

本田財団レポート No. 128

「超伝導で夢を叶える」

東京大学名誉教授

独立行政法人 科学技術振興機構 理事長

北 澤 宏 一

財団法人 本田財団

講師略歴

北 澤 宏 一 (きたざわ こういち)

東京大学名誉教授

独立行政法人 科学技術振興機構 理事長



《略 歴》

- 1943年 長野県生まれ
- 1966年 東京大学理学部化学科卒業
- 1968年 東京大学工学系大学院工業化学専攻修士課程修了
- 1972年 マサチューセッツ工科大学冶金及び材料科学専攻博士課程修了
- 1987年 東京大学工学部工業化学科教授
- 1989年 東京大学工学部超伝導工学専攻教授
- 1999年 東京大学大学院新領域創世科学研究科物質系専攻教授
(工学系研究科応用化学専攻、同 超伝導工学専攻教授兼担)
- 2002年 科学技術振興事業団 専務理事就任
- 2003年 独立行政法人 科学技術振興機構理事就任
- 2007年 同 理事長就任

《主な受賞歴》

- 1988年 日本セラミックス学会セラミックス大賞
日本応用物理学会賞 (論文賞)
日本 IBM 科学賞 (物理部門)
 - 1989年 米国セラミックス学会フルラス記念賞
 - 1996年 超伝導科学技術賞
 - 2001年 粉体粉末冶金協会論文賞
 - 2002年 紫綬褒章
- ほか多数

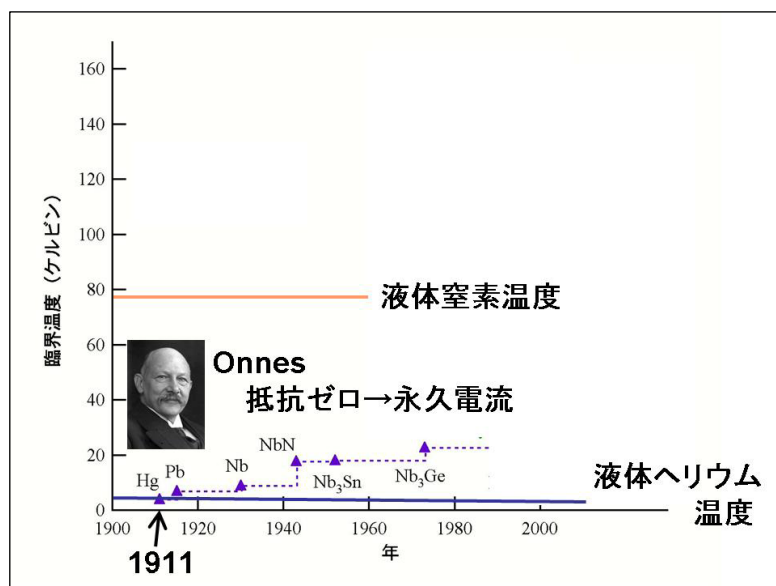
《主な著書》

- 1976年 『固体内の拡散』 P.G.Shewmon 著 共訳 コロナ社
 - 1981年 『電子材料の化学』 共著 丸善
 - 1982年 『セラミックス材料科学入門』 W.D. Kingely 著 共訳 内田老鶴新社
 - 1989年 『エレクトロニクス材料』 共著 大日本図書
 - 2002年 『新磁気科学』 監修 アイピーシー
 - 2003年 『科学技術者のみた 日本・経済の夢』 アドスリー
- ほか多数

このレポートは平成 21 年 5 月 19 日東京會館において行われた第 110 回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。

本日は、本田財団で講演させていただきます事を、大変うれしく思っております。「超伝導で夢を叶える」という題目で話をするようにと言われてまして、そのままの題目をとらせていただきました。

永久電流の発見



図－1

〈図－1〉 私は大学で学生たちと超伝導の研究をしてまいりました。超伝導は 1911 年、オランダのオネスによって発見されました。20 世紀初頭のサイエンスの状況は、熱力学が進展し体系化された時代でした。古典力学が完成した時代と言えるかと思います。ちょうどその頃、原子や分子、電子などのミクロな世界は古典力学では理解できない事も判かってきておりました。ミクロの世界を扱う量子力学がすでに勃興してきていた時代でありました。これが 1911 年、超伝導が発見された頃です。

そのような時代背景の中で、低温科学が華々しく幕を開けました。空気を冷やしていくと酸素や窒素が液体になります。そして最後に、空気中にほんの微量含まれるヘリウムが極低温で液体になります。オネスたちはやっと実現できたばかりの液体ヘリウムを用いて種々の金属を冷却し、電気抵抗を測定していたところ、電気抵抗が突然急激に減少してゼロになってしまうように見える新しい現象に遭遇しました。1911 年の出来事でした。

抵抗は本当にゼロになってしまったのか。どうしたらそれを確認できるのでしょうか。オネスたちは抵抗がゼロになったように見えた水銀という金属を丸いリングにして、そのリングに電流を流してみました。もしも抵抗が突然消失するように見えても、ほんの少しは抵抗があるという事であれば、リングに流れていた電流はじきに減衰してしまうはずでした。

しかし万一本当に抵抗が完全にゼロだと、リングに流れ始めた電流は永久に流れているはずです。オネスたちはそのリングに流した電流がどうなるかを観測してみました。そうしたところ、本当に永久に電流が流れ続けたのです。これが永久電流発見の時の事でした。

超伝導は摩擦のない世界

永久電流と言うのは、まったく摩擦のない世界と言う事ができます。この永久電流と言う言葉が、若い時の私をとりこにしてみました。例えば宇宙を進むロケットも、宇宙にはガス分子や微細な塵が存在していますから、いつかはそういう分子や塵にぶつかってスピードが変わってしまう。そういう意味で宇宙を進むロケットと言えども、まったく等速でずっと進んでいく事はできません。氷の上を滑るスケートも、いくら氷の摩擦が小さいからといってやはり止まってしまう。幾分かは摩擦があるのです。

仮に地球の上に標高ゼロで完全にずっと続いた氷が地球をぐるっと回って存在したとすると、ある地点からスケートで滑り出した人が、地球を一周してもとの地点まで戻ってくる事ができるかという、決してそんな事はない。摩擦があるのです。

超伝導という言葉に初めて出会った時、完全に摩擦がない状態、こういう現象の存在をどうしても私は信じる事はできませんでした。抵抗がゼロと言っても、どう考えても少しは抵抗があるのではないか。抵抗がまったくないなどという事は絶対に許せないと私は思っていました。(笑い)

現実の世界で抵抗が完全ゼロなどという事は許してはならないという、そういう哲学みたいなものが私にはあったかと思えます。

しかしながら、超伝導は本当に完全な抵抗ゼロが実現している世界です。この信じがたい超伝導というのは本当に不思議な現象だと、今でも私は思います。この完全性は古典力学ではあり得ない。けれども、量子力学の世界では実は「永久電流は当たり前」である事に、後に私は気づかされる事になります。

巨視的量子現象

この量子力学では当たりの事が、実は現実の目の前の大きな物質の中で起こっているのが超伝導だと理解できた時、私はすごい興奮を覚えました。その事を今でも思い出します。例えば原子について考えてみましょう。原子核の周囲を電子がぐるぐると回っております。いつまでも電子は止まりません。古典力学では、電子がぐるぐると回っていつまでも等速で回転しているというのは許されない事です。電子は等速直線運動をしていれば良いのですが、方向を変えつつ回転軌道を運動する時には電磁波を放出し、スピードを失って、原子核に向かって落ちていく。これが古典力学からの予想です。

ところが量子力学の考え方では、原子核の周りを回る電子は 1s 状態とか 2s 状態、2p 状態という、ある定まった飛び飛びのエネルギー状態をとり、その状態はいつまでも同じ状態が続いています。もちろんある状態から、例えば 2p 状態から 1s の状態に電子が落ちる事があります。その時には電子の状態は変わりますが、少なくとも 2p 状態にいる間は電子はまったく同じスピードでずっと回り続ける。電子が原子の周りをいつまでも回っているという事は、永久電流がミクロの世界では生じている事になると思います。

その意味で、超伝導は「巨視的量子現象」と呼ばれております。この言葉は言い得て妙と思

います。巨視的な大きなサイズの環状の線の中で量子的な永久電流現象が起きている。古典力学ではありえない事が起きているのです。つまり永久電流は、量子化された多数の電子が大きな物体の中をぐるぐる回っている。その状態が安定な定常状態になっている。逆に言うと、いつまでもぐるぐる回り続けている状態を保たないと、安定になれないという事になります。

ミクロな原子の世界で起きる永久電流現象が、超伝導では目の前に見える大きな物体中でも起きます。もう少し拡大して考えますと、地球を鉢巻にするような超伝導ケーブルの中でも永久電流が流れ、地球の周りをいつまでもぐるぐると流れ続ける。本当に不思議です。

超伝導のメカニズム解明と臨界温度

1911 年の発見以来、超伝導メカニズムの解明には多くの科学者たちが参加しました。けれども 50 年もの間、そのメカニズムはずっと謎に包まれておりました。その理由は、量子力学が難しかった上に、集団の多数の電子が関与しないと超伝導が起きないという事情がありました。多数の粒子を扱う事、多体問題は物理学には、非常に難しかったのです。

超伝導メカニズムは「20 世紀固体物理学最大の謎」と言われていました。しかし 1957 年、超伝導メカニズムは BCS 理論という、3 人の理論家によって提出された論文によって解明されました。50 年間の謎がやっと解けたのです。

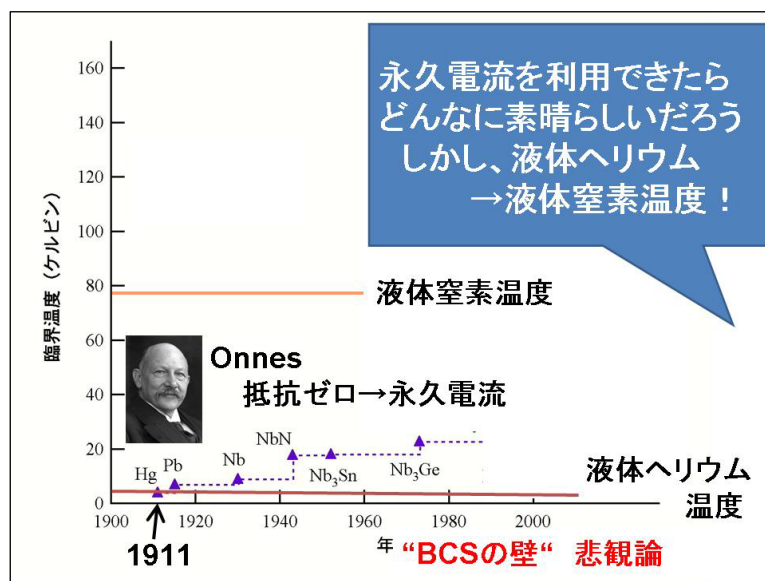
私が超伝導の研究を始めたのは 1981 年、講師の時でした。その頃、超伝導の臨界温度の最高は 23 ケルビン、マイナス 250℃。液体ヘリウムで冷却しないと、超伝導が起きない。極低温の世界の話でした。液体ヘリウムは高価です。地球規模の超伝導電力ネットワークなど到底考えられません。何とか超伝導の臨界温度を高くしたい。できる事であれば、液体窒素温度、77 ケルビンを超えるような超伝導体が欲しい。これが多くの研究者の夢でした。

では、超伝導の臨界温度はなぜそんなに低かったのでしょうか。超伝導が起きるためには二つの電子が引き付けあって、クーパー・ペアと呼ばれるペアを作らねばなりません。ところが、二つの電子が接近すると、マイナスの電子とマイナスの電子の間にクーロン力が働いて反発してしまいます。

クーロン力は比較的大きな力です。そのような大きな反発力に打ち勝って、二つの電子が接近するというのは非常に考えにくい事でした。超伝導のメカニズムでは、この二つの電子の間に金属を作っている原子が、多数イオン化してプラス・イオンとして挟まっています。それにより、プラス・イオンが二つの電子のマイナス電荷を見えにくくしている。さらに、若干の変位をする事によって、この二つの電子を引き付けあう事も起きるというのです。

しかし、もともと反発しあう電子同士ですから、引力はそれほど強くなれない。温度を上げると、ペアになった電子はすぐにばらばらになってしまう。超伝導が破れます。そのために超伝導の臨界温度は低いのだと信じられておりました。

破れなかった臨界温度の壁



図－2

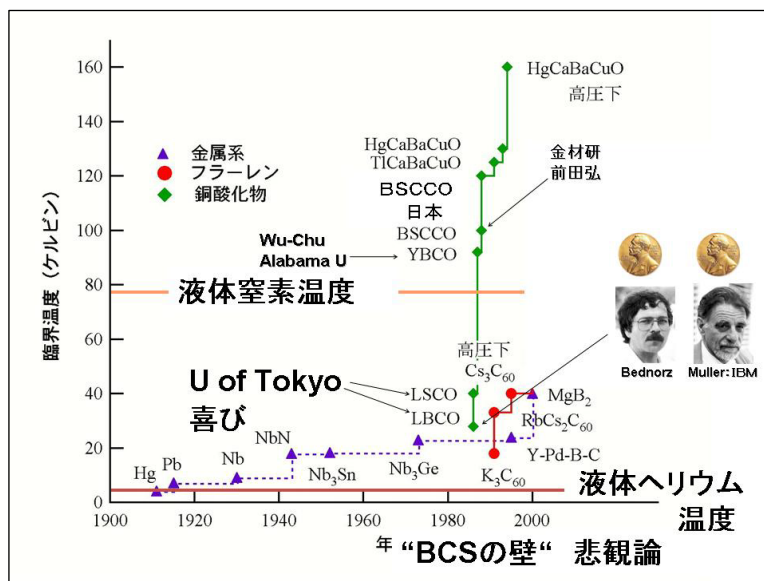
〈図－2〉 1981 年、私が超伝導の研究をスタートした当時、なかなか臨界温度が上がらない時代でした。理論家は、「超伝導メカニズムをよくよく考えてみると、もはやこれ以上臨界温度は上がりそうもない」と予言するまでになりました。これを「BCS の壁」と呼んでおりました。

実験家の私たちは「どうしたら BCS の壁を破れるか」の戦略を練りました。「理論家が扱えるような易しい構造を持った物質はやめよう。もっと難しい電子構造を持ち、理論家に理解できないような物質を扱おうと考えました。当時の私たちは悲観論が蔓延する雰囲気の下で、悲観的な事を言う理論家たちの鼻を何とか明かしてやりたいと思っていました。

超伝導体のほとんどは当時金属でした。私たちが酸化物を探索のターゲットにしていた理由は、まさに変てこな物質で、理論が当てはまらないような物質を研究しようという事にあったかと思います。私たちはいろいろな物質を試してみました。それまで発見されていた物質、つまり 23 ケルビンの物質に比べてより高い温度の臨界温度の物質は、5 年の間いくらやっても探し当てる事はできませんでした。

しかしながら、当時、国の内外から高温超伝導を発見したと報告している論文がいくつか出てきました。私たちは「本当だろうか」と報告された物質について真偽を確かめる実験をしておりまして。ある時、そのような不確かに思えた論文の一つが実は大発見である事が判りました。

ベドノルツとミュラーの報告



図－3

〈図－3〉 1986年4月17日、IBMチューリッヒ研究所のベドノルツ〈図－3中写真左〉とミュラー〈図－3中写真右〉がドイツの雑誌に論文を投稿しました。この日は実は私の誕生日でした。（笑い）

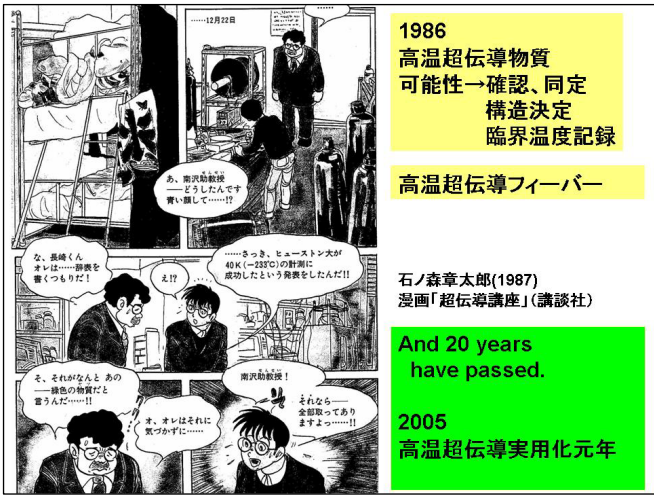
超伝導ではないかとする多くの論文が続いておりましたから、私たちはあまり気にも留めずにこの論文も読みました。

この論文の物質は、ランタンとバリウムと銅を含む酸化物の混合物で、物質はきちんと同定されていませんでしたが、ペロブスカイト (La,Ba) CuO₃ と思われる物質として報告されていました。電気抵抗がゼロになるのは、10 ケルビン以下と報告されていました。しかし 30 ケルビン付近から抵抗が減り始めるとされていました。

当時の臨界温度記録は 23 ケルビンが最高でしたから、もしも 30 ケルビンが本当だとしたら、これは過去例を見ない高温超伝導体という事になります。しかしながら、その論文を見ても誰も信じた風はありませんでした。欧州でも話題にもなっていませんでした。

ベドノルツたち自身は界面での超伝導が起こっているのではないかと推測していました。ベドノルツたちは企業の研究所の研究員でしたから、もしも本物の超伝導と信じていたら、当然、特許を出しただろうと思われます。しかし、後になって、特許は出されていない事が判明しました。その後私たちが、この中に本物の高温超伝導がある事を見つけ、さらに (La,Sr) 2CuO₄ という更に臨界温度の高い物質を見つけて 1986 年 12 月特許を出したのですが、それが高温超伝導では世界最初の特許であった事がその後判明しました。

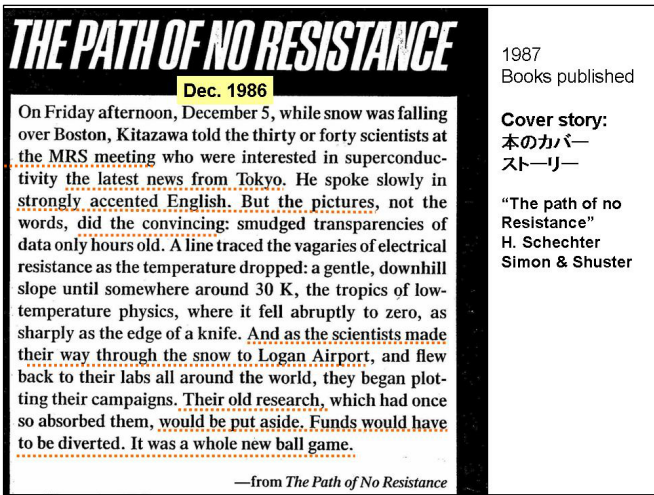
臨界温度の上昇



図－4

〈図－4〉 ともあれ、私たちもこのベドノルツ、ミュラーが報告した物質を試してみる事にしました。当時ちょうど新たに研究室にやってきた4年生の学生が卒業論文を始めるので、何をやろうかという事で、その実験を練習台としてやってもらう事にしました。そして短期間のうちに、驚くべき事が判りました。

この混合物の中には、2次元的な銅と酸素の構造を有する物質が一部含まれていました。X線回折で、 K_2NiF_4 構造を持った、層状構造の物質である事が判りました。その物質の含有量を増える方向に組成製造条件を変えてやると、臨界温度が上がり、ゼロ抵抗になる温度も上がっていく事が判りました。



図－5

私たちは、この物質が真の超伝導体である事をその段階で確信しました。そしてゼロ抵抗になる臨界温度が、過去最高の23ケルビンを超えた時にボストンでの学会で公表しました。12月5日、非常に寒くて雪が降っていました。マテリアル・リサーチ・ソサエティという会議でした。〈図－5〉これはアメリカで1987年に出版された本のカバーストーリーですが、「この

会議での北澤の発表がまったく新しいゲームの始まりであった」と述べています。その会議に参加した人たちが各々の研究機関に戻って研究を開始し、世界に高温超伝導のフィーバーが起きたとされました。〈図-6〉〈図-7〉〈図-8〉〈図-9〉



図-6

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 1980 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 Mukai, "What should I do?" And he said, "Why not go study at MIT?"



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.

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

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,

図-7



図-8

読売新聞 THE YOMIURI EVENING EDITION

税率は5%以下
簡易型 山中会長が初言及

明日の顔

なお壁多く超電導

図-9

日本、アメリカ、中国、ヨーロッパと「超伝導フィーバー」が広がっていきました。週刊誌、まんが、新聞を巻き込んで研究開発の内容が一般の人々にも伝えられました。銅を含む酸化物を種々探索する中で、12 月末までには私たちのところで、ストロンチウムやカルシウムを含む類似物質で臨界温度は上がっていきました。翌年 2 月にはアラバマ大学の W u 博士〈図-10〉とヒューストン大学の C h u 博士〈図-11〉によるイットリウム系（93 ケルビン）、さらにその翌年には金属材料研究所（現物質材料研究機構）の前田 弘博士〈図-12〉らのビスマス系（127 ケルビン）の発見によって、ついに液体窒素温度を超す臨界温度を持つ物質が発見されました。液体窒素温度の 77 ケルビンを超えたという意味で、私たち超伝導の研究者が「夢」と思っていた事が実現したのです。

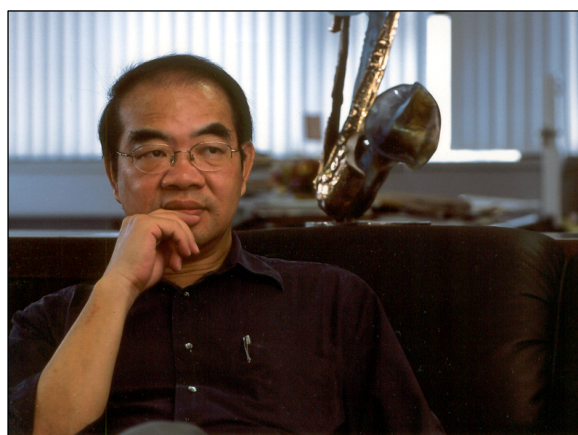


図-10 Maw-Kuen Wu 博士



図-11 Paul Ching-Wu Chu 博士



図-12 前田 弘 博士

あれから 22 年が経ちました。大勢の人が研究に参加し、新物質は主なものだけでも 100 種類以上見つかりました。その半分以上は日本で見つかったと言われています。日本は大活躍でした。その中から現在まで実用材料に育って来たのが、イットリウム系とビスマス系の二つです。ベドノルツとミュラーは 1987 年、ノーベル賞を受賞いたしました。

第2次高温超伝導フィーバー

〈図-13〉 この二つの物質が発見された 1987 年、88 年の頃が、超伝導フィーバーが最も盛り上がった頃、まさにフィーバーのクライマックスの時期でした。

その後、新物質の発見は大分下火になってしまいましたが、2008 年、東京工業大学の細野秀雄教授〈図-13 中写真右下〉の研究室から、新たな鉄系高温超伝導体が発見されました。これは私たち第1次超伝導フィーバーの頃の研究をしていた者にとっては非常識な物質と言えます。銅系は何とか超伝導になるけれども、鉄系は磁石になり易いので、超伝導にとっては有害だと誰もが思っていました。

ところが細野研究室から鉄を含む超伝導体が見つかった事で、鉄やその他の繊維金属を含む物質が次々と探索される状況に現在なっています。第2次高温超伝導フィーバーがスタートしたのです。ちなみに、細野教授の論文は、昨年「世界でもっとも引用件数の多かった論文」であった事がトムソンサイエンティフィック社から発表になりました。世界中が現在この新物質周辺の物質探索に取り組んでいます。どこまでこの鉄系超伝導体の臨界温度が上がるのか、期待に基づいています。

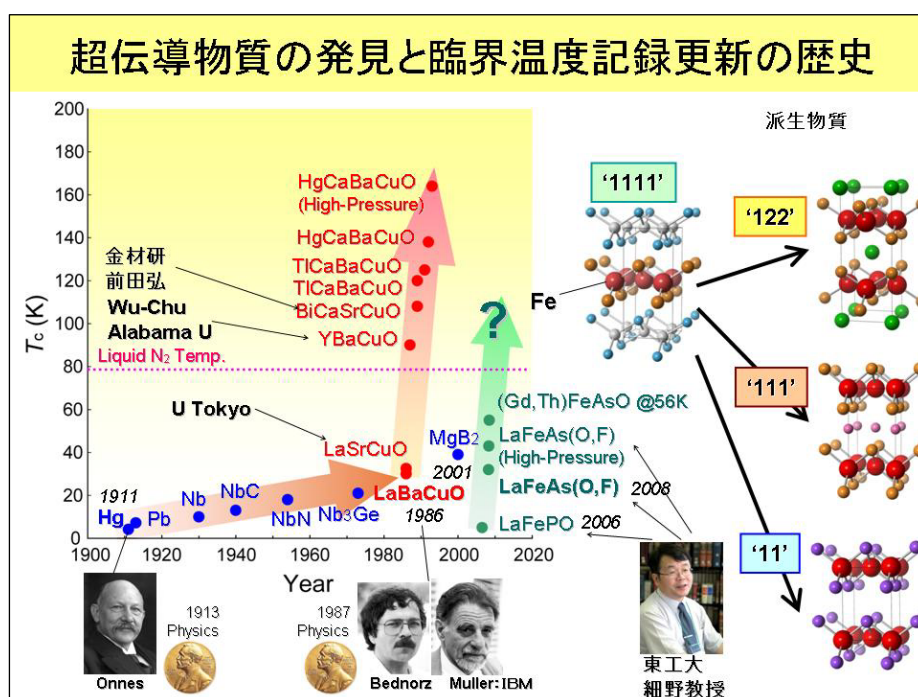


図-13

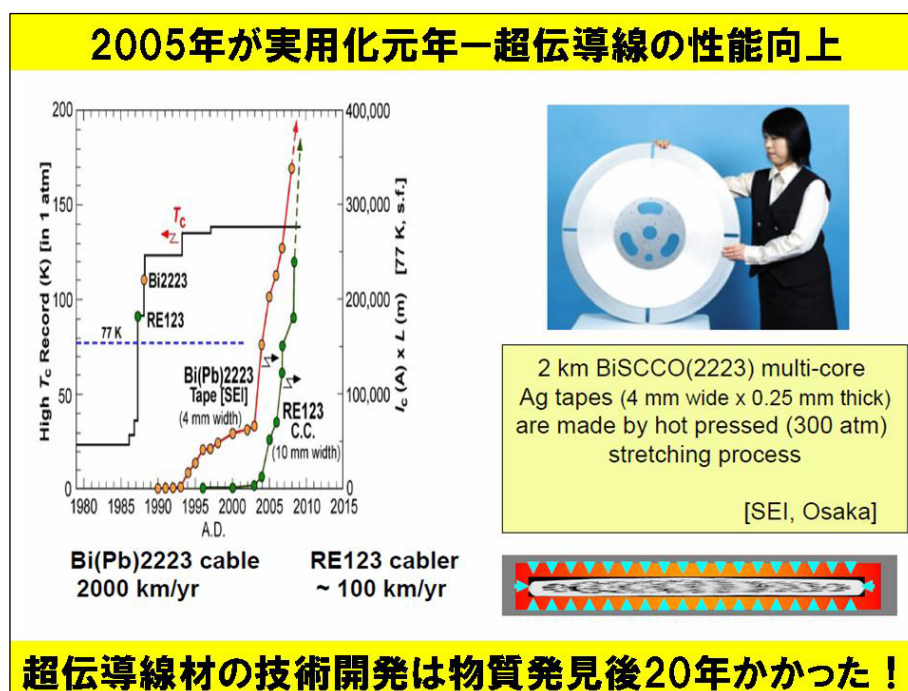
周期律表を見ながら、鉄系超伝導体にいくつぐらいの組み合わせがあるだろうかと、研究者たちは推定しています。2000 種類から 3000 種類ぐらいはありそうと言われています。最初に発見された物質群がいちばん臨界温度が高い確率は非常に低いですから、これから臨界温度が上がっていくのではないかと私たちは期待しているわけです。当面、フィーバーが続くと思います。

高温超伝導が発見されてから 22 年、なぜ臨界温度が急に高くなったのか、そのメカニズムは多くの理論家がフォノン機構から、スピン、電荷間の相互作用を重視するモデルまで種々の

提案をしておりますが、誰もが納得するという状況にはなってはいません。サイエンスの根源はなかなか難しい。

高温超伝導線材の実用化へ向けて

ところが一方、高温超伝導体を材料として使おうという努力が進んできました。22 年間、特に日本の企業のエンジニアは非常に優秀で良く頑張ってきました。高温超伝導物質はセラミックス系の物質ですので成形が難しい。それを細いファイバーにし、100 本ものファイバーをたくさん束ねて金属母相の中に分散させ、1 mm 程度の 1 本の線材に作り上げ、さらにそれをまた 100 本以上束ねて電力ケーブルに仕立てあげてきました。高温超伝導線材のいちばん重要な性能指標は、臨界電流と長さの積です。〈図－14〉技術が整って、その性能指標がぐぐっと上がったのが 2005 年の事でした。発見されたのが 1986 年で、それから約 20 年経った 2005 年になって、この性能指標がまさに目標値を超えて実用域に入ってきました。長い研究開発期間が必要でした。



図－14



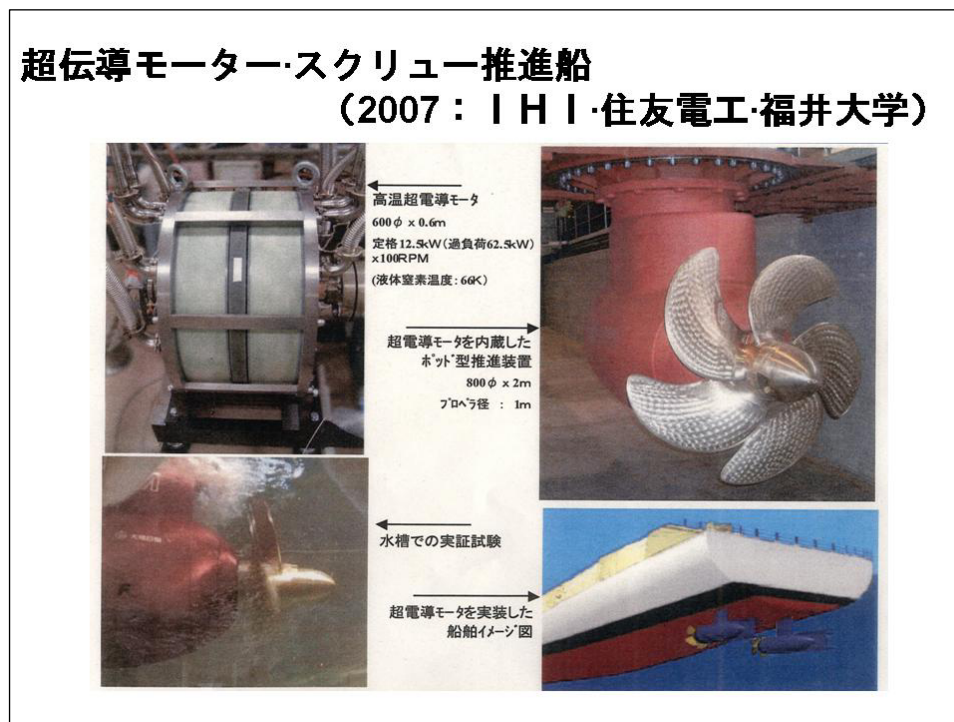
図－15

〈図－15〉 最初に実用域に達したのはビスマス系でした。金属材料技術研究所の前田 弘博士によって発見され、住友電工のエンジニアたちの努力によってこの高い性能の線材が作り上げられ、市販されるようになってきたのです。

この線材は断面が幅4ミリメートル、厚み 0.25 ミリメートルといった細い銀線ですが、その中に 200 本もの髪の毛よりずっと細い、ミクロンレベルの太さの酸化物超伝導ファイバーが埋め込まれています。そのファイバーの中の欠陥が制御されているのです。ナノテクノロジーの典型のような非常に精緻な材料技術が使われています。

世界で初めて目標とする性能が達成されたのが 2005 年と申し上げました。この精巧にデザインされた芸術品とも言えるような線材ができてきて、やっとそれを使って何か超伝導を使う機器を設計し、施策してみようという人たちが現れ始めています。

さらに、イットリウム系も少し遅れて実用に近い性能が出せるようになってきました。この系は特に製造速度が非常に遅いのが難点ですが、性能は優れているのです。今後、両線材がともに試されて用途開発が進み、いずれは地球を鉢巻きにする、超伝導地球電力ネットワークに向かって進んで行くと思われます。



図－16

〈図－16〉 超伝導線材の性能が上がると何が良いのでしょうか。超伝導線材で船のモーターを作り、スクリュウをモーターに直結する事を考えてみましょう。超伝導線の臨界電流が小さいと、超伝導線をたくさんコイルに巻かないといけません。モーターの方がスクリュウの半径よりもずっと大きくなってしまいます。スクリュウが隠れてしまって船は動きません。2005 年が、まさにモーターをスクリュウよりも小さくできるようになった年です。

スクリュウにモーターを直結して船を動かすと何が良いかと言いますと、船の方向とは関係なく、どちらの方向にでもスクリュウを向ける事ができ、操舵性が良くなる。ディーゼルエンジンとスクリュウをつなぐ、うるさいギアボックスも必要なくなる。ハイブリッドカーと同じように電池を充電しつつ、省エネも実現できます。

臨界電流が高い超伝導線を使って、電力を扱う機器を小型化できるようになります。電車に載せる変圧器を軽くしたり、あるいは超伝導モーターを使ったバスや自動車も十分考えられるようになってきた。そうなりますと、いろいろな試作品のデモンストレーションをしてみたいくなります。やっと今、そういう時期がきたと思います。現在も臨界電流はまだまだ上がる途中ですので、その意味では高温超伝導線を使った機器の性能はさらに良くなる事が楽しみです。

リニアモーターカーへの利用

リニアモーターカーの革新性

- ☆時速2000kmも不可能ではない！
地上リニア: 500km/h (減圧下2000km/h)
ジェット機: 1000km/h
- ☆廃ガスゼロ
- ☆自動車・鉄道より静か
- ☆省エネ: 国内航空機の1/3
- ☆安全性高い:
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)



図－17

〈図－17〉 皆さんは、JR 東海が 2025 年までに東京―名古屋間で、超伝導リニアモーターカーと言う、車輪やレールのない浮上列車を開通させると宣言した事をご存じでしょうか。この列車は車内に超伝導コイルの電磁石を積んでいます。永久電流で強い磁力を保ちます。外から電力を供給する必要がありません。このため、リニアモーターカーにはパンタグラフがない。パンタグラフは高速鉄道の悩みの種です。架線との摩擦があるのでうるさいし、しょっちゅう故障もある。雪の対策も必要です。

そして、超伝導リニアの最も素晴らしいところは、列車が地上のコイルと反発して浮かび上がって走る事です。10 センチ以上の隙間が開いている。雪が積もろうと、小さな石や砂がたまっていようと走る事ができる。地震で多少くらい軌道がずれても、脱線しないで走ります。メンテナンスがずっと楽になる事を意味します。

JR はこれまで 45 年間もこの超伝導リニアの研究を続け、やっと今、実用期に入ろうとしています。なぜ 45 年間もこの研究を続けてきたかと言いますと、研究担当者によれば「究極の安全性」を求めての事であったのだそうです。現在の列車はレールと車輪が接触しながら走ります。「モノが走る時には触らずに走るのがいちばん安全なのだ」と言われてみますと、なるほどとうなずけます。

一方、上海でも磁気浮上列車がすでに走っている事を、皆さんもご存じかと思います。この磁気浮上列車は、実は車上の普通の電磁石が鉄のレールと引き合いながら浮かび上がります。その隙間は 1 センチくらい。レールとの隙間が 1 センチくらいで時速 500 キロで走ったらどうなるかと言う事なのですが、私は調節がとても大変だと思っています。何よりレールをいつも小さなずれでも修正したり、きちんとメンテナンスしなければなりません。それでも時々はどうしても擦ってしまうのではないのでしょうか。

JR の方式は、車上の超伝導磁石が下に置かれたコイルと反発して 10 センチも浮かび上がります。しかも、浮上の高さは調節する必要もない。浮かび過ぎると浮上力が弱くなるので自然と高さ調節はできてしまうからです。吸い付く力で浮かぶ方式だと、磁石がくっ付いてしまわ

ないように注意深く、高さ調節をいつもしていなければならない。その意味で、超伝導リニアは遠距離を走る列車にも適していると言う事ができます。

超伝導リニアを前進させる力は、地上に置かれた異なるコイル列に電流を流し、車上の超伝導磁石の位置を検知しながら、前に前にと進めるよう各コイルの電流の方向を変えて行きます。列車の空気抵抗に抗して前進させるだけのエネルギーは、このコイルに通電する電力として必要になるのです。現在のリニアは時速 500 km を営業速度にしようとしています。その理由は地上の 1 気圧の下ではそれ以上の速度で走ると、空気抵抗によるエネルギーロスが大きくなり過ぎるからです。浮上のためのエネルギーはごくわずかで、ほとんどが空気抵抗によるエネルギー消費です。

未来の超伝導リニア

超伝導リニアは、すでに時速 581 キロメートルという世界記録を達成しましたが、私は未来において超伝導リニアは世界の高速省エネ型交通ネットワークとして、航空機に置き換わっていくだろうと予想しています。

ジェット機と同じ時速 1000 キロを出すにはどうしたら良いのでしょうか。乱暴に言うと、空気圧を半分に下げれば良いという事になります。実際スイスなどでは、観光のためにすべての列車を地下鉄にしてみよう、せっかく地下鉄にしてみようのであれば、圧力を下げて、より省エネタイプの乗り物にしようといった提案もあります。

トンネルやチューブの中を走らせるといった事を考えると、ジェット機の倍の時速 2000 キロにしたいとなればそれも可能です。実際、このリニアモーターカー開発をリーダーとして推進してこられた京谷好泰さんは、時速 2000 キロ以上で貨物コンテナを運ぶコンテナ・リニアモーターカーを、日米間に走らせる事もできるというアイディアも出しておられました。

超伝導リニアはとりあえずは東京―名古屋間で実現しますが、排ガスゼロで航空機より倍も速い、省エネ超高速交通機関としての未来に無限の可能性を秘める乗りものです。それがいよいよ蓄えてきた日本の技術によって実現します。

電力ケーブルへの利用

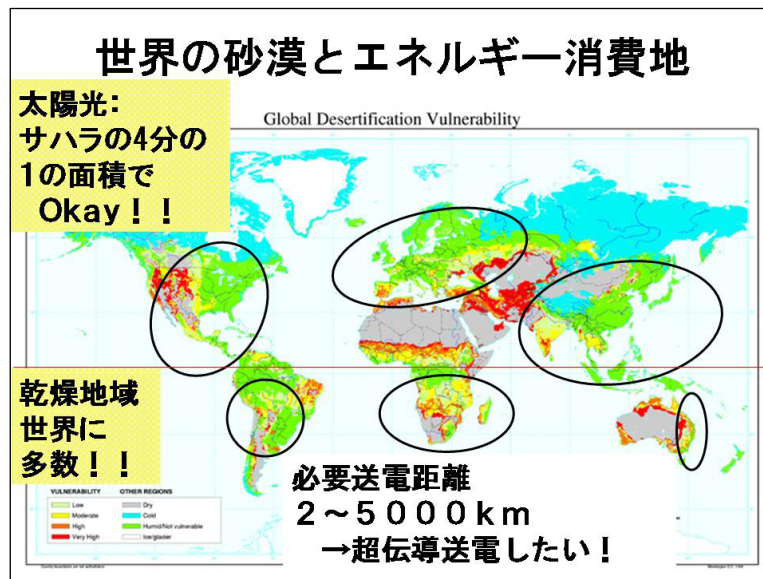


図－18

〈図－18〉 さらに地球環境と子どもたちの将来を考えると、超伝導で地球電力ネットワークを作る事が私の夢です。超伝導の電力ケーブルを地下に配置します。ケーブルを納める管の中には液体窒素を流します。管は断熱していますが、周囲から少しずつ熱が漏れてくるので液体窒素が蒸発します。これを補うために 20 キロメートルから 50 キロメートル置きに、液体窒素冷凍機を置いて液体窒素を作ります。

今年は横浜の東京電力旭変電所の中で、世界最大の高温超伝導ケーブル試験が実際の電力系統に組み込まれて行われます。電力事業では「信頼性」が大切ですから、何度も何度も試験を繰り返して、徐々に自信をつけていく必要があります。

グローバルなネットワークを作る前に、まず最初は現実問題として大都市の地下の穴、地下空洞の電力ケーブルを超伝導ケーブルで置き換えていきます。同じ断面積の地下空洞で超伝導ケーブルは銅線より大電力を送る事ができるようになってきましたので、土地の値段の高い日本の大都市では、この超伝導送電は、すでに銅線を使った従来の地下送電よりもコストで有利になるという試算も出てきています。また、空を見上げると送電用の鉄塔があちこちに見えます。美しい景観を損ねる高架送電線を是非地中に埋めていきたいものです。そのためには電圧を下げ、電流を高くして、かつ、電磁シールドが完全にできる超伝導送電が理想的です。



図－19

〈図－19〉 そして徐々に、地域と地域の間も超伝導のケーブルでつないでいき、最後に国と国との間をこの超伝導ケーブルでつないでいきます。地球の裏側まで電力ロスなしに自由に電力の融通をする事ができる時代が来ると期待します。

それができると何が良いのでしょうか。電力は自分で必要な量は自分で発電したとしても、お互いに融通できるようにしておいた方が、実は大きなメリットが出ます。それは電力系統に背骨のような幹線ができると、系統が安定化し、停電事故がずっと起きにくくなるからです。数年前に起きたニューヨーク州の大停電のような事態を避ける事ができます。

太陽光や風力発電所など自然エネルギーから電力を得るような時代が来ますと、風が吹いている地域か、太陽が照っている地域か、昼間か夜か、地域によって電力事情に変動が生じます。地球全体での融通ができるようになると、その変動を平均化して抑える事ができます。

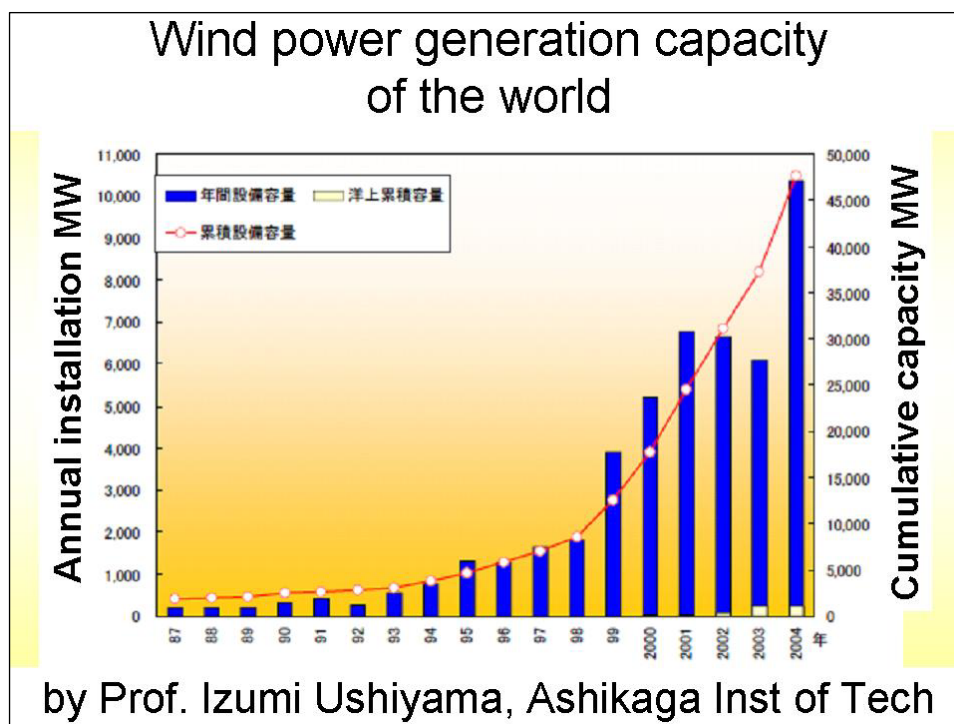
無秩序な変動源を n 個つなぐと、ふらつきはルート n 分の 1 に小さくなります。自然エネルギーのいちばんの泣き所は、個別の風力発電所や太陽光パネルの発電がお天気任せで、信頼性が低い事です。この本質的な欠点が超伝導地球ネットワークによって完全に解決できるので。しかも、地球規模電力網は寒くて風の強い地帯、乾燥地帯など不毛な地帯をエネルギー輸出国に変え、砂漠の緑化にも希望が持てるようになります。

超伝導ケーブルを使ってサハラから電力を運んでこようという考え方は、1989 年、三洋電機の社長をされ、「アモルファスシリコン太陽電池」で有名な研究者であられた、桑野幸徳氏によってジェネシス（GENESIS）計画という名前で発表されました。電力の平均化によって、自然エネルギーの欠点を克服するという考え方は私が提唱したものです。

ジェネシス計画が達成されると、太陽光や風力発電のトータルコストが下がり、世界の電力系統の安定化にとって有利となります。

自然エネルギーの実用化

風力発電や太陽電池がもはや「遊びの段階」を過ぎて、「基幹エネルギー」としての実用化がスタートしたと言えるのではないかと思います。大型発電所、原子力発電所や火力発電所の出力は大体 1 基 100 万キロワット（1 ギガワット）程度のものです。日本には大型原発が 54 基あり、これが倍になると計算上は日本の電力のすべてが原子力でまかなえる程度の規模です。つまり、日本の必要電力は平均 100 ギガワット程度。



図－20

〈図－20〉 風力発電所は現在年間 10 ギガワット容量ぐらい作られるようになってきました。風が止まっている時間もありますから、10 ギガワット容量というのはその事を考えて、大体 1 ギガワット、つまり大型発電所 1 基分ぐらいが世界で毎年作られるようになったと言えます。

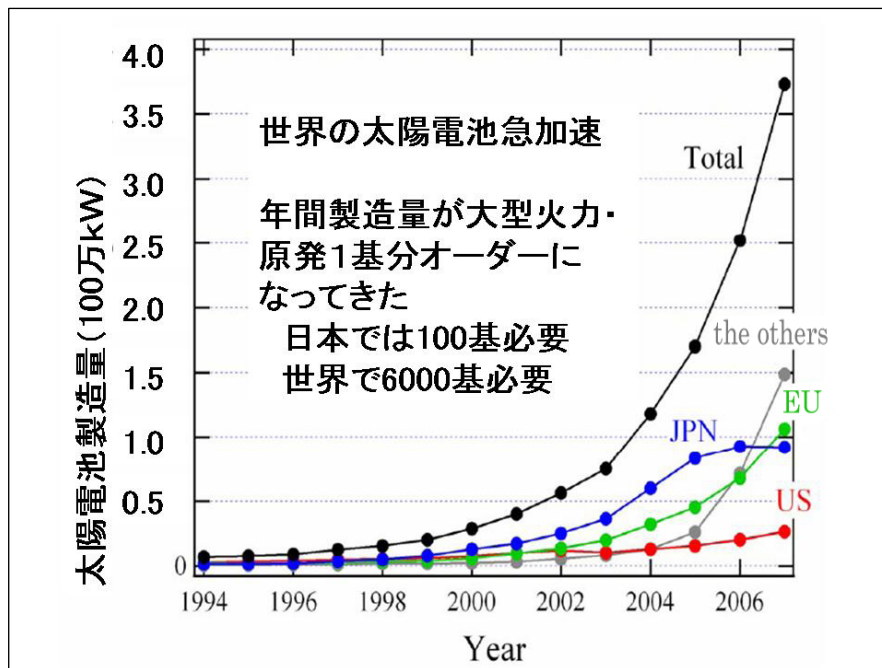


図-21

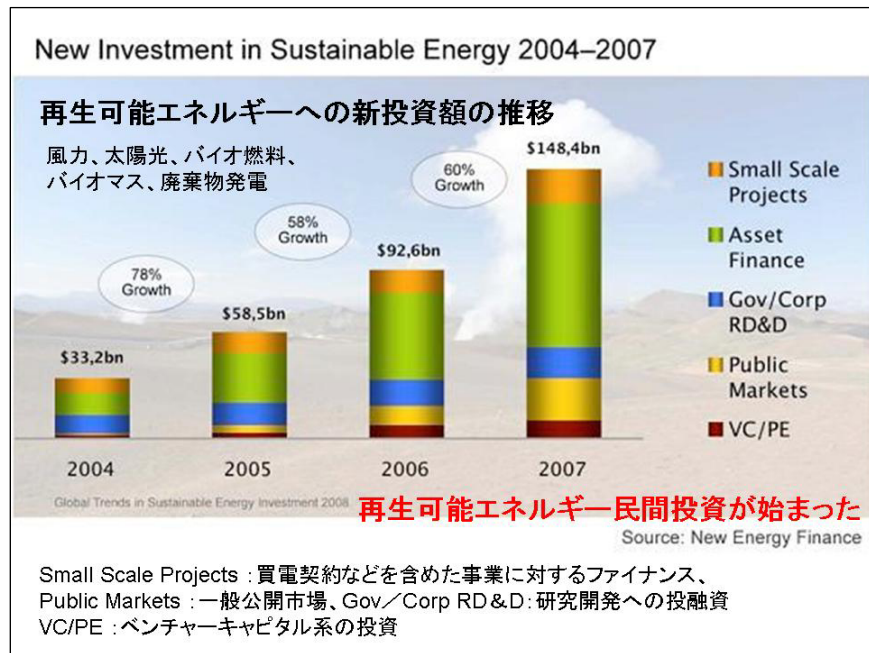
〈図-21〉 太陽電池は 2007 年で 3.5 ギガワット設備容量。これも稼働時間を考えて年間大型発電所 1 基弱が作られるようになってきたという事です。10 年前はその 100 分の 1 にも達していませんでした。この 10 年の間に、すさまじい勢いで伸びてきました。

例えば今現在、温暖化防止に向けて、温暖化ガスを排出しない発電所建設が志向されています。原発をなるべくたくさん早く作ろうと思っている国も多いわけですが、なかなか作れない。世界で 10 基までは作れていません。これが風力で 1 基、太陽光で 1 基できるとなったら、結構大きな基幹エネルギーの一部をきちんと占めるような規模に並んできたという事です。

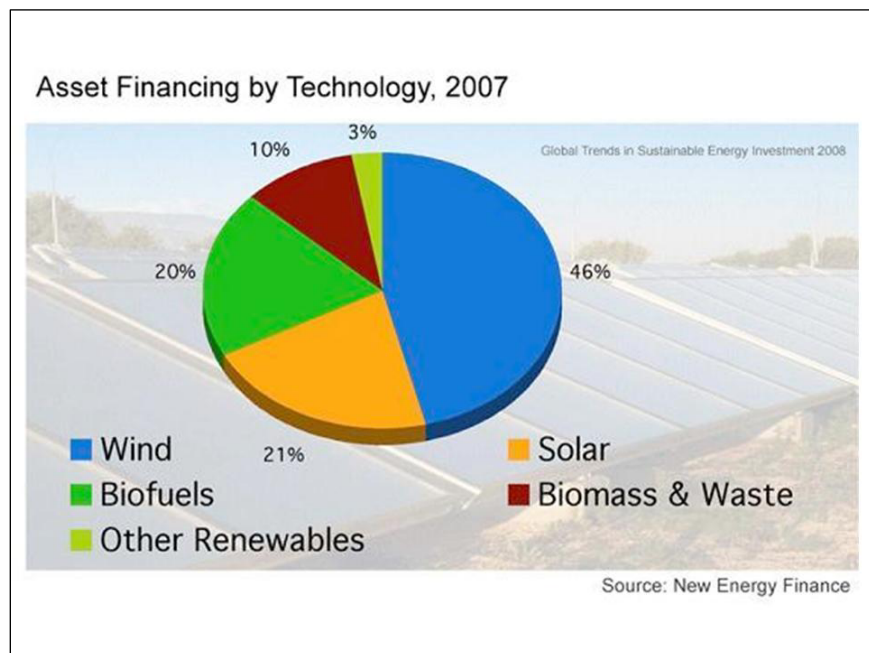
日本では大型のギガワットクラス発電所が 100 基分必要。世界では日本と同じぐらいの生活レベルになったとして、6000 基ぐらい必要です。当面は 2000 基というところでしょうか。

今、毎年 2 基分、自然エネルギーで作れるようになった。という事は、これからその 1000 倍を作ればいい。1000 倍を作ればいいと聞いた時に、ある人たちは、これはとても無理だとあきらめます。ある人たちは、「もうあとたったの 1000 倍か」と思います。私はだんだん楽観的になってきました。

自然エネルギーに投資を



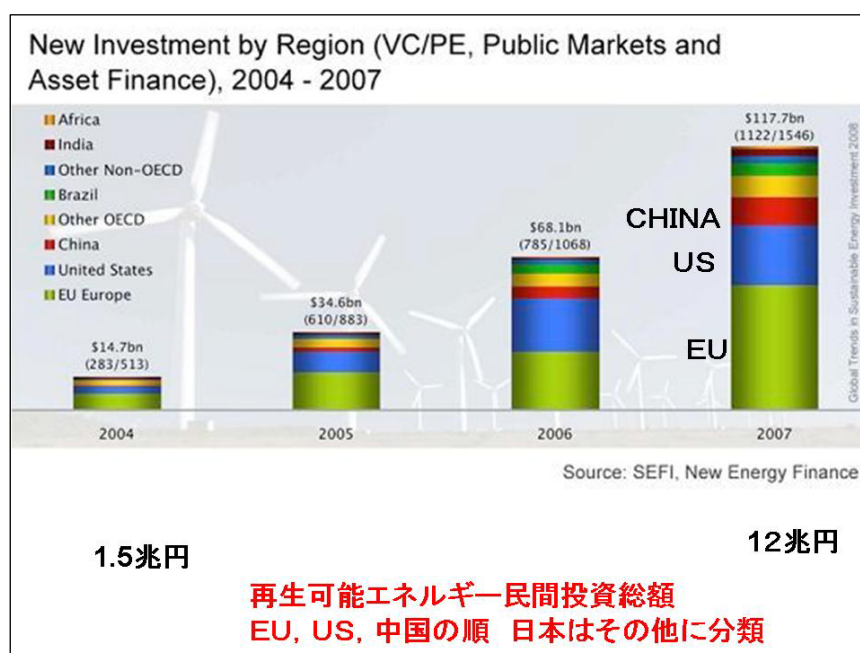
図－22



図－23

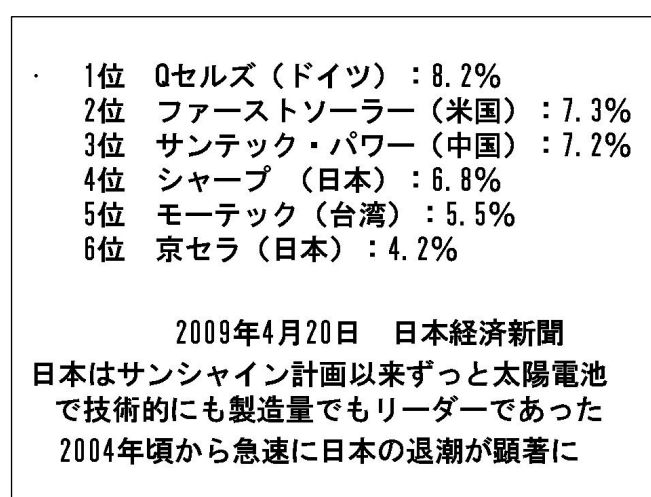
〈図－22〉〈図－23〉 世界では、個人や民間企業による自然エネルギーへの投資が非常に活発になってきました。一昨年の 2007 年には、なんと民間による投資総額が 15 兆円にもなっています。15 兆円というのはどのぐらいかと言いますと、日本の GDP が 500 兆円ですから、日本の GDP の 3%に相当するお金が世界の民間の投資家によって、自然エネルギー、再生エネルギーに投資される時代になってきたという事です。そしてここ 3 年間で 4 倍というすさまじ

いスピードでこの投資が増えてきています。その投資は、風力が1番、太陽光が2番、バイオ燃料が第3番目でした。今瞬間風速では、むしろ太陽光への投資の方が多くなりかかっていると聞いています。



図－24

〈図－24〉 どの国が投資しているかを見ますと、ヨーロッパ EU 諸国が第1位で、全体の半分近く。アメリカが第2位、第3位は中国。日本はどこにあるのでしょうか。日本は統計にも載らない悲しい状況に現在陥っています。日本ではまだ民間による投資は本格化していない状況です。



図－25

（図－25） 日本は1973年のオイルショック以降、「サンシャイン計画」を推進し、日本の太陽電池の技術を世界の座に押し上げてきました。日本の太陽電池技術によって、発電効率は6%程度であったものが、20%にまで上がってきたとされます。そして製造コストも大分下

がりました。つまり、日本はそれまで衛星や軍事用の技術であった太陽電池を民生用技術にまで持ってきたのです。しかし、その後の普及事業で日本は失敗してしまいました。なんとか投資もきちんとやって、世界首位の座を奪回して欲しいと、私も技術者の 1 人ですので切に願います。

失敗の理由は単純です。日本の為政者は、「太陽電池の値段はまだ高すぎる。このような段階で大量導入すると日本の国際競争力は衰えてしまう。」と考えたのです。一方のドイツを始めとする世界の国々は、「数倍くらい高くても余裕のある今のうちに導入しておけば、それ以降は燃料の要らない無料の電力源が 10 年後には 2 割くらい蓄積されていく。」と考えたのです。つまり私たちがもし今太陽電池を貯める事ができれば、親たちに貯めてもらった太陽電池で、私たちの子どもたちはクリーンなエネルギーを受け取ることができるというものです。

投資の試算

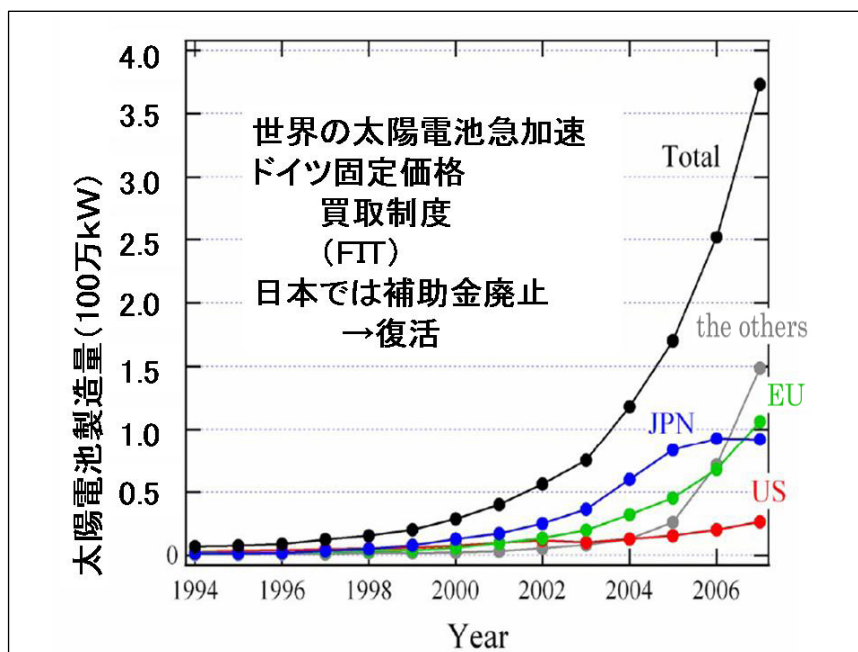
現在の技術レベルで太陽電池が今の値段だと仮定しますと、国民一人あたり毎年 10 万円を投資すると、10 年間でほぼ日本の必要電力の大勢がまかなえる事になります。年間 1 人 10 万円の投資が日本人にとって可能かどうかの問題です。

現時点でドイツ人は年間 1 万円を超えた辺りにいます。日本人は安い電力費を享受しているのですが、その分、国民の支出は何が増えてきたかと言うと娯楽費で、80 兆円を超えました。特にその中でもパチンコ代が 30 兆円近くに、スピリチュアル産業と言われる占いや星座などを代表とする分野が 1 兆円に育ってきています。つまり、国民の一人平均、年間 80 万円近くは娯楽費で、一人の支出の 2 割近く。日本は娯楽大国に成長してきたのです。

この事を考えると、もしも日本人がその気になるならば、ドイツの 10 倍の努力を払うとしても娯楽費の 8 分の 1，パチンコ代の 3 分の 1 程度でしかない事を銘記すべきかと思います。今後 10 年間で子どもたちに無料でクリーンなエネルギーを届けられる国にしたいかどうか、国民の意思を問う必要があります。私はその答えは明らかだろうと思います。

大量に導入が始まれば、電池は徐々にもっと安くなる。投資できる人がさらに増えていく。雪崩現象が起きるはずです。その時までには行政が支援する必要がある。今日本は民間や個人が投資できる「仕掛け」がないのですが、投資したい人たちは増えてきています。その人たちは若い人たちに多い。私の息子夫婦もなけなしのお金を自然エネルギーの共同発電所のような組織に投資しています。彼らにはそれが「楽しみ」であることが分かりました。私はまだ一銭も投資していません。楽しみを得るためには、パチンコにでも行かざるを得ません。(笑い)

ドイツの電力固定価格買取制度



図－26

〈図－26〉 では投資しようとする人たちが安心してできるような事を国が考えるには、どうしたら良いかを考えてみましょう。

ドイツでは 2000 年と 2004 年に電力固定価格買取制度を法律で決めました。それがドイツの太陽電池の設置量を飛躍的に高めるスタートラインになったと言われています。そして日本を追い抜いていきました。

電力固定価格買取制度というのはどういう制度かと言いますと、ある年にある人が太陽電池に投資したとします。その時の太陽電池の値段を元に、10 年経ったら元が取れるような電力価格で、電力会社はその太陽電池が発電する電力を 20 年にわたって買ってくれる。電力会社は、発電コストが高くなるので、売る電力の値段をその分高くしても構わない。そういう法律です。

つまり電力固定価格買取制度というのは、国民に対して電力の価格が高くなっても、自然エネルギーの導入をやっていきましょう、という法律です。その時に、自分自身がそれに投資すれば、自分が払う電力費は自分に返ってくる。

この電力固定価格買取制度はどこが優れているのでしょうか。多くのドイツ人は、「どうせ投資するなら少しぐらい金利が低くても、地球環境に良い事をしたい」という事で、太陽電池への投資を急速に増やしました。国自身は法律を作っただけで、国の予算はこれには一銭も使っていません。お金のない政府には非常に頭の良い方法だと思います。

ただし電力代金はその分高くなります。その事は国民は覚悟しなければなりません。ですから、もしも電力費が高くなり過ぎるようであったら、そこで少しスローダウンするような価格に計画を見直す必要があります。しかしながら今のところ、ドイツの国民は少しぐらい電力代が高くなっても、それに耐えてやっていこうという精神でやっている事になります。

こういう制度を導入した時に技術的な心配が指摘されています。太陽電池とか風力発電とかいう不確かな、信頼のおけない電力源をつなぐと、電力の供給システムが不安定になってしまうという心配です。

しかしながら、結局は「やるかやらないか」、それだけの事のように思います。つまりドイツや中国やスペインといった国にできる事を、日本の優秀な電力会社ができないわけがない。やると決めればそれで解決すべき事が出てくる。それを解決して進む。電力会社は不確かな電力源を受け入れて、しかも安定に供給していくという、自分たちの配電システムの安定化のための技術開発を進めるとともに、設備投資をしていく必要が生じる事になります。

金持ちの国、日本

さて、日本には環境などに投資できる経済的余裕があるのか、そういう観点からもう少し考えてみたいと思います。2008 年以降、世界の金融恐慌が起きていますので、ここ 2、3 年、金融や製造業に対する大きな攪乱効果が生じています。しかしながら、長期的に見ると、世界の中で日本が最も金持ちの国である事には変わりがない。

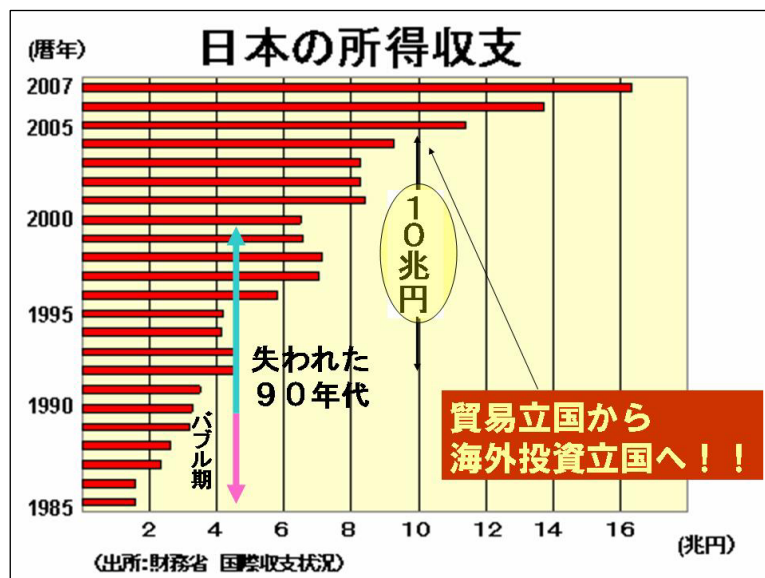
主要国の対外純資産			(対GDP比)
日 本	250兆 2,210億円(2007年末)		48.5%
ド イ ツ	107兆 5,715億円(2007年末)		26.4%
中 国	78兆 7,510億円(2006年末)		23.4%
香 港	61兆 6,548億円(2006年末)		273.0%
ス イ ス	55兆 2,187億円(2006年末)		116.5%
フランス	13兆 5,900億円(2006年末)		4.8%
ロ シ ア	▲7兆 5,195億円(2006年末)	▲	6.2%
イタリア	▲12兆 2,623億円(2006年末)	▲	5.3%
カ ナ ダ	▲18兆 280億円(2007年末)	▲	10.2%
英 国	▲80兆 2,259億円(2007年末)	▲	25.4%
アメリカ合衆国	▲302兆 890億円(2006年末)	▲	19.2%

(資料)日本:財務省
その他 IMF「International Financial Statistics(IFS)」他

図－27

〈図－27〉 それは対外純資産を比べれば分かります。対外純資産と言うのは、日本が海外に投資し、海外が日本に投資する、その両者の引き算をして、どれだけ正味日本が海外に投資しているかというお金です。対外純資産は、日本は 250 兆円、乱暴に言いますと国民 1 人当たり 250 万円、世界ダントツのトップです。第 2 位はドイツ、第 3 位は中国。

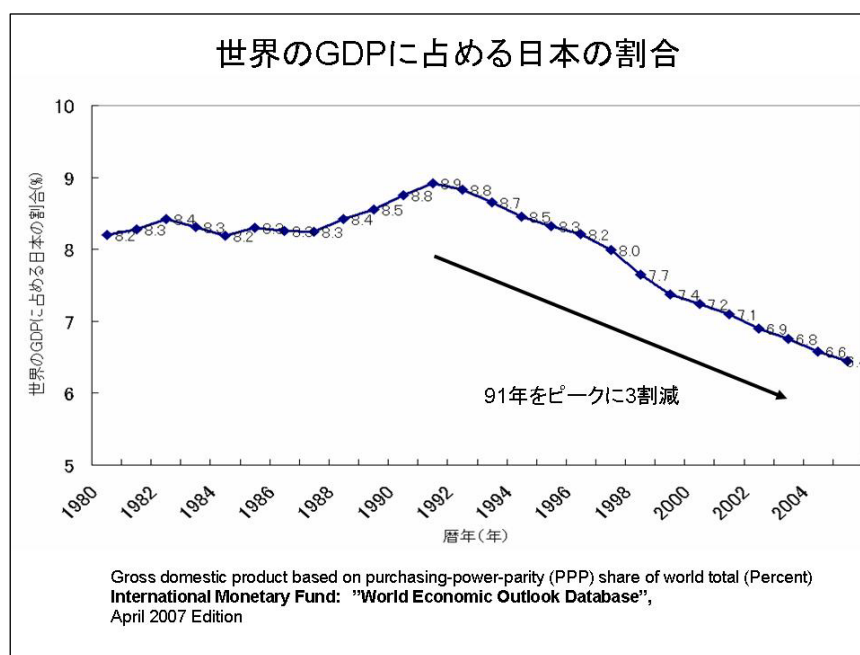
この世界最大の対外純資産は何によって出来上がってきたかと言いますと、日本はここ 22 年間、毎年 10 兆円という多額の貿易黒字を出した。それが 22 年間蓄積されてきたからです。



図－28

〈図－28〉 250兆円の巨額な対外純資産があると、そこから利益が上がってきます。その利益は日本の「所得収支黒字」という形で表れます。この250兆円から毎年上がってくる金利と考えると良いわけですが、2007年には16兆円になりました。この対外投資からの利益は所得収支黒字として、貿易黒字10兆円を超えています。昨年2008年は、瞬間風速的に日本の貿易は若干の赤字になったと言われています。しかしながら、この所得収支がそれをカバーして、去年は10兆円以上の経常収支の黒字を出していると思います。

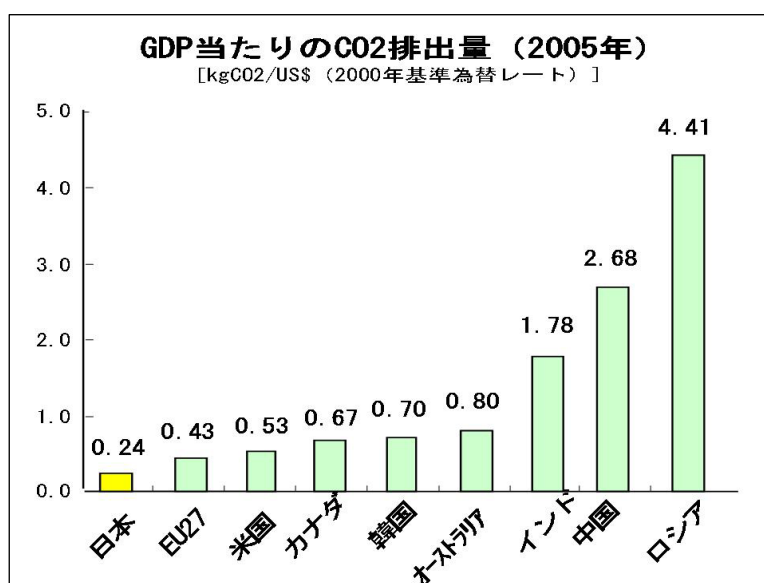
いずれにしても日本は貿易黒字をずっと続けて、多額のお金を貯めてきました。それを海外に貸している世界最大の金貸し国です。そういう日本が国内で職がない。何かしなければならない状況にある事は明らかです。海外の人から見ると、こんな不思議な国はないという事になるかと思います。



図－29

〈図－29〉 日本の置かれた状態は GDP に良く表れています。日本の GDP は 1990 年以降 20 年間、まったく増えなくなりました。つまり、日本は成長を止めた国になりました。そのため、世界の GDP に占める日本の割合は、1990 年を境にしてじりじりと減り、名目では約半分に、為替レートを考えても 3 割ぐらい減ってきています。

これはどういう事を意味しているのでしょうか。日本は金持ちになって海外にはお金を貸す。けれども、国内ではきちんとした事ができない国という事です。つまり海外には多額の投資をしながら国内で投資できない。どうして国内でもっと、将来の子どもたちのために投資しないのかというのが、日本に突きつけられている基本的な疑問になるかと思います。



図－30

〈図－30〉 GDP 当たりの炭酸ガス排出量を比べてみますと、日本は過去の技術の蓄積がありますので、現在でも世界で最も炭酸ガスの排出が少なく、同じだけの GDP を上げていく事ができます。そういう良い技術を持っている間に、日本はもっと国内の炭酸ガス排出の努力にお金をかけ、社会制度を充実させ、良い技術を海外に広めていかねばなりません。その活動が日本の国内の経済を活発にし、技術を更に進める事になります。今、動き出さないと日本の技術リードを護る事はなかなか難しいのではないかと思います。

日本の若者の意識

このような日本の状況の中で、若者たちはどのような見方をしているのでしょうか。これはノルウェーの調査によるものです。

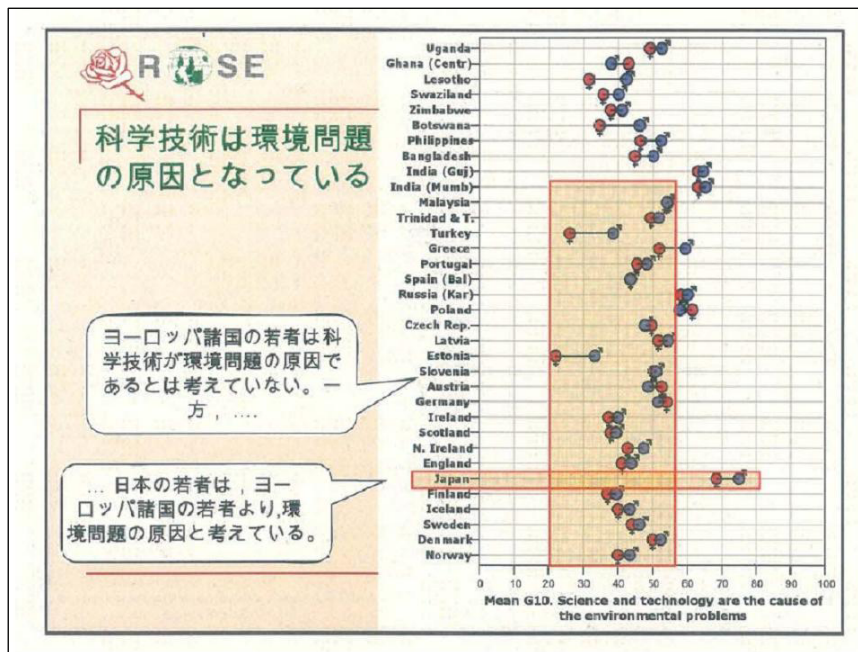


図-31

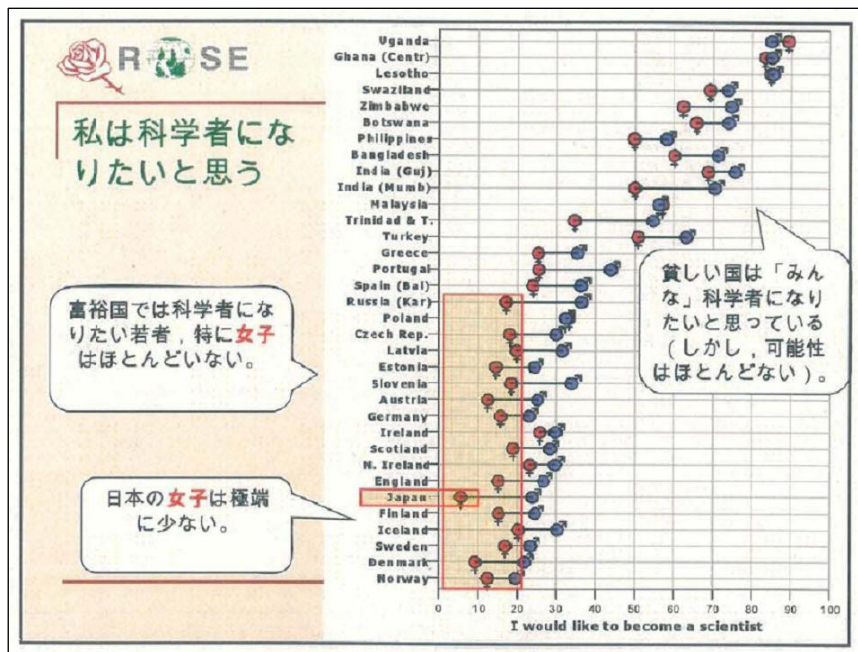


図-32

〈図-31〉〈図-32〉 「科学技術は環境問題の原因となっているでしょうか」という質問に対して、日本は男の子も女の子も両方とも、先進国のほかの子どもたちに比べてダントツに「なっている」と答えている子どもたちが多い。それから「私は科学者になりたいと思う」という

質問に対して、日本の特に女の子は世界で最も「なりたい」という子が少ない。

一方、日本で行われた高校生調査では「人類にとって 21 世紀は希望のある社会になると思うか」という質問に対して、日本は 35%だけが肯定的な答えでした。しかし、日本以外の先進国の高校生たちは 65%が「未来は明るい」と答えている。更に問題なことは、日本の子どもたちは、「自分のお父さんもお母さんも生きがいを持っていない」と答えています。

このように、日本という国は世界最大のお金を海外に投資する国になってきましたが、自分の国内では子どもたちは夢を失い、親たちが環境を悪くしてきたのだと信じている。そして、自分の親たちは生きがいを持たずに生きているようだ。そんな風に日本の子どもたちは、これまでの日本の親たちのやってきた事を総括しています。

子どもたちの未来のために

日本という国はこのような状況を放っておいて良いのでしょうか。現在の社会が抱えている多くの課題、そうした事に大人たちがきちんと取り組もうとしない態度に、子どもたちは非常に大きな不安と不満を覚えています。大人たちが取り組めない理由は、お金がないわけではない、むしろ余っている。労働力がないわけではない。むしろ、失業者が増えている。やらなければならない事に努力を振り向ける、「仕掛け」ができていない事が最大の問題です。ドイツでは電力固定価格買取制度導入によって、ある部分の仕掛けをつくりました。米国では企業の CSR 活動による投資が大きな新エネルギー産業を、シリコンバレーに創り出しているとされます。このような動きが欧州やアジアにも広がってきました。

日本がひとり惰眠をむさぼっていてはならないと思います。

地球規模での課題もたくさんあります。温暖化ガスの問題、インフルエンザやエイズなどの感染症。衛生状態を保つ水の確保、砂漠化の防止や緑化のための水の確保、さまざまな危機からの子どもたちの保護、食の確保と安全、クリーンなエネルギーの確保、資源のリサイクル。

子どもたちは何を見ているのでしょうか。まず、私たち、彼らの親の世代が未来に向けて何らかの努力をしてくれるのかどうかを、その気があるのかを子どもたちの目はしっかりと見ています。さらに、子どもたちは未来においてチャレンジしなければならない課題を提示され、それを親たちと一緒に協力できるような雰囲気望んでいるように思われます。彼らが実際に取り組めるような形にしていく必要があります。

我々自らが目標に向けて行動しようとする姿を子どもたちに向けて見せていく事、子どもたちの悲痛な気持ちの表現である、「両親ともに生き甲斐を持って生きていない」という状態からの脱却は、日本の将来にとって、「コストパフォーマンス」と言った言葉に代え難い「国家の重大事項」だと思います。そして、変化を実現すべき時期が来ているのではないのでしょうか。

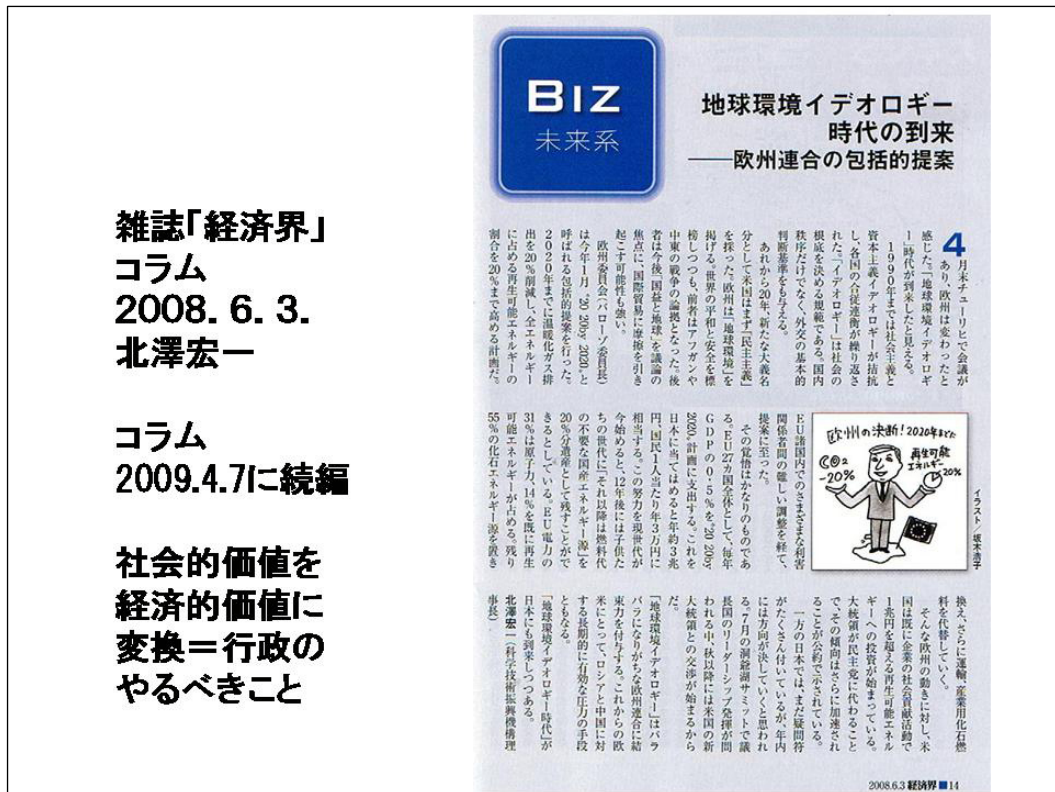


図-33

〈図-33〉 私は地球環境はこれからイデオロギーになっていくと思います。ヨーロッパは地球環境に向けてすでに急速に走り始めておりました。欧州連合の存在がそれを助長しているように見えます。カナダやオーストラリアは欧州に近いスタンスをとっています。一方で、中国、インドなどは先進国がもっと犠牲を負うことを要求し、アメリカやロシアなどはやや守旧派的態度をとっていました。今、オバマ大統領の出現によって、アメリカは急速にヨーロッパに近寄りました。その時に日本は世界から最も期待されながら、なぜか後ろ向きな態度しか国際的に見せる事ができていません。今後、日本が一体どういう態度を取るのかという事は、世界から注目され、そして日本の子どもたちからも注目される事になると思います。

地球環境は自分1人では守れない。炭酸ガスを出さないようにある国が努力しても、ほかの国も努力しなければ有効な温暖化対策にはなり得ない。その意味で地球環境というのは、必ず守ろうとする国々が、守ろうとしない国に対していろいろな形で外交的な圧力を加えざるを得ない事になります。また、温暖化問題は外交から家庭の生活にまで、これからの社会に大きな影響を与える規範となっていきそうです。まさに新たなイデオロギーの時代がやってくる。日本もどのような国になりたいかを、早く決めて行かねばならないと私は思っています。

どうもご清聴ありがとうございました。

■このレポートは本田財団のホームページに掲載されております。

講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得てください。

発 行 所 **財団法人 本田財団**

104-0028 東京都中央区八重洲2-6-20ホンダ八重洲ビル

Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103

<http://www.hondafoundation.jp>

発 行 者 原 田 洋 一