

## 第2章

# なぜ核融合か

田島 輝彦

tazima@nifs.ac.jp

核融合科学研究所研究・企画情報センター

---

### 2.1 はじめに

私は核融合分野では日本原子力研究所に10年、名古屋大学プラズマ研究所に10年、現在の核融合科学研究所に10年強在籍し、原研の最初の大規模機JT-2の建設と初期実験、それからJT60やINTORの炉心プラズマの設計担当をはじめ、ITERやLHDなどの作業会や委員会等いつもメインのプロジェクトになんらかの役割で関わってきたので、核融合の主な流れの本当のところをかなり証言できる1人と思う。

数年前、核融合の推進根拠に関する評価をきちんとしようと思い、資料をいろいろ探したが、体系的なものがなかなかなく、タテマエばかりで使い物にならないことに気づいた。

そこで自分で調べた結果をまとめ<sup>(1)~(3)</sup>、ある国立大学の電気系の学生に講演し、レポートを書かせたところ、300名の学生のうち、たった1人しか私の言いたいことが伝わっていなかった。かくのごとく他人に説明するのは難しい。私が学生に言いたかったことは「核融合にせよエネルギー問題にせよタテマエ論ばかりで、本当のところを知りたいければ、自分自身で検討しなければならない」であった。なぜタテマエ論ばかりなのかは、社会に受け入れてもらうために、俗耳に入りやすいものにならざるをえなかったからであろう。

しかしタテマエだけにのっとった開発研究は、当然妥当な研究開発方向から遠く離れてしまう危険性があるだけに、ホンネのところを研究者はしっかり把握しておく必要がある。核融合についての私の結論は、以下の3つである。

結論1：今後の100年程度ではエネルギー資源がなくなるわけでもなく、エネ

ルギー供給が足りなくなるわけでもないが、環境問題から使いたいだけ使うことが困難になってくる。したがってより環境保全性の高い基幹代替エネルギー源が求められている。

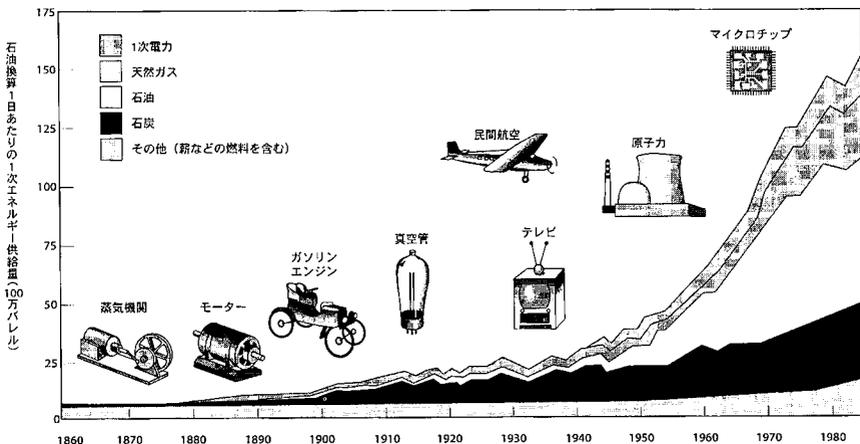
結論2： 基幹代替エネルギー源にうまい話はない。それぞれ長所があるが致命的短所も抱えている。

結論3： その困難さ故に核融合はまさしく mad scientist が行う mad science 分野で、およそ積み上げ型の研究開発スタイルはあり得ず、アイデアを最重要視して、チャレンジに次ぐチャレンジで切り開いて行かざるをえない。

代替エネルギー源の必要理由を核分裂炉がいろいろ宣伝してきているが、10年程度でそのキャッチフレーズを目まぐるしく変えてきている。当初は軍事用の原子炉（核爆弾用燃料生産用）維持のため、原子力の平和利用をアイゼンハワーが提唱したのであるが、無限のエネルギー源、その次はクリーンなエネルギー源と変わり、最近では安価なエネルギー源から炭酸ガスを出さないで環境に良いエネルギー源などと言っている。核融合も同じような宣伝をしてきたが、これらに確かな根拠があったわけではない。

個人的には、将来の基幹代替エネルギーとしての条件を満たしうるのは核融合し

図表1 世界のエネルギー需要の増大



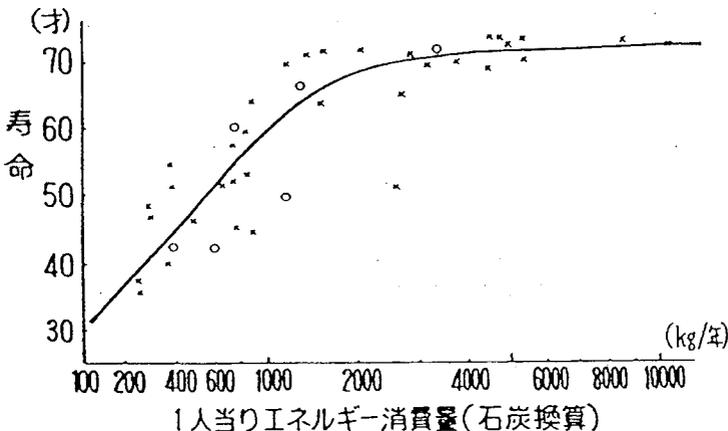
か可能性がないのではないかと思っている。その根拠を示すために、代替エネルギー源をめぐる論点について簡単に整理してみよう。まずエネルギー問題について見直してみる。

## 2.2 エネルギー問題～エネルギー需要は増大するのか？

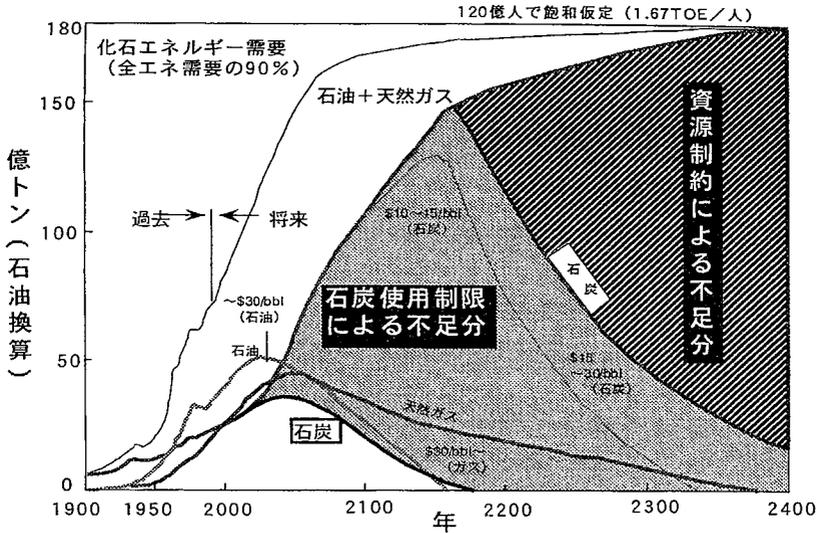
今後エネルギー需要が非常に増大するので代替エネルギー源が必要になると言われてきたが、今後どこまでエネルギー需要が増大するのかはよくわからない。確かに 20 世紀には人口爆発が生じ、そのためエネルギー需要が急増している[図表 1]<sup>(6)</sup>。ここで注目しておかなければならないのは、貧しい国は平均寿命も短く歴史的に人口がそれほど増えなかったが、20 世紀に入ると医学の進歩により、これらの国ほど人口爆発が生じていることだ。

よく指摘されるのは、2050 年代には、人口が 100 億人に達し、総エネルギー需要が 3 倍は必要になるため、エネルギーが不足するという予測だろう[図表 2]<sup>(7)</sup>。その根拠は、1 人当たり 3 kW のエネルギーを使うと、現在の豊かな生活が享受でき、平均寿命も伸びるといふところにある[図表 3]<sup>(8)</sup>。このように全世界が同程度に豊かな生活を営む持続的な発展という考え方があるが、専門家の間では問題点がさまざまに指摘されている。多分南北問題がより深刻化し、多数の難民が発生するという予測の方が現実的であろう。

図表 2 各国のエネルギー消費量と寿命



図表3



全エネルギー需要の90%を化石燃料でまかなう場合の化石燃料の消費曲線例。世界人口は120億人で飽和すると仮定し、さらに省エネルギーが進んで、1年間で1人平均1.7トンの石油に相当する化石燃料エネルギー(現在の先進諸国の人々が使う平均の1/3)を使うと仮定して計算したもの(電力中央研究所が行った評価)。及び、地球環境問題を考慮して、石炭の使用を大幅に制限した場合(斜線)のエネルギー供給の不足量の変化。

さて日本のエネルギー需要の予測と実績をしてみる (図表4)。点線が予測、太字が実績である。昭和45年頃の予測では、日本のエネルギー需要は急増しつづけ、20年後には世界の石油貿易量の半分を日本が消費するという、ありえないような数値を発表している。もちろんそういう事態は生じず、消費は横ばいであったが、この間経済は停滞することなく、GDPは約2倍にまで伸びている。いかに日本のエネルギー使用に無駄が多かったかという事実も明らかになった。

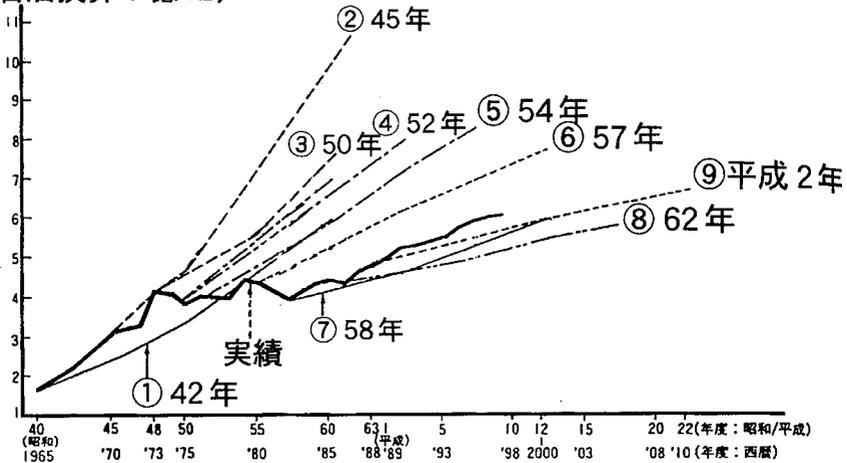
次々に予測が出されてきたが、いずれもエネルギー需要は増えるという予測ばかりである。現実との食い違いを見ると、これは予測ではなく期待だということが分かる。エネルギー需要の不足部分を原子力で補うという原子力推進のための国策に沿って、エネルギー大量消費の推進を旧通産省が行おうとしてきたからであろう。今までの政策の基本は大量生産・大量消費社会の維持だったということがわかる。

いずれにせよ、今後の日本のエネルギー需要がどこまで増大するのかわからない。昭和30年代ではエネルギー需要が少なく、自給率が75%もあった頃とは異なり、現在程度のエネルギー需要でも日本はまったく自給自足ができないことは確かである。

図4 日本のエネルギー需要予測と実績

総合エネルギー調査会長期エネルギー受給見通し推移・実績対比  
(エネルギー需要量合計・石油換算)

(石油換算：億 kJ)



2.3 エネルギー問題～石油は不足するのか？

化石燃料は早晚不足するので代替エネルギー源の開発が必要だと言われてきた。しかし石油資源ひとつとっても究極可採埋蔵量を基にしての資源寿命は、40年以上も前から常に30～40年と言われてきたが未だに不足していない。この間石油需要は5倍にもなったが、究極可採埋蔵量も同様の伸びがあったので、資源寿命は変わらなかったというのが一応の説明である。しかしすでに19世紀末の石炭使用全盛期に、その資源寿命を30年とした例もあるように、この30年という数字は、資源採掘販売企業集団（現在ではメジャー）の価格維持のための宣伝と見るのが定説となっている。

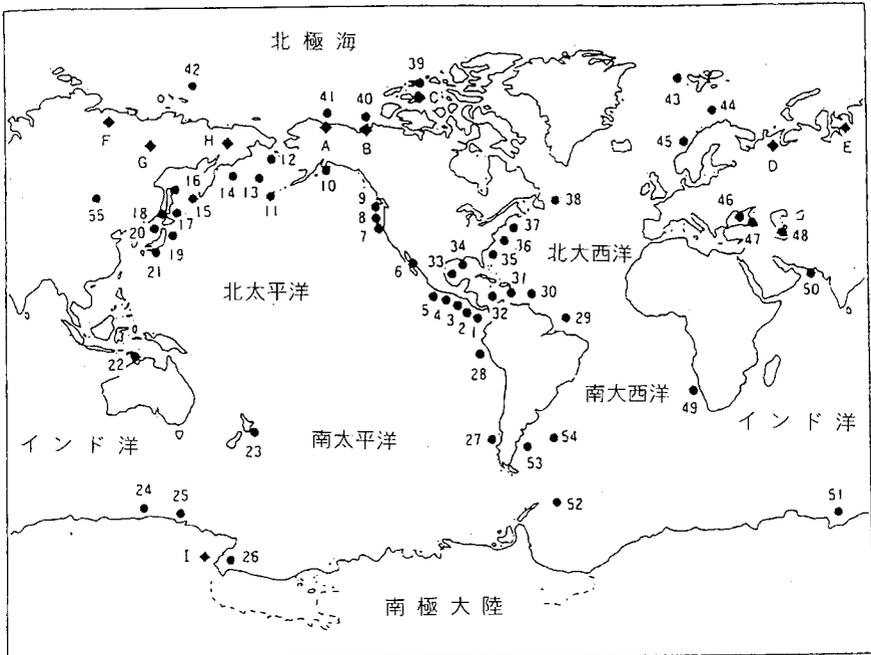
たとえば石油究極可採埋蔵量に関し、世界的に権威あるとされている28の調査、研

究機関の発表値には1兆バーレルから7兆バーレルもの開きがある<sup>9)</sup>。米国と旧ソ連の公表推定値の開きも大きく米国の方がはるかに低く見積っていて、いずれかあるいは両者がなんらかの政治的、経済的配慮をしているからだという指摘がある。

正確な埋蔵量を知る手立ては我々にはないが、中立の立場と見られる説では、石油の究極可採埋蔵量は、かつての1兆バーレルはもちろん現在の2兆バーレルどころか、4~5兆バーレルに達するとしている<sup>9)</sup>。

一方天然ガスの究極可採埋蔵量は、年々増え続けていて石油に迫る勢いである。さらに最近メタンの水化物であるメタンハイドレートが、世界の各地に膨大にあることがわかってきた[図表5]<sup>10)</sup>。燃料としてのメタンが従来の化石燃料の総量を上回るほどにあるとの推算がいくつか発表されている。ともかく膨大にあるガスや石炭を考えるまでもなく、石油だけを考えても、公表値よりも実際の埋蔵量ははるかに多いこと、さらに現実に供給が逼迫してくればエネルギー資源は高価格になり、その時今までも経験したように、コストの高い資源も新しく採掘されるようになるし、また需要も減少するという手伝うだけに、ここ100年程度で化石燃料が枯渇に至ることはないであろうとい

図表5 世界のメタンハイドレート分布図

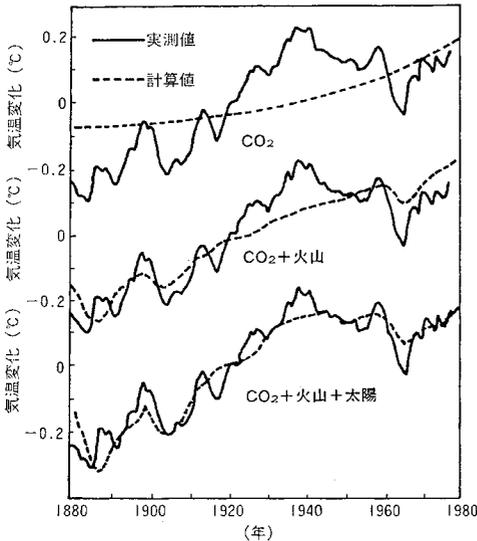


う説の方が有力になってきている。

## 2.4 エネルギー問題～環境問題

環境保全性の高い代替エネルギー源の開発が要請されているのは確かである。とはいえ炭酸ガスによる地球温暖化の明白な科学的証明はない。年間約60億トンもの炭酸ガス

図表6 過去100年間の気温変化(実線)とシミュレーション結果(点線)



注) CO<sub>2</sub>倍増時の気温上昇を2.8℃と評価するモデルを使用

放出のうち10億トンもが吸収源不明で、シミュレーションと現実では定性的にも合わない[図表6]<sup>(11)</sup>。約12万5千年前の前間氷期では炭酸ガスの重量濃度は2割少なかったが(体積濃度で1/2)、平均気温は2～3度高かった。1940～1970年代は炭酸ガスは増えたが、気温は下がった。当時小氷河期に突入する前兆と大騒ぎをし、エネルギー消費を増大させて地球を暖めるという提案さえあった。さらに太陽の放射エネルギーの変動(0.3～0.5%変動)で気温0.5度変動や地球の自然変動による数十年サイクルでの0.5度変動もありうる<sup>(12)</sup>。

なによりも地球の温度に影響

をもたらすのは大気中の水蒸気のはずである。地球物理の本には、大気がなければ地球の平均温度はマイナス18度であるが、大気の水蒸気のためにプラス15度で一定とされている。この記述が温暖化の本にはないのはなぜなのであろう？なぜ大気中の水蒸気量は一定であると仮定できるのであろうか？

酸性雨による森林、湖沼の被害や、土地や水や海の汚染、砂漠化等明らかな環境汚染を第一優先としないのはなぜなのだろう？先進国がこれらの局所的な環境破壊の深刻さを指摘しても、豊かな生活のために環境問題より経済成長を優先させた報いであると発展途上国に返されるだけであらう。となると今後地球環境悪化に大影響を与えるであろう発展途上国を引き込むには、汎地球的になりそうな事柄を

問題化する必要がある。炭酸ガスによる地球温暖化はまさしくそれであろう。

このように、環境問題も政治的な話があまりにも多くて、何が客観的な真実なのかよく分からない。

## 2.5 代替エネルギー源開発根拠

以上から代替エネルギー源開発の推進根拠は、

- 石油や石炭や天然ガス等の炭素エネルギー資源はここ百年程度では枯渇する恐れはなさそうであるが、有限であることは明らかであり、子々孫々に渡って大事に使うべき重要な工業材料資源である。
- 環境保全性の高いエネルギー源は焦眉の課題である。すなわち人口爆発とエネルギー消費増大、それにとまらぬ環境破壊はすでに今日の問題となっている。科学的証明はいかにも不十分である炭酸ガスによる地球温暖化はともあれ、21世紀には酸性雨等の問題はますます深刻化すると予想されている。地球環境の収奪によって豊かな生活を実現してきた先進国には特にその解決の責任がある。
- また日本では国家安全のためにも自給自足のできるエネルギー源の確保は悲願である。

## 2.6 代替エネルギー源の成立条件

このような代替エネルギー源開発研究の推進根拠を基に、それが成立する条件をしてみる。ここでは例えばエネルギー需要の10%程度の供給が限界のようなものではなく、単独でそのほとんどを賄える可能性のあるいわゆる基幹代替エネルギー源への要請条件について考える。

- [1]豊富な燃料資源があること。
- [2]エネルギー比が充分に大きいこと（少なくとも5以上）。
- [3]環境保全性が高く、立地制約が少ないこと（現在の日本の総エネルギー需要を満たすだけでも100万kWの発電所が約500基は必要となる）。
- [4]妥当な経済性があること。

図表7 基幹代替エネルギー源の比較

	核分裂	太陽光発電	核融合
燃料資源	海水中の1割で約千年分抽出開発OK 1~2円高/kWh	無尽蔵	海水中にUの5.60倍Li抽出開発OK 安価
エネルギー比	ガス拡散法 3~6 遠心分離法 6~10	1~3	5~10
環境保全性	△	◎	○
立地制約	△	×	○
経済性	10~15円/kWh	~30円/kWh (ただし土地代とエネルギー貯蔵のコスト、効率低下を考慮しない場合)	20~40円/kWh (DT磁場閉じ込みの場合)

ここで[1][2]はエネルギー源として自立しうる条件で、[3][4]は広く社会に受け入れられるための条件である。現在基幹代替エネルギー源として目されているのは核分裂炉、太陽光発電、核融合炉しかない。これらの評価を〔図表7〕<sup>(6)</sup>にまとめてみた。

### [1]燃料資源

太陽光発電ではその太陽エネルギーは無尽である。核分裂炉では燃えるU235は天然ウラン中0.7%しかなく、これでは世界の数十年分のエネルギー需要を賄うのも危うい。そこで99.3%の

燃えないU238を高速増殖炉で燃えるプルトニウムに変えれば、エネルギー資源量が数十倍になると考えたわけである。

しかし高速増殖炉で燃料が倍増する時間すなわちダブリングタイムは数十年かかることが分かってきて、これでは次々に造る高速増殖炉の初期装荷分の燃料を自給できないので、基幹エネルギー源としては成立しないことがわかってきた。各国が開発から手を引いた根本の理由はそれであろう。幸いにも海水ウランの抽出はうまくいき、その価格は鉱石ウランの数倍ではあるが軽水炉での燃料代の発電原価に占める割合は低いため、海水からのウランだけで代替しても、1~2円/kWh高くなるくらいですむと算定されている。海水中の1割程度のウランが利用できれば千年程度の資源量となる<sup>(13~15)</sup>。

DT核融合では燃料である重水素(D)と三重水素(T)のうち、重水素は海水に充分あり安価に抽出できる。三重水素はリチウムと中性子の反応を利用して自己生産をしなければならぬ。リチウムの海水からの抽出に関し、最近従来の化学的抽出法より約百倍も収着効率が高いイオン記憶合金を使う巧妙な方法が、通産省工業技術院四国工業技術研究所で開発された〔図表8、9〕<sup>(16)</sup>。海水にあるリチウムはウランよりも50~60倍も多いだけに、核融合のエネルギー資源も充分にある。

[2] エネルギー比

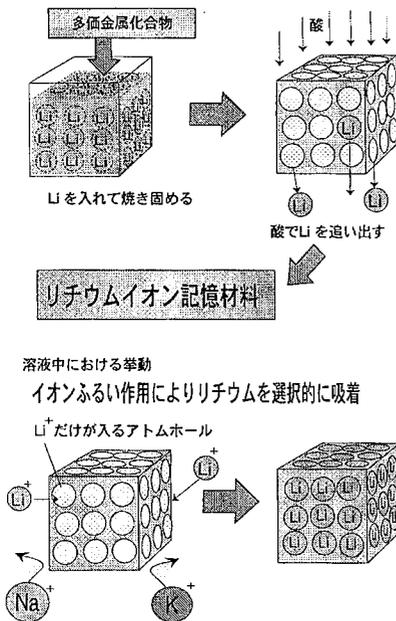
エネルギー比(=出力/入力)とは、プラントがその寿命(例えば20~30年)の間に生産する全出力エネルギー(ここでは電気)と、プラント建設や燃料製造およびプラント維持に必要な全入力エネルギーとの比で、どれだけエネルギーが増倍されるかを示す目安である。

太陽光発電プラントは巨大であり、その大重量架台および大面積の太陽光電池やそれを設置するアルミパネルの製造エネルギーが膨大になるため、太陽光発電のエネルギー比は非常に低くなるをえない。自然エネルギーを主張するエコロジストは、原子力は重厚長大というが、太陽エネルギーこそ重厚長大の典型である。

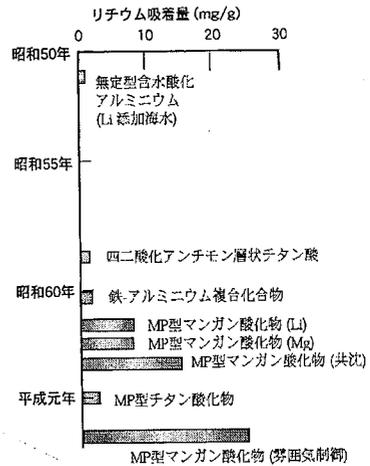
核分裂炉では入力に占める最大のものは燃料濃縮で、膨大な電気エネルギーを使用するが、遠心分離濃縮法であれば十分なエネルギー比が達成できる。注目すべきことに数万トンに及ぶプラントの建設エネルギーはそれほど大きくなく、そのエネルギーは1年以内に回収できる。

核融合炉プラント重量は軽水炉の2~3倍は重くなるが、エネルギー比5~10程度が期待できる [図表 10、11]<sup>(6, 17, 18)</sup>。

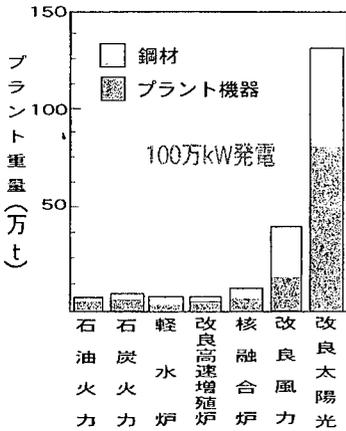
図表 8 海水からのリチウム抽出法



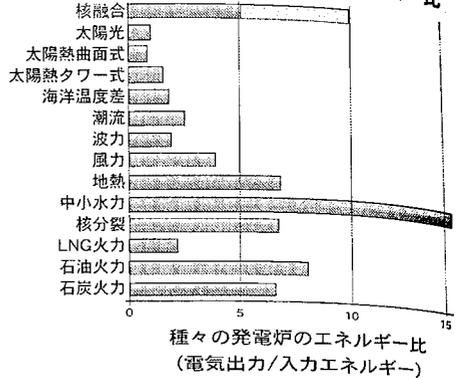
図表 9 海水からのリチウム吸着性能



図表 10 各種発電プラントの総重量比較



図表 11 各種発電プラントのエネルギー比



### [3]環境保全性と立地制約

太陽光発電は局所的にはともかく、環境保全性はずっとも優れる。その最大の問題はエネルギー密度が低いことにあり、現在の日本のエネルギー需要を全て賄おうとするのに、効率20%の太陽光電池を使っても3万k㎡を必要とし、これは日本の全耕地面積(もしくは四国全面積程度)が必要となるくらいである。したがって日本での立地はありえず他国に求めざるをえない。

核分裂炉の立地には、冷却水の豊富な海岸であること、耐震性のある岩盤があること、事故時の影響をなるべく少なくするために人口密集地帯から遠いことなど、多くの制約があり、国内に500基もの設置はいかにも困難である。

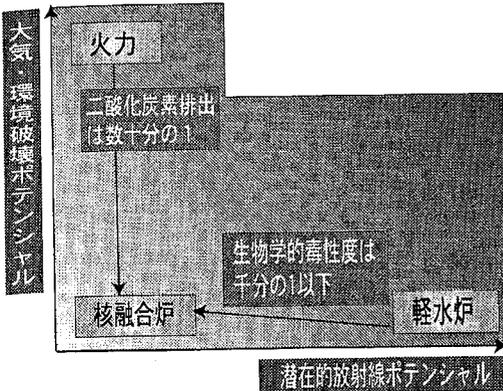
核分裂炉の保有する放射能はアクチノイド(放射性の核分裂生成物)がその殆どを占めている。これらの生成量を少なくすることは原理的にできない。またこのような高レベル放射性廃棄物の最終処分法が未解決になっている。核融合炉は核分裂炉のような高レベル放射性廃棄物を出さない。

核融合炉が実現した場合の放射能は総量では核分裂炉と同程度で、トリチウムはその約1割で約9割は誘導放射化された構造材(ステンレス鋼を主要とした場合)が占める。しかし核融合炉の放射性物質の生体への影響(生物学的毒性度)は、この場合でも軽水炉の1000分の1と低い。構造材の選択によって、この誘導放射性はさらに数桁も低くすることが可能である。また核融合炉はもともと暴走事故は原理的になく、想定最大事故でもはるかに核分裂炉より放射性物質の流失量は少ないといえる。さらに環境保全性を増

すためにトリチウムの保有量を減らしたり炉心部に低誘導放射材を開発して、その放射

能を減らす研究が進められている。もちろん大気環境を悪化する亜硫酸ガスや亜硝酸ガスや炭酸ガス等の排出は、火力発電より非常に少なくなる [図表 12]<sup>(19)</sup>。

図表 12 核融合炉と環境保全性

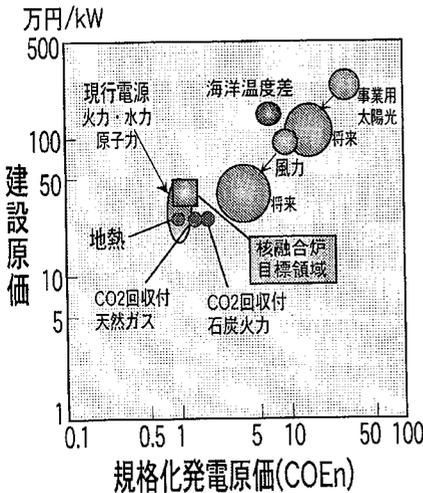


[4] 経済性

既存のエネルギー源のうち、軽水炉は仮定によって変わる予測値ではなく実績値では石油火力の20~30%高程度である。それと比較して、太陽光

発電の場合、太陽光電池がコスト高を招いている。他国にプラントを造る場合の土地代は無視しても発電原価が現状で約10倍、30年後でも2~3倍高と予想されている<sup>(20)</sup>。

図表 13 各種発電単価目標



磁場閉じ込め DT 核融合炉での検討を見ると、炉心部の重量は軽水炉のそれに較べ10~20倍も重くなる。これは炉心部のエネルギー密度が、軽水炉の50~100分の1と低いからで、結局プラント総重量は軽水炉の2~3倍は重くならざるをえない。核融合炉は軽水炉より複雑な加工、高級な材料を多量に使用するため、コストはこの重量比より高くなる傾向のため、DT 磁場閉じ込め核融合炉は軽水炉より2~3倍以上のキャピタルコストとなると予想される [図表 13]<sup>(19, 21)</sup>。

## 2.7 結論

以上から核融合の特長は、

- エネルギー自給自足ができる
- エネルギー比がかなり大きい
- 環境安全性が良く、立地条件の制約が比較的少ない

私自身の個人的な意見としては、基本条件だけを見ると、将来の代替基幹エネルギーとしては日本では核融合しか可能性がないと思う。核分裂炉も太陽光発電も立地問題だけでも困難がある。しかし核融合は、経済性と技術的困難性という厄介な課題を解決しない限り出番がないであろう。

以上をふまえて、次のような論点を議論のために提示しておきたい。

論点1：核融合の開発には後何十年もかかるとされているが、何が問題なのかを研究者にさえ分かりやすく説明していない。核融合の問題点を明らかにするほど解決の提案出てくるわけで、それらの提案を採用して挑戦して行けば10年、20年たつうちに解決の目途もたってくる可能性も出てくる。そう思って問題点を積極的に指摘している。ところが開発研究のリーダーの大半は悲観論者である。悲観論者だからこそ、問題を隠蔽しようとする。したがって、20年前の根本の問題点がいまだに解決されず残されている。では、核融合のような巨大技術の開発にあたって、楽観論者をリーダーにするにはどうすればよいか。

論点2：研究者がその一生ではゴールが見えないような研究開発を、迷いもせず墮落もせずにまともに行えるはずはない。

論点3：核融合に限らず、妥当な戦略は凡人でもたてられるが、その遂行には実行の英才が必要である。一方戦術の立案（作戦）には英才が要るがその実行は凡人でもできる。しかし失敗の歴史を見ると、失敗の原因は戦略の実施や戦術の企画に英才を起用せず凡人をあてるからである。核融合には研究の秀才が非常に多い。問題はそういう白馬を生かせる伯楽がいらないことだ。では、どうすれば伯楽を見つけてリーダーにできるか。

## 2.8 質疑応答

西川 核融合の炉の設計は40年くらい前から始まっていますが、キャピタルコストはどうなっていますか。だんだん知識は増えているけれど、安くなっていますか。

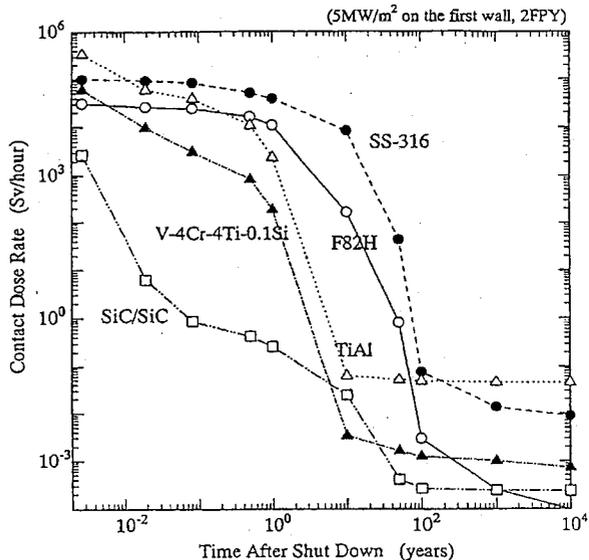
田島 磁場閉じ込め炉では、基本的には材料がどの程度の中性子照射に耐えられるかでコストは変わってきますね。現実には20年間あまり変わっていません。今の材料から3~4倍の開発ができれば、かなり安くできる可能性はあります。ところがそれは1000億円くらいの加速器を作り、それで材料にどんどん中性子をあてる実験をして良い材料かどうかをチェックしなければなりません、結論を出すのに最低限20年か30年かかります。どのくらいの材料かと言えば、500dpaくらいに耐える材料が欲しいんです。これは一つ一つの材料の粒子が500回移動されても元に戻れるというものです。現実には100dpaくらいに耐える材料はなんとかできています。

永山 100dpa程度に耐える材料はやはりステンレスですか。

田島 そうです。実用炉用の構造材としては低誘導放射性材で高耐中性子照射材と期待されるバナジウム、シリコンカーバイド、カーボンなどが候補にあがっています[図表14]<sup>(22)</sup>。

キャピタルコストについて言えば、火力発電所は100万kWで1500億円ですが、燃料代が高いので運転経費が高い。核分裂炉はキャピタルコストが3000億円なのになぜ成り立つかと言えば、燃料費が安いからです。核融合炉では核分裂炉より燃料費が安いので、キャ

図表14 核融合での各種構造材とその誘導放射能



ピタルコストは4000億円とか5000億円くらいまで許されると思いますが、それでは実験炉であるITERさえできないわけです。

### 【参考文献】

- (1) 田島輝彦, 井上信幸: プラズマ・核融合学会誌 70 (1994) 497.
- (2) 田島輝彦: 交流 No. 36 (1994) 14~17.
- (3) 田島輝彦: 核融合研究 I 第1編4章(名古屋大学出版会, 1996).
- (4) 田島輝彦: プラズマ・核融合学会誌, Vol. 74, No. 7 (1998) 668.
- (5) 田島輝彦: 核融合研ニュース, No. 120 (2001, JAN).
- (6) G. R. デービス: 別冊日経サイエンス 101 (1990) 6.
- (7) 電力中央研究所(依田直監修): 人類の危機トリレンマ(電力新報社, 1998)
- (8) "Energy statistics Year Book 1988" (U.N., New York, 1988).
- (9) 松井賢一: 世界のエネルギー世論を読む(電力新報社, 1991).
- (10) 奥田義久: ペトロテック, 16, 4 (1993) 12-18.
- (11) J. Hansen, S. Lebedeff: J. Geophysical Research, Vol. 92, No. D11 (1987) 13345~13372.
- (12) ジョージ・マーシャル研究所レポート: 最新科学論シリーズ 11 (学研, 1990) 91-112.
- (13) 須郷高信, 斉藤恭一: 日本原子力学会誌 36 (1994) 619.
- (14) 平岡徹: 日本原子力学会誌 36 (1994) 644.
- (15) 飯島勉: 日本原子力学会誌 36 (1994) 951.
- (16) 大井健太, 宮井良孝, 加藤俊作, 阿部光雄: 日本海水学会誌, 42 (1989) 219.
- (17) 神前康次: 日本原子力学会誌 35, (1993) 30.
- (18) 内山洋司, 山本博巳: 発電プラントのエネルギー収支分析 (電力中央研究所研究報告 Y90015, 平成3年).
- (19) 核融合会議開発戦略検討分科会報告書, 平成12年.
- (20) 永田豊: 日本原子力学会誌 36 (1994) 815.
- (21) エネルギー評価委員会報告書 (ICF フォーラム・レーザー核融合振興会, 平成7年).
- (22) F. Najmabadiet et al.: "Overview of ARIES-RS Tokamak Fusion Power Plant", 4th Int. Symp. On Fusion Nuclear Technology (April 1997, Tokyo).