

第1章

エネルギー開発を巡る科学政策

核融合研究を例題として

井口 春和

iguchi@nifs.ac.jp

総合研究大学院大学核融合科学専攻 助教授

プロフィール

大学では原子核理論の研究室に所属したが、エネルギー問題への関心から大学院進学と同時にプラズマ・核融合に転向。以後名古屋大学プラズマ研究所、核融合科学研究所を通じて大学共同利用機関で過ごす。核融合研究の拡張期にあつて研究環境には恵まれてきたが、20年あまりが過ぎて、核融合研究の社会的受容性を再確認したいと思い、総研大の共同研究「科学と社会」に参加。以後興味はさらに科学技術全般に及び、今も拡散中。狭い意味の専門はプラズマ計測、特に重イオンビームやリチウムビームを用いた計測の開発。

1. 科学研究と科学政策

1.1. 文理連携による科学政策のために

私は石油危機が叫ばれた70年代に核融合研究の世界に入り長く携わってきたが、社会から大きな期待をかけられていた当時と比べると、エネルギー開発としての核融合研究は、最近ではあまり関心をもたれないし期待もされていないという印象を受ける。核融合研究の位置づけを再定義する必要があるとの思いから、この数年総研大の共同研究「科学と社会」などを通して、専門分野外の人も議論する機会を持ってきた。幅広い視点からエネルギー問題について考えてみたいと思ったからである。その中でいろいろな分野のエネルギー開発政策について調べていくと、疑問を感じる事が少なくない。

エネルギー問題は環境問題と絡んで21世紀の人類社会が取り組むべき大きなテーマであり、若い世代にも一緒に考えてもらいたいと思う。ここでは核融合に限定せずに、エネルギー開発における科学政策に関して私なりに考

えてきたことを整理して話題にしたい。もとより、私自身は一実験研究者であり政策論の専門家ではないので、これから話す内容は講義ととらえずに、1つの見方、考え方を提供するものとして聴いてほしい。

まず、人類のエネルギー消費がどれほど拡大してきたかを見てみよう。それを端的に示す例として、夜の地球を衛星写真でとらえたものがある。これを見ると、ごく一部の地域を除いて、陸地のほとんどあらゆるところが明るく光っている。その明るさが人間のエネルギー消費の大きさを示す1つの指標と見ることができる。

かつて「ローマクラブ」は地球を1つのシステムと考え、はたして地球は拡張する人間文明を支えきれるかという問題提起をした。その後議論は発展し、「Sustainable Development」という概念が生み出された。文明の持続可能性を評価する1つの指標として、最近エコロジカル・フットプリントという考え方が出されている。それは、人類の活動が地球にどれだけの影響を与えているか、つまり、人間活動に必要な資源採取や汚染排出に対して地球の土地はそれをまかない吸収することができるか、という問題を数値化して評価しようとするものである。ある研究グループによれば、それはすでに1を超えているという。すなわち、地球はもはや持続可能な限界を越えているというのである。このような評価の正否については議論のあるところではあるが、大事なことは、エネルギー問題を考えるときに、こうした視点を避けては通れないということである。

ところで、科学の研究は「真理の探究」を普遍原理とする活動であり、そういう意味で、いわば一神教に近い閉じた世界を形作っている。また、真理の探究を目的とする限り、無限の拡張性を内在している。一方、科学政策は社会との関わりを考慮する必要があり、決定過程に普遍原理が存在するわけでもない。社会に対する影響や予算の制約など社会からのフィードバックが必要であり、結局は選択の問題になる。したがって、科学政策は真理の探究という科学の論理だけでは進められない。

一方で、しばしば指摘されるのだが、科学者は真理の探究が使命であり、その成果をどう使うかは行政や社会科学の問題である、という見方がある。

しかし、高度に専門化が進んだ故に科学政策の決定過程に科学者も組み込まれ、むしろ積極的に関わっているのだから、科学者にも結果責任があると考えるべきである。そうすると、科学者が真理の探究だけに安住して研究を進めていてよいのかという疑問が出てくる。

私はそういう意味で、いま「文理の連携」が必要だと思っている。科学技術の深く関わる社会の問題には、理系の科学者も、社会科学、人文科学と連携して議論に参加しなければならない。ただ最近よく「文理融合」の必要性が指摘されるが、私は、個人的には融合はありえないのではないかと考えている。もともと依って立つ指導原理が違うのだから、「融合」ではなく「連携」がふさわしいだろう。

1.2. ミクロ合理性とマクロ合理性

科学政策の決定過程においては、ミクロ合理性とマクロ合理性という見方がある。ミクロ合理性とは、局所的には非常に正確だが、全体としては合理性がないというものであり、専門家といわれる人たちの議論にしばしば見られる。それに対してマクロ合理性とは、個々の議論が必ずしも正確ではないが、全体としては合理性があるというものだ。

原子力開発の事例を挙げて説明しよう。原子力についてはメディアでもよく紹介されるが、複雑でよくわからないという声をしばしば聞く。この機会に、そうした話題を理解しやすいように、原子力の基礎的な枠組みを解説しておこう。原子力の話はおよそ次の3つに分類して考えるのがよい。

・ 軽水炉

現在、日本の原子力発電のほとんどをまかなっている炉形式で、天然ウラン中には0.7%しか含まれないウラン235を濃縮して燃料としている。日本では発電用の原子炉はすでに50基を越え、総電力量の3分の1以上を担っている。原子力利用については賛否両論あるが、現実に社会に大きな貢献をしているという事実がある。

- ・ 軽水炉+核燃料サイクル(プルサーマル)

軽水炉の中でわずかに生成されたプルトニウムを、使用済み燃料から取り出してウランと混ぜた混合燃料にし、それを軽水炉の中で燃やす方式。もともとは高速増殖炉で燃やすための燃料再生が核燃料サイクルの主目的だが、増殖炉の開発が進まず、再処理で生まれる余剰のプルトニウムを処理するために軽水炉で燃やそうとするもので、燃料の節約にはほとんど寄与しない。

- ・ 高速増殖炉+核燃料サイクル

高速中性子を用いて、天然ウランのほとんどを占めるウラン 238 を本格的にプルトニウムに変えて燃料を増殖させる炉の方式。最終的に大部分のウラン 238 をプルトニウムに変換して燃やすため、ウラン燃料の寿命が数十倍延びると期待され、研究がスタートした。「もんじゅ」はこの型の原型炉であるが、10年前にナトリウム漏れ事故を起こし停止したままになっている。

そこでマイクロ合理性、マクロ合理性の視点で考えてみよう。現在核燃料サイクルについては、世界中のほとんどの国が撤退している。経済性が成立しないという理由と、核兵器開発やテロなどへの核拡散の懸念があるという理由からである。そのためこれらの国々では、放射性廃棄物は地中深くに埋めるという方法を研究してきた。

一方、日本は青森県六ヶ所村に2兆円規模の再処理施設を作り本格的な核燃料サイクルの準備を進めてきた。様々な批判がある中で、最近原子力委員会は、この核燃料サイクル路線を維持する方針を決めた。その説明の根拠として、日本では放射性廃棄物の地層処理研究が進んでいないことが主張された。これは事実なので、一見もっともな説明に聞こえるし合理的にも見える。しかし、日本は核燃料サイクル路線を維持するという理由で、地層処理研究を抑制してきたという経緯がある。つまり原子力政策全体をマクロに見ると、このような政策決定が妥当かどうかの疑問が残る。もちろんその他にもいろいろな視点があり、これはその1つに過ぎないので、皆さんが自分自身で考

えていただきたい。そのためにできるだけ正確な資料を提供して、判断に役立ててもらおうのが専門家の役目であると思う。

ちなみに各国の核燃料サイクル政策は、以下のとおりである。フランスは高速増殖炉研究の最先端に立っていたが、現在は実証炉スーパーフェニックス計画を中止し、炉は解体されている。アメリカは20年以上前に計画を中止している。核拡散防止という政治的理由もあったが、経済的に成立しないという理由が大きかったという。1990年代には、イギリス、ドイツも中止した。一方で、ロシア、中国、インドでは研究が継続されている。

1.3. 科学研究の位置づけ

研究者は、自分の研究分野を空間軸と時間軸という2つの観点から位置づけていく必要があると思う。空間軸では研究全体の大きな枠組みの中で自分の研究分野の存在理由を把握し、時間軸ではその研究の歴史的な経緯と現状を評価することだ。

ここでも原子力を例題にしよう。まず空間軸を考えると、化石エネルギー、自然エネルギーを含むエネルギー開発全体の中で、原子力をどのように位置づけるかを考える必要がある。それぞれの長所・短所についてできるだけ客観的に評価する姿勢が大切である。一方時間軸はどうか。日本では、1950年代から平和利用として原子力の研究開発がスタートし、当初は夢の科学技術として、社会に歓迎され成長してきた。しかし1980年代以降、チェルノブイリ、スリーマイルにおける原発事故、日本では「もんじゅ」、JOCの事故などによって、原子力に対する社会の信頼が失われた。一方で、軽水炉として発電に役立っており、社会もこれを受け入れている面もある。このように時間軸上で、その位置づけと評価は時代とともに変遷していることを理解しておく必要がある。そうしないと、現在の科学政策の決定において正しい判断ができないだろう。

近年ではいろいろな分野で研究の拡張が見られるが、原子力開発のたどった歴史経緯も他山の石とする視点を忘れないでほしい。深い専門性と広い視野が必要である。とはいっても、現実には1人の研究者がすべてカバーできる

わけではないので、それぞれの研究領域で組織的に取り組む必要がある。

1.4. エネルギー開発の歴史と論理

エネルギー開発研究は一般に多額の予算を必要とするために、常に開発の論理が必要とされてきた。歴史的に見ると、およそ3つに大別できる。エネルギー資源枯渇論、エネルギーセキュリティ論、エネルギー環境適合論である。

①エネルギー資源枯渇論

1970年代に二度の石油危機があった。原因は、中東の政治情勢の不安定さと資源ナショナリズムの勃興という政治的要素が強かったが、それは当時の日本においては、数十年で石油資源が枯渇するという不安をおおった。そこで原子力、自然エネルギーなどの非化石燃料エネルギー待望論が強まった。それから30年ほどが経過したが、現在の化石燃料埋蔵量試算によれば、石油は40年、天然ガスは60年、石炭は200年の寿命と言われる。石油については1970年代と30年後の現在もほとんど同じ値であるため、この後も楽観的な見方もある。現在のエネルギー開発論理としてはかつてのような説得力がなくなったとは言え、化石燃料が長期的には枯渇性資源であることはまちがいない。

②エネルギーセキュリティ論

石油危機当時、日本で議論されたのは、日本がエネルギーの大半を輸入に頼っており、とりわけ政情不安定な中東に依存しているというエネルギーの視点から見た国家安全保障の問題であった。そこで、自前の資源確保や石油に過度に依存しない体制を作るために、新エネルギー開発の必要性が指摘された。エネルギー資源の乏しい日本では特に強調される視点である。

③エネルギー環境適合論

1980年代後半以降は、エネルギー開発と環境の適合性が問題とされるようになってきた。エネルギーを過剰に消費すると、酸性雨や地球温暖化を引き

起こすという環境問題との関係である。公害問題への対処として、脱硫、脱硝装置の開発などが日本では大いに進んだ。しかし、地球温暖化のような地球規模の環境問題の議論に発展して、エネルギー開発と環境の関係は質的に変化した。

いずれにしても、エネルギー問題はエネルギー開発の研究を進めるだけでは解決せず、総合的な知の結集によって取り組むべき課題である。

1.5. エネルギー開発を巡る政策

エネルギー開発を巡る政策について、いくつか具体的な例を見てみよう。たとえば政策手段として、国営、民営、自由化、補助金などいろいろな方法がある。原子力の場合、日本ではエネルギーは国の存立基盤であるから国策として推進すべきだとして、国策による研究開発を推進してきたが、実用発電所の建設、運営は民間が担ってきた。化石燃料を燃やす火力発電所は、すべて民営である。太陽エネルギーの場合は、太陽電池パネルの製造コストが高いため、政府が補助金を出して民間の研究開発と量産化によるコストダウンを促進させるという方法をとってきた。風力エネルギー促進のためには、そこで発生した電力を一定の価格で電力会社に購入を義務づける法律も制定されている。

アメリカは、日本に比べてもともと電力が安い。アメリカ各州の電気料金は、だいたい5~10セント/kWh、日本はその3倍以上の約21円/kWhである。政策は州ごとに異なるが、さらに自由化を進めてもっと安い電力を供給しようする傾向にある。ところが、ニューヨークやカリフォルニアで大規模な停電事件が起き、また電力関連企業の破綻によって料金が大幅に変動するなど、電力自由化の影の部分も明らかになりつつある。日本の電気料金は高く、産業界が国際競争上不利なので、もっと安くすべきであるという圧力のもと、日本でも自由化政策が進みつつあるが、アメリカの事例とは違って部分的なものに限定されている。

エネルギー安定供給のためには、いくつかのエネルギーを組み合わせるエ

エネルギー・ミックスの考え方が望ましいとされている。発電電力量で見ると日本の場合は、原子力の30%をトップに、水力、石炭、天然ガス、石油で構成されている。石油が意外に少ないと思われるかもしれないが、石油は液体燃料で利用しやすいため、ガソリンなど運輸部門に主に使われている。最近の原油価格の高騰で、エネルギー価格に影響が出ているのはガソリン代であり、電力料金にはそれほど大きな影響は出していない。ちなみにアメリカは、化石燃料の中でももっともCO₂を排出する石炭が、発電電力の5割を占めている。中国も自給できる石炭依存型であったが、近年経済発展に伴うエネルギー需要の拡大や国内の大気汚染の深刻化によって、石油・天然ガスを増やしつつある。

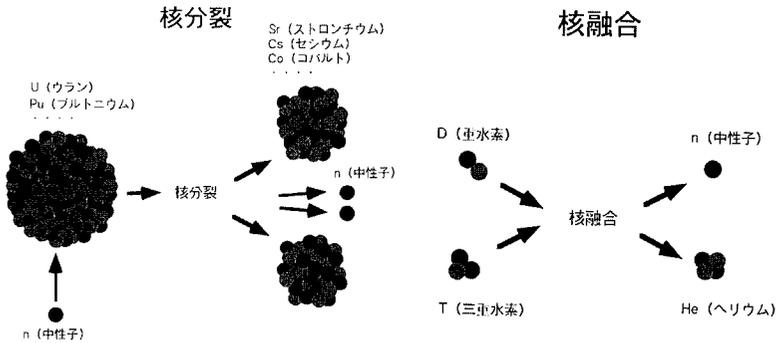
いずれにしてもエネルギー開発研究では、社会的要請や国益に基づくエネルギー政策との整合性が必要である。

1.6. 核融合エネルギーとは

核融合エネルギーも原子力の仲間であるが、核分裂とはいろいろな点で異なる。核融合の原理について、核分裂と比較しながら簡単に解説しておこう（【図表1】参照）。

現在、原子力発電で使われている核分裂は、ウランやプルトニウムという重い原子核が中性子を吸収して分裂するとき発生するエネルギーを使う。核融合はその逆で、重水素、三重水素のような軽い原子核が融合したときに大きなエネルギーを出す。この原理を使って発電をめざすのが、核融合研究の最終目的である。核融合については、かつてずいぶん期待された時期があったため、いまだ実現できていないことをしばしば批判される。核分裂は原爆として兵器に使われた一方で、平和利用としての原子炉がほとんど同じ時期に実現した。そのため核融合反応を用いた水爆が実現したときに、平和利用としての核融合炉も遠からず実現するものとの楽観的な予測があった。しかし、核分裂の実用化技術とは原理的に違うところが多く、予想以上に難しかったというのが現状だ。

【図表1】核分裂と核融合の原理

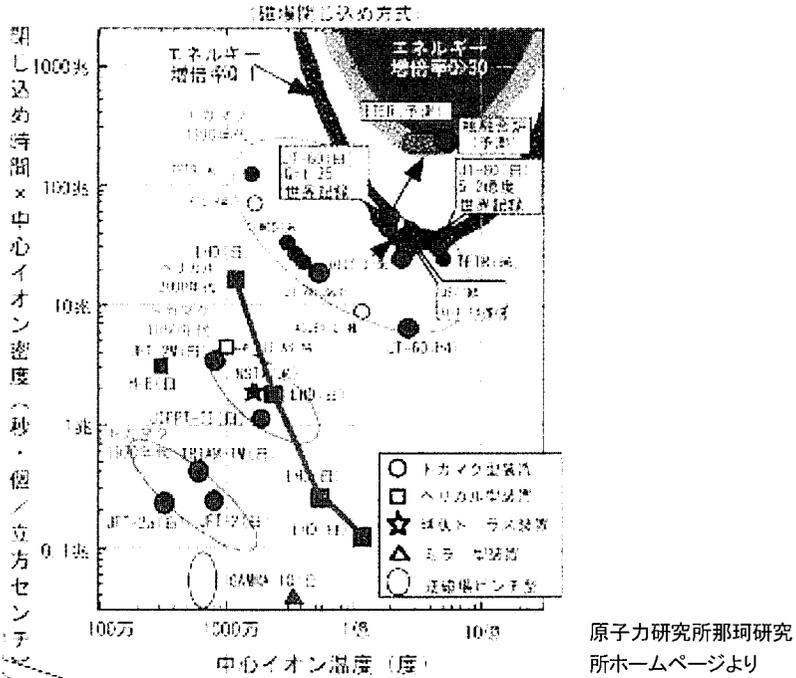


歴史的に見ると、アメリカでは原爆開発としてマンハッタン計画が有名だが、核融合エネルギー開発計画としては、1952年に始まったシャードウッド計画というプロジェクトがあった。シャードウッド計画では、ミラー方式、アストロン方式、ステラレーター方式など、いろいろなアイデアが出た。基本的なアイデアはこの時代はかなり出揃ったが、原子炉開発のようにはいかなかった。英国、ロシアでもそれぞれ秘密裏に研究が始まっていたが、1950年代半ば以降は、一般の科学研究と同様に、研究を国際的にオープンに行う体制ができた。高温プラズマを生成して核融合エネルギーを取り出すという方法をとるかぎり、核兵器に利用されることはないという判断があったからだ。そういう意味で、核融合研究は核分裂原子力研究と違って、早くから世界的にオープンな研究体制をとってきたと言える。日本でも1957年、総理府に「核融合反応懇談会」を設置して議論が始まった。

その後の経緯はここで詳しくは述べないが、1960年代末にソ連で成功したトカマク方式によるプラズマ閉じ込めをきっかけとして、世界中で大型トカマクの建設が始まった。一方、日本やドイツでは、トカマク以外にもヘリカル磁場を使うプラズマ閉じ込めの研究が進められてきた。現在核融合科学研究所で研究されているのは、この型の装置である。

さて、それでは現状はどこまで達したのか。【図表2】を見ていただきたい。

【図表2】磁場閉じ込め方式の研究の進展



横軸はプラズマの温度、縦軸は閉じ込め時間とプラズマ密度との積であるが、研究の進展とともに成績が向上してきたことがわかる。次の段階の計画として、核融合反応が持続するいわゆる核燃焼実験を行うために、国際熱核融合実験炉（ITER）が構想された。この計画は国際協力で行うことになっており、建設地を巡って日本とEUの競争になったが、最近フランスに建設されることが決まった。10年後の実験開始を目指して、建設がまもなくスタートする。

2. 「有限地球観のエネルギー論」をめぐって

さて後半は、私の論文「有限地球観のエネルギー論」を紹介しながら、若い世代との質疑応答を通じて、エネルギー開発の課題や問題点などを明らかにしていきたいと思う。

なおこの小論は、総合研究大学院大学共同研究の報告書として発行された「〈科学・技術・社会〉論の構築」(編者：柴崎文一、2005年3月1日発行)に掲載されたものである。以下に、その概要を紹介しておく。

〈要約〉

石油危機によってエネルギー資源の枯渇が懸念された時代に核融合研究の世界に入った筆者が、時代の変遷とともに変化するエネルギー問題に対する社会の関心や要請の歴史経緯をたどりながら、21世紀の視点でエネルギー論を試みたものである。地球が有限であることに基づく様々な制約の中でエネルギー問題を論ずるためには、新たな地球観が必要であり、科学技術としてエネルギー開発を推進するだけでは解決できない。一方で、環境ファシズム的な自然エネルギー礼賛だけで人類の基盤エネルギーを確保することは難しく、エネルギー論には現実主義も必要である。エネルギーと環境の問題をどのように整合を取っていくかについて議論した。内容構成は以下の通りである。

1. エネルギー問題の背景

- ・ エネルギー問題は科学技術だけでは解決できない
- ・ 無限の拡張を目指す科学技術と資本主義の共通性
- ・ 有限の地球と森の思想

2. 文明史の中のエネルギー問題

- ・ かつて森は唯一のエネルギー資源であった
- ・ イースター島の文明史
- ・ 森林の荒廃と文明の盛衰

- ・ 森と共生してきた日本の歴史
- ・ 危機に直面する現代日本の森
- ・ 世界では森林破壊が続いている

3. 化石燃料文明の時代

- ・ 化石燃料によるエネルギー革命
- ・ エネルギー問題と地球環境問題の融合
- ・ ポスト化石燃料時代の始まり——可能性は自然エネルギーと核エネルギー

4. 自然エネルギーへの期待と現実

- ・ 太陽エネルギー開発はどこまで進んだか
- ・ 西欧で進む風力エネルギー利用
- ・ 液化、ガス化燃料に適したバイオマス
- ・ 燃料電池はエネルギー源ではない
- ・ 小型分散型はエネルギー利用の高効率化

5. 核エネルギーの現実と将来展望

- ・ 原子力の何が問題か
- ・ ブレークスルーは海水ウラン

6. 核融合研究の社会的受容性

- ・ 核融合エネルギーの特長
- ・ 経済性の比較
- ・ 核融合開発戦略——1つのオプション

7. まとめとして

この論文を知り合いの何人かの研究者に読んでもらったところ、いくつかのコメントや疑問を指摘された。ここでは、まずそれに答える形で話を進めたい。

①エネルギー問題に対して、研究者はまずエネルギー開発に取り組むことが先決ではないか。

エネルギー問題は、エネルギー開発の研究者だけでは解決できない問題で、もっと幅広い知恵の結集が必要であると考えている。地球の有限性を考えると、今のままエネルギー消費を拡大していく文明では行き詰ると思う。そういう意味で、エネルギー問題はエネルギー開発研究に限定された問題ではなく、文明や思想の問題として開かれた議論が必要だと思う。

②森林が唯一のエネルギー資源というのは根拠があるのか。森林が蓄える水資源がエネルギー論と関係あるのか。

人類の歴史を大枠でとらえると、化石燃料の時代以前については森林が唯一のエネルギー資源であり、森林の荒廃が水資源を枯渇させ、ひいては文明の盛衰に密接に関わってきたと言える。森林や水資源の問題が現代のエネルギー問題と直接結びついているとは言えないが、エネルギー問題を文明論の枠組みで考える必要があるという意識で、あえてこの問題に言及した。たとえば、森林と水資源の関係で言えば、中国では、黄河文明の母体となった黄河の水が工業用水や農業用水として取水されたため、今や海までたどりつけなくなっている状況がある。歴史的には、黄河上流にも豊かな森林があったという事実が知られており、それは黄河の水量にも影響したはずである。環境問題とエネルギー問題の中で森林利用が絡む事例の1つだと言えるだろう。

③資源問題と環境問題は、地球という1つのシステムの中の物質循環として捉えれば同じ問題ではないか。

化石燃料資源が枯渇する危機に対処すべきだという発想から、この分野の研究に携わるようになったため、私はまず資源問題が先にあったと認識していた。20~30年たってみると、環境問題と絡む複雑な問題になってきたという印象を受ける。ローマクラブのレポートでは、すでに地球を1つのシステムととらえる考え方が提示されていた。しかし個人的には、資源問題をスタートとしてエネルギー問題を考えていくうちに、環境問題と絡めた議論をしなければならないという認識に至ったという経緯がある。今

は、同じ問題としてとらえる必要があると思っている。

④太陽電池パネルの採算性はどこまで進んでいるのか。

太陽電池パネルは非常に期待されているが、まだ独立して採算がとれるレベルには至っていない。近年、家庭の屋根に設置する場合には、政府が毎年 200 億円くらいの補助金を出して、企業の技術開発を促してきた。そうした政策によって、日本の太陽電池パネルの生産量は現在世界一である。自宅に太陽電池パネルをつけた場合、余剰電力は電力会社に売ることができるため、家庭で使う電力程度ならば太陽電池パネルだけで賄えるという事例も報告されている。

最近では、太陽エネルギーや風力エネルギーを一定量、決まった価格で電力会社に購入させるという法律ができ、風車や太陽電池パネルの新設を促進してきた。ところが、現実にはこのような売電が増加してきたため、電力会社も上限を設けようという姿勢に転じてきた。法律で規定された量以上の電力については、火力発電と同じ料金ベースでなければ購入しないとす。そうすると、1kW あたり 20 円で売ることができた風力発電の場合も 4～5 円でしか売れなくなる。太陽電池パネル設置への政府補助金も削減されつつある。そういう状況に対しても知恵を出していかなければ、市場原理だけでは自然エネルギーのシェアは頭打ちになるだろう。

⑤燃料電池がエネルギー源と誤解されるような宣伝が多い。

燃料電池の廃棄物は水だけであり理想的なクリーン・エネルギーである、としばしば宣伝される。しかし、燃料電池は水素から化学反応によって電気エネルギーを取り出すエネルギー変換装置であって、エネルギー源は水素である。その水素はどこから取ってくるかも含めて議論しないと、いたずらに期待だけが先走る結果になりかねない。もちろん、燃料電池がエネルギー利用の上で優れた方式であること、したがってその開発は大いに促進されるべきことは当然である。

⑥海水ウランは採算が取れるのか、取れるとすれば、なぜ今まで開発されなかったのか。

ウラン資源は軽水炉で燃やす限り 60 年で寿命が来るので、それに対処するために高速増殖炉を研究開発するというのが核燃料サイクルを推進する論理だった。ところが原子力研究所の小さな研究グループが、海水ウランを効率的に採取する技術を開発した。これが実用化されれば、海からウラン資源が入手できることになり、実質的に無尽蔵と言える。一方で、この研究は核燃料サイクルを推進する論理を否定しかねないので、あまり評価もされず公表もされてこなかったという経緯がある。海水ウランの研究成果をきちんと認め、高速増殖炉や核燃料サイクルの必要性についての議論に反映させるべきではないかと思う。

現実には原子力発電所の増設はほとんど進まず、陸のウランも余っているし、プルトニウム処理問題も解決していない。したがって、すぐに海水ウランが必要になる段階ではないのも実情だ。ちなみに現状では、海水ウランの採取には、陸のウラン採取に比べて 5～10 倍のコストが予想される。しかし、原子力発電における燃料費は、火力発電における石油や天然ガスの燃料費と比べて安いので、たとえ 10 倍の燃料コストでも、電力料金は 2 割上がる程度と推定されている。

⑦原子力では、放射性廃棄物の処理の問題が解決されていないことが最大の問題ではないか。

ご指摘のように、原子力はどのような選択をしようと、放射性廃棄物処理の大問題が残る。現状でその解決の目途は立っていない。同じことだが廃炉処理も問題である。個人的には、この研究にもっと真剣に取り組むべきだと思うし、安全な処理方法がないならば原子力エネルギーはあきらめざるをえないと思う。世界的には深地層処理が有望と考えられ、研究が進められている。

日本では、自主、民主、公開の原子力三原則に基づいて、平和利用に限定して原子力開発が進められてきたため、外国のように核兵器の開発と絡んで密室的な研究が行なわれてきたわけではない。しかし、日本で核分裂による原子力平和利用の研究がスタートした時、すでにアメリカ、イギリスでは原子炉が建造されていた。したがって、日本はその技術を丸ごと輸

入し、自主研究抜きに民間会社による商業炉として利用する体制を採用した。いわゆる国策民営と表現される体制である。

こうした政策によって国と民間が一体化し、しばしば指摘される“原子力村”の閉鎖性が生じた。そういう意味の密室性が、原子力における様々な困難を引き起こしてきたと言える。その反省から、最近の原子力コミュニティは情報を非常に広く公開するようになった。たとえば、原子力委員会の議論はほとんどインターネットで公開されている。それは、この数十年批判されてきた原子力開発の密室性、閉鎖性の反省に基づいているからだろう。

科学の他の分野においても、原子力の過去の反省を教訓として、それを今後のために生かしてもらいたい。若い世代には、自らの研究分野においても、その点を意識しておいてほしい。そういう意味で、原子力開発の経緯を知ることは、今後の研究や科学政策を考える上で役に立つと言えるだろう。

以上、私の「有限地球観のエネルギー論」についてのコメントと、それについての私の意見を紹介するかたちで、エネルギー開発を巡る科学政策について述べてきた。内容に関する議論は、次の質疑応答に譲りたい。

〈質疑応答〉

■核融合研究の現状と展望について

—— 核融合について、小柴先生と長谷川先生が ITER に反対されているようですが、そのくらい危険なものなのか。

井口 小柴先生が質問されたのは、そもそも材料が中性子照射によって消耗し早いサイクルで交換しなくてはならないとすれば、実用性に乏しいのではないか、という問題提起が先にあったと思う。しかし新聞紙上

では、「核融合炉の誘致は危険でムダ？」というタイトルがつけられたため、ITER 誘致の是非の問題と将来の核融合炉の問題が混同されてしまった。そのため核融合研究者の香山先生は、数日後の同じ新聞紙上で、材料はこれまで開発されたもので十分耐久性があると反論した。小柴先生の質問には核融合炉が念頭にあったと思うが、直接的には ITER の誘致問題を取り上げたものだったので、香山先生は、ITER という実験装置では材料は 20 年間の耐用性があると主張したのだ。将来の核融合炉では中性子照射量は ITER レベルのよりもはるかに強いという説明が十分でなかったため、両者の主張のすれ違いが世の中の人にはわかりにくかったと思う。

私が懸念することは、実用炉に至るにはまだ開発項目が多く残っているにもかかわらず、その説明が足りないために、ITER の実験が成功したら実用炉もできると誤解されていないかという点である。ITER について批判する人も多いが、装置は綿密に設計され、実験計画も具体性がある。核融合研究者がめざしてきた核燃焼に関するかなりの実験ができる装置であると見なされている。そういうレベルの話と、実験が成功したら実用化になるのかというエネルギー開発の話とが混同されているのではないか。おそらく、これまでの核融合研究者の説明やアピールが十分でなかったと思う。国の科学政策を国民が支持するかどうかは重要な観点で、その選択が誤解の上に進められてはいけなと思っています。

—— 実用炉の中性子対策としてどういう研究が行われ、どういうブレイクスルーが期待されているのか。

井口 私は炉心プラズマの研究者で材料開発は専門ではないので、詳細までは説明できないが、強い中性子照射に耐えられるかどうかの材料試験をする装置が必要だと言われている。IFMIF という国際協力による材料試験装置建設計画もあり、1000 億円くらいかかるといわれる。今までの材料試験は、核分裂原子炉の中性子を使っているので中性子のエネルギーが低いという問題があった。IFMIF では、実際に 14 MeV の中

性を発生させて材料試験をする計画になっている。IFMIF では、ITER の次の実証炉レベルで使う材料開発を想定しており、ITER と並行して進めようというものだ。

—— 中性子照射が材料に与える影響は物理の基本的な問題で、どういう材料がよいか、今できるかどうかというのは、現在の物理学の知識でかなりわかるのではないか。

井口 そういう意味では、材料候補はいくつかあがっている。低放射化フェライト鋼、バナジウム合金、SiC などは低放射化材料であり、物性として強い中性子照射に耐えうる材料であると推定されている。しかし、それらがどれほど大型装置の機械的ストレスに耐えうるかについては、やはり中性子を照射して実験してみないと分からない。プラズマに直接面してもっとも中性子照射量の大きいブランケットについては、その耐用年数が最低2年くらいはなければ、商業炉としての競争力がなくなるといわれる。

—— 基礎科学には、純粋な基礎研究と応用をめざした基礎研究の2つのタイプがあると思うが、近頃の研究者は、応用がなければ説明できないのではないかという意識をもっているように見える。核融合研究では、研究者集団はどういう意識をもっているか。

井口 現在の核融合研究の中でも、純粋にプラズマ物理学の基礎研究という意味はある。しかし、核融合エネルギーを実現するための基礎研究という観点からすれば、他のエネルギー源と競争できなければ、エネルギー開発研究としての意義が疑われるだろう。石油危機の頃は、化石燃料、ウランが枯渇することを前提にして、核融合しか究極のエネルギー源はないという研究者の認識があり、また世の中の期待もあった。しかし今は、核融合も競争しなければならないエネルギー開発の1つのオプションである、という位置づけがもっとも適切であるというのが私の認識である。もし競争力があれば、核兵器開発の恐れがなく、

放射性廃棄物のリスクが軽減されるなど、核分裂の原子力に比べても大きなメリットがあると思う。私は競争できるならば、核融合が原子力エネルギーの主役になれるはずだと思っている。

■核融合と他のエネルギー源との競争の意味

—— はたして競争することが社会にとっていいことか。安全性の軽視にならないか。

井口 少し競争の意味が違う。私が言いたいのは、核融合が原子力など他のエネルギー源と比較して、電気料金である程度対等にならないと、核融合炉が実現しても電力会社は商業炉として採用しないのではないかと、ということだ。太陽エネルギーや風力エネルギーなどは、再生可能な枯渇しないエネルギー源として期待されているが、現実には原子力発電や火力発電に比べてコストが高い。もちろん、開発段階ではコストは高いが、将来重要なエネルギー源になる可能性があるから国策として援助している。ある程度高くても、環境適合性で大きなメリットがあれば社会が受け入れるだろう。太陽光エネルギーも風力エネルギーも、今そういう意味での競争をしている。核融合についても、核分裂と比較したときのメリットがどの程度コスト高を許容できるかという評価が必要であると思う。

—— 原子力発電が安いというのは、どこまでの範囲のことか。廃棄物処理のコストも含めているのか。

井口 それはしばしば指摘される問題だ。私自身が正確に計算しているわけではないので、いろいろな資料から判断するしかないが、原子力発電が火力と同等かそれより安いというのは、廃棄物処理のコスト計算をしていないからだろう。そのコストを含めると、高くなる可能性は十分にある。なぜその計算がきちんとできないかと言えば、それは先ほど指摘したように、日本は核燃料サイクルを維持するという前提だか

らだ。地層処理の研究が十分でなければ、それがいくらかかるかについて詳細な計算はできない。核燃料サイクルの研究を推進することに固執したため、安い処理の仕方などの研究が遅れてきたと言える。

しかし、太陽エネルギーも風力エネルギーも自然条件による変動があり、現状ではベースにしっかりした電力があった上に成り立っている。今の段階では、独立してコスト競争はできない。独立に競争しようと思えば、発電による電気を蓄電池に蓄えるとか、水素に変換するなどして、安定で自立したエネルギー源にしなければならない。

こうした問題も含めて、私はオープンな議論をすることが大事だと思う。議論を通じて原子力エネルギーが不要という結論が出れば、それを受け入れることにやぶさかではない。しかし現時点で考える限り、それを捨てる決断ができるほどの代替エネルギーが準備されていないと思う。

- 核融合は他のエネルギー源とコストの点で競争しなければならないと指摘されたが、競争をあまり強調するのはいかがなものか。基礎科学と実用的なエネルギー開発のバランスが気になるが、核融合の研究者に、基礎科学に重点をおく意識はないのか。

井口 競争という言葉の説明が足りなくて誤解されたかもしれない。核融合が最終的に実用化されるためには、まだ基礎的な研究が必要であることも確かだ。ところが ITER に代表されるように、現在の研究は、実験装置を1つに集約せざるをえないほどコストがかかるようになってしまった。核融合はエネルギーを産み出すことが最終目標だから、いろいろな方式が考えられる。1つの大きな装置に集約すると、研究の中の競争もなくなり、他のエネルギー源との競争力低下のもとではないかと思っている。そういう意味で競争と言ったわけである。

- 科学の研究では、いろいろな研究方法を試みることによってブレークスルーが生じている。時間がかかっても、そのほうがコストも安く競争力のある成果が生まれる。それがないと、足が地に付かない核融合

研究になる。

井口 核燃焼実験を行うことは、核融合研究のステップとして大きなマイルストーンである。だからコストの問題を度外視して、まず核燃焼実験に取り組んでみたいというのが ITER 計画であり、核融合研究者のほぼ総意だろう。私自身も核融合研究に携わってきた者として、ぜひその現場を見たいという気持ちは強くある。しかし財政規模が2倍も違うEUと競争し、特段の財政負担をしてまで（誘致国は建設費の5割を負担することになっている）それを日本に誘致することについては、個人的には否定的意見であった。今回建設地がフランスに決まったのは、結果としてよかったのではないかと思っている。実用化までには ITER 以外に取り組むべき課題がまだまだ多くあり、国内の研究の幅が広がると思うからだ。

