

第5章

エネルギー開発における認識 論的転換

井口春和

iguchi@nifs.ac.jp

核融合科学専攻・核融合科学
研究所

はじめに

星の輝くエネルギーの大半は核融合反応によって生じる。「地上に太陽を作る」核融合の研究は人類をエネルギー問題から解放する究極のエネルギーと言われてきた。かつて石油危機が世界を震撼させた頃、核融合研究への期待は大きかった。長きにわたり日本の核融合研究を率いてきた山本賢三博士はその著書 [1] の中で当時を振り返り、予算増額に尽力された土光敏夫経団連会長の次のような言葉を紹介している。「山本さん、核融合はわれわれ経済界があなたがたにやっていたいでいるのであって、お礼を申し上げるのはこちらの方だ。」四半世紀が過ぎ去った現在、核融合研究者は未だ解決す

べき課題が山積しておりさらに予算が必要であると主張している。しかし今、かつてのような熱い期待はどこかへ消え去ってしまったようである。それは単にのどもと過ぎて熱さを忘れただけなのだろうか。核融合研究の片隅に身を置いて、このような研究者集団と社会との意識のずれが広がりつつあるのではないかという危惧を感じざるを得ない。しかしかかる現象は核融合研究に限らず、高度専門化が進んだ現代社会の様々な分野にみられるのではないか。ここではエネルギー開発という限られた分野における一例ではあるが、このずれを埋める努力が研究者の側に求められているのではないかという認識に立って個人的な考えをまとめたものである。

5.1 石油危機とエネルギー資源論

人類は、18世紀に始まった産業革命以来、再生不可能な地球資源を消費しながら高度産業文明を築き上げてきた。18世紀末のマルサス [2] の予測に反して食糧資源の増産は著しく、人口の幾何級数的成長は20世紀にも止まることはなかった。これに伴ってエネルギー需要も急増した。この傾向は石炭エネルギーから石油エネルギーへの転換が進んだ20世紀中期以降益々顕著になった。一方1970年代初頭に、このような幾何級数的成長を続ければ人類はいずれ破局に至るしかなく、早急に地球規模での対策が必要であるとして警鐘を發したのが、「ローマクラブ」のレポート「成長の限界」 [3] であった。人口、資源、汚染など様々な要素を地球規模で取り入れたシミュレーションは、本質的概念として地球を有限な一つのシステムととらえた初めてのものであった。その世界モデルの予測するところは、何の対策もとらなければ、今後数十年の間に資源は急速に枯渇に向かい、食料と医療サービスの減少による死亡率の上昇によって人口は破局的減少に転じるであろうというものであった。このグループの活動はその後も続き、「持続可能な社会」を築くために人類が選択すべきシナリオを提言してきた [4]。最初のレポートから30年が経過した今日、その予測するところが個々には必ずしも正し

かったわけではないが、破局を避けるために必要と考えられる一つ一つの対策がどのような地球規模のインパクトを与えるかという視点で考察した試みは画期的であり、その警鐘は今も重要性を失っていない。

その後まもなく世界は2度にわたる石油危機 [5] を体験することになった。その直接の原因が中東戦争あるいはイラン革命を契機とする資源ナショナリズムの高揚といった政治的理由であったとしても、これはエネルギーの観点から表面化した地球資源枯渇への警鐘だったといえる。主要なエネルギー源を中東石油に依存していた西側先進国は経済的パニックに陥り、エネルギー資源の多様化と新たなエネルギー開発の必要に迫られた。エネルギー資源に乏しい上に高度成長期にあった日本では、あまりにも石油（しかもほとんど中東の石油）に依存してきたエネルギー政策を見直して、天然ガスや原子力の拡大が図られてきた。とりわけ原子力エネルギーは、高速増殖炉まで考慮に入れば相当の長期にわたって資源の枯渇に悩まされることはなく、このエネルギー危機における救世主のように思われた。そして原子力発電所の建設ラッシュが始まった。しかしながらこの期間の特筆すべきことは、省エネルギーに関する個人レベルの認識の拡がり、と、産業界を中心とする省エネルギー技術の進展であった。特に80年代前半の日本では、石油依存度を減少させただけでなく、総エネルギー消費が減少する中で経済の成長を可能にし [6]、先進国の中で最もうまく石油危機を克服したと賞賛された。一方、OPEC 諸国は、石油戦略発動が引き起こした西側先進諸国の経済停滞の影響で意図したほどの経済的成長を果たすことができなかった。そればかりか、急激な社会変化はかえってイラン革命に代表されるようなイスラム原理主義への回帰の傾向を強め、一枚岩を維持することさえ難しくなった。このため石油価格は下落し、世界は再び安い石油を手にするようになった。このような世界情勢の変化は省エネルギー思想を後退させ、我が国においてもバブル景気と共に排気量の大きい車が好まれるようになったり家庭でのエアコンの普及が進むなど、エネルギー需要と石油消費は再び拡大の方向に向かうことになった。さらに石油危機の頃30-40年で枯渇するといわれた石油資源

も、新たな油田の発見によりその可採年数は増加の傾向さえみせ、今も 40 年程度といわれる。オイルサンドやオイルシェールといわれる非在来石油系資源 [7] も採掘コストを 2 倍程度まで許容すれば採算が取れるとさえ言われている。石炭資源はさらに豊富で、その可採年数は 200 年以上と推定されている。石油に主役を奪われた形の石炭資源であるが、液化技術あるいはガス化技術がさらに進めば再び基幹エネルギーになりうる可能性を持っている。さらにメタンハイドレート（水の分子に取り囲まれたメタンの氷）などこれまで未知とされてきた新たな資源も膨大に存在するらしい [8]。現在では、化石燃料が 21 世紀中に枯渇することはないという楽観的な見方が主流になりつつあり [9]、資源枯渇論に基づくエネルギー危機は当面去ったといえる。

5.2 地球環境危機がもたらす新しいエネルギー問題

ところが近年、エネルギー問題はこれとは異なる側面から再び注目されることになってきた。それは、人口増大と化石燃料の大量消費に伴う地球環境問題としてである [10-15]。

化石資源をエネルギー源として燃やすことによる環境汚染の問題は特別新しいことではない。かつて石油コンビナートの集中した四日市市で発生したいわゆる四日市喘息は日本における代表的な公害問題としてよく知られている。全国各地で報じられた車の排気ガスによる光化学スモッグ問題も記憶に新しい。それでもこれらは限られた地域の現象であって、その解決はどちらかといえばそれぞれの国あるいは地域の問題としてとらえられてきた。日本をはじめ西欧先進国では技術開発によってこれらの問題をかなりの程度解決してきた。しかし、モータリゼーションの世界化はこの問題を世界中に拡散させ、現在では開発途上国の大都会における深刻な問題となっている。これに対して大気中に拡散した二酸化硫黄が雨水に溶けて森林や湖水を汚染する酸性雨の現象は既に 1950 年頃から北ヨーロッパで観測され、西ヨーロッ

パの工業地帯の排煙が原因だとされた。このように国境を越えて影響が及ぶようになると国家間の利害が絡み国際問題に発展していった。その間にも酸性雨の問題はヨーロッパだけでなく、北米にも広がっていった。ヨーロッパ諸国やカナダなど先進国では国際的な取り組みとして長距離越境大気汚染条約（1979年）を結んで硫黄排出量の削減を図るなどの対策を講じている。しかしこの問題は現在も世界的に拡散しつつあり、近年は中国南部の森林での被害も報告されている。膨大な人口を抱える中国は豊富な石炭資源への依存度が高く、酸性雨の問題は今後も拡大される恐れがあり、決して解決した問題ではない。

このような環境問題の中でこの10年ほどの間に急速に国際的な議論の対象として浮上してきたのが、二酸化炭素の排出による地球温暖化問題である。ローマクラブのレポートでは「汚染」という抽象的な言葉でしか表現されていなかったことが、「二酸化炭素」と「温暖化」という地球の有限性にかかわる具体的な量として我々の前に提示されてきたのである。化石燃料から排出される二酸化炭素は膨大な量であり、不純物除去とは本質的に異なる。そもそも化石燃料とは炭素と水素の化合物を酸化して二酸化炭素と水に変換する化学反応のエネルギーを利用するものである。従って燃焼による排ガスは殆どが二酸化炭素と水蒸気である。メタンガスを主成分とする天然ガスが石油よりもクリーンであるといわれる一つの理由はその組成において炭素の割合が低いからである。長い地球の歴史から見れば、寒冷期には二酸化炭素濃度は低く、温暖期には高いというように大きく変動してきたわけで、そもそも現在の温暖化現象が人為的な二酸化炭素排出によるかどうかかわからないという議論もあった。しかし10年くらい前からやはり地球の温暖化は確実に進みつつあり、それは人類の放出する温暖化ガス（二酸化炭素、メタンガス、フロンガスなど）によるということが殆ど共通の認識となってきた。1988年には、世界気象機構と国連環境計画により「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」が設立され、気候変化に関する科学的評価、環境や社会経済への影響評価を行うことになった。近年の温暖化現象が地球の歴史

からみれば揺らぎの範囲にあるにもかかわらず大きな問題とされるのは、地球が過去経験したことの無いほどの急速な変化であり、気候の変動は脆弱な基盤の上に成り立っている高度文明社会に計り知れない影響を及ぼすと予想されるからである。このような共通の認識に基づいて、1997年の地球温暖化防止京都会議では各国の温室効果ガスの排出削減目標が定められた京都議定書が採択された。日本は2010年までに1990年ベースの6%削減を目標にすることになった。個々の企業レベルでも二酸化炭素の排出を押さえるために様々な努力が払われるようになってきた。現在は未だ強制力のない規制であるが、いずれ排出権の取引や、炭素税の導入（既に北欧諸国では取り入れられている。）は必至であるとの見方が一般的になってきたからである。電力会社が二酸化炭素の固定化技術の開発に乗り出したり、製紙会社がパルプ用の木材を輸入すると引き替えに海外で植林活動を展開したりといった例は枚挙にいとまがない。最近では、食品・飲料工場で排出される有機廃棄物から取り出したメタンガスと特殊な触媒を使って二酸化炭素から炭素を分離する技術が開発されたとも伝えられる [16]。このような新しい二酸化炭素削減技術の進展は注目に値するが、いずれもコストがかかることであり、何らかの国際的な広がりを持った政策的手段がとられなければ急速に普及することは難しい。実際、京都議定書の削減目標は先進国に対して課せられたものであるが、消極的な米国や海外での植林による森林の吸収機能を主張する日本とヨーロッパ諸国との考え方の溝は大きく、達成が危ぶまれている。今後は開発途上国の協力も必須であるが、二酸化炭素排出の大半の責任は先進国にあるとしてその押しつけには反発がある。温暖化見通しとして現在最も信頼性があるとされているIPCCの報告書では、二酸化炭素が現在の値（360 ppm）から倍増したときの温度上昇は1.5度から4.5度と見積もられている [12]。地球規模の気候シミュレーションは複雑であり、現在の精度では不確定はかなり大きいといえる。しかし、温暖化によって生育できる植物プランクトンの種類が変化することまで考慮すると二酸化炭素の増加と温暖化は更に加速されると指摘する研究者もいる [17]。たとえ不確定が大きいといえども、取り返しのつかない状況に至らぬうちに世界規模で対処する手だてを講

ずることが賢明であろう。もはや目標よりも政策として実施するべき段階にあるとさえいえる。地球環境の観点からエネルギー資源やその使用量に厳しい制約が課せられるようになってきたことがエネルギー問題の新しい側面である。

5.3 エネルギー開発の新しい流れ

地球温暖化に寄与することなく再生可能であるエネルギーとして現在注目されているのが太陽エネルギーや風力エネルギーである。太陽電池の低価格化によって個人住宅の屋根に取り付けて家庭で太陽エネルギーを利用する例も増えてきた。余った電力を電力会社に売ることによって年間を通しての電力料金の収支をプラスにすることさえできるといわれる [18]。初期投資が大きく、それを促進する補助金制度と個人のクリーンエネルギー指向の精神に頼っているのが現状であるが、今後も経済性の向上によって普及が進むことが期待されている。北欧やドイツなどで進展の著しい風力発電も最近になって普及が加速されつつある。いくつも風車を並べて村をウインドファーム化しようという試みをしている自治体もある。しかし、太陽光も風力も気象条件に依存し、今のところ出力をコントロールすることができない等の欠点があり必ずしも性質のよいエネルギー源とはいえない。家庭用の太陽光発電にしろ、地域の風力発電にしろ余剰分を電力会社が買い取ることで普及が図られているが、これは全体の電力に比べてわずかだから可能であるといえる。大量の電力に出力の揺らぎがあったのでは安定した電力供給を保證することができない。したがって、このようなエネルギーが真に基幹エネルギーの役割を担うためには、大電力貯蔵あるいは水素ガスの生産などと組み合わせる技術開発が必要である。一方、バイオマスエネルギー [19-20] は植物からアルコールを生産するなど液体燃料として利用する技術がすでに実用になっている。もともと大気中の二酸化炭素を固定して成長した植物を利用するものだから、これを燃やして二酸化炭素を排出しても全体として収支はゼロであ

るというのがこれからのエネルギーとして期待される由縁である。ブラジルでは自動車の燃料としてサトウキビから生産するアルコールが多く使用されていた。ただし、最近原油価格の低迷や国産の油田開発によって純粋アルコール燃料の車は10%程度に減少し、ガソリン車あるいはアルコール・ガソリン混合車が多くなっていると伝えられる。近年発達の著しい燃料電池もクリーンエネルギーと言われる。それは水素と酸素がエネルギー源だからである。しかし、実際には天然ガスから水素を分離して利用している場合が多く、二酸化炭素を排出しないわけではない。経済活動を支えるエネルギーは運輸など移動性のももあり、電力の形のエネルギーが必ずしも使いやすいわけではない。自動車用の燃料電池の開発は著しく、数年のうちに実用車が発売になるといわれている。どんな形の資源にしても究極的には水素を二次エネルギーとして利用する社会への移行が目標になると思われる。アイスランドではそのような壮大な国家的実験が始まっていると伝えられる。

エネルギー開発におけるもう一つの大きな流れは、分散型エネルギーの普及である(21)。都会から遠く離れた大きな発電所から送電する従来の方法では送電ロスが発生する。また発電の際のエネルギー変換効率は最新の火力発電所でも40-50%であり、残りは廃熱として大気あるいは海に捨てられているのが現状である。これに対して、必要な電力を必要な場所で発電するのが分散型である。排熱を捨てることなく地域の冷暖房や給湯に利用する方法はコジェネレーションと呼ばれ、全体としてのエネルギー効率を70-80%にあげることが可能だと言われている。送電ロスもない。最近開発されつつあるマイクロガスタービンやガスエンジンはその代表である。これらは化石燃料を使う限り二酸化炭素の排出は避けられないが、有効な省エネルギー技術であるという観点から二酸化炭素削減に寄与する新しい技術であると言える。

再生可能エネルギーは現状では基幹エネルギーとはいえない。人類の必要とするエネルギーのどれほどの割合をまかなうことができるかは今後の開発

にかかっている。しかし、地球環境の観点から今後のエネルギー開発において高いプライオリティを付与すべきものであると言える。

5.4 原子力エネルギーの光と影

原子力エネルギーも運転の段階では温暖化ガスを排出しない。未来の基幹エネルギーとなりうるであろうか。まず簡単に原子力エネルギーを利用するようになった経緯を振り返ってみよう。

原子物理学の進展により核分裂の連鎖反応を利用すれば膨大なエネルギーが解放されることが知られるようになった1930年代後半、ナチスドイツが先に兵器として利用することを恐れた米国政府は、科学者を集めてマンハッタン計画として知られる原子爆弾の研究をスタートさせた。結局ドイツはそのような技術を開発することなく降伏したが、研究プロジェクトはその後も継続され、1945年7月ニューメキシコ州アラモゴード砂漠で初の原爆実験が行われた。そして、実際に広島、長崎で使われることになった。一方連鎖反応を制御された状態で起こす試みはフェルミ、シラードらによって進められ、原爆完成より2年半も早く1942年シカゴ大学の実験室で初の原子炉として実現されていた。第二次世界大戦後の冷戦構造の中で原子爆弾は兵器として旧連合国側に拡散していったが、平和利用としての原子力は炉心溶融など様々な事故が起こり、必ずしも順調に進展したわけではない。しかし、1956年のスエズ動乱を契機とした英国の原子力重視政策によって大きく進むことになった。米国ではウェスチングハウス社やジェネラルエレクトリック社などの民間企業によって開発が進められ、1960年代中頃には200万kWクラスの大容量の沸騰水型原子炉、あるいは加圧水型原子炉は、新鋭の火力発電と採算性で競争できるようになった。これを契機に原子炉建設ラッシュが始まることになった。原子力が夢のエネルギーとして人々に受け入れられた時代である。ちなみに日本では1957年日本原子力研究所におい

て、アメリカ型の原子炉を用いて初の臨界を達成した。

これまでに世界中で 500 基を越える原子炉が建設された。化石燃料資源に乏しい日本は原子力利用を国策として進めてきており、現在約 50 基が稼働している。その総発電量は 4500 万 kW、発電電力量のおよそ 35 %を原子力に頼っていることになる [21]。電力の原子力依存度は電力会社によっても異なるが、多くの原子力発電所を持つ東京電力、関西電力では原子力の占める割合はさらに大きい。最近の新聞によれば、正月や大型連休など電力需要が最小になる時期の原子力発電比率は 90 %近いという。昨年正月には関西電力で 105 %になった日もあると報じられている [22]。今日原子力は日本における基幹電力として重要な位置を占めるようになってきている。もちろんエネルギーは産業用、運輸用、民生用など様々な利用形態があり、一次エネルギーに占める原子力の割合は 13 %程度である。50 %を越える石油依存が根本的に変わったわけではない。しかし、石油危機の頃は 8 割近くを石油に依存していたわけで、この間の変化、とりわけ原子力と天然ガス（約 12 %）などへのエネルギー資源の多様化はエネルギーセキュリティーの意味でも大きかった。このように、核分裂エネルギーを利用した原子力は確かに石油危機に対して応えてきたといえる。

しかし、急激な原子力エネルギー利用の拡大は、様々な矛盾を積み残したまま進んできた。とりわけ放射性廃棄物の処理に関する技術的課題、経済的負担を未来社会に大きな負の遺産として残すことになった。発電コストの採算性も廃棄物処理の費用まで含めて評価したものではなかった。高レベル放射性廃棄物の処理のための費用は今後何十年にもわたって年間数百億円の費用がかかると推定されている [23]。炉心で発生するプルトニウムは核兵器の材料となるため、その管理体制を巡る国際的政治問題を引き起こすことにもなった。さらにこの 20 年間の原子力に関わる様々な事故（スリーマイル、チェルノブイリ、もんじゅ、JCO など）は、人々の原子力に対する夢と信頼を失わせていった。現在の炉形式、安全技術から考えて、チェルノブイリ

の再現の可能性がどんなに小さいと説明されても、人々に安心を与えることになっていない。炉とはかけ離れたところで起こった JCO の事故はむしろ原子力に対するより根源的な不安を広めることになり、結局人類は原子の火に手を出すべきではないという考え方を持つ人々が増えてきた [18,24]。近年のこのような傾向は西側先進諸国では共通の現象であり、日本、フランスを除いて 1980 年代以降原子力発電所の発注は皆無といってよい。現在も増設が続いているのは人口の増大を抱えるアジア諸国がほとんどである。原子力推進の先頭にたっていたフランスも、最近高速増殖炉の実証炉であるスーパーフェニックスを閉鎖、解体することになった [25]。増殖炉開発計画を残すのは日本のみとなってしまった。その背景には海水からのウラン採取の採算性に目途がついてきたことや、再処理されたプルトニウムをプルサーマル（軽水炉でウランと一緒に燃やす）によって利用する技術が確立されつつあることがあると思われる。

原子力エネルギーは再生可能エネルギーと並ぶ人類の未来を担う基幹エネルギーであり、それ抜きにしては現在の地球人口さえ養っていくことはできないであろうというのが原子力を容認する立場である。しかし、人類は危険な原子の火から手を引くべきであるという反対意見がむしろ増えつつあるのが現状であるように思われる。両者の意見は消して交わることはないのかもしれない。それはどちらが正しいというような問題ではなく、人類の生存の形としてどちらを選択したいか、あるいは選択すべきかというそれぞれの人の哲学あるいは人生観の問題だからである。しかしどれほど困難であっても、議論を避けることは許されない。原子力に一定の役割を期待するにしろ、徐々に削減して将来完全に廃棄するにしろ、人類は相当に当分の間維持管理の負担を背負って行かなくてはならないからである。

5.5 核融合研究体制の変遷

もう一つの原子力エネルギーである核融合エネルギー開発はどこまで進んでいるのだろうか。まだ50年以上かかるであろうというのが大方の研究者の見方である。研究が始まって40年、何故これほどの時間がかかったのか、まず開発の歴史から振り返ってみたい [1,2,26,27]。

核融合エネルギーの解放は核分裂エネルギーの場合と異なりまず水素爆弾として実現された。1952年のことである。それから間もない1955年、ジュネーブで開かれた第1回原子力平和利用国際会議において、バーバー議長がその演説のなかで「制御された状態で核融合エネルギーを解放させる方法が今後20年以内に見つかるであろう」と述べて、核融合エネルギーの平和利用への関心が急速に高まった。そして1958年の第2回会議以降、制御核融合を目指す研究は国際的公開のもとに行われることになった。既に米国はシャードウッド計画 [28] として相当に多額の予算を投入し、スピッツァー博士のステラレーターの研究をはじめ、様々な実験装置が建設されていた。日本においても核融合研究に着手すべく、発足して間もない科学技術庁の原子力委員会のもとに湯川秀樹博士を会長とする核融合反応懇談会が開かれた。その議論に基づいて核融合専門委員会が設置され、2年間にわたって日本における核融合研究の進め方が検討された。基礎研究から始めるか (A 計画)、諸外国にならって中型装置を建設するか (B 計画) という、いわゆる A-B 論争が繰り返された。最終的には湯川会長の裁定により、大学における人材育成と学問的基礎を確立することを目的として、原子力予算ではなく文部省の科学研究予算の枠でスタートすることが決まった。その結果、1961年、名古屋大学に全国大学共同利用機関としてプラズマ研究所が設置され、原子物理学者の伏見康治博士が初代所長になった。1960年代の核融合研究は後に煉獄の時代と表現されたように、世界各国ともプラズマ閉じこめの難しさ

に悩まされていた。しかし、様々な方式の試行錯誤により少しずつ新しい知見が蓄積されていった時代でもあった。日本ではプラズマ研究所や大学における基礎研究を中心として、プラズマ物理学として多くの成果を上げていった。しかし核融合を指向するプロジェクト研究は大きく立ち後れていることが指摘され、科学技術庁傘下の日本原子力研究所でトラスプラズマの閉じ込め研究に着手することが決まった。、頭脳流出として米国に渡った二人の日本人、大河千弘博士、吉川庄一博士の活躍も大きく影響したと言われている。かつての A-B 論争の B 計画の復活である。以後文部省傘下の大学等における基礎的的原理的研究と、科学技術庁傘下の原子力研究所を中心とするプロジェクト研究という二本立ての研究体制ができあがった。

ところが、1960年代末にソ連におけるトカマク型装置の成功が報じられプラズマ閉じ込めに新しい展望が開けたことと、1970年代はじめの石油危機によって、エネルギー開発としての核融合への期待が急速に高まり、文部省の科学研究費、科学技術庁の原子力予算ともに急増することになった。プラズマ研究所や大学の研究もプロジェクト的な核融合指向の研究へとシフトし、様々な閉じ込め方式の間の競争になっていった。一方原子力研究所では核融合炉早期実現へのステップとして臨界プラズマ実験装置 JT-60 の建設が決まった。外部からの入力エネルギーと核反応によって生じたエネルギーとの比を示す Q 値が 1 となる臨界条件の達成、いわゆる科学的実証を目指す実験である。このプロジェクトは 21 世紀初頭の核融合実証炉運転を目標とする核融合エネルギー開発計画の一環と位置づけられた [29]。世界的にも米国、ソ連及びヨーロッパ共同体で同規模の実験計画がスタートしており、世界四大トカマクと呼ばれた。(ソ連は経済的な状況の悪化もあり、同規模の装置は結局建設されることはなかった。) しかし、各国とも当初の予想以上の時間と費用がかかり、JT-60U 装置 (途中で改造したため名前が変わった) では $Q=1$ の条件を達成するという約束を 1990 年代半ばになってやっと果たした。実用炉のはるか手前の臨界実験にはほぼ四半世紀を費やしてしまったことになる。(筆者は、核融合研究で通常使われる臨界というこ

とばは原子炉との対比において適切と言えず、かえって過度の期待を生むことになったのではないかと思う。)

一方大学関係では、予算規模の拡大とともに基礎科学としての研究は次第に隅に追いやられ、異なる閉じ込め方式の開発競争の様子を呈するようになった。プラズマ研究所では様々な方式と並んでトカマク型による核反応実験装置まで計画されるようになった。各地の大学に設置された研究センターにおける中型装置実験もそれぞれに進展があったが、そのまま大型化するには費用がかかりすぎるといった共通の難点を抱えていた。文部省傘下の次期計画については学術審議会で議論され、新しい研究所を設置して一本化すべきことが提言された。その結果、京都大学で開発されてきた日本独自のヘリオトロン型装置を大学共同利用実験装置として新しい研究所に設置することになった。1989年に名古屋大学プラズマ研究所、京都大学ヘリオトロン核融合研究センター、広島大学核融合理論研究センターを整理統合し核融合科学研究所が発足した。新設された大型ヘリカル装置 LHD の実験は 1998 年にスタートし、トカマク以外の閉じ込め方式で世界初の大型装置として研究が進められている。しかし一方では、この一本化によって大学の核融合研究離れを加速したという批判もある。

21 世紀を迎えて、文部省と科学技術庁は統合されて文部科学省となった。これまでの二本立ての研究体制は、教育及び基礎研究と開発研究を分担して担うという形で機能してきた。予算においても、科学研究費（文部省）と原子力予算（科学技術庁）というように独立が保たれてきた。しかし、省庁統合により核融合研究予算は一本化されることになり、新しい研究体制と理念の構築が必要となっている。

5.6 核融合研究者の反省すべきこと

以上に述べてきた経緯からも明らかなように、核融合研究は基礎科学というよりもエネルギー開発という目的研究として社会的に認知され予算を与えられていると見るべきである。石油危機以降の急速な予算の伸びはそれを示唆している。研究者の側もそれに便乗し、「無尽蔵・クリーン」という宣伝文句を携えて、展望の甘いままあたかもその危機に因應することができるかのような印象を与えて来たところがある。社会の過剰な期待に対して科学者として否定すべき点をはっきり否定するというような正直さを失っていたのではないか。石油危機に背中を押されて大型化してきた研究は世界的にも限界に達し、実証炉のはるか手前の実験装置でありながら国際協力で一つ作れるかどうかというほどの規模になってしまった。それにもかかわらず、実用化は50年も先と予想されるほどに技術的、経済的課題が大きい。そして今、40年にもわたる研究を重ねながら未だにエネルギーを生産することなく、今後さらに膨大な予算を必要とするであろうことを厳しく批判されている [30]。

核兵器としては原子爆弾と水素爆弾という形で10年を経ずして共に実現されたのに、平和利用において核分裂と核融合でかくも大きな差ができてしまったのはなぜだろうか。最大の理由は両者の制御技術の難しさに想像以上の差があったということであろう。原子炉は原子爆弾より先に実験室において制御された状態で臨界に達した。その後の原子炉の歴史は制御技術の進歩、発展の歴史であった。一方、核融合の連鎖反応が実現されたのはまず水素爆弾としてであり、しかもこの連鎖反応を起こすための起爆剤として原爆そのものの爆発エネルギーを利用しなければならなかった。図らずもJCOの事故によって誰もが知ることとなったように、原子炉では濃縮ウランを一定量集めるだけで自然に臨界に達する。ところが、核融合の連鎖反応を起こすには外から大きなエネルギーを注入し、原子核同士をクーロン障壁を越え

るに十分なエネルギーで衝突させなければならない。必然的に燃料である重水素は気体プラズマとなる。結局核反応の制御ではなく、高温気体プラズマの制御の難しさに核融合研究のほとんどのエネルギーを奪われてしまった。Q=1の条件は達成したけれど、実際に核融合連鎖反応の持続した核燃焼プラズマは未だ実験室で実現されたことがない。最も核反応を起こしやすい重水素-三重水素(D-T)反応が当面の目標になっているが、この反応を利用する限り大部分のエネルギーが14 MeVの中性子として発生する。このため装置の放射化は避けられず、今後耐高中性子照射材料や低放射化材料を開発する必要もある。14 MeVの中性子から安全かつ経済的にエネルギーを取り出す技術も確立していない。その上燃料である三重水素は放射性物質である。炉心プラズマ条件を最も達成しやすいD-T反応を使う核融合は、難しいところをすべて炉工学にゆだねてしまった感さえある。しかし炉として必要な研究はまだ端緒についたばかりであり、明確な見通しができていない。一方、重水素-ヘリウム3(D-He3)反応を使えば、発生するエネルギーの大部分を荷電粒子が担うため、中性子による放射化の問題は少なく、炉工学への負荷も少ないと期待される。ただ、この場合は炉心プラズマとして一桁以上高温のプラズマを閉じ込めなければならず、そのような閉じ込め方式は未だ小規模の実験しかないのが現状である。

核融合は高レベル放射性廃棄物を排出しないし、炉心溶融のような暴走事故も原理的にあり得ない。燃料である重水素やリチウムも豊富に存在するし、運転段階では二酸化炭素も排出しない。実用化されれば核分裂原子力に比べてはるかに安全でメリットも大きいというのが核融合研究者の主張である[31,32]。しかしエネルギー開発としての核融合はまだ核分裂エネルギーの足下にもおよばないと認めざるを得ないのが現状である。

5.7 人々が選択するエネルギーと地球環境

人類はいずれ再生可能エネルギーと原子力エネルギーへの依存度を高めざるを得ないというのが一般に共通した未来エネルギーの姿であろう。しかし、有限の地球の概念がはっきりしてきた段階で、かつてのような大量生産大量消費を豊かさの指標のように見なすエネルギー多消費社会はもはや成立しえない。エネルギー消費の幾何級数的な増大を前提とせず、石油危機の頃とは根本的に異なったエネルギー開発戦略を構築しなければならない。21世紀末には世界の人口は100億人を越えるであろうといわれている[33]。しかし、地球の有限性を知った今、単なる人口予測と現在の先進国並エネルギー消費を仮定したエネルギー需要予測は破綻せざるを得ない。いったい地球がどの程度の人口を養いうるかということは、エネルギーの問題だけでなく、食料をはじめ諸々の資源の制約、環境の制約を受けざるを得ない。アメリカ型ライフスタイルを理想とするような文明のあり方そのものも変化を余儀なくされるであろう。そのような厳しい制約の中で、それでも人間はエネルギーを使わずに生きていくことはできない。再生可能エネルギーだけでまかなっていけるならばそれに越したことはない。しかしどうしても必要ならば、人々の納得の上で足りない部分は原子力エネルギーに頼らざるを得ないというのがまっとうな道筋であると思われる。そのためにこそ、原子力エネルギーに対する信頼の回復に務め、それを扱う技術を維持させなければならないと考える[34,35]。

核融合は長期的視野にたった研究である。石油危機に対して何ら答えを出すことができなかったことを省みて、しかし、究極のエネルギー源として十分に魅力があることを考えるならば、これまでの研究体制を今一度検証し、究極のエネルギーといわれるにふさわしい道筋をもう一度見直すべきではないだろうか。核融合研究には今、真のブレイクスルーが求められている。時

間がかかっても完成した暁には核分裂のエネルギーから核融合のエネルギーへの転換を進めることができる。自分の世代では完結できないとすれば、次代を担う人材を育てなければならない。若者を引きつけるのは高い理想である。次世代が夢をもって取り組むことができるような研究でなければ衰退するであろう。そのためには人々に核融合が理想のエネルギーであり得ることを再び認識してもらうことがまず大切であり、回り道であってもこのプロセスを通らなければ将来への展望は開けない。狭いコミュニティの論理で拙速に進めるのではなく、幅広い議論と情報の公開を通じて人々の選択にゆだね、その選択に答える努力をすることが当事者たる科学者、技術者に求められている姿勢であると思われる。

終わりに

このような議論は一次資料から掘り起こして検証すべきとの批判はあろうが、エネルギー開発はあまりに多様多岐である。そのような方法はとうてい筆者の能力の及ぶところではない。そのため様々な文献を参考資料としたが消化不良は否めず、記述に多少の不正確があったとすればそれは筆者の責任である。尚、核融合科学研究所の田島輝彦博士には日頃から様々な観点からの助言や批判をいただいたことをここに記してお礼申し上げたい。

5.8 付録：プラズマ・核融合学会誌 73 巻 7 号 (1997) 編集後記より

近頃、科学の分野で胸躍らせる事件は、火星探査宇宙船の火星着陸とその後送られてきた火星表面の鮮明な画像であろう。このニュースを通してもう一つ感銘を受けたことは、20年の眠りを覚まして再度火星着陸を果たし

得たのが、29才の若者のアイデアと67才のベテラン宇宙服縫製技師（女性）の協力によるエアバッグ方式の成功によるものであったことである。一方はあの月着陸を果たしたアポロ宇宙船の飛行士の宇宙服を縫製した技師であり、片やアポロ着陸のニュースさえ記憶にないであろう若者である。さらに喝采を浴びたのは、この火星着陸船にかけた費用が20年前の十分の一であったということである。いや、むしろ十分の一だったからこそ喝采を浴びることができたのだろう。

このニュースを聞いて最初に心に浮かんだことがある。アメリカの高校の物理課程に次のような実験がある。生卵を校舎の屋上から落とす。このとき決められた重量以下の材料を使ってこの卵を軟着陸させよというものである。生徒たちは2-3週間かけて様々な工夫をする。宇宙開発の先陣を切ってきたアメリカらしい教育課題ではあるが、物理の感性を育てようとする意図は明らかである。心に浮かんだことというのは、あの若い科学者はきっとこの実験に真剣に取り組んで、必ずや失敗したに違いないということである。もちろんこれは推測にすぎないけれど。

さて、振り返って核融合研究の状況である。エネルギー資源の乏しい日本だけはまだ恵まれていると思われていた研究環境も、ここきてITERの誘致返上など世界的な潮流に逆らえない情勢である。これはもちろん、石油や天然ガスの究極可採埋蔵量の年々の増加などにより、石油ショック以後叫ばれてきた代替エネルギー開発の緊急性がやや薄れてきていることが大きい。しかしもっと重要な点は、原子力エネルギーの開発についても、国策としてのトップダウン方式は時代の要請に合わず、庶民感覚が重要視されるようになりつつあることである。昨今の原子力をとりまく状況を庶民感覚から表現すれば、「国策信ずるに足らず」ということになるだろう。核融合開発もどうやら同じように見えているらしい。二度にわたる石油ショックからほぼ20年、余程オープンに、時間をかけて、そう、高校生にもわかるような議論をしない限り説得力は生まれまいだろう。こうして20年くらい道草を食っ

ていると、石油ショックの怯えを知らない若い科学者が現れて、十分の一の投資でイグニッションを達成するアイデアを出すかもしれない。もちろんその間地道な努力は必要であるけれど。要するに核融合研究も「急がば回れ」の精神が必要ではないかということである。編集委員を仰せつかった期間だけでも、こういう時期の学会誌の役割を考えてみたいと思う次第です。

文献

- [1] 山本賢三「核融合の40年」ERC出版、1997.
- [2] マルサス「人口論」(世界の名著34)中央公論社、1969.
- [3] D.H. メドウズ他、大来佐武郎監訳「成長の限界」ダイヤモンド社、1972.
- [4] D.H. メドウズ他、茅陽一監訳「限界を超えて」ダイヤモンド社、1992.
- [5] NHK取材班「あのとき、世界は・・・I」、日本放送出版協会、1979.
- [6] 佐和隆光「地球温暖化を防ぐ」岩波新書、1997.
- [7] 日経サイエンス特集「しのびよる最後の石油危機」日経サイエンス1998年6月号.
- [8] NHK「海」プロジェクト「海-知られざる世界-2」NHK出版、1998.
- [9] 茅陽一「エネルギー環境問題と応用物理への期待」応用物理第66巻、第8号、921ページ(1999).
- [10] 米本昌平「地球環境問題とは何か」岩波新書、1994.
- [11] 宇沢弘文「地球温暖化を考える」岩波新書、1995.
- [12] 気象庁編「ICPP第二次報告書-地球温暖化の実体と見通し」大蔵省印刷局、1996.
- [13] 半田暢彦「大気水圏科学からみた地球温暖化」名古屋大学出版会、1996.
- [14] 住明正「地球温暖化の真実」ウェッジ、1999.
- [15] レスター・ブラウン、浜中裕徳監訳「地球白書2000-01」ダイヤモンド社、2000.
- [16] 篠原匡「温暖化防止へCO₂固定化」日経ビジネス2000年9月18日号.

- [17] NHK「海」プロジェクト「海-知られざる世界-4」NHK 出版、1999.
- [18] 池内了「私のエネルギー論」文春新書、2000.
- [19] 坂井正康「バイオマスが拓く 21 世紀のエネルギー」森北出版、1998.
- [20] 井田徹治「地球の資源 ウソ・ホント」講談社ブルーバックス、2001.
- [21] 資源エネルギー庁監修「1999-2000 資源エネルギー年鑑」通産資料調査会、1999.
- [22] 朝日新聞朝刊 2001 年 1 月 11 日.
- [23] 日本原子力産業会議「原子力年鑑 1999-2000 版」三美印刷、1999.
- [24] 高木仁三郎「原発事故はなぜくりかえすのか」岩波新書、2000.
- [25] 朝日新聞朝刊 2001 年 2 月 28 日.
- [26] 西川恭治「大学等における核融合研究体制の変遷」非売品、1997.
- [27] ロビン・ハーマン、三角鋭二訳「核融合の政治史」朝日新聞社、1996.
- [28] A. S. Bishop 「Project Sherwood-the U.S. Program in Controlled Fusion」Addison-Wesley Publishing Co., Inc., USA, 1958.
- [29] 原子力委員会「昭和 51 年 原子力年報」大蔵省印刷局、1976.
- [30] 有馬朗人「第 3 回核融合エネルギー連合講演会 2000.6.12」プラズマ核融合学会誌 77 巻第 1 号 2001.
- [31] 田島輝彦「基幹代替エネルギー源としての核融合の特徴」プラズマ核融合学会誌 74 巻 7 号、1998.
- [32] 井上信幸、田島輝彦編「核融合炉開発研究のアセスメント」平成 5 年度 NIFS シンポジウム報告書、NIFS-PROC-17, 1994.
- [33] 大塚柳太郎・鬼頭宏「地球人口 100 億の世紀」ウェッジ、1999.
- [34] 傍島眞「原子力は何が問題か」ERC 出版、1999.
- [35] 住田健二「原子力とどうつきあうか」筑摩書房、2000.