

展望

21世紀に向けて、電気事業の未来技術 —トリレンマ解決への挑戦—

井上正明 (財)電力中央研究所 人事部 能力開発担当
Masaaki Inoue

Future Technology of Electric Utility in 21C. -Challenge The Trilemma Problem-

1 まえがき

人類が地球上にその第1歩を踏み出して以来、着実に輝かしい発展をとげてきた。

しかし、人類の歴史を見るといつの時代にもこの発展を妨げる壁があったが、人類はこれに英知を結集して、これを乗り越えてきたことが分る。

図1に示すように人類は、火を発見し、家畜のエネルギーを使い、薪や風力・水車を活用しやがて石炭・石油を使う現代へとつなげてきた。この流れこそが人類発展の鍵であったし、その時々これらを使いこなす技術を生み出して来たのである。

その歴史の延長上にある今、我々の前にどんな壁が現れてきているのだろうか。その壁を乗り越えないとどうなってしまうのだろうか。また、これを乗り越えるため、今、我々は何をなさねばならぬのか。そのようなことをここで考えてみることにしたい。

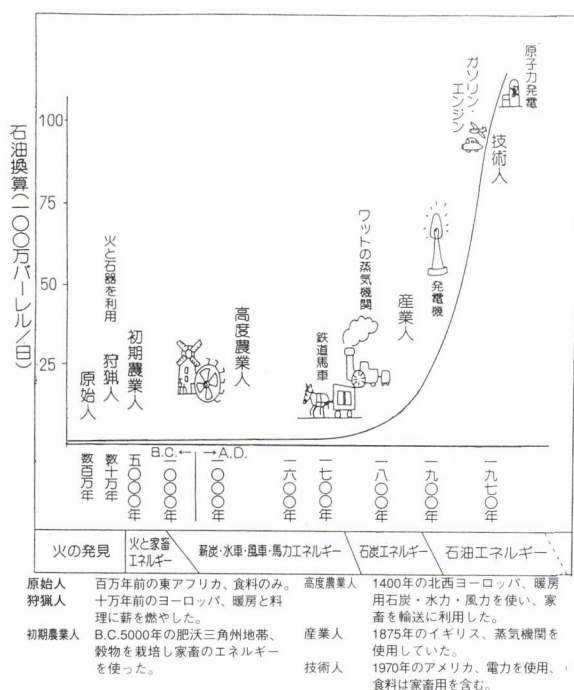


図1 人類のエネルギー消費 (資料: 電事連「94年版原子力図面集」)

2 化石燃料文明のもたらしたもの「トリレンマ」とは何か。 ^{1)~4)}

人類の大きな飛躍をもたらしたものの一つに、化石燃料の入手・利用が挙げられることは言うまでもない。この過程では誰もが、「石炭や石油は掘れば出てくる」、「山や森には薪が取れる」、「煙突の煙は大気がとり込み、大海は汚水を浄化してくれる」……と言った無限性を地球に期待していたに違いない。その結果、数千万年・数億年かけて蓄積された貴重な化石資源は2~300年の間に使われてしまい、そのうえ地球環境に赤信号を燈すところまで来てしまった。

地球人口の1/4以下で構成される工業先進国が、これまで地球のエネルギー資源の3/4を消費してきたことを考えれば、人口の3/4以上で構成される発展途上国の工業化傾向が今までの方法で進んだ時には計り知れぬ影響があることは誰もが想像できることであろう。だからと言って我々は発展途上国の人々の使うエネルギーに制約を加える権利はない。むしろ上手な手助けが重要なのである¹⁾。

「経済発展」、「発展のための資源・エネルギー・食糧消費」、消費がもたらす「環境悪化」、この結果は「迫りくる人類の危機」へとつながることは明白であろう。

これら三つの要因が相互に絡み合っている難問を図2に示す「トリレンマ」と称している。そして、人類の持続可能な発展を問う時、今までのやり方では地球上の人口が

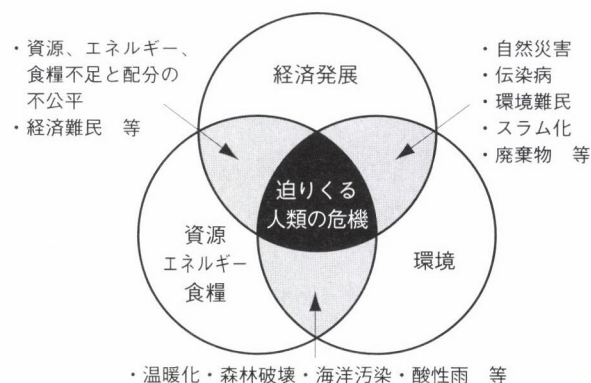


図2 トリレンマの構造²⁾

100億を越す21世紀中頃に具現してくる、避けては通れない難問である²⁾。

先述のように、かつての先人達が、それまでの古い考え方を転換し、全く新しい発想でルネッサンスや産業革命を成し遂げてきたように、我々も未来を見据えた新しい考え方（パラダイムと言う）と方法で解決し、地球と人類が共生・共栄する時代に相応しい社会のしくみやライフスタイルを創り出す必要がある。

図3に示すように我が国は、省エネによる経済成長を遂げてきた世界の優等生だ。だからこそ、これまで蓄積してきた知恵と技術を世界に向かって発信し、その原動力となる期待は実に大きいものがある。第16回世界エネルギー会議が95年10月、100余ヶ国、5000人以上を集めて我が国で開催されたこと、この課題に関し世界の相互理解の前進に寄与したことの両意義をもう一度考えて見るべき時である。

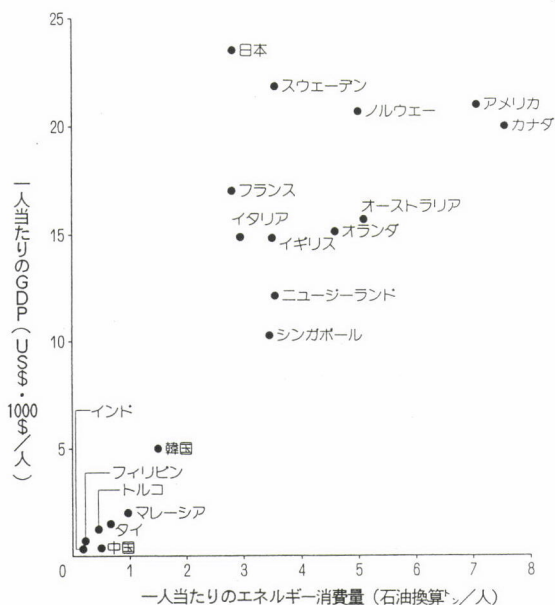


図3 経済成長とエネルギー (1989年) (資料：電事連「94年版原子力図面集」)

3 脱化石エネルギーに向けて

3.1 資源のない国—日本の将来エネルギー・資源—

1979年、IEA（国際エネルギー機関）理事会は「石油火力新設禁止勧告」を決議し、OECD（経済開発協力機構）加盟国に通知した。日本は、石油、石炭、天然ガスとしてエネルギー消費の不足分84%を海外に頼っているが、今までのやり方でゆけば21世紀中葉のエネルギー消費量は現在の約1.8倍、石油換算で年間7億トンと想定されている。¹⁾しかし、現状を見てもこれに見合う石油消費など国際的にも許されぬ方向にあり、その代替エネルギーを用意せねばならない。

ここで、我が国の将来エネルギー確保の点から重要なのは、「原子力基本法」。

その第1条では、「……原子力の研究・開発および利用を推進することによって、将来におけるエネルギー資源を確保し……」と、エネルギー対策の基本的な考え方が示されている。しかも、昭和30年の同法施行以来、この考え方に変更はない。

また、同法第2条では、「原子力の研究、開発及び利用は、平和目的に限り、安全の確保を旨として、……その成果を公開し、進んで国際協力に資する……」と、平和利用と安全確保が大前提であることが示されている。

さらに同法第4条では、原子力委員会、原子力安全委員会がその具体化のための企画審議・決定することとしている。そして、この条項により原子力委員会はほぼ5年毎に、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」を作成しており、最近では平成6年6月に公表された⁵⁾。この中でエネルギー確保、原子力開発利用を具体的に進める方法として、数値を挙げた目標として次の主旨を提言している。

- ①原子燃料サイクルを含む発電体系全体の安全性、信頼性、経済性が重点である。
- ②使用済み核燃料（使用済燃料と言う）は再処理し、プルトニウム（Pu）や未利用ウラン（ U^{238} や U^{235} ）などを回収し、再利用する。
- ③このため、軽水炉から将来は高速増殖炉（Fast Breeder Reactor ;FBRと略す）を発電の本命炉とし、Pu利用を実用化することで、ウラン資源を軽水炉より約100倍⁶⁾も有効利用する。

ここで重要なことは、同法によって我が国の基本的考えは脱化石エネルギーを原子力利用で実現することを明示し、さらに将来の本命がPu利用であると方向づけていることだ。

この問題に関して電気事業は、「必ずしも化石燃料にのみ依存しなくてもよいエネルギー産業」、という特徴を生かすことができる。電気事業は火力発電など環境技術やエネルギー利用効率の改善、省エネ型都市・住宅の開発・支援といった研究開発はもとより、太陽光や地球深部の高温岩体など自然エネルギーの開発、原子力の定着化、さらに次世代エネルギー資源の確立など自らの役割と責任を果たすべく、研究開発に取り組んでいる。

3.2 先ずは、アジアのリード役に

図4は各国の電力消費量が工業化・生活向上や教育・医療の高度化をもたらし、最終的には人口増加の低下をもたらす、といった電力利用と人口問題の間接的な関わりがある事を示しているように思われる。この大胆な仮定を信ずるなら発展途上国の電気文明化は、トリレンマ解決の一手段となろう。この電力供給に当たり化石燃料の使用が減少できれば、地球環境問題も前進するであろう。この意味で原子力平和利用の果たす役割は大きい。

平和利用は日本はもとより、国際的にも考え方を定着させることが大前提となるのだが、国内に資源がほとんどないにもかかわらず経済発展、エネルギー、環境問題の一応のバランスを達成しつつある我が国は、今後も原子力の電力利用分野で人類の発展のための牽引役の期待が大きくなる。

今、地球上すべてを対象とした対トリレンマ戦略作りなら、国際機関のIEAやIAEA（国際原子力機関）を活用し、我々はこれをバックアップするのがベストであろう。

もう一つは、東アジア、東南アジアなど緊急かつ重点的な個別地域を対象とするケースがある。現にアジアの国々は経済発展に向けエネルギー・環境問題に直面し、将来のエネルギー源として原子力発電を選択している。しかしその前提は、アジアの核不拡散問題と事故安全問題だ。この点、日本は技術的・経済的な面から十分な協力が出来る。即ち、我が国の原子力発電が小さなトラブルは経験しつつも安全裏に高稼働している事実と国際的な信頼のもとPuの安全な管理を続けていることから、この自信は出てくる。さらにこの自信を強固にするため、現在に増して技術・情報の透明性を確保する事が重要である。過去に関しアジアの国々は、我が国に色々な感情を持っている。戦後50年を過ぎ、改めてアジアの国々をエネルギー技術の面で支援できる時が来たのである。

一方、進行しつつあるアジア諸国の環境問題に対しても、我が国がこれまで環境保全に取り組み培ってきた技術的・人的資源で積極的に貢献できるし、これに係わる現地技術陣の育成へのニーズの高まりにも対応できるのである。

アジア地区のエネルギー問題は緊急かつ重大であるが、日本はこれに対するリーダーとしての役割が果たせる、と言えるし、ひいては地球のエネルギー・環境問題解決の一助となり、我々の子孫の将来にもプラスとなって返ってくるのである。

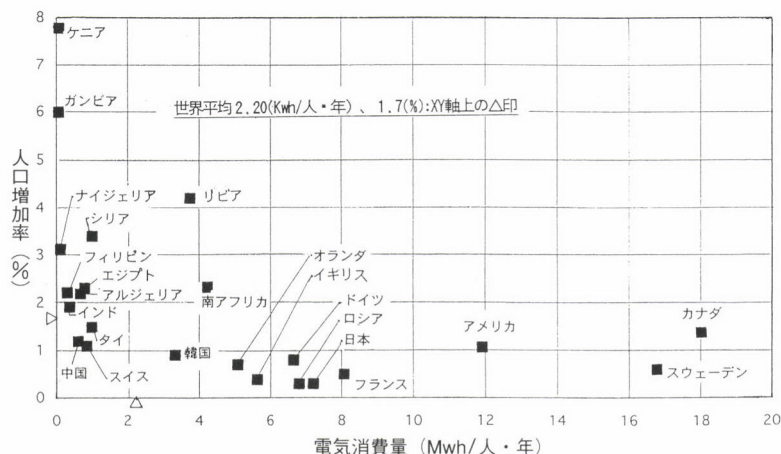


図4 人口増加と電力消費（資料：世界国勢図会・1995年より作図）

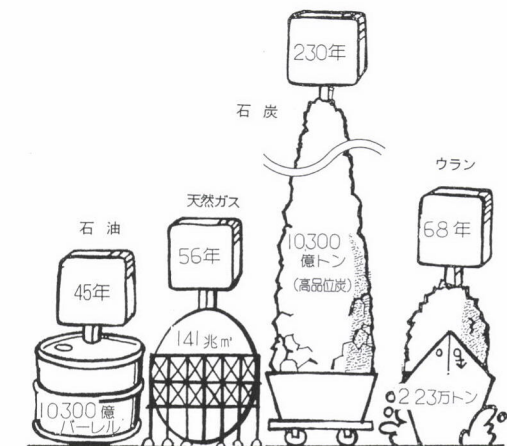
3.3 原子力発電にかける夢

さて、ここで問題となる、資源面、環境面から原子力の将来性を考えてみよう。化石燃料は良く「枯渇する」という言葉が行きかう。「枯渇」という言葉がない、とすれば、それは太陽、風、波、地熱……など自然エネルギーであろう。しかし、これらは現状では研究開発が進められているものの、信頼性や経済性などいろいろな課題が残っており、実用化にはまだまだ時間や費用が必要と思われる。

ところで、資源埋蔵量の推定がいろいろ発表されているが、一つの例を図5に示す。「95年世界エネルギー会議・資料」⁷⁾によれば、確認埋蔵量と現状のペースで採取した時の可採年数は、石炭1兆300億トン、230年、石油1兆300億バレル、45年、天然ガス141兆 m^3 、56年である。ウラン（化学記号U、ウラン資源としては、 U^{235} と U^{238} が対象となる）は、1kg当り130\$で採掘できる分として223万Uトン、68年だそうである。これだけ見る限り、原子燃料の先行きは、さほど明るくないようだが、後述のように現在発電に寄与していない U^{238} をPuに変えFBRで発電に利用できる技術が定着すれば、ウラン資源を軽水炉より約100倍も有効利用でき⁶⁾、68年でなく6000年近くなってしまう。さらにUは海水中にも40億トンが存在する⁶⁾と言われており、このうちのごく一部でも回収し、利用できる日が来れば、資源的にはかなり夢のある話に見えてくる。現に、海水中からUを回収する技術は我が国で研究が続けられている。

一方、環境面を考えると、指摘されるのは主に事故時の放射性核種の放出と放射性廃棄物の処分に関するものであろう。このうち廃棄物は大きく2つに分類できる。

その一つは、発電所の運転中や定期点検時に出る手袋、靴下、ウエス、これらの洗濯排水など「低レベル廃棄物」と言われるもので、これらは焼却・乾燥させ、ドラム缶内にコンクリートで固め、厳重な検査のうえ青森県内に地中埋設処分され始めた。これらは比較的放射能が少ないいうえ短期のうち



年数は可採年数（可採年数＝確認可採埋蔵量／年生産量）

図5 世界のエネルギー資源（参考資料：7より作図）

にほとんど零近くまで減衰してしまうので、将来は、埋設地点であっても人間の住環境が確保できる予定である。

もう一つは、使用済燃料の再処理に伴って出る超ウラン元素 (Trans Uranium; TRUと言う) などを含む「高レベル廃棄物」 (High Level Waste ;HLWと略す) と言われるものである。最近フランスに再処理を委託したことに伴って発生したものがガラスに固化され、第1回分として28本 (約14トン) が94年10月に返還され、現在青森県内に保管されている。

これらは、放射能レベルが高いものや半減期が100万年以上に及ぶTRUも含まれているので、廃棄に関しては人類の生活圏内から隔離する事が考えられており、このための研究開発が、当電力中央研究所も参加する9ヶ国の国際共同研究として、スウェーデンで進められている。しかし、この様なTRUも取り出して燃料として用いることが出来れば、問題の本質的な解決に繋がる。

そこで、当電力中央研究所はこのHLWに含まれるTRUを独自の方法で分離し、燃料にしてしまう研究を行い、技術的な見通しを得ている。この部分は4.2で述べることにする。

4 安全性・信頼性 —金属燃料FBRの実現に向けて—

図6は、21世紀のエネルギーをまかなうため、現在の軽水炉燃料サイクルに新たにFBR燃料サイクルを加えた最終形態のサイクルで、電力中央研究所の研究対象である。

後者のサイクルの組み合わせで始めて燃料の有効活用とTRUの消滅が実現する。ここでは、Pu利用新技術としてのFBRの新しい研究の中から代表例を紹介したい⁴⁾。

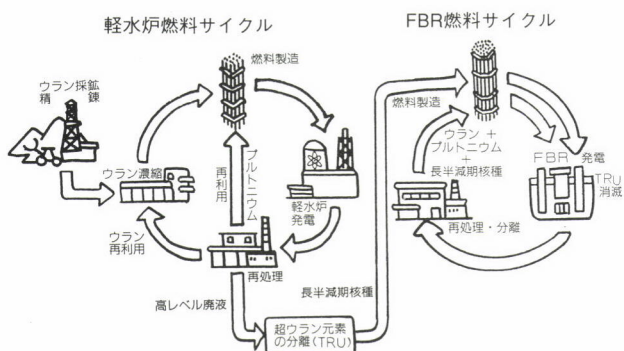


図6 21世紀を目指す燃料サイクル⁴⁾

4.1 将来のプルトニウム利用時代に向けた研究開発 —金属燃料FBRと乾式再処理—

FBRは、天然ウランの99.3%を占める核分裂をしない U^{238} とPuをほぼ8:2で混ぜた燃料を用い、発電しながら U^{238} をPuに変えてゆく、即ち使ったPu以上のPuを生産しつつ発電ができることから「増殖炉」という言葉が使われてい

る。「高速」とは、Puの核分裂にエネルギーの高い「高速中性子」を用いることから使われる言葉である。また、Puの核分裂熱を取り出すために水ではなくナトリウムを用いるのも特徴である。従って、FBRの重要な技術はPu管理とナトリウムの取扱い上の安全問題である。特に後者は水や空気中の酸素・水蒸気などはげしく化学反応し、爆発や火災を発生させる危険がある。1995年12月8日の「もんじゅ」のトラブルは、放射能の含まれていない2次系ナトリウムによる一例である。

このFBRの未来技術の一環で当所が重点的に研究しているのが「金属燃料FBR」と金属燃料の「再処理」である。金属燃料はUとPuなどの合金である。このため、現在のセラミック系の「酸化物燃料」に比べ熱伝導が良いため燃料の中心温度はかなり低く、高い燃料加工精度も要求されない。さらに金属燃料を用いる事によって、極限を仮想した最悪事故時にも炉が暴走しないとの実験と理論を基にした研究成果も米国で発表されており、「金属燃料FBR」が原子炉として究極の安全性を持っている事が、最近分かってきた。この研究については機会があれば別に紹介したい。

もう一つは、金属燃料を図7に示す「乾式法」という方法で再処理する技術。実はこの技術、1944年、原爆開発研究 (マンハッタン計画) の失敗例からのヒントでできた技術だ。もともと、燃料の再処理技術は、原爆用Puの製造が目的で開発されたものだ。しかし、1945年7月1日アラモゴルドの砂漠での核爆発実験成功以前、多数の不発爆弾が作成されていた。即ち核爆発を起こさないPuを再処理工程で作ってしまったのである。

その後再処理技術「湿式法 (ピューレックス法)」の発明によって軍事用Puの生産に成功した。さきの失敗の原因は、PuとTRU (この場合キュリウムという元素: 化学記号 Cm) が混合して回収されたためであることが分かった。戦後数十年間、日の目を見ることのなかったこの再処理法が、平和利用、即ち爆弾にならない発電用Pu生産用として見直され、改良が加えられて出来たのが「乾式再処理法」である。

従って「乾式法」には人類にとって素晴らしい2大長所が入っているのである。その1つは、この方法で回収されたPuは、爆弾とすることが不可能であること。もう1つは、現在廃棄物と考えられているTRUもPuと混合された形で回収され燃料として閉じ込められてしまうこと、である。

このように、乾式法は、TRUが出ないため廃棄物取扱い施設が簡易なこと、金属燃料は酸化物燃料に比べ成形加工工程が簡素化できることなどから再処理施設全体が現在の湿式法に比べかなりコンパクトになり、燃料サイクル施設の建設・運転費も軽減され、さらには発電所構内に再処理施設が並設 (IFR計画) されれば、使用済燃料の公道輸送

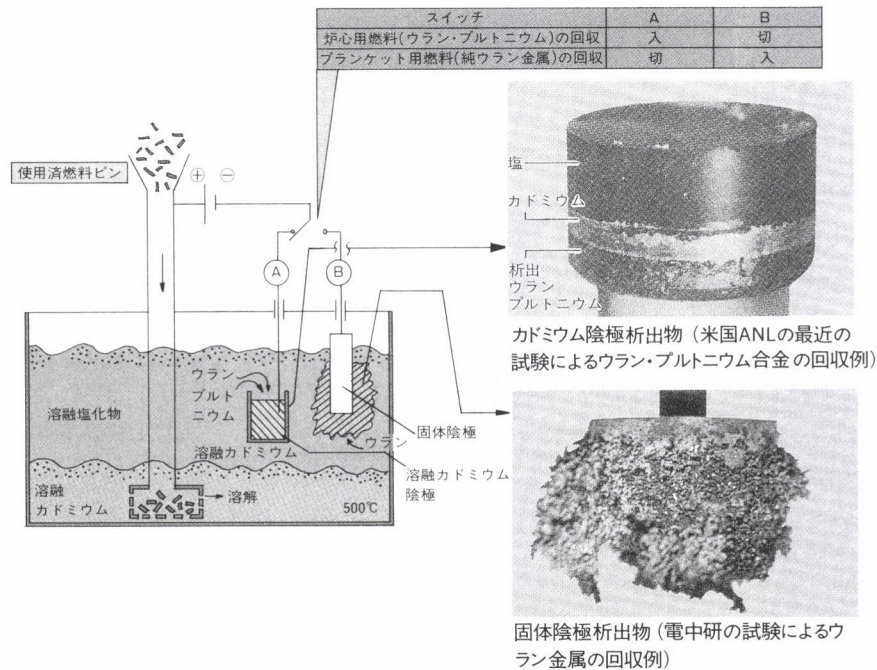


図7 電解精錬法による乾式再処理法（資料：電中研「電中研ニュース」No.165）

もなくなるなど、安全性・経済性も加わった究極の姿が期待できることだ。

核不拡散性と対環境性。安全性と経済性。まさに神が人類のために与えた技術と言えるのではなかろうか。

この研究を総合的に検証するため、当研究所は我が国の電気事業を代表して米国のアルゴンヌ国立研究所において日米共同研究を実施してきた。しかし近年、米国での原子力予算の関わりもあり、この共同研究は終了するが、得られた成果をベースとして電力中央研究所が独自の研究計画へと引き継ぐ予定である。

4.2 高レベルの放射性廃棄物がなくなる日

ー放射能の消滅処理

現在青森県で建設中の再処理工場では、軽水炉の使用済燃料からPuなど有益な資源を抽出した後は、TRUなどを含むHLWが発生する。

もし「TRUを廃棄物から分離し、別の核種に変えられれば」という研究者の一つの夢が完成されようとしている。「群分離・消滅処理技術」と呼ばれ、我が国では1988年10月、原子力委員会がこの研究開発長期計画（オメガ計画と言う）をまとめた。

電力中央研究所で行っているこの研究の特徴は、高レベル廃液のTRUを乾式再処理法で回収し（群分離）、FBRで発電しながら消滅させる（消滅）方法で、次の通りである。

- ①高レベル廃棄物（主にTRU）は再処理工程でPuと同時に分離され再び燃料内に閉じ込められ、外部に出されない。（当所と米国・アルゴンヌ国立研究所と共同研究）
- ②TRUはFBRの発電に伴い、別の核種に変えられてゆく。

③FBRの使用済燃料は、再処理によりTRUを含まない廃棄物や貴金属が回収され、TRUやPu、未燃のUは再び金属燃料サイクル内に閉じ込められる。

電力中央研究所と、EU（ヨーロッパ連合）の「超ウラン元素研究所」との「消滅」に関する共同研究によれば、金属燃料中に5%程度までのTRUを混合しても燃料性能が変わらないことも明らかにしている。

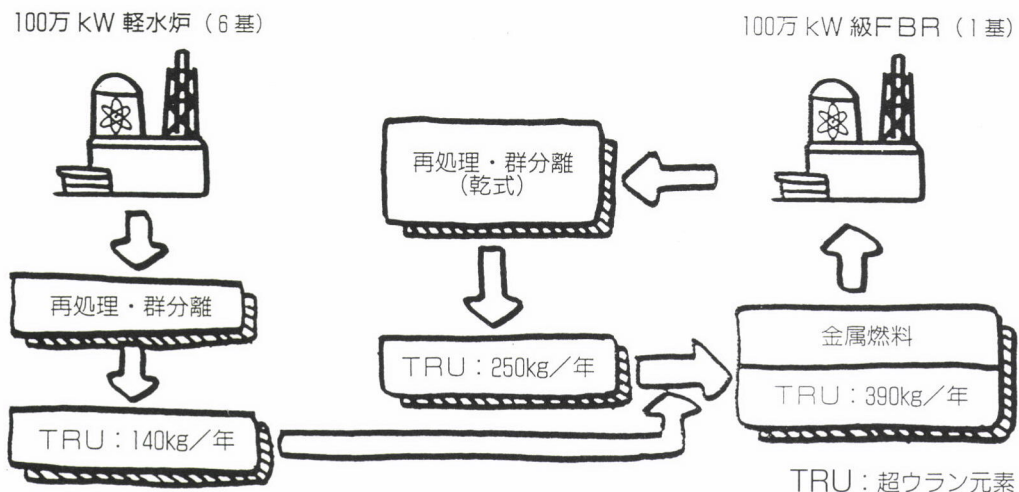
図8に示すように、当研究所の試算によれば、100万kWのFBR用金属燃料にTRU5%を混合するケースでは、FBR自体から出るTRUの他、100万kWの軽水炉5～6基から生じるTRUの処理が期待できるのである。

4.3 宅配用原子炉の時代 ー超小型FBRの構想―^{8)・9)}

さて、ここで少し夢のある話に移りたい。夢といっても現実にIAEAは発展途上国支援を目的としてこの研究開発に賛同しており、国際会議でも大きな話題となっている一それが、当電力中央研究所が提案した超小型FBR構想である。

発展途上国のトリレンマ解決のため、原子力の貢献を考えると、対象地域が広くかつ人口が点在し、地域紛争も考えられるため、大型炉・長距離送変電・施設というのは、経済性や安全性・信頼性（送電ルート）の面から適切とは言えない。即ち、相当な数の地域分散型となる。また、IAEAは発展途上国用の原子力として「核不拡散に対する安全」と「事故時への安全」ならびに「建設・運転コスト」を必要要件としてあげている。

一方、当研究所が原子力の究極の姿を追い求めた結果として独自に提案した超小型FBR（4Sと言う。Super-Safe, Small and Simple）の構想は上の要件と一致することが分



現在の発電に使用されている100万kWクラスの軽水炉6基分からTRUが年に140kg出る。一方、今後実用化が期待される100万kWクラスの金属燃料を使用したFBR炉ではTRUが年に250kg出る。これを軽水炉から出たTRUと一緒に混ぜて金属燃料として作り、これをFBRで燃やしてやることにより、TRUを消滅させるというもの

図8 金属燃料FBRによるTRUの消滅 (TRUを5%含む場合)⁴⁾

かったのである。4Sの構想を図9に示す。4Sの概要と、主な特長は次の通りである。

原子炉ユニットとして、炉心、中間熱交換器、崩壊熱除去コイルなどが一体で、出力5万kW。直径1cm、長さ6mの燃料棒が約4000本、プルトニウム量で1.3tonの燃料集合体を燃料とし、10年間燃料交換なし。容器は直径2.5m、長さ23mの円筒形で半地下設置のため地震に強く、蒸気発生器や発電機を合しても小学校の体育館程の大きさである。

炉心の長さ6mの燃料集合体の周囲に長さ2mの環状反射体という燃料から出る中性子を内部に反射させる筒がある。その内部だけで核分裂が盛んに生じ、環状反射体以外のところでは中性子は外部に拡散され核分裂が少ない。環状反射体は1日1mmの速度で移動し、10年間で炉心全体を移動し、発電を終了する。

この原子炉の特長は、現地での燃料交換なし、運転操作不要、機械的に動く部分が極度に少ない、点である。従来原発のトラブルは運転時や燃料交換時の誤操作や機械部分が主であったので、この原子炉は、保守・点検も不要である。

さらに、小型かつ大量生産のため工場での標準化設計・一体化生産ができ、高品質・低コストが確保できる。また、地球上に数千、数万機が分散してもこれらの核管理は一括してIAEAで衛星を用いて行われ、また燃料交換・乾式再処理も特定工場以外不可能なので核不拡散性は確保される。現在はさらに小型の炉へのニーズも高まり、全長6メートル余りの1万kW級の原子炉の概念設計も進められている。対象は数千～1万人程度の村落での海水淡水化を兼ねた分散型電源である。

もちろん、途発展上国以外でも十分活用でき、離島や僻地の電源、大型民間施設のコジェネシステムとしても、送電線が不要でかつ10年間に一度の原子炉の交換、すなわち、現在の家庭用のプロパンボンベのようにどこにでも配達できるのである。

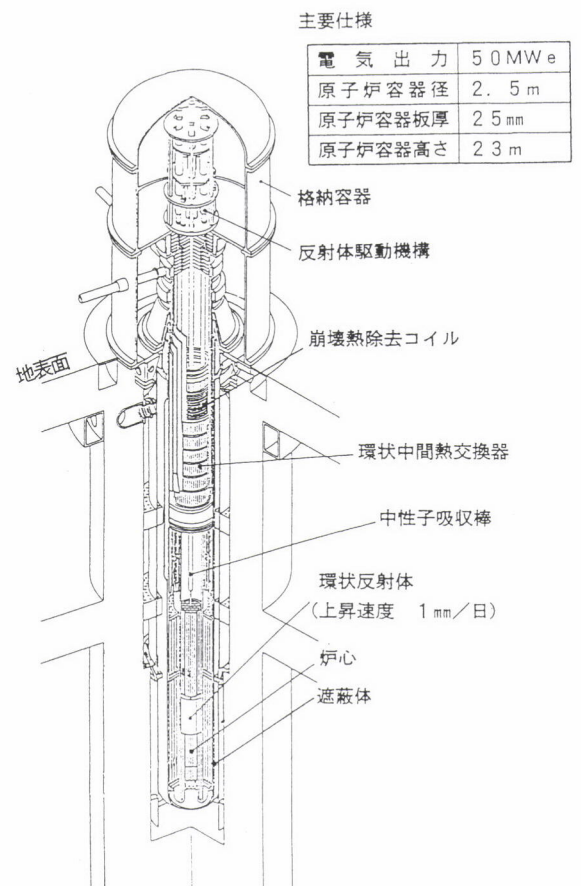


図9 超小型FBR (4S) の構想⁴⁾

5 むすびに代えて

人類の発展の前に大きく立ち塞がる壁、トリレンマ問題の解決には大変な困難がつきまとう。その第1は、発展途上国における人口増、エネルギー消費増であり、第2は先進諸国の省エネ・省資源である。しかし、この壁が人類の危機をもたらすとすれば、これを技術によって突破するしか道はない。こと原子力問題に関しては、とかく核兵器と事故時を思いうかべての「原発反対論」があり、また世界的な原子力政策の見直しの中でなぜ、日本、仏などが原子力発電推進をかかげているのか、といった疑問が専門家を含め意見が多くあるのを筆者は理解している。これらの国々が再び化石燃料にUターンした時、将来の地球環境はどうなるのか。このツケが回されるのは我々の子孫である。原子力に反対なら当然これに代わる提案を伴わねば大人の意見として扱うことができない。冷静な目を養い、子孫の将来のために評価・選択するのは今である。筆者は研究所で「電気事業における原子力分野の研究が必ず人類の幸に結びつく」との信念を持ってこの分野の研究に携わってきたが、原子力の平和利用のみですべて解決できるものではないことも理解している。ポイントとなるのは、一人ひとりが自分のできる範囲でトリレンマに向かって何をなすか、ということである。「がまん」ではなく、社会システムやライフスタイルを楽しみながら変えてゆける、発想の転換が鍵を握るであろう。

電力中央研究所は1951年11月、電力再編成に合せて出来た非営利目的の学問中心の研究機関であり、すべての運営のための資金は、国民の支払う電気料金の0.2%で賄われ

ている。工学・理学・農学・経済学・法学など多分野の700名の一流研究者がトリレンマ解決など社会をバックアップする研究開発を重点的に進め、電気事業の課題解決を通して社会に奉仕することを業務の基本としている。今後とも独創性溢れる先端技術の開発を目指して邁進する研究所でありたいと願って皆が一丸となって努力していることを記して、むすびとしたい。

参考資料

- 1) 井上正明, 他: 創立40周年記念論文集, (財) 電力中央研究所
- 2) 依田直: トリレンマへの挑戦, 毎日新聞社
- 3) 新田義孝, 他: 破局からの脱出—エネルギーからトリレンマに挑戦する—, 電力新報社
- 4) 「二匹目の電気うなぎ」, 日本工業新聞社
- 5) 「原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画」, 原子力委員会 (H6.6)
- 6) 服部禎男: プルトニウム問題について, PETOROTECH, (石油学会) 93.16-4
- 7) “Survey of Energy Resources 1995” World Energy Council.
- 8) 服部禎男, 湊章男: 超小型高速炉 (4S-50MWe) の設計思想, 日本原子力学会誌 36-10
- 9) N.Ueda, others: “Super-Safe, Small and Simple reactor for the global energy demand,” Proc. of Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, 1991

(1996年1月18日受付)