

総論

General Remarks

東 邦 夫*

Kunio Higashi

1. はじめに

エネルギーの安定供給は、人類の持続的発展にとって欠くべからざる前提条件である。しかし、世界的観点からみたエネルギーの今日的課題は、ますます深刻化してゆく地球環境問題や人口問題、あるいは天然資源の枯渇といった問題とも直接かかわり合っており、総合的視点を以ってのみ迫り得る問題となっている。特に原子力は、人類の長い歴史の中に忽然として現れ、ここ数10年の内に世界の電力の約17%を支える迄に成長してきたエネルギー源ではあるが、同時に、原爆の製造や核拡散のような政治的、軍事的問題とも陰に陽につながっており、国際情勢にも大きく影響されるという、更に複雑な側面をもっている。そして、各国の原子力政策は、その国固有の政治的、経済的、技術的、資源的、そして時には歴史的事情をも背景にして進められており、原子力を支える原子燃料サイクルの全体像は、今や国によって大いに異なっているという、極めて興味深い様相を呈してきている。

その中に在って、エネルギー資源をほとんど持たない我が国においては、30年以上にわたり悲願として進められてきた原子燃料サイクルの確立が、今日、ようやくにしてその形を整えつつある。しかし、我が国の原子燃料サイクルとその将来にも、さらに克服しなければならない経済性の問題や、“夢の原子炉”高速増殖炉が実用化するまでの間、プルトニウムを安全に有効利用していく問題、遠い将来の人々にまで残す負の遺産としての高レベル放射性廃棄物と、その地層処分や消滅処理技術の問題など、研究開発を継続してゆかねばならない様々な問題をかかえている。しかし、それ故にこそ、また、選択肢の多い多様な原子燃料サイクルの将来像に、様々な期待が託されているとも云

える。

本稿においては、この特集『原子燃料サイクルの新動向』で詳細に解説されてゆく各論に共通している事柄や背景になっている事柄をとり上げ、極く簡単に触れ、他稿に引き継ぐこととしたい。

2. 人口爆発・地球環境と原子力

現在、世界の人口の約4分の1にすぎない先進国が、全エネルギーの約4分の3を消費しており、1人当たりのエネルギー消費量は、開発途上国の10倍近くにもなっている¹⁾。一方、世界の人口は、ここ50年の間に25億人から約2.5倍に増え、2025年には85億人、2050年には約100億人に達するとの予測もある。そこで予想されている伸びのほとんどは、アジア、アフリカを中心とする開発途上国における人口増加である。

開発途上国における平均的な生活水準の高まりにより、1人当たりのエネルギー消費量も増えてゆくため、エネルギー消費量の伸び率は、人口爆発と呼ばれるものよりも更に高い伸び率で大きくなっていくはずである。その傾向は既にはじまっており、1980年代の10年間における開発途上国の人口は30%弱の伸びであるのに対し、そのエネルギー消費量は約60%増加した。10年間に1.6倍というこの伸び率は、50年間に約10倍になる伸び率に相当する。

一方、「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」(地球温暖化防止国際会議)では、石炭、石油、天然ガスのような化石燃料を、現在のレベルで使用し続けるならば、21世紀には温暖化が相当進むであろう事と、大気中の温室効果ガス濃度の上昇をくい止めるためには、放出量を6、7割削減する必要があるとの認識で、各国が一致している。

地球温暖化だけではなく、窒素酸化物、硫酸酸化物による酸性雨の問題も、世界各地で深刻になってきている。このような事から、省エネルギーにつとめると共に、非化石エネルギー源への転換を図ることが重要

* 京都大学工学研究科原子核工学専攻教授
〒606-8501 京都市左京区吉田本町

であると広く認識されている。環境に対する影響が小さく、身近なエネルギー源として先ず考えられるのは太陽光や風力のような再生可能なエネルギー源である。我が国においても、平成6年以来、政府主導で、新エネルギーの導入拡大が計られてきて²⁾、2010年までに、現在のさらに3倍にまで高める計画を立てている。

しかし、このようなマイルドで再生可能なエネルギーは、分散型のエネルギー源としては有用であるが、例えば、アジア地域の開発途上国が、今後の急速な経済成長を見越して採用するエネルギー源等としては、必ずしも適してはならず、彼等は遙かにエネルギー密度が高く、大量のエネルギーを廉価に得られる原子力にも大きな期待を寄せている。原子力発電は、化石燃料を使う火力発電とは異なり、発電時には燃料からCO₂を排出しない分、開発途上国の大量導入によっても温暖化への影響は小さいと考えられるが、定量的には、どの程度小さいと言えるのであろうか。それを知るために、化石燃料と原子力とで、単位エネルギー（1kwh）の発電当たりに排出するCO₂量（CO₂原単位）を詳しく分析した研究がある³⁾。このCO₂原単位を求めるためには、原子力発電所だけでなく、原子燃料サイクルの各種の施設を建設するために使われた金属材料やコンクリート等の資材を製造するために使ったエネルギーも化石燃料に換算し、それによって発生するCO₂のすべてをカウントして計算している。その結果、原子力発電がLNG火力発電に比べ、CO₂の発生量は、約30分の1と結論している。このような計算結果から、原子力発電が有毒な化学物質はほとんど排出せず、温室効果ガスの放出削減に対しても、効果的である事が確認できる。

しかし一方では、原子力発電所からは、放射能を帯びたガスが出るので心配との声もある。しかし、石炭を燃やすと、そこに含まれている少量の放射性重金属核種が環境中に放出されるし、また、天然ガスを使うと、放射性ラドンの放出を伴う。火力発電所から放出されるそれらの放射能は、自然環境中の放射能レベルに比べては無視できる程度のものであるが、時として、原子力発電所の通常運転時における放射能レベルを越える場合があるとの評価もある⁴⁾。

後で詳しく述べられるように、環境中への放出はなるべく抑制されてはいるものの、原子力発電によって放射性核種が大量に発生することは避けられず、これら不用品放射性核種を減らすために消滅処理をするための技術、あるいは十分に減衰するまで、地中深く安

全に生態圏から隔離するための技術等を確立して、人々が安心できるようにすることが大切である。

3. 原子力発電を支える原子燃料サイクル

1グラムのウランやプルトニウムが燃えると（核分裂を起こすと）、およそ1MWD（メガワット・デイ）のエネルギーを発生する。それは、1kWの電熱器1000個を1日24時間つけておいたときのエネルギーであり、石炭1グラムを燃やした時の約200万倍に相当する。このようなエネルギーを利用すべく、現在、およそ30カ国に、合わせて430基ほどの発電用原子炉があり、先述のように世界の電力の約17%が賄われている。我が国においては、約50基の原子炉から約30%の電力が供給されている。

しかし、このような原子力発電所を建設しただけでは原子力発電を行うことはできず、図-1に描かれている様に、ウラン鉱山でウラン鉱石を採掘することからはじまり、ウラン濃縮（ウランの同位体分離）や、ウラン燃料の成形加工等を経て、はじめて原子炉に供給される燃料が出来上がるのである。そして、3～4年間、原子炉内でエネルギーを出し続けた後、原子炉から取り出された使用済み燃料は、再処理と呼ばれる化学工程により、原子炉内で創り出された人工元素であるプルトニウムと、燃え残りのウランとを回収して、新たな燃料づくりに利用される。そして、再処理で分離された不用品放射性核種は、廃棄物として処理処分される。

このような一連の工程すべてが整ってはじめて、原子力発電が成立するのであり、原子力発電は、原子燃料サイクルによって支えられているといえる。

極く大雑把に云うならば、年に1回、30トンほどのウラン燃料を取り替えるだけで、原子炉（軽水炉）は100万kWもの電力を供給し続けてくれるのである。このように少量の燃料で大量のエネルギーが取り出せる原子力は、発電所内外の物流が少なく、極めて貯蔵性に優れたエネルギー源であると言える。また、石油や天然ガスのほとんどを外国からの輸入に頼っている我が国は、再処理によって回収したウランやプルトニウムを、準国産のエネルギー資源として位置づけ、そのリサイクル利用を積極的に進めることを、原子燃料サイクルに対する基本的政策としている。

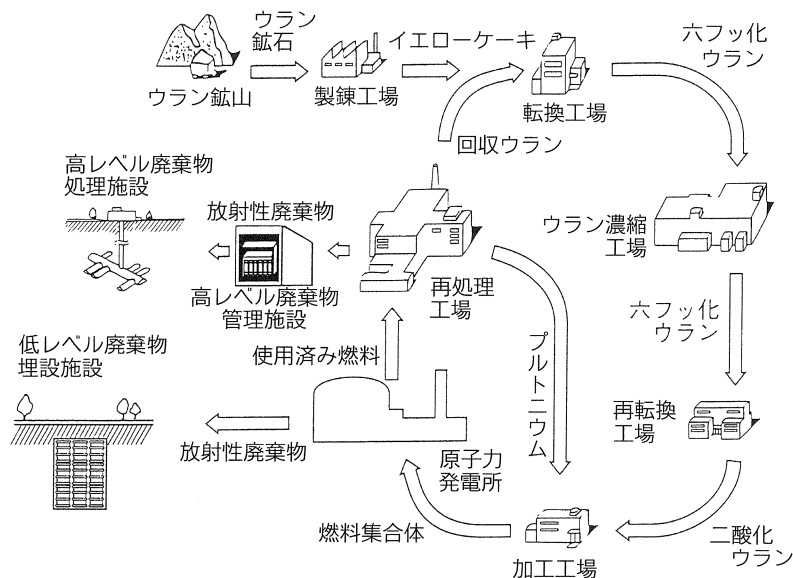


図-1 リサイクル型の原子燃料サイクル⁵⁾

4. リサイクル型とワンス・スルー型の原子燃料サイクル

原子炉から取りだした使用済み燃料を、そのまま捨ててしまおうか(Once-through型)、それとも、そこに含まれているプルトニウムと燃え残りのウランとを回収してリサイクル利用する(Recycle型)かによって、すなわち、再処理を行うか否かにより、原子燃料サイクルの形態は全く異なってしまうのである。それは、プルトニウムを積極的に利用するか、それを不要な厄介者のようにして捨てるかの違いである。そしてまた、地下深くに埋設処分する高レベル放射性廃棄物として、プルトニウムやウランを除いてつくったガラス状の安定な固化体にしてから捨てるか、それらを含んだ使用済み燃料を、腐食し難い金属で包み込むなどして、そのまま地下に捨てるかの違いになってくる。また視点を変えれば、核拡散の潜在的危険性のあるプルトニウムを、地上で民生用に敢えて使用するかどうかの違いでもある。このように、再処理は原子燃料サイクルの形態を左右する非常に重要な位置を占めており、扇のななめに例えて、原子燃料サイクルの要とも云われている。

使用済み燃料中に含まれているプルトニウムを利用するかどうかについての各国の考えは、相反する2つの方向に分かれてきており、一致していない。すなわち、我が国を含むいくつかの国々は、プルトニウムを

貴重なるエネルギー資源だと考え、使用済み燃料を再処理して回収し、利用する方向をとっている。しかし、他の多くの国々では、プルトニウムは使用済み燃料の中に留めておくべきであるとし、再処理をしない政策をとっている。そして、どちらにするか、未だ決めかねている国々もある。IAEA(国際原子力機関)は、これらの国々を、再処理をする国、再処理をしない国、および未だ決めかねている国の3つに分け、表1のようなものを作っている(1996年)⁷⁾。表中にある「直接処分」とは、再処理せずに使用済み燃料を、そのまま地中深くに埋設処分しようとしている国である。また、「未決定」と「再処理」との両方に印がついている国々があるが、これは例えば以前にフランスやイギリスに再処理を委託してプルトニウムを回収したが、今後どうするかは決めかねている、といった国である。また、「直接処分」にも「再処理」にも印がついている国々は、以前は外国に再処理を委託したり、自国で再処理をしていたが、現在では再処理をせず、プルトニウムやウランを含んだまま、直接処分することに決めたような国である。この表を見ると、「再処理」に多くの印がついていて、プルトニウムを回収しようとしている国々が沢山あるようにも見えるが、実際には、上に述べたような国々が含まれており、終始一貫して再処理路線をとってきたのは、日本、フランスの他、ごく少数にすぎない。また、政権の交代により、原子力政策が急変した国もある。

表1 使用済み燃料に対する各国の方策⁷⁾

国名	未決定	直接処分	再処理
アルゼンチン	×		×
ベルギー	×		×
ブラジル			×
ブルガリア	×		×
カナダ		×	
中国			×
チェコ	×	×	
フィンランド	×	×	×
フランス			×
ドイツ		×	×
ハンガリー	×		×
インド	×		×
イタリア	×		×
日本			×
韓国	×		
リトアニア	×		
メキシコ	×		
オランダ			×
パキスタン	×		
ロシア		×	×
スロバキア		×	×
スロベニア	×		
南アフリカ	×		
スペイン		×	×
スウェーデン		×	
スイス	×		×
英国	×		×
ウクライナ	×	×	×
米国		×	

しかし、実は、ずっと以前、すなわち原子力の平和利用に関する研究開発が始まってからしばらくの間は、世界中のどの国もが同じように、使用済み燃料は再処理してプルトニウムを回収し、ゆくゆくは実用化するであろう高速増殖炉にそれを利用しようと考えていたのである。ウラン濃縮の工場で発生する減損ウラン（核分裂を起こし易いウランの同位体U-235の濃度が、天然ウランより低くなったウラン）は、現在、利用価値がないため、大量に無為に保管されているが、プルトニウムがあれば、それを減損ウランに混ぜ燃料として高速増殖炉を立ち上げれば、その使用済み燃料中にはプルトニウムが“増殖”しているので、再処理して回収することにより、一層多くのプルトニウムを手に入れることができる。“夢の原子炉”などとも呼ばれているこの高速増殖炉は、新たな天然ウランをほとんど必要としないため、天然ウランの価格が高くなれば

なるほど、また、ウラン濃縮のコストが高くなればなるほど、高速増殖炉の有利さは際立ってくるはずである。当時、原子力産業が軌道に乗るにつれ、天然ウランの需要は増え、その価格は急激に上昇してゆく傾向にあった⁸⁾。そのため、高速増殖炉の実用化は、非常に魅力的な開発目標であり、且つ緊急を要する課題でもあったのである。

このような背景をもって再処理は実施されてゆき、プルトニウムの回収が進んだ。しかし現実には、高速増殖炉の開発は期待されたほど順調には進展しなかったため、プルトニウムの需要は伸びず、しばらくの間は、世界中のプルトニウムの在庫量は増え続けてゆくだろう事が誰の目にも明らかになっていった⁹⁾。そこで1960年代には、ドイツなどいくつかの国では、軽水炉などへのプルトニウムの利用に関する活発な開発研究を開始した。そして我国も、独自に開発したATR（新型転換炉）へのプルトニウム利用に道を拓いていったのである¹⁰⁾。

昨今、我国においても、現存の発電用原子炉（軽水炉）の燃料としてプルトニウムを利用する計画が、福島県や福井県の原子炉から本格的に始まろうとしていて、話題になっている。軽水炉の中では、核分裂を起こす為に必要な中性子が、原子炉内部の燃料や構造材料と熱平衡に近い状態にあり、中性子の飛び回っている速さは、その温度の原子量1（水素分子の半分の重さ）の気体分子の速さに近い。このようなエネルギーの中性子を熱中性子（サーマル・ニュートロン）と呼び、軽水炉のような原子炉を熱中性子炉という。そのため、プルトニウムを軽水炉の燃料として使用することを、プルサーマルと呼んでいる。プルサーマルについては、別稿で詳しく論じられるので詳述しないが、上記のように、プルサーマルには世界各国で、既に相当長い経験や開発研究の歴史があるのである。

5. 核拡散と原子燃料サイクル

第二次世界大戦後、大国は競って核開発を進め、米、英、仏、中、ソの5カ国だけが核を保有する時代が続いた。そして、1974年5月になって、インドが核実験に成功し、核拡散が明白な事実となって世界の人々の前に立ち現れた。インドの原爆は、研究用原子炉の燃料を秘密裏に再処理して回収したプルトニウムを使って製造したと云われている。このような現実を前にして、1976年に米国は、自ら発電用原子炉の使用済み燃料の再処理を行わないことを決め、他の国々にも、再

処理をしないように求めた。

さて、1994年に米国のNational Academy of Scienceが出した小冊子¹¹⁾の初めの部分に、およそ次のような記述がある。『米国、旧ソ連の両国には、何万発もの核弾頭が保有されており、そこから取り出される50トン以上のプルトニウムと、何百トンもの高濃縮ウランが過剰になっている。数キログラムのプルトニウム、あるいはその数倍の高濃縮ウランが有れば、1発の原子爆弾をつくるに充分である。』

図-2は、1994年の時点で世界中に保管されていたプルトニウムと高濃縮ウランの量を推定したものである¹²⁾。発電用の原子炉のほとんどは、数%程度の低濃縮ウランを使用する熱中性子炉であり、図中の高濃縮ウランのほとんどは、軍事目的に作られたものであることが分かる。逆に、プルトニウムは、軍事用よりも、発電用原子炉の中で出来た民生用のものの方が多いことを示しており、その内でも、再処理して回収されたプルトニウムは比較的少なく、分離回収されなまま使用済み燃料の中に在るものの方が多いことが分かる。ここで少し注意しておかねばならないことは、民生用のプルトニウムと、軍事目的で兵器用に作られたプルトニウムとが互いに異なることである。普通の(天然の)水素原子にも、7000個に1個ほどの割合で、重さが2倍の水素(重水素)が含まれていて、それを濃縮したものが重水素ガスである。同様に、天然ウラン中には、140個に1個ほどの割合で、核分裂を起こし易

いウラン原子が含まれており、それを95%以上にも濃縮したものが、高濃縮ウランである。実は、プルトニウムにも、核分裂を起こし易いプルトニウムと、そうでないプルトニウムがある。兵器用のプルトニウムは核分裂を起こし易いプルトニウムを高濃度で含んでいるが、発電用の原子炉で作られたプルトニウム中には、それが通常、70%程度しか含まれていないのである。したがって、民生用のプルトニウムが兵器用には適していないことは確かである。しかし、程度の差はあれ、民生用のプルトニウムでも、破壊兵器の原料に相応になり得るものである。

したがって、使用済み燃料中からプルトニウムを回収して積極的に利用する道歩んでいる我が国は、そのような原子燃料サイクルを進めていくためには、核兵器の不拡散に関する条約(NPT; Treaty on the Non-proliferation of Nuclear Weapons)に基づくIAEAの保障措置(査察等)を、総ての原子力関係施設で受け入れ、透明性を高め、他の国々から疑いをもたれることの無いよう、国際的な信頼を得ていくなどの努力を、引き続き重ねて行かねばならないことは、自明である。

6. おわりに

原子力も、軽水炉の時代が長く続き、その技術もほぼ成熟きったと言える。プルトニウムを取り巻く様々な問題と深く関わっている再処理の技術も、現行のPurex法が確立されて、既に久しい。今や、高速増殖炉等の新型炉の実用化と、プルトニウムの有効利用に向けた原子燃料サイクルの見直しが迫られている。また、消滅処理など、高レベル放射性廃棄物問題に対応し得る先進的再処理技術などが求められており、経済性は勿論のこと、環境問題や、将来世代への配慮までも視野に入れた新しい挑戦が始まっている。

図-1を見るまでもなく、原子燃料サイクルは、互いに関連し合い、つながり合った一連のものであり、一つの工程で芽生えた新しい動きは、否応なく他の工程の変革に結びついていくはずである。この特集『原子燃料サイクルの新動向』で論じられているそれぞれの分野の新しい動向が、互いに関連し合い、淘汰され、統合されながら、新しい大きな流れへと結実していくことを願っている。

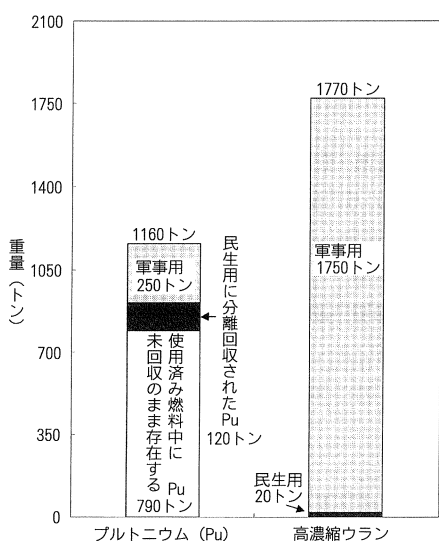


図-2 世界中に1994年末時点で存在するプルトニウムと高濃縮ウランの推定量¹²⁾

参考文献

- 1) 日本エネルギー経済研究所：エネルギー経済統計要覧，

- (1996), 省エネルギーセンター.
- 2) 資源エネルギー庁: 新エネルギー便覧, (1996), 通商産業調査会.
 - 3) 内山洋司, 横山速一: 原子力発電新技術のライフサイクル分析, 電力経済研究, No.37, (1996), 43-48.
 - 4) Juhn, P. E., Arkhipov, V.: Emerging Applications of Advanced Fuels for Energy Generation and Transmutation, IAEA Tech. Doc. 916, (1996), 21-24.
 - 5) 日本原子力文化振興財団: 原子力図面集, (1998).
 - 6) 原子力委員会: 原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画, (1994).
 - 7) Grigoriev, A: Status of the Nuclear Fuel Cycle in IAEA Member States, IAEA Thech. Doc., 916, (1996), 25-29.
 - 8) IAEA: Nuclear Fuel Cycle, IAEA Yearbook 1997, C 11-59.
 - 9) Joseph, C. J.: OECD Update on the Management of Separated Plutonium, Nuclear Energy, Vol.36, No.6, (1997), 417-425.
 - 10) Zarimpas, N., Stevens, G.: A Review of the Plutonium Activities of the OECD Nuclear Energy Agency, Proc. of Global '97; Intern. Conf. on Future Nuclear Systems, Yokohama, 5-10 Oct. (1997), 156-162.
 - 11) National Academy of Science: Exective Summary-Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, National Academy Press, (1994).
 - 12) Albright, D., Berkhout, F., Walker, W: Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996. World Inventories, Capabilities and Policies, Oxford Univ. Press, (1997).

募 集

第4回「トヨタ先端科学技術研究助成プログラム」 課題募集

1. 対象

国内の大学・研究機関等（民間含む）において「環境, エネルギー, 安全」に関する分野で, 独創的, 先進的な萌芽段階の研究に従事している研究者および研究グループ. なお, 社会・人文科学にまたがる領域も可.

2. 助成金額・件数

総額5,000万円程度（25件程度, 最高200万円）
（但し, 選考において45歳以下の方を優先）

3. 助成時期

平成12年4月

4. 募集締切

9月30日(木)英文申請も可.

■ 応募用紙請求・問合せ先

〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町1

トヨタ自動車株式会社 技術管理部 研究助成プログラム事務局

TEL 0565-23-6312 FAX 0565-23-5744

E-mail. yasuda @ mother.ee. toyota. co. jp.