

21世紀の社会を支えるエネルギー源

藤 家 洋 一
(東京工業大学原子炉工学研究所)

概要

世はあげて環境問題に深い関心を示し、就職学生にも環境は必須の言葉となっている。21世紀を間近にのぞむ20世紀の最後の10年を迎えて、エネルギー問題がこれまで潜在的に抱え、専門家の間では古くから議論されてきたことが一気に社会問題、政治問題にまで進展し、世界が協力して環境の保全を前提に人類の生存の条件を探り、未来を確保しようとしはじめたように見える。エネルギー問題が人類の生存に深く関わっていることがやっと認識されてきたとも言えよう。

ここで原子力エネルギーの持つ多くの可能性を中心に21世紀の中核エネルギーへの道を展望してみたい。

1. はじめに

エネルギー問題は複雑で多くの側面を持っているが、これまでその中では、エネルギーが人類の生存に必要な不可欠という観点が強調され、エネルギー源の確保が人類文化を支え、発展させるとともに人間の生活に豊かさをもたらすと信じられてきた。

又、エネルギー資源の確保は一国の自主独立に直接関わるものとして先進諸国は国産エネルギーの開発を精力的に行って来た。原子力開発も基本的にはこのカテゴリーの中に入れられる。

日本でも第一次石油危機の頃までは国産

エネルギー資源の開発確保が中心課題で、原子力はエネルギー資源確保の立場から石油代替の主役と考えられていた。当時から大気汚染、水質汚染を中心に公害問題は環境保全の観点から論じられていたが、エネルギー問題と直接関連しては議論されず、エネルギー資源に含まれる不純物のもたらず問題として除去技術、格納技術等の公害産業を開発することで対応してきた。エネルギー問題は時代とともに焦点となる課題が変わってきているが、現在はエネルギーの確保に対する重要性は何ら変わるところがないが、豊かさに慣れた目には必要と無駄の区別がつきにくく、素直にその必要性、重要性が論じられる状況にはない。更に、エネルギー供給が人口の爆発的増加をもたらし、これが更にエネルギー需要を加速する結果となり、その直接のおよび間接的影響のため地球が有限で狭いものになってしまっていることに人々が深い関心を持つようになってきた。エネルギー消費の結果、低質な熱エネルギーが環境に放出される他、エネルギー供給に際してエネルギー生産反応に際して行われる物質変換の直接結果である炭酸ガスが環境条件に大きな影響を与えるようになってきた事である。炭酸ガスの温室効果が問題となるに及んでエネルギー問題はその様相を一変する事になった。炭酸ガスは化石燃料の利用の結果そのもので従来の公害対策の枠からはみ出したものである。炭酸ガスを還元すること

はこれまで自然界で太陽エネルギーを利用した光合成によっておこなわれて来たものであり、これを環境から隔離し深海処分等を行うことは炭素が生態系での物質循環のキイとなる元素であることから難しい。

このため今後のエネルギー資源の開発を炭酸ガスの発生しない方法にたよるか、エネルギー変換の効率の飛躍的向上を計って、結果的に一次エネルギー需要の低減を計ることが要求される。

エネルギー問題の複雑さは社会構造や技術レベルにも深いかかわりを持つことにもある。人類の文化は都市の形成と人口の集中で特徴づけられ、分散から集中への歴史をたどってきた。これを可能にしたのは貯蔵性、輸送性に優れた化石燃料であり、自然エネルギーの直接利用から化石燃料の局所的集中大量利用へとエネルギー利用の形態が変遷していった。

又、社会のあるいは各国の持つ技術基盤の違いは、選択可能なエネルギー資源に差を生じ、天然資源の遍在化に由来するエネルギーの南北問題に対して技術のレベルや技術の裾野の広さから来るエネルギー利用の余裕の違いが新しい南北問題、いわば技術の南北問題をもたらしている。端的には原子力技術に代表されるであろう。社会の進展とともにエネルギー問題に対する認識も変わって来るものであるが、エネルギー資源の利用形態が社会に受け入れやすいものになっていることも重要なファクターになる。例えば、全体が巨大科学技術に属して日常性に乏しかったり、又、般用性のあるエネルギーになっていない場合には社会受容性が得にくくなるであろう。

今後のエネルギー資源開発はその利用形

態も含めて経済性、信頼性および安全性の確立に加えて社会受容性が要求される。社会受容性はその中に環境適合性を広い意味で含む事になる。

この視点からは化石エネルギーはエネルギー密度においても、環境適合性においても、今後大きな期待がもてない。今後のエネルギー資源に対する期待は古くて新しい課題である原子力と太陽、すなわち人工の原子力と自然の原子力の直接利用に将来を期待せざるを得ない。

又、将来の社会形態が現在の延長のように一極集中あるいは都市集中型となるのか、他方分散型になっていくのかによっても対応は異なって来ると思われるが、前者には原子力が、後者には太陽が本質的に適応しやすい。しかし双方ともそれぞれ分散型、集中型のエネルギー源への転換を計るべき技術開発を行って相互乗り入れ可能にしていくことは必要である。

21世紀以降のエネルギー源の理想系は、

1. 半永久的なエネルギー源であること
2. エネルギー変換効率が全体として良く、熱公害の程度が低いこと
3. 廃棄物量が少なく、環境に対するインパクトが小さいこと、あるいは原則的にシステム内部で処理が可能なこと
4. 安全性が高く、不安定運転による事故の影響が無視できること
5. 般用性が高く、多目的に利用できること
6. 総体として社会受容性が得やすいこと

2. 整合性のある原子力開発

2.1. 中性子の役割

軽水炉による原子力発電は宇宙創造の初期に作り出された小さな宇宙の代表ともいえる中性子が人類社会にもたらした恩恵であろう。中性子が切り拓く世界での最初の具体的成果だと言える。

しかし自ら整合性を持つ原子力システムは軽水炉とそこから出て来る使用済燃料の再処理の組み合わせだけでは望めない。軽水炉は軽水炉のような材料選択と空間配置を採れば小さな宇宙の原子核の中にひそむエネルギーを人間生活に必要なだけ取り出しうることを示し、しかも安全に安定して取り出せることを実証したわけである。しかし軽水炉は小さな宇宙の持つ能力を精一杯発揮させたのではなく、目的をエネルギーの安定した取り出しにしぼったものである。

原子力開発の整合性を追求するには小さな宇宙の代表である中性子に充分能力を発揮させることが必要である。

中性子が支配する原子核反応をつぶさに見ると整合性につながる現象が見えてくる。これまでも部分的にはその方向での研究開発が進められて来ている。

2.2 核分裂の連鎖反応とエネルギー生産

核分裂によって出て来る2~3ケの中性子は周囲の原子核と反応したり、外部に逃げてしまったりするが核分裂を連続して起こすには最低1ケの中性子が次の核分裂を起こす必要がある。今、核分裂の連鎖反応が時間的に一定している状態を臨界と呼んでおり、原子力開発の第一歩は臨界が実現できる装置すなわち原子炉を作り出すことにあった。中性子が他のものに吸収されて核分裂に寄与しなかったり、あるいは外部

に漏れ出て核分裂に寄与しなかったりすると臨界にならない。前者は原子炉を構成する材料に関係し、後者は原子炉の大きさに関係する。原子炉は材料の選択とその空間配置さらにその大きさによって決まる。エンリコ・フェルミはこの臨界問題を一挙に解決してシカゴパイル1号を作った。今年で丁度半世紀過ぎたことになる。核分裂の連鎖反応が継続する臨界状態ではエネルギーは自然に出てくる。この条件を満足しながら発生するエネルギーをいかに効果的に利用するかがエネルギー利用の目的である。

2.3 整合性における余剰中性子の役割

2.3.1 新燃料生産

整合性を確立する上で臨界を維持する中性子以外のいわゆる余剰中性子の役割は原子力システムの付加価値を高める上で重要である。それは新燃料生産、放射性物質の転換、安全の確保に振り向けられる。

中性子は電荷を持たないのでいろんな原子核と反応することが出来る。その中で中性子を吸収して元素が変換し、原子炉の燃料となるものがある。普通には核分裂を起こさないウラン238とトリウム232である。ウラン238は中性子を吸収してプルトニウム239にトリウムはウラン233になる。このような元素の転換によってエネルギー資源を確保しようとしている。現在の世界のエネルギー需要を1Qとして、この需要が将来もそれほど拡大しないとして何年供給できるかを考えるとウランは海水中のものを利用できることを前提にすれば百万年程度、トリウムは数千年の資源量がある。原子力は数十年のエネルギー供給

のために負の遺産を後世に永く残すという反対論はこの元素転換でプルトニウム生産を実用化することで解消することになる。無駄に浪費しないで大切に使いえば十分エネルギー資源はあることが分かる。化石燃料の石炭で数百年だから、原子力に対する期待は大きいといえる。これを可能にするのが臨界維持用の中性子を除く1~2ケの余剰中性子である。実は現在の軽水炉でもウラン238の転換は起こっている。軽水炉では2回の核分裂で1個のプルトニウムが生まれる程度で燃料生産の兆しはあるが、ウラン238をすべてプルトニウムに変えることは出来ない。

さて、1回の核分裂で1ケ以上のプルトニウムが出来るようになればウラン238はすべてプルトニウムに転換出来る。これを増殖と呼んでおり、これが出来る原子炉のことを増殖炉と呼び中性子のエネルギーが高いほど核分裂で出てくる中性子の数も多く利用価値があることから増殖は高速増殖炉で実現される。トリウム232からのウラン233生産は熱中性子でも増殖の可能性があるので、資源の有効利用の立場から熔融塩炉や高温ガス炉に応用しようという試みがあるが、プルトニウム利用の高速増殖炉ほど具体的な開発段階には至っていない。余剰中性子のうち最低1ケの中性子を燃料生産のために使うことが整合性確立のために必要になる。

核融合炉でも増殖は必要になる。今開発を進めている重水素と三重水素を燃料とする核融合炉を考えると三重水素は天然にないので例えばリチウムに中性子を吸収させて三重水素を作る。この中性子は核融合反応で生まれたものだが、核融合反応では一

回の反応で中性子は1ケしか生まれぬから増殖が出来ないので中性子の数をふやす反応を追加したシステムを考慮しておく必要がある。このように人工の原子力では中性子の役割は重要である。

新しい燃料の生産に関しては増殖型のもの自立型のものと考えられるが、現在想定されているのは軽水炉と高速増殖炉の併用期間が長期に亘るとの前提で全体のエネルギー供給の中で原子力の比重が次第に高くなることを考え、増殖型のもを前提にしている。高速増殖炉では核分裂あたり1.2~1.5ケ程度のプルトニウムが生産され、エネルギー供給と燃料生産が同時に行われる。

更に将来、非成長平衡社会が実現すると燃料の消費と生産が均衡すれば良いことになり理論的には増殖比は1で良いことになる。軽水炉ではこの値は1にはならない。高温ガス炉では1に近い値に出来るほか、トリウムを使ってウラン233の増殖比を1からもう少し大きくできる期待がある。1回の核分裂で出て来る中性子の数が3ケにもなる高速増殖炉をこの目的に用いるとまだ中性子に余裕があるので、自由度が増え放射性物質の消滅処理等を積極的に行う事ができる。

2.3.2 放射能消滅

放射性物質の転換あるいは非放射化の問題で、ジョージ・ガモフはその著書の中で核分裂によるエネルギー供給で最も問題になるのは原子炉の中で生まれる放射性物質の扱いであるといささか否定的ニュアンスで書いている。たしかに原子力開発の整合性を確立する上でおそらく最重要課題と考

えて差し支えない。

放射性物質は十分な時間があれば放射線を出し、他の元素に転換し、最終的には放射能のない非放射性物質になる。放射性物質の崩壊系列を見るとこの様子のはっきりする。しかしその時間が何万年にもなるのであれば、あまりにも永すぎて待てない、あるいはその間になにが起こるかを予測出来ないと言うことになり、環境から完全に隔離することが果たして可能かと疑問を感じることになる。

現在軽水炉の使用済み燃料から出る高レベルの放射性物質の取扱いについては、一つには形態的に非常に安定したガラス状にして深地層処分を行うという考えがあり、高レベル廃棄物をガラス固化体にする技術開発が進められている。しかしより抜本的な方法として実効的に放射性物質の寿命を短くして人間が管理できる時間のうちに非放射性物質に転換することが考えられている。事実軽水炉の中でも放射性物質が中性子を吸収して非放射性物質に変わっている。燃料の転換の場合と同様、この非放射性物質に転換される時間の短縮化を積極的に計るのが「放射性物質の消滅・処理」と呼ばれる分野である。

現在高レベル廃棄物と呼ばれる放射性物質は大別するとウラン235の核分裂によって生まれた核分裂生成物のうち半減期の永いヨロソ129とテクネチウム99とウラン238が中性子を吸収してできた超ウラン元素でアクチノイドと呼ばれるものである。その代表的な元素はプルトニウムである。このうちアクチノイドについては、現在地球上で自然界にこのような元素が見当たらないのを見ても分かるように、不安

定で核分裂を起こす可能性を持っている。従ってこれらの元素は燃料の中に分類してプルトニウムやウラン233と同様の扱いをするのが整合性の確立の観点からは整理しやすいと考えている。付加価値がある元素を廃棄物に分類するのは馬鹿げている。アクチノイドは全体として燃料に分類して原子炉の中で燃やすことにして従来の考え方を超える事が必要である。従って超ウラン元素は原子炉の中で燃やすことを前提に、又、核分裂生成物は中性子を吸収させて半減期の更に短い元素か或いは放射性でない元素に転換することを考えて整合性のある原子力システムを開発していくことが望まれる。

放射性物質の消滅あるいは放射能減衰時間の短縮については未だこれといった実用的な技術は開発されていない。原子炉の中で一回で核分裂・増殖・放射能消滅が同時に実行できる可能性はあまりないと思える。従って現在の技術の延長を考えれば、使用済み燃料を処理して消滅すべき放射性物質を取り出すプロセスが必要になるであろう。これを群分離と呼んでいる。これは目的とする放射能を消滅する一方で他の元素が中性子を吸収して放射性物質にならないようにするために該当する放射性元素のみをいかに高純度で選別していくかが重要な技術開発課題になる。

2.4 安全確保

最後は基本となる安全の確保になる。核分裂炉の安全の基本は連鎖反応の臨界条件の維持から出発する。臨界条件を変えようとする外乱が加わった時に原子炉を安全な状態に導くのが安全の基本である。

核分裂炉の安全の第一歩で最も本質的なことは超臨界状態を安定に臨界状態に導く作用を原子炉の固有の性質として備えていることであり、更に必要な場合に原子炉を「止める」ことである。「冷やす」ことはそれに続くものとして重要である。臨界維持に一つの核分裂中性子を使用した残りの中性子が核分裂に寄与すると臨界超過の状態に至る。従って出力の上昇あるいは原子炉内部で出力上昇の結果生じる事象によって余剰中性子が核分裂に寄与することを防止することになる。自ら整合性を有する原子力システムでは、エネルギー生産、燃料生産および放射能消滅の機能を併せ持った原子炉が出力の変動に対してネガティブフィードバック特性、すなわち出力が上昇しようとするのを自らの能力で抑止する自己制御性を備えていることが要求される。

更に将来原子力を太陽と同じように分散型のものとするには小型で、安全に関しては「止める」必要も「冷やす」必要もない固有安全炉を建設運転することが望まれる。水力発電も最近では遠隔自動制御で無人運転を行っている。原子炉は小型とは言え、いきなり無人運転を期待するのは社会的に容認されにくいかもしれないが、固有の安全性に加えて先端制御技術を駆使すれば小型、無人原子炉が将来社会に定着することになるだろう。このような小型の分散型原子炉は必ずしも現在の大規模原子力システムのように技術の裾野を必要とせず、世界のどこにでも設置可能となり、エネルギーの南北問題の解消にも貢献することになると期待される。

理想的な整合性のある原子力システムの一つは天然ウランを供給すれば原子力シス

テムが安全を確保しながら上に述べた機能を果たして結果として有用な元素を外部にもたらす自立型の原子炉である。

以上を全体としてみると整合性ある原子力システムを確立するのは中性子をうまく配分して要求される機能全体を発揮させることである。このためには中性子の積極的有効利用が重要でシステム外に逃れ出る中性子、合目的な吸収以外に中性子の浪費を防ぐこと、このような発想で原子力システム全体を見直す必要がある。今迄個別にはこのような問題を考えてきたが全体を同時に考える段階にきている。

更に場合によっては加速器の助けを借りることも考えられる。加速器を補助的に使うことによって中性子の供給を受ける上、臨界問題がなくなるので、効果的かと思える。更に核融合炉が中性子の豊富なシステムになることから、核分裂と組み合わせた核分裂-核融合ハイブリッドシステムによって整合性を計ることも考えられる。

3. おわりに

現在実用化された、あるいは開発中の原子力システムで自ら整合性を持つといえるものは残念ながら未だない。高速増殖炉がそのアプローチ線上にあって近いと思えるものの安全性と経済性について簡単なシナリオで語る段階には未だ至っていない。現在はハイテクの進展や、安全論理の変革や、経済性、社会受容性、環境適合性に対する見方から必ずしも従来の大型高速増殖炉に解を求めるだけでなく、多くの革新的高速増殖炉のアイデアが次々と提案される時代を迎えている。

核分裂によって生まれる中性子の数が軽水炉並だと整合性は期待出来ないが、逆に2倍あれば殆ど問題なく、エネルギー供給は何の問題もなく整合性を持つことだろう。現在の高速増殖炉ではすべてを解決することは必ずしも容易ではない。しかし他のエネルギーシステムから見れば整合性に対して一番正解を出すのに近い位置にあるといえる。21世紀に人類の英知がここに注がれて正解を導き出すことが期待される。

21世紀はエネルギー供給の面で原子力が定着する時代だと考えられる。自然の原子力と人工の原子力、いずれも人や環境と良く調和したものでなければ容認されにくくなる。自然の原子力は、太陽光線の直接利用に向けられることは確かだし、人工の原子力は、核分裂、核融合いずれも自ら整合性のあるものでないと社会受容性を持たないであろう。整合性確立へ向けて萌芽的研究から開発研究へ着実なステップでの歩みがすでに始まっている。