

IV. 自ら整合性を持つ原子力システム

東京工業大学 藤 家 洋 一

1. エンリコ・フェルミの功績

エンリコ・フェルミがシカゴ大学のスタグフィールドの片隅で、世界で初めて核分裂連鎖反応を実現してから今年で半世紀になる。

学生の頃、フェルミの原子核物理学を読んで受けた感銘は、ディラックの洗練された量子力学の本に接したのと双璧であった。ただCP-1を製作して連鎖反応を実現したことより、原子核に関する業績の方に、より関心が深かったのはその当時の私の興味によるものであろう。

原子力分野でCP-1がなかったらという仮説は無意味だが、エンリコ・フェルミの業績は、なんととっても極微の世界の現象を科学技術の世界に持ち込むきっかけを与えてくれたことだといえよう。小さな宇宙の代表で、宇宙創生の際に創り出された中性子が人類社会にもたらした最初の貢献だった。

核分裂反応に際して、エネルギーが放出されることは当時すでにわかっていたから、CP-1が完成し、連鎖反応が安定に行われた時、すでに原子核エネルギーの解放が技術の世界で実現し、人類のエネルギー源として利用できることが約束されていたと考えて差し支えない。これはまさに画期的なことで、核分裂反応の発見が小宇宙での事実の発見であったのに対しては格段に違いのあることと理解される。

小さな宇宙のエネルギーは巨大だといっても、技術の世界、日常生活でのエネルギーからみれば小さく、人類社会でのエネルギーとして利用するには単位時間当たり大変な回数の核反応を必要とするので、個々の反応を制御することは不可能で、全体を集団として制御すること以外に方法はない。例えば1 g/sの²³⁵Uを全部反応させるには、1兆の25億倍の回数の核分裂が起ることになる。このため宇宙はその創造時は別にして、大きな星を作って大きな器の中で自然にゆっくりとエネルギーを取り出している。太陽の核融合は出力密度が1 W/m³と低く、また中性子が陽子に転換する反応を含んでいるため非常にゆっくりと起っている。

地上の原子力は、いかに狭い空間で高い出力密度

のものを実現するかにあり、核融合研究の目指す方向でもある。

CP-1の出現は、そのまま核エネルギーの取出しが人類の科学技術の限界を大幅に越えることなくできることを示し、事実軽水炉の実用化によって実証された。

軽水炉は星と比べれば全く小さなものだが、出力100万kWeの発電炉はその大きさが直径4m、高さ4m程度の円筒状の空間で達成され、年間1兆の25億倍のさらに100万倍もの回数の核分裂が安全に、安定に起っていることになる。

エンリコ・フェルミの業績は核エネルギーの取出しが可能なことと、その量が充分人類社会のエネルギーをまかなう程度であることを一気に証明したことにあるといつてよい。

1970年になって、オクロ鉱山で自然の核分裂炉の痕跡が発見され、自然界の狭い空間でも核エネルギーが取り出されることが認められたが、このことによってフェルミの功績が減じられるものではない。むしろエンリコ・フェルミ以後、人類は原子力の持つ多くの付加価値をどれだけ利用できるようにしたかを考えると、それは未だほとんど可能性の中に、科学の中に残され、技術化さらには実用化は足踏み状態といつて差し支えない。原子力開発はむしろこれからが重要になるといえよう。

2. 整合性の要件と余剰中性子配分

熱力学的にいえば、地球は閉じた系であり、エネルギー的には開いているが元素の循環は閉じている。この地球で21世紀のエネルギーシステムが満たすべき条件は、次の4点にまとめられよう。

- (1) エネルギーの汎用性と高効率利用
- (2) 長期に亘る資源の確保
- (3) 有害物質の管理と処理・処分
- (4) 安全の確保

この4条件を同時に満たす原子力システムを自ら整合性のある原子力システムと定義することにする。もちろん現在、そのようなシステムは化石燃料を使ったシステムにもない。しかし、核分裂の連鎖

反応の特徴を生かして、整合性へ向けての検討が始められている。

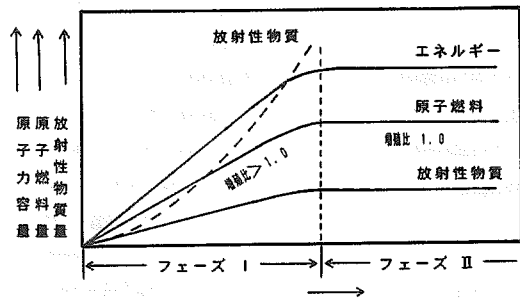
核分裂の連鎖反応の最大の特徴は、その反応維持条件が中性子の数のバランスで決定されることで、化石燃料や核融合燃料の反応維持条件がエネルギーバランスで決定されることと基本的に違っている。このため核分裂連鎖反応の維持条件を決定する方程式が齊次方程式となり、臨界条件と出力が必ずしも 1 : 1 の対応関係にない。このことは中性子の数のバランスがとれば、エネルギーは自然に放出されることを意味している。

U 資源からのエネルギーの安定した取出しは、すでに実用化の段階に入っているものであるが、核分裂反応によって放出されるエネルギーは生成粒子(核分裂生成物)当たり 100 MeV 程度と高く、温度換算するまでもなく、本質的に利用価値の高いものとなりうる可能性を秘めている。

現在 CO₂ の温室効果が環境保全の観点から問題とされているが、これは間接的な熱公害である。世界人口の爆発的増大が予想されている来世紀に直接問題化することは不可避と思われる。このため、エネルギー変換効率の飛躍的向上と人口の集中化を抑制するための分散型エネルギー源とが原子力システムに期待されることである。

連鎖反応の維持に直接関与しない中性子は、周囲物質と反応して元素の転換・変換に利用できる。原子力発電が実用化している現在、整合性のある原子力システムに対する最小限の要求は、中性子の数のバランスを中心としてその付加価値を高めることに向けるのが適当と思われる。この付加価値は当面、原子燃料の増殖と放射性物質の核変換とであろう。将来、核エネルギーがエネルギー供給の主軸となりかつ社会が成長社会から非成長社会に移行することを想定すれば、エネルギー需給の展望を、第 IV-1 図のように想定することも可能である。さらに原子力システム全体が保持する放射性物質の量についても図のように想定することができよう。

第 1 フェーズの増殖の要求は第 2 フェーズでは他の目的に変更でき、原子力システムの全体的物質バランスあるいは錬金術に利用することも考えられる。このようなシナリオによれば、核変換の直接対象となる放射性物質は TRU と核分裂生成物とであり、前者はその性質からいって直接または核変換によって核燃料物質としての再利用を図ることが期待



第IV-1図 整合性のある原子力システムでのエネルギー供給量と燃料放射性物質量

される。Puはその代表であろう。また核分裂生成物のうち半減期の長い元素(⁹⁹Tc, ¹²⁹I)や放射能強度の高いもの(⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs)などが、核変換の対象候補と考えられている。

自ら整合性のある原子力システムは、その目的を達成するためのサブシステムの集合と考えられ、システム構成のためには適切な物質(材料)の選択とその空間配置が必要である。前者は、燃料を中心とした燃料サイクルを通じて準備調整され、後者によって炉心構成が行われることになる。

整合性のある原子力システムでは、その目的達成のために中性子の積極的利用が図られることになる。このため、高速中性子の役割が大きいものとなる。高速中性子による核分裂では核分裂中性子の数が多いのに加え、TRUの α 値(吸収と分裂の比)が小さいこと、また質量数の大きいアクチノイドの生成が少ないことなど、熱中性子に比べてはるかにポテンシャルが高い。しかし、核分裂生成物の中には熱中性子との反応の方が合目的なものもあり、システムはその一部に熱中性子の役割に期待する部分も含まれることになる。

核燃料資源として、対象は海中のUの転換までとするのが妥当で、これによって100万Q(1Q=300兆kWh)程度となり、現在の世界のエネルギー消費で100万年程度の資源量となり、人類の文明の歴史からみて充分なものといえよう。

3. 放射性物質とCO₂

放射性物質の発生しない原子力システムを期待することはほとんど無意味である。これはちょうど化石燃料の燃焼でCO₂の発生が不可避なものと似ていて、エネルギー生産の代償として生成されるものである。

自然界のCO₂と放射性物質はいずれも地球の歴史と共に減少してきたが、人類が火を利用し、動力を開発利用する中で、化石燃料や原子力等技術系のエネルギーを大量消費してきた結果、特にCO₂については減少傾向に歯止めがかり、局所的には増大の方向に転じている。これは地球の物質の循環に影響を与えることになる。特に生態系の物質循環の重要元素である炭素が含まれているだけに、CO₂問題は深刻である。CO₂の還元反応は、これまで自然界で植物の光合成によって行なってきたものであり、これを太陽によらず技術系で代行して循環を閉じようとするのは、エネルギー的に意味がないのはいうまでもない。

これに対して原子力システムで問題となる放射性物質には、生態系での物質循環を支配する元素はなく、また、放射性物質をシステム内部に保持する技術は、これまでの原子力発電でも行われてきたことである。

さらに、放射性物質の核変換は核分裂で発生する余剰中性子の一部を利用するものであり、エネルギー的には充分成り立つ可能性を持っている。ここに物質循環の上で原子力システムが環境適合性を持ち、整合性を持ち得る根拠がある。原子力システムでの放射能の消滅によって、原子力システムの保持する放射性物質の量は、原子力の利用とともに積分的に増加することにはならず、エネルギー発生量に関連した平衡値に近づくことになる。

自ら整合性のある原子力システムの満たすべき前記(1)~(4)の4条件の同時成立性は、余剰中性子の配分の仕方ではチェックされる。すなわち臨界の維持に1個、燃料の増殖に1.2~1.5個、放射性物質の核変換に0.5個程度を考えれば、核分裂中性子の個数が3個近くあれば、充分整合性のある原子力システムの構成が可能であると考えられるが、これらの3条件を満たしながら、同時に安全が確保されることが重要である。

4. 整合性の要=安全

核分裂炉の特徴からみれば、安全の問題は核分裂の連鎖反応に直接つながる臨界に関連したものと、崩壊熱除去や冷却に関連したものとなる。

臨界関連は、現象の速さの点からも整合性のある原子力システムでは、システムが本来的に備えている固有の安全上の特徴や自己制御性によってコント

ロールされ安全が確保されることが望ましい。臨界に関連した異常事象に対して固有の耐性を備えていることが要求される。整合性を持つ原子力システムの安全確保を、このように核分裂の連鎖反応に直接関連した部分を第一義的にとらえれば、これは明らかに中性子の配分問題そのものになり、整合性を持つ原子力システムの満たすべき4条件は、中性子の合目的配分によって総合的にその達成可能性が評価されることになる。

核分裂中性子は通常運転時において臨界維持、増殖、放射性物質の核変換の役割を果たすほか、構造材等による寄生吸収やシステム外への漏洩等もある。このような中性子配分が異常時にどのように崩れて核分裂への寄与が増大するかを明確にし、超臨界状態の出現を抑制して安全な状態に導くのが安全の目標で、全体の要として位置づけられる。

異常時や事故時の臨界維持に寄与する中性子配分を減らすために中性子のスペクトル硬化による反応度増大を抑制したり、漏洩や寄生吸収が増大することを固有の特性の範囲で可能にすること⁽¹⁾等も考えられている。制御棒挿入は異常時に寄生吸収を増大させる方法であるが、これを固有の特性の範囲で可能にしたり、あるいは漏洩を増大させることも提案されている⁽²⁾。さらに積極的に炉心構成をこの観点からとらえなおし、固有の安全特性、固有の耐性に対する条件を設定することが望まれる。

5. 整合性ある原子力システムへのアプローチ

高速中性子を利用するシステムとして、核燃料生産を目的とした高速増殖炉は夢の原子炉と呼ばれ、世界の4極は当初こそって開発に着手した。これは軽水炉の実用化に刺激され、その経験と開発路線を継承した多くの概念の中から、一時Na冷却、MOX燃料、大型炉路線が各国で定着するかに見えたが、大型技術開発の難しさからか米国のCRBRが建設中に中止になるほか、Puの拡散防止の観点もあって、米国では増殖の概念が通用しなくなった。フランスは、Rapsodie, Phenix, Super Phenix-Iと世界の先駆的役割を果たしてきたが、SPX-IはNa火災対策不足とPhenixでの反応度異常といわれる事象等のため運転再開の目的が立たなくなり、開発が遅れている。旧ソ連のBNシリーズも着々とスケールアップを計ってきたが、Na火災等も経験し、現

在計画は中断状態と理解される。日本だけは「もんじゅ」の臨界を 1993 年に意図しているほか、1990 年代の後半に実証炉の建設を予定している。日本の高速炉技術が課題を克服することを世界が期待している。

このような大型高速増殖炉計画に対して、整合性を持つ原子力システムへのアプローチ線上にあると思われる概念設計やシステム研究が世界の諸機関で行われている。原子炉と燃料サイクルをセットにしたもので、増殖よりも放射性物質の核変換に焦点をおいたものとして ANL の IFR 計画がある。金属燃料を使い、乾式再処理装置とのセットで全体システムが集約されたものとして注目を浴びている。原子炉としては、例えば GE 社の PRISM がその候補の 1 つといわれ、小型炉としての安全上の特徴を發揮しようとしている。この計画は DOE (米国エネルギー省) の援助を受けながら世界的な広がりを見せようとしている。これに対して旧ソ連、現ロシアでは BN 計画の再建とは別に、Na 使用の不安解消や固有の安全を目指して鉛冷却の高速炉の開発が進められているが、その内容は近い将来明らかにされると期待される。

高速炉で増殖とアクチノイドを中心とした放射性物質の核変換を同時に行うことは充分可能なことである。ただやさしい安全論理を使って安全を説明する上では、さらに研究開発が必要である。特に物質移動に関連した炉心での再臨界を防止する方法が望まれる。この再臨界回避の方法はいくつか考えられるが、具体的な設計例は未だない。

このように原子炉と燃料サイクルを中心とした組合せで整合性のある原子力システム概念を構築していくことが経済的にも技術的にも望ましい方向と考えられるが、代替案も当然検討されるべきである。

臨界に直接関連した安全問題を本質的に避ける試みとして、未臨界状態の核反応システムに中性子源を持ち込むことで同様の目的を達成しようとする試

みがある。中性子供給の仕方は、加速器によるものや核融合システムによるものがある。

前者は、加速された高エネルギー荷電粒子の反応によって中性子を大量に作り出し、同時に未臨界の核分裂システムの中で中性子の増倍を計るもので、この基本となる考え方は古く、BNL で U 資源が未だ充分発見されていない段階で Pu 燃料を作ろうとしたことに端を発する。

また DT 反応の核融合システムは、エネルギー収支を計ることに開発の中心課題があるが、本来中性子の豊富なシステムなのでその中性子を積極的に使い、エネルギー生産や核分裂燃料の生産に貢献させようとするものである。これらは臨界に直接関連した安全から逃げられるところに特徴があるが、高速増殖炉とは異なる開発上の問題や経済性、信頼性の問題があり、近い将来その本質的特性を中心に多面的比較研究が必要と考えられる。

6. おわりに

21 世紀のエネルギー源はこれまでと違って多くのことが要求されることになるが、自ら整合性のある原子力システムはそれに充分応えられる可能性を持っている。軽水炉の技術開発に続いて、総合技術としての原子力開発を地道に続ける一方で、このような整合性の論議を展開し、核分裂反応の多くの特徴を生かしながら充分安全が確保できる原子力システム概念を社会に提示していくことが望まれる。

— 参考文献 —

- (1) FUJIE, Y. : An approach to self consistent nuclear energy system ; Potential of fast reactors, *Proc. Int. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants, Tokyo, Oct. 1992, (ANP'92)*.
- (2) MATVEEV, V. I., *et al.* : Physical grounds for further improvement of fast sodium power reactor safety, *Proc. Int. Fast Reactor Safety Mtg., Snowbird, Aug. 1990*.