

整合性のある原子力システム

藤家洋一

－資源確保と環境保全の同時達成は可能か?－

1 「整合性のある原子力システム」って何ですか?

天然原子炉は水の沸騰と凝縮を使って核分裂の連鎖反応を固有の安全性に頼って制御、80 万年の長期運転、放射性物質の格納および放射能自然消滅など、燃料の増殖を除いて今後の原子力システムが満たすべき方向と方策を与えてくれます。ここでは「整合性のある原子力システム」として核分裂反応の持つ固有の特性を生かしながら、資源の完全リサイクル使用と有害物質を環境に出さないゼロリリースが同時に達成できる核分裂エネルギーシステム概念を提示します。あえて社会的表現をとるとすれば「資源確保と環境保全の同時達成」として理解できます。図 1 はこれを機能別に表現したもので、核分裂反応が持つ能力の範囲すなわち核分裂反応で開放される約 3 個の中性子と約 200MeV のエネルギーを使うことでこれが科学的にどこまで達成可能か考えましょう。

1)整合性のある原子力システム

整合性のある原子力システムとは 5 つの機能、すなわち

1. 電気や水素エネルギーのような良質のエネルギーを生みだし、(エネルギー生産)
2. プルトニウムのような長期に渉る燃料資源を生産し、(燃料生産)
3. 放射性廃棄物の放射能を消滅あるいは隔離し、(放射性廃棄物の隔離または非放射化)
4. 原子炉を止める、冷やす、さらに放射性物質を閉じ込めることで安全を確保出来、
5. 核兵器に転用しにくい、核拡散抵抗性のある燃料を生産する。

を満足する原子力システムとここで定義しましょう。この議論で最初は核不拡散の議論は抜いていましたが、まだ世界は完全に核の脅威から開放されていないと考え、またこの機能が核燃料の性格を変えることでほかの 4 つの機能と同じ視点で捉えることが出来ると分かり、5 つの機能を同時に扱うことにしました。図 1 では 1 と 2 を資源確保につながる機能として、3、4、5 を環境保全につながる機能として表現しています。

これらの 5 機能を同時に満足する原子力システムを、「自ら整合性のある原子力システム」と呼ぶ事にしますが、略して SCNES (Self Consistent Nuclear Energy System の略) と呼ぶことにしましょう。このシステムを現在原子力分野で期待されているシステムや機器システムで言えば、高速炉が中心的役割を果たし、加速器やレーザーなどの原子力を代表する装置が動員されることになるでしょう。またレーザー利用とともに燃料サイクル、再処理などの言葉で表現されていますが、これらに応用されてきた化学装置などももちろん動

員されます。これらの新しい技術展開については5 革新技術の導入でお話します。

2) 資源と環境

最初にエネルギー資源について触れておきますと、文明を長期にわたって少なくとも100 万年支えるためには、資源があるだけではなく、環境との折り合いのよさを考えておくことも大切でしょう。これまでたとえば原始時代に太陽エネルギーの利用で数百万年過ごし火の発見と利用で切り拓いた化学エネルギーの時代を百数十万年すごしてきた人類が化石エネルギーの利用にいたって、質量ともに豊かな資源利用の世界を実現させましたが、わずか200 年足らずで、化石エネルギーの大量利用がもたらす、資源確保、環境保全両者に対する難しい課題に直面して、次のエネルギー源を求めることも課題になりました。この半世紀を越す研究開発および実用化を目指してきた核反応に依存する文明を考えたとき、そのエネルギー源としては、やはり核融合エネルギーの利用が具体化するまでは、海洋に眠るウランを中心にした核分裂エネルギーに求めるのが賢明と思われれます。陸上のウラン資源の使用も重要ですが、現在のような利用形態では数百年の資源と考えるほうが無難でしょう。それより、海中に眠るウラン資源やトリウム資源に着目し、その量40 億～50 億トンに挑戦することを考えましょう。これで100 万年の資源との考えが現実味を持つこととなります。その場合も現在議論されているように軽水炉利用では効率も悪く、高速炉に頼る以外にないで、しょう。この章ではシステムを中心とする核分裂炉は高速炉を考えています。

3)自然との調和、文明との調和

自然との調和、文明との調和を求めて原子力の研究開発そして応用があるのです。科学技術の研究開発は、理想の姿を科学的可能性の追求によって明確にし、あるべき姿へ向けて一步一步近づいて行く努力なのです。時間はかかりますが究極の姿を明確にし、長期展望の上に立って進めることが大切です。

もちろん現実決して明るいばかりではありません。社会的には安全性と経済性が要求されています。経済性を追求すると安全性がおろそかにされると言う人がいますが、両者が両立しないとの考えには賛成出来ません。原子力に限らず安全でないものは経済性も持てなくなるのが科学技術の特徴で、今回の東電福島第一原子力発電所事故が如実に示しています。事故を起とした後で補償すると言うのは許されなくなるでしょう。長所追求型でなく、むしろ調和の取れたバランスを大事にした開発理念がより評価されるべきことが今度の東電福島第一原子力発電所事故でも確認できたのではないのでしょうか。その意味では原子力の安全思想は時代に先行しています。原子力システムの設計、建設、運転に先立って安全性を確認する、安全審査と呼ぶ事前評価が施設ごとに行われてきています。少なくとも原子力安全の基本である放射線災害を防止することには実績があります。原子力はこれまでも安全を最優先しながら経済性を追求しているのです。

もちろん、新しい科学技術があるべき姿に一気に到達する事は出来ず、地道な努力を重ねるのが技術開発の正道です。巨大技術については特にそう言えます。プルトニウムの軽水炉利用もリサイクル燃料の中間貯蔵も再処理も、また地下埋設の研究もあるべき姿へ向けての途上にあると考え、理解したいものです。巨大システムは扱う範囲が広いため時間がたつにつれて個別技術の中には開発の進捗状況に差が出てくる場合もあります。との違いは長期展望の柔軟性の中で吸収して将来にバランスのとれた総合化を図っていききたいものです。

原子力を単に技術に特化することなく政治、社会、経済、外交などを含む広い観点から論議できる様にしたいものです。

2 整合性のある原子力システムの科学的成立性

1) SCNES は科学的概念

ここでいう「整合性のある原子力システム」(図2)は科学的概念です。自然や人類社会と調和でき、将来に夢を持たせる原子力システムのあるべき姿なのです。単に願望でなく科学的概念というからにはその成立性については証明が必要です。「整合性のある原子力システム」の科学的成立性は核分裂反応の持つ能力の範囲で証明されなければならないことは言うまでもありません。

SCNES の持つ 5 つの機能が核分裂反応で出てくる約 3 個、正確には平均 2.9 個の中子と同時に解放される約 200 MeV のエネルギーを使って達成できることを言えば科学的証明といえるでしょう。「整合性のある原子力システム」とは、曲がり角を迎えた化石エネルギーに依存した文明が資源確保と環境保全の同時満足が出来ない宿命を負っているのに対して、その課題を解決し、同時に原子力の今日的課題を自ら解決しうる可能性を持つ原子力システムと言うこともできます。

これはエネルギー生産の際の反応生成物である炭酸ガスを 100%放出することが実態であった化石エネルギーシステムとは明らかに異なる原子力エネルギーシステムの導入です。ここでは反応によって生まれた放射性物質を環境に放出しないことを原則にしています。ゼロリリース(放射性物質の無放出)の原則を導入した原子力システムといえるでしょう。原子力ではこれまでも放射性物質を閉じこめて環境から隔離する事を原則としてきたのですが、「整合性のある原子力システム」はより本質的な放射能消滅を考えた概念です。このような展開のなかに石油文明に代って原子力文明という言葉が定着する期待もあります。石油文明よりさらに根源的なマイクロな世界を含む原子力文明が調和を目指して 21 世紀に主要な役割を果たせるように期待しましょう。

原子力システムはすでにお話しましたようにエネルギー生産に関わる物質の量が化石エネルギーの場合に比べて圧倒的に少ないといえます。取り扱うべき物質量が極少量で、あ

ることがゼロリリースの原則を導入できる可能性を大きくしています。ちなみにウラン 1 グラムをすべて核分裂反応によってエネルギーに変換しますと石炭の 2 トン半に対応します。

250 万倍のエネルギー源になっているのです。廃棄物もこれに習って求めますと放射性物質は約 0.2 グラムであるのに対して炭酸ガスは約 10 トンになります。もちろん廃棄物としての毒性は放射性物質の方が圧倒的に高いことは当然考えておかなければなりません。(図 3 化石燃料と核燃料の量の比較)

化石エネルギーシステムでは反応生成物である炭酸ガスと水のうち、水は自然環境に豊富にあり、特に影響が有るわけではないので議論の対象にはしません。水と違って大気中の炭酸ガス中の炭素は特に自然界の物質循環のキーとなる物質です。

しかし、化石燃料の燃焼によって出来た炭酸ガスはこれを再び炭素と酸素に戻すには外部からエネルギーを供給することが必要です。このエネルギーをどこに求めるかですが、別の化石エネルギーに求めるのでは意味がありません。結果として正味のエネルギーが取り出せなくなるからです。一方原子力で炭酸ガスに対応する放射性的核分裂生成物は自然に放射能を失って行きますが、一方で中性子と反応して放射能のない物質に変わります。この辺は化学反応と核分裂反応の基本的性質の違いです。少々分かりにくいかも知れませんが、原子力の場合、核分裂反応で出て来る複数の中性子が重要な役割を果たすのです。「整合性のある原子力システム」のような理想のエネルギーシステムが存在しうるかどうかの科学的証明は、核分裂反応で出てくる中性子の数と核分裂で出てくるエネルギーの範囲で 5 つの機能が発揮できるかどうかを検証することになります。

2) SCNES の科学的成立性の証明: 核分裂反応の能力の範囲で出来ること

核分裂反応が持っている能力は反応で出てくる約 3 個の中性子と約 200MeV のエネルギーです。核分裂あたり解放される 200MeV というエネルギーの量は 1 グラムのウランあるいはプルトニウムが核分裂した場合に換算すると 1,000 キロワットの熱を 1 日出し続けることに対応します。この二つの能力を適切に使って整合性がどの程度達成出来るかが評価対象となります。それほど難しい話しではありません。

ここでは「整合性のある原子力システム」の科学的成立性についての話を計算した結果を図や表を中心にお話しましょう。専門的知識なしには理解しにくい内容ですが、結論はリサイクルとゼロリリースの原則が、核分裂反応の持つ能力の範囲で科学的というか原理的には成立します。ここでの証明はエネルギーが足りるのか、中性子の数が足りるかに絞って証明し、いずれの場合も条件を満足したものについてシステムを構築しています。

イ. エネルギーバランス

中性子の役割はまず核分裂の連鎖反応を継続すること、即ち臨界を維持することです。

これが出来なければ、元も子もありません。臨界維持に核分裂中性子のうち一つが必要です。臨界が維持できれば核分裂の連鎖反応でエネルギーが解放されます。表 1 は核燃料サイクルに必要なエネルギーを核分裂エネルギーから供給可能ということを示しています。本来の目的がエネルギーシステムですから社会にエネルギー供給が出来なければ意味がありません。表 1 では核燃料サイクルに必要なエネルギーを供給してなお核分裂エネルギーの 30~40% 近くがエネルギーとして社会に供給できる事を示しています。熱中性子炉でも高速炉でもエネルギー生産システムとしては十分能力があります。したがってこれからの議論は中性子バランスが成立するかどうかを中心に進めます。

ロ. 連鎖反応維持と燃料生産

表 2 は核分裂反応によって生まれてくる中性子の数が十分かどうかの計算です。高速中性子を使う高速炉では燃料が金属ウランであれ、酸化物ウランであれ可能ですが、軽水炉では核分裂で生まれた中性子だけでは中性子不足で目的が果たせないことになります。軽水炉でなく高速炉で初めて可能性があることを結果は示しています。したがって SCNES は高速炉が基本になります。

これらを引いた残りの二つ未満の中性子で新しい燃料生産と放射能消滅とをするわけです。燃料を特に増やす必要がなく、自分の燃料だけ作る場合には 1 個、増殖を考えますと 1.2 個ほどの中性子が必要です。残りを放射能消滅に回すことになります。(表 2)を見ると高速炉では酸化物燃料でも金属燃料でも増殖は可能ですが、熱中性子炉では増殖の可能性がないので、高速炉に期待することになります。

理論的には、あまり増殖を考えないと、整合性が成り立ちます。具体的評価は核分裂中性子を使い切った後、核分裂エネルギーのうちどれだけ有効エネルギーが得られるかを評価するのが良いでしょう。この結果エネルギーが得られることは表 1 に示しています。

中性子は原子炉の中での核反応によって付加価値であるエネルギー生産、燃料生産に寄与する傍ら、放射能消滅のために放射性核分裂生成物と反応します。

核燃料サイクルでは、中性子が効果的に役割を果たせるように、ウランやプルトニウムを含む超ウラン元素、放射性核分裂生成物を選別し、原子炉へ送り込みます。そのためのプロセスでエネルギーを消費します。化学的性質の違いで元素を分離するには多くのエネルギーを消費しませんが、同位体分離のためにはエネルギーが要るのが普通です。ウラン 235 とウラン 238 は同位体でその分離は同位体分離です。軽水炉で使う低濃縮ウランを作るのもまさに、同位体分離の例ですが、ウラン 235 とウラン 238 のわずかな質量の差を利用しての分離なのでそれほど易しくはありませんでした。軽水炉のエネルギー効率はウラン濃縮の効率に大きく影響されてきました。しかし、ガス拡散法から遠心分離法になって改善され、今レーザーによる濃縮が研究されさらなる効率改善が計られています。このような研究開発の流れの中で見ますとレーザー法が将来の放射性元素の同位体分離に

使われる可能性が高いと思います(表 3)。しかし、決して易しい技術開発ではありません。

また核不拡散性に関してはブランケットに劣化ウランを装荷しないことで達成できます。核不拡散の観点からは、現在の金属燃料でも酸化物燃料でも不拡散特性は満足されます。

ハ、安全確保 — 再臨界排除、(図 5 再臨界排除の原子炉内実験)

原子力発電の安全確保が原子炉を異常に際して止める、冷やすそして放射性物質を閉じ込めることにあり、深層防御の考え方に沿って安全を確保してきていることはすでにお話しましたが、中でも高速炉は原子炉を止めることが安全確保上最も大切です。これは万一の事故に際しても原子炉が連鎖反応を停止し、その後再び臨界に達する能力がないようにしておくことです。今回福島で起こった事故の際も再臨界の話が出ました。しかし、スリーマイル島事故の場合と同様再臨界現象は起こりませんでした。

軽水炉に比べて高速炉は再臨界の問題は最初から考慮され、炉心崩壊事故に伴う再臨界問題は安全確保の上から対策が採られてきました。「もんじゅ」でも対応してきました。

一方軽水炉でも再臨界排除を考えたものがフィンランドで建設中です。このための設計上の配慮は制御された状態で核燃料物質を原子炉の心臓部である炉心から外部に避難させるようにしています。この動作も人間が外部から制御するのではなく物質の融点の差を利用しています。これらの配慮で核分裂炉の基本である連鎖反応に直接関連した安全問題を解決しようとしています。この目的でカザフスタンに依頼し、研究に適した実験炉(EAGLE)を使って炉内実験を行い、再臨界排除が可能なことを理論だけでなく、実験でも証明しています。

ニ、放射能消滅:元素分離と核種分離

表 3 に示す計算結果は核分裂で生まれる約 3 個の中性子を使えばエネルギー生産、核燃料生産は出来ますが、放射能を消滅するにはやはり中性子が足りないことを示しています。しかしこの場合でも何らかの方法で核分裂生成物の中から、放射性核種だけを分離して放射能消滅の対象にするならこれが可能なことも同時に示しています。アクチニド元素は高速炉の中ではいずれ核分裂しますから、核燃料物質と考えておき、核分裂生成物の中から放射性的核種を選び出せば中性子が不足しないことを表 3 は示しています。

この表 3 は、元素分離だけでなく核種分離の必要なことを示しています。SCNES ではこの核種分離にレーザーを使うことを考えています。分離選別のために必要なエネルギーは核分裂で出てくるエネルギーの数%以下で済みそうです。核燃料サイクルでエネルギー消費が見込まれるのは再処理など化学反応に関するもので、理論的にその量は効率が少し悪くても核分裂の結果出てくるエネルギーに比べて小さいのです。

ホ、核拡散抵抗性の確保

表 4 は軍事転用がしにくい核拡散抵抗性のある燃料を生産するために金属ウラン燃料と

酸化物燃料を比較したのですが、どちらの場合も現在の高速炉で使用する燃料形態のままで十分であることを示しています。

また炉心周辺に装荷するブランケットにウラン濃縮に使った後の劣化ウランを使うことがこれまでの高速炉の開発計画では考えられてきましたが、劣化ウランをブランケットに装荷しますと中性子吸収の結果純粋なプルトニウムが出来ることになり、核不拡散の観点から望ましくないとの観点から SCNES では劣化ウランの装荷はしません。

2 は資源確保と環境保全が同時に達成できる科学的概念が存在することを説明しています。しかしここで仮定したいいくつかの要素技術はまだ研究開発が終わったものではなく、先端技術としてこれからの研究開発が期待されるものです。加速器やレーザー、さらに核種分離の革新技術などは、原子炉と並んで原子力の発展を支える重要な要素です。

3 究極の目標への歩み

1) 原子炉と燃料サイクルの協調

軽水炉やガス炉あるいは重水炉や高速炉など原子炉の種類は多くまた核燃料サイクルにも直接処分、再処理、廃棄物処理 再処理のなかでもピューレックス法や乾式再処理法など多くの概念やシステムがあります。これらはどう理解すればいいのでしょうか。

原子力システムに於いては、原子炉と燃料サイクルの協調が大切です。原子炉と核燃料サイクル、両者はどんな相互関係に有るのでしょうか。

簡単に言うと、原子炉は核分裂を含む中性子の核反応によって原子力の持つ付加価値を生み出す処です。此処で言う付加価値とは、核分裂によるエネルギーの生産、ウラン 238 がプルトニウムに転換することによる核燃料の生産、更に、放射性物質の非放射性物質への転換等です。付加価値は、中性子の核反応によって生み出されますが同時に核反応によって放射性物質が生まれることにもなります。生まれた放射性物質は放射能と言う観点だけから捉えればマイナスの価値になります。一方、核燃料サイクルは物質を分離や混合する事を通じて付加価値生産のための材料を調整、調合する事が目的です。このように、原子炉は付加価値の生産場所として、核燃料サイクルは付加価値生産のための物質の調合、調整の場所と考えるのが分かりやすいでしょう。

さて原子炉は中性子の運動場で、其処では中性子がいろいろな物質とぶつかり合っています。原子炉には、燃料、冷却材、構造材などが有ります。中性子はこれらを構成する原子と散乱、吸収あるいは核反応を行って、生まれたり、無くなったりします。この間、中性子との反応によって、原子炉の中で原子核の変換がおこなわれ、核エネルギーが解放される傍ら新しい元素が生まれます。超ウラン元素や、核分裂の結果生まれる核分裂生成物が主なものです。もちろん構造材などの原子が中性子を吸収して出来る放射性物質も少しあります。しかし燃料の中の原子がその主な対象なので、燃料を中心に考えることが良い

でしょう。

さて、燃料を作って原子炉に送り込み、一定期間原子炉の中で燃やした後、使用済みになった燃料を取りだします。使用済み燃料を直接地下埋設する方法もありますが、使用済み燃料を処理して燃料として使えるものを再利用する一方、不要なものを処理、処分して資源の有効利用と環境負荷の低減を図る事も考えられます。この一連のプロセスを核燃料サイクルと呼んでいます(図4 究極の核燃料サイクル概念図)。

イ. 高速中性子炉に期待: 高速増殖炉開発の今日的意味

核燃料サイクルを考える上でどんな核反応が、どの程度原子炉の中で起こせるのか見ておくことが大切です。軽水炉は、核分裂に依って生まれる中性子のうち、自由に使える中性子の数に余裕が無く、核分裂以外にプルトニウム生産も決して十分でなく、核分裂で出来た放射性物質の非放射化、即ち放射能消滅も十分では有りません。従って、軽水炉の燃料サイクルは連鎖反応の継続のためと、リサイクル燃料の中に残っている未燃焼燃料や、ウラン 238 が中性子を吸収して出来たプルトニウムの再利用のためと、核分裂の結果出来た核分裂生成物を分離して放射性廃棄物として処分するためです。

現在、高レベル放射性廃棄物の地下埋設は世界の原子力先進国の共通した課題です。日本も今、積極的にこれに取り組み、社会の理解を得ながら開発を続けています。

これに引き替え、高速中性子は、物質原子との反応する能力に恵まれ、多くのことが期待できます。まず中性子の数に余裕が有ることです。そのため、軽水炉の場合より中性子を多くの目的に使うことが出来ます。その一つは、新しい燃料を作り出すことです。燃えた燃料以上の燃料を原子炉の中で生み出すことが出来ます。これを増殖と呼んでいます。高速増殖炉の名前の由来です。また、放射性物質の非放射化も期待出来ます。高速炉は多くの場合燃料にウラン 235 でなく、プルトニウムを使います。また軽水炉から出てくる燃えにくい超ウラン元素を燃やすことも出来ます。このように、原子炉との組み合わせでどんなサイクルが可能かは、核反応の種類とその結果生まれる元素に目を向けた原子核変換について検討したあとで、そのような材料調達や、調合が核燃料サイクル側で可能かどうかを検討する事です。原子炉で期待する付加価値とそれを可能にする核燃料サイクルと言うことになります。発揮すべき機能中心の発想がまず有ってその可能性を追求するなかで、現実的方策を考えるのが望ましいでしょう。表2についてお話しましたが、新しい燃料を、使った燃料より以上に生産できる原子炉として高速炉がこれまで注目され、開発が続けられてきました。SCNESの開発にも不可欠です。

その意味で日本の原子力開発の現状は軽水炉システムに続く高速炉システムについて、将来のあり方を再確認する機会に恵まれたと理解すべきでしょう。これまで、ともすれば、高速炉の実用化時期が軽水炉に続いて早く来るものとの願望から脱却できず、軽水炉の延

長上にこれを捉えて来ました。例えば、燃料にしても軽水炉が二酸化ウランで成功したのに習って酸化燃料を採用してきました。この延長上に経済的実用炉が実現される事がもちろん最も効果的かつ望ましいので、「もんじゅ」が再起動されれば、この路線を追求することは最低限必要な事でしょうが、利用よりバランスの観点からの検討も重要です。

ここで SCNES で物質やエネルギーの流れを見ながら全体のシステム構成を考えましょう。

ロ. 加速器の原子力システムへの参加

将来原子力を支えるものとして原子炉の他に、加速器とレーザーが大切だと言いました。

加速器は原子力の能力発揮の一翼を担う十分有能な技術です。

加速器とは、電子や、陽子など電気を帯びた粒子を電場や磁場の中を通して加速し、高いエネルギー状態にします。この高性能の粒子を原子核に当てて核反応を起こすのです。

加速容は原子炉より早く 1932年にコッククロフトーウォルトンの直線状の加速器と円盤状のサイクロトロンが時を同じくしてイギリスとアメリカで発明されました。コッククロフトーウォルトンはラザフォードの核実験に使われ人工の核変換の成功に役立ちました。サイクロトロンの一つの業績はサイクロトロンからの中性子を使つてのオットーハーンの発見した核分裂反応をアメリカで追試し、確認したことです。

加速器は、素粒子などマイクロ世界の探求や材料研究、ガン治療などに力を発揮してきましたが、最近ではエネルギーシステムとして使うアイデアもあります。エネルギーシステムとして加速器からの粒子ビームを標的にあてて核融合反応を起こさせる慣性核融合の研究も始まっています。また加速器で核分裂反応を起こさせ、原子炉と同じような能力を発揮させることの研究も始まっています。加速器駆動炉とでも呼べばいいのでしょうか。

加速器の特徴は加速した荷電粒子を標的に当てることで中性子やガンマ線を作り出すことや粒子のエネルギーを揃えることで高性能の粒子が得られます。また制御が比較的容易で原子炉のように連鎖反応を継続することなく運転が出来ます。このような加速器で核分裂のエネルギーシステムを考えエネルギーシステムとして独立したものにする研究開発が最近日本でも世界でも脚光を浴びています。もちろん加速器の能力はまだ決して十分ではありません。開発課題も多くありますが、新しい方向です。

一方放射能消滅の分野で加速器に期待しながら原子炉と組み合わせた自由度の多い原子力システムを考えることも出来ます。

評価結果では、むしろ加速器だけより、この方が可能性が高いように思えます。原子炉と協働する場合放射性物質のうち、超ウラン元素の核燃焼は原子炉、放射性核分裂生成物の放射能消滅は加速器と役割分担できそうです。加速器は外部からエネルギーを供給して高性能のエネルギーを得るシステムですから、原子炉で生産したエネルギーの一部をこれに

使うことができます。その上でエネルギーを社会に供給できる事です。中性子のほか荷電粒子やガンマ線で反応を起こすことも出来ますから、核分裂エネルギーの一部を中性子発生など高性能の粒子の生産に当てることを意味しているのです。どの程度可能かは整合性評価の問題です。エネルギー的には少し効率が悪くなるかも知れませんが、十分可能性はあります。放射性の核分裂生成物の放射能消滅には、いくつかの方法が考えられます。大切なことはこれらの元素と核反応して放射能をなくすために、中性子がいいのか、光であるガンマ線がいいのか、あるいは電子、陽子などの荷電粒子がいいのかを調べることです。これは核物理の世界で核反応断面積の分野でもあります。原子力のルーツはこの辺にあるのです。時に本家がえりも必要です。原子炉と加速器が協働して核分裂生成物の放射能消滅に力を発揮するはずです。

ハ. レーザーの先進核燃料サイクルへの参加

核燃料サイクルで使用済み燃料の再利用を図る上で不可欠な再処理の技術は、軍事研究中心に開発され、プルトニウムを出来るだけ純粋に抽出すること考えたピューレックス法が中心で、平和利用の再処理でも使われています。世界の再処理の主流になっており、フランスやイギリスの商業用の施設や日本の原子力研究開発機構(JAEA)のもの、さらに建設中の日本原燃のものもピューレックス法を採用しています。

一方でピューレックス法に変えて核拡散抵抗性のある、平和利用に適した再処理の研究も強く望まれています。プルトニウムだけでなくその他の超ウラン元素も同時に抽出しようと考えた乾式再処理法の開発が行われています。アメリカのアルゴンヌ研究所で開発が続けられているもので日本とも共同研究が行われています。

乾式再処理プロセスは化学的に元素を分離するもので、同位体分離がこの後に続きます。このシステムではすべての超ウラン元素をリサイクルし、資源の有効利用を図るとともに、放射能の消滅処理を超ウラン元素について達成しようとしています。

同位体分離は確かに易しい技術ではありません。化学分離でどこまで放射能消滅が可能かを考えている人たちもいます。しかし、難しかったウラン濃縮をエネルギー効率の向上で経済的に実用化したことが、軽水炉の実用化につながったことを考えると同位体分離は原子力開発が生み、育てた技術であると認識して目下のウラン濃縮研究の先端にあるレーザー法を取り入れることが将来に夢を託す選択でしょう。現段階で核燃料サイクル全体を含めたシステム構成は出来ていません。今後の研究開発課題です。

4 SCNES のシステム構成

炭焼竈のように一度原子炉の運転を始めるとそのまま燃やし続け、すべてを燃やし終わって放射性のない核分裂生成物だけが取り出されるような「整合性のある原子力システム」が考えられるかどうかについて言えば、運転の仕方をうまく調節出来れば、それに近いものは科学概念だけですと可能かもしれません。「整合性のある原子力システム」の先駆け

になると言うより、現在の原子力システムの課題を改善する観点からこのような「燃やしきり原子炉」とでも言うべき原子炉を想定した概念研究も行われています。しかしここで SCNES の成立性評価のために想定したのは必要に応じて燃料交換の出来る核燃料サイクルのプロセスを含むものです。その理由は原子炉の運転特性の改善と整合性達成の双方を同時に扱う研究がまだ不十分なためと、炭焼き方式では整合性が完全に達成できると思えないからです。しかしこのような炭焼き方式、パッチ方式と言っていますがその概念は SCNES に近いものになる可能性は持っています。

ここで採用した SCNES の概念構成に取り入れた要素技術は、まだ十分その性能が確認されていないものの、少なくとも関連する基礎研究はすでに存在しており、今後の基盤研究を経て開発、実用化が期待出来るものに限定しました。このため天然原子炉のように 80 年はおろか、何十年も核燃料の交換なしに運転出来るような原子炉にはなっていません。長期間を対象にする場合でも途中で燃料交換があることを想定しています。

(図 2 整合性ある原子力システムの概念図)

1) SCNES での物質の流れと核変換

さて SCNES へは天然ウランだけが供給されます。天然ウランは精錬され、加工されて原子炉の中に入ります。そこで、プルトニウムを中心に核分裂反応が起るとエネルギーの生産を続けます。一方ウラン 238 が中性子を吸収してプルトニウムなどの超ウラン元素に変換されます。

核分裂の結果生まれた核分裂生成物は新しく生まれた燃料や燃え残りの燃料とともに原子炉の外に運び出され、元素分離と同位体分離の過程へ送られます。連鎖反応が継続出来なくなった使用済核燃料の中には付加価値として主み出されたプルトニウムなどの超ウラン元素のほか転換できなかったウラン 238 や燃え残りのウラン 235 さらにそれらに混じって核分裂生成物が含まれています。資源の有効利用を図り環境負荷をなくすためにはこれらの物質を再利用したり、処理したりすることが大切です。対象は大きく分けて燃料物質と核分裂生成物になります。ここではウラン、プルトニウムその他、アクチニドも含めて基本的に核燃料物質と考えています。核燃料サイクルの元素分離の過程では、主に燃料物質が核分裂生成物から分離されます。燃料物質は再び原子炉に送られるかあるいは他の原子炉の核燃料として使われます。

一方核分裂生成物についてはレアメタルのように将来新しい用途が開発されることが予想されます。新しい物質としての用途か放射線源あるいは熱源としての用途もあるでしょうが、錬金術の成果と考えて使うことも期待されます。ここでは放射能消滅対象として放射性核分裂生成物だけを扱いました。同位体分離の過程では放射性の核分裂生成物が放射性のないものと分離され、放射性のものは原子炉に再び送って放射能の消滅を行うか、あるいは加速器によって放射能消滅を計ります。科学的成立性の計算では原子炉に送る場合

を取り上げています。もちろん半減期が非常に短いものは SCNES のシステムの中にしばらく保管しているうちに放射性のない物質に変わります。

ここでの成立性評価では最終的に SCNES から外部環境へ出てくる物質はエネルギー資源としてのリサイクルを終えた物質ですが、放射性物質についてはゼロリリースを計りますので、結果としては、放射能のない核分裂生成物だけになります。

2) SCNES でのエネルギーの流れとエネルギー変換

SCNES の科学的成立性は原子炉で起こる核反応に必要な中性子の数が核分裂の結果出てくる中性子の数でまかなえることが必要です。またこれらのプロセスで消費されるエネルギーが核分裂で解放される核分裂エネルギーの一部で賄われなければなりません。

整合性のある原子力システムはエネルギーシステムですからここで生み出されたエネルギーは社会で有効に使われます。この割合が大きい方がいいのですが、一部はリサイクルとゼロリリース達成のためのエネルギーとして整合性のある原子力システムの内部で消費されます。

核分裂で出てくるエネルギーは多くの場合、熱の形で外部に運ばれた後、電気や機械エネルギーの形で、社会のニーズにあわせて消費されますが、一部は原子炉の運転や元素分離や同位体分離などの内部消費に回されます。これらは多くの場合熱エネルギーの形だけでなく電気エネルギーや機械エネルギーの形を取るでしょう。このためタービンなどによる電気エネルギーへのエネルギー変換が必要になります。その効率が高いことはもちろん大切で、高速炉だと 40%程度にできます。SCNES の運転維持に使われるエネルギーが核分裂エネルギーにくらべて十分小さいことが SCNES 成立のためには大切です。

社会に提供するエネルギーとしては高品質の、そして高齢化社会にもなじむものとして電気や水素エネルギーが重要になるでしょう。高速炉は効率のよい電気を、高温ガス炉は水素などの化学エネルギーを供給する能力があります。効率改善とともに多目的利用も視野に入っています。

3) 研究開発の多様性の中で将来を展望

しかし、現在の状況の中ではこれまでの判断をすべてに亘って追従するのではなく、原子力が将来のリサイクル文明を構築していくものと認識する事から出発する事はそれ以上に大切です。この機会に、原子炉の物理的性質が優れた金属燃料の採用を目指しての研究開発も大切で世界でも進められています。前者は「もんじゅ」及びその関連技術中心に、後者はシステム研究と基礎基盤開発中心に進めることも出来ます。前者を着実に進めながら、後者の検討、評価に数年費やしても決して開発が致命的に遅れることにはならないでしょうし、両者を平行して進めることは同時に共通点の抽出と相互乗り入れを可能にするでしょう。

これはすでに述べたように、高速炉システムの持つ機能と特徴が描き出されているから出

来ることです。共通点を中心に技術のステップ・アップあるいは、概念の整合に向けた議論に帰着させることが出来るでしょう。

高速炉システムの能力と付加価値を再確認し、現在の軽水炉システムとの関連及び、望ましい協調関係を明確にすることは、高速炉システム開発の重要性に対する社会や原子力関係者のコンセンサスを得る上でも大切なステップです。この際、軽水炉におけるシステムのステップ・アップは実用炉の改良改善の中で行われてきた事を参考にすべきでしょう。このような研究開発は、原子力開発における世界のトップランナーの取るべき姿勢でしょうし、日本の原子力は今、**Given the Problem** (問題が与えられてから仕事を始める)の過去から脱却して、自ら **Problem Definition**(自ら展望を切り拓く)の出来る態勢を作る時期に来ています。

5 高速炉と先進核燃料サイクルの夢－資源確保と環境保全の同時達成

これまで整合性のある原子力システムについて、いろいろ考えてきました、ここで夢に向かつて挑戦してみましょう。そのベースになるのは付加価値実現の可能性を求めての計算結果を示す 4 枚の表でした。そこにいろいろなアイデアと機器や装置を当てはめてその整合性を評価しましょう。この章で議論したアイデア、機器、装置はいずれもまったく初めのものではなく世界でも研究が行われているものを中心にしています。

1) 高速炉が中心

世界には「整合性ある原子力システム」を意識しているかどうかは別にして、それに近づく概念研究がいくつかあります。もちろん満たすべき 5 つの機能を完全に満足させることをもくろんだものはありませんが、高速炉と先進核燃料サイクルを組み合わせから出発します。

SCNES に近い例として図 6 は金属燃料、CDA 排除(炉心崩壊事故による再臨界)、レーザー技術による同位体分離、を取り入れた全体システムを示しています。

付加価値の生産場所としての原子炉は高速炉で、核燃料には金属ウランを採用しています。酸化物にするか、窒化物にするか、これまでの高速増殖炉は酸化物燃料も多いのですが、ここでは金属を採用しています。金属燃料は核物理的性質がよく、中性子の有効利用が図れるほか、熱伝導がよく同じ熱出力では燃料温度が低くてすみます。冷却材にはナトリウムを採用しています。ナトリウム冷却の高速炉は高速増殖炉開発のエースとしてヘリウム冷却や水蒸気冷却の高速炉を凌駕してきたのです。ナトリウムは中性子をほとんど減速しないと、熱伝導に優れているので、水と反応しやすいアルカリ金属でありながら高速増殖炉の冷却材に選ばれたのです。筆者はナトリウムの沸騰実験や、ナトリウムとカリウムの合金(NAK)を使った MHD 発電の実験を若い頃やり液体金属が扱いにくい物質だとは思っていません。

2) 核燃料サイクル

ここで云う「自ら整合性のあるエネルギーシステム」SCNESは資源の完全リサイクルと放射性廃棄物のゼロリリース(ゼロエミッション)を目標とした概念です。したがって核燃料サイクルは必然的に要求されるものです。

イ. 再処理

核燃料サイクルは超ウラン元素を分離するための再処理と放射性核分裂生成物を核種毎に分離するレーザーシステムを採用しています。このあたりはまだ十分研究が進んでいませんが図6は概念的表現にとどめています。

安全の確保の前提として整合性ある原子力システムでは自己制御性の重視に加えて再臨界排除を設計の原則にしています。このため原子炉は肩平な形にすることもあります。また金属燃料の使用は熱を伝えやすいため、運転時の燃料温度を高くする必要がないうえ、熱伝達が早く、自然に原子炉を安全な状態に導く能力があります。この能力を受動的安全性とか自己制御性とか呼んでいます。この能力はアメリカのスリーマイル島で、の原子炉事故以来原子力安全の本質として重要視されています。

ロ. 放射能消滅

核燃料サイクルでは、中性子が効果的に役割を果たせるように、ウランやプルトニウムを含む超ウラン元素、放射性核分裂生成物を選別し、原子炉へ送り込みます。そのためのプロセスでエネルギーを消費します。化学的性質の違いで元素を分離するには多くのエネルギーを消費しませんが、同位体分離のためにはエネルギーが要るのが普通です。ウラン235とウラン238は化学的性質が同じですから、両者を化学的には分離できず、物理的性質、簡単には質量の違いに目を付けて分離をします。ウラン235とウラン238は同位体でその分離は同位体分離です。軽水炉で使う低濃縮ウランを作るのもまさに、同位体分離の例ですが、ウラン235とウラン238のわずかな質量の差を利用した分離なのでそれほど易しくはありませんでした。軽水炉のエネルギー効率はウラン濃縮の効率に大きく影響されてきました。しかし、ガス拡散法から遠心分離法になって改善され、今レーザーによる濃縮が研究され、さらなる効率改善が計られています。このような研究開発の流れの中で見ますとレーザー法が将来の放射性元素の同位体分離に使われる可能性が高いと思います(表3)。しかし、決して優しい技術開発ではありません。レーザーによって28種類の放射性核種をまず分離し、それを加速器、あるいは原子炉に装荷して核反応によって放射能消滅を行い、非放射性物質にします。日本原子力研究開発機構(JAEA)のJ-PARCの研究開発計画の中に、放射能消滅の計画があります。

ハ. システムデザイン

「整合性のある原子力システム」に向けた技術的アプローチは整合性の成立に必要な、五

つの機能を同時に発揮するために、付加価値生産をする原子炉を作るための物質選択と材料の適切な空間配置を探求することです。核燃料サイクルはこの核反応による付加価値生産を維持するための物質の分離と混合など、材料の調整を行う処なのです。

放射能消滅と原子力システムの安全の確保を重要視しているのは、原子力安全の社会受容性を得るために、本質的な対応だと考えているためです。わかりやすい安全論理で安全を損なう可能性を除去し、放射性廃棄物をなくそうとしています。

さて究極の日標を掲げ、それを満たす「整合性のある原子力システム」の概念と技術が少し分かりかけてきました。それではこれまで開発が進められてきたあるいは実用化した原子炉や核燃料サイクルは整合性の観点から見てどこに位置付けられるでしょうか。また究極の目標に近づく上での現実方策としてどれだけ柔軟性があるでしょうか。整合性の観点からの評価は重要です。

6. 天然原子炉の残した知見

放射性廃棄物の処分に関しては原子力が解決すべき課題として重要視されてきています。ここでは整合性ある原子力システム構築に当たって天然原子炉の 20 億年の歴史を参考に、そこから得られる知見を中心に放射性物質の放射能消滅についての見解を明らかにしておきます。最近はいろいろな研究会や講演会で、次のような質問が出ないことが少ないと、いいほどです。

「日本の原子力も世界に遜色がないと思っていましたが、原子炉の放射性廃棄物問題が議論になる中でまだ一般にはその答えが示されていないようです。原子力はそのエネルギー資源を使いきり、放射性廃棄物が出ないように出来ないのですか？」

筆者はこの問題に取り組んできましたが、今その答えをお示ししたいと思います。ただそこにたどり着くまでに自然を直視し、また放射性物質の性質を理解することからはじめましょう。

1) , 放射能の減衰: 放射性物質はその半減期に従って時間とともに放射能をなくしていく。

天然原子炉は 80 万年近い運転の末、核分裂反応の連鎖反応を継続する能力がなくなって停止し、その残骸を残すことになりましたが、この様子を知ることは人類が原子力利用の結果生まれる放射性廃棄物を処理、処分する上で参考になります。

表 5 はオクロの天然原子炉の跡地から検出された元素や核種を示しています。オクロの天然原子炉は 80 万年も運転を続けたあと、化石として 20 億年もその地に眠っていたのです。もちろん長い年月の間に別の元素に変化したり、あるいは気体、液体状の元素は拡散した物もあるでしょう。しかし多くの元素がその場に残されていたことは放射性廃棄物の地層処分に参考になります。この表は現在の核種分布を示した物で天然原子炉の運転終了直後の物とは大きく異なります。しかしそこには多くの核分裂生成物や、アクチニドが残っていたことの証拠があります。これは特に固体状の放射性物質は移動することもなくそ

こに 20 億年もの間とどまっていたことになり、そのようなところにそのような放射性物質が処分されても安全だということの証明になります。これまでの地層処分の話はこれを参考にしてさらに工学的にガラス固化などで拡散しないようにしているのです。

軽水炉で核分裂が起るとその結果いろいろな核種が変化し、新しい核種も生まれます。その様子を図 7 に示します。天然原子炉の組成が軽水炉に近いことは類推を容易にします。これは言い換えれば軽水炉の使用済み燃料の核種分布と考えて差し支えありません。図 7 には多くの異なる半減期の核種が含まれています。天然原子炉が 20 億年も前に出来た物なので現在残されている核種はそれまでに減衰してなくなってしまった、たとえばプルトニウム 239 などのアクチニドは他の安定な鉛やバリウムに変わっています。ウラン 238 は約 45 億年の半減期なのでもちろん減ってはいるが十分残っています。

さて放射能の半減期に着目しながら図 7 をじっくり見てみましょう。原子力発電に関連して原子炉で生まれる放射性物質は大きく分けてウランより重い超ウラン元素と核分裂で生まれる核分裂生成物とがあります。

イ. アクチニド： 超ウラン元素

まず超ウラン元素に着目します。超ウラン元素はその名の通り、ウランより重い元素を云いますが、ウランにも多くの同位元素があるので、別にアクチニドという分類があります。アクチニドは原子番号 89 のアクチニウムから 103 のローレンシウムまでの元素を総称した名前です。原子炉でウランが中性子を捕獲して生まれるアクチニドにはプルトニウムの他にネプツニウム、アメリシウム、キュリウム等があり、プルトニウム 239 の 2 万 4 千年の半減期を初め、ネプツニウム 237 の 214 万年、アメリシウムの 7 千 3 百 40 年などの半減期の長いものがあり、全体として 1 万年から 50 億年までの半減期を持つ核種があり、このまま廃棄物として処理したのでは天然原子炉と同様に考えれば安全は確保されるにしても、社会的にはいつまでも不安が残ることになります。これはむしろ核燃料物質としてウランに順ずる物質として資源に分類し、核分裂につなげていくことが出来ると考えています。

ロ. 核分裂の結果生まれる放射性物質

核分裂によって出てくる核分裂生成物には多くの種類があります。そのうち放射性の核分裂生成物は約 2 割で、いろんな半減期のものがあります。しかし地下埋設や放射能消滅の観点から見ると 30 種類ほどが対象になります。放射性のすべてが対象ではありません。放射能の半減期に焦点を合わせてみましょう。

表 6 を見てみると半減期が 1 年未満のものが全体の 5% あります。これは図 4 にある核燃料サイクルの図で言いますと貯蔵のところに保管するのです。数年間保管している間に放射能をなくしていくでしょう。また 1 年から 10 年までのものが 1%、10 年から 30 年のものが 5%、30 年から 100 年までのものが 0.1 % あります。不思議なごとに 100 年から 1

万年のものはありません。1 万年から 50 億年までの半減期のものは約 7%あります。これらが放射性廃棄物の処分対象になります。対象半減期が 50 億年以上の半減期の核分裂生成物も全体の 8%ありますが、これだけ半減期が永いと準安定物質と見ることが出来、事実上影響はありません。言い方を変えますと半減期が短いと最初おおくの放射線を出しますが、短期間に減衰して放射線を出さなくなります。逆に長い半減期の放射性物質はいつまでも存在しますが、放射線はあまり出しません。その極限が安定元素なので準安定元素と呼ばれています。ウラン 238 の半減期より永いものを準安定元素と呼んでいます。

これから考える放射能消滅も半減期の似た放射性物質をグループ分けして考えて行くことが一つの整理の仕方です。システム内に数年貯蔵するだけで放射能をなくしていくグループもあり、またウラン 238 の半減期以上のものはそのリスクが問題になるのはウラン 238 の放射能が減衰する 100 億年以上後のことです。太陽や、地球の寿命を考えてもそこまで放射線のリスクを考えることはないでしょう。

燃料物質に分類したアクチノイドについてはプルトニウムやウランなどと同じ扱いの中で見て行くことにしますが、半減期を念頭に置いて議論を進めましょう。

2) 放射性物質の処理処分:

核分裂生成物について考えると、地下埋設、あるいは放射能消滅の対象として考慮すべきは約 30 種の核種です。

表 6 は使用済み燃料中の核分裂生成物とアクチノイド核種の割合を示しています。これで見ると半減期が 50 億年を超える核分裂生成物が全体の約 8%あるのに気が付きます。一般に半減期が短いと、短い時間で放射線を出し他の元素に変わって行きますが、逆に長いと緩慢に放射線を出すのでその強度は小さくなく、その意味で準安定元素と呼ばれています。ウラン 238 より長い半減期の核種が問題になるとすればウラン 238 の放射能が減衰する 100 億年以上後のことです。太陽や、地球の寿命を考えても人間がそこまで考える必要はないでしょうし、廃棄物中に存在してもそのリスクは無視できるでしょう。

半減期 1 年以下のものは約 5%ありますが、原子力施設の中でその減衰に期待することで十分でしょう。1 年から 100 年までが 6%あります。この中にはセシウムやストロンチウムのように量的に多く 100 年までの放射線リスクの中心的位置にあります。これらは発生熱が大きい核種があり、保管しておくかあるいは積極的に熱源として使うことも考えられます。半減期が 100 年から 1 万年までの物は不思議なことに存在しません。従って地下処分によって問題となるのは 1 万年から 50 億年までの物で約 7%あります。これには図に示すように 7 種類の核種があり、これらが地下埋設あるいは放射能消滅の主対象になります。結論的にいうなら放射能消滅の対象として重要なのはここで話した半減期 1 年から 100 年までの核分裂生成物と、一万年から 50 億年までの核分裂生成物になります。これらより短い半減期のもの、短期間の貯蔵でリスクはなくなり、また 50 億年以上の半減期の

ものは天然ウランのリスクレベル以下なので、処置の必要がないといえます。

さてこの様子を図に表現しようとするとき放射能の強度はその核種の半減期と共に指数関数的に減少していくので対数表示が適切です。また半減期は核種によって桁が大きく違い、さらに放射性核種は娘核種を生み、それが亦放射性で減衰していくこともあるので全体を表現しようとするならば時間軸も指数関数的に表現することになります。従って放射能の減衰は縦軸、横軸ともに対数目盛が適切と言うことになり、理解はあまり易しくはありません。唯どの時間領域で何が効くのかを見ることは可能です。以下の議論はそこに焦点を置いて進めましょう。

ここからの議論は少し難しく専門的過ぎるかもしれませんが、原子力の将来を考える上で最も重要ですので読み続けてください。

表 6 は天然原子炉が運転を終えたときの燃料の様子を再現しようとしたもので原子炉の核計算に習えば、計算機に頼るもののむずかしいことではありません。表 5 とは大きく異なりますが、当時の核種分布とは大きくは違わないと考えられ、この議論には十分でしょう。

図 8 は原子炉から取り出される使用済燃料の放射能毒性の減衰の様子を両対数グラフで表示しています。これは軽水炉ワンス・スルーから高速炉で 30 種の核分裂生成物の放射能消滅を指したサイクルまでのそれぞれに対応しています。それぞれの場合の放射性廃棄物のリスクと考えることが出来ます。最初は比較的短い半減期の核分裂生成物の放射能が主要なリスクになっています。続いてアクチニドの影響が主体になりますが。この時間領域は比較的長く、天然原子炉以降 20 数億年を経過してみる表 5 とは明らかに違って、文明の継続時間の単位であるミレニアムすなわち 1 千年を遥かに越えてリスクが継続することになります。

しかし、ここでプルトニウムを取り去ったらどうなるかを示したものが②です。確かにリスクは減少し、プルトニウムが資源的意義だけでなく放射線のリスクを持っているのに気が付きます。しかしプルトニウムを取り去ったとしても放射能のリスクが無視できるほど減少したとは言えないでしょう。

ここでアクチニドを取り去った場合を想定すると③がそれに対応します。

明らかにアクチニドの影響が大きいことに気が付きます。4 桁もリスクが低減されることになり、この事実はまさに燃料サイクルの重要性を示しています。

さらに影響の大きい放射性核分裂主生成物 7 種類を取り去った物が④に対応します。100 年程度でリスクが消滅する。究極的な場合として 1 年以上の半減期を持つ核分裂生成物を取り去れば、10 年未満でリスクはなくなります。

① ②や③あるいは④で必要となる放射能消滅を考えることにしましょう。

両対数グラフが複雑だと、思う人は表 7 を見てください。グラフ表示はありませんが、やはり放射性物質の処理の仕方では廃棄物の放射能毒性が 50 年、100 年さらに 1,000 年と時間の経過とともに大きく変化している様子が分かります。

7 原子力システムの整合性評価

1) 資源論と環境論の視点を重視

究極の姿を画き、「整合性のある原子力システム」の科学概念とシステム概念が構築出来ると、それを目標にして研究開発戦略を考えることです。究極の目標や、「整合性のある原子力システム」概念が十分に柔軟性を持っていることがこれまでの議論で、はっきりしましたから、その中で柔軟な現実方策を決めることが出来るでしょう。原子力の本質に関わる変えられない部分ももちろんあります。それについては主張を明確にして社会の理解を得るべく努力が必要です。更に提案される開発シナリオについては、常に整合性の観点からの評価が必要な事は言うまでもありません。

これまでこのような究極の目標を掲げての評価はありませんでしたが、日本が先進国として原子力開発を進めていく以上、将来の有るべき姿を描きその点から現在を見る評価手法を準備しておく事が望まれます。

資源論の観点からはプルトニウムなど超ウラン元素の生成燃焼の可能性を、環境論の観点からは特に臨界安全と放射性物質の隔離、消滅処理の可能性をさらに自己制御性と工学的安全性のバランスを評価対象とするのが良いでしょう。これらはお互いに独立に起こる訳ではありません。ウランやプルトニウムさらには核分裂生成物と核分裂で出てくる中性子の反応が基本になります。

一方原子炉及び核燃料サイクルの協調あるいは役割分担は前者が付加価値生産を後者が材料調整を行います。付加価値生産は主として中性子の核反応に依って行われ、核エネルギーの解放と新しい燃料の生産とになります。ここでは放射能消滅も環境論の観点から付加価値のうちに入れます。核燃料サイクルでの材料調整では、物質分離即ち元素分離と同位元素分離が主体で、エネルギーが消費されます。もちろん原子炉側でもプラント運転にエネルギー消費があります。また有効エネルギーは熱効率にも強く影響されます。

整合性のある原子力システム SCNES から最終的に外部に出される物質の放射能レベルをウラン鉱石の放射能レベルにするのは技術的には究極の目標とっていいでしょう。それ以前の間目標としては人体への影響を考えた放射性物質のもつ毒性を評価対象の候補に挙げることが出来るでしょう。放射性物質の潜在的毒性はその放射性物質をゼロにし、体に吸収した場合の人体への影響を考えたものです。国際放射線防護委員会は 1 年間の摂取限度を放射性物質ごとに定めています。放射線が皮膚などに当たって受ける外部被爆もありますが、体内に取り込んだ場合の影響が大きいので内部被爆を中心に摂取限度が決ま

っているのです。この値は地下埋設の評価に当たって使われています。すなわち、地下埋設の妥当性を議論する場合に人工の壁がながい年月の間に十分機能しなくなったりした場合に、地下水に放射性物質が溶け込み生態系に現われた様な希有の事も想定して安全性の評価をしています、その際に人体影響の目安として用いられています。

このような安全評価の方法は以前から原子力発電所や核燃料サイクル施設の設置に当たってとられてきたものです。その基本的考え方に放射性廃棄物の地下埋設の特徴を取り入れたものです。このような中間目標が設定されますと技術的に議論が進められるようになります。

たとえば、放射能消滅の技術を研究開発する場合にも、核燃料サイクル側でどれだけの元素分離や同位体分離が出来るのかを%で示し、また放射能消滅が何%できるのかを技術的に示すことが出来れば、ゼロリリースへ向けてこのシステムがどの段階にあるのかが評価出来、さらに次のステップへの研究開発テーマが浮かび上がってくるでしょう。またその方向では将来に展望が開けないとして研究開発の方向転換を計る判断根拠にもなります。まさに先進技術開発に求められるところです。

唯大切な事は放射能消滅が100%でなく90%としても放射性廃棄物の量は10分の1に減少することも一方で評価対象とするべきでしょう。またアクチニドの原子炉内での燃焼は核拡散防止へ貢献するものとして単に放射能消滅の観点だけでなく評価されるべきです。これらの中間目標はいずれもゼロリリースへ向けての努力のなかにあつて、今原子力が抱えるその他の問題の解決にもつながるものです。このような具体的な評価に対する議論も社会性を備えていくことが望ましいのです。

3) 何をどう評価するか

付加価値としてエネルギー生産と燃料生産と放射能消滅が有ります。エネルギー生産は臨界状態が継続すれば自動的に行われるので1個の中性子をこれに当てます。そうすると核燃料生産と放射能消滅を行うために核分裂エネルギー及び、核分裂中性子のどれだけが消費されるかを求めることにします。中性子を余す必要はないので約3個を使い切ることを前提とします。もちろん寄生吸収と漏洩は考慮しておく必要が有りますので、燃料生産すなわち増殖に使う中性子と放射能消滅に使う中性子の和が約2個以上にはできません。燃料生産と放射能消滅に中性子を分け合うこととなります。約2個で両方が可能かどうかには問題は帰着します。資源論と環境論のどちらをより、重要視するか時代によって考え方も変わるかもしれませんが、「利用から調和へ」という本冊子の理念にあわせて、言えば、放射能消滅の後、増殖性能を評価するのが妥当でしょう。

中性子を有効に使うには、核燃料サイクルの中で、元素や同位体を適切に分離あるいは混合しなければなりません。これは必ずしも純粋な元素や同位体に分離することを意味していません。燃料サイクルの分離混合の過程で消費されるエネルギーを各サブシステムごとに想定される(革新)技術に対して求めることです。このエネルギーが少ないほど社会へ

提供するエネルギーが多くなります。

ここまでお話しましたように「整合性のある原子力システム」にむけて今後開発課題は残されるものの、科学的可能性は示され、一つの方向性は見出されたように思われます。核分裂反応に根ざすエネルギーシステムが「資源確保と環境保全の同時達成」という化石エネルギーシステムでは達成不可能なシステムにチャレンジし、社会に応えられるよう開発が続けられることを期待したいものです。

以上