

Role of Excess Neutron from(Fission) Chain Reaction for Self Consistency of Nuclear Development

(自ら整合性を持つ原子力開発に於ける余剰中性子の役割)

藤家洋一 (東工大原子炉研)

整合性のある原子力開発を考える上で考慮すべきこと

1. 宇宙、恒星、元素

- 恒星はいずれも原子核反応によってエネルギーを発生している。
太陽はその代表的例である。
- 宇宙で元素は軽いものから次第に重いものへと転換されて行った。
中性子による核反応が元素の創生、転換に寄与した。
- 元素の転換によって多くの放射性物質が創生され、宇宙に存在している。

2. 地球

- 地球は約50億年前、放射性物質を含む冷い物質で形成されたが、内部で放射性物質の崩壊に伴う熱発生で暖まった。
地熱はその一例である。
- 地球上では植物によって太陽エネルギーが固定され、貯蔵性のある化学エネルギーに転換された。
化石エネルギー
分散型エネルギー
- 地球は長期に亘って放射性物質を内部に閉じ込め、格納してきた。
- 地球の歴史は自然には放射性物質と炭酸ガスの減少の歴史と言って良い。
- 空気中に炭酸ガスがなくなると生態圏は破壊される。放射性物質がないと風邪をひきやすくなるか？
- 炭酸ガスは閉じ込めが難しい。放射性物質は難しくない。

3. 人間社会で

21世紀において落ち着いた平和で豊かな社会が地球上に存続すると仮定するとその社会を構成する人々は

- 3.1 自らの判断で意思決定を行い、権威に頼る傾向は減少する。
- 3.2 原子力開発に対しては、原子力の究極の形を求め、肯定されるべき内容とアプローチの仕方を要求する。……不完全さ、説明不足に対しては、敏感であろう。
- 3.3 原子力の持つ影響の限界について分りやすく、その有限性を答えることが重要。

4. 原子力関係者が社会に早急に提示すべきこと

- 4.1 中性子に支配される核反応による原子力は充分未来エネルギーとしての資源があること。
- 4.2 反応に際して生成される元素が利用できること。
- 4.3 原子力に固有の放射性物質は
 - a) 元素の転換によるかあるいは
 - b) 他の工学的手段によって核エネルギーシステム内部で処理可能であるか、最低限事実上安全な対応が可能であること。
- 4.4 災害の発生防止をシステム固有の特性で行い
原子力システムからの影響が時間的にも空間的にも限られたものであることの証明
- 4.5 Simple Philosophy で論理づけ説明すること
が何にもまして重要であり、且つ究極の姿は数年内に提示し、且つそれへ向けての approach を示すことが必要である。

5. 自ら整合性を持つ原子力開発

“自ら整合性を持つ原子力開発” の定義を次のようにする。

- 5.1 (4.1) + (4.3)a) + (4.4) すなわち
永い未来に亘ってエネルギーを必要充分に供給出来、且つ人間社会に直接災害をもたらさない他、負の財産を残す事はしない。
- 5.2 5.1 を満たす核エネルギーシステムはエネルギー発生のための原子核反応を維持する以外の中性子による反応が重要になる。即ち余剰中性子の核反応が主役を演じる事になる。
- 5.3 核分裂反応と核融合反応では核反応の持続条件 (Chain Reactionの条件) が全く

異なる。

5.4 核分裂反応……中性子の数バランスによる反応持続

ν : 核分裂あたりの中性子数

1 : 反応持続……核分裂反応を生じる元素すべてを対象

$\nu - 1$: 5.1 の目的のための配分

$\nu - 1 < 1$ だと目的は達成されない……より具体的には ν の代わりに転換率CRを用いた方が良いのかもしれない。

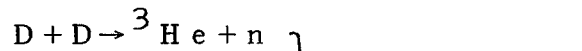
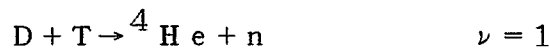
軽水炉は原子力開発上、そのトップバッターとしては重要な役割を果たしたが、自ら整合性を持つ存在とはなり得ない。

高速炉あるいは他の高エネルギー中性子を使用する原子力システムに期待がかかる。

(4.4)に関して臨界性に関連する安全問題も考慮。

5.5 核融合反応……中性子は反応持続に直接関係しない。

ν :



(DT), (D³He) いずれも $\nu = 1$ のneutronはLi+n → T + の燃料生成反応に用いることを考え、Li資源の転換に用いるが何らかのneutron multiplierなしには完成出来ない。

従ってこのままでは5.1にはならないし、また核分裂に関するもの以外では少々multiplierを加えてもそれ程 ν を大きくすることは出来ない。

5.6 Fission-Fusion Hybrid

Fission のcriticality 関連の問題を避け、同時にFusion Energy density の低さを解決することが考えられている。

$\nu = \nu_{\text{fission}}$

転換率CRをexplicitに表記する程設計が進んでいない。

5.7 表1に ν , CRの例を示す。

倍增時間 $DT = \frac{1}{\sigma_f \cdot \phi \cdot (BR - 1)}$ で考えるのが現実的。1年、10年、100年

6. 目標へ向けてのアプローチ

6.1 軽水炉開発の目的と実績

軽水炉開発は“原子力……その必要性和安全性”の枠内で語られた。これは(4.1), (4.2), (4.3)a, (4.4)のいずれも満足しないが、少なくとも(4.3)bを中心に空間的有限性は示した。

6.2 現在 5.1 の各項を同時に満たす原子力システムは開発されていない。このことが原子力開発を“事実上の安全”をベースに守りにしている。

6.3 5.1 は具体的には

Fuel Production …… Pu or ^{233}U 或いは核融合の T, ^3He

Actinide Burning …… Transuranium Burning

Safety on Criticality …… 反応度事故の有無、回避

を同時に達成することを考えて良い。

Actinideについての核データを整備することが重要、Actinideは宇宙の元素の創生の歴史からみれば本来それ程安全でなく、核分裂を起こし易いと考えられる。PuとActinideを分けて考えることが本当に意味があるのか。

6.4 臨界性に関する安全

余剰中性子が多い系では外乱によっては余剰中性子がそのまま核分裂連鎖反応に寄与することが考えられる。従って余剰中性子を積極的、効率的に使う核分裂炉ではこれは本来的問題として存続する。

6.4 Hybrid 炉、Accelerator reactor はいずれも臨界問題がない範囲で設計されるが、核分裂炉はこれが反応持続条件である。

6.5 $\frac{dk_{\text{eff}}}{dp}$ k_{eff} : reactivity, p : power

$\frac{dk_{\text{eff}}}{dp} < 0$ 必要条件

何が充分条件か nuclear reactor control

$$\frac{dk_{\text{eff}}}{dp} = \sum_i \frac{dk_{\text{eff}}}{\gamma X_i} \frac{dX_i}{dp}$$

の各項が各々負か又は合計で良いか。

現状の規制は全体についてである。

Chernobyl は全体よりも各項が正でないことが望ましいことを示している。

6.6 もし全体であれば

$$\left| \frac{dk_{\text{eff}}}{\gamma X_i} \frac{dX_i}{dp} \right| > 0 \text{ に対して } \frac{dk_{\text{eff}}}{\gamma X_i} \frac{dX_i}{dp} < 0 \text{ なものが}$$

少なくともsimultaneousに存在することが固有の安全性の観点からは重要である。

これは、parasitic absorptionかouter leakage のいずれかに頼る事になる。
しかしこれは同時に余剰中性子の積極的活用の観点からどうか。

6.7 Core Disruptive Accident

- Anticipated Transient w/o scram ……ATWS
- Recriticality problem

このいずれもがFBR では扱われ、C D A問題と呼ばれている。

C D A問題は専門家の観点からは数十万Kwe のLMFBR までは少なくとも対処可能で、空間的ひろがりは限定的でIn-Vessel Retention は可能と考えられるが、裁判問題にもなるように複雑な説明が必要である……Simple Philosophy につながらない。

6.8 MOX- 大型炉とMetal-Medium炉

- MOX-大型炉路線は固有の安全性に期待する以外にシステム構成要素の信頼度を高くする他、工学Defence-in-Depthの各点で安全性を高め、結果的にリスクを小さなものにする。

……LWR 開発の延長上に高速炉を把えた事実上の安全を目指す方向。

Metal-Medium炉は余剰中性子の積極的利用については多少ゆるめて、固有の安全性を積極的に活用し、且つSimple Philosophy 採用仕様としている。

……しかし、5.1 は満足していない。

- 余剰反応度を低く抑え、各種反応度係数に対する考え方を明確にし、且つ静的特性に加えて動的特性まで含めて安全を議論する必要がある。

6.9 原子力は再び核データ、炉物理の時代になった。

それは余剰中性子が自由に安全に遊べる場を提供することである。

21世紀がもし存在すれば、人類は核エネルギーに頼らざるを得ないであろう。

原子力はクリーンで環境適合性のあるエネルギー源である。

宇宙のエネルギーを地上の片隅で再現実用化し、未来に亘るエネルギーを確保する一方、原子炉を使った錬金術で夢を売ることが肝心である。

7. 原子力システムと環境

原子力システムの社会への時間的空間的インパクトの一つの側面は、エネルギーシステムのスケール、配置および固有の性質がある。

7.1 システム構成

例えば軽水炉を中心とした核分裂システムは巨大技術として把えられ、エネルギー生産系（原子炉）、輸送系（配電系）、燃料調達系（濃縮、加工）、処理処分系、燃料輸送系（鉱石、新燃料、使用済燃料）が明確に分離されている。

特にエネルギー系と燃料系とが別々になり、後者は開発、実用化が遅れ気味、エネルギー系に供給あるいはエネルギー系の処理はいくつかまとめて行うことになる。

一方核融合系では、これまでの概念設計をみると、いずれも燃料系をOn-Site に持つことを考えている。すなわちTritium Productionを自ら行い、その場で再び供給することになっているが、燃料輸送系は初期トリチウムの供給に必要。

7.2 原子力システムの燃料系

原子力システムでは燃料は一度にすべて燃焼出来ないこと、およびシステム内で燃料が再生産されること（余剰中性子の役割）にその本質的特徴がある。

この特徴を考えてエネルギー系と燃料系がある条件下で一つの系に統合出来るかどうか、また反応に伴って出来るActinideやFP等の副産物のうち何を最終的処分対象と考えるか。

エネルギー系、燃料系、輸送系がそれぞれどんなインパクトを持つか検討しておくことは重要であり、小型多数、大型少数、或いは集中化（小型をまとめて）、分散化の選択が必要。

7.3 エネルギー系のphase operation

一つの系で余剰中性子によってすべての役割が満たされる事はない。従って spectral shiftのような型で燃料生産phase とActinide Burning phase を交互に行うシステムのphase operation に期待する以外にないが、現実的には複数の系のRole sharingが必要になる。このためにも超ウラン元素、核分裂生成物の中性子断面積のEnergy dependence を最大限利用することを考える必要がある。

7.4 燃料サイクルの現状

我が国の燃料サイクルは軽水炉－高速炉路線を踏んでおり、再処理を前提としている。又、燃料系は軽水炉の場合プルトニウムおよび未燃焼ウランの回収に加えてTRU とFPの除去を考えている。

USA は、Carter doctrine で再処理によるpure Plutonium の回収は考えていなく、カナダと並んで使用済燃料のまま貯蔵することになっている。

IFR はこのいずれとも異なった路線を考えており、乾式再処理を採用して核融合同様の燃料サイクル内臓型を考えている。

8. 原子力システムの安全

原子力システムの安全問題に対する理解は、第一に原子力システムの種類、大きさに無関係に内臓する放射性物質の環境からの隔離、格納である。

8.1 燃料系においては内因性のエネルギー過渡は小さく、外因性のもの例えば航空機 missile 等がある。しかし、隔離期間はエネルギー系に比べて桁違いに永い。

8.2 エネルギー系については安全確保の主題は

止める、冷やす、閉じ込める

であった。これまでの世界の事故は

	止める	冷やす	閉じ込める
TMI	○	×	○
Chernobyl	×	×	×

これはpotential hazardが大きいことを前提にその顕在化を防止し、事実上の安全をdefence in depth principleにもとづき達成しようとしている。

8.3 原子力システムの時間的、空間的影響の限界

しかし、potential hazardの大きさ、放射性物質内臓量、および長期に有害性が残る放射性廃棄物の管理、処分に対するpublicの不安と不信に大して解答を用意することが必要。

このための第一はpotential hazardの減少あるいは除去である。

8.5 空間的限界

爆発的エネルギー放出の防止は、自らの能力すなわち外部からの制御でなく固有の安全性の範囲で処理出来ることを示すことがSimple Philosophy の中心となる。これも余剰中性子の振舞いを原子炉が自ら制御出来るかの問題に帰着する。

8.5 Defence in Depth

1)Prevention……発生を防止する。

2)Prevention+Protection or 拡大防止をSimpleに説明できるか。

3)Mitigation……結果を局限する。これは現在同様Open End Discussion になってしまう。なかなか理解しにくく、Simple Philosophy の枠内に入らぬ。

8.6 CDA研究

現在のCDA研究はUTOP, ULOF等を対象に固有の安全性(耐性)の中でIn-Vessel Retention が可能なことを証明し、空間的なひろがりやが局限されることをいうためのもの。

8.7 Simple Philosophy

• Defence in Depthから更に進んで余剰中性子の挙動に厳しい制限が加えられること…… 異常時に炉心に加えられる反応度(Δk)と反応度($\gamma k / \gamma \nu$)係数に対する制限

$$\Delta k < \beta$$

$$\frac{\partial k}{\partial \nu} \simeq 0 \text{ or } < 0$$

• 正体不明の事象は起こらない。