

「理想的な未来核平衡社会を目指して」

原子炉工学研究所 原子核工学専攻
COE-INES拠点リーダー 関本 博

本ニュースは筆者が学術業績賞を受賞したことに伴い日本原子力学会誌に掲載された記事「私の研究から：未来核平衡社会の研究を目指して」¹⁾をCOE-INESニュース用に書き換えたものです。

1. 研究開始の経緯について

私が学術業績賞を頂いた業績の名称は「核平衡状態の研究」ですが、「未来核平衡社会の研究」というタイトルで長らく研究を続けています。名前が気に入ったということで、訪ねてくる人もいるし、いつになったら社会の研究をやめるかと半ば愛想をつかした人もいます。私の専門は炉物理ですが、研究内容は炉物理の本道からは少し外れたものになっています。今でこそ似た研究が色々やられていますが、この研究を開始した当時はこのようなアプローチは皆無でした。

最初になぜこのような研究を開始したかについて述べておくのがよいかもしれませんが、これについては別に書いたこともあり、省略させていただきます。当時（20年近くも前のことになりましたが）原子力は廃棄物で行き詰ると考えられていました。一方で大学の原子力関連研究所は役目を終えたので廃止しようとしていました。このような状況の中で、私は「核分裂で長期のエネルギー供給が出来ること」を一般的な形で示したくてしようがありませんでした。そして「核分裂エネルギーの未来とはどのようなものか？」というのが当時の私の最大関心事でした。

2. 未来核平衡社会

適当な増殖炉と海水中のウランがあれば、核分裂エネルギーは100万年近くに亘って利用できるエネルギーとなります²⁾。しかしローマクラブの結論を待つまでも無く、地球の有限性により、我々の社会はやがてエネルギー消費率が一定の定常社会に落ちつくと考えられます³⁾。もしこのエネルギー供給が核分裂エネルギーによるものだとすると、原子炉に供給される燃料の挿荷率や廃棄物の取り出し率は一定となり、原子炉の中での各核種の生成率と消滅率も一定となり、それぞれの核種の存在量も一定となります。このような状態を核平衡状態 (nuclear equilibrium state) と呼び、核平衡状態にある社会を未来核平衡社会と呼ぶことにしました。

3. モデルシステム

核平衡状態としては色々のものが考えられますが、研究の手順として簡単なものから考えるのが順序です。複数の型の核変換施設を協働システムとして利用することも可能ですが、まずは核変換施設の型によって核平衡状態がどのようになるかを知るため、核変換施設の炉型を1種類に限ることにしました。今までのところは、核分裂施設即ち原子炉に限って検討しています。エネルギー利用は原子力パーク内の原子炉のみで行い、原子力パーク外で利用する原子炉は考えないものとしました。燃料も天然ウランかトリウムに限ることにしました。このようにして本研究の第一歩として図1のようなシステムについて検討を行いました。^{2,4)}

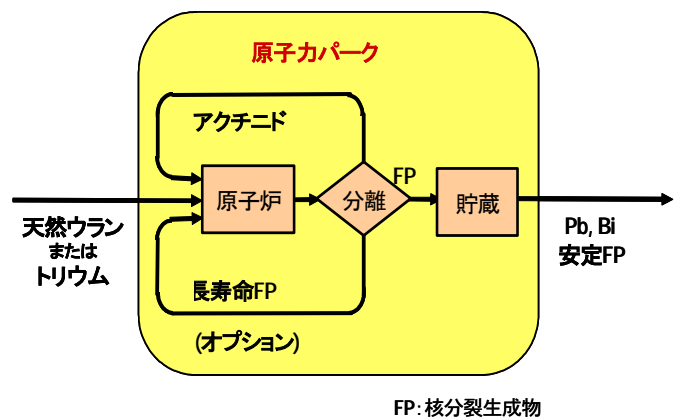


図1 核平衡状態の解析モデル

原子炉に天然ウランまたはトリウム（及びこれらと永年平衡にある娘核種）を供給します。生成されたアクチニドはすべて原子炉の中に閉じ込めるとすると、取り出される物質はFPとごくわずかの鉛及びビスマス（アクチニドの崩壊系列の最終核種）だけになります。FPの内、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{151}Sm （これらの核種を中寿命FPと呼ぶ）及びこれらより半減期の短いFPは、原子力パーク内で十分に崩壊させた後、一般廃棄物として原子力パークの外に出します。中寿命FPを充分崩壊させるには1000年近い冷却期間を必要としますが、その間定常的に生成されていたとしても、同時に崩壊消滅しており、その貯蔵量はそれぞれの核種で1 t/GWt程度であり、あまり問題になりません。また1000年という期間は人口バリアーに頼れる期間です。 ^{129}I 、 ^{135}Cs 、 ^{107}Pd 、 ^{93}Zr 、 ^{99}Tc 、 ^{126}Sn 及び ^{79}Se の7種の長寿命FPについては、崩壊に期待するわけにはいきません。しかしこれらの全毒性は、これらのFPを生成するために消費された天然ウラン及びそれと永年平衡にある娘核種の毒性の和より少し少ないことがわかりました。このため、これらの核種を原子炉で消滅するかそのまま原子力パークの外に出すかは考え方次第となります。

4. 支配方程式

燃料交換は普通はバッチ方式で行われますが、ここでは研究の第一歩として簡単のため、装荷と取出しを連続的に行うものとします。連続運転を続ければ、原子炉の中の核種の組成は一定となります。これは一般的なバッチ方式の燃料交換を行うような場合に対してもよい近似になっており、原子炉スペクトルや燃料の違いによる特性変化を調べるのに便利です。

厳密な核平衡状態では原子炉内の*i*番目の核種密度 n_i は一定であり、次式を満たします。

$$\frac{dn_i}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_{a,i}\phi + \lambda_d)n_i + \sum_j n_j \lambda_{j \rightarrow i} + \sum_k n_k \sigma_{k \rightarrow i}\phi + s_i = 0, \quad (1)$$

ここでは変数の記号は一般的なものにしてあるので、詳しくは説明しません。簡単のため燃料交換を連続交換とし、燃料取り出し率を λ_d としています。また s_i は外部核種源であり、原子炉に挿入する核種に対応しています。この式は係数を適当に採ることによりアクチニドやFPを含むすべての核種の変換の式として扱うことができます²⁾。

(1)式は線形代数方程式であり、簡単に解くことができます。式の展開を簡便にするため次のような行列式で表すことにします。

$$Mn = s \quad (2)$$

5. 中性子バランス

核種数密度は(1)または(2)式から簡単に求められますが、この密度で臨界条件が満足されるかは別問題です。臨界性については次の η 値に似た値 h 値を計算することによって検討します。

$$h = \frac{v\sum_f (\nu\sigma_f, \mathbf{n})}{\sum_a (\sigma_a, \mathbf{n})} \quad (3)$$

ここで(,)は内積を表します。 \mathbf{n} の成分は(1)式で扱ったすべての核種を採るわけで、FP等も含まれています。 h 値は無限増倍係数とも似ていますが、 \mathbf{n} の成分に冷却材や構造材を含まないところがこれとの違いであり、以後混乱を避けるため h 値とよぶことにした訳です。

臨界条件が満足され、原子炉設計を可能にするためには

$$h > 1 \quad (4)$$

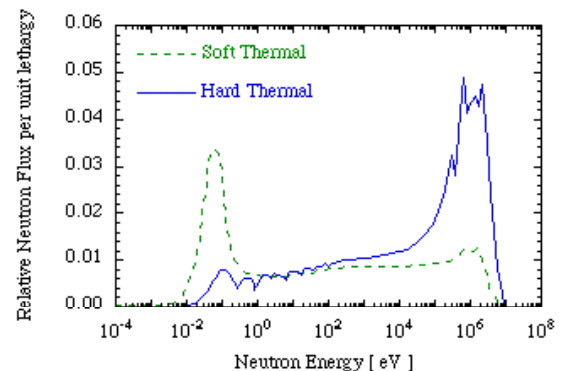
なる条件が満足されている必要があります。燃料以外の物質による中性子吸収や漏れを考慮してある程度1より大きな値にする必要がありますが、どれほどにするかは個々の原子炉に依存します。

6. 簡単な場合の答え

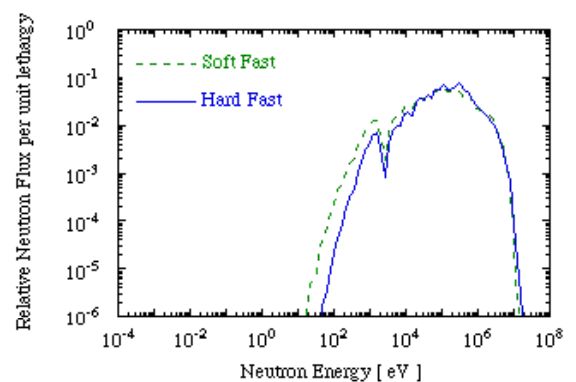
このあたりで、簡単な問題にたいして(1)式を解き、(3)式を使って h 値を求め、代表的な場合の核平衡状態の実現可能性を調べることにします。

6-1. 計算条件

代表的な原子炉として高速炉2種類と熱中性子炉2種類の計4種類について検討します。これらの中性子スペクトルを図2に示しておきます。



(a) 熱中性子炉（高減速黒鉛減速炉と軽水炉に対応）



(b) 高速炉（酸化物燃料と金属燃料に対応）

図2 本解析で扱った中性子スペクトル

原子炉の基本的な設計パラメータを表1に示しておきます。この段階では全体的なことだけを問題としているので、これだけのパラメータで充分です。

表1 基本原子炉設計パラメータ

	熱中性子炉	高速炉
熱出力	3GWt	3GWt
出力密度	50W/cc	300W/cc
取り出し半減期	1年	1年

6-2. 核種数密度

得られた平衡核種数密度のいくつかを図3に示します。トリウムを装荷した場合は、天然ウランを装荷した場合の結果を6だけ質量数の少ない方にずらした具合になっています。高速炉スペクトルは熱中性子スペクトルに比べて、直接できる核分裂性核種の密度は高いですが、質量数とともに速やかに少なくなっているのがわかります。このため高速中性子スペクトルを使うと、原子炉を臨界にしやすいか、高次のアクチノイドが発生しにくいといったメリットが生じます。

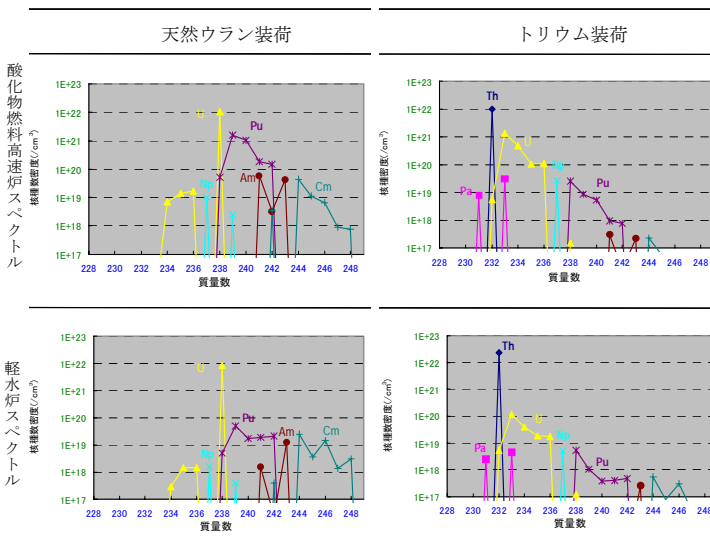
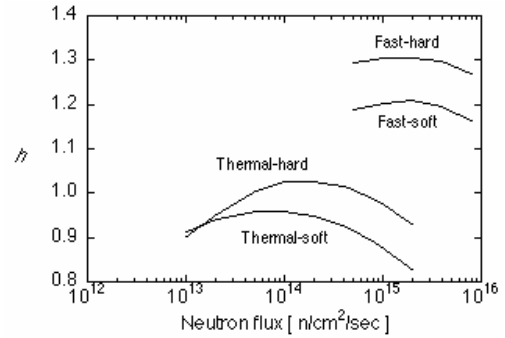


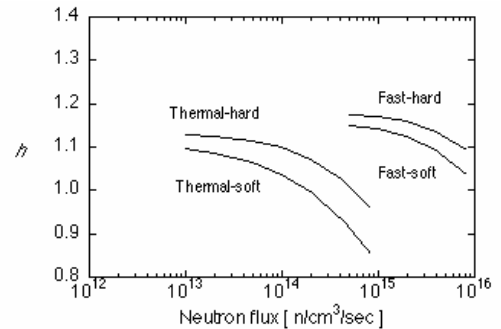
図3 異なった中性子スペクトル及び装荷燃料に対する平衡核種数密度

6-3. h値

得られた核種数密度から計算されたh値を図4に示します。横軸は中性子束レベルになっていますが、中性子束レベルが変わると中性子による核反応と崩壊による核反応の比が変化し、核種数密度が変化するためh値も変化することになります。高速炉とウランの組み合わせが一番臨界にしやすいのがわかります。通常の中性子束レベル範囲では、ウラン挿荷の場合h値を最大にする値がありますが、トリウム挿荷の場合には中性子束が高くなるほどh値は小さくなってしまいます。



(a) ウランを挿荷する場合



(b) トリウムを挿荷する場合

図4 核平衡状態の燃料組成(アクチノイド+FP)に対するh値

6-4. 核種インポートランス

核変換研究においては、アクチノイド核種が原子炉への挿入から核分裂するまでに発生・吸収する中性子の数が重要になりますが、これを求めるため複雑な計算が行われていました。著者はこれが核平衡方程式の随伴方程式の解(核種インポートランス)になることを見出し^{1,4)}、簡単に解けることを示しました。即ち中性子生成と吸収に関するインポートランスはそれぞれ次の式で求めることができます。

$$\mathbf{M}'\mathbf{f} = \phi\mathbf{v}\sigma_f,$$

$$\mathbf{M}'\mathbf{a} = \phi\sigma_a,$$

ここでM'は行列Mの随伴行列です。

核種インポートランスを使うと、h値は次のようにあらわすことができます。

$$h = \frac{(\mathbf{f}, \mathbf{s})}{(\mathbf{a}, \mathbf{s})}$$

これといくつかの燃料に関する束縛条件を連立させることにより、核平衡を実現するのに必要な初期燃料組成sを簡単に計算できます。

6-5. 毒性

毒性の評価についてはいくつかの方法がありますが、ここでは一般によく用いられているALI (Annual Limit of Intake) を使用しています。

原子炉に挿荷される天然ウランやトリウムも毒性をもって

7. おわりに

います。このことはこれらの毒性を原子炉で消滅しているということです。純粋の天然ウランの毒性は0.026ALI/gと小さいけれども、天然に永年平衡で存在している娘核まで入れると1.16ALI/gと大きい値になります。トリウムについては娘核を入れない場合0.16ALI/g入れた場合0.24ALI/gとなりあまり変わりません。熱出力を3GWtとした場合、ウラン挿荷量は約1t/年ということになり、娘核まで入れた毒性の消滅率は 10^6 ALI/年ということになります。

放射性物質の漏れが無いとした場合、ここで考えているシステムで問題となるのは長寿命のF Pの毒性だけです。1年間に原子炉から取り出される長寿命F Pの毒性は表2のようになります。ウランをその娘核といっしょに原子炉に挿荷してやれば、生成してくる毒性の方が消滅される毒性より少し小さくなっていることがわかります。毒性のバランスだけを考えるなら、長寿命F Pは消滅させる必要はありません。トリウムの場合には生成される方が多いので長寿命F Pも消滅させねばなりません。なお長寿命F Pを消滅させる場合、原子炉の臨界性が問題になり、いくつかの核種は同位体分離が必要となります。

このシナリオでは放射性毒物は原子力パークからは漏れないとしました。しかしこれは極めて難しい問題です。特にアクチノイドの漏れが問題です。1000年後の毒性が消滅した毒性と同じになるという条件ですら、ウランを燃料とした場合、漏れるアクチノイドの割合は 1.1×10^{-6} 以下でなければならないし、トリウムを燃料とした場合でも、高位のアクチノイドが少ないうちにもかかわらず、 1.2×10^{-5} 以下でなければなりません。^{2,6)}

表2 1年間に原子炉から取り出される長寿命FPの毒性

(a) ウランを挿荷した場合

Reactor	Thermal		Fast	
	Soft	Hard	Soft	Hard
Se-79	4.20E+04	5.11E+04	5.46E+04	5.69E+04
Zr-93	3.31E+04	3.24E+04	3.36E+04	3.45E+04
Tc-99	8.79E+04	9.31E+04	9.98E+04	1.02E+05
Pd-107	2.43E+02	2.30E+02	1.88E+02	1.80E+02
Sn-126	2.02E+05	2.23E+05	2.32E+05	2.33E+05
I-129	1.98E+05	2.28E+05	2.35E+05	2.43E+05
Cs-135	1.31E+04	2.15E+04	5.58E+04	5.68E+04
Total	5.76E+05	6.49E+05	7.11E+05	7.26E+05

(b) トリウムを挿荷した場合

Reactor	Thermal		Fast	
	Soft	Hard	Soft	Hard
Se-79	1.12E+05	1.15E+05	1.14E+05	1.17E+05
Zr-93	5.40E+04	5.33E+04	5.39E+04	5.43E+04
Tc-99	6.19E+04	6.23E+04	6.84E+04	6.90E+04
Pd-107	1.11E+01	1.45E+01	1.33E+01	1.27E+01
Sn-126	2.31E+05	2.10E+05	2.22E+05	2.21E+05
I-129	2.22E+05	2.39E+05	2.52E+05	2.56E+05
Cs-135	1.34E+04	2.31E+04	5.90E+04	5.95E+04
Total	6.94E+05	7.03E+05	7.69E+05	7.77E+05

未来核平衡状態の研究について色々述べてきました。研究対象は多岐に及び、限られたページ数ではどうも書ききれません。まずはここで述べた近似についての研究について、次にはもっと複雑な多くのシステムについて述べていきたいと思います。これらのいくつかのことは既に研究を終えましたが、多くのことがまだ残っています。多くの人がこのような研究に関心を持たれ、後に続いてもらえることを期待しています。

しかし正直、この記事を読まれてどれだけの人が本当に関心を持たれたか危惧しています。この研究を始めたとき、その目的を理解してくれた人はほんの少数でした。目的はこの記事の最初に書いたつもりです。原子力は100万年のエネルギーです。しかし殆どの人は今世紀で無くなる、あるいは無くなって欲しいと願っています。原子力とは現在そのようなエネルギーです。その理由の第一は放射性廃棄物だと思います。この問題を解決するためには何をすべきか、私はこの研究の中でそれを明らかにしたつもりです。要求されている毒性物質の分離が現状ではあまりにも不十分です。このためには革新的な分離方法が開拓されねばならないと思います。

このような動きはついで現れませんでした。昨年になって21世紀COEプログラム拠点形成計画に東工大の「世界の持続的発展を支える革新的原子力」が採択されました。この中でこのテーマは主要課題となっています。革新的な技術に挑戦しようとしている若い人達にぜひこのような技術を実現してほしいと願っています。

参考文献

- 1) 関本, “私の研究から: 未来核平衡社会の研究を目指して”, 日本原子力学会誌, 46[8], 561~565 (2004).
- 2) H. Sekimoto, “Equilibrium Models for the Fuel Cycle and Sustainability”, 1999 Frederic Joliot / Otto Hahn Summer School in Reactor Physics (Text Book), pp. 191~234 (1999).
- 3) D. H. Meadows, “The Limit to Growth”, New American Library (1972).
- 4) H. Sekimoto, N. Takagi, “Preliminary Study on Future Society in Nuclear Quasi-Equilibrium,” J. Nucl. Sci. Technol., **28**[10], 941~946 (1991).
- 5) H. Sekimoto, A. Nemoto, “Nuclide Importance and the Steady-State Burnup Equation,” Nucl. Sci. Engin., **135**[1], 84~102 (2000).
- 6) H. Sekimoto, H. Nakamura, N. Takagi, “Toxicity of Radioactive Waste Discharged from Nuclear Energy Center in the Future Equilibrium State,” Ann. Nucl. Energy, **23**[8], 663~668 (1996).



〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 N1-12
 原子炉工学研究所内 COE-INES事務局
 TEL/FAX: 03-5734-3992 Email: coe-ines@nr.titech.ac.jp
 URL: http://www.nr.titech.ac.jp/coe21/