

5.1 革新型原子炉

5.1.1 原子力パーク

1. 序

多量の2酸化炭素の放出は地球温暖化や異常気象を引き起こしている。原子力はこれを解決できる手段として殆ど唯一のものとして注目されているが、これからの放出量は開発途上国からのものが重要になると指摘されている。これらの国では大規模な電力網が無かったり、水や熱といった電気に比べ遠隔輸送が困難なものを必要としたりしている場合が多々ある。これらの要求に応えるためには小型長寿命原子炉が適切と考えられる。

我々は、図-1のような原子力パークを考え、ここで小型炉とそれを運転するのに必要な燃料を製造し、これをサイトに運び、建設し、運転することを考えた。

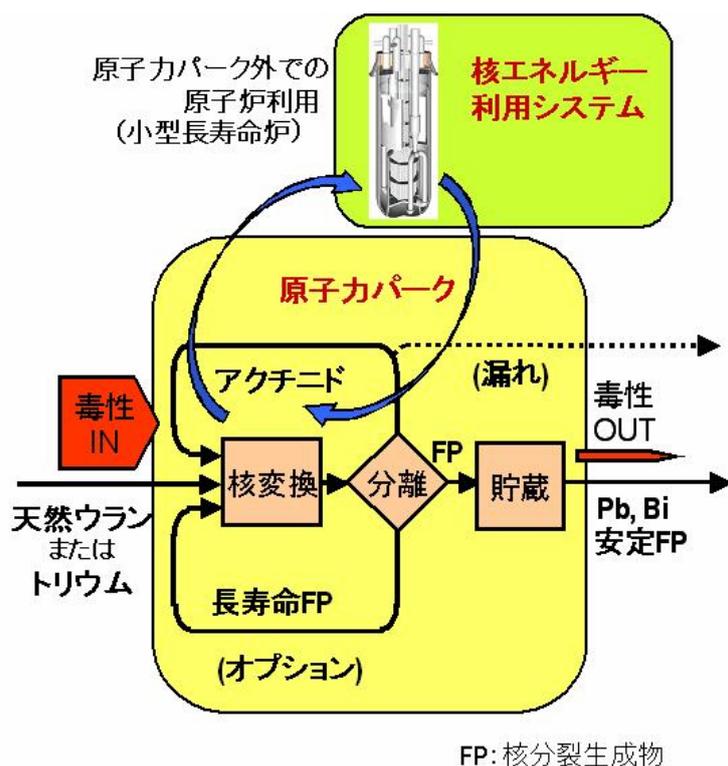


図-1 原子力パーク小型長寿命炉・システム

ここで問題になるのは原子力パーク内において小型炉に燃料を供給する原子炉（ここでは大型炉と呼ぶ）の発生エネルギーとサイトで運転される小型炉（通常複数）による発生エネルギーの比である。この比をサポートファクターと呼んでいるが、これが大型炉と小

型炉の特性でどのように変化するか調べている。

2. 原子炉サイズと転換比

核分裂性核種の生成と消滅の割合をそれぞれ P と C とすると転換比 c は

$$c \equiv \frac{P}{C}, \quad (1)$$

と書ける。この比は、核分裂性核種のマクロ吸収断面積と親核種のマクロ捕獲断面積をそ

れぞれ $\Sigma_{a, fis}$ 及び $\Sigma_{c, fer}$ とすると、

$$c = \frac{\Sigma_{c, fer}}{\Sigma_{a, fis}}, \quad (2)$$

と書ける。

増殖炉の場合には

$$c > 1.$$

を満足することになり、転換比は増殖比とも呼ばれる。しかしこの報告書ではいずれの場合でも転換比と呼ぶことにする。

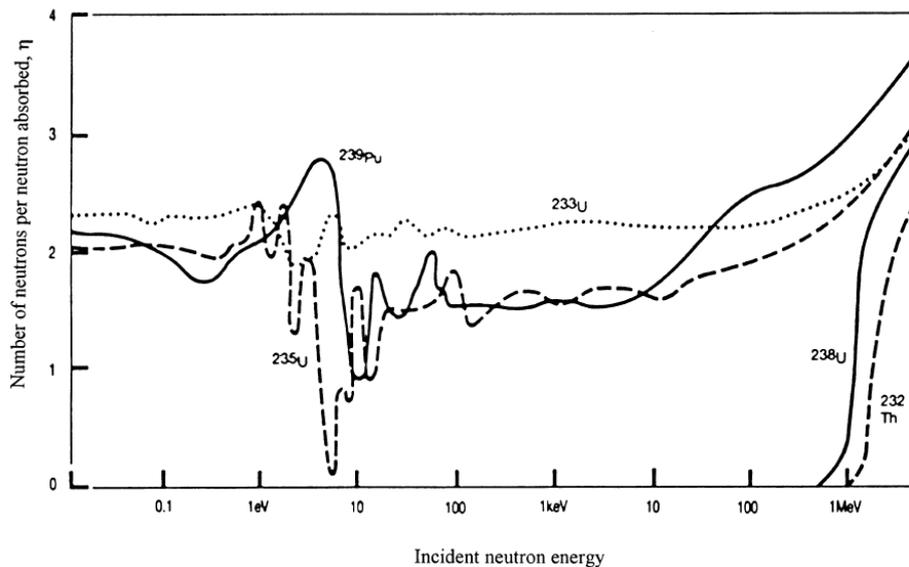


図-2 中性子エネルギーに対する重要な核種の η 値

臨界の場合の中性子バランスは

$$\left(\Sigma_{a, fis} + \Sigma_{c, fer} + \Sigma_{a, FP} + \Sigma_{a, cs} \right) V + LS = \eta \Sigma_{a, fis} V, \quad (3)$$

と書ける。ここで $\Sigma_{a, FP}$ と $\Sigma_{a, cs}$ は核分裂生成物のマクロ吸収断面積及び冷却材と構造材のマ

クロ吸収断面積である。 L は炉心境界からの中性子の漏れの割合（無次元）である。 S と V はそれぞれ炉心の表面積と体積である。 η は中性子を1個吸収した場合の核分裂で発生する中性子数の期待値であり、重要な核種に対する値を図-2に示す。図-1はエネルギーの関数として与えているが、(3)式では原子炉のスペクトルで平均した値になっている。

式(2)と(3)から

$$\begin{aligned} c &= \eta - 1 - \frac{\Sigma_{a,FP} + \Sigma_{a,cs} + L \frac{S}{V}}{\Sigma_{a,fis}} \\ &= \eta - 1 - a_{FP} - a_{cs} - l \frac{S}{V}. \end{aligned} \quad (4)$$

ここで

$$a_{FP} = \frac{\Sigma_{a,FP}}{\Sigma_{a,fis}} \quad (5)$$

$$a_{cs} = \frac{\Sigma_{a,cs}}{\Sigma_{a,fis}} \quad (6)$$

$$l = \frac{L}{\Sigma_{a,fis}} \quad (7)$$

である。

式(4)は $\eta - 1$ が転換比の上限になっていることを示している。図1は η 値がかろうじて2以上になることを示しており c を1以上にするのが難しいことがわかる。

3. サポートファクター

サポートファクター S は核分裂性核種の消滅割合 C を用いて次のように表される、

$$S = \frac{C_S}{C_L}, \quad (8)$$

ここで添え字 S と L は小型炉と大型炉を意味し、それぞれサイトと原子力パークで運転される。ここで式(1)での C は個々の原子炉に対する値であったが、ここでは対応するすべての炉の和に対する値である。

系全体の発生エネルギーは核分裂性物質の消滅割合の和に比例する。即ち α を比例定数として

$$C_L + C_S = \alpha E.$$

平衡状態では

$$C_L + C_S = P_L + P_S = \alpha E. \quad (9)$$

式(1)及び式(8)を式(9)に代入して

$$C_L + SC_L = c_L C_L + c_S SC_L. \quad (10)$$

即ちサポートファクター S は大型炉及び小型炉の転換比 c_L と c_S を用いて

$$S = \frac{c_L - 1}{1 - c_S}. \quad (11)$$

のように表される。

式(11)から

$$c_L > 1 \quad (12)$$

が原子力パーク小型長寿命炉・システムが成立するための必要条件であることがわかる。小型炉に関しては

$$c_S < 1 \quad (13)$$

でよい。式(12)を満足させることは可能であるが、既に述べたとおり、容易なことではなく、 c_L を1以上にできたとしても1に近い値にならざるを得ない。このため、 S を大きくするためには式(12)より c_S を1に近い値にまで大きくしなければならない。これは c_L を大きくするよりはるかに容易である。

大型炉も小型炉も転換比の高いものがよいわけであるから、本研究ではどちらも転換比の高い高速炉を考え、同様のピンセル設計をおこなうことにする。この場合式(4)を式(11)に代入して

$$S = -\frac{\eta - 2 - a_{cs} - a_{FP,L} - l \frac{S_L}{V_L}}{\eta - 2 - a_{cs} - a_{FP,S} - l \frac{S_S}{V_S}} \quad (14)$$

のようにサポートファクターが求まる。ここでは全体的な傾向を知ろうとしているので、小型炉と大型炉の基本的な相違は炉心体積と取り出し燃料の燃焼度だけとし、添え字で区別した。この場合でも炉心の中性子スペクトルは異なり、マイクロ断面積が小型炉と大型炉で異なるが、これは無視した。

4. 計算例 1

大型炉も小型炉も鉛ビスマス冷却の高速炉とし、ウラン-プルトニウムサイクルを採用した場合の計算例を図3に示す。ここでは炉心の形状は一定として体積だけが変化するとして計算している。また燃焼基幹は大型炉に対しては500日、小型炉に対しては1000日とした。大型炉の場合有る程度大きくなるとサポートファクターに対する効果はあまり現れなくなる。これに対し、小型炉は大きくするとサポートファクターを急激に大きくすることが可能であることがわかる。

原子炉は色々な設計が可能である。ここでは原子炉のサイズのサポートファクターに与える一般的な影響を調べるということで、炉心を簡単にして取り扱っている。このため正確な値はかなり違ってくるかもしれないが、定性的には正しい傾向が示されていると考えられる。

ここではウラン-プルトニウムサイクルを考えたが、天然ウランとトリウムを高速炉に装荷し、プルトニウムはニュークリアセンターで運転する高速炉の燃料として使い、トリウムから生まれた ^{233}U は小型長寿命炉の熱中性子炉で使うシステムに関して研究を行い、成立性を確かめている。

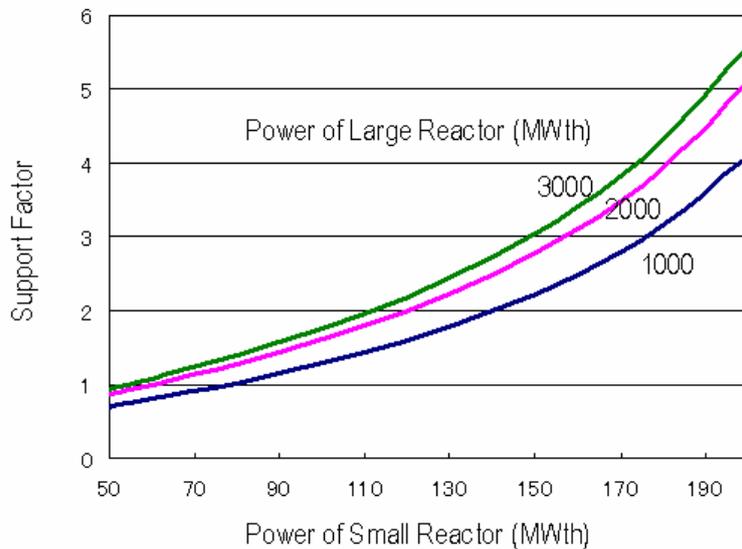


図-3. 原子炉のサイズを変えることによるサポートファクターの変化

5. 計算例2

5.1. 原子炉設計

これまでの、システム全体を個々の原子炉の詳細にとらわれず、簡単に扱ってきた。ここでは高速炉としては、3000MWth の大型ナトリウム冷却金属燃料高速炉[1,2]を、長寿命小型高速炉としては我々が長年にわたって設計研究を行ってきた LSPR[3]を採用する。これらの主要パラメータを表-1に示す。

表-1. 原子炉設計主要パラメータ

	Fast reactor	LSPR
Total power output [MWth]	3000	300
Power density [W/cc]	280	75
Coolant	Na	Pb-Bi
Fuel type	Metallic	Metallic

詳しい設計はそれぞれの文献を参照されたい。

5.2. 計算結果

長寿命 FP は原子炉から取り出すという燃料サイクル方式で得られた計算結果を、横軸に Pu 取り出し割合、縦軸にh-値とサポートファクターの形のグラフで図4に示す。ここでh-値とはアクチノイドや FP 等燃料から生まれたすべての核種に関して、吸収する中性子の数に対する核反応で発生する中性子の数のことである。無限体系中中性子増倍係数と似ているが、構造材等の中性子吸収効果

を入れていないので、体系を臨界にするにはこの値を 1.1 以上にすることが要求されている[1]。サポートファクターは今までとは異なり、ここでは大型高速炉 1 基あたり、Pu を供給できる小型長寿命炉の基数にとつていので注意してほしい。

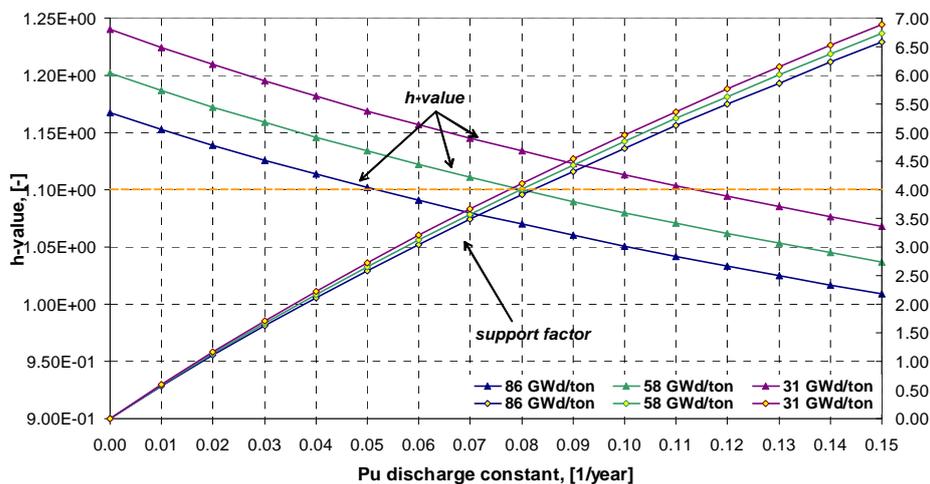


図-4. h-値とサポートファクター

図-4を見ると、大型高速炉燃料の燃焼度を 86GWd/t としたとき、臨界にするためには Pu 取り出し割合を 0.05/year にする必要があり、このときサポートファクターは約 2.6 となっている。燃焼度を 31GWd/t と小さくすると臨界は容易になり、Pu 取り出し割合は 0.11/year 程度になり、サポートファクターも約 5.3 と大きくできる。

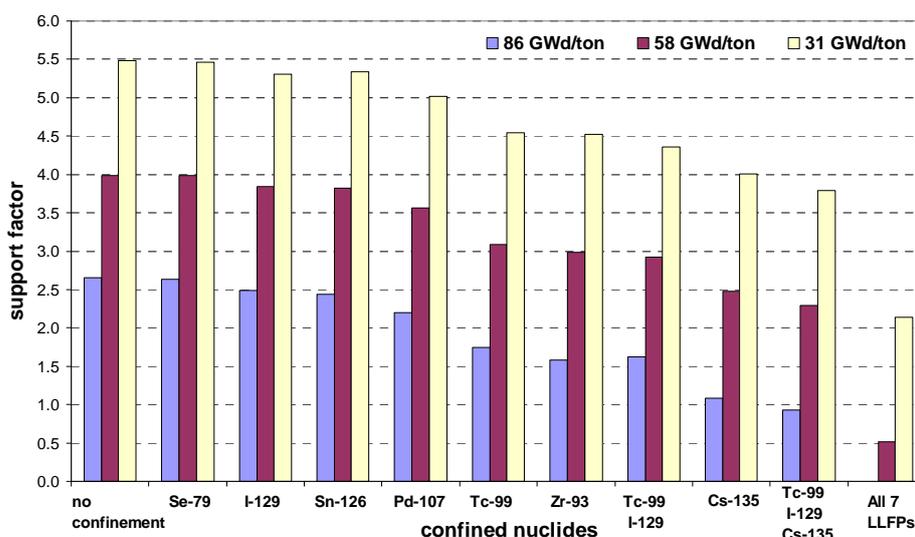


図-5. 長寿命 FP の種々の取り出しシナリオに対するサポートファクター

これらの結果は長寿命 FP を大型高速炉から取り出すシナリオに対するものであるが、長寿命 FP の種々の取り出しシナリオに対するサポートファクターがどのように変化するかを図-5に示す。問題核種である I-129, Tc-99 及び Cs-135 を核変換するため大型高速炉に閉じ込めるシナリオにおいても、小型長寿命炉をサポートできることがわかった。但し、あまり多くの小型長寿命炉をサポートすることはできない。このことから、ここで考えたようなシステムにおいても、大型原子炉による集中的な発電は、全体のエネルギー需要をまかなう上で極めて重要であることがわかった。

6. 目標と課題

最終的な目標は、放射性物質の取り扱いはその中でだけおこない、外の環境における放射性物質の量を増加させないような原子力パークとそこで製造されパークの外の利用サイトに運ばれ、使用後は新しい炉と交換できるような小型長寿命炉のシステムを完成することである。

ここで難しいのは、放射性物質を消滅することである。これに関しては、我々の過去の研究の取組がある[1]。ここで重要となったことは消滅のための原子炉の設計と放射性物質の分離であった。特に放射性物質の分離に関しては、従来常識を超えた高い分離係数が要求されている。もうひとつの困難は小型長寿命炉の設計と、これらに燃料を供給することである。

放射性物質の消滅と小型長寿命炉への燃焼供給は共に中性子を使わねばならない。このことから、本研究は中性子の有効利用が中心課題となる。MAやLLFPの消滅、核種分離、小型長寿命炉等は別の課題として研究されており、ここではこれらを総合して理想的なシステムを提示することとなる。

5. ロードマップ

	2010	2015	2020	2025	2030
原子力パーク概念研究		→			
大型炉研究		→			
分離研究				→	
小型長寿命炉研究				→	
原子力パーク最適化研究				←	→

参考文献

- [1] H. Sekimoto, "Equilibrium Models for the Fuel Cycle and Sustainability," The 1999 Frederic Joliot / Otto Hahn Summer School In Reactor Physics (Text Book), pp. 191-234 (1999).
- [2] A. Mizutani, H. Sekimoto, "Cell Geometry Effects on Nuclear Characteristics in Equilibrium

State,” Ann. Nucl. Energy, 25[9], 623-638 (1998).

[3] H. Sekimoto, et al., “A Long-Life Small Reactor For Developing Countries, LSPR,” International Seminar on Status and Prospects for Small and Medium Sized Reactors, 27-31 May 2001, Cairo, Egypt(CD)(2001).

以上