

## 宇宙の元素合成と原子力システムの核反応

東京工業大学 原子炉工学研究所

大崎 敏郎

tohsaki@nr.titech.ac.jp

### 1. はじめに

原子力開発研究は、従来、核物理等の核反応を扱う他の分野とは独立に、進められてきた。しかし、両分野間には本来共通の研究領域が存在し得る。この解説において、共通領域の存在する例として、宇宙の元素合成における核反応と原子力システムにおける核反応の共通点、類似性について述べる。

宇宙元素合成について大方御存知の方もおられると思うが、次の 2 節において、宇宙における元素合成について簡単に概観する。特に原子力について関連のある中性子反応を中心に述べたい。そして 3 節では、本解説の中心となる具体的な宇宙元素合成における核反応と、原子力システムにおける核反応の共通点、類似性について論じる。特に高速増殖炉(FBR)内の核分裂生成物(FP)の生成/変換反応と s-過程元素合成反応との比較を行なう。更に核統計的平衡(Nuclear Statistical Equilibrium : NSE)の概念を用いた宇宙元素合成反応と原子力システムの核反応の比較の試みについて述べる。最後に 4 節で、この解説のまとめを行なう。

### 2. 宇宙元素合成論概要

宇宙元素合成論とは、壮大な学問である。元素合成論の帰結である宇宙に存在する元素の分布は、宇宙が始まってからの進化の歴史と、そこに含まれた原子核の性質の全てを反映したものである。原子核の性質(主に反応断面積)が正確に分かっているならば、元素の存在分布から、宇宙の進化の歴史を推測することが可能となる。そして、このとき必要とされる核反応断面積は原子力開発においても必要とされるものである。

ところで、現在観測されている太陽系での元素存在度は、図 1 のようなものである[1]。この分布は、主に C1 炭素質コンドライトと呼ばれる揮発性元素を含む特殊な隕石と、太陽大気の解析から得られたものである。かつては、この分布をして"宇宙元素存在度(Cosmic Abundances)"と称していたが、現在では宇宙の各場所で多少分布が異なってい

ることが分かっており、謙虚に"太陽系元素存在度(Solar-System Abundances)"と称するようになっている。

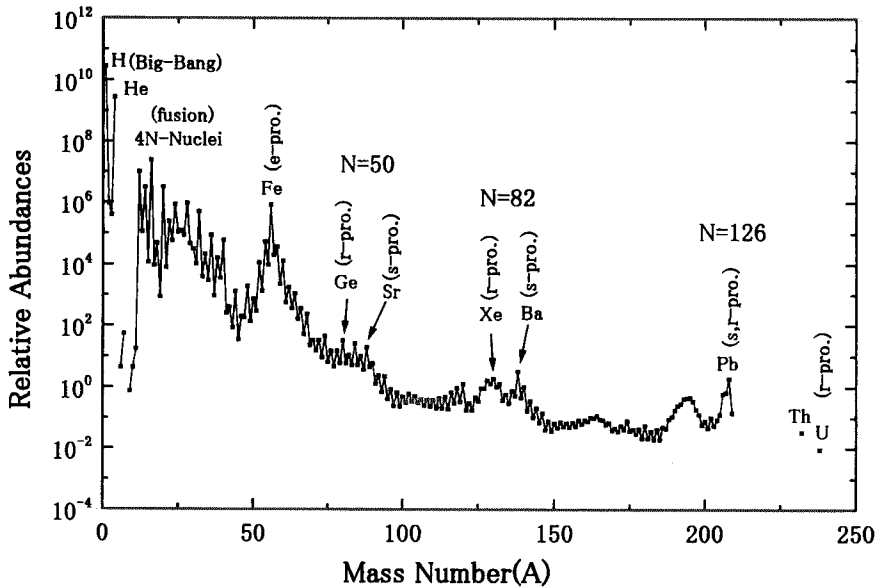


図 1. 太陽系内元素存在度

Si 原子の数を  $10^6$  に規格化。

図中の括弧内はその元素を主に合成した過程名を示す。

Big-Bang : ビッグバン元素合成、fusion : 熱核融合反応

e-pro. : e-過程、s-pro. : s-過程、r-pro. : r-過程

この分布を見て分かることは、第 1 に H と He が極端に多いことである。質量存在比でそれぞれ全体の 71% と 27% を占める。この He の大部分(全 He の 85%)は、少量の D や Li とともに宇宙初期のビッグバンで合成された。この時の宇宙の温度  $kT$  は  $kT=10\sim 100\text{keV}$  であった(以下元素合成過程名の後に括弧で温度を表示する)。但し、質量数  $A=5, 8$  に安定な核種がない等の理由により軽元素しかビッグバンで合成されなかった。質量存在比で残り 2% の元素は全て恒星で合成されたと言って良い。この残り 2% の内、Fe 族元素より軽い元素は、恒星内での熱核融合反応で合成された。具体的には p-p チェイン反応や CNO サイクル反応等の H 燃焼反応( $kT=1\sim 10\text{keV}$ )、その後に起こる He 燃焼反応( $kT\sim 10\text{keV}$ )、C 燃焼反応( $kT\sim 100\text{keV}$ )、O 燃焼反応( $kT\sim 200\text{keV}$ )、Ne 燃焼反応( $kT\sim 200\text{keV}$ )、S 燃焼反応( $kT\geq 300\text{keV}$ )で合成される。最後に e-過程( $kT\geq 300\text{keV}$ )と呼ばれる熱平衡核反応により Fe を中心とする対称的なピークが形成される。ここまで

の合成反応では、安定ないわゆる"4N核"が多く合成される。

しかし、Fe 族元素が核子当たりの結合エネルギーが最大であるため、これより先、発熱反応では元素は合成されない。これより先は、クーロン障壁のない中性子捕獲反応と  $\beta$  崩壊を繰り返しながら進む元素合成を中心に進む。これには、2 種類が知られており、1 つを s-過程(slow-neutron capture :  $kT \sim 30\text{keV}$ )、もう一方を r-過程(rapid-neutron capture :  $kT \sim 100\text{keV}$ )と呼ぶ。これら 2 つの反応チェーンを図 2 に示す[2]。

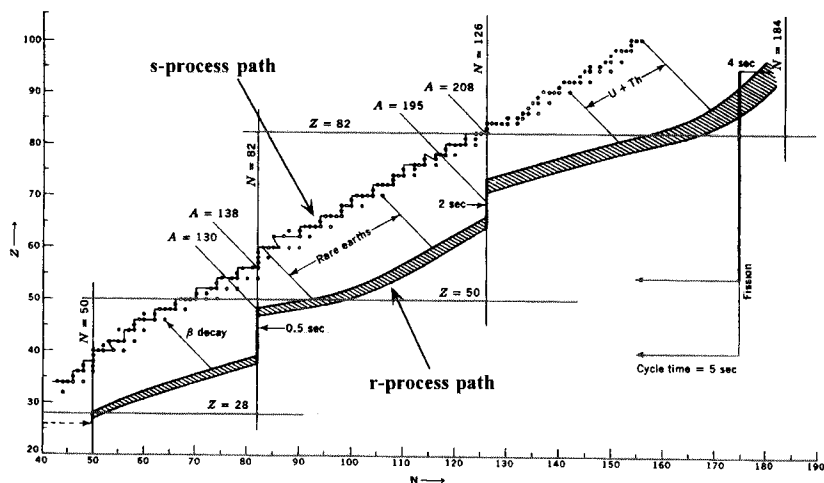


図 2. s-過程反応チェーンと r-過程反応チェーン

s-過程は中性子密度が比較的低く( $\phi \sim 10^8 \text{n/cm}^3$ )、競合する  $\beta$  崩壊反応率( $\lambda_\beta$ )に比べ中性子捕獲反応率が弱い( $\sigma_c \cdot \phi \ll \lambda_\beta$ )。他方 r-過程は s-過程とは反対に中性子密度が高く( $\phi \sim 10^{22} \text{n/cm}^3$ )、競合する  $\beta$  崩壊反応率に比べ中性子捕獲反応率が強い( $\sigma_c \cdot \phi \gg \lambda_\beta$ )。s-過程は  $\beta$  崩壊に強く影響されるために安定核の領域に沿って合成が進む。合成期間が十分長いので、各核種の合成量がその中性子捕獲断面積にほぼ反比例しているのが特徴である。この過程で必要となる中性子は、AGB(Asymptotic Giant Branch)星という中質量の恒星中の 2 つの異なる燃焼層で物質が混ざることにより起こる  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反応や  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$  反応により生成されることが知られている。また r-過程は中性子過剰な領域を進み、超新星爆発時等に起こるとされている。図 1 中には中性子魔法数に相当するピークが存在し、s-過程、r-過程の中性子捕獲反応によりこれらの元素が合成されたことが推測される。 $N=50$  の魔法数に対して s-過程により Sr、r-過程により Ga が合成される。また  $N=82$  の魔法数に対して s-過程により Ba、r-過程により Xe が合成される。 $N=126$  の魔法数に対して r-過程と s-過程により Pb が合成される。また、天然に存在する核燃料である U、Th は r-過程により合成される。これら中性子捕獲反応により合成される元素は質量存在比にして約 1% であるが、種類にすると半分以上の元素であるのは原

原子力研究に携わる者にとって、注目に値する。あと余談であるが、恒星内に豊富に存在する C、N、O 等の元素は、中性子捕獲反応によって Fe 族元素が捕獲すべき中性子を奪って s-過程を阻害するので、中性子毒(Neutron Poison)と呼ばれていることを述べておく。軽水炉でも熱中性子捕獲断面積の大きい  $^{135}\text{Xe}$ 、 $^{149}\text{Sm}$  を中性子毒と呼ぶが、どちらの分野が先に命名したのだろうか。

また、ここまでに述べた以外に、p-過程と呼ばれる陽子捕獲あるいは( $\gamma, n$ )反応によって合成される比較的陽子数の多い核種や、高エネルギーの宇宙線による核破碎反応( $E = \text{MeV} \sim \text{GeV}$ )によって生成される Li、Be、B 等の核種が僅かながら存在する。

原子力研究に携わる者にとってもう 1 つ興味深いことは、ビッグバン元素合成、熱核融合反応、s-過程、r-過程等の宇宙元素合成で中心的な過程は全てそのエネルギーが  $kT = 10 \sim 100 \text{keV}$  と、高速炉内の中性子のエネルギー  $E_n \sim 100 \text{keV}$  と近いことである。例外は核破碎反応くらいである。このことは宇宙元素合成にとっては特別のことではなく、むしろ当然の帰結である。なぜならエネルギーがこれよりも高過ぎると光分解反応により合成が阻止され、逆に低過ぎるとクーロン障壁により阻止されるからである。中性子捕獲反応である s-過程や r-過程でもこの条件は当てはまる。というのも中性子を生成する反応自身は、( $\alpha, n$ )反応のように荷電粒子反応であるからである。

### 3. 宇宙の元素合成と原子力システムの核反応

前節での解説で、宇宙の元素合成における核反応はその種類が豊富であるが、原子力における核反応とそれほど異なったものでないことがお分かり頂けたと思う。むしろ話は逆で、原子力システムにおける核反応が、宇宙における元素合成過程での核反応を模倣していると考えべきである。地上で起こっている現象は殆どが重力や電磁相互作用(化学反応)に支配されており、原子力システム内で起こっている核反応は非常に人工的で特殊なものと思われがちである。しかし、宇宙に目を移して見ると話は逆で、殆どの現象は星の誕生、進化、超新星爆発とそれに付随して起こる元素合成過程であり、重力と核力によって支配されている。宇宙において核反応は自然に起こっているありきたりの現象なのである。

#### 3.1 Gamow による高速炉からのビッグバン元素合成の発想

この宇宙における核反応と原子力システムにおける核反応の類似性については、かなり以前から、指摘されている。恐らく最初に指摘したのは、G.Gamow である。彼は、い

わゆるビッグバン元素合成理論( $\alpha\beta\gamma$ 理論)を1948年に発表している[3]。彼は高速炉の遮蔽材候補選びとして各元素の中性子捕獲断面積を眺めている時、各元素の存在度はその速中性子捕獲断面積にはほぼ反比例しているのを見てとった[4]。宇宙の初めには高温の中性子のみの状態を仮定し、宇宙の膨張と共に中性子が $\beta$ 崩壊により陽子に変換し、この陽子に次々と中性子が捕獲して現在観測される全ての重い元素が合成されたと考えた。但しその時、中性子は時間の経過と共に崩壊により数が少なくなり、重い元素になるほど合成が進まなかったとした。もちろん前節で説明したように質量数  $A=5, 8$  に安定な核種が存在しないなどの理由により、Gamow が考えたようにはならない。ある意味で誤りであるのだが、ビッグバンの基本的なアイデアは現在まで利用されている。また"各元素の合成量はその元素の速中性子捕獲断面積に反比例する"という考えは、現在の s-過程に生きている。当時のデータの精度はあまり良くなかったはずであるが、Gamow は図 5 の速中性子捕獲断面積から図 1 の太陽系元素存在度を読み取った訳である。かなり優れた着眼点があったと言える。

### 3.2 高速増殖炉内の FP 生成/変換反応と s-過程元素合成反応

ここまで来ると、原子力開発における高速増殖炉(FBR)と宇宙元素合成過程の間にはかなり共通点が存在するということが容易に想像できると思う。本解説では特に FBR 内の核分裂生成物(FP)の生成/変換反応と s-過程との共通点・類似性を調べていくことにする[5]。FBR 内と s-過程の起こっている恒星内の環境では、既に述べてきたように中性子のエネルギーは非常に近い。しかし、それ以外にも類似している点がある。これらの比較を表 1 にまとめる。

表 1. 中性子に注目した FBR 内 FP と s-過程の比較

	FBR 内 FP	s-過程
中性子エネルギー [keV]	~100	~30
中性子密度 [ $\text{cm}^3$ ]	$\sim 2 \times 10^6$	$\sim 2 \times 10^8$
元素	${}_{23}\text{V} \sim {}_{71}\text{Lu}$	${}_{26}\text{Fe} \sim {}_{83}\text{Bi}$
燃焼期間 [year]	~1	~1000

中性子エネルギーは FBR で ~100keV、s-過程で ~30keV と近い値となっているが、中性子数密度も FBR で  $\sim 2 \times 10^6/\text{cm}^3$  に対し、s-過程で  $\sim 2 \times 10^8/\text{cm}^3$  とこれもまた近い値である。更には FBR 内で生成される FP はおよそ  ${}_{23}\text{V} \sim {}_{71}\text{Lu}$  であるが、s-過程で合成され

る元素はおよそ  ${}_{26}\text{Fe} \sim {}_{83}\text{Bi}$  と、両者には類似している点が多い。図 3 に FBR 中の FP 生成/変換反応チェーンを示す。

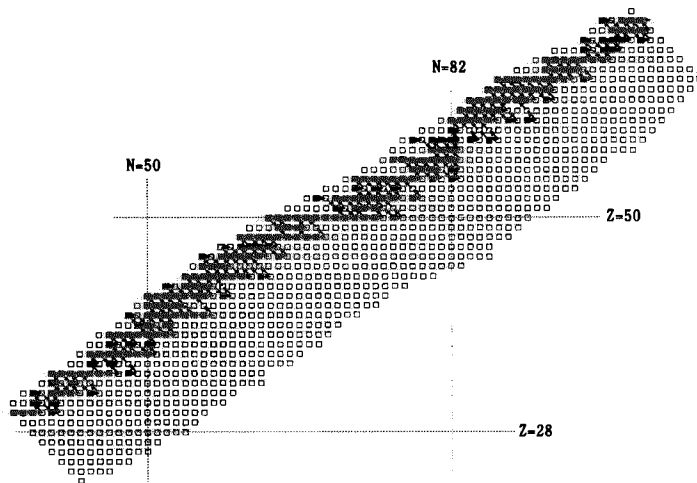


図 3. 高速炉内 FP 生成/消滅反応チェーン

当然の如く、この FBR の FP 生成/変換反応のチェーンと図 2 の s-過程元素合成反応のチェーンは類似したものとなる。いずれも安定核領域を通った経路となる。ここで、FBR 内の FP 反応チェーンは、次の約束に従ってプロットした。すなわち  $\beta$  崩壊の寿命が中性子捕獲による核変換の寿命より十分短い FP 核種は、反応チェーンから除いた。図 3 中の空白の四角で描かれた核種が、除かれた FP である。核分裂収率の整合性を保つため、除いた  $\beta$  崩壊短寿命 FP の核分裂収率は、同じ  $\beta$  崩壊系列中の安定 FP または  $\beta$  崩壊長寿命 FP の核分裂収率に繰り込んだ。この反応チェーン図では、 $\beta$  崩壊の半減期  $T_{1/2}$  が 0.1 年以上の FP 全てをつなげてプロットしてある。

このように、FBR と s-過程の起こっている恒星とは、中性子の観点からは非常に共通点が多い。しかしながら、両者間で大きく異なるのはその反応(燃焼)期間である。FBR では高々 1 年程度であるが、s-過程では 1000 年以上もある。従って、本来のままでは、それぞれの反応後の核種分布は、残念ながら似たものとはならない。そこで FBR の燃焼期間を十分長くとり平衡状態に達するまで計算をし、s-過程による合成元素分布との比較を行なう。

FBR の燃焼計算は、1 群近似により行なった。炉体系はナトリウム冷却金属燃料 ( $\phi = 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ,  $P = 2.5 \text{ GW}_{\text{th}}$ ) を仮定した。核分裂収率は、FBR 中の全核分裂の約 70% を担う  ${}^{239}\text{Pu}$  のみを考慮し、収率値は文献[6]によった。また中性子断面積は文献[7]を参照した。およそ 10000 年の連続燃焼で平衡に至った。図 4 に、平衡状態における FBR

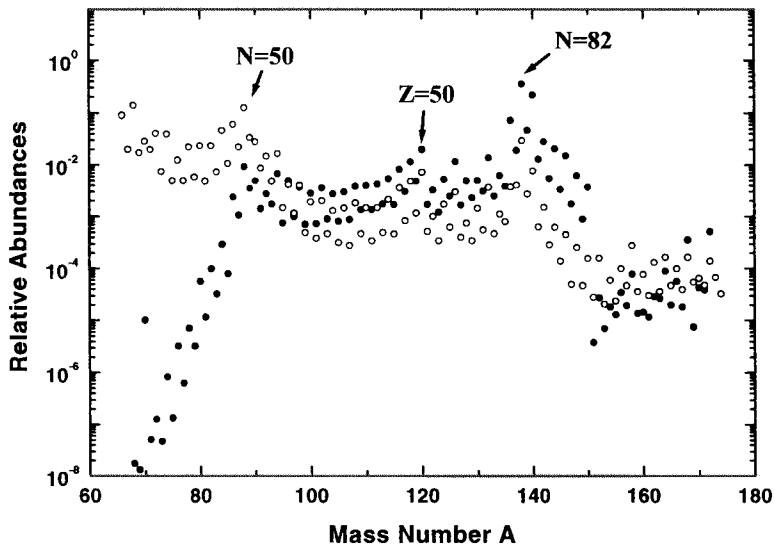


図4. 平衡時における FBR 内 FP 分布(●)と s-過程合成元素分布(○)の比較

内での FP 分布と s-過程元素分布[8]の比較を示す。

いずれの分布も 1 に規格化してあるが、質量数  $A > 80$  では、ほぼ一致していることが分かる。いずれの分布でも中性子魔法数  $N = 50, 82$  に強いピークが形成されており、また陽子魔法数  $Z = 50$  においても微弱ながらピークが存在する。s-過程では Fe 族元素を種核として元素合成が進むので、 $A < 60$  の元素の存在度が多い。一方、FBR 内では核分裂により  $A = 90, 140$  の核種を中心に常に供給がなされるため、 $N = 82$  に相当するピークの存在度が s-過程によるピークよりも強くなっていることが分かる。

以上より、FBR 内の FP 生成/変換反応と s-過程元素合成反応の間にも類似点があることが分かった。最後に参考までに、FBR 内の FP 生成/変換反応計算に用いた断面積と、s-過程元素合成計算で用いられる  $kT = 30\text{keV}$  でのマクスウェル平均捕獲断面積の比較を図5に示す。このマクスウェル平均捕獲断面積は、最近 JENDL-3.2 から求められたものである[9]。当然のことながら両者は近い値となり、両分野での協力が容易であろう事が分かる。

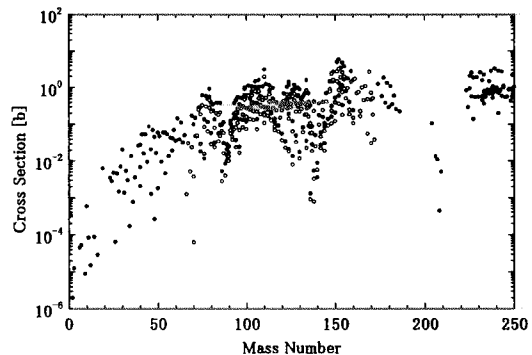


図5. s-過程元素合成計算に用いる  $kT = 30\text{keV}$  でのマクスウェル平均中性子捕獲断面積(●)と高速炉内 FP 中性子捕獲断面積(○)の比較

### 3.3 核的統計平衡に基づいた類似性についての考察

ここまで、原子力システム中の核反応と宇宙における核反応の類似性を見てきた。ところで現在では、宇宙における元素合成過程は、核的統計平衡(Nuclear Statistical Equilibrium : NSE)の概念を用いて分類出来ることが分かってきている[10]。NSE 状態においては、質量数  $A$ 、原子番号  $Z$  の核種の存在比  $Y(A, Z)$  は

$$Y(A, Z) = G(A, Z) \cdot \left[ \zeta(3)^{A-1} \cdot \pi^{(1-A)/2} \cdot 2^{(3A-5)/2} \right] \cdot A^{3/2} \cdot \left( \frac{kT}{m_N c^2} \right)^{\frac{3(A-1)}{2}} \cdot \phi^{1-A} \cdot Y_p^Z \cdot Y_n^N \cdot e^{\frac{B(A, Z)}{kT}} \quad (1)$$

で表される。ここで、 $\zeta(3)$  は 3 次のリーマンのツェータ関数、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は温度、 $m_N$  は核子の質量、 $c$  は光速、 $Y_p$  と  $Y_n$  は初期の陽子と中性子の数密度、 $B(A, Z)$  は結合エネルギーである。また  $G(A, Z)$  と  $\phi$  はそれぞれ核分配関数と、光子-バリオン数比であり、

$$G(A, Z) = \sum_i (2J_i + 1) \cdot e^{-E_i/kT} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{n_\gamma}{n_b} = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{g_\gamma}{(\hbar c)^3} \cdot \frac{\zeta(3) \cdot (kT)^3}{\rho \cdot N_A} \quad (3)$$

とそれぞれ表される。ここで、 $J_i$ 、 $E_i$  は、第  $i$  励起状態のスピンの励起エネルギー、 $g_\gamma$  は光子のヘリシティ、 $\hbar$  はプランク定数、 $\rho$  はバリオン密度、 $N_A$  はアボガドロ数である。このように、NSE 状態においては各核種の存在比は反応断面積に依存せずに、3 つのパラメーター  $T$ 、 $Y_p/Y_n$ 、 $\rho$  (あるいは  $\phi$  でも同値) のみで決定される。実際の宇宙における元素合成時に

おいては、厳密に NSE 状態が成立している場合は殆どなく、s-過程の場合では Falling Short of NSE、r-過程では Freezeout from NSE となっている[10]。原子力システム内での核反応についてもこの NSE もしくは Falling Short of NSE、Freezeout from NSE を用いて分類してみることは、興味のある

表 2. NSE の概念に基づいた、宇宙での元素合成と原子力システムでの核反応の予想対応

宇宙での元素合成	Nuclear Statistical Equilibrium (NSE)	原子力システム
ビッグ・バン 元素合成	Freezeout from NSE	(FBR) G. Gamow
熱核融合反応 (p-p チェイン)	NSE	核融合炉
s-過程	Falling Short of NSE	FBR の FP 生成/変換
r-過程	Freezeout from NSE	(FBR の 燃料増殖)??
オクロ天然炉		熱炉



あることである。表 2 に、NSE に基づいた宇宙での核反応と原子力システムでの核反応の予想対応を示す[4]。

ビッグバン元素合成は、宇宙初期の熱平衡状態からの断熱膨張がもとになっているので、明かに Freezeout from NSE であるが[11]、これは Gamow が指摘したように FBR と対応するであろう。恒星内の通常の燃焼(熱核融合反応)は NSE であるが、核融合炉がその対応物と考えて良いだろう。s-過程は Falling Short of NSE であるが、これは本解説で既に示したように FBR 内の FP の生成/変換が対応している。r-過程は Freezeout from NSE であるが、原子力システムにこれの対応物は見当たらない。しかし、r-過程が宇宙で恐らく唯一 Th、U を合成する過程であることから、FBR 中での燃料増殖と対応できないだろうか。あと、NSE とは無関係であるが、参考のためオクロ天然炉と原子力システムにおける熱炉も挙げておく。

現在のところ、表 2 の対応予想の確認は出来ていない。ここでは、その途中経過の例として、NSE 分布と Fe 付近までの太陽系内元素分布との比較を図 6 に、NSE 分布と FBR の FP 平衡分布との比較を図 7 に示す。計算には半減期が 1sec 以上の核種を考慮した。NSE の 3 つのパラメーターは、図 6 の場合に  $T=6 \times 10^9 \text{ }^\circ\text{K}$ 、 $Y_p / Y_n = 0.5$ 、 $\phi = 10^3$ 、

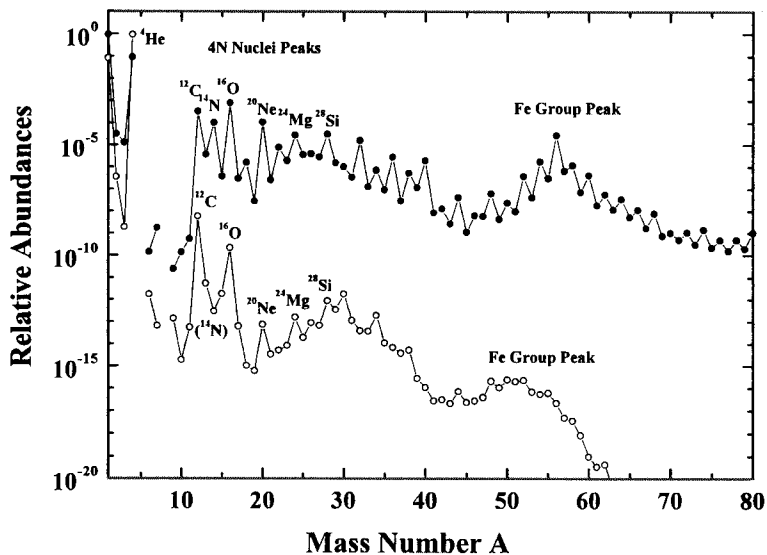


図 6. 太陽系内元素分布(●)と NSE 分布(○ :  $T=6 \times 10^9 \text{ }^\circ\text{K}$ 、 $Y_p / Y_n = 0.5$ 、 $\phi = 10^3$ )との比較

図 7 の場合には  $T=5 \times 10^9$  °K、 $Y_p / Y_n=0.5$ 、 $\phi=10^3$  とした。いずれの図でも全ての存在度は 1 に規格化してある。

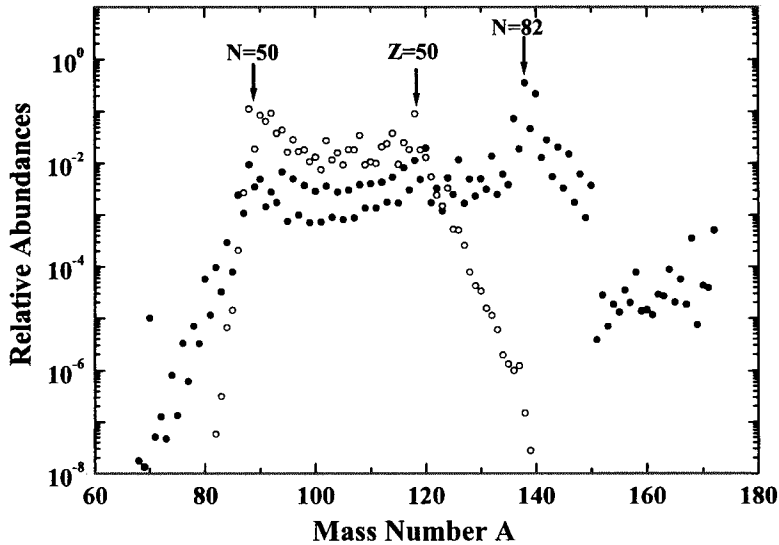


図 7. 平衡時の FBR 内の FP 分布(●)と NSE 分布(○ :  $T=6 \times 10^9$  °K、 $Y_p / Y_n=0.5$ 、 $\phi=10^3$ )との比較

NSE 分布は太陽系内元素分布と定量的には合わないが、定性的に再現していることが分かる。例えば H や He が豊富に存在し、4N 核のピークも再現できており、Fe 族のピークもある。但し  $^{14}\text{N}$  は 4N 核ではないため NSE 分布では再現できないが、太陽系内元素分布では CNO サイクルにより形成されるために存在する。次に NSE 分布と FBR の FP 平衡分布を比較すると NSE 分布では  $N=50$  と  $Z=50$  の魔法数あたりのピークは再現されているが、 $N=82$  の魔法数のピークは再現出来ていない。先にも述べたように、s-過程の対応物である FBR 中の FP 分布を再現するためには Falling Short of NSE を用いる必要があるであろう。

今後、Falling Short of NSE 及び Freezeout from NSE 等の計算を行い、原子力システムにおける核反応と宇宙における核反応の対応を調べていく予定である。

#### 4. おわりに

原子力システムにおける核反応と宇宙における核反応の間には、類似性が存在する。

本研究により、特に FBR 内での FP の生成/変換反応と恒星内 s-過程元素合成反応の間に類似性があることが確認できた。また核的統計平衡(Nuclear Statistical Equilibrium : NSE)の概念を用いると、これらの類似性の関係を統一的に記述することの出来る可能性があることが分かった。

原子力開発の研究と宇宙元素合成の研究は、お互い独立して行なってきたが、ここまで説明してきたように共通の領域がかなり存在する。今後、両者は協力して研究を行なう道を検討してはどうだろうか。

また、この解説では中性子反応に幾分偏っているため不十分な点もあると思う。特に陽子反応、 $\alpha$  反応等についても十分共通点が見つかり得ると思う。今後そちらの方面で研究を進めるのも興味深い。

## 参考文献

- [1] E.Anders, and N.Grevesse, *Geochem. et Cosmochem. Acta*, **53**, 197(1989).
- [2] P.A.Seeger, W.A.Fowler, and D.D.Clayton, *The Astrophys. J. Suppl.*, **11**, 121 (1965).
- [3] R.A.Alpher, H.Bethe, and G.Gamow, *Phys.Rev.* **73**, 803 (1948).
- [4] F.Reines ed., *Cosmology, Fusion & Other Matters*, Colorado Associated University Press (1972).
- [5] 大崎敏郎, 第 2 回「極限条件におけるハドロン科学」研究会報告集, *JAERI-Conf* in press.
- [6] H.Ihara, Tables and figures from JNDC nuclear data library of fission products, Ver. 2. *JAERI-M* 89-204 (1989).
- [7] N.Takaki, Dr. Thesis, Tokyo Institute of Technology (1992).
- [8] J.W.Truran, I.Iben, Jr., *The Astrophys. J.*, **216**, 797 (1977).
- [9] T.Nakagawa, S.Chiba, T.Ohsaki, and M.Igashira, *JAERI-Research* 2000-002 (2000).
- [10] B.S.Meyer, *Annu.Rev.Astron.Astrophys.* **32**, 153 (1994).
- [11] M.S.Smith, L.H.Kawano, and R.A.Malaney, *The Astrophys. J. Suppl.*, **85**, 219 (1993).