解説

放射性核廃棄物のゼロリリースに向けて —核融合中性子源への期待と役割—

齊 藤 正 樹

(東京工業大学原子炉工学研究所)

Toward Zero-Release of Radioactive Wastes — The Expectation and Role of Fusion Neutron Sources —

SAITO Masaki

Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8550, Japan

(Received 22 September 1999)

Abstract

The Establishment of a Self-Consistent Nuclear Energy System (SCNES) attempts to meet the following four requirements –energy production, fuel production, the burning of radionuclides, and system safety with a strong reliance on excess neutron generation. Based on several milestone studies, it has been pointed out that a fast fission reaction provides an appreciable neutron excess to incinerate fission products, while MA (Minor Actinides) may be treated as a fuel along with Pu in this system. To improve both the quality and quantity of neutron excess for the transmutation of radiowastes, neutron generation in the external neutron sources based on accelerator and/or fusion technologies was evaluated. Our results suggest that multi-component SCNES supplemented by accelerator-driven and fusion-based neutron sources may approach the final goal of the development of a nuclear energy system that is safe, wasteless, and supported by reliable fuel resources.

Keywords:

self-consistent, radioactive waste, zero -release, transmutation, neutron balance, energy balance, excess neutron cost, energy utilization factor, external neutron source, fusion neutron

1. はじめに

20世紀は、「石油」というエネルギー源により、人類社会は史上経験のない飛躍的な経済発展をなした。しかし、これは裏を返せば、20世紀は「有限のエネルギー資源を無制限に利用し、その廃棄物として二酸化炭素を地球環境に無防備に排出した世紀」であったともいえる。そして人類は、皮肉にも自らの生存の基盤を揺るがす「エネルギー資源の枯渇」と「地球温暖化」という厳しい環

境問題に直面している。

この環境問題とエネルギー資源の枯渇問題に対し、まだ誰もが納得する解を人類は見つけていない。今後さらに、開発途上国の経済発展や人口増加を考えると、省エネルギー技術や再生可能な新エネルギー技術開発はもとより、20世紀後半に人類が手に入れた原子力エネルギーの地球環境や人間社会との調和の可能性の追求なくしては、21世紀は、「地球環境破壊の加速と文明社会崩壊の

author's e-mail: msaitoh@nr.titech.ac.jp

始まりの世紀」となるだろう。

核分裂、核融合、加速器を問わず、原子力が、その利用の高度化に加え、地球環境や人間社会と調和し、原子力文化として人間社会に定着してゆくためには、原子力が究極的な形態として、人間社会において長期にわたって十分なエネルギー源となり得るとともに、システム内に内在する放射性廃棄物の無害化（消滅）ないしは、システムがいかなる苛酷環境条件下におかれても放射性廃棄物が時間的・空間的に限定され、システム外に放出せず、実質的にはゼロリリースをめざした新しい原子力システムの創出が必要である。

このような新しい原子力システム概念の創出とその成立可能性を科学的に検討する研究（「自ら整合性を持つ原子力システム (Self-Consistent Nuclear Energy System: SCNES) の研究」）が、1990年代初め頃から藤家らによって東京工業大学原子炉工学研究所で始められた[1-7]。この概念は、その後、核分裂反応単独系から核融合反応系やさらに加速器による核破砕反応系との共生 (symbiont) 系または混成 (hybrid) 系に拡張され、システム内の中性子経済、エネルギー経済、物質循環、個々の放射性廃棄物の消滅特性等を中心に、海外も含めた多くの研究者らが横断的に協力して研究をすすめている[8-19]。

本稿は、これらの研究のうち「自ら整合性を持つ原子力システム」の成立に向け、システム内の中性子経済、エネルギー経済の観点から「核融合中性子源への期待と役割」についてまとめたものである。

2. 自ら整合性を持つ原子力システム

原子力エネルギーが将来の人類の重要なエネルギー源の一つとして、人間社会に安心して受け入れられるためには、単にエネルギーの生産のみならず、原子炉の臨界安全の保証（核暴走の起こり得ない原子炉システムの構築）はもとより、原子力システムから発生する有害な放射性廃棄物を実質的な意味において、消滅・無毒化し、長い将来にわたって人間社会やそれを取り巻く自然環境と調和することが必要である。

これを達成するために、次の4つの目標

- (1) エネルギーの生産、
- (2) 燃料の増殖（自給）、
- (3) 放射性廃棄物の変換（消滅）、
- (4) システムの安全性確保

を同時に達成すべくものとして「自ら整合性を持つ原子力システム」が提案され[1,2]、その科学的成立性について研究が進められている。

Fig. 1 Material and energy flows in Self-Consistent Nuclear Energy System (SCNES).

Fig. 1にSCNESにおけるエネルギーと物質の流れを示す。このシステムでは、天然ウランを燃料として取り込み、取り出されるものはエネルギーと安定な核分裂生成物と短寿命の核分裂生成物である。

2.1 消滅対象核種の選定

原子力が将来の人間社会やそれを取り巻く自然環境に対して危険となる要因をもたらさず、長期的に安定かつ安心できるエネルギー源となるためには、原子炉から排出されるどのような放射性廃棄物（核種）を消滅対象として選択すべきか？ この問いに対する答えは、人間社会における価値観（時代や地域により異なる）により決まるものであるが、SCNESの研究では、Pu-239の高速中性子による核分裂生成物を対象として、以下に示す選定基準により、Table 1に示す29核種が消滅対象核種として選定されている[4]。

- (1)半減期が1年以上の核分裂生成物
- (2)収率(%) / 半減期(年) $> 10^{-10}$

Table 1 Fission products selected for transmutation.

$T_{1/2}$ (year)	Isotope	Yield	Fraction
1~10	106Ru	1.9766e-1	17.6
	102Rh	6.1917e-10	
	109Cd	3.9112e-10	
	125Sd	7.5423e-4	
	134Cs	5.3698e-4	
	146Pm	1.3804e-8	
	147Pm	9.9830e-7	
	154Eu	3.6053e-5	
	155Eu	5.8218e-4	
10~20	171Tm	1.6505e-8	0.505
	85Kr	5.7197e-3	
	93mNb	2.3433e-8	
	113mCd	6.2038e-6	
20~30	152Eu	1.7373e-7	68.7
	90Sr	3.4831e-2	
30~100	137Cs	7.4431e-1	0.0202
	121mSn	1.4931e-4	
100~10 ⁴	151Sm	8.0324e-5	3.36 × 10 ⁻⁴
	108mAg	8.6357e-8	
	158Tb	2.3016e-7	
	166mHo	3.4982e-6	
> 10 ⁴	79Se	6.0293e-5	13.2
	94Nb	3.6682e-6	
	93Zr	7.2122e-4	
	99Tc	5.6623e-6	
	107Pd	2.9967e-6	
	126Sn	1.3977e-1	
	129I	1.2504e-4	
	135Cs	9.0313e-3	

(100%)

第二の判定基準は、1,000 MWeの出力で1年間運転したときに蓄積される量が、その燃焼を無視したとき約 7×10^7 Bq (2 mCi) 以上の核分裂生成物を示す。すなわち、半減期が1年以下の核分裂生成物や生成量の微小な核分裂生成物は実質的に実害がないものとしている。

また、SCNESでは、マイナーアクチニド(MA)は、核廃棄物としてではなく、核分裂エネルギー生成に寄与するためプルトニウムと同様、貴重な核燃料物質として取り扱われている。

2.2 中性子バランス

核分裂炉を基本にした場合のSCNESが成立するためには、核分裂反応で発生する中性子数が、核分裂の連鎖反応維持および燃料の増殖に消費され、さらに冷却材や構造材による吸収や炉心外への漏洩を考慮して、上記で選択された核分裂生成物の消滅のために必要な中性子数を上回ることが必要条件である。

Table 2に、金属燃料ナトリウム冷却高速増殖炉（出力1,000 MWe、燃料、冷却材、構造材体積比=35:40:25）を仮定して求めた中性子バランスの一例を示す[20]。1核分裂あたり核分裂反応(Pu)で発生する中性子（約2.95個）は、連鎖反応維持（1個）、燃料増殖（平衡期とし、増殖比=1とする）に利用されるほか、冷却材や構造材による吸収、また、炉心外への漏れとなるが、その残りの余剰の中性子（約0.58個）は放射性核分裂生成物の消滅に利用できる。この原子炉内で生成される余剰中性子は、これまでの検討では、消滅すべき長寿命核分裂生成物（29核種）を同位体分離して炉内にリサイクルする場合、それらの消滅のために吸収される中性子数（約0.25個）を十分上回っている。

一方、消滅すべき長寿命核分裂生成物（29核種）を、

Table 2 An example of neutron balance in fast reactor.

(without leakage)	
(n/1 fission)	
• Generation (U and TRU)	+2.95
• Absorption (U and TRU)	-2.23
• Absorption (Coolant and Structures)	-0.14
• Excess Neutron (For Transmutation of FPs)	+0.58

同位体分離せずに元素分離のみで原子炉内にリサイクルする場合、それらの消滅のために吸収される中性子数は、隣の核の β 崩壊による生成および隣の核の中性子捕獲による生成を無視しても、1核分裂あたり0.99個であり、中性子が不足する[4]。

また、現在商用化されている軽水炉では、燃料や構造物材や冷却材による中性子の無駄吸収が多く、炉内で生成される余剰の中性子数は、消滅すべき核分裂生成物（29核種）を同位体分離をしてリサイクルする場合でも、それらの消滅のために吸収される中性子数を下回り、軽水炉だけでは SCNES は成立しない[3]。

2.3 エネルギーバランス

次に、消滅（システム内封じ込め）対象の長寿命核分裂生成物（29核種）を原子炉内にリサイクルするための元素分離および同位体分離に消費されるエネルギーが、核分裂によって生成するエネルギーで十分に賄えることが必要である。

Table 3 に、その評価の1例を示す[3,5]。ここでは、自由電子レーザー (FEL) を用いた同位体分離を例として、同位体分離に要するエネルギーを1核分裂あたりの形で示されている。この評価によると、1核分裂あたり約3 MeV 以下で同位体分離をしてリサイクルすることが原理的に可能であるといえる。

3. SCNES のための外部中性子源の役割

SCNES の4つの目標を達成するためには、システム内のエネルギーバランスおよび中性子バランス（中性子の数の「豊富さ」）が重要な要素となるが、核分裂反応系だけでは、放射性核種を変換（消滅）するための余剰の中性子数に限界がある。また、消滅対象として選定された29核種の完全な同位体分離には、多くの技術的課題があり、同位体分離をしないで元素分離のみでリサイクルするようなより現実的な場合を考えると、核分裂反応系だけでは余剰の中性子は不足する。たとえば、半減期1年以上の核分裂生成物を同位体分離をせずに、元素分

離のみでリサイクルする場合、それらの消滅のために吸収される中性子数は、隣の核の β 崩壊による生成および隣の核の中性子捕獲による生成をも考慮すると、1核分裂あたり6.7個であり、半減期30年以上の核分裂生成物を元素分離のみでリサイクルする場合ですら、1核分裂あたり1.12個となり、核分裂反応単独系では余剰の中性子は明らかに不足する[20]。

このシステム内の中性子経済を改善するために、Fig. 2 に示すような核分裂反応系で生成されるエネルギーにより駆動される核破砕反応系や核融合反応系等によって生成される中性子を、核分裂反応系における不足中性子を補うための外部中性子源として利用するシステムが提案されている[8-10]。

たとえば、Fig. 2 に示すように、核分裂エネルギーの一部(E_f^{NS})で加速器を駆動し、核破砕反応等を利用して新たな多くの中性子を発生させ、その中性子を、まず、自らの駆動源となった核分裂反応で発生した核分裂生成物の消滅に使用(n_{req}^{NS})すると、その残りの中性子は、“クリーンな”（放射能 free な）余剰中性子(Δn_{ex})と言

Table 3 Energy required for recycling of materials.

recycling process	method	energy used / fission
separation of (U+TRU) from discharge fuel	electrorefining process pyrochemical process	less than 1 MeV
separation of radioisotope (T > 1 year) from FP	atomic vapor laser isotope separation	less than 3 MeV

$$\text{Excess Neutron Cost(ENC)} = \frac{E_f^{NS}}{\Delta n_{ex}} (\text{MeV/n})$$

$$\text{Energy Utilization Factor(EUF)} = \frac{\text{Net Energy}(E_f^{net})}{\text{Total Energy Generated}}$$

$$= \frac{E_f^{net}}{E_f^{NS} + E_f^{NS} + E_f^{net}}$$

Fig. 2 SCNES with external neutron sources.

える。

このようにして生成される“クリーンな”余剰中性子の利用法は、いろいろと考えられるが（医療用にも利用できるだろう）、ここでは、核分裂エネルギー生成に利用するとして、その核分裂反応で生成する放射性核分裂生成物の消滅に利用するとすれば、これによって生成する核分裂エネルギー（ E_f^{net} ）は、放射性核分裂生成物の不安から解消された“クリーンな”核分裂エネルギーと言える。

このとき、システム全体で生成した全エネルギーのうち“クリーンな”核分裂エネルギーとしてシステム外に取り出せる割合は、“クリーンな”余剰中性子生成を生成するのに消費されるエネルギーが少ないほど大くなる。

以下に、これらの各種外部中性子源システムにおける中性子経済およびエネルギー経済を評価する一般的な方法論、およびそれに基づいて実施した各種の外部中性子源システムの中性子経済およびエネルギー経済をSCNESの成立性の観点から比較・評価した結果を紹介する。

3.1 外部中性子源システムの評価関数[8-10]

核分裂反応系で生成するエネルギーにより駆動される核破砕反応系や核融合反応系等によって生成される中性子を、核分裂反応によるエネルギー生成とともに生成される放射性核分裂生成物を変換（消滅）するための外部中性子源として利用するシステムにおける中性子経済およびエネルギー経済を評価するために、以下に示す2つの重要なシステムの性能を評価する指標、余剰中性子コスト (Excess Neutron Cost: ENC) およびエネルギー利

用率 (Energy Utilization Factor: EUF) が提案されている。

第一の性能指標（余剰中性子コスト）はシステムの中性子経済を評価する指標で、余剰中性子（システム内で生成される全中性子から、核分裂反応の維持、燃料の増殖、さらに、放射性核分裂生成物の消滅等に必要な中性子を差し引いた残りの中性子）1個を生成するのに必要なエネルギー (MeV) として定義されている。

第二の性能指標（エネルギー利用率）はシステム全体のエネルギー経済を評価する指標で、システム内で生成される全エネルギーに対するシステム外に供給される正味のエネルギー（全生成エネルギーから中性子を生成するために消費されるエネルギーを差し引いたエネルギー）の比として定義されている。すなわち、このエネルギー利用率は、システム内で生成される全エネルギーのうち、内部消費分を差し引いた後、“クリーンな”核エネルギーとしてどれだけ外部に供給できるかを示す指標である。

第二の指標である“クリーンな”核エネルギーの生成割合 (EUF) は、消滅に必要な不足中性子の数に依存するが、第一の指標である“クリーンな”余剰中性子生成コスト (ENC) が安いほど良くなる。

これら2つの性能指標の導入により、各種の外部中性子源システム間の性能を比較・評価することが可能となる。

3.2 各種外部中性子源システムの性能評価結果例[8-10]

前節で紹介した2つのシステム性能評価指標に基づいて、加速器技術を利用した核破砕反応やストリッピング反応による外部中性子源システム、および D-T や D-D 核融合反応による外部中性子源システムの Q 値（プラ

Fig. 3 Potential of accelerator technology in excess neutron generation.

Fig. 4 Comparison of excess neutron generation between D-T plasma fusion and accelerator-driven core systems.

Fig. 5 Comparison of excess neutron generation between D-T and D-D plasma fusion systems.

ズマ加熱に必要なエネルギーに対する核融合反応エネルギーの比)をパラメータとして、“クリーンな”余剰中性子生成性コストおよびエネルギー利用率の評価結果例をFig. 3, 4, 5に示す。ただし、これらの評価例は、消滅に必要な不足中性子の数を1核分裂あたり0.7個(この値は、半減期は30年以上の核種を同位体分離せずに、元素分離のみリサイクルする場合に、核分裂単独系では不足する中性子数(0.54個)に漏洩等による損失分を考

慮した値)とした場合の評価例である。

Fig. 3によると、高エネルギーに加速された陽子による核破砕反応系では、従来から提案されている鉛ターゲットを用いた核破砕反応系における余剰中性子コストは1330 MeV/n(エネルギー利用率:約18%)である。中性子経済を改善するために新しく提案された天然ウラン-ベスマスターゲット系では、天然ウランの高速核分裂の寄与のため中性子経済は優れており、余剰中性子コス

トは 660 MeV/n (エネルギー利用率: 約30%) で、鉛ターゲットの場合に比べて、約1/2となる。また、加速された重水素原子核とリチウムターゲットによるストリ

Fig. 6 Energy utilization factor as a function of excess neutron cost in SCNES with external neutron sources.

ッピング反応系は、高エネルギーに加速された陽子による核破砕反応系に比べ、中性子経済が劣り、余剰中性子は生成できない。

D-T 核融合反応系については、トリチウムの増殖を考慮しても、 $Q=1$ をもつ核融合反応系では、余剰中性子コストは 540 MeV/n (エネルギー利用率: 約35%)、 $Q=15$ をもつ核融合反応系では 50 MeV/n (エネルギー利用率: 約80%) となり、核破砕反応系 (天然ウラン-ビスマスターゲット系) に比べ、中性子経済がさらに優れ、余剰中性子コストは 1 桁以上安くなる。

これらの外部中性子源による余剰中性子コストとエネルギー利用率を Fig. 6 に示す。これらの結果は、例えば、ITER クラスの核融合炉と核分裂炉の混成系では、核分裂生成物を同位体分離せずに元素分離のみでリサイクルする条件で、システム全体で生成する核エネルギーの80%は30年以上の半減期を持つ放射性核分裂生成物の不安のない(それらが消滅された)“クリーン”な核エネルギーとして、システム外に取り出せる可能性を示すものである。

さらに、トリチウムの増殖の不要な D-D 核融合反応系では、D-T 核融合反応系に比べ、約 5 倍の余剰中性子生成能力があり、核分裂反応単独系での不足中性子数が

Fig. 7 Structure of multi-component SCNES.

増加する消滅条件の場合でも、D-D 核融合反応系は外部中性子源として、その適用性は高い。

4. まとめ (核融合中性子源への期待)

放射性廃棄物のゼロリリースをめざした「自ら整合性を持つ原子力システム」の成立の観点から、各種外部中性子源システムにおける中性子経済およびエネルギー経済を中心に比較・評価し、核融合中性子源への期待と役割をまとめた。核融合技術を利用した方が、高エネルギーに加速された陽子による核破砕反応を利用した場合に比べて、放射性廃棄物を消滅するための余剰中性子の生成効率が良く、その余剰中性子生成コストが安く、放射性核分裂生成物の心配のいらないクリーンな核エネルギーを、より多くシステム外に取り出せる可能性が高い。

また、核融合反応で発生する 14 MeV 中性子は、消滅の観点からすると核分裂中性子や核破砕中性子に比べ、「質の高い中性子」であり、Sr-90 や Cs-137 のように核分裂中性子では消滅困難な核分裂生成物の高い消滅効果が期待できる。

今後、核分裂反応単独系のみならず核融合反応系やさらに加速器による核破砕反応系のそれぞれの特徴を活かし、共生 (symbiont) 系または混成 (hybrid) 系として統合し、システム内の中性子経済、エネルギー経済、物質循環量、放射性廃棄物の消滅効果等の観点から最適な核物質のリサイクル系 (multi-component SCNES [19],

Fig. 7) の構築が望まれる。

参考文献

- [1] Y. Fujii-e, *Proc. Int. Conf. Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants* (1992).
- [2] Y. Fujii-e, T. Morita, H. Kawakami, K. Arie, M. Iida and H. Yamazaki, *Proc. Int. Specialists' Meeting on Potential of Small Nuclear Reactors for Future Clean and Safe Energy Sources* (Elsevier, Amsterdam, 1992) p.89.
- [3] A. Shimizu and Y. Fujii-e, *Prog. Nucl. Energy* **29**, 25 (1995).
- [4] H. Akatsuka, T. Ohsaki, T. Obara, M. Igashira, M.

- Suzuki and Y. Fujii-e, *Prog. Nucl. Energy* **29**, 477 (1995).
- [5] H. Arie, M. Suzuki, M. Kawashima, M. Igashira, A. Shimizu and Y. Fujii-e, *Prog. Nucl. Energy* **29**, 455 (1995).
- [6] H. Endo, M. Kawashima, M. Suzuki, M. Saito, A. Shimizu and Y. Fujii-e, *Prog. Nucl. Energy* **29**, 463 (1995).
- [7] R. Takagi, H. Matsuura, Y. Fujii-e, R. Fujita and M. Kawashima, *Prog. Nucl. Energy* **29**, 471 (1995).
- [8] M. Saito, A. Chmelev, V. Artisyuk, M. Suzuki, Yu. Korovin and Y. Fujii-e, *Prog. Nucl. Energy* **32**, 697 (1997).
- [9] V. Artisyuk, A. Chmelev, M. Saito, M. Suzuki, Yu. Korovin and Y. Fujii-e, *Kerntechnik* **63**, No.5-6, 255 (1998).
- [10] M. Saito, V. Artisyuk and A. Chmelev, *J. Nucl. Sci. Technol.* **36**, 560 (1999).
- [11] V. Artisyuk, A. Chmelev, M. Suzuki, M. Saito and Y. Fujii-e, *Prog. Nucl. Energy* **32**, 721 (1997).
- [12] Yu. Korovin, M. Saito, V. Artisyuk, M. Suzuki, E. Avdeyev, A. Konobeyev and A. Stankovsky, *Prog. Nucl. Energy* **32**, 457 (1997).
- [13] A. Chmelev, V. Artisyuk, M. Suzuki, M. Saito and Y. Fujii-e, *Prog. Nucl. Energy* **32**, 659 (1997).
- [14] Yu. Konobeev, Yu. Korovin, P.E. Pereslavl'tsev, V. Artisyuk and M. Saito, *Nucl. Energetics* **4**, 44 (1998) (in Russian).
- [15] V. Apse, V. Artisyuk, M. Saito and A. Chmelev, *Nucl. Energetics* **5**, 54 (1998).
- [16] V. Apse, V. Artisyuk, M. Saito and A. Chmelev, *Nucl. Energetics* **6**, 36 (1998).
- [17] D. Zialetsev, V. Artisyuk, M. Saito, M. Suzuki, A. Chmelev and Yu. Korovin, *Proc. Int. Conf. Future Nucl. Systems (GLOBAL'97)* **2**, 1344 (1997).
- [18] M. Saito, V. Artisyuk and A. Chmelev, *Genshikaku Kenkyu* **43**, 55 (1999).
- [19] M. Saito and V. Artisyuk, *to be published in Bulletin of the Research Laboratory for Nuclear Reactors* **23** (1999).
- [20] T. Ohsaki, *private communication*.