

5.2 革新的分離核変換

5.2.1 核変換(核不拡散と核廃棄物の低減を目指して)

斉藤 正樹

ここでは、21 世紀COE事業「世界の持続的発展を支える革新的原子力」における代表的な革新的核変換システム研究の一つである「人間社会や地球環境と調和した原子力システムの研究」について紹介します。

「人間社会や地球環境と調和した原子力システムの研究」は、1990年代初めに「自ら整合性を有する原子力システム(Self-Consistent Nuclear Energy System (SCNES))の研究」として開始されました。この研究の目的は、以下の4つの目標を同時に満足する原子力システム概念を構築することです。

- (1) エネルギー生産
- (2) 燃料の増殖
- (3) 核廃棄物の消滅(核変換)
- (4) 安全性の保障

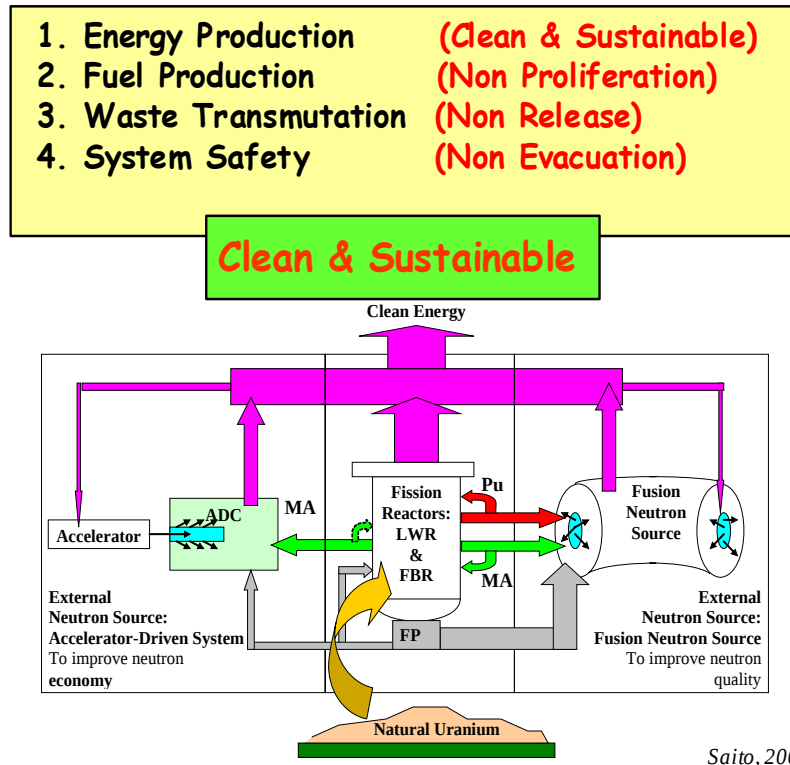
上記4つの目標達成には、原子力システム内の中性子の数と性質が大きな影響を与えるため、システム内の中性子の数と性質を改善するために、核分裂中性子以外に陽子ビームを利用した核破砕中性子や核融合中性子を取り込んだ **Multi-Component Self-Consistent Nuclear Energy System (MC-SCNES)** 研究に発展してきました。(図 5.2.1-1 参照)

当初SCNES研究では、マイナーアクチニド(MA)は核廃棄物としてではなく、速度の速い“硬い”高速中性子によって核分裂させることが出来るため、貴重な核燃料として取り扱われていました。しかし、例えば、MAの代表的な核種であるネプツニウム²³⁷Npやアメリシウム²⁴¹Amは、速度の遅い“柔らかい”熱中性子領域では、中性子を吸収して核分裂するよりも、プルトニウム²³⁸Puに変わることが分かってきました。この²³⁸Puは、他のプルトニウムの仲間に比べて、非常に高い崩壊熱と多くの自発核分裂中性子を放出するため、²³⁸Puを多く含むプルトニウムは軍事転用が困難だと言われています。

このようにMAの核変換を利用して、「高い核拡散抵抗性を有するプルトニウムの生成に関する研究(P³計画:Protected Plutonium Production (P³))」が 2000 年初めに開始されました。現在は、上記SCNESの 4 つの目標に「核不拡散」を達成すべき新たな目標として加えています。

このように、P³技術を利用すると、現在、高レベル放射性廃棄物の対象とされているマイナーアクチニド(MA)をウラン燃料に少量添加することにより、発電しながら、燃料中にプルトニウム²³⁸Puを多く含む強い核拡散抵抗性を持つプルトニウムを生成することが可能となります。また同時に、高レベル放射性廃棄物の対象とされているMAを減らすことに貢献します。

Multi-Component SCNES for Sustainable Growth



Saito, 2004,05,01

図 5.2.1-1 自ら整合性を有する原子力システム(MC-SCNES)

(1) 核廃棄物(長寿命核分裂生成物(LLFP))の消滅に関する研究

SCNES の核廃棄物の消滅(核変換)の研究では、MA 核種は核分裂をする核種が多く、これだけの消滅なら、MAと核分裂生成物(FP)を十分な精度で分離するという課題がありますが、一般的な条件で高速炉だけで中性子は不足しないことを研究のごく初期に明らかにしました。一方長寿命核分裂生成物(LLFP)に関しては、中性子は消費するだけで、原子炉だけで消滅するのはMAに比べて非常に困難です。しかし半減期 100 年以上の LLFP の放射性毒性や放射能は、それらを産んだ燃料(ウラン等)が元々有した放射性毒性や放射能とほぼ同等かそれ以下のレベルであることが我々の研究で判っています。

SCNESが目指す究極の目標は、核廃棄物を環境に出さない **“Zero-release of radioactive wastes”** です。LLFPについては更に研究を進め、半減期が 1 年以上、また核分裂収率／半減期比が 10^{-10} 以上とする2つの基準に基づき、29 核種の長寿命核分裂生成物(LLFP) を消滅(核変換)すべき核廃棄物として取り上げ、核廃棄物の無毒化や短寿命化の研究を行っています。

最近の研究により、以下のことが明らかになってきています。

- 29 核種の LLFP を、高速中性子(FBR 消滅炉)で核変換すると、ハザード指数(年間

摂取限界量(ALI)に基づくLLFP蓄積量の平衡到達時間を1000万～100万年のオーダーから、数千年のオーダーまで大幅に低減できる。

- もっとも厄介なLLFPは錫の ^{126}Sn (半減期約10万年。FBR消滅炉における平衡到達時間約3500年)であり、その次はジルコニウム ^{93}Zr (半減期150万年。FBR消滅炉における平衡到達時間約340年)である。
- FBR消滅炉において局所的に中性子エネルギー・スペクトル等を調整して核変換を促進することができれば、 ^{126}Sn 及び ^{93}Zr を含む29核種のすべてのハザード指数を百年前後にすることが可能となり、核廃棄物の消滅(核変換)の観点で、人間社会や地球環境により調和した原子力システムの実現が可能である。

また、更なる核変換の効率向上を図るため、システム内の中性子の数や性質が優れている核破碎中性子システムや核融合中性子システムによる核変換も、現在、研究中です。

(2)核拡散抵抗性の高いプルトニウムの生成(P³計画)研究

P³計画って何？

原子力の平和利用を地球規模で円滑に進めて行くためには、平和利用を担保するための国際的取り決め(「保障措置」及び「核物質防護措置」等)の遵守は当然重要ではありますが、これらは、基本的には国際的信頼性に基づく約束ごとであって、これだけでは本質的な意味における核不拡散の問題の解決策にはなりません。国際的な破壊行為をする集団や国家に対しては何の抵抗力もありません。

もっと重要なのは、使用する核物質そのもの自身が、核拡散に対して強い防護特性(核拡散抵抗性)をもつことであり、平和目的以外には物理的に転用不可能な核物質に変換することです。

例えば、プルトニウム ^{238}Pu は核兵器の優れた材料であるプルトニウム ^{239}Pu と核拡散抵抗性の観点から比較すると、単位質量あたりプルトニウム ^{239}Pu の約300倍の熱(崩壊熱)を自然に放出します。さらに、プルトニウム ^{238}Pu は1g当り1秒間に約2600個の自発核分裂中性子を自然に放出します。これはプルトニウム ^{239}Pu の約13万倍です。このように、多くの熱量を自然に発生するプルトニウム ^{238}Pu を多く含むプルトニウムは、常に冷やしておかないと、プルトニウム自身が溶けたり、また、周囲の材料(高速爆縮するための爆薬等)や機器に大きな悪影響を及ぼします。また、自発核分裂中性子を多く放出するプルトニウム ^{238}Pu は人の接近を妨げるのみならず、期待通りの核爆発を妨げるため、軍事転用には非常に困難で不都合な物質です。

しかし、プルトニウム ^{238}Pu は、平和利用として原子炉(特に高速炉)内では、プルトニウム ^{239}Pu と同様に、安定に核エネルギーを作ってくれます。

このような特性から、国際原子力機関（IAEA）の報告書によると80%以上のプルトニウム²³⁸Puを含むプルトニウムは、核物質の査察の対象から免除されています。

マイナーアクチニド（MA）は核のゴミですか？

それでは、如何にして強い核拡散抵抗性を持つプルトニウム²³⁸Puを作ることができるか？

現在、MA は多くの国では、高レベル放射性廃棄物として地層処分の対象とされています。しかし、MA は確かに放射性物質であるが、本当に核廃棄物なのだろうか？

例えば、図 5.2.1-2 に示すように、現行の軽水型原子炉から取り出される使用済み燃料中のMAの約半分を占めるネプツニウム²³⁷Npは、特に熱中性子領域では中性子をよく吸収します。中性子を吸収するとネプツニウム²³⁸Npを経て、プルトニウム²³⁸Puに核変換します。

また、残り約半分のMA（アメリシウム、キュリウム）は、例えば、前述のネプツニウム²³⁷Npよりもっとよく中性子を吸収するアメリシウム²⁴¹Amは、中性子を吸収すると、アメリシウム²⁴²Amを経て、キュリウム²⁴²Cmに核変換されます。このキュリウム²⁴²Cmは半減期約163日でα崩壊して、プルトニウム²³⁸Puに核変換されます。

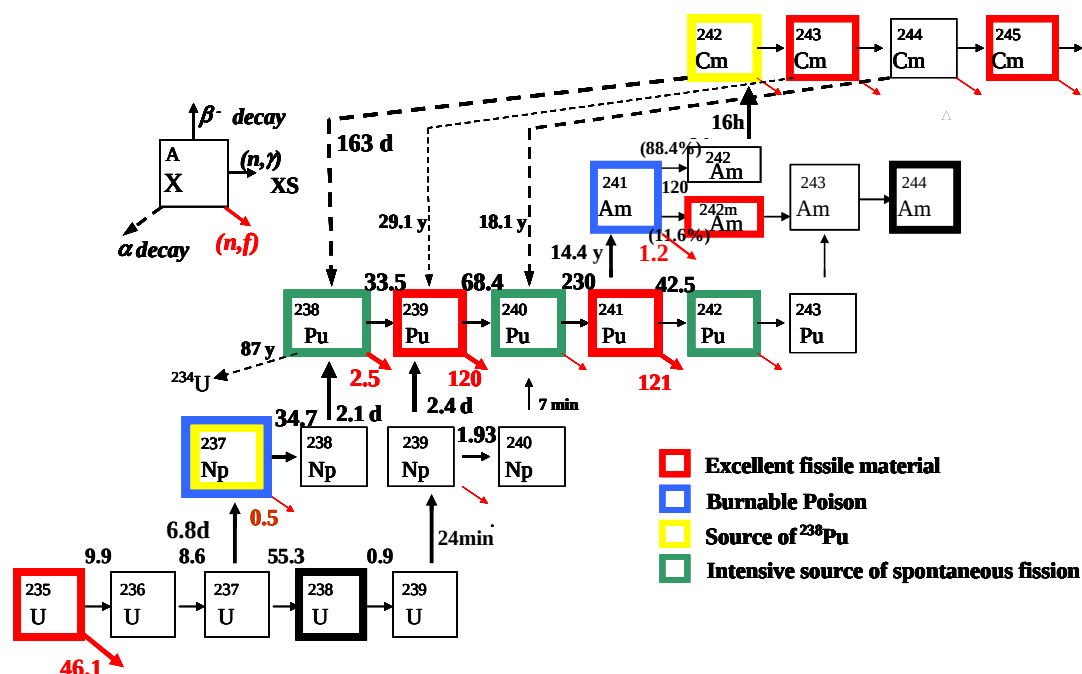
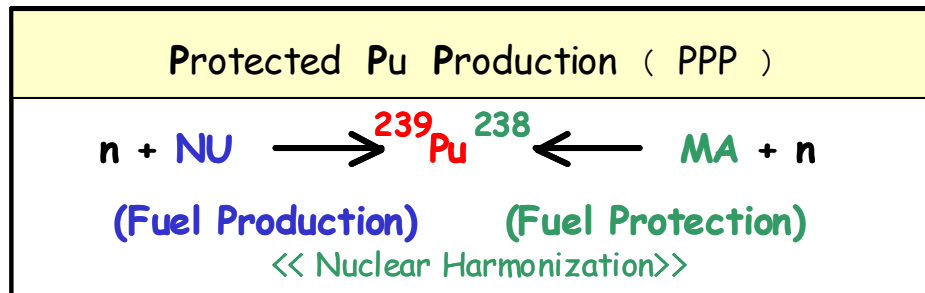


図 5.2.1-2 主要核種の燃焼チェーン

このように、P³技術を利用すると、現在、高レベル放射性廃棄物の対象とされているMAをウラン燃料に少量添加して原子炉に装荷すると、エネルギーを出しながら（即ち、発電しながら）、

燃料中にプルトニウム²³⁸Puを多く含む強い核拡散抵抗性を持つプルトニウムを生成（Protected Plutonium Production：PPP（P³）（下図参照））することが可能となります。また同時に、高レベル放射性廃棄物の対象とされているMAを減らすことが出来ます。



このように、マイナーアクチニドは決して厄介な核の「ゴミ」ではなく、貴重な「宝」として将来の人間社会の持続的発展を支えるものであります。

また、核拡散抵抗性の高い中・小型長寿命原子炉は、高レベル放射性核廃棄物の低減のみならず、地球規模での積極的な原子力平和利用の促進、すなわち海外輸出等新たな市場や用途の可能性を拓くものであります。そして、地球規模での原子力の平和利用の促進は世界のエネルギーの安全供給や地球環境保全、人類社会の持続可能な発展に貢献するでしょう。

現在、東京工業大学で進めているこの研究は、国際原子力機関（IAEA）でも高く評価され、IAEA が世界の専門家を集めて、この研究に関する IAEA 諮問会議をこれまでに2回開催しています。（2003年6月及び2006年6月）

（3）ロードマップ

核廃棄物（長寿命核分裂生成物（LLFP））を消滅する革新的原子炉システムについては、現在、我が国が世界に先駆けて開発している高速増殖炉の実用化の後、10年から20年位でその実現できると期待しています。そのためには、主要なLLFP核種の核データ（¹²⁶Sn等）の整備とLLFPをリサイクルするための核燃料サイクル施設の整備が重要です。

強い核拡散抵抗性を持つプルトニウムを生成する革新的原子炉システムについては、まず、現行の軽水型原子炉システムへ、P³技術が10年以内に適用が開始されることを予測しています。高速増殖炉への適用は、現在、我が国が世界に先駆けて開発している高速増殖炉の実用化と同時期に適用されるでしょう。

従って、今世紀の後半には、「人間社会や地球環境と調和した革新的原子力システム」の実現が期待できるでしょう。そして、そのころには、陸地でのウラン資源の枯渇が始まり、P³技術によって防護されたプルトニウムが原子力の平和利用を支えているでしょう。

SCNES やP³の研究は、東京工業大学が、未来の社会・世代へ贈るメッセージです。