特集

今後のエネルギー利用の長期視点 高い核拡散抵抗性を有するプルトニウム

東京工業大学 齊藤 正樹

使用済み燃料に含まれるマイナーアクチニドを軽水炉のウラン燃料や高速増殖炉のブランケット燃料に少量添加すると、燃料中に軍事転用困難な ^{238}Pu の同位体割合を増加させ、高い核拡散抵抗性を有するプルトニウムを生成することが可能である。「もんじゅ」は、余剰プルトニウムを効率的に燃やしながら(Pu Eater)、かつ、核拡散抵抗性の高い軍事転用困難なプルトニウムを増殖する(Pu Breeder)核不拡散上極めて重要な技術の実証に向けた国際研究開発拠点として、国内外の英知を結集して再構築し、将来のエネルギー安全保障のみならず、原子力の平和利用と核不拡散の両立の観点からも、人類史上初めての挑戦を、国は高い志を持って、揺るぎなく進めるべきである。

KEYWORDS: *Excess plutonium, Pu eater, Minor actinide, Plutonium with proliferation resistance, Pu breeder, Monju, International research and development Center, Peaceful use of nuclear energy and non-proliferation*

I. プルトニウムの核拡散抵抗性

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、核不拡散に向けた国際的条約などの外交活動は重要であるが、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、本質的な意味における核不拡散の問題の解決策ではない。国際的な破壊行為をする集団(国際テロ)や“ならず者国家”に対しては限界がある。より本質的に重要なのは、使用する核物質そのものの自身が、核拡散に対して固有の強い防護特性(核拡散抵抗性)を有することであり、平和目的の利用には有効に使えるが、軍事的には転用が非常に困難な核物質に変換することである。

例えば、第1図に示すように、 ^{238}Pu は1Kgあたり約570ワットの崩壊熱を放出する。これは、軍事利用に最も魅力的な材料である ^{239}Pu と比較すると、約300倍であり、このように、大量に発熱する ^{238}Pu の混合率の多いプルトニウムは、軍事転用する場合、核弾頭を常に冷やしておかないと、プルトニウム自身が融点に達したり、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すため、軍事転用は非常に困難な物質である。

さらに、 ^{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する。これは ^{239}Pu の約13万倍である。自発核分裂中性子を多く放出する ^{238}Pu は、核爆発の早期爆発現象を誘導し、軍事転用には非常に魅力のない物質である。また、不審な移動に対して検知が比較的容易である。

Plutonium with high proliferation resistance : Masaki Saito.
(2015年12月10日 受理)

しかし、 ^{238}Pu は原子炉(特に高速中性子炉)内では、 ^{239}Pu と同様に核分裂をして平和的に安全に安定してエネルギーを生成する。

このような特性から、国際原子力機関(IAEA)の報告によると、80%以上の ^{238}Pu を含むプルトニウムは、保障措置(査察)の対象から免除されている¹⁾。また、最近のIAEAと共催して東京工業大学で開催されたプルトニウムの核拡散抵抗性に関する国際科学技術フォーラム²⁾や東京工業大学での研究³⁾では、それよりもっと低い ^{238}Pu の混合率でも(例えば、10%から15%以上であれば)、軍事転用は非常に困難であるという議論がなされている。

また、軽水炉の使用済み燃料中には比較的多く含まれている ^{240}Pu や ^{242}Pu も自発核分裂中性子を多く放出す

第1図 Pu 同位体の崩壊熱と自発核分裂中性子

るため、これらの Pu 同位体を多く含有するプルトニウムも軍事転用に魅力がない核物質である。例えば、IAEA の元事務次長の B. Pellaud は、30%以上の ^{240}Pu が含むプルトニウムは、核兵器への転用について“Practically Unusable”と述べている⁴⁾。

しかし、 ^{238}Pu の核拡散抵抗性における熱的効果は、単位質量当り ^{240}Pu の約80倍(^{242}Pu の約5200倍)ある。即ち、熱的効果のみで言えば、プルトニウム中の ^{238}Pu の混合率を1%増加させることは、 ^{240}Pu の混合率を約80%増加させる効果に等しいといえる。

因みに、現行軽水型原子炉から取り出される使用済み燃料中の ^{238}Pu の混合率は約1~2%程度である。

それでは、如何にして原子炉内で高い固有の核拡散抵抗性を有する ^{238}Pu を多く含むプルトニウムを作ることができるか？

Ⅱ. マイナーアクチニドは核のゴミですか？

マイナーアクチニド(MA)とは、ネプツニウム(Np)、アメリシウム(Am)、キュリウム(Cm)等の総称である。国際原子力機関(IAEA)と東京工業大学の最近の共同研究によると、高レベル廃棄物中及び貯蔵されている使用済み燃料中に含まれる MA の総量は、2010 年で、世界に約270トン、また、2050年には世界で1270トンに増加すると予測されている⁵⁾。

これらの MA は、現在、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るが、しかし、MA は確かに放射性物質であるが、本当に廃棄物なのだろうか？

例えば、現行の軽水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 ^{237}Np は、特に熱中性子領域では大きな中性子捕獲断面積を持ち、中性子をよく吸収する。中性子を吸収すると ^{238}Np を経て、 ^{238}Pu に核変換する。残り約半分の MA(Am, Cm)は、例えば、前述の ^{237}Np よりもっと大きな中性子捕獲断面積を持つ ^{241}Am は、中性子を吸収すると、 ^{242}Am を経て、主に ^{242}Cm に核変換される。この ^{242}Cm は半減期約163日で α 崩壊して、 ^{238}Pu に核変換する。また、 ^{242}Am は、電子捕獲して ^{242}Pu に核変換する。さらに、 ^{244}Cm は α 崩壊して、 ^{240}Pu に核変換する。

このように現在、高レベル放射性廃棄物の対象とされている MA を軽水炉のウラン燃料や高速増殖炉のブランケット燃料に少量添加することにより、発電しながら、どのような燃焼度のタイミングで取り出しても、燃料中に ^{238}Pu や ^{240}Pu を多く含む高い核拡散抵抗性を有するプルトニウムを生成(Protected Plutonium Production: PPP(P^3))(第2図))することが可能となる⁶⁾。

この P^3 メカニズムは、中性子エネルギースペクトルの異なる国内外の2種類の研究炉(JAEAの高速実験炉

第2図 高い核拡散抵抗性を有するプルトニウム生成

第3図 P^3 技術を適用した核拡散抵抗性の高い軍事転用困難なPuを増殖する高速増殖炉サイクル
(原子力の平和利用と核不拡散の両立)

「常陽」と米国アイダホ国立研究所の熱中性子研究炉「ATR(Advanced Test Reactor)」で実証している⁷⁾。

従って、第3図に示すように、高速増殖炉では、MAは炉心に装荷して核分裂によって燃焼して減らすのではなく、ブランケットに装荷して、核拡散抵抗性の高いプルトニウムの増殖に活用すべきである⁶⁾。

また、 ^{237}Np や ^{241}Am は、初期の余剰反応度を抑える可燃性毒物かつ親物質として効果的に働くため、炉心の長寿命化に貢献する⁶⁾。

また、軽水炉の使用済み燃料から回収されたウランには、 ^{237}Np の約10倍の ^{236}U が含まれていて、これは ^{237}Np の原料物質である。このことは、今後、世界的に大量に蓄積される軽水炉の使用済み燃料からの回収ウランを再濃縮し、 P^3 燃料の材料として軽水炉で再利用することにより、ウラン資源の節約を図ると同時にPu核拡散抵抗性を向上させる新たな戦略的な核燃料サイクルシナリオ構築に寄与する⁸⁾。

因みに、Albert Einstein は“it is easier to denature plutonium than it is to denature the evil spirit of man”と述べている⁹⁾。

Ⅲ. 「もんじゅ」について

1978年に環境審査が開始し、1980年に安全審査が開

始され、1985年に本体工事着工、1992年に性能試験開始、1994年に初臨界達成した。「もんじゅ」の安全審査や建設は官民一体で取り組み、当時は「もんじゅ」国家プロジェクトに参画することは若い技術者や研究者にとって誇りであった。しかし、翌年1995年にNa漏洩事故が発生し、その後、Na漏洩対策が終了し、2007年に運転再開はしたが、その後も、新たなトラブルや不具合が見つかり、「もんじゅ」は行き着く方向を見失い始めた。

巨大プロジェクトには、ビジョン(目標)と組織的なチャレンジ力(挑戦力)が必要・不可欠である。ビジョンを見失い始めると、挑戦力が揺らぐ。また、状況が混乱すると目先のことしか見えなくなるのが常である。「もんじゅ」を取り巻く状況は、まさに、このような状況である。何故、このような状況になったのか？その要因と対応策のいくつかを以下に述べる。

(1) 有能な人材不足

多くの熟練した技術者や研究者が定年退職して、その補充や新人教育が間に合っていない。再度、国内外の英知を結集して、有能な人材を補充し、国際研究開発拠点として再構築すべきである。

(2) トップマネジメント力の低下

組織のトップマネージャーは、時代の流れ、国内外の動向、科学技術の新しい知見等を常に的確に把握し、プロジェクトのビジョンを見失わずに、先頭に立って、組織に挑戦力を湧き立たせ、荒波を乗り切っていく覚悟と責任が必要・不可欠である。

(3) 高速増殖炉のビジョン(開発目標)の見直し

国は原点に戻って、今後の高速増殖炉のビジョンを徹底的に見直すべきである。閉鎖的な議論ではなく、国民も含めて国全体でもう一度議論することが重要である。透明性を高めて情報公開を徹底し、広く国民に意見を求め、国の政策に反映すべきである。

その際に考慮すべき点を以下述べる。

- ①技術的な安全性の保障(公衆の安全確保)
- ②長期的なエネルギー安全保障(核燃料の自給(増殖とサイクルの確立))
- ③長期的な環境保全(地球環境保全と核廃棄物の低減)
- ④原子力の平和利用と核不拡散の両立(余剰プルトニウムの効率的な燃焼と核拡散抵抗性の高い軍事転用困難なプルトニウムの増殖)

原子力規制委員会は、「もんじゅの運営主体の交代」を勧告し、不可能な場合は、廃炉も選択肢として除外していないとする見解を示したが(毎日新聞)、「高速増殖炉」プロジェクトを継続するか、中止するかは、国の政策の問題であり、新基準に基づいて安全審査を終了した軽水炉の再起動については、国や地方自治体が決めることと原子力規制委員会が自ら言っているように、原子力規制委員会の役割ではない。原子力規制委員会は「運営主体

の交代」の勧告を提出して、安易に突き放すのではなく、新基準に基づいて、中立公平な立場で、国民の生命、健康及び財産の保護、環境の保全並びに我が国の安全保障に向けて、責任を持って指導をすることを期待したい。

Ⅳ. まとめ

現在、厄介な「核のゴミ」として扱われているMAは決して「ゴミ」ではなく、将来の人間社会の平和と繁栄を支える貴重な「宝」である。

P³技術を活用すれば、我が国のみならず、世界の原子力の平和利用と核不拡散が促進され、人間社会の持続的発展に大きく寄与することが期待される。

「もんじゅ」は、余剰プルトニウムを効率的に燃やししながら(Pu Eater)、かつ、核拡散抵抗性の高い軍事転用困難なプルトニウムを増殖する(Pu Breeder)核不拡散上極めて重要な技術の実証に向けた国際研究開発拠点として、国内外の英知を結集して再構築し、将来のエネルギー安全保障のみならず、核廃棄物の減容と毒性の低減や原子力の平和利用と核不拡散の両立の観点からも、人類史上初めての挑戦を、国は高い志を持って、揺るぎなく進めるべきである。

— 参考資料 —

- 1) IAEA, INFCIRC/153, 1972.
- 2) The 2nd International Science and Technology Forum on Protected Plutonium Utilization for Peace and Sustainable Prosperity, Tokyo, September, 2009.
- 3) Y. Kimura, M. Saito and H. Sagara, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 48, No. 5, p.215-723 (2011).
- 4) B. Pellaud, "Proliferation aspects of plutonium recycle", J. Nucl. Mater. Manage. Vol. 31, No.1, 2002.
- 5) K. Fukuda, Y. Peryoga, H. Sagara, M. Saito and M. Ceyhan., progress in Nuclear Energy, 50, p. 654-659, 2008.
- 6) M. Saito, Proc. of GROBAL 2009, p. 2363-2368, Sept. 6-11, 2009.
- 7) S. Koyama, M. Osaka, M. Itoh, H. Sagara and M. Saito, "Protected Plutonium Production by Transmutation of Minor Actinides for Peace and Sustainable Prosperity - Irradiation Tests of Np-U samples in Experimental Fast Reactor JOYO (JAEA) and Advanced Thermal Reactor ATR (INL) -, Proc. Of GROBAL 2009, p. 2358-2362, Sept. 6-11, 2009.
- 8) K. Fukuda, H. Sagara and M. Saito, J. of Nuclear Science and Technology, Vo. 45, No.10, p.1016-1027, 2008.
- 9) "bite-size Einstein", Quotation on Just About Everything from the Greatest Mind of the Twentieth Century", Compiled by J. Mayer & J. P. Holms.

著者紹介

齊藤正樹 (さいとう・まさき)

東京工業大学, 名誉教授, 特命教授

(専門分野/関心分野)原子炉安全, 核不拡散, 核セキュリティ