

平成 21 年 11 月 28 日

技術立国として生きる道：プルトニウム平和利用の必要性

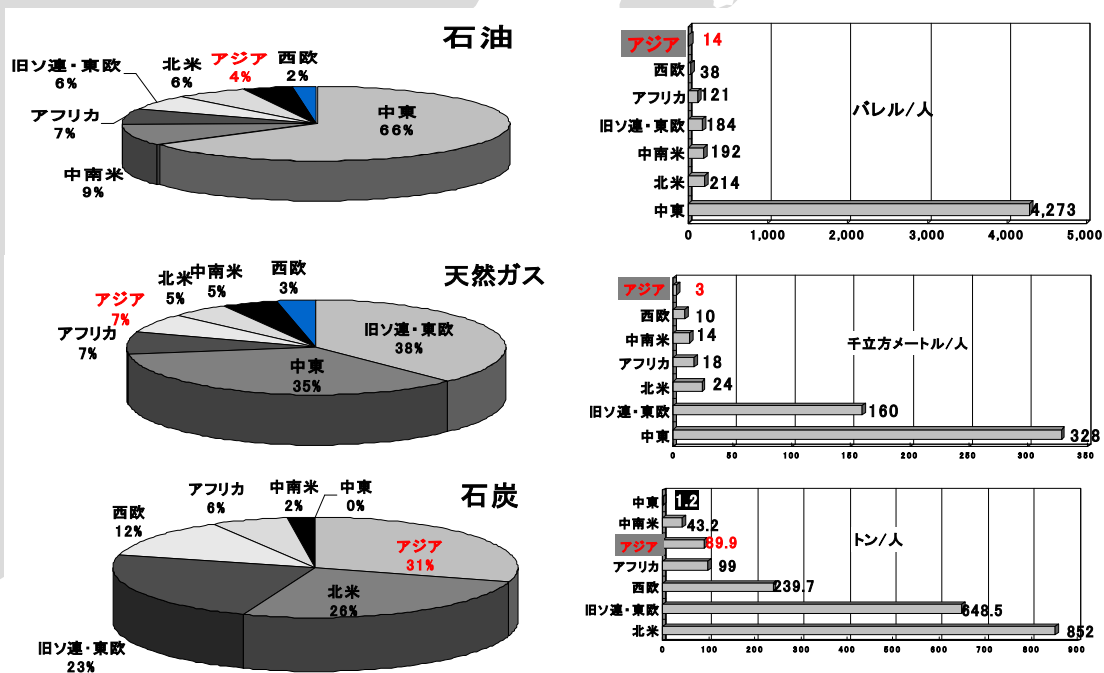
筑波大学大学院システム情報工学研究科リスク工学専攻 教授 内山洋司

(1) アジア地域のエネルギー事情

世界人口の 6 割を占めるアジア地域は人口が多だけでなく、他地域よりも人口増加が著しい地域です。また、世界の中で経済発展が最も進んでいる地域でもあります。人口増加と経済発展によって、今後、エネルギー需要が急増していくと予測されています。

一方、エネルギー資源をみますとアジア地域は、石油と天然ガスの資源に最も乏しい地域です（図 1）。多くの国々がエネルギー源を石炭に頼っています。しかし、地球温暖化問題から二酸化炭素排出量の抑制が叫ばれており、石炭を利用していくことは次第に厳しくなっていきます。

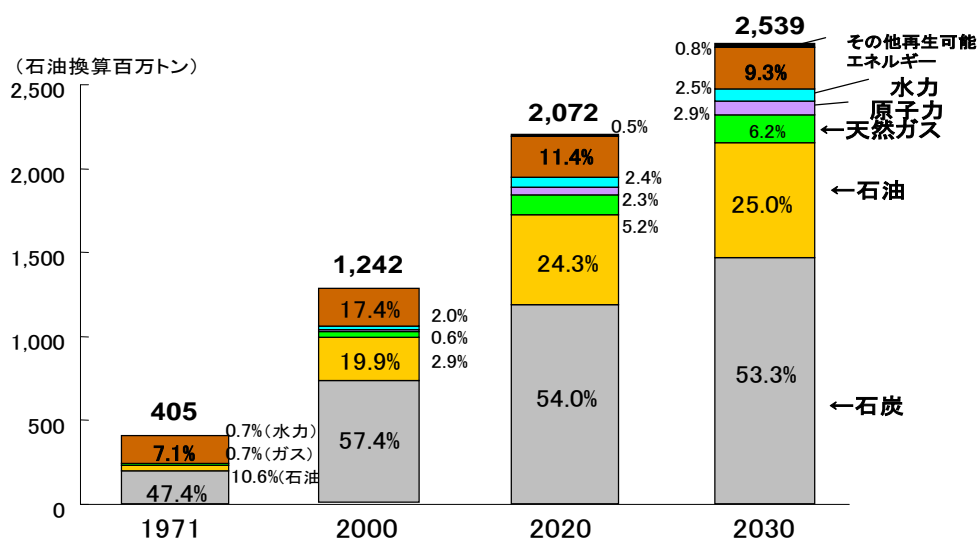
図 1 地域別に見た化石燃料の確認埋蔵量



化石燃料に代わるエネルギー源として原子力と再生可能エネルギーの利用技術の開発が必要になります。太陽光や風力など再生可能エネルギーは利点もありますが、エネルギー密度が低く、発電する出力の変動も大きく、そのうえコストが高いといった問題もあり、現状では補完的なエネルギーと位置付けられています。将来、アジア諸国のエネルギー安全保障を確立し、低炭素社会を構築していくためには、原子力の開発が不可欠となります。

アジア地域の中で、中国は人口が多いだけでなく経済発展が最も進んでいる国です。将来のエネルギー需要は、2030年には現在の2倍以上にまで高まると予測されており、その大半は化石燃料で供給されると考えられています（図2）。原子力発電の建設計画も進んでおり、「第11次電力産業五ヵ年計画」では2020年までに30基近くを新たに建設し原子力規模を3,600万kWにすると発表しています。

図2 中国の一次エネルギー消費量の推移と見通し



(出所)「WORLD ENERGY OUTLOOK 2004」

日本は、中国を含めたアジア諸国のエネルギー安定供給と地球温暖化対策において、技術面から大きく貢献していくことが求められています。鳩山首相が掲げている“東アジア共同体”構想の中で、地球温暖化問題と深く関係しているエネルギー問題は最も大きな課題の1つになっています。欧州ではエネルギー問題は地域全体で取り組む重要な政策課題と位置づけられています。欧州連合(EU)の前身である欧州委員会(EC)は欧州石炭鉄鋼共同体が母体となっており、それとは別に欧州原子力共同体(EURATOM)が1967年に設立され今日に至っています。アジア地域においても、原子力を含めたエネルギー問題で協力し合う共同体設立が大切になっており、日本のリーダーシップが問われています。

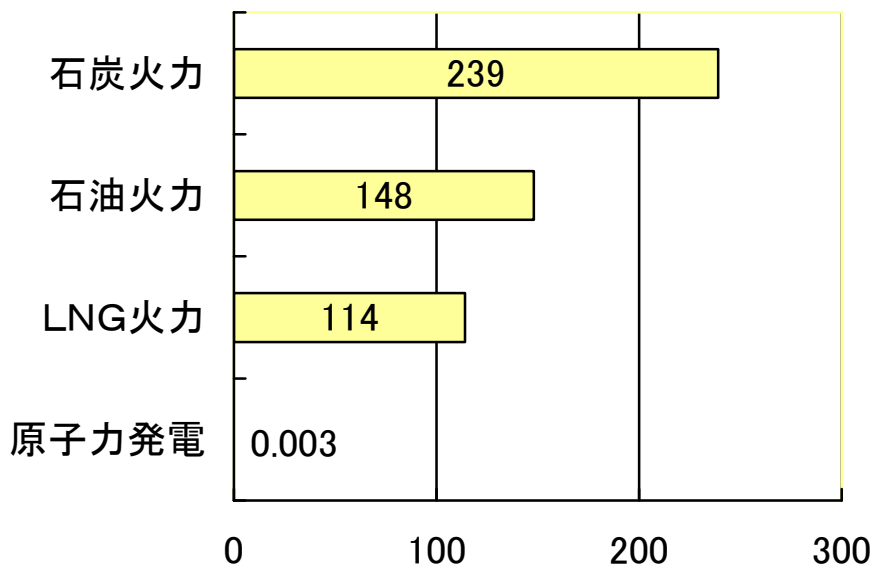
【参考】国際原子力機関(IAEA)によれば、現在、50以上の国が原子力発電に関心を表明し、トルコ、エジプト、ベトナム、ナイジェリアを含む12の国が原子力発電所新設計画に積極的に取り組んでいるので、今後15年間に約70基の新設が予想されるということです。原子力発電に対するこうした関心の高まりの理由としては、第1には、このところ各国で原子力発電所が安全に運転されていること、第2には、各国でエネルギー、とりわけ電力需要が高まっていること、第3にはエネルギー資源価格が上昇し、原子力発電の経済性が高まったこと、そして第4には、地球温暖化対策の推進のために低炭素エネルギー源の採用が求められている状況にあって、原子

力発電は大規模な供給力の実現が実証されている有力な低炭素エネルギー源として評価されるようになってきていることが挙げられます。(原子力委員会メールマガジン[No. 42, 2009年11月13日])

(2) 核燃料サイクルの経済性

原子力はわずかなウラン燃料で膨大なエネルギーが発生できる特徴があります。ウラン原子1つが核分裂によって発生するエネルギーは200[MeV]であり、その値は炭素原子と酸素分子の燃焼反応で発生するエネルギー4.20[eV]の4,760万倍にもなります。発電出力100万kWの発電所を運転した場合、石炭火力発電所では1年間に約240万トンもの石炭が必要になりますが、原子力発電では約30トン、原子炉内で実際に核分裂しているウランとプルトニウムの量は1トン程度です。

図3 発電プラントの燃料消費量(100万kW、年設備利用率80%) [単位: 万トン]



ウランを発電用燃料として利用するためには、採掘、製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工といったフロントエンドだけでなく、発電所から発生する使用済燃料を再処理して高レベル放射性廃棄物を処分するというバックエンドの技術開発が求められます。こういった複雑な工程があるにも係わらず、核燃料サイクルの発電コストは、日本では1.6円/kWhと化石燃料の燃料費4~8[円/kWh]に比べて安価であります。安価である大きな理由の1つに原子力が持つ高いエネルギー密度があり、それはウランのkWhあたりの燃料消費量を化石燃料に比べて極めて少なくしています。

核燃料サイクルの経済性については、2004年に原子力委員会の技術小委員会において使用済燃料を直接処分するシナリオを含めて検討しました。シナリオは4種類の異なる政策をもとに作られましたが、そのうち日本の基本路線である再処理シナリオと直接処分シナ

リオを比較しますと、前者は後者に比べて0.5～0.7[円/kWh]（割引率2%の場合）ほど高くなると試算されました（表1）。

この費用は、1世帯あたりの電気代に換算すると年間で600～840円の負担となります。現在、新エネルギーの普及に向けて太陽光発電で発生した余剰電力を買い取る制度が始まりました。その買取価格は48円/kWhになっており、プルサーマルを実施したときの原子力発電の発電コスト5.2円/kWhの9倍以上にもなる高額なものです。

表1 直接処分と再処理のコスト比較（割引率2%）

出典：原子力委員会技術小委員会「基本シナリオの核燃料サイクルコスト比較」（2004年11月）

		直接処分		再処理	
		費用 [10億円]	コスト [円/kWh]	費用 [10億円]	コスト [円/kWh]
フェ ロン ンド ト	ウラン燃料	13,600	0.61	12,400	0.57
	MOX燃料	—	—	1,700	0.07
バ ツ ク エ ン ド	再処理	—	—	20,000	0.63
	HLW貯蔵/処分	—	—	4,300	0.16
	TRU処理処分	—	—	3,500	0.11
	中間貯蔵	4,400	0.14	1,100	0.04
	SF処分	12,100-20,600	0.19-0.32	—	—
核燃料サイクルコスト		30,000-38,600	0.9-1.1	42,900	1.6

（注）この試算後にウラン価格は15倍以上にまで高騰したことがありました。そのウラン価格で核燃料サイクルコストを計算すると、再処理シナリオのほうが0.12円/kWhだけ安価になります。

（3） プルトニウム利用の意義

原子力を利用していく上で考えなければならない大切なことの1つに資源量評価があります。ウランの資源量は、採掘する価格によって評価されており、既知資源で130ドル/kg(金属ウラン)未満では393万トンと推定されています。この資源量で可採年数を計算すると85年程度となり、石油や天然ガスの可採年数41年と61年に比べてあまり変わりません。今後、世界各国で原子力開発が進むとウランの可採年数はさらに短くなっていきます。

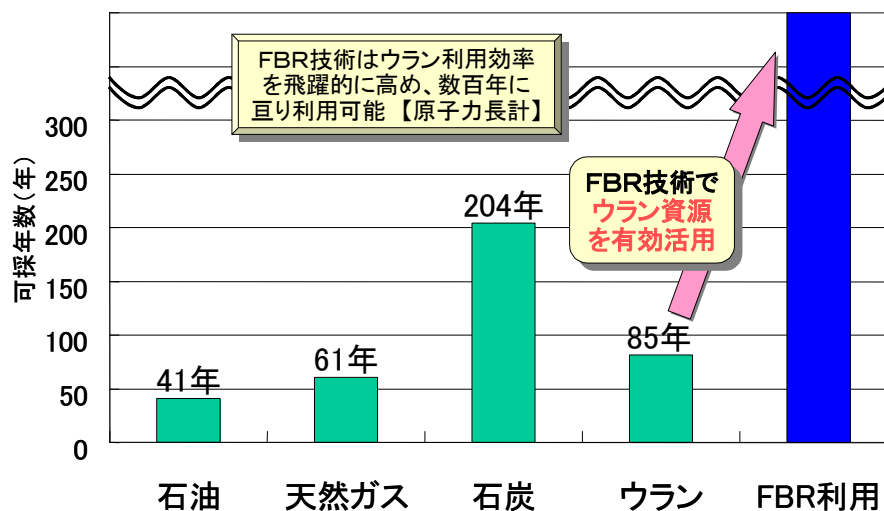
その対策としては未知のウラン資源探鉱や海水からウランを抽出する技術開発があります。それとは別に、軽水炉で使っているウランからプルトニウムを抽出し利用していく方

法が進められています。天然ウランの 99.3%は直接核分裂し難いウラン 238 です。それは中性子を吸収することで核分裂できるプルトニウム 239 に変換します。高速増殖炉は、プルトニウムを燃料とし核分裂によって発生する中性子で燃えた燃料よりも多いプルトニウムを生産する原子炉です（表 2）。もし、その技術が開発されればウランの資源量は約 60 倍にまで増えることになり、可採年数は 5,000 年近くにまで増大します（図 4）。高速増殖炉が日本で開発されれば、原子力は国産エネルギーとなって現在のエネルギー自給率 4 % を大きく改善します。それだけでなく、海外のエネルギー依存から脱却した分は、新しいエネルギー産業を国内に創出することになり雇用対策にも貢献できます。

表 2 世界の高速増殖炉の運転建設状況（2007 年 10 月現在）

【フランス】	原型炉のフェニックス（25 万 kW _e ）が運転中。2006 年に第 4 世代原子炉原型炉の概念設計を開始し、2020 年に運転開始する予定。
【ロシア】	実験炉 BOR-60(1.2 万 kW _e)と原型炉 BN-600(60 万 kW _e)を運転中。 実証炉 BN-800(80 万 kW _e)を建設中。
【インド】	実験炉 FBTR(1.3 万 kW _e)を運転中。原型炉 PFBR(50 万 kW _e 規模)を建設中。
【中国】	実験炉 CEFBR(2.5 万 kW _e)を建設中。2005 年に原型炉を 2020 年頃に完成する計画を正式発表。

図 4 プルトニウム利用の実用化とエネルギー資源の可採年数

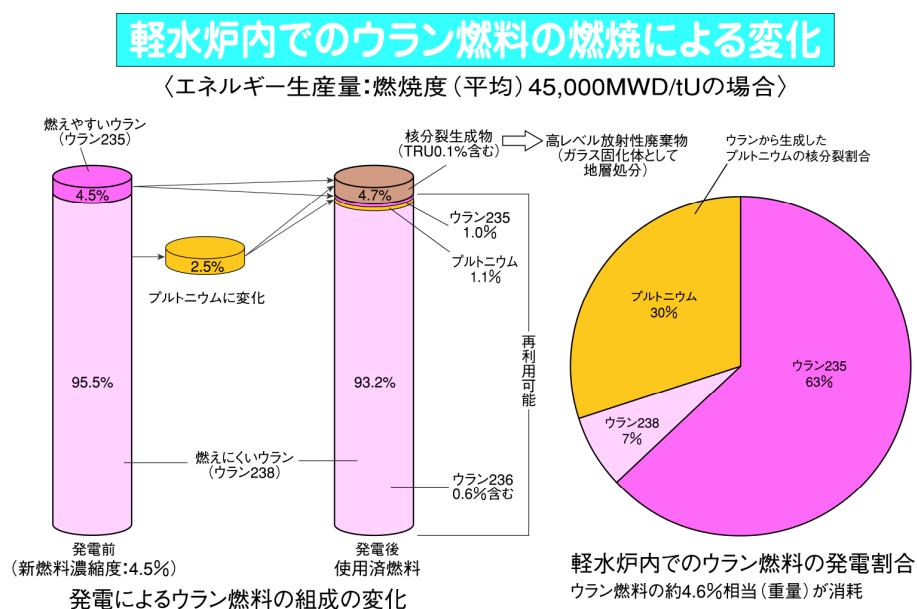


しかし、高速増殖炉は安全性を重視して慎重に開発しなければなりません。その技術開発には時間がかかり、実証炉の運転は 2025 年以降と見做されています。実証炉建設に向けて信頼性や安全性に関するデータの取得が必要になります。現在、福井県敦賀市にある原型炉“もんじゅ”は、信頼性データを取得するために建設されたもので、できるだけ早期の運転再開が望まれます。プルトニウムは高速増殖炉以外でも利用できます。わが国で稼

動している軽水炉でも、原子炉内で核分裂している燃料の 3 分の 1 は炉内で中性子によって生成されたプルトニウムによるものです。また、軽水炉の使用済み燃料の中には燃えな
いで残ったプルトニウムが 1.1%含まれています(図 5)。この燃料を再処理で取り出して、
MOX燃料として新たに利用していくシステムがプルサーマルです。プルサーマルを実施
していくためには、再処理とMOX燃料加工の施設を建設しなければなりません。その技
術は高速増殖炉にも受け継がれるもので、高速増殖炉の燃料サイクルを確立していく上で
不可欠となる技術開発です。

図 5 軽水炉内でのウラン燃料の燃焼変化

出典：日本原子力文化振興財団「原子力」図面集（2008 年版）



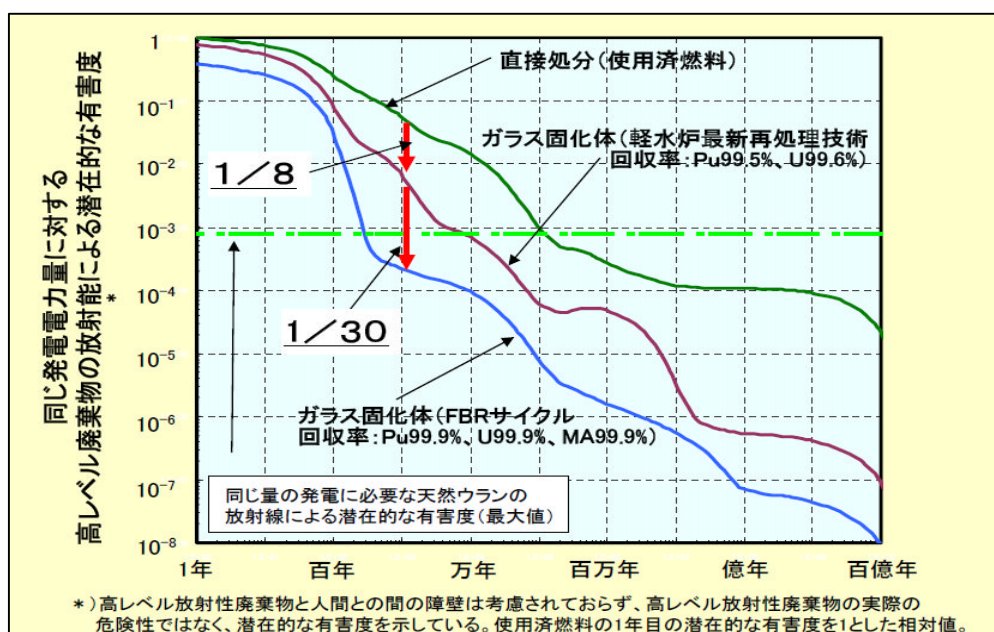
出典:原子力百科事典(ATOMICA)

プルトニウムを利用する再処理路線は、使用済燃料を直接処分する路線に比較して、現在のウラン価格の水準や技術的知見の下では経済性の面では若干劣ると試算されました。しかし、再処理はウラン燃料を有効に使う技術開発であり、ウラン燃料の節約と高レベル放射性廃棄物の処分量を少なくするがあります。再処理して再利用できるウランやプルトニウムを取り出せば、ウラン燃料を 10~20%だけ節約することができます。これは発電電力量で表すと 290 億~580 億 kWh になり、風力発電所 (500 kW) を 33,000~66,000 基だけ建設して得られる電力量に相当します。

原子力発電所で使い終わった燃料を再処理すると、使用済燃料の中に含まれるプルトニウムやウランを取り除くことができ、高レベル放射性廃棄物による環境への負荷を小さく抑えることができます。直接処分と比較すると 1,000 年の期間でみた場合、その潜在的な

有害度は 8 分の 1 になります。また、使用済燃料の中で生まれるマイナーアクチノイドの回収を行う高速増殖炉サイクルでは、さらに環境への負荷が小さくなります。同じように 1,000 年の期間で見ると高レベル放射性廃棄物の有害度は 30 分の 1 にまで低減します (図 6)。

図 6 処分される高レベル放射性廃棄物の放射能による潜在的な有害度の推移



(4) 安全性の確保

プルサーマルは、世界的には豊富な実績があります。ヨーロッパでは、1960年代から始まり、既に 5,000 体以上の集合体が使われています (図 7)。フランスでは、既設原子力発電所の 3 分の 1、ドイツでは 2 分の 1 くらいでプルサーマルが行われています。これまで事故は発生しておらず、MOX 燃料は安全に利用されています。日本においても、日本原子力発電所の敦賀発電所 1 号機 (BWR) で 2 体が、関西電力の美浜発電所 1 号機 (PWR) で 4 体を使用され、ともに安全な使用が確認されています。炉の形式は異なりますが、新型転換炉「ふげん」では 772 体の MOX 燃料が使用された実績もあります。これらの実績から運転中の炉心特性と燃料挙動の安全性の検証が行われ、原子力委員会において MOX 燃料が安全に利用できることが確認されています。

原子力委員会が 1995 年 6 月に取りまとめた安全審査の指標によると、現在運転されている原子力発電所では MOX 燃料が炉心の 3 分の 1 までであれば、燃料の特性や挙動はウラン燃料と大きな差はないとされています。MOX 燃料の大きな特徴としては以下に述べる 2 つの特性を挙げることができます。

① 燃料物性へのプルトニウム影響について

プルトニウムとウランの酸化物は化学的な特性は似ていますが、物理特性に若干の違い

があります。プルトニウム酸化物は熱伝導度が低いため、プルトニウムの混合割合が高まるとMOX燃料の温度が上昇します。この特性は通常の運転では全く問題はありませんが、冷却材がなくなるような事故の際には問題となる可能性があります。また、プルトニウム酸化物は融点が若干低いため、燃料の融点降下が70度程度の範囲でプルトニウムを使うようにしています。

MOX燃料の場合は、核分裂で生じたガスが被覆管の中に貯まる割合は若干高くなります。この対策として、燃料棒の中の空間（ガスだめ）の体積を増やすことで内圧の上昇を抑制しています。また、ウラン燃料でも通常、燃料ピンの内圧は数MPaにまで上昇しますので、その圧力になった時点で燃料を取り出すようにしています（燃焼度を制限）。

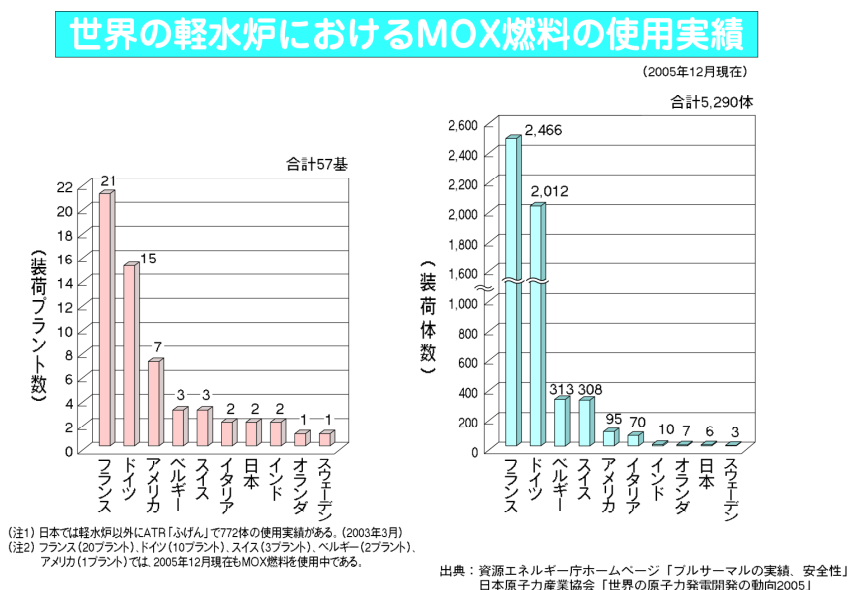
②核分裂反応の制御について

プルトニウムはウランに比べて中性子を吸収しやすいために、制御棒の効きが低下したり、燃料の出力が高くなる傾向になります。このことは、原子炉の圧力が上昇するような以上が生じた場合には、ウラン燃料よりも出力が大きくなる可能性があります。この対策として、燃料集合体のMOX燃料棒、それに炉中のMOX燃料集合体を適切に配置し、従来のウラン炉心と同様の十分な余裕を持たせています。このことにより、制御棒の「核分裂を止める」機能は、設計裕度内で働くことができます。MOX燃料はウラン燃料よりボイド効果（*）が大きく、出力上昇を抑えることができる特性があります。

* ボイド効果：原子炉内で水蒸気の泡が増えると核分裂反応が自然に抑えられる効果があります。

図7 世界の軽水炉におけるMOX燃料の使用実績

出典：日本原子力文化振興財団「原子力」図面集（2008年版）



(5) まとめ

プルサーマルを推進していくメリットには、「10～20%のウラン燃料の節約」と「高レベル放射性廃棄物処分量の削減」がありますが、それ以外にも以下に述べる副次的な効果があります。

- ① ウラン濃縮役務量の節約効果（数百 tSWU）
- ② ウラン消費減に伴うウラン鉱山での環境負荷低減
- ③ 使用済燃料量貯蔵量の7分の1への圧縮効果
- ④ 中間貯蔵施設数の削減
- ⑤ 高レベル放射性廃棄物の地層処分面積を削減
- ⑥ 軽水炉取り出しプルトニウムの兵器適性を損ずる

また、原子力委員会、技術検討小委員会では直接処分路線に比べると次のような特徴があると指摘されました。

- ① エネルギーセキュリティ、環境保全性、将来の不確実性への対応能力等の面では優れており、将来ウラン需給が逼迫する可能性を見据えた上で原子力発電を基幹電源に位置づけて長期にわたって利用していく観点から総合的にみて優位と認められる。
- ② 国及び民間事業者が核燃料サイクルの実現を目指してこれまで行ってきた活動と長年かけて蓄積してきた社会的財産（技術、立地地域との信頼関係等）は、わが国が原子力発電を基幹電源に位置づけて適宜適切に技術進歩を取り入れつつ維持すべき大きな価値を有していること。
- ③ 再処理路線から直接処分路線に政策変更を行った場合、立地地域との信頼関係の再構築が必要になる。国及び民間事業者が最大限の努力を行うことは当然としても、その再構築は極めて困難であると予想され、その結果として、原子力発電所からの使用済燃料の搬出が困難になって原子力発電所が順次停止する事態や中間貯蔵施設と最終処分場の立地に大きな困難が発生する事態に至ることが予想される。

このように原子力開発を推進していくためには、立地地域との信頼感を高めていくことが最も重要なことで、それは長い時間をかけて確保されるものです。