

# 再処理リサイクル・プルサーマルの意義

京都大学原子炉実験所 山名 元

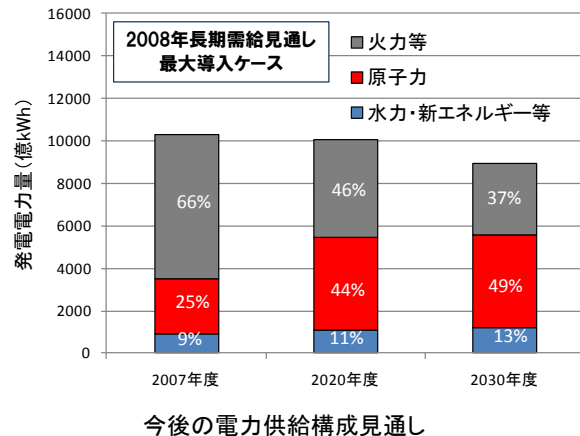
緒言： 9月の講演会によって、プルサーマルの基本的な紹介が既に行われたという認識です。本紙では、その意義や安全についてより踏み込んだ（詳細な）紹介を行います。

## 1. 低炭素中期目標と原子力

### ◆◆要点◆◆

- 96%のエネルギー資源を海外に依存する我が国にとって、“安定供給の確保”と“環境の保全”が不可欠である。このために、“省エネルギー”“新エネルギー”“原子力”の3つを柱として、化石資源依存度の低減を進める事が必要。
- 今後の本格的な低炭素社会構築のために、原子力の長期利用は不可欠である。

- わが国のエネルギー供給構成では、化石燃料資源（石油、石炭、ガス）への依存度が非常に高い（約80%）。この事は、温室効果ガス（二酸化炭素）の発生に直結して大変良くないだけでなく、わが国のエネルギー海外依存度を本質的に高めている。
- 化石資源への依存度が高くエネルギー資源自給率が低い状況は、先進国の中でもっとも悪い。一次エネルギーの96%を海外からの輸入に頼っている状況を改善するために、エネルギー自給率を強化することが求められる。
- 現実的に利用可能な電源として、火力、水力、原子力、新エネルギー（風力や太陽光）があるが、それぞれが一長一短を持っており、それぞれの特長を生かす最適な組み合わせで、リスクを分散させてゆくことが必要である。
- 原子力発電は、①ウラン燃料の輸入先が政治的に安定な国であること、②複数の国に分散していること、③国内での燃料備蓄効果が非常に高いこと、④燃料価格の変動に影響されにくいこと等、エネルギー安全保障（セキュリティ）上の効果が非常に高く、海外の状況に大きく左右されない安定電源として信頼性が高い。
- 今後、新エネルギー導入を積極的に進めながらも、環境保全型の大規模安定電源として原子力を発電量の3割～4割を担う程度に利用して行くことが必要であり、この方針は、自民党から民主党政権への移行における低炭素中期目標においての基本的な路線となっている。今後の原子力利用促進は、先進国での共通認識となっており、多くの国で、原子力利用の強化あるいは維持が図られている。

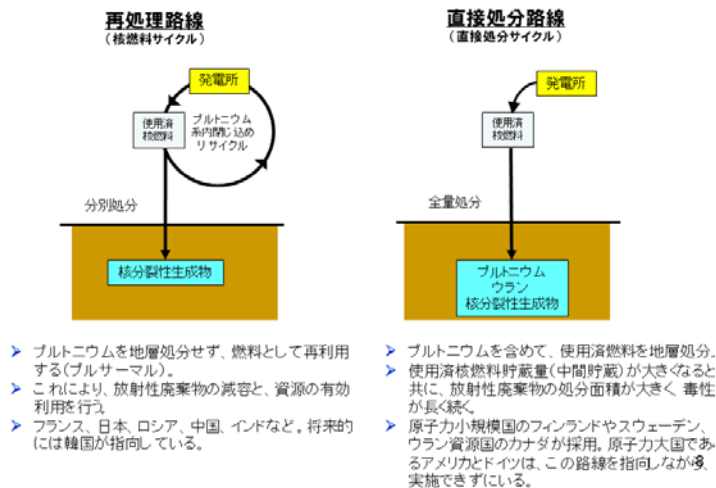


## 2. 使用済核燃料の総合的な管理方策

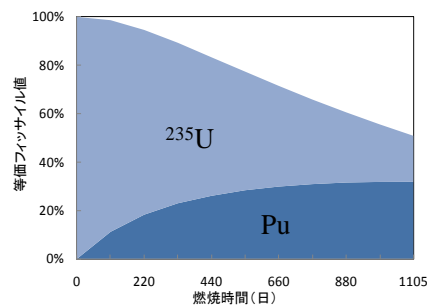
### ◆◆要点◆◆

- プルサーマルは、原子力発電所から発生し続ける使用済濃縮ウラン燃料を、総合的に管理するための方策としての“再処理リサイクル路線”の一部である。
- 再処理リサイクル路線では、プルトニウムやウランを地層処分しない。直接処分路線では、これらの全てを廃棄物として地層処分する。プルトニウムやウランには、資源価値があるからである。
- 代替策である“直接処分路線”には、地層処分での負担が大きい、社会的・技術的な基盤が整備されていない等の問題が多い。
- 当面我が国は、長い時間をかけて整備してきた再処理路線を安定に進めることが、最も現実的で安定なバックエンド方策である。

- 原子力利用を長期安定的に維持するためには、「安定なフロントエンド（ウラン燃料の調達）」と「安定なバックエンド（使用済燃料の管理）」を構築する必要がある。我が国においては、現在の原子力発電規模では、使用済濃縮ウラン燃料が一年に約 800～1000t 発生している。
- 使い終わった濃縮ウラン燃料（使用済燃料）には、①大半を占めるウラン、②放射性が強く早く社会環境から隔離すべき核分裂生成物（核燃料の約 5%）、③核燃料としての価値を持つプルトニウムが含まれる（核燃料の約 1%）。



使用済燃料管理の2つのオプション



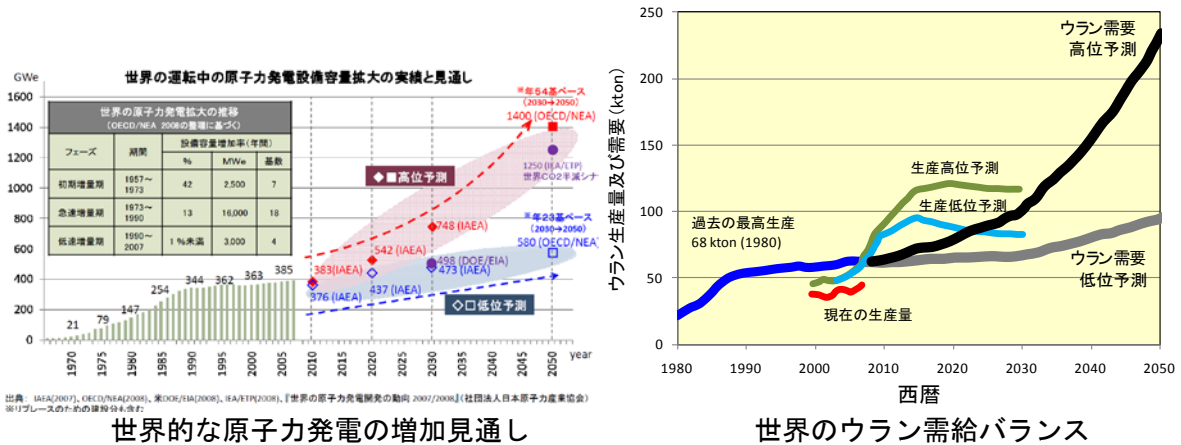
原子燃料の燃料価値の変遷

- 使用済燃料の管理方法としては本質的に、①直接処分路線、と②再処理リサイクル路線、の2つしかない。直接処分では、使用済核燃料を金属容器に封入した上で地層処分するのに対して、再処理リサイクル路線では、使用済燃料を化学処理（再処理）して、プルトニウムを分離回収した上で、高放射性物質だけを、安定で小さな固化体として地層処分する。
- 直接処分路線では、ウランやプルトニウムなど、本来地層処分する必要のないものを地層処分することになる。再処理路線は、プルトニウムを廃棄物にせず保持しながら将来に繋ぐ路線と言って良い。フィンランドやスウェーデンなど、小原子力規模国が採用している。
- “プルサーマル”は、分離回収されたプルトニウムを燃料としてもう一度、原子力発電所に供給して使うことであるが、これは、回収されたプルトニウムには燃料としての価値があるからである。
- 原子力発電所に供給される新しい核燃料の「燃料価値(燃えやすさ)」は、核燃料中のウラン-235 によるものである。この核燃料が炉から取り出された後の使用済燃料中には、初期の燃料としての燃料価値の約 5 1%が残留している（3 年程度燃焼させた場合）。この残留価値の約 70%がプルトニウムによるものである。

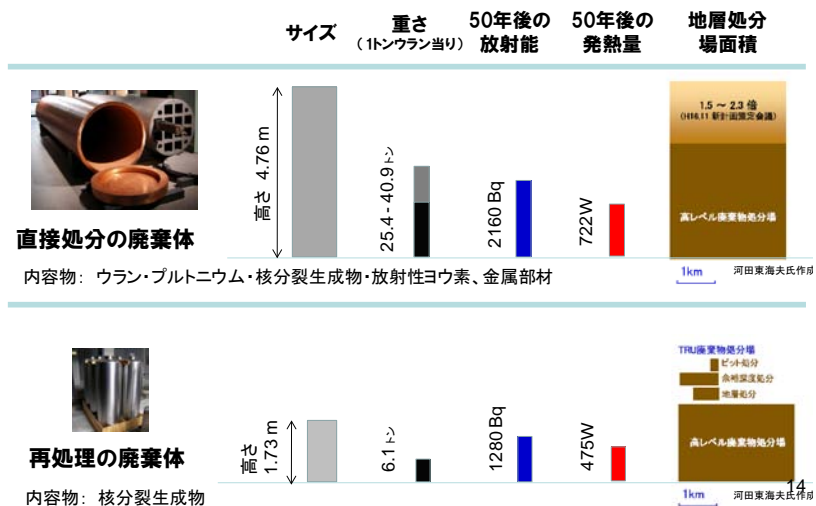
### 3. 燃料を廃棄しない事の意義

- 処理リサイクル路線はこのように、“使わなければ負の遺産、使えば燃料としての正の遺産”であるプルトニウムを回収して利用（消費）して行くための当面の最も現実的な手段である。
- 原子力発電の燃料は天然資源であるウランであり、我が国はこれを全て海外から輸入している。ウランは世界的に埋蔵量としては比較的豊富にあると見られているが（80 年程度）、ウラン資源の輸入を確保できる見通しが大変不安定である。
- 一方、今後、世界的に原子力発電が急増する可能性が高く、世界的なウランの生産と需要のバランスが崩れることが予想される。この需給バランスは 2030 年頃にも起こる可能性があり、世界的な価格の高騰のリスクが高くなっている。

- ▶ ウラン入手のリスクに対して、再利用可能な資源物質を使いながら将来につないでいくということが、プルサーマルによる路線の重要な意義である。ウランが大量に輸入できると楽観することは極めて危険である。また、ウラン産出国においてウラン掘り出して環境問題を作り出している現在のウラン採掘輸入を、そのまま無制限に続けてゆくことにも問題がある。自給式原子力（核燃料サイクル）の路線を指向することは、将来への「保険」として重要である。



- ▶ 再処理を行う場合の廃棄物発生と、直接処分を行う場合の廃棄物発生には、大きな違いがある（右図）。再処理では、プルトニウムやウランを除去しているので、コンパクトな廃棄体を地層処分することが出来る。
- ▶ 高速増殖炉は、将来的にウランが入手できなくなる場合に利用すべき「自給式原子力システム」であると共に、寿命の長い放射性核種を燃焼させる特性を持っている。この炉を経済的に実用できるレベルに高めておくことが重要である。



#### 4. 燃料の健全性や安全性について

- ◆◆要点◆◆
- MOX 燃料は、世界的に豊富な使用実績がある。設計仕様も海外（フランスやドイツ）と大差ない。
  - ウラン燃料と全く同じ形状の MOX 燃料をウラン燃料と同様に装荷するものであり、運転方法などは従来と変わらない。
  - プルトニウムを含む燃料によって燃料の特性が多少変わることを前提として、MOX 燃料の設計を適切に行う事により、濃縮ウラン燃料炉心と変わらない炉心特性を担保している。

- ▶ プルサーマルは世界的には多くの実績がある。既に欧州を中心に、6,400 体の集合体が使われている。脱原子力を進めて来たドイツでさえ、プルサーマルを進めている。

- ▶ プルサーマル燃料を装荷すると発電所からの放出放射能が増えるという心配を持つ方がいるが、これは明らかな誤解である。炉心の1/3まで装荷されるプルサーマル燃料は、炉心の2/3を占める濃縮ウラン燃料と同じように金属製被覆管に密閉された燃料であり、運転中に放射能が放出されることはない。
- ▶ プルサーマル燃料を装荷した炉心が事故を起こすと非常に大きな被害が周辺に出るという心配を持つ方が居るが、これも極端な誤解である。原子炉は安全設計によって炉心の損傷が起これないようにしているが、仮想的に炉心が損傷しても、放射性物質は炉容器や格納容器によって包蔵されるようになっていく。酸化プルトニウムは極めて揮発しにくい物質であり、最も飛散しにくい物質の一つであり、仮想事故において危険なのはむしろ核分裂生成物の方である。
- ▶ プルトニウムを含む燃料を装荷するため、炉心や燃料の特性が多少変わる。このために着目すべき課題については国の安全審査指針で明確に規定されており、MOX燃料の設計を適切に行う事によって、濃縮ウラン燃料炉心と変わらない炉心特性を担保している。
- ▶ 例えば、①MOX燃料の配置や量を制限することで反応の制御性をウラン燃料炉心と同程度確保している、②ウラン燃料では通常燃料ピンの内圧が数MPaまで上昇するが、MOX燃料では同等の圧力になる時点で燃料を取り出す（燃焼度を制限）、③燃料の融点の降下が70度程度の範囲でプルトニウムを使う、等。
- ▶ MOX燃料はプルトニウムを含むために放射線量がやや強いので、新燃料を取り扱う上で適切な遮蔽や遠隔操作が必要である。この技術は特に新しいものではなく国内外の経験も非常に多い。この件は、従業員の安全のための措置であって、周辺住民の問題ではない。

MOX 集合体の世界使用実績

国(発電所)	2004年末	2007年末	集合体/年
フランス(21基)	2,270	2,894	208
ドイツ(15基)	1,828	2,220	131
ベルギー(3基)	305	321	5
スイス(3基)	304	392	29
アメリカ(6基)	91	95	1
イタリア(2基)	70	70	0
インド(2基)	10	10	0
オランダ(1基)	7	7	0
日本(2基)	6	6	0
スウェーデン(1基)	3	3	0
合計(56基)	4,894	6,018	375
日本ふげん発電所	772	772	

## 5. 再処理・プルサーマルによる効果

### ◆◆要点◆◆

- 使用済ウラン燃料を発電所から払い出して再処理することで、発電所での使用済ウラン燃料の蓄積、発電所の停止、中間貯蔵施設の増設を回避できる。
- 安定で処分し易い高レベル放射性廃棄物の地層処分を実現できる。従来構築してきたインフラをそのまま利用する。
- 濃縮ウラン燃料を節約しつつプルトニウムを消費すると共に、将来的な資源物質として備蓄し管理下に置くことが出来る。プルトニウムを廃棄せずに使いながら管理するための、当面の手法である。

- ▶ 発電所から使用済濃縮ウラン燃料を再処理工場に払い出すことが出来る。発電所での使用済濃縮ウラン燃料の貯蔵量は増えなくなる。更に、将来的に再処理量が増えれば、減少に向かう。余計な使用済燃料の保管量を低減するだけでなく、使用済燃料が満杯になることで発電所が停止するリスクを軽減

### プルサーマルの効果まとめ

1. 軽水炉総発電量の15%程度をMOX燃料が担う
2. 濃縮ウラン燃料の節減(最大15%程度)天然ウラン購入量の節減(最大15%程度)
3. ウラン濃縮役割量の節減効果(数百tSWU)
4. 軽水炉ウランリスクに対する「二次供給効果」(最大15%程度)
5. 過剰なプルトニウムの消費効果
6. 軽水炉取り出しPuの兵器適性を損ずる
7. 使用済燃料貯蔵量の1/7への圧縮効果
8. 高レベル放射性廃棄物の軽量化・減量・早期地層処分
9. 地層処分面積の削減(最大50%程度)
10. 高レベル放射性廃棄物の潜在毒性の低減(1/8程度)
11. 中間貯蔵施設数の削減(18施設から数施設に抑制)
12. ウランリスク増大時の高速増殖炉サイクルへの展開の可能性確保
13. バックエンド運営の自由度の確保

直接処分シナリオとの対比は、比較的明白であるが、数値的な情報の強化は、さらに補強することが望まれる。結局、論点は、これの効用に対して「経済性が許容範囲内であるかどうか」

できる。

- ▶ 中間貯蔵施設の建設を減らすことが出来る。直接処分路線では、今後 60 年間に全国で約 12 箇所あるいはそれ以上の中間貯蔵施設が必要になるが、六ヶ所再処理工場を運営すれば、中間貯蔵施設は 3 箇所程度で済む。
- ▶ 直接処分路線ではプルトニウムを使用済燃料として貯め続けるが、再処理プルサーマル路線では、プルトニウムを積極的に燃焼させて消費する。
- ▶ プルトニウムを燃焼させることでプルトニウムの同位体組成を変化させ、二度と核兵器として利用できないものに変える。プルサーマルは、米国やロシアが解体核兵器プルトニウムの消費に利用されている。
- ▶ 濃縮ウラン燃料に代えてプルトニウム燃料を利用するので、約 15%程度の濃縮ウラン燃料を節約できる。同様に、ウラン濃縮役務の海外依存度を 15%程度下げることが出来る。
- ▶ 従来日本の原子力利用は、使用済燃料を再処理する事をすべての前提として進められてきた。再処理施設の確保、様々な法整備、原子炉の設置許可などのインフラ構築に 20 年近く費やした。これらのインフラをそのまま利用できる。再処理・プルサーマル路線を変えると、従来構築してきたインフラを全て変えるリスクを負う。
- ▶ 再処理リサイクル路線の高レベル放射性廃棄物の地層処分では、使用済燃料を直接処分する場合よりも、処分場の面積を少なくできる (2/3 あるいはそれ以下)。また、再処理リサイクル路線の高レベル放射性廃棄物の地層処分については、既に処分地の選定のための法整備や手続きが進められている。

## 6. 再処理・プルサーマル路線の選択

### ◆◆要点◆◆

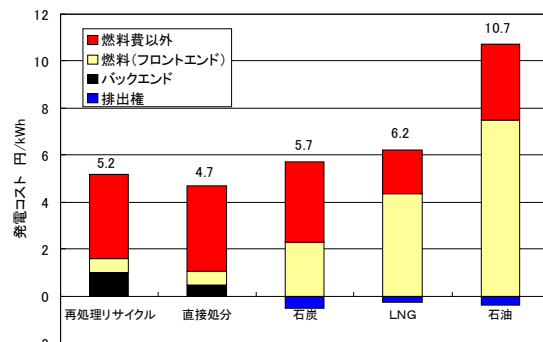
- 再処理リサイクル路線の選択は、国情に応じて大きく違ってくる。我が国なりの判断が重要。
- 核燃料サイクルの経済性評価の結果、再処理リサイクル路線が直接処分路線より 0.5 円/kWh 程度高いことが示されたが、総合的な効果や現実性から見て許容範囲にある。
- アメリカや国際原子力機関は、核不拡散の観点から、原子力国の使用済燃料を国際的に引き取って再処理する構想を提唱している。
- 米国・フランス・ロシア・中国・インドは高速増殖炉の開発を加速している。核燃料サイクルに対する世界の視点は、20年以上前の時代より大きく変わってきている。

- ▶ 世界には、再処理リサイクル路線を選択している国と直接処分路線を選択している国がある。直接処分を選択している国は、スウェーデン、スペイン、スイス、ドイツなどの原子力利用を限定的に見ている国である。

- ▶ アメリカ合衆国やドイツは、直接処分を指向しているが、全く実施できてない。韓国は再処理リサイクル路線を望んでいるが米国との協約によって実施していない。インドネシアやベトナムは今後原子力を導入する計画であるが、海外での再処理を希望している。

- ▶ プルサーマルは、ドイツ、ベルギー、スイスなどが海外委託再処理により行ってきた。フランスは自国の再処理によるプルサーマルを進めている。ロシアの解体核兵器からのプルトニウムを米国でプルサーマル利用する計画が進んでいる。

- ▶ 再処理路線と直接処分路線の経済性評価は、原子力政策大綱の策定において綿密に行われた。再処理路線は直接処分路線よりも 0.5 円/kWh 程度高くなることが分かったが、多くの効用を考慮すると許容範囲であると認識された。直接処分のコストには不確実性が多く、将来、ウランの価格が上昇すると、両者路線のコストが同レベルになる可能性もある。



再処理プルサーマル路線の経済性評価結果

