

原燃サイクルバックエンドにおける貯蔵過程の数理的考察

A Mathematical Analysis of Storage in the Fuel Cycle Back-end System

キーワード: 原燃サイクルバックエンド、使用済燃料、使用済燃料中間貯蔵、最適貯蔵期間、技術進歩

長野 浩司

使用済燃料中間貯蔵の意義と必要性を明らかにするため、プルトニウムリサイクル過程における貯蔵オプション選択の最適化問題の一般式を導出して解くことにより、各貯蔵オプションの貯蔵期間の選択を考察した。具体的には、ある時点で排出された1単位の使用済燃料に着目し、それが排出されてから、再処理された後に回収されたプルトニウム(Pu)が再び原子炉に装荷され燃焼されるまでの時間範囲に関して、原燃サイクル構成（使用済燃料中間貯蔵、再処理、Pu貯蔵、MOx燃料加工、MOx燃料貯蔵）の総費用とPu利用の効用についての最適化問題を定義し、各貯蔵オプションとその貯蔵期間の選択及び技術開発効果の観点からその最適条件を検討した結果、以下のことが示された。

- (1) ある貯蔵オプションの貯蔵期間を1年延長することの是非は、a-1)貯蔵期間の1年延長による当該貯蔵オプションの費用増分、a-2)貯蔵以降の処理の実施が1年遅延されることによるそれら費用の現在価値の変動、a-3)実施までに1年研究開発期間が伸びることによる技術進歩（費用低減）効果、の三者の和として表されるシステム費用の増減と、b)貯蔵以降の処理から回収された有用物質のリサイクル利用により得られる便益の発生が1年先送りされることの損失との比較で決まり、両者が等しくなる貯蔵期間 $[x,y,z]$ が各々の貯蔵過程における最適な貯蔵期間であり、その和 T が最適なリサイクル時点を与える。
- (2) もしリサイクル利用の効用が圧倒的に大きければ即時リサイクルが最適解となるが、Pu利用の効用は不確定な部分が大きい。Pu利用の効用を排除すれば、原問題は費用最小化問題に帰着し、公開されているコストデータを用いてその数値解を検討すると、3つの貯蔵オプションの中では使用済燃料の中間貯蔵がまず選択され、またこのときに貯蔵コストの関数形によっては貯蔵期間にある最適値が存在することがあり得る。再処理技術等について将来の技術進歩がより大きく期待できる場合には、使用済燃料貯蔵戦略の優位性はより強まり、またより早期の再処理の実施が正当化される。
- (3) 使用済燃料を再処理せず直接処分する場合にも、原問題と等価な問題を定義することができ、研究開発等による処分費用の低減効果と貯蔵期間の延長に伴う追加費用が等しくなる時点 T が存在するならば、そのときの T が最適な貯蔵期間及び処分時点を与える。

- | | |
|--------------|------------------------|
| 1. はじめに | 3.1 使用済燃料貯蔵の意義 |
| 2. 問題設定と解法 | 3.2 使用済燃料貯蔵コストと貯蔵期間の関係 |
| 2.1 問題設定と定式化 | 3.3 今後の課題 |
| 2.2 最適性の必要条件 | 4. おわりに |
| 2.3 数値例 | 参考文献 |
| 3. 考察 | |

1. はじめに
わが国原子力開発計画において、再処理リサ

イクル型原子燃料サイクルの完結と高速増殖炉(FBR)の実用化から成る、いわゆる再処理リサイクル戦略は、長らくその究極的な目標として掲

げられて来た。その中では、現在運転中の軽水炉から排出される使用済燃料は、プルトニウム(Pu)等の有用物質あるいは燃料資源を含有する、価値のある物資であり、また使用済燃料は原則的にその全量が原子炉から排出後直ちに再処理施設で再処理されることとされていた。1987年の「原子力開発利用長期計画」[1]では、そうした原則的な方向性に若干の修正が加えられ、再処理容量を上回る使用済燃料は適切に貯蔵・管理されることとされた。また、1994年に公表された「原子力の研究・開発・利用に関する長期計画」[2]では、さらなる軌道修正として「エネルギー資源の備蓄として」との一節が上記表現に加えられた。

超長期のエネルギー戦略を描く際に、原子力の必要性は明らかであるとしても、Puリサイクルの必要性は必ずしも明らかであるとは言えない。1997年6月に開催されたIAEAの国際シンポジウムにおいても、ウラン資源需給の観点からは、Puの当面の（具体的には2050年程度までの時間範囲での）利用を十分に正当化するのは困難であるとの見解が示されている[3]。

再処理リサイクル戦略を取るにせよ、ワンスルーエンジニアリング戦略を取るにせよ、原子力発電所の運転に伴って必然的に排出される使用済燃料の管理は、いずれ取り組まねばならぬ重要な問題である。前者の場合は、再処理施設への原料フィードの最適管理、ひいてはPu需給調整の機能を負うことになる。後者においては、最終処分施設へのフィード管理のみならず、もし処分施設の設置に遅延を生じたり、あるいはより良い技術体系の研究開発に時間を要する場合にその間の管理調整機能を要求される。そして、上記「原子力長計」に見られる通り、その主役として期待されているのは使用済燃料の中間貯蔵である。

本報告では、ある燃料サイクルバックエンド過程における使用済燃料管理の最適化問題のうち、最も簡単な形で理論的に定式化した上で、

原燃サイクルバックエンドにおける貯蔵過程の数理的考察

その最適性の必要条件と最適解の特性を考察する。具体的には、ある時点に排出された使用済燃料1単位に着目して、それが再処理され回収されたPu等の有用物質がリサイクル利用されるまでの間の時間調整をどのように行うべきかを検討し、中でも使用済燃料中間貯蔵の意義について考察を加える。

2. 問題設定と解法

2.1 問題設定と定式化

図1に、本報告が評価対象としている燃料サイクルバックエンドの範囲と概念を示す。ある原子力発電所から時点0に排出された1単位（たとえば1MTHM¹）の使用済燃料を考える。この使用済燃料をある時点（原子炉からの排出からx年後）に再処理し、回収されたPuをMOx燃料として成型加工した後に、ある時点（排出からT年後）に原子炉に装荷し燃焼させるものとする。

解くべき問題は、使用済燃料貯蔵（期間x年、費用 $f_1(x)$ ）、再処理（費用 f_r 、技術進歩率 i_r ）、プルトニウム貯蔵（期間y年、費用 $f_2(y)$ 、技術進歩率 i_2 ）、MOx燃料加工（費用 f_m 、技術進歩率 i_m ）、MOx燃料貯蔵（期間z年、費用 $f_3(z)$ 、技術進歩率 i_3 ）及びMOx燃料の原子炉への装荷・燃焼（効用U）を組み合わせたシステムの総効用現在価値TU（割引率r）²を最大化することである。

1 以下の定式化は、文献[4]において検討したものにより詳細に展開したものである。また、以前に筆者らは、文献[5]において同様の費用最小化問題について予備的な定式化と検討を試みている。本報告の定式化は、文献[5]のそれにPu利用の効用及び技術進歩率等の要素を加味することにより、効用最大化問題として拡張し一般化したものである。

2 Metric Ton of Heavy Metal、重金属換算トン。燃料中に含有する重金属の重量。Pu等を含まない新UO₂燃料の場合には、とくにMTU (Metric ton of uranium)と表記することが多い。

3 Mixed Oxide Fuel、混合酸化物燃料。

4 ただし、図1において副産物として現れる高レベル廃棄物の処理処分の費用は再処理費用に、補助投入物として現れるウランその他のMOx燃料製造のための

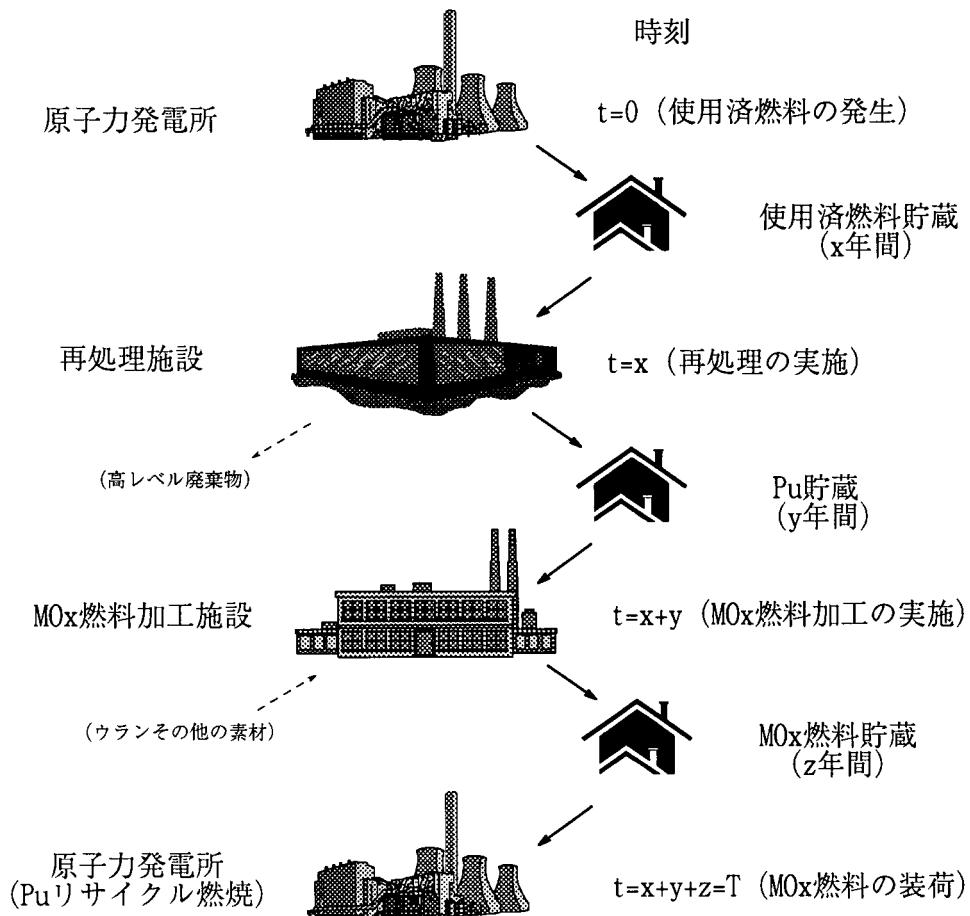


図1 評価対象の燃料サイクルバックエンドの範囲と定義

とである。すなわち、

$$\begin{aligned}
 TU = & -f_1(x) - e^{-rx} \cdot f_r \cdot (1-i_r)^x \\
 & - e^{-ry} \cdot f_2(y) \cdot (1-i_2)^y \\
 & - e^{-r(x+y)} \cdot f_m \cdot (1-i_m)^{(x+y)} \quad (1) \\
 & - e^{-r(x+y)} \cdot f_3(z) \cdot (1-i_3)^{(x+y)} \\
 & + e^{-rT} \cdot U \rightarrow \max.
 \end{aligned}$$

$$s.t. \quad T = x + y + z \quad (2)$$

ただし、上記並びにそれ以外の変数の定義については表1を参照されたい。

この問題を解くにあたり、原問題の主旨を逸

素材の費用は MOx 燃料加工費用に各々含まれていると見なし、明示的には取り扱わない。

脱しない範囲でいくつかの簡略化を行う。

まず、技術進歩率を個々の技術に対して定義したが、ここでは単にどれも一律の技術進歩係数（技術開発に費やす時間に応じて一定倍率で費用低減が生じる）を仮定し、 $i_n = i$, $n: r, 2, m, 3$ とおくこととする⁵。この仮定により、原問題(1)は以下のように置き換えられる。

5 ただし、この簡略化はあくまでも簡明のためであり、技術毎に区別した技術進歩係数としたまま式展開を進めても、以下の式展開には何ら支障ない。

表1 変数の定義

変数名	単位	意味
TU	¥/MTHM	総効用現在価値（目的関数）
r	1/yr	割引率
$f_1(x)$	¥/MTHM	x 年間の使用済燃料貯蔵コスト
f_r	¥/MTHM	使用済燃料再処理コスト
i_r	1/yr	使用済燃料再処理コストの改善率（技術進歩率）
$f_2(y)$	¥/gPu* $\alpha(x)$	当初の使用済燃料の再処理から回収された Pu を y 年間貯蔵するための貯蔵コスト
$\alpha(x)$	gPu/MTHM	当初の使用済燃料の Pu 含有量（ただし x 年間の貯蔵に伴う Pu の崩壊反応を考慮）
i_2	1/yr	Pu 貯蔵コストの改善率（技術進歩率）
f_m	¥/MTHM* $\beta(x+y)$	MOx 燃料成型加工コスト
$\beta(x+y)$	MTHM/MTHM	貯蔵された Pu 量から生成される MOx 燃料量（ただし $x+y$ 年間の経過に伴う Pu の燃料価値の低下を考慮）
i_m	1/yr	MOx 燃料成型加工コストの改善率（技術進歩率）
$f_3(z)$	¥/MTHM* $\beta(x+y)$	生成された MOx 燃料を z 年間貯蔵するための貯蔵コスト
i_3	1/yr	MOx 燃料貯蔵コストの改善率（技術進歩率）
$U(T)$	¥/MTHM	MOx 燃料を T 年後に原子炉で燃焼することによる効用
λ		ラグランジエ定数

$$\begin{aligned}
 TU = & -f_1(x) - e^{-(r+i)x} \cdot f_r \\
 & - e^{-(r+i)x} \cdot f_2(y) \\
 & - e^{-(r+i)(x+y)} \cdot f_m \\
 & - e^{-(r+i)(x+y)} \cdot f_3(z) \\
 & + e^{-rT} \cdot U \rightarrow \max.
 \end{aligned} \tag{3}$$

について最適性の必要条件を求める。すなわち、

$$I = TU - \lambda(T - x - y - z) \tag{4}$$

について、4 つの政策変数の各々について以下の 4 つの条件を定義する。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial I}{\partial x} = & -f_1'(x) + (r+i)e^{-(r+i)x} \cdot f_r \\
 & + (r+i)e^{-(r+i)x} \cdot f_2(y) \\
 & + (r+i)e^{-(r+i)(x+y)} \cdot f_m \\
 & + (r+i)e^{-(r+i)(x+y)} \cdot f_3(z) \\
 & + \lambda = 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

すなわち、技術進歩率一定の仮定は、割引率を見かけ上 r から $(r+i)$ に増加させることに等しい。これは、毎年確実に技術進歩が予想される行動主体にあっては、予想される改善率だけリスク回避的に行動することを意味する。

2.2 最適性の必要条件

(3)式の最適化問題に対して、制約式(2)及びラグランジエ定数 λ を導入して、変数 x, y, z, T に

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial y} = & -e^{-(r+i)x} \cdot f_2'(y) \\ & + (r+i)e^{-(r+i)(x+y)} \cdot f_m \\ & + (r+i)e^{-(r+i)(x+y)} \cdot f_3(z) \\ & + \lambda = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -e^{-(r+i)(x+y)} \cdot f_3'(z) + \lambda = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial I}{\partial T} = -r \cdot e^{-rT} \cdot U - \lambda = 0 \quad (8)$$

以上の準備の下に、式(5)-(7)の各々と(8)式から λ を消去することにより、次のことが言える。すなわち、ある貯蔵オプション（使用済燃料中間貯蔵、Pu貯蔵あるいはMOx新燃料貯蔵）の貯蔵期間を1年延長することの是非は、

a-1) 貯蔵期間の1年延長による当該貯蔵オプションの費用増分

a-2) 貯蔵以降の処理の実施が1年遅延されることによるそれら費用の現在価値の変動

a-3) 実施までに1年研究開発期間が伸びることによる技術進歩（費用低減）効果

の三者の和として表されるシステム費用の増減((5)-(7)式の各々の λ を除いた部分)と、

b) 貯蔵以降の処理から回収された有用物質のリサイクル利用により得られる便益の発生が1年先送りされることの損失((8)式の λ を除いた部分)

との比較で決まり、両者が等しくなる貯蔵期間 $[x,y,z]$ が各々の貯蔵過程における最適な貯蔵期間であり、その和 T が最適なサイクル時点を与える。

さて、最適性の必要条件について解法を進

める。ここでもう一つの仮定として、MOx新燃料の貯蔵については、設備面で遮蔽等の配慮を要するものの、技術的に大きな負担とは考えられず、他の費用項目に比べて無視できるものと考える。従って、(5)-(7)式において、

$$f_3(z) = f_3'(z) = 0 \quad (9)$$

と考えることにする。すると、(7)式に(9)式を適用すれば、

$$\lambda = 0 \quad (10)$$

次に、Pu利用の効用 U についてであるが、先進諸国に見られる高速増殖炉(FBR)開発からの撤退などを見ても、近年のPu利用計画の進展に不確実性が大きく、またその利用による効用についても、確たる判断基準を持ち難い。仮に、効用 U が原問題に対して何らの影響を及ぼさない、すなわち $U=0$ と仮定すれば、原問題(1)は3つの貯蔵オプションを含む燃料サイクル構成の総費用最小化問題に帰着する。

効用 U が明らかに正であれば、この定式化の範囲では、(8)式により I は T の単調減少関数となり、 T すなわちPu利用の時期を遅延させることは正当化されない。すなわち $T=0$ であり、本報告の定式化の限りにおいては即時再処理、即時Pu利用が最適解となる。

逆に、効用 U が負であれば、同じく(8)式により I は T の単調増加関数となり、この定式化によって示唆される最適解は（使用済燃料の）長期貯蔵となる。

さて、(5),(6)式から、

6 ここまで式展開では、単に $T=\infty$ が示唆されるのみである。以後の数式展開により、使用済燃料の貯蔵が他の貯蔵オプションに勝ることが示されるが、これを先取りしてこのように記述した。

$$f_1'(x) = e^{-(r+i)x} \cdot f_2'(y) + (r+i)e^{-(r+i)x} \cdot (f_r + f_2(y)) \quad (11)$$

この式の両辺は、各々以下を意味する。

- ・(左辺)：使用済燃料中間貯蔵の貯蔵期間を1年延長することによる、貯蔵費用の増分
- ・(右辺)：再処理以降の過程が1年遅延することによる、再処理以降の過程の費用の総現在価値の変動

この(11)式が、使用済燃料貯蔵における最適解の基本的な必要条件式を与える。(11)式を満たす x^* が存在するとき、その x^* が最適な貯蔵期間である。全く同様に、(6),(7)式からは最適 Pu 貯蔵期間 y^* の同等な条件式が得られる。すなわち、

$$f_2'(y) = e^{-(r+i)y} \cdot f_3'(z) + (r+i)e^{-(r+i)y} \cdot (f_{rm} + f_3(z)) \quad (12)$$

である。

2.3 数値例

以上の最適性の必要条件について、数値例を基に検討してみる。表2には、ここで用いたコストデータを示している。コストデータは OECD/NEA 等の公開している国際的なデータを用いた。

また、評価の前提とした使用済燃料の特性データは、文献[5]において仮定したものと同様に、燃焼度 31,900 MWd/MTHM⁸ のものとし、1回の

原燃サイクルバックエンドにおける貯蔵過程の数理的考察

取り替え燃料 24.5MTHM 中に Pu を 0.20t、うち核分裂性 Pu (Pu-239、Pu-241) を 0.14t 含有するものとした。その他、仮定した燃料特性については表3を参照されたい。燃焼度については、近年上昇傾向にあり、最新のものでは 45,000 MWd/MTHM 程度のものまで実用に供されている。これら高燃焼度燃料に対する評価については、データが揃えば同様に実施可能である。本報告では、以上のデータ設定に基づいて、あくまで一例を示すに留める。

数値例では、Pu のリサイクル利用の効用については検討せず、(3)式の原問題から効用 U を消去し、総費用最小化問題に帰着することで検討を進める。ただし、報告では Pu のリサイクル先として軽水炉（いわゆるプルサーマル）のみを考慮することとし、さらに文献[5]で採用した評価指標である、対象プロセスの総費用を総発電量の現在価値（もとのウラン燃料からの発生電力量に、MOx 燃料のリサイクル利用から得られる発電力量に e^{-T} を乗じたものの和）で除した kWh 単価を評価指標に採用することにする。この手続きにより、Pu リサイクルの効用を部分的に表現するとともに、即時再処理・Pu リサイクル燃焼の場合に得られるプルサーマル発電電力量（上記 0.14t の核分裂性 Pu から生成する MOx 燃料から発生する発電電力量）が、貯蔵中の時間経過に伴う Pu 核種組成変化（Pu-241 の崩壊）によって減少する効果を加味しているが、反面、MOx 燃料に対するバックエンド費用を無視しているという問題点が残る。この手法の詳細は文献[5]に譲る。

まず、Pu 貯蔵についてであるが、式(12)の最

7 文献[4]においては、筆者らは国内データによる検証も試みている。しかし、その後国内燃料サイクル格段における処理コスト、貯蔵コストなどは（使用済燃料の中間貯蔵を除いて）公開された情報がなく、現時点では国内データによる検証は不可能であると判断している。

8 Megawatt-day/MTHM。1MWd=24,000kWh、ただしこ

れは熱出力である。電力量に換算するには、発電効率を乗じればよい。

9 FBR 等へのより高度なリサイクルを含めて、どのようなリサイクル形態が最適であるか、あるいは戦略として正当化されるかについては、本報告の定式化におけるリサイクル利用の効用そのものに関わる本質的な問題である。ここではその議論には立ち入らないこととし、別の機会に譲る。

表 2 数値例で用いたコストデータと出典

費用項目	表 1 との対応	設定	出典
SF 貯蔵	$f_1(x)$	(51+5/yr) [\$/kgHM]	OECD/NEA(1994) ¹⁰
再処理	f_r	720 [\$/kgU]	OECD/NEA(1994)
Pu 貯蔵	$f_2(y)$	1 [\$/gPu/yr]	OECD/NEA(1989)
MOx 加工	f_m	800 [\$/kgHM]	OECD/NEA(1989)
MOx 貯蔵	$f_3(z)$	(無視)	
(SF 直接処分 : 参考)	(f_d)	610 [\$/kgU]	OECD/NEA(1994)

適条件と表 2 のデータより¹⁰、

(式(12)の左辺)

$$\begin{aligned} &= 1 [\$/gPu/yr] \times \alpha [gPu/MTHM] \\ &= 1 \times 7,874 \\ &= 7,874 [\$/MTHM/yr] \end{aligned}$$

(式(12)の右辺)

$$\begin{aligned} &= (r+i) \times 800 [\$/MTHM] \\ &\quad \times \beta [MTHM/MTHM] \\ &= (r+i) \times 800 \times 0.1468 \\ &= (r+i) \times 117 [\$/MTHM/yr] \end{aligned}$$

となり、左辺が右辺をはるかに(数桁)上回る。すなわち、Pu 貯蔵を 1 年延長することの費用増分が、MOx 燃料成型加工以降を 1 年遅延させることによる費用低減を常に大きく上回るので、原問題においては Pu 貯蔵は棄却され、常に、

$$y = 0 \quad (13)$$

となる。このとき、解くべき問題は、使用済燃料中間貯蔵期間の最適化問題に帰着する。

検証のため、 $T=20$ [yr] としたときに、使用

済燃料貯蔵、Pu 貯蔵、MOx 新燃料貯蔵のいずれかのみにより、20 年間の時間調整をする場合を相互に比較してみる。たとえば、使用済燃料貯蔵 20 年のケースでは、使用済燃料は排出後に 20 年間中間貯蔵され、その後直ちに再処理、MOx 燃料成型加工を経て原子炉に装荷されると考える。Pu 貯蔵 20 年のケースは、排出後に中間貯蔵せず直ちに再処理し、回収された Pu を 20 年間貯蔵し、その後直ちに MOx 燃料に加工し、原子炉に装荷するというものである。割引率(ここでは、一律の技術進歩率を加味した $r+i$ を割引率と呼ぶことにする、以下も同様)は、8%/年とおいた。

結果を図 2 に示す。Pu 貯蔵のケースが棄却される要因は、既に述べたように Pu 貯蔵の費用が高いことに加えて、使用済燃料貯蔵の条件式(11)における右辺の「再処理を 1 年遅延させることの費用現在価値の低減」が大きいことである。この要因が、使用済燃料貯蔵が選択される原因となっており、また MOx 新燃料の貯蔵のケースが棄却されるのも同じ原因による。

次に、使用済燃料中間貯蔵期間 x について、その最適値が存在するかどうかみてみよう。図 3 は、表 2 の費用データの下で、定義したシステム費用がどのように変化するかを、使用済燃料中間貯蔵の貯蔵年数に対して 1 年毎に計算し、プロットしたものである。割引率が 0 のときは、ある費用がどの時点で発生しても同じ現在価値を持つため、現在価値で判断する際に費用の支出時点を選択することが意味をなさない。

10 ただし、ここで数値比較においては、貯蔵の間の時間経過に伴う燃料価値の低下については繁雑になるので省略した。Pu の崩壊反応による価値の低下は後者(右辺)のほうが大きく作用するので、式(12)の両辺の比較結果には影響しない。

11 OECD/NEA(1985)の設定(40+4/yr)を、評価時点の差異で調整している。出典については[6]-[8]を参照されたい。

表3 仮定した燃料特性[5]

		LWR	LWR (Pu-thermal)	
			UO ₂ 燃料体	MO _x 燃料体
電気出力 [MWe]		1,000	1,000	
熱効率 [%]		34.0	34.0	
比出力 [MW/t]		38.3	38.3	
燃焼度 [MWd/t]		31,900	31,900	
炉内滞在時間 [yr]		3.0	3.0	
炉内燃料バッチ数		3	3	
装荷燃料	重金属性 [MTHM]	25.4	17.5	7.99
	ウラン [t]	25.4	17.5	7.46
	Pu [t]			0.53
	核分裂性 Pu [t]			0.30
取出燃料	重金属性 [MTHM]	24.5		
	ウラン [t]	24.5		
	Pu [t]	0.20		
	核分裂性 Pu [t]	0.14		
ウラン濃縮度 [%]		3.20	3.20	0.71

注：表3から、定式化における係数を計算すると、

$$\alpha(0) = 0.20 * 10^6 / 25.4 = 7,874 \text{ [gPu/MTHM]}$$

$$\beta(0) = (0.14 / 25.4) / 0.30 * 7.99 = 0.1468 \text{ [MTHM/MTHM]}$$

となる。

この場合は、再処理の実施を前提とした定式化の下での最適戦略は、即時再処理を行うというものとなる。ただし、再処理の是非そのものを問う問題設定の場合には、別途の検討が必要である。

割引率が0でない値を取るとき、使用済燃料の中間貯蔵期間に最適値が存在し、しかもその最適貯蔵期間（年数）が割引率の値によって変化し得ることが、図3に示唆されている。

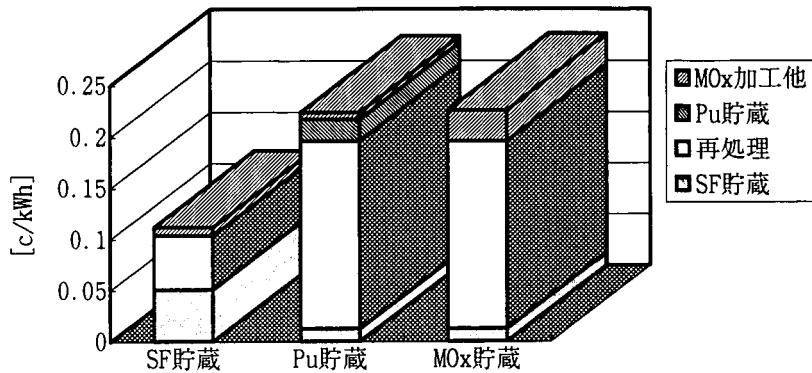
なお、図3において、貯蔵期間 $x=0$ の場合すなわち縦軸との切片は、特異点となっている。貯蔵コスト関数の形状に貯蔵期間の長短に依存しない定数項（表2における 51[\$/kgHM]）が存在するためであり、取扱いに注意を要する。図3に示されるように、割引率($r+i$)が図示した範

囲の値を取る限り、 $x=0$ の点が最小となることはない。

図3では、($r+i$)の数値として0, 4, 8%のケースを示しているが、8%から4%に減少させると、最適な貯蔵期間は31年程度から42年程度に伸びている。さらに割引率を低下させると、ある値でコスト最小が消滅するか、縦軸との切片の値を上回るようになる。その前後で、解は「無限期間の貯蔵」から「即時再処理」へと180°の転換を生じる。単純な問題設定にも関わらず、このような不安定性を有していることには注意を要する。

図4では、一律の技術進歩率の仮定条件を外した上で、再処理技術のみ技術進歩係数を考慮した場合である。再処理技術に研究開発効果が期待できるほど、最適な貯蔵期間は短くなり、より早期の再処理を促している。この結果は、再処理の技術進歩が早く進展するほどに、再処理の実施を正当化できるレベルにより早期に到

12 ただし、この結論はあくまでも表2に示す前提条件に基づく数値例について導かれるものであり、一般に最適な貯蔵期間が存在するという保証はない。この点については、3.2節でより詳細に論じる。

図2 $T=20$ 年を各々単独の貯蔵オプションで調整する場合の比較 ($r+i=8\%$)

(注) SF 貯蔵：使用済燃料貯蔵

達すると解釈することができる。この点からも、使用済燃料の最適な貯蔵期間は多くの条件の相関によって決まり、この意味で綿密な戦略策定が求められると言える。

図5は、参考までに、使用済燃料の直接処分を行うケースについて評価している。実は、(1),(2)式の定式化は使用済燃料を直接処分する場合においても基本的に等価であり、再処理を表すサフィックス r を直接処分の d に付け替え、Pu貯蔵以降の過程を無視することにより、同等

の最適化問題を得る。この場合、最適解の条件も以上の式展開と同様のものとなり、貯蔵を1年延長する費用増分と、処分を1年遅延するとの費用現在価値の低減（その本質は、割引きの効果と、技術進歩効果とから成る）が等しくなるというものである。図5は、表2の費用データの下に、処分の場合の最適貯蔵期間の存在を示唆している。直接処分の場合であっても、使用済燃料を貯蔵することで得る時間余裕がシステム全体に正の効果（便益）をもたらし得る

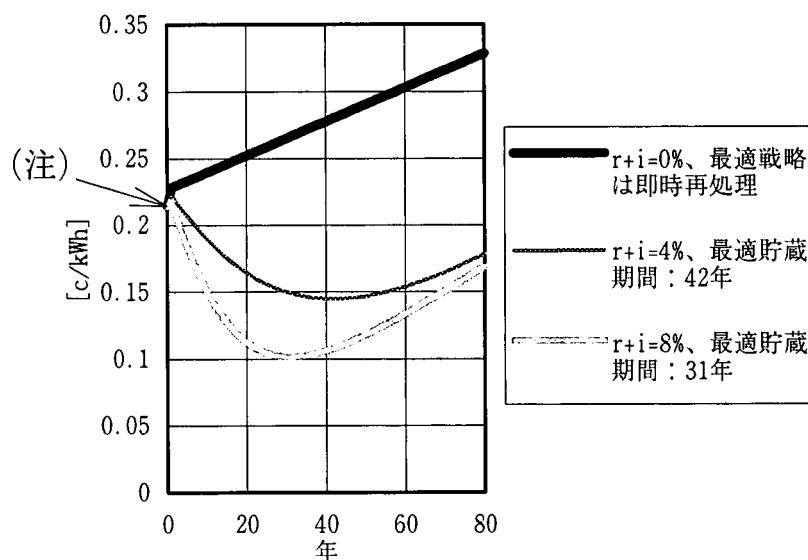


図3 使用済燃料中間貯蔵の最適貯蔵期間と割引率の影響

(注) 縦軸切片の値は、0.2137

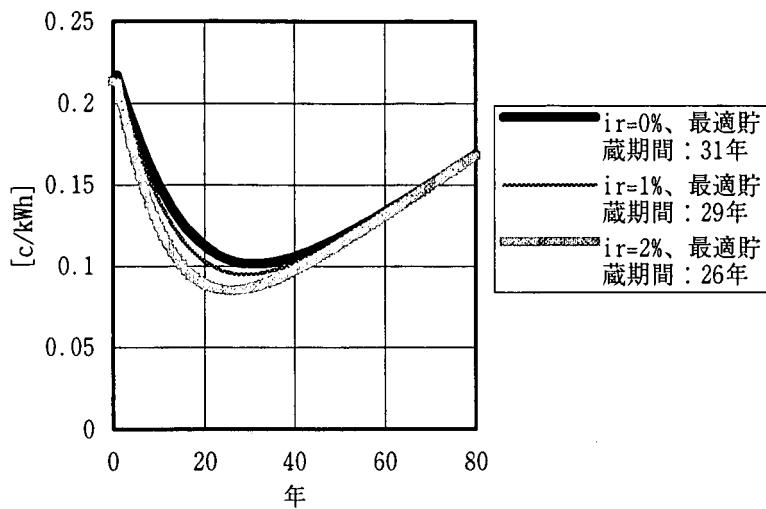


図4 再処理の技術進歩の効果

のである。

3. 考察

3.1 使用済燃料貯蔵の意義

筆者らは、従来より、使用済燃料の中間貯蔵の意義として次の2つの面を指摘してきた[9]。すなわち、至近時点ないし将来時点において、使用済燃料管理に何らかの措置を迫られることが不可避であり、適切な対策の立案が緊急に求められているという「現実の状況から来る必要性」、及び原子力開発利用の計画全体の最適な

方向性から要請されるという「原子力計画上の最適選択」である。

ここでは、後者についてより掘り下げて考えてみたい。後者の意味で中間貯蔵が選択されることの意義としては、「原燃サイクル技術を国産技術として成熟化させるための時間余裕を得る」ことが挙げられる。原燃サイクルを国産技術をもって完結させることは、単にわが国原子力開発の永年の念願であるに留まらない。原子力エネルギーが今後国際的なエネルギー財に展開していく、プラント技術のみならず燃料サイ

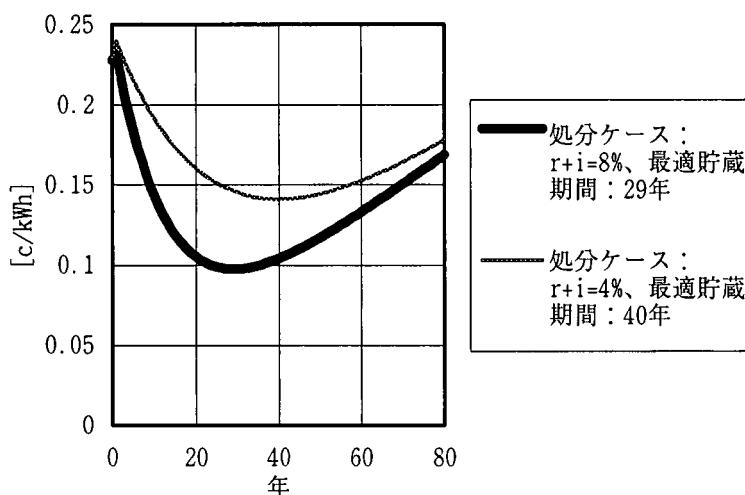


図5 直接処分の場合

クルサービスも国際市場において活発に取引されていくとすれば、国産技術の価格競争力を高めることは重要な急務である。また、国際情勢次第では、今後急成長が予想されるアジア諸国を中心に、日本の技術を積極的に供与していくことが必要となる可能性もある。

さらに、貯蔵による時間余裕は、より革新的な技術の研究開発と導入、あるいは逆に従来戦略からの撤退といった思い切った施策、決断を含めて、戦略の見直し・修正あるいは放棄のための検討評価のために供されるべきである。

将来に向けての不透明性が高まっている現在、不確実性への対処の一方途としての使用済燃料貯蔵の重要性は一層増していると考える。

3.2 使用済燃料貯蔵コストと貯蔵期間の関係

本報告で示した式展開において、図2~4のような貯蔵期間の最適値が出現するメカニズムは、基本的に使用済燃料貯蔵コストの貯蔵期間に対する依存性に起因する。

本報告では、表2に示したOECD/NEAの設定を用いている。その元となるのが、文献[8]における $(40+4/yr)[\$/MTHM]$ という設定である。

ここではこの貯蔵期間依存項 $(4/yr)$ を、1年の貯蔵期間延長につき、当該の延長された1年間毎に\$4ずつ支出される、すなわち貯蔵開始時の基準時点現在価値でみれば $\$(4 \cdot e^r)$ が延長に対する増分（従って、(11)式の左辺に相当）であることは解釈せず、設計変更その他の理由により基準時点現在価値で\$4の増加があることを意味している、との解釈に立っている。もし前者の解釈に立てば、(11)式の左辺の値は割引き項 (e^r) を乗じる分小さくなり、上記数値例で示した最適な貯蔵期間はより大きくなるか、場合によっては最適値が存在しないことになる。

13 Pu貯蔵が棄却され、かつ再処理に技術進歩がない場合には、(11)式の右辺が再処理コストの割引要因 $r \cdot e^r f_r$ のみとなるので、式(11)の両辺が一致する t が

ただし、その場合でも、貯蔵以降の過程に技術進歩を期待する場合には、貯蔵期間の最適値が存在する可能性がある。この意味で、貯蔵をバックエンド全体の研究開発との関連で捉え、最適な戦略立案を図ることの重要性を一層強調したい。

現実的には、貯蔵期間を1年延長することに伴う追加コストは、さほど大きなものになるとは考えにくい。水プール貯蔵の場合には、冷却水の循環動力や水質管理などの通常の運転経費がかかるが、その貯蔵コスト全体に対する比率は大きくはない。ましてや、金属キャスク貯蔵などの乾式貯蔵で自然空冷方式の場合には、追加的な経費はモニタリング等極く限定的なものとなろう。

ただし、貯蔵施設の使用年数の経過に伴って、設備の一部ないし全ての更新が必要となるような場合には、追加費用が一時的かつ不連続に急上昇することがあり得る。言い換えれば、より現実的な状況下では、貯蔵施設自体の耐用年数あるいは主要機器・設備の更新の時点が、貯蔵から次の過程に移行する一つの契機となり得ることが示唆される。

3.3 今後の課題

本報告では、最大限に単純化した問題設定により議論を進めたため、考慮から抜け落ちている要因が多く存在する。

まず何よりも、使用済燃料は単年に1単位発生するのではなく、実際には毎年様々な量の排出が起こり、またその組成や様態も様々である。さらに、再処理にしても貯蔵にしても、隨時必要な量のサービスの供給が得られるというわけではなく、国内設備についてはその設備設置・運用計画、海外供給については国際市場動向に

$(f'_i(t)=rf_i$ でない限りにおいて) 存在しない。その場合は、割引率が極端に小さい(1%以下)場合を除いて、長期貯蔵が選択されることになる。

ついての配慮が必要である。もとより、使用済燃料管理の問題は、そうした需給両面のダイナミックな連携の下に解くべきものであり、今後はより現実的な状況想定の下に戦略策定を図る方法論の構築を目指していきたい。

また、本報告の定式化においては、技術進歩効果について単に時間経過によって自動的に進歩が図られるとするに留まった。これに対して、技術進歩を経験の蓄積による「学習効果」として定義し、累積の生産量あるいは設備設置量に対して費用低減が発生するとの定式化があり得る。原燃サイクルバックエンドにおける技術進歩の発現メカニズムの検証と問題解法への反映は、最優先の課題である。

さらに、上記の現実的な文脈の下での戦略立案については、具体的な設備設置計画問題を解く上で、規模の経済性（大型設備を初期に少数設置する場合）と学習効果（小型設備を随時多数設置する場合）とのトレードオフが発生し得る。これらの要因は、最適化問題において非線型性をもたらし得るため容易な課題ではないが、重要な研究課題であると認識している。（使用済燃料貯蔵におけるこれらの支配要因については、文献[10]で検討を加えている。）

4. おわりに

本報告では、最も単純化した形で使用済燃料管理の最適化問題を定義し、最適解の必要条件を分析した。考察に述べたように、本報告の内容だけで実際の使用済燃料管理政策が描き出せるわけではなく、今後も発展と肉付けを加えていく必要がある。

しかしそれでも、使用済燃料貯蔵が「やむに止まれず」緊急避難的措置として実施されるだけでなく、全体の戦略の中での最適解として選択される可能性が示されたことは、今後のバックエンド政策の立案と展開を進める上で重要である。ことに、貯蔵の後の過程の技術開発研究

原燃サイクルバックエンドにおける貯蔵過程の数理的考察との兼ね合いで貯蔵期間の最適値が選択され得ることは、拙速を避け状況変化を見極めながら適切な措置を適切な時期に実施していくという、貯蔵を軸とする戦略の最大の長所を鮮明に描き出していると言える。

今後は、より現実的な文脈の下で、使用済燃料管理戦略の立案の体系的な方法論の構築に展開していきたい。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、編集委員および匿名の外部査読者から有益なコメントを戴いた。ここに深く感謝の意を表したい。

【参考文献】

- [1] 原子力委員会、原子力開発利用長期計画、1987年。
- [2] 原子力委員会、原子力の研究・開発・利用に関する長期計画、1994年。
- [3] IAEA, Future Fuel Cycle and Reactor Strategies, Key Issue Paper 3 for the International Symposium on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy: Adjusting to New Realities, 3-6 June, 1997, Vienna, Austria.
- [4] 長野、原燃サイクルバックエンドにおける貯蔵過程の数理的考察、（社）日本原子力学会平成9年秋の大会予稿集 No.E81、1997年。
- [5] 今村、長野、プルトニウムリサイクル過程における貯蔵の選択、電力中央研究所研究報告 No.Y90003、1990年。
- [6] OECD/NEA, The Economics of Nuclear Fuel Cycle, OECD, Paris, 1994.
- [7] OECD/NEA, Plutonium Fuel: An Assessment, OECD, Paris, 1991.
- [8] OECD/NEA, The Economics of Nuclear Fuel Cycle, OECD, Paris, 1985.
- [9] 三枝他、使用済燃料の原子力発電所構内キャスク貯蔵技術の評価、電力中央研究所総合報告 No.U27、（財）電力中央研究所、1993年。
- [10] Nagano, K., An Economic Analysis of Desired Spent Fuel Management and Storage, paper submitted to PBNC'98: 11th Pacific Basin Nuclear Conference, Banff, Canada, May 3-7, 1998.