

使用済燃料貯蔵を要諦とする原子燃料サイクル戦略

長野浩司*

わが国の原子力発電規模想定の下に、2050年までの使用済燃料管理のあり方を展望した。当面、再処理からのプルトニウム利用としては、軽水炉でのプルサーマル利用が中心となる。その際、軽水炉使用済燃料管理の観点から、以下の点が重要である。

- (1) 今後、2010～2020年程度の中期的には、使用済燃料再処理を上回る使用済燃料を貯蔵措置により収容せざるを得ない。その対処必要量は、相当程度の確度をもった想定が可能である。
- (2) 2050年までの長期的展望においては、原子力発電や再処理の実績次第で、貯蔵対処が不要になっていく場合から貯蔵対処必要量が単調に増大する場合まで、大きな不確実性が存在する。
- (3) プルサーマル実施により、MOX使用済燃料が発生するが、これは第二民間再処理工場が実現するまでは貯蔵により対処せざるを得ない。このように、今後の使用済燃料管理においては、単なる量的考慮だけでなく、低燃焼度のものから高燃焼度のもの、MOX燃料と質的に多様なものが存在する状況になっていくので、より綿密な計画が必要になる。
- (4) 一般に、貯蔵には最適な期間および最適な規模の選択が存在する可能性がある。今後の事業展開にあたっては、最適条件からの大幅な逸脱を生じないように、計画全体の吟味を繰り返しながら進めていくことが望まれる。

Keywords: 使用済燃料貯蔵, 使用済燃料再処理, プルサーマル, 不確実性

Under a set of assumptions for Japan's future nuclear power generation program, necessities for spent fuel management are assessed up to the year 2050. Within a foreseeable time frame, plutonium recovered from reprocessing will mainly be recycled to light water reactor (LWR) plants as "Pu-thermal" fuel. From the viewpoint of spent fuel management, the following observations are suggested as important:

- (1) In the middle-term up to 2010-2020, spent fuel arising which will exceed the domestic reprocessing capacity must be dealt with by storage. Amount of spent fuel to be stored can be forecasted with a high degree of precision.
- (2) In the longer-range up to 2050, significant uncertainty exists depending on number of factors, such as nuclear power generation and actual operation of reprocessing. Forecasted requirement of spent fuel storage varies from none to uniformly increasing up to 25,000tHM by 2050.
- (3) MOX spent fuel resulted from plutonium recycling in LWRs must be stored by the time when the second domestic reprocessing plant will be completed and can accept those fuel. This means careful planning and management will be needed for varying quantity and quality in the spent fuel accumulation in the near future depending on strategies to be undertaken.
- (4) Theoretically, it is suggested that there may be the optima in duration and capacity in storage. Thus, deliberation must be maintained in implementing services for spent fuel, such as reprocessing and/or storage, in a way the whole system does not by far depart from those optimality.

Keywords: spent fuel storage, spent fuel reprocessing, Pu-thermal, uncertainty.

1 はじめに

原燃サイクル戦略における使用済燃料貯蔵の基本的意義について、筆者は以下の3つの側面を指摘してきた[1].

- ・原子炉付設プールの容量超過を回避する「緊急避難措置」
- ・再処理施設への使用済燃料フィードの調整機能
- ・将来の不確実性への対処

わが国の原子力発電部門においては、まず第2の必要性が1987年の「原子力長計」において指摘され、相前後して第1の必要性が差し迫ったものとなり、その結果、各発電所におけるプール容量増強、日本原子力発電敦賀発電所における使用済燃料の号機間移送、東京電力福島第一発電所における共用プール及びキャスク貯蔵施設の設置等、個別の対策が相次いで導入されてきた。さらに、第3の意義及びエネルギー資源利用上の意義に関連して、1998年6月の総合エネルギー調査会原子力部会の中間報告書[2]において「リサイクル燃料資源貯蔵」の早期実用化への意志

が強く示され、これを受けて1999年の原子炉等規制法の改正により「貯蔵の業」が新たに規定されるなど、着実な制度整備が行われている。また、2000年11月には、青森県むつ市より東京電力(株)に対して使用済燃料貯蔵施設の立地可能性調査についての申し入れが行われ、事業化へ向けた動きが実現しつつある。2000年11月に公表された「新・原子力長計」においても、使用済燃料貯蔵事業の実現へのさらなる努力の継続を要請するものとなっている。

Table1 The needs for spent fuel storage in Japan. [3]

(単位: トンU)

項目	期間	1997-	2011-
		2010年度	2020年度
使用済燃料発生量(a)		15,200	16,000
再処理工場(六ヶ所)搬出量(b)		5,900	8,000
海外搬出量(c)		70	—
発電所内貯蔵量(d)		5,300	4,200
貯蔵対策必要量(a-b-c-d)		3,900	3,800
貯蔵対策必要量の累計		3,900	7,700

注: (a)～(d)及び貯蔵対策必要量は当該期間中の合計、四捨五入の関係で、累計値が各項目の数値の合計と一致しない場合がある

A strategic consideration on nuclear fuel cycle with spent fuel management as its core, by Koji Nagano (nagano@criepi.denken.or.jp)

* (財)電力中央研究所 経済社会研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry, Socioeconomic Research Center 〒100-8126 千代田区大手町 1-6-1

Table 2 The simulation cases.

	第一民間再処理施設の処理対象燃料優先順位	第二民間再処理	
		稼動開始	処理対象燃料
1	古いウラン使用済燃料(低燃焼度)を優先		なし
2	新しいウラン使用済燃料(高燃焼度)を優先		なし
3	古いウラン使用済燃料を優先	2030年	古いウラン使用済燃料を優先、MOX使用済燃料再処理せず
4	新しいウラン使用済燃料を優先	2030年	MOX使用済燃料・古いウラン使用済燃料の順に優先して再処理

将来の貯蔵需要の動向を概観すると、2020 年程度までの貯蔵需要については、資源エネルギー庁による予測評価が行われている。その概要[3]を Table1 に示す。わが国原子力発電設備容量が着実な伸びを続けることにより、年間の使用済燃料発生量は徐々に増加し、所要となる貯蔵対策の規模もまた着実に増大すると予測されている。それ以降については、原子力発電設備容量のみならず、2010 年を目途に方針が決定される第二民間再処理工場などの動向など、多くの不確実性要因があるため、厳密な予測は困難である。

本論文においては、将来の原子燃料サイクルを構成していく上で、使用済燃料貯蔵がその重要な鍵を担うことを論証し、貯蔵を要諦とした戦略の考え方を提示する。その要点は、冒頭に示した3つの意義のうちの第三の「不確実性への対処」である。次章では、2050 年までを評価期間とした原燃サイクルシミュレーション計算により、将来の軽水炉使用済燃料貯蔵対象量を試算する。第3章では、貯蔵期間の考え方についての理論的原則を、第4章では貯蔵規模の考え方について提示し、最後に結論を述べる。

2 原子燃料サイクルシミュレーション

2.1 シミュレーション計算の前提

2050 年までの長期の原燃サイクルの描像を得るために、いくつかの仮定の下にシミュレーション計算を試みる。

Table2 は、計算ケース設定の一覧である。主要な前提条件については、以下の通りである。

原子力発電設備容量については、既設分については40年運転後に廃止、廃止措置から16年後に1,350MWeの炉にリプレースされて運転再開するものとし、加えて未知地点に適宜新規設置を行いながら、2010年に約70GWe、2050年に約90GWeとなるよう調整した。具体的にはFig.1を参照のこと。

2050年の発電所内収容可能量は、貯蔵容量原単位を現状並み(約270tU/GWe)及び若干の拡張(300tU/GWe)として概算した。

第二民間再処理工場の設備容量は800[tHM/年]とし、2030年に稼動開始するものとした。感度解析においては2020年に稼動開始する場合を想定し、10年間の稼動の追

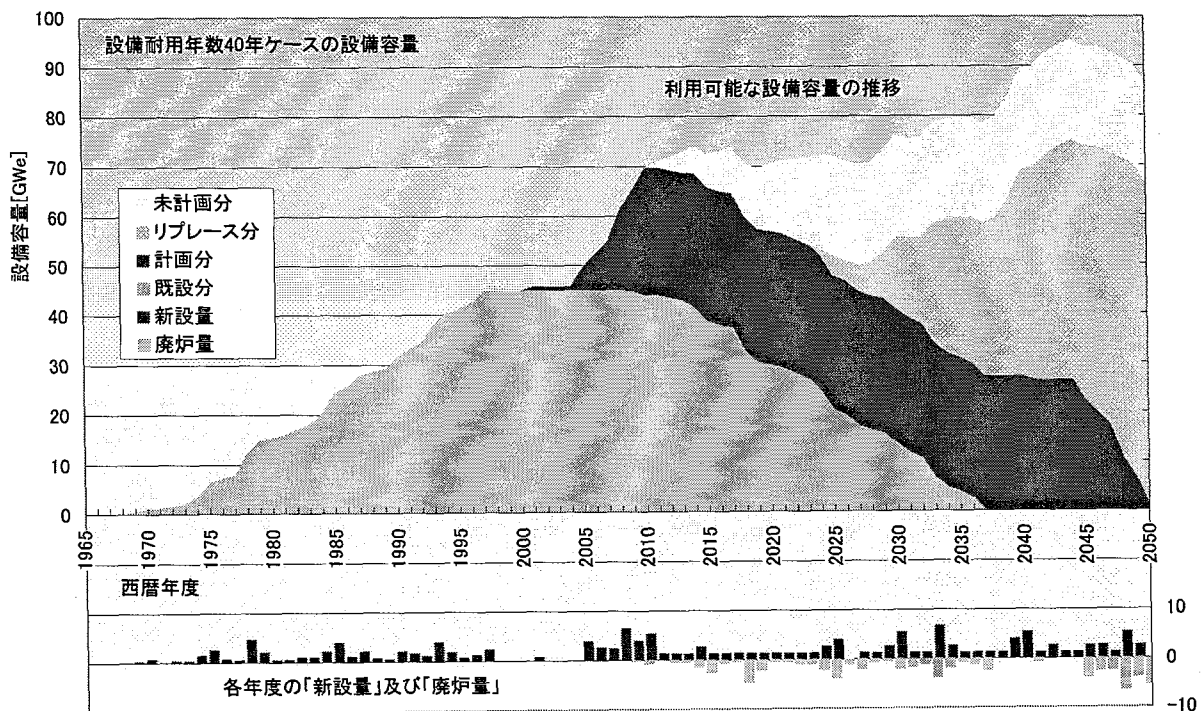


Fig.1 The assumed nuclear generation capacity.

Table3 The results of spent fuel accumulation and their storage needs in 2050.

試算 ケース	ウラン 使用済 燃料	新ウラン 使用済 燃料	MOX 使用済 燃料	合計 (A)	発電所内 収容 可能量 (B)	貯蔵対策 必要量 (C=A-B)	第二再処理 2020年 稼働	貯蔵対策 必要量の幅
1	0	39,000	10,000	49,000	24,000-	22,000-	/	0-25,000
2	7,000	30,000	11,000					
3	0	21,000	13,000	34,000	27,000	7,000-	△8,000	
4	0	23,000	11,000					

加により、累積処理量が800tHM/年×10年=8,000tHM増加すると仮定した。

第一民間再処理工場は、2005年に稼働開始し、ここでは容量800tHM/年で2050年まで稼働し続けるものとした。ウラン燃料は1992年までは低燃焼度（平均33,000MWd/tU）、以降は全て高燃焼度（平均45,000MWd/tU）が装荷されるものと仮定した。

再処理から得られるプルトニウムは、MOX燃料（燃焼度45,000MWd/tU）に加工され、再処理後1年で再装荷されるものとした。なお本計算では、高速増殖炉など、軽水炉プルサーマル以外のプルトニウム燃焼は考慮していない。

2.2 結果と考察

Table3は、上記設定の下で、発生する使用済燃料の蓄積量を概算したものである。

2050年までの使用済燃料の累積全発生量は、全ケース共通で約89,000tHMである。このうち、再処理に供する燃料の差異により、発生するMOX使用済燃料の内訳に差異を生じる。ケース1および2と、ケース3および4の間の差は、第二民間再処理の稼働によるものである。また、ケース1と2、ケース3と4の間の差は、プルトニウムの回収量を増やすことで積極的なリサイクルを行う後者に比べて、なるべくプルトニウム回収量を抑制しプルサーマル実施規模を最小にする、不拡散性を優先したシナリオとも言えよう。

2050年時点で稼働している発電所の炉内プール貯蔵容量は、単純に発電出力あたりの原単位を仮定して概算している。使用済燃料の累積発生量の地理的偏在が存在すると考えられるので、炉内貯蔵容量が全て活用されるとする本試算の仮定は楽観的に過ぎる。ここでは、日本全国大のマクロな物量の把握を目的とするので、ひとまずこの仮定を受け入れることにする。

蓄積量から炉内貯蔵容量を差し引いた結果が、追加的な貯蔵措置を必要とする量である。第二再処理の稼働を考慮しないケース1,2では、貯蔵対策必要量は単調に増大し、2050年時点で20,000tHMを超える使用済燃料貯蔵対策を

必要とする。第二民間再処理の稼働を仮定するケース3,4においては、第二民間再処理の稼働が本格化した以降は使用済燃料蓄積が減少し、2050年には10,000tHMを下回る。しかし、蓄積のピークである2030年代前半まではケース1,2と同様に蓄積が増大し、ケース3,4であっても短期的に15,000tHM程度の貯蔵対策が必要となる。

もし第二民間再処理の稼働が2020年から開始されれば、少なくとも使用済燃料管理の観点からは、2050年までにほとんどの使用済燃料を炉内貯蔵能力の範囲で管理できる状況に至る。この場合、回収プルトニウム量の増大をすべてプルサーマルに供したとすれば、使用済燃料の累積発生量には変化ないが、使用済燃料の内訳はMOX燃料が約2,000tHM増大し、ウラン燃料がその分減少することになる。

2.3 使用済燃料貯蔵を要諦とする原子燃料サイクル戦略

Table3は、一連の仮定条件を置いた上での試算である。試算ケースのうちのどれが蓋然性が高いか、あるいは望ましいかの議論はここでは差し控えるが、貯蔵に求められる役割として重要な視点を3つ指摘したい。

第一に、2020-30年程度の中期的には、Table1の予測、およびその外挿線上で予測可能な規模の貯蔵が必要となることが確実であり、適切な時期に所要の貯蔵能力を確保できるよう、着実な施策の展開が求められる。

第二に、現時点での2050年程度の長期展望では、貯蔵の必要が単調に増大し続けるケースから、途中でピークを迎えてその後消滅していくケースまで、多様な状況が想定され、幅広い状況変化に柔軟に対処できることが要請されている。予測に介在する不確実性を除去していく努力とともに、貯蔵技術が外部の状況変化に応じてその貯蔵能力、搬入・搬出能力等において十分な対応力を確保していることが必要である。

最後に、将来の貯蔵需要を規定する最大の要因が第二民間再処理工場にあることである。とくに、現在複数の電力会社がプルサーマル計画を公表しており、近い将来実際にMOX使用済燃料が発生することになる。第一民間再処理工場は技術的にMOX使用済燃料を受け入れることができ

Table4 The list of variables.

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/	当初の使用済の Pu 含有量 (ただし x 年間の貯蔵に伴う Pu の崩壊速度を考慮)
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
i_m	1/yr	MOX 燃料生成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		ラグランジェ定数

ないために、MOX 使用済燃料は第二民間再処理工場で再処理されることと想定されている。第二民間再処理工場の実現如何によっては、MOX 使用済燃料の蓄積が長期にわたって存在し続けることになる。このように、今後の貯蔵需要は、単に量的な面だけでなく、燃料の仕様や組成、排出年度及び貯蔵対策対象としての存在期間などにおいて、多様性が増えていく。このことは、貯蔵施設だけでなく発電所からの搬出、輸送、再処理を含めた「使用済燃料管理」全体の問題として、最も経済的、安全でかつわが国原子力開発利用計画に照らして適切なあり方を立案し選択することを要請している。その中で、原子力発電所からの使用済燃料の排出、再処理の双方の「貯蔵の両側の不確実性」に対処する要として、使用済燃料貯蔵が柔軟かつ機動的なバッファ機能を果たすことが不可欠である。

3 最適貯蔵期間の考え方

以上のように、使用済燃料貯蔵は今後の日本の原子燃料サイクル戦略において、不確実性への対処という最重要の機能を果たすことが期待されている。再処理に移行するまでの間は使用済燃料を収容して時間経過を待ち、再処理を必要とする時点に至れば貯蔵から排出して再処理に供するというのが基本的な機能である。プルトニウム利用のエネルギー価値や、再処理の費用に比較すれば、貯蔵の費用は安価であることが予想されるので、貯蔵の規模や期間は外的な状況次第で自由に選択することができるように思われるが、果たしてそうであろうか。本章では、使用済燃料管理の最適化問題を定式化し、その理論解の必要条件から、使用済燃料の貯蔵期間の考え方を論証する。

3.1 定式化

長野[4]は、ある時点で排出された使用済燃料 1 単位 (たとえば 1tHM) に着目し、それが再処理され、回収されたプルトニウム(Pu) を MOX 燃料に加工し、原子炉に装荷するまでの時間範囲の調整過程についての効用最大化問題として、以下の定式化を示した。

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

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

変数の定義等については、Table4 を参照されたい。

この問題を解く上で最も重要な項は、最終項のプルトニウム利用の効用の現在価値である。現時点で将来のプルトニウム利用の効用を正確に定量評価することは難しい。もし、プルトニウム利用の効用を無視するとすれば、原問題(1)は以下の費用最小化問題に帰着する。

$$\begin{aligned}
 TC = & f_1(x) + e^{-rx} \cdot f_r \cdot (1-i_r)^x \\
 & + e^{-rx} \cdot f_2(y) \cdot (1-i_2)^x \\
 & + e^{-r(x+y)} \cdot f_m \cdot (1-i_m)^{(x+y)} \\
 & + e^{-r(x+y)} \cdot f_3(z) \cdot (1-i_3)^{(x+y)} \rightarrow \min.
 \end{aligned} \quad (3)$$

上記の効用最大化問題について、最適性の必要条件を抽出する。ラグランジェ乗数 λ を導入し、次式

$$I= TU - \lambda(T-x-y-z) \quad (4)$$

について、4つの政策変数 $\{T, x, y, z\}$ の各々に対応する条件式として、以下を得る。

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

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

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

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

これらの式のうち、前3式は共通して以下を意味している。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、それら処理費用の現在価値の変動

a-3) 貯蔵移行の処理の実施までに研究開発期間が1年間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（(8)式の λ を除いた部分）

との比較で決まる。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^* が最適ナリサイクル時点を与える。

ここでは簡略化のため説明を省くが、Puの貯蔵費用が高価であること、MOX新燃料の貯蔵自体の費用は安価であるとしても、高価な再処理を早い時点に行うことに正当性がないことから、これらの貯蔵オプションの使用は棄却され、結局Puリサイクルのための時間調整（ラグタイム T の消化）には使用済燃料貯蔵が利用されることが最適となる。

さて、使用済燃料貯蔵期間についての最適条件は次式で表される。

$$\begin{aligned} f_1'(x) = & e^{-(r+i)x} \cdot f_2'(y) \\ & + (r+i)e^{-(r+i)x} \cdot (f_r + f_2(y)) \end{aligned} \quad (9)$$

この式の意味するところを改めて考えてみる。

（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

この両者が等しくなる x^* が存在すれば、それが最適な貯

蔵期間となる。存在しない場合は、再処理を正当化するような条件変化を生じるまでの間使用済燃料貯蔵を用いるか、あるいは直接処分を想定した問題設定に組み直すことになる。

長野[4]では、OECD/NEAなどの報告に基づいたコスト設定等に基づいて数値例を示している。そこでは、貯蔵費用の貯蔵期間に対する関数形によっては、上記の意味での最適使用済燃料貯蔵期間が存在することが示され、30-40年程度との数値が導出されている。条件設定によってこの最適値は変化し、とくに割引率の大きいほど、ないし（とくに再処理についての）技術進歩率の大きいほど、最適貯蔵期間が短くなり、より早期の再処理への移行が正当化されることが示されている。

3.2 不確実性の拡張

以上のまとめは、問題を効用の期待値の最大化（もしくは費用の期待値の最小化）を最適化の基準として取り扱っている。しかし、今日の情勢は、単に結果の期待値を最高の値にすることのみを求めるだけでは許されない。むしろ、多少の費用（効用）の大小はさほど問題ではなく、将来の不確実性をこそ最小化することが求められていると言える。

そこで、上記の最適化問題に不確実性の観点を加味した改良を試みる。目的関数を構成する要因のうち、燃料サイクルの各段の技術プロセスについては、今後の技術進歩によるコスト低減が期待される反面、大きなコストの高騰は考えにくい。この場合、技術進歩について保守的な仮定をおくことで、不確実性を十分に合理的に問題に反映することができる。唯一の例外は使用済燃料再処理であり、技術プロセスとしての成熟度が現時点で十分とは言えないことから、今後はある程度の再処理コストの変動（技術進歩による低減から、運転経験の不足等による予期せぬトラブルや障害に起因する上昇まで）を念頭におく必要がある。これらの不確実性は、運転経験の蓄積等、時間経過に伴って努力を継続することで、着実に低減させていくことができるものと期待される。

他方、やはりここでも最大の変動要因は、Pu利用の価値に関するものである。現時点では、他のエネルギー源との競合の側面、CO₂排出抑制の側面、あるいは市民の反対や懸念の側面のいずれについても、Pu利用について決定的な評価を与えるに至っていない。その価値が最終的に正と評価されるにせよ、負（すなわち、Pu利用を行うべきでない）と判断されるにせよ、その不確実性は、今後、社会において徹底的な議論を戦わすことにより、取り除いて行かれるべきものである。

結局、現問題について不確実性を取り入れた結果、以下のポートフォリオ最適化問題を得る。

$$\begin{aligned}
 TU^* - \alpha * \sigma(TU) = & \\
 & -f_1(x) - e^{-rx} \cdot f_r \cdot (1-i_r)^x \\
 & - e^{-rx} \cdot f_2(y) \cdot (1-i_2)^x \\
 & - e^{-r(x+y)} \cdot f_m \cdot (1-i_m)^{(x+y)} \\
 & - e^{-r(x+y)} \cdot f_3(z) \cdot (1-i_3)^{(x+y)} \quad (10) \\
 & + e^{-rT} \cdot U \\
 & - \alpha_1 * \sigma_r [e^{-rx} \cdot f_r \cdot (1-i_r)^x] \\
 & - \alpha_2 * \sigma_U [e^{-rT} \cdot U] \rightarrow \max.
 \end{aligned}$$

ただし、

- α : リスク回避係数
- $\sigma(TU)$: 総効用期待値の標準偏差など、将来の不確実性に起因するペナルティ項。右辺では、再処理コストに関する項(σ_r)と Pu 利用の効用に関する項(σ_U)の2つに代表させて式表示している。

この問題を解くには、再処理費用及びプルトニウム利用の効用について、その確率分布（あるいは単に標準偏差）を定量的に知る必要がある。ここでは、定性的に得られる結論を述べるに留める。標準的なコスト条件の下では、(1)式が求める最適戦略は、以下の(a),(b)2つの要素が等しくなるような使用済燃料貯蔵の最適期間 x^* が存在するとき、その期間 x^* だけ使用済燃料貯蔵により時間調整を図り、その後直ちに再処理、プルトニウム利用に移行するという戦略である。

(a) 以下の3項の和

- a-1) 貯蔵期間の1年延長に伴う使用済燃料貯蔵の費用増分
 - a-2) 使用済燃料貯蔵以降の処理の実施が1年遅延されることによる、再処理からMOx燃料貯蔵の費用総現在価値の変動
 - a-3) 再処理移行実施までに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
- (b) 使用済燃料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

(10)式では、原問題(1)式に、再処理費用とプルトニウム利用の便益に関する不確実性ペナルティ項が加わっている。最も単純化して言えば、使用済燃料排出から再処理の実施、プルトニウム利用の実施までの時間経過につれて、これらの項の不確実性は取り除かれる。すなわち、(10)式的最適解は、(1)式的最適解（最適な使用済燃料貯蔵期間 x^* ）から、より使用済燃料貯蔵期間を長めに選択（最適な貯蔵期間 x^{**} 、ただし $x^{**} > x^*$ ）する結果となる。その場合、貯蔵期間の最適選択は、(2)式におけるリスク回避係数 α_1 、 α_2 が大きいほど、すなわち将来の不確実性への忌避の程度が大きいほど、より長期化する。

(1)式の原問題に立ち返って、そもそも(1)式の目的関数においては、ほとんどの場合において、原子力発電コストの極く一部を形成するに過ぎない他項に比べて、プルトニウム利用の効用は圧倒的に大きいものと考えられる。この場合は、元的最適化問題に影響するのはプルトニウム利用の効用現在価値のみとなり、効用が正であれば他の条件が許す限り早期のプルトニウムリサイクルの実施、負であれば可能な限り実施を遅らせる（すなわち実施しない）ことが最適解となる。ここに、(10)式と同様のポートフォリオ問題を考えれば、リスク回避の度合いに応じたプルトニウムリサイクル実施の最適時点 T^{**} が得られ、この T^{**} を(2)式の T に置き換えた等式を制約条件とし、(10)式から U を消去した新たな最適化問題が得られる。それを解けば、再処理コストの不確実性の回避選好に応じた最適な使用済燃料貯蔵期間が求められる。

この関係を模式化して、Fig.2に示す。この例では、Pu利用の効用を正とおいているために、厳密な意味の最適解はPuリサイクルの即時実施($T^*=0$ の特異解)となっている。これを無視した場合、使用済燃料貯蔵の最適貯蔵期間

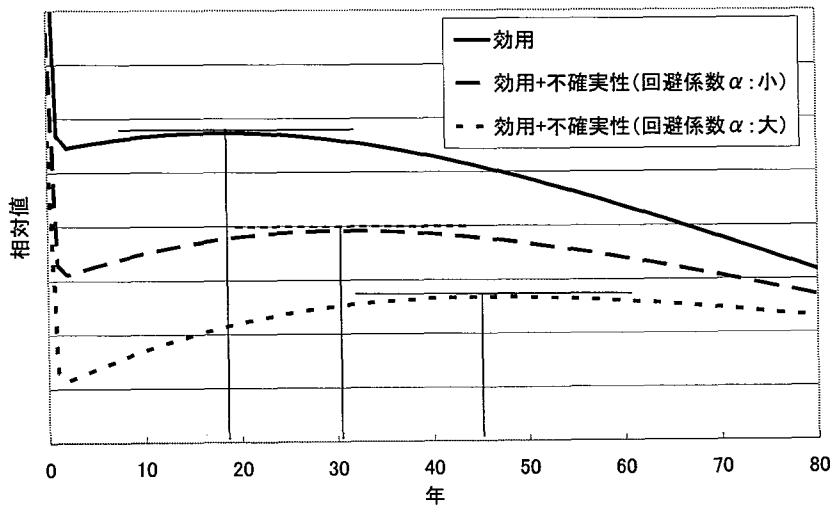


Fig.2 A Conceptual illustration of optimal storage duration under uncertainty.

の値が各々存在するが、不確実性の存在によって、その回避係数の値が大きいほど、貯蔵期間が延びることが示唆されている。

以上の考察から、使用済燃料の貯蔵が「将来の不確実性の見極め」のための時間確保のために有用であり、その観点での最適解として積極的に選択されるべきものであることが示唆された。使用済燃料の貯蔵は、決して決定の先延ばし、負担の後世代への先送りのために実施されるものではなく、現時点で考慮すべき指標に基づく最適判断として、将来の不確実性への対処のゆえに選択され、実施されるべきものである。

ここでの検討は、問題を解析的ないし定量的に厳密に解くことなく、定性的に推察できる範囲での論証に留まった。より詳細には、原子力戦略策定における不確実性の考え方を明らかにした上で、最適化問題を厳密に数値的に解くことが求められ、今後の課題としたい。

4 貯蔵容量と貯蔵設置形態の考え方

4.1 規模の経済性と集中のメリット

以上のように、貯蔵期間については最適解が存在する可能性がある。それでは、貯蔵規模について、同様の判断基準を見出すことができるだろうか。

一般に、設備規模と設備の容量（生産容量ないしサービス供給容量）の間には、以下の関係があると言われている。

$$\frac{TC(p)}{TC_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^\gamma \quad (11)$$

$$\frac{UC(p)}{UC_0} = \frac{TC(p)}{p} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\gamma-1} \quad (12)$$

ただし、

- $TC(p)$: 設備容量 p に対する総生産費用
- TC_0 : 基準設備容量 p_0 に対する総生産費用
- γ : スケール指数 ($0 \leq \gamma \leq 1$),
- $UC(p)$: 設備容量 p に対する単価
- UC_0 : 基準設備容量 p_0 に対する単価

このとき、一般にスケール指数 γ は 1 より小さく、たとえば化学工業などでは「0.7 乗則」「2/3 乗則」が成立すると言われる。ごく単純に、設備規模が設備容積（代表長さの 3 乗）に比例し、設備資本費が設備敷地面積（代表長さの 2 乗）に比例すれば、2/3 乗則が成立することになる。このとき、製造単価は設備規模の -1/3 乗に比例し、大型化がコスト節減につながる、すなわち「規模の経済性 (economy of scale)」の存在を示す。

使用済燃料貯蔵の場合、規模の経済性は水プール貯蔵やボルト貯蔵で、とくに 3,000tHM 以上の大容量において顕著であることが IAEA[5] に報告されている。日本の例で

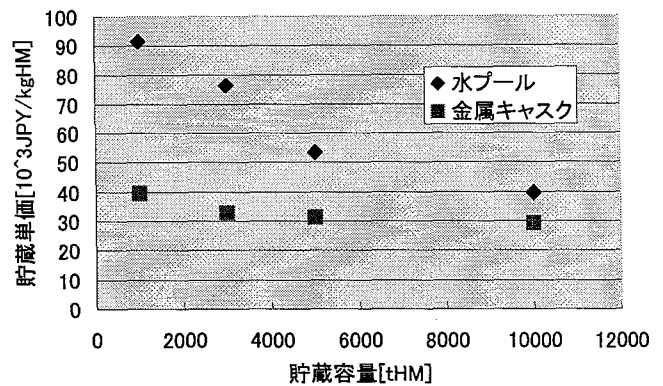


Fig.3 Unit Costs of storage assessed for AFR store.

は、伊藤ら[6]による敷地外貯蔵コストの評価結果 (Fig.3 参照) から、設備容量 1,000-10,000tHM の範囲において、水プール貯蔵で $\gamma=0.66$ 程度、金属キャスク貯蔵で $\gamma=0.88$ 程度であることが示唆される。

貯蔵施設の大型化が有利であることを示唆するもう一つの観点が、「範囲の経済性 (economy of scope)」である。たとえば、貯蔵施設を発電所ないし再処理施設などの施設と同一敷地内に設置することで、保守補修などに共用できる機器、設備や人員を節約できる可能性がある。機器や燃料の搬入・搬出のための輸送インフラなども、共用によるメリットが期待できる。具体的な事例では、ドイツのゴアレーベン中間貯蔵施設に隣接して、使用済燃料コンディショニングパイロットプラントが併設されている。これは単にロッドコンソリデーションの基礎研究に留まらず、前者の貯蔵中燃料に故障あったときの補修施設として機能することが期待されている点で重要である。

大規模貯蔵施設を集中的に設置する場合、小規模の貯蔵施設の分散的な設置に比較して、ハンドリングや保守に要する資源を節約できる可能性がある。これは、広義には先に述べた「規模の経済性」としてとらえるべき効果であるが、いずれにせよ大型化の利点として考慮に値する（以上の考察は主として Nagano[7] によった）。

4.2 習熟効果と小型分散のメリット

「習熟効果 (learning effect)」は、経験の蓄積によるプロセスの効率（たとえば生産コストないし製品価格、所要労働力投入あるいは生産期間など）が向上していく効果であり、次式で定義される。

$$C(n) = C_0 \cdot \delta \cdot \left(\frac{n}{2}\right)^{-\beta} = C_0 \cdot n^{-\beta} \quad (13)$$

$$\delta = 2^{-\beta} \quad (14)$$

ただし、

$$C(n) : \text{第 } n \text{ 製品の製造コスト (ないし他の性能評価指数の値)}$$

- C_0 : 初期製造コスト (性能評価指数の初期値)
- β : 習熟の指数 ($0 \leq \beta$),
- δ : 習熟のスロープ ($0 < \delta \leq 1$).

このとき,

$$\delta = \frac{C(2n)}{C(n)} \quad (15)$$

すなわち, 習熟のスロープ δ とは, 累積生産個数が倍増するときの性能向上の度合いを表す。

使用済燃料貯蔵における習熟効果として報告された事例はほとんどない。わずかな傍証としては, 1987 年の山地らの貯蔵コスト評価[8]においては, 貯蔵キャスクの単価は約 3 億円/基とされていたが, その後の製作技術の向上等により, その価格は現在までに少なくとも 30% の低減が図られているという。ただし, これが純粋に上記の意味での習熟の効果によるものか, 市場での競争の効果によるものかは定かではない。ここでは, いずれを原因とするにせよ, 経験の蓄積による効率改善を広く「習熟効果」と呼ぶことにする。

貯蔵施設を小型分散設置することのメリットとしては, 同一設計を繰り返し施工することによる習熟効果への期待がある。いま一つは, 貯蔵施設を発電所サイト内に設置することで, 使用済燃料輸送に関わる費用を節減することが考えられる。

4.3 最適貯蔵システムへの視点

以上に列記した中で, 規模の経済性と習熟効果は, トレードオフの関係にある。

いま, 大型施設 (貯蔵規模 C_L), 初期設置コスト L を設置して需要 D を満たす場合と, 小型施設 (貯蔵規模 C_S) を設置する場合を対比して考えてみる。両者の間には, スケール指数 γ で表される規模の経済性と, 習熟のスロープ δ で表される習熟効果の双方が働くものとする。簡単のため, $C_L/C_S = N$ (N は整数) とおく。

すると, 需要が十分に大きい場合, 両者の設置総費用 TC は各々次式で表される。

$$\begin{aligned} TC_L &= \sum_{i=1}^K L \times i^{-\beta} = L \times \sum_{i=1}^K i^{-\beta} \\ TC_S &= \sum_{i=1}^K \left\{ \sum_{j=1}^N [N(i-1) + j]^{-\beta} \times \left(\frac{L}{N^\gamma} \right) \right\} \\ &\geq \sum_{i=1}^K N \times (N \times i)^{-\beta} \times \left(\frac{L}{N^\gamma} \right) \\ &= L \times N^{1-\beta-\gamma} \times \sum_{i=1}^K i^{-\beta} \end{aligned} \quad (16)$$

このとき, 小型が大型に対して有利となる必要条件是,

$$N^{1-\beta-\gamma} \leq 1 \quad (17)$$

$$\therefore \beta \leq 1 - \gamma$$

となる。 δ を用いて表記すれば,

$$\gamma \leq 1 + (\ln \delta / \ln 2) \quad (18)$$

となる。

上述の通り, 貯蔵施設の規模の経済性はかなり明瞭であり, 水プール貯蔵で $\gamma=0.66$ 程度, 金属キャスク貯蔵で $\gamma=0.88$ 程度である。このとき, 大型化を凌駕して小型分散設置が有利になるための条件は, 習熟のスロープ δ の値にして 0.79, 0.92 と, 迅速なコスト改善が必要となる。ただし, 金属キャスク貯蔵については, 上述のように実際に着実な製造実績の向上が見られること, 同一仕様の多数の製品を反復製造することになるために, 習熟が規模の経済性を凌駕する期待も持ち得ると思われる。この点で, 水プール貯蔵では大型化が有利であることはほぼ自明である一方で, 金属キャスク貯蔵 (あるいは同様にモジュール性を有するコンクリート系乾式貯蔵技術) では, 今後の習熟の獲得に注視し, 最適な貯蔵形態を見極める必要がある。

以上は, 無限に大きな需要を仮定した静的条件下の考察である。実際には, 貯蔵施設が需要に対して設置される基数は, 小型分散と言えども莫大な数にはならないという意味で, 大型化の優位性が強まる。その一方で, 施設が時間軸上の異なる時点に設置される場合は, 大型施設が需要の伸びに先行して設置されることになるので, 現在価値換算の総費用で比較する限り, この要因は小型化に有利に働き得る。

以上が, 貯蔵施設の最適規模を考える上で考慮すべき条件に関する一般的考察であるが, 実際の貯蔵の最適配置問題においては, 前に述べた地理的配置と輸送コストの関係が大きく作用し, この点でより精密な分析が必要となる。

5 まとめと今後の課題

わが国の原子力発電規模想定の下に, 2050 年までの使用済燃料管理のあり方を展望した。当面, 再処理からのプルトニウム利用としては, 軽水炉でのプルサーマル利用が中心となる。その際, 軽水炉使用済燃料管理の観点から, 以下の点が重要である。

今後, 2010~2020 年程度の中期的には, 使用済燃料再処理を上回る使用済燃料を貯蔵措置により収容せざるを得ない。その対処必要量は, 相当程度の確度をもった想定が可能である。

2050 年までの長期的展望においては, 原子力発電や再処理の実績次第で, 貯蔵対処が不要になっていく場合から貯蔵対処必要量が単調に増大する場合まで, 大きな不確実性が存在する。

プルサーマル実施により, MOX 使用済燃料が発生するが, これは第二民間再処理工場が実現するまでは貯蔵により対処せざるを得ない。このように, 今後の使用済燃料管理においては, 単なる量的考慮だけでなく, 低燃焼度のものから高燃焼度のもの, MOX 燃料と質的に多様なものが

存在する状況になっていくので、より綿密な計画が必要になる。

一般に、貯蔵には最適な期間および最適な規模の選択が存在する可能性がある。今後の事業展開にあたっては、最適条件からの大幅な逸脱を生じないように、計画全体の吟味を繰り返しながら進めていくことが望まれる。

本研究は多くが定性的検討に留まっており、考察の肉付けのための定量評価が必要である。とくに、規模の経済性と習熟効果のトレードオフの検討については、貯蔵施設の地理的配置を考慮した輸送・貯蔵の統合評価ツールの開発により、日本全国大のあるべき使用済燃料管理のあり方を探っていきたい。

参考文献

- [1] 三枝利有他：原子力発電所構内キャスク貯蔵の検討。電力中央研究所総合報告 No.U27, (財)電力中央研究所(1993)。
- [2] 総合エネルギー調査会原子力部会：リサイクル燃料資源中間貯蔵の実現に向けて(中間報告)。平成10年6月11日(1998)。
- [3] 通商産業省資源エネルギー庁：核燃料サイクル：6。使用済燃料の中間貯蔵。 <http://www2.enecho.go.jp/atom/siraberu/recycle1/index06s.html>。
- [4] 長野浩司：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。電力経済研究 No.39, pp.1-12, (財)電力中央研究所(1998)。
- [5] Lojas, J. (ed.): *Economics of Spent-fuel Storage*, International Atomic Energy Agency, Vienna(1990)。
- [6] 伊藤千浩, 長野浩司, 三枝利有：使用済燃料敷地外貯蔵技術の経済性評価。電力中央研究所研究報告 No.U99047, (財)電力中央研究所(2000)。
- [7] Nagano, K.: An economic analysis of spent fuel management and storage. *Proceedings for PBNC'98, the 11th Pacific Basin Nuclear Conference, Session E-1 (Waste Management and Disposal Concepts)*, Banff, Canada, May 3-7, 1998 (1998)。
- [8] 山地憲治, 長野浩司, 三枝利有：使用済燃料乾式貯蔵技術検討・評価—各種貯蔵技術の経済性比較。電力中央研究所研究報告 No.L87001, (財)電力中央研究所(1987)。