

燃料サイクル最適化モデルの構造と最適解の特性

キーワード：最適化分析，線形計画法，燃料サイクル，
使用済燃料中間貯蔵，プルサーマル，高速増殖炉

長野 浩 司 山 地 憲 治

〔要 旨〕

1966年から2055年までの90年間を計画期間として、原子炉炉型構成および燃料サイクル構成を一体として最適化する原子力戦略評価モデルFCOMを開発した。評価基準は、計画期間にわたって発生する種々の費用の現在価値換算総額の最小化である。原子力発電規模見通し、高速増殖炉や軽水炉プルサーマルなど新技術の利用可能性、および軽水炉使用済燃料再処理に基づくプルトニウム需給などの物質バランスは、モデルにおける制約条件として扱われる。FCOMの特長は、コンパクトなモデルであるにも拘らず、使用済燃料貯蔵および再処理計画の最適化が行え、しかも貯蔵についてはコストのかかる中間貯蔵とそうでない発電所施設内貯蔵とを分離して扱っている点である。

いくつかの条件設定の下にケーススタディを実施して、最適解の基本特性を調べ、以下の点を明らかにした。

1. 軽水炉の燃料サイクルにおける最適な再処理時期の選択は、貯蔵コストの増大と再処理費現在価値の低減との間のトレードオフ関係の下で行われ、高速増殖炉導入が起らない場合には、再処理で回収されたプルトニウムは直ちに軽水炉プルサーマルに使用される。最適計画における軽水炉プルサーマルの実施規模、時期と燃料サイクルのコスト条件、特に再処理費との関係を示した。
2. 高速増殖炉と軽水炉との相対的成本条件によって、最適計画における高速増殖炉の導入規模および導入時期が、導入無しの場合から最大限早期に最大規模の導入を図る場合まで様々な変化することを定量的に示した。
3. ある規模の軽水炉使用済燃料再処理の実施を前提と考える場合、最適解はコスト条件に対してさらに多様化し、前提とする再処理計画の範囲内で高速増殖炉導入を図る軽水炉／高速増殖炉の中長期的な共存解が出現する。
4. 上記のいずれの最適計画においても、再処理はプルトニウム需要に合わせて実施され、プルトニウム需給のタイミングの調整手段としては、使用済燃料の中間貯蔵が選択されている。

以上により、超長期のプルトニウム利用に関する技術の評価においてFCOMが有する特徴と有効性を示したこと、およびその結果、使用済燃料の貯蔵が燃料サイクルに大きな柔軟性を与えていること、それゆえに、長期の原子力システムの議論においては燃料サイクル全体の戦略を原子炉炉型戦略と一体として検討することが肝要であることが、本稿の結論として指摘される。

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| 1. はじめに | 3-2. 最適解の基本特性(1)——軽水炉プルサーマル |
| 2. 燃料サイクル最適化モデルFCOMの概要 | 3-3. 最適解の基本特性(2)——高速増殖炉導入条件 |
| 2-1. FCOMの基本構成 | |
| 2-2. FCOMの目的関数 | |
| 3. ケーススタディと最適解の基本特性 | 4. おわりに |
| 3-1. 前提条件 | |

1. はじめに

原子炉内ではエネルギー生産と同時に燃料の再生産が行われるので、原子炉技術の評価はその燃料サイクルの構成を含めたシステムを対象として実施する必要がある。しかも、高速増殖炉に代表されるプルトニウム利用に関する技術の評価においては、プルトニウムの生産から利用までに数十年が経過するケースもあるので、超長期の時間範囲を扱う必要がある。

上記の視点に立ち、長期間にわたって発生する種々の費用の現在価値換算総額を評価基準として、原子炉炉型構成および燃料サイクル構成を一体として最適化する評価モデル (Fuel Cycle Optimization Model, FCOM) を開発した^{[1]~[3]}。本稿では、燃料サイクル最適化モデル FCOM の構造、およびケーススタディを通して得られた最適解の基本特性について報告する。

2. 燃料サイクル最適化モデル FCOM の概要

2-1. FCOM の基本構成

本研究において開発した燃料サイクル最適化モデル FCOM の概要を図 2-1 に示す。

FCOM は、1966 年から 2055 年までの 90 年間に計画期間として、総費用を最小化する原子炉炉型構成 (これを最適炉型戦略と呼ぶ) およびそれに対応する燃料サイクル戦略を求めるものである。原子力発電規模見通し、高速増殖炉や軽水炉プルサーマルなど新技術の利用可能性、および軽水炉使用済燃料再処理に基づくプルトニウム需給などの物質バランスは、モデルにおける制約条件として扱われる。最小化すべき総費用は、入力条件として与える各種コストパラメータにより定まる全期間にわたる費用を、割引率によって現在価値換算した総額である。

モデルは、時間軸を分割し離散的に扱うこと

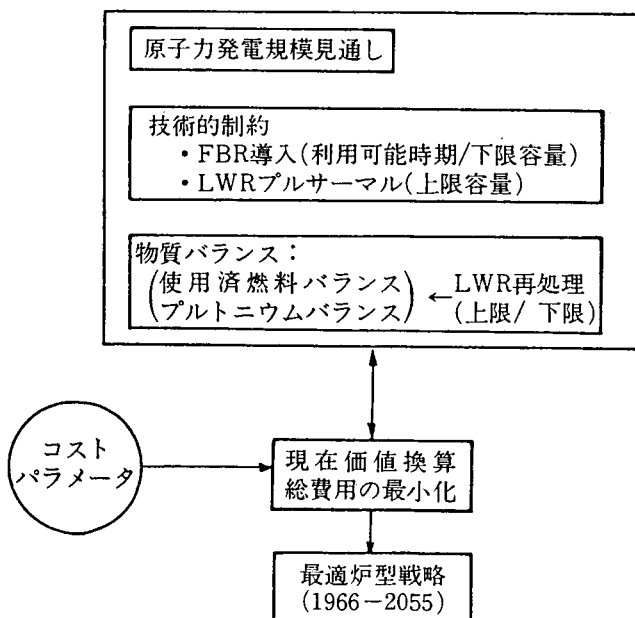


図 2-1 FCOM の概要

で、線形計画モデルとして定式化されている。すなわち、1966年から2055年までの90年間に10年を1期とする9期に分割し、その各期ごとに、原子炉の新設量、使用済燃料及びプルトニウムの需給量等の変数を定義する。これにより、目的関数である現在価値換算総費用、および燃料サイクル中の物量バランスを含む全ての制約条件が計画変数の一次式として記述される。

本モデルにおける燃料サイクルの取り扱いを図2-2に示す。制約条件として与えられる原子力発電規模を実現するよう設備寿命を考慮して軽水炉ないし高速増殖炉が設置され、各々の炉型の運転中容量、廃止容量が定まる。運転中（通常炉心、プルサーマル炉心）及び廃止軽水炉からは各々対応する組成の使用済燃料が排出されるが、これらはモデル中で各々区別して取り扱い、発電所施設内貯蔵（At Reactor Storage, AR貯蔵）さらには施設外貯蔵（Away

From Reactor Storage, AFR貯蔵）を経た後、必要に応じ再処理される。

使用済燃料の貯蔵期間については、従来の燃料サイクルモデルでは炉取り出しから再処理まで一定期間のラグタイム（たとえば5年）を考慮することが一般的であったが、FCOMでは、軽水炉使用済燃料について貯蔵期間を任意として扱い、どの燃料をいつ再処理するかは最適化アルゴリズムによって決定する。

また、軽水炉燃料の再処理により回収されるプルトニウムについても、貯蔵期間は最適化アルゴリズムで決定し、高速増殖炉燃料サイクルからの回収プルトニウムとともに、新設及び運転中高速増殖炉、あるいは軽水炉プルサーマルの燃料として供給される。

高速増殖炉の燃料サイクルについては、使用済燃料は一定の冷却期間の後に再処理するものとして扱う。従って、運転中及び廃止高速増殖炉の容量に対応する量のプルトニウムが排出さ

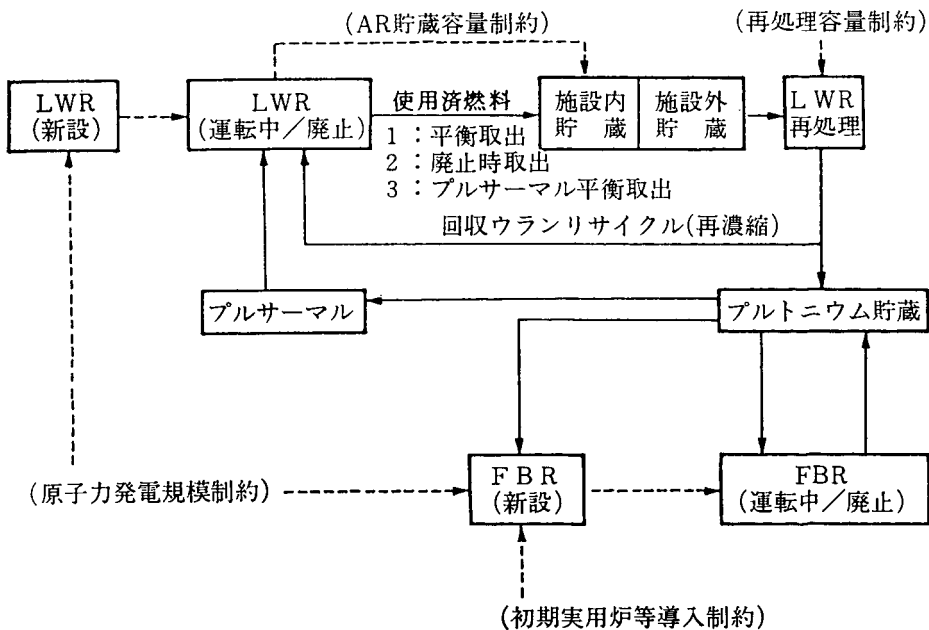


図 2-2 FCOM における燃料サイクルの表現

れるとして、プルトニウム需給に組み込まれる。

ただし、FCOMにおける時間軸の取扱いでは、炉内の燃焼および取出燃料の冷却期間を厳密に取り扱うことが困難である。ここでは、ある期に装荷する燃料から算定される使用済燃料発生量のうち、当該の期中に再処理の対象となり得る量の比率を与え、近似的にこの遅れ時間の影響を考慮している。

なお、FCOMはパソコン上に実現されており、本稿における基本的な計算ケースにおいて変数280個、制約式120本、非零要素1,000個程度である。

2-2. FCOMの目的関数

FCOMの目的関数である現在価値換算総費用の構成要素は、大別して以下の3つから成り、いずれも各期の中央時点で発生するものと近似している。各種コストパラメータの設定は各期毎に行うことができる。

① 資本費

資本費は、計画期間の終端点の影響を排除するため、設備寿命の各年について均等化された年経費として表す。

② 運転維持費

運転中の設備について、毎年建設費の一定割合が計上されるものとした。

③ 燃料サイクル費

○軽水炉サイクル

天然ウラン精鉱費／濃縮サービス費／成形加工費／使用済燃料再処理費／使用済燃料貯蔵費／プルトニウム貯蔵費

○高速増殖炉サイクル

燃料サイクル費（一括して扱う）

なお、各費目はいずれも実質価格表示とする。

3. ケーススタディと最適解の基本特性

3-1. 前提条件

(1) 原子力発電規模見通し

以下の解析において、2000年およびそれ以降の原子力発電規模見通しは、1987年6月に発表された原子力委員会「原子力開発利用長期計画」〔4〕を参考に、表3-1のように設定した。

表 3-1 原子力発電規模見通し

年度	GWe
1970	2.5
1980	15
1990	34
2000	53
2010	71
2020	86
2030	100
2040	116
2050	132

原子力規模の長期見通しについて、近年では上記「長期計画」に至るまで徐々に下方修正がなされてきた。最近の原子力をとりまく状況は不透明さを増しており、様々な状況変化に対して最新の条件を随時盛り込みながら解析を加えて行くことは、今後の重要な課題の一つである。

(2) 原子炉特性および技術的制約

原子炉の炉特性データについては表3-2に示したものをを用いた。

その他の技術的制約条件については、以下の仮定をおいた。

- ・高速増殖炉は2006年以降導入可能とした。
- ・軽水炉プルサーマルはMOX燃料装荷炉心の出力が軽水炉容量を超えない範囲で可能とした。つまり、軽水炉全設備の全炉心をMOX燃料装荷とするプルサーマルも可能

表 3-2 炉特性データ

(出力 1 GWe あたり)

	LWR	LWR プルサーマル	FBR
○初装荷燃料			
ウ ラ ン (t)	76.7	76.7	76.466
濃 縮 度 (%)	2.60	2.60	0.300
分裂性プルトニウム (t)	0.0	0.0	3.286
重 金 属 (t)	76.7	76.7	81.030
○平衡装荷燃料			
ウ ラ ン (t/年)	25.4	23.80	25.417
濃 縮 度 (%)	3.2	0.71	0.300
分裂性プルトニウム (t/年)	0.0	0.957	1.154
重 金 属 (t/年)	25.4	25.49	27.02
○平衡取出燃料			
ウ ラ ン (t/年)	24.3	23.22	24.408
濃 縮 度 (%)	0.90	0.44	0.234
分裂性プルトニウム (t/年)	0.17	0.67	1.337
重 金 属 (t/年)	24.5	24.47	26.255
○廃止時取出燃料			
ウ ラ ン (t)	74.4	70.19	74.217
濃 縮 度 (%)	1.49	0.53	0.253
分裂性プルトニウム (t)	0.42	2.23	3.836
重 金 属 (t)	74.9	74.01	79.523

備考) ウラン濃縮のテール濃度は 0.2% とした。

と仮定した。

- ・軽水炉の施設内 (AR) 貯蔵容量は、100 万 kWe につき 200 MTU とした。
- ・燃料サイクルの遅れ時間の近似パラメータとして、軽水炉、高速増殖炉ともに、任意の期に発生する使用済燃料の 70% がその期中に再処理の対象になり得るとした。

(3) 軽水炉使用済燃料再処理容量

軽水炉使用済燃料再処理容量については、基準ケースでは全く制約しないこととしたが、比較ケースとして、1996 年以降の 30 年間について、少なくとも 800 tHM/年の容量が確保される場合を検討した。

(4) コストデータ

コストに関する設定を表 3-3 に示す。価格はいずれも 1985 年実質価格とし、全期間を通して実質で一定とした。

建設費は軽水炉について 1 kWe あたり 30 万円とし、高速増殖炉についてもこれと同額を基

準として、この 0.9~1.1 倍の範囲をパラメータサーベイした。

運転維持費は、軽水炉、高速増殖炉ともに建設費の 5%/年とした。

軽水炉の燃料サイクル費関係では、使用済燃料貯蔵費は施設外貯蔵についてのみ考慮した。

高速増殖炉の燃料サイクル費については、後に述べるように、軽水炉の燃料サイクル費を基準としてパラメータサーベイした。

3-2. 最適解の基本特性 (1)——軽水炉プルサーマル

まず、軽水炉においてプルサーマルの実施が起る場合の燃料サイクル特性を、軽水炉使用済燃料再処理単価をパラメータとして調べた。

いくつかのケースについてモデルによる最適化を行った結果を図 3-1 に示す。今回の設定条件の下では、基準とした再処理単価 17 万円/kgHM においてはプルサーマルは実施されない。単価を下げて行くと、計画期間の後期から

表 3-3 コストデータ設定 (価格は全て1985年価格)

項目	設定値	備考(出典)
1) 資本費		
建設費(軽水炉)	3,000 億円/GWe	
稼働率(軽水炉/高速増殖炉)	75%	
2) 運転維持費(軽水炉/高速増殖炉)	建設費の5%/年	
3) 軽水炉燃料サイクル費		
・天然ウラン精鉱費	35 \$/lb U ₃ O ₈	市場価格に基づく。転換費、輸送費含む
・濃縮費	139 \$/kgSWU	DOE 価格に基づく
・成型加工費 UO ₂ 燃料	80,000 ¥/kgU	実績値に基づく
MOX 燃料	1,000 \$/kgHM	ALKEM 推定値に基づく
・使用済燃料貯蔵費 施設内	0	
・使用済燃料再処理 施設外	40+4/年 \$/kgHM	OECD/NEA[5]
・使用済燃料再処理	170,000 ¥/kgHM	海外再処理委託の値を参考。廃棄物処理処分費を含む
・プルトニウム貯蔵費	5.6 \$/g Pu/年	原産年次大会(1987)資料より
4) その他		
・割引率	5%/年	
・為替レート	130 ¥/\$	

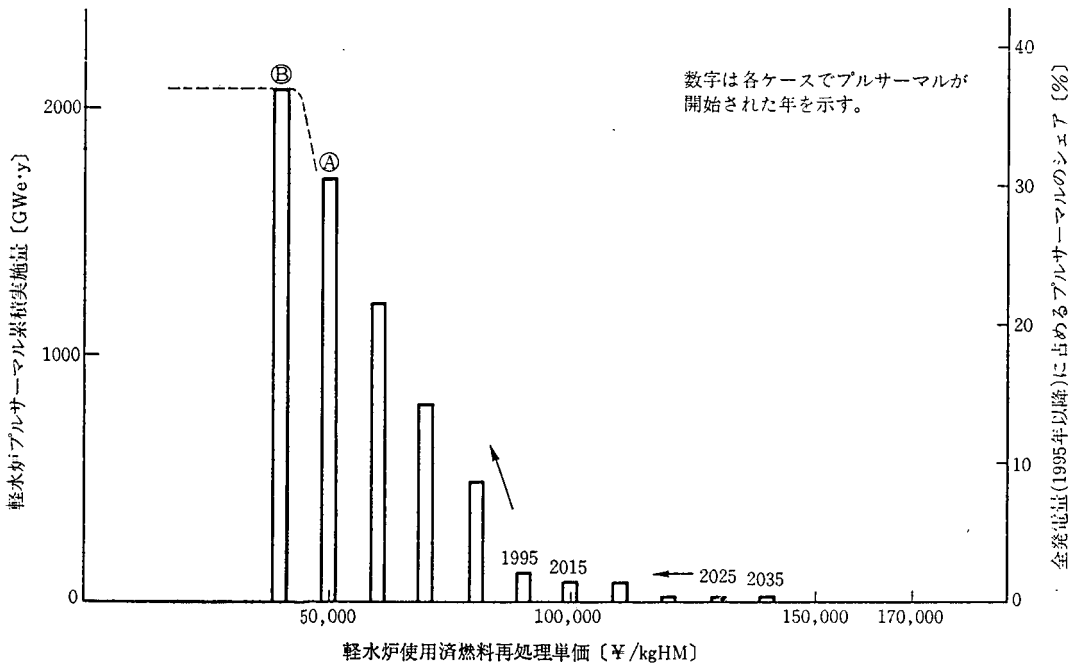


図 3-1 最適解の特性(1)
軽水炉プルサーマル導入条件

徐々にプルサーマルが実施されるようになり、さらに再処理単価が低下すると、プルサーマル実施規模はより大規模になり、

象となる使用済燃料は全て再処理され、プルサーマルを行う(図中Aで示す)、あるいは、

① 使用済燃料施設外貯蔵 (AFR 貯蔵) の対

② 施設内貯蔵 (AR 貯蔵) 対象量を含めた

全使用済燃料を再処理し、最大規模のプルサーマルを実施する（図中ⓐで示す）、規模に達する。

従来の評価では、軽水炉プルサーマルの導入条件としては、各々独立に燃料サイクルを完成しているものとして、通常（濃縮ウラン）燃料を用いる場合の燃料サイクル単価〔 \yen/kWh 〕をプルサーマルの場合のそれが下回ることが必要であるとするものが一般的であった。その際、この条件を満たしておれば、プルサーマルは最大規模（従って、他の技術的条件より定まるある一定の規模）実施することが最も経済的と判断される。

ところが、上記の結果から、プルサーマルの実施の判断基準はより複雑であることがわかる。すなわち、軽水炉の燃料サイクルにおいて使用済燃料を直ちに再処理せず貯蔵することは、貯蔵コストが増大する反面、再処理時点を後らせることによる再処理費現在価値の低減効果がある。このトレードオフ関係により、直ちに再処理することは中間貯蔵する場合に比べて経済的でないとしても、ある時期には再処理してプルサーマルを行うことが有利になることがあり得る。その際、プルサーマルの実施規模のみならず実施時期がコスト条件により様々に変化する。

このことは、使用済燃料の貯蔵が燃料サイクルに大きな柔軟性を与えていること、及びそれゆえに長期炉型戦略の議論においては、燃料サイクル全体の戦略をも一体として検討することが肝要であることを端的に示している。

3-3. 最適解の基本特性（2）——高速増殖炉導入条件

次に、高速増殖炉が軽水炉との競合に打ち勝って最適炉型戦略として導入されるための条件

を、高速増殖炉と軽水炉の建設費及び燃料サイクル費の相対比率について調べた。なお、燃料サイクル費の相対比率表示においては軽水炉のフロントエンド部分の燃料サイクル費を基準とした。

（1）基準ケース

軽水炉燃料再処理設備容量について特に制約を課さない基準ケースでの結果を図3-2に示す。種々のコスト比率について求めた最適炉型戦略は次の3種のパターンに分類され、図はその各パターンの存在領域を、縦軸に燃料サイクル費比率、横軸に建設費比率をとる平面上に示したものである。

- a. 計画期間内に高速増殖炉導入が起こらない場合（図中には×印で表示：軽水炉領域）
- b. 高速増殖炉導入開始可能時点以後のいずれかの時点で高速増殖炉導入が図られ、次第に高速増殖炉のシェアが増大するものの、中長期的に軽水炉と高速増殖炉が共存していく場合（図中には△印で表示：高速増殖炉・軽水炉共存領域）
- c. 高速増殖炉導入開始可能時点以後、軽水炉使用済燃料バランスの範囲内で最大規模の高速増殖炉導入を図る場合（図中には○印で表示：高速増殖炉領域）

軽水炉の経済性は軽水炉使用済燃料の貯蔵期間によって変化し、そのため競合するオプションの導入の起こり方は複雑なメカニズムをとることを、前項ではプルサーマルについて示したが、高速増殖炉の導入についても同様のことが言える。

すなわち、軽水炉との競合関係は上記の3通りの形態があり、特に最大限の導入を図る場合（上記c.の領域）は、高速増殖炉の経済性が軽

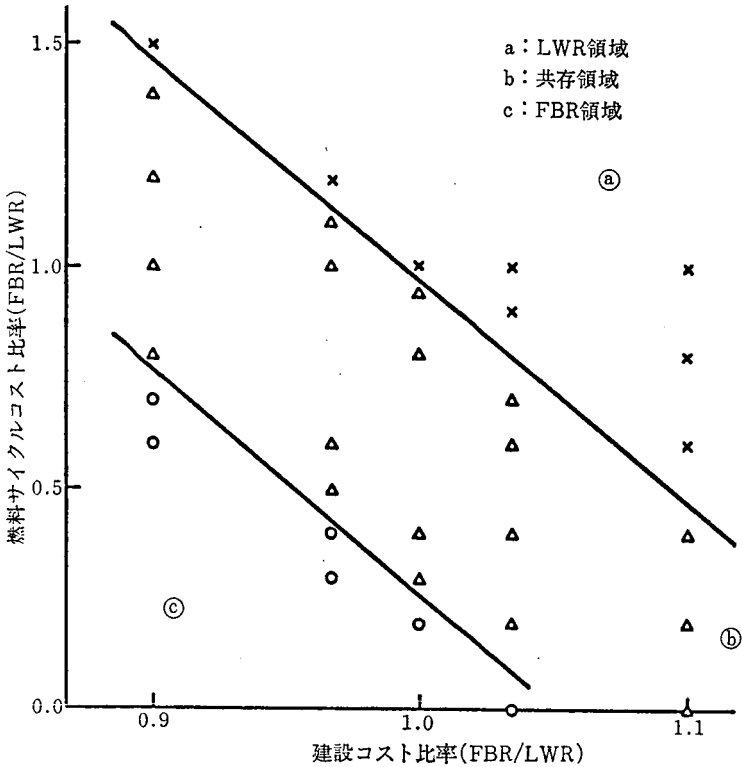


図 3-2 最適解の特性 (2a)
高速増殖炉導入条件

水炉に比べて格段に優れている必要がある。

軽水炉・高速増殖炉の共存する場合（上記 b. の領域）は、図 3-2 に見られる通りかなり広い。この領域では、コスト条件によって高速増殖炉の導入のされ方は徐々に変化し、高速増殖炉の経済性が向上するほど導入規模が大きくなるとともに導入時期も早まる。

軽水炉とほぼ同程度の高速増殖炉の経済性では、軽水炉側では使用済燃料を長期貯蔵することも可能であるため、導入が起こる場合でも直ちに導入されるとは限らず、軽水炉との相対的なコスト条件に応じた時期に導入され、ある程度のシェアを獲得するものの軽水炉を駆逐するには至らない。

(2) 軽水炉使用済燃料再処理計画の効果

前項の基準ケースについての解析では、軽水

炉燃料再処理設備容量は制約条件を課していない。次にここでは、1996 年以降 30 年間について、毎年 800 tHM の軽水炉使用済燃料の再処理を行うことを前提条件とし、それを越える再処理容量の設置は炉型構成に併せて最適化させる解析を行った。結果は図 3-3 に示す。

この図を図 3-2 と比較すると、高速増殖炉の導入が生じる領域が若干拡大しているとともに、最適解の特性がさらに多様化している。すなわち、図 3-3 は次の 5 つの領域の存在を示している。

- a. 計画期間内に高速増殖炉導入が起こらず、前提とした再処理計画からの回収プルトニウムは軽水炉プルスーマルで消費する場合（図中には×印で表示：軽水炉領域）
- b. 高速増殖炉導入開始可能時点以降、前提

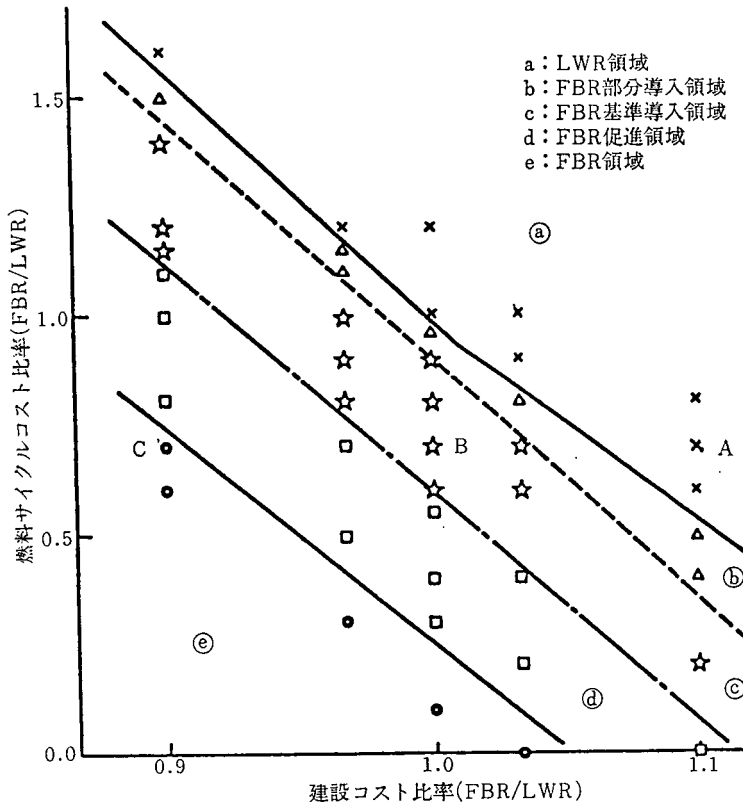


図 3-3 最適解の特性 (2b)
再処理計画の下での高速増殖炉導入条件

とした再処理計画からの回収プルトニウムにより、プルサーマル実施と並行してある程度的高速増殖炉導入が図られ、中長期的に軽水炉と高速増殖炉が共存していく場合 (図中には△印で表示：高速増殖炉部分導入領域)

- c. 前提とした再処理計画の範囲で賄えるだけの高速増殖炉導入を図り、軽水炉も相応のシェアを保つ場合 (図中では☆印で表示：高速増殖炉基準導入領域)
- d. 前提とした再処理計画に加えてさらにある程度の再処理を実施し、高速増殖炉導入をより促進する場合 (図中には□印で表示：高速増殖炉促進領域)

e. 軽水炉使用済燃料バランスの範囲内で最大規模の高速増殖炉導入を図る場合 (図中には◎印で表示：高速増殖炉領域)

前項の図 3-2 に示した領域 b. (共存領域) が図 3-3 では上記 b. ~d. の3つの領域に分かれている。このように、軽水炉使用済燃料の再処理量に制約を課すことによって最適炉型戦略は変化し、ある量の再処理の実施を前提条件と考えることは高速増殖炉の導入の判断基準に直接に影響を及ぼす。

上記のうち b. の領域は比較的狭く、高速増殖炉の経済性が改善される (領域 a. から図 3-3 の左下方にコスト条件が変化すると導入規模は急速に領域 c. のそれに達し、領域 c. では同

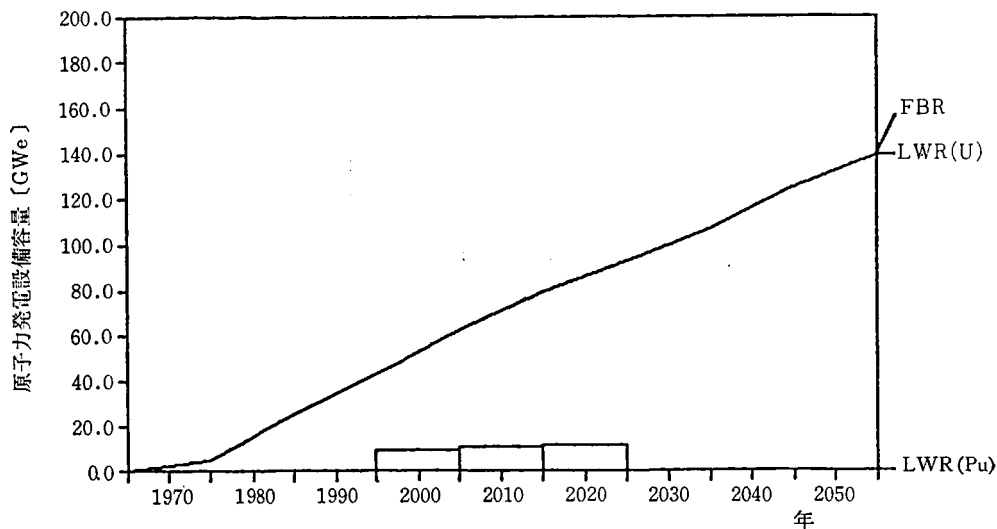


図 3-4 (a) 炉型戦略の最適解の例 (1)
(図 3-3 中の点A)

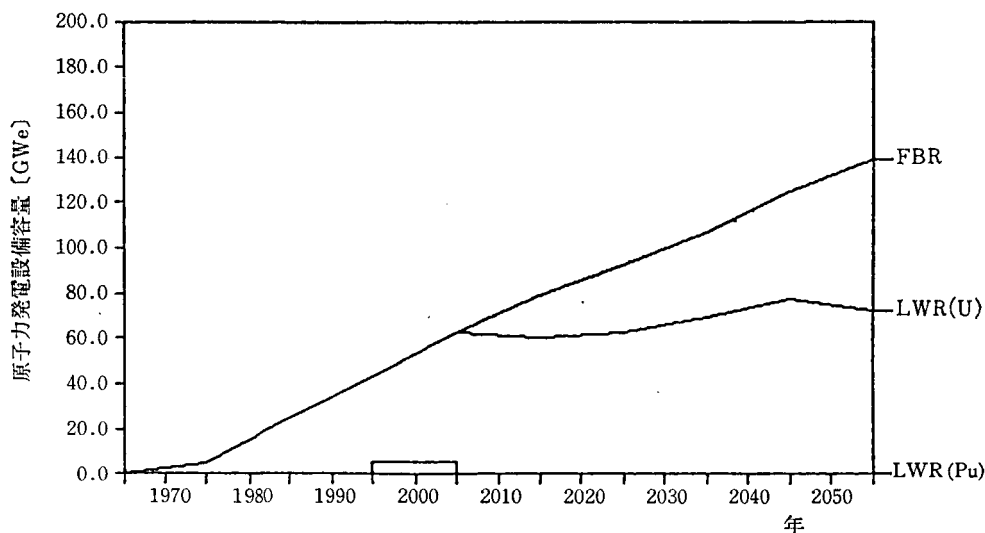


図 3-4 (b) 炉型戦略の最適解の例 (2)
(図 3-3 中の点B)

様の解が出現する領域となっている。

(3) 最適炉型構成と燃料サイクル

前項までに説明した解析のうち、高速増殖炉領域、共存領域、軽水炉領域の代表点として、図 3-3 中の A, B, C 点を取り上げて、炉型構成と燃料サイクル構成の内容を検討する。原子力発電設備容量の内訳を図 3-4 (a)~(c) に、

また、軽水炉サイクルのバックエンドの状況について、図 3-5 (a)~(c) に軽水炉使用済燃料貯蔵量および再処理量を示す。

軽水炉使用済燃料の再処理に制約を課さない場合には、最適炉型戦略として導入される高速増殖炉のためのプルトニウム需要がある場合にのみ再処理が実施され、プルトニウムの貯蔵は

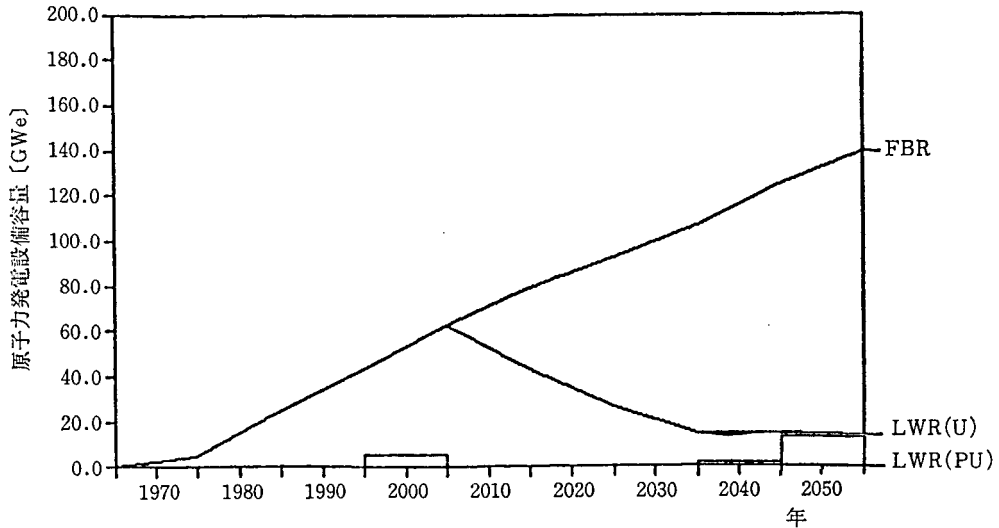


図 3-4 (c) 炉型戦略の最適解の例 (3)
(図 3-3 中の点C)

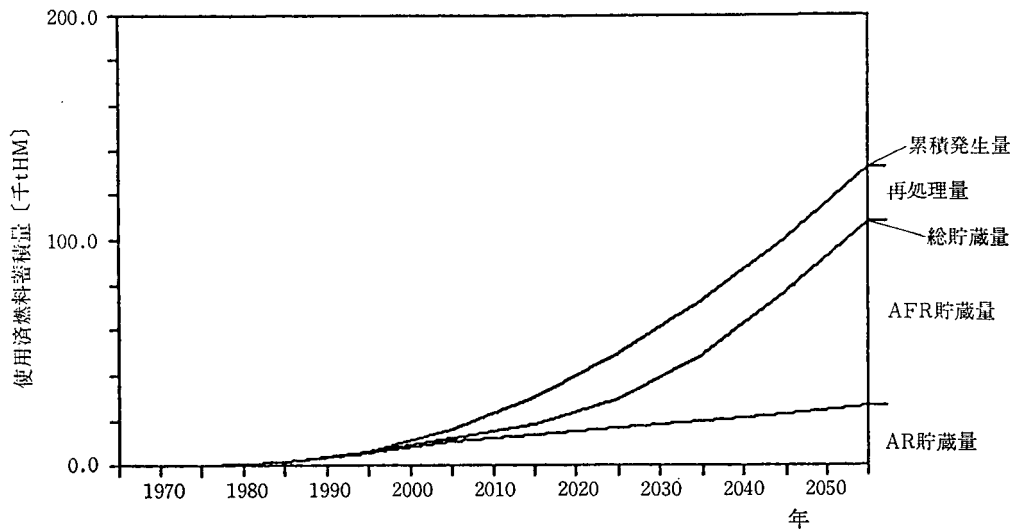


図 3-5 (a) 燃料サイクル戦略の最適解の例 (1)
(図 3-3 中の点A)

発生しない。なお、今回設定した高速増殖炉の増殖性能の下では、全面的に高速増殖炉を導入することが有利なコスト条件下においても、原料となる軽水炉使用済燃料の不足によりプルトニウムが不足するという事態が生じ、全原子力が高速増殖炉となるケースは出現しなかった(注1)。

ただし、プルトニウムバランスについては、炉特性の設定値に加えて燃料サイクルの炉外期間

(注1) 図 3-4 (c) 参照。ただし、1996 年より一定の再処理を前提とするこのケースでは、高速増殖炉導入開始可能時点として仮定した 2006 年以前の 10 年間に、再処理により回収されたプルトニウムは軽水炉プルサーマルで減耗されている。今回のサーベイの範囲からさらに高速増殖炉の経済性が良くなった場合には、この分のプルトニウムを貯蔵しておき、後の時点での高速増殖炉導入を促進して、高速増殖炉の規模が若干増大すると予想される。

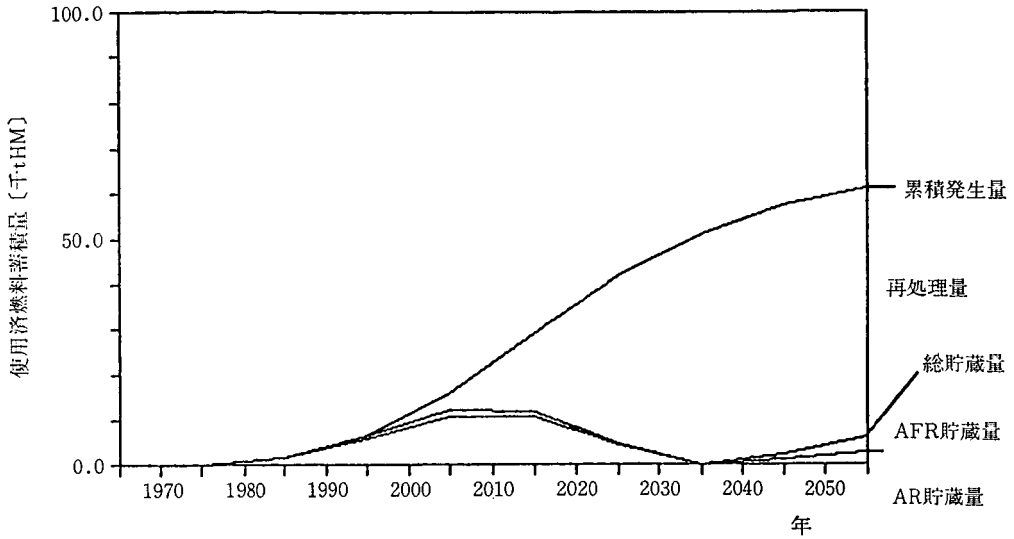


図 3-5 (b) 燃料サイクル戦略の最適解の例 (2)
(図 3-3 中の点 B)

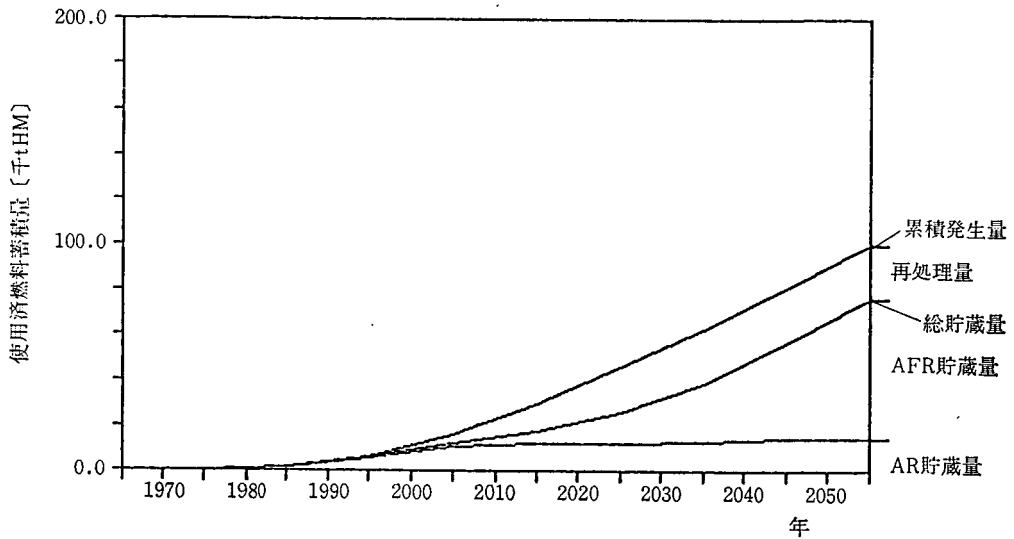


図 3-5 (c) 燃料サイクル戦略の最適解の例 (3)
(図 3-3 中の点 C)

の影響も大きいので、更に慎重な検討が必要である。

軽水炉燃料の再処理量に 1996 年以降の 30 年間 800 tHM/年という下限制約を置く場合、図 3-4 に示す通りコスト条件から高速増殖炉の導入規模が決まり、プルトニウムの余剰が発生する時期には、やはり貯蔵はせず軽水炉プルサー

マルによりこれを消費している。この場合に、図 3-5 (a)~(c) に示すように、再処理と並行して必要となる使用済燃料の貯蔵規模はケースによって大きな差を生じ、この点からも炉型戦略の検討と燃料サイクル計画とが密接不可分の関係にあることが強調される。

4. おわりに

本稿では、原子炉炉型戦略と一体として燃料サイクル戦略を最適化するモデル FCOM の開発と、基本的な最適解の特性について報告した。

FCOM の特長は、コンパクトなモデルであるにも拘わらず、使用済燃料貯蔵および再処理計画の最適化が行え、しかも貯蔵についてはコストのかかる中間貯蔵とそうでない発電所施設内貯蔵とを分離して扱っている点である。

今回示した最適解の特性から、使用済燃料貯蔵が燃料サイクルに大きな柔軟性を与えていること、それゆえに燃料サイクル戦略は炉型戦略の議論と一体として検討することが極めて重要であることが結論として指摘される。

なお、今回はある条件設定の下に最適解の基本的な特性を示したに過ぎないが、今後は客観的なデータ設定が可能な限り、ケーススタディの範囲を広げつつ分析を進める必要がある。また、FCOM はコンパクトなモデル化を意図しているため、幾つか大胆な単純化を行って

る。例えば、時間軸の粗い離散化やそれに伴う燃料サイクルにおける時間遅れの不十分な取り扱い等は最適解の特性に影響する可能性もある。今後は、より詳細な分析を行いつつ、単純化に伴う誤差の程度を見極めておく必要がある。

参考文献

- [1] 山地，長野：“燃料サイクル最適化モデルの開発—高速増殖炉実用化条件の解析—”，電中研研究報告 No. Y88002 (1988)
- [2] 山地，長野，長田：“最適化モデルによる長期炉型戦略の解析”，日本原子力学会昭和 62 年秋の大会予稿集 No. B-3 (1987)
- [3] 長野，山地：“最適燃料サイクル戦略と高速増殖炉実用化条件の解析”，第 6 回エネルギーシステム・経済コンファレンス論文集 No. 9-2 (1989)
- [4] 原子力委員会：“原子力開発利用長期計画”，(1987)
- [5] OECD/NEA：“The Economics of the Nuclear Fuel Cycle” (1985)

(ながの こうじ
やまじ けんじ
経済部 エネルギー研究室)