

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。

2001. 11. 30

[技術情報室]

海外資源外乱に対するプルトニウム 利用体系の安定性解析



1988年7月

株式会社 野村総合研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

もの
、復
は使

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問合せは下記に願います。


〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

動力炉開発推進調整部



配布限定

PNC  J 2295 88- 001

1988年7月

海外資源外乱に対するプルトニウム利用体系の安定性解析

久保川俊彦^{*}，笠松宏行^{*}，横沢 誠^{*}
坂本典子^{*}

要 旨

高速増殖炉は、21世紀の原子力発電システムの中核をなし、わが国のエネルギー安定供給に大きく寄与するものと期待されている。一方、今後のエネルギー需要の伸びがかなり小さくなっていくものと予測されるなかで、高速増殖炉の開発導入のタイミングとその経済性の達成については、開発戦略の根本的な見直しが求められている。

本調査研究は、海外依存リスクモデル分析手法として、インポートプレミアム分析手法が高速増殖炉の導入効果の分析に適用することができるかどうか、できるとすれば、具体的にどのような手法として定量化できるかを明らかにし、高速増殖炉の最適な開発導入戦略策定に資することを目的とした。

研究の結果、インポートプレミアム分析手法を取り入れると、高速増殖炉導入開発戦略が、総合的な導入ペネフィットを最大化する問題に帰着することを明らかにした。

簡単な数値例の試算によって、この手法を適用すると、高速炉の発電コストが軽水炉よりも悪い場合でも、高速増殖炉を導入した方が総合的な経済性から見て合理的となることを明らかにした。

本報告書は、(株)野村総合研究所が、動力炉・核燃料開発事業団の委託により、実施した研究の成果である。

* (株)野村総合研究所社会システム研究部

目 次

要 旨

1	海外依存リスクモデル分析としてのインポートプレミアム分析 適用の考え方	1
1.1	原子力開発政策と海外依存リスク	1
1.2	インポートプレミアム分析の理論的枠組み	2
1.3	高速増殖炉導入開発戦略への適用手法の基本的考え方	20
2	高速増殖炉導入開発戦略へのインポートプレミアム分析適用手法 の確立	28
2.1	21世紀のウラン市場の展望	28
2.2	インポートプレミアムに基づく高速増殖炉導入開発戦略の 定式化	43
3	高速増殖炉導入開発戦略へのインポートプレミアム分析手法 適用試算	50
3.1	手法適用試算	50
3.2	インポートプレミアム分析手法の可能性と今後の課題	63

付録 A

1. 海外依存リスクモデル分析としてのインポートプレミアム分析適用の考え方

1.1 原子力開発政策と海外依存リスク

近年、石油価格の大幅な低下、および、産業社会のソフト化、情報化の進展によるエネルギー需要の伸びの停滞傾向が定着する中で、従来のエネルギーセキュリティ論におけるパラダイムチェンジが起こりつつある。すなわち、海外からのエネルギー供給途絶といった不測の事態が発生する可能性があることそれ自体を重視する立場から、より総合的な経済合理性に基づいた冷静なエネルギー開発投資態度を重視する立場への移行現象が見られる。わが国の原子力開発における政策体系の再構築においても、両者の考え方の相違が際立ってきつつある。

今後のわが国の原子力開発の中心的かつ最大のテーマは、どのような「プルトニウム利用体系」をどのようなタイミングで構築し、ウラン燃料の海外依存リスクを低減していくかということにある。

これに関連する具体的な政策的課題を列挙すると、

- (1) 天然ウランの供給源多角化をどこまで進めるべきか
- (2) ウラン燃料備蓄はどの程度行えば十分か
- (3) 海水回収ウラン利用の経済性目標を何ドルに置くか
- (4) 再処理回収ウラン利用の効果はどの程度あるか
- (5) ウラン濃縮国産化の比率は何割が合理的か
- (6) 軽水炉でのプルトニウム利用の規模をどうするか
- (7) HCLWRの開発は行うべきかどうか
- (8) 高速増殖炉の開発のタイミングをどうすべきか

これらの政策的課題に共通している構造は、各々の施策は、わが国のエネルギーセキュリティ上、明らかに効果が期待できるが、一方では、一定の「コスト」がかかってくるものであり、したがって、効果があるからといって、全ての政策を即時に進めることにはつながってこないということである。そこで、重要になるのは、これらのセキュリティ上のメリットとコストを同一の考え方の中で総合的に捉えていくことである。即ち、各政策単独では、特に開発初期においては、経済的に魅力がない場合でも、天然ウランや濃縮ウランを海外に依存していることからくる経済的損失の可能性（供給途絶等による）を考慮して見ると、総合的には経済合理性がでてくることが期待できる。

本研究は、総合的な経済合理性に基づいた分析手法のひとつとして最近注目されている「インポートプレミアム概念」を、高速増殖炉の導入開発戦略に適用し、定量的な分析を行うことを目的としたものである。

以下、1.2節では、インポートプレミアム分析の理論的枠組について説明する。なお、付録Aには、核燃料サイクルの開発効果の分析にインポートプレミアム概念を適用した事例を紹介し、インポートプレミアム概念がどのような分析に使えるのかを例示してある。第1章の最後として、高速増殖炉導入開発戦略への適用の基本的考え方を示す。

1.2 インポートプレミアム分析の理論的枠組

1.2.1 インポートプレミアム概念

世界の原油市場において、何らかの供給障害が発生した場合に、需給曲線の新たなバランスに対応して価格が上昇する。逆に、石油代替エネルギー開発によって、原油需要の削減（輸入国であれば、輸入量の削減）が行われれば、価格は低下する。

インポートプレミアム概念は、供給障害が発生するという状況下で石油代替エネルギーの開発すなわち原油需要の削減を実行した場合に、期待しうる効果（原油需要を削減しておけば削減していない場合よりも、価格上昇は低くなると期待しうる）を定量的に評価するものとして導入される。

インポートプレミアムは、次に示すように、市場力要因（＝平常時の原油需要削減の効果）と安全保障要因（＝供給障害時の原油需要削減効果）の2つの要因に分解することができる。

(1) 市場力要因

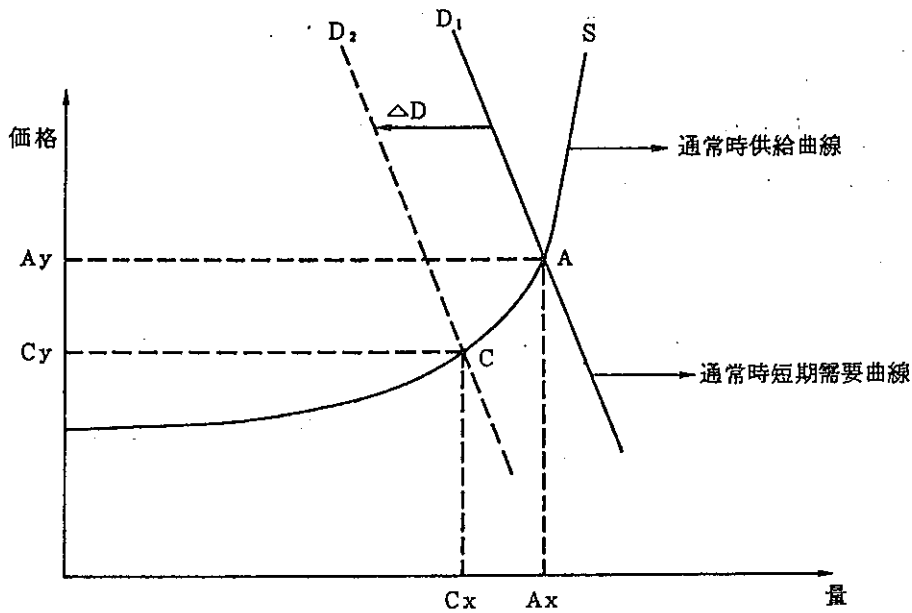


図 1.1 - 1 インポートプレミアム概念図

- 短期需要が ΔD 減少することによって、輸入総額は、 A_x, A_y から C_x, C_y に減少する。単位需要減少量当りのこの差額は $(A_x A_y - C_x C_y) / \Delta D$ となり、これが需要減少分の単位価値に相当する。

通常の場合の単位価値は A_y (市場価格) であるので、両者の差が、純粹に、マーケットメカニズムに基づくプレミアムである。(ΔD が充分小さい時)

$$\text{市場力要因} = (A_x \cdot A_y - C_x \cdot C_y) / \Delta D - A_y$$

- 市場力要因は、当然、マーケットの需給の状況によって大きく異なる。供給力が過剰な場合 (供給曲線がフラットな部分で需給がバランスする) には、インポートプレミアムの市場力要因分はゼロとなる。逆に供給が逼迫した場合には、大きくなる。
- ΔD が有意に大きい時は、市場力要因は小さくなり、ゼロに近づく。

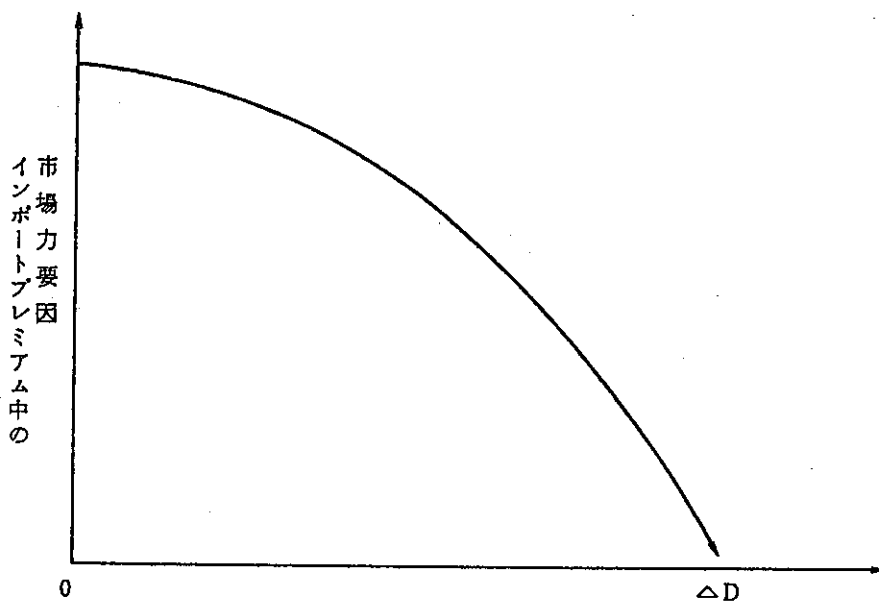


図 1.1 - 2 需要減少分と市場力要因の関係の概念図

(2) 安全保障要因

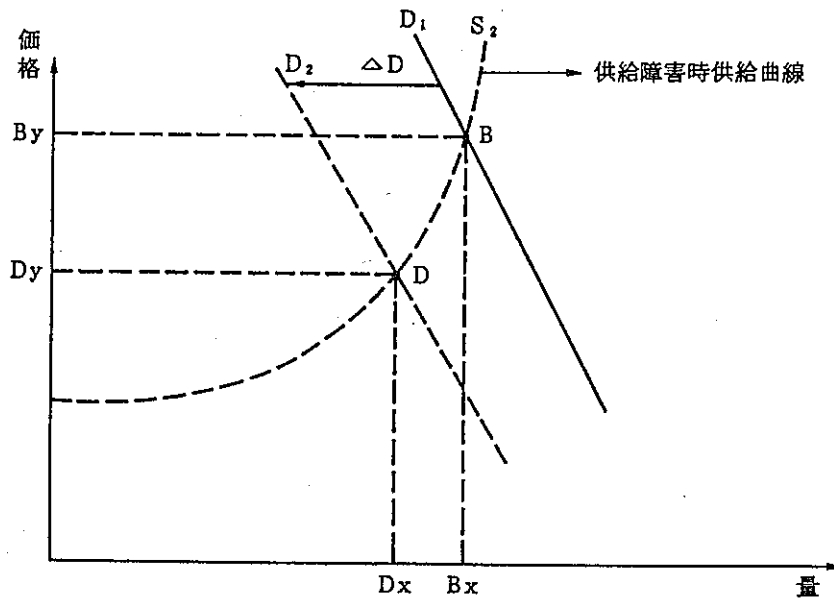


図 1.1 - 3 安全保障要因概念図

- 供給障害時マーケットの場合にも、短期需要を ΔD 減少させることは、 $(B_x B_y - D_x D_y) / \Delta D$ だけの単位価値を生みだす。
通常マーケット時の単位価値は、 $(A_x A_y - C_x C_y) / \Delta D$ であったから、供給障害時には、通常時よりも
 $(B_x B_y - D_x D_y) / \Delta D - (A_x A_y - C_x C_y) / \Delta D$
だけ、需要減少の単位価値又は効果が大きくなる。
- 供給障害が、特定の期間内に発生する確率を P とすると単位価値増分の期待額は、

$$\{ (B_x B_y - D_x D_y) / \Delta D - (A_x A_y - C_x C_y) / \Delta D \} \cdot P$$
 となる。これが、インポートプレミアムの安全保障要因分である。
- 安全保障要因も、市場力要因と同様に、マーケットの需給の状況によって大きく異なる。供給力が極端に過剰な場合には、インポートプレミアムの安全保障要因分もゼロに近づく。
- 安全保障要因は、 ΔD よりも、供給曲線 S_2 がどうなるかがポイントである。また、需要曲線の価格弾力性が大きいと安全保障要因は小さくなり、逆に価格弾力性が小さいと安全保障要因は大きくなる。
- ΔD が有意に大きい時には、安全保障要因も市場力要因と同時に小さくなるが、ゼロではなく $(B_y - A_y) \cdot P$ に近づく。

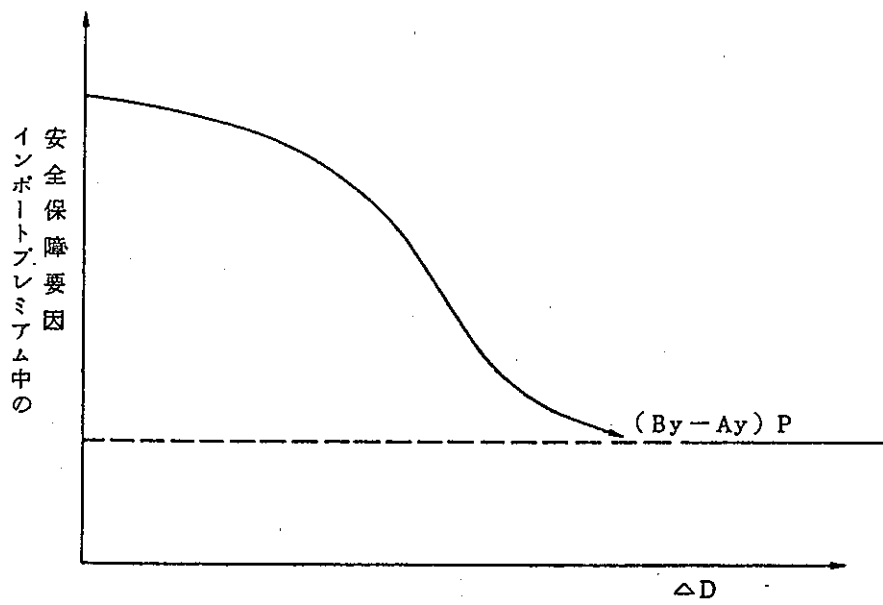


図 1.1 - 4 インポートプレミアム中の安全保障要因と ΔD の関係

(3) インポートプレミアム

- インポートプレミアムは、市場力要因と安全保障要因の和である。
- インポートプレミアムと ΔD の関係は次のようになる。

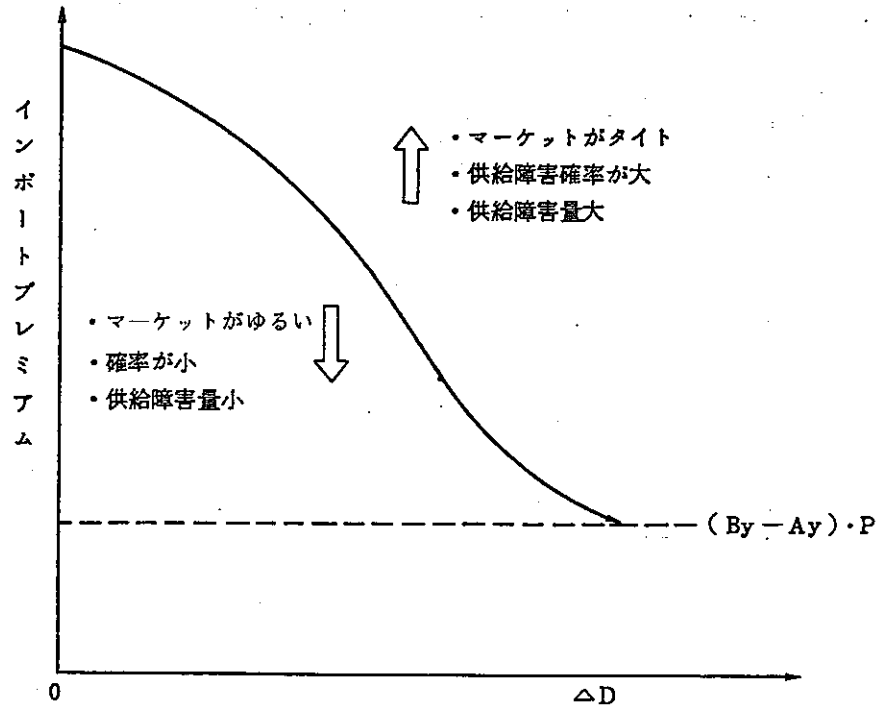


図 1.1 - 5 インポートプレミアムと ΔD の関係

- 又、インポートプレミアムと供給障害確率 P との関係は次図のようになる。

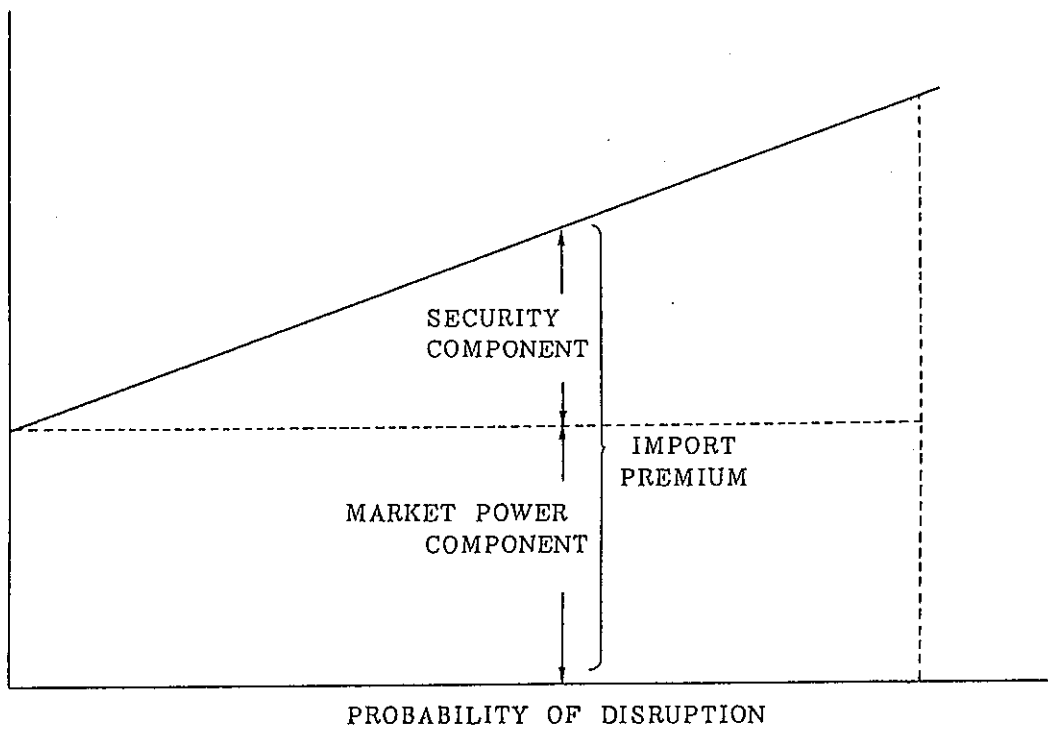


図 A - 1 インポート・プレミアムの構成要因

(4) インポートプレミアム概念の展開

① 供給障害確率の意味

表 1.1 - 2 供給障害確率の意味

ある年に供給障害が発生する確率 P	10年間に1回以上供給障害が発生する確率	20年間に1回以上供給障害が発生する確率
(イ) [0.001	0.02
	0.005	0.10
(ロ) [0.01	0.20
	0.02	0.34
(ハ) [0.05	0.65
	0.1	0.88
	0.2	0.99

- (イ) 理論上、障害が発生することが考えられるので、発生した場合の事後対策を決めておく。
- (ロ) 障害が発生する恐れがあるので、事後の対策を決めると共に事前の対策を検討し、一部を実行する。
- (ハ) 障害が発生することは、まず間違いないので、事前対策を十分に詰めて、全面的に実行する。

- SWU供給における障害確率…………… 0.005～ 0.01 (?)
- ウラン供給における障害確率…………… 0.01 ～ 0.02 (?)
- 石油供給における障害確率…………… 0.05 ～ 0.1 (?)
- 供給障害確率は、一般に、供給障害の大きさ ($\Delta S = S_1 - S_2$) によって変化すると考えられる。 ΔS が大きい程、発生確率は小さくなる。

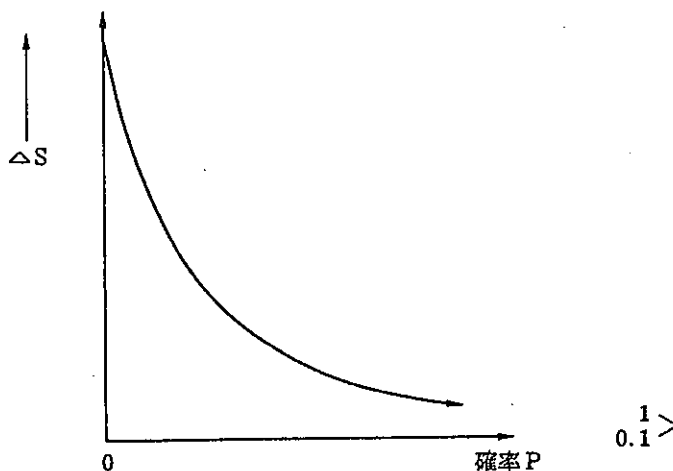


図1.1-11 ΔS と 確率 P と の 関 係

- しかし、具体的な関係は、ウラン供給者（国）、SWU供給国を個別に吟味しなければ、明らかにすることはできない。
- 一方、インポートプレミアムは、 $\Delta D = \text{一定}$ 、 $P = \text{一定}$ とすると、 ΔS の単調増加関数である。

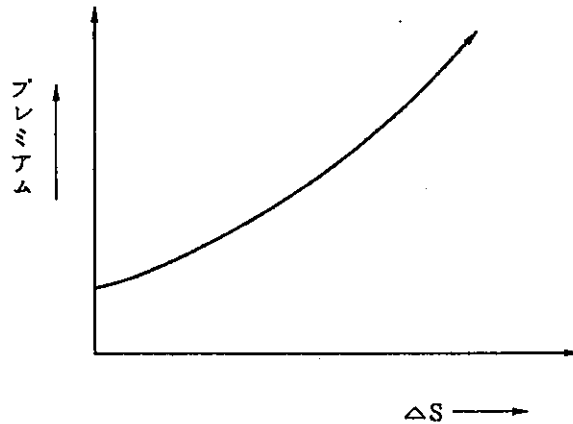


図1.1-12 プレミアムと ΔS との関係

- 前ページの2つの図を合成すると、概念的には、次のようになる。

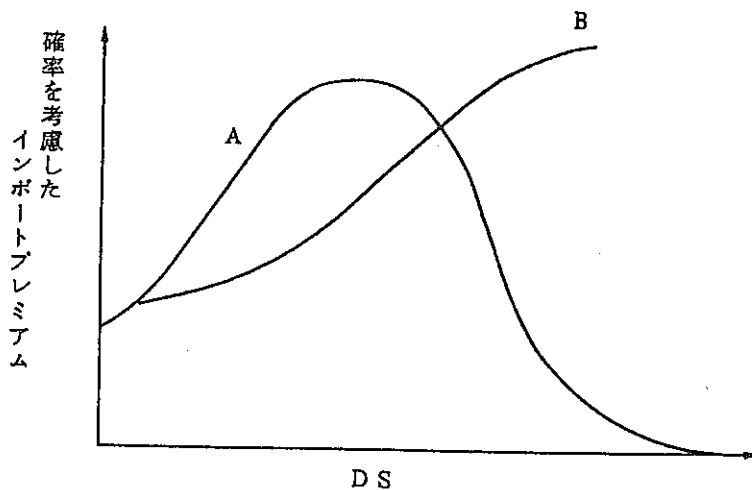


図1.1-13 確率を考慮したインポートプレミアム概念図

- この概念図が意味することは、供給障害は大規模であるが、発生確率が極めて小さいリスクに対するインポートプレミアムよりも、供給障害は中程度でも発生確率の比較的大きいリスクに対するプレミアムが大きい可能性があり、このリスクに対する対策も考慮すべきということである。

② 供給障害曲線によるインポートプレミアムの差

(イ) フリーマーケットとカルテル市場における安全保障要因の差

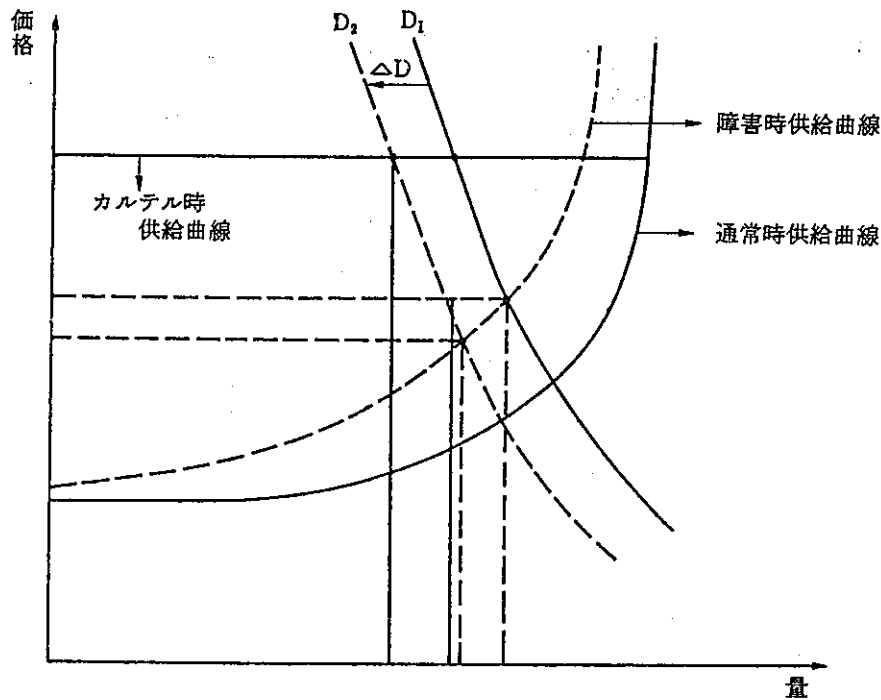


図 1.1-14 フリーマーケットとカルテル市場における安全保障要因の差

- 一般にフリーマーケットにおける供給障害よりも、カルテル市場化による供給障害の安全保障要因の方が大きくなる。

- (ロ) ○ 生産コストの低い国の供給障害が高い国よりもインパクトが大きい。
 ○ ウランの場合は、1985年ではカナダが一番インパクトが大きい。
 2000年頃には、オーストラリアのインパクトが大きくなる。

③ 障害の継続期間

- 過去の事例を見ると

石油の場合	約10年
ウランの場合	約5年

今後においても、もし、障害が発生すれば、この程度の期間は続き、1年以下といった短期にはならないであろう。

- しかし、ウランの供給者は多いため、ウラン価格の高騰は開発意欲の増加に即反映し、急速に、バランスは回復されよう。
- SWU供給については、石油やウランと直接類似する前例はない。しかし、アメリカが独占的供給者であった時代を、ある種の「障害」であったと考えれば、ほぼ20年継続したことになる。

- SWU供給は、石油やウランのような「天然資源」ではなく「技術資源」をベースとするものであるが、資源の偏在という観点からは、石油やウラン以上に偏在しており、容易に供給曲線が管理されうる。
- 管理期間が何年継続しうるかは、市場の需給バランスによるが一度管理可能になれば、10年程度長期化する可能性は十分ある。
- 何故なら、1990年以降のSWU需要の伸びはスローペースとなり、SWUマーケットへの新規参入のバリアは、相対的に高くなるからである。
- 以上のことから本分析では
「ウランやSWUの供給障害は、一度発生すれば、5～10年間程度は継続する。
ウランは5年間、SWUは10年間と想定する」

(5) インポートプレミアムと核燃料サイクル開発効果との関係

- ① インポートプレミアム概念を用いた場合、核燃料サイクルの開発規模（ウラン、SWUの輸入量の削減、海外依存度の減少）について、ある意味での“最適規模”を導出することができる。
- ② ΔD だけの輸入削減（海外への需要削減）に要する単位コストは ΔD と一般に次のような関係にある。単位コストとは具体的には、海水ウランの回りコストドル/kgu、国内SWUのコストドル/kgswu等のことである。

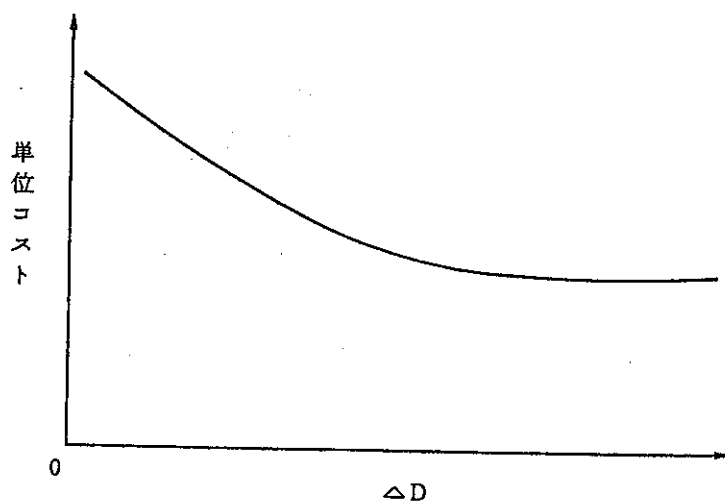


図1.1-15 単位コストと ΔD の関係

- ③ ページの ΔD のインポートプレミアムの関係図と上図を重ねると下図のようなパターンが得られる。

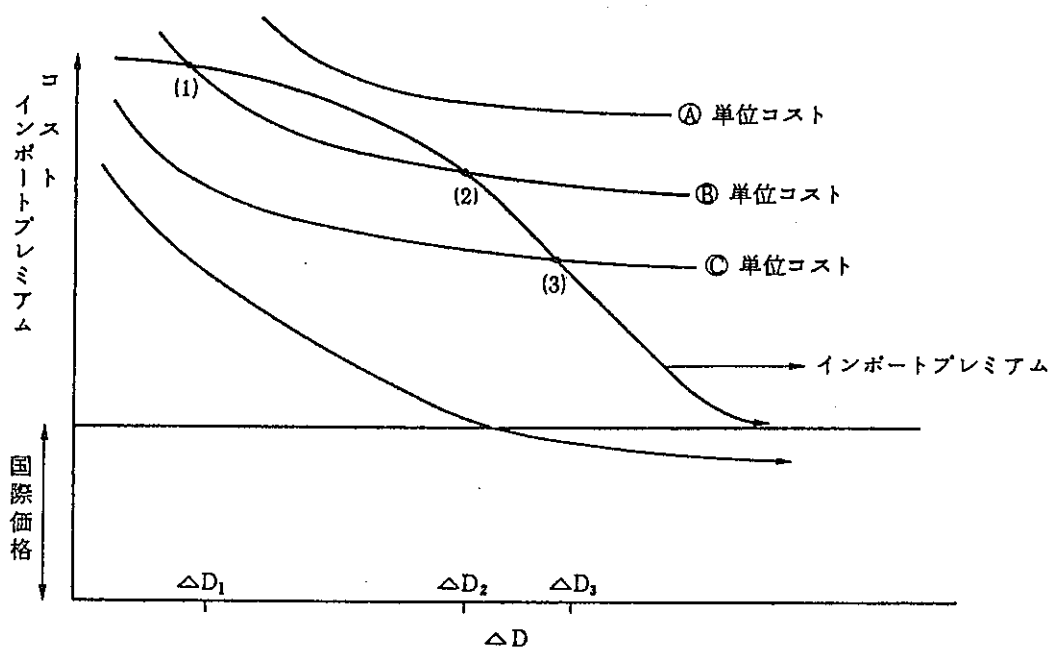


図1.1-16 コストインポートプレミアムと ΔD との関係

- ΔD だけの輸入削減をするための単位コストがAの場合は、このような輸入削減政策は経済的合理性がないことになる。
(現在の技術レベルでの海水ウラン回収がこれに該当する)
- Bの場合は、 $\Delta D_1 \sim \Delta D_2$ の規模であれば経済合理性がでるが、 ΔD が ΔD_1 より小さい場合、又は ΔD が ΔD_2 よりも大きい場合は、経済合理性がでない。
例えば国産ウラン濃縮の規模が1,000トンSWU以下ではコスト的にペイしないし、逆に、例えば、国際価格よりも高い場合には、 ΔD_2 を越えた国産化は合理性がでないということである。
- Cの場合は、経済合理性のでる国産化最大規模は ΔD_3 ということになる。
- Dの場合は、国産化(輸入削減)の上限はない。

- ④ 通常の場合、国産化の単位コストの計算の中には、実用化のための研究開発投資の全部は含まれない。もし、次の図に示すように、国産価格と国際価格の差と研究開発投資分の利がインポートプレミアム内におさまる時には、このような研究開発投資は、十分に経済合理性をもつ。

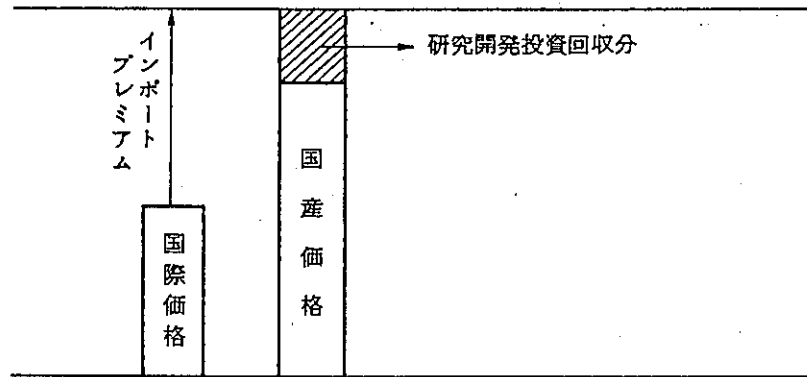


図1.1-17 インポートプレミアムと研究開発投資回収分

1.2.2 石油輸入削減の場合のインポートプレミアムの試算と展開

(1) 数値例

インポートプレミアムの一般的な概念については 1.2.1で述べたのでここでは簡単な例題を用いてその概念の理解を深めることとする。

いま、図A-2において、以下のような数値を仮定しよう。

ケース		エネルギー輸入量(MMBD)	価格(\$/bbl)
通常ケース	輸入抑制・有	6.0 (= Ax)	35.0 (= Ay)
	" 無	5.6 (= Cx)	33.5 (= Cy)
供給障害ケース	輸入抑制・有	5.7 (= Bx)	60.0 (= By)
	" 無	5.0 (= Dx)	45.0 (= Dy)

いま、図A-2における需要曲線 $D_1 \rightarrow D_2$ のシフト量 ΔD を0.5MMBDとし、エネルギー供給ショックが任意の1年間に発生しうる確率 p が0.05（これは10年間に供給ショックが必ず1回発生する確率が40%であることを意味する）と仮定する。

これらの数値を用いて、インポートプレミアムを計算すると、

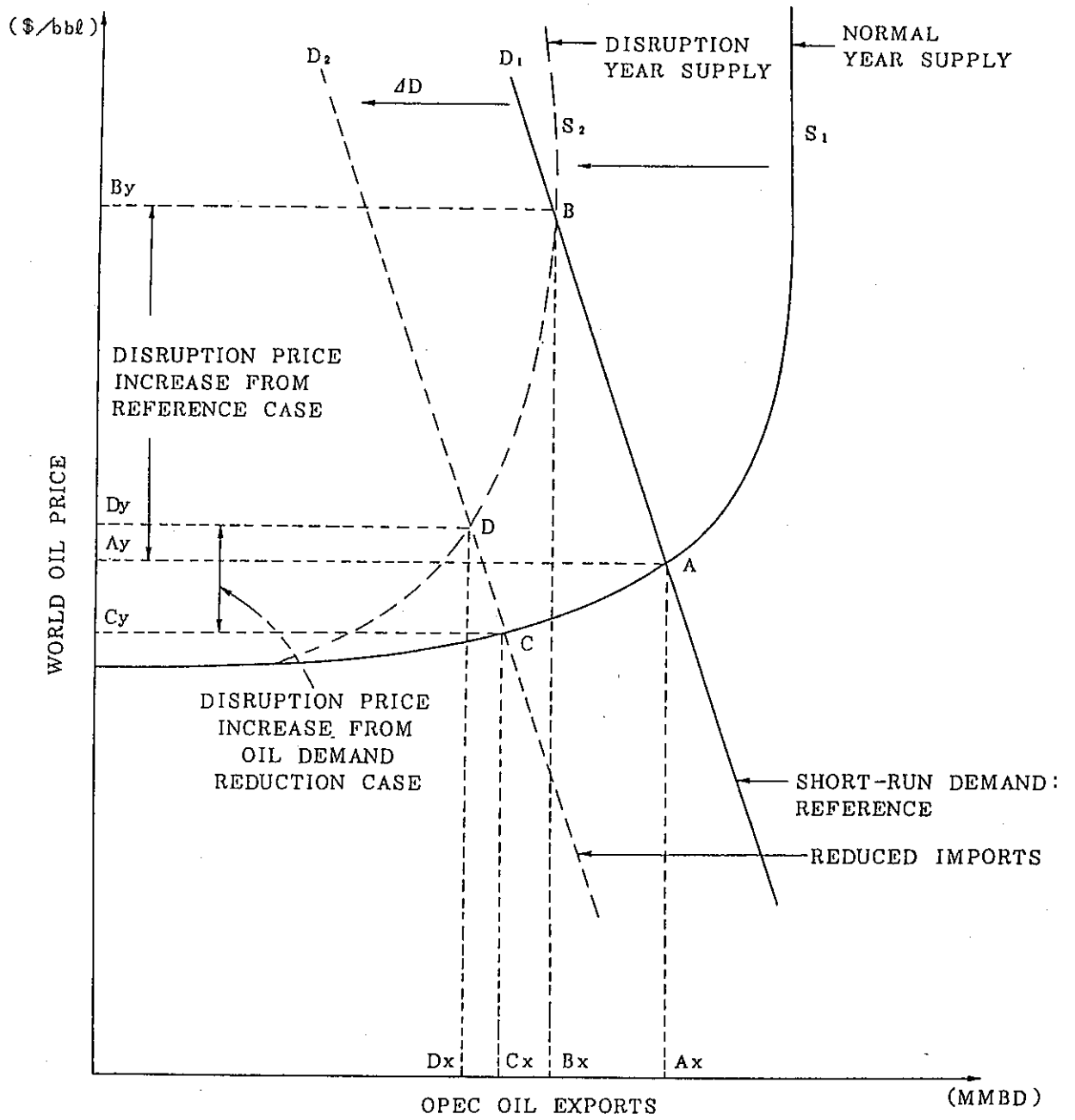


図 A - 2 石油輸入削減による供給障害インパクトの低減効果

$$\begin{aligned} \text{市場力要因} &= (A_x A_y - C_x C_y) / \Delta D - A_y \\ &= -9.8 \text{ [\$ / bb\bar{q}]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{安全保障要因} &= [\{ (B_x B_y - D_x D_y) - (A_x A_y - C_x C_y) \} / \\ &\quad \Delta D] p \\ &= 9.46 \text{ [\$ / bb\bar{q}]} \end{aligned}$$

したがって、

$$\text{インポートプレミアム} = 19.26 \text{ [\$ / bb\bar{q}]}$$

となる。

ここで、インポートプレミアムと石油代替エネルギー開発・導入のインセンティブとの関係について考えてみる。今、石油供給障害が単年度の確率 p の割合で発生するかもしれない状況を想定する。この時、石油輸入量を従来通り抑制しない場合にかかる石油の1年間の期待総輸入額を C_0 ($\$/y$)、一方石油輸入量をあらかじめ ΔD (MMBD) だけ抑制する場合にかかる石油の1年間の期待総輸入額 C_1 ($\$/y$)、その石油抑制分 ΔD を、そのまま石油の従来価格の代替エネルギーで補う場合にかかる年総費用を C_2 ($\$/y$)、石油の従来価格よりも高価な代替エネルギーの開発・導入にかかる年投資額を C_3 ($\$/y$)、とおく。すると、石油輸入抑制ケースで石油よりも高価な代替エネルギーを導入する経済的インセンティブは、輸入抑制ケースにかかる期待総費用 ($C_1 + C_2 + C_3$) が、通常ケースの期待総費用 (C_0) を上回らない、即ち、

$$C_1 + C_2 + C_3 \leq C_0$$

という条件の成立する時に生じると考えられる。ここで、

$$C_0 = \{ (1-p) \cdot A_x A_y + p \cdot B_x B_y \} \times 10^6 + 365$$

$$C_1 = \{ (1-p) \cdot C_x C_y + p \cdot D_x D_y \} \times 10^6 + 365$$

$$C_2 = A_y \cdot \Delta D \times 10^6 + 365$$

であるから結局

$$\begin{aligned} C_3 &\leq C_0 - C_1 - C_2 \\ &= (\text{インポートプレミアム}) \times \Delta D \times 10^6 \times 365 \end{aligned}$$

と変形される。これを用いて前述の例で計算すると、

$$C_3 \leq 3.51 \times 10^9 \text{ (\$ / y)}$$

となる。つまり、将来発生するかもしれないエネルギー供給障害をまともに受ける経済的損失を軽減するために、あらかじめ輸入抑制を行えば、さらに 3.51×10^9 \$ までの期待費用をその代替エネルギーに投資出来ることが示された。

(2) 現在の原油市場に適用した場合

- 原油市場においても、過去数十年の間、様々な市場メカニズムが働いたことはよく知られており、石油メジャーによる市場支配、OPECによるカルテル、

そして、現在においてもオイルグラットによる原油価格の暴落とOPECの再結束といった動きが見られ、原油市場が単純な需要曲線と供給曲線から構成されているとはいえない。

- しかし、中長期的な観点からは、原油市場においても厳然とした需給均衡と市場価格の形成メカニズムは機能しており、OPECのカルテル行為が唯一の市場決定要因でないことは、ここ2、3年のオイルグラットの経験が示すところである。
- 今後の原油市場の動向についてDOE、その他の分析の一例を資料Bに示したが、これにおいても需給の逼迫状況を示す指標としてOPECの原油生産稼働率が用いられており、原油市場における需要曲線と供給曲線の考え方は妥当なものといえよう。
- また、表 1.1-1 には、原油の供給曲線のベースとなる生産コストカーブデータも示してあり、これを図化すると図 1.1-6 のような生産コストカーブが得られる。

表 1.1-1 原油直接生産コストとコスト別産油量

生産コスト* (\$/BBL)	能 力 (百万B/D)	生 産 量 (百万B/D)	生 産 地 域
\$ 2 未 満	1 5	8	中 東
\$ 2~\$ 4	1 5	1 2	中東、アフリカ、インドネシア、メキシコ、北海、南アメリカ
\$ 4~\$ 6	1 0	1 0	北海、アメリカ、アフリカ、南アメリカ
\$ 6~\$ 8	6	6	北海、アメリカ、カナダ、南アメリカ、アジア
\$ 8~\$10	4	4	アメリカ、カナダ、アジア、ヨーロッパ
\$10~\$12	2	2	アメリカ、カナダ、ヨーロッパ
\$12~\$14	2	2	アメリカ、カナダ、ヨーロッパ
\$14~\$24	2	1	アメリカ、カナダ、ヨーロッパ
	5 6	4 5	

*生産コストは油田の減衰、償却費、金利、および利益を除いた直接生産コストである。

出所：Texas Eastern Corp.

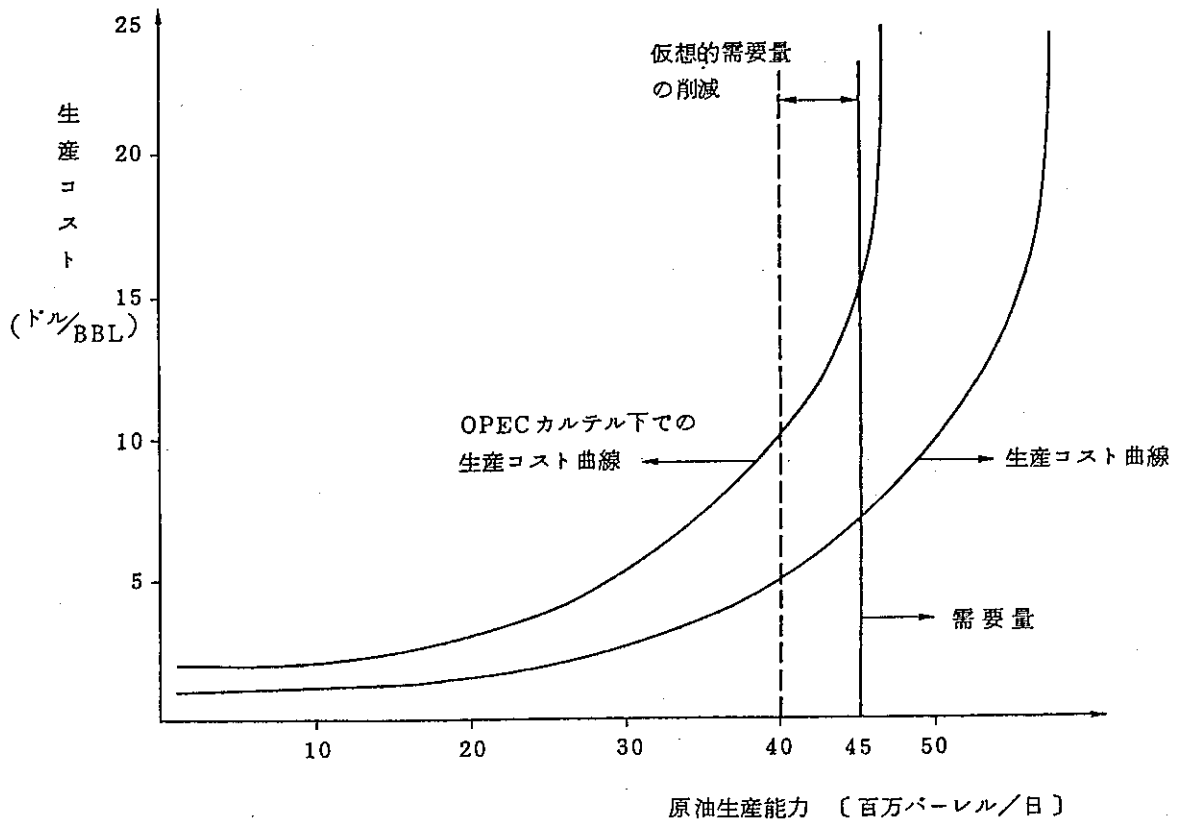


図 1.1 - 6 原油生産コスト曲線像

- この図をベースに、現在の原油市場のカルテルによるインポートプレミアムを求めると、次のような計算結果となる。前提として $\Delta D = 5$ 百万バレル/日
 - (イ) 市場力要因 = $(45 \times 7 - 40 \times 5) / 5 - 7 = 16$ ドル/バレル
 - (ロ) 安全保障力要因 = $\{ (45 \times 18 - 40 \times 9) / 5 - (45 \times 7 - 40 \times 5) / 5 \} \times P$
 $= (90 - 23) \times P = 67 \times P$
 - 現実には、OPECカルテル下での生産コスト曲線が適用されているため確率 $P = 1$ であり、全体としてのインポートプレミアムは、83ドル/バレル
 - 従って、世界全体で5百万バレル/日の原油削減を達成する代替エネルギー開発には、 $83 \text{ドル} \times 130 \text{円} \times 5 \text{百万バレル} \times 365 \text{日} = \text{約} 20 \text{兆円/年}$ を投じても経済合理性が成立する。1 GWe の原子力発電所によって約3万バレル/日の原油削減ができるとすると 167 GWe の原子力発電所を建設し運転する必要がある。原子力発電プラントの費用回収を15年とすると、1 GWe を建設し、運転するに要する費用は、概略
 - $(3300 \text{億円} / 1 \text{GWe} / 15 \text{年}) \times 2 = 440 \text{億円}$
 - (燃料費、運転維持費を 220億円/年・GWe とした)
- したがって、 $167 \text{GWe} \times 440 = 7 \text{兆} 3480 \text{億円}$
 この額は、20兆円よりも、大幅に安くなっており、国民経済的に見て、原子力

発電プラントの導入は、極めて経済合理性が高いものといえる。

- ただし、1.2.1の(5)で述べたように
20兆円－7兆円＝13兆円以上の原子力導入のための研究開発投資は、経済的でなくなる。

1.3 高速増殖炉導入開発戦略への適用の基本的考え方

1.3.1 基本的考え方

高速増殖炉は、21世紀の原子力発電システムの中核をなし、わが国のエネルギー安定供給に大きく寄与するものと期待されている。一方、今後のエネルギー需要の伸びがかなり小さくなっていくものと予測されるなかで、高速増殖炉の開発導入のタイミングとその経済性の達成については、開発戦略の根本的な見直しが求められている。

高速増殖炉の開発戦略を考える場合に考慮すべき要因は、技術的側面、経済性、ウラン資源需給、制度的問題、産業政策等のさまざまな側面にわたっている。さらに、これら側面を個々に検討するのではなく、総合的に考えなければ、21世紀にも通用する高速増殖炉の開発戦略を策定することはできなくなっている。しかしこれについては、これまでは定性的な分析にとどまり、定量的な総合的分析までは行われてこなかった。

このような総合的な開発戦略を検討するための客観的な定量的分析手法として、インポートプレミアム分析手法が注目されている。インポートプレミアム分析手法は、1.2節で説明したように海外依存リスクに関する経済的モデル分析手法の一つであり、ある技術開発によってもたらされるエネルギー資源の輸入削減がどのような総合的な効果をもたらすかを計量・分析する手法で、技術開発の経済的な妥当性を判断することができるものである。高速増殖炉の場合にこの手法を適用すると、高速増殖炉導入によるウラン資源の輸入削減の直接的な効果の外に、ウラン資源の世界市場のかく乱の可能性に対する対抗力を高めることによるエネルギー安全保障効果を定量化することが期待できる。したがってこれらの総合的な効果と高速増殖炉の開発導入コストを比較することにより高速増殖炉の開発導入戦略の経済的側面からの総合的な分析をすることが可能となる。

高速増殖炉に期待される役割とインポートプレミアム分析の狙いについては、次のように考える。

21世紀のエネルギー環境を踏まえると高速炉の導入に関しては、以下の7点の意義が指摘できる。

① 炉型多様化

- ・ 一次エネルギー供給のシェアは2030年に原子力が30%となって、最も大きなエネルギー供給源になり、電力供給の60%が原子力となる。
- ・ 現在のウラン価格を前提にしても、2030年には年間約4000億円がウラン購入費となる。（現在は700億円程度）

② 資源節約

- ・ 国際的に貢献するためにも、大資源消費国である日本が資源節約を率先して

行う必要がある。

③ 資源輸入依存度の低下

- ・ 2030年の電源の輸入資源依存度は、現在よりも約20%上昇し、90%となる。

④ ウラン価格の安定化

- ・ 軽水炉と競合しうる高速炉の開発によって、ウラン価格上昇のカウンターパートとなり、軽水炉の発電コスト抑制になる。

⑤ 競争環境下での炉型開発

- ・ 軽水炉と特性の異なる電源を適切なタイミングで開発することによって、競争原理を働かせ、ウラン価格上昇時にも、適切なコストの電源を円滑に導入する。

⑥ プルトニウム管理

- ・ プルトニウムの収支を適切にバランスさせることによって、プルトニウム貯蔵費用、核拡散上のプレッシャーを小さくする。

⑦ 原子力開発の活力の維持

- ・ 常に次世代の高性能原子炉の開発を夢のあるビジョンのもとで開発を進めることによって、技術力の向上を図る。

以上の7点のうち、インポートプレミアム分析がカバーするのは、①～⑤までで、広い論点にわたるものである。

高速増殖炉の導入開発戦略については、様々な考え方があるが、単純化してみると、表 1.3-1のように整理することができる。インポートプレミアム分析は、これらの意見のどちらが正しいかを明らかにすることを直接的な目的とするのではなく、これらの議論にできるだけ客観的な共通の議論のベースを提供することを目的とするものである。

図 1.3-1に、インポートプレミアム分析の視点から重要となる高速増殖炉導入開発戦略の構成要因の関連図を示した。この図の基本的な考え方は、高速炉の導入に伴うベネフィットとコストを計量し、相互比較することにより最適な導入開発戦略（タイミングと導入量）の方向を明らかにしようとするものである。インポートプレミアム概念は、高速炉導入のベネフィット（直接的効果と質的効果）を総合し、ある種の価格概念である「インポートプレミアム」で表現し、「コスト」との直接的比較を可能ならしめようとするものである。

表 1.3-1 高速増殖炉に関する見方

視 点	多 数 意 見	少 数 意 見
1. 基本的必要性	<ul style="list-style-type: none"> ○高速炉は必ず必要となる（ウラン資源面から）。しかし、後40～50年は軽水炉でやっていく。 ○こういう状況では、あわてて導入する必要はない。 ○将来のエネルギー危機に対する保険である。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ウラン資源的に重要であるから急ぐべき。
2. 現在の開発について	<ul style="list-style-type: none"> ○「もんじゅ」は高すぎる。 	
3. 経 済 性	<ul style="list-style-type: none"> ○本格的導入時には軽水炉と同等のコストである必要がある。 ○コスト低減は簡単には進まない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○1台目3倍、2台目で2倍、3台目で1.5倍と順調に下がればよい。
4. 導入のテンポ	<ul style="list-style-type: none"> ○技術開発進展度とウラン価格を見て決める。 ○開発費もそれによって決める。 ○経済社会の動きにまかせる。 ○入れるのならば大量導入。少数基は意味がない。 	<ul style="list-style-type: none"> ○急ぐべきである。
5. 開発の進め方	<ul style="list-style-type: none"> ○民間企業中心でやっていく（電力会社が主体的にやっていく）。 ○開発の準備だけをやっておけば後の世代が引継ぐ。 	<ul style="list-style-type: none"> ○だれかがやらなければ、コストは下がらない。 ○電力のサポートが重要。
6. そ の 他		<ul style="list-style-type: none"> ○安全設計を根本的に見直して簡素化する。 ○Na 冷却炉に注目して活用する道があるのでは。

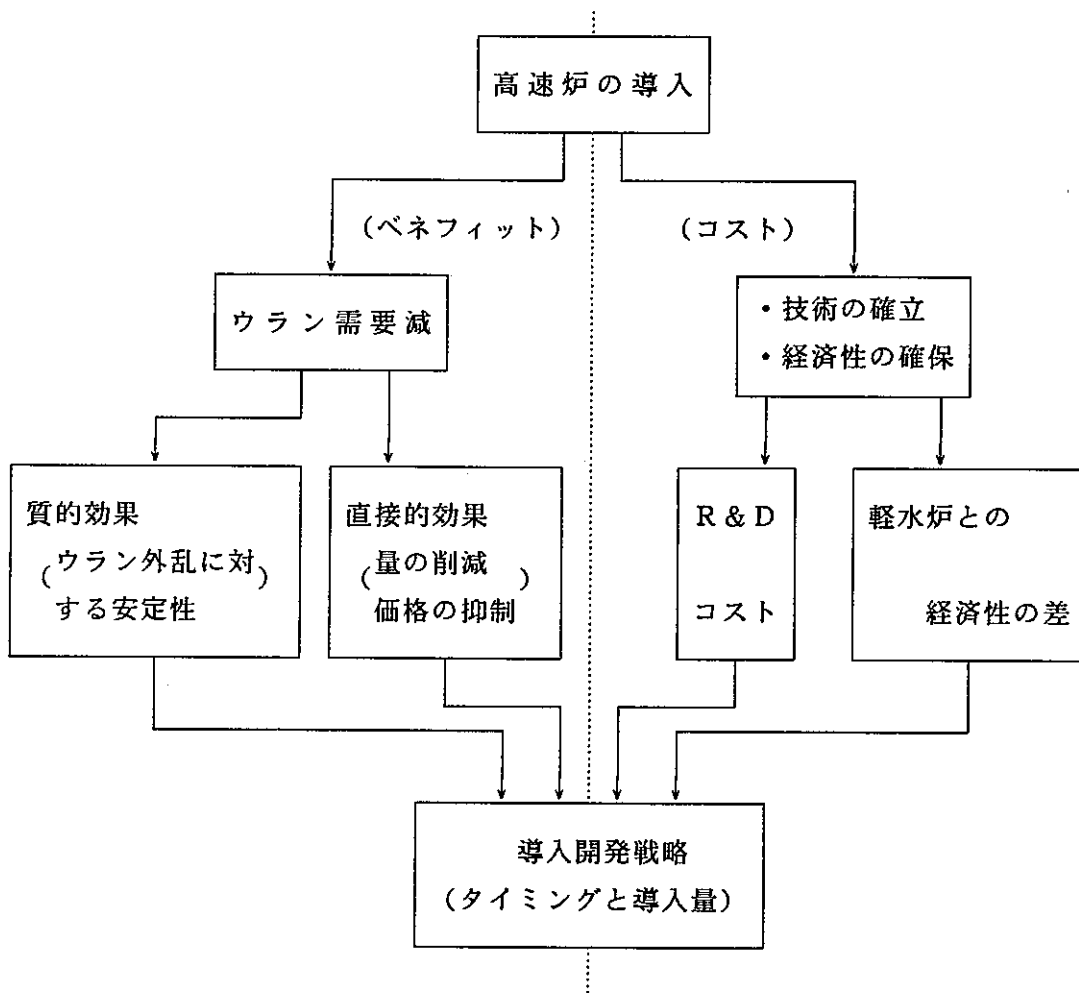


図 1.3-1 インポートプレミアム分析における高速炉増殖炉導入開発戦略の構成要因

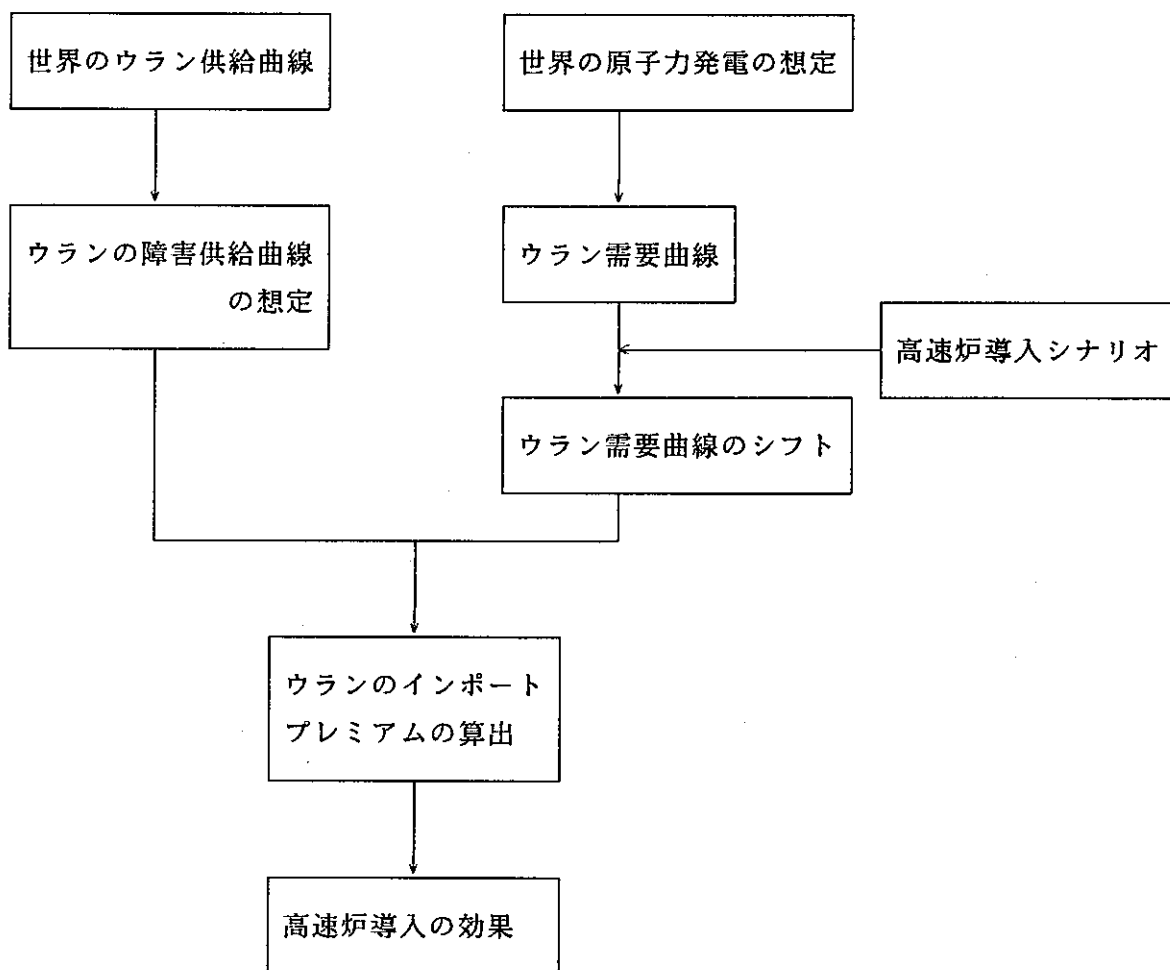


図 1.3-2 ウランのインポートプレミアムの算出と高速炉導入の効果

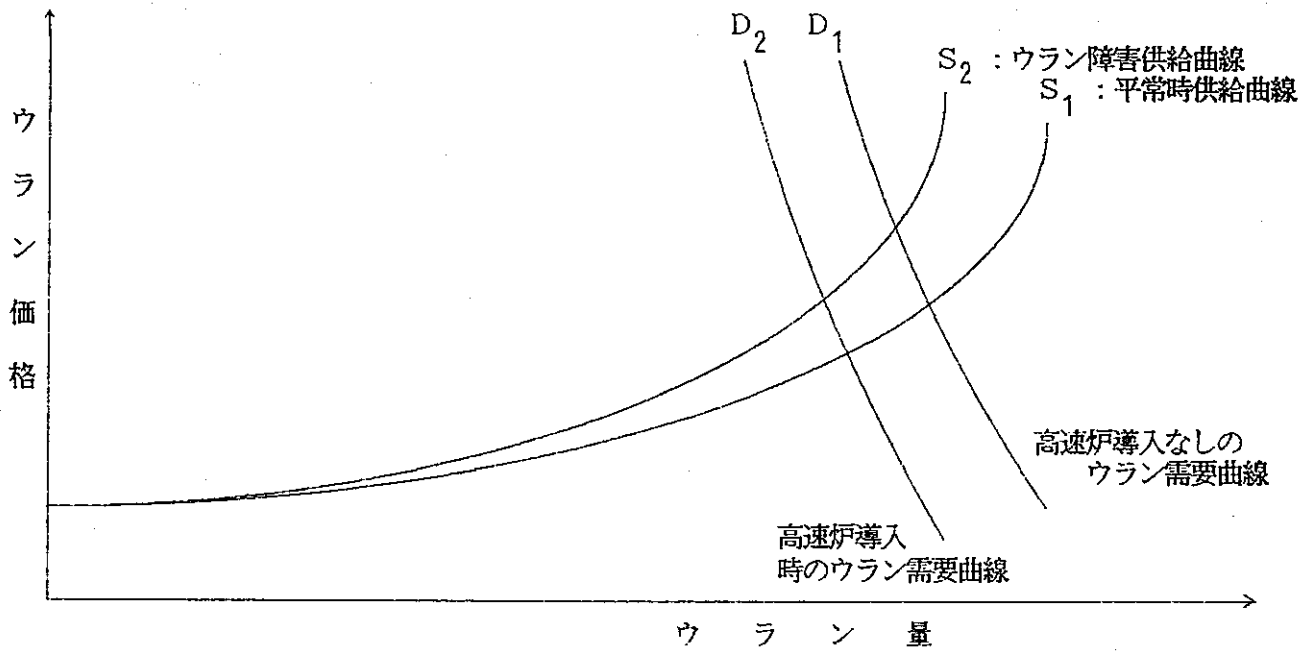


図 1.3-3 ウランのインポートプレミアムの算出概念図

1.3.2 インポートプレミアム分析適用のポイント

図 1.3-2にウランのインポートプレミアムの算出と高速炉導入の効果の検討の流れを示した。インポートプレミアムの算出の部分については、図 1.3-3に示したように、基本的には、1.2節で述べたことと同じである。問題は、インポートプレミアム（高速炉の導入効果）をどのように関連づけるかということである。

(1) 高速炉と軽水炉の発電コストの比較への応用

図 1.3-1に基づいて説明してみる。高速増殖炉を 100万kw1 基導入したことによるベネフィットは、概念的には「量的効果」と「質的効果」に分けられるが、これは各々、ウランのインポートプレミアムの「市場要因」と「安全保障要因」に対応するものである。ウランのインポートプレミアムは高速増殖炉を 1 基導入したことに伴うベネフィット（ドルで表示される）の全体をウランの削減量 1 単位（例えば $1 \text{ lb } \text{U}_3\text{O}_8$ ）当りに換算したものである。これを具体的数字を使って例示しよう。

例えば、高速炉 100万kw1 基導入によって、100トンU/年だけウラン需要が削減され、この時のウランのインポートプレミアムが

$IP = \text{市場要因分} + \text{安全保障要因分} = 80 + 100P_e$ （ドル/ $\text{lb } \text{U}_3\text{O}_8$ ）
であったとする。ここで、ウランの供給障害確率が 0.2であったとすると、

$$IP = 80 + 100 \times 0.2 = 80 + 20 = 100 \text{ (ドル/} \text{lb } \text{U}_3\text{O}_8 \text{)}$$

この時の高速炉を 1 基導入する時のベネフィットの総体は、

$$\begin{aligned} \text{ベネフィット} &= 100 \text{ (トンU)} \times 2.600 \text{ (} \text{lb } \text{U}_3\text{O}_8 \text{/トンU)} \\ &\quad \times 100 \text{ (ドル/} \text{lb } \text{U}_3\text{O}_8 \text{)} = 26 \text{ 百万ドル} \\ &= 33.8 \text{ 億円 (1ドル = 130円換算)} \end{aligned}$$

このベネフィットを、軽水炉との経済性の差との比較ができるように発電コストに換算すると、

$$33.8 \times 10^8 / (8.760 \times 0.88 \times 10^6) = 33.8 / 77.1 = 0.438 \text{ 円/kWh}$$

となる。（稼働率を88%とした時）

この値は、高速増殖炉の経済性のプレミアムを表わしており、直接的な費目をベースに算出された発電コストよりも、この分だけ割引いて考えるべきことを示している。すなわち、通常の高速炉の発電コストが 8円/kWh であったとすると、プレミアム分を勘案すれば、 $8 - 0.438 = 7.562 \text{ 円/kWh}$ が、高速炉の総合的な経済性ということになり、軽水炉との経済性比較はこの数字を使って論議しなければならない。

(2) 高速炉研究開発費用上限への適用

高速炉を 1 基導入すると、年間33.8億円のプレミアムベネフィットが生ずる。

したがって、高速炉の寿命を40年間とすると、単純計算では、 $33.8 \times 40 = 1,352$ 億円のベネフィットとなる。この額を利用して、開発にどれだけのコストをかけるのが合理的かが議論できる。すなわち、高速炉を、例えば30基導入することを前提に、高速炉のR & Dを進めるとした時には、研究開発費用の総額は、期待ベネフィットの総額 $1,352$ 億円 \times 30基 = 約 4兆円を越えないことが経済合理性の点からは望まれる。

この時に、30基でなく60基導入を前提とすれば、倍の 8兆円までかけてよいかとなると、単純にはそうはいえない。1.2節にも述べたように、高速炉の導入基数を大きくし、ウラン削減量を大きくすると、ウラン1単位当りのインポートプレミアムは小さくなっていく。従って1基導入当りの平均ベネフィットは33.8億円よりもかなり、小さくなるからである。ただし、ベネフィットの総額自体は大きくなるから、30基導入シナリオよりも60基導入シナリオの方が許容される研究開発費用は大きくなることは間違いない。

(3) 高速増殖炉導入のタイミング／導入量とインポートプレミアム分析の関係

(1) に述べた軽水炉との経済性の差に関する適用は、ある一時点（例えば2030年）を取り出して分析適用したものであり、定性的な高速増殖炉の総合的経済性については興味ある示唆をうることができる。

しかし、高速増殖炉の導入開発戦略の核心は、何時から、どの程度の量の高速増殖炉を導入し、さらに、毎年何基程度導入すべきか、そして最終的には100%高速増殖炉とすべきなのか、又は軽水炉と高速増殖炉の共存が望ましいのかという点にある。インポートプレミアム分析は、ある一時点でのウラン市場を想定して算出されるので、一見すると上の課題には適用できないと思われるが、実際には、次に述べるような概念的な関連づけをとることができ、重要な役割を演ずることとなる。すなわち、

- ① 高速増殖炉のタイミング……高速増殖炉のタイミングが早い場合（例えば2000年頃）は、その時のウラン市場はウラン資源的にはタイトになっていず、ウランのインポートプレミアムもそれ程高くなっていないと考えられる。したがって高速増殖炉の導入ベネフィットもそれ程大きくはならない。逆に、遅くなれば（例えば2040年頃）、ウランは高価格で市場もタイトとなり、当然、ウランのインポートプレミアムはかなり高くなり、高速炉の導入ベネフィットは大きくなる。直観的な感覚とインポートプレミアム概念が一致していることがわかる。
- ② 導入量……ある一時点における高速増殖炉の導入量が大きいと、ウランのインポートプレミアムは小さくなることは既に述べた。すなわち、高速増殖炉の導入量は、単純に多ければよいというものではなく、その時々のウラン市場の反映であるウランのインポートプレミアムに見合う導入量が自然と示唆されるものと期待できる。

最適な高速増殖炉の導入タイミングと導入量については、第2章で詳細な定量的定式化を示すが、この定式化は上に述べた2つの概念が核となるものである。

(4) 高速増殖炉開発の国際協力とインポートプレミアム分析

インポートプレミアム分析が明らかにできるもうひとつの側面は、高速増殖炉の開発は国際協力の元に進めるのが得策であるという点である。

インポートプレミアム概念は、ウランの国際マーケットを想定して計算されており、したがって、高速増殖炉の導入効果（ウラン削減の量的及び質的效果）は、世界全体に、かつ軽水炉側にもたらされるものである。例えば、先に例示した高速増殖炉30基導入によってもたらされるベネフィット約4兆円は、全世界の軽水

炉所有者にもたらされるものである。日本だけが高速増殖炉30基導入し、欧米が0基の場合でも、日本、アメリカ、ヨーロッパが10基ずつ合計30基分担した場合でも、トータルのベネフィットは約4兆円であり、日本側が享受できるのは、世界における日本の軽水炉シェアに比例する部分であり、シェアが10%とすると日本のベネフィットは、わずか4,000億円相当にとどまる。

このような簡単な分析からだけでも、一国だけの高速増殖炉の開発よりも、国際協力が得策であることがわかる。

ただし、以上のコメントは事態を単純化した議論であり、次に示すような論点はまだ多く残されている。

- ① 先進国が高速増殖炉開発をやることは、軽水炉のみを用いる原子力後進国への間接的なベネフィット供与になる。
- ② ウラン需要国であると同時にウラン供給国であるアメリカなどの評価はまた異なってくる。
- ③ 海外へのウラン資源依存度の高い日本などは、高速増殖炉開発のベネフィットは、単なる世界におけるウラン需要シェアよりも、より大きなベネフィットが期待できる。

2. 高速増殖炉の導入開発戦略へのインポートプレミアム分析適用手法の確立

2.1 21世紀のウラン市場の展望

1章で述べたように、高速増殖炉の導入効果の計量の基礎になるのは、高速増殖炉の導入を考える時点でのウラン市場がどのような需給構造をもっているかである。したがって、現在のウラン市場ではなく、21世紀前半のウラン市場がどうなるかという展望が重要となる。しかも、ウラン市場は厳密に言えば、毎年毎年変化する。少なくとも、5年単位で変化していくものと考えなければならない。この変化がウランのインポートプレミアムの大きさを左右していくからである。21世紀のウラン市場がどうなるかを完全予測することはできない。ウラン市場は多くのアンノウンファクターに依存しているからで、しかも、これから検討しようとしている高速増殖炉の導入開発戦略がどうなるかによっても変化するからである。すなわち、独立した所与の条件としてウラン市場を考えるのではなく、高速増殖炉の導入によってウラン市場の需給バランスが変化し、これによってウランのインポートプレミアムが変化し、さらにインポートプレミアムの変化に対応して高速増殖炉の導入開発戦略が変化するという相互依存の関係があることが、インポートプレミアム分析適用手法のポイントとなる。

以上のことを念頭において、21世紀のウラン市場をインポートプレミアム分析の観点からどのように把えていけばよいかを述べる。

2.1.1 ウラン需要曲線

(1) ウラン需要量

21世紀の世界のウラン需要がどうなるかについては、OECDNEAとIAEAの共同作業の結果が「Yellow Book 1987」に報告されている。表 2.1-1に原子力発電容量が、図 2.1-1と 2にウラン需要（年間と累積）が示されている。低ケースの場合（本研究では、以下、低ケースのみを引用することとする）、2000年発電容量が497GWe、2025年が875GWeと想定している。対するウラン需要量は、「LWR」ケースの場合、2025年で年間約14万トンUの需要となり、累積では約400万トンUとなっている。このケースの場合、図 2.1-2から現在知られている50ドル/1bU₃O₈のウラン資源を全て使い切ってしまうことになることがわかる。図 2.1-1には、高燃焼変化やプルサーマル、高速炉を投入した時のウラン需要が示されている。

表 2.1-1

INSTALLED NUCLEAR CAPACITY

		Net GWe					
Year (end)		Short Term			Long Term		
		1985	1990	1995	2000	2010	2025
OECD Europe + Pacific	short term a)	117	156	188	233		
	low b)			186	215	270	325
	high b)			186	257	440	760
OECD-America	short term	90	123	132	132		
	low			133	150	190	230
	high			133	172	260	390
OECD	short term	207	279	320	365		
	low			319	365	460	555 c)
	high			319	429	700	1 150 c)
Developing WOCA	short term	12	18	22	32		
	low			27	36	63	120
	high			39	71	170	405
WOCA	short term	219	297	342	397		
	low			346	401	523	675 d)
	high			357	500	870	1 555 d)
CPE	short term	35	60	85	111		
	low			73	96	142	200
	high			89	146	295	605
World	short term	253	357	427	508		
	low			419	497	665	875
	high			447	646	1 165	2 160

a. Short term refers to short-term data from (5), (8) and (9), see Table 4.

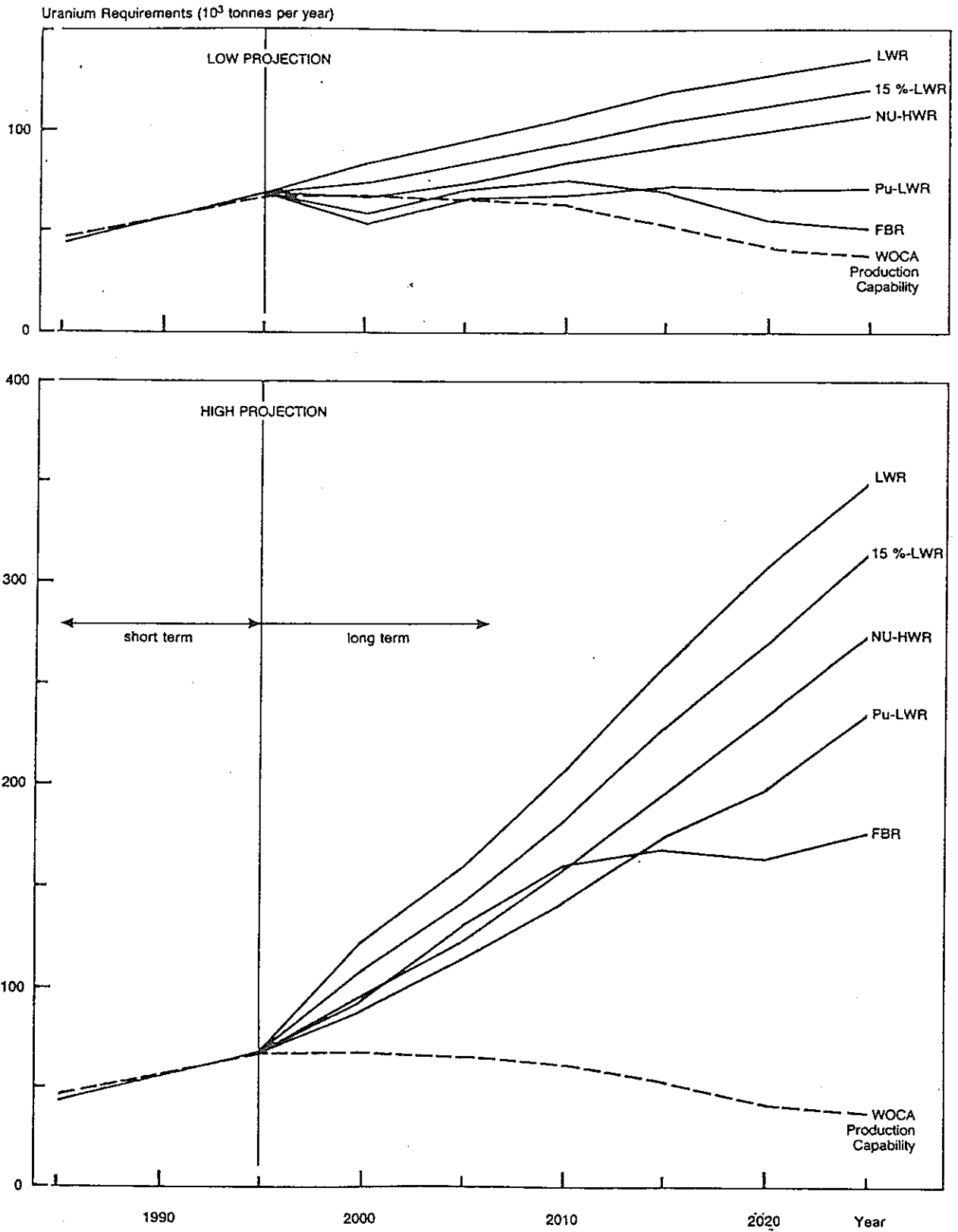
b. Low and high refer to data derived from low and high nuclear electricity projections.

c. Yellow Book-2 ranged from 915 to 1 914 GWe for OECD.

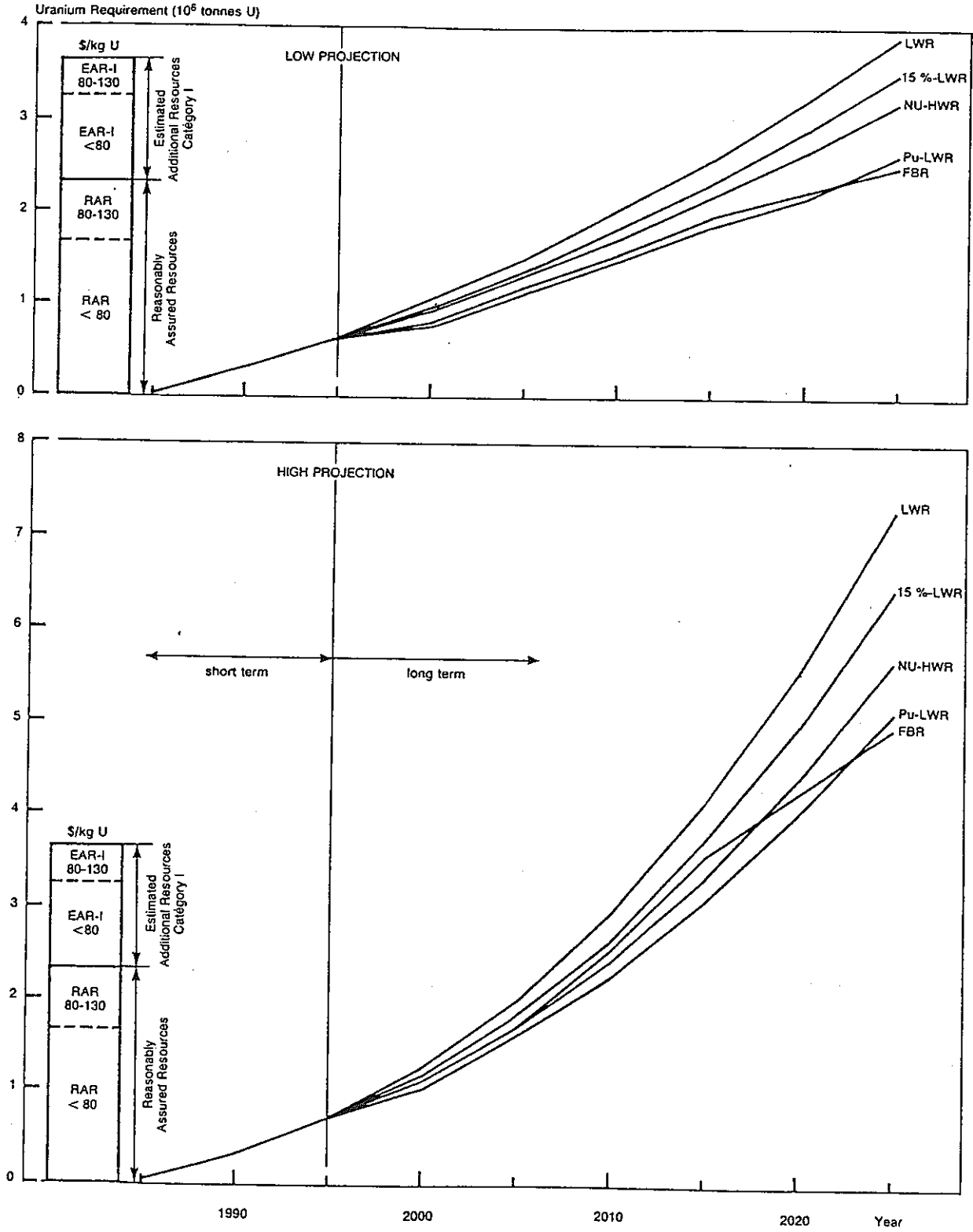
d. Yellow Book-2 ranged from 1 311 to 2 794 GWe for WOCA.

Totals may not equal sum of components due to independent rounding.

2.1-1 ANNUAL NATURAL URANIUM REQUIREMENTS FOR THE WORLD BY REACTOR STRATEGY



2.1-2 CUMULATIVE NATURAL URANIUM REQUIREMENTS FOR THE WORLD BY REACTOR STRATEGY



(2) ウラン需要曲線

需要曲線が価格に対して、どれだけ弾力的であるかによって、インポートプレミアムの安全保障要因は変化する。弾力的であれば、安全保障要因は小さくなる。

一般には、天然ウラン需要は、原子力発電所の運転には不可欠であるため、価格に対して極めて非弾力的であると考えられている。

一方、一般の金属の需要は、かなり価格に対して弾力的であり、特に長期的に見た場合はそうであると考えられている。

確かに、炉寿命全期間を通じて必要となる天然ウランはほぼ決まってくるが、天然ウラン市場が成熟し、ユーザー（電力事業）が天然ウラン市場の変動に慣れてくると、適当なウラン在庫を抱えることにより、天然ウランの購入時期と量を市場動向を見て決めることができるようになってきた。図 2.1-3にNukem社のウラン市場取引データをベースに作成したスポット価格の変動とウラン需要の関係が示されている。この図から、ウランスポット価格が上昇するとウラン取引量（需要量）は減少し、逆にウランスポット価格が低下すると取引量は拡大するという関係を読み取ることができる。従って、少なくとも短期のウラン需要曲線はスポット価格に対して、かなり弾力的であると言える。

しかし、中長期的に見ればウラン需要はウラン必要量に合致するものであり、価格弾力性はかなり低くなってくることに留意しなければならない。

天然ウラン需要の価格弾力性に関して最近問題とされているのは、ドルの価値が大幅に変化するようになり、この為替レートの変動が天然ウランの需要にどのような影響を与えているかということである。すなわち、天然ウランの価格がドル建てで15ドル/ポンド U_3O_8 で変化がないとしてもドルに対して強くなった通貨（例えば円）を持つ国にとっては実質ウラン価格が大幅に低下したことになり短期のウラン需要は増加すると考えられるからである。

1985年のウラン協会の年次大会での報告によれば、ドルの価値が10%低下すると、ウランのスポットマーケット価格は約7.5%上昇するとされている。例えば、世界通貨市場で平均して、ドルが20%ドル安になれば、スポット価格は15ドルから17.5ドルに上昇するという計算になる。

日本の場合、ドルの価値は、ここ2年の間に約37%ドル安となった。しかし、世界の通貨全体の中ではドルはそれ程安くなっていないため、ウランのスポット価格の上昇にすぐ結びつくことはない。

これまでの市場からすると、天然ウラン需要の価格弾力性について次の2つのケースが設定できる。

<ケース1> 価格弾力性 = 0 …… 需要曲線は垂直の直線となる

<ケース2> 価格弾力性 = 2 …… 価格が10%上下すると需要は20%変化する

ケース1は、中長期の天然ウラン必要量の反映である。ケース2は図1.2-16に示された短期のウラン需要曲線のビヘイビアに対応させたものである。

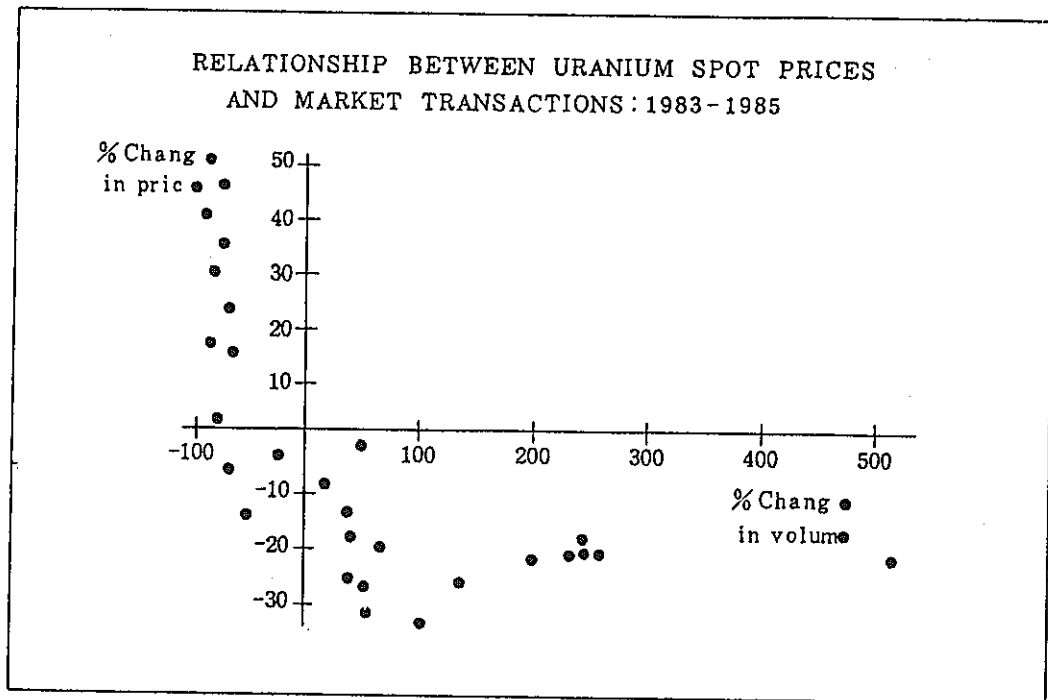


図2. 1-3 Relationship between uranium spot prices and volume of market transactions 1983 to 1985 (percentage changes over corresponding month of previous year)
Source : Nukem

それでは、21世紀を想定した場合に、ウラン需要曲線の価格弾力性についてはどのように考えることができるであろうか。結論的にいえば、価格弾力性は大きくなる方向にある。その理由として、

- ① 21世紀のウラン市場は、過去のウラン市場と異なり、ほとんど、通常の金属と変わらない市況商品となっていると思われる。
- ② ウラン節約技術としての、高燃焼変化、プルトニウム回収技術（再処理）、プルトニウム利用技術（プルサーマル、HCR、高速炉）が確立していると考えられる。
- ③ 燃料サイクル事業が確立し、サイクルに大量の流通在庫が存在していると考えられる。

以上のことから、本研究ではウラン需要曲線の価格弾力性として〈ケース2〉を基準とすることにする。

2.1.2 ウラン供給曲線

(1) 2000年までのウラン供給曲線

天然ウラン供給曲線についても、最近種々のデータが分析公表されている。

まず最初に、RTZ（リオ・ティント・ジンク社）の分析例を図 2.1-4に紹介する。この図は、ウラン、銅、鉛、亜鉛、ニッケルの5つの金属資源の供給コスト曲線を1983年～1984年のスポットマーケット価格を基準にして作成したものである。

ウランとニッケルの生産コストの曲線は非常に似たものであることが分る。鉛だけが異常であり、大半の供給業者がコスト割れの状態であり、かなりの供給過剰になっていることが分る。ウランの場合は、スポット価格で生産コストをカバーできるのは約半数にすぎない。

インポートプレミアム分析における市場力要因分は、供給コスト曲線の傾きでほぼ決まるので、試算してみると、

ウラン市場力要因分=0.28（スポット価格を1.0とした時）

したがって、スポット価格を20ドル/ポンド U_3O_8 とすると、ウランの市場力要因分は、わずか5.6ドル/ポンド U_3O_8 ということになる。

天然ウランの供給コスト曲線については、NACが「Future Development of The Uranium Industry」（1985.9）の中で詳細なデータを示している。これを表 2.1-2と図 2.1-5に示した。

また、図 2.1-7には、NUEXCOによる2000年までの供給コストデータを示した。この図から、2000年頃にはわずか1%程度であるが50ドル/1b U_3O_8 （130ドル/kgU）のコストのウランが供給されると予想されている。このことは、2000年頃のウラン市場価格は50ドルを越えることが予想されるということである。

(2) 21世紀のウラン供給曲線

21世紀のウラン供給曲線はどうか。まずウラン資源の状況を見て見ると、Red Book 1988によれば、表 2.1-3に示すような資源が確認及び推定されているが、これらは、先に見たように2025年までに使い切られる。この他に次のものが予想されている。

EAR-II		SPECULATIVE	
\$ 80/kg U 以下	\$ 80 ~ 130/kg U	\$ 130/kg U 以下	\$ 260/kg U 以下
663千トン	536千トン	3,000千トン	~ 3,200千トン
		4,300千トン	

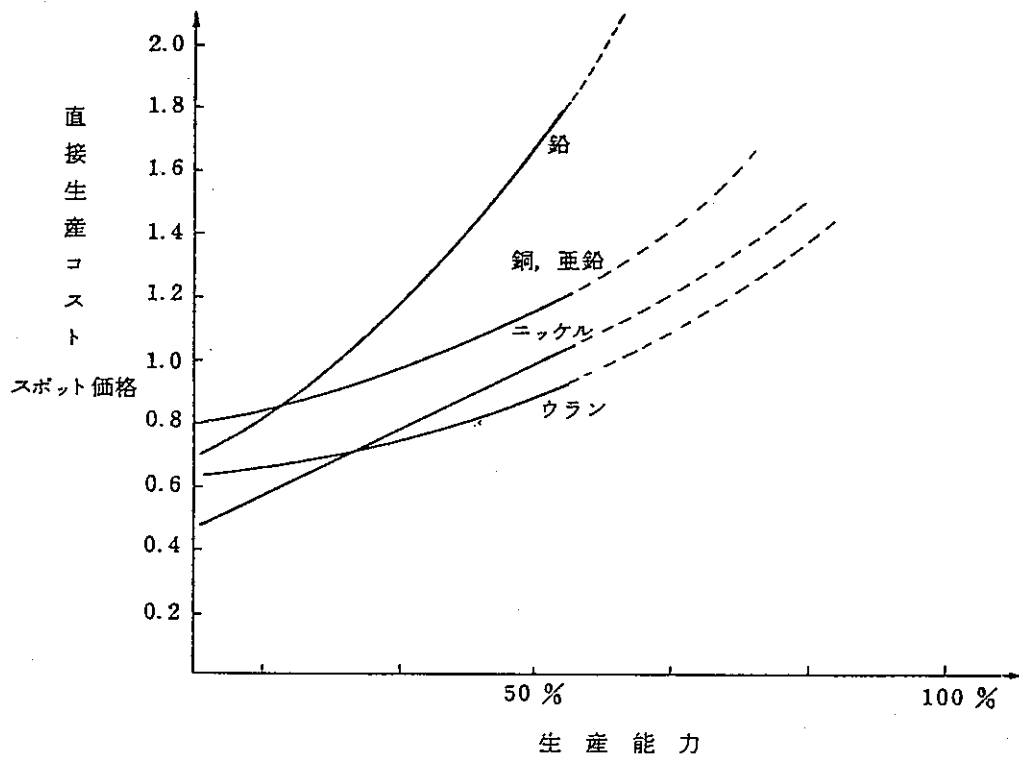


図2. 1-4 直接生産コスト曲線

(出所) 1984年ウラン協会シンポジウム

表2. 1-2 カナダ・南アフリカ・オーストラリア・アメリカのU₃O₈計画生産量 [s. t. U₃O₈/年]
 の将来限界費用 [1985US\$/lbU₃O₈/年]

西暦 限界費用	1985	1990	1995	2000	2005
5	8,010	6,030	6,030	2,045	0
10	11,340	9,360	8,584	2,045	0
15	24,159	24,669	21,643	13,745	11,700
20	28,837	34,135	28,591	17,633	15,120
25	31,328	40,052	42,373	30,836	26,568
30	35,625	43,087	49,274	36,697	31,248
35	43,651	50,264	57,567	44,763	35,117
40	44,046	50,952	58,255	53,594	42,778
45	45,812	54,150	61,342	58,855	45,621
50	45,972	54,466	61,612	61,237	52,815
55	46,682	55,117	61,882	61,619	57,068
60	47,149	"	"	"	58,938
65	47,284	"	"	"	"
70	"	55,168	61,933	61,670	"
75	"	"	62,104	61,841	59,109
80	"	"	62,254	61,991	59,708
85	47,432	"	"	"	"
90	"	"	"	"	"
95	"	"	"	"	"
100	"	"	"	"	"

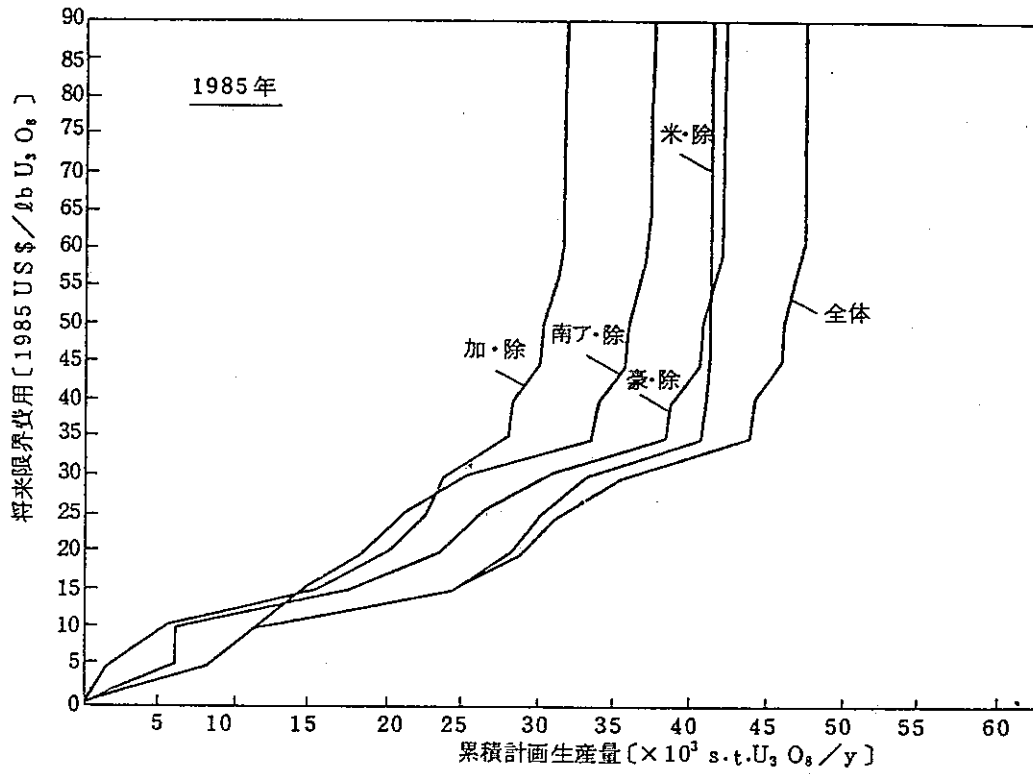


図2. 1-5 1985年におけるウラン供給曲線

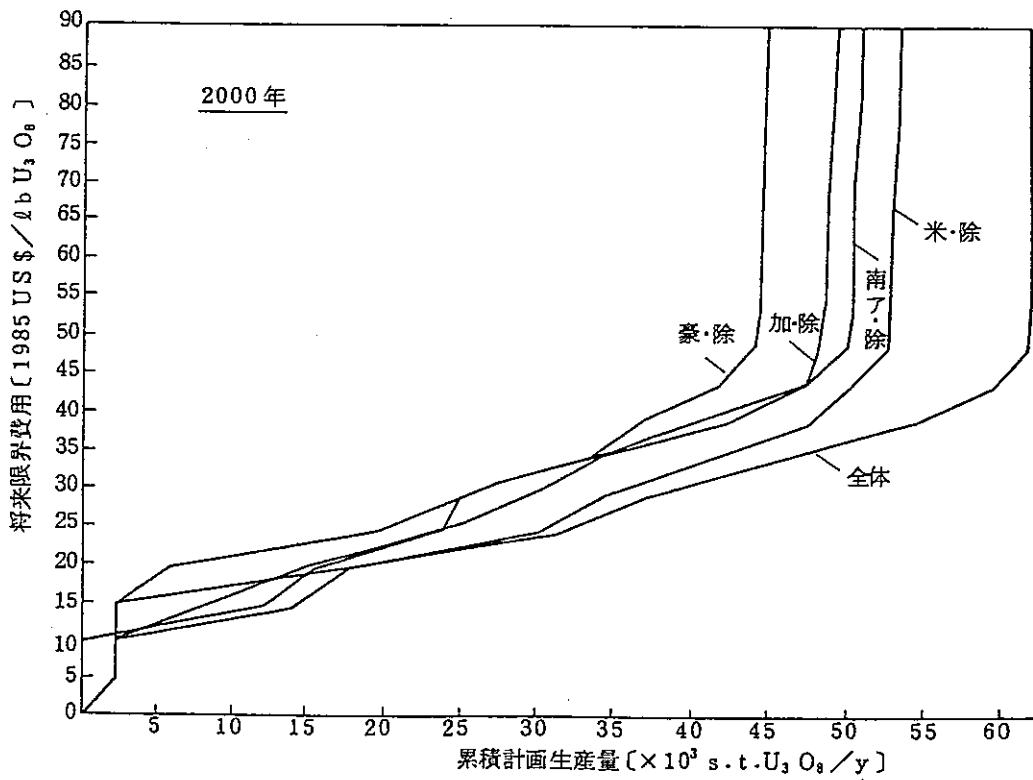
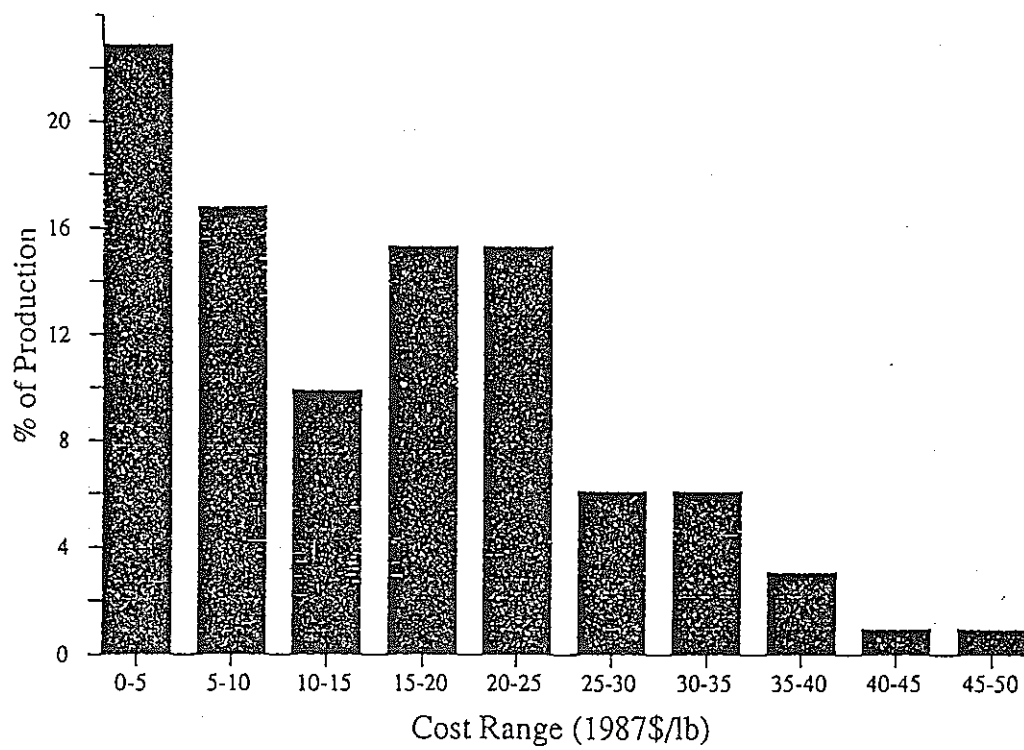


図2. 1-6 2000年におけるウラン供給曲線



▣ 2. 1-7 *Projected distribution of forward costs*

一方、表 2.1-4に示すように、2025年での年間需要が 139千トンであるとすれば、埋蔵量は少なくとも40倍、通常は60倍程度は欲しい。なぜならば、原子炉寿命は約40年であり、2025年に稼働中の原子炉の寿命期間内の需要は、R A R P H E A Rとして埋蔵の裏づけがなければ、安定した運転は行えないからである。すると、2025年での埋蔵量は約 8,340千トン程度は必要となる。この量は上に示したE A R - IIとS P E C U L A T i V Eを合計した値 (7,400~ 8,699千トン) にほぼ相当する。したがって、2025年にはコストが 100ドル/1bU₃O₈ 以上のウランも含めて供給しなければならないことが想定される。この想定は、2000年での50ドル/1bU₃O₈ の想定と、自然につながるものとする。

したがって、ウラン供給曲線は2000年、2025年、2050年と時間が経過するにつれて、図 2.1-8 のようにシフトしていくものと考えられることができる。

表2. 1-4

WOCA KNOWN URANIUM RESOURCES

10³ tonnes U

	Reasonably Assured Resources		Estimated Additional Resources Category I		Total
	\$80/kg U	\$80-130/kg U	\$80/kg U	\$80-130/kg U	
OECD Europe and Pacific	571	153	298	218	1 240
OECD America	286	326	105	92	809
OECD Total	857	479	403	310	2 049
Developing WOCA	812	167	521	96	1 597
Total WOCA (rounded)	1 669	646	925	407	3 646

Source: (15).

表2. 1-5 ウラン資源量の推移

(単位: 千トン)

年	30 ^F _N / 1bU ₃ O ₈ 以下 (*)		30~50 ^F _N / 1bU ₃ O ₈ (*)		合 計	需 要	合計 / 需要
	R A R	E A R	R A R	E A R			
1973	866	916	680	632	3,094	16	193倍
1977	1,650	1,510	540	590	4,290	24	179倍
1979	1,850	1,480	740	970	5,040	28	180倍
1981	1,747	1,605	546	1,115	5,013	31	162倍
1985	1,609	1,500	641	930	4,680	36	130倍
(**) 2025					8,340	139	60倍

(*) 1973年においては、10ドル以下、10~15ドルという区分であった。

(**) Yellow Book 1987

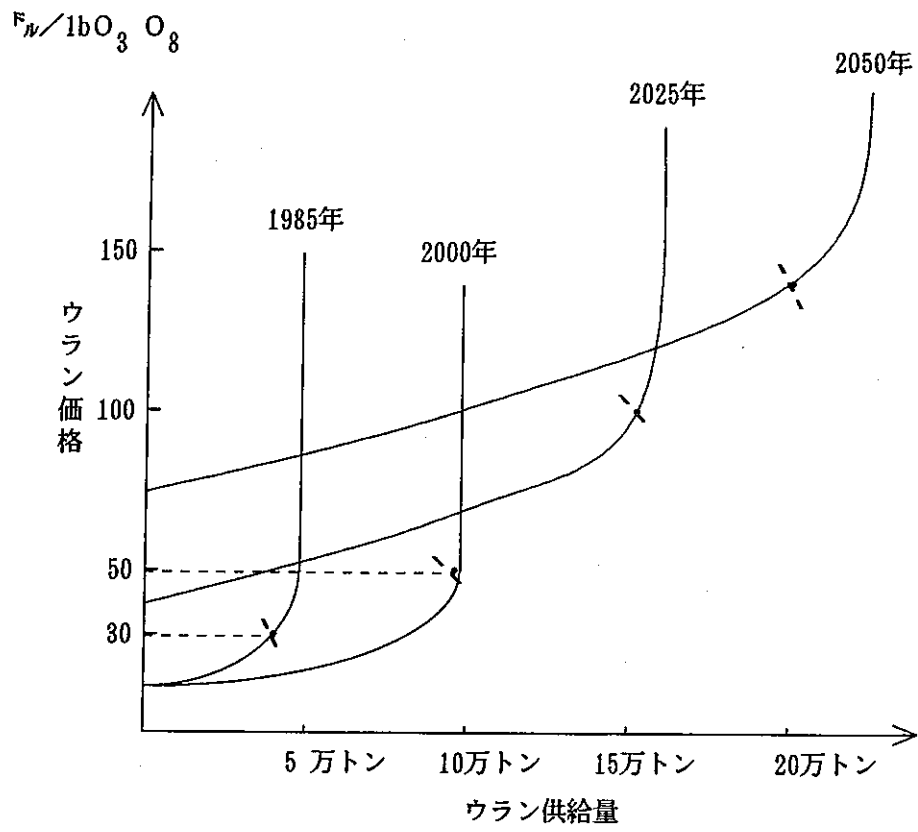


図 2.1-8 ウラン供給曲線のシフトのイメージ

(4) 高速増殖炉導入とウラン供給曲線のシフト

高速増殖炉を導入すると、ウラン需要が減少、従ってウラン需要曲線が左にシフトすることは当然であるが、ウラン供給曲線も中長期的にシフトさせることになることに注意すべきである。すなわち、高速増殖炉の導入が進むと、軽水炉によるウラン需要が減少し、ウラン供給曲線は右側にシフトする。

従って、ウラン需要曲線が同じとしても、ウラン価格は低下し、かつ、インポートプレミアムも小さくなる。すなわち、高速増殖炉の導入が進めば進む程、導入のドライブフォースの大きさを表わすインポートプレミアムは小さくなっていく。このメカニズムが働くことにより、高速増殖炉の導入ペースには、最適なパスが存在することになると考えられる。

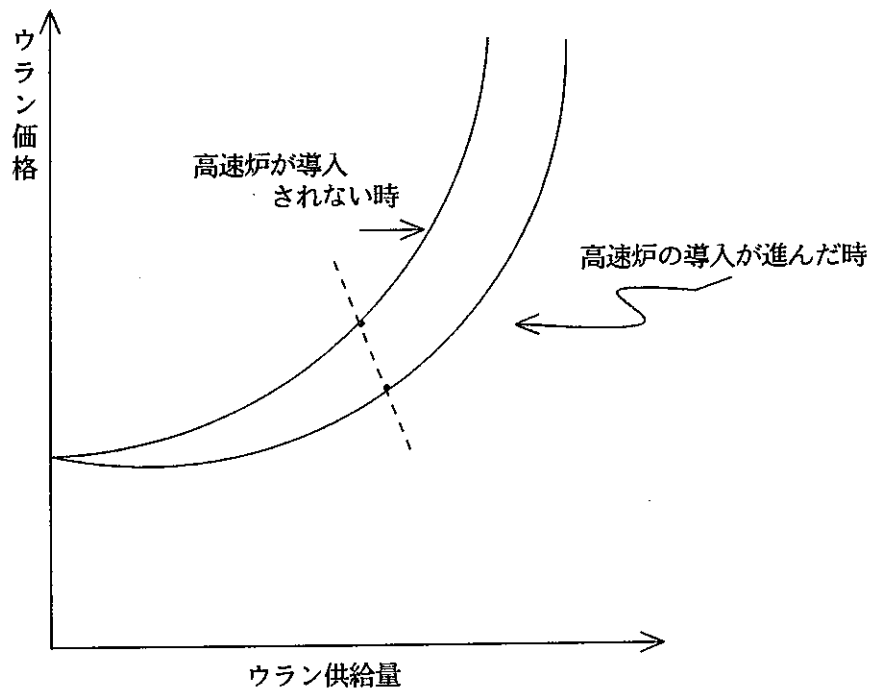


図 2.1-9 高速炉導入がウラン供給曲線に与える効果

2.1.3 ウラン供給障害の可能性

これまでの経験では、ウラン供給障害をもたらす可能性は広く論議されてきた。

- ① 核不拡散及び戦略物質としての扱い
- ② 南アフリカ、ナミビア等の政治的不安定
- ③ 自国資源の保護、高付加価値化
- ④ 自国の原子力産業の保護・育成
- ⑤ 国際カルテル

現在においても、アメリカの時刻ウラン産業の保護に絡んだ政策の動向が注目されている。

ウラン資源の状況から見ると、現在の供給国であるカナダ、アメリカ、オーストラリア、南アフリカの4ヶ国は、21世紀においても有力なウラン供給国であると考えられる。ただし、21世紀には、オーストラリアのシェアが大きくなる。

南アフリカの供給不安定性は現在から2000年までがピークであり、21世紀には何らかの政治的安定が得られている可能性もあるが本研究では、過去及び現在想定されるウラン供給障害の可能性が引き続き、21世紀にも残されているものと仮定する。

2.2 インポートプレミアムに基づく高速増殖炉導入開発戦略の安定化

2.2.1 ある一時点での高速増殖炉導入時のベネフィットとコスト

(1) 1基導入時

21世紀前半のある時点で、100万kWクラスの高速増殖炉を1基導入した時の、炉寿命全体にわたるベネフィットとコストがどうなるかを考える。ここで重要なことは、例えば、2020年に高速増殖炉を1基導入した時のベネフィット（インポートプレミアムに比例する）は、2020年だけの値でなく、炉寿命全体で考えなければならないことである。したがって、インポートプレミアムの算出は、2020年時点の値だけでなく、炉寿命全体にわたって、例えば2060年までのインポートプレミアムを算出しておかなければならない。そして、このインポートプレミアムが、ウラン市場の変化に対応して大きく変わっていくことがポイントとなる。

次のような変数を定義する。

t : 高速増殖炉建設（年）

t : 時間パラメータ（年） $t = t \sim t + L$

L : 炉寿命（年）

$IP(t)$: 時間 t でのインポートプレミアム（ドル/ $1bU_3O_8$ ）

$CF(t)$: 高速炉の発電コスト（円/kWh）

- $C_L(t)$: 軽水炉の発電コスト (円/kWh)
 $b(t)$: 高速増殖炉1基導入に伴うベネフィット (億円)
 r : 現在価値換算率
 k : k_1, k_2, \dots , 各種単位換算パラメータ

インポートプレミアムに直接対応するベネフィットは次のようになる。

$$b(t) = k_1 \int_t^{t+L} IP(t') \exp(-rt') dt' \dots (1)$$

この k_1 は次のように計算される。

ΔD : 高速増殖炉1基導入に伴う年間のウラン節約量 (トンU)

α : ドル/円 換算レート (~ 130円/ドル)

$$k_1 = \Delta D \times 1,000 \times 2.6 \times \alpha \div 10^8 = 0.00338 \cdot \Delta D$$

軽水炉に代えて、高速増殖炉1基を導入することの総合的な判断は、次の式が正であるか負であるかによる。

$$k_2 (C_L(t) - C_F(t)) + b(t) \dots (2)$$

すなわち、 $C_F > C_L$ で、高速炉が不利な場合でも、その分をインポートプレミアムに基づくベネフィット $b(t)$ が上廻れば、高速増殖炉の導入が有利と判断できる。 $b(t) \geq 0$ であるから、もし $C_F < C_L$ であれば(2)式は当然、正の値となり、高速増殖炉の導入が有利となる。したがって、インポートプレミアム分析が重要な役割を果たすのは、通常高速増殖炉の発電コストが軽水炉の発電コストよりも高くなっている過渡期の段階であり、 $C_F < C_L$ である場合には、高速炉の導入はプルトニウムの利用可能量によってのみ制約されることになる。本研究では、 $C_F > C_L$ の場合を想定する。

高速増殖炉が軽水炉とブレイクイーブンになるのは、

$$b(t) = k_2 (C_F(t) - C_L(t)) \dots (3)$$

となる時である。

ここで k_2 は次のように計算される。

LF : 稼働率 (-)

$$k_2 = 8.760 \times LF \times 106 \times L \times 10^8 = 87.6 \times LF \times L$$

($L=40$ 年、 $LF=0.8$ とすると $k_2 = 2,803$)

(2) 数基導入した場合

1基だけでなく、数基導入した場合、導入基数が特に大きくないとした時には、ベネフィットは導入基数に比例すると考えてよい。したがって、

$$b(t, \Delta g) = k_1 \Delta g(t) \int_t^{t+L} IP(t', \Delta g) \exp(-rt') dt' \dots (4)$$

ここで、注意しなければならないのは、IP自体は、 Δg によって変化することである。一般には、IPは Δg の単調減少関数となる。この場合のブレイクイープン式は(3)式でなく次の(5)式に変更する必要がある。

$$b(t, \Delta g) = k_2 \Delta g(t) (C_F(t) - C_L(t)) \dots (5)$$

(3) 初期導入時期と導入量決定への応用

以上の定式化を用いて、高速増殖炉の初期導入時期と導入量の決定分析がどのように行えるか、簡単な数値例を用いて説明する。

次のような前提を置く。

- ① 導入可能時期 t は2020年、2030年、2040年の3点から選ぶ
- ② 導入量 Δg は10基、20基、30基のどれかを選択する。
- ③ インポートプレミアムは次のようになったと仮定する。

(ドル/1bU₃O₈)

Δg 時期	2020年	2030年	2040年
10基	100	150	200
20基	80	130	180
30基	50	100	120

- ④ 軽水炉と高速炉の発電コストを各々 8円/kWh、8.8円/kWh とする。
- ⑤ 現在価値換算率は簡単のため0とする。
- ⑥ 稼働率80%、ドル円換算率 130円、炉寿命40年とする
- ⑦ 高速増殖炉1基導入によるウラン節約量は年間 110トンとする。

以上の前提でベネフィットを計算すると次のようになる。

(億円)

導入量 導入時期	2020年	2030年	2040年
10基	14.872	22.308	29.744
20基	23.795	38.792	53.539
30基	22.308	44.616	53.539

一方、1基導入のコストは、

$$k_2 (C_F - C_L) = 2,803 \times 0.8 = 2,242 \text{億円であるので、}$$

	2020年	2030年	2040年
10基	22,420	22,420	22,420
20基	44,840	44,840	44,840
30基	67,260	67,260	67,260

(ベネフィット) - (コスト) を計算すると、

導入量 導入時期	2020年	2030年	2040年
10基	- 7,548	- 112	7,324
20基	- 21,045	- 6,048	8,699
30基	- 44,952	- 22,644	- 13,721

この表から、高速増殖炉の導入メリットができるのは、2040年からで、10基、又は20基の場合であることがわかる。2040年でも30基導入するとベネフィットよりもコストが大きくなり、大量導入は合理的でないという結論が得られる。

以上、簡単な数値例であったが、インポートプレミアム分析が高速増殖炉の導入時期の決定に有効であることがわかる。

次にもう1例として、軽水炉と高速炉の経済性の差が、上例の0.8円でなく、0.6円であればどうなったであろうか。

(ベネフィット) - (コスト) の表は次のように修正される。

	2020年	2030年	2040年
10基	- 1,948	5,488	12,924
20基	- 9,845	5,152	19,899
30基	- 28,152	- 5,844	3,079

この場合には、高速炉の経済性が0.2円/kWhだけ改善されるだけで、高速増殖炉の導入可能時期は2040年から2030年に早まることがわかる。

2.2.2 一般式の定式化

(1) 定式化

2.2.1 では、ある一時点での高速増殖炉導入のベネフィット（インポートプレミアム）を用いた導入戦略検討の式を導いたが、これを一般化し、ある期間内（例えば、2020年～2100年）で、高速増殖炉をどのようなタイミングとベースで導入していくべきかの検討の一般式を定式化しよう。

新たに、次のような変数を定義する。

t_0 : 期間開始年

T : 期間終了年

$g(t)$: t における稼働中の高速増殖炉基数 (Gwe)

$G(t)$: t における総発電容量

一般式導出の考え方は、2.2.1 で導出した各時点でのベネフィットとコストの総和をとり、この総和が最大となるような高速増殖炉の導入量 $\Delta g(t)$ を決定するという最適化問題としての定式化である。ここでポイントとなるのは、各時点でのローカルな最適解の合成では、全体としての最適解は作れないという点である。すなわち、 t_2 時点での最適解は t_1 時点での高速炉の導入量がどうであったかによって変化するのである。その理由は、既に述べたように、 t_2 時点でのインポートプレミアムは、実は $IP(t_2, \Delta g(t_2))$ でなく $IP(t_2, g(t_2), \Delta g(t_2))$ となり、 t_2 までに高速炉がどのように導入されてきたか（すなわち $g(t_2)$ ）によって変化する。何となれば、 $g(t_2)$ の大きさにより、 t_2 時点でのウラン市場、従って、インポートプレミアムが大きく変化するからである。一般に、 $g(t_2) = 0$ であれば、インポートプレミアムは大きくない、 $g(t_2)$ が大きければ、インポートプレミアムは小さくなるからである。

結局、一般式は次のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{t_0}^T b(t, g(t), \Delta g(t)) \exp(-rt) dt \\ \quad + k_2 \int_{t_0}^t (C_L(t) - C_F(t)) \Delta g(t) \exp(-rt) \cdot dt \rightarrow \text{最大値} \dots (6) \\ \\ b(t, g(t), \Delta g(t)) = k_1 \Delta g(t) \cdot \int_t^{t+L} IP(t', g(t'), \Delta g(t')) \\ \quad \cdot \exp(-rt') dt' \dots (7) \\ \\ g(t) = \int_{t_0}^t \Delta g(t') dt' \dots (8) \\ \\ 0 \leq g(t) \leq G(t) \dots (9) \end{array} \right.$$

(2) 学習効果の取り込み方

ここで、 $C_L(t)$ は与えられるものと考えることとする。 $C_F(t)$ についても与えられるものとした取扱い方もできるが、高速炉の導入初期における建設費の学習効果を考慮し、より一般的な取扱い方もできる。例えば、表2.2-1に示すように、高速炉の建設費は建設量が増加するに従って安くなっていくものと考えられている。そうすると、

$$C_F(t) = C_F(t_0) (1 - \alpha)^X \dots\dots\dots (10)$$

$$X = \text{Log } g(t) / \text{Log } 2 \dots\dots\dots (11)$$

α = Learning Factor

とにおいて、(6) に代入することができる。

表 2.2-1 Learning Effect による建設費の低減 (Learning Curve)

基 \ Learning Factor	5%	10%	15%
1	1.0	1.00	1.00
2	0.95	0.90	0.85
3	0.92	0.85	0.77
4	0.90	0.81	0.72
5	0.89	0.78	0.69
10	0.84	0.70	0.58
15	0.82	0.66	0.53
20	0.80	0.63	0.50

(注) Learning Curveは $C_n = (1 - \alpha)^X$

C_n : n 基目の建設

C_0 : 1 基目の建設

α : Learning Factor

X : $X = \text{Log } 2n = \text{Log } n / \text{Log } 2$

(3) 解法について

上に定式化した最適化問題は、制御変数で Δg で、評価関数が(6)式、(7)は定義式、(9)は制約条件と考えることができる。解法としては、様々なものが考えられるが、問題の基本性格が、

- ① 多段階意志決定問題である
- ② 重要なIPが解析的に表現できない

という点にあるため、DP(ダイナミックプログラミング)問題として捉えるのが一番望ましい。変数が Δg のみであるので、解法は比較的やさしいが、計算コードを開発する必要がある。

(4) インポートプレミアムの計算

具体的な解法においては、 $IP(t', g(t'))$ をどう計算するかということが一番のポイントとなる。各変数の変化幅は世界全体を対象としているので、おおよそ、

$$2020 \leq t' \leq 2100$$

$$0 \leq g(t') \leq 1,000$$

$$0 \leq \Delta g(t') \leq 100$$

の範囲内にある。したがって、各変数を連続的に変化させるのは極めて困難となる。具体的な解法としてDPを適用することも考慮すると、上の3変数については、次のような離散化をベースにIPを計算するのが望ましい。

$$t' = 2020, 2030, \dots, 2100 \text{ (10年間隔)}$$

$$g(t') = 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, \dots, 1,000$$

$$\Delta g(t') = 0, 25, 50, 75, 100 \text{ (25基間隔)}$$

この程度の荒い離散化を行うと、インポートプレミアムとして予め、 $9 \times 13 \times 5 = 585$ 個の数値を求めておけばよいことになる。この程度であれば、計算コードで計算するのは、それ程困難なことではない。

$g(t') = 250$ の時のインポートプレミアムは、次のような補完によって求めればよい。

$$IP(2020, 250, 50) = \{ IP(2020, 200, 50) + IP(2020, 300, 50) \} / 2$$

3. 高速増殖炉導入開発戦略へのインポートプレミアム分析手法適用試算

3.1 手法適用試算

2章で確立した手法を現実のパラメータに沿って適用しようとするると各種の計算コードとDPアルゴリズム適用コードを開発しなければならない。そこで本章では、極めて簡単な例を用いて、インポートプレミアム概念による分析が高速増殖炉導入開発戦略の検討に役立つことを説明する。

(1) モデルの簡単化

まず、2.2 で示した一般式(6)～(9)を次のように簡単化および離散化する。

- ① 現在価値換算率 $r = 0$ とする
- ② 高速増殖炉建設費の学習効果は考慮しない
- ③ 期間は次の3点のみで考える
2020年、2030年、2040年
- ④ Δg は、いずれの点においても、次の3つのうちの一つを選ぶものとする。
0基、10基、20基
- ⑤ インポートプレミアムは、2020年、2030年、2040年の他に、炉寿命40年を考慮して2050年、2060年、2070年、2080年における値も計算する。
- ⑥ g の取りうる値は、 Δg の組み合わせから考えて、次の値で十分である。
0, 10, 20, 30, 40, 50, 60
- ⑦ 高速炉と軽水炉の経済性の差は0.8 円/KWH とした。その他のパラメータは2.2.1 節と同じとした。

(2) インポートプレミアムの想定

インポートプレミアム $IP(t, g(t), \Delta g)$ については、表3-1 に2020年～2080年の想定値を示した。ここで想定した数値は、21世紀のウラン市場を想定し、ウランが潤渇するにしたがって、インポートプレミアムが高くなるようにした。但し、2050年以降は簡単なためにインポートプレミアムは同一と仮定した。

表3-2 には、インポートプレミアムから算出したベネフィットを2030年、2040年、2050年について示した。

表 3-1 インポートプレミアムの想定値

(1) インポートプレミアム a t (2020年)

($F_{it} / 1 b U_3 O_8$)

g	Δg	0 基	1 0 基	2 0 基
	0 基	0	100	80
	1 0 基	0	95	75
	2 0 基	0	90	70
	3 0 基	0	—	—
	4 0 基	0	—	—
	5 0 基	0	—	—
	6 0 基	0	—	—

(2) インポートプレミアム a t (2030年)

($F_N / 1 b U_3 O_8$)

g	Δg	0 基	1 0 基	2 0 基
	0 基	0	150	130
	1 0 基	0	145	125
	2 0 基	0	140	120
	3 0 基	0	135	115
	4 0 基	0	130	110
	5 0 基	0	-	-
	6 0 基	0	-	-

(3) インポートプレミアム a t (2040年)

($\text{F}_L / 1 \text{ b U}_3 \text{ O}_8$)

g	Δg	0 基	1 0 基	2 0 基
	0 基	0	200	180
	1 0 基	0	180	160
	2 0 基	0	170	150
	3 0 基	0	160	140
	4 0 基	0	150	130
	5 0 基	0	140	120
	6 0 基	0	130	110

(4) インポートプレミアム a t (2050年)

($F_{\nu} / 1 b U_3 O_8$)

g	Δg	0 基	1 0 基	2 0 基
	0 基	0	250	240
	1 0 基	0	230	220
	2 0 基	0	210	200
	3 0 基	0	190	180
	4 0 基	0	170	160
	5 0 基	0	150	140
	6 0 基	0	140	120

(5) インポートプレミアム a t (2060年)

($\text{F}_\nu / 1 \text{ b U}_3 \text{ O}_8$)

g	Δg	0 基	1 0 基	2 0 基
	0 基	0	250	240
	1 0 基	0	230	220
	2 0 基	0	210	200
	3 0 基	0	190	180
	4 0 基	0	170	160
	5 0 基	0	150	140
	6 0 基	0	140	120

(6) インポートプレミアム a t (2070年)

($\text{F}_\mu / 1 \text{ b U}_3 \text{ O}_8$)

g	Δg	0 基	1 0 基	2 0 基
	0 基	0	250	240
	1 0 基	0	230	220
	2 0 基	0	210	200
	3 0 基	0	190	180
	4 0 基	0	170	160
	5 0 基	0	150	140
	6 0 基	0	140	120

(7) インポートプレミアム a t (2080年)

(F_v / 1 b U₃ O₈)

g	Δ g	0 基	1 0 基	2 0 基
	0 基	0	250	240
	1 0 基	0	230	220
	2 0 基	0	210	200
	3 0 基	0	190	180
	4 0 基	0	170	160
	5 0 基	0	150	140
	6 0 基	0	140	130

表 3.1-2 ベネフィット

(1) ベネフィット a t (2020年)

(億円)

g	Δg	0 基	1 0 基	2 0 基
	0 基	0	26.030	23.420
	1 0 基	0	24.170	21.560
	2 0 基	0	22.680	20.070
	3 0 基	0	—	—
	4 0 基	0	—	—
	5 0 基	0	—	—
	6 0 基	0	—	—

(2) ベネフィット at (2030年)

(億円)

g	Δg	0 基	1 0 基	2 0 基
0 基		0	31,600	58,740
1 0 基		0	29,180	53,900
2 0 基		0	27,140	49,820
3 0 基		0	25,090	45,720
4 0 基		0	23,050	41,640
5 0 基		0	—	—
6 0 基		0	—	—

(3) ベネフィット a t (2040年)

(億円)

g	Δg	0 基	1 0 基	2 0 基
	0 基	0	35.320	66.920
	1 0 基	0	32.340	60.960
	2 0 基	0	29.740	55.760
	3 0 基	0	27.140	50.560
	4 0 基	0	24.530	45.360
	5 0 基	0	21.930	40.140
	6 0 基	0	20.440	34.940

(3) 結果

表3-3 に結果を示した。表には、27個の高速増殖炉導入シナリオと、対応する（ベネフィット）－（コスト）の数値を示してある。この数値が最大となるシナリオが与えられた条件の下での最適な導入シナリオということになる。

表から、シナリオ⑤、すなわち2030年に10基導入、2040年にも追加して10基導入、合計20基とする場合がベネフィット－コストが正であり、かつ最大であるので、シナリオ⑤が最適シナリオであると結論づけることができる。このように、たとえ、高速炉の経済性が軽水炉よりも悪いとしても（この場合0.8 円/KWH の差）、インポートプレミアムを考慮すると、高速炉の導入が総合的な経済合理性を持つことが分る。

上の例では、発電コストの差は0.8 円/KWH としたが、これが1.05円/KWH にまで拡大すると、上の最適解の正味のベネフィットはゼロとなる。すなわち、発電コスト差が1.05円/KWH 以下ならば、高速炉導入には総合的な経済合理性を持つといえる。

この数値例では、高速増殖炉導入の正味のベネフィットが約1.4 兆円あるので、ここまでならば、研究開発費用は経済合理性の範囲内にあることになる。

表3. 1-3 導入戦略の評価

番号	△g			g			ベネフィット 合計値 (億円)	コスト (億円)	正味の ベネフィット (億円)
	2020年	2030年	2040年	2020年	2030年	2040年			
①	0	0	0	0	0	0	0	0	0
②	0	0	10	0	0	10	32.340	22.420	9.920
③	0	0	20	0	0	20	55.760	44.840	10.920
④	0	10	0	0	10	10	29.180	22.420	6.760
⑤	0	10	10	0	10	20	58.920	44.840	14.080(*)
⑥	0	10	20	0	10	30	79.740	67.260	12.480
⑦	0	20	0	0	20	20	49.820	44.840	4.980
⑧	0	20	10	0	20	30	76.960	67.260	9.700
⑨	0	20	20	0	20	40	95.180	89.680	5.500
⑩	10	0	0	10	10	10	24.170	22.420	1.750
⑪	10	0	10	10	10	20	53.910	44.840	5.070
⑫	10	0	20	10	10	30	74.730	67.260	7.470
⑬	10	10	0	10	20	20	48.340	44.840	3.500
⑭	10	10	10	10	20	30	72.510	67.260	5.250
⑮	10	10	20	10	20	40	93.700	89.680	4.020
⑯	10	20	0	10	30	30	69.890	67.260	2.630
⑰	10	20	10	10	30	40	94.420	89.680	4.740
⑱	10	20	20	10	30	50	110.030	112.100	-2.070
⑲	20	0	0	20	20	20	40.140	44.840	-4.700
⑳	20	0	10	20	20	30	67.280	67.260	20
㉑	20	0	20	20	20	40	85.500	89.680	-4.180
㉒	20	10	0	20	30	30	65.230	67.260	-2.030
㉓	20	10	10	20	30	40	89.760	89.680	80
㉔	20	10	20	20	30	50	105.380	112.100	-6.730
㉕	20	20	0	20	40	40	81.780	89.680	-7.900
㉖	20	20	10	20	40	50	103.710	112.100	-8.390
㉗	20	20	20	20	40	60	116.720	134.520	-17.800

(注) * 印が最大値

3.2 インポートプレミアム分析手法の可能性と今後の課題

- (1) 3.1 節に示した簡単な例からでも、インポートプレミアム分析手法を取り入れると、高速増殖炉導入開発戦略について、単なる発電コストだけの比較や、ウラン削減量の比較だけの論議ではなく、これらを統合した一貫した分析が行える可能性があることが分った。
- (2) しかし、インポートプレミアム分析の核心である21世紀のウラン市場におけるウラン供給線やウラン需要曲線については、まだ概念的な理解にとどまっており、今後、この点をもっと深く研究する必要がある。
- (3) また、2.2.2 節に定式化した最適化問題を現実に即して解くためには、計算コードの開発が不可欠である。特に次の2つのコードを開発しなければならない。
 - ① インポートプレミアムを計算するための、ウラン需給シミュレーションコード
 - ② 最適化問題を解くためのダイナミックプログラミングコード

付録 A インポートプレミアム分析による核燃料サイクル国産化効果

A. 1 ウラン輸入削減によるインポートプレミアムの試算

1) 供給障害想定対象国

1985年時点ではカナダの供給障害の影響が一番大きく、2000年頃にはオーストラリアの供給障害の影響が大きい。そこで、1985年の供給障害想定対象国としてカナダ、2000年の供給障害想定対象国としてオーストラリアを仮定すると、1985年と2000年に想定しうる最大のインポートプレミアムが計算しうる。しかしインポートプレミアムで供給障害国によって変化するのは安全保障要因分であり、市場力要因は変化しない。安全保障要因はその障害が発生する確率に大きく依存する。現在から2000年位までを想定して、供給障害が発生する確率が高いのは南アフリカである。そこで本分析では南アフリカを供給障害想定対象国とした。表2に供給コストテーブルを示した。

2) ウラン需給バランス点の想定

1985年の世界のウラン需要は約4万トン、2000年では約7万トン前後と想定されている。試算想定ということで、1985年の全世界のウラン生産施設の平均稼働率約80%想定し、2000年では90%としてウラン需給がバランスしているものとした。したがって、1985年で約3.8万ショートトン U_3O_8 /年、2000年で約5.4万ショートトン U_3O_8 /年で通常時に需給がバランスしているものとした。

表2 南アフリカの計画生産量を除いた場合の U_3O_8 計画生産量 (s.t. U_3O_8 /年) と将来限界費用 (1985 US\$/lb U_3O_8)

西暦 限界費用	1985	1990	1995	2000	2005	1985-2004 の総和
5	8,010	6,030	6,030	2,045	0	22,115
10	11,340	9,360	8,584	2,045	0	31,329
15	14,550	12,735	9,709	2,045	0	39,039
20	18,718	22,201	16,657	5,933	3,420	63,509
25	21,209	28,118	30,439	19,136	14,868	98,902
30	25,506	31,153	37,340	24,997	19,548	118,996
35	33,532	38,330	45,633	33,063	23,417	150,558
40	33,927	39,018	46,321	41,894	31,078	161,160
45	35,693	42,216	49,408	47,155	33,921	174,472
50	35,853	42,532	49,678	49,537	41,115	177,600
55	36,563	43,183	49,948	49,919	45,368	179,613
60	37,030	"	"	"	47,238	180,080
65	37,165	"	"	"	"	180,215
70	"	43,234	49,999	49,970	"	180,368
75	"	"	50,170	50,141	47,409	180,710
80	"	"	50,320	50,291	48,008	181,010
85	37,313	"	"	"	"	181,158
90	"	"	"	"	"	"
95	"	"	"	"	"	"
100	"	"	"	"	"	"

3) ウラン輸入削減量の想定

わが国のウラン需要は、1985年で約 6,700トン/年、2000年でちょうど2倍の1万 3,400トンと推定される。そこで、約3分の1が削減できるものとし、1985年の場合の $\Delta D = 2,200$ トン、2000年の $\Delta D = 4,400$ トンと想定した。

4) ウラン需要曲線の価格弾力性の想定

ウラン需要曲線の価格弾力性は0と2の間にあることを示されているので、本試算では、0.5と仮定する。すなわち、ウラン価格が10%上下すると、ウラン需要は5%変動することになる。

5) 1985年でのウラン輸入削減インポートプレミアムの試算

以上の前提の下に、需給のバランス点を求めると

$$(i) A_x = 3.8 \quad A_y = 31.5$$

$$(ii) C_x = 3.58 \quad C_y = 30.125$$

$$(iii) B_x = 3.45 \quad B_y = 42$$

$$(iv) D_x = 3.36 \quad D_y = 37$$

したがって

$$\text{市場力要因} = (3.8 \times 31.5 - 3.58 \times 30.125) / 0.285 - 31.5 = 10.1$$

$$\begin{aligned} \text{安全保障要因} &= ((3.45 \times 42 - 3.36 \times 37) / 0.286 - 41.6) \times P_e \\ &= (71.9 - 41.6) \times P_e \\ &= 30.3 P_e \end{aligned}$$

$$\text{インポートプレミアム} = 10.1 + 30.3 P_e$$

もし、南アで向う10年間の任意の年に供給障害が発生する確率Pが0.02であるとすると、10年間に1回以上供給障害が発生する確率は0.18となる。ウラン供給障害リスクは平均して5年間続くものとする、実効的な障害発生確率は

$$0.18 \times 5 \text{年} / 10 \text{年} = 0.09 \quad \text{となる。}$$

従ってインポートプレミアムは

$$10.1 + 30.3 \times 0.09 = 12.8 \text{ドル/ポンド } U_3 O_8$$

もしある年での障害発生確率を0.1と見るならば、インポートプレミアムは

$$10.1 + 30.3 \times 0.325 = 19.9 \text{ドル/ポンド } U_3 O_8 \quad \text{となる。}$$

6) 2000年でのウラン輸入削減インポート

プレミアムの試算同様の計算をすると、

$$(i) A_x = 5.4 \quad A_y = 40.5$$

$$(ii) C_x = 4.8 \quad C_y = 37.5$$

$$(iii) B_x = 4.95 \quad B_y = 50.0$$

$$(iv) D_x = 4.56 \quad D_y = 43$$

したがって

$$\begin{aligned} \text{市場力要因} &= (5.4 \times 40.5 - 4.8 \times 37.5) / 0.572 - 40.5 = 67.7 - 40.5 \\ &= 27.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{安全保障要因} &= \{ (4.95 \times 50.0 - 4.56 \times 43) / 0.572 - 67.7 \} P_e \\ &= (89.9 - 67.7) P_e \\ &= 22.2 \cdot P_e \end{aligned}$$

$$\text{インポートプレミアム} = 27.2 + 22.2 \cdot P_e$$

1985年の場合と同様の供給障害発生確率を想定するとインポートプレミアムは、それぞれ29.2ドル/ポンド $U_3 O_8$ 、34.4ドル/ポンド $U_3 O_8$ となる。

確かに2000年のインポートプレミアムは1985年よりも倍程度に大きくなるが、その内容を見ると、安全保障要因は小さく、ほとんどが供給コスト曲線の傾きが大きくなる（安いウラン資源が少なくなる、又は高いコストのウラン資源を使うようになる）ことによると市場力要因となることが大きな特長である。南アでの供給障害発生確率が大きくなってもインポートプレミアムはそれ程大きくならない。逆にいえば、南アのウラン供給障害のインパクトは現在が一番大きく、今後は次第に弱くなっていくと解釈することができる。参考のために2000年について同様の計算をオーストラリアの供給障害についてしてみると、

$$(i) A_x = 5.4 \quad A_y = 40.5$$

$$(ii) C_x = 4.8 \quad C_y = 37.5$$

$$(iii) B_x = 4.42 \quad B_y = 60.0$$

$$(iv) D_x = 4.3 \quad D_y = 47.5$$

$$\text{市場力要因} = 27.2$$

$$\begin{aligned} \text{安全保障要因} &= \{ (4.42 \times 60.0 - 4.3 \times 47.5) / 0.572 - 67.7 \} \times P_e \\ &= (106.6 - 67.7) P_e \\ &= 38.9 P_e \end{aligned}$$

$$\text{インポートプレミアム} = 27.2 + 38.9 P_e$$

オーストラリアの供給障害発生確率も南アの場合と同様とすると、インポートプレミアムは各々、30.7ドル/ポンド $U_3 O_8$ 、37.2ドル/ポンド $U_3 O_8$ となる。

以上の南アとオーストラリアのインポートプレミアム分析をまとめると、本ケースの前提条件の下では2000年頃のウランの輸入削減のインポートプレミアムは30～37ドル/ポンド $U_3 O_8$ の範囲内にあるとよいであろう。もちろん前提条件が変化すれば、特に、需要曲線の価格弾力性が現ケースの0.5から小さくなれば、安全保障要因インポートプレミアムが大きくなってくる。

7) まとめ

1985年頃のウラン市場をベースに考えるとインポートプレミアムは13～20ドル

／ポンド $U_8 O_8$ 程度と考えられる。2000年頃の想定ウラン市場をベースに考えると、インポートプレミアムは30～37ドル／ポンドで $U_8 O_8$ である。また、インポートプレミアムのうち市場力要因と安全保障要因を比較すると、1985年、2000年のいずれにおいても市場力要因の方が大きい。特に2000年においては市場力要因の方が主要因であるといえる。

A. 2 SWUのインポートプレミアムの試算の分析

(1) 次のような前提の下にSWUインポートプレミアムを試算した。

(イ) $\Delta S = 5,000$ トンとした。

(ロ) $\Delta D = 1,500$ トン、 $3,000$ トン、 $6,000$ トンの3ケースを想定した。

(ハ) 供給コスト曲線の価格弾力性は① S_1 と② S_2 の2通りを想定した。

(ニ) 通常時は3万5000トンで需給がバランスしているものとした。インポートプレミアムは次のようになる。

①と②を比較すると、次のことがわかる。

① 供給コスト曲線 S_1 の場合（供給の価格弾力性が大きい時）

ΔD	市場力要因	安全保障要因	$Pe = 0.1$ のとき インポートプレミアム
1,500トン	16.75	$2.5 \times Pe$	17.00
3,000トン	16.00	$2.5 \times Pe$	16.25
6,000トン	14.50	$2.5 \times Pe$	14.75

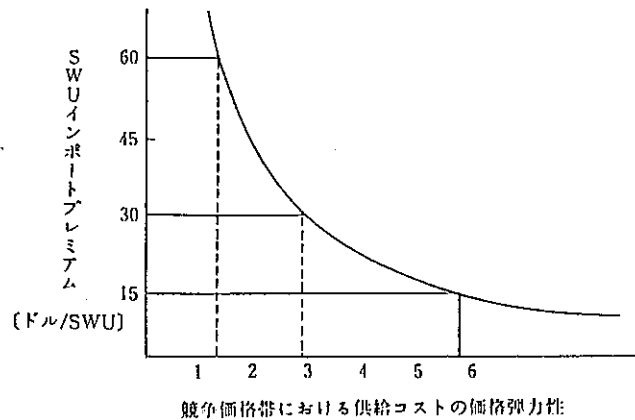
(注) 1年間にどこかでSWUの供給障害が発生する確率を0.01とすると10回以上供給障害が発生する確率は0.1となる。実効率は $0.1 \times \frac{10\text{年}}{10\text{年}} = 0.1$ とした。

② 供給コスト曲線 S_2 の場合（価格弾力性は S_1 の半分）

ΔD	市場力要因	安全保障要因	$Pe = 0.1$ のとき インポートプレミアム
1,500トン	33.5	$5 \times Pe$	34
3,000トン	32.0	$5 \times Pe$	32.5
6,000トン	29.0	$5 \times Pe$	29.5

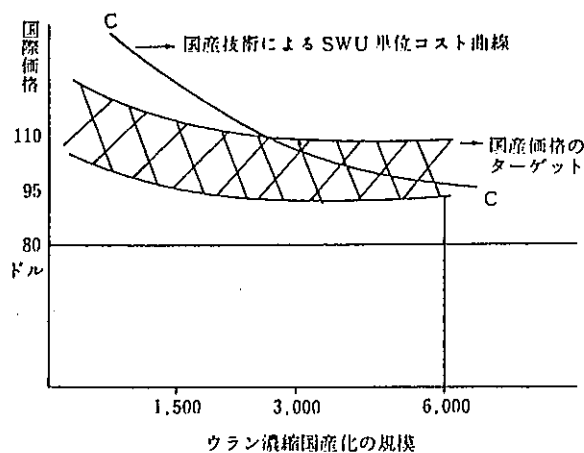
(イ) ②のインポートプレミアムは、①のちょうど2倍となっている。インポートプレミアムは供給の価格弾力性にちょうど逆比例する。言い換えれば、供給が価格に対して非弾力的になる程、インポートプレミアムは大きくなる。(図3-1参照)但し、この関係が成立するのは、①と②の両者共に通常時も供給障害時も需給のバランス点の傾きが一定の直線上にあったためである。そうでない場合を(2)で試算する。

図6 SWUインポートプレミアムと供給コストの価格弾力性の関係



- (ロ) ①と②の場合、安全保障要因は市場力要因に比して極めて小さく、このような場合には事実上市場力要因=インポートプレミアムと考えてよい。
- (ハ) 消費国全体におけるウラン濃縮国産化の規模によるインポートプレミアムの差は比較的小さい。インポートプレミアムの大きさはSWU供給コストの価格弾力性によってほぼ水準が決まる。①の場合約15ドル/SWU、②の場合約30ドルである。すなわち、SWU市場が①と②の間にあるとすれば、ウラン濃縮国産化のインポートプレミアムは15~30ドル/SWUとなる。したがって国産のSWU価格が国際価格よりも15~30ドル/SWU程度上廻る範囲内に抑まるならば、国産化には十分な経済合理性があるということである。
- (ニ) (ハ)より図3-2のような国産価格のターゲットが想定できる。もし、国産技術によるSWU単位コストがCC曲線であるとしたら、ウラン濃縮の国産化は約3,000トンSWU以上とすることが経済的に見て合理化ということになる。ウラン濃縮技術によってもCC曲線の形は変化する。

図7 国産SWU価格のターゲット



(2) 次に、供給障害時の供給曲線と通常の需要曲線の交点が、価格弾力性が極めて大きい部分にくる場合の計算を行う。

(イ) $\Delta S = 5,000$ トン (A) の場合と同じ)

(ロ) $\Delta D = 1,500$ トン、 $3,000$ トン、 $6,000$ トンの3ケース (これも (A) と同じ)

(ハ) 供給コスト曲線は、価格弾力性が小さい S_2 を想定

(ニ) 通常時は4万トンで需給がバランスしているものとする。(この前提が(1)と大きく異なる。SWU需給は極めてタイトな状況にあるものとした) インポートプレミアムは次のようになる。

③

ΔD	市場力要因	安全保障要因	$Pe = 0.1$ のとき インポートプレミアム
1,500トン	38.5	$135.5 \times Pe$	52.05
3,000トン	37.0	$131 \times Pe$	50.10
6,000トン	34.0	$105 \times Pe$	44.50

(イ) (B) と (A) の差は安全保障要因が20倍以上大きくなったことである。市場力要因はそれ程変化しない。

(ロ) また、 $\Delta S = 5,000$ トンに対して、 $\Delta S = 6,000$ と $\Delta D > \Delta S$ になると安全保障要因もかなり小さくなる。つまり、リスク (供給障害) 以上の対策をすると、超過分の効果は、小さくなるということである。

(ハ) 供給障害の確率を考慮すれば、インポートプレミアムの半分以上は市場力要因によって決まるそうである。(但し、供給コスト曲線があるとした場合にのみ)

(3) ウラン濃縮国産化効果のまとめ

① 消費国全体におけるウラン濃縮国際化の効果をインポートプレミアムの観点から分析すると、基本的にはウラン濃縮市場をどのように想定するかに依存するが、本分析で想定した範囲内では、国産SWUのインポートプレミアムは15ドル～50ドル/SWUの範囲内にあった。言い換えれば、想定したウラン濃縮市場の下では、国産SWUの価格がたとえ国際価格よりも15ドル～50ドル/SWU上廻っても、経済合理性をもつと言える。

② ウラン濃縮の国産化規模によっては、それ程インポートプレミアムは変化しない。スケールメリットが小規模から出る技術であれば、国産化しやすい。逆に、一定規模以上でないとスケールメリットがでないものについては、コスト評価を十分に行う必要がある。

- ③ 上に示したインポートプレミアムはウラン濃縮国産化に必要な研究開発投資分も含める必要がある。したがって、研究開発投資分を含めた国産価格が国際価格よりも15～50ドル/SWU以内に入っていないなければならない。

A. 3 インポートプレミアム概念による核燃料サイクル国産化効果のまとめ

- (1) インポートプレミアムの概念は、その適用に際して、需給曲線の想定、確率概念の適用等の問題点は残しているものの、核燃料サイクルの開発効果を総合的に考えると基本概念として有用である。
- (2) ウラン市場の現状と動向、ウラン濃縮市場の現状と動向の分析を踏まえた条件設定の下でインポートプレミアムを試算してみると、
- ウラン輸入削減インポートプレミアム
1985年時点 13～30ドル/ポンドU₃O₈
2000年時点 30～37ドル/ポンドU₃O₈
 - SWU節約インポートプレミアム
2000年時点 15～50ドル/ポンドU₃O₈
- (3) SWUインポートプレミアム概念を用いるとウラン濃縮国産化のコストターゲットや、開発規模を明らかにすることができる。