

Waseda University  
Institute of Finance



## Working Paper Series

WIF-07-001 : January 2007

インフラストラクチャー建設の戦略的価値

高森 寛, 高嶋 隆太

早稲田大学  
ファイナンス総合研究所

<http://www.waseda.jp/wnfs/nif/index.html>

# インフラストラクチャー建設の戦略的価値\*

ーエネルギー・インフラとしての国土幹線ガスパイプラインの意義ー

高森 寛<sup>†</sup> 高嶋 隆太<sup>‡</sup>

2006年10月30日

## 1 はじめにー研究の背景

今後20年ほどで、わが国のエネルギーインフラの大部分は、新しいものになる。それは、まず、省エネと低炭素経済への構造転換の課題に取り組むプロセスで、旧型発電設備の閉鎖、新型ガス発電所、コージェネはじめESCO設備、分散エネルギー設備、再生可能エネルギー設備、原子力発電所の更新および新設、新型送電システム等への新規投資の形で進行する。また、よりクリーンな技術、製品、生産プロセスの開発が、エネルギーインフラを、多面的に、更新していく。

国土幹線ガスパイプラインという新しい社会資本が実現すれば、電力システムと相まって、相互補完的に、わが国のエネルギー輸送インフラが、再構成されることになる。それは、経済活動におけるエネルギー利用に、多様な選択のオプションを与え、エネルギー・セキュリティを、飛躍的に、改善する。

電力・ガス等のエネルギー取引が市場型に移行するための制度の整備・充実は、エネルギー関連のソフトなインフラの新生を促進していく。そこでは、自由な市場取引と市場価格の形成を介して、各種エネルギーは、経済の適所に適正な価格で還流し、わが国にとって、最も利となるエネルギー・ミックスの形成を可能にする。さらに、新しいビジネス・事業、新しい産業と市場（先物・デリバティブ市場等を含む）の創生を促し、新たな経済価値創造の源泉となる。それらは、わが国の産業に活力を与え、国際競争力を維持・回復する不可欠の基盤となる。

---

\* この研究は、筆者が従事している下記の研究の一部を紹介している。日本システムインテグレーション協会におけるテーマ別研究：情報技術（IT）と金融技術（FT）の進展と新ビジネス・モデルの開拓（2001年度および2002年度）株式会社日立製作所 システム開発研究所より青山学院大学が受けた研究委託：事業展開のオプションとその価値の評価（2002年度および2003年度）が日本GIF研究財団より受けた委託研究「オペレーションズ・リサーチ的アプローチによるインフラストラクチャー問題に関する基礎研究」。

<sup>†</sup> 早稲田大学大学院ファイナンス研究科

<sup>‡</sup> 東京大学 大学院工学系研究科

## 2 エネルギー・セキュリティの基本要因

どのような形で、わが国のエネルギー・セキュリティが脅かされるのであろうか。

- 石油の世界的な需給逼迫と価格の急騰の可能性
- CO2 削減要請と義務
- 原子力発電の維持・更新と拡大への制約
- 新エネルギー源（太陽エネルギー、水素エネルギー等）開発と実用化の時間的な不確実性
- 石油と天然ガス利用の相対的な経済性

国土幹線ガスパイプラインは、建設開始までに  $T$  年かかり、建設に数年かかり、完成してから、産業および民生の各種代替のエネルギーから、ガス利用に転換するためのインフラ形成の投資が行われ、ガス転換潜在需要が顕在化するのに、さらに、数年の時間がかかる。

ガス燃料の利用に転換されるために必要なインフラ投資・設備類

- 石油ボイラーのガス燃料転換、コージェネ化
- ガス燃料自家発電設備
- 分散エネルギー設備
- 幹線パイプラインから、個々の需要者への配線パイプライン網

### 2.1 建設開始のタイミング - セキュリティの観点から

問題提起：長期的な観点に立つてのエネルギー危機管理が、わが国のエネルギー戦略の基本であると考えられる。その危機が来たときに、幹線ガスパイプライン・インフラやその他の対策を打っても、間に合わない。実効が出るのに、数年から 10 年のスパンが必要である。

幹線ガスパイプラインというインフラが、わが国の経済にとって、どうしても不可欠であるという危機状況は、いつくるのかが不確実であり、来ないかもしれない。そういう事態が、明確に到来してから、建設に取り掛かるのでは、完成までに数年かかり、さらに、それを活用するための種々のインフラ投資、燃料転換が進行して、潜在需要が顕在化するのに、何年かを経て、建設開始から 5 年から十数年がかかる。その十数年の社会的費用と損失は大きい。

そのような不確実な将来にむけて、いま、1.7 兆円の建設費用をかけて、この新しい産業・経済インフラの建設にとりかかることの価値を定量的に評価したい。

$$p_t = \frac{P_{ot}}{P_{nt}} = \frac{\text{Oil Price}}{\text{Natural Gas Price}}$$

$$p_{C_t} = \text{CO}_2 \text{ Emission Level}$$

$$p_{C_0} = 100 : (\text{CO}_2 \text{ Emission Level of 2005})$$

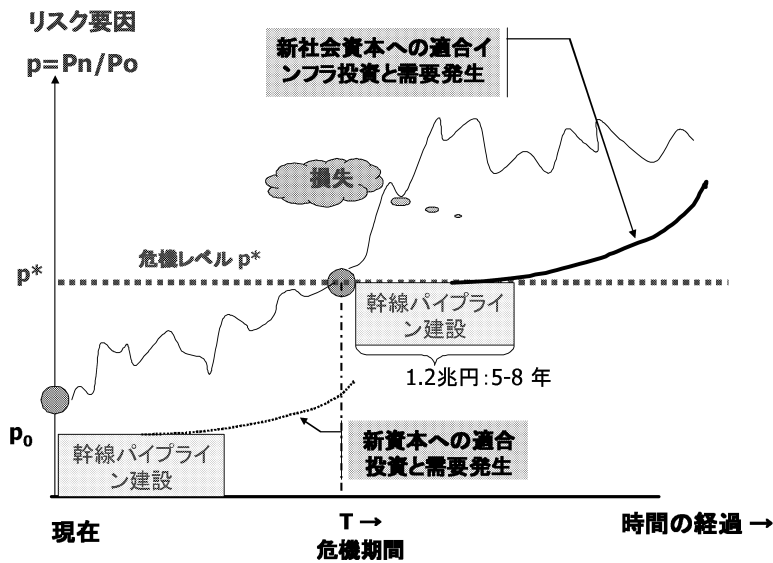


図1 危機の到来とエネルギー・セキュリティ

$$p_{Ot} = \frac{P_{Ot}}{P_{nt}} = \frac{\text{Oil Price}}{\text{Natural Gas Price}}, \quad p_{Lt} = \frac{P_{Lt}}{P_{nt}} = \frac{\text{LNG Price}}{\text{Natural Gas Price}}$$

$p_{at}$  を原子力発電の維持・拡大に係わる制約指標

$p_{a0} = 100$ : 2005年の水準を100とする。エネルギー・総合危機指標



図2 原油価格の動向

$$R_t = w_o p_{ot} + w_c p_{ct} + w_n p_{nt} + w_L p_{Lt} + w_a p_{at}$$

ただし、 $w_i$  ( $i = o, C, n, L, a$ ) は各危機指標のウェイト

$$dp_{it} = \alpha_i p_{it} dt + \sigma_i p_{it} dz_t, \quad i = o, C, n, L, a$$

以上のような問題状況を定式化したモデル分析を行う。

これまで、技術レベルや環境汚染レベルの不確実性を考慮した環境政策の費用便益分析に関する研究が多数行われてきた。しかしながら、エネルギー政策、特に、エネルギーセキュリティに関して不確実性を考慮した経済性評価の研究はほとんど行われていない。そこで、本節では石油価格の不確実性を考慮したときのガスパイプライン導入に関して、エネルギーセキュリティをコスト面、すなわち経済性の観点から評価することを目的とする。

### 3 単純なモデル – オプションとしてのインフラストラクチャー

わが国の  $t$  時点におけるエネルギーの総消費量を  $Q_t$  とし、また、その消費量  $Q_t$  のうち、石油消費による比率、すなわち、石油依存度を  $\alpha_t$  とする。国土幹線ガスパイプライン（以下では、ガス P/L と記す。）建設を、現時点 = 0 で、着工して、 $t = T$  年の時点で完成するものとする。

ここでは、国土幹線ガスパイプライン（以下では、ガス P/L と記す。）建設は、石油価格指数の変動に反応して、エネルギー消費のうちの石油依存度を軽減し、それは、また、エネルギー費用の軽減という形で、どのような便益をもたらすかを分析したいので、エネルギーの総消費量は一定、すなわち、 $Q_t = Q$  と想定する。

本研究では、わが国の  $t$  時点で、消費するエネルギー総量  $Q_t$  は、石油で消費するか、それ以外の燃料で消費するものとして、石油以外の燃料をすべて、簡略的に天然ガスと総称し、その価格を  $P_t^N$  とし、しかも、一定  $P_t^N = P^N$  とする。

以上のような仮定において、分析をすすめる理由は、将来のエネルギー危機に直面して、国土幹線ガスパイプラインというインフラストラクチャーの存在が、どのような価値の違いをもたらすかを明らかにしたいからである。

ここで、エネルギー価格危機要因を表現する指数として、

$$\text{石油価格指数： } p_t = P_t^O / P^N$$

なるものを定義する。いまは、石油以外の燃料の価格は変わらない、すなわち、 $P_t^N = P^N$  としているので、 $p_t = P_t^O / P^N$  は、石油価格の変動を直接に表している。

この価格指数  $p_t$  は、現時点  $t = 0$  での値  $p_0 = e^{\mu_0}$  からスタートして、時間  $t$  の経過につれて、

$$p_t = p_0 e^{y_t} \tag{1}$$

ただし、  $y_t = (\mu - \sigma^2/2)t + \sigma W_t$

に従って、不確実な変動をするものとする。ここで、 $\mu$  は、それぞれ石油価格指数の長期的な変動トレンドを表し、 $\sigma$  は、石油価格の変動の不確実性の度合いを表現するパラメータで、ボラティリティと呼ばれるものである。また、 $W_t$  は、期待値がゼロ、分散が  $t$  の正規分布  $\mathcal{N}(0, t)$  の確率変数で、ブラウン運動と呼ばれる。この場合、石油価格指数  $p_t = e^{y_t}$  は、幾何ブラウン運動と呼ばれる不確実変動になる\*1。石油価格指数  $p_t$  が (1) 式に従って変動するならば、現時点  $t = 0$  から見て、

\*1  $p_t$  の変動 (1) 式は、伊藤の補題により、

$$dp_t = \mu p_t dt + \sigma p_t dW_t$$

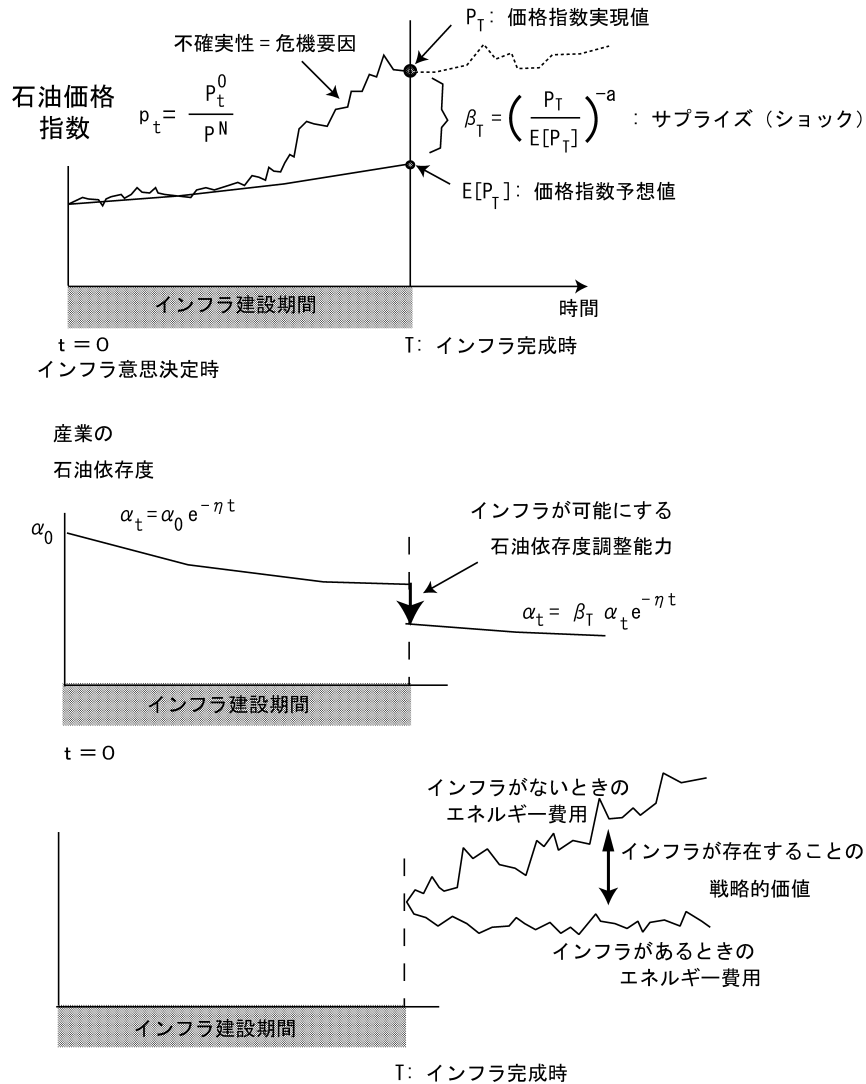


図3 インフラ計画の戦略的価値

ガス P/L が完成する T 年目には、石油価格指数は、

$$\mathbb{E}[p_T] = p_0 e^{\mu T} \quad (2)$$

になると期待される。

わが国の石油依存度、すなわち、総エネルギー消費のうち石油燃料の占める比率  $\alpha_t$  は、時間  $t$  とともに、

$$\alpha_t = \begin{cases} \alpha_0 e^{-\eta t}, & t < T \\ \beta_T \alpha_0 e^{-\eta t}, & t \geq T \end{cases} \quad (3)$$

で、減少していくものとする。ここで、図3に示すように、 $\beta_T$  は、ガス P/L が完成した時点 T で

---

と記述できる。これは、幾何ブラウン運動の変動である。

のガス転換緊急度をあらわして、

$$\begin{aligned}\beta_T &= \left( \frac{p_T}{\mathbb{E}[p_T]} \right)^{-a} = e^{-a(y_T - K)} \\ &= e^{a[(\sigma^2 T)/2 + \sigma W_T]} \\ &\text{ただし、} a > 0, K = \mu T\end{aligned}\tag{4}$$

とするモデルを考える。この  $\beta_T$  は、ガス P/L が完成しているときに、(4) 式に従う確率事象となるのであって、現時点  $t = 0$  で、ガス P/L 建設に着手しないのであれば、時点  $T$  では、何も起こらず、 $\beta_T = 1$  である。

いま、考えている問題状況では、不確実でリスクの根源となる確率変数は、石油価格指数  $p_t = p_0 e^{y_t}$  であり、時点  $T$  において、何らかの値  $p_T = p_0 e^{y_T}$  が実現する。その実現値  $p_T = p_0 e^{y_T}$  が、当初の予想  $\mathbb{E}[p_T] = p_0 e^{\mu T}$  を上回っているとしてみよう。このとき、もし、現時点  $t = 0$  で、ガス P/L 建設に着手していたのであれば、この時点、 $T$  年目において、 $\beta_T$  はモデル (4) 式により、1 より小さく、わが国の産業は、(3) 式に従って、石油依存度をより大きく引き下げることが可能となる。このことは、図 3 に示すように、現時点  $t = 0$  で、ガス P/L に着手するという意思決定が、わが国の産業に、危機指数  $p_t$  の予期しない上昇に対応できるオプション権利を与えることを表現している。計量経済学、ファイナンスや予測理論などの分野では、このような危機指数の予想値を超えた量  $y_T - K$  あるいは、 $p_T/y_T - K\mathbb{E}[p_T]$  は、サプライズとか、ランダム・ショックと呼ばれている。

ガス P/L などの国家的インフラ建設は、当初は、その価値を具体的に認識しにくい。また、そのようなインフラが完成する遠い将来においても、そのような危機的事態が、ほんとうに到来するのかは、不透明である。しかし、危機的事態が、現実には、到来した場合には、いま、着工していることが、 $T$  時点での危機に対処する権利、すなわち、オプションを国の産業に与える。

本研究での基本的な視点は、インフラストラクチャー計画のオプション価値を、危機に対応しての戦略的価値として把握し、図 3 の一番下に示すように、その価値を定量的に評価することを試みることである。

以下では、ガス P/L に着手するという意思決定の、エネルギー危機に対応しての、戦略的価値を評価することを試みる。

わが国の石油依存度  $\alpha_t$  が (4) 式に従って変動し、ガス P/L が存在しない状況のもとで、わが国が、将来、消費する総エネルギー費用を、 $T$  時点での価値に割り引いて、換算した値は、 $r$  を割引率として、

$$\tilde{J} = \int_T^\infty e^{-r(t-T)} [\alpha_t Q_t P_t^O + (1 - \alpha_t) Q_t P_t^N] dt,\tag{5}$$

と書ける。

ガス P/L 建設が時点  $T$  で完成していれば、わが国の石油依存度  $\alpha_t$  の低下は、現状から想定される減衰係数  $\eta$  よりも、早い速度で実現され、しかも、それは、危機係数としてのランダム・ショック  $y_T - K$  に依存することを、モデル (3) と (4) は表現している。

ガス P/L が存在しない世界では、わが国が消費する総エネルギー費用 (5) 式は、

$$\tilde{J}_T^C = C_0 \int_T^\infty e^{-r(t-T)} [\alpha_0 e^{-\eta t} p_t + (1 - \alpha_0 e^{-\eta t})] dt \quad (6)$$

と書ける。ここで  $C_0 = QP^N$  は、現時点におけるわが国のエネルギー消費  $Q$  を、すべて石油以外の燃料で消費したと想定したときの、総エネルギー費用額である。

一方、ガスパイプラインが完成している場合は、エネルギー危機が到来して、サプライズ  $y_T - K$  あるいは  $p_T/\mathbb{E}[p_T]$  が大きいときは、産業は、本来織り込まれていたものから  $\beta_T$  ( $< 1$ ) 倍に石油依存度を下げる。よって、消費する総エネルギー費用の  $T$  時点での価値は以下である。

$$\tilde{J}_T^G = C_0 \int_T^\infty e^{-r(t-T)} [\beta_T \alpha_0 e^{-\eta t} p_t + (1 - \beta_T \alpha_0 e^{-\eta t})] dt. \quad (7)$$

以上から、ガス P/L の建設に、時点  $t = 0$  で、着手するという国家レベルの意思決定がもたらす便益は、すなわち、それによるエネルギー費用削減額は、(6) 式 - (7) 式、 $T$  時点価値で、次のように表せる。

$$\begin{aligned} \tilde{V}_T &= \tilde{J}_T^C - \tilde{J}_T^G \\ &= C_0 \int_T^\infty e^{-r(t-T)} [\alpha_0 e^{-\eta t} p_t + (1 - \alpha_0 e^{-\eta t})] dt \\ &\quad - C_0 \int_T^\infty e^{-r(t-T)} [\beta_T \alpha_0 e^{-\eta t} p_t + (1 - \beta_T \alpha_0 e^{-\eta t})] dt \end{aligned} \quad (8)$$

このガス P/L の建設がもたらす便益  $\tilde{V}_T$  の  $T$  年後の時点における条件つき期待値は、次のように二つの部分に分けることができる。  $C = \alpha_0 C_0$  として、

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_T [\tilde{V}_T] &= C(1 - \beta_T) \mathbb{E}_T \left[ \int_T^\infty e^{-r(t-T)} (e^{-\eta t} p_t - e^{-\eta t}) dt \right] \\ &= C(1 - \beta_T) \mathbb{E}_T \left[ \int_T^\infty e^{-r(t-T)} (e^{-\eta t} p_t) dt \right] - C(1 - \beta_T) \int_T^\infty e^{-\eta t} dt \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、まず、 $T$  時点条件つき期待値

$$\mathbb{E}_T \left[ \int_T^\infty e^{-r(t-T)} e^{-\eta t} p_t dt \right]$$

を求める。石油価格指数  $p_t = p_0 e^{y_t}$  の  $T$  時点での実現値を  $p_T$  とする。このとき、確率変動  $z_t = e^{-\eta t} p_t = p_0 e^{(\mu - \eta - \sigma^2/2)t + \sigma W_t}$  は、 $T$  時点での実現値  $e^{-\eta T} p_T$  を初期値として、それ以降は、ドリフトが  $\mu - \eta$  の幾何ブラウン運動となるので

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_T \left[ \int_T^\infty e^{-r(t-T)} e^{-\eta t} p_t dt \right] &= \frac{e^{-\eta T} p_T}{r - (\mu - \eta)} \\ &= A p_T \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ただし、 $A = e^{-\eta T} / (r - \mu + \eta)$  である。



以上から、 $T$  時点における期待値 (9) 式は、次のように整理できる。

$$\mathbb{E}_T [\tilde{V}^G(p)] = C(1 - \beta_T)Ap_T + C(1 - \beta_T)\frac{e^{-(r+\eta)T}}{\eta} \quad (11)$$

ガス P/L がもたらす便益の現時点  $t = 0$  での価値  $V$  は、期待値 (9) 式、すなわち、(11) 式を現在に割り引いた量の期待値である、すなわち、

$$\begin{aligned} V &= \mathbb{E} \left[ e^{-rT} \mathbb{E}_T [\tilde{V}^G(p)] \right] \\ &= CAe^{-rT} (\mathbb{E} [p_T] - \mathbb{E} [p_T\beta_T]) + \frac{Ce^{-(r+\eta)T}}{\eta} (1 - \mathbb{E} [\beta_T]) \end{aligned} \quad (12)$$

この (12) 式の期待値は、各変数  $\beta_T$ ,  $p_T$ ,  $\beta_T p_T$  の 0 時点期待値を求めることで得られる。

$$\begin{aligned} \mathbb{E} [\beta_T] &= \mathbb{E} \left[ e^{a[(\sigma^2 T)/2 + \sigma W_T]} \right] = e^{a(\sigma^2 T)/2 + a^2 \sigma^2 T} \\ &= e^{(1/2 + a)a\sigma^2 T} \\ \mathbb{E} [\beta_T p_T] &= \mathbb{E} \left[ e^{a[(\sigma^2 T)/2 + \sigma W_T]} p_0 e^{(\mu - \sigma^2/2)T + \sigma W_T} \right] \\ &= p_0 \mathbb{E} \left[ e^{(\mu + (a-1)\sigma^2/2)T + (1+a)\sigma W_T} \right] \\ &= p_0 e^{\mu T + a(a+3)\sigma^2 T/2} \end{aligned} \quad (13)$$

以上から、ガス P/L がもたらす便益、すなわち、戦略的価値としての (12) 式は、次のように整理される。

$$\begin{aligned} V &= \mathbb{E} \left[ e^{-rT} \mathbb{E}_T [\tilde{V}^G(p)] \right] \\ &= CAp_0 e^{-(r-\mu)T} \left( 1 - e^{a(a+3)\sigma^2 T/2} \right) \\ &\quad + \frac{Ce^{-(r+\eta)T}}{\eta} \left( 1 - e^{a(\sigma^2 T)/2 + a^2 \sigma^2 T} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 $C = \alpha_0 Q P^N$  である。

## 4 ガスパイプラインの操業開始タイミングと費用便益分析

石油資源の枯渇や価格の高騰等から我が国におけるエネルギーセキュリティの重要性が増している。また、CO<sub>2</sub> 排出等の環境面においても代替エネルギーの必要性が考えられる。石油エネルギーの代替エネルギーの一つとして天然ガスが挙げられ、発電設備の燃料等、天然ガス利用が拡大している。さらに、国土幹線ガスパイプライン建設が計画され、天然ガスエネルギーへの大きな転換が考えられており、エネルギー政策に関する費用、便益を算出し、これらを定量的に評価する必要がある。不確実な状況における、石油エネルギーから天然ガスエネルギーへシフトするような政策転換の評価を行う手法として、リアル・オプション・アプローチが挙げられる。本手法を用いることにより、最適な政策転換のタイミングや、あらゆる不確実な状況下での政策価値を見出すことが可能となる。

これまで、環境政策の実施に関する不可逆性を企業の投資の意思決定と同様であることを示し、さらに、技術レベルや環境汚染レベルの不確実性を考慮し、環境政策の費用便益分析を行った研究は多数存在する [4, 5]. しかしながら、エネルギー政策、特に、代替エネルギー転換に関して不確実性を考慮した経済性評価の研究はほとんど行われていない. そこで、本節では天然ガスエネルギー、特にガスパイプライン導入に関して、石油価格の不確実性を考慮した経済性評価を行うことを目的とする. 特に、天然ガスエネルギー転換の最適タイミングを求め、建設期間、建設費、さらには石油価格の不確実性に関する分析を行う.

#### 4.1 モデル

時刻  $t$  の石油価格を  $P_t^O$  とすると、石油価格は以下の確率過程に従うものとする:

$$dP_t^O = \mu P_t^O dt + \sigma P_t^O dW_t, \quad P_0^N = p \quad (15)$$

ここで、 $\mu, \sigma$  はそれぞれ石油価格のトレンド、ボラティリティを表しており、 $W_t$  は標準ブラウン運動である. また、天然ガス価格を  $P_t^N$  として、本節では簡便のため一定 ( $P_t^N = P^N$ ) とする.  $Q_t, \alpha_t$  をそれぞれ  $t$  時点におけるエネルギーの総供給量、石油依存度とすると、従来のエネルギー政策に関する期待総割引費用は以下の式になる:

$$J^C(p) = \mathbb{E} \left[ \int_0^\infty e^{-rt} [\alpha_t Q_t P_t^O + (1 - \alpha_t) Q_t P_t^N] dt \right], \quad (16)$$

ここで  $r$  は割引率であり、 $Q_t = Q, \alpha_t = \alpha_0$  として一定とする.

次に、ガスパイプラインを導入したときのコストを導出する.  $\tau$  時点においてガスパイプラインの導入が決定され、建設期間  $T$  年を経て ( $\tau + T$  時点において)、ガスパイプラインが操業開始す

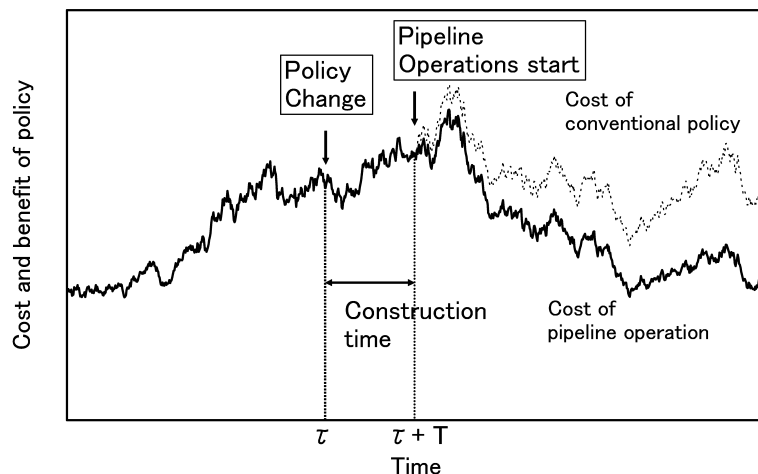


図4 ガス・パイプライン政策のコスト・フローの概念図

るときの期待総割引費用は以下の式になる\*2:

$$J^G(p) = \mathbb{E} \left[ \int_0^{\tau+T} e^{-rt} [\alpha_t Q_t P_t^O + (1 - \alpha_t) Q_t P_t^N] dt + I e^{-r\tau} + \int_{\tau+T}^{\infty} e^{-rt} [\alpha_t Q_t P_t^O + (1 - \alpha_t) Q_t P_t^N] dt, \right] \quad (17)$$

ここで石油依存度  $\alpha_t$  は以下の式に従うとする:

$$\alpha_t = \begin{cases} \alpha_0 & t < \tau + T, \\ \alpha_0 e^{-\eta(t-\tau-T)} & t \geq \tau + T, \end{cases} \quad (18)$$

ここで  $\eta$  は石油依存度の減少率であり、天然ガスの依存度の増加率としても考えられる。(18)式は、ガスパイプラインを操業する  $\tau + T$  時点から、石油から天然ガスに移行するため石油依存度が減少することを表している\*3。従来のエネルギー政策を  $\tau$  時点で中止したとき、その政策の費用は便益として考えられる。従って、ガスパイプライン政策の期待総割引価値は(16)式と(17)式より与えられる。

$$J(p) = J^C(p) - J^G(p) \\ \mathbb{E} \left[ -I e^{-r\tau} + \int_{\tau+T}^{\infty} e^{-rt} [\alpha_0 Q P_t^O + (1 - \alpha_0) Q P_t^N] dt - \int_{\tau+T}^{\infty} e^{-rt} [\alpha_t Q P_t^O + (1 - \alpha_t) Q P_t^N] dt. \right] \quad (19)$$

図4にも示されているように、破線が石油エネルギーのときの費用であり、実線が天然ガスエネルギーの費用である。この実線と破線間の価値が、ガスパイプライン導入することにより政策の価値であり、(19)式である。本問題は、期待総割引価値(19)式を最大化するものである。すなわち以下のような式になる:

$$\Phi(\gamma) = \max_{\tau \in \mathcal{T}} J(p; \tau). \quad (20)$$

ここで、 $\mathcal{T}$  はガスパイプライン導入時期の全体である。

政策の価値関数を  $\phi(p)$  とすると、Bellman 方程式より以下の常微分方程式が導出される(導出方法に関して、[6]を参照されたい):

$$\frac{1}{2} \sigma^2 p^2 \phi''(p) + \mu p \phi'(p) - r \phi(p) = 0. \quad (21)$$

この方程式の一般解は以下のようになる:

$$\phi(p) = A p^\beta, \quad (22)$$

\*2 実際、建設費は建設期間  $T$  年間にかかるものであるが(会計上では、減価償却費として操業時に支払われる.)、政策の不可逆性を考慮しており、 $\tau$  時点で全建設費を支払うとしている。

\*3 既に、石油依存度は減少傾向にあるが[2]、我が国において、ガスパイプラインの導入により石油依存度が天然ガス依存度に対し相対的に減少することを意味している。

ここで、 $\phi(0) = 0$  の条件より、 $\beta = \frac{1}{2} - \frac{\mu}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\mu}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma^2}}$  である。政策決定時の閾値  $p^*$  における、境界条件は以下のとおりである。

$$\begin{cases} Ap^{*\beta} = \frac{e^{-(r-\mu)T} \alpha_0 Q \eta}{(r-\mu)(r-\mu+\eta)} p^* - \frac{e^{-rT} \alpha_0 Q \eta P^G}{r(r+\eta)} - I, \\ A\beta p^{*\beta-1} = \frac{e^{-(r-\mu)T} \alpha_0 Q \eta}{(r-\mu)(r-\mu+\eta)}, \end{cases} \quad (23)$$

これらの式から、政策変更の閾値  $p^*$ 、(22) 式における定数  $A$  が導かれる：

$$p^* = \frac{\beta(C_2 + I)}{(\beta - 1)C_1}, \quad A = \frac{C_1}{\beta} p^{*1-\beta}, \quad (24)$$

但し、 $C_1, C_2$  は以下のとおりである：

$$C_1 = \frac{e^{-(r-\mu)T} \alpha_0 Q \eta}{(r-\mu)(r-\mu+\eta)}, \quad C_2 = \frac{e^{-rT} \alpha_0 Q \eta P^G}{r(r+\eta)},$$

これらの式より、様々な状況における政策変更のタイミングや政策価値が算出可能となる。

#### 4.1.1 石油依存度の減少率

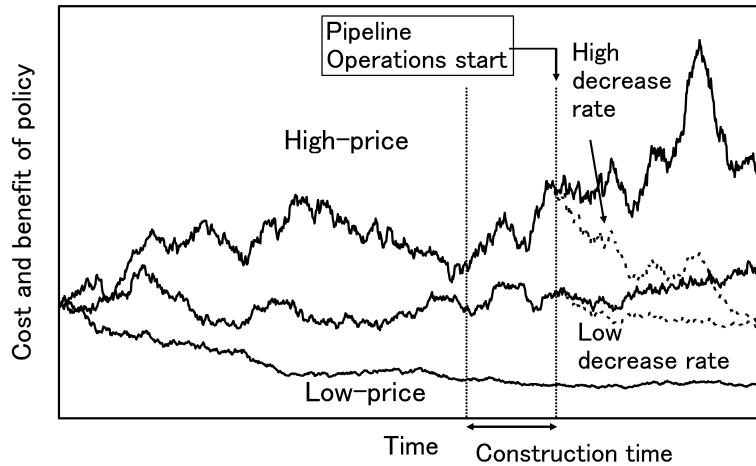


図5 石油依存減少率と価格の関係

ガスパイプライン導入時期において、石油価格が高い状況では、政策に関する費用を出来るだけ早急に減少させようとするため石油依存度は、より急速に減少するものと考えられる。他方において、価格が低い時期にガスパイプラインを導入した場合、石油依存度の減少率は低く、さらには、ガスパイプラインの導入時期を先延ばしすることも考えられる（図5）。将来の価格の高低に関するパラメータとして、ボラティリティ  $\sigma$  が挙げられる。 $\sigma$  が大きいほど、将来の価格の分布は広がり、高価格になる確率が高い。また、 $\sigma$  が小さいときは現在の価格との差は小さく、高価格になる確率は小さい。これら  $\sigma$  が大きいときと、小さいときと共通していることは、ある一定以上の価格に達しない限り、政策転換はなく現行の政策のままであるということである。つまり、石油依存度

の減少率  $\eta$  は、ボラティリティ  $\sigma$  に依存するものと考えられる<sup>\*4</sup>。本研究では、比例関係にあるものとして以下のように仮定する：

$$\eta = a\sigma, \quad (25)$$

ここで、 $a$  は定数である。以下では、この関係を用いて計算を行う。

#### 4.1.2 結果と考察

基本ケースのパラメータとして、以下の値を用いる<sup>\*5</sup>： $r = 0.05$ ,  $\mu = 0.01$ ,  $\sigma = 0.2$ ,  $a = 0.1$  ( $\eta = 0.02$ ),  $\alpha_0 = 0.8$ ,  $Q = 1$ ,  $P^G = 2$ ,  $T = 5$ ,  $I = 10$ 。これらの値を (24) 式に代入することにより、以下の政策転換閾値等の値が得られる： $\beta = 1.850781$ ,  $A = 0.575627$ ,  $p^* = 6.823433$ 。これらの値をもとに、政策価値を示したものが図 6 である。直線は現在正味価値 (NPV) を表している。政策転換のタイミングを NPV で評価したときの政策転換閾値は  $p_{NPV}^* = 3.1$  であり、3.1 以上であれば価値は正になり、その時点で政策転換することを意味している。将来の石油価格が予測可能なときや、価格自体に変化が無いときは、この NPV 法用いられる。ここでは、石油価格が不確実であるとしており、そのときの最適な政策転換閾値は、図 6 にも示されているように  $p^* = 6.8$  である<sup>\*6</sup>。石油価格が不確実である状態のとき、<sup>\*7</sup> NPV で評価した場合、政策価値は  $\phi(3.1) = 4.67$  となり、リアルオプションで評価したときの  $\phi(6.8) = 20.12$  と比べ 70% 以上の損失であることが分かる。

現在の石油価格が  $p^*$  より高いときは、そのときに政策転換をすることが最適である。また、 $p^*$  より低ければ、石油価格が  $p^*$  に達するまで政策転換を行わないことが経済的であることを意味している。

政策転換閾値  $p^*$  と政策価値  $\phi(p)$  に関する建設費  $I$  の影響を示したのが、表 1 である。建設費が増加するとともに閾値も増加しており、政策転換を行うインセンティブが低下することが分かる。また、現在の石油価格が  $p_0 = 5$  としたときの政策価値を示した。 $p^*$  の値と比べると、 $I = 5$  のときは、政策転換を延期している状態であり、 $I = 10, 15$  のときは現在、政策を転換することが最適であること示している。基本ケースの建設費  $I = 10$  の  $\pm 50\%$  ( $I = 5, 15$ ) において、政策価値はそれぞれ 9.1, 15.2 となる。建設費 50% の減少から、政策価値 34% の増加となり、また 50% の増加から政策価値 20% の減少となることが分かった<sup>\*8</sup>。

図 7 は、建設期間の影響を示している。建設期間が長くなるにつれて、政策価値の低下や  $p^*$  の増加、つまり、政策を転換することが難しい状態になることが分かる。また、建設期間が 5 年から

<sup>\*4</sup> 実際の石油依存度の減少率  $\eta$  は、政策転換時点  $\tau$  の価格  $p_\tau$  に依存し、 $\eta_t = \eta(t; p_\tau)$  の関数として表すものと考えられるが、上記のモデルが解析的に解けるときの条件として  $\eta$  が  $\sigma$  の関数であると仮定した。

<sup>\*5</sup> 本研究で用いられているパラメータは、モデルの感度分析を行うため実際の値ではない。今後、パラメータ調査を行い現実的な値を用いて解析を行う。

<sup>\*6</sup> 図 6 における曲線が、リアルオプション価値である。一般的にリアルオプション価値が正である理由として、ある最適基準に達するまで、行動を起こさないためである (NPV は、いつれの時にも行動を起こすとしているため負の領域が存在する)。また、境界条件によってはリアルオプション価値も負になり得る場合もある。

<sup>\*7</sup> ここでは、幾何ブラウン運動に従うとしている。

<sup>\*8</sup> 本計算は、現在の石油価格に依存する。今後、実際のパラメータを用いて計算することにより、建設費に対する現実的な政策価値が算出される。ここでは、その方法論を示した。

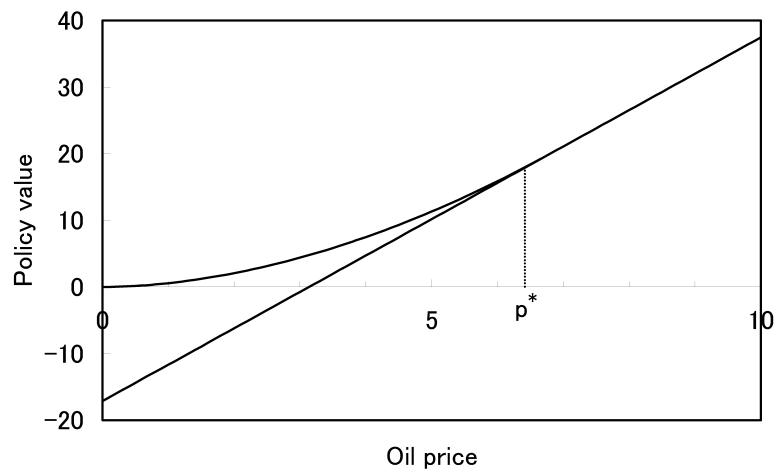


図6 基本ケースの価値関数

10年へと2倍延びたとき、政策価値は25%減少し、3倍延びたとき価値は44%減少する。本計算から、直感的に考えられる建設費や建設期間が政策転換に及ぼす影響を定量的に示すことが可能となった。

不確実性の影響を調べたものが図8である。ボラティリティ $\sigma$ の増加にともない、政策価値は増加し、 $p^*$ は減少している\*<sup>9</sup>。つまり、現実のように石油価格の不確実性が高い場合は、政策を転換する経済的な価値は十分にあり、さらに、より早い段階で政策を転換することが望ましいことを意味している。また、ボラティリティと政策転換閾値との関係を示したものが図9である。 $\sigma$ が0.14付近までは、急激に $p^*$ が減少し、0.14以降では緩やかに増加している。ボラティリティが小さい領域では、石油依存度の減少率の寄与が大きく、ボラティリティが大きい領域ではボラティリティ自体そのものの寄与が大きく図のような関数となっている。全体的には、石油依存度の減少率の影響が大きいと考えられるが、これはパラメータ $a$ に依存する。不確実性が、ほとんど存在しない $\sigma = 0.01$ のとき比べ、 $\sigma = 0.1$ 以上の $p^*$ は極めて低い値であることが分かる。この分析において、石油価格が安定していたときと比べ、現在の石油価格の不確実性を考慮すると出来る限り早急

表1 政策転換閾値と政策価値に関する建設費の影響

$I$	5	10	15
$p^*$	4.830662	6.823433	8.816204
$\phi(5)$	15.18432	11.3183	9.101386

\*<sup>9</sup> 従来のリアルオプションモデルでは、ボラティリティが高くなるにつれて、閾値は増加し、投資を行うインセンティブが低下する結果となっている [6]。本研究では、石油依存度の減少率の影響から逆の結果となっており、応用研究としてだけでなく、リアルオプション研究のとしても興味のある結果であると言える。

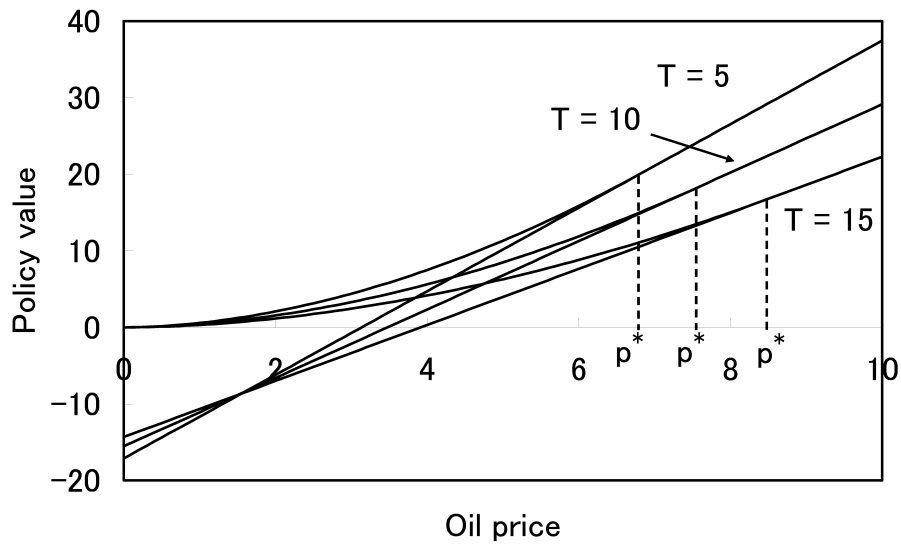


図7 建設期間の影響

な政策転換を要することが分かる。

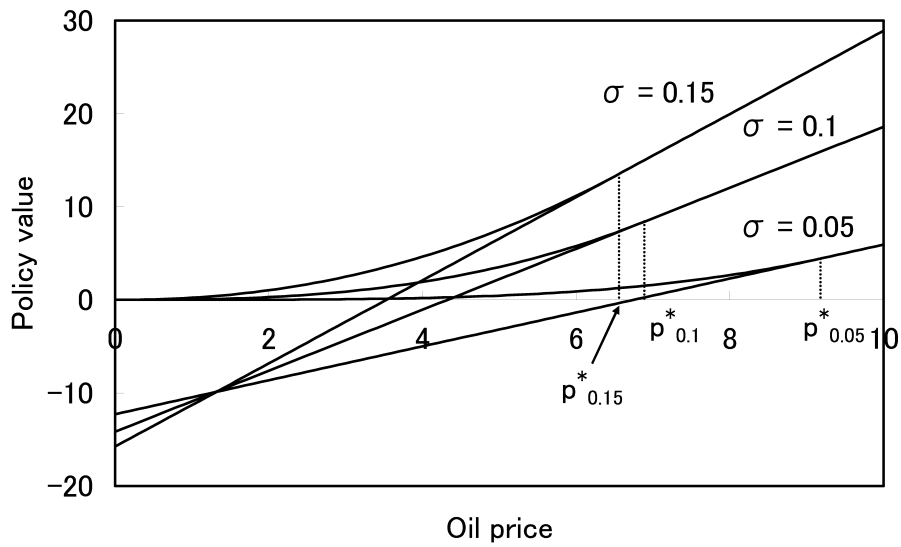


図8 ボラティリティの影響

#### 4.1.3 結論

本節では、リアル・オプション・アプローチを用いて、石油価格が不確実な状況下、石油エネルギーからガスパイプラインを導入し天然ガスエネルギーへ政策転換するときの費用・便益分析を

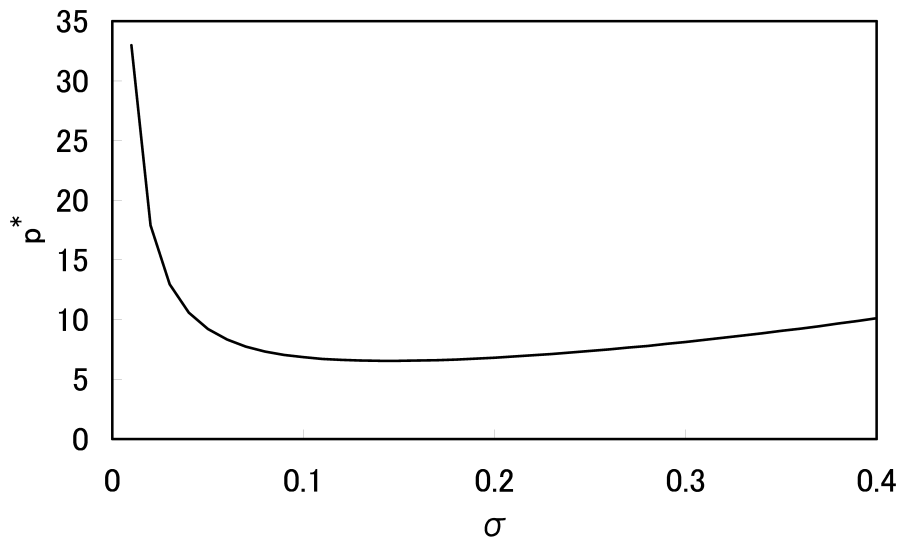


図9 ボラティリティと政策転換閾値との関係

行った。政策転換に対する建設費，建設期間の影響を定量的に示し，建設費増加や建設期間延長の価値損失を算出した。また，政策価値や転換のタイミングに関して不確実性の影響を分析した。その結果，石油価格が安定な状況と比べ，より早急にガスパイプラインを導入し，天然ガスエネルギーへ転換することが望ましいことが分かった。今後，実際のパラメータを用いて分析する予定である。

## 参考文献

- [1] 朝倉堅五 「国土幹線パイプライン基本計画」10月31日、法政大学
- [2] 三菱総合研究所 天然ガスパイプライン事業部（編著）国土幹線ガスパイプライン。東洋経済新報社（2000）。
- [3] 資源エネルギー庁 <http://www.enecho.meti.go.jp/energy/lng/lng01.htm>
- [4] Pindyck, R.S., Irreversibilities and the timing of environmental policy. *Resource and Energy Economics*, **22**, (2000) 233-259.
- [5] Pindyck, R.S., Optimal timing problems in environmental economics. *Journal of Economic Dynamics & Control*, **26**, (2002) 233-259.
- [6] A. K. Dixit and R. S. Pindyck: *Investment under Uncertainty* (Princeton University Press, Princeton, (1994).

## 付録A エネルギー換算表



表 2 エネルギー換算表

エネルギー MJ ( $10^6$ J)	電力 kWh	熱量 kcal	原油換算 kl	原油換算 ton	BTU
1	0.278	239	$.0258 \times 10^{-3}$	$.0239 \times 10^{-3}$	948