

京都大学大学院 学生会員 和田 尚之  
 京都大学防災研究所 正会員 横松 宗太  
 京都大学防災研究所 正会員 岡田 憲夫

## 1 はじめに

現代の文明は電気エネルギーによって支えられている。日本は電気エネルギー生産量の約 3 割を原子力発電所によって賄ってきた。しかし、東日本大震災の発生によって原子力発電の内包するリスクが明らかとなった今となつては、旧来のエネルギー生産体制を維持することは難しい。そこで、本研究では、新エネルギーに対する技術開発投資と、原子力発電の閉鎖や建設を将来にわたつてどのようにコントロールすべきかについて検討する。尚、本研究における新エネルギーとは太陽光発電、風力発電、地熱発電、バイオマス発電、水力発電等である。

## 2 基本モデル

原子力発電と新エネルギーによる発電をリスクの観点から比較すると、原子力による発電はリスクが高く、新エネルギーによる発電は、リスクは低いが、現在の技術水準では発電効率が低く、実用化という点から芳しくない。そこで、本研究では新エネルギーによる発電のコストを小さくするための研究開発投資が必要と考える。但し、本研究における「リスク」とは、事故がある時点で確率事象として起き、その地域に人が住めなくなることを表している。代表的個人の最適化行動を以下のように定式化する。

$$\max_{c(t), i(t), z(t)} E_T \left\{ \int_0^T U(c(t)) \exp(-\rho t) dt + W \exp(-\rho T) \right\} \quad (1)$$

上式において、 $c$  は電力を用いた生産物の消費量を、 $i$  は新エネルギーへの技術開発投資を表す。 $z$  は原発の毎期の変化量を表し、閉鎖するとき正の値をとるとする。 $\rho$  は時間的割引率を表す外生変数であり、 $T$  は原発事故が発生する時刻、 $U(c(t))$  は  $c(t)$  に関する効用関数、 $W$  は終端効用を表す定数である。ここで、 $T$  は確率変数とする。 $E_T$  は期待値記号であ

る。目的関数は、時刻  $T$  以降、放射能による影響を受けた終端効用  $W$  の下で暮らしてゆく個人の生涯効用の期待値を意味している。 $T$  の到着をハザード関数を用いて  $h(N(t)) = \frac{\phi(t)}{1-\Phi(t)}$  のように表現する。 $h(N(t))$  はハザード率と呼ばれる。 $h'(N(t)) > 0$ 、 $h''(N(t)) < 0$  とする。 $N(t)$  は、時刻  $t$  における原発のストックを表す状態変数とする。災害事象の発生確率を同時に考えるために目的関数にハザード関数を組み込むと個人の最適化行動は以下ようになる。

$$\max_{c, i, z} \int_0^\infty \{U(c) + h(N(t))W\} \exp(-\rho t - \int_0^t h(N(t')) dt') dt \quad (2)$$

(2) 式では、個人の主観的割引率は  $\rho$  と  $\frac{\int_0^t h(N(t')) dt'}{t}$  の和として表現される。つまり、主観的割引率が原発の存在によって増加したことが分かる。(2) 式は、無限的視野をもつ確定的最適制御問題としての表現である。本モデルの制約条件を以下のように与える。

$$c(t) = f(E_1(N(t)) + E_2(X(t))) - i(t) \left\{ 1 + A \left( \frac{i(t)}{X(t)} \right) \right\} \quad (3)$$

$$\dot{N}(t) = -z(t) \quad (4)$$

$$-\bar{z}' \leq z \leq \bar{z} \quad (5)$$

$$E_1 = E_1(N(t)), E_1'(N(t)) > 0, E_1''(N(t)) < 0 \quad (6)$$

$$\dot{X}(t) = i(t) \quad (7)$$

$$E_2 = E_2(X(t)), E_2'(X(t)) > 0, E_2''(X(t)) < 0 \quad (8)$$

(3) 式は予算制約を表している。 $f$  は生産関数を表している。 $E_1(t)$  は原子力発電による電力を表す。 $E_2(t)$  は新エネルギーによる電力を表す。 $E_1(t)$  と  $E_2(t)$  の合計が全電気量である。 $A \left( \frac{i(t)}{X(t)} \right)$  は調整費用関数を表しており、 $A$  は凸、 $A \geq 0$ 、 $A(0) = 0$ 、 $A' > 0$ 、 $A'' < 0$  を満たす。 $X(t)$  は新エネルギーの技術水準を表す状態変数とする。(4) 式は原発の制御過程を表している。(5) 式は 1 時点の原発の変化量の可能

域を表している。尚、原発の最大閉鎖量を  $\bar{z}$ 、最大増加量を  $-\bar{z}'$  とした。(6) 式は原子力による電力の生産関数とその性質を表している。(7) 式は新エネルギーの技術水準と新エネルギーへの研究開発投資の関係を表している。(8) 式は新エネルギーによる電力の生産関数とその性質を表している。以上の制約条件の下で、目的関数の最大化問題を解く。

### 3 原発の制御ルールと新エネルギーの投資ルール

1 階の最適化条件を整理して、原発のシャドウプライスを以下のように得る。

$$\nu(t) = \int_t^\infty \left[ W \frac{dh(N)}{dN} + \mu \frac{\partial f}{\partial E_1} \frac{dE_1}{dN} + [U(c) + h(\tau)W - \mu\{c + i(1 + A(\frac{i}{X})) - f(E_1 + E_2)\} + qi - \nu z] \left( -\frac{dh(N)}{dN} \right) \right] \exp\{-\rho(\tau - t) - \int_t^\tau h(N(t'))dt'\} d\tau \quad (9)$$

原発の増加によるメリットは  $\int_t^\infty \left[ W \frac{dh(N)}{dN} + \mu \frac{\partial f}{\partial E_1} \frac{dE_1}{dN} \right] \exp\{-\rho(\tau - t) - \int_t^\tau h(N(t'))dt'\} d\tau$  の部分である。第一項は原発後の社会において  $W$  という厚生をより早く得られるというメリットである。第二項は生産のための電力が増加するというメリットである。原発の増加によるデメリットは  $\int_t^\infty [U(c) + h(\tau)W - \mu\{c + i(1 + A(\frac{i}{X})) - f(E_1 + E_2)\} + qi - \nu z] \left( -\frac{dh(N)}{dN} \right) \cdot \exp\{-\rho(\tau - t) - \int_t^\tau h(N(t'))dt'\} d\tau$  である。これは最適成長経路上でハミルトニアンが意味するところの経済厚生が減少することを意味する。原発の制御ルールは以下のようになる。

$$\begin{cases} \nu < 0 \text{ の時, } & z = \bar{z} \\ \nu > 0 \text{ の時, } & z = -\bar{z}' \end{cases} \quad (10)$$

新エネルギーのシャドウプライスは次式に決まる。

$$q(t) = \int_t^\infty \left[ \mu \left[ \frac{\partial f}{\partial E_2} \frac{dE_2}{dX} + \left( \frac{i}{X} \right)^2 A' \left( \frac{i}{X} \right) \right] \cdot \exp(-\rho(\tau - t) - \int_t^\tau h(N(t'))dt') d\tau \quad (11)$$

(11) 式の右辺第一項は新エネルギーの技術水準が上がることによる生産の増加を意味している。第二項は新エネルギーに対する技術開発投資を行うほど調整費用が下がることを意味している。新エネルギーの投資ルールは以下のようになる。

$$\begin{cases} \frac{q(t)}{\mu(t)} \geq 1 : \text{投資を行う。} \\ \frac{q(t)}{\mu(t)} < 1 : \text{投資を行わない。} \end{cases} \quad (12)$$

以上から、新エネルギーのシャドウプライス  $q$  は、原発のリスクにより割引を受けること、したがって

新エネルギーへの技術開発投資と同時に原発の発電量を減らさなければ新エネルギーのシャドウプライスは上がらず、新エネルギー開発投資は十分に行われないことが分かる。

### 4 原発の安全性の変化がシャドウプライスに与える影響

以下では、原発の安全性の変化がシャドウプライスに与える影響を分析するためにハザード率  $h(N)$  を  $\varepsilon \bar{h}(N)$  で置き換える。 $\varepsilon$  を外生変数とする。尚、 $U(c) + \varepsilon \bar{h}(\tau)W - \mu\{c + i(1 + A(\frac{i}{X})) - f(E_1 + E_2)\} + qi - \nu z = H^{c*}$  とする。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \nu(t)}{\partial \varepsilon} &= \int_t^\infty \left[ \left\{ W \frac{d\bar{h}(N)}{dN} - \bar{h}(N)W\varepsilon \frac{d\bar{h}(N)}{dN} + H^{c*} \cdot \left( -\frac{d\bar{h}(N)}{dN} \right) \right\} \exp\{-\rho(\tau - t) - \varepsilon \int_t^\tau \bar{h}(N(t'))dt'\} \right. \\ &\quad \left. + \{(W - 1)\varepsilon \frac{d\bar{h}(N)}{dN} + \mu \frac{\partial f}{\partial E_1} \frac{dE_1}{dN} H^{c*}\} \cdot \exp\{-\rho(\tau - t) - \varepsilon \int_t^\tau \bar{h}(N(t'))dt'\} \left( -\int_t^\tau \bar{h}(N(t'))dt' \right) \right] d\tau \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q(t)}{\partial \varepsilon} &= \int_t^\infty \left[ \mu \left[ \frac{\partial f}{\partial E_2} \frac{dE_2}{dX} + \left( \frac{i}{X} \right)^2 A' \left( \frac{i}{X} \right) \right] \exp\{-\rho(\tau - t) - \varepsilon \int_t^\tau \bar{h}(N(t'))dt'\} \right. \\ &\quad \left. - \varepsilon \int_t^\tau \bar{h}(N(t'))dt' \right] \left( -\int_t^\tau \bar{h}(N(t'))dt' \right) d\tau < 0 \quad (14) \end{aligned}$$

(13) 式から、 $W$  が十分に小さく、かつ  $\mu$  や  $\frac{\partial f}{\partial E_1}$  が十分な大きさを持つときには  $\frac{\partial \nu(t)}{\partial \varepsilon} < 0$  である。(14) 式から、 $\frac{\partial q(t)}{\partial \varepsilon}$  は常に負である。したがって、原発の安全性が低下した場合、すなわち  $\varepsilon$  が増加した場合、原発のシャドウプライス、新エネルギーのシャドウプライスは低下することが分かる。この時、(10) から制御ルールは変化せず、(12) から新エネルギーに対する投資のルールは、投資を行わない件数が増加する。この結果からも、原発の安全性と新エネルギー開発の価値は補完的な関係にあることが分かる。

### 5 おわりに

本研究では、原発の制御ルールや新エネルギーに対する投資ルールを導いた。また、原発の安全性の変化がシャドウプライスに与える影響を分析した。その結果、原子力発電所で事故が発生する確率は社会の一般化割引率を増加させ、それが新エネルギーのシャドウプライスを減少させる。そのため、効果的な新エネルギー開発投資を進めるためには、計画的に原発を閉鎖していくことが重要であることを指摘した。また、原発の安全性が低下した場合、新エネルギーに対する投資ルールにおいて、投資を行わない場合が増加することを指摘した。