土木学会論文集 No.0/I–1, pp.1–4, 2012.5

原子力発電と新エネルギー開発投資の シャドウプライスの構造に関する一考察

和田尚之[1]・横松宗太[2]

[1]学生会員　京都大学大学院工学研究科 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所)
E-mail: wada@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp
[2]正会員　工博　京都大学准教授　防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: yoko@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

本研究では，原子力発電から新エネルギーによる発電へと長期的に転換を進める際のシャドウプライスの構造について検討する．その際，転換期間中に起こりえる原子力事故のリスクや，事故発生による放射性物質の拡散の被害を考慮する．そして，シャドウプライスにおける将来便益の割引率が，時間的割引率のみならず，原発と人口集積地の間の距離を反映した空間的割引率や，原発事故の到着率に依存することを明らかにする．

Key Words : *Nuclear risk, alternative energy, dynamic optimization, shadow price*

1.　はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故によって，原子力発電のリスクが広く社会に認識されるようになった[1)]．世間では脱原発，反原発のスローガンが唱えられている．一方，今すぐに全ての原発を停止させることは性急であるとの意見もある．太陽光発電，風力発電，地熱発電などの新エネルギーが，低コスト化などにおいてまだ十分に開発されていないとの指摘もある．

そのような中で，多数の同意を得ている見方として，今後数十年をかけて原子力発電をゼロにしていくという方向性がある[2)3)]．しかしながら，それが 30 年であるのか，40 年であるのかを科学的に決定するための理論的な枠組みは提示されていない．エネルギー政策が長期的な視点を要する問題であることに異論は存在しないが，長期的政策を分析するモデルは開発されていない．

本研究では動学的最適化モデルを用いて，原子力事故のリスク下におけるエネルギー転換政策について分析する．事故による被害は放射性物質の拡散と考える．そこでは放射性物質を含む物資の流通によって拡がる二次拡散も含めることとする．二次拡散の具体的な事例としては，2012 年 3 月 17 日に秋田県大館市の木質ペレット製造業者が市内の事業所などから回収したペレットストーブの焼却灰の一部から，チェルノブイリ原発事故によるものと思われる放射性物質が検出された事例等が挙げられる[4)]．また，土壌に付着したセシウム 134 やセシウム 137 といった放射性物質が風雨によって飛ばされることや，放射性瓦礫の処分の問題，粉ミルクから放射性セシウムが検出された事例が挙げられる[5)]．以下，**2.** では，エネルギー転換問題の目的関数としての社会厚生関数を導く．**3.** では，原子力発電や新エネルギーのシャドウプライスを導出し，その構造を分析する．また最適なエネルギー転換ルールについて検討する．**4.** では，本研究の結果と今後の課題を示す．

2.　モデル

(1)　生涯期待効用関数

原子力発電所の所在地を $x = 0$ とした 1 次元空間を考える．原子力事故が発生すると，地域社会の生活環境は一変する．個人の効用は $u(x,t)$ から $\tilde{u}(x,t)$ へと変化するものとする．ただし t は時刻，x は居住地点を表す．時点 0 における個人の生涯期待効用関数は以下のように表される．

$$\Gamma(x) = E_\tau\left[\int_0^\tau u(x,t)\exp(-\rho t)dt + \int_\tau^\infty \tilde{u}(x,t|\tau)\exp(-\rho t)dt\right] \quad (1)$$

ただし，τ は原子力事故が発生する時刻であり，確率変数である．E_τ は τ に関する期待値操作を意味する．ρ は時間的割引率を表す．原子力事故の到着は高々 1 回であると仮定する．個人は時刻 τ 以降，無限の将来まで放射能による影響を受けた環境で暮らすものとする．

事故の発生後，放射性物質は拡散方程式に従って空間を移動するものと仮定する．既述のように，本モデルでは主として放射性物質を含む物品や天然資源等の移動

による拡散，すなわち２次拡散を対象とする．地点 x で時刻 t に存在する放射性物質の量を $P(x,t)$ とする．今，事故によって放出される放射性物質の量を P_0 とする．また，初期放出以外に放射性物質の放出はないものと仮定する．１次元空間を Δx の間隔で離散化すると，時刻 t に地点 x に存在した物理量は時刻 $t+\Delta t$ には $\frac{1}{2}$ の確率で地点 $x+\Delta x$ に，$\frac{1}{2}$ の確率で地点 $x-\Delta x$ に飛び移るものとする．すると，$t+\Delta t$ における $P(x,t+\Delta t)$ の期待値は $P(x,t+\Delta t)=\frac{1}{2}P(x+\Delta x,t)+\frac{1}{2}P(x-\Delta x,t)$ と表される．$\Delta x,\Delta t$ が十分小さいと仮定し，各項を Taylor 展開した後に整理すると以下の拡散方程式が導かれる．

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\kappa\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \tag{2}$$

ただし，κ は拡散係数であり，$\kappa=\frac{(\Delta x)^2}{2\Delta t}(>0)$ により得られる．上式 (2) を解くことにより，時刻 $t(>\tau)$，地点 x における放射性物質の物理量 $P(x,t-\tau)$ は以下のように導かれる．

$$P(x,t-\tau)=\frac{P_0}{2\{\pi\kappa(t-\tau)\}^{\frac{1}{2}}}\cdot\exp\left\{-\frac{x^2}{4\kappa(t-\tau)}\right\} \tag{3}$$

τ は原子力事故が発生した時刻である．

一方，原子力事故の到着をハザード関数を用いて以下のように表現する．

$$h(N(t))=\frac{\phi(t)}{1-\Phi(t)} \tag{4}$$

$h(N(t))$ はハザード率を表す．$N(t)$ は時刻 t における原発のストック量を表す．$h'(N(t))>0$，$h''(N(t))<0$ を仮定する．すなわち原発ストックの量が多いほど事故の発生率が高いものと仮定する．$\Phi(t)$ は時刻 t までに事故が発生した累積分布を表し，$\phi(t)$ はその確率密度である．すなわち $\phi(t)=d\Phi(t)/dt$ である．以上より，次の微分方程式が得られる．

$$\dot{\Phi}(t)=\{1-\Phi(t)\}h(N(t)) \tag{5}$$

初期条件 $\Phi(0)=0$ を考慮して，時刻 0 から時刻 t まで積分することにより，次式が導かれる．

$$1-\Phi(t)=\exp\{-\int_0^t h(N(t'))dt'\} \tag{6}$$

式 (6) は事故事象が時刻 t まで生じない確率を表す．したがって，時刻 0 から時刻 t まで災害が発生せず，かつ期間 $[t,t+dt]$ に災害が発生する確率 $\pi(t)dt$ は以下のようになる．

$$\pi(t)dt=h(N(t))\exp\{-\int_0^t h(N(t'))dt'\}dt \tag{7}$$

本モデルでは生産や個人の消費・貯蓄行動を捨象するため，原子力事故の前後の効用関数を以下のように単純化する．

$$u(x,t)=0 \quad (t<\tau) \tag{8a}$$

$$\tilde{u}(x,t|\tau)=-P(x,t-\tau) \quad (t\geq\tau) \tag{8b}$$

したがって，地点 x に住む個人の期待生涯効用 $\Gamma(x)$ は以下のようになる．

$$\begin{aligned}\Gamma(x)&=E_\tau\left[\int_\tau^\infty \tilde{u}(x,t|\tau)\exp(-\rho t)dt\right]\\&=\int_0^\infty \pi(\tau)\left\{\int_\tau^\infty -P(x,t-\tau)\exp(-\rho t)dt\right\}d\tau\end{aligned} \tag{9}$$

$0\leq\tau\leq t<\infty$ に留意して積分順序を入れ替える等の操作をして整理すると次式を得る．

$$\begin{aligned}\Gamma(x)&=\int_0^\infty \pi(t)B(x,t)\exp(-\rho t)dt\\&=\int_0^\infty h(t)B(x,t)\exp\left\{-\rho t-\int_0^t h(t')dt'\right\}dt\end{aligned} \tag{10}$$

ただし，$h(t)=h(N(t))$ であり，時刻 t に原発ストックが $N(t)$ であるときの事故の到着率を表す．また，

$$B(x,\tau)=\int_\tau^\infty -P(x,t-\tau)\exp\{-\rho(t-\tau)\}dt \tag{11}$$

であり，事故発生時刻 τ における地点 x の放射性物質の価値を表す．ただし $B(x,\tau)<0$ であり，負の価値をもつ資産として表現している．したがって，式 (10) より，地点 x の個人の生涯期待効用水準 $\Gamma(x)$ は，毎時，放射性物質資産の期待値 $h(t)B(x,t)$ が得られる流列の割引現在価値に等しいことがわかる．このときの割引率は事故の到着率によってマークアップされることになる．つまり，一般化割引率は原発ストック $N(t)$ によって増加する．

(2) 社会厚生関数

社会の全人口を 1 に基準化し，人口密度を $\theta(x),(x_1\leq x\leq x_2)$ とする．社会全体の生涯期待効用水準の総和は以下のように表される．

$$W_0=\int_{x_1}^{x_2}\Gamma(x)\theta(x)dx \tag{12}$$

式 (10) を用いて変形すると，

$$\begin{aligned}W_0&=\int_0^\infty\left\{\int_{x_1}^{x_2}B(x,t)\theta(x)dx\right\}\\&\quad\cdot h(t)\exp\left\{-\rho t-\int_0^t h(t')dt'\right\}dt\\&=\int_0^\infty h(t)M(t)\exp\left\{-\rho t-\int_0^t h(t')dt'\right\}dt\end{aligned} \tag{13}$$

ただし，

$$M(t)=\int_{x_1}^{x_2}B(x,t)\theta(x)dx \tag{14}$$

であり，時刻 t で原子力事故が発生した場合の社会全体にとっての放射性物質の価値を表す．$M(t)<0$ である．

本研究では現在から将来にわたって原子力発電から新エネルギーへと転換するための新エネルギー開発投資について考える．本モデルでは，原子力事故の不確実性と転換計画の関係のみに関心を集中するため，毎時点の原発による発電量と新エネルギーによる発電量

の総量は一定と仮定してモデルを簡単化する．よって以下のような制約条件を設ける．

$$N(t) + G(t) = \Omega \ (= \text{const.}) \tag{15}$$

$G(t)$ は新エネルギーの発電施設の量を表す．施設の量は発電量に比例すると考える．時刻 t における，原子力発電から新エネルギー発電への転換の量を $z(t)$ と表す．発電量一定の仮定より，次式が従う．

$$-\dot{N}(t) = \dot{G}(t) = z(t) \tag{16}$$

エネルギー転換 $z(t)$ に要する費用は $C(z(t))$ により与えられるものとする．$C'(z(t)) > 0, C''(z(t)) > 0$ を仮定する．社会厚生関数を以下のように定義する．

$$\begin{aligned}W &= W_0 - \int_0^\infty C(z(t))\exp(-\rho t)dt \\ &= \int_0^\infty h(t)M(t)\exp\left\{-\rho t - \int_0^t h(t')dt'\right\}dt \\ &- \int_0^\infty C(z(t))\exp(-\rho t)dt\end{aligned} \tag{17}$$

社会的最適化問題は以下のように表される．

$$\begin{aligned}&\max_{z(t)} \ W \\ &\text{subject to} \ \ 式 (15), 式 (16)\end{aligned} \tag{18}$$

問題 (18) は，無限的視野をもつ確定的最適制御問題として表現されている[6)]．

3. シャドウプライスの構造

(1) 最適エネルギー転換ルール

問題 (18) の当該期価値ハミルトニアンは以下のようになる．

$$\begin{aligned}H &= M(t)h(N(t))\exp\left\{-\int_0^t h(N(t'))dt'\right\} - C(z(t)) \\ &+\lambda(t)\{\Omega - N(t) - G(t)\} + \nu(t)z(t) - \mu(t)z(t)\end{aligned} \tag{19}$$

$\lambda(t)$ は式 (15) に対応したラグランジュ乗数，$\nu(t)$ は新エネルギーのシャドウプライス，$\mu(t)$ は原発のシャドウプライスを表す．１階の条件は以下のようになる．

$$C'(z(t)) = \nu(t) - \mu(t) \tag{20a}$$

$$\dot{\nu}(t) - \rho\nu = \lambda(t) \tag{20b}$$

$$\begin{aligned}\dot{\mu}(t) - \rho\mu &= -M(t)h'(N(t)) \\ &\cdot \exp\left\{-\int_0^t h(N(t'))dt'\right\} + \lambda(t)\end{aligned} \tag{20c}$$

$$\lim_{t\to\infty} \nu(t)G(t) = 0 \tag{20d}$$

$$\lim_{t\to\infty} \mu(t)N(t) = 0 \tag{20e}$$

ここで，新エネルギーと原発のシャドウプライスの差を $q(t)$ により表すこととする．

$$q(t) := \nu(t) - \mu(t) \tag{21}$$

式 (20a) より，時刻 t の最適エネルギー転換水準 $z^*(t)$ はその時点の $q(t)$ に依存して決定することになる．

$$\begin{aligned}&C'(z^*(t)) = q(t) \\ &\Rightarrow \quad z^*(t) = z^*(q(t)), \quad z^{*\prime}(q(t)) > 0\end{aligned} \tag{22}$$

$z^*(t)$ は $q(t)$ の増加関数となる．式 (20b) から式 (20c) を差し引くと以下のようになる．

$$\begin{aligned}&\{\dot{\nu}(t) - \dot{\mu}(t)\} - \rho\{\nu(t) - \mu(t)\} \\ &= \dot{q}(t) - \rho q(t) \\ &= M(t)h'(N(t))\exp\left\{-\int_0^t h(N(t'))dt'\right\}\end{aligned} \tag{23}$$

右辺は時刻 t の瞬間に災害が到着した場合の期待被害額の増分を表している．式 (20d)(20e) より，

$$\lim_{t\to\infty} q(t)\{G(t) - N(t)\} = 0 \tag{24}$$

さらに $G(t) - N(t) < \Omega$ であることに留意すると，シャドウプライス $q(t)$ は以下のように収束することがわかる．

$$\lim_{t\to\infty} q(t) = 0 \tag{25}$$

上記の値を終端条件として式 (23) を解くと，$q(t)$ は以下のようになる．

$$\begin{aligned}q(t) =& \int_t^\infty -M(\tau)h'(N(\tau))\exp\left\{-\int_0^\tau h(N(t'))dt'\right\} \\ &\cdot\exp\{-\rho(\tau - t)\}d\tau\end{aligned} \tag{26}$$

$M(t) < 0$ より $q(t) > 0$ であり，新エネルギーのシャドウプライス $\nu(t)$ の方が原発のシャドウプライス $\mu(t)$ よりも大きいことがわかる．以下では $q(t)$ の構造を調べる．右辺の積分の中の，$h'(N(\tau))\exp\{-\int_0^\tau h(N(t'))dt'\}$ は，時刻 τ まで災害が到着せず，時刻 τ の瞬間に災害が到着する確率の増分を表す．よって原発 $N(\tau)$ を閉鎖していくときには，限界的閉鎖による確率の減少分を意味する．したがって，右辺の１行目は，時刻 τ で原発 $N(\tau)$ を１単位閉鎖させることによる（負である）期待資産額の減少分を表す．すなわち原発ストックを減少させることによる社会厚生の増分の期待値を表す．シャドウプライス $q(t)$ は社会厚生で評価した，将来にわたる原発閉鎖の限界便益の時点 t における価値を表している．

式 (20a) を t で微分すると，以下のようになる．

$$C''(z(t))\cdot\dot{z}(t) = \dot{\nu}(t) - \dot{\mu}(t) \tag{27}$$

式 (20a)，(23) を考慮することにより次式を得る．

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) =& \rho\cdot\frac{C'(z(t))}{C''(z(t))} + \frac{1}{C''(z(t))} \\ &\cdot M(t)h'(N(t))\exp\left\{-\int_0^t h(N(t'))\right\}dt'\end{aligned} \tag{28}$$

上式は原子力から新エネルギーへの転換の速度を表している．

(2) 人口がある地点に集中している場合

人口が分布せずに地点 $\bar{x}$ に集中している場合，$q(t)$ は以下のようになる．

$$q(t) = \int_t^\infty \int_\tau^\infty h'(N(\tau)) \frac{P_0}{2\{\pi\kappa(\tau'-\tau)\}^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp\left\{-\rho(\tau'-t) - \frac{\bar{x}^2}{4\kappa(\tau'-\tau)} - \int_0^\tau h(N(t'))dt'\right\} d\tau' \cdot d\tau \tag{29}$$

式 (29) の右辺 2 行目の割引因子について考える．第 1 項 $\exp\{-\rho(\tau'-t)\}$ が時間的割引を，第 2 項 $\exp\{-\frac{\bar{x}^2}{4\kappa(\tau'-\tau)}\}$ が空間的割引[7]を，第 3 項 $\exp\{-\int_0^\tau h(N(t'))dt'\}$ が原子力事故の到着リスクに関する割引を表している．エネルギー転換政策を考慮する際の割引率は，原発との距離や事故の到着率を反映している．

また，式 (29) より，P_0 の減少や $\bar{x}$ の増加，κ の減少はシャドウプライス $q(t)$ を減少させ，その結果 $z(t)$ を減速させることがわかる．つまり，原発事故が発生した際に放出される放射性物質の総量の低下や，原発からより遠くへの居住地移転，汚染物質の 2 次拡散の防止等の対策は，原発の閉鎖を伴うエネルギー転換政策と代替的な役割を発揮するといえる．

4. おわりに

本研究では，原子力から新エネルギーへの転換を進める際のシャドウプライスの構造について，原子力事故のリスク下の動学的投資モデルを用いて分析を行った．そして，政策決定に適用されるべき割引率が，時間的割引率のみならず，原発と居住地との距離を反映した空間的割引率や，原発事故の到着率に依存していることを明らかにした．また，原発周辺住民の遠隔地への移転や，原発の部分的な運転停止措置等の代替的な政策との関係に関する示唆を得た．なお，本研究は多方面に課題を残している．今後は，原発による発電量を減少させる際の費用や原発を廃炉にする際の放射性物質の拡散，新エネルギーによる発電量を増加させる際の費用，財の消費による効用の増加等を考慮する必要がある．また 2 次拡散に関する拡散係数の大きさについても把握する必要がある．

参考文献

1) 国土交通省: http://www.mlit.go.jp/common/000139083.pdf
2) 長谷川公一：脱原子力社会へ，岩波新書，2011.
3) 大島堅一：原発のコスト，岩波新書，2011.
4) 秋田魁新報http://www.sakigake.jp/
5) 小出裕章：騙されたあなたにも責任がある　脱原発の真実，幻冬舎，2012.
6) Yaari, M. E.:Uncertain lifetime, life insurance, and the theory of the consumer, Review of Economic Studies, Vol.32, pp. 137-150, 1965.
7) Perrings, C. and Hannon, B.:An introduction to spatial discounting, Journal of Regional Science, Vol.41,No.1, pp.23-38, 2001.

(平成 24 年 5 月 4 日 受付)