

不確実性下の原子力発電プラントの廃止措置，設備更新， リプレースの経済性評価

千葉工業大学・社会システム科学部 高嶋 隆太 (Ryuta Takashima) *
Faculty of Social Systems Science,
Chiba Institute of Technology

東京大学・大学院工学系研究科 中田 翔治 (Shoji Nakada)
Graduate School of Engineering,
The University of Tokyo

電力中央研究所・社会経済研究所 長野 浩司 (Koji Nagano)
Socio-economic Research Center,
Central Research Institute of Electric Power Industry

1 はじめに

1.1 原子力発電の現状

現在，54 基の原子力発電プラントが稼働し，設備容量 4,884 万 7,000kW と原子力発電による電力量は日本の総発電電力量の約 3 割を占めている．建設中 2 基と着工準備中 12 基を加えると全 68 基，合計出力 6,815 万 5,000kW となる予定である．原子力発電は，石炭，石油による火力発電に比べて二酸化炭素の排出量が少なく，太陽光や風力発電に比べてエネルギーの安定供給が行えるという点で，現状としてはエネルギー自給率の低い日本において長期計画としては最も現実的な発電方法である (資源エネルギー庁，2006a)．しかしながら，原子力発電には事故時の大規模災害の危険性や，プルサーマルをはじめとする核燃料サイクルの確立，高レベル放射性廃棄物の処分問題など多くの課題も残されている (資源エネルギー庁，2007)．こうした現状の下，2005 年 10 月閣議決定された原子力政策大綱の中で原子力政策に対して基本目標が設定された．基本目標を達成するためには，円滑に原子力発電プラントのリプレースを進める必要がある．そこで，本稿では原子力発電プラントのリプレース問題に注目する．

原子力発電プラントの寿命は約 60 年と考えられており，高経年化した原子力発電プラントは適切な時期に廃止措置を取らなければならない．原子力プラントの廃止措置が取られた後も，原子力発電による電力供給を安定的に同水準に保つためには新たに代替プラントを新・増設する必要がある．この一連の事業が原子力発電リプレースである．現在稼働中のプラントの多くは 2030 年頃から本格的にリプレースが始まると予想されている (資源エネルギー庁，2006b)．供給計画どおりに新・増設が進んだ場合，原子力比率は総発電電力量の 35%前後を維持できるが，原子力発電プラントが 60 年間運転された後リプレースされず停止するものと仮定すると 2038 年度には 5,800 万 kW を割り込む水準となり 2014 年度の総発電電力量と比較すると 30%を下回るという試算が出ている (資源エネルギー庁，2006c)．

それゆえ，原子力の総発電電力量比を 30%～40%に維持するには，新・増設を円滑に進めていく必要性が高く，リプレースを考える場合，廃止措置，寿命延期となる設備更新を一体的に考えることが必要となる．我が国の商業用原子力発電プラントの廃止措置は，2001 年に東海発電所，2009

*275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1, E-mail: takashima@sun.it-chiba.ac.jp

年に浜岡発電所の1, 2号機が行ったが, これらのプラントの廃止措置をとるときに別の代替案として設備更新を行い寿命延期ということも考えられる。特に, 浜岡発電所の1, 2号機においては, 高額な設備更新費用がかかることから廃止措置をとったとされており, 廃止措置と寿命延期, リプレイスといった意思決定の選択を考えることは, 今後, 必要性が高くなるものと考えられる。

1.2 原子力発電投資における不確実性

原子力発電投資における不確実性として考えられるものには非常に多くのものが存在する。例えば, 電力需要量や技術革新, 代替エネルギーの可能性, さらに社会的合意形成の問題まで不確実性として考えることができる。その中で特に, プラントの経済性に関する不確実性の因子として, 電力価格や変動費があげられる。2005年に日本卸電力取引市場(JEPX)が開設され, 市場で取引がなされるようになった。JEPXにおけるスポットの取引量は系統需要全体の0.4%と少ないが, 価格は市場での取引により決定され, 日々, 不確実に推移している。原子力発電によって供給されている電力は相対取引であり, 市場で決定された売電価格ではないが, 卸電力市場が存在するため市場価格の推移を無視することはできず, その売電価格は市場価格と大きな乖離はせず相関があるものと予想される。

一方, 変動費は燃料費と運転維持費から構成される費用であり, 燃料価格の変動や設備のメンテナンス費用などによって左右される。運転維持費については高経年化したプラントほど, その費用は高額になることが容易に予想できるが, 燃料価格は市場の価格に依存する。原子力発電に必要な燃料は, ウラン燃料であり, 取引時には加工前の八酸化三ウラン(U_3O_8)の状態で行われる。2003年以降, ウラン価格は急激に上昇していることから, 燃料価格の不確実的な変動は存在するが, 燃料費に占める割合は少なく, 変動に係わる影響も小さいものと考えられる。以上の電力価格と変動費の現状を踏まえ, 本研究では原子力発電プラントの売電価格を不確実性因子として考える。

1.3 先行研究

これまでリアルオプションのフレームワークを用いた原子力発電プラント投資の経済性評価に関する研究が多数行われてきた。Pindyck (1993) は, 建設費の不確実性状況下における投資評価モデルを構築し, 1979年に起きたスリーマイル島原子力発電所事故後の新規建設中止の影響について分析している。Takizawa et al. (2001) は, 電力価格とウラン価格の不確実性を考慮し, これらが完全相関である仮定のもと, 原子力発電プラントの投資評価モデルを構築している。小田他 (2005) は, 売電価格の不確実性を考慮し, それが平均回帰過程にしたがうと仮定したとき, 原子力発電プラントの建設投資を実行する期間が有限である評価モデルを構築している。Gollier et al. (2005) は電力価格の不確実性状況下において, 出力1,200MWの軽水炉1基の建設投資と, 300MWのモジュール炉4基の逐次投資の評価を行い, 規模の経済と意思決定の柔軟性の比較を行っている。これらの分析から, 不確実性の増加によりモジュール炉が経済的に有利であることを明らかにしている。Rothwell (2006) は, プラント操業による収益が不確実である状況下において, 米国内でAPWRを建設するときのリスクプレミアムについての評価を行い, この分析から1,200\$/kW程度の建設費であれば, プラントを発注する誘因となることを明らかにしている。また, 我が国で2006年に導入された, 初期投資負担額の一部を引当金として積み立て, 運転開始後の減価償却費の負担を平準化できる制度に注目し, この平準化制度が投資の意思決定にどのように影響を及ぼすかを分析したものとして中田他 (2010) があげられる。中田他 (2010) では, この

制度の導入により、投資が促進されることを明らかにしている。また、Takashima (2009) は、以前から用いられてきた減価償却法から、このような新しい制度に切り替わる不確実性、すなわち制度の不確実性に注目し、新規建設投資の問題について分析している。

このように多くの先行研究が見受けられる中で、本稿の関連研究として、小野・神蘭 (2004), Takashima et al. (2007), Naito et al. (2010) があげられる。小野・神蘭 (2004) は、シミュレーションによるリアルオプションモデルを構築し、電力価格の不確実性状況下において廃止措置もしくは寿命延期の意思決定について分析している。また、Takashima et al. (2007) は、小野・神蘭 (2004) と同じような問題設定により廃止措置と設備更新の選択について定式化を行っている。これらの研究では、廃止措置、もしくは寿命延期の意思決定を行う他に、意思決定を延期する3つの領域があることが明らかにしている。これらは廃止措置と寿命延期という現実的な問題設定でモデル化を行っているが、将来重要となる廃止措置後の新規プラントのリプレースを考慮していない。一方、Naito et al. (2010) はリプレースプロジェクトの経済性評価を行っており、リプレースを廃止措置とその後の新規プラント建設の逐次的な意思決定である定義し、不確実性や廃止措置期間の影響について分析している。このように Naito et al. (2010) では、廃止措置後の投資問題も考慮してモデル化を行っている。

2 モデル

本節では、まず、本稿で扱う不確実性について述べ、モデルの設定と仮定について説明する。これらの設定や仮定の下で、原子力発電プラントの廃止措置、設備更新、リプレースの経済性評価モデルを導出する。

2.1 モデル設定と仮定

本稿では、前述のとおり不確実性状況下における原子力発電プラントの廃止措置、設備更新、リプレースの経済性評価を行う。原子力発電プラントの投資における不確実性、リスクの因子として、建設費、燃料費、売電価格、廃炉費用、訴訟、計画外停止、規制変更等の様々ものがあげられる。本稿では、これらの不確実性が売電価格に集約されるとする。また、原子力発電での電力売買は相対取引ベースであるが、相対取引における価格は、卸電力市場におけるシステム価格と乖離しないとする。それゆえ、売電価格は幾何ブラウン運動に従うと仮定する。

$$dP_t = \mu P_t dt + \sigma P_t dW_t, \quad P_0 = p, \quad (1)$$

ここで μ は売電価格の期待増加率、 σ は不確実性の指標であるボラティリティ、 W_t は標準ブラウン運動である。燃料費と運転維持費を含んだ変動費を C 、設備利用率を経年化による低下を考慮し

$$\alpha_t = \alpha_0 e^{-\delta t} \quad (2)$$

とする。ここで δ は低下率である。これらより、プラントの運転から得られる収益フロー π_t は以下のように表すことができる：

$$\begin{aligned} \pi_t &\equiv \pi(P_t; \delta, C) = \alpha_t P_t - C, \\ &= \alpha_0 e^{-\delta t} P_t - C. \end{aligned} \quad (3)$$

後述するモデル導出の簡便化のため以下のような変数変換を行う：

$$X_t := P_t e^{-\delta t}. \quad (4)$$

(1) 式と (4) 式から、以下のように X_t が従う確率微分方程式が導出される：

$$dX_t = (\mu - \delta)X_t dt + \sigma X_t dW_t, \quad X_0 = x, \quad (5)$$

以下では、この X_t を状態変数としてモデル化を行う。また、原子力発電プラントの建設費を I 、建設期間を T 、プラント寿命を L とする。また、設備更新、廃止措置に関する費用をそれぞれ K, U とする。

2.2 新規設置オプション

本節では、原子力発電プラントの新規設置投資問題の評価モデルについて、McDonald and Siegel (1986) が構築した投資オプションの基本モデルに、建設期間とプラント寿命を加味した拡張モデル (Gollier et al., 2005) に従い、定式化する。

投資費用を支払い、建設期間を経てプラントの操業が開始し、操業停止までの間利益フローが発生する。このときの建設投資を含めたプラントの価値は、

$$F(x) \equiv \sup_{\tau \in \mathcal{V}_i} \mathbb{E} \left[\int_{\tau+T}^{\tau+T+L} e^{-\rho t} \pi_t dt - e^{-\rho \tau} I \right], \quad (6)$$

となる。ただし、 ρ は割引率、 τ は建設投資時刻を表しており、 $\mathcal{V}_i$ は考えられるすべての投資時刻 (τ) の集合である。最適な投資の時刻は以下のように表すことができる

$$\tau^* = \inf \{t \geq 0 \mid X_t \geq X^*\}, \quad (7)$$

ここで、 X^* は最適な投資の閾値を表している。

投資後のプラント操業による期待現在価値は、

$$\begin{aligned} V(x) &= \mathbb{E} \left[\int_T^{T+L} e^{-\rho t} \alpha_0 X_t - C dt - I \right] \\ &= A_1 \frac{\alpha_0 x}{\rho - \mu + \delta} - A_2 \frac{C}{\rho} - I \end{aligned} \quad (8)$$

である。ここで、 $A_1 = e^{-(\rho - \mu + \delta)T}(1 - e^{-(\rho - \mu + \delta)L})$ 、 $A_2 = e^{-\rho T}(1 - e^{-\rho L})$ 、である。投資オプション価値を満たす微分方程式は、Bellman 方程式より、

$$\frac{1}{2} \sigma x^2 F''(x) + \mu x F'(x) - \rho F(x) = 0, \quad (9)$$

となる。境界条件は以下のとおりである：

$$\begin{cases} F(0) = 0 \\ F(X^*) = V(X^*) \\ F'(X^*) = V'(X^*) \end{cases} \quad (10)$$

第一の条件式は、 X の水準が 0 に近づけば、投資を延期することのオプション価値も 0 になることを表している。第二と第三の条件式は、value-matching, smooth-pasting 条件を表している。これらの境界条件の下、微分方程式 (9) 式を解くと、

$$F(x) = \left(\frac{x}{X^*} \right)^{\beta_1} V(X^*) \quad (11)$$

となる。ここで、 β_1 は $\frac{1}{2}\sigma^2\beta(\beta-1) + (\mu-\delta)\beta - r = 0$ の正の根、すなわち、

$$\beta_1 = \frac{1}{2} - \frac{\mu-\delta}{\sigma^2} + \sqrt{\left(\frac{\mu-\delta}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}} > 1 \quad (12)$$

である。投資の閾値 X^* は、

$$X^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \frac{\rho - \mu + \delta}{A_1 \alpha_0} \left(\frac{A_2 C}{\rho} + I \right) \quad (13)$$

となる。NPV 法による投資の閾値 X_{npv} と比較すると、 $\frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} > 1$ であることから、 $X_{npv} < X^*$ となることがわかる。すなわち、NPV 法による判断と比較して、投資オプションを考慮すると、投資の決定をより遅らせることが分かる。

2.3 廃止措置オプション

本節では、原子力発電プラントの廃止措置問題を考える。現時点において、原子力発電プラントが操業状態にあり、廃止措置の時点まで利益フローが発生する。このとき、廃止措置プロジェクトの価値は、

$$F_d(x) \equiv \sup_{\tau_d \in \mathcal{V}_d} \mathbb{E} \left[\int_0^{\tau_d} e^{-\rho t} \pi_t dt - e^{-\rho \tau_d} K \right], \quad (14)$$

となる。ただし、 τ_d は廃止措置時刻を表しており、 $\mathcal{V}_d$ は考えられるすべての廃止措置時刻 (τ_d) の集合である。最適な廃止措置の時刻は以下のように表すことができる：

$$\tau_d^* = \inf \{ t \geq 0 \mid X_t \leq X_d^* \}. \quad (15)$$

ここで、 X_d^* は最適な廃止措置の閾値を表している。

廃止措置オプションの価値を満たす微分方程式は、Bellman 方程式より、

$$\frac{1}{2}\sigma x^2 F_d''(x) + \mu x F_d'(x) - \rho F_d(x) + \alpha_0 x - C = 0, \quad (16)$$

となる。(16) 式の一般解は、

$$F_d(x) = B_1 x^{\beta_1} + B_2 x^{\beta_2} + \frac{\alpha_0 x}{\rho - \mu + \delta} - \frac{C}{\rho} \quad (17)$$

となる。ここで、 B_1, B_2 は未知定数、 β_2 は $\frac{1}{2}\sigma^2\beta(\beta-1) + (\mu-\delta)\beta - \rho = 0$ の負の根、すなわち、

$$\beta_2 = \frac{1}{2} - \frac{\mu-\delta}{\sigma^2} - \sqrt{\left(\frac{\mu-\delta}{\sigma^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2\rho}{\sigma^2}} < 0 \quad (18)$$

である。 $F_d(x)$ が満たすことが必要な境界条件は以下のとおりである：

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow \infty} (B_1 x^{\beta_1} + B_2 x^{\beta_2}) = 0, \\ F_d(X_d) = -U, \\ F_d'(X_d) = 0. \end{cases} \quad (19)$$

第一の条件式は、 x の水準がきわめて高いところにあれば、オプション価値は 0 でなければならず、 $B_1 = 0$ となる。その際、プロジェクト価値 (17) 式は操業の価値のみとなる。第二と第三の条件式は、value-matching, smooth-pasting 条件を表している。これらの境界条件の下、(17) 式を解くと、

$$F_d(x) = V(x) - (V(x_d) + U) \left(\frac{x}{X_d} \right)^{\beta_2} \quad (20)$$

となる。廃止措置の閾値 X_d は、

$$X_d = \frac{\beta_2}{\beta_2 - 1} \frac{\rho - \mu + \delta}{\alpha_0} \left(\frac{C}{\rho} - K \right) \quad (21)$$

となる。

NPV 法による廃止措置の閾値は、

$$X_{d,npv} = \frac{\rho - \mu + \delta}{\alpha_0} \left(\frac{C}{\rho} - K \right) \quad (22)$$

となり、上記で求めたそれぞれの閾値を比較すると、 $\frac{\beta_2}{\beta_1 - 2} < 1$ であることから、 $X_{d,npv} > X_d$ となることがわかる。すなわち、投資オプションのときと同様に NPV 法による判断と比較した場合、廃止措置の決定を遅らせることが分かる。

2.4 リプレースオプション

本節では、Naito et al. (2010) に従い、原子力発電プラントのリプレースプロジェクトを考える。本稿でのリプレースプロジェクトは、現時点において稼働している原子力発電プラントに、廃止措置を講じた後、跡地に新規設置するという一連のプロジェクトをいう。後継プラントの建設期間と寿命については考慮するが、現行のプラントの廃止措置期間は考えないものとする。

既存プラントの変動費、設備利用率を C_0 , α_0 とする。また、後継プラントの変動費、設備利用率を C_1 , α_1 とする。リプレースすることにより、変動費の低下、設備利用率の向上というメリットの発生が考えられるので、それらを反映させるために、 $C_0 \geq C_1$, $\alpha_0 \leq \alpha_1$ の関係があるものとする。上記の設定により、リプレースプロジェクトの価値は、

$$\begin{aligned} F_r(x) &\equiv \sup_{\tau_r, \tau_i \in \mathcal{V}_r} \mathbb{E} \left[\int_0^{\tau_r} e^{-\rho t} \pi_t^0 dt - e^{-\rho \tau_r} U + \int_{\tau_i}^{\tau_i + L + T} e^{-\rho t} \pi_t^1 dt - e^{-\rho \tau_i} I \right], \\ &= \sup_{\tau_r, \tau_i} \mathbb{E} \left[\int_0^{\tau_r} e^{-\rho t} \pi_t^0 dt + e^{-\rho \tau_r} (F_i(X_{\tau_r}) - U) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

となる。ここで、 $\pi_t^0 = \alpha_0 X_t - C_0$, $\pi_t^1 = \alpha_1 X_t - C_1$ である。また、 $F_i(x)$ は、新規設置オプションを表しており、(6) 式同様に、任意の時刻 t_a において、

$$F_i(x) = \sup_{\tau_i} \mathbb{E} \left[\int_{t_a + \tau_i + T}^{t_a + \tau_i + T + L} e^{-\rho(t - t_a)} \pi_t^1 dt - e^{-\rho(\tau_i - t_a)} I \right], \quad (24)$$

となる。さらに、 τ_r は既存プラントの廃止措置時刻、 τ_i は後継プラントの建設投資時刻を表しており、 $\mathcal{V}_r$ は考えられるすべての廃止措置時刻 (τ_r) と建設投資時刻 (τ_i) の組み合わせの集合である。最適な廃止措置の時刻は以下のように表すことができる：

$$\tau_r^* = \inf \{ t \geq 0 \mid X_t \leq X_r^* \}. \quad (25)$$

同様に、最適な投資の時刻は以下のように表すことができる：

$$\tau_i^* = \inf \{t \geq 0 \mid X_t \geq X_i^*\}. \quad (26)$$

Naito et al. (2010) に示されているように、リプレースオプションは、廃止措置と新規設置投資とを逐次的に意思決定を行う、逐次的オプション (sequential option) である。そのため、本節のリプレースプロジェクトの解（最適な廃止措置のタイミングとプロジェクトの価値）を得るために、後ろ向き (backward) に解く必要がある。はじめに後継プラントの設置オプションは、(11) 式と同様に、

$$F_i(x) = \left(A_1 \frac{\alpha_1 X_i}{\rho - \mu + \delta} - A_2 \frac{C_1}{\rho} - I \right) \left(\frac{x}{X_i} \right)^{\beta_1} \quad (27)$$

となる。投資の閾値 X_i も (21) 式同様に、

$$X_i^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \frac{\rho - \mu + \delta}{A_1 \alpha_1} \left(\frac{A_2 C_1}{\rho} + I \right) \quad (28)$$

となる。

次に、上記で得られた投資オプション価値を用いて、廃止措置のタイミングとリプレースプロジェクトの価値を求める。リプレースオプションの価値を満たす微分方程式は、Bellman 方程式より、

$$\frac{1}{2} \sigma x^2 F_r''(x) + \mu x F_r'(x) - \rho F_r(x) + \alpha_0 x - C_0 = 0, \quad (29)$$

となる。(29) 式の一般解は、

$$F_r(x) = B_3 x^{\beta_1} + B_4 x^{\beta_2} + \frac{\alpha_0 x}{\rho - \mu + \delta} - \frac{C_0}{\rho} \quad (30)$$

となる。ここで、 B_3, B_4 は未知定数である。 $F_r(x)$ が満たすことの必要な境界条件は以下のとおりである：

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow \infty} (B_3 x^{\beta_1} + B_4 x^{\beta_2}) = 0, \\ F_r(X_r^*) = F_i(X_r^*) - U, \\ F_r'(X_r^*) = F_i'(X_r^*). \end{cases} \quad (31)$$

第一の条件式は、 x の水準がきわめて高いところにあれば、オプション価値は 0 でなければならない、 $B_3 = 0$ となることを表している。第二と第三の条件式は、value-matching, smooth-pasting 条件を表しており、前節の廃止措置オプションとは異なり、後継プラント設置オプション価値 $F_i(X_t)$ が考慮されている。これらの境界条件の下、(30) 式を解くと、

$$F_r(x) = \frac{\alpha_0 x}{\rho - \mu + \delta} - \frac{C_0}{\rho} - \left(\frac{\alpha_0 X_r^*}{\rho - \mu + \delta} - \frac{C_0}{\rho} - F_i(X_r^*) + U \right) \left(\frac{x}{X_r^*} \right)^{\beta_2} \quad (32)$$

となるが、 X_r^* には解析解は存在せず、解を得るために数値計算を行う必要がある。

2.5 意思決定の選択モデル

前節までは、新規設置、廃止措置、リプレースと個々のプロジェクトの意思決定問題についてのモデルを示した。すなわち、各々のモデルにおいて、意思決定者は、単一のプロジェクトの取捨のみを考慮していた。しかしながら、現実的には、Takashima et al. (2007) で示されているように、廃止措置、もしくは設備更新による寿命延伸といった複数の代替案が存在し、その中から経済的に最も妥当である案が選択される。そこで本節では、経年化した原子力発電プラントについて、廃止措置、設備更新、もしくはリプレースの代替案を持っているときのモデルを構築する。

既存プラント（プラント 1）の設備利用率を α_0 、変動費を C_0 とする。事業者はプラント 1 に対して、廃止措置、設備更新、リプレースという 3 つのオプションを持っているものとする。廃止措置を選択する場合は、時刻 τ_d に費用 U_1 を支払ってプラント 1 を廃棄する。設備更新の場合は、時刻 τ_r に費用 K を支払ってプラント 1 の補修を行う。このとき設備更新後のプラント 1 の設備利用率、変動費をそれぞれ α_1, C_1 とし、設備更新後のプラント寿命を L_1 とする。リプレースを選択する場合には、時刻 τ_R に費用 U_2 を支払ってプラント 1 を廃棄し、その後、費用 I を支払うことで後継プラント（プラント 2）を建設するものとする。プラント 2 の設備利用率、変動費、プラント寿命をそれぞれ α_2, C_2, L_2 とする。ここで、各々の設備利用率、変動費の関係は、 $\alpha_0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2, C_0 \geq C_1 \geq C_2, K_1 \leq K_2, I_1 \leq I_2, L_1 \leq L_2$ である。

廃止措置、設備更新、リプレースと 3 つの選択肢をもっているときのプロジェクト価値 $F_c(x)$ は

$$F_c(x) = \sup_{\tau_d, \tau_r, \tau_R \in \mathcal{V}_c} \mathbb{E} \left[\int_0^{\min(\tau_d, \tau_r, \tau_R)} e^{-\rho t} \pi_t^0 dt - \mathbf{1}_{\{\tau_d < (\tau_r, \tau_R)\}} e^{-\rho \tau_d} U_1 \right. \\ \left. + \mathbf{1}_{\{\tau_r < (\tau_d, \tau_R)\}} \left(\int_{\tau_r}^{\tau_r + L_1} e^{-\rho t} \pi_t^1 dt - e^{-\rho \tau_r} K \right) \right. \\ \left. + \mathbf{1}_{\{\tau_R < (\tau_d, \tau_r)\}} e^{-\rho \tau_R} (F_R(X_{\tau_R}) - U_2) \right] \quad (33)$$

となる。ここで、 $\mathbf{1}_{\{\cdot\}}$ は指示関数を表しており、 $\{\cdot\}$ が成立すれば 1 を、成立しないときは 0 を、各々返す関数である。 $\mathcal{V}_c$ は考えられるすべての廃止措置時刻 (τ_d)、設備更新時刻 (τ_r)、リプレース時刻 (τ_R) の組み合わせの集合である。 $F_R(X_t)$ はリプレースのための廃止措置を行った場合に得られる価値であり、プラント 2 に対する投資オプション価値である。また、設備更新によって得られる価値 $V_r(x)$ は

$$V_r(x) = \mathbb{E} \left[\int_0^{L_1} e^{-\rho t} \pi_t^1 dt \right] \\ = \frac{(1 - e^{-(\rho - \mu + \delta)L_1})\alpha_1}{\rho - \mu + \delta} x - \frac{(1 - e^{-\rho L_1})C_1}{\rho} \quad (34)$$

となる。リプレースによる後継プラントの投資オプション価値 $F_R(x)$ は

$$F_R(x) = \sup_{\tau_i} \mathbb{E} \left[\int_{\tau_i+T}^{\tau_i+T+L_2} e^{-\rho t} \pi_t^2 dt - e^{-\rho \tau_i} I \right] \quad (35)$$

となる。前節と同様に、後継プラント設置のオプション価値を満たす微分方程式は、

$$\frac{1}{2} \sigma^2 x^2 F_R'' + (\mu - \delta) x F_R' - \rho F_R = 0 \quad (36)$$

となる。(36) 式は、(11) 式と同様に、

$$F_R(x) = \left(A_1 \frac{\alpha_2 X_R^*}{\rho - \mu + \delta} - A_2 \frac{C_2}{\rho} - I \right) \left(\frac{x}{X_R^*} \right)^{\beta_1} \quad (37)$$

となる。投資の閾値 X_i^* も (21) 式同様に、

$$X_R^* = \frac{\beta_1}{\beta_1 - 1} \frac{\rho - \mu + \delta}{A_1 \alpha_2} \left(\frac{A_2 C_2}{\rho} + I \right) \quad (38)$$

となる。

事業者は X_t の初期時点の水準 x が、それぞれの閾値 $X_d, X_{r1}, X_{r2}, X_{R1}, X_{R2}, X_{R3}$ に対して、 $x \leq X_d$ のときは廃止措置を選択し、 $X_d < x < X_{R1}$ のときは意思決定を延期する。また、 $X_{R1} \leq x \leq X_{R2}$ においてはリプレースのための廃止措置、 $X_{R2} < x < X_{r1}$ では意思決定を延期する。さらに $X_{r1} \leq x \leq X_{r2}$ では設備更新を行い、 $X_{r2} < x < X_{R3}$ では意思決定の延期、 $X_{R3} \leq x$ ではリプレースのための廃止措置となる。以上より、事業者の意思決定の選択は、廃止措置とリプレース、リプレースと設備更新、設備更新とリプレースの3つの場合に分けられる。各々のオプション価値を $F_1(x)$, $F_2(x)$, $F_3(x)$ とする。廃止措置とリプレースの選択のオプション価値を満たす微分方程式は、

$$\frac{1}{2} \sigma^2 x^2 F_1'' + (\mu - \delta) x F_1' - \rho F_1 + \alpha_0 x - C_0 = 0 \quad (39)$$

となる。(39) 式の一般解は

$$F_1(x) = B_5 x^{\beta_1} + B_6 x^{\beta_2} + \frac{\alpha_0 x}{\rho - \mu + \delta} - \frac{C_0}{\rho} \quad (40)$$

となる。ここで、 B_5, B_6 は未知定数である。 $F_1(x)$ が満たす value-matching, smooth-pasting 条件は以下のとおりである：

$$F_1(X_d) = -U_1 \quad (41)$$

$$F_1'(X_d) = 0 \quad (42)$$

$$F_1(X_{R1}) = F_R(X_{R1}) - U_2 \quad (43)$$

$$F_1'(X_{R1}) = F_R'(X_{R1}) \quad (44)$$

廃止措置とリプレースの各々の閾値 X_d, X_{R1} の解析解は存在せず、数値計算により、閾値 X_d, X_{R1} と未知定数 B_5, B_6 が求まる。同様に、リプレースと設備更新の選択のオプション価値は、

$$F_2(x) = B_7 x^{\beta_1} + B_8 x^{\beta_2} + \frac{\alpha_0 x}{\rho - \mu + \delta} - \frac{C_0}{\rho} \quad (45)$$

となる。ここで、 B_7, B_8 は未知定数である。 $F_2(x)$ が満たす value-matching, smooth-pasting 条件は以下のとおりである：

$$F_2(X_{R2}) = F_R(X_{R2}) - U_2 \quad (46)$$

$$F_2'(X_{R2}) = F_R'(X_{R2})' \quad (47)$$

$$F_2(X_{r1}) = V_r(X_{r1}) - K \quad (48)$$

$$F_2'(X_{r1}) = V_r'(X_{r1}) \quad (49)$$

リプレースと設備更新の各々の閾値 X_{R2}, X_{r1} の解析解は存在せず、数値計算により、閾値 X_{R2}, X_{r1} と未知定数 B_7, B_8 が求まる。

さらに、設備更新とリプレースの選択のオプション価値は、

$$F_3(x) = B_9 x^{\beta_1} + B_{10} x^{\beta_2} + \frac{\alpha_0 x}{\rho - \mu + \delta} - \frac{C_0}{\rho} \quad (50)$$

となる。ここで、 B_9, B_{10} は未知定数である。 $F_3(x)$ が満たす value-matching, smooth-pasting 条件は以下のとおりである：

$$F_3(X_{r2}) = V_r(X_{r2}) - K \quad (51)$$

$$F'_3(X_{r2}) = V'_r(X_{r2}) \quad (52)$$

$$F_3(X_{R3}) = F_R(X_{R3}) - U_2 \quad (53)$$

$$F'_3(X_{R3}) = F'_R(X_{R3})' \quad (54)$$

リプレースと設備更新の各々の閾値 X_{r2}, X_{R3} の解析解は存在せず、数値計算により、閾値 X_{r2}, X_{R3} と未知定数 B_9, B_{10} が求まる。

3 パラメータ

本節では、原子力発電プラントのリプレース等の経済性評価を行うために設定するパラメータについて言及する。前節で示したモデルにおいて設定すべきパラメータは、経済状態に係わるものと原子力発電プラントに関するものとに分けることができる。

経済状態に関するパラメータとして売電価格構造を表す期待成長率やボラティリティ、また、経済性評価に用いられる割引率があげられる。これらのパラメータが適切なものであるかを判断することは難しく、本稿においては、期待成長率を年率 1%，売電価格のボラティリティを年率 15% で分析を行う。また、割引率は IEA (2005) を参考にして年率 5% とした。これらのパラメータを表 1 に示す。

原子力発電プラントに関するパラメータとして、設備利用率、費用に関するもの、建設期間、プラント寿命等の時間に関するものがあげられる。設備利用率は、既存のプラント、設備更新したプラント、リプレースを行い新規建設したプラントを別々に設定し、それぞれを年率で 60%，80%，100% ととした。また、設備利用率の減少率は年率で 2% ととした。変動費に関しては、資源エネルギー庁 (1999) によると、燃料費は 1.65(yen/kWh)，運転維持費は 1.9(yen/kWh) と試算されており、変動費全体では 3.55(yen/kWh) となる。本稿では、この値を参考に、既存のプラント、設備更新したプラント、新規建設したプラントをそれぞれ、5.0(yen/kWh)，4.0(yen/kWh)，3.0(yen/kWh)

表 1: 経済状況に関するパラメータ

売電価格の期待成長率	μ	0.01
売電価格のボラティリティ	σ	0.15
割引率	ρ	0.05
初期売電価格	x	12.0

表 2: プラントに関するパラメータ

設備利用率 (既存プラント)	α_0	0.6
設備利用率 (設備更新)	α_1	0.8
設備利用率 (後継プラント)	α_2	1.0
設備利用率の減少率	δ	0.02
変動費 (既存プラント)	C_0	5.0
変動費 (設備更新)	C_1	4.0
変動費 (後継プラント)	C_2	3.0
後継プラント建設費	I	400,000
設備更新費	K	0-120,000
廃止措置費	U_1	30,000
廃止措置費 (リプレース時)	U_2	40,000

とした。新規プラントの建設費に関しては、資源エネルギー庁 (2006c) によると、投資費用が 4,000 億円と試算されている。原子力発電プラント一基の出力を 100 万 kW と想定した場合、kW あたりの建設費は、40 万 (yen/kW) となり、本稿では、この値を採用した。設備更新に係わる費用は、そのときに取り換えるプラント機器の種類によって大きく異なる。そこで本稿では、設備更新費を 0.12 万 (yen/kW) として分析を行う。廃止措置費用は、資源エネルギー庁 (1985) において 110 万 kW 級の原子力発電プラントで 300 億円 (当時価格) と見積もられており、本稿では、3 万 (yen/kW) とした。また、リプレースを考慮したときの廃止措置費用は、廃止措置のみのときよりも少し高めに設定し 4 万 (yen/kW) とした。以上のパラメータを表 2 にまとめる。

4 分析結果と考察

前述したように、浜岡原子力発電所の 1, 2 号機の廃止措置を決定したとき、設備更新の代替案があり、経済性の影響にそのような意思決定が行われた。これから経年化したプラントが廃止措置をとる場合、設備更新により寿命延期をするか、もしくは廃止措置をとるかとう選択をする機会が増えることが予想される。そこで本節では、前節におけるモデルを用いて、廃止措置、設備更新、リプレースといった代替案がある中で、それぞれの意思決定が、不確実性や費用にどのように影響するかを分析する。

これらの代替案を持ったプロジェクト評価モデルを構築することで、売電価格の水準に依存して 7 つの意思決定の領域が存在することがわかった。すなわち、 $x \leq X_d$ は廃止措置を行う領域、 $X_d < x < X_{R1}$ は、廃止措置とるかリプレースを行うかを選択する領域、 $X_{R1} \leq x \leq X_{R2}$ はリプレースを行う領域、 $X_{R2} < x < X_{r1}$ はリプレースを行うか設備更新を行うかを選択する領域、 $X_{r1} \leq x \leq X_{r2}$ は設備更新を行う領域、 $X_{r2} < x < X_{R3}$ は設備更新を行うかリプレースを行うかを選択する領域、 $X_{R3} \leq x$ はリプレースを行う領域である。例えば、現在の売電価格の水準が 12.0 円/kWh のとき、35.257 万円/kW のプロジェクト価値があり、設備更新かリプレースかを選択する状態であることがわかる (図 1)。この水準が下降し 10.150 円/kWh になった場合は、設備更新を実施することが最適である。また、水準が上昇し 14.980 円/kWh になったときは、リプレースを行うことが最適である。

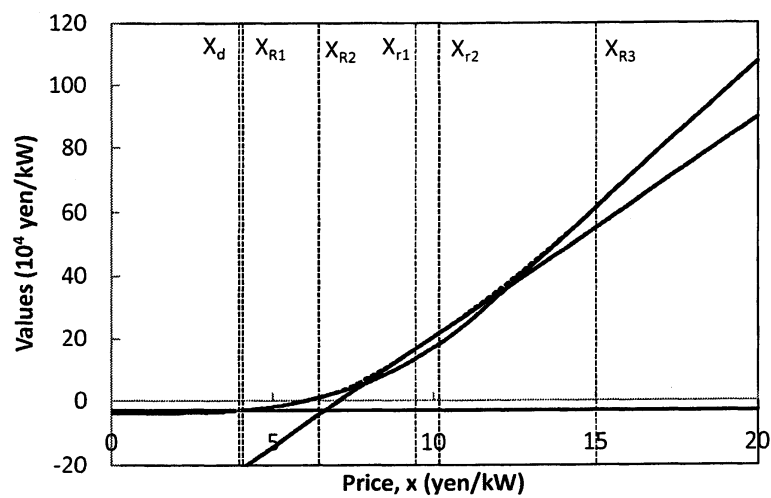


図 1: 廃止措置, 設備更新, リプレースの選択オプションの価値.

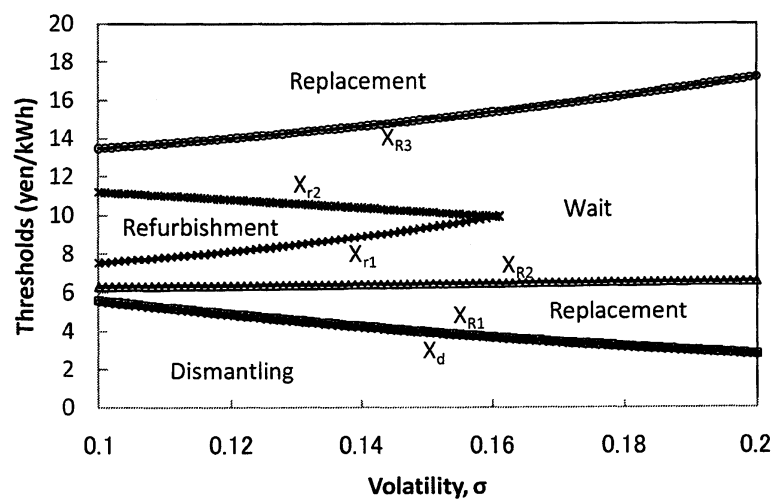


図 2: 各々の意思決定に対するボラティリティの影響.

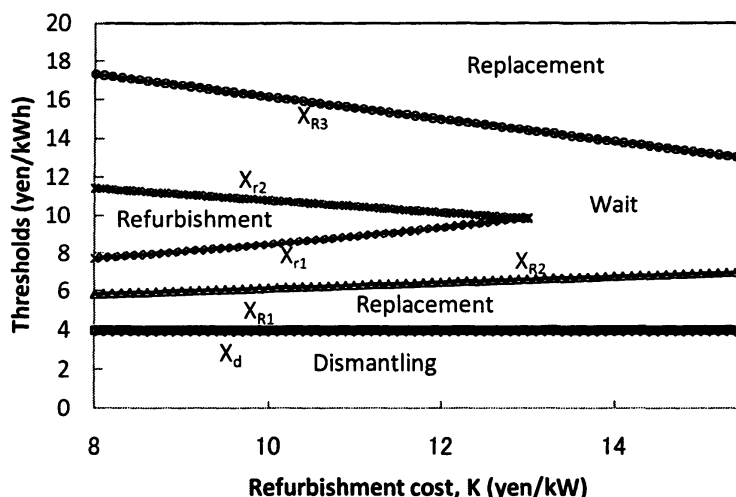


図 3: 各々の意思決定に対する設備更新費用の影響。

図 2 は、上で示したそれぞれの閾値に対する不確実性の影響を示したものである。ボラティリティの増加によって、意思決定の延期する機会が増加することがわかる。また、図に示されているように、 $x \leq X_d$ の領域と $X_{r1} \leq x \leq X_{r2}$ の領域は、ボラティリティが高い場所では、減少し消滅していることがわかる。すなわち、不確実性が大きくなるにしたがい、廃止措置や設備更新よりもリプレースが選択される可能性が高いことがわかる。

設備更新費用が各々意思決定の選択にどのように影響を及ぼすかを分析したものが図 3 である。設備更新費用が増加するにしたがい、設備更新の領域は減少し、さらには消滅、リプレースの閾値 X_{R2} は増加、 X_{R3} は減少していることがわかる。これは、浜岡原子力発電所の一・二号機の設備更新か廃止措置かの選択の意思決定を表しており、設備更新費用が高くなるにしたがい、設備更新を行うことが困難になり、その影響で、よりリプレースを選択する機会が増加することを表している。

5 おわりに

本稿では、不確実性下における経済性評価手法の一つであるリアルオプションのフレームワークを用いて、売電価格の不確実な状況下における高経年化原子力発電プラントの経済性評価モデルを構築した。特に、廃止措置、リプレース、設備更新の代替案を持っているときの経済性評価モデルを構築し、意思決定のタイミングやプロジェクト価値について分析を行った。

基本ケースにおいて、売電価格の水準に依存し、廃止措置、リプレース、設備更新、リプレースをそれぞれ実行する 4 つの領域に併せて、廃止措置、もしくはリプレースを選択する領域とリプレース、もしくは設備更新を選択する領域の 7 つの領域が存在することが明らかとなった。これらの領域に対し、不確実性や費用の影響について分析を行った。その結果、不確実性が大きくなるにしたがい、廃止措置、設備更新の機会は減少するものの、リプレースを選択する機会が増加することが明らかとなった。これは、リプレースという意思決定の他に、廃止措置、設備更新が存在することから、これらの意思決定に対して相互作用がはたらき、個々の意思決定を単体で考えたときと異なる結果になったと考えられる。また、設備更新費用の増大により、設備更新を選択

する機会は減少するものの、リプレースを選択する機会は大きく増加することがわかった。これは、浜岡原子力発電所 1, 2 号機の廃止措置のときの実際意思決定と整合的な結果であるといえる。

本稿のモデルでは、意思決定を延期する期間が無限であるという設定でモデル化を行った。意思決定をする時間が比較的長いような投資問題のときには、このような仮定においてモデル化を行っても、その影響は結果に依存しない。しかしながら、寿命延期後、即座に廃止措置を決定する場合も考えられ、このようなときは、時間が意思決定に大きく影響する。また、経年化にともない、運転維持費、保守費用等の増加が考えられ、プラント寿命付近において、浜岡原子力発電所 1, 2 号機のように、設備更新を行うか廃止措置をとるかという意思決定は非常に大きな問題である。そこで今後の課題として、寿命期間の設定や、経年化にともなう運転維持費や保守費用の増加をモデルに組み込むことで、設備更新と廃止措置、もしくはリプレースの代替案があるときの意思決定問題について考える。また、計画外停止の事象確率も考慮することで、経済性と安全性の相互作用が、どのように上記の意思決定に影響するかを検討する。

参考文献

- 小田潤一郎, 松橋隆治, 吉田好邦, 高嶋隆太 (2005), 「投資リスクを踏まえた電源の投資問題」, 日本エネルギー学会誌, 84, 134-141.
- 小野賢治, 神菌健次 (2004), 「原子力発電プラントのリアルオプションモデルの開発」, 電力中央研究所報告, P03002.
- 資源エネルギー庁, 総合資源エネルギー調査会, 原子力部会, (1999). 「原子力発電の経済性について」原子力部会第 70 回報告.
- 資源エネルギー庁, 総合資源エネルギー調査会, 電気事業分科会, 原子力部会, (2006). 「原子力立国計画」.
- 資源エネルギー庁, 総合資源エネルギー調査会, 電気事業分科会, 原子力部会, (2006). 電力自由化と原子力に関する小委員会第 2 回配布資料 3. <http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/data/060220d-3.pdf>
- 資源エネルギー庁, 総合資源エネルギー調査会, 電気事業分科会, 原子力発電投資環境整備小委員会, (2006). 第 2 回, 第 3 回, 第 4 回配布資料.
- 資源エネルギー庁, (2007). 「エネルギー白書 2007 年版」.
- 中田翔治, 高嶋隆太, 長野浩司, 木村浩, 班目春樹, 「原子力発電リプレース投資における減価償却費の評価」, 日本原子力学会和文論文誌, 9, 252-270.
- Gollier, C., Proult, D., Thais, F. and Walgenwitz, G. (2005), "Choice of nuclear power investments under price uncertainty: Valuing modularity," *Energy Economics*, 27, 667-685.
- IEA. (2005), "Projected costs of generating electricity," OECD/IEA, Paris.
- McDonald, R. and Siegel, D. (1986), "The value of waiting to invest," *Quarterly Journal of Economics*, 101, 707-727.
- Naito, Y., Takashima, R., Kimura, H. and Madarame, H. (2010), "Evaluating replacement projects of nuclear power plants under uncertainty," *Energy Policy*, 38, 1321-1329.

- Pindyck, R.S. (1993), "Investment of uncertain cost," *Journal of Financial Economics*, **34**, 53–76.
- Rothwell, R. (2006), "A real options approach to evaluating new nuclear power plants," *Energy Journal*, **27**, 37–53.
- Takashima, R., Naito, Y., Kimura, H. and Madarame, H. (2007), "Decommissioning and equipment replacement of nuclear power plants under uncertainty," *Journal of Nuclear Science and Technology*, **44**, 1347–1355.
- Takashima, R., "Irreversible investment, depreciation, and tax law uncertainty," in the 2009 INFORMS Annual Meeting, San Diego, CA, USA (11-14 October 2009).
- Takizawa, S., Omori, R., Suzuki, A. and Ono, K. (2001), "Analysis of critical electricity price for the investment for constructing a nuclear power plant using real options approach," *Journal of Nuclear Science and Technology*, **38**, 907–909.