

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 6 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21710145

研究課題名（和文） 金融工学的手法による原子力発電リプレースの経済性分析

研究課題名（英文） An Economic Analysis of Nuclear Power Replacements: A Financial Engineering Approach

研究代表者

高嶋 隆太（TAKASHIMA RYUTA）

千葉工業大学・社会システム科学部・助教

研究者番号：50401138

研究成果の概要（和文）：本研究では、不確実性下での投資決定理論のフレームワークにより、原子力発電リプレースプロジェクトの経済性評価モデルの構築を行った。本評価モデルを用いることによって、不確実性が、どのように既存プラントの廃止措置や新規プラント設置のそれぞれの時期に影響を及ぼすかを示した。さらに、不確実性が大きくなるにしたがい、既存プラントの廃止措置、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。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed an economic evaluation model for projects of nuclear power replacements in a framework with respect to a theory of investment decision under uncertainty. We showed how uncertainties affect a decommissioning time for existing plant and an installation one for new plant. In addition, it turned out that as uncertainties become large, opportunities of dismantling and refurbishment decrease and an opportunity of replacement increases.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：

## 1. 研究開始当初の背景

（1）我が国では、現在、55基の原子力発電所を有し、初期のプラントが2010年までに運転年数が40年に達するなど経年化が進んでいる。中長期的に電源構成の原子力発電の割合を30～40%に維持することが望ましいとされており、リプレースの需要が増加するものと見込まれている。このリプ

レース政策を行う上で考えるべき重要な要素として電力自由化の影響が挙げられる。電力自由化の進展の下、電力価格は不確実に推移し、従来の総括原価方式のようなコスト回収がなくなる。このような状況において、不確実性を考慮した経済性評価が必要となる。

(2) 不確実性下での原子力発電プラント投資の経済性評価に関する主な先行研究は以下のとおりである。Pindyck(1993)は、建設費の不確実性を考慮し原子力発電プラントの新規建設の評価を行っている。特に、スリーマイル島事故後の原子力発電プラント建設プロジェクトの延期、撤退に関して経済性の観点から分析を行っている。Takizawa et al.(2001)は、電力価格とウラン価格の2つの不確実性を考慮し、原子力発電プラントの建設投資のタイミングの分析を行っている。Gollier et al.(2005)は、1200MWの原子力発電プラントと、300MWのモジュール・プラント4基建設したときの価値を算出し、それぞれの価値の比較を行っている。Takashima et al.(2007)は、廃止措置と設備更新の2つのオプションが存在するときの最適タイミングと価値の評価を行っている。このように、原子力発電プラントの新規建設や廃止措置の経済性分析は多数行われているが、既存プラントの廃止措置と代替プラントの建設の連続的な意思決定を要する経済性評価モデルは存在せず、不確実性下における原子力発電プラントのリプレース評価を行うことが可能なモデルの構築と分析が必要となる。

#### 参考文献

1. Pindyck, R. S., Investment of Uncertain Cost, Journal of Financial Economics, Vol. 34, pp. 53-76, 1993.
2. Takizawa, S., Omori, R., Suzuki, A., Ono, K., Analysis of Critical Electricity Price for the Investment for Constructing a Nuclear Power Plant using Real Options Approach, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 38, pp. 907-909, 2001.
3. Gollier, C., Proult, D., Thais, F., Walgenwitz, G., Choice of Nuclear Power Investments under Price Uncertainty: Valuing Modularity, Energy Economics, Vol. 27, pp. 667-685, 2005.
4. Takashima, R., Naito, Y., Kimura, H., Madarame, H., Decommissioning and Equipment Replacement of Nuclear Power Plants under Uncertainty, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 44, pp. 1347-1355, 2007

#### 2. 研究の目的

(1) 売電価格が不確実な状況下において、既存プラントの廃止措置と代替プラントの設置について統合的に評価することのでき

る原子力発電プラントのリプレース評価モデルを構築し、リプレースプロジェクトの経済性評価を行う。

(2) 本モデルを用いることにより、不確実性がリプレースプロジェクトに与える影響を分析し、最適な廃止措置や設置のタイミング、リプレースプロジェクトの価値を明らかにする。

(3) 既存プラントの廃止措置時点と代替プラントの設置時点にタイム・ラグが存在するような、より現実的な状況での最適意思決定基準やリプレースプロジェクト価値への影響について分析する。

(4) リプレースのみならず、既存プラントの廃止措置や設備更新による寿命延伸の3つの選択肢を同時に考慮する評価モデルを構築し、不確実性の程度や設備更新の規模が、それぞれの投資選択枝の経済性の優劣や、投資決定に与える影響を分析する。

#### 3. 研究の方法

(1) 既存の原子力発電プラントの廃止措置の意思決定は、新規プラントの設置から操業し収益が得られたときの価値、すなわち、新規プラント自体の価値が既知の状態で行われる。これを本研究ではリプレースの意思決定問題としている。そのため、本研究のモデルは、新規プラントの設置問題から既存プラントの廃止措置問題へとバックワードに計算する必要がある。

(2) 既存プラントの廃止措置問題と新規プラントの設置問題は、それぞれ確率制御理論の一つである最適停止問題として定式化される。本研究のリプレース問題は、これらの廃止措置と建設投資問題とを統合的に定式化するため複合最適停止問題となる。本研究の数理モデルは先行研究と比べ複雑であることから、解析的だけでなく数値的アプローチからも解を求める。さらに、本モデルを用いることにより、原子力発電プラントリプレースの意思決定に対する電力価格の不確実性や電力需要のトレンド等の影響を分析する。

(3) より現実的な状況を分析することのできるモデルにするために、上記のモデルの拡張を行う。既存プラントの廃止措置時点と新

規プラントの設置時点にタイム・ラグや新規プラントの設置において建設期間が存在するときの状況を考慮したモデルの拡張を行う。先行研究の投資決定とタイム・ラグに関するモデルにおいては、準解析解を導出しているが、本研究では、準解析解の導出だけでなく、モンテカルロ・シミュレーションによる解の導出を試みる。タイム・ラグは、本研究のモデルのように新規設置（2つめの投資決定）において柔軟性のある行動をとるような状況下において、廃止措置の意思決定時点から設置時点までプロジェクト価値が変化するため、廃止措置、すなわちリプレースの意思決定に大きな影響を及ぼす。先行研究において、投資の意思決定とタイム・ラグ、もしくは建設期間との関係を分析する研究が多数行われ、その重要性が明らかとなっている。本研究のモデルは、より現実的な原子力発電プラントのリプレース問題の設定になっており、リプレースの投資決定政策に示唆を与えるものと考えられる。

(4) 上記のリプレース問題の設定では、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。そこで上記のモデルを投資決定の代替案モデルに関する先行研究のフレームワークを用いることによって拡張し、廃止措置、設備更新、もしくはリプレースの代替案をもっているときのモデルを構築する。

#### 4. 研究成果

(1) 現時点の売電価格水準における、リプレースオプションの価値と廃止措置後の投資オプション価値との比較において、現時点の水準で、リプレースオプションの価値が大きいときは、廃止措置を行った後に新規設置を行う逐次的な意思決定となるが、投資オプションが大きいときは、リプレースオプションを保持する意味がなくなり、廃止措置を即座に行い、次いで新規設置を実行することになる。このような状態はパラメータに依存し、特に、ボラティリティへの依存度は大きいことが明らかとなった。

(2) リプレースオプションは、廃止措置単体のオプションと比べ、後継プラント設置への投資を考慮した分だけ、より廃止措置を行うインセンティブが高く、さらに、廃止措置費用低下が、その実施可能性に及ぼす影響は大きいことがわかった。

(3) 廃止措置（単純閉鎖）というのは、収益性が悪い状況で「それ以上悪くならない」ようにするために投資するものであり、新規設置は、（現状でも悪いとは限らない）収益性を「現状よりさらに良くする」ために投資するものである。このため、両者の不確実性や投資基準に対する性状は、逆になる。よって、リプレースの意思決定は、このような両者の特性を内包していることから、リプレースの意思決定に対する廃止措置費用の影響に関して、単純閉鎖である廃止措置とは異なる挙動を示すことがわかった。

(4) 既存プラントの廃止措置時点と新規プラントの設置時点にタイム・ラグ（すなわち、有限な廃止措置期間）や新規プラントの設置期間が存在するときの状況を考慮したモデルにおいて、準解析解の導出とモンテカルロ・シミュレーションによる解の導出を試み、それぞれ同様の結果が得られることを確認した。本モデルによる主な分析結果は、プロジェクト価値に対するタイム・ラグと不確実性の影響が明らかになった点である。すなわち、将来の不確実性が大きい状況下では、リプレースプロジェクト価値に対するタイム・ラグの影響が小さいことが示された。

(5) 廃止措置、リプレース、設備更新の同時選択問題として定式化する混合モデルにおいては、体系全体の現在価値が大きくなるにつれて、廃止措置→設備更新→リプレースと、選択される投資戦略が変化する。さらに、2つの戦略が切り替わる中間領域では、両者の選択の意思決定を延期することが最適であり得る。不確実性の増大や、設備更新費用の増加は、特にリプレースの選択を促進する。以上の試算を通じて、本研究が提案する分析手法及び計算モデルが、対象とする投資選択問題に有益な示唆を与えることが示された。

(6) 今後の課題として、本研究で提示した評価手法を現実的な状況に適用していくことに加えて、構築したモデルが基本的なものであることから、多様な拡張を加えていくことが考えられる。特に、高経年化に伴う種々の事象、たとえば稼働率や運転維持費等のパフォーマンス変化を、明示的に取り込むことは重要であると考えられる。

(7) 本研究課題は、東日本大震災前に計画したもので、原子力発電のリプレースに関して経済性のみを考慮した意思決定問題を分析したものである。しかしながら、東日本大

震災による福島第一原子力発電所の事故の影響により、原子力発電の安全性をさらに重要視することが必要であり、現状では、既存プラントの停止や廃止措置、新規プラント設置が延期となり、多くの火力発電プラントを稼働させることが予定されている。そこで、本研究をさらに遂行するために、プラントの安全性や社会的な不確実性を考慮することで、発電プラントの設置・廃棄問題について分析を行うことを考えている。特に、設置や廃止措置のタイミングについて異なる技術のプラントを有することの影響について分析する予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計13件)

- ① 小田潤一郎、高嶋隆太、キャップ割当スキームの不確実性が電源投資に与える影響評価、リアルオプション研究、査読有、4巻、2011、pp.47-60
- ② Takashima, R., Yagi, K. and Takamori, H., Government Guarantees and Risk Sharing in Public-Private Partnerships, 査読有, Vol.19, 2010, pp.78-83
- ③ Goto, M., Takashima, R. and Tsujimura, M., Real Options in a Duopoly Setting: Investment on the Project with Operational Options and Fixed Costs, Journal of Applied Operational Research, 査読有, Vol.2, 2010, pp.22-32
- ④ Takashima, R., Goto, M. and Tsujimura, M., Irreversible Investment, Operating Flexibility, and Time Lags, Asia-Pacific Journal of Operational Research, 査読有, Vol.27, 2010, pp.271-286
- ⑤ 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、査読有、9巻、2010、pp.252-270
- ⑥ Yagi, K., Takashima, R. and Takamori, H., An Optimal Investment Policy in Equity-Debt Financed Firms with Finite Maturities, Lecture Notes in Operations Research, 査読有, Vol.12, 2010, pp.288-295
- ⑦ Naito, Y., Takashima, R., Kimura, H. and Madarame, H., Evaluating Replacement Project of Nuclear Power Plants under Uncertainty, Energy

Policy, 査読有, Vol.38, 2010, pp.1321-1329

[学会発表] (計57件)

- ① Naito, Y. and Takashima, R., Replacement Investment Timing and Capacity Sizing, ACMSA 2011, 2011年12月22日, Pearl River Garden Hotel, Sanya, Hainan, China
- ② Takashima, R., Kuno, Y., Omoto, A. and Tanaka, S., Economic Evaluation of Multilateral Nuclear Fuel Cycle Approach, The 10th International Conference GLOBAL 2011, 2011年12月14日, Makuhari Messe, Chiba, Japan
- ③ Takashima, R., Reversibility, Operating Flexibility, and Asset Returns in Competitive Equilibrium, INFORMS Annual Meeting 2011, 2011年11月13日, Charlotte Convention Center, Charlotte, North Carolina, USA
- ④ Siddiqui, A. and Takashima, R., Capacity Switching Options under Rivalry and Uncertainty, 34th IAEE International Conference, 2011年6月20日, Stockholm School of Economics, Stockholm

[図書] (計3件)

- ① Legrand, J.B. and Verheyen, L.T. (Eds) (Takashima, R. and Yagi, K.), Nova Science Publishers, Real Options Analysis (Ch.3 Flexibility in Sequential Investment and Catastrophic Risk), 2011, 113(pp.55-73)
- ② Tsvetkov, P. (Eds) (Takashima, R.), SCIIYO, Nuclear Power (Ch.4 Construction, Decommissioning, and Replacement of Nuclear Power Plants under Uncertainty), 2010, 388(pp.49-62)
- ③ 木島正明 監訳 (高嶋隆太他共訳)、朝倉書店、金融工学ハンドブック(第8章 離散型バリアオプションとルックバックオプション)、2009、1000(pp.336-367)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高嶋 隆太 (TAKASHIMA RYUTA)

千葉工業大学・社会システム科学部・助教

研究者番号：50401138