

投資費用の不確実性と撤退オプションを考慮した風力発電事業の価値評価*

同志社大学・商学研究科 辻村元男[†]

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科 吉岡秀和

概要

本研究は投資費用の不確実性を考慮した風力発電事業の価値を評価する。価値評価においては、発電事業者が開発・建設期間中に事業環境が悪化した場合は、風力発電事業から撤退できることを考慮した。発電事業から撤退するタイミングを求める最適停止問題として定式化された問題を解き得られた風力発電事業の価値を元に、発電事業者は入札に参加するか否かを定める。定式化された発電事業者の問題は解析的に解くことはできず、数値的に問題を解き発電事業の価値を求めた。

キーワード: 風力発電, FIT, 投資費用, 撤退オプション

1 はじめに

再生可能エネルギーの一翼を担うとして期待され、世界中で洋上風力発電の導入が進められた。しかし近年、洋上風力発電プロジェクトからの撤退や中止が相次いでいる¹。日本でも再エネ海域利用法に基づく第1ラウンドで3つの海域を落札した三菱商事グループの撤退が決まった。これらの主な要因として世界的なインフレによる建設費の高騰が挙げられる。こうした社会背景を踏まえ、本研究は投資費用に不確実性が存在し、かつプロジェクトからの撤退オプションを考慮し、洋上風力発電事業の価値評価を行う。

事業環境の不確実性の下、事業からの撤退という意味決定については、リアルオプション・アプローチを用いた分析が有効であり、多くの研究が為されてきた。代表的な初期の研究として、Bonini (1977), Myers and Majd (1983), Pindyck (1993) などがある。Bonini (1977) は資本投資することで得られるキャッシュフローの不確実性を確率分布として捉え、キャッシュフローの自己関係も考慮した撤退オプションを含む投資プロジェクトの価値を評価した。Myers and Majd (1983) はプロジェクトからの撤退オプションを配当を考慮した株式のアメリカ型プットオプションとして分析を行った。Pindyck (1993) はプロジェクト完成の物理的な困難さを表す技術的不確実性と建設資材価格の不確実性を表す投入費用の不確実性の2種類の投資コストの不確実性の下で、撤退オプションを考慮した資本投資の分析を行った。

*本研究は JSPS 科研費 JP25K00240 の助成に加え、京都大学数理解析研究所「共同利用・共同研究拠点事業」の支援を受けた。

[†]連絡先: 602-8580 京都市上京区今出川通烏丸東入

E-mail address: mtsujimu@mail.doshisha.ac.jp

¹日本経済新聞 2025 年 8 月 27 日 <https://www.nikkei.com/article/DGXZQ0UC2742X0X20C25A8000000/> や 9 月 27 日記事 <https://www.nikkei.com/article/DGXZQ0UC128T80S5A910C2000000/> (最終閲覧日: 2025 年 12 月 2 日)

彼ら以降も研究は続けられ、Berger et al. (1996) は撤退オプションの実証分析を行い、用途の特定度合いが低い資産の方が特定度合いの高い資産よりも撤退オプション価値が高いことを示した。Choi and Lee (2000) はアウトプットの価格と投資費用の不確実性を幾何ブラウン運動に従う場合について、企業の投資・撤退問題を考察した。Zhou et al. (2000) はプロジェクトの価値、石油価格、為替レート、政治リスクの不確実性を幾何ブラウン運動で表現し、操業中の石油プロジェクト撤退について考察した。3 項モデルを用いてこれらの不確実性を計算し、オプション価値を求めた。Thijssen (2022) は建設過程とプロジェクトからの収益の不確実性を考慮し、プロジェクトの価値評価を考察した。意思決定者は、建設開始のオプション、建設期間中のプロジェクトからの撤退オプション、完成後の操業開始あるいは撤退オプションを保持し、逐次的に意思決定を行う。最適停止問題として定式化された意思決定主体の問題をマルコフ連鎖近似法を用いて数値的に解いている。

以上の研究蓄積を踏まえ、本研究はリアルオプションアプローチを用いて、建設費用の不確実性とプロジェクトからの撤退の可能性を考慮した洋上風力発電事業の価値評価を行う。洋上風力発電事業者は固定価格買取 (Feed-in Tariff: FIT) 制度を用いた入札に参加するかしらないかを検討している。入札への参加の可否は、洋上風力発電事業の収益性にに基づき判断される。収益性を評価するためには、発電事業者は最適な入札価格を決める必要がある。また、先に述べたように開発・建設期間中に事業環境が悪化した場合は、プロジェクトから撤退することも可能である。

プロジェクトの開始と撤退の問題を扱う先行研究とは異なり、本研究は発電事業者が入札に参加し落札した場合は、発電事業の開始期限が決まっていることから、建設は落札後直ぐに開始されると仮定する。すなわち、プロジェクトの開始時刻は固定されている。また、本研究は設備の耐用年数を考慮し、有限期間の問題を考察していることも特徴である。

本稿の構成は以下である。第 2 節で発電事業者の問題を定式化し、第 3 節で数値的に事業者の問題を解く。最後に、第 4 節で本研究の残された課題と拡張の可能性について述べ、本稿をまとめる。

2 発電事業者の問題

発電事業者はリスク中立であり、洋上風力発電の公募に入札することを検討している。公募においては FIT 制度が採用されているとする。

風力発電の総容量を K [MW] とする。風力発電の設備利用率 (capacity factor) は一定であり、 CF とする。Liu et al. (2021) と同様に時間間隔を 1 年とし、風力発電の年間の発電量 E_A は次で与えられる²。

$$E_A = CF \times K$$

FIT 価格を X_{FIT} [円/kWh] とすると、年間の売電収入は $\gamma X_{FIT} E_A$ となる。ただし、 γ は変換係数を表し γX_t [百万円/MW/年] となる。

²年単位で一定の発電量を仮定していることで、風速の不確実性を分析から除外している。

発電設備 1 単位当たりの運転維持費 (operation and maintenance (O&M) costs) を M_t とし、次の微分方程式に従っているとする。

$$dM_t = aM_t dt$$

ただし、 $a > 0$ は設備利用率を一定に保つために、タービンの劣化率などを想定する (Staffell and Green, 2014; Hamilton et al., 2020; Kim and Kim, 2025)。

発電事業者の操業利益 π は、売電収入と運転維持費との差額として与えられる。

$$\pi(M_t) = \gamma X_{FIT} E_A - M_t K \quad (2.1)$$

操業利益 π の期待割引現在価値 Λ は次となる。

$$\begin{aligned} \Lambda(M_t) &:= \mathbb{E}_t \left[\int_{t_S}^{t_S+T} e^{-r(s-t)} \pi(M_s) ds \right] \\ &= \frac{\gamma X_{FIT} E_A}{r} e^{-r(t_S-t)} (1 - e^{-rT}) - \frac{M_t K}{r-a} e^{-(r-a)(t_S-t)} (1 - e^{-(r-a)T}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

風力発電設備の単位 (MW) 当たりの価格 Y_t は、Choi and Lee (2000) と同様に幾何ブラウン運動に従う。

$$dY_t = \mu Y_t dt + \sigma_Y Y_t dZ_t^Y \quad (2.3)$$

本研究では簡化のため、風力発電の建設は開発・投資期間 $[t_0, t_S]$ に一様に進められると仮定する。また、MW 当たりの開発費 D は每期一定とする。耐用年数 T が終了した風力発電設備は、建設費用の $\eta \in (0, 1)$ 倍の廃棄費用が掛かるとする。

発電事業者は入札においては、操業利益を高めるためになるべく高い価格で入札をしたい。しかし、競合他社が存在するために、落札するためには競合他社よりも低い価格で入札をしなければいけない。ここで、各競合他社の入札価格は、それぞれ独立に一様分布 $U(0, \bar{x})$ に従っているとする (井上, 2016)。ただし、 $\bar{x}$ は入札における上限価格を表す。競合他社の数を n とすると、入札価格 X_{FIT} で落札できる確率 P_S は、次で与えられる。

$$P_S = (P_{S1})^n = \left(\frac{\bar{x} - X_{FIT}}{\bar{x}} \right)^n \quad (2.4)$$

ただし、 P_{S1} は競合他社が 1 者の場合 ($n = 1$) の落札できる確率である。

$$P_{S1} = \Pr\{X_{FIT} < X_{FIT}^c\} = \frac{\bar{x} - X_{FIT}}{\bar{x}}$$

ただし、 X_{FIT}^c は競合他社の入札価格である。最適な入札価格 X_{FIT}^* は、入札に成功して得られる操業利益の期待割引現在価値を最大とすように求まる。

$$X_{FIT}^* = \arg \max_{X_{FIT}} \Lambda(M_{t_0}; X_{FIT}) P_S(X_{FIT}) \quad (2.5)$$

(2.5) 式より、最適な入札価格 X_{FIT}^* は次と求まる。

$$X_{FIT}^* = \frac{\bar{x}}{1+n} \quad (2.6)$$

入札価格 X_{FIT}^* で風力発電事業を実施する場合の正味現在価値 NPV は次となる。

$$NPV(t_0, M_{t_0}, Y_{t_0}) := \mathbb{E}_{t_0} \left[- \int_{t_0}^{t_S} e^{-r(t-t_0)} \left(D + \frac{Y_t}{t_S - t_0} \right) K dt + \int_{t_S}^{(t_S+T)} e^{-r(s-t_0)} (\gamma X_{FIT}^* E_A - M_t K) dt - e^{-r(t_S+T)} \eta Y_{t_S} K \right] \quad (2.7)$$

発電事業者は最適な入札価格を用いて風力発電事業の価値を評価し、入札に参加するか否かを判断する。事業価値評価においては、開発・建設期間中に事業環境が悪化した場合に、風力発電事業から撤退できるものとする。したがって、風力発電事業者の問題は次のように整理される。

- (i) 最適な入札価格 X_{FIT}^* を決める。
- (ii) 求まった最適な入札価格 X_{FIT}^* で計算された風力発電事業の価値を元に、入札への参加の可否を判断する。
- (iii) ただし、風力発電事業の開発・建設期間中に事業環境が悪化した場合は、風力発電事業から撤退ができる。

ここで、(ii) の意思決定に用いられる風力発電事業の価値は、(iii) の撤退ができる事を考慮した価値であることに注意されたい。

風力発電事業からの撤退時刻を $\tau \in [t_0, t_S]$ とすると、撤退時刻を決める問題は次のように定式化される。

$$G(t_0, M_{t_0}, Y_{t_0}) := \sup_{\tau \in [t_0, t_S]} \mathbb{E}_{t_0} \left[- \int_{t_0}^{\tau \wedge t_S} e^{-r(t-t_0)} \left(D + \frac{Y_t}{t_S - t_0} \right) K dt - e^{-r\tau} \left(\frac{\tau - t_0}{t_S - t_0} \right) \eta Y_\tau K \mathbf{1}_{\{\tau \leq t_S\}} + \left\{ \int_{t_S}^{t_S+T} e^{-r(s-t_0)} (\gamma X_{FIT}^* E_A - M_t K) dt - e^{-r(t_S+T)} \eta Y_{t_S} K \right\} \mathbf{1}_{\{\tau \notin [t_0, t_S]\}} \right] \quad (2.8)$$

(2.8) 式の右辺第 1 項は、開発・投資期間 $([t_0, t_S])$ に掛かる開発費と投資費用を表す。第 2 項は時刻 τ に発電事業から撤退した場合に掛かる廃棄費用を表す。簡単化のため、廃棄費用は撤退時の設備の価格 Y_τ を元に計算されると仮定する。第 3 項は操業利益と耐用年数まで操業した場合の設備の廃棄費用を表す。

入札に参加するか否かの決定を ξ とすると、 ξ は (2.8) で計算される事業価値 G が正であれば、入札に参加し、さもなければ参加しないとして与えられる。

$$\xi = \begin{cases} 1, & G(t_0, M_{t_0}, Y_{t_0}) > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.9)$$

以上より、発電事業者の問題は次のように与えられる。

$$V(t_0, M_{t_0}, Y_{t_0}) = \max_{\xi \in \{0,1\}} \xi G(t_0, M_{t_0}, Y_{t_0}) \quad (2.10)$$

このように定式化された発電事業者の問題 (2.10) は解析的に解くことはできず、次節で数値的に解く。

3 数値分析

本節では、Brandão and Dyer (2005), Aquila et al. (2020), Liu and Ronn (2020), Liu et al. (2021) などと同様に、発電事業者の問題 (2.10) の近似として、2 項モデルを用いて数値的に解く。

時刻 t の風力発電の設備の価格 Y_t は、時刻 $t + \Delta t$ に確率 q で uY_t に上昇し、確率 $1 - q$ で dY_t に下落するとする。ただし、 $u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$ 、 $d = \frac{1}{u}$ 、 $q = \frac{e^{r\Delta t} - d}{u - d}$ である。

時刻を i 、 Y の状態を j として表すと、時刻 i 、状態 j の設備の価格 Y_{ij} は次となる。

$$Y_{ij} = Y_0 u^j d^{i-j}, \quad i \in [0, N], \quad j \in [0, i] \quad (3.1)$$

ただし、 $N = \frac{t_s - t_0}{\Delta t}$ である。

時刻 i 、状態 j の時の事業価値を $G(i, j)$ とする。時刻 $i = N$ 、すなわち $t = t_s$ の時における撤退の意思決定問題は次である。

$$G(i, j) = \max\{NPV(i, j), 0\}, \quad i = N, \quad j \in [0, i] \quad (3.2)$$

ただし、 $NPV(i, j)$ は時刻 i 、状態 j の時の正味現在価値 NPV である。時刻 $i \in [0, N - 1]$ 、すなわち $t \in [0, t_s)$ における撤退の意思決定問題は次となる。

$$G(i, j) = \max\{-CA(i, j), e^{-r\Delta t}[qG(i + 1, j + 1) + (1 - q)G(i + 1, j)]\}, \quad i = N, \quad j \in [0, i] \quad (3.3)$$

ただし、 $CA(i, j)$ は撤退によって生じる風力発電設備の廃棄費用であり、 $CA(i, j) = \frac{i}{N}\eta Y_{ij}K$ と与えられる。

表 1 に記載の数値を用いて数値計算を行うと、 $G(0, 0) = 0$ すなわち $G(t_0, M_{t_0}, Y_{t_0}) = 0$ となり、入札に参加しない $\xi = 0$ という結果になった。各年における事業からの撤退の閾値を表したのが図 1 である。 $G > 0$ となり入札に参加する FIT 価格は $X_{FIT} > 28.172$ となり、ほぼ入札の上限価格となる。また、 $G > 0$ となる発電設備の価格は $Y_0 < 87.0247$ となるときと計算された。

4 まとめ

本研究は投資費用の不確実性を考慮した風力発電事業の価値を評価した。投資費用が不確実であるため、費用高騰によって事業環境が悪化した場合は、開発・建設期間中に風力発電事業から撤退できる場合を考察した。発電事業者が入札を検討している制度においては FIT 制度が採用されており、最適な入札価格を求め、その価格を用いて発電事業の価値を評価した。発電事業者の問題は発電事業から撤退するタイミングを求める最適停止問題と、入札に参加するかしないかの

表 1: 係数の基準値

表記	値	説明	参照
σ_Y	0.5	風力発電設備の価格のボラティリティ	仮想的な値
Y_0	515	風力発電設備の初期価格 [百万円/MW]	経済産業省 (2025.2.6)
K	350	風力発電の総容量 [MW]	経済産業省 (2025.2.6)
CF	0.35	設備利用率	経済産業省 (2025.2.6)
γ	$\frac{1000 \times 8760}{1000000}$	変換係数 [h]	$X_t[\text{円/kWh}] \gamma[h] = X_t[\text{百万円/MW/year}]$
$\bar{x}$	29	入札上限価格 [円/kWh]	資源エネルギー庁 (2025.10)
n	1	競合他社の数	仮想的な値
M_0	22.5	運転維持費の初期値 [百万円/MW/年]	経済産業省 (2025.2.6)
a	0.02	運転維持費の変化率	仮想的な値
D_t	4.3	開発費 [百万円/MW/年]	仮想的な値
η	0.05	廃棄費用係数	IEA and NEA (2020)
r	0.06	割引率	仮想的な値
t_0	0	入札日	
t_S	7	開発・投資の期限 [年]	仮想的な値
T	25	設備の耐用年数 [年]	経済産業省 (2025.2.6)

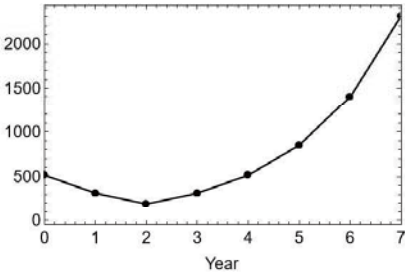


図 1: 閾値

問題として定式化される。定式化された問題は解析的に解くことはできず、数値例を用いて分析を行った。

本研究で用いたモデルは風力発電事業の価値評価としては導入的なものであり、以下のような拡張が考えられる。まず、数値例で用いた数値は仮想的な値も多く、実際の発電事業の評価に際しては各事業が直面している数値を用いる必要がある。次に、再エネ海域利用法に基づく洋上風力発電事業者公募の第2・第3ラウンドでは、市場価格連動型のFIP (feed-in premium) 制度が採用されており、FIP制度の下での事業価値評価も重要な課題である。FIP制度を考える場合は、電力価格の不確実性も考慮する必要がある。次に、投資費用の不確実性に技術進歩の影響を考慮することが考えられる。最後に、入札制度についての考察も考えられる (Matthaus et al., 2021)。

参考文献

- Aquila, G., de Queiroz, A.R., Balestrassi, P.P., Junior, P. R., Rocha, L.C.S., Pamplona, E.O., and Nakamura, W.T. (2020). Wind energy investments facing uncertainties in the Brazilian electricity spot market: A real options approach, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100876.
- Berger, P. G., Ofek, E., and Swary, I. (1996). Investor valuation of the abandonment option, *Journal of financial economics*, 42(2), 259–287.
- Bonini, C. P. (1977). Capital investment under uncertainty with abandonment options, *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 12(1), 39–54.
- Brandão, L. E., and Dyer, J. S. (2005). Decision analysis and real options: A discrete time approach to real option valuation. *Annals of operations research*, 135(1), 21–39.
- Choi, Y. K., and Lee, S. W. (2000). Investment and abandonment decisions with uncertain price and cost. *Journal of Business Finance & Accounting*, 27(1 - 2), 195–213.
- Hamilton, S. D., Millstein, D., Bolinger, M., Wiser, R., and Jeong, S. (2020). How does wind project performance change with age in the United States?. *Joule*, 4(5), 1004–1020.
- IEA and NEA. (2020). Projected Costs of Generating Electricity 2020, <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>, 最終閲覧日: 2025年12月2日.
- 井上正澄. (2016). ゲーム理論で読み解く石油開発. *石油技術協会誌*, 81(2), 183–196.
- Kim, D., and Kim, B. (2025). Quantification of performance degradation due to wind turbine aging: Estimating the reduction in annual energy production using the annual degradation rate. *Energy*, 324, 136142.

- Liu, X., and Ronn, E. I. (2020). Using the binomial model for the valuation of real options in computing optimal subsidies for Chinese renewable energy investments. *Energy Economics*, 87, 104692.
- Liu, Q., Sun, Y., Liu, L., and Wu, M. (2021). An uncertainty analysis for offshore wind power investment decisions in the context of the national subsidy retraction in China: A real options approach, *Journal of Cleaner Production*, 329, 129559.
- Matthäus, D., Schwenen, S., and Wozabal, D. (2021). Renewable auctions: Bidding for real options. *European Journal of Operational Research*, 291(3), 1091–1105.
- Myers, S. C., and Majd, S. (1983). Calculating abandonment value using option pricing theory. Working papers 1462-83., Massachusetts Institute of Technology (MIT), Sloan School of Management.
- Pindyck, R. S. (1993). Investments of uncertain cost. *Journal of financial Economics*, 34(1), 53–76.
- Staffell, I. and Green, R. (2014). How does wind farm performance decline with age?. *Renewable energy*, 66, 775–786.
- Thijssen, J. JJ, (2022). Optimal investment and abandonment decisions for projects with construction uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 298(1), 368–379.,
- Zhou, H. L., Tang, B. J., and Cao, H., (2020). Abandonment decision-making of overseas oilfield project coping with low oil price, *Computational Economics*, 55(4), 1171–1184.
- 資源エネルギー庁 (2025.10). 洋上風力発電について (2025 年 10 月) . https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/104_s01_00.pdf, 最終閲覧日：2025 年 12 月 2 日.
- 経済産業省 (2025.2.6). 各電源の諸元一覧, https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_20250206_02.pdf, 最終閲覧日：2025 年 12 月 2 日.