Evaluating Investments of Power Plant under Uncertainty: Investment Rate Switching and Spark Spread Options*

Ryuta Takashima,^{a,†} Naoya Miyaguchi,^b and Makoto Goto^c

^a *Department of Nuclear Engineering and Management, Graduate School of Engineering,
The University of Tokyo*

^b *Department of Industrial and Management Systems Engineering, Graduate School of
Creative Science and Engineering, Waseda University*

^c *Graduate School of Finance, Accounting and Law, Waseda University*

Abstract: This paper investigates an investment project of power plants which have the operational flexibility to start-up and shut-down. The project analyzed in this study consists of two sequential phases such as the construction and the operation of the power plant. We develop a simulation model taking into account the uncertainties of construction cost, electricity prices, and fuel prices. Consequently, the project value and the probability distribution of the value are calculated by using the model. Furthermore, we show the effect of the investment rate switching and the spark spread options on the project value.

Keywords: Electricity markets; investment rate switching option; spark spread option; real options; simulation model

*Received: December 7, 2006; Accepted: May 21, 2008.

[†]Corresponding author. Address: 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan; Phone: +81-3-5841-2960; E-mail: takashima@n.t.u-tokyo.ac.jp

不確実性下における発電プラントの投資評価: 投資率変更オプションとスパークスプレッド・オプション

高嶋 隆太^a, 宮口 直也^b, 後藤 允^c

^a 東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻

^b 早稲田大学大学院創造理工学研究科経営システム工学専攻

^c 早稲田大学大学院ファイナンス研究科

1 はじめに

世界先進各国における規制緩和の潮流の下, 我が国においても電力自由化が進展している. 1995 年, 電気事業法の改正により卸電力事業が自由化され, 独立系発電事業者 (IPP) が卸供給に参入することが可能となった. さらに 2005 年 4 月には, 日本卸電力取引所 (Japan Electric Power Exchange: JEPX) が開設され, 日々電力が市場で取引されるようになった. このため電気事業者は, 従来の総括原価主義であった規制下の時のようにコスト回収の保証がなくなり, 発電プラントの投資に対する判断の比重として, 投資リスクや経済性が以前より大きくなったと考えられる. また, IPP や PPS も同様に市場リスクに晒されるものの, 柔軟性のある経営手法によって市場へ参入することが可能となり, 企業価値を高める投資の機会が増加したものと考えられる. このような不確実性が存在する電力市場下において, 電力事業・経営の環境に適した評価手法が必要となる.

近年, 不確実性下における投資戦略や事業価値の評価法としてリアルオプション・アプローチが注目されている [6, 14]. 本手法を用いることによって, 投資の最適タイミングの決定や柔軟性のある投資行動の価値創出に関する研究が多数行われており, その中でも, 電力経営や発電事業への応用が多く見受けられる. Pindyck [8] は, 建設費が不確実な状況下における原子力発電プラントの建設投資の評価を行い, 建設の延期や中止に関する不確実性との関係について分析している. Deng, Johnson and Sogomonian [5] は, スパークスプレッド・オプションの観点から火力発電プラントの価値について分析を行い, 価格モデルが異なる確率過程のとき価値を見出している. Tseng and Barz [15] は, 短期における発電プラントの起動停止問題に関して考察している. Thompson, Davison and Rasmussen [13] は, 電力価格や燃料価格の不確実

性、さらには、発電プラントの物理的特性を考慮し、水力発電プラントや火力発電プラントの評価を行っている。Gollier, Proult, Thais and Walgenwitz [7] は、原子力発電プラントの大型炉と小型炉の建設投資計画に関して、規模の経済と柔軟性の価値の比較により分析を行っている。小田、松橋、吉田、高嶋 [16] は、それぞれの発電プラントの最適投資基準に係る資本費と変動費の関係から、我が国における電源投資の特性を明らかにしている。このように、発電プラントに関する様々なプロジェクトの研究が行われているが、建設や操業を統合的に分析している研究や、発電プラントのライフサイクル評価にリアルオプション的な経営戦略や思考を取り入れた研究は、ほとんど見受けられない。

発電プラントの価値評価も含めて、研究開発や資源開発のような複雑な事業の分析や評価を行うとき、あらゆる状態変数やその不確実性を考慮する必要がある。状態変数の数が増し、より複雑な投資問題を扱うとき、解析的な解を得ることだけでなく、評価モデルの式を導出することさえ困難になる。このような場合、シミュレーションモデルは有効である。Cortazar and Schwartz [1] は、多数の不確実な状態変数を扱うことができるシミュレーションの有効性を示し、油田開発の評価を行っている。さらには、Schwartz and Zozaya-Gorostiza [12] は破壊的技術の投資評価、Schwartz and Moon [10] はインターネット企業の価値評価をシミュレーションモデルを用いて行い、その有効性を示している。発電プラントの価値評価を行う場合、建設費、燃料費、運転維持費等あらゆる不確実性が存在する。さらに、電力市場が開設された現在において電力価格も不確実性の一つとなった。不確実性が多数存在し投資判断の基準が困難にはなったが、リアルオプション的な思考を取り入れることにより、柔軟的な経営戦略から発電プラントの価値を高めることが可能になると考えられる。

そこで本研究では、操業時に運転・停止といった柔軟性の高い電源である火力発電プラントに注目し、建設期間と操業期間の両期間を取り入れた火力発電プラントの事業評価を行うシミュレーションモデルを構築する。価値評価にあたっては、JEPX での取引を想定し、完全競争市場としてモデルを構築している。このモデルを用いることによって、建設費、電力価格、燃料価格の不確実性やそれぞれの変数間の相関が投資に及ぼす影響を分析する。また、建設期間における投資率変更戦略を考慮したときのプロジェクト価値や操業期間のスパークスプレッドに基づいたときの運転・停止オプションを考慮したプロジェクトの価値を算出する。

本稿の構成は以下のとおりである。2 節では、本稿で用いる問題設定を示すと伴に、状態変数

のモデルや評価を行うシミュレーションの説明を行う。3節では、仮想的な火力発電プラントの価値の分析を行い、建設時や操業時の戦略的価値を明らかにする。そして、4節を結論とする。

2 モデル

本節では、火力発電プラントの投資評価に用いる建設、操業のそれぞれの期間における状態変数と、その不確実性について説明を行い、評価シミュレーション方法について言及する。

2.1 建設費の不確実性

発電プラントの建設期間は5年から10年と長期にわたることから、発電プラント評価に建設期間も含めることは重要である。建設期間が長期であることだけでなく、プラントの建設に係る資材等の費用の変動や工事中の予期せぬ事故、さらには規制による工期遅延等の不確実性要因が多いことから、建設費の不確実性を考慮する必要がある。そこで本研究では、費用の外生的な不確実性や工期遅延等を考慮することが可能な期待残余建設費を状態変数として導入する[8]。この期待残余費用を用いて、費用の不確実な状況下での研究開発投資[12, 11]やエネルギー政策[3]等を分析して研究が多く見受けられる。本研究における、期待残余建設費は以下の確率微分方程式に従うものとする¹：

$$dK = -Idt + \gamma Kdw, \quad (1)$$

ここで I は投資率を表し、 γ は建設費の不確実性の大きさを表す。 dw はWiener過程の増分である。建設費の不確実性は建設材料市場や労働市場、経済状況等に起因し発生する。初期時点において予想される発電プラントの建設費を $K(0)$ として、建設が進むにつれて期待残余建設費 K は減少する。 $K = 0$ となった時点で建設完了とする。

¹Pindyck [8] は、技術的な不確実性と投入費用（外生的）の不確実性の2つを取り入れ分析している。本研究では、研究開発等において影響する技術的な不確実性は小さいものとして、外生的な不確実性のみを考慮する。

図 1: スパークスプレッド

2.2 収益の不確実性

火力発電プラントの建設が完了することにより，その時点から収益が発生する．収益は，次式のように表される：

$$Profit = P_E - H \cdot P_F, \quad (2)$$

ここで P_E は電力価格， H は熱消費率， P_F は燃料価格であり， $H \cdot P_F$ は燃料費である．本研究では，この電力価格と燃料費の差であるスパークスプレッドに基づき発電プラントの運転・停止が行われるオプションを考慮する．つまり，スパークスプレッドが 0 より大きいときには発電プラントを運転し，0 より小さいとき，つまり燃料費が電力価格を上回った場合は運転を停止するものとする．図 1 において，電力価格と燃料費のサンプル・パスが示されており，点線の丸の部分が発電を停止するところである．従ってスパークスプレッド・オプションのペイオフは次式のようになる．

$$Payoff = \max(P_E - H \cdot P_F, 0) \quad (3)$$

本研究では、このスパークスプレッドに基づく運転・停止の選択権をスパークスプレッド・オプションという。上でも述べたように、Deng et al. [5] は、このスパークスプレッド・オプションを考慮し発電プラントの価値を算出している。さらに後で示すように、本研究では操業期間中にかかる運転維持費（O&M 費）も考慮している。

2.3 エネルギー価格モデル

電力価格やエネルギー価格の推移を確率過程で表す場合、平均回帰過程を用いて分析する研究が多く見受けられる [5, 4, 9, 2]。そこで本研究においても、電力価格 P_E と燃料価格 P_F は平均回帰過程に従うと仮定する²：

$$d(\ln P_E) = \eta_E(\ln \bar{P}_E - \ln P_E)dt + \sigma_E dz_E, \quad (4)$$

$$d(\ln P_F) = \eta_F(\ln \bar{P}_F - \ln P_F)dt + \sigma_F dz_F, \quad (5)$$

ここで、(4) 式、(5) 式それぞれ η は回帰速度、 $\bar{P}$ は長期均衡価格を表しており、 dz_E と dz_F は Wiener 過程の増分である。さらに、電力価格と燃料価格の変動による相関を考慮する：

$$dz_E dz_F = \rho_{E,F} dt,$$

ここで $\rho_{E,F}$ は電力価格と燃料価格の相関係数である³。例えば、負の相関であれば燃料費が下降したときに電力価格が上昇し、大きな収益を得られるといった状況が考えられる。

2.4 シミュレーションモデル

火力発電プラントのプロジェクト価値は、(1) 式、(4) 式、(5) 式の離散化を行い、シミュレーションにより算出される。

総建設費の現在価値は次式のようになる：

$$PV_C = E_0 \left[\int_0^T I e^{-rt} dt \right], \quad (6)$$

²電力価格を含めエネルギー価格の特性として平均回帰性の他に、季節性、週・月の周期変動、気温との相関等が挙げられる。今後の研究において、これらの特性を価格モデルに反映し、発電プラントの投資評価を行う予定である。

³電力価格と燃料価格のバスを発生させるときの乱数をそれぞれ ε_E , ε_F とすると、相関係数 $\rho_{E,F}$ を考慮したときの乱数は、それぞれ $\varepsilon_E = \rho_{E,F}e_1 + \sqrt{1 - \rho_{E,F}^2}e_2$, $\varepsilon_F = e_2$ である。ただし、 e_1 と e_2 はそれぞれ独立な標準正規乱数である。

ここで、 I は投資率、 r は割引率⁴、 τ は建設の完了時点を表しており (1) 式より K が 0 となる時点であることから確率変数である。

次に、収益の現在価値は次式のようにになる：

$$PV_P = E_0 \left[\left\{ \int_{\tau}^T \max [P_E - H \cdot P_F, 0] e^{-r(t-\tau)} dt \right\} e^{-r\tau} \right], \quad (7)$$

ここで、 T は操業期間として収益が算出されるまでの時点、 τ は建設の完了時点、 P_E は電力価格、 P_F は燃料価格、 H は熱消費率、 r は割引率である。また、操業期間において修繕費、人件費などの O&M 費を考慮する。O&M 費は、年率で $TC \cdot R_{O\&M}$ と表せる。 TC は建設にかかった実際の総費用⁵で、建設期間が確率変数であることから TC も確率変数となる。また、 $R_{O\&M}$ は定数で本研究では、5% と設定する⁶。操業期間における O&M 費の現在価値は次式のようになる：

$$PV_{O\&MC} = E_0 \left[\left\{ \int_{\tau}^T (TC \cdot R_{O\&M}) e^{-r(t-\tau)} dt \right\} e^{-r\tau} \right]. \quad (8)$$

これらの式をもとにプロジェクト価値は次式のようになる。

$$V = PV_P - PV_{O\&MC} - PV_C \quad (9)$$

プロジェクト価値 V は投資の意思決定者に対し、 V が 0 より大きいときは投資を実行し、0 より小さいときは投資を実行しないという示唆を与える。

このプロジェクト価値を求めるシミュレーションのサンプルパス（それぞれの変数の時間発展）を図 2 に示した。刻み幅を 0.01 年としてシミュレーションを行っている。点線の左側が建設期間で、右側が操業期間となっている。時点 τ （約 16 年）で建設が完了し収益が発生する。操業期間において、電力価格 P_E 、燃料費 P_{FC} は確率変数として変動している。この期間において燃料費が電力価格を上回る場所がある（例えば、約 20 年時点）。このようなところにスパークスプレッド・オプションが存在する。時点 T （約 36 年）でプロジェクトは終了する。この一連のシミュレーションを 1 回として、1 万回のシミュレーションより期待プロジェクト価値が算出される。このモデルによりスパークスプレッド・オプションを考慮するときとしないときの両ケースの価値を求める。

⁴本研究で扱う割引率は、評価するプロジェクトや産業特有の外性的に与える割引率である。

⁵建設にかかる実際の費用を $TC = \int_0^{\tau} I dt$ とする。

⁶つまり O&M 費は総費用の 5%（年率）である。

図 2: 火力発電プラント評価のシミュレーションモデル

シミュレーションにあたって、 H は一定とし、操業期間は 20 年とした。各時点のキャッシュフローの算出にあたっては、法人税等を 0 とすることで、O&M 費に減価償却費は考慮していない。

3 結果と考察

本研究において分析対象の発電プラントは、仮想的な火力発電プラントであり、運転・停止を行うことが可能な電源を想定している。分析に用いる基本ケースのパラメータは、表 1 に示されている。燃料費に関して、熱消費率 H が一定であることから $C = H \cdot P_F$ として燃料費自体が確率過程に従うとする。この設定によって、燃料費の初期値が示されている。また、電力価格と燃料費の相関係数が 0 となっているが、相関が正、負のときの分析も行う。

不確実性下における発電プラントの投資評価：
投資率変更オプションとスパークスプレッド・オプション

表 1: モデルプラントの基本ケース・パラメータ

割引率	r	0.04
期待建設費	$K(0)$	20 万円/kW
投資率	I	1.3 万円/kW
期待建設費のボラティリティ	γ	0.2
初期電力価格	$P(0)$	15 円/kWh
電力価格の回帰率	η_P	0.2
長期均衡価格	$\bar{P}$	15 円/kWh
電力価格のボラティリティ	σ_P	0.5
初期燃料費	$C(0)$	10 円/kWh
燃料費の回帰率	η_C	0.2
燃料費の長期均衡値	$\bar{C}$	10 円/kWh
燃料費のボラティリティ	σ_C	0.2
電力価格と燃料費の相関係数	$\rho_{P,C}$	0
運転・維持費用比率	ξ	0.05

図 3: スパークスプレッド・オプションの価値

図 4: 事業価値の分布

3.1 スパークスプレッド・オプションの評価

図 3 は、電力価格のボラティリティとプロジェクト価値の関係を示している。上がスパークスプレッド・オプションを考慮したときのプロジェクト価値で、下が考慮していないときのプロジェクト価値である。両方の場合においても、電力価格のボラティリティが増えることにより、プロジェクト価値が大きくなることが分かる。スパークスプレッド・オプションを考慮することによりスパークスプレッドが負の時には運転を停止し損失を回避するため、電力価格のボラティリティが大きくなるにつれて、スパークスプレッド・オプションは経済的価値を増すことがわかる。JEPX のような電力取引市場が創設され、さらに取引量が増し、電力価格の不確実性が大きな状況下において、火力発電プラントの持つスパークスプレッド・オプションは経済的な価値を持ち、不確実性の大きさによりその価値を増すことが示唆される。

図 4 は、電力価格のボラティリティが 0.5 のときの事業価値の分布をスパークスプレッド・オプション保持の有無のそれぞれのケースにおいて比較したものである。オプションを考慮することによって事業価値分布の幅は小さくなることが示されている。それぞれの期待事業価値は 36.10 円/kW, 27.62 円/kW であり、期待価値の分散は 36.70 円/kW, 41.23 円/kW である。特

不確実性下における発電プラントの投資評価：
投資率変更オプションとスパークスプレッド・オプション

図 5: 電力価格と燃料価格の相関の影響

に、負の価値になる確率が 26.73% から 13.15% へと減少しており、期待事業価値の確率は増加していることが分かる。これらの図から不確実な状況に適応するプラントの柔軟性は重要性を増し、市場拡大と共にこのような柔軟性を計画し保有する必要性は大きくなるといえる。

図 5 はプロジェクト価値に対して、オプションが考慮されていないときの電力価格と燃料価格の確率的変動の相関の影響を示したものである。2 変数の相関が正の場合は、燃料価格の上昇が電力価格の上昇に大きく影響し、プロジェクト価値の増加へと導く。また、価格が下降するときはプロジェクト価値に影響を及ぼさない。つまり、スパークスプレッドの負の機会が少ないことを示している。

図 6 は電力価格と燃料価格の相関の影響をオプション保持の有無の両ケースにおいて比較したものである。この図の縦軸は図 5 の縦軸とスケールが異なっている。相対的にスパークスプレッド・オプションを考慮していないときのプロジェクト価値には、あまり影響はみられないが、スパークスプレッド・オプションを考慮したときのプロジェクト価値に対して、正の相関のときは、電力価格の上昇が燃料価格の上昇により打消され、プロジェクト価値の減少を導いている。負の相関のときは、電力価格の上昇が燃料費の下降へとつながりスパークスプレッドを大きくすることや、その逆の状態のときは、オプションを行使することで、プロジェクト価

図 6: 相関の影響の比較

値に対して正の影響が大きく現れている．このようにオプションを保持している発電プラントにおいては，正の相関が大きいとき，相対的に価値が減少するが，

3.2 投資率変更戦略

オプションを保持していない発電プラントと比べ，価値が高いことが分かる．また，電力価格と燃料価格との相関を市場で観察し，運転・停止戦略を調整することにより価値を高めることが可能であることを示唆している．

これまで操業期間における柔軟な事業戦略である運転・停止オプションを考えてきた．しかしながら，建設期間においても柔軟性のある経営戦略をとることにより価値を高めることが考えられる．例えば，建設期間において収益が高いと予想したとき，建設の完成を早めることによって，収益が高い状態で操業期間に入る可能性を高める．また，収益が低いときに建設の完成を遅らせることにより，収益が低い状態で操業期間に入る可能性を低くする．これは発電プラントの収益の源泉である電力価格の動向を観察することにより可能であると考えられる．

そこで本節では，電力価格に焦点を当て，電力価格がある上限値に達した場合に投資率を上

不確実性下における発電プラントの投資評価：
投資率変更オプションとスパークスプレッド・オプション

図 7: 投資率変更戦略

げ、ある下限値に達したら投資率を下げる投資率変更戦略を考える。通常の投資率を $I = I_{st}$ とし、電力価格が上限値に達したときの投資率を $I = 1.5I_{st}$ とし、下限値に達したときの投資率を $I = 0.5I_{st}$ とする。これを表現したものが図 7 である。図 7 は費用の不確実性が 0 ($\gamma = 0$) のときのものである。

上限値と下限値をそれぞれ電力価格 $15 \pm a$ 円/kWh (a は正の定数) として、その幅 $2a$ の異なる戦略を考える。それぞれ異なった戦略のときの事業価値を算出したものが図 8 である。これ結果より最良の戦略⁷は 6 円/kWh の幅 (上限値 18 円/kWh, 下限値 12 円/kWh) のときで事業価値 40.14 円/kW のときである。

この最良の戦略を考慮したときの事業価値を電力価格のボラティリティ別に算出したものが図 9 である。スパークスプレッド・オプションのみを考慮したときの方が、価値増加への寄与が大きい。建設期間の投資率変更オプションによって、さらに事業価値が増し、ボラティリティが高くなるにつれてこれが顕著になっていることが分かる。これは、操業期間における運転・停止戦略だけでなく、建設期間における戦略の必要性を示しており、先行研究では分析さ

⁷Schwartz and Zozaya-Gorostiza [12] も指摘しているように、本研究において得られる解は、ある条件に対するシミュレーションによって得られていることから最適解ではない。ある与えられた条件においての最適行動として「最良の行動」としている。

図 8: 投資率変更戦略下での事業価値

図 9: 2つのオプションの影響

れてこなかった，建設と操業両期間のにおける戦略的な事業価値を示している．

4 おわりに

本研究では，火力発電プラントの事業評価に対し，建設費，電力価格，燃料価格の不確実性を考慮したリアルオプション・アプローチによるシミュレーションモデルを構築した．これにより，電力価格の不確実性や変数間の相関と事業価値の関係を示すことが可能となった．さらに，スパークスプレッド・オプションや投資率変更オプションを考慮した場合としない場合を比較することによりオプション価値が算出され，柔軟性のある事業戦略の正当性を示した．発電プラントの操業によってだけでなく，収益が発生しない建設期間においても戦略的な意思決定を行うことで，価値創造へとつながることが分かった．JEPX における取引が活発になり，独立電気事業者（Independent Power Producer: IPP）の新規参入が注目されている中，IPP は，本研究のような建設期間における戦略的な経営方針をとることにより参入の可能性を高めることが可能であるということを示唆している．

本研究のモデルにおける電力価格モデルは，先行研究と同様な平均回帰過程としたが，今後，JEPX の電力価格分析を行うことでモデル化を行い，本研究の評価モデルに，その価格モデルを組み込むことで投資の分析を行う．また，本研究では，一つの発電プラントに関する投資評価を行ってきたが，今後は，様々なプラントを有する電力会社がリアルオプション的な思考によって投資行い，その競争行動によって電力価格が変化するような分析をエージェントシミュレーションを用いて行う．

謝辞

本稿を作成するにあたり，高森寛教授には大変貴重なコメントを頂いた．この場を借りて謝意を表したい．

参考文献

- [1] Cortazar, G. and Schwartz, E. S. (1998). Monte Carlo Evaluation Model of an Undeveloped Oil Field. *Journal of Energy Finance & Development*, **3**, 73–84.

- [2] Cortazar, G. and Schwartz, E. S. (2003). Implementing a stochastic model for oil futures prices. *Energy Economics*, **25**, 215–238.
- [3] Davis, G. A. and Owens, B. (2003). Optimizing the level of renewable electric R&D expenditures using real options analysis. *Energy Policy*, **31**, 1589–1608.
- [4] Deng, S. and Jiang, W. (2005). Lévy process-driven mean-reverting electricity price model: the marginal distribution analysis. *Decision Support Systems*, **40**, 483–494.
- [5] Deng, S. Johnson, B. and Sogomonian, A. (2001). Exotic electricity options and the valuation of electricity generation and transmission assets. *Decision Support Systems*, **30**, 383–392.
- [6] Dixit, A. K. and Pindyck, R. S. (1994). *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press, Princeton.
- [7] 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.
- [8] Pindyck, R. S. (1993). Investment of uncertain cost. *Journal of Financial Economics*, **34**, 53–76.
- [9] Pindyck, R. S. (2004). Volatility and commodity price dynamics. *Journal of Futures Markets*, **24**, 1029–1047.
- [10] Schwartz, E. S. and Moon, M. (2000). Rational Pricing of Internet Companies. *Financial Analysts Journal*, **56**, 62–75.
- [11] Schwartz, E. S., and Moon, M. (2000). Evaluating Research and Development Investments. In Brennan, M.J. and Trigeorgis, L. (eds). *Project Flexibility, Agency, and Competition*, Oxford, Oxford University Press, 85–106.
- [12] Schwartz, E. S. and Zozaya-Gorostiza, C. (2000). Evaluating Investments in Disruptive Technologies. UCLA Working Paper.

- [13] Thompson, M. Davison, M. and Rasmussen, H. (2004). Valuation and optimal operation of electric power plants in competitive markets. *Operations Research*, **52**, 546–562.
- [14] Trigeorgis, L. (1996). *Real Options*. MIT Press, Cambridge.
- [15] Tseng, C. L., and Barz, G. (2002). Short-term generation asset valuation: A real options approach”, *Operations Research*, **50**, 297–310.
- [16] 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』, **84**, 134–141.