

火力発電補填に着目した電力会社への 太陽光発電システム導入評価に関する研究 ～ROA (Real Option Approach) による分析～

資料構成

- 研究背景
- 研究目的
- 事業のモデル化
- モデル評価
- 定式化
- 分析・評価
- まとめ・今後の方針
- 参考文献
- *Appendix*

東京理科大学工学研究科
経営工学専攻
修士2年 杉原良和

電力エネルギー動向

□ 電力会社のエネルギー事情

■ 電力の安定供給

➤ 化石燃料の枯渇, 燃料価格の高騰

➤ CO₂ 排出抑制(地球温暖化)

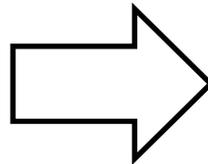
□ CO₂ 抑制対策[11]

➤ 安全確保を前提とした原子力発電[6]の導入

➤ 再生可能エネルギーの開発・普及

□ 放射性廃棄物の処理問題

□ 東日本大震災の影響



**原子力発電の新規建設が
困難な可能性**

研究背景

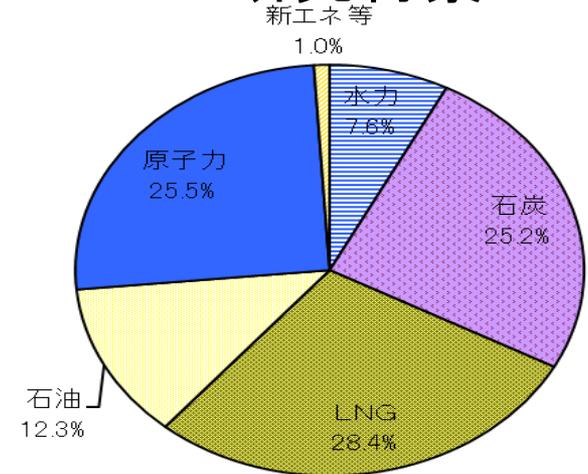


図1:日本の発電電源構成(2008)

◆太陽光発電の技術発展^[12]

✓ 太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換する発電方式

- 発電によるCO₂を排出しない
- 将来導入目標が多い.
- 潜在利用可能量が多い. [13]
- メーカー, 自治体の雇用創出

□電力会社の対応

◆メガソーラー発電の普及

- 実証研究・設置
- 電力会社の建設計画
- ✓ 2020年までに14万kw^[11]

メガソーラー:出力1000kw以上の規模
を有する太陽光発電

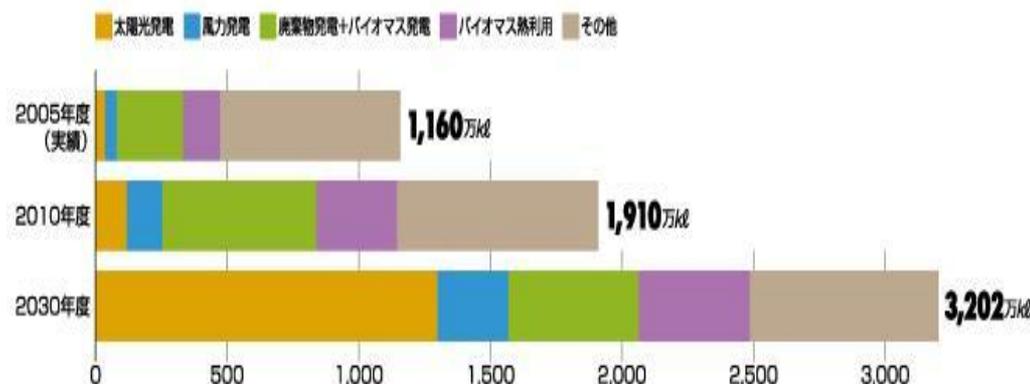


図2:新エネルギー等導入目標



図3:北杜サイトでの太陽光発電実証研究

導入便益評価の必要性

研究背景

➤ 導入課題

- ✓ 原子力や火力を全て賄う発電力を有していない.
- ✓ 初期投資(技術開発)が高コスト.
- ✓ 日射量による発電量の変化.

建設計画・目標があるため、実証評価だけでなく
将来の長期期間での導入による便益評価の必要性

➤ 便益評価の着目(不確実性下での評価)

- 火力発電を補うメガソーラー発電導入に着目
- CO₂排出量削減による経済価値(便益)に注目
- ◆ CO₂取引価格, 発電電力量, 火力燃料費を考慮

- **ROA(Real Option Approach)** [7][8] [10]
 - ✓ 不確実性下での経営の柔軟性を考慮した投資評価手法.
 - ROAによる電源設備の新設・更新評価[3] [5]
 - ✓ CO₂削減排出量を経済価値(不確実要因)として考慮
 - Joseph, Maurryの先行研究[1]
 - ✓ 太陽光発電導入でCO₂削減排出量・価格の不確実性を考慮.
 - ✓ 4項アプローチによる表現.
 - 操業変更(スイッチング・オプション)による評価[2] [7] [9]
 - ✓ 代替的操業変更を考慮.

研究目的

- メガソーラーの導入便益評価の必要性
- ✓ 火力発電を補う導入に着目 (どの燃料に補填すべきか)
- ✓ 不確実性下での評価 (ROAによる評価の提案)

• 研究目的

事業の不確実性を考慮できるROAより、火力発電の一部の操業変更を考慮した大型太陽光発電の導入評価を行う。

□意思決定の選択(オプション)

- 火力発電から導入して発電量だけ火力を縮小する操業変更。

□不確実性要因

- CO₂取引価格, 太陽光発電電力量の変動。

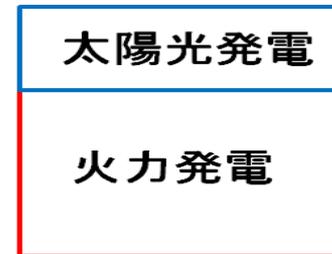
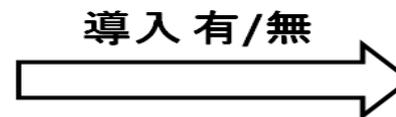
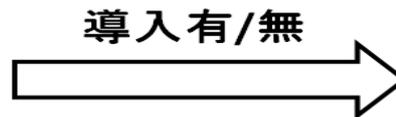
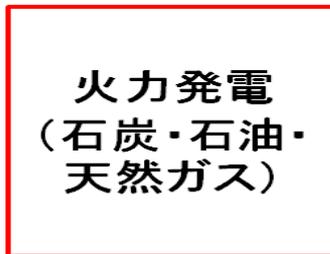
評価モデル

事業のモデル化

従来の設備導入評価



本研究の導入評価



2012年

図4:評価モデルの概要図

t年

導入便益(発電量により変動)

- ✓削減火力燃料費
- ✓削減CO₂排出量価値
- ✓RPS相当量[4]
- ✓電力収入
- ✓火力保守・修繕費機会価値

導入による損失

- ✓太陽光発電初期投資
(土地代, 工事費, 導入費, その他)
- ✓太陽光保守・修繕費

対象整理

事業のモデル化

• 導入対象

- 電力会社(日本国内)

• 評価・期間

- 便益評価:20年間(2012年～)
- 操業変更(オプション)評価:15年間
- 意思決定期間:1年毎(離散的意思決定)

• 評価方法

- 4項アプローチによる評価に操業変更(スイッチング・オプション)を適用
- スwitching・オプション
- ✓ 一定のコストで操業モード間(火力継続→太陽光導入)の変更を行う権利.

➤ 2項モデル

- 1期間で不確定要因が2通りに推移するモデル[7]

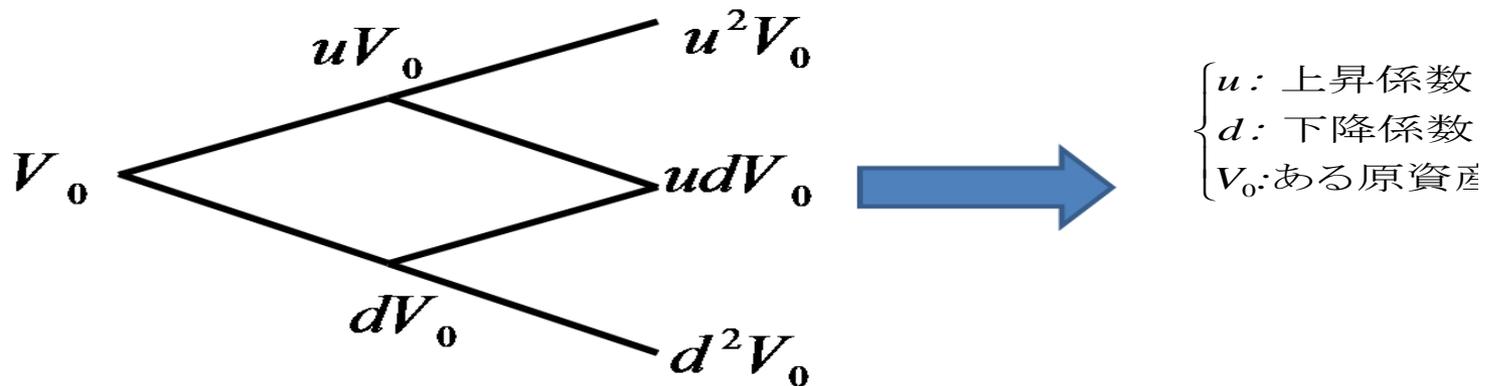


図5:2項モデルによる原資産の推移

- Cox, Ross, Rubinstein (CRR) [7]

$$u_j = e^{\sigma_j \sqrt{\Delta t}}, d_j = e^{-\sigma_j \sqrt{\Delta t}} \dots (1)$$

$\left\{ \begin{array}{l} \sigma: \text{原資産ボラティリティ} \\ \Delta t: \text{意思決定期間} \end{array} \right.$

- 2つの不確実要因の推移による評価^{[1][9]}

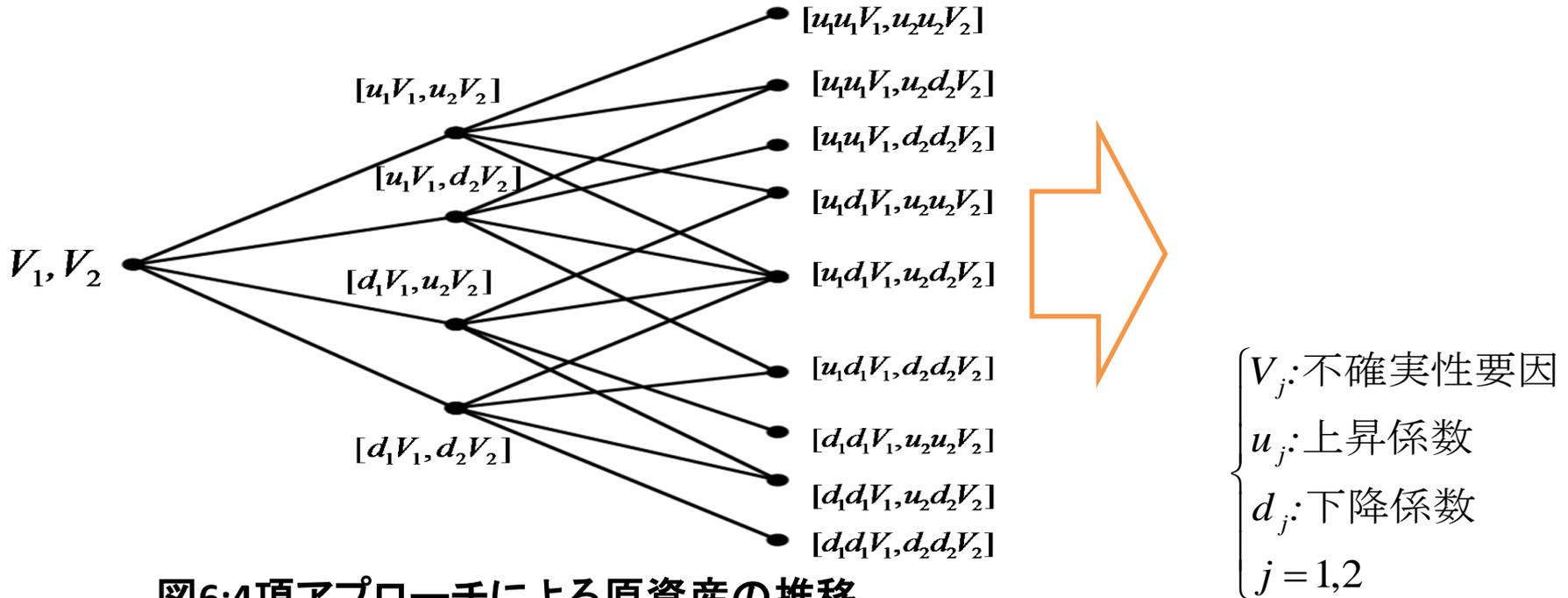


図6:4項アプローチによる原資産の推移

➤ 本研究での設定

- ◆ CO₂取引価格, 太陽光発電電力量の推移を4項アプローチにより表現
- ◆ スイッチングオプション(**火力継続**→**太陽光導入**)を4項アプローチに取り込む.

- Step0:初期パラメータの設定(事前設定)
 - 発電量, 燃料費, 初期投資額, 火力及び太陽光保守費の推移を記述
- Step1:変動要因の推移から便益の導出
 - 4項アプローチ上での不確定要因(CO₂取引価格, 太陽光発電電力量)推移より得られる便益(太陽光導入, 火力継続)を導出する.
- Step2:各便益価値の導出
 - 得られた便益から4項アプローチ各状態での価値(太陽光導入, 火力継続)を導出.
- Step3:操業変更のオプションを考慮した評価
 - 操業変更(火力継続→太陽光導入)を考慮した便益価値評価を行う.
- Step4:導入評価・感度分析
 - Step0～Step3の条件を変更することで感度分析.
 - 導入年数の推定, CO₂排出削減効果の推定

記号の定義

表1:4項アプローチで使用するパラメータ

定式化

固定パラメータ	
記号	内容
CO_f	火力発電CO ₂ 排出量[ton-CO ₂ /kwh]
CO_{PV}	太陽光発電CO ₂ 排出量[ton-CO ₂ /kwh]
EP	市場電力価格[円/kwh]
RPS	RPS相当量取引価格[円/kwh]
r	リスクフリーレート
nT	評価期間[年]
T	オプション行使可能期間[年]
状態変数	
記号	内容
S	4項アプローチ上の各状態(各頂点)
t	時刻
$F(t)$	火力発電燃料費[円/kwh]
$PV_{t,s}$	太陽光発電電力量[kwh]
$CO_{t,s}$	CO ₂ 取引価格[円/ton-CO ₂]
$PO(t)$	太陽光発電保守費[円]
$OM(t)$	火力発電保守・修繕費[円]
$I(t)$	太陽光発電導入費[円]
nP	導入制約時刻

導出パラメータ	
記号	内容
$L_{t,s}$	太陽光発電導入便益
$M_{t,s}$	火力発電継続便益
$VL_{t,s}$	太陽光発電導入便益価値
$VM_{t,s}$	火力発電継続便益価値
$\hat{E}[\cdot]$	リスク中立確率割引期待値
$C_{t,s}$	操業変更を考慮した便益価値
$SC_{t,s}$	導入制約を考慮した便益価値

4項アプローチによる評価①

定式化

□ 4項アプローチによる便益の推移 (Step1)

➤ 太陽光発電導入による便益

$$L_{t,s} = F(t) \cdot PV_{t,s} + (CO_f - CO_{PV}) \cdot PV_{t,s} \cdot CO_{t,s} + EP \cdot PV_{t,s} + RPS \cdot PV_{t,s} - PO(t) \dots (2)$$

削減火力
燃料費

削減CO₂
排出量価値

電力収入

RPS相当量取引

保守費用

➤ 導入なしでの便益 (火力発電継続)

$$M_{t,s} = EP \cdot PV_{t,s} - OM(t) - F(t) \cdot PV_{t,s} \dots (3)$$

□ 4項アプローチ上の各状態での便益価値の導出 (Step2)

✓ 割引き期待価値と各状態の便益の和で表現.

□ リスク中立確率を使用

$$\begin{cases} VL_{t,s} = \frac{1}{1+r} \hat{E}[VL_{t+1,s}] + L_{t,s} \\ VM_{t,s} = \frac{1}{1+r} \hat{E}[VM_{t+1,s}] + M_{t,s} \end{cases} \dots (4)$$

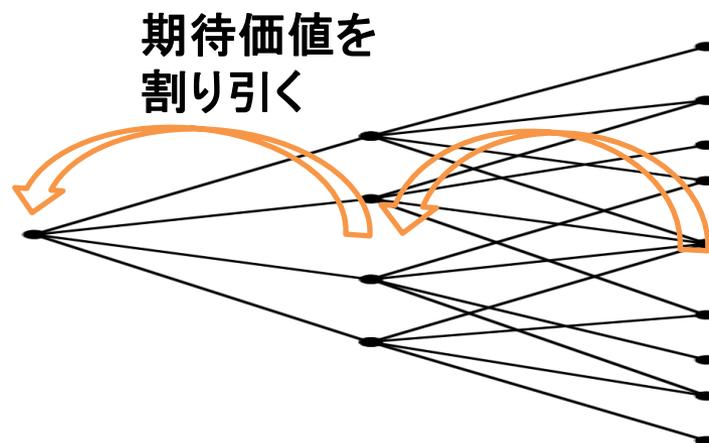


図7:各状態の便益価値の導出

4項アプローチによる評価②

定式化

□ リスク中立確率^{[7][8][9]} (Step2)

◆ 期待価値をリスクフリーレートで割り引く際の仮想的な値.

➤ 4項アプローチにおける期待割引

$$\hat{E}[\alpha] = p_{u_1 u_2} \cdot \alpha_{t+1, s(u_1 u_2)} + p_{u_1 d_2} \alpha_{t+1, s(u_1 d_2)} + p_{d_1 u_2} \alpha_{t+1, s(d_1 u_2)} + p_{d_1 d_2} \alpha_{t+1, s(d_1 d_2)} \cdots (5)$$

$$p_{u_j} = \frac{(1+r) - d_j}{u_j - d_j}, p_{d_j} = 1 - p_{u_j} (j=1,2) \cdots (6)$$

j : 不確実要因

$$\begin{cases} p_{u_1 u_2} = p_{u_1} p_{u_2} \\ p_{u_1 d_2} = p_{u_1} p_{d_2} \\ p_{d_1 u_2} = p_{d_1} p_{u_2} \\ p_{d_1 d_2} = p_{d_1} p_{d_2} \end{cases} \cdots (7)$$

- 4項アプローチ上のツリーの先端まで後退的に繰り返し算出
- 操業変更を考慮しない各便益価値 (**火力継続**, **太陽光導入**) の算出.

4項アプローチによる評価③

定式化

□ 操業変更を考慮した便益価値の導出 (Step3)

➤ 最終期間における便益価値

$$C_{T,s} = \max[VL_{T,s} - I(T), VM_{T,s}] \cdots (8)$$

➤ 各状態での便益価値

継続による価値

導入による価値

$$C_{t,s} = \max\left[M_{t,s} + \frac{1}{1+r} \hat{E}[C_{t+1,s}], VL_{t,s} - I(t) + OMS(T) - OMS(t) \right] \cdots (9)$$

$$OMS(t) = \sum_{i=0}^t OM(t) \cdots (10)$$

□ 導入制約を考慮したオプション便益価値の導出 (Step3)

$$SC_{np,s} = VL_{np,s} - I(np) + OMS(T) - OMS(np) \cdots (11)$$

$$SC_{t,s} = \max\left[M_{t,s} + \frac{1}{1+r} \hat{E}[SC_{t+1,s}], VL_{t,s} - I(t) + OMS(T) - OMS(t) \right] \cdots (12)$$

➤ 操業変更 (**火力継続** → **太陽光導入**) の考慮による各状態の便益価値が算出

パラメータ初期値の設定 (Step0) 定式化

- ◆ 太陽光発電初期投資額, OM費, 保守費[3] [5]
- 期間において一定の期待変化率で変化すると仮定.

$$\begin{cases} I(t) = I(0) \cdot e^{\mu_I t} + const \\ OM(t) = OM(0) \cdot e^{\mu_{OM} t} \dots (13) \\ PO(t) = rate \cdot I(t) \end{cases}$$

μ_I, μ_{OM}, μ_f : 各期待変化率
 σ_f : 燃料費のボラティリティ
 rate : 太陽光発電保守率
 const : 工事費

◆ 燃料費の変動

- 幾何ブラウン運動の離散化により表現

$$F(t) = F(0) \cdot e^{\left(\mu_F + \frac{\sigma_f^2}{2}\right)t} \dots (14)$$

◆ 年間太陽光発電電力量

- 各月の日射量及びセル温度を考慮[14]

$$PV_{0,s} = \sum_{moh=1}^{12} L \cdot J \cdot H_{moh} (1 - 0.005(tm_{CR} + 25)) \cdot x_{moh} \dots (15)$$

- シミュレーションによる初期値の導出

J : 太陽光発電導入出力[kw]
 L : 損失係数(汚れ及び電力変換)
 H_{moh} : 各月の平均日射量[kw/m²]
 tm_{CR} : 温度
 x_{moh} : 月の日数
 $moh = 1 \dots 12$ [月]

評価項目

分析・評価

◆ 補填燃料(石炭・石油・天然ガス)の識別, 従来の設備評価との比較

- ✓ 操業変更による価値の変化
- ✓ 意思決定割合(行使割合)の推移
- ✓ CO₂排出削減効果の導出

➤ 感度分析により導入可能性の検証

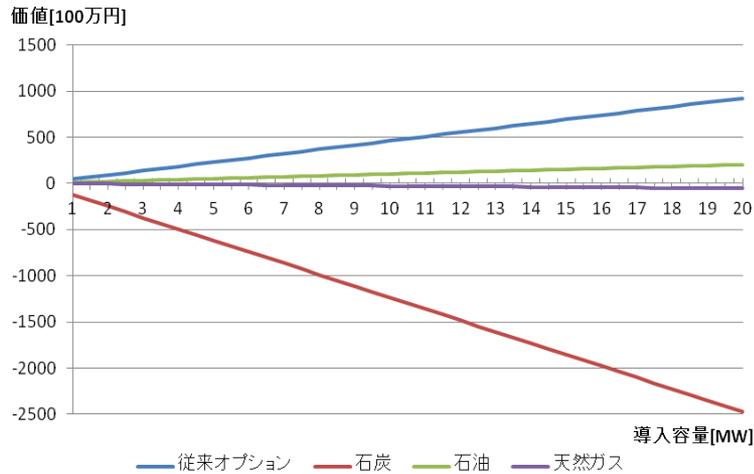
- ✓ 太陽光発電導入容量の変化
- ✓ 太陽光発電保守費用の影響
- ✓ 太陽光発電導入パネル価格の影響
- ✓ 導入制約を設けた場合での評価

表2:評価に使用したパラメータの概要

内容	値	内容	値
CO ₂ 価格初期値[円/ton-CO ₂]	1000	火力発電燃料費初期値[円/kwh]	
CO ₂ 価格ボラティリティ	18%	石炭	3.4
太陽光発電関連		石油	12.6
太陽光発電導入容量	1~20MW	天然ガス	7
年間太陽光発電量[kwh](1000kw)	973315	火力発電燃料費期待変化率	
発電量ボラティリティ	32%	石炭	0.039
太陽光発電発電CO ₂ 排出量[g-CO ₂ /kwh]	38	石油	0.045
太陽光発電経費関連		天然ガス	0.018
パネル価格[円/kw]	400000	火力発電燃料費ボラティリティ	
出力価格の期待変化率	-2%	石炭	0.043
土地代	20%	石油	0.120
工事費[円/kw]	100000	天然ガス	0.107
その他経費(その他設備費)	10%	火力発電CO ₂ 排出量[g-CO ₂ /kwh]	
太陽光発電年間保守費用	10%	石炭	943
リスクフリーレート	0.014	石油	738
評価考慮期間	20	天然ガス	599
オプション満期	15	火力発電建設費[円/kw](OM費は7%)	
意思決定期間	1年毎	石炭	300000
市場電力価格[円/kwh]	25	石油	190000
火力発電保守・修繕費期待変化率	0.03	天然ガス	200000

導入容量の変化

分析・評価

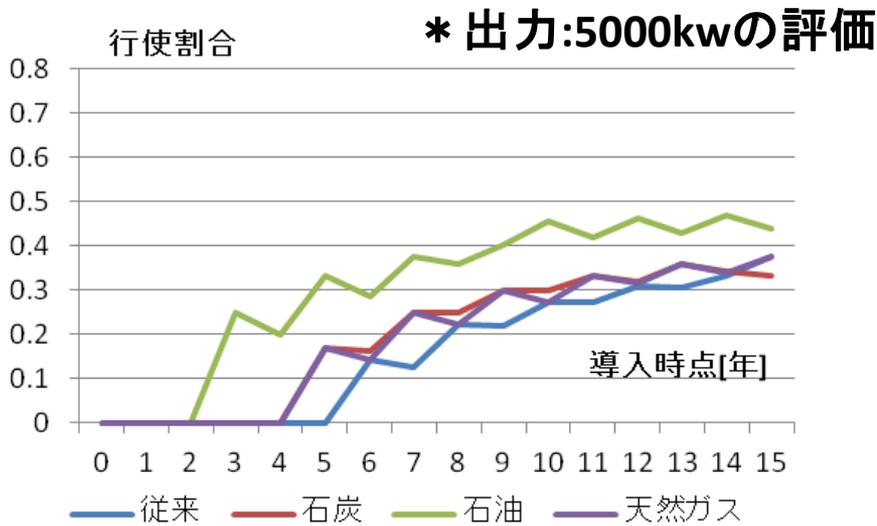


◆補填による導入可能性

- ✓石油→天然ガス→石炭補填
- ✓導入容量の拡大→石炭火力補填による導入価値が下落

- 従来評価に比べ価値が減少
- ✓火力継続の意思決定が働くため

図8: 導入容量変化での操業考慮による価値(百万円)



◆行使割合による導入可能性

- ✓2年後までは導入意思決定が行われない。
- ✓**石油火力補填**による導入が望ましい。
- ✓石炭・天然ガス火力補填は10年後以降の導入が望ましい。
- 従来法では早期導入の意思決定が働かない。

保守費用の増減による影響

分析・評価

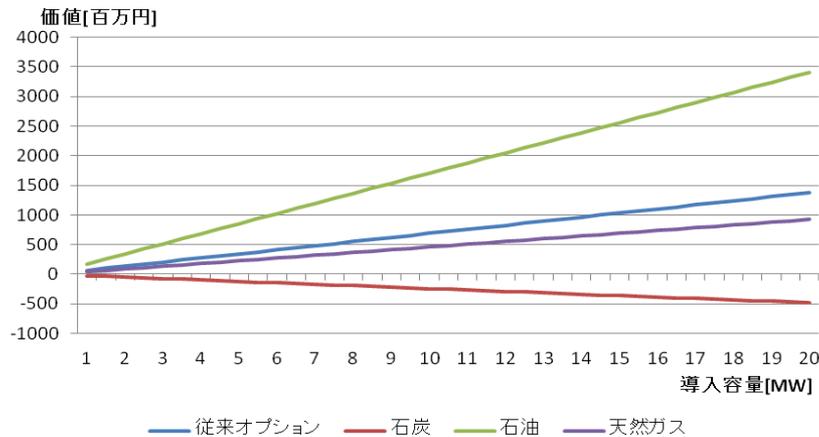


図10(a):保守率5%評価

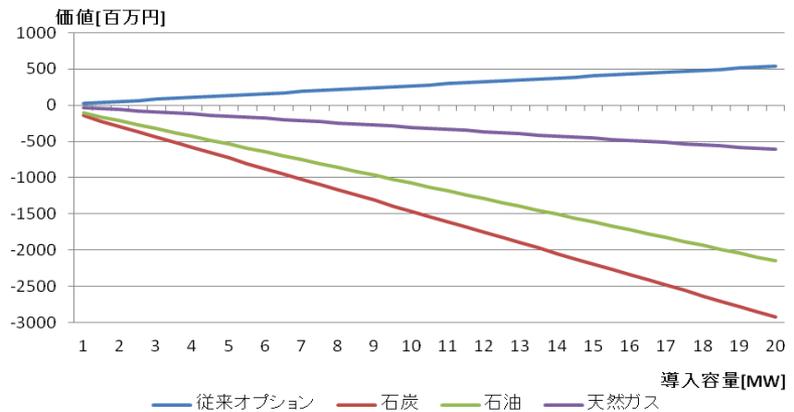


図10(b):保守率20%評価

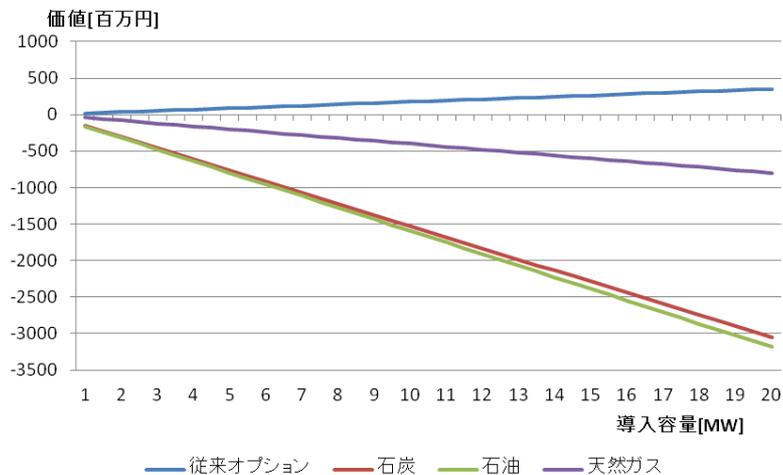


図10(c):保守率30%評価

◆保守費用の影響

- ✓ 小規模導入では影響は小さい.
- ✓ 石油・石炭補填の価値に大きく影響

◆大規模導入における影響対策

- 現状稼働中のメガソーラー保守費用を加味した上で補填燃料を識別すべき.

パネル価格による影響

分析・評価

* 出力:5000kwの評価

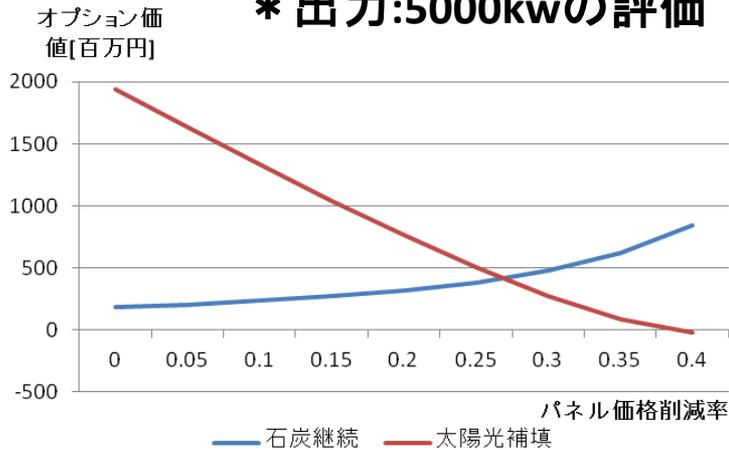


図11(b):石炭火力補填オプション価値

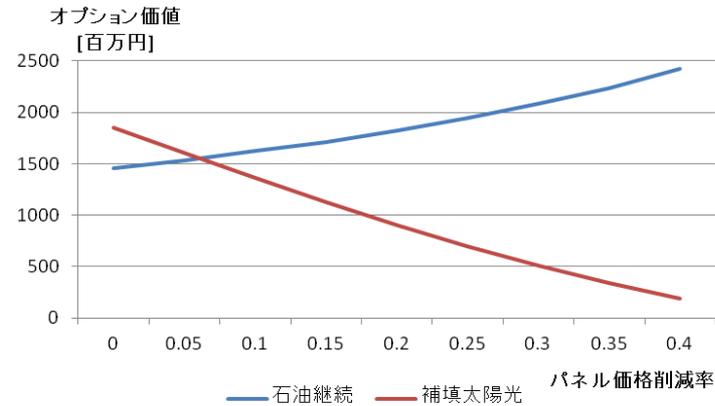


図11(b):石油火力補填オプション価値

オプション価値
= 操業変更価値 - 火力継続, 操業変更価値 - 太陽光導入

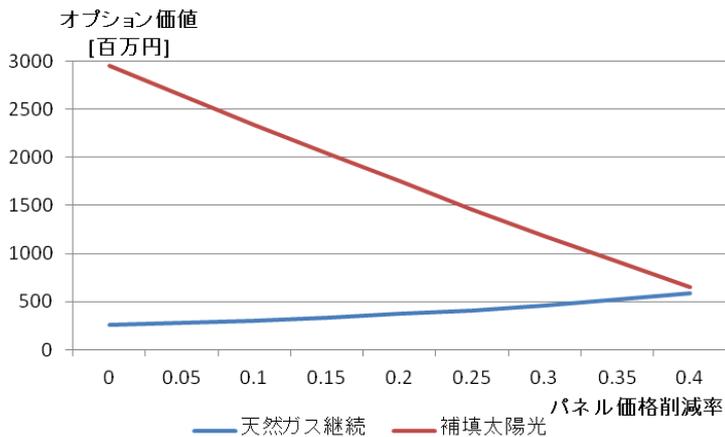


図11(c):天然ガスオプション価値

◆パネル価格の影響

✓石炭:25%,石油:5%,天然ガス:40%以上で
火力継続→太陽光導入意思決定が働く.

◆導入容量を考慮

✓図9, 10(a)~(c)を考慮すると, 大規模導入
では長期の天然ガス補填の導入可能性.
(パネル大量受注による価格下落より)

パネル価格の影響(行使割合の推移) 分析・評価

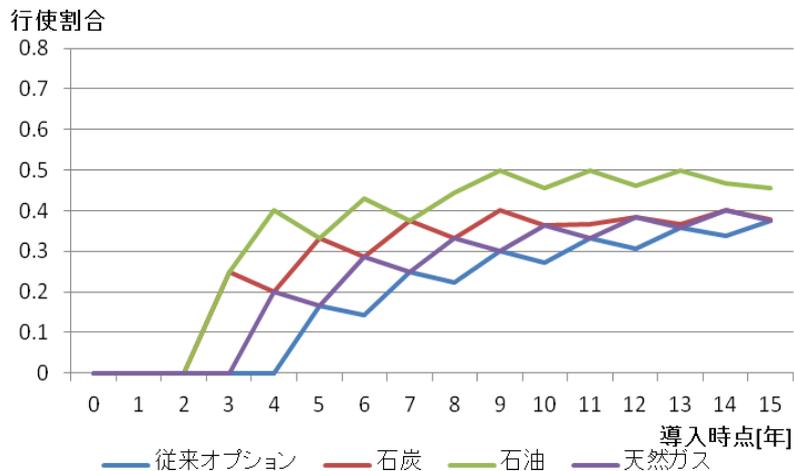


図12(a):行使割合(削減率20%評価)

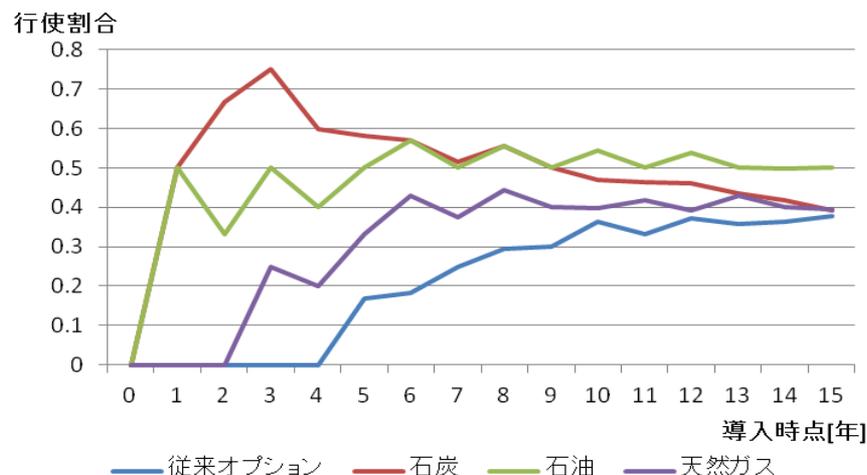


図12(b):行使割合(削減率40%評価)

◆パネル価格変化での行使割合

□ 石炭火力補填の導入意思決定が上昇.

✓パネル価格の下落→石炭火力補填は**早期**の太陽光導入可能性.

□天然ガス火力補填・従来法ではパネル価格に影響されにくい.

✓補填による導入は長期的に行う必要あり.

CO₂排出削減による評価

分析・評価

- 行使割合より評価期間における期待CO₂排出削減率を導出.
- ✓ 各火力継続において、太陽光導入による削減割合を表記.
- ✓ 従来法では360[g-co₂/kwh]で期待削減率を導出

表3: 期待CO₂排出削減率(保守費用の変化)

保守割合	5%	10%	20%	30%
石炭	19.0	6.3	3.2	2.7
石油	17.9	10.8	6.6	5.0
天然ガス	9.9	6.0	3.5	2.6
従来	6.6	5.1	3.4	0.2

表4: 期待CO₂排出削減率(パネル価格の変化)

削減率	なし	10%	20%	30%	40%
石炭	6.3	7.9	10.1	13.2	21.7
石油	10.8	11.4	12.6	14.8	18.9
天然ガス	6.0	6.7	7.7	9.0	10.8
従来	5.1	5.8	6.4	6.5	7.1

◆保守費用増加の影響

- ✓石炭:削減率が大幅減少.
- ✓石油:導入効果が他の補填と比較して大きい.
- ✓天然ガス:削減率は保守費用に影響せず小さい.

◆パネル価格下落の影響

- 0~30%:石油→石炭→天然ガス補填
- 30%以上:石炭→石油→天然ガス補填

導入制約による評価

➤ 導入制約による価値の推移 $SC_{t,s}$

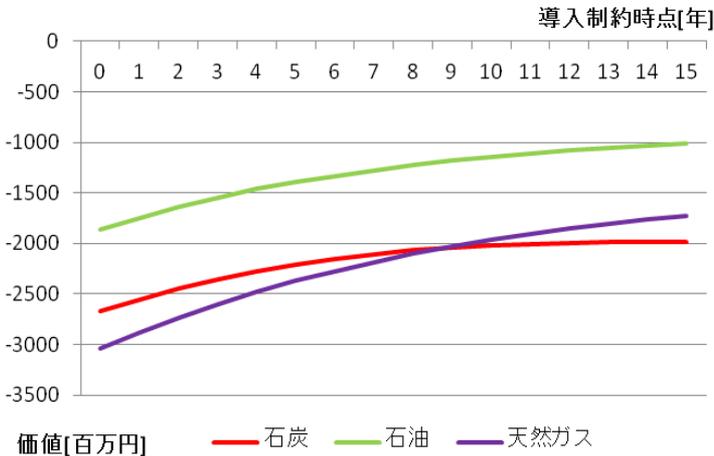


図13:導入制約による価値(5MW)

- ◆ 導入制約により価値が減少
- ✓ 制約導入には補助金やパネル価格の下落が不可欠
- ◆ 制約容量の拡大により制約下では石炭火力補填の導入可能性が増加

制約有無による価値の差異: $C_{t,s} - SC_{t,s}$

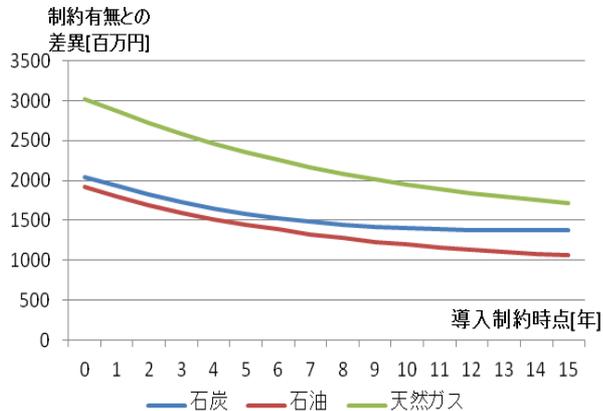


図14(a):制約有無による価値の差異(5MW)

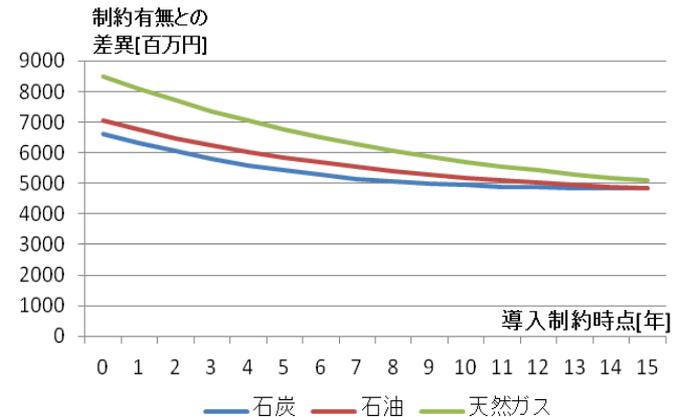


図14(b):制約有無による価値の差異(13MW)

結果の整理

分析・評価

表5: 各補填燃料の導入可能性(保守費用変化)

表6: 各補填燃料の導入可能性(パネル価格変化)

評価基準 導入順位	便益価値優先			CO ₂ 削減効果優先		
	1	2	3	1	2	3
5%	石油	天然ガス	石炭	石炭	石油	天然ガス
10%	石油	天然ガス	石炭	石油	石炭	天然ガス
20%	天然ガス	石油	石炭	石油	石炭	天然ガス
30%	天然ガス	石炭	石油	石油	石炭	天然ガス

評価基準 導入順位	便益価値優先 導入意欲	CO ₂ 削減効果優先		
		1	2	3
0%	石油5%, 石炭25%, 天然ガス40%以上	石油	石炭	天然ガス
10%		石油	石炭	天然ガス
20%	便益評価	石油	石炭	天然ガス
30%	石油0%, 天然ガス0%, 石炭30%	石油	石炭	天然ガス
40%		石炭	石油	天然ガス

➤ 石炭火力補填

- ✓ 保守費用が少ない, またはパネル価格が大幅に下落する場合は大規模容量を早期に導入. 保守費用が高騰する場合は小規模容量の導入. CO₂排出削減効果の期待が大きい.

➤ 石油火力補填

- ✓ 保守費用が少ない場合は大規模容量を導入. 保守費用が高騰する場合は小規模容量の導入. 便益及びCO₂排出削減効果で補填による太陽光導入意思決定が一番大きい.

➤ 天然ガス火力補填

- ✓ 保守費用が高騰する場合, 大規模容量を長期に導入すべき. CO₂排出削減効果は期待できない.

* 導入時期は少なくとも3年(2015)以降

まとめ・今後の課題

• まとめ

□ 火力発電(石炭・石油・天然ガス)燃料補填に着目した太陽光発電の導入評価をROAより行った.

- 4項アプローチによる不確実性の推移を表現
- スイッチング・オプションによる導入価値の評価
- 各補填燃料での導入評価(便益及びCO₂排出削減効果)

• 今後の方針

- 地区ごとの評価(各地区の日射量・気温の変動を考慮)
- 段階的導入による評価
- 一括導入との比較.

参考文献

- [1]: Joseph Sarkis and Maurry Tamarkin, "Real options analysis for renewable energy technologies in a GHG emissions trading environment", Springer Science Emissions trading Part B, 103-119 (2008)
- [2]: Kulatilaka, N and L Trigeorgis, "The general flexibility to switch: Real option revisited", The Journal of the Financial Vol.6, No.2, pp778-798 (1994)
- [3] Y. Zhou and M. Kato, "A Basic on Optimal Investment of Power Sources Considering Environmental Measures-An Economic Evaluation of CCS through a Real Option Approach-", IEEJ Trans, PE, Vol.128, No.12, pp1505-1512 (2008)
- [4] 近藤かおり: "我が国における新エネルギーの現状と課題-RPS制度を中心に-", 調査と情報-ISSUE BRIEF- No.636 (2009)
- [5] Y. Zhou and M. Kato, "An Economic Evaluation on Replacement Plan for Aged Thermal Power Plants through a Real Option Approach", IEEJ Trans, PE, Vol.130, No.6, pp584-592 (2010)
- [6] 高山文二: "我が国の原子力発電の現状と課題", レファレンス, Vol.59, No.12, pp77-100 (2009)
- [7] L. Trigeorgis, 山口浩, 他訳: 「リアルオプション」, エコノミスト社 (2001)
- [8] Dixit & Pindyck, 川口有一郎, 他訳: 「投資意思決定とリアルオプション」, エコノミスト社 (2002)
- [9] T. Copeland and V. Antikarov: 「Real Options」, Texere (2001)
- [10] 服部徹: "リアル・オプション分析-不確実性下での意思決定ツール-", IEEJ Journal, Vol.26, No.7, pp439-442 (2006)
- [11] 電気事業連合会編集: 「電気事業と新エネルギー2010-2011」, 電気事業連合会 (2011)
- [12] 高森圭介: 「太陽光発電のすべて」, ニュートンプレス (2010)
- [13] 近藤かおり: "我が国の太陽光発電の動向", 調査と情報-ISSUE BRIEF- No.683
- [14] A. Yona, T. Senjyu, T. Funabashi and H. Sekine, "Application of Neural Network to 24-hours-Ahead Generating Power for PV system", IEEJ Trans, PE, Vol.128, No.1, pp33-39 (2008)

Appendix

ROAの研究背景

• 資源配分問題・戦略的投資計画

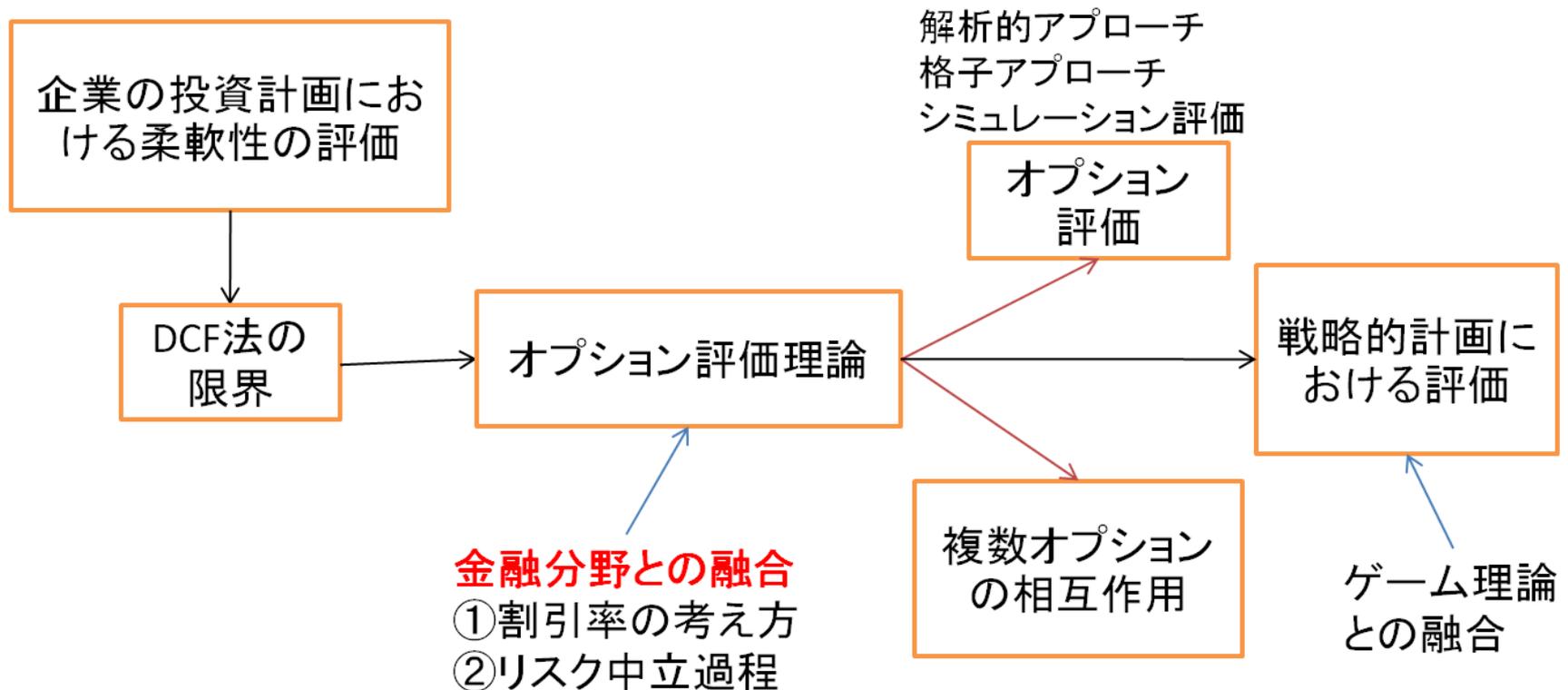


図15:リアルオプションFLOW

従来の設備投資評価（従来法） 定式化

- 便益及び便益価値

$$NL_{t,s} = (E[m] - n) \cdot PV_{t,s} \cdot CO_{t,s} + EP \cdot PV_{t,s} + RPS \cdot PV_{t,s} - PO(t)$$

$$VNL_{t,s} = \frac{1}{1+r} \hat{E}[VNL_{t+1,s}] + NL_{t,s}$$

- 導入延期の柔軟性を考慮した便益価値

$$NC_{T,s} = \max[VNL_{T,s} - I(T), 0]$$

$$NC_{t,s} = \max\left[\frac{1}{1+r} \hat{E}[NC_{t+1,s}], VNL_{t,s} - I(t)\right]$$

- 導入制約を考慮した便益価値

$$SNC_{np,s} = VNL_{np,s} - I(np)$$

$$SNC_{t,s} = \max\left[\frac{1}{1+r} \hat{E}[SNC_{t+1,s}], VNL_{t,s} - I(t)\right]$$

$NL_{t,s}$: 建設有無での太陽電導入による便益
$VNL_{t,s}$: 導入便益価値
$NC_{t,s}$: 導入延期の柔軟性を考慮した便益価値
$SNC_{t,s}$: 導入制約を考慮した便益価値

RPS制度について

➤ 概要[4]

- ✓ 小売電気事業者に対して、販売する電力量に応じて、新エネルギーにより発電された電気を一定割合利用するよう義務つけることにより、新エネルギーの導入促進を図る制度。

➤ 対象(新エネルギー)

- ✓ 太陽光発電, 風力発電, 地熱発電, 水力発電, バイオマス

➤ 義務施行方法

RPS相当量: 新エネルギー環境付加価値分

電気と分離して事業者間で取引可能

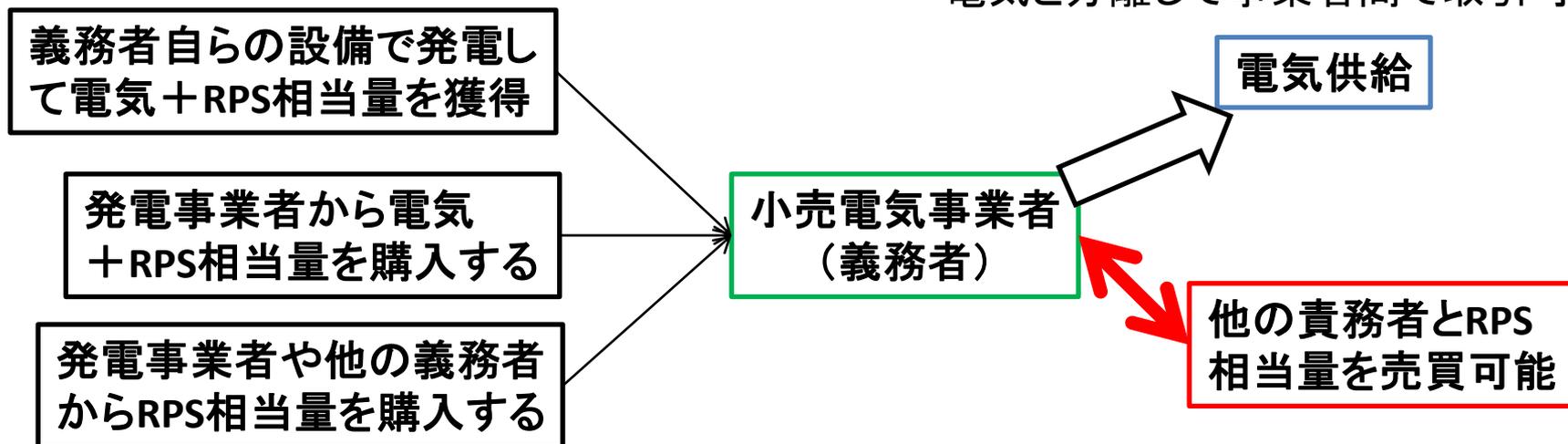


図16: RPS義務施行方法

幾何ブラウン運動

- 資産の変動

$$\frac{dS(t)}{S(t)} = \nu dt + \sigma \varepsilon dz$$

- 離散時間における対数正規過程

$$\Delta \ln[S(t)] = \frac{\Delta S(t)}{S(t)} = \left(\nu + \frac{1}{2} \sigma^2 \right) \Delta t + \sigma \sqrt{\Delta t}$$

$$E[S(t)] = S(0) \cdot e^{\left(\nu + \frac{1}{2} \sigma^2 \right) t}$$

ν : 期待変化率
σ : ボラティリティ
$S(t)$: 資産
dz : 標準ウィーナー過程増分
t : 時間

◆期待収益率とボラティリティの導出

- ヒストリカルデータより推定

$$u_i = \ln(S_{i+1}/S_i)$$

$$\hat{u}_i = E[\ln(S_{i+1}/S_i)]$$

$$\mu = E[\ln(S_{i+1}/S_i)] \cdot \Delta t$$

S_i : ヒストリカルデータ
 n : データ数
 Δt : 変換係数
 μ : 期待収益率
 σ : ボラティリティ

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(u_i - \hat{u} \right)^2 \cdot \Delta t}$$

◆本研究でのヒストリカルデータによるパラメータ推定

- ✓ 燃料費の期待変化率・ボラティリティ
- ✓ CO₂取引価格の期待変化率・ボラティリティ

市場取引価格の推移(石炭・石油CIFデータ)

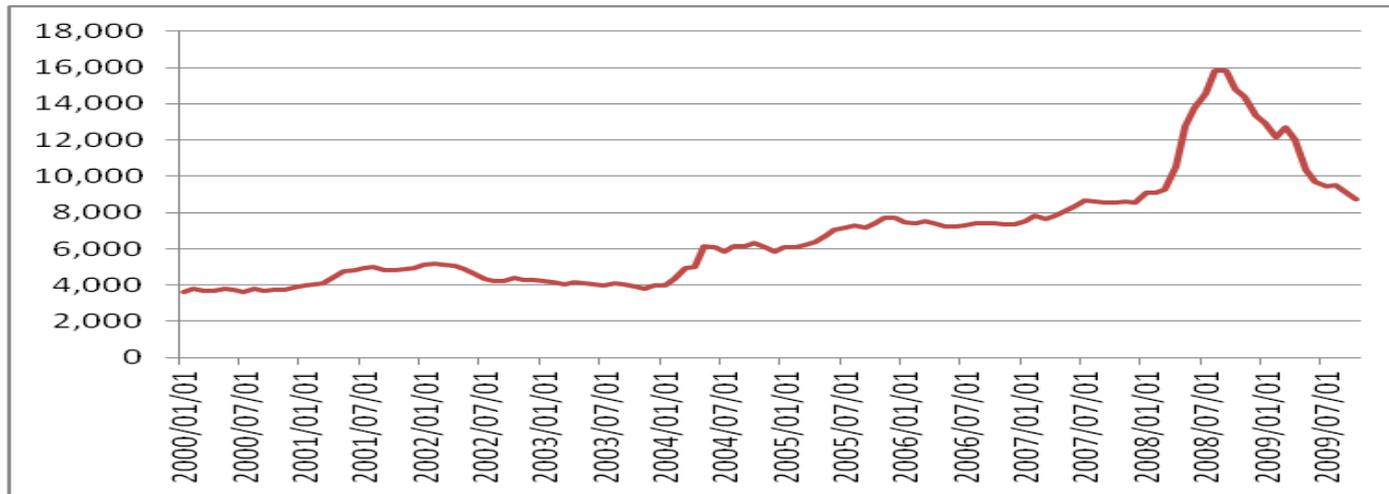


図17:石炭CIF価格の推移

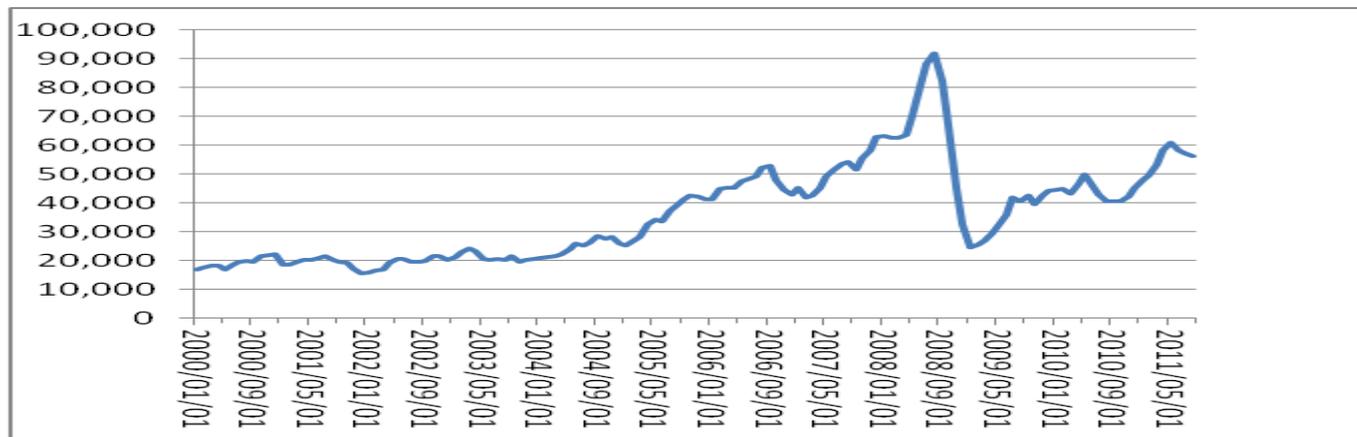


図18:石油CIF価格の推移

市場取引価格の推移(天然ガスCIFデータ, 排出権取引)

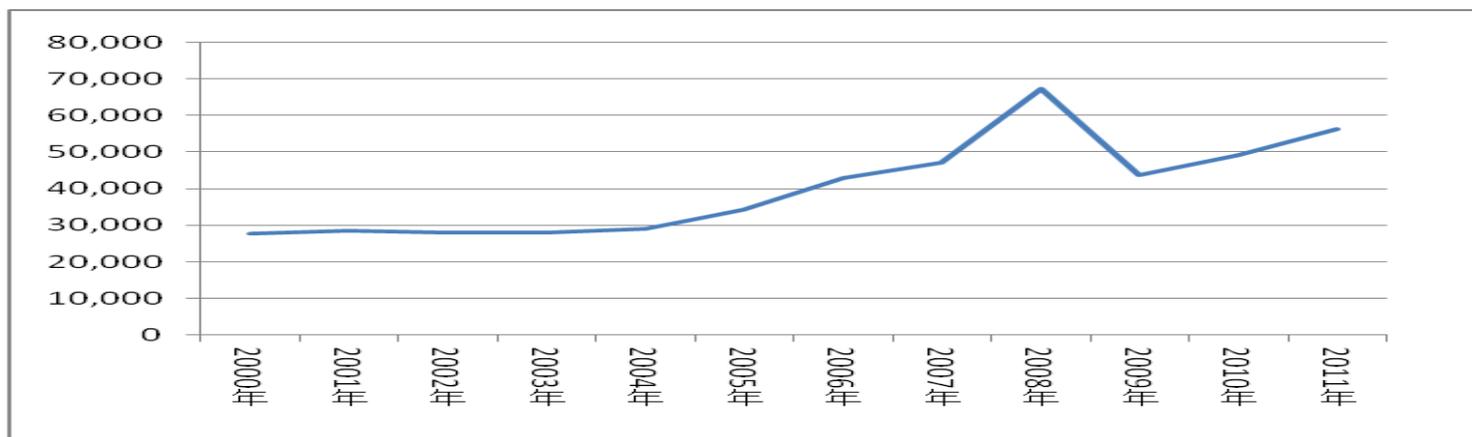


図19:天然ガス(LNG)CIF価格の推移

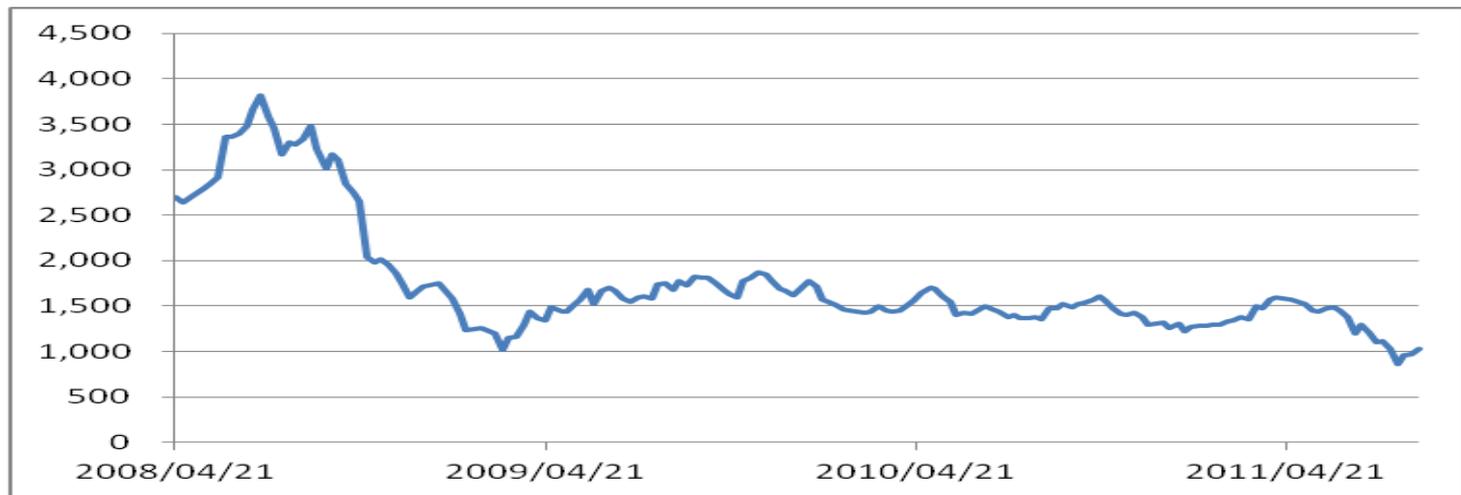


図20:日経・JBIC排出量取引参考気配

リスク中立確率①

- 前提

- 市場に裁定の機会が存在しない.
- 全ての資産の期待収益率が無リスク.

- 原資産と無リスク資産によるポートフォリオの複製

好調時と低調時の期末ポートフォリオは等価

$$uV_0 - aC_u = dV_0 - aC_d$$

ヘッジレシオより原資産の収益を算出

$$V_0 - aC_0 = uV_0 - aC_u$$



$$C_0 = \left[C_u \left(\frac{(1+r) - d}{u - d} \right) + C_d \left(\frac{u - (1+r)}{u - d} \right) \right] \div (1+r)$$

リスク中立確率

リスクフリーレートで割り引く

V_0 : 原資産単位
 a : 単位数ヘッジレシオ
 u, d : 好調, 低調時
 C_0 : オプション価値
 r : リスクフリーレート

リスク中立確率②

- 変動パラメータの相関を考慮した場合. [9]

$$P_{u_1u_2} = \frac{u_1u_2 + u_2g_1 + u_1g_2 + \rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2\Delta t}{4u_1u_2}$$

$$P_{u_1d_2} = \frac{u_1u_2 + u_2g_1 + d_1g_2 - \rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2\Delta t}{4u_1u_2}$$

$$P_{d_1u_2} = \frac{u_1u_2 + d_2g_1 + u_1g_2 - \rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2\Delta t}{4u_1u_2}$$

$$P_{d_1d_2} = \frac{u_1u_2 + d_2g_1 + d_1g_2 + \rho_{1,2}\sigma_1\sigma_2\Delta t}{4u_1u_2}$$

$$g_j = \left(r - \frac{\sigma_j^2}{2} \right) \Delta t, (j = 1, 2)$$

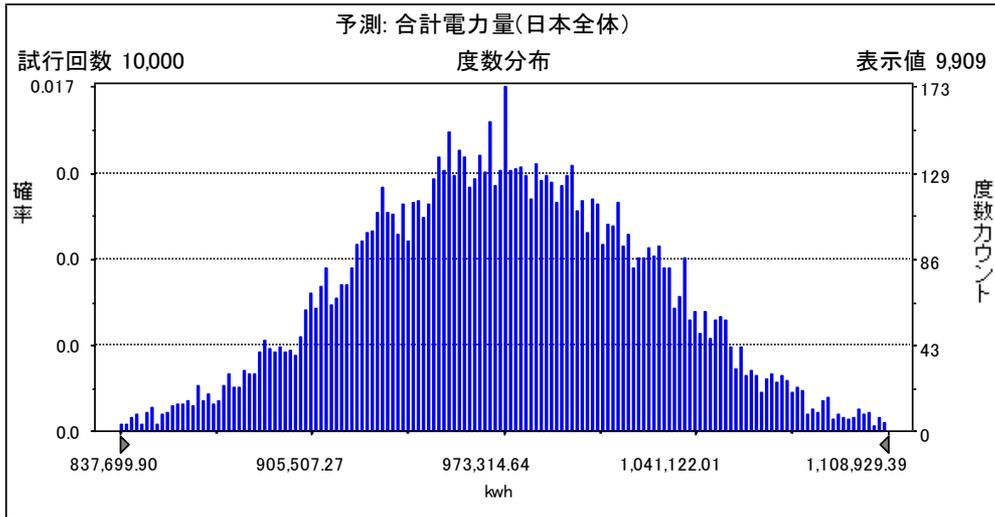
$$u_j = e^{\sigma_j\sqrt{\Delta t}}, d_j = e^{-\sigma_j\sqrt{\Delta t}}$$

$\rho_{1,2}$: 二変数の相関係数
 σ_1, σ_2 : 各変数のボラティリティ
 Δt : 意思決定期間
 u_1, u_2 : 各変数の上昇係数
 d_1, d_2 : 各変数の下降係数

- 本研究では二変数の独立を仮定.

• 予測太陽光発電量の導出(例1000kw)

表7:シミュレーション結果・統計量



予測: 合計電力量(日本全体)	
統計量	値
試行回数	10,000
平均値	973,315
中央値	972,804.51
最頻値	---
標準偏差	52,159.52
分散	2,720,615,213.67
歪度	0.02
尖度	2.98
変動係数	0.05
範囲下限	781,582.65
範囲上限	1,176,812.24
範囲	395,229.59
平均標準誤差	521.6

図21:太陽光発電電力量(出力1000kw)の変動

表8:月別平均気温と日射量(NEDOデータより作成)

気温	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均	4.25	4.80	7.78	12.99	17.37	20.94	24.61	25.88	22.31	16.81	11.48	6.72
標準偏差	2.42	3.40	3.68	4.17	4.98	5.64	6.45	6.84	6.25	5.05	3.89	3.25
日射量	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
平均	2.96	3.49	4.06	4.44	4.83	4.52	4.57	4.63	3.80	3.58	2.95	2.71
標準偏差	0.96	0.70	0.47	0.24	0.24	0.40	0.41	0.41	0.44	0.45	0.71	0.96