

博士論文

世界エネルギーモデルを用いた地球温暖化緩和策の評価と

リアル・オプション法による電源投資分析

小田 潤一郎

目次

要旨	4
第 1 章 序論.....	6
1.1 本論文の背景.....	6
1.2 関連する既往研究.....	6
1.2.1 電源計画の既往研究	6
1.2.2 温暖化緩和策の既往研究	7
1.2.3 リアル・オプション分析の既往研究.....	8
1.3 エネルギー・温暖化政策に関する論点.....	9
1.3.1 はじめに	9
1.3.2 エネルギー問題、地球温暖化問題.....	9
1.3.3 電源構成に関する包括的な評価軸.....	13
1.3.4 国家間でエネルギー・温暖化政策が異なる要因.....	21
1.3.5 エネルギー・温暖化政策のまとめ.....	25
1.4 本論文の目的・実施内容.....	26
1.5 本論文の構成.....	27
第 2 章 リアル・オプション法の定式化・解法.....	28
2.1 はじめに.....	28
2.2 代表的な確率過程.....	28
2.3 オプション評価に関する数値解法.....	32
2.3.1 数値解法に利用される近似式	32
2.3.2 数値解法の比較	39
2.4 定式化の手法.....	42
2.4.1 条件付請求権分析法	42
2.4.2 動的計画法	46
2.5 本章のまとめ.....	48
第 3 章 世界エネルギーシステムモデル（DNE21+）による分析.....	49
3.1 はじめに.....	49
3.1.1 DNE21+の特徴とモデル開発の経緯.....	49
3.1.2 DNE21+の概要.....	50
3.2 鉄鋼部門のモデル化（DNE21+の拡張）.....	55
3.2.1 鉄鋼生産方式と省エネ設備	55
3.2.2 国別のエネルギー原単位推計	60
3.2.3 鉄鋼部門のモデル化	61

3.2.4	粗鋼生産シナリオの設定	64
3.2.5	鉄スクラップの入手可能性の分析.....	66
3.3	セメント部門のモデル化（DNE21+の拡張）	71
3.3.1	セメント生産方式とエネルギー原単位.....	71
3.3.2	セメント部門のモデル化	73
3.4	DNE21+の分析・結果	74
3.4.1	CO ₂ 排出シナリオの設定	74
3.4.2	結果と考察	75
3.5	エネルギーセキュリティ指標	81
3.5.1	セキュリティ指標導入に際しての背景.....	81
3.5.2	既往文献における分析評価ロジックとセキュリティ指標.....	82
3.5.3	セキュリティ指標の構築	82
3.5.4	地域分割とカントリーリスク	84
3.5.5	セキュリティ指標の結果と考察	85
3.6	本章のまとめ	87
第4章	リアル・オプション法による発電部門の分析.....	89
4.1	はじめに.....	89
4.2	石油火力の保有維持・廃棄に関する分析	89
4.2.1	背景及び概要	89
4.2.2	廃棄評価モデルの解法	91
4.2.3	石油火力の動向及びパラメータの設定.....	95
4.2.4	結果(一変数評価フレーム).....	99
4.2.5	結果(二変数評価フレーム).....	105
4.3	資本集約的電源（単一電源）の投資分析	109
4.3.1	はじめに	109
4.3.2	評価フレームと定式化	110
4.3.3	パラメータの設定	112
4.3.4	結果	114
4.3.5	感度解析	116
4.3.6	本節のまとめ	119
4.4	炭素価格下における複数電源の投資分析	119
4.4.1	はじめに	119
4.4.2	評価フレーム、定式化、数値解法.....	120
4.4.3	パラメータの設定	122
4.4.4	結果	129
4.4.5	感度解析	131
4.4.6	政策的含意の考察	132
4.4.7	本節のまとめ	133

4.5 本章のまとめ	134
第 5 章 結論.....	136
参考文献.....	138
謝辞	147

要旨

本論文は、費用効果的な地球温暖化緩和策を世界エネルギーシステムモデル DNE21+にて分析し、そこで重要な緩和策の一つと示された CO₂回収貯留（carbon capture and storage、以下 CCS）技術の投資リスクをリアル・オプション法により分析したものである。各章の構成は次の通りである。

第 1 章では、本論文の全体背景、既往研究を示し、続いてエネルギー・温暖化政策に関する定性的議論を整理し、その中で特にエネルギーセキュリティについて詳述した。エネルギー・温暖化政策は、相反する視座が常に存在すること、かなりの程度を価値判断に依存せざるをえないこと、などを示した。これは第 3 章にてエネルギーセキュリティ指標を導入する際の、また第 3 章、第 4 章の結果から政策的含意を抽出し考察する際の基礎となる。以上を背景としつつ本論文の目的、実施内容を示した。

第 2 章では、リアル・オプション法の理論、定式化、解法（解析解、数値解）、及びこれら一連の流れを整理した。第 4 章にてリアル・オプション法を発電部門の実問題に適用し投資分析などを行うが、その適用に際して事実上必須となる数値解法について第 2 章にて詳述した。

第 3 章では、世界エネルギーシステムモデル DNE21+の一部拡張、及び分析を行った。産業部門の中でも代表的なエネルギー集約産業である鉄鋼部門、セメント部門について調査、モデル化したことを示す。鉄鋼部門は鉄スクラップが世界全体で見てどの程度利用可能であるかが今後の CO₂ 排出規模、及び緩和策の余地を規定する要因の一つであるため、過去 140 年に渡るマテリアルフロー分析を実施し将来の鉄スクラップ入手可能性についても分析を行い、その結果を DNE21+の前提条件に組み入れた。

DNE21+の分析により、世界全体で大幅な CO₂ 排出削減を進めるためには省エネ、再エネ、燃料転換に加え CCS が重要な技術方策の一つであることを示した。450 ppm CO₂ eq 安定化のみならず、550 ppm CO₂ eq 安定化、650 ppm CO₂ eq 安定化であっても CCS は重要な方策である。ただし、実際に CCS 普及を進めるためにはいくつかの障壁があり、その障壁を乗り越えることが必要である。エネルギーセキュリティはそのような障壁の一つである。そこで DNE21+の結果をエネルギーセキュリティ指標に当てはめた。日本については CO₂ 排出削減、及び CCS 普及が（省エネ、再エネ、燃料転換などとあいまって）エネルギーセキュリティ指標値をそれほど悪化させないことを示した。即ち、日本にとって CCS はエネルギーセキュリティ上の懸念に逆行することなく大幅な CO₂ 排出削減を進めるための重要な方策の一つであると言える。

第 4 章では、日本の電気事業者が直面している諸課題及び実問題に対しリアル・オプション法を適用した。最初に経年石油火力の維持・廃棄にリアル・オプション法を適用し、電気事業者が行ってきた経年石油火力の維持・廃棄に関する過去の行動を定量的に説明できることを示した。次に、簡素な投資評価分析、即ち一つの資本集約的電源投資オプションを所与とした上で、不確実な卸電力価格の下、投資を直ちに行うか、もしくはしばらく待機するかという投資評価分析を行った。本分析では複数の感度解析を実施し、卸電力価格のボラティリティが上昇することで、新規電源への投資が敬遠されること、特に固定費比率が大きい電源ほど投資が敬遠されることを定量的に示した。これは即ち自由化（規制緩和、規制変化）に伴い不確実性が増大した場合、資本集約的な電源への投資はより敬遠される可能性があることを意味している。

第 4 章の後半部分では、より本格的に日本の電気事業者が新規の発電設備及び CCS へ投資する場合に

ついてリアル・オプション法を適用し分析を行った。CCS に関して CO₂回収のみならず、CO₂輸送、CO₂貯留に至るまでの一貫したシステムを明示的に考慮した。電気事業者が保有するオプションは、微粉炭火力、微粉炭火力+CCS、コンバインドサイクル、コンバインドサイクル+CCS の4つとした。不確実性項目は炭素価格及び天然ガス価格とし、これらが幾何ブラウン運動に従うとした。リアル・オプション分析の結果、日本の電気事業者が CCS 投資に踏み切る閾値は、仮に投資リスクがなくともある一定の炭素価格（150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 程度）が必要と見られることを示した。リアル・オプション法を適用し投資リスクを考慮すると CCS 投資の閾値がより高くなり 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強といった水準となることを示した。なおこれら閾値はグランドファザリングに基づき排出枠の無償割り当てがなされることを事業者が見越している場合の結果である（グランドファザリングとしない場合、CCS 投資の閾値が 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強から 150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強へ低下することを確認した）。

以上から CCS の投資リスクが相当大きく早期の CCS 普及が容易でないことを示唆している。政策的含意として、予見性があり安定的な炭素価格及び天然ガス価格が望ましいことが示唆される。予見性があり安定的な炭素価格といった面からは、炭素税、規制、R&D 補助、自主的取組、税額控除などの政策が有効である可能性がある。またグランドファザリングによる無償割り当ては CCS への投資閾値を上昇させるため、電力の CO₂原単位（絶対値）を参照するような政策が相対的に望ましいと言える。天然ガス価格自体はそもそも政策誘導の対象とはならないものの、方向性として天然ガス先物市場の整備、LNG 備蓄が挙げられ、これらはエネルギーセキュリティの観点からも有効と考えられる。

第5章において本論文の結論を述べた。450 ppm CO₂ eq 安定化のみならず、550 ppm CO₂ eq 安定化、650 ppm CO₂ eq 安定化であっても世界全体で大幅な CO₂排出削減が必要であり、省エネ、再エネ、燃料転換に加え CCS が重要な技術方策の一つである。日本については炭素制約、CCS 普及は（省エネ、再エネ、燃料転換などの進展とあいまって）エネルギーセキュリティをそれほど悪化させない。日本の発電部門において早期の CCS 投資を促すには、予見性があり安定的な炭素価格及び天然ガス価格が望ましい。陰伏的な炭素価格付けとして、規制、R&D 補助、自主的取組、税額控除などの政策は、予見性があり安定的な炭素価格に資するものであり有効と考えられる。

第1章 序論

1.1 本論文の背景

1970年代から1980年代にかけての2度に渡る石油危機の経験もあり、エネルギーセキュリティは日本のエネルギー政策にとって主要なテーマとされてきた。1990年代以降、地球温暖化緩和策（CO₂排出削減）の必要性が指摘されると同時に、日本ではエネルギー分野の自由化（規制緩和、規制変化）も進めることとなった。このように、自由化の中でエネルギーセキュリティを確保しつつCO₂排出削減を進めるという日本の方向性は、2011年の福島第一原子力発電所事故以降、弱まるどころか、むしろ強まりつつある。

世界の地球温暖化緩和策に注目すると、世界全体での大幅なCO₂排出削減を意味する長期目標（例えば2℃目標）が規範的文脈において言及されている。その一方で現状を記述的に見れば、2000年以降の中国に見られるように経済発展、工業化、都市化は電力などのエネルギー需要の増大、鉄鋼、セメント、アルミなどの素材需要の増大をもたらした。時間軸が異なるもののこれらの間のギャップは相当大きいと言わざるをえない。

本論文は、以上の背景に基づき、世界の地球温暖化緩和策（特に発電部門、鉄鋼部門、セメント部門）、日本の地球温暖化緩和策（特にCO₂回収貯留（CCS）技術）¹とエネルギーセキュリティとに着目する。

1.2 関連する既往研究

1.2.1 電源計画の既往研究

電源構成の内部費用に着目した研究は数多く、例えば火力発電の部分負荷、起動停止を明示的に考慮した山本ら[1]がその一例である。過去の内部費用を有価証券報告書から計測しようと試みた既往研究として國武[2]、松尾ら[3]が挙げられる。

外部費用（環境負荷、エネルギーセキュリティ、社会的側面など）も含めて電源構成、電源計画を分析・議論した既往研究として、内山ら[4]、福田ら[5]、Stirling[6]、Brower[7]、Lucas et al. (Western[8]の中の一原稿)、Shoai et al.[9]などが挙げられる。内山ら[4]は、専門家9名のアンケート調査に基づきAHP法²を適用することでエネルギーセキュリティ、環境リスクを定量化し、それらと電源内部費用との総和を最小化する最適電源構成を算出している。Stirling[6]は電源多様化の重要性を指摘した上で、多様化指数と電源内部費用を共に考慮した英国における電源構成を提示している。Shoai et al.[9]は欧州の電気事業者の投資選好（発電設備規模、電源の需給調整能力、電源の初期費用やリードタイム、政策変更時の対応能力など）を明示的に考慮した欧州の電源構成の分析を行っている。

¹ CCSはCarbon Capture and Storageの略。

² AHPはAnalytic Hierarchy Processの略。

1.2.2 温暖化緩和策の既往研究

(1) 統合評価モデル

先駆的分析として 1993 年の Nordhaus[10]が挙げられる。Nordhaus[10]は温暖化緩和費用と気温上昇による被害を内生的に扱う DICE モデルを提示している。DNE21 は、山地、藤井、RITE が開発したモデルである（DNE21 の原型は NE21 であり、NE21 は DICE も参照している）³。DNE21 は世界を 10 地域に分割し、主なエネルギー供給部門（例えば発電部門）や CO₂ 回収貯留（CCS）技術を積み上げ的に評価している[11]。DNE21 を元に開発された DNE21+は、世界を 54 地域に分割し、より詳細な技術評価が可能となっている。例えば Oda et al.[12]は、セクター別アプローチの具体的方策を探るべく鉄鋼部門エネルギー原単位（GJ/t 粗鋼）の制約を地域別に課したシナリオと、CO₂ 排出総量に制約を課したシナリオとの比較を行っている。

他の統合評価モデルとして、IIASA の MESSAGE、FEEM の WITCH、国立環境研究所の AIM-Enduse などが挙げられる⁴。このような複数のモデルの比較プロジェクトが世界でいくつか実施されており、その一例として EMF（例えば Koelbl et al.[13]）、AMPERE（例えば Kriegler et al.[14]）が挙げられる⁵。Koelbl et al.[13]は、外生的に与えた CO₂ 排出制約下で EMF 参加のモデルが 2010 年～2100 年累積で 600 GtCO₂ ～3050 GtCO₂ の CO₂ 貯留量となる、これらは CO₂ 排出制約の厳しさや再エネの利用可能性で増減する、とまとめている。

(2) 二酸化炭素回収貯留（CCS）

CCS 費用について、2000 年以降 Herzog らのグループが米国における CCS 費用を整理している（例えば Hamilton et al.[15]、Rubin et al.[16]）。Rubin et al.[16]は 2005 年発刊の IPCC による CCS 特別報告書[17]から 10 年経過した 2015 年までの間に CCS 費用がどのように変化したか述べ、その上で CCS 費用の将来見通しを提示している。

日本における CCS 費用は Akimoto et al.[18]、RITE（[19][20]）などが見積もっており、欧米での CCS 費用と比べ日本では CO₂ 輸送費用、貯留費用が高いと指摘している。また、Sato[21]は貯留モニタリング・検証評価の重要性を指摘しており、モニタリング・検証は費用負担の面のみならず、社会的影響も大きいと考えられる。

CCS は一般に CO₂ 回収に適した CO₂ 回収地点（ソース）と、条件に優れた CO₂ 貯留地点（シンク）⁶を同時に選択しようとする CO₂ 輸送費用が上昇するため、CO₂ 回収、輸送、貯留までの一貫したシステムを考慮することが重要である。これを背景として、ソースシンクマッチングの研究も行われている（Tan et al.[22]、Kjärstad et al.[23]など）。Kjärstad et al.[23]は所与の CO₂ 排出制約シナリオの下、欧州のソースシンクマッチング（主に輸送パイプライン網）を 2050 年まで 1 年ごとに例示している。

³ DICE は Dynamic Integrated model of Climate and the Economy の略。DNE21 は Dynamic New Earth 21 の略。NE21 は New Earth 21 の略。

⁴ MESSAGE は Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact の略。WITCH は World Induced Technical Change Hybrid model の略。

⁵ EMF は Energy Modeling Forum の略。AMPERE は Assessing Pathways toward Ambitious Climate Targets at the Global and European Levels の略。

⁶ 貯留地点の条件として、貯留費用、貯留ポテンシャル（年間貯留量[とりわけ、一本の圧入井による年間貯留量]、累積貯留量）、キャップロック条件、地層の連続性、リスク評価検証のしやすさ、などが挙げられる。

CCS の政策面について多様な議論がある。例えば Flannery[24]は現時点において CCS の大規模普及を後押しする政策措置は経済的に成り立たず⁷、同時に事業者にとって CCS のビジネスモデルは存在しない点を挙げている。Banks and Boersma[25]は米国における既存の債務保証、税額控除の有効性を認めつつも、CCS の技術的リスク、経済的リスクに配慮したさらなる政策追加が必要としている。

(3) CO₂ 排出削減とエネルギーセキュリティの関係

CO₂ 排出削減とエネルギーセキュリティはシナジーの関係か、あるいはトレードオフの関係かといった問題意識に基づく分析がいくつか実施されている。McCollum et al.[26]は MESSAGE モデルを用いて、地域別に資源輸入制約を課した上で CO₂ 排出制約も課すことにより世界の多くの地域で一次エネルギー供給が多様化するためエネルギーセキュリティが改善する（シナジーの関係がある）と指摘している。Matsumoto and Andriosopoulos[27]は一般均衡モデルを用いて日本、中国、韓国の分析を行い、CO₂ 排出削減シナリオ下において石炭輸入が減少するためエネルギーセキュリティが改善する（シナジーの関係がある）と指摘している。

(4) 鉄鋼部門、セメント部門における緩和策

鉄鋼部門の緩和策について例えば Worrell et al.[28]は米国の省エネ技術別の費用を提示している。Neelis and Patel[29]は、世界合計の鉄スクラップ入手可能性を明示的に考慮しつつ、2100 年までの鉄鋼部門の CO₂ 排出量やその低減方策について分析を行っている。Oda et al.[12]は系統電力側の低炭素化なども同時に見込んだ多部門のモデル（DNE21+）にて鉄鋼部門の原単位（tCO₂/t 粗鋼）目標の有効性について分析している。Oda et al.[30]はセメント部門についても技術調査に基づき個々の技術を明示的に考慮したボトムアップ的なモデル化を行った上で、セメント部門の緩和策評価を行っている。

Oda et al.[31]は緩和策そのものを扱っていないが、鉄鋼部門、セメント部門について国別に比較可能なエネルギー原単位（2005 年時点）を推計している。国別のエネルギー原単位を比較可能とするべく、世界共通のバウンダリーや計算条件を適用している。

1.2.3 リアル・オプション分析の既往研究

金融のオプション価格評価法として 1900 年の Bachelier[32]、1973 年の Black and Scholes[33]が挙げられるが、実物資産のオプション評価（即ちリアル・オプション）としては、1967 年の Robichek and Van Horne[34]、1985 年の Brennan and Schwartz[35]がとりわけ先駆的研究として挙げられる。Brennan and Schwartz[35]は、銅鉱山に注目し、運転、停止、廃棄の柔軟性を明示的に評価している。Dixit and Pindyck[36]はリアル・オプション法を体系的にまとめている。

発電部門にリアル・オプション法を適用した研究として、Hsu[37]、Deng et al.[38]、Deng and Oren[39]、服部ら[40]などが挙げられる。Hsu[37]は燃料価格と電力価格の差をオプションと見立て、そのオプションの積算期待値が設備価値であるとしたスパーク・スプレッド・オプションを提示した。Deng and Oren[39]は火力発電の起動停止に関するコストを明示的に考慮しつつスパーク・スプレッド・オプション評価を

⁷ この指摘の背景には、「2°C 目標を前提とした CCS の大規模普及は、世界全体で現在の石油産業と同規模の CCS 投資・設備運用が必要となること」、「そのような CCS を後押しするほどの強力な政策は、財政負担、産業の国際競争力の面から存続が難しいこと」がある。

行い火力発電の設備価値評価を行っている。服部[40]は日本の発電部門にもリアル・オプション法の適用可能性があることに言及した上で、経年石油火力の廃棄分析をツリーモデルにより例示している。

温暖化緩和策の視点も導入した分析として、Oda et al.[41]は米国のCO₂-EORに着目し、石炭火力(+CCS)とガス火力(+CCS)の競合を明示的に分析している。小田・高嶋[42]は、グランドファザリングでCO₂排出キャップが割り当てられることを事業者が予見していた場合、CCS投資はより敬遠されることを示した。Zhu and Fan[43]は中国の石炭火力CCSに着目しモンテカルロ法によるシナリオ分析を行っている。Heydari et al.[44]は欧州の既設石炭火力に対しフルCCSと部分的CCSを後付で投資するオプションに着目しそれらの投資閾値を算定している。

1.3 エネルギー・温暖化政策に関する論点

1.3.1 はじめに

本節は、世界の「エネルギー問題」、「地球温暖化問題」について簡潔に触れた後、第1.3.3項にて「電源構成の評価軸」について既往の議論を整理する。電源構成の評価軸の中でとりわけ重要とされながら、識者間、あるいは人々の間で意見の対立が顕著であるエネルギーセキュリティと社会的側面（社会的受容性）について詳述する。第1.3.3項までは国家間の差異については論点としないが、続く第1.3.4項では「国家間で政策が異なる要因」について整理する。

以上の整理により抽出された含意のを先に述べると、「エネルギー・温暖化政策は、相反する見方や視座が存在するため、単一のロジックや視座によって判断することはできない（すべきでない）」「客観的事実の積み上げというよりも、むしろかなりの程度を価値判断に依存せざるをえない」という点である。

本節は、後のエネルギーセキュリティ指標の導入（第3.5節）、さらにリアル・オプション分析の政策的含意抽出（第4.4.6項）に際して重要かつ不可欠な背景情報となる。

1.3.2 エネルギー問題、地球温暖化問題

(1) エネルギー問題

世界のいわゆるエネルギー問題として、エネルギーアクセス、エネルギー貧困、エネルギー起因の室内大気汚染や室外大気汚染[45]、エネルギー補助金や事業者の累積赤字、エネルギーセキュリティなどが挙げられる。

エネルギーアクセスの内、電力へのアクセスが十分でない世界人口は2009年時点で13億人程度とみられる[46][47]。将来の見通し（目標ではない）の一例として、2050年時点で9億人程度との試算もある[47]。エネルギーアクセスの内の伝統的バイオマス依存については、深刻な状況がより継続するとみられる。伝統的バイオマス依存の世界人口は2009年時点で27億人程度と見られ[46][47]、将来の見通しの一例として、2050年時点で25億人程度⁸との試算もある[47]。このように室内大気汚染による健康影響が今後も懸念される。

エネルギーアクセスや貧困への対応のため、あるいはそれを根拠としてエネルギー補助金が多く地域で実施されている。エネルギー補助金の形態は多様であり、エネルギー価格の規制、エネルギー上流部門やエネルギー供給事業者への補助金支給、石油ガス田などの開発権の付与、政府によるR&D費支給、

⁸ 2009年時点の推計値、2050年時点の試算値は共に改良型クックストーブを使用している人口を除く。

エネルギーの輸出規制、税額控除、政府による債務保証、政府による事業サービスや情報・物資提供などが挙げられる[48]。このような直接、間接のエネルギー補助金により、実態として極めて安価な二次エネルギー価格となっている地域の存在が報告されている。安価な二次エネルギー価格は、今後の省エネや温暖化緩和策の進展を阻害する要因の一つである。

(2) 地球温暖化問題

① はじめに

地球温暖化の科学的メカニズムについては、1990 年以前から度々指摘されていたが、世界的に広く人々の関心を集めるようになったのは、1980 年代後半[49]、あるいは冷戦終結後の 1990 年代からと言える。1988 年には気候変動に関する政府間パネル (IPCC) ⁹が設立され、1990 年には IPCC 第一次報告書 (FAR) ¹⁰が出版された。1992 年には気候変動に関する国連枠組条約 (UNFCCC) ¹¹が締結された。

以下、温暖化の科学的基礎、及び緩和策 (CO₂ 削減) などについて記す。なお、本論文では後の章の分析と関連が深いリスクや不確実性、識者間の認識や価値判断の差異に対し主に焦点を当てる。

② 地球温暖化の科学的基礎・気候物理

IPCC は第一次報告書 (FAR) が 1990 年に出版されて以降出版を重ね、2013 年から 2014 年にかけて第五次評価報告書 (AR5) ¹²が出版された。気候変動の科学的基礎を扱う第一作業部会 (WGI) ¹³の記載を順に見ていくと、版を重ねるごとに「人為起源の温室効果ガス排出が気温上昇の (主な) 要因であること」について「慎重な言い回し」から「確信度の高い明示的表現」へ推移してきたことが分かる。この点を端的に抜粋したのが表 1-1 である。

表 1-1 IPCC WGI の記載内容 (人為的温暖化の可能性について、一部抜粋)

	1995 年 第二次評価報告書 (SAR)	2013 年 第五次評価報告書 (AR5)
記載例	The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate [SPM, p.4 及び p.5] ¹⁴ (証拠のバランスから、全球気候に対する識別可能な人為的影響が存在することが示唆される。)	Human influence on the climate system is clear. [SPM, p.15] (気候システムへの人為的影響は明らかである。)
補足	次の通り慎重な言い回しに終始している。 Any human-induced effect on climate will be superimposed on the background "noise" of natural climate variability, ... (省略) [SPM, p.4] (気候に対するどのような人為的影響であっても、気候の自然変動性という「ノイズ」と重なって現れる) Our ability to quantify the human influence on global climate is	正味 27 ページに渡る SPM の中で variability を 23 回、uncertainty (uncertainties) を 31 回記載している。つまり、自然の変動性や不確実性を SPM 内に記載していない訳ではない。

⁹ IPCC は Intergovernmental Panel on Climate Change の略。

¹⁰ FAR は First Assessment Report の略。

¹¹ UNFCCC は United Nations Framework Convention on Climate Change の略。

¹² AR5 は Fifth Assessment Report の略。

¹³ WG1 は Working Group I の略。

¹⁴ SPM は Summary for Policymakers の略。

	currently limited, ...(省略) [SPM, p.5] (全球気候への人為的影響を定量化する能力は、今のところ限られる)	
--	------------------------------------------------------------------------	--

注) 表中の英文は原文による。日本語箇所は筆者による邦訳、もしくは筆者による追記。

気候変動の科学的基礎・気候物理について多様な議論があるが、本論文は「人為起源温室効果ガス排出が気温上昇の（主な）要因であり、地球温暖化は実際に対応を取るべき重要課題である」との前提に基づき以下議論を進める。

③ 温暖化の緩和策、適応策、残余温暖化影響被害に関する議論

温暖化問題の特徴の一つは、社会経済活動から温暖化影響被害までのチェーンが長く、それぞれに不確実性が存在することである。この不確実性は、科学的不確実性であったり、社会的な不確実性であったりする¹⁵。山地[50]を参考に以上を整理したのが表 1-2 である。なお、山地[50]の概念的基礎は 1989 年に発表された茅恒等式である。

表 1-2 社会経済活動から温暖化影響被害に至るチェーン（概念整理）

項目	項目の説明	不確実性要因
POP	世界人口	
GDP/POP	1 人当たり GDP	
GHG/GDP	GDP 当たりの GHG 排出量	技術進展の度合いや、技術進展の方向性
ppm/GHG	GHG 排出を所与とした場合の大気中 GHG 濃度 (ppm CO ₂ eq)	植生変化（降雨パターンなどによって変化）などを通じた炭素循環
TEMP/ppm	GHG 濃度を所与とした場合の全球平均気温上昇	過 渡 気 候 応 答 (Transient climate response)、平衡気候感度
Damage/TEMP	全球平均気温上昇を所与とした場合の温暖化影響被害	適応費用や適応可能性、脆弱性

補足) 上 3 行と異なり下 3 行は累積効果によるものであるため二重線で区別した。「TEMP/ppm」は太陽放射管理 (SRM)¹⁶などのジオエンジニアリング導入によって変わりうるが本表では省略した。海洋酸性化などの気温を直接的経路としない温暖化影響について省略した。

また人々の間における認識や価値判断の差異も大きい。現時点でどの程度の強度の CO₂ 削減目標を目指すべきかという点について意見差異を簡易比較したのが表 1-3 である。

¹⁵ ここで言う科学的不確実性とは、物理法則で規定されるような不確実性であり、例えば平衡気候感度が挙げられる。またここで言う社会的な不確実性とは、経済発展状況、技術進展動向、政治システム、人々の価値観や認識、ライフスタイルなどであり、例えば（温暖化問題が存在しないと仮定したベースラインでの）温室効果ガス排出量である。

¹⁶ SRM は Solar Radiation Management の略。

表 1-3 現時点でのどの程度の CO₂ 削減目標を掲げるのが妥当かという意見の差（簡易比較）

主張 A: ゆるやかな CO ₂ 削減が適切・妥当 (2°C 目標は aspirational goal に とどめるべき)		主張 B: 大幅な CO ₂ 削減が適切・妥当・必要 (産業革命以前比で 2100 年気温上昇を 2°C 未満にすべき)
現実の複雑性を考えると費用大。 (世界協調は現実には期待できないし、期 待すべきでない)	CO ₂ 削減 (世界協調 の可能性)	安価となりえる。 (世界協調ができないという指摘は言い訳 であり、最初から諦めるべきではない)
臨機応変に、あるいは意図せず自発的に 適応が進む部門多数[51]。	適応策	脆弱な人々や地域は適応が特に難しい[52]。
現存する貧困に対応することも倫理的に 重要[51]。	貧困・倫理	将来の貧困世帯に温暖化影響被害（リスク） を押し付けるのは倫理的に許されない[52]。
温暖化により便益を得る人々、部門、地 域もある。このような温暖化の便益を無 視するのは不適切であり[51]、便益をある 程度割り引くにしろ正味で見るべき。	温暖化影響 被害の定量 評価方法	受益者と被害者とは別。被害に注目すべ きで、被害を差し引くべきではない。
貨幣価値換算できない要素はあるもの の、温暖化以外の課題と大まかな優先順 位をつけ資源の有効活用を図るために も、コスト・ベネフィット分析は一定の 有用性がある。	貨幣価値換 算やコス ト・ベネフ ィット分析に ついて	貨幣価値換算できない要素、すべきでない 要素も多数あり、むしろそのような要素を 重視すべき。コスト・ベネフィット分析を 参照すべきでない。
温暖化の問題に対してだけ慎重な判断を すべきではない。中央をつくる必要がある [51]。カタストロフィーといった低確率大規 模被害リスクにはジオエンジニアリング で対応できる可能性がある。	リスクや不 確実性への 態度	慎重な判断が必要。 ティッピング・エレメント、さらには カタストロフィーが起きるファットテール も考慮すべき。

補足) 明示的な記載がある指摘のみ文献番号をつけた。

また、温暖化緩和策の実施や温暖化の議論を難しくしている要因として次の 1.~7.が挙げられる。

1. CO₂ 削減の負担が自国に生じ、便益が広く拡散すること
2. 数十年～数百年といった長い時間スケールの問題であること
3. 慣性が強く働き、気づいた時には手遅れといった可能性があること
4. 緩和費用、適応費用などが科学的、社会的に不確実であること
5. 温暖化被害の地理的範囲が広大であり全球に対し影響が生じうること（ただし、その度合いは地域固有の状況にも左右される）
6. 緩和策、適応策、残余気候変動影響被害が（地球温暖化分野以外の）幅広い分野と関連があること
7. 科学的判断だけではなく、むしろ個人の価値判断にゆだねざるをえない側面が強いこと

ただし藤井は RITE ALPS 委員会[53]にて「仮に 2.~7.までの理由がなくとも、1.の CO₂削減の負担が自国に生じ便益が広く拡散する点だけ取り上げても温暖化は対処し難い問題である」と指摘している。つまりそれほど温暖化の議論は容易ではないということが言える。

本論文では後の第 4 章にて将来の炭素価格 (CO₂削減の政策強度) が不確実であるとの前提に基づきリアル・オプション分析を行うが、そのような前提が妥当であることが、以上の不確実性の大きさや人々の認識や価値判断の差異から示唆される。

1.3.3 電源構成に関する包括的な評価軸

本論文では、DNE21+分析、及びリアル・オプション分析において、経済性 (内部費用の費用効率性) を主な評価軸として分析を進める。ただし電源の評価軸として経済性 (内部費用) が唯一のものではない。自由化 (規制緩和、規制変化) の流れの中で、事業者は当然ながら内部費用へ注目せざるを得ないが、一方、社会全体の評価軸として環境負荷やエネルギーセキュリティなどの幅広い評価軸 (外部費用) も重要である。そこで、本節では電源に関する包括的な評価軸 (外部費用含む) について整理を行う。

(1) 政府審議会資料

最初に、政府審議会資料を基に電源構成を構築するにあたり考慮すべき評価軸を政府はどのように表現してきたか整理する。1987 年の資料[54]では、電源構成の基本的考え方として、1)燃料供給の安定性 (供給国の情勢)、2)経済性、3)技術的な運転特性 (起動時間、負荷応答性、出力調整機能) の 3 点を挙げている。

1989 年の審議会資料[55]では、社会経済環境という言葉も含めて次のように言及している。『最適な電源構成の構築に当たっては、「強靱な供給力の確保」に最大の目標を置きつつ、「供給コストの低減」、「社会経済環境への調和性の向上」に十分配慮し、一種類の電源へ過度に依存することなく、適正なバランスを保つ必要がある。』ここで、「強靱な供給力の確保」とは燃料供給の安定性、各電源の運転特性、各電源の建設・運転上の柔軟性のことを指し、「社会経済環境への調和性の向上」とは地球環境問題、反原発運動の動向、国際的視点のことを指す。前回の資料[54]と比較し、供給力の確保の重要性を強調している点は共通だが、環境、社会という言葉も使われたことが目新しい。

1992 年の審議会資料[56]では、電源構成に関する評価軸について明記していないものの、電力の供給力、エネルギーセキュリティ、CO₂対策を重要な要素としている。これは、いわゆる 3E に相当する評価軸である。1994 年の資料[57]では、1987 年の評価軸[54]に環境特性を加え、『今後の電源構成に当たっては、供給安定性、経済性、環境特性、各電源の運転特性等を踏まえた最適な構成 (ベストミックス) としていくことが必要である』としている。1994 年の資料[57]で示された「供給安定性」、「経済性」、「環境特性」、「各電源の運転特性」の 4 要素は、2004 年における電気事業者の報告書 ([58][59]) においても提示されている。なお、政府審議会のより詳細な内容については入江[60]を参照のこと。

(2) 既往研究

政府審議会資料から離れ、例えば内山ら[4]は 1986 年の段階で、燃料と電力の供給安定性をセキュリティ、環境特性をリスクとみなし、専門家 9 名のアンケート調査に基づき AHP 法を適用しセキュリティと

リスクを貨幣価値換算し、さらに各電源の運転特性を考慮しつつ総費用が最小となる最適電源構成を算出した。内山ら[4]が用いた評価軸を図 1-1 に示す。内山ら[4]の特徴は、燃料の供給安定性、電力の供給安定性、環境特性を定量化し、さらに内山ら[4]が指摘する心理的リスクを含めて最適電源構成を求めたことである。

福田ら[5]が用いた評価軸を図 1-2 に示す。福田ら[5]は社会的受容性という評価軸を加え、非専門家のアンケート調査に基づき最適な電源構成を定量的に求める手法を提案している。福田ら[5]は、社会的受容性を大項目とし採り上げており、社会的受容性に「地域合意」や「大規模事故の程度」を含めている点に特徴がある。

鈴木篤之[61]は、最適な電源構成に向けての評価軸として、「供給力（供給量の潜在的可能性、信頼性、負荷追従性）」、「安定性（供給国の政治情勢、気候変動に対する耐性）」、「経済性（発電単価）」、「二酸化炭素排出量（kgCO₂/kWh）」、「廃棄物（社会的受容性）」、「補完性（石油に対する補完性）」を提案している。社会的受容性を廃棄物の中に組み入れている点で、福田ら[5]の評価軸と大きく異なる。また、供給力、安定性に加え、石油に対する補完性を明示的に採用しており、間接的にエネルギーセキュリティの概念に近い要素を重要視していることが分かる。

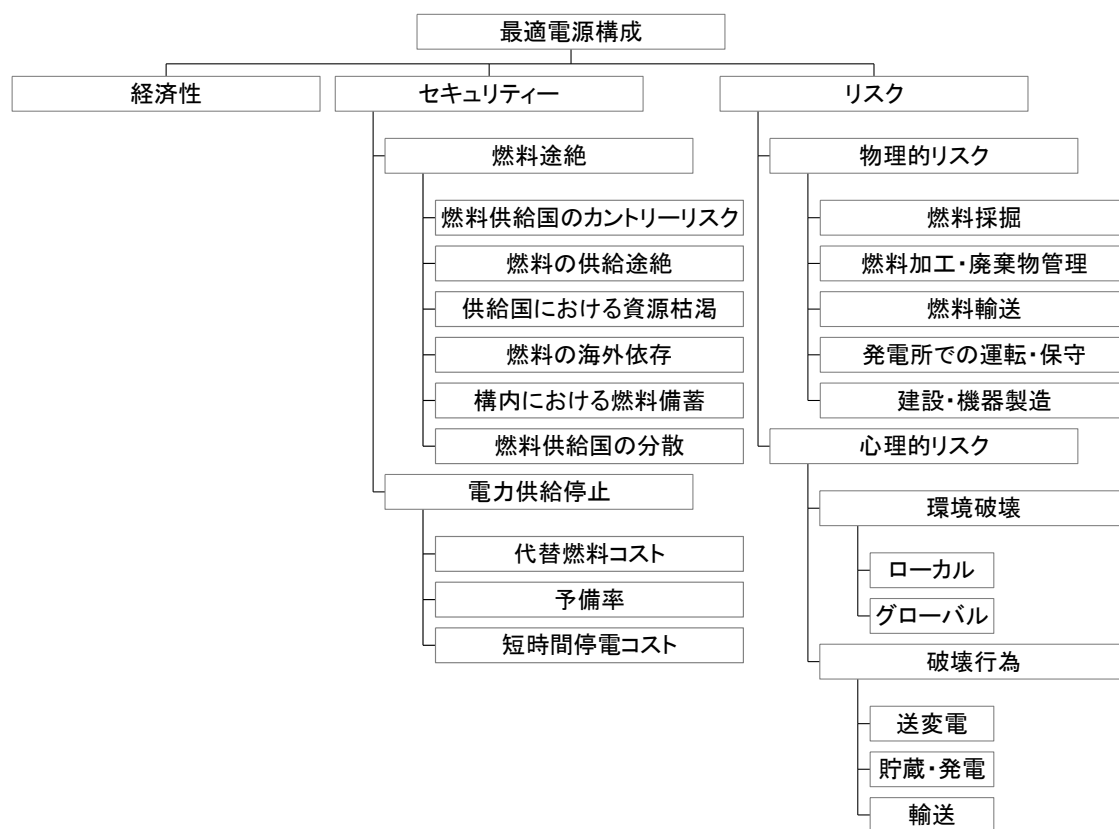


図 1-1 内山ら[4]による評価軸

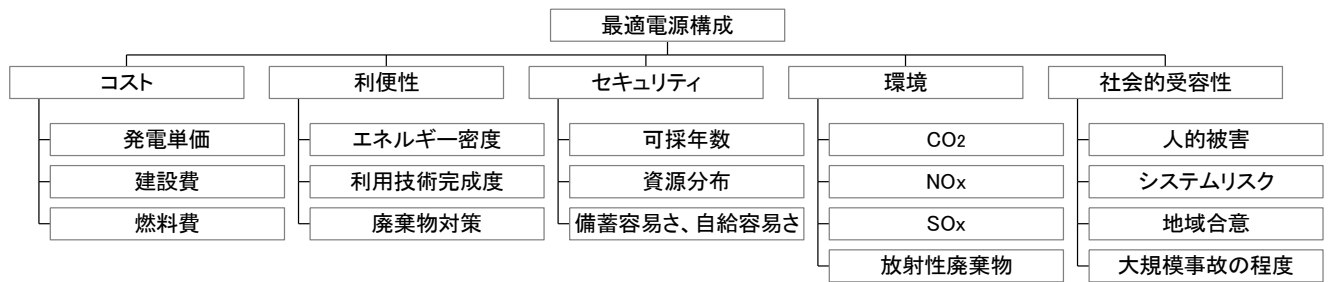


図 1-2 福田ら[5]による評価軸

Stirling[6]は、エネルギー政策・電源計画全般に渡る不確実性、予測不可能性、無知といった側面を挙げ、目的と優先順位、評価軸、そのウェイトは将来必ず変化し、かつどのように変化するか我々は知ることができないという。これを論文タイトルにある通り「無知 (ignorance)」と明示している。さらに「無知」を前提とした議論が必要かつ重要であるとした。従って、エネルギー政策・電源計画を考えるにあたり、「多様性」こそが無知に対する対抗手段として有力かつ頑健な評価軸であると主張している。Stirling[6]は無知と多様性に関する定性的議論を丁寧に行った後、定量化の試みとして経済性とシャノン・ウィナー多様化指数の2つを評価軸をウェイト付けし英国の最適電源構成を例示している。

この Stirling[6]の主張をきっかけに、その後、多様な議論がなされた（物議をかもした）。Brower[7]は、多様化指数分析の有用性を一部認めつつも、多様化指数分析が確率論的分析やシナリオ分析を代替する訳ではなく、互いに補完の関係にあるとコメントした。Lucas et al. (Western[8]の中の一原稿)は何を持って同じ、あるいは別の電源とするかという区分の仕方（恣意的判断に頼らざるを得ない）¹⁷に結果が依存すること、電源の特性（例えば風力が間欠性電源であること）を考慮できていないこと、などから多様化指数分析は構造的に問題があると厳しく批判している。Lucas et al. (Western[8]の中の一原稿)のこのコメントに対し、Stirling (Western[8]の中の一原稿)は「無知に対応することが必要かつ重要であり、そのため多様化指数という定量評価手法は（概念的には少なくとも）有効である」としている。

(3) 電源構成に関する包括的な評価軸のまとめ

以上から、電源構成を考える際、大きくは「供給安定性」、「経済性」、「環境特性」、「各電源の運転特性」の4要素が主軸であるが、エネルギーセキュリティ、社会的受容性、リスク及び不確実性（あるいは無知）、といった要素の扱いが文献によって大きく異なることが分かる。

文献により取り扱いが大幅に異なるこれら要素は、電源に関する政策的含意を考える際に重要かつ不可欠の背景情報である。これら要素をより一般的な文脈にも配慮しつつ、以下、詳しく整理する。

(4) エネルギーセキュリティ

エネルギー安全保障、エネルギー安定供給とも呼ばれるが、本論文では、エネルギーセキュリティと同義と捉えてエネルギーセキュリティという語彙を用いることとする。以下、エネルギーセキュリティの歴史的経緯、定義、具体的な対応策などについて記す。

¹⁷ 例えば再生可能エネルギーを陸上風力、洋上風力、太陽光、バイオマス、小水力、潮力、波力といったように別々の電源として分けた場合、これらの多様化価値は高く評価される。この場合、他の電源、例えばガス火力や原子力は構造的に低く評価される。

① 日本の歴史的経緯（1945 年まで）

1868 年の明治維新以降、富国強兵政策を進めたい日本にとって、国内の石炭資源は十分豊富とは言えず、エネルギー資源獲得は、日本も植民地獲得競争に加わった理論的根拠とされる。植民地獲得・拡大により資源獲得を目指したものの、その後、軍事的に鍵となるエネルギー源が石炭から石油に転換される中で、結果的にエネルギー資源、特に石油、鉄スクラップは、欧米列強、あるいは欧米列強の植民地からの輸入に頼らざるを得なかった。そのような状況の中、1937 年の支那事変をきっかけとし、米国、イギリス、オランダなどは、日本への石油の輸出を制限した。1940 年に米国は日本に対し鉄スクラップを禁輸した。さらに、1941 年 7 月に日本軍がフランス領インドシナへ進駐したことを理由に、米国は日本に対し石油輸出の全面的禁止を通告した。同年 12 月 8 日に日本は真珠湾攻撃を行い、太平洋戦争を開始したが、その背景に石油資源などの絶対的な不足がある。同時に、太平洋戦争の敗因の一つは、石油資源の確保や輸送に失敗したこととされる[62]。

軍事行動に直接必要なエネルギー源が石炭から石油に転換し、石油がいわゆる戦略物資となるのは、当時から広く予想されていた。そのため 1941 年に至る前から「人造石油」が日本でも検討され、また投資もされてきたが、結局、人造石油の供給力は量的に小さいものであった（人造石油の供給見通しを楽観的に過大見積もりするよう圧力もあったようである[62][63]）。

以上のいわゆる戦前の歴史的背景を基に、石油資源は、国家の主権（自由度や選択肢の幅）、（軍事的）安全保障、維持運営に不可欠の戦略物資であるとされる。こういった文脈で、エネルギーセキュリティとは、究極的に軍事セキュリティのことを指し¹⁸、セキュリティが確保されることとは、エネルギーの「量」が確保されること同義であるとする主張、あるいはその方向性に近い主張は現在においても度々なされる。

② 日本の歴史的経緯（1945 年以降）

戦後間もない 1946 年 12 月に、国内産業や経済の復興発展を目的とし、限られた税収や外貨を有効に配分する「傾斜生産方式」が閣議決定された。具体的には、石炭の増産が当初最優先され、鉄鋼、造船、電力部門へ重点的に資源が配分された¹⁹。サンフランシスコ講和条約（及び旧日米安保）が発効した 1952 年には、石油に関して過去の生産能力などの実績に基づく外貨割当制度の措置がとられた[66]。この講和条約には原子力研究の禁止や制限の条項がなく、1953 年 12 月のアイゼンハワー大統領による国連総会での「アトムズ・フォー・ピース」演説から間もない 1954 年 3 月には、1954 年度予算として戦後初の原子力開発予算を計上した[67]。なお、1960 年には、旧安保にかわり新日米安保が発効し、変遷を経つつも現在に至るまで日本の安全保障の根幹を成す[68]。

¹⁸ 松井[64]は、松井が参加したエネルギー国際会議において、米国から参加した発表者が次のように発言したと明記している。“日本のエネルギーの安全保障は米国が担っている。・・・もし・・・日本にエネルギー輸入を妨げるような挑発が行われた場合、日本は他国の軍勢力、特に米国の軍勢力に頼らざるを得ない。・・・日米同盟は、日本のエネルギー供給に必須のシーレーンを・・・守ることを保障し・・・している。・・・（石油、LNG の安定的なシーレーン通過を）米国海軍が保障する能力を有することに、日本は信頼を置くべきである。”これが厳然たる事実としても、日本においてこのような軍事的話題を持ち出すことは一般に抵抗があると考えられる。

¹⁹ ただし、傾斜生産方式の事後的評価として、闇市場が実質的に活用されたこともあり傾斜生産が有効に機能した実態はなく、従って傾斜生産は「構想」に留まるものであり、傾斜生産「構想」の有効性は認められないとの主張もある[65]。

1960年代に入ると工業発展・経済成長が加速し、一方で、安価な海外資源が登場したため（GATT 総会、IMF 総会で貿易・為替の自由化の要請が日本になされたこともあり）、石炭、原油の輸入量が著しく増大した。この流れにより、国内の石炭生産は逆に減産を余儀なくされた。1967年には、石炭対策特別会計が施行され、原・重油関税による税収の使途が石炭産業の（雇用）安定化に、石炭対策特別会計²⁰が施行された[69]。

1973年以前のエネルギー政策は、低廉、安定、自主の3原則に基づく「総合エネルギー政策」に特徴付けられる（[66][70]）。1973年以前にも、政府審議会で石油の安定供給の必要性が度々指摘され²¹、産油国情勢の変化が見られるため低廉性よりも安定性を重視すべきであり[72]、具体的な石油備蓄増強（少なくとも60日分[72]、または90日分[73]）の提案もなされたが、一方で、低廉かつ安定した石油供給が継続するという見方が日本で主流を占め、実態として、安定性よりも低廉性に主眼がおかれた[72]。このような状況の中、1973年10月に第一次石油危機を迎える。

OECD 諸国は、エネルギーセキュリティ確保を目的に、1974年11月 IEA を設立し、OECD 諸国は国内努力として、石油備蓄、石油代替、省エネルギー、石油の供給源多様化、エネルギーR&D を進めた。日本も、1974年に電源開発促進対策特別会計法を施行し、原子力の推進体制をより強固にした²²。

1978年のイラン革命に端を発する第二次石油危機を受け、1979年に省エネルギー法を施行、1980年には石炭及び石油対策特別会計の「石油勘定」を「石油及び石油代替エネルギー勘定」に改め、石油代替エネルギーの開発導入を加速した[66]。世界的には、北海やアラスカ地域などにおける非 OPEC 諸国の原油生産の増加、省エネルギーの進展、代替エネルギーの進展といった一連の変化により、また直接的には、販売量が縮小し続けていたサウジアラビアがネットバック方式を採用したため、1986年に原油価格は暴落した。

プラザ合意（1985年9月）後の急激な円高にもかかわらず米国の貿易赤字の解消が進まないため、米国政府は日本に対し関税引下げ、内需拡大、市場の規制緩和・自由化を強く迫った[66]。また、国内でも内外価格差、産業の国際競争力増強、消費者の自由な選択が許容されるべきという事項を理由に、石油、電力、ガス産業に対する規制緩和（規制変化）の要望が高まった。電力部門に関しては、発電と送電部門を分離し別組織とするアンバンドリングを求める声もあったが、環境負荷低減、エネルギーセキュリティ、ユニバーサルサービスといった社会的要請や、電力の同時同量といった特殊性を理由に、発送電分離（アンバンドリング）は実施せず、卸電力市場を創設することとなった（その後、2005年4月に運

²⁰ 1972年に、石炭勘定の他に石油勘定が創設され、「石炭対策特別会計」は「石炭及び石油対策特別会計」に改正された。その後、1980年と1993年の改正を経て、現在の「石油及びエネルギー需給構造高度化対策特別会計」に至っている。

²¹ 1962年10月の石油市場自由化に際し、石油の安定供給のため政府が何らかの対応をする必要があるとされ、外貨割当制度に代わり、新たな石油業法が制定された。1967年2月に総合エネルギー調査会は、石油供給の低廉安定、自主性の確保に加え、原子力、LNG などによってエネルギー源多様化を図るというエネルギー政策を提案している。なお、通産省では、1962年の議論の際を含め、国営一貫操業石油会社の設立が望ましいとする考えが主流であったが、結果として合意が得られなかった[66]。その後の1973年10月25日にエクソンなどのメジャーは日本に対し約10%の供給削減を通告しており[68]、こういった文脈からナショナルフラッグカンパニーやメジャーの有無は、エネルギーセキュリティに影響を与えるとされる[71]。

²² 1974年のインド核実験を契機として、米国政府は核不拡散の観点から、日本の核燃料サイクル/プルトニウム利用を制限しようと圧力を強めたが、日本は度重なる議論や協議を粘り強く重ね[66]、1986年6月には、再処理など一連の核燃料サイクルの実施が一定の条件下で許容される日米原子力協定の合意に至った[67]。核不拡散という観点において、原子力は国際政治上に左右されやすい側面を持つが、日本はこの側面に対する交渉には成功したと言える。一方、国内の社会的側面の扱いや対応に関して厳しい指摘もなれる[67]。

用・取引を開始)。また、小売自由化の順次拡大が一連の電気事業分科会にて決定した。2011 年の福島第一原子力発電所事故を経て、今後は発送電分離など含めた自由化（規制緩和、規制変化）を進めることとなっている。

一方、1992 年には気候変動に関する国連枠組条約（UNFCCC）が締結され、1997 年の京都議定書採択もあり、日本のエネルギー政策の目標として 3E（Economic growth、Environmental protection、Energy security）の同時達成が取り上げられるようになった。つまり、エネルギーセキュリティのみを根拠にエネルギー政策を行うことは、より困難になりつつある²³。ただし、2011 年以降、石油火力や LNG 火力に依存した発電構成となっており、エネルギーセキュリティ上の対策が必要との指摘も改めてなされている（例えば豊田[75]）。

③ エネルギーセキュリティの目標及び定義

狭義の定義

エネルギーセキュリティの目標・定義に関して、無数の提案がなされている。例えば Yergin[76]はエネルギーセキュリティの目標を「国家の主要な価値や目的を損なわない方法により、適正な価格で十分かつ信頼にたつエネルギー量を確保・保障すること」²⁴とした。

Samuels[77]は、エネルギーセキュリティの目標を、次のように多段階の概念によって表現している²⁵。

1. 海外からの脅威・圧力に対する脆弱性を（事前に）減らしておく
2. 供給危機が（そもそも）起きないようにする
3. （仮に）供給危機が起きても、経済への影響、軍事への影響を最小限にする

なお、括弧内は文脈を分かりやすくするため筆者が追加した。

広義の定義

近年、以上の狭義の定義をエネルギーセキュリティの根幹としつつも、より幅広い定義を行う方が、エネルギーセキュリティの現実的な維持向上に望ましいとの主張がなされつつある。

Yergin は、その後 2006 年の文献[78]で、エネルギーセキュリティに対する見方を再考すべきであり、国内のエネルギーセキュリティだけを考えるのではなく、国家間の関係や経済の地域間相互依存性にも注目すべきと主張する。石油・ガスの供給は、テロリズム、ナショナリストの反動、供給地や供給経路の争奪、紛争、ハリケーンなどに対し依然として脆弱であり、「国単位での量の確保」という従来の考えを広げ、（グローバル市場の整った現在において）石油価格を上昇・不安定化させる要因にも注目すべきとしている。

²³ 3E の目標については、一部批判的な指摘もある。即ち「3E を掲げる限り、原子力が優れた電源であるという論理展開にならざるを得ないが、はたしてそれで良いのか」という指摘である。また、海外に目を向けると、英国の Department of Energy & Climate Change (DECC) の設置は、エネルギー・温暖化政策の問題を、セキュリティではなく温暖化の観点から行うことを象徴しているとの指摘もある。欧州では、1990 年代はエネルギー市場の自由化が重視されたが、2000 年代は地球温暖化問題がエネルギー・温暖化政策の中心に置かれたという[74]。

²⁴ 原文は次の通り。“The objective of energy security is to assure adequate, reliable supplies of energy at reasonable prices and in ways that do not jeopardize major national values and objectives.”

²⁵ 原文は次の通り。1) Reducing vulnerability to foreign threats or pressure, 2) Preventing a supply crisis from occurring, and 3) Minimizing the economic and military impact of a supply crisis once it has occurred.

Hippel et al.[79]は、田中[68]がセキュリティ（安全保障）の大枠として提示した3要素、即ち、「何を守るかー安全保障の対象」「何から守るかー安全保障への脅威」「何で守るかー安全保障の手段」の重要性を指摘した。その上で、彼らはこの3要素に加え、「誰が守るかー安全保障を実施する主体」という要素を挙げ、エネルギーセキュリティを表1-4の通り整理した。Yergin[78]との共通点が伺える。

表1-4 エネルギーセキュリティの中心概念

「何の」	「どのような脅威/ リスクから」	「どのような手段により」		「誰が(誰を/何を)守るか」
		危機管理/ 短期的手段	長期的手段	
石油供給 (LNG、LPG供給)	供給途絶	石油備蓄取り崩し、 (軍事行動、)政治外交的手段	エネルギー源多様化、供給源多様化、自給率向上、石油の自主開発、供給国との外交親善の拡充、省エネルギー、長距離輸送の安全確保	一国政府が 国民を守る
	資源枯渇		代替エネルギー資源へのシフト、省エネルギー、エネルギー研究開発	
石油価格 (LNG、LPG価格)	突然の高騰、高位水準での停滞(アジア・プレミアム拡大)	石油備蓄取り崩し	エネルギー源多様化、省エネルギー	地域政府が 地域国民を守る
石油供給 (LNG、LPG供給)	供給途絶	アジア地域内石油備蓄の融通措置	アジア地域政府の協調、アジア地域における市場の整備 中東地域以外の石油供給源の確保	
石油価格 (天然ガス価格)	突然の高騰、高位水準での停滞	多国間交渉、IEA協調、OPECとの交渉	経済的相互依存度の増大、国際石油市場の発達、原油の余剰生産能力、原油の余剰精製能力	複数政府が 世界経済を守る

注) Hippel et al.[79]に基づき、筆者整理。

④ エネルギーセキュリティと関連する要素

Hippel et al.[79]は、石油・ガスの量的確保、価格高騰に加え、地域環境・地球環境、技術・社会・文化、エネルギー需要、外交や軍事、といった要素も同時に考慮すべきとしている。この内、社会とは個人のライフスタイルや、原子力の立地や現実の設備利用率が社会的側面によって左右されることを意味する。文化とは、伝統的な文化的価値といった視点に加え、税制や規制を企業や国民がどのように評価するかといった要素を意味する。Yergin[78]もこれら要素の相互依存性に着目すべきとしている。

後の第3.5節では、エネルギーセキュリティ指標を導入するが、その際は、以上の定性的議論を参照する。

(5) 社会的側面（社会的受容性）

① 既往の研究例（特にリスク認知について）

人々が、ある特定の科学技術や迷惑施設に関して自分の態度・賛否を決定する場合、恩恵や有用性、実施主体者への信頼、リスク認知によって態度・賛否が左右されるとされる。これらの要素のうち特にリスク認知が重要な役割を果たすと、田中[80]、木村ら[81]は指摘している。リスク認知はSlovicの研究（例えば[82]）に代表されるように、幅広い研究分析がなされてきた。以下、社会的側面に強い影響を与えるリスク認知に注目する。

健康や生命に関するリスクという文脈において、人々のリスク認知は、様々な要因により左右される

ことが示されている。1969 年に Starr[83]は、自ら能動的に行う行為のリスク許容度に比べ、押し付けられる行為のリスク許容度が低いことを示した。Tversky and Kahneman[84]は、生存率、死亡率という言葉のニュアンスによって、人々の選択が変化するというフレーミング効果の存在を示し[85]、人々は不確実性よりも損害を嫌忌しているとした。Slovic[82]は、1)破滅的で、コントロールが難しく、致命的な事象、2)未知で、観測が困難な事象、という二つの次元で複数のリスク項目を評価した上で、これらの尺度が高いほど、人々はリスクを大きいと認識することを示した。

Kahneman et al.[86]は、ヒューリスティック（短く分かり易いフレーズ、簡便な方法、経験則）によって、確率や損害規模を判断するといった一貫した傾向（バイアス）が存在することを示した。例えば、思い浮かべ易い事象ほど、自分が経験した事象ほど、最近起こった事象ほど、確率や損害規模を大きいとみなす（利用可能性ヒューリスティック）。両事象が独立に生起する場合でも、独立であるとはあまり認識しない傾向がある。あるいは、両事象が同時に発生する確率を過大に評価する傾向がある（代表性ヒューリスティック）。事前に持っている情報や主張をベースに、（無意識のうちに）新たな情報を取捨選択したり、新たな情報の信憑性を決定したりする。その後、（無意識のうちに）自ら選択し、自ら信憑性を主観的に決めた「情報」を偏りのない情報と認識し、その情報を基に自分の考えを調整する傾向がある（係留と調整のヒューリスティック）。

また Festinger[87]は、人々の知識、意見、信念などの認知要素が、不一致、矛盾しているとき、心理的緊張を軽減するため、自分の認知を修正しようとすることを示した（認知的不協和の理論）。木村ら[81]は、原子力発電所の立地という文脈で、実施主体者への信頼が、リスク認知に大きく影響を与えることを示したが、これは認知的不協和の理論と整合的である。つまり、原子力の立地に反対の立場・意見の場合、実施主体者を信頼せず、またリスクが受け入れられないほど高いと判断する方が、認知的不協和は低くなる。

なお、ここで注意が必要なのは、バイアスやヒューリスティックの存在を根拠に、人々が非合理である、誤った判断をしている、とは言えないことである。人々の日常生活において、通常、時間的リソースは限られている一方、健康や生命に影響を与えるリスク要因は無数にあり、かつリスクだけに関心を寄せることはない。つまり、個々のリスクを素早く簡便に（端的には安全か危険か、気に掛ける必要があるかないか、といった二分論で）判断することは妥当であり、制限付きとは言え合理的である。認知作業を節約するためにも、人々が個人レベルでの内的判断として利用する限り適切であろう。

② 語彙の扱い

一般に、社会的受容性という語彙が使われてきたが、暗黙のうちに「社会が受動的に受け入れるかどうか」あるいは「受け入れるべき」との文脈を伴い兼ねない。そのため **public involvement** という語彙も多用される。ただし、実態として住民参加が伴わない場合もある。どのような手続きによって「住民」と認定するかも議論がある。このような観点から、語彙としては曖昧であるが本概念を表すために「社会的側面」という語彙を本論文では主に用いる。

③ 社会的側面の扱いに関する議論

これまで工学の分野では、リスクの定量的指標の一つとして期待損失（生起確率と損害による積）が参照されてきた（例えば Cohen[88]）。またリスク学の分野では、人々がどうしても避けたい事象を「エ

ンドポイント」と設定し議論すべきと中西[89]は指摘している。実運用上、エンドポイントとして期待損失、損失余命のような特定の定量指標を用いることが提案されてきた。しかし、以上のような人々のリスク認知の特性を是とすると、期待損失、損失余命といった定量指標は社会的に限定的な役割しかないとの指摘もある²⁶。

電源構成の評価において、人々のリスク認知をどのように組み入れるのが妥当かという判断は識者間で意見が大きく分かれる。社会的側面を重視する（極端な）立場からは、1)人々のリスク認知を真、あるいは妥当と見なし、最大限尊重すべきである、2)人々の賛否（社会的側面）は、環境特性や経済性、さらには定量化できない要素を含めあらゆる評価軸をバランスよく考慮している、3)専門家や政府も相応のバイアスがあるし判断を誤る、4)従って、電源構成を社会的側面のみで決定すべきである、5)仮に誤った判断であっても、その被害は意思決定した人々が受けるため社会的倫理的にも問題はない、とする。

一方、社会的側面を電源構成の評価に組み入れるべきではないという（極端な）立場からは、1)人々のリスク認知を含め、個々人の意見の差異も大きく反映しようとしてもそもそもできない、2)つまり仮に社会的側面を反映させようとしても、結果は手続きに左右されるため、社会的側面を適正に反映することはできない、3)人々のリスク認知は特定の情報に振り回され、正しい合理的な判断にはなりえない（従って電源構成の評価軸として社会的側面を含めるべきではない）、4)ある一定の中央省庁、専門家、立地主体者、電源が立地される自治体が電源立地の是非を決定すべきである、5)電源構成の影響は、その電源立地地域への影響というよりもむしろ、日本全体のエネルギーセキュリティやマクロ経済に影響を与えるため、無責任な方法を取るべきではない、7)ある一定の中央省庁、専門家、立地主体者が電源構成やその評価軸を決定するとしても、多くの国民（サイレント・マジョリティー）の意見を実質的にくみ取ることにもなるため、社会的側面を尊重していることにもなるし反映していることにもなるため社会的倫理的にも問題はない、とする。

このような幅広い考えが存在するため、今後とも、社会的側面に関する議論が行われることが望まれる。

1.3.4 国家間でエネルギー・温暖化政策が異なる要因

前節では電源構成を考える際に考慮される評価軸として、人々の意見が分かれる傾向にあるエネルギーセキュリティ、社会的側面を整理した。次に、このようなこれまでの議論を踏まえつつ、電源を含めたエネルギー・温暖化政策が国家間で異なる要因について包括的に整理する。本節は、Hippel et al.[79]を主に参照しつつ、次の5項目について整理する。

1. 国内資源の相違
2. 市場と国家の役割に対する考えの相違
3. 短期的対策と長期的対策の考え方の相違
4. 軍事セキュリティと経済セキュリティに対する考え方の相違
5. 国民と国家のリスク負担や意思決定主体に対する考えの相違

²⁶ 例えば Cohen[88]は、原子力の商業利用は他の選択肢と比べ健康被害（期待値）、損失余命で見て優れており、原子力拡大こそリスク低減につながると主張している。ただしこの主張に対し幅広い賛同が得られているとは言い難い。

これまで議論してきた通り政策は客観的かつ定量的事実の積み上げというより、むしろ定性的な価値判断に依存せざるを得ない部分を併せ持つ分野である。また事実上、政治的影響を受けやすい。国による差異を議論することは、エネルギー・温暖化政策を相対化、具体化し、客観性を高めるために有効と考えられる。

(1) 国内資源の相違

国内資源に恵まれている国は、戦争や紛争に伴う石油の供給途絶、あるいは通常の商取引ができない緊急事態において、政府権限によって国内のエネルギー供給量を潜在的に増大可能である。価格高騰時においても、国内生産量が大きい場合、海外への所得移転を抑制できる。

これに対し、国内資源量が少ない国は、このような緊急時対応を実施できない（あるいは、量的確保がより高コストとなる）。従って、国内資源の乏しい国は、国内資源の豊富な国よりも、緊急時に実施できる政策手段が限られる[79]。従来から、リスクの源泉は、海外への石油依存、特に政治的に不安定な中東への石油依存とその輸送経路の安全性であり[75]、国内資源の乏しい日本は、エネルギーセキュリティを重視する必要があることが強調される（[90][91]）。

一方、冷戦終結以降、国際エネルギー市場が整い、石油価格の上昇は、石油消費国全てに影響を与える。価格高騰時において、エネルギー自給率は海外への所得移転と連関を持つが、それ以上の意味を持たない。米 GAO[92]は価格高騰時のマクロ経済へのダメージは、自給率というよりは、むしろ価格水準と石油の消費量に依存し、平時に高コストである国内資源の開発・生産に補助金を提供する米 DOE の政策は非効率であると批判している。また、供給途絶時や商取引が不可能な緊急時には備蓄石油の放出が有効であり、かつコスト効率的であるとする。

従って、冷戦終結以降、国内資源の有無や自給率は、石油備蓄で対応できないような長期に渡る供給途絶リスクに対して重要な要素であるが、短期的な供給途絶や価格高騰に関して、決定的な要素とはならず、むしろ石油やガスの消費量水準を低下させることの方が重要かつ本筋であるという[92]。

(2) 市場と国家の役割に対する考えの相違

① 政府が市場へ介入すべき根拠

経済学的文脈において、一般に政府が市場に介入する根拠は、市場の失敗、所得配分及びケインズ効果²⁷である。市場の失敗²⁸が起こる基礎的要因は、市場支配力、不完全情報、公共財、外部性である[95]。

電気事業に関して、18 世紀末当初、規模の経済性や自然独占性が観察された²⁹。従って、独占を認める代わりに市場支配力を濫用しないよう価格規制がしかれた。石油製品、ガス、電力などのエネルギー商品は、厳密には公共財とはいいがたいが、全ての（多くの）企業や個人が使用する必需的な財であり、電力や石油製品の品質は公共財的側面も有する。また、山間部・離島といった地理的条件に関係なく均一のサービスが提供させるべきといった公益的側面が存在する。また、エネルギーの生産・輸送・消費

²⁷ ケインズ効果とは、減税や公共事業といったより能動的な政府の働きにより、経済全般に広がる不確実性を軽減し、有効需要の増加、雇用の増加、GDP の増加を引き起こすことを指す[93]。ケインズ効果は、1929 年の世界大恐慌を脱するため、積極的な政府の介入が必要であるという文脈で当初知られたが、その後の好況期においても、政府の市場への介入を正当化する根拠とされた。政府介入の有効性、効率性といった意味で、ケインズ効果はエネルギー分野の規制緩和に関する議論にも強い影響を与えている[94]。

²⁸ 「公共財」「外部性」といった市場の失敗は、「市場の欠如」とも呼ばれる。

²⁹ あるいは、二重投資や行き過ぎた価格競争により、電力の安定供給が損なわれた時期もあった。

に関して、必然的に環境負荷やエネルギーセキュリティなどの外部性が伴う。

以上から、現在においても、石油、ガス、電力といったエネルギー事業に対し、政府が規制・税制・補助金・R&D などを通して介入すべき理論的根拠が存在する。実態として、電力などのエネルギー産業の場合、商品の差別化を図るのは困難で、かつ設備の資本回転率が低く、R&D の成果は他へ波及するため、民間が自ら R&D に取り組もうとするインセンティブは弱く、従って政府による R&D への支出 (technology-push) も必要とされる[96]。

② 政府が市場へ介入すべきではない根拠

1950 年以降の国内外の発電部門、発送電部門における規模の経済性の分析から、規模の経済性が消滅しているとする結果も多く得られている。明らかでない「規模の経済性」を根拠に、政府が地域独占を認め新規参入を阻止すべきという主張は、説得力に乏しいという[97]。

エネルギー産業、電力産業という文脈において、Yergin and Stanislaw[94]は、政府の市場への介入を正当化するケインジアンを強く否定し、その上で「政府は将来を確定的に予測できること、政府は経済全体を把握できること」という期待を揶揄して「The Commanding Heights (管制高地)」と呼んでいる。過去の歴史を振り返る限り、国際エネルギー市場が整備されつつある一方、複雑で予測がより困難な現代において、そういった「管制高地」は幻想に過ぎず、政府による市場への介入は、理想的な初期の目標とかけ離れ、政府の失敗を引き起こすとした³⁰。従って、エネルギー産業、電力産業に対し民営化や規制緩和を推し進め、政府は企業による自由な経済活動が行われるよう監視に徹する必要があるという。

Stirling[6]は、我々は無知であり、将来予測は困難であるという。従って、あたかも不確実性が存在しないとみなし確定的な将来像を根拠に政府がエネルギー政策を行うことは避けるべきだとしている。また、外部性が存在するのは確かだが、それを多くの人々が納得する形で金銭換算できないため、特定のエネルギー源や電源を政府が推進することは望ましくなく、エネルギー源の多様化を図ることが重要であると指摘している。R&D に関して、エネルギー、及び電力部門の特殊性を考慮してもなお、政府による R&D への支出は実証研究ではなく、基礎研究を重視すべきとの主張もある³¹。

(3) 短期的対策と長期的対策の考え方の相違

短期的に効果を発揮する政策として、一般に石油備蓄、国内生産量の増大、軍事行動などが考えられるが、この内、日本政府が実施できるのは石油備蓄のみである。これに対し、長期的に変化を生じさせ石油の供給途絶・価格高騰といった緊急時における脆弱性を減少させる方策は、省エネ、石油代替、供

³⁰ 政府の失敗は、政府関係者の能力がいかに高くても、また意図が崇高かつ適切であったとしても、政府をとりまく第三者を含めた環境、政府組織としての手続きの影響を通して、結果的に失敗する場合があるということであろう。政府の市場への介入は、短期的な対処能力の低下、政府内部での縄張り争いなどを引き起こすとした。また、政府自体に政府の介入を強化しようとするインセンティブが常に発生することも Yergin and Stanislaw[94]は挙げている。

³¹ R&D に関して、日本学術会議[98]は R&D の区分を実証研究で金額の大きい「投資」と基礎研究で金額の小さい「保険」といった表現で区分けした。その上で、国の R&D は将来の不確実性 (R&D の失敗や社会的反発) を前提とし、「保険」的に多様な基礎研究をより重視しつつ、柔軟に実施すべきことをポートフォリオの概念を用いつつ主張した。これは事実上、過去行ってきた予算規模の大きい R&D 予算項目 (実証規模開発など) を大幅に見直すべきであり、自己正当化のために今後も同じような R&D 予算を執行するのは不適切であるという主張であった。なお、当初の原稿案では、そのような明確なメッセージを持っていたが、その後、技術の「深層性」が必要との記述が加わり、主張が曖昧なものとなった経緯がある。

給地の分散、産油国への直接投資、自主開発、R&D など多岐に渡る。セキュリティを高めるためには、多段階かつ多くの選択肢を確保しておく方が望ましく、（日本にとって緊急時に短期的効果を発する選択肢が限られているため、従って）原子力分野への R&D を含めた長期的対策に対して重点的に予算を配分してきた[99]。エネルギー供給技術、例えば原子力や石炭火力の分野では数十年以上の研究蓄積が必要であり、長期に渡る安定的な R&D を正当化する根拠とされてきた。

一方、長期的対策は短期的な対処能力を低下させる可能性がある[92]³²。また新たな情報が長期的対策に反映されることは極めてまれである。石油産業活性化センター[71]の中で鈴木達治郎は、1999 年の段階で次の通り主張している。日本の商業用軽水炉が発電電力量の 1/3 を担うほど普及したこと、さらなる長期的対策は別のセキュリティ問題を引き起こすこと（例えば R&D の失敗、社会的側面、余剰プルトニウムと核不拡散への懸念）、マクロな省エネルギー指標である GDP 当たりのエネルギー消費量が欧米諸国と比べ小さいこと、石油備蓄の経済性が優れていることを背景とし、日本のエネルギーセキュリティ対策として、長期的対策は十分実施されており、今後は短期的対策、即ち諸外国との緊急時対応に関する議論及びコンセンサスの形成、石油備蓄などの短期的対策の整備に傾注すべきという。

(4) 軍事セキュリティと経済セキュリティに対する考え方の相違

伝統的には軍事セキュリティが安全保障やエネルギーセキュリティの大きな柱であり、最狭義のエネルギーセキュリティは、軍事セキュリティと等しい（[71][79]）。石油産業活性化センター[71]は、日米の専門家間で十分な議論を行ったが、米国専門家側の「政府の役割は限定的にすべき」との主張と、日本専門家側の主張は、最後まで平行線をたどったとしている。日本専門家側は、同報告書の結論として「強力な軍事力とオイルメジャーを擁する米国とは異なり、これらを持たない日本は、冷戦終結以降の現在においてもなお、エネルギーセキュリティを確保するため政府が一定の役割を果たす必要がある」とまとめている。これは、生産設備や海上輸送路の安全確保のためには、短期的には軍事力、長期的には軍事力に基づく交渉力が必要であることを一つの背景としている[64]。

これに対し、冷戦終結に伴う秩序形成や治安維持により、グローバルなエネルギー市場の整備が進んだため、相互依存理論に見られるように、次第に経済セキュリティの重要性が指摘されるようになってきている。相互依存理論では、日本などの石油輸入国の供給セキュリティだけではなく、産油国の需要セキュリティにも注目し、産油国と需要国の経済的相互依存に着目する。産油国の多くは、国内経済や雇用、税収、外貨を石油産業及び石油輸出に依存しており、適当な価格で石油を販売可能なことが国家財政や経済活動にとって不可欠である。このような文脈において、軍事セキュリティは経済セキュリティの前提と位置付けられる（[71][79]）。

また、冷戦終結以降、欧米では産油国（あるいは産油国グループ）の意図的行動によるショック（ストラテジック・ショック）よりも、戦争などの偶発的事件によるショック（ランダム・ショック）が相

³² 既往の政策がその後の状況、実態、あるいは「新たな情報」にすぐわなくなっても、その政策を修正・撤廃しなかったり、あるいは逆に強化されたりする場合がある。これは、政府自体に既存政策を正当化するインセンティブが働くと同時に、政策（政策導入の可能性）はそれ自体、政府以外の第三者にとって自らに有利なようにその政策を活用しよう、あるいは変更しようという「レント・シーキング」のインセンティブを与える。この観点に基づくと、政策を柔軟に見直すことが必要である（日本学術会議[98]の当初案）。一方、鈴木篤之によると（原子力分野の R&D という文脈において）「政策は長期的に（例えば数十年）安定してこそ効果が発揮される」「柔軟な政策は、政策ではない」「柔軟な政策とは、何も決めてないことを意味する」といった暗黙の前提に基づき原子力政策について議論している[61]。

対的に注目されつつあり、石油の供給途絶よりも、これらショックによる価格高騰によるマクロ経済的ダメージを懸念する傾向にある[71]。ストラテジック・ショックは、軍事を背景とする外交交渉により未然に防ぐことが可能である場合もあるが、ランダム・ショックはその特性から未然に防ぐことは困難である。石油価格の高騰は、グローバルなエネルギー市場がより整備された現在、軍事力の有無に関わらず、全ての石油消費国に対し影響を与える。

以上から、伝統的にそして現在においても軍事力の有無はエネルギー政策に影響を与える要因であるものの、その一方で冷戦終結以降、ランダム・ショックへの対応、及び経済セキュリティの重要性は相対的に増しつつあると言える（石油産業活性化センター[71]）。

(5) 国民と国家のリスク分担や意思決定主体に対する考えの相違

米国は 1990 年代初め、道路補修のためのガソリン税（BTU tax）についても導入できなかった歴史的経緯がある。Hippel et al.[79]によると、米国では国民が自分の行動に責任を持ち同時にリスクをとる一方で、政府による介入、税制、規制に対し批判的立場をとる自由主義の考えが根強いことが背景にある。一方、欧州は高額なガソリン税が導入されている地域が多い。

日本は明治以降、列強へ対抗するため（大正デモクラシーといった動きがあったものの結果的に）中央集権化が優先され強化された。1947 年 5 月には国民主権、基本的人権の尊重を柱とする日本国憲法が施行されたが、欧米と異なり国民自らが勝ち取った憲法とは言い難い。戦後一貫して中央省庁の権限が強かったことは一般に指摘される³³。中央省庁が意思決定主体となり、経済成長とその安定に寄与し、政府が企業や国民のリスクを引き受けることは、一定の賛同が得られていた側面がある。歴史的に見て、国民が自らリスクをとりかつ国民が直接的に意思決定を行う文化は、日本（の少なくともサイレント・マジョリティ）に希薄と言える。このように、国民の価値観や歴史的経緯は、政策に影響を与える。

1.3.5 エネルギー・温暖化政策のまとめ

エネルギー・温暖化政策と関連の深い地球温暖化問題への望ましい対応策、エネルギーセキュリティや社会的側面の意見差異について整理・議論した。さらに国家間で政策が異なる要因について整理した。以上から得られた主な含意は次の通りである。

- エネルギー・温暖化政策は、相反する見方や視座が存在するため、単一のロジックや単一の視座によって判断することはできない（すべきでない）
- 客観的事実の積み上げというよりも、むしろかなりの程度を価値判断に依存せざるをえない
- 政策はその安定性や継続性が必要との指摘がなされる一方、新たな情報に基づく修正・撤廃が必要との指摘も同時になされる

後の DNE21+による分析（第 3 章）、リアル・オプション分析（第 4 章）では主に経済性に注目した定量分析を行うが、本節で行った整理・議論は第 3 章、第 4 章の結果を考察し、政策的含意を抽出するた

³³ Vogel[101]は、中央省庁と企業の適切な話し合い、相互理解と信頼醸成の結果、世界の変化に最も上手く対応し経済成長を遂げたと 1979 年時点で指摘している。ただし、Vogel は 2000 年発行の文献[102]において、変動の激しいグローバル市場において、日本が競争力を取り戻していくためには、政治家が社会システム全般における構造改革及び規制緩和を行っていく必要があると主張している点に注意が必要である。

めに有用かつ不可欠の基礎背景である。

1.4 本論文の目的・実施内容

(1) 本論文の目的・新規性

本論文は、世界全体での大幅な CO₂ 排出削減の必要性が指摘される中、世界全体での発電部門、鉄鋼部門、セメント部門における地球温暖化緩和策、特に日本にとっての CO₂ 回収貯留（CCS）技術の位置づけを明らかにし、その上で CCS 普及見通し、並びに電気事業者の CCS 投資リスクに配慮した政策的含意を得ることを目的とする。

本論文の新規性は主に次の点である。新規性の具体的内容や既往文献との差異については次の第(2)項に記す。

- 既存の DNE21+にて考慮していた発電部門 CCS などに対し、今回新たに鉄鋼部門、セメント部門の具体的な省エネ技術、鉄鋼部門での CCS を明示的に考慮できるよう DNE21+を拡張
 - 鉄鋼部門、セメント部門の地域別エネルギー原単位（2010 年時点）について推計³⁴し既存の設備ストックとして DNE21+へ反映
 - 鉄鋼部門では日本での技術開発動向、欧州の技術開発動向などを参考に³⁵、一貫製鉄所（高炉転炉法）に CCS を組み合わせる技術オプションを追加
 - 鉄鋼部門では、鉄スクラップの入手可能性について過去 140 年間のマテリアルフロー分析も実施しそれと整合的な将来の鉄スクラップ発生シナリオを作成し、そのシナリオを DNE21+へ反映
- DNE21+の結果をエネルギーセキュリティ指標に当てはめることにより、時点別、地域別、CO₂ 排出制約別のエネルギーセキュリティ指標を算定（ただし DNE21+の評価関数の中にエネルギーセキュリティ指標を組み込んでいない点に留意が必要）
- 日本の発電部門における CCS（CO₂ 回収、輸送、貯留までの一貫したシステム）に着目し、CCS の投資リスクをリアル・オプション法にて分析

(2) 本論文と既往研究の関係

上記の本論文の新規性と既往研究の関係は次の通りである。

一点目の新規性に関して、もっとも関連が深い既往研究として Neelis and Patel[29]が挙げられる。Neelis and Patel[29]は鉄スクラップの入手可能性について 1870 年以降の約 130 年間に渡るマテリアルフロー分析を実施し、鉄鋼部門からの CO₂ 排出見通しを分析している。ただし、鉄鋼部門に特化したモデルであり、鉄鋼部門以外の発電部門や CCS は分析対象外である。これに対し、本論文では鉄のマテリアルフロー分析を実施し、その上で鉄鋼部門、発電部門などを同時に解析する。なお本論文は Oda et al.[12]を一部拡張

³⁴ 鉄鋼部門、セメント部門のエネルギー原単位を国別に比較可能な形で推計するためには、バウンダリーを揃え、バウンダリー内外のやり取りについては一定の方法によるアロケーションを行う必要がある。例えば鉄鋼部門ではコークス輸出入の影響、中間製品の銑鉄やスラブの輸出入の影響を考慮する必要がある。このような分析を実施していることは新規性の一つである。

³⁵ より具体的には、日本における鉄鋼部門の技術開発プロジェクト CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking process by innovative technology for cool Earth 50 (COURSE50)、欧州における鉄鋼部門の技術開発プロジェクト Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS)を参考とした。

したものである。さらに本論文の DNE21+分析は鉄鋼部門、セメント部門のエネルギー原単位推計（2000 年、2005 年、2010 年）に基づくものである。

二点目の新規性に関して、McCollum et al.[26]は世界 11 地域別の分析も示しているが、そもそも使用している MESSAGE モデルにおいて、日本はオーストラリア、ニュージーランドと集約された一地域“Pacific OECD”に区分されており、日本のエネルギーセキュリティを評価できない。また Matsumoto and Andriosopoulos[27]は日本、中国などの地域別の CO₂ 貯留ポテンシャルを考慮していない。これらに対し、本論文では日本の CO₂ 貯留ポテンシャルも明示的に考慮した分析となっている。

三点目の新規性に関して、Oda et al.[41]、小田・高嶋[42]、Zhu and Fan[43]、Heydari et al.[44]などと関連があるが、これらは何れも諸外国の費用データを参照している。これに対し、本論文では日本の発電部門における CO₂ 回収、輸送、貯留までの一貫した CCS システムを分析対象としつつリアル・オプション法を適用する。また石炭火力のみならずガス火力も同時に選択肢とすることにより電源間の競合についても明示的に考慮する。

1.5 本論文の構成

続く第 2 章はリアル・オプション法の理論的な定式化から具体的な数値解法までの一連の流れを示す（後の第 4 章では第 2 章にて示した数値解法を利用・参照する）。

第 3 章は、世界エネルギーモデル DNE21+の一部拡張、及び分析を示す。産業部門の中でも代表的エネルギー集約産業である鉄鋼部門、セメント部門について調査、モデル化した。さらに鉄鋼部門については過去 140 年に渡る鉄鋼マテリアルフロー分析も行う。DNE21+の分析により、世界全体で大幅に CO₂ 排出削減を進めるためには、CO₂ 回収貯留（CCS）技術が重要な技術の一つであることを示す。ただし、CCS 普及を進めるにはいくつかの障壁があり、その障壁の一つは各国のエネルギーセキュリティである。そこで DNE21+のエネルギー輸出入マトリックス結果をエネルギーセキュリティ指標に当てはめエネルギーセキュリティ指標値を算定する。（DNE21+の評価関数にエネルギーセキュリティを明示的に組み込んだ分析ではないため強い主張はできないが）炭素制約、CCS は（省エネ、再エネ、燃料転換などが同時に進むことで）セキュリティ指標値をそれほど悪化させないことを示す。

第 4 章は、日本の電気事業者が直面している諸課題及び実問題に対しリアル・オプション法を適用する。最初に経年石油火力の維持・廃棄にリアル・オプション法を適用し、電気事業者が行ってきた経年石油火力の維持・廃棄に関する過去の行動を定量的に説明できることを示す。次に、資本集約的電源への投資オプションを所与とした上で、不確実な卸電力価格の下、投資を直ちに行うか、もしくはしばらく待機するかという投資評価分析を行う。第 4 章の後半では日本の電気事業者が CCS 普及を実際に進めるにあたり障壁となりうる投資リスクについて、リアル・オプション法を用いて分析を行う。事業者が保有するオプションは、微粉炭火力、微粉炭火力+CCS、コンバインドサイクル、コンバインドサイクル+CCS の 4 つとする。

第 5 章において本論文の結論を示す。

第2章 リアル・オプション法の定式化・解法

2.1 はじめに

本章は文献[36][103][104]などを基にリアル・オプション法の理論、定式化、解法（解析解、数値解）を整理し直したものである。後の第4章において発電部門へリアル・オプション法を適用し投資分析などを行うが、その適用に際して必要となる基礎的内容を本章にて整理する。

なお、Dixit and Pindyck[36]は特にリアル・オプション法の理論、定式化、解析解に力点をおいている一方、森平ら[104]は数値解法を詳細に説明している。本章は、理論から数値解法に至るまでの一連の流れを整理した点に特徴がある。

2.2 代表的な確率過程

(1) 伊藤過程

一般的かつ基礎的な確率過程は、次の伊藤過程である。

$$dx = a(x,t)dt + b(x,t)dz \quad (2.1)$$

ただし、 x は状態変数、 t は時刻、 $a(x,t)$ は x と t に依存する期待変化、 $b(x,t)$ は x と t に依存するボラティリティ、 dz はウィナー過程の増分であり、 ε_t を平均0、標準偏差1の標準正規分布をもつ確率変数とすると、 $dz = \varepsilon_t(dt)^{1/2}$ 、 $E[dz] = 0$ 、 $Var[dz] = E[(dz)^2] = E[(\varepsilon_t)^2]dt = dt$ を満たす。ただし、 $Var[.]$ は分散を表し、 $E[.]$ は期待値を表す。またウィナー過程は、異なる時刻 t, s において、 $E[(\varepsilon_t)(\varepsilon_s)] = 0$ が成り立ち、系列相関が存在しない。従って、ウィナー過程はマルコフ過程となっている。マルコフ性を持つ場合、後の分析が飛躍的に簡略化されるため、マルコフ性を持つか持たないかは重要な要素である。状態変数 x がマルコフ性を持つとき、現在の x は将来の x を予測する最良かつ唯一のパラメータとなる。

(2) ブラウン運動

伊藤過程を最も単純化した確率過程は、次のドリフト付きブラウン運動である。

$$dx = a dt + b dz \quad (2.2)$$

ここで、 a は期待変化、 b はボラティリティ、 dz はウィナー過程の増分である。これまでは連続時間で確率過程を表現してきたが、(2.2)式を離散時間で表現すると、次の(2.3)式となる。

$$\Delta x_t = a \Delta t + b \varepsilon_t \sqrt{\Delta t} \quad (2.3)$$

(2.3)式から、時刻 $t(n \cdot \Delta t)$ における x_n は次の通り導ける。

$$\begin{aligned}
x_n &= x_{n-1} + \Delta x_n \\
&= x_{n-1} + a\Delta t + b\varepsilon_n \sqrt{\Delta t} \\
&= x_{n-2} + 2a\Delta t + b\sqrt{\Delta t}(\varepsilon_n + \varepsilon_{n-1}) \\
&= \cdots = x_0 + at + b\sqrt{\Delta t} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i
\end{aligned} \tag{2.4}$$

(2.3)、(2.4)式を用いればブラウン運動のサンプルパスを計算でき、モンテカルロ計算を行うことができる。ここで、 x_n の期待値、分散は次の(2.5)式となる。

$$\begin{aligned}
E[x_n] &= E\left[x_0 + at + b\sqrt{\Delta t} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i\right] = x_0 + at + b\sqrt{\Delta t} \sum_{i=1}^n E[\varepsilon_i] = x_0 + at \\
\text{Var}[x_n] &= E[(x_n - E[x_n])^2] = E\left[\left(b\sqrt{\Delta t} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i\right)^2\right] = b^2 \Delta t \cdot E\left[\left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i\right)^2\right] = b^2 n \Delta t = b^2 t
\end{aligned} \tag{2.5}$$

(2.5)式から、 x_n の予測値、信頼区間はそれぞれ(2.6)式、(2.7)式となる。

$$\hat{x}_n = x_0 + at \tag{2.6}$$

$$x_0 + at \pm bk\sqrt{t} \tag{2.7}$$

ただし、 k は標準正規累積分布関数の値に該当し、(2.7)式は $k=1$ の時 68.3%信頼区間、 $k=1.96$ の時 95%信頼区間を示す。

(3) 幾何ブラウン運動

次に、伊藤過程の一つであり、本論文で頻繁に用いられる幾何ブラウン運動を示す。

$$dx = axdt + bxdz \tag{2.8}$$

ただし、 a は期待変化率、 b はボラティリティ、 dz はウィナー過程の増分である。幾何ブラウン運動を離散時間で表現すると、次の(2.9)式になる。

$$\Delta x_t = ax_{t-1}\Delta t + bx_{t-1}\varepsilon_t \sqrt{\Delta t} \tag{2.9}$$

(2.9)式を用いれば幾何ブラウン運動のサンプルパスを計算でき、モンテカルロ計算を行うことができる。ここで、時刻 $T(=n \cdot \Delta t)$ における x_n 及び x_n^2 の期待値は次の(2.10)、(2.11)式の通りである。

$$\begin{aligned}
E[x_n] &= E[x_{n-1} + \Delta x_n] \\
&= E[x_{n-1} + ax_{n-1}\Delta t + bx_{n-1}\varepsilon_t \sqrt{\Delta t}] \\
&= x_{n-1}(1 + a\Delta t)
\end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
E[x_n^2] &= E[(x_{n-1} + \Delta x_n)^2] \\
&= E[x_{n-1}^2 + 2x_{n-1}\Delta x_n + (\Delta x_n)^2] \\
&= x_{n-1}^2(1 + (2a + b^2)\Delta t)
\end{aligned} \tag{2.11}$$

$$\begin{aligned} E[(\Delta x_n)^2] &= E[a^2 x_{n-1}^2 (\Delta t)^2 + 2ab x_{n-1}^2 \varepsilon_t (\Delta t)^{3/2} + b^2 x_{n-1}^2 (\varepsilon_t)^2 \Delta t] \\ &= b^2 x_{n-1}^2 \Delta t \end{aligned} \quad (2.12)$$

ただし、(2.11)式は、 Δt よりも早く 0 に収束するより高次の $(\Delta t)^{3/2}$ 、 $(\Delta t)^2$ を無視できるとした(2.12)式を用いている。(2.10)、(2.11)式より、 x_n の期待値、分散はそれぞれ次の(2.13)、(2.14)式となる。

$$\begin{aligned} E[x_n] &= E\left[\frac{x_n}{x_{n-1}} \frac{x_{n-1}}{x_{n-2}} \cdots \frac{x_1}{x_0}\right] x_0 = E\left[\frac{x_n}{x_{n-1}}\right] E\left[\frac{x_{n-1}}{x_{n-2}}\right] \cdots E\left[\frac{x_1}{x_0}\right] x_0 \\ &= x_0 (1 + a\Delta t)^n \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} x_0 e^{at} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} Var[x_n] &= E[x_n^2] - (E[x_n])^2 = E\left[\frac{x_n^2}{x_{n-1}^2} \frac{x_{n-1}^2}{x_{n-2}^2} \cdots \frac{x_1^2}{x_0^2}\right] x_0^2 - (x_0 (1 + a\Delta t)^n)^2 \\ &= x_0^2 (1 + (2a + b^2)\Delta t)^n - x_0^2 (1 + a\Delta t)^{2n} \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} x_0^2 e^{2at} (e^{b^2 t} - 1) \end{aligned} \quad (2.14)$$

x_n の予測値、信頼区間はそれぞれ(2.15)、(2.16)式となる。 k の値は(2.7)式と同様、 $k=1$ の時 68.3%信頼区間、 $k=1.96$ の時 95%信頼区間を示す。

$$\hat{x}_n = x_0 e^{at} \quad (2.15)$$

$$x_0 e^{at \pm bk\sqrt{t}} \quad (2.16)$$

次に、 x が(2.8)式の幾何ブラウン運動に従う場合に、 x を対数変換した関数 $F(x, t) = \ln x$ がどのような性質を持つか示す。伊藤の公式から、 F の全微分 dF は次の(2.17)式に従う。伊藤の公式の詳しい説明は本論文の p.41 を参照のこと。

$$\begin{aligned} dF &= \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} (dx)^2 \\ &= \left(\frac{\partial F}{\partial t} + ax \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{1}{2} b^2 x^2 \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right) dt + bx \frac{\partial F}{\partial x} dz \end{aligned} \quad (2.17)$$

ここで、 $F(x, t) = \ln x$ より、

$$\frac{\partial F}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{1}{x}, \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = -\frac{1}{x^2}$$

であるから、(2.17)式は次の(2.18)式となる。

$$dF = \left(a - \frac{1}{2} b^2\right) dt + b dz \quad (2.18)$$

(2.18)式から、関数 $F(x, t) = \ln x$ は期待変化 $(a - b^2/2)$ 、ボラティリティ b のブラウン運動に従うことが分かる。このように、幾何ブラウン運動は対数変換を行うことでブラウン運動へ変換される。

(4) 平均回帰過程

オルンシュタイン＝ウーレンベック過程

平均回帰過程の内、最も基礎的なオルンシュタイン＝ウーレンベック過程(Ornstein-Uhlenbeck

process、以下 OUP)を示す。

$$dx = \eta(\bar{x} - x)dt + \sigma dz \quad (2.19)$$

ただし、 η は回帰速度、 \bar{x} は x の回帰値、 σ はボラティリティ、 dz はウィナー過程の増分である。(2.19)は、(2.20)式に示した一次の自己回帰過程(Autoregressive process、以下 AR 過程)において、 $\Delta t \rightarrow 0$ と極値をとると得られる。

$$x_t - x_{t-1} = \bar{x}(1 - e^{-\eta}) + (e^{-\eta} - 1)x_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2.20)$$

ここで ε_t は、平均 0、標準偏差 σ_ε が次の(2.21)式となる正規分布である。

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{\sigma^2}{2\eta}(1 - e^{-2\eta}) \quad (2.21)$$

なお、一次の AR 過程は AR(1)と表記されることが多い。 $(x_t - \bar{x})$ の期待値、分散は、それぞれ次の(2.22)、(2.23)式となる。

$$E[x_t - \bar{x}] = (x_0 - \bar{x})e^{-\eta t} \quad (2.22)$$

$$\text{Var}[x_t - \bar{x}] = \frac{\sigma^2}{2\eta}(1 - e^{-2\eta t}) \quad (2.23)$$

(2.22)、(2.23)式はコルモゴロフの前向き方程式から導くことができる[36]。信頼区間は、次の(2.24)式となる。

$$\bar{x} + (x_0 - \bar{x})e^{-\eta t} \pm k \sqrt{\frac{\sigma^2}{2\eta}(1 - e^{-2\eta t})} \quad (2.24)$$

k の値は(2.7)、(2.16)式と同様に $k=1$ の時 68.3%信頼区間、 $k=1.96$ の時 95%信頼区間を示す。

ここで(2.20)式以降、各式内においてパラメータの単位を統一する必要がある。例えば、(2.20)式の AR(1)過程の時間ステップを一ヶ月とした場合、 η は(%/月)、 σ は月当たりボラティリティを用いる必要があり、時刻 t の単位は(月)となる。

対数変換後の変数が OUP に従うケース

理論上ゼロ以下にならない変数を対数変換し、対数変換された新たな変数が OUP に従うと仮定するケースがある。元の変数を y とし、変数 $x(\ln y)$ が(2.19)式の OUP 過程に従う場合、変数 y の期待値、信頼区間はそれぞれ次の(2.25)式、(2.26)式となる。

$$E[y] = E[e^x] = \exp \left[\bar{x} + (x_0 - \bar{x})e^{-\eta t} + \frac{\sigma^2}{4\eta}(1 - e^{-2\eta t}) \right] \quad (2.25)$$

$$\exp \left[\bar{x} + (x_0 - \bar{x})e^{-\eta t} \pm k \sqrt{\frac{\sigma^2}{2\eta}(1 - e^{-2\eta t})} \right] \quad (2.26)$$

このように、信頼区間は(2.24)式を指数とした値をとる。期待値は(2.22)式に(分散/2)を加えた(もしくは差し引いた)値を指数としたものとなる。

2.3 オプション評価に関する数値解法

2.3.1 数値解法に利用される近似式

(1) ブラウン運動の格子モデル近似

一変数格子モデル

本項では最初に、Cox and Miller[103]が開発し、Dixit[105]が整理した二項ツリーモデル(以下、Cox-Miller モデル)を示す。Cox-Miller モデルは図 2-1 に示したように、初期値 x_0 から始まり、離散時間 Δt の間に確率 p で上方($+\Delta x$)へ、確率 q で下方($-\Delta x$)へ移動するモデルである。ここで、確率 p 、 q は時刻に対し独立である。このような移動はランダム・ウォークと呼ばれる。

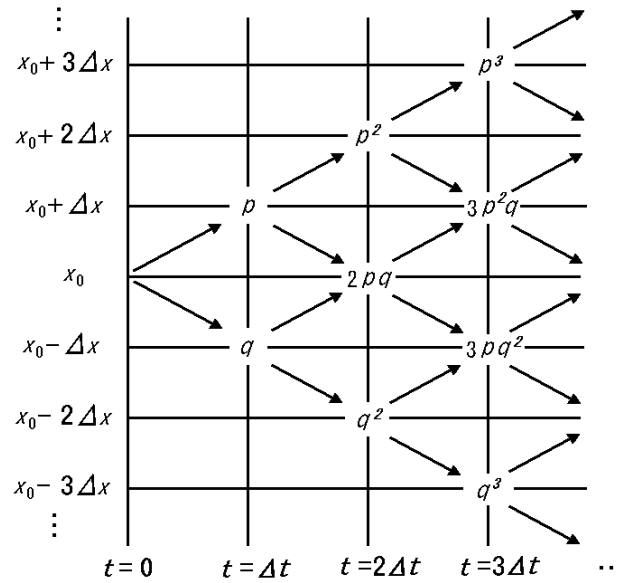


図 2-1 Cox-Miller モデル

図 2-1 から分かる通り、Cox-Miller モデルはステップ数 n が多くなるにつれて、考慮すべき縦方向の格子点も増加していく。一般にこのようなモデルはツリーモデルと呼ばれる。本論文では、ツリーモデルを応用し、 x の下限、上限、 t の終点といった境界条件を外生的に与え、長方形領域における全ての格子点における評価関数の値を算出する手法を格子モデルと呼ぶ。

ここで、ステップ幅 Δx 、確率 p 、 q を次の(2.27)式と設定する。

$$\Delta x = b\sqrt{\Delta t}, \quad p = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{a}{b} \sqrt{\Delta t} \right], \quad q = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{a}{b} \sqrt{\Delta t} \right] \quad (2.27)$$

(2.27)式が成り立つ時、1 ステップ経過後の x_1 の期待値と分散は(2.28)式となる。

$$\begin{aligned} E[x_1] &= p(x_0 + \Delta x) + q(x_0 - \Delta x) = x_0 + (p - q)\Delta x \\ \text{Var}[x_1] &= E[(x_1 - x_0)^2 - (E[x_1 - x_0])^2] = E[(\Delta x)^2 - (p - q)^2(\Delta x)^2] = 4pq(\Delta x)^2 \end{aligned} \quad (2.28)$$

各ステップにおけるランダム・ウォークは互いに独立のため、 n ステップ(時間 $t = n \cdot \Delta t$)経過後の平均は $x_0 + n(p - q)\Delta x$ 、分散は $4npq(\Delta x)^2$ となる。従って、 n ステップ経過後の x_n の期待値と分散は次の(2.29)式となる。

$$\begin{aligned}
E[x_n] &= x_0 + n(p-q)\Delta x = x_0 + \frac{t}{\Delta t} \left(\frac{1}{2} \left(1 + \frac{a}{b} \sqrt{\Delta t} \right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{b} \sqrt{\Delta t} \right) \right) b \sqrt{\Delta t} = x_0 + at \\
\text{Var}[x_n] &= 4npq\Delta x = 4 \frac{t}{\Delta t} \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{a}{b} \sqrt{\Delta t} \right) \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{b} \sqrt{\Delta t} \right) b \sqrt{\Delta t} \\
&= \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \Delta t \right) b^2 t \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} b^2 t
\end{aligned} \tag{2.29}$$

$\Delta t \rightarrow 0$ と極値をとった(2.29)式は(2.5)式と等しくなる。従って、移動幅 Δx 、確率 p 、 q が(2.27)式に従い、時間刻み Δt が十分小さい時、Cox-Miller モデルは(2.2)式に示したブラウン運動を近似していることが分かる。

数値計算を行うためには、離散近似の影響を十分小さくするため Δt としてある程度小さな値を設定する必要があるが、(2.27)式から分かる通り Δt が小さければ小さいほどプログラムソース上で宣言すべき変数の数と、同時に使用するメモリ領域が増加する。しかし、2015 年時点で市販（量販）されている汎用のハードウェアであっても約 26 万の float 変数を宣言できる³⁶。従って、宣言する変数の数の上限制約によって Cox-Miller モデルの解の精度が低下することは実計算上生じない。

二変数格子モデル

これまで、一変数格子モデルについて議論してきた。しかし、この格子モデルを拡張することで、二変数のブラウン運動を近似する格子モデルを作成することができる。ここで、二変数 x_1 、 x_2 が(2.30)式に示したブラウン運動に従い、時刻 t において $(x_{1,t}, x_{2,t})$ であるとする。

$$\begin{aligned}
dx_1 &= a_1 dt + b_1 dz_1 \\
dx_2 &= a_2 dt + b_2 dz_2
\end{aligned} \tag{2.30}$$

ここで、 ρ を x_1 と x_2 の相関係数とすると、 $E[(dz_1)(dz_2)] = \rho \cdot dt$ が成り立つ。時刻 $t + \Delta t$ における座標 $(x_{1,t+1}, x_{2,t+1})$ が、確率 p_1 で $(x_{1,t} + \Delta x_1, x_{2,t} + \Delta x_2)$ 、確率 p_2 で $(x_{1,t} + \Delta x_1, x_{2,t} - \Delta x_2)$ 、確率 p_3 で $(x_{1,t} - \Delta x_1, x_{2,t} + \Delta x_2)$ 、確率 p_4 で $(x_{1,t} - \Delta x_1, x_{2,t} - \Delta x_2)$ となる等幅二変数格子モデルを想定する。この格子モデルが(2.30)式を近似するためには、次の(2.31)式が満たされる必要がある。

$$\begin{aligned}
p_1 + p_2 + p_3 + p_4 &= 1 \\
E[x_{1,t+1} - x_{1,t} | (x_{1,t}, x_{2,t})] &= (p_1 + p_2)\Delta x_1 + (p_3 + p_4)(-\Delta x_1) = a_1 \Delta t \\
E[x_{2,t+1} - x_{2,t} | (x_{1,t}, x_{2,t})] &= (p_1 + p_3)\Delta x_2 + (p_2 + p_4)(-\Delta x_2) = a_2 \Delta t \\
\text{Var}[x_{1,t+1} - E[x_{1,t+1}] | (x_{1,t}, x_{2,t})] &= (p_1 + p_2)(\Delta x_1)^2 + (p_3 + p_4)(-\Delta x_1)^2 + o(\Delta t) = b_1^2 \Delta t \\
\text{Var}[x_{2,t+1} - E[x_{2,t+1}] | (x_{1,t}, x_{2,t})] &= (p_1 + p_3)(\Delta x_2)^2 + (p_2 + p_4)(-\Delta x_2)^2 + o(\Delta t) = b_2^2 \Delta t \\
E[(x_{1,t+1} - E[x_{1,t+1}])(x_{2,t+1} - E[x_{2,t+1}]) | (x_{1,t}, x_{2,t})] &= (p_1 - p_2 - p_3 + p_4)\Delta x_1 \Delta x_2 + o(\Delta t) = \rho b_1 b_2 \Delta t
\end{aligned} \tag{2.31}$$

ここで、 $o(dt)$ は dt より次数が高く無視できる項である。(2.31)式から、移動幅 x_1 、 x_2 、確率 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 を次の通り求めることができる。

³⁶ さらに、動的な変数割り当て（例えば C 言語でのポインタ）を行えば、変数の数の上限を気にかける必要はなく、より微細な離散化を行うことができる。

$$\begin{aligned}
\Delta x_1 &= b_1 \sqrt{\Delta t} & \Delta x_2 &= b_2 \sqrt{\Delta t} \\
p_1 &= \frac{1}{4} \left[1 + \rho + \left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} \right] & p_2 &= \frac{1}{4} \left[1 - \rho + \left(\frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} \right] \\
p_3 &= \frac{1}{4} \left[1 - \rho - \left(\frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} \right] & p_4 &= \frac{1}{4} \left[1 + \rho - \left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} \right]
\end{aligned} \tag{2.32}$$

三変数格子モデル

二変数格子モデルは、さらに三変数格子モデルへ拡張できる。

$$\begin{aligned}
dx_1 &= a_1 dt + b_1 dz_1 \\
dx_2 &= a_2 dt + b_2 dz_2 \\
dx_3 &= a_3 dt + b_3 dz_3
\end{aligned} \tag{2.33}$$

ここで、 ρ_{ij} を x_i と x_j の相関係数とすると、 $E[(dz_i)(dz_j)] = \rho_{ij} \cdot dt$ ($i \neq j$) が成り立つ。このケースにおける移動幅、各確率は次の(2.34)式のように設定したらよい。各確率の移動方向は、各式内の a_i/b_i の +/- の通りである。

$$\begin{aligned}
p_1 &= \frac{1}{8} \left[1 + \rho_{12} + \rho_{23} + \rho_{31} + \left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} + \frac{a_3}{b_3} \right) \sqrt{\Delta t} \right] & p_2 &= \frac{1}{8} \left[1 + \rho_{12} - \rho_{23} - \rho_{31} + \left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} - \frac{a_3}{b_3} \right) \sqrt{\Delta t} \right] \\
p_3 &= \frac{1}{8} \left[1 - \rho_{12} - \rho_{23} + \rho_{31} + \left(\frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2}{b_2} + \frac{a_3}{b_3} \right) \sqrt{\Delta t} \right] & p_4 &= \frac{1}{8} \left[1 - \rho_{12} + \rho_{23} - \rho_{31} - \left(\frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2}{b_2} - \frac{a_3}{b_3} \right) \sqrt{\Delta t} \right] \\
p_5 &= \frac{1}{8} \left[1 - \rho_{12} + \rho_{23} - \rho_{31} + \left(\frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2}{b_2} - \frac{a_3}{b_3} \right) \sqrt{\Delta t} \right] & p_6 &= \frac{1}{8} \left[1 - \rho_{12} - \rho_{23} + \rho_{31} - \left(\frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2}{b_2} + \frac{a_3}{b_3} \right) \sqrt{\Delta t} \right] \\
p_7 &= \frac{1}{8} \left[1 + \rho_{12} - \rho_{23} - \rho_{31} - \left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} - \frac{a_3}{b_3} \right) \sqrt{\Delta t} \right] & p_8 &= \frac{1}{8} \left[1 + \rho_{12} + \rho_{23} + \rho_{31} - \left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} + \frac{a_3}{b_3} \right) \sqrt{\Delta t} \right]
\end{aligned} \tag{2.34}$$

(2) 幾何ブラウン運動の格子モデル近似

一変数格子モデル

幾何ブラウン運動に従う一変数をツリーモデルへ近似する方法は、Cox et al.[106]が先駆けとなり、様々な拡張が行われてきた。Boyle[107]は三項ツリーモデルを示し、Rubinstein[108]は二変数を扱ったツリーモデルを作成した。幾何ブラウン運動の格子モデルは、森平ら[104]において詳しくまとめられており、また本質的には対数変換を行うことでブラウン運動として扱うことが可能であるものの((2.18)式を参照)、本項では幾何ブラウン運動の一変数格子モデルを示し、次に二変数格子モデルを示す。

x が幾何ブラウン運動に従うとする((2.8)式)。Cox et al.[106]は、確率 p で u 倍、確率 $(1-p)$ で d 倍されるツリーモデルを提案した。各係数は、次の通りである。

$$u = e^{b\sqrt{\Delta t}} \quad d = e^{-b\sqrt{\Delta t}} \quad p = \frac{e^{a\Delta t} - e^{-b\sqrt{\Delta t}}}{e^{b\sqrt{\Delta t}} - e^{-b\sqrt{\Delta t}}} \tag{2.35}$$

以降、(2.35)式に示したツリーモデルを CRR モデルと呼ぶ。CRR モデルが 2 ステップおきに初期値 x_0 において再結合を繰り返し、実際の数値計算が容易になるためには、 $u=1/d$ となる必要があり、(2.35)式はこの条件を満たしている。確率 p は、指数部分をテイラー展開し、高次の項を無視した次の(2.36)式を

用いることもある。

$$p \approx \frac{1+a\Delta t-d}{u-d} \approx \frac{1}{2} \left[1 + \left(a - \frac{b^2}{2} \right) \frac{\sqrt{\Delta t}}{b} \right] \quad (2.36)$$

p 、 u 、 d の選択は、(2.35)式以外にも無数に考えることができる。例えば、次の(2.37)式のような設定も考えられる[104]。

$$u = e^{(a-\frac{1}{2}b^2)\Delta t + b\sqrt{\Delta t}} \quad d = e^{(a-\frac{1}{2}b^2)\Delta t - b\sqrt{\Delta t}} \quad p = \frac{1}{2} \quad (2.37)$$

(2.35)式はドリフト効果を確率 p に押し込んだのに対し、(2.37)式は上昇下降の確率を $1/2$ にした代わりにドリフト効果を移動幅 u 、 d に押し込んで表現している。

二変数格子モデル

次に二変数格子モデルを考える。変数は、次の幾何ブラウン運動に従うとする。

$$\begin{aligned} dx_1 &= a_1 x_1 dt + b_1 x_1 dz_1 \\ dx_2 &= a_2 x_2 dt + b_2 x_2 dz_2 \end{aligned} \quad (2.38)$$

ここで、 ρ を x_1 と x_2 の相関係数とすると、 $E[(dz_1)(dz_2)] = \rho \cdot dt$ が成り立つ。 (x_1, x_2) は、両変数が共に上昇するとき (u_{x_1}, A_{x_2}) へ、 x_1 のみ上昇するとき (u_{x_1}, B_{x_2}) へ、 x_2 のみ上昇するとき (d_{x_1}, C_{x_2}) へ、共に下降するとき (d_{x_1}, D_{x_2}) へ推移するケースを考える。また、4 方向全ての確率を $1/4$ とする。この時、 u, d, A, B, C, D を次の(2.39)式と設定すればよい。

$$\begin{aligned} u &= e^{(a_1 - \frac{1}{2}b_1^2)\Delta t + b_1\sqrt{\Delta t}} & d &= e^{(a_1 - \frac{1}{2}b_1^2)\Delta t - b_1\sqrt{\Delta t}} \\ A &= e^{(a_2 - \frac{1}{2}b_2^2)\Delta t + b_2\sqrt{\Delta t}(\rho + \sqrt{1-\rho^2})} & B &= e^{(a_2 - \frac{1}{2}b_2^2)\Delta t + b_2\sqrt{\Delta t}(\rho - \sqrt{1-\rho^2})} \\ C &= e^{(a_2 - \frac{1}{2}b_2^2)\Delta t - b_2\sqrt{\Delta t}(\rho + \sqrt{1-\rho^2})} & D &= e^{(a_2 - \frac{1}{2}b_2^2)\Delta t - b_2\sqrt{\Delta t}(\rho - \sqrt{1-\rho^2})} \end{aligned} \quad (2.39)$$

この二変数モデルは、(2.37)式に示したモデルの拡張版と言える。

(3) 平均回帰過程の格子モデル近似

確率過程として平均回帰過程を仮定した場合、最も単純な問題設定であれば、級数形式の準解析解を得ることができる(Dixit and Pindyck[36]の第 5.5 節を参照)。しかし一般に、このようなことは稀で、実用的側面から考えればモンテカルロ・シミュレーション、格子モデルといった数値解法に依存せざるを得ない。

近年米国を中心に、確率変数に平均回帰過程を仮定し、電気事業分野にリアル・オプション法を適用した研究が行われるようになった。Deng and Oren[39]は、火力設備の起動コスト、起動時間、出力別熱効率を明示的に考慮し、火力発電の設備価値評価を行っている。彼らは、電力価格と燃料価格の差によって利益を得るというスパーク・スプレッド・オプション(spark spread option)の積算期待値を火力発電の設備価値とみなし、格子モデルを用いて数値計算を行っている[37]。

一変数格子モデル

本項では、最初に一変数平均回帰過程格子モデルを示す。平均回帰過程の内、最も一般的な OUP 過程を考える((2.19)式)。ここで、移動幅 Δx 、上昇確率 p_t 、下降確率 q_t を

$$\Delta x = b\sqrt{\Delta t} \quad p_t = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\eta}{b} (\bar{x} - x_{t-1}) \sqrt{\Delta t} \right] \quad q_t = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\eta}{b} (\bar{x} - x_{t-1}) \sqrt{\Delta t} \right] \quad (2.40)$$

と設定すると、1 ステップ経過後の期待変化、分散は次の(2.41)式となる。

$$\begin{aligned} E[x_{t+1} - x_t | x_t] &= p_{t+1}(\Delta x) + q_{t+1}(-\Delta x) = \eta(\bar{x} - x_t)\Delta t \\ \text{Var}[x_{t+1} - x_t | x_t] &= p_{t+1}(\Delta x)^2 + q_{t+1}(-\Delta x)^2 = b^2 \Delta t \end{aligned} \quad (2.41)$$

(2.41)式から、(2.40)式に示した格子モデルは OUP 過程を近似していることが分かる。

二変数格子モデル

次に、Deng and Oren[39]が示した二変数平均回帰過程格子モデルを示す。想定する二変数は次の(2.42)式に従い、時刻 t において $(x_{1,t}, x_{2,t})$ であるとする。

$$\begin{aligned} dx_1 &= \eta_1(\bar{x}_1 - x_1)dt + b_1 dz_1 \\ dx_2 &= \eta_2(\bar{x}_2 - x_2)dt + b_2 dz_2 \end{aligned} \quad (2.42)$$

これまでと同様、 ρ を x_1 と x_2 の相関係数とすると、 $E[(dz_1)(dz_2)] = \rho \cdot dt$ が成り立つ。時刻 $t+1$ における座標 $(x_{1,t+1}, x_{2,t+1})$ が、確率 $p_{1,t}$ で $(x_{1,t} + \Delta x_1, x_{2,t} + \Delta x_2)$ 、確率 $p_{2,t}$ で $(x_{1,t} + \Delta x_1, x_{2,t} - \Delta x_2)$ 、確率 $p_{3,t}$ で $(x_{1,t} - \Delta x_1, x_{2,t} + \Delta x_2)$ 、確率 $p_{4,t}$ で $(x_{1,t} - \Delta x_1, x_{2,t} - \Delta x_2)$ となる等幅二変数格子モデルを想定する。この時、各移動幅、各確率を Deng and Oren[39]は次のように設定した。

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= b_1 \sqrt{\Delta t} \quad \Delta x_2 = b_2 \sqrt{\Delta t} \\ p_{1,t} &= \frac{1}{4} \left[1 + \rho + \left(\frac{\eta_1(\bar{x}_1 - x_{1,t-1})}{b_1} + \frac{\eta_2(\bar{x}_2 - x_{2,t-1})}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} + \frac{\eta_1(\bar{x}_1 - x_{1,t-1})\eta_2(\bar{x}_2 - x_{2,t-1})}{b_1 b_2} \Delta t \right] \\ p_{2,t} &= \frac{1}{4} \left[1 - \rho + \left(\frac{\eta_1(\bar{x}_1 - x_{1,t-1})}{b_1} - \frac{\eta_2(\bar{x}_2 - x_{2,t-1})}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} - \frac{\eta_1(\bar{x}_1 - x_{1,t-1})\eta_2(\bar{x}_2 - x_{2,t-1})}{b_1 b_2} \Delta t \right] \\ p_{3,t} &= \frac{1}{4} \left[1 - \rho - \left(\frac{\eta_1(\bar{x}_1 - x_{1,t-1})}{b_1} - \frac{\eta_2(\bar{x}_2 - x_{2,t-1})}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} - \frac{\eta_1(\bar{x}_1 - x_{1,t-1})\eta_2(\bar{x}_2 - x_{2,t-1})}{b_1 b_2} \Delta t \right] \\ p_{4,t} &= \frac{1}{4} \left[1 + \rho - \left(\frac{\eta_1(\bar{x}_1 - x_{1,t-1})}{b_1} + \frac{\eta_2(\bar{x}_2 - x_{2,t-1})}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} + \frac{\eta_1(\bar{x}_1 - x_{1,t-1})\eta_2(\bar{x}_2 - x_{2,t-1})}{b_1 b_2} \Delta t \right] \end{aligned} \quad (2.43)$$

(2.32)、(2.34)、(2.40)式とは異なり、(2.43)式は $(\Delta t)^{1/2}$ の項のみならず Δt の項も含まれることに注意する必要がある。

(4) 有限差分法

有限差分法は、古くから注目された数値計算手法であり、扱った文献も多く、特に、森平ら[104]はこれらを包括的にまとめている。その一方で、森平ら[104]は金融オプションを扱っており、リアル・オプション特有の問題設定や境界条件に言及していない。後に数値解法の比較を行い、有限差分法の有用性

と限界について言及を行うため、本項では有限差分法の概略を示す。

陽解法

有限差分法は、偏微分項を差分で近似し、元の偏微分方程式を数値的に解く手法である。有限差分法は大きく陽解法と陰解法に分けられ、陽解法は、陰解法に比べ計算が容易であるという特徴を持つ。ここで、注目すべき偏微分方程式が(2.44)式で与えられたとする。

$$\frac{1}{2}b^2F_{xx}(x,t)+aF_x(x,t)+F_t(x,t)-rF(x,t)+x=0 \quad (2.44)$$

(2.44)式は、単位時間当たりの利益 x が(2.2)式に示したブラウン運動に従う場合の設備価値 $F(x,t)$ に関する偏微分方程式である(詳しくは(2.79)式を参照)。金融工学分野における陽解法は、時刻 t に関する偏微分の差分を後退差分³⁷、 x に関する一階の偏微分の差分を中心差分、 x に関する二階の偏微分の差分を中心差分的手法でそれぞれ近似する((2.45)式)。

$$\begin{aligned} F_t &\approx \frac{F_{i,j} - F_{i,j-1}}{\Delta t} & F_x &\approx \frac{F_{i+1,j} - F_{i-1,j}}{2\Delta x} \\ F_{xx} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \approx \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{F_{i+1,j} - F_{i,j}}{\Delta x} - \frac{F_{i,j} - F_{i-1,j}}{\Delta x} \right) = \frac{F_{i+1,j} - 2F_{i,j} + F_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \end{aligned} \quad (2.45)$$

ただし $F(x,t)=F(i\Delta x, j\Delta t)=F_{i,j}$ であり、 Δx は単位時間当たりの利益 x のステップ幅、 Δt は時間のステップ幅である。(2.45)式を(2.44)式に代入し整理すると、次の(2.46)式が得られる。

$$\begin{aligned} F_{i,j-1} &= cF_{i+1,j} + dF_{i,j} + gF_{i-1,j} + i\Delta x\Delta t \\ c &= \frac{b^2\Delta t}{2(\Delta x)^2} + \frac{a\Delta t}{2\Delta x} & d &= 1 - r\Delta t - \frac{b^2\Delta t}{(\Delta x)^2} & g &= \frac{b^2\Delta t}{2(\Delta x)^2} - \frac{a\Delta t}{2\Delta x} \end{aligned} \quad (2.46)$$

(2.46)式を利用し、時刻 t に関して後ろ向きに逐次 $F_{i,j}$ を求めていけば、全ての $F_{i,j}$ を求めることができる。ただし、陽解法は Δx に対し Δt を大きく設定すると安定性が悪化するため Δx 、 Δt の設定に注意が必要である。

陰解法

次に、有限差分法の陰解法を紹介する。注目すべき方程式が(2.44)式で与えられたとする。金融工学分野における陰解法では、時間差分に関して次の前進差分近似を用いる。

$$F_t \approx \frac{F_{i,j+1} - F_{i,j}}{\Delta t} \quad (2.47)$$

(2.47)式及び x に関する差分((2.45)式)を(2.44)式に代入すると、次の(2.48)式が得られる。

³⁷ 金融工学分野では時刻 t に関して後ろ向き（バックワード）に解くため、時刻 t に関する偏微分の差分として（物理分野や工学分野などで用いられる「前進差分」ではなく）「後退差分」を用いる場合を陽解法と呼んでいる。「後退差分」を用いることで、時刻 t に関し後ろ向きに直接 $F_{i,j-1}$ を解くことができる。同じく金融工学分野では時刻 t に関する偏微分の差分として「前進差分」を用いる場合を陰解法と呼んでいる。

$$F_{i,j+1} = cF_{i+1,j} + dF_{i,j} + gF_{i-1,j} - i\Delta x\Delta t$$

$$c = -\frac{b^2\Delta t}{2(\Delta x)^2} - \frac{a\Delta t}{2\Delta x} \quad d = 1 + r\Delta t + \frac{b^2\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad g = -\frac{b^2\Delta t}{2(\Delta x)^2} + \frac{a\Delta t}{2\Delta x} \quad (2.48)$$

陽解法((2.46)式)とは異なり、時刻に関し後ろ向きに直接(2.48)式を解くことはできない。

次に、 x に関して $(n-1)$ 分割するケースを考える。 $F_{0,j}$, $F_{n,j}$ が既知であれば、(2.48)式に $i=1,2,3,\dots,n-2,n-1$ を逐次代入していくことにより、次の行列を得る。

$$\begin{bmatrix} F_{1,j+1} + \Delta x\Delta t - gF_{0,j} \\ F_{2,j+1} + 2\Delta x\Delta t \\ F_{3,j+1} + 3\Delta x\Delta t \\ \vdots \\ \vdots \\ F_{n-2,j+1} + (n-2)\Delta x\Delta t \\ F_{n-1,j+1} + (n-1)\Delta x\Delta t - cF_{n,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & c & & & \\ g & d & c & & 0 \\ & g & d & c & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & & & & g & d & c \\ & & & & & g & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{1,j} \\ F_{2,j} \\ F_{3,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ F_{n-2,j} \\ F_{n-1,j} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

(2.49)式右辺の $(n-1)$ 正方行列は対角疎行列となっている。最初に、2行1列の g を消去し、次に3行2列の g を消去していくという作業を繰り返し、順次 $(k+1)$ 行 k 列を消去することで、 $(n-1)$ 正方行列を整理することを考える。この作業後の k 行 k 列を dk 、(2.49)式左辺の第 k 行を $F'_{k,j+1}$ とすると、これらは次の(2.50)式となる。

$$\begin{aligned} d_1 &= d & F'_{1,j+1} &= F_{1,j+1} + \Delta x\Delta t - gF_{0,j} \\ d_2 &= d_1 - \frac{g}{d_1}c & F'_{2,j+1} &= F_{2,j+1} + 2\Delta x\Delta t - \frac{g}{d_1}F'_{1,j+1} \\ d_3 &= d_2 - \frac{g}{d_2}c & F'_{3,j+1} &= F_{3,j+1} + 3\Delta x\Delta t - \frac{g}{d_2}F'_{2,j+1} \\ &\vdots & &\vdots \\ d_k &= d_{k-1} - \frac{g}{d_{k-1}}c & F'_{k,j+1} &= F_{k,j+1} + k\Delta x\Delta t - \frac{g}{d_{k-1}}F'_{k-1,j+1} \\ &\vdots & &\vdots \\ d_{n-2} &= d_{n-3} - \frac{g}{d_{n-3}}c & F'_{n-2,j+1} &= F_{n-2,j+1} + (n-2)\Delta x\Delta t - \frac{g}{d_{n-3}}F'_{n-3,j+1} \\ d_{n-1} &= d_{n-2} - \frac{g}{d_{n-2}}c & F'_{n-1,j+1} &= F_{n-1,j+1} + (n-1)\Delta x\Delta t - cF_{n,j} - \frac{g}{d_{n-2}}F'_{n-2,j+1} \end{aligned} \quad (2.50)$$

以上により、求めたい $F_{k,j}$ を(2.51)式により計算できる。

$$\begin{aligned}
F_{n-1,j} &= \frac{1}{d_{n-1}} F'_{n-1,j+1} \\
F_{n-2,j} &= \frac{1}{d_{n-2}} (F'_{n-2,j+1} - cF_{n-1,j}) \\
&\vdots \\
F_{k,j} &= \frac{1}{d_k} (F'_{k,j+1} - cF_{k+1,j}) \\
&\vdots \\
F_{2,j} &= \frac{1}{d_2} (F'_{2,j+1} - cF_{3,j}) \\
F_{1,j} &= \frac{1}{d_1} (F'_{1,j+1} - cF_{2,j})
\end{aligned} \tag{2.51}$$

2.3.2 数値解法の比較

(1) 数値解法の選択基準

本項では、数値解法の簡単な定性的比較を行う。一般に、適切な数値解法を選択する基準として、一貫性、安定性、効率性がある。森平ら[104]によるこれら基準の解釈もあるものの、本論文ではこれらの基準を次のように定義する。

一貫性 … 「真の解」とされる値に近い数値解を算出することが可能かどうかという指標。一貫性に優れているとは、計算時間を十分かけた時の限界精度が高いことを指す。

安定性 … 分割数、ステップ幅、インプットデータなどの変化に対し、数値解が頑健であるかどうかという指標。逆に、数値解が発散・振動するケースが散見される場合、安定性が低いと判断する。

効率性 … 単純なアルゴリズムを用いて、短い計算時間の中である実用上十分な精度をもつ数値解を導くことが可能かどうかという指標。効率性は、時間計算量（解を得られるまでの時間に影響）、空間計算量（使用するメモリ領域）、プログラムソースファイルの記述しやすさという 3 つの要素からなるとする。分析者の作業効率という実用面から見た指標であり、分析者が慣れ親しんでいる分析ほど効率性が高まることに注意が必要である。

(2) 有限差分法

有限差分法の陽解法は一定の条件下において安定性が低いものの、効率性、特に時間計算量、空間計算量という点で優れている。Geske and Shastri[109]は、幾何ブラウン運動に従う原資産を想定し、各数値解法を比較した結果、対数変換後に有限差分・陽解法を用いた手法が最も効率的である例を示している。有限差分法は、分割数が少なくステップ幅が大きくても比較的精度の高い数値解を算定する点で優れる一方、格子モデルと比較し相対的に一貫性が低く（(2.44)式のような評価関数を算出できない）複雑な問題には適用できないという課題を持つ。

(3) 格子モデル

格子モデルは安定性が高く、一般に有限差分法よりも一致性に優れている。また、自由境界問題に有限差分法を適用すると、自由境界付近で安定性が低下するが、格子モデルではこのような問題は起こらない。森平ら[104]は、一般に二変数までは格子モデルが適用し易く、三変数以上はモンテカルロ・シミュレーションが適用し易いとしているが、ただし Oda et al.[41]に示されたように自由境界問題であれば三変数までは格子モデルが適用可能であり、実用的でもある可能性がある。

二変数自由境界問題を格子モデルで解く場合、解の精度を上昇させるために時間ステップ Δt や移動幅 Δx を比較的細かくする必要があり一定の計算量を要するが、それでもモンテカルロ・シミュレーションより効率性は高い。三変数自由境界問題を格子モデルで解く場合、宣言できる変数の数の上限が制約となり一致性は低い、モンテカルロ・シミュレーションよりも効率性が高い(Oda et al.[41])。

(4) モンテカルロ・シミュレーション

一般に、アメリカン・タイプのオプション評価にモンテカルロ・シミュレーションは適用しにくいとされてきたが、Barraquand and Martineau[110]や Tilley[111]によって、モンテカルロ・シミュレーションの適用が行われてきた。Barraquand and Martineau[110]は、多資産アメリカン・オプションの価値を、多数のパスを一次元に写像しセルごとの評価関数をバックワードに求める手法(Stratified State Aggregation 法、以下 SSA 法)を示している。Tilley[111]は、セルごとに一度求めたオプションの行使・非行使を前後の行使・非行使結果から再度検討し、新たな行使・非行使を決定し、バックワードに評価関数を求める手法を示した。このように多資産のアメリカン・オプションであってもモンテカルロ・シミュレーションで求めることが可能である。むしろ、Barraquand and Martineau[110]が指摘した通り、4 資産以上であれば SSA 法が最も適切な(事実上、唯一の)解法となる。

モンテカルロ・シミュレーションは一致性が高いものの一般に多くの時間計算量を要するなど効率性が低い³⁸、他の手法を適用可能な場合はモンテカルロ・シミュレーションの効率性について注意することが望ましい。

(5) まとめ

本論文では、全体を通して自由境界問題を扱っているため、効率性を重視し格子モデルを用いる。問題を解く前段階において、自由境界の位置を把握できないため、幅広い格子点において、事業価値 V や投資機会価値 F を算出する必要がある。一般に、一変数二項ツリーモデルは、ある 1 つの初期値を与え、 n ステップ経過後にツリー幅が $(n+1)$ になるモデルであるが、このようなツリーモデルでは、自由境界を捉えにくい。本論文では、一変数問題の場合、時刻方向分割数を m_1 、確率過程に従う変数の分割数を m_2 とすると、 $(m_1+1) \times (m_2+1)$ 個の格子全体に対し V や F を算出する手法を用いる。当然、この手法であれば境界条件を外生的に与える必要がある。二変数問題であれば、直方体領域全体の格子点を計算する格子モデルとなる。

このような格子モデルを用いる場合、CRR モデルは境界条件を設定しにくい。また、CRR モデルよりも、幾何ブラウン運動に従う変数を対数変換した後に Cox-Miller モデルを用いる方が効率性が高い

³⁸ ただし、対称変量法や層化抽出法などの分散減少法により、単純なモンテカルロ・シミュレーションに比べ効率性を上昇させることは可能である。

([103][110])。ツリーモデルの中でも CRR モデルはこれまで頻繁に用いられてきた手法であるが、本論文では境界条件設定の簡便さ、効率性を理由に Cox-Miller モデルを用いる。

(6) 補足：伊藤の公式

Dixit and Pindyck[36]の第 3.4 節を基に、伊藤の公式について説明を行う。まず、企業の状態変数 x が次の伊藤過程に従う場合を考える ((2.1)式再掲)。

$$dx = a(x, t)dt + b(x, t)dz \quad (2.1)\text{再掲}$$

次に x と時刻 t に依存した企業価値 $F(x, t)$ を考える。ここで、 $F(x, t)$ を x で表現したり、 $F(x, t)$ を微分、積分したり、あるいは $F(x, t)$ が従う方程式を導出する必要に迫られる。伊藤の公式を用いれば、このようなことが可能となる。

伊藤の公式は、テイラー展開の一種と見なして考えると理解しやすい。微分値に関する通常の法則では一階の微分として定義される。この法則に従えば、 F の全微分値は

$$dF = \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial x} dx \quad (2.52)$$

となる。(2.52)式の x についてより高次の項を含めると、次の(2.53)式となる。

$$dF = \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} (dx)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F}{\partial x^3} (dx)^3 + \dots \quad (2.53)$$

ここで $(dx)^2$ に注目する。 $(dx)^2$ は(2.1)式より、次の(2.54)式となる。

$$(dx)^2 = a^2(x, t)(dt)^2 + 2a(x, t)b(x, t)(dt)^{3/2} + b^2(x, t)dt \quad (2.54)$$

$a(dt)$ は dt より次数が高く無視できる項を意味しており、 $b_2(x, t)dt$ 以外の項は全て $b_2(x, t)dt$ よりも早く 0 に収束する。従って、次の(2.55)式が成り立つ。

$$(dx)^2 = b^2(x, t)dt \quad (2.55)$$

(2.55)式で注意すべきことは、 $(dx)^2$ の「期待値」を左辺にとっているのではなく、ランダム・プロセス dx の二乗 $(dx)^2$ そのものが決定論プロセスになっている点である。結局、 t に関する二階以上の項、 x に関する三階以上の項は (dt) よりも早く 0 に収束するため、 F の全微分は次の(2.56)式となる。

$$dF = \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} (dx)^2 \quad (2.56)$$

(2.56)式に(2.1)、(2.55)式を代入し整理すると、 dF は次の(2.57)式となる。

$$dF = \left[\frac{\partial F}{\partial t} + a(x, t) \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{1}{2} b^2(x, t) \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \right] dt + b(x, t) \frac{\partial F}{\partial x} dz \quad (2.57)$$

(2.56)、(2.57)式は伊藤の公式、もしくは伊藤のレンマと呼ばれる。

2.4 定式化の手法

2.4.1 条件付請求権分析法

(1) 動的計画法との定性的比較

条件付請求権分析法は、分析対象の事業リスクが市場にて取引されている資産(もしくは資産のポートフォリオ)で、完全に複製可能であるとき適用可能である。もしくは、そのような条件を前提として定式化がなされる。このように、条件付請求権分析法は十分厚みを持った市場が存在することを前提としている。条件付請求権分析法は、分析対象としている事業・投資機会と市場の資産を組み合わせることにより「無リスクポートフォリオ」を作成し、この作成された無リスクポートフォリオの利益率が、リスクフリーレートに等しいとする考えに基づく。

条件付請求権分析法では、常に無裁定条件が成り立つことを前提にしている。条件付請求権分析法を用いる場合、必要なデータは、リスクフリーレートとボラティリティ、コンビニエンス・イールドである。投資主体者の「リスク選好」や、時間に対する「割引選好」は結果を左右しない。市場によって外生的にこれらが規定されるという前提である。

リスクフリーレートとして、一般的慣例では投資対象国の10年物国債利率を用いる。リアル・オプションの分野において、コンビニエンス・イールドは、理論的概念や具体的データの設定方法といった意味で複雑であり、特段の注意が必要となるため、次に詳しく議論する。

これに対し、動的計画法は一連の意思決定を二つの要素に分割して考える。1つは現在の意思決定であり、もう1つは現在の意思決定から続く一連の意思決定を集約させた評価関数である。そして、将来最適な意思決定が行われることを前提に、現在の最適な意思決定を行う。条件付請求権分析法では、分析対象のリスクが市場の資産によって複製可能でなくてはならなかったが、動的計画法ではこのような必要はない。ただし、投資主体者のリスク選好や、時間に対する割引選好を内包した「割引率」を設定する必要がある。動的計画法を適用する上で必要なデータは、この「割引率」と不確実性項目の期待変化率、ボラティリティである。

(2) コンビニエンス・イールド

コンビニエンス・イールドは、条件付請求権分析法を用いる際に重要な役割を果たす。コンビニエンス・イールドは一般に、商品を保有することによる「粗利益(売上と保有コストの差)」を、商品価格で割った値と定義される[112]。

コンビニエンス・イールドの源泉は対象によって異なる。対象が株式であれば株式の配当がコンビニエンス・イールドに相当する。このように、金融商品であればコンビニエンス・イールドの源泉が明確である。対象が樹木であれば切り出される木材から得られる収益がコンビニエンス・イールドに相当する[36]。

次に、このように直接的な配当や収益は得られないが、貯蔵可能な商品(例えば石油や銅)のコンビニエンス・イールドを考える。これらの商品を保有することにより、事業者は商品が必要となった時、スポット市場から調達しなくても、在庫を取り崩し即時に商品を使用できる。商品を原材料としている事業者は、商品を保有することで、常に任意の生産を行うことができ、生産と販売の調整をしやすくなるという便益を得る。スポット価格が上昇した場合、保有している商品をスポット市場で売却する機会を持っている。貯蔵可能な商品に対するコンビニエンス・イールドは、これらの便益に起因しており、スポ

ット価格、先物価格、保管費用、リスクフリーレートを用いてコンビニエンス・イールドの値を算出できる。一般に、コンビニエンス・イールドは、価格水準や在庫水準の将来の期待によって変化することが明らかになっており、Schwartz[113]はコンビニエンス・イールドが平均回帰過程に従うと仮定し分析を行っている。

保管中の劣化速度が速い商品や、貯蔵不可能な商品の場合、直接的にコンビニエンス・イールドを観測できない。電力は、実質的に貯蔵困難なため、スポット価格と先物価格で裁定機会がなく、また保有コストを算出できない。定義上、保有コストデータがなければコンビニエンス・イールドを算出できない。コンビニエンス・イールドに関してこれまで述べてきた解釈の他に、Dixit and Pindyck[36]は、コンビニエンス・イールドを競合他社の参入や、競合他社のキャパシティー拡大を反映するものと解釈できる可能性を示した。もう一つの可能性は、法人税の支払いを節約できることなどの税制上の便益を反映していることである。

電力のコンビニエンス・イールドを考えた場合、運転可能な発電設備と燃料によって(技術的制約がなければ)任意に電力を生み出すことができるため、電力のコンビニエンス・イールドを、発電設備容量や燃料のコンビニエンス・イールドとみなせる可能性がある。水力発電の場合は、貯水量が電力のコンビニエンス・イールドに該当する可能性もある。

このように、金融商品であればコンビニエンス・イールドの源泉が明確であるが、対象が貯蔵できない実物資産であれば、コンビニエンス・イールドの源泉が曖昧になる。コンビニエンス・イールド値の設定が困難であることは、条件付請求権分析法ではなく動的計画法を用いるべき根拠と成り得る。

(3) CAPM の導入

企業の利益フローが、企業の産出物価格 x に依存している場合を考える。さらに、 x が幾何ブラウン運動に従うとする。

$$dx = axdt + bxdz \quad (2.58)$$

ただし a は期待変化率、 b はボラティリティ、 dz はウィナー過程の増分である。ここで、企業の産出物が金融市場で取引されているとする。他の資産と同様、この産出物も十分高いリターンが予想される時のみ、投資家に保有される。リターンの一部は、産出物価格の期待上昇率 a からなる。リターンの他の部分は、直接的な配当もしくは間接的な配当からなる。このような配当をコンビニエンス・イールド δ と見なす。さらに、産出物の期待(総)収益率 μ が次の(2.59)式を満たすと仮定する。

$$\mu = a + \delta \quad (2.59)$$

期待収益率 μ は、産出物のリスクに対応している必要がある。資本資産評価モデル(Capital Asset Pricing Model, CAPM)によれば、市場全体のポートフォリオ(市場ポートフォリオ)と産出物の関係から、産出物の期待収益率 μ は次の(2.60)式を満たす。

$$\mu = r + \phi b \rho_{xm} \quad (2.60)$$

ただし、 r はリスクフリーレート、 ϕ はリスクの市場価値、 ρ_{xm} は産出物(価格 x) と市場ポートフォリオの相関係数である。本論文において r は外生的に与えられ時刻によらず一定とする。

(4) 複製ポートフォリオによる定式化

Dixit and Pindyck[36]の第 4.2 節に基づき説明を行う。ここでは、産出物のリスクとリターン特性を、市場で取引されている商品で置き換えることにより、利益フロー $\pi(x, t)$ を持つ企業価値 $F(x, t)$ を見出す。具体的には、無リスク資産に \$1 投資し、同時に企業の産出物を n 単位購入することを考える。このポートフォリオを構築するのに、 $\$(1+nx)$ のコストがかかる。微小時間 dt のオーダーにおいて、ポートフォリオは保有される³⁹。この dt 間に、無リスク資産により rdt の利益が発生し、 nx の資産は、配当(インカムゲイン) $n\delta xdt$ と、ランダムなキャピタルゲイン $ndx=naxdx+nbxdz$ を生み出す。 dt 間において、\$1 当たりのポートフォリオ利益率は次の(2.61)式となる。

$$\frac{r+n(a+\delta)x}{1+nx}dt + \frac{nbx}{1+nx}dz \quad (2.61)$$

(2.61)式と、企業の所有権(株式)を dt 間保有することを比較する。所有権を得るためには、コスト $F(x, t)$ がかかる。配当は利益 $\pi(x, t)dt$ となる。この所有権という資産(価格 $F(x, t)$)もランダムなキャピタルゲインを持っている。伊藤の公式より、 $F(x, t)$ の全微分は次の(2.62)式となる。

$$\begin{aligned} dF &= F_t(x, t)dt + F_x(x, t)dx + \frac{1}{2}F_{xx}(x, t)(dx)^2 + o(dt) \\ &= \left[F_t(x, t) + axF_x(x, t) + \frac{1}{2}b^2x^2F_{xx}(x, t) \right]dt + bxF_x(x, t)dz \end{aligned} \quad (2.62)$$

ここで、 F_t は t に関する一階の偏微分、 F_x は x に関する一階の偏微分、 F_{xx} は x に関する二階の偏微分を表す。(2.62)式より、\$1 当たりの利益率は次の(2.63)式となる。

$$\frac{\pi(x, t) + F_t(x, t) + axF_x(x, t) + \frac{1}{2}b^2x^2F_{xx}(x, t)}{F(x, t)}dt + \frac{bxF_x(x, t)}{F(x, t)}dz \quad (2.63)$$

ポートフォリオが企業保有のリスクを複製しているなら、(2.61)、(2.63)式の dz の係数は等しくなる。

$$\frac{nx}{1+nx} = \frac{xF_x(x, t)}{F(x, t)} \quad (2.64)$$

また同等のリスクを持つ二つの資産は、市場において同等のリターンを持つ。

$$\frac{r+n(a+\delta)x}{1+nx} = \frac{\pi(x, t) + F_t(x, t) + axF_x(x, t) + \frac{1}{2}b^2x^2F_{xx}(x, t)}{F(x, t)} \quad (2.65)$$

(2.65)式左辺は、(2.64)式を用いて、次の(2.66)式へ変形できる。

$$r \left[1 - \frac{nx}{1+nx} \right] + (a+\delta) \frac{nx}{1+nx} = r \left[1 - \frac{xF_x(x, t)}{F(x, t)} \right] + (a+\delta) \frac{xF_x(x, t)}{F(x, t)} \quad (2.66)$$

(2.65)、(2.66)式から、次の(2.67)式が得られる。

³⁹ 次の微小時間 dt では、 x の変化に応じて最適なポートフォリオが再構築される。このように、常にポートフォリオの構成が変化するポートフォリオは、ダイナミックポートフォリオ、もしくは動的ポートフォリオと呼ばれる。

$$\frac{1}{2}b^2x^2F_{xx}(x,t)+(r-\delta)xF_x(x,t)+F_t(x,t)-rF(x,t)+\pi(x,t)=0 \quad (2.67)$$

(2.67)式は Dixit and Pindyck[36]の主軸となる偏微分方程式である。

(5) 無リスクポートフォリオによる定式化

(2.61)式から(2.67)式で示した複製ポートフォリオの定式化の他に、産出物を空売りし、無リスクポートフォリオを作成し、企業価値 $F(x,t)$ を見出す手法がある。本項では無リスクポートフォリオによる定式化手法を、Dixit and Pindyck[36]の第 5.3 節 B、第 6.1 節 B とやや異なる式展開により示す。

これまでと同様に、産出物の価格が x であり、利益フローが $\pi(x,t)$ である企業を考える。ここで、企業保有者が、産出物を n 単位空売りし、空売りによって得たキャッシュ nx を直ちに無リスク資産に投資したポートフォリオを想定する(空売りに関して、後に詳しく説明)。このポートフォリオは、資産価値が $F(x,t)$ であり、微小時間 dt のオーダーのみ保有される。

このポートフォリオは、 dt 経過後に無リスク資産のリターン $nx(1+rdt)$ 、ロングポジション側の投資家への配当支払い $-n\delta xdt$ 、産出物の市場からの購入費用 $-n(x+dx)$ 、企業保有による配当 $\pi(x,t)dt$ といったキャッシュフローを生み出す。さらに、企業保有によりキャピタルゲイン dF を得る。 dF は伊藤の公式を用いて(2.62)式のように展開できる。ポートフォリオを dt 間保有することにより、以上を合計した次の利益を得る。

$$\left[\pi(x,t) + F_t(x,t) + axF_x(x,t) + \frac{1}{2}b^2x^2F_{xx}(x,t) + nrx - n\delta x - nax \right] dt + [bxF_x(x,t) - nbx] dz \quad (2.68)$$

ポートフォリオが無リスクであるためには、(2.68)式の dz の係数が 0 となる必要がある。従って $n=F_x(x,t)$ が成り立つ。裁定取引の可能性を排除するため、無リスクポートフォリオの期待収益率は、リスクフリーレートと等しくなる必要がある。従って、ポートフォリオ価値 $F(x,t)$ と rdt の積が、(2.68)式の第一項と等しくならなければならない。

$$rF(x,t)dt = \left[\pi(x,t) + F_t(x,t) + \frac{1}{2}b^2x^2F_{xx}(x,t) + (r-\delta)xF_x \right] dt \quad (2.69)$$

$F(x,t)$ は dt 間において dF 変化するが、(2.69)式左辺から分かる通り、この変化は他の項より早く 0 に収束するため無視できる。(2.69)式を整理することで同様に(2.67)式が得られる。

(6) 補足：空売りの構造

無リスクポートフォリオで用いた空売りについて説明を行う。時刻 t において、売り手が n 単位の産出物を買手に対し市場価格 x で空売りしたとする。この場合、時刻 t において売り手は買手から nx の代金を受け取るという金銭の受け渡しは生じるが、産出物の受け渡しは行わない。

通常の取引であれば、次の時間 dt が経過する間に、買手は(コンビニエンス・イールド δ に比例する配当 $n\delta xdt$ を受け取れたはずであるが、本ケースは空売りであるため売り手がその配当を得ることとなる。

時刻 $(t+dt)$ において、産出物の市場価格(市場価値)は時間 dt における微小変化分 dx を価格 x に加えた $(x+dx)$ となる。空売りの売り手はこの時点で初めて産出物を渡すと同時に、時間 dt 間に生じたであろう配当 $n\delta xdt$ を渡す。

空売りの売り手は、このように産出物価格の変動リスクを被る一方、早期の資金獲得が可能となる性質を持つ。

2.4.2 動的計画法

本節では、離散時間多期間における一般的な動的計画法を示し、その後、事業の最適廃棄問題について示す。さらに、離散時間のステップ幅 Δt を無限小にした時に、事業の継続領域において成り立つ偏微分方程式を示す。Dixit and Pindyck[36]の第 4.1 節とは若干異なる角度から説明を行う。

(1) 離散時間多期間モデル

本項では、より一般的な問題に着目した動的計画法を示す。ある単一の事業を行う企業の状態変数 x がマルコフ過程を満たす確率過程に従うとする。状態変数 x はベクトルとしてもよいがここではスカラーであると仮定する。将来時点の状態変数 x_{t+1} 、 x_{t+2} 、 x_{t+3} 、…の確率分布は、マルコフ過程を仮定しているため、現在の状態変数 x_t に集約されている。各時点において企業はいくつかの選択肢を持っているが、この選択肢を操作変数 u とする。操作変数 u は、投資や廃棄といった離散的な選択のみならず、産出率、稼働率といった連続的な変数も含むことができ、一般的にベクトルとなる。 u_t は x_t の情報に基づいて決めることができるが、将来の情報 x_{t+1} 、 x_{t+2} 、…を参照することはできない。しかしながら、将来の累積確率分布関数 $\Phi(x_{t+1} | x_t, u_t)$ (cumulative probability distribution function) は、 x_t 及び u_t によって一意に推定できる。

現時点を t 期とし、次の期間を $(t+1)$ 期とする。この単位期間当たりの割引率を r 、 t 期における単位期間当たりの企業収益を $\pi(x_t, u_t)$ とする。企業は、 t 期、 $(t+1)$ 期、 $(t+2)$ 期、…の各時点において、企業価値を最大にするように、その時々 x_t 、 x_{t+1} 、 x_{t+2} 、…に応じて最適な操作変数 u を選択するとし、その場合に得られる収益の純現在価値(=企業価値)を $F_t(x_t)$ とする。 $(t+1)$ 期の純現在価値は t 期から見ると確率変数であるので、 $E_t[F_{t+1}(x_{t+1})]$ となる。企業は $F_t(x_t)$ を最大化するように最適な行動を行うので、 $F_t(x_t)$ は次の(2.70)式を満たす。

$$F_t(x_t) = \max_{u_t} \left[\pi(x_t, u_t) + \frac{1}{1+r} E_t[F_{t+1}(x_{t+1})] \right] \quad (2.70)$$

(2.70)式はベルマン方程式(Bellman equation)、または最適性の基礎方程式(fundamental equation of optimality)と呼ばれている。動的計画法は、一連の意思決定を二つの要素に分割して考える。一つは現在の意思決定であり、(2.70)式に示した t 期の操作変数 u_t の決定がこれに該当する。もう一つは現在の意思決定から続く一連の意思決定を集約させた評価関数である。これは $E_t[F_{t+1}(x_{t+1})]$ となって(2.70)式に示されている。

事業の最適廃棄分析

単一の事業を行っている企業が、事業を直ちに廃棄・売却するか、もしくは事業をとりあえず継続し事業の廃棄・売却という意思決定を先延ばしにするかといった二者択一の問題設定を考える。事業を廃棄・売却することによる収益を最終損益 $\mathcal{Q}(x_t)$ とする。このとき、一般的な(2.70)式は、次の(2.71)式となる。

$$F_t(x_t) = \max \left[\Omega_t(x_t), \pi(x_t) + \frac{1}{1+r} E_t[F_{t+1}(x_{t+1})] \right] \quad (2.71)$$

(2.71)式から分かる通り、企業は、直ちに事業を廃棄し $\Omega(x_t)$ を得るか、もしくは事業を継続し今期の収益 $\pi(x_t)$ というフローと、次期の企業価値の期待値 $E_t[F_{t+1}(x_{t+1})]$ を割引率で割り引いたストックを手に入れるかという二者択一の選択を迫られる。現在の企業価値 $F_t(x_t)$ は、これらの大きい方となる。

次に、事業の継続可能時刻 T が外生的に与えられているケースを考える。仮に T 期に至るまで事業が継続されても、 T 期において企業は直ちに事業の廃棄を行わねばならない。従って、 T 期において(2.72)式が成り立つ。

$$F_T(x_T) = \Omega_T(x_T) \quad (2.72)$$

(2.71)式を参考にすると、 $(T-1)$ 期において次の(2.73)式が成り立つ。

$$F_{T-1}(x_{T-1}) = \max \left[\Omega_{T-1}(x_{T-1}), \pi(x_{T-1}) + \frac{1}{1+r} E_{T-1}[F_T(x_T)] \right] \quad (2.73)$$

(2.72)、(2.73)式を使い、さらに $(T-2)$ 期、 $(T-3)$ 期、 \dots における企業価値 $F(x)$ を順次求めていけば、現在の企業価値 $F(x_t)$ を算出できる。また同時に廃棄に踏み切ることが最適となる臨界曲線 x_t と、 x_t によって区切られた保有領域、廃棄領域を求めることができる。このように、時刻に関して後ろ向きに解く方法は一般にバックワード解法と呼ばれ、本論文全体を通して頻繁に用いる。

(2) 連続時間モデル

再び、(2.70)式に示した一般的な問題を考える。さらに状態変数 x が、操作変数 u を含む伊藤過程に従うケースを考える。

$$dx = a(x, u, t)dt + b(x, u, t)dz \quad (2.74)$$

単位時間当たりの割引率を r 、時刻 t における単位時間当たりの事業収益を $\pi(x, u, t)$ 、企業価値を $F(x, t)$ とする。これらの変更に加え、(2.70)式の1期間の長さを微少時間 dt とすると、次の(2.75)式が得られる。

$$F(x, t) = \max_u \left[\pi(x, u, t)dt + \frac{1}{1+rdt} E[F(x+dx, t+dt) | x, u] \right] \quad (2.75)$$

(2.75)式の両辺に $(1+rdt)$ をかけ整理すると、次の(2.76)式が成り立つ。

$$\begin{aligned} rF(x, t) &= \max_u \left[\pi(x, u, t) + \frac{1}{dt} E[dF] \right] \\ &= \max_u \left[\pi(x, u, t) + F_t(x, t) + a(x, u, t)F_x(x, t) + \frac{1}{2}b^2(x, u, t)F_{xx}(x, t) \right] \end{aligned} \quad (2.76)$$

(2.76)式の2行目は、伊藤の公式を用いている。

次に、再び廃棄問題のケースを考える。廃棄問題において(2.75)式は次の(2.77)式となる。

$$F(x, t) = \max \left[\Omega(x, t), \pi(x, t)dt + \frac{1}{1+rdt} E[F(x+dx, t+dt) | x] \right] \quad (2.77)$$

この廃棄問題に伊藤の公式を適用すると、事業の継続領域において次の偏微分方程式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}b^2(x, t)F_{xx}(x, t) + a(x, t)F_x(x, t) + F_t(x, t) - rF(x, t) + \pi(x, t) = 0 \quad (2.78)$$

ここで、状態変数 x が幾何ブラウン運動に従うケースを考えると、(2.78)式は次の(2.79)式となる。

$$\frac{1}{2}b^2x^2F_{xx}(x,t)+axF_x(x,t)+F_t(x,t)-rF(x,t)+\pi(x,t)=0 \quad (2.79)$$

$$\frac{1}{2}b^2x^2F_{xx}(x,t)+(r-\delta)xF_x(x,t)+F_t(x,t)-rF(x,t)+\pi(x,t)=0 \quad (2.67)\text{再掲}$$

(2.79)式は、(2.67)式とほぼ同様の偏微分方程式となっている。(2.67)式は、企業の産出物価格 x が幾何ブラウン運動に従うと仮定し、利益フロー $\pi(x,t)$ を持つ企業価値 $F(x,t)$ について条件付請求権分析法を用いて解いた式であり、 r はリスクフリーレートを意味している。これに対し、(2.79)式は企業の状態変数 x が幾何ブラウン運動に従うと仮定し、利益フロー $\pi(x,t)$ を持つ事業の継続領域における企業価値 $F(x,t)$ について動的計画法を用いて解いた式であり、 r は割引率を意味している。このような違いがあるものの、(2.67)、(2.79)式の違いは、 $F(x,t)$ にかかる係数と、 $F_x(x,t)$ にかかる係数のみである。

条件付請求権分析法と動的計画法は、適用できる前提、用いるパラメータにこのような違いがあるものの、同様の偏微分方程式を導き同様の解を与える。いわば、コインの表裏の関係にあると言える[36]。

2.5 本章のまとめ

本章は文献[36][103][104]などを基にリアル・オプション法の理論、定式化、解法（解析解、数値解）の一連の流れを整理した。後の第4章では本章で示した数値解を用いて解を算定する。また、第4章の前半部分で行う（比較的簡素な）分析については一部条件を緩和することで本章で示した解析解も導出できる。この場合には解析解と数値解が一致することを確認する。この確認により単なる分析手法の整理にとどまらず実課題への適用までを含めた一連の流れをカバーできる。本章は本論文全体に対し以上のような位置づけ、役割を持っている。

第3章 世界エネルギーシステムモデル（DNE21+）による分析

3.1 はじめに

3.1.1 DNE21+の特徴とモデル開発の経緯

文献[12][114][115]などを基に DNE21+の概略とこれまでのモデル開発の経緯を以下に記す。

世界エネルギーシステムモデル（Dynamic New Earth 21 plus、以下 DNE21+と記載）は、世界のエネルギー起源 CO₂ 排出を扱った技術評価モデルである。「技術評価モデル」と呼ぶ所以は、例えば、世界合計の CO₂ 排出に制約を課した場合、どのような地域に、どの技術が、どのくらいの容量入るかを分析することができるためである。エネルギー変換技術（発電など）、エネルギー需要技術（自動車など）、あるいは省エネ技術（コークス乾式消火設備⁴⁰など）を個々に積み上げて（ボトムアップに）モデル化している⁴¹。エネルギーモデルを、技術の記述方法にて大別すると「トップダウン型」と「ボトムアップ型」に分けられるが、DNE21+は「ボトムアップ型」である⁴²。

地域区分については、世界を 54 地域に区分している。ただし国内（ロシア、米国、中国、インドなど）の分割まで含めると 77 地域である（図 3-1）。

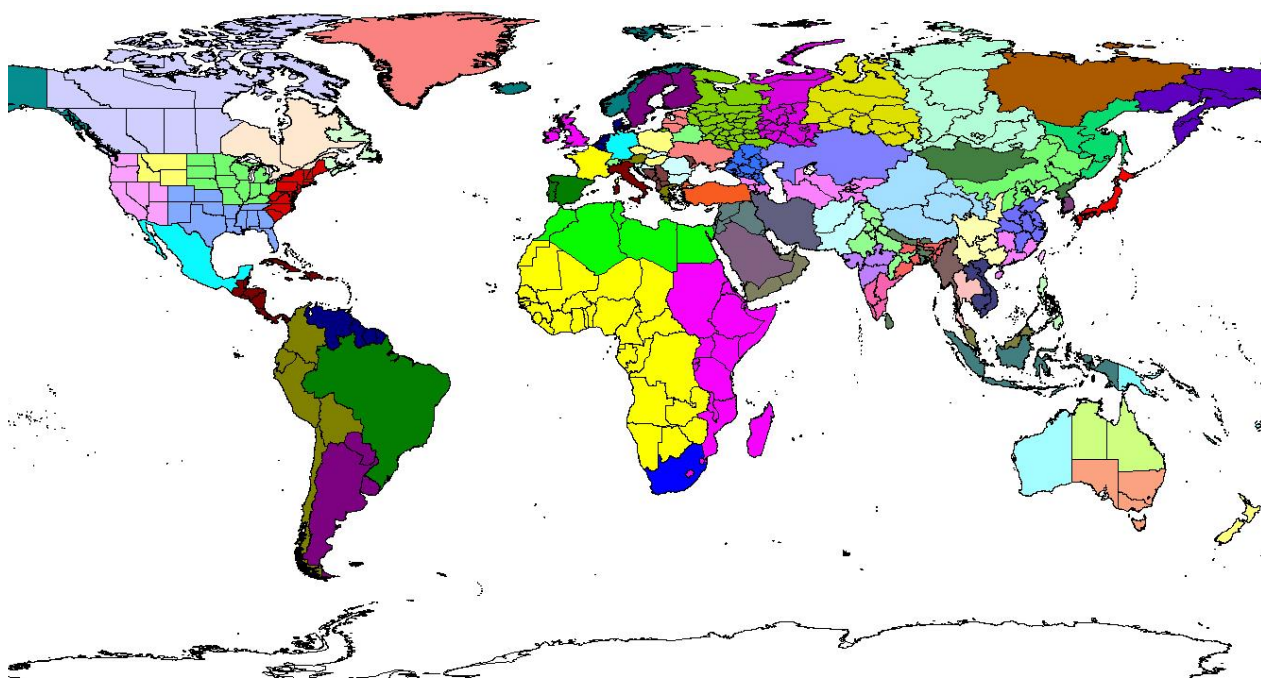


図 3-1 DNE21+における地域区分

⁴⁰ コークス乾式消火設備とは、コークス炉において製造したばかりの赤熱コークス（約 1050℃）の顕熱を回収し、得られた蒸気を発電などに利用する省エネ技術。CDQ とも呼ばれる。

⁴¹ 数え方にもよるが、200～300 の技術をモデル化している。

⁴² 「トップダウン型」とは、エネルギー需要を長期価格弾力性にて表現したりする記述方法である。これはマクロ経済的手法が基となっている。一方、「ボトムアップ型」は工学的手法を基にしている。DNE21+は、この両方を組み合わせており、「ハイブリッド型」とも呼ばれるが、ボトムアップでの記述が中心となっているため、ここでは「ボトムアップ型」に区分した。

このように地域区分が細かいため、例えば各国が UNFCCC に提出した⁴³いわゆる約束草案 (Intended Nationally Determined Contributions: INDCs) の「努力」を比較分析することなどが可能である。そもそも、京都議定書のような国別排出目標の評価分析にも対応できるよう開発・構築してきた経緯がある。

ところで、エネルギーモデルを計算手法で分類すると「シミュレーション型」、「最適化型」に大別される。DNE21+は最適化型であり、エネルギーシステムコスト⁴⁴の最小化を行う。このような費用最小化モデルも、每期ごとに逐次的に最適化を行うモデル（静的な最適化）と、将来の複数時点に渡る累積費用を最適化するモデル（動的な最適化）に分けられる。DNE21+は動的最適化モデルである。

DNE21+は、DNE21⁴⁵を基に RITE が構築・運用しているモデルであるが、DNE21 は、さらに New Earth 21 (NE21) に遡る。NE21 は逐次最適化モデルであり、DNE21、DNE21+は動的最適化モデルである。

DNE21 は 2100 年までの分析評価が可能であり（計算自体は 2150 年まで実施）、CO₂削減費用だけでなく全球平均気温（簡易気候モデルによる）や温暖化被害（簡易的に被害関数を導入している）を含めた巨視的な分析が可能である。ただし、地域分割は世界 10 地域であり、ボトムアップで記述した技術オプションも DNE21+に比べ少ない。

DNE21+は（基本的に⁴⁶）2050 年までを分析対象としており、エネルギー起源 CO₂までの分析に特化しつつ、既述の通りきめ細かい技術オプションの評価、詳細な地域区分を行っている点が特徴である。

3.1.2 DNE21+の概要

DNE21+の主なモデル構造・想定は次の通りである（主に文献[116]を参照）。

- 分析開始の基準年を 2000 年とする。最適化時点は 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年、2025 年、2030 年、2040 年、2050 年の 8 時点とする。ただし 2005 年、2010 年については実績値でキャリブレーションを実施する。
- 時点別に生じる費用を割引率 5%/年にて割引し、モデル評価期間の累積エネルギーシステムコストを算定する。
- エネルギー供給技術・転換技術（発電技術、石油精製、石炭ガス化技術、水素製造技術など）、CO₂回収貯留 (CCS) については、各技術のコストやエネルギー効率などを明示的にモデル化する（いわゆるボトムアップ的モデル化）。
- エネルギー需要技術については、次の通り。
 - エネルギー集約産業の内、鉄鋼、セメント、紙パ、アルミ、化学の一部（エチレン製造、プロピレン製造、アンモニア製造）、運輸（乗用車、トラック、バス）、民生（エアコン、テレビ、冷蔵庫、照明など）については、各技術のコストやエネルギー効率などを明示的にモデル化する（いわゆるボトムアップ的、あるいは積み上げモデル化）。これらの部門の活動量

⁴³ UNFCCC は United Nations Framework Convention on Climate Change の略。

⁴⁴ 「エネルギーシステムコスト」とは、エネルギーの掘削、転換、需要までの一連のシステム（例えば原油掘削、輸送、精製、小売、乗用車で利用まで）を含めたシステム全体に要するコストを積み上げたものである。

⁴⁵ DNE21 は、山地憲治、藤井康正、RITE が開発したモデルである。DNE21 の原型である NE21 は茅陽一、山地憲治、藤井康正が開発した。

⁴⁶ DNE21+についても、2100 年まで分析評価が可能となるようにモデル拡充を進めている（2016 年現在）。

(産業部門は生産 t 数、自動車部門は人・km や t・km、民生部門は機器の普及台数や年間利用時間など) を外生的に想定し、モデル計算において固定とする。一方、技術(例えばエネルギー効率に差異があるエアコン機器)の選択はモデルで内生的に決定され、普及台数、エネルギー消費量などが導出される。

- 上記以外の部門については、個別技術の積み上げのモデル化を行うことがそもそも容易でなく、かつ必ずしも的確な評価結果につながらないため、個別技術としてモデル化せず、最終エネルギー需要(固体燃料需要、液体燃料需要<ガソリン需要、軽質油需要、重質油需要>、気体燃料需要、電力需要)を産業、運輸、民生部門別にモデル化する(いわゆるトップダウン的モデル化)。このエネルギー需要はベースライン時のエネルギー需要となる。
- トップダウン的に表現した部門の CO₂ 排出制約シナリオにおける省エネルギー進展は、エネルギー需要の長期価格弾性値を用いて評価する。
- 各設備については、設備の年式(過去どの時点でどのくらいの容量の設備が導入されたか、ヴィンテージとも呼ぶ)を外生的に与える。そのため、時点によって技術代替の費用が異なる。設備を残置し(遊休設備とし)新たな設備導入を行うことも許容する。
- 8 種の一次エネルギーを考慮する(石炭、石油(在来型、非在来型)、天然ガス(在来型、非在来型)、水力・地熱、原子力、風力、太陽光、バイオマス)。
 - 石炭、石油、天然ガスの資源量、及び累積生産量別の掘削費用は Rogner[117]に基づき RITE が想定した数値を用いる(図 3-2 参照)。
 - 北米シェールガスはこれまで非在来型資源の一つとして採掘コストを高位に設定していたが、シェールガスの影響を反映するため北米ガス生産費用を低位に更新した。
 - 原子力については、外生的に地域別の上限制約を与える。

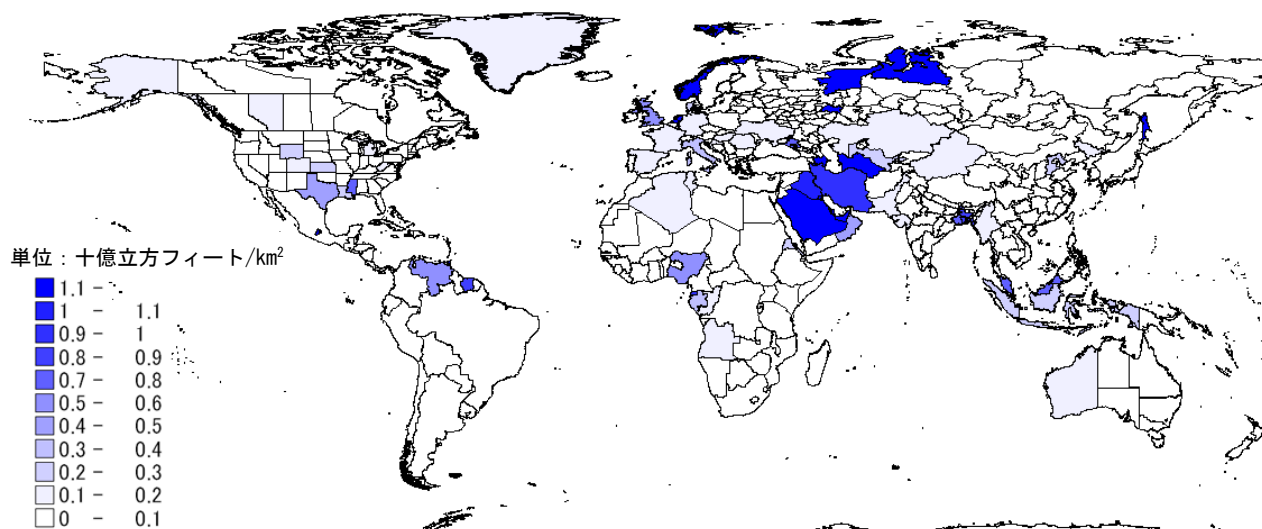


図 3-2 DNE21+における在来型天然ガス賦存量の想定

出典) Rogner[117]に基づき RITE 想定。

補足) 在来型ガス賦存量は世界全体で 2430 億 toe (USGS を基に RITE 整理)。非在来型ガス賦存量の内、実利用が可能な量として 8200 億 toe を想定。なお、世界の 2014 年ガス生産量は 29.2 億 toe (IEA 暫定値)。

- 77 地域間のエネルギー（石炭、石油、天然ガス、合成油、エタノール、電力、水素）及び CO₂ の輸送をモデル化する。ただし、CO₂ は国内輸送のみ許容し、CO₂ の国際間輸送は不可とする。
- CO₂ 貯留は石油増進回収（enhanced oil recovery、以下 EOR）、炭層メタン増進回収、廃ガス田貯留、帯水層貯留を想定する。帯水層貯留のポテンシャルとして USGS の堆積盆地 GIS データに基づく RITE 推定値（図 3-3）を参照する。CO₂ 海洋貯留は導入不可とする。

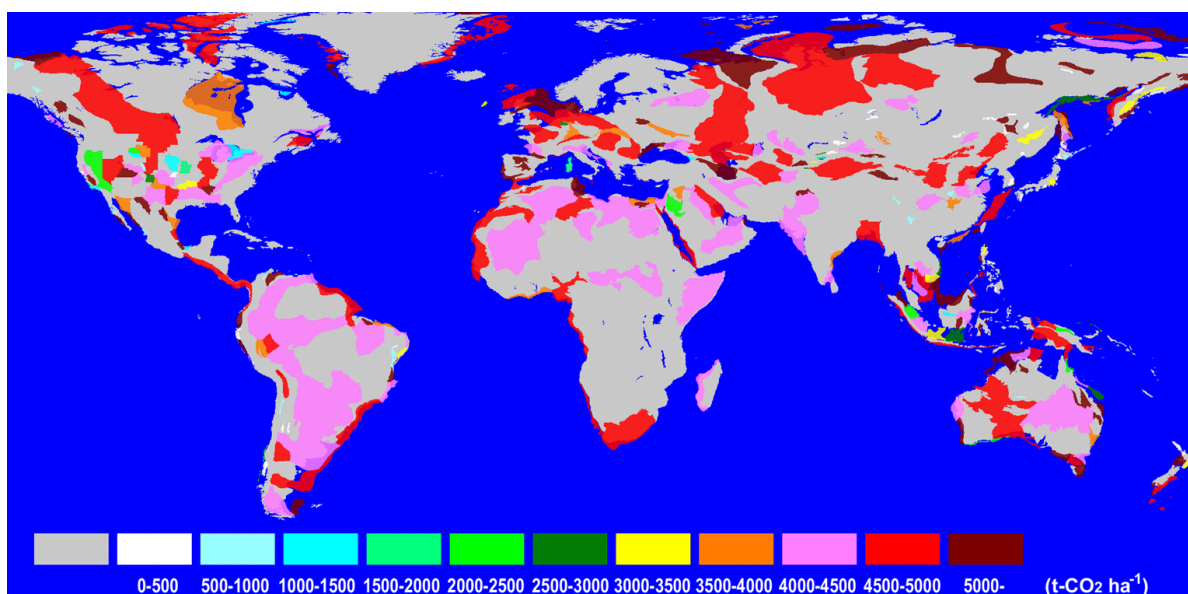


図 3-3 理論的な帯水層貯留ポテンシャル推計値

出典) Akimoto et al.[11]

補足) 理論的ポテンシャルの内、実利用可能な貯留量は陸域帯水層 10%、海底下帯水層 20%と想定する。

- 電力需要の負荷変動に関しては、年負荷持続曲線を基に 4 時間帯（ベース、ミドル、ピーク、瞬時ピーク）に区分し、それぞれ地域別・時間帯別の需給バランスをとるよう制約を与える。
- 発電設備の資本費、発電効率を図 3-4 の通り想定する。
- エネルギーシステムコストは以下の式にて算定する。
 - ボトムアップ的にモデル化した部門の費用：

$$\text{エネルギーシステムコスト} = \text{設備費} \cdot \text{年経費率} + \text{燃料費}$$

$$= \frac{\text{設備費}}{\text{投資回収年数}} + \text{運転維持費} + \text{燃料費} \quad (3.1)$$

- トップダウン的にモデル化した部門の費用（消費効用の低下）：
最終エネルギー価格と省エネルギー量の関係を長期価格弾性値で表現（既述の通り）。これら積分値を消費効用の低下とし、費用としてカウントする。
- 投資回収年数は地域、部門によって異なる数値を設定した。その上下端を表 3-1 に示す。各部門での実際の投資行動から陰伏的に計算される投資回収年数、あるいはアンケート結果に対

する明示的回答などの投資回収年数を参照した。なお表 3-1 では、投資回収年数と主観的割引率が逆数の関係にあるとして数値を記入した。日本は投資回収年数の上端を参照するが、一人当たり GDP の低い地域は相対的に短い投資回収年数を参照する。

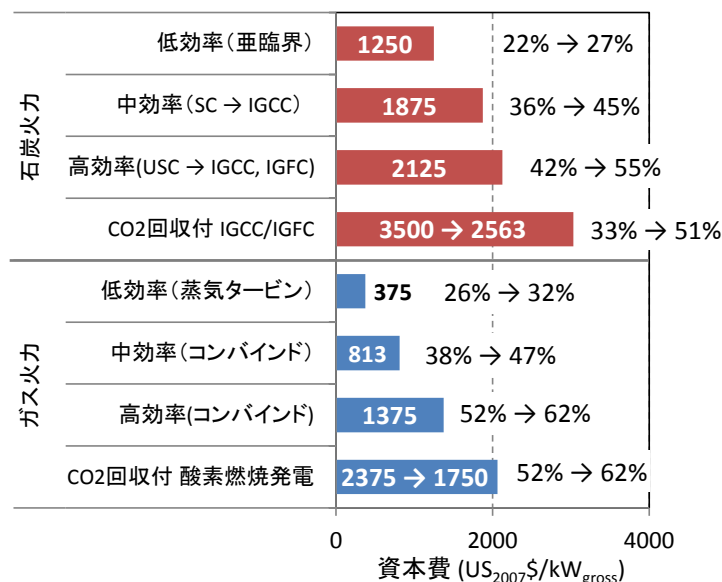


図 3-4 石炭火力、ガス火力の資本費及び発電効率の想定

出典) RITE 想定。

注) ただし、ロケーションファクター（一人当たり GDP にて簡易表現）を考慮する前の段階の資本費。

表 3-1 DNE21+における各部門の投資回収年数の想定値

	投資回収年数（主観的割引率）	
	投資回収年数の上端	投資回収年数の下端
発電部門	11.9 年(8%/年)	5.0 年(20%/年)
エネルギー転換部門（発電部門除く）	6.6 年(15%/年)	4.0 年(25%/年)
エネルギー集約産業（鉄、セメント部門など）	6.6 年(15%/年)	4.0 年(25%/年)
運輸部門（乗用車、トラック、バスなど）	3.3 年(30%/年)	2.2 年(45%/年)
民生部門（エアコン、冷蔵庫など）	3.3 年(30%/年)	1.8 年(55%/年)

出典) RITE 想定。

- 人口、GDP の想定はそれぞれ図 3-5、図 3-6 の通りとした。人口は国連 2008 年版の中位推計[118]に基づく。GDP は一人当たり GDP と経済成長率の関係などを基に RITE[119]が作成した（詳細は RITE[119]を参照のこと）。粗鋼生産シナリオ、セメント生産シナリオなどは人口、GDP シナリオ（図 3-5、図 3-6）に基づき後に想定する。

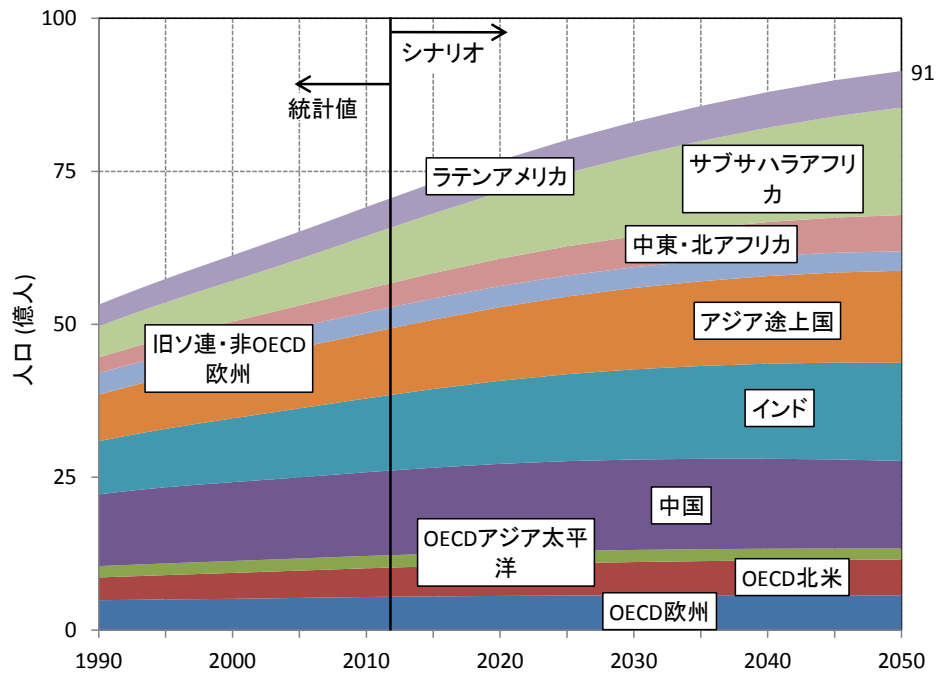


図 3-5 DNE21+における人口想定

出典) RITE 想定。

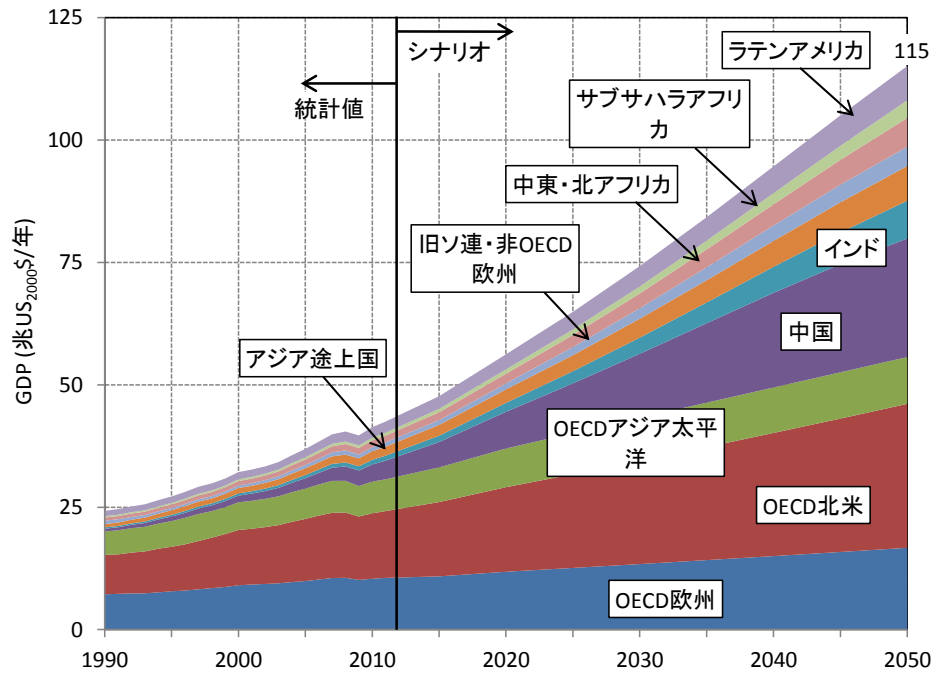


図 3-6 DNE21+における GDP (MER) 想定

出典) RITE 想定。

本章の以下の構成は次の通りである。発電部門のモデル化は、DNE21+以外のモデルでも数多くなされている。そこで、本論文では代表的なエネルギー集約産業である鉄鋼部門、セメント部門のモデル構造について、なぜそのようなモデル化を行ったかという背景を含め記載する。これら部門を積み上げ的に（ボトムアップ的に）モデル化しているのは、DNE21+の特徴の一つである。

その後、世界合計のエネルギー起源 CO₂ 排出に制約を課した場合に、発電部門、鉄鋼部門、セメント部門の設備容量がどのように変化するか、その結果を示す。さらに、エネルギーセキュリティ指標を導入し、DNE21+で得られた世界の石油、ガスの国際貿易マトリックス結果などをそのセキュリティ指標に当てはめ、時点別、地域別、CO₂ 排出制約別のセキュリティ指標値を示す。

3.2 鉄鋼部門のモデル化（DNE21+の拡張）

本節では Oda et al.[12][31]などを基に、エネルギー原単位、CO₂ 原単位といった面に注目しつつ鉄鋼生産方式について述べた後、鉄鋼部門のモデル化について記す。さらに粗鋼生産シナリオ、鉄のマテリアルフロー分析について記す。

3.2.1 鉄鋼生産方式と省エネ設備

(1) 概要

鉄鋼生産方式は概念上、2つに大別できる。一つは鉄鉱石由来の鉄から鉄鋼製品を作る方法である。高炉転炉法（あるいは一貫製鉄所とも日本では呼ばれる）は、その代表格である。もう一つは、鉄スクラップから鉄鋼製品を作る方法である。これは一般に電炉法と呼ばれる。以上を簡単に模式化したのが図 3-7 である。

転炉、あるいは電炉で溶解・製錬された鉄は、二次精錬や三次製錬（図 3-7 では省略）を経て、連続鑄造設備に送られる。連続鑄造設備にてスラブ、ブルーム、ビレットといった固体の半製品（鋼片）が得られる。この半製品の内、不良を除いたものを一般に「粗鋼」と呼んでいる。粗鋼はその後、鋼材の種類に応じて、熱間圧延、焼きなまし、冷間圧延、めっき処理、鋼管への加工がなされる。鋼材は多種多様であり、そのためこのような下工程に要するエネルギーも鋼材によって千差万別である。DNE21+では、大局的観点に基づく簡素なモデル化を意識し、多くの鋼材で行っている一次熱間圧延までのエネルギー消費量までを明示的な鉄鋼部門のエネルギー量として計上する。

ここで注意が必要なのは、図 3-7 にも示した通り、高炉で生産された銑鉄（溶銑）の多くは転炉へ投入される一方、銑鉄の一部は電炉へも投入される点である（例えば中国、インドなど）。さらに、スクラップの多くは電炉へ投入される一方、スクラップは転炉へも投入さる（例えば米国）。従って、転炉鋼であってもその鉄源の 30%がスクラップであったり（米国）、逆に電炉鋼であってもその鉄源の 60%が鉄鉱石由来であったりする（中国）。このようにマテリアルフローが地域により異なるため注意が必要であるが、以下、説明を単純化し、世界平均の数値にて議論することとする。

世界平均の高炉転炉法、電炉法を比べると、電炉法は酸化鉄の還元エネルギーを要しないためエネルギー投入量が少なくてすむ。典型的なエネルギー投入量を整理したのが表 3-2 である。表 3-2 では比較のため電力を一次エネルギー換算して示した（換算係数： $1\text{kWh}=3.6/(1/3)=10.8\text{MJ}$ ）。

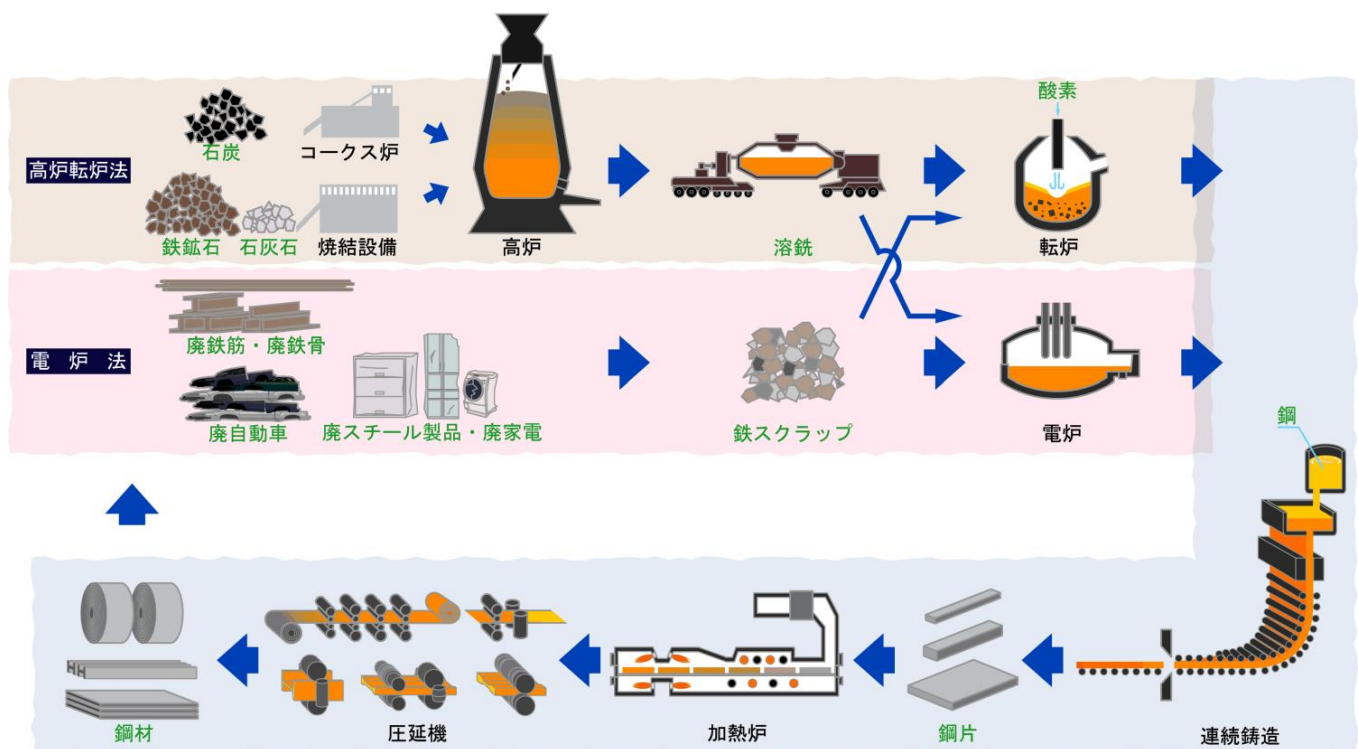


図 3-7 主な鉄鋼生産方式（概略）

出典）RITE 作成。

表 3-2 鉄鋼生産方式別の一次エネルギー原単位（典型的な数値）

(GJ/t 粗鋼)	非電力（石炭、ガスなど）	電力	計
高炉転炉法 BF-BOF (粗鋼 1t あたりの銑鉄投入量 1.025t)	22.3	4.8	27.1
スクラップ電炉法 Scrap-EAF (鉄源の 100%を鉄スクラップとした場合)	2.5	6.3	8.8
直接還元鉄電炉法 DRI-EAF [ガス DRI] (鉄源の 100%を直接還元鉄とした場合)	15.9	7.6	23.5

出典）Oda et al.[12][31]などを基に整理。

補足）BF-BOF は blast furnace・basic oxygen furnace の略。EAF は electric arc furnace の略。DRI は direct reduced iron の略。

また表 3-2 では、それぞれの鉄源比率を明示した。高炉転炉法は 2005 年時点の世界平均値「粗鋼 1t あたり銑鉄投入量 1.025t」を採用した。スクラップ電炉法とは、鉄源の 100%を鉄スクラップとした場合をここでは意味する。このようにスクラップ電炉法は、高炉転炉法と比較しトン粗鋼生産あたり 1/3 程度の一次エネルギー投入量ですむ。

表 3-2 では、直接還元鉄電炉法 DRI-EAF についても示した。直接還元鉄 DRI とは、鉄鉱石を固層のまま、一般に 1000℃程度の温度で還元する方式である（高炉は内部の温度分布も顕著であるが、2000℃前後が一般的である）。図 3-8 に 2014 年時点の主な DRI 生産国を示す。インド、中東、中南米、アフリ

カなどで生産されている。2014 年の世界の DRI 生産量 7321 万 t は、世界の粗鋼生産量 16.7 億 t に対し 4.4%の規模である。

DRI 生産にはコークスを必要としない反面、天然ガスや石炭、さらにその後の電炉まで含めると多くの電力を必要とする。表 3-2 は天然ガスを主燃料とした DRI 生産方式の典型的エネルギー原単位を示した。インドでは石炭による直接還元鉄が広く行われているが、エネルギー原単位は表 3-2 よりも著しく劣る（DNE21+では、インドの石炭による DRI 生産方式を低効率の高炉転炉法として表現する）。

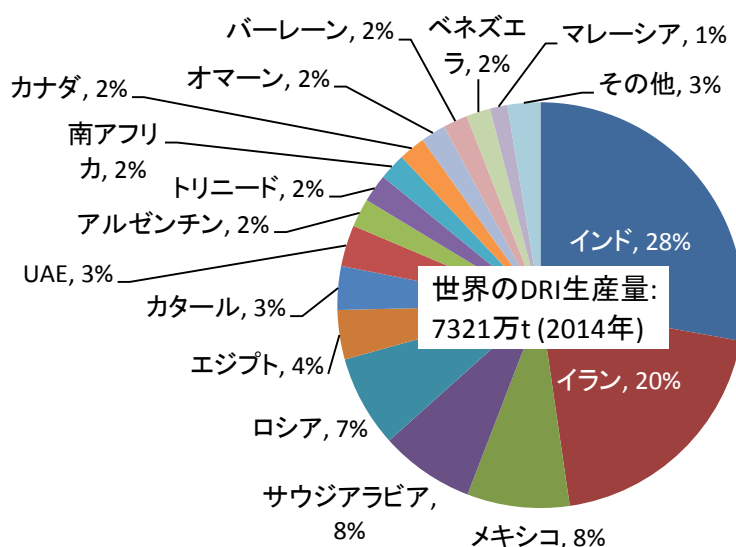


図 3-8 直接還元鉄（DRI）の生産シェア（2014 年）

出典）worldsteel[120]

(2) 現在利用可能な省エネ技術調査・整理

高炉転炉法、及びスクラップ電炉において、現在利用可能な生産設備、及び省エネ技術について幅広い文献（[121][28][122][123][124][125]など）を基に調査した。調査結果を一部集約し整理したのが表 3-3 である。表 3-3 は後に行う鉄鋼部門モデル化の基礎情報となる。

表 3-3 高炉転炉法、スクラップ電炉法における典型的エネルギー消費原単位、省エネ見込み

エネルギー消費原単位		省エネ見込み	補足
A. コークス製造工程			
1 廃プラ利用設備			原料炭 0.59GJ/t コークスを代替 (最大値)
2 石炭乾燥調湿機		0.29GJ/t コークス	
3 COG 回収		7.58GJ/t コークス	
4 従来型の湿式コークス消化設備			
5 低効率コークス乾式消火設備 (CDQ; Coke dry quenching)		65kWh/t コークス 0.38GJ/t コークス [蒸気]	旧ソ連型(旧ソ連、インドで普及)
6 コークス乾式消火設備 (CDQ; Coke dry quenching)		150kWh/t コークス	
7 自動燃料制御装置		0.14GJ/t コークス	
8 従来型のコークス炉	2.83GJ/t コークス (原料炭除く) 52kWh/t コークス		
9 次世代コークス炉 (例えば SCOPE21; Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st century)		3.87GJ/t-coke (現在利用可能な省エネ設備を全て利用した場合)	
B. 焼結鉱製造工程			
10 焼結原料偏析装入改善装置		0.08GJ/t 焼結鉱	
11 従来型手動燃料制御点火装置	0.28GJ/t 焼結鉱 65kWh/t 焼結鉱		
12 自動燃料制御点火装置	0.15GJ/t 焼結鉱 65kWh/t 焼結鉱		
13 従来型の焼結炉	0.55GJ/t 焼結鉱		
14 主排風顕熱回収装置		0.13GJ/t 焼結鉱	
15 焼結鉱クーラ排熱回収装置		0.25GJ/t 焼結鉱	
C. 製鉄工程 (高炉)			
16 微粉炭吹き込み装置(PCI; Pulverized coal injection): 88 kg/t 鉄鉄			コークス 2.34GJ/t 鉄鉄を代替
17 微粉炭吹き込み装置(PCI; Pulverized coal injection): 214 kg/t 鉄鉄			コークス 5.69GJ /t 鉄鉄 代替
18 高炉炉頂圧発電 湿式(TRT; Top pressure recovery turbines, wet type)		30-42.4kWh/t 鉄鉄	高炉規模にも依存
19 高炉炉頂圧発電 乾式(TRT; Top pressure recovery turbines, dry type)		55.4kWh/t 鉄鉄	高炉規模にも依存
20 熱風炉排熱回収装置		0.13GJ/t 鉄鉄	
21 小型高炉	18.22GJ/t 鉄鉄 326kWh/t 鉄鉄		小型高炉は、省エネ設備の追加が経済的、技術的に困難と見られる(従来、中国で広く普及)
22 中型高炉	17.99GJ/t 鉄鉄 326kWh/t 鉄鉄		
23 大型高炉	16.75GJ/t 鉄鉄 326kWh/t 鉄鉄		電力消費には、酸素製造用電力消費を含む
24 高炉の高圧操業、酸素富化操業	酸素製造 0.3~0.7kWh/Nm ³ -O ₂		深冷分離法、及び圧カスイング吸着法(PSA; Pressure Swing Adsorption)、酸素の純度にも依存
D1. 製鋼工程(転炉)(BOF; Basic Oxygen Furnace)			
25 転炉ガス(BOG; Basic Oxygen Gas)回収装置		0.87-0.95GJ/t 粗鋼	
26 転炉ガス(BOG; Basic Oxygen Gas)回収装置 及び 顕熱回収装置		0.95-1.08GJ/t 粗鋼	
27 蓄熱式バーナ取鍋加熱装置		0.21GJ/t 粗鋼	
28 転炉			
29 平炉(Open hearth furnace; OHF)			平炉は 1 バッチに必要な運転時間が長く、さらなる省エネ余地は少ない
D2. 製鋼工程(電炉)(EAF; Electric Arc Furnace)			
30 スクラップ原料予熱装置		25kWh/t 粗鋼	
31 蓄熱式バーナ取鍋加熱装置		0.21GJ/t 粗鋼	
32 三相交流アーク炉	434kWh/t 粗鋼 0.25GJ/t 粗鋼		
33 直流式水冷炉壁アーク炉	397kWh/t 粗鋼 0.25GJ/t 粗鋼		
34 小型の誘導炉	719kWh/t 粗鋼 0.25GJ/t 粗鋼		インドなどで広く普及

D. 鑄造・圧延		
35 造塊・分塊圧延設備	0.81GJ/t 粗鋼 49kWh/t 粗鋼	
36 連続鑄造設備(低効率)	0.13GJ/t 粗鋼 30kWh/t 粗鋼	
37 連続鑄造設備(高効率)	0.05GJ/t 粗鋼 16kWh/t 粗鋼	
38 非熱片装入	0.29GJ/t 粗鋼	
39 熱片装入		0.21GJ/t 粗鋼 [非熱片装入のケースと比べ]
40 直送圧延設備		0.29GJ/t 粗鋼 [非熱片装入のケースと比べ]
41 従来型加熱炉	0.88GJ/t 粗鋼	
42 蓄熱式バーナ加熱炉	0.72GJ/t 粗鋼	
43 熱間圧延設備(低効率)	0.23GJ/t 粗鋼 95kWh/t 粗鋼	
44 熱間圧延設備(高効率)	0.10GJ/t 粗鋼 95kWh/t 粗鋼	

表 3-3 において注意が必要な点として次の 2 点が挙げられる。一点目は、マテリアルフローの変化による影響である。例えば、微粉炭吹込み装置 (PCI) を増強しコークス比率を低下させた場合、粗鋼当たりで見たの CDQ の省エネ量は変化する。二点目は、省エネ量や経済性が高炉容積 (m³) に依存し、TRT の場合、目安として高炉容積 1,000m³ ないし 2,000m³ 以上で経済的となる (中国の場合[125])。

表 3-3 に入っていない省エネ技術で比較的 CO₂ 排出原単位に与える影響が大きいものに、副生ガス⁴⁷によるコンバインドサイクル発電が挙げられる。LNG コンバインドサイクルには及ばないものの従来の汽力発電よりも高い発電効率となる。

また熱間圧延より後の各種鋼材生産のためのプロセスとして、溶融亜鉛めっき鋼板製造プロセスでの省エネなども製鉄所全体の CO₂ 排出原単位に影響を与える。ただし、世界の各地域で生産する鋼種にばらつきがあり、また製鉄所全体の CO₂ 排出原単位に与える影響も相対的に小さいため、熱間圧延より後のプロセスについて本論文では明示的に扱わないこととする。

(3) 将来期待される鉄鋼生産方式と省エネ技術

高炉を用いつつ CO₂ 排出量を低減させる技術として、欧州の ULCOS にて検討されている高炉ガスを循環させると共に CO₂ を回収するシステム、日本の COURSE50 で技術開発中のコークス炉ガスを水素増幅し、高炉ガスから CO₂ を回収するシステムが挙げられる⁴⁸。また硬質のバイオマス由来固形燃料もコークス代替として可能性がある。

高炉以外の鉄鋼一次生産方式でかつ現時点で技術的に導入可能である方式として表 3-2 に示した直接還元法 (DRI-EAF) が挙げられる。CO₂ 原単位の観点から見れば天然ガスを用いた直接還元法でかつ CO₂ 回収を行うシステム、あるいは外部から水素を調達するシステムが今後のさらなる普及という意味で有望である⁴⁹。

高炉や直接還元法ではない鉄鋼一次生産方式 (一般に非高炉の溶融還元法と呼ばれる) として、相当な数の方式が検討されており、具体的には Corex、Finex、Cyclone Converter Furnace、DIOS、AISI、

⁴⁷ 高炉ガス、コークス炉ガス、転炉ガスの総称。

⁴⁸ ULCOS は Ultra Low CO₂ Steelmaking の略。COURSE50 は CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking process by innovative technology for cool Earth 50 の略。

⁴⁹ 2015 年時点において、石炭 DRI はインド、ガス DRI は中東、中南米にて広く普及している。

HISmelt、Fastmet、Fastmelt、Circofer、Circoredなどが挙げられる。この内、FinexはPOSCOなどが稼働⁵⁰させているものの、他の方式の商用機は2015年時点で稼働していない。Daniëls[126]はCO₂原単位低減を前提とすれば既存の高炉一貫製鉄所に対しこれらの新方式の一次生産方式は有効としており、今後ともこれらの技術的、経済的特性や可能性を含め調査検討する必要がある。

3.2.2 国別のエネルギー原単位推計

鉄鋼部門は、1)マテリアルフローが国によって異なること（例えばコークスの輸出入）、2)IEAなどのエネルギー統計では、高炉転炉法と電炉法が共に「鉄鋼部門」としてまとめて計上されており区分が困難なこと、3)製鉄所と製鉄所外の間でエネルギー取引がなされていること（例えば蒸気、電力、副生ガスなど）、などから国別に比較可能なエネルギー原単位を推計するのは容易でない。

そこで次のようなデータ、考え方にに基づき、国別比較可能なエネルギー原単位を推計した[31]。結果を図3-9に示す。

- 世界統計に基づく手法
 - IEA エネルギーバランス表[127]と worldsteel 集計の粗鋼生産量、銑鉄生産量[120]に基づく手法
- データ積み上げによる手法
 - 企業の環境報告書、各国鉄鋼協会報告に基づく手法
 - 技術普及率を参照する手法
 - IEA “Energy Technology Perspectives 2012”[128]にて示された地域別省エネポテンシャルを参照する手法
 - 地域別還元材比を基に算定する手法

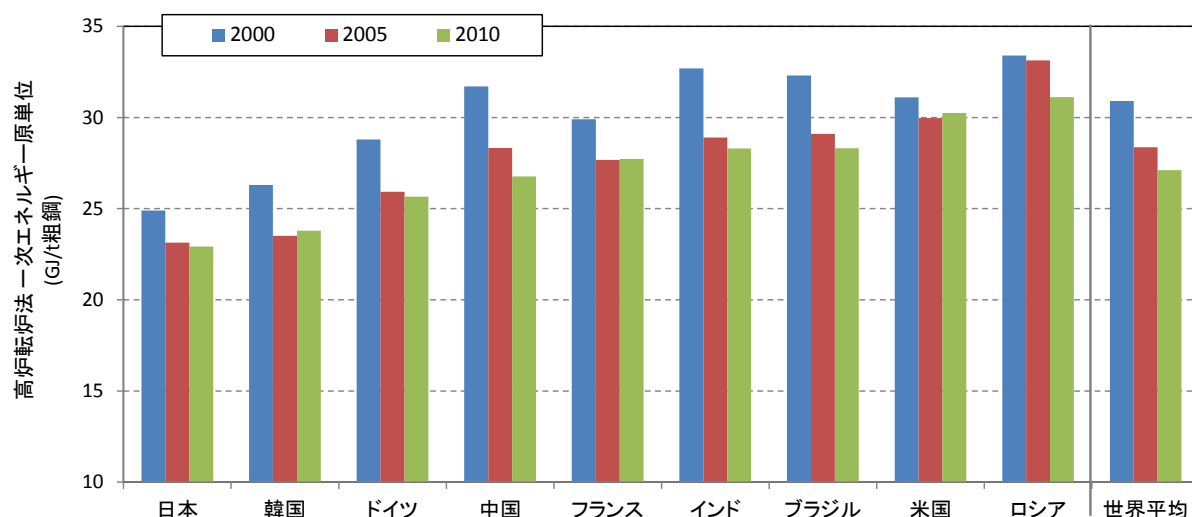


図3-9 比較可能な一次エネルギー原単位の推計値（高炉転炉法）

出典) Oda et al. [31]などに基づく。

⁵⁰ POSCOによれば2014年にFinex第1プラント（年産60万tクラス）を停止した。その後はFinex第2プラント（年産150万tクラス）、第3プラント（年産200万tクラス）の2基体制の操業となっている。

図 3-9 では、時点別、国別に比較可能とするため、粗鋼当たりの銑鉄生産量をそろえている（粗鋼 1t 当たり銑鉄生産量 1.025t）。また、コークスの輸出入、電力の製鉄所外とのやりとりなども明示的に考慮し、正味の一次エネルギー量を計上している。

図 3-9 を含め、次のことが示唆される。

- 世界平均のエネルギー原単位は、これまでゆるやかに改善している
- 日本、韓国がとりわけ優れたエネルギー原単位となっている（これは、副生ガスの回収有効利用率や各種省エネ設備の普及率の差異、運用保守含めたソフト面の優位性などに起因する）
- 中国などの非 OECD 諸国は、新規設備導入や省エネ技術普及に伴いエネルギー原単位の改善がみられる

本研究では、図 3-9 の成果を DNE21+における既存鉄鋼生産設備のデータとして外生的に設定し、後述のシミュレーションに反映した。

3.2.3 鉄鋼部門のモデル化

本論文にて明示的にモデル化する鉄鋼部門のバウンダリーは図 3-10 の中の実線内とする。

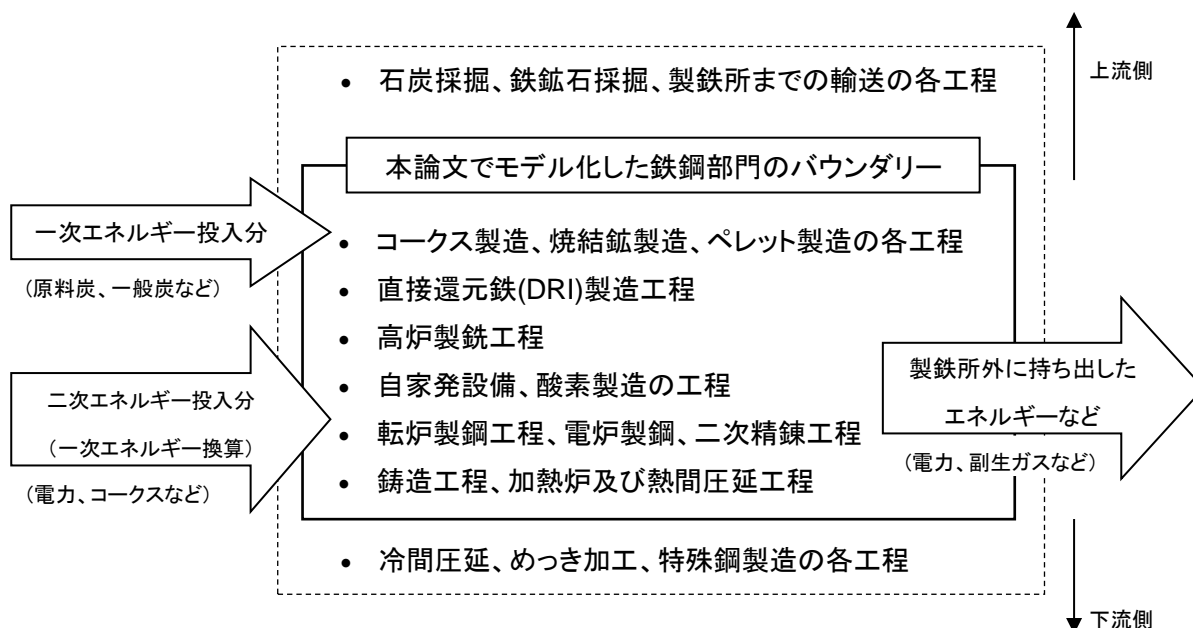


図 3-10 本論文で明示的にモデル化した鉄鋼部門のバウンダリー

これまでに示した鉄鋼部門のエネルギー消費原単位、省エネ技術（表 3-3）、及び世界各地域におけるエネルギー原単位の実績推定値（図 3-9）に基づき、鉄鋼部門を表 3-4 の通りモデル化・離散化し DNE21+へ組み込む。Type II～IV については副生ガスや電力のやり取りがやや複雑であるために簡素化したエネルギーフローをそれぞれ図 3-11～図 3-13 に示す。

表 3-4 鉄鋼部門モデル化 (DNE21+向け)

注)「+」と記載している設備は 後付可能な設備	エネルギー消費原単位 (-は副生ガスなどの 正味発生量) (t 粗鋼あたり)	省エネ量(-で表示) 増エネ量(+で表示) (t 粗鋼あたり)	資本費 (US ₂₀₀₀ \$/t 粗鋼) 「+」は後付設備の 資本費
高炉転炉法(BF-BOF)			
Type I: 低効率(石炭 DRI や平炉含む)	石炭: 29.9GJ 重油: 1.2GJ 電力: 490kWh		276.2
+コークス炉ガス回収 [type I 向け]		-1.9GJ	+11.6
Type II: 中効率	石炭: 26.9GJ 重油: 0.2GJ 電力: 465kWh		295.4
+コークス炉ガス回収 [type II 向け]		-2.2GJ	+9.3
+転炉ガス回収		-0.9GJ	+16.2
+CDQ		-63kWh	+16.1
+TRT		-48kWh	+13.6
Type III: 高効率	石炭: 24.1GJ 副生ガスなど-4.5GJ 電力: 364kWh		386.5
+廃プラ廃タイヤ利用		-0.25GJ	+1.54
+CCS(0.6tCO ₂ /t 粗鋼回収)		石炭-3.0GJ 副生ガスなど+3.0GJ~+2.5GJ 電力+118kWh~+107kWh	+59.7~+51.4
Type IV: 次世代コークス炉	石炭: 22.5GJ 副生ガスなど-4.5GJ 電力: 364kWh		377.1
+CCS(0.6tCO ₂ /t 粗鋼回収)		石炭-3.0GJ 副生ガスなど+3.0GJ~+2.5GJ 電力+118kWh~+107kWh	+59.7~+51.4
スクラップ電炉法(Scrap-EAF)			
Type V: 低効率(小型誘導炉含む)	電力: 623kWh 重油: 3.6GJ		143.0
Type VI: 中効率	電力: 551kWh 重油: 2.5GJ		174.0
Type VII: 高効率	電力: 513kWh 重油: 2.4GJ		183.7
DRI 電炉法(DRI-EAF)			
Type VIII: 中効率	天然ガス: 15.9GJ 電力: 705kWh		374.3
Type IX: 高効率	天然ガス: 12.1GJ 電力: 695kWh		438.1
Type X: 高効率(水素利用)	水素: 12.1GJ 電力: 695kWh		438.1(水素は外部 調達を前提)

注1) 高炉転炉法への CCS 導入の際には CO₂ 回収エネルギーを確保するため、高炉スラグ顕熱利用 0.53GJ/t 粗鋼(0.88GJ/tCO₂ 相当)も合わせて導入される場合を想定。

注2) 幅のある数値は、それぞれ設備導入時点が 2010 年時点と 2050 年時点の場合を意味する。

DNE21+向けモデル化(表 3-4)の特徴は次の通りである。

- 生産方式を高炉転炉法、スクラップ電炉法、DRI 電炉法の 3 種に大別する
- それぞれにエネルギー効率に差をつけた 2 通りないし 4 通りのタイプにて代表させる
 - 高炉転炉法について、Type I であれば製鉄所外部から系統電力を購入するか、あるいは自家発用の燃料を別途調達する必要があるが、Type III であれば発生する副生ガスで発電することで正味で系統電力を購入する必要は生じない(図 3-12)
 - Type III と Type IV には CCS を後付することができる(表 3-4 の注及び図 3-13 に記載した通り現在利用されていない高炉スラグ顕熱の利用も前提とする)

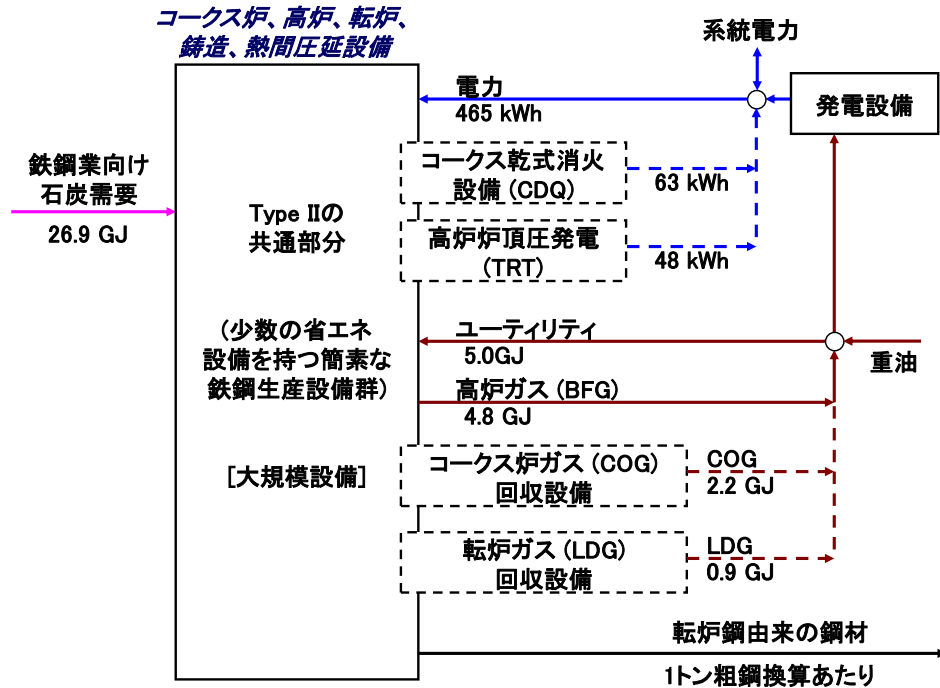


図 3-11 中効率高炉転炉法 (Type II) のエネルギーフロー概略

注) 破線で囲んでいる技術は後付可能であることを意味する。

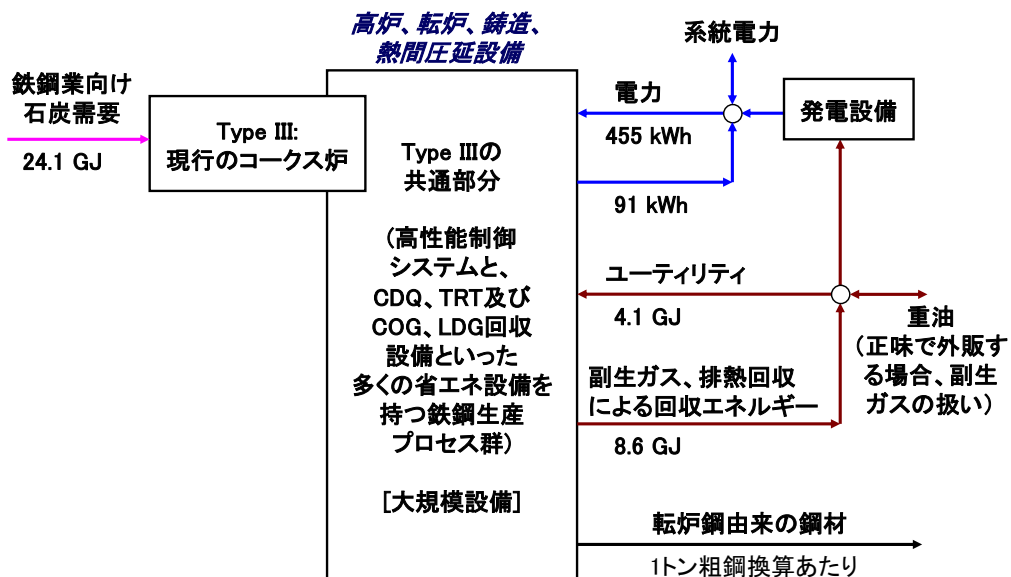


図 3-12 高効率高炉転炉法 (Type III) のエネルギーフロー概略

注) Type III は CCS の後付も可能と想定しているが、本図は CCS について記載を省略した。CCS について次の図 3-13 を参照のこと。

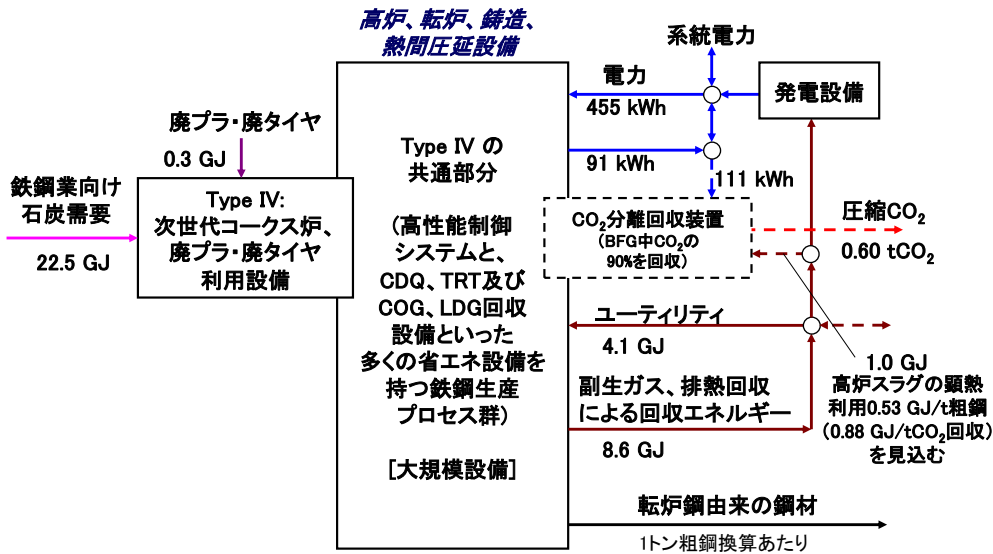


図 3-13 次世代コークス炉を含む高炉転炉法（Type IV）のエネルギーフロー概略

注）破線で囲んでいる技術は後付可能であることを意味する。

DNE21+の鉄鋼部門における算定ロジックや外生的に与えた制約は次の通りである。

- 世界各地域におけるエネルギー原単位の実績推定値（図 3-9）と整合的な既存設備（Type I～X の組合せ）を既に保有しているものとする
- 設備寿命を 40 年とする
 - 40 年経過する前に製鉄所を廃棄することは不可とし年経費が発生するものとする（遊休化は許容する）
- 世界 54 地域別に与えた粗鋼生産量を満たしつつシステムコストが最小となるよう Type I～Type X を選択する
 - 同時に、スクラップ電炉鋼（Type V～VII）の合計は、世界 54 地域別に与えた上下限制シナリオを満たすこととする
 - また DRI 電炉法はこれまでローカルに資源⁵¹が得られる地点での小規模あるいは中規模生産が主体であり、世界的な普及の可能性について限定されるとの前提を置くこととする（具体的には、世界 54 地域別に DRI 電炉法の成長制約を課すこととする）

3.2.4 粗鋼生産シナリオの設定

粗鋼生産について、一般に逆 U 字仮説が言及されている。即ち、1) 一人当たり GDP が低い（農業国の）段階では一人当たり粗鋼生産量が低い、2) その後一人当たり GDP が高まると基礎的インフラ（交通インフラ、水道インフラ、公共施設、堤防などの防災施設など）の拡充、工業化の進展、都市化の進展により一人当たり粗鋼生産量が急激に高まる、3) 一人当たり GDP がさらに高まると相対的に経済に占める第三次産業のシェアが増大し、一人当たり粗鋼生産量が横ばい、あるいは低下する、という仮説である[129]。

⁵¹ 典型的には、ストランドドガス田 (stranded gas field)が挙げられる。

このような逆 U 字仮説は、一人当たり鉄鋼蓄積量でも説明されうる[129]。即ち、鉄鋼蓄積量の小さな状況で、アジア各国のように急激に経済発展が進むと、一定の蓄積量に到達するまで急激な鉄鋼需要の増大が起こるとする指摘である。1960 年代の日本、1970 年以降の韓国、そして 2000 年代の中国がそうである[12]。

Oda et al.[12]はこのような理論的な背景について意識しつつ、足元での各国の粗鋼見掛消費量⁵²の多様性を考慮し、一人当たり粗鋼見掛消費量シナリオを作成している。図 3-14 はその更新版であり、図 3-5、図 3-6 から算定される一人当たり GDP (MER)、及び粗鋼見掛消費量統計値[120]を参照した。本論文は図 3-14 のシナリオを参照する。

鋼材の貿易シナリオ（直接輸出量）を別途想定し図 3-14 と組み合わせることで、地域別の粗鋼生産シナリオを作成した（図 3-15）。想定したシナリオは、特にインドを中心としたアジア途上国で粗鋼生産量が増加するシナリオである。長期的に見て中国、インド以外の粗鋼生産規模はあまり目立たないがこれは、1)中国などからの直接輸出による影響、2)自動車や機械に内包された形での輸出（間接輸出）による影響、による。図 3-14、図 3-15 は従って将来の産業構造やサプライチェーンと表裏一体の関係にある。DNE21+では CO₂ 排出制約に関わらず図 3-15 で示した粗鋼生産を行うとの前提とした。

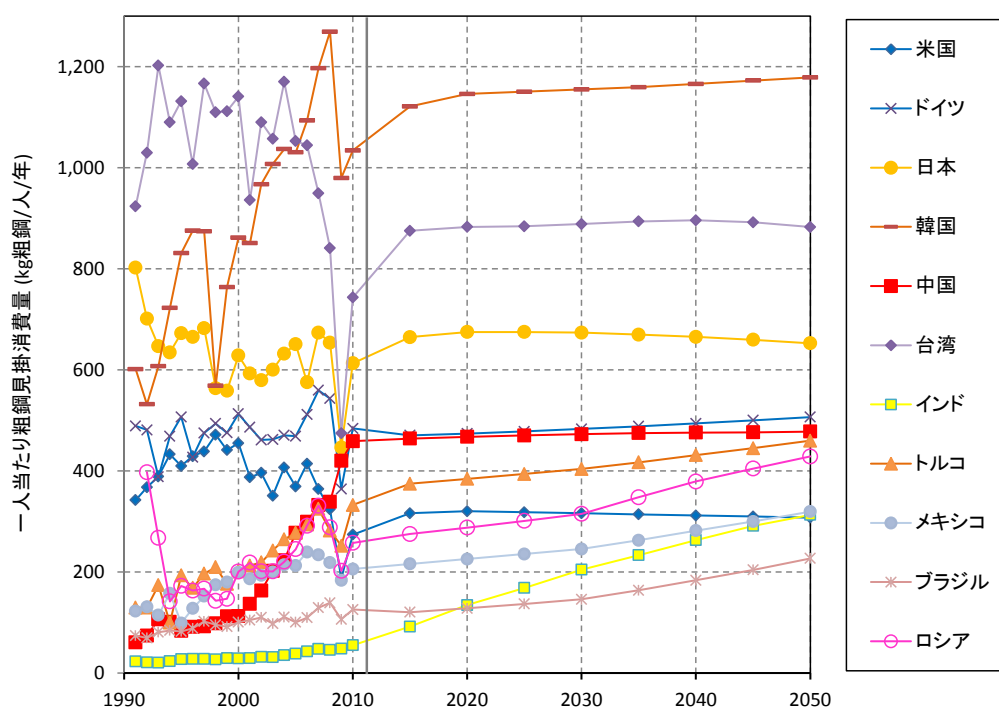


図 3-14 想定した粗鋼見掛消費量シナリオ

⁵² 「粗鋼見掛消費量」とは、一旦は国内に出荷された鋼材量（粗鋼換算）を意味する。即ち、定義上「粗鋼生産量＝粗鋼見掛消費量＋正味の鋼材輸出量（粗鋼換算）」という関係が成り立つ。ここでの正味の鋼材輸出量は「直接輸出量」とも呼ばれる。なお、国内に出荷された鋼材も自動車や機械に加工され輸出される場合がある。これを間接輸出と呼ぶ。生産量から正味の直接輸出、正味の間接輸出を差し引いた量が国内正味需要量となる。

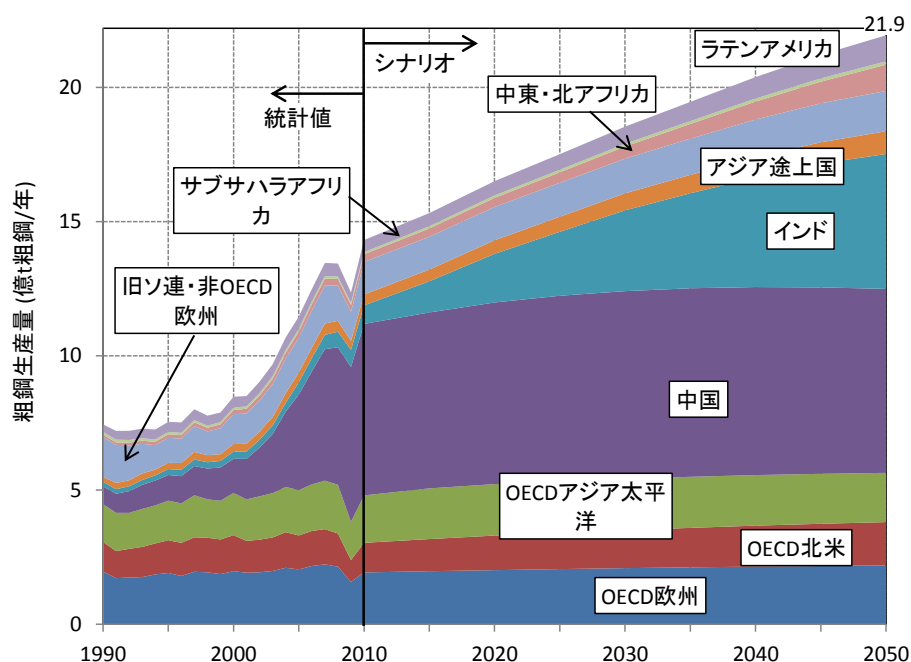


図 3-15 想定した粗鋼生産シナリオ

3.2.5 鉄スクラップの入手可能性の分析

(1) 分析フレーム及び語彙の定義

図 3-15 に示した粗鋼生産シナリオを所与としても、鉄鉱石由来の鉄生産を行うのか（一次生産）、それとも鉄スクラップから鉄生産を行うか（二次生産）によって表 3-2 で示した通り粗鋼 1t 当たりには要する一次エネルギーに大きな差があり、一次生産は二次生産の約 3 倍の一次エネルギー投入が必要となる。CO₂ 排出抑制の観点からは二次生産が望ましいが、スクラップが世界的に貿易されているため、世界の二次生産量の見通しは世界全体で得られるスクラップ量に帰着される。

他の論点として、鋼材需要側の制約によって一次生産、二次生産が規定されるとの指摘がある。自動車や家電、スチール製品に用いられる冷延鋼板、めっき鋼板、高張力鋼板などは専ら一次生産による鋼材に経済的、技術的な優位性がある。このような鋼材需要側の制約が一次生産、二次生産を規定するとの論点もあるが、電炉側の技術進展⁵³もあり二次生産でも生産可能な鋼材種は H 型鋼や鋼板類を含め拡大しつつある。従って、大局的、長期的に見れば鋼材需要側の制約ではなく、世界全体で得られるスクラップ量が制約となると言える。

Oda et al.[130]は以上の観点に基づき、過去の世界全体（世界合計値）の鉄鋼フロー、鉄鋼蓄積量を整理・推計している。その上で、過去の鉄鋼フロー・蓄積量と整合的な将来の鉄スクラップ入手量を提示した。以下、Oda et al.[130]の分析内容を示す。

図 3-16 は参照した鉄鋼フロー（概略）である[130]。「不明」とは使用されていない土木構造物（例：使用されていないトンネル）などであり、ここでは表 3-5 の通り定義する。表 3-5 では、「不明」に加え、

⁵³ 老廃屑を鉄源とした製鉄は、銅や錫といったトランプエレメントの混入割合が一定の値を超えると、製造歩留まりの低下や、鋼材の品質・性能（強度、加工性などの）低下につながる。ただし、トランプエレメントの計測、管理、制御技術向上により、希釈材（銑鉄、所内屑、加工屑など）にあまり頼らず老廃屑を鉄源としたより幅広い鋼材生産が可能となりつつある。

「社会での使用」、「廃棄」についても合わせて示した。DNE21+の分析でのバウンダリーは図 3-10 の通り 鋳物生産を含まないが、鉄フローとして鋳物生産（機械産業）は極めて影響が大きい。そのため本項（Oda et al.[130]）では鋳物生産も含めて分析している。

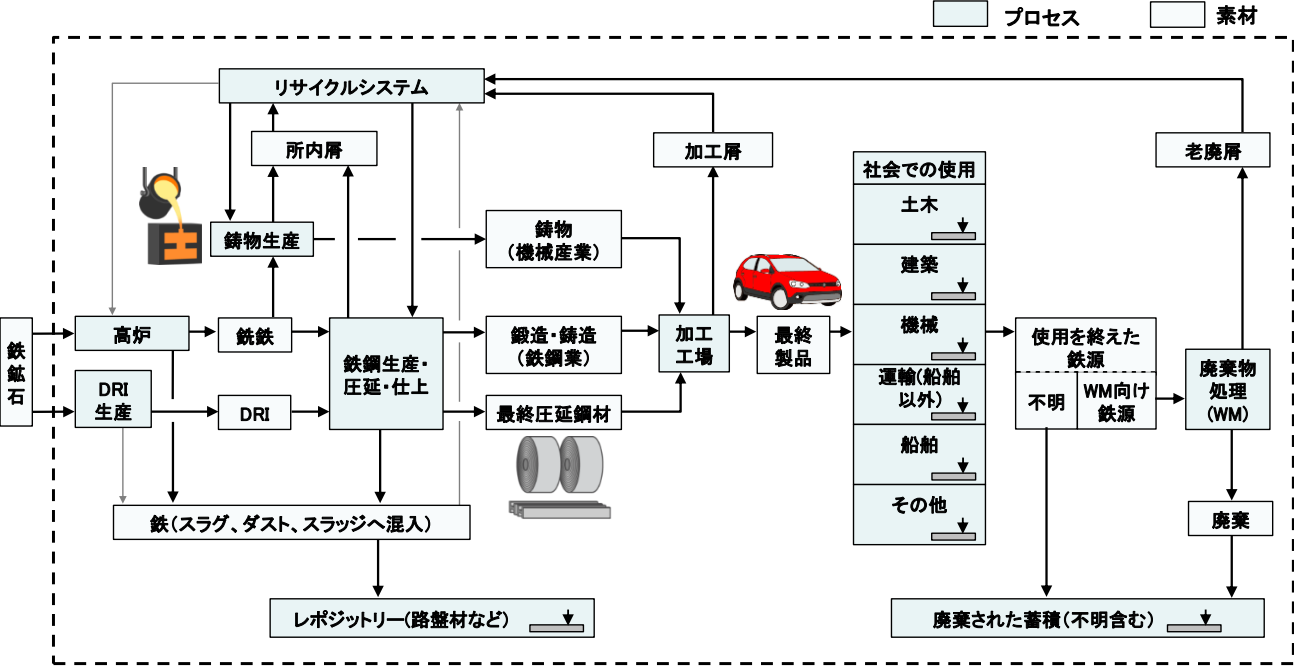


図 3-16 鉄鋼フローの分析例

出典) Oda et al.[130]に基づき整理。

注) 図中の WM は waste management の略。

表 3-5 鉄鋼蓄積、不明、廃棄に関する語彙の定義・具体例

	定義・具体例
社会での使用 (in-use stock, working stock)	<ul style="list-style-type: none">使用中の輸送機械（自動車、船舶、電車など）、容器、機械、建築物、土木構造物など二次利用（鋼材の再利用、歴史的遺跡、その他の二次利用）
不明 (gray area, unobserved residue) <鉄スクラップ回収の 対象とならないもの>	<ul style="list-style-type: none">使用されていない土木構造物（例：使用されていないトンネル、橋脚）機能が低下した土木構造物（例：沈下した港湾施設）地下に残置される鋼材（例：杭基礎、輸送用鋼管）廃棄された施設（例：閉鎖された鉱山、閉鎖された石油ガス生産井）回収見込みのないもの（例：危険物の長期保管、危険物と共に埋立、人口漁礁など）散逸的利用の鋼材（例：土砂崩れ防止施設、防砂ダム）及び使用中の腐食（錆び）や流出その他（軍事関連、その他の僻地利用など）
廃棄 (waste, observed waste)	<ul style="list-style-type: none">埋立処分されたもの（都市ごみと共に埋立、産業廃棄物と共に埋立）不法投棄されたもの沈没船や残置された海底ケーブル

出典) Oda et al.[130]

「不明」の量がどの程度か観測できず、使用中かどうかといった解釈には任意性があり、文献により区分方法が異なる。「不明」を永久利用あるいは使用中と扱う文献、廃棄と扱う文献が共に存在する。「不明」を永久利用と捉えればリサイクル率は（見かけ上）高くなる一方、「不明」を廃棄と捉えればリサイクル率は（見かけ上）低くなる。

ここでのポイントは、図 3-16 に示した「不明」を永久使用と呼ぼうが、廃棄と呼ぼうが、どちらの場合においてももはや老廃屑として回収されることは期待できないことである。ここでは、図 3-16 に示した通り「不明」も廃棄された蓄積として計上することとした。

(2) 過去（1870 年～2012 年）のフローに関するマスバランス

Oda et al.[130]では、世界合計の鉄のマスバランスに着目し、以下のロジックに基づき、将来得られる世界合計の老廃屑量を算定している。以下、個々に説明する。

(3.2)式は、鉄鋼製造から最終製品（機械、自動車など）製造までをバウンダリーとしたバランス式である。ここでの「ロス」とは、製鉄所内においてスラグ、ダスト、スラッジなどに混入してしまい再利用されない鉄源を指す。鉄鋼製造段階で生じる歩留り落ちの多くは所内屑として再利用されるが、一部は「ロス」となる。また最終製品製造段階の歩留り落ちが加工屑となる（図 3-16）。

(3.2)式は最終製品とロスの合計と等しい鉄源供給が必要であり、鉄源供給から一次生産を差し引いた量が老廃屑消費量と等しくなるとしたバランス式である。過去の統計データの内でも入手が困難な数値が老廃屑量であるため、(3.2)式は相対的にデータ入手がしやすい最終製品量や一次生産量から老廃屑を推計する手法をとっている。

過去（1870 年～2012 年）のバランス式

$$\text{老廃屑量} = \text{最終製品量} + \text{ロス} - 1 \text{ 次生産量} \quad (3.2)$$

$$\text{リサイクル率(\%)} = \text{老廃屑量} / \text{使用を終えた鉄源} = \text{老廃屑量} / (\text{廃棄量} + \text{不明} + \text{老廃屑量}) \quad (3.3)$$

Oda et al.[130]では最終製品のシェアと、最終製品別の寿命関数（ワイブル分布）を与えることにより、「使用を終えた鉄源」を算定する。「使用を終えた鉄源」は(3.3)式に示した通り、老廃屑量、廃棄、不明からなる。Oda et al.[130]は、世界を二地域に分割し、それら二地域別に最終製品シェアと最終製品別寿命関数を与える（表 3-6、図 3-17）。

以上の分析により得られた世界全体のリサイクル率((3.3)式定義による)は 53%である(1870 年～2012 年の累積値)。既往の文献では 40%から 70%と示されており、本研究ではこれら既往の文献の数値とほぼ同水準、もしくは相対的に若干低いリサイクル率を得た（図 3-18）。図 3-18 の下段には(3.3)式と同様のリサイクル率の定義を用いた文献値を載せている。図 3-18 の上段は、分母に不明分を含まない異なった定義のリサイクル率を参照した文献値を載せているため、図 3-18 の下段と上段を直接比較できない点に注意が必要である。

表 3-6 最終製品のシェア・寿命の想定

	設定したシェア [単位: %]		設定した寿命（標準偏差） [単位: 年]	
	欧州・CIS ・南北アメリカ・アフリカ	アジア・オセアニア ・中東	欧州・CIS ・南北アメリカ・アフリカ	アジア・オセアニア ・中東
土木	18%	23%	67(29)	34(14)
建築	19%	28%	67(29)	31(13)
機械・電気機器	22%	27%	20(9)	17(7)
運輸（船舶以外）	34%	15%	17(7)	15(6)
船舶	0.5%	1.5%	30(13)	30(13)
その他	6.5%	5.5%	20(9)	15(5)

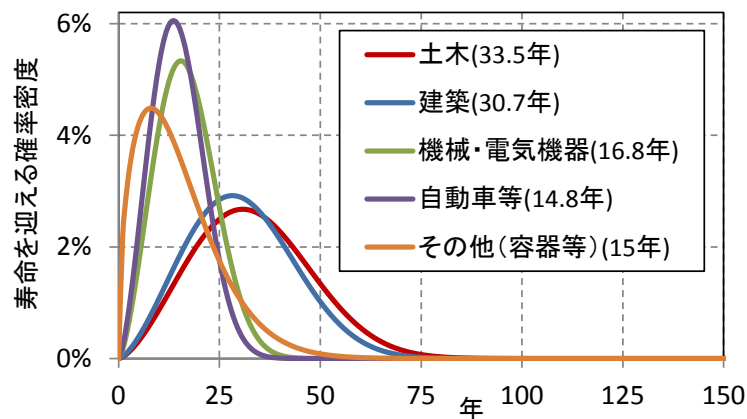


図 3-17 想定した寿命関数（ワイブル分布）[アジア・オセアニア・中東]

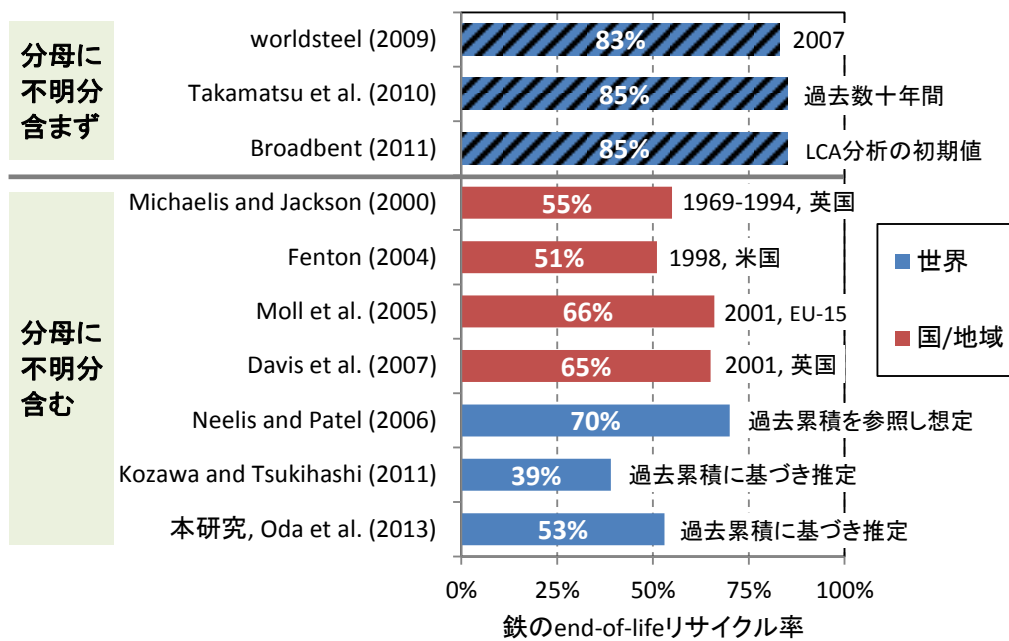


図 3-18 これまでの鉄のリサイクル率推定値の文献間比較

補足）鋳物部門でのスクラップ発生、消費も含む（図 3-16 を参照のこと）。

出典) 図中の出典はそれぞれ次の通り。worldsteel (2009)[131]、Takamatsu et al. (2010)[132]、Broadbent (2011)[133]、Michaelis and Jackson (2000)[134]、Davis et al. (2007)[135]、Fenton (2004)[136]、Moll et al. (2005)[137]、Neelis and Patel (2006)[29]、Kozawa and Tsukihashi (2011)[138]、Oda et al. (2013)[130]。

(3) 将来 (2013 年～2100 年) のシナリオ

将来の老廃屑量の利用可能量を(3.4)式にて想定した。即ち過去のリサイクル率 (53%) が今後も継続すると見なし、使用を終えた鉄源との積をとった。また一次生産量 (銑鉄及び DRI) を(3.5)式にて算定した。結果を図 3-19 に示す。図 3-19 から、今後は電炉の伸び率が大きいものの、今回の分析からは 2050 年時点においても高炉転炉法が主軸となるとの結果を得た⁵⁴。

将来 (2013 年～2100 年) のバランス式

$$\text{老廃屑量} = \text{過去のリサイクル率} \cdot \text{使用を終えた鉄源} \quad (3.4)$$

$$\text{一次生産量} = \text{全生産量} - \text{二次生産量} \quad (3.5)$$

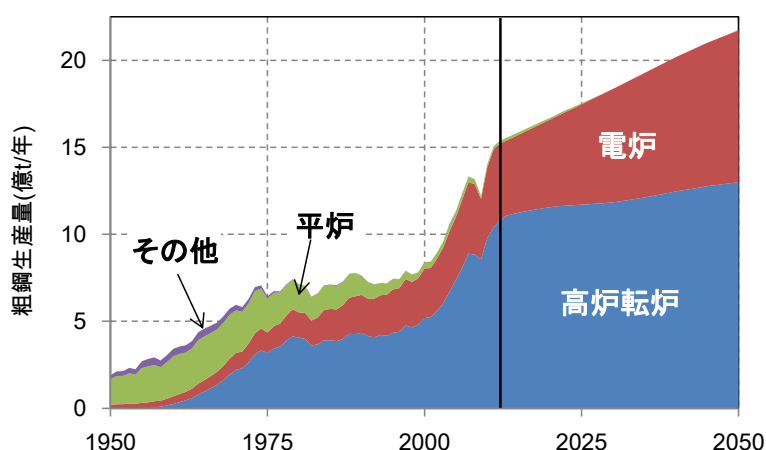


図 3-19 マテリアルフロー分析結果に基づく将来の高炉転炉法、電炉法の見通し

注) DRI-EAF の生産量が今後とも全粗鋼の 5%を維持するとの前提を置いた。

(4) DNE21+向けのスクラップ電炉鋼シナリオ

以上のマテリアルフロー分析と整合的なスクラップ電炉鋼比率 (上下限シナリオ) を世界 54 地域別に設定した。設定したシナリオを図 3-20 に示す (世界計)。世界計のスクラップ電炉比率を見ると 2010 年時点で 24%と減少傾向であったが、今後は回復し 2050 年には 34%ないし 38%に上昇するシナリオである。

⁵⁴ ただし、いわゆるベースラインでの結果であり、第 3.4 節で導入するような世界全体の CO₂ 排出制約を前提としない場合の結果である。

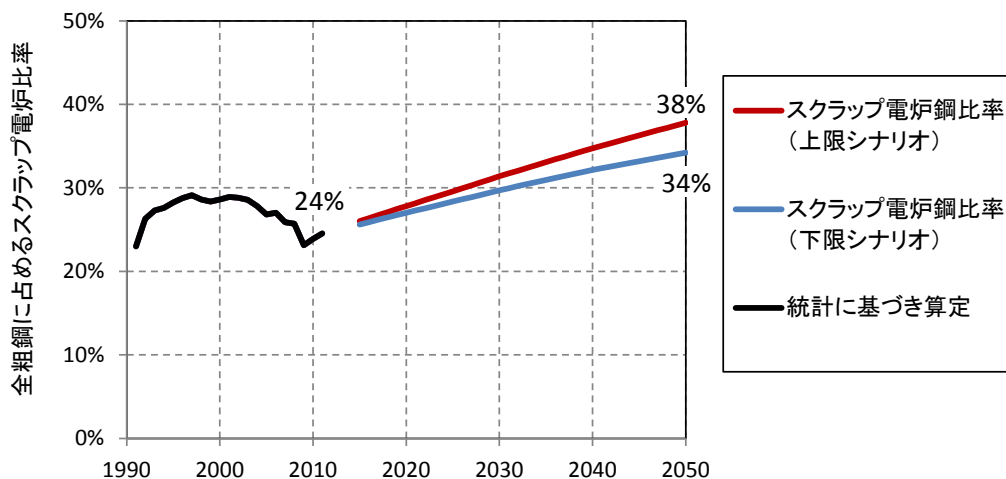


図 3-20 DNE21+向けのスクラップ電炉鋼上下限シナリオ（世界計）

3.3 セメント部門のモデル化（DNE21+の拡張）

3.3.1 セメント生産方式とエネルギー原単位

(1) セメント部門の概要

セメント業は、主原料となる石灰石が世界各地で産出でき、一方でセメント需要の 7 割を占める生コン事業者が需要各地に点在し製品価格に占める輸送費比率が上昇しやすいため、鉄鋼などの他の製品に比べれば輸出入比率が小さく、生産地が地理的に広く分布しているといった特徴を有する。

セメント製造の大きな流れは次の通りである。セメント製造プロセスは、大きく「原料工程」「焼成工程」「仕上工程」の 3 つに区分される。「原料工程」では主原料である石灰石に加え、粘土、けい石、高炉スラグなどを粉砕・混合する。次の「焼成工程」ではこれら原料を、予熱器（プレヒータ）に投入しロータリーキルンを経ることによりクリンカを製造する（日本や欧米の場合）。クリンカはセメントの主原料となる中間生産物であり、セメント製造プロセスの中核をなす。最後の「仕上工程」ではクリンカの粉砕、さらに石こうとの混合を経てセメントとなる（普通ポルトランドセメントの場合）。高炉セメントを製造する際は、「仕上工程」で再度、高炉スラグをクリンカと混合する（高炉セメント重量比で 40% 程度の高炉スラグが投入される場合が多い）。

セメントの成分に着目すると、セメントは CaO 、 MgO 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 を主成分とし、これらの成分比率により決定される水硬率（HM）、ケイ酸率（SM）、鉄率（IM）、石灰飽和比（LSR）などが一定の範囲に入るよう原材料を調合する必要がある。また、アルカリ（ $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ）、 P_2O_5 、 Zn 、 CrCl_3 などの少量微量物質の管理や原料焼成時の易焼成性の確保が必要であるものの、セメント業は多様な副産物・廃棄物（難処理廃棄物を含む）を取り込むことが可能である[139]。

世界的に見れば石灰石の湿分や純度の違いに加え、粘土、ケイ石、鉄源などの原材料や、使用エネルギーも地域によって多様であり、副産物・廃棄物の利用を含め個々の地域特性が比較的強い産業である⁵⁵。

⁵⁵ 事業規模については、欧州、北米において企業買収による寡占化、集約化も進む一方、中国含めたアジア地域では多数の中堅・中小企業がセメント製造を行っており生産活動が分散されている。

(2) セメント生産プロセスのエネルギー原単位

セメント製造に必要な一次エネルギーの内、7割程度が焼成工程の熱源が占め、残りを原料やクリンカの粉砕、混合などのため電力が占める。CO₂ 排出に関して、燃料燃焼や発電に伴う排出の他、焼成工程における石灰石由来（プロセス由来）の CO₂ 排出が伴うこともセメント業の特徴の一つである。

世界のクリンカ製造プロセスを見ると、大きく堅窯とロータリーキルンに分けられる。堅窯は、堅炉（たてろ）、立炉、シャフト炉とも呼ばれる。中国では 2000 年代となっても、堅窯により小規模生産方式が主流であったとされる[140]。

ロータリーキリン方式は、湿式、乾式などに分かれる。米国は 2013 年時点で湿式 10 プラント（平均 7.0 GJ/t クリンカ）、乾式 83 基（平均 3.9 GJ/t クリンカ）が稼働している（米国平均で 4.1 GJ/t クリンカ）[141]。日本は乾式の中でもエネルギー効率に優れた SP もしくは NSP であり⁵⁶、2010 年時点で 3.3 GJ/t クリンカと推定されている[142]。

以上のような生産方式別のクリンカ製造のための熱エネルギー投入量を整理したのが図 3-21 である。図 3-21 は、CEMBUREAU[143]、IEA[144]などの技術データと、各国の企業から報告されたエネルギー原単位[145]を結び付けて Oda et al.[31]がまとめたものである。図 3-21 と個々のキルンデータ[146]を結びつけることでデータが間欠的な地域についてもエネルギー原単位を推測することができる。

(3) 将来の技術進展見通し

堅窯の代替技術として新型流動床シャフト炉の可能性が指摘されている[121]。新型流動床シャフト炉は生産規模が比較的小さい割にエネルギー効率が期待されている。ただし実機での安定的な操業が可能かどうかという技術的課題がある。

大型生産設備として、NSP を大きく超えるようなシステムは報告されていない。CCS の可能性について、欧州において燃焼後回収や酸素燃焼による R&D が進んでいる。石灰石由来の CO₂ も回収でき、また CO₂ 排出ポイントが拡散している製鉄所と比較し、予熱器（プレヒータ）からの排ガスに CO₂ が集約されている点でセメント部門での CCS は有利である。しかし、特に生産量の多いアジア地域において生産設備（比較的規模が小さい）が各地に点在しているため実際に CCS 普及を進めるのは容易ではないと考えられる。本論文ではこのような観点に基づきセメント部門での CCS についてはモデル化しないこととする。

⁵⁶ 「SP」は予熱器（サスペンション・プレヒータ）の略。「NSP」はニュー・サスペンション・プレヒータの略であり、予熱炉・仮焼炉付きロータリーキルンを指す。予熱器は英語名で cyclone preheater と呼ばれる。

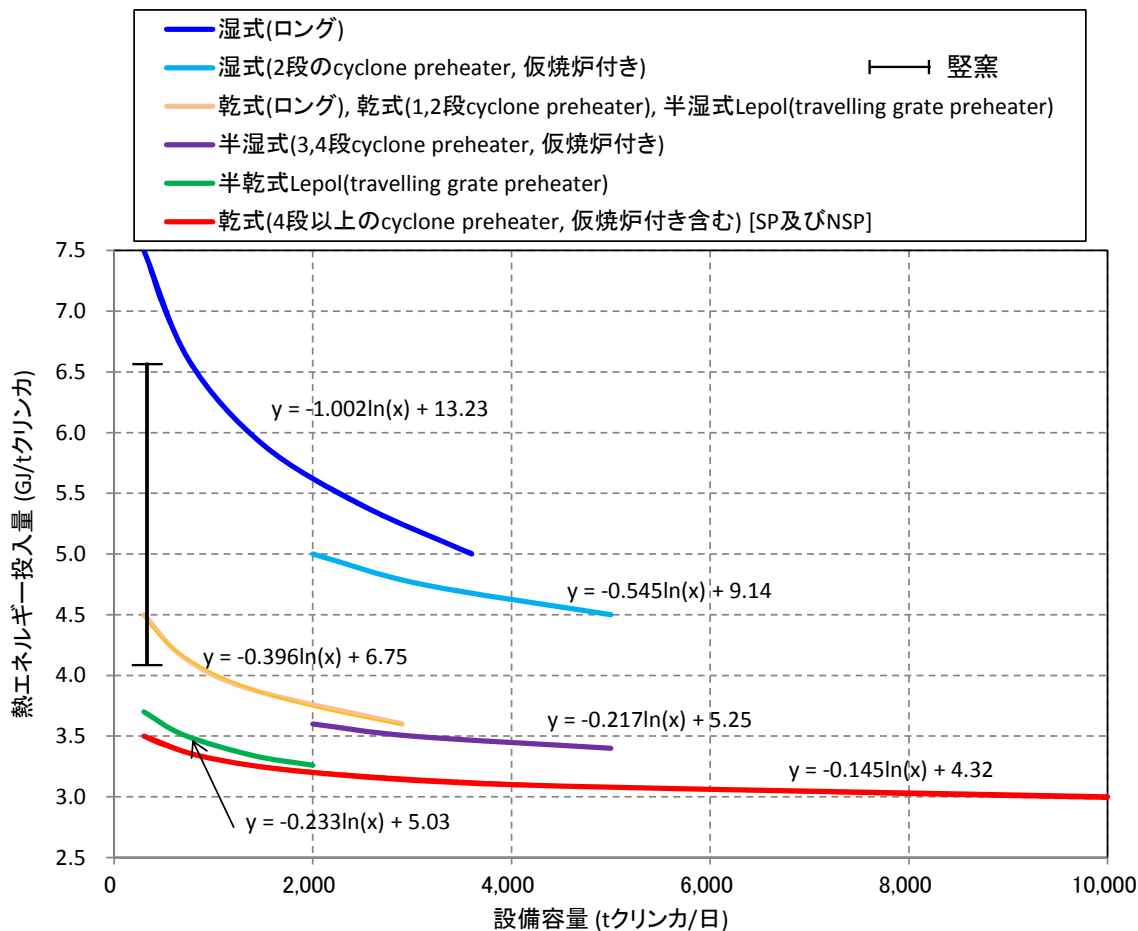


図 3-21 生産方式別の生産容量とクリンカ製造のための熱投入量

3.3.2 セメント部門のモデル化

以上の情報を基に DNE21+向けセメント部門のモデル化を表 3-7 に示す通り行った。図 3-21 に示す通り設備容量によってエネルギー原単位が大きく異なる一方、中国で見られるようにセメントの需要特性や地域性から小型生産設備によるセメント生産も今後継続すると見られる。そこでセメント需要全体を小規模生産設備にてまかなう需要、大規模生産設備にてまかなう需要の 2 区分とした。これらは目安として 2000t クリンカ/日を境界として分離し、小規模生産設備は 1000t クリンカ/日を、大規模生産設備は 3000t クリンカ/日をそれぞれ設備容量の代表値とした。

Type IX は、現在利用可能な最良技術を集約した生産方式とした。即ち、クリンカクーラ排熱回収設備、プレヒータ排ガス回収設備を導入し排熱発電を行う（そのため電力消費原単位が低い）。また、受け入れる副産物・廃棄物についても、既に乾燥処理などの事前処理がなされたもののみ受け入れることを前提とした。このような設定については議論があるが、後に外生的に与える大幅な CO₂ 排出削減制約を見越してこのような Type IX も導入した。

表 3-7 セメント部門のモデル化 (DNE21+向け)

	燃料消費原単位 (GJ/t クリンカ)	電力消費原単位 (kWh/t クリンカ)	設備費 (US ₂₀₀₀ \$/(t クリンカ/年))
小規模設備 (2000t クリンカ/日 未満)			
Type I: 竖窯	5.45	148	324.9
Type II: 湿式ロータリーキルン	6.20	146	438.5
Type III: 乾式ロータリーキルン	4.00	146	526.9
Type IV: 乾式 SP/NSP	3.50	141	501.7
Type V: 新型流動床シャフト炉	2.99	110	473.3
大規模設備 (2000t クリンカ/日 以上)			
Type VI: 湿式ロータリーキルン	4.95	146	409.1
Type VII: 乾式ロータリーキルン	3.58	139	542.8
Type VIII: 乾式 SP/NSP	2.98	134	267.9
Type IX: 乾式 SP/NSP (BAT)	2.41	88	307.8

補足) 燃料消費原単位には廃油、廃プラ、廃タイヤ、木屑を含まない

3.4 DNE21+の分析・結果

3.4.1 CO₂ 排出シナリオの設定

DNE21+の分析に際し、多様な形態の制約をモデルへ与えることが可能である。例えば、1)CO₂ 排出制約、2)炭素税導入、3)部門別エネルギー効率目標（例えば鉄鋼部門であれば、t 粗鋼当たりエネルギー原単位の目標）などが代表的な制約として挙げられる。Oda et al.[12]では3)の制約を課した場合、1)と比べどの程度費用対効果が低下するか分析を行っている。

本節では、後のエネルギーセキュリティ指標導入の結果解釈を容易にするため、「1)CO₂ 排出制約」、即ち世界合計の CO₂ 排出量に対し制約を課するという簡素なシナリオ導入とする。これは、ある将来時点において、全地域・全部門で CO₂ 限界削減費用が均等化することを意味する⁵⁷。

想定した CO₂ 排出シナリオを図 3-22 に示す。ベースシナリオとは特段の気候変動政策を課さない場合の結果である。ただし現行のエネルギー税、エネルギー補助金については今後も継続することをベースシナリオでも想定する。炭素制約シナリオとして 450 ppm CO₂ eq 安定化、550 ppm CO₂ eq 安定化、650 ppm CO₂ eq 安定化の 3 通りを外生的に想定する。これらは以下、450 シナリオ、550 シナリオ、650 シナリオと記載する。

評価時点間のエネルギーシステムコストを累積する際に用いる割引率として 5%/y を参照する。なお本論文に以下に示す DNE21+の結果は 2011 年 9 月から 2012 年 3 月にかけて解いた結果である。

⁵⁷ ただし、2010 年時点については京都議定書の状況を DNE21+に外生的に与えており、CO₂ 限界削減費用は均等化していない。後に示す 2010 年時点限界削減費用の結果については 0US\$/tCO₂ として表示する。

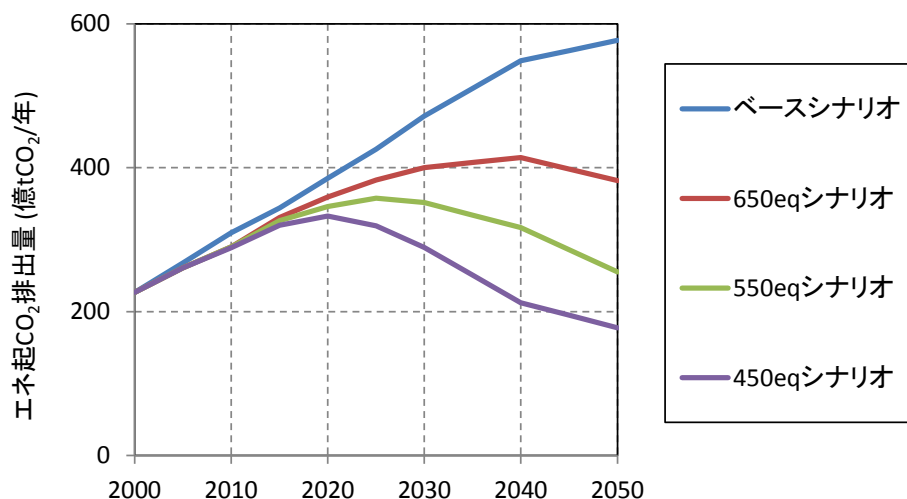


図 3-22 世界合計のエネルギー起源 CO₂ 排出制約シナリオ

注) 比較のため特段の温暖化緩和策をとらないベースシナリオについても図示した。

3.4.2 結果と考察

CO₂ 限界削減費用、及び世界合計の CO₂ 排出量・貯留量の結果をそれぞれ図 3-23、図 3-24 に示す。650 シナリオでは数十 US₂₀₀₀\$/tCO₂ の CO₂ 限界削減費用であるが、2050 年時点で 550 シナリオ、450 シナリオは、それぞれ 109 US₂₀₀₀\$/tCO₂、276 US₂₀₀₀\$/tCO₂ となる結果である。

CO₂ 排出量・貯留量については、ベースシナリオにおいても CO₂-EOR が一部進み 2050 年には年 9 億 tCO₂ 程度貯留される。450 シナリオではより早い段階から帯水層貯留が行われ、2040 年時点で年 41 億 tCO₂ 程度貯留される結果である(これは年 100 万 tCO₂ 規模の CCS サイト換算で 4100 サイトに相当)。

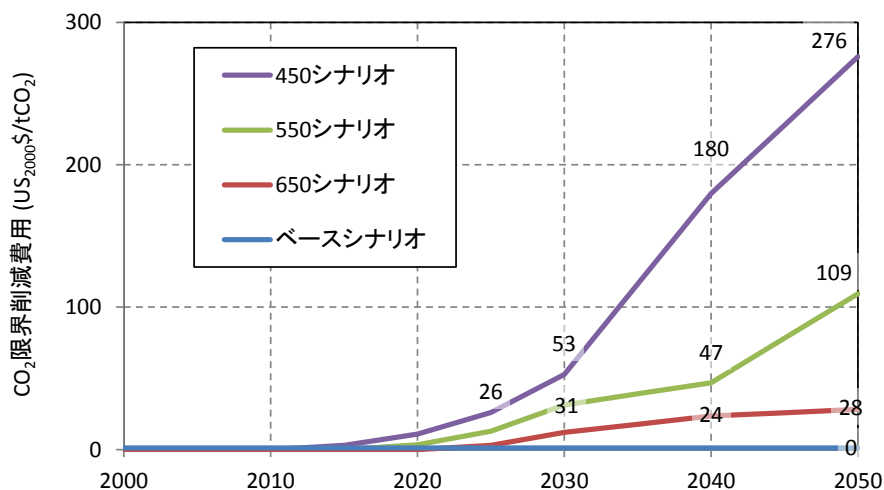


図 3-23 CO₂ 限界削減費用

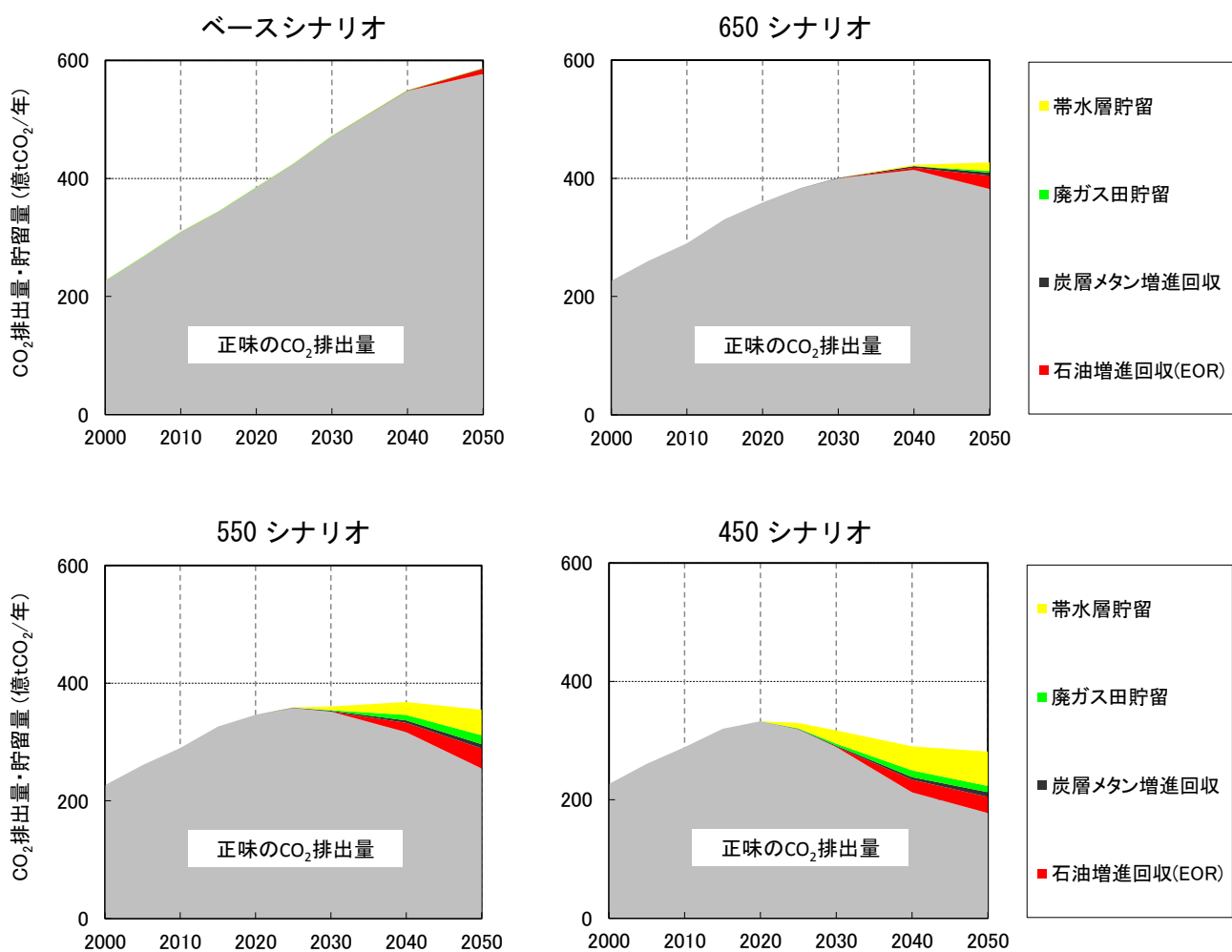


図 3-24 エネルギー起源 CO₂ 排量・貯留量の結果（世界計）

世界合計の一次エネルギー供給量の結果を図 3-25 に示す。CO₂ 制約が厳しくなるにつれて特に石炭が低下していくと同時に、バイオマス、原子力、風力、太陽光などが増加する結果である。石炭はベースシナリオでの 2040 年において 78.4 億 toe/y（シェア 38%）であり、量のみならずシェアで見ても増加する結果である（2010 年のシェアは 30%）。一方、450 シナリオでの 2040 年は 17.2 億 toe/y（シェア 10%）となる結果である。

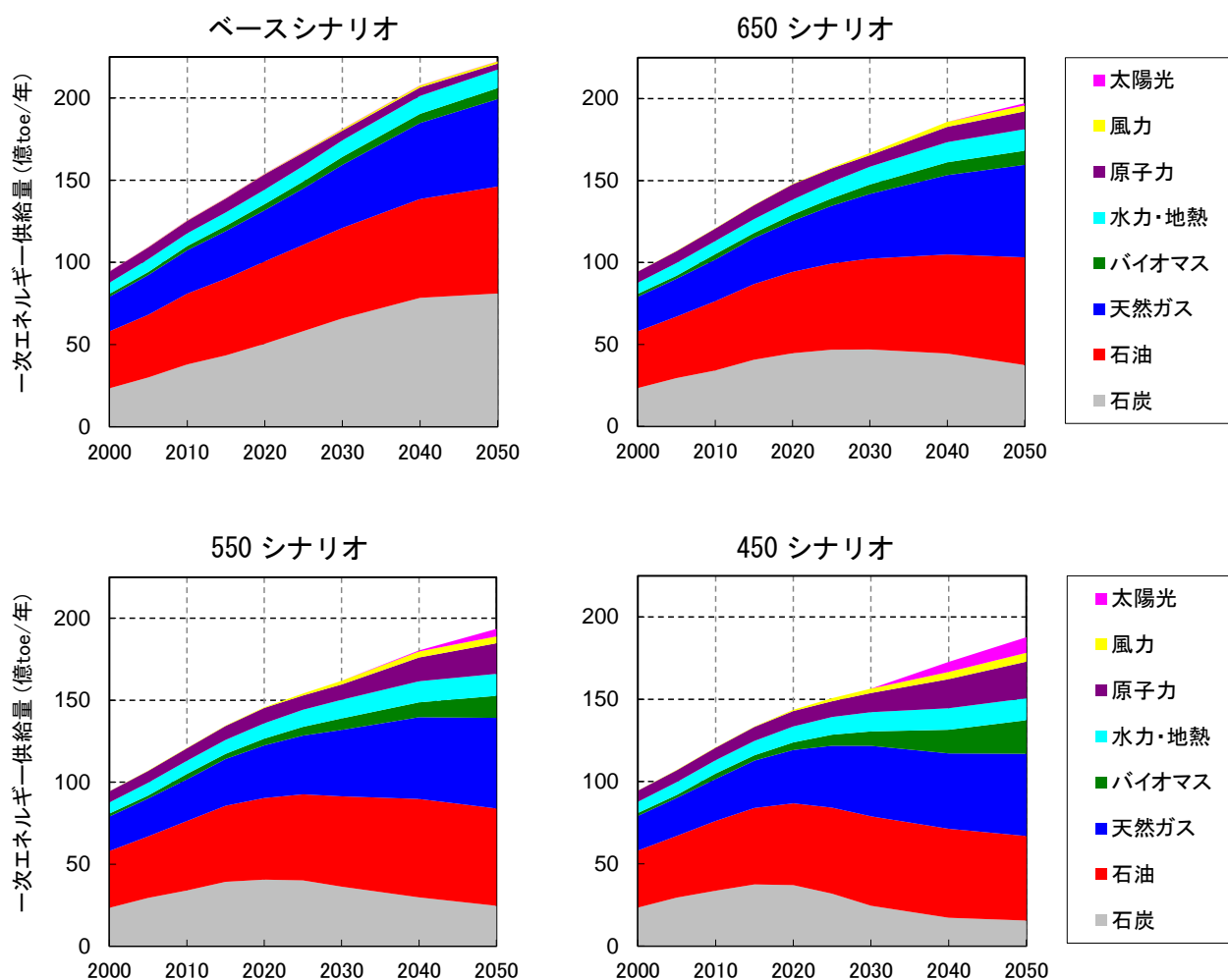


図 3-25 一次エネルギー供給量の結果（世界計）

世界合計の発電電力量（発電端）の結果を図 3-26 に示す。ベースシナリオと比較すると、650 シナリオであっても石炭火力が大幅に低下すると同時に、CO₂ 回収設備が導入される結果である。650 シナリオでの 2050 年時点では、石炭火力の 4 割、年 5700TWh 相当が CO₂ 回収付きとなる結果である。550 シナリオでは一部のガス火力を除き、ほぼ全ての火力発電に CO₂ 回収設備が付加される結果である。

CO₂ 回収に加え、550 シナリオ、450 シナリオでは原子力、風力、太陽光も大幅に導入される結果である。450 シナリオでの 2050 年において原子力は 2010 年の 2.9 倍、1 基 100 万 kW（設備利用率 80%）換算で 1220 基相当の規模となる結果である。

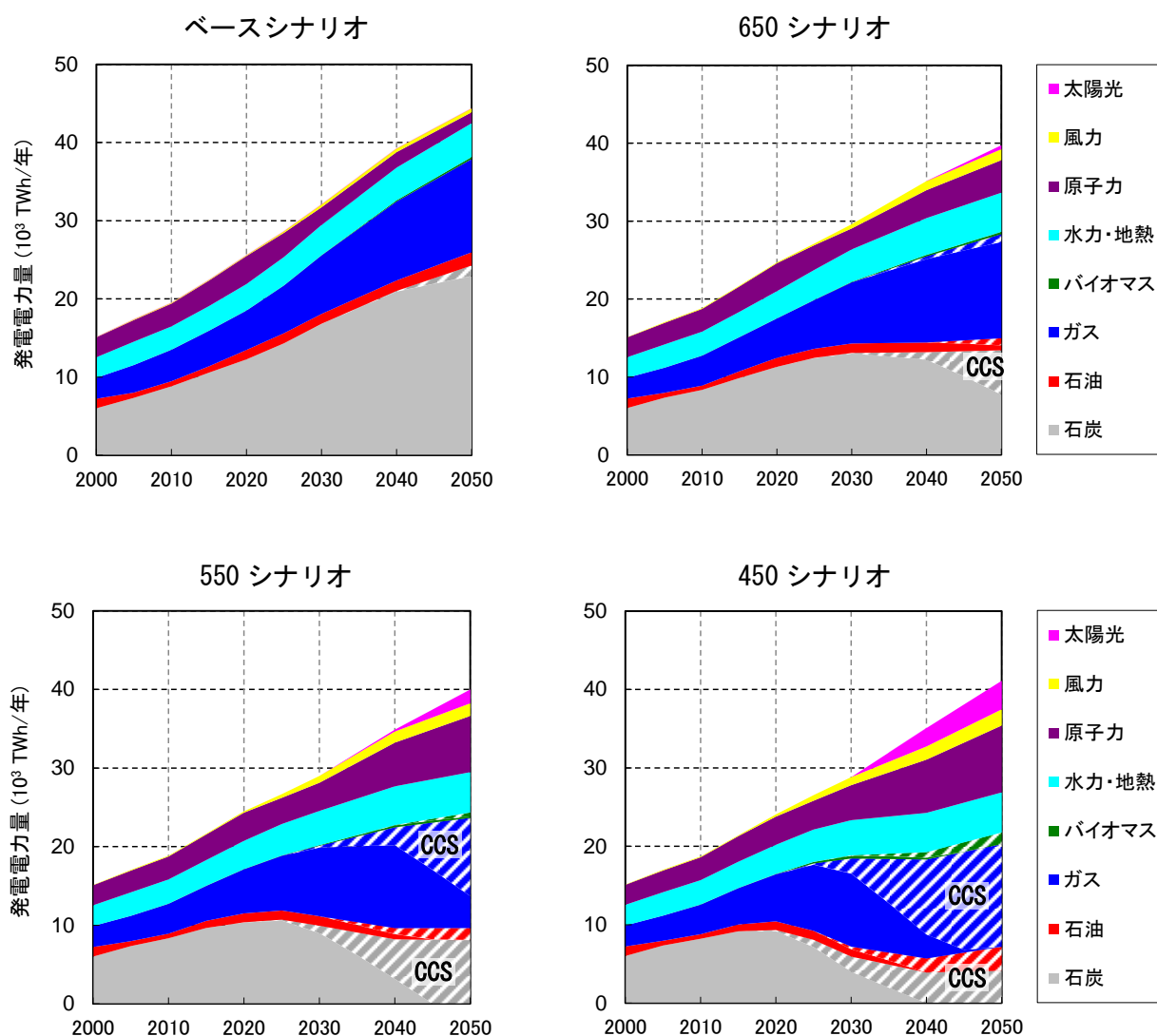


図 3-26 発電電力量の結果（発電端、世界計）

注）図中に縞をつけた箇所は、各火力発電設備が CO_2 回収設備を保有・稼働していることを意味する（図中ではスペースの関係から「CCS」とのラベルを付けた）。なお、 CO_2 回収率はそれぞれ 90%である。

世界合計の粗鋼生産設備容量の結果を図 3-27 に示す。図 3-27 において Type I から IV は高炉転炉法、Type V から VII がスクラップ電炉法、Type VIII から X が直接還元鉄（以下、DRI）電炉法である。発電部門同様、650 シナリオにおいて CO_2 回収設備が一部普及し、550 シナリオでの 2050 年には、ほぼ全ての高炉転炉法において CO_2 回収設備が導入される結果である。ただし、高炉転炉法に CO_2 回収設備を付加しても CO_2 回収率は 1/3 にとどまると想定しており、発電部門の CO_2 回収率 90%と大きな違いがある。

DRI は現状、天然ガスを用いる方式、石炭を用いる方式に二分される。本分析の 450 シナリオでは天然ガスを用いた DRI 電炉法、さらに CO_2 回収設備も保有する DRI 電炉法が大きく増加する。鉄鉱石から鉄の小規模生産を行う場合で、かつ燃料価格が安価な地域において、一般に DRI 電炉法は経済的優位

性を持つが、450 シナリオのように炭素制約が厳しいとこれら制約を超えて DRI 電炉法が経済性を持つようになる結果である。スクラップ電炉法（Type V から VII）のエネルギー原単位改善余地は限られるが、系統電力の CO₂ 原単位低下に伴いスクラップ電炉法の間接 CO₂ 排出も低下することとなる。

鉄鋼部門は、DRI 電炉法、スクラップ電炉法という比較的低碳素化を進めやすい生産方式があるが、スクラップ入手の制約があるため政策的にスクラップ電炉率をさらに高めることはできない。高炉転炉法は CO₂ 回収設備を付加しても CO₂ 排出の 1/3 しか回収できず、技術的に CO₂ 排出削減を進めにくい部門と言える。なお、図 3-27 の 450 シナリオでは 2040 年時点で全設備容量が 1.5 億 t 粗鋼/年ほど他のシナリオより大きくなっている。これは CO₂ 原単位の高い設備（Type I 及び II）を遊休化していることによる。

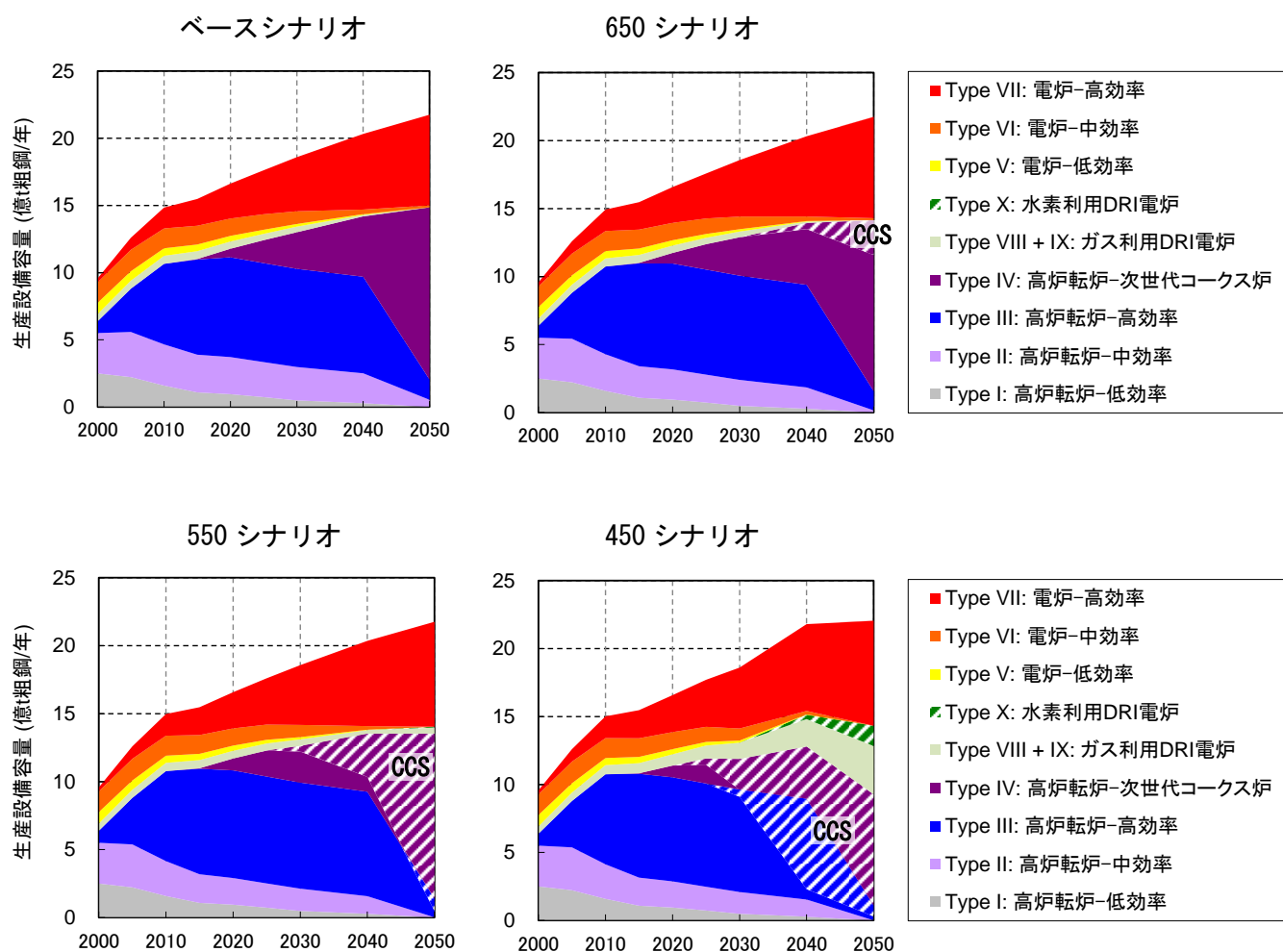


図 3-27 鉄鋼生産設備の結果（世界計）

注）図中に縞をつけた箇所は、CO₂ 回収設備を保有・稼働している製鉄所であることを意味する（図中ではスペースの関係から「CCS」とのラベルを付けた）。

以上は世界全体の鉄鋼部門の結果であるが、次に日本の鉄鋼部門の結果を図 3-28 に示す。650 シナリオにおいて世界の傾向と同様に一部の高炉転炉法に CCS が付加される結果である。具体的には 2050 年

時点で粗鋼生産 1300 万 t/年相当の設備に CCS が付加され、800 万 tCO₂/年の CO₂ が回収される結果である。450 シナリオでは 2050 年においては全ての高炉転炉法の設備（粗鋼生産 7450 万 t/年相当）に CCS が付加されるのみならず、水素を利用した DRI 生産設備が粗鋼生産 850 万 t/年相当の規模で導入される結果である。なお、450 シナリオにおいて日本の DRI 生産は外生的に与えた上限制約まで拡大する結果である。

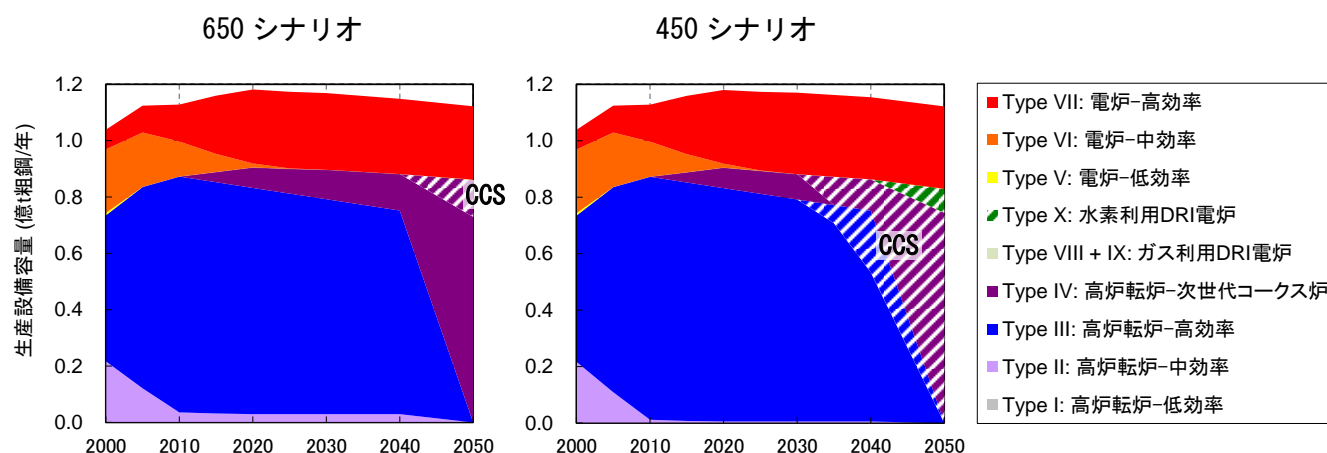


図 3-28 鉄鋼生産設備の結果（日本）

注）図中に縞をつけた箇所は、CO₂ 回収設備を保有・稼働している製鉄所であることを意味する（図中ではスペースの関係から「CCS」とのラベルを付けた）。

世界合計のセメント部門（クリンカ生産設備容量）の結果を図 3-29 に示す。Type I から V が小規模設備の容量、Type VI から IX が大規模設備の容量である。小規模設備による生産量は 2010 年以降低下し、ほぼ既存設備のみで供給される結果である。このように小規模設備の需要が低下し小規模設備の新設必要量が小さく、450 シナリオであってもごく一部容量に新型流動床シャフト炉が導入されるにとどまる結果である。大規模設備では、予熱装置付き乾式ロータリーキルン（SP）、仮焼炉及び予熱装置付き乾式ロータリーキルン（NSP）が費用面、エネルギー効率の両面で優れている。Type IX は、資本費、運転費共に高価となる SP/NSP の BAT 技術を想定しているが、450 シナリオでの 2050 年に Type IX が 4.2 億 t/年程度導入される結果である。セメント部門は（CO₂ 回収設備付加を許容できるモデル化を今回行っていないこともあるが）基本的に CO₂ 排出削減を進めにくい部門と言える。

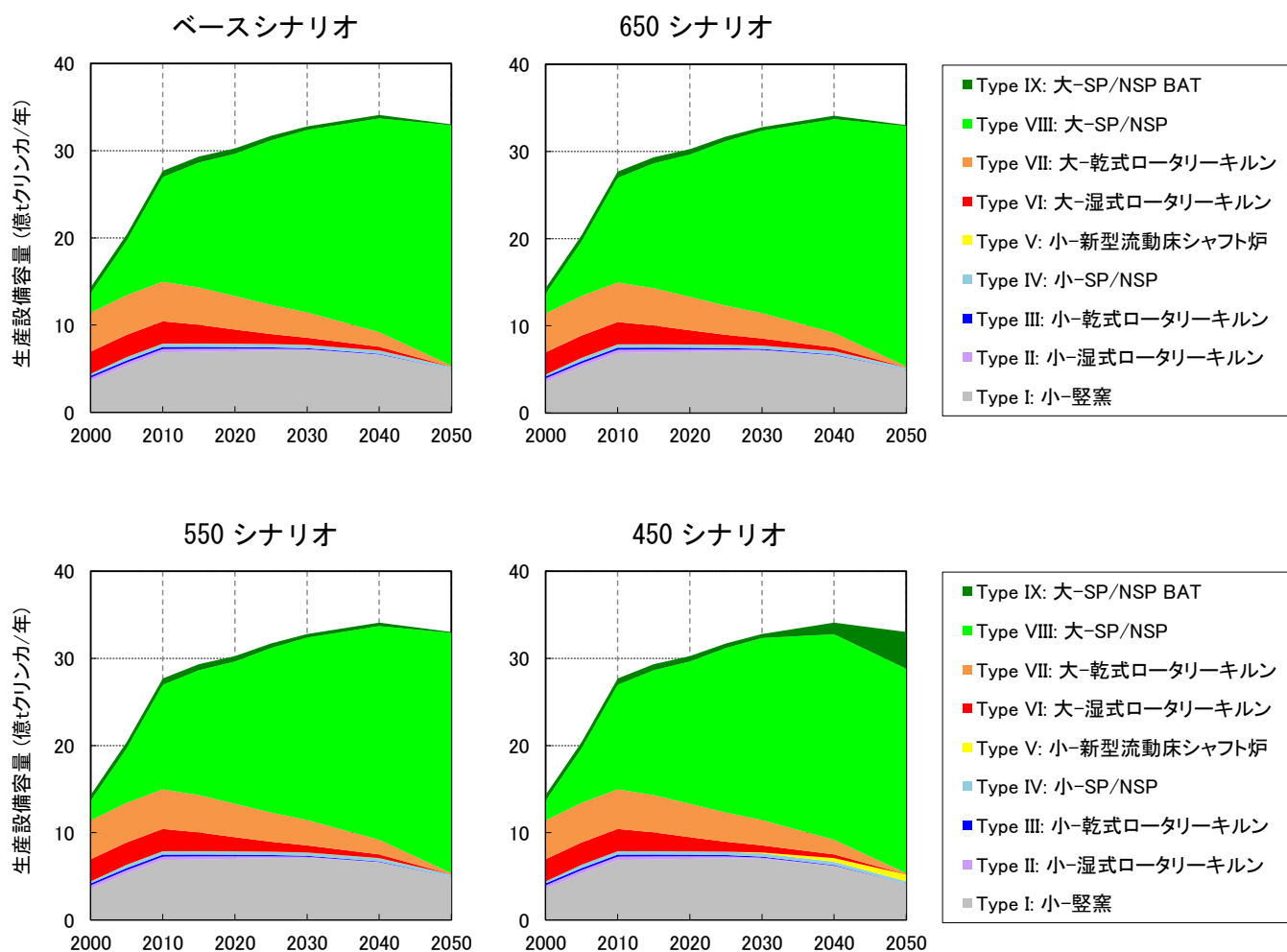


図 3-29 セメント生産設備の結果（世界計）

3.5 エネルギーセキュリティ指標

3.5.1 セキュリティ指標導入に際しての背景

これまで DNE21+を用いて、650 シナリオ、550 シナリオ、450 シナリオを所与とした場合の費用効果的な技術普及について見てきた。しかし、そのような技術普及が実現するためにはいくつかの障壁がある。障壁の一つはエネルギーセキュリティである。CO₂ 排出削減費用の観点から費用効果的であっても、各国政府から見てエネルギーセキュリティ上の課題が大きく許容されない場合、そのような技術普及、及び技術普及を後押しする政策手段に期待できない。

障壁のもう一つは投資実施主体から見た投資リスクである。省エネ技術、エネルギー効率に優れた技術・設備、及び CCS などは相対的に資本集約的であり、投資リスクの観点から投資が期待通り進まなかったり、異なる技術選択が行われたりする可能性もある。投資リスクについては次の第 4 章にて扱うこととし、本節ではエネルギーセキュリティに着目する。

エネルギーセキュリティは第 1.3.3 項及び第 1.3.4 項にて議論した通り、そもそもの定義、定性的内容や方向性を含め識者間で多様な認識・意見が見られる。そのため、エネルギーセキュリティの定量的評価はその位置づけや意味合いについて注意が必要である。特に政策的含意を抽出する際には注意が必要

であり、セキュリティの定量評価は専門家判断を代替するものとはならず、補完するものである。

一方、各国別、CO₂ 排出制約シナリオ別のエネルギーセキュリティを議論する際には、定量的なエネルギーセキュリティ指標（以下「セキュリティ指標」と記載）が分析都合上、大変有効である。これは分析実施者自身が状況把握するために有用であるばかりでなく、コミュニケーション上も有用である。

本節は、このようなセキュリティ指標の分析都合上の有用性に着目し、以下、セキュリティ指標の構築、導入を行う。ただし、DNE21+の評価関数の中にセキュリティ指標を明示的に組み込んでいない一方向の分析であることに注意が必要である。

3.5.2 既往文献における分析評価ロジックとセキュリティ指標

エネルギーセキュリティ評価のための分析ロジックとして、より本格的に評価関数の中にセキュリティを組みこむことにより明示的かつ能動的にエネルギーセキュリティ対応行動を分析する手法がある。例えば川上ら[147]は、原油・LNG の供給途絶、原子力稼働停止というリスクを明示的に考慮し、確率動的計画法により、総期待費用が最小となる最適備蓄運用（原油・LNG 取り崩し量など）を算定している。川上ら[147]の分析ロジックと比べると大幅に簡素化しているが、小田ら[148]は輸入する原油、天然ガスに対し価格の 25%の関税を課すことによって、地域別、CO₂ 排出制約シナリオ別のセキュリティ指標がどのように変化するか評価を行っている。Stirling[6]は、英国の電源構成に着目し発電費用と多様性指数を加重平均した評価関数により最適な電源構成を多様性指数を用いた定量分析例として示している。

他方、より簡素な評価ロジックとして、エネルギー需給やエネルギー貿易マトリックスを固定及び所与とした上で、それをセキュリティ指標に当てはめるという一方向の評価ロジックも見られる。このような評価ロジックにおいて参照するセキュリティ指標は包括型と特化型に大別される。包括型は、化石燃料輸入状況や電源構成のみならず、チョークポイント依存比率、石油備蓄日数、国産エネルギー比率、エネルギーR&D 支出、二次エネルギー価格、最終エネルギー需要（対 GDP 比）など、できるだけ幅広い項目を包括的に参照するアプローチである。包括型の例として、Choong et al.[149]、資源エネルギー庁[150]などが挙げられる。包括型は必要となるパラメータが相対的に多く、主に過去の時点における少数の国に対して適用される。

特化型は、化石燃料輸入、一次エネルギーや電源構成といった特定の項目に注目し指数化するアプローチである。特化型の例として McCollum et al.[26]、Matsumoto and Andriopoulos[27]、IEA[151]、Oda et al.[152]などが挙げられる。特化型はカバレッジが狭く網羅性に劣るが将来分析にも応用しやすい。（セキュリティを考慮した能動的行動を考慮していない簡素なロジックを用いている点に加え）セキュリティ指標の定式化に任意性があるものの、これらを前提とすれば国家間比較、時点間比較なども可能となる。本論文では DNE21+の結果を特化型のセキュリティ指標へ当てはめることとする。

3.5.3 セキュリティ指標の構築

セキュリティ指標として無数の定式化が考えられるが、本論文では DNE21+の特性を考慮した Oda et al.[152]の定式化を踏襲・引用する。Oda et al.[152]の定式化は、Neff[153]の拡張版、IEA[151]の（一部）簡素版にあたる。以下、Oda et al.[152]の定式化について述べる。

特化型のセキュリティ指標の関数形として、一般にシャノン－ウィナー多様化指数、あるいはハーフ

インダール指数が用いられている。シャノン-ウィナー多様化指数は、熱力学のエントロピー、情報理論のエントロピー、生物多様性の評価指数として広く用いられている。シャノン-ウィナー多様化指数を(3.6)式に示す。

$$S = -\sum_i w_i \ln w_i \quad (3.6)$$

ただし、 w_i はシェアである。 i は分析評価によって異なり、エネルギーセキュリティへ適用する場合、国や地域、エネルギー種や電源種などとなる。Stirling[6]は、(3.6)式と各電源の発電単価を重み付けし、英国における最適な電源構成を例示している。McCollum et al.[26]は(3.6)式を基にした一次エネルギー供給の多様性指数を導入し世界 11 地域別のセキュリティ指標（多様化指数）を示している。

ハーフィンダール指数は、米国司法省や連邦取引委員会、日本の公正取引委員会が、市場の集中度を測定する際の定量的指標として用いている((3.7)式)。

$$HHI = \sum_i w_i^2 \quad (3.7)$$

ただし、 w_i はシェア(%)である。 i は分析評価によって異なる。IEA[151]、Neff[153]は、エネルギー供給安定性（分散の程度）の定量的指標として、ハーフィンダール指数を用いている。

シャノン-ウィナー多様化指数は、ごく小さなシェアを占めるもの（シェア順序で下位のもの）でも多様化指数に与える影響は相対的に大きい。その一方、ハーフィンダール指数はシェア順序で上位のものの影響が大きく、ごく小さなシェアを占めるもの（シェア順序で下位のもの）の影響は小さい。

本論文では、シェア順序で上位のものの影響が大きいハーフィンダール指数を参照する。これは、第 1.3.3 項、及び第 1.3.4 項に示した定性的内容（特に石油やガスの中東依存度が歴史的経緯もあり懸念されている点）から判断して妥当と考えられる。

評価対象として本論文では IEA[151]、Oda et al.[152]と同様に化石燃料輸入に着目する。ここで、IEA[151]はガス輸入に関して、石油価格リンクのガス価格となっているガス輸入と、ガス市場独自の価格付けがなされているガス輸入を区別している。また石炭についても、その脆弱性を評価している。

本論文では、実務上の観点、即ち DNE21+の結果の特性⁵⁸に基づき、ガス輸入の脆弱性、及び石油輸入の脆弱性に注目した次の(3.8)式のセキュリティ指標を導入する。(3.8)式に示した通り、ガス輸入について、ガスの価格付け方式、輸送方式（パイプライン、LNG タンカー）の区別をしないこととする。(3.8)式は Oda et al.[152]の定式化と同様である。

セキュリティ指標 原油輸入の脆弱性 ガス輸入の脆弱性

$$= \frac{C_{oil}}{TPES} \sum_i (r_i \cdot S_{oil,i}^2) + \frac{C_{gas}}{TPES} \sum_i (r_i \cdot S_{gas,i}^2) \quad (3.8)$$

ただし、 C_{oil} 、 C_{gas} は原油、ガスの輸入量、 $TPES$ は一次エネルギー供給量（及び輸出量の合計）、 r_i は地域 i のカントリーリスク（1～3）、 $S_{oil,i}$ 、 $S_{gas,i}$ は原油、ガス輸入に占める地域 i のシェア（0～100）であ

⁵⁸ DNE21+の結果と特性として、次の点が特にセキュリティ指標と関連がある。(1) 石炭貿易マトリックスが将来分析において単純化しやすい（石炭の性状、特にコークス製造向けの石炭の性状や、鉱山の権益や資本関係などを DNE21+へ組み込んでいないことによると考えられる）。(2) ガスの価格付けについて評価対象としておらず、例えば将来の石油価格リンクのガス取引量などについて明示的な結果が得られない。(3) ガスの輸送方式、即ちパイプライン輸送、LNG タンカー輸送の競合が前提条件によって左右されるが、この点について詳細分析は行っていない。

る。

導入したセキュリティ指標(3.8)式の構造及び意味合いは次の通りである。セキュリティ指標は、原油輸入の脆弱性、ガス輸入の脆弱性の和とする（値が大きい方が相対的にセキュリティ上、脆弱との評価となる）。原油輸入の脆弱性は、評価地域の一次エネルギーに占める原油依存度と、原油輸入の不安定性（ Σ の項）の積とする。原油輸入の不安定性（ Σ の項）は、原油輸入元の集中度と、輸入元のカントリーリスクの積とする。ガス輸入の脆弱度についても、原油輸入と同等の計算式とする。

以上、明示的に取り上げた原油、ガス以外にも、石油製品、LPG、石炭、ウランなどの輸入資源について、その安全保障が懸念されるところである。この内、石炭については1) 輸入元が世界に広く分散していること、2) 過去、例えば1970年代から1980年代の石油危機のような事態が起きていないこと⁵⁹、などから原油、ガスと比較するとセキュリティへの懸念が一段低いと見られるため（また前述の脚注の通りDNE21+において将来の石炭貿易マトリックスが単純化しやすいといったテクニカルな理由もあり）石炭輸入の脆弱性を組み入れないこととする。

3.5.4 地域分割とカントリーリスク

(1) 地域分割

セキュリティ指標を算定する際の地域分割については、国別の差異を明示的に抽出するためにはできるだけ細かい区分が望ましい一方、原油、ガスの輸送経路が共通となる地域は集約する方が逆に望ましい。以上の観点から、本論文では図3-30に示す通り世界を15地域分割しセキュリティ指標を算定した。

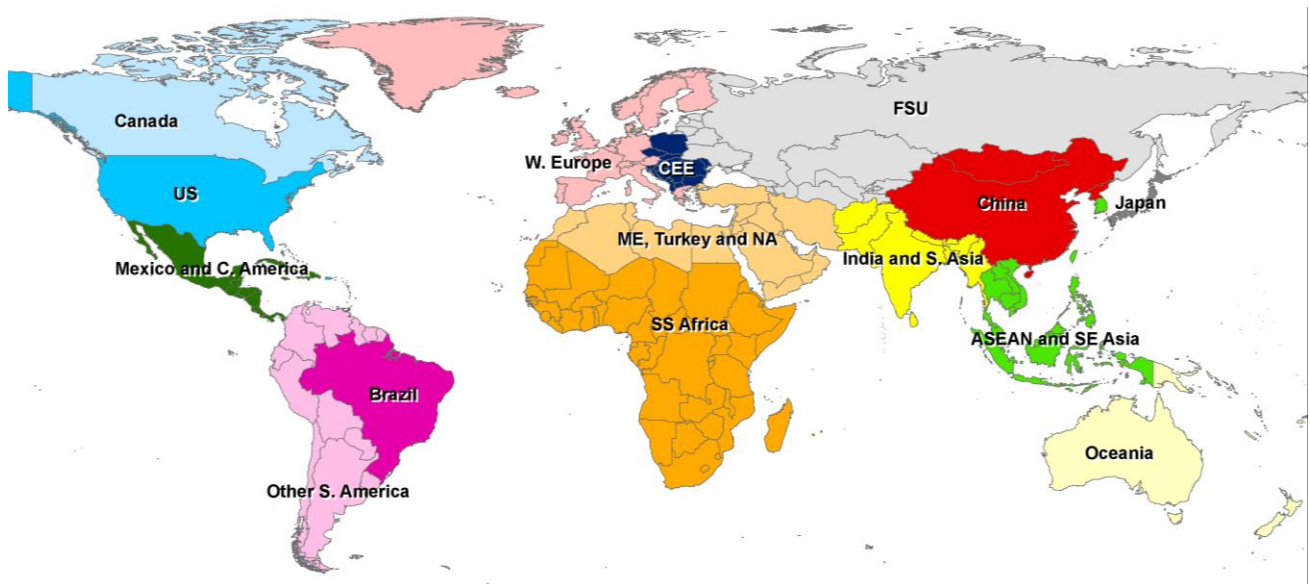


図 3-30 セキュリティ指標算定のための地域区分（世界 15 地域）

(2) カントリーリスク

(3.8)式に示したセキュリティ指標算定のために、地域別のカントリーリスクを指数化する必要がある。

⁵⁹ ただし、一部地域からの供給量低下・供給停止（例えば、洪水、ハリケーン、あるいはストライキなどに起因）は、たびたび観測される。

カントリーリスク設定に際しては、いくつか方法があるが、本論文では IEA[151]の手法を参照した。即ち、世界銀行[154]が提示している 6 つの Worldwide Governance Indicators の内、エネルギーの供給安定性と関連が深いと考えられる “Political Stability”、“Regulatory Quality” の平均値を参照した。これら元データは-2.5～+2.5 までの数値で示されているが、IEA[151]同様に 1～3 の数値に線形変換し参照した（図 3-31）⁶⁰。カントリーリスクは今後変化することが見込まれるが、本論文では将来時点においても図 3-31 に示したカントリーリスク値 r_i は変化しないとみなした。

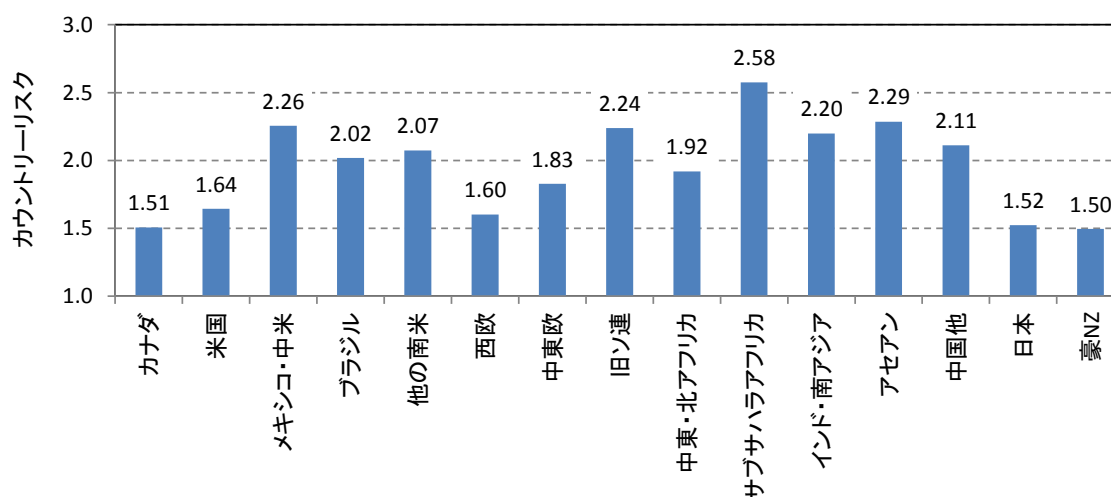


図 3-31 想定した地域別カントリーリスク

注) 数字が小さいほどカントリーリスクが小さく、大きい程カントリーリスクが大きいことを意味する。

3.5.5 セキュリティ指標の結果と考察

時系列で見たセキュリティ指標の結果を図 3-32 に示す。2001 年時点のセキュリティ指標は、GTAP データベース（2001 年値）に基づき算定した。2030 年、2050 年は DNE21+のベースシナリオの結果をセキュリティ指標へ当てはめて算定した。若干の変遷はあるものの、およそ米国、中国はセキュリティ指標値が低くセキュリティ上の脆弱度が相対的に低いと評価される。これに対し、西欧、インド・南アジアは脆弱度が増す結果である。西欧は北海油田の採算量低下、インド・南アジアは輸入増大による影響による。

日本については、2030 年から 2050 年の間、原子力の発電量が 189TWh/y を維持するという想定としている（発電電力量の 15%、100 万 kW 設備利用率 80%換算で 26.9 基相当）。この想定の下、日本はセキュリティ上の脆弱度が高止まりしている状態が継続する結果である。

⁶⁰ 本分析ではカントリーリスクを 1～3 の数値に変換したが、地域間のリスク差はもっと大きいとの指摘・議論もある。

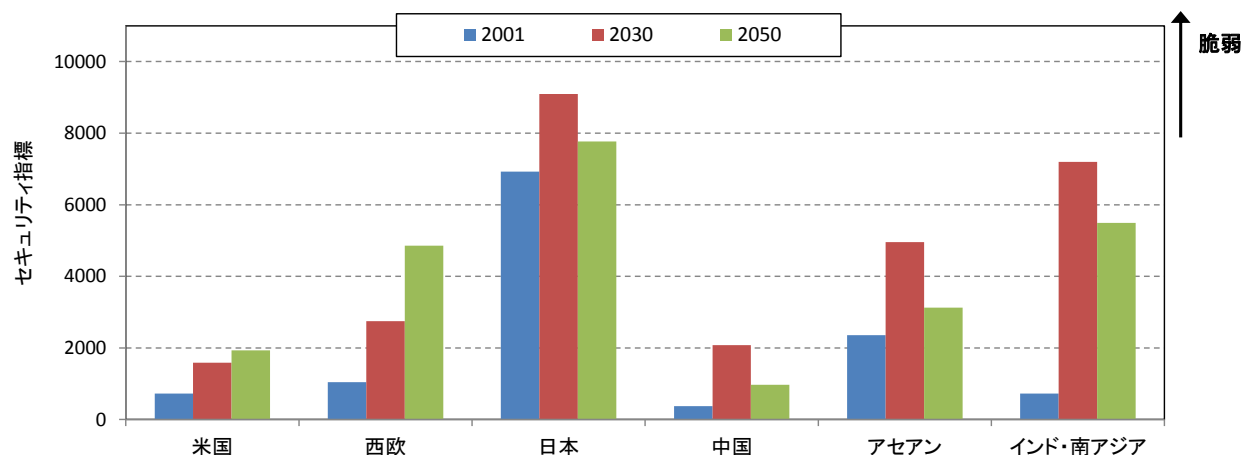


図 3-32 セキュリティ指標の時系列推移の結果

注) 2001 年は GTAP データベースに基づき算定。2030 年及び 2050 年は DNE21+ベースシナリオに基づき算定。

2030 年時点、及び 2050 年時点のセキュリティ指標が、炭素制約シナリオによってどのように変化するかを見たのが図 3-33、図 3-34 である。時点、地域、炭素制約シナリオによってやや複雑な動きをするが、大きな傾向として、欧米諸国は炭素制約が厳しくなっても脆弱度が増すことはなく、横ばいか、あるいはむしろ頑健となる結果である。これは、石炭 CCS、再エネを含め域内の CO₂ 削減方策手段が豊富であることによる。

日本は、炭素制約の有無・強度に関係なく 2030 年から 2050 年の間、原子力の発電量が 189TWh/y を維持する設定としている。CCS については、450 シナリオの 2050 年において 4100 万 tCO₂/y を帯水層貯留する結果である。日本は、そもそもセキュリティ上脆弱であるという評価であるが、450 シナリオであっても、省エネ、再エネ、燃料転換、CCS などがいまって、それほど脆弱になることはないという結果である（2030 年、2050 年共に炭素制約によって若干の悪化は見られるため、本論文の要旨、結論部において「それほど悪化しない」という記載とする）。

CCS とセキュリティの一对一関係について本研究では明示的分析を行っていないが、日本について CCS 利用を制限した場合、さらに LNG への依存度を強めこととなりセキュリティ指標値が悪化すると考えられる。この定性的考察から、日本において炭素制約、及び CCS は省エネ、再エネ、燃料転換などあいまってセキュリティをそれほど悪化させることはないと言える。

一方、中国、インド・南アジアは炭素制約が厳しくなるにつれて脆弱度が増す結果である。これは、域内の石炭生産量を減少させ、ガス輸入を増大させることが直接の原因である。その背景には、域内のエネルギー需要規模に比べ、域内のガス生産余力が小さく、CCS 適地が限られることによる⁶¹。

以上の結果は第 3.5.2 項で示した通り DNE21+の評価関数の中にセキュリティを組み込んでおらず、DNE21+の結果を所与としセキュリティ指標にその結果を当てはめて算定している点に留意が必要である。DNE21+の評価関数に明示的なセキュリティの組み込み（特に貿易マトリックスの明示的考慮）を

⁶¹ 中国、インド、南アジアなどのアジア諸国は、2050 年時点で世界の人口の約半分を占めることが見込まれるが、帯水層、廃ガス田、CO₂-EOR などの CO₂ 貯留ポテンシャル（適地）は世界の 11%を占めるにとどまる。そのため CO₂ 貯留キャパシティを節約する必要があり、石炭 CCS ではなく、ガス CCS が普及する結果である。なお、DNE21+において CO₂ の国際輸送は認めていない。

行うことは今後の課題の一つである。

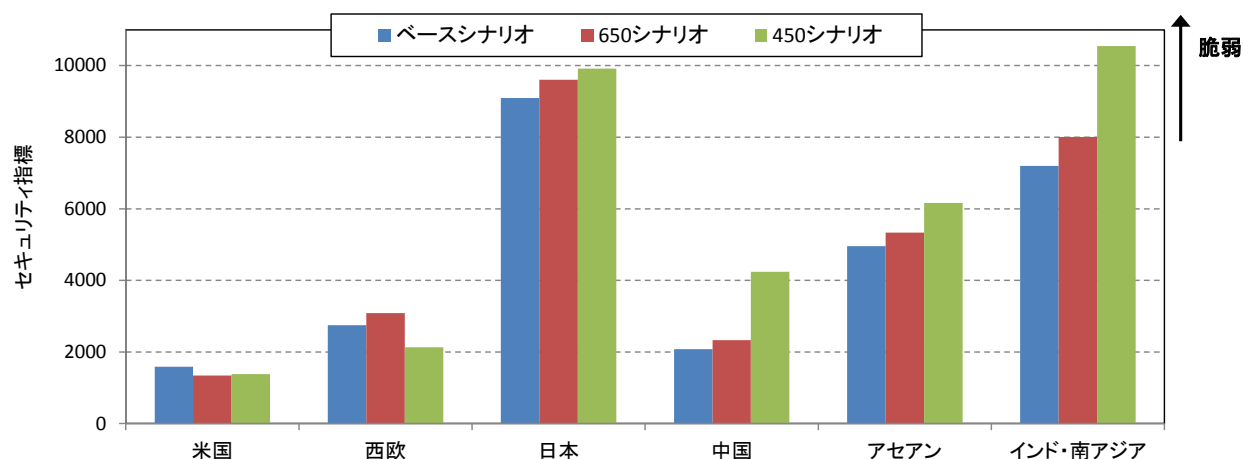


図 3-33 炭素制約シナリオ別のセキュリティ指標の結果（2030 年）

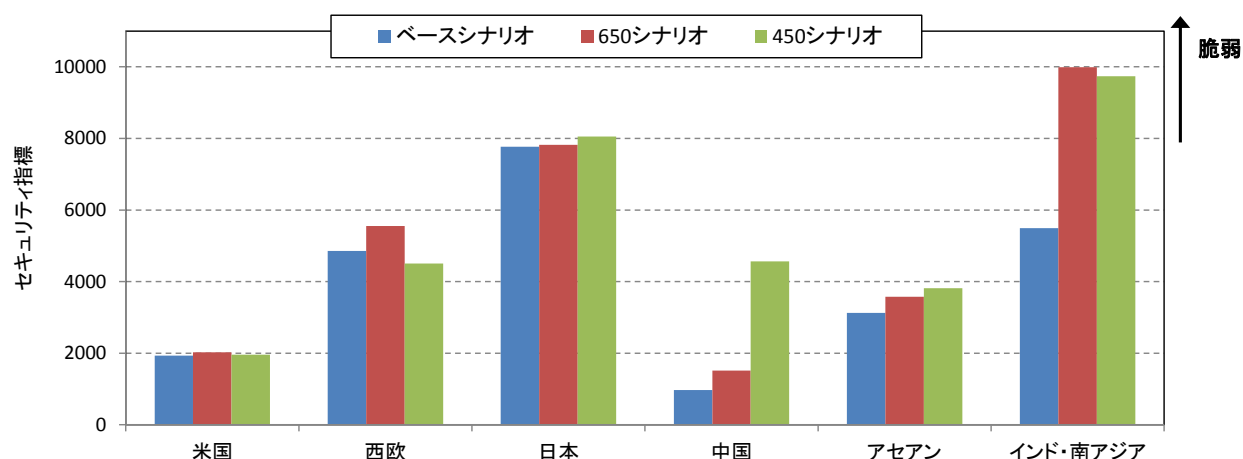


図 3-34 炭素制約シナリオ別のセキュリティ指標の結果（2050 年）

3.6 本章のまとめ

本章では、発電部門、鉄鋼部門、セメント部門、及び CCS に注目しつつ、DNE21+の拡張、及び拡張された DNE21+を用いた分析を行った。鉄鋼部門では、粗鋼生産量に占めるスクラップ電炉鋼比率などを外生的に与えているが、世界の鉄鋼蓄積量、及び老廃屑発生量などのマテリアルフロー分析も別途行い、それと整合的なスクラップ電炉鋼比率を前提とした。また DNE21+の結果をエネルギーセキュリティ指標に当てはめることにより、炭素制約シナリオ別のセキュリティ指標を算定した。

以上の分析から、主に次の結果が得られた。

- 世界の大幅な CO₂ 排出削減を進めるためには、省エネ、再エネ、燃料転換などに加え、CCS の大幅な拡大が費用効率的である
- 450 シナリオ（期待値として産業革命以前比 2℃未満、いわゆる 2℃目標に十分合致）でなくとも、より緩やかな 550 シナリオ、650 シナリオであっても、CCS 普及が費用効果的となる結果であり、発電部門、鉄鋼部門の一部に CCS が普及する結果である

- なお、DNE21+の結果をセキュリティ指標に当てはめることにより、ベースシナリオにおいて日本は脆弱と評価されるが、CO₂削減を進めてもその脆弱度がそれほど増すことはない(CCS、省エネ、再エネ、燃料転換などが全体として、脆弱性を増す方向には寄与しない) との結果を得た

これらから、CCS は CO₂ 排出削減のための有効な一手段と言える。日本に関して炭素制約、CCS 普及は（省エネ、再エネ、燃料転換などの進展とあいまって）エネルギーセキュリティ上の脆弱度をそれほど悪化させない。ただし現に CCS 普及を進めるには、他の障壁、例えば事業者が実際に投資を行うかという「投資リスク」を克服する必要がある。次の第 4 章にて、CCS の投資リスクをリアル・オプション法を適用し分析する。

ところで第 2 章及び第 4 章で着目するリアル・オプション法の考え方を第 3 章で着目した世界エネルギーモデルへ組み込む場合、どのような分析フレームが可能かといった問題意識も重要な観点である。目的によってその組み込み方に無数の方法が考えられるが、一つの分析例として Arino et al.[155]が挙げられる。Arino et al.[155]は気候感度の不確実性を明示的に考慮し⁶²、ジオエンジニアリングの一つである太陽放射管理（solar radiation management、以下 SRM）の選択肢を含め（第 3 章で扱った DNE21+ よりも簡素な）DNE21 にて分析評価している。SRM の選択肢がない状況下で産業革命以前比 2.5℃以下を制約として課すと気候感度が高位の場合に備え真の気候感度が判明するまでの間、大幅な CO₂ 排出削減が必須となる⁶³。一方、SRM の選択肢を許容すれば 2.5℃以下を制約として課しても気候感度が高位の場合には SRM を実施（ただし上限は 0.5℃の冷却まで）することができるため大幅な CO₂ 排出削減は短中期的に必須とはならず、気候感度が中位の場合と同水準の CO₂ 排出パスが許容される。

このように世界エネルギーモデルの中で明示的に不確実性を考慮しつつ能動的な行動を解析することは今後の課題の一つである。

⁶² 気候感度は離散的な 3 ケース（低位 2℃、中位 3℃、高位 4℃）を前提としている。

⁶³ 2050 年には真の気候感度が明らかになることを前提としており、2.5℃制約を課した場合、高位の気候感度となる場合に備え、それ以前（DNE21 分析のタイムスパンで見て 2040 年まで）において世界のエネルギー CO₂ 排出を 2015 年比で半分程度に抑制する必要があると生じる。

第4章 リアル・オプション法による発電部門の分析

4.1 はじめに

前章（第3章）ではDNE21+を用いて緩和策の分析を行った。DNE21+では、世界合計のエネルギーシステムコストを目的関数とし、それが最小となる技術選択がなされるとした。しかし、実際には技術選択に関する意思決定主体は各国の各企業などに分散している。例えば、自由化、規制緩和が進む中、日本の電気事業者は今後の温暖化政策とその不確実性などにもらみながら、自らが晒される電源の投資リスク、あるいは投資せず待機することによるリスクなどを含め、経営判断を行うものと考えられる。

本章では、不確実性下における電気事業者の意思決定に着目し、その定量的分析手法としてリアル・オプション法を適用する。リアル・オプション法の方法論、解法については第2章に詳述しており、本章では電気事業分野へのリアル・オプション法の適用に焦点を当てる。

本章の構成と位置づけは次の通りである。次の第4.2節では経年石油火力発電所の保有維持・廃棄に着目し、経年石油火力発電設備を不確実な状況下でどのようなタイミングで廃棄することが妥当であるかリアル・オプション法にて分析を行う。過去、電気事業者が行ってきた保有維持・廃棄の行動を定量的かつ合理的に説明できることを示す。

第4.3節では資本集約的電源の投資について分析する。第4.3節はオプションを保有し続けるか、オプションを行使し所与の電源へ投資するかといった簡素な二者択一の構造とし、そのためリアル・オプション法から導き出される解析解（一部条件下で得られる）と数値解の比較も可能である。いわば、リアル・オプション法の理論と、実際に電気事業者が直面している課題の分析の橋渡しの役割を持つ。

第4.4節は、より本格的に電気事業者が直面している課題について分析を行う。具体的には、不確実な炭素価格、天然ガス価格の下、微粉炭火力、微粉炭火力+CCS、コンバインドサイクル、コンバインドサイクル+CCSへの投資について分析を行う。

以上を第4.5節にまとめる。

4.2 石油火力の保有維持・廃棄に関する分析

4.2.1 背景及び概要

(1) はじめに

2011年3月の東日本大震災以降、それまで低位の設備利用率であった石油火力の焚き増しを行い、電力の供給確保を進めた。これは石油火力がバックアップ電源としての機能した端的な例の一つであるが、一定の供給力が確保できている状況下において、経年石油火力をどのようなタイミングで廃棄するかは、より効率的な事業運営を行う上での課題の一つである。

本節は、東日本大震災以前の状況に基づき、経年石油火力の保有維持・廃棄に関する意思決定に対しリアル・オプション法を適用する。例えば、2001年度当時の状況を振り返ってみると、電力十社所有の石油火力発電は10.6(%)と低い設備利用率となっており、運転開始年の平均も1974年となっている[156]。設備利用率が低くても、保有電力会社から見れば、短期的な需給調整能力、長期的なバックアップ電源としての価値がある一方、設備維持補修のため固定費を支払う必要がある。仮に資料[57]の固定資産税、

諸費、給料手当、一般管理費、事業税を固定費とみなし、kW 当りに変換すると 7(千円/kW/年)となる。40 万 kW の発電設備であれば、年間 28(億円)の固定費が発生する。経年石油火力発電設備を不確実な状況下でどのようなタイミングで廃棄するかは、合理的な経営を行う上での 1 つの課題である。

(2) 分析の概要と目的

本節では、分析対象の経年石油火力の費用や便益を 2 つの変数に集約して表現する。一つは保有便益 x (億円/年)であり、電源の固定費、変動費といった実際に生じるキャッシュフローだけでなく、需給調整能力、バックアップ電源としての便益も含む。もう一つは廃棄後の最終損益 Q (億円)であり、 Q は発電設備の廃棄費用や廃棄後の土地及び付帯送電設備の利用機会価値を含む。従って、例えば廃棄しても電力需要を賄うに十分な供給力があるかといった側面は x に含まれる。また、経年石油火力を保有維持するのと新鋭火力へリプレースするのとどちらが経済的に優れているかという側面は Q に集約される。

本節は保有便益 x が最も単純な確率過程の 1 つであるブラウン運動に従うことを仮定する。

$$dx = a_1 dt + b_1 dz_1 \quad (4.1)$$

ただし、 a_1 は x の期待変化、 b_1 は x のボラティリティ、 dz_1 はウィナー過程の増分であり、後の二変数問題のケースに対応するため添え字をつけている。

このように不確実な保有便益 x の下、時刻 t における設備価値 $F(x, t)$ 、直ちに廃棄に踏み切ることが最適となる臨界曲線 $x^*(t)$ を求める。その上で、日本の電気事業者が実際に行ってきた経年石油火力の保有維持・廃棄の意思決定を、本問題設定によってどの程度定量的に説明できるか明らかにすることを目的とする。

(4.1)式に従う保有便益 x を生み出す経年石油火力を保有している事業者は、保有便益 x を見ながら任意の時点で経年石油火力を廃棄することができると仮定する⁶⁴。本節では設備の運転可能期間を T とし、 T 年経過するまでは任意の時点で廃棄することができるが、 T 年経過すると直ちに廃棄しなければならないとする。

以上の問題設定の下、直ちに廃棄することが最適となる臨界曲線 $x^*(t)$ を算出する。

経年石油火力の保有維持・廃棄は、実際に次のような多様な要素とも関連がある。1) 自社供給力の不確実性(原子力発電の設備利用率、水力発電の出水率)、2) 需要の不確実性(夏季冬季の気温、景気変動)、3) 急峻な需要変動に対する負荷追従性、4) 送電設備の制約、5) 既存の燃料受入設備、6) 燃料取引に関する契約や取り決め、7) 電源立地自治体との関係や地域の雇用、8) 自由化(規制緩和、規制変化)による影響、競合他社の動向、9) 対象石油火力の故障や維持費の不確実性。このような多様な諸条件に基づく総合的判断がなされていることを認識しつつも、本節では定量的表現方法としてこれらが保有便益 x (億円/年)、最終損益 Q (億円)に集約・代表されるとして分析を進める。

(3) 既往研究との関係

廃棄の柔軟性を持っている事業は、廃棄の柔軟性のない事業より価値が高いことは古くから指摘され

⁶⁴ 石油火力発電設備を廃棄する場合、電気事業者は地域雇用や固定資産税の支払い額の変化などを考慮し、半年から数年前に廃棄することを地元地域や自治体に対し告知するが、問題を簡略化するため本論文ではこのような事前の告知を行わず任意の時点で設備を廃棄可能であると仮定する。

ており、1967 年の Robichek and Van Horne[34]はそのことを定量的に示した初期の文献である。1983 年の Myers et al.[157]及び 1990 年の Myers and Majd[158]は、廃棄に踏み切ることが最適となる臨界点や、廃棄可能な事業価値を有限差分法を用いて定量的に示した。1985 年の Brennan and Schwartz[35]は銅の鉱山開発に注目し、運転、停止、廃棄の柔軟性を明示的にとりあげた先駆的分析である。1994 年の Dixit and Pindyck[36]は第 4.1 節において動的計画法により廃棄可能な設備の設備価値 $F(x, t)$ が従う方程式を詳しく示している。2003 年の服部ら[40]は石油火力の廃棄問題に着目し、タイムステップを 1 年としたツリーモデルにより廃棄の柔軟性価値を計算している。

本節では、保有便益 x がブラウン運動に従う評価フレームを考える。本節の以下における構成は次の通りである。設備の運転可能期間を無限と見なすことが可能であれば、解析解を導くことが可能であることを第 4.2.2 項に示す。石油火力という実課題の現状把握及びパラメータの設定を第 4.2.3 項にて行う。設備の運転可能期間を有限とし、Dixit and Pindyck[36]を基に、設備価値や臨界曲線 $x^*(t)$ を計算する (第 4.2.3 項)。用いる数値解法は、1965 年 Cox and Miller[103]が開発し、1993 年に Dixit[105]が整理した二項ツリーモデル(以下、Cox-Miller モデル)である。さらに、保有便益 x 及び最終損益 Ω が共にブラウン運動に従う二変数のフレームについて第 4.2.5 項に示す。

4.2.2 廃棄評価モデルの解法

(1) ベルマン方程式による定式化及び解析解

単位時間あたりに $\pi(x, t)$ のキャッシュフローを生み出す事業を現在保有しているとする。事業保有者は、任意の時点で事業を廃棄・売却し直ちに最終損益 $\Omega(x, t)$ を得ることができる。ただし、その意思決定を行うことは、将来の $\pi(x, t)$ をあきらめることになる。事業者が常にその時の状況に応じて事業価値を最大にするよう意思決定を行うことを前提とすると、事業価値 $F(x, t)$ は次の(4.2)式を満たす。

$$F(x, t) = \max \left[\Omega(x, t), \pi(x, t)dt + \frac{1}{1+rdt} E[F(x+dx, t+dt) | x] \right] \quad (4.2)$$

ただし、 r は事業者の主観的な割引率を表す。(4.2)式は(2.77)式を再掲したものであり、一般にベルマン方程式と呼ばれる。

解析解を得るため、事業は未来永劫保有可能であり、 $\pi(x, t)=\pi$ 、 $\Omega(x, t)=\Omega$ と仮定する。この時、事業価値は時刻 t に依存しない関数 $F(x)$ となり、(4.2)式から $F(x)$ は次の(4.3)式を満たす。

$$F(x) = \max \left[\Omega, \pi dt + \frac{1}{1+rdt} E[F(x+dx) | x] \right] \quad (4.3)$$

さらに、 x が(4.4)式のブラウン運動に従うと仮定すると、 dF は(4.5)式となる。従って、事業保有が最適となる領域において成り立つ方程式は、(4.3)式の第二項が $F(x)$ に等しいという方程式を解くことで、(4.6)式となる。

$$dx = a dt + b dz \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} dF &= F'(x)dx + \frac{1}{2} F''(x)(dx)^2 \\ &= \left[aF'(x) + \frac{1}{2} b^2 F''(x) \right] dt + bF'(x)dz \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{2}b^2F''(x)+aF'(x)-rF(x)+x=0 \quad (4.6)$$

(4.6)式は常微分方程式であるため、 $F(x)$ は一般解と特殊解の和になる。

$$F(x)=A_1e^{\beta_1x}+A_2e^{\beta_2x}+\frac{x}{r}+\frac{a}{r^2} \quad (4.7)$$

特殊解が $(x/r+a/r^2)$ となることは、 $(x/r+a/r^2)$ を(4.6)式に代入することによって確認できる。また、 β_1 及び β_2 ($\beta_1 \geq \beta_2$)は、次の二次方程式 ((4.8)式) の解であり、(4.9)式となる。

$$Q(\beta)=\frac{1}{2}b^2\beta^2+a\beta-r=0 \quad (4.8)$$

$$\beta_1=-\frac{a}{b^2}+\sqrt{\frac{a^2}{b^4}+\frac{2r}{b^2}} \quad \beta_2=-\frac{a}{b^2}-\sqrt{\frac{a^2}{b^4}+\frac{2r}{b^2}} \quad (4.9)$$

ここで割引率 $r>0$ を仮定すると、(4.8)式において $Q(0)=-r<0$ となるため、 $\beta_1>0$ かつ $\beta_2<0$ である。

次に、廃棄の柔軟性がなく現時点の保有便益が x_0 の事業価値 $V(x_0)$ について考える。現在時刻を $t=0$ とし運転期間を τ とすると、 $V(x_0)$ は(4.10)式と評価される。

$$\begin{aligned} V(x_0) &= \int_0^\tau E[x(t)]e^{-rt} dt = \int_0^\tau (x_0 + at)e^{-rt} dt \\ &= \left(\frac{x_0}{r} + \frac{a}{r^2} \right) - e^{-r\tau} \left(\frac{x_0 + a\tau}{r} + \frac{a}{r^2} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

(4.10)式において、 $\tau \rightarrow \infty$ とすると第1項のみ残り、この第1項は $F(x)$ の特殊解と等しい。従って、 $F(x)$ の特殊解は廃棄の柔軟性がないケースの事業価値を、 $F(x)$ の一般解は廃棄の柔軟性価値を表している。将来廃棄する可能性を無視できるほど x が十分大きい時、廃棄の柔軟性価値は0になる。従って、 $x \rightarrow \infty$ の時、同次方程式の一般解は0へ収束する必要がある。このためには $A_1=0$ でなくてはならない。

(4.3)式から、(4.7)式の境界条件は次の(4.11)式となる。

$$F(x^*)=\Omega \quad F'(x^*)=0 \quad (4.11)$$

ただし、 x^* は直ちに廃棄に踏み切ることが最適となる臨界保有便益である。(4.11)式を用いて(4.7)式を解くと、 $F(x)$ 及び x^* は次の(4.12)式となる。

$$F(x)=A_2e^{\beta_2x}+\frac{x}{r}+\frac{a}{r^2} \quad x^*=r\Omega+\frac{1}{\beta_2}-\frac{a}{r} \quad A_2=-\frac{1}{r\beta_2}e^{-\beta_2x^*} \quad (4.12)$$

(4.12)式は、事業は未来永劫保有可能であることを仮定し求めた解析解である。この解析解は、事業の保有可能期間を有限とした数値解と後に比較する際に参照する。

(2) 数値解法

① 一変数格子モデル

ブラウン運動の離散時間表現として、Cox and Miller[103]が開発し、Dixit[105]が整理した一変数二項モデル(Cox-Miller モデル)を用いる。Cox-Miller モデルは、移動幅 Δx 、上昇確率 p 、下降確率 q を次の(4.13)式と設定する。Cox-Miller モデルの詳細については、第2.3.1項に記した。

$$\Delta x = b_1 \sqrt{\Delta t} \quad p = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{a_1}{b_1} \sqrt{\Delta t} \right] \quad q = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{a_1}{b_1} \sqrt{\Delta t} \right] \quad (4.13)$$

解法の概略を図 4-1 に示す。図 4-1 に示したように、設備価値 F を、時刻 t に関して後ろ向き（バックワード）に解く。一般に用いられる二項ツリーモデルと異なるのは、 x に関して下限境界条件($F(-100, t)=0$ (億円))、上限境界条件($F(900, t)=V$ (億円))を設定し、囲まれた領域(x, t)全ての格子上の設備価値 $F(x, t)$ を求めることである。

$x=900$ (億円/年)といった十分大きな x を持つとき、 x がその後低下し廃棄される可能性を実質的に無視できる。従って上限境界条件として、(4.10)式の V を用いた。各格子点 $F_{i,j}$ 、 $F_{i+1,j+1}$ 、 $F_{i-1,j+1}$ の関係として、(4.2)式のベルマン方程式を本ケースに修正した、次の(4.14)式を用いる。

$$F_{i,j} = \max \left[0, i \Delta x \Delta t + \frac{p \cdot F_{i+1,j+1} + q \cdot F_{i-1,j+1}}{1 + r \Delta t} \right] \quad (4.14)$$

ただし、 $F_{i,j} = F(i \Delta x, j \Delta t)$ である。

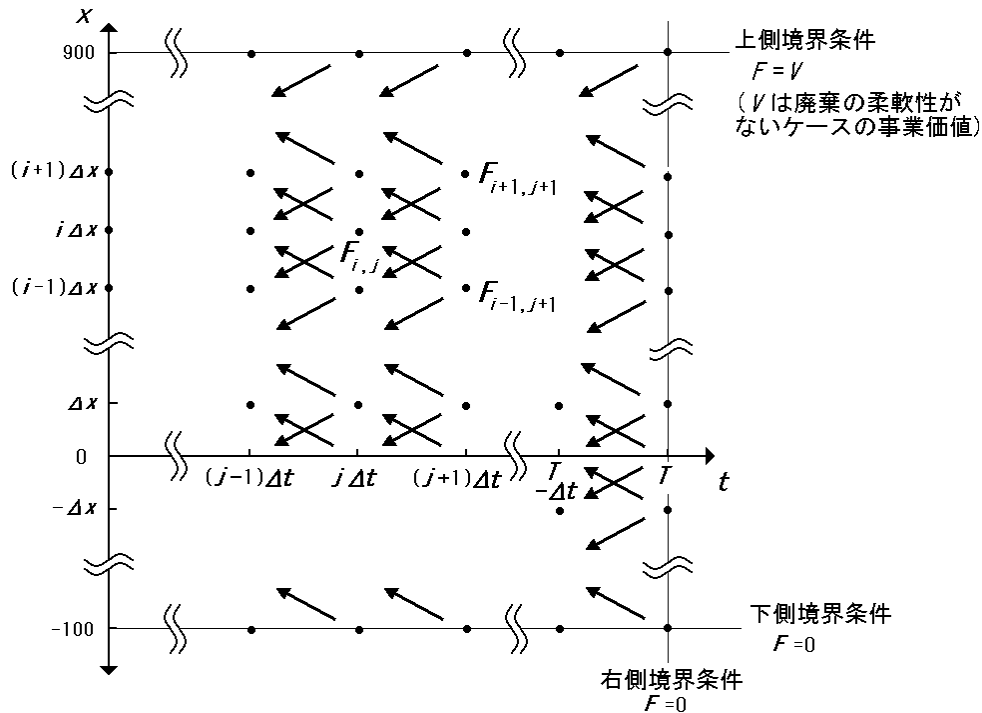


図 4-1 一変数格子モデルの概要

② 一変数モデルの他の数値解法

格子モデル以外の数値解法として、有限差分法、モンテカルロ法が考えられる。本問題は自由境界問題であり、有限差分法のみで自由境界 $x(t)^*$ を見出すのは有効ではない。モンテカルロ法は、 x が $x(t)^*$ に近いほど、 t が T に近いほど計算効率が高まるが、本問題では格子モデルの方が、計算の効率性、解の安定性といった意味で適用しやすい。より一般的な数値解法の比較については、第 2.3.2 項に記した。

③ 二変数格子モデル

次に、事業者にとって最終損益 Ω (億円)も不確実である場合、即ち次の二変数廃棄評価モデルを考える。

$$\begin{aligned} dx &= a_1 dt + b_1 dz_1 \\ d\Omega &= a_2 dt + b_2 dz_2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

ここで、 ρ を x と Ω の相関係数とすると、 $E[(dz_1)(dz_2)] = \rho \cdot dt$ が成り立つ。(4.15)式に従う保有便益 x を生み出す経年石油火力を保有している事業者は、 x を見ながら任意の時点で経年石油火力を廃棄することができる。ただし、廃棄と同時に最終損益 Ω (億円)が発生する。本節において、現在保有中の経年石油火力の運転可能期間を T とし、 T 年経過するまでは任意の時点で廃棄することができるが、 T 年経過すると直ちに廃棄しなければならないとする。

Boyle の格子モデル[107]を参考に、一変数 Cox-Miller モデルを拡張し、ブラウン運動二変数格子モデルを作成する。時刻 t における初期値座標を (x, Ω) とし、時刻 $t + \Delta t$ において、確率 p_1 で $(x + \Delta x, \Omega + \Delta \Omega)$ 、確率 p_2 で $(x + \Delta x, \Omega - \Delta \Omega)$ 、確率 p_3 で $(x - \Delta x, \Omega + \Delta \Omega)$ 、確率 p_4 で $(x - \Delta x, \Omega - \Delta \Omega)$ へそれぞれ推移するモデルを考える(図 4-2)。ここで、 Δt 経過後の移動幅 Δx 、 $\Delta \Omega$ 及び、各確率 $p_1 \sim p_4$ を次のように設定する。

$$\Delta x = b_1 \sqrt{\Delta t} \quad \Delta \Omega = b_2 \sqrt{\Delta t} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{1}{4} \left[1 + \rho + \left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} \right] & p_2 &= \frac{1}{4} \left[1 - \rho + \left(\frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} \right] \\ p_3 &= \frac{1}{4} \left[1 - \rho - \left(\frac{a_1}{b_1} - \frac{a_2}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} \right] & p_4 &= \frac{1}{4} \left[1 + \rho - \left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} \right) \sqrt{\Delta t} \right] \end{aligned} \quad (4.17)$$

(4.16)、(4.17)式に示した二変数格子モデルは、 Δt を十分小さくすると二変数ブラウン運動のよい近似となり、 $\Delta t \rightarrow 0$ の時この格子モデルは二変数ブラウン運動に収束する。

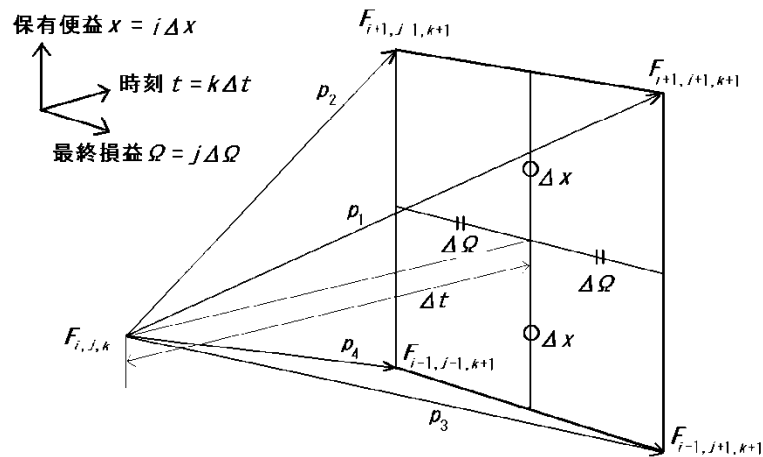


図 4-2 二変数格子モデルの概要

本節は、分析最終時点 $T(F(x, \Omega, t) = \Omega)$ から時刻 t に対しバックワードに解く。各格子点の関係として、

(4.2)式のベルマン方程式を本ケースに修正した次の(4.18)式を用いる⁶⁵。

$$F_{i,j,k} = \max \left[j\Delta\Omega, i\Delta x\Delta t + \frac{p_1 \cdot F_{i+1,j+1,k+1} + p_2 \cdot F_{i+1,j-1,k+1} + p_3 \cdot F_{i-1,j+1,k+1} + p_4 \cdot F_{i-1,j-1,k+1}}{e^{r\Delta t}} \right] \quad (4.18)$$

一般の二変数ツリーモデルと異なるのは、 x に関する下限境界条件($F(-50, \Omega, t) = \Omega$ (億円))、上限境界条件($F(125, \Omega, t) = G_1$ (億円))、 Ω に関する下限境界条件($F(x, -150, t) = G_2$ (億円))、上限境界条件($F(x, 650, t) = G_3$ (億円))を設定し、囲まれた領域(x, Ω, t)全ての格子上の設備価値 $F(x, \Omega, t)$ を求めることである。ここで、 G_i は x 、 Ω のボラティリティ b_1 、 b_2 を共に 0 とした時の設備価値を表す。 G_i は静的な計算により算定できる。

基準ケースの場合、例えば x 方向に 175 分割、 Ω 方向に 400 分割し、 Δx を 1(億円/年)、 $\Delta \Omega$ を 2(億円)、 Δt を 0.2(年)とし計算を行った⁶⁶。感度解析を行う場合は、境界位置や、分割数(刻み幅)を適宜変更し、設備価値 $F(x, \Omega, t)$ 、廃棄が最適となる臨界境界(x, Ω, t)*を求める。

④ 二変数モデルの他の数値解法

格子モデル以外の数値解法として、有限差分法、モンテカルロ法が考えられる。本問題は自由境界問題であり、かつ二変数を扱っているため、有限差分法のみで自由境界(臨界境界)を見出すのは現実的ではない。モンテカルロ法は時刻 t が T に近いほど短時間で高い精度の自由境界を求めることができ、全ての(x, Ω, t)領域における設備価値 $F(x, \Omega, t)$ をモンテカルロ法により求めることは理論的に可能であるものの、計算時間が長くかつ解の精度も低い。

本問題において格子モデルは、計算の効率性といった意味で適用しやすい。より一般的な数値解法の比較については第 2.3.2 項に記した。

4.2.3 石油火力の動向及びパラメータの設定

(1) 低稼働率の石油火力が数年間保有されるケース

資源エネルギー庁[156]を基に、電力十社が保有する石油火力発電設備の運転状況を簡易的に調査した。過去 10 年間に於いて廃棄された石油火力発電所の内、時間稼働率が 1 桁に低下した後も、数年間保有され続ける発電所が複数見受けられた。表 4-1 に、関西電力保有の石油火力発電設備の時間稼働率を示す。関西電力保有の石油火力の内、廃棄された 6 発電所はこのように、非常に低い時間稼働率でありながら数年間保有されている。このような低稼働率の発電所は、(その発電所単体で見れば)売電収入を固定費が上回り、実際に発生しているキャッシュフローは負となる。

伝統的な NPV の方法論に基づくと、負のキャッシュフローを正当化するためには、設備保有により需

⁶⁵ 一変数問題を扱った(4.14)式では Δt を十分小さくすることは容易であり $\exp(r\Delta t)$ をテイラー展開した近似値 $(1+r\Delta t)$ を用いて割り引いた。二変数を扱う本ケースでは Δt を十分小さく設定すると計算時間が増加する場合もありテイラー展開による誤差を避けるため、より正確な $\exp(r\Delta t)$ にて割り引く式を提示する。

⁶⁶ x 方向、 Ω 方向の分割数をそれぞれ m_1 、 m_2 とすると、コンピュータで数値計算を実行する際に、 $2 \cdot (m_1+1) \cdot (m_2+1)$ 個の変数をメモリ上に常駐させる必要がある。メモリ上に常駐可能な変数の数に上限が存在するが、本ケースでは二変数の問題であり三変数問題よりも簡便なため、このようなメモリ制約は解の精度を制限する要因とはならないことを別途確認した。また、C 言語のポインタを利用し動的な変数割り当てを行えば、変数の数の上限を気にかける必要はない。

給調整能力、バックアップ電源、送電設備の制約緩和などの大きな正の便益が発生しているか、もしくは最終損益が大きな負の値をとっているかのどちらかである。リアル・オプションの評価フレームを適用することにより、負のキャッシュフローを正当化する別の可能性も定量分析できる。それは、設備保有による正味の便益(キャッシュフローも含む)が将来不確実であるため、保有が妥当なケースである。本節では、この可能性を前提とし、保有便益 x (億円/年)が不確実なケースにおける廃棄評価フレームを考える。

なお、九州電力や北陸電力などでは、経年石油火力を長期計画停止とする例もある。これは、保有維持と廃棄の中間的な選択肢と考えられる。長期計画停止は将来の不確実性に対する費用効果的な方策であると考えられるが、本節では分析結果の考察をより簡素に行うため、保有維持と廃棄の選択肢に代表されると見なして以下分析を進める。

表 4-1 関西電力保有の石油火力発電所

発電所名	設備容量 (MW)	時間稼働率(%)									
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
春日出(2001年12月廃棄)	312	4.8	9.1	15.6	9.2	3.8	2.7	1.0	2.3	2.6	
三宝(2003年3月廃棄)	156	3.3	9.8	6.0	2.6	0.5	0.3	0.1	0.1		
尼崎東(2001年12月廃棄)	312	16.3	25.0	20.8	6.8	3.7	2.0				
大阪	312	15.5	25.1	16.4	16.2	1.0	1.2	0.7	0.5		
海南	2,100	36.7	48.9	43.3	49.0	32.6	21.1	24.4	20.0	8.7	6.6
高砂	900	23.6	37.2	40.5	31.1	22.5	15.4	10.8	8.1	3.3	4.9
尼崎第三(2001年12月廃棄)	468	4.3	8.4	6.0	8.0	3.4	1.1	1.2	0.6	1.0	
多奈川(2001年12月廃棄)	462	2.4	5.4	10.6	4.4	1.2	0.4	0.2	0.3		
多奈川第二	1,200	37.9	47.7	44.7	37.8	15.6	11.3	11.7	8.5	10.2	11.7
相生	1,125	14.6	21.1	16.2	11.6	2.9	1.9	1.7	2.2	0.7	1.7
御坊	1,800	26.1	38.7	33.8	30.4	14.3	10.4	11.9	6.7	2.9	4.9
赤穂	1,200	28.8	37.3	24.0	20.3	17.2	19.7	21.4	10.2	3.3	2.1
姫路第一(2001年6月廃棄)	266	3.9	12.6	4.1	2.0	0.3	1.1	0.1			
宮津エネルギー研究所	750	15.4	30.5	19.7	15.0	4.2	5.3	3.8	4.1	2.5	2.5

(2) 低稼働率ではない石油火力が廃棄(リプレイス)されるケース

表 4-2 に、東京電力保有の石油火力発電設備の時間稼働率を示す。千葉火力発電所、品川火力発電所は、時間稼働率がそれほど低位ではない状態であるものの設備が廃棄され、新規の LNG 火力へリプレイスされている。これは、表 4-1 に例示したケースとは異なり、土地や付帯送電設備の利用価値が高く、保有中の経年石油火力を廃棄する方が経済的に優位であったためと推測される。ただし、経年石油火力廃棄後の土地及び付帯送電設備の利用機会価値は、事業者にとって不確実であることが予想される。第 4.2.5 項では、保有便益 x (億円/年)及び最終損益 Q (億円)が共に不確実であるとした二変数の評価フレームに着目する。

表 4-2 東京電力保有の石油火力発電所

発電所名	設備容量 (MW)	時間稼働率(%)									
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
千葉(1999年3月廃棄、LNG火力建設)	600	26.9	39.1	27.5	29.3	29.2	15.2				
品川(1996年3月廃棄、LNG火力建設)	375	29.8	32.2	27.2							
横須賀	2,630	36.4	40.9	30.4	28.0	26.7	18.3	15.8	15.4	7.3	17.0
鹿島	4,400	35.3	45.9	37.5	24.6	24.5	19.2	20.9	23.5	14.7	33.0
大井	1,050	43.3	48.6	47.2	43.2	38.1	30.7	39.3	36.8	32.0	39.4
広野	600	33.1	39.6	32.2	20.2	35.3	14.9	16.0	21.1	11.2	16.8

(3) パラメータの設定

① 保有便益 x (億円/年)に関するパラメータ (a_1 , b_1)

電力十社の所有している石油火力発電の設備容量平均は、2004 年 1 月時点で 39.7 万 kW である。本節ではこの平均値を参照し、設備容量 40(万 kW)の石油火力発電設備を想定する。

保有便益 x (億円/年)の期待変化 a_1 及びボラティリティ b_1 については、次のような考えに基づき設定する。 x は、電源の固定費、変動費といった実際のキャッシュフローだけでなく、需給調整能力、バックアップ電源としての便益を含んでいることを既に述べた。ここで、公開データから概算可能である費用は、この内のキャッシュフローである。本章では、そのキャッシュフローを、設備別の時間稼働率と、「売電価格と発送電費の差(この差を 10(円/kWh)であると仮定⁶⁷[159])」から見積もる⁶⁸。

売電価格と発送電費の差を 10(円/kWh)と固定すると、40(万 kW)の設備容量を想定しているので、設備利用率 1%の変化は、3.5(億円)の変化となる。以上を前提とし、関西電力及び東京電力保有の石油火力発電設備の期待変化 a_1 及びボラティリティ b_1 を概算した。結果を表 4-3 及び表 4-4 に示す。これらの表は、保有便益 x のパラメータを、 x の構成要素の 1 つであるキャッシュフローのパラメータ(a_1, b_1)で代表させていること、40(万 kW)の設備容量に規格化していることに注意が必要である。

⁶⁷中部電力(2001 年度)[159]を参考に、売電価格と発送電費の差を概算する。石油火力平均の発電端熱効率(HHV)は 35.99(%)、重油 C の発熱量(HHV)は 41,060(kJ/ℓ)、重油 C の購入原価は 25,170(円/kℓ)、所内率は 9.1(%)である。この時、燃料消費率は 0.2436(ℓ/kWh)、発電端燃料費は 6.1(円/kWh)、送電端変動費 6.7(円/kWh)となる。送配電費を 4.1(円/kWh)[文献[159]から概算]、送配電ロスを 4(%) [2001 年度における日本全体の送配電ロス値]とすると、これらを合計した受電端コストは 11.1(円/kWh)となる。この電力を全て電灯部門で販売し、販売単価が 22.7(円/kWh)[文献[159]から概算]であれば、売電価格と発送電費の差は 11.6(円/kWh)となり、およそ 10(円/kWh)に近い。

⁶⁸ 売電価格と発送電費の差を 10(円/kWh)であると仮定したが、この 10(円/kWh)には、一般管理費(1.8(円/kWh))、電源開発促進税及び事業税(計 0.7(円/kWh))を含んでないので、過大評価の可能性がある(括弧内の数値は、文献[159]に基づく推定値)。その一方、経年石油火力は、需要ピーク時に発電しているが、10(円/kWh)にはそのプレミアム分を含めていない。従って、10(円/kWh)は過小評価である可能性もある。

売電価格と発送電費の差は、燃料購入原価により年度と共に変動するが、経年石油火力の設備利用率の変化に比べれば、前者の変動は小さいので、ここでは売電価格と発送電費の差を一定とした。

表 4-3 関西電力保有石油火力のパラメータ概算

発電所名	1993年度から2002年度まで		1994年度から2002年度まで	
	\hat{a}_1 (億円/年)	\hat{b}_1 (億円)	\hat{a}_1 (億円/年)	\hat{b}_1 (億円)
春日出(2001年12月廃棄)	-1.0	15.5	-3.3	15.2
三宝(2003年3月廃棄)	-1.6	12.1	-5.7	6.0
尼崎東(2001年12月廃棄)	-10.0	28.3	-20.1	19.6
大阪	-7.5	27.4	-14.4	22.5
海南	-11.7	32.2	-18.5	26.6
高砂	-7.3	25.5	-14.1	16.1
尼崎第三(2001年12月廃棄)	-1.4	9.6	-3.7	7.7
多奈川(2001年12月廃棄)	-1.1	13.2	-3.0	13.3
多奈川第二	-10.2	30.4	-15.8	27.2
相生	-5.0	15.1	-8.5	11.7
御坊	-8.3	26.8	-14.8	19.4
赤穂	-10.4	24.0	-15.4	20.0
姫路第一(2001年6月廃棄)	-2.2	19.5	-8.8	12.4
宮津エネルギー研究所	-5.0	26.9	-12.3	16.9
単純平均値	-5.9	21.9	-11.3	16.8

注) 本節におけるボラティリティの単位は、厳密には(億円/ $\sqrt{\text{年}}$)である。ただし、ボラティリティは通例として年当たりの数字にて提示するため、ボラティリティの単位を簡素化し(億円)と記載する。本論文では全体を通してボラティリティの単位を簡素化し表記する。

表 4-3 には、関西電力保有石油火力に対し、分析対象期間を「1993 年度から 2002 年度まで」と「1994 年度から 2002 年度まで」とした両ケースにおける概算結果を示した。表 4-3 から、分析対象期間によって概算結果が大きく異なることが分かる。これは、分析期間が短期であることに加え、1994 年度は夏季の電力需要が大きく、また水力の出水率が低く、これらの影響で石油火力の設備利用率が高位であったことにもよる。

表 4-4 には、東京電力保有石油火力に対し、分析対象期間を「1993 年度から 2001 年度まで」と「1993 年度から 2002 年度まで」とした両ケースにおける推定結果を示した。表 4-4 から、表 4-3 と同様、分析対象期間によって概算結果が大きく異なることが分かる。これは、分析期間が短期であることに加え、2002 年度は、東京電力保有原子力発電設備に関する一連の不祥事により、原子力の設備利用率が低下し、石油火力の設備利用率が上昇したことによる。

表 4-4 東京電力保有石油火力のパラメータ概算

発電所名	1993年度から2001年度まで		1993年度から2002年度まで	
	\hat{a}_1 (億円/年)	\hat{b}_1 (億円)	\hat{a}_1 (億円/年)	\hat{b}_1 (億円)
千葉(1999年3月廃棄、LNG火力建設)	-8.2	16.7	-8.2	16.7
品川(1996年3月廃棄、LNG火力建設)	分析対象から外す			
横須賀	-12.7	17.5	-7.6	22.6
鹿島	-9.0	26.9	-0.9	35.0
大井	-4.9	19.4	-1.5	20.8
広野	-9.6	40.8	-6.3	39.4
単純平均値	-8.9	24.3	-4.9	26.9

本節では、時間稼働率を基に概算したキャッシュフローを参考にしつつ、基準ケースにおける a_1 及び b_1 をそれぞれ－5(億円/年)、25(億円)とする。

次に、 a_1 及び b_1 に対し定性的な考察を行う。 a_1 に関しては、当設備の経年化、老朽化に伴う維持費・修繕費の増大、新鋭火力の発電効率や経済性の向上を考慮し、負の a_1 を設定することが定性的に妥当であると考えられる。 b_1 に関しては、当設備の維持費・修繕費の不確実性のみならず、電力需要（気温、経済情勢）や供給力（原子力の設備利用率、水力の出水率）、あるいは電力市場の制度設計、競合他社の動向といった外部環境を考慮し、やや大きな b_1 を設定することが定性的に妥当である。基準ケースの設定は、これら定性的観点も考慮し設定した。

② 設備の運転可能期間 T

石油火力発電設備の運転開始年平均は 1973 年となっている⁶⁹。一方、1995 年 1 月から 2004 年 1 月までに廃棄された電力十社保有の石油火力発電所は、合計で 28 サイトであり、運転年数は平均 38 年、最小 27 年⁷⁰[156]、最大 46 年⁷¹である。2004 年 1 月時点で稼働可能な設備の平均運転年数は 31 年であるため、過去の最大運転年数と現在の平均運転年数の差をとり、基準ケースにおける設備の運転可能期間 T を 15 年と設定する。

③ 割引率 r

関西電力の 2004 年 3 月末時点における加重平均資本コスト WACC を有価証券報告書などにに基づき推定した⁷²。その結果 1.28(%/年)と低い値となった。この推定値 1.28%/年は、自由化（規制緩和、規制変化）が進む以前の過去の状況を反映していること、公益的側面を持つ電気事業者について下方リスクが限定していると市場が判断している可能性などから、WACC 推定値は過小評価の可能性がある。

関西電力の行っている事業平均のリスクよりも、経年石油火力発電に関するリスクが高い場合、WACC にリスク・プレミアムを加算する必要が生じる。本ケースのタイムスパンは 15 年であるが、2005 年から 15 年遡った 1990 年時点の WACC 値は、当時の負債利率が 6(%/年)を超えていることから、現在の WACC 値より高位であったことが予想される。

以上のように、現在の諸データを基に算出した WACC 値 1.28%/年は過小評価の可能性も考えられるが、WACC 値は時代と共に変化する性質を持つため、実証的側面、理論的側面のどちらに基づいたとしても妥当かつ広く合意を得られる割引率を設定するのは容易でない。本節では、基準ケースにおける割引率 r を 5%/年とし、さらなる考察は感度解析にて行う。

4.2.4 結果(一変数評価フレーム)

(1) 基準ケースの結果

基準ケースにおける設備価値 $F(x, t)$ の結果を図 4-3 に示す。図 4-3 は時刻 t 、保有便益 x によって $F(x, t)$ がどのように変化するかを示している。廃棄の柔軟性があるため、例え (x の期待変化 a_1 が負であり、

⁶⁹ 2004 年 1 月時点において、稼働可能な電力十社保有の石油火力発電設備。

⁷⁰ 中部電力西名古屋発電所 6 号機。同発電所 5、6 号機廃棄後、同敷地の石炭火力発電所などから発生する硫黄酸化物と窒素酸化物を、電子ビーム照射することにより除去する工場が建設された[160]。

⁷¹ 関西電力姫路第一発電所 1 号機。

⁷² WACC は Weighted Average Cost of Capital の略。

かつ) x が負の領域であっても、直ちに廃棄せず保有することが最適となる領域が存在する。ただし時間が経過し、 t が運転可能期間である 15 年に近づくにつれ、許容される x の値(臨界保有便益 $x^*(t)$)は押し上がる。保有便益 x が小さいほど $F(x, t)$ が 0 に近づいていき、 $F(x, t)=0$ となる x は、廃棄に踏み切ることが最適となる x^* となる。また、 $F(x, t)$ はなめらかに 0 に接することが理論的に判明しており ((4.11)式及び Dixit and Pindyck[36]を参照のこと)、図 4-3 はこの条件を満たしていることが分かる。

図 4-4 に、廃棄に踏み切ることが最適となる臨界保有便益 $x^*(t)$ の結果を示す。時刻 $t=0$ (年)における臨界保有便益 $x^*(0)$ は -37.9(億円/年)である。ここで、設備保有可能期間 T が無限であるケース(第 4.2.2 項)との比較を行う。 T が無限であるケースでは、臨界保有便益 x^* を解析解に得ることができ、その値は -43.54(億円/年)となる。基準ケースでは $T=15$ であるが、 T を 30 年以上にすると $x^*(0)$ は -43(億円/年)以下となる。 T をさらに増加させた数値解が T を無限とした解析解に収束することを別途確認した。

以上は時刻 $t=0$ (年)に着目した結果であるが、時刻 t が増加するにつれて臨界保有便益 $x^*(t)$ は -37.9(億円/年)よりも上昇していき、運転可能期間の 15 年が経過した時刻 $t=15$ (年)において臨界保有便益 $x^*(15)$ は 0(億円/年)となる。図 4-4 には、40(万 kW)の設備容量を持つ石油火力の年間固定費推定値も記した。表 4-1 に示した関西電力保有の石油火力を図 4-4 に示した結果と関連付けて考察を行うと次の通りである。本項の問題設定下において、時刻 $t=10$ (年) (これは運転開始から 39 年経過に相当)にて(設備利用率が低く、同時にバックアップ電源としての価値が小さく)保有便益 x が固定費相当(ここでは 28(億円/年)と試算)であれば、時刻 $t=10$ (年)にて廃棄が最適となる(図 4-4)。

表 4-1 に示した通り、関西電力保有の春日出、三宝、尼崎東、尼崎第三、多奈川、姫路第一発電所は、設備利用率が 1 桁に落ち込んでいても数年間保有され、0~2(%)という非常に低い時間稼働率となった時点(発電開始から平均で 39 年経過)で、実際に廃棄されている。また、1992 年以降廃棄された電力十社保有石油火力発電所の平均年数は 38(年)である。以上から、本モデルにより算出した基準ケースにおける最適解(図 4-4)は、関西電力の経年石油火力、電力十社の平均的な石油火力の現状とおおよそ整合的であると言える。このように過去の実態を定量的に説明することもありアル・オプション法の活用法の一つと言える。

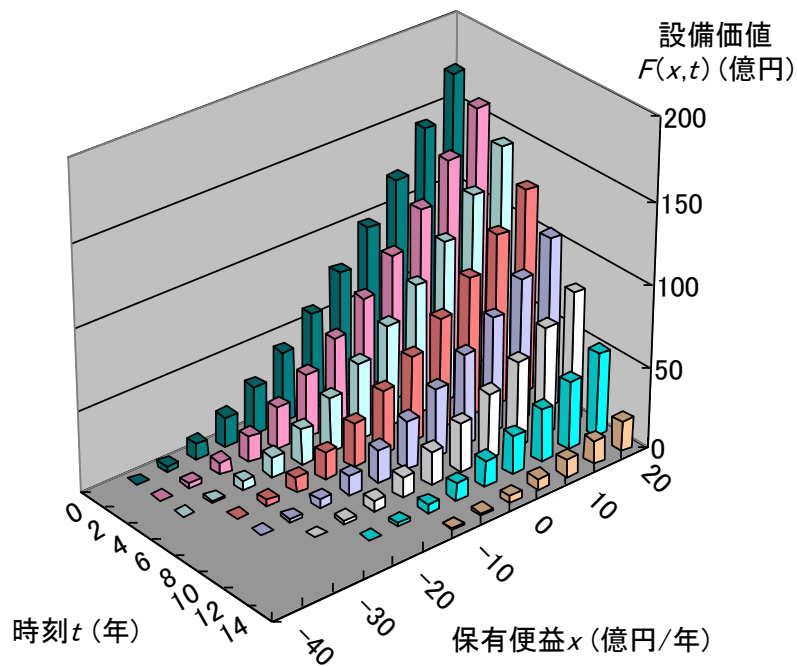


図 4-3 基準ケースにおける設備価値 $F(x, t)$

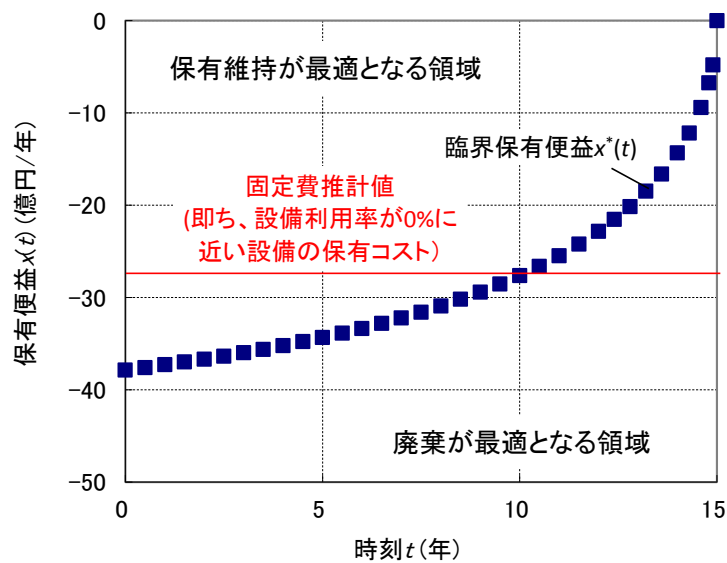


図 4-4 臨界保有便益 $x^*(t)$ の推移

注) 図注の「固定費」は、資料[57]の固定資産税、諸費、給料手当、一般管理費、事業税を積み上げることにより推定。詳細は本文中を参照。

(2) 感度解析

① 臨界保有便益 $x^*(t)$ の感度解析

図 4-5 に、廃棄に踏み切ることが最適となる臨界保有便益 $x^*(t)$ の割引率 r に関する感度解析結果を示す。基準ケース $r=0.05$ (/年) に対し、図 4-5 では $r=0.02$ (/年) と $r=0.08$ (/年) のケースを示した。割引率については、理論的側面、実務的側面からより妥当な値を設定できるよう注意が必要があるが、今回の分析では図 4-5 から分かる通り、割引率の値は臨界保有便益 $x^*(t)$ に大きな影響を与えない。

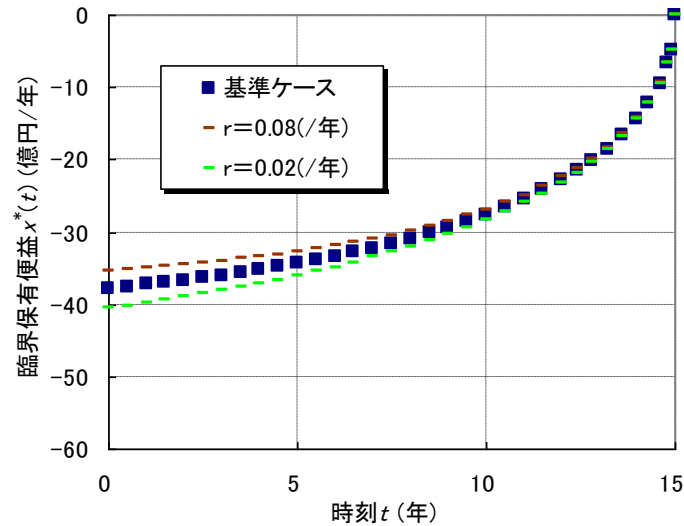


図 4-5 臨界保有便益 $x^*(t)$ の割引率 r 依存性

図 4-6 に、保有便益 x の期待変化 a_1 に関する臨界保有便益 $x^*(t)$ の感度解析結果を示す。基準ケース $a_1 = -5$ (億円/年) に対し、図 4-6 では表 4-3、表 4-4 を参考に $a_1 = -10$ (億円/年) と $a_1 = 0$ (億円/年) のケースを示した。図 4-6 から、 x の期待変化 a_1 は時刻 t が小さいほど臨界保有便益に影響を与えることが分かる。これは、期待変化が長期的に x の変化へ影響を与えることによる。時刻 $t=0$ において、 $a_1 = -10$ (億円/年) のケースでは $x^*(0) = -54$ (億円)、 $a_1 = 0$ (億円/年) のケースでは $x^*(0) = -27$ (億円) となり、基準ケース $x^*(0)$ が -38 (億円/年) と大きく異なる。

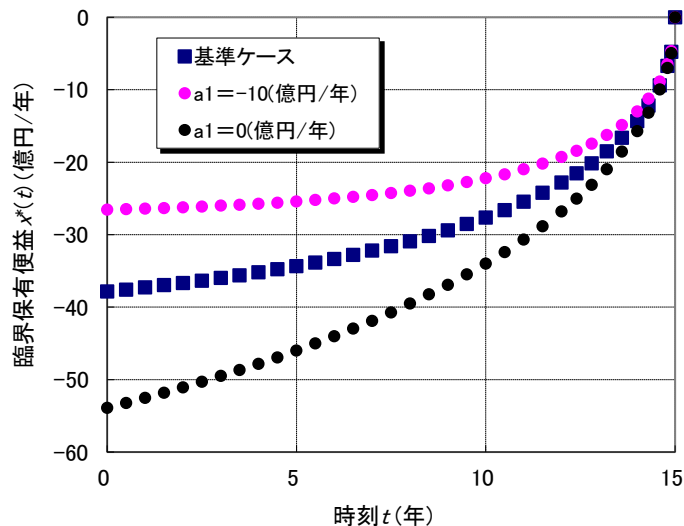


図 4-6 臨界保有便益 $x^*(t)$ の期待変化 a_1 依存性

図 4-7 に、保有便益 x の年当たりボラティリティ b_1 に関する臨界保有便益 $x^*(t)$ の感度解析結果を示す。基準ケース $b_1 = 25$ (億円) に対し、図 4-7 では表 4-3、表 4-4 を参考に $b_1 = 15$ (億円) と $b_1 = 35$ (億円) のケースを示した。図 4-7 から、 x のボラティリティ b_1 は a_1 と比べ、時刻 t の広い範囲で臨界保有便益に影響

響を与えることが分かる。これは、ボラティリティが短期的に x の変化へ強い影響を与え、待機して情報を得る価値がボラティリティに依存することによる。時刻 $t=0$ において、 $b_1=15$ (億円)のケースでは $x^*(0)=-18$ (億円)、 $b_1=35$ (億円)のケースでは $x^*(0)=-59$ (億円)となり、基準ケースの $x^*(0)=-38$ (億円/年)との差が大きい。

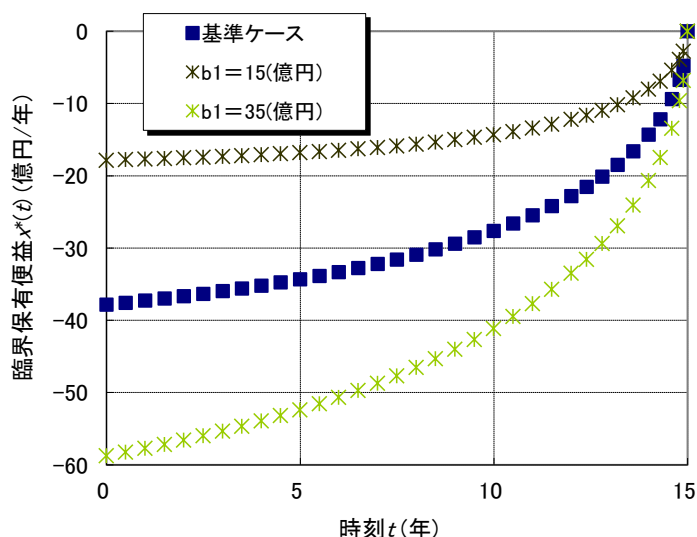


図 4-7 臨界保有便益 $x^*(t)$ の年当たりボラティリティ b_1 依存性

② 時刻 $t=0$ における設備価値 $F(x, 0)$ の感度解析

図 4-8 に、時刻 $t=0$ における設備価値 $F(x, 0)$ の割引率 r に関する感度解析結果を示す。基準ケース $r=0.05$ (/年)に対し、図 4-8 では $r=0.02$ (/年)と $r=0.08$ (/年)のケースを示した。図 4-8 から割引率は結果にあまり影響を与えないことが分かる。より細かく見れば、保有便益 x が大きいほど結果に影響を与える傾向も若干観察される。これは、 x が大きいほど期待保有期間が長く、割引率の影響をより強く受けることによる。

時刻 $t=0$ における設備価値 $F(x, 0)$ の a_1 に関する感度解析結果を図 4-9 に示す。基準ケース $a_1=-5$ (億円/年)に対し、図 4-9 では表 4-3、表 4-4 を参考に $a_1=-10$ (億円/年)と $a_1=0$ (億円/年)のケースを示した。図 4-9 から、保有便益 x が大きいほど x の期待変化 a_1 は設備価値により強い影響を与えることが分かる。これは、 x が大きいほど期待保有期間が長く、 a_1 の影響を受けやすくなることによる。

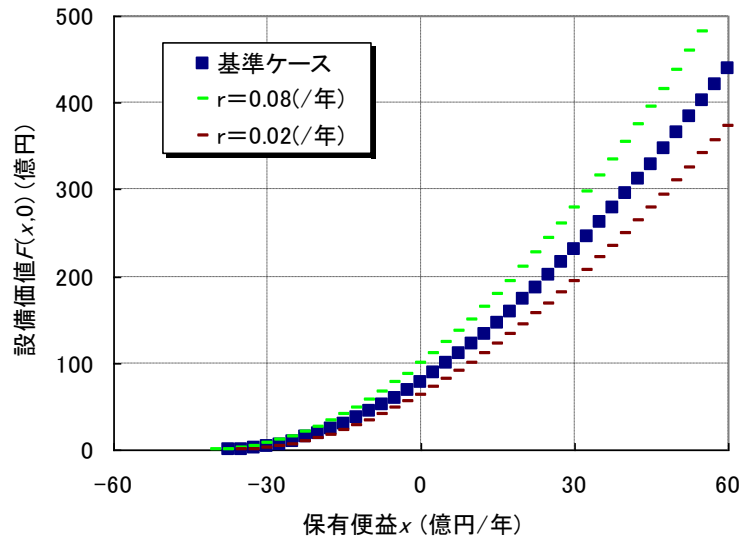


図 4-8 時刻 $t=0$ における事業価値 $F(x, 0)$ の割引率 r 依存性

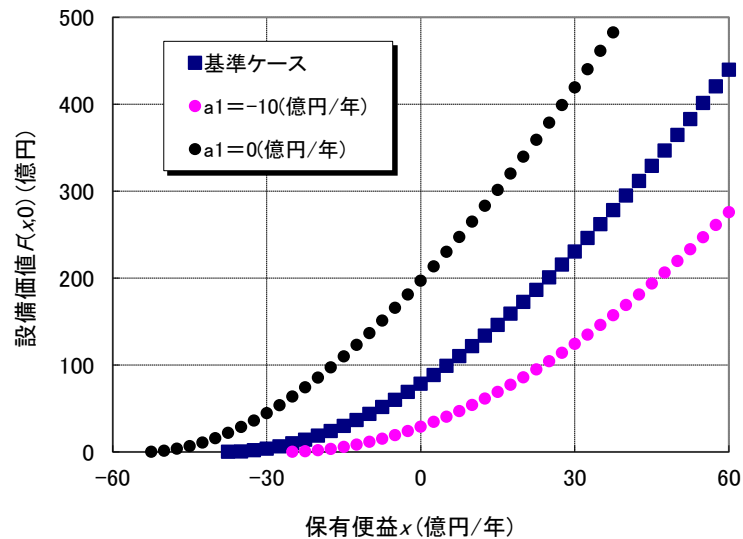


図 4-9 時刻 $t=0$ における事業価値 $F(x, 0)$ の a_1 依存性

時刻 $t=0$ における設備価値 $F(x, 0)$ の b_1 に関する感度解析結果を図 4-10 に示す。基準ケース $b_1=25$ (億円)に対し、図 4-10 では表 4-3、表 4-4 を参考に $b_1=15$ (億円)と $b_1=35$ (億円)のケースを示した。図 4-10 から、設備価値 $F(x, 0)$ は x のボラティリティ b_1 の影響を受けるものの、その影響の強さは保有便益 x の大小に依存しないことが分かる。これは、ボラティリティ b_1 の変化は、臨界保有便益 $x^*(t)$ に強い影響を与えるが(図 4-7)、 x の大きな領域では、臨界保有便益 $x^*(t)$ の変化を通じて間接的に設備価値に影響を与えるのみであることによる。

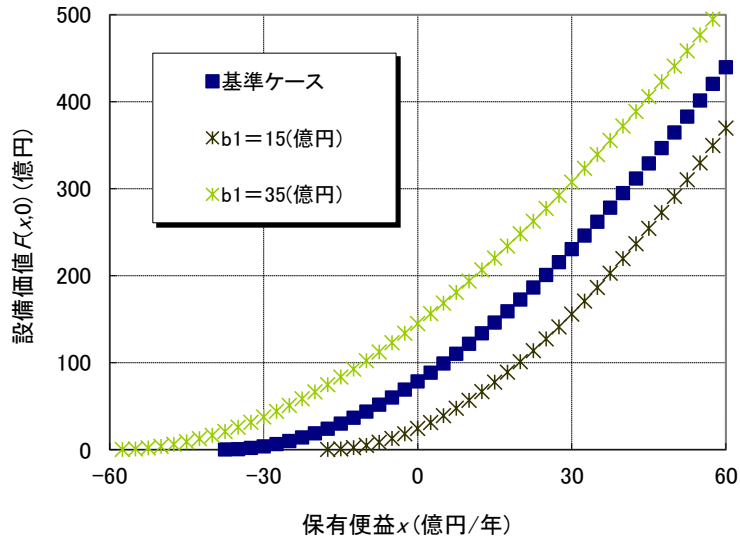


図 4-10 時刻 $t=0$ における事業価値 $F(x, 0)$ の b_1 依存性

③ 考察

感度解析結果から分かる通り、保有便益 x の期待変化 a_1 、及びボラティリティ b_1 の想定値によって、廃棄が妥当となる臨界保有便益 $x^*(t)$ の結果は影響を受ける。一方、今回設定した基準ケースにおける結果は、表 4-1 に示した関西電力石油火力の実際の保有・廃棄の状況とおおよそ整合的である。即ち、分析上の時刻 $t=10$ (年)(運転開始から 39 年経過において)において、保有便益 x が試算される固定費相当であれば廃棄が最適となり、関西電力保石油火力の状況、電力十社保有石油火力発電所の平均稼働年数 38(年)とおおよそ整合的である。

ところで、表 4-2 に示した東京電力保有の千葉及び品川発電所は、高稼働率設備ながら廃棄されている。この状況は、最終損益 Ω を 0 と設定した本項では説明できない。次項では、最終損益 $\Omega=0$ という仮定を外した上で定量分析を進める。

4.2.5 結果(二変数評価フレーム)

(1) 評価フレームの設定

表 4-2 に示した通り、東京電力保有の千葉及び品川発電所は、高い時間利用率ながら廃棄されている。これは、土地や付帯送電設備の利用価値が高く、保有中の経年石油火力を廃棄する方が経済的に優位であったためと推測される。ただし、経年石油火力廃棄後の土地及び付帯送電設備の利用機会価値は、事業者にとって不確実であり、また現在保有中の石油火力の保有便益 x と正の相関を持つことが予想される。既に述べた通り、最終損益 Ω は、発電設備の廃棄費用のみならず、廃棄後の土地及び付帯送電設備の利用機会価値も含む。

本項では以上を背景とし、次の 2 変数廃棄評価フレームを考える。

$$\begin{aligned} dx &= a_1 dt + b_1 dz_1 \\ d\Omega &= a_2 dt + b_2 dz_2 \end{aligned} \quad (4.19)$$

ここで、 ρ を x と Ω の相関係数とすると、 $E[(dz_1)(dz_2)] = \rho \cdot dt$ が成り立つ。(4.19)式に従う保有便益 x を

生み出す経年石油火力を保有している事業者は、保有便益 x 、廃棄後直ちに得られる最終損益 Q を共に見ながら任意の時点で経年石油火力を廃棄することができる。第 4.2.4 項と同様、本項においても、現在保有中の経年石油火力の運転可能期間を T とし、時刻 $t=0 \sim T$ (年)において任意の時点で廃棄することができるが、 T (年)経過すると直ちに廃棄しなければならないとする。

(2) パラメータの設定

保有便益 x の期待変化 a_1 及びボラティリティ b_1 を含め、既に前項で設定したパラメータを本項でも用いることとする。従って、 $a_1=-5$ (億円/年)、 $b_1=25$ (億円)、設備の運転可能期間 $T=15$ (年)、割引率 $r=5.0$ (%/年)である。

新たに設定すべきパラメータは、最終損益 Q の期待変化 a_2 及びボラティリティ b_2 、 x と Q の相関係数 ρ である。最終損益 Q の一要素である現保有設備の廃棄費用は次のように推定する。通商産業省[57]は、石油火力の建設単価を 19(万円/kW)としている。設備の廃棄費用を建設単価の 10(%)⁷³とすると、40(万 kW)の設備の廃棄費用は 76(億円)となる。一方、最終損益 Q の別の要素である「廃棄後の土地及び付帯送電設備の利用機会価値」は、事業者が保有している送電設備の状況、発電所立地可能な土地の入手可能性に関する状況、既存の LNG 受入施設の状況、現在の供給能力や電源構成、将来の電力需要により左右され、事業者、発電所によって大きな開きがあると考えられる。以上の要素を加味しつつも、最終損益 Q に関する具体的なパラメータを見出すことを本論文では割愛し、基準ケースとして $a_2=0$ (億円/年)、 $b_2=50$ (億円/年)、 $\rho=0.5$ を用いる。事業者別、発電所別の Q に関する具体的なパラメータを推定することは今後の課題の一つである。

(3) 結果

基準ケースにおける設備価値 $F(x, Q, 0)$ の結果を図 4-11 に示す。図 4-11 は、時刻 $t=0$ における設備価値を示しており、最長で後 T (年)(本項では $T=15$ (年)と設定)運転可能という状況下の結果である。本項では、直ちに設備を廃棄し最終損益 Q を得ることが可能という設定を行っているため、 $F(x, Q, 0)$ は少なくとも最終損益 Q 以上の値をとる。 $F(x, Q, 0)$ と Q の差は、任意の時点で廃棄が可能であるという柔軟性を伴った保有価値を意味している。 $F(x, Q, 0)$ と Q の差がゼロとなる点は、直ちに廃棄することが最適となる臨界境界 $(x, Q, 0)^*$ を意味しており、図 4-11 に示した通り $Q=-100$ (億円)の場合 x^* は -40 (億円/年)、 $Q=300$ (億円)の場合 x^* は -20 (億円/年)となる。最終損益 $Q=-100$ (億円)のように負の最終損益が生じる場合、既存設備を保有維持し廃棄及び最終損益発生を先送りする傾向が生じる一方、最終損益 $Q=300$ (億円)のように正の最終損益が生じる場合、早い段階で経年石油火力を廃棄し最終損益を得る傾向が生じる。

⁷³ 電源など含めた一般的な大型設備の廃棄費用は、建設単価の 10(%)と見積もることが通例となっている。これには 2 つの背景がある。一つは、実際の廃棄費用が建設単価の 10(%)程度となることが経験的に観察されていることである。もう一つは、会計上、大型設備の減価償却上限を購入簿価(建設単価)の 90(%)としており、減価償却を終えた設備は、残存簿価と廃棄費用が等しく、設備の経済的価値は 0 となるといった会計上の扱いによるものである。

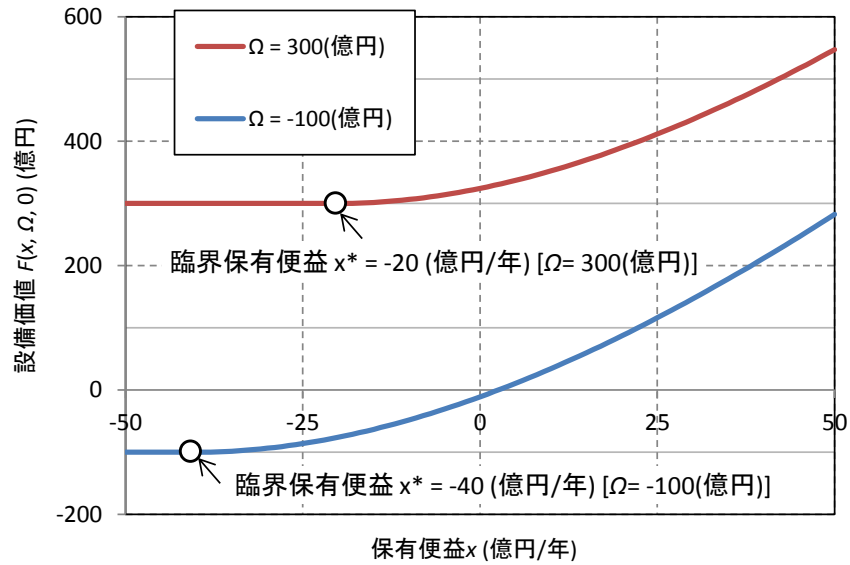


図 4-11 基準ケース、 $t=0$ における設備価値 $F(x, \Omega, 0)$

注) 縦軸の設備価値 $F(x, \Omega, 0)$ には、経年石油火力の廃棄により得られる最終損益 Ω を含む。

(4) 臨界境界 $(x, \Omega, 0)^*$ の感度解析

時刻 $t=0$ において廃棄に踏み切ることが最適となる臨界境界 $(x, \Omega, 0)^*$ の割引率 r に対する感度解析結果を図 4-12 に示す。割引率 r が大きい程、臨界境界の傾き(最終損益 Ω に対する保有便益 x の変化)が大きい。最終損益 Ω が大きい程、基準ケースとの差が生じており、例えば割引率 $r=8(\%/年)$ であれば、保有便益 x が正の値であっても、直ちに廃棄することが最適となる領域が広がる。これは、将来に意思決定を残しておく柔軟価値が大きな割引率で割り引かれると同時に、設備の保有維持継続により最終損益 Ω も割り引かれるためである。

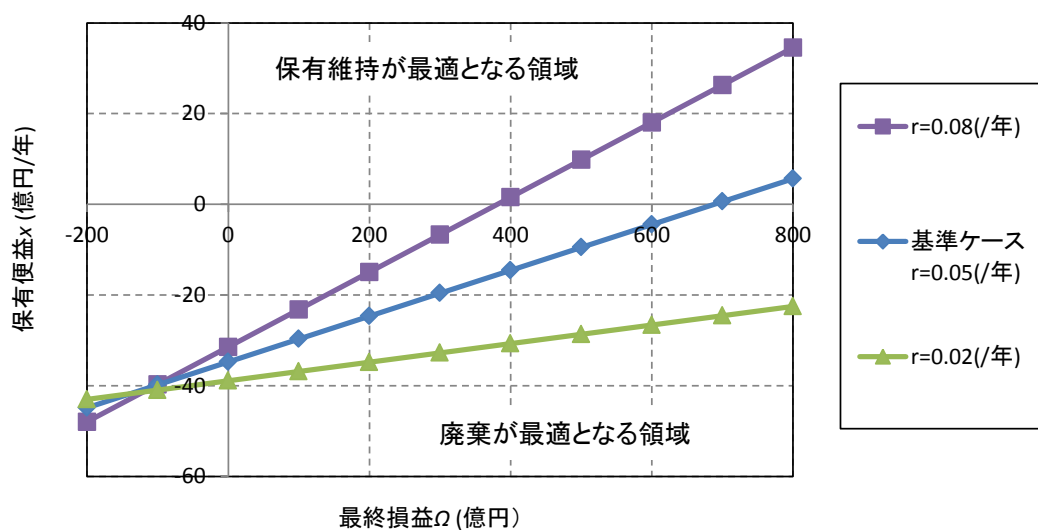


図 4-12 $t=0$ における臨界境界 $(x, \Omega, 0)^*$ の割引率 r 依存性

注) 図中の線よりも、左上の領域は経年石油火力の保有維持が最適となる領域（廃棄するオプションを

残しておくことが最適となる領域)、右下の領域は直ちに経年石油火力を廃棄することが最適となる領域を意味する。

(5) 考察

ここで、表 4-2 に示した東京電力保有の石油火力の状況について考察を行う。千葉 1、2 号機は 42 年間、3 号機は 40 年間、4 号機は 36 年間保有されている。品川 1、2 号機は 36 年間、3 号機は 35 年間保有されている。本項では 31 年間運転してきた設備に着目し、運転開始から 31 年経過した時点进行分析上の初期時点($t=0$)としてきた。従って、これら設備の廃棄は $t=4$ (運転開始から 35 年経過)から $t=11$ (運転開始から 42 年経過)にかけて行われたことになる。そこで、改めて時刻 $t=10$ において廃棄に踏み切ることが最適となる臨界境界($x, \Omega, 10$)*の結果を図 4-13 に示す。

第 4.2.3 項のように、売電価格と発送電費の差を 10(円/kWh)とすると、廃棄時の千葉発電所設備利用率 15.2(%)から、千葉発電所の廃棄年時点のキャッシュフロー（固定費含む、40(万 kW)へ規格化)は、25.3(億円/年)と推計される。このキャッシュフローを保有便益 x とみなし図 4-13 に同じく図示した。図 4-13 から、千葉発電所は比較的大きな最終便益 Ω であったため廃棄された可能性がある。これは即ち新鋭 LNG 火力発電設備建設により、その土地や付帯送電設備を有効利用することが経済的に優位だったことを意味する⁷⁴。また事業者が相対的に大きな割引率を暗に参照した可能性もある(図 4-13)。さらには、経済的根拠を超えたより総合的な判断があったものと推察される。

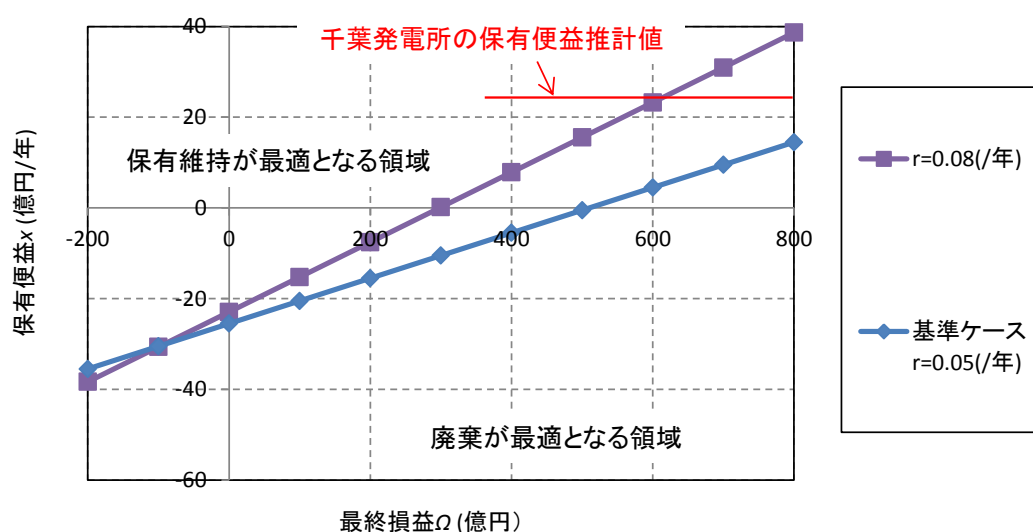


図 4-13 $t=10$ における臨界境界 ($x, \Omega, 0$)*の結果

注) 図中の線よりも、左上の領域は保有維持が最適となる領域（廃棄するオプションを残しておくことが最適となる領域）、右下の領域は直ちに廃棄することが最適となる領域を意味する。

⁷⁴ 千葉発電所や品川発電所は電力需要地近郊であること、東京電力にとって他の発電所立地地点が限られていることなどから、他の電気事業者と比較し大きな最終便益 Ω であることが推察される。

4.3 資本集約的電源（単一電源）の投資分析

4.3.1 はじめに

前節では経年石油火力の保有維持・廃棄評価フレームについて分析を行ったが、本節では電源投資評価フレームに注目する。本節では、ある単一の電源の投資機会を保有している電気事業者を想定し、どのようなタイミングで投資を行うかについて分析を行う。これは具体的には、関西電力の石炭火力、舞鶴発電所 2 号機が（事実上の）着工準備中であったときに、どのようなタイミングで着工に取り掛かるか、といった状況を考えている⁷⁵。即ち、環境アセスメントや地元の合意や了承といった、比較的長期かつ不確実なリードタイムを要する準備及び手続を終えており、任意のタイミングで着工に取り掛かることができるという状況に注目することを意味する。

このように電源は所与であるが、直ちにその着工に着手するか、もしくは着工機会を保有しつつ待機するかといったタイミングについての評価フレームを考える。電源の費用は固定費 I と、変動費 c を考える。固定費 I は初期投資や運転維持費の固定費分などを集約した費用とし、一旦着工にとりかかると回収ができない費用、いわゆるサunkコストであるとする。

このような電源の着工については、第一義的に電気事業者の保有するベースロード電源、ミドルロード電源などの供給力と、今後の電力需要見通しに依存すると考えられる。本節では、このような需給状況とその不確実性は、卸電力価格 P に帰着されているものとする。

電源は上記の通り石炭火力(微粉炭火力)のような資本集約的なベースロード電源を中心に検討を行うものの、卸電力価格 P が変動費 c を下回ったら発電所の稼働を一時中断し、変動費 c の支払いを回避できるものとする⁷⁶。このようにミドルロード、より具体的には LNG コンバインドサイクルのような運用についても表現できるより汎用性の高い評価フレームとする。以上をまとめ、本節では「不確実な卸電力価格 P の下、所与の電源(固定費 I 、変動費 c を伴う)を、どのようなタイミングで(どの程度の卸電力価格 P にて)着工すると、期待収益が最大となるか」という評価フレームについて分析を行う。

なお、複数の電源投資の投資機会を比較したり、炭素価格も想定したりするといったより複雑な分析評価は次の第 4.4 節にて行うこととし、本節ではより簡素な評価フレームとする。本節はこのように簡素な評価フレームのため、（一部条件下で得られる）解析解との比較が可能であり、リアル・オプション法の理論的側面と現実の課題を関連付けすることが可能となる。

本節は、定量評価箇所について小田ら[161]を参照しつつ、とりわけ東日本大震災後の状況や、その後の自由化、規制緩和の議論を踏まえ、定性的な解釈、考察、議論について修正、加筆を行ったものである。

⁷⁵ 関西電力舞鶴発電所（石炭火力発電所）の 2 号機についての詳細は、同発電所パンフレットによると次の通りである。1997 年 3 月舞鶴発電所の敷地造成工事着工、1999 年 5 月 1,2 号機工事着工、その後 2 号機工事は事実上の中断に入り、2007 年 5 月に 2 号機本格工事再開を行った経緯がある（なお 1 号機は 2004 年 8 月に影響運転開始）。2007 年 5 月に 2 号機の本格工事再開を行うまでは、事実上の着工準備中であったといつてよく、本節はこのような着工準備中の状況下に注目する。

⁷⁶ このような稼働中断は、日間運用や週間運用ではなく、数か月に渡り、その間に点検補修なども行うようなケースをここでは想定している。そのため、起動停止や部分負荷運転に伴う発電効率低下を考慮しない。

4.3.2 評価フレームと定式化

(1) 卸電力価格 P

一般の商品に見られない電力固有の問題として、日間、週間、季節間によって電力需要及び電力価格が規則的な周期運動を示すことが挙げられる。また、夏季や冬季のピーク時では、電力価格のボラティリティが変化したり、価格がスパイク状に跳ね上がったたりする現象が見受けられる。送電容量の制約により需給が逼迫したときも、オフピーク時の電力価格とは異なる挙動を短期的に示す。

これらの電力固有の諸問題を認識しつつも、ミドルロード電源、及びベースロード電源の収益は、より中長期的な卸電力価格の水準に依存するため、本節ではこれら短期的な価格変動の影響を無視できるとし以下、中長期的な卸電力価格の水準に着目する。

米国の火力発電設備価値を評価した既往の文献では、今後 10 年間を分析対象期間とし、電力価格の確率過程として平均回帰過程を用いた分析例もある（例えば[38][39]など）。平均回帰過程を採用した理由は、米国の電力市場におけるアワリーベースの電力価格(1 年間分)の推移をみると、統計的に平均回帰過程であることが示されることである。一方、Dixit and Pindyck[36]は、30 年から 40 年といったタイムスパンでみると、(電力価格に間接的に影響を与える)原油価格は、平均回帰過程であるか幾何ブラウン運動であるか統計的に判別できないことを示した。これは、平均回帰過程を前提としてもボラティリティに比べ回帰速度が相対的に小さいことによる。

本節では、数十年に渡る分析を行うため、卸電力価格 P の確率過程として幾何ブラウン運動を採用する。その上で、平均回帰過程は感度解析の一つとして分析を行う。

(2) タイムスケジュールの設定

本節において電源の運転期間 T を 40 年とする。日本では、環境アセスメントなどを含めた電源立地に必要なリードタイムは長期に渡る傾向があり、リードタイム期間の差異は電源選択の重要な要素の一つであるが、既に述べた通り着工準備中の電源を分析対象とするため、着工の決定から運転開始までの建設期間は十分短いとみなし、本節ではより簡素に着工決定と同時に運転開始がなされるとする(なお、次の第 4.4 節では建設期間を明示的に考慮する)。

本節では、電源の着工を遅らせ投資せず待機できることを明示的に考慮し、この待機可能な最大期間を投資待機可能期間 τ と表記する。許認可を含めた手続き上の課題、地元自治体との関係などを考慮し、基準ケースにおける τ を 10 年と設定する。 τ をより長期とした計算については別途感度解析にて行う。

(3) 定式化

卸電力価格 P が、次の幾何ブラウン運動に従うとする。

$$dP = aPdt + bPdz \quad (4.20)$$

ここで、 a (%/年)は卸電力価格 P の期待変化率、 b (%)は P のボラティリティ、 dz はウィーナー過程の増分であり、 $E[(dz)^2]=dt$ である。 a 、 b は時刻 t (年)に対し一定とする。電源の設備利用率上限を CF (%)、運転時の所内率を aux_1 (%)、停止時の所内率を aux_2 (%)とし、発電端設備容量 1(kW)あたりに規格化し分析を行う。運転を停止しており所内向け電力を自ら供給できない時は、市場から P (円/kWh)の価格で電力を調達するものとする。単純化のため、確率 CF (%)で設備を運転することが可能、確率 $(1 - CF)$ (%)で

設備の運転が不可であるとする。以上の仮定により、電源の単位時間あたりの利益 $\pi(P)$ (円/kW/年)は次の(4.21)式を満たす。

$$\begin{aligned}\pi(P) &= 8760(CF \cdot \max[(1 - aux_1)P - c, -aux_2 \cdot P] - (1 - CF) \cdot (aux_2 \cdot P)) \\ &= 8760 \max[(1 - aux_1 + aux_2)CF - aux_2)P - CF \cdot c, -aux_2 \cdot P]\end{aligned}\quad (4.21)$$

割引率を r (%/年)とし、投資が行われてからの経過時間を t' (年)とすると、事業価値 $V(P, t')$ (円/kW)は、 $\pi(P)$ (円/kW/年)の積分値の期待値となる((4.22)式)。

$$V(P, t') = E \left[\int_{t'}^T \pi(P) \cdot e^{-r(t-t')} dt \right] \quad (4.22)$$

一方、運転期間中($0 \leq t' < T$)であれば、 $V(P, t')$ (円/kW)は次のベルマン方程式に従う。

$$V(P, t') = \pi(P)dt' + \frac{1}{1+r \cdot dt'} E[V(P+dp, t'+dt')] \quad (4.23)$$

(4.23)式を伊藤のレンマを使って解くと、次の(4.24)式が得られる。

$$\frac{1}{2}b^2P^2V_{PP}(P, t') + aPV_P(P, t') + V_{t'}(P, t') - rV(P, t') + \pi(P) = 0 \quad (4.24)$$

次に、投資機会価値 $F(P, t)$ (円/kW)に注目する。 $F(P, t)$ (円/kW)をベルマン方程式で表すと、次の(4.25)式となる。

$$F(P, t) = \max \left[V(P, 0) - I, \frac{1}{1+r \cdot dt} E[F(P+dp, t+dt)] \right] \quad (4.25)$$

直ちに投資せず(少なくとも dt 間は)待機することが最適となる領域において、投資機会価値 $F(P, t)$ (円/kW)は次の偏微分方程式を満たす[36]。

$$\frac{1}{2}b^2P^2F_{PP}(P, t) + aPF_P(P, t) + F_t(P, t) - rF(P, t) = 0 \quad (4.26)$$

(4) 解析解の導出

(4.24)式、(4.26)式をこれ以上解析的に解くことはできない。(4.24)式、(4.26)式をさらに解析的に解くためには、問題フレームを変化させる必要がある。

次に、電源の運転期間 T 、投資待機可能期間 τ が無限であるケースを考える。これらが無限であれば、事業価値 $V(P, t')$ (円/kW)、投資機会価値 $F(P, t)$ (円/kW)が t' 、 t に依存しなくなり、(4.24)式、(4.26)式は P に関する常微分方程式となる。バリュー・マッチング条件($F(P^*) = V(P^*) - I$)、スムーズ・ペースティング条件($F'(P^*) = V'(P^*)$)を用いることで次の解析解を得る。

$$V(P) = \begin{cases} K_1 P^{\beta_1} - \frac{8760aux_2}{r-a} P & (P < c' = \frac{c}{1-aux_1+aux_2}) \\ B_2 P^{\beta_2} + 8760 \left[\frac{(1-aux_1+aux_2)CF - aux_2}{r-a} P - \frac{CF \cdot c}{r} \right] & (P > c' = \frac{c}{1-aux_1+aux_2}) \end{cases} \quad (4.27)$$

$$F(P) = A_1 P^{\beta_1} \quad (4.28)$$

また、臨界卸電力価格 P^* は次の方程式の解である。

$$(\beta_1 - \beta_2)B_2(P^*)^{\beta_2} + (\beta_1 - 1) \frac{8760((1 - aux_1 + aux_2)CF - aux_2)}{r - a} P^* - \beta_1 \left(I + \frac{8760CF \cdot c}{r} \right) = 0 \quad (4.29)$$

ただし、各定数は次の通りである。

$$K_1 = \frac{8760CF}{\beta_1 - \beta_2} \cdot \frac{c^{1-\beta_1}}{(1 - aux_1 + aux_2)^{-\beta_1}} \left(\frac{\beta_2}{r} - \frac{\beta_2 - 1}{r - a} \right) \quad (4.30)$$

$$B_2 = \frac{8760CF}{\beta_1 - \beta_2} \cdot \frac{c^{1-\beta_2}}{(1 - aux_1 + aux_2)^{-\beta_2}} \left(\frac{\beta_1}{r} - \frac{\beta_1 - 1}{r - a} \right) \quad (4.31)$$

$$A_1 = B_2(P^*)^{\beta_2 - \beta_1} + \left(\frac{8760((1 - aux_1 + aux_2)CF - aux_2)}{r - a} P^* - \frac{8760CF \cdot c}{r} - I \right) (P^*)^{-\beta_1} \quad (4.32)$$

β_1 、 β_2 ($\beta_1 > \beta_2$) は、次の二次方程式の解である。

$$\frac{1}{2} b^2 \beta(\beta - 1) + a\beta - r = 0 \quad (4.33)$$

これら一連の解析解は $r > a$ の時のみ成り立ち、 $r \leq a$ であれば本問題は有意な解 P^* を持たない。これらの数式の展開や詳細な理論的背景は Dixit and Pindyck[36] を参照のこと。本論文では、Dixit and Pindyck[36] が提示した数式展開に対し、電源固有の要素である設備利用率 CF 、所内率 aux_1 、 aux_2 も考慮した拡張を行っている。

なお以上の解析解は、電源の運転期間 T 、投資待機可能期間 τ を有限としたケースの数値解と後に比較する。

4.3.3 パラメータの設定

(1) 割引率 r

割引率は以前から議論の対象となっているパラメータであるが、本項では基準ケースにおける割引率 r を 5.0(%/年) とする。

(2) 卸電力価格 P に関するパラメータ

日本の卸電力価格は、日本卸電力取引所が 2005 年 4 月以降のデータを提示している。ただし、卸電力価格の期待変化率 a やボラティリティ b を過去のデータから推定することは、分析対象期間に依存するため、安定的かつ説得力のあるパラメータを設定するのは容易でない。本項では、数十年といった長期で見て発電効率の向上や電気事業者のより効率的な経営などが期待できるとし、基準ケースにおける卸電力価格 P の期待変化率 a を -0.5 (%/年) とする⁷⁷。卸電力価格のボラティリティ b は、海外の電力市場

⁷⁷ 2000 年以降の電力小売高価格（産業、業務、家庭）の低下傾向を参照し、本分析では卸電力価格 P の期待変化率 a を -0.5 (%/年) とした。2005 年以降の卸電力価格の推移、特に燃料費などの変動費を除いた卸電力価格の推移の分析などは今後の課題の一つである。

よりも価格変化が穏やかな市場を想定し、基準ケースにおけるボラティリティ b を 15(%/年)とする⁷⁸。

(3) 電源のコストパラメータの設定

本項では、微粉炭火力のような資本集約的なベースロード電源を中心に検討を行うが、ミドルロード電源についても対応できるよう卸電力価格 P が変動費 c を下回ったら発電所の稼働を一時中断し、変動費 c の支払いを回避できる評価フレームとすることを既に述べた。

ところで、電源のコストの推定方法は大きく分けて二つあり、一つはモデルプラントを想定し個々のコストデータを積み上げて推定する方法（例えば NEA[162]）、もう一つは有価証券報告書に記載されているデータから算出する方法である（例えば國武[2]）。有価証券報告書では石炭、LNG、石油などの火力発電の費用が集約され記載されており、これを電源種別に分けることは恣意性を高める。ただし、原子力発電については分離され費用計上されているため、第三者が費用推定するのに有用である。

本項では基準ケースのコストパラメータとして、資本集約的電源の一つである原子力発電を参照する。その上で、原子力発電の固定費 I と変動費 c を算定する。最初に、変動費 c について考える。一般に変動費は燃料費と運転管理費の一部からなる。燃料費に相当する項目（燃料費、核燃料税に相当する雑税の一部（90%）、使用済核燃料再処理費、廃棄物処理費、特定放射性廃棄物処分費）を変動費とみなすことにする。過去 6 年間（1997 年度から 2002 年度、以下同）の電力九社の燃料サイクル費は、平均で 2.02（円/kWh、名目価格、発電端）である[159]。

運転管理費は各費用項目の性質を考慮し、修繕費、消耗品費を変動費、給料手当、給料手当振替額（貸方）、厚生費、雑給、委託費、補償費、賃借料、損害保険料、諸費、雑税（10%）を固定費とする。運転管理費に属する変動費（修繕費、消耗品費）は、過去 6 年間の電力九社のデータを平均すると 1.17（円/kWh、名目価格、発電端）である。本節では、これに燃料サイクル費を加えた 3.19（円/kWh）を発電端変動費 c とする。

次に、原子力発電の固定費 I について考える。一般に、固定費は運転管理費の一部と資本費からなる。上記の変動費分を差し引いた運転管理費の固定費分は 4,388（円/kW/年、名目価格）となる。以上のコストデータは、電力九社の有価証券報告書[159]に記載されているデータを用いて國武の手法[2]により算出した。

資本費についてはモデルプラントを想定した NPV 法に基づく分析も参考にする。1999 年の政府資料[163]は、原子力の資本費（事業報酬を除く）を 1.9（円/kWh）としている。この政府資料[163]では減価償却期間 40 年、設備利用率 80(%)、割引率 3(%/年)なので、設備容量当たりの資本費を 30.8（万円/kW）と暗に想定している。一方 1994 年の政府資料[57]は、建設単価を 31（万円/kW）程度としている。本項では、これらを参考に資本費を 31（万円/kW）と仮定する。

本項では、40 年間に渡る運転管理費の固定費相当 4,388（円/kW/年）を割引率 $r=5.0$ （%/年）で割り引いた値 7.6（万円/kW）と資本費 31（万円/kW）を合計した 38.6（万円/kW）を基準ケースの固定費 I とする。発電所を長期休止させる場合、40 年経過以前に発電所を廃棄する場合、該当する期間において運転管理費の固定費相当分の支払いが減額するが、本項ではこれらのケースは感度解析にて対応する。

次に、所内率のパラメータ設定を行う。原子力発電所の過去の実績[164]、文献（[162][163]）の設定

⁷⁸ 米国の卸電力価格は天然ガス価格変動に加え需要ピーク時には電力供給容量不足や送電制約により卸電力価格が急激に上昇するスパイク現象も観察される。このような地域別、時間帯別の卸電力価格の実態分析は今後の課題の一つである。

を参考に、設備利用率上限 CF を 80 (%) とする。運転時所内率 aux_1 (%)、停止時所内率 aux_2 (%) については、1998 年度から 2002 年度の 5 時点における電力九社合計のデータ[164]を用いて推計を行う。具体的には、「所内向け電力量実績値」 Q_0 (kWh)を被説明変数、「発電端発電電力量実績値」 Q_1 (kWh) 及び、「設備利用率を 100 (%) とした時の仮想発電端発電電力量－発電端発電電力量実績値」 Q_2 (kWh) を説明変数とし、切片を 0 とする回帰分析を行った。得られた回帰式は、次の(4.34)式である。

$$\begin{aligned} Q_0 &= 0.0421Q_1 + 0.0099Q_2 \\ (237.4) \quad (13.7) \\ F &= 416 \quad DW = 2.07 \end{aligned} \tag{4.34}$$

ただし、回帰係数の下の()内は各説明変数の t 値であり、 F は F 値、 DW はダービン・ワトソン比を示している。 t 値、 F 値は有意水準 5% を満たしており、ダービン・ワトソン比も 2 に近いこと、本項では(4.34)式に従い、運転時所内率 aux_1 を 4.2 (%)、停止時所内率 aux_2 を 1.0 (%) とする。このように、稼働時は所内ポンプ動力や機械設備の電力消費が高いことを明示的に考慮する。

4.3.4 結果

以上の評価フレームを第 2.3.1 項に示した格子モデルにより数値的に解いた。投資機会価値 F 及び事業価値 V の結果を図 4-14 に示す。具体的には、分析初期時点($t=0$)の投資機会価値 $F(P,0)$ と、8 年経過後の $F(P,8)$ を示した。また比較のため、事業価値 $V(P,0)$ と固定費 I の差を示した。 $(V(P,0) - I)$ は、直ちに投資に踏み切ることによる期待損益を意味する。事業価値 $V(P,t)$ の評価では、投資が行われた時刻を $t'=0$ としており、投資機会価値 $F(P,t)$ の評価で用いる時刻 t とは投資待機期間だけ時点が異なる。

投資機会価値 F は、任意の時点で投資に踏み切ることができるというオプション価値と、投資実施による期待損益 $(V(P,0) - I)$ の和を意味する。ただし、卸電力価格 P が低い範囲では、そもそも投資を行わないため、図 4-14 に示した通り投資機会価値 F は常に 0 以上、かつ期待損益 $(V(P,0) - I)$ 以上となる。

また、 $F(P,t)$ と $(V(P,0) - I)$ の差は、最大 $(10 - t)$ (年) 待機可能であるオプション価値であるとも言える。期待損益 $(V(P,0) - I)$ が正の範囲において、 P が大きいほどオプション価値は小さくなり、オプション価値が 0 になる卸電力価格 P が臨界卸電力価格 P^* となる。即ち、卸電力価格 P が臨界卸電力価格 P^* に等しくなる時点で投資に踏み切ることが本評価フレームにおいて最適となる。

さらに、図 4-14 から t が大きくなるにつれ待機可能期間 $(10 - t)$ (年) が減少し、 $F(P,t)$ は $F(P,t)=0$ 、及び $(V(P,0) - I)$ に近づく。待機可能期を使い果たした $t=10$ (年) の時は、従来の NPV 法の意味決定と同様の評価フレームとなる。

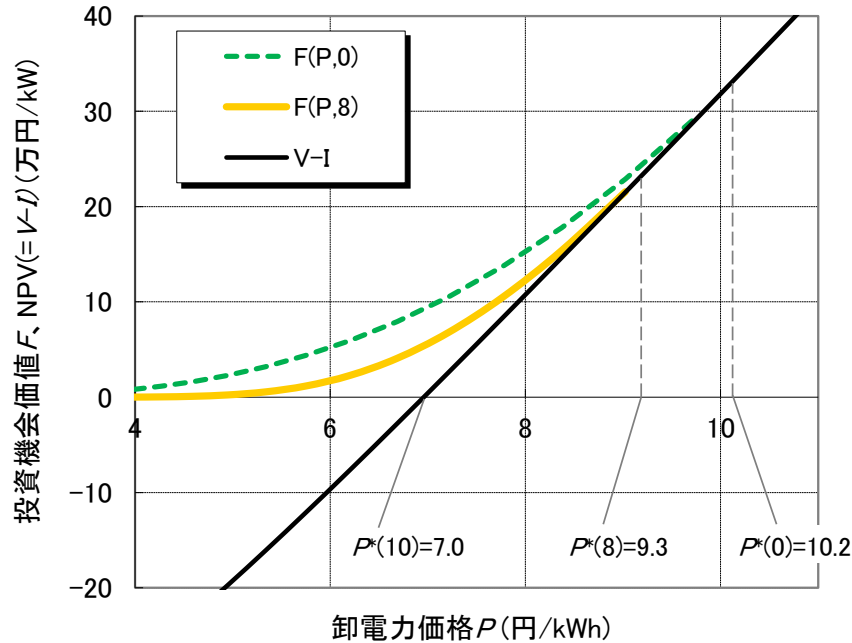


図 4-14 $t=0$ (年) 及び $t=8$ (年) における投資機会価値 F と、正味の事業価値 ($V-I$)

基準ケースにおける臨界卸電力価格 $P^*(t)$ の結果を図 4-15 に示す。図 4-15 は、卸電力価格が $P^*(t)$ よりも低位であれば投資せずに待機することが最適であり、卸電力価格が $P^*(t)$ 以上となれば直ちに投資することが最適となることを示している。従って、当初は投資に踏み切ることが最適となる閾値が高いが、時間の経過に伴い(即ち投資待機可能期間 τ を消費するにつれ)、投資の閾値が徐々に下がっていくことを表している。

投資待機可能期間 τ を無限大としたケースについて、数値解で求めた $V(P,0)$ と解析解(4.28)式による投資機会価値 $F(P)$ を利用して P^* を求めた。その結果、 τ を無限大としたケースの P^* は 10.6 (円/kWh) であり、基準ケースにおける $P^*(0)=10.2$ (円/kWh) とそれほど離れていない。従って、基準ケースの τ 値(10 年)は、 P^* を決めるにあたって比較的長い期間であったことが分かる。また、 τ を増加させていくと $P^*(0)$ が 10.6 (円/kWh) に収束することを別途確認した。

さらに投資待機可能期間 τ のみならず電源の運転期間 T を無限大としたケースの P^* を(4.29)式を用いて解析的に算出すると 10.1 (円/kWh) であり、 τ のみ無限として解いた 10.6 (円/kWh) に近い。基準ケースの電源の運転期間 T (40 年) は、 P^* を決めるにあたって比較的長い期間であることが分かる。

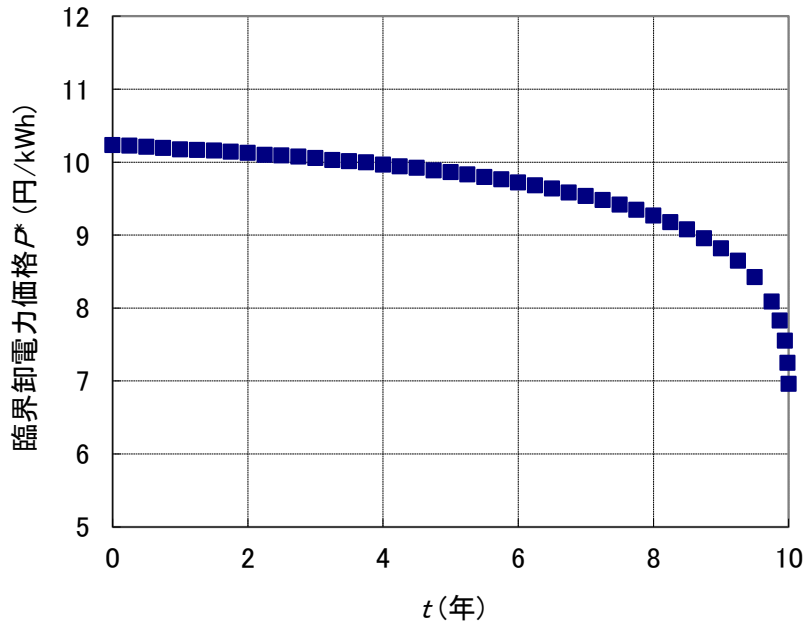


図 4-15 臨界卸電力価格 $P^*(t)$ の推移

4.3.5 感度解析

(1) 割引率 r に関する感度解析

図 4-16 に、割引率に関する感度解析結果を示す。基準ケース($r=5\%/年$)に対し、 $r=2\%/年$ 、 $r=8\%/年$ の結果を示す。この割引率 r に関する感度解析を行う際には、固定費 I の一部を占める運転管理費の固定費分 4,388(円/kW/年)を割り引く r も同様に变化させた。従って割引率 r に関する感度解析においては、全固定費 I も整合的に变化していることに注意が必要である。

図 4-16 から、時刻 $t=10$ (年)の時点、即ち投資待機可能期間 τ (10 年)が経過し待機することができず NPV に基づく判断がなされる $P^*(10)$ は、割引率 r による一定の影響がある。即ち割引率 r が小さいと $P^*(10)$ は低くなるが、割引率 r が大きいと $P^*(10)$ は高くなる。

待機可能な時刻($0 \leq t < 10$)では、時刻 $t=10$ (年)の $P^*(10)$ と比べ基本的に $P^*(t)$ が高い。これは、待機可能であれば直ちに投資せず当面待機することが最適となることを意味している。さらに $r=8\%/年$ とした $P^*(t)$ は幅広い時刻 t に対し 1(円/kWh)程度、基準ケース($r=5\%/年$)の $P^*(t)$ より高い。これは、割引率上昇により投資がより慎重となることを定性的に意味している。

一方、割引率 $r=2\%/年$ のケースでは、 t が小さい程 $P^*(t)$ が基準ケース($r=5\%/年$)の $P^*(t)$ に近づく。この理由について定性的に考察を行うと次の通りである。従来の NPV 法に基づく臨界卸電力価格 $P^*(10)$ で投資を行うことは、クローズ・ツー・ザ・マネー(close to the money)の投資を意味する。卸電力価格 $P(t)$ が、この臨界価格よりも大きくなればなるほど、投資はディープ・イン・ザ・マネー(deep in the money)となる。即ち、時刻 t が小さい時(=待機可能な期間が長い時)は、どの程度ディープ・イン・ザ・マネーであれば投資に踏み切るべきかが問題となる。割引率 r が小さい時、この期待収入が割り引かれる負の効果よりも、待機し新たな情報を手に入れることによる正の効果の方が相対的に大きくなり、待機することが魅力的となり $P^*(t)$ は上昇する。従って、割引率 $r=2\%/年$ の $P^*(t)$ は、時刻 t が小さいほど基準ケース($r=5\%/年$)の $P^*(t)$ に近づく。

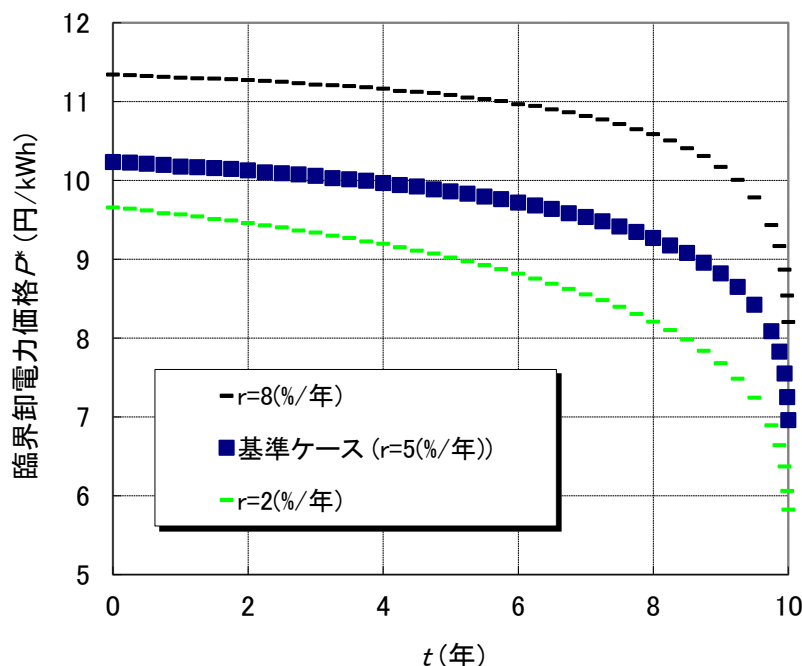


図 4-16 臨界卸電力価格 $P^*(t)$ の割引率依存性

(2) 卸電力価格 P のボラティリティ b に関する感度解析

卸電力価格 P のボラティリティ b に関する感度解析結果を図 4-17 に示す。基準ケース ($b=15\%$) に対し、 $b=20\%$ 及び $b=10\%$ のケースでは、 t が小さいほど基準ケースの $P^*(t)$ との差が大きくなる。これは、待機し新たな情報を手に入れることの待機価値が、ボラティリティ b に強く依存しており、ボラティリティが大きいほどこの待機価値が大きくなることによる。即ち、ボラティリティ b が小さいと従来の NPV 法に近い投資判断が妥当となるが、不確実性が大きいとより慎重な投資判断が妥当となる。

なお、図 4-17 には、平均回帰過程の一つであるオルンシュタイン＝ウーレンバック過程 (OUP) に従うケースについても併記したが、このケースについては次に説明を行う。

(3) 卸電力価格 P が平均回帰過程に従うケース

これまで卸電力価格 P が幾何ブラウン運動に従うケースについて注目してきた。ここで、卸電力価格 P が最も基礎的な平均回帰過程であるオルンシュタイン＝ウーレンバック過程（以下、OUP）に従うケースを考える。

$$dP = \eta(\bar{P} - P)dt + b_2 dz \quad (4.35)$$

ただし、 η は回帰速度 (%)、 \bar{P} は卸電力価格 P の回帰値をである。具体的には、 $\eta=2\%$ (年)、 $\bar{P}=7.0$ (円 / kWh) とした。 b_2 は、 P が幾何ブラウン運動に従うケースのボラティリティ $b(\%)$ と \bar{P} の積をとり、 1.05 (円 / kWh) とし、第 2.3.1 項に示した格子モデルを用いて数値計算を行った。

OUP の結果を図 4-17 に示す。OUP の結果は、幾何ブラウン運動を仮定した基準ケースに比べ臨界卸電力価格 $P^*(t)$ が低く、ボラティリティを 10% とした幾何ブラウン運動の結果に近い。以上は分析の一例であるが、平均回帰過程を用いたとしても解の構造が変化していない。また、平均回帰過程を導入す

ると回帰速度、回帰値、ボラティリティと 3 つのパラメータ設定が必要であり、これらのより妥当な設定法は実務上容易でない⁷⁹。以上を背景として、本論文では全体を通して不確実性変数が従う確率過程としてブラウン運動、もしくは幾何ブラウン運動を参照する。

今後の課題として、過去の卸電力価格からパラメータの推定を行ったり、平均回帰過程やより複雑な確率過程の導入を行ったりすることが考えられる。

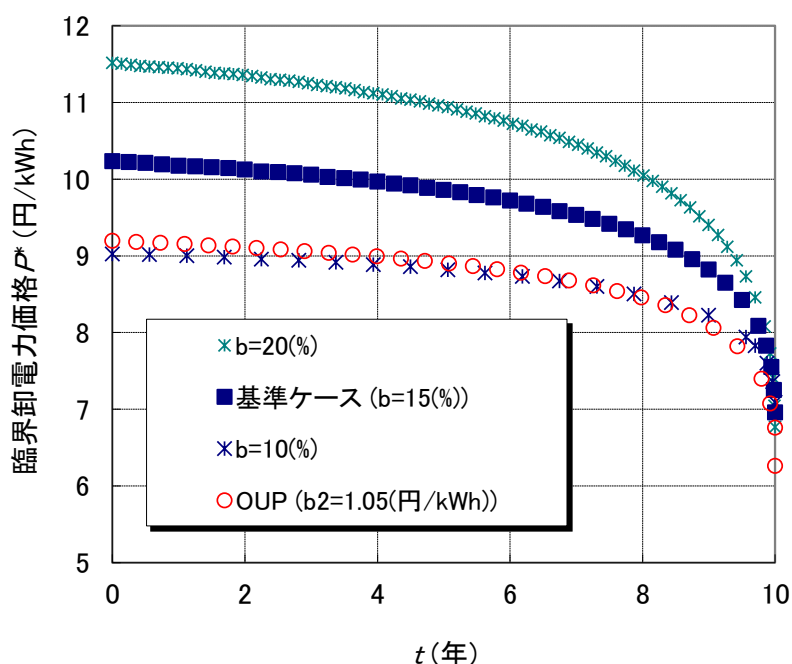


図 4-17 卸電力価格 P のボラティリティ b などに関する感度解析結果

(4) 同じ臨界卸電力価格 $P^*(0)$ を与える固定費 I と変動費 c の組み合わせ

図 4-18 に、同じ臨界卸電力価格 $P^*(0)=10.2$ (円/kWh)となる固定費 I と変動費 c の組み合わせを示す。基準ケースでは図 4-18 に示した通り、臨界卸電力価格 P のボラティリティ b は 15(%)、固定費 I は 38.6(万円/kW)、変動費 c は 3.19(円/kWh)である。この時、早期の投資、即ち時刻 $t=0$ (年)の時点で、投資待機可能期間が 10 年残っている時に投資に踏み切るには臨界卸電力価格 $P^*(0)=10.2$ (円/kWh)以上の卸電力価格が必要である。この $P^*(0)=10.2$ (円/kWh)となる固定費 I と変動費 c の組み合わせは無数にあり、それを図 4-18 に示した。

さらに、図 4-18 に臨界卸電力価格 P のボラティリティ b が 25(%)のケースの結果も示した。これらはいずれのライン上であっても、同じ臨界卸電力価格 $P^*(0)=10.2$ (円/kWh)となる。図 4-18 で注目すべきポイントは、図 4-18 の左上の領域では 2 つのラインが近いが、右下の領域では 2 つのラインが離れる点である。即ち、変動費主体の燃料集約的電源（左上に位置）はボラティリティの影響を相対的にそれほど受けないものの、資本集約的な電源（右下に位置）はボラティリティの影響をより強く受けることである。図 4-18 は「不確実性の増大によって資本集約的な電源の立地がより敬遠される」という定性的な指摘を定量的に表している。

⁷⁹ エネルギー価格、電力価格に対し平均回帰過程を当てはめた分析からは、回帰速度が小さく、また推定された回帰値が分析期間によって大きくことなることが実務上の課題となる。そのため、より簡便な確率過程である幾何ブラウン運動などを導入する方が妥当と考えられる。

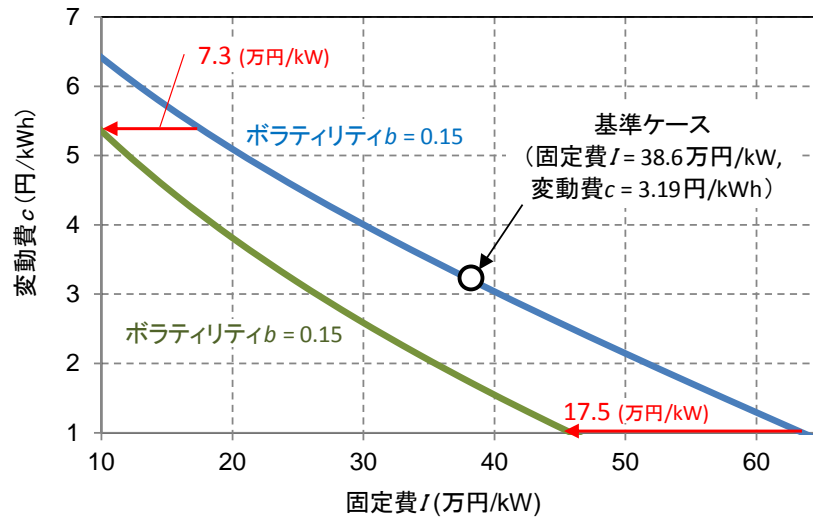


図 4-18 臨界卸電力価格 $P^*=10.2$ (円/kWh) を与える固定費 I と変動費 c の組み合わせ

4.3.6 本節のまとめ

本節では、着工準備中であり投資せず待機可能な電源に着目し、臨界卸電力価格が不確実であるとの想定の下、直ちに投資に踏み切ることが最適となる臨界卸電力価格を算定した。数値解を中心的に利用したが、一部条件下で求められる解析解との比較も行い、得られた数値解の精度についても確認した。

本節で設定したパラメータ(基準ケース)において、一般に参照される従来の NPV 法に基づく投資が妥当となる臨界卸電力価格($P^*(10)$ と表記)は 7.0(円/kWh)程度であるが、投資せず待機可能であれば臨界卸電力価格($P^*(0)$ と表記)は 10.2(円/kWh)程度となる。

感度解析から、参照する割引率が高くなればなるほど、また卸電力価格のボラティティが大きい程、臨界卸電力価格は上昇する。例えば卸電力価格のボラティティが 15(%)から 20%に上昇すると、臨界卸電力価格($P^*(0)$ と表記)は 11.5(円/kWh)程度となる。さらに、資本集約的な電源は(燃料集約的な電源と比較して)卸電力価格のボラティティが大きい程、投資が敬遠されることを定量的に示した。

以上から、自由化、規制緩和が進み不確実性が増すことにより、電源の投資、特に資本集約的な電源の投資が敬遠されることが今後見込まれる。

4.4 炭素価格下における複数電源の投資分析

4.4.1 はじめに

今後、日本においても電気事業の自由化、規制緩和が進み、事業者にとって不確実性がさらに増すと考えられる。その一方、地球温暖化対策の一環として発電部門での CO_2 排出抑制が求められており、より長期的には第 4 章にて示した通り、世界全体で 450 ppm CO_2 eq 安定化や 550 ppm CO_2 eq 安定化を所与とすると、発電部門での大規模な CCS 導入も必要となる。これまで一般に日本の発電部門で CCS を導入すると 7,000 円/t CO_2 から 10,000 円/t CO_2 といった費用単価であると指摘されてきたが(例えば

RITE[19][20])、これは従来の NPV 法に基づくブレイクイーブンコストであり⁸⁰、CCS の投資リスクを含んだ費用単価ではない。

以上を背景として、本節では、今後とも自由化の進展が見込まれる中、さらには CCS の投資リスクがある中、事業者が CCS へ投資することが費用効果的となる閾値に着目する。分析開始時点では経年石炭火力を保有しており、そのリプレース候補として石炭火力、コンバインドサイクル、及びこれらの CCS 付きという 4 つの投資オプションを保有しているとする。また事業者は不確実な炭素価格と天然ガス価格にさらされているとした分析を行う。ここでの炭素価格は、基本的にエネルギー政策や温暖化政策を集約・代表させた指標であり、明示的な炭素価格（排出権取引価格、炭素税など）のみならず、陰伏的な炭素価格（例えば規制、R&D 補助、自主行動）の影響や強度も含む。

既往文献では日本以外の費用を参照した分析が主になされているが（例えば[41][42]）、本節では日本における電源、及び CCS 付きの場合は、CO₂回収、パイプライン輸送、帯水層貯留までの一貫したシステムに着目し、CCS 導入による増エネの考慮、及び日本で CCS を導入した場合に実際に生じることが見込まれる日本固有の費用を明示的に考慮する。

4.4.2 評価フレーム、定式化、数値解法

(1) 分析対象とする事業者の想定

本節で分析対象とする事業者は次のような状況にあるものとする。

- これまで自家発電設備として石炭火力を運転することで自社グループ向けベースロード電源を供給してきたが、当自家発電設備の経年化に伴い電源更新が必要となっている。
- 電源更新にあたっては、1)石炭火力、2)石炭火力+CCS、3)ガス火力、4)ガス火力+CCS、以上 4 つの選択肢を持つ。投資決定と同時に着工に取り掛かることができ、そのため投資決定から運開までのリードタイムは比較的短い⁸¹。
- 事業者は、政府などによる温暖化政策、エネルギー政策による明示的、暗示的な炭素価格の影響下にある。その炭素価格が今後どのように推移するか不確実である。
- 炭素価格に加え、天然ガス価格も不確実であることを明示的に考慮する。
- 電源更新に際して、設備容量及び設備利用率などは新旧設備でほぼ同様とする。従って売電、あるいは系統電力からの調達には予定していない（卸電力価格の不確実性は扱わない）。
- 事業者は、今後 40 年間に渡り発生する総期待費用を最小化したいと考えている（事業者はリスク中立的であり、割引率 5%/年を参照する）。

(2) タイムスケジュールの想定

本節にて想定するタイムスケジュールを図 4-19 に示す。分析開始時点をも $t=0$ （年）とし、現在稼働中の既存石炭火力は $t=10$ （年）までに稼働停止し新規電源へ代替する必要があるとする。投資決定から運開までのリードタイムを石炭火力（+CCS）は 5 年、ガス火力（+CCS）は 3 年とする。従って、石炭火

⁸⁰ CCS 費用は、条件が不利な地点（例えば一本の圧入井当たりの年間圧入量(tCO₂/井)が小さい)では、数万円/tCO₂ となることも RITE[19][20]に示されている。一般に CCS の適地に関する費用が参照されることに注意が必要である。

⁸¹ 本節で必要となるリードタイムは、設備機器の設置調整といったエンジニアリングに関する期間のみで済むことを想定している。

力（+CCS）に投資するならば $t=5$ までに意思決定する必要がある、それ以降はガス火力（+CCS）しか選択できない。また遅くとも $t=7$ には「ガス火力」か「ガス火力+CCS」のどちらかを選択しなくてはならない。逆に $t=0$ と同時にガス火力（+CCS）への投資を決定することで最短で $t=3$ に既存石炭火力の稼働を停止し、新規ガス火力（+CCS）へ切り替えができる。

また図 4-19 に示した通り、事業者は $t=10\sim 25$ において実排出と同水準の無償排出枠の割り当てが行われることを見越しているとする。これは例えば、石炭火力であれば後の表 4-5 に示す通り $835 \text{ kgCO}_2/\text{MWh}_{\text{net}}$ に相当する無償排出枠が与えられ、石炭火力+CCS であれば $101 \text{ kgCO}_2/\text{MWh}_{\text{net}}$ に相当する無償排出枠が与えられることを意味する（これは事業者の懸念に配慮した想定であり、CCS 投資にとって不利な想定である）。

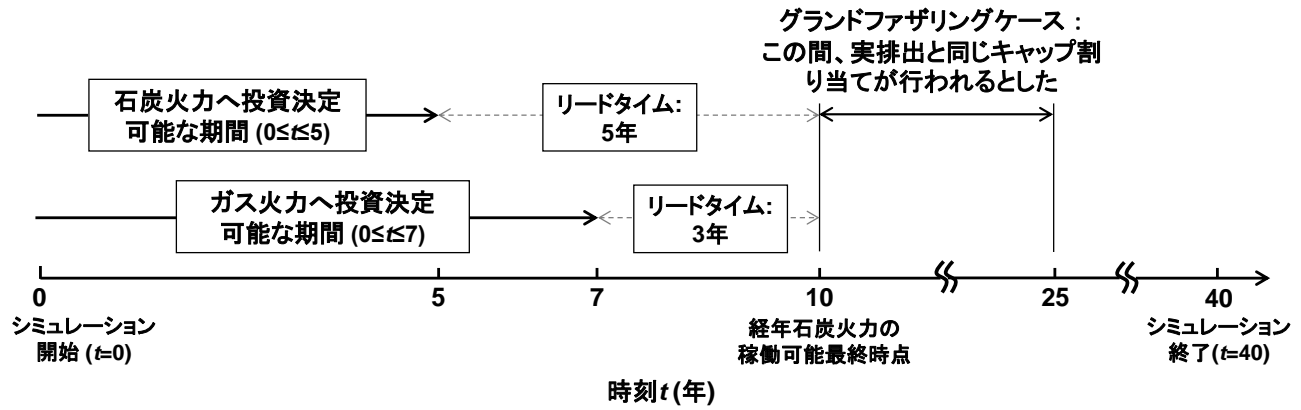


図 4-19 想定したタイムスケジュール

(3) 定式化と数値解法

既に述べた通り、本節では天然ガス価格及び炭素価格が不確実であるとし、これらが次の幾何ブラウン運動に従うとする。

$$\begin{aligned} dP_1 &= a_1 P_1 dt + b_1 P_1 dz_1 \\ dP_2 &= a_2 P_2 dt + b_2 P_2 dz_2 \end{aligned} \quad (4.36)$$

ここで P_1 は天然ガス価格、 P_2 は炭素価格、 a_1 、 a_2 は天然ガス価格 P_1 及び炭素価格 P_2 の期待変化率(%/年)、 b_1 、 b_2 は天然ガス価格 P_1 及び炭素価格 P_2 のボラティリティ、 dz_1 、 dz_2 はウィナー過程の増分である。天然ガス価格 P_1 と炭素価格 P_2 の相関係数を ρ とすると、 $E[(dz_1)(dz_2)] = \rho \cdot dt$ が成り立つ。

本節の評価フレームにおいては、投資に踏み切るまでの待機可能期間、電源の運転期間が有限なため解析解は得られず、数値解に頼らざるを得ない。本節では、ベルマン方程式を用いた動的計画法により数値的に待機・投資の閾値を求める。企業が時刻 t 以降最適な意思決定を行った場合の累積期待費用を F_t (US\$/kW) とすると、 F_t (US\$/kW) は離散近似した次のベルマン方程式に従う。

$$\begin{aligned} F_t &= \min \left[V_{gas,t}, V_{gas_ccs,t}, V_{coal,t}, V_{coal_ccs,t}, 8760CF \cdot C_{age} \cdot \Delta t + E[F_{t+\Delta t}] \cdot \exp(-r\Delta t) \right] \quad (0 \leq t \leq 5) \\ F_t &= \min \left[V_{gas,t}, V_{gas_ccs,t}, 8760CF \cdot C_{age} \cdot \Delta t + E[F_{t+\Delta t}] \cdot \exp(-r\Delta t) \right] \quad (5 < t < 7) \\ F_t &= \min \left[V_{gas,t}, V_{gas_ccs,t} \right] \quad (t = 7) \end{aligned} \quad (4.37)$$

ただし、 $V_{gas,t}$ 、 $V_{gas_ccs,t}$ 、 $V_{coal,t}$ 、 $V_{coal_ccs,t}$ (US\$/kW)は時刻 t において、ガス火力、ガス火力+CCS、石炭火力、石炭火力+CCS へ投資すると決定した場合のそれぞれの期待費用であり静的な解析解にて計算できる。 $CF(\%)$ は設備利用率、 C_{age} (US\$/kWh)は現保有石炭火力の運転維持費、燃料費、炭素価格関連費の合計、 $r(\%/年)$ は割引率、 Δt (年)は離散近似した 1 ステップ期間である。(4.37)式は 1(kW)に規格化しており、 $8760CF$ は 1(kW)当りの年間発電電力量である。

$F_t + \Delta t$ は Δt 後の期待費用であり、(4.36)式の幾何ブラウン運動を対数変換し Cox-Miller モデル (Cox and Miller[103]) を拡張した等幅二変数格子モデルにより計算した。時刻 t に関して後ろ向き (バックワード) に期待費用 F_t を算出し待機・投資の閾値を求めた (第 2.3 節参照)。

数値計算にて用いる時間ステップ幅 Δt は約一週間に相当する 0.02 (年)とした。この場合、天然ガス価格 15 US₂₀₀₇\$/GJ 前後でのステップ幅は 0.5 US₂₀₀₇\$/GJ 程度、炭素価格 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 前後でのステップ幅は 4 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 程度となる (基準ケース)⁸²。

4.4.3 パラメータの設定

設定すべきパラメータは、電源及び CO₂ 回収に関するもの、CO₂ 輸送や貯留に関するもの、確率過程に関するもの (天然ガス価格 P_1 及び炭素価格 P_2) に分けられる。以下、これらを順に示す。

(1) 電源及び CO₂ 回収に関するパラメータ

最初に電源及び CO₂ 回収に関するパラメータを示す。既存石炭火力はコスト等検証委員会資料[165]に基づき表 4-5 の通り設定した。例えば、送電端発効率は 37.0%とした。

新規石炭火力は超々臨界圧 (USC) 微粉炭火力とする。CO₂ 回収なしであれば送電端発効率 41.1%である。ただし、CO₂ 回収設備 (ここでは化学吸収法の中でも特に代表的である KS-1 を参照) の稼働により送電端発効率は 34.0%まで低下すると想定した。CO₂ 回収により増エネとなる主な要因は、吸収液から CO₂ を分離させる際に必要な熱投入、所内ポンプ動力増分、CO₂ 圧縮動力などによる。本節では回収された CO₂ を発電所側で 15.3 MPa まで昇圧するものとして、その圧縮動力に要する電力消費[166]を発電端電力量から差し引き送電端電力量とした。以上は、既往の文献、即ち RITE[19][20]、コスト等検証委員会[165]、IPCC[17]、NEA[162]、NETL[167][168]を基に、現在入手可能な技術水準を想定し設定した (将来の技術進展を織り込んだパラメータではない)。

新規のガス火力はコンバインドサイクルとする。石炭火力と同様、RITE[19][20]、コスト等検証委員会[165]、IPCC[17]、NEA[162]、NETL[167][168]を基に、現在入手可能な技術水準を想定した。また、表 4-5 に示した費用は相互に比較可能な費用水準とした。例えば NEA[162]には、地域、評価年 (基準年) などにより幅広い費用データを提示しているが、表 4-5 に示した費用の内、石炭火力 (+CCS) とガス火力 (+CCS) の費用の相対的關係は、これら既往の文献とおおよそ整合的である。

なお、本節では石炭価格 (実質値) が今後も表 4-5 に示した 4.78 US₂₀₀₇\$/GJ (LHV)が維持される (変化しない) と想定する。石炭の単位発熱量当たりの価格は天然ガスの 1/4 程度であり、かつ石炭価格の価格変動が相対的に小さいため、このような簡素化を行った。

⁸² 天然ガス価格 P_1 及び炭素価格 P_2 のステップ幅はそれらに対数変換した後に等幅分割している。従って、これら値が大きい程ステップ幅も大きい。

表 4-5 電源及び CO₂ 回収設備に関するパラメータ想定（日本）

項目	単位	既存 石炭火力	新規石炭火力 Ultra-supercritical pulverized coal combustion (USC PCC)		新規ガス火力 Combined cycle gas turbine (CCGT)	
			CO ₂ 回収 なし	CO ₂ 回収 付き	CO ₂ 回収 なし	CO ₂ 回収 付き
送電端設備容量	MW	233.5	562.8	436.9	462.2	388.9
発電端発電効率(LHV 基準)	%	39.6	43.8	37.9	58.0	52.5
送電端発電効率(LHV 基準)	%	37.0	41.1	34.0	56.8	48.8
CO ₂ 回収技術	-	-	-	KS-1	-	KS-1
CO ₂ 回収率	%	-	-	90	-	90
CO ₂ 排出原単位	kgCO ₂ /MWh _{net}	928	835	101	348	41
CO ₂ 回収原単位	kgCO ₂ /MWh _{net}	-	-	908	-	365
CO ₂ 回収量	MtCO ₂ /y	-	-	2.96	-	1.06
送出 CO ₂ の圧力	MPa	-	-	15.3	-	15.3
設備利用率	%	85	85	85	85	85
リードタイム	y	-	5	5	3	3
燃料発熱量(LHV 基準)*	GJ/t	24.4 GJ/t 石炭			49.1 GJ/t LNG	
燃料価格	-	116.7 US ₂₀₀₇ \$/t, 4.78 US ₂₀₀₇ \$/GJ (LHV)			P_2^{**}	
資本費***	US ₂₀₀₇ \$/kW _{net}	N/A	2,719	5,005	1,549	2,926
燃料消費率	MJ(LHV)/kWh _{net}	9.73	8.76	10.59	6.33	7.38
燃料費	US ₂₀₀₇ \$/MWh _{net}	46.5	41.9	50.6	$P_2 \times$ 燃料消費率	
運転維持費	US ₂₀₀₇ \$/MWh _{net}	13.0	13.0	23.5	7.0	12.7
費用算定の基準年	y	2010	2010	2010	2010	2010
主な出典	-	コスト等検 証委員会 [165]	RITE[19][20]、コスト等検証委員会[165]、 IPCC[17]、NEA[162]、NETL[167][168]			

* 受け取りベース。

** 天然ガス（LNG）の 2012 年平均 CIF 価格は 797 US₂₀₀₇\$/t、16.2 US₂₀₀₇\$/GJ (LHV)。

*** overnight capital cost であり、建設中利子を含まない。

注）本表を含め本節の分析にて為替換算が必要な場合、市場為替レート（1 US₂₀₀₇\$/100 JPY）を参照した。(2) CO₂ 輸送・CO₂ 貯留に関するパラメータCO₂ 輸送、CO₂ 貯留に関して設定したパラメータを表 4-6、表 4-7 にそれぞれ示す。今回設定する日本

のパラメータの位置づけを明確にするため、NETL[168][169]で引用されている米国の CO₂ 輸送パイプラインや陸域帯水層のパラメータの一例も併記した。日本で実際に CCS を行う場合、技術パラメータや費用パラメータは CCS 実施地点の状況に大きく依存すると考えられる。本節では、苫小牧沖での CCS 実証プロジェクトを参考としつつ、苫小牧まで 80 km の陸域パイプライン輸送を行う大規模 CCS を前提とした。年間の CO₂ 輸送量を米国で例示したように 1 プロジェクト当たり 3.2 MtCO₂/y と大きくとった方が輸送費用は安価となるが、この規模で 30 年間に渡り貯留が見込めるサイトが日本では限られるため⁸³、今回提示のように輸送・貯留に関しては 1 プロジェクト当たり 1.0 MtCO₂/y と設定した[19][20]。なお、1.0 MtCO₂/y ではなく 3.0 MtCO₂/y の輸送規模とした場合、日本の CO₂ 輸送単価は表 4-6 で提示した費用のおよそ半分程度となる[19]。

表 4-6 CO₂ 輸送に関するパラメータ想定

項目	単位	日本	(参考) 米国
年間の CO ₂ 輸送量	MtCO ₂ /y	1.0	3.2
パイプライン長	km	80	80
再圧設備の有無	-	再圧設備なし	再圧設備なし
入口圧力	MPa	15.3*	15.3
出口圧力	MPa	10.0	10.0
パイプライン径	in, m	通称: 8 in, 実サイズ: 外径 8.75 in (0.222 m), 内径 8.37 in (0.212 m)	通称: 12 in, 実サイズ: 外径 12.75 in (0.324 m), 内径 12.19 in (0.310 m)
パイプライン建設単価	million US ₂₀₀₇ \$/km	平均 2.84 (一般部 2.27, 特殊部 10.2) **	0.523
年間の運転維持費	-	建設費の 3%	建設費の 1%程度
輸送費用計***	US ₂₀₀₇ \$/ tCO ₂ 輸送	23.3	1.1
費用算定の基準年	y	2011	2011
主な出典	-	RITE[19][20]	NETL[168]

* 日本では 7 MPa までしかパイプライン輸送実績がなく、15.3 MPa の輸送に際しては規制整備、規制対応を含め相当な準備期間が必要である[19]。

**一般部とは公道下 1.2m にパイプを敷設する場合、特殊部とは河川や鉄道などを推進工法で横断する場合をそれぞれ意味する。RITE[19][20]のパイプライン建設単価を 2001 年コストベースと見なし、本表では日本機械輸出組合[170]のプラントコストインデックス⁸⁴との積をとり 2011 年コストベースとした。

*** 30 年間に渡り CO₂ 輸送した場合の平均費用（割引率 5%/y）

⁸³ 例えば、想定モデル地点の CO₂ 貯留可能量（累積）は苫小牧沖 2600 万 tCO₂～6500 万 tCO₂、鵜川沖（苫小牧沖の東部に位置）1900 万 tCO₂～4800 万 tCO₂、阿賀沖（新潟空港の北部に位置、数か所の合計）5600 万 tCO₂～1.3 億 tCO₂[19][20]。

⁸⁴ 日本機械輸出組合[170]のプラントコストインデックスは 2001 年 99.5、2011 年 139.7 と約 1.4 倍へ上昇している。

CO₂貯留に関するパラメータとして、稼働圧入井 1 本当たり年 25 万 tCO₂と設定とした。大偏距坑井掘削（ERD）は陸域垂直井と比較し坑井単価が 1 桁大きく、例えば陸域垂直井（深度 1,000m、垂直井）は 1.8 億円/本、ERD 坑井は垂直深度 1,000m、偏距 2,500m、掘削長 3,013m の条件で 11.75 億円/本、垂直深度 2,000m、偏距 5,000m、掘削長 5,708m の条件で 26.26 億円/本とされる（何れも 2001 年コストベース）[19]。そのため圧入井 1 本当たり貯留量は貯留費用を左右する大きな要素である（事業者から見てリスク要因と言えるが、本節ではこの不確実性を明示的に扱わないこととする）。

2001 年コストベースの CO₂貯留コストを 2011 年コストベースへ換算するため石油ガス業界の上流部門で主に参照される IHS Upstream Operating Costs Index を参照し、2011 年コストベースの CO₂貯留コストとした（表 4-7）。IHS の指数では 2001 年 100.4、2011 年 181.4 と約 1.8 倍へ上昇している。

表 4-7 CO₂貯留に関するパラメータ想定

項目	単位	日本 海底下帯水層貯留	(参考) 米国 陸域帯水層貯留	
			“Wolfcamp2”	“Muddy5”
年間の CO ₂ 貯留量	MtCO ₂ /y	1.00	3.20	1.19
貯留地点での昇圧	MPa	昇圧不要	昇圧不要	昇圧不要
深度	m	1,000	1,120	2,240
貯留層の（有効）厚さ	m	50	300	40
空隙率	%	25	12.5	15
浸透率	mD	10～100	100 (垂直浸透率 100, 水平浸透率 30, 総合浸透率 55)	20 (垂直浸透率 20, 水平浸透率 6, 総合浸透率 11)
圧入量 (稼働圧入井当たり)	MtCO ₂ /井/y	0.25 (垂直深度 1,200m、偏距 3,200m、掘削長 4,290m の ERD)	1.07	0.15
圧入井本数	本	稼働本数 4 (掘削本数 5) (掘削費計 146 million US ₂₀₀₇ \$**)	稼働本数 3 (掘削本数 4)	稼働本数 8 (掘削本数 9)
テスト井、調査井、観測井 (事前調査、モニタリング、 検証など)	-	計 10 本 (垂直深度 1,300m、偏 距 1,600m の傾斜井相当、掘削 費計 72 million US ₂₀₀₇ \$**)	テスト井 5 本 調査井 14 本*	テスト井 5 本 調査井 17 本*
貯留費用計***	US ₂₀₀₇ \$ /tCO ₂ 貯留	24.8	4.8	19.1
費用算定の基準年	y	2011	2011	2011
主な出典	-	RITE[19][20]	NETL[169]	NETL[169]

* 米国データ（NETL[169]）は EPA クラス VI の規制基準、実サイトにおける許認可実績、専門家検討結果

などに基づく観測井本数（デフォルト値）などが提示されている。地質構造は Dome（ドーム）、Anticline（背斜）、Regional dip の 3 種を想定しており費用は後者ほど高い⁸⁵。本表は Anticline の観測井本数、費用を提示した[169]。

** IHS Upstream Operating Costs Index（2001 年 100.4、2011 年 181.4）[171]を参照し 2011 年コストベースとした。

*** 30 年間に渡り CO₂ 貯留した場合の平均費用（割引率 5%/y）。

表 4-5、表 4-6、表 4-7 のパラメータに基づき、費用最小となる新規電源のブレイクイーブンコストを従来の NPV 法（割引率 5%/y）により算定したのが図 4-20 である。図 4-20 から石炭火力の CCS 導入のブレイクイーブンとなる炭素価格は 150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 程度であることが読み取れる。一般に日本では 7,000 円/tCO₂ から 10,000 円/tCO₂ といった費用単価であると指摘されてきた(例えば RITE[19][20])。これよりも高い費用となっているのは今回の設定において、(i) 2000 年以降の燃料価格上昇、設備費上昇を考慮したこと、(ii) 従来の設定より長いパイプライン（今回 80km）を前提としたこと、(iii) 図 4-19 に示した通りグランドファザリングによる無償排出枠の割り当てを行う前提としたこと、(iv) 将来の技術進展を織り込んでいないこと、などによる。また見かけ上の理由として、図 4-20 の炭素価格は回避された CO₂ 量当たりで見た炭素価格（US\$/tCO₂ avoided）であるが、一般には貯留した CO₂ 量当たりで見た炭素価格（US\$/tCO₂ injected）を参照することもあるためと考えられる。

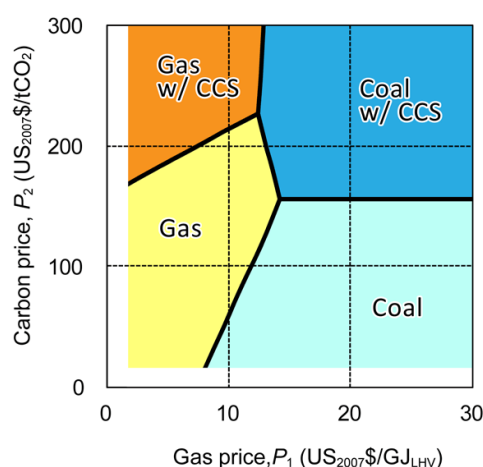


図 4-20 従来の NPV 法によるブレイクイーブンコスト（日本、グランドファザリングケース）

⁸⁵ 存在割合を Dome 1.25%、Anticline 1.25%、Regional dip 97.5% (Regional dip の内訳は、傾斜 10 度 32.5%、傾斜 5 度 32.5%、水平 32.5%) としている[169]。

Box: 諸条件及びパラメータ設定の重要性

本節では日本の帯水層貯留に着目した。一方、米国では表 4-7 に示した通り帯水層貯留の適地が存在するのに加え、CO₂-EOR が徐々に進んでいる。CO₂-EOR は、CO₂回収事業者にとって CO₂を（典型的には 20US\$/tCO₂ という価格で）販売できる経済的優位性がある。米国の石炭価格や設備費用、及び CO₂-EOR を前提とした場合、CO₂回収設備の閾値は大幅に低下し数十\$/tCO₂程度となる（図 4-21）。このように CO₂-EOR か帯水層貯留か、米国コストか日本コストか、といった諸条件の違い、パラメータの違いは分析結果を大きく左右するため重要である。

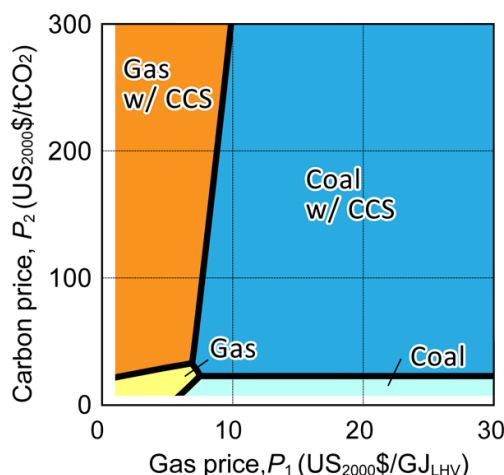


図 4-21 米国 CO₂-EOR を前提としたブレークイーブンコスト（従来の NPV 法による）

(3) 天然ガス価格 P_1 及び炭素価格 P_2 に関するパラメータ

本節では幾何ブラウン運動に従うと想定した天然ガス価格 P_1 及び炭素価格 P_2 に関するパラメータとして表 4-8 を参照する。表 4-8 のパラメータを用いた場合のサンプルパスを図 4-22 に示す。表 4-8 は、(i)過去の天然ガス価格、排出権取引価格などの時系列推移に基づく推計値⁸⁶、(ii)オプション価格から逆算されるインプライド・ボラティリティ、(iii)DNE21+によるモデル分析結果（第 3 章）、(iv)IEA や US DOE/EIA 見通し、などを基に設定した。

この内、炭素価格のボラティリティについては EU Emissions Trading System (EU ETS)における European Union Allowance (EUA)価格も参照した（図 4-23）。EUA 価格の年変化率（2005 年から 2015 年）に基づくボラティリティは 0.29 と算定された。この水準は「(ii)オプション価格から逆算されるインプライド・ボラティリティ」ともおおよそ整合的である。

次に天然ガス価格と炭素価格の相関係数を試算するため欧州の 2005 年以降のガス価格も参照した（図 4-24）。欧州の場合、およそ 2011 年あたりまでこれらの間に正の相関があるものの、その後は負の相関が見られる⁸⁷。そのため 2005 年～2015 年の相関係数は 0.12、2005 年～2014 年の相関係数は 0.26 と期

⁸⁶ 天然ガス価格のボラティリティについては、日本のドル建て価格、年次データ、期間（2001 年から 2015 年）、到着ベース（契約ベースではない）の条件で求めた 0.24 を参照する[172]。なお、1977 年以降の米国ヘンリーハブ価格、欧州ガス輸入平均価格、日本天然ガス価格のボラティリティは、それぞれ 0.29～0.37、0.25～0.31、0.21～0.25 程度である（何れも年変化率ベースの試算）。

⁸⁷ これは 2012 年の日本の天然ガス（LNG）輸入増加に伴うガス価格上昇も背景にあると考えられる。

間の取り方によって差異が大きい。また信頼区間もかなり大きい。「(i)過去の時系列推移」のみを参照すると、このように分析対象期間の取り方によって導き出されるパラメータに大きな差が生じるため、上述の(ii)～(iv)の手法、見通しなども合わせて参照しつつ表 4-8 に示すパラメータを基準ケースとして参照した。

表 4-8 天然ガス価格 P_1 及び炭素価格 P_2 に関するパラメータ（基準ケース）

	期待変化率 a_i	ボラティリティ b_i	相関係数 ρ
天然ガス価格 P_1	1.5 (%/y)	0.24	0.20
炭素価格 P_2	3.2 (%/y)	0.29	

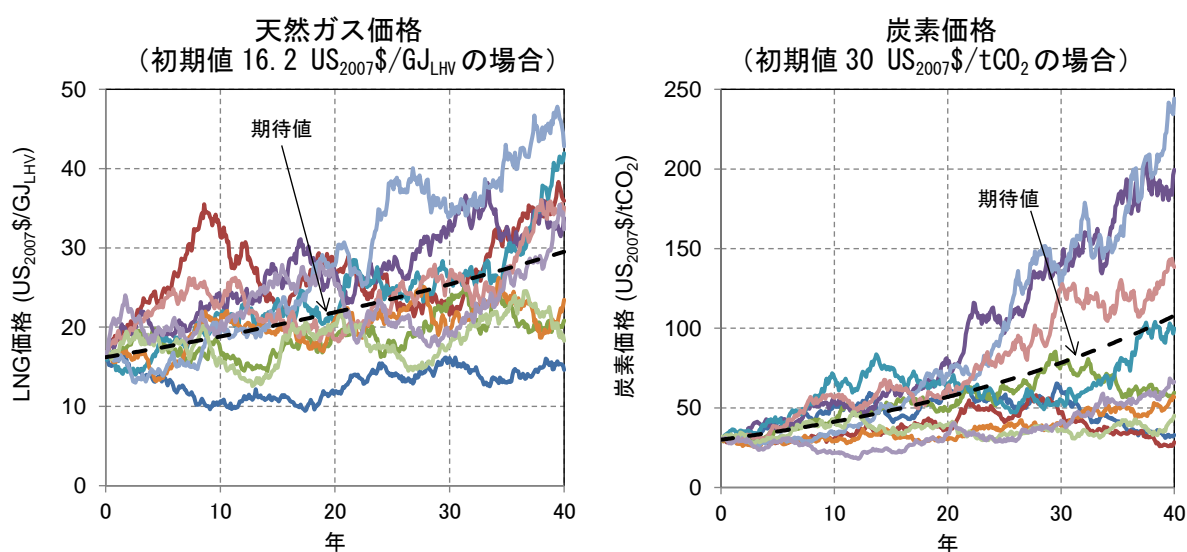


図 4-22 天然ガス価格 P_1 及び炭素価格 P_2 のサンプルパス

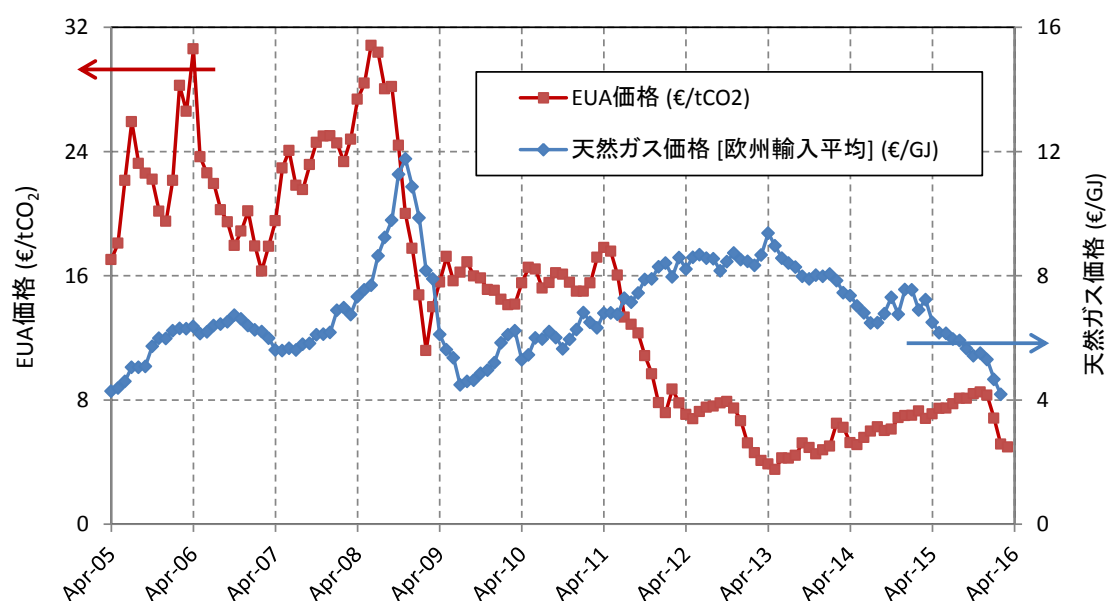


図 4-23 欧州における EU ETS 炭素価格とガス輸入平均価格の推移（月次）

補足)炭素価格は2012年11月までは2012年12月渡しの European Union Allowance (EUA)価格、2012年12月以降は翌月渡し（Front Month）の EUA 価格。EUA 価格の出典は Intercontinental Exchange,

Inc.[173]。ガス輸入価格の出典は世界銀行[172]。

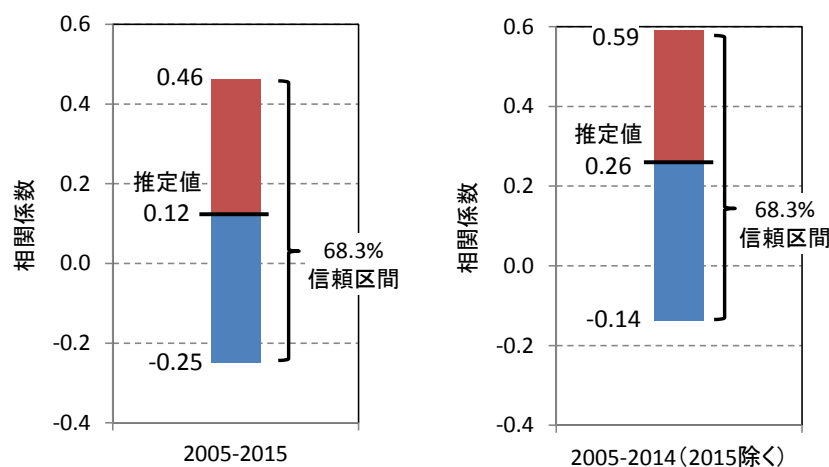


図 4-24 欧州における EU ETS 炭素価格とガス輸入平均価格の相関係数の試算（年変化率ベース）

4.4.4 結果

以上の想定、期待費用が最小となる待機・投資の閾値を数値計算により求めた。割引率は 5%/年とした。結果を図 4-25 に示す。ここで待機とは、既存石炭火力を（少なくともその時点で）稼働し続けることにより、将来の任意の時点で任意の電源を選択できるというオプション機会を保有し続けることを意味する。直ちに投資決定することが妥当となる領域は、そのオプション機会を放棄し、できるだけ早い段階で（リードタイム後に）新規電源を運開させることで期待費用が最小となることを意味する。

図 4-25 を時系列で見ると次の通りである。 $t=7$ （年）は既存石炭火力の稼働を 3 年後に停止する必要があるため、ガス火力（CCS 無し）、ガス火力+CCS のどちらかを選択する必要がある。これはガス火力のリードタイムを 3 年と設定したためである。天然ガスの 2012 年平均 CIF 価格 16.2 US₂₀₀₇\$/GJ で見ると、CCS 付きが選択されるためには 250 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強の炭素価格が必要となる。

$t=6$ （年）は待機するか、あるいはガス火力（CCS 無し）、ガス火力+CCS へ投資するかを選択できる時点である。図の左下の領域、もしくは左上の領域であれば、直ちに投資することが最適となるが、待機が最適となる領域も広い。

$t=5$ （年）は石炭火力（CCS 無し）、石炭火力+CCS へ投資可能な最終時点である（石炭火力のリードタイムを 5 年と設定したため）。天然ガス価格が 15 US₂₀₀₇\$/GJ 以上であれば、炭素価格に関わらず石炭火力を選択することが期待費用最小となる。石炭火力+CCS が選択されるためには、150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強の炭素価格が必要となる（これは従来の NPV 法で求めた図 4-20 と同じとなる）。

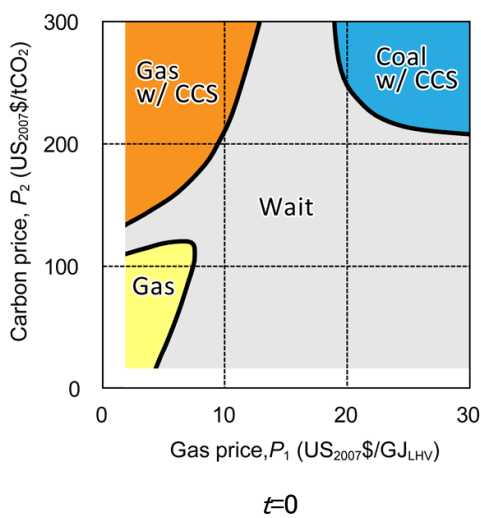
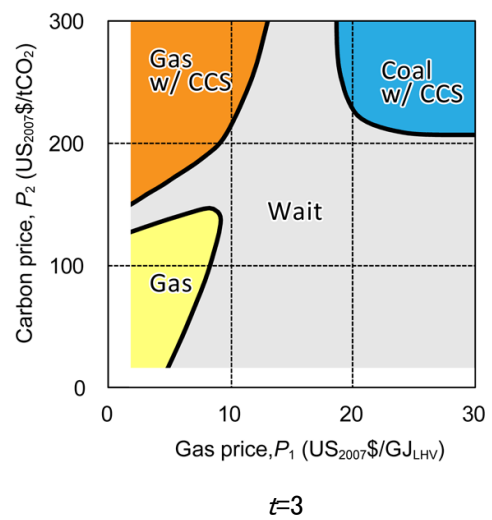
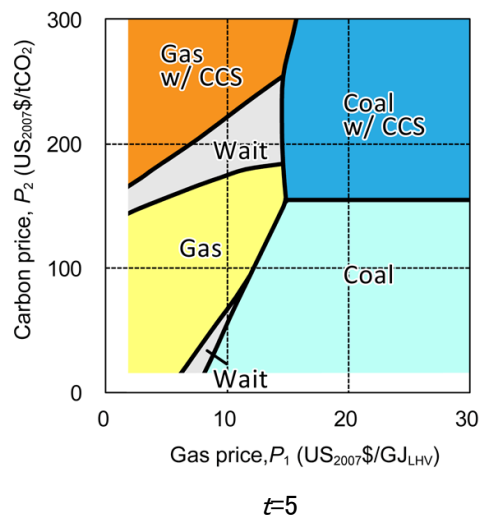
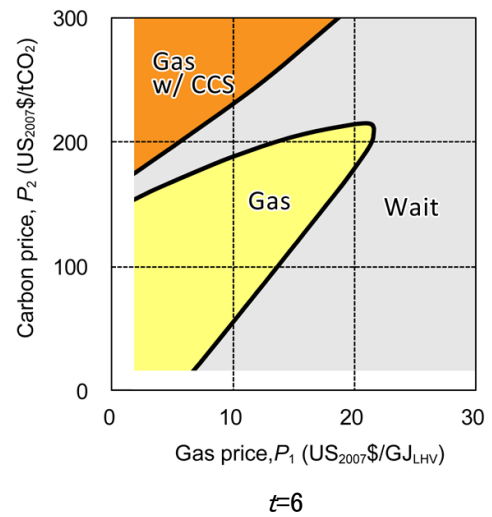
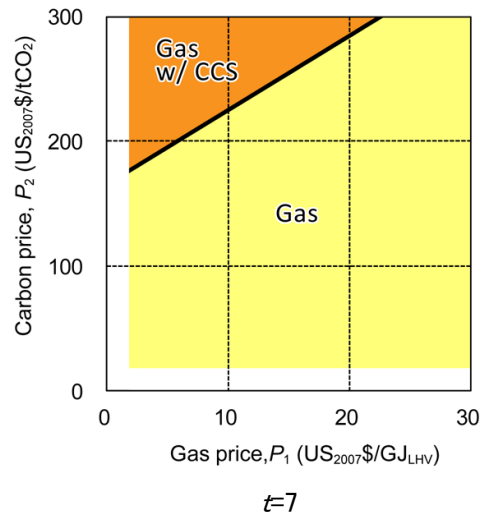


図 4-25 投資・待機の閾値の結果（グランドファザリングケース）

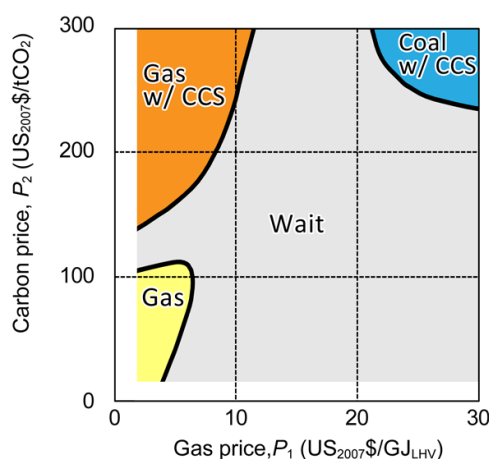
補足）天然ガス価格、炭素価格のボラティリティをそれぞれ 0.24、0.29 とした結果。横軸、縦軸共に当該時点の価格を意味する。

$t=3$ （年）及び $t=0$ （年）は、本分析の鍵になる結果である。即ち、これら時点では待機することにより、将来、石炭火力、石炭火力+CCS、ガス火力、ガス火力+CCS の 4 つの選択肢へ投資することができ、既存石炭火力は相対的に CO_2 原単位が高いが、単に炭素価格が高いだけでは待機が最適となり、既存石炭火力を稼働継続することが最適となる。ガス火力+CCS への投資は、天然ガス価格 $10 \text{ US}_{2007}\$/\text{GJ}$ の場合で $200 \text{ US}_{2007}\$/\text{tCO}_2$ 強の炭素価格が必要である。また石炭火力+CCS への投資も少なくともそれと同水準（ $200 \text{ US}_{2007}\$/\text{tCO}_2$ 強）の炭素価格が必要である。このように $t=3$ （年）及び $t=0$ （年）において待機が妥当な領域が広いことは、CCS の早期普及が容易でないことを意味している。

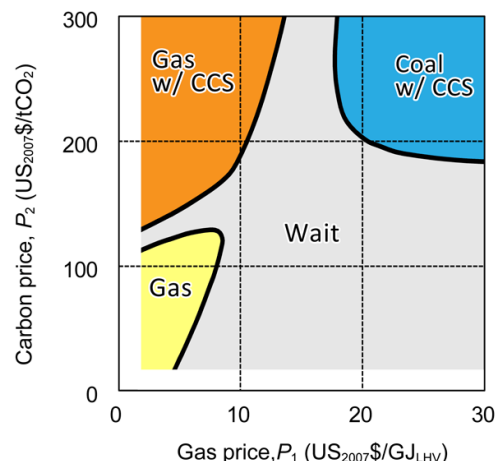
4.4.5 感度解析

天然ガス価格、及び炭素価格のボラティリティに関する感度解析の結果を図 4-26 に示す。基準ケース（図 4-25）では表 4-8 に示した通りそれぞれ 0.24、0.29 のボラティリティを参照したが、図 4-26 では高ボラティリティケース（0.27、0.34）、低ボラティリティケース（0.21、0.24）の 2 ケースの結果を示す。時点は $t=0$ 、即ち 4 つの選択肢を最長 5 年間保有する時点とした。

低ボラティリティケース（0.21、0.24）は、基準ケース（0.24、0.29）と比べガス火力+CCS、石炭火力+CCS へ直ちに投資することが妥当な領域が広く、相対的に早期の CCS 投資が見込める。これに対し、高ボラティリティケース（0.27、0.34）は待機が妥当な領域が広く早期の CCS 投資が相対的に見込めない結果である。以上の感度解析に基づく、事業者から見て予見性があり安定的な炭素価格、天然ガス価格が早期の CCS 投資を促すために望ましいと言える。



高ボラティリティケース
(天然ガス価格のボラティリティ: 0.27、
炭素価格のボラティリティ: 0.34)



低ボラティリティケース
(天然ガス価格のボラティリティ: 0.21、
炭素価格のボラティリティ: 0.24)

図 4-26 ボラティリティの感度解析（ $t=0$ 、グランドファザリングケース）

補足）横軸、縦軸共に当該時点の価格を意味する。

これまでグランドファザリングケース（ $t=10\sim 25$ において実排出の CO_2 原単位と同じ水準の無償割り当てがなされるケース）を前提としてきた（図 4-19 を参照のこと）。これは、CCS を導入した場合、この期間において無償割り当て量が大幅に縮小されるケースであり、 CO_2 原単位の大きい電源（石炭火力

など)には有利に、CO₂ 原単位の小さい電源 (ガス火力+CCS など)には不利であった。グランドファザリングをなしとしたケースを図 4-27 に示す。グランドファザリングなしの場合は、CCS、特にガス火力+CCS の炭素価格に関する閾値が大幅に低下する結果である。グランドファザリングケースでは CCS 投資閾値の目安が 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強という水準であったが、グランドファザリングなしでは 150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強といった水準へ低下する (ここではガス価格が 10 US₂₀₀₇\$/GJ あるいは 30 US₂₀₀₇\$/GJ における閾値を参照した)。

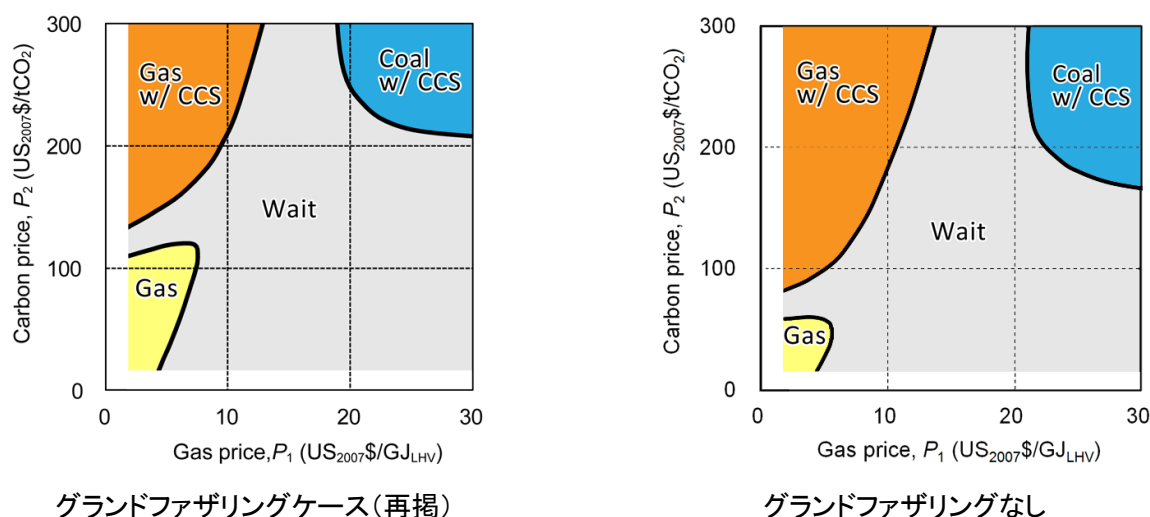


図 4-27 グランドファザリングの影響 ($t=0$)

補足) 横軸、縦軸共に当該時点の価格を意味する。

なお、図 4-24 に示した通りヒストリカルデータに基づく炭素価格と天然ガス価格の相関係数の信頼区間がかなり大きい。そこで相関係数が 0.6 のケースについて感度解析を行ったが、ボラティリティに比べれば相関係数の結果への影響度は相対的に低いことを別途確認した。

4.4.6 政策的含意の考察

図 4-25 をより広い文脈で考察すると次の通りである。一般には従来の NPV 法によるブレークイーブンコスト (図 4-20) が参照され、今回の設定に基づく限り 150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 程度が CCS 投資の目安として参照される。しかし不確実性下において企業は投資に慎重になるため、直ちに CCS 投資を促すにはより高い炭素価格が必要である (例えば 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強、以上グランドファザリングケース)。CCS 投資を促すには、単に高い炭素価格だけではなく、事業者から見て予見性のある安定的な天然ガス価格、炭素価格が望ましい。これらが安定的であれば、即ちボラティリティが低い状況であれば図 4-26 に示した通り早期の CCS 投資が相対的により期待できる (予見性のある安定的な天然ガス価格については、次の第 4.4.7 項にて言及する)。

予見性のある安定的な炭素価格といった観点から、明示的な価格付けとして炭素税、陰伏的な炭素価格付けとして規制的手段、自主的取組み (低炭素社会実行計画など)、R&D 補助、税額控除などが挙げられる。ここで石炭火力 (CCS なし) と石炭火力+CCS は事業者から見て資本費規模や輸送、貯留実施リスクといった意味で大きく異なる選択肢である。石炭火力 (CCS なし) と石炭火力+CCS をつなぐ方

策として、規制的手段の一つであるキャプチャーレディーも一案と考えられる。石炭ガス化複合発電（Integrated coal Gasification Combined Cycle、以下 IGCC）については現時点でベースコストが高いことなどを理由に本分析で明示的に扱かわなかったが、酸素吹き IGCC は特に CO₂ 回収による増エネ分が相対的に小さいという意味でキャプチャーレディーを内包した技術と言える。従って、今後の温暖化緩和策の選択肢をより広げるために IGCC は重要な技術の一つと考えられる。キャプチャーレディー規制に関する今後の課題として、日本の実情に即したキャプチャーレディー規制の内容の検討、及び具体的な定量分析の実施が挙げられる。

以上の通り CCS 投資の閾値は例えば 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強という水準であったが、これは無償排出枠割り当てにグランドファザリングケースを想定した影響もある。グランドファザリングを想定しない場合、CCS 投資閾値は 150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強といった水準へ低下することを確認した。このような観点からは、電力の CO₂ 原単位（絶対値）を参照するような政策が望ましいと言える。具体的に例えば、各自治体が電力調達を行う際に「環境に配慮した電力調達契約」を足元で進めており、その一環として電力の CO₂ 原単位（kg-CO₂/kWh）も参照される。このような流れは長期的に見て発電部門の低炭素化に資するものであり有効と考えられる。

4.4.7 本節のまとめ

本節では、日本における CCS、即ち発電所における CO₂ 回収、輸送、帯水層貯留までの一貫したシステムに着目し、技術パラメータ、費用パラメータなどを整理した。従来の NPV 法によるブレイクイーブンコストは、これまで一般に指摘された水準より高く 150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 程度であった（グランドファザリングケース）。

次に、不確実な天然ガス価格、炭素価格の下、CCS への投資に踏み切ることが最適となる閾値をリアル・オプション法により算定した。投資せず待機可能であれば、事業者は待機することが期待費用最小となり、そのような中、投資を促すためにはさらに高い炭素価格、具体的には 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強といった水準が必要となる結果を得た（グランドファザリングケース⁸⁸）。CCS 投資の閾値は天然ガス価格、炭素価格のボラティリティにも影響を受け、仮に低いボラティリティを事業者が見込んだ場合、CCS 投資の閾値が低下することを感度解析にて確認した。

以上から、早期の CCS 投資を促すためには、単に高い炭素価格だけではなく、事業者から見て予見性のある安定的な炭素価格、天然ガス価格が望ましいことが示唆される。150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 程度、あるいは 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強といった水準は、第 3.4 節で行った世界エネルギーモデル DNE21+ の分析結果（かつ世界共通の限界削減費用を仮定）からすると 2040 年以降の 450 ppm CO₂ eq 安定化シナリオで実現される炭素価格水準であるものの、現状の産業国際競争条件を考えれば極めて高い炭素価格水準であり、明示的な炭素価格だけでは炭素リーケージをもたらす可能性が高い。陰伏的な炭素価格として規制的手段、自主的取組み（低炭素社会実行計画など）、R&D 補助、税額控除などが挙げられ、これらはいずれも有効と考えられる。

また早期の CCS 投資が費用効果的となるには安定的な天然ガス価格が望ましい。天然ガス価格はそも

⁸⁸ グランドファザリングとしない場合、CCS 投資の閾値が 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強から 150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強へ低下することを確認した。CO₂ 原単位（kg-CO₂/kWh）の絶対値を参照する政策が有効であることが示唆される（これは自治体が電力調達する際に配慮すべき事項として既に進みつつある動きである）。

そも政策誘導の対象とはならないものの、方向性としては先物市場の整備、LNG 備蓄、近隣諸国との平時における LNG 融通、緊急時における LNG 融通措置の事前検討、なども有効と考えられる。これらは同時にエネルギーセキュリティの向上にも資することが期待できる⁸⁹。

ところで、本論文では炭素価格、天然ガス価格の不確実性を明示的に考慮する一方、CCS 自体の他の不確実性については捨象した。例えば、想定した圧入レートで圧入可能かどうかといった地質や安全性に関する技術的不確実性（さらにそれらに依存する CCS 費用の不確実性）、許認可や地元合意を含め安定的稼働が可能かどうかといった社会的な不確実性が考えられる。このような CCS 自体の不確実性の明示的分析は今後の課題の一つである。CCS 自体の不確実性をリアル・オプションで分析する方向性として、小規模投資（例えば国内での小規模 CCS の実施）によって CCS 自体の不確実性に関する情報を収集でき、次の大規模 CCS 投資に踏み切るかどうか判断する（即ちコンパウンド・オプション）、といった分析フレームが考えられる。

4.5 本章のまとめ

本章は、日本の電気事業者が直面している諸課題及び実問題に対しリアル・オプション法を適用した。第 4.2 節では経年石油火力の維持・廃棄にリアル・オプション法を適用し、電気事業者が行ってきた経年石油火力の維持・廃棄に関する過去の行動をリアル・オプション法により定量的に説明できることを示した（最終損益をゼロと想定した一変数分析）。また時間稼働率がそれほど低くない状況下で石油火力が廃棄されたのは、その土地や付帯送電設備を有効利用することが経済的に優位だったこと（即ち既存石油火力の廃棄によって生じる最終損益が大きいこと）が主要因と考えられることを示した。このように過去の実態を定量的に説明・考察することもリアル・オプション法の活用法の一つと言える。

第 4.3 節では不確実な卸電力価格の下、所与の資本集約的電源への投資に踏み切るか、もしくは（少なくともしばらく）投資せず待機するかという評価フレームに着目した。従来の NPV 法に基づく本設定下において投資が妥当となる臨界卸電力価格は 7.0(円/kWh)程度であるが、投資せず待機可能であれば臨界卸電力価格は 10.2(円/kWh)程度となる。これは自由化（規制緩和、規制変化）が進むと、サンクコストとなりうる投資リスクを事業者が回避しようとする可能性を示唆している。また感度解析から、資本集約的な電源は（燃料集約的な電源と比較して）、卸電力価格のボラティリティが大きい程、投資が敬遠されることを定量的に示した。

第 4.4 節では、まず CCS のパラメータ、即ち日本における CO₂回収、輸送、帯水層貯留までの一貫したシステムの技術パラメータ、費用パラメータなどを整理した。従来の NPV 法によると CCS 投資のブレイクイーブンコストはこれまで一般に指摘された水準よりやや高く 150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 程度であった（グランドファザリングケース）。次に幾何ブラウン運動に従う炭素価格、天然ガス価格の下、微粉炭火力、微粉炭火力+CCS、コンバインドサイクル、コンバインドサイクル+CCS への投資について分析を行った。投資せず待機可能であれば、事業者は待機することが期待費用最小となり、そのような中、投資を促すためにはさらに高い炭素価格、具体的には 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強といった水準が必要となることを示した（グランドファザリングケース）。またボラティリティの感度解析結果から仮に天然ガス価格、及び炭素価格のボラティリティが低い場合 CCS 投資が妥当となる閾値が低下することを確認した。以上から、早期の CCS 投資を促すためには、単に高い炭素価格だけではなく、事業者から見て予見性のある安

⁸⁹ エネルギーセキュリティ向上がむしろ主目的となりうる方策もここで示した。

定的な炭素価格が必要となることが示唆された。また安定的な天然ガス価格の方が望ましいと言える。天然ガス価格自体はそもそも政策対象とはならないものの、方向性として LNG 先物市場の整備、LNG 備蓄も有効と考えられ、これらは同時にエネルギーセキュリティ向上にも資すると期待できる。

炭素価格に関して 150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 程度、あるいは 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強といった水準は、第 3.4 節で行った世界エネルギーモデル DNE21+ の分析結果（かつ世界共通の限界削減費用、2050 年時点）からすると妥当であるものの、現状の産業国際競争条件を考えれば極めて高い炭素価格水準である。明示的な炭素価格だけで 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強といった水準をカバーするのは炭素リーケージをもたらす可能性が高い。陰伏的な炭素価格として規制的手段、自主的取組み（低炭素社会実行計画など）、R&D 補助、税額控除などが考えられ、これらはいずれも予見性のある安定的な炭素価格に資するため有効と考えられる。

なお、今後の課題として次の項目が挙げられる。

- 炭素価格、天然ガス価格の確率過程やパラメータの実証分析
- これら以外の不確実性（想定した圧入レートで圧入可能かどうかといった不確実性、許認可や地元合意を含め安定的稼働が可能かどうかといった不確実性）の明示的考慮
- 日本の実情に即した（CO₂ 排出削減、及び CCS 普及に向けた）政策ポートフォリオの検討、及びその具体的な定量分析

第5章 結論

本論文は、第3章にて世界エネルギーモデル DNE21+による分析を実施した。産業部門の中でも代表的なエネルギー集約産業である鉄鋼部門、セメント部門について調査、モデル化し DNE21+の一部拡張を行った（第3.2節、第3.3節）。鉄鋼部門は鉄スクラップが世界全体で見てどの程度利用可能であるかが今後のCO₂排出規模、及び緩和策の余地を規定する要因の一つであるため、過去140年に渡るマテリアルフロー分析を実施し将来の鉄スクラップ入手可能性についても分析を行い、その結果を DNE21+の前提条件に組み入れた（第3.2.5項）。また DNE21+の結果（一次エネルギー供給量、原油・ガスの貿易マトリックス）をエネルギーセキュリティ指標式へ当てはめることにより、CO₂ 排出制約シナリオ別のエネルギーセキュリティ指標値を算定した（第3.5節）。

第3章にて得られた主要な結果は次の通りである。

- 450 ppm CO₂ eq 安定化（期待値として産業革命以前比 2°C未満、いわゆる 2°C目標に十分合致）でなくとも、より緩やかな 550 ppm CO₂ eq 安定化、650 ppm CO₂ eq 安定化であっても、世界全体で大幅な CO₂ 排出削減が必要である
- 省エネ、燃料転換は多くの部門で有効であるが、鉄鋼部門、セメント部門に着目すると省エネ、燃料転換の余地は相対的に限られる
- 世界全体で大幅な CO₂ 排出削減を行うには（省エネ、再エネ、燃料転換と共に）CCS の大規模普及が費用効果的であり、発電部門、鉄鋼部門において CCS が普及する結果である
- DNE21+の結果をエネルギーセキュリティ指標に当てはめることにより、日本については CO₂ 排出削減、及び CCS 普及が（省エネ、再エネ、燃料転換とあいまって）エネルギーセキュリティ指標値をそれほど悪化させないことを確認した

以上から、CCS は CO₂ 排出削減のための有効な一手段であり、日本については CO₂ 排出削減、及び CCS 普及が（省エネ、再エネ、燃料転換などとあいまって）エネルギーセキュリティ指標値をそれほど悪化させないことを示した。即ち、日本にとって CCS はエネルギーセキュリティ上の懸念に逆行することなく大幅な CO₂ 排出削減を進めるための重要な方策の一つであると言える。

ただし実際に CCS 普及を進めるには、事業者の投資リスクを克服する必要がある。第4章は、第2章で整理したリアル・オプション法を日本の電気事業者が直面している諸課題及び実問題に適用した（CCS の投資リスクについては第4章の後半にて着目した）。第4章では最初に経年石油火力の維持・廃棄にリアル・オプション法を適用し、電気事業者が行ってきた経年石油火力の維持・廃棄に関する過去の行動をリアル・オプション法により定量的に説明できることを示した。このように過去の実態を定量的に説明することもリアル・オプション法の活用法の一つと言える。

次に、簡素な投資評価分析、即ち一つの資本集約的電源投資オプションを所与とした上で、不確実な卸電力価格の下、投資を直ちに行うか、もしくはしばらく投資せず待機するかという投資評価分析を行った。本分析では複数の感度解析を実施し、例えば卸電力価格のボラティリティは（直ちに投資を行うことが妥当となる）臨界卸電力価格へ与える影響が大きいことを示した。また卸電力価格のボラティリティが上昇すると電源への投資が敬遠されること、特に変動費に対して固定費比率が大きい電源ほど投

資が敬遠されることを定量的に示した。これは即ち自由化（規制緩和、規制変化）に伴い不確実性が増大し資本集約的な電源への投資はより敬遠される可能性があることを意味している。このような状況の中、CO₂排出削減を進める必要がある。以上が第4章の前半部分である。

第4章の後半では、日本の電気事業者が CCS 一貫システムへ投資する場合の費用について整理し、その上でリアル・オプション法を用いて CCS 投資分析を行った。具体的には、微粉炭火力、微粉炭火力+CCS、コンバインドサイクル、コンバインドサイクル+CCS の4つのオプションを考慮し、直ちに投資へ踏み切ることが最適（期待費用最小）となる閾値を算定した。不確実性項目は炭素価格及び天然ガス価格とし、これらが幾何ブラウン運動に従うとした。

第4章の後半にて得られた主要な結果は次の通りである。

- 日本の電気事業者が CCS 一貫システムへ投資を行う場合、仮に投資リスクがなくても一定の炭素価格（150 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 程度）が必要と見られる（グランドファザリングケース）
- 炭素価格、天然ガス価格の不確実性を考慮すると、投資せず待機可能であれば直ちに投資することが最適となる閾値は 200 US₂₀₀₇\$/tCO₂ 強といった水準となる（グランドファザリングケース）
- これは、CCS の投資リスクが相当大きく早期の CCS 普及が容易でないことを示唆している
- CCS 投資リスクを低下させるために事業者から見て予見性のある安定的な天然ガス価格、炭素価格が望ましいことを感度解析により確認した
 - 天然ガス価格自体はそもそも政策誘導の対象とはならないものの、方向性として LNG 先物市場の整備、LNG 備蓄、近隣諸国との平時における LNG 融通、緊急時における LNG 融通措置の事前検討、なども有効と考えられる（同時にエネルギーセキュリティ確保にも資する（第1.3節））
 - 予見性のある安定的な炭素価格に向けた政策手段としては、明示的な炭素価格付けとして炭素税、陰伏的な炭素価格として規制、R&D 補助、自主的取組み（低炭素社会実行計画など）、税額控除などが有効と考えられる
 - グランドファザリングによる無償割り当ては CCS への投資閾値を上昇させるため、電力の CO₂ 原単位（絶対値）を参照するような政策が相対的に望ましいと言える

エネルギー・温暖化政策は第1.3節で示した通り、相反する視座が常に存在し単一のロジックや視座によって判断することができず、同時にかなりの程度を価値判断に依存せざるをえないものの、地球温暖化という長期問題に対し早期に対応するためにも予見性、安定性を伴った炭素価格、天然ガス価格が望ましい。

今後の研究課題として次の点が挙げられる。

- エネルギーセキュリティを DNE21+ の評価関数へ明示的に組み込んだ場合の分析
- 鉄鋼部門、セメント部門の今後の技術進展（特に大幅な CO₂ 排出削減を所与とした場合）、及び素材間競争の分析
- 炭素価格、天然ガス価格の確率過程やパラメータの実証分析、これら以外の不確実性要因（例えば CO₂ 貯留に関する物理的リスク、許認可や地元合意を含めた社会的リスク）の明示的考慮
- 日本の実情に即した（CO₂ 排出削減、及び CCS 普及に向けた）政策ポートフォリオの検討、及びその具体的な定量分析

参考文献

- [1] 山本博巳, 坂東茂, 杉山昌広, “火力発電の複数の運転モードと需給調整力を考慮した電源構成モデルの開発,” 電力中央研究所, Y12030, 2013.
- [2] 國武紀文, “わが国における原子力発電のコスト構造分析 —電力九社の財務諸表に基づく経済性評価,” 電力中央研究所 研究報告書 Y98003, 1999.
- [3] 松尾雄司, 永富悠, 村上朋子, “有価封建報告書を用いた火力・原子力発電コスト構造の分析,” エネルギー資源, vol. 33, no. 5, pp. 21-30, 2012.
- [4] 内山洋司, 高橋圭子, 斉藤雄志, “経済性, セキュリティ, リスクからみた我が国の最適電源構成の検討,” 電力経済研究, 電力中央研究所, 20, 1986.
- [5] 福田研二, 片山善順, 藤本登, 饒燕飛, “社会的選好を考慮した最適電源構成の算出法の開発,” presented at the エネルギー資源学会, 第17回研究発表会講演論文集, 1998, pp. 91-96.
- [6] A. Stirling, “Diversity and ignorance in electricity supply investment: Addressing the solution rather than the problem,” Energy Policy, vol. 22, no. 3, pp. 195-216, Mar. 1994.
- [7] M. Brower, “Comments on Stirling’s ‘Diversity and ignorance in electricity supply investment,’” Energy Policy, vol. 23, no. 2, pp. 115-116, Feb. 1995.
- [8] R. Western, “Diversity and ignorance in electricity supply investment: a reply to Andrew Stirling,” Energy Policy, vol. 23, no. 1, pp. 5-16, Jan. 1995.
- [9] T. B. Shoai, J.-C. Bocquet, and T. Tomoda, “Part III: DSM in Decision-Making: Electricity Investments and Nuclear Development: Investment Choice Modeling based on Value Creation,” in Risk and Change Management in Complex Systems, F. Marle, M. Jankovic, M. Maurer, D. M. Schmidt, and U. Lindemann, Eds. Oxford: Hanser, 2014, pp. 95-106.
- [10] W. D. Nordhaus, “Rolling the ‘DICE’: an optimal transition path for controlling greenhouse gases,” Resour. Energy Econ., vol. 15, no. 1, pp. 27-50, Mar. 1993.
- [11] K. Akimoto, T. Tomoda, Y. Fujii, and K. Yamaji, “Assessment of global warming mitigation options with integrated assessment model DNE21,” Energy Econ., vol. 26, no. 4, pp. 635-653, Jul. 2004.
- [12] J. Oda, K. Akimoto, F. Sano, and T. Tomoda, “Diffusion of energy efficient technologies and CO₂ emission reductions in iron and steel sector,” Energy Econ., vol. 29, no. 4, pp. 868-888, 2007.
- [13] B. S. Koelbl, M. A. van den Broek, A. P. C. Faaij, and D. P. van Vuuren, “Uncertainty in Carbon Capture and Storage (CCS) deployment projections: a cross-model comparison exercise,” Clim. Change, vol. 123, no. 3-4, pp. 461-476, Feb. 2014.
- [14] E. Kriegler, K. Riahi, V. Bosetti, P. Capros, N. Petermann, D. P. van Vuuren, J. P. Weyant, and O. Edenhofer, “Introduction to the AMPERE model intercomparison studies on the economics of climate stabilization,” Technol. Forecast. Soc. Change, vol. 90, Part A, pp. 1-7, Jan. 2015.

- [15] M. R. Hamilton, H. J. Herzog, and J. E. Parsons, "Cost and U.S. public policy for new coal power plants with carbon capture and sequestration," *Energy Procedia*, vol. 1, no. 1, pp. 4487-4494, Feb. 2009.
- [16] E. S. Rubin, J. E. Davison, and H. J. Herzog, "The cost of CO₂ capture and storage," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 40, pp. 378-400, Sep. 2015.
- [17] IPCC, *Carbon Dioxide Capture and Storage: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [18] K. Akimoto, H. Kotsubo, T. Asami, X. Li, M. Uno, T. Tomoda, and T. Ohsumi, "Evaluation of Carbon Sequestrations in Japan with a Mathematical Model," in *Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference*, J. G. Kaya, Ed. Oxford: Pergamon, 2003, pp. 913-918.
- [19] RITE, "二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書, 平成 17 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業, (公財)地球環境産業技術研究機構(RITE), CO₂ 貯留研究グループ," Mar. 2006.
- [20] RITE, "二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書, 平成 18 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業, (公財)地球環境産業技術研究機構(RITE), CO₂ 貯留研究グループ," Mar. 2007.
- [21] K. Sato, "Value of information analysis for adequate monitoring of carbon dioxide storage in geological reservoirs under uncertainty," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 5, no. 5, pp. 1294-1302, Sep. 2011.
- [22] R. R. Tan, K. B. Aviso, S. Bandyopadhyay, and D. K. S. Ng, "Optimal source-sink matching in carbon capture and storage systems with time, injection rate, and capacity constraints," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 32, no. 2, pp. 411-416, Jul. 2013.
- [23] J. Kjarstad, J. Morbee, M. Odenberger, F. Johnsson, and E. Tzimas, "Modelling Large-scale CCS Development in Europe Linking Techno-economic Modelling to Transport Infrastructure," *Energy Procedia*, vol. 37, pp. 2941-2948, 2013.
- [24] B. P. Flannery, "Comment," *Energy Econ.*, vol. 33, no. 4, pp. 605-607, Jul. 2011.
- [25] J. P. Banks and T. Boersma, "Next generation policy to commercialize CCS in the United States," The Brookings Institution. [Online]. Available: <http://www.brookings.edu/research/papers/2015/10/low-carbon-energy-ccs-banks-boersma>. [Accessed: 03-Jan-2016].
- [26] D. L. McCollum, V. Krey, K. Riahi, P. Kolp, A. Grubler, M. Makowski, and N. Nakicenovic, "Climate policies can help resolve energy security and air pollution challenges," *Climate Change*, vol. 119, no. 2, pp. 479-494, Feb. 2013.
- [27] K. Matsumoto and K. Andriosopoulos, "Energy security in East Asia under climate mitigation scenarios in the 21st century," *Omega*, vol. 59, Part A, pp. 60-71, Mar. 2016.
- [28] E. Worrell, L. Price, and N. Martin, "Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector," *Energy*, vol. 26, no. 5, pp. 513-536, May 2001.

- [29] M. Neelis and M. Patel, Long-term production, energy use and CO₂ emission scenarios for the worldwide iron and steel industry. Utrecht University, 2006.
- [30] J. Oda, K. Akimoto, F. Sano, T. Homma, and T. Tomoda, "Evaluation of Energy Saving and CO₂ Emission Reduction Technologies in Energy Supply and End-use Sectors Using a Global Energy Model," *IEEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 72-83, 2007.
- [31] J. Oda, K. Akimoto, T. Tomoda, M. Nagashima, K. Wada, and F. Sano, "International comparisons of energy efficiency in power, steel, and cement industries," *Energy Policy*, vol. 44, pp. 118-129, 2012.
- [32] L. Bachelier, "Theorie de la speculation," Universite de Paris (Sorbonne), Paris, 1900.
- [33] F. Black and M. Scholes, "The Pricing of Options and Corporate Liabilities," *J. Polit. Econ.*, vol. 81, no. 3, pp. 637-654, 1973.
- [34] A. A. Robichek and J. C. Van Horne, "Abandonment Value and Capital Budgeting," *J. Finance*, vol. 22, no. 4, pp. 577-589, Dec. 1967.
- [35] M. Brennan and E. Schwartz, "Evaluating Natural Resource Investments," *J. Bus.*, vol. 58, no. 2, pp. 135-157, 1985.
- [36] A. K. Dixit and R. S. Pindyck, *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press, 1994.
- [37] M. Hsu, "Spark Spread Options Are Hot!," *Electr. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 28-39, 1998.
- [38] S. J. Deng, B. Johnson, and A. Sogomonian, "Exotic electricity options and the valuation of electricity generation and transmission assets," *Decis. Support Syst.*, vol. 30, pp. 383-392, 2001.
- [39] S. J. Deng and S. S. Oren, "Incorporating Operational Characteristics and Start-up Costs, in Option-based Valuation of Power Generation Capacity," vol. 17, no. 2, pp. 155-182, 2003.
- [40] 服部徹, 吉本佳生, 高橋雅仁, 松屋親広, 山口順之, "電力経営におけるリアルオプションの価値評価手法と適用事例," 電力中央研究所研究報告 Y02013, 2003.
- [41] J. Oda, R. Matsushashi, and Y. Yoshida, "The decision to invest in emissions reduction technologies based on the real options approach," in *Greenhouse Gas Control Technologies 7 (GHGT-7)*, pp.2471-2474, 2005.
- [42] 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, vol. 4, no. 1, pp. 47-60, 2011.
- [43] L. Zhu and Y. Fan, "A real options-based CCS investment evaluation model: Case study of China's power generation sector," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4320-4333, Dec. 2011.
- [44] S. Heydari, N. Ovenden, and A. Siddiqui, "Real options analysis of investment in carbon capture and sequestration technology," *Comput. Manag. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 109-138, Jun. 2010.

- [45] GEA Writing Team, *Global Energy Assessment*, Cambridge University Press, 2012.
- [46] IEA, “World Energy Outlook,” Paris, 2011.
- [47] J. Oda, K. Akimoto, F. Sano, T. Homma, A. Hayashi, M. Nagashima, K. Wada, and T. Tomoda, “Comprehensive Evaluation of Sustainable Development and Climate Stabilization: ALPS Project,” presented at the IIASA 40th Anniversary Conference, Vienna, Austria, Oct-2012.
- [48] D. Koplow, “Measuring Energy Subsidies Using the Price-Gap Approach: What does it leave out? IISD’s ‘Bali to Copenhagen’ Trade and Climate Change Project,” 2009.
- [49] 茅陽一, 秋元圭吾, 山地憲治, 温暖化とエネルギー. 東京: エネルギーフォーラム, 2014.
- [50] 山地憲治, 環境学入門〈11〉エネルギー・環境・経済システム論. 東京: 岩波書店, 2006.
- [51] N. Lawson, *An Appeal to Reason: A Cool Look at Global Warming*. London u.a.: Gerald Duckworth & Co Ltd, 2008.
- [52] N. Stern, *The Stern Review: The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, 2007.
- [53] RITE, “平成 24 年度第 2 回委員会（地球温暖化対策国際戦略技術委員会）,” 21-Jan-2013.
- [54] 通商産業省資源エネルギー庁, “総合資源エネルギー調査会, 電気事業分科会, 需給部会, 中間報告 (10 月 1 日).” 1987.
- [55] 通商産業省資源エネルギー庁, “総合資源エネルギー調査会, 電気事業分科会, 需給部会, 中間報告.” 1989.
- [56] 通商産業省資源エネルギー庁, “総合資源エネルギー調査会, 電気事業分科会, 需給部会, 電力基本問題検討小委員会, 報告(6 月 11 日).” 1992.
- [57] 通商産業省資源エネルギー庁, “総合資源エネルギー調査会, 電気事業分科会, 需給部会, 中間報告 (6 月 23 日).” 1994.
- [58] 関西電力株式会社, “関西電力 Company Profile 2003.” 2004.
- [59] 東北電力株式会社, “環境行動レポート 2004,” 2004.
- [60] 入江一友, “エネルギー安全保障概念の構築と施策の体系化,” エネルギー資源, vol. 23, no. 4, pp. 230-235, 2002.
- [61] 鈴木篤之, “原子力エネルギーに関する俯瞰工学的考察,” 原子力エネルギー社会工学(日本原電) 寄附講座, 報告書, 2000.
- [62] 三輪宗弘, 太平洋戦争と石油—戦略物資の軍事と経済. 東京: 日本経済評論社, 2004.
- [63] 有馬純, “石油から見た第二次世界大戦,” NPO 法人 国際環境経済研究所, 13-Aug-2014. [Online]. Available: <http://ieei.or.jp/2014/08/special201212077/>. [Accessed: 17-Apr-2015].
- [64] 松井賢一, “エネルギー安全保障について,” 総説 立命館国際研究, vol. 13, no. 3, pp. 109-117, 2001.
- [65] 三輪芳朗, J. M. Ramseyer, “経済規制の有効性—「傾斜生産」政策の神話,” 経済学論集(東京大学), vol. 70, no. 3, 2004.
- [66] 松井賢一, 国際エネルギー・レジーム エネルギー・地球温暖化問題と知識. 東京: エネルギーフォーラム, 2006.

- [67] 吉岡齊, 原子力の社会史—その日本的展開. 東京: 朝日新聞社, 1999.
- [68] 田中明彦, 安全保障—戦後 50 年の模索. 東京: 読売新聞社, 1997.
- [69] 十市勉, 佐川直人, 小川芳樹, 日本エネルギー学会, エネルギーと国の役割—地球温暖化時代の税制を考える. 東京: コロナ社, 2001.
- [70] 有沢広巳, 日本のエネルギー問題. 岩波書店, 1963.
- [71] 石油産業活性化センター, “アジアのエネルギー・セキュリティ: アジアのエネルギー・セキュリティと日本の役割に関する調査, 日米共同研究会,” 1999.
- [72] 日本エネルギー経済研究所, 向坂正男, 国際石油情勢とエネルギー問題. ダイヤモンド社, 1972.
- [73] 松井賢一, 青木桂城, “石油供給安定論,” 日本エネルギー経済研究所研究報告, 1971.
- [74] 有馬純, “欧州のエネルギー・環境政策をめぐる風景感 (その 1),” 17-Jul-2014. [Online]. Available: <http://ieei.or.jp/2014/07/special201212071/>. [Accessed: 17-Apr-2015].
- [75] 豊田正和, “「エネルギー安全保障」と日本の課題,” 14-Feb-2012.
- [76] D. Yergin, “Energy Security in the 1990s,” *Foreign Affairs*, no. Fall 1988, Fall-1988.
- [77] R. Samuels, “Securing Asian Energy Investments,” *MIT Jpn. Program Sci. Technol. Manag. Rep.*, vol. 4, no. 2, 1997.
- [78] D. Yergin, “Ensuring Energy Security,” *Foreign Affairs*, no. March/April 2006, Apr-2006.
- [79] D. von Hippel, T. Suzuki, J. H. Williams, T. Savage, and P. Hayes, “Energy security and sustainability in Northeast Asia,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 11, pp. 6719-6730, Nov. 2011.
- [80] 田中豊, “科学技術の社会的受容を決定する要因,” *実験社会心理学研究*, vol. 35, p. 111, 1995.
- [81] 木村浩, 古田一雄, “原子力の賛否を判断する要因は何か: 居住地域および知識量に着目した比較分析,” *社会技術研究論文集*, vol. 1, pp. 307-316, 2003.
- [82] P. Slovic, “Perception of risk,” *Science*, vol. 236, no. 4799, pp. 280-285, Apr. 1987.
- [83] C. Starr, “Social Benefit versus Technological Risk,” *Science*, vol. 165, no. 3899, pp. 1232-1238, Sep. 1969.
- [84] A. Tversky and D. Kahneman, “The framing of decisions and the psychology of choice,” *Science*, vol. 211, no. 4481, pp. 453-458, Jan. 1981.
- [85] D. Kahneman and A. Tversky, “Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk,” *Econometrica*, vol. 47, no. 2, pp. 263-292, 1979.
- [86] D. Kahneman, P. Slovic, and A. Tversky, *Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases*. Cambridge University Press, 1982.
- [87] L. Festinger, *A Theory of Cognitive Dissonance*. Stanford Univ Press, 1957.
- [88] B. L. Cohen, 私はずなぜ原子力を選択するか—21 世紀への最良の選択. ERC 出版, 1994.
- [89] 中西準子, 環境リスク論—技術論からみた政策提言. 東京: 岩波書店, 1995.
- [90] 経済産業省資源エネルギー庁, “エネルギーセキュリティワーキンググループ報告書, 総合資源エネルギー調査会, 電気事業分科会, 総合部会.” 2001.
- [91] 今井隆吉, ヘルガスティーグ, マーチンウィリアム, 日米欧委員会, 脱「2010 年の危機」—世界のエネルギー安全保障のために. 日本電気協会新聞部, 1997.

- [92] U.S. Government Accountability Office (GAO), “Energy Security: Evaluating U.S. Vulnerability to Oil Supply Disruptions and Options for Mitigating Their Effects,” RCED-97-6, Dec. 1996.
- [93] J. M. Keynes, 雇用・利子および貨幣の一般理論. 東洋経済新報社, 1995.
- [94] D. Yergin and J. Stanislaw, The Commanding Heights: The Battle for the World Economy, Rev Upd Su 版. Simon & Schuster, 2002.
- [95] R. S. Pindyck and D. L. Rubinfeld, Microeconomics, 6th Edition, 6th edition. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2004.
- [96] (財)地球産業文化研究所, “エネルギー技術開発普及促進に係る調査研究委員会報告書,” 2007.
- [97] 植草益, 講座・公的規制と産業①: 電力. NTT 出版株式会社, 1994.
- [98] 日本学術会議, “エネルギー研究開発総合戦略の確立について: 社会・産業・エネルギー研究連絡委員会報告,” Mar. 2000.
- [99] 入江一友, “エネルギー安全保障概念の構築に関する研究,” 京都大学, 2002.
- [100] Nautilus Institute, “A Framework for Energy Security Analysis and Application to a Case Study of Japan, Synthesis Report for Pacific Asia Regional Energy Security (PARES) Project, Phase 1,” 1998.
- [101] E. F. Vogel, Japan As Number One: Lessons for America. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1979.
- [102] E. F. Vogel, ジャパン・アズ・ナンバーワン—それからどうなった. たちばな出版, 2000.
- [103] D. R. Cox and H. D. Miller, The Theory of Stochastic Processes. CRC Press, 1977.
- [104] 森平爽一郎, 小島裕, 小暮厚之, コンピュータシヨナル・ファイナンス. 朝倉書店, 1997.
- [105] A. K. Dixit, The Art of Smooth Pasting. Taylor & Francis, 1993.
- [106] J. C. Cox, S. A. Ross, and M. Rubinstein, “Option pricing: A simplified approach,” J. Finance. Econ., vol. 7, no. 3, pp. 229-263, Sep. 1979.
- [107] P. P. Boyle, “Option Valuation Using a Three Jump Process.”
- [108] M. Rubinstein, “Return to OZ,” RISK, vol. 7, no. 11, pp. 67-71, 1994.
- [109] R. Geske and K. Shastri, “Valuation by Approximation: A Comparison of Alternative Option Valuation Techniques,” J. Finance. Quant. Anal., vol. 20, no. 1, pp. 45-71, Mar. 1985.
- [110] J. Barraquand and D. Martineau, “Numerical Valuation of High Dimensional Multivariate American Securities,” Paris Research Laboratory, 1994.
- [111] J. A. Tilley, “Valuing American Options in Path Simulation Model,” Trans. Soc. Actuar., vol. XLV, pp. 499-52, 1994.
- [112] L. Trigeorgis, Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation, New 版. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1996.
- [113] E. S. Schwartz, “The Stochastic Behavior of Commodity Prices: Implications for Valuation and Hedging,” J. Finance, vol. 52, no. 3, pp. 923-73, 1997.
- [114] RITE, 茅陽一, CO2 削減戦略—地球を救うシナリオ. 東京: 日刊工業新聞社, 2000.
- [115] K. Akimoto, “Decision analyses for energy strategies on global warming issues with an

- energy systems model of optimization type,” 横浜国立大学, 1998.
- [116] RITE, “RITE 世界エネルギー・温暖化対策モデル DNE21+の概要,” 03-Aug-2012. [Online]. Available: https://www.rite.or.jp/Japanese/lab/sysken/about-global-warming/download-data/Options_energyenvironment_RITEDNE21plus.pdf.
- [117] H. H. Rogner, “An Assessment of World Hydrocarbon Resources,” *Annu. Rev. Energy Environ.*, vol. 22, no. 1, pp. 217-262, 1997.
- [118] UN Population Division, “World Population Prospects (The 2008 Revision),” 2009.
- [119] RITE, “長期社会経済シナリオの策定 —人口・GDP—,” 05-Apr-2011. [Online]. Available: http://www.rite.or.jp/Japanese/lab/sysken/research/alps/baselinescenario/ScenarioOutline_POP_GDP_20110405.pdf.
- [120] worldsteel, “Steel Statistical Yearbook, 各年.”
- [121] 日本プラント協会, “国内の省エネルギー技術に関する調査、NEDO 委託,” 2001.
- [122] 新日本製鐵, “インド/コークス乾式消化設備 (CDQ) モデル事業実施可能性調査、NEDO 委託,” 2002.
- [123] 川崎製鐵, “中国南昌鉄鋼におけるコークス炉環境改善、省エネルギー対策、NEDO 委託,” 2002.
- [124] 新日鉄, “ロシア・マグントゴルスク製鉄所 省エネ調査、NEDO 委託,” 1999.
- [125] 川崎製鐵, “中国攀枝花鋼鉄 (集団) 公司 高炉炉頂圧発電設備 (TRT) プロジェクト、NEDO 委託,” 2000.
- [126] B. W. Daniels, Transition paths towards CO₂ emission reduction in the steel industry. 2002.
- [127] IEA, “Energy Balances of OECD/Non-OECD Countries, 各年,” Paris.
- [128] IEA, “Energy Technology Perspectives 2012 - how to secure a clean energy future,” Paris, 2012.
- [129] H. Hatayama, I. Daigo, Y. Matsuno, and Y. Adachi, “Outlook of the World Steel Cycle Based on the Stock and Flow Dynamics,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 16, pp. 6457-6463, Aug. 2010.
- [130] J. Oda, K. Akimoto, and T. Tomoda, “Long-term global availability of steel scrap,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 81, pp. 81-91, Dec. 2013.
- [131] worldsteel, “The three Rs of sustainable steel. Fact sheet,” 2009.
- [132] N. Takamatsu, K. Yonezawa, H. Ueno, S. Hayashi, and W. Tamaki, “Steel recycling circuit in the world. Current advances in materials and processes,” presented at the Report of the ISIJ meeting, 2010, vol. 23, p. 1041.
- [133] C. Broadbent, “End-of-life recycling and disposal: essential to any LCA study,” presented at the The World Steel Association, 2011.
- [134] P. Michaelis and T. Jackson, “Material and energy flow through the UK iron and steel sector: Part 1: 1954-1994,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 29, no. 3, pp. 131-156, 2000.
- [135] J. Davis, R. Geyer, J. Ley, R. Clift, A. Kwan, M. Sansom, and T. Jackson, “Time-depend

- ent material flow analysis of iron and steel in the UK: Part 2: Scrap generation and recycling,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 51, no. 1, pp. 118-140, 2007.
- [136] M. Fenton, “Iron and steel recycling in the United States in 1998,” U.S. Geological Survey, Circular 1196-G, Version 2.0 [revised 07.17.06], 2004.
- [137] S. Moll, J. Acosta, and H. Schutz, “Iron and steel - a materials system analysis, Pilot study examining the material flows related to the production and consumption of steel in the European Union. European Topic Centre on Waste and Material Flows, working paper,” Mar-2005.
- [138] S. Kozawa and F. Tsukihashi, “Analysis of global demand for iron source by estimation of in-use steel stock,” *ISIJ Int.*, vol. 51, no. 2, pp. 320-329, 2011.
- [139] 無機マテリアル学会編, セメント・セッコウ・石灰ハンドブック. 技報堂出版株式会社.
- [140] 田島俊雄, 加島潤, 朱蔭貴, 中国セメント産業の発展—産業組織と構造変化. 東京: 御茶の水書房, 2010.
- [141] USGS, “Cement Statistics and Information,” 2015.
- [142] RITE システム研究グループ, “2010 年時点のエネルギー原単位の推計 (セメント部門) ,” 2014.
- [143] CEMBUREAU, “Best Available Techniques for the Cement Industry, Chapter 3: General description of the cement production process,” 1999.
- [144] IEA, “Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions,” 2007.
- [145] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), “Cement Industry Energy and CO2 Performance: Getting the Numbers Right, Cement Sustainability Initiative (CSI).”
- [146] CEMBUREAU, *World Cement Directory 2002, Volume I and II*. Brussels, 2002.
- [147] 川上恭章, 小宮山涼一, 藤井康正, “数理計画法によるエネルギー安全保障評価手法の開発と燃料備蓄の最適運用戦略に関する分析,” *エネルギー・資源*, vol. 34, no. 5, pp. 21-30, 2013.
- [148] 小田潤一郎, 秋元圭吾, 佐野史典, 和田謙一, “CO2 制約下における国別のエネルギーセキュリティ指標,” 第 28 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2012, vol. 31-3.
- [149] W. L. D. Choong, B. W. Ang, and T. S. Ng, “Development of an Energy Security Index for Singapore, 4th IAEE Asian Conference,” presented at the IAEE, Beijing, 2014.
- [150] 資源エネルギー庁, 2015 年版 エネルギー白書. 東京: 経済産業調査会, 2015.
- [151] IEA, *Energy Security and Climate Policy: Assessing Interactions*. 2007.
- [152] J. Oda, K. Akimoto, F. Sano, M. Nagashima, K. Wada, and T. Tomoda, “Analysis of CCS Impact on Asian Energy Security,” *Energy Procedia*, vol. 37, pp. 7565-7572, 2013.
- [153] T. L. Neff, “Diversification and Risk Reduction, Fossil and Nuclear Fuels. Synthesis Report for Pacific Asia Regional Energy Security (PARES) Project, Phase 1, Attachment Set A, The Nautilus Institute,” 1997.
- [154] World Bank, “Worldwide Governance Indicators,” 2008.
- [155] Y. Arino, K. Akimoto, F. Sano, T. Homma, J. Oda, and T. Tomoda, “Estimating option v

- alues of solar radiation management assuming that climate sensitivity is uncertain,” Natl. Acad. Sci. U. S. Am. PANS, vol. 113, no. 21, pp. 5886-5891, May 2016.
- [156] 資源エネルギー庁電力・ガス事業部, 電力需給の概要. 中和印刷, 2004.
 - [157] S. C. Myers, S. Majd, and S. S. of Management, “Calculating abandonment value using option pricing theory,” 1983.
 - [158] S. C. Myers and S. Majd, “Abandonment Value and Project Life,” Adv. Futur. Options Res., 1990.
 - [159] 電力会社(電力九社), 有価証券報告書. 2004.
 - [160] 徳永興公, “実用化例: 排煙処理,” 1998. .
 - [161] 小田潤一郎, 松橋隆治, 吉田好邦, 高嶋隆太, “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, vol. 84, no. 2, pp. 134-141, Feb. 2005.
 - [162] Nuclear Energy Agency (NEA), Projected costs of generating electricity: 2010 Update. Paris: OECD Publishing, 2010.
 - [163] 通商産業省資源エネルギー庁, “原子力発電の経済性について, 第 70 回総合エネルギー調査会, 原子力部会資料 3.” 1999.
 - [164] 電気事業連合会, 電気事業便覧. 2003.
 - [165] 内閣官房/国家戦略室, “コスト等検証委員会報告書,” Dec. 2011.
 - [166] D. L. McCollum and J. M. Ogden, “Techno-Economic Models for Carbon Dioxide Compression, Transport, and Storage & Correlations for Estimating Carbon Dioxide Density and Viscosity,” Institute of Transportation Studies, UC Davis, Institute of Transportation Studies, Working Paper Series, Oct. 2006.
 - [167] NETL, “Cost and performance baseline for fossil energy plants, volume 1: bituminous coal and natural gas to electricity,” DOE/NETL-2010/1397, Revision 2a, 2013.
 - [168] NETL, “FE/NETL CO2 Transport Cost Model,” DOE/NETL-2014/1667, Jul. 2014.
 - [169] NETL, “FE/NETL CO2 Saline Storage Cost Model,” DOE/NETL-2014/1669, Jul. 2014.
 - [170] 日本機械輸出組合, “プラントコストインデックス/ロケーションファクター報告書 2015 年,” 2015.
 - [171] IHS Inc., “IHS Upstream Operating Costs Index (UOCI).” [Online]. Available: <https://www.ihs.com/info/cera/ihsindexes/Index.html>. [Accessed: 14-Apr-2016].
 - [172] World Bank, “Commodity Markets.” [Online]. <http://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>. [Accessed: 14-Apr-2016]
 - [173] Intercontinental Exchange, Inc., “EUA Futures.” [Online]. Available: <https://www.theice.com/products/197/EUA-Futures>. [Accessed: 14-Apr-2016]

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々からご助言ご助力頂きましたことを心よりお礼申し上げます。

松橋隆治教授、吉田好邦教授には、2003年7月以降、長きに渡り、温かく、また時には厳しく本質的に重要となる要点を含め、微に入り細に入り非常に熱心なご指導を頂きました。深く感謝致します。大変お忙しい中、博士論文の審査を快諾してくださいました藤井康正教授、井原智彦准教授、高嶋隆太准教授に心よりお礼申し上げます。

鈴木篤之教授(当時)、長谷川秀一教授には、指導の一言一言が深遠で身が痺れる思いがすると同時に、温かい言葉にて励ましてくださいました。この当時から高嶋隆太准教授にはリアル・オプション法の基礎から応用までご指導頂きました。改めて厚くお礼申し上げます。

鈴木達治郎教授、長野浩司氏ならびに電力中央研究所社会経済研究所の皆様には、修士課程(1999年4月～)以降の長きに渡りエネルギー・温暖化政策のエッセンス(理想含む)と実践(具体策含む)の両面をご教授くださいました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

地球環境産業技術研究機構(RITE)の秋元圭吾氏、及び皆様方にご助力ご支援頂きました。心より感謝申し上げます。

私事ながら私の両親、家族、親戚にも笑顔で接してもらったことも心の支えとなりました。

最後になりますが、本研究を進めるにあたり支えてくださいました全ての皆様に心より厚くお礼申し上げます。