

博士論文

電力貿易におけるリスク管理に関する研究

(A Study on the Risk Management of Electricity Trading)

佐々木 大輔

目 次

要旨	1
1 序論	7
2 本研究の目的及び特色	15
3 リスク管理及びリアルオプションの適用に関する既往の研究	17
4 研究方法	21
4.1 定性的分析	21
4.1.1 リスク管理モデル(Risk Management Model).....	21
4.1.2 リスクの識別 (Identifying)	22
4.2 定量的分析	26
4.2.1 DCF 法 (Discounted Cash Flow Method)	26
4.2.2 リアルオプション	27
4.3 事例研究の枠組み	31
5 IceLink に関する分析結果, 及び考察	33
5.1 IceLink プロジェクトの概要	33
5.2 定性的分析	35
5.2.1 ヒアリング結果等の整理	35
5.2.2 プロジェクトの実施において想定されるリスク	40
5.3 定量的分析	42
5.3.1 DCF 法による分析結果	42
5.3.2 リアルオプションに関する分析結果	51

5.4	まとめ	61
6	CASA-1000に関する分析結果，及び考察	63
6.1	CASA-1000プロジェクトの概要	63
6.2	定性的分析	65
6.2.1	文献調査結果等の整理	65
6.2.2	プロジェクトの実施において想定されるリスク	70
6.3	定量的分析	72
6.3.1	DCF法による分析結果	72
6.4	まとめ	82
7	本研究の総括	83
	引用文献	87
	付録	97
	付録．A Excel VBAのソースコード（Black-Scholesモデル）	97
	付録．B Excel VBAのソースコード（メインプロシージャ[LSM]）	100
	付録．C Excel VBAのソースコード（サブプロシージャ[LSM]）	109
	謝辞	133

図目次

図 1-1	英国における制度的枠組み	8
図 1-2	日本における制度的枠組み	9
図 1-3	DESERTEC のプロジェクトマップ	10
図 1-4	TuNur のプロジェクトマップ	10
図 1-5	Medgrid のプロジェクトマップ	11
図 1-6	アジア・スーパーグリッド構想 (ASG) のプロジェクトマップ	11
図 3-1	上下水道事業におけるリスク一覧表の例	19
図 3-2	電力セクターにおけるリアルオプションの適用事例	20
図 4-1	リスク管理モデル(Risk Management Model)	21
図 5-1	IceLink における送電イメージ	34
図 5-2	感度分析 (売電価格)	44
図 5-3	感度分析 (取引電力量)	45
図 5-4	感度分析 (設備投資額)	46
図 5-5	感度分析 (リスク調整後割引率)	47
図 5-6	感度分析[オプション価値] (ボラティリティ)	53
図 5-7	感度分析[オプション価値] (行使価格)	54
図 5-8	感度分析[満期前行使確率] (ボラティリティ)	55
図 5-9	感度分析[満期前行使確率] (行使価格)	56
図 6-1	CASA-1000 における送電イメージ	64
図 6-2	感度分析 (リスク調整後割引率)	74
図 6-3	感度分析[オプション価値] (リスク調整後割引率)	77

図 6-4 感度分析[オプション価値] (ボラティリティ) 79

表目次

表 4-1	オプションの種類	27
表 4-2	本研究におけるオプション価値の算出手法	29
表 5-1	IceLink における主なリスク	41
表 5-2	DCF 法による評価の前提条件	42
表 5-3	感度分析の範囲	43
表 5-4	感度分析（売電価格×取引電力量）	48
表 5-5	感度分析（売電価格×設備投資額）	48
表 5-6	感度分析（売電価格×リスク調整後割引率）	49
表 5-7	感度分析（取引電力量×設備投資額）	49
表 5-8	感度分析（取引電力量×リスク調整後割引率）	50
表 5-9	感度分析（リスク調整後割引率×設備投資額）	50
表 5-10	オプション価値の算出に係る前提条件	51
表 5-11	オプション価値の算出結果	52
表 5-12	感度分析[オプション価値（アメリカン）]（ボラティリティ×行使価格）	57
表 5-13	感度分析[オプション価値（ヨーロピアン）]（ボラティリティ×行使価格）	58
表 5-14	感度分析[満期前行使の価値]（ボラティリティ×行使価格）	59
表 5-15	感度分析[満期前行使割合]（ボラティリティ×行使価格）	60
表 6-1	CASA-1000 における主なリスク	71
表 6-2	CASA-1000 のキャッシュフロー推計（WACC=10.0%）	72
表 6-3	感度分析（リスク調整後割引率）	73

表 6-4 シミュレーションの前提条件	75
表 6-5 感度分析（リスク調整後割引率）	76
表 6-6 感度分析（ボラティリティ）	78
表 6-7 感度分析[差額（NPV－オプション価値）]（WACC×ボラティリティ）	80

要旨

■ 研究の背景

諸外国では、電力の貿易が広く一般的に行われている。とりわけ、最近では再生可能エネルギーへの需要の高まりから、水力や地熱といった電源の余剰を積極的に取引しようとする動きが顕著である。具体的な例を挙げれば、EUの全加盟国は2020年までに全エネルギー消費の20%を再生可能エネルギー由来としなければならないという義務を負っており、そのままでは義務の履行が困難と考えられる国では、再生可能エネルギーに余剰がある国から電力を輸入しようとするのである。加えて、固定価格買取制度（FiT）などの制度的な枠組みも整備されつつあることから、電力貿易に係る事業には大きなビジネスチャンスがあると考えられるようになった。

このような状況の下、高圧直流（High-Voltage Direct Current, HVDC）による送電により電力貿易を行うプロジェクトが、現在、世界中で計画されている。これらのプロジェクトは「スーパーグリッド（super grids）」と呼ばれており、代表的なものでは、DESERTEC（主に欧州）、TuNur（チュニジア）、Medgrid（北アフリカ・欧州）等がある。また、アジア地域においても、アジア・スーパーグリッド構想（ASG）等が提言されており、電源の確保・多様化といった観点から検討に値するものであるといえよう。

さて、電力貿易には大きな商機がある一方で、相当程度のリスクが存在することにも留意しなければならない。すなわち、国際的なインフラ事業には様々なリスクが伴うことから、適切なリスク管理が求められるのである。具体的なリスクの例としては、

需要リスク (Demand Risk), 資金調達リスク (Funding Risk), 金利変動リスク (Interest Rate Risk), 非常危険 (Political Risks) といったものが挙げられるが, 事業の円滑な遂行を図る観点から, これらのリスクに対しては対処法 (ヘッジ) が講じられるのが一般的である. なお, 上下水道事業の国際展開を対象としたものではあるが, 国際的なインフラ事業を実施する際に想定されるリスクを体系的に整理し, その対処法 (ヘッジ) について, 主にリスク管理の視点から考察し評価を加えた研究としては, 佐々木他 (2014) がある.

また最近では, 事業の遂行に伴う不確実性の取扱いに関して, リアルオプションの導入が議論されている. リアルオプションとは, ファイナンス理論を実物資産 (事業) に適用する概念であり, 実物資産 (事業) のオプション性を定量化して取引可能なものにしようとする試みである. これまで, 電力事業においては, 発電プロジェクトを中心にリアルオプションの適用可能性が研究されてきた. これについては, Martinez-Cesena et al.(2013)に詳しい. 今後は, 電力貿易のような送電を伴うプロジェクトにおいても, リスクへの対処法 (ヘッジ) の一形態として, リアルオプションの適用可能性を模索する動きが活発になるものと考えられる.

■ 研究の目的

本研究では, リスク管理の観点から, 定性的側面と定量的側面の両面に関する分析を行い, その結果を基に, 電力貿易におけるリスク管理上の特徴・留意点等に関する知見を得ることを目的としている. その際, 当該リスクへの対処法 (ヘッジ) の一形態としてリアルオプションを導入し, ヘッジコストの試算を試みた. もし, 当初の事

業価値がヘッジコストよりも大きければ、理論的には、リスクヘッジが可能ということになる。

■研究方法

本研究は、文献調査、インタビュー調査、シミュレーションにより実施した。また、事例研究の対象としては、IceLink（アイスランド・英国間の送電プロジェクト）及びCASA-1000（中央アジアにおける送電プロジェクト）を選択した。また、IceLinkに係る事例研究の枠組みとしては、東京大学・マースダール科学技術大学・アイスランド大学・アイスランド国営電力会社（Landsvirkjun）の4者による共同研究を採用した。

シミュレーションについては、各事例について、まず伝統的な評価手法（DCF法）で事業評価を行った後、リアルオプションの算出を行った。なお、本研究においては、リアルオプションをリスクへの対処法（ヘッジ）の一形態として捉えていることから、考察の対象を「事業撤退オプション」（プット）とした。すなわち、事業に内在するリスク（不確実性）が顕在化した際には、一定の対価を受領して事業から撤退できる権利の価値を算出した。価値の算出に当たっては、ヨーロピアンタイプ（満期時のみ権利行使可能）の場合 Black-Scholes 方程式を、アメリカンタイプ（いつでも権利行使可能）の場合 LSM 法（Least Squares Monte Carlo Approach）をそれぞれ用いた。また、主要なパラメータについては、適宜、感度分析を行ってその特徴を把握した。

■研究の特色

電力事業のプロジェクト評価に係る既往研究では、将来のキャッシュフローを確定

的に見積もるものが少なくない。本研究では、リアルオプションの考え方を導入することにより、事業の遂行に伴う不確実性を評価の枠組みに陽に取り入れており、この点に特色がある。また、電力事業においては発電プロジェクトに適用されることが多いリアルオプションを電力貿易（送電プロジェクト）に適用している点は、特筆に値する。すなわち、電力貿易に固有のリスク（例えば、非常危険（Political Risks）等）が相当程度存在するようなケースにおいて、本研究の成果を基に、リアルオプションを対処法（ヘッジ）の一形態として導入可能か否かの検討を行うことができるようになるものと考えられる。

■ 研究で得られた知見

アイスランドでは、ほぼすべての電力が水力発電及び地熱発電により賄われており、再生可能エネルギー由来の電力を欲する英国に対して、国内よりも高い価格で売電しようとするプロジェクト（IceLink）が計画されている。具体的には、アイスランドからスコットランドまでの約 1,000 km を送電容量 1,000 MW の海底送電ケーブルで結ぶことにより、年間 5 TWh の電力を英国に輸出するというものであり、2022 年の実現を目指している。当該プロジェクトに内在するリスクのうち、特に留意する必要のあるものは、資金調達リスク (Funding Risk) と非常危険 (Political Risks) である。まず、資金調達リスクであるが、2008 年の金融危機の際、アイスランドの銀行は英国を始めとした欧州諸国の預金者に損失を与えており、訴訟にまで発展している。このような状況下で、IceLink の実施に当たり、外国の金融機関（ファイナンサー）から長期的に安定した資金供給を受けることには、相応の困難が伴うだろう。また、IceLink は、収益

性の面で英国の再生可能エネルギー由来の電力に対する固定価格買取制度（FIT-CfD）における権利行使価格（strike price）が相対的に高いことに依存しており、英国の政策変更の影響を強く受けるという点で、潜在的な非常危険（Political Risks）を内包しているものと考えられる。

CASA-1000（Central Asia South Asia Electricity Transmission and Trade Project）については、1,200 km の送電線を敷設し、タジキスタン、さらに将来的にはキルギス共和国から、夏期に発生する余剰電力 1,300 MW をアフガニスタン経由でパキスタンに供給しようとするプロジェクトである。当該プロジェクトは、2006 年以降、タジキスタン、キルギス共和国、アフガニスタン、パキスタンの 4 か国が中央アジアの水力発電を利用した中央アジア・南アジア間の国際電力貿易の実現に向けて合意し、世界銀行を中心とした国際金融機関の支援の下、進められてきたものである。特に留意すべきリスクとしては、電力供給リスク（Power Supply Risk）、及び需要リスク(Demand Risk)が挙げられるだろう。あくまで、夏期に発生する余剰電力のみを取引する前提で計画されており、新規の発電施設を建設しなくても経済的利益は確保できるとされているが、今後、夏期の国内電力需要が想定よりも増えた場合は、輸出される電力量が減り、事業の経済性に影響を及ぼす可能性がある。同様に、電力価格の内外差に起因する貿易への需要も、今後の電源開発等の状況により変化することは十分想定される。

さて、シミュレーションの結果であるが、IceLink 及び CASA-1000 の両プロジェクトともに、伝統的な評価手法（DCF 法）によっても、事業可能性が確認された。さらに、リアルオプションの価値についても算出し、リスクへの対処法（ヘッジ）の一形態として導入する際のコストの目安を提示した。すなわち、ヘッジの対価として適正

とされる価格について、リアルオプションの考え方（ファイナンス理論）に基づいて計算した。

今後の課題としては、リアルオプションをどのようなスキーム（契約形態）で導入するのか、実務的な観点から考察すること等が挙げられよう。例えば、契約締結の際に、何らかの偶発事故条項（contingency clause）を設定すること等が考えられる。今後は、既存の商慣習等も踏まえた上で、より実務的なスキームの提案が求められる。

1 序論

諸外国では、電力の貿易が広く一般的に行われている。とりわけ、最近では、再生可能エネルギーへの需要の高まりから、水力や地熱といった電源の余剰を積極的に取引しようとする動きが顕著である。例えば、EUの全加盟国は、2020年までに全エネルギー消費の20%を再生可能エネルギー由来としなければならないという義務を負っており（European Union, 2009）、このままでは義務の履行が困難と考えられる国では、再生可能エネルギーに余剰がある国から電力を輸入しようとするのである。加えて、固定価格買取制度（Feed-in Tariff, FiT）などの制度的な枠組みも整備されつつあることから（DECC, 2014）（資源エネルギー庁, 2015）、電力貿易には、大きなビジネスチャンスがあると考えられるようになった（図 1-1, 図 1-2参照）。

このような状況の下、長距離送電に有効な高圧直流（High-Voltage Direct Current, HVDC）（SIEMENS, 2014）により電力貿易を行おうとするプロジェクトが、現在、世界中で計画されている。これらのプロジェクトは、一般に「スーパーグリッド（super grid）」と呼ばれており、代表的なものでは、DESERTEC（主に欧州）、TuNur（チュニア）、Medgrid（北アフリカ・欧州）等がある（DESERTEC, 2015）（TuNur, 2015）（Medgrid, 2015）（図 1-3, 図 1-4, 図 1-5参照）。また、アジア地域においても、アジア・スーパーグリッド構想（ASG）等が提言されており（Japan Renewable Energy Foundation, 2014）、電源の確保・多様化といった観点から検討に値するものであるといえよう（図 1-6参照）。

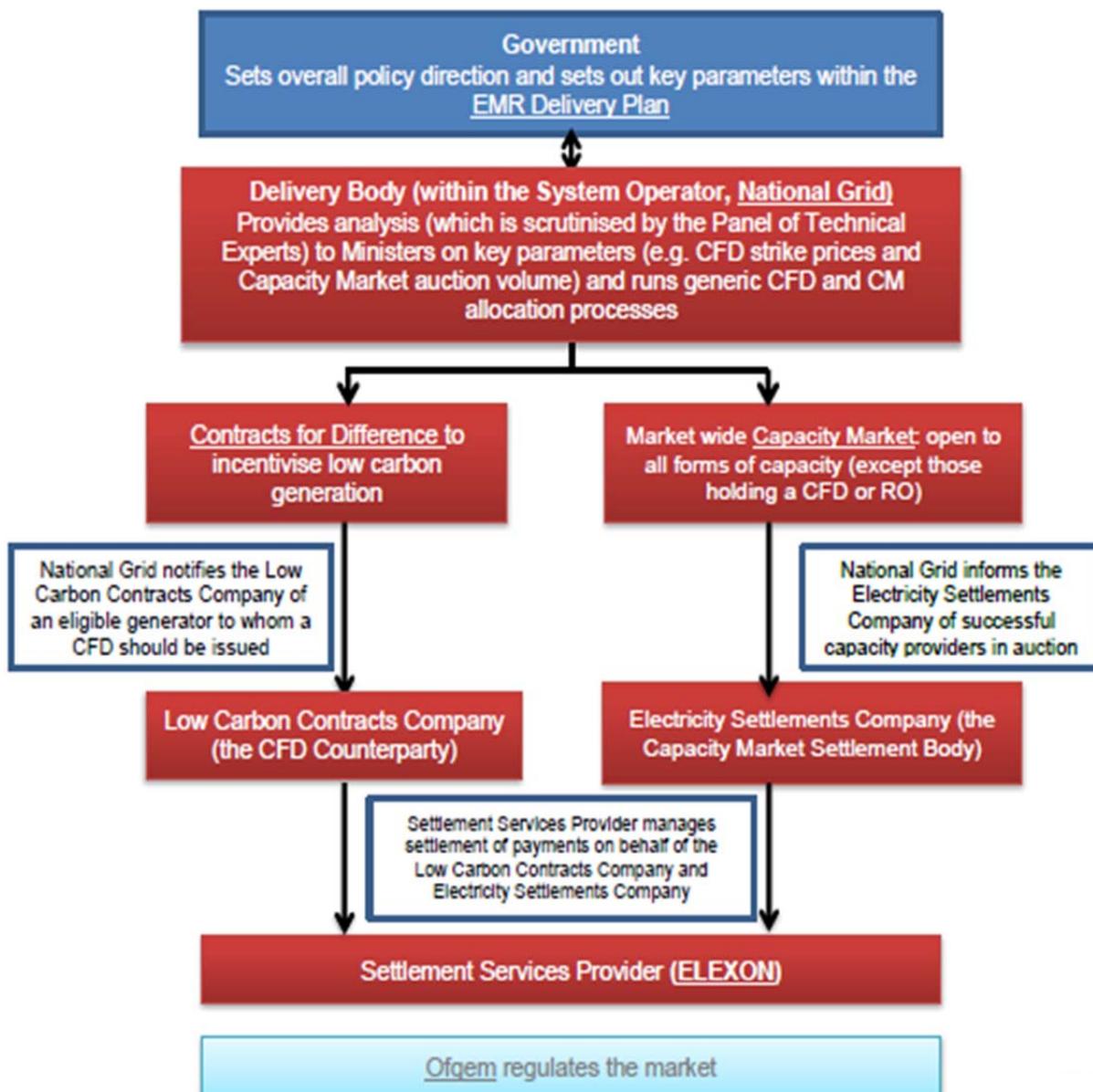


図 1-1 英国における制度的枠組み
(出所) DECC (2014)



図 1-2 日本における制度的枠組み
(出所) 資源エネルギー庁(2015)



図 1-3 DESERTEC のプロジェクトマップ
(出所) DESERTEC(2015)

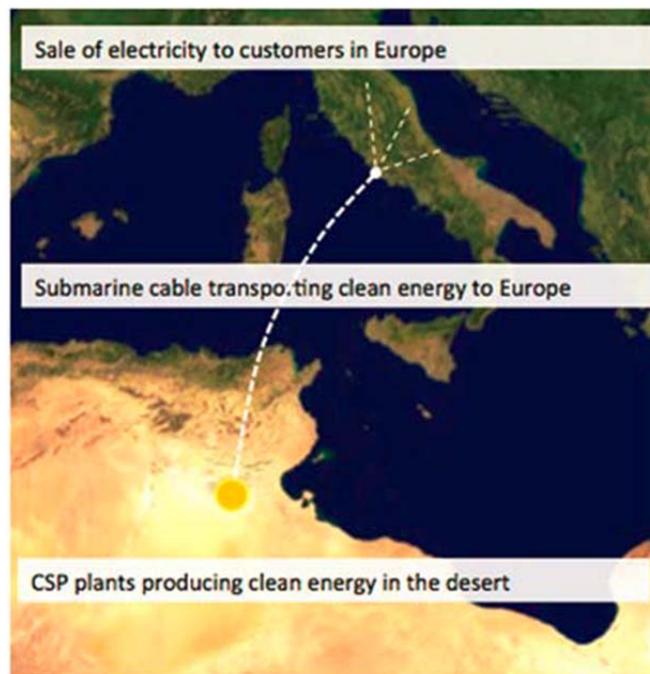


図 1-4 TuNur のプロジェクトマップ
(出所) TuNur(2015)



図 1-5 Medgrid のプロジェクトマップ
(出所) Medgrid(2015)



図 1-6 アジア・スーパーグリッド構想 (ASG) のプロジェクトマップ
(出所) Japan Renewable Energy Foundation (2014)

さて、電力貿易には大きな商機がある一方で、相当程度のリスクが存在することにも留意しなければならない。すなわち、国際的なインフラ事業には様々なリスクが伴うことから、適切なリスク管理が求められるのである。具体的なリスクの例としては、需要リスク (Demand Risk)、資金調達リスク (Funding Risk)、金利変動リスク (Interest Rate Risk)、非常危険 (Political Risks) といったものが挙げられるが、事業の円滑な遂行を図る観点から、これらのリスクに対しては、対処法 (ヘッジ) が講じられるのが一般的である。

また、最近では、事業の遂行に伴う不確実性の取扱いに関して、リアルオプションの導入が議論されている。リアルオプションとは、ファイナンス理論を実物資産 (事業) に適用する概念であり、実物資産 (事業) のオプション性を定量化して取引可能なものにしようとする試みである。今後は、電力貿易においても、リスクへの対処法 (ヘッジ) の一形態として、リアルオプションの適用可能性を模索する動きが活発になるものと考えられる。

本研究において、事例研究の対象としたのは、アイスランド・英国間 (IceLink)、及び中央アジア諸国内 (CASA-1000) の2つの電力貿易プロジェクトである。

アイスランドは、国土面積103,000km²、人口約32万人の小国であるが、(2010年の時点で) 総発電量の73.8%を水力発電、26.2%を地熱発電が占めており、電力のほぼ100%が再生可能エネルギー源から供給されている (Statistics Iceland, 2012)。総発電量の内、70%はアルミニウムの精錬のために消費されている。電力を販売している国営企業であるLandsvirkjunから見ると、アルミニウム精錬所の他にはアイスランド国内で大手の需要が存在しないことから、電力価格は「買い手市場」による低価格を余儀なくされ

ている。従って、より高価格での売電を実現する為に、電力をアイスランドから英国などのヨーロッパ諸国に輸出しようという計画は以前から検討されていた (Hammons *et al.*, 1993)。現状では、アイスランドにおける水力発電と地熱発電の潜在的発電量の26%のみが開発されており、潜在的発電量の20%から34%は今後の開発が可能と見積もられている (IEA Geothermal Implementing Agreement, 2012)。前述のとおり、2000年以降、欧州連合(EU)では、再生可能エネルギー電力の導入促進を規定した「再生可能エネルギー電力指令(2001/77/EC)」が発せられるなど、電力の「再生可能エネルギー化」が急務とされている (伊藤, 2011)。そのような動きの中で、2012年5月に英国とアイスランドは担当大臣間での覚え書きを交換し、アイスランドと英国の間に送電線を敷設する可能性を検討することで両国が合意した(Askja Energy, 2014)。

一方、タジキスタンは、1991年に旧ソビエト連邦から独立した中央アジア諸国のひとつであり、キルギス共和国、ウズベキスタン、中国、アフガニスタンと国境を接している。タジキスタンは他の中央アジア諸国と比べ、石油や天然ガスなど化石燃料には乏しいが、豊富な水資源を有する水資源国家である。さらに、同国は中央アジアの代表的な国際河川アムダリア川およびシルダリア川の上流国でもある。このような地政学的な条件から、タジキスタン政府は自国の水力発電の開発を経済発展のための重要な国家政策のひとつとして位置づけてきた (Libert *et al.*, 2008)。しかしながら、タジキスタンは旧ソ連諸国の中でも最貧国であり、外部の資金援助なしに国内の水力発電所を改修あるいは新設することは困難な状況である。しかし2006年以降、タジキスタン、キルギス共和国、アフガニスタン、パキスタンの4ヶ国は、中央アジアの水力発電を利用した中央アジア・南アジア間の国際電力貿易の実現にむけて合意し、世界銀行

を中心とした国際金融機関の支援のもとCASA-1000 (Central Asia South Asia Electricity Transmission and Trade Project)が立ち上げられた (SNC-Lavalin, 2011). CASA-1000は、1,200kmの送電線を敷設し、タジキスタン、さらに将来的にはキルギス共和国から、夏期に発生する余剰電力1,300MWをアフガニスタン経由でパキスタンに供給するという計画である。この計画の実現により、アフガニスタンとパキスタンにおける電力不足の解消、電力輸出国の外貨収入増大による経済発展、アフガニスタンの復興および社会的安定に寄与することなどが国際社会から期待されている。

ただ、アイスランド、及びタジキスタンから外国への売電を目的とした上記の2つのプロジェクトは、共に政治上の困難をはじめとした各種リスクを内包しており、プロジェクトの実施に当たっては、リスク管理が極めて大きな意味を持つ。こうした状況を踏まえ、本研究ではこの2つのプロジェクトについて分析を行った。

本論文の構成は、以下のとおりである。まず本章で、本研究の背景について概説した。続いて第2章では、本研究の目的及び特色について述べる。第3章では、リスク管理及びリアルオプションの適用に関する既往の研究を紹介する。第4章では、本研究における方法論を紹介する。第5章では、事例研究対象の1つであるアイスランド・英国間の電力貿易プロジェクト「IceLink」について、分析結果の説明、及び考察を行う。同様に、第6章では、もう1つの事例研究対象である中央アジア諸国内の電力貿易プロジェクト「CASA-1000」について、分析結果の説明、及び考察を行う。そして最後に、第7章で本研究を総括する。

2 本研究の目的及び特色

本研究の目的は、電力貿易について、事例を基に定性的・定量的分析を行い、その結果から、リスク管理上の特徴・留意点等に関する知見を得ることにある。その際、当該リスクへの対処法（ヘッジ）の一形態としてリアルオプションを導入し、ヘッジコストの試算を試みた。もし、当初の事業価値がヘッジコストよりも大きければ、理論的にはリスクヘッジが可能ということになる。リスク管理の実務においては、リスクを識別・評価した後、適切に対処していくことが求められることから、電力貿易におけるリスクヘッジについて考察することには、大きな意義がある。

また、本研究では、CASA-1000の事例を基に、援助的色彩の強い電力貿易プロジェクトであっても、適切な利益水準とリスクヘッジを担保することで、民間資金の導入可能性を見出すことができないか検討している。今後、公民連携（Public-Private Partnership, PPP）により電力貿易プロジェクトを実施するケース等も想定されるが、民間資金を導入するに当たっては、適切なリスク管理の実施が不可欠である。すなわち、民間が資金を提供するには、リスクに見合った利益（リターン）が確保されていることに加え、民間ではコントロールできないリスクに対して、適切にヘッジがなされていることが前提となる。本研究の特色としては、こうしたリスク管理に対して、一定の示唆を与えるものである点が挙げられる。

なお、本研究では、表計算ソフト（Microsoft Excel）に標準装備されているプログラム機能（Visual Basic for Applications, VBA）等を用いてシミュレーションを実施している。このように、比較的容易に実務への応用が可能である点も、本研究の特色の1つで

あると考えられる.

3 リスク管理及びリアルオプションの適用に関する既往の研究

電力セクターにおけるリスク管理については、例えば、ADB(2009)が定性的な側面から整理を行っている。また、民間からの資金調達によるインフラ事業におけるリスク管理については、Irwin(2007)が政府保証の分析を行う中で詳しく論じている。その他にも、Grimsey and K.Lewis(2002)やBaloi and Price(2003)、Cagno *et al.*(2007)がプロジェクトにおけるリスク分析の方法論を提案しており、Eppler and Aeschmann(2009)がリスクの見える化について概念的な整理を与えている。さらに、佐々木ほか(2014)が上下水道事業の国際展開を例に、国際的なインフラ事業を実施する際に想定されるリスクを体系的に整理し、その対処法(ヘッジ)について考察している(図 3-1参照)。いずれの研究においても、まずはリスクを観察して定性的に分類・整理していることから、本研究でも同様のアプローチを採用する。なお、事例研究の対象としているIceLink、及び、CASA-1000については、中山ほか(2015)が詳細な定性的分析を行っており、本研究では、当該分析結果を基に、主としてリスク管理の観点から、さらなる分析・考察を試みた。

電力セクターにおいてリアルオプションを適用した最近の事例としては、Pringles *et al.*(2015)、Abadie(2015)、Kucsera and Rammerstorfer(2014)、Boomsma *et al.*(2012)等がある。また、Martinez-Cesena EA *et al.*(2013)がレビューを行っており、これによると、2000年代に入ってから、多くの電力セクターの事例において、リアルオプションの適用が

試みられてきたことがわかる (図 3-2参照). なお, リアルオプションの手法については, 微分方程式によるもの, ツリー (格子) モデルによるもの, シミュレーションによるものに大別されるとしている. このうち, 本研究では, 微分方程式 (Black-Scholes 方程式) による手法と, シミュレーション (Least Squares Monte Carlo Approach) による手法の2つを採用する.

	概要	対処法(ヘッジ)の例
1. 財務的リスク(Financial Risks)		
1.1 内留財務的リスク(Internal Financial Risks)		
1.1.1 需要リスク(Demand Risk)	水需要の下振れ	(移轉)相手国政府等による最低収入保証の導入
1.1.2 不払リスク(Nonpayment Risk)	需要家、オフテイカーの不払等	(処理)支払意思額の増加策、(処理)合理的な料金徴収制度の確立、(移轉)相手国政府による支払保証
1.1.3 原水リスク(Raw Water Risk)	渇水等による原水の確保困難、原水水質の悪化等	(処理)適度な水原余裕率、(処理)水質管理の徹底
1.1.4 人材確保リスク(Personnel Risk)	適切な人材の確保困難	(処理)職員の処遇改善、(処理)人材育成の推進
1.1.5 資材調達リスク(Procurement Risk)	資材の調達困難	(処理)官民連携ネットワークの活用
1.1.6 資金調達リスク(Funding Risk)	事業資金の調達困難	(処理)政策金融の活用
1.1.7 予算超過リスク(Cost Overrun Risk)	事業予算の超過	(移轉)相手国関係機関等との負担区分の明確化
1.1.8 事業遅延リスク(Time Overrun Risk)	供用開始の遅延	(移轉)相手国関係機関等との負担区分の明確化
1.1.9 維持管理リスク(Maintenance Risk)	大規模修繕の発生等	(移轉)相手国関係機関等との負担区分の明確化
1.1.10 賠償責任リスク(Liability Risk)	事業遂行に伴う賠償責任の負担	(移轉)損害保険(賠償責任保険)の利用
1.2 外留財務的リスク(External Financial Risks)		
1.2.1 物価変動リスク(Inflation Risk)	インフレ等によるコスト増	(移轉)料金(tariff)に対する自動調整メカニズムの導入
1.2.2 金利変動リスク(Interest Rate Risk)	金利上昇に伴う(資金調達)コスト増	(移轉)長期・固定による資金調達
1.2.3 為替変動リスク(Foreign Exchange Risk)	為替差損の発生	(移轉)料金(tariff)に対する自動調整メカニズムの導入、(移轉)現地通貨建ての資金調達
2. 非財務的リスク(Non-financial Risks)		
2.1 非常危険(Political Risks)		
2.1.1 収用・権利侵害リスク(Expropriation/Breach of Contract Risk)	外国政府等による収用・権利侵害	(移轉)貿易保険の利用
2.1.2 戦争リスク(War/Civil Disturbance Risk)	戦争、革命、テロ行為その他の内乱、暴動または騒乱	(移轉)貿易保険の利用
2.1.3 不可抗力リスク(Force Majeure Risk)	地震、洪水などの天災、国書制裁、ゼネラルストライキ等	(移轉)貿易保険の利用
2.1.4 送金リスク(Currency Inconvertibility Risk)	為替取引の制限等	(移轉)貿易保険の利用
2.2 契約締結リスク(Contract Risk)	法制度の不整備、契約締結の遅延・不能、契約内容の不備等	(処理)相手国関係機関等との綿密な調整、(処理)リーガルアドバイザーの活用
2.3 協働者リスク(Partnership Risk)	協働者の破綻等	(処理)特別目的会社(SPC)の設立
2.4 不正・汚職(Corruption Risk)	従業員等の不正・汚職	(処理)信賞必罰の徹底、(処理)適正人員配置の実現
2.5 環境(Environmental Risk)	環境汚染の進行	(処理)環境アセスメントの実施
2.6 反対運動(Risk of Opposition Campaign)	近隣住民、既存事業者等による反対運動	(処理)事前調査の徹底、(処理)住民対話の実施
2.7 風評リスク(Reputational Risk)	風評被害	(処理)広報活動の充実
2.8 開発効果未達リスク(Developmental Risk)	開発効果の未達	(処理)プロジェクトの再設計

※対処法の頭に記された(処理)、(移轉)はそれぞれ、treat(処理)、transfer(移轉)のカテゴリーに属するものであることを示す。

図 3-1 上下水道事業におけるリスク一覧表の例
(出所) 佐々木ほか(2014)

著者	発電の種類	適用する段階	不確実性	手法	出版年
Barria and Rudnick	発電全般	計画	価格	ツリー	2011
Takashima et al.	発電全般	計画	価格	微分方程式	2010
Zhou et al.	発電全般	計画	価格	シミュレーション	2007
Martinez and Davalos	発電全般	計画	価格、費用	シミュレーション	2011
Nihat	発電全般	運転	需要	シミュレーション	2011
Nansheng et al.	発電全般	運転	価格、費用	微分方程式	2008
Min and Wang	発電全般	計画、運転	価格	ツリー	2000
Min and Wang	発電全般	計画、運転	価格	ツリー	2006
Agusdinata	発電全般	計画	価格、需要	ツリー	2005
Botterud et al.	発電全般	計画	価格	ツリー	2005
Gahungu and Smeers	発電全般	計画	価格	微分方程式、 シミュレーション	2010
Wang et al.	発電全般	計画	需要	微分方程式、 シミュレーション	2006
Liu et al.	発電全般	計画、運転	価格、費用、政策	微分方程式	2011
Correia et al.	発電全般	計画	複数	ツリー	2008
Herve-Mignucci	発電全般	計画	価格、費用、政策	ツリー	2010
Fleten et al.	発電全般	計画	価格	微分方程式	2007
Takashima et al.	火力、原子力	計画、運転	価格	微分方程式	2008
Siqueira	水熱	運転	政策	ツリー	2011
Takashima et al.	原子力	運転	価格	微分方程式、 シミュレーション	2007
Cardin et al.	原子力	全て	技術	ツリー	2010
Hedman and Sheble	水力、風力	運転	風量	微分方程式、 シミュレーション	2006
Xian et al.	水力	運転	水量、価格	シミュレーション	2005
Kjaerland and Larsen	水力、火力	運転	水量、費用	シミュレーション	2009
Bockman et al.	水力	計画	価格	微分方程式	2008
Wang and de Neufville	水力	計画、設計	価格	ツリー、 シミュレーション	2006
Wang and de Neufville	水力	計画、設計	価格	ツリー、 シミュレーション	2004
Wang and de Neufville	水力	計画、設計	価格	ツリー、 シミュレーション	2005
Martinez and Mutale	水力	計画、設計	価格	ツリー、 シミュレーション	2011
Scatasta and Mennel	風力	計画	政策、収入	微分方程式	2009
Cheng et al.	風力	計画	価格、費用、政策	ツリー	2010
Dykes and de Neufville	風力	計画、運転	価格、政策	ツリー	2008
Munoz et al.	風力	計画	価格	ツリー、 シミュレーション	2009
Zhou et al.	風力	計画	価格	シミュレーション	2007
Fleten and Maribu	風力	計画	価格	微分方程式	2004
Mendez et al.	風力	計画、運転	キャッシュフロー	ツリー、 シミュレーション	2009
Martinez and Mutale	風力	計画、設計	風量	ツリー、 シミュレーション	2012
Hoff et al.	太陽光	計画	価格	ツリー	2003
Sarkin and Tamarkin	太陽光	計画	技術、政策	ツリー	2008
Ashuri and Kashani	太陽光	計画	技術、価格	ツリー、 シミュレーション	2011
Martinez and Mutale	太陽光	計画	技術	シミュレーション	2012
Martinez and Mutale	太陽光	全て	需要応答	ツリー、 シミュレーション	2011

図 3-2 電力セクターにおけるリアルオプションの適用事例
(出所) Martinez-Cesena EA *et al.*(2013)を一部加工

4 研究方法

4.1 定性的分析

4.1.1 リスク管理モデル(Risk Management Model)

例えば, HM Treasury(2004)ではリスク管理のモデルとして, 図 4-1 を提示している. ここでは, リスク管理の過程を1つのサイクルと捉え, 4段階(Identifying(識別), Assessing(評価), Addressing(対処), Reviewing and reporting(見直し, 報告))に分類している. このうち, 本研究では定性的分析において, Identifying(識別)について考察を行った.

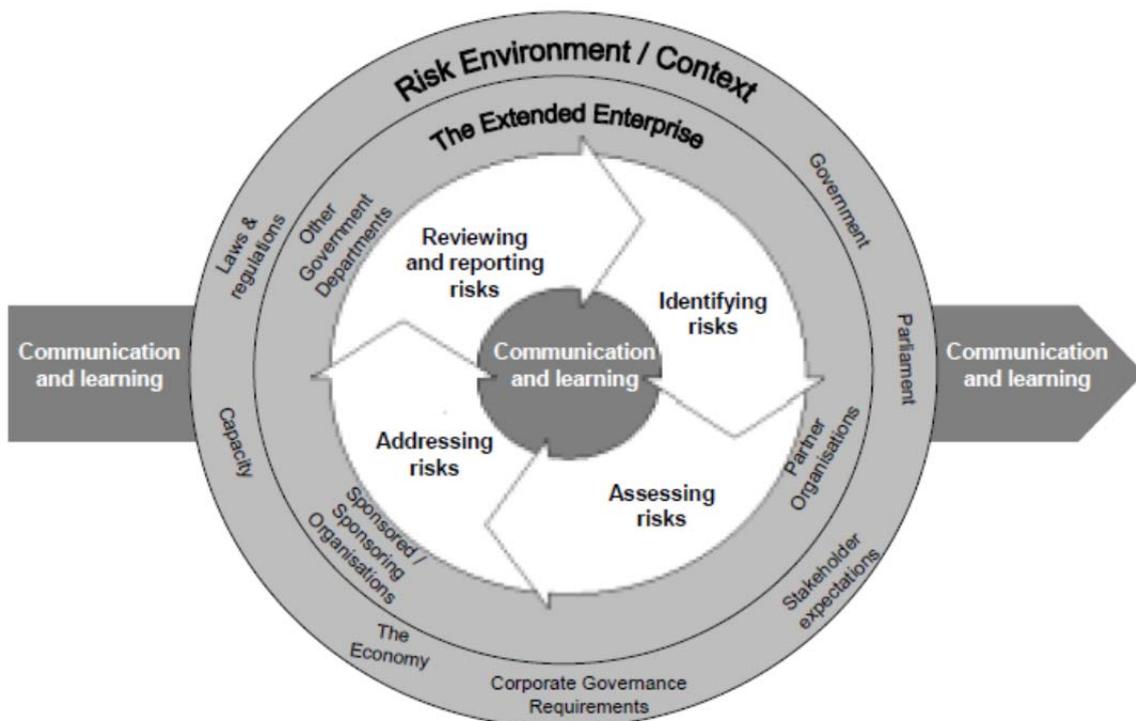


図 4-1 リスク管理モデル(Risk Management Model)

(出所)HM Treasury(2004)

4.1.2 リスクの識別 (Identifying)

リスクの識別(Identifying risks)は、リスク管理における第1段階であり、今後、プロジェクトの実施に当たり想定されるリスクを洗い出す作業である。先行事例としては、例えば、ADB(2009)が一般的なリスクの洗い出しに関して指針を出している。これに対し、本研究では、各種リスクを以下のように定義している。事例研究における定性的分析では、これらのリスクのうち、当該プロジェクトにおいて留意すべきリスクを抽出した。

(1) 財務的リスク

ここでは、財務的リスクを「その量を比較的容易に貨幣的価値に換算できるリスク」と定義する。すなわち、リスクの顕在化に伴い生じる損失を貨幣的評価により認識・測定することが比較的容易なものを財務的リスクと考える。なお、財務的リスクのうち、「当該事業に固有のリスク」を内部財務的リスクと定義する。内部財務的リスクの例としては、下記のようなものが考えられる。

a) 需要リスク(Demand Risk)

電力需要の下振れ。

b) 不払リスク(Nonpayment Risk)

需要家、オフテイカーの不払等。

c) 供給リスク(Supply Risk)

輸出電力の確保困難等。

d) 人材確保リスク(Personnel Risk)

適切な人材の確保困難.

e) 資材調達リスク(Procurement Risk)

資材の調達困難.

f) 資金調達リスク(Funding Risk)

事業資金の調達困難 (なお, 事業者にとっては, 長期・固定金利・現地通貨建ての資金調達が望ましいが, これはファイナンスに後述の金利変動リスク, 為替変動リスクを負担させることになる. すなわち, 資金調達リスクと金利変動リスク, 為替変動リスクはトレードオフの関係にあるといえる).

g) 予算超過リスク(Cost Overrun Risk)

事業予算の超過.

h) 事業遅延リスク(Time overrun Risk)

供用開始の遅延.

i) 維持管理リスク(Maintenance Risk)

大規模修繕の発生等.

j) 賠償責任リスク(Liability Risk)

事業遂行に伴う賠償責任の負担.

また, 財務的リスクのうち, 「経済情勢等の外生的要因によるリスク」を外部財務的リスクと定義する. 外部財務的リスクの例としては, 下記のようなものが考えられる.

k) 物価変動リスク(Inflation Risk)

インフレ等によるコスト増.

l) 金利変動リスク(Interest Rate Risk)

金利上昇に伴う(資金調達)コスト増.

m) 為替変動リスク(Foreign Exchange Risk)

為替差損の発生.

(2) 非財務的リスク

ここでは、非財務的リスクを財務的リスクの補集合として定義する。すなわち、リスクの顕在化に伴い生じる損失を貨幣的評価により認識・測定することが困難なものを非財務的リスクと考える。非財務的リスクの例としては、下記のようなものが考えられる。

a) 非常危険(Political Risks)

外国政府等による収用・権利侵害，戦争等.

b) 契約締結リスク(Contract Risk)

法制度の未整備，契約締結の遅延・不能，契約内容の不備等.

c) 協働者リスク(Partnership Risk)

協働者の破綻等.

d) 不正・汚職(Corruption Risk)

従業員等の不正・汚職.

e) 環境 (Environmental Risk)

環境汚染の進行.

f) 反対運動(Risk of Opposition Campaign)

近隣住民, 既存事業者等による反対運動.

g) 風評リスク(Reputational Risk)

風評被害.

上記に示したのは, 電力貿易において想定されるリスクに係る定義付けの標準的な整理法であり, 当然, これ以外の定義付けも考えられる. すなわち, リスクは事業内容やプロジェクトの建付け等に大きく依存するものであることから, リスクの識別を行う際に, 各事業者が個別最適なリスクの定義を作成することが合理的な場合もある. このように, リスクの識別においては, 予め関係者へのヒアリング等を入念に行い, 各々のプロジェクトに固有のリスクを的確に捉える必要がある. なお, リスクの種類等については, プロジェクトの性質に大きく依存する点に留意しなければならない. また, いずれの場合においても, リスクを重複なくかつ漏れなく定義することが重要である(Mutually Exclusive and Collectively Exhaustive, MECE).

4.2 定量的分析

4.2.1 DCF法 (Discounted Cash Flow Method)

本研究では、まず、伝統的なプロジェクト評価手法である DCF 法 (Discounted Cash Flow Method) による分析を行う。DCF 法では、式(1)で与えられる正味現在価値 (Net Present Value, NPV) の正負でプロジェクトの事業可能性を評価する。

$$NPV = \sum_t (FCF)_t \exp^{-rt} - I \quad (1)$$

(ただし、 $(FCF)_t$ 、 r 、 I はそれぞれ、時刻 t におけるフリーキャッシュフロー、リスク調整後割引率 (Weighted Average Cost of Capital, WACC)、設備投資額 (Capital Expenditure, CAPEX) を表すものとする)

すなわち、NPV が正である場合は、当該プロジェクトに事業可能性があるものと判断される。なお、リスク調整後割引率 r は、資本コストを意味しており、それぞれの事業主体によって異なる値となる。したがって、同じプロジェクトであっても、資金調達力に乏しい事業主体では、資金調達力のある事業主体に比べて、リスク調整後割引率 r がより大きな値となることから、結果として、相対的に NPV が小さな値となる (もしくは、NPV が負になる) こともありうる。なお、本研究では各々のパラメータについて、適宜、感度分析を実施し、それぞれの影響度 (impact) について考察している。

4.2.2 リアルオプション

DCF法による分析の後、リアルオプションを導入する。リアルオプションは、Myers(1977)が最初に提唱した概念であり、Dixit and Pindyck(1994)をはじめ、一定の整理がされてきた。端的に言えば、リアルオプションとは、ファイナンス理論を実物資産（事業）に適用する概念であり、実物資産（事業）のオプション性（事業の遂行に係る意思決定等の自由度）を定量化して取引可能なものにしようとする試みである。なお、Copeland and Antikarov (2003)では、リアルオプションには、キャッシュフローの現在価値 (NPV) が当該事業の市場価値の不偏推定量であるとの仮定 (Marketed Asset Disclaimer, MAD) が存在するとしている。

さて、オプションには、表 4-1 にまとめたように、様々な種類が存在している。

表 4-1 オプションの種類

	ヨーロッパ	アメリカン
コール	ある一定の期間経過後（満期時）に、対象となる資産等を前もって定めた価格（行使価格）で購入する権利	ある一定の期間中に、対象となる資産等を前もって定めた価格（行使価格）で購入する権利
プット	ある一定の期間経過後（満期時）に、対象となる資産等を前もって定めた価格（行使価格）で売却する権利	ある一定の期間中に、対象となる資産等を前もって定めた価格（行使価格）で売却する権利

(出所)著者作成

まず、コールとプットの違いであるが、コールとは、ある一定の期間の後（もしくは期間中）に、対象となる資産等を前もって定めた価格（行使価格）で購入する権利のことであり、リアルオプションの場合は、例えば、事業等に一定の対価を払って参入する権利となる。すなわち、将来的に設備投資額の高騰が見込まれる場合、コールオプションを保有することにより、価格高騰のリスクから解放されることになる。一方、プットはコールの逆で、ある一定の期間の後（もしくは期間中）に、対象となる資産等を前もって定めた価格（行使価格）で売却する権利のことである。したがって、将来、事業価値が下落する恐れがある場合に、リスクヘッジとしてプットを保有することが考えられる。次に、ヨーロピアンとアメリカンの違いであるが、ヨーロピアンの場合は、権利行使が満期時に限定されている。一方で、アメリカンでは、満期までの間いつでも権利行使ができる。したがって、アメリカンはヨーロピアンに比べて、満期前行使ができる分、オプション価値が高くなる。

本研究では、リスクへの対処法（ヘッジ）の一形態としてリアルオプションを導入することから、事業に内在するリスク（不確実性）が顕在化した際に、一定の対価を受領して事業から撤退できる権利である「事業撤退オプション」（プット）を考察の対象とする。当該オプションを保有することで、事業主体は、事業価値の変動に伴うリスクから解放されることになる。なお、簡単のため、キャッシュフローの現在価値(NPV)が幾何ブラウン運動 (Geometric Brownian motion, GBM) に従うものと仮定し、ヨーロピアン・アメリカンのそれぞれについて、オプション価値を算出する。すなわち、オプション価値の算出に当たっては、すべての認識されたリスクを一様に取り扱うことになり、それぞれのリスクの特性については捨象している。したがって、非常危険の

表 4-2 本研究におけるオプション価値の算出手法

	事業撤退オプション (プット)
ヨーロピアン	Black-Scholes 方程式 (解析的手法)
アメリカン 【IceLink のみ】	LSM 法 (シミュレーション)

(出所)著者作成

ように、非線形のリスクと考えられるものについても、他のリスクと併せることで、リスクの総体としては、幾何ブラウン運動に従うというモデルを想定していることになる。

オプション価値の算出手法については、表 4-2 に掲げたとおりである。確率過程が幾何ブラウン運動である場合、ヨーロピアンプットオプションの価値 P_E は、Black-Scholes 方程式 (式(2)) により、解析的に求めることができる (Black and Scholes, 1973)。 PV_0 , K , T , σ , r_f をそれぞれ、キャッシュフローの現在価値 (NPV)、行使価格、満期までの期間、ボラティリティ、無リスク金利とすると、

$$P_E = Ke^{-r_f T} N(-d_2) - PV_0 N(-d_1) \quad (2)$$

$$\text{(ただし, } d_1 = \frac{\ln(PV_0 / K) + (r + \sigma^2 / 2)T}{\sigma\sqrt{T}})$$

$$d_2 = \frac{\ln(PV_0 / K) + (r - \sigma^2 / 2)T}{\sigma\sqrt{T}} = d_1 - \sigma\sqrt{T})$$

が成り立つ。また、アメリカンプットオプションの価値 P_A については、LSM 法 (Least Squares Monte Carlo Approach) と呼ばれるシミュレーションにより求める。なお、本分析はヨーロッパンオプションとの相違点を把握することが目的であるため、IceLink についてのみシミュレーションを行う。LSM 法は、アメリカンオプションの価値をモンテカルロシミュレーションにより求める手法として、Longstaff and Schwartz (2001) により提唱されたものである。この手法では、各期限前行使可能点における条件付期待関数を最小二乗法を用いて推定することにより、満期前の時点で行使か継続かの判断が必要となるアメリカンオプションの評価に、モンテカルロシミュレーションを用いることを可能にしている。なお、本研究では、条件付期待関数を推定する際の基底関数として、Longstaff and Schwartz (2001) 同様、Laguerre 多項式 (式(3)) を採用する。

$$L_n(X) = \exp(-X/2) \frac{e^X}{n!} \frac{d^n}{dX^n} (X^n e^{-X}) \quad (3)$$

シミュレーションのコードについては、大野(2013)を参考に作成した。乱数発生のアドインについても、大野(2013)が提供しているものを使用している。

4.3 事例研究の枠組み

本研究では、事例研究を行うに当たり、東京大学・アイスランド大学・Landsvirkjun 社・マスタートール科学技術大学（アラブ首長国連邦）の4者による共同研究の枠組みを構築した。これにより、事業データ等へのアクセスが容易になったことに加え、アイスランド大学の教員やLandsvirkjun 社の社員に対するインタビュー調査を円滑に実施することができた。インタビュー調査については、レイキャビク（アイスランド）で2014年3月12日から14日にかけて実施した。調査先は、Landsvirkjun 社（国営電力会社）、アイスランド大学、GAMMA 社（コンサルティング会社）、Askja Energy Partners（独立系情報提供機関）である。

5 IceLink に関する分析結果, 及び考察

5.1 IceLink プロジェクトの概要

アイスランドは、国土面積 103,000 km², 人口約 32 万人の小国であるが、(2010年の時点で) 総発電量の73.8%を水力発電, 26.2%を地熱発電が占めており、電力のほぼ100%が再生可能エネルギー源から供給されている (Statistics Iceland, 2012). 総発電量の内、70%はアルミニウムの精錬のために消費されている。電力を販売している国営企業である Landsvirkjun から見ると、アルミニウム精錬所の他にはアイスランド国内で大手の需要が存在しないことから、電力価格は「買い手市場」による低価格を余儀なくされている。従って、より高価格での売電を実現する為に、電力をアイスランドから英国などのヨーロッパ諸国に輸出しようという計画は以前から検討されていた (Hammons *et al.*, 1993).

現在、アイスランドでは、気象変動に起因する既存の水力発電所への流入水量の増加による発電量の増大、及び、新設される水力発電所及び地熱発電所による発電量の増大を、英国及び他の欧州諸国への売電に振り向けようとしている (Atlantic Journal, 2014). 就中、英国への売電計画は「IceLink プロジェクト」として推進され、最初の実現することが期待されている。2022年の実現を目指す IceLink は、図 5-1に示したとおり、アイスランド西部からスコットランド北部までの約 1000km を送電容量 1000 MWの海底送電ケーブルで結ぶことで、年間 5 TWhを英国に売電することを想定している (Landsvirkjun, 2013).



図 5-1 IceLink における送電イメージ

(出所)中山ほか(2015)

5.2 定性的分析

5.2.1 ヒアリング結果等の整理

アイスランドでは、「国内の電力料金が引き上げられるのではないか」という国民の家計への影響への懸念と、小国であるアイスランドに対して欧州諸国が「電力の貿易」を理由として「政治的な干渉」を行うのではないかという国際政治上の懸念が、欧州への売電への反対論（慎重論）として現れている。

このようなアイスランド国民の懸念は、経済破綻時以来の国民の政府に対する不信感と、その折の欧州諸国からの「干渉」によるトラウマに起因している。

すでに他国への電力輸出を行っているスウェーデンでは、近年、国内の電力価格が高騰している(Swedish Energy Agency, 2013)。高騰の理由は渇水による水力発電量の低下および寒波に起因する卸電力価格の上昇とされている(海外電力調査会, 2014)。しかし、アイスランドで有識者に実施したヒアリング (Sigurjonsson, 2014) によれば、アイスランド国民はスウェーデンにおける電力価格高騰の直接的な要因が電力輸出にあると捉えている。そして、アイスランドがIceLink のような電力輸出を行えば、スウェーデン同様、アイスランドの国内電力価格も高騰するのではないかと懸念している。

アイスランド、スウェーデン共に、水力発電が主要な電源であるという類似性を有しており、アイスランド国民の懸念は一見妥当なように思われるが、アイスランドとスウェーデンではその前提条件に大きな相違があることがアイスランド国民には看過されている。スウェーデンでは総電力使用量に対する家庭部門等の電力使用量の割合

は約 58 % (2010年)であるのに対し(Swedish Energy Agency, 2013), アイスランドでは約 5% (2011年)となっており(ORKUSTOFNUN, 2012), 需要家としての家庭部門等の位置付けが両国で大きく異なっている。すなわち, アイスランドではスウェーデンに比べて, 全体に占める家庭部門等の割合が僅少であるため, 家庭部門等の電力価格を上げるインセンティブに乏しいものと考えられる。また, アイスランドではスウェーデンと異なり, 地熱エネルギー(geothermal energy)が幅広く使用されている。例えば, アイスランドにおける家庭部門等の主要なエネルギー需要の 1つに部屋暖房(space heating)があるが, アイスランドではそのおよそ9割を地熱エネルギーにより賄っている(ORKUSTOFNUN, 2012)。一方, スウェーデンでは 2010年の家庭部門等における地域熱供給(district heating)量が49 TWh であるのに対し, 当該部門における電気暖房(electric heating)の電力使用量は20 TWh となっている(Swedish Energy Agency, 2013)。従って, アイスランドではスウェーデンに比べて, 暖房のエネルギー構成に占める電気(electricity)の割合が低く, 家庭部門等の電力価格において, 厳冬等の影響を相対的に受けにくいものと思料される。

このように, アイスランドの電力輸出(IceLink)をスウェーデンの事例にそのまま当てはめるのは少々早計であるように思われる。しかしながら, 当該事例を基に内政的なリスク要因を整理することには一定の意義がある。そこで本研究では, 以下の 2 つの内政的要因について, 当該事例と関連させながら整理した。

第一の内政的要因は, 地熱エネルギーによらない部屋暖房を用いている国民が抱く懸念である。前述のとおり, アイスランドでは部屋暖房に必要なエネルギーの 9 割を地熱で賄っているが, 電気暖房を用いざるを得ない家庭も一定数存在している。地熱

エネルギー由来の暖房と電気暖房では現在でも数倍の価格差があり、補助金によりその差を埋めているのが実情である (ORKUSTOFNUN, 2012)。スウェーデンのように電気暖房の電力使用量が全体に占める割合が相対的に高くなると、厳冬等を引き金に電力価格が高騰する恐れが高まる。従って、アイスランドにおいても、電気暖房を使用している家庭では電力輸出による価格の高騰を懸念し、IceLink に反対する声上がる可能性がある。

第二の内政的要因は、大口需要家が抱く契約価格上昇への懸念である。アイスランドの国営電力会社であるLandsvirkjunでは、専らアルミニウムを製造している5社 (Alcoa, Rio Tinto Alcan, Nordurál, Elkem, Becromalの 5 社) への売電収入が全体の約86%を占めている(Landsvirkjun, 2012)。この点で、企業部門の電力使用量が全体の約41%であるスウェーデンとは大きく異なっている(Swedish Energy Agency, 2013)。そして、ヒアリング(Gudmundur F. Ulfarsson, 2014)によれば、これらの企業とLandsvirkjunは長期の売電契約を締結しているとのことであったが、電力輸出により新たな販路が生まれることに対し、既存の大口需要家が契約価格上昇への懸念を抱くことは十分想定される。また、アイスランドでは、大口需要家が政治的にも一定の影響力を持っているとのことであり(Gudmundur F. Ulfarsson, 2014)、アルミニウム精錬業からの反対はIceLinkを進める上で最大の隘路となりかねない。Landsvirkjunは、経営戦略の一つとして "A diverse client group (の構築)" を掲げており(Landsvirkjun 2012, p.18)、既存顧客の中でも最大の顧客グループであるアルミ精錬業各社に対し、IceLink の実現がアルミ精錬業への売電価格の上昇にはつながらないことを丁寧に説明することが必要である。

また、アイスランドの国民は、以下に詳述する歴史的な経緯から、欧州諸国から干

渉を受けることに対しての警戒心が強く、それが IceLink実現の大きな障壁になっている。

アイスランドはヨーロッパからは 1000 km以上隔たった孤島ではあるが、周辺が豊かな漁場であることから、1950 年代から 1970 年代に掛けては水産資源の漁業権を巡り、ヨーロッパ諸国（特に英国と西ドイツ）との間では確執が絶えなかった。1958 年から1975年に掛けて、アイスランドが自国の領海を 4 海里から、12海里、50 海里、200海里と拡大する過程で、主に英国との間で深刻な衝突が生じた (Johannesson, 2004)。1970年代初めには英国が派遣した軍艦と（軍隊を保有しない）アイスランドの沿岸警備隊が互いに砲撃したり、英国と西ドイツが国際司法裁判所に提訴するなど紛争は拡大し、アイスランドは英国との断交を仄めかす程であった。漁業権を巡る紛争は、1970年代半ばに英国がアイスランドに対して譲歩する形で決着したが、アイスランドの国民に英国をはじめとするヨーロッパ諸国への強い不信感を抱かせる結果となった。

また、アイスランド国民の欧州諸国への不信感とは別に、アイスランドと英国などの欧州諸国との関係に起因する 2つのリスクが、IceLinkへの資金調達上の外政的要因として存在している。

まず第一に、資金調達に係るリスクがある。2008 年の金融危機では、英国を始めとした欧州諸国の預金者にも損失が発生しており、Landsbanki銀行のIcesave 問題に関しては、2011 年末にアイスランド政府がEFTA裁判所に訴訟される事態に至っている (Ministry for Foreign Affairs of Iceland, 2014; 布田, 2012)。このような状況下で、IceLinkの実施に当たり外国の金融機関（ファイナンサー）から長期的に安定した資金供給を受けるには、相応の困難を伴うものと推察される (Jonsson, 2014)。なお、IceLinkに対

しすでに関心を表明している投資ファンドもあるが(Disruptive Capital Finance, 2014), 期待収益率等の条件が折り合うかは不明である.

第二のリスクは, 英国の(再生可能エネルギー起源の電力に対する)固定価格買取制度(FIT-CfD)に係るものである. IceLinkの収益性は, 固定価格買取制度における権利行使価格(strike price)が相対的に高いことに依存している. 同様のことはわが国でも観察されているが, IceLink ではアイスランドから見れば外国(英国)の制度を活用しており, アイスランドの国家としての裁量権の外にあるリスクを内包している点に注意しなければならない. すなわち, 一度何らかの事由で当初の計画通りに当該制度を利用することができなくなった場合, 救済を受けることが容易ではないと推察される. 但し, 固定価格買取制度における権利行使価格は, アイスランドに限らず全ての再生可能エネルギー起源の電力に適用され, また, 一意に英国の裁量権に委ねられる事項である. 従って, それにより生じるリスクは「商業ベースでの貿易」の枠組の中で考慮されるべきリスクであり, 英国とアイスランドの間での外交的な交渉の対象とされるべき性質の事項ではない.

5.2.2 プロジェクトの実施において想定されるリスク

文献調査、及び関係者へのインタビュー調査等の結果、IceLink プロジェクトを実施するに当たり、主なリスクとしては、次のようなものが存在していることがわかった（表 5-1 参照）。

まず、需要リスク（Demand Risk）が存在する。これは、アイスランドからの輸入電力に対する英国の需要が当初の想定を下回るリスクである。現在は、再生可能エネルギー由来の電力に対する需要が極めて旺盛であるが、今後、プロジェクトの全期間にわたって、同様の需要が見込める保証はない。なお、当該リスクは、英国の固定価格買取制度（FIT-CfD）を活用することにより、相当程度低減させることができるが、その場合には、後述の非常危険（Political Risks）を抱えることになる。

次に、供給リスク（Supply Risk）が存在する。アイスランドでは、現在、アルミニウム精錬業者が大口需要家となっており、政治的にも一定の影響力を持っているとのことであった。今後、国外へ電力を輸出することに対し、契約価格の上昇を懸念して、大口需要家が反対することも考えられる。その場合、当初の想定通り、輸出電力を確保できず、事業の収益性に悪影響を及ぼす恐れがある。

続いて、資金調達リスク（Funding Risk）が想定される。アイスランドの銀行は、2008年の金融危機の際、英国を始めとした欧州諸国の預金者に損失を与えており、訴訟にまで発展している。このような状況下で、IceLink の実施に当たり、外国の金融機関（ファイナンサー）から長期的に安定した資金供給を受けることには、相応の困難が伴うものと考えられる。また、資本コストも相対的に高くなることが予想されるこ

表 5-1 IceLink における主なリスク

需要リスク (Demand Risk)	アイスランドからの輸入電力に対する英国の需要が当初の想定を下回るリスク
供給リスク (Supply Risk)	大口需要家等の反対により, 当初の想定通り輸出電力を確保できないリスク
資金調達リスク (Funding Risk)	長期的に安定した資金供給を受けることに相応の困難が伴うリスク
非常危険 (Political Risks)	英国の政策変更の影響により, 事業の収益性が悪化するリスク

(出所)著者作成

とから, リスク調整後割引率については, より保守的に見積ることが求められるだろう。

そして, 前述のとおり, 非常危険 (Political Risks) も存在するものと考えられる。英国の再生可能エネルギー由来の電力に対する固定価格買取制度 (FIT-CfD) における権利行使価格 (strike price) は相対的に高く, このことが IceLink の収益性を高めていることは疑う余地がない。ただ, 他国である英国の制度に強く依存しているということは, 他国の政策変更の影響を強く受けることにもなる。したがって, 主なリスクの1つとして非常危険を認識し, 適切に対処していくことが求められる。

5.3 定量的分析

5.3.1 DCF 法による分析結果

DCF 法による分析結果は、以下のとおりである。なお、前提条件については、DECC(2013)やヒアリングの結果等を基に決定した（表 5-2 参照）。

表 5-2 DCF 法による評価の前提条件

売電価格	£ 100/MWh	リスク調整後 割引率	8.0 %
取引電力量	3.25 TWh	プロジェクト期間	25 年
設備投資額	£ 1.50 billion	(うち, 建設期間)	5 年
発電コスト	£ 27.25/MWh	負荷率	65 %

(出所)著者作成

まず、NPV を計算したところ、382.08[百万 £]（正值）との結果を得た。これは、設備投資額の約 25%に相当するものであり、十分な収益性を認めることができる。このように、DCF 法による結果からは、IceLink に事業可能性があると結論される。次に、各パラメータにストレスをかけた際の NPV に対する影響度を調べるため、表 5-3 に記載された範囲で、感度分析を実施したところ、次のような結果となった。なお、当該感度分析の範囲については、他の事例等を参考に設定している。

表 5-3 感度分析の範囲

売電価格	£ 55/MWh～£ 100/MWh (£ 5/MWh 刻み)
取引電力量	2.00 TWh～4.25 TWh (0.25 TWh 刻み)
設備投資額	£ 1.50 billion～£ 1.95 billion (£ 0.05 billion 刻み)
リスク調整後割引率	8.0%～12.5 % (0.5% 刻み)

(出所)著者作成

まず、売電価格については、 $\text{£}80/\text{MWh}$ ～ $\text{£}85/\text{MWh}$ の間で NPV の正負が入れ替わった (図 5-2 参照)。すなわち、売電価格がおよそ 2 割以上下がると、事業可能性が失われることになる。したがって、売電価格の変動要因となりうるリスク (需要リスク、非常危険など) には、特に留意する必要があるといえよう。

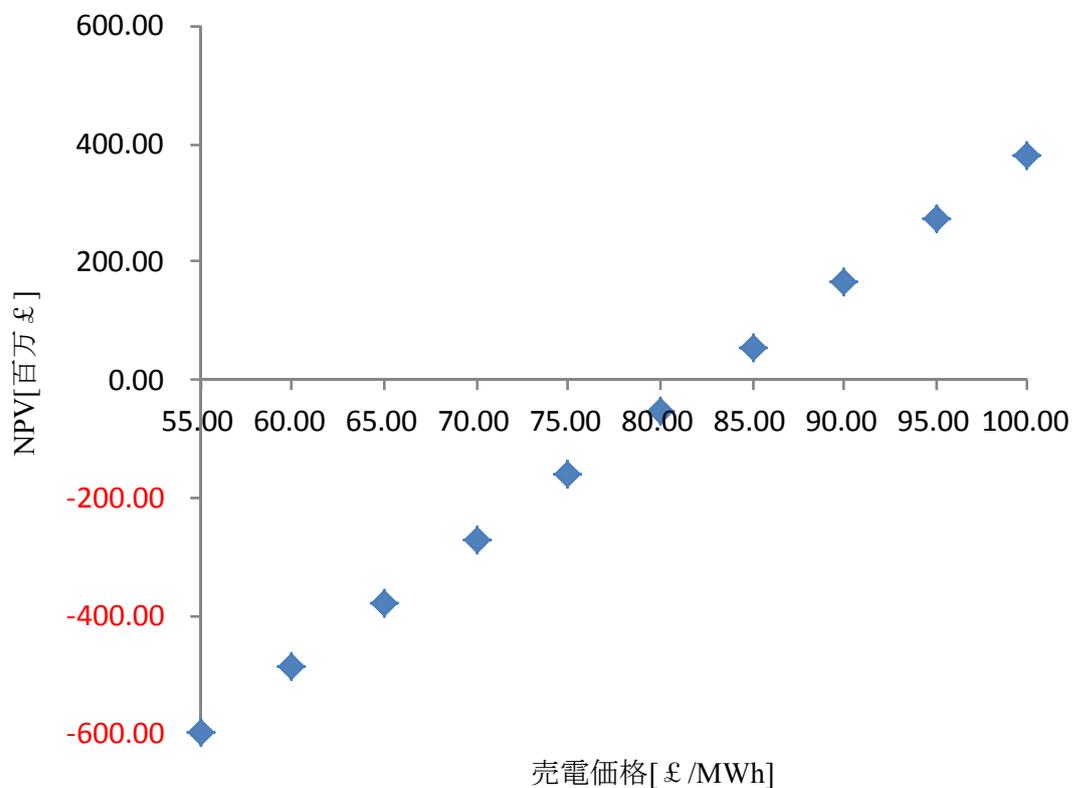


図 5-2 感度分析 (売電価格)

(出所)著者作成

次に、取引電力量であるが、2.25 TWh～2.50TWh の間で NPV の正負が入れ替わっている（図 5-3 参照）。これについても、およそ 2～3 割下がると事業可能性が失われるという結果になっており、関連するリスク（供給リスク、非常危険など）に留意する必要があることがわかる。

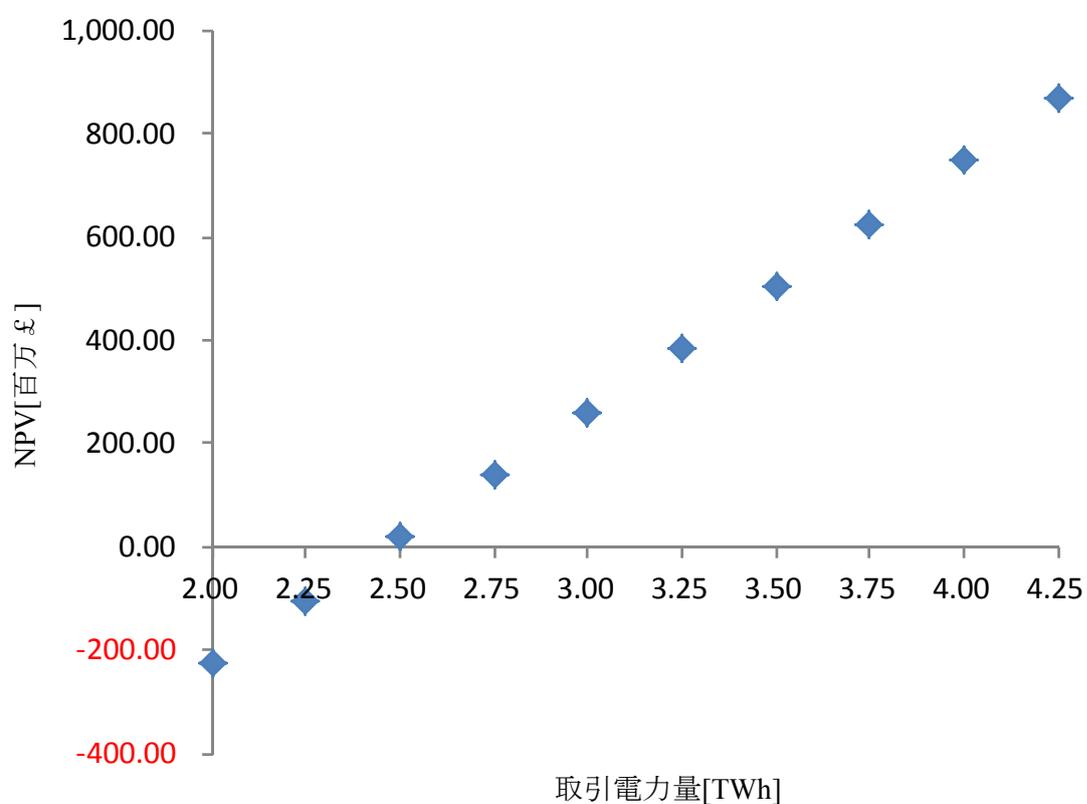


図 5-3 感度分析（取引電力量）

(出所)著者作成

また、設備投資額であるが、これについては、感度分析の範囲において NPV が負になることはなかった (図 5-4 参照).

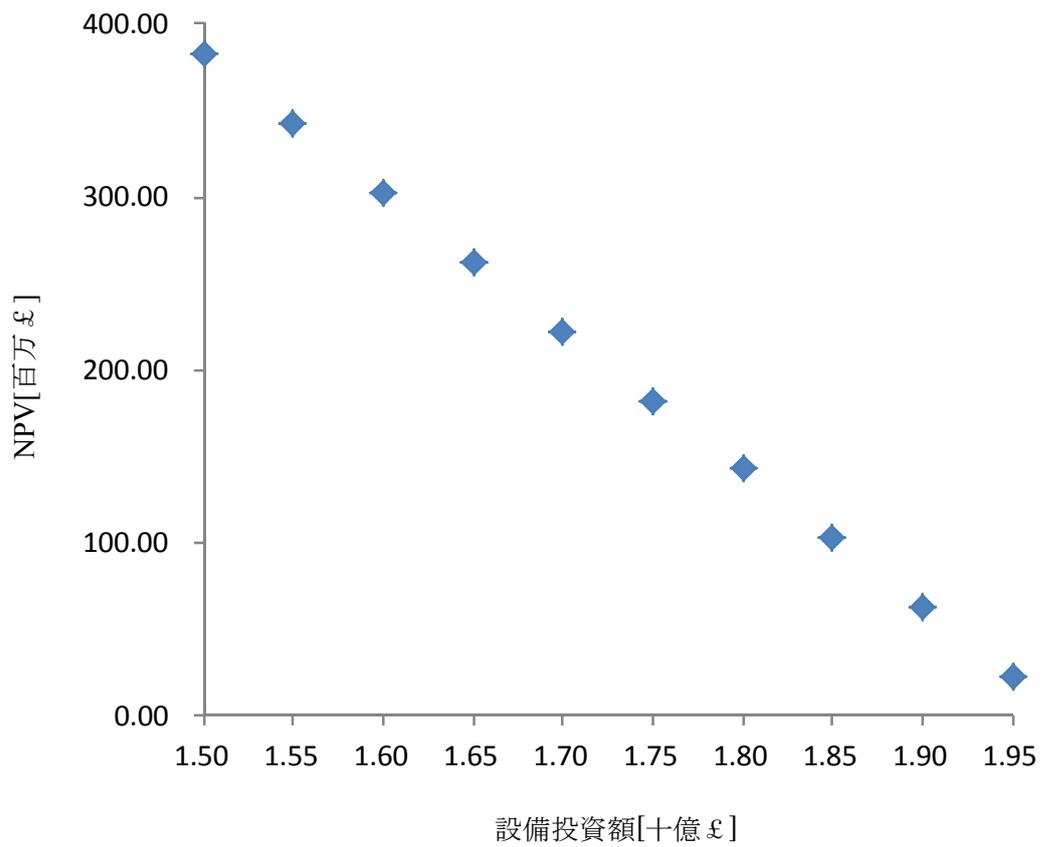


図 5-4 感度分析 (設備投資額)

(出所)著者作成

そして、リスク調整後割引率であるが、11.0%～11.5%の間でNPVの正負が入れ替わった(図5-5参照)。すなわち、リスク調整後割引率が11.0%を上回ると、事業可能性が失われることになる。一般に、先進国企業のリスク調整後割引率は5～10%程度といわれているが、アイスランドでは金融危機の影響が未だ残っており、他の先進国に比べて、相対的に高い値(10%以上)となる恐れがある。したがって、やはりIceLinkには資金調達リスクが存在しているものと考えられる。

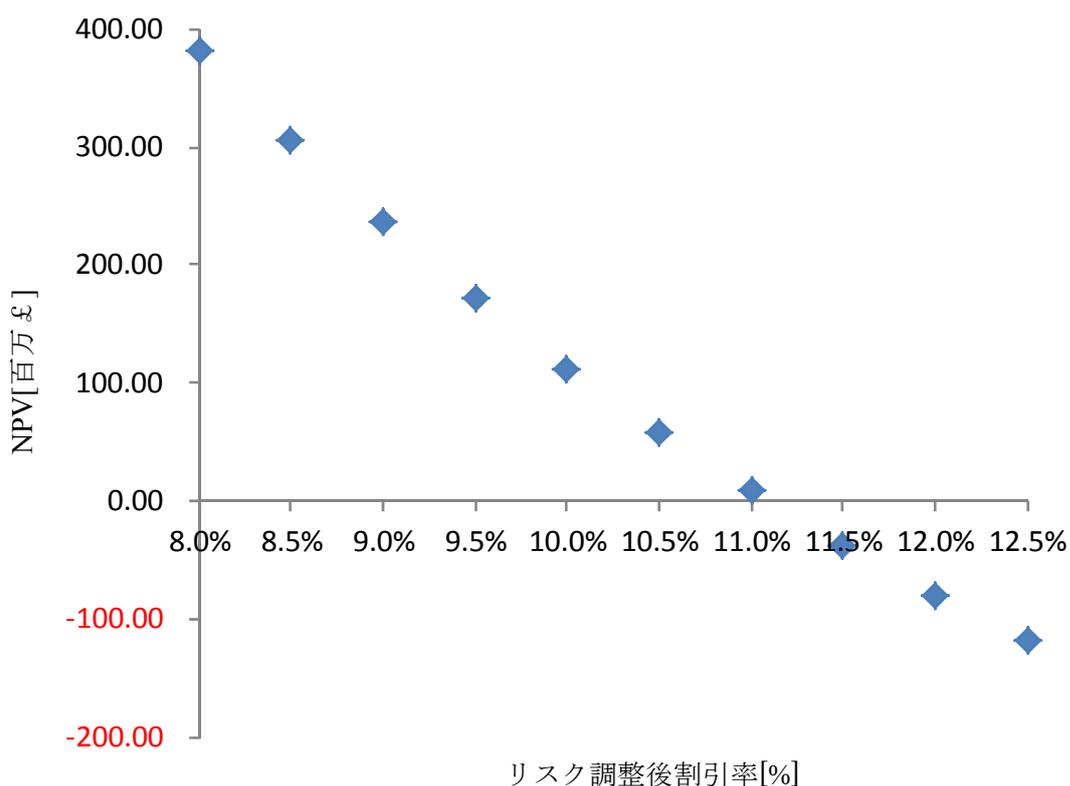


図 5-5 感度分析 (リスク調整後割引率)

(出所)著者作成

表 5-4 感度分析（売電価格×取引電力量）

【NPV】 [百万 £]		取引電力量[TWh]									
		2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25
売電価格 [£/MWh]	55.00	-826.96	-780.60	-734.24	-687.89	-641.53	-595.17	-548.82	-502.46	-456.10	-409.75
	60.00	-760.14	-705.43	-650.72	-596.01	-541.30	-486.59	-431.88	-377.17	-322.46	-267.75
	65.00	-693.32	-630.26	-567.19	-504.13	-441.07	-378.01	-314.95	-251.88	-188.82	-125.76
	70.00	-626.50	-555.08	-483.67	-412.25	-340.84	-269.42	-198.01	-126.59	-55.18	16.23
	75.00	-559.68	-479.91	-400.14	-320.37	-240.61	-160.84	-81.07	-1.31	78.46	158.23
	80.00	-492.86	-404.74	-316.62	-228.50	-140.38	-52.26	35.86	123.98	212.10	300.22
	85.00	-426.03	-329.56	-233.09	-136.62	-40.15	56.33	152.80	249.27	345.74	442.22
	90.00	-359.21	-254.39	-149.56	-44.74	60.09	164.91	269.74	374.56	479.39	584.21
	95.00	-292.39	-179.22	-66.04	47.14	160.32	273.49	386.67	499.85	613.03	726.20
	100.00	-225.57	-104.04	17.49	139.02	260.55	382.08	503.61	625.14	746.67	868.20

(出所)著者作成

表 5-5 感度分析（売電価格×設備投資額）

【NPV】 [百万 £]		設備投資額[十億 £]									
		1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90	1.95
売電価格 [£/MWh]	55.00	-595.17	-635.10	-675.03	-714.96	-754.88	-794.81	-834.74	-874.66	-914.59	-954.52
	60.00	-486.59	-526.52	-566.44	-606.37	-646.30	-686.23	-726.15	-766.08	-806.01	-845.93
	65.00	-378.01	-417.93	-457.86	-497.79	-537.72	-577.64	-617.57	-657.50	-697.42	-737.35
	70.00	-269.42	-309.35	-349.28	-389.20	-429.13	-469.06	-508.99	-548.91	-588.84	-628.77
	75.00	-160.84	-200.77	-240.69	-280.62	-320.55	-360.48	-400.40	-440.33	-480.26	-520.18
	80.00	-52.26	-92.18	-132.11	-172.04	-211.96	-251.89	-291.82	-331.75	-371.67	-411.60
	85.00	56.33	16.40	-23.53	-63.45	-103.38	-143.31	-183.24	-223.16	-263.09	-303.02
	90.00	164.91	124.98	85.06	45.13	5.20	-34.72	-74.65	-114.58	-154.51	-194.43
	95.00	273.49	233.57	193.64	153.71	113.79	73.86	33.93	-6.00	-45.92	-85.85
	100.00	382.08	342.15	302.22	262.30	222.37	182.44	142.52	102.59	62.66	22.73

(出所)著者作成

表 5-6 感度分析（売電価格×リスク調整後割引率）

【NPV】 [百万£]	リスク調整後割引率[%]										
	8.0%	8.5%	9.0%	9.5%	10.0%	10.5%	11.0%	11.5%	12.0%	12.5%	
売電価格 [円/MWh]	55.00	-595.17	-614.59	-631.82	-647.05	-660.48	-672.27	-682.56	-691.49	-699.19	-705.76
	60.00	-486.59	-512.32	-535.41	-556.09	-574.58	-591.08	-605.76	-618.79	-630.31	-640.46
	65.00	-378.01	-410.05	-439.00	-465.12	-488.68	-509.89	-528.97	-546.09	-561.44	-575.16
	70.00	-269.42	-307.78	-342.59	-374.16	-402.78	-428.70	-452.17	-473.39	-492.57	-509.86
	75.00	-160.84	-205.51	-246.18	-283.19	-316.88	-347.52	-375.38	-400.70	-423.69	-444.56
	80.00	-52.26	-103.24	-149.77	-192.23	-230.97	-266.33	-298.58	-328.00	-354.82	-379.26
	85.00	56.33	-0.97	-53.36	-101.26	-145.07	-185.14	-221.79	-255.30	-285.95	-313.96
	90.00	164.91	101.30	43.05	-10.30	-59.17	-103.95	-144.99	-182.60	-217.07	-248.66
	95.00	273.49	203.57	139.46	80.67	26.73	-22.77	-68.20	-109.90	-148.20	-183.36
	100.00	382.08	305.84	235.87	171.63	112.63	58.42	8.60	-37.21	-79.32	-118.06

(出所)著者作成

表 5-7 感度分析（取引電力量×設備投資額）

【NPV】 [百万£]	設備投資額[十億£]										
	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90	1.95	
取引電力量 [MWh]	2.00	-225.57	-265.50	-305.43	-345.35	-385.28	-425.21	-465.13	-505.06	-544.99	-584.92
	2.25	-104.04	-143.97	-183.90	-223.82	-263.75	-303.68	-343.60	-383.53	-423.46	-463.39
	2.50	17.49	-22.44	-62.37	-102.29	-142.22	-182.15	-222.07	-262.00	-301.93	-341.86
	2.75	139.02	99.09	59.16	19.24	-20.69	-60.62	-100.54	-140.47	-180.40	-220.33
	3.00	260.55	220.62	180.69	140.77	100.84	60.91	20.99	-18.94	-58.87	-98.80
	3.25	382.08	342.15	302.22	262.30	222.37	182.44	142.52	102.59	62.66	22.73
	3.50	503.61	463.68	423.75	383.83	343.90	303.97	264.05	224.12	184.19	144.26
	3.75	625.14	585.21	545.28	505.36	465.43	425.50	385.58	345.65	305.72	265.79
	4.00	746.67	706.74	666.81	626.89	586.96	547.03	507.11	467.18	427.25	387.32
	4.25	868.20	828.27	788.34	748.42	708.49	668.56	628.64	588.71	548.78	508.85

(出所)著者作成

表 5-8 感度分析（取引電力量×リスク調整後割引率）

【NPV】		リスク調整後割引率[%]									
[百万£]		8.0%	8.5%	9.0%	9.5%	10.0%	10.5%	11.0%	11.5%	12.0%	12.5%
取引電力量 [MW]	2.00	-225.57	-266.48	-303.65	-337.42	-368.09	-395.92	-421.16	-444.04	-464.75	-483.49
	2.25	-104.04	-152.02	-195.75	-235.61	-271.94	-305.05	-335.21	-362.67	-387.67	-410.40
	2.50	17.49	-37.55	-87.84	-133.80	-175.80	-214.18	-249.26	-281.30	-310.58	-337.32
	2.75	139.02	76.91	20.06	-31.99	-79.65	-123.31	-163.30	-199.94	-233.50	-264.23
	3.00	260.55	191.37	127.97	69.82	16.49	-32.45	-77.35	-118.57	-156.41	-191.15
	3.25	382.08	305.84	235.87	171.63	112.63	58.42	8.60	-37.21	-79.32	-118.06
	3.50	503.61	420.30	343.78	273.44	208.78	149.29	94.55	44.16	-2.24	-44.98
	3.75	625.14	534.77	451.68	375.26	304.92	240.16	180.50	125.53	74.85	28.11
	4.00	746.67	649.23	559.59	477.07	401.06	331.03	266.45	206.89	151.93	101.19
	4.25	868.20	763.69	667.49	578.88	497.21	421.89	352.40	288.26	229.02	174.28

(出所)著者作成

表 5-9 感度分析（リスク調整後割引率×設備投資額）

【NPV】		設備投資額[十億£]									
[百万£]		1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90	1.95
リスク調整後割引率 [%]	8.0%	382.08	342.15	302.22	262.30	222.37	182.44	142.52	102.59	62.66	22.73
	8.5%	305.84	266.43	227.03	187.62	148.21	108.81	69.40	29.99	-9.41	-48.82
	9.0%	235.87	196.97	158.08	119.18	80.29	41.39	2.49	-36.40	-75.30	-114.20
	9.5%	171.63	133.24	94.84	56.44	18.05	-20.35	-58.75	-97.15	-135.54	-173.94
	10.0%	112.63	74.72	36.82	-1.09	-39.00	-76.91	-114.81	-152.72	-190.63	-228.54
	10.5%	58.42	20.99	-16.43	-53.86	-91.29	-128.72	-166.15	-203.58	-241.01	-278.43
	11.0%	8.60	-28.36	-65.32	-102.28	-139.24	-176.20	-213.16	-250.11	-287.07	-324.03
	11.5%	-37.21	-73.70	-110.20	-146.70	-183.20	-219.70	-256.20	-292.70	-329.20	-365.70
	12.0%	-79.32	-115.37	-151.42	-187.47	-223.52	-259.56	-295.61	-331.66	-367.71	-403.75
	12.5%	-118.06	-153.67	-189.27	-224.88	-260.48	-296.09	-331.70	-367.30	-402.91	-438.51

(出所)著者作成

5.3.2 リアルオプションに関する分析結果

続いて、リアルオプション（事業撤退オプション）に係るオプション価値の算出結果を示す。なお、前提条件は、表 5-10 に掲げたとおりである。

まず、ヨーロピアンについては、表 5-11 に示したとおり、156.76[百万円]という値であった。これは、NPV（382.08[百万円]）のおよそ4割に相当している。このオプションを保有していれば、満期時に一定の行使価格（今回のシミュレーションでは建設期間（5年）終了後の事業価値（NPV））で事業を売却できることから、前述の各種リスクが顕在化した場合であっても、事業主体が損害を被ることはなくなる。

表 5-10 オプション価値の算出に係る前提条件

現在価値 (NPV)	382.08 [百万円]	満期までの 期間	5年
ボラティリティ	20.0%	行使価格	561.40
無リスク 利子率	2.0%	(行使価格については、 建設期間（5年）終了後の 事業価値（NPV）とした)	

(出所)著者作成

表 5-11 オプション価値の算出結果

ヨーロピアン	156.76[百万 £] (NPVの41%に相当)
アメリカン	180.57[百万 £] (NPVの47%に相当)
満期前行使の価値	23.81[百万 £] (NPVの6%に相当)
満期前 行使割合	96.7%

(出所)著者作成

続いて、アメリカンであるが、LSM 法によるシミュレーションでは、180.57[百万 £] という結果になった。これは、NPV (382.08[百万 £]) のおよそ 5 割に相当する。いずれのオプションについても、NPV より小さい値となっていることから、リスクヘッジとして活用可能であるものと考えられる。すなわち、事業開始の段階で事業撤退オプションを購入したとしても、NPV は負にならないため、依然として事業可能性が認められるのである。ここで、ヨーロピアンとアメリカンでは、23.81[百万 £]の差が生じているが、これは満期前行使の価値である。ちなみに、今回のシミュレーションでは、満期前に行使する割合が 96.7%となり、アメリカンの場合、ほぼ満期前に行使することがわかった。

また、オプション価値（アメリカン）及び満期前行使確率について、ボラティリティと行使価格に関する感度分析を実施したところ、次のような結果となった（感度分析の範囲は、ボラティリティについて 10.0%～100.0%（10.0%刻み）、行使価格について 382.08[百万£]～561.40[百万£]（17.9[百万£] 刻み）とした）。

まず、オプション価値（アメリカン）は、ボラティリティが大きくなればなるほど、また、行使価格が高くなればなるほど、大きな値をとることがわかる（図 5-6、図 5-7 参照）。

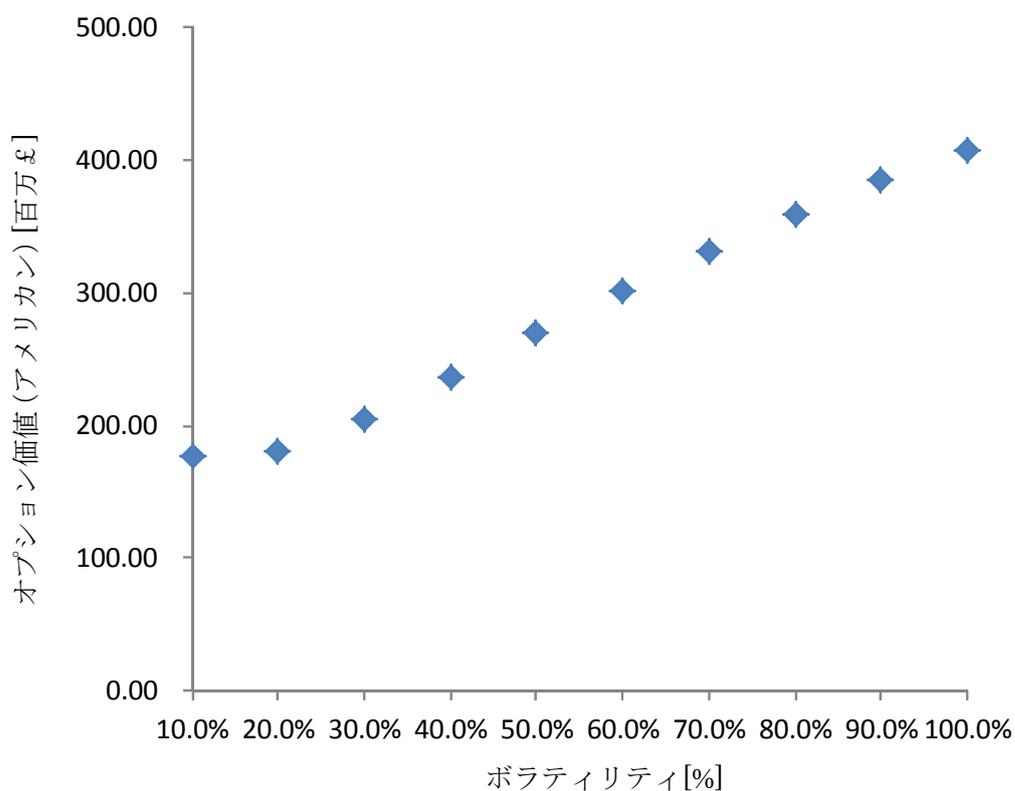


図 5-6 感度分析[オプション価値]（ボラティリティ）

(出所)著者作成

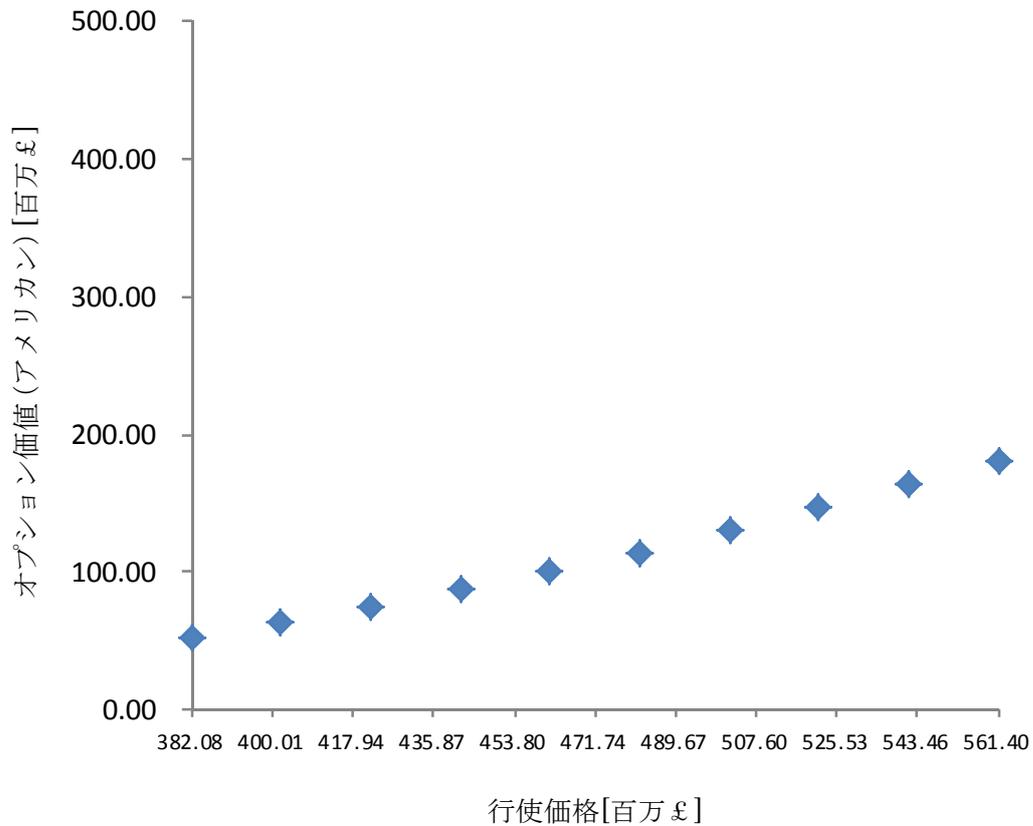


図 5-7 感度分析[オプション価値] (行使価格)

(出所)著者作成

これは、オプションの性質に鑑みれば当然の結果であるが、注目すべきは、ボラティリティが 90%を超えると、オプションの価値が当初の事業価値 (NPV) を上回る点である。この場合は、オプション料 (premium) を支払うと NPV が負になってしまうことから、リスクヘッジの目的でリアルオプションを導入することができない。

続いて、満期前行使確率であるが、いずれのケースにおいても、80%以上となっている(図 5-8, 図 5-9 参照)。したがって、オプションの種類をアメリカンとした場合、シミュレーション上は高い確率で満期前行使することになるのであるが、実際のところ、国家的なインフラ事業である IceLink において、満期前行使(事業移転)を前提にオプション取引が行われることは想定し難い。

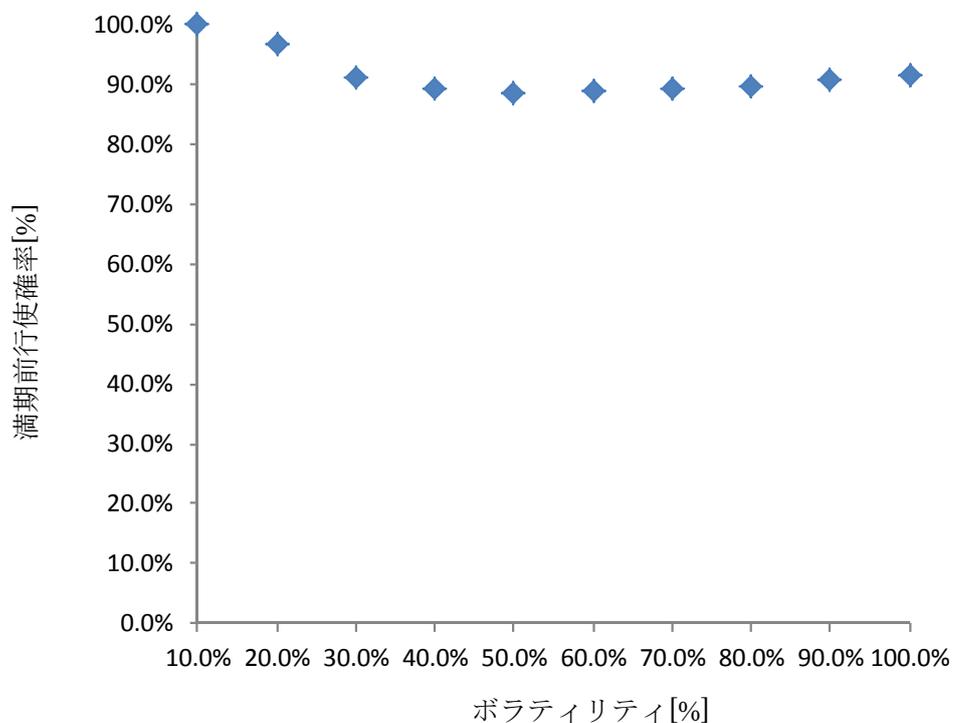


図 5-8 感度分析[満期前行使確率] (ボラティリティ)

(出所)著者作成

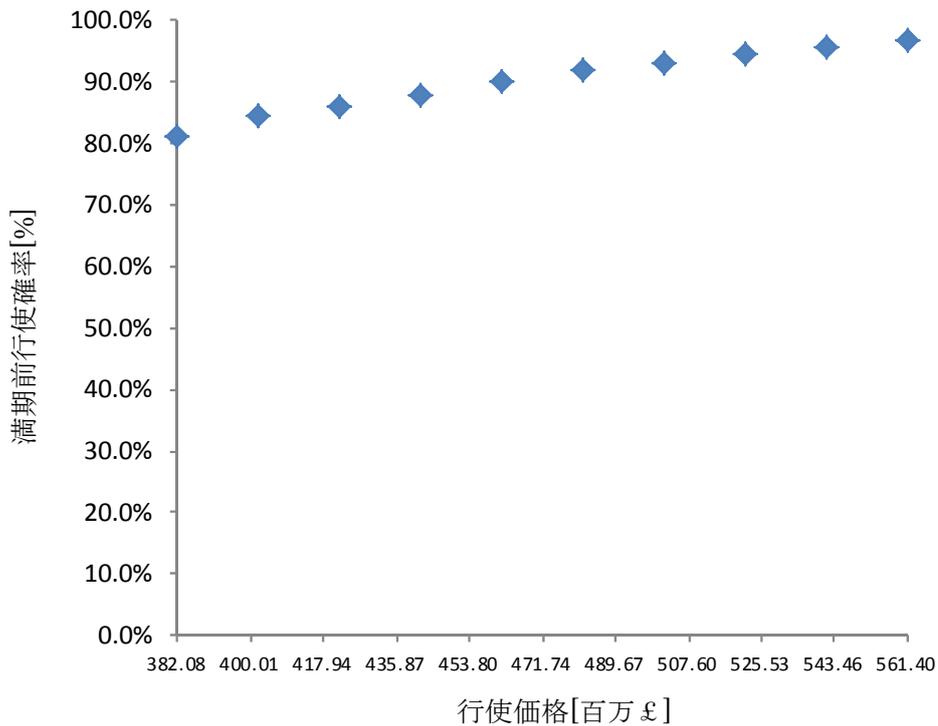


図 5-9 感度分析[満期前行使確率] (行使用格)

(出所)著者作成

本研究では、リアルオプションをリスクヘッジの一形態と捉えており、単なる金融取引とは考えていない。以上の議論を踏まえると、IceLinkなどの電力貿易実務において応用することが可能なオプションは、アメリカンよりもヨーロピアンの方であるものと思料される。

なお、その他、ボラティリティ及び行使用格に係る感度分析に関する詳細なシミュレーション結果は、次頁以降の表（表 5-12, 表 5-13, 表 5-14, 表 5-15）に示すとおりである。

表 5-12 感度分析[オプション価値 (アメリカン)] (ボラティリティ×行使価格)

オプション 価値 (アメリカン) [百万円]		行使価格[百万円]									
		382.08	402.00	421.93	441.85	461.78	481.70	501.62	521.55	541.47	561.40
ボラ ティ リ テ ィ [%]	10.0%	21.33	31.32	44.13	59.90	78.04	97.27	117.04	136.87	156.70	176.52
	20.0%	51.95	62.51	74.32	86.81	100.51	114.98	130.68	146.52	163.63	180.57
	30.0%	82.94	94.49	106.57	119.39	132.39	146.01	160.35	175.24	190.49	205.79
	40.0%	113.25	125.45	138.14	151.49	164.93	178.83	192.75	207.57	222.29	237.14
	50.0%	142.03	155.17	168.34	182.20	196.37	210.70	225.04	239.87	254.99	269.75
	60.0%	169.19	183.33	197.62	211.62	226.06	240.78	255.13	270.59	286.20	301.37
	70.0%	194.83	209.55	224.06	238.57	254.14	269.43	284.30	300.20	315.73	331.54
	80.0%	218.50	233.32	249.02	264.44	279.29	295.03	311.32	326.92	343.85	360.17
	90.0%	239.62	255.17	271.44	287.00	302.98	319.33	335.81	352.07	368.28	384.92
	100.0%	258.77	274.80	291.38	307.30	324.20	341.06	358.01	374.60	391.46	408.37

(出所)著者作成

表 5-13 感度分析[オプション価値 (ヨーロピアン)] (ボラティリティ×行使価格)

オプション 価値 (ヨーロピアン) [百万円]		行使価格[百万円]									
		382.08	402.00	421.93	441.85	461.78	481.70	501.62	521.55	541.47	561.40
ボラ ティ リ テ ィ [%]	10.0%	17.38	24.83	33.85	44.37	56.28	69.40	83.56	98.59	114.32	130.62
	20.0%	47.78	57.21	67.43	78.38	90.03	102.31	115.17	128.57	142.44	156.76
	30.0%	78.43	89.05	100.17	111.78	123.84	136.30	149.16	162.37	175.91	189.76
	40.0%	108.20	119.78	131.72	144.01	156.62	169.53	182.71	196.16	209.85	223.77
	50.0%	136.61	149.03	161.73	174.69	187.89	201.31	214.95	228.79	242.81	257.01
	60.0%	163.35	176.53	189.92	203.52	217.30	231.26	245.39	259.67	274.09	288.66
	70.0%	188.18	202.04	216.08	230.27	244.61	259.09	273.71	288.44	303.29	318.25
	80.0%	210.95	225.43	240.04	254.79	269.65	284.62	299.70	314.88	330.14	345.50
	90.0%	231.56	246.59	261.73	276.98	292.32	307.74	323.25	338.84	354.50	370.24
	100.0%	249.99	265.51	281.12	296.81	312.58	328.41	344.32	360.29	376.31	392.39

(出所)著者作成

表 5-14 感度分析[満期前行使の価値] (ボラティリティ×行使価格)

満期前行使の 価値 [百万円]		行使価格[百万円]									
		382.08	402.00	421.93	441.85	461.78	481.70	501.62	521.55	541.47	561.40
ボラ ティ リ テ ィ [%]	10.0%	3.95	6.49	10.28	15.53	21.76	27.87	33.48	38.28	42.37	45.90
	20.0%	4.17	5.31	6.89	8.43	10.48	12.67	15.51	17.95	21.19	23.81
	30.0%	4.51	5.45	6.40	7.60	8.56	9.70	11.19	12.87	14.58	16.03
	40.0%	5.05	5.68	6.42	7.48	8.32	9.31	10.04	11.41	12.44	13.37
	50.0%	5.42	6.14	6.61	7.51	8.49	9.38	10.09	11.08	12.18	12.74
	60.0%	5.84	6.80	7.70	8.11	8.76	9.52	9.74	10.92	12.11	12.71
	70.0%	6.64	7.51	7.98	8.30	9.53	10.34	10.60	11.76	12.44	13.30
	80.0%	7.55	7.89	8.97	9.65	9.64	10.41	11.62	12.05	13.70	14.68
	90.0%	8.06	8.58	9.71	10.03	10.66	11.58	12.56	13.23	13.78	14.68
	100.0%	8.79	9.29	10.26	10.49	11.63	12.65	13.69	14.31	15.15	15.97

(出所)著者作成

表 5-15 感度分析[満期前行使割合] (ボラティリティ×行使価格)

満期前行使割合 [%]		行使価格[百万円]									
		382.08	402.00	421.93	441.85	461.78	481.70	501.62	521.55	541.47	561.40
ボラティリティ [%]	10.0%	87.5%	91.4%	95.3%	97.7%	99.2%	99.8%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
	20.0%	81.7%	83.9%	86.3%	87.8%	89.8%	91.7%	93.0%	94.9%	95.8%	96.7%
	30.0%	81.0%	82.6%	83.8%	85.6%	86.4%	87.6%	88.3%	89.7%	90.5%	91.3%
	40.0%	81.3%	83.0%	83.6%	84.8%	86.0%	86.9%	87.6%	88.4%	89.1%	89.5%
	50.0%	83.0%	83.0%	85.3%	84.9%	86.0%	86.5%	86.6%	87.6%	88.2%	88.6%
	60.0%	84.1%	84.1%	85.3%	86.5%	86.4%	87.4%	87.1%	87.5%	87.3%	89.1%
	70.0%	85.1%	84.6%	85.5%	86.7%	87.4%	87.7%	88.2%	89.0%	89.6%	89.5%
	80.0%	86.1%	87.0%	88.4%	87.6%	88.2%	87.7%	89.7%	89.1%	89.0%	89.7%
	90.0%	87.5%	87.7%	88.9%	89.4%	89.7%	89.8%	89.1%	91.6%	90.4%	90.8%
	100.0%	87.4%	88.3%	88.8%	89.9%	90.8%	90.0%	90.2%	91.0%	91.3%	91.5%

(出所)著者作成

5.4 まとめ

本章では、IceLinkプロジェクトについて、定性的側面と定量的側面の両面から分析を行った。

まず、定性的な分析の結果、IceLinkには、需要リスク、供給リスク、資金調達リスク、非常危険といったリスクが存在することがわかった。ただ、再生可能エネルギーに対する需要は世界的に見ても旺盛であり、各国が固定価格買取制度のような制度的枠組みを提供している点に鑑みると、これらのリスクの多くが他の電力貿易プロジェクトにも内在しているものと推察される。

また、定量的な分析（DCF法）の結果、定性的な分析で指摘されたリスクが、事業の収益性に大きな影響を及ぼす可能性があることが確認された。

そして、リアルオプションの考え方を導入した結果であるが、IceLinkにおいては、事業撤退オプションに係るオプション料（premium）を支払ったとしても、NPVが負にはならなかった。したがって、予め当該オプションを保有することにより、前述の各種リスクが顕在化した場合であっても、事業主体は損害を受けずに済むことになる。換言すれば、オプションを使ったリスクヘッジが可能になるということである。なお、シミュレーションの結果、アメリカンの場合は、満期前行使確率がかなり高い値となったことから、実務上応用可能なオプションは、ヨーロピアンの方であると考えられる。

本章における分析の結果、IceLinkプロジェクトにおけるリスクがより明確になるとともに、一定の仮定の下で、ヘッジの一形態としてリアルオプション（事業撤退オプ

ション) の導入可能性が認められた。前述のように、IceLinkに対して関心を表明している投資ファンドもあり(Disruptive Capital Finance, 2014)、プロジェクトファイナンスを組成する際に、リアルオプションを導入してリスクヘッジを図ることも想定されよう。とりわけ、年金基金からの資金拠出を前提としたスキームの場合、期待収益率が若干低下してもリスクを軽減する方が好まれるものと思料される。なお、Landsvirkjun社からは、本研究の成果であるリアルオプションを用いたリスクヘッジに対し、高い関心が示されているところである。

6 CASA-1000 に関する分析結果，及び考察

6.1 CASA-1000 プロジェクトの概要

CASA-1000 (Central Asia South Asia Electricity Transmission and Trade Project) は，2006年以降，タジキスタン，キルギス共和国，アフガニスタン，パキスタンの4ヶ国が，中央アジアの水力発電を利用した中央アジア・南アジア間の国際電力貿易の実現にむけて合意し，世界銀行を中心とした国際金融機関の支援のもと立ち上げられたプロジェクトである(SNC-Lavalin, 2011). 図 6-1に示すように，CASA-1000は，1,200kmの送電線を敷設し，タジキスタン，さらに将来的にはキルギス共和国から，夏期に発生する余剰電力1,300MWをアフガニスタン経由でパキスタンに供給するという計画である．この計画の実現により，アフガニスタンとパキスタンにおける電力不足の解消，電力輸出国の外貨収入増大による経済発展，アフガニスタンの復興および社会的安定に寄与することなどが国際社会から期待されている．



図 6-1 CASA-1000 における送電イメージ
(出所)中山ほか(2015)

6.2 定性的分析

6.2.1 文献調査結果等の整理

CASA-1000はタジキスタンと隣国ウズベキスタンとの間に対立を引き起こす結果となっている。タジキスタンの水力発電所はそのほとんどが旧ソ連時代に計画され、建設が進められたものである。そのひとつに、タジキスタンに建設中の「ログン(Rogun)水力発電所」がある。ログン水力発電所は、旧ソ連時代にアムダリア川の支流であるバフシ(Vaksh)川で建設が開始され、完成すれば発電量 3,600MW、堤高 335mの世界最大のダムになる予定である。しかし旧ソ連の崩壊、独立後の内戦、洪水などの出来事により建設が度々中断されており、現在も建設は中断状態にある。

近年、CASA-1000 の計画により、タジキスタン政府のログン水力発電所建設の再開に対する期待が高まっている。自国の財源のみで水力発電所を建設することが困難であるタジキスタンにとって、CASA-1000は国際社会の支援を得てログン水力発電所建設を推進する機会として捉えられた。しかし実際CASA-1000 のフィージビリティ・スタディを実施したSNC-Lavalin (2011)によれば、同プロジェクトは新規の発電施設を建設しなくとも経済的利益は確保されると結論づけている。また CASA-1000を支援する主要なドナーである世界銀行も CASA-1000 とログン水力発電所の関連性を否定している。それはCASA-1000 の計画では、夏期のみ電力供給が想定されており、キルギスタンとタジキスタンは既存の発電設備により夏期に十分な余剰電力が確保しうるからである(Asia Times, 2013)。

一方、タジキスタンのエモマリ・ラフモン大統領は、ログン水力発電所なくして CASA-1000 の経済的利益は確保できないと公言している(Asia Times, 2013)。このタジキスタンのログン水力発電所をめぐる思惑に対して、アムダリア川の下流国ウズベキスタンは強く反発している。中央アジアにおいて国際電力貿易が促進されることで上流国タジキスタンに水力発電所を建設する動機を与えることをウズベキスタンは懸念している。ウズベキスタンは CASA-1000がログン水力発電所建設と結び付けられる限り、CASA-1000 の計画にも反対するとも主張している。このウズベキスタンの反発が要因のひとつとなりプロジェクトの進展が遅れていると同時に、タジキスタンとウズベキスタンの関係も悪化する事態に陥っている。

先にも述べたように、現状では、CASA-1000を実現する上でログン水力発電所の建設は必ずしも必要ではないと指摘されている。しかしタジキスタン国民にとってログン水力発電所はもはや国の経済発展のための象徴にもなっている。Laruelle & Peyrose (2013)は、近年、ログン水力発電所プロジェクトに対する国民の政治的圧力が強まっており、プロジェクトの失敗はタジキスタン大統領の正当性をも脅かしかねないと指摘している。これまでもタジキスタン政府は、ログン水力発電所建設が国内の電力不足を解決し、経済発展を実現するための突破口になりうると主張する (Marat, 2010) など、電力不足に苦しむ国民に対して水力発電所建設の正当性をアピールしてきた。つまり、国内ではログン水力発電所建設は国内の政治的安定を維持するためのプロパガンダとしての役割も果たしている。

ログン水力発電所は近隣国に対するタジキスタンの国威発揚のツールとしても捉えられている傾向がある。ログン水力発電所は完成されれば世界最大の堤高 (335m) を

有するダムとなる予定であるが、これに対してウズベキスタンは、災害などでダムが決壊した際、下流域が大規模な洪水の被害を受けることに強い懸念を示してきた (Republic of Uzbekistan, 2010)。これまでも国際機関やウズベキスタンはダムの堤高を低くするよう警告してきたが、タジキスタン大統領はこの提案を受け入れていない。

Sodiqov (2012)は、タジキスタンがログンダムを建設することで国際河川の流れをコントロールすることを可能にしようとしていると指摘している。タジキスタンのログン水力発電所建設は国威発揚とも受け取られ、ウズベキスタンからの合意を得ることをますます困難にする要因になっていると考えられる。

CASA-1000の実現を阻害する外政的要因のひとつはログン水力発電所建設に対するウズベキスタンの反発である。ウズベキスタンは水資源配分の問題をログン水力発電所建設に反対する主な理由として挙げている。

ウズベキスタンの主要な産業のひとつは農業であり、とくに綿花は旧ソ連時代から続く国の経済を支える主要な輸出産業である。綿花の栽培は夏期に多量の水を必要とする。そこで旧ソ連時代には、ウズベキスタンなど下流国の綿花産業を支えるため、冬期にタジキスタンやキルギス共和国など上流国の貯水池に水を貯め、夏期に放水するかわりに、下流国は冬期に電力が不足する上流国に対して電力や天然ガスを供給する「水とエネルギーのバーター」の仕組みが機能していた。しかし旧ソ連の崩壊にともない、中央アジア諸国が独立国家となったことで、この仕組みも徐々に崩壊している。タジキスタンのログン水力発電所建設によって、ウズベキスタンでは夏期の綿花栽培に必要な水供給を十分得られず、綿花産業に悪影響が及ぼされること、さらにはタジキスタンが国内への電力供給を目的として冬期に大量の放水を行う場合には、下

流国が洪水被害を受けることをウズベキスタンは懸念している。

ウズベキスタンはログン水力発電所に反発する背景には、政治的な思惑も影響していると考えられる。ウズベキスタンは他の中央アジア諸国全てと国境を接する唯一の国であり、旧ソ連時代から地域を横断する鉄道、ガスパイプライン、電力網などのインフラをコントロールする中心的な役割を担ってきた。そのような地政学的な優位性に加え、地域において比較的経済力が大きいこと、人口の多さ、資源の豊富さなどの優位性をもっている。Spechler & Spechler (2009)の指摘では、ウズベキスタンは自国が地域においてもっとも力のある国であると自認し、また他のすべての中央アジア諸国と国境を接する国であることから中央アジアの覇権国であるのは当然と認識している。また Bohr (2004)は、旧ソ連崩壊後、ウズベキスタンはモスクワに代わる地域の覇権国としての立場を強固なものとしていると指摘する。

このように地域の覇権国であるウズベキスタンにとって、タジキスタンのログン水力発電所の建設は、地域における覇権国としての地位を脅かす脅威にもなりかねない。もしもタジキスタンとウズベキスタンの間で水資源を巡る係争が生じた場合、ログン水力発電所が交渉過程においてタジキスタンに優位性を与えることをウズベキスタンは懸念している (Asia Times, 2012)。

恩賀(2013)は、ウズベキスタンは近隣諸国同士が合意を結び電力貿易を開始することはそれが自国の不利益につながるとして好ましく思わない傾向があると指摘している。たとえば、現在、ウズベキスタンとタジキスタンの両国ともアフガニスタンと二国間で電力取引をしているが、タジキスタンの自国産電力価格が 3.5 セント/kWhであるのに対し、ウズベキスタンのアフガニスタン向け電力価格は 7.5セント/kWhであるため、

ウズベキスタンはタジキスタン産電力の低価格に脅威を感じている(稲垣, 2012). 実際, ウズベキスタンはアフガニスタンに対してタジキスタンから電力を輸入しないよう求め, 要求に従わない場合は, アフガニスタンへの電力供給を停止すると圧力をかけるなど(恩賀, 2013), しばしば征圧的な外交政策もとってきた.

このように, 地域において自国の優位性を維持することが重要である地域の大国ウズベキスタンからの経済的あるいは政治的な思惑を背景とした反発は, タジキスタンが水力発電によって新規に電力輸出する際の主な阻害要因の一つになっている.

6.2.2 プロジェクトの実施において想定されるリスク

文献調査結果等を踏まえると、CASA-1000 プロジェクトには、主なリスクとして、次のようなものが存在していることがわかる（表 6-1 参照）。

まず、最も大きなリスクは、非常危険（Political Risks）であろう。地域の大国ウズベキスタンからの経済的あるいは政治的な思惑を背景とした反発は、プロジェクトの遂行上、看過することはできないものである。したがって、何らかのリスクヘッジを講じることが不可欠であるものと思料される。

次に、需要リスク（Demand Risk）も存在するものと考えられる。具体的には、パキスタンの電力需要が減少し、送電量が下振れするリスクである。このことに関して、中国がパキスタンへ 3.2 GW の電力輸出を行うことを申し出ている（Pakistan Observer, 2013）。この申し出は、2013 年 10 月に中国当局から Punjab 州首相に対してなされたものである。このように、パキスタンと中国は、経済関係の強化を積極的に推し進めており、今後、中国からパキスタンに対して、さらなる電力輸出が計画される場合は、CASA-1000 プロジェクトの遂行に少なからず影響を及ぼすものと考えられる。

続いて、供給リスク（Supply Risk）も想定されるだろう。CASA-1000 プロジェクトは、タジキスタンで夏期に発生する余剰電力をパキスタンに供給するというものだが、今後、タジキスタン国内における電力需要が想定以上に増加することも考えられる。この場合、当初の送電量を確保できなくなり、プロジェクト収支が悪化してしまう。

表 6-1 CASA-1000 における主なリスク

非常危険 (Political Risks)	地域の大国であるウズベキスタンの反発・妨害により、事業が頓挫するリスク
需要リスク (Demand Risk)	他（例：中国）からの電力輸入により、需要が当初の想定を下回るリスク
供給リスク (Supply Risk)	供給側の国内における電力需要の増加により、当初の想定通り輸出電力を確保できないリスク

(出所)著者作成

6.3 定量的分析

6.3.1 DCF 法による分析結果

DCF 法による分析結果は、以下のとおりである。なお、表 2 に示したプロジェクトのキャッシュフローについては、World Bank(2014)で提供されているキャッシュフローの将来推計における数値を基にしている。なお、WACC については、民間資金の導入可能性を検証するため、World Bank(2014)では 2.1%であったものを 10.0%に変更している（特に注釈のない限り、以下同様）。

表 6-2 CASA-1000 のキャッシュフロー推計（WACC=10.0%）

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Cash Inflow	USD Million					418	418	418	418
Cash Outflow	USD Million					57	58	59	60
Investment	USD Million	104	311	414	207				
NPV	USD Million	1,302							

		2022	2023	2027	2031	2035	2039	2043	2047
Cash Inflow	USD Million	418	418	418	406	324	111	3	0
Cash Outflow	USD Million	61	63	68	72	69	53	47	51
Investment	USD Million								
NPV	USD Million								

(出所) World Bank(2014)を基に、著者作成

まず, NPV であるが, 1,302 [百万ドル] (正值) であった. これは, 設備投資額 (1,035 [百万ドル]) を大きく上回るものであり, 十分な収益性を認めることができる. また, WACC について感度分析を実施した結果が, 表 6-3 及び図 6-2 である.

表 6-3 感度分析 (リスク調整後割引率)

WACC (%)	NPV (USD Million)
2.0%	4,002
4.0%	3,020
6.0%	2,285
8.0%	1,728
10.0%	1,302
12.0%	973
14.0%	715
16.0%	512
18.0%	350
20.0%	220
22.0%	115
24.0%	30
26.0%	-40
28.0%	-98
30.0%	-146

(出所)著者作成

本研究では、WACC を 2.0%から 30.0%まで 2.0%刻みで変化させた。結果としては、WACC が 24.0%と 26.0%の間で NPV の正負が入れ替わった。これは、World Bank(2014)で Project FIRR(Financial Internal Rate of Return)が 25%であるとの結果と符合する。このように、DCF 法による結果からは、CASA-1000 では、比較的大きな WACC であっても（換言すれば、高い収益率を求めるリスク性資金を導入しても）、事業可能性があるものと結論される。したがって、この結果を見る限り、必ずしも民間資金の導入は不可能であり、公的資金の注入が不可欠であるとは言い切れない。しかしながら、定性的分析で認識したリスクに鑑みると、DCF 法による結果だけを根拠に、民間資金の導入が可能であると結論するのも早計であるといわざるを得ない。

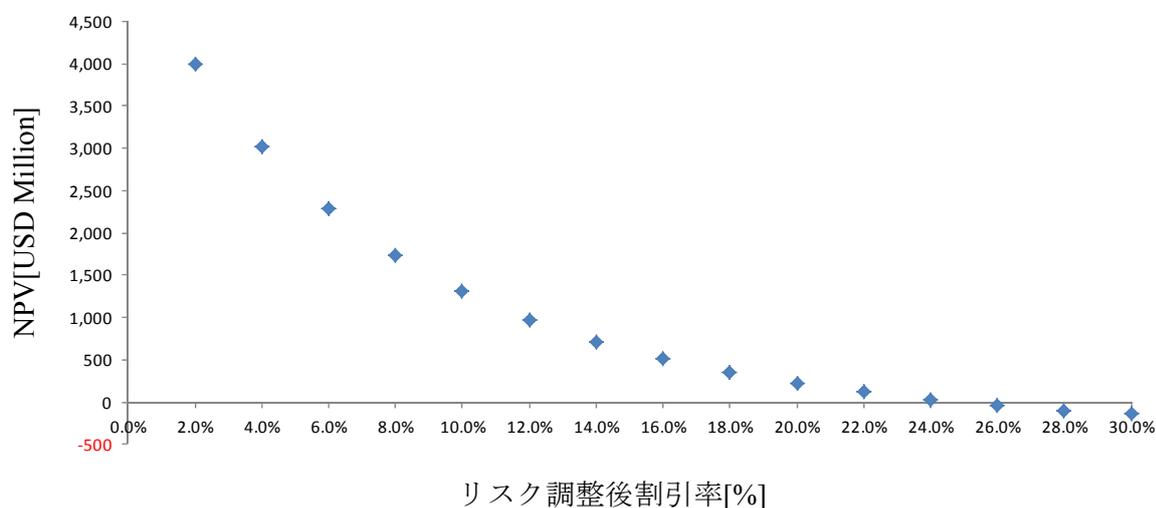


図 6-2 感度分析（リスク調整後割引率）

(出所)著者作成

そこで、リスクへの対処法（ヘッジ）の一形態としてリアルオプションを導入し、ヘッジコストの試算を試みる。すなわち、当初の事業価値がヘッジコストよりも大きければ、理論的にはリスクヘッジが可能ということになり、リスク管理の観点からも、民間資金の導入可能性が示唆される。そこで、まずはボラティリティを 20.0%として、WACC を 2.0%から 20.0%まで 2.0%刻みで変化させ、NPV、事業撤退オプション価値、及びその差額について計算した。なお、シミュレーションの前提条件については、表 6-4 に示したとおりである。

表 6-4 シミュレーションの前提条件

無リスク利子率	2.0 %
満期までの期間	10 年
行使価格	満期時の事業価値

(出所)著者作成

結果は、表 6-5 及び図 6-3 のとおりとなった。例えば、WACC が 2.0% の場合 (World Bank(2014) の条件とほぼ同じである場合)、NPV は 4,002 [百万ドル] であるのに対して、事業撤退オプション価値は 501 [百万ドル] であることから、差額は 3,501 [百万ドル] となり、事業撤退オプションを購入してその対価を支払ったとしても、依然として事業可能性が認められる。

表 6-5 感度分析 (リスク調整後割引率)

WACC (%)	NPV (USD Million)	Option value (USD Million)	Difference (USD Million)
2.0	4,002	501	3,501
4.0	3,020	624	2,397
6.0	2,285	746	1,539
8.0	1,728	865	864
10.0	1,302	974	328
12.0	973	1,071	-98
14.0	715	1,152	-437
16.0	512	1,218	-706
18.0	350	1,267	-917
20.0	220	1,300	-1,080

(出所) 著者作成

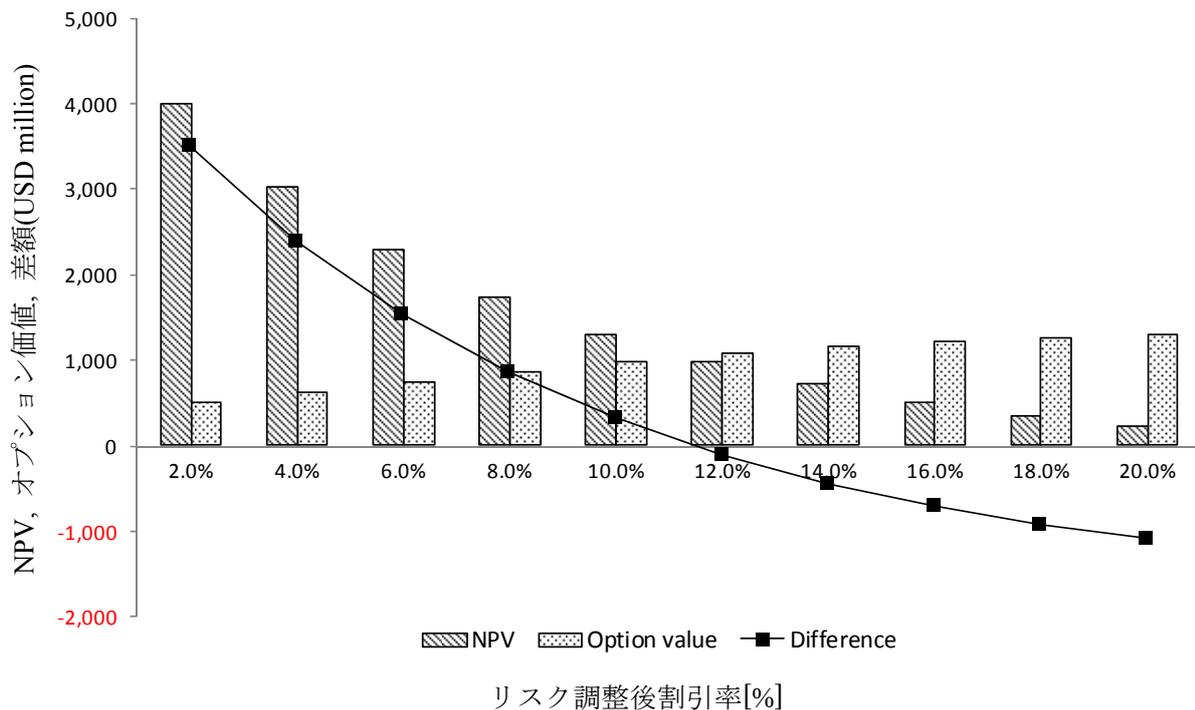


図 6-3 感度分析[オプション価値] (リスク調整後割引率)

(出所)著者作成

一方で、WACC が 20.0%の場合、NPV が 220 [百万ドル]であるのに対して、事業撤退オプション価値は 1,300 [百万ドル]であるから、差額は-1,080 [百万ドル]となった。すなわち、事業撤退オプションを購入してその対価を支払うと、事業価値はマイナスになってしまう。なお、差額の正負が入れ替わるのは、WACC が 10.0%と 12.0%の間であった。したがって、WACC が 12.0%以上の場合には、事業撤退オプションの価値が NPV を上回ることから、リアルオプションに基づくリスクヘッジを行うことはできない。

次に、WACC を 10.0%で固定した上で、ボラティリティを 10.0%から 100.0%まで

10.0%刻みで変化させ、NPV、事業撤退オプション価値、及びその差額について計算した結果が、表 6-6 及び図 6-4 である。例えば、ボラティリティが 10.0%の場合、事業撤退オプション価値は 862[百万ドル]となり、NPV が 1,302 [百万ドル]であることから、差額は 441 [百万ドル]となり、事業撤退オプションを購入してその対価を支払ったとしても、依然として事業可能性が認められる。

表 6-6 感度分析 (ボラティリティ)

Volatility (%)	NPV (USD Million)	Option value (USD Million)	Difference (USD Million)
10.0	1,302	862	441
20.0	1,302	974	328
30.0	1,302	1,132	170
40.0	1,302	1,295	7
50.0	1,302	1,449	-147
60.0	1,302	1,588	-285
70.0	1,302	1,708	-406
80.0	1,302	1,811	-508
90.0	1,302	1,895	-593
100.0	1,302	1,962	-660

(出所)著者作成

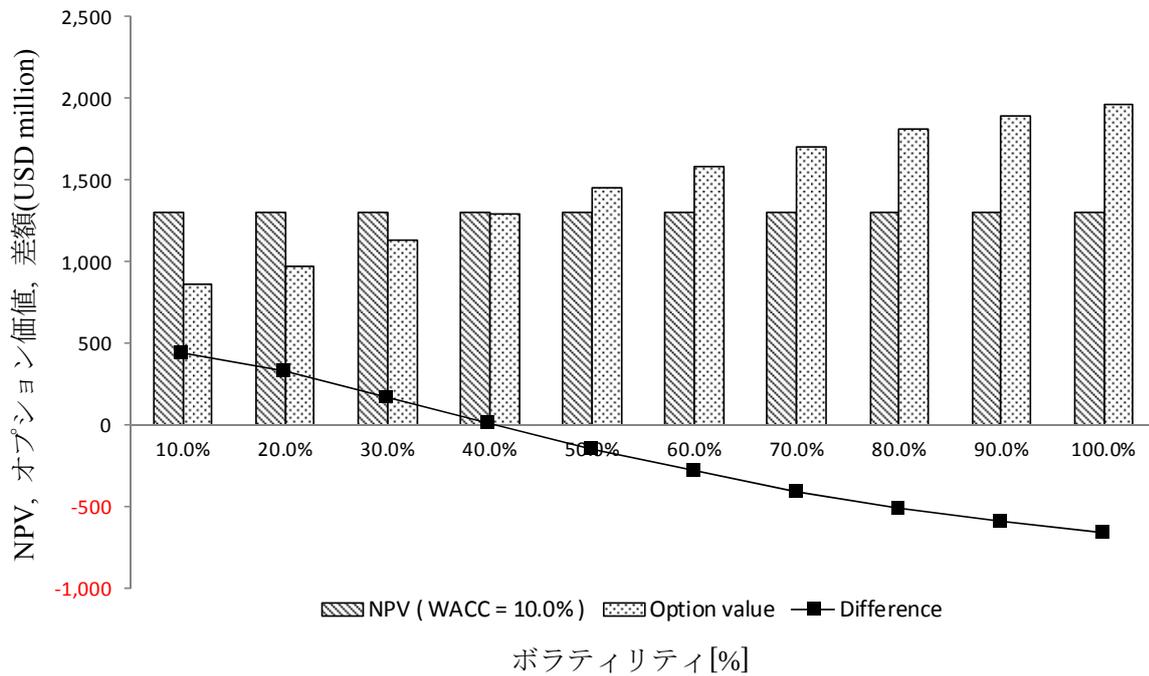


図 6-4 感度分析[オプション価値] (ボラティリティ)

(出所)著者作成

一方で、ボラティリティが 100.0%の場合、事業撤退オプション価値は 1,962 [百万ドル]となり、差額は-660 [百万ドル]となった。すなわち、事業撤退オプションを購入してその対価を支払うと、事業価値はマイナスになる。なお、差額の正負が入れ替わるのは、ボラティリティが 40.0%と 50.0%の間であった。したがって、ボラティリティが 50.0%以上の場合には、事業撤退オプションの価値が NPV を上回ることから、リアルオプションに基づくリスクヘッジを行うことはできない。

表 6-7 感度分析[差額 (NPV－オプション価値)] (WACC×ボラティリティ)

	Volatility (%)									
	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
2.0	3,869	3,501	3,111	2,740	2,400	2,099	1,839	1,620	1,440	1,297
4.0	2,749	2,397	2,059	1,744	1,459	1,208	991	809	660	541
6.0	1,826	1,539	1,260	1,000	764	555	376	225	101	2
8.0	1,060	864	646	437	245	74	-74	-199	-301	-383
10.0	441	328	170	7	-147	-285	-406	-508	-593	-660
12.0	-45	-98	-204	-326	-446	-556	-653	-736	-805	-860
14.0	-417	-437	-501	-587	-677	-762	-839	-905	-960	-1,005
16.0	-700	-706	-739	-794	-858	-921	-980	-1,031	-1,075	-1,110
18.0	-915	-917	-930	-961	-1,002	-1,046	-1,089	-1,127	-1,159	-1,186
20.0	-1,080	-1,080	-1,084	-1,098	-1,120	-1,147	-1,174	-1,200	-1,223	-1,242

(出所)著者作成

さて、これらの結果をマトリックス形式にまとめたものが、表 6-7 である。これによると、WACC が 2.0% の場合は、ボラティリティが 10.0% から 100.0% の間でどのような値をとっても、NPV から事業撤退オプション価値を引いた差額は正となり、リアルオプションに基づくリスクヘッジが可能であるとされる。一方で、WACC が 10.0% を超える場合は、ボラティリティが 10.0% から 100.0% の間でどのような値をとっても、NPV から事業撤退オプション価値を引いた差額は負となり、リアルオプションに基づくリスクヘッジを行うことはできない。同様に、ボラティリティが 10.0% の場合は、WACC が 10.0% 以下であれば、NPV から事業撤退オプション価値を引いた差額は正と

なり、リアルオプションに基づくリスクヘッジが可能である。一方で、ボラティリティが 100.0%の場合は、WACC が 6.0%以下でなければ、NPV から事業撤退オプション価値を引いた差額は負となり、リアルオプションに基づくリスクヘッジを行うことはできない。

以上の議論を踏まえると、リアルオプションに基づくリスクヘッジを前提とした民間資金の導入可能性が出てくるのは、WACC が 10.0%以下の場合であり、かつ、ボラティリティが（WACC に応じた）一定の値（表 6-7 参照）を下回っている場合であることがわかる。

6.4 まとめ

本章では、CASA-1000プロジェクトについて、リスク管理の観点から、定性的側面と定量的側面の両面に関する分析を行った。

定性的分析の結果であるが、CASA-1000には、大きな非常危険（地政学的リスク）が存在することがわかった。また、一定程度の需要リスク、供給リスクも存在しているものと考えられる。したがって、事業可能性について評価を行う際は、これらのリスクに対するヘッジコストも考慮に入れた方が良好だろう。

次に、定量的分析の結果であるが、DCF法によると、CASA-1000では、比較的大きなWACCであっても（換言すれば、高い収益率を求めるリスク性資金を導入しても）、事業可能性があるものと考えられる。ただし、当該プロジェクトには、前述のようなリスクが存在していることから、リアルオプションに基づくリスクヘッジが可能か否かの検討を行った。その結果、WACCが10.0%以下であり、かつ、ボラティリティが（WACCに応じた）一定の値を下回っていれば、リアルオプションに基づくリスクヘッジが理論的に可能であることがわかった。この場合には、リスク管理の観点からも、民間資金の導入可能性が示唆されるものと考えられる。

7 本研究の総括

本研究では、IceLinkとCASA-1000の両プロジェクトについて、主にリスク管理の観点から、定性的側面と定量的側面の両面において分析を行った。

まず、定性的な分析の結果、IceLink、CASA-1000ともに、需要リスク、供給リスク、非常危険といったリスクが存在することがわかった。とりわけ、CASA-1000においては、非常危険がkiller risk（事業の遂行を不可能にする恐れのあるリスク）となっており、民間事業者の参入を阻む要因の一つになっている。これは、定量的な分析（DCF法）の結果とも整合している。なお、これらのリスクの多くは、他の電力貿易プロジェクトにおいても想定し得るものであり、本研究で得られた知見は、電力貿易におけるリスク管理を論ずる上で、一定の汎用性を有するものであると推察される。

巨額の初期投資を要する電力貿易プロジェクトにおいて、定性的分析で識別されたリスク（需要リスク、供給リスク、非常危険、等）を看過することはできない。そこで、リスクへの対処として適切なヘッジを模索することになるが、本研究ではヘッジの一形態としてリアルオプションを導入し、定量的な分析の中でヘッジコストを試算した。その結果、IceLink、CASA-1000のいずれの事例においても、一定の条件の下で、事業撤退オプションの導入可能性が示唆された。すなわち、当該オプションに係る対価（premium）を支払ったとしても、NPVが負にはならなかった。したがって、予め当該オプションを保有することにより、前述の各種リスクが顕在化した場合であっても、事業主体は損害を受けずに済むことになる。換言すれば、オプションを使ったリスクヘッジが可能になるということである。この結果から、これまで識別されたリスクが

大きすぎて事業主体がなかなか現れないようなプロジェクトであっても、リアルオプション（事業撤退オプション）を用いた適切なヘッジが提供されれば、事業可能性が認められる場合が出てくるものと考えられる。すなわち、プロジェクトファイナンスを組成する際に、リアルオプションを導入してリスクヘッジを図ることも想定されるといえよう。とりわけ、年金基金等からの資金拠出を受ける場合には、期待収益率が若干低下しても、リスクを軽減する方が好まれるものと思料される。

さて、本研究における今後の課題であるが、主にリアルオプションの導入に関して、3点ほど挙げられる。

まず第1に、オプションの取引方法について未検討である。本研究では、オプション価値を算出することにより、ヘッジコストの試算を試みたが、実際にオプションが取引されなければリスクヘッジを行うことはできない。金融の世界では、オプションは市場で取引されているが、電力貿易に関するリアルオプションについて、市場での取引を想定することは難しいだろう。その場合、何らかの相対取引（契約）によって、オプションの売買を実現していくことが考えられる。

第2に、確率過程の精緻化である。本研究では、簡単のため、キャッシュフローの現在価値（NPV）が幾何ブラウン運動に従うものと仮定したが、今後は、より複雑な確率過程を採用する必要があるだろう。また、確率過程として直接取り扱うことが困難なリスクについても、今後、モデルに陽に取り込むことが求められるものと思料される。

そして第3に、非常危険（Political Risks）の取扱いである。非常危険とは、前述のとおり、他国の政策変更等の影響により事業の収益性が悪化するリスクである。当該リ

スクについては、モデル化が難しく、シミュレーションに織り込むことは容易ではないが、電力貿易における主要なリスクの1つであることから、今後、有効な取扱手法について検討することが求められる。

本研究の結果、電力貿易におけるリスクがより明確になるとともに、ヘッジの一形態としてリアルオプション（事業撤退オプション）の導入可能性が認められた。今後、より実務的な議論が進むことを期待したい。

引用文献

Abadie, L.M.: Operating Flexibility at Power Plants: A Market Valuation, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.64, pp.41–49, 2015.

ADB: *Guidance Note Electricity Sector Risk Assessment*, ADB, 2009.

Asia Times: *The Rogun Juggernaut*, 4 January 2012,

http://www.atimes.com/atimes/Central_Asia/NA04Ag02.html. Last access: 5 October 2013.

——: *Tajikistan Deviates from CASA Script*, 24 January 2014,

http://www.atimes.com/atimes/Central_Asia/CEN-01-240613.html. Last access: 12 October 2013.

Askja Energy: *UK National Grid Showing Interest in IceLink*, 6 January 2014,

<http://askjaenergy.org/2014/01/06/uk-national-grid-showing-interest-in-icelink/>. Last access: 15 April 2014.

Atlantic Journal: *Iceland, UK Close to Connecting on Power Cable*, 23 February 2014,

<http://arcticjournal.com/business/420/iceland-uk-close-connecting-power-cable>. Last access: 13 April 2014.

Baloi, D. and Price A.D.F.: Modelling Global Risk Factors Affecting Construction Cost Performance, *International Journal of Project Management*, Vol.21, pp.261-269, 2003.

Black, F. and Scholes, M.: The Pricing of Options and Corporate Liabilities, *Journal of Political Economy*, Vol.81, No.3, pp.637-654, 1973.

Bohr, A.: Regionalism in Central Asia: New Geopolitics, Old Regional Order, *International Affairs*, Vol.80, No.3, pp.485-502, 2004.

Boomsma, T.K., Meade, N. and Fleten, S.E.: Renewable Energy Investments under Different Support Schemes: A Real Options Approach, *European Journal of Operational Research*, Vol.220, pp.225–237, 2012.

Cagno, E., Caron, F. and Mancini, M.: A Multi-dimensional Analysis of Major Risks in Complex Projects, *Risk Management*, Vol.9, pp.1-18, 2007.

Copeland, T. and Antikarov, V: *Real Options : A Practitioner's Guide*, Texere, 2003.

DECC: *Investing in Renewable Technologies – CfD Contract Terms and Strike Prices*, DECC, 2013.

——: *Implementing Electricity Market Reform (EMR)*, DECC, 2014.

DESERTEC: *DESERTEC Foundation Flyer*, 2015,

http://www.desertec.org/fileadmin/downloads/desertec_foundation_flyer_en.pdf. Last access:

18 May 2015.

Disruptive Capital Finance: *Atlantic Supergrid Corporation*, 2014,

<http://www.disruptivecapital.com/content/atlantic-supergrid-corporation>. Last access: 27

March 2014.

Dixit, A. and Pindyck, R.: *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, 1994.

Eppler M.J. and Aeschmann M: A Systematic Framework for Risk Visualization in Risk Management and Communication, *Risk Management*, Vol.11, pp.67-89, 2009.

European Union: *DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources and Amending and Subsequently Repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*, Official Journal of the European Union, 2009.

Grimsey, D. and Lewis, M.K.: *Evaluating the Risks of Public Private Partnerships for*

Infrastructure Projects, *International Journal of Project Management*, Vol.20, pp.107-118, 2002.

Hammons, T.J., Olsen, A., Kacejko, P. and Leung, C.L.: Proposed Iceland/United Kingdom Power Link - An Indepth Analysis of Issues and Returns, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.8, No.3, pp.566-575, 1993.

HM Treasury: *The Orange Book: Management of Risk - Principles and Concepts*, HM Treasury, 2004.

IEA Geothermal Implementing Agreement: *Iceland Country Report 2012*, IEA Geothermal Executive Committee, 2012.

Irwin, T.C.: *Government Guarantees Allocating and Valuing Risk in Privately Financed Infrastructure Projects*, World Bank, 2007.

Japan Renewable Energy Foundation: *Gobitec and Asian Super Grid for Renewable Energies in Northeast Asia*, Spotinov, 2014.

Johannesson, G.T.: How 'Cod War' Came: The Origins of the Anglo - Icelandic Fisheries Dispute, 1958-61, *Historical Research*, Vol.77, No.198, pp.543-574, 2004.

Jonsson, A.: Professor at University of Iceland, Interview in Reykjavik on 13 March 2014.

Kucsera, D. and Rammerstorfer, M.: Regulation and Grid Expansion Investment with Increased Penetration of Renewable Generation, *Resource and Energy Economics*, Vol.37, pp.184–200, 2014.

Landsvirkjun: *Annual Report 2012*, Landsvirkjun, 2012.

——: *Opportunities in Renewable Energy in Iceland*, 26 June 2013,

http://www.islandsstofa.is/files/opportunities-in-renewable-energy-in-iceland_presentation-by-ragna-arnadottir.pdf. Last access: 15 April 2014.

Laruelle, M. and Peyrouse, S.: *Globalizing Central Asia: Geopolitics and the Challenges of Economic Development*, Routledge, 2013.

Libert, B., Orolbaev, E. and Steklov, Y.: Water and Energy Crisis in Central Asia, *China and Eurasia Forum Quarterly*, Vol.6, No.3, pp.9-20, 2008.

Longstaff, F.A. and Schwartz, E.S.: Valuing American Options by Simulation : A Simple Least-Squares Approach, *The Review of Financial Studies*, Vol.14, No.1, pp.113-147, 2001.

Marat, E.: *Will Tajikistan Successfully Construct Rogun?*, 26 January 2010,
http://www.jamestown.org/single/?no_cache=1&tx_ttnews%5btt_news%5d=35955&tx_ttnews%5bbackPid%5d=7&cHash=53f9274652#.Us2nn_RdWSo. Last access: 23 September 2013.

Martinez-Cesena, E.A., Mutale, J. and Rivas-Davalos, F.: Real Options Theory Applied to Electricity Generation Projects : A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.19, pp.573–581, 2013.

Medgrid: *Opening New Lines for Sustainable Electricity*, 2015,
<http://www.medgrid-psm.com/en/files/2011/08/Brochure-Medgrid-EN.pdf>. Last access: 18 May 2015.

Ministry for Foreign Affairs of Iceland: *Iceland welcomes acquittal in Icesave case*, 2014,
<http://www.mfa.is/tasks/icesave/>. Last access: 27 March 2014.

Myers, S.C.: Determinants of Corporate Borrowing, *Journal of Financial Economics*, Vol.5, pp.147-175, 1977.

ORKUSTOFNUN: *Energy Statistics in Iceland 2012*, ORKUSTOFNUN, 2012.

Pakistan Observer: *China Offers 3,200 MW Electricity*, 25 October 2013,

<http://pakobserver.net/201310/25/detailnews.asp?id=221701>. Last access: 2 June 2015.

Pringles, R. , Olsina, F. and Garcés, F.: Real Option Valuation of Power Transmission Investments by Stochastic Simulation, *Energy Economics*, Vol.47, pp.215–226, 2015.

Republic of Uzbekistan: *Transboundary Environmental Problems Discussed*, 19 November 2010, <http://www.gov.uz/en/press/society/7108>. Last access: 17 April 2014.

SIEMENS: *Fact Sheet High-Voltage Direct Current Transmission (HVDC)*, 2014, <http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2013/energy/2013-08-x-win/factsheet-hvdc-e.pdf>. Last access: 18 May 2015.

Sigurjonsson, K.: Representative of Askja Energy Partners, Interview in Reykjavik on 13 March 2014.

SNC-Lavalin: *Central Asia - South Asia Electricity Transmission and Trade (CASA-1000) Project Feasibility Study Update*, SNC-Lavalin, 2011.

Sodiqov, A.: *The Rogun Dam Controversy: Is Compromise Possible?*, 5 February 2012, <http://old.cacianalyst.org/?q=node/5764>. Last access: 10 April 2013.

Spechler, D.R. and Spechler, M.C.: Uzbekistan among the Great Powers, *Communist and Post Communist Studies*, Vol.42, pp.353-373, 2009.

Statistics Iceland: *Iceland in figures 2012*, Statistics Iceland, 2012.

Swedish Energy Agency: *Energy in Sweden 2012*, Swedish Energy Agency, 2013.

TuNur: *Overview*, 2015,

<http://www.tunur.tn/index.php/en/project/overview.html>. Last access: 18 May 2015.

Ulfarsson, G.F.: Professor at University of Iceland, Interview in Reykjavik on 12 March 2014.

World Bank: *Central Asia and South Asia - 1000 Electricity Transmission and Trade Project*,
World Bank, 2014.

伊藤葉子: EUにおける再生可能エネルギー電力の導入状況と2020年に向けた目標及び
政策の枠組み, *エネルギー経済*, Vol.37, No.2, pp.34-45, 2011.

稲垣文昭: 中央アジアの電力網改革: 南アジアへの電力供給源の可能性と各国の思惑,
国際情勢: 紀要, Vol.82, pp.169-182, 2012.

大野薫: モンテカルロ法によるリアル・オプション分析, 金融財政事情研究会, 2013.

恩賀万理恵: 中央アジア電力セクターの地域連携に関するカザフスタンおよびウズベキスタンの政治リーダーによる意思決定の評価手法, 東京大学大学院博士論文 (未公開), 2013.

海外電力調査会: 海外電力調査会: データ集: 各国の電気: スウェーデン, 2014年1月,
http://www.jepic.or.jp/data/ele/ele_09.html. (2014/03/27参照)

佐々木大輔, 佐藤裕弥, 滝沢智: 日本企業及び自治体等による上下水道事業の国際展開において想定されるリスクとその対処法, 公益事業研究, Vol.66, No.1, pp.31-40, 2014.

資源エネルギー庁: 再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック (2015 (平成27) 年度版), 資源エネルギー庁, 2015.

中山幹康, 佐々木大輔, 伊藤園子: 水力発電による他国への新規売電を阻む内政および外政上の困難に関する考察, 水文・水資源学会誌, Vol.28, No.2, pp.72-83, 2015.

布田功治: アイスランド通貨金融危機研究序説: 国際資金フローの変化に焦点を当てて, 東海大学紀要.政治経済学部, Vol.44, pp.165-178, 2012.

付録

付録. A Excel VBA のソースコード (Black-Scholes モデル)

Option Explicit

```
Public Function BS_Call(ByVal S0 As Double, _  
                        ByVal σ As Double, _  
                        ByVal r As Double, _  
                        ByVal T As Double, _  
                        ByVal K As Double) As Double  
  
    Dim d1 As Double, d2 As Double  
  
    d1 = (Log(S0 / K) + (r + σ ^ 2 / 2) * T) / (σ * Sqr(T))  
    d2 = d1 - σ * Sqr(T)  
  
    BS_Call = S0 * Application.NormSDist(d1) - K * Exp(-r * T) * Application.NormSDist(d2)  
  
End Function
```

```

Public Function BS_Put(ByVal S0 As Double, _
                    ByVal σ As Double, _
                    ByVal r As Double, _
                    ByVal T As Double, _
                    ByVal K As Double) As Double

```

```

    Dim d1 As Double, d2 As Double

```

```

    d1 = (Log(S0 / K) + (r + σ ^ 2 / 2) * T) / (σ * Sqr(T))

```

```

    d2 = d1 - σ * Sqr(T)

```

```

    BS_Put = K * Exp(-r * T) * Application.NormSDist(-d2) - S0 *
Application.NormSDist(-d1)

```

```

End Function

```

```

Public Function GBMプロセス(ByVal St As Double, _
                    ByVal σ As Double, _
                    ByVal μ As Double, _
                    ByVal Δt As Double, _
                    ByVal ε As Double) As Double

```

$$\text{GBMプロセス} = S_t * \text{Exp}((\mu - \sigma^2 / 2) * \Delta t + \sigma * \text{Sqr}(\Delta t) * \varepsilon)$$

End Function

付録. B Excel VBA のソースコード(メインプロシージャ[LSM])

'モジュール変数の定義

Const 推定係数数 = 4 '3次のLaguerre多項式

Private 全価格パス() As Double, 全CF表() As Double, InTheMoney() As Boolean

Private 行使実行点() As Double, 平均行使点 As Double, 行使数 As Long, 満期行使数
As Long

Private 行使確率 As Double, 当初PV As Double, σ As Double, rf As Double

Private 行使価格 As Double, 満期 As Double, Δt As Double, 指定サンプル数 As Long

Private ε As Double, 負相関PV As Double, 総サンプル数 As Long

Private 総ステップ数 As Integer, PV As Double, 行使点 As Integer

Private 有効サンプル数 As Long, 全Y() As Double, 全X() As Double

Private Y() As Double, X() As Double, 係数() As Double

Private XT() As Double, M1() As Double, M2() As Double, M3() As Double

Private 継続価値 As Double, 行使価値 As Double

Private オプション価値 As Double, Z As Double, NF As Double

Private iL As Long, j As Integer

Public Sub LSMに基づくオプション価値の推定()

Call タイマー("開始", "B26")

```

Call パラメーターの読み込みと初期処理

Call 全価格パスの発生

Call 満期時キャッシュフロー評価

Call 全CF表満期時以外を初期化

For 行使点 = 総ステップ数 - 1 To 1 Step -1

    Call 有効データの作成

    Call 期待関数の多項式推定

    Call 継続か実行の意思決定

Next 行使点

Call オプション価値の計算と出力

Call タイマー("表示", "B26")

End Sub

```

```

Private Sub パラメーターの読み込みと初期処理()

```

```

    当初PV = Range("B5").Value

     $\sigma$  = Range("B6").Value

    rf = Range("B7").Value

    行使価格 = Range("B8").Value

    満期 = Range("B9").Value

     $\Delta t$  = Range("B10").Value

    指定サンプル数 = Range("B11").Value

```

総サンプル数 = 指定サンプル数 * 2 '負相関変量法

NF = 行使価格

総ステップ数 = Round(満期 / Δt, 0)

ReDim 全価格パス(1 To 総サンプル数, 1 To 総ステップ数)

ReDim 全CF表(1 To 総サンプル数, 1 To 総ステップ数)

ReDim InTheMoney(1 To 総サンプル数)

ReDim 行使実行点(1 To 総サンプル数)

ReDim 全Y(1 To 総サンプル数)

ReDim 全X(1 To 総サンプル数, 推定係数数)

ReDim 係数(1 To 推定係数数, 1 To 1)

ReDim M1(1 To 推定係数数, 1 To 推定係数数)

ReDim M2(1 To 推定係数数, 1 To 推定係数数)

Range("B18:B22").ClearContents

End Sub

Private Sub 全価格パスの発生()

For iL = 1 To 指定サンプル数

PV = 当初PV

負相関PV = 当初PV

For j = 1 To 総ステップ数

ε = 正規乱数

PV = GBMプロセス(PV, σ , rf, Δt , ε)

全価格パス(iL, j) = PV

負相関PV = GBMプロセス(負相関PV, σ , rf, Δt , $-\varepsilon$)

全価格パス(指定サンプル数 + iL, j) = 負相関PV

Next j

行使実行点(iL) = 0

Next iL

End Sub

Private Sub 満期時キャッシュフロー評価()

For iL = 1 To 総サンプル数

If 全価格パス(iL, 総ステップ数) < 行使価格 Then '行使価格を下回る場合

全CF表(iL, 総ステップ数) = 行使価格 - 全価格パス(iL, 総ステップ数)

行使実行点(iL) = 総ステップ数

Else

全CF表(iL, 総ステップ数) = 0 '行使価格を上回る場合

End If

Next iL

End Sub

Private Sub 全CF表満期時以外を初期化()

```

For iL = 1 To 総サンプル数

    For j = 1 To 総ステップ数 - 1

        全CF表(iL, j) = 0

    Next j

Next iL

End Sub

Private Sub 有効データの作成()

    For iL = 1 To 総サンプル数

        InTheMoney(iL) = False

    Next iL

    有効サンプル数 = 0

    For iL = 1 To 総サンプル数

        If 全価格パス(iL, 行使点) < 行使価格 Then

            InTheMoney(iL) = True

            有効サンプル数 = 有効サンプル数 + 1

            If 行使実行点(iL) > 0 Then '行使済みの場合

                全Y(有効サンプル数) = 全CF表(iL, 行使実行点(iL)) * Exp(-rf * (行使実行点
(iL) - 行使点) * Δt) / NF

            Else '行使していない場合

                全Y(有効サンプル数) = 0

```

End If

Z = 全価格パス(iL, 行使点) / NF

全X(有効サンプル数, 1) = 1

全X(有効サンプル数, 2) = Exp(-Z / 2)

全X(有効サンプル数, 3) = Exp(-Z / 2) * (1 - Z)

全X(有効サンプル数, 4) = Exp(-Z / 2) * (1 - 2 * Z + Z ^ 2 / 2)

End If

Next iL

End Sub

Private Sub 期待関数の多項式推定()

If 有効サンプル数 < 推定係数数 Then '有効サンプル数が足りない場合

For j = 1 To 推定係数数

 系数(j, 1) = 0

Next j

Else

ReDim Y(1 To 有効サンプル数, 1 To 1)

ReDim X(1 To 有効サンプル数, 1 To 推定係数数)

ReDim XT(1 To 推定係数数, 1 To 有効サンプル数)

ReDim M3(1 To 推定係数数, 1 To 有効サンプル数)

For iL = 1 To 有効サンプル数

Y(iL, 1) = 全Y(iL)

For j = 1 To 推定係数数

X(iL, j) = 全X(iL, j)

Next j

Next iL

'重回帰分析

XT = 転置行列(X) 'XT

M1 = 行列乗算(XT, X) 'XT X

M2 = 逆行列(M1) '(XT X)^(-1)

M3 = 行列乗算(M2, XT) '(XT X)^(-1) XT

係数 = 行列乗算(M3, Y) '(XT X)^(-1) XT Y

End If

End Sub

Private Sub 継続か実行の意思決定()

For iL = 1 To 総サンプル数

If InTheMoney(iL) Then

行使価値 = 行使価格 - 全価格パス(iL, 行使点)

Z = 全価格パス(iL, 行使点) / NF

継続価値 = 係数(1, 1) + 係数(2, 1) * Exp(-Z / 2) + 係数(3, 1) * Exp(-Z / 2) * (1 -
Z) + 係数(4, 1) * Exp(-Z / 2) * (1 - 2 * Z + Z ^ 2 / 2)

継続価値 = 継続価値 * NF

If 行使価値 > 継続価値 Then 行使する

全CF表(iL, 行使点) = 行使価値

For j = 行使点 + 1 To 総ステップ数

全CF表(iL, j) = 0

Next j

行使実行点(iL) = 行使点

End If

End If

Next iL

End Sub

Private Sub オプション価値の計算と出力()

オプション価値 = 0

行使数 = 0

満期行使数 = 0

平均行使点 = 0

For iL = 1 To 総サンプル数

If 行使実行点(iL) > 0 Then 満期も含めてどこかで行使した場合

オプション価値 = オプション価値 + 全CF表(iL, 行使実行点(iL)) * Exp(-rf * 行使実行点(iL) * Δt)

行使実行点(iL) * Δt)

行使数 = 行使数 + 1

平均行使点 = 平均行使点 + 行使実行点(iL)

If 行使実行点(iL) = 総ステップ数 Then

満期行使数 = 満期行使数 + 1

End If

End If

Next iL

オプション価値 = オプション価値 / 総サンプル数

行使確率 = 行使数 / 総サンプル数 '満期時の行使を含む

平均行使点 = 平均行使点 / 行使数

Range("B18") = オプション価値

Range("B19") = 行使確率

Range("B20") = (行使数 - 満期行使数) / 総サンプル数 '期限前行使確率

Range("B21") = 満期行使数 / 総サンプル数 '満期時行使確率

Range("B22") = 平均行使点 * Δt

End Sub

付録. C Excel VBA のソースコード (サブプロシージャ [LSM])

Option Explicit

'変数の定義

Private 開始行 As Integer

Private σ 2 As Double, rf2 As Double, 行使価格2 As Double, 満期2 As Double, Δt 2 As Double

Private σ 間隔 As Double, rf間隔 As Double, 行使価格間隔 As Double, 満期間隔 As Double

Private 当初PV2 As Double, 感度分析R As Double, 感度分析C As Double

Private オプション価値1 As Double, オプション価値2 As Double

Private 期限前行使確率 As Double, 満期時行使確率 As Double, 期限前行使割合 As Double

Private i As Integer, j As Integer

Private タイトル As String

Public Sub 感度分析()

Call 感度分析用タイマー("開始", "E1")

開始行 = 3

感度分析R = 0

感度分析C = 0

'初期値の入力

Worksheets("Monte Carlo (LSM)").Activate

$\sigma^2 = \text{Range}("B6").\text{Value}$

$rf^2 = \text{Range}("B7").\text{Value}$

行使価格2 = Sheets("NPV").Range("G26").Value

満期2 = Range("B9").Value

$\Delta t^2 = \text{Range}("B10").\text{Value}$

当初PV2 = Range("B5").Value

$\sigma \text{ 間隔} = 0.1$

$rf \text{ 間隔} = 0.005$

行使価格間隔 = (行使価格2 - 当初PV2) / 9

満期間隔 = 1

Call ボラティリティ行使価格

開始行 = 開始行 + 12

Call ボラティリティリスクフリーレート

開始行 = 開始行 + 12

Call ボラティリティ満期

開始行 = 開始行 + 12

Call リスクフリーレート行使価格

開始行 = 開始行 + 12

Call リスクフリーレート満期

開始行 = 開始行 + 12

Call 行使価格満期

開始行 = 開始行 + 12

Call 感度分析用タイマー("表示", "E1")

End Sub

'ボラティリティ×行使価格

Private Sub ボラティリティ行使価格()

タイトル = "ボラティリティ×行使価格" '適宜修正

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 1).Value = タイトル

Cells(開始行, 3).Value = "オプション価値 (アメリカンタイプ) 【" & タイトル & "】 "

Cells(開始行, 15).Value = "オプション価値 (ヨーロッパアンタイプ) 【" & タイトル & "】 "

"

Cells(開始行, 27).Value = "期限前行使の価値 【" & タイトル & "】 "

Cells(開始行, 39).Value = "期限前行使割合 (%) 【" & タイトル & "】 "

感度分析R = 0.1 '適宜修正

感度分析C = 当初PV2 '適宜修正

For i = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 15).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 27).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 39).Value = 感度分析R

For j = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 3 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 15 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 27 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 39 + j).Value = 感度分析C

Worksheets("Monte Carlo (LSM)").Activate

Range("B6").Value = 感度分析R '感度分析の対象 (行)

Range("B7").Value = rf2

Range("B8").Value = 感度分析C '感度分析の対象 (列)

Range("B9").Value = 満期2

Range("B10").Value = Δt 2

Call LSMに基づくオプション価値の推定

オプション価値1 = Range("B18").Value

オプション価値2 = Range("B24").Value

期限前行使確率 = Range("B20").Value

満期時行使確率 = Range("B21").Value

期限前行使割合 = 期限前行使確率 / (期限前行使確率 + 満期時行使確率)

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3 + j).Value = オプション価値1

Cells(開始行 + i, 15 + j).Value = オプション価値2

Cells(開始行 + i, 39 + j).Value = 期限前行使割合

感度分析C = 感度分析C + 行使価格間隔 '適宜修正

Next j

感度分析C = 当初PV2 '適宜修正

感度分析R = 感度分析R + σ 間隔 '適宜修正

Next i

End Sub

'ボラティリティ×リスクフリーレート

Private Sub ボラティリティ×リスクフリーレート()

タイトル = "ボラティリティ×リスクフリーレート" '適宜修正

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 1).Value = タイトル

Cells(開始行, 3).Value = "オプション価値 (アメリカンタイプ) [" & タイトル & "]"

Cells(開始行, 15).Value = "オプション価値 (ヨーロピアンタイプ) [" & タイトル & "]"

"

Cells(開始行, 27).Value = "期限前行使の価値 [" & タイトル & "]"

Cells(開始行, 39).Value = "期限前行使割合 (%) 【" & タイトル & "】 "

感度分析R = 0.1 '適宜修正

感度分析C = 0.015 '適宜修正

For i = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 15).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 27).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 39).Value = 感度分析R

For j = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 3 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 15 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 27 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 39 + j).Value = 感度分析C

Worksheets("Monte Carlo (LSM)").Activate

Range("B6").Value = 感度分析R '感度分析の対象 (行)

Range("B7").Value = 感度分析C '感度分析の対象 (列)

Range("B8").Value = 行使価格2

Range("B9").Value = 満期2

Range("B10").Value = Δt_2

Call LSMに基づくオプション価値の推定

オプション価値1 = Range("B18").Value

オプション価値2 = Range("B24").Value

期限前行使確率 = Range("B20").Value

満期時行使確率 = Range("B21").Value

期限前行使割合 = 期限前行使確率 / (期限前行使確率 + 満期時行使確率)

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3 + j).Value = オプション価値1

Cells(開始行 + i, 15 + j).Value = オプション価値2

Cells(開始行 + i, 39 + j).Value = 期限前行使割合

感度分析C = 感度分析C + rf間隔 '適宜修正

Next j

感度分析C = 0.015 '適宜修正

感度分析R = 感度分析R + σ 間隔 '適宜修正

Next i

End Sub

'ボラティリティ×満期

Private Sub ボラティリティ満期()

 タイトル = "ボラティリティ×満期" '適宜修正

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 1).Value = タイトル

Cells(開始行, 3).Value = "オプション価値 (アメリカンタイプ) 【" & タイトル & "】 "

Cells(開始行, 15).Value = "オプション価値 (ヨーロピアンタイプ) 【" & タイトル & "】 "

"

Cells(開始行, 27).Value = "期限前行使の価値 【" & タイトル & "】 "

Cells(開始行, 39).Value = "期限前行使割合 (%) 【" & タイトル & "】 "

感度分析R = 0.1 '適宜修正

感度分析C = 1 '適宜修正

For i = 1 To 10 Step 1

 Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

 Cells(開始行 + i, 3).Value = 感度分析R

 Cells(開始行 + i, 15).Value = 感度分析R

 Cells(開始行 + i, 27).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 39).Value = 感度分析R

For j = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 3 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 15 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 27 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 39 + j).Value = 感度分析C

Worksheets("Monte Carlo (LSM)").Activate

Range("B6").Value = 感度分析R '感度分析の対象 (行)

Range("B7").Value = rf2

Range("B8").Value = 行使価格2

Range("B9").Value = 感度分析C '感度分析の対象 (列)

Range("B10").Value = Δt_2

Call LSMに基づくオプション価値の推定

オプション価値1 = Range("B18").Value

オプション価値2 = Range("B24").Value

期限前行使確率 = Range("B20").Value

満期時行使確率 = Range("B21").Value

期限前行使割合 = 期限前行使確率 / (期限前行使確率 + 満期時行使確率)

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3 + j).Value = オプション価値1

Cells(開始行 + i, 15 + j).Value = オプション価値2

Cells(開始行 + i, 39 + j).Value = 期限前行使割合

感度分析C = 感度分析C + 満期間隔 適宜修正

Next j

感度分析C = 1 適宜修正

感度分析R = 感度分析R + σ 間隔 適宜修正

Next i

End Sub

'リスクフリーレート×行使価格

Private Sub リスクフリーレート行使価格()

タイトル = "リスクフリーレート×行使価格" 適宜修正

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 1).Value = タイトル

Cells(開始行, 3).Value = "オプション価値 (アメリカンタイプ) [" & タイトル & "]"

Cells(開始行, 15).Value = "オプション価値(ヨーロッパタイプ)【" & タイトル & "】

"

Cells(開始行, 27).Value = "期限前行使の価値【" & タイトル & "】 "

Cells(開始行, 39).Value = "期限前行使割合 (%)【" & タイトル & "】 "

感度分析R = 0.015 '適宜修正

感度分析C = 当初PV2 '適宜修正

For i = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 15).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 27).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 39).Value = 感度分析R

For j = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 3 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 15 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 27 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 39 + j).Value = 感度分析C

Worksheets("Monte Carlo (LSM)").Activate

Range("B6").Value = σ^2

Range("B7").Value = 感度分析R '感度分析の対象 (行)

Range("B8").Value = 感度分析C '感度分析の対象 (列)

Range("B9").Value = 満期2

Range("B10").Value = Δt^2

Call LSMに基づくオプション価値の推定

オプション価値1 = Range("B18").Value

オプション価値2 = Range("B24").Value

期限前行使確率 = Range("B20").Value

満期時行使確率 = Range("B21").Value

期限前行使割合 = 期限前行使確率 / (期限前行使確率 + 満期時行使確率)

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3 + j).Value = オプション価値1

Cells(開始行 + i, 15 + j).Value = オプション価値2

Cells(開始行 + i, 39 + j).Value = 期限前行使割合

感度分析C = 感度分析C + 行使価格間隔 '適宜修正

Next j

感度分析C = 当初PV2 '適宜修正

感度分析R = 感度分析R + rf間隔 '適宜修正

Next i

End Sub

'リスクフリーレート×満期

Private Sub リスクフリーレート満期()

タイトル = "リスクフリーレート×満期" '適宜修正

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 1).Value = タイトル

Cells(開始行, 3).Value = "オプション価値 (アメリカンタイプ) [" & タイトル & "]"

Cells(開始行, 15).Value = "オプション価値 (ヨーロピアンタイプ) [" & タイトル & "]"

"

Cells(開始行, 27).Value = "期限前行使の価値 [" & タイトル & "]"

Cells(開始行, 39).Value = "期限前行使割合 (%) [" & タイトル & "]"

感度分析R = 0.015 '適宜修正

感度分析C = 1 '適宜修正

For i = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 15).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 27).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 39).Value = 感度分析R

For j = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 3 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 15 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 27 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 39 + j).Value = 感度分析C

Worksheets("Monte Carlo (LSM)").Activate

Range("B6").Value = σ^2

Range("B7").Value = 感度分析R '感度分析の対象 (行)

Range("B8").Value = 行使価格2

Range("B9").Value = 感度分析C '感度分析の対象 (列)

Range("B10").Value = Δt^2

Call LSMに基づくオプション価値の推定

オプション価値1 = Range("B18").Value

オプション価値2 = Range("B24").Value

期限前行使確率 = Range("B20").Value

満期時行使確率 = Range("B21").Value

期限前行使割合 = 期限前行使確率 / (期限前行使確率 + 満期時行使確率)

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3 + j).Value = オプション価値1

Cells(開始行 + i, 15 + j).Value = オプション価値2

Cells(開始行 + i, 39 + j).Value = 期限前行使割合

感度分析C = 感度分析C + 満期間隔 '適宜修正

Next j

感度分析C = 1 '適宜修正

感度分析R = 感度分析R + rf間隔 '適宜修正

Next i

End Sub

'行使価格×満期

Private Sub 行使価格満期()

タイトル = "行使価格×満期" '適宜修正

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 1).Value = タイトル

Cells(開始行, 3).Value = "オプション価値 (アメリカンタイプ) 【" & タイトル & "】 "

Cells(開始行, 15).Value = "オプション価値 (ヨーロッパタイプ) 【" & タイトル & "】 "

"

Cells(開始行, 27).Value = "期限前行使の価値 【" & タイトル & "】 "

Cells(開始行, 39).Value = "期限前行使割合 (%) 【" & タイトル & "】 "

感度分析R = 当初PV2 '適宜修正

感度分析C = 1 '適宜修正

For i = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 15).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 27).Value = 感度分析R

Cells(開始行 + i, 39).Value = 感度分析R

For j = 1 To 10 Step 1

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行, 3 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 15 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 27 + j).Value = 感度分析C

Cells(開始行, 39 + j).Value = 感度分析C

Worksheets("Monte Carlo (LSM)").Activate

Range("B6").Value = σ^2

Range("B7").Value = rf2

Range("B8").Value = 感度分析R '感度分析の対象 (行)

Range("B9").Value = 感度分析C '感度分析の対象 (列)

Range("B10").Value = Δt^2

Call LSMに基づくオプション価値の推定

オプション価値1 = Range("B18").Value

オプション価値2 = Range("B24").Value

期限前行使確率 = Range("B20").Value

満期時行使確率 = Range("B21").Value

期限前行使割合 = 期限前行使確率 / (期限前行使確率 + 満期時行使確率)

Worksheets("Sensitivity Analysis").Activate

Cells(開始行 + i, 3 + j).Value = オプション価値1

Cells(開始行 + i, 15 + j).Value = オプション価値2

Cells(開始行 + i, 39 + j).Value = 期限前行使割合

```

        感度分析C = 感度分析C + 満期間隔      '適宜修正
    Next j

        感度分析C = 1                          '適宜修正

        感度分析R = 感度分析R + 行使価格間隔  '適宜修正

    Next i

End Sub

```

```

Public Function 転置行列(ByRef M1() As Double) As Double()

```

```

    Dim 行数 As Long, 列数 As Long

    Dim M2() As Double, i As Long, j As Long

    行数 = UBound(M1, 1)
    列数 = UBound(M1, 2)

    ReDim M2(1 To 列数, 1 To 行数)

    For i = 1 To 行数
        For j = 1 To 列数
            M2(j, i) = M1(i, j)
        Next j
    Next i

```

転置行列 = M2

End Function

Public Function 行列乗算(ByRef M1() As Double, ByRef M2() As Double) As Double()

Dim M1行数 As Long, M2列数 As Long, M1列数 As Long, 合計 As Double

Dim TempM() As Double, i As Long, j As Long, K As Long

M1行数 = UBound(M1, 1)

M2列数 = UBound(M2, 2)

M1列数 = UBound(M1, 2)

ReDim TempM(1 To M1行数, 1 To M2列数)

For i = 1 To M1行数

For j = 1 To M2列数

合計 = 0

For K = 1 To M1列数

合計 = 合計 + M1(i, K) * M2(K, j)

Next K

TempM(i, j) = 合計

Next j

Next i

行列乗算 = TempM

End Function

Public Function 逆行列(ByRef M1() As Double) As Double()

Dim サイズ As Integer

Dim TempM1() As Double, TempM2() As Double, b1 As Double

Dim i As Integer, j As Integer, K As Integer

サイズ = UBound(M1, 1)

ReDim TempM1(1 To サイズ + 1, 1 To サイズ * 3)

ReDim TempM2(1 To サイズ, 1 To サイズ)

For i = 1 To サイズ

For j = 1 To サイズ

```

    TempM1(i, j) = M1(i, j)

Next j

Next i

For i = 1 To サイズ

    For j = サイズ + 1 To 2 * サイズ

        TempM1(i, サイズ + i) = 1

    Next j

Next i

For i = 1 To サイズ

    b1 = TempM1(i, i)

    For j = 1 To 2 * サイズ

        TempM1(i, j) = TempM1(i, j) / b1

    Next j

    For j = 1 To サイズ

        If j = i Then j = j + 1

        b1 = TempM1(j, i)

        For K = 1 To 2 * サイズ

            TempM1(j, K) = TempM1(j, K) - b1 * TempM1(i, K)

        Next K

```

Next j

Next i

For i = 1 To サイズ

For j = 1 To サイズ

TempM2(i, j) = TempM1(i, j + サイズ)

Next j

Next i

逆行列 = TempM2

End Function

謝辞

本研究の実施に当たっては、科研費（25570003および15H02864）、「二十一世紀文化学術財団学術奨励金（平成25年度）」、「東京大学新領域創成科学研究科 学融合研究 推進調査費（平成25年度）」、「経済産業省『産油国高度人材育成支援事業』補助金（平成25年度，平成26年度，平成27年度）」などからの助成を受けた。ここに謝意を表したい。

本研究では、事例研究を行うに当たり、東京大学・アイスランド大学・Landsvirkjun社・マスダール科学技術大学（アラブ首長国連邦）の4者による共同研究の枠組みを構築した。関係各位には、データの提供から研究方法に関するアドバイスまで、多岐にわたるご協力を頂いた。ここに感謝申し上げたい。

指導教授である中山幹康先生には、様々な場面で常に的確かつ丁寧なご指導を頂戴した。二足の草鞋を履く社会人学生として、限られた時間の中、標準修業年限の3年で博士論文をまとめることができたのは、ひとえに中山先生のご指導の賜物である。ここに心より感謝申し上げたい。

また、お忙しい中、副査をお引き受け頂いた本田利器先生、山路永司先生、坂本麻衣子先生、高嶋隆太先生からは、博士論文の質の向上に資する、大変貴重なコメントを頂戴した。ここに心より感謝申し上げたい。

そして、佐藤純子さんをはじめ秘書の皆様には、事務手続き等において大変お世話になった。ここに御礼申し上げます。

最後に、業務時間外の研究活動を快諾してくれた職場の上司・同僚、そして、論文執筆に追われていた私を温かく見守ってくれた両親に、心より感謝の意を伝えたい。