

修 士 論 文

水素エネルギーシステムの導入効果に関する研究

A Study on the Effect of Introducing Hydrogen Energy Systems

東京大学 新領域創成科学研究科

環境学専攻 国際環境協力コース

学籍番号 47-36768

氏名 村中 実

本論文は、修士（国際協力学）取得要件の一部として、2006年1月23日に提出され、同年2月2日の最終試験に合格したものであることを、証明する。

2006年2月2日

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境学専攻 国際環境協力コース

主査 _____

論文要旨

日本は、エネルギー資源の多くを輸入に依存しており、国際的にみても、エネルギーセキュリティの低い国である。そこで、現在のエネルギー消費形態、エネルギー供給形態を抜本的にかえることにより、日本のエネルギーセキュリティを向上させることができる社会システムとして、水素エネルギーシステムが注目を集めており、近年、日本やアメリカ、EU 諸国を中心として、水素エネルギーシステム実現に向けた研究が推進されている。

水素エネルギーシステムとは、太陽光や水力などの自然エネルギーや原子力エネルギーなどから水素を製造した後、消費する場所までタンクローリーやパイプラインなどで輸送し、使用されるまで気体、液体、金属吸蔵などの形態で貯蔵して、最後に、燃料電池などによって、最終エネルギーとして消費する、水素をエネルギーキャリアとして構築される、新しいエネルギー消費構造を持った社会構造のことを意味する。

水素エネルギーシステムに関しては、省エネルギーや環境保全、エネルギーセキュリティの向上といった観点から、常々その有効性が主張されてきたのであるが、実際にどのくらい効果があるのかについては、明らかにされてこなかった。そこで本研究は、水素エネルギーシステムを導入した場合に、水素エネルギーシステムが日本のエネルギー獲得リスクに与える効果を定量的に分析することを試みた。

エネルギー獲得リスクを定量的に算出するために、金融工学で活用されているモダンポートフォリオ理論におけるシングルインデックスモデルを応用し、将来における水素エネルギーシステムの導入効果を比較検証した。エネルギーセキュリティの指標であるエネルギー獲得リスクは、エネルギーの輸入価格の変動から算出した。エネルギーの輸入価格は、戦争や海賊、経済の低迷などの様々な事象の影響を含んだ情報であるため、エネルギーの輸入価格の変動から、各エネルギーの持つ安定供給性などを評価することは、非常に有効な手法であるといえる。

2030年における水素エネルギーシステムがほとんど導入されていない社会、2030年における水素エネルギーシステムが導入段階である社会及び水素エネルギーシステムが最も浸透した社会の3ケースから、未来における日本のエネルギー獲得リスクを、2002年におけるアメリカ、イギリス、フランス、ドイツ及び日本のエネルギー獲得リスクと比較した。そして、これまで定量的に比較することができなかった、日本のエネルギーセキュリティの向上に関する水素エネルギーシステムの導入効果を明らかにすることができた。

目次

第1章 序論.....	6
1.1. 研究の背景.....	6
1.2. 研究の目的.....	8
1.3. 研究の方法.....	8
1.4. 論文の構成.....	9
1.5. 用語の定義.....	10
第2章 水素エネルギーシステムの概要.....	11
2.1. はじめに.....	11
2.2. 水素エネルギーシステムの概要.....	12
2.3. 水素の製造.....	14
2.3.1. 水素製造プラントでの大量生産.....	14
2.3.2. オンサイトでの生産.....	17
2.3.3. 工業プラントから発生する副生ガス.....	17
2.4. 水素の輸送・貯蔵.....	17
2.5. 水素の消費—燃料電池—.....	18
2.6. 水素エネルギーシステム導入の意義.....	20
2.6.1. 省エネルギー効果.....	20
2.6.2. 環境保全.....	21
2.6.3. エネルギー多様化の促進.....	21
2.7. 水素エネルギーシステム導入ケース.....	24
2.7.1. レファレンス（基準）ケース.....	24
2.7.2. 水素エネルギーシステムを含むエネルギー技術進展ケース.....	25
2.7.3. 水素エネルギーシステムが最も社会に浸透したケース.....	26
第3章 エネルギー獲得リスクの定量化.....	29
3.1. はじめに.....	29
3.2. 既往の研究.....	29
3.3. リスクの定量化.....	30
3.4. 世界エネルギー輸入価格の算出.....	33
3.5. シングルインデックスモデル.....	34
第4章 水素エネルギーシステムの導入効果の分析.....	37
4.1. はじめに.....	37
4.2. 世界エネルギー輸入価格の算出.....	37
4.3. α_{ij} 、 β_{ij} 、 e_{ijt} の算出.....	41

4.4. 各国の輸入1次エネルギーが持つリスク.....	47
4.5. 日本と他国のエネルギー獲得リスクの比較.....	50
4.6. 日本のエネルギー獲得リスクの推移.....	52
4.7. 水素エネルギーシステム導入後のポートフォリオリスク.....	55
第5章 結論.....	57
5.1. 結論.....	57
5.2. 将来の研究課題.....	58
付録.....	60
参考文献.....	109
謝辞.....	112

第1章 序論

1.1. 研究の背景

18世紀に始まった産業革命以降、今日に至るまで、人類の消費するエネルギー量は大変な勢いで増加している。そして今後も、世界人口の激増、発展途上国の経済発展に伴い、世界のエネルギー消費量は、ますます増加していくことが予想されている。ところが、2001年における日本のエネルギー自給率¹は6%しかないのが現状であり、自給できているエネルギーは、主に水力などの自然エネルギーである。また、一度輸入した後に、数年間は在庫として貯蔵することができ、再処理を行えば再び燃料として用いることができるウランを燃料とする原子力エネルギーが、日本の1次エネルギー²供給の13%をまかなっている。ここで、ウランは輸入資源ではあるものの、国内循環性の高い性質により、準国産資源と見なされ、日本のエネルギー自給率は原子力エネルギーを含めて19%であると表現されることもある。残りの81%を占める化石燃料（石油、石炭、天然ガス）は、ほぼ全量が輸入でまかなわれており、石油が49%、石炭19%、天然ガス13%という割合になっている。この内、石油の87%は中東から輸入している（エネルギー白書、2004）。

図1-1は、日本と他の先進国のエネルギー自給率を、原子力を含む場合と含まない場合に分けて表現している。図1-1より、原子力発電によって1次エネルギー供給の42.3%をまかなっているフランス、自国産の石油、石炭及び天然ガスを持つアメリカ、北海油田を持つイギリス、総発電量の64%を水力発電によってまかない、自国産の石炭、天然ガス及びウランなどを持つカナダなどの国々と比較すると、日本のエネルギー自給率は非常に低いことがわかる。

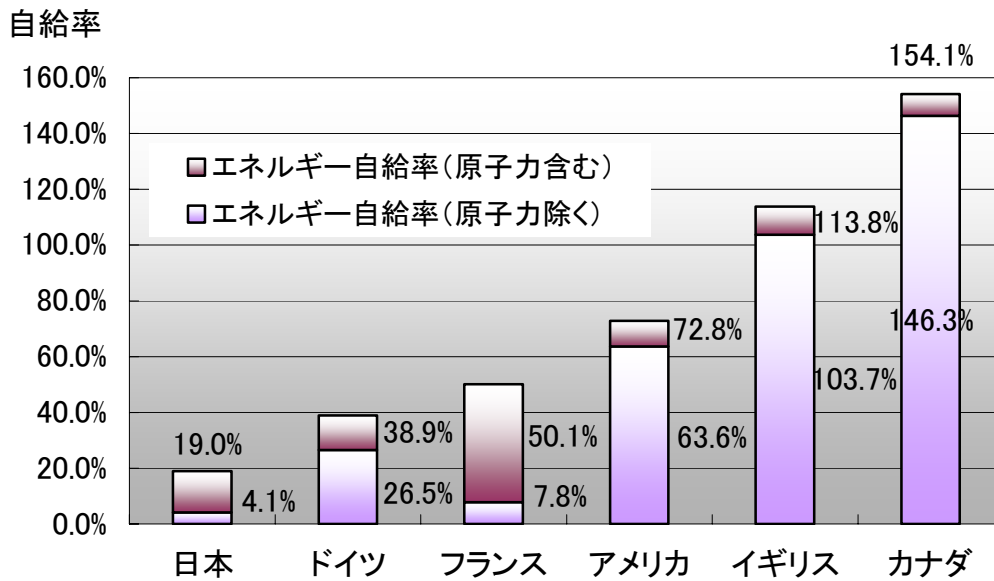
石油、石炭、天然ガス及びウランを現在のペースで使った場合に予想される各エネルギーの可採年数³は、BP統計2004とURANIUM2003によれば、石油が41年、石炭192年、天然ガス67年及びウラン85年となっている。今後、中国やインドなどに代表される発展途上国のエネルギー消費量が年々増加していくと思われることを考慮に入れると、各エネルギーの可採年数は、さらに短くなることが予想される。そして、これらのエネルギーをほぼ全量輸入している日本は、現在と同じように必要十分なエネルギー量を将来においても確保するにあたり、より一層の困難に直面することが推測される。

このように、日本は国際的にみて、非常にエネルギーセキュリティの低い国なのである。

¹ 1次エネルギー供給量のうち、国内で生産されたエネルギーの占める割合。

² 石油、石炭、天然ガス、ウランなど、自然界から加工することなく得られるエネルギー。

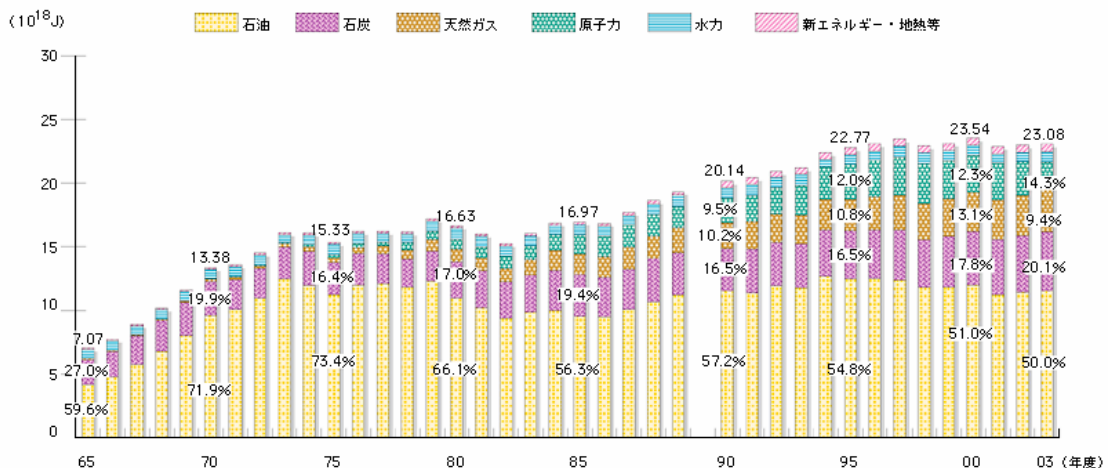
³ 可採年数＝確認可採埋蔵量/年間生産量。新たな鉱脈・油田の発見や採掘技術の進歩、あるいは年間生産量の変化に伴って変化する。



ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES 2001-2002、2004 より著者作成

図 1-1 エネルギー自給率の国際比較

図 1-2は、日本の1次エネルギー供給割合の推移を表している。図 1-2から、日本は石油の消費量を増やさずに、主に天然ガスと原子力を推進することによって、エネルギー需要を満たしてきたことが読み取れる。過去2度の石油危機を体験した後に、自国産エネルギー資源の乏しい日本は、エネルギー源の多様化を進めることにより、エネルギーの安定供給に努めてきたのである。



資料：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」
 (注)「総合エネルギー統計」は、1990年度以降の数値について算出方法が変更されている。

エネルギー白書 2005 より抜粋

図 1-2 日本の1次エネルギー供給の推移

しかし、エネルギーの多様化を進めてきたからといって、エネルギー資源の多くを輸入に依存している日本は、エネルギー価格、エネルギー輸送経路、為替、他国との外交摩擦などのエネルギー安定供給に対する不安要素を、依然として持ち続けていることにかわりはない。自動車、飛行機、船舶などは、石油由来のガソリンや軽油、ジェット燃料などを燃料にし、家庭やオフィスでは、大規模発電所で発電され、送電線を経由して送られてくる電気を使用しているエネルギー消費形態のもとで、日本のエネルギー輸入体質を抜本的にかえることは不可能であると思われる。

そこで、現在のエネルギー消費形態、エネルギー供給形態を抜本的にかえることが可能であり、日本のエネルギーセキュリティを向上させることができる社会システムとして、水素エネルギーシステムが注目を集めており、近年、日本やアメリカ、EU 諸国を中心として、水素エネルギーシステム実現に向けた研究が推進されている。

1.2. 研究の目的

水素エネルギーシステムを導入することの利点として、省エネルギーや環境保全、エネルギーセキュリティの向上などが挙げられているが、本研究で文献調査をした範囲内では、水素エネルギーシステムを導入した場合、エネルギーセキュリティの向上に対して、どれほどの効果があるのかを定量的に分析した研究は見あたらなかった。そこで本研究は、日本が水素エネルギーシステムを導入した場合における、日本のエネルギーセキュリティ向上効果を定量的に分析することを目的とする。

1.3. 研究の方法

エネルギー獲得リスクの定量化手法について、既存の研究論文や参考文献を調査した。エネルギー獲得リスクの定量化手法として、モダンポートフォリオ理論におけるシングルインデックスモデルを応用することとし、金融工学の教科書などを参照するとともに、水素エネルギーシステムをより深く理解するために、水素エネルギーシステムに関する文献や経済産業省が公開している水素エネルギーシステムに関する報告書を熟読した。シングルインデックスモデルを用いて分析するときに必要な世界エネルギー価格を算出する手法を、日経平均株価や TOPIX、GDP デフレーター、消費者物価指数などの算出方法を比較検討することにより決定した。本研究で使用する各国のエネルギー輸入価格や輸入量の時系列データは、インターネット及び東京大学総合図書館所蔵の資料より入手し、そのデータをもとに、Microsoft Office Excel 2003 を用いて計算式を組み立て、エネルギー獲得リスクを算定した。

1.4. 論文の構成

第 1 章は序論であり、研究の背景を紹介するとともに、日本のエネルギーセキュリティ向上の観点から、水素エネルギーシステムの導入効果を定量的に分析するという研究目的を述べる。

第 2 章では、水素エネルギーシステムの全体像とその構成要素を説明し、さらに将来の日本において想定される水素エネルギーシステム導入ケースを示す。

第 3 章では、エネルギーセキュリティを議論するときに必要な、各エネルギー及び 1 次エネルギー供給全体の持つリスク (=エネルギー獲得リスク) の高さを定量的に表す手法について論じる。

第 4 章では、日本と他国の 1 次エネルギー獲得リスクの比較を行い、1980 年から 2004 年までの日本における 1 次エネルギー獲得リスクの推移を明らかにするとともに、日本が水素エネルギーシステムを導入した場合の効果を分析する。

第 5 章は結論であり、本研究を総括し、今後の研究課題を述べる。

巻末に、本研究において分析するために収集した時系列データ及び計算結果を付録として収録する。

1.5. 用語の定義

水素エネルギーシステム：ガソリンや都市ガスなどのかわりに、水素を用いてエネルギーの輸送・貯蔵を行い、最終的に燃料電池などで電気を発生させ、エネルギーを消費するエネルギー供給消費構造。

1次エネルギー：石油や天然ガス、石炭、ウラン、水、太陽光、風などの自然界に存在するエネルギー。

2次エネルギー：ガソリンや都市ガス、電気など、1次エネルギーから人類が使いやすいように加工したエネルギー。

リスク：ある事象とその発生確率がわかっているときに使われる。事象はわかっているが、発生確率がわかっていないものは不確実性と呼ばれる。

エネルギー獲得リスク：ある国に必要な1次エネルギーを、様々な組み合わせによって獲得するときに存在する総合的なリスク。

シングルインデックスモデル：モダンポートフォリオ理論で展開されるリスク定量手法の1つ。ある1つの価格が、マーケットの変動とどのような関係を持っているのかを定式化し、その関係からリスクを計算する。

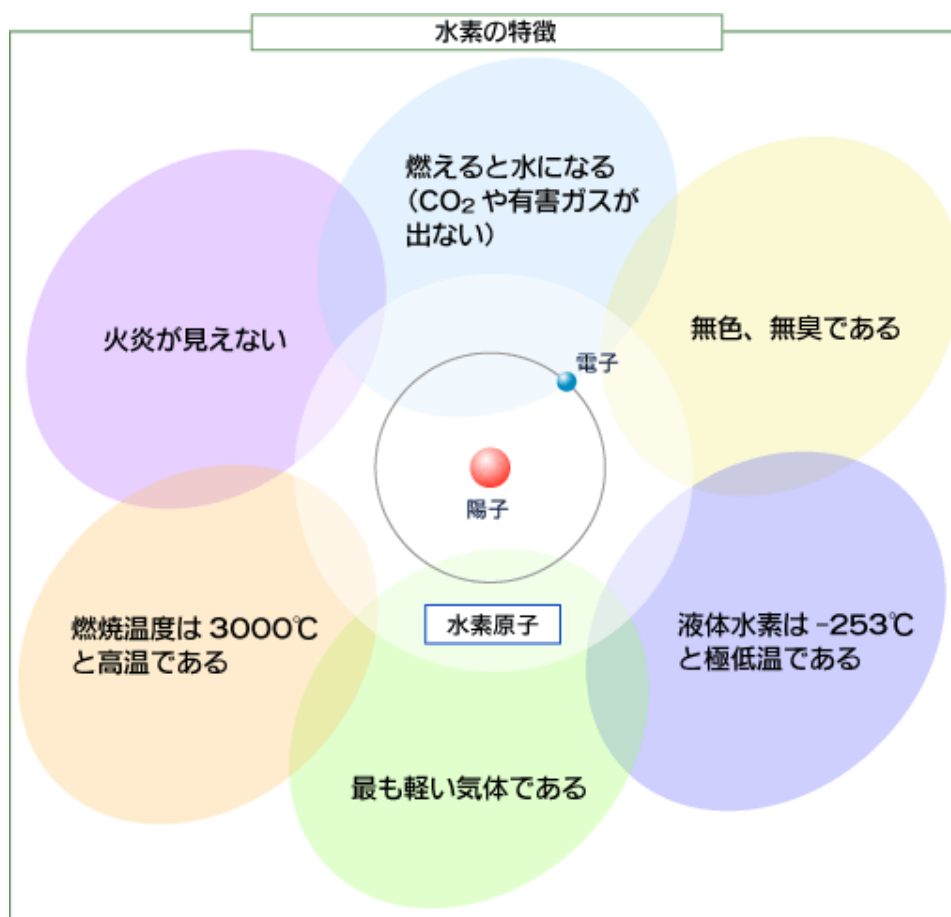
世界エネルギー価格：各国のエネルギー輸入価格と輸入量から各エネルギーのシェアを計算し、そのシェアから算出された世界におけるエネルギー輸入価格の推移を表す代表値。

第2章 水素エネルギーシステムの概要

2.1. はじめに

水素とは、元素記号はH、原子番号は 1、分子式は H_2 で表される物質であり、1766 年にイギリスのH. Cavendishにより、はじめて物質として確認された無色、無臭の最も軽い気体である。水素は、自然界において単独の分子としてはほとんど存在せず、水や有機化合物の形態で存在している。このため、水素を得るには、水や石油、石炭などの有機化合物より、何らかの方法で水素を製造する必要がある。

水素と空気中の酸素を直接燃焼させることによって、熱エネルギーを取り出すことができ、さらに、水素と酸素を燃料電池に供給することによって、電気エネルギーも取り出すことができる。このとき排出される物質は水のみである。



NEDO⁴ HPより

図 2-1 水素の特徴

⁴ 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
The New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)

水素は、アンモニアの製造や石油の精製、石油製品の製造、シリコン半導体に使用される高純度シリコンの製造などに使用されており、現代社会において非常に重要な役割を果たしている。一方、エネルギー源としては、ロケット燃料として使用されているが、石油や天然ガスなどの活躍により、一般用途に向けた使われ方はされていない。しかし、環境に優しいエネルギー源、現在における世界エネルギー供給の 90%を占めている化石燃料からの脱却手段として、水素をエネルギーキャリア⁵とした水素エネルギーシステムが脚光を浴びるようになってきた。

本章においては、「水素エネルギー最前線」(2003)を参考にして、水素エネルギーシステムについて説明する。はじめに、水素エネルギーシステム全体のイメージを捉えられるように水素エネルギーシステムの概要を述べる。次に、水素エネルギーシステムを構成する、水素の製造、水素の輸送・貯蔵、燃料電池を用いた水素の利用方法について説明する。その後、水素エネルギーシステムの各要素が持っている特性より、水素エネルギーシステム導入の意義を述べ、最後に日本政府が提案している水素エネルギーシステム導入ケースと独自に想定した水素エネルギーシステムが最も社会に浸透したケースを紹介する。

2.2. 水素エネルギーシステムの概要

人類は様々なものからエネルギーを獲得している。直感的に理解できるものとして、自動車の燃料であるガソリン、家庭用コンロで火を使うときに消費する都市ガス、テレビを見るときに消費する電気などがある。これらのガソリンや都市ガス、電気などは 2 次エネルギーと呼ばれる。

1 次エネルギーとは、石油や石炭、天然ガス、ウラン、太陽光、風、水などの自然界に存在している物質のことを意味しており、この 1 次エネルギーを人間が扱いやすいように加工したガソリンや都市ガス、電気などを 2 次エネルギーという。そして、これらの 1 次エネルギーや 2 次エネルギーを、最終的に消費することによって得られる自動車の推進力や家庭用コンロから発せられる熱、蛍光灯の光などを最終エネルギーという。

水素は、自然界において、水素分子という状態ではほとんど存在しないため、何らかの 1 次エネルギーを加工して作り出す必要があり、2 次エネルギーに含まれる。つまり、水素はガソリンや都市ガス、電気と同じように、人間が日常生活で扱いやすい形態に加工されたエネルギーを運ぶ物質、エネルギーキャリアである。そして、水素エネルギーシステムとは、この水素をエネルギーキャリアとして構築される、新しいエネルギー供給消費構造を持った社会構造のことを意味する。

⁵電気や水素、ガソリン、都市ガスなどのエネルギーを運搬するもの。

水素利用のトータルシステム

水素の製造、精製

製造

原料 (化石燃料や水など) + エネルギー (熱や電気など) → 水素

精製

水素の純度を高める



課題

製造コスト、生産能力、エネルギー効率

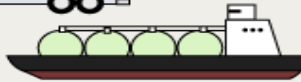
水素の輸送

次の研究開発が行われている

- ・ 輸送コンテナ
- ・ パイプライン



パイプライン



課題

輸送量と費用、漏れ、安全性 (ガス漏れなど)、エネルギーロス、材料の水素脆性

水素の貯蔵

次の研究開発が行われている

- ・ 高圧ボンベ (気体)
- ・ 水素吸蔵合金 (気体)
- ・ 液体水素 (液体)



貯蔵タンク

水素ボンベ



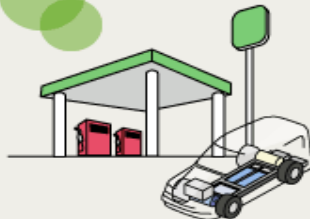
水素ポンペ

水素吸蔵合金

課題

重量、容量、ガス漏れ、安全性、耐久性、コンバクト、エネルギーロス、水素脆性

水素の利用



課題

安全性、効率性、普及への啓蒙

NEDO HP より

図 2-2 水素エネルギーシステムの概要

具体的には、図 2-2で表現されているように、はじめに何らかの 1 次エネルギーから水素を製造する。次に、製造された水素を消費する場所までタンクローリーやパイプラインなどで輸送し、使用されるまで気体や液体、金属吸蔵などの形態で貯蔵する。最後に、燃料電池などによって、最終エネルギーとして消費される。

2.3. 水素の製造

2 次エネルギーである水素は、何らかの 1 次エネルギーから製造する必要があり、その製造方法は製造する場所、製造する方法、製造するために使用される 1 次エネルギーの種類などで分類することができる。

水素を製造する場所として、次の 3 つにわけることができる。

1) 水素製造プラントでの大量集中生産

大規模発電所と同じように、一カ所で大量の水素を集中製造すること。

2) オンサイトでの生産

自動車や各家庭などの水素消費地にて、ガソリンや天然ガスから水素を製造すること。

3) 工業プラントから発生する副生ガス

製鉄業でのコークス製造プロセスや石油化学プロセスにおいて、水素が副生ガスとして発生しており、この水素を捨てずに、エネルギーとして利用すること。

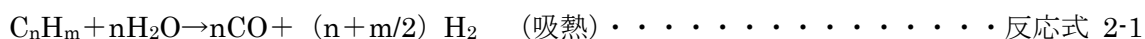
2.3.1. 水素製造プラントでの大量生産

大規模プラントでの水素製造では、エネルギーセキュリティの観点から化石資源から製造する方法と非化石資源から製造する方法にわけられる。現在、世界で製造されている水素の 97%は化石資源から製造されており、全水素製造量の 50%は天然ガスの水蒸気改質法によって製造されている。一方、非化石資源からの水素製造法は、脱化石資源や温暖化ガス対策として非常に有効な手段ではあるが、現段階では技術開発や水素製造コストに課題があり、実用化に向けて日々研究開発が行われているのが現状である。

本研究では、化石資源からの水素製造方法として、水蒸気改質法と部分酸化法、自己熱改質法を説明し、非化石資源からの水素製造方法として、水の電気分解法と水の熱分解法、水の光分解法を説明する。

1) 水蒸気改質法

水蒸気改質法は、天然ガス、ナフサなどの炭素資源を、高温・触媒存在下で水蒸気と反応させ、水素と一酸化炭素の合成ガス（改質ガス）を獲得する方法であり、その主な反応は、反応式 2-1 のガス化反応で表される。



水蒸気改質法は、改質ガス中の水素の存在比が高く、メタンやナフサなど軽質の炭化水素を原料とする水素製造に適した方法である。しかし、吸熱反応（外部の熱を吸収することによって反応が進行する）であるので、常に熱を外部から供給しなければならず、多量の投入エネルギーが必要となる。また、触媒劣化や炭素析出などの問題から、重質の炭化水素原料への適用は困難である。

2) 部分酸化法

部分酸化法は、触媒を必要としないため、原料中の不純物による制約がほとんどなく、軽質の炭化水素だけでなく、石炭や重質油などの重質の炭化水素原料も用いることができ、その主な反応は、反応式 2-2 のように表される。



部分酸化法の欠点としては、合成ガス中のH₂/CO比が水蒸気改質法より低く、反応温度が非常に高く、反応炉材料が高価になることが挙げられる。

3) 自己熱改質法

水蒸気改質反応の主反応は吸熱反応であり、外部からの熱供給を必要とするのに対し、部分酸化法は発熱反応である。そこで、これらの反応を、一つの反応器内部で進行させ、熱的に自立させる方法が自己熱改質法である。

4) 水の電気分解法

水の電気分解法は、水に電流を流すと陽極側から酸素、陰極側から水素が発生する性質を用いて、水素を製造する方法であり、アルカリ水電解法や固体高分子電解質水電解法、高温水蒸気電解法などの種類がある。

アルカリ水電解法は、現在実用化されている最も一般的な水の電気分解法である。アルカリ水電解法は、電解質として 25%程度の KOH 水溶液を用いる。装置の構造はシンプルなのだが、エネルギー効率が 20%程度と低い。

固体高分子電解質水電解法は、H⁺イオンのみが通過する 0.1 mm程度の厚さのフッ素樹脂系イオン交換膜を、白金触媒電極と多孔質系給電体、主電極で挟む構造となっている。エネルギー効率が高く、装置のコンパクト化が可能であるが、イオン交換膜や白金触媒の価格が高いことが課題となっている。

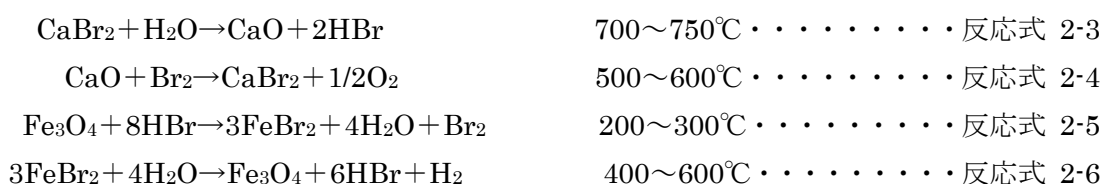
高温水蒸気電解法は、900～1000℃で水蒸気の電気分解を行う手法である。エネルギー効率が高く（～50%）、1Nm³の水素を製造するために必要な電力は、室温下よりも 30%少なく、廃熱の利用も考えられる。

これらの水の電気分解法は、原子力、水力、太陽光、風力などから発電された電力を用いれば、化石資源に頼らなくても良いという特徴を持つが、同時に電気という様々な装置を動かすことができる非常に便利なエネルギー形態から水素を作り出すことになる。今後、水の電気分解法による水素製造は、既存の電力インフラを活かす意味でも、余剰電力や電力系統に接続しにくい自然エネルギーなどから得られた電力を水素に変換し、電力を貯蔵する方法として発展していくものと思われる。

5) 水の熱分解

水を熱によって直接分解するためには、4000℃以上の高温を必要とするのだが、この温度領域では、構造材料的にも、エネルギー収支的にも非現実的である。しかし、いくつかの熱化学反応を組み合わせることにより、1000℃以下の温度領域で水を分解し、水素を取り出すことができる。

1つの方法として、東京大学を中心とするグループにより考案された UT-3 プロセスがあり、反応式 2-3 から反応式 2-6 の4つの要素反応からなる。



米国ゼネラル・アトムクス社により考案され、日本原子力研究所などで活発に研究されている熱分解プロセスとして IS プロセスがあり、反応式 2-7 から反応式 2-9 の3つの要素反応からなる。



熱分解プロセスに用いる熱源として、化石資源を使わず、かつ水素の大規模製造が可能な原子炉、特に高温ガス炉の核熱の利用が近年注目されている。現在、商業用原子炉として主流の軽水炉では、冷却剤である水（軽水）の出口温度は330℃程度であるが、高温ガス炉ではヘリウムガスを冷却剤として使い、900℃を超える熱を取り出すことが可能である。

原子力プラントを用いた水素製造は、そのエネルギー出力及び密度の高さから、大規模な水素製造が可能であり、将来の大きな水素需要を環境制約、資源制約を満たしつつまかなう手法として期待されている。

6) 水の光分解法

水の光分解法とは、水中に設置した半導体光触媒である二酸化チタン(TiO_2)に、太陽光線に含まれる紫外域の光を当てることによって化学反応が起き、水が水素と酸素に分解される本多・藤嶋効果を用いることにより、水素を製造する方法である。現在、光触媒は建物の外壁や車内の防汚、除菌、脱臭などの目的で商品化されている。しかし、水素製造の観点から見ると、化石資源を使わずに水素を製造することができる手法ではあるが、太陽光中の紫外域の光しか利用できないために、太陽光発電と水の電気分解を組み合わせた水素製造システムと比べて、エネルギー効率がかなり低いのが現状である。

2.3.2. オンサイトでの生産

オンサイトでの水素製造とは、水素を消費する場所で水素を製造することである。つまり、水素製造場所までは、ガソリンや都市ガス、灯油などの形態でエネルギーを輸送・貯蔵し、家庭用燃料電池などのシステムの中で、都市ガスを水素に変換し、最終的に水素からエネルギーを取り出すシステムである。この場合、装置が小規模であり、メンテナンスが必要な装置が分散することになるため、コスト面では不利ではあるが、利点として、既存のエネルギーインフラを活用できることが挙げられる。当面は、水素の輸送・貯蔵に関する技術や水素供給ステーションなどのインフラ整備などに時間がかかることが予想されるので、本格的な水素エネルギー社会が到来するまでは、オンサイトで液体燃料や都市ガスから水素を製造するという姿が現実的である、との見方がある。

2.3.3. 工業プラントから発生する副生ガス

製鉄業でのコークス製造プロセス、塩素や苛性ソーダの生産のための食塩電解プロセス、石油化学プロセスにおいて、水素ガスが副生ガスとして発生している。このうち、相当量は、工業用原料や熱エネルギー源として自家消費されたり、外販されたりしているが、使われずに大気中に放出されている水素ガスもかなりある。この未使用水素ガスを回収することにより、短中期的な水素需要を満たすことができると考えられている。

2.4. 水素の輸送・貯蔵

水素は、都市ガスやガソリンなどと同じように、「物質として存在する」2次エネルギーであるため、電気とは違い、大量に輸送・貯蔵することができる。具体的な方法として、パイプラインや圧縮ガス、液体水素、水素吸蔵材などを用いて、輸送・貯蔵することができる。

1) パイプラインによる水素輸送

水素は、天然ガスと同じように、パイプラインで輸送することが可能である。実際に、水素又は水素と天然ガスの混合ガスを輸送するパイプラインが、世界で30カ所以上存在す

る。特に、欧州には約 1500 km のパイプラインがあり、安全上の問題もなく、生産者と消費者の間で用いられている。

2) 圧縮ガスタンク

圧縮ガスによる水素貯蔵は、水素の貯蔵方法として技術的な歴史が長く、最も一般的な方法である。一般的に、金属材料は水素を吸収すると、水素脆性と呼ばれる現象を生じ、脆くなるため、圧縮水素ガス容器材料には、水素脆性を起こさない材料が用いられる。自動車搭載用タンクの場合では、軽量かつ省スペース、高密度である必要があり、現在では 350 気圧の充填が可能な高压水素タンクが用いられている。このタンクを用いた場合の航続走行距離は 300~355 km であり、ガソリン車並の 500 km 以上の航続走行距離を実現するために 700 気圧対応の超高压タンクの開発が進められている。

3) 液体水素タンク

水素は、 -252.8°C という極低温にすると液化され、標準状態での水素ガスに比べて、体積が約 1/800 の高密度になり、圧縮水素よりもコンパクトになる。また、液体水素はガソリンの約 4 倍の質量エネルギー密度を有しており、コンパクトかつ優れた質量エネルギー密度の大きさを持つ水素輸送・貯蔵形態である。しかし、液体水素を得るためには、高純度の水素と大量の電力が必要となる。そして、貯蔵中にもロスが生じるため、総合エネルギー効率が大きく低下してしまうという欠点を持っている。

4) 水素吸蔵材

金属の中には、水素と反応して金属水素化物を生成しやすいものがある。水素をある圧力より加圧することにより金属中に吸蔵し、減圧することにより放出する性質を利用した水素貯蔵材を水素吸蔵合金と呼ぶ。水素が金属中に固定されると、体積は常温常圧の 1/1000 程度と液体水素よりもコンパクトになるのだが、金属自体の重量が重くなるため、質量エネルギー密度は圧縮水素と同程度となる。

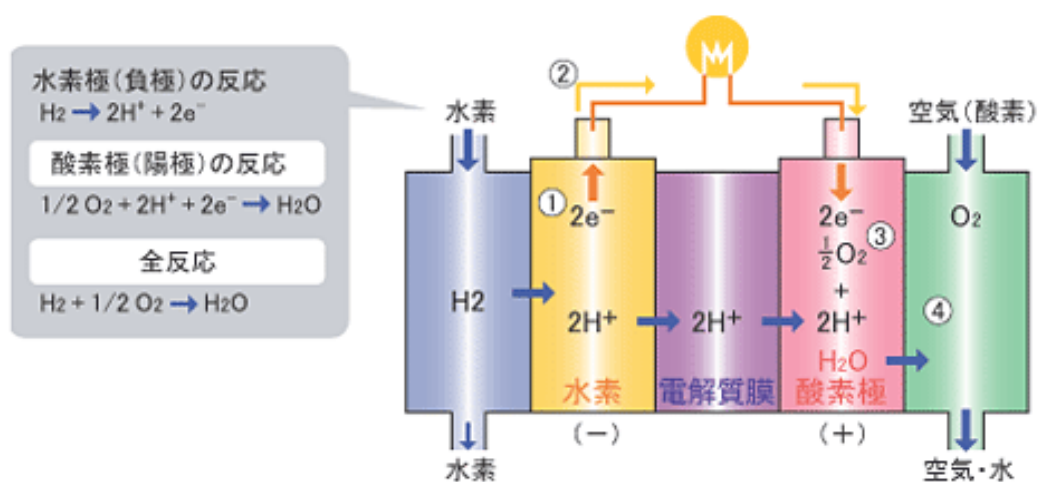
他にも、カーボンナノチューブやグラファイトナノファイバーといったナノ構造を持つ炭素系物質やシクロヘキサン-ベンゼン系、メチルシクロヘキサントルエン系、デカリン-ナフタレン系などの室温で液体である有機化合物、アラネートと呼ばれるアルミニウム水素化物などの無機系水素化合物などが、新たな水素吸蔵用材料として研究されている。

2.5. 水素の消費—燃料電池—

水素は、都市ガスのように直接空気中の酸素と反応させて燃焼させることも可能であるが、水素エネルギーシステムでは、燃料電池を用いて水素と酸素から電気を取り出して利用することが想定されている。

燃料電池は、電気を貯める蓄電池と似たようなものである、と連想されることがあるが、実際には全く違う。燃料電池は電気を貯めるものではなく、電気を発電する装置である。また、燃料電池は、火力発電所やディーゼル発電機などのような発電装置とも違った特徴を持っている。既存の火力発電所などの発電システムは、石油などの化石燃料を熱エネルギーに変換し、さらにタービンの回転という力学的エネルギーにかえ、モーターを回すことによって、最終的に電気を得る。しかし、燃料電池は、電気化学反応によって、水素という化学エネルギーを直接電気に変換することができる装置である。さらに、燃料電池は発電に伴って熱を発生させるので、電気と熱を同時に供給するコージェネレーション装置や熱エネルギーを利用するタービンと組み合わせて、高効率の発電システムを構築することができる。

図 2-3は、燃料電池の原理を表している。原理はとても単純で、イギリスのWilliam Grove卿による実験により、電解質を挟んで水素と酸素を供給すると、電気と熱と水が発生することが発見された。



JHFC⁶ HPより

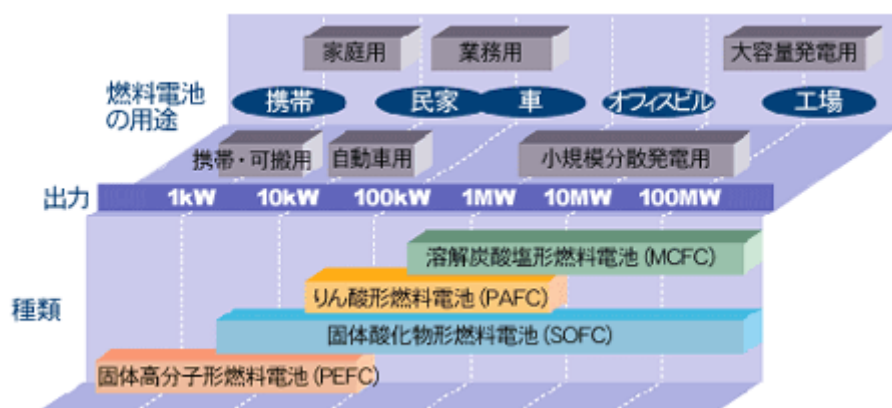
図 2-3 燃料電池の原理

Grove卿が基本的な原理を発見した後、様々な電解質が考案されてきた。現在では、リン酸形や固体高分子形、アルカリ形、直接メタノール形、熔融炭酸塩形、固体酸化物形などが研究開発されている。このうち、リン酸形燃料電池と固体高分子形燃料電池は、200℃や80℃といった比較的低温で動作するので、家庭用燃料電池や自動車搭載用燃料電池として応用されている。一方、熔融炭酸塩形燃料電池や固体酸化物形燃料電池は、600℃以上及び800～1000℃の高温で動作するので、発生する熱エネルギーを利用した中規模発電プラント

⁶ Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project

水素・燃料電池実証プロジェクト

として位置づけられている。さらに、直接メタノール形燃料電池は、携帯電話やラップトップ型コンピュータ用の電源として利用されることが見込まれている。図 2-4は、各燃料電池の用途を表している。



JHFC HP より

図 2-4 燃料電池の用途

2.6. 水素エネルギーシステム導入の意義

依然、技術的ブレークスルーを多く必要とし、現状では非常にコスト高の水素エネルギーシステムではあるが、このシステムは非常に多くの利点、特に日本における利点を有している。

水素エネルギーシステムの利点は、以下に示す 3 つに大別される。

- 1) 省エネルギー効果
- 2) 環境保全
- 3) エネルギーの多様化の促進

2.6.1. 省エネルギー効果

水素エネルギーシステムでは、最終的に燃料電池を用いて水素を消費することとなる。燃料電池は、電気と熱の両方を取り出すことができる非常に効率の高い装置であり、家庭用や業務用の分散電源として定置式燃料電池を用いた場合、電気を発電するのと同時に熱を得ることができ、その熱を給湯や暖房などに利用することにより、エネルギー効率 80% 程度のコージェネレーションシステムを実現することができる。この利点により、民生部門における省エネルギー効果が期待できる。

2.6.2. 環境保全

我が国が排出する温暖化ガスの 80%はエネルギー起源であるといわれており、現在のガソリン車から燃料電池自動車に切り替えれば、たとえ水素をガソリンから改質した場合でも現状の半分、天然ガスから製造すれば現状の 4 割程度に減らせるとの試算がある。原子力発電や自然エネルギーから得た電気を、水素に変換して自動車で利用すれば、発生する二酸化炭素をゼロにすることも可能となる。

自動車や家庭、オフィスなどで燃料電池を用いた場合、排出される物質は水のみなので、窒素酸化物、硫黄酸化物、浮遊粒子物質などによる大気汚染問題が解決される。燃料電池自動車には、現在のエンジンよりもはるかに静かな電気モーターが搭載されることから、燃料電池自動車は非常に静かに走行することができ、騒音問題も解決される。

2.6.3. エネルギー多様化の促進

水素エネルギーシステムの持つ省エネルギー効果と環境保全効果は、大変優れた利点ではあるが、日本における水素エネルギーシステム導入における最大の利点は、1 次エネルギー源の多様化効果である。日本は、原子力エネルギーを自国産のエネルギーに含めても、1 次エネルギー供給の 80%を占める石油や石炭、天然ガスのほぼ全量を輸入に頼っている自国産エネルギー資源の貧しい国である。過去 2 度のオイルショックやロシアのウクライナへの天然ガス供給停止騒動などからも垣間見られるように、1 次エネルギーを輸入に頼っている国は、常にエネルギー供給断絶の危険性を有しているのである。現在の日本においては、自動車、船舶、飛行機はガソリンやジェット燃料でのみ動き、家庭やオフィスで用いる電気の大半は、大規模発電所で発電され、送電線を経由して送られてきた電気である。そして、この構造は、エネルギー供給消費構造そのものの抜本的な変化がない限りはかわらぬと思われる。もし、突然石油供給が途絶えてしまった場合、現在の日本のエネルギー供給消費構造のもとでは、自動車や船舶、飛行機を動かすことができなくなり、電力の供給量も減少することとなる。その結果、日本は現在のように活発な経済活動を行うことができなくなり、経済が低迷し、エネルギー資源を買う財力もなくなり、さらに経済が低迷するという悪循環に陥ってしまうこととなる。

日本はこれまでに、エネルギー供給断絶による影響を少なくするために、原子力エネルギーや天然ガスなどを積極的に利用し、エネルギー源の多様化を進めてきた。そして、さらなるエネルギー源の多様化を実現するための手段として、水素エネルギーシステムが注目されている。水素エネルギーシステムを導入すれば、今まで石油由来の燃料でしか動かなかった自動車、船舶、飛行機などを、原子力エネルギーや自然エネルギーなどの自国産のエネルギーから作り出した水素によって動かすことができるようになる。

原子力エネルギーや自然エネルギーからは、水素と同じ 2 次エネルギーである電気を得ることができる。しかし、エネルギーキャリアとして、水素と電気には以下に示すような違いがある。

- 1) 水素は大量に貯蔵できるが、電気はできない。
- 2) 電気はものを移動させずにエネルギーを輸送できるが、水素はできない。
- 3) 水素は長距離の輸送に適しているが、電気は短距離の輸送に適している。

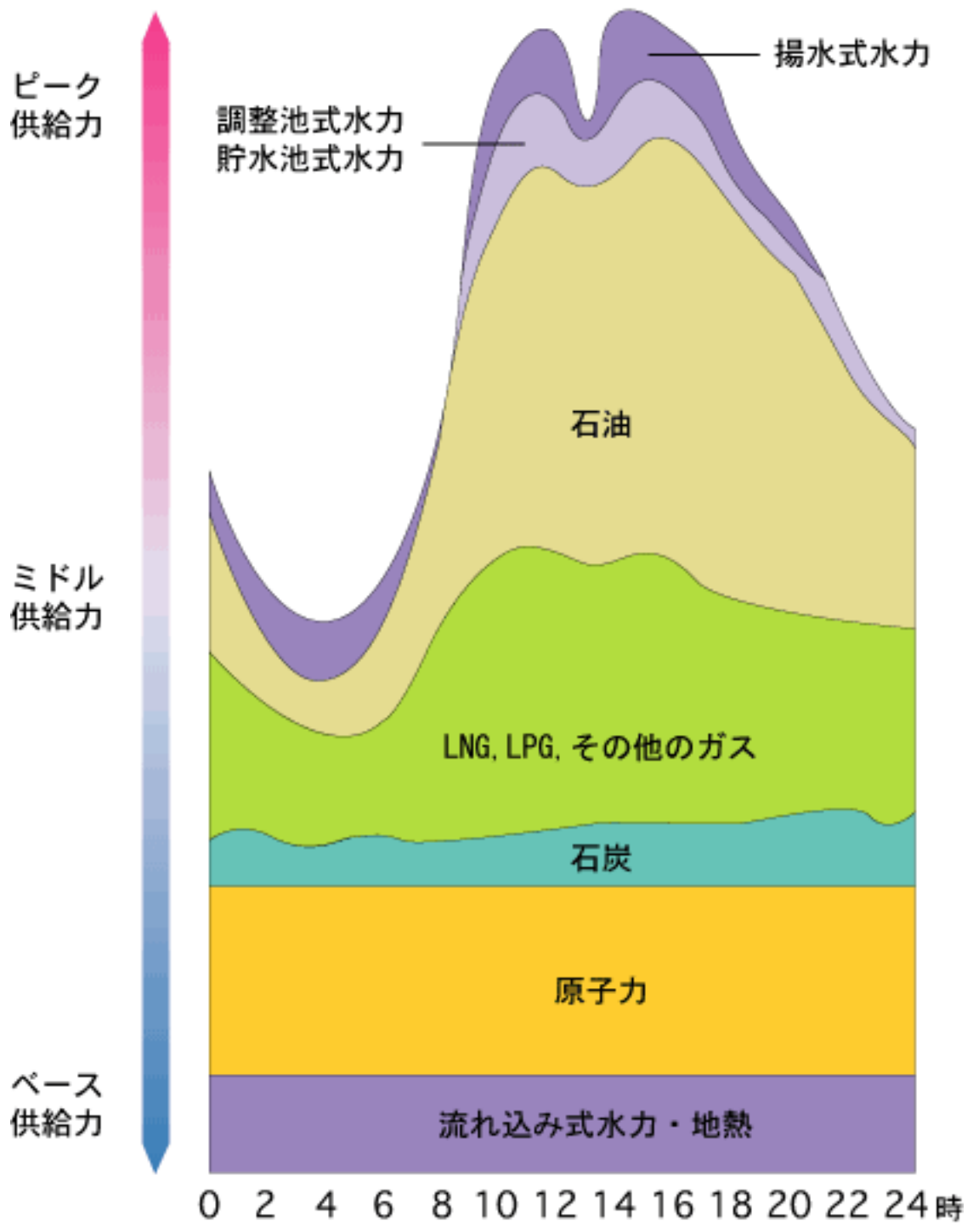
1) 水素は大量に貯蔵することができる、という特徴が、エネルギー源の多様化に対して発揮する優れた効果を、以下に示す。

- i) 図 2-5は、一日における各電源の割合の変化を表しており、電気の無駄使いを避けるために、電力需要のピーク時にのみ、石油や石炭、天然ガスによる火力発電を利用してきた。水素エネルギーシステムを導入した場合、最初からピーク時の需要に見合うだけの電力を、ベース電源⁷である原子力発電と水力発電でまかない、電気が余っているときは水素の形態で貯蔵し、その水素を自動車などの燃料として活用することができるようになる。
- ii) 風力発電や太陽光発電などの自然エネルギー由来の電源は、発電量が天候に左右されるため、発電量が不安定になり、系統電源⁸に接続する際の取り扱いが非常に難しいのであるが、発電された電気を水素という形に変換すれば、変換ロスはあるものの、系統電源へ影響を与えるという問題が解決されるので、現在よりもさらに自然エネルギーの利用が促進されることが期待できるようになる。
- iii) 高温ガス炉での水の熱分解による水素製造のように、全く新しい方法で、2次エネルギーを製造することができるようになる。

i) から iii) の例のように、様々な 1 次エネルギーを一度水素に変換し、最終的には燃料電池を用いて電気に変換する水素エネルギーシステムを導入することにより、今まで存在しなかった柔軟なエネルギー供給消費構造が実現し、エネルギー源の多様化が一層促進され、日本のエネルギーセキュリティが向上することが期待できる。

⁷ 発電コストが安く、常に一定量発電し続けるように位置づけられた原子力発電や水力発電をベース電源という。

⁸ 電力網に流れる電力量は常に調整されているのだが、自然エネルギーなどから得られた不規則な電力は、電力網に流す電力量の制御を困難にさせてしまうという欠点がある。



電力事業連合会 HP より

図 2-5 一日における各電源の割合の変化

2.7. 水素エネルギーシステム導入ケース

1次エネルギー供給の将来像がどのようになっているのかを詳細に議論することは、非常に難しいので、本研究では、詳細な将来予測を独自に行うことは避け、経済産業省総合資源エネルギー調査会需給部会が平成17年3月に公表した報告書「2030年のエネルギー需給展望」より、①「レファレンスケース」と②「水素エネルギーシステムを含むエネルギー技術進展ケース」の2ケースを参考にする。さらに、水素エネルギーシステムが最も社会に浸透したケースを第3ケースとする。

本研究においては、これらの将来予測に含まれる情報のうち、将来における1次エネルギー供給割合のみを分析に用いることになるので、本章においては、各ケースの基本的な仮定と1次エネルギー供給割合の予測結果のみを述べる。

2.7.1. レファレンス（基準）ケース

現行の技術体系と既に実施済の施策を前提とし、経済社会や人口構造、マーケットや需要家の嗜好、民間ベースの取組が、これまでと同じような流れで変化し、推移した場合を想定して試算したケースである。

レファレンスケースにおける仮定は、以下に示すとおりである。

1) 主な前提条件とマクロフレーム

- a) 労働力人口など供給側の制約を参考に、今後の経済成長率、最終需要項目を推計し、将来の産業構造の変化を予測する。
- b) 経済成長率は、年率1%台で漸減。産業構造は、これまでと同じような流れで変化していくと想定するとともに、経済のサービス化と高付加価値化を想定する。
- c) 社会構造の変化については、これまでの流れから将来が予測できるものに限定して、試算に反映する。
- d) 国際エネルギー価格については、代表的な見方を前提として設定する。

2) 需要サイド

- a) 省エネルギー対策の効果については、既に実施済みの施策のみを前提とし、今後は、マーケットや需要家の嗜好、民間ベースの取組によって、自律的に普及していくものと想定。

3) 供給サイド

- a) 原子力は、2010年度から2030年度までの新規運開容量は、当該期間の電力需要増分に比例すると想定。
- b) 新エネルギーは、あまり進展しないと仮定し、2010年度で約900万kl(石油換算)、2030年度で約1,900万kl(石油換算)と想定。

c) 上記以外のエネルギー供給については、エネルギーモデルによって経済合理的に決定されるものとして試算。

図 2-6は、以上の仮定のもとで算出された 1 次エネルギー供給割合予測を表している。石油の依存度が減少し、天然ガスの割合がさらに増え、原子力とその他のエネルギーの割合も微増していることが予測されている。

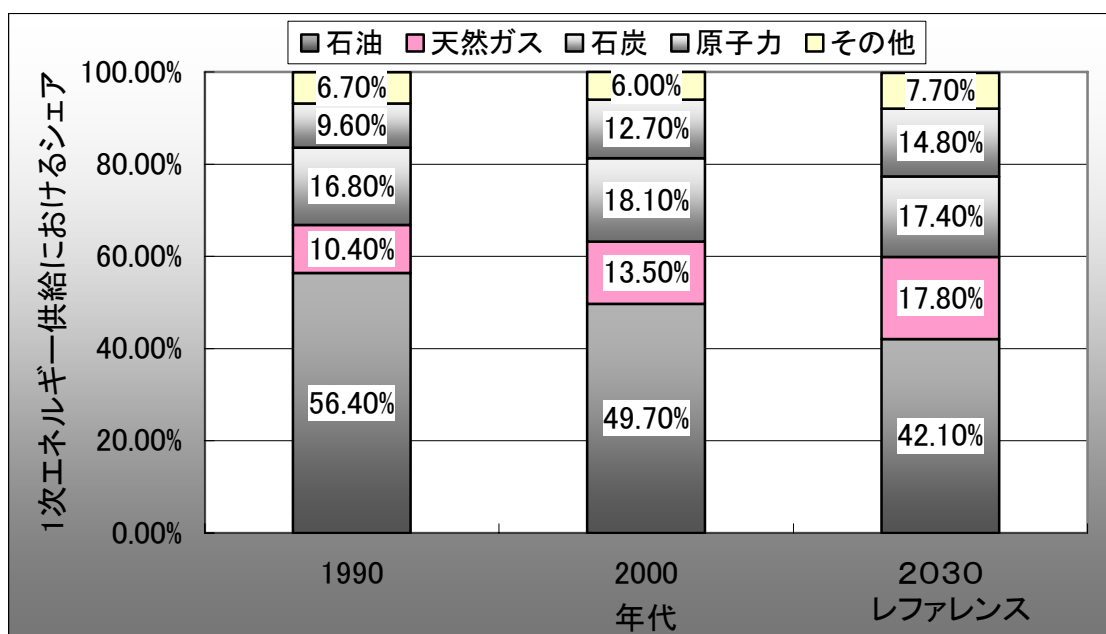


図 2-6 2030 年レファレンスケースにおける 1 次エネルギー供給割合予測

2.7.2. 水素エネルギーシステムを含むエネルギー技術進展ケース

レファレンスケースよりも省エネルギー・新エネルギーなどが大きく進展し、そのポテンシャルが最大限に発揮されるケースである。レファレンスケースとの違いは、現在開発中の省エネ技術・ビジネスモデルが、実用化・開拓されるとともに、導入促進に向けた官民の取組、需要家の選好などによって円滑かつ広範に普及浸透し、大幅な省エネルギー進展が実現するとしたことである。具体的には、

- 1) 現行の省エネルギー取組（従来型の省エネルギー技術）の普及・進展
- 2) 新規の省エネルギー技術の普及・進展
- 3) ヒートポンプを利用した省エネルギー技術の普及・進展
- 4) 燃料電池&分散型エネルギーの普及・進展

を考慮しており、水素エネルギーシステムは、4) 燃料電池&分散型エネルギーの普及・進

展、に含まれ、以下に示すような仮定がおかれている。

- a) 定置用燃料電池：1250 万 Kw（総発電量 11, 287 億 Kw の 0.011%）
- b) 燃料電池自動車：1500 万台（総自動車数 8, 000 万台の 18.75%）

図 2-7は、2030 年において最もエネルギー技術が進展した場合に達成される 1 次エネルギー供給割合の予測結果である。レファレンスケースと比べると、石油への依存度がさらに減少しており、天然ガスの割合も減っている。原子力の割合は大幅に増えており、その他のエネルギーの割合も増加していることがわかる。

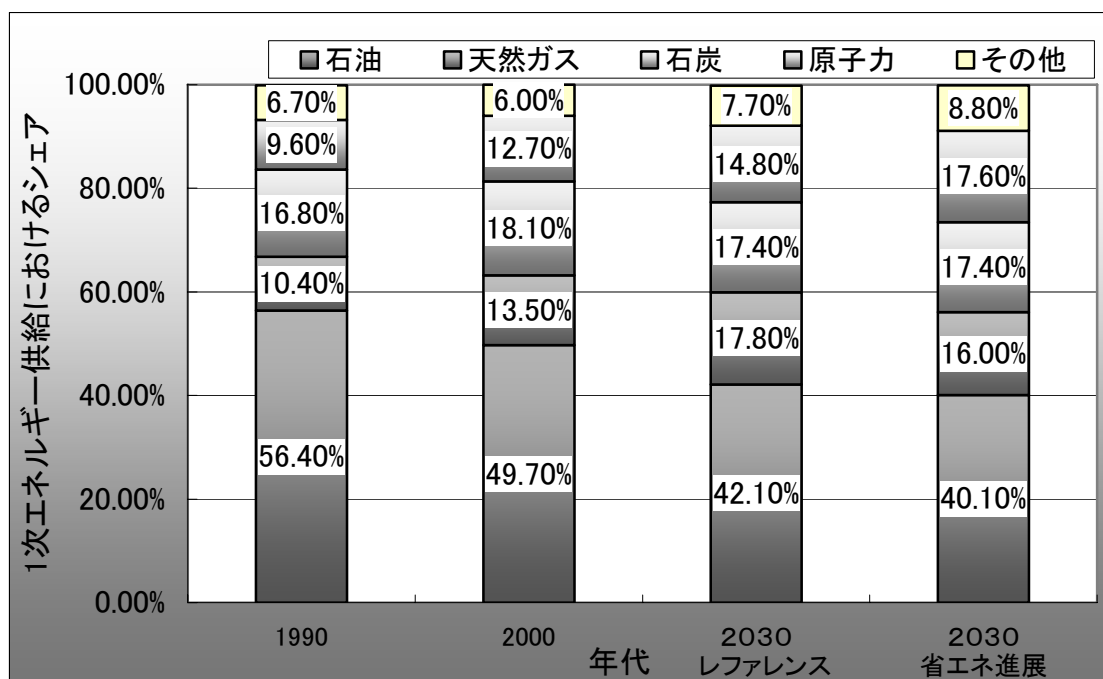


図 2-7 2030 年におけるエネルギー技術進展ケースにおける 1 次エネルギー供給予測

2.7.3. 水素エネルギーシステムが最も社会に浸透したケース

独自に想定した、水素エネルギーシステムが最も社会に浸透したケースである。図 2-8は、2001 年度における日本のエネルギーフローを表しており、2001 年度に日本国内で流通したエネルギーの流れを 1 次供給段階と流通段階、最終消費段階にわけて表現しているものであり、日本におけるエネルギーの流れを一目で理解することができる。



エネルギー白書 2004 より

図 2-8 わが国のエネルギーバランス・フロー（2001年度）と二酸化炭素排出量

水素エネルギーシステムが最も社会に浸透したケースにおいて予測される将来像としては、エネルギー単位を 10¹⁵Jとして、

- 1) 自動車は全て燃料電池自動車に切り替わっている。
→ガソリン (2, 064)、軽油 (1, 352) はなくなる。
- 2) 定置用燃料電池が全家庭・オフィスに普及している。
→都市ガス (1, 078)、灯油・LPG(1,951)はなくなる。
- 3) 発電は、ベース電源である原子力と水力が中心で、ベース電源のみでピーク時の電力をまかなうことができ、余剰電力は常に水素に変換して貯蔵している。
→非常用の発電用燃料として、石油 (200)、天然ガス (500)、石炭 (500) のみ残る。
- 4) 1) から 3) で削減されたエネルギーは、原子力と水力、自然エネルギーなどによる発電と高温ガス炉における水素製造などによって代替される。

1) から 4) をもとに、1 次エネルギー供給割合を計算すると、表 2-1の結果を得ることができ、表 2-1をグラフにしたものが図 2-9である。石油の用途は、産業用石油製品と他輸送燃料、発電用のみとなり、天然ガスは発電用のみ、石炭は発電用が 500 に減るのみで残りはかわらない。一方、発電と水の熱分解による水素製造のために、原子力発電の規模が 2001 年の 3 倍強になり、電力だけのときには発電量が安定せず、貯蔵することができなかった自然エネルギーも、エネルギー変換効率の向上と水素に変換することによる利便性により、2001 年度の 3 倍弱になる。

表 2-1 最も水素エネルギーシステムが社会に浸透した場合の 1 次エネルギー供給割合

	1990	2001		2030 水素エネルギー社会	
		10 ¹⁵ J	100	10 ¹⁵ J	
石油	56.40%	10761	48.55%	5319	24.00%
天然ガス	10.40%	2988	13.48%	500	2.26%
石炭	16.80%	4215	19.02%	2662	12.01%
原子力	9.60%	2879	12.99%	10000	45.12%
その他	6.70%	1321	5.96%	3683	16.62%
合計	100.00%	22164	100	22164	100.00%

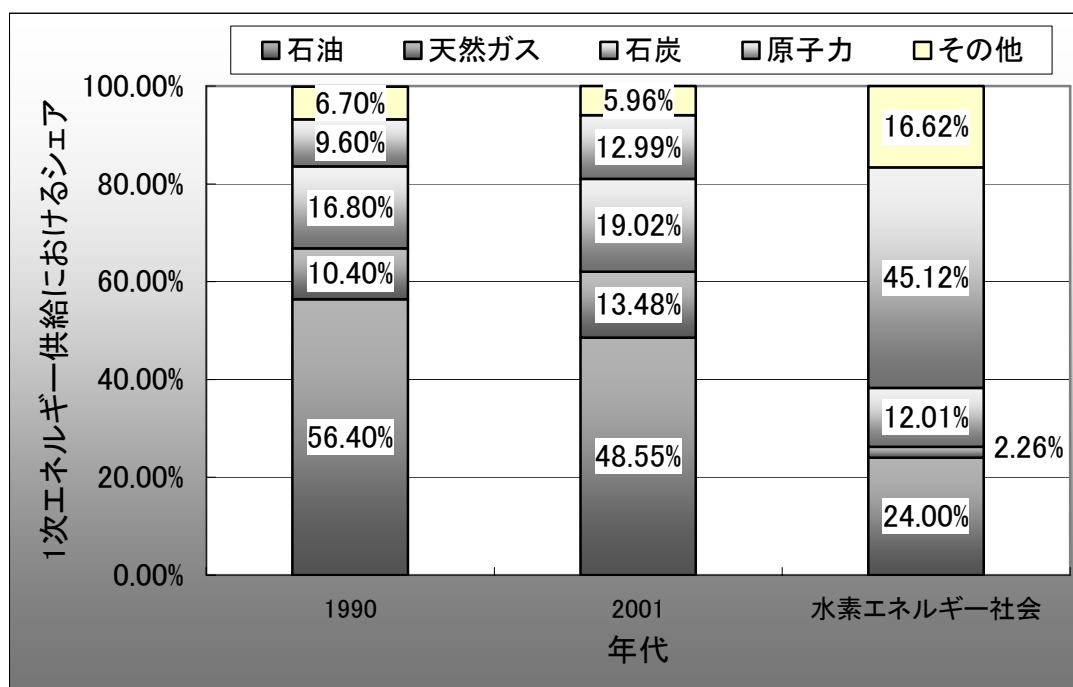


図 2-9 最も水素エネルギーシステムが社会に浸透した場合の 1 次エネルギー供給割合

第3章 エネルギー獲得リスクの定量化

3.1. はじめに

日本の1次エネルギー供給を構成する石油や石炭などの各エネルギーが持つリスクを、定量的に示すことは難しい問題である。例えば、石油供給が突然途絶えてしまったケースを考えると、国交が断絶してしまったために輸入ができなくなった、運搬途中に海賊に襲われてしまった、産油国で戦争が勃発したために輸出されなくなってしまった、などの理由が存在すると思われる。一つ一つの想定しうる事象を挙げることは比較的容易であるが、いざ各事象の発生確率を知ろうとすると、途端に困難に直面する。しかし、エネルギー問題を定量的に分析するためには、各エネルギーの持つ不確実性を、リスクとして捉えなくてはならない。本論文では、「エネルギー供給全体が持つリスクを定量化する手法」として、これまでに金融投資の分野でリスクと収益率の効果的配分を算出する手法として活用されてきた、モダンポートフォリオ理論のシングルインデックスモデルの考え方を応用した。

本章では、はじめに、エネルギー供給全体が有するリスクの定量化を、ポートフォリオ理論を応用することにより試みた既往の研究について述べる。次に、本研究におけるエネルギーセキュリティ向上の定義、不確実性とリスクの違い、リスクを計測するための統計データ等を論じる。その後、世界エネルギー価格を導出し、最後に、エネルギー供給全体のリスクを計算するために応用したシングルインデックスモデルについて論述する。

3.2. 既往の研究

ポートフォリオ理論を応用してエネルギーセキュリティを議論している論文としては、Neff(1997)が発表したアジア太平洋地域におけるエネルギーセキュリティの研究がある。Neff は産油国の石油生産量データから、平均分散モデルを用いて、湾岸戦争時の供給安定性を議論しており、湾岸戦争時においても、輸入先を複数国に分散させることにより、石油供給リスクを低下させることができることを示している。この研究は、エネルギー供給源を分散させることによりエネルギーセキュリティを向上させる政策を、産油国の石油生産量データの推移をもとに定量的に分析している。

2000年には、経済産業省のエネルギーセキュリティ・ワーキンググループが、1次エネルギーをどのような組み合わせにすると最もリスクを低くできるのかを、分散・共分散行列を用いて定量的に分析している。この研究では、石油のリスクを基準値1.0とした場合に、天然ガスと石炭、原子力のリスクはいくらになるかを、世界のエネルギー需給バランスから得たエネルギー産出国の偏在性と、Euromoney誌の政治・経済指標（100点満点）を用いた輸入相手国の政治的リスクから算出している。そして、想定されうる様々な将来シナリオにおいて、どのような組み合わせのとき、1次エネルギー供給獲得リスクが最小になるかを比較検証している。

Lesbirel(2004)は、1970年から1999年までの、日本におけるエネルギーセキュリティの

変化を分析している。Lesbirel は、世界エネルギー輸入価格指数と日本の石油と天然ガス、プロパンガス、一般炭のエネルギー輸入価格データから、シングルインデックスモデルを応用することにより、日本が輸入している各エネルギーと世界エネルギー輸入価格指数との関係、日本が 1 次エネルギーを獲得するときに世界のエネルギー市場から受けるリスク及び各エネルギーが独自に保有しているリスクなどを算出している。また、1970 年から 1984 年と 1985 年から 1999 年までの 2 つの期間にわけて、日本のエネルギーセキュリティの変化の推移を考察している。

本研究で文献調査をした範囲内では、水素エネルギーシステムを導入した場合の日本のエネルギーセキュリティの変化を、定量的に分析した研究は見あたらなかった。そこで、本研究は、Lesbirel の用いた手法を応用して、水素エネルギーシステムが日本のエネルギーセキュリティに与える効果を定量的に検証することとした。

3.3. リスクの定量化

はじめに、何か危険なことと捉えられがちなリスクという言葉を明確に定義する。そもそも、リスクと不確実性は異なった概念であり、リスクとは、ある既知の事象とその発生確率がわかったものであり、不確実性とは、事象は既知であるが、その発生確率は未知であることを意味する。そして、リスクが高いとは、ある期待値のまわりの分散度合いが大きいことを意味し、リスクが低いとは、ある期待値のまわりの分散度合いが小さいことを意味している。図 3-1 と図 3-2 は、リスクの大小のイメージを表している。図 3-1 は期待値 5、分散 1 の分布を表しており、図 3-2 は期待値 5、分散 4 の分布を表している。この 2 つを比べた場合、図 3-1 の事象は図 3-2 の事象よりリスクが低いことになる。

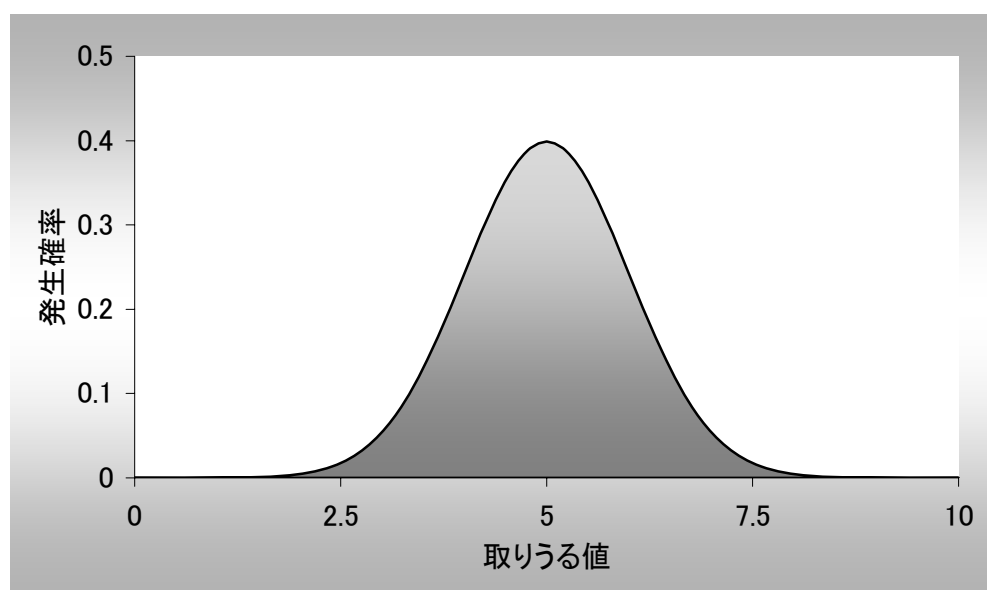


図 3-1 期待値 5、分散 1 の分布

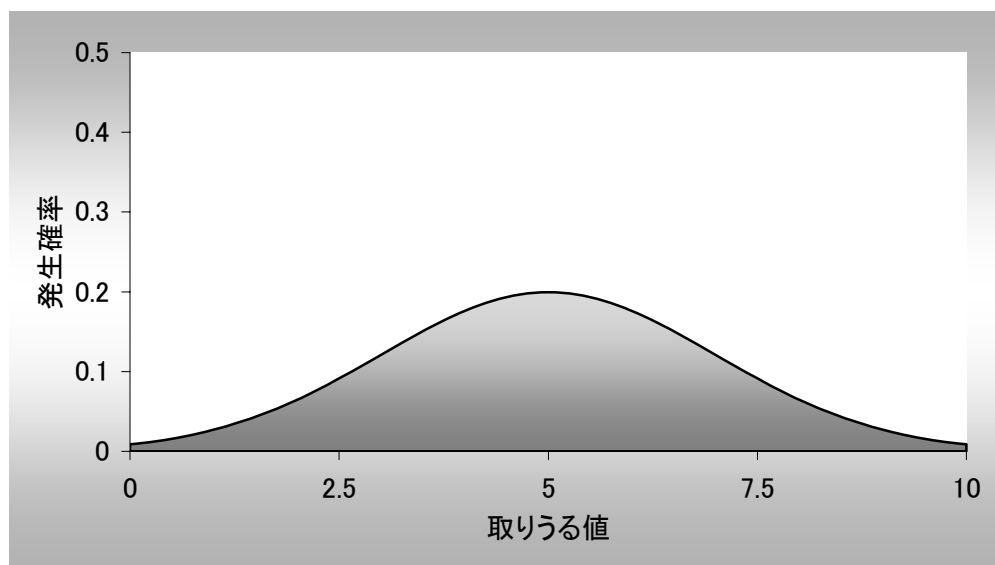


図 3-2 期待値 5、分散 4 の分布

日本において「エネルギーセキュリティの向上」という言葉は、エネルギー自給率の向上のことを意味することが多い。しかし、本研究における「エネルギーセキュリティの向上」は捉え方が異なる。本研究におけるエネルギーセキュリティとは、エネルギーを購入し、国内に運び入れるまでに存在するリスクの高さのことを意味し、エネルギーセキュリティが向上するとは、エネルギー獲得時に存在するリスクが低下することを意味する。

ここで、一般的には、

- 1) 構成エネルギー数を増やした方が、全体としてのリスクが低くなる
- 2) リスクの低いエネルギーの割合を増やした方が、全体のリスクが低くなる
- 3) 自国産エネルギーの方が、輸入エネルギーよりもリスクが低い
- 4) 構成エネルギー数を増やし、自国産エネルギーの割合を増やせば、全体のリスクが低くなる

ということが予想される。この結果、「エネルギーセキュリティが向上する」ということを意味する、エネルギー獲得時に存在するリスクが低下することとエネルギー自給率が向上することが同じ意味になる。

本研究では、エネルギー生産量、エネルギー輸入量、エネルギー輸出価格、エネルギー輸入価格などの様々な時系列データから、エネルギーの輸入価格⁹を用いてエネルギー獲得リスクの定量化を試みる。エネルギー輸入価格データを用いてエネルギー獲得リスクを定量化する利点として、以下の3つが挙げられる。

⁹ CIF価格：Cost（価格）、Insurance（保険）and Freight(輸送料)を含めた価格

- 1) エネルギー供給量は生産国によって操作されるが、エネルギー輸入価格はエネルギー市場における需要と供給の結果である。
- 2) エネルギー輸入価格には、途中の輸送費や保険なども加味されているため、各エネルギーが持っている輸送の困難さや海賊被害などの様々なリスクも価格に添加されている。
- 3) 長期間にわたる時系列データを手に入れることができる。

戦争や事故などによって、供給が需要に追いつかないという事象が起こりやすいエネルギーは、価格が安定せず分散が大きくなることから、リスクが高いエネルギーであるということになる。逆に、需要と供給のバランスが安定しているエネルギーは価格が安定し、分散が小さくなることから、リスクが低いエネルギーであるということになる。

本論文では、1980年から2004年の間に、日本とアメリカ、イギリス、ドイツ、フランス、スペインが輸入した石油、天然ガス、一般炭、燃料炭の輸入価格と輸入量の時系列データを取得した。上記6カ国のデータを用いたのは、この6カ国でOECD加盟30カ国のエネルギー輸入量の71%を占めており、他の国では1980年から2004年までの時系列データが不完全であったためである。ウランに関しては、どの国においても輸入価格や輸入量の詳しいデータを公表していない。このため、The Ux Consulting Company, LLC¹⁰とTradeTech, LLC¹¹が公表しているウランのスポット価格¹²の推移を、ウランの時系列データとして用いることとした。

エネルギー獲得リスクを算出するために、はじめに、獲得した各国のエネルギー輸入価格と輸入量の時系列データから、世界のエネルギーの価格変化の推移の指標となる、世界エネルギー輸入価格(W_p)を算出する。次に、算出された世界エネルギー輸入価格と各国の各エネルギー輸入価格とを、シングルインデックスモデルを用いて関係づけた後に、各エネルギーの輸入価格の分散、1次エネルギー供給全体の分散を計算することにより、エネルギー獲得リスクを定量的に表すことができる。

1次エネルギーの種類は、石油、石炭、天然ガス、原子力及びその他のエネルギーと区分した。エネルギー輸入価格を用いて分析することから、輸入エネルギーではない自国産の石油と石炭、天然ガス、水力、太陽光や地熱、風力などの自然エネルギーは、その他のエネルギーとして扱っている。そして、エネルギーの輸入という観点から、その他のエネルギーに分類されるエネルギーの輸入価格は0であるとした。

¹⁰ The Ux Consulting Company, LLC <http://www.uxc.com/index.html>

¹¹ TradeTech, LLC <http://www.uranium.info/>

¹² 商社や投資家などが参加するスポット市場で取引されている価格

3.4. 世界エネルギー輸入価格の算出

世界エネルギー輸入価格(W_p)を算出するために必要な 1980 年から 2004 年までの日本、アメリカ、イギリス、ドイツ、フランス、スペインにおける石油、一般炭、燃料炭、天然ガスの輸入価格は、OECD¹³においてエネルギー政策を扱うために 1974 年に設立された IEA¹⁴が発行している Energy Prices & Taxes に掲載されている値を用いた。また、エネルギー輸入量は、同じく IEA が発行している Oil Information、Coal Information、Natural Gas Information に掲載されている値を用いた。

W_p は、数式 3-1 で表されるように、各国における各エネルギーの取引規模（\$）による加重平均として求めている。

$$W_{p_t} = \sum_i \sum_j \left(\frac{P_{ijt} Q_{ijt}}{\sum_i \sum_j P_{ijt} Q_{ijt}} P_{ijt} \right) \dots \dots \dots \text{数式 3-1}$$

P_{ijt} は、t 年の i 国におけるエネルギー j の輸入価格であり、 Q_{ijt} は、t 年の i 国におけるエネルギー j の輸入量である。

ここで、加重平均する際に、各エネルギー輸入価格の単位を揃える必要があり、次のように単位変換を行い、各エネルギー輸入価格の単位を \$/GJ¹⁵に揃えた。

- 石油 : 1GJ=6.074 bbl
- 天然ガス : 1GJ=1.055 Mbtu
- 一般炭 : 1GJ=28.9 ton
- 燃料炭 : 1GJ=26.6 ton
- ウラン : 1GJ=680 lb

IEA から得られた各エネルギー輸入価格は、現在価値に換算されていないが、ドルの価値は年代と共に変化している。したがって、ドルの価値の変化を考慮に入れるために、U.S. Department of Labor が公表しているアメリカ消費者物価指数をもとに、各エネルギー価格の時系列データを現在価値に換算した。各エネルギーの時系列データは、小数点以下 2 桁で得られたので、本研究において議論される数値の有効数字は、小数点以下 2 桁となる。

¹³ The Organization for Economic Co-operation and Development

¹⁴ The International Energy Agency, OECD

¹⁵ ギガジュール=10⁹J J(ジュール)はエネルギーをあらわす単位の一つ

3.5. シングルインデックスモデル

t年における世界エネルギー輸入価格(Wp_t)とi国のエネルギーjの輸入価格(P_{ijt})の間には、
数式 3-2 の関係が成り立つ。

$$P_{ijt} = \alpha_{ij} + \beta_{ij}Wp_t + e_{ijt} \dots \dots \dots \text{数式 3-2}$$

ここで、 $\alpha_{ij} + \beta_{ij}Wp_t$ は、 Wp_t と P_{ijt} を Wp - P_{ij} 平面にプロットしたときに得られる分布に対し、
最小2乗法を用いて直線近似した式であると理解でき、 α_{ij} は P_{ij} 切片の値を、 β_{ij} は近似
直線の傾きを表している。また、 e_{ijt} は近似直線と P_{ijt} との誤差を意味しており、定義より、
 e_{ijt} の期待値は0、かつ、 Wp と e_{ijt} はお互いに独立である。すなわち、

$$E(e_{ij}) = \frac{1}{2004 - 1980 + 1} \sum_{t=1980}^{2004} e_{ijt} = \frac{1}{25} \sum_{t=1980}^{2004} e_{ijt} = 0 \dots \dots \dots \text{数式 3-3}$$

$$E[e_{ij}(Wp - \bar{Wp})] = \frac{1}{25} \sum_{t=1980}^{2004} (e_{ijt} - 0)(Wp - \bar{Wp}) = 0 \dots \dots \dots \text{数式 3-4}$$

となる。具体例として、 Wp と日本の石炭輸入価格をプロットすると、図 3-3のようになる。
このとき、 $\alpha_{\text{日本・石炭}}=0.84$ 、 $\beta_{\text{日本・石炭}}=0.35$ である。

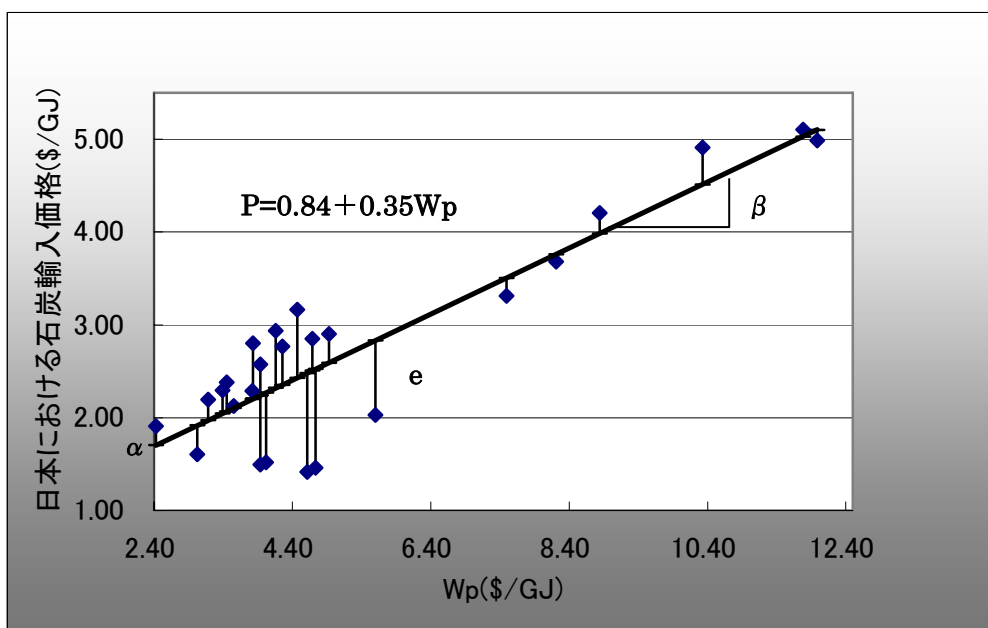


図 3-3 Wp と日本の石炭輸入価格の関係

ここで、i国のエネルギーjにおける β_{ij} は、最小 2 乗法より求められる係数であり、その値は定義より、

$$\beta_{ij} = \frac{\sigma_{ijWp}}{\sigma_{Wp}^2} = \frac{\sum_{t=1980}^{2004} [(P_{ijt} - \overline{P_{ij}})(Wp_t - \overline{Wp})]}{\sum_{t=1980}^{2004} (Wp_t - \overline{Wp})^2} \dots \dots \dots \text{数式 3-5}$$

で表される。ここで、 $\overline{P_{ij}}$ は、1980年から2004年におけるi国のエネルギーjの輸入価格の期待値であり、 \overline{Wp} は、1980年から2004年におけるWpの期待値である。 β_{ij} は、Wpが1\$/GJ変化した場合に、 P_{ij} がどのくらい変化するかを表している。

次に、 α_{ij} は、 $\sum_{t=1980}^{2004} e_{ijt} = 0$ より、数式 3-6 のように計算できる。

$$\alpha_{ij} = \overline{P_{ij}} - \beta_{ij} \overline{Wp} \dots \dots \dots \text{数式 3-6}$$

最後に、 e_{ijt} は、数式 3-7 のように計算できる。

$$e_{ijt} = P_{ijt} - \alpha_{ij} - \beta_{ij} Wp_t \dots \dots \dots \text{数式 3-7}$$

このようにして得られた Wp と各エネルギーの輸入価格の関係式をもとに、i 国の持つエネルギー獲得リスクを意味するポートフォリオリスク σ_p^2 （ポートフォリオの分散）を計算すると、i 国のエネルギー獲得リスク σ_p^2 は、数式 3-8 のように表される。

$$\sigma_{pi}^2 = \beta_{pi}^2 \sigma_{Wp}^2 + \sum_j \sum_k X_{ij} X_{ik} \sigma_{iejek} \dots \dots \dots \text{数式 3-8}$$

X_{ij} はi国の1次エネルギー供給におけるエネルギーjのシェアであり、

$$\sum_j X_{ij} = 1 \cdots \cdots \cdots \text{数式 3-9}$$

$$\beta_{pi} = \sum_j X_j \beta_{ij} \cdots \cdots \cdots \text{数式 3-10}$$

$$\sigma_{Wp}^2 = E(Wp_t - \overline{Wp})^2 = \frac{1}{25} \sum_{t=1980}^{2004} (Wp_t - \overline{Wp})^2 \cdots \cdots \cdots \text{数式 3-11}$$

$$\sigma_{iejek} = E(e_{ij} e_{ik}) = \frac{1}{25} \sum_{t=1980}^{2004} (e_{ijt} - 0)(e_{ikt} - 0) \cdots \cdots \cdots \text{数式 3-12}$$

である。

第4章 水素エネルギーシステムの導入効果の分析

4.1. はじめに

本章では、第3章までに述べてきた水素エネルギーシステム導入ケースとリスクの定量化手法を用いて、水素エネルギーシステムを導入した場合の効果を分析する。はじめに、世界エネルギー輸入価格(W_p)を算出し、次に、各国における各エネルギーの α 、 β 、 e を算出する。その後、日本と他国のエネルギー獲得リスクを比較するとともに、日本の1980年から2004年までのエネルギー獲得リスクの推移を算出する。そして最後に、水素エネルギーシステム導入後のエネルギー獲得リスクを算出する。

4.2. 世界エネルギー輸入価格の算出

世界エネルギー輸入価格(W_p)を、数式 4-1 を用いて算出する。

$$Wp_t = \sum_i \sum_j \left(\frac{P_{ijt} Q_{ijt}}{\sum_i \sum_j P_{ijt} Q_{ijt}} P_{ijt} \right) \dots \dots \dots \text{数式 4-1}$$

図 4-1は、実際にW_pを計算した結果である。図 4-2は、世界における石油、天然ガス、石炭のシェアの推移を表しており、25年の間に、石油のシェアは90%付近から77%付近まで落ち、一方天然ガスのシェアが10%付近から20%付近に増加し、石炭のシェアもわずかではあるが増加しているのが見て取れる。このような変化の背景として、1979年の第2次石油危機を経験した後に、各国が石油の依存度を減らす政策をとってきたことが考えられる。各国が石油の依存度を減らそうと努力してきたにも関わらず、依然として、石油の占めるシェアが高いことから、石油が現代社会にとって、使用用途の多い、大変便利なエネルギーであることがわかる。

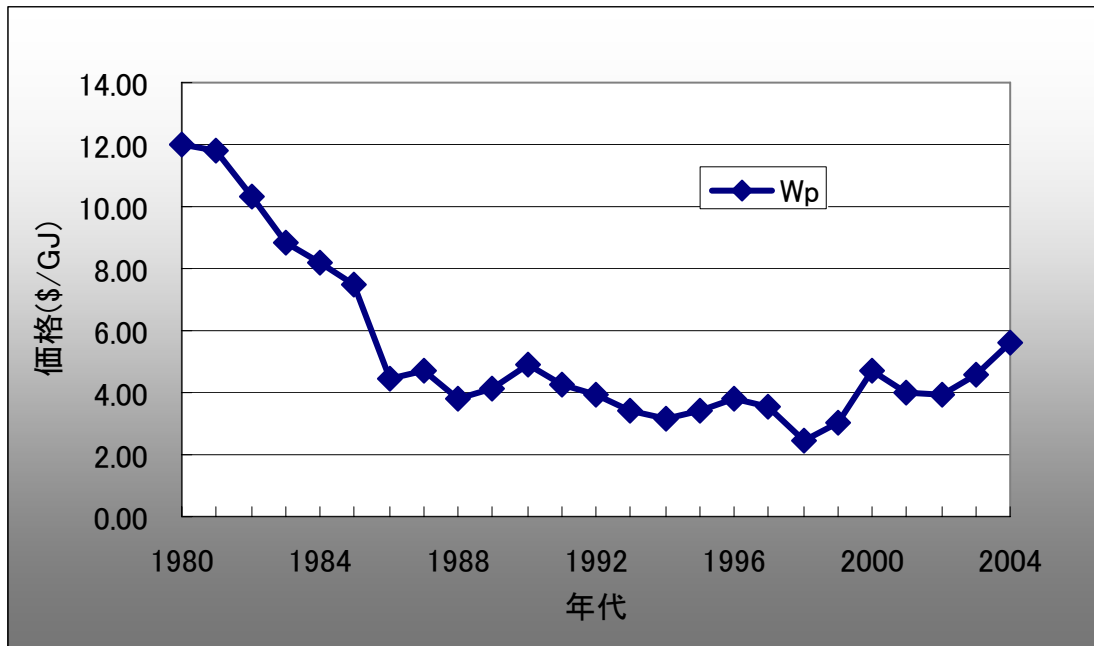


図 4-1 Wp の推移

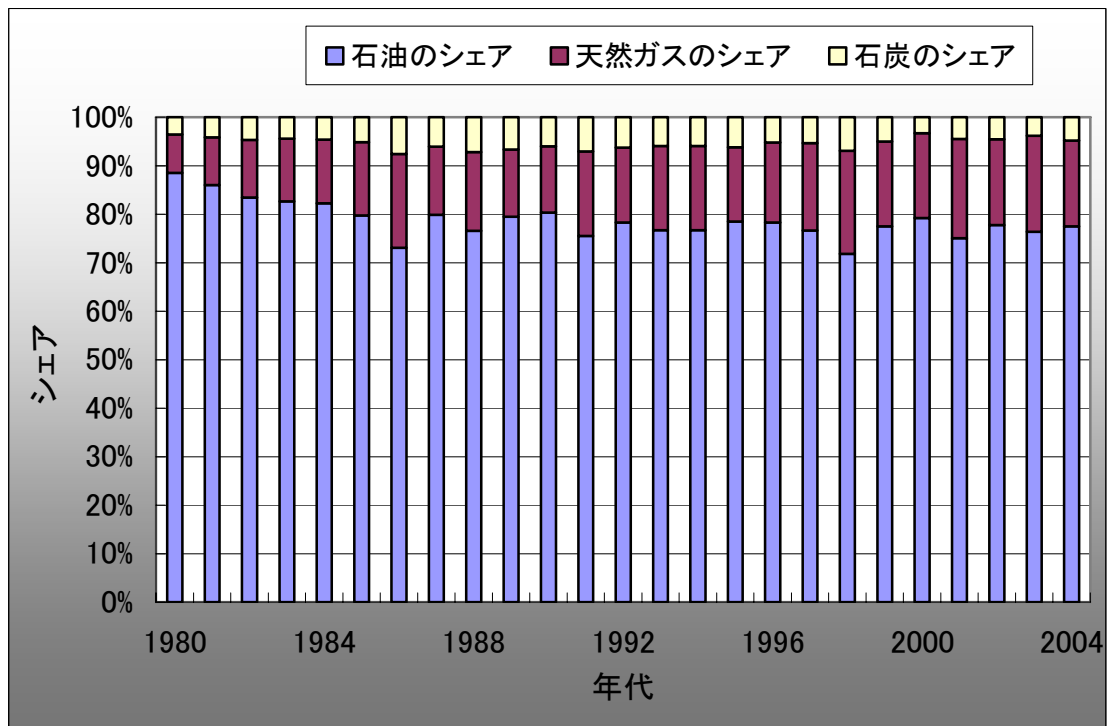


図 4-2 世界における石油、天然ガス、石炭のシェアの推移

図 4-3から図 4-6は、 W_p と日本の石油、天然ガス、石炭の輸入価格とウランのスポット価格との関係を表している。図 4-3が示すように、石油のシェアの高さによって、 W_p は、ほぼ石油と同じように推移していることがわかる。

図 4-4が示すように、天然ガスのエネルギーシェアはそれほど高くないにも関わらず、天然ガスの輸入価格の推移と W_p の推移は非常によく似ている。 W_p と天然ガスの輸入価格が同じように推移するということから、天然ガスの輸入価格の推移は、石油の輸入価格の推移とも似通っているといえる。このことより、天然ガスの市場は、石油の市場と密接な関係があることが推測される。

図 4-5は、 W_p と石炭の輸入価格との関係を表している。図 4-5より、石油や天然ガスと比べて、石炭の輸入価格は長期間にわたり、比較的安定して推移していることがわかる。石炭の確認可採埋蔵量は石油や天然ガス、ウランに比べて最も多く、埋蔵場所も世界中に分散していることが輸入価格の安定につながっていると推測される。

どの国もウランの詳細な輸入価格と輸入量を公表していないことから、 W_p へウランのシェアを反映させることはできなかった。しかし、ウランのスポット価格はTradeTech, LLCとThe Ux Consulting Company, LLCのHPより入手することができたので、輸入価格ではないが、ウランの価格推移を示す指標として採用した。図 4-6は、 W_p とウランのスポット価格との関係を表しており、ウランの価格は W_p の10分の1程度で推移していることがわかる。

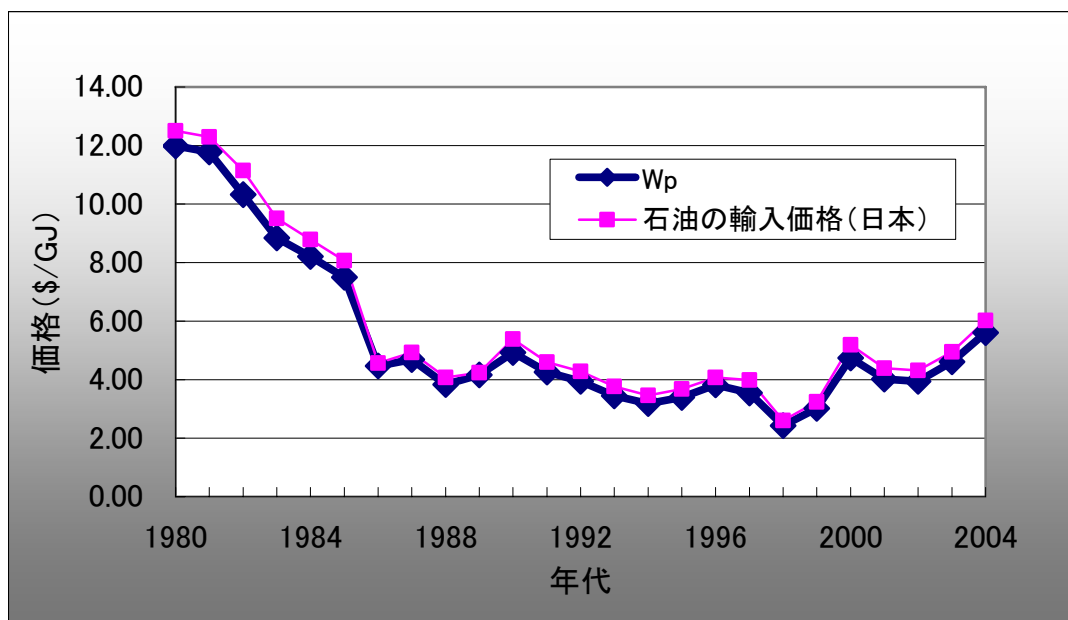


図 4-3 W_p と石油の輸入価格の関係

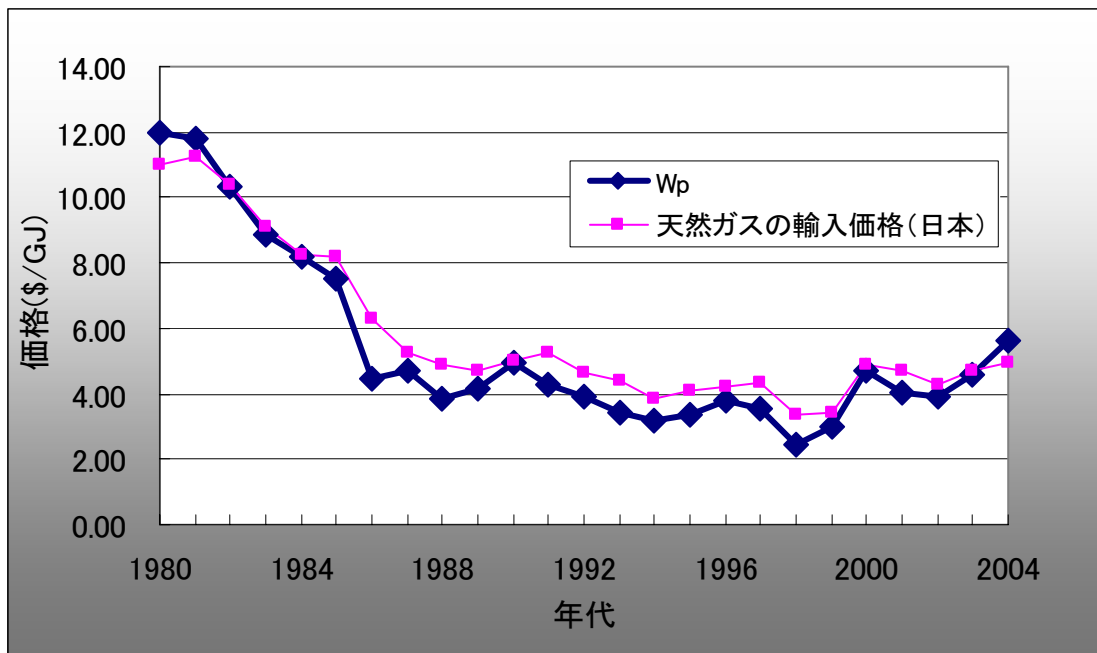


図 4-4 Wp と天然ガスの輸入価格の関係

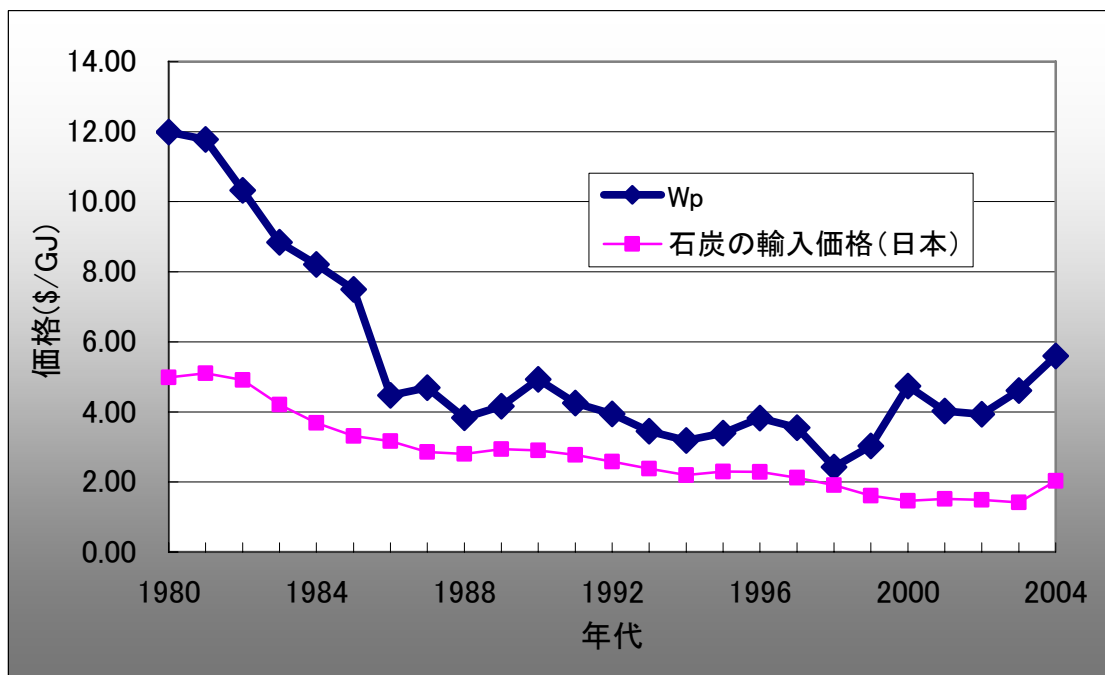


図 4-5 Wp と石炭の輸入価格の関係

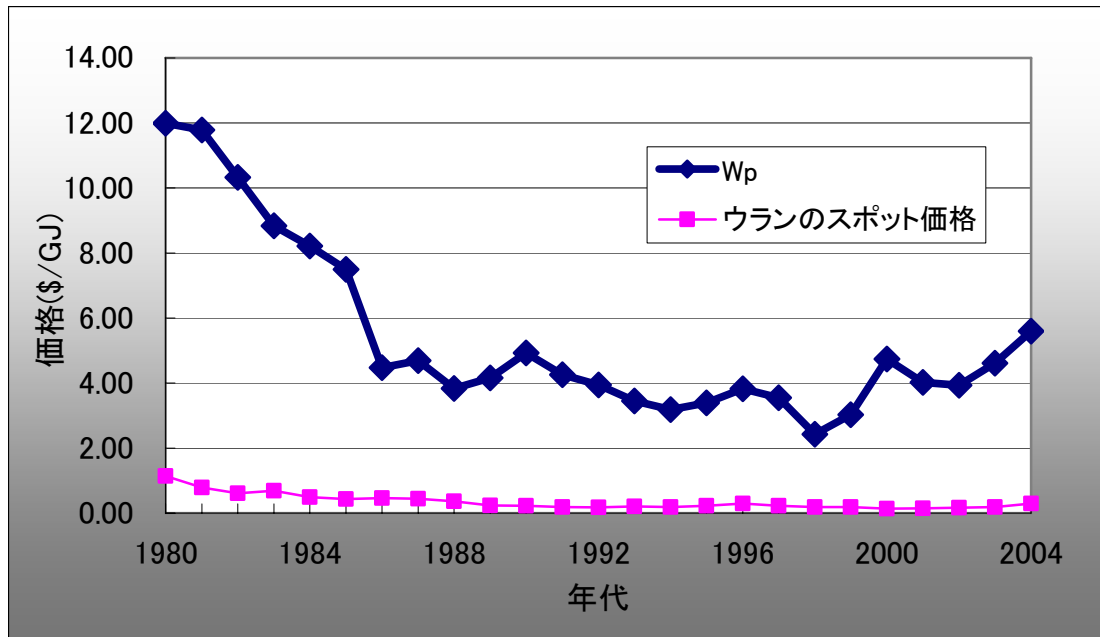


図 4-6 Wp とウランのスポット価格の関係

4.3. α_{ij} 、 β_{ij} 、 e_{ijt} の算出

各国における各エネルギーの輸入価格 P_{ijt} と算出された Wp_t から α_{ij} 、 β_{ij} 、 e_{ijt} を算出する。
 β_{ij} は、数式 4-2 を用いて算出する。

$$\beta_{ij} = \frac{\sigma_{ijWp}}{\sigma_{Wp}^2} = \frac{\sum_{t=1980}^{2004} [(P_{ijt} - \bar{P}_{ij})(Wp_t - \bar{Wp})]}{\sum_{t=1980}^{2004} (Wp_t - \bar{Wp})^2} \dots\dots\dots \text{数式 4-2}$$

表 4-1は、アメリカ、イギリス、フランス、ドイツ、スペイン、日本における石油、天然ガス、石炭、ウラン、その他のエネルギーの β の計算結果を表している。ここで、 β は Wp が1\$/GJ変化した場合に、あるエネルギーの輸入価格がどのくらい変化するかを表していることに注意すると、日本の天然ガスと石炭の輸入価格は、 Wp の変化に対して、他国より敏感であることがわかる。イギリス以外の国では、石油、天然ガス、石炭、ウランの順番に Wp の影響を受けやすいという傾向になっている。

ウランの β は、各国別の輸入価格ではなく、スポット価格から算出しているため、どの国においても同じ値になっている。各国のウランの輸入価格がわかるのであれば、各国のウランの β を算出することが可能になる。その他のエネルギーの β が全て0であるのは、その他のエネルギーの輸入価格を0であると仮定しているためである。

表 4-1 各国における各エネルギーの β

	石油	天然ガス	石炭	ウラン	その他
アメリカ	1.07	0.79	0.16	0.08	0.00
イギリス	1.01	-0.04	0.35	0.08	0.00
フランス	1.18	0.54	0.31	0.08	0.00
ドイツ	1.08	0.49	0.32	0.08	0.00
スペイン	1.05	0.67	0.20	0.08	0.00
日本	1.05	0.85	0.35	0.08	0.00

次に、 α と e を算出する。本章では、日本の結果のみを示す。（他国の結果は付録を参照のこと）表 4-2 から表 4-5 は、日本における石油と天然ガス、石炭、ウランの α と e の計算結果を示している。この α 、 β 、 e を用いて、リスク分析を行うこととする。

表 4-2 日本の石油の α と e

年	WP	P(石油)	α	βWp	e
1980	11.99	12.50	0.12	12.55	-0.17
1981	11.78	12.29	0.12	12.34	-0.17
1982	10.33	11.14	0.12	10.81	0.21
1983	8.84	9.51	0.12	9.26	0.14
1984	8.21	8.79	0.12	8.60	0.06
1985	7.50	8.06	0.12	7.85	0.10
1986	4.47	4.56	0.12	4.68	-0.24
1987	4.69	4.93	0.12	4.91	-0.10
1988	3.83	4.07	0.12	4.01	-0.07
1989	4.16	4.24	0.12	4.36	-0.24
1990	4.93	5.39	0.12	5.16	0.11
1991	4.26	4.60	0.12	4.46	0.02
1992	3.94	4.28	0.12	4.12	0.03
1993	3.45	3.76	0.12	3.61	0.03
1994	3.18	3.46	0.12	3.33	0.00
1995	3.39	3.68	0.12	3.55	0.00
1996	3.82	4.07	0.12	4.00	-0.05
1997	3.55	3.98	0.12	3.72	0.14
1998	2.43	2.61	0.12	2.54	-0.05
1999	3.02	3.24	0.12	3.17	-0.04
2000	4.74	5.19	0.12	4.96	0.11
2001	4.02	4.39	0.12	4.21	0.06
2002	3.94	4.32	0.12	4.12	0.07
2003	4.61	4.95	0.12	4.83	0.00
2004	5.60	6.02	0.12	5.86	0.04

\$/GJ

表 4-3 日本の天然ガスの α と e

年	WP	P(天然ガス)	α	βWp	e
1980	11.99	10.99	1.22	10.24	-0.47
1981	11.78	11.22	1.22	10.07	-0.07
1982	10.33	10.41	1.22	8.83	0.36
1983	8.84	9.10	1.22	7.56	0.32
1984	8.21	8.28	1.22	7.02	0.04
1985	7.50	8.22	1.22	6.41	0.59
1986	4.47	6.33	1.22	3.82	1.28
1987	4.69	5.23	1.22	4.01	0.00
1988	3.83	4.92	1.22	3.28	0.42
1989	4.16	4.72	1.22	3.56	-0.06
1990	4.93	4.99	1.22	4.21	-0.45
1991	4.26	5.28	1.22	3.64	0.43
1992	3.94	4.66	1.22	3.37	0.07
1993	3.45	4.41	1.22	2.95	0.24
1994	3.18	3.88	1.22	2.72	-0.07
1995	3.39	4.09	1.22	2.90	-0.03
1996	3.82	4.19	1.22	3.27	-0.30
1997	3.55	4.36	1.22	3.04	0.10
1998	2.43	3.38	1.22	2.07	0.09
1999	3.02	3.42	1.22	2.59	-0.39
2000	4.74	4.92	1.22	4.05	-0.35
2001	4.02	4.69	1.22	3.44	0.03
2002	3.94	4.30	1.22	3.36	-0.29
2003	4.61	4.69	1.22	3.94	-0.47
2004	5.60	4.97	1.22	4.79	-1.04

\$/GJ

表 4-4 日本の石炭の α と e

年	WP	P(石炭)	α	βWp	e
1980	11.99	4.99	0.84	4.25	-0.11
1981	11.78	5.10	0.84	4.18	0.08
1982	10.33	4.91	0.84	3.66	0.40
1983	8.84	4.20	0.84	3.14	0.22
1984	8.21	3.68	0.84	2.92	-0.08
1985	7.50	3.31	0.84	2.66	-0.19
1986	4.47	3.17	0.84	1.59	0.73
1987	4.69	2.85	0.84	1.66	0.34
1988	3.83	2.80	0.84	1.36	0.60
1989	4.16	2.94	0.84	1.48	0.62
1990	4.93	2.90	0.84	1.75	0.31
1991	4.26	2.77	0.84	1.51	0.41
1992	3.94	2.57	0.84	1.40	0.33
1993	3.45	2.38	0.84	1.22	0.31
1994	3.18	2.20	0.84	1.13	0.22
1995	3.39	2.29	0.84	1.20	0.25
1996	3.82	2.29	0.84	1.36	0.09
1997	3.55	2.13	0.84	1.26	0.02
1998	2.43	1.91	0.84	0.86	0.20
1999	3.02	1.61	0.84	1.07	-0.31
2000	4.74	1.46	0.84	1.68	-1.06
2001	4.02	1.52	0.84	1.43	-0.75
2002	3.94	1.49	0.84	1.40	-0.75
2003	4.61	1.42	0.84	1.64	-1.07
2004	5.60	2.03	0.84	1.99	-0.80

\$/GJ

表 4-5 ウランの α と e

年	WP	P(ウラン)	α	βW_p	e
1980	11.99	1.15	-0.08	0.96	0.27
1981	11.78	0.79	-0.08	0.94	-0.07
1982	10.33	0.61	-0.08	0.83	-0.13
1983	8.84	0.69	-0.08	0.71	0.06
1984	8.21	0.49	-0.08	0.66	-0.08
1985	7.50	0.43	-0.08	0.60	-0.09
1986	4.47	0.46	-0.08	0.36	0.19
1987	4.69	0.44	-0.08	0.38	0.15
1988	3.83	0.37	-0.08	0.31	0.14
1989	4.16	0.24	-0.08	0.33	-0.01
1990	4.93	0.22	-0.08	0.39	-0.09
1991	4.26	0.19	-0.08	0.34	-0.07
1992	3.94	0.18	-0.08	0.32	-0.05
1993	3.45	0.21	-0.08	0.28	0.01
1994	3.18	0.19	-0.08	0.26	0.02
1995	3.39	0.22	-0.08	0.27	0.04
1996	3.82	0.30	-0.08	0.31	0.07
1997	3.55	0.22	-0.08	0.28	0.02
1998	2.43	0.19	-0.08	0.19	0.08
1999	3.02	0.18	-0.08	0.24	0.02
2000	4.74	0.14	-0.08	0.38	-0.15
2001	4.02	0.15	-0.08	0.32	-0.09
2002	3.94	0.16	-0.08	0.32	-0.07
2003	4.61	0.19	-0.08	0.37	-0.10
2004	5.60	0.29	-0.08	0.45	-0.07

\$/GJ

4.4. 各国の輸入 1 次エネルギーが持つリスク

4.3.で算出された α 、 β 、 e と数式 4-3 より、各エネルギーの持つリスク（分散）を算出することができる。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^2 &= \beta_{ij}^2 \sigma_m^2 + \sigma_{e_{ij}}^2 \\ &= \beta_{ij}^2 E(Wp_t - \overline{Wp})^2 + E(e_{ij})^2 \quad \dots \dots \dots \text{数式 4-3} \\ &= \beta_{ij}^2 \times \frac{1}{25} \sum_{t=1980}^{2004} (Wp_t - \overline{Wp})^2 + \frac{1}{25} \sum_{t=1980}^{2004} (e_{ijt} - \overline{e_{ij}})^2 \end{aligned}$$

表 4-6は、各国における各エネルギーが持つリスクの計算結果を示しており、日本の場合、石油のリスクが最も高く、続いて天然ガス、石炭、ウラン、その他の順番となっているのがわかる。これらの値は、1 次エネルギー供給を各エネルギー単独でまかなった場合のリスクを表している。すなわち、日本で供給しているエネルギーを全て輸入した石油でまかなった場合のリスクは 7.90 であり、全てを石炭でまかなった場合のリスクは 1.16 になる。

Wp のリスクも計算することができ、そのリスクは、世界のエネルギー流通市場が持つリスクであると考えることができる。世界のエネルギー市場における石油の占めるシェアが非常に高いものの、天然ガスや石炭なども流通していることから、 Wp のリスクは、石油のリスクよりも低く、天然ガスや石炭などのリスクよりは高くなっている。

表 4-6 各国における各エネルギーのリスク（分散）

	Wp	石油	天然ガス	石炭	ウラン	その他
アメリカ	7.19	8.32	4.91	0.28	0.06	0.00
イギリス	7.19	7.42	0.13	1.19	0.06	0.00
フランス	7.19	9.96	2.75	0.87	0.06	0.00
ドイツ	7.19	8.41	2.13	0.98	0.06	0.00
スペイン	7.19	7.89	3.32	0.40	0.06	0.00
日本	7.19	7.90	5.45	1.16	0.06	0.00

本研究で得られるリスクの値を議論する場合に、その値に絶対的な意味はなく、他の値との相対的な関係を議論して始めて意味がある。例えば、日本における各エネルギーのリスクを議論する場合には、天然ガスのリスクは 5.45 なので、7.90 である石油よりリスクは低く、1.16 である石炭よりはリスクが高いと述べることはできるが、天然ガスのリスクは 5.45 なので、絶対的にリスクの高いエネルギーである、と述べることはできない。

一般的傾向として、リスクの高さは石油>天然ガス>石炭>ウラン>その他、となっているのがわかる。イギリスのみ、天然ガスのリスクが石炭より低くなっている。これは、

イギリスが長期的に見て、天然ガスをほとんど輸入しておらず、イギリスにおける天然ガスの輸入価格の変化が小さいためであると考えられる。

数式 4-3 は、 $\beta_{ij}^2 \sigma_m^2$ という Wp に左右されている第 1 項と、 σ_{eij}^2 という Wp とは全く独立な第 2 項に分けられる。表 4-7 は、第 1 項と第 2 項の数値を分けて表したものであり、各エネルギーのリスクのうち、第 1 項の占める割合が非常に大きいことがわかる。 σ_m^2 は一定の値なので、第 1 項は β の大きさに左右されることになる。すなわち、各エネルギーのリスクは、 β の大きさに左右されるということがわかる。

表 4-7 各エネルギーのリスクの内訳

		石油	天然ガス	石炭	ウラン	その他
アメリカ	$\beta_{ij}^2 \sigma_m^2$	8.30	4.44	0.18	0.05	0.00
	σ_{eij}^2	0.02	0.47	0.10	0.01	0.00
	計	8.32	4.91	0.28	0.06	0.00
イギリス	$\beta_{ij}^2 \sigma_m^2$	7.37	0.01	0.89	0.05	0.00
	σ_{eij}^2	0.05	0.11	0.29	0.01	0.00
	計	7.42	0.13	1.19	0.06	0.00
フランス	$\beta_{ij}^2 \sigma_m^2$	9.96	2.11	0.71	0.05	0.00
	σ_{eij}^2	0.00	0.63	0.17	0.01	0.00
	計	9.96	2.75	0.87	0.06	0.00
ドイツ	$\beta_{ij}^2 \sigma_m^2$	8.39	1.75	0.75	0.05	0.00
	σ_{eij}^2	0.02	0.38	0.23	0.01	0.00
	計	8.41	2.13	0.98	0.06	0.00
スペイン	$\beta_{ij}^2 \sigma_m^2$	7.86	3.24	0.29	0.05	0.00
	σ_{eij}^2	0.03	0.07	0.11	0.01	0.00
	計	7.89	3.32	0.40	0.06	0.00
日本	$\beta_{ij}^2 \sigma_m^2$	7.88	5.26	0.91	0.05	0.00
	σ_{eij}^2	0.01	0.19	0.26	0.01	0.00
	計	7.90	5.45	1.16	0.06	0.00

4.5. 日本と他国のエネルギー獲得リスクの比較

アメリカとイギリス、ドイツ、フランス、スペイン、日本のエネルギー獲得リスクを比較する。表 4-8は、IEAの発行しているEnergy Balance 2004に掲載されている、2002年における各国の1次エネルギー収支から、1次エネルギー供給割合を計算して表にまとめたものである。表 4-8に示されている各国における各エネルギーの総1次エネルギー供給に占めるシェアを X_{ij} として分析を行う。ここで、 X_{ij} は総1次エネルギー供給における輸入されている石油と天然ガス、石炭と自国産扱いである原子力、その他のエネルギーの供給割合のことである。その他には、自国産の石油と天然ガス、石炭も含まれる。

表 4-8 各国の1次エネルギー供給割合

	輸入			生産				総エネルギー供給 (石油換算 100 万トン)	
	石油	天然ガス	石炭	原子力	石油	石炭	天然ガス		その他
アメリカ	21.93%	3.86%	0.51%	8.69%	21.96%	14.67%	18.41%	9.96%	2412.24
				65.00%					
イギリス	24.79%	1.98%	7.64%	9.69%	13.05%	7.43%	34.22%	1.20%	236.7
				55.91%					
スペイン	47.56%	15.31%	11.99%	13.29%	0.26%	5.47%	0.38%	5.73%	123.56
				11.84%					
ドイツ	32.79%	20.16%	7.91%	13.15%	0.87%	18.21%	2.97%	3.93%	326.62
				25.98%					
フランス	30.44%	14.26%	4.83%	43.30%	0.62%	0.24%	0.00%	6.32%	262.89
				7.18%					
日本	49.59%	12.21%	19.75%	14.57%	0.09%	0.00%	0.36%	3.43%	527.96
				3.89%					

各国における各エネルギーの α_{ij} 、 β_{ij} 、 e_{ijt} と Wp 、表 4-8から得られる各エネルギーの総 1 次エネルギー供給に占めるシェア X_{ij} を、数式 4-4 から数式 4-8 に代入し、各国のエネルギー獲得リスクを算出する。

$$\sigma_{pi}^2 = \beta_{pi}^2 \sigma_{Wp}^2 + \sum_j \sum_k X_{ij} X_{ik} \sigma_{iejek} \dots \dots \dots \text{数式 4-4}$$

$$\sum_j X_{ij} = 1 \dots \dots \dots \text{数式 4-5}$$

$$\beta_{pi} = \sum_j X_j \beta_{ij} \dots \dots \dots \text{数式 4-6}$$

$$\sigma_{Wp}^2 = E(Wp_t - \overline{Wp})^2 = \frac{1}{25} \sum_{t=1980}^{2004} (Wp_t - \overline{Wp})^2 \dots \dots \dots \text{数式 4-7}$$

$$\sigma_{iejek} = E(e_{ij} e_{ik}) = \frac{1}{25} \sum_{t=1980}^{2004} (e_{ijt} - 0)(e_{ikt} - 0) \dots \dots \dots \text{数式 4-8}$$

表 4-9は、各国のエネルギー獲得リスクの計算結果である。各国のエネルギー獲得リスクは、低い順にアメリカ、イギリス、フランス、ドイツ、スペイン、日本となっている。各エネルギーのリスクの高さが、 β の大きさに大きく左右されるのと同様に、エネルギー獲得リスクも β の大きさに大きく左右されている。つまり、 β の大きなエネルギーの割合が多ければ、エネルギー獲得リスクが高くなり、 β の小さなエネルギーの割合を増やせば、エネルギー獲得リスクを低くすることができることになる。

表 4-9に示されているように、 β が大きい石油の割合が少なく、 β が 0 であるその他のエネルギーの割合が多いアメリカやイギリスのエネルギー獲得リスクは低く、逆に、石油の割合が多く、その他のエネルギーの割合が少ない日本やスペインのエネルギー獲得リスクは高くなっている。フランスは、日本と同じように、自国産の石油、天然ガス、石炭がほとんどないにも関わらず、 β の小さい原子力の割合を多くすることにより、ドイツと同じくらいのエネルギー獲得リスクを実現している。第 2 次オイルショック後、日本も石油の依存度を減らす政策をとってきたのではあるが、他国と比較すると、依然として高いエネルギー獲得リスクを持っていることがわかる。

表 4-9 各国のエネルギー獲得リスクの比較

	エネルギー供給割合					エネルギー獲得リスク (σp)
	石油	天然ガス	石炭	原子力	その他	
アメリカ	21.93%	3.86%	0.51%	8.69%	65.00%	0.54
イギリス	24.79%	1.98%	7.64%	9.69%	55.91%	0.59
フランス	30.44%	14.26%	4.83%	43.30%	7.18%	1.71
ドイツ	32.79%	20.16%	7.91%	13.15%	25.98%	1.74
スペイン	47.56%	15.31%	11.99%	13.29%	11.84%	2.91
日本	49.59%	12.21%	19.75%	14.57%	3.89%	3.80

4.6. 日本のエネルギー獲得リスクの推移

日本における各エネルギーの α_{ij} 、 β_{ij} 、 e_{ijt} と W_p 、1980 年から 2004 年までの各エネルギーの総 1 次エネルギー供給に占めるシェア X_{ij} の推移の値を、数式 4-4 から数式 4-8 に代入し、1980 年から 2004 年までの日本のエネルギー獲得リスクの推移を算出する。

表 4-10 は、日本の 1980 年から 2004 年までのエネルギー獲得リスクの推移を計算した結果である。表 4-10 に示すように、第 2 次オイルショック後、大局的には、日本は石油の割合を減らし、天然ガスと原子力の割合を増やしてきたことがわかる。そして、この変化に伴って、日本のエネルギー獲得リスクも低下してきていることがわかる。2001 年から 2003 年にかけて、エネルギー獲得リスクが徐々に高くなっているが、その原因は、東海村での臨海事故、原子力発電所のトラブル隠しなどによって、原子力発電所の稼働率が低下し、石油や天然ガス、石炭による火力発電の割合が増加したためであると考えられる。

表 4-10 日本のエネルギー獲得リスクの推移

年度	石油	天然ガス	石炭	原子力	その他	β_p	$\beta_{pi}^2 \sigma_{wp}^2$	$\sum_j \sum_k X_{ij} X_{ik} \sigma_{iejek}$	σ_{pi}^2
1980	66.08%	6.08%	16.95%	4.68%	6.22%	0.81	4.69	0.01	4.71
1981	63.70%	6.35%	18.42%	5.17%	6.36%	0.79	4.50	0.01	4.51
1982	61.85%	6.93%	18.54%	6.33%	6.36%	0.78	4.35	0.01	4.36
1983	61.47%	7.54%	17.97%	6.70%	6.31%	0.78	4.34	0.01	4.36
1984	59.19%	9.17%	18.80%	7.49%	5.35%	0.77	4.27	0.02	4.29
1985	56.30%	9.40%	19.40%	8.90%	6.00%	0.75	4.00	0.02	4.02
1986	56.60%	9.80%	18.20%	9.40%	5.90%	0.75	4.03	0.02	4.04
1987	56.90%	9.70%	18.00%	10.00%	5.40%	0.75	4.05	0.01	4.07
1988	57.30%	9.60%	18.10%	9.00%	5.90%	0.75	4.08	0.01	4.10
1989	57.90%	10.00%	17.30%	8.90%	5.90%	0.76	4.16	0.01	4.17
1990	58.30%	10.10%	16.60%	9.40%	5.60%	0.76	4.19	0.01	4.20
1991	56.70%	10.60%	16.90%	9.80%	6.00%	0.75	4.07	0.01	4.08
1992	58.20%	10.60%	16.10%	10.00%	5.10%	0.77	4.21	0.01	4.22
1993	56.60%	10.70%	16.10%	11.10%	5.60%	0.75	4.05	0.01	4.06
1994	57.40%	10.80%	16.40%	11.30%	4.10%	0.76	4.16	0.01	4.17
1995	55.80%	10.80%	16.50%	12.00%	4.80%	0.74	3.99	0.01	4.00
1996	55.20%	11.40%	16.40%	12.30%	4.60%	0.74	3.98	0.01	3.99
1997	53.60%	11.60%	16.90%	12.90%	5.10%	0.73	3.84	0.01	3.85
1998	52.40%	12.30%	16.40%	13.70%	5.20%	0.72	3.76	0.01	3.77
1999	52.00%	12.70%	17.40%	13.00%	4.90%	0.73	3.78	0.02	3.80
2000	51.80%	13.10%	17.90%	12.40%	4.70%	0.73	3.81	0.02	3.83
2001	50.40%	13.40%	18.80%	12.80%	4.80%	0.72	3.72	0.02	3.74
2002	50.70%	13.60%	19.30%	11.60%	4.60%	0.72	3.78	0.02	3.80
2003	51.00%	14.50%	19.80%	9.50%	5.20%	0.74	3.89	0.02	3.91
2004	49.00%	13.00%	19.00%	13.00%	6.00%	0.70	3.54	0.02	3.56

図 4-7は、日本のエネルギー獲得リスクとその β をプロットしたものである。図 4-7より、日本のエネルギー獲得リスクと各エネルギーの β_{ij} をエネルギー供給割合によって加重平均した β_p は、同じように変化しているのがわかる。表 4-10より、エネルギー獲得リスクを構成する $\beta_{pi}^2\sigma_{wp}^2$ と $\sum_j \sum_k X_{ij}X_{ik}\sigma_{iejek}$ の数値の大きさを比較すると、世界のエネルギー獲得リスクからの影響を意味する、 $\beta_{pi}^2\sigma_{wp}^2$ の割合が非常に大きいことがわかる。よって、各エネルギーの持つリスクの議論の場合と同じように、エネルギー獲得リスクを低下させるためには、 β_p を小さくするようなエネルギーの供給割合を達成する必要があるといえることができる。

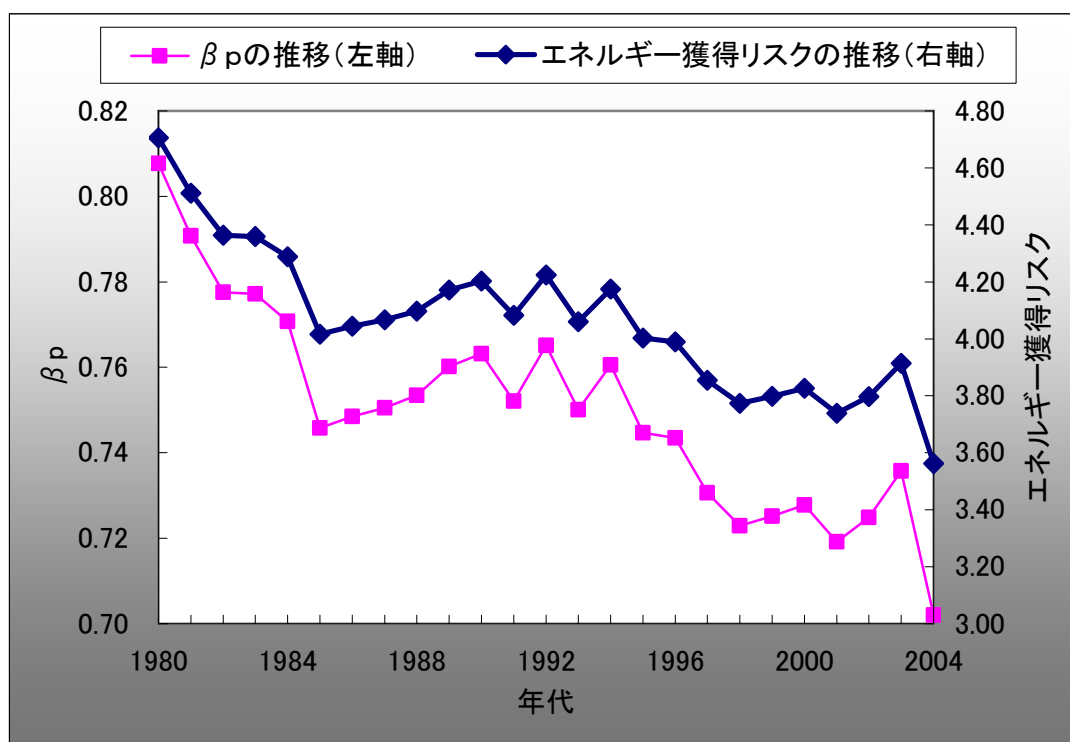


図 4-7 日本における β_p (左軸)とエネルギー獲得リスク (右軸) の推移

4.7. 水素エネルギーシステム導入後のポートフォリオリスク

日本における各エネルギーの α_{ij} 、 β_{ij} 、 e_{ijt} と W_p 、将来の 1 次エネルギー供給割合を予測した 2030 年リファレンスケースと 2030 年エネルギー技術進展ケース及び水素エネルギーシステムが最も社会に浸透したケースにおける各エネルギーの総 1 次エネルギー供給に占めるシェア X_{ij} の値を、数式 4-4 から数式 4-8 に代入し、将来予測における日本のエネルギー獲得リスクを算出した。結果は、表 4-11 に示すとおりである。

表 4-11 将来予測ケースにおける日本のエネルギー獲得リスク

年度	石油	天然ガス	石炭	原子力	その他	β_p	$\beta_{pi}^2 \sigma_{Wp}^2$	$\sum_j \sum_k X_{ij} X_{ik} \sigma_{iejek}$	σ_{pi}^2
2030 年 レファレンスケース	42.00%	18.00%	17.00%	15.00%	8.00%	0.67	3.19	0.02	3.21
2030 年 エネルギー技術 進展ケース	40.00%	16.00%	17.00%	18.00%	9.00%	0.63	2.86	0.02	2.88
水素エネルギー社会	24.00%	2.26%	12.01%	45.12%	16.62%	0.35	0.88	0.01	0.89

表 4-11 の結果を、これまでに求めた 1980 年から 2004 年までの日本のエネルギー獲得リスクと一緒にプロットし、2002 年におけるアメリカ、イギリス、フランス、ドイツ、スペイン及び日本のエネルギー獲得リスクの高さを表示したものが、図 4-8 である。図 4-8 より、現在、日本が 2030 年に向けて打ち立てているエネルギー政策は、確かに日本のエネルギーセキュリティを向上させる効果を持っていることがわかる。しかし、この結果を表 4-9 で表されている他国のエネルギー獲得リスクと比較すると、2030 年エネルギー技術進展ケースの社会が実現した場合に、やっと 2002 年のスペインよりもエネルギー獲得リスクが低くなるのみで、2030 年レファレンスケースにおいては、依然として 2002 年におけるアメリカ、イギリス、フランス、ドイツ、スペインよりも高いエネルギー獲得リスクを保持していることがわかる。

しかし、極端な例として独自に想定した、水素エネルギーシステムが最も社会に浸透したケースにおいては、2002 年におけるフランス、ドイツ、スペインよりもエネルギー獲得リスクを低く抑えることが可能になっており、2002 年におけるアメリカやイギリスよりも高いものの、極めて近い状態までエネルギー獲得リスクを低下させることができることが示されている。2002 年のアメリカやイギリスと極めて近いエネルギー獲得リスクまで低下させることは、既存のエネルギー供給体系では決して実現することのできないことであり、水素エネルギーシステムを導入することにより、自国産のエネルギーを持っていない日本が、自国内にエネルギーを豊富に持つ国に極めて近い状態まで、自国のエネルギーセキュリティを向上させることができるということを示唆している。

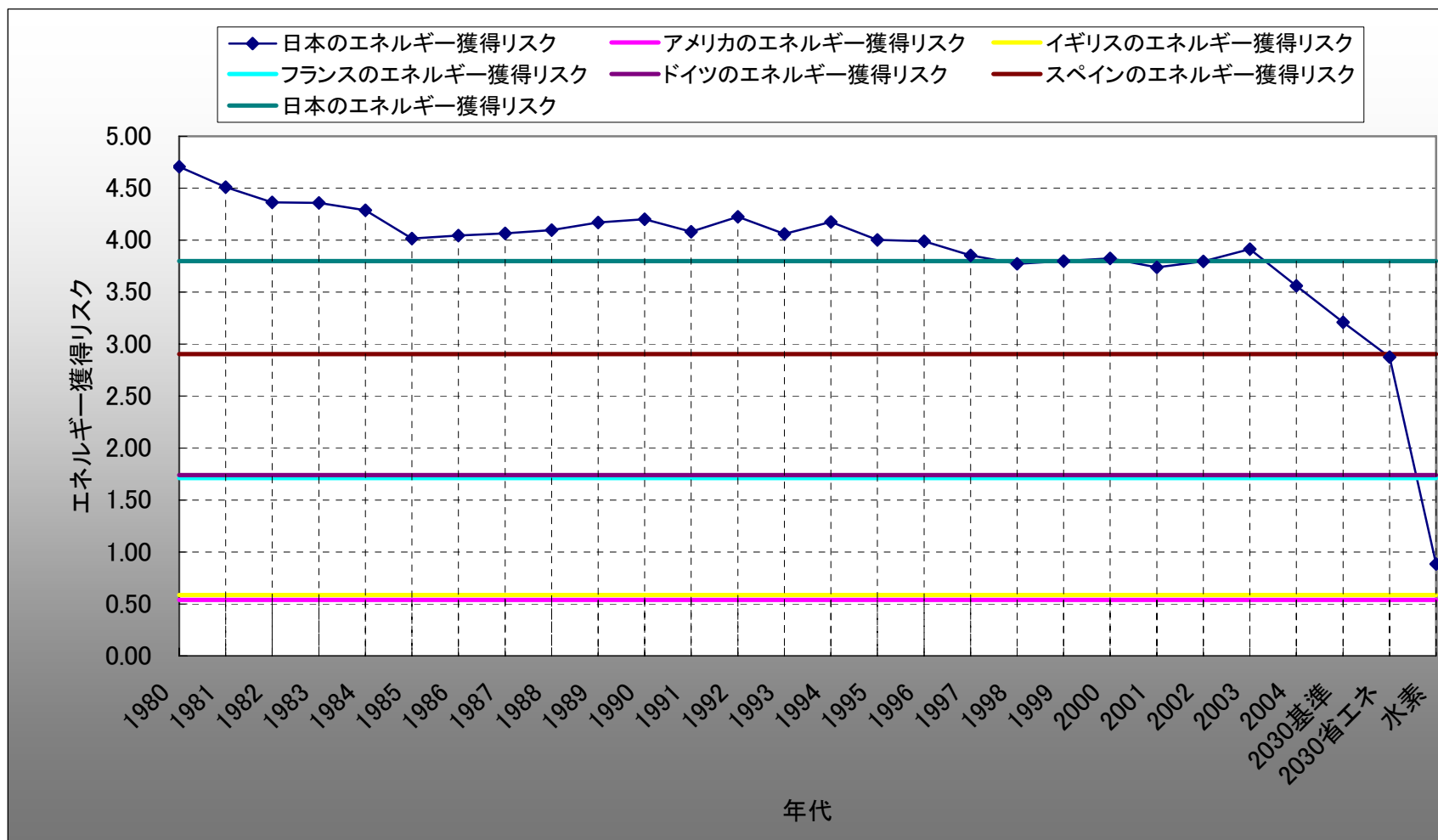


図 4-8 1980 年から 2004 年及び将来予測ケースにおける日本のエネルギー獲得リスク

第5章 結論

5.1. 結論

水素エネルギーシステムに関しては、省エネルギーや環境保全、エネルギーセキュリティの向上といった観点から、常々その有効性が主張されてきたが、実際にどのくらい効果があるのかについては、明らかにされてこなかった。本研究では、水素エネルギーシステムを導入した場合に、日本のエネルギー獲得リスクに与える効果を定量的に分析することを試みた。エネルギー獲得リスクを定量的に算出するために、金融工学で活用されているモダンポートフォリオ理論におけるシングルインデックスモデルを応用し、水素エネルギーシステムの導入効果を定量的に比較検証した。

本研究の範囲内で、以下のことがいえると考えられる。

各国が輸入している石油、天然ガス、石炭及びウランの持つリスクを比較すると、石油の持つリスクが最も高く、天然ガス、石炭、ウランの持つリスクの順にリスクが低くなることが明らかになった。

2002年におけるアメリカ、イギリス、フランス、ドイツ、スペイン及び日本のエネルギー獲得リスクを算出した結果、エネルギー獲得リスクが低い順から、アメリカ、イギリス、フランス、ドイツ、スペイン、日本となった。アメリカとイギリスは、1次エネルギー供給に占める自国産のエネルギーの割合が多く、フランスは1次エネルギー供給に占める自国産のエネルギーの割合が日本と同程度であるにも関わらず、原子力エネルギーの割合を高くすることにより、エネルギー獲得リスクを低くしていることが明らかになった。

経済産業省が公表している将来予測のうち、特別な技術進展がなく、水素エネルギーシステムがほとんど導入されていない2030年の日本を想定した場合、エネルギー獲得リスクは、2002年における日本よりも低下するものの、依然として2002年におけるアメリカ、イギリス、フランス、ドイツ及びスペインのエネルギー獲得リスクよりも高いことが明らかになった。2002年の日本と比較して、1次エネルギー供給に占める石油の割合をわずかに低下させ、原子力と天然ガスの割合を増やすことによって、エネルギー獲得リスクを低くしたと考えられる。

経済産業省が公表している将来予測のうち、新エネルギーや省エネルギー技術が特に進歩し、水素エネルギーシステムが導入段階である2030年の日本を想定した場合、エネルギー獲得リスクは、水素エネルギーシステムがほとんど導入されていない2030年における日本と2002年におけるスペインの持つエネルギー獲得リスクよりも低くなったが、2002年におけるアメリカ、イギリス、フランス、ドイツのエネルギー獲得リスクと比較すると、依然として高いことが明らかになった。水素エネルギーシステムがほとんど導入されていない2030年の社会よりも、1次エネルギー供給に占める石油と天然ガスの割合をさらに低下させ、原子力エネルギーとその他のエネルギーの割合を高くすることにより、エネルギ

一獲得リスクを一段と低下させたと考えられる。

水素エネルギーシステムが最も社会に浸透した未来の日本を想定した場合、エネルギー獲得リスクは、2002年におけるフランス、ドイツ及びスペインのエネルギー獲得リスクよりも低くなり、2002年におけるアメリカやイギリスのエネルギー獲得リスクよりも高いものの、ほぼ同じくらいまで日本のエネルギー獲得リスクが低下することが明らかになった。水素エネルギーシステムが社会に浸透することにより、既存のエネルギー供給体系よりも、さらに柔軟なエネルギー供給体系を実現することが可能になり、1次エネルギー供給に占める石油、天然ガス及び石炭の割合が大幅に減少させ、リスクの低い原子力エネルギーとその他のエネルギーの割合が増加させることによって、自国産のエネルギー資源に乏しい日本においても、自国産のエネルギー資源が豊富なアメリカやイギリスと同程度まで、エネルギー獲得リスクを低下させることが可能になると考えられる。

5.2. 将来の研究課題

1) エネルギー獲得リスクの定量化手法

エネルギー獲得リスクに関係する事象として、戦争や海賊、航路断絶、外交の断絶など、未来において何がいつ、どのような規模で起こるのかわからない、未知な事象が含まれるために、エネルギー獲得リスクを完璧に定量化することはできないと考えられる。しかし、完璧に知ることができない未来のことを予測する手法として、過去に起こった事象とその回数から、何らかの規則を発見し、未来を予測する手法が有効であると思われる。

本研究では、エネルギーの輸入価格の変動からエネルギー獲得リスクを計算した。エネルギーの輸入価格は、戦争や海賊、外交の断絶などの様々な事象の影響を含んだ情報であるため、エネルギーの輸入価格の変動から、各エネルギーの持つ安定供給性などを評価することは、非常に有効な手法であるといえる。

しかし、全てのエネルギーに関する詳細な時系列データを入手することは困難であり、入手できる時系列データの質も作成された国によって異なるため、本研究の手法も、エネルギー獲得リスクを表現するにあたり、必ずしも完全な手法ではない。本研究においては、多くの国の輸入価格やウランの輸入価格などの時系列データを入手することができなかった。ウランの輸入価格や輸入量の時系列データは、国の安全保障に関わることもあり、今後も入手することは困難であると予想されるが、各エネルギーの持つリスクは、本研究の分析結果に大きな影響を与えるため、全てのエネルギーに関して、可能な限り正確な時系列データを手に入れることが重要であると考えられる。

本研究では、1980年から2004年までの時系列データから各エネルギーの β を算出し、未来におけるエネルギー獲得リスクを比較した。しかし、2030年などの未来における各エネルギーの β は、1980年から2004年までの時系列データから算出した β とは異なり、未来におけるエネルギー獲得リスクの値も本研究の値とは異なる。水素エネルギーシステムの効果を正確に知るためには、未来の β を用いて計算されるべきなのだが、未来の β を得

るためには、未来のエネルギー輸入価格を知る必要がある。水素エネルギーシステムの効果をより正確に比較検証するためには、未来のエネルギー輸入価格を限りなく正確に予測できる手法が考案されることが期待される。

2) 水素エネルギーシステムの導入予測

未来に起こる水素エネルギーシステムの導入ケースを予測することは、非常に難しいことであると考えられる。最近 10 年間で、携帯電話やインターネット、人型ロボットなど、科学技術は非常に速いスピードで進歩しており、多くの技術は、先人の予測を遙かに上回ったスピードで進歩している。水素エネルギーシステムに関しても同様であり、未来における水素エネルギーシステムに関わる技術的な進歩は、現時点で考えられるスピードよりも遙かに速くても不思議ではない。固定電話が主流だった 1990 年代後半から、10 年も経たないうちに、携帯電話が主流の時代にかわってしまったように、社会のニーズに合い、ビジネスチャンスが生まれさえすれば、水素エネルギーシステムが本格的に導入される日も、そう遠くはないと思われる。

本研究においては、経済産業省が公表した将来予測ケースと独自に概算したケースをもとに分析を行った。第 2 章でも述べたように、将来予測ケースを詳細に考えることは難しいことであり、本研究においては、全てを独自に算出することはしなかった。しかし、本研究の分析結果に大きな影響を与える、将来の 1 次エネルギー供給割合を算出するために、詳細な説得力のある将来予測ケースを考案する必要があると考えられる。

本研究の考え方をもとに、エネルギー獲得リスクの定量化手法をさらに改良し、将来予測も細かく説得力のあるものにより、さらに優れた分析結果を得ることが可能になると考えられる。水素エネルギーシステムの持つ、省エネルギー効果、環境保全効果などを定量化し、水素エネルギーシステムを導入する際に必要となるコストを算出し、比較することにより、水素エネルギーシステムの費用対効果を知ることが可能となる。すなわち、本研究は、水素エネルギーシステムの持つ効果を、様々な角度から研究するときの土台となる研究と位置づけられ、さらに深く研究されることが期待される。

付録

付録 表目次

表 付録-1	日本のエネルギー輸入価格	62
表 付録-2	アメリカのエネルギー輸入価格	63
表 付録-3	イギリスのエネルギー輸入価格	64
表 付録-4	フランスのエネルギー輸入価格	65
表 付録-5	ドイツのエネルギー輸入価格	66
表 付録-6	スペインのエネルギー輸入価格	67
表 付録-7	日本のエネルギー輸入価格（現在価値）	68
表 付録-8	アメリカのエネルギー輸入価格（現在価値）	69
表 付録-9	イギリスのエネルギー輸入価格（現在価値）	70
表 付録-10	フランスのエネルギー輸入価格（現在価値）	71
表 付録-11	ドイツのエネルギー輸入価格（現在価値）	72
表 付録-12	スペインのエネルギー輸入価格（現在価値）	73
表 付録-13	アメリカ消費者物価指数の変化から計算したドルの価値変化	74
表 付録-14	日本のエネルギー輸入価格(\$/GJ)（現在価値）	75
表 付録-15	アメリカのエネルギー輸入価格(\$/GJ)（現在価値）	76
表 付録-16	イギリスのエネルギー輸入価格(\$/GJ)（現在価値）	77
表 付録-17	フランスのエネルギー輸入価格(\$/GJ)（現在価値）	78
表 付録-18	ドイツのエネルギー輸入価格(\$/GJ)（現在価値）	79
表 付録-19	スペインのエネルギー輸入価格(\$/GJ)（現在価値）	80
表 付録-20	日本のエネルギー輸入量	81
表 付録-21	アメリカのエネルギー輸入量	82
表 付録-22	イギリスのエネルギー輸入量	83
表 付録-23	フランスのエネルギー輸入量	84
表 付録-24	ドイツのエネルギー輸入量	85
表 付録-25	スペインのエネルギー輸入量	86
表 付録-26	日本の6カ国におけるエネルギーシェア	87
表 付録-27	アメリカの6カ国におけるエネルギーシェア	88
表 付録-28	6カ国におけるエネルギーシェア	89
表 付録-29	フランスの6カ国におけるエネルギーシェア	90
表 付録-30	ドイツの6カ国におけるエネルギーシェア	91
表 付録-31	スペインの6カ国におけるエネルギーシェア	92
表 付録-32	ウランのスポット価格	93
表 付録-33	アメリカにおける石油の α と e (Dollars/GJ)	94
表 付録-34	アメリカにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ)	95
表 付録-35	アメリカにおける石炭の α と e (Dollars/GJ)	96
表 付録-36	イギリスにおける石油の α と e (Dollars/GJ)	97

表 付録-37	イギリスにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ).....	98
表 付録-38	イギリスにおける石炭の α と e (Dollars/GJ).....	99
表 付録-39	フランスにおける石油の α と e (Dollars/GJ).....	100
表 付録-40	フランスにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ).....	101
表 付録-41	フランスにおける石炭の α と e (Dollars/GJ).....	102
表 付録-42	ドイツにおける石油の α と e (Dollars/GJ)	103
表 付録-43	ドイツにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ)	104
表 付録-44	ドイツにおける石炭の α と e (Dollars/GJ)	105
表 付録-45	スペインにおける石油の α と e (Dollars/GJ).....	106
表 付録-46	スペインにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ).....	107
表 付録-47	スペインにおける石炭の α と e (Dollars/GJ).....	108

表 付録-1 日本のエネルギー輸入価格

	日本			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	33.11	5.06	54.60	66.40
1981	35.92	5.70	65.22	71.06
1982	34.57	5.61	64.92	74.42
1983	30.47	5.06	55.53	67.76
1984	29.35	4.80	49.67	63.09
1985	27.90	4.94	45.32	59.77
1986	16.08	3.87	44.86	57.42
1987	17.99	3.32	41.49	53.97
1988	15.47	3.25	42.64	55.05
1989	16.91	3.27	48.84	58.39
1990	22.64	3.64	50.97	60.72
1991	20.14	4.02	50.43	60.61
1992	19.30	3.65	48.47	57.86
1993	17.47	3.56	45.92	55.39
1994	16.48	3.21	43.88	51.91
1995	18.02	3.48	47.85	55.03
1996	20.55	3.67	49.29	56.39
1997	20.55	3.91	45.26	55.19
1998	13.68	3.08	40.68	50.98
1999	17.38	3.18	35.87	42.95
2000	28.72	4.73	34.59	39.46
2001	25.01	4.64	37.95	41.13
2002	24.96	4.32	36.95	42.14
2003	29.26	4.82	34.93	41.73
2004	36.59	5.24	51.48	61.40

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-2 アメリカのエネルギー輸入価格

	アメリカ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	33.39	4.05	38.10	0.00
1981	36.69	4.44	31.38	0.00
1982	33.39	4.54	33.51	0.00
1983	29.19	4.08	37.03	0.00
1984	28.60	3.79	38.99	0.00
1985	26.78	2.96	39.73	0.00
1986	14.71	2.32	39.71	0.00
1987	17.73	1.99	35.32	0.00
1988	14.33	1.79	29.67	0.00
1989	17.50	1.77	35.12	0.00
1990	21.07	1.87	36.86	0.00
1991	18.23	1.77	35.65	0.00
1992	17.73	1.80	35.80	0.00
1993	15.87	1.98	32.32	0.00
1994	15.06	1.82	33.08	0.00
1995	16.74	1.45	36.50	0.00
1996	20.16	1.92	35.17	0.00
1997	18.34	2.12	36.64	0.00
1998	12.02	1.91	33.60	0.00
1999	17.06	2.22	33.64	0.00
2000	27.54	3.90	31.11	0.00
2001	22.07	4.35	35.14	0.00
2002	23.52	3.07	37.61	0.00
2003	27.66	5.09	33.76	0.00
2004	35.86	5.70	40.10	0.00

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-3 イギリスのエネルギー輸入価格

	イギリス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	31.22	0.00	62.35	69.56
1981	35.24	0.00	60.76	74.03
1982	33.73	0.00	68.90	68.45
1983	30.01	0.00	65.97	61.06
1984	28.70	0.00	74.60	60.27
1985	27.63	0.00	60.65	62.98
1986	14.07	0.00	54.99	57.67
1987	18.05	0.00	56.84	56.74
1988	14.92	3.19	66.64	56.40
1989	17.60	2.67	64.16	56.65
1990	22.92	3.30	67.59	72.53
1991	20.06	3.47	59.45	62.07
1992	19.07	3.33	55.89	62.20
1993	16.58	3.01	50.31	57.29
1994	15.83	2.98	49.19	55.35
1995	17.29	3.22	45.07	57.61
1996	21.08	3.51	45.97	60.59
1997	19.32	3.35	45.10	60.49
1998	12.64	4.76	42.91	57.19
1999	18.01	0.00	39.80	49.41
2000	28.45	0.00	39.37	46.82
2001	24.45	0.00	45.46	53.14
2002	24.58	0.00	40.28	56.81
2003	29.13	0.00	43.71	57.33
2004	37.75	0.00	64.96	77.73

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-4 フランスのエネルギー輸入価格

	フランス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	0.00	3.03	49.90	67.66
1981	0.00	3.55	57.19	82.67
1982	0.00	3.54	52.51	76.73
1983	0.00	3.57	45.43	66.25
1984	0.00	3.52	41.21	59.09
1985	0.00	3.51	39.51	62.74
1986	0.00	3.19	43.43	62.08
1987	0.00	2.23	44.02	56.60
1988	0.00	2.22	42.05	54.67
1989	0.00	2.12	46.31	56.81
1990	0.00	2.64	49.29	65.05
1991	0.00	3.03	45.93	64.26
1992	18.94	2.67	45.48	65.26
1993	16.05	2.49	41.92	56.33
1994	15.76	2.39	41.03	60.75
1995	17.14	0.00	46.24	61.83
1996	20.82	2.68	45.62	60.68
1997	18.99	2.70	45.27	57.86
1998	12.43	2.36	38.54	55.60
1999	17.45	1.87	36.28	49.41
2000	28.18	2.48	35.33	47.26
2001	24.13	0.00	42.05	52.43
2002	24.63	0.00	39.54	60.17
2003	28.87	0.00	40.12	61.96
2004	37.61	0.00	63.11	75.45

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-5 ドイツのエネルギー輸入価格

	ドイツ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	33.96	2.81	55.57	68.69
1981	37.09	3.51	66.63	66.82
1982	34.02	3.84	62.56	77.61
1983	30.23	3.51	51.66	65.15
1984	29.31	3.35	44.35	45.64
1985	27.93	3.53	48.35	41.80
1986	14.88	3.42	48.26	51.98
1987	18.32	2.33	43.94	55.30
1988	15.26	2.07	41.80	53.63
1989	18.23	1.81	46.39	54.73
1990	23.17	2.58	54.65	63.73
1991	20.36	2.97	50.33	59.39
1992	19.13	2.54	50.34	64.70
1993	16.88	2.50	40.28	61.13
1994	15.81	2.39	39.63	66.44
1995	17.07	2.69	48.53	69.35
1996	20.68	2.65	44.67	65.50
1997	19.01	2.74	42.24	56.09
1998	12.48	2.28	37.09	54.81
1999	17.51	1.86	32.41	44.63
2000	28.09	2.83	33.25	42.41
2001	24.15	3.64	42.03	50.50
2002	24.40	3.27	37.57	62.49
2003	28.44	4.03	39.38	57.87
2004	36.65	4.43	63.62	78.19

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-6 スペインのエネルギー輸入価格

	スペイン			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	32.25	0.00	0.00	0.00
1981	35.94	0.00	0.00	0.00
1982	32.84	0.00	0.00	0.00
1983	29.13	0.00	0.00	0.00
1984	28.71	0.00	0.00	0.00
1985	27.15	0.00	0.00	0.00
1986	13.87	0.00	37.54	55.73
1987	18.29	0.00	30.25	53.60
1988	14.42	0.00	37.53	53.98
1989	17.22	0.00	43.50	59.08
1990	21.88	0.00	44.18	62.36
1991	18.50	0.00	45.74	61.65
1992	17.31	0.00	40.03	59.92
1993	15.13	2.27	36.91	55.53
1994	15.24	2.38	36.18	56.48
1995	16.96	2.72	42.61	58.55
1996	20.45	2.75	40.19	60.71
1997	18.34	2.74	38.29	60.62
1998	11.80	2.25	33.27	56.82
1999	16.99	1.63	29.36	51.72
2000	27.16	3.24	31.69	49.11
2001	23.32	3.93	37.02	52.32
2002	23.95	3.36	34.57	57.09
2003	28.13	4.28	36.41	60.44
2004	36.03	4.42	55.75	79.30

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-7 日本のエネルギー輸入価格（現在価値）

	日本			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	75.90	11.60	125.17	152.22
1981	74.65	11.84	135.53	147.67
1982	67.67	10.98	127.08	145.68
1983	57.79	9.60	105.32	128.51
1984	53.36	8.74	90.30	114.70
1985	48.98	8.67	79.56	104.93
1986	27.71	6.67	77.32	98.97
1987	29.91	5.51	68.99	89.74
1988	24.70	5.19	68.09	87.90
1989	25.76	4.98	74.40	88.95
1990	32.72	5.26	73.67	87.76
1991	27.93	5.58	69.94	84.06
1992	25.99	4.91	65.26	77.90
1993	22.84	4.65	60.03	72.41
1994	21.01	4.09	55.93	66.17
1995	22.34	4.31	59.31	68.21
1996	24.74	4.42	59.34	67.89
1997	24.19	4.60	53.27	64.96
1998	15.85	3.57	47.14	59.08
1999	19.71	3.61	40.67	48.70
2000	31.51	5.19	37.94	43.29
2001	26.68	4.95	40.48	43.87
2002	26.21	4.54	38.80	44.25
2003	30.04	4.95	35.86	42.84
2004	36.59	5.24	51.48	61.40

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-8 アメリカのエネルギー輸入価格（現在価値）

	アメリカ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	76.55	9.29	87.34	0.00
1981	76.25	9.22	65.21	0.00
1982	65.36	8.88	65.60	0.00
1983	55.36	7.74	70.23	0.00
1984	52.00	6.89	70.89	0.00
1985	47.01	5.19	69.75	0.00
1986	25.35	4.01	68.44	0.00
1987	29.48	3.31	58.73	0.00
1988	22.88	2.86	47.38	0.00
1989	26.66	2.70	53.50	0.00
1990	30.45	2.70	53.27	0.00
1991	25.28	2.45	49.44	0.00
1992	23.87	2.42	48.20	0.00
1993	20.75	2.59	42.25	0.00
1994	19.20	2.32	42.16	0.00
1995	20.75	1.80	45.24	0.00
1996	24.27	2.31	42.34	0.00
1997	21.59	2.50	43.12	0.00
1998	13.93	2.21	38.94	0.00
1999	19.34	2.52	38.14	0.00
2000	30.21	4.28	34.13	0.00
2001	23.54	4.64	37.48	0.00
2002	24.70	3.22	39.49	0.00
2003	28.40	5.23	34.66	0.00
2004	35.86	5.70	40.10	0.00

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-9 イギリスのエネルギー輸入価格（現在価値）

	イギリス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	71.57	0.00	142.94	159.46
1981	73.23	0.00	126.27	153.84
1982	66.03	0.00	134.87	133.99
1983	56.92	0.00	125.12	115.81
1984	52.18	0.00	135.63	109.58
1985	48.51	0.00	106.48	110.57
1986	24.25	0.00	94.78	99.40
1987	30.01	0.00	94.52	94.35
1988	23.82	5.09	106.41	90.06
1989	26.81	4.07	97.74	86.30
1990	33.13	4.77	97.69	104.83
1991	27.82	4.81	82.45	86.09
1992	25.68	4.48	75.25	83.75
1993	21.67	3.93	65.77	74.89
1994	20.18	3.80	62.70	70.55
1995	21.43	3.99	55.86	71.41
1996	25.38	4.23	55.35	72.95
1997	22.74	3.94	53.08	71.19
1998	14.65	5.52	49.73	66.28
1999	20.42	0.00	45.13	56.02
2000	31.21	0.00	43.19	51.36
2001	26.08	0.00	48.49	56.68
2002	25.81	0.00	42.30	59.65
2003	29.91	0.00	44.87	58.86
2004	37.75	0.00	64.96	77.73

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-10 フランスのエネルギー輸入価格（現在価値）

	フランス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	0.00	6.94	114.39	155.11
1981	0.00	7.37	118.85	171.80
1982	0.00	6.94	102.79	150.20
1983	0.00	6.78	86.16	125.65
1984	0.00	6.40	74.92	107.43
1985	0.00	6.15	69.36	110.14
1986	0.00	5.50	74.85	107.00
1987	0.00	3.70	73.20	94.12
1988	0.00	3.54	67.14	87.30
1989	0.00	3.23	70.55	86.54
1990	0.00	3.82	71.24	94.02
1991	0.00	4.20	63.70	89.12
1992	25.50	3.59	61.23	87.87
1993	20.98	3.26	54.80	73.64
1994	20.09	3.05	52.30	77.43
1995	21.25	0.00	57.31	76.64
1996	25.07	3.23	54.92	73.06
1997	22.35	3.18	53.28	68.10
1998	14.41	2.73	44.66	64.43
1999	19.79	2.12	41.14	56.02
2000	30.91	2.72	38.76	51.84
2001	25.74	0.00	44.85	55.92
2002	25.86	0.00	41.52	63.18
2003	29.64	0.00	41.19	63.61
2004	37.61	0.00	63.11	75.45

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-11 ドイツのエネルギー輸入価格（現在価値）

	ドイツ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	77.85	6.43	127.39	157.47
1981	77.08	7.28	138.46	138.86
1982	66.59	7.51	122.46	151.92
1983	57.33	6.65	97.98	123.56
1984	53.29	6.10	80.63	82.98
1985	49.03	6.19	84.88	73.38
1986	25.65	5.89	83.18	89.59
1987	30.46	3.88	73.07	91.96
1988	24.37	3.30	66.75	85.64
1989	27.77	2.76	70.67	83.37
1990	33.49	3.73	78.99	92.11
1991	28.24	4.12	69.80	82.37
1992	25.76	3.42	67.78	87.11
1993	22.07	3.27	52.66	79.91
1994	20.15	3.05	50.51	84.69
1995	21.16	3.33	60.15	85.96
1996	24.90	3.19	53.78	78.86
1997	22.37	3.22	49.71	66.01
1998	14.46	2.64	42.98	63.52
1999	19.85	2.11	36.75	50.60
2000	30.81	3.10	36.47	46.52
2001	25.76	3.88	44.83	53.86
2002	25.62	3.43	39.45	65.62
2003	29.20	4.14	40.43	59.41
2004	36.65	4.43	63.62	78.19

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-12 スペインのエネルギー輸入価格（現在価値）

	スペイン			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	73.93	0.00	0.00	0.00
1981	74.69	0.00	0.00	0.00
1982	64.28	0.00	0.00	0.00
1983	55.25	0.00	0.00	0.00
1984	52.20	0.00	0.00	0.00
1985	47.66	0.00	0.00	0.00
1986	23.91	0.00	64.70	96.05
1987	30.41	0.00	50.30	89.13
1988	23.03	0.00	59.93	86.19
1989	26.23	0.00	66.27	90.00
1990	31.62	0.00	63.85	90.13
1991	25.66	0.00	63.44	85.50
1992	23.31	0.00	53.90	80.68
1993	19.78	2.97	48.25	72.59
1994	19.43	3.03	46.12	71.99
1995	21.02	3.37	52.82	72.57
1996	24.62	3.31	48.39	73.09
1997	21.59	3.22	45.07	71.35
1998	13.67	2.61	38.56	65.85
1999	19.26	1.85	33.29	58.64
2000	29.79	3.55	34.76	53.87
2001	24.87	4.19	39.49	55.81
2002	25.15	3.53	36.30	59.95
2003	28.88	4.39	37.38	62.05
2004	36.03	4.42	55.75	79.30

Dollars/bbl Dollars/Mbtu Dollars/tonne Dollars/tonne

表 付録-13 アメリカ消費者物価指数の変化から計算したドルの価値変化

	アメリカ消費者物価指数	ドルの価値変化
1980	82.40	2.29
1981	90.90	2.08
1982	96.50	1.96
1983	99.60	1.90
1984	103.90	1.82
1985	107.60	1.76
1986	109.60	1.72
1987	113.60	1.66
1988	118.30	1.60
1989	124.00	1.52
1990	130.70	1.45
1991	136.20	1.39
1992	140.30	1.35
1993	144.50	1.31
1994	148.20	1.27
1995	152.40	1.24
1996	156.90	1.20
1997	160.50	1.18
1998	163.00	1.16
1999	166.60	1.13
2000	172.20	1.10
2001	177.10	1.07
2002	179.90	1.05
2003	184.00	1.03
2004	188.90	1.00

1982-84=100

2004=1\$

表 付録-14 日本のエネルギー輸入価格(\$/GJ) (現在価値)

	日本			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	12.50	10.99	4.71	5.27
1981	12.29	11.22	5.10	5.11
1982	11.14	10.41	4.78	5.04
1983	9.51	9.10	3.96	4.45
1984	8.79	8.28	3.39	3.97
1985	8.06	8.22	2.99	3.63
1986	4.56	6.33	2.91	3.42
1987	4.93	5.23	2.59	3.11
1988	4.07	4.92	2.56	3.04
1989	4.24	4.72	2.80	3.08
1990	5.39	4.99	2.77	3.04
1991	4.60	5.28	2.63	2.91
1992	4.28	4.66	2.45	2.70
1993	3.76	4.41	2.26	2.51
1994	3.46	3.88	2.10	2.29
1995	3.68	4.09	2.23	2.36
1996	4.07	4.19	2.23	2.35
1997	3.98	4.36	2.00	2.25
1998	2.61	3.38	1.77	2.04
1999	3.24	3.42	1.53	1.69
2000	5.19	4.92	1.43	1.50
2001	4.39	4.69	1.52	1.52
2002	4.32	4.30	1.46	1.53
2003	4.95	4.69	1.35	1.48
2004	6.02	4.97	1.94	2.12

Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ

表 付録-15 アメリカのエネルギー輸入価格(\$/GJ) (現在価値)

	アメリカ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	12.60	8.81	3.28	0.00
1981	12.55	8.74	2.45	0.00
1982	10.76	8.42	2.47	0.00
1983	9.11	7.33	2.64	0.00
1984	8.56	6.53	2.66	0.00
1985	7.74	4.92	2.62	0.00
1986	4.17	3.80	2.57	0.00
1987	4.85	3.14	2.21	0.00
1988	3.77	2.71	1.78	0.00
1989	4.39	2.56	2.01	0.00
1990	5.01	2.56	2.00	0.00
1991	4.16	2.33	1.86	0.00
1992	3.93	2.30	1.81	0.00
1993	3.42	2.45	1.59	0.00
1994	3.16	2.20	1.59	0.00
1995	3.42	1.70	1.70	0.00
1996	4.00	2.19	1.59	0.00
1997	3.55	2.37	1.62	0.00
1998	2.29	2.10	1.46	0.00
1999	3.18	2.39	1.43	0.00
2000	4.97	4.06	1.28	0.00
2001	3.88	4.40	1.41	0.00
2002	4.07	3.06	1.48	0.00
2003	4.68	4.95	1.30	0.00
2004	5.90	5.40	1.51	0.00

Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ

表 付録-16 イギリスのエネルギー輸入価格(\$/GJ) (現在価値)

	イギリス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	11.78	0.00	5.37	5.52
1981	12.06	0.00	4.75	5.32
1982	10.87	0.00	5.07	4.64
1983	9.37	0.00	4.70	4.01
1984	8.59	0.00	5.10	3.79
1985	7.99	0.00	4.00	3.83
1986	3.99	0.00	3.56	3.44
1987	4.94	0.00	3.55	3.26
1988	3.92	4.83	4.00	3.12
1989	4.41	3.86	3.67	2.99
1990	5.45	4.52	3.67	3.63
1991	4.58	4.56	3.10	2.98
1992	4.23	4.25	2.83	2.90
1993	3.57	3.73	2.47	2.59
1994	3.32	3.60	2.36	2.44
1995	3.53	3.78	2.10	2.47
1996	4.18	4.01	2.08	2.52
1997	3.74	3.74	2.00	2.46
1998	2.41	5.23	1.87	2.29
1999	3.36	0.00	1.70	1.94
2000	5.14	0.00	1.62	1.78
2001	4.29	0.00	1.82	1.96
2002	4.25	0.00	1.59	2.06
2003	4.92	0.00	1.69	2.04
2004	6.22	0.00	2.44	2.69

Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ

表 付録-17 フランスのエネルギー輸入価格(\$/GJ) (現在価値)

	フランス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	0.00	6.58	4.30	5.37
1981	0.00	6.99	4.47	5.94
1982	0.00	6.57	3.86	5.20
1983	0.00	6.43	3.24	4.35
1984	0.00	6.07	2.82	3.72
1985	0.00	5.83	2.61	3.81
1986	0.00	5.21	2.81	3.70
1987	0.00	3.51	2.75	3.26
1988	0.00	3.36	2.52	3.02
1989	0.00	3.06	2.65	2.99
1990	0.00	3.62	2.68	3.25
1991	0.00	3.98	2.39	3.08
1992	4.20	3.41	2.30	3.04
1993	3.45	3.09	2.06	2.55
1994	3.31	2.89	1.97	2.68
1995	3.50	0.00	2.15	2.65
1996	4.13	3.06	2.06	2.53
1997	3.68	3.01	2.00	2.36
1998	2.37	2.59	1.68	2.23
1999	3.26	2.01	1.55	1.94
2000	5.09	2.58	1.46	1.79
2001	4.24	0.00	1.69	1.94
2002	4.26	0.00	1.56	2.19
2003	4.88	0.00	1.55	2.20
2004	6.19	0.00	2.37	2.61

Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ

表 付録-18 ドイツのエネルギー輸入価格(\$/GJ) (現在価値)

	ドイツ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	12.82	6.10	4.79	5.45
1981	12.69	6.90	5.21	4.80
1982	10.96	7.12	4.60	5.26
1983	9.44	6.30	3.68	4.28
1984	8.77	5.78	3.03	2.87
1985	8.07	5.87	3.19	2.54
1986	4.22	5.58	3.13	3.10
1987	5.02	3.68	2.75	3.18
1988	4.01	3.13	2.51	2.96
1989	4.57	2.61	2.66	2.88
1990	5.51	3.54	2.97	3.19
1991	4.65	3.91	2.62	2.85
1992	4.24	3.24	2.55	3.01
1993	3.63	3.10	1.98	2.77
1994	3.32	2.89	1.90	2.93
1995	3.48	3.16	2.26	2.97
1996	4.10	3.02	2.02	2.73
1997	3.68	3.06	1.87	2.28
1998	2.38	2.50	1.62	2.20
1999	3.27	2.00	1.38	1.75
2000	5.07	2.94	1.37	1.61
2001	4.24	3.68	1.69	1.86
2002	4.22	3.25	1.48	2.27
2003	4.81	3.92	1.52	2.06
2004	6.03	4.20	2.39	2.71

Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ

表 付録-19 スペインのエネルギー輸入価格(\$/GJ) (現在価値)

	スペイン			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	12.17	0.00	0.00	0.00
1981	12.30	0.00	0.00	0.00
1982	10.58	0.00	0.00	0.00
1983	9.10	0.00	0.00	0.00
1984	8.59	0.00	0.00	0.00
1985	7.85	0.00	0.00	0.00
1986	3.94	0.00	2.43	3.32
1987	5.01	0.00	1.89	3.08
1988	3.79	0.00	2.25	2.98
1989	4.32	0.00	2.49	3.11
1990	5.21	0.00	2.40	3.12
1991	4.22	0.00	2.38	2.96
1992	3.84	0.00	2.03	2.79
1993	3.26	2.81	1.81	2.51
1994	3.20	2.88	1.73	2.49
1995	3.46	3.20	1.99	2.51
1996	4.05	3.14	1.82	2.53
1997	3.55	3.06	1.69	2.47
1998	2.25	2.47	1.45	2.28
1999	3.17	1.75	1.25	2.03
2000	4.91	3.37	1.31	1.86
2001	4.10	3.97	1.48	1.93
2002	4.14	3.34	1.36	2.07
2003	4.75	4.16	1.41	2.15
2004	5.93	4.19	2.10	2.74

Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ Dollars/GJ

表 付録-20 日本のエネルギー輸入量

	日本			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	1824452676.00	1002856050.99	6343000.00	62227000.00
1981	1642599828.00	1012274892.72	12625000.00	65333000.00
1982	1568166484.00	1050927731.22	14397000.00	64138000.00
1983	1561902072.00	1127374456.25	15474000.00	59651000.00
1984	1623200120.00	1547401967.95	19290000.00	67937000.00
1985	1534965840.00	1656918343.70	24207000.00	69242000.00
1986	1565222876.00	1699436466.05	23947000.00	66445000.00
1987	1578631824.00	1753550439.95	26981000.00	63935000.00
1988	1679002940.00	1849753060.22	30113000.00	71128000.00
1989	1798307816.00	1996204370.53	32820000.00	68689000.00
1990	1896556280.00	2183455899.27	36863000.00	68203000.00
1991	1850952544.00	2308433410.42	42151000.00	68115000.00
1992	1934971104.00	2349233628.83	44098000.00	64074000.00
1993	1895232396.00	2402059174.78	46830000.00	62978000.00
1994	2025431580.00	2554093672.88	53958000.00	65126000.00
1995	1980626612.00	2623668782.18	58343000.00	65291000.00
1996	2018701220.00	2796747603.47	59421000.00	65515000.00
1997	1975294096.00	2885219656.03	65965000.00	65916000.00
1998	1895217604.00	2993877079.82	64732000.00	61449000.00
1999	1907975704.00	3133456774.40	71915000.00	63766000.00
2000	1956648780.00	3256286905.63	84785000.00	65687000.00
2001	1832003992.00	3272177517.02	90503000.00	64587000.00
2002	1865751940.00	3308253499.62	95507000.00	67177000.00
2003	1882089704.00	3512254591.70	100675000.00	67632000.00
2004	1854221576.00	3488633412.62	97144000.00	86314000.00

bbbl

Mbtu

tonnes

tonnes

表 付録-21 アメリカのエネルギー輸入量

	アメリカ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	2434844556.00	1175299247.81	1083000.00	0.00
1981	2076892948.00	1099887993.32	946000.00	0.00
1982	1678307716.00	1135534499.93	673000.00	0.00
1983	1665645764.00	1117496508.63	1153000.00	0.00
1984	1809379628.00	1025588648.20	1167000.00	0.00
1985	1659691984.00	1155290395.17	1771000.00	0.00
1986	2063513584.00	913065940.57	2007000.00	0.00
1987	2233429288.00	1207686465.13	1585000.00	0.00
1988	2467860300.00	1574029478.92	1936000.00	0.00
1989	2674504540.00	1680968998.77	2587000.00	0.00
1990	2671553536.00	1864355243.65	2449000.00	0.00
1991	2503176200.00	2157687340.27	3075000.00	0.00
1992	2660674020.00	2600477079.08	3450000.00	0.00
1993	2912515216.00	2858162669.08	6631000.00	0.00
1994	3067039844.00	3191006556.17	6880000.00	0.00
1995	3002420992.00	3455134285.92	6533000.00	0.00
1996	3224360160.00	3572381229.37	6464000.00	0.00
1997	3460536628.00	3641526862.68	6792000.00	0.00
1998	3676292740.00	3833502627.23	6818000.00	1050000.00
1999	3731681384.00	4360469658.78	7139000.00	1065000.00
2000	3924006968.00	4598828829.53	9724000.00	1547000.00
2001	4087850556.00	4836329048.32	16581000.00	2091000.00
2002	3965838744.00	4883571406.48	13853000.00	2207000.00
2003	4223559760.00	4860379703.38	21058000.00	1556000.00
2004	4462576292.00	5179050883.02	22648000.00	1987000.00

bbbl

Mbtu

tonnes

tonnes

表 付録-22 イギリスのエネルギー輸入量

	イギリス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	0.00	461872972.22	4927000.00	2407000.00
1981	0.00	494756332.80	1686000.00	2604000.00
1982	0.00	459539302.17	1423000.00	2640000.00
1983	0.00	497333188.70	2012000.00	2444000.00
1984	0.00	589241049.13	3422000.00	5472000.00
1985	0.00	590958953.07	5582000.00	7150000.00
1986	0.00	550588210.63	4297000.00	6257000.00
1987	0.00	517518559.92	3289000.00	6492000.00
1988	0.00	463834062.00	4603000.00	7082000.00
1989	0.00	446225546.68	4139000.00	7998000.00
1990	0.00	310511135.95	6169000.00	8614000.00
1991	0.00	273146725.40	10415000.00	9196000.00
1992	0.00	242653930.58	11954000.00	8385000.00
1993	0.00	191975764.55	9798000.00	8602000.00
1994	0.00	130131222.95	7023000.00	8065000.00
1995	0.00	73869869.13	8142000.00	7754000.00
1996	0.00	73869869.13	9554000.00	8245000.00
1997	0.00	54543449.88	11685000.00	8072000.00
1998	0.00	39941266.45	12598000.00	8646000.00
1999	0.00	48960262.10	12273000.00	8020000.00
2000	0.00	102215284.03	14983000.00	8462000.00
2001	0.00	118105895.42	27819000.00	7723000.00
2002	0.00	235782314.85	22372000.00	6315000.00
2003	0.00	337138646.92	25417000.00	6474000.00
2004	0.00	520095415.82	29774000.00	6345000.00

bbbl

Mbtu

tonnes

tonnes

表 付録-23 フランスのエネルギー輸入量

	フランス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	832656472.00	836759799.97	18954000.00	10456000.00
1981	693005200.00	998531661.25	17280000.00	10220000.00
1982	650293300.00	921655460.23	14835000.00	8120000.00
1983	612388800.00	1071972054.40	12017000.00	6528000.00
1984	619585108.00	1038043451.72	13907000.00	7711000.00
1985	594926844.00	1166456770.73	11062000.00	7773000.00
1986	597959204.00	1227871836.35	9243000.00	7614000.00
1987	621974016.00	1179341050.23	5777000.00	7532000.00
1988	620553984.00	1065959390.63	3949000.00	8165000.00
1989	631832884.00	1123509172.40	8174000.00	7769000.00
1990	633112392.00	1211122273.00	11541000.00	7848000.00
1991	671031684.00	1290145853.93	14132000.00	7660000.00
1992	640567560.00	1358862011.27	14532000.00	7457000.00
1993	633371252.00	1272966814.60	7327000.00	6904000.00
1994	600355508.00	1327510264.48	5443000.00	6747000.00
1995	627565392.00	1393220089.93	5890000.00	7300000.00
1996	659087144.00	1512614413.30	8371000.00	7387000.00
1997	649709016.00	1517338649.12	6369000.00	7235000.00
1998	683767596.00	1511325985.35	11372000.00	7052000.00
1999	663598704.00	1744960920.28	10891000.00	6950000.00
2000	665292388.00	1762569435.60	12437000.00	6543000.00
2001	697864372.00	1724775549.07	9018000.00	6942000.00
2002	687524764.00	1807664413.85	11737000.00	6405000.00
2003	691348496.00	1864784719.63	10183000.00	6460000.00
2004	690520144.00	1888835374.70	12900000.00	6797000.00

bbbl

Mbtu

tonnes

tonnes

表 付録-24 ドイツのエネルギー輸入量

	ドイツ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	1078514304.00	1667177067.09	13136000.00	3019000.00
1981	913073180.00	1915892361.65	14381000.00	2266000.00
1982	854186228.00	1791344326.48	13978000.00	2087000.00
1983	837404704.00	1801222274.10	12280000.00	1818000.00
1984	848461724.00	1820119217.37	11242000.00	1965000.00
1985	872824148.00	1951109392.28	13312000.00	2235000.00
1986	951436232.00	1997063322.50	14919000.00	2246000.00
1987	918930812.00	2172718999.68	12760000.00	2200000.00
1988	919870104.00	2104861794.32	11056000.00	2248000.00
1989	860458036.00	2300702842.72	8790000.00	2281000.00
1990	884406284.00	2331625113.52	11874000.00	1706000.00
1991	947235304.00	2438994109.35	14366000.00	1057000.00
1992	972958592.00	2500838650.95	14095000.00	1357000.00
1993	964497568.00	2677353280.10	12103000.00	987000.00
1994	967389404.00	2786869655.85	14390000.00	1093000.00
1995	955467052.00	3015350878.98	13625000.00	1427000.00
1996	990095124.00	3416910923.40	14159000.00	2189000.00
1997	988083412.00	3289356556.35	17495000.00	2536000.00
1998	1017149692.00	3188859176.25	17950000.00	4299000.00
1999	932265800.00	3296657648.07	19159000.00	3519000.00
2000	917377652.00	3254139525.72	23340000.00	4608000.00
2001	956413740.00	3381264416.78	29527000.00	3984000.00
2002	897349284.00	3493357648.43	27951000.00	5174000.00
2003	910129572.00	3628213107.20	29395000.00	5504000.00
2004	882150504.00	3870008085.82	32098000.00	6838000.00

bbbl

Mbtu

tonnes

tonnes

表 付録-25 スペインのエネルギー輸入量

	スペイン			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	361767944.00	72454253.25	1604000.00	4074000.00
1981	352685656.00	83318340.77	3500000.00	3545000.00
1982	311837548.00	85036244.70	3543000.00	3633000.00
1983	310439704.00	90619432.48	2782000.00	3127000.00
1984	285086216.00	76876201.02	3565000.00	3428000.00
1985	287770964.00	89760480.52	4326000.00	4090000.00
1986	284494536.00	90189956.50	5618000.00	3097000.00
1987	305343860.00	91478384.45	5449000.00	3437000.00
1988	336813840.00	121112227.30	5123000.00	3643000.00
1989	353965164.00	143874454.42	6569000.00	4000000.00
1990	360229576.00	173508297.27	6286000.00	4169000.00
1991	365428964.00	207007423.97	8336000.00	4652000.00
1992	385834528.00	227622271.17	9936000.00	4343000.00
1993	369378428.00	239218122.72	8154000.00	4572000.00
1994	400308500.00	305357424.15	7611000.00	3893000.00
1995	433804984.00	353888210.27	10164000.00	3244000.00
1996	428413300.00	390823144.83	8676000.00	3318000.00
1997	461636132.00	542857642.93	7595000.00	3745000.00
1998	498312896.00	566908298.00	10649000.00	3905000.00
1999	510146496.00	653662446.63	16550000.00	3548000.00
2000	524908912.00	727102839.78	17894000.00	3755000.00
2001	538458384.00	744281879.12	15492000.00	3424000.00
2002	550358548.00	890303713.45	21089000.00	3425000.00
2003	556060864.00	995525329.37	18231000.00	3321000.00
2004	568922508.00	1157437775.08	20430000.00	4043000.00

bbbl

Mbtu

tonnes

tonnes

表 付録-26 日本の6カ国におけるエネルギーシェア

	日本			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	28.14%	2.36%	0.16%	1.93%
1981	27.91%	2.73%	0.39%	2.20%
1982	30.25%	3.29%	0.52%	2.66%
1983	30.13%	3.61%	0.54%	2.56%
1984	29.59%	4.62%	0.60%	2.66%
1985	28.59%	5.47%	0.73%	2.76%
1986	24.99%	6.53%	1.07%	3.79%
1987	25.08%	5.14%	0.99%	3.05%
1988	24.78%	5.74%	1.23%	3.74%
1989	24.42%	5.24%	1.29%	3.22%
1990	27.04%	5.00%	1.18%	2.61%
1991	25.83%	6.43%	1.47%	2.86%
1992	23.98%	5.51%	1.37%	2.38%
1993	22.80%	5.89%	1.48%	2.40%
1994	23.19%	5.70%	1.65%	2.35%
1995	23.27%	5.95%	1.82%	2.34%
1996	21.72%	5.38%	1.53%	1.93%
1997	21.66%	6.02%	1.59%	1.94%
1998	19.15%	6.81%	1.95%	2.31%
1999	19.27%	5.79%	1.50%	1.59%
2000	19.96%	5.47%	1.04%	0.92%
2001	18.23%	6.04%	1.37%	1.06%
2002	18.87%	5.79%	1.43%	1.15%
2003	18.02%	5.54%	1.15%	0.92%
2004	17.14%	4.62%	1.26%	1.34%

表 付録-27 アメリカの6カ国におけるエネルギーシェア

	アメリカ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	37.88%	2.22%	0.02%	0.00%
1981	36.05%	2.31%	0.01%	0.00%
1982	31.27%	2.87%	0.01%	0.00%
1983	30.78%	2.89%	0.03%	0.00%
1984	32.14%	2.41%	0.03%	0.00%
1985	29.67%	2.28%	0.05%	0.00%
1986	30.13%	2.11%	0.08%	0.00%
1987	34.97%	2.12%	0.05%	0.00%
1988	33.74%	2.69%	0.05%	0.00%
1989	37.58%	2.39%	0.07%	0.00%
1990	35.45%	2.20%	0.06%	0.00%
1991	31.62%	2.65%	0.08%	0.00%
1992	30.29%	3.01%	0.08%	0.00%
1993	31.83%	3.90%	0.15%	0.00%
1994	32.09%	4.04%	0.16%	0.00%
1995	32.77%	3.27%	0.16%	0.00%
1996	34.04%	3.59%	0.12%	0.00%
1997	33.86%	4.12%	0.13%	0.00%
1998	32.64%	5.41%	0.17%	0.00%
1999	36.99%	5.62%	0.14%	0.00%
2000	38.38%	6.37%	0.11%	0.00%
2001	35.90%	8.37%	0.23%	0.00%
2002	37.79%	6.07%	0.21%	0.00%
2003	38.23%	8.10%	0.23%	0.00%
2004	40.44%	7.46%	0.23%	0.00%

表 付録-28 6カ国におけるエネルギーシェア

	イギリス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	0.00%	0.00%	0.14%	0.08%
1981	0.00%	0.00%	0.05%	0.09%
1982	0.00%	0.00%	0.05%	0.10%
1983	0.00%	0.00%	0.08%	0.09%
1984	0.00%	0.00%	0.16%	0.20%
1985	0.00%	0.00%	0.23%	0.30%
1986	0.00%	0.00%	0.23%	0.36%
1987	0.00%	0.00%	0.17%	0.33%
1988	0.00%	1.41%	0.29%	0.38%
1989	0.00%	0.96%	0.21%	0.36%
1990	0.00%	0.65%	0.26%	0.39%
1991	0.00%	0.66%	0.43%	0.40%
1992	0.00%	0.52%	0.43%	0.33%
1993	0.00%	0.40%	0.34%	0.34%
1994	0.00%	0.27%	0.24%	0.31%
1995	0.00%	0.16%	0.24%	0.29%
1996	0.00%	0.14%	0.23%	0.26%
1997	0.00%	0.10%	0.28%	0.26%
1998	0.00%	0.14%	0.40%	0.37%
1999	0.00%	0.00%	0.28%	0.23%
2000	0.00%	0.00%	0.21%	0.14%
2001	0.00%	0.00%	0.50%	0.16%
2002	0.00%	0.00%	0.37%	0.15%
2003	0.00%	0.00%	0.36%	0.12%
2004	0.00%	0.00%	0.49%	0.12%

表 付録-29 フランスの6カ国におけるエネルギーシェア

	フランス			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	0.00%	1.18%	0.44%	0.33%
1981	0.00%	1.68%	0.47%	0.40%
1982	0.00%	1.82%	0.43%	0.35%
1983	0.00%	2.43%	0.35%	0.27%
1984	0.00%	2.27%	0.36%	0.28%
1985	0.00%	2.73%	0.29%	0.33%
1986	0.00%	3.89%	0.40%	0.47%
1987	0.00%	2.32%	0.22%	0.38%
1988	0.00%	2.26%	0.16%	0.43%
1989	0.00%	1.91%	0.30%	0.35%
1990	0.00%	2.01%	0.36%	0.32%
1991	0.00%	2.71%	0.45%	0.34%
1992	7.79%	2.33%	0.42%	0.31%
1993	7.00%	2.18%	0.21%	0.27%
1994	6.57%	2.20%	0.16%	0.28%
1995	7.01%	0.00%	0.18%	0.29%
1996	7.19%	2.12%	0.20%	0.23%
1997	6.58%	2.19%	0.15%	0.22%
1998	6.28%	2.63%	0.32%	0.29%
1999	6.73%	1.90%	0.23%	0.20%
2000	6.66%	1.55%	0.16%	0.11%
2001	6.70%	0.00%	0.15%	0.14%
2002	6.86%	0.00%	0.19%	0.16%
2003	6.53%	0.00%	0.13%	0.13%
2004	6.56%	0.00%	0.21%	0.13%

表 付録-30 ドイツの6カ国におけるエネルギーシェア

	ドイツ			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	17.06%	2.18%	0.34%	0.10%
1981	16.02%	3.18%	0.45%	0.07%
1982	16.22%	3.84%	0.49%	0.09%
1983	16.03%	4.00%	0.40%	0.07%
1984	15.44%	3.79%	0.31%	0.06%
1985	16.27%	4.59%	0.43%	0.06%
1986	14.05%	6.78%	0.71%	0.12%
1987	14.87%	4.48%	0.50%	0.11%
1988	13.39%	4.15%	0.44%	0.12%
1989	12.60%	3.34%	0.33%	0.10%
1990	12.90%	3.79%	0.41%	0.07%
1991	13.36%	5.03%	0.50%	0.04%
1992	11.95%	4.08%	0.46%	0.06%
1993	11.21%	4.61%	0.34%	0.04%
1994	10.63%	4.63%	0.40%	0.05%
1995	10.63%	5.29%	0.43%	0.06%
1996	10.72%	4.74%	0.33%	0.08%
1997	10.02%	4.81%	0.39%	0.08%
1998	9.38%	5.37%	0.49%	0.17%
1999	9.48%	3.56%	0.36%	0.09%
2000	9.15%	3.27%	0.28%	0.07%
2001	9.19%	4.90%	0.49%	0.08%
2002	8.87%	4.63%	0.43%	0.13%
2003	8.47%	4.78%	0.38%	0.10%
2004	8.17%	4.33%	0.52%	0.14%

表 付録-31 スペインの6カ国におけるエネルギーシェア

	スペイン			
	原油	天然ガス	一般炭	原料炭
1980	5.44%	0.00%	0.00%	0.00%
1981	6.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1982	5.72%	0.00%	0.00%	0.00%
1983	5.73%	0.00%	0.00%	0.00%
1984	5.08%	0.00%	0.00%	0.00%
1985	5.22%	0.00%	0.00%	0.00%
1986	3.92%	0.00%	0.21%	0.17%
1987	4.93%	0.00%	0.15%	0.16%
1988	4.63%	0.00%	0.18%	0.19%
1989	4.89%	0.00%	0.23%	0.19%
1990	4.96%	0.00%	0.17%	0.16%
1991	4.68%	0.00%	0.26%	0.20%
1992	4.29%	0.00%	0.26%	0.17%
1993	3.85%	0.37%	0.21%	0.17%
1994	4.24%	0.50%	0.19%	0.15%
1995	4.80%	0.63%	0.28%	0.12%
1996	4.59%	0.56%	0.18%	0.11%
1997	4.52%	0.79%	0.16%	0.12%
1998	4.34%	0.94%	0.26%	0.16%
1999	5.04%	0.62%	0.28%	0.11%
2000	5.06%	0.84%	0.20%	0.07%
2001	5.00%	1.16%	0.23%	0.07%
2002	5.34%	1.21%	0.30%	0.08%
2003	5.12%	1.39%	0.22%	0.07%
2004	5.18%	1.29%	0.29%	0.08%

表 付録-32 ウランのスポット価格

	取引単位(ポンド) あたりの価格	GJ あたりの価格	GJ あたりの価 格 (現在価値)
1980	31.79	0.05	0.11
1981	24.19	0.04	0.07
1982	19.90	0.03	0.06
1983	22.98	0.03	0.06
1984	17.27	0.03	0.05
1985	15.60	0.02	0.04
1986	17.00	0.03	0.04
1987	16.92	0.02	0.04
1988	14.63	0.02	0.03
1989	9.97	0.01	0.02
1990	9.76	0.01	0.02
1991	8.75	0.01	0.02
1992	8.55	0.01	0.02
1993	10.11	0.01	0.02
1994	9.37	0.01	0.02
1995	11.46	0.02	0.02
1996	15.61	0.02	0.03
1997	12.05	0.02	0.02
1998	10.31	0.02	0.02
1999	10.25	0.02	0.02
2000	8.20	0.01	0.01
2001	8.80	0.01	0.01
2002	9.89	0.01	0.02
2003	11.55	0.02	0.02
2004	18.55	0.03	0.03

dollars/lb

dollars/GJ

dollars/GJ

表 付録-33 アメリカにおける石油の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石油)	α	β Wp	e
1980	11.99	12.60	-0.26	12.87	-0.01
1981	11.78	12.55	-0.26	12.66	0.16
1982	10.33	10.76	-0.26	11.09	-0.07
1983	8.84	9.11	-0.26	9.50	-0.12
1984	8.21	8.56	-0.26	8.82	0.00
1985	7.50	7.74	-0.26	8.05	-0.05
1986	4.47	4.17	-0.26	4.80	-0.37
1987	4.69	4.85	-0.26	5.04	0.08
1988	3.83	3.77	-0.26	4.12	-0.09
1989	4.16	4.39	-0.26	4.47	0.18
1990	4.93	5.01	-0.26	5.29	-0.02
1991	4.26	4.16	-0.26	4.57	-0.15
1992	3.94	3.93	-0.26	4.23	-0.04
1993	3.45	3.42	-0.26	3.71	-0.03
1994	3.18	3.16	-0.26	3.42	0.00
1995	3.39	3.42	-0.26	3.64	0.03
1996	3.82	4.00	-0.26	4.10	0.15
1997	3.55	3.55	-0.26	3.81	0.00
1998	2.43	2.29	-0.26	2.61	-0.05
1999	3.02	3.18	-0.26	3.25	0.20
2000	4.74	4.97	-0.26	5.09	0.15
2001	4.02	3.88	-0.26	4.32	-0.18
2002	3.94	4.07	-0.26	4.23	0.10
2003	4.61	4.68	-0.26	4.95	-0.02
2004	5.60	5.90	-0.26	6.01	0.15

表 付録-34 アメリカにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(天然ガス)	α	β Wp	e
1980	11.99	8.81	-0.17	9.41	-0.43
1981	11.78	8.74	-0.17	9.25	-0.34
1982	10.33	8.42	-0.17	8.11	0.48
1983	8.84	7.33	-0.17	6.94	0.57
1984	8.21	6.53	-0.17	6.45	0.25
1985	7.50	4.92	-0.17	5.89	-0.79
1986	4.47	3.80	-0.17	3.51	0.46
1987	4.69	3.14	-0.17	3.68	-0.37
1988	3.83	2.71	-0.17	3.01	-0.13
1989	4.16	2.56	-0.17	3.27	-0.54
1990	4.93	2.56	-0.17	3.87	-1.13
1991	4.26	2.33	-0.17	3.34	-0.84
1992	3.94	2.30	-0.17	3.09	-0.62
1993	3.45	2.45	-0.17	2.71	-0.08
1994	3.18	2.20	-0.17	2.50	-0.13
1995	3.39	1.70	-0.17	2.66	-0.79
1996	3.82	2.19	-0.17	3.00	-0.63
1997	3.55	2.37	-0.17	2.79	-0.25
1998	2.43	2.10	-0.17	1.91	0.37
1999	3.02	2.39	-0.17	2.38	0.18
2000	4.74	4.06	-0.17	3.72	0.51
2001	4.02	4.40	-0.17	3.16	1.41
2002	3.94	3.06	-0.17	3.09	0.14
2003	4.61	4.95	-0.17	3.62	1.51
2004	5.60	5.40	-0.17	4.40	1.18

表 付録-35 アメリカにおける石炭の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石炭)	α	β Wp	e
1980	11.99	3.28	1.09	1.88	0.32
1981	11.78	2.45	1.09	1.85	-0.48
1982	10.33	2.47	1.09	1.62	-0.24
1983	8.84	2.64	1.09	1.38	0.17
1984	8.21	2.66	1.09	1.29	0.29
1985	7.50	2.62	1.09	1.17	0.36
1986	4.47	2.57	1.09	0.70	0.78
1987	4.69	2.21	1.09	0.73	0.38
1988	3.83	1.78	1.09	0.60	0.09
1989	4.16	2.01	1.09	0.65	0.27
1990	4.93	2.00	1.09	0.77	0.14
1991	4.26	1.86	1.09	0.67	0.10
1992	3.94	1.81	1.09	0.62	0.11
1993	3.45	1.59	1.09	0.54	-0.04
1994	3.18	1.59	1.09	0.50	0.00
1995	3.39	1.70	1.09	0.53	0.08
1996	3.82	1.59	1.09	0.60	-0.10
1997	3.55	1.62	1.09	0.56	-0.03
1998	2.43	1.46	1.09	0.38	-0.01
1999	3.02	1.43	1.09	0.47	-0.13
2000	4.74	1.28	1.09	0.74	-0.55
2001	4.02	1.41	1.09	0.63	-0.31
2002	3.94	1.48	1.09	0.62	-0.22
2003	4.61	1.30	1.09	0.72	-0.51
2004	5.60	1.51	1.09	0.88	-0.46

表 付録-36 イギリスにおける石油の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石油)	α	β Wp	e
1980	11.78	0.19	12.13	-0.54	11.78
1981	12.06	0.19	11.92	-0.06	12.06
1982	10.87	0.19	10.45	0.23	10.87
1983	9.37	0.19	8.95	0.23	9.37
1984	8.59	0.19	8.31	0.08	8.59
1985	7.99	0.19	7.59	0.21	7.99
1986	3.99	0.19	4.52	-0.72	3.99
1987	4.94	0.19	4.74	0.00	4.94
1988	3.92	0.19	3.88	-0.15	3.92
1989	4.41	0.19	4.21	0.01	4.41
1990	5.45	0.19	4.99	0.27	5.45
1991	4.58	0.19	4.31	0.08	4.58
1992	4.23	0.19	3.98	0.05	4.23
1993	3.57	0.19	3.49	-0.12	3.57
1994	3.32	0.19	3.22	-0.09	3.32
1995	3.53	0.19	3.43	-0.10	3.53
1996	4.18	0.19	3.87	0.12	4.18
1997	3.74	0.19	3.59	-0.04	3.74
1998	2.41	0.19	2.46	-0.24	2.41
1999	3.36	0.19	3.06	0.11	3.36
2000	5.14	0.19	4.79	0.15	5.14
2001	4.29	0.19	4.07	0.03	4.29
2002	4.25	0.19	3.98	0.07	4.25
2003	4.92	0.19	4.67	0.06	4.92
2004	6.22	0.19	5.67	0.35	6.22

表 付録-37 イギリスにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(天然ガス)	α	βWp	e
1980	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1981	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1984	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1985	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1987	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1988	4.83	4.35	-0.16	0.64	4.83
1989	3.86	4.35	-0.18	-0.32	3.86
1990	4.52	4.35	-0.21	0.38	4.52
1991	4.56	4.35	-0.18	0.39	4.56
1992	4.25	4.35	-0.17	0.07	4.25
1993	3.73	4.35	-0.15	-0.47	3.73
1994	3.60	4.35	-0.13	-0.61	3.60
1995	3.78	4.35	-0.14	-0.42	3.78
1996	4.01	4.35	-0.16	-0.18	4.01
1997	3.74	4.35	-0.15	-0.46	3.74
1998	5.23	4.35	-0.10	0.98	5.23
1999	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 付録-38 イギリスにおける石炭の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石炭)	α	β Wp	e
1980	11.99	5.45	1.18	4.22	0.04
1981	11.78	5.04	1.18	4.15	-0.29
1982	10.33	4.85	1.18	3.64	0.04
1983	8.84	4.36	1.18	3.11	0.06
1984	8.21	4.45	1.18	2.89	0.37
1985	7.50	3.91	1.18	2.64	0.10
1986	4.47	3.50	1.18	1.57	0.75
1987	4.69	3.41	1.18	1.65	0.58
1988	3.83	3.56	1.18	1.35	1.03
1989	4.16	3.33	1.18	1.47	0.69
1990	4.93	3.65	1.18	1.74	0.74
1991	4.26	3.04	1.18	1.50	0.36
1992	3.94	2.86	1.18	1.39	0.30
1993	3.45	2.53	1.18	1.22	0.14
1994	3.18	2.40	1.18	1.12	0.10
1995	3.39	2.29	1.18	1.20	-0.09
1996	3.82	2.30	1.18	1.35	-0.22
1997	3.55	2.23	1.18	1.25	-0.20
1998	2.43	2.08	1.18	0.86	0.05
1999	3.02	1.82	1.18	1.07	-0.43
2000	4.74	1.70	1.18	1.67	-1.15
2001	4.02	1.89	1.18	1.42	-0.70
2002	3.94	1.83	1.18	1.39	-0.74
2003	4.61	1.86	1.18	1.63	-0.94
2004	5.60	2.57	1.18	1.97	-0.59

表 付録-39 フランスにおける石油の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石油)	α	β Wp	e
1980	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1981	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1984	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1985	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1986	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1987	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1988	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1989	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1990	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1991	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1992	4.20	-0.46	4.63	0.02	4.20
1993	3.45	-0.46	4.06	-0.15	3.45
1994	3.31	-0.46	3.75	0.02	3.31
1995	3.50	-0.46	3.99	-0.04	3.50
1996	4.13	-0.46	4.50	0.09	4.13
1997	3.68	-0.46	4.18	-0.04	3.68
1998	2.37	-0.46	2.86	-0.03	2.37
1999	3.26	-0.46	3.56	0.15	3.26
2000	5.09	-0.46	5.57	-0.03	5.09
2001	4.24	-0.46	4.73	-0.04	4.24
2002	4.26	-0.46	4.63	0.08	4.26
2003	4.88	-0.46	5.43	-0.09	4.88
2004	6.19	-0.46	6.59	0.06	6.19

表 付録-40 フランスにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(天然ガス)	α	βWp	e
1980	6.58	0.99	6.50	-0.90	6.58
1981	6.99	0.99	6.39	-0.38	6.99
1982	6.57	0.99	5.60	-0.01	6.57
1983	6.43	0.99	4.79	0.65	6.43
1984	6.07	0.99	4.45	0.63	6.07
1985	5.83	0.99	4.06	0.78	5.83
1986	5.21	0.99	2.42	1.80	5.21
1987	3.51	0.99	2.54	-0.02	3.51
1988	3.36	0.99	2.08	0.30	3.36
1989	3.06	0.99	2.26	-0.18	3.06
1990	3.62	0.99	2.67	-0.04	3.62
1991	3.98	0.99	2.31	0.69	3.98
1992	3.41	0.99	2.13	0.29	3.41
1993	3.09	0.99	1.87	0.23	3.09
1994	2.89	0.99	1.73	0.18	2.89
1995	0.00	0.99	1.84	-2.82	0.00
1996	3.06	0.99	2.07	0.00	3.06
1997	3.01	0.99	1.93	0.10	3.01
1998	2.59	0.99	1.32	0.29	2.59
1999	2.01	0.99	1.64	-0.62	2.01
2000	2.58	0.99	2.57	-0.97	2.58
2001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 付録-41 フランスにおける石炭の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石炭)	α	β Wp	e
1980	11.99	4.83	1.11	3.76	-0.04
1981	11.78	5.21	1.11	3.70	0.40
1982	10.33	4.53	1.11	3.24	0.18
1983	8.84	3.79	1.11	2.77	-0.09
1984	8.21	3.27	1.11	2.58	-0.42
1985	7.50	3.21	1.11	2.35	-0.25
1986	4.47	3.26	1.11	1.40	0.75
1987	4.69	3.00	1.11	1.47	0.43
1988	3.83	2.77	1.11	1.20	0.46
1989	4.16	2.82	1.11	1.31	0.41
1990	4.93	2.97	1.11	1.55	0.31
1991	4.26	2.74	1.11	1.34	0.30
1992	3.94	2.67	1.11	1.24	0.33
1993	3.45	2.30	1.11	1.08	0.11
1994	3.18	2.32	1.11	1.00	0.22
1995	3.39	2.40	1.11	1.06	0.23
1996	3.82	2.30	1.11	1.20	-0.01
1997	3.55	2.18	1.11	1.11	-0.04
1998	2.43	1.95	1.11	0.76	0.09
1999	3.02	1.74	1.11	0.95	-0.31
2000	4.74	1.63	1.11	1.49	-0.97
2001	4.02	1.81	1.11	1.26	-0.56
2002	3.94	1.87	1.11	1.24	-0.47
2003	4.61	1.87	1.11	1.45	-0.68
2004	5.60	2.49	1.11	1.76	-0.37

表 付録-42 ドイツにおける石油の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石油)	α	β Wp	e
1980	11.99	12.82	-0.09	12.95	-0.04
1981	11.78	12.69	-0.09	12.73	0.05
1982	10.33	10.96	-0.09	11.16	-0.10
1983	8.84	9.44	-0.09	9.55	-0.02
1984	8.21	8.77	-0.09	8.87	-0.01
1985	7.50	8.07	-0.09	8.10	0.07
1986	4.47	4.22	-0.09	4.83	-0.51
1987	4.69	5.02	-0.09	5.06	0.04
1988	3.83	4.01	-0.09	4.14	-0.04
1989	4.16	4.57	-0.09	4.50	0.17
1990	4.93	5.51	-0.09	5.32	0.28
1991	4.26	4.65	-0.09	4.60	0.14
1992	3.94	4.24	-0.09	4.25	0.08
1993	3.45	3.63	-0.09	3.73	0.00
1994	3.18	3.32	-0.09	3.44	-0.03
1995	3.39	3.48	-0.09	3.66	-0.09
1996	3.82	4.10	-0.09	4.13	0.06
1997	3.55	3.68	-0.09	3.84	-0.06
1998	2.43	2.38	-0.09	2.62	-0.15
1999	3.02	3.27	-0.09	3.27	0.09
2000	4.74	5.07	-0.09	5.12	0.05
2001	4.02	4.24	-0.09	4.34	-0.01
2002	3.94	4.22	-0.09	4.25	0.06
2003	4.61	4.81	-0.09	4.98	-0.09
2004	5.60	6.03	-0.09	6.05	0.07

表 付録-43 ドイツにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(天然ガス)	α	β Wp	e
1980	11.99	6.10	1.41	5.90	-1.21
1981	11.78	6.90	1.41	5.80	-0.31
1982	10.33	7.12	1.41	5.09	0.63
1983	8.84	6.30	1.41	4.35	0.54
1984	8.21	5.78	1.41	4.05	0.33
1985	7.50	5.87	1.41	3.69	0.77
1986	4.47	5.58	1.41	2.20	1.98
1987	4.69	3.68	1.41	2.31	-0.04
1988	3.83	3.13	1.41	1.89	-0.17
1989	4.16	2.61	1.41	2.05	-0.84
1990	4.93	3.54	1.41	2.43	-0.29
1991	4.26	3.91	1.41	2.10	0.41
1992	3.94	3.24	1.41	1.94	-0.10
1993	3.45	3.10	1.41	1.70	-0.01
1994	3.18	2.89	1.41	1.57	-0.09
1995	3.39	3.16	1.41	1.67	0.08
1996	3.82	3.02	1.41	1.88	-0.26
1997	3.55	3.06	1.41	1.75	-0.10
1998	2.43	2.50	1.41	1.20	-0.10
1999	3.02	2.00	1.41	1.49	-0.90
2000	4.74	2.94	1.41	2.33	-0.80
2001	4.02	3.68	1.41	1.98	0.29
2002	3.94	3.25	1.41	1.94	-0.09
2003	4.61	3.92	1.41	2.27	0.24
2004	5.60	4.20	1.41	2.76	0.03

表 付録-44 ドイツにおける石炭の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石炭)	α	β Wp	e
1980	11.99	5.12	1.05	3.88	0.19
1981	11.78	5.01	1.05	3.81	0.14
1982	10.33	4.93	1.05	3.34	0.54
1983	8.84	3.98	1.05	2.86	0.07
1984	8.21	2.95	1.05	2.66	-0.76
1985	7.50	2.87	1.05	2.42	-0.61
1986	4.47	3.11	1.05	1.45	0.62
1987	4.69	2.96	1.05	1.52	0.40
1988	3.83	2.74	1.05	1.24	0.45
1989	4.16	2.77	1.05	1.35	0.37
1990	4.93	3.08	1.05	1.59	0.43
1991	4.26	2.74	1.05	1.38	0.31
1992	3.94	2.78	1.05	1.27	0.46
1993	3.45	2.37	1.05	1.12	0.21
1994	3.18	2.41	1.05	1.03	0.33
1995	3.39	2.62	1.05	1.10	0.47
1996	3.82	2.38	1.05	1.24	0.09
1997	3.55	2.08	1.05	1.15	-0.12
1998	2.43	1.91	1.05	0.79	0.07
1999	3.02	1.57	1.05	0.98	-0.46
2000	4.74	1.49	1.05	1.53	-1.09
2001	4.02	1.77	1.05	1.30	-0.58
2002	3.94	1.88	1.05	1.27	-0.45
2003	4.61	1.79	1.05	1.49	-0.76
2004	5.60	2.55	1.05	1.81	-0.31

表 付録-45 スペインにおける石油の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石油)	α	β Wp	e
1980	11.99	12.17	-0.12	12.53	-0.23
1981	11.78	12.30	-0.12	12.32	0.10
1982	10.33	10.58	-0.12	10.79	-0.09
1983	8.84	9.10	-0.12	9.24	-0.02
1984	8.21	8.59	-0.12	8.59	0.13
1985	7.50	7.85	-0.12	7.83	0.14
1986	4.47	3.94	-0.12	4.67	-0.61
1987	4.69	5.01	-0.12	4.90	0.23
1988	3.83	3.79	-0.12	4.01	-0.09
1989	4.16	4.32	-0.12	4.35	0.09
1990	4.93	5.21	-0.12	5.15	0.18
1991	4.26	4.22	-0.12	4.45	-0.10
1992	3.94	3.84	-0.12	4.12	-0.16
1993	3.45	3.26	-0.12	3.61	-0.23
1994	3.18	3.20	-0.12	3.33	-0.01
1995	3.39	3.46	-0.12	3.55	0.04
1996	3.82	4.05	-0.12	3.99	0.18
1997	3.55	3.55	-0.12	3.71	-0.04
1998	2.43	2.25	-0.12	2.54	-0.16
1999	3.02	3.17	-0.12	3.16	0.13
2000	4.74	4.91	-0.12	4.95	0.08
2001	4.02	4.10	-0.12	4.20	0.01
2002	3.94	4.14	-0.12	4.11	0.15
2003	4.61	4.75	-0.12	4.82	0.06
2004	5.60	5.93	-0.12	5.85	0.20

表 付録-46 スペインにおける天然ガスの α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(天然ガス)	α	βW_p	e
1980	11.99	0.00	0.00	0.00	0.00
1981	11.78	0.00	0.00	0.00	0.00
1982	10.33	0.00	0.00	0.00	0.00
1983	8.84	0.00	0.00	0.00	0.00
1984	8.21	0.00	0.00	0.00	0.00
1985	7.50	0.00	0.00	0.00	0.00
1986	4.47	0.00	0.00	0.00	0.00
1987	4.69	0.00	0.00	0.00	0.00
1988	3.83	0.00	0.00	0.00	0.00
1989	4.16	0.00	0.00	0.00	0.00
1990	4.93	0.00	0.00	0.00	0.00
1991	4.26	0.00	0.00	0.00	0.00
1992	3.94	0.00	0.00	0.00	0.00
1993	3.45	2.81	0.64	2.32	-0.14
1994	3.18	2.88	0.64	2.14	0.10
1995	3.39	3.20	0.64	2.28	0.28
1996	3.82	3.14	0.64	2.56	-0.06
1997	3.55	3.06	0.64	2.38	0.04
1998	2.43	2.47	0.64	1.63	0.21
1999	3.02	1.75	0.64	2.03	-0.91
2000	4.74	3.37	0.64	3.18	-0.45
2001	4.02	3.97	0.64	2.70	0.64
2002	3.94	3.34	0.64	2.64	0.07
2003	4.61	4.16	0.64	3.10	0.43
2004	5.60	4.19	0.64	3.76	-0.21

表 付録-47 スペインにおける石炭の α と e (Dollars/GJ)

年	WP	P(石炭)	α	β Wp	e
1980	11.99	0.00	0.00	0.00	0.00
1981	11.78	0.00	0.00	0.00	0.00
1982	10.33	0.00	0.00	0.00	0.00
1983	8.84	0.00	0.00	0.00	0.00
1984	8.21	0.00	0.00	0.00	0.00
1985	7.50	0.00	0.00	0.00	0.00
1986	4.47	2.88	1.42	0.89	0.57
1987	4.69	2.49	1.42	0.93	0.13
1988	3.83	2.62	1.42	0.76	0.43
1989	4.16	2.80	1.42	0.83	0.55
1990	4.93	2.76	1.42	0.98	0.36
1991	4.26	2.67	1.42	0.85	0.40
1992	3.94	2.41	1.42	0.78	0.20
1993	3.45	2.16	1.42	0.69	0.06
1994	3.18	2.11	1.42	0.63	0.06
1995	3.39	2.25	1.42	0.68	0.15
1996	3.82	2.17	1.42	0.76	-0.01
1997	3.55	2.08	1.42	0.71	-0.05
1998	2.43	1.86	1.42	0.48	-0.04
1999	3.02	1.64	1.42	0.60	-0.38
2000	4.74	1.59	1.42	0.94	-0.78
2001	4.02	1.71	1.42	0.80	-0.51
2002	3.94	1.72	1.42	0.78	-0.48
2003	4.61	1.78	1.42	0.92	-0.56
2004	5.60	2.42	1.42	1.12	-0.12

参考文献

- 1) 小暮 厚之、照井 信彦、“計量ファイナンス分析の基礎”、朝倉書店、2001
- 2) 世良 力、“資源・エネルギー工学要論 (第2版)”、東京化学同人、2005
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁総合政策課、“2003 年度におけるエネルギー需給実績について”、2005
- 4) 経済産業省総合資源エネルギー調査会総合部会エネルギーセキュリティワーキンググループ、“エネルギー供給源リスクの定量的評価分析試算の概要”、2001
- 5) 経済産業省総合資源エネルギー調査会需給部会、“2030 年のエネルギー需給展望”、2005
- 6) 経済産業省資源エネルギー庁エネルギー情報企画室、“平成 15 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書)”、2004
- 7) 経済産業省資源エネルギー庁エネルギー情報企画室、“平成 16 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書)”、2005
- 8) 経済産業省燃料電池実用化戦略研究会、“固体高分子形燃料電池/水素エネルギー利用技術開発戦略”、2001
- 9) 小波 秀雄、“水素がわかる本”、工業調査会、2005
- 10) 東京大学教養学部統計学教室、“統計学入門”、東京大学出版会、1991
- 11) 縄田 和満、“Excel による統計入門 (第2版)”、朝倉書店、2000
- 12) 文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター、“水素エネルギー最前線”、工業調査会、2003
- 13) John O'M. Bockris, T. Nejat Veziroglu, Frano Barbir, 井東 廉介訳、“水素エネルギー入門 水素エネルギーの経済と技術がわかる”、西田書店、2003
- 14) PEM-DREAM、“燃料電池の基本と動向”、秀和システム、2004
- 15) Edwin J. Elton, Martin J. Gruber, Stephan J. Brown, William N. Goetzmann, “*Modern Portfolio Theory and Investment Analysis*”, Wiley, 2003
- 16) H. Hayden Lesbirel, “*Diversification and Energy Security Risks: The Japanese Case*”, Japanese Journal for Political Science, 5 (1)1-22, Cambridge University Press, 2004
- 17) International Energy Agency, “*COAL INFORMATION 2005*”, OECD Publishing, 2005
- 18) International Energy Agency, “*COAL INFORMATION 2004*”, OECD Publishing, 2004
- 19) International Energy Agency, “*COAL INFORMATION 2003*”, OECD Publishing, 2003
- 20) International Energy Agency, “*COAL INFORMATION 2002*”, OECD Publishing, 2002
- 21) International Energy Agency, “*COAL INFORMATION 2001*”, OECD Publishing, 2001

- 22) International Energy Agency, “*COAL INFORMATION 2000*”, OECD Publishing, 2000
- 23) International Energy Agency, “*ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES 2001-2002*”, OECD Publishing, 2004
- 24) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 2005*”, OECD Publishing, 2005
- 25) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 2004*”, OECD Publishing, 2004
- 26) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 2003*”, OECD Publishing, 2003
- 27) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 2002*”, OECD Publishing, 2002
- 28) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 2001*”, OECD Publishing, 2001
- 29) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 2000*”, OECD Publishing, 2000
- 30) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 1999*”, OECD Publishing, 1999
- 31) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 1998*”, OECD Publishing, 1998
- 32) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 1997*”, OECD Publishing, 1997
- 33) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 1996*”, OECD Publishing, 1996
- 34) International Energy Agency, “*ENERGY PRICES & TAXES 1995*”, OECD Publishing, 1995
- 35) International Energy Agency, “*ENERGY STATISTICS OF OECD COUNTRIES 2001-2002*”, OECD Publishing, 2004
- 36) International Energy Agency, “*NATURAL GAS INFORMATION 2005*”, OECD Publishing, 2005
- 37) International Energy Agency, “*NATURAL GAS INFORMATION 2004*”, OECD Publishing, 2004
- 38) International Energy Agency, “*NATURAL GAS INFORMATION 2003*”, OECD Publishing, 2003
- 39) International Energy Agency, “*NATURAL GAS INFORMATION 2002*”, OECD Publishing, 2002
- 40) International Energy Agency, “*NATURAL GAS INFORMATION 2001*”, OECD Publishing, 2001
- 41) International Energy Agency, “*NATURAL GAS INFORMATION 2000*”, OECD Publishing, 2000

- 42) International Energy Agency, “*OIL INFORMATION 2005*”, OECD Publishing, 2005
- 43) International Energy Agency, “*OIL INFORMATION 2004*”, OECD Publishing, 2004
- 44) International Energy Agency, “*OIL INFORMATION 2003*”, OECD Publishing, 2003
- 45) International Energy Agency, “*OIL INFORMATION 2002*”, OECD Publishing, 2002
- 46) International Energy Agency, “*OIL INFORMATION 2001*”, OECD Publishing, 2001
- 47) International Energy Agency, “*OIL INFORMATION 2000*”, OECD Publishing, 2000
- 48) NEA/IAEA, “*Uranium 2003*”, OECD Publishing , 2004
- 49) Robert A. Haugen, “*MODERN INVESTMENT THEORY fourth edition*”, Prentice Hall, 1997
- 50) Shimon Awerbuch, “*Portfolio-based Electricity Generation Planning: Implication for Renewables and Energy Security*”, 2004
- 51) Thomas L. Neff, “*IMPROVING ENERGY SECURITY IN PACIFIC ASIA: DIVERSIFICATION AND RISK REDUCTION FOR FOSSIL AND NUCLEAR FUELS*”, 1997

- 52) 水素・燃料電池実証プロジェクト ホームページ
<http://www.jhfc.jp/>
- 53) 電気事業連合会 ホームページ
<http://www.fepec.or.jp/>
- 54) NEDO ホームページ
<http://www.nedo.go.jp/index.html>
- 55) BP ホームページ
<http://www.bp.com/subsection.do?categoryId=95&contentId=2006480>
- 56) The Ux Consulting Company, LLC ホームページ
<http://www.uxc.com/index.html>
- 57) TradeTech, LLC ホームページ
<http://www.uranium.info/>
- 58) U.S. Department of Labor, Bureau of Labor Statistics ホームページ
<http://www.bls.gov/cpi/home.htm>

謝辞

本論文執筆中には、大変お忙しいにも関わらず、常に最優先で御指導、御助言をして頂き、修士課程在学中の全ての期間においても、常に私が強く、正しく、朗らかに成長する方向に導いて下さった國島正彦教授には、どのような感謝の言葉を用いても表現しきれない程、心の底から感謝しております。この場を借りて、篤く御礼申し上げます。修士課程在学中、数々の人生経験に裏打ちされた力強い御言葉と優しい御心遣いによって、無意識のうちに自ら作ってしまっていた殻をやぶり、様々な貴重な経験をすることができました。2年半に及ぶ國島先生の下での生活は、私の人生において、間違いなく最も成長した期間であったとともに、今後も生かすことのできる大きな糧を得ることのできた期間でもありました。これから先、さらなる試練が数多く待ち受けているとは思いますが、強く、正しく、朗らかに人生を歩んでいきます。

本論文において、副査をして頂いた柳田辰雄教授に頂いた厳しく、かつ、的確な御助言によって、研究の主張する内容を明確にする必要性を再認識させられました。同じく、副査をして頂いた吉田恒昭教授には、研究で行き詰まりそうになったときに、優しく励まして頂いたとともに、私の将来の進路に関しても励ましのエールを送って頂き、大変救われました。湊隆幸助教授におかれましては、私の研究の問題点を早々に指摘して頂いた上に、参考図書も快く貸し出して下さいました。御3方の先生方に、心から感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

社会基盤工学専攻の小澤一雅教授におかれましては、建設マネジメント研究室のランチゼミの際に有益な御助言を頂いたとともに、将来の進路に関する相談にも乗って頂きました。同じく、社会基盤工学専攻の堀田昌英助教授におかれましては、本研究の問題点を御指摘頂いたとともに、Durham 大学ビジネススクールへの交換留学の機会を与えて頂き、さらに将来の進路の相談にも乗って頂きました。御両名の御指導、ご鞭撻により、本研究を進めることができ、将来の進路に向けて歩み出すことができました。誠にありがとうございました。

国際環境協力コースの後輩である、堀川君、佐々木さん、劉さん、野中さん、村山さんからは、一緒に開いたゼミにおいて研究に対する有益なコメントを多く頂き、日々の研究生活を楽しく過ごすことができましたのも、國島先生の指導学生であるみなさんに出会えたからだと思っています。ありがとうございました。みなさんの今後のご活躍を楽しみにしています。

建設マネジメント研究室の藤崎研究員、Sasha さん、Chakrit さん、佐藤君、松尾君、三浦君、M1 のみなさん、4年生のみなさん、既に卒業した小倉さん、今泉君、田中君、豊田君、Alex 君には並々ならぬ感謝を申し上げます。ありがとうございました。本来、社会基盤工学専攻に属さない新領域創成科学研究科の私を受け入れて下さり、合宿や日々の

研究室生活において、大変楽しい時間を過ごすことができましたのは、建設マネジメント研究室のみなさんのおかげです。今後とも、自律して、ともに学び、ともに遊ぶ研究室の良さを生かして、より一層発展することを心から祈っています。

最後に、これまでの人生において、常に私を支え続けてくれた、父親、母親、仲井稚香子さん、中村俊介君、林弘毅君、加藤要太君、そして、多くの先生方、先輩、同輩、後輩に心から感謝しています。本当にありがとうございました。

2006年1月
村中 実