

博士学位論文

福島原子力発電所事故による  
エネルギー・セキュリティレベルの変化と  
評価指標に関する研究

指導教員 中野 冠

2020年3月

慶應義塾大学大学院

システムデザイン・マネジメント研究科

システムデザイン・マネジメント専攻

清水 裕

Doctor's Dissertation

Changes in Energy Security Level  
due to the Fukushima Nuclear Power Plant Accident  
and Research on Evaluation Indicators

Supervisor Masaru Nakano

March 2020

Graduate School of System Design and Management,  
Keio University  
Major in System Design and Management

Yutaka Shimizu

## 要旨

福島第一原子力発電所の事故によって、もともと欧米諸国に比べて低いレベルであった日本のエネルギーセキュリティレベルは、事故以降更に厳しい状況に置かれた。本論文では、福島原発事故後 5 年以上が経過した日本のエネルギーセキュリティの姿を、諸外国との比較によって定量的に把握することを目的とする。

本研究では、原子力発電に対する一般大衆の受容性が、その国のエネルギー原子力政策に強い影響を与え、エネルギーセキュリティ上のリスクになるとの考え方から、原発への大衆の受容性を、重要なセキュリティ指標の一つとして取り込んだ。その分析は、Win Gallup が福島原発事故直後の世界 47 カ国の人々 3 万 4 千人に行なった原子力発電への賛成・反対の世論調査データに寄り、また、福島事故後 5 年以上が経過する間に行われた内閣府や新聞社、NHK や各研究機関が行った世論調査の中から、非常にシンプルな原発への Yes と No の回答のみを抽出しこれを指標化した。

一方、原油や天然ガス輸入相手国の多様性指標と、カントリーリスク指標、チョークポイントリスク指標の 3 指標を一つの指標に集約化して、集約指標を作成した。指標を集約化した理由は、この 3 指標が一連の資源供給サプライチェーンの中に含まれ、それぞれの指標に重みを付ける際に、一つの同種同類の指標は一つでなければならないことから集約化を行ったものである。この指標の集約によって、原油や天然ガスの輸入と輸送に関連する一連のセキュリティのレベルを一つの指標で簡単に把握できるようになったことは集約化のメリットである。

このようにして算出されたそれぞれの指標には、重みをつけて評価した。重み付けの方法は、エネルギーセキュリティの定義について書かれた 45 の学術論文の定義を分解し、セキュリティのキーワードをカウントし、それを上位から並べて重みとした。そして重みをつけなかったケースから、最も重い重みを付けたケースまで、8 ケースについて重みと、原発への受容性のケーススタディを行った。

原発の受容性指標を入れ、指標に重みを加えた結果、これまでは福島原発事故によって一時はエネルギーセキュリティレベルが大きく下がったものの、近年は再生可能エネルギーの伸展や、省エネの推進などによって、セキュリティレベルはやや持ち直している、と判断していたものが、日本のエネルギーセキュリティレベルは、まだ低下を続けていると結論が大きく変更された。

比較対照した国は OECD34 カ国に、non-OECD 上位 4 カ国（中国、インド、ロシア、ブラジル）の 38 カ国との比較を行った。この 38 カ国で世界のエネルギー消費の 75% をカバーしている。

# Abstract

Following the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Japan's energy security level, which was originally lower than in European countries, has further declined since the accident. The purpose of this paper is to quantitatively understand the state of energy security in Japan more than five years after the Fukushima accident by comparing it with other countries.

In this study, we believe that the public's acceptance of nuclear power has a strong impact on the country's energy policy and poses a risk to energy security. For this reason, public acceptance of the nuclear power plant is one of the important security indicators. We use opinion polls conducted by Win Gallup on 34,000 people in 47 countries around the world immediately after the Fukushima nuclear accident, as well as polls conducted by the Cabinet Office, newspapers, NHK and other research institutions. From these public opinion poll data, only responses for and against nuclear power were extracted and indexed.

In this study, we have compiled the three indicators of the diversity of oil importing countries, the country risk indicator and the chokepoint risk indicator into one indicator to create an aggregate indicator. Aggregate indicators were created because these three indicators are included in a series of resource supply chains.

Each index to be calculated is weighted and evaluated. The weighting method breaks down the definition of energy security in 45 academic papers, counts the number of occurrences of security keywords, and uses that as the weight. In addition to the weighted index and the nuclear acceptability index, a comprehensive evaluation is made using eight case studies.

Previous research concluded that Japan's security level had increased in recent years due to the expansion of renewable energy and the promotion of energy conservation.

However, adding the nuclear power acceptability index and adding weight to the index shows that Japan's energy security level has been declining since the Fukushima nuclear accident, and the conclusions have changed drastically.



# 目 次

## 目 次

要旨.....	i
Abstract.....	ii
図一覧.....	viii
表一覧.....	ix
第1章 序論.....	1
1.1 はじめに.....	2
1.2 本研究の背景.....	3
1.2.1 背景 (1) エネルギー自給率.....	4
1.2.2 背景 (2) 貿易収支.....	5
1.2.3 背景 (3) CO <sub>2</sub> 排出量.....	5
1.3 本研究の目的.....	6
1.4 本研究の全体像.....	7
1.5 既往の研究.....	9
1.5.1 既往研究 (1).....	9
1.5.2 既往研究 (2).....	10
1.5.3 既往研究 (3).....	11
1.6 本研究の独自性.....	12
1.7 論文の構成.....	14
1.8 まとめ.....	15
第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法.....	16
2.1 エネルギーセキュリティの定義.....	17
2.1.1 エネルギーセキュリティの概念と定義.....	17
2.1.2 エネルギーセキュリティ概念の歴史の変遷.....	18
2.1.3 日本政府の定義.....	18
2.1.4 IEA の定義.....	19
2.1.5 学術研究による定義.....	19
2.1.6 本稿におけるエネルギーセキュリティの定義.....	19
2.1.7 原発の受容性をエネルギーセキュリティの定義項目に加える.....	20

## 目 次

<b>2.2 指標の分類法</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 APERC の 4A's.....	21
2.2.2 個々の資源に焦点 .....	22
2.2.3 経済的側面 .....	22
2.2.4 環境問題.....	23
2.2.5 社会的問題 .....	23
<b>2.3 エネルギーセキュリティの定量化手法</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4 エネルギーセキュリティ指標の選定手順</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5 エネルギーセキュリティ指標の取りまとめ法（総合化手順）</b> .....	<b>25</b>
2.5.1 正規化 .....	26
2.5.2 重み付け.....	27
2.5.3 指標の総合化 .....	29
<b>2.6 指標の集約化</b> .....	<b>29</b>
<b>2.7 定量化の問題点と今後</b> .....	<b>31</b>
<b>第3章 福島原発事故から5年経過後の日本のエネルギーセキュリティレベルの変化</b> ... <b>32</b>	
<b>3.1 はじめに</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2 指標の選定と計算</b> .....	<b>37</b>
3.2.1 エネルギー自給率 .....	37
3.2.2 エネルギー消費効率 .....	37
3.2.3 資源多様性 .....	38
3.2.4 原油及び天然ガス輸入相手国分散（集中）度.....	38
3.2.5 原油のチョークポイントリスク .....	39
3.2.6 エネルギー価格.....	40
3.2.7 発電部門における CO <sub>2</sub> 排出量.....	41
<b>3.3 各指標の評価</b> .....	<b>41</b>
3.3.1 エネルギー自給率 .....	41
3.3.2 エネルギー消費効率 .....	43
3.3.3 資源多様性 .....	45
3.3.4 原油及び天然ガス輸入相手国分散（集中）度.....	46
3.3.5 原油のチョークポイントリスク .....	46
3.3.6 エネルギー価格.....	47
3.3.7 発電部門における CO <sub>2</sub> 排出量.....	48
<b>3.4 まとめ</b> .....	<b>49</b>

## 目 次

3.4.1 結果の総合化、取りまとめ法.....	49
3.4.2 結果のまとめ .....	50
<b>第4章 エネルギーセキュリティ指標の集約化.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1 集約化指標のフレームワーク .....</b>	<b>59</b>
4.1.1 本研究の目的 .....	59
4.1.2 先行研究.....	60
4.1.3 節立て .....	61
4.1.4 調査対象国 .....	61
<b>4.2 多様性指標の集約化.....</b>	<b>62</b>
4.2.1 化石資源の集中リスクと多様性指標.....	62
4.2.2 カントリーリスクの組み込み.....	65
4.2.3 チョークポイントリスクの組み込み.....	66
<b>4.3 エネルギーセキュリティへの適用と分析.....</b>	<b>67</b>
4.3.1 原油輸入相手国多様性への適用 .....	67
4.3.2 天然ガス輸入相手国多様性への適用.....	69
<b>4.4 集約化指標の応用.....</b>	<b>70</b>
<b>4.5 まとめ .....</b>	<b>71</b>
<b>第5章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価.....</b>	<b>73</b>
<b>5.1 原発の社会的受容性.....</b>	<b>74</b>
<b>5.2 原発の受容性に関する既往の研究 .....</b>	<b>74</b>
<b>5.3 受容性評価指標の位置付け .....</b>	<b>75</b>
<b>5.4 調査の方法.....</b>	<b>76</b>
<b>5.5 受容性の分析と評価（Win Gallup の世界的調査） .....</b>	<b>77</b>
<b>5.6 日本の世論調査 .....</b>	<b>80</b>
<b>5.7 まとめ .....</b>	<b>83</b>
<b>第6章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト .....</b>	<b>85</b>
<b>6.1 本研究の概要・目的.....</b>	<b>86</b>
6.1.1 既往の研究.....	87

## 目 次

6.1.2 本稿の章立て .....	88
<b>6.2 分析方法 .....</b>	<b>88</b>
6.2.1 天然ガス輸入相手国の多様性.....	88
6.2.2 その他使用した指標 .....	89
<b>6.3 分析結果 .....</b>	<b>91</b>
6.3.1 アジア諸国 .....	91
6.3.2 欧州諸国.....	92
6.3.3 ドイツ .....	92
6.3.4 イギリス.....	93
6.3.5 中国、インド、アジア諸国 .....	94
6.3.6 日本 .....	97
<b>6.4 まとめ .....</b>	<b>98</b>
<b>第7章 考察.....</b>	<b>104</b>
<b>7.1 エネルギーセキュリティ指標に重みを付ける .....</b>	<b>105</b>
7.1.1 エネルギーセキュリティの定義を明確にする .....	105
7.1.2 定義に合致した指標を選定する .....	107
<b>7.2 指標を正規化する .....</b>	<b>107</b>
<b>7.3 指標に重みを付ける .....</b>	<b>108</b>
7.3.1 重み付けの方法.....	108
7.3.2 重み係数の算出方法 .....	109
<b>7.4 指標の総合化方法について .....</b>	<b>110</b>
7.4.1 総合化の方法（加法集計法） .....	110
7.4.2 加法集計法の修正 .....	111
7.4.3 場合分け.....	112
<b>7.5 得られた結果 .....</b>	<b>114</b>
<b>7.6 原子力発電の受容性について、まとめ.....</b>	<b>116</b>
<b>7.7 あらためて原子力発電の受容性について .....</b>	<b>117</b>
7.7.1 本研究における提案：人々の原発に対する意見について.....	117
7.7.2 日本政府の対応について .....	118
<b>7.8 再生可能エネルギーの発電コストについて .....</b>	<b>122</b>
7.8.1 ドイツの事例 .....	122
7.8.2 オーストラリアの事例.....	123

## 目 次

7.8.3 世界の再生エネルギーコストの潮流.....	124
7.8.4 日本の場合 .....	125
7.9 パリ協定の影響、石炭火力発電について .....	125
7.9.1 石炭火力発電について .....	125
7.9.2 パリ協定の目標値について .....	126
第8章 結論 .....	127
8.1 本研究の概要まとめ .....	128
8.2 本研究の結論について .....	128
文献 .....	132
研究業績 .....	141
謝辞 .....	143

図一覧

図 - 1	エネルギー自給率と原発稼働率 .....	4
図 - 2	日本の貿易収支 .....	5
図 - 3	全電源（事業用および自家発電）の発電に伴う CO <sub>2</sub> 排出量 .....	6
図 - 4	多様性、カントリーリスク、チョークポイントリスクの集約化 .....	8
図 - 5	原発に対する賛成、反対の意見 .....	9
図 - 6	本研究の全体像 .....	9
図 - 7	論文構成 .....	14
図 - 8	Kruyt の ‘Energy Security Spectrum’ .....	22
図 - 9	指標の取りまとめ法 .....	25
図 - 10	正規化の概念図 T-Scores 法 .....	27
図 - 11	IEA Indicator Pyramid .....	30
図 - 12	指標の取りまとめ法 .....	35
図 - 13	独、イタリア、仏、スペイン、日本のエネルギー自給率 .....	42
図 - 14	発電用エネルギー中の再生可能エネルギー比率 .....	43
図 - 15	エネルギー消費効率 .....	44
図 - 16	エネルギー多様性指標の変化 .....	45
図 - 17	原油のチョークポイントリスク .....	46
図 - 18	LNG 輸入価格の変化 .....	48
図 - 19	電力由来 CO <sub>2</sub> 排出量 .....	49
図 - 20	結果の取りまとめ法（T-Scores 法の概念図） .....	50
図 - 21	集約化するエネルギー資源供給リスク指標 .....	59
図 - 22	Herfindahl-Hirschman Index (HHI) と Shannon-Wiener Index (SWI) によって示される低いシェアで表れる指標値の違い .....	63
図 - 23	それぞれの国の原油輸入相手国多様性の HHI と SWI による違い .....	64
図 - 24	日本と中国の将来の電源構成が示す HHI と SWI の違い .....	65
図 - 25	フランス、ドイツ、イタリア、日本の原油輸入の輸入相手国集中リスク、カントリーリスク、チョークポイントリスクを表す図 .....	68
図 - 26	フランス、ドイツ、イタリア、日本の天然ガス輸入の輸入相手国集中リスク、カントリーリスク、チョークポイントリスクを表す図 .....	69
図 - 27	日本の原油輸入相手国を中東から米国へシフトした場合の HHI3 リスクレベルの低減効果（シフト量 5%~20%） .....	70
図 - 28	福島事故前後の原子力発電に対する各国の反応 .....	77
図 - 29	福島事故前後の（’68~’17）の原子力発電に対する日本人の態度 .....	81
図 - 30	アジア対象国の天然ガス輸入相手国多様化 .....	91

## 図・表

図 - 31	欧州対象国の天然ガス輸入相手国多様化 .....	92
図 - 32	アジアにおけるエネルギー消費と CO2 排出量の関係.....	95
図 - 33	日本の LNG 輸入相手先別のシェア .....	97
図 - 34	ケース 1~8 における原発事故前後のエネルギーセキュリティレベルの変化 .	112
図 - 35	(修正後) ケース 1~8 における原発事故前後の、エネルギーセキュリティレベルの変化.....	115
図 - 36	西オーストラリア州パースの電気料金と、太陽光発電+バッテリーシステムの料金.....	123
図 - 37	太陽光発電と風力発電の発電コスト、世界の潮流.....	124
図 - 38	ケース 1~8 におけるエネルギーセキュリティレベルの変化 (震災前、後、5 年後) .....	130

## 表一覧

表 - 1	福島第一原発事故の概要 (事故 3 ヶ月後 : 2011.6.17) .....	3
表 - 2	本稿で行なった指標研究の全体像 .....	8
表 - 3	本研究の独自性.....	13
表 - 4	エネルギーセキュリティ概念の歴史的変遷.....	18
表 - 5	学術文献によるエネルギーセキュリティキーワードの上位 6 項目 .....	19
表 - 6	本稿で使用した指標 .....	24
表 - 7	4A's、定義項目、指標、単位、指標の定義の関係.....	36
表 - 8	原油輸出国-輸入国間のチョークポイント通過表.....	40
表 - 9	日本のエネルギーセキュリティ度総合表 (震災前、後、5 年後) 全電源 .....	50
表 - 10	日本のエネルギー自給率 .....	51
表 - 11	日本のエネルギー価格 (工業用天然ガス) .....	51
表 - 12	日本の CO <sub>2</sub> 排出量 .....	52
表 - 13	日本のエネルギー利用効率 .....	52
表 - 14	日本の資源多様性 (集中度) .....	52
表 - 15	輸入相手国分散度 .....	53
表 - 16	チョークポイントリスク .....	53
表 - 17	エネルギー自給率、再生可能エネルギーのセキュリティレベル比較表.....	54
表 - 18	エネルギー効率、エネルギー資源多様性のセキュリティレベル比較表.....	55
表 - 19	エネルギー価格、エネルギー資源多様性のセキュリティレベル比較表.....	56

図・表

表 - 20	エネルギー輸入相手国多様性、原油ショックポイントリスク指標のセキュリティレベル比較 .....	57
表 - 21	集約化した指標（枠） .....	60
表 - 22	HHI-1~HHI-3 のデータを各国との比較による偏差値として計算した表.....	72
表 - 23	原発受容性指標の全体指標に対する位置付け .....	76
表 - 24	震災の前後における原発に対する意識について .....	78
表 - 25	日本人の原子力発電に対する意見調査機関とその方法 .....	82
表 - 26	原発受容性を加えない総合指標 .....	84
表 - 27	原発受容性を加えた総合指標.....	84
表 - 28	本研究で使用した要素、エネルギーセキュリティの指標.....	90
表 - 29	エネルギー消費と CO <sub>2</sub> 排出量の関係.....	95
表 - 30	アジアと欧州の天然ガス輸入相手国多様化指標と関係値.....	98
表 - 31	エネルギーセキュリティ指標の総合取りまとめ表.....	100
表 - 32	エネルギーセキュリティ指標の計算結果（1）アジア .....	101
表 - 33	エネルギーセキュリティ指標の計算結果（2）ヨーロッパ 1.....	102
表 - 34	エネルギーセキュリティ指標の計算結果（2）ヨーロッパ 2.....	103
表 - 35	学術文献によるエネルギーセキュリティの定義上位 6 項目と新たな指標 .....	106
表 - 36	4A'S、エネルギーセキュリティ定義項目、項目の出現数、選定した指標.....	107
表 - 37	ケース 1~8 におけるエネルギーセキュリティレベルの計算結果（左が合計、右は平均） .....	111
表 - 38	ケース 1~8 の場合分け、ケース 8 が従来のやり方 .....	113
表 - 39	指標の重み付け：シミュレーション 8 ケースの場合分け.....	114
表 - 40	原発の受容性と重み付け、ケース分けの結果 .....	116
表 - 41	「原発に対する受容性」と「指標の重み付け」の総合的結果 .....	117
表 - 42	Re-Scaling 法によって正規化した全指標 .....	120
表 - 43	年度別、ケース別、重み付けと指標値表 .....	121
表 - 44	欧州主要国の再生可能比率と目標 .....	122
表 - 45	欧州と日本の太陽光発電コストの推移（円/KWH） .....	125
表 - 46	日本のエネルギーセキュリティ度総合表（震災前、後、5 年後） .....	i
表 - 47	全電源 .....	i
表 - 27	全電源 .....	i



「福島原発事故によるエネルギー・セキュリティレベルの  
変化と評価指標に関する研究」

# 第1章 序論

---

序論では、本研究の背景や全体像、エネルギーセキュリティに関連する定義、本研究の目的、既往の研究、本研究の独自性について述べる。

---

## 第 1 章 序論

### 第 1 章 序論

#### 1.1 はじめに

日本におけるエネルギー・セキュリティの概念は、1973 年と 1978 年の二回の石油危機が起こった 1970 年台に形成されたといわれている (入江 [1])。1973 年の第一次石油危機の際日本では、石炭から石油へのエネルギーの転換が行われていて、1973 年には 1965 年の 3.3 倍の石油が供給され、石油が全一次供給エネルギーの 78% を占めた。これはドイツ 47%、英国 50%、フランス 67% など、当時の OECD の平均 53% に比べても最も高い国の一つであった[2]。そのため石油危機による混乱は大きく、「石油の安定供給確保」が重要な課題として認識された。

1960 年ごろから開発されていた原子力発電は、石油危機によって一気に開発の足を早めた。原子力発電所立地地域への電源三法交付金制度などの法律が制定 (1974) され、原子力発電の開発が進み (堀江 [3])、1980 年までにはすでに 21 基 [4] の原子炉が、また 1995 年には全電源に対する 34% を原子力発電で占め、49 基の原子炉の商業運転が開始されていた [9]。

その間、米国スリーマイル島原子力発電所の事故 (1979)、ウクライナのチェルノブイリ原子力発電所事故 (1986)、日本では東海村 JCO 臨界事故 (1999) [5][6][7] など、過酷な原発事故にも関わらず、事故後も原子力発電所の新規建設は堅持され[8]、原子力に対する賛意が優った民意にも大きな変化はみられなかった。福島事故直前の 2010 年に策定された「第三次エネルギー基本計画」[10]では、「2030 年に、原子力発電比率 50% 超を目指す」とされ、原子力が日本のエネルギーの中核と位置付けられてきた。

一方 1990 年代以降、環境問題への意識が高まり、非化石エネルギーの利用を拡大することは、化石エネルギーへの依存を低減し、エネルギー自給率を向上させる点でエネルギーセキュリティエネルギー政策と合致する重要な政策目標であると広く認識されるようになった。

1997 年には京都議定書が採択されたが、米国は締結せず、また中国やインドは削減義務を負っていなかった [11]。

一方 2015 年に採択されたパリ協定は、全ての国が参加する合意となり、世界共通の長期目標として平均気温の上昇を 2℃より十分下方に抑えること等が規定された。日本は、2030 年度までに、2013 年度比マイナス 26.0% の水準とする約束草案 (INDC: Intended Nationally Determined Contributions) を提出した[12]。

## 第 1 章 序論

資源の乏しい日本のエネルギーセキュリティは、第一次石油危機を始まりとして原子力発電を中心に据えるエネルギー政策を産み、様々な変遷を経たのちに 2011 年の福島第一原子力発電所の事故へと繋がり、一方、環境問題の高まりとともに 2015 年のパリ協定の採択へと展開してきたのである。

### 1.2 本研究の背景

東京電力福島第一原子力発電所は、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震とその後の津波に襲われて爆発するなど深刻な被害を被り、大規模な放射能漏れ事故を起こした。福島原子力発電所の原子炉は、BWR：Boiling Water Reactor 型と呼ばれ、核燃料を核分裂させて発生する熱によって蒸気をつくり、その蒸気でタービンを回転させて発電を行う。タービンを回した後の蒸気は、海水により冷やされ、再び原子炉に送りこまれ、核燃料の冷却の役割も果たすよう設計されている。

福島原発では最初に発生したマグニチュード 9.0 の地震で、稼働中の 1~3 号機に制御棒が挿入され原子炉は停止したが、地震によって外部電源の供給が停止し、さらに約 1 時間後に到来した津波によって、海水ポンプなどが破壊、6 号機を除いて非常用ディーゼル発電機も使えなくなった。これらにより核燃料や使用済燃料を冷やす機能が次第に失われていったといわれている。

表-1 福島第一原発事故の概要（事故 3 ヶ月後：2011.6.17）  
出典）山口聡ら（2011）調査と情報 No.718 「福島第一原発事故とその影響」

	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
営業運転開始年月	1971/3	1974/7	1976/3	1978/10	1978/4	1979/10
電気出力（万千瓦ワット）	46.0	78.4	78.4	78.4	78.4	110.0
地震発生時の運転状況	運転中	運転中	運転中	停止中	停止中	停止中
核燃料の状況	溶融	溶融	溶融	核燃料なし	異常なし	異常なし
圧力容器の状況	破損	破損の疑い	破損の疑い	異常なし	異常なし	異常なし
格納容器の状況	破損の疑い	爆発で破損	破損の疑い	異常なし	異常なし	異常なし
原子炉建屋の状況	爆発で損壊	異常なし	爆発で損壊	爆発で損壊	異常なし	異常なし
使用済燃料の状況	不明	不明	不明	不明	異常なし	異常なし

2012 年 9 月、原子炉の安全性審査のため、環境省の中に原子力規制委員会（Nuclear Regulation Authority：NRA）が設置され、原子炉の設計を審査する新しい基準を策定した。その基準は、既存の原子力施設に遡って適用されたため、バックフィットと呼ばれた [86]。新基準により、定期検査によって停止した原子炉の再稼働は次々に延期され、九州電力川内原子力発電所 1 号機が 2015 年 8 月に再稼働するまでの約 2 年間、日本中の全て

## 第 1 章 序論

の原子力発電所が停止した。2019年4月現在、54基の原子炉のうち、稼働中のものは9基、再稼働が許可されたものが6基、廃炉を決定したものは24基で、未申請のもの9基である[87]。

### 1.2.1 本研究の背景 (1) : エネルギー自給率

エネルギー自給率とは、一次供給エネルギーに占める国産エネルギーの割合を言う。経済産業省では、使用済核燃料を再処理すれば再利用できること、ウランは備蓄が容易であること、発電コストに占める燃料費の割合が小さいことなどの理由により、1990年頃以降はIEAの分類に従って、原子力発電を準国産エネルギーと位置付けて、自給率に含む扱いをしている。

原発事故によって自給率が急落したことが本研究の背景にあるが、図-1の通り、日本の自給率はほぼ原発の稼働率と同じ軌跡を取り、原発の稼働率とエネルギー自給率の間には、強い相関がある(相関係数=0.987)。すなわち日本の国産エネルギーとは、ほぼ原子力発電のことを指し、事故以前の長期にわたり再生可能エネルギー等他の国産エネルギー開発は殆ど行って来なかったのである。

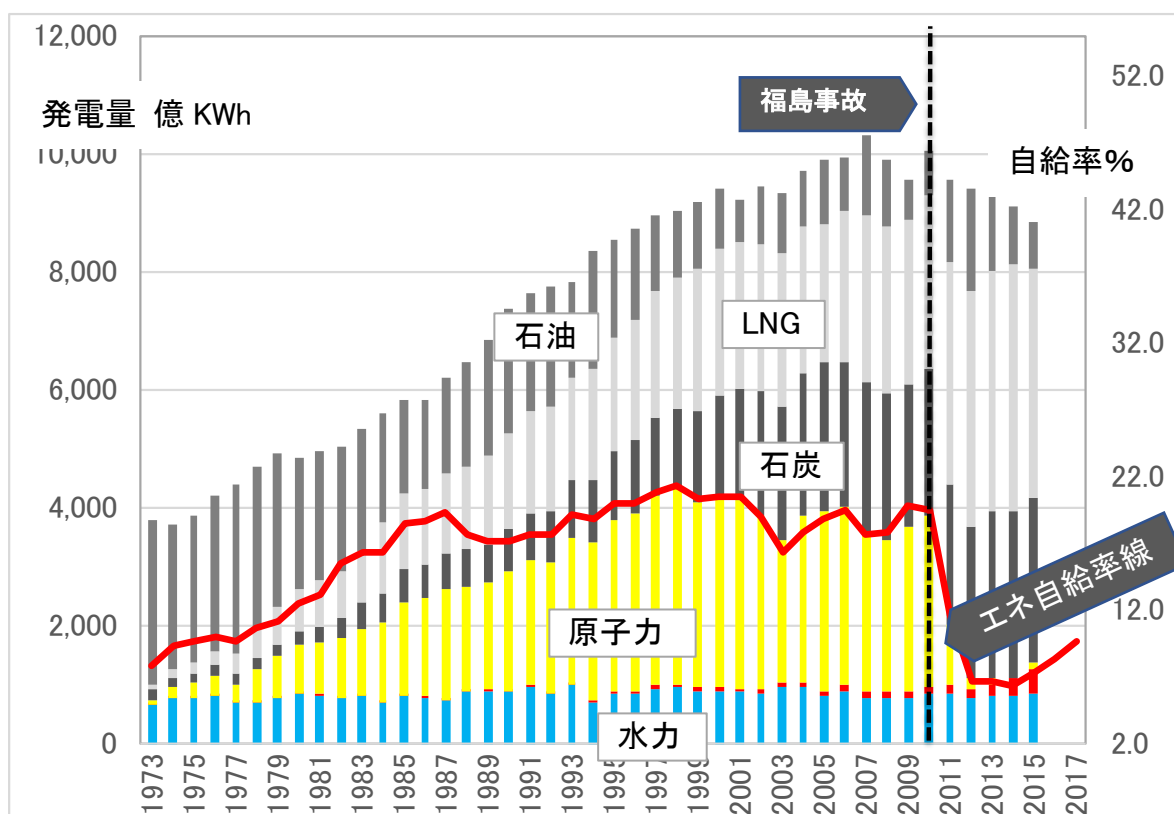


図 - 1 エネルギー自給率と原発稼働率 出典)原子力安全基盤機構「平成25年版原子力施設運転管理年報」、電気事業連合会「INFOBASE2016」、IEA Statics

## 第 1 章 序論

なお、ここでエネルギー自給率とは、以下の式で表される。

$$\text{エネルギー自給率 (\%)} = \frac{\text{自国の生産エネルギー}}{\text{一次エネルギー総供給量}} \times 100 \quad \dots (1)$$

また、原子力発電所の設備利用率とは、以下の式で表される。

$$\text{設備利用率} = \frac{\text{発電電力量 (MWh)}}{\text{認可出力 (MW)} \times \text{暦時間 (h)}} \times 100 \quad \dots (2)$$

### 1.2.2 本研究の背景 (2) : 貿易収支

原子力発電停止を代替するため LNG の輸入を増加させたため、日本は 2011 年から 30 年ぶりに貿易赤字に転落した。赤字額は 2014 年度には 12 兆 8 千億円となり、原子力発電停止がもたらす「国富の流出」といわれた [89]。しかしその後 2016 年度には、原油相場の低迷と対前年度比 10% の円高、原油輸入量の減少などにより再び 4 兆円の黒字を計上した。

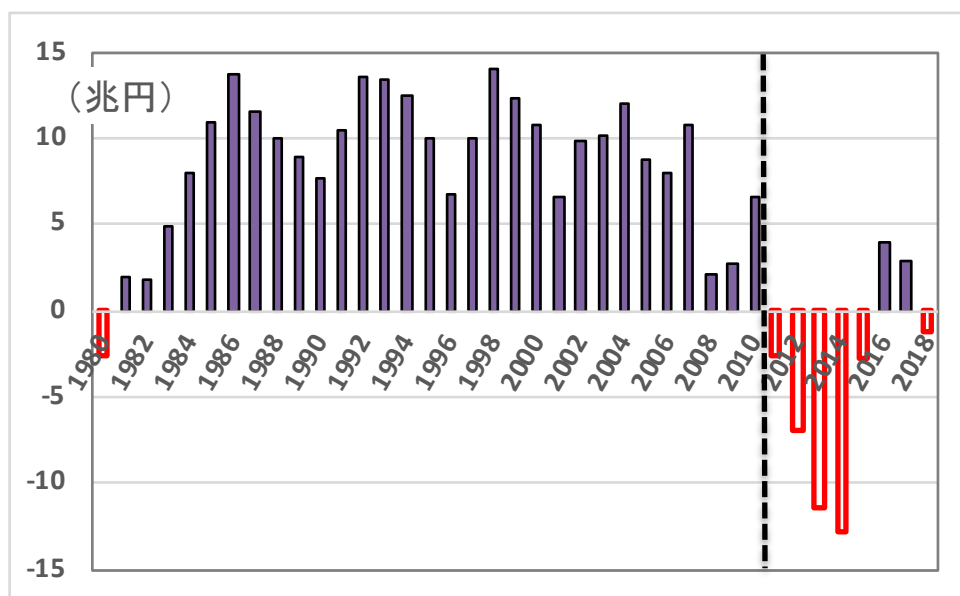


図 - 2 日本の貿易収支 出典)財務省貿易統計

### 1.2.3 本研究の背景 (3) : CO<sub>2</sub> 排出量

もう一点、本研究の背景として事故による CO<sub>2</sub> 排出量の増大がある。第一次石油危機以降 2000 年代半ばにかけて、電力需要の増加により発電量が増加し、それに伴い発電由来の CO<sub>2</sub> 排出量も増加した。燃料構成は、オイルショックを受け石油から石炭と原子力、および天然ガスへの転換が進んだ。2008 年の金融危機により CO<sub>2</sub> 排出量は一旦下がったも

## 第1章 序論

この、ほぼ一貫して増加を続けた。東日本大震災後、日本中の原発停止に伴い、天然ガスを中心とする火力発電等の増加により、発電由来のCO<sub>2</sub>排出量は2013年度まで大きく増加したが、2014年度から若干減少している。ただし、2016年度からは再び増加に転じている。

一方、再生可能エネルギーの増加と、原発の再稼働が進み、その稼働率が2018年には15%に増加した。しかし石炭の使用量も増加しており、これらの要因のせめぎ合いでCO<sub>2</sub>排出量が決められている。日本、韓国、インドネシア等東アジア各国のCO<sub>2</sub>排出量が増大する一方で、英国、フランス、スペイン、イタリア、ドイツなど欧州各国はCO<sub>2</sub>排出量が減少する傾向にある。

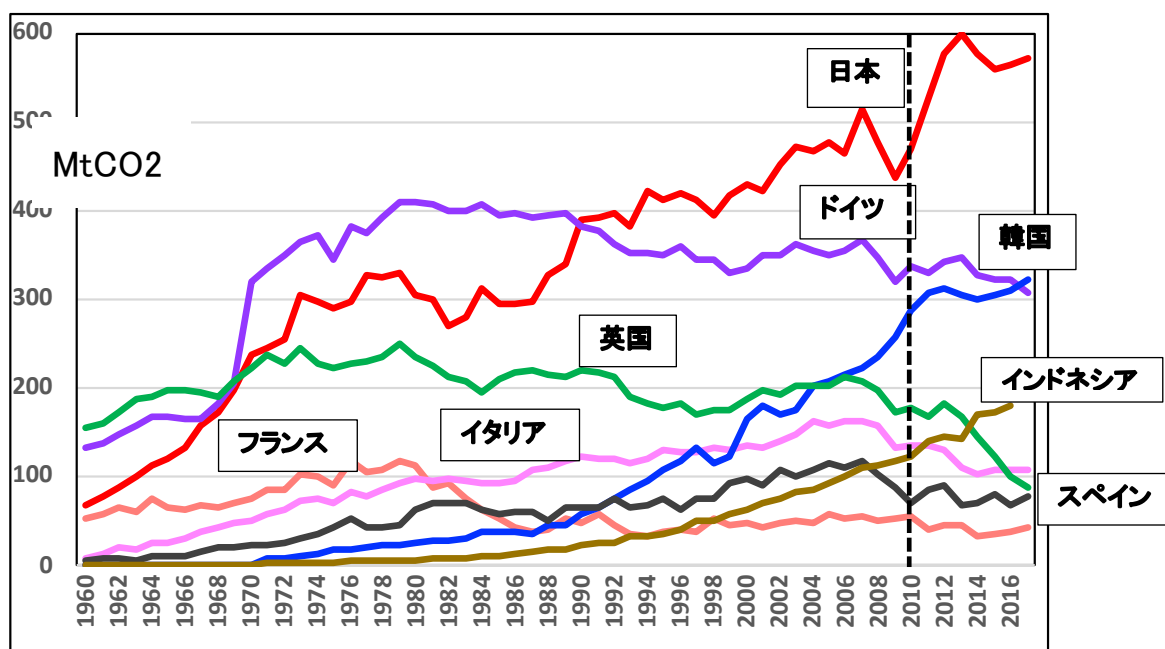


図-3 全電源(事業用および自家発電)の発電に伴うCO<sub>2</sub>排出量 出典)IEA CO2

### 1.3 本研究の目的

エネルギーセキュリティ研究の目的は、一般にエネルギーの為政者に対する適切な情報を提供することである場合も多い。しかし Sovacool.B.K, [13] がその研究で述べているように、それだけではなく、どのエネルギーをどれだけ、いくら(適切な価格)で、安全に、効率的よく、環境に優しく、利用できるか、という疑問に答えを出すことでもある。本研究の目的は、以下の3つに分けられる。

## 第 1 章 序論

目的 1. 福島原発事故後の日本のエネルギーセキュリティレベルの変化と、近年の環境問題への関心がエネルギーセキュリティに与える影響について分析する

2011年に起こった福島第一原子力発電所の事故後現在まですでに8年が経過しているが、日本のエネルギーセキュリティのレベルはその間どのように変化したのか、について OECD34 カ国に Non-OECD 上位 4 カ国を加えた国との比較によって定量的に分析することが本稿の目的の一つである。

目的 2. 原子力発電への一般社会の受容性を、一つの指標としてエネルギーセキュリティの分析を行うこと

福島原発事故によって、一般大衆の原発に対する意識は大きく反原発に変化した。この変化は過去 1979 年 3 月に起こった米国スリーマイル島の原発事故や、1986 年 4 月のウクライナのチェルノブイリ原発事故の際の小規模な変化とは比較にならない程大きく、8年が経過した現在でも収束せず、むしろ拡大している。イタリアや台湾での原発に対する国民投票を例として、世論と政策の乖離は一つのリスクであると考え、原発の受容性も一つのエネルギーセキュリティ指標として取り扱った。

目的 3. 資源供給リスクを表す新たな指標を提案する

本稿 1.8 で、エネルギーセキュリティの重要な定義の一つの要素として、「資源への安全で信頼できるアクセス確保」を掲げた。化石資源（原油、天然ガス、石炭）の輸入の場合、輸出国から海上輸送を経て日本に到着する間に考えられる 3 つのリスク：「資源輸出国が集中するリスク」「資源輸出国のカントリーリスク」「輸送途中のチョークポイントを通過するリスク」は、資源輸入に関連する一連のサプライチェーンのリスクと考える。一つの定義項目には一つの指標を適応させることは、この指標に重みを付ける際に必要な処理である。

### 1.4 本研究の全体像

本研究は、大きく分けてエネルギーセキュリティ指標を研究した部分と、その指標を使って福島原子力発電所の事故後の日本のエネルギーセキュリティの評価を行なったものに分けられる。指標の研究では、原子力発電に対する世論の受容性をエネルギーセキュリティの指標とする考え方を提示したことと、産油国から日本に原油を輸送する間の 3 つの指標を集約化して一つの指標とする指標の開発を行なった。全体像を次の図-6 に示す。

# 第1章 序論

4A's SFA-1	エネルギーセキュリティの定義項目	指標	Angの分類	指標の定義付け
Availability	安定供給	① 総エネルギーに対するエネルギー自給率	SFA-2	一次総供給エネルギーに占める自国の生産エネルギーの比
		② 電力部門におけるエネルギー自給率		総発電量に占める非火力（水力、太陽光、風力、木質、廃棄物）発電量の比
Accessibility	エネルギー効率	③ エネルギー消費効率	SFA-0	2010年US\$レートによる実質GDPあたりのエネルギー消費量（電力部門）
		④ エネルギー資源多様性（Herfindahl-Hirschman 指標）	SFA-2	エネルギー資源（化石燃料、原子力、水力、地熱、太陽光、風力）の多様性度
	⑤ 原油・天然ガス輸入相手国多様性（カントリーリスクを見込む）	原油の輸入相手国の多様性度（カントリーリスクを見込む）		
	資源への安全なアクセス	⑥ 原油のチョークポイントリスク指標		チョークポイントを通過する毎に計上する原油量の総量と、原油の総輸入量に対する割合
Affordability	経済的価格	⑦ エネルギー価格	SFA-3	天然ガスの輸入単価
Acceptability	環境改善	⑧ CO <sub>2</sub> 排出量	SFA-4	発電部門のCO <sub>2</sub> 排出量
	原発受容性	⑨ 原発に対する大衆の世論	SFA-5	アンケート総数対し「今後原発は減すべき」と回答した数の割合

表-2 本稿で行なった指標研究の全体像

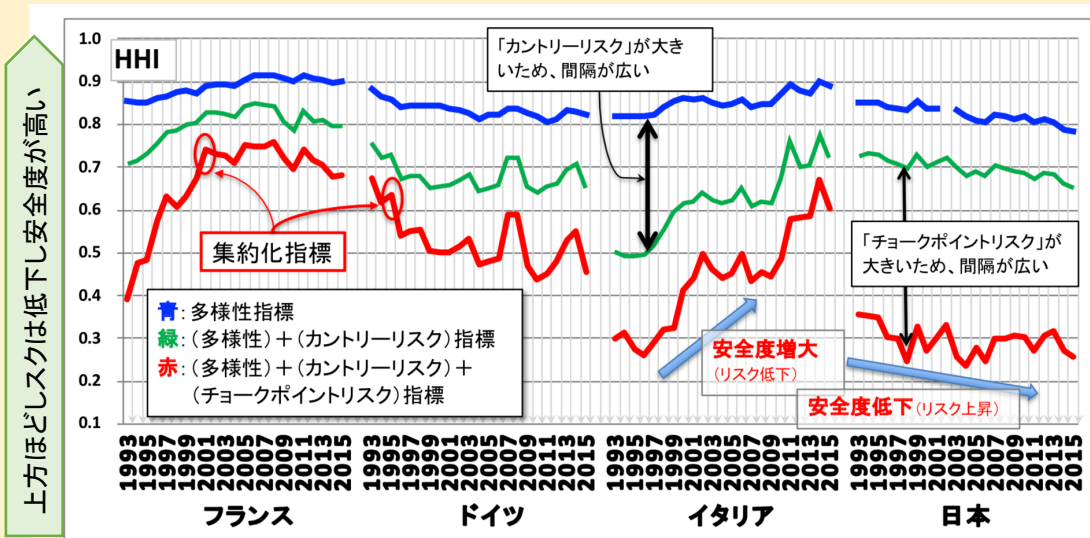


図-4 多様性、カントリーリスク、チョークポイントリスクの集約化



# 第1章 序論

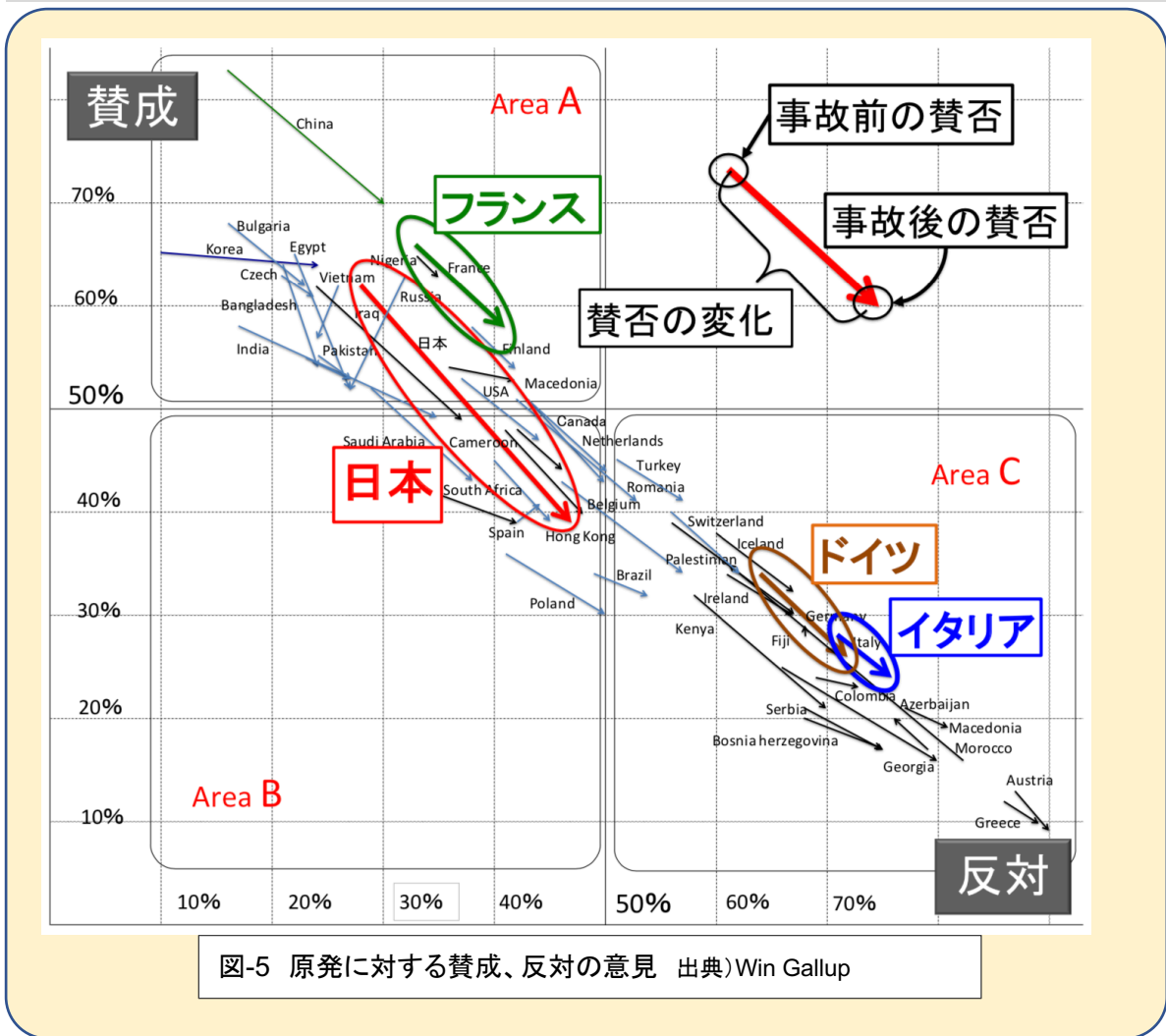


図-5 原発に対する賛成、反対の意見 出典)Win Gallup

図-6 本研究の全体像

## 1.5 既往の研究

既往の研究を大きく分類すると、指標によってセキュリティレベルを分析したもの、エネルギーセキュリティの定義や指標そのものについて研究したもの、福島原発事故をエネルギーセキュリティの面から分析したもの、の3つに分けられる。

### 1.5.1 既往研究 (1)

エネルギーセキュリティ指標によって、日本など特定の国のエネルギーセキュリティレベルを分析し、エネルギー政策への提言を行ったもの

山田 [41] は、エネルギーセキュリティレベルを先進諸国間の相対的な位置関係から統計的な処理を行い、総合的かつ定量的に評価する手法を提案した。さらにこの適用

## 第 1 章 序論

例として、日本のエネルギーセキュリティレベルの向上に果たす原子力の役割について検討を行った。

経済産業省から委託を受けて日本エネルギー経済研究所（IEEJ）が行った研究（村上, [62]）で、エネルギーセキュリティ評価基軸を「資源調達」「国内供給」「国内消費」の3段階に分類し、7つの指標によって安全性を比較評価した。

もう一つは三菱総合研究所（MRI）が行った経済産業省からの委託研究（三菱総合研究所, [80]）で、エネルギー供給上のリスクは確率的に顕在化するものであるから、燃料調達に潜在するリスクは供給率の確率分布として表すことができ、その分布の形状を指標化することで、エネルギー安全保障を評価できる、との考え方に基づいている。しかしこれらの研究は、エネルギー安全保障を狭義に捉え、“Economics”及び“Environment”を対象から外しており、原発の影響を広く捉えようとする本稿の立場とは異なっている。

### 1.5.2 既往研究（2）

#### エネルギーセキュリティの概念や定義、エネルギーセキュリティの指標に関する研究

Sovacool et al. [43] は、エネルギーセキュリティを分析するため、5つの Dimension と 20 個の Component、それに 320 個の simple な指標と 52 個の複雑な指標を提示した。この研究は、エネルギーセキュリティの Kleber [92] の“5S”、APERC [49] の“4A”、Hughes [93] の“4R”なども含んでいて指標の網羅性は高い。しかしこの研究は指標それぞれを深く考察する内容ではない。

Kruyt et al. [94] は、エネルギーセキュリティ指標の概念と定義は時を経て拡大しているとした上で、APERC [49] が提唱する4つの分類“The 4A’s of Energy Security”を強く支持（adhere）し、その分類に従ったセキュリティ指標の概要を示した。

Jansen [65] らは、長期のエネルギーセキュリティに対する Shannon-Wiener Index により多くの要素を付け加える4つの指標を考案した。しかし Jansen [65] らの研究も、Lefevre [63] の研究も、シーレーン上のチョークポイントリスクは考慮されていない。

Lefevre [63] は、エネルギーの不安定さや危険性は、資源の偏在、集中による寡占状態から起こり、それによって価格変動リスクが大きくなると指摘、価格リスクを定量化する指標 Energy Security Price Index（ESPI）を考案した。しかし ESPI は資源の取引価格とは無関係に定まるため、原発事故による資源価格の変動状況を捉えることはできない。

APERC [49] は、エネルギーセキュリティを広く捉え、資源の Availability（地質学的な要素）と経済活動への利用可能性 Accessibility、Affordability（経済的要素）、

## 第 1 章 序論

Acceptability（環境受容性）を加え四つの基本的分類法を示した。この分類法はエネルギーを利用しようとする場合の原理的な内容を示しており、最新の広義なエネルギーセキュリティの概念に適した分類だと思われる。本稿でもこれに倣って原発事故の影響を端的に表す指標を 7 つ選定した。

この分類の範疇に入るその他の研究として、Hughes L. [93]、Ang B.W. [48] などがある。研究機関としては、IEA や World Bank、World Resources Institute などがある。

### 1.5.3 既往研究 (3)

#### 福島原発事故を、エネルギーセキュリティの問題から捉え、分析した研究

Scopus で Key Words ; “energy”, “security”, “Fukushima” で検索すると、2014 年の 14 件をピークとして計 47 件がヒットする。内容は福島原発事故に関連して、原子炉の安全性に関する研究が 15 件で最も多く、ついで放射性物質の拡散データを解析したものが 5 件、日本の電力システムや新エネルギーへの提言を行なったもの 5 件、一般民衆の原子力の受容について調査をおこなったもの 4 件などが続く。以下、福島原子力発電所事故を、エネルギーセキュリティの問題として捉え、分析した研究の主な内容について述べる。

#### (1) 福島原子力発電所事故の後の、新たな原子力発電の使用を含む日本の将来のエネルギーの姿についての提言を行なった研究

McLellan et al. [22], Zhang et al. [28], Hong et al. [17], Takase et al. [144] の研究は、それぞれ原発事故後の日本の将来のエネルギー利用に関する提言を行っている。McLellan et al. の研究では、日本政府が提示した 3 ケースの電力構成について、2030 年代までの原子力比率の達成可能性について述べた。彼の研究は日本の将来のエネルギー環境に力点があり、福島原発事故後のエネルギーセキュリティの定量的な分析は行われていない。

#### (2) 福島原子力発電所事故が、著者の自国のエネルギーセキュリティに及ぼす影響（原発の再導入を含む）についての研究

Furlan et al. [14], Hayashi et al. [15], Bittneben B.B.F [27], Nian et al. [23] の論文は福島原発事故が著者の自国のエネルギーセキュリティに及ぼす影響について述べた。

Furlan et al. [14] は、福島原発事故がフランス、ドイツ、米国、ロシアなどに及ぼしたウランの消費動態の影響について調査し、消費を減少させた国と、増加させた国を特定し、全世界的には消費減少傾向にあるとした。本研究は、歴史的、経済

## 第 1 章 序論

的、社会的、技術的側面に依存する中期トレンド（10 年）と比較した事故の短期的な影響（3 年）を認識することを目的としている。

### (3) 日本のエネルギーセキュリティに及ぼした福島原子力発電所の事故の影響についての研究

Vivoda [26]、Hayashi et al. [16] の研究がこの種に属する。Vivoda は、福島原発事故のエネルギーセキュリティ面での影響を詳報し、原子力災害の影響を分析した。しかし彼の研究は、その根拠を全面的に経済産業省が行なった分析から引用したため、結論は日本の政策の方向とほぼ一致する。再生可能エネルギーは非常に高価であるため、失われた原子力を補うには多額の投資が必要になり、日本がそれに耐えることは不可能であるとして原子力への回帰を提案した。しかし彼の研究は後の、再生可能エネルギーコストの大幅な低下を想像し得ていない。

### 1.6 本研究の独自性

本研究の独自性を以下の 3 つに分類して述べる。

独自性（1）本研究の独自性は、福島第一原子力発電所の事故以後、パリ協定を経て現在に至る日本のエネルギーセキュリティのレベルの変化を、7 つの基軸的指標と、34 カ国の比較により定量的に捉えた点にある。

本研究は、福島原発事故についてエネルギーセキュリティの面から研究した類似の先行研究のいずれにも該当する研究はない。(Furlan [14], Hayashi [16], Hong [17], Huenteler [18], Kato [19], Kamsamrong [20], Kosai [21], McLellan [22], Nian [23], Siegrist [24], Vivoda [25], Wittneben [27], Zhang [28])

独自性（2）さらに本研究では、これまでの既往のエネルギーセキュリティ指標研究にはない「原子力発電に対する大衆の受容性」を、エネルギーセキュリティの指標として分析を試みた。

福島原発事故によって日本人の原発に対する感情は肯定から一気に否定に変わった。先が見えずに増大を続ける事故処理費用、いまだに避難者数は 5 万人を超え（2019/05/31 時点）、増え続ける汚染水などにより、一般大衆の感情は、収束の兆しが見えない。原発の再稼働に反対する市民を中心とする訴訟は 49 件（2019 年 9 月）が係争中である。

## 第 1 章 序論

原子力発電に対する民衆の社会受容性に言及した学術論文は、以下の 5 論文に見ることができるが、受容性をエネルギーセキュリティの一つの重要な指標と捉えたものはない。Wang B. et al. [36]、Roh S., Kim D. [37]、Kimura H.[38]、丸山[39]、岩井 [40]。

独自性 (3) 本研究の独自性の 3 つ目は、エネルギーセキュリティの定義項目の一つである「エネルギー資源供給リスク」を表す指標を提案したことである。

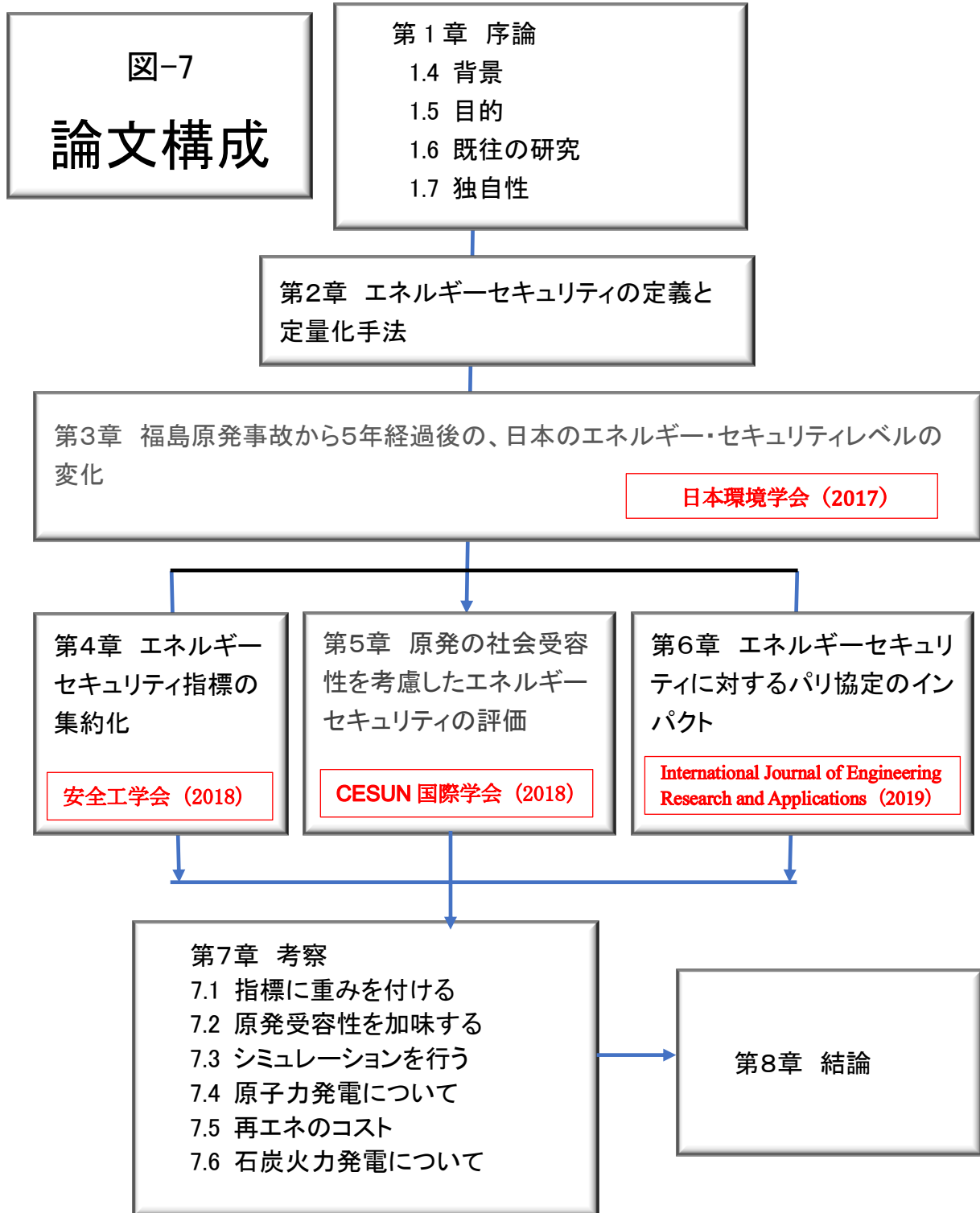
化石資源輸入相手国～日本に至るアクセス間に存在する 3 つのリスク（輸入相手国多様性リスク、カントリーリスク、チョークポイントリスク）を、一つの指標で表す統合指標を作成した。この統合化によって、例えば日本の天然ガスの輸入相手先を中東から米国にシフトした場合のリスクの低減効果を、一つの指標数値で捉えることができることとなった。

表-3 本研究の独自性

独自の研究	既往の研究・データ
<p>① 原発事故～現在までの、日本のセキュリティレベル → 基軸指標と 34 カ国の比較で把握</p> <p>② 「原子力発電に対する大衆の受容性」 → 指標として定量化</p> <p>③ 「資源へのアクセス」指標 → 統合指標を作成した</p>	<p>■ 指標の学術的研究 Kruyt (2009) Loschel (2010) Lefevre (2010) Sovacool (2011) Cherp (2014) Ang (2015)</p> <p>■ 政府・研究機関のデータ IEA BP 電気事業者 政府統計</p> <p>■ 政府による研究 経済産業省 資源エネルギー庁 環境省</p>

# 第 1 章 序論

## 1.7 論文の構成



### 1.8 まとめ

本章では、エネルギーセキュリティの研究の背景として、1970年代に起こった2つの石油危機がそもそもの始まりであることを示した。当時は、日本の一次供給エネルギーの78%を占めていた石油が、中東戦争によって断たれるという事態を迎え、エネルギー安全保障に対する危機意識が高まった。また石油危機は、「省エネルギーの推進」と「石油代替エネルギーの利用促進」、「石油備蓄政策推進」の三政策を生んだ。

次に本稿論文の目的を記した。本研究の目的は、日本のエネルギーセキュリティの変化を、1973年の第一次石油危機、2011年の福島第一原子力発電所の事故、2015年のパリ協定を経て変化してゆく状況を示すことにあることを述べた。

次に本研究の独自性について、以下の3点をあげた。①福島第一原子力発電所の事故以後、パリ協定を経て現在に至る日本のエネルギーセキュリティのレベルの変化を、7つの基軸的指標と、34カ国の比較により定量的に捉えた点、②「原子力発電に対する一般大衆の受容性」を、エネルギーセキュリティの指標として分析を試みた点、③エネルギーセキュリティの定義項目の一つである「エネルギー資源への信頼性の高いアクセス」に対応する指標を作成したことである。

## 第2章 エネルギーセキュリティの定義と定量化手法

---

第2章では、エネルギーセキュリティの定義と、定量化手法について述べる。エネルギーセキュリティ関心領域の設定、評価指標の選定、指標の統合化、集約化について述べる。

---



### 第2章 エネルギーセキュリティの定義と定量化手法

#### 2.1 エネルギーセキュリティの定義

エネルギーセキュリティの定量評価に関する既往の研究は数多く存在するが、以下の通り調査の結果、「エネルギーセキュリティの定義が不明確であること、および定義と評価基準が直接的に関係付けされていない」、という問題が三菱総研によって指摘されていることが分かった。本研究を進めるにあたって、エネルギーセキュリティとは何か、エネルギーセキュリティの定義についてはっきりさせておく必要があると共に、その定義に沿った正確な評価基準を持つ必要がある。

Ang et al. [48] は、2001年から2014年までに報告されたエネルギーセキュリティに関する104件の論文を分析し、83件はエネルギーセキュリティの具体的な定義について述べており、3つの期間、すなわち2001年～2005年、2006年～2009年、および2010年～2014年に分割したところ、その研究数はそれぞれ11、39、54と急速に増加している、と報告している。また Sovacool [43] は、スタンフォード大学の David Victor 教授が彼に語ったこととして「エネルギーセキュリティは、ロールシャッハのインクブロットテストのようなものだ。あなたはそれで見たいものは何でも見ることができる」と記載している。即ち、エネルギーセキュリティの概念と定義に関する研究は、まだ途上にあり、定まったものはないと言える。

エネルギーセキュリティの定義が定まらない理由は、各国のエネルギー政策が、経済的課題、国際政治上の困難性、環境規制や地政学的位置などそれぞれの国が抱えるリスクが異なっていることから、取りうるエネルギーセキュリティ政策の焦点もそれぞれ異なるからに他ならない。であるならば尚更、「福島原発事故後の日本のエネルギー供給リスクを顕在化し、セキュリティ・レベルを定量的に分析する」目的に合致した定義と、定義に合った評価指標を持つ必要がある。

##### 2.1.1 エネルギーセキュリティの概念と定義

本稿で行おうとしている「福島原発事故後の日本のエネルギー供給リスクの顕在化と、セキュリティ・レベルの定量分析」は、まず一般的な範囲の広いエネルギーセキュリティの定義が必要である。そこで IEA (International Energy Agency) や日本の政府、さらに学術研究で行われているエネルギーセキュリティ定義について調査し、これらが示す定義項目を明らかにした。

## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

次に必要なこととして「原発事故」を挙げなければならない。原子力発電に対しては様々なアプローチがあるが、本研究では原発事故を起こした後、日本人に原発が受け入れられるのか（原発は受容できるか）、という観点で調査を進めた。ただし、原発について研究を進めるうちに、原発の受容性に派生して、原発のコストについて調査を進める必要性があることが分かった。しかしこの原発のコストについては、詳しい研究に至らず、考察で述べるに留めた。

### 2.1.2 エネルギーセキュリティの歴史的変遷

エネルギーセキュリティの概念は第一次石油危機以来、歴史的な変遷を経て現在に至っている。入江ら [1] によるとその概念と定義は、まだその途上にあると言って良い。第1章で、エネルギーセキュリティの概念と歴史的変遷について概要を述べた。表-4は、入江らの研究に筆者が手を入れたエネルギーセキュリティ概念の歴史的変遷をまとめた表である。

表-4 エネルギーセキュリティ概念の歴史的変遷

出典)入江,神田,「エネルギー安全保障概念の形成と変容」/筆者修正

区分	期間	エネルギーセキュリティの概念	エネルギー情勢
揺籃期	1973以前	エネルギーの安定供給（未成熟）	国内石炭の安定供給 輸入石油の確保
成立期	1973 ～1982	輸入資源の突然の中断対応 資源の <b>長期的安定供給</b>	石油危機対応 資源枯渇・資源長期安定供給
変容期第1期	1983 ～1988	安定供給+ <b>資源コストの低減</b>	OPEC原油価格引き下げ 石油需要後退→石油コスト削減
変容期第2期	1988～	安定供給+資源コスト低減に <b>地球環境の改善</b> が加わる	石油需要増加 地球温暖化対策・環境機運上昇

### 2.1.3 日本政府の定義

経済産業省のエネルギー安全保障に関する定義は、「市民生活、経済産業活動のために、環境への影響を考慮しつつ、必要十分なエネルギーを合理的な価格で継続的に確保することである」としている。さらに「長期的視点から見るとエネルギー安全保障とは、経済発展や環境保全を考慮に入れた上でエネルギー供給のために必要な投資を適宜行うことまでを目指すものである」としている[47]。

## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

### 2.1.4 IEA（国際エネルギー機関）の定義

一方、国際エネルギー機関 IEA は、エネルギーセキュリティの定義を “the uninterrupted availability of energy sources at an affordable price” 「手頃な価格でエネルギー源が途切れなく利用できること」としている。更に、「長期的なエネルギーセキュリティは主に、経済的な価格と持続可能な環境ニーズに沿ってエネルギーを供給することである」と述べている。IEA “What is energy security?”, (氏田 [61])

### 2.1.5 学術研究による定義

Sovacool [43] の研究によると、現在研究されているエネルギーセキュリティの定義に関する論文は 45 個あると報告した。

その中には、APEREC (Asia Pacific Energy Research Centre)の 4A’s (Availability, Accessibility, Affordability, Acceptability) や、Hughes の 4R’s (review ; understanding the problem, reduce ; using less energy, replace ; shifting to secure sources, restrict ; limiting new demand to secure sources)、IEA (後述)、World Bank (Access to secure supplies of fuel, a competitive market that distributes those fuels, stability of resource flows and transit points, and efficiency of end use)、World Resources Institute (Sufficiency of supply as well as reliability, affordability, environmental sustainability, geopolitical stability, and social acceptability) などがあある。また彼自身の定義も挙げている。Sovacool の定義は、「技術的実現可能性、手頃な価格、環境保護、信頼性、および供給の安全性」であると述べている。

### 2.1.6 本稿におけるエネルギーセキュリティの定義

Sovacool が研究したこれらの 45 の研究論文が行なったエネルギーセキュリティの定義について、その定義を全て引用して、その定義を構成する要素（キーワード）を数えたところ、上位 6 項目は、次の表-5 に掲げる通りとなった。

表-5 学術文献によるエネルギーセキュリティキーワードの上位6項目 筆者カウント

順位	キーワード	定義の要素	出現数
1	環境改善	環境面の持続可能な改善	23
2	経済価格	リーゾナブルな安定価格	21
3	安定供給	安定した十分なエネルギー供給	19
4	安全なアクセス	エネルギー源への信頼できるアクセス	17
5	効率性	エネルギーの効率的利用	9
6	資源多様性	エネルギー資源の多様性	7
7	研究投資	エネルギーに対する適切な研究投資	6

## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

この6項目には、日本政府の定義も IEA の定義要素も含まれており、これらがエネルギーセキュリティ定義の基軸となる定義要素と考えて良いと思われる。本稿では全ての研究で、この基軸定義を採用した。

### 2.1.7 原発の受容性をエネルギーセキュリティの定義項目に加える

本研究では、前項で挙げた基軸的な定義要素を含むエネルギーセキュリティの定義に、さらに「原子力発電に対する一般大衆の受容性」を定義要素に加えた。

加えた理由は、一例として2011年6月に行われたイタリアの国民投票を挙げる。周知のようにイタリアでは1987年、その前年のチェルノブイリ原発事故を契機として原発存続に関する国民投票を実施し、投票者の8割が「廃止」を求めたため、1990年までに全ての原子力施設が閉鎖された。しかし2003年の大停電事故などを契機として、原発再開の動きが強まり、原発を推進しようとしたベルルスコーニが2008年に政権を握ると一気に原発再開の機運が盛り上がった。原発再開に関わる法整備を経て、2020年までに少なくとも4基の原発稼働が宣言された。ところが2011年3月の福島原発事故を機に、原発反対運動が顕著となり、2011年6月に実施された国民投票の結果、原発の廃止が94%を占め、再び原発の廃止が決定された。

他の例として台湾の原発政策を挙げる。福島原発事故以後、台湾では脱原発の社会機運が高まり、新たに政権を握った蔡英文は2017年1月、2025年までに、稼働している原子力発電所を完全停止させる法案を可決させた。しかしそのころから石炭火力発電による排煙公害が国民に不安を与え、また2017年8月には、全契約世帯の約半数の668万世帯に停電が発生する事態が起こった。そのため、同年11月、「2025年までに全ての原発の運転を停止する」との法規定の廃止の可否を問う国民投票が実施され、この法律は廃止されることが決定したのである。

原発に対するイタリアの2度の国民投票が脱原発への政策転換を選択し、一方、原発の廃止法案に反対する台湾の国民投票が、原発を選択する民意が示された。このように、原発に対する一般大衆の世論は、エネルギーセキュリティ政策上の重要なファクターとなっているのである。

アンケートを取ると日本の国民の70%を超える人々は、原発を直ちにまたは将来廃止する意向を示している。一方、政府は原子力発電については、「可能な限り原発依存度を低減する」としながら今回も「重要なベースロード電源」と明記し、再稼働を推進する方針を表明し、その電源構成はなんら従来のものと変化をさせなかった。

## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

このように政策と一般大衆の人々の意見が大きく異なることは、エネルギーセキュリティ上のリスクであると考えた結果である。

### 2.2 指標の分類法

Ang B.W.et al. [48] は、エネルギーセキュリティの定量化のための指標は、特定の関心事項に伴って構築され選択されていると指摘した。Ang は、2001年から2014年6月までに書かれた104のエネルギーセキュリティ文献の調査に基づいて、エネルギーセキュリティの主な関心領域を「特定焦点領域」(SFA: Specific Focused Areas)と呼んで、SFA-1からSFA-5まで、5つに分類した。

しかし Sovacool [43] の研究によると、エネルギーセキュリティ指標の分類法に、特に定まったものはないとしている。中には著名なエネルギー指標の論文著書 (Streimikiene, Kemmler, Tsai, Schlor, Liu) ごとに、単純な指標 (Simple Indicator) と集約化指標 (Aggregated Indices) のたった2つに分類した García-Álvarez M.T. [42] の例もある。

#### 2.2.1 APERC の 4A's (SFA-1)

4A's の A は、Availability、Accessibility、Acceptability、Affordability の4つの分野を表し、APERC (Asia Pacific Energy Research Centre) [49] によって紹介されて以来、多くのエネルギーセキュリティの研究で採用されている基本的なエネルギーセキュリティ指標の分類法である。

本稿でも、APERC の “The 4A's of Energy Security” によって指標を分類したが、Kruyt B. [94] は、APERC の提唱した 4A's を強く推奨し、これを ‘Energy Security Spectrum’ と呼ぶ図によって表し、モデルベースのシナリオ分析に取り入れた。この図は、IPCC の排出シナリオに関する特別報告書 (SRES) で、将来の温室効果ガス排出シナリオのために4つの異なるストーリーライン (A1~A2、B1~B2) を定義するために使用されたと述べられている。

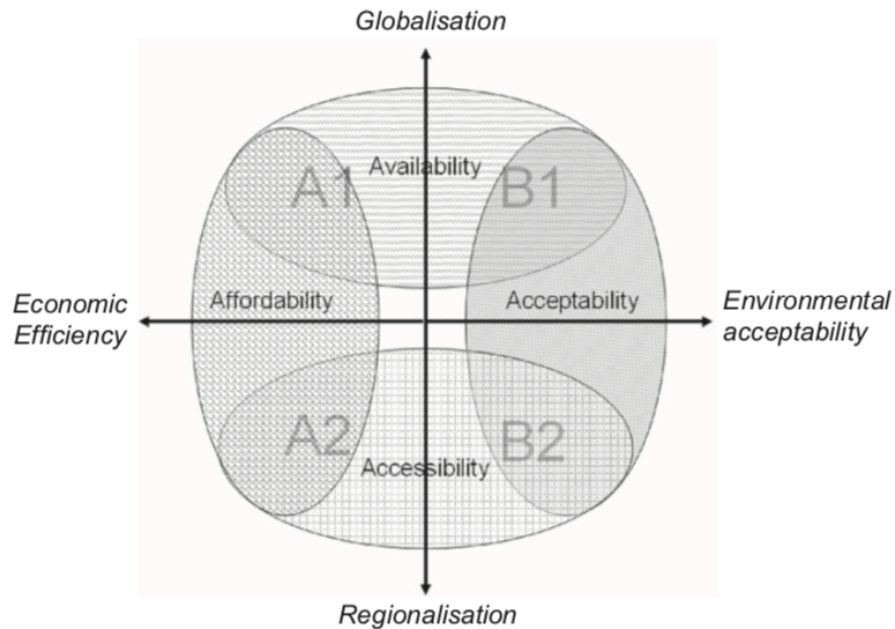


図-8 Kruyt の ‘Energy Security Spectrum’、エネルギーセキュリティ4つの Dimension とそれらの関係 出典)Kruit et al. [94] Indicator for Energy Security

### 2.2.2 個々の資源に焦点 (SFA-2)

SFA-2 は、個々のエネルギー資源に焦点を合わせた分野である。Le Coq C. et al. [50] は、石油、ガス、石炭の3つの資源について別々の評価指標を作成し、EU加盟国の供給リスクレベルが、資源によって異なることを実証した。Darko Pavlović D. et al. [51] は、天然ガス供給の安全性を分析することを目的とした複合指数を提示した。この複合指標には、エネルギー輸入依存度、エネルギー原単位、国内天然ガス総消費量などが含まれた。これらの例のように、個々のエネルギー資源に焦点を当てた分野が SFA-2 である。

### 2.2.3 経済的側面 (SFA-3)

SFA-3 は、エネルギーセキュリティの経済的側面を取り扱う指標を使用した研究である。Streimikiene D. et al. [52] は、バルト諸国を例として、途上国経済におけるエネルギー政策開発のためのエネルギー指標の適用可能性を研究した。この研究では、さまざまな経済分野の経済的側面について合計 11 の指標が使用された。

## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

### 2.2.4 環境問題 (SFA-4)

SFA-4 は、環境問題を取り扱う研究分野である。Sovacool B. K. [53] は、エネルギーセキュリティは、availability, affordability, efficiency, sustainability, governance の各要素 (Dimension) の中の一つとして、Environmental sustainability を選択して土地利用、水、気候変動および汚染に関して指標化した。García-Álvarez M.T. et al. [42] は、EU-15 のエネルギー持続可能な開発の総合指標 (SD Index) を得ることを目的に、33 の変数に基づいて3つの指数を計算し、総合指標を作成した。

### 2.2.5 社会的問題 (SFA-5)、その他 (SFA-0)

SFA-5 は、エネルギーの社会問題を取り扱う分野である。Angelis-Dimakis A. et al. [54] は、Social dimension (社会的側面) を形成するために次の3つの独自の指標「電気を利用できる世帯の割合」、「燃料と電気に使われた世帯収入の割合」、「各所得層のエネルギー消費の家計支出に対する割合」を使った。北田 [109] は、福島原発事故から2年半後の日本の世論を調査し、汚染水漏れの状況が原子力発電への態度にネガティブな影響を与えていること等の結論を得た。

## 2.3 エネルギーセキュリティの定量化手法

エネルギーセキュリティの定量化手法とは、① まずエネルギーセキュリティ指標選定のための手順について、次いで② 計算された指標の取りまとめ法 (総合化手法) を、③ さらに3つの指標を1つの指標で表す「指標の集約化法」と、④ 定量化の問題点を指すものとし、以下それぞれの章で述べる。

## 2.4 エネルギーセキュリティ指標の選定手順

本稿で使用した指標は、Sovacool [43] がエネルギーセキュリティ指標の定義について研究したとする45個の文献を全て挙げ、書かれていた定義を分解し、この定義に示されているセキュリティ・キーワードの出現数が多いものから6項目を取り、これをエネルギーセキュリティ指標として選定した。(表-6) それによると、最も関心があるキーワードは「環境」問題で、その次がエネルギー価格、安定供給と続く。本稿ではこれを基軸となる定義項目とした。次にこの項目に、今般新たに本研究で提示する「原子力発電への受容性」指標を加え、計7項目の定義項目を定めた。そしてこれらの項目について、福島原発事故をよく表す指標をそれぞれ当てはめ、9つの指標を選択した。(表-6 参照)

## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

表-6 本稿で使用した指標

4A's SFA-1	エネルギーセキュリティの定義項目	指標	Ang の分類	指標の定義付け
Availability	安定供給	① 総エネルギーに対するエネルギー自給率	SFA-2	一次総供給エネルギーに占める自国の生産エネルギーの比
		② 電力部門におけるエネルギー自給率		総発電量に占める非火力（水力、太陽光、風力、木質、廃棄物）発電量の比
Accessibility	エネルギー効率	③ エネルギー消費効率	SFA-0	2010年US\$レートによる実質GDPあたりのエネルギー消費量（電力部門）
	資源多様化	④ エネルギー資源多様性（Herfindahl-Hirschman 指標）	SFA-2	エネルギー資源（化石燃料、原子力、水力、地熱、太陽光、風力）の多様性度
		⑤ 原油・天然ガス輸入相手国多様性（カントリーリスクを見込む）		原油の輸入相手国の多様性度（カントリーリスクを見込む）
資源への安全なアクセス	⑥ 原油のチョークポイントリスク指標		チョークポイントを通過する毎に計上する原油量の総量と、原油の総輸入量に対する割合	
Affordability	経済的価格	⑦ エネルギー価格	SFA-3	天然ガスの輸入単価
Acceptability	環境改善	⑧ CO <sub>2</sub> 排出量	SFA-4	発電部門のCO <sub>2</sub> 排出量
	原発受容性	⑨ 原発に対する大衆の世論	SFA-5	アンケート総数対し「今後原発は減すべき」と回答した数の割合

指標の集約化

新たな指標



## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

### 2.5 エネルギーセキュリティ指標の取りまとめ法（総合化手順）

Ang et al.によれば、それぞれで計算された指標は無次元化する必要がある。これを指標の正規化（Normalization）といい、正規化された指標は、次にそれぞれの指標の重み付け（Weighting）が為される。重みがつけられたそれぞれの指標は、最終的に集約化（Aggregation）される、という手順をとる。

- ① 指標の正規化（Normalization）
- ② 指標の重み付け（Weighting）
- ③ 指標の集約化（Aggregation）

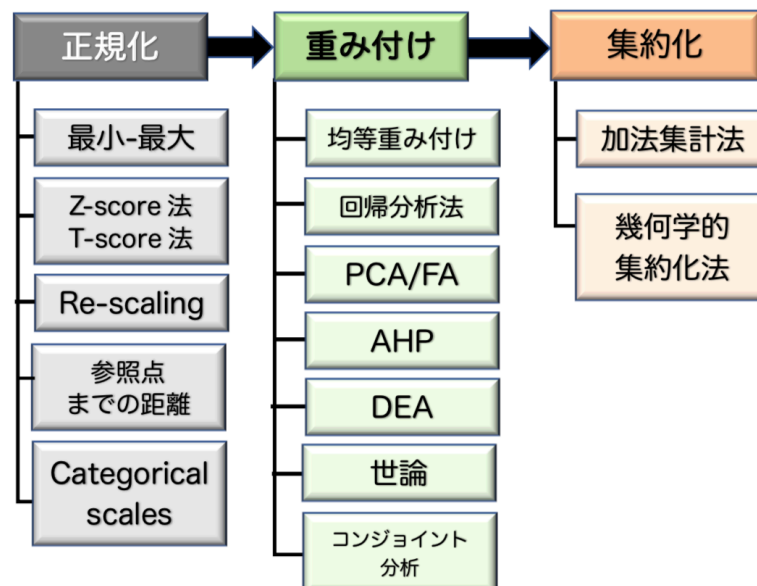


図-9 指標の取りまとめ法 出典)Ang.B.W.et al. Energy security: Definitions, dimensions and indexes および Nardo et al. "Tools for Composite Indicators Building" によって筆者作成  
PCA: 主成分分析 (Principal Component Analysis), AHP: 階層分析法 (Analytic Hierarchy Process), DEA: 包絡分析法: (Data Envelopment Analysis)

Ang B.W. [48] は、この全てのステップを踏む場合もあるが、そのうちの一つだけをピックアップすることもあると述べて、図-9 を示した。（この図-9 は、Ang et al. が提唱する "Index Creation Methods" に、Nardo et al. [74] の論文 "Tools for Composite Indicators Building" を加えて筆者が作成した）

### 2.5.1 正規化

Ang et al. [48]は、次のように述べている。「選択された指標は、通常異なる単位と異なる縮尺を持っている。そのため、全体を見通す指標を構築しようとする、指標の変換が必要である」選択された指標は、この段階でさまざまな種類の定量的情報を包含している。通常は異なる単位を持ち、縮尺も異なっている。ある指標は、他の指標と不整合であり、異なる測定単位を持つ。たとえば、本稿で使用したエネルギー自給率指標は、資源多様性指標と全く整合性が取れない状態で表示されている。したがって、集計段階に進む前に、指標を純粋な無次元数に変換することにより、指標を同じ標準状態にする必要がある。このプロセスを正規化と呼ぶ。無次元数に変換するための一般的な方法として、Nardo et al. [74] は、次の8項目を挙げた。

- ① Ranking of indicators across countries: 最も単純な正規化方法。国ごとに各指標をランク付けする。
- ② Standardisation (or z-scores): 最も一般的に使用されるのは、すべての指標を平均がゼロで標準偏差が1の共通のスケールに変換する方法。平均が50で標準偏差が10に変換したものを「偏差値」または T-scores と言う。
- ③ Re-scaling: 標準偏差ではなく範囲に基づく。指標がすべて同じ範囲(0~1)になるように指標を正規化する。
- ④ Distance to a reference country: 参照国までの距離。分析で使用された国の平均的な国に1が与えられ、距離に応じてスコアが与えられる。
- ⑤ Categorical scales: 「完全に達成」、「部分的に達成」、「未達成」などの定性的なカテゴリに分類され、次に各カテゴリにスコアが割り当てられる方法。

その他 ⑥ Indicators above or below the mean: 平均の周囲の任意に定義されたしきい値の上下にある指標が対象。⑦ Methods for Cyclical Indicators: ビジネス傾向調査のように、一連の調査シリーズに基づく調査。⑧ Percentage of annual differences over consecutive years: 連続年にわたる年間差異の割合。一定の式によって変換される。絶対レベルではなく、前年に対する成長率を表す。指標が何年も利用可能な場合にのみ使用、など。

本稿では、上記の②のうち T-scores 法(偏差値法)を用いた(図-10)。それぞれ計算された指標値は、正規分布すると仮定し、その平均値(50)からの偏差値を評価点とする方法である。偏差値  $T_i$  を表す式は次の通り。

$$T_i = 10 * (x_i - \mu_x) / \sigma_x + 50 \dots \quad (3)$$

## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

ただし、 $T_i$  は、指標値  $i$  の偏差値。 $x_i$  は、指標値  $i$  のある値。 $\mu_x$  は、値  $x$  の平均値、 $\sigma_x$  は、標準偏差を示す。

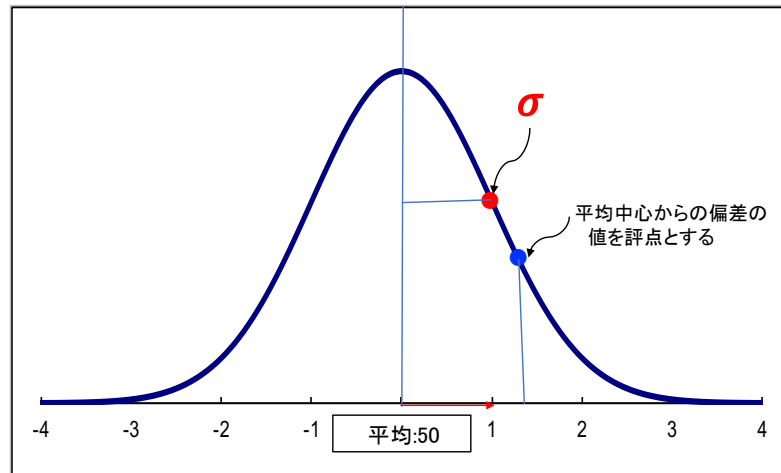


図-10 正規化の概念図、T-scores 法

この方法の欠点は、サンプルサイズが十分に大きくなければならないことである。本研究では OECD34 カ国に、non-OECD 上位 4 カ国を加え、全世界の 75% のエネルギー量をカバーするサンプル数に基づいて行なった。しかし天然ガス価格指標は、そもそも天然ガスを輸入する十分な国の数がなかったり、原油輸入相手国多様性指標のように、全ての原油輸入国の輸入データが揃わなかった指標もある。

正規化の「標準化法」を採用した先行研究事例は、山田 [60]、氏田 [61] がこの手法を取っている。山田は、指標の平均値を中央とする正規分布を仮定し、正規分布上の偏差値を評点とした。また、「最小／最大法」の例としては、村上ら [62] の研究で使用され、レダーチャート図によって視覚的に見える形で示した。

### 2.5.2 重み付け

指標間の重み付けには、定まった方法は存在しない。政策の優先順位と理論的背景を知っている専門家の意見に基づいて指標に重み付けし、利害関係者の多様な視点を反映させることもある。主成分分析 (Principal Component Analysis: PCA) 法、階層分析法 (Analytic Hierarchy Process: AHP)、包絡分析法 (Data Envelopment Analysis: DEA) などが用いられているが、欠点としては、それらが実際の理論的根拠や関係性を持っていないことである。

Nardo et al. [74] によると、重み付けは、以下様々な方法が考えられている。

## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

- ① Principal component analysis and factor analysis: 主成分分析 (PCA)、因子分析 (FA)
- ② Data envelopment analysis: データ包絡分析 (DEA)
- ③ Regression approach: 回帰分析法
- ④ Budget allocation: 予算配分 (BAL)
- ⑤ Public opinion: 世論
- ⑥ Analytic Hierarchy Process: 階層分析法 (AHP)
- ⑦ Conjoint analysis: コンジョイント分析

以上の他、均等重み付け、“Unobserved components models: 未観測のコンポーネントモデル (UCM) ”、“Benchmarking with “distance to the target””: 「ターゲットまでの距離」によるベンチマーク”などが示されている。

重み付けに関する先行研究は、以下の例が挙げられる。

蔡ら [145] の研究では、資源の多様性、資源の輸入価格、資源輸入地域の多様性、環境影響、エネルギー効率の5種の評価指標に基づいて、エネルギーセキュリティを包括的に評価する方法を提示したが、それぞれの指標の重みづけに、文献データベース Scopus の過去20年間の試料の引用回数を使用した。ただしこの方法は、新しい文献ほど引用回数が少ないという欠点があり、正確なデータを出しにくいものと思われる。

全ての指標に等しい重みを割り当てる均等重み付けは、エネルギーセキュリティ研究の3分の1以上を占める最も一般的なアプローチであるが、その理由は主に代替の案を考え出すことの難しさのためであると言われている。

山田 [60] は、使用した5個の指標を統合化するにあたり、均等重み付けを行なったが、考察の中で、本来は指標ごとに重みが異なっているはずだとし、その解決法として階層分析法 (AHP) の使用を提案したが、実施に至らなかったと述べている。

本研究における重み付け法は、Sovacool [43] の研究による、エネルギーセキュリティ指標の定義の分類において、既往のエネルギーセキュリティ研究45個の定義に示されているエネルギーセキュリティ・キーワードの出現数を数え挙げ、それを重み付けの原資データとした。それによると、最も関心があるキーワードは「環境」問題で、その次がエネルギー価格、安定供給、安全な資源へのアクセス、エネルギー効率性、資源多様性と続く6項目である。(表-6)

### 2.5.3 指標の総合化

多くのエネルギーセキュリティ研究では、指標は最初にサブインデックスに分割され、サブインデックスは別のサブインデックスを使用してメインインデックスに総合化される。最も単純で最も普及している集約方法は、加算型集計方法 (Additive methods) である。指標は重み付けが行われ、次に合計 (加算) されてインデックスに到達する。Ang et al. [48] によると、この方法は、エネルギー安全保障指数の集約化の 83% で使われている。残りの 17% は、インデックスを作成するための指標の二乗平均平方根など、他の方法を使用している。Nardo et al.によると、Geometric aggregation (幾何学的集約法) などが例示されている。

### 2.6 指標の集約化

IEA は、図-7 に示すようにピラミッド型の配置で指標を説明した。IEA 統計の基礎となる最も統合化した指標は上に、細分化した指標 (エネルギー原単位など) は中央に、プロセスの最終用途などは下に細分化する。ピラミッドの高さを低くすると、それほど複雑な集約化は必要ないが、裾野が広がるため、データの数が多く必要となる。IEA [55] や Phylipsen [56] はこのピラミッドを、エネルギー効率化の指標構築のために使用した (Trudeau [57]) 。

Ang B.W. et al. [48] によれば、エネルギーセキュリティ研究の 75% が 20 以下の指標を採用しており、20 を超える多数の指標を使った研究は、具体的で単純な指標を使用する傾向があると述べている。指標の数が少ない例として、Blyth W., Lefevre N. [59] の研究がある。彼らが作成した指標「地政学的市場集中リスク指標」  $GMC_f$  は、市場集中リスクに政治的安定性、および市場流動性などを 1 つの指標にまとめ、少ない指標でエネルギーセキュリティを分析した。

□ 指標選定 'IEA Indicator Pyramid' : 集約化した指標は上に、単純な指標は下に配置。下にゆくほど多数の指標を必要とする 出典) Development of Energy Efficiency Indicators

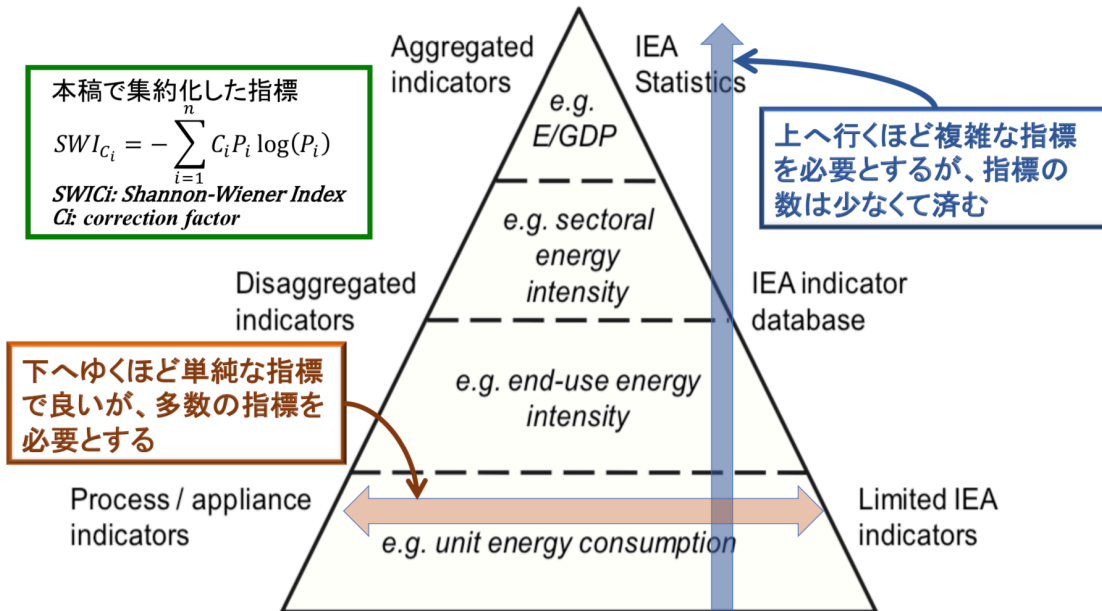


図-11 IEA Indicator Pyramid  
出典) Development of Energy Efficiency Indicators

本稿では、この IEA Indicator Pyramid で言う Aggregated Indicator (集約化した指標) として、複数の指標を一つの指標にする集約化を試みた。集約化には、指標を複合指標にまとめることが含まれる。本研究では紛らわしいので、集約化と総合化はそれぞれ別のものであることを明記する。指標の総合化とは、全体として統一化された指標を重み付け、全体として集約して取りまとめることを言い、また指標の集約化は、複数の指標を一つの指標にすることを言う。

本研究では、「資源輸入相手国多様性指標」と「カントリーリスク」と「チョークポイントリスク指標」の3指標を一つに複合化した指標を作成した。この3指標を複合化する目的は、原油の輸入のケースにおいて、産油国からオイルタンカーで輸入して、安全に輸入国(日本)の港に到着する一連の流れ(定義: 資源への安全なアクセスの確保)を一つの指標で表すという意味である。これによって他の国との定量比較が非常に容易になる。

## 第2章 エネルギーセキュリティの定量化手法

Aggregation（本稿では複合化）は、個別の指標を複合指標にまとめることであるが、Jansen [65] 及び Joint Research Centre (JRC) [58]は、Shannon-Wiener Index に Correction factor  $C_i$  を組み込む方法を提示した。

$$- \sum_{i=1}^n C_i P_i \log(P_i) \cdot \cdot \cdot \quad (4)$$

JRC は、 $C_i$  : Correction factor にカントリーリスクを組み込み、さらに該当国の資源の生産率を組み込むことを提唱している。本稿では、次章「エネルギーセキュリティ指標の複合化」で、 $C_i$  : Correction factor にカントリーリスクとチョークポイントリスクを組み込む、輸入相手国多様性集約指標を作成した。実際の複合化研究は、第4章で述べる。

### 2.7 定量化の問題点と今後

各国のエネルギーセキュリティ政策は、経済的課題、国際政治上の困難性、環境規制や地政学的位置など抱えるリスクが異なっていることから、それぞれ国によって異なる。それに伴い、採用するエネルギーセキュリティ指標も異なる。

エネルギーセキュリティはまだ新興の研究分野であり、報告された学術研究は、年を追うごとに増加している。Chester [146] はエネルギーセキュリティの定義を分析し、「エネルギーセキュリティの概念は本質的に多義的である」と結論付けている。Winzer [147] は、リスクの原因や影響範囲などのさまざまな属性に従って、エネルギーセキュリティの定義を分析するためのフレームワークを使用して、30を超えるエネルギーセキュリティ定義をレビューした。Ang et al.はエネルギーセキュリティの定義は文献中に83個あると述べている。Angはその83個の定義から、主要な7つのテーマを抽出したと述べており、これは本稿で選定した6つの指標とほぼ合致している。Vivoda [148]と Sovacool [149] はさらに、エネルギーセキュリティの包括的な測定を可能にするために200以上の指標を提案した。

エネルギーセキュリティの定義や指標の今後であるが、エネルギーセキュリティを取り巻く環境は常に変化していて新たに発展するものも多い。状況に依存しているエネルギーセキュリティの概念は、新たに出現したリスクや脅威を反映するために定期的に改訂する必要があると思われる。しかし、エネルギーセキュリティの概念や定義、使用される指標の経時的に変化についての研究は僅かしかない。今般本研究で提示した「原子力発電に対する大衆の世論指標」は、日本の福島原発事故には欠かせないエネルギーセキュリティ指標であることを示した。今後の日本のエネルギーセキュリティを探求するに当たり、一般概念として定着する可能性があると考えられる。

## **第3章 福島原発事故から5年 経過後の、日本のエネルギー・ セキュリティレベルの変化**

---

第3章では、東日本大震災で福島原子力発電所の事故が起こってから5年後の日本のエネルギーセキュリティレベルの変化について述べる。

---



## 第3章 東日本大震災から5年経過後の、日本のエネルギー・セキュリティレベルの変化

### 3.1 はじめに

福島第一原子力発電所の事故によって日本は国の1/3の電源を失い、各方面で大規模で長期にわたる影響を与えた。例えば、放射性物質による環境汚染、食品、人体への影響、風評被害などの社会的影響、損害賠償等経済的な影響、住民の避難に対する精神的、経済的な影響などがあるが、2011年の事故から既に8年が経過した。その日本の姿を、エネルギーセキュリティの面から、冷静に定量的に捕まえることは、エネルギー政策の選択の上で非常に重要である。

本稿の比較対象国は、OECD加盟34カ国に、非OECDのエネルギー上位4カ国（中国、インド、ロシア、ブラジル）を加えた。この対象38カ国によって全世界の75%のエネルギー供給量をカバーしている。なお使用するデータは、公式なエネルギー機関が定期的に発行し、かつ公的なエネルギー機関や政府機関が政策立案のベースに用いるなど、世界各国で広く周知され利用されていること（普遍性）や、出所を明記すれば誰でもアクセス可能であること（透明性・入手容易性）によって選択した。

以下、簡単に第1章、第2章で述べてきたことを記載する。

本稿第1章では、次の各項目について述べた。

#### 1.3 はじめに

エネルギーセキュリティの概念の起こりから、2011年3月の福島第一原子力発電所の事故に至る歴史的変遷の概要について述べた。

#### 1.4 本研究の背景

本研究の背景として、福島原発事故の主な影響である①エネルギー自給率の急落、②経済混乱・貿易収支の赤字転落、③CO<sub>2</sub>排出量の更なる増加、を挙げた。

#### 1.5 本研究の目的

本研究の目的として、①福島原発事故後の日本のエネルギーセキュリティレベルの変化と、近年の環境問題への関心がエネルギーセキュリティに与える影響について分析する、②原子力発電への一般大衆の受容性を、一つの指標としてエネルギーセキュリティの分析を行うこと、③資源多様性に関する新たな統合指標を作成する、の3項目を挙げた。

## 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

### 1.6 既往の研究

既往の研究としては、①エネルギーセキュリティの指標に関する研究、②エネルギーセキュリティの概念や定義について研究した、③福島原発事故を、エネルギーセキュリティの問題から捉え、分析した研究、に分類し、それぞれ例を挙げて記載した。

### 1.7 本研究の独自性

本研究の独自性として、①福島第一原子力発電所の事故以後、パリ協定を経て現在に至る日本のエネルギーセキュリティのレベルの変化を、7つの基軸的指標と、34カ国の比較により定量的に捉えた点にある事、②これまでの既往のエネルギーセキュリティ指標研究にはない「原子力発電に対する一般大衆の受容性」を、エネルギーセキュリティの指標として分析を試みたこと、③エネルギーセキュリティの定義項目の一つである「エネルギー資源への信頼性の高いアクセス」に対応する指標を作成したことであること、の3点を挙げた。

また本稿第2章では、次の各項目について述べた。

#### 2.1 エネルギーセキュリティの定義

エネルギーセキュリティに関する学術研究から、エネルギーセキュリティの定義は、6個の定義項目によって構成されている研究が最も多いことが分かった。本稿ではこれを基軸指標として使用し、更に「原発の受容性」指標を加えて、7項目の指標によって定量比較することとした。

#### 2.2 エネルギーセキュリティの定量化手法、特定の関心領域

エネルギーセキュリティの定量化のための指標は、特定の関心事項（経済的側面、環境問題、社会的問題等）に伴って構築され、選択されているとの研究があり、本研究も同様であることが確認されたが、これに則らない指標もあることが分かった。

#### 2.3 エネルギーセキュリティ指標選定

具体的なエネルギーセキュリティ指標の選定は、まず先に挙げたエネルギーセキュリティの定義項目に従って指標の項目を挙げ、APERC (Asia Pacific Energy Research Centre) が提唱した4A'sの分類に従って抜けているものやバランスを考慮して目的にあった指標を選定した。IEAのIndicator Pyramidに従い、指標は出来るだけSimpleな指標を使うことによって、述べたいことが分かりやすくダイレクトに示せるように考慮したが、1項目だけは、集約化した指標を作成した。これについては第3章で述べる。

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

#### 2.4 指標の総合化の手順

指標を取りまとめて、総合的なエネルギーセキュリティ評価を得るためには、①指標の正規化、②指標の重み付け、③指標の集約化、の各段階を経る必要がある。本稿では、「指標の正規化」のうち、全体を正規分布とみなして平均を50とし、平均からの偏差値を評点とする方法（T-score法）によって総合的評価を行った。

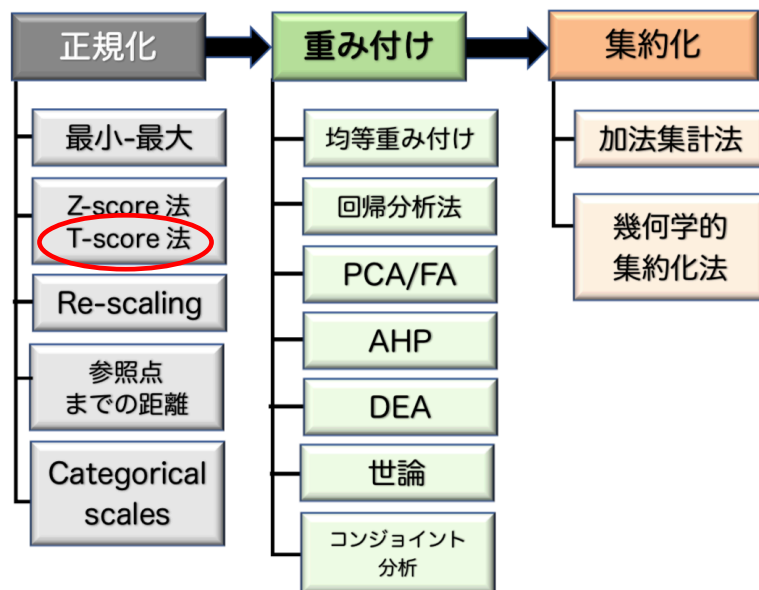


図-12 指標の取りまとめ法 出典)Ang.B.W.et al. Energy security: Definitions, dimensions and indexes および Nardo et al. “Tools for Composite Indicators Building” によって筆者作成  
PCA: 主成分分析(Principal Component Analysis), AHP: 階層分析法 (Analytic Hierarchy Process), DEA: 包絡分析法: (Data Envelopment Analysis)

この指標は本稿ではまだ  
検討されていない

4A's	エネルギーセキュリティの定義項目	指標	単位	指標の定義付け
Availability	安定供給	① 総エネルギーに対するエネルギー自給率	%	一次供給エネルギーに占める自国の生産エネルギーの比
		② 電力部門におけるエネルギー自給率	%	総発電量に占める非火力（水力、太陽光、風力、木質、廃棄物）発電量の比
Accessibility	エネルギー効率	③ エネルギー消費効率	KWh/GDP <sub>2010年US\$</sub>	2010年US\$レートによる実質GDPあたりのエネルギー消費量（電力部門）
		④ エネルギー資源多様性（Herfindahl-Hirschman 指標）	Herfindahl-Hirschman 指標	エネルギー資源（化石燃料、原子力、水力、地熱、太陽光、風力）の多様性度
	資源多様化	⑤ 原油・天然ガス輸入相手国多様性（カントリーリスクを見込む）	Herfindahl-Hirschman 指標	原油の輸入相手国の多様性度（カントリーリスクを見込む）
		⑥ 原油のショックポイントリスク指標	%	ショックポイントを通過する毎に計上する原油量の総量と、原油の総輸入量に対する割合
		⑦ エネルギー価格	US\$/百万BTU	天然ガスの輸入単価
Affordability	環境改善	⑧ CO <sub>2</sub> 排出量	CO <sub>2</sub> 百万トン	発電部門のCO <sub>2</sub> 排出量
		⑨ 原発に対する大衆の世論	%	アンケート総数対し「今後原発は減らすべき」と回答した数の割合
Acceptability	原発受容性			

表-7 4A's、定義、指標、単位、指標の定義の関係

### 3.2 指標の選定と計算

#### 3.2.1 エネルギー自給率

エネルギー自給率は、一次総供給エネルギーに占める自国産のエネルギーの割合と定義されるが [95]、自国産のエネルギーに原子力を含む場合と、含まない場合の二通りの見方がある。経済産業省は 1990 年以前には自給率に原子力を含まない取扱いをしていたが、それ以後は IEA の定義に従って原子力を概ね自給率に含む取扱いをしている。本稿では、その両方の立場で計算を行った。

《エネルギー自給率 SS 》

$$SS = DEP/TPES \times 100 \quad (5)$$

*DEP* : Domestic Energy Production (自国のエネルギー生産量；但し、原発を含む場合、含まない場合の2通り)

*TPES* : Total Primary Energy Supply (一次エネルギー総供給量)

また自国の生産エネルギーの一つとして、発電電源に占める再生可能エネルギーの比率も、福島以後のエネルギーセキュリティを表す指標として重要な位置をしめるようになった。

$$RE = Re/EG \times 100 \quad (6)$$

*RE* : Renewable Electricity Generation rate (%)

*Re* : Renewable (TWh)

*EG* : Total Electricity Generation (TWh)

#### 3.2.2 エネルギー消費効率

省エネルギーの度合いを測る指標として、GDP あたりのエネルギー消費量を使用する。但し、GDP として市場為替レートを使った場合は、貿易できないサービス業などの価格を反映できないため、先進国の GDP 原単位が過大になる傾向がある。逆に途上国の財・サービスは先進国に比べて品質が劣っており、物価水準が過小評価される可能性があるため、購買力平価 GDP では途上国の GDP 原単位が過大評価される可能性がある。

(末広, [96])。本稿では、OECD 加盟先進国間の比較を主眼としたため、2010 年の US\$ 市場為替レートを使用した実質 GDP によって 5 部門の消費量 (TFC: 最終エネルギー総消費量、Industry: 工業用消費量、Transport: 運輸部門消費量、Electricity: 電力

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

部門消費量、Residential：一般家庭部門消費量、Service：サービス部門消費量) のエネルギー効率を算出して比較した。

《エネルギー消費効率EE》

$$EE_{ETFC} = ETFC / GDP_{2010USD} \quad (7)$$

*ETFC*: Electricity Total Final Efficiency (kwh)

*GDP*<sub>2010USD</sub> : GDP (2010 USD)

#### 3.2.3 資源多様性

Chang [66] によれば、エネルギーセキュリティで使用される多様性指標は、殆どの場合、Herfindahl-Hirschman Index (HHI) か Shannon-Wiener Index (SWI) か、またはこれらの変形指標が使用されている。本稿では HHI を使用したが、HHI と SWI には特性の違いがある。SWI はシェアの低い要素に対して、大きく反応するのに対して、HHI はシェアの高い低いには左右されない。大垣 [69] はこれを、「SWI では、起こる確率が小さいほど、その事象の情報量は大きい」と表現した [69]。

《エネルギー源多様性指標の変化を表す式》

$$\lambda_i = 1 - HHI_i = 1 - \sum_i S_{if}^2 \quad (8)$$

$\lambda_i$  : 国  $i$  のエネルギー資源多様性度

$S_{if}$  : 国  $i$  のエネルギー資源  $f$  の TPES (Total Primary Energy Supply) のシェア

$f$  : エネルギー資源の種類 (化石燃料、原子力、水力、地熱、太陽光、風力)

#### 3.2.4 原油及び天然ガス輸入相手国分散(集中)度

カントリーリスクを加味した原油輸入相手国の分散度は、Lefevre [63] や、Jansenら [65] によって提唱された。本稿では、シェアの大きな輸入相手国を見る必要があるため、Lefevre [63] の提唱する分散指標を使用した。またカントリーリスク度は、OECD の "Country Risk Classification : CRC" を使用した [71]。この CRC は、各国間の貿易上の保険料率を決める目的で設定されており、142 カ国に対し 0~7 の 8 段階で格付けしている。CRC の格付けは、国の経済状況、財政状況、政策履行指標及び対外返済実績等やフォースマジュールリスクを織り込み、更に将来の見通し (2016 年半ばに採択されたエネルギー市場に影響を与える政策や措置、公表された目標値、意向の全部または一部) など

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

も考慮して決定されている[72]。このCRCをエネルギーセキュリティ指標研究に使用した適用事例としては、村上 [62] がある。

《資源輸入相手国の集中度》

$$\lambda_i = 1 - HHI_i = 1 - \sum_i (S_{if}^2) \quad (9)$$

$$\lambda_{r_i} = 1 - HHI_i = 1 - \sum_i (r_i * S_{if}^2) \quad (10)$$

$\lambda_i$  : 国*i* のエネルギー資源多様性度

$\lambda_{r_i}$  : 国*i* のエネルギー資源多様性度 (カントリーリスクを加味)

$S_{if}$  : 国*i* のエネルギー資源*f* のTPES (Total Primary Energy Supply) のシェア

*f*: エネルギー資源の種類 (化石燃料、原子力、水力、地熱、太陽光、風力)

$r_i$  : 輸出国*i* に於けるカントリーリスク (OECD, 2016) ( $r_i \leq 3$ )

#### 3.2.5 原油のチョークポイントリスク

米国EIAは、ホルムズ海峡やマラッカ海峡など7つの海峡を「チョークポイント」と定義している [75]。外務省は中東エリアを「世界の物流上の戦略的要衝であると同時に、宗派・民族対立やテロ、過激派の問題等が存在する。近年には「アラブの春」とその後の政治的変動があり、情勢がさらに不安定化した。同地域の不安定化は日本へのエネルギー供給等に大きな影響を及ぼし、安全保障上のリスクである」と分析している [76]。また経済産業省は資源供給国のリスク評価について3つの指標を挙げ、そのうちのひとつとして「資源輸送の途絶リスク」(資源輸送上紛争等の起こりやすいポイント=ホルムズ海峡等=をどのくらい経由するか)を評価指標としている [77]。

本稿で使用したチョークポイントリスクの分析手法は村上ら [62]や、三菱総研 [80]などが使用しており、鳥海ら [81]によって、Lloyd's List Intelligenceが提供している実際の船舶動静データに基づく分析との比較評価が行われ、国によっては過大評価があるものの、両者は概ね一致する、と評価された。

《原油タンカーがチョークポイントを通過するリスク $CP_r$ は次式で表す》

$$CP_r = \sum_j (\alpha \cdot S) / \sum_i T \quad (11)$$

$\alpha$  : 原油輸出国と輸入国間で通過するチョークポイントの通過回数

$\sum_i T$  : 輸入国*i* の原油の総輸入量

$\sum_j (\alpha \cdot S)$  : 輸出国*j* の原油がチョークポイント通過する量

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

表-8 原油輸出国-輸入国間のチョークポイント通過表

出典) 筆者作成

輸入国	輸出国	ホルムズ海峡	マンダブ海峡	スエズ運河	マラッカ海峡	ボスフォラス海峡	デンマーク海峡	パナマ運河
France Germany Italy Spain	Iran, Iraq, Kuwait, Qatar, UAE	○	○	○				
	Oman		○	○				
	Saudi Arabia(50%)	○	○	○				
	Sweden						○	
	Kazakhstan, Russian Federation					○		
USA	Iraq, Kuwait, Qatar, UAE	○	○	○				
	Saudi Arabia	○	○					
	Oman, Iran		○	○				
	Russian Federation					○		
	Peru(50%)							○
	Yemen			○				
	Indonesia(50%), Malaysia(50%)							○
China JAPAN Korea	Iran, Iraq, Kuwait, Qatar, Saudi Arabia, UAE	○			○			
	Oman, Yemen, Indonesia (50%)、USA (50%)、Malaysia(50%)				○			
	Trinidad and Tobago, Norway, Brazil, Venezuela, Norway, UK							○
	Algeria, Kazakhstan, Syrian Arab, Azerbaijan, Libya, Tunisia		○	○	○			
	Egypt		○	○	○			
Canada	Kazakhstan, Russian Federation					○		
	Iraq, Kuwait, Saudi Arabia	○	○	○				
UK	Sweden						○	
	Ecuador							○
	Russian Federation					○		
	Iran, Saudi Arabia (50%)、Iraq(50%)、Kuwait, Qatar, UAE	○	○	○				
	Oman		○	○				

#### 3.2.6 エネルギー価格

日本は、事故によって突然失われた原子力エネルギーの不足を、化石燃料で補うしかなかった。実際には事故後、省エネルギーと需要の減退で、原油の輸入量は2013年まではほぼ横ばいで推移し、以後徐々に減少し2016年には2010年度対比で11%減少した。石炭は現在に至るまでほぼ横ばいの輸入数量を維持したが、天然ガスは原発事故前に比べて、2014年には26%増加し、2016年でも20%の増加を示した。特に豪州、カタール、ロシアからの輸入が増加した。即ち日本は、福島後のエネルギー不足を世界の天然ガス市場から補充したことになる。本稿では、福島事故前から現在に至るまでの、天然ガスの輸入単価を指標として各国と比較した。



## 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

### 3.2.7 発電部門におけるCO<sub>2</sub>排出量

エネルギー安全保障に、「環境」という概念が加わったのは1990年代である。IEAは、エネルギーセキュリティの定義について「環境への配慮を尊重しながら：while respecting environment concerns」と表現をした。また、2015年に採択されたパリ協定では、「世界平均気温の上昇を産業革命前の水準を2°C下回るレベルに抑える：Holding the increase in the global average temperature to well below 2°C above pre-industrial levels」とすることが具体的に決められた。温暖化による異常気象は、エネルギーセキュリティ上の大きなリスクであるとする考え方である。パリ協定は今後世界で排出できるCO<sub>2</sub>の総量に事実上の上限を設けた。現在のペースで化石燃料を使い続ければ、あと25年ほどで上限に達するという。この考え方では、化石燃料にいくら埋蔵量が残っていても、使えないことになる。CO<sub>2</sub>を測る指標は様々あるが、本稿では最も単純に、発電部門におけるCO<sub>2</sub>排出量を指標とした。

## 3.3 各指標の評価

### 3.3.1 エネルギー自給率

日本の一次供給エネルギー自給率は、福島事故直前には19.9%であったが事故後急落し、現在でも7%で殆ど回復していない(図-13)。原子力発電が停止すれば自給率がその分下がるのは当然であるが、図-13に示すように、もともと長期に渡って原子力に頼って、自国の資源開発を怠ってきたことが顕在化したに過ぎない、という言い方もできる。

2012年、日本も漸く本格的にFeed-in Tariff (Fit) 制度を取り入れ、全電源に占める再生可能エネルギーの割合は2015年には2010年対比40%増(10%：2010→14%：2015)となった。しかし同じ期間に3.6倍の伸びを示した英国(7%：2010→25%：2015)や、50%増加させたイタリア(26%：2010→39%：2015)や70%のドイツ(17%→29%)などには及ばなかった。日本の2017年の再生可能エネルギーの割合はフランスと同じ16%だが、ドイツは26%、スペインは40%、イタリアでは43%(2015)にまで導入が進んでいる(図-14)(IEA [98])。再生可能エネルギーが一時供給自給率を押し上げる力は7年間でも1.79%(3.68%：2010→5.47%：2017)程度(IEA [99])であるが、電力自給率についてみれば、6%増加(10%：2010→16%：2017)となる(図-13)。これに原子力発電の3.1%(2017)を加えれば19.1%が日本の2017年の電力自給率である。

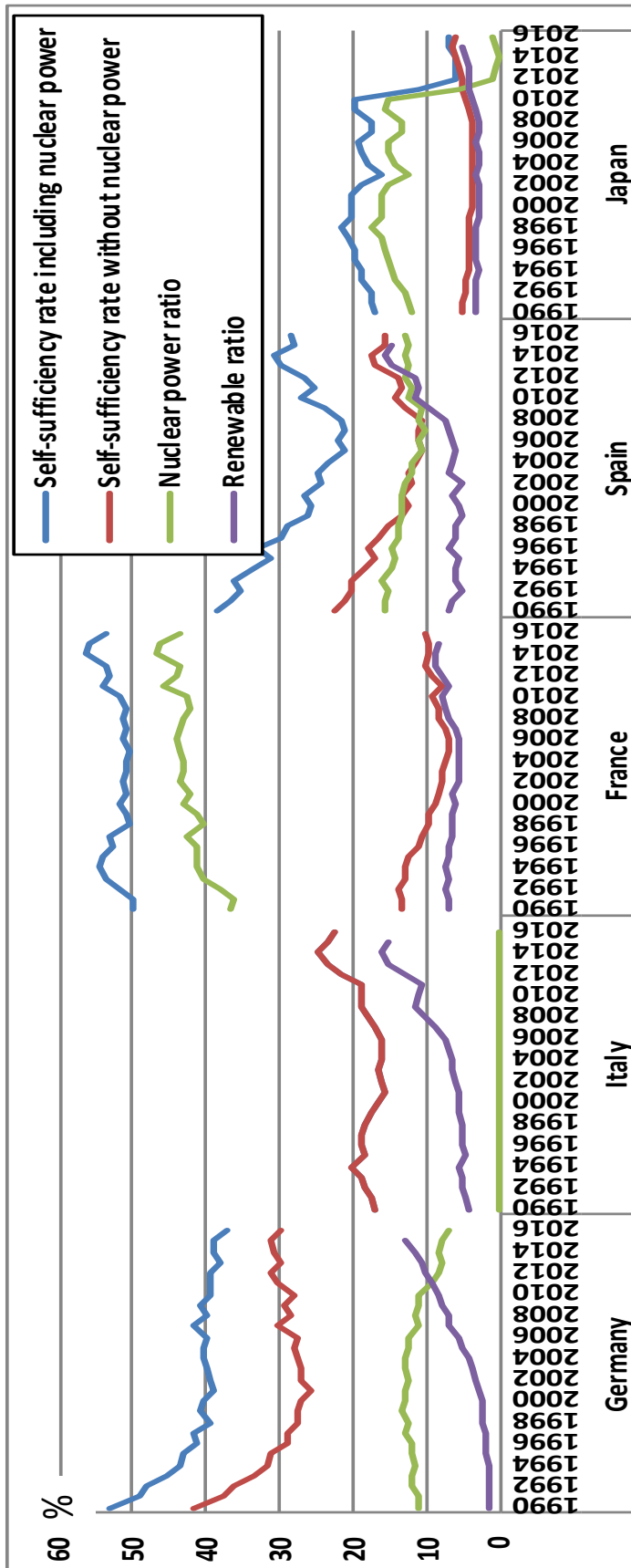


図-13 独、イタリア、仏、スペイン、日本のエネルギー自給率  
出典) IEA. Energy Balances of OECD Countries, 1992-2017

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

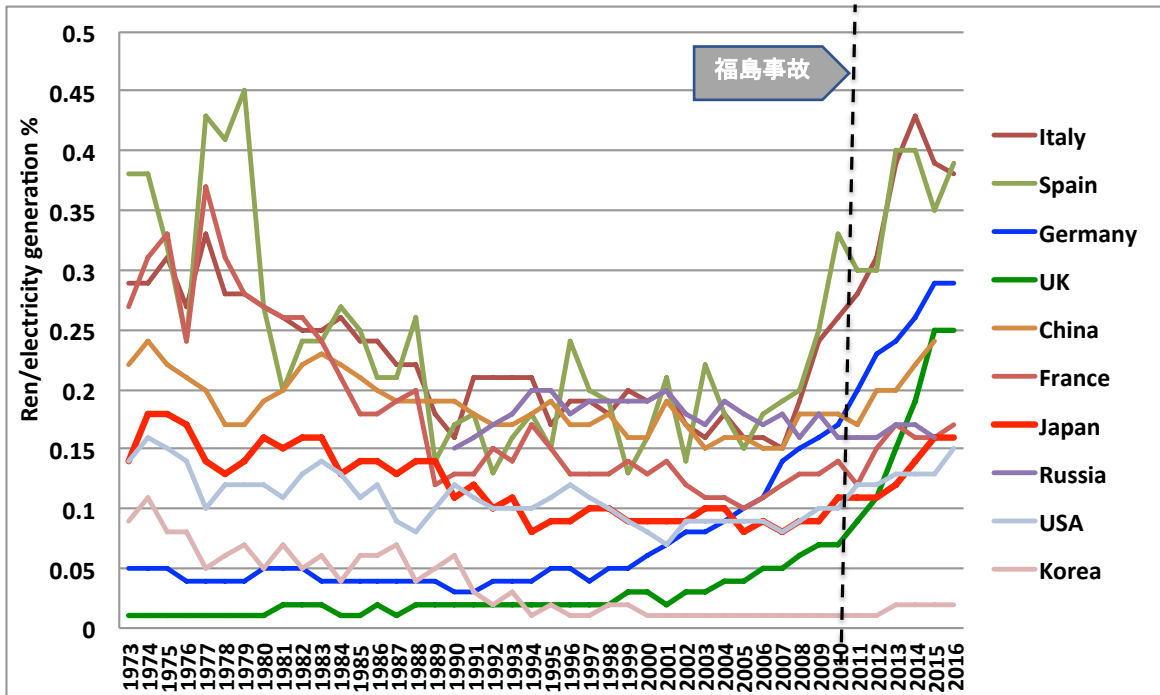


図-14 発電用エネルギー中の再生可能エネルギー比率

出典) IEA, Renewables Information

#### 3.3.2 エネルギー消費効率

日本は元々省エネルギーで高効率な国といわれてきたが、実際のエネルギー効率は1980年代以降20年間にわたり、ほとんど伸びず停滞していた(星野 [100])。しかし福島事故による電力不足によって、エネルギー総消費は2010年を100とすると、2015年には91まで効率化が進んだ(図-15)。しかし同じ間、英国、スウェーデンや仏やカナダなどはさらに飛躍的に効率化を進めた。(IEA, [99]) 2015年の日本のエネルギー消費効率の対象38カ国の中の位置は、平均より若干高めである。

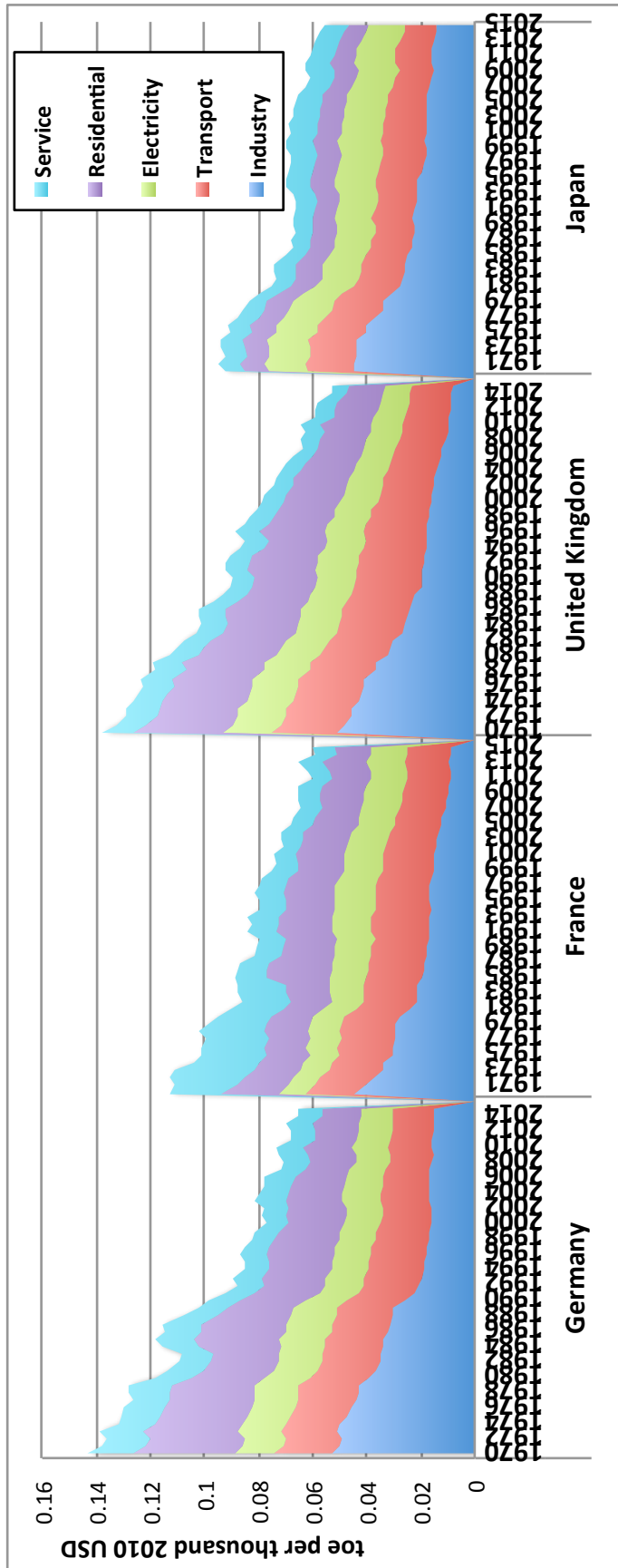


図-15 エネルギー消費効率：GDP あたりのエネルギー総消費量 (toe per thousand 2010 US\$)

出典) IEA. Energy Balance of OECD Country

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

#### 3.3.3 資源多様性

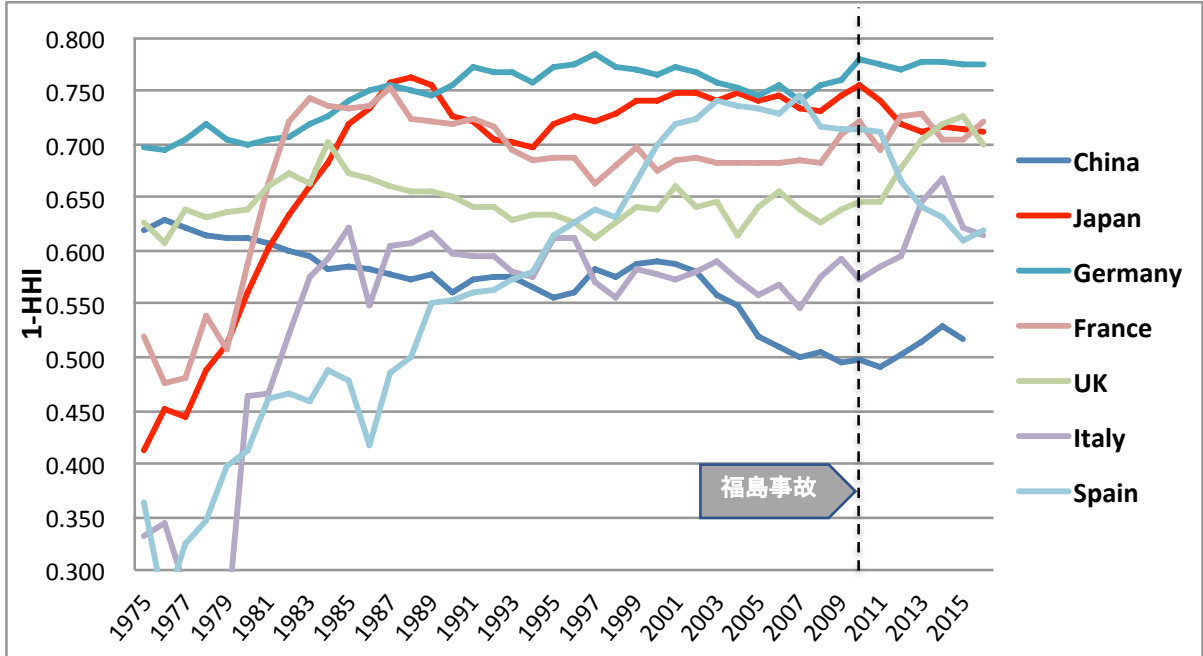


図-16 エネルギー多様性指標の変化(上方ほど多様性が高い)

出典) IEA. “Energy Balances of OECD Countries,

福島事故以前 2010 年の日本の原子力発電の一次総供給エネルギー供給に占めるエネルギー構成は 15%で、一次エネルギー資源多様性度は、 $HHI=0.245$ であった。福島事故後、全原子力発電を失った 2014 年で、一次エネルギー資源多様性度は  $HHI=0.284$  を示し、事故前に比べて 16%程度悪化した。すなわち、原子力発電がなくなった分の多様性が失われた結果である。エネルギー多様性が進んでいるドイツは、原油 24%、天然ガス 31%、石炭 24%、再生可能エネルギー14%と、どのエネルギーもバランスよく構成されていることがわかる(2016年： $HHI=0.226$ )。これに対し日本は、原油 40%、天然ガス 24%、石炭 28%、再生可能エネルギー5%と、今もなお原油の構成比率が高いことと、原子力の構成比率が 15%程度と低かったこと、さらには天然ガスが震災前より 30%増加したにも関わらず全エネルギーの中の天然ガス比率が 24%程度となったため、全体として多様性の落ち込みはそれほど大きくはなかった(2016年： $HHI=0.289$ )。その結果、図-16 に示す通り、他の OECD 諸国に比べても 2016 年現在、まだ高い分散性を保っている。

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

#### 3.3.4 原油及び天然ガス輸入相手国分散（集中）度

原子力発電所の停止前後の日本の原油の供給量は2010年対比で、▲11%の減少を示した(IEA. [101])。一方、サウジアラビアとUAE 2国への輸入相手国集中は2010年：全供給量の54%から2015年：63%へと増大し、中東全体では82%に達している。伊28%、仏25%、スペイン14%などに比べても、また独のロシア依存(36%)に比べても、日本の原油の中東依存は突出している。そのため、日本の原油輸入相手国の分散度は、カントリーリスク込みで $\lambda_{2if}$ は、2010年：0.69から2015年：0.65に低下(分散度が悪化した)したが、イタリアは同じ期間で $\lambda_{2if}=0.67$ から0.72、スペインは $\lambda_{2if}=0.78$ から0.81へ上昇した。

#### 3.3.5 原油のチョークポイントリスク

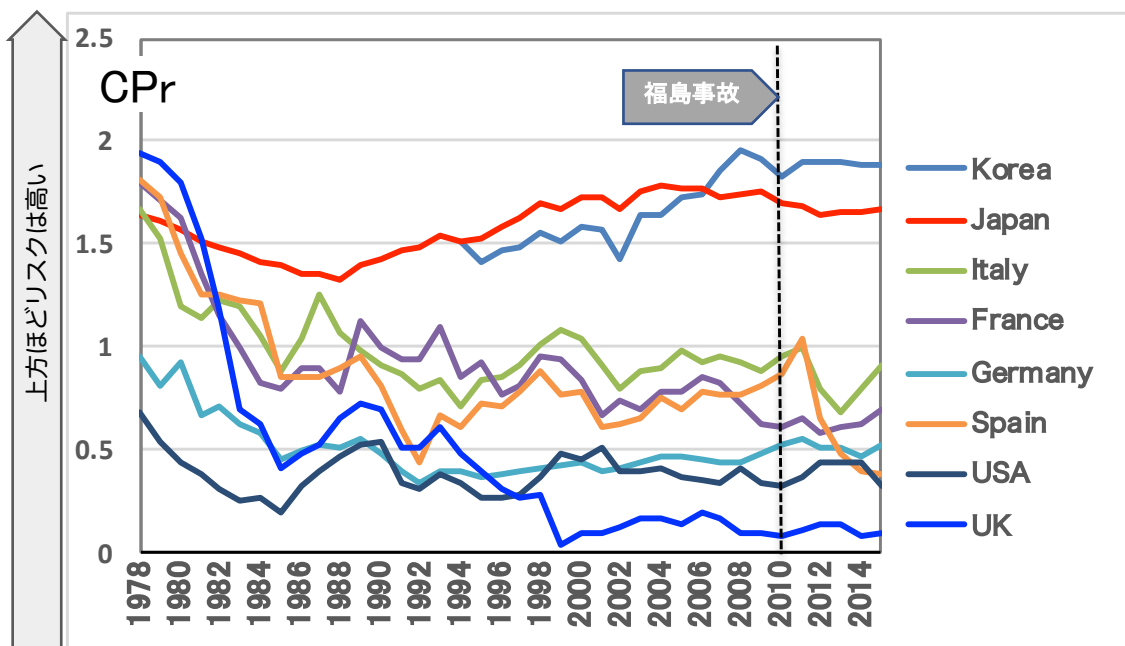


図-17 原油のチョークポイントリスク

出典)筆者計算

地政学的に日本や韓国のチョークポイントリスクは欧米に比べ非常に高い。しかし図-17に示す通り、日本のチョークポイントリスクは、原油の輸入とともに第2次石油危機以降一旦大きく減った。1979年/1987年では▲34%減少した。しかしその後再び上昇に転じ、1994年をピークとして石油危機の時代とほぼ同様の原油輸入水準となった。しかし図-17に示すように更にチョークポイントリスクは2004年代に向けて上昇しているが、こ

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

これは原油輸入総量は減少しているのに、中東各国からの原油輸入が上昇したためである。2000 台年以降（2011 年の原発事故以降も含め）、日本のリスクは少しずつではあるが徐々に下がっているが、その理由は、原油の輸入が減ったと同時に中東産原油の輸入が減少したためである。中東原油は 2013 年では 1994 年対比▲23%減少した。

一方欧州諸国のチョークポイントリスクは 1980 年代を境に大きく下がった。1970 年代までは欧州各国のチョークポイントも高かったことが理解される。特に英国は 1980 年代までは日本よりもリスクが高かったが、2000 年代に向かって急激にチョークポイントリスクが下がった。これは原油の輸入量減に加えて、中東地域からの原油輸入をノールウェイの北海原油に切り替えたためである。英国の原油輸入量は 1978 年：2015 年対比では、▲35%減少した。（IEA. Energy Balance of OECD Countries による筆者計算）

#### 3.3.6 エネルギー価格

LNG 輸入価格は 2008 年のリーマンショック後に急騰したが、福島事故は価格の急騰局面で起こった。2012 年から 2 年間にわたり LNG 輸入価格は 17 \$/MBtu を超えた。この価格は UK の輸入価格の約 2 倍である。（IEA [102]）

日本は原発の停止以降、エネルギー総輸入額が 58%上昇し、そのため貿易収支は赤字に転落した。しかし 2010 年対比でエネルギー輸入量の増加は 6.7%に留まっており、従って貿易収支の悪化の原因は、燃料価格の高騰と円安の両局面で出たものと見るべきである。現に LNG 価格は原油安につられて下落し、2016 年 5 月には 5.95 \$/MBtu となり、その結果 2015 年 10 月度の貿易収支は黒字化した。福島原発事故後、国内エネルギー価格は、OECD 加盟 34 カ国の中で最も大きく値上がりし、家庭用で 25%、工業用では 34%、電力卸価格では 44%に達した。

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

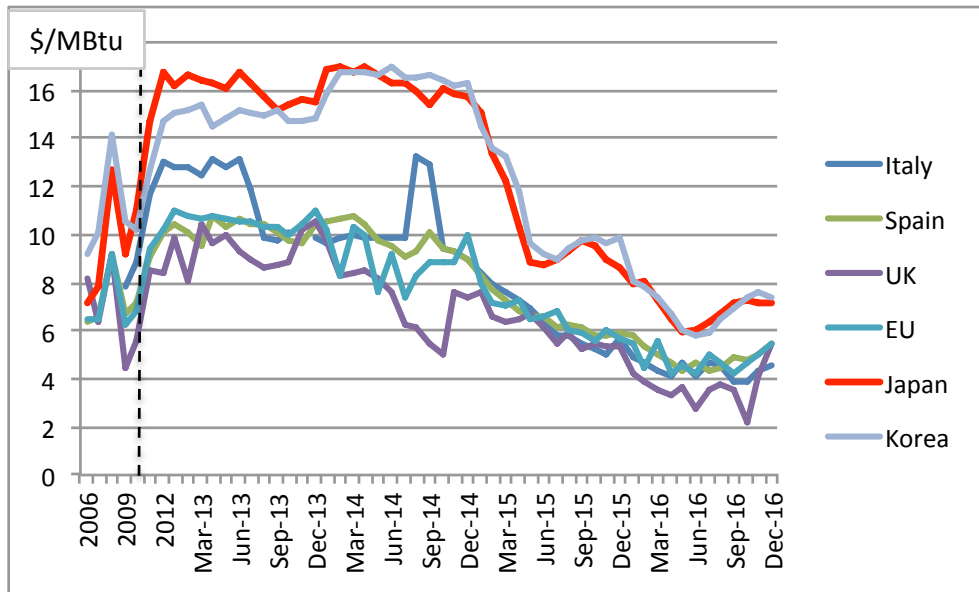


図-18 LNG 輸入価格の変化

#### 3.3.7 電力部門における CO<sub>2</sub> 排出量

全世界で最も多くの CO<sub>2</sub> を排出しているのは中国、次いで米国、ロシア、インドで、この4カ国で全世界総 CO<sub>2</sub> 排出量の 55% を占める。この4カ国に次いで多くの CO<sub>2</sub> を排出しているのは日本である (IEA [103])。原発事故後日本の電力由来 CO<sub>2</sub> 排出量は、2010 年対比 25% の大幅な増加を示した (図-19)。しかし日本の総 CO<sub>2</sub> 排出量は 1970 年代よりずっと増加傾向にあり、この総 CO<sub>2</sub> 排出量の増加原因が原発の停止のみにあるのではないことは明らかである。日本は 1970 年から 40 年間に、石炭の使用量を 2.4 倍に増加させ、CO<sub>2</sub> 排出量も 1.6 倍に増加したが、同じ間でドイツや英国、フランスなどは逆に石炭の使用量を 4 割減～7 割減とし CO<sub>2</sub> 排出総量を 2 割～3 割減じた。日本や韓国などとは対照的である。



### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

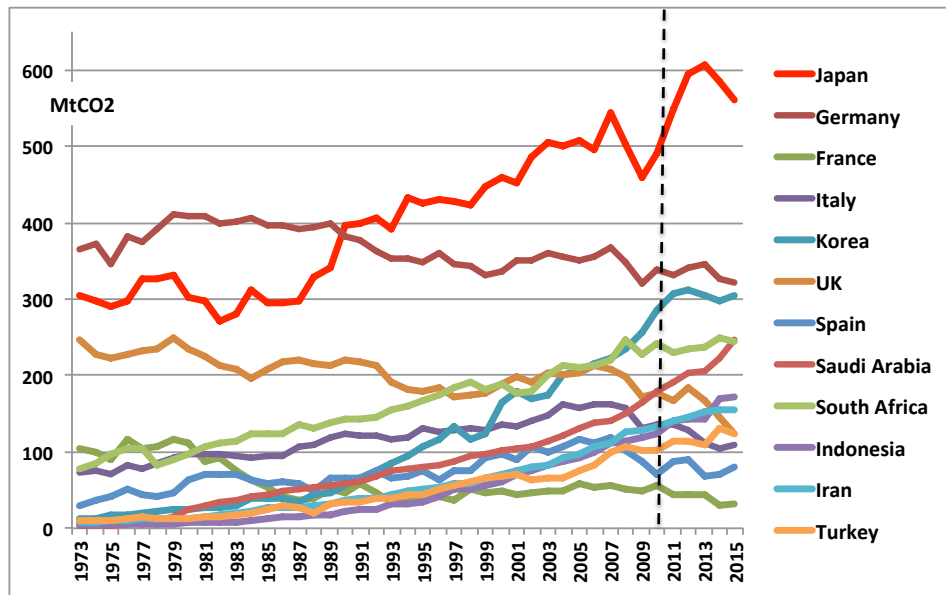


図-19 電力由来 CO<sub>2</sub> 排出量 出典) IEA CO<sub>2</sub> Emissions

## 3.4 まとめ

### 3.4.1 結果の総合化、取りまとめ法

本研究は、第2章「指標の総合化の手順」に述べた方法に従って取りまとめを行った。即ち、選択された指標は、通常異なる単位と異なる縮尺を持っているため、全体を見通す指標を構築しようとする、指標の変換が必要である (Ang et al. [48])。したがって、集計段階に進む前に、指標を純粋な無次元数に変換することにより、指標を同じ標準状態にする必要がある。このプロセスを正規化 (Normalization) と呼ぶが、正規化の手法として第2章では8つの方法を挙げた。本章ではそのうち「標準化法：Standardisation (or T-scores 法)」によって指標を総合化して取りまとめを行なった。T-scores 法は、各国の指標の算出値は正規分布すると仮定し、その平均値を50として平均値からの偏差値を評点として日本のエネルギーセキュリティ度合いを評価するものである。

本稿で用いた T-scores 法 (偏差値法) では、それぞれ計算された指標値は、正規分布すると仮定し、その平均値 (50) からの偏差値を評価点とする方法である。偏差値  $T_i$  を表す式は次の通り。

$$T_i = 10 * (x_i - \mu_x) / \sigma_x + 50 \dots (3)$$

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

ただし、 $T_i$  は、指標値  $i$  の偏差値。 $x_i$  は、指標値  $i$  のある値。 $\mu_x$  は、値  $x$  の平均値、 $\sigma_x$  は、標準偏差を示す。

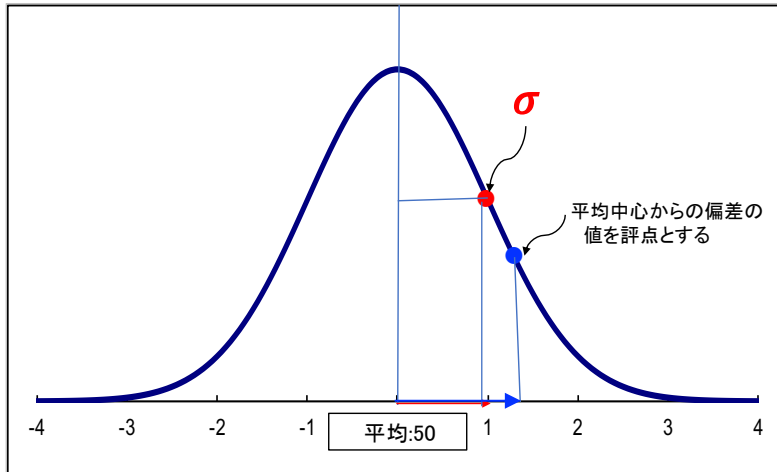


図-20 結果の取りまとめ法 (T-scores 法の概念図)

#### 3.4.2 結果のまとめ

##### (1) 総合的なエネルギーセキュリティレベルの計算結果

本研究の結果、福島第一原子力発電所の事故は、日本のエネルギーセキュリティ上もともと高くはないセキュリティ度であった状態を悪化させたが、5年を経過して若干上昇させたものの、大震災前には戻っていない、という結果であった。

原発の不稼働によって総合エネルギーセキュリティレベルは低下したことが示されたが、中でもエネルギー価格指標の落ち込みが最も大きいものであった。しかしエネルギー資源の分散度、資源輸入相手国の分散度、チョークポイントリスク指標などは若干ではあるものの5年を経過して上昇したものもある。また再生可能エネルギーの開発は大きく進んだものの、世界的な比較レベルでは世界の状況と比べ殆ど変化が見られないものもあった。

表-9 日本のエネルギーセキュリティ度総合表  
(震災前、後、5年後)

年	2010	2012	2015
偏差	51	42	44

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

#### (2) エネルギー自給率

事故後19%から6%に急落した一次エネルギー自給率は、原子力に頼って自国のエネルギー開発を怠ってきたことを浮き彫りにしたが、事故後Fit制度によって太陽光発電は大きく発展した。電力自給率は2010年：10%→2017年16%へ60%の増加を果たしている。しかし欧州主要国は既に30%に達していて、制度上の様々な問題点のため、再生可能エネルギーの開発のスピードはまだ遅く、その差は増々大きくなりつつあり、相対的にエネルギーセキュリティ度は低下している。

表-10 日本のエネルギー自給率

年	2010	2012	2015
偏差	44	43	43

#### (3) 経済評価

原子力の代替エネルギーとして、LNGを大幅に買い増しし、それによって貿易赤字をもたらしたと言われたが、(IEA [104]) その後LNG価格の下落によって、貿易黒字を回復している。したがって、この時の貿易赤字の原因は、原子力発電が徐々になくなり、天然ガスを買増した事だけではなく、当時の円安と天然ガス価格の値上がりの理由もあったものと思われる。エネルギー価格指標は一旦大幅にマイナスの傾向を見せたが、2016年になって原料価格の低下とともに改善した。だが依然として、日本の天然ガス購入価格は欧州各国に比べて非常に高い。

表-11 日本のエネルギー価格(工業用天然ガス)

年	2010	2012	2015
偏差	36	18	30

#### (4) CO<sub>2</sub>排出量

福島後25%もCO<sub>2</sub>排出量が増加し、セキュリティ指標も一時大幅にマイナス変化を見せたが、CO<sub>2</sub>排出量は1980年からずっと増加基調にあるため、原因は原子力発電の停止に依るものだけとは言えない。CO<sub>2</sub>排出量の増大傾向は、福島事故後2013年まで続いたが、2014年からCO<sub>2</sub>排出量は減少傾向に転じた。しかし未だ2010年の水準には戻っていない。世界的にみれば、日本の環境指標は、福島原発事故以前からレベルが非常に低く、原発事故の後さらに悪化している、という結果である。

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

表-12 日本のCO<sub>2</sub>排出量

年	2010	2012	2015
偏差	32	30	31

#### (5) エネルギー効率（省エネ）

元々高い効率性を保っていたにも関わらず、20年間にわたる停滞期を超えて漸く改善し始めたエネルギー効率化（30%）であり、エネルギー効率の改善傾向は継続しているものの、家庭用途部門やサービス部門など、部門によっては再び停滞し始めている。他のエネルギーセキュリティ指標の中で数少ない平均以上の指標値を示している。

表-13 日本のエネルギー利用効率

年	2010	2012	2015
偏差	58	58	58

#### (6) エネルギー資源の多様性、原油輸入相手国多様性

原子力発電を失って、エネルギー多様性指標は低下（0.76→0.71へ約16%低下）したものの、エネルギー多用性レベルは上昇（41→46へ）した。多様性レベルは諸外国との比較値であるから、日本以外の国々の多様性のレベルが低下したことを示している。

表-14 日本の資源多様性(集中度)

年	2010	2012	2015
偏差	41	45	46

また原油輸入相手国の多様性は原油の輸入が減った影響で、中東原油への傾斜が大きくなったことが影響して指標値は悪化（0.69→0.65）したが、原油輸入相手国の分散レベルは逆に上昇した（52→61）。これは他の国々の悪化の方が大きかったことを示している。悪化のレベルが大きい値であるのは、データの制限のため、この指標のサンプルの数が少なかったことが影響しているものと思われる。データの数が十分大きければ、これほどの落ち込み（日本にとっては上昇）は見られないものと思われる。

又天然ガスの輸入相手国多様性については、事故後東南アジアからの輸入が減少し、中東からの輸入が増加したため、全体としてバランスが良くなり多様性指標は改善した。82%にも達した原油の中東依存度だが、原油輸入の減少で輸入相手国分散度は逆に上昇し、チョークポイントリスクも下がった。

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

表-15 輸入相手国分散度

年	2010	2012	2015
偏差	52	59	61

#### (7) チョークポイントリスク

日本のチョークポイントリスクは、もともと欧州諸国に比べ地政学的に非常に悪い。しかしチョークポイントリスクのレベルは、原発の前後で変わらなかった。これは、原油の中東依存度が上昇したのにも関わらず、原油の輸入量自体が減少したためと見られる。

表-16 チョークポイントリスク

年	2010	2012	2015
偏差値	36	36	36

以 上

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

表-17 エネルギー自給率、再生可能エネルギーのセキュリティレベル比較表

		Self-Sufficiency %						Share of Renewable in Electricity %					
		2010		2012		2015		2010		2012		2015	
1	Australia	250	67	250	65	304	69	0.09	43	0.11	43	0.14	42
2	Austria	35	46	39	46	36	46	0.66	64	0.75	67	0.76	66
3	Belgium	26	45	26	45	20	45	0.07	42	0.13	44	0.21	45
4	Canada	158	58	165	58	174	58	0.61	62	0.63	62	0.63	61
5	Chile	30	45	35	46	36	46	0.40	54	0.36	52	0.44	54
6	Czech Rep.	71	49	77	50	69	49	0.07	42	0.09	42	0.11	41
7	Denmark	120	54	109	53	99	51	0.32	51	0.48	57	0.66	62
8	Estonia	88	51	92	51	102	52	0.08	42	0.12	43	0.14	42
9	Finland	47	47	51	47	55	48	0.30	50	0.41	54	0.44	54
10	France	52	47	53	48	56	48	0.14	45	0.15	44	0.16	43
11	Germany	40	46	39	46	39	46	0.17	46	0.23	47	0.29	48
12	Greece	34	45	39	46	37	46	0.18	46	0.17	45	0.29	48
13	Hungary	43	46	45	47	45	47	0.08	42	0.08	42	0.11	41
14	Iceland	82	50	90	51	88	50	1.00	76	1.00	76	1.00	75
15	Ireland	14	43	10	44	14	44	0.00	39	0.01	39	0.02	38
16	Israel	17	44	13	44	32	46	0.00	39	0.01	39	0.02	38
17	Italy	18	44	22	45	24	45	0.26	49	0.31	50	0.39	52
18	Japan	19	44	6	43	7	43	0.11	43	0.11	43	0.16	43
19	Korea	18	44	18	44	19	44	0.01	40	0.01	39	0.02	38
20	Luxembourg	3	42	3	43	4	43	0.08	42	0.11	43	0.32	49
21	Mexico	128	55	116	53	102	52	0.17	46	0.14	44	0.15	43
22	Netherlands	84	50	82	50	64	48	0.09	43	0.12	43	0.12	41
23	New Zealand	92	51	83	50	80	50	0.73	66	0.72	66	0.80	67
24	Norway	606	103	684	104	703	103	0.96	75	0.98	75	0.98	74
25	Poland	67	49	73	49	71	49	0.07	42	0.10	42	0.14	42
26	Portugal	24	44	22	45	24	45	0.53	59	0.43	55	0.48	55
27	Slovak Rep.	35	46	39	46	40	46	0.22	47	0.19	46	0.23	46
28	Slovenia	51	47	51	47	52	47	0.29	50	0.28	49	0.29	48
29	Spain	27	45	27	45	28	45	0.33	52	0.30	50	0.35	50
30	Sweden	66	49	72	49	75	49	0.55	60	0.59	61	0.63	61
31	Switzerland	48	47	50	47	50	47	0.57	60	0.59	61	0.62	60
32	Turkey	31	45	26	45	25	45	0.26	49	0.27	49	0.32	49
33	UK	73	49	61	48	66	48	0.07	42	0.11	43	0.25	46
34	USA	78	50	84	50	92	51	0.10	43	0.12	43	0.13	42
35	China	89	51	85	50	84	50	0.18	46	0.20	46	0.24	46
36	Brazil	93	51	89	51	94	51	0.85	71	0.82	69	0.74	65
37	India	72	49	68	49	65	48	0.16	45	0.16	45	0.15	43
38	Russian Fed.	186	61	178	59	188	59	0.16	45	0.16	45	0.16	43

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

表-18 エネルギー効率、エネルギー資源多様性のセキュリティレベル比較表

		Energy Efficiency						Resource Diversity					
		2010		2012		2015		2010		2012		2015	
1	Australia	0.059	58	0.057	57	0.055	57	0.68	50	0.69	49	0.70	48
2	Austria	0.071	56	0.066	56	0.066	55	0.78	39	0.78	38	0.78	38
3	Belgium	0.088	53	0.081	53	0.082	52	0.69	49	0.68	50	0.65	54
4	Canada	0.117	48	0.116	47	0.108	47	0.74	43	0.74	43	0.74	43
5	Chile	0.110	49	0.103	49	0.096	49	0.72	45	0.71	47	0.71	46
6	Czech Rep.	0.131	46	0.125	45	0.114	46	0.74	43	0.75	42	0.75	42
7	Denmark	0.048	59	0.042	60	0.039	60	0.58	61	0.59	60	0.64	55
8	Estonia	0.152	42	0.134	44	0.123	45						
9	Finland	0.107	50	0.100	50	0.098	49	0.78	39	0.76	40	0.76	41
10	France	0.061	57	0.057	57	0.053	57	0.72	45	0.73	44	0.70	47
11	Germany	0.067	56	0.062	56	0.060	56	0.78	39	0.77	39	0.78	39
12	Greece	0.065	57	0.068	55	0.067	55						
13	Hungary	0.148	43	0.136	44	0.132	43	0.75	42	0.76	40	0.77	39
14	Iceland	0.191	36	0.191	34	0.188	33	0.37	85	0.36	86	0.39	85
15	Ireland	0.052	59	0.047	59	0.035	61	0.64	54	0.68	50	0.70	48
16	Israel	0.063	57	0.055	58	0.050	58						
17	Italy	0.063	57	0.060	57	0.058	56	0.57	62	0.60	59	0.62	57
18	Japan	0.054	58	0.052	58	0.049	58	0.76	41	0.72	45	0.71	46
19	Korea	0.144	43	0.143	42	0.138	42	0.63	55	0.62	57	0.60	60
20	Luxembourg	0.074	55	0.071	55	0.058	56						
21	Mexico	0.112	49	0.105	49	0.099	49	0.65	53	0.64	54	0.66	53
22	Netherlands	0.079	54	0.073	55	0.065	55	0.58	61	0.58	61	0.58	62
23	New Zealand	0.088	53	0.083	53	0.084	52	0.75	42	0.75	42	0.75	42
24	Norway	0.050	59	0.046	59	0.044	59	0.64	54	0.60	59	0.61	59
25	Poland	0.146	43	0.133	44	0.119	45	0.62	57	0.64	54	0.66	53
26	Portugal	0.060	57	0.073	55	0.071	54	0.68	50	0.68	50	0.65	54
27	Slovak Rep.	0.128	46	0.109	48	0.099	49						
28	Slovenia	0.109	49	0.106	49	0.098	49						
29	Spain	0.064	57	0.062	56	0.056	57	0.71	46	0.67	51	0.61	59
30	Sweden	0.071	56	0.066	56	0.060	56	0.75	42	0.75	42	0.76	41
31	Switzerland	0.036	61	0.033	62	0.030	62	0.78	39	0.78	38	0.79	37
32	Turkey	0.101	51	0.097	50	0.086	51	0.73	44	0.72	45	0.74	43
33	UK	0.057	58	0.052	58	0.047	58	0.65	54	0.68	50	0.73	45
34	USA	0.101	51	0.095	51	0.092	50	0.72	46	0.71	46	0.69	49
35	China	0.251	26	0.236	26	0.209	29	0.50	71	0.50	70	0.52	70
36	Brazil	0.095	52	0.096	51	0.097	49	0.72	45	0.73	44	0.73	44
37	India	0.290	19	0.277	19	0.252	21	0.67	51	0.66	52	0.66	53
38	Russian Fed.	0.275	22	0.256	22	0.265	19	0.65	53	0.66	52	0.67	51

### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

表-19 エネルギー価格、エネルギー資源多様性のセキュリティレベル比較表

		Energy Price Industry 2010=100						CO <sub>2</sub> Emissions MtCO <sub>2</sub>					
		2012		2014		2016		2010		2012		2015	
1	Australia	114	46	105	52	90	54	211	46	202	47	191	47
2	Austria	104	60	99	60	86	59	17	55	15	55	14	55
3	Belgium	107	56	104	54	102	39	23	55	20	55	17	55
4	Canada	109	53	115	41	103	38	110	51	101	51	103	51
5	Chile	..		..		..		25	55	34	54	33	54
6	Czech Rep.	104	60	98	61	84	61	64	53	59	53	54	53
7	Denmark	111	50	105	53	88	57	22	55	15	55	11	55
8	Estonia	115	45	110	47	94	49	15	55	13	55	12	55
9	Finland	117	43	110	46	103	38	32	54	21	55	17	55
10	France	112	49	108	49	100	42	55	53	45	54	33	54
11	Germany	110	51	110	47	96	46	338	39	341	41	323	41
12	Greece	113	47	108	50	95	47	42	54	43	54	31	54
13	Hungary	118	41	112	45	91	53	16	55	15	55	12	55
14	Iceland							0	56	0	56	0	56
15	Ireland	122	36	119	36	92	52	13	55	13	55	12	55
16	Israel	122	36	..		..		41	54	49	54	39	54
17	Italy	122	36	117	38	103	38	136	49	129	50	109	51
18	Japan	122	36	134	18	109	30	491	32	593	30	560	31
19	Korea	122	36	120	35	110	30	286	42	311	42	306	42
20	Luxembourg	122	36	109	48	86	58	1	56	1	56	1	56
21	Mexico	105	58	115	41	96	47	138	49	154	49	143	49
22	Netherlands	100	65	103	55	95	48	61	53	55	53	63	53
23	New Zealand	109	53	99	61	79	68	7	56	8	55	6	55
24	Norway	89	80	89	73	84	61	3	56	2	56	2	55
25	Poland	110	52	99	60	85	60	161	48	157	49	150	49
26	Portugal	116	44	112	44	104	36	15	55	18	55	19	55
27	Slovak Rep.	110	52	101	58	93	50	9	56	8	55	7	55
28	Slovenia	109	53	104	55	85	60	6	56	6	56	5	55
29	Spain	113	48	110	47	91	53	72	53	91	52	81	52
30	Sweden	103	61	99	60	92	52	11	56	7	55	6	55
31	Switzerland	112	49	106	51	98	44	3	56	3	56	3	55
32	Turkey	107	56	100	59	86	58	102	51	115	51	124	50
33	UK	106	58	103	55	92	52	178	47	183	48	123	50
34	USA	105	58	106	51	78	69		56		56		56
35	China								56		56		56
36	Brazil							45	54	55	53	91	52
37	India							790	17	922	15	1067	9
38	Russian Fed.							892	12	947	14	812	20



### 第3章 東日本大震災から5年経過後の日本のセキュリティレベルの変化

表-20 エネルギー輸入相手国多様性、原油チョークポイントリスク指標のセキュリティレベル比較

		Crude Oil Supplier Diversity						Crude Oil's Choke Point Risk					
		2010		2012		2015		2010		2012		2015	
10	France	0.78	41	0.81	36	0.80	37	0.62	54.2	0.58	54.5	0.69	52
11	Germany	0.64	57	0.66	63	0.65	62	0.52	55.8	0.52	55.6	0.53	54.6
17	Italy	0.67	53	0.70	56	0.72	50	0.96	48.4	0.8	50.6	0.53	48.4
18	Japan	0.69	52	0.69	59	0.65	61	1.7	35.6	1.64	35.9	1.68	35.8
19	Korea	0.73	47	0.73	50	0.74	46	1.83	33.5	1.9	31.4	1.89	32.3
29	Spain	0.78	42	0.78	40	0.81	34	0.87	49.8	0.66	53.1	0.39	57
33	UK	0.51	71	0.69	58	0.66	61	0.08	63.4	0.14	62.1	0.09	61.9
34	USA	0.82	38	0.79	38	0.73	49	0.33	59.2	0.45	56.8	0.33	58

## 第4章 エネルギーセキュ リティ指標の集約化

---

第4章では、複数のエネルギーセキュリティ指標を一つにする集約化について研究したところを述べる。化石資源に関し、輸入相手国多様性指標、カントリーリスク、チョークポイントリスクの3つを集約して一つの指標で表した。

---

## 第 4 章 エネルギーセキュリティ指標の集約化

### 4.1 指標集約化のフレームワーク

エネルギーセキュリティ指標の集約化とは、エネルギーセキュリティの複合的な評価を得るために、それぞれ個々に計算された指標を取りまとめることである。これについては本稿 2 章「エネルギーセキュリティの定量化手法」、2.4「指標の統合化の手順」で述べたところである。そこでも述べたように、指標を統合化する手法として、①正規化、②重み付け、③集約化の 3 つがあるが、本稿第 4 章では、第 3 章の「福島原発事故から 8 年経過後の、日本のエネルギー・セキュリティレベルの変化」で使用した指標の集約化を行なった。（表-21 赤枠の指標）

#### 4.1.1 本研究の目的

本研究は、元々の研究目的である「福島原発事故後の日本のエネルギー供給リスクの顕在化と、セキュリティ・レベルの定量分析」の一環である。資源エネルギーの供給リスクは、輸入相手国の集中リスク、および輸入相手国のカントリーリスクに加えて、資源輸送シーレーン上のチョークポイントリスクの 3 つのリスクから成り、これらサプライチェーン上のリスクを一つにした集約リスク指標の開発を目的として本研究を行なった。

本集約化の目的は、一つの定義項目には一つの指標を当てはめる、ためである。一つの定義項目に二つ以上の指標を当てはめると、指標を全体として取りまとめ、正規化した指標に重みを付ける際に、重みはその指標に二重についてしまい、合理的な取りまとめができないためである。また本集約指標によって、従来個別に計算されていた輸入相手国集中リスク、カントリーリスク、チョークポイントリスクを一元的に把握することが可能となり、各国とのエネルギーセキュリティの比較も容易となる。



図-21 集約化するエネルギー資源供給リスク指標

日本のように、エネルギー自給率が極めて低い国では、エネルギーを安定的に確保するために、外国からのエネルギー供給に頼らざるを得ない。特に原油の中東依存度が 83%（2013 年）、シーレーン上のチョークポイントリスク、ホルムズ海峡依存度は 81%

## 第 4 章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

(2013) に達する日本にとって、中東エリアやシーレーンの安定はセキュリティ上非常に重要である。

表-21 集約化した指標 (枠) 出典) 筆者作成

4A's	定義項目	指 標
Availability	① 安定供給	① 発電部門のエネルギー自給率
Accessibility	② エネルギー効率	② 電力部門のエネルギー消費効率
	③ 資源多様性	③ エネルギー資源多様性
		④ 原油輸入相手国多様性
④ 資源への安全なアクセス	⑤ 原油のチョークポイントリスク	
Affordability	⑤ 経済的価格	⑥ 天然ガス輸入単価
Acceptability	⑥ 環境改善	⑦ 発電部門のCO <sub>2</sub> 排出量
	⑦ 原発受容性	⑧ 原発に対する大衆の世論

集約化した指標

### 4.1.2 先行研究

エネルギー安全保障政策のニーズを満たすための多様性に焦点を絞った現実的な定量的研究は、あまり多く行われているとは言い難い。本研究の先行研究として、Lefevre [63] は、エネルギーの不安定さや危険性は資源の偏在、集中による寡占状態から起こり、それによって価格変動リスクが大きくなると指摘、価格リスクを定量化する指標 Energy Security Price Index (ESPI) と、この ESPI に国の政治的リスクを加味する指標を考案した。Lefevre はさらに、国の総一次供給資源に占める資源種ごとに重み付けを行い、総合的エネルギーセキュリティ価格指標を作った。しかし Lefevre の研究は、多様性指標として Herfindahl-Hirschman Index のみを元にしていて、Shannon-Wiener Index への配慮はない。

Neumann [64] は、自由化された欧州の天然ガス市場における供給セキュリティの把握のために、欧州各国のセキュリティ度を Herfindahl-Hirschman Index と、Shannon-Wiener Index を使って分析した。さらに Shannon-Wiener Index を使って、自国の生産資源がある場合のエネルギーセキュリティ指標、Shannon-Wiener-Neumann Index を作成した。

## 第4章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

Jansen [65] らは、長期のエネルギーセキュリティに対する Shannon-Wiener Index により多くの要素を付け加える4つの指標を考案した。しかし Neumann の研究も Jansen らの研究も、もう一方の Herfindahl-Hirschman Index では行われておらず、またシーレーン上のチョークポイントリスクも考慮されていない。本稿では Jansen らが考案した指標を改善し、シーレーン上のチョークポイントリスクを Herfindahl-Hirschman Index と Shannon-Wiener Index に適用させ、化石燃料に対する日本のエネルギーセキュリティの状況を表すとともに、両多様性指標の比較を行った。

Chuang [66] は、台湾のエネルギー供給構造を事例として、輸入エネルギーの多様性指標に着目して Herfindahl-Hirschman Index と Shannon-Wiener Index の不備を改善した異なるエネルギー間の共分散係数を導入する式を提示し、両指標を使用した総合的エネルギーセキュリティ価格指標を作った。しかし Chuang の研究には、チョークポイントリスクへの考慮はない。

### 4.1.3 節立て

以下本稿の節立てを説明する。本稿第4.2節では、輸入相手国多様性指標について、Herfindahl-Hirschman Index と Shannon-Wiener Index の両指標に対してカントリーリスクとチョークポイントリスクを加味する改造を行い、輸入資源の安定供給に対するリスクを、統一的に評価する手法を提案する。第4.3節では、改善された指標を使って算出した結果、特に日本の原油輸入に関するチョークポイントリスクは欧米各国に比べて非常に大きいことを定量的に示し、さらに統合的リスクは経年的に悪化していることを示す。また感度分析によって原油輸入元を、中東から米国などにシフトすることによって、リスクを大きく低減できることも示した。また、エネルギーセキュリティの分野で多く使用される多様性指標 Herfindahl-Hirschman Index と Shannon-Wiener Index にはそれぞれ持っている特性があり、一定の境界値を超えると、両者で異なる結果が出て判断を誤る場合も起こり得ることを、実際の事例にあてはめて示した。第4.5節では本稿の取りまとめを行い、今後の研究の方向性を検討する。

### 4.1.4 調査対象国

調査対象国として原油の場合は OECD 加盟 34 カ国、項目によってはこれに中国、インド、ロシア、ブラジルの Non-OECD 上位 4 カ国を加えた。また LNG の検討対象国は、LNG 輸入上位 10 カ国（日本、韓国、中国、スペイン、台湾、英国、メキシコ、トルコ、イタリア）とした。ただし石炭は、日本の輸入元が豪州、インドネシア、ロシア、カナダ、米国で 98.5% を占め、殆どチョークポイントを通過しないため検討対象から外した。

## 第4章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

対象とした期間は、原油については1975年から2014年までの39年間、天然ガスについては1993年から2014年まで21年間のデータについて計算し分析を行った。

なお使用するデータは、公式なエネルギー機関が定期的に発行し、かつ公的なエネルギー機関や政府機関が政策立案のベースに用いるなど、世界各国で広く周知され利用されていること（普遍性）や、出所を明記することによって誰でもアクセス可能であること（透明性・入手容易性）をデータ選択の基準とした。

### 4.2 多様性指標の集約化

#### 4.2.1 化石資源の集中リスクと多様性指標

生態学的多様性の指標は、Magurran [67]、樋口 [68] によって多数報告されているが、大垣 [69] によると1960年代までに出現した主な多様性指数はSimpsonの $\lambda$ 、Shannon-Wienerの $H'$ などで、ほぼ50年間使われたとのことである。その後1990年代に入って、多様度の評価に分類の情報を組み込み、種をより複雑に分類するWarwic-ClarkeのTaxonomic Distinctness Index（分類学的多様度指数）が現われたとしている。Chang [66]によれば、エネルギーセキュリティで使用される多様性指標は、殆どの場合、Herfindahl-Hirschman Index（HHI：Simpsonの $\lambda$ と同じ）かShannon-Wiener Index（SWI）か、またはこれらの変形指標が使用されている。エネルギーの分野では、生物の群集生態学でみられるような多様な分類は必要がないため、と考えられるが、Jansenら [65]が提示したような資源の埋蔵量を評価する必要がある場合などには、より複雑な多様性指標が必要となる。

Herfindahl-Hirschman IndexとShannon-Wiener Indexは、次の式で表されるが、この2つの指標は本研究の基本となる。本稿においては以下、資源 $f$ の集中を表す式を $HHI_{if}$ 、 $SWI_{if}$ とし、カントリーリスクを加味した指標式は $HHI2_{if}$ 、 $SWI2_{if}$ 、また更にチョークポイントリスクを加味した指標式は $HHI3_{if}$ 、 $SWI3_{if}$ と表す。この $HHI3_{if}$ 、 $SWI3_{if}$ が本稿で提案する統合的なリスク指標（IRI：Integrated Risk Indicator for Energy Security）である。

$$HHI_{if} = \sum_i P_{if}^2 \quad (12)$$

$$SWI_{if} = \sum_i P_{if} \ln P_{if} \quad (13)$$

$i=1, \dots, N$ :  $N$ は輸入国に対する輸出国 $i$ の数

$f=1$  or  $2$ :  $f=1$ は原油、 $f=2$ は天然ガス

$P_{if}$ : 輸出相手国 $i$ の化石資源 $f$ のシェア、 $0 \leq P_{if} \leq 1$

## 第 4 章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

式 (12) , (13) は、多様性が高いほど 0 に近い値を取り、多様性が低くなる程 1 に近づく。従って実際には、上方向は多様性が高く、リスクは低くなるよう上下の調整を行った。以下全ての式で同じである。

ところで、HHI と SWI の 2 つの指標にはそれぞれ異なる特性がある。この特性を考慮せず、漫然と指標を使用すると結果が曖昧なものとなったり、真逆の結果が得られることもある。

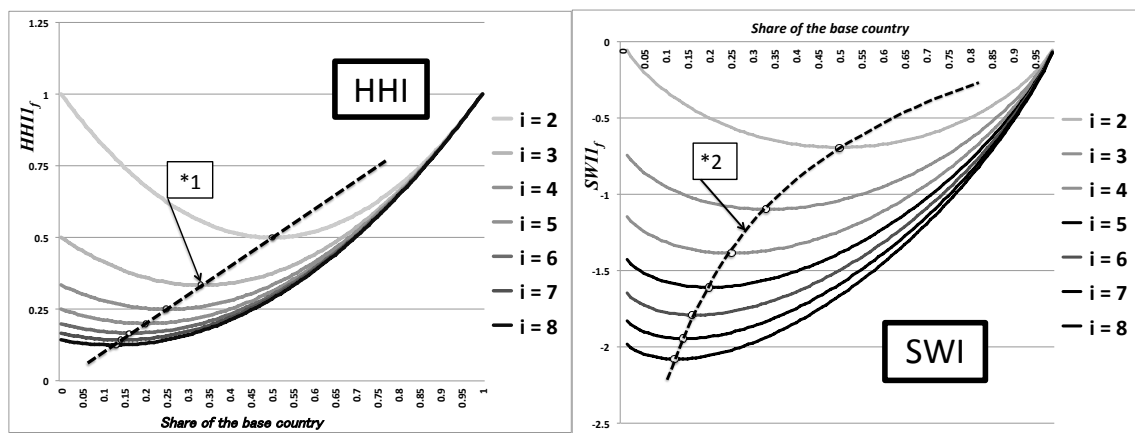


図-22 Herfindahl-Hirschman Index (HHI) と Shannon-Wiener Index (SWI) によって示される低いシェアで表れる指標値の違い

要素の数は  $i$  によって示す。また破線は、それぞれ  $i$  によって定まる極値を結んだ線。出典) 筆者計算

図-22 は一定の同一条件下で 2 つの指標をグラフ化したものである。このグラフに示された通り、HHI に対し SWI は、シェアの低い領域で要素に対して大きく反応する。大垣 [69] はこれを、「SWI では、起こる確率が小さいほど、その事象の情報量は大きい」と表現した。図-22 に示すように、SWI のグラフは極値の左側が跳ね上がった左右非対称を示し、 $i$  の数が多い程、極値はシェアの小さい方向へ、またより深い方向へ移動する。そのため SWI の極値を繋いだ線は曲線を示す。この境界線より左側の領域では、シェアの小さい要素の反応がより大きく出る。一方 HHI では、極値で左右対称を示すため、そのようなことはない。このように SWI と HHI は、それぞれ特性を持った指標であることに注意が必要である。

実際の例として輸入国に対する輸出国の分散度について、HHI と SWI の違いを調査した。データは、1975 年を 1 とする指数によって表されている。

## 第4章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

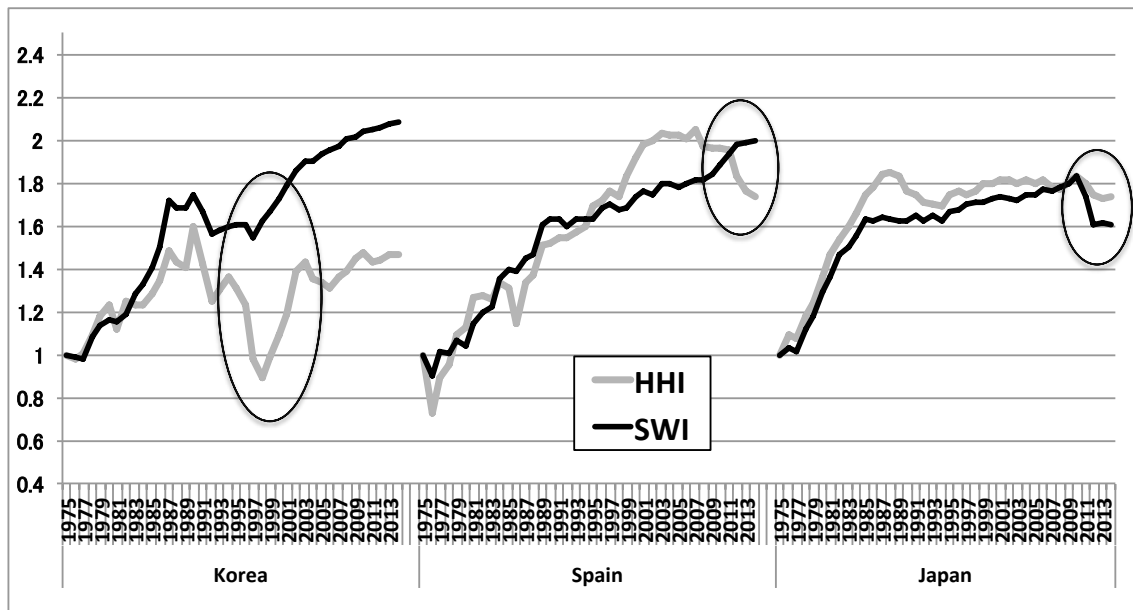


図-23 それぞれの国の原油輸入相手国多様性の HHI と SWI による違い (1975 = 1)  
出典) IEA “Oil Information.”を元に筆者作成

その結果、HHI と SWI が概ね同じような傾向値を示す仏やカナダ、デンマーク、中国、イタリアなどがある一方、図-23 のように韓国やスペインなど数年にわたって異なる傾向を示す国がある。韓国では、1992 年から HHI が大きく落ち込んだのに対し SWI ではそれ程大きく変化が見られない。実際には原油の寡占化 (55%→64%) が進んだため HHI が落ち込む一方、天然ガス・原子力・バイオ・廃棄物等の小さなシェアの資源の落ち込みが少なかったために SWI の変化が押さえられた結果である。またスペインでは、特に 2012 年以降、原油の供給が増加 (45%→54%) したのに対し、太陽光・風力 (1.7%→6.6%)、バイオマス・廃棄物が (4.1%→6.1%) と小さなシェアの資源が増加したことから HHI が減少し、SWI が増加を示した結果である。

日本のケースで SWI が 2012 年以降に落ち込んだのは、東日本大震災直前には 15% を示していた原子力の比率が、2013 年には 0.5%、2014 年には 0% となったことが、SWI の指標で明確に反映されたためである。その間原油の比率は、37% (2010 年) から 39% (2014 年) に僅かに上昇したに過ぎず、HHI の下落も僅かなものに留まった。これらは HHI と SWI の性格の違いをよく表すものである。



## 第 4 章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

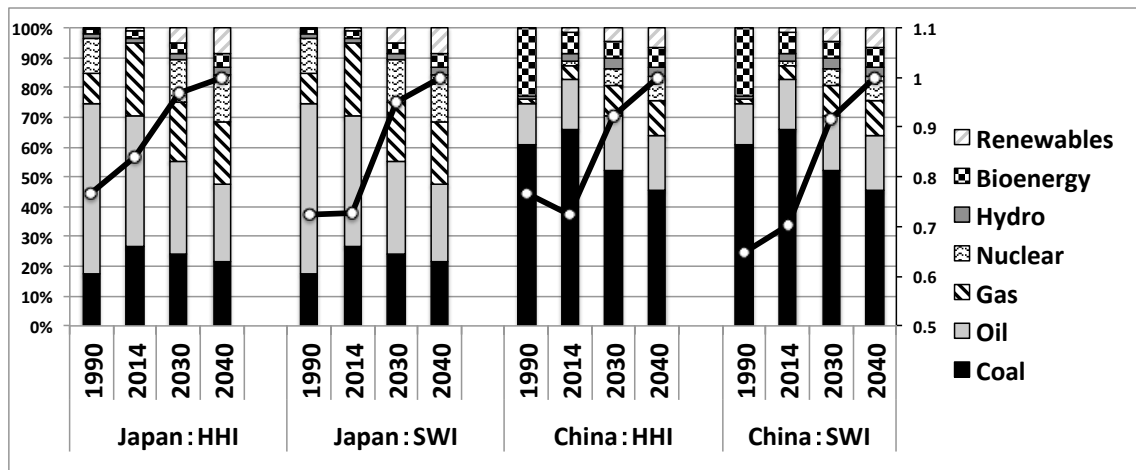


図-24 日本と中国の将来の電源構成が示す HHI と SWI の違い  
出典) IEA “World Energy Outlook 2016.” に基づき筆者計算

図-24 は、日本と中国の 1990 年・2014 年・2030 年・2040 年のエネルギー種（石炭、石油、天然ガスなど図に示す 7 種）の集中リスクを HHI と SWI で表した図である。データは IEA, “World Energy Outlook 2016” における新政策シナリオ（NPS：New Policies Scenario）の総一次エネルギー需要（TPED：Total Primary Energy Demand）構成を用いた。図-22 で示したように、7 区分の場合は、シェア 15% 以下の要素に対して SWI に影響が出る。中国の場合は、石炭と原油以外の 5 種のエネルギーのシェアが 15% 以下となったことが SWI により強く反映され、一方日本は、2014 年に原子力発電が 0 になったことが SWI により強く反映されたものである。従って、要素をどのように分割するかはポイントの一つとなる。エネルギー多様性がエネルギーセキュリティに与える影響について詳細な報告を行った Stirling [70] は、分割によって根本的に異なる結果が得られることがある、と述べている。

### 4.2.2 カントリーリスクの組み込み

$HHI_f$  及び  $SWI_f$  は、化石資源  $f$  の偏在と集中を表すが、政治的に不安定な国が資源を輸出している場合、輸出国の政情安定度をカントリーリスクとして組み込むことが行われた。Lefevre [63] は、資源輸出国の地理的、政治的な安定度を評価する尺度として  $ESMC$  (Energy Security Market Concentration) を定義し、カントリーリスクを組み込んだ構成式を示した。

$$HHI2_f = \sum_i r_{if} P_{if}^2 \quad (14)$$

ここで  $1 \leq r_{if} \leq 3$ 、また  $r_{if}$  は化石資源  $f$  の輸入相手国  $i$  のカントリーリスクを表す。

## 第4章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

一方、Jansen ら [65] は、Shannon-Wiener Index (SWI) に、より多くの要素を付け加える4つの指標を考案した<sup>4)</sup>が、次の式は同論文中第3番目の調整指標で、 $C_i$  (*correction factor*) を輸入相手国のカントリーリスクを組み込んだものである。

$$SWI2_f = - \sum_i r_{if} P_{if} \ln (P_{if}) , 0 \leq P_{if} \leq 1 \quad (15)$$

$P_{if}$  : 輸出相手国*i*の化石資源*f*のシェア

$r_{if}$  : 化石資源*f*の輸出相手国*i*のカントリーリスク

本稿でカントリーリスク度は、OECDの”Country Risk Classification : CRC [71]”を使用した。このCRCは、各国間の貿易上の保険料率を決める目的で設定されており、主要な142カ国に対し0~7の8段階に格付けしている。また日本貿易保険(NEXI)は、225カ国の格付けを行っているが、主要な142カ国の国と地域の格付けはCRCの格付けを使用している[72]。CRCの格付けは、Jansenらが例示した三大格付け会社Moody'sやStandard & Poor'sなどが行っているソブリン格付けとは異なっているとされ[73]、CRCは国が通貨を外貨に交換したり、海外送金を規制するリスク(T&Cリスクと呼ばれる)を加えた上で、国の経済状況、財政状況、政策履行指標及び対外返済実績等や、フォースマジュール(戦争や収用、革命、内乱、洪水や地震などの災害リスク)を織り込み、更に将来の見通し(2016年半ばに採択されたエネルギー市場に影響を与える政策や措置、公表された目標値、意向の全部または一部)なども考慮して決定されている。このCRCをエネルギーセキュリティ指標研究に使用した適用事例としては、村上[62]がある。

### 4.2.3 チョークポイントリスクの組み込み

米国EIAは、ホルムズ海峡やマラッカ海峡など7つの海峡を「チョークポイント」と定義し、それぞれのチョークポイントについて最新情報をレポートしている[75]。日本の外務省は中東エリアを「世界の物流上の戦略的要衝であり、宗教・民族対立やテロ、過激派の問題が存在する。同地域の不安定化は我が国へのエネルギー供給等に大きな影響を及ぼし、安全保障上のリスクである」と分析している[76]。また経済産業省は、資源供給国のリスクの一つとして「資源輸送の途絶リスク」(資源輸送上紛争等の起こりやすいポイント=ホルムズ海峡等をどのくらい経由するか)を挙げ[77]、加えて近時では、南シナ海や東シナ海における中国の海洋活動の拡大が与える影響を憂慮している[78]。チョークポイントリスクは日本のエネルギーセキュリティの上でも非常に重要な要素であるとされている[79]。

## 第4章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

Jansen ら [65] および JRC [58] は、提示した Shannon-Wiener Index の式  $-\sum c_i p_i \ln(p_i)$  の  $c_i$  (*correction factor*) を、「輸入資源の多様度」、「輸入依存度」、「供給国の政治的安定度」、「資源枯渇リスク」、「エネルギー輸送に伴うリスク」とする補正例を示し、Herfindahl-Hirschman Index にも展開した。そこで本稿では次式の通り、チョークポイントリスクを加える補正を行った。

$$HHI3_f = \sum_i r_{if} k_{if} P_{if}^2, \quad 0 \leq P_{if} \leq 1 \quad (16)$$

$$SWI3_f = -\sum_i r_{if} k_{if} P_{if} \ln(P_{if}), \quad 0 \leq P_{if} \leq 1 \quad (17)$$

$P_{if}$  : 輸出相手国  $i$  の化石資源  $f$  のシェア

$r_{if}$  : 化石資源  $f$  の輸出相手国  $i$  のカントリーリスク

$k_{if}$  : 化石資源  $f$  の輸出相手国  $i$  との間のチョークポイントリスク

チョークポイントリスクの展開手法は、チョークポイントを1ヶ所通過するごとに、供給リスクを1レベル上げて評価するという考え方である。この手法は村上ら [62] や、三菱総研 [80] などが使用しており、鳥海ら [81] によって、Lloyd's List Intelligence が提供している実際の船舶動静データに基づく分析との比較評価が行われ、国によっては過大評価があるものの、両者は概ね一致する、とされた。第3章表-8で示した表は、資源輸出国と輸入国間でチョークポイントを何ヶ所通過するかを想定した表である。

### 4.3 エネルギーセキュリティへの適用と分析

資源輸入相手国の集中リスク ( $HHI1$ ) とカントリーリスク ( $HHI2=HHI1$ +カントリーリスク)、さらにシーレーン上のチョークポイントリスク ( $HHI3=HHI1+HHI2$ +チョークポイントリスク) を組み込んだ原油と天然ガスの  $HHI1_f \sim HHI3_f$  及び  $SWI1_f \sim SWI3_f$  の応用について調査した。

#### 4.3.1. 原油輸入相手国多様性への適用

図-25に、原油の輸入相手国に関する  $HHI1_f \sim HHI3_f$  の結果を示す。グラフは1993年から2015年までの23年間の仏、独、伊、日本の経年推移である。この4カ国は、OECD原油輸入上位7カ国の中から選定した。何れのグラフも上方向ほどリスクが少なく、下方ほどリスクが大きい。

## 第4章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

図-25 フランス、ドイツ、イタリア、日本の原油輸入の輸入相手国集中リスク、カントリーリスク、  
 チョークポイントリスクを表す図  
 出典) IEA “Oil Information 2000–2015.”に基づき筆者計算

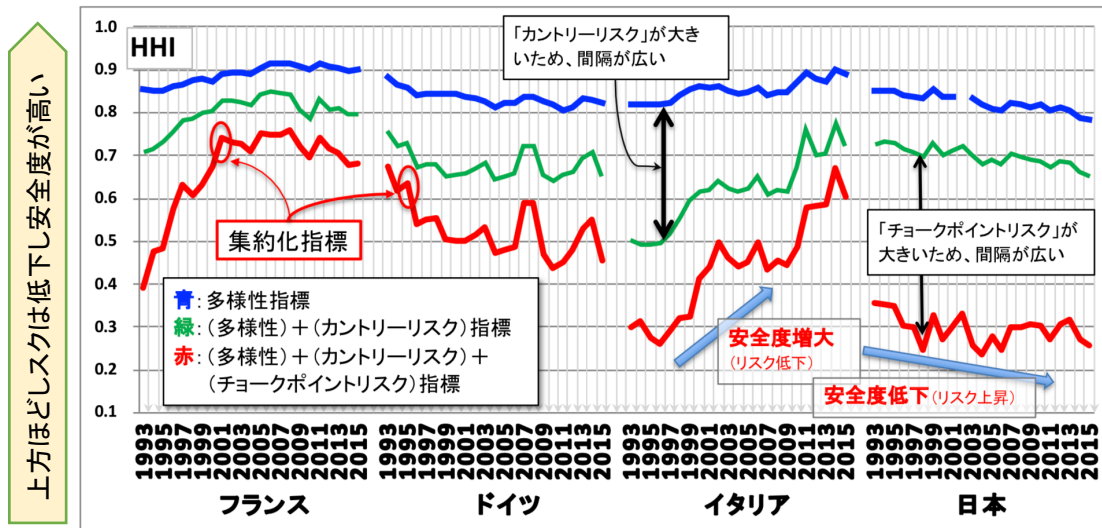


図-25のHHI-1（グラフの青線）は原油の輸入相手国多様性指標で、HHI-2（グラフの緑線）はこの指標にカントリーリスクを乗せたものであり、HHI-3（グラフの赤線）はHHI-2にチョークポイントリスク指標を乗せたものである。したがって集約化した指標HHI-3（赤）が、エネルギーの供給リスクを表していて、産油国の集中リスクとカントリーリスクとチョークポイントリスクを集約した指標となっている。集約化したリスクは、輸入相手国集中リスク（青色）およびカントリーリスク（緑色）とは概ね同じ傾向を示していることが理解される。カントリーリスクが少なく、またチョークポイントも少ない輸入相手国から資源を輸入すれば、HHI-3（赤）はHHI-1（青）に近づくことになる。逆にそれぞれの折れ線が離れているということは、それぞれのリスクが大きいことを表している。このようにしてエネルギー供給リスク指標を集約化することは可能であるが、欠点としては、集約化してしまうとその間のリスクが隠れてしまうので、なぜそうなったかを解釈することが難しくなることである。

図-25でフランスは、4カ国の中で、集中リスク、カントリーリスク、チョークポイントリスクのいずれのリスクも比較的少ない。特にチョークポイントリスクの2010年にかけての改善が大きく現れている。イタリアは、1990年から2000年初にかけて、カントリーリスクの高いリビア（CR=7）から多量（1996：33%）の原油を輸入していたことがHHI<sub>2</sub>の低い原因で、それが2011年にかけて減少（7%）したことが、リスクの改善に寄

## 第4章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

与した。これに比べ日本は、特にチョークポイントリスク ( $HHI3_f$ ) が4カ国の中で最も大きく、また  $HHI1_f$  が徐々に減少している原因は、中東地域からの原油輸入が8割を越し、更に増大の傾向を示しているためである。また、独の  $HHI2_f$  と  $HHI3_f$  が大きく変化しているのは、ロシアからの輸入の増大 (1993: 17% → 2015: 36%) とロシアのカントリーリスクの減少 (CR=7 → 4) にある。

次に原油の  $SWI1_f \sim SWI3_f$  であるが、例えば2015年の日本の場合、使用したIEAのデータでは、シェアが約6%以下の国が17カ国中12カ国あり、これらの国は輸入に対してリスクの減少する方向に反応する。その結果、 $HHI1_f \sim HHI3_f$  で示した図とは差異のある結果となった (図は省略した) が、その国の状況を概観するような場合には、境界値より低いシェアの国々をカットするか、指標として Herfindahl-Hirschman Index を使用するほうが全体を見ることができる。Coq [82] は、輸入相手国の大きなシェアを占める国々が安全保障上の問題を引き起こす可能性が大きいと思われるため、そのような場合には、Herfindahl-Hirschman Index を使用するほうがより適切である、と述べている。

### 4.3.2. 天然ガス輸入相手国多様性への適用

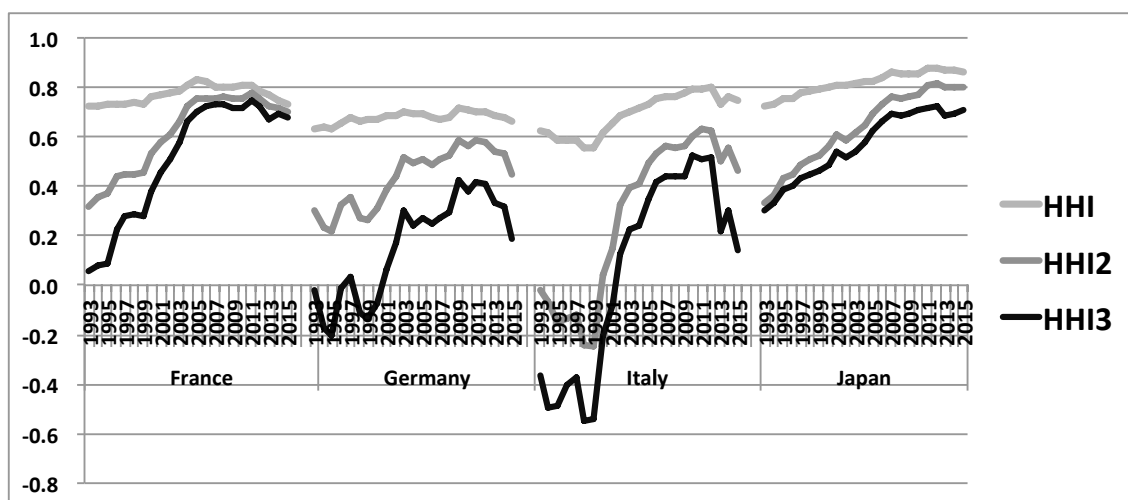


図-26 フランス、ドイツ、イタリア、日本の天然ガス輸入の輸入相手国集中リスク、カントリーリスク、チョークポイントリスクを表す図

出典) IEA “Natural Gas Information 2000–2015.”に基づき筆者計算

天然ガスの全体傾向を  $HHI1_f \sim HHI3_f$  によって示したものが図-26 である。

仏は、1990年代初めにはロシア (36% : CR=7) やアルジェリア (29% : CR=6) などカントリーリスクが高い国から大半 (65%) の天然ガスの輸入を行っていたことがリスクの高かった原因である。しかし2000年中頃にはノルウェー (23% : CR=0) やオランダ (18% : CR=0) にも輸入先を分散したことにより、指標値が大きく改善した。特徴的な

## 第 4 章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

動きを示すイタリアだが、1990年代までは、アルジェリアとロシアの輸入で93%まで寡占化が進んでいたこととその2カ国はカントリーリスクが高かったことが  $HHI2_f$ 、 $HHI3_f$  が低かった原因である。

日本については1990年台の初め頃からインドネシアやマレーシア、ブルネイなどの東南アジアなどの国から広くLNGを買い付け、チョークポイントリスクの無いアジア地域からの輸入がその殆ど（90%：1988年）を占めていたが、2010年頃を境にアジア、特にインドネシア産の天然ガスが減少し、中東産の天然ガスと拮抗し始めた。さらに豪州やカタール、UAE、ロシアなど広くLNGを買い付けたため、リスクが少ない状態となっている。

### 4.4 集約化指標の応用

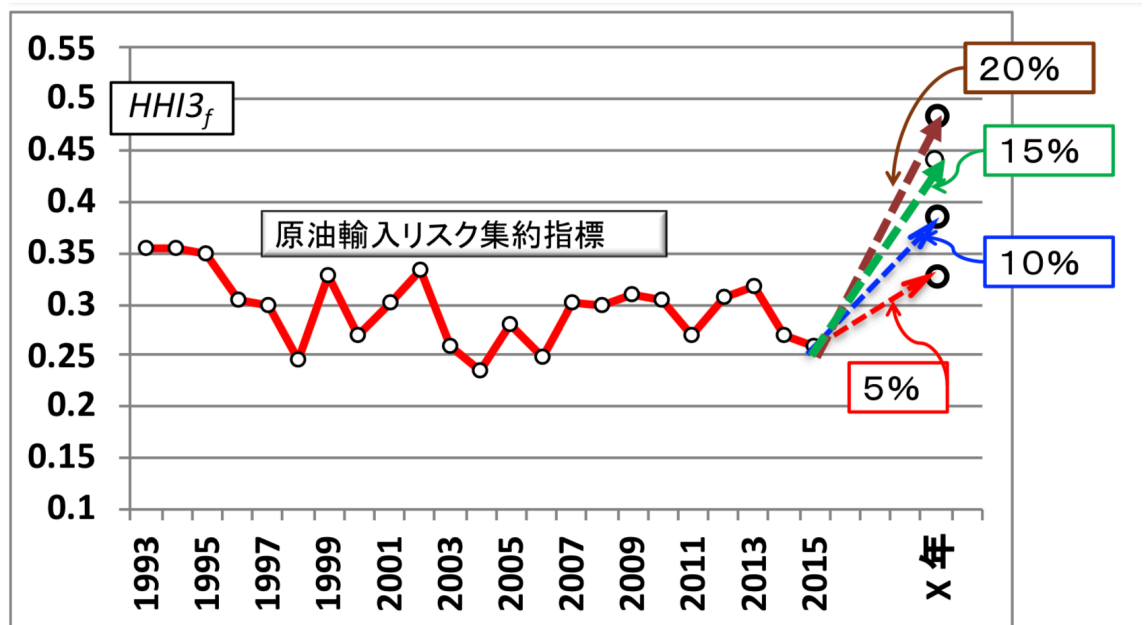


図-27 日本の原油輸入相手国を中東から米国へシフトした場合の  $HHI3_f$  リスクレベルの低減効果（シフト量5%~20%）  
出典）IEA “Oil information 2000-2015.”に基づき筆者計算

図-27は  $HHI3_f$  を応用して、日本の原油輸入元を中東諸国（イラン、イラク、クウェイト、オマーン、カタール、サウジ、UAE）から米国に5%刻みで20%までシフトさせた場合の感度分析の結果を示す。数量のシフト以外の条件を変えなかった場合、 $HHI3_f$  は26%から87%まで改善する。米国のシェールオイルは、2009年の25万BBL/日から2015

## 第4章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

年の489万BBL/日に20倍近くの伸びを示し、米国は2015年末、40年ぶりに原油輸出禁止措置を解除した[83]。なお、イタリアのグラフは日本との比較のために示した。

### 4.5 まとめ・集約化指標と単純指標

エネルギーセキュリティの定量分析では、エネルギーセキュリティ指標を総合的に評価するには、従来、それぞれバラバラに異なった指標の単位を統合する手法が必要であった。例えば村上ら [62] は、レダーチャートで表わし、山田 [60] は統計的な処理を行って総合的なエネルギーセキュリティ度を分析した。これに対して、本研究では、原油及び天然ガス資源の集中のリスク、カントリーリスク、チョークポイントリスクの3つのリスクを統合的に見ることが出来るものである。本研究により、エネルギーミックスの将来像に対するリスクの度合いや、輸入相手国をリスクの少ない他の国にシフトさせた場合の、エネルギーセキュリティの変化を、簡便に評価する可能性を示した。

また、HHI-1～HHI-3それぞれの国との比較した偏差値を取ったところ次の表-24を得た。本表によると、例えば日本の1995年のHHI-1（原油輸入相手国多様性指標）は偏差値53.1であるから、他国との相対的な位置は若干の安全サイドであるが、年を経るごとに多様性度は悪化し、2015年には他国との相対的な位置も低下した。2015年の日本のHHI-2は38.6であるから、カントリーリスクの良くない国から輸入していることがわかる。さらにHHI-3チョークポイントリスクについては、日本はさらに悪化し他国との相対的な位置関係も悪化し、偏差値は30.8を示している。日本はチョークポイントリスクを大きく受けていることが理解される。

## 第 4 章 エネルギーセキュリティ指標の統合化

表-22 HHI-1～HHI-3 のデータを各国との比較による偏差値として計算した表

HHI-1		1995	2000	2005	2010	2012	2015
	France	53.4	54.1	56.7	56.7	62.5	60.4
	Germany	53.9	51.5	50.6	49.8	44.0	48.8
	Italy	50.0	53.1	52.6	54.2	56.5	58.8
	Japan	53.1	50.8	49.8	49.7	44.1	42.8
	Korea	51.0	53.7	53.0	51.7	49.8	53.3
	Spain	57.3	57.0	56.9	56.9	60.6	62.0
	UK	24.3	24.0	24.4	24.6	29.7	31.3
	USA	57.0	55.8	56.1	56.3	52.8	42.6
HHI-2		1995	2000	2005	2010	2012	2015
	France	56.0	62.3	61.8	58.9	64.5	62.8
	Germany	55.8	44.7	45.7	43.3	36.7	38.4
	Italy	30.4	40.1	43.2	46.7	43.9	50.4
	Japan	55.8	50.2	49.1	48.4	41.0	38.6
	Korea	49.5	55.9	55.2	53.0	49.9	53.8
	Spain	55.2	56.0	57.8	58.1	59.9	65.5
	UK	36.8	31.1	29.0	29.2	42.3	39.3
	USA	60.5	59.7	58.2	62.5	61.8	51.1
HHI-3		1995	2000	2005	2010	2012	2015
	France	50.0	61.6	63.3	61.6	60.1	57.6
	Germany	61.0	48.4	46.0	43.7	43.8	43.3
	Italy	34.6	41.6	44.4	47.2	50.8	52.5
	Japan	40.0	30.7	33.4	34.5	31.8	30.8
	Korea	41.9	47.5	47.0	42.8	39.1	40.7
	Spain	53.8	55.9	59.4	54.7	57.1	62.1
	UK	52.8	51.0	43.7	48.2	56.3	55.2
	USA	65.9	63.3	62.8	67.3	61.0	57.8

一方本研究では、エネルギー多様性を表すために最も多く使われる2つの指標、SWIとHHIにはそれぞれ特性があり、同じデータを使って多様度を算出しても、異なる結果を示すことがあることを実際の事例で述べた。SWIでは、限界値よりレアな要素、例えばシェアの小さいエネルギー種（日本の太陽光や風力、地熱やバイオマス等）や、東日本大震災による日本の原子力発電の停止動向などをよりよく表し、一方国全体のセキュリティ度合いを表す場合にはHHIの方が優れていることを示した。しかし本稿では、原油・天然ガス・石炭等の化石資源リソースを全て包含して一元的に示す指標にまでは至っていない。今後の研究で示したい。



## 第5章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

---

第5章では、福島原子力発電所の事故前後の民衆の、原発に対する受容性を分析した。

---

### 第5章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

#### 5.1 原発の社会受容性

社会受容性とは、企業活動や新しい施設、新しい技術などが地域社会や国民の理解を得て受け入れられることをいう。原子力の社会受容性は、福島原子力発電所事故を契機として、より注目されるようになった（下郡 [105]）。本研究で調査した結果、日本人の原子力発電に対する世論は、原発事故直後から「反対」に変化し、徐々に増大し、6ヶ月後には世論の多数を占めるようになった。5年経過後の現在においてもこの増加傾向は変わらず、いまだに徐々に増加している。またその再稼働に反対する原発の差し止めを要求する訴訟は現在（2019年9月）49件行われている。震災前に53基あった日本の原発は、8年経った現在の稼働数は7基、また再稼働が許可されたにも関わらず稼働状態にない原発は6基、廃炉が決まった原発は24基、安全審査を受けていない原発は9基ある。本論文では、原子力発電に対する肯定・否定の一般民衆の受容性をエネルギーセキュリティの一つの重要な指標と考えて指標化を試みた。

その理由として、第2章2.1.7「原発の受容性をエネルギーセキュリティの定義項目に加える」で、2011年6月に行われたイタリアの国民投票と、2017年11月に台湾で行われた国民投票の2つの例を挙げた。原発に対するイタリアの2度の国民投票が脱原発への政策転換を選択し、一方、原発の廃止法案に反対する台湾の国民投票が、原発を選択する民意が示された。このように、原発に対する一般大衆の民意は、エネルギーセキュリティ政策上の重要なファクターとなっているのである。日本が原子力の利用を継続推進するためには、国の原子力政策や事業者による原子力発電所の安全対策などについて、広く国民の理解を得ることが必要である。

#### 5.2 原発の受容性に関する既往の研究

福島原発事故の世論調査に関する既往の研究を以下に概観する。

Wang et al. [36] の研究では、福島原発事故の影響が見られるものの、エネルギーセキュリティ及び環境対応の観点から、中国の世論は原子力開発を条件付きで支援すると結論づけた。Roh et al. [37] は、福島以後の韓国の世論について調査した。それによると韓国では、福島以後世論はリスクとベネフィットの認識が低下したが、2005年から2010年にかけてUAEへの韓国原子炉の輸出に成功しており、世論は原発への支持が急増していた。従って安全性の向上と原発輸出によって世論を回復すべきであると述べている。

## 第5章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

木村ら [38] の研究によると、人々が原子力の社会的受容性を判断する際に、原子力に関する知識を獲得することによって、判断に寄与する要因の影響力が変化すると考えられるが、居住地域が異なると、その影響力の変化も異なったものになることが示唆される、として、回答者の知識量が増加することによって、電力消費地域では「原子力発電の有用性」因子の影響力が増大し、「原子力技術に対するリスク認知」因子の影響力が減少するのに対し、電源地域では「原子力発電の有用性」因子の影響力が減少し、「原子力技術に対するリスク認知」因子の影響力が増大することが期待され、電力消費地域と電源地域とは、その変化が大きく異なっていた、と指摘した。

丸山 [39] の研究は、原子力発電に対する公衆の態度について、男女差という観点を中心にアプローチした結果、男性はプラス方向にはどちらかということ変化しにくい、マイナスの情報により否定方向へ変化しやすいこと、逆に女性は、プラスの情報の呈示により肯定方向へは態度が変わりやすいが、マイナス方向へはあまり変化しない傾向があることが判明したとしている。

上記の文献の調査及び岩井 [40] の研究によると、原子力発電への反対意識は、女性でより強く、若年層の男性や保守内閣（自民党）支持層で弱く、この点はチェルノブイリ事故後の結果と一致している。原発から 70km の範囲に居住している場合には、原発の近くに住んでいるほど原発事故が発生するリスクをより高く認知していた。また、原子力政策に対する原発からの距離と地震発生リスク認知には、交互作用効果が存在しており、地震発生リスク認知が低い場合には、原発近くに住む人ほど原子炉廃止への支持が少ないことが明らかとなったとした。

### 5.3 受容性の評価指標の位置付け

本稿第2章「エネルギーセキュリティの定量化手法」2.1.7で示したように、本稿の主題である福島原発事故後の日本のエネルギーセキュリティレベルを最もよく表す6個の定義に、さらに「原子力発電に対する一般大衆の受容性」を本稿7つ目の定義要素に加えた。そしてこの定義要素にリンクする評価指標として「原発の受容性指標」を付け加えた。（表-23 参照） この指標は第2章2.2.1で示す、APERC（Asia Pacific Energy Research Centre） [49]の4A's（Availability、Accessibility、Affordability、Acceptability）のうち、Acceptabilityにより強く属すると考えられる。

次の表-23は、本稿の原発受容性指標が全体の指標の中で示す位置付けを表している。

## 第 5 章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

表- 23 原発受容性指標の全体指標に対する位置付け

4A's	定義項目	指標	単位	指標の定義付け
Availability	安定供給	① 総エネルギーに対するエネルギー自給率	%	一次総供給エネルギーに占める自国の生産エネルギーの比
		② 電力部門におけるエネルギー自給率	%	総発電量に占める非火力（水力、太陽光、風力、木質、廃棄物）発電量の比
Accessibility	エネルギー効率	③ エネルギー消費効率	KWh/GDP <sub>2010年US\$</sub>	2010年US\$レートによる実質GDPあたりのエネルギー消費量（電力部門）
	資源多様化	④ エネルギー資源多様性（Herfindahl-Hirschman 指標）	Herfindahl-Hirschman 指標	エネルギー資源（化石燃料、原子力、水力、地熱、太陽光、風力）の多様性度
		⑤ 原油・天然ガス輸入相手国多様性（カントリーリスクを見込む）	Herfindahl-Hirschman 指標	原油の輸入相手国の多様性度（カントリーリスクを見込む）
資源への安全なアクセス	⑥ 原油のチョークポイントリスク指標	%	チョークポイントを通過する毎に計上する原油量の総量と、原油の総輸入量に対する割合	
Affordability	経済的価格	⑦ エネルギー価格	US\$/百万BTU	天然ガスの輸入単価
Acceptability	環境改善	⑧ CO <sub>2</sub> 排出量	CO <sub>2</sub> 百万トン	発電部門のCO <sub>2</sub> 排出量
	原発受容性	⑨ 原発に対する大衆の世論	%	アンケート総数対し「今後原発は減ずべき」と回答した数の割合

### 5.4 調査の方法

原子力発電に対する大衆の受容を表す指標としては、原発事故前後の変化を捉えた Win Gallup [106] の調査がある。この調査は、世界 47 カ国の人々 34122 人に対して東日本大震災の直後である 2011 年 3 月 20 日から 4 月 7 日の間に行った世論調査 “Global Barometer of Views on Nuclear Energy After Japan Earthquake” という調査である。

この調査における原発への賛否（表-24）を座標とし、事故前後の座標の変化を矢印の始点と終点で表し、矢印の位置、方向と長さによって当該国のステークホルダーの原発に対する受容性を表す指標として分析を行った。図-28。多くの矢印が左上から右下に流れているが、これは原子力発電に対して、否定的な意見が多くなったことを表している。矢印の始点は、福島事故以前の当該国の意見で、矢印の先端は、福島原発事故後の当該国の大衆の意見を表している。矢印の長さは、賛否の意見が大きく変化したことを表している。

第 5 章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

5.5 Win Gallup の原発に対する世界同時調査の視覚化（グラフ化）と指標化

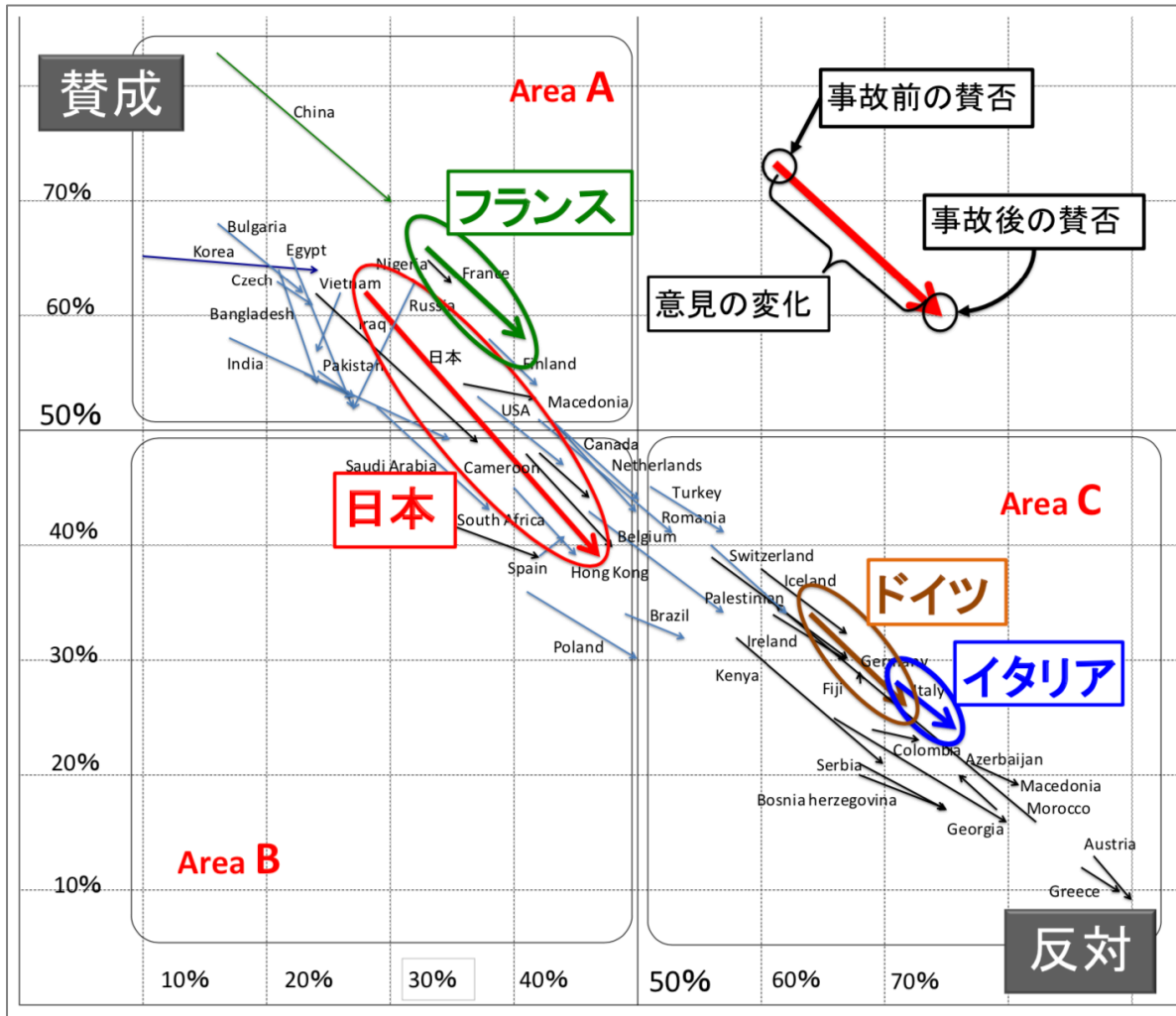


図-28 福島事故前後の原子力発電に対する各国の反応 出典)Win Gallup 世界同時調査のデータを筆者がグラフ化した

前項 5-4 で述べた方法によって、グラフにプロットしたものが 図-28 である。

また、この原発に対する賛成と反対の意見を指標化する方法は、以下の通りである。

- ① Win Gallup のデータ (表-24) の (賛成数) - (反対数) = (ネット支持数) を算出した。この「ネット支持数」を当該国の指標値とした。
- ② 指標値は T-Scores 法によって正規化を行う。正規化式は以下の通り。

$$\text{T-Scores 法による正規化式} = (S_i - \sum_i S_i / D) / \sigma_i * 10 + 50 \quad (18)$$

- ③ 正規化した指標をエネルギーセキュリティ指標とした。
- ④ ただし、後でこの T-Scores 法は修正が必要であることが分かった。第 7 章で詳しく記載する。

## 第 5 章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

表-24 震災の前後における原発に対する意識について 出典) Win-Gallup International : GLOBAL SNAP POLL ON EARTHQUAKE IN JAPAN AND ITS IMPACT ON VIEWS ABOUT NUCLEAR ENERGY (March 21-April 10, 2011)

	全対象国	震災前				震災後			
		34122	57	32	25	11	49	43	6
		賛成 (1)	反対 (2)	ネット 支持 (1)-(2)	わから ない	賛成 (1)	反対 (2)	ネット 支持 (1)-(2)	わから ない
1 Austria	500	13	87	-74	0	9	90	-81	1
2 Azerbaijan	522	17	79	-61	4	20	76	-55	4
3 Bangladesh	920	64	21	43	15	51	34	18	15
4 Belgium	500	43	46	-3	11	34	57	-23	9
5 Bosnia and Herze	500	20	68	-48	11	17	75	-58	8
6 Brazil	1001	34	49	-14	17	32	54	-22	14
7 Bulgaria	996	68	16	52	16	62	23	39	16
8 Cameroon	501	48	42	6	9	44	46	-2	10
9 Canada	1058	51	43	8	5	43	50	-7	7
10 China	501	83	16	67	0	70	30	40	0
11 Colombia	500	24	69	-45	7	23	73	-50	4
12 Czech Republic	500	63	31	32	7	61	34	27	5
13 Egypt	200	65	22	43	13	52	37	15	10
14 Fiji	555	28	68	-40	4	29	68	-38	3
15 Finland	503	58	38	20	4	52	44	8	4
16 France	1192	66	33	34	1	58	41	16	1
17 Georgia	500	26	66	-42	9	16	80	-64	4
18 Germany	501	34	64	-30	2	26	72	-46	1
19 Greece	500	12	86	-74	2	10	89	-80	1
20 HongKong	300	48	41	7	12	40	48	-8	12
21 Iceland	819	38	60	-22	2	32	67	-35	1
22 India	1084	58	17	41	25	49	35	13	16
23 Iraq	600	62	24	38	13	49	37	12	14
24 Ireland	1001	34	61	-27	5	30	67	-37	4
25 Italy	1000	28	71	-43	2	24	75	-51	1
26 Japan	1000	62	28	34	10	39	47	-7	14
27 Kenya	501	32	58	-26	10	21	70	-48	9
28 Korea, South	1031	65	10	54	25	64	24	41	12
29 Latvia	503	84	36	18	9	53	42	11	6
30 Macedonia	500	21	67	-46	11	19	71	-52	10
31 Morocco	500	16	82	-66	2	35	61	-27	4
32 Netherlands	501	51	43	8	6	44	50	-7	6
33 Nigeria	562	65	33	32	3	63	35	28	2
34 Pakistan	2716	55	24	31	20	53	27	26	20
35 Palestinian territo	816	39	56	-17	5	30	67	-38	3
36 Poland	531	36	41	-5	22	30	50	-19	20
37 Romania	500	51	42	10	7	41	53	-12	6
38 Russia	1500	63	32	31	4	52	27	25	21
39 Saudi Arabia	527	52	39	13	9	43	48	-6	9
40 Serbia	1125	21	68	-47	11	17	75	-58	8
41 South Africa	500	45	40	6	15	49	45	4	6
42 Spain	514	39	42	-4	19	41	44	-4	15
43 Switzerland	511	40	56	-16	4	34	62	-28	4
44 Tunisia	1009	44	29	15	26	39	41	-3	20
45 Turkey	1021	45	51	-6	5	41	57	-16	3
46 United States	500	53	37	16	10	47	44	3	9
47 Vietnam	500	62	26	35	12	57	34	23	10

## 第 5 章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

この調査の質問は 8 項目あるが、全世界に共通の質問として「あなたは現在、世界のエネルギー供給源の一つとして、原子力を使用することについて賛成か反対か」を問うものである。調査結果の概要として、「日本の震災の認知率は、対象国全体で 91%で、福島第一原子力発電所の放射能漏れについても、81%が認知している。」また原子力発電に対して「賛成」とする意見は、震災以前の 57% から震災後は 49% に減少し、「反対」は 32% から 43% に増加した。表中、支持率（賛成-反対の割合）でみると 25% から 6%へ減少しているが、しかし「賛成」は 47 カ国で 49%と、「反対」の 43%を若干上回っていることは注目に値する結果である。また、震災後、原子力発電に対して「賛成」とする意見が最も大きく落ちこんだのは日本で、支持率は 34% から ▲7% へ 41 ポイント減少した。

図-28 中矢印は、韓国のような一部の国を除き、全般に左上から右下に向かって流れており、原発に対する向否定の反応が見られる。このように矢印ベクトルの方向は、賛成・反対の意向を示し、ベクトルの長さは姿勢変化の強さを示している。矢印の長さが最も長い国は日本である。日本は、震災前の賛成から、大きく反対に意見が変わったことを示している。

この図上で area A にある国はフランス、中国、韓国、フィンランド、ブルガリア、チェコ、ベトナム、パキスタン、インド、米国等で、原発に対して過半数が肯定的な意見を持っている。area C にある国々はオーストリア、ギリシア、コロンビア、イタリア、ドイツ等原発に否定的な意見の国々である。特にイタリアは反対が 75%に達し、また変化率も 8%と少なく“安定した”原発反対国と言える。イタリアはチェルノブイリ原発事故後に国民投票で脱原発を決定していたが、2009 年にはこれを覆し原発再開の法案を可決していた。しかし福島原発事故直後の 6 月に実施した国民投票によって、94%もの反対票が集まり、再び原発再開を断念した。また area B の国々は南アフリカ、チュニジア、ポーランド、カナダ、カメルーン等賛否相拮抗している国々である。

その中で area B から area C へと大きく（変化率 20%）原発反対へ舵を切ったのはベルギーである。ベルギーは 2011 年 12 月に発足した新政権が、2025 年までに国内 7 基の原発を閉鎖する決定を行った。日本も元々はこの原発肯定の area A の中に入っていたが、原発事故後は原発に反対する意見が多く見られるようになり、矢印の終点は area C に近い area B に留まった。また始点が area C から始まる国 17 国のうち 14 カ国（図中黒色の矢印）が原発施設を持っていない国々であることから、本調査で見られる意見が概ねその国の原発受容性を表しているとみて良いと思われる。

## 第5章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

Ipsos MORI [107] は1998年から英国における原子力発電所の建て替えへの支持率を世論調査しており、福島原発事故後の2011年6月とそれから半年後の2011年12月にその意識調査を行っている。この調査によると、事故直後の世論調査では大きく反原発に傾いていたが、事故9ヶ月後には支持率は概ね原発事故以前の水準に戻ったと報告している。

### 5.6 日本の世論調査

一方、日本の原子力発電に関する世論調査については、1970年以前から原発事後の直近に至るまで継続して世論調査行われたことは数点しかない。そのため、各地・各種に行われた原子力発電に関する世論調査のうち、「原子力発電所を今後増やすべきか、それとも減らすべきか」という単純な質問に関する「yes, no, どちらでもない」の3つの回答を要求するものに絞った調査対象とした。調査は、内閣府「原子力の平和利用に関する世論調査」や毎日新聞社、朝日新聞社、読売新聞社、時事通信社、エネルギー総合工学研究「エネルギーに関する公衆の意識調査」、日本リサーチセンター、NHK「原発とエネルギーに関する世論調査」、日本原子力文化財団、国立環境研究所などが行ったものである。各社や調査機関の世論調査の結果には若干の違いが見られるが、本稿で取り上げた争点については、各社、新聞社、調査機関による違いはほとんどみられなかった。

またこの調査に対する結果を図-22に示す。横軸は西暦年で1968年から2018年までの期間の調査結果を表す。横軸は、調査が行われた年月を表すため、等間隔にはならない。やはり2011年の福島原発事故の後には件数が多いが、2017年以降はほとんど行われていない。図の色分けの意味は、紫色：(原発を)増加する乃至は徐々に増加する。桃色：現状を維持する。空色：直ちに、あるいは将来原発を無くす。緑色：どちらとも言えない。

(岩井 [120]) は、1978年から2013年までの間で、原発を「増やす」、「現状維持」、「減らす」、「わからない・無回答」の調査を行い、同様の図を書いているが、やはり「減らす」の回答が増加していて同じ傾向を示している。



第5章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

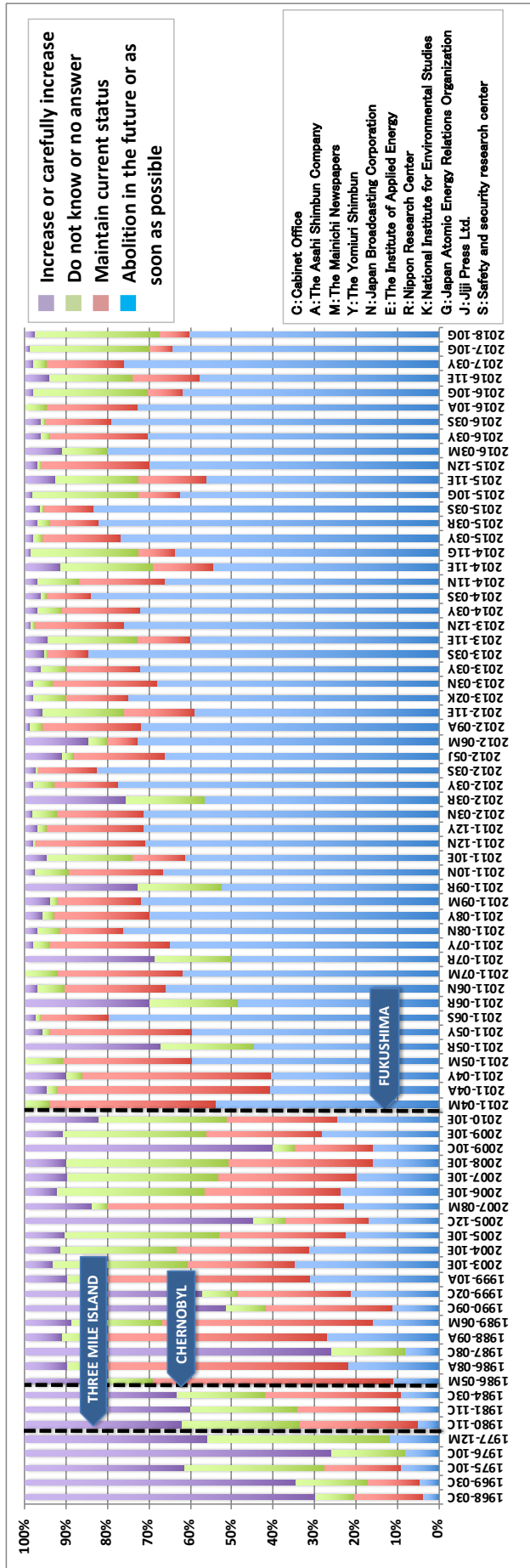


図-29 福島事故前後('68～'17)の原子力発電に対する日本人の態度

## 第 5 章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

表-25 日本人の原子力発電に対する意見調査機関とその方法

	Research Organization	Survey name	Date	Sampling/ Survey	Population			Abbreviation		
1	Cabinet Office	P.O.P. on the peaceful use of nuclear energy	1968/03	SRS/IS□	N, M&W, 20	2,438	81.3	1968-03C		
		P.O.P. on the peaceful use of nuclear energy	1969/03	SRS/IS	N, M&W, 20	2,538	84.6	1969-03C		
		P.O.P. on Poll on Nuclear Power Generation	1975/10	SRS/IS	N, M&W, 20	2,467	82.2	1975-10C		
		P.O.P. on science & technology & nuclear	1976/10	SRS/IS	N, M&W, 20	3,972	79.4	1976-10C		
		P.O.P. on energy saving	1980/11	SRS/IS	N, M&W, 20	4,113	82.3	1980-11C		
		P.O.P. on energy saving	1981/11	SRS/IS	N, M&W, 20	4,007	80.1	1981-11C		
		P.O.P. on nuclear power	1984/03	SRS/IS	N, M&W, 20	2,252	75.1	1984-03C		
		P.O.P. on Poll on Nuclear Power	1987/08	SRS/IS	N, M&W, 20	2,370	79.0	1987-08C		
		P.O.P. on Poll on Nuclear Power	1990/09	SRS/IS	N, M&W, 20	3,751	75.0	1990-09C		
		P.O.P. on Poll on Energy	1999/02	SRS/IS	N, M&W, 20	2,125	70.8	1999-02C		
		P.O.P. on Poll on Energy	2005/12	SRS/IS	N, M&W, 20	1,712	57.1	2005-12C		
		Special P.O.P. on nuclear power	2009/10	SRS/IS	N, M&W, 20	1,850	61.7	2009-10C		
		2	The Mainichi Newspapers	Consciousness survey of living	1977/12	SRS/IS	N, M&W, 20	2,257	75.2	1977-12M
				Investigation of current affairs	1986/05	SRS/IS	N, M&W, 20	2,252	75.0	1986-05M
Nuclear problem investigation	1989/06			SRS/IS	N, M&W, 20	3,030	73.0	1989-06M		
Periodic poll	1989/08			RDS/PS	N, M&W, 20	1,165		2007-08M		
Periodic poll	2011/04			RDS/PS	N, M&W, 20	1,507	62.0	2011-04M		
Periodic poll	2011/05			RDS/PS	N, M&W, 20	1,043	69.0	2011-05M		
Periodic poll	2011/07			RDS/PS	N, M&W, 20	1,129	73.0	2011-07M		
Investigation of current affairs	2011/09			SRS/IS	N, M&W, 20	2,413	55.0	2011-09M		
Periodic poll	2012/06			RDS/PS	N, M&W, 20	1,015	62.0	2012-06M		
Periodic poll	2016/03			RDS/PS	N, M&W, 20	1,017	59.0	2016-03M		
3	The Institute of Applied Energy	Public Attitude Survey on Energy	2003/10	QS/LM	C, M&W, 20	500		2003-10E		
		Public Attitude Survey on Energy	2004/10	QS/LM	C, M&W, 20	500		2004-10E		
		Public Attitude Survey on Energy	2005/10	QS/LM	C, M&W, 20	500		2005-10E		
		Public Attitude Survey on Energy	2006/10	QS/LM	C, M&W, 20	500		2006-10E		
		Public Attitude Survey on Energy	2007/10	QS/LM	C, M&W, 20	500		2007-10E		
		Public Attitude Survey on Energy	2008/10	QS/LM	C, M&W, 20	500		2008-10E		
		Public Attitude Survey on Energy	2009/10	QS/LM	C, M&W, 20	500		2009-10E		
		Public Attitude Survey on Energy	2010/10	QS/LM	C, M&W, 20	500		2010-10E		
		Public Attitude Survey on Energy	2011/10	QS/LM	C, M&W, 20	500		2011-10E		
		Public Attitude Survey on Energy	2012/11	QS/LM	C, M&W, 20	500		2012-11E		
		Public Attitude Survey on Energy	2013/11	QS/InS	C, M&W, 20	500		2013-11E		
		Public Attitude Survey on Energy	2014/11	QS/InS	C, M&W, 20	500		2014-11E		
		Public Attitude Survey on Energy	2015/11	QS/InS	C, M&W, 20	500		2015-11E		
		Public Attitude Survey on Energy	2016/11	QS/InS	C, M&W, 20	500		2016-11E		
4	The Asahi Shimbun Company	Awareness survey on nuclear power plants	1986/08	SRS/IS	N, M&W, 20	2,315	77.0	1986-08A		
		Awareness survey on nuclear power plants	1988/09	SRS/IS	N, M&W, 20	2,342	78.0	1988-09A		
		The Asahi Shimbun public opinion poll	1999/10	SRS/PS	N, M&W, 20	1,025	68.0	1999-10A		
		Nationwide, regular public opinion polls	2011/04	RDD/PS	N, M&W, 20	1,999	59.6	2011-04A		
		The Asahi Shimbun public opinion poll	2012/09	SRS/MS	N, M&W, 20	2,178	73.0	2012-09A		
		The Asahi Shimbun public opinion poll	2016/10	RDD/PS	N, M&W, 20	2,036	51.1	2016-10A		
		5	The Yomiuri Shimbun	National public opinion poll	2011/04	RDD/PS	N, M&W, 20	1,036	62.0	2011-04Y
National public opinion poll	2011/05			RDD/PS	N, M&W, 20	1,073	62.0	2011-05Y		
National public opinion poll	2011/07			RDD/PS	N, M&W, 20	1,068	62.0	2011-07Y		
National public opinion poll	2011/08			RDD/PS	N, M&W, 20	1,055	62.0	2011-08Y		
Japan-US joint opinion poll	2011/12			RDD/PS	N, M&W, 20	1,023	50.0	2011-12Y		
1-y after the Great East Japan Earthquake P.O. Survey	2012/03			SRS/IS	N, M&W, 20	1,661	55.0	2012-03Y		
2-y P.O.P. after the Great East Japan Earthquake	2013/03			SRS/IS	N, M&W, 20	1,455	49.0	2013-03Y		
3-y after the Great East Japan Earthquake P.O. Survey	2014/03			SRS/IS	N, M&W, 20	1,512	50.0	2014-04Y		
4-y after the Great East Japan Earthquake P.O. Survey	2015/03			SRS/MS	N, M&W, 20	1,927	64.0	2015-03Y		
6	Nippon Research Center	A national opinion poll on the pros and cons of nuclear power plants after the "Great East Japan Earthquake"	2011/05	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2011-05R		
		A national opinion poll on the pros and cons of nuclear power plants after the "Great East Japan Earthquake"	2011/06	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2011-06R		
		A national opinion poll on the pros and cons of nuclear power plants after the "Great East Japan Earthquake"	2011/07	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2011-07R		
		A national opinion poll on the pros and cons of nuclear power plants after the "Great East Japan Earthquake"	2011/09	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2011-09R		
		A national opinion poll on the pros and cons of nuclear power plants after the "Great East Japan Earthquake"	2012/03	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2012-03R		
		P.O.P. on nuclear power and energy	2015/03	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2015-03R		
7	NHK Broadcasting Culture Research Institute	Awareness survey on nuclear power plants and energy	2011/06	RDD/PM	N, M&W, 20	1,813	68.4	2011-06N		
		Awareness survey on nuclear power plants and energy	2011/08	RDD/PM	N, M&W, 20	1,589	66.1	2011-08N		
		Awareness survey on nuclear power plants and energy	2011/10	RDD/PM	N, M&W, 20	1,775	67.7	2011-10N		
		P.O.P. on disaster prevention, energy and life	2011/12	SRS/MS	N, M&W, 16	2,579	71.6	2011-12N		
		Awareness survey on nuclear power plants and energy	2012/03	RDD/PM	N, M&W, 20	1,585	60.9	2012-03N		
		Awareness survey on nuclear power plants and energy	2013/03	RDD/PM	N, M&W, 20	1,655	65.3	2013-03N		
		P.O.P. on disaster prevention, energy and life	2013/12	SRS/MS	N, M&W, 16	2,459	68.3	2013-12N		
		Survey on Sendai Nuclear Power Plant and Energy	2014/11	RDD/PM	N, M&W, 20	1,001	66.4	2014-11N		
8	Japan Atomic Energy Relations Organization	P.O.P. on the use of nuclear energy	2014/11	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2014-11G		
		P.O.P. on the use of nuclear energy	2015/10	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2015-10G		
		P.O.P. on the use of nuclear energy	2016/10	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2016-10G		
		P.O.P. on the use of nuclear energy	2017/10	MDM/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2017-10G		
		9	Security & Safety Research Center	Changing public opinion about nuclear power	2011/06	/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2011-06S
Changing public opinion about nuclear power	2012/03			/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2012-03S		
Changing public opinion about nuclear power	2013/03			/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2013-03S		
Changing public opinion about nuclear power	2014/03			/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2014-03S		
Changing public opinion about nuclear power	2015/03			/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2015-03S		
Changing public opinion about nuclear power	2016/03			/LM	N, M&W, 15-79	1,200		2016-03S		
10	National Institute for Environmental Studies	Public opinion poll on lifestyle	2013/02	SRS/IS	N, M&W, 20	1,121	37.4	2013-02K		
		Nationwide P.O.P. on the Great East Japan Earthquake and nuclear power generation	2012/05	RS/IS	N, M&W, 20	1,272	32.0	2012-05J		
11	Jiji Press Ltd.	SRS: Stratified Random Sampling, RDS: Random Digit Sampling, QS: Quota Sampling, MDM: Map Database Method, RS: Random Sampling IS: interview survey, PS: phone survey, LM: leaving method, InS: internet survey, MS: mail survey. N, M&W, 20: Nationwide Men and Women over 20 ; C, M&W, 20: Capital Area Men and women over 20 P.O.P.: Public Opinion Poll								

### 5.7 まとめ

図-29 に示されている通り、1986年のチェルノブイリ事故の際には、原発を減らす意見が20%程度まで増加したものの間も無く取まっている。しかし2011年3月福島事故以後の大衆の意見は、これまでとは異なり、事故直後から原発の廃止を求める意見が50%に達し、「廃止」の意見は、約6ヶ月後には70%に達し、以後5年間にわたって維持され、徐々に拡大しており、現在もその傾向は継続している。また一方、原発を拡大させる、または徐々に拡大させるという意見は年とともに減少している。

原子力安全システム研究所 (INSS) では1993年～2013年の間に、福島原発事故後の4回を含め計16回の原子力発電に関する意識の継続調査を実施している。INSSで、継続して人々の意識調査を行っている北田 [108～111] の研究によると、福島原発事故7カ月後の2011年12月調査では、福島原発事故によって原子力発電を「減らす」「やめる」という否定意見は、チェルノブイリ事故後やJCO事故後も含め、長期にわたって3割程度で推移していたが、福島原発事故後に7割に上昇したと報告していて、本調査の結果と同様の結果を示した。また、大多数の人は「原子力発電には人間の手に負えない危険性がある」と認識したが、本質的な危険性についての認識は、記憶の減衰では低下せず、変容しにくいことが示唆される、とした重要な結果を示唆している。

「減らす」「やめる」が、福島原発事故に限って減少せず、増加の傾向を示している理由としては、原発への本質的な不安感のほか、高レベル放射性廃棄物を処理することができないことが理解されてきたことのほか、タンクからの汚染水漏れや、汚染水の海への流出が判明するなど、増え続ける汚染水を制御できていない状況によって、将来的にも解決できないかもしれないという漠然とした重い不安を感じたことも一因である可能性がある。

原子力発電について政府は2030年に全電源の20～22%とする計画を立てているが、民意は明らかに原子力発電所を廃止する方向にあり、7年が経過した現在でもその傾向は衰えを見せていない。原子力安全性が社会的受容を得るには、何より、原子力発電に対する信頼を取り戻すことである。一般公衆の人々に原子力の本質を理解できる十分な知識を有する人はほとんどいない。福島原発事故によって、安全神話は崩れ去り、この人が言うならば、とかこの機関が言うならば、と言う信頼できる発言が聞かれなくなった。しかし、少なくとも論理的合理性による理解が得られるならば、問題のかなりの部分は解決されると思われる。

## 第5章 原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価

### 原発の受容性を考慮した指標の変化について

第5章では、原発の受容性指標を考慮しない8つの指標によって日本のエネルギーセキュリティ指標を総合的に見た。その際の指標は次の表の通りである。

表-26 原発受容性を加えない総合指標

年	2010	2012	2015
偏差	43	42	44

原発受容性を  
加えない総合指標

- 原発事故以前のエネルギーセキュリティのレベル  
→対象38カ国の平均以下のレベル
  - 事故直後から2年の間  
→レベルは更に悪化
  - 事故から5年後のレベル  
→最悪は脱したものの、まだ平均には届いていない
- という結論を得ていた。

では、原発の受容性を入れた指標の変化を見てみたところ、次の表を得た。

表-27 原発受容性を加えた総合指標

年	2010	2012	2015
偏差	45	43	43

原発受容性を  
加えた総合指標

上記の通り、

- 原発受容性指標を加えると  
→事故前のレベルは少し上昇、5年後のレベルは悪化
  - 悪化ではあるものの、それほど大きな変化はない
- という結果であった。
- この結果については、第7章で述べる。

## 第6章 エネルギーセキュリティ に対するパリ協定のインパクト

---

第6章では、エネルギーセキュリティに対する環境問題を取り扱う。環境問題への意識の高まりが、エネルギーセキュリティに、どのような影響があるかについて報告する。

---

## 第 6 章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

### 6.1 本研究の概要・目的

IEA が 2018 年に示した 2040 年までの将来エネルギー予測 [122]の中で、中心となる「新政策シナリオ (NPS: New Policies Scenarios) においては、2040 年の一次エネルギー総需要量のうち、化石燃料の割合は依然として 74%を示すとしている。特に天然ガスは、2000 年に比べて 2 倍強の伸びを示し、化石エネルギーの 34%を占める予測を立てている。一方 2018 年 7 月に閣議決定された日本の「第 5 次エネルギー基本計画」では、2030 年の電力のエネルギーミックスを 2015 年に決まったものを踏襲するとし、化石燃料比率を 56% (ただし一次エネルギーベースでは 75%) とする目標を立てている。20 年後でも現実として化石資源の使用は過半を占めることとなり、課題の困難さを感じるものである。

パリ協定は 2015 年に、「第 21 回国連気候変動枠組条約締約国会議 (COP21) 」で合意され、2016 年 11 月 4 日に発効した。1997 年に採択された京都議定書と異なり、パリ協定では多くの国が参加し、締結国だけで世界の温室効果ガス排出量の約 86%、159 の国または地域をカバーするものとなっている (2017 年 8 月時点)。このパリ協定で、世界共通の長期目標として平均気温の上昇を 2°C より十分下方に抑えること (2°C 目標) を設定した。日本は、2030 年度までに 2013 年度比マイナス 26.0% の水準とすることを内容とする約束草案を、事務局に提出した。

2018 年の第 5 次エネルギー基本計画はこのパリ協定の長期目標を強く意識して策定されたものの、2030 年の一次エネルギー供給の 75%が化石資源で占められており、中でも天然ガスは電源構成の 27%を占める最大のエネルギー資源とされている。

天然ガスにおけるエネルギーセキュリティが目指す方向は、輸送ルートリスク低減、エネルギーの効率化、ガス自給率の増加、CO<sub>2</sub> 排出量の削減、ガスコストの低減などに加えて、輸入相手国の多様化がエネルギーセキュリティの重要項目である。Stirling [123] は、エネルギー多様性がエネルギーセキュリティに与える影響について詳細な報告を行った。出来るだけ多くの国や地域から天然ガス資源を調達することによって、政治的または環境的なリスクを排除する狙いがある。

以上、エネルギーセキュリティの環境側面の研究において、輸入相手国の多様性に考慮して各国間 (特にアジア/欧米国) の定量比較を行った研究はない。本稿の目的は、福島第一原子力発電所事故後のエネルギーセキュリティレベルの変化について、多国間比較

## 第 6 章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

をする中で、パリ協定等環境側面による影響を明らかなのすることである。特に重要な天然ガスのエネルギーセキュリティレベルについて分析することは、今後の日本のエネルギーセキュリティにとって大きな意義があると考えられる。

### 6.1.1 既往の研究

エネルギー・セキュリティの環境側面からの定量分析に関する先行研究について示す。Alvarez.M.T. [124] らは、欧州連合における持続可能な開発は 3 つの柱の枠組み - 経済、社会開発および環境保護 - に基づいているとした上で、EU-15 のエネルギー持続可能な開発の総合指標を作成した。シンプルな指標と 2 つの集約化指標の合計 33 の変数に基づき、供給のエネルギー安全保障、市場価格競争、環境保護の側面に関連して 3 つの指数を計算し、最終的に総合指数にまとめた。その総合指数に基づき、EU-15 カ国のエネルギーセキュリティ度を 3 つの段階に評価した。しかし Alvarez の研究は、日本や成長速度の著しいアジア諸国を対象としていない。

Iddrisu.I. et al. [125] は、従来の多次元指標は持続可能性次元を適切に捕らえていないとして、技術的、経済的、社会的、環境的、そして制度的な 5 つの側面から、持続可能性に焦点を当てた複合指標 SEDI (Sustainable Energy Development Index) を提案した。そして、技術的側面として 3 個、経済的側面として 3 個、社会的側面として 2 個、環境的側面として 2 個、制度的側面として 1 個、合計 11 の指標を示した。そして SEDI 指標を使って、62 の発展途上国の持続可能性度をランキングした。しかしこの論文では、開発途上国のエネルギーアクセス問題への適応がより適切であるとして日本は対象とされていない。

Neves A. R. [126] は、環境影響評価としても行動計画ツールとしても使用される、地域のエネルギー持続可能性指標の枠組みを提案することを目的として、選択された指標の試験的自治体によるテストにより、18 の指標で構成されるフレームワークを作成した。この中にはエネルギー使用による森林減少率やエネルギーと電気の再生可能エネルギーシェアなど独自の指標を選択している一方、コミュニティグループ会議への出席率や公共交通機関へのアクセスのしやすさなど、地域独特の指標を使用していて、国単位の指標データでは入手が難しいと思われる指標がある。

Neumann [64] は、自由化された欧州の天然ガス市場における供給セキュリティの把握のために、欧州各国のセキュリティ度を Herfindahl-Hirschman Index と、Shannon-Wiener Index を使って分析した。さらに Shannon-Wiener Index を使って、自国の生産資源がある場合のエネルギーセキュリティ指標、Shannon-Wiener-Neumann Index を作成した 3)。

## 第 6 章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

また、Jansen [65] らは、長期のエネルギーセキュリティに対する Shannon-Wiener Index により多くの要素を付け加える 4 つの指標を考案した。しかし Neumann の研究も Jansen らの研究も、本項で採用した Herfindahl-Hirschman Index では行われていない。

Hauser [127] は、ヨーロッパの天然ガスモデルとドイツのエネルギーシステムモデルを組み合わせた 6 個のシナリオを開発した。そのモデル解析によると、新しいパイプラインの開発と LNG 基地の建設など天然ガスインフラの長期的な整備がエネルギーセキュリティ上重要であり、CO<sub>2</sub> 排出削減の手段としてガス火力発電への切り替えが必要であることが示された。しかし Hauser の論文は、再生可能エネルギーの急速な発展により、電力卸市場で天然ガスが価格競争にさらされている事態については言及されていない。

### 6.1.2 本稿の節立て

以下本稿の節立てを説明する。本稿第 7.2 節では、アジアと欧州の経済成長動向とエネルギー消費との関係、経済成長に伴う CO<sub>2</sub> 排出量の増大について述べ、また、エネルギー多様性指標の分析方法について言及する。第 7.3 節では、多様性指標を使って算出した結果について、アジアと欧州各国の状況を分析する。第 7.4 節では本稿の取りまとめを行い、今後の研究の方向性を検討する。

調査対象国は、LNG 輸入アジア上位 7 カ国（日本、中国、韓国、インド、台湾、タイ、シンガポール）と、欧州上位 8 カ国（独、（米国）、伊、トルコ、オランダ、仏、UK、スペイン、ポーランド）とした。対象とした 16 カ国によって、世界の天然ガス輸入量の 74% をカバーしている。対象期間は、1993 年から 2017 年まで 24 年間とした。

なお使用するデータは、公式なエネルギー機関が定期的に発行し、かつ公的なエネルギー機関や政府機関が政策立案のベースに用いていて、広く周知され、誰にでも利用可能であることとした。

## 6.2 分析方法

### 6.2.1 天然ガス輸入相手国の多様性

本稿では、エネルギーセキュリティ評価のうち、資源輸入国の多様性を表す指標 IRD (Import Region Diversity) は、Herfindahl-Hirschman Index を使用した。Chang [66] によれば、エネルギーセキュリティで使用される多様性指標は、殆どの場合、Herfindahl-Hirschman Index (HHI : Simpson の  $\lambda$  と同じ) か Shannon-Wiener Index (SWI) か、またはこれらの変形指標が使用されている。

Herfindahl-Hirschman Index と Shannon-Wiener Index は、次の式で表される



$$IRD_{if}^{HHI} = \sum_i P_{if}^2 \quad (19)$$

$$IRD_{if}^{SWI} = \sum_i P_{if} \ln P_{if} \quad (20)$$

$i=1, \dots, N$ :  $N$  は輸入国に対する輸出国  $i$  の数

$f=1$  or  $2$ :  $f=1$  は原油、 $f=2$  は天然ガス(本稿では  $f=2$  の場合のみ選択する)

$P_{if}$ : 輸出相手国  $i$  の化石資源  $f$  のシェア、 $0 \leq P_{if} \leq 1$

拙著論文 [128]でその根拠と実例によって示したように、Herfindahl-Hirschman Index と Shannon-Wiener Index にはそれぞれ異なる特性がある。HHI に比べて SWI は、シェアの低い要素に対してより大きく反応する。化石燃料のようにシェアが大きな要素によって多様性を表す場合は、HHI を使用した方が良い結果が期待できる。本稿では以後、多様性の算出には HHI を使用した。

### 6.2.2 その他使用した指標

本稿の分析には、基本的にこれまでに構築したエネルギーセキュリティの指標選定の考え方を踏襲している。即ち、福島第一原発事故に対応するエネルギーセキュリティ指標は、広くエネルギーセキュリティの一般的な考え方が基本となるため、学術研究の中から最も多く使用されている上位 6 個のエネルギーセキュリティの定義項目を抽出し、その定義項目に基づき指標を選定する、というプロセスで戦隊するという考え方に基づいている。その他使用したエネルギーセキュリティの指標は、表-28 の通りである。

表-28 本研究で使用した要素、エネルギーセキュリティの指標

指標	指標の式	説明
自給率	$SS = EP / TPES \times 100$	SS : Energy self-sufficiency rate, EP : Energy Production (Includes nuclear power generation) . TPES : Total Primary Energy Supply.
エネルギー効率	$EE_{TPES} = TPES / GDP_{2010USD}$ $EE_{TFC} = TFC / GDP_{2010USD}$ $EE_{ETFC} = ETFC / GDP_{2010USD}$ $EC_{PC} = TFC_{PC} / GDP_{PC}$	EE:総エネルギー供給効率、TPES: Total Primary Energy Supply, 総エネルギー消費効率、TFC : Total Final Consumption 電力エネルギー消費効率,ETFC: Electricity Total Final Consumption( kwh ) 一人当たりのエネルギー消費効率,
資源多様性	$RD_f = \sum_i S_{if}^2$	$S_{if}$ : 国iのエネルギー資源fのシェア f: エネルギー資源の種類
チョークポイントリスク	$CR_f = \sum_j (a * S) / \sum_i T$	$\alpha$ : チョークポイント通過回数, $\sum_i T$ : 輸入国jの原油 (LNG) 総輸入量 $\sum_j (a * S)$ : 輸出国jの原油 (LNG) がチョークポイント通過する量
エネルギーコスト		1973年を比較年とするインデックス
CO2排出	$CO2_{TPES} = CO2 / TPES$ $CO2_{TFC} = CO2 / TFC$ $CO2_{cap} = CO2 / Population$ $CO2_{kWh} = CO2 / kWh$	エネルギー総供給量あたりのCO2排出量 エネルギー総消費量あたりのCO2排出量 一人当たりのCO2排出量 1KWの発電をするのに排出されるCO2量
輸入相手国の多様性	$IRD_{if}^{HHI} = \sum_i P_{if}^2$	IRD (Import Region Diversity), i: 輸出国の数 f=1, 2, 1=oil, 2=natural gas $P_{if}$ : 輸出相手国iの化石資源fのシェア

### 6.3 分析結果

#### 6.3.1 アジア諸国

図-30 は、アジアの対象国の輸入相手国分散（集中リスク）を示した図である。アジアの国で、1993 年以前に天然ガスの輸入を開始していたのは日本と韓国、台湾、シンガポールである。インドは 2004 年カタルから、中国は 2006 年豪州から、タイは 2000 年ミャンマーから天然ガスの輸入を開始した。東南アジアの天然ガス輸入の開始は欧州に比べて平均で 10 年以上遅く始まっている。

いずれの輸入国も輸入を開始した当初は、輸入相手国の数が少なく、セキュリティ上の配慮もまだ生まれていないことから IRD（資源輸入国の多様性を表す指標：IRD (Import Region Diversity)）の値も高いが、いずれの国も国の政策として輸入相手国の多様化が図られた結果、徐々にあるいはインドのように急激に多様性が高まり、IRD が低下してゆく様子が現れている。アジアの開発国は速度の多少はあるものの、エネルギーの増大とともに、一様に輸入相手国が多様化されて行く途上にあると言って良い。また東南アジア各国は 2011 年 3 月の福島第一原子力発電事故の影響を受けている国があることが図に現れている。

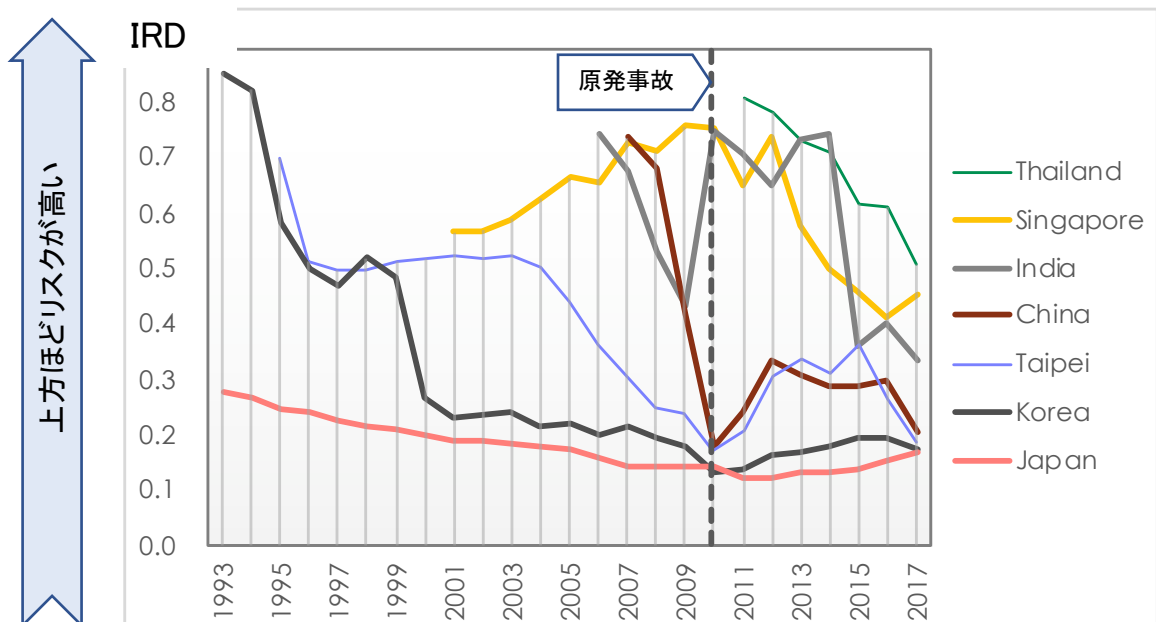


図-30 アジア対象国の天然ガス輸入相手国多様化

## 第6章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

### 6.3.2 欧州諸国

一方、図-31は欧州対象国の天然ガス輸入相手国の多様化の状況を表す図である。欧州の天然ガス輸入は、いずれも比較的古くから輸入を開始しており、総じてIRD（資源輸入国の多様性を表す指標：IRD (Import Region Diversity)）は低い。ただしアメリカは天然ガスの産出国で、輸入は97%がカナダ一国のみである。このような国は輸入相手国IRDが高くても、天然ガスの自給率も高く、セキュリティ上問題はないので、除外して考える必要がある。

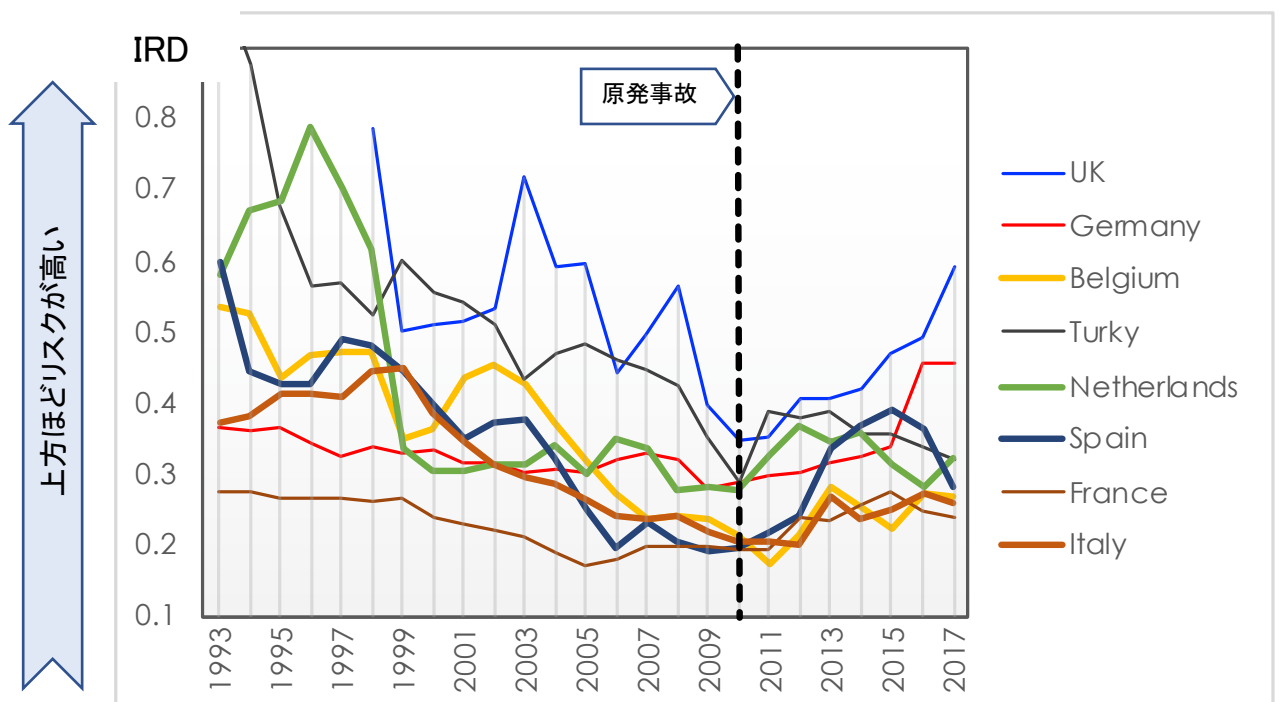


図-31 欧州対象国の天然ガス輸入相手国多様化

図-31の欧州の国の中で特に英国やドイツにみられるように、2010年ごろを境に、2015年以降は急にIRDの値が悪化している。欧州の一部の国の傾向として、2000年代を底として、IRDが徐々に上昇する傾向にある。これが意味する内容について次節で国ごとに分析する。

### 6.3.3 ドイツ

アジアの天然ガス輸入国が近年、全般に多様性を高めてゆく一方、欧州の一部の天然ガス輸入国は、逆に多様性を低める動きをしている。（図-31）

## 第 6 章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

ドイツは、2017年に日本を抜いて世界第1位の天然ガス輸入国となったが [129]、2012年ごろから徐々に IRD (=HHI) が増す（多様性が落ちる）状態となっている。ドイツは、オランダから 34,000Mcm (2015年)の天然ガスの輸入をやめ、またノルウェイからの輸入量 22,000Mcm (2015年)を半減させて、ロシアから天然ガスパイプライン (NS: Nord Stream) [130]を経由して 2012年に輸入を開始した。2012年～2017年のロシアからの天然ガス輸入量の増加量は 39,000Mcm に達し、合計 72,000Mcm となり、ロシア産の天然ガス量は独自の輸入天然ガスの 60%を超えた。現在のドイツの主な天然ガス輸入先はロシアとノルウェイの2カ国のみである。この理由によって、ドイツの IRD (=HHI) は 0.46 (2017) にまで悪化し、日本の 2.7 倍の水準となった。さらにドイツーロシア間のノルド・ストリーム 2 (NS2: Nord Stream2) [131]が 2019年に稼働を始める計画で、独自のロシア産天然ガスの比率はさらに高まることとなる。

ドイツはこれまで、温室効果ガスの削減目標を高く掲げてきた [132]。再生可能エネルギーは過去 16 年間で大幅な成長を遂げ、さらに、一次エネルギー需要に占める再生可能エネルギーの目標を（現状は 30%）、2025年までに 45%に引き上げた。

再生可能エネルギーの増加に伴い、自由化された電力市場で電力卸価格は低下した。5年前までは 1MWh あたり約 50 ユーロだった卸価格が、現在は 20 ユーロまで低下した。この価格では資源価格の高い天然ガスだけでなく、低コストと言われる褐炭火力発電所も経済性を失う可能性がある。再生可能エネルギーは燃料費がほぼゼロであり、発電中は二酸化炭素を排出しない。電力卸市場では、このような「良質の」電源から優先的に買われる。つまり再生可能エネルギーによる電力がまず買われ、再エネでは埋まらない残りの需要を高い火力が埋めることになる。天然ガス火力発電は競争力を失い、悪い採算状況にあり、そのため、設備利用率も低い。運営・給電にかかるコストも含め総発電コストが、取引価格を上回る場合があるため、ガス火力発電所の競争力はほとんどない[133]。天然ガスを取り巻くこのような状況にあつて、ドイツは天然ガス輸入相手国多様性のセキュリティよりも、資源コストの安い方を選ばざるを得ない状況にあると言える。

### 6.3.4 イギリス

英国はもともとオランダに次ぐ欧州第3位の天然ガスの輸出国であった（2003年）が、2000年をピーク(115,400Mcm)に生産量が減少に転じた。2015年の生産量は 41,300Mcm、ピーク時（2000年）の 36%にまで減っている。

一方、英国は世界初の LNG 輸入国であり、1964年アルジェリアからの輸入が最初の商業輸入である。英国はノルウェイからは3本のパイプライン (Langeled、Vesterled、

## 第 6 章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

Tampen) によって天然ガスを輸入し、2017 年総計で 36,000Mcm となり、全天然ガス輸入量の 75% を占めている [134]。

また 2011 年当時は、英国はカタール産の LNG を 22,000Mcm 輸入していて、ノールウェイ産の天然ガスと拮抗していたため、IRD (=HHI) も 0.35 と低かったが、2017 年は 6,200Mcm、28% にまで減少した。2017 年の Pipeline 天然ガスと LNG の数量比は 85 : 15 で、天然ガスは LNG の 5.7 倍である。

以上の要因の結果、IRD (=HHI) の値は 2011-2017 で 0.35-0.59 にまで上昇した。英国もドイツと同様、天然ガス輸入国の多様性が長期（7 年間）に渡って悪化している国の一つである。たとえ多様性が悪化したとしても、LNG より天然ガスの方が安く、また扱い易いと英国は判断している。

### 6.3.5 中国、インド、アジア諸国

The Institute of Energy Economics Japan (IEEJ) [135] によると、世界全体各国が省エネルギー・低炭素化のための対策をこれまで以上に実施しないレファレンスケースにおいては、今後 2035 年までの間に、世界の一次エネルギー消費は 1.5 倍、CO<sub>2</sub> 排出量は 1.8 倍に増大する。しかし各国がより一層のエネルギー安定供給の確保や地球温暖化対策の強化に資する一連のエネルギー・環境政策を実施し、また国際協調等により革新的技術の開発、導入を加速させることにより、一次エネルギー消費を 16%、CO<sub>2</sub> 排出量を 34% 削減することが可能である。このうち、中国・インド等のアジア途上国における削減量は非常に大きく、これらのアジア諸国での技術進展によるエネルギー消費の低減が世界のエネルギーセキュリティ及び環境負荷低減のための最も重要な手段であることは明らかである。

第 6 章エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

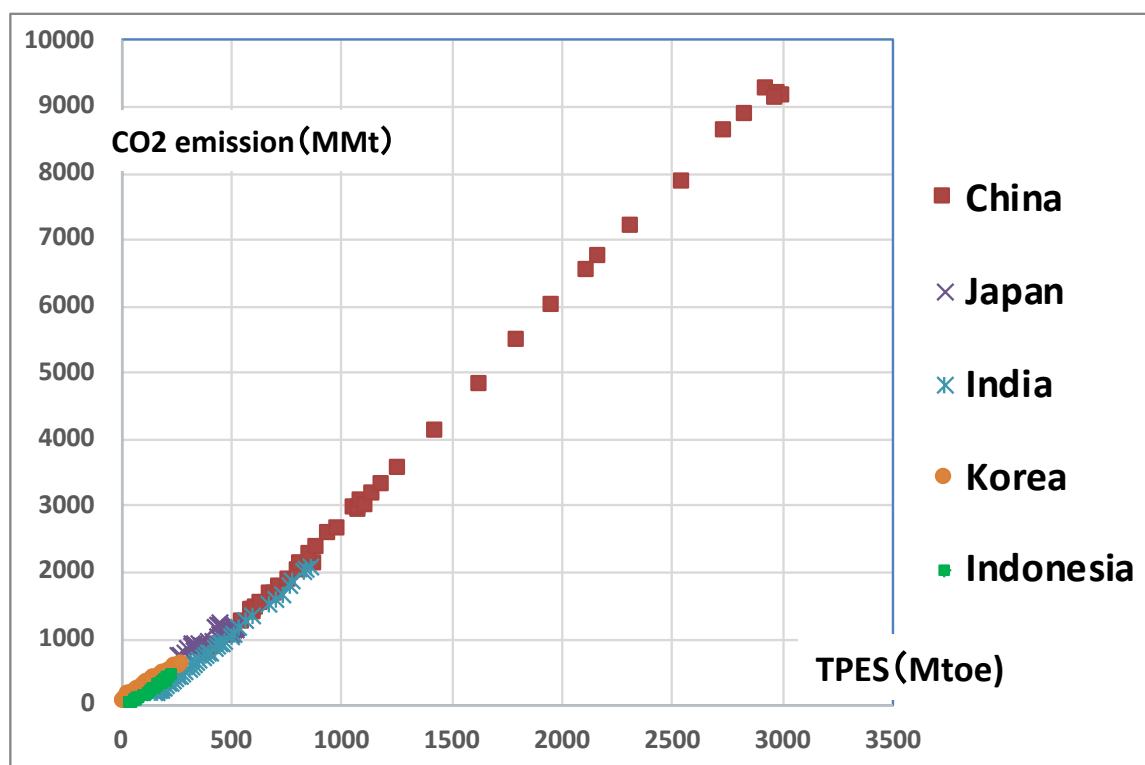


図-32 アジアにおけるエネルギー消費と CO<sub>2</sub> 排出量の関係

出典) IEA. CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion 2016 Edition より筆者計算

表-29 エネルギー消費と CO<sub>2</sub> 排出量の関係・続

	China	Japan	India	Korea	Indonesia
CMC R	0.9996	0.9138	0.9988	0.9977	0.9947
CD R2	0.9992	0.8350	0.9976	0.9954	0.9894
Adjusted R2	0.9991	0.8313	0.9975	0.9953	0.9891
Intercept	-611.434	342.430	-277.234	39.540	-63.206
X Value 1	3.321	1.595	2.689	2.021	2.193
CMC : coefficient of multiple correlation					
CO : coefficient of determination					

図-32 は、中国、インド、韓国、インドネシア、日本のエネルギー供給量と CO<sub>2</sub> 排出量の関係について示している。表-29 は、その際の相関関係統計値である。表-29 の通り、いずれの国についても、式の当てはまりはよく、決定係数は 0.9 を超えている。したがって、これらのアジアの国々は、エネルギーの供給量と CO<sub>2</sub> 排出量には大きな相関関係があ

## 第6章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

ることが伺える。すなわち、アジア圏では、現状のエネルギー供給量が継続するならば、このまま CO<sub>2</sub> 排出量も増大し続ける傾向があることを示している。X の係数は、CO<sub>2</sub> 排出との関係性が高いことを表すが、中国の 3.3 が最も大きく、次いでインドが 2.7、インドネシアが 2.2、韓国が 2.0 で日本は 1.6 程度である。[136]

中国はパリ協定で、二酸化炭素排出量は 2030 年頃をピークとし、一次エネルギー消費において非化石燃料が占める割合を 2030 年までに 20% に増やすという約束を示した。中国は脱炭素に向けて、石炭から天然ガスへの転換を進めている(2016 年:「エネルギー発展第 13 次 5 カ年計画 [137]」)。小林 [138] によると、現状は、2000 年に比べ、2016 年には天然ガスを 8.2 倍に拡大したが、石炭も 2.9 倍に拡大し、全供給エネルギーの 65% を石炭が占めている。世界最大の CO<sub>2</sub> 排出国である中国は、依然として石炭依存が極めて強い。

中国では 2004 年に、タリム盆地から上海まで 4,000Km を結ぶ西気東輸パイプラインを完成させた。またトルクメニスタンやカザフスタンからの天然ガスパイプラインも稼働させ、ロシアから 4,000Km に及ぶパイプラインは 2014 年に建設が開始された [139]。一方 2006 年に、広東省深圳に中国初の LNG 輸入ターミナルを建設して以降、2017 年時点で上海市・広東省・福建省など沿岸地域を中心に約 30 の LNG 輸入ターミナルを稼働させている [140]。その間の 10 年間で天然ガス需要は実に 22 倍以上の増加となった。2018 年もこうした需要の拡大が継続されるとみられ、2018 年の需要増 600 万トン は世界全体の需要増の 40% を占める。

中国は、当初天然ガス輸入先は従来豪州のみであったが、トルクメニスタンやカタールからの輸入によって、2013 年には IRD (=HHI) が 0.31 にまで多様性が改善された。2017 年にはトルクメニスタンの比率を下げ、さらにインドネシアやマレーシアなどの輸入量を増加したため、IRD (=HHI) が 0.21 という高い多様性が実現した。中国の天然ガスの多様化のスピードは早い。

インドの天然ガスは、生産と輸入比率が約 55% (2016 年) で、主に発電と化学肥料原料として使われている。天然ガスパイプラインは無く、全輸入が LNG である。インドは現在アジアでは、日本、中国、韓国に次いで 4 番目の LNG の輸入国であり、IEA (WEO2018) [141] は、2040 年への世界の一次エネルギー需要の伸びが最も大きい国はインドで、2017 年の 2.1 倍になると予測した。

だがインドの一次供給エネルギーの現状は、まだ 44% が石炭であり、LNG は 5.5% に過ぎない。中国もインドもアジアの国々も、天然ガスは環境対策を主な目的として急激な拡大を続けているが、価格の安い石炭にまだ追いついていない。[142]



6.3.6 日本

日本の天然ガスの輸入は、1969 年のアラスカからの LNG の輸入から始まった。それ以来、需要は年々増加しており、2017 年の日本の一次エネルギー供給の 24% は天然ガスで、その主な用途は電気と都市ガス用に使用されている。輸入天然ガスはすべて LNG 輸入であり、パイプラインによる天然ガス輸入はない。

図-28 の通り、日本は、1972 年にブルネイ、1977 年に UAE とインドネシア、1982 年にマレーシア、1989 年に豪州、1997 年にカタール、2000 年からオマーンの LNG を輸入して輸入相手国の多角化を図ってきた[29]。その結果、輸入相手国の多様化指標 IRD (=HHI) は、1995 年 0.25、2000 年 0.20、2005 年 0.17、2010 年 0.15、2015 年 0.14 と順調に多様化されてきた。

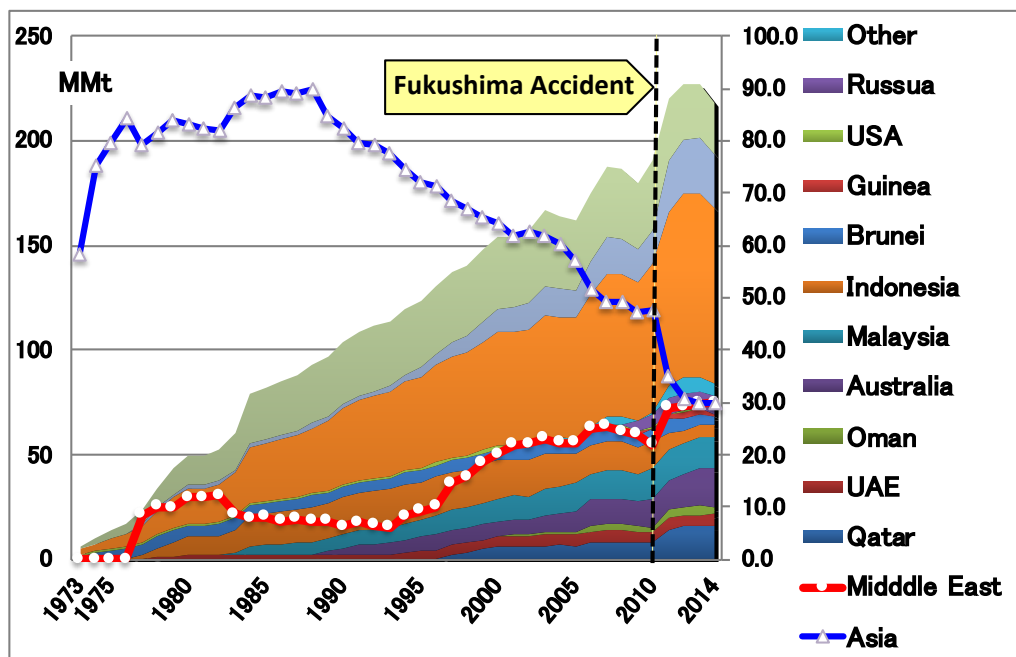


図-33 日本の LNG 輸入相手先別のシェア

日本は、東日本大震災によって全ての原発が 2 年間に渡って停止し、その代替えエネルギーとして、2010 年対比 30% の LNG 増加によってエネルギーの不足を補った。その不足分の天然ガスの輸入を、アジアから中東に切り替え、世界で最も高い価格で購入した。そのため、その間の天然ガスセキュリティは、輸入相手国の多様性は保たれたが、代償として高いコストを支払った。福島原発事故によって、天然ガスの数量は、25,436Mcm 増加し、輸入相手国は 6 カ国増加し合計で 20 カ国になり、IRD (=HHI) は 0.13 減少した。

## 第 6 章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

### 6.4 まとめ

表-30 アジアと欧州の天然ガス輸入相手国多様化指標と関係値

	Country	Pipeline ratio (%)	HHI	Import Country (countries)	Total Import (Mcm)	Import Histiry (year)	Major natural gas exporter : Percentage of total %				
Asia	Japan	0	0.17	18	115,285	40	AUS:32.0	MYS:17.0	QAT:11.8	RUS:8.4	IDN:8.0
	Korea	0	0.17	15	48,651	32	QAT:31.4	AUS:18.5	OMN:11.6	MYS:10.1	IDN:8.9
	India	0	0.33	13	24,435	15	QAT:54.1	NGA:16.4	AUS:8.3	AGO:5.3	GIN:4.9
	Chinese Taipei	0	0.19	13	19,974	29	QAT:33.2	MYS:18.0	IDN:13.9	PIG:12.1	RUS:8.6
	China	40.3	0.21	21	89,789	13	TKM:35.9	AUS:22.7	QAT:11.4	MYS:6.2	IDN:4.6
	Thailand	67.8	0.51	10	16,371	21	MMR:68.2	QAT:19.5	AUS:4.2	MYS:3.1	NGA:1.2
	Singapore	74.7	0.45	7	11,253	27	IDN:64.4	MYS:12.0	AUS:11.6	QAT:9.8	EGY:0.8
	Asia Ave.	26.1	0.29	13.9	46,537	25					
Europe	Belgium	50.7	0.27	5	18,103	53	NLD:23.3	NOR:15.6	DEU:8.1	GBR:8.1	QAT:3.2
	Italy	52.8	0.26	13	69,651	45	RUS:39.4	DZA:29.4	QAT:10.1	LBY:7.0	AUT:4.1
	Spain	52.8	0.28	11	34,627	48+	DZA:48.3	NGA:12.5	PNG:10.2	QAT:10.0	NOR:9.9
	France	64.8	0.24	10	48,708	52	NOR:42.3	RUS:18.9	NLD:10.2	DZA:7.9	NGA:6.2
	UK	85.3	0.59	10	47,765	55	NOR:75.4	QAT:12.9	BEL:5.6	NLD:3.9	
	Turkey	89.0	0.32	11	55,121	34	RUS:51.9	IRN:16.8	AZE:11.9	DZA:8.4	NGA:3.8
	Netherlands	99.7	0.32	6	53,795	41+	NOR:47.3	RUS:28.0	BEL:13.2	GBR:2.9	DEU:2.9
	Germany	100.0	0.46	2	119,471	53	RUS:60.3	NOR:11.0			
	EU Ave.	50.3	0.32	11.2	51,221	36					

AUS:Australia MYS:Malaysia QAT:Qatar RUS:Russia IDN:Indonesia OMN:Oman NGA:Nigeria AGO:Angola GIN:Guinea  
 PIG:Papua New Guinea TKM:Turkmenistan MMR:Myanmar EGY:Egypt NLD:Netherlands NOR:Norway AZE:Azerbaijan  
 DEU:Germany GBR:United Kingdom DZA:Algeria NGA:Nigeria PNG:Papua New Guinea BEL:Belgium IRN:Iran

天然ガスの輸入において、一般に輸入量・輸入経験が豊富なほど輸入多様化ポートフォリオの改善傾向が見られる。日本の他、韓国、台湾など、特にパイプラインを持たない国は概ねこの傾向があり、いずれも高い多様性を実現している。

中国は、輸入経験は少ない（13年）が、急激な需要の拡大と深刻なPM2.5対策に応じるため、石炭から天然ガスへの転換を強力に進めている。中央アジアや新疆など中国西部で生産した天然ガスを上海などの東部や広東、福建など南部の沿海地域に供給するパイプラインを敷設した。一方、中国沿岸部にはLNG輸入ターミナルを建設し、21もの天然ガス供給国との契約を締結して多様性を誘導している。

アセアン諸国では、1990年代から「広域アセアン天然ガスパイプライン網」（TAGP）と呼ばれる計画を立ち上げ [31]、現在すでに総延長9,000Kmを超えるパイプラインが完成し、さらに5,000Kmのパイプラインを建設中である。タイ、シンガポールの輸入契約相手国は、10カ国以下で、そのためHHIの値は0.5前後と比較的高い（リスクが高い）が、域内のガス田と消費国を結ぶパイプライン網によって、供給の安定性を確保している。

## 第 6 章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

今般本稿では、天然ガス・エネルギーセキュリティの重要な指標である輸入相手国の分散について、パリ協定がこの指標に与える影響について状況を調査した。（表-32～表-34）アジア諸国が急激な経済発展と環境対策の両立を図るために天然ガスの導入を進めているのに対し、欧州の様相は全く異なっている。欧州の天然ガスパイプライン網は、1940年～60年代の自国産天然ガス開発を契機に整備が進んだ。欧州の天然ガス輸入はアジアの輸入より平均 10 年以上の長い輸入経験を持っている。また本稿で取り上げた天然ガス輸入上位 8 カ国は、全てパイプライン輸入比率が 50% を超えている。欧州はパイプライン網の整備が進むにつれて、徐々に HHI が上昇し、多様性が失われてきた。

ドイツの例で取り上げたように、京都議定書やパリ協定をきっかけとして欧州の国々は強力に環境対策を進めた。ドイツは再生可能エネルギーの大幅な導入を図った結果、電力卸市場で再生可能エネルギーのコストが大きく下落した。そのため再生可能エネルギーに対して天然ガスは価格競争力を失い、電力用途として天然ガスは使用されなくなりつつある。欧州各国の天然ガス輸入契約相手国の数はアジアの国々より少なく、HHI が高めである。その理由は、天然ガス市場が自由化された結果、欧州では多様性よりも価格の方がより重要なファクターとなりつつあるためである。

全ての天然ガス輸入国にとって、欧州とアジアで起こっていることは注視すべきである。環境対策としての天然ガスの大幅な導入が進むアジアの国々では、今後も天然ガスは増加し、また天然ガスの多様性は改善してゆくものと思われる。一方、環境対策が進むと同時に電力市場が発達する欧州型の国々では、天然ガスと再生可能エネルギーとの価格競争が起こっており、IRENA（International Renewable Energy Agency）が収集したデータでは、大規模太陽光発電（PV）プロジェクトにおける、2010 年以降の発電費用の LCOE（Levelized Cost Of Electricity：均等化発電原価）の国際的加重平均は、2017 年発注の新規プロジェクトで USD 0,10/kWh となり、2010 年以降 73% 低下していると述べている。これに対し、G20 諸国の 2017 年の化石燃料による火力発電費用は、USD 0.05~USD 0.17/kWh の範囲と予測されていた。

本章では、天然ガスの多様性が失われつつあることから、主に欧州で起こっている再生可能エネルギーとの価格競争という問題に波及した結果を述べた。この驚異的な再生可能エネルギーの LCOE の低下傾向は、様々な現象を引き起こしつつあり、第 7 章の考察で述べる。

第 6 章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

表-31 エネルギーセキュリティ指標の総合とりまとめ表

	Self-sufficiency %			Share of renewable in electricity %			Energy efficiency			Resource diversity			Supplier diversity			Choke point risk			Energy price Industry 2010=100			CO <sub>2</sub> emissions		
	2010	2012	2015	2010	2012	2015	2010	2012	2015	2010	2012	2015	2010	2012	2015	2010	2012	2015	2010	2012	2015	2010	2012	2015
1 Australia	250	250	304	0.09	0.11	0.14	0.059	0.057	0.055				114	105	90	211	202	191						
2 Austria	35	39	36	0.66	0.75	0.76	0.071	0.066	0.066				104	99	86	17	15	14						
3 Belgium	26	26	20	0.07	0.13	0.21	0.088	0.081	0.082				107	104	102	23	20	17						
4 Canada	158	165	174	0.61	0.63	0.63	0.883	0.116	0.108				109	115	103	110	101	103						
5 Chile	30	35	36	0.40	0.36	0.44	0.890	0.103	0.096			0.72	0.71	0.71	..	..	..	25	34	33				
6 Czech Rep.	71	77	69	0.07	0.09	0.11	0.889	0.125	0.114			0.60	0.61	0.65	104	98	84	64	59	54				
7 Denmark	120	109	99	0.32	0.48	0.66	0.954	0.042	0.039						111	105	88	22	15	11				
8 Estonia	88	92	102	0.08	0.12	0.14	0.848	0.134	0.123						115	110	94	15	13	12				
9 Finland	47	51	55	0.30	0.41	0.44	0.893	0.100	0.098						117	110	103	32	21	17				
10 France	52	53	56	0.14	0.15	0.16	0.939	0.057	0.053			0.72	0.73	0.70	0.34	0.28	0.34	55	45	33				
11 Germany	40	39	39	0.17	0.23	0.29	0.933	0.062	0.060			0.78	0.77	0.78	0.42	0.42	0.42	338	341	323				
12 Greece	34	39	37	0.18	0.17	0.29	0.935	0.068	0.067						113	108	95	42	43	31				
13 Hungary	43	45	45	0.08	0.08	0.11	0.854	0.136	0.132						118	112	91	16	15	12				
14 Iceland	82	90	88	1.00	1.00	1.00	0.809	0.191	0.188								0	0	0					
15 Ireland	14	10	14	0.00	0.01	0.02	0.948	0.047	0.035						122	119	92	13	13	12				
16 Israel	17	13	32	0.00	0.01	0.02	0.937	0.055	0.050						122	..	..	41	49	39				
17 Italy	18	22	24	0.26	0.31	0.39	0.937	0.060	0.058			0.57	0.60	0.62	0.69	0.51	0.53	136	129	109				
18 Japan	19	6	7	0.11	0.11	0.16	0.946	0.052	0.049			0.76	0.72	0.71	1.28	1.22	1.19	491	593	560				
19 Korea	18	18	19	0.01	0.01	0.02	0.856	0.143	0.138			0.63	0.62	0.60	0.73	0.73	0.74	286	311	306				
20 Luxembourg	3	3	4	0.08	0.11	0.32	0.926	0.071	0.058						122	109	86	1	1	1				
21 Mexico	128	116	102	0.17	0.14	0.15	0.888	0.105	0.099						105	115	96	138	154	143				
22 Netherlands	84	82	64	0.09	0.12	0.12	0.921	0.073	0.065						100	103	95	61	55	63				
23 New Zealand	92	83	80	0.73	0.72	0.80	0.912	0.083	0.084						109	99	79	7	8	6				
24 Norway	606	684	703	0.96	0.98	0.98	0.950	0.046	0.044						89	89	84	3	2	2				
25 Poland	67	73	71	0.07	0.10	0.14	0.854	0.133	0.119						110	99	85	161	157	150				
26 Portugal	24	22	24	0.53	0.43	0.48	0.920	0.073	0.071						116	112	104	15	18	19				
27 Slovak Rep.	35	39	40	0.22	0.19	0.23	0.872	0.109	0.099						110	101	93	9	8	7				
28 Slovenia	51	51	52	0.29	0.28	0.29	0.891	0.106	0.098						109	104	85	6	6	5				
29 Spain	27	27	28	0.33	0.30	0.35	0.936	0.062	0.056			0.71	0.67	0.61	0.98	0.83	0.53	72	91	81				
30 Sweden	66	72	75	0.55	0.59	0.63	0.929	0.066	0.060						103	99	92	11	7	6				
31 Switzerland	48	50	50	0.57	0.59	0.62	0.964	0.033	0.030						112	106	98	3	3	3				
32 Turkey	31	26	25	0.26	0.27	0.32	0.899	0.097	0.086						107	100	86	102	115	124				
33 UK	73	61	66	0.07	0.11	0.25	0.943	0.052	0.047			0.65	0.68	0.73	0.06	0.12	0.06	178	183	123				
34 USA	78	84	92	0.10	0.12	0.13	0.899	0.095	0.092			0.72	0.71	0.69	0.45	0.54	0.34	2346	2117	1985				
35 China	89	85	84	0.18	0.20	0.24	0.749	0.236	0.209			0.50	0.50	0.52				3648	4184	4423				
36 Brazil	93	89	94	0.85	0.82	0.74	0.905	0.096	0.097			0.67	0.66	0.66				45	55	91				
37 India	72	68	65	0.16	0.16	0.15	0.710	0.277	0.252						790	922	1067							
38 Russian Fed.	186	178	188	0.16	0.16	0.16	0.725	0.256	0.265						892	947	812							

第6章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

表-32 エネルギーセキュリティ指標の 計算結果 (1) アジア

Security Index		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Japan	Self-sufficiency rate	20%	20%	19%	17%	19%	20%	20%	20%	18%	20%	20%	11%	6%	6%	7%	8%	
	Energy efficiency	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07
	Resource diversity	0.26	0.25	0.25	0.26	0.25	0.26	0.25	0.27	0.27	0.25	0.24	0.26	0.28	0.29	0.28	0.29	0.28
	Price Index	79.8	83.1	80.8	84.2	85.7	91.5	96.7	97.3	110.2	100.8	100.0	110.7	118.3	127.8	134.2	121.0	109.2
China	CO2 Emissions	51.9	52.3	54.2	54.9	52.9	53.3	52.4	54.9	53.4	53.1	52.8	60	63.6	64.6	64.7	63.9	64.4
	Import diversity	0.20	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17	0.16	0.14	0.14	0.14	0.14	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15
	Self-sufficiency rate	99%	101%	98%	97%	95%	94%	92%	91%	91%	89%	88%	88%	85%	85%	85%	84%	80%
	Energy efficiency	0.51	0.48	0.47	0.49	0.50	0.50	0.48	0.46	0.43	0.42	0.42	0.41	0.39	0.38	0.36	0.34	0.31
Korea	Resource diversity	0.41	0.41	0.42	0.44	0.45	0.48	0.49	0.50	0.49	0.50	0.50	0.51	0.49	0.48	0.47	0.48	0.46
	CO2 Emissions	65.5	66.6	67.3	68.4	70.1	72.5	73.1	73.7	73.9	74.1	73.4	75.2	74.7	75.4	73.5	72.7	73.1
	Import diversity	0.27	0.23	0.24	0.24	0.22	0.22	0.20	0.22	0.20	0.18	0.14	0.14	0.16	0.17	0.18	0.20	0.19
	Self-sufficiency rate	18%	18%	19%	19%	18%	20%	20%	20%	19%	20%	19%	18%	18%	17%	18%	19%	18%
India	Energy efficiency	0.27	0.26	0.25	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22
	Resource diversity	0.53	0.49	0.40	0.39	0.42	0.43	0.44	0.41	0.41	0.38	0.37	0.39	0.38	0.37	0.37	0.40	0.40
	Price Index	65.2	70.0	72.3	76.8	78.5	84.3	92.5	95.8	102.5	98.6	100.0	104.0	112.4	117.2	120.0	112.2	109.5
	CO2 Emissions	54.8	55.7	52.4	51.6	52.7	52	51.9	51.3	51.4	52.3	52.6	52.6	52.2	52	50.1	51	49.8
Chinese Taipei	Import diversity							0.75	0.68	0.53	0.43	0.75	0.71	0.65	0.73	0.74	0.36	0.40
	Self-sufficiency rate	80%	80%	80%	80%	79%	78%	76%	75%	74%	73%	72%	71%	68%	67%	65%	64%	65%
	Energy efficiency	0.55	0.53	0.50	0.50	0.49	0.46	0.44	0.43	0.43	0.44	0.42	0.42	0.41	0.39	0.39	0.36	0.35
	Resource diversity	0.29	0.30	0.30	0.30	0.31	0.30	0.31	0.31	0.32	0.33	0.33	0.33	0.34	0.35	0.35	0.34	0.34
Thailand	CO2 Emissions	47.9	47.9	48	47.7	48.9	49.8	51.2	52.9	53.1	53.7	53.9	54.2	56.1	56.8	58.4	57.8	57.5
	Import diversity	0.52	0.53	0.52	0.53	0.50	0.44	0.37	0.31	0.25	0.24	0.17	0.21	0.31	0.34	0.31	0.37	0.26
	Self-sufficiency rate	14%	13%	13%	13%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	11%	10%
	Energy efficiency	0.29	0.30	0.30	0.30	0.29	0.28	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.22	0.22	0.21
Singapore	Resource diversity	0.35	0.35	0.35	0.40	0.43	0.45	0.42	0.39	0.37	0.40	0.33	0.32	0.36	0.34	0.33	0.33	0.34
	CO2 Emissions	60.3	59	58.4	58.8	58.6	59.3	59.7	57.8	57.3	56.1	55.3	55.8	55.5	54.8	54.3	54.9	56.2
	Import diversity												0.81	0.78	0.73	0.71	0.62	0.61
	Self-sufficiency rate	61%	58%	56%	55%	53%	56%	57%	57%	61%	60%	60%	58%	60%	58%	59%	56%	57%
Aian Country	Energy efficiency	0.33	0.33	0.34	0.35	0.35	0.35	0.34	0.34	0.34	0.34	0.35	0.34	0.34	0.36	0.35	0.34	0.34
	Resource diversity	0.41	0.42	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.39	0.39	0.41	0.38	0.38	0.38	0.37	0.36	0.39	0.37
	CO2 Emissions	50.3	51.4	49.2	47.5	48.1	48.3	47.7	47.5	47.5	45.9	45.3	45	45.2	43.8	43.4	44	42.2
	Import diversity	0.57	0.57	0.59	0.63	0.67	0.66	0.73	0.71	0.76	0.75	0.65	0.65	0.74	0.58	0.50	0.46	0.41
Aian Country	Self-sufficiency rate	1%	2%	2%	2%	1%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	3%	2%	2%	2%
	Energy efficiency	0.14	0.16	0.15	0.18	0.19	0.13	0.13	0.11	0.12	0.10	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09
	Resource diversity	0.87	0.81	0.73	0.69	0.69	0.59	0.59	0.55	0.58	0.54	0.56	0.57	0.54	0.50	0.49	0.51	0.51
	CO2 Emissions	53.9	47.2	46.6	35.6	30.8	41.9	39.5	43.9	38.1	45.4	41.6	42.5	42.7	43.5	41.5	39.5	39.5
Aian Country	Import diversity								0.74	0.68	0.42	0.18	0.24	0.34	0.31	0.29	0.29	0.30

第6章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

表-33 エネルギーセキュリティ指標の計算結果(2) ヨーロッパ1

Security Index		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Germany	Self-sufficiency rate	40%	39%	40%	40%	40%	41%	40%	42%	40%	41%	40%	40%	39%	38%	39%	39%	37%	
	Energy efficiency	TPES/GDP	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	
	Resource diversity	HHI	0.23	0.23	0.23	0.24	0.25	0.24	0.24	0.26	0.24	0.24	0.22	0.22	0.23	0.22	0.22	0.22	0.23
	Price Index		64.0	66.3	68.7	74.1	76.1	84.5	91.4	91.8	100.7	95.4	100.0	108.6	110.3	112.2	109.6	101.6	96.3
	CO2 Emissions	CO2/TPES	57.6	57.3	57.6	58.2	56.6	55.7	55	55.7	55.9	55.4	55.5	56.4	57.2	57.4	56.4	56.6	56.3
United States	Import diversity	HHI	0.33	0.32	0.32	0.30	0.31	0.30	0.32	0.33	0.32	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.32	0.34	0.46
	Self-sufficiency rate	%	73%	76%	73%	72%	71%	70%	72%	71%	75%	78%	78%	82%	85%	86%	91%	92%	88%
	Energy efficiency	TPES/GDP	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13
	Resource diversity	HHI	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29	0.30	0.32
	Price Index		78.6	79.8	72.1	81.8	88.1	103.6	106.9	108.0	124.7	93.6	100.0	108.3	105.3	105.9	106.4	85.4	77.7
Italy	CO2 Emissions	CO2/TPES	60.2	61.1	58.7	59.3	58.9	58.7	58.3	58.1	57.8	56.5	57.7	56	54.5	55.1	54.5	53.7	53.3
	Import diversity	HHI	0.88	0.88	0.89	0.77	0.73	0.74	0.75	0.68	0.82	0.77	0.77	0.81	0.89	0.93	0.96	0.93	0.94
	Self-sufficiency rate	%	16%	16%	16%	16%	16%	16%	16%	17%	18%	19%	19%	19%	22%	24%	25%	24%	22%
	Energy efficiency	TPES/GDP	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07
	Resource diversity	HHI	0.38	0.37	0.37	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.31	0.30	0.28	0.27	0.26	0.28	0.28
Turkey	Price Index		79.1	85.3	84.9	88.2	89.4	98.7	106.9	104.6	103.1	96.4	100.0	107.7	121.4	120.2	117.4	108.5	102.9
	CO2 Emissions	CO2/TPES	58.5	58.3	58.9	58.6	59.4	58.5	58.1	57.3	56.4	54	53.9	54.6	54.3	51.9	51.9	51.6	51.5
	Import diversity	HHI	0.39	0.35	0.31	0.30	0.29	0.26	0.24	0.24	0.24	0.22	0.22	0.21	0.20	0.27	0.24	0.25	0.27
	Self-sufficiency rate	%	35%	35%	33%	31%	30%	28%	28%	27%	29%	30%	30%	30%	28%	26%	24%	25%	26%
	Energy efficiency	TPES/GDP	0.15	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.14	0.13	0.14	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12
Netherlands	Resource diversity	HHI	0.22	0.25	0.24	0.25	0.24	0.24	0.24	0.25	0.24	0.21	0.22	0.23	0.23	0.22	0.23	0.22	0.20
	Price Index		77.4	84.7	85.6	82.0	76.0	84.1	85.8	84.7	95.1	96.2	100.0	99.4	107.0	110.4	100.1	90.0	86.3
	CO2 Emissions	CO2/TPES	63	62.1	62	61.7	61.4	61.4	61.7	63.4	63.7	63.5	60.5	61	60.5	59.2	61.6	59.2	59.2
	Import diversity	HHI	0.56	0.54	0.51	0.43	0.47	0.48	0.46	0.45	0.42	0.35	0.29	0.39	0.38	0.39	0.36	0.36	0.34
	Self-sufficiency rate	%	78%	79%	78%	72%	82%	77%	76%	75%	85%	80%	84%	85%	84%	90%	82%	65%	62%
France	Energy efficiency	TPES/GDP	0.10	0.10	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08
	Resource diversity	HHI	0.37	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35	0.36	0.38	0.36	0.34	0.34	0.33	0.32	0.33
	Price Index		87.6	88.3	83.8	86.9	87.7	94.6	101.5	102.1	106.1	106.3	100.0	98.0	100.0	100.7	103.1	99.5	94.9
	CO2 Emissions	CO2/TPES	51.2	51.2	50.7	49.8	49.5	49	48.3	48.6	49.3	48.5	48.2	48.3	47.5	48.1	48.4	50.7	50.3
	Import diversity	HHI	0.24	0.23	0.22	0.21	0.19	0.17	0.18	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.24	0.26	0.28	0.25
Self-sufficiency rate	%	52%	51%	51%	51%	50%	50%	51%	51%	51%	51%	52%	54%	53%	54%	56%	54%	54%	
Energy efficiency	TPES/GDP	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	
Resource diversity	HHI	0.33	0.32	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32	0.31	0.32	0.32	0.29	0.28	0.31	0.27	0.27	0.30	0.27	
Price Index		72.6	69.6	67.3	69.1	73.7	82.8	86.1	92.2	101.4	91.8	100.0	109.2	112.1	110.9	108.1	103.0	99.5	
CO2 Emissions	CO2/TPES	34.6	33.8	33.2	32.9	32.5	32.6	32.3	31.9	31.3	31.5	30.9	29.5	29.8	29.7	27.9	28.1	28.6	
Import diversity	HHI	0.51	0.51	0.53	0.72	0.59	0.60	0.44	0.50	0.56	0.40	0.35	0.35	0.41	0.41	0.42	0.47	0.49	

第 6 章 エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト

表-34 エネルギーセキュリティ指標の 計算結果 (3) ヨーロッパ2

		Security Index																	
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Europe Country No.2	UK	Self-sufficiency rate	122%	117%	118%	110%	102%	92%	85%	83%	80%	80%	73%	69%	60%	57%	60%	65%	67%
		Energy efficiency	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07
		Resource diversity	0.36	0.34	0.36	0.35	0.39	0.36	0.35	0.36	0.37	0.36	0.36	0.35	0.35	0.32	0.30	0.28	0.28
		Price Index	70.7	70.7	69.5	70.7	74.0	84.3	92.5	89.8	89.8	102.0	98.2	100.0	104.4	105.6	105.3	103.2	96.1
		CO2 Emissions	55.8	57.1	56.4	56.8	57.4	57	58.1	59	58.1	58.1	56	55.9	55.6	56.9	55.9	54.2	51.7
		Import diversity	0.40	0.35	0.37	0.38	0.32	0.25	0.20	0.20	0.23	0.21	0.19	0.20	0.22	0.24	0.34	0.37	0.39
	Spain	Self-sufficiency rate	26%	27%	25%	25%	23%	21%	22%	22%	21%	22%	24%	27%	25%	27%	30%	31%	28%
		Energy efficiency	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08
		Resource diversity	0.30	0.28	0.27	0.26	0.26	0.27	0.27	0.27	0.26	0.28	0.29	0.29	0.29	0.33	0.36	0.37	0.38
		Price Index	76.2	74.6	75.0	73.5	75.0	88.0	92.1	88.0	88.0	101.4	93.5	100.0	106.2	112.6	110.2	99.3	90.9
		CO2 Emissions	54.6	53.4	55.1	54.3	54.9	56.2	54.7	56.1	56.1	53.2	51.6	49	50.3	49.6	47.9	48.4	49.6
		Import diversity	0.30	0.31	0.31	0.31	0.34	0.30	0.35	0.34	0.34	0.28	0.28	0.28	0.33	0.37	0.35	0.36	0.32
	Poland	Self-sufficiency rate	89%	89%	90%	88%	86%	85%	80%	75%	73%	71%	67%	67%	67%	73%	72%	72%	67%
		Energy efficiency	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.24	0.22	0.22	0.20	0.21	0.20	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17
		Resource diversity	0.46	0.45	0.44	0.44	0.42	0.41	0.41	0.40	0.39	0.38	0.38	0.37	0.38	0.37	0.39	0.37	0.34
		Price Index	53.1	57.8	59.4	62.5	66.4	74.8	77.3	77.8	77.8	94.5	90.7	100.0	106.0	109.8	103.0	99.2	85.0
		CO2 Emissions	77.9	77.1	76.3	77.1	77.9	76.8	76	75.9	73.7	74.1	74.1	73.1	71.7	72.7	71.5	70.9	71.1
		Import diversity	0.37	0.43	0.46	0.43	0.37	0.32	0.27	0.24	0.24	0.24	0.24	0.22	0.18	0.22	0.28	0.26	0.22

# 第7章 考察

---

第7章では、「原発事故後の日本のエネルギーセキュリティレベル」、「指標の集約化」、「再生可能エネルギーのコストの潮流」について考察する

---



### 第7章 考察

#### 7.1 エネルギーセキュリティ指標に重みを付ける

本稿第3章において、「福島原発事故から5年経過後の、日本のエネルギー・セキュリティレベルの変化」について研究を行なった。その際には、選定したエネルギーセキュリティ指標に「原発に対する大衆の受容性指標」も加えた上で、日本のセキュリティレベルを評価した。セキュリティ指標は、正規化 Normalization を行い、T-scores 法と呼ばれる平均値を50とする偏差値によって比較し定量評価を行った結果を示した。しかしこの方法では、原発の受容性指標を組み入れても、結果は福島原発事故以前のセキュリティレベルとほとんど変わらない、という結果しか得られなかった。そこで指導教授から、エネルギーセキュリティ指標には重みを付け、その重みを変化させるシミュレーションを行うこと、という課題をいただいた。本稿第7章「考察」では、指標に重み付けを行い、重み付けの違いによってセキュリティレベルがどのように変化するかについて考察した。

##### 7.1.1 エネルギーセキュリティの定義を明確にする

もう一度、エネルギーセキュリティの定義から課題を明確にしてゆく。

本稿第2章において、エネルギーセキュリティの定義について、現在の研究がいまだに流動的で確定できていないことを述べた。エネルギーセキュリティの定義が定まらない理由は、各国のエネルギー政策が、経済的課題、国際政治上の困難性、環境規制や地政学的位置などそれぞれの国が抱えるリスクが異なっていることから、取りうるエネルギーセキュリティ政策の焦点もそれぞれ異なるからに他ならないためである。

IEAなどのエネルギーの研究機関や日本政府などでも定義はそれぞれ異なっているが、Ang et al. [48] や Sovacool [43]、また Kruyt et al. [94] がエネルギーセキュリティの研究の中で、一義にエネルギーセキュリティの定義を定めることが難しいことを繰り返して述べている。しかしだからこそ、福島原子力発電所の事故を契機として、日本のエネルギーセキュリティの状況を浮かび上がらせるという目的のために、本課題におけるエネルギーセキュリティの定義は明確にしておく必要がある。

本稿第2章では、福島原子力発電所の事故のように、大規模で長期にわたり、各方面への影響も広範囲に及ぶような事態に合致したエネルギーセキュリティの定義は、まず一般的なエネルギーセキュリティの定義項目（キーワード）は全て網羅する必要がある、と考えた。そのため、Sovacool [43]

## 第7章 考察

が、エネルギーセキュリティの定義について書かれている学術論文は現在45個ある、として論文の中に記載されていたので、この45の論文を全て並べ、記載されているエネルギーセキュリティの定義の中から、セキュリティ・キーワードを高頻度の順に挙げた。そしてそのうち頻度の高いものから6個を並べたものが、次の表である。（この表は第2章「エネルギーセキュリティ定量化手法」でも使用した。）

表-35 学術文献によるエネルギーセキュリティの定義上位6項目と新たな指標

順位	定義項目	出現数	選定した指標
第1位	環境への配慮	23	CO <sub>2</sub> 排出量
第2位	経済的な価格で	21	工業用エネルギー価格
第3位	安定した十分なエネルギー供給	19	エネルギー自給率
第4位	資源への安全なアクセス	17	原油のチョークポイントリスク
第5位	エネルギーの効率利用	9	電力部門のエネルギー消費効率
第6位	資源の多様性確保	7	エネルギー資源多様性
新たな指標	原発に対する大衆の受容性	—	原発に対する大衆の世論

新たに作成した指標

この表の定義の要素（キーワード）は、現在エネルギーセキュリティの中で、最も関心が高いものから順に並んでおり、環境問題が最も上位にあり、次がエネルギーコスト、その次が資源の安定供給と並んでいることは、きちんと世の中の世相を反映しているものと思われる。福島原発事故の特有の項目として、「原子力発電への一般世論の受容性」を定義項目の一つとして加えた。この計7項目が、本稿で定めた定義の項目である。

福島原発事故以後、日本の世論は原子力発電に対し厳しい批判的な意見が大勢を占め、8年が経過した今でもその意見は衰えていない。しかし政府が2018年に立てた第5次エネルギー基本計画では、原子力発電の比率を20%～22%にするとし、新たな原発の建設は避けられない状況にある。政府のエネルギー政策が世論と乖離することは、大きなリスクである、という考え方の元に原発に対する世論の受容性を項目に加えた。これによって、本稿におけるエネルギーセキュリティの定義が定まり、定義に沿った指標が選定可能となる。本研究でエネルギーセキュリティが高い状態とは、「エネルギーの効率的な利用の元に、資源の多様性を確保し、環境への十分な配慮をしつつ、資源への安全なアクセスを確保し、安定した十分なエネルギーを、リーズナブルな価格で、確保することを言う。

## 第 7 章 考 察

また特に原子力発電については、「大衆への受容性を確保することが重要である」ということとなり、これが本研究におけるエネルギーセキュリティの定義である。

### 7.1.2 定義に合致した指標を選定する

この定義 7 項目には、APEREC (Asia Pacific Energy Research Centre) の 4A's (Availability, Accessibility, Affordability, Acceptability) の 4 つの要素が全て含まれている。本研究では、これらのエネルギーセキュリティの定義項目に一つずつ対応する 7 つの指標を選定した。

エネルギー自給率 (SS: Energy Self-Sufficiency Rate)、エネルギーの効率的利用 (EE: Energy Consumption Efficiency)、資源多様性 (RD: Resource Diversity)、チョークポイントリスク (Choke Point Risk)、資源価格 (EP: Energy Price)、環境影響 (EI: Environmental Impact)、それに原発への受容性 (PA: Public Acceptance for Nuclear Power) の 7 種の指標に基づき、エネルギーセキュリティを包括的に評価する。

エネルギーセキュリティ定義項目、Sovacool [43] の 45 のエネルギーセキュリティ定義から出現したキーワードの数、選定したエネルギーセキュリティ指標については、次の表に一覧記載した。

表-36 4A's、エネルギーセキュリティ定義項目、項目の出現数、選定した指標

4A's	定義項目	出現数	選定した指標
Availability	① 安定した十分なエネルギー供給	19	エネルギー自給率
Accessibility	② エネルギーの効率利用	9	電力部門のエネルギー消費効率
	③ 資源の多様性確保	7	エネルギー資源多様性
	④ 資源への安全なアクセス	17	原油のチョークポイントリスク
Affordability	⑤ 経済的な価格で	21	工業用エネルギー価格
Acceptability	⑥ 環境への配慮	23	CO <sub>2</sub> 排出量
	⑦ 原発に対する大衆の受容性	--	原発に対する大衆の世論

### 7.2 指標を正規化する

第 2 章「エネルギーの定量化手法」でも述べたように、算出された各指標値は、通常異なる単位を持ち、縮尺が異なっており、互いに独立していて、指標どうしを比較するこ

## 第7章 考察

とはできない。総合評価を得るために、何らかの変換が必要（これを正規化: Normalization と言い、第2章第4項で述べた）であるが、変換の一般的な方法として5項目ほど挙げた。本稿では T-scores と呼ばれる平均が 50 の偏差値で表す方法と、指標が全て 0~1 の範囲になるように、指標の最小値と最大値を 0 から 1 の範囲に位置付ける Re-scaling 法の 2 つの方法によって正規化: Normalization を行なった。

T-scores 法（偏差値法）の正規化の方法は、それぞれ計算された指標値は、正規分布すると仮定し、その平均値 (50) からの偏差値を評価点とする方法である。偏差値  $T_i$  を表す式は次の通り。

$$T_i = 10 * (x_i - \mu_x) / \sigma_x + 50 \quad (21)$$

ただし、 $T_i$  は、指標値  $i$  の偏差値。 $x_i$  は、指標値  $i$  のある値。 $\mu_x$  は、値  $x$  の平均値、 $\sigma_x$  は、標準偏差を示す。

福島原発事故前と 1 年後、4 年後のエネルギーセキュリティレベルの変化を、正規化した状況で表示したものが第3章表-17~表 20 の表である。この表は各指標を全項目で比較できる偏差値で（平均値を 50 とする）置き直したものである。

一方、正規化を Re-scaling 法によって行なった場合について表-42 に示す。Re-scaling 法は、指標値を 0~1 の間で置き直す方法であり、最高値と最低値の間で、日本がどの位置にあるかということが T-scores 法（偏差値法）に比べて、より明確に差異が出てくるものと思われる。良好な状態ほど数値 1 に近づく。当初は T-scores 方のみで比較していたが、Re-scaling 法を加えた理由は、次に行う「重み付け」において、それぞれの指標の重みを、ダイレクトに反映できるからである。これらの評価指標はすべて絶対評価であるため、本研究のように国家間のセキュリティレベルの比較ができるだけでなく、例えば日本のエネルギーセキュリティレベルの経年変化に伴う指標間相互のレベル差についても評価が可能である。したがって、3E の概念（Energy security + Economic efficiency + Environment）を直接的に比較することも可能である。

### 7.3 指標に重みを付ける

#### 7.3.1 重み付けの方法

次に本研究における重み付け法について述べる。第2章「エネルギーセキュリティの定量化手法」で述べたように、重み付けの方法は、特に定まった方法はないとしながらも、どこにどのくらいの重みをつけるかということによって、セキュリティレベルの評価

## 第7章 考察

が全く異なることになるので、様々な方法が提案されている。第2章では、Ang et al. の“Energy security: Definitions, dimensions and indexes” および Nardo et al. [74] の“Tools for Composite Indicators Building”が述べているように、主成分分析 (Principal Component Analysis: PCA) 法、階層分析法 (Analytic Hierarchy Process: AHP)、包絡分析法 (Data Envelopment Analysis: DEA)などが提案されている。

山田 [60] は、「先進諸国との比較におけるわが国のエネルギーセキュリティレベルの評価研究」において、定めた5つの評価指標を「同等のウェイトを持つとして」総合的な評点を算出したが、エネルギー政策における重点は、エネルギー需給の状況、国際的な政治経済活動などにより異なっているため、評価指標のウェイト付けを行うことが適切であると述べている。彼はその方法としてAHP（階層分析法）の採用が考えられるとして、一対比較の実施を提案したが、実際には行なっていない。考え方として山田は、安定供給>環境保全>経済性としたが、この論文は2007年に書かれており、本稿で示す順序環境保全>経済性>安定供給とは異なっている。

また蔡ら[145]の研究では、日本のエネルギーセキュリティ代表指標として $\alpha$ 資源多様性、 $\beta$ 資源輸入価格、 $\gamma$ 輸入地域の多様性、 $\delta$ 環境影響、 $\lambda$ エネルギー効率の5種類と上げて指標の重み付けを行なった。その重みは、 $\alpha=1.667$ ,  $\beta=1.894$ ,  $\gamma=0.606$ ,  $\delta=0.758$ ,  $\lambda=0.076$ と決定されているが、環境の重みが資源多様性の半分以下で、資源輸入価格の88%にもなっているのは理解しにくい。また日本の指標として、安定供給に対する指標が無いというのも疑問が残るものと考えられる。

本稿における重み付けは、Sovacool [43] がエネルギーセキュリティの定義は45個あるとした全ての文献を検索して分解し、書かれていた定義の、エネルギーセキュリティのキーワードをピックアップして、その出現数が高いものから順に6個の定義項目を作り、それに合致する指標を6個選定することによって行なった。その際にカウントしたキーワードの出現数を「重み」と見て重み付けを行なった。前7.1.2で掲載した表に出現数を示す。この表の「出現数」は、「環境」配慮項目が最も多く、ついで「経済的価格」、「安定供給」と続くが、この順序はこの3つを柱とする近年の環境、経済重視傾向とも合致する。

### 7.3.2 重み係数の算出方法

## 第7章 考察

それぞれの重み係数の歳出方法を述べる。重み係数の算出方法は、定義項目の数を出現数の総和で除し、1出現数あたりの重みを算出し、それにそれぞれの出現数を乗じて重みを算出する。当然ながら重みの総和は定義項目の数と同じである。

### 7.4 指標の総合化方法について

#### 7.4.1 総合化の方法（加法集計法）

本稿第2章 2.5「エネルギーセキュリティ指標の取りまとめ法」で「加法集計法」と呼ばれる方法について計算した。

まず先に第3章「東日本大震災から5年経過後の日本のエネルギーセキュリティレベルの変化」で使用した指標と、第5章「原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価」で使用した指標を列挙する。

エネルギー自給率（SS：Energy Self-Sufficiency Rate）、エネルギーの効率的利用（EE：Energy Consumption Efficiency）、資源多様性（RD：Resource Diversity）、チョークポイントリスク（CP: Choke Point Risk）、資源価格（EP: Energy Price）、環境影響（EI：Environmental Impact）、それに原発への受容性（PA：Public Acceptance for Nuclear Power）とすると、

#### ① Energy Security (ES)

$$ES = \alpha SS + \beta EE + \gamma RD + \delta CP + \varepsilon EP + \zeta EI + \eta PA \quad (21)$$

ここで、重み係数をそれぞれ  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta$  とする。

第3章「東日本大震災から5年経過後の日本のエネルギーセキュリティレベルの変化」で使用した指標式について、その定義式を式(21)から式(24)に示す。それぞれの指標の式は第3章で解説した。

#### ② Energy Self-Sufficiency Rate (SS: エネルギー自給率)

$$SS = DEPT/PES \times 100 \quad (21)$$

#### ③ Energy Consumption Efficiency (EE: エネルギーの効率的利用)

$$EE_{ETFC} = ETFC/GDP_{2010USD} \quad (22)$$

#### ④ Resource Diversity (RD: 資源多様性)

$$RD = \lambda_i = 1 - HHI_i = 1 - \sum_i S_{if}^2 \quad (23)$$

#### ⑤ Choke Point Risk (CP: チョークポイントリスク)

$$CP_r = \sum_j (\alpha \cdot S) / \sum_i T \quad (24)$$

## 第 7 章 考 察

- ⑥ Energy Price (EP: Industrial electricity prices) 工業用電力価格: USD
- ⑦ Environmental Impact (EI: CO2 Emission) CO2 排出量: MtCO2

ここで、DEP : Domestic Energy Production (自国のエネルギー生産量: Mtoe) 、TPES : Total Primary Energy Supply (一次エネルギー総供給量: Mtoe) 、ETFC: Electricity Total Final Efficiency (kwh)、 $GDP_{2010USD}$  : GDP (2010 USD) 、 $\lambda_i$  : 国  $i$  のエネルギー資源多様性度、 $S_{if}$  : 国  $i$  のエネルギー資源  $f$  の TPES (Total Primary Energy Supply) のシェア、 $f$ : エネルギー資源の種類 (化石燃料、原子力、水力、地熱、太陽光、風力) 、 $\alpha$  : 原油輸出国と輸入国間で通過するチョークポイントの通過回数、 $\sum_i T$  : 輸入国  $i$  の原油の総輸入量: Mtoe、 $\sum_j (\alpha \cdot S)$  : 輸出国  $j$  の原油がチョークポイント通過する量: Mtoe。

第 5 章「原発の受容性を考慮したエネルギーセキュリティの評価」で使用した指標は、次の通り原発に対する大衆の受容性指標 (PA) 指標である。

- ⑧ Public Acceptance for Nuclear Power (PA) 原発に対する大衆の受容性

### 7.4.2 加法集計法の修正

次の表 は、全指標を、Re-scaling 法で 0~1 の間でスケールを置き直して正規化を行い、重み付けを様々なケースで実施 (重みづけをしないケースを含む) した計算の結果である。「合計」というのは、式 (25) で計算した指標計算の総和である。「平均」というのは、「合計」を指標の数で除した平均値：修正した式 (26) を表す。グラフは上方ほどセキュリティレベルが高くなるように調整を行なった。

表-37 ケース 1~8 におけるエネルギーセキュリティレベルの計算結果 (左が合計、右は平均)

合計	2010年	2012年	2015年	平均	2010年	2012年	2015年
ケース1	3.4999	3.0975	2.7509	ケース1	0.5000	0.4425	0.3930
ケース2	3.3497	2.7946	2.0158	ケース2	0.4785	0.3992	0.2880
ケース3	3.1445	2.6465	2.0634	ケース3	0.4492	0.3781	0.2948
ケース4	3.0926	2.6091	2.0754	ケース4	0.4418	0.3727	0.2965
ケース5	2.9677	2.5190	2.1044	ケース5	0.4240	0.3599	0.3006
ケース6	2.7166	2.3379	2.1627	ケース6	0.3881	0.3340	0.3090
ケース7	2.0628	1.8122	1.9153	ケース7	0.3438	0.3020	0.3192
ケース8	2.7339	2.4909	2.5296	ケース8	0.4557	0.4152	0.4216

## 第 7 章 考 察

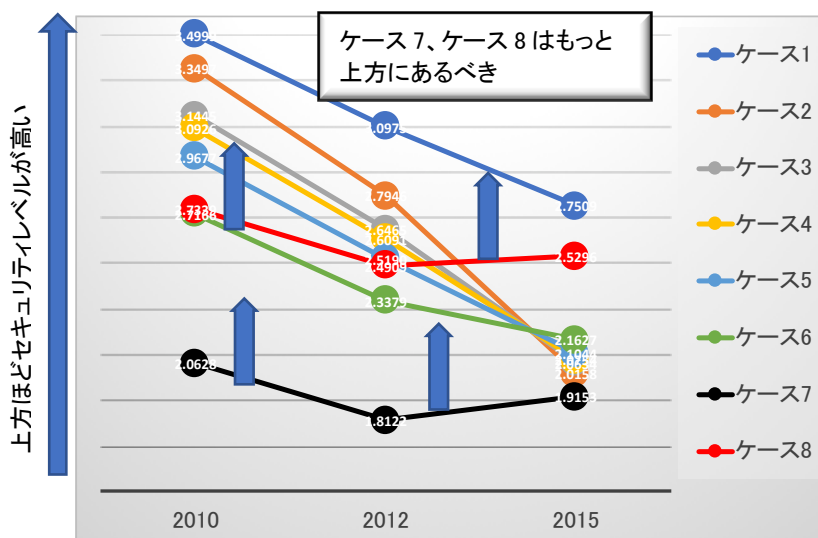


図-34 ケース 1～8 における原発事故前後のエネルギーセキュリティレベルの変化

この図から理解されるように、Energy Security (ES)として、

$$ES = \alpha SS + \beta EE + \gamma RD + \delta CP + \epsilon EP + \zeta EI + \eta PA \quad (25)$$

という式に則り、全指標（重み付けあり）の和で表したが、ケース7およびケース8は、原発の受容性を含まないケース（全6項目）で、他の値全7項目より項目が1つ少ない。そのため、原発の受容性の指標分だけ少なく表示されてしまうことになるため、式(1)は、修正が必要である。結局、合計ではなく、平均値で比較することとした。

修正した式は次の通り。

$$ES' = 1/n * (\alpha SS + \beta EE + \gamma RD + \delta CP + \epsilon EP + \zeta EI + \eta PA) \quad (26)$$

ここで、 $n$  は全指標の数で、 $n=6$  は、原発受容性指標を含まない場合で、 $n=7$  は、原発受容性指標を含む場合である。原発受容性指標を含まない場合は、当然  $\eta=0$  である。

### 7.4.3 場合分け

シミュレーションのw場合分けについて説明する。ケース1～ケース6は、全て原発の受容性を含んだケースで、ケース7と8は、原発の受容性を含まない。また、原発の受容性以外の指標は、そのキーワードの出現数を固定した（重みはケースによって異なる）。その上で、原発の受容性をどの程度（何%）入れるかについて、ケース2～ケース6までパーセンテージを変えて検討した。またケース1とケース8は均等荷重のケースで



## 第 7 章 考 察

ある。それぞれ原発の受容性をどの程度含めるかについての考え方は、次の ①～⑧ の記載の中で述べる。

表-38 ケース 1～8 の場合分け、ケース 8 が従来のやり方

		場合分け	場合分けの内容説明
原発の受容性を組込	重み付けあり	ケース1	原発受容性含む、全項目等荷重 $\alpha=\beta=\gamma=\delta=\varepsilon=\zeta=\eta=1$
		ケース2	原発受容性含む、 $\eta=45$ 回(100%)で重み付けあり
		ケース3	原発受容性含む、 $\eta=32$ 回(71%:2017年の読売新聞社調査における日本人の反原発比率)で重み付けあり
		ケース4	原発受容性含む、 $\eta=29$ 回(64.5%:Win Gallup調査:全世界の反原発比率)で重み付けあり
		ケース5	原発受容性含む、 $\eta=22.5$ 回(50%:定義の半分)重み付けあり
		ケース6	原発受容性含む、 $\eta=11.25$ 回(25%:定義の四半)重み付けあり
		ケース7	原発受容性含まず、重み付けあり
		ケース8	原発受容性含まず、等荷重 $\alpha=\beta=\gamma=\delta=\varepsilon=\zeta=1$

重み係数をそれぞれ $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta$ とする。本研究では、第3章で算出した指標と、新たな指標「原発への大衆の受容」を評価対象として、次の8つの異なるケースを設定した。

- ① ケース 1：全項目等荷重  $\alpha=\beta=\gamma=\delta=\varepsilon=\zeta=\eta=1$
- ② ケース 2：定義項目の出現数  $\alpha=19$  回,  $\beta=9$  回,  $\gamma=7$  回,  $\delta=17$  回,  $\varepsilon=21$  回,  $\zeta=23$  回,  $\eta=45$  回 (全定義でこの指標を採用)
- ③ ケース 3：定義項目の出現数  $\alpha=19$  回,  $\beta=9$  回,  $\gamma=7$  回,  $\delta=17$  回,  $\varepsilon=21$  回,  $\zeta=23$  回,  $\eta=32$  回 (71%：2017年の読売新聞社調査における日本人の反原発比率)
- ④ ケース 4：定義項目の出現数  $\alpha=19$  回,  $\beta=9$  回,  $\gamma=7$  回,  $\delta=17$  回,  $\varepsilon=21$  回,  $\zeta=23$  回,  $\eta=29$  回 (64.5%：Win Gallup 調査における全世界の反原発比率)
- ⑤ ケース 5：定義項目の出現数  $\alpha=19$  回,  $\beta=9$  回,  $\gamma=7$  回,  $\delta=17$  回,  $\varepsilon=21$  回,  $\zeta=23$  回,  $\eta=22.5$  回 (50%：定義の半分で原発受容性指標を採用)
- ⑥ ケース 6：定義項目の出現数  $\alpha=19$  回,  $\beta=9$  回,  $\gamma=7$  回,  $\delta=17$  回,  $\varepsilon=21$  回,  $\zeta=23$  回,  $\eta=11.25$  回 (25%：定義の四半分で原発受容性指標を採用)
- ⑦ ケース 7：原発の受容性指標を含まない6項目評価(ただし、重み付けあり)。定義項目の出現数  $\alpha=19$  回,  $\beta=9$  回,  $\gamma=7$  回,  $\delta=17$  回,  $\varepsilon=21$  回,  $\zeta=23$  回で原発の受容性指標をカウントしないケース
- ⑧ ケース 8：原発の受容性指標を考慮せず、他の6項目の等荷重で評価  $\alpha=\beta=\gamma=\delta=\varepsilon=\zeta=1$

## 第 7 章 考 察

それぞれのケース分けとそれぞれ組み込んだ重みは、次の表-39 に示す。

表-39 指標の重み付け: シミュレーション 8 ケースの場合分け

場合分け		ケース1	ケース2		ケース3		ケース4	
原発受容性の比率		等荷重	全定義で原発採用		71%(日本の反原発)		64.5%(全世界の反原発)	
No.	定義項目	重み	出現数	重み	出現数	重み	出現数	重み
1	自給率	1	19	0.9433	19	1.0395	19	1.0638
2	効率	1	9	0.4468	9	0.4924	9	0.5039
3	多様性	1	7	0.3475	7	0.3830	7	0.3919
4	チョークポイント	1	17	0.8440	17	0.9301	17	0.9518
5	コスト	1	21	1.0426	21	1.1489	21	1.1758
6	環境	1	23	1.1418	23	1.2583	23	1.2877
7	原発受容性	1	45	2.2340	31.95	1.7479	29.025	1.6251
合計		7	141	7	127.95	7	125.025	7

場合分け		ケース5		ケース6		ケース7		ケース8
原発受容性の比率		原発半分:50%		原発1/4:25%		6項目で重み付け		6項目で等荷重
No.	定義項目	出現数	重み	出現数	重み	出現数	重み	重み
1	自給率	19	1.1224	19	1.2401	19	1.1875	1
2	効率	9	0.5316	9	0.5874	9	0.5625	1
3	多様性	7	0.4135	7	0.4569	7	0.4375	1
4	チョークポイント	17	1.0042	17	1.1096	17	1.0625	1
5	コスト	21	1.2405	21	1.3706	21	1.3125	1
6	環境	23	1.3586	23	1.5012	23	1.4375	1
7	原発受容性	22.5	1.3291	11.25	0.7343	--	--	--
合計		118.5	7	107.25	7	96	6	6

### 7.5 得られた結果

得られた結果を整理すると以下の4つの点が浮き彫りになった。(C-は Case-の略)

- ① 原発の受容性を組み込まない全てのケースで、事故の後、セキュリティレベルは一旦下がるが、4年後には殆ど回復すると結論した。しかし原発受容性を加味した全てのケースで、事故後もセキュリティレベルは下がり続け、いずれ逆転して低くなる。
- ② 原発の受容性を組み込んでも組み込まない場合でも、均等荷重 C1 (C8)と、重みを付けた場合 C2~C6 (C7)の比較では、重みを付けた方が、セキュリティレベルは下がる。

## 第7章 考察

- ③ 重み付けを行なった場合、原発の受容性を加味しないC7は、加味する全てのケースC2～C6で、当初は加味するケースがレベルは高いが、原発事故以後3年以内に逆転してレベルが低くなる。
- ④ 原発受容性の重みを重くしたもの、C2から順に軽くC6を比べると、最初は軽いものの方がセキュリティレベルは低いですが、2014年+のある時点で逆転し、これ以降は軽いものの方がセキュリティレベルは高くなる。逆転する時期は、本ケースでは原発受容性の割合には無関係である。

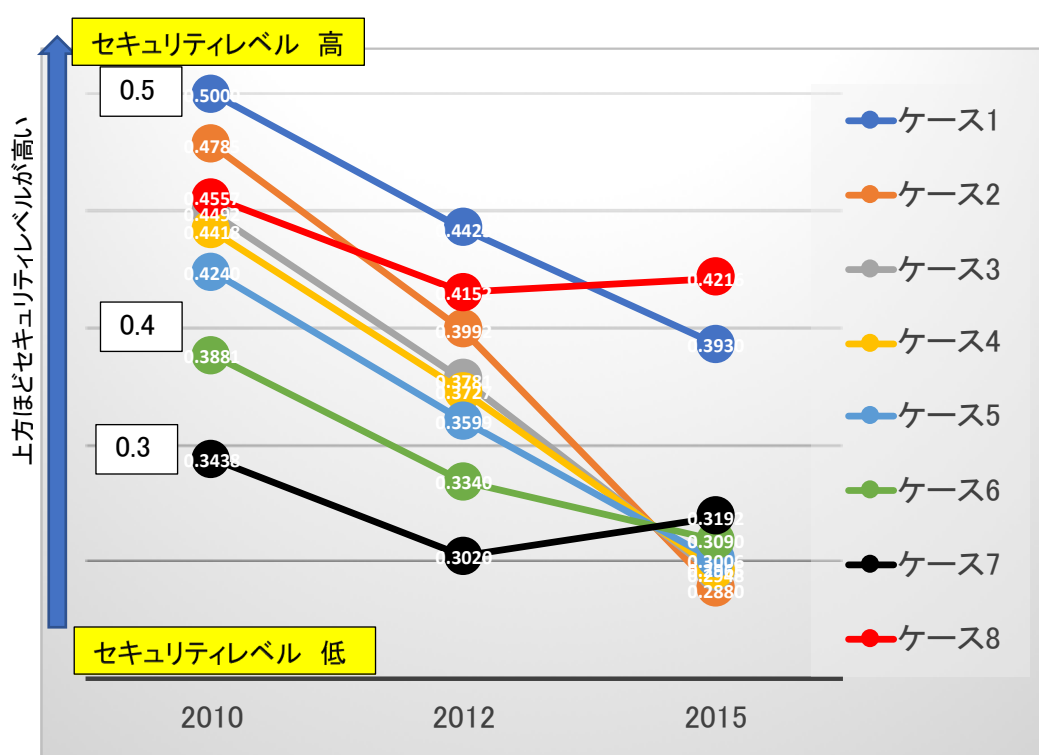


図-35 (修正後)ケース1～8における原発事故前後の、エネルギーセキュリティレベルの変化

以上のことを解釈すると、以下の内容になると思われる。

- ① 原発の受容性指標を組み込むと、エネルギーセキュリティレベルは悪化し続けることがわかる。これは原発の受容性指標のみならず、重みが重いとされた「環境要因」「エネルギー価格」「安定供給」が未だに回復していない可能性を示唆しているものと思われる。
- ② 原発の受容性を組み込んだ場合、均等荷重より重み付けを行なった方がレベルは低くなる。また原発の受容性を組み込まなかった場合、重み付けを行なった場合の方がレ

## 第 7 章 考 察

レベルは低くなる。ということで、今般の重みが重い指標は、日本のエネルギーセキュリティ上の弱みと見ることもできる。

- ③ 25%の組み込みでもまだ若干全体的に原発の受容性に引っ張られて全体のレベルは下がるが、これを超えると原発の受容性を組み込まない場合に似てくる。従って概ね4～5分の1以上の論文で、この原発の受容性指標を組み込んだ指標を使用するならば、この指標の重要性が認識されるものと思われる。

表-40 原発の受容性と重み付け、ケース分けの結果

ケース分け		結果
原発受容性あり	C1-C6	下がり続ける
原発受容性なし	C7 重み付けあり	持ち直す (下)
	C8 重み付けなし	持ち直す (上)
重み付けあり	C2-C7	全体に低い
重み付けなし	C1 原発受容性あり	下がり続ける
	C8 原発受容性なし	持ち直す

### 7.6 原子力発電の受容性について、まとめ

以上によって理解したことを簡単に述べる。

今までは何の疑いもなく、出てきた指標をそのまま評価してきた。従って本研究第3章「福島原発事故から5年経過後の、日本のエネルギー・セキュリティレベルの変化」では、福島原発事故の後、日本のエネルギーセキュリティレベルは2年後に一旦下がったものの、2015年では90%以上回復していると結論付けた。

しかし原発の受容性指標を加味したケース（ケース2～ケース6）はその全てのケースで、福島事故以来セキュリティレベルは下がり続けていることを示している。以上の通り、これまでの結論とは全く異なる結論が出た。

また原発受容性指標を加味したケースでは、均等荷重を行なったケース1に比べ、均等荷重ではない全てのケース（ケース2～ケース6）のセキュリティレベルが低く出た。これは荷重条件が、日本の得意ではないエネルギー安定供給指標や資源価格指標、環境指標の3つの指標の影響が強く出た結果だと思われる。世界的なエネルギー

## 第7章 考察

セキュリティの傾向では、やはりこの3つの指標（安定供給、資源価格、環境）に重心があることを表している。

表-41 「原発に対する受容性」と「指標の重み付け」の総合的結果

- エネルギーセキュリティ指標に重みを付けた  
→合理的な説明が可能になった
- 「原発に対する受容性」をエネルギーセキュリティ指標に組み込んだ→日本の世論の7割が原発の廃止を訴えている
- 日本のエネルギーセキュリティ・レベルは原発事故以降、下がり続けている

### 7.7 あらためて原子力発電の受容性について

#### 7.7.1 本研究における提案：人々の原発に対する意見について

本研究で原子力発電に対する世論の受容性について述べ、これをエネルギーセキュリティの一つの指標とする提案を行なった。その中で原発の設置や運転の継続をめぐる合意形成を左右するのは、原子力発電に関する人々の意識である、という感を深めた。原子力発電に対する人々の受容意識は、科学的に裏付けられた（とみられる）原発の安全性が、社会にどれだけ受け入れられているのかを端的に表す。

世論調査でも一定の結果が出ているように、福島第一原発事故を経験して、原子力利用に関する日本の国民の意識は、大きく変わった。すなわち、日本の（将来を含む）電力供給において、原子力発電は重要な役割を果たすという認識が薄らぎ、原子力発電は必要ないという意見が増加したのである。将来における廃止を望む意見が過半以上（7割以上）を占めるようになり、その後も収束することなくむしろ拡大している。このことは過去の同種の事故にはなかった今回福島原発事故の特徴である。

世論調査によって表される国民意識は、原子力発電について科学的知見により十分検討された結果の判断とは言い難いものがある。しかし、原子力発電によって生じた放射性物質、放射性廃棄物は、十万年にも及ぶ将来に亘る世代の人々の人体に悪影響を及ぼす可能性があるとしてされている。どのような種類のどのような規模の悪影響なのか、正確な予測

## 第7章 考察

はできないし、それを防ぐ方策も明らかではない。影響を軽くする方策はその多くを将来の世代に期待せざるを得ない。自分たちが起こした事象によって、斯様な将来世代への負荷の転嫁が許されることはないのではないかと。一向に下がろうとしない原発の継続使用に対する高い割合の反対意見には、このような原罪的な原発使用への疑問が再燃していると見ている。

### 7.7.2 日本政府の対応

日本政府は2018年7月3日、「第5次エネルギー基本計画」を閣議決定した。第4次エネルギー基本計画が2014年であるから、4年ぶりの改定である。その間で世界は、パリ協定を締結し、脱炭素の具体的目標値の設定が各国に求められ、人々の環境に対する意識は大きく変わった。にも関わらず、第5次エネルギー基本計画で政府は、長期的な電源構成については、2015年7月に閣議決定した「長期エネルギー需給見通し」の中で示した2030年目標を据え置いた。今回日本政府は、2015年に策定した2030年電源構成目標を変えることはしなかった。

据え置かれた2030年目標は、再生可能エネルギーが22%から24%、原子力が20%から22%、このうち再生可能エネルギーには、水力約9%が含まれるため、太陽光、風力、地熱、バイオマスは実質的に13%から15%となる。

原子力発電については、「可能な限り原発依存度を低減する」としながら今回も「重要なベースロード電源」と明記し、再稼働を推進する方針を表明し、その構成数値はなんら変化をさせなかった。

では本稿で調査した人々の原発への受容性の中身である「将来もしくは直ちに原発を廃止する」という意見はどうなるのか。大衆の意見を放置すれば、エネルギーセキュリティ上の大きな問題となることは本研究で示した通りである。

### 7.7.3 国内の定量的なシナリオ分析と脱原発のシナリオ

国内のシンクタンクの調査を見ると、国立環境研究所では2050年でのNo-Nuclearケース、地球環境産業技術研究機構の2050年の原子力フェーズアウトケース、日本経済研究センターの脱原発ケース、WWFジャパンのブリッジシナリオなど、2050年にはCO2 ▲80%を実現しながら原発を使わない選択肢が示されている。

2011年に国民投票で再び脱原発を決めたイタリア、2022年までに原発を止めるとしたドイツ、2034年までに脱原発を実現するとしたスイスなどの例にも見られるように、国民投票などの国民の意思を反映させて脱原発の方向性を決める「国民的議論」の方向性しか日本の人々が納得して原子力発電の動向を決めることはできないのではないかと。2011年の福島原発事故からすでに9年が経とうとしているにも関わらず、はっきりとし

## 第7章 考察

た原子力 it に対する政策を打ち出せない政権に、国民の 70% が No を突きつけていると見ることも可能である。

2050 年までには脱原発を進める、これを国民の何らかの意思によって決める、これしか日本の多くの人々を納得させる政策はないと思われる。これによって日本のエネルギーセキュリティ・レベルは上昇することが本研究で見出せている。

## 第 7 章 考 察

表-42 Re-Scaling 法によって正規化した全指標

	Energy Self-Sufficiency		Energy Efficiency		Resource Diversity		Crude Oil's Choke Point Risk		Energy Price Industry		CO2 Emissions		Total		Average	
	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012	2010	2012
1 Australia			0.9094	0.9016	0.8936	0.7667	0.7597	0.7667	0.7667		0.7185	0.7398	2.3877	2.4281	0.7959	0.8003
2 Austria	0.2078	0.2222	0.8622	0.8648	0.8468	0.9924	0.9924	1.0000	0.9787	0.6583	0.6786	3.0170	3.7061	3.6574	0.7412	0.7315
3 Belgium	0.1494	0.1420	0.7953	0.8033	0.7787	0.7561	0.6374	0.6374	0.7023	0.7052	0.6328	3.3229	3.3304	3.0653	0.6661	0.6131
4 Canada	1.0000	1.0000	0.6811	0.6598	0.6681	0.9044	0.8262	0.8070	0.9732	0.8821	0.8743	4.1954	4.0330	3.9948	0.8066	0.7990
5 Chile	0.1753	0.1975	0.1862	0.7087	0.7131	0.9351	0.9365	0.9506	0.5602	0.7048	0.6522	3.3283	3.4961	3.4517	0.8657	0.6903
6 Czech Rep.	0.4416	0.4568	0.3810	0.6280	0.6426	0.8933	0.9182	0.9086	0.6005	0.6272	0.7285	3.4825	3.5566	3.5931	0.6985	0.7186
7 Denmark	0.7597	0.6543	0.5577	0.9606	0.9631	0.9617	0.4887	0.6172	0.7556	0.7716	0.7346	3.9310	3.9155	3.8488	0.7831	0.7698
8 Estonia	0.5519	0.5494	0.5773	0.5433	0.5861	0.6043			0.8671	0.8147	0.7252	2.9482	2.9366	2.8938	0.7371	0.7234
9 Finland	0.2922	0.2963	0.2970	0.7205	0.7254	0.7106	1.0000	0.9588	0.8583	0.8022	0.7845	3.8273	3.7512	3.7032	0.7655	0.7406
10 France	0.3182	0.3086	0.3043	0.9016	0.9021	0.8537	0.8687	0.7864	0.7947	0.7495	0.6720	4.3114	4.3649	4.1291	0.7186	0.6882
11 Germany	0.2338	0.2222	0.2044	0.8780	0.8811	0.8723	0.9938	0.9737	0.6428	0.6108	0.5186	3.9963	3.9808	3.8269	0.8635	0.8378
12 Greece	0.2013	0.2222	0.1907	0.8858	0.8566	0.8426			0.7581	0.6747	0.6931	2.7805	2.6974	2.6789	0.6951	0.6697
13 Hungary	0.2597	0.2593	0.2394	0.5669	0.5779	0.5660	0.9192	0.9531	0.6594	0.6840	0.7167	3.3733	3.4464	3.4375	0.6747	0.6875
14 Iceland	0.5519	0.5370	0.4938	0.3898	0.3525	0.3277	0.0000	0.0000	0.6355	0.5832	0.5728	1.9418	1.8895	1.8213	0.4854	0.4724
15 Ireland	0.0649	0.0432	0.0609	0.9370	0.9426	0.9787	0.6513	0.7667	0.9003	0.7851	0.7553	3.2610	3.3004	3.3554	0.6622	0.4553
16 Israel	0.0909	0.0617	0.1641	0.8937	0.9098	0.9149			0.9000	0.7178	0.6840	2.8371	2.7074	2.7909	0.6769	0.6717
17 Italy	0.0909	0.1173	0.1152	0.8937	0.8893	0.8809	0.4914	0.5644	0.0000	0.0000	0.0000	2.6912	2.9489	2.8932	0.4485	0.4822
18 Japan	0.1104	0.0185	0.0177	0.9291	0.9221	0.9191	0.9366	0.8554	0.5046	0.3749	dc	2.7339	2.4909	#####	0.4557	0.4170
19 Korea	0.0974	0.0926	0.0870	0.5748	0.5492	0.5404	0.6323	0.6156	0.9953	0.7232	0.7232	2.8748	1.8445	2.4432	0.4791	0.3689
20 Luxembourg	0.0000	0.0000	0.0000	0.8504	0.8443	0.8809			0.7476	0.7689	0.8397	2.5915	2.6074	2.7157	0.6479	0.6789
21 Mexico	0.7987	0.6975	0.5770	0.7008	0.7049	0.7064	0.6699	0.6729	0.8099	0.7559	0.7967	3.6745	3.5279	3.4641	0.7349	0.7056
22 Netherlands	0.5260	0.4877	0.3549	0.8307	0.8361	0.8511	0.4394	0.5231	0.7466	0.7782	0.7624	3.4433	3.4868	3.3130	0.6887	0.6626
23 New Zealand	0.5779	0.4938	0.4468	0.7953	0.7951	0.7702	0.9251	0.9288	0.9865	0.8808	0.8032	4.2631	4.0775	3.8961	0.8526	0.8155
24 Norway				0.9449	0.9467	0.9404	0.6482	0.5373	0.9692	1.0000	1.0000	3.5387	3.5069	3.4561	0.8847	0.8640
25 Poland	0.4156	0.4321	0.3947	0.5669	0.5902	0.6213	0.5918	0.6693	0.7240	0.7585	0.7616	3.0764	3.2605	3.2570	0.6153	0.6514
26 Portugal	0.1429	0.1173	0.1182	0.8268	0.8361	0.8255	0.7498	0.6434	0.7093	0.6169	0.5970	3.3948	3.2923	3.1507	0.6790	0.6585
27 Slovak Rep.	0.2078	0.2222	0.2123	0.6378	0.6885	0.7064			0.4587	0.5137	0.5813	2.2811	2.4053	2.4821	0.5703	0.6205
28 Slovenia	0.3117	0.2963	0.2810	0.7126	0.7008	0.7106			0.7187	0.7429	0.7686	2.7343	2.7322	2.7537	0.6836	0.6884
29 Spain	0.1558	0.1481	0.1422	0.8898	0.8811	0.8894	0.8340	0.7282	0.6636	0.6032	0.7948	3.8847	3.2685	3.8292	0.6475	0.6382
30 Sweden	0.4026	0.4259	0.4154	0.8622	0.8648	0.8723	0.9182	0.9188	0.8507	0.8649	0.8971	3.9962	4.0431	4.0749	0.7992	0.8086
31 Switzerland	0.2922	0.2901	0.2687	1.0000	1.0000	1.0000	0.9885	0.9863	0.7670	0.6887	0.6181	4.0209	3.9516	3.8631	0.8042	0.7726
32 Turkey	0.1818	0.1420	0.1206	0.7441	0.7377	0.7617	0.8720	0.8793	0.5635	0.6129	0.6638	3.1701	3.1481	3.2007	0.6340	0.6296
33 UK	0.4545	0.3580	0.3627	0.9173	0.9221	0.9277	0.6691	0.8406	0.7204	0.6728	0.5185	4.3940	4.3793	4.3643	0.7323	0.7259
34 USA	0.4670	0.5000	0.5177	0.7441	0.7459	0.7382	0.8443	0.8297	0.7904	0.6728	0.5185	3.9355	3.8627	3.7266	0.7871	0.7453
35 China	0.5584	0.5123	0.4689	0.1220	0.1434	0.2170	0.3013	0.3435	1.0000	0.9609	0.8529				0.7725	0.7453
37 India	0.4481	0.4012	0.3586	0.0000	0.0000	0.0000	0.0553	0.7349				0.9818	0.9992	1.0025	0.3273	0.3342
38 Russian Fed.			0.0591	0.0861	0.0000	0.6883	0.7251	0.7073				1.1829	1.1145	1.0904	0.3943	0.3635
36 Brazil	0.5844	0.5309	0.5265	0.7677	0.7418	0.7149	0.8602	0.8757				-0.0325	0.8027	0.7343	0.2383	0.2448
												0.7250	0.7162	0.6827	0.7343	0.6953



第7章 考察

表-43 年度別、ケース別、重み付けと指標値表

定義項目	ケース1 等荷重		ケース2 全定義で採用		ケース3 71%(日本の反原発)		ケース4 64.5%(全世界の反原発)		ケース5 半分50%		ケース6 25%		ケース7 0%(6項目で評価)		ケース8 6項目で等荷重評価		
	重み係数	重み	指標値	重み	指標値	重み	指標値	重み	指標値	重み	指標値	重み	指標値	重み	指標値	重み	指標値
2010年																	
自給率:α	0.1104	1	0.1104	0.9433	0.1041	1.0395	0.1147	1.0638	0.1174	1.1224	0.1239	1.2401	0.1369	1.1875	0.1311	1	0.1104
効率消費:β	0.9291	1	0.9291	0.4468	0.4151	0.4924	0.4575	0.5039	0.4692	0.5316	0.4940	0.5874	0.5458	0.5625	0.5226	1	0.9291
多様性:γ	0.9366	1	0.9366	0.3475	0.3255	0.3830	0.3587	0.3919	0.3671	0.4135	0.3873	0.4569	0.4279	0.4375	0.4097	1	0.9366
チヨークポイント:δ	0.0719	1	0.0719	0.8440	0.0607	0.9301	0.0669	0.9518	0.0695	1.0042	0.0722	1.1096	0.0798	1.0625	0.0764	1	0.0719
コスト:ε	0.5046	1	0.5046	1.0426	0.5261	1.1489	0.5797	1.1758	0.5933	1.2405	0.6260	1.3706	0.6916	1.3125	0.6623	1	0.5046
環境:ζ	0.1813	1	0.1813	1.1418	0.2070	1.2583	0.2281	1.2877	0.2334	1.3586	0.2463	1.5012	0.2721	1.4375	0.2606	1	0.1813
原発受容性:η	0.7660	1	0.7660	2.2340	1.7112	1.7479	1.3389	1.6251	1.2447	1.3291	1.0180	0.7343	0.5624				
合計		7	3.4999	7	3.3497	7	3.1445	7	3.0926	7	2.9677	7	2.7166	6	2.0628	6	2.7339
平均			0.5000		0.4785		0.4492		0.4418		0.4240		0.3881		0.3438		0.4557
2012年																	
定義項目																	
自給率	0.0185185	1	0.01852	0.9433	0.0175	1.0395	0.0192	1.0638	0.0197	1.1224	0.0208	1.2401	0.0230	1.1875	0.0220	1	0.0185
効率	0.9221311	1	0.92213	0.4468	0.4120	0.4924	0.4540	0.5039	0.4647	0.5316	0.4902	0.5874	0.5417	0.5625	0.5187	1	0.9221
多様性	0.8553589	1	0.85536	0.3475	0.2973	0.3830	0.3276	0.3919	0.3352	0.4135	0.3537	0.4569	0.3908	0.4375	0.3742	1	0.8554
チヨークポイント	0.1460854	1	0.14609	0.8440	0.1233	0.9301	0.1359	0.9518	0.1390	1.0042	0.1467	1.1096	0.1621	1.0625	0.1552	1	0.1461
コスト	0.37487	1	0.37487	1.0426	0.3908	1.1489	0.4307	1.1758	0.4408	1.2405	0.4650	1.3706	0.5138	1.3125	0.4920	1	0.3749
環境	0.1739708	1	0.17397	1.1418	0.1986	1.2583	0.2189	1.2877	0.2240	1.3586	0.2364	1.5012	0.2612	1.4375	0.2501	1	0.1740
原発受容性	0.6065574	1	0.60656	2.2340	1.3551	1.7479	1.0602	1.6251	0.9857	1.3291	0.8062	0.7343	0.4454				
合計		7	3.09749	7	2.794573	7	2.646547	7	2.6091	7	2.5190038	7	2.337861	6	1.8122	6	2.4909
平均			0.4425		0.399225		0.378078		0.3727328		0.3598577		0.33398		0.3020		0.4152
2013年																	
定義項目																	
自給率	0.0177433	1	0.01774	0.9433	0.0167	1.0395	0.0184	1.0638	0.0189	1.1224	0.0199	1.2401	0.0220	1.1875	0.0211	1	0.0177
効率	0.9191489	1	0.91915	0.4468	0.4107	0.4924	0.4526	0.5039	0.4632	0.5316	0.4887	0.5874	0.5399	0.5625	0.5170	1	0.9191
多様性	0.8127106	1	0.81271	0.3475	0.2824	0.3830	0.3112	0.3919	0.3185	0.4135	0.3361	0.4569	0.3713	0.4375	0.3556	1	0.8127
チヨークポイント	0.1173089	1	0.11731	0.8440	0.0990	0.9301	0.1091	0.9518	0.1117	1.0042	0.1178	1.1096	0.1302	1.0625	0.1246	1	0.1173
コスト	0.4444846	1	0.44448	1.0426	0.4634	1.1489	0.5107	1.1758	0.5226	1.2405	0.5514	1.3706	0.6092	1.3125	0.5834	1	0.4445
環境	0.2181941	1	0.21819	1.1418	0.2491	1.2583	0.2746	1.2877	0.2810	1.3586	0.2964	1.5012	0.3275	1.4375	0.3137	1	0.2182
原発受容性	0.2213115	1	0.22131	2.2340	0.4944	1.7479	0.3868	1.6251	0.3596	1.3291	0.2941	0.7343	0.1625				
合計		7	2.7509	7	2.015819	7	2.063412	7	2.0754	7	2.1042608	7	2.162663	6	1.9153	6	2.5296
平均			0.39299		0.287974		0.294773		0.2964919		0.3006315		0.308952		0.3192		0.4216

## 第7章 考察

### 7.8 再生可能エネルギーの発電コストについて

6章「エネルギーセキュリティに対するパリ協定のインパクト」6.3.3で、ドイツの事例を取り上げた。ドイツはこれまで、温室効果ガスの削減目標を高く掲げてきた [132] 結果、ドイツの再生可能エネルギーは過去 16 年間で大幅な成長を遂げ（全電源に占める再生可能エネルギーの割合で現状は 32%：2017 IEA）（図-14 参照）、さらに、全電源に占める再生可能エネルギーの割合目標を、2025 年までに 45%に引き上げたことを報告した。

表-44 欧州主要国の再生可能比率と目標 出典) IEA, Renewables Information

	ドイツ	スペイン	イタリア	英国	フランス	米国	中国	日本
2017年 再エネ比率	33.6%	32.4%	35.6%	29.7%	16.5%	17.0%	24.9%	16.0%
主要再エネ	風力	風力	風力	風力	風力	風力	風力	太陽光
目標年	①2025年 ②2035年	2020年	2020年	2030年	2030年	2035年	2020年	2030年
目標比率	①40~45% ②55~60%	40%	35~38%	44% 複数あり	40%	80%	15% 一次エネ 中の比率	22~24%

この表の通り、欧州主要各国（ドイツ、スペイン、イタリア、英国）では、既に全電源に占める再生可能エネルギーの比率は 30%を超えている。またいずれの国も、主要再生可能エネルギーは風力である。

#### 7.8.1 ドイツの事例

本稿第 6 章に置いて、再生可能エネルギーの増加に伴い、自由化された電力市場で電力卸価格が低下、5 年前までは 1MWh あたり約 50 ユーロだった卸価格が、現在は 20 ユーロまで低下したことを報告した。

この価格では資源価格の高い天然ガスだけでなく、低コストと言われる褐炭火力発電所も経済性を失う可能性がある。再生可能エネルギーは燃料費がほぼゼロであり、発電中は二酸化炭素を排出しない。電力卸市場では、このような「良質の」電源から優先的に買われる。つまり電力市場では再生可能エネルギーによる電力がまず買われ、再エネでは埋まらない残りの需要を高い火力が埋めることになる。天然ガス火力発電は競争力を失い、採算状況は悪化、そのため、設備利用率も低い。運営・給電にかかるコストも含め総発電コストが、取引価格を上回る場合があるため、ガス火力発電所の競争力はほとんどないという状態にある[133]。

## 第7章 考察

### 7.8.2 オーストラリアの事例

Green J., Newman P. [143] は、西オーストラリアの首都パースで起こっている現象について分析している。パースは新しい鉄鉱石採掘および天然ガス開発の急成長に依って、過去10年間で人口が200万人を超え、過去7年間で40万人がこの都市に流入した都市である。パースでは、郊外の屋上に設置された太陽光発電が急成長をして、パースの23%以上の住宅に設置されている。しかし、パースのグリッド送電網の電力価格は2008年以降85%以上上昇して高く、消費者物価指数 Consumer Price Index (CPI)を大幅に上回っていることも報告されている。

中国では、太陽光発電に対する世界的な需要の大幅な増加により生産が急増し、太陽電池部品の品質の向上、および全体的なコストの低下が起こった。またこれまで高価であった太陽光発電用蓄電池の小売価格は、予想を大幅に上回って下落し、つい最近 TESLA は、価格がさらに AU \$ 350 / kWh (US \$ 260) まで下がったと発表した。

このように、太陽光発電とリチウムイオン電池をベースにした太陽光発電システムの価格は大幅に下落している。図-36 は、屋上に設置された太陽光発電と家庭用蓄電池システムとの組み合わせが、2017/2018年頃に、パースのグリッド電気料金と逆転した様子を示している。

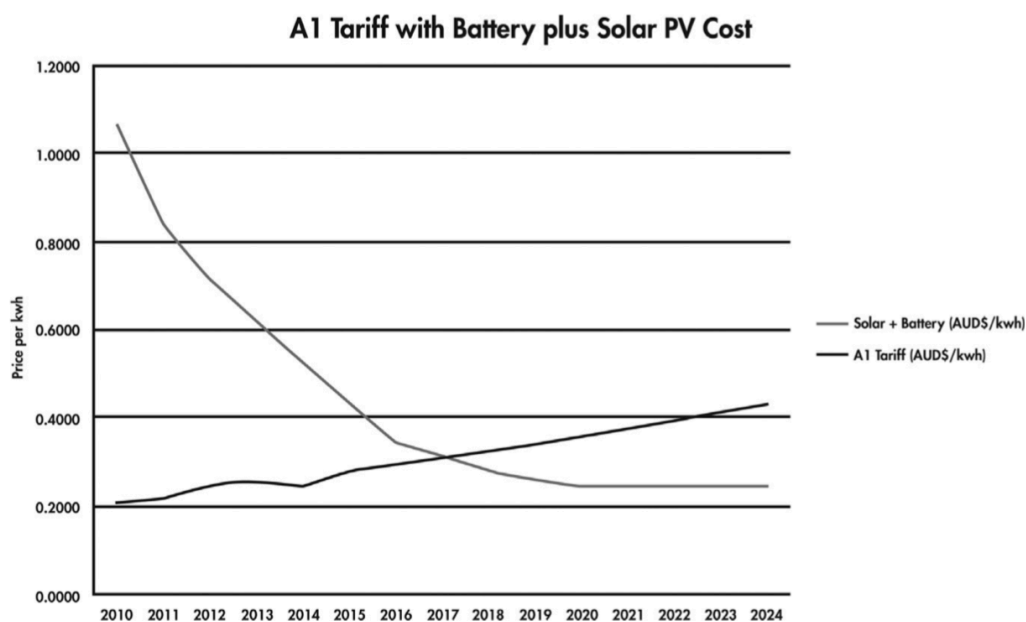


図-36 西オーストラリア州パースの電気料金と、太陽光発電+バッテリーシステムの料金  
出典) Jemma Green\*, Peter Newman, "Citizen utilities: The emerging power paradigm"

## 第7章 考察

### 7.8.3 世界の再生可能エネルギーコストの潮流

次の図は、IEA Renewables 2017 が示した各国や地域の太陽光発電、風力発電の電力市場でのオークション価格、太陽光発電と風力発電の LCOE (Levelized Cost Of Electricity、均等化発電原価) 価格、それに日本の Fit 価格である。図中 100USD/MWh は、11 円/KWh (1USD=110 円) であるから、世界的には太陽光・風力共に 10 円/KWh 未満での売電契約が広がっていることを示している。

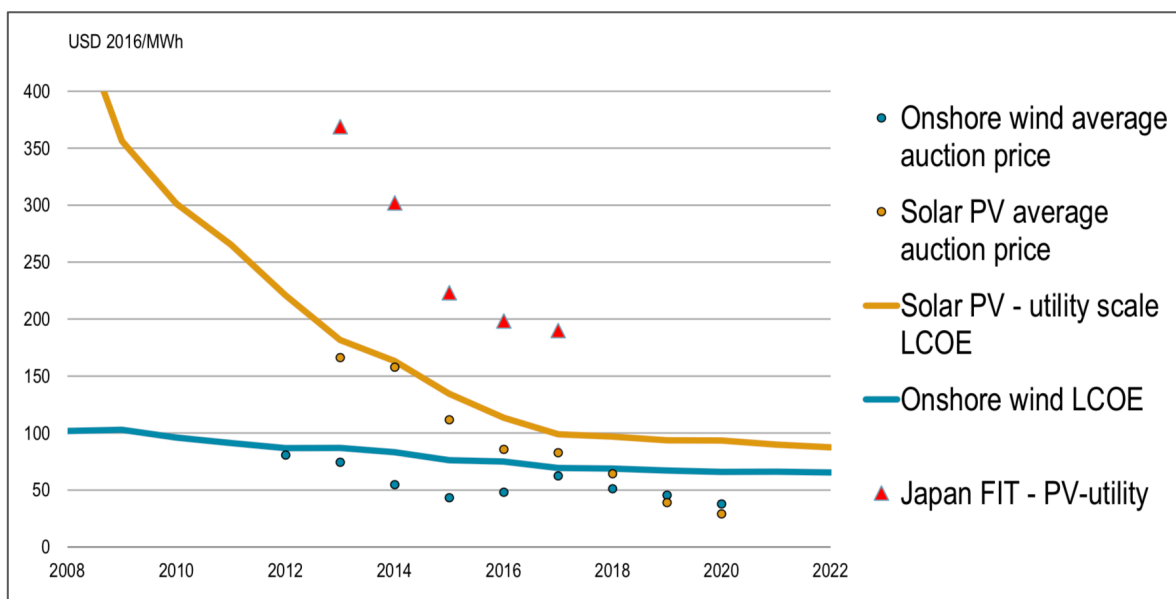


図-37 太陽光発電と風力発電の発電コスト、世界の潮流 出典)IEA Renewables 2017

IPENA (International Renewable Energy Agency) は、「2017 年再生可能エネルギー発電費用」の中で、「大規模太陽光発電 (PV) プロジェクトにおける、2010 年以降の発電費用の下落は驚異的だ。大規模太陽光発電の LCOE の国際的な加重平均は、2017 年発注の新規プロジェクトでは USD 0.10/kWh となり、2010 年以降 73%低下した」と述べている。さらにブラジル、カナダ、ドイツ、インド、メキシコ、モロッコでの最近 (2017) の電力入札では、陸上風力発電による電力の LCOE が USD 0.03/kWh という低価格を記録した、と述べている。数年前ならとても信じられない数字である。

また IRENA は、現在商業的に使用されている再生可能発電は、全て 2020 年までに化石燃料による発電費用の範囲内に収まり、大部分が低価格帯に位置するか、化石燃料を下回ると予測した。再生可能エネルギーによる電力の価格は、まもなく化石燃料による電力を恒常的に下回ると予測している。一方 IEA も、「全体的な価格傾向は、2023 年までに陸上風力および太陽光発電技術の入札価格が、20USD/MWh (2.2 円/KWh) から 50USD/MWh (5.5 円/KWh) の範囲である」と述べている。

## 第7章 考察

### 7.8.4 日本の場合

残念ながら IEA は Renewables 2018 の中で、日本のケースについて次の通り述べている。「一方、日本では、投資コストが非常に高いため、風力および太陽光 LCOE は高いままである。高い燃料コストにもかかわらず、再生可能エネルギーコストは新しい天然ガスおよび石炭ベースの発電コストより高い。」 日本の再生可能エネルギーに関する IEA の見立ては以上の通りではある。

欧州と日本の太陽光発電コストの推移について、経済産業省は「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた課題と展望」（2019年7月）において、日本もコストダウンは進むものの、一方でいまだに欧州の2倍のコストがかかっているとして、次の表の内容を報告している。

表-45 欧州と日本の太陽光発電コストの推移(円/kWh)  
出典)「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた課題と展望」(2019年7月12日経産省)

	2010年	2016年	2019年		
	総コスト	総コスト	総コスト	設備・工事	運転維持
欧州	約40円	9円	7円	5円	2円
日本	約40円	18円	13円	9円	4円

日本の再生可能エネルギーコストが高い理由として、経産省は「Fit 価格が高価格であること、競争が成立していないこと、流通段階が複雑で、下請け構造となっていること、平地が少なく、低コストの立地条件が少ないことなどを挙げている。IRENA は、再生可能エネルギーの価格低減を促進する3つの主要要素として、① 技術の向上（性能の向上、費用の低減）、② 競争調達、③ 経験豊富で国際的に活躍する数多くの開発者達の存在、が不可欠だと述べている。一刻も早く、この認識を現実的な形にすることが求められている。

### 7.9 パリ協定の影響、石炭火力発電について

#### 7.9.1 石炭火力発電について

パリ協定を受けて、CO<sub>2</sub>の排出制限が大きな制約条件となり、それがエネルギーセキュリティにどのような影響を与えるか、について本論で述べられなかったことについて少しだけ考察する。

本稿では、Sovacool [43]の45のエネルギーセキュリティ定義を分解し、その定義の中から出現したキーワードの数を定義項目として重要度の重み付けの基軸に置いた。そのエネルギーセキュリティの第一番目の関心事項は「環境への配慮」であったことから、最新のエネルギーセキュリティ指標の中で最も比重が高いのは、この環境問題であることは間違いない。特に、パリ協定が求める脱炭素社会に向けた大きな流れの中で、石炭火力事

## 第7章 考察

業からのダイベストメント（投資撤退）は世界的規模で拡大しており、日本の金融機関も無視できない状況になりつつあると言われている。しかしそうした中であっても日本のメガバンクは、日本政府案件や国際開発機関等が支援する石炭火力発電所新設プロジェクトは、例外であると位置付けているし、大手商社も、日本政府が支援するものなどは適用除外としている。

現在、新規の石炭火力設備に求められる技術は、超々臨界圧(USC)の最高効率のものといわれるが、USCのCO<sub>2</sub>排出係数は、0.80～0.84kg-CO<sub>2</sub>/kWhで、最新鋭の石炭ガス化複合発電でも、0.73kgである。天然ガス火力で一般に使われている複合発電(GTCC)の0.32～0.36kgと比較すると、CO<sub>2</sub>排出量でまだ約2倍の差がある。それでもこのような適用除外を設ける背景は何か。そこには、日本政府が石炭火力を重要な電源として位置づけ、超々臨界圧の石炭火力は「高効率」であるとして国内外の普及促進に積極的な方針であるためであると考えざるを得ない。

2018年7月に改正されたエネルギー基本計画では、石炭火力と原子力発電は長期に渡ってベースロードとして使い続けるとし、一方で自然エネルギーについては「主力電源化」させると言いながら、2030年に22～24%という世界標準から言うと半分程度の低い目標を変更しなかった。これが現実的な日本政府の方針である。

しかし一方では、世界的な自然エネルギーの急速な低コスト化と普及が進んでいる現状がある。機関投資家としては、電源の約8割を火力発電に頼り、今後も石炭火力に拘り続ける日本の政策で、将来の国内企業の炭素生産性やエネルギーコストの差が海外と広がることへの懸念はぬぐえないであろう。中長期的にみれば、競争力、電力需要予測、政策コストなど、どれをとっても石炭火力事業は融資側にプラスになるような材料はない。石炭火力向け融資の残高が大きいほど投資家のマイナス評価につながる時代である。これは世界の動きとして、認めざるを得ないのではないか。

政府の方針が動かない中で、ファイナンス側が石炭ダイベストメントの方針を決めれば、実質的にはそれがスタンダードにならざるを得ない。日本の2050年に向けた長期戦略策定は、このような金融機関の意向を踏まえ、最もCO<sub>2</sub>排出の多い石炭火力電源からの早期の退出期限を明確に設けるべきではないか。懸念される石炭火力からの脱却と、脱炭素社会に向けた国内市場を育てる方針を打ち出すことが求められている。

### 7.9.2 パリ協定の目標値について

パリ協定の影響をエネルギーセキュリティ指標の変化から見ようとした（第6章）が、まだその兆候かどうかははっきりとせず、非常に難しいと感じた。しかし各国が出した排出ガスの目標値には、その時に算出された電源構成が記載添付されている国々もあった（米国、カナダ、メキシコ等）。電源構成からは、CO<sub>2</sub>排出量やエネルギー資源の多様性のレベルやエネルギー自給率なども計算できる可能性があるため、ある程度はセキュリティレベルを測ることは可能である。今後の研究で実際に実施してみたい。

# 第 8 章 結論

---

第 8 章では、本論文の結論について述べる。

---

## 第 8 章 結 論

### 8.1 本研究の概要まとめ

本研究は、福島第一原子力発電所事故によって置かれた日本のエネルギーセキュリティ・レベルの変化を、諸外国との比較によって定量的に浮き彫りにした研究である。特に本研究の独自性として、原子力発電に対する一般大衆の受容性をエネルギーセキュリティの指標の一つとして取り扱ったこと、また原油輸入相手国の分散リスク、資源輸出国のカントリーリスク、輸送途中のチョークポイントリスクを一連の資源輸入リスクとして集約化を試みたことが新しい研究の内容である。その中でも、原子力発電に対する一般大衆の意見（単純化されている）を指標化した方法やこれを視覚化した手法、また作成した指標を正規化

(Normalization) して重みを付ける方法は、オリジナリティもありまた苦労した点でもある。また、指標の集約化については、先行研究の中から輸入相手国の分散を表す式、Herfindahl-Hirschman Index と Shannon-Wiener Index の両式の correction factor に対して、カントリーリスクとチョークポイントリスクを加味する改良を行ったもので、これも独自の方法である。

### 8.2 本研究の結論について

本研究では、第 3 章で、福島原子力発電所の事故から 5 年経過後の、日本のエネルギーセキュリティ・レベルの変化について、8 個のセキュリティ指標を用いて定量評価した研究について述べた。そしてこの 8 個の指標を T-scores 法という平均値が 50 の正規分布を想定した偏差値によって表し、全体の評価を得た。

さらに第 5 章では、原子力発電に対する一般大衆の受容性をエネルギーセキュリティの指標の一つとして取り扱った研究について述べた。日本の原発に対する世論は、事故から 8 年経った今でも反対の意見が非常に多い。しかし政策ではずっと変わらず 2030 年に総発電量の 20%~22%を原子力発電によるとして変更しなかった。このように政権から乖離した大衆の世論は、エネルギーセキュリティ上のリスクではないか、というところからこれを指標化することを試みた。

そして上記の第 3 章と第 5 章から得られた結果は、次の表の通りである。しかし第 5 章で原発の受容性に対する指標を加えた試みを行い、その結論を得た。

その結論を並べて表示する。



## 第 8 章 結 論

表-46 日本のエネルギーセキュリティ度総合表（震災前、後、5年後）

年	2010	2012	2015
偏差	51	42	44

年	2010	2012	2015
偏差	45	43	43

原発受容性を  
加えた総合指標

この2つの表を見比べてわかるように、それほど大きな差異はない。福島原発事故の後、日本のエネルギーセキュリティレベルは2年後に一旦下がったものの、2015年では90%以上回復していると結論付けた。

しかし今般、指標の取りまとめ方を全て変えてみた。すなわち出てきた指標を正規化する場合、今まではT-scores法（偏差値法）と呼ばれる方法：指標は中心を50とする正規分布をするという仮定のもとに、偏差値を取る方法によっていたが、これでは中心の近くでは差が出にくいということから、Re-scaling法と呼ばれる方法に変えたことである。Re-scaling法は、指標を最大が1で最小が0として全ての指標値を0から1の間に置き直す方法である。こちらの方が、中央値前後の部分の分解能が良いと思われたためである。

もう一点、上記の指標にそれほど大きな差が出なかった理由は、やはり重みを付けていなかったことが大きいと思われた。均等荷重であるため、原発の受容性だけで7ポイントの差があっても、7つの指標で均等に割れば1しか差が出ない。したがって原発の指標を加えてもさほどの差が出なかったのである。

そこで指標の重みを付けることにした。重み付けの方法は第7章で詳しく述べたので繰り返さないが、簡単に言えば、エネルギーセキュリティの文献に出てきたキーワードの数を重みと見た方法を採用した。この方法は、学術文献上で最も関心の高い領域は艦橋側面であり、次に関心が高いのはエネルギーコスト、その次が安定供給ということになる。

その方法で重みを付けた結論は第7章でも述べたが、次の図のようになった。

## 第 8 章 結 論

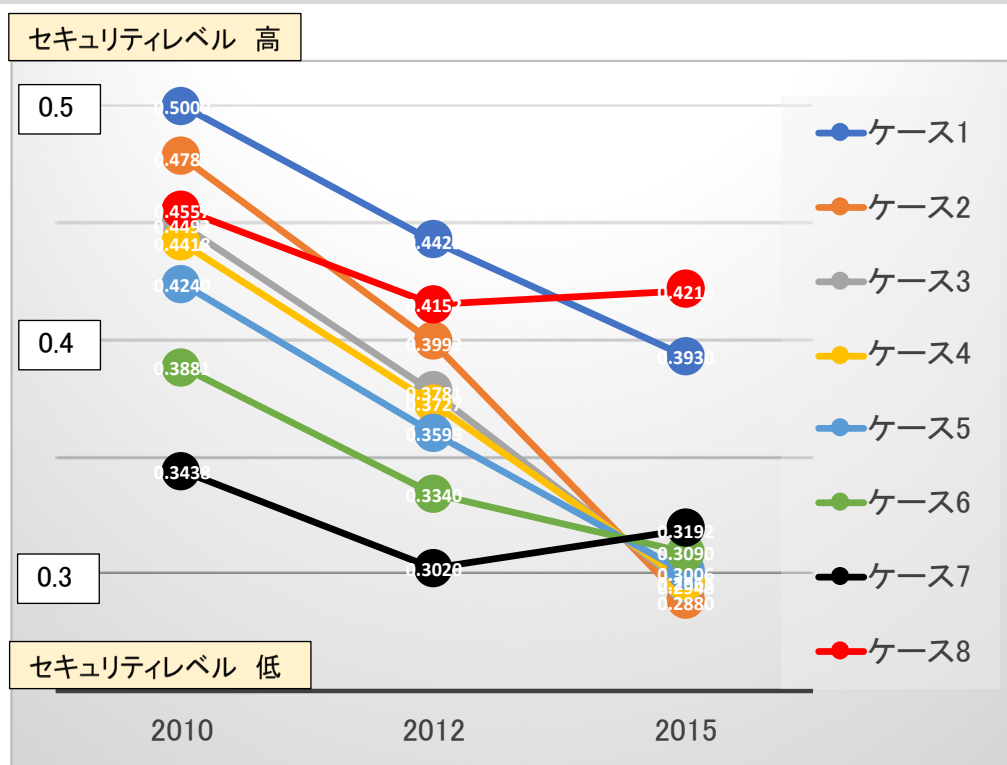


図-38 ケース1～8におけるエネルギーセキュリティレベルの変化（震災前、後、5年後）

この図の中で、従来重みを付けず、原発の受容性指標も考慮しないという線は、ケース8である。原発の受容性指標は入れたものの重み付けを行わなかったケースはケース1である。ケース7は、重みはつけるものの原発の受容性を含まないケースである。

ケース8もケース7も原発の受容性を加味しなかったケースは、いずれも原発事故後日本のエネルギーセキュリティレベルは一旦大きく後退するものの、2015年にかけて改善するという結論であった。

しかし原発の受容性を加味したケースでは、どのケースでもエネルギーセキュリティレベルは事故以来下がり続けていることを示しており、先の結論と大きく異なっている。

では一体どのくらいの比率まで原発の受容性指標を加味したら、傾向は変わらない（すなわちセキュリティレベルは下がり続けるか）については、ケース6（25%）がそれに近い傾向を示していることから、概ね20%前後であれば、この傾向は続くものとして良いと思われた。つまり、45のエネルギーセキュリティの論文のうち、9個以上の論文にエネルギーセキュリティの指標として原発の受容

## 第 8 章 結 論

性を含めるのがエネルギーセキュリティの指標として相応しいと考えたならば、原発の受容性の指標は広く一般的な指標として認知されるものと考えられる。

エネルギーセキュリティ指標の研究は、まだまだ発展の途上にあると言われて  
いる。文献数も近年大きく伸びている新興の分野である。本稿では福島原発事故  
についてエネルギーセキュリティレベルの変化を追った。今後どのように変化し  
てゆくのか注視してゆきたいと思う。

## 文献

- [1] 入江一友, 神田啓治. エネルギー安全保障概念の形成と変容. 日本エネルギー学会. 2002, Vol. 81, No. 5, pp. 311-321
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁. 平成 27 年度エネルギーに関する年次報告. 2016, 第 1 章, pp. 8-98.  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016pdf/whitepaper2016pdf\\_1\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016pdf/whitepaper2016pdf_1_1.pdf) (閲覧 2019-07-17)
- [3] 堀江興. 原子力発電所建設に伴う電源三法制度適用に関する研究—新潟県と福井県の比較—. 2000 年度第35回日本都市計画学会学術研究論文集. 2000, No. 44, pp. 259-364  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalcpj/35/0/35\\_259/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalcpj/35/0/35_259/_pdf/-char/ja) (閲覧 2019-06-01)
- [4] 経済産業省資源エネルギー庁. 日本における原子力の平和利用のこれまでとこれから. 掲載記事. 2018, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/nihonnonuclear.html> (閲覧 2019-07-17)
- [5] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). Backgrounder on the Three Mile Island Accident. 2018, <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html> (Accessed July 17, 2019)
- [6] The World Nuclear Association. Chernobyl Accident 1986. 2019, <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx> (Accessed July 17, 2019)
- [7] 日本原子力産業協会. JCO 臨界事故の概要. 1999  
<http://www.jaif.or.jp/ja/news/1999/1207-1.html> (閲覧 2019-07-17)
- [8] 経済産業省資源エネルギー庁. 平成 21 年度エネルギーに関する年次報告エネルギー白書. 2010, 第 2 節  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2010pdf/whitepaper2010pdf\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2010pdf/whitepaper2010pdf_1.pdf) (閲覧 2019-07-17)
- [9] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構. 日本の原子力発電開発の歴史. ATOMICA. 2006  
[https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\\_detail\\_16-03-04-01.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_16-03-04-01.html) (閲覧 2019-07-17)
- [10] 経済産業省資源エネルギー庁. エネルギー基本計画. 2010,  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/100618honbun.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/100618honbun.pdf) (閲覧 2019-07-17)
- [11] 世界自然保護基金ジャパン (WWF ジャパン). 京都議定書とは? 合意内容とその後について. 2010, <https://www.wwf.or.jp/activities/basicinfo/3536.html> (閲覧 2019-07-17)
- [12] United Nations. Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Addendum, Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twenty-first session. Contents, Decisions adopted by the Conference of the Parties  
<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf> (閲覧 2019-07-17)
- [13] Sovacool B.K., Mukherjee I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. Energy. 2011, Vol. 36, pp. 5343-5355

- [14] Furlan C., Guidolin M., Guseo R. Has the Fukushima accident influenced short-term consumption in the evolution of nuclear energy? An analysis of the world and seven leading countries. *Technological Forecasting & Social Change*. 2016, Vol. 107, pp. 37-49
- [15] Hayashi M., Hughes L. The Fukushima nuclear accident and its effect on global energy security. *Energy Policy*. 2013, Vol. 59, pp. 102-111
- [16] Hayashi M., Hughes L. The policy responses to the Fukushima nuclear accident and their effect on Japanese energy security. *Energy Policy*. 2013, Vol. 59, pp. 86-101
- [17] Hong S., Bradshaw C.J.A., Brook B.W. Evaluating options for the future energy mix of Japan after the Fukushima nuclear crisis. *Energy Policy*. 2013, Vol. 56, pp. 418-424
- [18] Huenteler J., Schmidt T.S., Kanie N. Japan's post-Fukushima challenge – implications from the German experience on renewable energy policy. *Energy Policy*. 2012, Vol. 45, pp. 6-11
- [19] Kato T., Takahara S., Nishikawa M., Homma T. A case study of economic incentives and local citizens' attitudes toward hosting a nuclear power plant in Japan: Impacts of the Fukushima accident. *Energy Policy*. 2013, Vol. 59, pp. 808-818
- [20] Kamsamrong J., Sorapipatana C. An assessment of energy security in Thailand's power generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2014, Vol. 7, pp. 45-54
- [21] Kosai S., Unesaki H. Quantitative analysis on the impact of nuclear energy supply disruption on electricity supply security. *Applied Energy*. 2017, Vol. 208, pp. 1198-1207
- [22] McLellan B.C., Zhang Q., Utama N.A., Farzaneh H., Ishihara K.N. Analysis of Japan's post-Fukushima energy strategy. *Energy Strategy Reviews*. 2013, Vol. 2, No. 2, pp. 190-198
- [23] Nian V., Chou S.K. The state of nuclear power two years after Fukushima - The ASEAN perspective. *Applied Energy*. 2014, Vol. 136, pp. 838-848
- [24] Siegrist M., Sütterlin B., Keller C. Why have some people changed their attitudes toward nuclear power after the accident in Fukushima?. *Energy Policy*. 2014, Vol. 69, pp. 356-363
- [25] Vivoda V. Steady as She Goes': Effect of the Fukushima disaster on Australia-Japan relations. *Asian International Studies Review*. 2018, Vol. 19, No. 2, pp. 87-114
- [26] Vivoda V. Japan's energy security predicament post-Fukushima. *Energy Policy*. 2012, Vol. 46, pp. 135-143
- [27] Wittneben B.B.F. The impact of the Fukushima nuclear accident on European energy policy. *Environmental Science & Policy*. 2012, Vol.15, pp. 1-3
- [28] Zhang Q., McLellan B.C., Tezuka T, Ishihara K.N. Economic and environmental analysis of power generation expansion in Japan considering Fukushima nuclear accident using a multi-objective optimization model. *Energy*. 2012, Vol. 44, No. 1, pp. 986-995
- [29] Azzuni A., Breyer C. Definitions and dimensions of energy security: a literature review. *Wiley Interdisciplinary Reviews. WIREs Energy and Environment*. 2018, Vol. 7, pp.1-34
- [30] National Research Council of the National Academies. Lessons learned from the Fukushima nuclear accident for improving safety of U.S. Nuclear Plants. The National Academies Press. 2014, pp. 1-394
- [31] Coletti M., Hultquist C., Kennedy W.G., Cervone G. Validating Safecast data by comparisons to a U. S. Department of Energy Fukushima Prefecture aerial survey. *Journal of environmental radioactivity*. 2017, Vol. 171, pp. 9-20

- [32] Hou H., Li Z., Ye L., Yang X. Concern on the sustainable development of China nuclear power emergency treatment after the Japan Fukushima nuclear crisis. *Materials Science & Engineering*. 2013, pp. 571-574
- [33] Hou H., Tang A. China energy policy reaction and adjustment after Fukushima nuclear crisis. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2014, pp. 103
- [34] Kim S.C., Chung Y. Dynamics of Nuclear Power Policy in the Post-Fukushima Era: Interest Structure and Politicisation in Japan, Taiwan and Korea. *Asian Studies Review*. 2018, Vol. 42, No. 1, pp. 107-124
- [35] Tsuzuki K., Shimizu H., Takeji S., Takeda T., Kato E., Kurosawa A., Tanaka T. Investigation of role of nuclear toward 2050-world and Japanese cases. 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants. ICAPP. 2017
- [36] Wang B., Yu H., Wei Y. Impact factors of public attitudes towards nuclear power development: A questionnaire survey in China. *International Journal of Global Energy Issues*. 2013, Vol. 36, No. 1, pp. 61-79
- [37] Roh S., Kim D. Effect of Fukushima accident on public acceptance of nuclear energy (Fukushima accident and nuclear public acceptance). *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*. 2017, Vol. 12, No. 6, pp. 565-569
- [38] 木村浩, 古田一雄, 鈴木篤之. 原子力の社会的受容性を判断する要因—居住地域および知識量による比較分析. *日本原子力学会和文論文誌*. 2003, Vol. 2, No. 4, pp. 379-388
- [39] 丸山喜代美, 柳原良造, 三隅二不二, 林知己夫. 原子力発電に対する公衆の態度—男性と女性の態度の特徴を中心とする予備的調査—. *INSS*. 1996, pp. 5-45
- [40] 岩井紀子, 宍戸邦章. 東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故が災害リスクの認知および原子力政策への態度に与えた影響. *社会学評論*. 2013, Vol. 64, No. 3, pp. 420-438
- [41] 山田英司. 先進諸国との比較におけるわが国のエネルギーセキュリティレベルの評価研究. *日本原子力学会和文論文誌*. 2007, Vol. 6, No. 4, pp. 383-392
- [42] García-Álvarez M.T., Moreno B., Soares I. Analyzing the sustainable energy development in the EU-15 by an aggregated synthetic index. *Ecological Indicators*. 2016, Vol. 60, pp.996-1007
- [43] Sovacool B.K. *The Routledge Handbook of Energy Security*. Routledge International Handbooks. 2011
- [44] 松井賢一. エネルギーの安全保障について. *立命館国際研究*. 2001, Vol. 13-3, pp. 375-383
- [45] 橋爪吉博. 石油におけるエネルギー安全保障—調達面と流通面での安定供給. *国際環境経済研究所月刊ビジネスアイ エネコ*. 2019  
<http://ieci.or.jp/2019/05/opinion190528/?type=print> (閲覧 2019-07-17)
- [46] 河村徳士, 武田晴人. 通商産業政策 (1980~2000年)の概要 資源エネルギー政策—橋川武郎著『通商産業政策史 10 資源エネルギー政策』の要約—. RIETI (経済産業研究所). *Policy Discussion Paper Series*. 2014, Vol.14, pp. 017
- [47] 経済産業省資源エネルギー庁. 平成 21 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書). 2010, 序節「エネルギー安全保障」概念の本質  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2010pdf/whitepaper2010pdf\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2010pdf/whitepaper2010pdf_1.pdf) (閲覧 2019-07-17)

- [48] Ang B.W., Choong W.L., Ng T.S. Energy security: Definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, Vol. 42, pp. 1077-1093
- [49] Intharak N., Julay J.H., Nakanishi S., Matsumoto T., Mat Sahid E.J., Ormeno Aquino A.G., Aponte A.A. A quest for energy security in the 21st century. Japan: Asia Pacific Energy Research Centre. 2007, pp. 1-100.  
[https://aperc.iecej.or.jp/file/2010/9/26/APERC\\_2007\\_A\\_Quest\\_for\\_Energy\\_Security.pdf](https://aperc.iecej.or.jp/file/2010/9/26/APERC_2007_A_Quest_for_Energy_Security.pdf) (閲覧 2019-07-17)
- [50] Le Coq C., Paltseva E. Measuring the security of external energy supply in the European Union. *Energy Policy*. 2009, Vol. 37, pp. 4474-4481
- [51] Pavlovića D., Banovac E., Vištica N. Defining a composite index for measuring natural gas supply security - The Croatian gas market case. *Energy Policy*. 2018, Vol. 114, pp. 30-38
- [52] Streimikiene D., Ciegis R., Grundey D. Energy indicators for sustainable development in Baltic States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007, Vol. 11, pp. 877-893
- [53] Sovacool B.K. An international assessment of energy security performance. *Ecological Economics*. 2013, Vol. 88, pp. 148-58
- [54] Angelis-Dimakis A., Arampatzis G., Assimacopoulos D. Monitoring the sustainability of the Greek energy system. *Energy for Sustainable Development*. 2012, Vol. 16, pp. 51-56
- [55] IEA. *Energy Efficiency Indicators: Essentials for Policy Making*. 2014
- [56] Phylipsen G.J.M. World Bank. *Energy Efficiency Indicators, Best practice and potential use in developing country policy making*. Phylipsen Climate Change Consulting. Commissioned by the World Bank. 2010, pp. 1-102
- [57] Trudeau N., Murray I. *Development of Energy Efficiency Indicators in Russia*. IEA Working Paper. 2011, pp. 1-54
- [58] Joint Research Centre (JRC). *Energy Security Indicators*. European Commission Joint Research Center Institute for Energy Security Unit. 2010  
<http://www.drustvo-termicara.com/resources/files/7fa5460.pdf> (閲覧 2019-07-17)
- [59] Blyth W, Lefevre N. *Energy security and climate change policy interactions*. International Energy Agency Information Paper. 2004, pp. 1-88
- [60] 山田英司. 先進諸国との比較におけるわが国のエネルギーセキュリティレベルの評価研究. *日本原子力学会和文論文誌*. 2007, Vol. 6, No. 4, pp. 383-392
- [61] 氏田博士. エネルギーセキュリティと原子力の役割に関する考察. *日本原子力学会和文論文誌*. 2011, Vol. 10, No. 1, pp. 1-11
- [62] 村上朋子, 本蔵満, 九谷一朗. 各国のエネルギー安全保障政策と実態の調査分析: 主要国のエネルギー安全保障政策の定量評価. IEEJ: 日本エネルギー経済研究所. 2011,  
<https://eneken.iecej.or.jp/data/3548.pdf> (閲覧 2019-09-10)
- [63] Lefevre N. Measuring the energy security implications of fossil fuel resource concentration. *Energy Policy*. 2010, Vol. 38, pp.1635-1644

- [64] Neumann A. Security of Supply in Liberalized European Gas Markets. Europa-University Viadrina Frankfurt/Oder. 2004, pp. 17-20
- [65] Jansen J.C., Arkel V., Boots M.G. Designing Indicators of Long-Term Energy Supply Security. Commissioned by the Netherlands Environmental Assessment agency. 2004, pp. 1-35
- [66] Chuang M.C. Energy Security and Improvements in the Function of Diversity Indices –Taiwan Energy Supply Structure Case Study. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013, Vol. 24, pp. 9-20
- [67] Magurran A.E. Ecological Diversity and Its Measurement. Princeton University Press. 1988, pp. 127-167
- [68] 樋口広芳. 生物の多様性-その意味、仕組、進化、保護. A Journal of Field Ornithology. 1994, Vol. 13, pp. 1-30
- [69] 大垣俊一. 多様度と類似度 分類学的新指標. 関西海洋生物談話会. Argonauta. 2008, No. 15, pp. 10-22. <http://www.mus-nh.city.osaka.jp/iso/argo/nl15/nl15-10-22.pdf> (閲覧 2019-09-19)
- [70] Stirling A. Multicriteria Diversity Analysis: A Novel Heuristic Framework for Appraising Energy Portfolios. Energy Policy. 2010, Vol. 38, Issue 4, pp. 1622-1634
- [71] OECD. Country Risk Classifications of the Participants to the Arrangement on Officially Supported Export Credits. Valid as of 29 January 2016  
<http://www.oecd.org/trade/xcred/cre-crc-historical-internet-english.pdf> (閲覧 2019-09-19)
- [72] 独立行政法人日本貿易保険企画室. カントリーリスクと国カテゴリー. e-NEXI. 2016, pp. 6-10  
<https://www.nexi.go.jp/cover/categorytable> (閲覧 2019-10-02)
- [73] OECD Topics. Country Risk Classification. Last Updated 20 April (2017)  
<http://www.oecd.org/trade/xcred/crc.htm>
- [74] Nardo M., Saisana M., Saltelli A., Tarantola S. Tools for Composite Indicators Building. Joint Research Centre European Commission. 2005, pp. 1-134
- [75] U.S. Energy Information Administration. World Oil Transit Chokepoints. Last Updated 25 July 2017  
[https://www.eia.gov/beta/international/analysis\\_includes/special\\_topics/World\\_Oil\\_Transit\\_Chokepoints/wotc.pdf](https://www.eia.gov/beta/international/analysis_includes/special_topics/World_Oil_Transit_Chokepoints/wotc.pdf)
- [76] 外務省. 我が国を取り巻く外交・安全保障環境. 2013  
[http://www.kantei.go.jp/jp/singi/anzen\\_bouei/dai1/siryoku4.pdf](http://www.kantei.go.jp/jp/singi/anzen_bouei/dai1/siryoku4.pdf) (閲覧 2019-07-17)
- [77] 経済産業省資源・燃料部. エネルギーセキュリティの評価指標について. 2016  
[http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen\\_nenryo/pdf/011\\_03\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen_nenryo/pdf/011_03_00.pdf) (閲覧 2019-07-17)
- [78] 経済産業省資源エネルギー庁. 平成 28 年度エネルギーに関する年次報告. エネルギー白書. 2017, pp. 208  
[http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2017pdf/whitepaper2017pdf\\_2\\_2.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2017pdf/whitepaper2017pdf_2_2.pdf) (閲覧 2019-07-17)
- [79] 総合資源エネルギー調査会資源・燃料部会石油・天然ガス小委員会. 中間報告. 2014, p. 5



- [http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen\\_nenryo/pdf/010\\_04\\_02.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shigen_nenryo/pdf/010_04_02.pdf) (閲覧 2019-07-17)
- [80] 三菱総合研究所環境・エネルギー研究本部. 平成 26 年度石油産業体制等調査研究(化石燃料を中心としたエネルギー安全保障評価調査)報告書. 2015.  
[https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2015fy/001059.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/001059.pdf) (閲覧 2019-07-17)
- [81] 鳥海重喜, 高嶋隆太. 海上航路ネットワークとエネルギー資源の国際輸送におけるチョークポイント分析. GIS-理論と応用. 2013, Vol. 21, No.1, pp. 47-55
- [82] Coq C.L., Paltseva E. Measuring the Security of External Energy Supply in the European Union. Energy Policy. 2009, Vol. 37, pp. 4474-4481
- [83] 日本経済新聞. 米、原油輸出 40 年ぶり解禁へ. 日経新聞 Web 版. 2015  
[https://www.nikkei.com/article/DGXLASGM16H5T\\_W5A211C1FF1000/](https://www.nikkei.com/article/DGXLASGM16H5T_W5A211C1FF1000/) (閲覧 2018-06-01)
- [84] 経済産業省資源エネルギー庁. 平成 25 年度エネルギーに関する年次報告. 2014, p. 143  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014pdf/whitepaper2014pdf\\_2\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014pdf/whitepaper2014pdf_2_1.pdf) (閲覧 2018-06-01)
- [85] METI Agency for Natural Resources and Energy, Japan's Energy White Paper, Prologue, Section2, 2005
- [86] 原子力規制庁原子力規制部. 実用発電用原子炉に関する審査業務の流れについて. 2019, pp. 1-93 <http://www.nsr.go.jp/data/000183859.pdf> (閲覧 2019-07-17)
- [87] 経済産業省資源エネルギー庁. 原子力発電所の解体 (一般廃炉) の現状と課題について. 2019 [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/genshiryoku/pdf/020\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/020_04_00.pdf) (閲覧 2019-07-25)
- [88] 削除
- [89] METI. Electricity supply and demand verification committee report. section2. 2012, vol.1, p.42  
[http://www.meti.go.jp/setsuden/pdf/120514/supply\\_120514\\_01b.pdf](http://www.meti.go.jp/setsuden/pdf/120514/supply_120514_01b.pdf)  
(記事は 2019-07-25 現在、削除されている)
- [90] 内閣エネルギー・環境会議電力需給に関する検討会合. 今夏の電力需給対策について. May 18, 2012 [http://www.kantei.go.jp/jp/singi/electricity\\_supply/20120518/siryoku3.pdf](http://www.kantei.go.jp/jp/singi/electricity_supply/20120518/siryoku3.pdf) (閲覧 2019-07-25)
- [91] 脱原発弁護団全国連絡会. 全国脱原発訴訟一覧. July 24, 2019  
<http://www.datsugensatsu.org/bengodan/list/> (閲覧 2019-07-25)
- [92] Kleber D. The U.S.Department of defense: valuing energy security. Journal of Energy Security. 2009, pp. 12-22
- [93] Hughes L. The four R's of energy security. Energy Policy. 2009, Vol. 37, pp. 2459-2461
- [94] Kruyt B, van Vuuren D.P., de Vries, H.J.M., Groenenberg H. Indicators for energy security. Energy Policy. 2009, Vol. 37, pp. 2166-2181
- [95] METI. Agency for Natural Resources and Energy. Japan's Energy White Paper. 2013, Part2, Section 1, Vol. 4, p. 104  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013pdf/whitepaper2013pdf\\_2\\_1.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2013pdf/whitepaper2013pdf_2_1.pdf) (閲覧 2019-07-25)

- [96] 末広茂. 省エネルギー指標としての DGP 原単位-GDP 原単位における国際比較の問題点と部門別アプローチによる推計-.IEEJ. 2007  
<https://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/1494.pdf> (閲覧 2019-08-10)
- [97] 削除
- [98] IEA. Renewables Information. 2017
- [99] IEA. Energy Balances of OECD Countries. 2017
- [100] 星野優子. エネルギー消費原単位の国際比較-日本, 中国の製造業を中心に-. (財)電力中央研究所. SERC Discussion Paper. 2009
- [101] IEA. Oil Information. 2017
- [102] IEA. Energy Prices and Taxes, First Quarter 2017
- [103] IEA. CO2 Emissions from Fuel Combustion 2016 Edition
- [104] IEA. Natural Gas Information 2016
- [105] 下郡けい. 原子力発電の社会的必要性: 高レベル放射性廃棄物の地層処理を事例に. 日本エネルギー経済研究所戦略研究ユニット原子力グループ. 2016, pp. 41-53  
<https://www.t-enecon.com/cms/wp-content/uploads/2016/12/hiroba467-series.pdf> (閲覧 2019-07-25)
- [106] Win GALLUP. Global Barometer of Views on Nuclear Energy After Japan Earthquake. 2011, pp. 1-15.  
[http://www.redcresearch.ie/wp-content/uploads/2015/10/RED-C-Research-Press-Release-Japan-Earthquake-Survey-\\_Snap-Poll\\_.pdf](http://www.redcresearch.ie/wp-content/uploads/2015/10/RED-C-Research-Press-Release-Japan-Earthquake-Survey-_Snap-Poll_.pdf). [Accessed: 20-Jun-2019]
- [107] Ipsos MORI. Update on GB public attitudes to nuclear energy. Nuclear Update December. 2012
- [108] 北田淳子. 東電問題が公衆の原子力発電に対する態度に及ぼした影響. (株)原子力安全システム研究所社会システム研究所. 2003, pp. 44-62
- [109] 北田淳子. 継続調査でみる原子力発電に対する世論\_過去 30 年と福島第一原子力発電所事故後の変化. 日本原子力学会和文論文誌. 2013, Vol. 12, No. 3, pp. 177-196
- [110] 北田淳子. 再稼働への賛否と原子力発電についての認識-2014 年の INSS 継続調査から. INSS JOURNAL. 2015, Vol. 22
- [111] 北田淳子. 人々の電源選択に関する意識の現状-福島第一原子力発電所事故から 2 年半後-. INSS JOURNAL. 2014, Vol. 21
- [112] Government of Japan. Cabinet Office. Public opinion poll on nuclear power. 1968, 1969, 1975, 1980, 1981, 1984. 1987, 1990, 1999, 2005, 2009
- [113] Asahi Newspaper. Nationwide regular poll survey. April 2011, July 2012
- [114] Yomiuri Newspaper. Headquarters National Poll. April 2011, May 2011, July 2011, August 2011, December 2011, March 2012, March 2013, March 2014, March 2015, March 2016, March 2017
- [115] Mainichi Newspaper. Regular poll survey. August 2007, April 2011, May 2011, July 2011, September 2011, June 2012, May 2015, March 2015, March 2016
- [116] NHK: Japan Broadcasting Corporation. Survey of public opinion on nuclear power and energy. August 2011, October 2011, March 2012, March 2013, December 2015

- [117] The Institute of Applied Energy. Public senses survey on energy. October 2004, October 2005, October 2009, October 2010, October 2011, November 2012, November 2012. November 2013, November 2014, November 2015
- [118] Nippon Research Center. National opinion poll on pros and cons for nuclear power after 'East Japan great earthquake' and change in lifestyle. May 2011, July 2011, September 2011, March 2012
- [119] Safety and security research center. Changes in public opinion over nuclear power plants. July 2013
- [120] 岩井紀子. 宍戸邦章. 東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故が災害リスクの認知および原子力政策への態度に与えた影響. 社会学評論. 2013, Vol. 64, pp. 420-438
- [121] International Energy Agency. World energy balances. 2018
- [122] International Energy Agency. World Energy Outlook 2018
- [123] Stirling A. Multicriteria diversity analysis : A novel heuristic framework for appraising energy portfolios. Energy Policy. 2010, Volume 38, Issue 4, pp.1622-1634
- [124] Álvarez G. M. T., Moreno B., Soares I. Analyzing the sustainable energy development in the EU-15 by an aggregated synthetic index. Ecological Indicators. 2016, Vol. 60, pp. 996-1007
- [125] Iddrisu I., Bhattacharyya S. C. Sustainable Energy Development Index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015, Vol. 50, pp. 513-530
- [126] Neves A.R. Energy sustainability indicators for local energy planning: Review of current practices and derivation of a new framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010, Vol. 14. pp. 2723-2735
- [127] Hauser P., Heinrichs H.U., Gillessen B., Muller T. Implications of diversification strategies in the European natural gas market for the German energy system. Energy. 2018, Vol. 151, pp. 442-454
- [128] 清水裕, 中野冠, 安全工学会誌, チョークポイントリスクを考慮したエネルギーセキュリティ指標. 2018, Vol.57, No. 3, pp. 237-245
- [129] Ministry of Economy. Agency for Natural Resources and Energy. Trade and Industry. Energy white paper 2016, No.1, Summary of energy supply and demand
- [130] Gazprom, Nord Stream. [Online] <http://www.gazprom.com/projects/nord-stream/>. [Accessed: 13-Jun-2019]
- [131] Nord Stream 2 AG. Nord Stream 2. 2019 [Online] <https://www.nord-stream2.com/> [Accessed: 13-Jun-2019]
- [132] Ministry of the Environment. Outline of long- term strategies of each country (Long-term Low Carbon Vision Subcommittee (20th). 2017, Document 1, City Center Hotel
- [133] Mitsubishi Research Institute. Inc., Mid- and long-term renewable energy introduction expansion investigation study report for realization of low carbon society in 2016. Ministry of the Environment commissioned research. 2017
- [134] Japan Petroleum Energy Center. UK Oil and Energy Industry. JPEC report. 2014, Vol. 17 [http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H26\\_2014/2014-017.pdf](http://www.pecj.or.jp/japanese/minireport/pdf/H26_2014/2014-017.pdf), [Accessed: 13-Jun- 2019].

- [135] 松尾雄司, 小宮山涼一, 富永悠, 末広茂, 柴田善朗, 土井菜保子ら. 2035年までのアジア・世界エネルギー需給見通し. The Institute of Energy Economics Japan (IEEJ). 2011  
<https://eneken.ieej.or.jp/data/3717.pdf> (閲覧 2019-07-25)
- [136] 武石礼司. アジアのエネルギー消費とCO2排出量の増大に関する課題. 国際関係学研究 東京国際大学大学院国際関係学研究科. 2008, Vol. 21, pp. 1-27
- [137] National Development and Reform Commission, National Energy Bureau. Notice of the National Development and Reform Commission and the National Energy Agency on the Distribution of the 13th Five-Year Plan for Energy Development. 2016, Vol. 2744
- [138] 小林良和. 2018年の内外ガス情勢の展望と課題. 日本エネルギー経済研究所第428回定例研究報告会. 2017 <https://eneken.ieej.or.jp/data/7704.pdf> (閲覧 2019-07-25)
- [139] BP, BP Energy Outlook 2019 edition, 2019
- [140] OECD Library. IEA Natural Gas Information Statistics. World-Natural Gas Imports by Origin. [https://stats-oecd-org.kras1.lib.keio.ac.jp/BrandedView.aspx?oecd\\_bv\\_id=naturgas-dataen&doi=data00555en](https://stats-oecd-org.kras1.lib.keio.ac.jp/BrandedView.aspx?oecd_bv_id=naturgas-dataen&doi=data00555en) (閲覧 2019-06-13)
- [141] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2018
- [142] 日本エネルギー経済研究所 (IEEJ). IEEJ アウトルック-2050年に向けた展望と課題-. IEEJ. 2017
- [143] Green J., Newman P. Citizen utilities: The emerging power paradigm. Energy Policy. 2017, Vol. 105, pp. 283-293
- [144] Takase K., Suzuki T. The Japanese energy sector: Current situation, and future paths. Energy Policy. 2011, Vol. 39, pp. 6731-6744
- [145] 蔡 亮成, 古林 敬顕, 中田 俊彦. 日本機械学会誌. エネルギーセキュリティ及びレジリエンスの評価手法の提案と日本のエネルギー需給を対象とするケーススタディ. 2017, Vol. 83, No. 846, pp. 16-00161
- [146] Chester L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. Energy Policy. 2010, Vol. 38, Issue 2, pp. 887-95.
- [147] Winzer C. Conceptualizing energy security. Energy Policy. 2012, Vol. 46, pp. 36-48
- [148] Vivoda V. Evaluating energy security in the Asia-Pacific region: a novel methodological approach. Energy Policy. 2010, Vol. 38, pp. 5258-63
- [149] Sovacool BK. Evaluating energy security in the Asia Pacific: towards a more comprehensive approach. Energy Policy. 2011, Vol. 39, pp. 7472-7479

# 研 究 業 績

## 1. 定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）

- 清水裕, 中野冠. チョークポイントリスクを考慮したエネルギーセキュリティ指標, 安全工学. 2018, Vol. 57, No. 3, pp. 237-245
- Shimizu Y., Nakano M. Comparing Natural Gas Energy Security in Asia and Europe: The Impact of the Paris Agreement on Import Countries' Indicators of Diversity. Journal of Engineering Research and Application. 2019, Vol. 9, Issue 7, pp. 24-32

## 2. 定期刊行誌掲載論文（その他の論文）

- 清水裕, 中野冠. 東日本大震災から5年経過後の日本のエネルギー・セキュリティレベルの変化. 人間と環境. 2017, Vol. 43, No. 1, pp. 2-13

## 3. 国際会議論文（査読付きの full-length papers）

- Shimizu Y\*., Nakano M. Five Years after Fukushima, Japan's Energy Security Policy and Changes in Security Levels. CESUN (Council of Engineering Systems Universities) 2018 Conference

以 上

## 謝辞

本研究は、筆者が慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科後期博士課程で行った研究成果をまとめたものです。本研究を行うにあたり、大変多くの方々よりご指導とご協力と励ましを頂戴しました。全ての方々のお名前を記すことはできませんが、皆様から頂いたお力添えに深く感謝申し上げます。

なんと言ってもここまで来られたのは指導教員である中野冠教授のご指導の賜物です。未熟な私に、研究のやり方のイロハから、研究論文の書き方、研究に取り組む姿勢、研究を行う価値とは、に至るまで丁寧に実にきめ細やかに教えていただきました。大切な序文の書き方は決して忘れません。九州電力八丁原の地熱発電所にご一緒に視察に行ったことなど、中野冠教授の元での6年にもわたる研究活動を通じ、研究の難しさ、面白さ、楽しさを知ることができたのは、何よりの経験になりました。中野教授には心より感謝と重ねてお礼を申し上げます。

副査を担当いただきました高野研一教授にもお世話になりました。私の論文を持って行って、安全工学会誌に投稿ができるか尋ねたところ、リスクの話だから大丈夫です、と言っていただきました。にこやかな笑顔の中に、大変鋭いご指摘がいくつもあり、学ばせて頂きました。同じく副査を担当いただいた日比谷孟俊元教授にはいつもその博学さに驚かされました。ある文献で、原子力発電所事故の専門家でもあることを知り、本当に驚きました。公聴会が始まる30分前まで熱心に教えていただきました。厚くお礼申し上げます。副査を担当いただいた国立環境研究所の山形与志樹先生には環境とエネルギーについて、丸の内のレストランで朝早くから何時間も教えていただきました。環境の最先端で活躍されている方のお話を間近に見聞きすることができてとても参考になりました。

中野研の皆さんにも大変お世話になりました。都丸孝之特任准教授には、特に書籍（「働きながらも博士号は取れる」）と後輩のために残された学位取得までの実に細々としたレポートは、繰り返し何度も読んで励まされました。佐藤みずほ東京農業大学准教授には、本当にお世話になりました。論文が進まずに落ち込んでいるときに、決まって「大丈夫？」というメールがきます。一人家で深夜にパソコンを睨み続けている時、そんなメールが飛び込んで来ると本当に泣きました。有り難かったです。ありがとうございます。博士部屋で隣の席になった宇野研一さんにも随分教えていただきました。研究室は違いましたが、多分年齢的に近いのだろうと思って、親しみを感じておりました。いつもにこや

かに、特に学位論文の提出方法について、丁寧に教えていただきました。ありがとうございました。水谷仁さんにも大変親切にいただきました。私が研究に行き詰まると、いつも熱心にアドバイスをいただきました。いつも明るく気軽に何でも相談に乗っていただき有り難かったです。夜の時間帯になると、必ず博士部屋の自分の席に居て、遅くまで研究されている姿が印象的でした。

私に地球環境学の世界を開いていただいたのは静岡県立大学の鬼頭宏学長です。元々は同じボーイスカウトの指導者ですが、久住高原にキャンプに行くバスで隣にお座りになったのが鬼頭教授とお話しをした最初でした。タイで開催された第20回世界ジャンボリーでは暑い中、一緒に汗を流しました。学長のご指導で上智大学四谷キャンパスにビオトープを創ったのですが、四谷の都会にまだホタルは生きていますでしょうか。その他本当にたくさんの方々にお世話になりました。環境省の川上毅先生には環境行政のあり方、Well-being という指標があることなどについて教えていただきました。軽井沢の環境研修、ゴミ焼却場や上水道見学、大学の環境施設見学、国立環境研究所での最先端の環境研究見学、ビオトープなど、本当にたくさんの機会を与えていただきました。2年間のゼミの最後に先生から頂いた表彰状は忘れられないものでした。環境政策対話研究所の代表柳下正治教授には、京都議定書の初歩から教えていただき、また先生の山中湖畔の別荘で、バーベキューをいただきながら、「国民的議論」に関する執筆活動のお手伝いをさせていただきました。上智大学の大坪国順教授の授業はその全てが新鮮で驚きに満ちていました。安全性の高い小型の原子炉について、また福島原発事故の拡散モデルなどについて教えていただきました。大坪教授の最後に近い授業で、教授の故郷である郡上八幡の清廉な水の利用について講義がありました。私は直ぐに郡上八幡に行き、教授がご不在の間に、ご自宅に上がり込み、お父様から郡上八幡の古い歴史について教えていただきました。

皆様、本当にお世話になりました、ありがとうございました。最後に、修士課程～博士後期課程の長い研究活動を支えてくれた家族に感謝します。美佐子（妻）、香織（長女）、梢（次女）、綾乃（三女）の理解がなければ、本論文の完成はなかったと思われまます。本当にありがとうございました。

(2020年2月 清水 裕)