

# エネルギーの長期的な安定供給に関する一考察

## - 3要素モデルの分析を中心に -

日本大学大学院総合社会情報研究科

博士後期課程 総合社会情報専攻

令和4年度

指導教員 陸 亦群

71201002 泉谷 清高

# 目 次

はじめに.....	1
研究の背景と目的.....	1
本論文の構成.....	4
第1章 日本におけるエネルギー事情の特徴.....	6
第1節 世界のエネルギー事情.....	6
(1) 世界のエネルギー消費.....	6
(2) 世界の電力事情.....	9
第2節 日本のエネルギー事情.....	12
(1) 日本の国土と自然災害.....	12
(2) 日本のエネルギー消費.....	15
(3) 日本の電力事情.....	17
第2章 本研究の着眼点および理論的背景.....	22
第1節 本研究の着眼点.....	22
(1) 南海トラフ巨大地震の港湾エリア被害想定.....	23
(2) 首都直下地震の港湾エリア被害想定.....	24
(3) 発電用燃料の国内在庫と安定供給.....	25
第2節 本研究の理論的基礎.....	25
(1) 電力について.....	26
(2) 需給の見込みについて：2050年の見込み.....	29
(3) 化石燃料の確認可採埋蔵量と確認可採年数.....	30
(4) エネルギーに関して.....	30
(5) 火力発電所と原子力発電所の立地条件と規制基準.....	32
(6) 脱炭素化社会の実現に向けて.....	36
第3節 本論文の主要論点（同時アプローチの必要性）.....	37
第3章 先行研究.....	39
第1節 エネルギー安全保障と安定供給.....	39
(1) エネルギー安全保障の定義.....	39
(2) エネルギー安全保障の定量評価.....	40
第2節 安全性の確保（被害予想と復旧予想の重要性）.....	43
第3節 安全性の確保（レジリエンス，安定性，安全性）.....	45
(1) レジリエンスの概念.....	45
(2) 安全性と安定供給.....	46

第4節	カーボンニュートラルに関する研究	47
	(1) 再生可能エネルギーの大量導入と電力の安定供給に対する負の作用	47
	(2) CO <sub>2</sub> 限界削減費用	48
	(3) 温暖化問題の難しさ, 自然現象と自然災害	50
	小括	51
第4章	エネルギー安定供給と3要素モデル	53
第1節	本論文の研究課題	53
第2節	仮説の提示	54
	仮説1 「安定供給に資する安定性と安全性の向上」の 카테고리	54
	仮説2-1 「安定供給に資する安定性と安全性の向上」の 카테고리	54
	仮説2-2 「安定供給に資する安定性と安全性の向上」の 카테고리	54
	仮説3 「CO <sub>2</sub> 排出量削減」の 카테고리	55
第3節	シミュレーションの構築	55
	仮説1 発電用燃料と安定供給	55
	仮説2-1 電源構成と災害時の安定供給 その1	57
	仮説2-2 電源構成と災害時の安定供給 その2	63
	仮説3 電源構成とCO <sub>2</sub> 排出量	65
第4節	モデル分析手順 — その検証方法について	68
第5章	シミュレーションによる検証および研究結果	71
第1節	検証結果の分析	71
	仮説1の検証 発電用燃料と安定供給	71
	仮説2-1の検証 電源構成と災害時の安定供給 その1	77
	仮説2-2の検証 電源構成と災害時の安定供給 その2	84
	仮説3の検証 電源構成とCO <sub>2</sub> 排出量	92
	参考1: 原子力発電の現状と再稼働による総発電電力量の推計	97
	参考2: 2030年度のCO <sub>2</sub> 削減した統計データからのイメージ	97
第2節	本論文の研究結果	98
	むすびに	102
	参考・引用文献	104

## はじめに

日本は社会生活や経済活動のために、世界の一次エネルギーの約3%を消費している世界第5位のエネルギー消費大国であると同時に一次エネルギー自給率<sup>1</sup>の極めて低いエネルギー資源小国である。くわえて、日本は、台風、豪雨、豪雪、洪水、土砂災害、地震、津波、火山噴火などによる災害が発生しやすい国土である。この2つは、我が国のエネルギー問題を考えていくうえでの与件である。日本は、国際情勢の変化によるエネルギー資源の需給変化や価格変動の影響を強く受けやすい脆弱なエネルギー供給構造になっている。このような背景もあり日本のエネルギー政策では「安定供給」を重視してきた。本論文では、日本は脆弱なエネルギー供給構造であり自然災害が多いという2つの厳しいこの与件の下「安定供給」を如何に実現させるかに関わる基礎的な要件を明らかにするとともに、「安定供給」に影響を与える「エネルギー安全保障」、「安全性の確保（特に災害時の安全確保）」と時代の要請により新しく加わった「カーボンニュートラル（脱炭素化）」の3要素の関係性を理論的に明らかにし、3要素を同時に満足するための方策を探求するものである。

## 研究の背景と目的

日本がエネルギーの「安定供給」を確保するにあたり、2つの厳しい条件が与えられている。1つは、日本がエネルギー消費大国であると同時にエネルギー資源小国であるという厳しいエネルギー供給制限下にあることである。例えば、一次エネルギー自給率が100%を超えるオーストラリアやカナダなどエネルギー資源輸出国は、国内需要の増減は輸出量の調整により容易に国内の需給バランスをとることができる。これは国内で閉じた問題ととらえることができる。これに対して、日本が安定供給を確保するには、エネルギー源の多様化、輸入先の多様化、利用効率の向上（省エネ）、備蓄の拡大などの方策が必要となる。一次エネルギー自給率を向上する現実的な手段は、再生可能エネルギーと原子力を増やすことであるが、この方法にも様々な制限がある。このように、日本は国際情勢の変化によるエネルギー資源の需給変化や価格変動の影響を強く受けやすい脆弱なエネルギー供給構造になっている。2つ目は、日本が、その位置、地形、地質、気象などの自然的条件から、台風、豪雨、豪雪、洪水、土砂災害、地震、津波、火山噴火などによる災害が発生しやすい国土となっている。定量的にみると、世界全体に占める日本の災害発生割合は、マグニチュード6以上の地震回数20.5%、活火山数7.0%、死者数0.3%、災害被害額11.9%など、世界の0.25%の国土面積に比して、非常に高くなっていることが分かる<sup>2</sup>。このように、国ごとに「エネルギー安全保障における安定供給」と「災害時における安全性の確保」を如何に実現するかは、国情によりアプローチの方法が全く異なる。本研究では、日本は脆弱なエネルギー供給構造であり自然災害が多いという与件の下、3要素（エネルギー安全保障、安全性の確保、カーボンニュートラル）モデルと捉え、その「3要素の関係性」を理論的に明らかにし、「3要素を同時に満足するための方策」を探求する。本研究の守備範囲は、エネルギー分野の

<sup>1</sup> 国民生活や経済活動に必要な一次エネルギーのうち、自国内で産出・確保できる比率をいう。

<sup>2</sup> 平成22年版 防災白書、第2部 災害の状況と対策 第1章 我が国の災害の状況 図「世界の災害に比較する日本の災害」による。(https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/bousai2010/html/zu/zu001.htm, 最終閲覧2022年10月19日)

「電力」、とりわけ「電力システム」に焦点を当て、電力の安定供給を実現するために、どのような取り組みが必要かを明らかにしていく。災害の範囲は自然災害とし、地震・津波に焦点を当てる。対象エリアは、火力発電所のほかエネルギー関連施設が集中する港湾エリアに注目していく。

まずは、「電力の安定供給」の必要性について説明する。電力の安定供給の必要性は、大きく2つの理由により説明できる。1つは電力という財は準公共財に分類され、必需性をもつため「安定供給」の社会的な要請が強いことによる。2つ目は電力のもつ「同時同量性」からの必要性である。同時同量性とは、電気の発生と消費は同時にかつ同量に行われなくてはならない、という電氣的な性質である。つまり、需要の変動に合わせて供給を瞬時瞬時にバランスさせる必要があるということである。このバランスが崩れると「停電」という最悪の事態に至るという電気工学からの制約条件になっている。現状を見渡すと、政府はサイバーセキュリティの観点より、情報通信、金融、航空、空港、鉄道、電力、ガス、政府・行政サービス、医療、水道、物流、化学、クレジット、石油の14を重要インフラと位置づけている。重要インフラとは、国民生活や経済活動の基盤となるインフラのうち、機能が停止したり、低下したりすれば特に大きな混乱を招くと見込まれるものをいう。これらの重要インフラは、いうまでもなくコンピュータと通信ネットワーク抜きでは正常に運用することができない。この重要インフラは、無停電電源装置（UPS）や非常用発電装置等で無停電化しているが、安定した商用電力を前提にしていることはいうまでもない。企業・家庭においても、マイクロプロセッサを搭載した電子機器の所有が増え、通信ネットワークへの接続も増えたことから、電力の安定供給の重要性はますます高まっていると言える。

「3要素モデル」の関係性を解明するアプローチの方法は、最初に3要素のうちエネルギー安全保障、安全性の確保の2要素に注目した。この2要素を細分化し、「エネルギー安全保障における電力の安定供給とは、安定性とは何か」、「災害発生時における安全性の確保とは、安全性とは何か」の文脈において考察を進める。電力部門におけるカーボンニュートラルとは、電力部門においてCO<sub>2</sub>（二酸化炭素）を中心とした温室効果ガス排出量を削減し、全体としてゼロにすることである。これらより論点を再構築すると、「エネルギー安全保障における電力の安定供給とは、安定性とは何か」、「災害発生時における電力システムにおける安全性の確保とは、安全性とは何か」、「電力部門のCO<sub>2</sub>排出量削減」の3要素の関係性を解明することになる。

次に、日本は脆弱なエネルギー供給構造であり自然災害が多いという与件の下、3要素を同時に満足する方策を得るアプローチの方法は、概念をできるだけ細分化し定量化していく。「厳しいエネルギー供給制限下」を細分化すると「エネルギーの需要に対して供給が少なく、一次エネルギー自給率が極めて低い状況」と同義である。一次エネルギー自給率とは、国民生活や経済活動に必要な一次エネルギーのうち、自国内で確保できる比率のことである。日本の電力部門のエネルギー自給率を向上させる選択肢は、原子力または再生可能エネルギーによる発電電力量（kWh）を増やすことであり、この2つを合理的に組合せた増量方法が重要になってくる。論点を再構築すると「原子力または再生可能エネルギーを増量しエネルギー自給率を向上させる要請の下、電力の安定供給を実現するための、エネルギー安全保障、安全性の確保（特に災害時の安全確保）とCO<sub>2</sub>排出量削減という3要素を同時に満足する方策は何か」を探求することになる。一方で、電源構成<sup>3</sup>において原子力発電と再生可能エネルギーの構成比率

---

<sup>3</sup> 電源構成は、発電設備容量（kW）あるいは一定期間の発電電力量（kWh）で表すことができるが、本論では後者を採用している。理由は、発電電力量が実際に消費した一次エネルギー量を示す尺度となり、発電のためどの一次エネルギーがどれだけ使用されているかが分かりやすいからである。

を増やすことで、一次エネルギー自給率の向上と CO<sub>2</sub> 排出量削減に寄与することはよく知られている事実である。つまり、電源構成が変わると一次エネルギー自給率と CO<sub>2</sub> 排出量に変化する。他に電源構成比が変わると他に何が変化するのだろうか。太陽光発電や風力発電は主力の再生可能エネルギーであり、これらは発電量 (kWh) が天候に左右されるため「変動性再生可能エネルギー」と呼ばれ、「電力の安定供給」に対して不安定要素 (外乱) になることが知られている。つまり、電源構成において変動性再生可能エネルギーの構成比が増えると、安定供給に対して負の作用 (不安定な要素) が増える。加えて、火力発電所と同じ発電設備容量 (kW) を太陽光発電所や風力発電所で実現するためには、再生可能エネルギー (発電設備) のエネルギー密度 (kW/m<sup>2</sup>) が低いことから、火力発電所用敷地の数百倍程度の広い敷地が必要になる、さらに同じ発電量(kWh)を得るためには、再生可能エネルギーの設備利用率が低いことから火力発電所の数千倍程度の土地の面積が必要なることも知られている。つまり、電源構成において、火力発電を減らし、太陽光発電や風力発電の構成比率を増やす (置換え) には新しく広大な土地の面積が必要になる。この土地面積の制約は、国土が狭く平地が少ない我が国に、どのような影響があるのだろうか。さらに、電源構成が変化すると「災害発生時における安全性」は変化するのだろうか。本研究では、電源構成が変化すると災害発生時における「安全性が変化する」ことを明らかにしていく。

「エネルギー安全保障における電力の安定供給とは、安定性とは何か」、「災害発生時における電力システムにおける安全性の確保とは、安全性とは何か」、「電力部門の CO<sub>2</sub> 排出量削減」の 3 要素の関係を解明するとき、「電力部門の CO<sub>2</sub> 排出量削減」は、既に「何をどうする」という行動 (この場合は「削減」と対象 (同じく「CO<sub>2</sub> 排出量」とその単位 (同じく「炭素-トン」) までが定まっている。しかし、前者の 2 要素については未定であり、先行研究より「安定性」、「安全性」の概念をサーベイし、土木工学分野における「レジリエンス (Resilience)」に関する研究のなかで「安定性としてレジリエンスの概念」を援用することにより、「電力システムにおいて、安定性と安全性は同義であり、安定性と安全性の向上は安定供給の向上に資する」ことを論証していく。

先ず「電力の安定供給」の指標は「供給信頼度 (停電時間)」で定義されている。「停電時間」は「機能停止から復旧までの時間」と同義である。「災害時における電力システムの安全性の確保」を「機能の低下度」と「機能停止から復旧までの時間」を指標として比較することができる。次に、「CO<sub>2</sub> 排出量の削減」の比較について説明する。「LC-CO<sub>2</sub> 排出量 (g-CO<sub>2</sub>/kWh)」という係数が公開されている。これは、LNG 火力発電や石炭火力発電等の電源種ごとに 1kWh 発電すると何グラムの CO<sub>2</sub> が排出されるという係数である。「LC-CO<sub>2</sub> 排出量」のは「ライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量<sup>4</sup>」を略している。この係数 (g-CO<sub>2</sub>/kWh) と電源種ごとの発電電力量 (kWh) が分かれば、「発電電力量 (kWh)」と「LC-CO<sub>2</sub> 排出量 (g-CO<sub>2</sub>/kWh)」を乗算すると、分子と分母の「kWh」がキャンセルされ電源種ごとの CO<sub>2</sub> 排出量「g-CO<sub>2</sub>」を計算することができる。例えば、2010 年度の総発電電力量は 11,494 (億 kWh)、総 CO<sub>2</sub> 排出量は 571.0 (百万トン-CO<sub>2</sub>) である。内訳は、2013 年度の総発電電力量は 10.845 (億 kWh)、総 CO<sub>2</sub> 排出量は 708.9 (百万トン-CO<sub>2</sub>) である。2010 年度と比較して 2013 年度の方が、発電電力量は 5.6%と減少、CO<sub>2</sub> 排出量は 24.2%増加である。平均 LC-CO<sub>2</sub> 排出量を比較するために総 CO<sub>2</sub> 排出量を総発電量で除して比較すると、31.6%増加していることが分かる。このように電源構成が変化すると CO<sub>2</sub> 排出量に変化し、定量的に分析・評価することができる。このように 3 要素を同時に満足する方策を得るアプローチの方法は、「電

<sup>4</sup> LC-CO<sub>2</sub> 排出量は、発電燃料の燃焼に加え、原料の採掘から発電設備の建設・燃料輸送・精製・運用・保守等のために消費される全てのエネルギーを対象として CO<sub>2</sub> 排出量を算出している。原子力については、使用済燃料国内再処理・プルサーマル利用 (1 回リサイクルを前提)・高レベル放射性廃棄物処分・発電所廃炉を含めて算出した BWR(19g-CO<sub>2</sub>/kWh)と PWR(20g-CO<sub>2</sub>/kWh)の結果を設備容量に基づき平均している。

力システムにおける安定性と安全性の確保」を「機能の低下度」と「機能停止から復旧までの時間」を指標として比較し、「CO<sub>2</sub>排出量の削減」については「電源構成から算出したCO<sub>2</sub>排出量」を比較することで3要素を満たす問題の解法を探っていく。

## 本論文の構成

第1章では、日本におけるエネルギー事情を整理する。まずは、世界のエネルギー事情として、エネルギー消費、世界のエネルギー需給、電力需給の過去、現在、将来像とGDP・人口・エネルギー消費・CO<sub>2</sub>排出量との関係性を概観していく、世界の電力事情では電源構成を中心にOECD諸国<sup>5</sup>と非OECD諸国を対比しながら見ていく。次に、日本のエネルギー事情として、日本の国土と自然災害の発生状況を概観し、世界と日本のエネルギー消費を比較することにより、日本の世界におけるポジションや日本特有の事情を整理していく。これにより、日本は脆弱なエネルギー供給構造であり自然災害が多いという厳しい与件をより明確に示す。第1章で得た注目するポイントをカテゴリー化し、第3章の先行研究のサーベイに展開する。

第2章では、本研究の着眼点および理論的背景をとりあげる。第1節では着眼点として、日本のエネルギー政策を概観し、政策の変遷を大きく捉えると、最初に「エネルギー安全保障」があり、東日本大震災を機に「安全性の確保（特に災害時）」が加わり、持続可能な経済社会をつくるための、時代の要請から「カーボンニュートラル（脱炭素化）」が加わっており、「エネルギー安全保障」「安全性の確保」「カーボンニュートラル」は、エネルギー安定供給を決定する3要素と捉え、同時にアプローチする必要があることを提起する。本研究の守備範囲は、エネルギー分野の電力、とりわけ電力システムとし、災害の範囲は自然災害とし、南海トラフ巨大地震、首都直下地震は最大級の自然災害と捉え、対象エリアは火力発電所のほかエネルギー関連施設が集中する港湾エリアに注目していく。次に、南海トラフ巨大地震と首都直下地震の港湾エリアの被害想定を概観し、発電用燃料の供給途絶の可能性について見ていく。第2節では理論的基礎として、本論で使用する概念と用語を整理する。

第3章では、第1章で捉えた注目するポイントに関する先行研究を概観していく。カテゴリーは大きく5つあり、①化石燃料は2050年も主役であること、②エネルギー安全保障と自然災害、③再生可能エネルギー・原子力と脱炭素化、④日本の脱炭素化が後退、⑤再生可能エネルギー大量導入による負の作用である。第1節において、エネルギー安全保障とエネルギー安全保障の定量的評価の方法を概観する。第2節において、被害予想と復旧予想の重要性について、第3節において、レジリエンスと安全性、安定性の先行研究を概観する。第4節では、カーボンニュートラルの研究として、再生可能エネルギーの大量導入と電力の安定供給に対する負の作用、CO<sub>2</sub>限界削減コスト、温暖化問題の難しさ、自然現象と自然災害について概観する、第5節の小括では、先行研究の未到達の領域を踏まえ、「エネルギー安全保障」「安全性の確保」「カーボンニュートラル」の3つがエネルギー安定供給決定の3要素であり、同時にアプローチする必要があることを総括する。

---

<sup>5</sup> OECDは「Organization for Economic Co-operation and Development：経済協力開発機構」の略で、本部はフランスのパリに置かれている。現在、OECDの加盟国は以下の38か国である。OECDは、先進国間の自由な意見交換・情報交換を通じて、経済成長、貿易自由化、途上国支援に貢献することを目的としている。

第4章では、エネルギー安定供給と3要素モデルをもとに、先行研究で得た知見を踏まえ、第1節ではリサーチクエスチョンを提示、第2節の仮説はリサーチクエスチョンから仮説を提起する。第3節ではシミュレーション構築、仮説を提示。仮説ごとに、①モデルの前提条件、②モデル設定、③分析方法、④モデルのバックグラウンドを説明する。第4節ではモデル分析手順（検証方法について）と構成する。仮説は、カテゴリー「安定供給に資する安定性と安全性の向上」より3つの仮説、カテゴリー「CO<sub>2</sub>排出量削減」より2つの仮説を設定する。仮説1は「首都直下地震が発生し発電用燃料の供給途絶が発生した場合は、国内民間在庫日数の少ないLNGを用いたLNG火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、LNG火力が停止した時の電力供給量が低下する幅が大きい。すなわち、LNG火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な供給になる」である。仮説2は「火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な供給になる」を原型の仮説とし、対象とするエリアを仮説2-1は「九州エリア、四国エリア」、仮説2-2は「全国エリア、西日本エリア」と別に提起する。仮説2-1は九州エリアと四国エリアを対象とし「火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な供給になる」とする。仮説2-2は、対象エリアを全国エリアと西日本エリアに拡げ「日本全体と西日本エリアの両ケースにおいても、火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な供給になる」とする。仮説3は、太陽光発電と風力発電の2つの発電方式に分けて仮説を設け、仮説3-1は「太陽光発電を2020年度実績（791億kWh）から2030年度計画値（1308億kWh）へ168%増やすことは、山手線一杯の面積（58km<sup>2</sup>）が10倍以上の土地の面積を必要とするため、実現性は低い」、仮説3-2は「風力発電を2020年度実績（90億kWh）から2030年度計画値（467億kWh）へ519%増やすことは、東京湾の面積（1380km<sup>2</sup>）80%以上の土地の面積が必要のため、実現性は低い」とする。

第5章第1節では、シミュレーションによる検証結果の分析を行う。第2節では、本論文の研究結果として、仮説検証のまとめ、検証結果の分析を行う。これらを踏まえ、わが国の厳しいエネルギー供給制限と自然災害が多いという2つの厳しい与件の下における電力の安定供給を実現するための方策は何かを明らかにする。

なお、本論文は、筆者の個人的一考察、意見であり、筆者の勤務先、所属組織とは関係しないことを付言する。



## 第1章 日本におけるエネルギー事情の特徴

本論では電力の安定供給を主題としており、それは地震・津波などの自然災害発生時においてもカーボンニュートラル政策の推進時においても、長期的な安定供給をいかに確保するかを探求していく。その準備として、世界のエネルギー需給、電力需給の過去、現在、将来像とGDP・人口・エネルギー消費・CO<sub>2</sub>排出量との関係性を概観していく。そのうえで、日本のエネルギー事情について、地球全体からみたプレゼンスとエネルギー消費構造の特性をみていく。第1節は「世界のエネルギー事情」、第2節は「日本のエネルギー事情」と展開する。

### 第1節 世界のエネルギー事情

「エネルギー」とは物理学では「仕事をする能力」として定義される。本論では「仕事をする能力を有する資源」として、石炭、石油、天然ガス、原子力、水力などの従来型エネルギーから太陽光、風力、オイルサンド、シェールオイル、シェールガス、可燃廃棄物等の非在来型エネルギーを扱うものとする。この節の構成は、「世界のエネルギー消費」、「世界の電力事情」となる。

#### (1) 世界のエネルギー消費

エネルギーを利用する視点から分類すると、一次エネルギー（エネルギー資源）と二次エネルギーに大別できる。一次エネルギーとは、石炭、石油などエネルギー転換・加工を行う前の天然のエネルギー資源をいう。原子力や水力、地熱、太陽光、風力等の再生可能エネルギーも発電する前のエネルギー形態は一次エネルギーになる。これに対して、二次エネルギーは転換後のエネルギーで、社会活動で使われているエネルギーである。二次エネルギーであるエネルギー製品には石油製品（ガソリン、灯油、軽油、重油、液化石油ガス等）、天然ガス製品（都市ガス、メタノール、エタノール等）、石炭製品（液化燃料、ガス化燃料、コークスガス等）、電気、熱、水素燃料等がある。最終エネルギー消費について述べる。最終エネルギー消費（需要）部門とは、一次エネルギー部門あるいは転換部門（発電部門、石油精製、都市ガス製造等）で生産（転換）した二次エネルギーを経済活動や社会活動に直接利用する部門である。つまり、最終エネルギー消費とは、需要家レベルで消費されるエネルギーの総量であり、転換部門でのエネルギー消費は含まれない。

世界の一次エネルギー消費（2019年）は、14,486（石油換算百万トン）である。「石油換算トン」とは1トンの原油を燃焼させた時に得られるエネルギー単位である。次に一次エネルギー消費の構成を見る。石炭は3,878（石油換算百万トン）、石油は4,475（石油換算百万トン）、天然ガスは3,363（石油換算百万トン）、原子力は728（石油換算百万トン）、水力は363（石油換算百万トン）、可燃再生・廃棄物は1,357（石油換算百万トン）である。化石燃料である石炭・石油・天然ガスの合計は11,716（石油換算百万トン）となり全体の約81%を構成する。これに可燃再生・廃棄物を加えた合計は13,073（石油換算百万トン）となり全体の約90%を構成する。つまり、一次エネルギーの90%は燃焼するとCO<sub>2</sub>を排出することになる。原子力は全体の約5%、水力は約2.5%である。その他322（石油換算百万

トン) は約 2.2%であり、この一部に地熱、太陽光、風力等の再生可能エネルギーが含まれる。現状では、このように一次エネルギーに占める再生可能エネルギーは僅かである。(図 2 を参照のこと)

図 2 より、1971 年から 2019 年までの一次エネルギー消費量は単調増加していることが読み取れ、主たる一次エネルギーが化石燃料であり牽引していることが分かる。

CO<sub>2</sub> 排出する主な要因を分解し、式の形式で示した「茅恒等式 (Kaya Identity)」を以下に示す。

$$C = (C/E) \times (E/GDP) \times (GDP/人口) \times (人口) \cdots \text{数式 1}$$

$C$ : CO<sub>2</sub> 排出量,  $E$ : エネルギー消費量

数式 1 は、左辺「CO<sub>2</sub> 排出量」は、右辺の第 1 項「エネルギー消費量あたりの CO<sub>2</sub> 排出量」、第 2 項「経済活動のエネルギー効率」、第 3 項「人口 1 人あたりの経済水準」、第 4 項「人口」の積で表されている。式 1 右辺の項ごとの分子に注目すると、「エネルギー消費量」、「GDP」、「人口」の値を大きくすると左辺の「CO<sub>2</sub> 排出量」が増加する関係性を表している。したがって、「CO<sub>2</sub> 排出量」を削減するには、生活の質を低下させる、人口を減らすことで可能なことは自明であるが、本論の目的に反している。GDP (=第 3 項×第 4 項) の成長を確保しつつ、CO<sub>2</sub> 排出量削減を進めるには、第 1 項と第 2 項の値を小さくする方策をとる必要がある。第 1 項「エネルギー消費量あたりの CO<sub>2</sub> 排出量」の値を低くするには「CO<sub>2</sub> 排出係数がより小さい燃料への転換 (石炭から天然ガス等)」、「CO<sub>2</sub> 排出がほとんどない原子力、再生可能エネルギーへの転換」を推進すること、第 2 項「経済活動のエネルギー効率」の値を小さくするには「省エネルギー」を推進することが必要となる。具体的には、産業、業務、家庭、運輸各部門における設備・機器の高効率化の更なる推進が必要になる。たとえば、エネルギー消費効率<sup>6</sup>の高い LED 照明、省エネ基準達成率<sup>7</sup>の高い設備・機器の導入促進、燃費性能の高い自動車の普及を促進するなどが挙げられる。

---

<sup>6</sup> エネルギー消費効率とは、製品ごとに定められた測定方法によって得られた数値で、製品によって表示語が異なる。照明器具では表示語は「固有エネルギー消費効率」、単位は「lm/W(ルーメン/W)」となる。電気冷蔵庫では、表示語は「年間消費電力量」、単位「kWh/年」となる。

<sup>7</sup> 省エネ基準達成率とは、その製品がトップランナー基準値を、どの程度達成しているかを%で示したもの。トップランナー基準とは、エネルギー消費機器等のうち省エネ法で指定するものの省エネルギー基準を、各々の製品において、基準設定時に商品化されている製品のうち最も省エネ性能が優れている製品の性能、技術開発の将来の見通し等を勘案して設定する基準である。

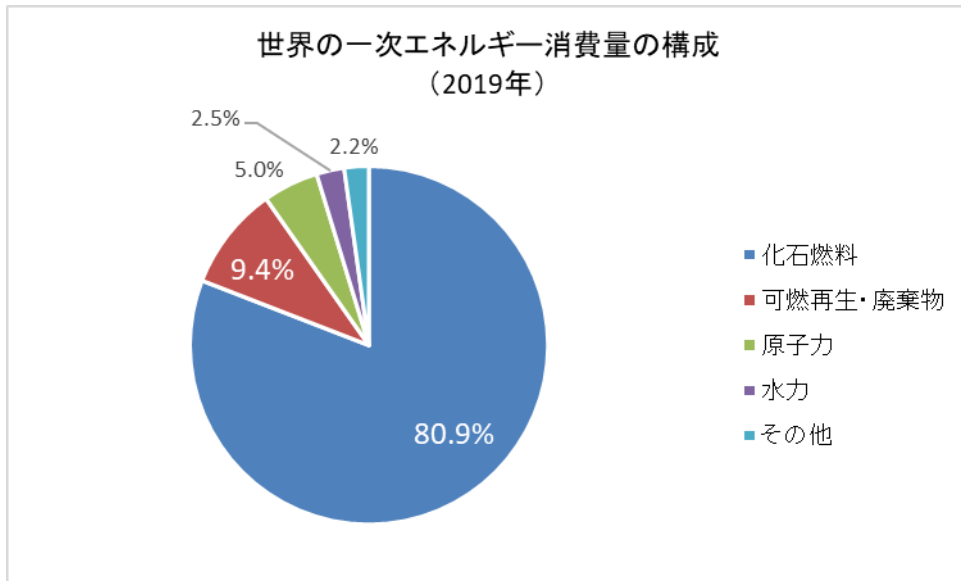


図 1 一次エネルギー消費の構成

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧』  
をもとに筆者作成。

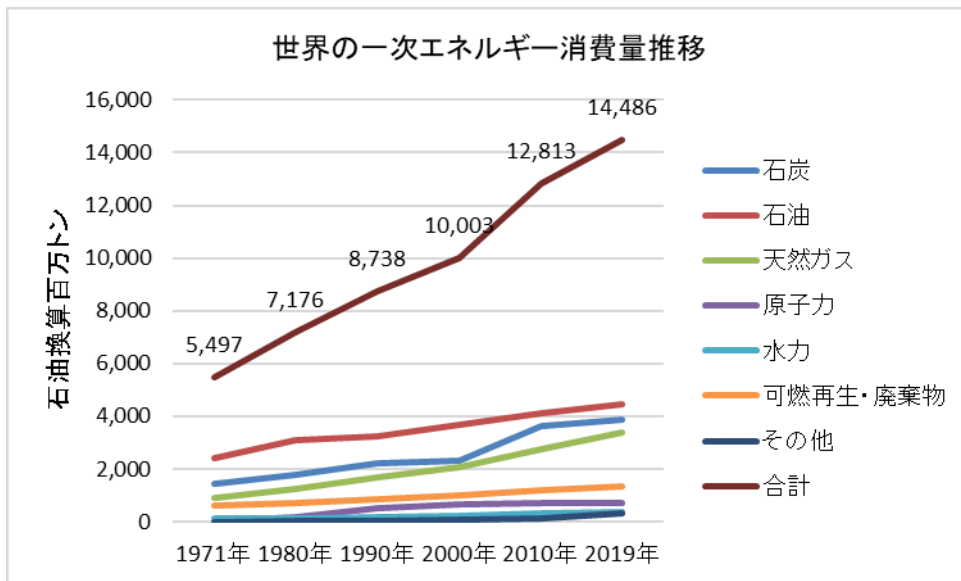


図 2 一次エネルギー別の消費推移

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧』  
をもとに筆者作成。

## (2) 世界の電力事情

本論ではエネルギー分野のなかで電力を扱うことから、世界の電力事情について見ていく。表1は発電するために必要な燃料投入量（投入ベース）と得られた発電量を「石油換算百万トン」で示している。具体的には、世界で5,454（石油換算百万トン）の発電用燃料を投入し、得られた発電量は2,316（石油換算百万トン）である。と発電ロス率（%）も併記している。関係式は下記のとおり。

発電構成：（投入エネルギー） - （発電ロス） = （発電量）・・・数式 2

発電ロス率：（発電ロス） ÷ （投入エネルギー）・・・数式 3

前出にあるように、世界の一次エネルギー消費（2019年）は14,486（石油換算百万トン）である。地球規模では、一次エネルギーの約38%（=5,452/14,486）を発電用として消費していることになる。発電用に投入した一次エネルギー100単位から得られる二次エネルギーの発電量は42単位、実に58単位がロス（損失）となる。OECD38の発電ロス率は54%、非OECD諸国の発電ロス率は60%となっている。一次エネルギーから二次エネルギーである電力をより多く取り出すには、発電ロス率を小さくしていく必要がある。

表2より、世界の発電用の燃料投入量の合計は5,454（石油換算百万トン）でOECD38が38%、非OECD諸国が62%を構成している。図4より、世界の電源構成を見ると、化石燃料の石炭（45%）、石油（3%）、天然ガス（23%）の合計71%である。これにバイオマス・廃棄物（4%）を加えた合計は75%となる。これらはCO<sub>2</sub>を排出する電源である。図4より、非OECD諸国の電源構成に注目すると化石燃料の石炭（57%）、石油（4%）、天然ガス（21%）の合計82%である。

ここで石炭火力発電に注目すると、石炭火力発電は世界の約46%を構成する。世界の発電方式の中で、何故、環境負荷の大きい石炭火力を多く採用しているのだろうか。電力構成を考えていく要素として、供給の安定性、経済性、環境適合性、安全性などがあり、一方で、すべての面でこれらを満たす一次エネルギーが存在しない。したがって、国情に照らして、これらの要素のバランスを取りながら最適な一次エネルギーとその組合せをすることになる。これがエネルギーミックス（ベストミックス）の考え方である。石炭は、供給安定性や経済性の面で優れた一次エネルギーであり、石油や天然ガスに比べて可採年数が長く、存在している地域が分散していることから、供給の安定性が高い。また、石油火力発電や天然ガス火力発電に比べて安い燃料費で発電できるからである。特に、非OECD諸国において石炭火力発電が多い理由は、発電の経済性、供給の安定性である。地球温暖化問題では、依然としてCO<sub>2</sub>排出係数が大きい石炭火力発電への廃止圧力は強いものの、石炭火力発電が電源構成（投入ベース）の45%を占めるという現実を踏まえると、石炭火力発電の発電ロスを削減し、有限な石炭資源をより長く使うこと、CO<sub>2</sub>排出量を削減すること、つまり石炭を効率的に使うテクノロジーを追及することは重要である。このことを拡張すれば、2050年までの一次エネルギーの消費動向は化石燃料が大宗を占めるとの見通しがあることから、有限な化石燃料をより長く使うこと、CO<sub>2</sub>排出量を削減すること、つまり化石燃料を効率的に使うテクノロジーを追及することは現実的かつ重要な課題と言える。特に、これから一次エネルギー消費を牽引する新興国・途上国が化石燃料を効率的に使うことは、地球規模で重要な課題である。

一次エネルギーの発電燃料から二次エネルギーの電力を得る際に発電ロスが生じることを述べた。世界の一次エネルギーを二次エネルギーに転換する際のロスについて概観する。2019年の一次エネル

ギーの供給量は14,486（石油換算百万トン）、最終エネルギー消費量は9,983（石油換算百万トン）である。ロス分は4,503（石油換算百万トン）で約31%ある。「ロス率」の定義は（一次エネルギー消費/最終エネルギー消費）である。2019年のロス率は約145%（=14,486/9,983）となる。図5より、ロス率は1971年から2019年にかけてロス率は130から145と増加している。この背景には、最終エネルギー需要に占める電力需要の増加がある。表1にあるように世界の発電ロス率は58%であり、発電量が増加すれば増加するほどロス率は増加する。最終エネルギー消費に占める電力消費量の割合を「電力化率」と呼ぶ。機械類を生産する加工組立産業やサービス業、家庭部門ではエネルギー消費量に占める電力の比率が高いため、産業構造が鉄鋼、窯業、化学繊維など他の工業の原材料や建設資材などを生産する素材産業から加工組立産業に移行するなど、民生部門のエネルギー消費量の増加率が他の部門よりも大きい場合には、国全体としての電力化率が高まる傾向がある。世界の電力化率（2019年）は19.7%、日本は28.6%、OECD38は22.0%、非OECD諸国は19.6%である。日本の電力化率の高いことが分かる。電力化率の高い日本では「電力の安定供給」はより重要である。電気は使い易い二次エネルギーであるが、一次エネルギーから電気エネルギーに変換する際に大きなロスを生じることから、行き過ぎた電化には注意が必要である<sup>8</sup>。

#### カテゴリー(1):

化石燃料は2050年も主役であり、世界全体で化石燃料を効率的に利用するテクノロジーは重要である。

表1 世界の電源構成（2019年，投入ベース）

単位：石油換算百万トン

	燃料投入量							合計 ①	発電量 ②	発電ロス ③=①-②	発電ロス率 ④=③÷①
	石炭	石油	天然ガス	原子力	水力	地熱・風力等	バイオマス・廃棄物				
OECD38	579	45	568	517	126	143	104	2,083	958	1,125	54%
非OECD	1,866	140	697	210	237	122	99.2	3,371	1,359	2,012	60%
世界	2,445	185	1,265	727	363	265	203	5,454	2,316	3,138	58%

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022年版）』p.277をもとに筆者作成。

表2 世界の電源構成（2019年，発電量ベース）

単位：TWh

	石炭	石油	天然ガス	原子力	水力	地熱・風力等	バイオマス・廃棄物	合計
OECD38	6,734	522	6,606	6,013	1,465	1,663	1,210	24,212
非OECD	21,702	1,628	8,106	2,442	2,756	1,419	1,154	39,207
世界	28,435	2,150	14,712	8,455	4,222	3,082	2,363	63,420

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022年版）』p.226をもとに筆者作成。

<sup>8</sup> 給湯を電気温水器で行うより、ガス給湯器で行う方がエネルギーロス（損失）は小さい。発電ロスは表1にあるように58%程度（世界平均）、ガス給湯器の熱損失は5～15%程度であり、発電ロスと比較すると約四分の一以下である（熱損失は1より熱効率を引いた数）。（<https://www.gas.or.jp/gas-life/ecojozu/>、最終閲覧2022年10月19日）

注) 1 (石油換算トン) =  $1.16300 \times 10^4$  (kWh) なので、表1の発電量2,316 (石油換算百万トン) は、表2の26,947 (TWh) ( $\approx 2,316 \times 1.163 = 26,936$ , 誤差0.04%) と一致する。

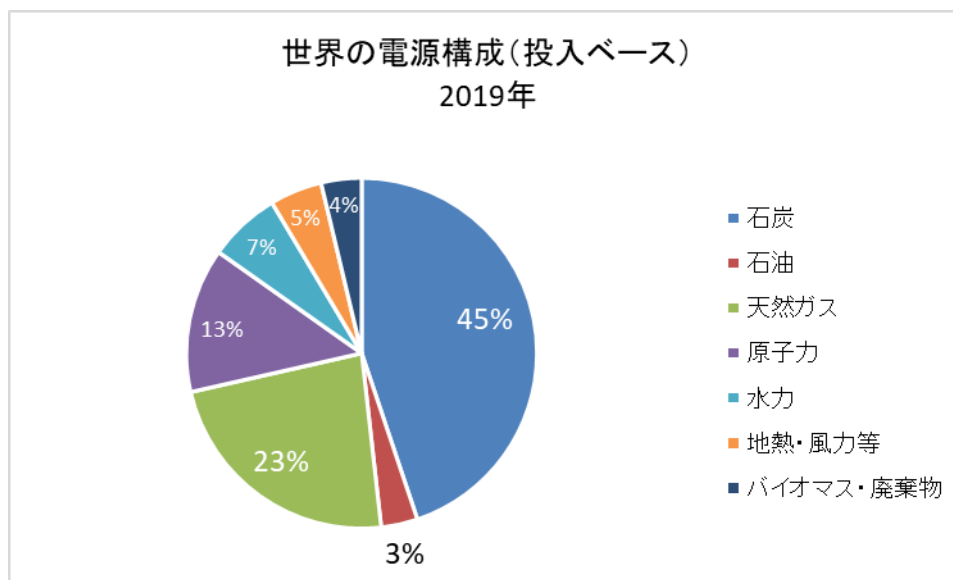


図3 世界の電源構成 (投入ベース)

出所: 表2をもとに筆者作成。

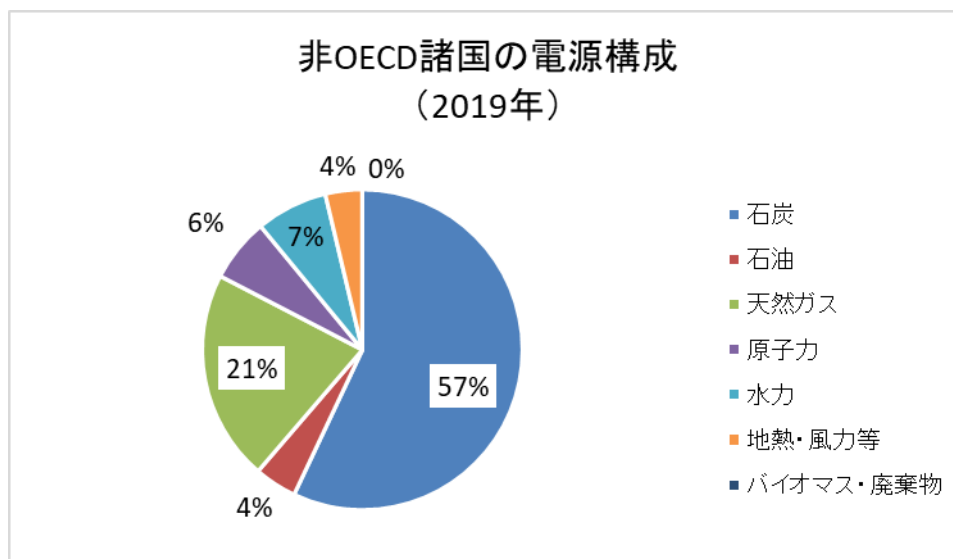


図4 非OECD諸国の電源構成 (投入ベース)

出所: 表2をもとに筆者作成。

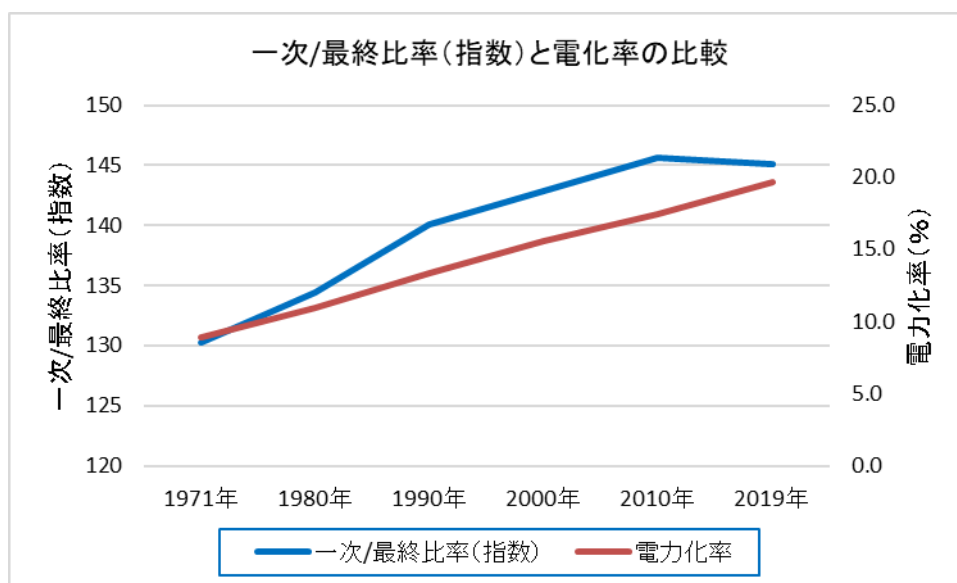


図5 ロス率（一次エネルギー消費/最終エネルギー消費）と電化率（電力消費/最終エネルギー消費）の比較

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022年版）』pp.216-217, p.228, p.233をもとに筆者作成。

## 第2節 日本のエネルギー事情

まずは、日本の国土と自然災害を含めた自然環境を概観し、エネルギー事情を概括する。

### （1）日本の国土と自然災害

日本の国土は、北海道、本州、四国、九州の比較的大きい4つの島と、そのほかの小さな島で構成される。日本の国土の総面積は約37万8000km<sup>2</sup>である。最大の面積を占める本州は約22万8000km<sup>2</sup>であり、国土の約60%を占める。日本の国土の地形を「山地」、「丘陵地」、「台地」、「低地」、「内水域等」に分けて地形別の面積を見ると、「山地」と「丘陵地」を合わせると7割になる。つまり、山が多く平地が少ない国土である。日本の森林面積は約25万km<sup>2</sup>あり「森林率」は67%である<sup>10</sup>。世界の森林率<sup>11</sup>は約30%であり、日本は世界各国のなかでも森林に恵まれた国土である。

防災白書（平成22年度版）によれば、「日本は、海洋プレート（太平洋プレート、フィリピン海プレート）及び陸側のプレートの境界部に位置し、日本周辺で太平洋プレートが千島海溝、日本海溝及

<sup>9</sup> 総務省統計局、「都道府県、地形・傾斜度別面積（エクセル：36KB）」より計算した値。  
（<https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.stat.go.jp%2Fdata%2Fnenkan%2F65nenkan%2Fzuhyou%2Fy650108000.xls&wdOrigin=BROWSELINK>, 最終閲覧2022年10月12日）

<sup>10</sup> 林野庁、「都道府県別森林率・人工林率（平成29年3月31日現在）」  
（<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/1.html>, 最終閲覧2022年10月12日）

<sup>11</sup> 林野庁、国際連合食糧農業機関（FAO）「世界森林資源評価2020 Key finding（仮訳）」  
（<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaigai/attach/pdf/index-4.pdf>, 最終閲覧2022年10月12日）

び伊豆・小笠原海溝で陸側のプレートとフィリピン海プレートの下に沈み込み、またフィリピン海プレートが南西諸島海溝、南海トラフとその延長である駿河トラフ及び相模トラフで陸側のプレートの下に沈み込んでいる。このように複雑な地殻構造の上に位置する我が国は、世界の0.25%の国土面積であるがマグニチュード6以上の地震回数は世界の20.5%を占める。このように我が国は、世界的に見ても地震の発生が多い国であり、過去より頻繁に大きな被害を生じるような地震に見舞われてきた。」(第2部第1章「災害を受けやすい日本の国土」, 第2部>3 自然災害対策>3-1 震災対策>(1)地震の発生と被害状況を要約)<sup>12</sup>

2011年3月11日、マグニチュード9.0という我が国の観測史上最大規模の東北地方太平洋沖地震(震災名は東日本大震災)が発生した。強大な地震とともに巨大な津波が東北地方から関東地方を襲い、広範囲に及ぶ数多くの施設に甚大な被害をもたらした。東京電力福島第一原子力発電所では、地震動と津波の影響により、炉心溶融など放射性物質の放出をともなった原子力事故を引き起こした。太平洋沿岸では、港湾施設等のインフラ施設の損壊及び電気、石油、ガス等のエネルギー施設への大きな被害をもたらし、日本のエネルギー安定供給の脆弱性を露見させた。

東日本大震災後、内閣総理大臣を会長とする中央防災会議は、2012年7月に「南海トラフ巨大地震対策について(中間報告)」<sup>13</sup>と「首都直下地震対策について(中間報告)」<sup>14</sup>を公表し、2013年5月に「南海トラフ巨大地震について(最終報告)」<sup>15</sup>、同年12月に「首都直下地震の被害想定と対策について(最終報告)」を公表している。「南海トラフ巨大地震について(最終報告)」の被害想定によれば、南海トラフ巨大地震が発生すると、静岡県から宮崎県にかけての一部では震度7となる可能性があるほか、これに隣接する広い地域では震度6強から6弱の強い揺れになると想定されている。また、関東地方から九州地方にかけての太平洋沿岸の広い地域に10mを超える津波が想定されている。そして、資源エネルギー庁、「エネルギー供給レジリエンスの向上」によれば、首都直下地震予想地域と南海トラフ巨大地震予想地域に製油所、石油タンク、LNG基地(Liquefied Natural Gas; 液化天然ガス)、LPG基地(Liquefied Petroleum Gas; 液化石油ガス)、LNG火力発電所、石油火力発電所、石油火力発電所が集中しており、首都直下地震や南海トラフ巨大地震により、日本全体のエネルギー供給能力が相当長期間にわたり大きく毀損されるおそれがある(表3を参照のこと)。

---

<sup>12</sup> 平成22年版 防災白書, 下記2箇所の節を要約した。

・第2部 災害の状況と対策>第1章 我が国の災害の状況>1 災害を受けやすい日本の国土

([https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/bousai2010/html/honbun/2b\\_1s\\_1\\_01.htm](https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/bousai2010/html/honbun/2b_1s_1_01.htm), 最終閲覧 2022年10月12日)

・第2部>3 自然災害対策>3-1 震災対策>(1)地震の発生と被害状況

([https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/bousai2010/html/honbun/2b\\_2s\\_3\\_01\\_1.htm](https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/bousai2010/html/honbun/2b_2s_3_01_1.htm), 最終閲覧 2022年10月12日)

<sup>13</sup> 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ「南海トラフ巨大地震対策について(中間報告)」2013年7月19日。

([https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku\\_wg/index.html](https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/index.html), 最終閲覧 2022年10月12日)

<sup>14</sup> 中央防災会議 防災対策推進検討会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ「首都直下地震対策について(中間報告)」2013年7月19日。

([https://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku\\_wg/](https://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/), 最終閲覧 2022年10月12日)

<sup>15</sup> 中央防災会議 防災対策推進検討会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ「南海トラフ巨大地震について(最終報告)」2013年5月28日。

([https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku\\_wg/index.html](https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/index.html), 最終閲覧 2022年10月12日)



火力発電所の立地条件<sup>16</sup>として、大量の冷却水が容易に得られること、LNG、石炭、石油などの発電用燃料の受入れが容易なことから港湾エリアに立地し、その多くは地盤が脆弱かつ標高が低い埋立地にある<sup>17</sup>。つまり、地震・津波による影響を受け易い立地であると言える。また、LNGは貯蔵後LNG火力発電の燃料として使用されるほか、ガス化学製品の原料や気化・熱量調整・付臭の工程を経て二次エネルギーの都市ガスとなる。石油、石炭も同様に発電用に使用される他、それぞれの化学製品の原料や石油燃料（ガソリン、軽油、灯油等）、コークスなどの二次エネルギーとなる。このようにエネルギーサプライチェーン上でみると、港湾エリアは一次エネルギーの海上輸送の終点であり、同時に二次エネルギーの始点になっている。このことから、地震大国のわが国では、港湾エリアにあるエネルギー施設の地震・津波被害を軽減することは極めて重要である。

## カテゴリー(2): エネルギー安全保障と港湾エリアの地震・津波被害

南海トラフ巨大地震と首都直下地震の発生予想エリアにエネルギー施設が集中していることから、港湾エリアにあるエネルギー施設の地震・津波被害を軽減することは極めて重要である。

表 3 首都圏、東海地震防災対策強化地域、東南海・南海地震防災対策推進地域にある拠点（対全国比）

施設	南海トラフ巨大地震と首都直下地震予想地域	内、関東
製油所	79%	38%
石油タンク	60%	26%
LNG基地	86%	41%
LPG基地	84%	36%
LNG火力発電所	84%	44%
石炭火力発電所	39%	5%
石油火力発電所	60%	27%

出所：資源エネルギー庁、「エネルギー供給レジリエンスの向上」、2013年8月をもとに筆者作成。

注記）定義は以下のとおり、石油精製：製油所の原油処理能力の対全国比、石油タンク：製油所・油槽所等のタンク容量の対全国比、LNG基地：稼働中の輸入基地における受入規模の対全国比、LPG基地：輸入基地における実貯蔵能力の対全国比率、LNG火力：LNG火力の発電設備容量の対全国比率、石炭火力：LNG火力の発電設備容量の対全国比率、石油火力：石油火力の発電設備容量の対全国比率、である。（首都圏とは、東京都およびその周辺地域である茨城県・栃木県・群馬県・埼玉県・千葉県・神奈川県・山梨県の1都7県を指す）

<sup>16</sup> 火力発電所の立地条件は本文のほかに複数ある。主な条件として、地盤が良好な広大な用地を安価に確保できること、台風、高潮、津波、洪水、地震などによる自然災害が少ないこと、大型・重量機材の搬出入が容易なこと、淡水を容易に確保できること、漁業補償などの問題が少ないこと、大都市などの需要中心に近いこと、送電線への連系が容易なことなどが挙げられる。ただし、地盤が強固でなければならないのは原子力発電所の場合のみである。

<sup>17</sup> 小荒井衛他によれば、東京湾にある石油コンビナート、火力発電所の所在する埋立地は1965年頃から1973年頃までの埋立地が多い。古いものは56年以上前に造られたものである。経年劣化とともに、地盤沈下、液状化、側方流動の対策や護岸補修・強化などの必要があると推測される。エネルギー施設の基礎である埋立地を社会資本の老朽化と維持管理の問題の一つとして捉えて対処する必要もある。

出所：小荒井衛ほか（2013）「面積調でみる東京湾の埋め立ての変遷と埋立地の問題点」国土地理院時報。

（[https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo\\_10167940\\_po\\_000085175.pdf?contentNo=1&alternativeNo=](https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10167940_po_000085175.pdf?contentNo=1&alternativeNo=)、最終閲覧2022年10月12日）

## (2) 日本のエネルギー消費

ここでは世界と日本を比較し、わが国のポジションを見ていく。2019年、日本の人口は126(百万人)で世界の約1.6%を構成し、一次エネルギー消費は415(石油換算百万トン)で世界の2.9%、CO<sub>2</sub>排出量は1,059(CO<sub>2</sub>百万トン)で世界の3.2%、実質GDPは6,211(2010年、十億米ドル)で世界の7.3%である。つまり、わが国は、世界の1.6%人口で、世界の2.9%の一次エネルギーを消費し、世界の3.2%のCO<sub>2</sub>を排出しながら、世界の7.3%の経済活動を行っていることになる。一次エネルギー自給率に注目すると、日本は極めて低いエネルギー資源小国である。2019年の一次エネルギー消費量の順位を国別に記すと、1位中国(23.4%)、2位アメリカ(15.3%)、3位インド(6.6%)、ロシア4位(5.3%)、5位日本(2.9%)である(数値は世界に占める消費割合)。一方、一次エネルギー自給率は、1位中国(80%)、2位アメリカ(104%)、3位インド(62%)、ロシア4位(198%)、5位日本(12%)となっている。つまり、日本は大量に消費するが自給は僅かしかできない不均衡な需給構造になっており、このため日本は国際情勢の変化によるエネルギー資源の需給変化や価格変動の影響を強く受けやすい脆弱なエネルギー供給構造となっている。

一次エネルギー自給率12%をOECD36の中でみると35位である、34位は韓国(17%)、36位はルクセンブルク(5%)の間に位置している。G7でみると、カナダ(175%)、アメリカ(104%)、イギリス(71%)、フランス(54%)、ドイツ(36%)、イタリア(23%)となっており、一次エネルギー自給率の向上は大きな課題であることが分かる。日本が一次エネルギー自給率を向上させるには、再生可能エネルギー、原子力発電を増加することが考えられる。2000年代の一次エネルギー自給率の最小値は、2014年で6.2%であり、これは原子力発電の全停止の時期と符合する。

また、わが国は島国であり、一次エネルギーの輸入は海上輸送によって行われている。ヨーロッパでは天然ガスのパイプラインが大陸全体に整備されており、同じ島国であるイギリスが、ヨーロッパ本土と複数の天然ガスパイプラインで接続していることと事情が大いに異なる。

### カテゴリー(3):

再生可能エネルギー・原子力を増やすことは、一次エネルギー自給率の向上とカーボンニュートラル推進の要である。エネルギー資源小国の日本が一次エネルギー自給率を向上させるには、再生可能エネルギー、原子力発電を増加することが考えられる。

各国のエネルギーとCO<sub>2</sub>への取組みを比較するには、前出の「茅恒等式」が有効である。右辺の第1項「一次エネルギー消費当たりCO<sub>2</sub>排出量」はCO<sub>2</sub>削減の取組み、第2項「GDP当たりエネルギー消費」は経済活動のエネルギー効率の取組みの指標になっている。第3項「1人当たりのGDP」経済水準の指標になっている。

表5より、日本の「一次エネルギー消費当たりCO<sub>2</sub>排出量」(2019年)は2.55(CO<sub>2</sub>トン/石油換算トン)であり、世界平均2.32(CO<sub>2</sub>トン/石油換算トン)、OECD38平均2.08(CO<sub>2</sub>トン/石油換算トン)、非OECD諸国平均2.42(CO<sub>2</sub>トン/石油換算トン)と比較しても数値が大きくなり悪化している。2010年以降に数値が増大しているのは東日本大震災に原子力発電の電源構成比がゼロもしくは小さいことが主要因である。原子力発電の全停止している2015年が最大値となっている。この数値を抑えるには、一次エネルギーの低炭素化を推進することである。(推移は、2010年2.25、2015年2.65、2019年2.55となる。2015年は原子力発電所がほぼ全停止の時期と重なる。)

表 6 より、日本の「実質 GDP 当たり一次エネルギー消費」（2019 年）は 66.9（石油換算トン/2010 年価格百万米ドル）であり、この数値は一貫して低減し、改善している。G7 のなかでも、この数値より小さいのはイギリス（58.4）だけである。この数値を抑えるには、エネルギー効率のよい機械を導入するなどして、省エネルギーを推進することである。この数値は産業構造が関係しており、一般的に GDP における製造業の比率が多ければこの数値が大きく、同様に金融・保険業を含むサービス業の比率が多ければこの数値が小さい。イギリスにもこのことが当てはまる。表 6 より、日本の「1 人当たりの実質 GDP」（2019 年）は 49,188（2010 年価格米ドル/人）であり、微増している。この数値は G7 のなかではアメリカ（55,753）、カナダ（51,586）に続く 3 位となる。オーストラリア（59,551）、シンガポール（58,829）など、さらに高い数値の国もある。

このように茅恒等式を分解してみると、わが国では「一次エネルギーの脱炭素化」は課題と言えることから、再生可能エネルギーと原子力発電の扱いに注目する必要がある。

#### カテゴリー(4): 日本の脱炭素化は後退

現在、日本の「一次エネルギー消費当たり CO<sub>2</sub> 排出量」は、東日本大震災以前と比較して増えており悪化している。OECD38 平均だけでなく非 OECD 諸国平均より悪い値であることから、一次エネルギーの脱炭素化は課題である。

表 4 一次エネルギー消費当たり CO<sub>2</sub> 排出量  
単位：CO<sub>2</sub> トン/石油換算トン

	1973年	2000年	2010年	2015年	2019年
世界	2.56	2.31	2.38	2.39	2.32
日本	2.79	2.23	2.25	2.65	2.55
OECD38	2.72	2.32	2.22	2.18	2.08
非OECD	2.22	2.25	2.47	2.50	2.42
APEC20	N.A.	2.43	2.58	2.59	2.49
ASEAN10	N.A.	2.01	2.01	2.12	2.28

N.A. (not applicable) : 欠損値の意

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022 年版）』p.252 をもとに筆者作成。

表 5 実質 GDP 当たり一次エネルギー消費

単位：石油換算トン/2010年価格百万米ドル

	1973年	2000年	2010年	2015年	2019年
世界	271	200	194	179	171
日本	134	96.5	87.7	72.4	66.9
OECD38	210	139	121	108	100
非OECD	466	379	332	298	281
APEC20	N.A.	214	205	186	176
ASEAN10	N.A.	321	272	241	228

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022年版）』p.249をもとに筆者作成。

表 6 1人当たりの実質 GDP

単位：2010年価格米ドル/人

	1973年	2000年	2010年	2015年	2019年
世界	5,735	8,170	9,565	10,336	11,032
日本	22,138	42,170	44,508	47,103	49,188
OECD38	18,912	31,916	34,941	37,089	39,252
非OECD	1,545	2,363	3,737	4,397	4,915
APEC20	6,121	10,536	13,281	15,104	16,683
ASEAN10	930	2,281	3,338	4,019	4,654

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022年版）』p.246をもとに筆者作成。

### （3）日本の電力事情

日本の発電量（2019年）は1,037（TWh）であり、世界の発電量の約3.8%を占める。発電するための一次エネルギー（発電用燃料）は183（石油換算百万トン）であり、日本の一次エネルギー消費の約44%（=183/415）を消費している。図6は日本の発電設備能力（kW）の推移である。図7は発電設備を用いて発電した発電電力量（kWh）の推移である。図8は年毎の電源構成の内訳を表したグラフである。2030年の値は、第6次エネルギー基本計画にある計画値である。図9の電源構成の推移より、1973年、1979年と二度のオイルショックを経て、日本はエネルギー安全保障（エネルギーセキュリティ）の強化のための施策を打った。①石油の安定的な確保、②エネルギーを効率的に使うこと、③一次エネルギーの多様化の3つである。電力部門においても、一次エネルギー供給源の分散を図り、電源構成の分散度を上げた。その結果、石油火力の構成比を減らし石炭火力、原子力発電の構成比を増やしている。一方で、水力発電の構成比を増やすことは容易でないことが窺える。2011年の東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故後は、原子力発電所の停止し再稼働が進まず、CO<sub>2</sub>削減の要請よりCO<sub>2</sub>排出係数の小さいLNG火力発電が増加したことが読みとれる。このLNG火力の増加は、原子力発電所が全停止した東京電力が牽引している。

一般送配電事業者の供給区域は、北海道電力ネットワーク区域、東北電力ネットワーク区域、東京電力パワーグリッド区域（ここまで50Hzエリア）、中部電力パワーグリッド区域、北陸電力送配電区域、関西電力送配電区域、中国電力送配電区域、四国電力ネットワーク区域、九州電力送配電区域、沖縄電力区域（60Hzエリア）の10区域となっている。沖縄電力区域を除く供給区域の間で、電力会社どうしが電気を相互にやりとりするために使う送電設備である「系統連系線」を使い、その能力内で電力融通が可能である。周波数の異なる東日本と西日本との間では周波数変換設備を介して電力融通を行っている。しかし、わが国では、国境を跨ぐ連系線を国際連系線との接続は無い。国際連系線網が整備されているヨーロッパやカナダとアメリカとは大いに事情が異なる。つまり、日本は安定供給も再生可能エネルギーの大量導入によるカーボンニュートラル政策もすべて自前で言うという厳しい国情である。

新エネルギー等<sup>18</sup>に注目する。日本の新エネルギーの歴史は、通商産業省が1973年の第一次オイルショック後に、石油だけに頼らないエネルギーの長期的な安定供給の確保を目指し太陽、地熱、風力、石炭液化・ガス化、水素エネルギーを中心とした新エネルギー技術研究開発である「サンシャイン計画」<sup>19</sup>から始まった。その後、徐々に電源構成の構成比を高めたが2010年度で僅か2.2%であった。表7と図9より、2020年度は2010年度比で4.7倍となり構成比は12%となった。この急激な増加は、「再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT制度）」<sup>20</sup>によるところが大きい。2020年10月、日本政府は「2050年までに脱炭素化社会を実現し、温室効果ガスの排出を実質ゼロにする」を目的とした「2050年カーボンニュートラル宣言」を発表した。2021年10月、「第6次エネルギー基本計画」では、2030年度電源構成における再生可能エネルギーの構成比を36%～38%を掲げている。内訳は、太陽光（14～16%）、風力（5%）、地熱（1%）、水力（11%）、バイオマス（5%）である。再生可能エネルギーの増加による電力料金の値上がりと電力の安定供給への悪影響が懸念される。

#### カテゴリー(5): 再生可能エネルギー大量導入による負の作用

太陽光発電と風力発電を主とした再生可能エネルギーの増加による電力料金の値上がりと電力の安定供給への負の作用が懸念される。

<sup>18</sup> 新エネルギーとは、風力、太陽光、地熱（バイナリー発電に限る）、中水力（1000kW以下）、バイオマスなど自然環境から得られ、再生可能なエネルギーのうち、その普及のために支援を必要とするものを指す。平成9年4月施行の「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」および「同施行令」において、定義および具体的な種類が規定されている。法における定義は、「非化石エネルギーのうち、経済性の面における制約から普及が十分でないものであって、その促進を図ることが非化石エネルギーの導入を図るため特に必要なもの（法第2条）」となっている。具体的な種類は、(1)バイオマス（動植物に由来する有機物）を原材料とする燃料製造、(2)バイオマス熱利用、(3)太陽熱利用、(4)河川水などを熱源とする温度差熱利用、(5)雪氷熱利用、(6)バイオマス発電、(7)地熱発電（バイナリー発電）、(8)風力発電、(9)水力発電（出力1,000kW以下）、(10)太陽光発電の10種類（施行令第1条）となる。

<sup>19</sup> サンシャイン計画は、1993年に省エネルギー技術の研究開発を目指す「ムーンライト計画」と統合し「ニューサンシャイン計画」に改組された。1994年には「新エネルギー導入大綱」が策定された。この大綱で初めて、再エネを含む新エネルギーや、コージェネレーションなどエネルギーの新しい利用方法を、国として積極的に導入すべきであるという指針が明確に示された。1997年、京都議定書が策定された年に「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法（新エネ法）」が施行された。

<sup>20</sup> 「再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT制度）」は、再生可能エネルギーで発電した電力を、電力会社が一定価格で一定期間買取を国が約束する制度である。電力会社が買取費用の一部を需要者から電力料金と一緒に「再エネ賦課金」という形で徴収し、コストの高い再生可能エネルギーの発電設備の導入を支えている。この制度により、発電設備のコスト回収の見通しが立ちやすくなった。

これまでのわが国の注目するポイントと課題を整理し、第3章の先行研究の扱いにつなげる。

2050年までの世界の一次エネルギー需給の趨勢をみると化石燃料が主役である。このことから有限な化石燃料を長く使うため、またCO<sub>2</sub>排出量を抑制するためにも石油燃料を効率的に利用するテクノロジーは重要な役割を果たすことから、このテクノロジーをいかに共有し利用するかは人類にとって大きな課題である。日本は先進的なテクノロジーを有していることから、エネルギー資源と脱炭素化の面での国際貢献が求められる。一方で、日本の一次エネルギー消費当たりCO<sub>2</sub>排出量は、東日本大震災以前と比較して増えており悪化している。OECD38平均だけでなく非OECD諸国平均より悪い値であることから、一次エネルギーの脱炭素化は喫緊の課題である。脱炭素化を進めるには、石炭からLNGへの置換えなどCO<sub>2</sub>排出係数の小さい一次エネルギーへシフトする方法とCO<sub>2</sub>排出量が僅かな再生可能エネルギーや原子力を増やす方法がある。脱炭素化の推進と一次エネルギー自給率の向上の両立を図るには、再生可能エネルギーと原子力の取組みが重要である。他方で、変動性再生可能エネルギーである太陽光発電と風力発電の大量導入は、電力供給を不安定にさせることが指摘されている。日本の災害時の安全性の確保を考えると、南海トラフ巨大地震と首都直下地震の発生予想エリアにエネルギー施設が集中していることは最大級のリスクであり、港湾エリアにあるエネルギー施設の地震・津波被害を軽減するだけでなく、エネルギー構造の転換を図る検討は重要である。

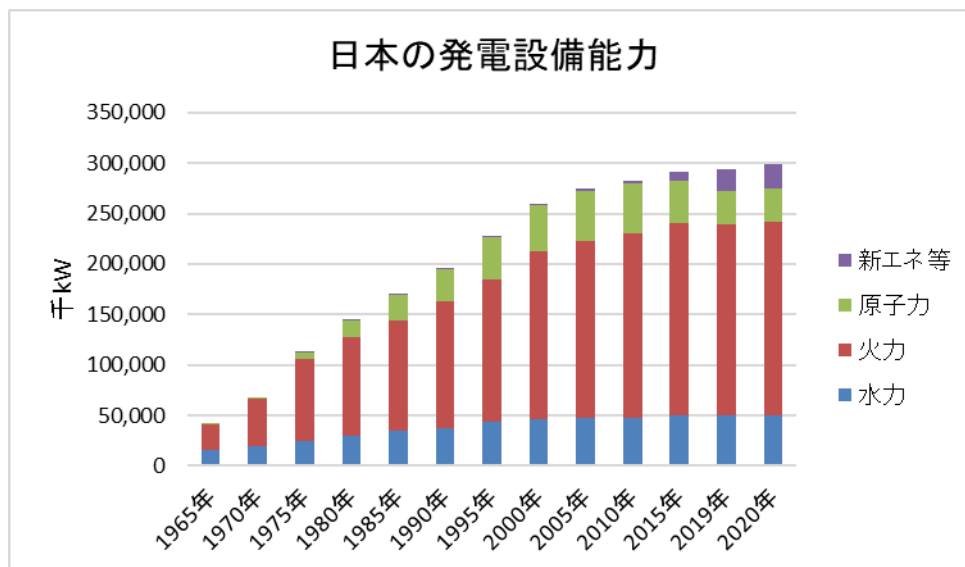


図6 日本の発電設備能力

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022年版）』pp.192-193をもとに筆者作成。

注：統計対象は電気事業用と自家用。

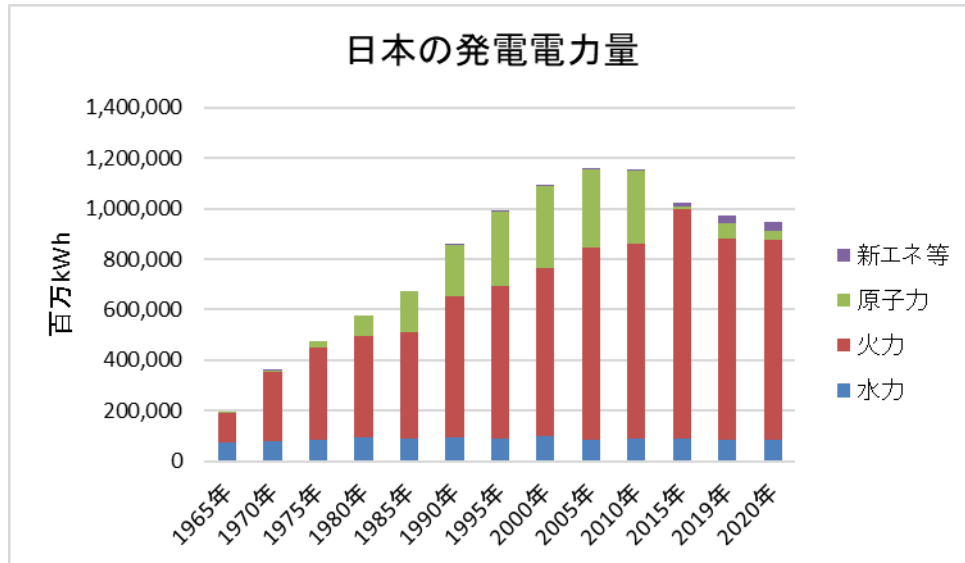


図 7 日本の発電電力量

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022年版）』pp.194-195 をもとに筆者作成。

注：統計は、旧一般電気事業者、その他電気事業者と自家用が対象。

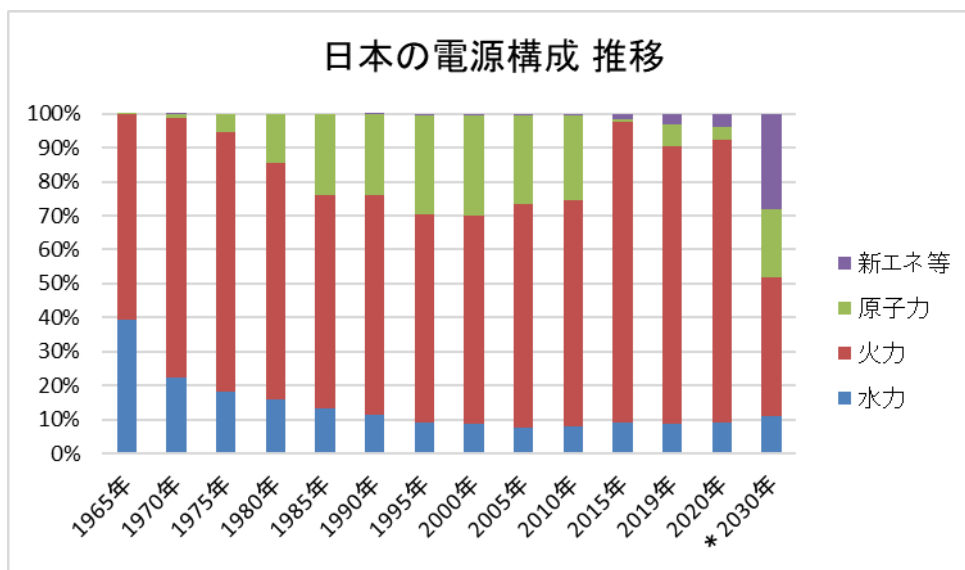


図 8 電源構成 推移

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022年版）』pp.194-195 をもとに筆者作成。

注：統計は、旧一般電気事業者、その他電気事業者と自家用が対象。1965～2020年度までは実績。2030年度の値は「第6次エネルギー基本計画の概要」p.12による<sup>21</sup>。

<sup>21</sup> 資源エネルギー庁「エネルギー基本計画の概要」，令和3年10月  
(<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-2.pdf>, 最終閲覧 2022年10月12日)

表 7 電源構成と最終電力消費

単位：億 kWh

	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
原子力	2,882	1,018	159	93	0	94	181	329	649	638	388
石炭	3,199	3,058	3,340	3,571	3,544	3,560	3,448	3,473	3,324	3,266	3,102
天然ガス	3,339	4,113	4,320	4,435	4,552	4,257	4,351	4,211	4,028	3,815	3,899
石油等	983	1,583	1,885	1,567	1,161	1,006	999	889	727	641	636
水力	838	849	765	794	835	871	795	838	810	796	784
太陽光	35	48	66	129	230	348	458	551	627	694	791
風力	40	47	48	52	52	56	62	65	75	76	90
地熱	26	27	26	26	26	26	25	25	25	28	30
バイオマス	152	159	168	178	182	185	197	219	236	261	288

出所：資源エネルギー庁「令和2年度（2020年度）におけるエネルギー需給実績（確報）」p.4より筆者作成。（<https://www.meti.go.jp/press/2022/04/20220415003/20220415003-1.pdf>，最終閲覧2022年10月19日）

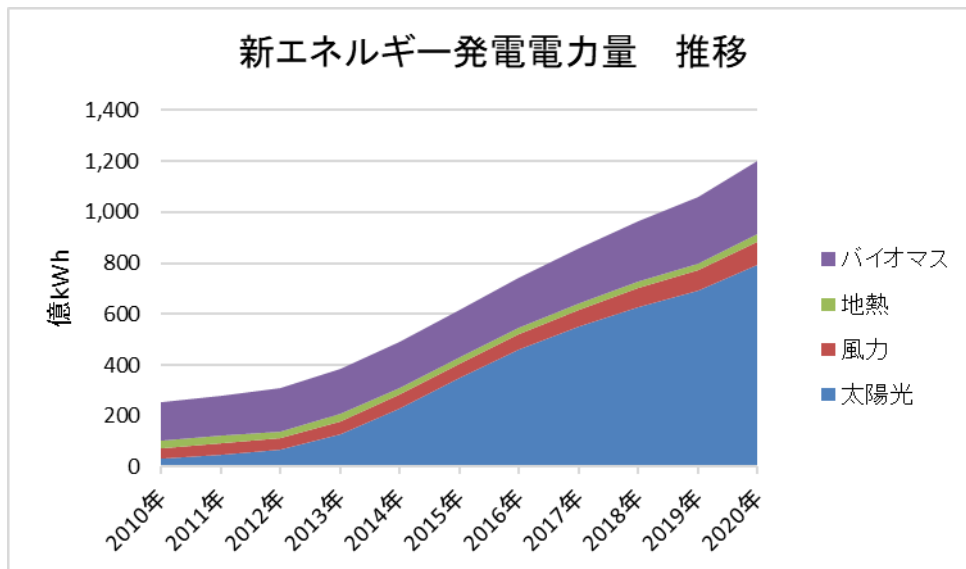


図 9 新エネルギー発電電力量推移

出所：表 7 をグラフ化した。



## 第2章 本研究の着眼点および理論的背景

### 第1節 本研究の着眼点

わが国のエネルギー政策を俯瞰すると、二度のオイルショックを経験した1970年代の政策課題は「安定供給」であった。1980年代では「安定供給+経済性」となり、1990年代では京都議定書採択も関係し「安定供給、経済性+環境」となり、2000年代では、資源価格の高騰や資源ナショナリズムの関心が高まり「安定供給、経済性、環境+資源確保の強化」となっている。ここまでは、海外でのエネルギー供給の支障に対して、どう対応するかに主眼が置かれた。しかし、2011年3月、東日本大震災を機に、国内におけるエネルギー安定供給体制の自然災害に対する脆弱性が改めて認識され、エネルギーサプライチェーンのレジリエンスへの関心が高まった。政策課題は、安全性(Safety)を大前提とし、「安定供給 (Energy Security), 経済性 (Economic Efficiency), 環境 (Environment)」としており、「S+3E」の取組みとなっている。2020年10月、「2050年カーボンニュートラル宣言」が加わった。この流れを大きく捉えると、最初に「エネルギー安全保障」があり、東日本大震災を機に「安全性の確保 (特に災害時)」が加わり、持続可能な経済社会をつくるための、時代の要請から「カーボンニュートラル (脱炭素化)」が加わっている。

安全保障には危機管理の点から有効性、実現可能性、経済性の3つを比較衡量することを求められているが、本論では専ら守備範囲をエネルギー安全保障とし、エネルギー安全保障の共通した要件を「必要なときに」、「必要十分な量を」、「合理的な価格で」の3つとし、定義を「エネルギー安全保障とは、エネルギー安定供給と低廉なエネルギー価格を確保すること」とする。エネルギー安全保障を安定供給として扱っていることを説明する。エネルギー安全保障は様々な定義があり「エネルギーの安定供給と低廉なエネルギー価格の確保」の2つの要素で構成されているものが多い。しかし、エネルギー価格は需給市場で決定されることから、これを捨象し、エネルギー安全保障をエネルギー供給の安定性、安定供給として本論では扱う。エネルギー安全保障を確保するために、わが国では一次エネルギー自給率の向上、エネルギー輸入先多様化、エネルギー多様化、チョークポイントリスクの軽減、化石燃料の供給途絶対応の対応能力など様々な取組みをしている。

電力部門では、安定的な電力供給ができるように複数の燃料別発電方式を組み合わせることにより電力を作っている。この取組みをエネルギーミックスという。電源構成のバランスは、ベース電源、ミドル電源、ピーク電源の特性に応じて構成されている<sup>22</sup>。電力部門における安全性の確保には、電力インフラの強靱化がある。本論での強靱化の意味は、災害に対して機能として致命的なダメージ (損傷) を受けず、ダメージを最小化して迅速に復旧することを指す。具体的な強靱化の取組みは、個々のインフラの耐震強化、全国ネットワークの複線化などが挙げられる。強靱化の取組みには、安全性を高めた新規制基準の制定なども含まれる。電力部門におけるカーボンニュートラル (脱炭素化) の取組みはCO<sub>2</sub>排出量の削減が中心となるが、安定供給、安全性の確保との相互の兼ね合いが必要となる。例えば、再生可能エネルギーの主力である太陽光発電と風力発電では発電用燃料は不要であるが、日射

---

<sup>22</sup> ベース電源は時間帯を問わず安定的に発電できる電源 (石炭火力、原子力)、ミドル電源は発電コストの観点ではベース電源に劣るものの電力需要に応じて柔軟に発電量を調整できる電源 (LNG火力)、ピーク電源はベース電源とミドル電源では電力が足りないとき利用される電源 (揚水式水力発電、石油火力) である。

量や風速などに発電電力量が左右され電力系統の不安定要素なる（安定供給の問題）。石炭火力発電は安定供給に優れているがCO<sub>2</sub>排出量が多い（脱炭素化の問題）。原子力発電は一次エネルギー自給率を向上させるが高レベル廃棄物の問題がある（安全性の問題）など、電力の安定供給を実現するには、安定性、安全性、脱炭素化は相互に関係している。

これまでも日本はエネルギー消費大国であると同時にエネルギー資源小国であることから脆弱なエネルギー供給構造であり、大規模な自然災害が多いというなかで、エネルギーの安定供給を実現するために様々な政策を実行してきた。これまでは、エネルギー安全保障、安全性の確保（特に災害時の安全確保）を考えればよかった。しかし、時代の要請によりカーボンニュートラル（脱炭素化）が新しく加わり、3要素が相互に関係することが明らかになった以上、エネルギー安全保障、安全性の確保（特に災害時の安全確保）、カーボンニュートラル（脱炭素化）の「エネルギー安定供給決定の3要素」を同時にアプローチする必要がある。つまり「3要素モデル」として扱う必要がある。

しかし、本研究の目的はエネルギー政策の評価するものではなく、脆弱なエネルギー供給構造であり自然災害が多いという与件の下に「3要素モデル」と捉え、その「3要素の関係性」を理論的に明らかにし、「3要素を同時に満足するための方策」を探求する。本研究の守備範囲は、エネルギー分野の「電力」、とりわけ「電力システム」に焦点を当て、電力の安定供給を実現するためにどのような取り組みが必要かを明らかにしていく。災害の範囲は自然災害とし、南海トラフ地震についてはマグニチュード8～9クラスの地震の30年以内の発生確率が70～80%、首都直下地震で想定されるマグニチュード7程度の地震の30年以内の発生確率は70%程度と予測されていること<sup>23</sup>から、最大級の自然災害と捉え地震・津波に焦点をあてる。対象エリアは、火力発電所のほかエネルギー関連施設が集中する港湾エリアに注目していく。以下、南海トラフ巨大地震と首都直下地震の被害想定における港湾エリアの被害想定と発電用燃料の供給途絶の可能性について概観する。

### （1）南海トラフ巨大地震の港湾エリア被害想定

「南海トラフ巨大地震の被害想定について（第二次報告）」による港湾の被災直後の様相は、静岡県、愛知県、三重県、和歌山県、四国4県、宮崎県の港湾を中心に、震度6強以上のエリアでは、耐震強化岸壁は機能を維持するが、非耐震の岸壁の陥没・隆起・倒壊、上屋倉庫・荷役機械の損傷、防波堤の沈下、液状化によるアクセス交通・エプロンの被害等が発生し、機能を停止する。国際戦略港湾・国際拠点港湾を含む全国の港湾の岸壁が約630～1200箇所被害を受ける。津波が想定される港湾では、港内コンテナや貨物の流失・浸水、引き波による座礁、船舶の転覆・沈没・流出・破損、流失物による港湾施設の破損や航路障害、上屋倉庫・荷役機械の損傷、アクセス交通の寸断、防波堤の被害等が発生し機能を停止する。国際戦略港湾・国際拠点港湾を含む全国の港湾の防波堤が約126km～135km被災する。被害が軽微な地域においても、非常用電源を備えていない場合は広域的な停電の影響でガントリークレーンなどの荷役機械等に支障が生じる。津波警報・注意報が解除後に航路啓開、港湾施設の復旧開始となっている。

<sup>23</sup> 国土交通白書 2020, 第2節 地球環境・自然災害に関する予測の記述による。  
(<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/html/n1222000.html>, 最終閲覧 2022年10月19日)

更に厳しい被害様相では、被害拡大をもたらすその他の事象の発生として、三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）地域では、津波漂流物が湾内に滞留し、船舶の入出港が困難となり、サプライチェーンが寸断され、産業活動が停滞する。コンビナート港湾等においては、老朽化した民有の護岸等が崩壊し、土砂等の流出により港湾内の航路の機能が制限される。また、危険物の海域への流出等が発生する。二次災害の発生として、津波発生に伴い港内の船舶が一斉に沖合に避難し、船舶同士の衝突による火災等の二次災害が発生し、船舶の航行機能の確保が困難となる。港湾設備や船舶の重油に引火し、火災が発生するとある。

## （２）首都直下地震の港湾エリア被害想定

「首都直下地震の被害想定と対策について（最終報告）」<sup>24</sup>による港湾の被災直後の様相は、震度 6 強以上のエリアでは、耐震強化岸壁は機能を維持するが、非耐震の岸壁の陥没・隆起・倒壊、上屋倉庫・荷役機械の損傷、防波堤の沈下、液状化によるアクセス交通・エプロンの被害等が発生し、機能を停止する。東京湾内の各港湾の岸壁が約 250 箇所被害を受ける。被害が軽微な地域においても、非常用電源を備えていない場合は広域的な停電の影響でガントリークレーンなどの荷役機械等に支障が生じる。1 日後の状況は、優先的に啓開した港湾について、耐震強化岸壁への一部船舶の入港が可能となり、緊急輸送を実施する。（ただし、注記によれば、東日本大震災においては、八戸港が 3 月 14 日、久慈港・宮古港・釜石港が 3 月 15 日に岸壁の災害対策利用が可能となったが、首都直下地震においては、東日本大震災に比べ津波の規模が小さいと想定されるため、早期に復旧に着手できると考えられることから前倒しの想定としたとある。）

被害拡大をもたらすその他の事象の発生として、東京湾内に石油等が流出し、船舶の入出港が困難となる。コンビナート港湾等において、老朽化した民有の護岸等が崩壊し、土砂等の流出により港湾内の航路の機能が制限される。また、危険物の海域への流出等が発生する。その結果、耐震強化岸壁等に繋がる航路の機能が制限される。

更に「相模トラフ沿いの大規模な地震が発生した」ケースでは、東京湾外の港湾を中心に津波による被害が発生する。津波の発生を受け、東京湾内の船舶が一斉に沖合に避難し、湾内が多数の避難船舶により混雑する。津波により港湾のコンテナや小型船等が港湾内や一般水域に流出し、緊急輸送船をはじめとする船舶の航行が困難となる。

以上のことから、南海トラフ巨大地震、首都直下地震発生時において、港湾エリアにある火力発電所を含むエネルギー施設への地震・津波の影響は小さいとは言えない。発電用燃料の供給途絶の可能性も小さいとは言えない。

---

<sup>24</sup> 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループによる「首都直下地震の被害想定と対策について」（2013 年 12 月）の「【別添資料 2】～施設等の被害の様相～」 pp.44～46 を要約した。（[https://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku\\_wg/pdf/syuto\\_wg\\_siry002.pdf](https://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_siry002.pdf), 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日）

### (3) 発電用燃料の国内在庫と安定供給

日本の火力発電所向けの燃料在庫の状況は以下のとおりである。洋上在庫を含まず、電力会社の発電用在庫（2012年度平均日数等）で計算した「国内民間在庫日数」<sup>25</sup>は、LNG（約14日）、石油（約170日）、石炭（約30日）、ウラン（約2.7年）である。LNGに注目すると、在庫（備蓄）が14日分しかない。なぜならば、LNGはマイナス162℃を保たなくてはならず、そのために高いコストが掛る。さらにマイナス162℃で管理をしても、毎日0.1%ずつ気化してしまう。すなわち、備蓄管理を確り行っても使い続けなければ無駄になる。2020年度、LNG火力が電源構成に占める構成比は約39%、石炭火力が占める構成比は約31%である。つまり、LNGの供給が14日途絶すれば発電電力量の39%が喪失し、さらにその16日後（被災30日後）には70%（=39+31）の発電電力量が喪失することになる。このように、電力の安定供給を考える上で発電用燃料の国内民間在庫日数は重要な要素である。特に東京電力におけるLNG火力が電源構成に占める構成比は大きく約65%（2015年度）であり、首都直下地震発生時の「電力の安定供給」には大きな懸念がある。2018年9月、北海道胆振東部地震発生時に起こった「ブラックアウト」<sup>26</sup>が、首都圏で発生すれば、東京一極集中に変化がない以上、日本のダメージは計り知れない。

## 第2節 本研究の理論的基礎

本研究では、日本の置かれているエネルギー環境を考えるうえで、エネルギー環境を「厳しいエネルギー供給制限と自然災害が多いという2つの与件における、3要素（エネルギー安全保障、安全性の確保、カーボンニュートラル）モデル」（3要素モデル）として捉えた。

本節では、日本がどのようにエネルギー安全保障と安全性の確保（特に災害時）とCO<sub>2</sub>排出量の削減を推進していくべきかを明らかにするために、理論的基礎あるいは背景を共有していく。

まずは、電力の安定供給の重要性に関して、次に一次エネルギー自給率の極めて低い日本は世界の需給状況の影響を強く受けることから、2050年までの世界の需給見込みと一次エネルギーの大宗を占める化石燃料の確認可採埋蔵量と確認可採年を概観する。以下順にエネルギー問題を分析する基礎として「経済成長とエネルギー消費」、「エネルギーの分類と基礎概念」、「茅恒等式」について、安全性の確保に関しては「日本の地震・津波」、「火力発電所と原子力発電所の立地条件、規制基準の違い」について、CO<sub>2</sub>排出量の削減と述べていく。

---

<sup>25</sup> この「国内民間在庫日数」は「総合資源エネルギー調査会 長期エネルギー需給見通し小委員会（第5回会合）資料4」（2015年3月）p.10に掲載されている。

（[https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11445532/www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/mitoshi/005/pdf/005\\_08.pdf](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11445532/www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/005/pdf/005_08.pdf), 最終閲覧2022年10月12日）

<sup>26</sup> ブラックアウト：大手電力会社の管轄する地域のすべてで停電が起こる現象（全域停電）のことをいう。大きな自然災害にともなって大規模停電が発生することはこれまでもあったが、北海道のブラックアウトは日本で初めてのケースである。

## (1) 電力について

### 1) 安定供給の重要性

植草 (1994) は、電気という財の特性を以下のように整理している。①財の必需性・共通使用性、②供給の即時性、③供給の公平性・非差別性、④電気は公共的性格をもつとはいえ、個別需要家の需要量が明確に区別できる財であるから、価格形成が可能な「私的財」ないし「経済財」であること、⑤貯蔵困難性と需要の季節別・時間帯別変動性、の5項目である。電気は、産業の企業も家庭の個人もすべてが使う「共通の必需」財であるので、これを供給する企業は顧客に対していつでも供給でき、しかも「安定的に供給する」体制を整えておかなければならない性質を強くもつ<sup>27</sup>。つまり、電気事業者は、第一に「安定供給」が求められることが分かる。穴山 (2005) は、電気という財の特性を6項目に整理している。①非貯蔵性、②同質性、③共通必需性がある。さらに、これらの特性から導出される産業特性として、④ネットワークシステム供給、⑤装置産業である、⑥サービス製品である。電気という財の特性の1つに「非貯蔵性」があり、これは「電気は貯められない」ということを意味するが、これは物理的に不可能であることを意味しない<sup>28</sup>。基本的に「貯められない」という性質が強調されるのは、電気の発生と消費は同時にかつ同量に行われなくてはならない、という電氣的な性質ゆえである(同時同量性)。つまり、需要の変動に合わせて供給を瞬時瞬時にバランスさせる必要があるということである。

### 電力は需要と供給の一致が不可欠(同時同量)

安定供給の条件は、電力の需給バランスは「同時同量」でなければならない。「同時同量」とは、電気をつくる量(供給)と電気の消費量(需要)が、同じ時に同じ量になっているということである。これらの量が常に一致していないと、電気の品質(周波数)が乱れてしまい、電気の供給を正常におこなうことができなくなる。その結果、安全装置の発動によって発電所が停止してしまい、予測不能な大規模停電をまねく可能性がある。このように瞬時瞬時の「同時同量性」を求められるエネルギーは「電力(電気)」以外には見当たらない。

#### (i) 「同時同量」の工学的側面

次に財の特性である「同時同量性」について物理的な現象と関連づけておく。需要と供給がバランスしている状態から、供給が一定の場合に、需要のみが増加したとき周波数が低下し、電圧も低下する。逆に、需要と供給がバランスしている状態から、供給が一定の場合に、需要が減少したとき周波数が上昇し、電圧も上昇する現象が起こる。いずれの場合も周波数と電圧の適正範囲を外れた場合には、発電所(発電設備)は商用電力系統から切り離され、切り離された供給エリアは停電となる。つまり、需要と供給をバランスすることが、「同質性(周波数、電圧等)」を確保することになり、安定供給の前提条件となる。

次に、電力システムの供給信頼度を向上する方策について記す。方策は様々あるが、有効な対策は「予備力増強」と「系統連系」であり、これについて記す。電力システムを安定運用するうえで最も重要な対策は、適切な「予備力」を確保することである。一般に需要の8~10%以上を確保することを目標としており、「供給予備力」とも呼ばれる。この供給予備力は3種類に分類される。①待機予備力: 起動から発電までに数時間を要して、起動後は数時間継続して発電可能な予備力、②運転予備力: 数分で供

<sup>27</sup> 植草益 (1994) 『講座・公的規制と産業①電力』NTT出版, pp.3-4.

<sup>28</sup> 穴山悌二 (2005), 「第I部 電力産業の特徴と公的規制」, 『電力産業の経済学』NTT出版, pp.3-9.

給力増加が可能な予備力、③瞬動予備力：電源脱落時の周波数低下に対して即座に出力増加が図れる供給予備力である。瞬動予備力は総需要の3%以上、運転予備力は総需要の3~5%を確保することになっている。系統構成の面から供給信頼度を向上させるには、発電機・送電線・変圧器などの機器をできる限り並列接続することである。「予備力」も並列接続する発電機台数を増やしていくことで得られる。大きくとらえると、電力会社同士が系統連系線を介して電力融通することも並列接続といえる。

電力の供給は、「同時同量性」を実現するために、季節や曜日によって1日の需要の変化は異なるが、電源構成は供給量や使用頻度を基準に、ベース電源、ミドル電源、ピーク電源の3電源の組み合わせとなっている。ベース電源とは1日通してある一定以上の需要を賄う電源であり、主な電源としては石炭火力、原子力、水力、地熱発電がある。ミドル電源とはベース電源、ピーク電源の中間的役割を果たす電源であり、主にLNG火力やLPG火力発電が多い。ピーク電源は1日のうち、需要の大きな時間帯だけを受け持つ電源であり、主に揚水式水力発電、小規模な石油火力発電が受け持つ。

## (ii)電力の安定供給の指標

電気の安定供給能力の安定度の指標（供給信頼度）は、一般に「1世帯当たりの年間停電時間（停電が発生してから復旧するまでの時間）」で評価する。数式4を見ると、左辺を小さくするためには、「停電時間を短くすること」と「停電も範囲を拡げないこと」であることが分かる。「停電時間を短くすること」は「復旧時間を短くする」ことに等しい。「停電も範囲を拡げないこと」は「停電の範囲を瞬時に、正常な電力網から切り離し、正常な電力網に影響を及ぼさないこと」に等しいことが分かる。これは、「停電しないことが最良であるが、停電した場合には復旧時間が短ければ短いほど供給信頼度が高い」のことを意味する。

### [1 需要家あたり年間停電時間（分）]

$$= \frac{\sum \text{停電時間（分）} \times \text{停電低圧電灯需要家口数}}{[\text{期首低圧電灯需要家口数}] \cdots \text{数式 4}}$$

出所：電力広域的運営推進機関<sup>29</sup>、「電気の質に関する統計集」、2017年。

([https://www.occto.or.jp/houkokusho/2015/files/H27\\_shitsu\\_toukei\\_1701r.pdf](https://www.occto.or.jp/houkokusho/2015/files/H27_shitsu_toukei_1701r.pdf), 最終閲覧2022年10月19日)

供給信頼度（安定供給能力の安定度の指標）の補足事項として

電力の供給信頼度を評価する際には、設備の充足度を表すアデカシー（Adequacy）と系統擾乱が発生した場合に耐え得ることができかどうかを表すセキュリティ（Security）の2つがある。安定供給を維持・向上を実現するための方法は以下のとおり、アデカシーとしては、需要変動の下で需給バランスするために適切な予備力を確保すること。セキュリティとしては、諸条件が変化した場合においても電圧・周波数などを適正範囲に維持し続けること、仮に停電が生じた場合は、事故点付近を迅速に切り離し停電範囲の最小化を図り、迅速に再送電を行うこと（事故範囲の最小化と復旧時間の短縮化）。電力系統（Electric Power System）の面から供給信頼度を向上させるには、発電機・送電線・変圧器などの機器をできる限り並列接続することである。例えば、1回線の送電線で送るところ2回線で送電する。並列する発電機台数を増やすことが、供給信頼度を強化することになる。このような並行機器による供給信頼

<sup>29</sup> 電力広域的運営推進機関（略称：広域機関）は、電気事業法に基づき、日本の電気事業の広域的運営を推進することを目的として設立された団体であり、日本の全ての電気事業者が機関の会員となることを義務付けられている。広域機関の役割は、主に以下の3つである。(1)全国規模で平常時・緊急時の需給調整機能を強化する、(2)中長期的な電力の安定供給を確保する、(3)電力系統の公平な利用環境を整備する。

度の考え方をさらに拡張すると、電力系統（電力事業者＝大手電力会社）どうしを互いに並列化して運転する方法が考えられ、これを系統連系と呼ぶ。例えば、東京電力エリアで災害による事故が生じた場合、連系線を通じて電力融通を行うことにより、供給信頼度の向上を図ることができる。

## 2) 電力産業への社会的要請

日本では、戦後9電力体制と呼ばれる地域独占の供給体制がとられ、電気事業法によって参入や料金などに関して規制が実施されてきた。このような公的規制を受けているのは、自然独占性という技術的条件を備えていると考えられるからである。自然独占性は、ある産業の市場需要に見合った供給量の生産を考えたとき、その技術的特性から、1社のみによって生産された方が複数の企業による場合よりも費用が安くなるという性質である。他方、市場の供給サイドを1私企業にすべて任せれば、価格支配などの独占の弊害が発生するので、これを防ぐために公的機関による料金規制などが参入規制と同時に必要とされる。

電力という財は準公共財に分類され、必需性をもつため「安定供給」や「電力供給の差別的扱いの禁止および差別的な価格の禁止」の社会的な要請が強い。1963年に成立した電気事業法は改正を重ねているが、「安定供給」と「離島等における一般の需要に応ずる電気の供給を保障するための電気の供給（離島ユニバーサルサービス）」を継続して義務付けている。また、安定供給を確保する義務として、電気事業法の第28条では、「電気事業者及び発電用の自家用電気工作物を設置する者は、電源開発の実施、電気の供給、電気工作物の運用等の遂行に当たり、広域的運営による電気の安定供給の確保その他の電気事業の総合的かつ合理的な発達に資するように、相互に協調しなければならない。」と「安定供給」のために電気事業者等の相互の協調を課せられている。

このように、電力産業においては「安定供給」への社会的要請は強い。

## 3) 電力に関して：設備容量、発電電力量、設備利用率

以下、本論で使われる用語について記す。

### (i) kW と kWh の違い

電気の単位でよく使われるのがkW(キロワット)とkWh(キロワットアワー)である。

kWは、瞬間に使われる電力を表す単位、kWhはkWに時間(Hour)をかけたもので使用電力量を表す単位である。(例)消費電力1.6kWのエアコンを2時間使い続けた場合、使用電力量は3.2kWhとなる。(1.6kW×2h=3.2kWh)

### (ii)設備容量 (Installed Capacity)

発電設備における単位時間当たりの最大仕事量。単位はワット(W)あるいは実用的にキロワット(kW)が用いられる。「発電設備能力」とも呼ばれる。

### (iii)発電電力量 (Electrical Energy)

発電設備がある経過時間に供給した電力の総量。電力と時間の積に等しい。

実用な単位として、ワット時(W・h)あるいはキロワット時(kWh)が用いられる。

なお、年間発電電力量は下式により算定される。

年間発電電力量(kWh/年)

＝設備容量(kW)×年間時間数(365日×24時間)×設備利用率(%)・・・数式5

### (iv)設備利用率 (Capacity Factor)

発電設備の総供給設備容量に対する発電電力量の比であり、設備がどのくらい有効に使われているかを表現する指標である。設備利用率は下式で表わされる。

設備利用率(%)

$$= \text{年間発電電力量(kWh/年)} / \text{年間時間数(365日} \times 24 \text{時間)} \times \text{設備容量(kW)} \times 100(\%)$$

・・・数式 6

## (2) 需給の見込みについて：2050年の見込み

第1章では、1970年代から現在までの世界の一次エネルギー消費の推移をみてきた。さらに、日本政府がカーボンニュートラルを宣言している2050年までの見通しについて見てみる。日本エネルギー経済研究所（IEEJ: The Institute of Energy Economics, Japan）より見通しが示されている。図10は日本エネルギー経済研究所の見通し（試算）であり、現在を起点として行うフォアキャスト型の手法を採用している。具体的には、これまでの趨勢的な変化が継続するシナリオであるレファレンスシナリオに基づいた見通しで、先進国と新興国・途上国の趨勢に着目している。この見通しの概説以下のとおり、効率化および省エネルギーなどのエネルギー消費原単位の下落率以上にマクロ経済が拡大するため、世界の一次エネルギー消費は増え続け、2050年には現行水準の1.2倍に増加する。この増加を牽引するのは、インド、中東・北アフリカ諸国（Middle East & North Africa）、東南アジア諸国連合（ASEAN）の新興国・途上国となるとしている。

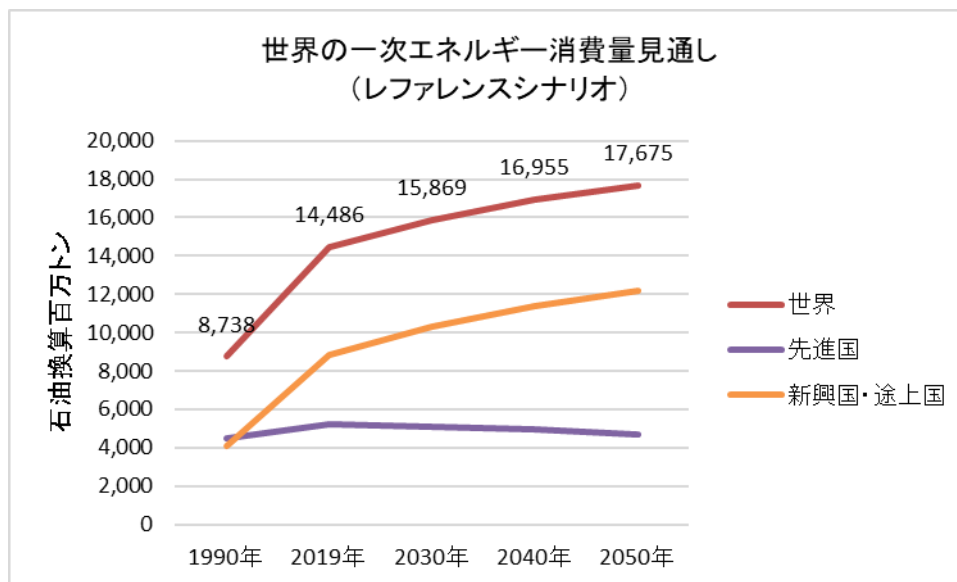


図10 一次エネルギー消費見通し（レファレンスシナリオ）

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧』に掲載されている「IEEJ アウトルック 2022」をもとに筆者作成。



### (3) 化石燃料の確認可採埋蔵量と確認可採年数

確認可採埋蔵量とは、存在が確認され、経済的にも生産され得ると推定される埋蔵量である。可採年数とは、ある年の年末における確認可採埋蔵量をその年の生産量（＝消費量）で割って得られる年数である。確認可採埋蔵量に追加がないとした場合、当該年の生産量を何年維持できるかを表す。したがって、確認埋蔵量は、石油のケースでは新規油田・油井が発見や採掘技術による生産性の向上や原油価格の上昇など経済的条件が変化して、既発見油田が見直されるのに応じて変動する。

表8では単位が異なり比較することができないことから、熱量ベースに換算し表9とした。表9より、熱量ベースで見ると石炭、石油、天然ガスの順番で消費しており、可採年数も同じ順番である。このように石炭は、熱量ベースで一番多く消費し可採年数も最も長いことから、CO<sub>2</sub>排出係数の一番大きい石炭を工夫し、環境負荷を抑えて消費することは重要と言える。

表8 化石燃料の確認可採埋蔵量と可採年数（2020年末）

エネルギー資源	確認埋可採埋蔵量	可採年数
石油	1732.4(十億バレル)	53.5
天然ガス	188.1(兆立法メートル)	48.8
石炭	1,074(十億トン)	139

出所：日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧（2022年版）』p.264-269をもとに筆者作成。

表9 化石燃料の確認可採埋蔵量・可採年数・年間消費量

単位：石油換算十億トン

エネルギー資源	確認埋可採埋蔵量	可採年数	消費量/年
石油	244.4	53.5	4.6
天然ガス	169.4	48.8	3.5
石炭	751.4	139	5.4

出所：表9の確認可採埋蔵量を熱量ベース（石油換算トン）に換算した。

### (4) エネルギーに関して

#### 1) 経済成長とエネルギー消費

経済成長とエネルギー消費との関係を見るには、一般にエネルギーの所得弾性値（GDP弾性値）が使われる。定義は下式となる。

$$(\text{エネルギーの GDP 弾性値}) = (\text{エネルギー需要の伸び率}) / (\text{GDP の伸び率}) \cdots \text{数式 7}$$

一般的に

- (i) 経済成長とエネルギー消費の間には、かなりの相関がある。
- (ii) しかし、時系列データを区切ってみると、弾性値は安定しない。
- (iii) 弾性値の信頼性は、その値が小さいとき低下する。
- (iv) 経済成長が低い期間においては弾性値の信頼性は低い。

エネルギーの所得（GDP）弾性値： 所得が 1%変化した時のエネルギー需要の変化率。例えば、GDP 成長率が 1.2%で GDP 弾性率が 0.9 の場合、エネルギー需要は  $1.2 \times 0.9 = 1.08\%$  増えることになる。

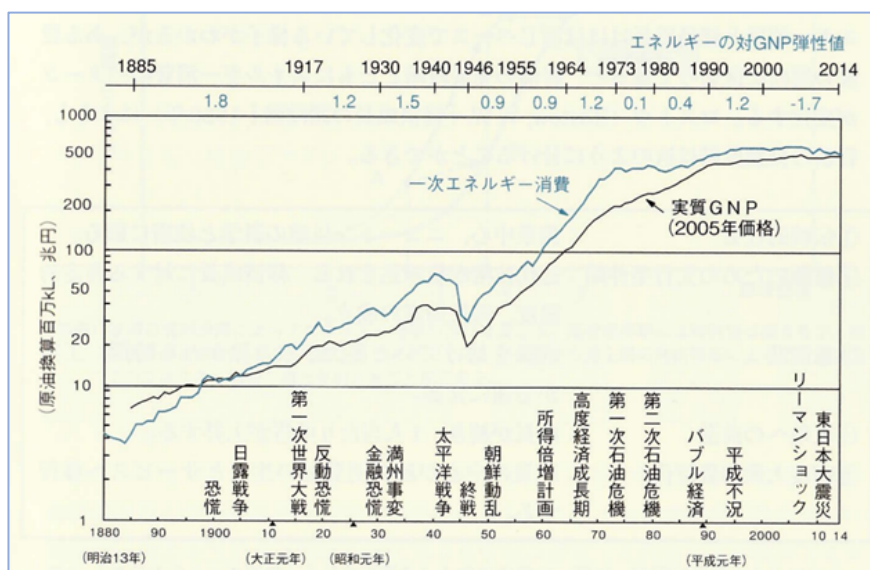


図 11 GDP と一次エネルギー消費の推移

出所：日本エネルギー経済研究所，「改訂 4 版図解 エネルギー・経済データの読み方入門」p.9 より転載。

## 2) エネルギーの分類と基礎となる概念，単位

「エネルギー」とは物理学では「仕事をする能力」として定義されるが、本論では「仕事をする能力を有する資源」として、石炭、石油、天然ガス、原子力、水力などの従来型エネルギーから太陽光、風力、オイルサンド、可燃廃棄物等の非従来型エネルギーを扱うものとする。本論では、エネルギーの単位として「ジュール (J)」、 「キロワット時 (kW・h)」、 「石油換算トン」を主に使用する。「石油換算トン」は、1 トンの原油を燃焼させたときに得られるエネルギーである。

表 10 エネルギーの分類と基礎となる概念、単位

分類の基礎となる概念		説明
一次エネルギー	二次エネルギー	採掘されたままの石炭, 原油, 天然ガス等は一次エネルギーとし, 一次エネルギーをさらに加工・精製した電力, 石油製品, 都市ガス等 (転換によって生産された) は二次エネルギーと呼ぶ。
枯渇性エネルギー	非枯渇性エネルギー	非枯渇性エネルギーは再生可能エネルギーとも呼ぶことも多い。
化石エネルギー	非化石エネルギー	化石エネルギーは化石燃料とも呼ばれる。
再生可能エネルギー	非再生可能エネルギー	再生可能エネルギーとはエネルギーとして利用した後再び利用可能なエネルギーである。太陽光, 風力, 水力, バイオマス等を指す。
従来型エネルギー	非従来型エネルギー	非従来型エネルギーは, オイルサンド, オイルシェール, シェールガスを指す。
商業エネルギー	非商業エネルギー	商業エネルギーとは市場取引を経由して調達するエネルギーである。新興・途上国の薪やバイオマス等の消費量は統計的な把握が課題になっている。
新型エネルギー		新エネルギーとは利用形態上新しいエネルギーもしくはその技術である。太陽エネルギー, 海洋エネルギー, 水素エネルギー等が挙げられる。燃料電池, コージェネレーション, 石炭のクリーン利用なども広義の新エネルギーである。

出所：筆者作成。

### 3) エネルギー需要のアプローチと茅恒等式

#### (i) エネルギー需要のアプローチとして

##### ① 原単位からのアプローチ：

$$(\text{エネルギー消費量}) = (\text{エネルギー消費原単位}) \times (\text{財の生産})$$

(例) (鉄鋼業のエネルギー消費量)

$$= (\text{粗鋼 1 トン当たりのエネルギー消費}) \times (\text{粗鋼生産量})$$

##### ② ストックからのアプローチ：

(エネルギー需要)

$$= (\text{エネルギー利用効率}) \times (\text{稼働率}) \times (\text{エネルギー利用資本ストック})$$

(例) (ガソリン需要) = (燃費) × (走行距離) × (乗用車保有台数)

##### ③ エネルギー間の代替可能性

一般に, エネルギー源間の短期期間での代替は小さい。

#### (ii) 茅恒等式 (CO<sub>2</sub> 排出量の見方)

この式は, CO<sub>2</sub> 排出量を変化要因に分解して示すために, 広く利用されている。

$$C = (C/E) \times (E/GDP) \times (GDP/\text{人口}) \times (\text{人口})$$

C : CO<sub>2</sub> 排出量, E : エネルギー消費量

### (5) 火力発電所と原子力発電所の立地条件と規制基準

日本での火力発電所と原子力発電所の立地は, 平地が少なく河川および湖沼の規模が小さいことから, 冷却水源の確保は海岸部に限られる。ここでは立地条件の違いと原子力発電所の「従来の規制基準」と福島第一原子力発電所事故後の「新規規制基準」について概観する。

## 1)立地条件

### 地盤

表 11 は火力発電所と原子力発電所の立地条件の比較したものである。火力発電所においては軟弱地盤上での建設が可能であるが、原子力発電所の場合は安全確保のため地盤に対して特に厳しい条件が付されており、「発電所の主要構造物は、直接基盤にすえるかまたは確実な地盤によって支えられなければならない」とある。加えて、地震活動の低い地域であることとある。地震の規模や震源地からの距離が同じでも揺れの大きさが大きく異なる場合があり、その主な原因となるのは「地盤」の違いである。軟らかい地盤（軟弱地盤）では振幅が大きく周期が長くなり、硬い地盤（強固な地盤）では振幅が小さく周期が短くなる性質がある。つまり、地盤が強固であれば揺れは小さく地震動による被害が少ないということになる。このように、原子力発電所では求められる立地基準の方が火力発電所より厳しく定められている。

### 標高（敷地高）

既設火力発電所は、これまで公共団体等が臨海工業地帯に増設した埋立地を譲り受け立地されることが多かった。今後は原子力発電所と同様、電力会社自身が未開発な沿岸部で単独立地（土地造成）することが増えると予想される。埋立て地盤高は既往の最高潮位上に1～2m程度の余裕高を加えた高さにするのが普通であるが、圧密沈下を考慮することも必要である。既往の最高潮位は、天文潮、状況により気象潮、津波等による異常潮位の実績値または推算値に基づいて定める。この既往の最高潮位を設計潮位という。

原子力発電所は、非居住区域を確保するため広大な敷地を必要とし、さらに原子炉建屋等の基礎を岩盤につける必要があるため、発電所の適地として都市部から離れた場所に単独立地（敷地造成）するケースが多い。また、原子力発電所は、堅硬な岩盤を必要とするため、地山の切り取りにより主要設備を設置する敷地を確保し、さらに切り取った土・岩で海面を埋立て敷地造成するのが一般的である。これらの立地基準により敷地高を比較したのが表 12 である。表 12 より、火力発電所の敷地の敷地高（標高）の最低値（3.0m）、最高値（5.0m）、平均値（4.25m）である。原子力発電所では最低値（6.0 m）、最高値（21.0m）、平均値（11.5m）となっており、明らかに標高が高い位置にある。ちなみに、重大事故のあった福島第一原子力発電所での敷地高と実際の浸水深の関係は、1～4号機の敷地高（10 m）に対して、実際の浸水深は（約 11.5～15.5m）であり、5～6号機では敷地高（13m）に対して、実際の浸水深は（約 13.0～14.5m）であった。

### 立地の現状

発電所の立地方式を設置場所に分類すると内陸立地と沿岸立地に分けられる。内陸立地の火力発電所としては、コベルコパワー真岡（栃木県真岡市）124.8万kW（燃料：都市ガス）等少数がある<sup>30</sup>。主流をなす立地は沿岸立地である。理由は冷却水の確保と燃料輸送が容易であることによる。また、原

<sup>30</sup> 臨海部に立地する発電所では、ガスタービンから発生する蒸気を冷却する際に海水を使用するが、内陸部ではその利用が出来ない。このためコベルコパワー真岡では、ファンによる空気冷却方式（空気冷却式復水器）を採用している。内陸立地であることから、埋立地であること、津波被害に遭遇する危険のないという特長がある。北海道電力の奈井江発電所（石炭火力35万kW）と砂川発電所（石炭火力25万kW）がある。2019年3月末より休止、2027年3月末廃止予定。燃料は道内炭を燃料としていた。

火力発電所は人口密度が低く、地盤の強固な地域に、原子力発電所は大都市に近く、主として埋立地にそれぞれ分布が分かれている。従来の火力発電所は、需要地に近い臨海工業地帯などに立地できることが特徴であり、これが送電経費などの面で有利な条件であったが、大気汚染に対する規制などから需要地中心地から離れて立地される傾向にある。

表 11 火力発電所と原子力発電所の立地条件

火力発電所	原子力発電所	補足説明
(1)復水器冷却用水 1000MW級の発電所では約33m <sup>3</sup> /secと多量の冷却水が必要である。	(1)復水器冷却用水 火力に比べて1.6倍必要である。	共通の現状 冷却水の確保が容易な沿岸立地である。
(2)広大な用地の入手が可能なこと ①用地費が安く、最終規模に対して必要な面積並びに地形が確保できること ②地盤が良好で、基礎に多額の費用を要さないこと ③冷却用水路の延長ができるだけ短く、かつ冷却水の再循環の恐れがないように取水口、放水口を配置できる地形であること	(2)用地 ①非居住区域として広大な用地が必要である。 ②発電所周辺の人口密度が低く、人口密集地帯から離れていること <sup>注1)</sup> 。 ③地盤が強固なこと。	原子力発電所の条件「地盤が強固なこと」 火力発電所においては軟弱地盤上での建設が可能であるが、原子力発電所の場合は安全確保のため地盤に対して特に厳しい条件が付されている <sup>注2)</sup> 。「発電所の主要構造物は、直接基盤にすえるかまたは確実な地盤によって支えられなければならない」「基盤とは第3紀以前の地層、洪積砂利層、またはこれらに相当する支持力をもつ地盤で、圧密沈下の恐れのないものをいう。ただし、古い地層でその表面の風化亀裂などの多いもの、または山崩れ、地滑りなど危険のあるものは基盤と見なさない」と記されている。
(3)台風、洪水、高潮、津波、地滑りなど自然災害が少ないこと	加えて、地震活動の低い地域であること	原子力発電所は、安全確保の面から火力発電所に比べ特に耐震設計が要求される。
(4)燃料の受け入れが容易なこと	原子力発電所については燃料輸送が立地を左右することにはならない。	燃料のほとんどを海外に依存しており、海上交通機関を利用していることから沿岸立地である。
(5)機材の搬出入が容易なこと	共通	なし
(6)淡水の確保が容易なこと	共通	なし
(7)漁業補償、公共補償などの補償が少ないこと	共通	なし
(8)電力需要地に近く送電線の引出しが容易なこと	共通	なし

出所：電力土木技術協会編「火力・原子力発電所土木構造物の設計（1977年版）」、「火力・原子力発電所土木構造物の設計 増補改訂版（1995年版）」をもとに筆者作成。

注1：科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室監修、「原子力安全委員会安全審査指針集（改訂7版）—原子炉立地審査指針及びその適用に関する判断のめやすについて—1964.5, 1989.3」, 大成出版社。

注2：科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室監修、「原子力安全委員会安全審査指針集（改訂7版）—原子炉に関する耐震設計審査指針—1981.7」, 大成出版社。

表 12 火力・原子力発電所における敷地造成工事の諸元

発電所名		出力 (MkW)	造成面積 (万m <sup>3</sup> )	敷地高 (EL. m)	県名	所属	津波浸水想定 (想定最大規模)
火力 発電所	能代火力発電所 (#1)	600	104	整地レベル+4.2~4.3	秋田	東北電力	5m~10m
	広野広野火力発電所 (#1~4)	3200	59	本館他 +3.7	福島	東京電力	5m~10m
	横須賀火力発電所 (#1~8)	2630	42	本館他 +5.4	神奈川	東京電力	3m~5m
	七尾大田火力発電所 (#1)	500	51	整地レベル+3.5	石川	北陸電力	津波浸水無し
	敦賀火力発電所	500	26	本館他 +4.5	福井	北陸電力	津波浸水無し
	宮津エネルギー研究所	750	24	本館他 +5.5	京都	関西電力	津波浸水無し
	柳井発電所 (#1, 2)	1400	50.1	本館他 +5.5	山口	中国電力	津波浸水無し
	新大分発電所 (#1)	690	47	本館他 +3.0	大分	九州電力	3m~5m
松島火力発電所 (#1, 2)	1000	39	本館他 +2.84	長崎	電源開発	津波浸水無し	
原子力 発電所	泊発電所 (#1, 2)	1158	33	本館他 +10.0	北海道	北海道電力	津波浸水無し
	女川原子力発電所 (#1)	524	21.6	本館他 +13.5	宮城	東北電力	津波浸水無し
	柏崎刈羽原子力発電所 (#6, 7)	2712	2.9	本館他 +12.0	新潟	東京電力	津波浸水無し
	浜岡原子力発電所 (#4)	1137	4	本館他 +6.0	静岡	中部電力	津波浸水無し
	志賀原子力発電所 (#1)	540	32	本館他 +21.0	福井	北陸電力	津波浸水無し
	大飯発電所 (#3, 4)	2360	21	本館他 +6.0	福井	関西電力	津波浸水無し
	島根原子力発電所 (#1, 2)	1280	167	本館他 +15.0	島根	中国電力	津波浸水無し
	伊方発電所 (#3)	890	16.5	本館他 +10.0	愛媛	四国電力	津波浸水無し
	玄海原子力発電所 (#1, 2)	1189	73.8	本館他 +13.0	佐賀	九州電力	津波浸水無し
	川内原子力発電所 (#1, 2)	1780	24.9	本館他 +13.0	鹿児島	九州電力	津波浸水無し
敦賀発電所 (#1, 2)	1160	7.1	本館他 +7.0	福井	日本原子力	津波浸水無し	

出所：電力土木技術協会編、『火力・原子力発電所土木建造物の設計 増補改訂版，1995年版』をもとに筆者作成。津波浸水想定（想定最大規模）の記述は、国土交通省の「重ねるハザードマップ」の「凡例」からの読取值による。（<https://disaportal.gsi.go.jp/>，最終閲覧 2022 年 10 月 13 日）

注：浜岡原子力発電所の津波浸水想定は、敷地内への浸水を防ぐ措置として、海拔 22m の防波壁の設置（2015 年 12 月完了）と両端の改良盛土の設置（2016 年 3 月完了）の効果は反映されていないと思われる。

（<https://www.chuden.co.jp/energy/nuclear/hamaoka/anzen/setsubitaisaku/shikichinai/>，最終閲覧 2022 年 10 月 13 日）

## 2) 従来の規制基準と新規規制基準

原子力発電所と火力発電所の立地条件に着眼し比較すると、原子力発電所の方が敷地高（標高）の面から津波に対して厳しい規制基準があり、地震の揺れに関しても「発電所の主要構造物は、直接基盤にすえるかまたは確実な地盤によって支えられなければならない」を求めていることから厳しい規制基準があったことが窺える。

従来の規制基準は、地震や津波等の大規模な自然災害の対策が不十分であり、また重大事故対策が規制の対象となっていなかったため、十分な対策がなされてこなかったこと。また、新しく基準を策定しても、既設の原子力施設にさかのぼって適用する法律上の仕組みがなく、最新の基準に適合することが要求されなかったことなどの問題点が挙げられていた。原子力規制委員会<sup>31</sup>が策定した「新規規制基準」<sup>32</sup>は、これら問題点を解消して制定されたものである。新規規制基準は設計基準が強化され、その設計の想定を超える事象にも対応するシビアアクシデント対策の二本柱で構成されている。地震や津波への対策が強化されたほか、火山や竜巻などの自然災害、火災など幅広いリスクに備えるため、設計基準が強化されている。このことから現在稼働中の原子力発電所や今後再稼働する原子力発電所は、従来の規制基準と比較して安全性がより高まっているといえる。下図の「発電用軽水型原子炉」だけではなく、加工

<sup>31</sup> 福島第一原子力発電所事故発生以降、原子力行政の推進と規制（原子力安全・保安院）が同じ経済産業省内の組織により実施されていたことが、事業者に対する規制を不十分なものとした背景であるとの指摘がなされた。その反省に立って、原子力規制組織及び原子力規制制度の改革が実施されることとなり、原子力規制委員会が発足した。

<sup>32</sup> 新規規制基準の説明があるサイト（<https://www.nra.go.jp/activity/regulation/tekigousei.html>，最終閲覧 2022 年 10 月 12 日）

施設，試験研究用等原子炉施設，使用済燃料貯蔵施設，使用済燃料再処理施設，第二種廃棄物埋設施設，廃棄物管理施設に対して，①設地震・津波の評価方法を厳格化，②火山，竜巻，森林火災等の設計上考慮すべき自然事象について最新の知見に基づく評価を要求している。また，全ての核燃料物質使用施設に対する要求として，遮へい，閉じ込め，火災・爆発等の安全対策を明確化した。

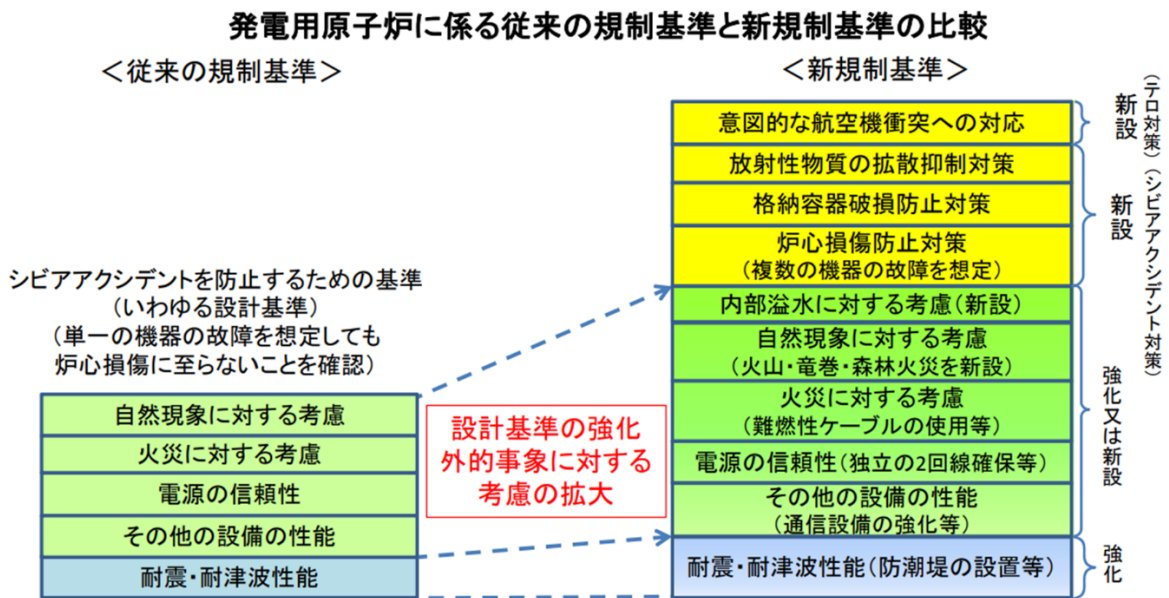


図 12 発電用原子炉に係る従来の規制基準と新規規制基準の比較

出所：原子力規制委員会のホームページより，「発電用原子炉に係る従来の規制基準と新規規制基準の比較」を転載した。(https://www.nra.go.jp/activity/regulation/reactor/kisei/sekkei/sekkei2.html, 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)

## (6) 脱炭素化社会の実現に向けて

近年，エネルギー問題は，持続可能な社会の実現という枠組みで捉える必要がある。つまり，エネルギー問題は単に温室効果ガス排出と温暖化問題と関係だけでなく，循環経済と資源効率と共に持続可能な社会実現のための中心的な課題と認識する必要がある。エネルギー資源の有限性の観点から，環境への影響を最小化しながら，持続可能な方法で地球上の限られた資源を利用するという資源効率の考え方が基本になる。この限られたエネルギー資源とは，主に使用する際に CO<sub>2</sub> を排出する化石燃料（石油，石炭，天然ガス）に他ならない。化石燃料は，モノを作るための資源とエネルギー源としての 2 つの面があり，海洋プラスチック問題や CO<sub>2</sub> 排出による温暖化問題と緊密に関係する。この時代の要請を受け，エネルギー安定供給は，エネルギー安全保障，安全性の確保の 2 要素に脱炭素化を加えた 3 要素を同時に満足するための方策を探求することになる。

### 1)カーボンニュートラル

カーボンニュートラルとは、温室効果ガスの排出量と吸収量を均衡させることを意味する。「排出を全体としてゼロ」というのは、CO<sub>2</sub>をはじめとする温室効果ガスの「排出量」から、植林、森林管理などによる「吸収量」を差し引いて、合計を実質的にゼロにすることを意味している。人為的なものカーボンニュートラルの達成のためには、温室効果ガスの排出量の削減並びに吸収作用の保全及び強化をする必要がある。

パリ協定（2015年）からみると、地球規模の課題である気候変動問題の解決に向けて、パリ協定が採択され、世界共通の長期目標として、世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°Cより十分低く保つとともに、1.5°Cに抑える努力を追求すること（2°C目標）今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡を達成すること等を合意した。この実現に向けて、世界が取組を進めており、120以上の国と地域が「2050年カーボンニュートラル」という目標を掲げている。

出所：環境省、「脱炭素とカーボンニュートラルとは」を要約。

([https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon\\_neutral/about/](https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/), 最終閲覧 2022年10月13日)

## 2) 温暖化問題の経済学的視点

温暖化問題を経済学的に把握するうえで重要な性質として、越境性、長期性、不確実性が挙げられる。越境性とは、温暖化の原因、被害は1国にとどまらず、ある国の温室効果ガス排出があらゆる国々に負の外部性（外部不経済）を与えることになる。この意味で温暖化問題は国内の環境問題と本質的に異なる。ここで問題になるのは、フリーライダーを生む構造と南北間の対立などの世代内の衡平性、国際的な温室効果ガスの削減費用分担の合意が難しいことである。長期性とは、一般に温暖化によって実際に被害を受けるリスクを負うのは次世代以降の人々であり、現在世代の温暖化防止へのインセンティブは低くなりがちである。このため、将来世代のために現在世代がどの程度の負担をするかが問題となる。不確実性とは、「地球のCO<sub>2</sub>濃度が上昇することで全球的に気温が上昇する」は確実としても、その予測に不確実性の幅を持っていること。「損害はどの程度か、対策コストはどの程度か」など社会経済的な予測にはさらに不確実性が高いことをいう。不確実性の下にあっても、「現時点において早急に積極的対策を行うべき」という意見と、「温案化の状況についての知識が深まってから適切な対策を行うべき」という意見が対立している。前者は被害の不可逆性を考慮した予防主義的な考えであり、後者は環境保全に対する過度の投資を防ぐために現在は様子を見るべきだという考え（ノー・リグレット政策）である。

カーボンニュートラル政策において具体的アクションは、「CO<sub>2</sub>を中心とした温室効果ガス排出量の削減」である。

## 第3節 本論文の主要論点（同時アプローチの必要性）

本章では、日本のエネルギー政策が、エネルギー政策はエネルギー安全保障、安全性の確保、カーボンニュートラル（脱炭素化）と順に要素が加わった変遷を概観した。経済学的視点では、電力という財は準公共財に分類され、必需性をもつため安定供給や電力供給の差別的扱いの禁止などの社会的な要請が強い。電力は需要と供給の一致が不可欠（同時同量性）であること、また同時同量性は工学的にも不可欠であることを見てきた。この安定供給を確保するために、電力需要の増加に応えるべく電力インフ



ラを増設し、増加する一次エネルギー（エネルギー源）供給の安定的に確保してきた。また、安定供給を確保するために、需要変動の下で需給バランスするため予備力を確保し、電圧・周波数などを適正範囲に維持し、仮に停電が生じた場合は事故点付近を迅速に切り離し停電範囲の最小化を図り、迅速に再送電する取組みを概観してきた。これは、電力の安定供給には、安定性と安全性の確保が決定要素であること意味している。安全性の確保には、規制基準の整備も含まれる。最後に加わったカーボンニュートラル（脱炭素化）は、エネルギーを考える以前に、循環経済と資源効率<sup>33</sup>と共に持続可能な社会実現のための中心的な課題と認識する必要がある。つまり資源の有限性の観点から環境への影響を最小化しながら、持続可能な方法で地球上の限られた資源を利用するという資源効率の考え方が基本になる。2019年、世界の一次エネルギー消費量は14,486（石油換算百万トン）に対し、発電用として5,452（石油換算百万トン）と約38%を構成している。この影響の大きさからも、電力部門への脱炭素化は時代の強い要請である。

したがって、電力の安定供給を実現するためには、「エネルギー安全保障」、「安全性の確保（特に災害時の安全確保）」、「カーボンニュートラル（脱炭素化）」がエネルギー安定供給決定の3要素であり、この3要素は同時にアプローチする必要がある。すなわち、「3要素モデル」として捉える必要がある。

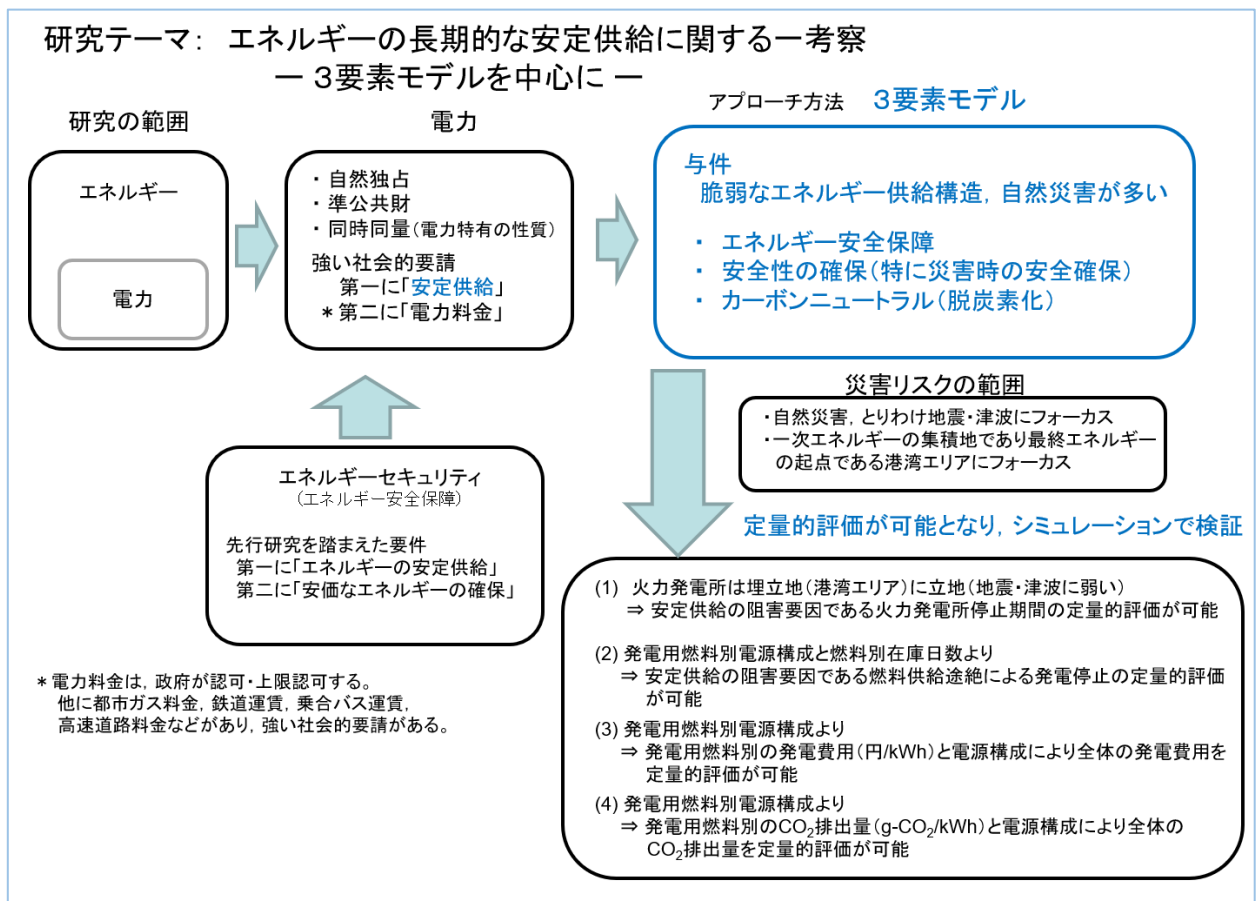


図 13 研究の範囲, アプローチ方法, 災害リスクの範囲

出所：筆者作成。

<sup>33</sup> 欧州委員会ホームページ, 資源効率(Resource Efficiency): Resource efficiency means using the Earth's limited resources in a sustainable manner while minimising impacts on the environment. It allows us to create more with less and to deliver greater value with less input. [https://ec.europa.eu/environment/resource\\_efficiency/](https://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/) (最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)

### 第3章 先行研究

この章では、第1章で捉えた注目するポイントに関する先行研究を概観していく。カテゴリーは大きく5つあり、①化石燃料は2050年も主役であること、②エネルギー安全保障と自然災害、③再生可能エネルギー・原子力と脱炭素化、④日本の脱炭素化が後退、⑤再生可能エネルギー大量導入による負の作用であった。第1節ではエネルギー安全保障とエネルギー安全保障の定量的評価の方法を概観する。第2節では被害予想と復旧予想の重要性について、第3節ではレジリエンスと安全性、安定性の先行研究を概観する。第4節ではカーボンニュートラルの研究として、再生可能エネルギーの大量導入と電力の安定供給に対する負の作用、CO<sub>2</sub>限界削減コスト、温暖化問題の難しさ、自然現象と自然災害について概観する。第5節の小括では、先行研究の未到達の領域を踏まえ、「エネルギー安全保障」、「安全性の確保（特に災害時の安全確保）」、「カーボンニュートラル」がエネルギー安定供給決定の3要素であり、この3要素は同時にアプローチする必要がある。すなわち、「3要素モデル」として捉える必要があることを整理する。

#### 第1節 エネルギー安全保障と安定供給

##### (1) エネルギー安全保障の定義

エネルギー安全保障の定義は複数ある。松井（2001）によれば「(エネルギー安全保障とは) 必要とときに必要とするエネルギーをある合理的な価格の範囲内で確保することと定義する<sup>34</sup>。なお、同様の意味合いで、エネルギー安定供給という言葉が使われることも多いが、エネルギー安定供給はどちらかといえば、平常時におけるエネルギーの供給に関連し、エネルギーの安全保障は、産油国における政変、軍事紛争、あるいは石油輸送ルートが民族紛争によって危険にさらされた場合等の緊急時におけるエネルギーの供給に関連して使用されることが多いように思える。」(第1章「安全保障も概念について」より抜粋)。藤井（2005）によれば「エネルギー安全保障とは、将来世代が現在世代と同等以上の幸福を実現するために必要な資源と環境を継承することを現在世代が保証したうえで、現在世代が相対的に希少なエネルギーを安定的に供給し、かつ低廉な価格でエネルギーを消費する仕組みを持続させることである。」(「まえがき」より抜粋)<sup>35</sup>。資源エネルギー庁、「エネルギー白書2010」<sup>36</sup>によれば、現代におけるエネルギー安全保障を「国民生活、経済・社会活動、国防等に必要な量のエネルギーを、受容可能な価格で確保できること」と定義し、「エネルギー安全保障を強化するためには、エ

<sup>34</sup> 松井賢一（2001）「論説 エネルギー安全保障について」立命館国際研究，pp.109-117。

([https://www.ritsumei.ac.jp/ir/isaru/assets/file/journal/13-3\\_10matsui.pdf](https://www.ritsumei.ac.jp/ir/isaru/assets/file/journal/13-3_10matsui.pdf), 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

<sup>35</sup> 藤井秀昭（2005）「東アジアのエネルギーセキュリティ戦略」NTT 出版，p.1。

<sup>36</sup> 経済産業省資源エネルギー庁は、エネルギーの需給に関して行った施策について、国会に年次報告（「エネルギー白書」）を提出している。エネルギーをめぐる国内外の状況、これを踏まえた日本の取組みや政策方針、今後の方向性などがまとめられ、エネルギーの現況について知るための資料である。「エネルギー白書2010」p8、第1部エネルギーを巡る課題と今後の政策、第1章各国のエネルギー安全保障の定量評価による国際比較（pp.65-98）に記載されている。なお、この定義は「エネルギー白書2015」にも再掲されている。

([https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11194359/www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2010pdf/whitepaper2010pdf\\_1.pdf](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11194359/www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2010pdf/whitepaper2010pdf_1.pdf), 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

エネルギー自給率等の改善を図ることにより、エネルギー安全保障そのものを向上させるとともに、エネルギー安全保障を脅かすリスクを低減することを目指していくことが基本となる」としている。

国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）は「Energy security as the uninterrupted availability of energy sources at an affordable price.」と定義している<sup>37</sup>。また、IEAは、安全で手頃なエネルギー供給（石油を中心に）を確保するために設立され、石油供給の中断にとどまらず、新たに天然ガスセキュリティ（LNGを含む）の課題、電力セキュリティでは再生可能エネルギーの増加に伴う電力システムの柔軟性と回復力の向上に関する現在および将来のリスクに関する分析を行っている。このほかにも、エネルギー構造の変化とサイバー犯罪の増加により、エネルギー安全保障を構成する範囲が拡大してきている。入江ほか（2001）は、通商産業省（現・経済産業省）の政策文書を中心に分析することにより「エネルギー安全保障概念は一見自明に思われるが、その形成と変容の過程をたどると、その時代時代のエネルギー情勢や政策担当者の問題関心に応じて内容が変化しており、混乱が生じている部分もある。」としている<sup>38</sup>。

第2章第1節で前述したとおり、本論ではエネルギー安全保障の定義が複数あること、定義者の時代背景や問題関心により定義が変化することを前提に、エネルギー安全保障の共通した要件を「必要ときに」、「必要十分な量を」、「合理的な価格で」の3つとし、定義を「エネルギー安全保障とは、エネルギー安定供給と低廉なエネルギー価格を確保すること」とする。

## （2）エネルギー安全保障の定量評価

エネルギー安全保障を定量的かつ総合的に評価することは、エネルギー政策を立案し推進するうえで有効である。しかし、エネルギーセキュリティに関する先行研究のなかで定量的評価をテーマとしているものは多くはない。内山ほか（1986）は、「最適電源構成の総合評価」を構成する階層を第1レベル、第2レベルとした。第1レベルには、経済性、セキュリティ、リスク、の3つの属性を、更に、第2レベルは、セキュリティの属性として、燃料供給途絶、電源供給停止の属性を、リスクの属性として物理リスク、心理的リスクの2つの属性を設定し、階層分析を行っている<sup>39</sup>。戒能（2004）は、各エネルギー源の供給リスクを、国産エネルギー源については設備利用率、輸入エネルギー源については、輸入先国の貿易保険において保険料の算定基礎と使用されている国倍率から算定した国別リスクを用いて算出し、供給構成から、わが国のエネルギー供給に関わるリスクの総和を定量的に評価している<sup>40</sup>。

山田（2007）は、先行研究を踏まえ、エネルギーセキュリティに関わる概念の多様化を指摘し、エネル

<sup>37</sup> IEAのエネルギー安全保障の定義は以下の記事から抜粋（下線の部分）した。

The IEA defines energy security as the uninterrupted availability of energy sources at an affordable price. Energy security has many aspects: long-term energy security mainly deals with timely investments to supply energy in line with economic developments and environmental needs. On the other hand, short-term energy security focuses on the ability of the energy system to react promptly to sudden changes in the supply-demand balance.

<sup>38</sup> 入江一友・神田啓治(2002)「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誌。

([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jie1992/81/5/81\\_5\\_311/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jie1992/81/5/81_5_311/_pdf/-char/ja), 最終閲覧 2022年10月12日)

<sup>39</sup> 内山洋司, 高橋圭子, 齋藤雄志「経済性, セキュリティ, リスクから見たわが国の最適電源構成の検討」電力経済研究。([https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals20\\_02.pdf](https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/pdf/periodicals20_02.pdf), 最終閲覧 2022年10月12日)

<sup>40</sup> 戒能一成（2007）「エネルギー安全保障の定量的評価の研究」文部科学省学術フロンティア推進事業。

(<https://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/X0820GKApr1.pdf>, 最終閲覧 2022年10月12日)

ギーセキュリティに関わる評価軸と指標を設置している。評価軸は、①エネルギー利用効率、②エネルギー源の安定輸入、③エネルギーの供給構造、④経済への影響、⑤電力供給のセキュリティ評価に関わる指標となっている<sup>41</sup>。2011年1月、日本エネルギー経済研究所より報告書「各国のエネルギー安全保障政策と実態の調査分析」が公表されている<sup>42</sup>。この報告は前年度に、同研究所が経済産業省より受諾し実施した「平成21年度エネルギー環境総合戦略調査等\_各国のエネルギー安全保障政策と実態の調査分析報告書」の一部である<sup>43</sup>。この報告書は「エネルギー白書2010」のエネルギーセキュリティ定量評価の考え方の基礎になっていることが示唆される。

エネルギー白書では、「エネルギー白書2010」において、初めて「エネルギーセキュリティ指標」を用いたエネルギーセキュリティの定量評価が行われた。対象国は、英国、ドイツ、フランス、韓国、米国、中国、日本の7カ国である。エネルギーセキュリティ指標の項目は、①一次エネルギー自給率、②エネルギー輸入先多様化、③エネルギー多様度、④チョークポイントリスク、⑤電力の安定度供給力、⑥エネルギー消費のGDP原価、⑦化石燃料の供給途絶対応の対応能力の7つである。②エネルギー輸入先多様化の指標は、資源（石油・石炭・LNG）輸入相手国の分散度<sup>44</sup>であり、③エネルギー多様度の指標は、一次エネルギー供給源の分散度と電源構成の分散度である。次にエネルギーセキュリティ指標を扱ったのは「エネルギー白書2015」であり、7つのセキュリティ指標が踏襲された。最新では「エネルギー白書2021」において、従来の7つの指標に⑧蓄電能力、⑨電力サイバーセキュリティが加わっている。この9つセキュリティ指標の選定過程を以下で詳しく見ていく。

「エネルギー白書2010」によれば、エネルギーセキュリティ指標の選定は下記のように行われた。最初にエネルギーのサプライチェーンを「資源調達」、「国内供給」、「国内消費」の三段階で構成されていると考えた。「資源調達」は、国内外で資源を発見・確保し、消費地まで安定的に輸送することを指し、その段階でエネルギー安全保障を強化する要素は「国産・準国産エネルギー資源の開発利用」、「海外エネルギー資源の確保」、「資源の輸送リスク管理」であるとした。次に、「国内供給」の段階で、安定的な供給を持続してエネルギー安全保障を確保するためには「国内リスク管理」が必要と考えた。また、「国内消費」の面からエネルギー安全保障を強化するには「需要抑制」が有効とした。さらに、サプライチェーン全体を支えるものとして「供給途絶への対策」が備わっているかもエネルギー安全保障の重要な要素とした。これらをイメージしたものが図14である。こうした観点に加え、国際比較、年代比較ができることを条件とし、エネルギー安全保障を定量評価するための基軸となる指標を次のとおり選定したとしている。「エネルギー白書2021」では、2050カーボンニュートラルに向けた気候変動対策の強化や太陽光や風力発電等の自然変動電源の大量導入などを巡る情勢の変化を背景に⑧蓄電能力が加わった。

<sup>41</sup> 山田英司（2007）「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。（[https://www.jstage.jst.go.jp/article/taesj/6/4/6\\_J06.061/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/taesj/6/4/6_J06.061/_pdf/-char/ja)、最終閲覧2022年10月12日）

<sup>42</sup> 村上朋子、本蔵満、久谷一朗（2011）「各国のエネルギー安全保障政策と実態の調査分析」日本エネルギー経済研究所。（<https://eneken.ieej.or.jp/data/3548.pdf>、最終閲覧2022年10月12日）

<sup>43</sup> 平成21年度エネルギー環境総合戦略調査等「各国のエネルギー安全保障政策と実態の調査分析」報告書。（[https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9204476/www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2010fy01/E000910.pdf](https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9204476/www.meti.go.jp/meti_lib/report/2010fy01/E000910.pdf)、最終閲覧2022年10月12日）

<sup>44</sup> 分散度は、ハーフィンダール・ハーシュマン・インデックス(Herfindahl-Hirschman Index, HI)を採用している。HIは、その産業に属する全ての企業の市場占有率の2乗和と定義される。HIは独占状態においては1となり、競争が広くいきわたるほど0に近づく。寡占度指数とも呼ばれる。例えば、2社による寡占状態であり、市場占有率がともに50%である場合、HIは $2 \times (0.5^2) = 0.5$ となり、100社の市場占有率が全て1%ずつである場合HIは $100 \times (0.01^2) = 0.01$ となる。

デジタル化の進展に伴い、主要インフラであるエネルギーにおけるサイバーセキュリティの重要性は増加していることから、新たに⑨電力のサイバーセキュリティを加えた。9つのエネルギーセキュリティ指標（大項目）、基軸指標と補足指標を表13にまとめた。補足指標は、基軸指標と並列で論ずるには概念のレベルが異なるものや、国際比較・年代比較が困難なものであって、政策立案に際してのインプリケーションを含む指標である。

本研究で着眼点の1つは、2010年から2021年の間に、東日本大震災が発生し日本のエネルギー政策が大きく変化した。その後もエネルギーセキュリティ指標は変わっておらず、2021年においても地震・津波のリスク要素が組み込まれていないことである。資源エネルギー庁は、国際比較、年代比較ができることを指標選定の条件としているためなのかも知れない。しかし、前出にあるように、エネルギー安全保障を強化するためにはエネルギー安全保障を脅かすリスクを低減することが基本となっており、国際比較するにせよ、最大級のリスクである地震・津波リスクを図14における「国内リスク管理」への追加、あるいは組み入れることは合理的な必要性があると考えており、本論にて説明を試みる。

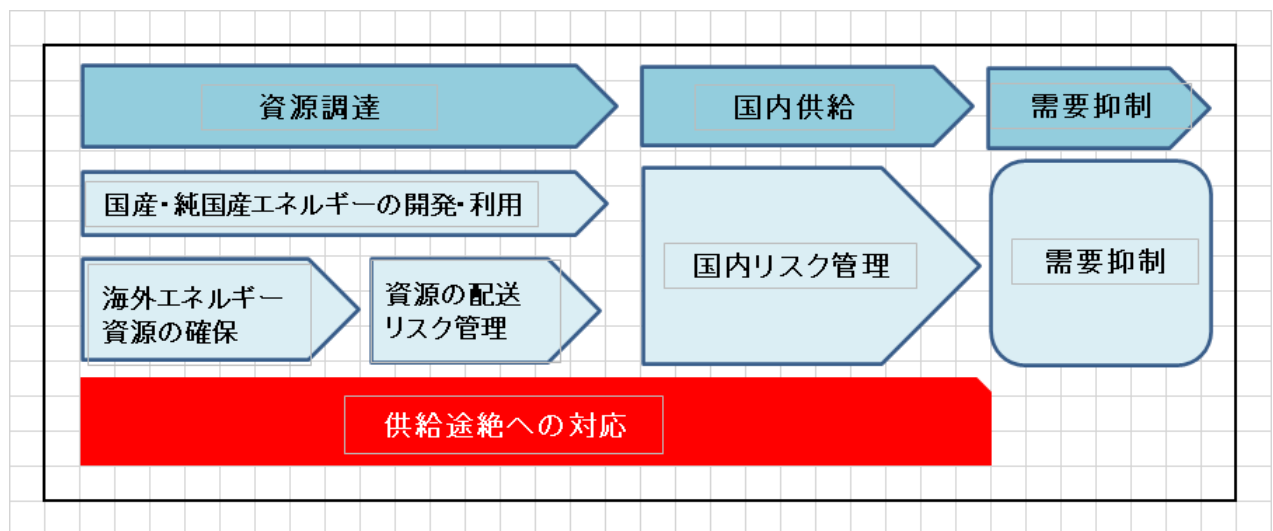


図14 エネルギーサプライチェーンにおけるエネルギー安全保障を構成する要素  
出所：「エネルギー白書2010」第1部第1章4節（p.65）より筆者作成。

表 13 エネルギーセキュリティの評価項目と指標

大項目	基軸指標	補足指標
(1) 国産・準国産エネルギー資源の開発・利用	一次エネルギー自給率 (原子力含む)	電源設備利用率
(2) エネルギー輸入先多様化	各資源輸入相手国の寡占度	評価対象国から産資源国への直接投資額
(3) エネルギー供給源構造多様化	・一次エネルギー供給源の分散度 ・発電電力量構成の分散度 (補足指標は無し)	
(4) 資源の輸送リスク管理	チョークポイントリスクへの依存度 (補足指標は無し)	
(5) 国内リスク管理	電力供給信頼度 (停電時間)	政府のエネルギー関連研究開発予算額
(6) 需要抑制	エネルギー消費のGDP原単位	部門別エネルギー消費のGDP原単位
(7) 供給途絶への対応	石油備蓄日数	国産資源利用可能年数
(8) 蓄電能力	・発電量に対する蓄電容量の比率	
(9) 電力のサイバーセキュリティ	国際電気通信連合 (ITU) のサイバーセキュリティの5つの指標を使用。(補足指標は無し)	

出所:「エネルギー白書2010」第1部第1章4節と「エネルギー白書2021」第1部第3章第3節より筆者作成。

## 第2節 安全性の確保 (被害予想と復旧予想の重要性)

土木工学や地震工学の分野では、地震・津波による被害予想と復旧予想の研究分野がある。ここでは、何故、被害予想と復旧予想をすることが必要なのか、そして国土強靱化と被害予想と復旧予想がどのように関係するのかを記す。

片山・磯山(1980)は「ライフラインをいかに耐震的に造ろうとも、ある程度以上の地震では(システムの)一部要素の被害、機能低下(被害)は避けられない。また、すでに存在している施設の耐久性向上はすぐには不可能である。したがって、地震発生に備えて、1日でも早い復旧が行えるよう、事前に応急対策、復旧計画等の防災対策を立てておくことがぜひとも必要である。具体的には、想定された地震に対して被害の予測、影響の予測(地震時機能の評価)、最適な防災対策の立案となる。」と被害予想と復旧予想の必要性を述べている<sup>45</sup>。能島ほか(2002)によれば「ライフラインの地震機能の予測法は主として2種類に大別される。一つは「積み上げ式」の方法であり、地震動強度、物理的被害要因、機能的被害要因および復旧要因に関するデータを用いて予測が進められる。わが国や米国における地震被害想定も多くは、基本的にこうした流れを踏むことによって不確実性が增大するという問題があるものの、事実上の標準的手順となっている。しかし詳細なデータを利用できるのは、一

<sup>45</sup> 片山恒雄・磯山龍二(1980)「ライフラインの地震防災—考え方と現状報告」,「生産研究」  
(<https://irdb.nii.ac.jp/00926/0001767263>, 最終閲覧2022年10月12日)

般にライフライン事業者や被害想定に関する一部機関に限定される。(中略) ライフラインの地震時機能のためのもう一つの方法は、被災事例に基づいて震度と機能停止の統計的な関係を求め、そのモデルを用いて予測を行う方法である<sup>46</sup>。

2013年以降、東日本大震災に関する被害報告書が公表され、災害事例に基づく火力発電所の被害(機能低下、機能停止)と復旧期間に関する研究が行われた。例えば、寅屋敷ら(2013)は、実際の被災した28ヵ所の火力発電所の震度、津波浸水高と復旧期間から回帰式を求め震度7の復旧期間を推計している<sup>47</sup>。湯山ら(2014)は、発電所単位ではなく、9つの設備に分類し、それぞれの被害要因と被害ランクを調査し、さらに設備被害の発生状況の分析と個別設備の被害の発生確率または脆弱性を表すためのフラジリティ曲線(縦軸は損失率、損害金額。横軸は地震動の大きさ)を推計した<sup>48</sup>。これらの研究は、「被災事例に基づいて震度と機能停止の統計的な関係を求め、そのモデルを用いて予測を行う方法」を採用している。

被害推定の重要なことから電力会社にて実用化された例を示す。2010年5月、東北電力は、大規模地震発生時における配電設備(電柱、電線、柱上変圧器等)の被害推定を行う「地震被害推定システム」を電力中央研究所(電中研)と共同で開発し導入したことを発表した<sup>49</sup>。翌年、東日本大震災発生時に、地震被害推定システムにより評価された被害推定結果が実際に復旧体制の確立や人員・資材計画を立案する基礎資料として活用されている<sup>50</sup>。以下、地震被害推定システムを開発した経緯とシステムの概要を述べる。大規模な地震災害が発生した場合、早期復旧を図るためには被害状況の把握と効果的な応援隊の派遣が必要になる。一方で、配電設備は地域的に面的に広がっているため、設備量は膨大となっている。また、地震また、地震発生時は道路の寸断などにより巡視による被害状況の把握に多くの時間が掛かる。こうした背景により、地震発生後、早期に主要な配電設備の被害推定を行いシステムの開発が必要になった。地震被害推定システムは、(1)地震発生直後に得られる地震情報、(2)予めシステム内にデータ登録している東北電力管内の地盤情報、(3)設備情報(電柱の位置や電線、柱上変圧器の施設状況に関する情報)などに基づき、自動的に配電設備の被害状況を推計する。さらに、被害推定後に得られた詳細な地震情報や巡視情報をデータ入力することで、被害推定を補正し、被害推定の精度を向上することができる。導入効果は、(1)平時には、シミュレーション機能の活用による被害推定結果に基づき、耐震対策を先見的に実施することができる。(2)地震発生時には、早期に被害推定により、巡視地域の優先順位付け、応援派遣要請、効果的な人員配置などの判断をより迅速かつ的確に行うことができ、停電の早期復旧につながる。以上の記述には、例えば、電柱、電線、柱上変圧器の1箇所を応急復旧するために必要な目標復旧時間と目標復旧レベルが事前にデータ登録されており、復旧スケジュールの推定結果により、応援派遣要請の判断材料になる。

<sup>46</sup> 能島ほか(2002)「震度情報に基づく供給系ライフラインの地震時機能リスクの二段階評価モデル」『土木学会論文集』公益社団法人土木学会。(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2003/724/2003\_724\_225/\_pdf-char/ja, 最終閲覧2022年10月12日)

<sup>47</sup> 寅屋敷哲也・河田恵昭(2015)「南海トラフ巨大地震における中・長期的な電力需給ギャップ推計方法の一試案」社会安全学研究。(https://www.kansai-u.ac.jp/Fc\_ss/english/common/pdf/bulletin004\_15.pdf, 最終閲覧2022年10月12日)

<sup>48</sup> 湯山安由美(2019)「巨大複合災害時における火力発電所の供給リスク評価」筑波大学。(https://core.ac.uk/download/pdf/250581591.pdf, 最終閲覧2022年10月12日)

<sup>49</sup> 東北電力のプレスリリース, 2010年5月27日  
(https://www.tohoku-epco.co.jp/pastnews/normal/1181504\_1049.html, 最終閲覧2022年10月12日)

<sup>50</sup> 朱牟田善治「電力設備の自然災害対策の基本的考え方」『電気設備学会誌』  
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieiej/33/3/33\_159/\_pdf-char/ja, 最終閲覧2022年10月12日)

### 第3節 安全性の確保（レジリエンス，安定性，安全性）

まずは，気候変動，自然災害や心理学等の分野で「レジリエンス（Resilience）」という用語が頻繁に使われているが，この用語は自然災害，生態システム，社会システムなど，その定義は多様であり，統一的な定義存在しない。自然災害対策の分野でも「レジリエンス」という用語が頻繁に使われていることから，本論におけるレジリエンスを定義し，電力システムにおける安定供給との関係性を説明する。

#### （1）レジリエンスの概念

塩崎ら（2015）によれば，レジリエンスの概念は，「システムの安定性」としてのレジリエンスと「システムの適応的再構築能力」としてのレジリエンスの概念に分類される<sup>51</sup>。

##### 1) 「安定性」としてのレジリエンスの概念

この概念では，システムにとって望ましい状態を被災前の状態としており，レジリエンスはシステムの安定性として定義されている。システムの安定性とは，①システムがハザードに曝された時に，その状態・機能を可能な限り保持する能力，②状態・機能が損なわれた場合においても迅速に被災前の水準（あるいは許容可能な水準）まで回復する能力，から成るとし，①の性質を「頑健性」，②の性質を「回復力」としている。

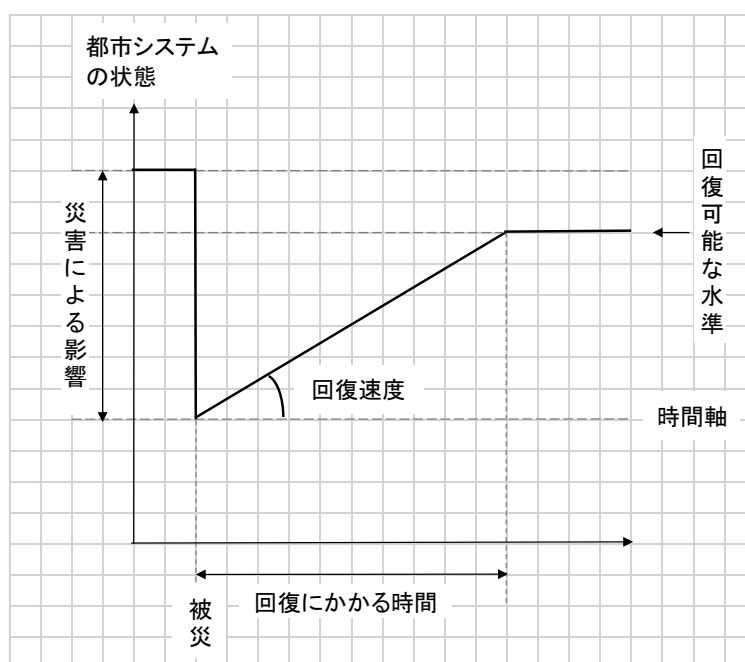


図 15 「安定性」としてのレジリエンスの概念

<sup>51</sup> 塩崎 由人，加藤 孝明，菅田 寛，「自然災害に対する都市システムのレジリエンスに関する概念整理」『土木学会論文集』公益社団法人土木学会。（[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejipm/71/3/71\\_127/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejipm/71/3/71_127/_pdf/-char/ja)，最終閲覧 2022 年 10 月 12 日）



出所：塩崎ら（2015）「自然災害に対する都市システムのレジリエンスに関する概念整理」より筆者作成。

## 2) 「適応的再構築能力」としてのレジリエンスの概念

このレジリエンスの概念では、都市システムには被災前の状態のほかにも望ましい状態が複数存在する可能性があることを前提としており、その範囲内で都市システムが従前とは異なる状態へと変化することを許容している。このアプローチにおけるレジリエンスは、都市システムが被災した際、そのシステムが置かれている環境に適応し、都市システムが望ましい状態へと自身を再構築する能力であると定義している。

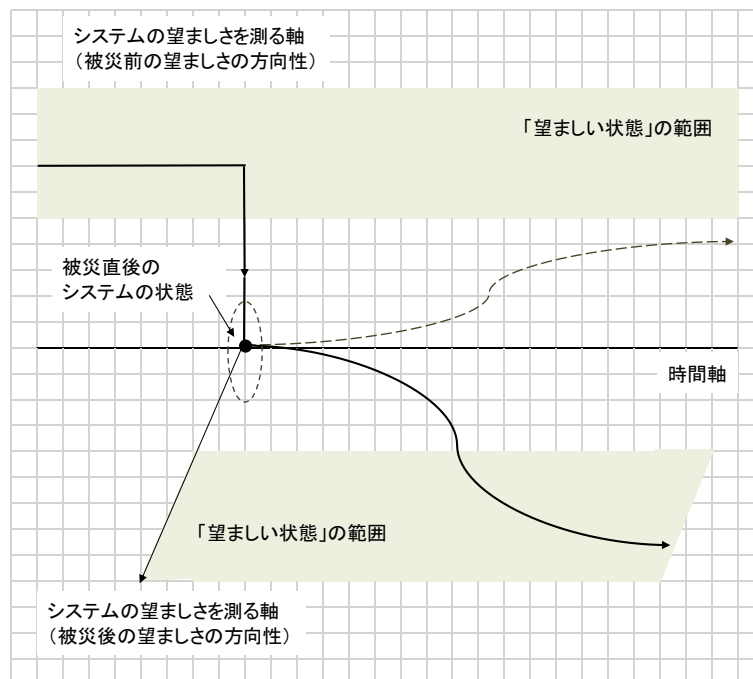


図 16 「適応的再構築能力」としてのレジリエンスの概念

出所：塩崎ら（2015）「自然災害に対する都市システムのレジリエンスに関する概念整理」より筆者作成。

## (2) 安全性と安定供給

まずは、本論では「安全」の定義を ISO/IEC GUIDE 51:2014 による下記の定義

「Safety: freedom from risk which is not tolerable」（安全とは、許容不可能なリスクがないこと）を用いる。このことから「安全」や「安全な」を用いる際に「安全な状態であっても、ある程度のリスクが存在すること」「リスクゼロは存在しないこと」を前提に用いている。

「S+3E」は、日本のエネルギー政策の基本的視点である。Safety（安全性）を前提とし、Energy Security（エネルギーの安定供給）を第一とし、Economic Efficiency（経済効率性の向上）による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、Environment（環境への適合）を図るというものである。この Safety（安全性）は、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、従来の「3E」に「S」が加わった経緯がある。この安全

性を強化する具体的な取組みは、原子力部門をはじめ、火力・水力などの発電所や、送配電ネットワークでも自然災害対策を見直し、ハードウェア・ソフトウェアの両面で「安定性としてのレジリエンス」の強化を実施することであった。

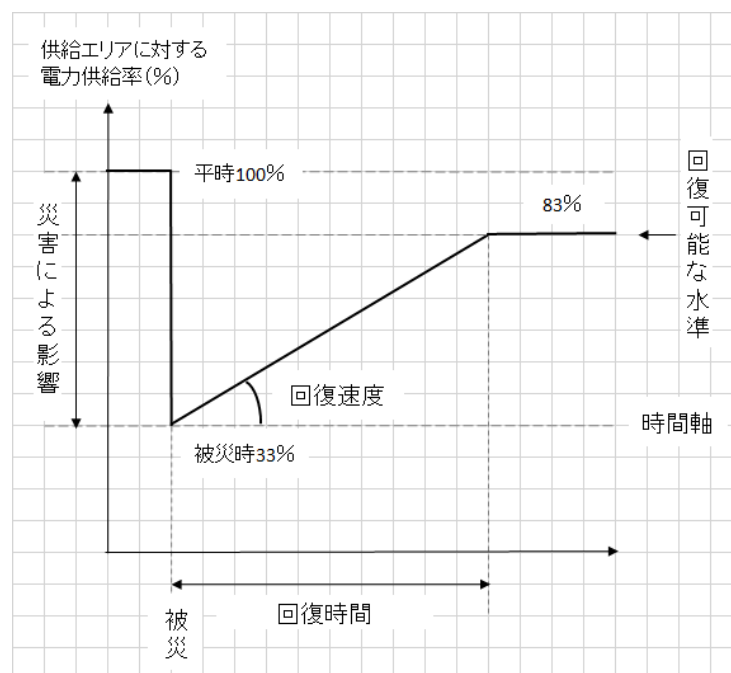


図 17 電力供給エリアに対する「電力の安定供給」のイメージ  
出所：筆者作成。

#### 第4節 カーボンニュートラルに関する研究

本節では第2章の基礎理論「カーボンニュートラル（脱炭素化）」に続き、再生可能エネルギーの大量導入と安定供給，加えて「CO<sub>2</sub> 限界削減費用の国際比較」，「温暖化問題の難しさ，自然現象と自然災害」を概観する。

##### （1）再生可能エネルギーの大量導入と電力の安定供給に対する負の作用

小宮山（2021）によれば，2030年に向けた重要な施策の一つとして再生可能エネルギーの主力電源化に向けた取り組みが掲げられているが，再生可能エネルギーの大量導入にあたっては多くの課題が存在する<sup>52</sup>。再生可能エネルギーの発電量増加に対し消費電力とのバランスを一定に保つためには，火力発

<sup>52</sup> 小宮山涼一（2021）「世界情勢の構造的変化とエネルギー，（その4）再生可能エネルギーを巡る課題（2）」『日本原子力学会誌』（[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/63/8/63\\_605/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/63/8/63_605/_pdf-char/ja)，最終閲覧 2022年10月12日）

電機などの大型同期発電機の運転台数を減らす必要がある。それにより、電力系統には、同期発電機に備わる電力系統の瞬間的な変動に対応する調整能力、いわゆる系統慣性の保有量が低下する。系統慣性の保有量が低下すると、系統事故等における安定性が損なわれ、最悪の事態では広域停電へと繋がるおそれがある。そのような事態を回避すべく、電力系統において一定の慣性を確保することが重要であると指摘している。

電力広域的運営推進機構によれば、火力発電や水力発電などの同期電源と太陽光発電や風力発電などのインバータ電源(非同期電源)の違いは、これまでの電力系統は 50Hz/60Hz 交流系統であり、その 50Hz/60Hz の回転力を火力発電や水力発電などの同期電源により生み出すことで、安定的に電気を送ってきた。他方で、太陽光発電や風力発電などはインバータ電源（非同期電源）であり、自ら回転力を生み出さないことが異なると説明している<sup>53</sup>。

中垣（2020年）によれば、2030年を見据えると大都市部への人口集中の流れは止まらず、その結果、東京電力、関西電力、中部電力の3社で全体の三分の二の年間需要があり、夏季にはピークを伴う最大需要があり、用途別シェアでは産業用電力需要が40%も占める<sup>54</sup>。現在、変動性再生可能エネルギーの発電量が多く、今後さらに増設が想定される適地は、九州電力、東北電力、北海道電力であり、ここが大消費地である東京電力、関西電力、中部電力の3社エリアへ変動性再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電で広域送電すると、地場の需要に対して何倍もの変動性再生可能エネルギーを供給（発電）することになる。この結果、九州電力、東北電力、北海道電力のエリアでは電力の安定供給が難しくなる懸念があること、産業用は常時安定した電力の需要があり、その要求に対して変動性再生可能エネルギーのみで応えることが困難であることを指摘している。

## （2）CO<sub>2</sub> 限界削減費用

2022年、地球環境産業技術研究機構（RITE）<sup>55</sup>の「2030年国別貢献NDCsの排出削減努力の評価とその含意」によれば、先進国を中心にNDCs<sup>56</sup>達成のCO<sub>2</sub> 限界削減費用（コスト）は相当に高いと推計している。炭素リーケージの懸念あること、排出削減努力の小さいと見られる国への目標引き上げの要請は強めていくことは重要であると指摘している。日本のCO<sub>2</sub> 限界削減費用を2015年（削減目標：▲26%）と2021年（削減目標：▲46%）で比較すると378（米ドル/トン-CO<sub>2</sub>）から452（米ドル/トン-CO<sub>2</sub>）と120%上昇している。これはCO<sub>2</sub>を追加的に1単位（CO<sub>2</sub>トン）削減するのに必要な費用の国際比較である。先進国の費用が相対的に高く、日本での費用は突出して高いと指摘している。

<sup>53</sup> 「再エネ主力電源化に向けた技術的課題及びその対応策の検討について」電力広域的運営推進機構，p.6。  
([https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/files/chousei\\_55\\_03r.pdf](https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2020/files/chousei_55_03r.pdf)，最終閲覧2022年10月12日)

<sup>54</sup> 中垣隆雄（2020）「変動性再エネの導入増に伴うCO<sub>2</sub>削減と電力安定供給の課題」『日本原子力学会誌』  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/62/6/62\\_312/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/62/6/62_312/_pdf-char/ja)，最終閲覧2022年10月12日)

<sup>55</sup> 正式名：公益財団法人地球環境産業技術研究機構。設立目的は、地球環境の保全に資する産業技術に関する研究開発、調査研究等を行うとともに、これらに関する情報の収集・提供等を行うことにより、地球環境の保全に資する産業技術の進歩向上を図り、もって地球環境の保全及び世界経済の発展に資することを目的とする。

<sup>56</sup> NDCは、Nationally Determined Contributionの略称、「国が決定する貢献」と訳される。2015年のNDCは「国内の排出削減・吸収量の確保により、2030年度に2013年度比-26.0%（2005年度比-25.4%）の水準（約10億4,200万t-CO<sub>2</sub>）にすること」である。2021年、米国主催気候サミットにおいて、2030年度に温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指すこと、さらに50%の高みに向け挑戦を続けることを表明した。

## 2030年(米国のみ2025年)

【世界GDP比削減費用】NDCs:0.38%、最小費用:0.06%

最小費用(限界削減費用均等化):6\$/tCO<sub>2</sub>

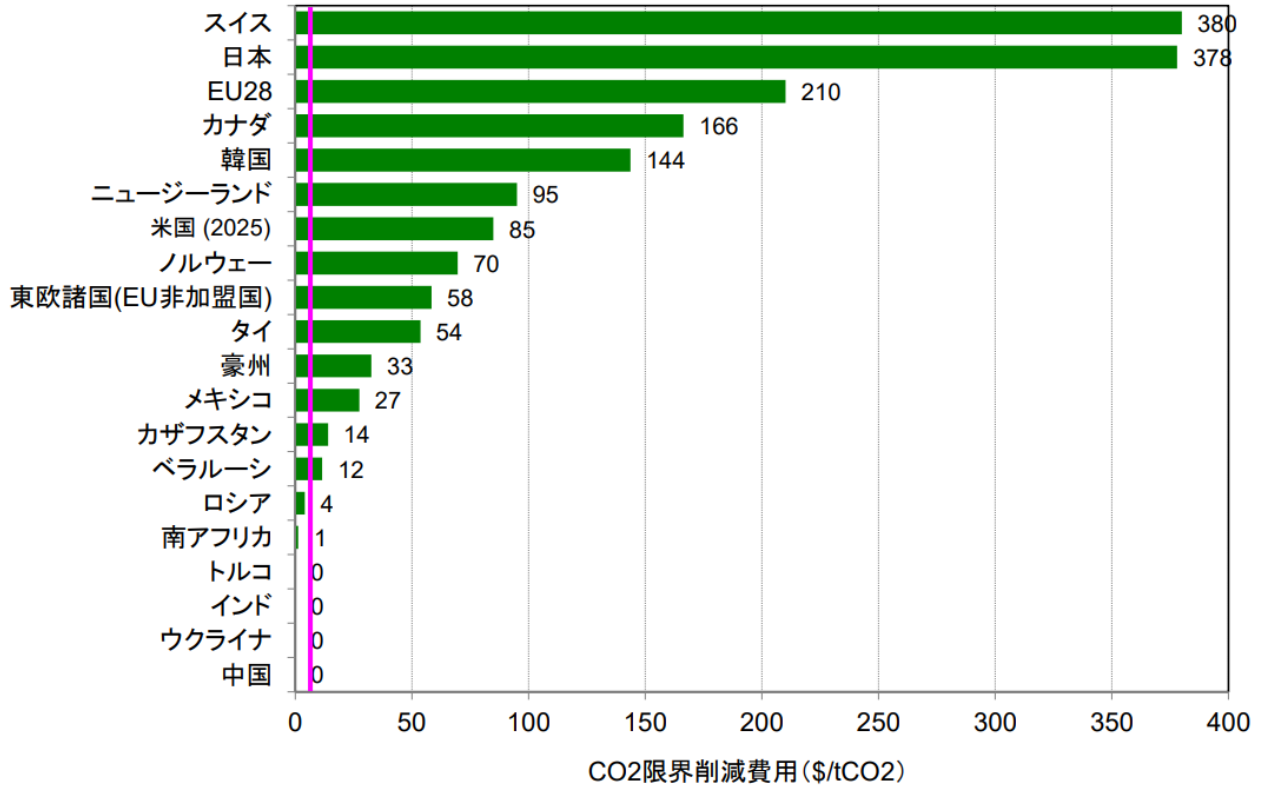


図 18 約束草案の CO<sub>2</sub> 限界削減費用の国際比較(2015 年時の推計)

出所：地球環境産業技術研究機構，秋元圭吾「2030年国別貢献NDCsの排出削減努力の評価とその含意」p.4，2022年3月8日より転載。(https://www.rite.or.jp/system/events/5\_akimoto\_1.pdf, 最終閲覧2022年10月12日)

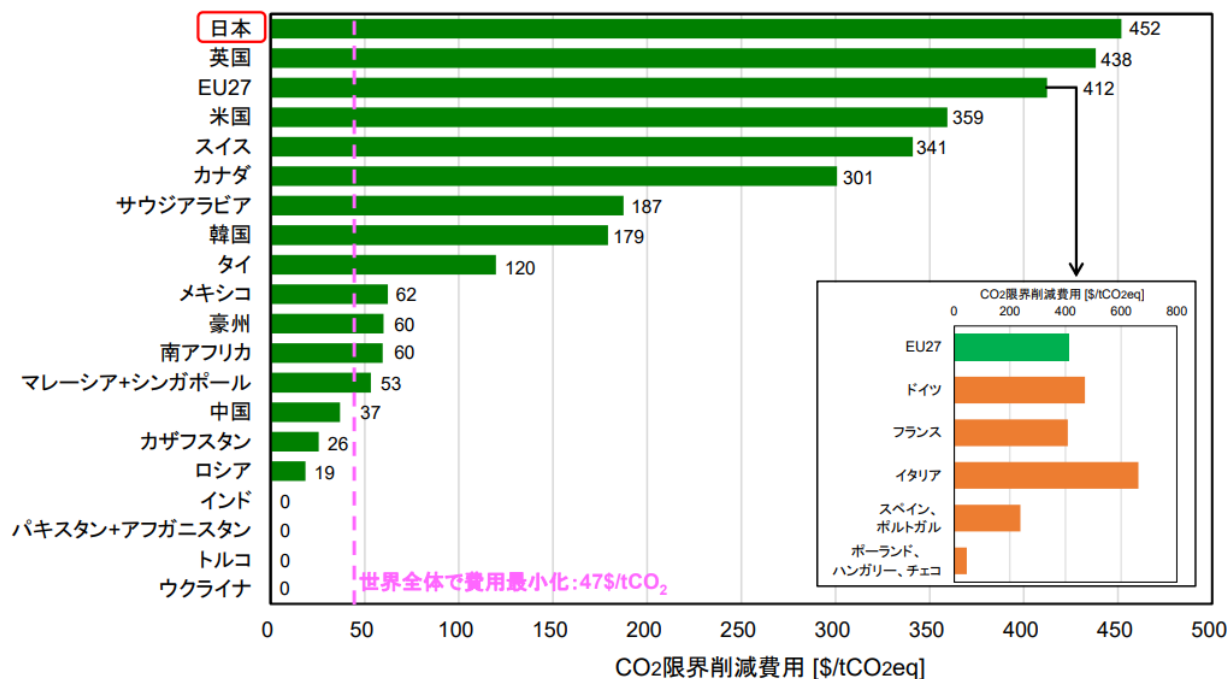


図 19 約束草案の CO<sub>2</sub> 限界削減費用の国際比較(2021 年度の推計)

出所：地球環境産業技術研究機構，秋元圭吾「2030 年国別貢献 NDCs の排出削減努力の評価とその含意」p.27，2022 年 3 月 8 日より転載。(https://www.rite.or.jp/system/events/5\_akimoto\_1.pdf, 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

### (3) 温暖化問題の難しさ，自然現象と自然災害

#### 1) 温暖化問題の難しさ

有馬 (2016 年)<sup>57</sup>によれば，「各国政府が直面する政策課題は，地球温暖化防止だけではない。経済成長，貧困撲滅，雇用確保，エネルギー安全保障，エネルギー価格の安定，いずれも重要な政策目的である。特に途上国においては，エネルギーアクセスの確保を含む国民の生活レベルの向上は至上命題である」とし，地球温暖化が唯一の政策課題ではないこと，地球温暖化以外の地球規模課題としてリソース配分（飢餓，疫病，貧困，水問題等）のバランス，その他（紛争やテロ，貧困，感染症，環境汚染，防災等）等の存在を指摘している<sup>58</sup>。

<sup>57</sup> 有馬純 (2016) 『精神論抜き地球温暖化対策—パリ協定とその後—』エネルギーフォーラム，p.103。

<sup>58</sup> 有馬純 (2015) 「温暖化問題の難しさ」第 427 回定例研究報告会。

(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/100/1/100\_1\_79/\_pdf/-char/ja, 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

## 2) 自然現象と自然災害との違い

- (i)大八木 (1991) によれば、「自然災害は自然現象ではない。災害を引き起こす“自然現象”がある“自然的”営力によって発生する。しかし、“自然災害”は、これだけでは発生しない。この“自然現象”の影響範囲の中に人間がいて活動している事が必要である。したがって、“自然災害”の発生には、災害を起す“自然現象”の発生と、人間の生存あるいは生存のための活動の存在、が必要条件となる」と自然現象と自然災害の関係性を指摘している。また「自然災害とは、人類の活動圏のうち生活圏における人類の生存あるいは日常生活が自然現象によって著しく損なわれることである」と自然災害を定義している<sup>59</sup>。
- (ii) 自然災害は自然現象がきっかけ（素因）で起こる災害である。たとえば火山の爆発や断層のずれによる地震の発生などが、そのきっかけである。ただし、それだけでは自然現象の一つにすぎない。それが災害と呼ばれるようになるとすれば、そこに人々が居合わせているからである。（日本リスク研究学会、『リスク学辞典』、阪急コミュニケーションズ、2006年、p.94を要約）
- (iii) 自然災害とは、自然現象によって人間の生命・身体・財産に被害が発生することがある。例えば、地震が発生しても、火山が噴火しても、北極の氷が溶けても、被害が人間社会に及ばない限り、それらは単なる自然現象であって自然災害ではない。自然災害は、自然の外力によって人間社会に被害が発生する現象といえる。
- （林 俊彦（2011）『大災害の経済学』PHP 研究所、pp.30-31を要約）

## 小括

これまでのエネルギー安全保障における安定性の研究では、生産国から日本（港湾）に届くまでのサプライチェーンでの支障にどう対処するかが中心となっており、港湾までサプライチェーンの範囲に含んでおらず、港湾エリアが一次エネルギーの集積地であると同時に二次エネルギーの生産起点と捉えている研究は少ない。特にエネルギー供給の安定性とエネルギー施設の自然災害時における安全性と関連づけた研究が少ない。安全性に関する研究では、土木工学、電力システム工学のなかで頑健性と回復力について専門的に深く掘り下げているが、施設や構造物の安定性（頑健性と回復力）が中心であり、必ずしもエネルギーの安定供給との関係性が中心となっていない。電力分野では、ベストミックスを実現するための電源構成において電力供給の安定性とCO<sub>2</sub>排出量削減の関係性の研究が中心であり、安全性（特に災害時の安全確保）とカーボンニュートラルを同時に関連づけた研究は極めて少ない。

以上より、時代の要請によるカーボンニュートラル（脱炭素化）の要素を、従来のアプローチに加え拡張し、エネルギー安全保障、安全性の確保（特に災害時の安全確保）、カーボンニュートラル（脱炭素化）の「エネルギー安定供給決定の3要素」を同時にアプローチする必要がある。つまり「3要素モデル」として扱う必要がある。

これまでのエネルギー安全保障における安定性の研究では、生産国から日本（港湾）に届くまでのサプライチェーンでの支障にどう対処するかが中心となっており、港湾までサプライチェーンに含んでおらず、港湾エリアが一次エネルギーの集積地であると同時に二次エネルギーの生産起点と捉えている研

---

<sup>59</sup> 大八木規夫（1991）「自然災害とその研究史」地理雑誌  
（[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/100/1/100\\_1\\_79/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/100/1/100_1_79/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022年10月12日）。

究は少ない。特にエネルギー供給の安定性とエネルギー施設の自然災害時における安全性と関連づけた研究が少ない。安全性に関する研究では、土木工学、電力システム工学のなかで頑健性と回復力について専門的に深く掘り下げているが、施設や構造物の安定性（頑健性と回復力）が中心であり、必ずしもエネルギーの安定供給との関係性が中心となっていない。電力分野では、ベストミックスを実現するための電源構成において電力供給の安定性とCO<sub>2</sub>排出量削減の関係性の研究が中心であり、安全性（特に災害時の安全確保）とカーボンニュートラルを関連づけた研究は極めて少ない。

時代の要請によりカーボンニュートラル（脱炭素化）の要素を、従来のアプローチに加え拡張し、エネルギー安全保障、安全性の確保（特に災害時の安全確保）、カーボンニュートラル（脱炭素化）の「エネルギー安定供給決定の3要素」を同時にアプローチする必要がある。つまり「3要素モデル」として扱う必要がある。

## 第4章 エネルギー安定供給と3要素モデル

本論では、厳しいエネルギー供給制限と自然災害が多いという与件の下、エネルギー安定供給と3要素モデルをもとに、先行研究で得た知見を踏まえ、世界と日本のエネルギー事情を整理し、第1節ではリサーチクエストionsを整理し提起し、第2節では仮説を提起、第3節ではシミュレーションを構築、第4節ではモデル分析（検証方法）を示す。

### 世界のエネルギー事情

世界の電源構成（2019年）を見ると、化石燃料の石炭火力発電（46%）、石油火力発電（3%）、天然ガス発電（24%）の合計73%であり、電力部門でも化石燃料を使用する火力発電が大半を占める。世界の電源構成において、石炭火力発電が46%も占めることあら、石炭火力のCO<sub>2</sub>排出量をいかに削減するかはカーボンニュートラル政策を推進するうえで重要な課題である。カーボンニュートラル政策においては、CO<sub>2</sub>削減は日本国内で実施することも他国においてCO<sub>2</sub>削減することも等価であり、国ごとにCO<sub>2</sub>限界削減コストは大きく異なることから、この内外コスト差の利用は、日本にとって重要な検討事項である。

### 日本のエネルギー事情

エネルギー需給面では、エネルギー消費大国でありエネルギー資源小国というエネルギー供給制約があり、一次エネルギー自給率は極めて低い。自然制約面では、日本は地震・津波大国であり、一方で首都直下地震と南海トラフ巨大地震の発生予想地域の港湾エリアに多くのエネルギー施設が集中している。安全性確保の面から規制基準を見ると、東日本大震災前の旧規制基準においても火力発電所と原子力発電所の立地条件や規制基準は原子力発電所の規制基準の方が厳しかった。原子力発電所の「新規制基準」の制定後は、地震・津波被害に対する規制基準はさらに厳しくなり、安全性はより強固になったと考えるのが合理的である。電源構成を発電燃料別に細分化して見ると、発電方式により発電燃料の国内民間在庫日数に差があり、首都直下地震と南海トラフ巨大地震の被害予想より、発電燃料の供給途絶の可能性があることが判明した。特に、東京電力エリアでは原子力発電所は全停止しており、CO<sub>2</sub>排出係数が小さいLNG火力発電の割合が増加した。LNGは「国内民間在庫日数」が一番少なく、燃料途絶への影響が大いに懸念される。再生可能エネルギーの大量導入と安定供給への負の作用がある。本論では、先行研究を踏まえ「安定供給に資する安定性と安全性の向上」、「CO<sub>2</sub>排出量の削減」の категорияに分けリサーチクエストionsを整理していく。

## 第1節 本論文の研究課題

カテゴリーを「安定供給に資する安定性と安全性の向上」と「CO<sub>2</sub>排出量の削減」に分類し研究課題を整理する。

「安定供給に資する安定性と安全性の向上」のカテゴリーとして、本論文の第1の研究課題（リサーチクエストion 1）は「仮に首都直下地震が発生し、発電用燃料が途絶した場合に、どのような電源構成が電力の安定供給の面で優れているのか」とする。リサーチクエストion（2）は「仮に南海トラ



フ巨大地震が発生し、地震動や津波による被害が生じた場合に、九州電力供給区域と四国電力供給区域を比較すると、どちらが安定供給の面で優れているのか」とする。リサーチクエスト(3)は「日本全体と西日本エリアをそれぞれケースにおいて、南海トラフ巨大地震が発生し、地震動や津波による被害が生じた場合に、どのような電源構成が安定供給の面で優れているのか」とする。

資源エネルギー庁より「2030年度におけるエネルギー需要の見通し」(電源構成比は、原子力22%、石炭火力19%、LNG火力20%、石油火力2%、水力11%、太陽光発電14%、風力発電5%、地熱1%、バイオマス5%、水素・アンモニア1%)が示されている。再生可能エネルギーはエネルギー密度(kW/m<sup>2</sup>)が低いこと、設備利用率が低いことから広い土地の面積を必要とすることを踏まえ、「CO<sub>2</sub>排出量の削減」の категорияとして、リサーチクエスト(4)は「国土が狭く平地が少ないという自然制約と太陽光発電や風力発電は広い土地の面積が必要という特性が、大量増設にどのような影響があるのだろうか」とする。リサーチクエスト(5)は「2030年度のCO<sub>2</sub>削減目標は2013年度比46%減である。これは何時の時代に相当するのか」、リサーチクエスト(6)は「日本の石炭火力発電技術を中国・米国・インドで展開した場合のCO<sub>2</sub>削減効果はどのくらいか」とする。

## 第2節 仮説の提示

### 仮説1 「安定供給に資する安定性と安全性の向上」の category

リサーチクエスト(1)は「仮に首都直下地震が発生し、発電用燃料が途絶した場合に、どのような電源構成が電力の安定供給の面で優れているのか」である。

仮説1は「首都直下地震が発生し発電用燃料の供給途絶が発生した場合は、国内民間在庫日数の少ないLNGを用いたLNG火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、LNG火力が停止した時の電力供給量が低下する幅が大きい。すなわち、LNG火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な供給になる」とする。

### 仮説2-1 「安定供給に資する安定性と安全性の向上」の category

リサーチクエスト(2)は「仮に南海トラフ巨大地震が発生し、地震動や津波による被害が生じた場合に、九州電力供給区域と四国電力供給区域を比較すると、どちらが安定供給の面で優れているのか」である。

仮説2-1は「火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な供給になる」とする。

### 仮説2-2 「安定供給に資する安定性と安全性の向上」の category

リサーチクエスト(3)は「日本全体と西日本エリアをそれぞれケースにおいて、南海トラフ巨大地震が発生し、地震動や津波による被害が生じた場合に、どのような電源構成が安定供給の面で優れているのか」これはリサーチクエスト(2)を拡張、一般化したものである。

仮説2-2は「日本全体と西日本エリアの両ケースにおいても、火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高

れば高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な供給になる」とする。

### 仮説3 「CO<sub>2</sub>排出量削減」のカテゴリー

資源エネルギー庁より「2030年度におけるエネルギー需要の見通し」が示されている。再生可能エネルギーはエネルギー密度(kW/m<sup>2</sup>)が低いこと、設備利用率が低いことから広い土地の面積を必要とすることを踏まえ、「CO<sub>2</sub>排出量の削減」のカテゴリーとして、リサーチクエスト(4)は「国土が狭く平地が少ないという自然制約と太陽光発電や風力発電は広い土地の面積が必要という特性が、大量増設にどのような影響があるのだろうか」である。

2030年におけるCO<sub>2</sub>排出量が最も小さい電源構成を実現するためには、CO<sub>2</sub>排出係数の大きな化石燃料を燃料とする電源を減らし、非化石燃料の電源を増やすことである。CO<sub>2</sub>排出係数の大きな電源の最たるものは石炭火力であるから、これを減らす。次に、非化石燃料の電源を増やすことは、すなわち再生可能エネルギーまたは原子力発電を増やすことである。

仮説3は、太陽光発電と風力発電の2つに分けて仮説を設ける。仮説3-1は「太陽光発電を2020年度実績(791億kWh)から2030年度計画値(1308億kWh)へ168%増やすことは、山手線一杯の面積(58km<sup>2</sup>)が10倍以上の土地の面積を必要とするため、実現性は低い」とする。仮説3-2は「風力発電を2020年度実績(90億kWh)から2030年度計画値(467億kWh)へ519%増やすことは、東京湾の面積(1380km<sup>2</sup>)80%以上の土地の面積が必要なため、実現性は低い」とする。

## 第3節 シミュレーションの構築

本節では、仮説を検証するにあたり、シミュレーションの説明を行う。仮説ごとに「(1)モデルの前提条件」、「(2)モデルの設定」、「(3)分析方法」、「(4)モデルのバックグラウンド」の順で説明する。次節にて「(3)分析方法」をもとに分析目的と手法、つまりモデル分析手順の概要を説明する。

### 仮説1 発電用燃料と安定供給

仮説1は「首都直下地震が発生し発電用燃料の供給途絶が発生した場合は、国内民間在庫日数の少ないLNGを用いたLNG火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、LNG火力が停止した時の電力供給量が低下する幅が大きい。すなわち、LNG火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な電力供給になる」とする。

#### (1)モデルの前提条件

- 1) このモデルは、火力発電、原子力発電、水力発電等の発電設備や送配電線などに被害は無く、発電用燃料の供給途絶による出力の変化のみ扱うものとする。
- 2) 発電用燃料の途絶時期は、地震発生と同時に開始するものとする。
- 3) 発電用燃料を使い切る日数は、第2章第3節第4項より、「国内民間在庫日数」の内容から、LNG(14日)、石油(170日)、石炭(30日)、ウラン(2.7年)とする。燃料を使いきったとき、その電源出力は0%とするものとする。LNG火力を例にとると、被災日(1日目)から被災後13日目24時で燃料を使い切り、14日目0時をもって出力は0%とする。

- 4) 地震被害の範囲は、東京電力供給区域<sup>60</sup>とする。
- 5) 電源構成は、モデルとして設定した当時の構成比を用いる。(2010年度、2015年度、2020年度の実際の電源構成比を用いる)
- 6) 電源構成には、東京電力に属する新潟県、福島県にある原子力発電所の発電電力量を含む。
- 7) 他の供給区域からの電力融通は受けないものとする。

## (2) モデル設定

- 1) 被災日を含め14日間は、火力発電所の出力(kW)は50%とする。
- 2) 出力100%時の時間当たりの燃料消費量を100単位とすると、出力A%時の時間当たりの燃料消費量は(100単位×A%)とする。(例：50%では50単位とする)
- 3) 15日目から28日目に向かい出力50%から100%まで一次関数を用いて増加させる。
- 4) 電源別に燃料が無くなると、出力は0% (停止) となる。LNG火力、石炭火力、石油火力の順で出力0%となる。

## (3) 分析方法

2010年度、2015年度、2020年度の電源構成モデルとして、燃料途絶した時の電力供給率の挙動を比較する。「災害時に電力の安定供給が優れている」とは、「被災時に電力供給量(電力供給率)の低下が少ないこと」かつ「設定した期間における発電電力量が多いこと」が指標である。この指標の比較はグラフにより容易に判別できる。注目する変数は、LNG火力発電の電源構成における構成比であり、2000年度(37%)、2010年度(46%)、2015年度(67%)となっている。

## (4) モデルのバックグラウンド

- 1) 2010年度の東京電力に属する火力発電は、常陸那珂火力発電所、鹿島火力発電所、千葉火力発電所、五井火力発電所、姉崎火力発電所、袖ヶ浦火力発電所、富津火力発電所、品川火力発電所、大井火力発電所、川崎火力発電所、東扇島火力発電所、横浜火力発電所、南横浜火力発電所、横須賀火力発電所、鹿島共同発電所、君津共同発電所、磯子火力発電所の17箇所である。発電設備能力は4467(万kW)である。このうち東京湾<sup>61</sup>の外にあるのは、常陸那珂火力発電所(茨城県東海村)、鹿島火力発電所(茨城県神栖市)、鹿島共同発電所(茨城県鹿嶋市)の3箇所であり、発電設備能力は866(万kW)である。東京湾内に面している火力発電所の発電能力は約81%(=866/4467)となっており、東京電力供給区域での火力発電所の東京湾内への集中がある。
- 2) 基礎数値である「国内民間在庫日数」は、第2章第3節第4項による。
- 3) 第2章第3節「エネルギー施設の地震予想区域への偏在と発電用燃料の供給途絶」で述べた港湾設備や航路の被害想定した時、発電用燃料の供給途絶のシナリオの可能性は排除できない。
- 4) その他

<sup>60</sup> 供給区域の対象となる県は、栃木県、群馬県、茨城県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、山梨県と静岡県の一部である。

<sup>61</sup> 東京湾とは一般的には、房総半島西側の洲崎と三浦半島の釧崎を結ぶ線より北の水域を指す。

東日本大震災では、石油製品の供給再開には海上輸送も陸上輸送でも、航路や道路の啓開と入出荷設備の修復が必要であった。航路啓開に必要な大型浚渫（しゅんせつ）兼油回収船は日本3隻しかない。また、燃料供給には、その供給設備を稼働させるための電力供給の状況に依存することが知られている<sup>62</sup>。

## 仮説 2-1 電源構成と災害時の安定供給 その1

仮説 2-1 は「火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な電力供給になる」とする。

### (1) モデルの前提条件

本論におけるシミュレーションは、第3章先行研究 第2節 安全性の確保（被害予想と復旧予想の重要性）にあるように「被災事例に基づいて震度と機能停止の統計的な関係を求め、そのモデルを用いて予測を行う」というシミュレーション方法を採用している。

- 1) 2014年6月、土木学会より『東日本大震災におけるエネルギー施設（火力・水力・送変配電・ガス）の被害状況と今後への展開について 報告書（最終報告）』<sup>63</sup>が発表された。この報告書では、東北電力（4カ所）、東京電力（15カ所）、その他（5カ所）計24カ所の火力発電所を対象とし、内容として地盤情報、地震観測記録、津波観測記録、地震被害、津波被害、復旧期間が網羅されている。これをもとに「震度」と「津波浸水の有無」により表14、表15を作成した。表14は、津波浸水有りのケースをまとめ、発電所ごとに実際の復旧期間（日数）が記載してある。ダミー発電所A（浸水深10m以上）とダミー発電所B（10m未満）の値は、震度6弱の復旧期間の長い第1位、第2位を採用した。最短復旧期間は震度4以下から震度5まではサンプルが無く直近上位の値を採用した。最長復旧期間は777日とし、震度4以下は最長復旧期間の長い第3位の283日を採用した。表15は、津波浸水無しのケースをまとめた。2018年9月6日、北海道胆振東部地震で起こったブラックアウトでは、離島地域と送配電設備故障により通電不能地域を除く道内ほぼ全域293万戸（99%）で停電が解消された時間は51時間であった。これを切上げ処理し3日を最短復旧期間として採用した。最長復旧期間は、震度6弱の最長復旧期間88日を採用した。震度6強はサンプルが無いことからダミー発電所Cを置き震度6弱の平均復旧期間62日を最短・最長期間に採用した。表14、表15においてダミー発電所A、ダミー発電所B、ダミー発電所Cは、火力発電所または原子力発電所である。言い換えると、この表では、火力発電所と原子力発電所の「復旧期間」は「震度」と「津波浸水深の有無」の組合せのみで決定している。シミュレーションでは、この表を使用するため、火力発電所と原子力発電所を区別していない。
- 2) 津波浸水深は、「国土交通省ハザードマップポータルサイト」の「重ねるハザードマップ」画像

<sup>62</sup> 泉谷（2017）「首都直下地震における石油製品の供給予測」『国際情報研究』日本国際情報学会，pp.27-38。（[https://www.jstage.jst.go.jp/article/gscs/14/1/14\\_27/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/gscs/14/1/14_27/_pdf/-char/ja)，最終閲覧2022年10月12日）

<sup>63</sup> 土木学会 エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員会（2014）「東日本大震災におけるエネルギー施設（火力・水力・送変配電・ガス）の被害状況と今後への展開について報告書（最終報告）」

（<https://committees.jsce.or.jp/enedobo/system/files/報告書（最終報告）東日本大震災におけるエネルギー施設の被害状況と今後の展開について.pdf>，最終閲覧2022年10月12日）

より読み取った。

- 3) 最大震度は、「南海トラフ巨大地震の被害想定（第二次報告）」の「市町村別最大震度」<sup>64</sup>による。
- 4) 全国の火力発電所（100 箇所，出力合計:15,188 万 kW）と原子力発電所（19 箇所，出力合計:4,996 万 kW）分を「予想最大震度」「予測最大津波浸水深(m)」をその他のデータセットとともに、「論文 DB\_HZM 火力,原子力発電所\_\*\*」としてデータベース化した。

表 14 震度別 復旧時間の設定表（津波浸水有り）

震度 （津波浸 水有り）	系列	4以下	5弱	5強	6弱	6強	7	浸水深 (m)	燃料
原町火力	1号機				777			13.0	石炭
仙台火力	4号機				334			5.0	LNG
広野火力	2号機				122			4.0	石油・石炭
広野火力	4号機				125			4.0	石油・石炭
新仙台火力	1号機				291			3.0	石油
新地2号機	2号機					283		3.0	石炭
勿来7号機	7号機					111		1.5	石油・石炭
勿来9号機	9号機					111		0.4	石油・石炭
常陸那珂	1号機				65			1.0	石炭
鹿島火力	2号機				27			1.0	石油
鹿島火力	3号機				26			1.0	石油
鹿島火力	5号機				40			1.0	石油
ダミー発電所A							334	10m未満	
ダミー発電所B							777	10m以上	
最短復旧期間（日）		26	26	26	26	111	334		
最長復旧期間（日）		283	777	777	777	777	777		

<sup>64</sup> 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループによる報道発表資料一式（平成 24 年 8 月 29 日発表）の一部「資料 1-6 市町村別最大震度一覧表」による。（[https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/1\\_6.pdf](https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/1_6.pdf)，最終閲覧 2022 年 10 月 13 日）

表 15 震度別 復旧時間の設定表（津波浸水無し）

震度 (津波浸水無し)	系列	4以下	5弱	5強	6弱	6強	7	浸水深 (m)	燃料
苫東厚真							3	無し	石炭
鹿島共同	1号機				36			無し	石油
鹿島共同	3号機				88			無し	石油
東扇島火	1号機			13				無し	LNG
八戸火力	3号機			9				無し	石油
千葉火力	2号機			当日中再開				無し	LNG
大井火力	2号機		2					無し	石油
大井火力	3号機		6					無し	石油
横浜火力			当日中再開					無し	LNG・石油
能代火力	1号機		2					無し	石炭
能代火力	2号機		3					無し	石炭
酒田共同	1号機		1					無し	石炭
酒田共同	2号機		3					無し	石炭
秋田火力	2号機		1					無し	石油
秋田火力	3号機		1					無し	石油
秋田火力	4号機		1					無し	石油
五井火力	1号機		1					無し	LNG
ダミー発電所C						62	88	無し	
最短復旧期間（日）	継続運転		1	9	36	62	3		
最長復旧期間（日）	継続運転		6	13	88	62	88		

「論文 DB\_HZM 火力，原子力発電所\_\*\*」の概要

「津波浸水想定」のデータを得るために、発電所ごとのデータベース（以下DB）を“Microsoft Excel”にて作成した。経済産業省の統計「電気事業者の発電所数，出力（2019年3月）」<sup>65</sup>によると、国内の火力発電所数は450発電所，出力容量は合計171,469,280（kW）である。作成したデータベースに格納している範囲は、北海道電力，東北電力，東京電力，中部電力，北陸電力，関西電力，中国電力，四国電力，九州電力，沖縄電力の10電力会社と電源開発（J-POWER）に所属する火力発電所から176発電所（179カ所/450カ所=39%）分，出力容量の合計146,636,058（kW）であり，出力容量全体の約86%（=146,636,058/171,469,288）をカバーしている。同様に原子力発電所は，16発電所，出力容量合計38,042,000（kW）であり，これは出力容量全体を100%カバーしている。このDBは，火力発電と原子力発電の合計の約88%をカバーしている。DBの項目は下記21項目で構成され，本モデルではその一部を利用している。

- 1) 面する海：（太平洋，日本海，瀬戸内海など）
- 2) 沿岸・内陸：（選択）
- 3) 発電所名：
- 4) 使用燃料：（石炭，重油，LNGなど）
- 5) 総出力（万kW）：発電設備能力

<sup>65</sup> 電気事業者の発電所数，出力（2019年3月）“1 電気事業者の発電所数，出力”による。  
[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric\\_power/ep002/results\\_archive.html#h30](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results_archive.html#h30)，最終閲覧2022年10月12日）

- 6) 地域：北海道，東北，関東，中部，北陸，近畿，中国，四国，九電，沖縄の10地域。次の区分による。一般電気事業者分は自社設備分，電源開発（株）分は地域別である。
- 7) 所在地：（住所）
- 8) 所属：発電所の所属先
- 9) 位置：緯度・経度（10進法）  
この位置データにより，多種多様な地図や空中写真の利用が統一的に扱うことができる。
- 10) 最大震度：南海トラフ巨大地震の被害想定（第二次報告）の「市町村別最大震度」による。
- 11) 最大津波高（m）：最大震度：南海トラフ巨大地震の被害想定（第二次報告）の「都道府県別市町村別最大津波高」<sup>66</sup>による。
- 12) ハザードマップから浸水深（m）：浸水深は，重ねるハザードマップ（図20）の色の濃淡を基準色より（0m以上0m未満）として読み取る。読み取ったデータは，画像データをエビデンスとして保存している。理由は，「重ねるハザードマップ」のバージョンアップにより全く同じ画像データとは限らないため，過去のデータも取得日を記して残している。
- 13) わがまちのハザードマップ：URLの記録
- 14) 運転状態：停止，休止，廃止などの状態

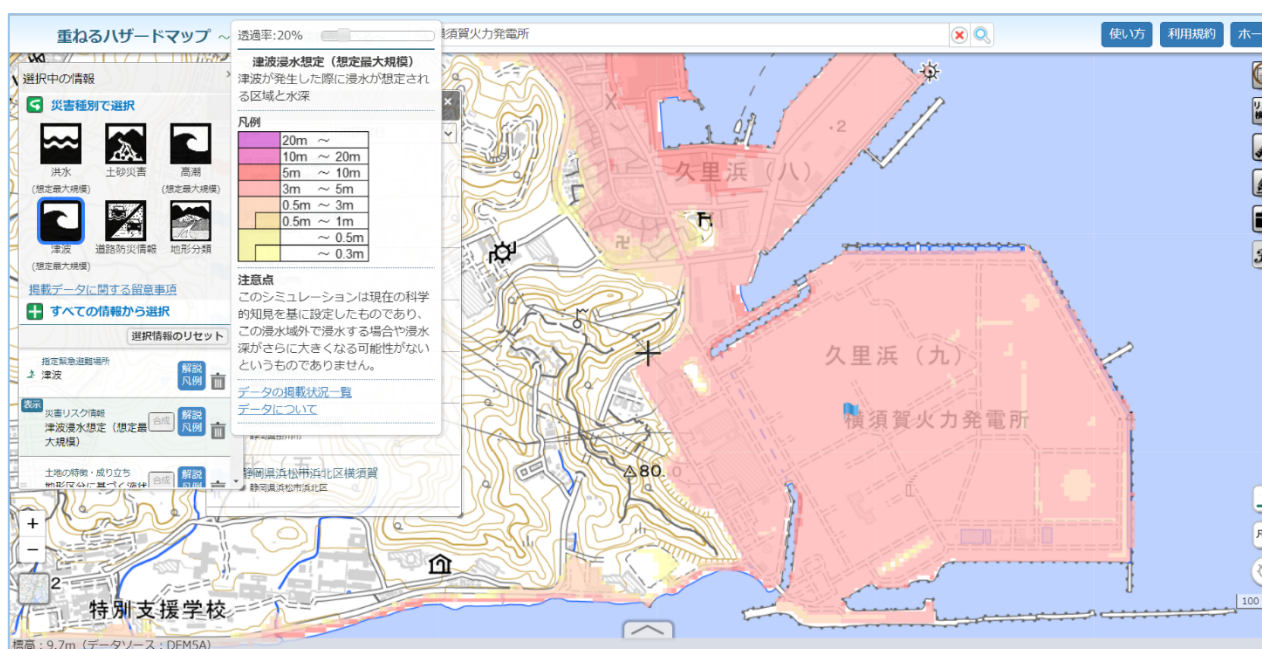


図20 重ねるハザードマップの画像（横須賀火力発電所の周辺）

補足説明：津波浸水想定（想定最大規模）津波が発生した際に浸水が想定される区域と水深を凡例の色の濃淡で測る。

<sup>66</sup> 都道府県別市町村別最大津波高 ([https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/1\\_2.pdf](https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/1_2.pdf), 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

## (2) モデル設定

同じ九州電力区域の電源構成の2010年度と2014年度の電源構成を表16でまとめている(構成比を併記)。同じ地域でも構成が大きく異なる。最大の背景は、東京電力福島第一原子力発電所の事故が起因となり、全国の原子力発電所が全停止になったことによる。表17の関係も同様である。

### 1)モデル 2-1a

同じ九州電力区域の電源構成の2010年度と2014年度の電源構成を表16でまとめている(構成比も併記した)。同じ地域でも構成が大きく異なる。最大の背景は、東京電力福島第一原子力発電所の事故が起因となり、全国の原子力発電所が全停止になったことによる。同じ電力会社で電源構成以外は同じ条件で、地域内にある複数の火力発電所と原子力発電所に対して、「震度」と「津波浸水の有無」という条件を与え「復旧期間」を得ることが、モデルこのモデルに対して(人工的に)南海トラフ巨大地震を発生させ、電力供給の落込みから復旧の状態をシミュレーションすることになる。

2)モデル 2-1b は、四国電力区域のケースとなる。

## (3) 分析方法

モデル 2-1a とモデル 2-1b の復旧期間をそれぞれ比較し、復旧期間の短い方の電源構成が安定供給の面で優れていると評価する。「災害時に電力の安定供給が優れている」とは、「被災時に電力供給量(電力供給率)の低下が少ないこと」かつ「設定した期間における発電電力量が多いこと」が指標である。この指標の比較はグラフにより容易に判別できる。

表 16 九州電力供給区域の電源構成 (2010 年度, 2014 年度)  
電源構成 (単位: 百万 kWh)                      電源構成 構成比表示

	2010年度	2014年度		2010年度	2014年度
水力	6,311	6,605	水力	5.0%	5.9%
火力	79,769	102,047	火力	63.6%	91.4%
原子力	37,375	0	原子力	29.8%	0.0%
風力	494	641	風力	0.4%	0.6%
太陽光	2	1,019	太陽光	0.0%	0.9%
地熱	1,433	1,295	地熱	1.1%	1.2%
燃料電池	0	0	燃料電池	0.0%	0.0%
発電計	125,384	111,607	発電計	100.0%	100.0%



表 17 四国電力供給区域の電力構成（2010 年度，2014 年度）

電源構成（単位：百万 kWh）                      電源構成 構成比表示

	2010年度	2014年度		2010年度	2014年度
水力	3,796	4,035	水力	6.6%	8.1%
火力	37,625	45,245	火力	65.1%	90.8%
原子力	16,104	0	原子力	27.9%	0.0%
風力	293	324	風力	0.5%	0.7%
太陽光	1	235	太陽光	0.0%	0.5%
地熱	0	0	地熱	0.0%	0.0%
燃料電池	0	0	燃料電池	0.0%	0.0%
発電計	57,819	49,839	発電計	100.0%	100.0%

#### (4) モデルのバックグラウンド

- 1) 経済産業省は，2016 年度まで地域別\* 発電電力量（kWh）を水力，火力，原子力，太陽光，地熱，燃料電池別に統計データを公開していた。この発電電力量（kWh）は，発電設備（kW）をその時々に合わせて発電した年間の発電電力量（kWh）の累計である。仮に 2010 年度のある時点で，四国電力供給区域が地震で被災した瞬間に，どの発電設備を組合せて発電していたかを予想することはできない。しかし，2010 年度のある瞬間に，発電量（kW）が電源構成（kWh）の構成比で，発電設備を用いて発電しているとして扱うことには一定の合理性がある。この考え方に基づき被災した時点の発電出力（kW）の構成比は，電源構成（年間の発電電力量の構成比）と同じとして扱い，モデル化している。
- 2) 被災する対象は，火力発電所と原子力発電所とした。その他の水力発電所，送配電線等は被災しないとした。
- 3) 被災した時，全ての火力発電所と原子力発電所は稼働中であったとした。各発電所の受ける「最大震度」と「津波浸水の有無」により，発電を継続する発電所，停止後，復旧期間経過後に発電を再開する発電所がある。各発電所の出力の総和が，その対象地域に供給される電力となる。
- 4) 四国電力供給区域の電源構成比表示を下に再掲する。表 18，表 19 より，2010 年度の火力発電 65.1%は坂出發電所，阿南発電所，橘湾発電所，橘火力発電所，西条発電所の 5 発電所があり，原子力発電所は伊方発電所 1 箇所のみである。火力発電所の総出力合計は 549.1（万 kW）である。坂出發電所 138.5（万 kW）は火力発電所の総出力合計の 25.2%（ $=138.5/549.1$ ）であることから，四国電力供給区域の発電電力量（kWh）の 16.4%（ $=0.65.1 \times 0.252$ ）を分担しているとした。つまり，坂出發電所が地震で停止すると四国電力供給区域の電力供給量の 16.4%が減るという考え方である。逆に坂出發電所が復旧すれば，四国電力供給区域の電力供給量の 16.4%増えることになる。

表 18 四国電力供給区域の電源構成（構成比表示）（表 17 を再掲）

	2010年度	2014年度
水力	6.6%	8.1%
火力	65.1%	90.8%
原子力	27.9%	0.0%
風力	0.5%	0.7%
太陽光	0.0%	0.5%
地熱	0.0%	0.0%
燃料電池	0.0%	0.0%
発電計	100.0%	100.0%

表 19 四国電力供給区域の電源構成（発電所リスト）

発電所名	使用燃料	総出力 (万kW)	所属
坂出發電所	LNG、重油、原油、副生ガス	138.5	四国電力
阿南発電所	重油、原油	90	四国電力
橘湾発電所	石炭	70	四国電力
橘湾火力発電所	石炭	210	電源開発
西条発電所	石炭、木質バイオマス	40.6	四国電力
伊方発電所	3号機 MOX燃料	89	四国電力

注：「地域別」とは、経済産業省の9経済産業局と沖縄総合事務局の区分である。北海道、東北、関東、中部、北陸、近畿、中国、四国、九州、沖縄に区分される。この区分で統計データを作成している。

## 仮説 2-2 電源構成と災害時の安定供給 その2

仮説 2-2 は「日本全体と西日本エリアの両ケースにおいても、火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な電力供給になる」とする。本仮説は、仮説 2-1 の範囲を2段階に拡張したものである。

### (1) モデルの前提条件

1)モデルの前提条件は仮説2と同じ。

2)ただし、全国エリア、東日本エリア、西日本エリアとして分析するため、東西エリア

間では電力融通しない。個々のエリアの復旧する挙動は一体で見ているのでエリア内では電力融通するとした。

- 3)データベース「論文 DB\_HZM 火力,原子力発電所\_\*\*」のデータを利用する。  
 4)このDBの震度と津波浸水深は、南海トラフ巨大地震を想定したデータである。

## (2) モデル設定

全国版で2010年度と2014年度を比較する。

### 1)モデル 2-2a

このモデルは、仮説 2-1 の九州・四国版を全国エリアに拡張したものである。全国エリアでも2014年度は原子力発電が全停止した分、火力発電の構成比が増加している。

表 20 全国の電源構成 (2010 年度, 2014 年度)  
 電源構成 (億 kWh)                      電源構成 構成比表示

	2010年度	2014年度		2010年度	2014年度
水力	90,681	86,942	水力	7.8%	8.3%
火力	771,339	955,352	火力	66.7%	90.7%
原子力	288,230	0	原子力	24.9%	0.0%
風力	4,016	5,038	風力	0.3%	0.5%
太陽光	22	3,808	太陽光	0.0%	0.4%
地熱	2,632	2,577	地熱	0.2%	0.2%
燃料電池	0	0	燃料電池	0.0%	0.0%
計	1,156,921	1,053,717	計	100%	100%

### 2)モデル 2-2b

このモデルでは、西日本エリア単体での被災直後から復旧過程の挙動を見る。電源構成は、50Hz エリアと 60Hz エリアではおおよそ同じである。南海トラフ巨大地震では西日本 (60Hz エリア) に被害が集中する予想があることから、このエリアの復旧期間は2010年と2014年の差異が顕著に表れることが予想される。

表 21 50Hz エリアの電源構成 (2010 年度, 2014 年度)  
 電源構成 (億 kWh)                      電源構成 構成比表示

	2010年度	2014年度		2010年度	2014年度
水力	36,636	34,819	水力	7%	8%
火力	333,380	421,070	火力	66%	91%
原子力	127,980	0	原子力	26%	0%
風力	2,184	2,759	風力	0.4%	0.6%
太陽光	10	1,239	太陽光	0.0%	0.3%
地熱	1,199	1,283	地熱	0.2%	0.3%
燃料電池	0	0	燃料電池	0.0%	0.0%
計	501,389	461,170	計	100%	100%

表 22 60Hz エリアの電源構成 (2010 年度, 2014 年度)

電源構成 (億 kWh)

電源構成 構成比表示

	2010年度	2014年度		2010年度	2014年度
水力	54,011	52,111	水力	8%	9%
火力	429,113	525,820	火力	66%	90%
原子力	160,250	0	原子力	25%	0%
風力	1,800	2,251	風力	0%	0%
太陽光	13	2,555	太陽光	0%	0%
地熱	1,433	1,295	地熱	0%	0%
燃料電池	0	0	燃料電池	0%	0%
計	646,620	584,032	計	100%	100%

### (3) 分析方法

モデル 2-2a とモデル 2-2b の復旧期間をそれぞれ比較し、復旧期間の短い方の電源構成が安定供給の面で優れていると評価する。「災害時に電力の安定供給が優れている」とは、「被災時に電力供給量（電力供給率）の低下が少ないこと」かつ「設定した期間における発電電力量が多いこと」が指標である。

### (4) モデルのバックグラウンド

- 1) 経済産業省は、2016 年度まで地域別\* 発電電力量 (kWh) を水力、火力、原子力、太陽光、地熱、燃料電池別に統計データを公開していた。この発電電力量 (kWh) は、発電設備 (kW) をその時々に合わせて発電した年間の発電電力量 (kWh) の累計である。仮に 2010 年度のある時点で、四国電力供給区域が地震で被災した瞬間に、どの発電設備を組合せて発電していたかを予想することはできない。しかし、2010 年度のある瞬間に、発電量 (kW) が電源構成 (kWh) の構成比で、発電設備を用いて発電しているとして扱うことには一定の合理性がある。この考え方にに基づき被災した時点の発電出力 (kW) の構成比は、電源構成 (年間の発電電力量の構成比) と同じとして扱い、モデル化している。
- 2) 被災する対象は、火力発電所と原子力発電所とした。その他の水力発電所、送配電線等は被災しないとした。
- 3) 被災した時、全ての火力発電所と原子力発電所は稼働中であつたとした。各発電所の受ける「最大震度」と「津波浸水の有無」により、発電を継続する発電所、停止後、復旧期間経過後に発電を再開する発電所がある。各発電所の出力の総和が、その対象地域に供給される電力となる。

### 仮説 3 電源構成と CO<sub>2</sub> 排出量

仮説 3 は、太陽光発電と風力発電の 2 つに分けて仮説を設ける。仮説 3-1 は「太陽光発電を 2020 年度実績 (791 億 kWh) から 2030 年度計画値 (1308 億 kWh) へ 168% 増やすことは、山手線一杯の面積 (58km<sup>2</sup>) が 10 倍以上の土地の面積を必要とするため、実現性は低い」とする。仮説 3-2 は「風力発電を 2020 年度実績 (90 億 kWh) から 2030 年度計画値 (467 億 kWh) へ 519% 増やすことは、東京湾の面積 (1380km<sup>2</sup>) 80% 以上の土地の面積が必要なため、実現性は低い」とする。

## (1) モデルの前提条件

- 1) LNG 火力と原子力発電は，出力（kW）当たり土地の面積が同等とする。
- 2) LNG と原子力発電は，設備利用率（80%程度）で同等とする。つまり，LNG 火力と原子力発電の年間発電電力量（kWh）が同等で，土地の面積が同じとした。
- 3) 「原子力発電所（LNG 火力発電所）」と「太陽光発電所」と「風力発電所」の土地の面積の比率は，図 41 より「1：97：356」となる。
- 4) この土地の面積が，現実の制限になることを考慮する。
- 5) 表 24 より，2030 年度の発電電力量（供給）は 9,340 億 kWh 程度であり，電源構成は①石油等 2%程度，②石炭 19%程度，③天然ガス 20%程度，④原子力 20～22%程度，⑤再生可能エネルギー 36～38%程度（3,362～3,549 億 kWh），⑥水素・アンモニア 1%程度の見通しである。再生可能エネルギーを分解すると，太陽光 14～16%，風力 5%，地熱 1%，水力 11%，バイオマス 5%である。
- 6) 発電電力量は，減少傾向となる。（表 23 を参照のこと）

表 23 日本の発電電力量推移と計画

単位：億 kWh

	2010年度	2013年度	2020年度	2030年度
発電電力量	11,494	10,845	10,008	9,340
2010年度比	100%	94%	87%	81%
2013年度比	—	100%	92%	86%

出所：「発電電力量：9340 億 kWh」の値

資源エネルギー庁，「2030 年度におけるエネルギー需給の見通し」2011 年 9 月，p.3。

（[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/opinion/data/03.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/opinion/data/03.pdf)，最終閲覧 2022 年 10 月 12 日）

## (2) モデル設定

モデル 3-1、モデル-2 の前提となる電源構成は，原子力 20～22%程度，再生可能エネルギー 36～38%程度と幅があるため，2030 年度（原子力：22%，再生可能エネルギー：36%）と固定する。

表 24 電源構成の推移と計画

発電電力量 (億kWh)	2010年度	2013年度	2020年度	2030年度 原子力:22% 再エネ:36%	2020年度比	2010年度比
原子力	2,882	93	388	2,055	530%	71%
石炭	3,199	3,571	3,102	1,775	57%	55%
LNG	3,339	4,435	3,899	1,868	48%	56%
石油等	983	1,567	636	187	29%	19%
水力	838	794	784	1,027	131%	123%
太陽光	35	129	791	1,308	165%	3736%
風力	40	52	90	467	519%	1168%
地熱	26	26	30	93	311%	359%
バイオマス	152	178	288	467	162%	307%
水素・アンモニア	0	0	0	93		
縦計	11,494	10,845	10,008	9,340	93%	81%
最終電力消費 (億kWh)	10,354	9,896	9,135	8,640		

出所：資源エネルギー庁，(1)「令和2年におけるエネルギー需給実績（確報）」p.4，

(2)「2030年度におけるエネルギー需給の見通し」p.68より筆者作成。

([https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/gaiyou2020fykaku.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/gaiyou2020fykaku.pdf)，最終閲覧2022年10月12日)

補足：上記の表は，2030年度の目標（原子力発電：22%，太陽光発電：14%）を具体的な数値に計算したものである。エネルギー基本計画には最終電力消費（億kWh）表記なので，発電電力量は108.1%で割り戻してある。

### (3) 分析方法

モデルの前提条件に則り「原子力発電所（LNG火力発電所）」と「太陽光発電所」と「風力発電所」の土地の面積の比率が「1：97：356」となることを利用して，太陽光発電と風力発電の発電電力量を得るための，必要な土地の面積を計算する。

### (4) モデルのバックグラウンド

本モデルでは，発電に際しCO<sub>2</sub>を排出する火力発電からCO<sub>2</sub>を排出しない太陽光発電と風力発電に置換えた分だけCO<sub>2</sub>が削減するという単純なモデルとし，必要な敷地面積に注目した。厳密に発電にかかる環境へのCO<sub>2</sub>の影響を定量的に評価するためには，発電プラントの運用段階のCO<sub>2</sub>排出量だけでなく，その建設や破棄，さらには燃料の採掘・加工・廃棄物処理などのサプライチェーン全体，すなわち発電のライフサイクル（LC）を包含して評価する必要がある。同一の評価基準の下，対比可能な形で商用発電技術および技術的に確立された発電技術の電源別ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量（LC-CO<sub>2</sub>）が必要になる。日本では，電力中央研究所が2016年に発表している報告書「日本における発電

技術のライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量総合評価<sup>67</sup>に掲載されている「各種発電技術の LC-CO<sub>2</sub> 排出量」があり、この数値をもとにした公文書や研究が多い。この数値は下記の計算例に使用される。

(参考)

求める値：

2010 年度の石炭火力発電所の発電電力量は 2,882 (億 kWh) である。このときの CO<sub>2</sub> 排出量は何トンか。石炭火力 (平均) の LC-CO<sub>2</sub> 排出量は 943 (g-CO<sub>2</sub>/kWh) とする。

計算例：

$$2,882 \times 10^8 \text{ (kWh)} \times 943 \text{ (g-CO}_2\text{/kWh)} = 2.717726 \times 10^{14} \text{ (g-CO}_2\text{)}$$

$$= 2.717726 \times 10^{11} \text{ (kg-CO}_2\text{)} = 2.717726 \times 10^8 \text{ (トン-CO}_2\text{)} = 271.8 \text{ (百万トン-CO}_2\text{)}$$

2010 年度発電部門の CO<sub>2</sub> 排出量は 531.2 (百万トン-CO<sub>2</sub>) であるから、石炭火力の CO<sub>2</sub> 排出量は、約 51% を占めることになる。

## 第 4 節 モデル分析手順 — その検証方法について

本節にて「(3)分析方法」をもとにモデル分析手順を仮説ごとに説明する。

### 仮説 1

首都直下地震が発生し発電用燃料の供給途絶が発生した場合は、国内民間在庫日数の少ない LNG を用いた LNG 火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、LNG 火力が停止した時の電力供給量が低下する幅が大きい。すなわち、LNG 火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な電力供給になる。

ステップ	分析目的	手法の説明
第1ステップ	2010年度と2015年度の安定供給性を比較する。	電源構成と安定供給の関係性を分析するにあたり、2010年度LNG火力(46%)、原子力(28%)と2015年度LNG火力(67%)、原子力(0%)を比較する。電力供給率と発電電力量を比較し、優劣を判別する。
第2ステップ	2010年度と2015年度の安定供給性を比較する。	電源構成と安定供給の関係性を分析するにあたり、2015年度LNG火力(67%)、原子力(0%)と2000年度LNG火力(37%)、原子力(42%)を比較する。電力供給率と発電電力量を比較し、優劣を判別する。
第3ステップ	2000年度、2010年度、2015年度の安定供給性の比較	電源構成と安定供給の関係性を分析するにあたり、2010年度、2010年度、2015年度を比較する。3つを比較することで、どの要素が支配的なのかを分析する。

<sup>67</sup> 電力中央研究所、「日本における発電技術のライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量総合評価」2016 年。  
(<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDownload?reportNoUkCode=Y06&tenpuTypeCode=30&seqNo=1&reportId=8713>, 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

## 仮説 2-1

火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な電力供給になる。

ステップ	分析目的	手法の説明
第1ステップ	九州地域における2010年度と2014年度の安定供給性を比較する。	モデル2-1aの電源構成と安定供給の関係性を分析するために、2010年度火力（63.6%）、原子力（29.8%）と2014年度火力（91.4%）、原子力（0%）を比較する。被災後の電力供給率（落込み）と復旧期間を比較し、優劣を判別する。同エリアにおける年代別電源構成の影響を比較する。
第2ステップ	四国地域における2010年度と2014年度の安定供給性を比較する。	モデル2-1bの電源構成と安定供給の関係性を分析するために、2010年度火力（65.1%）、原子力（27.9%）と2014年度火力（90.8%）、原子力（0%）を比較する。被災後の電力供給率（落込み）と復旧期間を比較し、優劣を判別する。同エリアにおける年代別電源構成の影響を比較する。
第3ステップ	ほぼ同じ電源構成である2つの地域復旧経過の差異を明らかにする。	2つのモデルの復旧経過の差異の要因を洗い出し、どの要因の影響が大きいのか総合的に考察する。例えば、震度の差異、津波浸水の有無、火力発電の構成比が90%のケースでも、いくつの発電設備で分担しているか（分散度）などを総合的に分析する。

## 仮説 2-2

日本全体と西日本エリアの両ケースにおいても、火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な電力供給になる。（本仮説は仮説 2-1 の範囲を2段階に拡張したもの）

ステップ	分析目的	手法の説明
第1ステップ	全国エリアで2010年度と2014年度を比較する。	仮説2-1と基本的に同じ。モデル2-2aの電源構成と安定供給の関係性を分析するために、2010年度と2014年度を比較する。被災後の電力供給率と復旧期間を比較し、優劣を判別する。同エリアにおける年代別電源構成の影響を比較する。
第2ステップ	南海トラフ巨大地震の被害が大きい西日本の2010年度と2014年度を比較する。	50Hzエリアと60Hzエリアの電源構成はほぼ同じであるが、南海トラフ巨大地震では西日本（60Hzエリア）に被害が集中する予想があることから、このエリア（モデル2-2b）の復旧期間は2010年と2014年の差異が顕著に表れることが予想される。
第3ステップ	ほぼ同じ電源構成である2つの地域復旧経過の差異を明らかにする。	モデル2-2aとモデル2-2bにおける差異の要因を洗い出し、どの要因の影響が大きいのか総合的に考察する。例えば、震度の差異、津波浸水の有無、火力発電の構成比が90%のケースでも、いくつの発電設備で分担しているか（分散度）などを総合的に分析する。



### 仮説 3-1

太陽光発電を 2020 年度実績（791 億 kWh）から 2030 年度計画値（1308 億 kWh）へ 168%増やすことは、山手線一杯の面積（58km<sup>2</sup>）が 10 倍以上の土地の面積を必要とするため、実現性は低い。

### 仮説 3-2

風力発電を 2020 年度実績（90 億 kWh）から 2030 年度計画値（467 億 kWh）へ 519%増やすことは、東京湾の面積（1380km<sup>2</sup>）80%以上の土地の面積が必要なため、実現性は低い。

ステップ	分析目的	手法の説明
第1ステップ	発電電力量（kWh）を得るための土地面積を求める。	仮説3-1では、実在の堺太陽光発電所（関西電力）の土地面積、エネルギー密度（kW/m <sup>2</sup> ）、設備利用率を実数として計算する。仮説3-2では、実在の風力発電所の土地面積、エネルギー密度、設備利用率の正確な実数が得られないことから、「平均的な100万kW級原子力発電所が1年間発電した発電電力量を65.1億kWh」として、これに相当する風力発電所の土地面積は、原子力発電所の356倍という既知数を採用し計算した。
第2ステップ	土地面積の広さをイメージする	太陽光発電、風力発電により、2030年度計画値まで設備を増設するために、どの程度の面積が必要となるか、山手線一杯分、東京都の土地面積、東京湾と比較しイメージを形成する。

## 第5章 シミュレーションによる検証および研究結果

### 第1節 検証結果の分析

第4章では、仮説の提起とモデルの前提条件、モデル設定、モデルのバックグラウンドを説明した。ここでは、具体的にシミュレーションにて検証を進める。

#### 仮説1の検証 発電用燃料と安定供給

仮説1は「首都直下地震が発生し発電用燃料の供給途絶が発生した場合は、国内民間在庫日数の少ないLNGを用いたLNG火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、LNG火力が停止した時の電力供給量が低下する幅が大きい。すなわち、LNG火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な電力供給になる」である。

ここでは仮説を検証するために、4つのシミュレーションを行なう。

シミュレーション1：2010年度の電源構成での電力供給率の挙動を見る。

シミュレーション2：2015年度の電源構成での電力供給率の挙動を見る。

シミュレーション3：2010年度と2015年度の挙動を同一面で比較する

シミュレーション4：2015年度と電源構成が大きく異なる2000年度と比較する。

#### (1)シミュレーション1：2010年度の電源構成のケース

##### 分析1

図21は、2010年度の電源構成において、首都直下地震が発生し発電用燃料の供給途絶し、電源種ごとに燃料消費が進行し燃料が無くなり、それに伴い供給量の電力供給量が変化する挙動を計算したグラフである。縦軸は、平時の電力供給量を100%とし、供給量の変化を「電力供給率(%)」として表している。図22は、電源構成を反映したものである。LNG火力、石炭火力の順で消え、その後は石油火力、原子力、その他で賄われるのが読み取れる。

表 25 2010年度の電源構成の構成  
東京電力供給区域

2010年度	構成比
LNG	46%
石炭	10%
石油	9%
原子力	28%
その他	7%
	100%

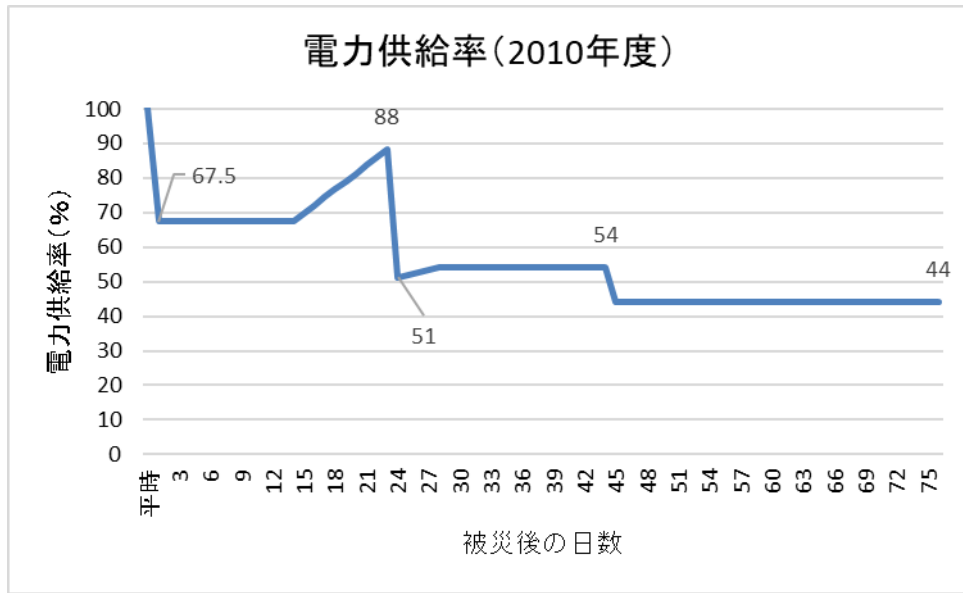


図 21 東京電力供給区域 電力供給率 (2010 年度)

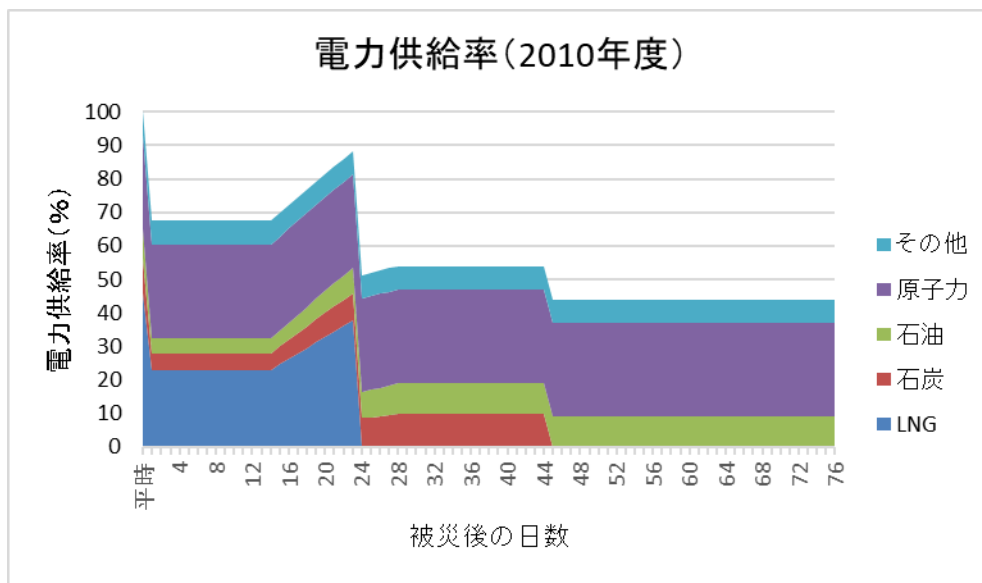


図 22 東京電力供給区域 電力供給率 (電源種反映版) (2010 年度)

(2) シミュレーション 2 : 2015 年度の電源構成のケース

分析 2

図 23 は、2015 年度の電源構成において同様に首都直下地震が発生した時の電力供給量が変化する挙動を計算したグラフである。図 24 は、電源構成を反映したものである。LNG 火力、石炭火力の順で消え、その後は石油火力、「その他」で賄われるのが読み取れる。

表 26 2015 年度の電源構成の構成  
東京電力供給区域

2015年度	構成比
LNG	67%
石炭	18%
石油	6%
原子力	0%
その他	9%
	100%

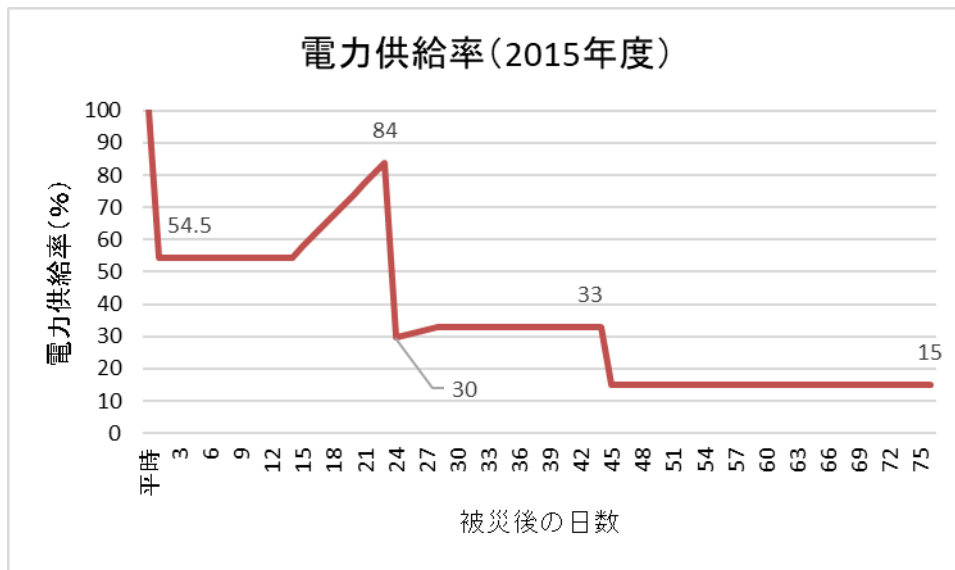


図 23 東京電力供給区域 電力供給率 (2015 年度)

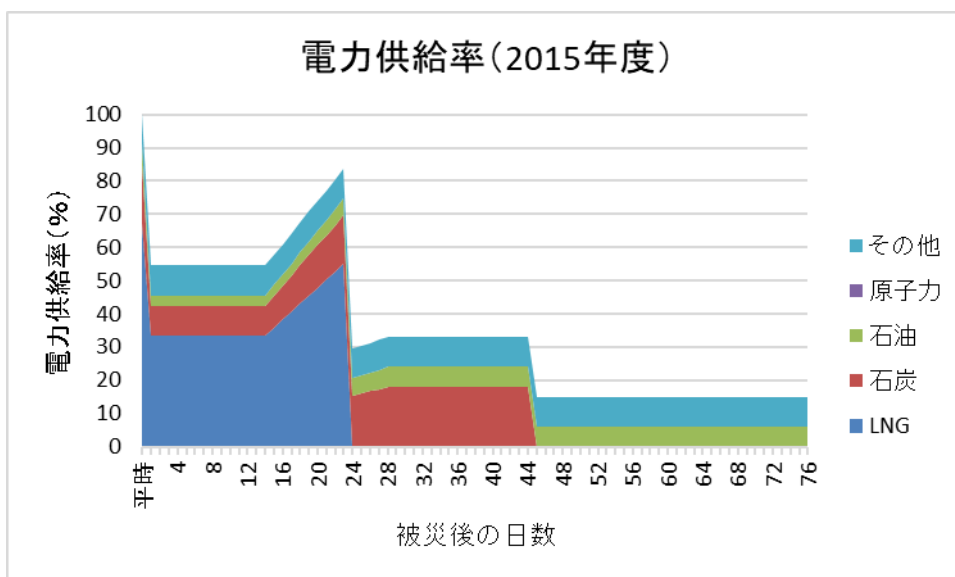


図 24 東京電力供給区域 電力供給率 (電源種反映版) (2015 年度)

### (3) シミュレーション 3 : 2010 年度と 2015 年度を比較

#### 分析 3

図 25 より、2010 年度は被災当日の電力供給率 67.5%、発災後 76 日後 44.0%である。2015 年度は被災当日の電力供給率 54.5%、発災後 76 日後 15.0%である。2010 年度の方が 2015 年度より、電力供給率をより高く維持していること、累積の発電電力量がより多く供給できるという点で電力の安定供給の面で優れていると言える。2010 年度と 2015 年度の挙動では、電源構成に原子力発電が含まれているか否かが大きく影響していることが分かる（表 27,表 28 の比較による）。

表 27 2010 年度の電源構成  
東京電力供給区域

2010年度	構成比
LNG	46%
石炭	10%
石油	9%
原子力	28%
その他	7%
	100%

表 28 2015 年度の電源構成  
東京電力供給区域

2015年度	構成比
LNG	67%
石炭	18%
石油	6%
原子力	0%
その他	9%
	100%

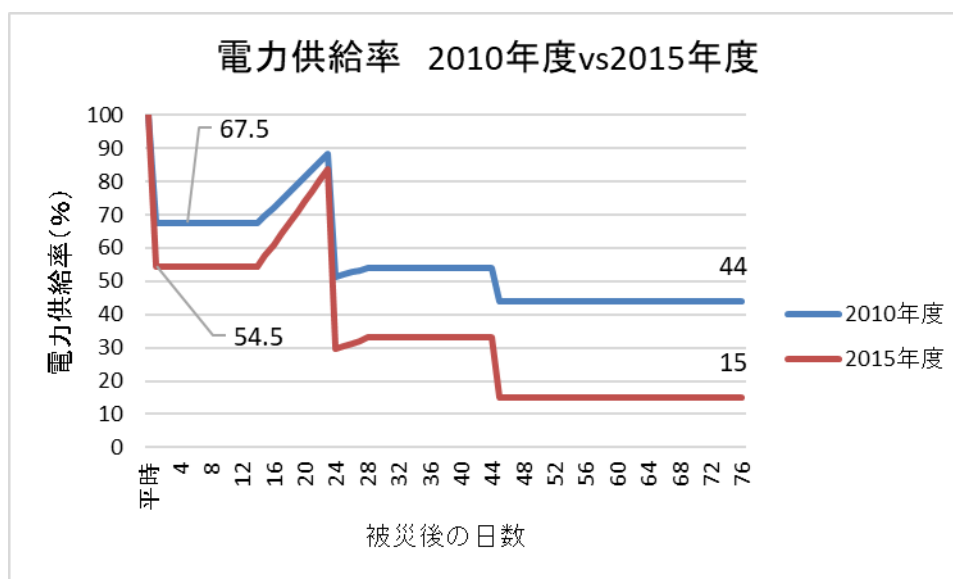


図 25 電力供給率の比較 (2010 年 vs 2015 年度)

#### (4) シミュレーション 4 : 2000 年度と 2015 年度を比較

##### 分析 4

ここでは、電源構成において原子力発電のウェイトが大きな 2000 年度と 2015 年度を比較してみる。表 34 に被災当日と被災後 76 日の電力供給率をまとめた。これにより、原子力発電の割合が大きい 2000 年度が被災当日や被災後 76 日目も電力供給率が高く維持されており電力供給率に優れていると言える。

表 29 2000 年度の電源構成

東京電力供給区域

2020年度	構成比
LNG	58%
石炭	21%
石油	0%
原子力	0%
その他	21%
	100%

表 30 2015 年度の電源構成 (表 28 を再掲)

東京電力供給区域

2015年度	構成比
LNG	67%
石炭	18%
石油	6%
原子力	0%
その他	9%
	100%

表 31 電力供給率 (2000 年度, 2010 年度, 2015 年度)  
東京電力供給区域

電力供給率	被災当日	76日後
2000年度	74%	59%
2010年度	68%	44%
2015年度	55%	15%

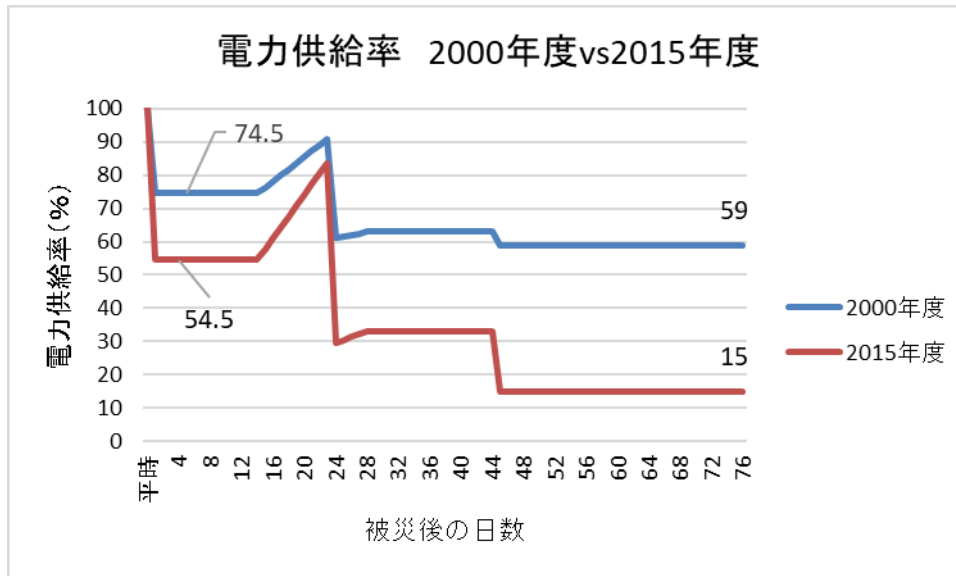


図 26 電力供給率の比較 (2000 年度 vs 2015 年度)

### 仮説 1 の小括

4 つのシミュレーションを通して、火力発電と原子力発電の電源構成比の変化を変化させ、電力供給率を比較することにより、仮説 1 は成立することが明らかになった。

現在、原子力発電所の再稼働は 60Hz エリアでは実績もあるが、50Hz エリア (北海道電力、東北電力、東京電力供給区域) で再稼働の実績はない。原子力の電源構成比の差が、60Hz エリアと 50Hz エリアの電力の安定供給のレベル差を生じさせていることが示唆される (2022 年 9 月末現在)。現在、首都直下地震のケースでいえば、火力発電所は多くが東京湾内に集中している。一方、原子力発電所で首都圏にある<sup>68</sup>のは東海第二 (茨城県, 110 万 kW) 1 箇所であり、残りの柏崎刈羽原子力発電所 (新潟県, 821 万 kW) は日本海側に位置していることから、結果として電源の地理的な分散がなされている<sup>69</sup>。西日本でも同様の傾向がある。仮説 1 は、自然災害による燃料途絶というケースを想定した時の挙動である。現状、「ロシアによるウクライナ侵略 (Russia's Aggression against Ukraine)」の影響で、EU では天然ガスを中心に発電用燃料不足に直面している。EU 諸国の政府は、停電という最悪の事態を回避するために、

<sup>68</sup> 首都圏とは、東京都およびその周辺地域である茨城県・栃木県・群馬県・埼玉県・千葉県・神奈川県・山梨県の 1 都 7 県を指す。

<sup>69</sup> 泉谷 (2014) 「日本における火力発電所の沿岸部偏在と地震被害の問題点」『国際情報研究』日本国際情報学会, pp.3-19。

国民に節電の協力を要請している。このことは、EU だけ<sup>70</sup>ではなく日本でも<sup>71</sup>散見されている。つまり、発電用燃料の供給途絶は発電用燃料の供給不足の一部であるから、一般化すると自然災害だけでなく地政学的な要因等であっても「発電用燃料の供給不足の状況下では、国内民間在庫日数の多い燃料種を用いた発電の比率が高い電源構成が安定供給に優れている」と言える。

## 仮説 2-1 の検証 電源構成と災害時の安定供給 その 1

仮説 2-1 は「火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な電力供給になる」である。

ここでは、シミュレーションに必要な 2 つの電力供給区域の基礎データである火力発電所と原子力発電所の属性を最初に示し、それぞれの電力供給区域で 2010 年度と 2014 年度の電源構成の 2 つのケースで、被災当日からの復旧過程の挙動をシミュレーションする。

2010 年度と 2014 年度の電源構成が復旧過程の挙動の差異として現れる。九州電力供給区域と四国電力供給区域では、規模、立地の分散度等も異なり、属性の影響を見ていく。

### (1) シミュレーション 1：九州電力供給区域の 2010 年度と 2014 年度の比較

#### 分析 1

図 27 より、九州電力供給区域では、2010 年度における被災当日と被災後 28 日の電力供給率は 47% と 88% であり、2014 年度においてはそれぞれ 42% と 82% である。その差異は 5% 程度であるが、2010 年度の電源構成の方が 2014 年度と比較して安定供給の面で優れている。2010 年度の電源構成には、原子力発電が構成比 29.8% あるが、川内原子力発電所が「震度 4、浸水無し」で「運転継続」、玄海原子力発電所は「震度 5、浸水無し」で最短復旧期間が 9 日となっており、このことが被災当日の電力供給率に影響を与えている。

---

<sup>70</sup> 日本経済新聞記事「欧州で節電規制相次ぐ 石炭火力発電も再稼働」

(<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGR040G20U2A800C2000000/>, 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

<sup>71</sup> 日本経済新聞記事「大手電力、家庭・企業に節電呼びかけ 寒波で需給逼迫」

(<https://www.nikkei.com/article/DGXZQODZ1014V0Q1A110C2000000/>, 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

「電力、太陽光・節電頼み 東電管内は逼迫注意報を継続」

(<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUA283H30Y2A620C2000000/>, 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)



基礎データ 1：九州電力供給区域の火力発電所、原子力発電所の属性

表 32 基礎データ 1：九州電力供給区域の火力発電所、原子力発電所の属性

(火力発電所 13 箇所、原子力発電所 2 箇所)

面する海	沿岸・内陸	発電所名	総出力 (万kW)	地域	所在地	所属	最大震度	津波浸水深(m)	最短復旧 期間 (日数)	最長復旧 期間 (日数)
日本海	沿岸・埋立	新小倉発電所	180	九州	福岡県北九州市小倉北区西港町64-1	九州電力	5弱	浸水無し	1	6
瀬戸内海	沿岸・埋立	苅田発電所	36	九州	福岡県京都郡苅田町長浜町1-1	九州電力	5強	浸水無し	9	13
瀬戸内海	沿岸・埋立	豊前発電所	50	九州	福岡県豊前市大字八屋2463-9	九州電力	5強	浸水無し	9	13
日本海	沿岸・埋立	唐津発電所	103.1	九州	佐賀県唐津市二夕子3-213	九州電力	5弱	浸水無し	1	6
日本海	沿岸・埋立	松浦発電所	370	九州	長崎県松浦市志佐町白浜免字開発2091-1	九州電力	4	浸水無し	運転継続	運転継続
瀬戸内海	沿岸・埋立	新大分発電所	282.5	九州	大分県大分市大字青崎4-1	九州電力	6強	2m以上5m未満	111	777
東シナ海	沿岸・埋立	相浦発電所	97.3	九州	長崎県佐世保市光町183-1	九州電力	4	浸水無し	運転継続	運転継続
東シナ海	沿岸・埋立	苓北発電所	140	九州	熊本県天草郡苓北町年柄字苓陽1091	九州電力	5弱	浸水無し	1	6
東シナ海	沿岸・埋立	川内発電所	100	九州	鹿児島県薩摩川内市港町字唐山6110-1	九州電力	5強	浸水無し	9	13
日本海	沿岸・埋立	戸畑共同火力発電所*	104	九州	福岡県北九州市戸畑区大字中原字先の浜46-93	戸畑共同火力	5弱	浸水無し	1	6
瀬戸内海	沿岸・埋立	大分共同発電所*	65.7	九州	大分県大分市大字西ノ洲1	大分共同火力	6強	2m以上5m未満	111	777
日本海	沿岸・埋立	松島火力発電所	100	九州	長崎県西海市大瀬戸町松島内郷2573-3	電源開発	5弱	浸水無し	1	6
日本海	沿岸・埋立	松浦火力発電所	200	九州	長崎県松浦市志佐町白浜免字瀬崎458-1	電源開発	4	浸水無し	運転継続	運転継続
東シナ海	沿岸	玄海原子力発電所	347.8	九州	佐賀県東松浦郡玄海町今村	九州電力	4	浸水無し	運転継続	運転継続
東シナ海	沿岸	川内原子力発電所	178	九州	鹿児島県薩摩川内市久見崎町字片平山1765番地3	九州電力	5強	浸水無し	9	13

注：2010年度と2014年度の発電能力構成は変化なし。

基礎データ 2：電源構成 2010 年度 vs2014 年度

このデータは、各年度における発電所ごとの構成比を計算したものである。  
2014 年度は、原子力発電所は発電設備能力としては存在するものの停止している。

表 33 2010 年度 電源構成

電源種	発電所名	構成比
火力	新大分発電所	10.0%
	大分共同発電所*	2.3%
	新小倉発電所	6.4%
	苅田発電所	1.3%
	豊前発電所	1.8%
	唐津発電所	3.1%
	松浦発電所	13.1%
	相浦発電所	3.1%
	苓北発電所	4.9%
	川内発電所	3.5%
	戸畑共同火力発電所*	3.7%
	松島火力発電所	3.5%
	松浦火力発電所	7.1%
原子力	玄海原子力発電所	17.0%
	川内原子力発電所	12.8%
その他	水力	5.0%
	風力	0.4%
	太陽光	0.0%
	地熱	1.1%
	燃料電池	0.0%
		100.0%

表 34 2014 年度 電源構成

電源種	発電所名	構成比
火力	新大分発電所	14.3%
	大分共同発電所*	3.3%
	新小倉発電所	9.1%
	苅田発電所	1.8%
	豊前発電所	2.5%
	唐津発電所	4.4%
	松浦発電所	18.8%
	相浦発電所	4.4%
	苓北発電所	7.1%
	川内発電所	5.1%
	戸畑共同火力発電所*	5.3%
	松島火力発電所	5.1%
	松浦火力発電所	10.1%
原子力	玄海原子力発電所	0%
	川内原子力発電所	0%
その他	水力	5.9%
	風力	0.6%
	太陽光	0.9%
	地熱	1.2%
	燃料電池	0.0%
		100.0%

注：2010 年度と 2014 年度の発電能力構成は変化なし。

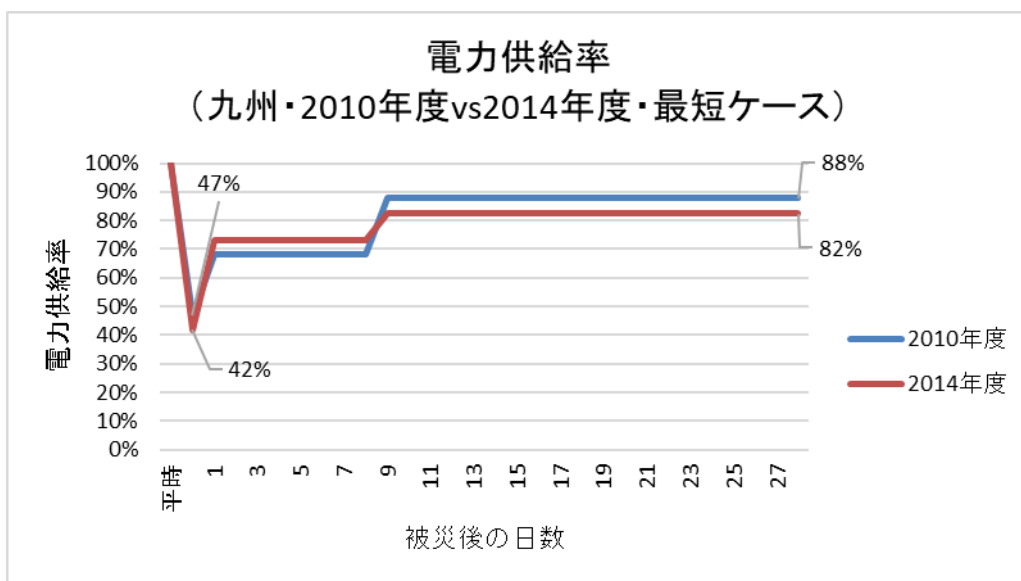


図 27 九州電力供給区域 電力供給率 (2010 年度 vs 2014 年度), 最短ケース

(2) シミュレーション 2 : 四国電力供給区域の 2010 年度と 2014 年度の比較  
分析 2

図 28 より、四国電力供給区域では、2010 年度における被災当日と被災後 333 日の電力供給率は 7.1% と 56% であり、2014 年度においてはそれぞれ 9.3% と 39% である。被災日当日は 2% ほど 2014 年度の方が電力供給率良い。これは、表 37 により水力発電とその他の合計 9.3% が担っている。総じて、63 日以降は、総じて 2010 年度の電源構成の方が 2014 年度と比較して安定供給の面で優れている。

基礎データ 3：四国電力供給区域の火力発電所，原子力発電所の属性

(面する海，立地，所在地，最大震度，津波浸水深(m)，最短復旧期間，最長復旧期間)

表 35 基礎データ 3：四国電力供給区域の火力発電所，原子力発電所の属性

四国電力供給区域（火力発電所 5 箇所，原子力発電所 1 箇所）

面する海	沿岸・内陸	発電所名	総出力 (万kW)	地域	所在地	所属	最大震度	津波浸水深(m)	最短復旧 期間 (日数)	最長復旧 期間 (日数)
瀬戸内海	沿岸・埋立	坂出発電所	138.5	四国	香川県坂出市番の州町2	四国電力	6強	0.01m以上0.3m未満	111	777
瀬戸内海	沿岸・埋立	阿南発電所	90	四国	徳島県阿南市橋町幸野106	四国電力	7	3m以上5m未満	334	777
瀬戸内海	沿岸・埋立	橘湾発電所	70	四国	徳島県阿南市橋町小勝1	四国電力	7	2m以上5m未満	334	777
瀬戸内海	沿岸・埋立	西条発電所	40.6	四国	愛媛県西条市喜多川853	四国電力	7	浸水無し	3	88
瀬戸内海	沿岸・埋立	橘湾火力発電所	210	四国	徳島県阿南市橋町小勝3	電源開発	7	2m以上5m未満	334	777
瀬戸内海	沿岸	伊方発電所	202.2	四国	愛媛県西宇和郡伊方町九町コチワキ3-40-3	四国電力	6強	浸水無し	61	62

注：2010 年度と 2014 年度の発電能力構成は変化なし。

基礎データ 4：電源構成 2010 年度 vs2014 年度

このデータは、各年度における発電所ごとの構成比を計算したものである。  
2014 年度は、原子力発電所は発電設備能力としては存在するものの停止している。

表 36 2010 年度 電源構成

電源種	発電所名	構成比
火力	坂出發電所	16.4%
	阿南発電所	10.7%
	橘湾発電所	8.3%
	橘湾火力発電所	24.9%
	西条発電所	4.8%
原子力	伊方発電所	27.9%
水力	水力	6.6%
その他	風力	0.5%
	太陽光	0.0%
	地熱	0.0%
	燃料電池	0.0%
		100.0%

表 37 2014 年度 電源構成

電源種	発電所名	構成比
火力	坂出發電所	22.9%
	阿南発電所	14.9%
	橘湾発電所	11.6%
	橘湾火力発電所	34.7%
	西条発電所	6.7%
原子力	伊方発電所	0.0%
水力	水力	8.1%
その他	風力	0.7%
	太陽光	0.5%
	地熱	0.0%
	燃料電池	0.0%
		100.0%

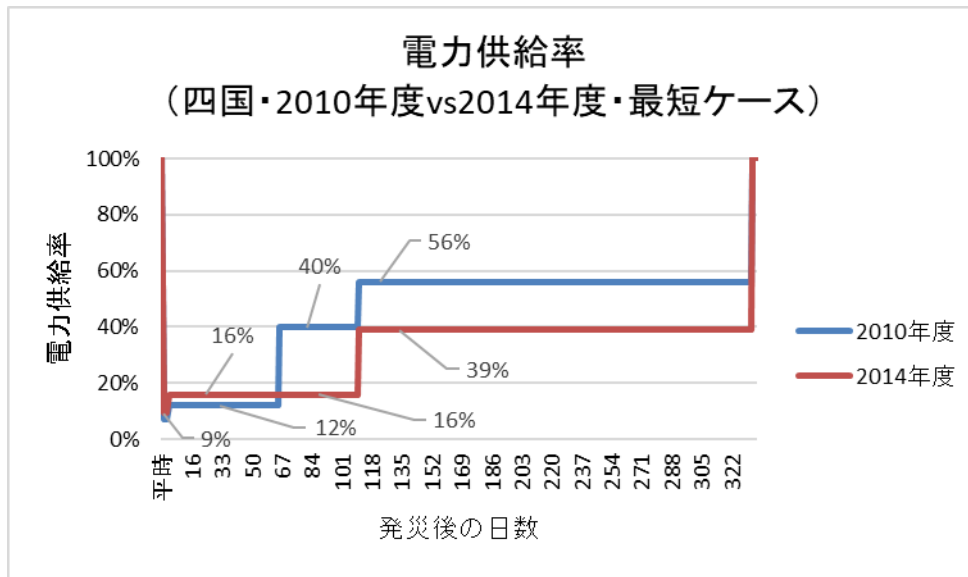


図 28 九州電力供給区域 電力供給率 (2010 年度 vs 2014 年度), 最短ケース  
注 : 2010 年度被災時の電力供給率は 7.1%

### 仮説 2-1 の小括

本シミュレーションは、電源構成を原子力、火力、その他（水力、再生可能エネルギー）の構成で、その他の構成比が同じとすれば、原子力発電所の割合が大きい方が、地震・津波による被災でも電力供給率の落ち込みが少なく、復旧期間が短いので安定性が高いと言える。安定性が高いことは、前出の下図「安定性としての概念」と一致する。

したがって、「仮説 2-1 は成立する」ことが明らかになった。

### 仮説 2-2 の検証 電源構成と災害時の安定供給 その 2

仮説 2-2 は「日本全体と西日本エリアの両ケースにおいても、火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な供給になる」である。

ここでは仮説を検証するために、2つのシミュレーションを行う。

#### シミュレーション 1 :

ここでは、北海道電力、東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、関西電力、中部電力、四国電力、九州電力の 9 つの供給区域を 1 つ集合体として 2010 年度と 2014 年度の電源構成での電力供給率の挙動を見る。

グラフの時間軸（横軸）の幅を 7 日間、28 日間、56 日間、84 日間として個別に示した。(図 29～図 32)

#### シミュレーション 2 :

全国エリアを対象とした検証をシミュレーション1で行い。被害が集中する西日本エリアの検証をシミュレーション2で行う。

### (1)シミュレーション1: 南海トラフ巨大地震の影響 (全国版)

#### 分析1

図29から図32より、被災当日の電力供給率を比較すると、2010年度が58%に対して29%である。東日本大震災発生直後に東京電力エリアでは、事故直前は約5,200万kW（点検等の理由で停止しているものもあるため設備容量全体は7,769万kW）であったが、そのうち約2,100万kWが停止し、約3,100万kWへと約4割減となったとされる<sup>72</sup>。単純に全国エリアにて、これと同等の事態が2010年度の電源構成でも起こることになる。被災28日後（4週間）に、2010年度では87%、2014年度では75%まで回復する。被災84日後（3ヵ月後）に2010年度では95%、2014年度では91%まで回復する。

2010年度と2014年度の比較において、「火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど復旧時間が長い。すなわち、不安定な供給になる」と言える。

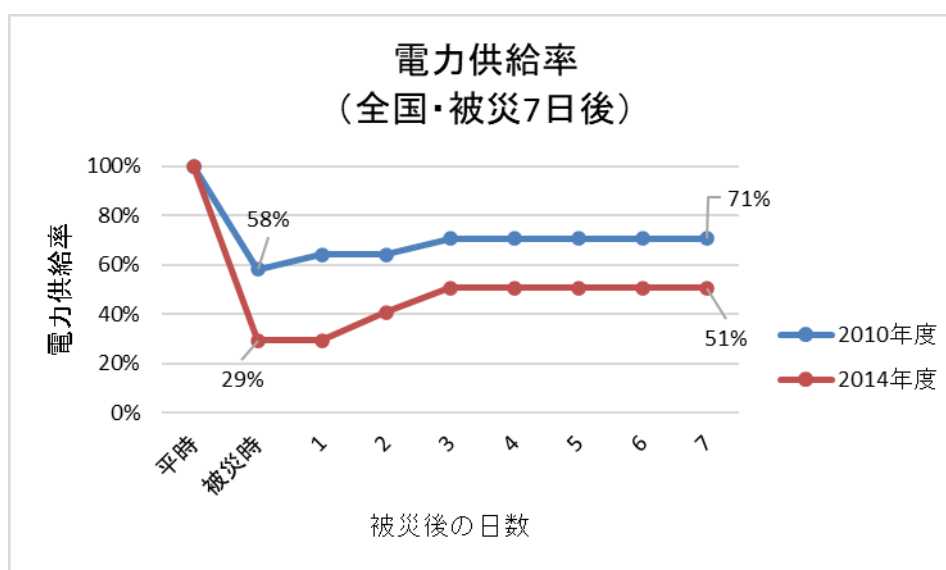


図29 全国版電力供給率 (被災7日後, 2010年度 vs 2014年度)

<sup>72</sup> 参議院 経済産業委員会調査室「東日本大震災と電力需給をめぐる課題」p.131。  
 ([https://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou\\_chousa/backnumber/2011pdf/20110601131.pdf](https://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2011pdf/20110601131.pdf), 最終閲覧 2022年10月19日)



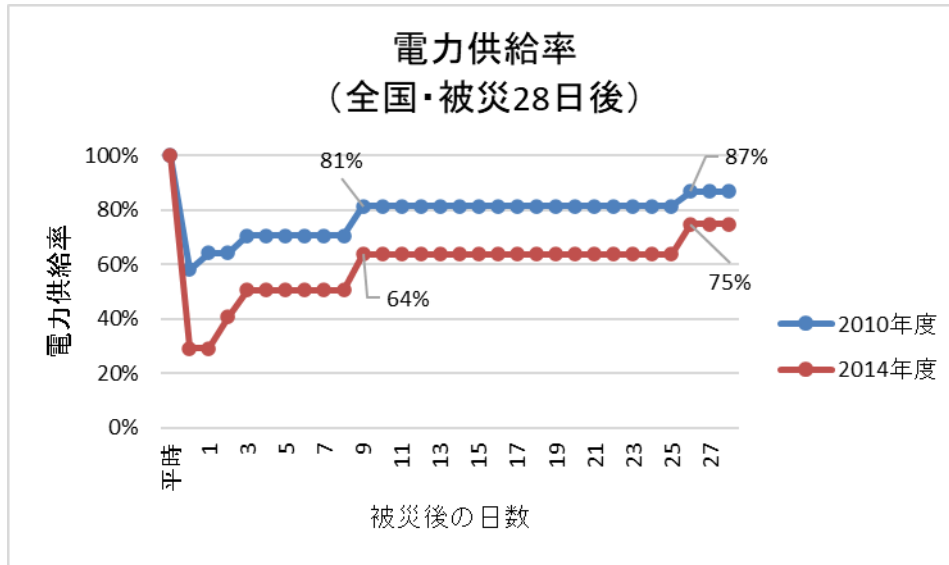


図 30 全国版電力供給率（被災 28 日後，2010 年度 vs 2014 年度）

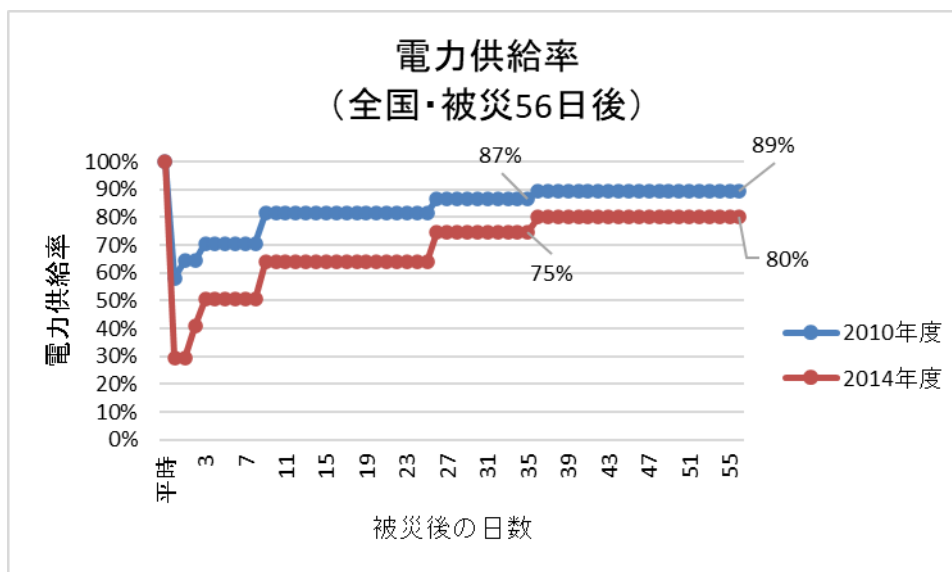


図 20 全国版電力供給率（被災 56 日後，2010 年度 vs 2014 年度）

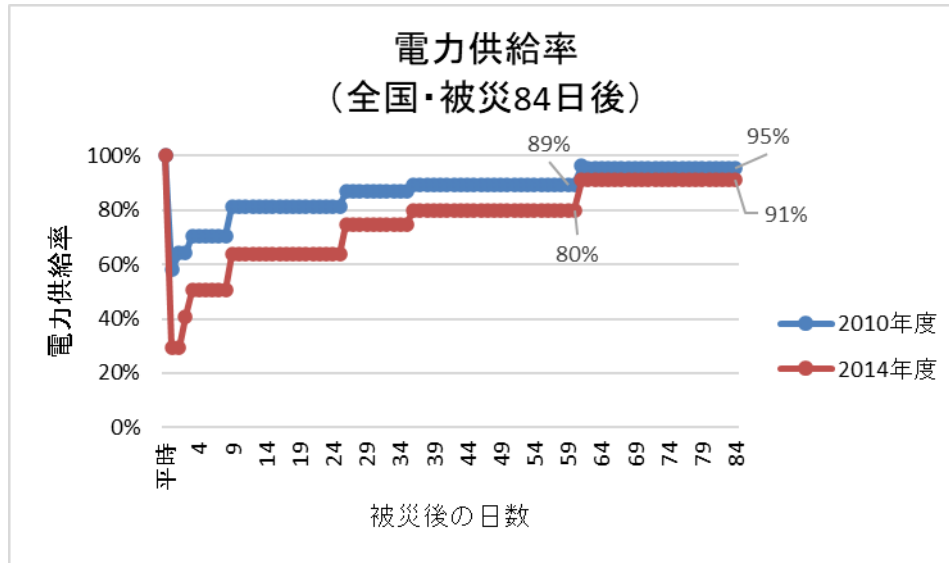


図 32 全国版電力供給率 (被災 84 日後, 2010 年度 vs 2014 年度)

## (2) シミュレーション 2 : 南海トラフ巨大地震の影響 (60Hz エリア版)

ここでは、被害が集中することが予想される中部電力、北陸電力、関西電力、中部電力、四国電力、九州電力の 6 つの供給区域を 1 つ集合体として、2010 年度と 2014 年度の電源構成での電力供給率の挙動を見る。

### 分析 2

- このシミュレーションでは、図 33、図 34 のように被災直後の電力供給率は 2010 年度 10%、2014 年度 6%となっている。仮に、この状況下であれば、電力供給区域によっては、ブラックアウト<sup>73</sup>になることが十分に考えられる。2018 年 9 月 6 日 3 時 7 分、北海道胆振東部を最大震度 7 の地震が襲い、17 分後の 3 時 25 分、日本で初めてとなるエリア全域におよぶ大規模停電 (ブラックアウト) が発生してした。このときは地震動のみで、津波浸水は無かったケースである。このケースと比べると、本シミュレーションでは、津波浸水有りのケースも多くことから、被災当日の電力供給率が大幅に低下し、復旧期間も長くなっている。
- 図 36 より、被災 56 日後の電力供給率は 2010 年度 68%、2014 年度 59%となっている。図 37 より、被災 84 日後 (3 ヶ月) の電力供給率は 2010 年度 86%、2014 年度 82%となり、80%台を回復する。図 38 より、168 日後 (半年) の電力供給率は 2010 年度 90%、2014 年度 87%となり、大よそ 90%台に達することになる。
- 図 39 より、被災 28 日後の電力供給率を全国エリアと 60Hz エリアを比較したものである。電力供給率は、それぞれ 87%と 60%であることから、制限はあるものの周波数変換所を介して 50Hz エリアから 60Hz エリアへ電力融通が期待できる。

<sup>73</sup> ブラックアウトとは、大手電力会社の管轄する地域のすべてで停電が起こる現象 (全域停電) のことをいう。大きな自然災害にともなって大規模停電が発生することはこれまでもあったが、北海道のブラックアウトは日本で初めてのケースである。

・図 40 は、図 39 に一番厳しい状況におかれている四国電力供給区域を加えたグラフである。被災 61 日後からは電力供給率 86%まで回復することから、制限はあるものの四国供給区域への電力融通が可能になると考えられる。

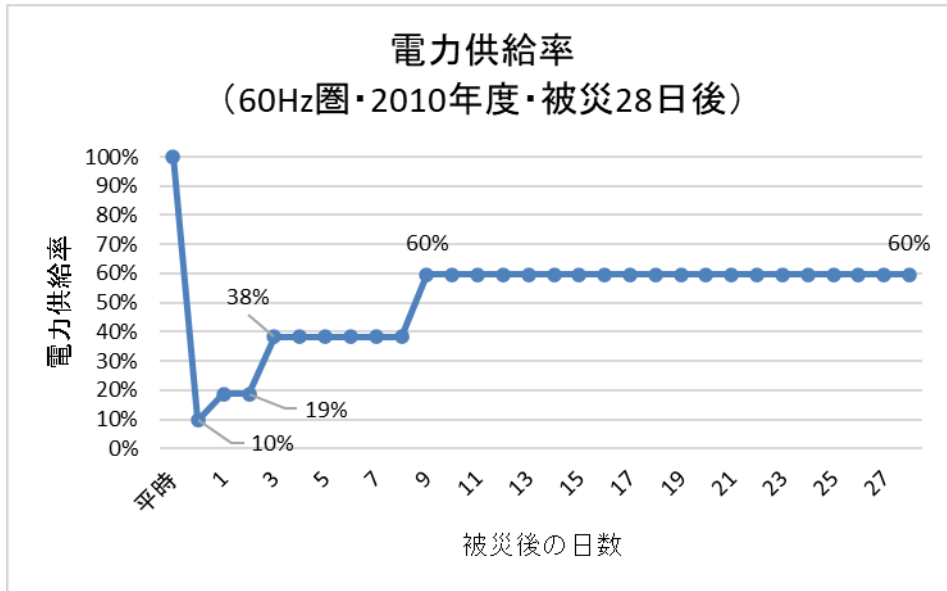


図 33 60Hz エリア電力供給率 (被災 28 日後, 2010 年度)

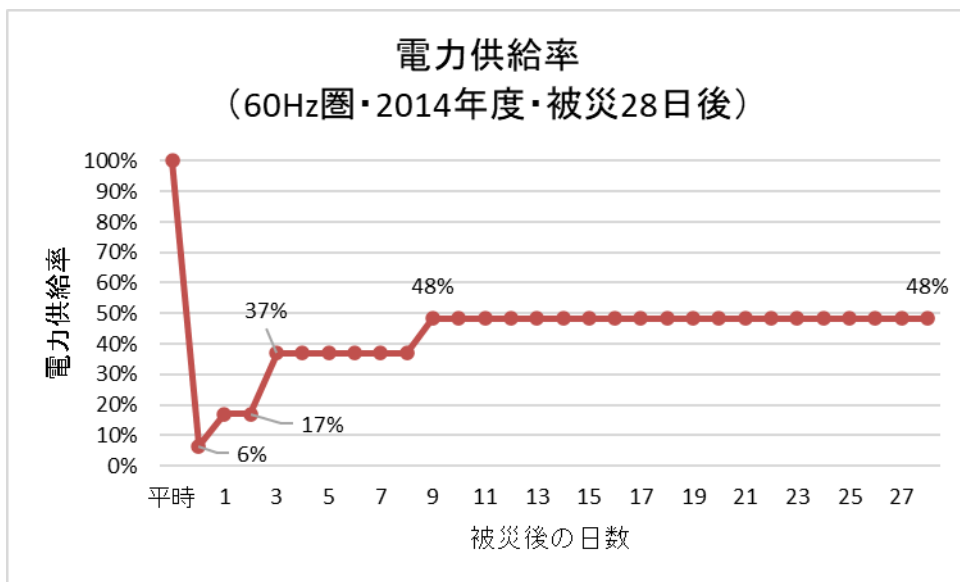


図 34 60Hz エリア電力供給率 (被災 28 日後, 2014 年度)

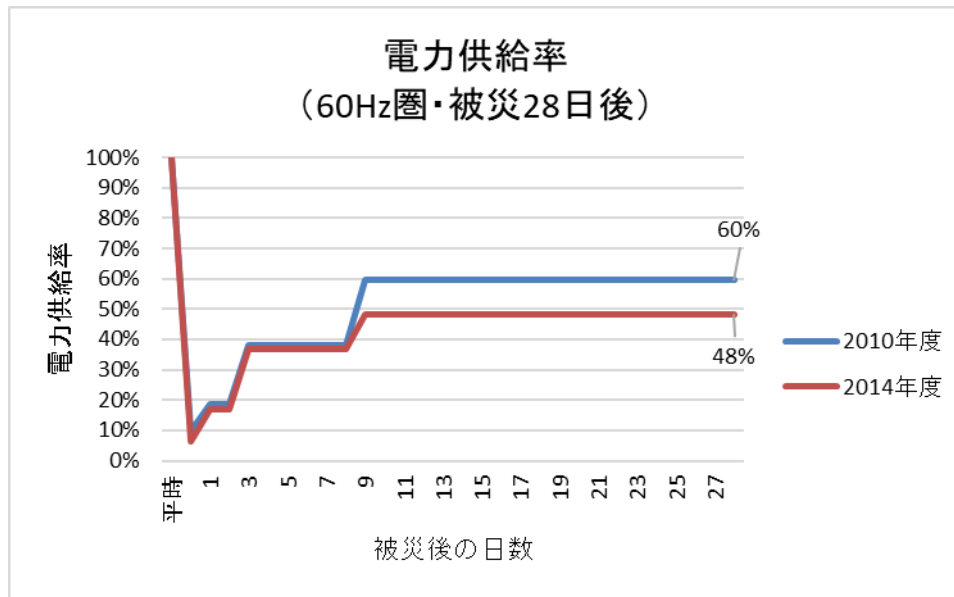


図 35 60Hz エリア電力供給率 (被災 28 日後, 2010 年度 vs 2014 年度)

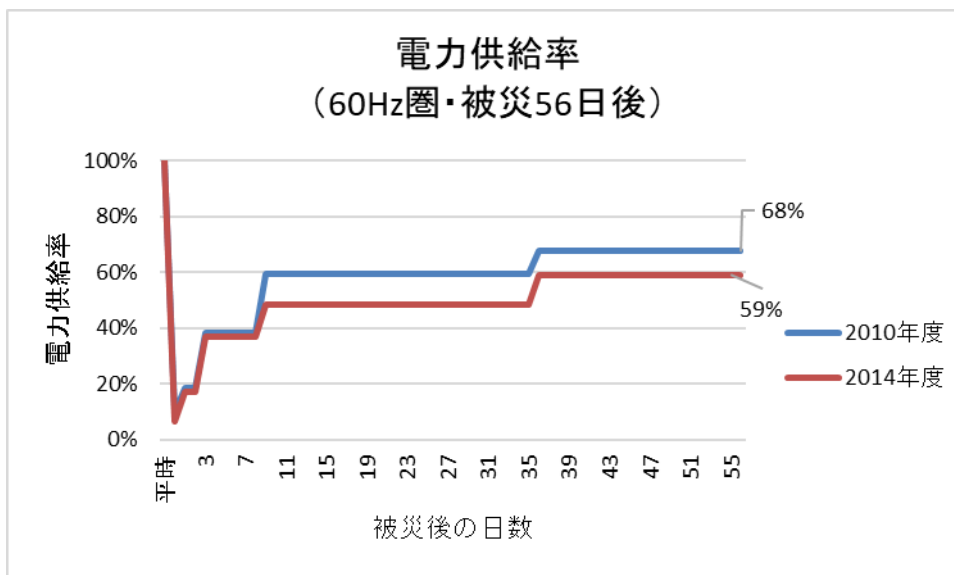


図 36 60Hz エリア電力供給率 (被災 56 日後, 2010 年度 vs 2014 年度)

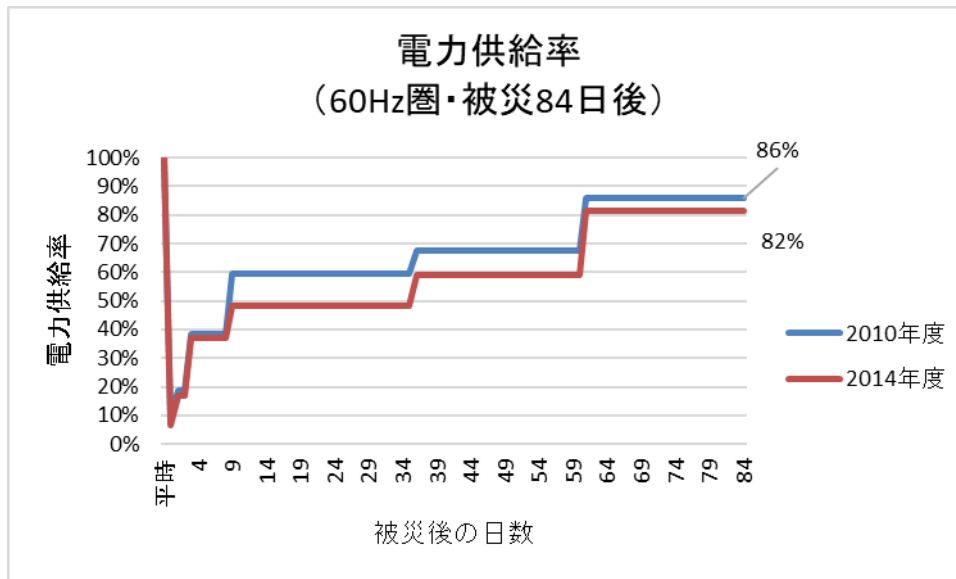


図 37 60Hz エリア電力供給率 (被災 84 日後, 2010 年度 vs 2014 年度)

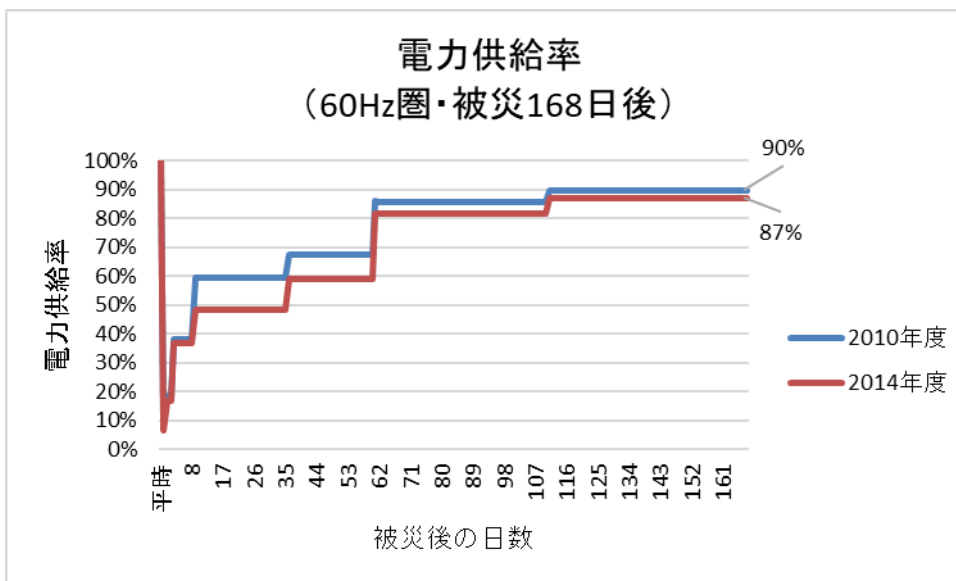


図 38 60Hz エリア電力供給率 (被災 168 日後, 2010 年度 vs 2014 年度)

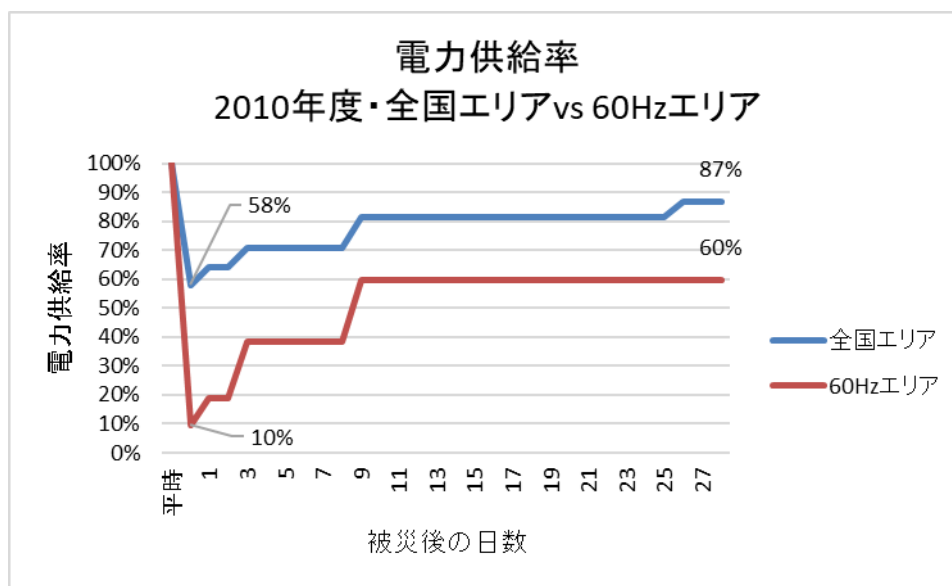


図 39 電力供給率 (2010 年, 全国エリア vs 60Hz エリア)

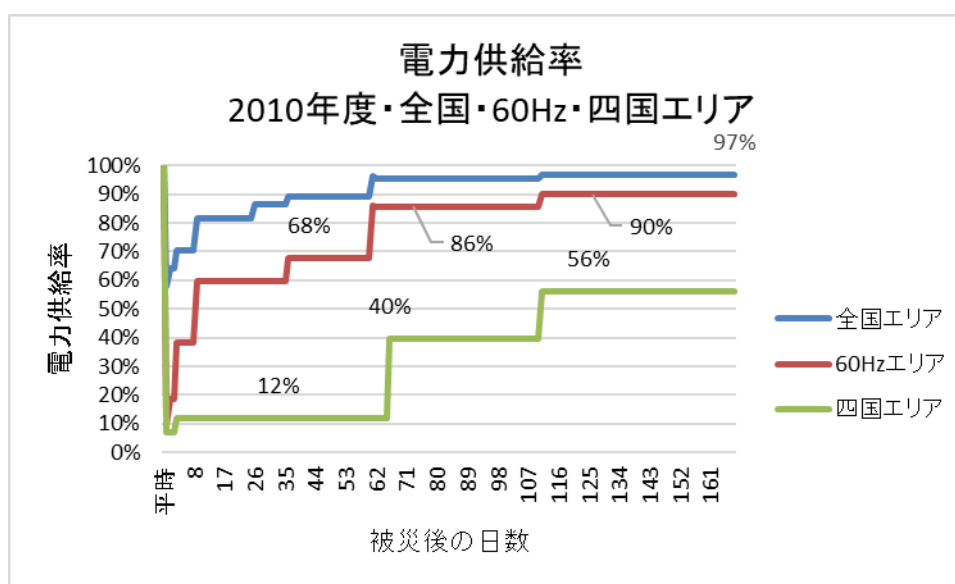


図 40 電力供給率 (2010 年, 全国 vs 60Hz エリア vs 四国エリア)

仮説 2-1 及び 2-2 の小括 「安定供給に資する安定性と安全性の向上」の 카테고리

仮説 2-1 の検証では、九州電力供給区域と四国電力供給区域の被災当日からの電力供給率の復旧過程の挙動を見た。仮説 2-2 の検証では、地理的範囲を拡大し全国エリアの挙動を見たうえで、被害の大きいことが予想される 60Hz エリアの挙動を分析した。これらの分析結果により、「日本全体と西日本エリアの両ケースにおいても、火力発電所は埋立地に立地していることから、地震動と津波被害の影響が大きい。したがって、電源構成において火力発電所の比率が高ければ高いほど、復旧時間が長い。すなわち、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、不安定な供給になる」は成立する。

### 仮説3の検証 電源構成とCO<sub>2</sub>排出量

仮説3は、太陽光発電と風力発電の2つに分けて仮説を設ける。

仮説3-1は「太陽光発電を2020年度実績(791億kWh)から2030年度計画値(1308億kWh)へ168%増やすことは、山手線一杯の面積(58km<sup>2</sup>)の10倍以上の土地の面積を必要とするため、実現性は低い」とする。

仮説3-2は「風力発電を2020年度実績(90億kWh)から2030年度計画値(467億kWh)へ519%増やすことは、東京湾の面積(1380km<sup>2</sup>)80%以上の土地の面積が必要のため、実現性は低い。」とする。

表39より、発電電力量は2010年度、2013年度、2020年度と減少しており、2030年度も2020年度比で約93%となっている。次に、2020年度から2030年度にかけて増加する電源ごとの増減は、表39の上から順に、原子力(+1667億kWh, 530%増)、石炭(-1327億kWh, 57%減)、LNG(-2031億kWh, 48%減)、石油等(-449億kWh, 29%減)、水力(+243億kWh, 136%)、太陽光(+517億kWh, 165%増)、風力(+377億kWh, 519%増)、地熱(+63億kWh, 310%増)、バイオマス(+179億kWh, 162%)、水素・アンモニア(+93億kWh)

#### 仮説3-1の検証

仮説3-1「太陽光発電を2020年度実績(791億kWh)から2030年度計画値(1308億kWh)へ168%増やすことは、山手線一杯の面積(58km<sup>2</sup>)が10倍以上の土地の面積を必要とするため、実現性は低い」である。

ここでは、太陽光発電と火力発電のエネルギー密度(kW/m<sup>2</sup>)の違いを比較しながら、土地の面積の視点で試算を進めて行く。実在の関西電力に属する堺港発電所(LNG火力発電所)と堺太陽光発電所の実数をもとに、純増分517(億kWh/年)を太陽光発電で賄うケースの計算を行う。

#### 計算1:

純増分517(億kWh/年)を堺太陽光発電所(1100万kWh/年)で賄うには、何箇所分が必要になるかを求める。

$$\begin{aligned} & 517 \text{ (億kWh/年)} \div 1100 \text{ (万kWh/年)} \\ & = 517 \times 10^8 \text{ (kWh/年)} \div 1100 \times 10^4 \text{ (kWh/年)} = 4,700 \text{ (箇所)} \cdots \text{計算結果1} \\ & \text{つまり、堺太陽光発電所換算で約4700箇所を新設すれば実現できることになる。} \end{aligned}$$

#### 計算2

堺太陽光発電所4700箇所分の土地の面積(km<sup>2</sup>)を求める。

$$\begin{aligned} & \text{表38より、堺太陽光発電所の土地の面積は21(万m}^2\text{)であるので} \\ & 21 \text{ (万m}^2\text{)} \times 4700 \text{ (箇所)} \\ & = 98,700 \text{ (万m}^2\text{)} = 987 \text{ (km}^2\text{)} \cdots \text{計算結果2} \end{aligned}$$

$$\text{補足: } 1 \text{ (km}^2\text{)} = 1000 \text{ (m)} \times 1000 \text{ (m)} = 1,000,000 \text{ (m}^2\text{)} = 1 \text{ (百万m}^2\text{)}$$

### 計算 3

山手線一杯の面積と比較する。

山手線一杯の面積は約 58 (km<sup>2</sup>), 517 (億 kWh) を太陽光発電で発電するのに必要な面積は,  
 $987 \text{ (km}^2) \div 58 \text{ (km}^2) = 17.0 \text{ (杯分)}$ ・・・計算結果 3

### 計算 4

東京都の面積と比較する。

比較の補助線として、東京都の面積と比較する。

東京都の面積は約 2,194 (km<sup>2</sup>), 517 (億 kWh) を太陽光発電で発電するのに必要な面積は,  
 $987 \text{ (km}^2) \div 2,194 \text{ (km}^2) = 45.0\%$ ・・・計算結果 4

### 分析 1

517 (億 kWh) を太陽光発電所で賄うには、山手線一杯の面積の約 17 杯分、東京都の面積の約 45% を必要とすることになる。このように土地の面積という視点から見ると、太陽光発電で純増分 517 (億 kWh) を新設で賄うことは容易なことではないと考える。

したがって、「太陽光発電を 2020 年度実績 (791 億 kWh) から 2030 年度計画値 (1308 億 kWh) へ 517 億 kWh (168%) 増やすことは、山手線一杯の面積 (58km<sup>2</sup>) の 10 倍以上の土地の面積を必要とするため、実現性は低い」は成立する。

前出にあるように、日本の国土の地形を山地、丘陵地、台地、低地、内水域等に分けて地形別の面積を見ると、山地と丘陵地を合わせると 7 割になり、山が多く平地が少ない国土であること。日本の「森林率」は 67% であり、日本は世界各国のなかでも森林に恵まれた国土であること。太陽光発電に関しては、既に日本は主要国の中で最大の導入量である。国土面積当たりの太陽光の発電量は「ドイツ：126kWh/km<sup>2</sup>」に対して「日本：147kWh/km<sup>2</sup>」、平地面積当たりでは、「ドイツ：184kWh/km<sup>2</sup>」に対して「日本：426kWh/km<sup>2</sup>」(ドイツ：日本=10:23) となっているという事実がある。そもそも国土が狭く平地が少ない日本に、どこまでエネルギー効率の悪い再生可能エネルギーのために平地を割くのか、恵まれた森林資源を減少させていいのか、十分な議論が必要である。

### 仮説 3-2 の検証

仮説 3-2 は「風力発電を 2020 年度実績 (90 億 kWh) から 2030 年度計画値 (467 億 kWh) へ 519% 増やすことは、東京湾の面積 (1380km<sup>2</sup>) 80% 以上の土地の面積が必要なため、実現性は低い」である。

ここでも、風力発電と火力発電のエネルギー密度 (kW/m<sup>2</sup>) の違いを比較しながら、土地の面積の視点で試算を進めて行く。風力発電所への置換えの計算のために参考とする数値 (絶対値) がないので、図 41 にある「100 万 kW 級原子力発電所 (面積 0.6km<sup>2</sup>) が 1 年間発電した分と同じ発電電力量を得るのに必要な面積は、太陽光発電が約 58km<sup>2</sup>, 風力発電が 214km<sup>2</sup>。(1:97:356)」という関係式を用いて計算する。

先ずは、平均的な 100 万 kW 級原子力発電所 (面積 0.6km<sup>2</sup>) を設備利用率 75% で 1 年間発電した発電電力量 (kWh) を計算し、本計算もモデルとする。



#### 計算 5 :

本モデルの原子力発電所の年間発電電力量は  
 $1 \times 10^6 \text{ (kW)} \times 24 \text{ (h/day)} \times 365 \text{ (day)} \times 0.75$   
 $= 65.7 \times 10^8 \text{ (kWh)} = 65.7 \text{ (億 kWh/年)} \dots \text{計算結果 5}$

「平均的な 100 万 kW 級原子力発電所が 1 年間発電した発電電力量は 65.7 (億 kWh)」として、以下の計算を進める。

#### 計算 6 :

純増分 377 (億 kWh) を風力発電で賄うための土地の面積計算を 3 段階で行う。

(a) 原子力発電所で賄うには、

$$377 \text{ (億 kWh)} \div 65.7 \text{ (億 kWh)} = 5.74$$

必要な面積は、 $0.6 \text{ (km}^2) \times 5.74 = 3.44 \text{ (km}^2)$

(b) 太陽光発電では、原子力発電の 97 倍なので

$$3.44 \text{ (km}^2) \times 97 \text{ 倍} = 334.0 \text{ (km}^2) \text{ の面積が必要になる。}$$

(c) 風力発電では、太陽光発電の 3.4 倍なので

$$334.0 \text{ (km}^2) \times 3.4 \text{ 倍} = 1,136 \text{ (km}^2) = \dots \text{計算結果 6}$$

#### 計算 7 :

東京湾の面積は約 1,380km<sup>2</sup>、計算結果 6 (1,161km<sup>2</sup>) であるから

$$1,136 \text{ (km}^2) \div 1,380 \text{ (km}^2) = \text{約 } 82\% \dots \text{計算結果 7}$$

#### 分析 2

これまでは、陸上風力発電が多かったが、図 41 にあるように必要な面積は非常に広いこのこともあり、今後は洋上風力発電が主流になっていく。この点から海域での比較を試みた。東京湾の約 82% の面積は、僅かな面積の海域とは言えない。ちなみに大阪湾の約 78% (=1,136/1,450) となる<sup>74</sup>。海域の面積という視点のみから見ても、風力発電で 385 (億 kWh) を純増することは容易ではないと考える。

したがって、「風力発電を 2020 年度実績 (90 億 kWh) から 2030 年度計画値 (467 億 kWh) へ 519% 増やすことは、東京湾の面積 (1380km<sup>2</sup>) 80% 以上の土地の面積が必要なため、実現性は低い」は成立する。

<sup>74</sup> 三大湾の水面面積は、東京湾 1,380km<sup>2</sup>、大阪湾 1,450 km<sup>2</sup>、伊勢湾 2,342 km<sup>2</sup> である。

([http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/intro/detail/osakawan/detail\\_p02-2.aspx](http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/intro/detail/osakawan/detail_p02-2.aspx), 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

表 38 太陽光発電所と火力発電所のエネルギー密度の比較

	設備容量 kW	発電電力量 kWh/年	面積 m <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>
関西電力 堺太陽光発電所	1万	約1100万	約21万	0.048	52
関西電力 堺港発電所 (LNG火力)	200万	約140億	約10万	20	14万
LNG火力/太陽光	200倍	1273倍	48%	420倍	2672倍

原子力発電1年間分と同じ発電量を得るために必要な面積

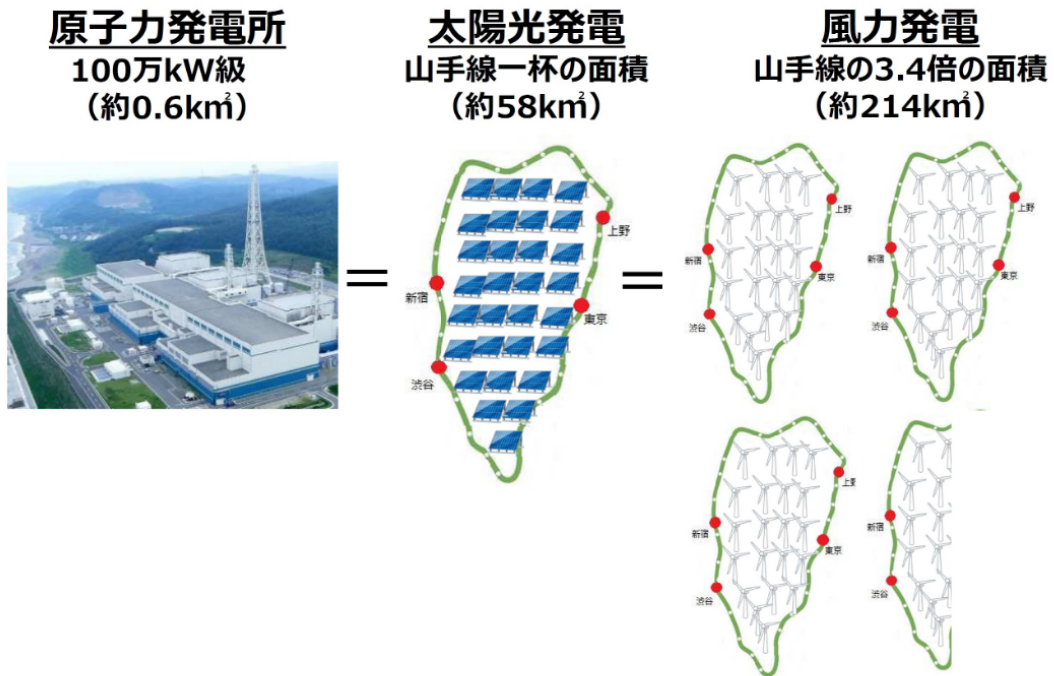


図 41 原子力発電 1 年間分と同じ発電量を得るために必要な面積

出所：資源エネルギー庁，記事「原発のコストを考える」による。

(<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/nuclearcost.html>，最終閲覧 2022 年 10 月 19 日)

補足説明：原子力発電：太陽光発電：風力発電 = 1 : 97 : 356

表 39 電源構成の推移と 2030 年度の電源構成 (表 24 を再掲)

発電電力量 (億kWh)	2010年度	2013年度	2020年度	2030年度 原子力:22% 再エネ:36%	2020年度比	2010年度比
原子力	2,882	93	388	2,055	530%	71%
石炭	3,199	3,571	3,102	1,775	57%	55%
LNG	3,339	4,435	3,899	1,868	48%	56%
石油等	983	1,567	636	187	29%	19%
水力	838	794	784	1,027	131%	123%
太陽光	35	129	791	1,308	165%	3736%
風力	40	52	90	467	519%	1168%
地熱	26	26	30	93	311%	359%
バイオマス	152	178	288	467	162%	307%
水素・アンモニア	0	0	0	93		
縦計	11,494	10,845	10,008	9,340	93%	81%
最終電力消費 (億kWh)	10,354	9,896	9,135	8,640		

表 40 電源構成の推移 (表 39 の構成比表示)

電源構成	2010年度	2013年度	2020年度	2030年度 原子力: 22% 再エネ:36%
原子力	25.1%	0.9%	3.9%	22.0%
石炭	27.8%	32.9%	31.0%	19.0%
LNG	29.0%	40.9%	39.0%	20.0%
石油等	8.6%	14.4%	6.4%	2.0%
水力	7.3%	7.3%	7.8%	11.0%
太陽光	0.3%	1.2%	7.9%	14.0%
風力	0.3%	0.5%	0.9%	5.0%
地熱	0.2%	0.2%	0.3%	1.0%
バイオマス	1.3%	1.6%	2.9%	5.0%
水素・アンモニア	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%
縦計	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

### 参考 1：原子力発電の現状と再稼働による総発電電力量の推計

原子力発電の 2010 年度の発電設備能力は 48,960 (千 kW)、発電電力量は 2,882 (億 kWh) であり、2020 年度の発電設備能力は 33,083 (千 kW)、発電電力量は 388 (億 kWh) である。発電設備能力 (kW) は 2010 年度比で 2020 年度は 67.6%となっている。発電設備能力が減った背景は、東日本大震災での福島第一原子力発電所事故後に複数の原子力発電所の運転終了、廃止に至ったためである。

### 計算 8：

仮に、2020 年度の使用可能な発電設備能力 (33,083 千 kW) で 2010 年度の設備利用率<sup>75</sup>67.3%で発電すると、

$$33,083 \text{ (千 kW)} \times 24 \text{ (h/day)} \times 365 \text{ (day)} \times (\text{設備利用率} : 67.3\%) \\ = 1.950 \times 10^{11} \text{ (kWh)} = 1950 \text{ (億 kWh)} \cdots \text{計算結果 8}$$

1,950 (億 kWh) は賄えることになる。しかし、2030 年度の目標値 2,091 (億 kWh) に対しては 6.8%不足している。1995 年～2001 年の設備利用率の実績は 80%以上であるから、74.1% (=67.3+6.8) 以上の設備利用率を達成することは不可能ではない。

と言える。計算結果 8 を再計算すると、2030 年度の目標値 2,091 (億 kWh) は可能となる。

$$33,083 \text{ (千 kW)} \times 24 \text{ (h/day)} \times 365 \text{ (day)} \times (\text{設備利用率} : 74.1\%) \\ = 2147 \text{ (億 kWh)} \cdots \text{計算結果 8'} \text{ [} > 2091 \text{ (億 kWh)} \text{ ]}$$

### 参考 2：2030 年度の CO<sub>2</sub> 削減した統計データからのイメージ

日本の 2030 年度目標は、2013 年度比で CO<sub>2</sub> 排出量 43%の削減である。入手が容易なエネルギー起源の CO<sub>2</sub> 排出量を基準に調査する。2013 年度のエネルギー起源の CO<sub>2</sub> 排出量は 1,237.2 (百万トン-CO<sub>2</sub>) である。これの 43%減の数値は 705.2 (百万トン-CO<sub>2</sub>) である。入手可能なデータは、エネルギー起源の CO<sub>2</sub> 排出量の 1965 年度 387.0 (百万トン-CO<sub>2</sub>) と 1970 年度 758.8 (百万トン-CO<sub>2</sub>) の 2 点のみしかないことから、直線補完で計算した。2030 年度目標値 705.2 (百万トン-CO<sub>2</sub>) は、図 42 より 1969 年と 1970 年度の間にあることが分かる。

つまり、エネルギー起源の CO<sub>2</sub> 排出量を基準にすると約 52 年前の日本の姿ということになる。1970 年度のエネルギーに関係する主要な数値を見ると、CO<sub>2</sub> 排出量が 758.8 (百万トン-CO<sub>2</sub>) で 2013 年度比 61% (削減は 39%) である。発電電力量は 2013 年度比で 33%、一次エネルギーは 61%、運輸部門は 43%、ガソリン車の台数は 25%、軽油車の台数は 20%である。2030 年度の目指す姿が、2013 年度比のガソリン車、軽油車の台数が、それぞれ四分の一、五分の一という姿は、今後の省エネ性能が革新的に向上したとしてもイメージしがたい。

<sup>75</sup> 日本原子力研究開発機構、ATOMICA「日本の原子力発電所の 1975 年度から 2010 年度までの認可出力および設備利用率の年次推移」による。(https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\_detail\_02-05-02-04.html, 最終閲覧 2022 年 10 月 12 日)

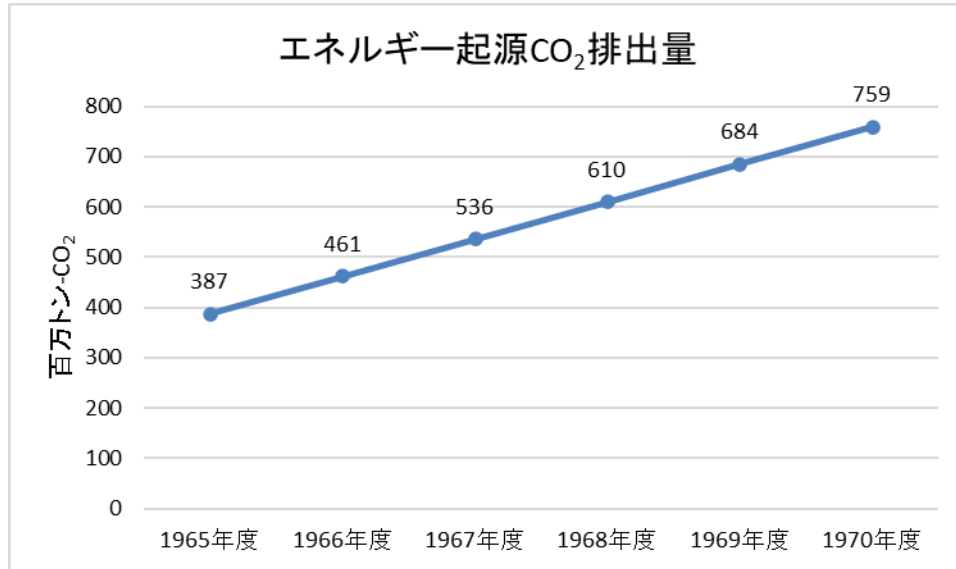


図 42 エネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量の直線補完（1965 年度～1970 年度）

表 41 1970 年度のエネルギー指標から見た日本の姿

	エネルギー起源 排出量 : 百万トン- CO <sub>2</sub>	発電電力 量 : 百万kWh	一次エネ ルギー : 10 <sup>10</sup> カロ リー	運輸部門 : 10 <sup>10</sup> カロ リー	ガソリン車 : 千台	軽油車 : 千台
2013年度	1237.2	1,090,482	517,496	79,059	66,347	5,997
1970年度	758.8	359,538	319,708	34,273	16,724	1,261
2013年度比	61%	33%	62%	43%	25%	21%

## 第 2 節 本論文の研究結果

### 仮説検証のまとめ

仮説 1 の検証では「国内民間在庫数」に着眼した。発電燃料の途絶（供給不足も含む）を想定した場合は、国内民間在庫日数の短い LNG 火力発電に過度に依存することは安定供給の面で脆弱である判明した。逆にいうと、燃料供給途絶のリスク回避には国内民間在庫日数の長い原子力が有効であることが明らかになった。発電用燃料の供給途絶は発電用燃料の供給不足の一部であるから、一般化すると自然災害だけでなく地政学的な要因等であっても「発電用燃料の供給不足の状況下では、国内民間在庫日数の多い燃料種を用いた発電の比率が高い電源構成が安定供給に優れている。再生可能エネルギーも発電用燃料が不要という点で国内民間在庫日数が無限大として扱うことができる。

仮説 2 の検証では「火力発電所は地盤が脆弱で標高が低い埋立地に立地している」ことに注目した。九州電力エリア、四国電力エリア、全国エリア、西日本（60Hz）エリア別にシミュレーションを行い、その結果、火力発電の電源比率が高ければ高いほど、電力供給率の落込みが大きく復旧期間が長いことが判明した。逆に、原子力発電所の割合が大きい方が、地震・津波による被災による電力供給率の落込みが少なく、復旧期間が短いので安定性が高いことが明らかになった。

仮説3の検証では、太陽光発電と風力発電のエネルギー密度(kW/m<sup>2</sup>)と設備利用率が低いことから、火力発電の電源構成比を小さくし、その分を太陽光発電、風力発電に置換える場合に必要な土地の面積に注目した。図41にある原子力発電所1年間分と同じ発電量を得るために必要な面積の比率「原子力：太陽光発電：風力発電=1：97：356」の関係性を用いて計算し実在の面積と比較した。「太陽光発電を2020年度実績(791億kWh)から2030年度計画値(1308億kWh)へ517億kWh(168%)増やす」ためには、山手線一杯の面積の約17杯分、東京都の面積の約45%を必要とすることになり、「風力発電を2020年度実績(90億kWh)から2030年度計画値(467億kWh)へ377億kWh(519%)増やす」ためには、東京湾の面積(1380km<sup>2</sup>)80%以上の面積が必要となることが明らかになった。日本は国土が狭く平地が少ないことから太陽光発電には制限が多い。また、日本は長い海岸線と広い領海を有するものの、風力発電の適地となると条件が厳しく、自ずと制限があることを明らかにした。

参考1として「原子力発電の現状と再稼働による総発電電力量の推計」を行った。この推計は、2010年度の発電設備能力48,960(千kW)、発電電力量2,882(億kWh)に対し、2020年度の発電設備能力33,083(千kW)(2010年度比：67.6%)、発電電力量388(億kWh)(2010年度比：13.5%)まで縮小している。現有の発電設備能力で、2030年度計画値(2,091億kWh)の発電電力量を確保できるかを試算したものである。計算結果は、1995年～2001年の設備利用率の実績は80%以上であるから、現有の発電設備能力を使い、設備利用率74.1%で発電すれば、2030年度の目標値2,091(億kWh)は達成できる。純増分の発電電力量を他の電源種と比較すると、純増分1,703(億kWh)は、2020年度の火力発電の発電電力量7,900(億kWh)の約22%と等しく、LNG火力3,155(億kWh)の約54%に等しいことが判明した。

参考2として「2030年度のCO<sub>2</sub>削減した統計データからのイメージ」を公開データより求めた。日本の2030年度目標は、2013年度比でCO<sub>2</sub>排出量43%の削減である。エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量を基準にすると約52年前の日本の姿ということになる。1970年度のエネルギーに関する主要な数値を見ると、CO<sub>2</sub>排出量が758.8(百万トン-CO<sub>2</sub>)で2013年度比61%(削減は39%)である。発電電力量は2013年度比で33%、一次エネルギーは61%、運輸部門は43%、ガソリン車の台数は25%、軽油車の台数は20%である。1970年から2020年までの50年間で省エネ技術は進化したことを織り込んで、2030年度までに、ここまでの姿にするという目標には無理があることが示唆される。

## 検証結果の分析

仮説1の検証結果として、1回の燃料補給で何日間発電できるかという指標である「国内民間在庫(日数)」が多い発電燃料を使用することが燃料供給途絶(供給不足も含む)による影響が少なく、電力の安定供給の面で望ましいことが明らかになった。現状をみると、東日本大震災後は原子力発電所の再稼働が進まないことから、わが国では火力発電が中心であり、なかでも国内民間在庫が約14日と最も少ないLNGを燃料とするLNG火力発電の電源構成比が高くなり、燃料供給途絶(供給不足も含む)による電力の安定供給に対してリスクが高い状態が続いている。世界を見渡すと、天然ガス・LNGは再生可能エネルギー普及までの「つなぎ」燃料との位置付けであることから、今後も需要増加の傾向が見込まれ、供給不足の懸念がある。国内民間在庫(日数)が多いのは、原子力発電(約2.7年)であり、再生可能エネルギーは発電用燃料が不要という点から国内民間在庫(日数)が無限大と捉えることができ、この2つの電源種は燃料供給途絶のリスクは低い。つまり、原子力と再生可能エネルギーの電源構成比が高い電源構成は、燃料供給途絶のリスクが低くなると同時に一次エネルギー自給率の向上に寄与することになる。中長期の時間スケールでみると、一次エネルギーの約90%を構

成する化石系エネルギー資源が有限であり必ず枯渇すること、今後も脱炭素化の取組みは継続すること、南海トラフ巨大地震や首都直下地震の発生する確率が高く燃料供給の途絶の可能性を考えると、原子力と再生可能エネルギーの電源構成比が高い電源構成が望ましい。

仮説2の検証結果として、南海トラフ巨大地震と首都直下地震の発生予想エリアにエネルギー施設が集中していること、火力発電所は地盤が脆弱で標高が低い埋立地に立地していることに注目し、複数のシナリオでシミュレーションを行い、電力供給率の落込みと復旧期間の結果を得た。その結果は、火力発電の電源構成比が高ければ高いほど、電力供給率の落込みが大きく復旧期間が長いことが明らかになった。逆に、原子力発電の電源構成比が高ければ高いほど、電力供給率の落込みが小さく復旧期間が短いことも成立した。その背景は、東日本大震災前の旧規制基準においても、火力発電所と原子力発電所の立地条件や規制基準は原子力発電所の規制基準の方が火力発電所より厳しかったことによる。さらに東日本大震災後に制定された、原子力発電所の新規制基準は地震・津波被害に対してもさらに厳しくなり、これにより安全性はより強固になった。したがって、南海トラフ巨大地震と首都直下地震の発生予想エリアにある火力発電所の電源構成比率を下げるのが望ましい。

仮説3の検証結果として、燃料供給途絶のリスクとCO<sub>2</sub>排出量が極めて低く、一次エネルギー自給率にも寄与する再生可能エネルギーに注目した。太陽光発電と風力発電を取り上げ、エネルギー密度(kW/m<sup>2</sup>)が低く設備利用率が低いことが、国土が狭く平地の少ない日本にどのような影響を与えるかを検証した。原子力発電所1年間分と同じ発電量を得るために必要な面積の比率「原子力：太陽光発電：風力発電=1：97：356」の関係性を用い、具体的に計算したところ、再生可能エネルギーを主力電源化することは、必要とする面積が広大であることから、自ずと制限があることを明らかにした。加えて、変動性再生可能エネルギーを大量導入する際にも考慮すべき点は、安定供給への影響である。前出の中垣(2020年)の先行研究によれば、2030年を見据えると大都市部への人口集中の流れは止まらず、その結果、東京電力、関西電力、中部電力の3社で全体の三分の二の年間需要があり、用途別シェアでは産業用電力需要が40%も占める。現在、変動性再生可能エネルギー(太陽光、風力)の発電量が多く、増設が想定される適地は九州電力、東北電力、北海道電力であり、ここが大消費地である東京電力、関西電力、中部電力の3社エリアへ再生可能エネルギー(電力)を広域送電すると、地場の需要に対して何倍もの再生可能エネルギーを供給することになる。この結果、九州電力、東北電力、北海道電力のエリアでは、地場の電力の安定供給が難しくなる懸念があること、需要側から見ると、特に産業用は常時安定した電力が必要であり、その要求に対して再生可能エネルギーのみで応えることが困難であるとの指摘は、電力の安定供給を確保するうえで、太陽光発電、風力発電の大量導入(主力電源化)の難しさの一面である。つまり、太陽光発電と風力発電はエネルギー密度が低く設備利用率も低いことから、建設に必要な面積が広大になり、主力電源化するにも、自ずと制限があることを明らかにし、電力の安定供給に対して負の作用があることを指摘した。

「参考1：原子力発電の現状と再稼働による総発電電力量の推計」の検証結果として、現有の原子力発電の発電設備能力(kW)で何ができるのかを試算した。2010年度の発電設備能力(kW)と2020年度では、運転終了と廃止により48,960(千kW)から33,083(千kW)と約32%減となっているが、実績のある設備利用率で運用すれば2,091(億kWh)が発電でき、この発電電力量は、2020年度の火力発電の発電電力量7,900(億kWh)の約22%に等しく、LNG火力3,155(億kWh)の約55%に相当する。日本の原子力発電の設備利用率は、2000年度81.7%、2010年度67.3%、2020年度13.4%となっている。つまり、現在の原子力発電の発電設備能力は、運転終了と廃止により約32%少なくなったが、実績のある設備利用率で運転すれば、政府が掲げている2030年度計画値(1,308億kWh)の発電電力

量を確保できる。CO<sub>2</sub>排出量削減のために、既設（現有）の原子力発電設備を用いることは有効な手段の1つである。

「参考2：2030年度のCO<sub>2</sub>削減した統計データからのイメージ」の検証結果として、日本の2030年度目標は、2013年度比でCO<sub>2</sub>排出量43%の削減であり、エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量を基準に調査すると1969年と1970年度の間にあることを示した。1970年は大阪万国博覧会があった年である。つまり、エネルギー起源のCO<sub>2</sub>排出量を基準にすると約52年前の日本の姿ということになる。1970年度のエネルギーに関する主要な数値を見ると、CO<sub>2</sub>排出量が758.8（百万トン-CO<sub>2</sub>）で2013年度比61%（削減は39%）である。発電電力量は2013年度比で33%、一次エネルギーは61%、運輸部門は43%、ガソリン車の台数は25%、軽油車の台数は20%である。運輸部門でみるとガソリン車と軽油車は、EV（電気自動車）への置き換えで可能と思われがちであるが、EVに使用する電力がどの程度CO<sub>2</sub>を排出したのかを上流まで遡った検証が必要となる。2019年度のエネルギーバランス表<sup>76</sup>によれば、運輸部門が消費する石油製品の最終エネルギー消費量は71,115（10<sup>10</sup>kcal）であり、日本全体の最終エネルギーにおける電力量は83,243（10<sup>10</sup>kcal）であることから、運輸部門の石油製品（ガソリン、軽油等）をすべて電気に置き換えるには、単純計算で日本の発電電力量（kWh）を約1.9倍にする必要がある。この1点をとっても、短期間でEVへの置き換えすることは容易ではないことが示唆される。

---

<sup>76</sup> 一次エネルギー供給から、転換過程を経て、最終消費までに至るエネルギーの流れを表形式で示したものをエネルギーバランス表と呼び、通常1年間にわたるエネルギーの流れを表示する。



## むすびに

本論文は、日本が脆弱なエネルギー供給構造であり自然災害が多いという与件の下、エネルギー安全保障、安全性の確保（特に災害時の安全確保）、カーボンニュートラル（脱炭素化）の3つがエネルギー安定供給決定の3要素であり、同時にアプローチする必要性があること、すなわち「3要素モデル」と捉え、その3要素の関係性を理論的に明らかにし、3要素を同時に満足する方策を実証的に導いてきた。最後に本論文で明らかにした点と今後の課題についてまとめる。

### （1）本論文で明らかにしたこと及びインプリケーション

第一に、電力分野における安定供給、安定性、安全性の関係については「電力システムにおいて、安定性と安全性は同義であり、安定性と安全性の向上は安定供給の向上に資する」と関係性を明らかにした。第二に、安定性と安全性は「機能低下（の割合）」と「復旧時間」の2値で規定することができることを明らかにした。また、カーボンニュートラル（脱炭素化）の割合はCO<sub>2</sub>排出量（CO<sub>2</sub>-トン）と規定できたことにより、評価軸が「機能低下、復旧時間」と「CO<sub>2</sub>排出量」の2軸となった。次に、この2軸上の値は、電源構成が変化すると変化する値であることを示し、検証をシミュレーションで行った。現実の電源構成は電源種ごとの発電電力量（kWh）は変化するが、安定性、安全性、平均CO<sub>2</sub>排出量（CO<sub>2</sub>-g/kWh）、平均発電コスト（円/kWh）などの基本的な性質は保持されることから、電源構成比を視点としたアプローチ方法は電力事情を分析するのに有用な方法と言える。

第二に、仮説3-1、仮説3-2、原子力発電の現状と再稼働による総発電電力量の推計を通じて、太陽光発電と風力発電、原子力発電ごとの2020年度実績を踏まえ2030年度計画値の実現可能性を検証した結果により、厳しいエネルギー供給制限と自然災害が多いという2つの与件の下における電力の安定供給を実現するために3要素を同時に満足するための方策は、「原子力発電の電源構成比を最大限に高め、次に再生可能エネルギーの電源構成比を高めることである」が導出された。この電源構成は、安定性と災害の安全性を最大限に確保し、電力の安定供給に資すると同時に、CO<sub>2</sub>排出量を最も少なくする。その電源構成は、一次エネルギー自給率の向上に最大限に貢献する電源構成となり、燃料途絶による電力の安定供給へのリスクも一番低い電源構成となる。つまり、原子力発電の電源構成比を最大化し、次に再生可能エネルギーの電源構成比を高めることが、3要素（エネルギー安全保障、安全性の確保、カーボンニュートラル）を同時に満たす電源構成となる。「その時代の与えられた条件の下」とは、その時代における個々の発電方式の安全性への評価、発電コスト、既設（現有）の発電設備等の条件を指す。わが国においては、国民の発電方式の安全性への評価、とりわけ発電所の立地先の合意が前提であることは言うまでもない。

第三に、原子力発電の電源構成比を最大化し、次に再生可能エネルギーの電源構成比を高めた電源構成は一次エネルギー自給率の向上に寄与することになり、このことは自然災害だけでなく地政学的リスクを要因とする燃料途絶発生による電力の不安定供給化のリスクも最小化することになることを示した。

第四に、カーボンニュートラル（脱炭素化）においては、CO<sub>2</sub>削減は日本国内で実施することも他国においてCO<sub>2</sub>削減することは等価であること、国ごとにCO<sub>2</sub>限界削減コストは大きく異なることから、CO<sub>2</sub>限界削減コスト内外差を利用することは、日本の脱炭素社会を実現するために必要なコストを抑制する有用な方法であることを明らかにした。

## (2) 残された課題

エネルギー安全保障では、第一にエネルギー安定供給、第二に低廉なエネルギー価格の確保であるが、本論文ではエネルギー価格は需給調整市場で価格決定するとし捨象し、CO<sub>2</sub> 限界削減コストは国別で大きい異なることを示し、脱炭素化を推進するとエネルギーコストが上昇することを示唆するにとどめている。理由は、シミュレーションにより検証する際に利用できる公開されている基礎データが少ないこと、公開されているケースであっても、その数値が導出されるプロセスが必ずしも明瞭でないことによる。シミュレーションに耐え得るデータが公開された後に、発電コストを含めた電力の安定供給の課題として取り組みたい。CO<sub>2</sub> 限界削減コストの国内外コスト差を利用することは、我が国にとって有用なことを示唆したものである。この利用方法についても今後の課題として研究に取り込みたい。

安全保障には危機管理の観点から有効性、実現可能性、経済性の3つを比較衡量することを求められている。本論文では、専ら守備範囲をエネルギー安全保障とし、リスクの範囲も自然災害とし地震・津波に焦点を当て3要素モデルをもとに展開した。今後は、エネルギー安全保障を安全保障との関係性のなかで捉え、有効性、実現可能性、経済性を比較衡量し、研究に取り組んでいきたい。

## 参考・引用文献

- 穴山悌三 (2005) 『電力産業の経済学』 NTT 出版.
- 安部智久 (2007) 「事業継続支援のための国際物流インフラマネジメント方策に関する基礎的検討」  
ISSN 1346-7328 国総研資料 第 409 号.  
(<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0409pdf/ks0409.pdf>, 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 泉谷清高 (2014) 「日本における火力発電所の沿岸部偏在と地震被害の問題点」『国際情報研究』日本国際情報学会
- 泉谷清高 (2017) 「首都直下地震における石油製品の供給予測」『国際情報研究』日本国際情報学会
- 泉谷清高 (2020) 「南海トラフ巨大地震による九州・四国地域における火力発電所の被害予測」『国際情報研究』日本国際情報学会
- 泉谷清高 (2021) 「日本のカーボンニュートラル政策」『Kokusai-Joho』日本国際情報学会
- 泉谷清高 (2021) 「日本のエネルギー政策」『紀要』日本大学大学院総合社会情報研究科  
(<https://gssc.dld.nihon-u.ac.jp/wp-content/uploads/journal/pdf22/22-001-012-Izumiya.pdf>, 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 泉谷清高 (2021) 「日本のエネルギーセキュリティ」『紀要』日本大学大学院総合社会情報研究科  
(<https://gssc.dld.nihon-u.ac.jp/wp-content/uploads/journal/pdf22/22-121-132-Izumiya.pdf>, 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 池田三郎 (2016) 「低頻度・巨大損失事象」に係わるリスク学 (分析) の課題—巨大複合災害 (大地震動+巨大津波+福島原子炉溶融事故) としての東日本大震災から学ぶ」行動計量学  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jbhmk/43/1/43\\_21/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jbhmk/43/1/43_21/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 入江一友 (2018) 「エネルギー安全保障とエネルギーの経済性の統合的理解に向けての試論」エネルギー経済 (<https://eneken.ieej.or.jp/data/7798.pdf>, 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 入江一友・神田 啓治 (2002) 「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  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jie1992/81/5/81\\_5\\_311/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jie1992/81/5/81_5_311/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 植草益 (1994) 『講座・公的規制と産業①電力』NTT 出版
- 植草益 (2000) 『社会的規制の経済学』NTT 出版
- 内山洋司 (2003) 「資源論からみたエネルギー供給問題」日本原子力学会誌  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesj1959/45/8/45\\_481/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesj1959/45/8/45_481/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 内山洋司 (2006) 『エネルギー工学と社会』日本放送出版協会
- 内山洋司・羽田野祐子・岡島敬一 (2012) 『エネルギーシステムの社会リスク』コロナ社
- 小野憲司 (2020) 「近年の台風災害の教訓を踏まえた港湾 BCP の深化」IATSS Review (国際交通安全学会誌) ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/iatssreview/45/2/45\\_134/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/iatssreview/45/2/45_134/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 小野憲司・赤倉康寛 (2015) 「ビジネスインパクト分析及びリスク評価の手法を取り入れた港湾物流 BCP 作成手法の高度化に関する研究」京都大学防災研究所年報 (<https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/210097/1/a58b0p01.pdf>, 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)

- 小山真人 (2003) 「低頻度巨大災害のリスクを定量評価する」 月刊地球  
([https://sakuya.vulcania.jp/koyama/public\\_html/etc/onlinepaper/Kagaku\\_201402\\_Koyama.pdf](https://sakuya.vulcania.jp/koyama/public_html/etc/onlinepaper/Kagaku_201402_Koyama.pdf), 最終閲覧  
2022年10月13日)
- 戒能一成 (2004) 「エネルギー安全保障の定量的評価の研究」 (<https://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/X0820GKAprt1.pdf>, 最終閲覧 2022年10月13日)
- 片岡正次郎・白戸智・牛島由美子・高宮進 (2013) 「インフラシステムの災害復旧モデル化と災害復旧シミュレーション」 『土木学会論文集』 公益社団法人土木学会  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejseee/69/1/69\\_1/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejseee/69/1/69_1/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)
- 加藤宏紀・能島暢呂 (2015) 「供給系ライフラインの地震時機能的被害・復旧評価モデル」 日本地震工学会論文集 ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaee/15/7/15\\_7\\_354/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaee/15/7/15_7_354/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)
- 片山恒雄・磯山龍二 (1980) 「ライフラインの地震防災-考え方と現状報告」 生産研究  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/1995/507/1995\\_507\\_231/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/1995/507/1995_507_231/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)
- 河田恵昭 (1997) 「巨大災害対策としてのインフラ整備のあり方」 安全と管理  
(<https://core.ac.uk/download/pdf/228727379.pdf>, 最終閲覧 2022年10月13日)
- 栗田昌之 (2015) 「我が国の災害政策と危機管理研究の一考察」 法政大学公共政策研究科  
(<https://core.ac.uk/download/pdf/223199165.pdf>, 最終閲覧 2022年10月13日)
- 国立環境研究所 地球環境研究センター (2011) 『ココが知りたい地球温暖化』 成山堂書店
- 小松章剛 (2011) 「関東大震災等復興と都市計画法(東日本大震災の復興に向けて)」, Urban study 53: 2011.12 p.26-35
- 近藤洋輝 (2003) 『地球温暖化予測がわかる本』 成山堂書店
- 近藤洋輝 (2009) 『地球温暖化予測の最前線』 成山堂書店
- 佐々木信行 (2014) 『資源論入門』 コロナ社
- 佐藤慎司 (2012) 「低頻度災害への備え」, 月刊建設  
([http://www.zenken.com/kikkansi/vol\\_56/zk\\_vol56\\_09/zk\\_vol56\\_09\\_04\\_05.pdf](http://www.zenken.com/kikkansi/vol_56/zk_vol56_09/zk_vol56_09_04_05.pdf), 最終閲覧 2022年10月13日)
- 塩崎由人・加藤孝明 (2012) 「自然災害と関連分野におけるレジリエンス, 脆弱性の定義について」 生産研究 ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/seisankenkyu/64/4/64\\_643/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/seisankenkyu/64/4/64_643/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)
- 塩崎由人・加藤孝明・菅田寛 (2015) 「自然災害に対する都市システムのレジリエンスに関する概念整理」 土木学会論文集 ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejipm/71/3/71\\_127/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejipm/71/3/71_127/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)
- 朱牟田善治・登藤貴毅・高橋健吾・石川智巳 (2010) 「配電設備を対象とした地震被害推定手法の開発」 電気学会論文誌 ([https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejeiss/130/7/130\\_7\\_1253/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejeiss/130/7/130_7_1253/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)
- 朱牟田善治 (2013) 「電力設備の自然災害対策の基本的考え方」 電気設備学会誌  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieiej/33/3/33\\_159/\\_pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieiej/33/3/33_159/_pdf-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)

消防庁（2013年3月）「東日本大震災記録集」

([https://www.fdma.go.jp/relocation/concern/publication/higashinihondaishinsai\\_kirokushu/index.html](https://www.fdma.go.jp/relocation/concern/publication/higashinihondaishinsai_kirokushu/index.html), 最終閲覧 2022年10月13日)

石油天然ガス・金属鉱物資源機構 調査部（2009）『石油資源の行方』コロナ社

総務省「国土強靱化の経緯」([https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000653487.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000653487.pdf), 最終閲覧 2022年10月13日)

寶馨（2020）「低頻度巨大災害分科会の活動」土木工学・建築学委員会低頻度巨大災害分科会

([https://janet-dr.com/060\\_event/20200317/200318\\_0102.pdf](https://janet-dr.com/060_event/20200317/200318_0102.pdf), 最終閲覧 2022年10月13日)

寺尾和彦（2017）「国土強靱化の基本概念と国の政策」農村計画学会誌

([https://www.jstage.jst.go.jp/article/arp/36/3/36\\_398/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/arp/36/3/36_398/_pdf/-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)

電力土木技術協会編「火力・原子力発電所土木構造物の設計 増補改訂版（1995年版）」

電力土木技術協会編「火力・原子力発電所土木構造物の設計（1977年版）」

東京電力（2013）「東北地方太平洋沖地震に伴う電気設備の停電復旧記録」

([https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo\\_11374811\\_po\\_teiden\\_hukkyuu.pdf?contentNo=1&alternativeNo=](https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_11374811_po_teiden_hukkyuu.pdf?contentNo=1&alternativeNo=), 最終閲覧 2022年10月13日)

十市勉・小川芳樹・佐川直人（2001）『エネルギーと国の役割』コロナ社

時政島・藪田雅弘・今泉博国・有吉範敏（2008）『環境と資源の経済学』勁草書房

土木学会 エネルギー委員会 新技術・エネルギー小委員（2014年8月）会「東日本大震災におけるエネルギー施設（火力・水力・送変配電・ガス）の被害状況と今後への展開について」報告書（最終報告）(<https://committees.jsce.or.jp/enedobo/system/files/報告書（最終報告）東日本大震災におけるエネルギー施設の被害状況と今後の展開について.pdf>, 最終閲覧 2022年10月13日)

日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編（2011）『図解エネルギー・経済データの読み方入門』省エネルギーセンター

日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編『エネルギー・経済統計要覧』（1993年～2022年），省エネルギーセンター

能島暢呂・杉戸真太・鈴木康夫・石川裕・奥村俊彦「震度情報に基づく供給系ライフラインの地震時機能リスクの二段階評価モデル」『土木学会論文集』公益社団法人土木学会

([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2003/724/2003\\_724\\_225/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2003/724/2003_724_225/_pdf/-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)

能島暢呂・亀田弘行（1993）「地震時のシステム間相互連関を考慮したライフライン系のリスク評価法」『土木学会論文集』公益社団法人土木学会

([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/1995/507/1995\\_507\\_231/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/1995/507/1995_507_231/_pdf/-char/ja), 最終閲覧 2022年10月13日)

早田敦（2016）「大規模災害を踏まえた電力の取組みについて」電気学会全国大会

([http://www.iee.jp/wp-content/uploads/honbu/03-conference/16-taikai/rinri/1\\_h5\\_3.pdf](http://www.iee.jp/wp-content/uploads/honbu/03-conference/16-taikai/rinri/1_h5_3.pdf), 最終閲覧 2022年10月13日)

八田達夫・田中誠（2004）『電力自由化の経済学』東洋経済新報社

八田達夫・田中誠（2007）『規制改革の経済分析』東洋経済新報社

藤井秀昭（2014）『入門・エネルギーの経済学』日本評論社

藤井秀昭（2005）『東アジアのエネルギーセキュリティ戦略』NTT出版

- 松井賢一（1991）『エネルギーデータの読み方使い方』電力新報社
- 松井賢一（2000）『エネルギー経済・政策論』嵯峨野書院
- 松井賢一（2009）『データから読み解くエネルギー問題』エネルギーフォーラム
- 松井賢一（2001）「エネルギー安全保障について」『立命館国際研究』  
([https://www.ritsumei.ac.jp/ir/isaru/assets/file/journal/13-3\\_10matsui.pdf](https://www.ritsumei.ac.jp/ir/isaru/assets/file/journal/13-3_10matsui.pdf), 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 三室戸義光（2002）「エネルギー安全保障における石炭の役割」エネルギー経済  
([https://eneken.ieej.or.jp/data/old/pdf/0110\\_07.pdf](https://eneken.ieej.or.jp/data/old/pdf/0110_07.pdf), 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 宮本健郎（1996）『エネルギー工学入門』培風館
- 新柄欽次（2003）「天然ガスの地下備蓄」『総合政策論集』島根県立大学 (<https://hamada.u-shimane.ac.jp/research/32kiyou/10sogo/seisaku06.data/seisaku606.pdf>, 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 村上朋子・本蔵 満・久谷一朗（2011）「各国のエネルギー安全保障政策と実態の調査分析」  
(<https://eneken.ieej.or.jp/data/3548.pdf>, 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 湯山安由美・梶谷義雄（2019）「2011 年東日本大震災のデータに基づく火力発電所の被害・復旧関数の推計」『土木学会論文集』公益社団法人土木学会  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejsce/70/4/70\\_I\\_664/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejsce/70/4/70_I_664/_pdf/-char/ja), 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- 湯山安由美（2019）「巨大複合災害時における火力発電所の供給リスク評価」筑波大学  
(<https://core.ac.uk/download/pdf/250581591.pdf>, 最終閲覧 2022 年 10 月 13 日)
- W・D・ノードハウス著（1982）『エネルギー経済学』東洋経済
- Field, C. Barry (1997), *Environmental Economics, An Introduction, Second Edition*, The McGraw-Hill Companies, Inc. (バリー・C・フィールド著『環境経済学入門』日本評論社)
- W・D・ノードハウス[著]（2002）『地球温暖化の経済学』（室田泰弘・山下ゆかり・高瀬香絵[訳]）東洋経済新報社
- W・D・ノードハウス[著]（2015）『気候カジノ（経済学から見た地球温暖化問題の最適解）』（藤崎香里[訳]）日経 BP 社

## 謝辞

論文執筆にあたり指導教官の陸亦群教授には研究と学業の全般にわたり懇切丁寧なご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。また、在籍していた日本大学大学院総合社会情報研究科では、多くの先生方にご指導を賜りました。深く感謝いたします。研究を進めるにあたり、ご支援を頂きましたゼミの皆さま方に心より御礼申し上げます。最後に、研究を支えてくれた妻栄子に感謝いたします。