

## 論文審査の結果の要旨

氏名：泉谷 清高

博士の専攻分野の名称：博士(総合社会文化)

論文題名：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—

審査委員：(主査) 日本大学教授 陸 亦群

(副査) 日本大学教授 安藤 貴世

(副査) 千葉科学大学教授 木村 栄宏

(副査) 日本大学准教授 瀧川 修吾

### <論文審査要旨>

#### 1 本論文の主題と構成

本論文はエネルギー分野の「電力」とりわけ「電力システム」に着目し、日本は脆弱なエネルギー供給構造と自然災害が多いという厳しい制約条件の下、電力の長期的な安定供給を実現するためにはどのような取り組みが必要かを明らかにすることを試みたものである。

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、特に安定性と災害時の安全性を含めた研究が少ない。また、安全性の研究では、頑健性と回復力については土木工学、電力システム工学のなかで専門的に深く掘り下げており、必ずしも安定供給との関係性が中心となっていない。2020年代以降、脱炭素社会の実現に向けた取り組みが求められているが、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安定性とCO<sub>2</sub>排出量削減の関係性の研究はあるものの、安全性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。本論文は、港湾エリアにおけるエネルギーサプライチェーンの供給の安定性の評価と土木工学分野の東日本大震災におけるエネルギー施設被害の先行研究と結び付け、港湾エリアを集積地のみならず、二次エネルギーである石油製品、都市ガス、電力の生産起点としてサプライチェーンの要としてフォーカスしている。そして時代の要請に応え、従来のアプローチにカーボンニュートラル(脱炭素化)を加えて、新たに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要素モデル」を提示している。本論文の「3要素モデル」はエネルギー安定供給を決定する3要素を同時にアプローチするモデルであり、自然災害時の安全性の確保とカーボンニュートラルを同時に関連づけた研究である。先行研究との差異や内容的な独創性から見ても、その学術的意味と価値は高く評価されるものである。

本論文は、「はじめに」から始まり、本文が5章構成でなされ、「おわりに」で括られている。本論文はA4版(40字×40行)で110頁、内容構成は以下の通りである。

はじめに

第1章 日本におけるエネルギー事情の特徴

第1節 世界のエネルギー事情

第2節 日本のエネルギー事情

- 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
  - 第2節 本研究の理論的基礎
  - 第3節 本論文の主要論点（同時アプローチの必要性）
- 第3章 先行研究
  - 第1節 エネルギー安全保障と安定供給
  - 第2節 安全性の確保（被害予想と復旧予想の重要性）
  - 第3節 安全性の確保（レジリエンス、安定性、安全性）
  - 第4節 カーボンニュートラルに関する研究
  - 第5節 小括
- 第4章 エネルギー安定供給と3要素モデル
  - 第1節 本論文の研究課題
  - 第2節 仮説の提示
  - 第3節 シミュレーションの構築
  - 第4節 モデル分析手順 — その検証方法について
- 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2節 本論文の研究結果
- むすびに

## 2 本論文の概要

本論文の「はじめに」では、エネルギー供給制限と自然災害多発の2つの与件の下における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要素の関係性を理論的に明らかにし、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を探索しようとする研究目的を提示している。

第1章では、世界と日本のエネルギー事情が説明され、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の比較により、日本の世界におけるポジションや日本特有の事情を明らかにした上、日本には脆弱なエネルギー供給構造および自然災害が多いという厳しい与件があることを示している。

第2章においては、本論文の着眼点と理論的背景を説明し、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）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とともに、本論文の守備範囲や本論文で扱う概念と用語を整理し、本論文の主要論点を明らかにしている。

第3章では、エネルギー安全保障と安定供給、安全性の確保（被害予想と復旧予想の重要性）、カーボンニュートラルの3つのカテゴリーに分けて先行研究を概観し、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論じている。

第4章では、先行研究の知見を踏まえ、リサーチクエストを提示し仮説を立て、仮説ごとにモデルの前提条件、モデル設定、分析方法、モデルのバックグラウンド、シミュレーションの構築とモデル分析手順といったエネルギー長期的安定供給を実現するための3要素同時アプローチの分析枠組みを提示している。

第5章では、シミュレーションによる一連の検証を通して、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、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かかり、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、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ている。そして、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方策は、まず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というインプリケーションを導き出している。

本論文の「むすびに」において、この論文の研究意義、本論文で明らかにしたことと残された課題についてまとめている。

### 3 本論文の研究成果および本論文に対する審査評価

本論文は、3要素モデルをもとに「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」の2つのカテゴリーに分けてリサーチクエスチョンを提起し仮説を立てた。エネルギー供給制約と自然災害多発という与件の下、南海トラフ巨大地震の港湾エリアと首都直下地震の港湾エリアの被害を想定し、発電用燃料の国内在庫を用いてシミュレーションによる仮説検証を行った。本論文のシミュレーションでは、ハザードマップを用いた火力発電所の埋立地（港湾エリア）の立地分析により、安定供給の阻害要因である火力発電所停止期間の定量的評価を可能にし、発電用燃料別電源構成と燃料別在庫日数より、安定供給の阻害要因である燃料供給途絶による発電停止の定量的評価を可能にした。そして発電用燃料別電源構成においては、発電用燃料別の発電費用（円/kWh）と発電用燃料別のCO<sub>2</sub>排出量（g-CO<sub>2</sub>/kWh）を用いたことによって、全体の発電費用の定量的評価と全体のCO<sub>2</sub>排出量の定量的評価を可能にした。こうした電源構成比を視点としたアプローチが本論文のオリジナリティであり、学術的価値がとりわけ高い点として評価するものである。

本論文では、電力分野における安定供給、安全性、安定性の関係性について、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安定性と安全性は密接な関係にあり、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解明した。安定性と安全性の度合を機能低下の度合と復旧時間の2値に規定し、また、カーボンニュートラル（脱炭素化）の度合いをCO<sub>2</sub>排出量（CO<sub>2</sub>-トン）と規定することにより、評価軸が「機能低下、復旧時間」と「CO<sub>2</sub>排出量」の2軸として明確にした点についても評価できるものである。

本論文の「国内民間在庫日数」に着眼したシミュレーションによる検証では、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と判明し、「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」に注目した検証では、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、電力供給率の落ち込みが大きく復旧期間が長いことが判明された。さらに、「CO<sub>2</sub>排出量の削減」に注目した検証では、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く、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。

本論文は、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や、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の枯渇、脱炭素化の取組みの推進を考慮に入れた場合、電力の安定供給を実現するためには、火力発電の電源構成比率を下げ、原子力と再生可能エネルギーの電源構成比率を高めることが求められるとの結論に至った。エネルギー需給面では、日本はエネルギー消費大国でありながら、一次エネルギー自給率は極めて低いエネルギー資源小国である。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。これらの状況を正面から捉えた本論文は重要な研究であり、学術的貢献として評価できるものである。

他方、本論文にはいくつかの課題も残されている。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を捉えているが、本論文ではエネルギー価格を需給調整市場で価格決定するものとして扱い、エネルギー安全保障の概念を専らエネルギー安定供給のみとし、エネルギー価格を捨象している。また、本論文の守備範囲とする災害の範囲は自然災害とし、地震・津波に焦点を当てているが、地政学的リスクをどのように想定するかが課題であろう。本論文では、日本では太陽光発電や風力発電等の変動性再生可能エネルギーの大量導入が進み、需給バランスの調整力の強化がますます必要となり、この調整力は火力発電や揚水発電が主に担っているとしているが、太陽光発電や蓄電池、コージェネレーションシステムなど分散型エネルギー資源（DER: Distributed Energy Resources）を活用したデマンドレスポンス（DR: Demand Response）は社会実装に向け研究開発が活発に行われているなか、資源効率と循環経済の視点を踏まえ分散型エネルギー資源の利用からのアプローチが必要であろう。今後の更なる研究を期待したい。

以上、本論文における今後の課題はあるものの、博士（総合社会文化）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和5年1月18日