

台湾におけるエネルギー転換の政策分析： E3ME-FTTモデルによる経済評価*

陳 禮 俊

Abstract

As climate change and various environmental pollution issues are becoming more serious, many countries are actively promoting energy transition. The Paris Agreement, adopted in 2015, is aimed at curbing the rise in global average temperatures to within 2°C above pre-industrial levels and limiting temperature rises to 1.5°C above pre-industrial levels. Taiwan is accelerating its path of energy transition to a "nuclear-free homeland" and "low-carbon economy" by phasing out all nuclear power generation in 2025 and imposing a legally binding goal of reducing coal-fired power generation from 47 percent to 26 percent. This paper investigates the impact of nuclear and coal power regulations on fuel mix CO₂ emissions in the power sector by 2050 in Taiwan. Analysis is a future technology shift in the power sector called "Future Technology Transformations; FTT" for the power sector; Consider using the E3ME model linked to FTT: Power sub-model.

Keywords: Energy Transition, E3ME-FTT Model, climate change, sustainability, energy transition

はじめに

世界はエネルギー動向に関する転換点にある。一見すると、過去20年間にほとんど何も起こらなかったとすることができる。世界全体のエネルギー構成における化石燃料のシェアは約80%で一定のままであった。しかし、この数字は、多くの異なる重要なエネルギー動向を隠している。一方、化石燃料からデカップリング (decoupling)、クリーンエネルギーの未来に向けて動

*本稿は、科学研究費補助金、基盤研究 (A) 研究課題/領域番号: 16H01799「東アジアの持続可能な未来に向けたエネルギー、資源、土地利用の大転換と制度改革」による研究成果の一部である。

く多くのガバナンスの意志の明確なシグナルが見られる。自動車の車両基準の実施、家電製品のエネルギー効率表示、再生可能なエネルギー技術の支援は、気候変動 (climate change) と持続可能性 (sustainability) の角度で、ここ数十年にわたって実施されてきた重要な政策の強力な例であり、エネルギーの消費と生産方法を転換しつつある。

気候変動やさまざまな環境汚染問題が深刻化しつつある中、多くの国が「エネルギー転換 (energy transition)」を積極的に推進している。国際社会が、エネルギー転換を推進する最も重要な理由は、21世紀の人間社会が直面している最大の環境問題である「気候変動」である。2015年に採択されたパリ協定は、世界の平均気温上昇を産業革命前のレベルより2℃以内に抑制し、温度上昇を産業革命前のレベルより1.5℃高く制限することを目的としている。2018年に、国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が発行した1.5℃の地球温暖化に関する特別報告書によると、人間社会はパリ協定の1.5℃の目標に達する期限は2030年である。¹⁾ 国連環境プログラム (UNEP) は、2019年に発表された「排出ギャップレポート (2019)」でさらに指摘した。この目標を達成するには、世界は2019年から直ちに行動を始め、年間の温室効果ガス排出量は約7.6%削減された。²⁾ 1.5℃の目標を維持する時間は刻々と過ぎていく。気候変動を遅らせるために、さまざまな方法を積極的に採用する必要がある、エネルギーと電力部門は重要な部門の1つである。

台湾は近年、洋上風力発電を発展し、2019年10月に最初の洋上風力発電所を完成させた。再生可能なエネルギーの発展は、台湾と国際社会のコンセンサスである。台湾は、すべての原子力発電を段階的に廃止し、石炭火力の発電量を47%から26%に削減するという法的拘束力のある目標を課すことにより、「脱原発 (nuclear-free homeland)」と低炭素経済への転換経路を加速させている。政府は、再生可能なエネルギーへの投資の拡大と電力市場の段階的な改革を通じて、その野心的な目標を達成しようと試みている。しかし、政府が原子力発電の段階的廃止の特定の日付を設定することを制限するために、2018年11月下旬に、国民投票が可決されたため、エネルギー転換の進展

は2018年に大きな後退に直面している。

メディアの報道、公開討論、国民投票の結果に基づくと、市民の大多数は、再生可能なエネルギーを中間的で、高価なエネルギーの選択肢と見なす「ベースロード (base load)」パラダイムシフトに依然として、拘束されていることを示唆している。したがって、台湾のエネルギー転換は、革新的なガバナンスシステムによって、引き起こされなければならない社会技術的ダイナミクスの根本的な変化によってのみ成功するだろう。

再生可能なエネルギーを目指した野心的な転換が進むにつれ、さまざまな長期シナリオ（通常、今後20~40年をカバーするものと定義される）を開発・精査し、特にさまざまな転換経路のコスト効率を評価・比較する必要がある（Mia et al., 2013）。³⁾ このような評価を支援するさまざまなモデル分析ツールがある。エネルギー政策の決定は常に、このようなツールで作成される定量的シナリオによる便益を受け、長期政策目標やこれを達成するための最も経済的な投資行程の定義にこれを利用してきた（INREA, 2017）。

そのようなシナリオは主として、2つのレベルで使用されている。最初のレベルでは、主に重要な政策問題、およびエネルギーシステムの長期的開発との関連性を特定し認知を高める目的で（国際機関、企業、研究機関などが開発した）、全世界または地域のエネルギーシナリオが使用されてきた。このようなシナリオは、世界の政策論争を形作る上で大きい影響力を持つことがある。エネルギー政策の優先課題は変わる可能性があり、環境領域（例えば、気候変動と大気汚染など）、社会的領域（例えば、エネルギーのアクセスと開発、エネルギー安全保障および輸送政策など）、あるいは技術経済的領域（例えば、化石燃料の利用可能性、再生可能なエネルギーのシステム連系、水素経済など）が中心になる。

2番目のレベルでは、各国政府が将来のエネルギー政策の方向性およびエネルギー部門開発における特定の将来経路選択との関連性を定量的に評価するため長期エネルギーシナリオを開発する。多くの場合、各国政府はシナリオ開発のため長期モデルを採用してきた。通常このようなモデルでは、ベー

スライン（基準）シナリオと、広範囲の不確実性或政策オプションを含む代替政策シナリオの両者が調べられる。

このようなシナリオは、管轄区域により、各国の長期エネルギー計画（マスタープランと呼ばれることが多い）、統合エネルギー計画、または統合資源計画の基礎となる。各国の国家エネルギー計画（および計画策定のプロセス）では、政策決定者に対し複雑な経済・政治・環境上の相互関係やエネルギーシステムを取りまく不確実性に関する知識を提供する。長期計画では国の全体的な政策目標を実現するためのエネルギー構成の数値目標を定め、いつ、どこで、どのようにエネルギー部門に投資を行うかというプロセスを指示する。これらの目標を達成するため、政策手段と規制が定められる（エネルギー計画策定の目的、プロセス、および手法のより総合的な考察については、NASEO（2014）とWilson and Biewald（2013）に示されている概略を参照されたい）。

本稿は、台湾における2050年までの電力部門の燃料構成のCO₂排出量に対する原子力・石炭発電規制の影響について考察する。解析は、電力部門における将来の技術転換「Future Technology Transformations for the power sector : FTT : Power (Mercurie, 2012)」にリンクされたE3MEモデルを使用して考察する。分析はOgawa et al. (2015)に基づいているが、より洗練されたシナリオを評価し、より長い期間（2030年から2050年）を考慮する。

2050年まで延長することで、再生可能なエネルギー技術のさらなる進化と、再生可能なエネルギー発電コストの削減を想定している。一般に、再生可能なエネルギー発電のコスト、すなわち、主に太陽光がグリッドパリテイ（grid parity）に達すると、原子力発電や石炭火力に比べてコストが下がる可能性があると推測されている（IEA, 2016を参照されたい）⁴⁾ さらに、台湾の石炭火力発電施設は、2050年までに資本コストを回収し、資本ストックロックイン効果（Lock-in Effect of Capital Stock）を排除する⁵⁾。したがって、本稿の時間枠は、再生可能なエネルギーの発電への容易な転換を確実にするのに十分な長さである。

本稿の参考シナリオは、2017年に日本エネルギー経済研究所（Institute of Energy Economics, Japan；IEEJ）が作成した実際のデータと「アジア・世界エネルギー見通し（Asia/ World Energy Outlook；AEO）」の参照シナリオの仮定に基づいている（Azuma et al., 2019）。最初のシナリオ（S1）では、原子力規制（nuclear regulation）を分析する。第2のシナリオ（S2）では、石炭火力発電所の規制（coal regulation）を分析する。第3のシナリオ（S3）では、原子力発電と石炭火力発電の両方に対する制限（nuclear and coal regulation）を同時に分析する。本稿の焦点は、石炭と原子力に関する規制が電源構成と電力部門の排出量にどのような影響を与えるかに焦点を当てている。本稿は、以下のように構成されている。第1節では、E3ME-FTTモデルの概要を説明する。第2節は、台湾の電力部門の関連する政策の概要を示す。第3節では、適用されたE3ME-FTTモデリング方法論について説明する。第4節は、評価するシナリオについて説明する。第5節は、推定結果を分析する。最後に、分析による政策の影響と課題について概説する。

第1節 E3ME-FTTモデルの概要

1.1 E3MEマクロ計量モデル

E3MEマクロ計量モデル（E3ME macro-econometric model）は、世界の経済・エネルギーシステムと環境のコンピュータベースのモデルである。もともとは1990年代に、欧州委員会（European Commission）の研究フレームワークプログラムを通じて開発され、現在は政策評価、予測、研究目的でヨーロッパおよびそれ以降で広く使用されている。このモデルは、世界全体の合計に一致するように、すべてのG20諸国、すべての欧州連合（EU）諸国、その他の地域グループの明示的な表現を含む59の地域に世界を分割する。東アジアは、モデルの4つの地域（中国、日本、韓国、台湾）によって表される。ただし、分析をこれらの4つの領域に限定しない。国際貿易を通じて、世界の他の国々との交流が重要である可能性がある。

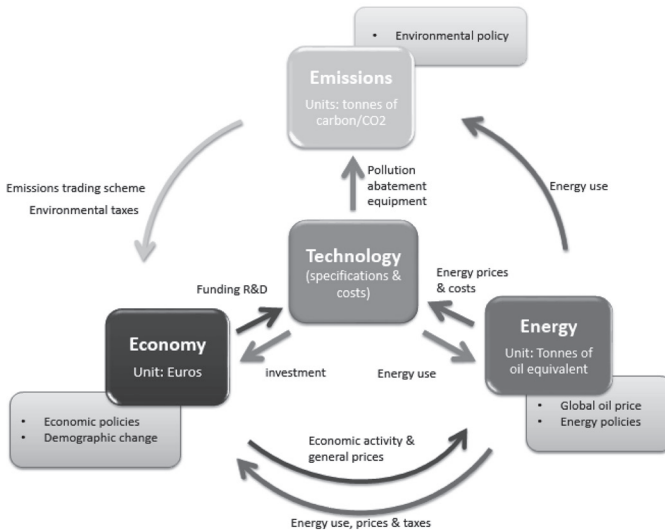
モデルの各領域内では、経済は43の経済生産部門に分かれている。これらの部門には、一次生産（農業、鉱業など）、製造業、建設、さまざまなサービス部門が含まれる。これらの各部門は、他の部門（部門間の購入を決定する投入産出テーブルを通じてモデル化）と相互作用し、異なる量で異なる方法で天然資源を使用する。持続可能性政策（sustainability policy）を考える際には、部門の分解が重要である。

モデリングアプローチは非常に経験的である。東アジア4地域のデータは、1970年までの期間をカバーする年次時系列として、国家統計機関から取得される（利用可能な場合）。これらのデータは、価格の変化に対する需要の応答など、モデル内の行動パラメータを推定するために、計量的なエクエータで使用される。部門と地域別に分解された、35個の計量経済学方程式がある。

図1は、E3MEモデルの各種モジュールを示している。この図は、このモデルが経済システムを天然資源（エネルギーおよび材料）の消費だけでなく、経済へのフィードバック（例えば、採掘部門の経済パフォーマンスを通じて）にどのように結び付けるかを示している。同様に、システム・ダイナミクス・モデリング（systems dynamics modeling）で使用されるアプローチでは、各モジュールは、可能な限り物理量を使用して、独自の単位を使用する。

E3MEモデルは、通常、パラメータの推定に使用される方法を反映して、マクロ計量モデルと呼ばれる。しかし、その最も重要な特性の多くは、ポストケインズマクロ経済理論（Post-Keynesian economics）の表現から派生している。モデルパラメータ化の問題はさておき、最適な動作の仮定の緩和はモデリングパラダイムを変える。システムが最適化されない場合、経済に予備の資源（失業者など）が存在する可能性がある。その結果、経済の生産レベルは、最大潜在的な供給ではなく、資源の総需要のレベルによって決定される。資源の可用性に関する制約がモデリングで尊重されるが、産出は通常、その潜在的なレベルを下回る。ケインズの一般理論（Keynes, 1936）

図1 E3MEモデルの各種モジュール



出典：Cambridge Econometrics (www.e3me.com.)

の最も重要な知見の1つは、失業が経済の自然な結果であるということであった。多くの経済学者の信念とは対照的に、この発見は、賃金の「粘着性 (stickiness)」だけでなく、現代経済における資本と金融システムの役割を反映している (Pollitt and Mercure, 2017 ; Pollitt et al, 2019)。

最適な行動や金融システムの仕組みについては、技術的に見過ごせることがあるが、モデルの結果に強い影響を与えている。例えば、次の3つの記述を考えてみる。

- (1) 意思決定が最適でない場合は、結果を改善するための政策決定の役割がある。
- (2) 個人の最適な意思決定が社会全体にとって最良の結果につながらない場合、結果を改善するための政策決定の役割がある。
- (3) 利用可能な経済資源がすべて使用されていない場合は、それらを使用

する政策を見つけることによって生産量を増やすことができる。

新古典主義経済学に基づく標準的な CGE モデルでは、条件が満たされていないので、これらの記述はいずれも関連しない。ただし、E3ME が提供するポストケインズモデリングフレームワーク (Post-Keynesian modeling framework) では、それぞれが真である可能性があるが、最終結果は提案されている政策によって異なる。重要な点は、政策決定 (価格ベースの措置と規制の両方を含む) の潜在的な正味の影響が仮定によって排除されないことである。E3ME モデルの結果は、しばしば CGE モデルの結果と比較される。このような演習の例としては、Lee et al. (2015), European Commission (2015), Jansen and Klaassen (2000) が含まれる。このモデルは、さまざまな結果を提供するために、政策分析のために CGE モデルと一緒に使用されるようになっている (例えば、European Commission, 2015)。E3ME モデルの詳細については、モデルのウェブサイトで入手できるモデルマニュアル (Cambridge Econometrics, 2019; www.e3me.com) で見つけることができる。持続力の文脈におけるモデリングアプローチのさらなる議論は、Mercure et al. (2016) で提供される。方程式の完全なリストは、Mercure et al. (2018b) の付録で提供されている。

1.2 電力部門における将来の技術転換モデル

低炭素の持続可能な転換の成功は、採用されている技術によって決定される。したがって、この転換をモデル化するには、技術開発と採用の詳細な処理が必要である。基本的な E3ME モデルは、いくつかの理由から、このような処理を提供するために十分に装備されていない。第 1 に、モデルの部門分解は詳細ではない。技術的な詳細の高レベルを組み込むのに十分ではない。第 2 に、計量的アプローチでは、履歴データの完全なセットが必要である。第 3 に、技術開発と展開のプロセスは非常に非線形である。つまり、計量的な構造に適合することは困難である。したがって、E3ME を支える仮

定と広く互換性のある別のアプローチが必要である。これは、将来の技術転換ファミリー (FTT Family) のモデルによって提供される。E3ME と同様に、FTT はシミュレーションベースのアプローチに従い、企業や個人が行動を最適化することについて仮定しない。

FTT は、いくつかの異なるオプションに直面している主要なエネルギー部門の投資家のための意思決定コアを使用している (Mercure, 2012)。例えば、新しい設備容量に投資する電力会社は、さまざまな従来技術と再生可能な技術の中から選択できる。意思決定の中核は、先行投資と生涯ランニングコストを含む「ペアワイズ法 (pairwise method)」の「平準化された (levelized cost)」コスト比較によって行われる。このアプローチは概念的には、測定された技術コスト分布によって、パラメータ化されたバイナリロジックモデル (binary logic model) と同等である。

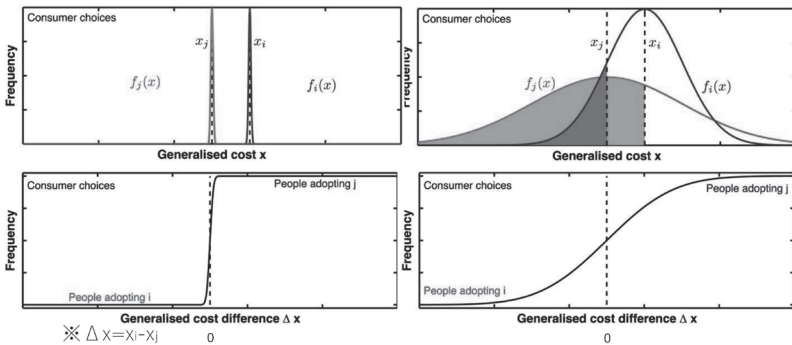
一連の学習曲線 (learning curve) によって決定されるパスに従って、投資コストは時間の経過とともに減少する。技術の普及は、市場を捉える大規模または確立された産業のより良い能力と技術の平均余命を表す「ロトカ・ヴォルテラ (Lotka-Volterra)」または「レプリケータダイナミクス (replicator dynamics)」と呼ばれる結合された非線形微分方程式のセットに従う。学習の実行と採用へのリターンの増加により、電力部門の政策から生じるパスに依存する技術シナリオが生ずる。

FTT : 電力 (FTT : Power ; Mercure, 2012 ; Mercure et al., 2014) は、最初の FTT モデルを構築した。E3ME モデルからの電力需要を取り、必要な電力を生産するために使用される技術構成を推定する。E3ME へのフィードバックには、電力、エネルギー消費、電力部門による投資が含まれる。FTT : 電力には、電力網の断続的な技術のシェアに関する制限が含まれている。

技術拡散 (technology diffusion) は、例えば、初期拡散が遅い市場に参入する際に、S 字型の機能に従い、その後急速に進行し、市場浸透の高いレベルで飽和することが長年にわたって知られている。このプロパティは経験的

な発見であるが、消費者 / 投資家が選択する際の行動に関する簡潔な議論でも説明できる。技術拡散は、既存の技術の代わりとして、新しいものと見なすことができるため、S字型の振る舞いは技術の代替の1つである。消費者が従来のシステムを新しい革新（例えば、馬を車で置き換えること、生地の合成繊維の天然物、建設中の鋼鉄用木材など）によって、従来のシステムを置き換えることを決定した場合、転換は一般的にこの傾向に従う。しかし、消費者 / 投資家が複数の新しい技術の中から選択をする場合、結果は必ずしもS字曲線ではないが、多くの形を取ることができる。それはより複雑になるが、簡潔に説明することができる（図2を参照されたい）。

図2 技術拡散における選択確率は消費者/投資家の多様性を表す



- ※ $\Delta x = x_i - x_j$
- 電力部門は、技術寿命に関連する時間間隔で、発電システムを転換する。
 - 選択は、発電の平準化コスト（levelized cost）：投資コスト、燃料費、およびメンテナンスコストの組み合わせの尺度に基く。
 - 観察された選好（preferences）や傾向に、これらのコストの較正（calibration）：建設のリードタイム、異なる快適性レベル、地域変動性（local variations）、既存の政策などを説明する。

出典：Mercuré (2012)

S字型の技術普及の傾向は、既存の技術転換の観点から、技術寿命に依存する速度で説明することができる。言い換えれば、既存の技術が摩耗のために寿命の終わりに来るとき（例えば、車は15年ごとに？）転換の要件の割合は、技術を転換する機会の割合を提供し、技術の全体的な変化率を制約する。

2つの技術の場合、 S を市場シェアの変数として使用すると、次のように記述される。

$$\Delta S_1 = S_1(1 - S_1)F_{12}\Delta t = S_1S_2F_{12}\Delta t \quad (1)$$

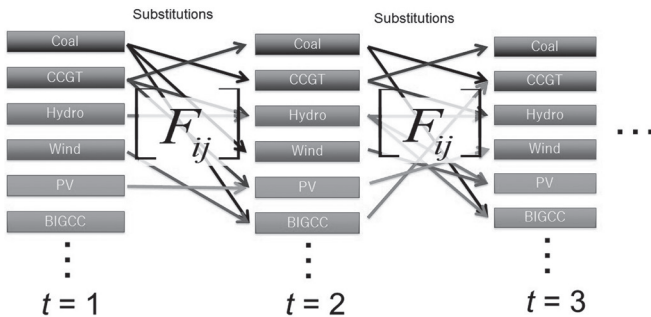
任意の数の技術の場合、技術 i と j の間の転換は次のように記述できる(図3を参照されたい)。

$$\Delta S_{ij} = S_iS_j(A_{ij}F_{ij} - A_{ji}F_{ji})\Delta t \quad (2)$$

行列 A_{ij} には技術転換時定数(可能な限り一対の技術間)が含まれ、行列 F_{ij} は投資家/消費者の選好(preferences)を表す(例えば、選択は i の60%、 j の場合は40%、その場合は $F_{ij} = 60\%$ および $F_{ji} = 40\%$ である。詳細はMercure (2012)を参照されたい。)

図3 電力部門における将来の技術転換モデルの概要

FTT: Power Modeling Technology Substitution



出典: Mercure (2012)

消費者/投資家に複数の選択肢がある場合、技術カテゴリ間の個々の転換を考慮することで、取引の複雑性を軽減することができる。ある技術と他の

すべての技術（図2の右側）との間の転換を評価できれば、その拡散または衰退の後に、他のすべての技術との転換をすべて追加することができる。この技術転換論は、いくつかの既存の技術、または消費者/投資家のための選択による市場メカニズムの競争を表現している。これは、Lotka (1925) と Volterra (1939) によって解明され、生態学分野における種と人口増加と非常によく似た進化論的な過程であることがわかった。

第2節 台湾の電力部門の概要

2.1 電力需給の現状

経済、産業、人口、気温、電力価格、需要面管理など、電力負荷に影響を与える多くの要因がある。電力消費量は、電力と電気の2つの範疇に細分化することができる。台湾の2018年の電力消費量は、約264.3TWhである。このうち、産業部門では144.1TWhが、総電力消費量の54%を占め、次にサービス部門と住宅部門が18%を占めた。

台湾の2018年の総発電設備容量は、約5,268万kWである。このうち、石炭火力発電は約1,926万kWとガス火力発電は約1,620万kWでは、電力システムの主要な電源であり、それぞれ37%と32%を占める。政府は、再生可能なエネルギーの設備容量を拡大し、約626万kWに達した。その内訳は、揚水力が209万kW、太陽光発電が274万kW、風力が70万kWとその他の再生可能なエネルギー約73万kWを含み、総設備容量の約11%を占め、揚水力および太陽光発電は主な再生可能なエネルギー源である。

2018年の総発電量は、約273.6TWhで、石炭火力発電が126.6TWh、ガス発電が94.8TWhで、それぞれ46%と35%を占めた。また、再生可能なエネルギーの発電量は、政府の大規模な普及により、2018年には12.7TWhに達し、全国の総発電量の約5%を占めている。再生可能なエネルギーの電源構成のうち、揚水力は4.5TWhと最も多く、総発電量の2%を占め、他の発電（主に廃棄物発電）は3.9TWh、残りは太陽光発電と風力発電で、それぞれ約2.7TWhと1.7TWhで、全国の総発電量の1%を占めた（經濟部エネルギー

ギー局, 2019)。

電力システムが安定しているかどうかを評価するためのもう1つの要素は、電力システムの毎日の配電情報に注意を払う必要がある。過去の3年間に、電力会社の電力システムの供給予備率は、それぞれ1.64%(2016年5月)、1.72%(2017年8月)および2.89%(2018年5月)であった。主に高温と高温の天候による日数が多く、電源設備に一時的な故障(パイプ故障やタワーの倒壊など)が発生し、電力需要が急増し、供給能力が低下している。2016年から2017年までの供給予備率が6%未満の日数は、78日から101日に急増し、電力供給がタイトであることを示している。2018年には、大潭7号機(ガスシングルサイクル)、通霄新1号機、大林新1号機などの電源設備が商業運転し始めたため、経済成長に伴う電力需要が予想以上に増加したが、供給予備率6%未満の日数が29日間に減少し、台湾の電力需給状況が徐々に改善していることを示している。

2.2 エネルギー政策の方向性

台湾の一次エネルギーの約98%は輸入に依存している。国際市場のエネルギー価格と供給が安定しているかどうか、地政学的な影響を強く受けている。台湾の電力システムは独立した電力網であり、電力供給が不十分な場合、外部からの支援を受けることができない。そのため、国内の社会・経済状況に影響を与え、国家の安全保障不安のリスクを高める。そのため、国家エネルギー安全保障の全体的考慮事項は、エネルギー供給の安全性を確保し、エネルギー源の多様化を通じて行う必要がある。政府は、2016年にエネルギー転換政策を提案し、2025年までに原子力発電の段階的に廃止するように、電気産業法を改正した。しかし、2018年11月30日に、この原子力政策の転換はエネルギー関連の国民投票が否決された。その結果に応じて、電気産業法第95条第1項が廃止された。したがって、台湾のエネルギー転換の全体的目標は、ゼロ思考と実用的なレビューの後、現在の政策が国民投票法の規定に適合していることを評価した。したがって、政府は電力の安定供給と関

連するエネルギー支援措置の完成を確実にし、エネルギー転換目標を積極的に達成することである。

2.3 エネルギー政策のポイント

2017年4月24日に、行政院は、台湾のエネルギー政策の上位原則として、エネルギー発展綱領（原文：能源發展綱領）の改正を承認した。(1)「エネルギー安全保障」、(2)「グリーン経済」、(3)「環境の持続可能性」、および(4)「社会的公平性」を両立させる。と同時に(1)「脱原発（nuclear-free homeland）」、(2)「安定的な電力供給」、および(3)「大気汚染の改善」という3つの目標を推進し、エネルギー転換とガバナンスの完全な枠組みを構築する。主な政策内容と推進戦略は次のとおりである。

2.4 エネルギー政策の推進戦略

政府は、エネルギー開発、省エネルギー、エネルギー貯蔵、インテリジェントシステム統合などの具体的な戦略を採用し、エネルギー転換を推進し、全体的な推進戦略の枠組みは以下のとおりである。

(1) クリーンエネルギー発展を推進するため、多角的なエネルギー発展を積極的に推進する。再生可能エネルギー：技術の実現可能性と費用対効果を考慮し、段階的な発展を通じて、再生可能なエネルギーを推進し、徐々に国内グリーンエネルギー産業の発展を促進する。火力発電所：電力供給の安定を確保し、エネルギーの多様化を維持するためには、火力発電の利用を維持する必要がある。天然ガス受け入れターミナルと貯蔵施設の建設を加速（拡大）し、天然ガスの使用を徐々に拡大し、ガス火力発電所の高効率再循環発電設備を廃止し、石炭火力発電所を超臨界高効率設備に転換し、石炭火力発電のシェアを徐々に削減する。

(2) 省エネルギーの最大化を推進し、エネルギー利用効率を高め、低電力需要の成長を抑制する。そして、産業部門、住宅部門、政府部門、その他の部門を総合的に推進する。また、低炭素エネルギーの転換を促進するため、

政府主導、産業対応、全国民参加による新たな節電キャンペーンの推進も計画している。

(3) エネルギー貯蔵、高速反応設備の追加、揚水発電所の増設、スケジューリング頻度の増加などを通じて、グリッドエネルギー貯蔵を推進する。

(4) インテリジェントシステムの統合は、行政院が承認したスマートグリッドマスタープランに従って推進する。スマートメーターは、高電圧需要家の建設を完成した後、その後、低電圧電力の大口需要家と都市人口密集地域をスマートメーターの優先建設対象として、時間電気価格によって駆動される。国民投票の結果を受け、実際的な見直しを経て、現段階では、2025年までの台湾の電源構成の比較目標を計画し、ガスが50%、再生可能なエネルギーが20%、石炭燃焼が27%、その他のエネルギーが3%の低炭素クリーンエネルギーを目標にしている。

台湾では、経済部(MOEA)エネルギー局は、国家エネルギー政策、法律、規制の作成および実施を担当する権限を有している。近年、国際化・自由化の経済発展の流れに対応するため、エネルギー政策は大きく変化している。一方で、エネルギー産業が規制緩和され、民営化になり、民営発電所や製油所を開放することを積極的に奨励している。また、国内の石油・電気料金を規制し、透明性を高め、エネルギー需要の管理を強化する。一方、経済成長、環境保護、エネルギー需要のバランスを達成することを期待し、エネルギー・環境問題や対策を拡大している。

これらの動きは、台湾のエネルギー産業が新しい法律や規制を通じて、より自由化されつつあることを示している。しかし、こうした自由化政策に関しては、まだ考慮すべき社会的要因が多いため、法律は必ずしも期待通り有効になるとは限らない。

台湾は現在、独自のエネルギー転換に向けて進んでいる。2016年5月から始まる民主進歩党(Democratic Progressive Party; DPP)の政権は、国内法と国際コミットメントの両方に沿って、台湾の原子力発電を段階的に廃止すると同時に、2025年までにGHGを2005年比で20%削減すると約束した。

同時に、DPP 政権は電力を供給するために、十分に信頼性が高く手頃な価格の電力供給を維持することを約束した。現在原子力発電の16%を転換するほか、総発電量に占める再生可能なエネルギーの割合が20%を目指している。これは、20GWを提供する計画された太陽光発電設備容量と3GWを提供する洋上風力発電に基づいている。政権はまた、2つの原子力発電所から発電された電力に相当するエネルギーを節約するための省エネ政策を期待し、台湾の産業部門にとって、新たな世界的なビジネス機会を引き起こすために、再生可能なエネルギーへの投資を誘致する。このすべては、2025年までに10年以内に達成される予定である（表1を参照）。

2.5 エネルギー効率と高炭素削減

台湾は、エネルギー転換、省エネルギー・炭素削減政策の実施を図る。電気産業法第47条第4項の規定により、電力産業の規制機関は、政府の省エネルギーと炭素削減の目標を達成するために、電気販売産業が設定した計画

表1 台湾における2019~2025年の電源構造

		2019年		2020年		2021年		2022年		2023年		2024年		2025年	
発電量(注1)		2,783		2,820		2,880		3,043		3,092		3,112		3,132	
エネルギー源															
発電量・億kWh・シニア	再生可能なエネルギー	181	7%	249	9%	341	12%	376	12%	431	14%	507	16%	617	20%
	ガス発電	925	33%	932	33%	962	33%	1,104	36%	1,156	37%	1,252	40%	1,580	50%
	石炭火力発電	1,271	46%	1,263	45%	1,259	44%	1,259	41%	1,259	41%	1,166	37%	851	27%
	原子力発電	299	11%	295	10%	236	8%	221	7%	165	5%	108	3%	29	1%
	その他(注2)	108	4%	82	3%	82	3%	82	3%	81	3%	80	3%	54	2%

注1：発電量=台湾電力の純購入電力+発電電力（台湾電力、民営、再生可能なエネルギー、コジェネ）+自家用電力（再生可能なエネルギー、コジェネを含む）

注2：その他のエネルギーには、燃油発電と揚水力が含まれる。

注3：揚水力発電は、ピーク時に余剰電力で揚水し、2025年に、ガスと石炭火力発電の比率に応じて、エネルギー源に計上される。

出典：經濟部エネルギー局（2019）『エネルギー統計月報』より筆者作成。

に従って、年間節電と炭素削減の結果を公表しなければならない。経済部は、負荷需要を減らすのに電力を節約するために、毎年節電計画を作成するよう国営の台湾電力会社（Taipower）に義務付けた。また、大気汚染の改善を図るにあたっては、今後も石炭火力発電所を超臨界高効率発電設備に転換する。一部の季節的な大気質不良時には、安定した電力供給を損なわない緊急稼働制限に協力し、電源構成を段階的に調整する。温室効果ガス第1段階の規制目標に向けて、全体的な電力排出係数は、2016年の1 kWh 当たり0.529kgのCO₂排出量から、2020年には1 kWh 当たり0.492kgのCO₂に減少した。2025年には、1 kWh 当たり0.394kgのCO₂排出量に削減される目標を掲げている。

第3節 E3ME-FTTモデリング方法論

この節では、台湾の電力技術構成（power technology mix）をモデル化するために、使用するツールについて説明する。前述した電力技術拡散のシミュレーションモデル（simulation model of power technology diffusion）であるFTT：電力（Mercure, 2012）を補完するE3MEモデルを使用している。⁶⁾FTT：電力は、この電力需要を投入として取り、炭素税や技術支援メカニズムなどの特定の電力部門の政策との技術構成を決定し、電力価格、電力部門の投資、電力部門の燃料需要と電力部門のGHG排出量を計算する。これらのFTT産出は、E3MEにフィードバックされ、電力需要やその他の経済的影響に関するフィードバックを得る。E3ME-FTTモデルを組み合わせることで、気候政策手段が世界中の排出量を削減する影響を分析した（Mercure et al., 2014；Azuma et al., 2019）。

3.1 動学的方程式

FTT：電力は、投資家の選択（the choice of investors）と技術の普及（diffusion of technology）という2つの部分で構成されている。投資家の選択は、離散的な選択理論（discrete choice theory）、バイナリロジット

(binary logit) に関連する方法を使用して表され、利用可能なオプション間のコスト比較を行う分散多様なエージェントのセットを含む (Mercure et al., 2014の付録を参照されたい)。これらの選択肢は、交換速度 (平均余命を使用する) と建設率に応じて、技術オプションの普及を促進するために使用される。電源の予測可能性や柔軟性に関連する技術的な制約は、グリッドの安定性の問題 (例えば、100% 風力発電) のために、特定の組成物が発生することを許さないかもしれない。資本ストックロックイン効果を避けようとする投資家は、そのような投資ミスを避ける先見性を持っていると仮定される。技術の選択を表し、可能なすべてのオプション F_{ij} のペア間の選好 (preferences) の行列を使用して、技術の変化と技術的な制約 G_{ij} のタイムスケールの行列、FTT を駆動する中心方程式：電力は、非線形有限差方程式のセットである。

$$\Delta S_i = \sum_j S_i S_j (A_{ij} F_{ij} G_{ij} - A_{ji} F_{ji} G_{ji}) \frac{1}{\bar{\tau}} \Delta t. \quad (3)$$

ここで、 S_i は設備容量 (generation capacity)、 t は時間、 $\bar{\tau}$ は平均余命 (life expectancy) である。(3) 式は、2つの競合する技術に対して、低浸透での拡散速度が遅く、その後、高浸透で飽和する前に、中間段階での高速拡散を生成する。しかし、これは、24の可能な技術オプション間の競争を表している (技術オプションの完全なリストについては、Mercure and Salas, 2012を参照されたい)。例えば、一連の中間技術がシステムの入入りする可能性のある技術のはしごを含み、より複雑なパターンを生成することができる。

3.2 技術拡散のタイムスケール

(3) 式によって表現されたFTT：電力における技術の普及は、単純な人口動態に従う。この式は、レプリケータダイナミクス (Replicator Dynamics；進化的ゲーム理論のように) または「ロトカヴォルテラ」 (Lotka-Volterra；集団生物学のように) と呼ぶことができる。生存解析

(survival analysis) および人口統計で、一般的に行われているように、何年もの間の生存の確率に対応する技術の生存関数を定義することができる。また、これらの技術の差分アップスケーリング率 (differential rate of upscaling) を決定することによって、(1) 技術の統計的寿命を尊重する技術変化のダイナミクスを導き出し、(2) 投資家の選択に関連するものを超えて、それらが転換することができるレートを導き出すことができる。(3) 式につながる理論は、Mercure and Salas (2013) で詳細に説明される。

3.3 天然資源の利用

FTT：電力における再生可能な電力技術の多様化は、コスト供給曲線を用いた天然資源の利用可能性によって制限されている。このフレームワークでは、開発レベルの増加に伴って増加する採掘コストが、投資家の選択に影響を与えるコストに供給され、コストが高くなったときの調整が制限される。このため、再生可能なエネルギー資源の広範な評価は、土地利用モデルから得られた結果の一部と Mercure and Salas (2012) の両方の文献に基づいて行われた。これは投資家の選択の条件に含まれている。再生可能でない資源（化石燃料および核燃料）の場合、価格履歴を与えられると、パス依存の枯渇シナリオを発生させ、より複雑な枯渇アルゴリズム (depletion algorithm) が使用される (Mercure and Salas, 2013)。この計算では、消費される再生可能でない資源のコスト配分と将来の消費のために残されたコスト配分は、商品の価格履歴に依存する。したがって、価格は必要な供給を生産することとして決定される。しかし、この方法論は、従来型と非伝統的な資源の両方を含む古典的なピークオイル理論 (peak oil theory) の枯渇プロフィール (depletion profiles) と一致する枯渇ダイナミクスと、世界市場のダイナミクスの一部を再現することができる。燃料費は、投資家が行う平準化原価 (levelized costs) の計算に含まれる。

3.4 ピーク需要, エネルギー貯蔵, グリッドの安定性

グリッドの柔軟性の問題, ピーク需要 (peak demand), エネルギー貯蔵 (energy storage) は, システムが不安定になるすべての技術のシェアに対する単純な制限として, FTT: 電力で理解されている。大まかに言えば, 電気の3種類の発電力が存在する: (1) ベースロードシステム (baseload systems), ここでは, 迅速に変化することができない産出と定義する (例えば, 原子力と石炭火力)。 (2) 柔軟なシステム (flexible systems), 需要や変動供給 (例えば, ガスタービン, 石油発電設備または水力) の急速な変化を補うために十分に急速に産出を変更することができるシステム, および (3) 可変性システム (variable systems), 制御不能な可変性産出 (例えば, 太陽光, 風力および波力) を有する再生可能なエネルギーシステムを有すると定義する。安定性と需要を維持するために, グリッドは変数システムまたはベースロードシステムで一意に構成することはできない。ベースロードの供給と可変システムの供給と需要の違いは, 適切なタイミングでオン/オフを切り替えることができる柔軟なシステムによって, バッファリングする必要がある。日々の需要のプロファイルに関連する制約が追加され, 柔軟性が必要になる。しかし, 電力貯蔵によって柔軟性を提供することも可能であり, 需要の時間プロファイル, つまり変動供給プロファイルを置き換え, 制約を緩めることができる (図2と図4を参照されたい)。

$$S_{flex}CF_{flex} + S_{var}CF_{var} + S_{base}CF_{base} = \overline{CF} \leq \overline{CF}_{rated}, \quad (4)$$

$$S_{flex}CF_{flex} + S_{var}CF_{var} \geq \overline{CF} \left(\frac{\Delta D}{D} + \frac{U_{var}T_D}{D} + \frac{E_S}{D} \right), \quad (5)$$

$$S_{flex} - S_{var} \geq \left(\frac{\Delta U_D}{U_{tot}} - \frac{U_s}{U_{tot}} \right), \quad (6)$$

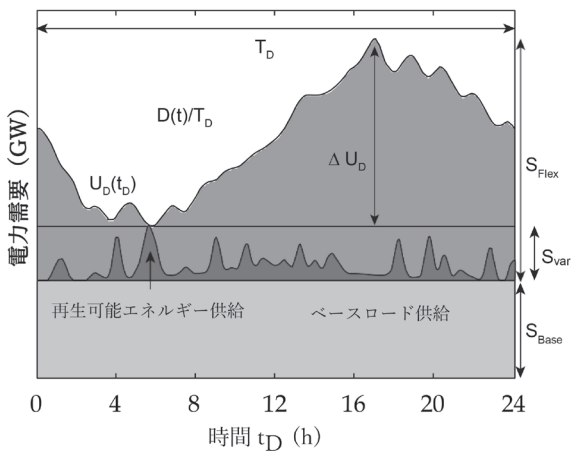
$$S_{base} + S_{var} \leq \left(\overline{CF} - \frac{1}{2} \frac{\Delta U_D}{U_{tot}} + \frac{U_s}{U_{tot}} \right), \quad (7)$$

これらの制限は、異なるタイプの共有の不等式としてコンパクトに表現され、図4にも概略的に示される。 S_{flex} 、 S_{base} と S_{var} は、それぞれ柔軟な、ベースロードおよび可変性システムの設備容量を示す。 $\frac{\Delta U_D}{U_{tot}}$ は、総設備容量に対するピークロード (peak load to total capacity ratio) であり、 $\frac{U_s}{U_{tot}}$ は蓄電能力の総設備容量に対する比率 (ratio of electricity storage production capacity to total capacity) である。 \overline{CF} は加重平均容量係数 (weighted average capacity factor) であり、 $\frac{\Delta D}{D}$ は平均電力需要比のピーク (peak to average electricity demand ratio) である。 $\frac{U_{var}T_D}{D}$ は、100%の容量係数 (capacity factors) を持つ場合に、可変ソース (variable sources) によって生成される総生成である。そして、 $\frac{E_s}{D}$ は、エネルギー貯蔵の総需要比率で、 \overline{CF}_{rated} は、加重平均容量係数である。

変動性再生可能なエネルギー (Variable renewable energy: VRE) をバックアップする柔軟な発電設備を操作すると、毎日の時間のほんの一部しか実行されないため、設備容量の要因が低くなるため、これらの不等式が柔軟な技術に使用できる最大容量係数も決定する。したがって、共有制限のために、十分な供給に柔軟性が存在する限り、いかなる技術の開発にも制限はない。しかし、システムがシェア制限の一方または他の範囲に近づくと、一部のタイプのシェア交換は (3) 式で禁止される。

これはいくつかの可能性につながる可能性がある。例えば、変動性再生可能なエネルギー市場は、ベースロード市場とは別のものであり、技術転換は利用可能な柔軟性の量によって許容される割合の量を競う。これは、ベースロード技術とは異なる価格レベルで行うことができる。同様に、柔軟な発電

図4 グリッド安定性の共有限界の単純な表現 (方程式 4-7 に関連する)



出典：Mercuré and Salas (2012)

市場は、再生可能なエネルギーやピーク需要の量に対応するために、異なる価格レベルでサブマーケットを形成することもできる。再生可能なエネルギーの増加は、柔軟性と貯蔵の程度によって制限されることが多く、それに焦点を当てることは、貯蔵容量の増加と組み合わせる必要がある。

再生可能なエネルギー、またはピーク需要の量に対応するために、異なる価格レベルでのサブマーケット。再生可能なエネルギーの増加は、柔軟性と貯蔵の程度によって強化されることが多い。再生可能なエネルギーに焦点を当てることは、貯蔵容量の増加と組み合わせる必要がある。⁷⁾

3.5 FTT：電力とE3ME間のリンケージ

2つのモデル、FTT：電力およびE3MEは、単一のフレームワーク内で完全に統合されている。E3MEは1年以内に反復処理を行うが、各地域の電力需要を推定する。FTT：電力は、需要がどのように満たされるかを推定する。異なる燃料の価格もE3MEからFTT：電力に渡される。燃料を使用する技術を通じて、発電される電力のコストを計算するためである。この情

報を受け取ることで、FTT：電力は、24の技術オプションで、電力需要を満たす方法を決定する。電気料金、新しい発電所の投資コスト、燃料使用はFTT：電力からE3MEに渡される。電力価格は需要に影響を与え、需要は反復プロセスにフィードバックされる。コストは、投入・産出関係を通じて、電力部門から他の産業への中間需要を概説する。燃料使用は、排出率の計算に利用される。

第4節 シナリオ

ここでは、台湾において、2050年までの電源構成とCO₂排出量に対する原子力・石炭電力規制の影響を考察する。シナリオは、異なる原子力および石炭火力発電所の能力の仮定に基づいている。

4.1 ベースライン シナリオ (baseline scenario)

過去のデータを基に、台湾の石炭火力発電所の年間稼働率は0.70に設定され、原子力発電所の年間稼働率は0.85に設定されている。これらの運用率は、各種の発電技術から年間電力産出を計算する際に使用される。⁸⁾ E3MEの当初の仮定は、歴史的経済統計を含む他の投入に使用される（詳細については、Cambridge Econometrics, 2019を参照して下さい）。

4.2 政策シナリオ

シナリオ1 - 原子力発電能力の制限 (nuclear regulation)

シナリオ1 (S1) は、原子力規制の影響を考察する。このシナリオでは、原子力発電所の能力が大幅に削減されるか、段階的に廃止される。2018年の国民投票では、台湾政府の脱原発 (nuclear-free homeland) 政策は否決されたが、2025年までに台湾は原子力発電所を段階的に廃止することを想定している。そのため、現在稼働中の3つの原子力発電所は、2018年から2025年までの40年間の寿命に従って段階的に停止すると想定されている。

シナリオ 2 - 石炭火力の設備容量を制限する (coal regulation)

シナリオ 2 (S2 : 石炭規制) では、台湾において石炭火力発電の設備容量が大幅に低下することが想定される。S2 は、気候変動に対応するため、CO₂排出量の削減を目指している。2020年から2030年の間に、石炭火力発電所の建設は一切想定しない。さらに石炭火力発電所の設備容量は、2030年から2050年にかけてゼロにまで減少すると想定している。ただし、このシナリオにおける石炭火力発電に関する規制の前提は、現在の台湾の石炭削減政策の傾向を考えると非現実的ではないことに注意すべきである。

シナリオ 3 - 原子力火力と石炭火力発電の能力制限 (nuclear and coal regulation)

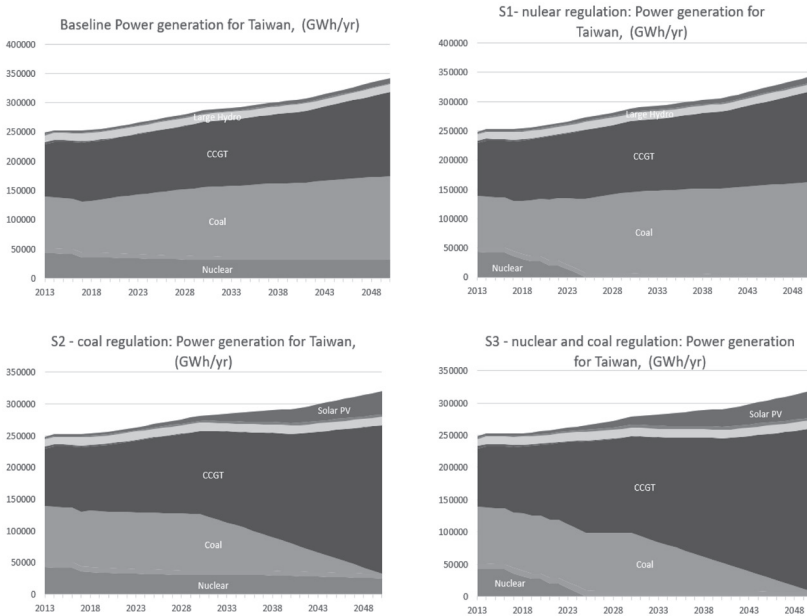
シナリオ 3 (S3 : 原子力発電と石炭火力発電の両方に対する同時制限) は、S1 と S2 の同時適用を前提としている。すなわち、S1 のような原子力発電の制限と、S2 と同様の石炭火力発電の制限が同時に実施される。

第5節 モデリングの結果

図 5 は、台湾における電源構成 (power mix) の発電量のシナリオを示している。再生可能なエネルギーは、台湾の S2 で最大のシェアを占めている。台湾は2025年までに原子力発電を段階的に廃止することを決定したため、石炭火力の削減はガスと再生可能なエネルギーに転換される。政府の目標に関しては、2025年の再生可能なエネルギーの設備容量は7,239MW で、目標の9,952MW を達成していない。しかし、2030年には23,678MW に増加し、その年の目標12,502MW の2倍に達する。これは、低浸透での遅い技術拡散を経た後、中間段階での高速技術拡散が実現されるからと思われる。S2 では、この中間段階はさらに早く始まり、再生可能なエネルギーの総設備容量は、2025年に35,977MW に達し、国家目標よりもはるかに高いレベルに達する。再生可能なエネルギーの高いシェアは、柔軟なガス火力発電の普及によって支えられ、石炭火力発電に取って代わる。

表 2 は、台湾における2050年の電源構成 (シェア : %) を示す。S1 と S

図5 台湾における電源構成の発電量のシナリオ



出典：E3ME-FTT：電力シミュレーション結果

表2 台湾における2050年の電源構成

	ベースライン	S1	S2	S3
原子力発電	9.1	0.0	7.8	0.0
化石燃料（ガスおよびIGCC技術を含）	84.1	92.5	75.7	81.6
再生可能なエネルギー（CCSを含む）	6.8	7.5	16.7	18.4
合計（％）	100.0	100.0	100.0	100.0

出典：E3ME-FTT：電力シミュレーション結果

3では、原子力発電のシェアはゼロだが、S1とS3では、化石燃料シェアが増加している。電源構成はS2のそれと似ているが、原子力が含まれている。これは、ガスやIGCC技術（化石燃料を含む）もこのシナリオでは増加するが、他の技術を補償するために、増加しなければならないことを意味し、再生可能な技術をさらに増加させる。

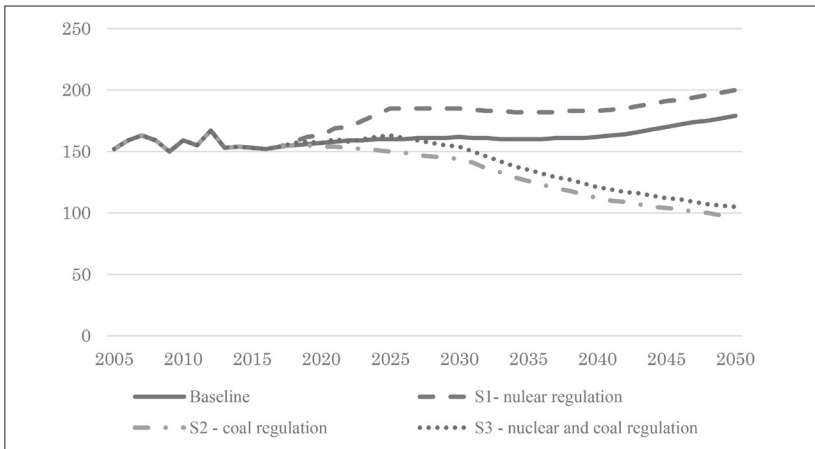
S1（原子力規制）では、他の政策を講じずに、原子力発電の規制が生ま

れるということは、発電が石炭火力に戻ることを意味する。これは、石炭火力が原子力を転換するだけでなく、ガスの使用を大幅に削減し、ベースラインと比較して、再生可能な技術の使用を大幅に削減する。この場合、石炭火力が主な発電源となる。

S2（石炭規制）では、石炭火力からの発電がベースラインの総発電量の約3分の1を占めるため、石炭火力の発電量をゼロに制限することは、原子力の限界よりも大きな影響を及ぼす。このモデルの結果は、石炭火力発電の削減を補うために、他のすべての発電技術の増加を示している。ガス、IGCC、原子力は、発電量のシェアが全体で最も大きく増加する技術である。太陽光発電は、再生可能なエネルギーの中で最も増加するが、CCS技術もこのシナリオで増加する。

S3（原子力と石炭規制）では、再生可能なエネルギーのシェアが最も増加するが、全体的に石炭火力発電の規制にもかかわらず、この電源構成は依然として、化石燃料（天然ガス）によって支配されている。そのため、石炭規制によりCO₂排出量を効果的に削減しているにもかかわらず、電力部門におけるCO₂削減目標の達成は困難である。また、一部の代替品は天然ガスで、CO₂も排出する。原子力規制は、再生可能なエネルギーの使用を促進する他の政策や化石燃料を制限する政策を設けることなく、石炭やガスなどの主な原子力転換がCO₂排出量を増加させるため、CO₂排出量が増加する。

図6は、電力部門の各シナリオにおけるCO₂排出量を示している。S1（原子力規制）では、2050年の電力部門のCO₂排出量は2005年のベースラインに比べて、約36%増加している。これは、原子力はもはや低炭素の選択肢ではなく、すべての追加発電は石炭火力から由来するからである。S2（石炭規制）では、電力部門のCO₂排出量はベースラインと比較して16%減少する。これは、石炭火力発電がCO₂排出の少ない技術に置き換えられるためである。S3（原子力と石炭規制）では、CO₂排出量の純削減率はゼロ（0%）である。なぜなら、原子力・低炭素オプションはもはや機能しないからである。さらに、S3の石炭火力発電もゼロに制限されているにもかかわらず、

図6 台湾における電力部門のCO₂排出量 (Mt-CO₂)

出典：E3ME-FTT：電力シミュレーション結果

すべての追加発電は天然ガス火力に転換され、CO₂排出量が増加する。

終わりに

E3ME-FTT：電力モデルのシミュレーション結果を用いることで、シナリオ（電子力規制）では台湾の電力部門における原子力発電が段階的に廃止されれば、石炭火力の使用は大幅に増加する可能性が高い。2050年までの技術転換による発電コストの削減により、転換可能なエネルギー技術は徐々に増加する。しかし、本稿では、固定価格買取、炭素税、補助金などの追加の再生可能なエネルギー支援政策を分析しなかった。したがって、原子力発電の規制だけでは、炭素集約型石炭発電は依然として、発電に最も費用対効果の高い技術であるため、再生可能なエネルギーの普及にはあまり寄与しない。

しかし、シナリオ2（石炭規制）では、再生可能なエネルギーが増加する。ここでは、2050年までに石炭火力発電は原子力発電ではなく、ガス火力発電と再生可能なエネルギー（主に太陽光発電と陸上風力）に転換される。つま

り、再生可能なエネルギーを使用する新技術が急速に進み、単価が急速に削減されるため、原子力発電は2050年に、最も費用対効果の高い技術ではなくなる。したがって、再生可能なエネルギーの供給源を促進するためには、電力部門の石炭火力発電を規制することが重要である。シナリオ3（原子力・石炭規制）では、電源構成が多様化する一方で、主にガス火力発電を推進し、再生可能なエネルギーを使用する技術を少なくすることを示した。

本稿は、2つの課題に直面している。1つは、政策シナリオにおける異なる電源構成の経済的影響である。社会的観点からどの電源構成が望ましいかを評価するには、GDP、競争力、雇用、家計所得などの指標を含み、異なる電源構成が経済に及ぼす影響を評価する必要がある。第2の課題は、台湾の持続可能な低炭素社会につながる再生可能なエネルギーの利用を推進する政策のためのさらなる考察である。

台湾のエネルギー転換を実現するためには、エネルギー転換を推進する上で、エネルギー供給の安定を確保し、環境の安定性を考慮に入れ、情報公開、市民参加、政策リスクコミュニケーションを強化し、転換プロセスが円滑に行われるように、台湾のエネルギー政策の中核価値は、「エネルギー安全保障」、「グリーン経済」、「環境持続可能」、そして「社会的公平性」という4つの共通のガバナンスとバランスを取らなければならない。

2018年11月24日の国民投票の要請に直面して、経済部エネルギー局は、地方自治体による石炭火力発電設備の稼働制限、高炭素の電源設備の早期の廃止などの対策が求められている。市民社会とのコミュニケーション調整、低炭素電源設備設置の迅速化、発電技術更新の加速化など、積極的に「将来の技術転換（FTT）」の評価と見直しを行っている。汚染防止施設や電源設備が大気質に合わせて、環境ガバナンスを実施し、発電所の大気汚染排出量を削減し、汚染削減の目標を達成するため、石炭火力発電所を新たに建設する計画はない。ガス火力発電については、新しい電源設備と拡張、または新しいガス受け入れターミナルが環境影響評価に難航しているが、将来的には、すべての部門間のコミュニケーションとスケジュール管理を積極的に強

化し、予定通りに完成しなければならない。再生可能なエネルギーについては、今後、洋上風力発電や太陽光発電の設置を積極的に推進し、承認を受けた事業者がフォローアップ工事を行い、各事業者に対し、スケジュールに従い、洋上風力発電所の設置を積極的に処理し、予定通りに設置を完成するよう促す政策課題が残っている。

原子力発電については、經濟部は、国民投票の結果に基づいて、電気産業法第95条第1項の削除後、原子力の延命および第4原子力発電所を稼働する可能性を現実的に評価するが、客観性は実現不可能であり、地方世論の支持は得られない。将来的には、原子力発電所の稼働が困難で、石炭火力発電が制限されている限り、ガス火力とグリーンエネルギーが将来の電力供給の主力となるだろう。供給予備率15%の電力供給の安定化目標を達成するため、政府は、供給側の対応策を綿密に計画するほか、需要側の省エネルギー対策などの電力需要を低減するインセンティブと新技術を政策的に導入しなければならない。クリーンエネルギーシステム及び健全な生活環境を構築し、新たなグリーンエネルギー産業の発展を促進する。また、グリーン産業を促進し、エネルギー民主主義と正義を促進し、エネルギーの持続可能な発展を促進するさまざまな課題に直面し続けている。

注：

- 1) 国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC), 「1.5°Cの地球温暖化に関する特別報告書」, 2018/10. (<https://www.ipcc.ch/sr15/>, “The Special Report on Global Warming of 1.5°C (SR15)”, on 2020.06.20)
- 2) 国連環境計画 (UNEP), 「排出ギャップレポート2019」, 2019/11/26. (<https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2019>, “Emissions Gap Report 2019”, on 2020.03.20.)
- 3) グリッドパリティとは、再生可能なエネルギーによる発電コストが既存の電力コスト（電力料金、発電コスト等）と同等か、それより安価になる点（コスト）を指す。
- 4) エネルギー政策立案の情報源とするための長期エネルギーモデルの適用は文献で広く

論じられている。例えば、国際エネルギー機関の再生可能エネルギー技術配備 (IEA-RET D) 実施協定のもとで RE-ASSUME プログラムにより発表された「シナリオ、モデル分析、および仮定を評価するための意思決定者の手引き (Decision Maker's Guide to Evaluating Scenarios, Modelling and Assumptions)」では、エネルギーシナリオとモデルが不確実性のもとでの政策決定の情報提供にどのように使用されたかを取り上げ、そのようなモデル結果の使用にひそむ一般的な危険について述べている。手引きでは、シナリオが将来を予測するとは期待されず、モデルは問題に適合させる必要があることが強調されている。通常業務の仮定のもとで、最も可能性のある結果を表すものとして、通常業務シナリオが開発されている。これは予測としてではなく、さまざまな選択肢を比較するための基準として、使用すべきである。モデルの選択が目の前の問題によって決まるという事実は、あらゆる状況に適用できる完璧なモデルが存在しないことを示唆している (Mai et al. 2013)。

- 5) 既存の生産設備を置き換える障壁として「ロックイン効果」と呼ばれるものがある。工場には電気設備やガス設備、蒸気・水配管などユーティリティーが存在しており、通常、生産設備はそのユーティリティーありきで設計される。例えば、既存のユーティリティーに蒸気配管があれば、生産設備のリブレースも蒸気を活用するものになる。ユーティリティーの更新時期には、今度は蒸気を用いる生産設備が制約となって、蒸気配管が更新される。このように、一度導入された設備の燃料転換は難しい。これが「ロックイン効果」である。
- 6) E3ME モデルの詳細については、www.e3me.comを参照されたい。
- 7) 貯蔵のパラメータは、柔軟な生成の国際貿易によって得られる柔軟性を暗黙的に表していることに注意してください。この仮定では、電気取引量は1日を通してゼロになる。電気の国際貿易は、モデルのこのバージョンではカバーされていないので、それは外性変数の仮定として取り扱う。
- 8) 年間電力産出 (kWh) = 設置容量 (kW) × 年間稼働率 × 8,760時間である。

参考文献：

- ・経済部エネルギー局 (2019) 『107年全國電力資源供需報告』。
- ・A. J. Lotka (1925) *Elements of Physical Biology*, Williams and Wilkins Company.

- ・ Aiko Azuma, Unnada Chewpreecha, Sung-In Na, Li-Chun Chen, Yanmin He, Ken'ichi Matsumoto and Soocheol Lee (2019), 'Regulatory Policies to Reduce the Amount of Nuclear and Coal-fired Power Generation in East Asia', in Soo-Cheol Lee, Hector Pollitt and Kiyoshi Fujikawa (Eds.), *Energy, Environmental and Economic Sustainability in East Asia*, London and New York : Routledge, pp. 19-49.
- ・ IRENA (2017) *Planning for the Renewable Future: Long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- ・ Jackson, T. (2009) *Prosperity Without Growth*, New York : Routledge.
- ・ Jansen, H and G Klaassen (2000) 'Economic impacts of the 1997 EU energy tax : simulations with three EU-wide models', *Environmental and Resource Economics*, Volume 15, Issue 2, pp 179-197.
- ・ Keynes, JM (1936) *The General Theory of Employment, Interest and Money*, New York : Palgrave Macmillan.
- ・ Lee, S, H Pollitt and SJ Park (2015) *Low-Carbon, Sustainable Future in East Asia*, New York : Routledge.
- ・ Mai, T., Logan, J., Blair, N., Sullivan, P., Bazilian, M., (2013) *RE-ASSUME: A Decision Maker's Guide to Evaluating Energy Scenarios, Modeling, and Assumptions* (No. 1090954). International Energy Agency - Renewable Energy Technology Deployment.
- ・ Mercure, J-F. (2012) 'FTT : Power : A global model of the power sector with induced technological change and natural resource depletion', *Energy Policy*, Volume 48, pp 799-811.
- ・ Mercure, J-F and P Salas (2012) 'An assessment of global energy resource economic potentials', *Energy*, Volume 46, Issue 1, pp 322-336
- ・ Mercure, J-F and P Salas (2013) 'On the global economic potentials and marginal costs of non-renewable resources and the price of energy commodities', *Energy Policy*, Volume 63, pp 469-483.
- ・ Mercure, J-F, P Salas, A Foley, U Chewpreecha, H. Pollitt, PB Holden and NR Edwards (2014) 'The dynamics of technology diffusion and the impacts of climate policy

- instruments in the decarbonisation of the global electricity sector', *Energy Policy*, Volume 73, pp 686-700.
- Mercure, J-F, H. Pollitt, AM Bassi, JE Viñuales and NR Edwards (2016) 'Modelling complex systems of heterogeneous agents to better design sustainability transitions policy', *Global Environmental Change*, Volume 37, pp 102-115.
 - Mercure, J-F, H. Pollitt, NR Edwards, PB Holden, U Chewpreecha, P Salas, A Lam, F Knobloch and JE Viñuales (2018b) 'Environmental impact assessment for climate change policy with the simulation-based integrated assessment model E3ME-FTT-GENIE', *Energy Strategy Reviews*, Volume 20, pp 195-208.
 - NASEO, (2014) *State Energy Planning Guidelines — A Guide to Develop a Comprehensive State Energy Plan Plus Supplemental Policy and Program Options*. National Association of State Energy Officials (NASEO), Arlington, Virginia, US.
 - Ogawa, Y., Mercure, J-F., Lee, S., Pollitt, H., Matsumoto, K. and Chiashi, A. (2015). 'Modeling the power sector in East Asia - Economic and environmental impacts of the choices of power sources', in S. Lee, H. Pollitt and S-J. Park (Eds.), *Low- Carbon, Sustainable Future in East Asia : Improving Energy Systems, Taxation and Policy Cooperation*. New York : Routledge, pp. 63-72.
 - Pollitt, H and J-F Mercure (2017) 'The role of money and the financial sector in energy-economy models used for assessing climate and energy policy', *Climate Policy*, Volume 18, Issue 2, pp 184-197.
 - Hector Pollitt, Soocheol Lee and Unnada Chewpreecha (2019) 'Introduction to the E3ME and FTT models', in Soo-Cheol Lee, Hector Pollitt and Kiyoshi Fujikawa (Eds.), *Energy, Environmental and Economic Sustainability in East Asia*, London and New York : Routledge, pp. 5-15.
 - V. Volterra (1939) 'The general equations of biological strife in the case of historical actions', *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 6 (1) 4.
 - Wilson, R., Biewald, B., (2013) *Best Practices in Electric Utility Integrated Resource Planning — Examples of State Regulations and Recent Utility Plans*. Synapse Energy Economics and the Regulatory Assistance Project (RAP).