

京都大学大学院経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座
ディスカッションペーパー

OECD 諸国はどのように石炭を削減し再生可能エネルギーを導入してきたか？

－ 石炭＝再エネ指標の提案と分析 －

How OECD countries reduce coal and increase renewables?

A Proposal of “Coal-RE index” and Analysis



2020年5月22日

22nd May, 2020

京都大学大学院経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座 特任教授

安田 陽

Yoh YASUDA

Project Professor,

Graduate School of Economics

Kyoto University



OECD 諸国はどのように石炭を削減し再生可能エネルギーを導入してきたか？

－石炭＝再エネ指標の提案と分析－

How OECD countries reduce coal and increase renewables?

A Proposal of “Coal-RE index” and Analysis

京都大学大学院経済学研究科 特任教授 安田 陽

Yoh YASUDA

Project Professor, Graduate School of Economics, Kyoto University

Abstract:

This paper proposes a couple of tools like “C-R Map”, a correlation map between share of coal-fired plant and that of renewable energy in an annual consumption and “CR Index”, an index composed by above two indicators in order to objective visualization and quantitative analysis of statistical data rather than an abstract “trend” or “tendency” of the world current for the climate change such as “reducing coal and increasing renewables”. Using the proposed C-P Map and CR Index, an international comparison analysis on share of coal and renewables from 1990 to 2018 in 36 OECD member countries. The results by the tools quantitatively shows that 31 countries among OECD members clearly have a trend decreasing share of coal and increasing share of renewables, while only 5 countries, Chile, Turkey, Mexico, Japan and Korea, have unique and opposite trend against the rest of member countries.

Keywords: generation mix, renewable energy, coal-fired plant, Organisation for Economic Cooperation Development (OECD), Index

要旨

本論文では、気候変動対策として世界的な動向である「石炭を減らし再生可能エネルギーを増やす」という傾向を、単なる主観的な印象ではなく、統計データから客観的に可視化・定量化するために、石炭火力＝再生可能エネルギー導入率相関図（C-R マップ）および石炭＝再生可能エネルギー指標（CR 指標）という 2 つのツールと指標を提案する。また、このツールと指標を用いて、経済協力開発機構(OECD)加盟 36 ヶ国の 1990～2018 年の石炭火力および再エネ導入率に関する国際比較分析を行った。C-R マップおよび CR 指標という客観的評価手法を用いた定量分析の結果、OECD 加盟 36 ヶ国中、1990～2018 年の 29 年間に石炭火力導入率を減らし再エネ導入率を増やす傾向にある国は 31 ヶ国あり、それ以外の特異な傾向を持つ（石炭火力導入率を増やしたおよび／または再エネ導入率を減らした）国は、チリ、トルコ、メキシコ、日本、韓国の 5 ヶ国しかないことを明らかにした。

キーワード： 電源構成、再生可能エネルギー、石炭火力発電、経済協力開発機構 (OECD)、指標

(2020年3月31日受理、2020年5月19日再投稿)

1. はじめに

気候変動に対する対策は喫緊の課題であり、その具体的な行動として「石炭の低減」と「再生可能エネルギー（以下、再エネと略称）の増加」の2つの大きな方針が世界中で掲げられている。世界中で「石炭の低減」と「再エネの増加」が推奨され、複数の国や地域でその行動が進んでいるが、実際にその2つの潮流がどのような形で進んでいるだろうか？

これまでも、さまざまな国際機関や世界各国が公表する統計データを丹念に分析すれば、経済協力開発機構(OECD)加盟36ヶ国を始めとする世界中の多くの国や地域で「石炭の低減」と「再エネの増加」という傾向や動向を示すことができ、この「傾向」や「動向」を肌感覚で感じている研究者や政策決定者・ジャーナリストも少なくないだろうが、それらが単に抽象的な「傾向」や「動向」に留まる限りその評価は主観が入りやすく、それに懐疑的な人々を説得することは難しい。

そこで本論文ではこの「石炭の低減」と「再エネの増加」という2つの潮流を、単なる抽象的な「傾向」や「動向」に留めず、それらを可視化し定量化することを目的として、C-R correlation map（石炭火力＝再エネ導入率相関図。以下、C-Rマップと略称）およびCR index（石炭＝再エネ指標。以下、CR指標と略称）という2つのツールと指標を提案する。また、このツールと指標を用いて、OECD加盟36ヶ国の1990年から現在（本校執筆時点で入手可能な最新データ年である2018年）までの石炭火力および再エネの導入率に関する国際比較分析を行う。

1.1 研究の背景

気候変動に対する具体的かつ実効性のある対策としての「石炭の低減」と「再エネの増加」の2つの方針は、例えば国際エネルギー機関(IEA)の“World Energy Outlook” (IEA, 2019a) や国際再生可能エネルギー機関(IRENA)の“REmap” (IRENA, 2018) など、多くの国際機関の報告書にも明記されている。

図1はIEA (2019) およびIRENA (2019) に掲載されたパリ協定（2℃目標）を順守するためのエネルギーミックスの見通し（シナリオ）を示した図である。2つの国際機関は互いに協調・協力しながらも異なるモデルを用いているため、結果（グラフの形状）が若干異なるが、いずれのグラフからも、石炭火力を可能な限り低減させることと、気候変動対策に最も貢献する手段が再エネである（次いで省エネルギー）であることが唱えられている。

また、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) がまとめた特別報告書 (IPCC, 2014) においても、石炭火力の高い負の外部性と再エネの相対的に低い外部性についての諸研究の成果がレビューされており（図2）、石炭火力を削減し再エネを導入することは、気候変動の観点からだけでなく、健康被害の観点からも重要であることが科学的に裏付けられている。

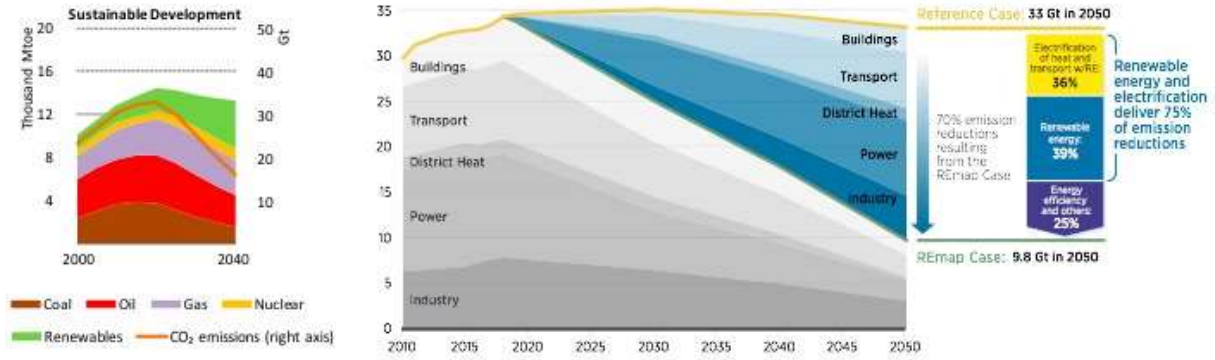


図1 IEA(左)およびIRENA(右)によるエネルギーミックスの見通し

出所：IEA(2019a), IRENA(2019)

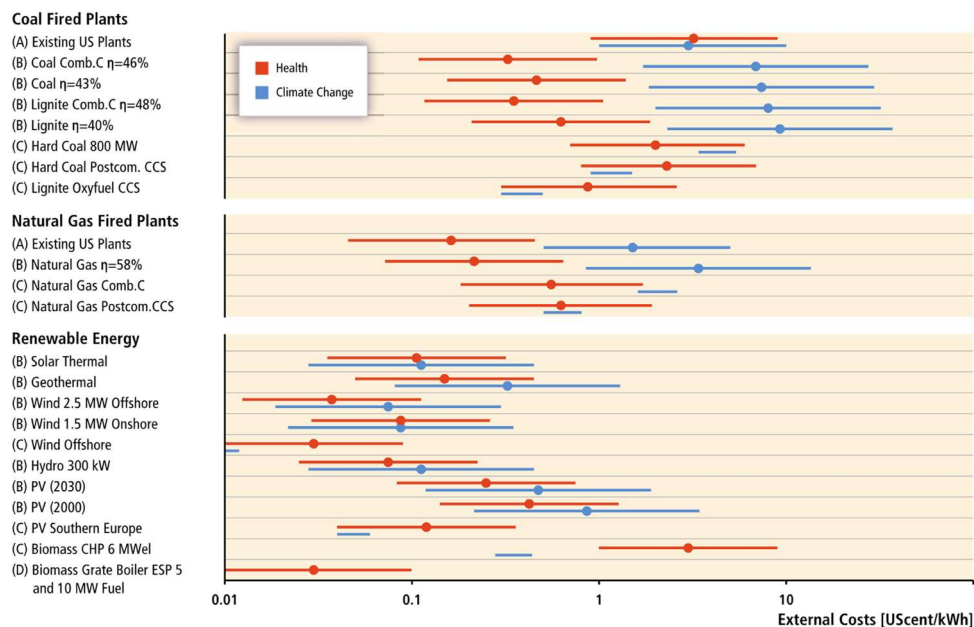


図2 IPCCによる各種電源の外部コストのレビュー

出所：IPCC(2011)

各国政府レベルでも、特に欧州を中心として石炭火力発電のフェーズアウトが今や競い合うように宣言されている。例えば、2017年のCOP23（国際気候変動枠組条約大23回締約国会議）において、英国およびカナダの呼びかけにより脱石炭火力連盟（PPCA: Powering Past Coal Alliance）が発足し、2020年3月末時点で33ヶ国および27の地方自治体、37の民間組織・企業が参加している。英国は欧州の中でもいち早く2015年の段階で石炭フェーズアウトを宣言し、2025年までに石炭火力発電を閉鎖することを予定している。カナダも2030年までに石炭をフェーズアウトすることを公表している(PPCA, 2020; 自然エネルギー財団, 2017)。

「石炭の低減」と「再エネの増加」という2つの潮流は、国際機関や政府機関だけでなく、民間でも加速度的に進みつつある。例えば、石炭に対するダイベストメント

(divestment, 投資の引き上げ) は現時点 (2020 年 3 月現在) で 1,200 の組織・企業で約 14 兆ドル (1,550 兆円) の規模で行われている (Fossil Free, 2020)。また、IEA の調査によると、2018 年の電力部門に対する投資の内訳は再エネに対する投資が最も多く全体の 38% を占めている (図 3)。

このように、「石炭の低減」と「再エネの増加」という 2 つの潮流は世界中で (少なくとも OECD 諸国では) もはや否定や過小評価が不可能なほど、大きな動向として進展し、その勢いはさらに加速しつつある。

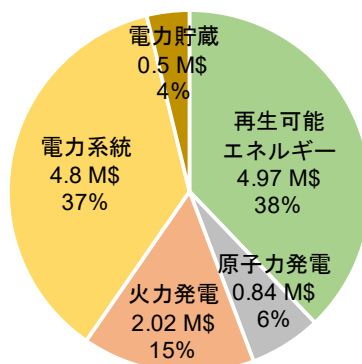


図 3 世界の電力部門に対する投資状況 (2018 年)

出所: IEA(2019b)のデータより筆者作成

図 4 に、1990 年および 2018 年における OECD 加盟 36 ヶ国の石炭火力導入率をランキングとして降順に並べたものを示す (データソースの詳細については 2.1 節で後述)。なおここで、「導入率」とは、年間消費電力量に対する当該電源の年間発電電力量の比率を指す。また、同様にして図 5 に、1990 年および 2018 年における再エネの導入率ランキングを示す。なお、図で導入率が 100% を超えている国がいくつか見られるが、その理由は、(i) 発電所構内の電力消費、(ii) 送電損失、(iii) 統計誤差、(iv) 電力輸出によるものであり、特に (i)~(iii) の合計は各国とも概ね 10% 程度であるため、概ね 110% を超えた分は (iv) の国際連系線を通じた輸出によるものと考えてよい。

図 4 の石炭火力導入率の 1990 年と 2018 年の比較から、2018 年の時点は 1990 年に比べ、石炭火力の導入率を減らした国が多いことが読み取れる。また図 5 の再エネ導入率の 1990 年と 2018 年の比較から、2018 年の時点は 1990 年に比べ、再エネの導入率を増やした国が多く、また 1990 年には再エネといえば多くの国でほぼ水力発電だけであったものが、2018 年では風力発電をはじめさまざまな種類の再エネが導入され、実際に発電電力量を稼いでいることが見て取れる。さらに、図 4 と図 5 の比較から、石炭火力の導入率が多い国は再エネの導入率が少ない傾向にあり、またその逆の傾向もいえることがわかる。

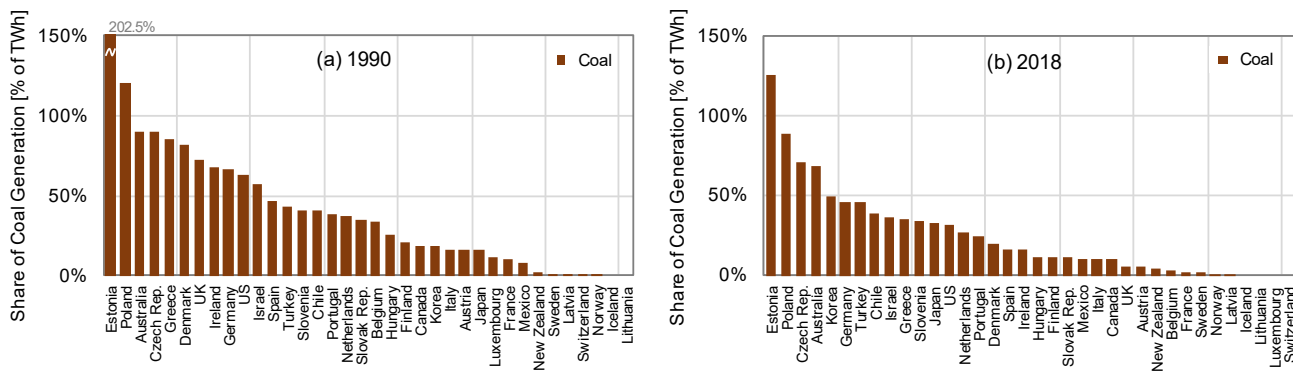


図4 1990年および2018年における石炭火力導入率ランキング

出所：IEA(2019c), IEA(2020)のデータより筆者作成

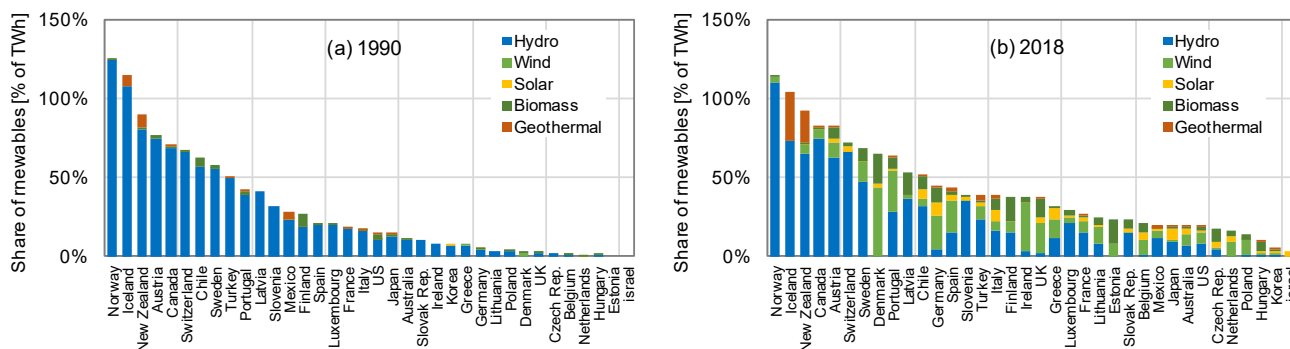


図5 1990年および2018年における再エネ導入率ランキング

出所：IEA(2019c), IEA(2020)のデータより筆者作成

1.2 本論文の目的と提案手法

しかしながら、上記の考察における「傾向」はあくまで図4と図5の合計4つのグラフを見比べた結果得られる「視覚的な印象」や「全体的な傾向」に過ぎず、評価者がみな同じ結論に至る客観的な抽出情報とはいふことができない。したがって、本論文では、より直感的に理解が容易な可視化ができ、かつ客観的な評価が可能な「C-Rマップ」や「CR指標」を提案し、それらを用いてより客観的・定量的な分析を行うこととする。C-Rマップは誰でも容易に思いつく手法であるが、本論文では改めてその数学的意味と視覚的評価手法としての有用性を確認し、直感的に理解が容易な可視化のための一手法を提案する。また、CR指標は、筆者が調査する限りこれまでにない新規性のある指標であり、本論文にて初めて提案するものである。

本論文で用いる1つめのツールはC-R correlation map（石炭＝再エネ相関図。以下、C-Rマップと略称）であり、対象となる国や地域の石炭火力導入率（年間総消費電力量に占める石炭火力発電の発電電力量の比率）と再エネの導入率の相関を描いた

グラフである。このマップは単純な2変数の相関図に過ぎないが、この2次元マップ上で空間（複数の国・地域のデータ）や時間（対象となる国や地域の経年変化）を比較することで、「国際動向」や「世界の中の位置付け」が把握できるようになる。2変数からなる2次元は多くの分野で用いられており、特段目新しい手法ではないが、ここでは図6に示すような数学的な概念図を用いて、改めて客観的・定量的評価手法の意義を確認する。

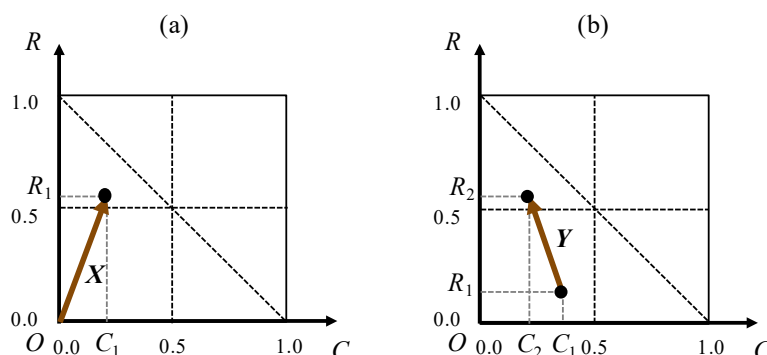


図6 C-R マップの概念図

筆者作成

今、石炭火力導入率 C と再エネ導入率 R の直交座標系空間（C-R 空間）を考え、ある国や地域のある年の石炭火力導入率および再エネ導入率をそれぞれ C_1, R_1 とすると、その相関プロットは図の2次元ベクトル（図6(a)の例ではベクトル $X = (C_1, R_1)$ ）で表すことができる。

なお、C-R 空間では C および R は負の値を取らず、 C と R の和は通常1（100%）を超えないので、 $(C, R) = (1.0, 0.0)$ と $(C, R) = (0.0, 1.0)$ の2点を結ぶ右下から左上に横切る直線（以下、-45度線と呼称）より左下の領域三角形OCRの中に概ね分布する（厳密には、発電所内の消費電力や送電損失、統計誤差、輸出により100%を超える国もあるため、-45度線よりも上方にプロット点が分布することもある）。

複数の国や地域、あるいは年のデータ同士を比較する場合は、2点を結ぶベクトル（図6(b)の例ではベクトル $Y = (C_2 - C_1, R_2 - R_1)$ ）の長さ（距離）および方向を計測することにより、2点間の相対関係が定量的に表現される。また、対象となる国や地域の進展度合いや複数の国・地域間の比較が2次元空間で視覚的に把握しやすくなり、直感的な理解ができるようになる。

本論文で提案する2つ目のツールは **CR index**（石炭＝再エネ指標。以下、CR 指標と略称）である。この指標は、石炭火力と再エネの導入率という2つの指数を統合したものであり、「石炭を減らして再エネを増やす」という「2つの潮流」の進展度合いを統合して客観的・定量的な数値として表すためのものである。CR 指標は、簡単にいうと、C-R 空間にあるベクトル X を-45度線に正射影させたものである。これによ



り、石炭火力導入率と再エネ導入率という 2 つの指数が統合され、一つの指標として客観的・定量的に評価できるようになる。

より具体的には、石炭火力導入率 C と再エネ導入率 R という 2 つ軸で張られる C - R 空間を、仮想的な CR - A 空間に座標変換することで、元の CR 空間上のベクトルを CR - A 空間上の CR 軸 (Coal-RE の意) と A 軸 (Alternative の意) に正射影して成分分解することによって、元のベクトル X の CR 軸成分として CR 指標が得ることができる (図 7(a))。

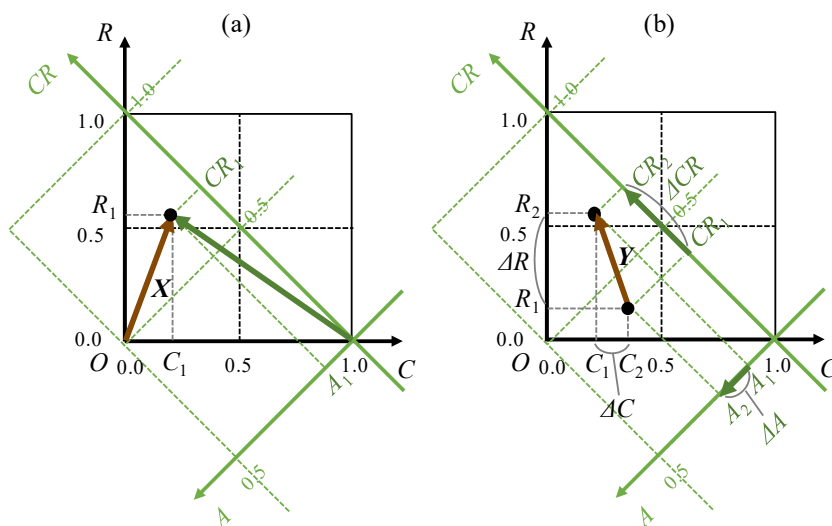


図 7 CR 指標の概念図

筆者作成

CR - A 空間の CR 軸が C - R 空間の -45 度線に相当し、 CR - A 空間の原点は元の C - R 空間の点 $(C, R) = (1.0, 0)$ に位置する。座標変換は、 C - R 空間を -135 度 ($-3/4 \cdot \pi$) 回転させ、原点を点 $(C, R) = (1.0, 0)$ に移動させたより写像することによって得られる (詳細の変換式は 3.1 節で詳述)。

図 7(a) の概念図では、元の C - R 空間上にあるベクトル $X = (C_1, R_1)$ は、座標変換により CR - A 空間上では $X' = (CR_1, A_1)$ と表記される。この CR_1 が本論文で提案する CR 指標である。異なる国や地域、年のデータを比較する場合は、図 7(b) に示すように、 C - R 空間上のベクトル $Y = (C_2 - C_1, R_2 - R_1)$ は CR - A 空間に座標変換されると $Y' = (C_2 - C_1, R_2 - R_1)$ と成分分解される。 CR 軸に写像された $\Delta CR = C_2 - C_1$ が CR 指標の変化分として表される。

このような可視化・定量化のツールを用いることで、これまで「世界では石炭火力が減少し、再エネが増加している」「ある国では石炭火力の減少や再エネの増加があまり進んでいない」と漠然と表現されていた「傾向」や「潮流」が簡易な指標により定量化でき、客観的評価が可能となる。

1.3 類似の先行研究例と本研究の意義、期待される効果

一般に指標 (index) とは、統合指数 (composite indicator) のことを指し、単一の指数 (indicator) ではなく複数の指数から合成された指数を指す。例えば、OECD では“composite indicator” は以下のように定義されている(OECD, 2013)。

- **Definition:** A composite indicator is formed when individual indicators are compiled into a single index, on the basis of an underlying model of the multi-dimensional concept that is being measured.

Context: A composite indicator measures multi-dimensional concepts (e.g. competitiveness, e-trade or environmental quality) which cannot be captured by a single indicator. Ideally, a composite indicator should be based on a theoretical framework / definition, which allows individual indicators / variables to be selected, combined and weighted in a manner which reflects the dimensions or structure of the phenomena being measured.

- **【筆者仮訳】**

定義：統合指数は、個々の指数が計測される多次元概念のモデルを元に単一の指標に統合される際に形成される。

背景：統合指数は、単一の指数では把握できない多次元概念（例：競争性、電子取引もしくは環境の質）を計測する。理想的には、統合指数は理論的枠組み／定義に基づくことが望ましく、そこでは個々の指数／変数が計測される現象の次元または構造を反映する方法で選択・結合・重みづけることが許される。

OECDをはじめとする国際的な機関が公表する統合指数としては、例えば GDP（国内総生産, Gross Domestic Product）や HDI（人間開発指数, Human Development Index）などが挙げられ、それらは多数の変数と複雑な重み付けから成り立っており、その方法論を定義するためには多くの研究者や政策決定者の合意形成が必要となる。環境や持続可能な発展 (SDGs: Sustainable Development Goals) の分野でもそのような統合指数（指標）の開発の試みが進められている（例えば、中口(2000), Sachs(2018), OECD(2019), 高井(2020)などを参照のこと）。

本研究の提案手法は上記のような多数の変数を用いて複雑な国際的合意形成が必要となるレベルではなく、統合指標の作成方法としては最も単純で基本的なものに過ぎない。その点で、本研究は学術上の大きな新規発見や高度な独自性があるとまでは言うことができない。

しかしながら、例えば「石炭の低減」と「再エネの増加」といった「2つの潮流」や「世界動向」という現象を議論する際にも、漠然とした「傾向」や「動向」を論ずるだけでは、評価者がみな同じ結論に至る客観的な抽出情報とは必ずしもいうことができず、特にこの傾向や動向に懐疑的な人々を説得することはできない。特に政策決定者や産業界の意思決定者に対しては、評価者の主観や恣意性が入らない「誰が評価しても同じ結論に至る」客観的な評価指標による情報提供が不可欠となる。



本論文で提案した CR 指標は、わずか2つの変数から合成された指標であり、重み付けもないため恣意性や主観も混入の余地がなく、初等数学（高校数学）の基礎理論さえ身につけていれば多くの人に十分理解が可能な手法により算出されている。また、必要となる石炭火力や再エネの発電電力量に関するデータソースも、少なくとも OECD 加盟国に関しては、誰でも入手しやすい整理された公開データが用意されている。このような、公開された統計情報と客観的な法則に基づいた透明性の高い簡易なツールや指標を用いて議論することにより、必ずしも電力・エネルギーが専門でない政策決定者やジャーナリスト、市民にも、「世界的な動向」を直感的かつ定量的に理解しやすい情報を提供でき、エネルギー問題や気候変動問題を議論する上で役に立つものと期待できる。

2. C-R マップ(石炭＝再エネ導入率相関図)

本章では、“C-R correlation map”（石炭＝再エネ導入相関図、以下、C-R マップと略称）を用い、この C-R マップ上で空間（複数の国・地域のデータ）や時間（対象となる国や地域の経年変化）に関する比較分析を行う。

2.1 本論文の分析対象とデータ諸元

気候変動緩和のためには熱や運輸などさまざまなセクターでの温室効果ガスの削減効果を検討することが必要であるが、本論文では、再エネの導入が最も早く進む部門である電力部門に注目し、かつ、年間消費電力量や電源別発電電力量がまとまって整理されている OECD 加盟国 36 ヶ国をデータ分析の対象として^{注1}、各国の石炭火力および再エネの発電電力量に関する 1990～2018 年までの 29 年間の推移を定量的に比較分析する。

統計情報のデータソースは主に IEA のウェブデータサービス “Electricity Information”（有料）(IEA, 2019c) を用い、“OECD, Electricity and Heat Generation” および “OECD, Electricity/Heat Supply and Consumption” のデータベースから、1990 年から現在入手可能な 2018 年までの 29 年間のデータをダウンロードし、分析した^{注2}。

IEA による石炭と再エネに関するデータの詳細分類と本論文での分類の関係を表 1 に示す。また、IEA の分類に従って、地域ごとの指数を比較するために、OECD 加盟国を表 2 のようにいくつかのグループに分類した。

なお、2018 年の消費電力量に関しては、本稿執筆時点（2020 年 3 月）ではデータ

注1: 1990 年以降に OECD に加盟した国（メキシコ、チェコ、ハンガリー、ポーランド、韓国、スロバキア、チリ、スロベニア、イスラエル、エストニア、ラトビア、リトアニア）についても、IEA(2019c)では 1990 年以降のデータが提供されている。

注2: ここで、IEA(2009c)から参照した各電源別の発電電力量は、発電所構内での電力消費分を考慮しないグロス (gross) の値であり、発電所構内での電力消費を差し引いたネット (net) でないことに注意。IEA(2019c)ではネットの発電電力量情報も入手可能だが、各電源別に詳細に分類されておらず、各電源別のデータはグロスでしか入手できない。また、IEA(2020)では各電源別のネットの発電電力量も入手可能であるが、2015 年以前のデータは記載されておらず、長期に亘る年次比較ができないため、本論文での発電電力量はすべてグロスで統一している。

が IEA(2009c)からは入手できなかったため、IEA(2020)に記載されているデータを参照した^{注3}。

表 1 IEA による各種電源の分類

(IEA(2019d), IEA(2020)による)

本論文での分類	IEA による詳細定分類
石炭	hard coal and patent fuel, Brown coal and BKB, Coal gases, Anthracite, Coking coal, Other bituminous coal, sub-bituminous coal, Lignite, Patent fuel, Coak Oven Coke and Lignite Coke, Gas coke, Coal tar, BKB (Brown coal briquettes), Gas works gas, Coke oven gas, Other recovered gases, Peat, Peat products, Oil shale and oil sands
石油	Liquid Fuels and Refinery Gas, Crude oil, Refinery gas, Liquefied petroleum gases, Naphtha, Kerosene type jet fuel, Kerosene, Gas/diesel oil, Fuel oil, Bitumen, Petroleum coke, Non-specified petroleum products
ガス	Natural Gas
再生可能エネルギー	Hydro, Geothermal, Solar, Tidal, wave and ocean, Wind, Municipal waste (renewable), Solid biofuels, Biogas, Landfill gas, Sewage sludge gas, other biogases, Biodiesel, Biogasoline, Liquid biofuels, Non-specified comb. renew. and waste
バイオマス	Municipal waste (renewable), Solid biofuels, Biogas, Landfill gas, Sewage sludge gas, other biogases, Biodiesel, Biogasoline, Liquid biofuels, Non-specified comb. renew. and waste

表 2 IEA による OECD 加盟国の分類

(IEA(2019d)による)

グループ名	IEA による分類と本論文における日本語表記
OECD アメリカ (OECD Americas)	カナダ(Canada), チリ(Chile), メキシコ(Mexico), 米国 (the United States)
OECD アジア・オセアニア (OECD Asia Oceania)	オーストラリア(Australia), イスラエル(Israel), 日本(Japan), 韓国(Korea), ニュージーランド(New Zealand)
OECD 欧州 (OECD Europe)	オーストリア(Austria), ベルギー(Belgium), チェコ(the Czech Republic), デンマーク(Denmark), エストニア(Estonia), フィンランド(Finland), フランス(France), ドイツ(Germany), ギリシャ(Greece), ハンガリー(Hungary), アイスランド(Iceland), アイルランド(Ireland), イタリア(Italy), ラトビア(Latvia), リトアニア(Lithuania), ルクセンブルグ(Luxembourg), オランダ(the Netherlands), ノルウェー(Norway), ポーランド(Poland), ポルトガル(Portugal), スロバキア(the Slovak Republic), スロベニア(Slovenia), スペイン(Spain), スウェーデン(Sweden), スイス(Switzerland), トルコ(Turkey), 英国(the United Kingdom)
OECD 東欧州 (OECD East Europe)*	チェコ(the Czech Republic), エストニア(Estonia), ハンガリー(Hungary), ラトビア(Latvia), リトアニア(Lithuania), ルクセンブルグ(Luxembourg), ポーランド(Poland), スロバキア(the Slovak Republic), スロベニア(Slovenia), トルコ(Turkey)
OECD 西欧州 (OECD West Europe)*	オーストリア(Austria), ベルギー(Belgium), デンマーク(Denmark), フィンランド(Finland), フランス(France), ドイツ(Germany), ギリシャ(Greece), アイスランド(Iceland), アイルランド(Ireland), イタリア(Italy), ルクセンブルグ(Luxembourg), オランダ(the Netherlands), ノルウェー(Norway), ポーランド(Poland), ポルトガル(Portugal), スペイン(Spain), スウェーデン(Sweden), スイス(Switzerland), 英国(the United Kingdom)

* IEA の定義にはないが、本論文で便宜上定義するグループ

注3: イスラエルに関しては、2018 年の消費電力データが IEA(2020)にも記載されていなかったため、IEA(2019c)に記載されている 2017 年と 2018 年の消費電力量がほぼ同じであると仮定して、2017 年のデータをそのまま 2018 年に用い、仮の参照値とした。

2.2 C-Rマップを用いた各国比較

C-R マップは単純に石炭火力導入率と再エネ導入率の相関を2次元マップで図示するものであるが、空間（複数の国・地域のデータ）や時間（対象となる国や地域の経年変化）を比較することで、さまざまな情報を可視化することができる。

図8および図9は1990年および2018年にけるOECD加盟36ヶ国の石炭火力導入率 C と再エネ導入率 R の相関をとったグラフである（1990年時点でOECDに加盟していなかった国もここでは加盟国として扱っている）。図では、その年の最も多く発電電力量を稼いだ電源（以下、最大電源と称する）ごとにプロット点を色分けした。なお、導入率 C または R が100%を超えている国（アイスランド、ノルウェー、ポーランド、エストニア）は、プロット点が図の枠外にあるため、導入率100%の位置にプロット点を描いている。

まず図8を見ると、1990年においては、図の左上に再エネを最大電源とする国のグループ、図に右下に石炭火力を最大電源とする国のグループとに分かれ、1.2節の図4と図5（それぞれの導入率ランキングのグラフ）から観察された「石炭火力の導入率が多い国は再エネの導入率が少ない傾向にあり、その逆の傾向もいえる」という状況が、2次元空間の分布図でより明確に可視化されていることがわかる。

また、その中間層として、原子力と石油火力、ガス火力のグループが混在していることがわかる。このグループのように「再エネでも石炭でもない選択肢」として原子力や石油火力、ガス火力を選択すると、グラフの左下の原点（ C および R が 0%）に近づくことになり、この傾向はC-Rマップからも視覚的に容易に把握できる。

一方、2018年時点でのC-Rマップである図9に目を転じると、1990年の図8と比較して大きな変化があることが直感的に認められる。まず、図9では再エネ・石炭両グループ共に左上へとシフトしていることが見て取れる。また、いくつかの国が新しく再エネのグループに入ったり、石炭のグループから抜けている国も少なくないこともわかる。

中間層に着目すると、ガス火力が最大電源の国は1990年においてはわずか1ヶ国であったのが、2018年では9ヶ国に増え、そのほとんどが石油や石炭からシフトしたことが見て取れる。ガス火力のグループの領域と原子力の2つグループの領域が互いに重なりあうのは1990年の原子力・石油火力・ガス火力の3つのグループの分布傾向と類似しており、石油火力や石炭火力がガス火力に置き換えられた国が多いことを示唆している。

図8と図9を注意深く観察すると、全体的に多くの国のプロット点が1990年から2018年にかけてマップ左上方向にシフトしており、このことは、多くの国で（原子力やガス火力・石炭火力を最大電源として選択している国でも）、石炭火力を減少させ再エネを増加させている傾向があることを示している。この「傾向」については、次節でより詳細に定量分析する。

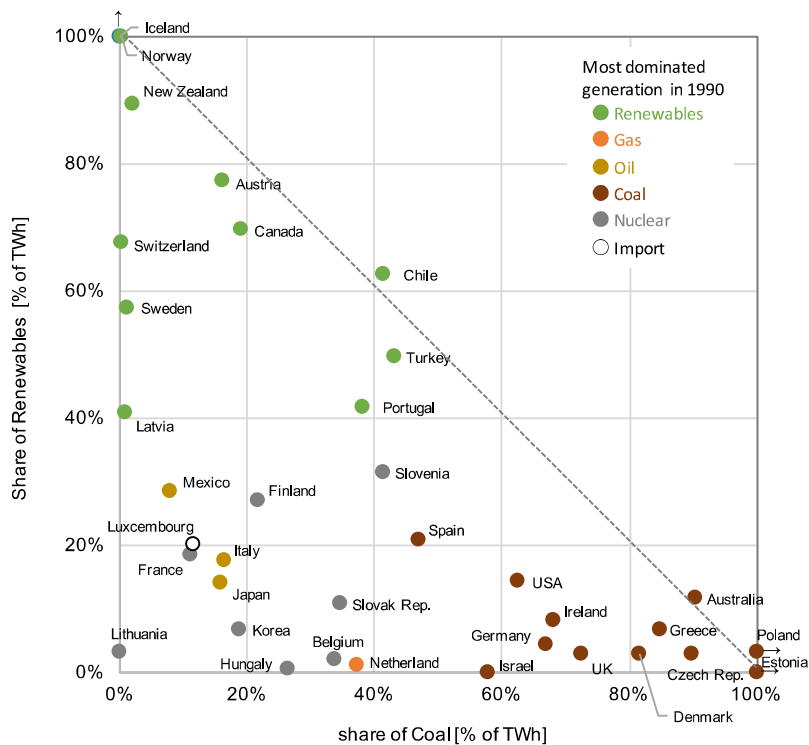


図 8 1990 年における OECD 加盟 36 ヶ国の C-R マップ

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

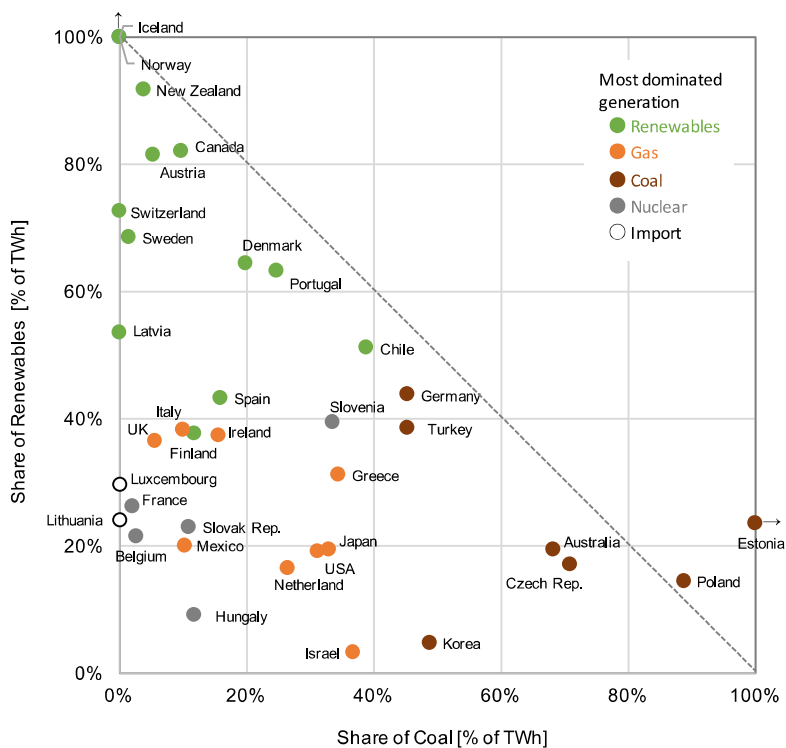


図 9 2018 年における OECD 加盟 36 ヶ国の C-R マップ

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成



また、OECD 加盟 36 ヶ国を表 2 の分類に基づいて各地域に分け石炭および再エネ導入率を C-R マップ上にプロットすると、図 10 のようになる（1990 年時点で OECD に加盟していなかった国もここでは加盟国として扱っている）。

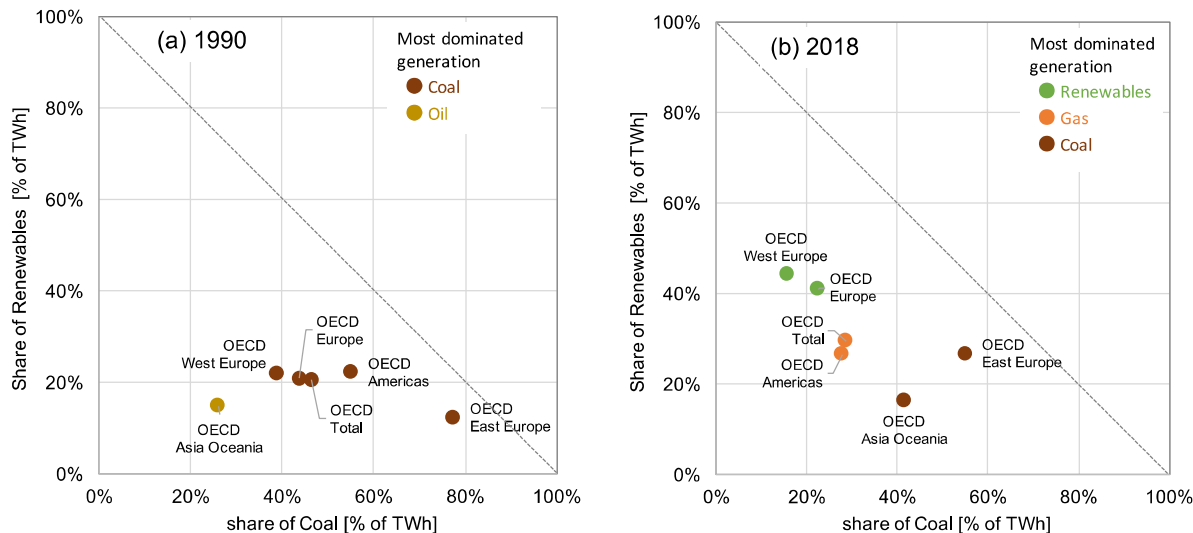


図 10 1990 年および 2018 年における OECD 各地域の C-R マップ

出所：IEA(2019c), IEA(2020)のデータより筆者作成

まず図 10(a)をみると、1990 年においては OECD 全体でも石炭火力が支配的で、再エネ導入率は 20%程度であったことがわかる。OECD アメリカは OECD 全体よりも C も R も高い地点に位置しており、OECD アジア・オセアニアはその逆で OECD 全体よりも C も R も低い地点に位置している。OECD 欧州は OECD 全体よりもわずかではあるが C が低く R が高い傾向を示しており、OECD 西欧州ではその傾向が若干ではあるが強まっている。一方、OECD 東欧州は OECD 欧州全体および OECD 全体よりもはるかに画面右下側に位置しており、すなわちこの地域は OECD 加盟国の中でもとりわけ C が高く R が低い傾向を示していることがわかる。

次に図 10(b)に目を移すと、2018 年には OECD 全体で最大電源がガス火力にシフトしており、C が減少し R が上昇していることがわかる。地域ごとの分布状況も、全体的に C-R マップ上で画面左上方向にシフトしており、「石炭を減らし再エネを増やす」という全体的な傾向を確認することができる。ただし、OECD アジア・オセアニアのみは、1990 年時点では最大電源が石油火力であったものが 2018 年には石炭火力に転じており、C を大幅に増やす結果となっている。一方、OECD 欧州では 2018 年には最大電源が再エネに転じており、さらに OECD 西欧州では再エネ導入率は 44%に達し、「石炭を減らし再エネを増やす」度合いがさらに高まっていることがわかる。

1990 年と 2018 年の違いについては、次節でもより定量的に考察を行う。

2.3 C-Rマップを用いた過去と現在の比較

前節では 1990 年と 2018 年の 2 つの年の各国の状況をそれぞれ異なる 2 枚の C-R マ

ップとして作成したが、本節では、1枚のC-Rマップで経年変化を可視化し、その変化を各国比較することを試みる。

図11はOECD加盟36ヶ国の1990年から2018年のC-Rマップ上での変化をベクトル(矢印)で示したものである。すなわち、ある国のベクトルの起点は図8のプロット点に相当し、ベクトルの終点が図9のプロット点に相当する。ただし、1990年および2018年の両年において再エネが100%を超えるアイスランドとノルウェーに関しては、再エネ導入率を100%とみなしてマップ上では移動しないプロット点として表している。また、1990年および2018年の両年において石炭火力が100%を超えるエストニアに関しては、枠外のため図11では表示されていない(図14で後述)。

図11はOECD加盟国36ヶ国すべての情報が描かれているためやや複雑であるが、全体的に多くの国のベクトルがマップ左上方向に向いていることがわかる。このことは、1990~2108年の約30年の間に多くの先進国(すなわちOECD加盟国)で石炭火力を減らし再エネを増やしてきた「傾向」があると解釈することができる。

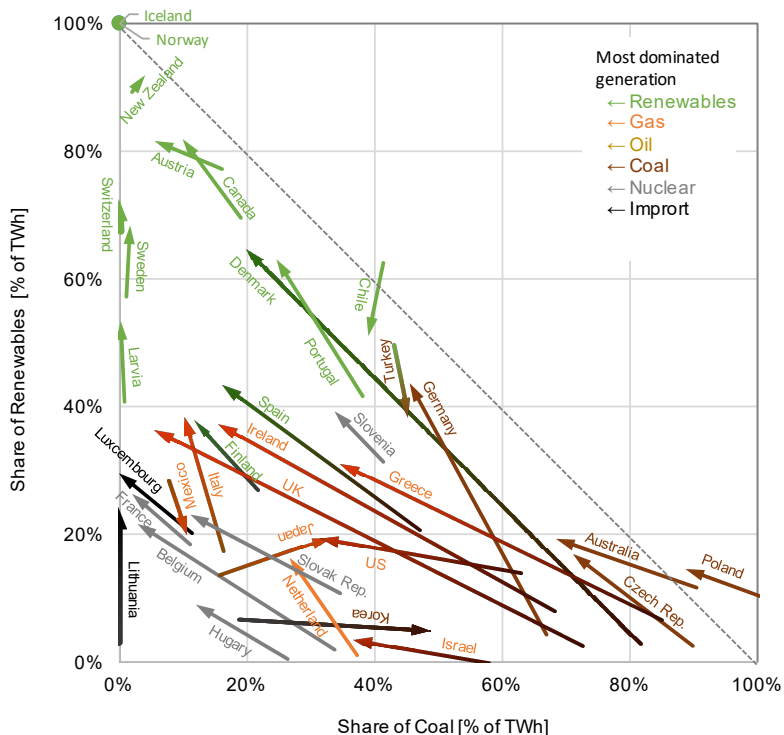


図11 OECD加盟36ヶ国の1990~2018年にかけての石炭・再エネ導入率の推移(C-Rマップ)

出所: IEA(2019c), IEA(2020)のデータより筆者作成

図11は情報量が多く複雑であるため、以下、いくつかのグループに分けて図示し直し、詳細に分析および解説を行う。

まず、図11を見るとマップ上を右下から右上に大きく横切る長いベクトルがいくつか見られるが、最もベクトルの長さ(移動距離)が長い国を上位から5ヶ国選んで

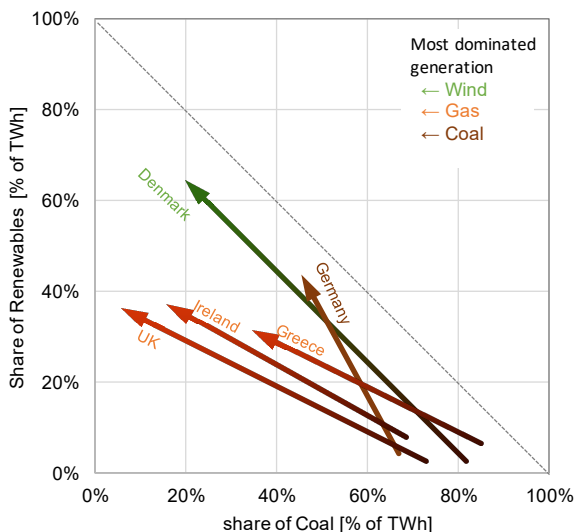


図 12 1990～2018 年にかけての石炭・再エネ導入率の推移

(図 11 よりデンマーク、ドイツ、ギリシャ、アイルランド、英国のみ抽出)

出所：IEA(2019c), IEA(2020)のデータより筆者作成

再構成したものが図 12 である。この図から得られることとして、以下のような情報が挙げられる。

- デンマークのベクトルの長さが最も長く、 ΔC は -59.4 パーセントポイント、 ΔR は $+69.1$ パーセントポイントである。
- 次いで移動距離が長いのは英国で、 ΔC は 66.4 パーセントポイント、 ΔR は 37.2 パーセントポイント増加している。
- デンマークのベクトルの長さは、 -45 度線とほぼ平行である。このことは、1990 年から石炭火力を削減した分を直接再エネで代替していることを意味する。
- 英国、アイルランド、ギリシャのベクトルの傾きは -45 度線より小さく、 C が小さくなるに従って -45 度線から離れていく傾向を示している。このことは、石炭火力を削減した分が再エネだけでなく他の電源（例えばガス火力）で代替されていることを意味している。
- ドイツのベクトルの傾きは -45 度線より大きく、 C が小さくなるに従って -45 度線に近づいていく傾向を示している。このことは、石炭火力を削減した分を直接再エネで代替しているだけでなく他の電源（例えば原子力）も削減していることを意味している。

次に、図 11 から別のグループとして、1990 年から 2018 年にかけてのベクトルの方向が例外的な国（すなわちベクトル方向が全体的な傾向を示すマップ左上方向以外を示す国）を図 13 に抽出して描画する。

この図から読み取れることとして、以下のような情報が挙げられる。

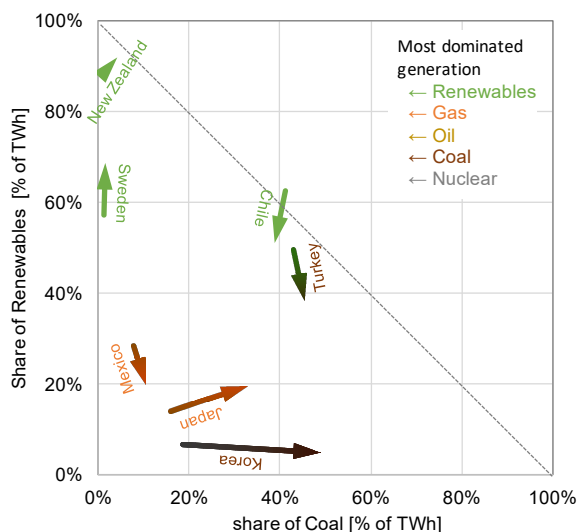


図 13 1990～2018 年にかけての石炭・再エネ導入率の推移

(図 11 よりチリ、日本、韓国、メキシコ、ニュージーランド、スウェーデン、トルコのみ抽出)

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

- チリおよびトルコのベクトル方向は下向きであり、両国とも 1990 年には水力が最大電源であったが、2018 年には石炭火力が最大電源となり、同時に R を減少させている。チリはわずかに C を減少させているが、トルコはわずかに C を増加させている。
- メキシコもトルコと同じベクトル方向を示すが、最大電源は石油火力 (1990 年) からガス火力 (2018 年) にシフトしている。
- ニュージーランドおよびスウェーデンのベクトルは右上方向であり、 R を増加させている一方、 C も増加させている。ただし、 C の増加分はわずかであり、 C の値自体も非常に小さい。
- 日本及び韓国のベクトルは右方向であり、その長さ (移動距離) も比較的長く、図 11 の OECD 全体図を見ても明らかに他国と異なる「傾向」を示している。日本はわずかに R を増加させている一方、韓国はわずかに R を減少させている。

さらに、別のグループ分けの方法として、2018 年における最大電源ごと (すなわち再エネ、ガス火力、原子力、石炭火力) の分類をしたものを図 14(a)～(d)に示す。

図 14 から、以下の情報を客観的に読み取ることができる。

- 2018 年において再エネが最大電源の国は、(図 13 で取り上げた「例外的な国」を除いて) いずれも C の値が 1990 年の時点で小さく、2018 年ではさらに R を増加させている (図(a))。
- 2018 年においてガス火力が最大電源の国は、(図 13 で取り上げた「例外的な国」を除いて) いずれもベクトル方向が左上を向いており、全体的に

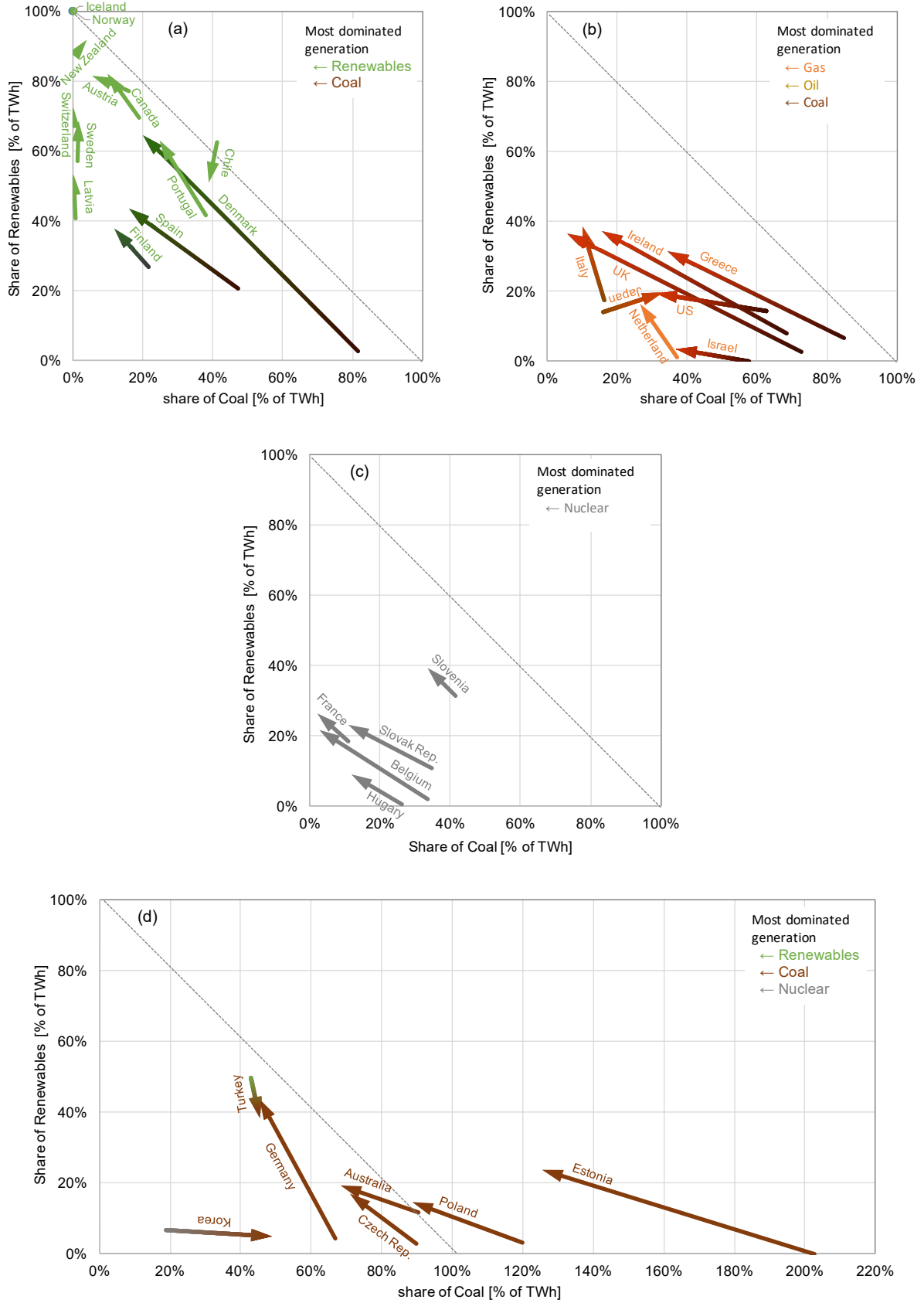


図 14 1990~2018 年にかけての石炭・再エネ導入率の推移

(図 11 より 2018 年の最大電源が(a)再エネ、(b)ガス火力、(c)原子力の国をそれぞれ抽出)

出所：IEA(2019b), IEA(2020)のデータより筆者作成

C を減少させ R を増加させている傾向が見られる(図(b))。また、このグループの国々は、他のグループ(図(a),(c),(d))に比べ全体的にベクトルの長さ(移動距離)が長い傾向にある。このことは、ガス火力を最大電源として選択しながら、再エネの導入も進めていることを意味している。

またこのグループは、ベクトルの傾きが -45° 線より小さいサブグループ(イタリア、オランダ)と大きいサブグループ(アイルランド、スペイン、英国など)の2つのサブグループにさらに分けることができる。このことは、石炭火力を削減した分が再エネだけでなく他の電源(ガス火力など)で代替されているサブグループと、石炭火力を削減した分を直接再エネで代替しているだけでなく他の電源(ガス火力など)も削減しているサブグループがあることを意味している。

- 2018年において原子力が最大電源の国は、(図13で取り上げた「例外的な国」を除いて)いずれもベクトル方向が左上を向いている。このことは、原子力を最大電源として選択しながら、着実に石炭火力を減少させ再エネの導入も進めていることを意味している(図(c))。

また、ベクトルの傾きも -45 度線にほぼ平行な国が多い。このことは、石炭火力を削減した分は直接再エネで代替していることを意味している

- 図14(d)では、図11のC-Rマップでは描かれなかった(範囲外の) $C > 100\%$ の領域も示している。年間消費電力量に対する石炭火力導入率 C が100%を大きく超えるということは、(概ね10%程度が見込まれる発電所構内の電力消費、送電損失、統計誤差の和を除いて)その超過分が電力輸出に当てられていることを意味している。エストニアとポーランドは1990年に輸出分も含め大きな C の値をとっていたが、2018年までにその値を大きく減少させており、現時点で依然として高い C の値を取っているものの、 ΔC も大きいことがわかる。

2018年において石炭が最大電源の国は、(図13で取り上げた「例外的な国」を除いて)いずれもベクトル方向が左上を向いている。このことは、現時点でも石炭火力を最大電源として選択しながら、徐々に石炭火力を減少させ再エネの導入も進めていることを意味している。

さらに、前節図10に示したようなOECD加盟国を各地域に分けた場合の1990年と2018年の推移をC-Rマップ上にベクトルで示したものを図15に示す。

この図から、以下の情報を読み取ることができる。

- OECD全体では、1990年の最大電源が石炭火力であったものが2018年には最大電源がガス火力に転じており、 ΔC は約18パーセントポイント減少、 ΔR は約9パーセントポイント上昇している。
- OECDアメリカも1990年の最大電源が石炭火力であったものが2018年には最大電源がガス火力に転じており、 ΔC は約27パーセントポイント

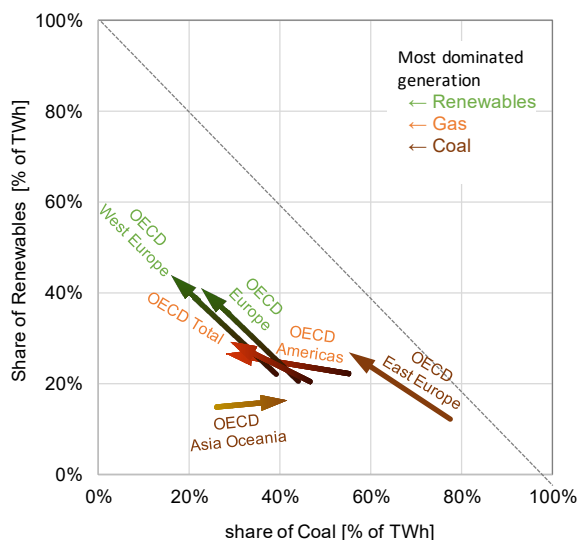


図 15 OECD 各地域の 1990～2018 年にかけての石炭・再エネ導入率の推移

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

減少、 ΔR は約 4 パーセントポイント上昇している。この C および R の増減傾向は、同地域で最大の消費電力量を誇る米国のそれとほぼ同じである。

- OECD アジア・オセアニアは 1990 年の最大電源が石油火力であったものが 2018 年には最大電源が石炭火力に転じており、 ΔC は約 16 パーセントポイントも上昇する一方、 ΔR はわずかに約 2 パーセントポイント上昇に留まっている。この C および R の増加傾向は、他の OECD 地域とも明らかに大きく異なっており、図 13 で見たように日本と韓国の傾向に類似している。
- OECD 欧州は 1990 年の最大電源が石炭火力であったものが 2018 年には最大電源が再エネに転じており、 ΔC は約 21 パーセントポイント減少、 ΔR は約 20 パーセントポイント上昇している。
- さらに OECD 欧州を (OECD の定義にはないが便宜上) 表 2 に従って OECD 西欧州と OECD 東欧州に分類すると、OECD 東欧州では ΔC は約 23 パーセントポイント減少、 ΔR は約 22 パーセントポイント上昇となり、OECD 欧州全体よりもさらに「石炭火力を減らし再エネを増やす」結果となることがわかる。
- 一方、OECD 東欧州では ΔC は約 22 パーセントポイント減少、 ΔR は約 14 パーセントポイント上昇と、ベクトルの長さや方向は OECD 欧州全体と遜色ないものの、2018 年時点でも依然として石炭導入率 C が 77.4% の位置にあり、この傾向は図 13 における東欧諸国の影響が反映されているものと推測される。

最後に、図 11～14 で示した OECD 加盟国のベクトル (C-R 空間上における 1990 年

から 2018 年の移動) の始点を原点に集めるようにそれぞれ平行移動させて描画すると、図 16 のようになる。この図ではベクトルの始点が統一されているため各国のベクトルがどの方向を向いているかが直感的に一目瞭然で把握することができる。

図から、多くの OECD 加盟国が図の左上 (ΔC が負、 ΔR が正) 方向に向いており、OECD 加盟 36 ヶ国のうち例外は、画面下 (ΔR が負) 方向のチリ、トルコ、メキシコ、画面 (ΔC が正) 右方向の日本、韓国の 5 ヶ国しかないことがわかる。つまり、前者 3 ヶ国は約 30 年間で再エネ導入率を大きく減らした国のグループ、後者 2 ヶ国は約 30 年間で石炭火力導入率を大きく増やした国のグループであり、このチリ、トルコ、メキシコ、日本、韓国の 5 ヶ国が OECD 加盟国の中で際立って特異な傾向を示していることがこのベクトル図から可視化される。

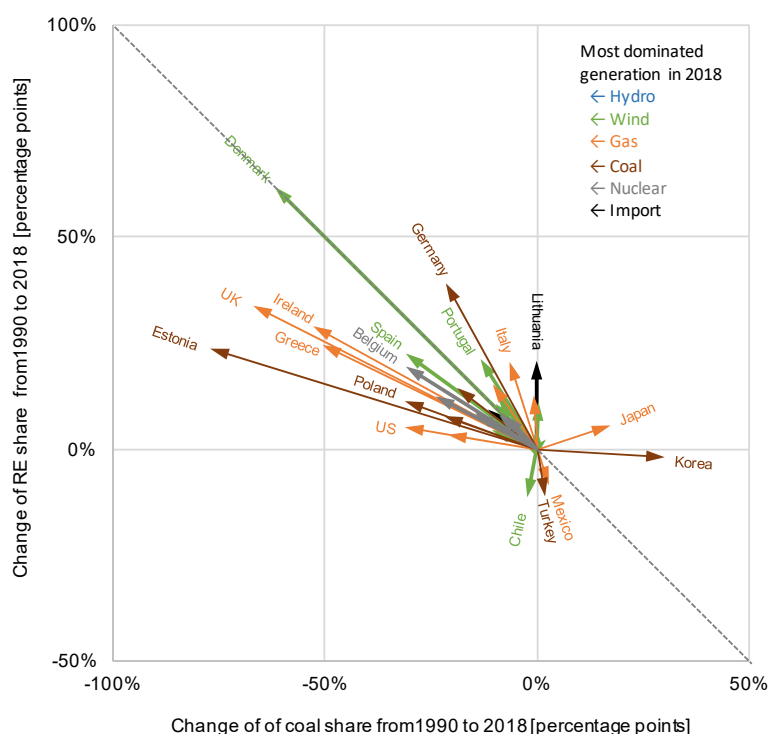


図 16 OECD 加盟 36 ヶ国の 1990～2018 年の
石炭・再エネ導入率の変化

(図中、国名はいくつか代表的な国のみ表示)

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成



3. CR 指標(石炭＝再エネ指標)

本章では、“CR index” (石炭＝再エネ指標、以下、CR 指標と略称) を提案し、この CR 指標を用いて複数の国・地域同士や対象となる国や地域の経年変化に関する比較分析を行う。

3.1 CR指標の提案と定義

CR 指標は、既に 1.3 節において簡単に紹介した通り、石炭火力と再エネの導入率という 2 つの指数を統合したものであり、「石炭を減らして再エネを増やす」という「2 つの潮流」の進展度合いを統合して客観的・定量的な数値として表すための指標である。

CR 指標は、石炭火力導入率 C および再エネ導入率 R という 2 つの指数 (変数) からなる 2 次元 C - R 空間上にあるベクトル X を -45 度線 ($(C, R) = (1.0, 0)$ と $(C, R) = (0, 1.0)$ の 2 点を結ぶ右下から左上に横切る直線) に正射影させたものである。換言すると、 C - R 空間を CR - A 空間に座標変換した際のベクトル X の CR 軸上への正射影、ということができる。ここで CR - A 空間とは 2 つの独立変数 CR と A (変数 A は Alternative の意) からなる 2 次元直交座標であり、変数 CR は元の C - R 空間の -45 度線に相当し、原点を元の C - R 空間の $(C, R) = (1.0, 0)$ として A 軸を CR 軸に対して 90 度に張ったものである。すなわち C - R 空間から CR - A 空間への座標変換は①回転、②拡大、③平行移動、の 3 つの変換からなり、それらを式で表すと以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} CR \\ A \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで $\theta = -3/4 \cdot \pi$ ($= -135^\circ$) であるのでこれを代入して、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} CR \\ A \end{pmatrix} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos \frac{3}{4}\pi & \sin \frac{3}{4}\pi \\ -\sin \frac{3}{4}\pi & \cos \frac{3}{4}\pi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} \\ &= -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C \\ R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\therefore \begin{cases} CR = -\frac{1}{2}(C - R + 1) \\ A = -\frac{1}{2}(C + R + 1) \end{cases} \quad (2)$$

と座標変換の式を得ることができる。

また、以上の式を図示すると、図 17 のようになる。図 17 では、対象物（ここではベクトル X ）は不動で移動せず、座標軸が回転・拡大・平行移動することによって座標変換される様子を示している。元の C - R 空間（黒で描画）から、まず①-135°回転座標変換を行い（灰色で描画）、②元の CR 空間における-45 度線上の $(C, R) = (1.0, 0)$ と $(C, R) = (0, 1.0)$ の距離が CR - A 空間上では 1.0 になるように拡大し（オレンジ色で描画）、③ CR - A 空間の原点が元の C - R 空間の $(C, R) = (1.0, 0)$ に一致するように平行移動することで、最終的に CR - A 空間（緑色で描画）を得ることができる。ここで、元の指数 C および R に対する重み付けは行わない。このようにして、元の C - R 空間上のベクトル $X = (C_1, R_1)$ が CR - A 空間上のベクトル $X' = (CR_1, A_1)$ に座標変換されることが図 17 からわかる。

これによって、これまで石炭火力導入率 C および再エネ導入率 R という 2 つの独立した指数（変数）が CR という 1 つの指標に統合されることになり、「石炭を減らし再エネを増やす」という「傾向」を 1 変数で表すことが可能となる。

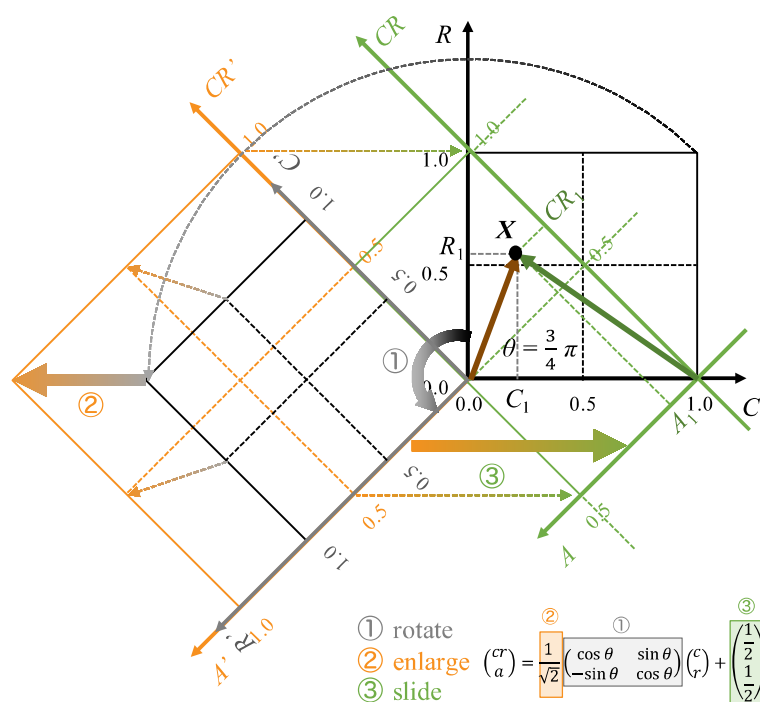


図 17 C-R 空間から CR - A 空間への座標変換の概念図

筆者作成



このような C-R 空間から CR-A 空間への座標変換で得られる CR 指標により、前章の 2 次元マップで可視化された情報をより客観的に定量分析することが可能となる。

3.2 CR指標を用いた各国比較

前節の(2)式で定義した CR 指標を用いて、本研究で対象とした OECD 加盟 36 ヶ国の「石炭を減らして再エネを増やす」という「2つの潮流」の進展度合いを 1 次元の指標として比較することが可能となる。

図 18 に 1990 年時点での OECD 加盟国の石炭火力導入率 C および再エネ導入率 R から(2)式に従い CR を算出し、CR 指標が高いものから降順に並べたランキングを示す(1990 年時点で OECD に加盟していなかった国もここでは加盟国として扱っている)。図の棒グラフは、1990 年の最大電源ごとに色分けして示されている。この図から、CR 指標の上位には再エネが最大電源のグループ、CR 指標の下位には石炭火力が最大電源のグループ、中位には石油火力や原子力など他の選択肢を最大電源とするグループに概ね分けられることがわかる。

この中で、上位 2 国のノルウェーとアイスランドは CR 指標が 1 を超えており、このことはすなわち、その国の年間消費電力量以上の電力量を再エネで賄っており、石炭火力がほぼゼロであることを意味している(CR 指標が 1 を超える理由は、発電所構内の電力消費、送電損失、統計誤差、電力輸出(ただしノルウェーのみ)のため)。

また、下位 2 国のポーランドとエストニアは CR 指標が 0 を下回っており、このことはすなわち、その国の年間消費電力以上の電力量を石炭火力で賄っていることを意味している(CR 指標が 0 を下回る理由は電力輸出のため)。

一方、図 19 は CR 指標の意味を確認するための参考図であり、1990 年の CR 指標ランキング順(すなわち図 18 と並び順は同じ)で石炭火力導入率 C および再エネ導入率 R を積み上げ棒グラフで表したものである。図から CR 指標が上位になるほど再エネ導入率が高く、CR 指標が下位になるほど石炭火力が高くなるという「傾向」が見て取れる。また、CR 指標中位の国々を見ると、 R が高くても C が高い国は R が高く C が低い国より順位が低く、 C が高くても R が高い国は C が高く R が低い国より順位が高い「傾向」にあることがわかる。

しかしながら、やはり図 19 のような C と R の変数だけでは主観的な「傾向」しか把握することができない。そこで、この「傾向」を一定の変換式を用いて生成した数値で定量的に示したものが図 18 の CR 指標であるといえる。

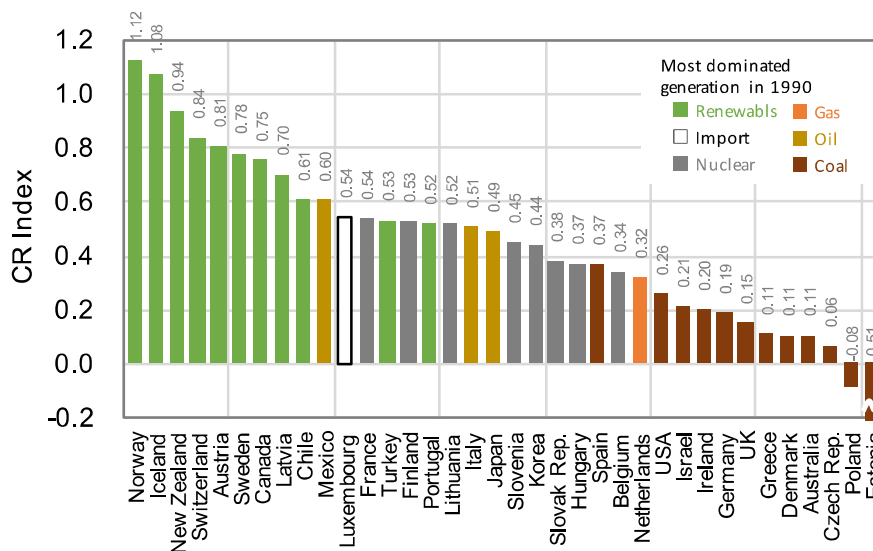


図 18 OECD 加盟 36 ヶ国の 1990 年における CR 指標ランキング

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

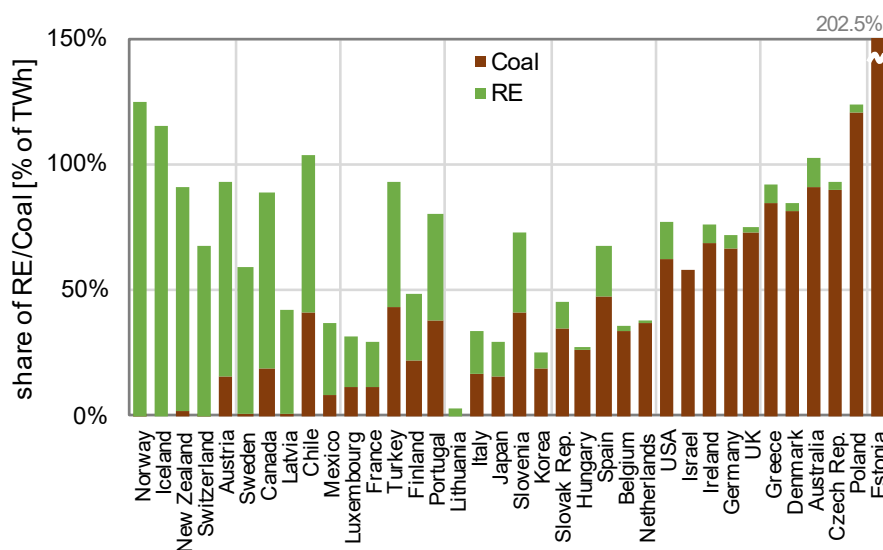


図 19 OECD 加盟 36 ヶ国の 1990 年における石炭火力および再エネ導入率

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

次に、図 20 に 2018 年時点での OECD 加盟国の CR 指標ランキングを示す。また、図 21 に参考図として 2018 年の CR ランキング順での C および R の積み上げ棒グラフを示す。図 20 および 21 においても、図 18 および図 19 と同様の傾向を見ることができる。

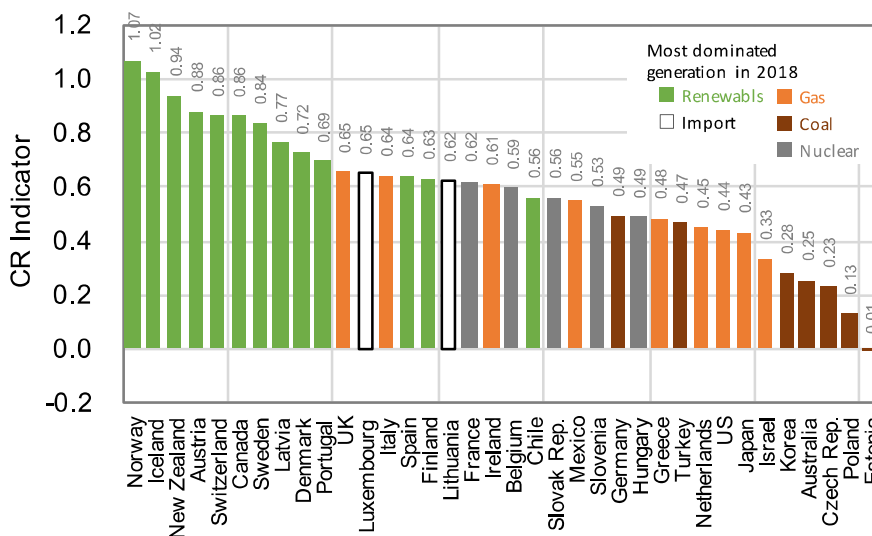


図 20 OECD 加盟 36 ヶ国の 2018 年における CR 指標ランキング

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

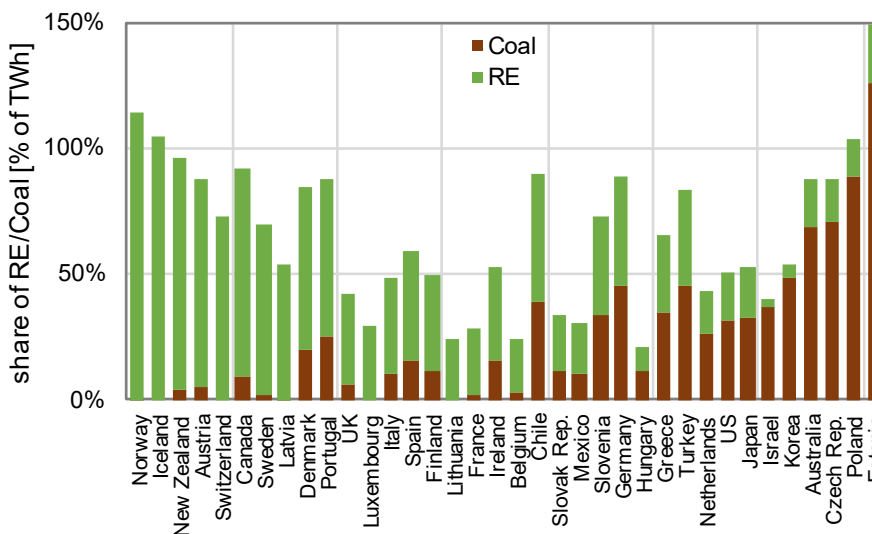


図 21 OECD 加盟 36 ヶ国の 2018 年における石炭火力および再エネ導入率

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

3.3 CR指標を用いた過去と現在の比較

CR 指標は、同じ年の国同士の比較だけでなく、時間的な比較を行うこともできる。例えば、図 18 と図 20 を比較すると、1990 年と 2018 年で CR 指標のランキング順位が大きく異なることがわかるが、これを改めて表で比較すると表 3 のようになる。

この表から、CR 指標ランキング上位のノルウェーやアイスランド、また下位のポーランドやエストニアのように順位がまったく変わらない国もあるが、表中緑色で示したデンマーク、英国、アイルランド、スペインのように約 30 年間で順位を大きく

上げた国もあれば、チリ、メキシコ、トルコ、日本、韓国のように順位を大きく下げた国もあることがわかる。この傾向は、第2章の図12および図13のようにC-Rマップにおけるベクトルの長さや方向から把握できる傾向にほぼ一致する（完全に一致しないのは、CR指標の変化 ΔCR と単純なランキング順位差という異なる次元のものを比べているため）。

表3 1990年および2018年のCR指標ランキング比較

順位	1990年 CR 指標	2018年 CR 指標	順位差
1	Norway	Norway	0
2	Iceland	Iceland	0
3	New Zealand	New Zealand	0
4	Switzerland	Austria	1
5	Austria	Switzerland	-1
6	Sweden	Canada	1
7	Canada	Sweden	-1
8	Latvia	Latvia	0
9	Chile	Denmark	23
10	Mexico	Portugal	5
11	Luxembourg	UK	19
12	France	Luxembourg	-1
13	Turkey	Italy	4
14	Finland	Spain	9
15	Portugal	Finland	-1
16	Lithuania	Lithuania	0
17	Italy	France	-5
18	Japan	Ireland	10
19	Slovenia	Belgium	5
20	Korea	Chile	-11
21	Slovak Rep.	Slovak Rep.	0
22	Hungary	Mexico	-12
23	Spain	Slovenia	-4
24	Belgium	Germany	5
25	Netherlands	Hungary	-3
26	US	Greece	5
27	Israel	Turkey	-14
28	Ireland	Netherlands	-3
29	Germany	US	-3
30	UK	Japan	-12
31	Greece	Israel	-4
32	Denmark	Korea	-12
33	Australia	Australia	0
34	Czech Rep.	Czech Rep.	0
35	Poland	Poland	0
36	Estonia	Estonia	0

また、1990年から2018年にかけてのCR指標の変化 ΔCR を高いものから降順に並べたランキングを図22に、参考図としてCR指標ランキング順で並べた1990～2018



年の ΔC および ΔR の積み上げ棒グラフを図 23 に示す^{注4}。

図 22 から、ランキング上位にはデンマーク、エストニア、英国、アイルランド、ギリシャ、ドイツと並び、ランキング下位は低い方から韓国、トルコ、日本、メキシコ、チリと並んでいることが一目して読み取れる。この上位および下位のグループは、第 2 章の図 12 および図 13 のように C-R マップにおけるベクトルの長さと同方向に一致する（エストニアは例外で、図 11 および図 12 では枠外のため除外されている）。より正確には、図 11~14 の C-R マップ上に示されたベクトルを -45 度線へ正射影したものが CR 指標である。

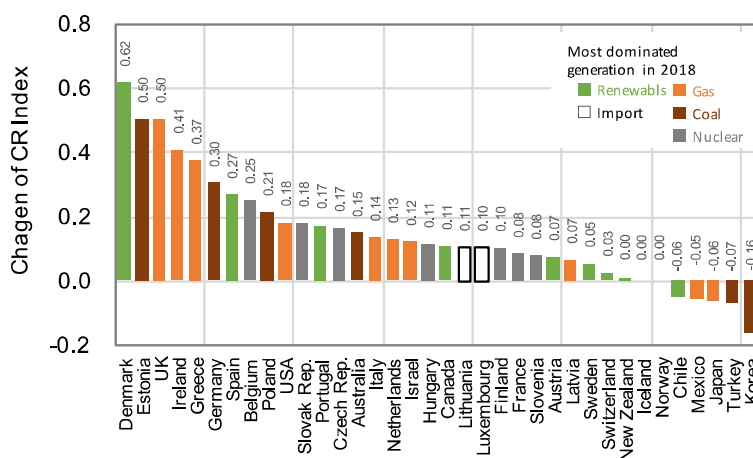


図 22 OECD 加盟 36 ヶ国の 1990~2018 年の CR 指標変化(ΔCR)ランキング

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

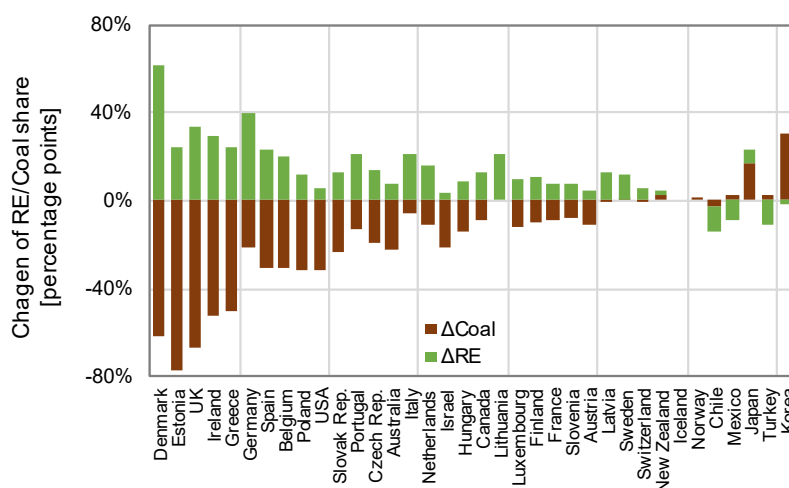


図 23 OECD 加盟 36 ヶ国の 1990~2018 年の石炭火力および再エネ導入率の変化率

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

注4 1990 年および 2018 年の再エネ導入率がともに 100%を超えているノルウェーとアイスランドについては、 ΔCR を計測することに意味はないので、ここでは $\Delta CR = 0$ としている。実際には両国とも ΔCR はわずかに負の値をとるが、これは発電所構内の電力消費や送電損失が減り、消費電力量に対して相対的にはグロスの発電電力量が減った（つまり電力輸送の効率がよくなった）ことに起因すると推測できる。

特に下位 5 ヶ国は ΔCR の値がマイナスの値をとっており、この顕著な特異性が定量的に表現されていることがわかる。またこの 5 ヶ国は表 3 における CR 指標ランキング推移で大きく順位を下げた国と一致している。このことは、前章図 16 で可視化されたこの 5 ヶ国のベクトルの方向の特異性を、より定量的に表現したものであるといえる。

また、図 23 から、CR 指標の変化 (ΔCR) ランキング上位になるほど石炭火力導入率 C を大きく減らし再エネ導入率 R を増やす「傾向」にあることが見て取れる。特にランキング下位の国は、 C を大きく増やしたり、 R を大きく減らしたりしていることがわかる。CR 指標の変化およびそのランキングは、この「傾向」を定量的に評価したものといえる。

このように、CR 指標により、従来「石炭を減らして再エネを増やす」という行動を判断するために「傾向」や「印象」といった主観的な判断に頼っていたものが、CR 指標という定量的評価手法により客観的に表現可能となることがわかる。

3.4 A指標の意味とその評価

ところで、C-R 空間から CR-A 空間に座標変換した際に、CR 指標だけでなく A 指標なる変数（空間軸のひとつを構成するパラメータ）も式(2)により生成される。この A 指標とは、「石炭火力と再エネ以外の選択肢」の導入傾向を示し（A は Alternative の意）、例えば原子力やガス火力の導入率が大きな国は A 指標が大きくなる（最大値は $A=0.5$ ）。また、仮に石炭火力と再エネ以外の電源が全くない場合は $A=0$ となり、輸出により石炭火力導入率 C と再エネ導入率 R の和が 100 を超えると $A < 0$ となる。

また、ある期間の変化を比較評価する場合も、 C を減らした分だけ R を増やしたとすれば $\Delta A = 0$ となり、再エネ以外の方法で C を減らした場合や C を減らさなくても R を減らした場合は $\Delta A > 0$ 、 R を増やす際に他の電源（例えばガス火力や原子力）を減らす場合や R も C も同時に増やす（すなわち輸出をしない限り他の電源が減る）場合は $\Delta A < 0$ となる。

このように A 指標は CR 指標ほど重要なパラメータではないが、その国の電源構成の中で石炭火力と再エネ以外の電源がどのような位置を占めるのかを定量的に評価できるという点で有用である。

例えば、図 11~14 のベクトル図は 1990~2018 年の推移として単に 1990 年のプロット点と 2018 年のプロット点の 2 点を直線で結んだに過ぎないが、実際には年ごとに紆余曲折しながら変化していくのが一般的である。図 24 に特徴的な変化をする 4 ヶ国（デンマーク、英国、ドイツ、日本）を選んで 1990~2018 年の推移を C-R 空間に示す。

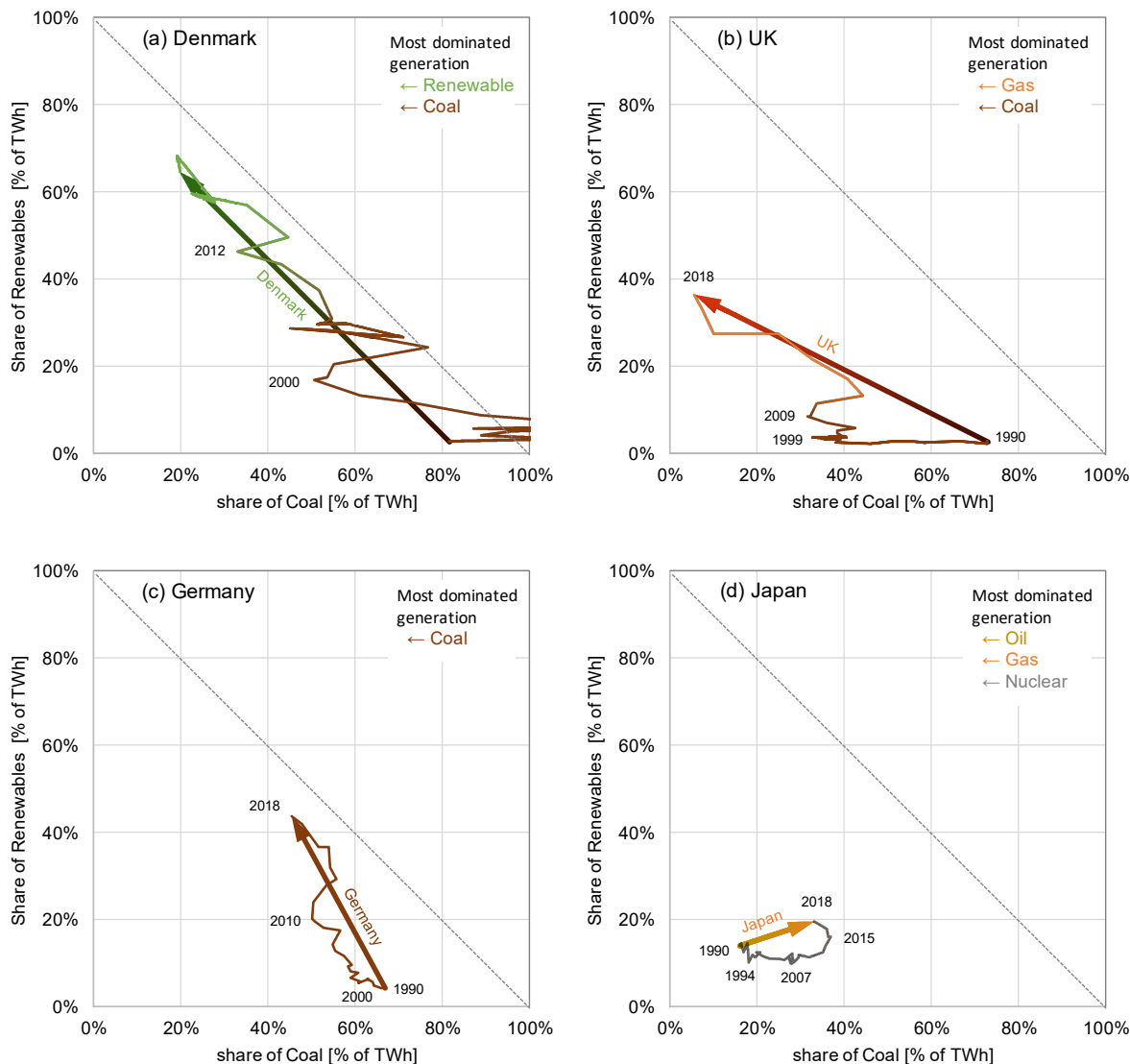


図 24 デンマーク、英国、ドイツ、日本の 1990～2018 年の石炭火力および再エネ導入率の推移 (C-R マップ)

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

また、図 25 は図 24 の曲線を CR-A 空間に座標変換したものである。

図 25(a)のデンマークは、1990 から 2018 年にかけて結果的に CR 軸と完全に平行に移動しているが、各年の推移を見るとジグザグ状に進んでいる。これはデンマークの国際連系線を通じた市場取引が豊富で年ごとに輸出入量が大きく変動することに起因していると推測できる。特に 1990 年代前半は CR および A とも負の値をとっており、これはデンマークが輸出超過になるほど石炭火力による発電していたことを示している。全体的な (長期的な) 傾向としては、1990 年代後半より一貫して石炭を減らし再エネを増やす方向に進んでいると見ることができる。

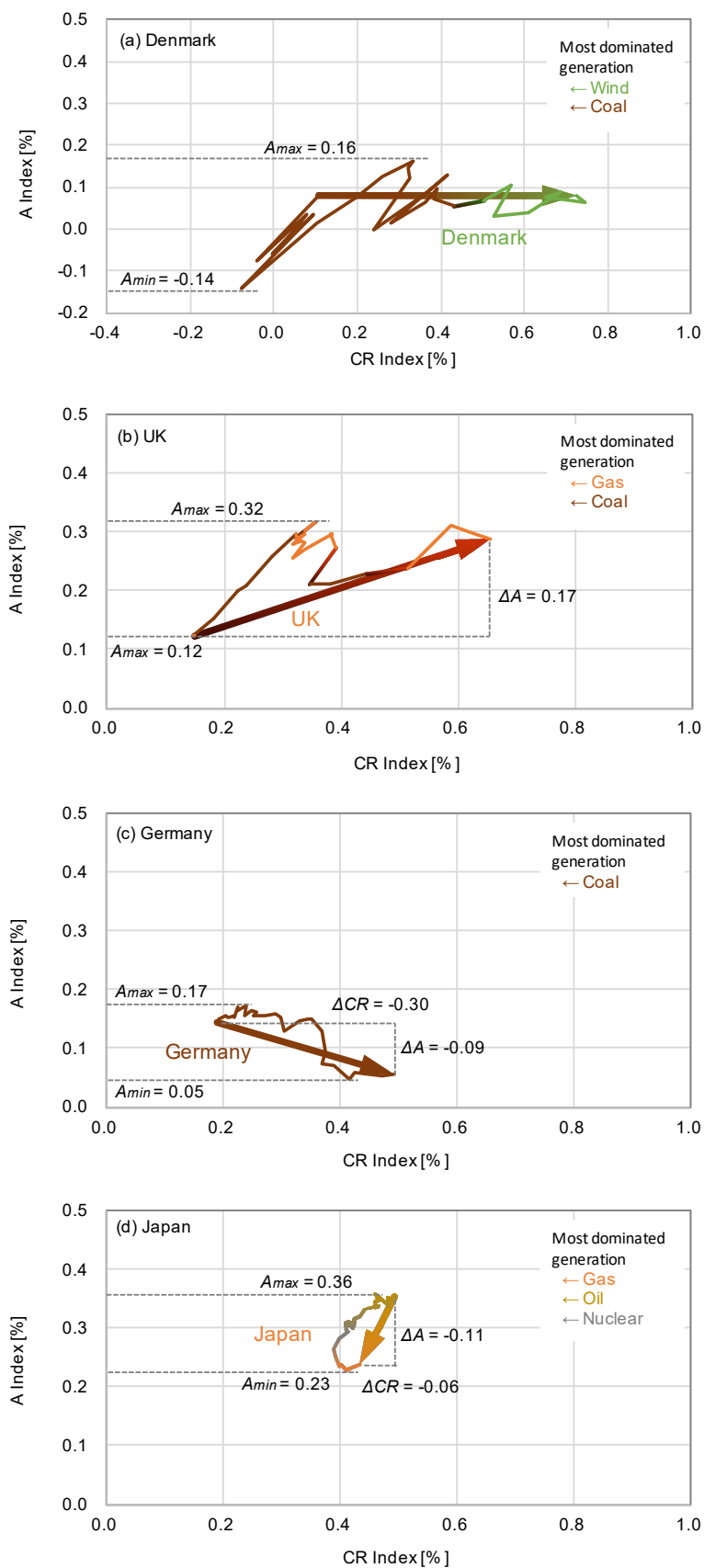


図 25 デンマーク、英国、ドイツ、日本の 1990~2018 年の石炭火力および再エネ導入率の推移 (CR-A マップ)

出所 : IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成



図(b)の英国は、1990年と2018年のA指標の差 ΔA が0.17と正になっており、このことは他の選択肢（ここでは具体的にガス火力）を増やしながら石炭火力を減らし、再エネを増やしたことを意味している。また各年の推移を見ると、上に凸の曲線状を呈しており、このことはまず1990年代に他の選択肢（ガス火力）を急激に増やす形で石炭火力を減らし、その後（図では若干の石炭の揺り戻しがあるものの）2010年代から順調に再エネを増やしたと解釈できる。

図(c)のドイツは、1990年と2018年のA指標の差 ΔA が-0.09と負の値を示しており、このことは他の選択肢（ここでは具体的に原子力）を減らしながら石炭火力の導入率を減らし、再エネ導入率を増やしたことを意味している。また各年の推移を見ると、前半ではAの値はあまり変わらず（すなわち上に凸）、後半に下に凸の曲線状となってAの値を急激に減らしており、このことは2000年代までは再エネを増やすことで石炭火力を減らし、2010年代は石炭を減らしながらも原子力も減らすことで再エネを増やしたと解釈できる。

図(d)の日本は、1990年と2018年のCR指標の差 ΔCR が-0.06と負の値を示しており、上記の3ヶ国の例とは傾向が明らかにことなっていることがわかる。また、A指標の差 ΔA が-0.11と負の値を示しており、このことは他の選択肢（ここでは具体的に石油火力と原子力）を減らしながら石炭火力の導入率を増やしたことを意味している。特に日本は2011年の福島第一原子力発電の事故以降、原子力発電の導入率が急激に落ち込んだが、この2011年の原発事故以前から石炭火力をコンスタントに増やしてきており、再エネを増やす方向に転じたのはようやく2010年代後半のここ数年になってからという時間的推移が図25(d)のCR-Aマップからも読み取れる^{注5}。

さらに、図26は、1990年から2018年の間にOECD加盟各国のCR指標とA指標がどのように変化したかの相関を取ったものである。CR-A空間が元のC-A空間の回転を伴う座標変換であるため、この図は図16のベクトル図を135度回転させたものと相似となる。

図26の第I象限は $\Delta CR \geq 0$ かつ $\Delta A \geq 0$ の領域であり、この領域に属する国は1990年から2018年にかけてCR指標を増加させた（すなわち石炭火力導入率を減らし再エネ導入率を増やした）だけでなく、石炭火力を減らす手段として再エネだけでなく他の手段（原子力やガス火力）も増やしていることを示している。デンマークなどいくつかの国は縦軸線上（すなわち $A = 0$ ）に乗っているが、これは石炭火力導入率を減らした分をそのまま再エネで置き換えていることを意味している。

また、第IV象限は $\Delta CR \geq 0$ かつ $\Delta A < 0$ の領域であり、この領域に属する国は1990年から2018年にかけてCR指標を増加させただけでなく、石炭火力だけでなく他の手段（原子力やガス火力）も減らしながら再エネ導入率を増やしていることを示して

注5 なお、日本ではしばしば基準年を1990年ではなく2000年や2013年とすべきという議論もあるが、仮に2000年を基準としたとしてもその後のCR指標の減少傾向（すなわち石炭火力の増加傾向）はあまり変わらないことが図25(d)から読み取れる。また2013年を基準とすることは、図25(a)~(c)から読み取れるように、既に他の多くの国がCR指標を増加させた（すなわち石炭を減らし再エネを増やした）段階の年を改めて基準することを意味しており、国際的な比較という観点からは、日本というOECDの中でも特異な傾向を示す国が独自で定めた恣意的で公平性を欠いた基準と見られても仕方がないことがわかる。

いる。

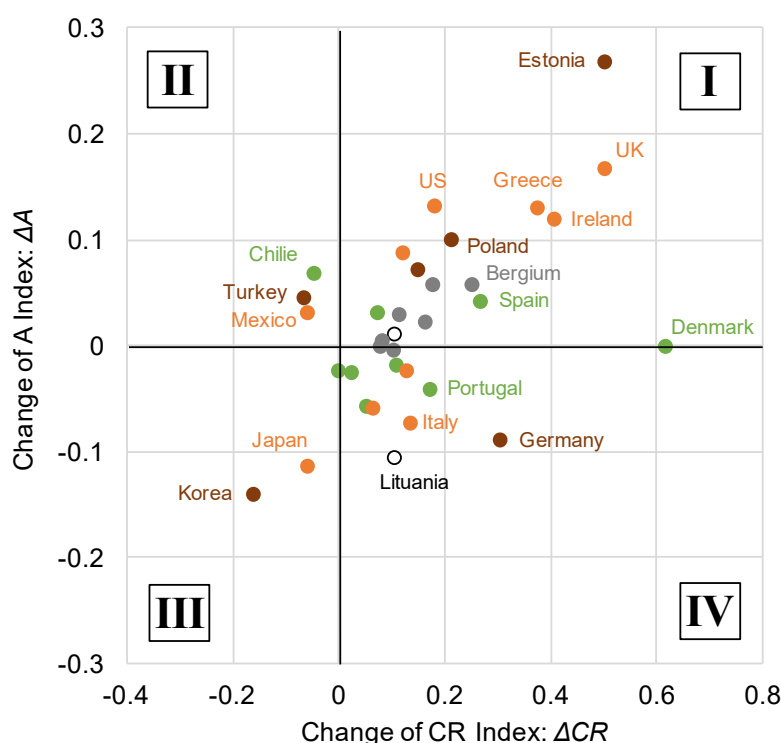


図 26 OECD 加盟 36 ヶ国の 1990～2018 年の CR 指標および A 指標の変化

(図中、国名はいくつか代表的な国のみ表示)

出所：IEA(2009c), IEA(2020)のデータより筆者作成

さらに第 II および第 III 象限の国は CR 指標を減少させたことを意味し、特に第 II 象限は他の手段（例えばガス火力）を増加させながら再エネ導入率を減少させ、第 II 象限は他の手段（例えば石油火力や原子力）を減少させながら石炭火力導入率を増加させたことを示している。

また、図 26 の各象限に位置する国を分類したものが表 4 となる。図 22 および表 4 から明らかな通り、OECD 加盟 36 ヶ国の中で第 I 象限に分類される国は 18 カ国、第 IV 象限に分類される国は 11 カ国、第 II 象限に分類される国は 3 カ国、第 III 象限に分類される国は 2 カ国となる。

このように CR 指標と A 指標を組み合わせることにより、「石炭を減らし再エネを増やす」傾向が他の選択枝の動向も含め、客観的・定量的に分類可能となる。またその結果分類された第 II 象限および第 III 象限の国、すなわちチリ、メキシコ、トルコ、日本、韓国が OECD 加盟国の中で如何に特異な傾向を示しているかが、客観的手法で示されることがわかる。このことは、前章図 16 において可視化した「傾向」を、より客観的・定量的評価手法で示すことができたということを示している。



表 4 1990～2018 年の CR 指標および A 指標の変化傾向の分類

		CR 指標	
		負	正
A 指標	正	第 II 象限： Chile, Mexico, Turkey	第 I 象限： Denmark, Estonia, UK, Ireland, Greece, Germany, Spain, Belgium, Poland, USA, Slovak Rep., Czech Rep., Australia, Israel, Hungary, Luxembourg, France, Austria
	負	第 III 象限： Japan, Korea	第 IV 象限： Portugal, Italy, Netherlands, Canada, Lithuania, Finland, Slovenia, Latvia, Sweden, Switzerland, New Zealand

注：Norway, Iceland は 1990 年、2018 年ともに再エネ導入率が 100%を超えているため、ここでは評価対象外として省略。

3.5 二酸化炭素排出量との比較

本章の最後に、本論文で提案・検証した CR 指標の有用性の傍証として、二酸化炭素排出量との比較を行う。第 1 章で確認した通り、「石炭を減らし再エネを増やす」という世界的傾向は第 1 に気候変動対策のためである。したがって、「石炭を減らし再エネを増やす」という傾向を定量化した CR 指標は、電力部門からの二酸化炭素排出量との相関が高いと予想される。

但し、第 1 章図 3 で見た通り、化石燃料の負の外部性は気候変動に対する悪影響だけでなく、健康被害など他の悪影響も多く、また逆に、電力部門における二酸化炭素排出量を削減するためには再エネ以外の他の選択肢（例えば原子力発電）などもあることに留意が必要である。

図 27 は 2018 年における OECD 加盟 36 ヶ国の CR 指標（第 3 章参照）と電力部門における kWh あたりの二酸化炭素排出量との相関を取ったグラフである。

この図から、CR 指標が高いほど kWh あたりの二酸化炭素排出量が低く、逆に CR 指標が低いほど kWh あたりの二酸化炭素排出量が高い傾向を示していることがわかる。また、原子力発電が最大電源の国は全体的に CR 指標が低くても kWh あたりの二酸化炭素排出量が低い傾向を示し、ガス火力が最大電源である一部の国は CR 指標が高くても kWh あたりの二酸化炭素排出量が高い傾向を示している。

図から相関係数を計算すると 1990 年は 0.814、2018 年は 0.889 となり、CR 指標と電力部門における kWh あたりの二酸化炭素排出量の 2 つの変数の間には強い相関があるといえる。

以上の検討から、CR 指標は電力部門における kWh あたりの二酸化炭素排出量と強い相関を持ち、気候変動対策の指標のひとつとして有用であることが確認された。

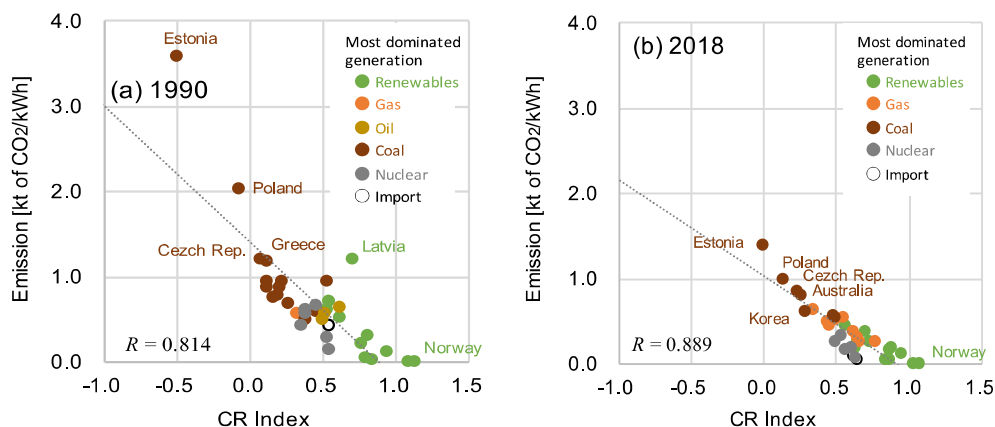


図 27 OECD 加盟 36 ヶ国の CR 指標と電力部門における kWh あたりの二酸化炭素排出量の相関 ((a) 1990 年、(b) 2018 年)

(図中、国名はいくつか代表的な国のみ表示)

出所：IEA(2019c), IEA(2020), IEA(2019e)のデータより筆者作成

4. まとめ

本論文では、国際的な動向である「石炭を減らし再エネを増やす」という傾向を客観的・定量的に取り扱うため、可視化し定量化することを目的として、**C-R correlation map**（石炭＝再エネ相関図。本論文では C-R マップと略称）および **CR index**（石炭＝再エネ指標。CR 指標と略称）という 2 つのツールと指標を提案した。また、このツールをと指標を用いて 1990 年から現在までの石炭火力および再エネに関する国際比較分析を行った。

第 1 章ではさまざまな国際機関による文献から、気候変動対策や従来型電源の負の外部性の緩和のために、「石炭を減らし再エネを増やす」という傾向が世界的に起こっていることを確認し、その「傾向」を可視化し定量化するための C-R マップおよび CR 指標の必要性を述べた。

第 2 章では、C-R マップを用いて OECD 加盟 36 ヶ国の 1990 年および 2018 年における石炭火力導入率および再エネ導入率の状況や 1990～2018 年にかけての変化を視覚的に（一部定量的に）比較分析した。その結果、図 28（第 2 章図 16 の再掲）に示すように、OECD 加盟 36 ヶ国のうち 31 ヶ国が 1990～2018 年にかけて「石炭を減らし再エネを増やす」傾向を持ち（図 16 参照。左上方向に向かうベクトル）、それに反する傾向を持つのはチリ、トルコ、メキシコ、日本、韓国とわずか 5 ヶ国であることが明らかになった。

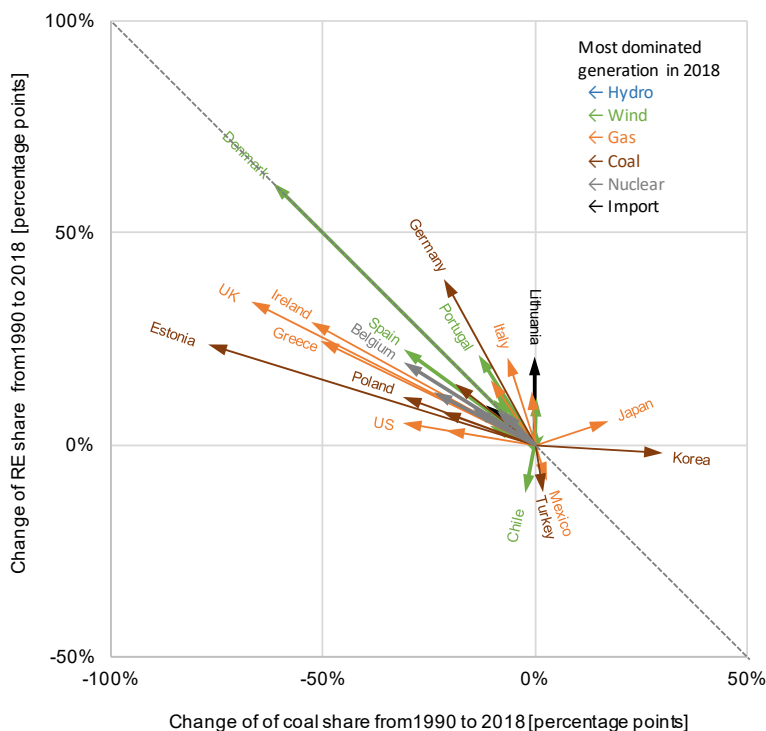


図 28 OECD 加盟 36 ヶ国の 1990～2018 年の石炭・再エネ導入率の変化

(第 2 章図 16 の再掲)

第 3 章では、CR 指標を提案し、CR 指標を用いて第 2 章で視覚的に示した傾向をより定量的に分析した。その結果、図 29 (第 3 章図 22 の再掲) に示すように、OECD 加盟 36 ヶ国のうち 31 ヶ国が 1990～2018 年の間の CR 指標の差 (ΔCR) が正の値を取り、 ΔCR が負の値を取るのはチリ、トルコ、メキシコ、日本、韓国とわずか 5 ヶ国であることが明らかになった。このことは第 2 章の C-R マップで視覚化した「傾向」をより定量的に示せたことを意味している。

このように、本論文で提案した C-R マップや CR 指標は、1 枚のグラフ (図 28) や 1 つの指標のランキング (図 29) で「石炭を減らし再エネを増やす」という傾向を客観的手法で可視化し、定量化できるという特徴を持つ。

本論文では、統計データが公開され入手しやすい OECD 加盟国のみを対象として分析を行ったが、この C-R マップや CR 指標を用いた比較分析は、他の途上国の電源構成の傾向の分析にも応用が可能である。

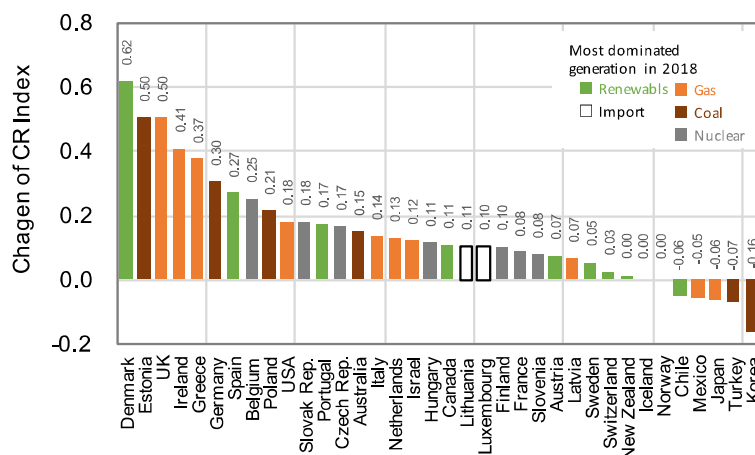


図 29 OECD 加盟 36 ヶ国の 1990～2018 年の CR 指標変化(Δ CR)ランキング

(第 3 章図 22 の再掲)

このように、公開された統計情報と客観的な法則に基づいた透明性の高い簡易なツールや指標を用いことで、必ずしも電力・エネルギーを専門としない人々にも、「石炭を減らし再エネを増やす」という世界的傾向を定量的に可視化されたグラフや数値で提供することが可能となる。多くの人々がエビデンスベースでエネルギー問題や気候変動問題を議論する上で、本論文で提案した C-R マップや CR 指標が些かでも役に立てば幸いである。

参考文献 (ウェブサイトはいずれも2020年3月31日最終確認)

高井亨(2020), SDGs の到達度を測る -正射影ベクトルを用いた統合指標作成の試み-, 経済論叢, Vol.194, No.1, p.91

中口毅博(2000), 持続可能な発展の指標に関する国内外の動向と課題, 環境情報科学, Vol.29, No.3, p11-15

Fossil Free(2020), 1000+ Divestment Commitments, <https://gofossilfree.org/divestment/commitments/>

IEA(2019a), World Energy Outlook 2019, International Energy Agency

IEA(2019b), World Energy Investment

IEA(2019c), Electricity Information, web version

<http://wds.iea.org/WDS/Common/Login/login.aspx>

IEA(2019d), Electricity Information 2019 Final Edition, Database Documentation

<http://wds.iea.org/WDS/tableviewer/document.aspx?FileId=1612>

IEA(2019e), CO2 Emissions from Fuel Combustion

<http://wds.iea.org/WDS/Common/Login/login.aspx>

IEA(2020), Monthly Electricity Statistics, with data up to December 2019 – Revised historical data

<https://www.iea.org/reports/monthly-oecd-electricity-statistics>

IRENA(2018), Global Energy Transformation – A Roadmap to 2050, 2019 edition, International Renewable



Energy Agency

OECD: Glossary of Statistical Terms, Composite Indicator, Created on Friday, December 10, 2004, Last updated on Wednesday, December 11, 2013, Organisation for Economic Co-operation and Development

<https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=6278>

OECD(2019) Measuring Distance to the SDGs Targets 2019:An assessment of where OECD countries stand,

Powering Past Coal Alliance(2020), <https://poweringpastcoal.org/about/declaration>

Sachs, J. *et. al*(2019), SDG Index and Dashboards Report 2019 Global Responsibilities, Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDSN)