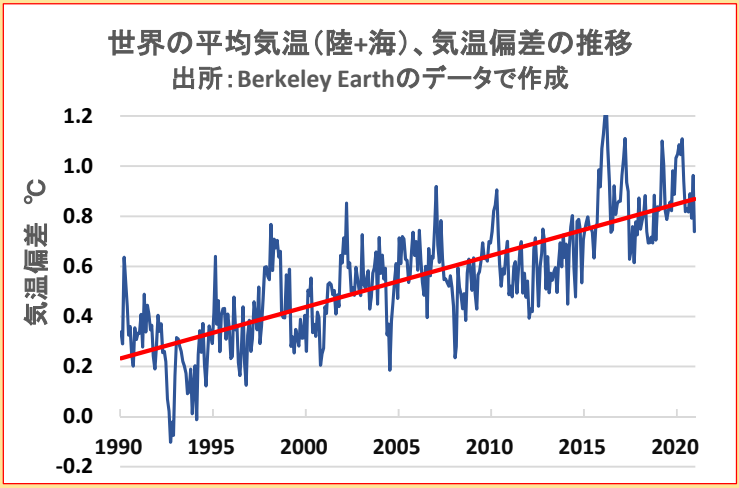
常識的に考える
日本の温暖化防止の長期戦略

（ 改訂１版 ）

1. 気温上昇
2. GHG 排出量
3. GHG 削減シナリオと気候変動
4. 各国の GHG 排出量はいくらにすべきか
5. GHG 排出ゼロとは何か
6. CO2 回収貯留（CCS）
7. 高比率の太陽光発電シミュレーション
8. ドイツの GHG 削減長期シナリオ
9. ドイツのシナリオで日本に役立つ事項
10. 日本の GHG 削減長期戦略
11. EU と日本の GHG 実質ゼロ



目　次

ページ

はじめに ····· 4
1. 気温上昇 ····· 8
1.1. 都市化と地球温暖化 ····· 8
1.2. 地球温暖化データ ····· 13
1.3. 温暖化 2100 年 ····· 23
2. GHG 排出量 ····· 26
2.1. 情報源 ····· 26
2.2. GHG 排出量 ····· 28
2.3. 1 人当たりの排出量 ····· 29
2.4. 豊かさと GHG 排出量 ····· 32
3. GHG 削減シナリオと気候変動 ····· 36
3.1. 5 次評価報告書と GHG 削減シナリオ ····· 36
3.2. RCP シナリオと気温・海面の上昇 ····· 41
3.3. 温暖化による極端な気象現象 ····· 44
3.4. 温暖化による主要リスク ····· 45
3.5. IPCC の評価報告書に想うこと ····· 47
3.6. 転載：5 次評価報告書の極端気象現象 ····· 50
4. 各国の GHG 排出量はいくらにすべきか ····· 59
4.1. 1 人当たりの GHG 排出枠 ····· 59
4.2. RCP シナリオと 2100 年の 1 人当たり排出量 ····· 61
4.3. 2030 年の各国の削減目標 ····· 67
4.4. 2100 年の各国の GHG 削減量 ····· 72
4.5. 常識的に考える 2100 年の削減目標 ····· 77
5. GHG 排出ゼロとは何か ····· 84
5.1. 現状の GHG 排出内訳 ····· 84
5.2. 化石燃料が無い世界 ····· 88
5.3. 脱炭素エネルギー ····· 95

6. CO2 回収貯留（CCS） ····· 102
6.1. CCS に対する懸念 ····· 102
6.2. 過去の経緯 ····· 106
6.3. なぜ CCS が注目されるのか ····· 110
7. 高比率の太陽光発電シミュレーション ····· 113
7.1. 概要 ····· 113
7.2. 想定する電源構成 ····· 113
7.3. 日射量と太陽光発電出力 ····· 114
7.4. シミュレーション方法 ····· 115
7.5. 電力需給 ····· 117
7.6. PV のピーク発電量 ····· 119
7.7. 月ごとの各種電力量 ····· 120
7.8. 電力貯蔵の必要量 ····· 121
7.9. 電力貯蔵による損失 ····· 122
7.10. 電力貯蔵シミュレーション ····· 123
7.11. 充放電速度 ····· 125
7.12. 電力貯蔵を無くせるか ····· 127
7.13. 検討結果のまとめ ····· 127
7.14. 検討結果に基づく提案 ····· 128
8. ドイツの GHG 削減長期シナリオ ····· 131
8.1. 温暖化防止シナリオ 2050 ····· 131
8.2. エネルギー産業と発電所 ····· 132
8.3. 建物部門の熱供給 ····· 139
8.4. 家庭部門と三次産業 - 家電機器とプロセス ····· 143
8.5. 産業部門 ····· 146
8.6. 輸送部門 ····· 150
8.7. 農業部門と LULUCF ····· 153

9. ドイツのシナリオで日本に役立つ事項 ····· 160
10. 日本の GHG 削減長期戦略 ····· 169
10.1. 日本での検討経緯 ····· 169
10.2. 日本の長期戦略から見えること ····· 173
11. EU と日本の GHG 実質ゼロ ····· 178
11.1. 菅首相の方針 ····· 178
11.2. EU 加盟国の GHG 排出量 ····· 180
11.3. GHG 排出量に係わる各種データ ····· 183
11.4. 各国の GHG 排出状況 ····· 190
11.5. GHG 実質ゼロに関する要点整理 ····· 205
11.6. EU 諸国の GHG 排出量低減の推移 ····· 209
11.7. 温暖化の危機感 ····· 213
おわりに ····· 216

はじめに

＜本書の立場＞

温暖化は確かに進行していると考えますが、異常気候のような温暖化による深刻な被害発生の確かさについては、気候モデル等による更なる調査が必要と考えています。

一方、温室効果ガス（GHG）排出実質ゼロや化石燃料をほとんど使用しない世界への移行は、極めて困難な課題です。先進国は豊かさをかなり犠牲にすることで達成できるでしょうが、発展途上国が今より豊かになりつつGHG 排出実質ゼロを達成するのは困難でしょう。

1990 年度比で 2019 年度の日本の GHG 排出量は、僅か 5%しか低減していません。それに対し、再エネ電力買取制度の 2019 年度の賦課金総額だけでも 2.4 兆円と言われます。日本は GHG 低減に年間どれだけの費用を費やしているのか想像もできません。2050 年に GHG 実質ゼロを目指すなら、膨大な費用が掛かることだけは確実でしょう。

このままでは温暖化による深刻な被害が確実で、GHG 実質ゼロが不可欠なら、気候モデルなどによる精一杯の調査により確認し、国民に分かり易く説明することが必要です。また、GHG 実質ゼロに移行するシナリオを示すことも重要と考えます。本書はこの問題について極力データで示すことを意図したものです。

＜改訂１版＞

本書の初版は 2020 年 3 月には発行したのですが、同 9 月に菅首相が選出され、翌月の所信表明演説で「温室効果ガス排出を 2050 年に実質ゼロを目指す」方針が表明されました。GHG 排出実質ゼロの方針は、工業分野の人達に当初戸惑いを持たれたようですが、首相の方針を無視することはできないとして、GHG 排出実質ゼロに向けて日本が動き出していることを感じます。

しかし、私自身は初版に記載した考えは変わっていないため、初版の記載はほとんど修正せず、新たに 11 章を追加し、GHG 排出実質ゼロを推進して

いるEUと日本のGHG排出についての比較分析を紹介しました。

＜初版のはじめに＞

地球温暖化に関するパリ協定は、2℃未満1.5℃の温暖化防止を求めています。世界各国はそれなりに温暖化防止に努めており、日本も温暖化防止に年間3兆円以上を投じていると言われます。しかし、現状のトレンドに従うなら、2100年には平均気温上昇が3℃近くになることは確実です。

2℃未満の温暖化防止は極めて困難な課題です。再生可能エネルギーの導入に努めていれば、ひとりでに移行できるようなことではありません。世界全体を変革するようなことです。先進国は豊かさをかなりの程度犠牲にすれば実行できるかもしれません。しかし、発展途上国や低所得国は、貧困が増加し、飢餓や難民が発生する問題であるというのが私の認識です。

本書は、日本は長期の温暖化対策を如何に行うべきかを常識的に考えたものです。本書の前半には、世界が温暖化防止に精一杯努力したらできるだろことを記しました。しかし、IPCCが主張するように、1.5℃の温暖化防止が本当に必要になるかもしれません。後半には、その時に備えた事項を記載しました。

◆ ◆ ◆ ◆

温暖化防止に努めている人でも、GHG排出実質ゼロの実行について、まじめに考えたことがある人は少ないと思います。温室効果ガス排出ゼロとは、先ず、石油・石炭・天然ガスをほとんど生産も消費もしない世界です。

2019年10月ニューヨーク、国連気候行動サミットに訪れていたスウェーデンの少女は、前方を通り過ぎたトランプ大統領を睨みつけ、その画像が世界に配信され注目されました。世界は温暖化で全ての生態系が破壊されることによる大量絶滅の始まりにいると固く信じているようです。その20日ほど後、原油埋蔵量が世界3位の可能性がある大油田がイランで発見されたというニュースが新聞の一面を飾りました。温暖化を信じていても、化石燃料を使用しない社会がくるかもしれないことなど誰も夢想もしていないということでしょう。

化石燃料の使用を止めれば、温室効果ガスの排出量がゼロになるわけではありません。2010 年温室効果ガス排出量の推定で、化石燃料と工業プロセスから排出される CO2 は、温室効果ガス排出量全体の 65%に過ぎません。残りの 11%は林業及びその他土地利用（FOLU）に関する CO2、24%がメタン、亜酸化窒素、フッ素化ガスなどの非 CO2 の温室効果ガスです。温室効果ガスをゼロにするのは大変な事なのです。

◆ ◆ ◆ ◆

本書は次のような内容になっています。

1 章に「気温上昇」のタイトルで、都市化と地球温暖化の気温上昇の違い、陸域の平均気温上昇と陸+海の平均気温上昇の違いを紹介しました。

2 章は「GHG 排出量」のタイトルで、排出量の多い国々のデータ、高所得国や低所得国など、豊かさと GHG 排出量の関係を紹介しました。

3 章は「GHG 削減シナリオと気候変動」のタイトルで、IPCC の 5 次評価報告書にある 4 種の RCP シナリオの 2100 年の放射強制力、GHG 排出量、世界平均地上気温上昇、平均海面水位上昇などを紹介しました。また、温暖化による主要リスクがどのように記載されているかを示しました。

4 章では、世界が精一杯温暖化防止に取り組んだら、中長期の温暖化はどの程度抑制できるかを考えてみました。

5 章以降では、温室効果ガス 80%削減やゼロについて記載しました。異常気象の恒常化などで、それが必要になる事態に対するものです。また、化石燃料の無い世界や脱炭素エネルギーについて記載しました。

6 章では、各論として CO2 回収貯留（CCS）について、問題点やコスト、これまでの実績を紹介し、なぜ、今 CCS に関心が持たれているのかを記載しました。

7 章では、太陽光発電に大幅に依存したときに問題になる発電電力量の変動について、筆者が行った毎時変動シミュレーションを紹介し、問題点を定量的に示しました。

8 章と 9 章では、ドイツは温室効果ガスを 80%および 95%削減する長期シナリオを作成しており紹介しました。9 章では、ドイツの長期シナリオにつ

いて、日本の長期シナリオを考える上で参考になる要点を示しました。

10 章では、京都議定書以後、ラクイナ・サミツトでの温室効果ガス 80%削減の合意やパリ協定に関し、日本で検討されてきた温暖化防止の長期計画について紹介した上で、温室効果ガス削減の長期シナリオを作成する上で考慮すべき要点を示しました。

11 章は改訂 1 版で追加したもので、GHG 排出実質ゼロを推進している EU の加盟諸国の GHG 排出内訳と日本の比較を紹介しました。森林等の GHG 吸収（LULUCF）を考慮して、最も GHG 排出実質ゼロに近いのはスウェーデンですが、人口密度が極めて低いためであることを示しました。また、1990 年から 2018 年までの EU 各国の LULUCF を考慮した GHG 実質排出量の推移を示し、GHG 排出実質ゼロに真剣に取り組んでいるのは、EU 加盟国の一部であることを示しました。

◆ ◆ ◆ ◆

日本が国連に提出した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」には、今世紀後半のできるだけ早期に「脱炭素社会」の実現を目指すとともに、2050 年までに GHG80%削減に大胆に取り組むとされています。

2050 年は 30 年も先のことと思うかもしれません。しかし、30 年で温室効果ガス 80%削減を実行できるかと、エネルギー問題の専門家に質問したら、ほとんどの人は無理だろうと答えることでしょう。なぜ、平気でいられるのかといえば、80%削減や脱炭素社会の実現などに、国際的な合意は得られないと高を括っているからだと思います。

それは適切な判断かもしれませんが、温室効果ガス 80%削減を内外に公言しているのですから、せめて長期シナリオを作って検討すべきです。それにより、日本の温暖化防止に関する方向がはっきり見えてくると考えます。

（注：この記載は初版発行の 2020 年 3 月時点での筆者の率直な想いです）

1. 気温上昇

1.1. 都市化と地球温暖化

＜2018 年の夏＞

2018 年は異常に暑い夏でした。高齢の方は、子供の頃と比べて気温が 4～5℃高くなったと感じたことでしょう。但し、地球温暖化は、暑い気温の一部でしかありません。また、自然現象ですから、暑さ寒さの変動は付き物です。

地球温暖化について紹介する前に、身近な日本の気温上昇から見ることにしましょう。気象庁は、現在全国 1300 余りの観測地点（アメダス形式）を有し、気象庁のウェブサイトで、古いものでは明治時代からの気象データを閲覧することができます。

都市化が進んだ代表例として、東京（丸の内）の年間平均気温の推移を見ることにしましょう。図-1.1 に、1876 年（明治 9 年）からの年平均気温の推移を示しました。なお 2014 年 12 月の気温観測データから、観測地点は千代田区大手町の気象庁本庁の構内から、皇居に隣接する北の丸公園内に移転し、最低気温の月平均値などは、1℃くらい低くなったようです。

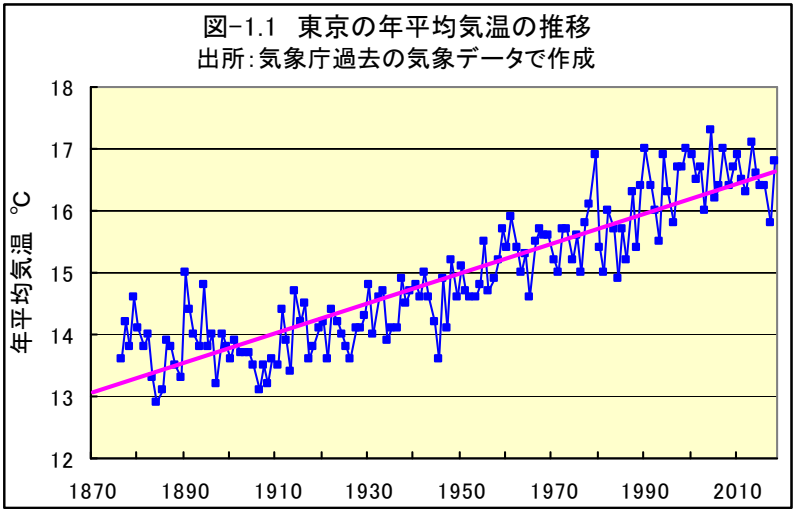
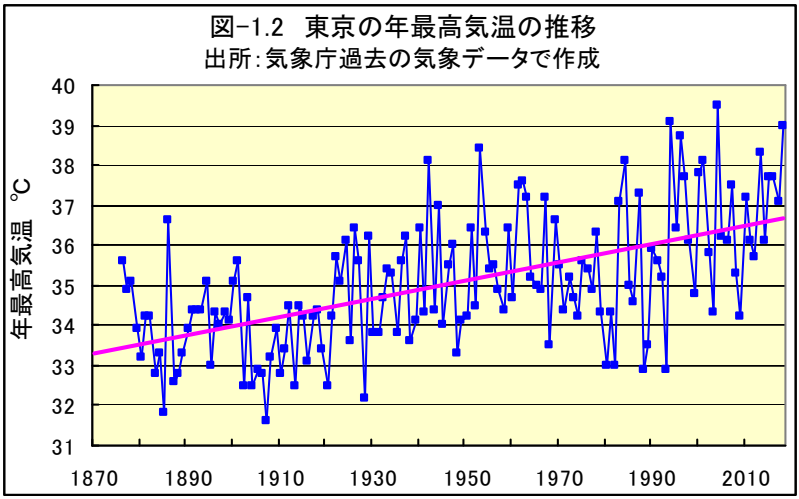


図-1.1 に付記した赤線は、変動する気温グラフを Excel の機能を用いて直線近似したものです。近似直線によると、1876 年から 2018 年までの約 140

年間に、東京の年平均気温は約 3.5℃上昇したことが分かります。

しかし、昔と比べて暑くなったという実感を確かめるには、年平均気温よりも年最高気温を調べるべきでしょう。図-1.2 には、同様に気象庁のデータで、年最高気温の推移を示しました。



赤色の近似直線で、年最高気温も 3.5℃近く高くなっていることが分かります。近似直線によれば、終戦直後（1945 年頃）に 35℃くらいだった年最高気温は、最近は 37℃に近づいています。

なお、年最高気温の変動幅は大きく、2018 年の最高気温は 39℃でしたから、暑い夏であったという実感に間違はなかったことになります。

＜気温変動の要因＞

46 億年と言われる地球の歴史の中で、数回の氷河時代かあったことか知られています。年代については種々の主張があるようですが、最も新しい氷河時代は、およそ 260 万年前から現在に至る第四紀氷河時代です。直近の約 40 万年では、氷期と間氷期（温暖期）の変化が約 10 万年周期で訪れていると言われます。氷期に比べて間氷期は 1 万年から 3 万年と短く、現在はおよそ 15,000 年前に始まる間氷期にあると言われます。

地球温暖化が一般に注目され始めたのは1980年代末頃ですが、1970年代には地球寒冷化が取りざたされたこともありました。

長期の気温変動に影響を及ぼす自然現象としては、地球の公転軌道の離心率や自転軸の傾きの周期的変化、自転軸の歳差運動により、長い周期で日射量が変動すること（ミランコビッチ・サイクル）が知られています。加えて、太陽活動の変化や火山の大規模噴火により太陽光線が少し遮られることなどが氷期や間氷期、ミニ氷期などを発生させます。その他、エルニーニョやラニーニャなどの海面水温の変化は、比較的短期の気温変動を引き起こします。

一方、温暖化の人為的原因のうち都市化の影響は、ヒート・アイランド現象とも呼ばれます。都市化による気温上昇の原因は、緑地や水面の減少、アスファルト舗装やコンクリート構造物の増加により、水分の蒸発が減少、地表面温度が上昇することで、大気へ与えられる熱量が増加すること。日射光や地面からの反射光の赤外線の一部が建築物に日中吸収され、夜間に放出されることで気温の低下が抑えられること。産業活動や社会活動に伴い排出される熱量の増加などが主なものです。

＜都市化の影響＞

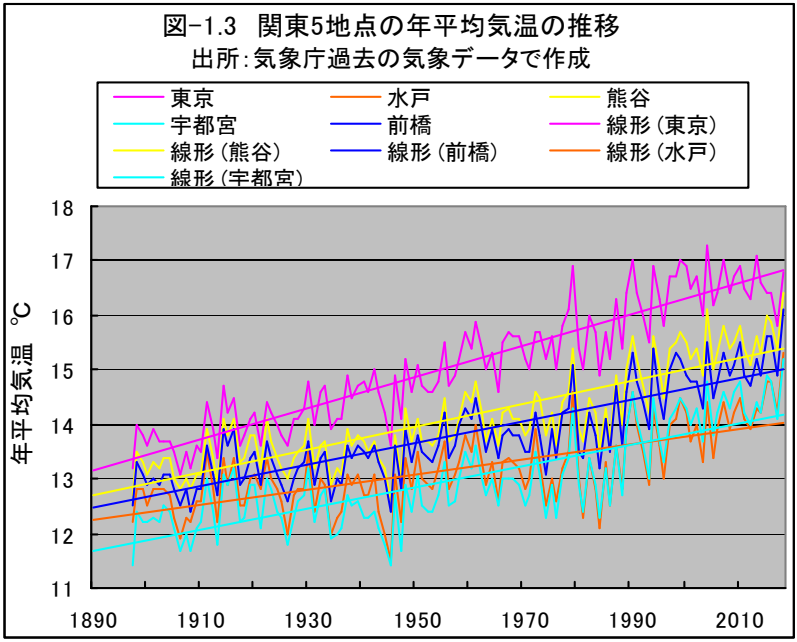
国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が2013年から2014年にかけて発行した第5次評価報告書によれば、地球温暖化により世界の平均気温は、1880年から2012年の130余年の期間に0.85℃上昇したと報告されています。なお、世界の平均気温とは、陸域における地表付近の気温と海面水温の平均で、都市化の影響による気温上昇を除いた値です。

また、2015年12月に温暖化防止に関して合意されたパリ協定の長期目標は、産業革命前からの世界の平均気温上昇を2度未満に抑える。更に、平均気温上昇1.5度未満を目指すというものです。蛇足ですが、産業革命はイギリスで1760年代に始まったと言われ、ジェームズ・ワットの蒸気機関は1769年に開発されました。

一方、東京の年平均気温の上昇は、図-1.1に示したように、地球温暖化よりも遥かに高い値に達しています。その理由の一つは、世界の平均気温上昇

は、海面温度を含めた世界の平均温度で、後述するように、陸域のみの気温上昇よりもかなり低い値になっているためです。

もう一つの主な理由は、ここで紹介する都市化の影響です。図-1.3 には、東京を含めた関東 5 地点について、1897 年から 2018 年の 120 年余の期間の年平均気温の推移を示しました。

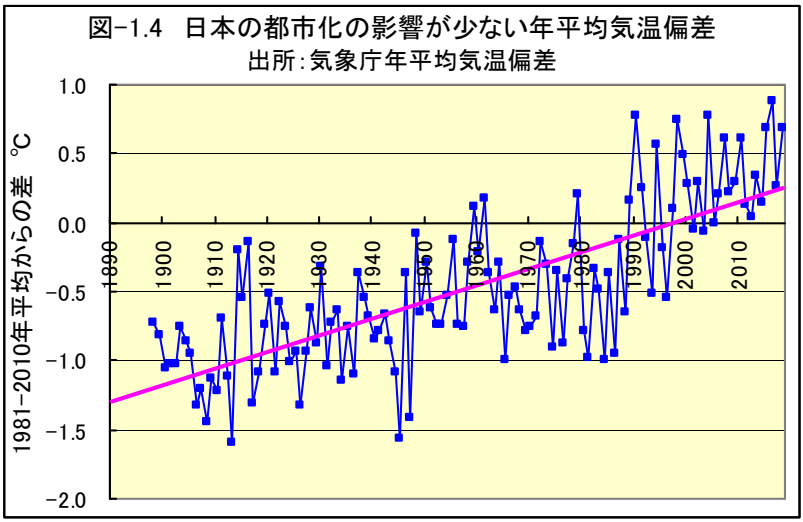


温度グラフの近似直線を比較すると、熊谷、前橋、宇都宮はほぼ同じ傾きで、東京よりも傾きは小さいのですが、同期間に約 2.5℃上昇しています。また、水戸の近似直線は、それよりも傾きが小さいのですが、それでも同期間の気温上昇は約 1.8℃です。

紹介した地点は県庁所在地相当で、都市化がかなり進んでいます。日本の場合、都市化の影響は多くの地点に現れており、都市化の影響が少ない気温上昇のデータを調べるには、注意深い観測地点の選定が必要になります。

図-1.4 は気象庁の報告で、1898 年以降観測を継続している気象観測所の中から、都市化による影響が小さく、特定の地域に偏らないように選定された

15 地点の月平均気温データです。1981～2010 年の 30 年平均値を基準に偏差を示したものです。



15 地点は、網走、根室、寿都（すっつ）、山形、石巻、伏木（高岡市）、飯田、銚子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬、石垣島です。地名からも、都市化の影響が少ないだろうと想像できると思います。近似直線で示した 120 年間の日本の年平均気温の上昇は約 1.5℃で、地球温暖化による気温上昇よりも高い値です。

なお、この 15 地点には、海の近くの地点もありますが、全て陸域の地点であり、海面温度のデータが含まれていないことが、地球温暖化の平均気温上昇よりかなり高い値になっている主な理由と思われます。

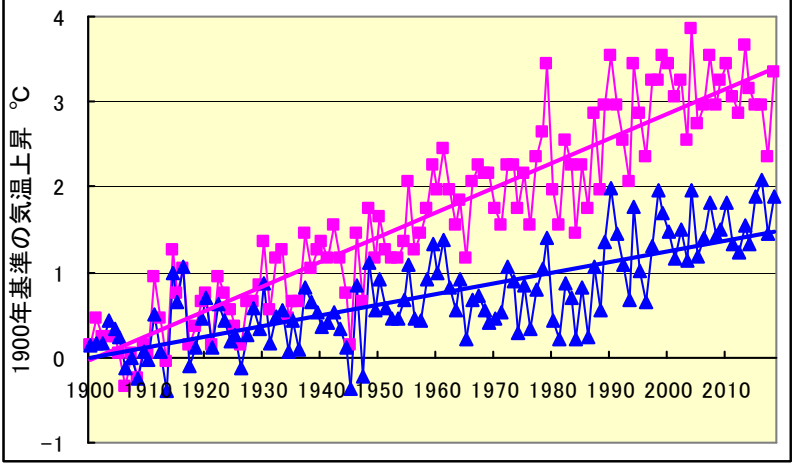
＜東京の都市化の影響＞

図-1.5 には、東京の気温上昇に対する都市化の影響を見るため、図-1.4 に示した都市化の影響が少ない地点の気温上のグラフを、1900 年を基準にして東京の気温上昇と共に示しました。両者の気温上昇の差が、東京の気温上昇での都市化の影響と概ね見做せると思います。

2019 年現在の東京の気温上昇に関する都市化の影響は約 2℃、太平洋戦争終結頃（1945 年）では 0.7℃前後と思われます。

都会に住んでいる人が体感的に地球温暖化を考える際には、陸域の世界平均気温上昇のデータを基に、都市化の影響を念頭に入れて考えることが必要です。

図−1.5 都市化の影響が少ない地点と東京の気温上昇
出所：気象庁過去の気象データで作成



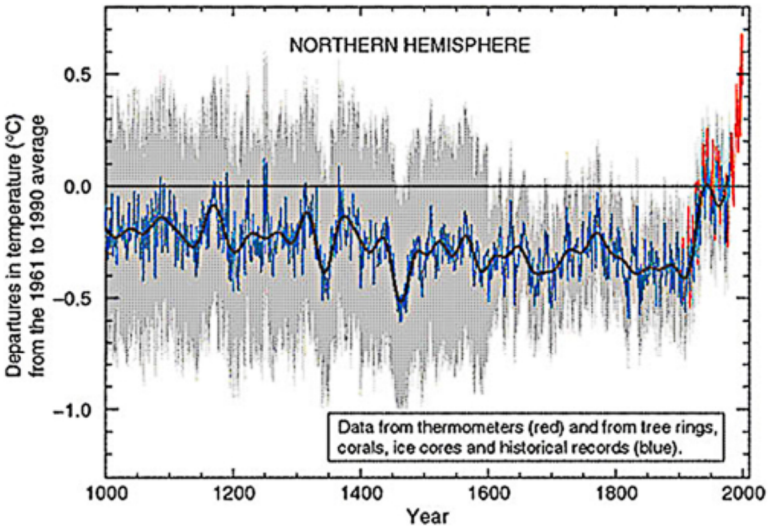
1.2. 地球温暖化データ

＜ホッケースティック論争＞

地球温暖化に対する懐疑論があります。有名なのは「ホッケースティック論争」でしょう。過去 1000 年以上の長期の気温変化を見積もった下記の世界の気温グラフにより、20 世紀以降に示されている急激な気温上昇が、人為的な地球温暖化の証拠であると主張したものです。グラフの形がホッケースティックに似ていたことで、その名前が付きました。

しかし、概ね直線的に推移している 20 世紀以前について、欠落している温度データの指摘が相次ぎ、データの改竄ではないかという疑念が拡がりま

した。実態はミスが重なったもののようですが、温暖化に対する疑念の根拠になりました。



地球温暖化に関する懐疑論が生まれる原因の一つは、世界の気温データから、都市化の影響を排除することの難しさが背景にあるように思います。

＜Berkely Earth＞

筆者は温暖化懐疑論者ではありません。世界の平均気温が人為的原因により、産業革命以降に 1℃近く上昇したと考えています。世界の平均気温上昇の情報は、IPCC の報告書の他に、Berkeley Earth のウェブサイトのデータを利用しています。本書では、世界の平均気温上昇のデータは、Berkeley Earth のデータを中心に紹介することにしました。

Berkeley Earth は 2010 年に、米国カリフォルニア大物理学教授 Richard Muller 等により、地球温暖化懐疑論の懸念事項を検証するために設立されたと記されています。懸念事項として、気温データの選択が適正か、人為的データ調整（改竄）が無いか、精度が悪い気温データが含まれていないか、都市化の影響が混入していないか、そして、人為的影響による気温上昇問題に

関し、IPCC が大規模で複雑な地球規模の気候モデルに過度に依存していないか、という 5 点があげられています。

地球温暖化に懐疑的な人もいるのですから、IPCC の報告や、その根拠データの 1 つである米国海洋大気庁（NOAA）の Global Historical Climatology Network（GHCN）のデータを紹介するより、Berkeley Earth のデータの方がよいのではないかと考えました。

なお、Berkeley Earth のレポートによれば、独自の方法で世界の平均気温を求めているが、その結果は、GHCN のデータと合致していることを確認している記載されており、温暖化懐疑論の懸念を否定しています。

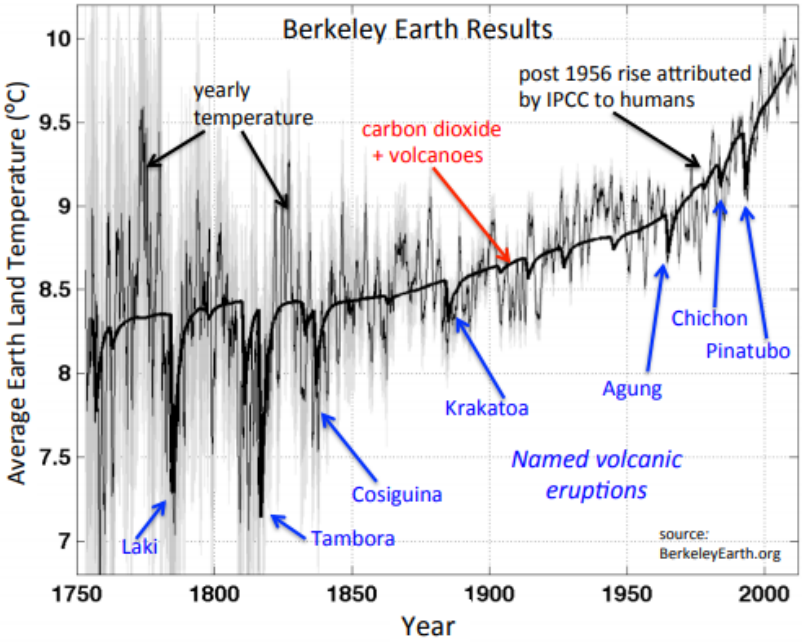
Berkeley Earth のサイトから気温データをダウンロードし、Excel を利用して種々のグラフを作成しました。以下に紹介する世界の平均気温上昇データは、IPCC の報告と同一ではないが、同様のものと理解しています。

＜Berkely Earth の調査結果＞

詳しくは Berkeley Earth のウェブサイトをご覧戴きたいと思いますが、調査結果の一部を紹介します。地球の陸域の平均気温を求めるために、独自の方法を開発しています。地球表面の陸域を約 16,000 の要素に分割し平均気温を計算しています。気温データが欠けている要素は、周囲の気温データからガウス過程回帰により気温を推定します。気温の測定器の変更や移動などによるデータの不連続性に対しては、不連続点を検出しデータを分割して利用する方式です。気温データの記録ミスやヒート・アイランドの影響、測定場所の不良などによる誤った傾向を示す測定データの影響を減らすため、各分割要素に重み付けを導入して平均気温を求めています。

調査結果として、世界の陸域の平均気温は過去 250 年間で 1.5℃上昇したとされます。その陸域の平均気温の推移は、大気中の CO2 濃度と、火山噴火による大気中の硫酸塩濃度を考慮した単純モデルによるフィッティングが温度記録と良い一致がみられ、一方、太陽活動の変動（太陽黒点数の変化）は、フィッティングの改善に寄与しなかったと報告されていま

す。そのことから、温暖化の最も簡単な説明は人間の温室効果ガス排出であることが示唆されると述べられています。



上図は 36,000 以上の測定場所の気温データから決定された地球の陸域の平均気温の推移です。大気中 CO2 濃度に、火山噴火のみを考慮した単純モデルが黒の太線で併記されています。10 年単位の短期急激な気温変動は、エルニーニョやガルフストリームなどの海流の変化が原因と考えられています。

都市化の影響による気温上昇についても報告されています。陸域の全ての気温データに基づく平均気温の推移と、都市化の影響を受けない田舎（very rural sites）のみのデータの平均気温を比較しています。

下図に調査結果を示しました。左側グラフの赤線は全てのデータに基づく平均気温の推移、青線は田舎のみのデータの平均気温です。右側のグラフは、全てデータの平均気温から、田舎の平均気温を差し引いた値の推移です。両者の差は誤差範囲であると述べられています。見難いグラフのため、関心が

ある方は、レポート Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average using Rural Sites Identified from MODIS Classifications を参照下さい。

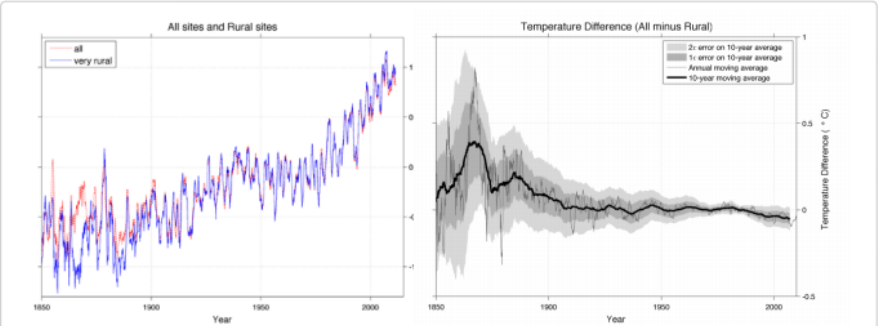


Figure 5: A) Berkeley Earth global temperature averages normalized to zero mean for 1950-1980. The dashed (red) estimate is based on all sites; the solid (blue) estimate is based on the very rural sites (those more than 0.1 degrees distant from a MOD500 urban region).

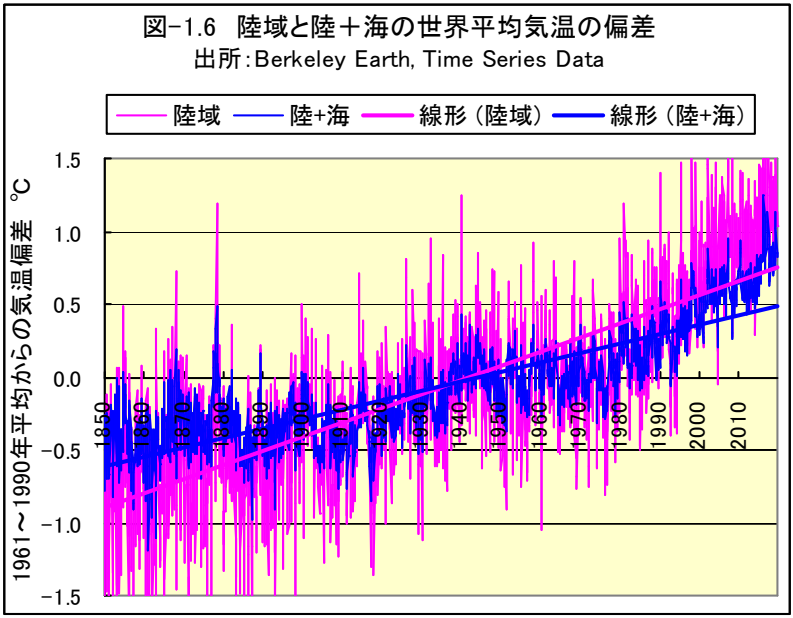
B) is the difference between the two curves in A. The thin line shows a one-year running average; the thicker line shows the 10-year running average. The dark grey area shows the standard error on the 10-year running average, the light grey twice the standard error on the 10-year running average. The standard errors are calculated by adding the statistical uncertainties calculated for each average, using the Jackknife method of Rohde et al. [29], in quadrature.

前述した東京の気温のように、都市化による大きな気温上昇があることは事実ですが、都市化の影響を受ける陸域の面積は、地球全体の陸域面積に比べて僅かであるため、地球全体の平均気温に及ぼす影響は小さいということのようです。

＜世界の平均気温と陸域の気温＞

地球温暖化でいう世界の平均気温とは、前述のように、陸域における地表付近の気温と海面水温の平均です。なお、1.1 項で紹介した日本の平均気温上昇は、何れも陸域の気温です。

図-1.6 に Berkeley Earth のデータで、1850 年から直近の 2019 年 7 月までの毎月の陸域のみと、陸+海の世界の平均気温上昇を示しました。同グラフは、1961 年～1990 年の平均からの温度偏差を示し、近似直線を併記しています。



直線で近似するのには問題があるように思いますが、二本の近似直線を比較すると、陸域のみの近似直線の傾きが大きく、温度上昇が大きいことが分かります。陸域の気温上昇に比べ、海面水温の上昇が小さいためです。また、毎月の平均温度の変動幅も、陸域の方が大きい値を示しています。大気層の熱容量に比べて、海の熱容量は大きく、海の温度上昇は小さいだろうことは想像できると思います。

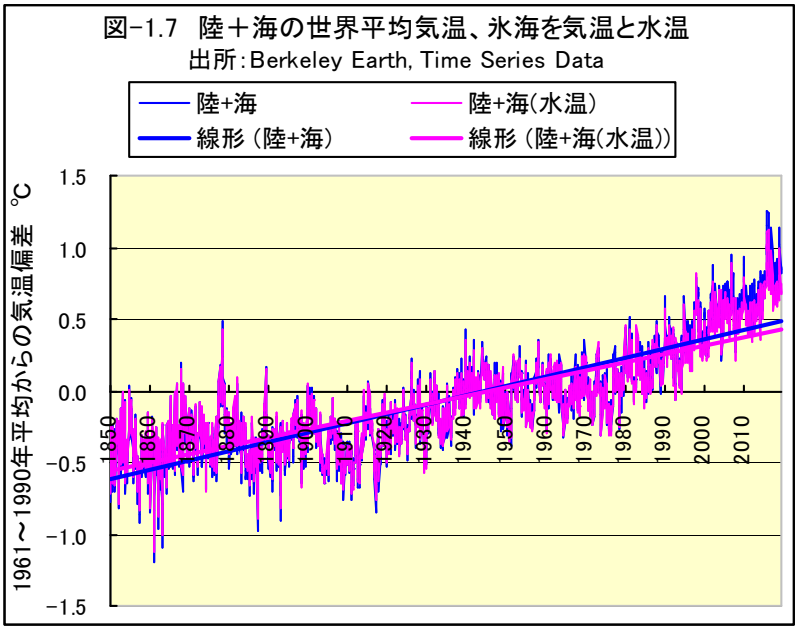
細かい話になりますが、Berkeley Earth のウェブページには、2 種類の陸＋海の温度データが掲載されています。

地球の表面の約 7 割が海で、その一部は氷海です。氷海面積は月により変化しますが、地球表面の 3.5～5.5%が氷海に覆われているのだそうです。氷海の温度をどのように考えるべきでしょうか。氷上部の気温を用いるべきか、氷の付近の海水温度とすべきか、選択が必要になります。

蛇足かもしれませんが、図-1.7 に両者による陸＋海による世界の平均気温の推移を示しました。青色で示したグラフと近似直線は、氷海上部の気温を

用いたもので、図-1.6 に示したグラフと同じものです。一方、赤色で示したグラフと近似直線は、氷海周囲の海水温度を用いたものです。

図−1.7　陸＋海の世界平均気温、氷海を気温と水温
出所：Berkeley Earth, Time Series Data



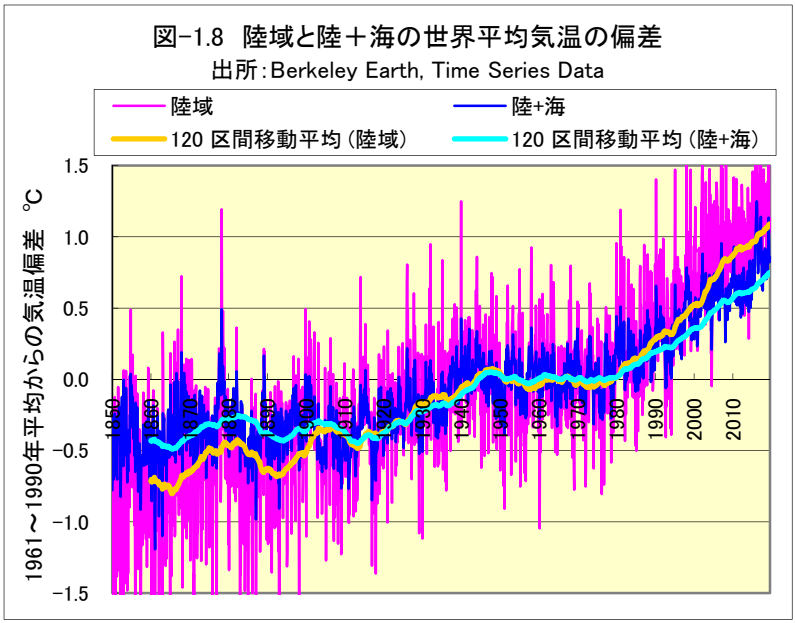
両者の世界平均気温上昇量の差は僅かですが、約 170 年間で 0.2℃くらいの違いがあります。氷海の問題は一例ですが、膨大な気温データの精度や都市化の影響の除去など、世界の平均気温上昇を厳密に論ずるのは簡単なことではないようです。

＜世界の平均気温上昇＞

図-1.6 に示した世界の平均気温上昇のグラフを、一本の直線で近似するのは少し無理があります。図-1.6 の近似直線の代わりに、図-1.8 には 120 ヶ月（10 年間）の移動平均の近似曲線を併記しました。移動平均の近似曲線は、例えば、日々変動する株価データの長期の大きな動きを認識するためなどに用いられています。

水色で示した陸＋海の 1850 年から現在までの約 170 年間の平均気温の近

似曲線では、1920 年以前は気温上昇がほとんど無く、その後 1950 年頃まで気温上昇を示し、次の 1980 年まで気温上昇が無く、その後は現在までの高い気温上昇の期間になっています。

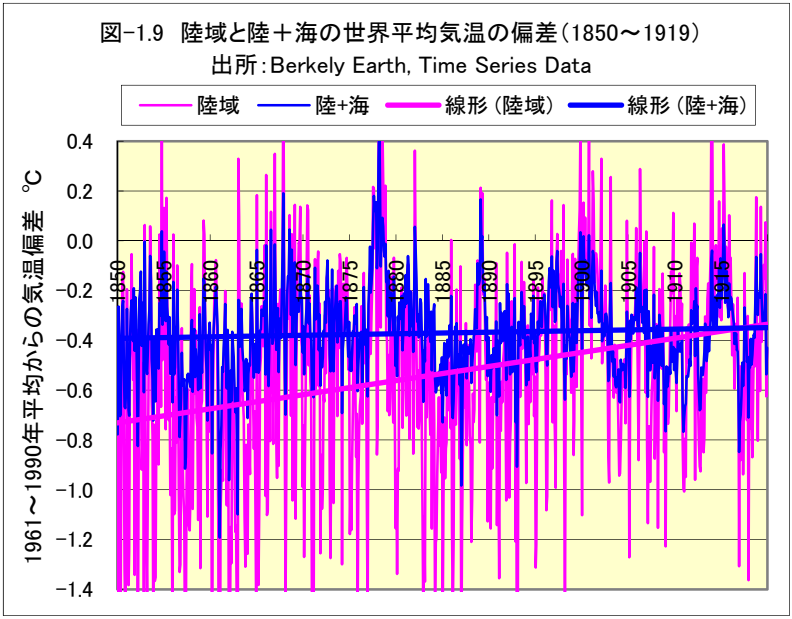


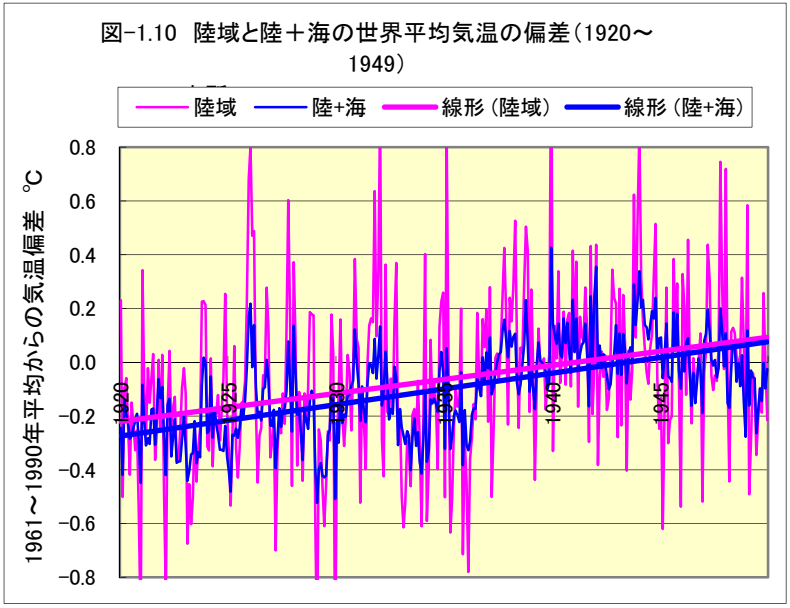
そこで、図-1.6 を 1920 年以前、1950 年、1980 年、現在までの 4 期間に分けて、図-1.9～図-1.12 に陸域と陸＋海の世界平均気温上昇と近似直線を示しました。近似直線は、各々の区間に対応したものです。なお、4 つのグラフは、縦軸と横軸のスケールが同じではないことに注意して下さい。

図-1.9 に示した 1919 年以前の期間の近似直線では、陸＋海の気温上昇はほとんど認められないのに対し、陸域では 70 年間に約 0.3℃の気温上昇があります。陸域気温よりも海面温度の上昇が小さいことに起因しているためと思われます。

図-1.10 に示した次の 30 年間では、陸域と陸＋海の世界の平均気温上昇の近似直線は似たような傾きで、気温上昇は 0.3℃台です。

図-1.11 に示した 1950 年以降の 30 年間の気温上昇の近似直線では、陸域と陸＋海ともに気温上昇は小さく、30 年間で 0.1℃以下です。





これらのデータからは、世界の平均気温上昇、とりわけ海面温度の変化を

推測することの難しさが窺われます。

図-1.11 陸域と陸＋海の世界平均気温の偏差(1950～1979)
出所：Berkeley Earth, Time Series Data

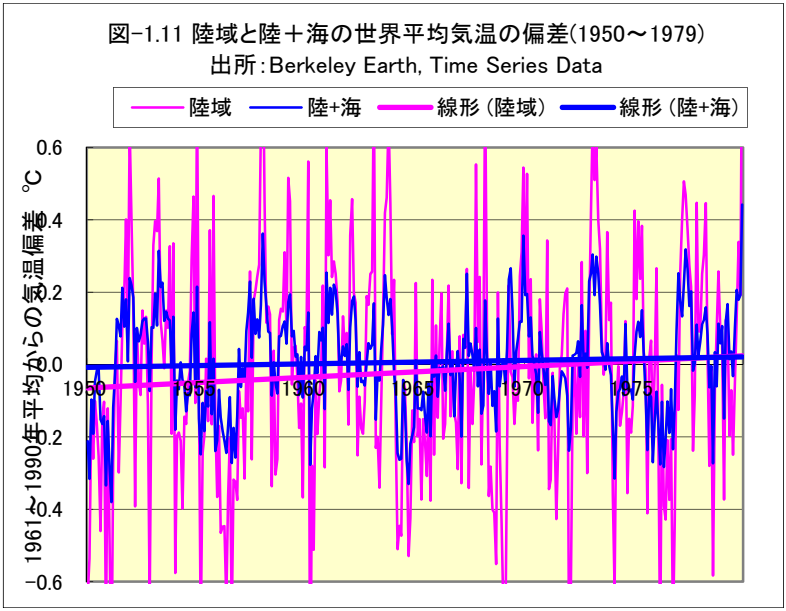


図-1.12 陸域と陸＋海の世界平均気温の偏差(1980～2019)
出所：Berkeley Earth, Time Series Data

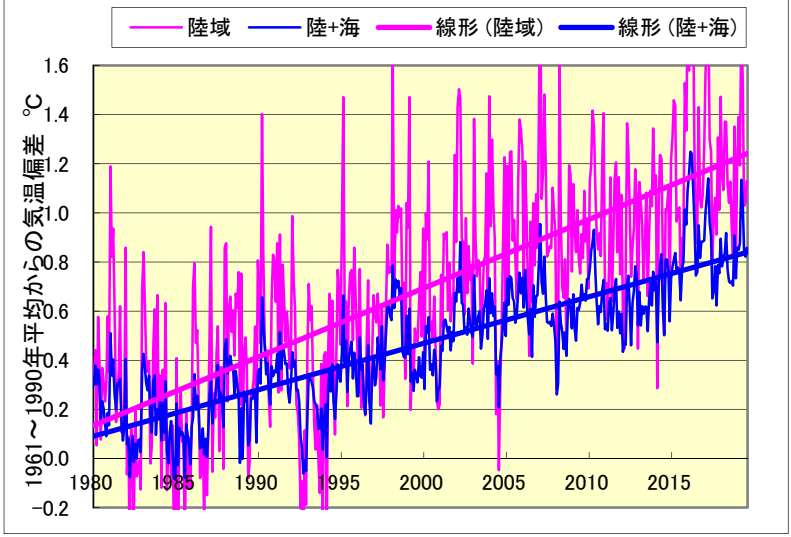


図-1.12 に示した最近の 40 年間の平均気温上昇の近似直線は、IPCC の指摘にもあるように、顕著な気温上昇を示しています。

表-1.1 には、上述の近似直線による気温上昇値を一覧表で示しました。陸＋海の気温上昇の近似直線の読み取り値で、気温上昇が大きい 1920～1949 年と 1980～2019 年の年率の気温上昇では、後者は前者の約 1.6 倍です。

表-1.1 世界平均気温上昇の近似直線の読み取り値

期間	年数	平均気温上昇 ℃		気温上昇率 ℃/100年		備考
		陸域	陸＋海	陸域	陸＋海	
1850-1919	70	0.40	0.04	0.57	0.06	図-1.8
1920-1949	30	0.31	0.35	1.05	1.17	図-1.9
1950-1979	30	0.09	0.03	0.30	0.10	図-1.10
1980-2019	40	1.11	0.75	2.77	1.88	図-1.11
1850-2019	170	1.91	1.17	1.12	0.69	全体

確かに最近の気温上昇は顕著ですが、1920～1940 年代にも気温上昇がかなり大きかったことを無視することはできないでしょう。筆者のような門外漢には、その原因は明確でないように感じられます。

温暖化懐疑論に与するものではありませんが、2℃未満の温暖化防止の実行は本当に大変なことであり、慎重に取り組むべき必要性を示唆している事例の一つであるように思われます。

1.3. 温暖化 2100 年

1980 年から 2019 年現在までのトレンドで気温が上昇した場合について、2100 年の世界の平均気温上昇を図-1.13 に示しました。この様な外挿をしたら専門家に叱られると思いますが、この調子で熱くなると 2100 年にはどうなるかは、皆の関心があることと思います。2100 年までの 120 年間での世界の平均気温上昇は、陸域のみの平均気温上昇は約 3.4℃、陸＋海の平均気温上昇では約 2.3℃となります。

＜陸域の気温上昇＞

暑くなったことを体感するのは陸域の気温です。2100 年の陸域の世界平均

気温上昇が耐えられないものか、素人考えで述べてみます。この先 2100 年までの 80 年余りの間では、世界の平均気温上昇は約 2.2℃です。

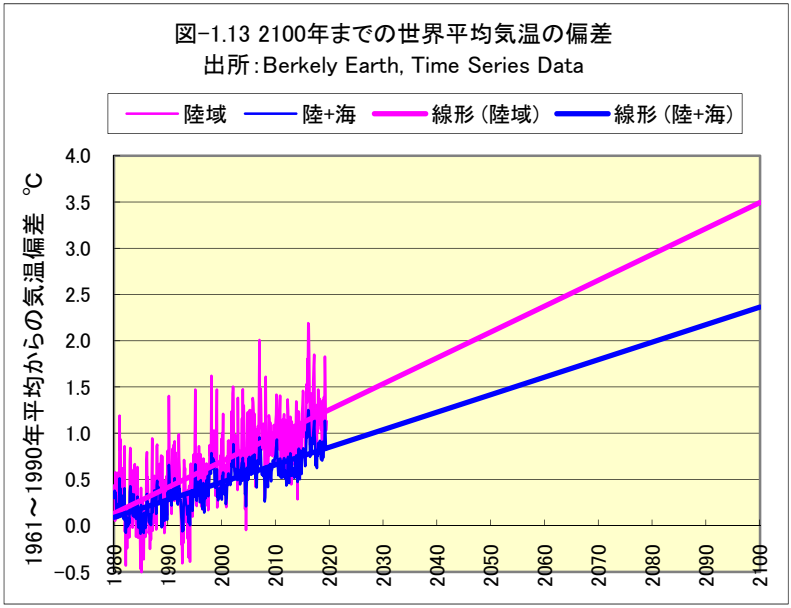


図-1.13 2100年までの世界平均気温の偏差
出所：Berkely Earth, Time Series Data

東京の場合に、都市化の影響による気温上昇は、これ以上ほとんど増加しないでしょうから、2.2℃に都市化の影響を加える必要はないでしょう。寧ろ、東京などの都市部では、都市化の影響を減らす都市開発の考え方が生まれるでしょう。

1980 年からの過去 40 年余を振り返ると、図-1.1 に示したように、東京の年平均気温は 1℃弱上昇しました。私は 1970 年頃に東京の近郊に住んでいましたが、当時多くの家庭でエアコンはまだ使われていませんでした。しかし、現在は暑い日には冷房が不可欠になっています。

今後 2℃余の平均気温の上昇により、冷房の使用時間は増加するでしょうが、一般的に言って、人間が耐えられないことはないように思います。冷房を使わない陸上の動植物は、適応できない一部の種があるかもしれませんが、生息地域が寒い地域へと移動することになることでしょう。生息域を変えることのできる動植物は、対応できるのではないかと考えます。今いる生き物

は、気温変動の長い歴史を生き延びてきたものと思います。但し、この種の議論では人間でも動植物でも、対応力が低い弱者への配慮が不可欠です。

日本の場合、都会に住すみ冷房をガンガン使用する生活が嫌な人は、不便にはなりますが、都市化の影響が少ない田舎に住む選択肢もあると思います。国連の人口推計（中位）によれば、2100 年の日本の人口は現在の約 2/3 に減少すると予測されています。過疎化が進む地方では、都市化による気温上昇が少ない街づくりを特長とすることもできると思います。

200 年、300 年将来のことは分かりませんが、2100 年までなら人間や動植物は、気温上昇になんとか対応できるように思われます。

＜2100 年その他の問題＞

IPCC により指摘されている地球温暖化による主な問題として、海面上昇や異常気象の増加があります。

その他、気温上昇がある限界点を超えると、温暖化による問題が急速に進むという指摘や、既にその臨界点を超えているという恐ろしい指摘もあるようです。しかし、その主張には、未だ充分な根拠あるわけではないように思います。

温帯地方の気温が上昇することで、マラリアなどが拡がるリスクも指摘されます。しかし、熱帯の人達が現実に生活している環境なのですから、そのような気候変化に伴う問題には、対策を講じることを考えるべきでしょう。概して、動植物にとって温暖化よりも寒冷化の方が厳しい問題です。

IPCC の報告では、世界の平均気温上昇とは、陸+海の平均気温です。図-1.13 に示した Berkeley Earth のデータで、1980 年を基準にした 2100 年の世界の平均気温上昇（陸+海）は約 2.3℃です。産業革命以降を基準にするなら、気温上昇は約 2.7℃になります。なお、今後の気温上昇は、過去 40 年間のトレンドより少し高くなるでしょうから、産業革命以降 2100 年の気温上昇は、3℃近くになることを想定すべきでしょう。

このままでは、世界の平均気温上昇を 2℃未満に押さえ、1.5℃未満を目指して努力するというパリ協定の目標を満たせないことは確実です

2. GHG 排出量

2.1. 情報源

このレポートで使用した温室効果ガス（GHG）排出量データの情報源を紹介しておきます。GHG のうち燃料燃焼由来の CO2 排出量は、石炭、原油、天然ガスなどの消費量と、その燃焼で発生する平均的 CO2 排出割合のデータから算出できます。例えば、国際エネルギー機関（IEA）の統計データなど、幾つかのデータベースが公開されています。

地球温暖化について記載する場合に、CO2 排出量ではなく、GHG 排出量で論じたいと思うのは理解できると思います。先進国である京都議定書の附属書 I 国については、国連の UNFCCC のデータベースを利用できます。しかし、今後の GHG 排出量を考える場合、発展途上国の動向が重要になります。

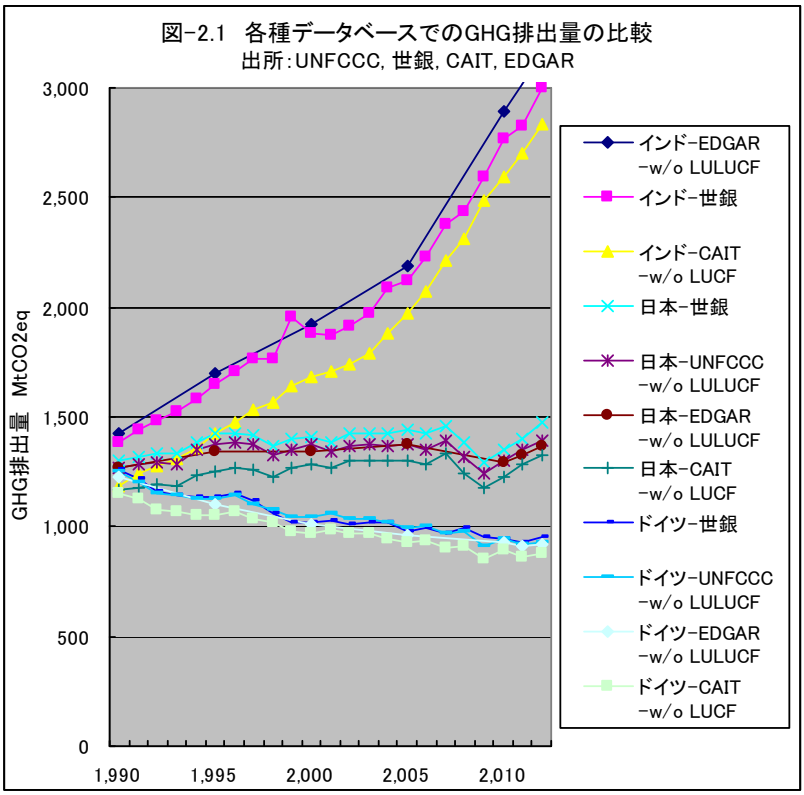
発展途上国を含めた世界各国の GHG 排出量の統計データは、あまり公表されていません。CO2 以外の GHG 排出量の積算には手間が掛かり、全ての国々をカバーしようとすると、概略の推定値にならざるを得ないためと想像されます。公表されているデータベースで筆者が知っているのは世界銀行のデータベースと、World Resources Institute が提供している CAIT データベースくらいです。

その他には、2017 年に EU が温暖化に関して下記レポートを発行し、それに関連して世界各国の GHG 排出量のデータベース EDGAR を公表しています。200 余りの国と地域のデータが掲載されています。

Fossil CO2 & GHG emissions of all world countries

上記 4 つのデータベースに掲載されている GHG 排出量は、相互に少し違いがあります。GHG の集計範囲や、推計・積算方法に違いがあるためでしょう。

図-2.1 には、参考例として、各データベースに掲載されている日本、ドイツ、インドの GHG 排出量の値を示しました。インドは、京都議定書の附属書 I 国でないため、UNFCCC のデータはありません。UNFCCC と EDGAR の値は LULUCF を含まない値、CAIT は LUCF を含まない値です。



特に発展途上国については、GHG 排出量を正確に把握するのは難しく、数%の違いを問題にしてもしようがないように思います。例えば、中国でも最近まで、国内で産出、消費される石炭のデータは、信頼が置けないと言われていました。

世界銀行は公的機関で、1970 年以降のデータがあるので、それを使用しようと思ったのですが、インドネシアやブラジルなどの一部の国について、GHG 排出データに、異常に大きな変動が見られます。森林火災や森林破壊による GHG 排出量の影響を考慮しているためかもしれません。

突発的な大きな変動がある世界銀行のデータは、種々比較する上で少し扱い難いため、このレポートでは、UNFCCC や世銀データとほぼ等しい

EDGAR のデータを用いることにしました。

2.2. GHG 排出量

図-2.2 に、2012 年の GHG 排出量で上位 20 ヵ国の排出割合を示しました。上位 20 ヵ国で世界の GHG 総排出量の 75%を占め、上位 4 ヵ国で 50%を超えていることが分かります。

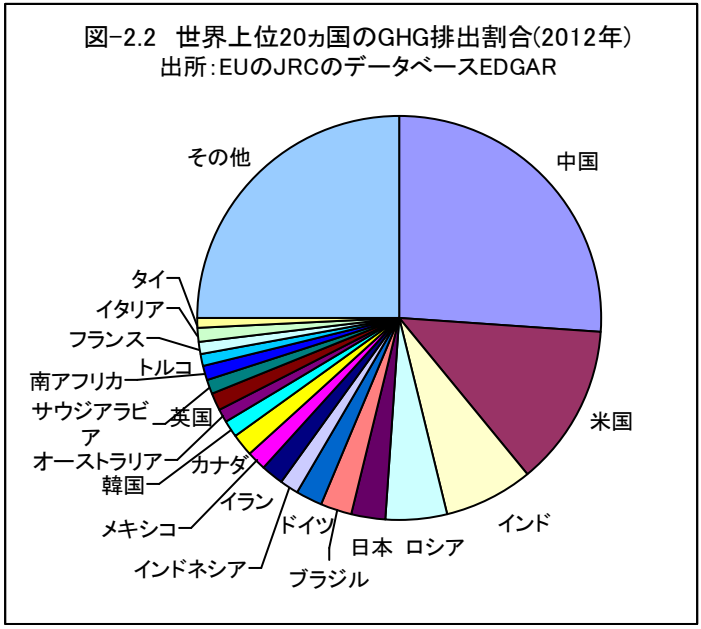
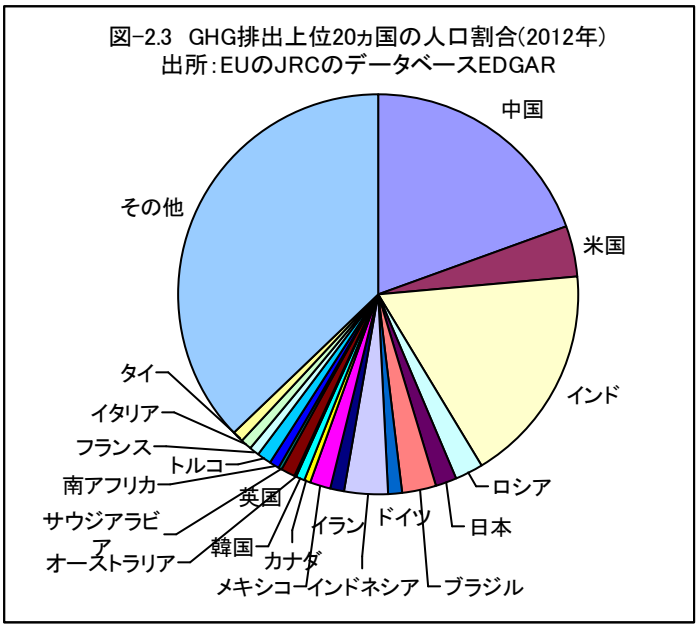


図 2-3 には、同じ国々について人口比率を示しました。上記 20 ヵ国の人口は、世界の総人口の約 63%、同じく 4 ヵ国では約 45%を占めています。人口割合もかなり高いことが分かります。

人口が多い大国は、GHG 排出削減に大きな責任がありますが、GHG 排出量が多くなるのは当たり前のことです。旧ソ連のように、大国が幾つかの国々に分裂しても、GHG 排出量の総量が減少する訳ではありません。このレポートでは、人口 1 人当たりの GHG 排出量に着目して述べることにします。



2.3.1 人当たりの排出量

図-2.4 には、人口 1 人当たりの GHG 排出量が多い上位 20 の国と地域を示しました。その 8 割は産油国です。残りの多くは、ルクセンブルクやジブラルタルなど小さな国や地域です。

なお、ニュージーランドも産油国で、非 CO2 の GHG が 50%以上に達しており、その多くは牧畜で有する多数の羊や牛の腸内発酵（いわゆる牛のゲップ）です。また、エストニアは、旧ソ連圏でバルト海沿岸の北国で、国内で産する石炭をエネルギー源に多用していることが GHG 排出量の多い原因でしょう。

図示していませんが、2012 年の世界平均の 1 人当たりの GHG 排出量は 6.5 tCO2eq/人です。1 人当たりの GHG 排出量が多い国には、削減努力をしてもらわなければならないと思います。しかし、世界の GHG 排出削減を考える場合、排出量の多い国に着目する必要があります。

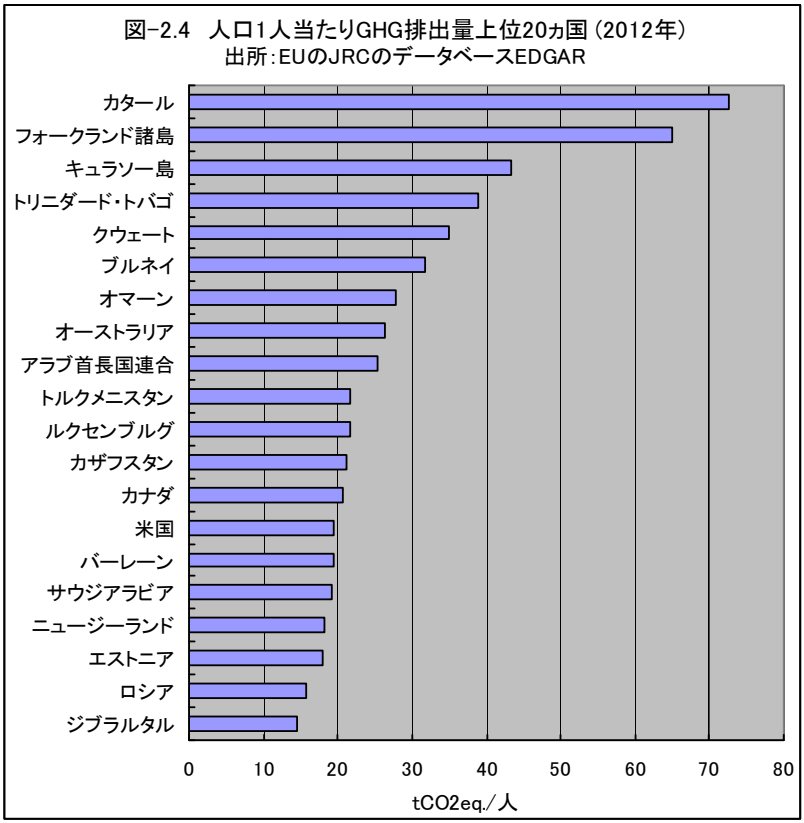


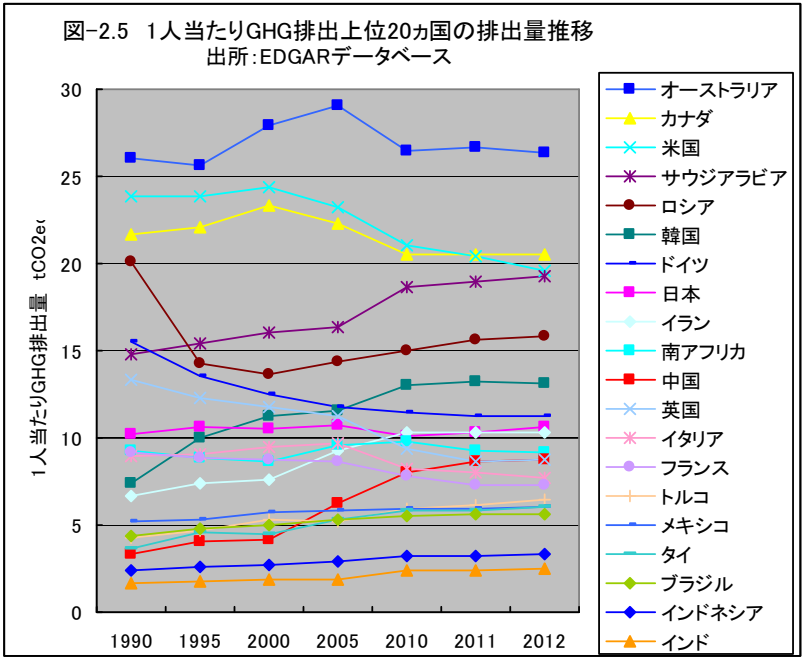
図-2.5 には、前記の図 2-2 に示した GHG 排出量が多い 20 ヵ国について、1990 年以降の 1 人あたりの GHG 排出量の増減を示しました。1990 年以降 5 年毎と、2010 年以降 3 年間の値を示しました。

上から順に記載しますが、オーストラリアは高止まりしています。石油、石炭、天然ガスを輸出している資源大国で、人口は日本の 1/5 以下です。カナダと米国は、2000 年代に入って GHG 排出量は少し低下したのですが、エネルギー資源には困っていないため、オーストラリアと同様に、GHG を削減するインセンティブが働かないのでしょう。

世界最大の石油生産量のサウジアラビアは、逆に GHG 排出量が増加しています。サウジアラビア、米国と共に 3 大石油生産国であるロシアは、ソ連

崩壊の混乱で GHG 排出量が減少しましたが、その後、増加に転じています。

韓国は、中国に次いで高い増加比率を示しています。京都議定書の附属書Ⅰ国でなく、GHG 削減の義務がなかったため、経済成長に任せて GHG を増加させたものです。排出削減の力が働かなければ、GHG は増加することを示す典型的事例です。



ドイツは GHG の顕著な減少がみられますが、1990 年の東西ドイツの統合により、社会全般のエネルギー効率が低かった旧東ドイツの改善が図られたためです。それでも、2012 年の 1 人当たりの GHG 排出量は、日本の値を少し上回っています。

日本は GHG 排出削減に、年間およそ 3 兆円以上が投じられていると言われますが、1990 年以降の GHG 排出量は概ね横這いです。もし、何も対策を講じなかったなら、韓国のように GHG が増加してしまったことでしょう。その事実からは、GHG 削減の難しさを読み取るべきでしょう。

イランは、恐らく経済成長により GHG が増加し、一方、南アフリカは概ね横這いの状態を示しています。

最大の GHG 排出国になった中国は、特に 2000 年以降、排出量が顕著に増加しています。中国は 2002 年に世界貿易機関（WTO）に加盟したことで、経済成長に拍車がかかり、GHG の増加もそれに対応したものです。1 人当たりの GHG 排出量は、先進国の平均水準に近付いています。注意すべきは、それが広大な中国の平均値であることです。北京、上海、広州などの大都市は、既に先進国の排出水準を超えていると思われます。今後、経済成長が遅れている西部や周辺地域の経済成長により、GHG 排出量はまだまだ増加すると思われ脅威です。

EU 加盟国である英国、イタリア、フランスは、EU の方針に従い、GHG 排出量は減少し、日本の値を下回っています。但し、その種の比較では、産業構造や気候風土、利用可能な再生可能エネルギーなどの比較評価も不可欠です。

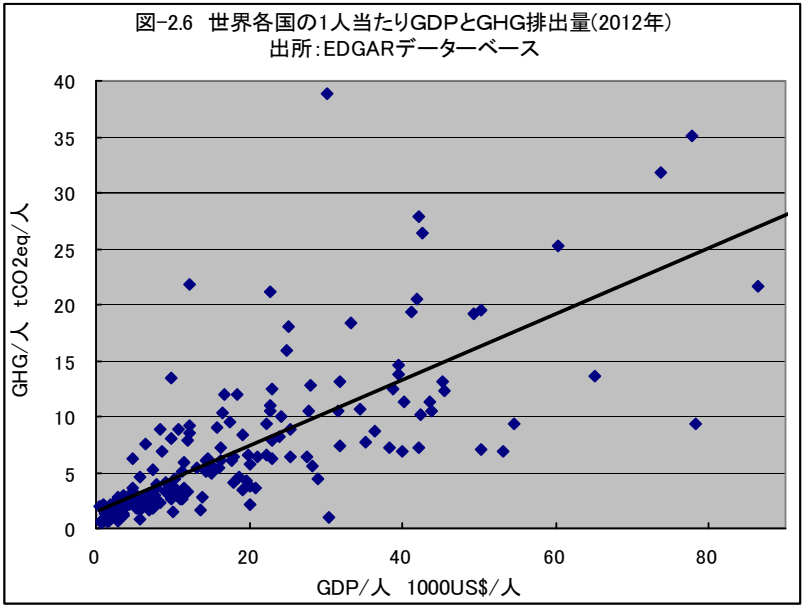
トルコ、メキシコ、タイ、ブラジルの 4 ヵ国のグラフは、ほとんど重なって見え、顕著ではないが排出量は増加しています。タイが、これらの国々と同水準であるのは驚きです。中国に代わるアジアの生産拠点になりつつあることを反映したものでしょう。

インドネシアの 1 人当たりの GHG 排出量は 3.3 tCO2eq、インドは 2.5 tCO2eq で、世界平均値を大きく下回っています。今後、経済成長につれて、1 人当たりの GHG 排出量は増加することでしょう。インドは世界 2 位の人口で、2020 年代のうちに中国を超えると予測されています。インドネシアも世界 4 位の人口であり、今後の GHG 排出量の増加に大きな影響を与えることは確実です。

2.4. 豊かさと GHG 排出量

図-2.6 に、世界約 200 の国と地域について、1 人当たりの GDP と GHG 排出量の分散図を示しました。EDGAR データベースの 2012 年のデータを用いたものです。

1 人当たりの GDP と GHG 排出量の間には、相関があることが分かります。経済成長してエネルギー消費が増大すると、GHG 排出量が増加します。

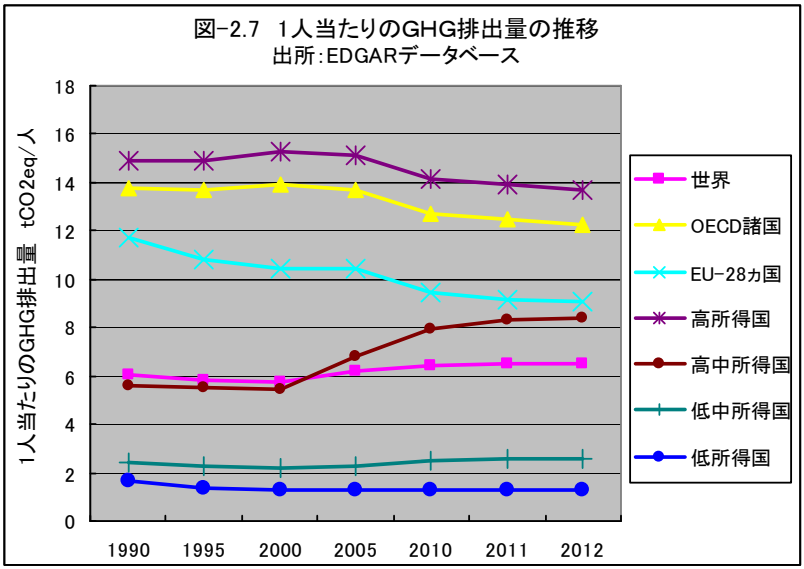


世界銀行は、世界の国や地域を表-2.1 に示す 4 つの所得水準に分けて統計データを公表しています。2017 年版の分類を用い、EDGAR データベースのデータを分類し、1 人当たりの GHG 排出量を集計しました。それに加え、世界全体、先進国を表すものとして OECD 諸国、および、EU-28 ヵ国のデータの推移を併記して、図-2.7 に示しました。

表-2.1 世界銀行の所得水準による分類（2017年版）

分類	GNI/人 current US$
低所得国	＜ 1,005
低中所得国	1,006 － 3,955
高中所得国	3,956 ― 12,235
高所得国	＞ 12,235

世界全体の平均値は、6 tCO2eq/人前後で微増しています。先進国グループを示す OECD 諸国の平均は、14 から 12 tCO2eq/人へと減少しています。EU-28 は EU の GHG 削減方針を反映して、約 12 から 9 tCO2eq/人へとかなり減少しています。



グラフの一番上に位置する高所得国の平均は、1 人当たりの GHG 排出量が減少していることが分かります。一方、高中所得国の平均は、約 6 から 8 tCO2eq/人へと顕著に増加しています。経済成長につれて、GHG 排出量も増加したということでしょう。低中所得国は概ね横這い、低所得国は減少傾向を示しています。

低所得国が GHG の減少傾向を示しているのは意外なので調べてみました。図-2.8 に示したように、GDP と GHG 排出量は増加しているのですが、人口の増加が上回ったため、1 人当たりの GHG 排出量が減少したことが分かりました。

1 人当たりの GHG 排出量は、前述のように 1 人当たりの GDP と相関があり、豊かになれば増加するものです。

既に豊かになっている先進国が、GHG 排出削減をすることは構いません。しかし、豊かになろうとしている国や、貧しさから脱しようとしている国に、先進国が GHG 排出削減を求める権利は無いと思います。

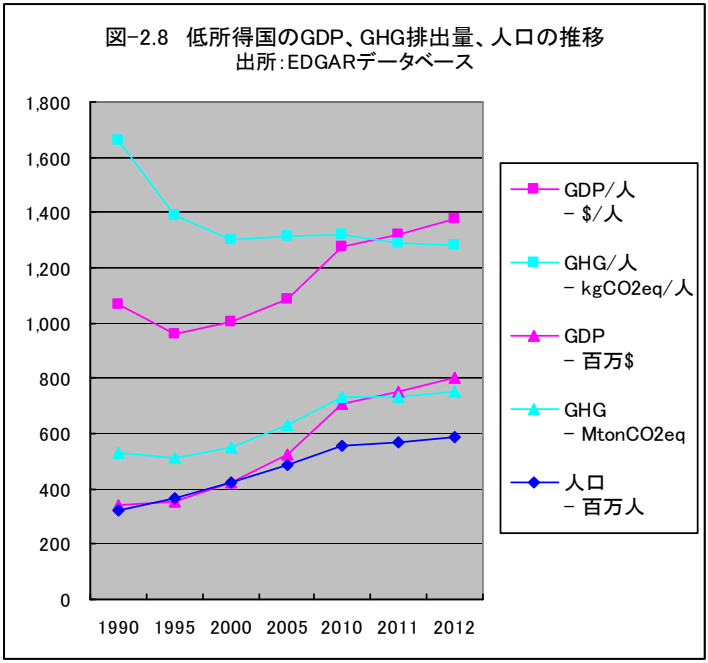
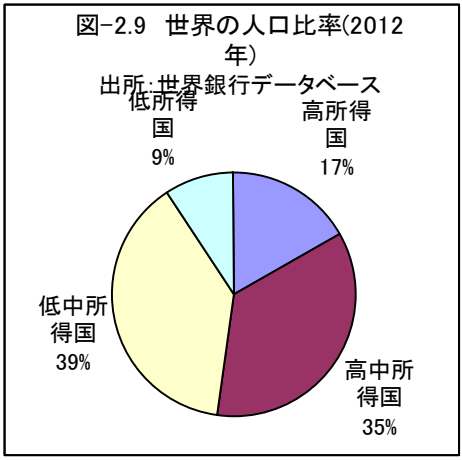


図-2.9 に示すように、1 人当たりの GHG 排出量が減少している高所得国の人口は、世界の 17%に過ぎません。残りは、GHG 排出量を増加させて豊かになろうとしている高中所得国と、貧しさから脱したいと願っており世界の人口の約半分を占める低中所得国と低所得国なのです。



3. GHG 削減シナリオと気候変動

気候変動に関するパリ協定は、産業革命前からの世界の平均地上気温上昇を 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をすることを求めています。一方、IPCC によれば、1880 年から 2012 年までの 130 年余の期間に、世界の平均地上気温は既に 0.85℃上昇としたと報告しています。2100 年までの気温上昇を 1.5℃に抑えるのは極めて困難な目標です。

本章では、IPCC の 5 次評価報告書に記載されている GHG 排出削減シナリオと、関連した気温上昇、海面上昇、温暖化による極端な気候の発生などについて紹介します。

3.1. 5 次評価報告書の GHG 削減シナリオ

IPCC は気候変動に関する第 5 次評価報告書を 2013 年から 2014 年にかけて発行しました。3 つの作業部会、自然科学的根拠、影響・適応・脆弱性、気候変動の緩和、の各報告書は、英文で合計 5,000 頁近いものですから、全てをまともに読んだ日本人は少ないと思います。なお、各作業部会が発行している政策決定者向け要約と技術要約は各々数 10 頁で、日本の関係機関が翻訳版を発行しています。

IPCC はこれまでに世界中で検討された約 900 件の GHG 排出量のシナリオをデータベース化して検討しています。図-3.1、表-3.1 に示すように、2100 年時点の大気中の GHG 濃度を 7 区分とし、そのような大気濃度になる GHG 排出量や、世界の平均地上気温上昇や海面水位上昇などを示しています。

＜RCP シナリオ＞

5 次評価報告書には、また、代表的濃度経路（RCP）シナリオが示されています。RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 の 4 シナリオです。

RCP の後ろに付いている 2.6 などの数値は、W/m^2 の単位で放射強制力を表すものです。放射強制力とは、地球に出入りするエネルギーが地球の気候に対して持つ放射の大きさを示すものです。IPCC では 1750 年を基準にしており、宇宙から地球への放射によって地球が持つエネルギーを増やす（温

暖化させる）外部因子が正の放射強制力です。放射強制力と、大気中の GHG 濃度とは対応関係があります。

図-3.1　2000～2100 年の GHG 排出経路:5 次評価報告書の全てのシナリオ

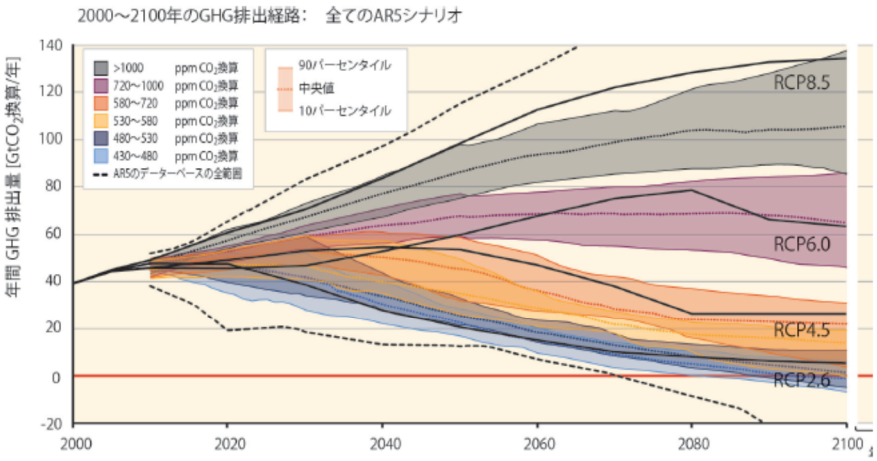


表-3.1　5 次評価報告書の GHG 濃度経路シナリオ

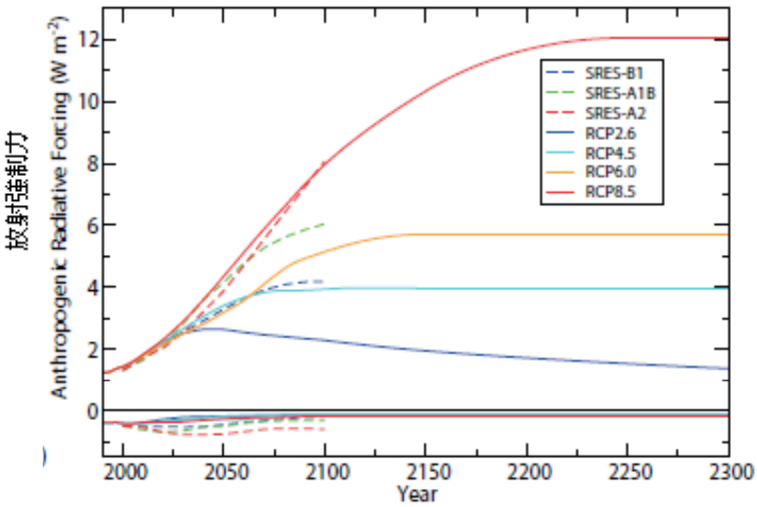
表 SPM.1 |　AR5 第 3 作業部会で集められ、評価されたシナリオの主な特徴。各シナリオの全てのパラメータについて 10 から 90 パーセンタイルを示す[1,2]。[表 6.3]

2100 年の CO_2 換算濃度区分ラベル（濃度幅）[3]	細区分	RCP シナリオの相対的位置[5]	累積 CO_2 排出量[3]（$GtCO_2$（Gt は 10 億トン））2011～2050 年	累積 CO_2 排出量[3]（$GtCO_2$（Gt は 10 億トン））2011～2100 年	2010 年比の CO_2 換算排出量変化（%）[4] 2050 年	2010 年比の CO_2 換算排出量変化（%）[4] 2100 年	温度変化(1850-1900 年平均比)[5,6] 2100 年の温度変化（°C）[7]	温度変化(1850-1900 年平均比)[5,6] 21 世紀に下記の温度水準未満に留まる可能性(%)[8] 1.5°C	2.0°C	3.0°C	4.0°C
< 430	430ppmCO_2 換算未満では限られた数のモデルしか研究されていない										
450（430～480）	全体幅[1,10]	RCP2.6	550～1300	630～1180	−72 ～ −41	−118 ～−78	1.5～1.7（1.0～2.8）	どちらかと言えば可能性が低い	可能性が高い	可能性が高い	可能性が高い
500（480～530）	530ppmCO_2 換算のオーバーシュート無		860～1180	960～1430	−57 ～ −42	−107 ～ −73	1.7～1.9（1.2～2.9）		どちらかと言えば可能性が高い		
	530ppmCO_2 換算のオーバーシュート		1130～1530	990～1550	−55 ～ −25	−114 ～ −90	1.8～2.0（1.2～3.3）		どちらも同程度		
550（530～580）	580ppmCO_2 換算のオーバーシュート無		1070～1460	1240～2240	−47 ～ −19	−81 ～ −59	2.0～2.2（1.4 ～3.6）	可能性が低い			可能性が高い
	580ppmCO_2 換算のオーバーシュート		1420～1750	1170～2100	−16 ～ 7	−183 ～ −86	2.1～2.3（1.4～3.6）		どちらかと言えば可能性が低い[12]		
(580～650)	全体幅	RCP4.5	1260～1640	1870～2440	−38 ～ 24	−134 ～ −50	2.3～2.6（1.5～4.2）				
(650～720)	全体幅		1310～1750	2570～3340	−11 ～ 17	−54 ～ −21	2.6～2.9（1.8～4.5）		可能性が低い	どちらかと言えば可能性が高い	
(720～1000)	全体幅	RCP6.0	1570～1940	3620～4990	18 ～ 54	−7 ～ 72	3.1～3.7（2.1～5.8）			どちらかと言えば可能性が低い	
>1000	全体幅	RCP8.5	1840～2310	5350～7010	52 ～ 95	74 ～ 178	4.1～4.8（2.8～7.8）	可能性が低い[11]	可能性が低い	可能性が低い	どちらかと言えば可能性が低い

図-3.2 に、RCP シナリオで想定されている放射強制力の長期変化を示しました。なお、破線で示されている SRES シナリオは、4 次評価報告書に記載

されているものです。

図-3.2　RCP シナリオで想定されている放射強制力の
長期変化　　出所：5 次報告書 WG I Fig 12.3



RCP2.6 の放射強制力は、少し増加した後、減少し非常に低い値になります。2100 年の世界の平均地上温度の上昇を 2℃未満に抑えることを意図したシナリオです。

RCP4.5 の放射強制力は増加した後、2100 年には比較的低いレベルに安定化します。RCP6.0 の放射強制力は、中レベルに安定するシナリオですが、2100 年には安定化しません。RCP8.5 は、放射強制力が非常に高いレベルに達するシナリオです。

＜GHG 排出量＞

多くの人にとって、放射強制力や大気中の GHG 濃度よりも、GHG 排出量の方がなじみがあると思います。以下に RCP シナリオの GHG 排出量について記します。なお、RCP シナリオで想定されている年間の GHG 排出量の推移は、図-3.1 に示されています。

表-3.2 には、図-3.1 の RCP シナリオのグラフから読み取った 2050 年と 2100 年の世界の GHG 排出量を示しました。また、2010 年の GHG 排出量との比率も併記しました。

表-3.2 RCPシナリオの主なパラメータ （IPCCの5次評価報告書に基づき作成）

代表的濃度経路シナリオ	2100年の放射強制力	放射強制力の変化	2100年の大気中CO2換算のGHG濃度 ppm	
	Wm^{-2}		CO2のみの濃度	メタンとN2Oを加えた場合
RCP2.6	約 2.6	放射強制力は少し増加してピークに達し、その後減少して非常に低いレベルになる。	421	475
RCP4.5	約 4.5	放射強制力は増加し、2100年以前に比較的低いレベルに安定化する。	538	630
RCP6.0	約 6.0	放射強制力は増加し2100年までにはピークに達しず、その後中レベルに安定化する。	670	800
RCP8.5	約 8.5	放射強制力は2100年を過ぎても増加を続け、非常に高いレベルに達する。	936	1313

表-3.2 つづき

代表的濃度経路シナリオ	世界のGHG排出量 GtCO2eq/年 AR5 WG3 図 SPM.4 による		世界のGHG排出量の比率 2010年（49GtCO2eq）との比	
	2050年	2100年	2050年	2100年
RCP2.6	約 21	約 5	約 0.43	約 0.10
RCP4.5	約 54	約 26.5	約 1.10	約 0.54
RCP6.0	約 60	約 63.5	約 1.22	約 1.30
RCP8.5	約 99	約 134.5	約 2.02	約 2.74

RCP2.6 シナリオは 2010 年以降、GHG 排出量が僅かに増加した後減少し、2050 年には 2010 年の GHG 排出量の約 43%、2100 年には 2010 年の約 10%になります。

なお、表-3.1 に示される RCP2.6 と同じ GHG 濃度区分のシナリオの中には、2100 年の GHG 排出量がマイナスのケースもあります。GHG 排出量をマイナスにするには、GHG 排出量を殆どゼロにし、森林などによる CO2 吸収量を増加させるか、大気中から CO2 を回収貯留する CCS などが必要になります。

世界の平均地上気温の上昇を2℃未満に抑えるRCP2.6シナリオは、2100年までにかなりの人口増加と発展途上国の経済成長が想定される下で、GHG排出量を2010年の約10%に削減するのですから、実施することが極めて困難であることが想像できると思います。

RCP4.5は、GHG排出量が増加して2050年前後にピークに達し、その後減少し、2100年前に一定のGHG排出量になるシナリオです。2010年のGHG排出量と比較して、2050年には約110%に増加し、その後2100年に約54%に減少するものです。GHG排出量の増加は、2章で示した中所得国や低所得国の排出量増加を考慮したもので、先進国のGHG排出量が増加するわけではありません。

RCP6.0では、GHG排出量が2000年代後半にピークに達し、以後減少に転じるシナリオです。2010年のGHG排出量と比較して、2050年には約120%、2100年には約130%になります。

RCP8.5は、GHG排出量が最大のシナリオです。2010年のGHG排出量と比較して、2050年には約200%、2100年には約270%になるものです。排出削減の努力をしない成り行きのケースと誤解している方もいるかもしれませんが、人口の増加を考慮しても、筆者には排出量の想定が過大なケースに感じられます。

第2章に示したように、2010年の世界の人口1人当たりのGHG排出量は約7 tCO2eq/人で、人口は約69億人です。国連世界人口予測・2017年版の中位推計によれば、世界の人口は2100年には112億人に達すると予測しています。この人口増加に基づくなら、2100年の世界のGHG排出量が2010年の270%なるには、2100年の1人当たりのGHG排出量は約12 tCO2eq/人となり、2010年の1人当りのGHG排出量より大幅に増加することになります。

先進国を除けば、GHG排出量の増加は、豊かになりエネルギー消費が増加する結果です。中所得国や低所得国が、本当に豊かになるならハッピーなことですが、RCP8.5シナリオは、GHG排出量を成り行きよりもかなり過大に想定しただけのように思われます。

3.2. RCP シナリオと気温・海面の上昇

温暖化の影響として定量的に検討されている事項に、世界の平均地上気温の上昇と世界平均海面水位上昇があります。その他、氷河の後退がよく言われますが、積雪面積や海氷面積の変化も定量的に調べられている事項です。

＜気温上昇＞

表-3.3 は、RCP シナリオに基づく 21 世紀中ごろと 21 世紀末の世界の平均地上気温上昇の予測値です。1,986～2005 年の平均値を基準にした値で、産業革命後の気温上昇とは違うので注意して下さい。

表-3.3 RCPシナリオの世界平均地上気温上昇の予測
出所：5次報告書、WG Ⅰ、表SPM.2

代表的濃度経路シナリオ	1986～2005年平均を基準にした世界平均地上気温上昇 ℃			
	21世紀中頃（2046～2065年）		21世紀末（2081～2100年）	
	平均	予測幅	平均	予測幅
RCP2.6	1.0	0.4～1.6	1.0	0.3～1.7
RCP4.5	1.4	0.9～2.0	1.8	1.1～2.6
RCP6.0	1.3	0.8～1.8	2.2	1.4～3.1
RCP8.5	2.0	1.4～2.6	3.7	2.6～4.8

基準が種々あるのは紛らわしいので、換算することにしました。図-3.3 は 1 章で紹介した Berkeley Earth の世界平均地上気温上昇のデータで、1986 年から 2012 年までのデータを示しました。

赤色の近似直線で、1986～2005 年平均と 2012 年の偏差は約 0.33℃です。一方 IPCC の報告で、1880 年から 2012 年までに世界の平均地上気温は 0.85℃上昇したとされています。従って、1880 年から 1986～2005 年平均の偏差は 0.52℃になります。

筆者の換算は概略ですから端数を丸めた値にして、1880 年基準の気温上昇は、表-3.3 に示した平均の温度上昇に 0.6℃を加えたもの、2010 年を基準にした気温上昇は 0.3℃を減じたものとして、表-3.4 に示しました。

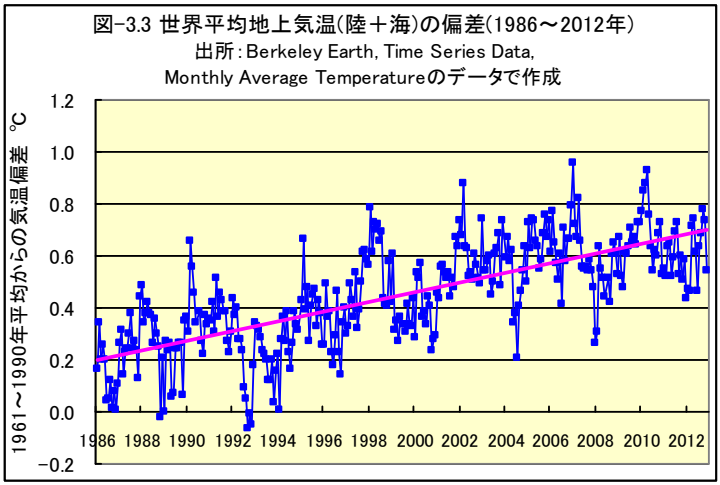


表-3.4 RCPシナリオの世界平均地上気温上昇の予測

代表的濃度経路シナリオ	世界平均地上気温上昇、予測平均値 ℃			
	1880年基準		2010年基準	
	21世紀中頃	21世紀末	21世紀中頃	21世紀末
RCP2.6	約 1.6	約 1.6	約 0.7	約 0.7
RCP4.5	約 2.0	約 2.4	約 1.1	約 1.5
RCP6.0	約 1.9	約 2.8	約 1.0	約 1.9
RCP8.5	約 2.6	約 4.3	約 1.7	約 3.4

2010 年を基準にした気温上昇を加えたのは、産業革命以後の気温上昇と言われてもピンとこないので、今後どのくらいの気温上昇が予測されているかを示したかったためです。また、予測精度を考慮して、表-3.3 のように予測幅で示すべきでしょうが、分かり易い様に予測平均値のみを示しました。

表-3.4 で、RCP8.5 シナリオは前述のように GHG 排出量を過大に想定していると思われ、それを除けば、2100 年までの平均気温上昇は、1880 年基準で 3℃未満、2010 年基準では 2℃未満です。RCP8.5 を除くと、随分小さい気温上昇の違いを議論しているというのが筆者の卒直な感想です。

1.3.項にも記載しましたが、2℃の平均気温の上昇により、一般的に人間が耐えられないことはないように思われます。生息域を変えることのできない動植物には適応できない種があるかもしれませんが、生息地域が寒い地域へ移行することになるのでしょう。但し、この種の議論では人間でも動植物でも、対応力が低い弱者への配慮が不可欠です。

＜海面水位の上昇＞

表-3.5 には、RCP シナリオに基づく世界平均海面水位上昇の予測を紹介しました。表-3.3 と同様に 1986～2005 年平均を基準にした値です。

21 世紀末の予測平均値は RCP8.5 を除くと 40 cm 台で、1990 年代に言われていた海面水位の上昇に比べかなり小さいようです。

表-3.5 RCPシナリオの世界平均海面水位上昇の予測
出所：5次報告書、WG Ⅰ、表SPM.2

代表的濃度経路シナリオ	1986～2005年平均を基準にした世界平均海面水位上昇 m			
	21世紀中頃（2046～2065年）		21世紀末（2081～2100年）	
	平均	予測幅	平均	予測幅
RCP2.6	0.24	0.17～0.32	0.40	0.26～0.55
RCP4.5	0.26	0.19～0.33	0.47	0.32～0.63
RCP6.0	0.25	0.18～0.32	0.48	0.33～0.63
RCP8.5	0.30	0.22～0.38	0.63	0.45～0.82

2100 年までに限定すれば、実施が極めて困難な RCP2.6 シナリオと、それと比べて遥かに容易な RCP6.0 シナリオで、海面上昇の予測平均値の差は 10cm 以下です。海面上昇の観点だけなら、RCP2.6 シナリオという選択は無いように思われます。

但し、海面上昇が 40 cm 台といっても、堤防など世界中で多くの施設の嵩上げが必要になるでしょう。しかし、平均気温上昇を 2℃未満に抑制するための膨大な費用と比べれば、それほど大きな問題ではないと思います。

南太平洋の島嶼国など地域は限られるでしょうが、深刻な被害が出てその対策に多額の費用を要しする国や地域もあると思います。海面上昇は世界全

体の活動で生じる被害ですから、被害国に対し世界で支援・補償する枠組みを作るべきでしょう。

3.3. 温暖化による極端な気象現象

温暖化による気温上昇や海面上昇は、筆者の常識によるならば、GHG 排出ゼロとする RCP2.6 シナリオの実行を要する事態とは感じられません。GHG ゼロが必要になるとしたら、温暖化による異常気象の多発化・恒常化により、その被害額が GHG 排出ゼロの経済負担を上回る場合であると考えます。日本では最近、集中豪雨や大型台風による被害が増加していますが、異常気象の発生は、日本だけではないようです。

IPCC の 5 次評価報告書では、温暖化による極端な気象現象の発生について、過去の観測結果と、気象モデルによる将来予測が示されています。

＜過去の観測結果＞

5 次評価報告書で、世界の平均地上気温は産業革命以降 1℃近く上昇したと報告しており、その気温上昇の下で観測された極端な気象現象について、表-3.6 のように指摘しています。

上表①②に示されるように、寒い日が減少し暑い日が増加していること、それが人為的影響であることの可能性は非常に高いと述べています。③の熱波の頻度や持続期間の増加については、欧州、アジア、オーストラリアの大部分でその可能性が高いが、世界全体では中程度の可能性としています。④の大雨の頻度、強度、持続期間の増加については、減少している陸域よりも増加している陸域の方が多い可能性が高いと、曖昧な評価です。⑤の干ばつの強度と期間増加についても、明確な変化の発生を指摘していません。⑥の強力な台風については、1970 年以降の西太平洋を除くと、変化発生の可能性を否定しています。⑦の高い潮位の発生については、海面水位の上昇と同様に可能性が高いということです。

日本では近年、50 年に一度の集中豪雨や観測史上最大規模の台風により大きな被害が発生し、その都度マスコミは温暖化のためと報じますが、科学的

根拠が乏しいことが分かります。

表-3.6 気候変動の極端現象での観測された変化
出所:5次評価報告書-統合報告書の環境省PP

	現象及び変化傾向	変化発生の評価	人間活動の寄与評価
①	ほとんどの陸域で寒い日や寒い夜の頻度の減少や昇温	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い
②	ほとんどの陸域で暑い日や暑い夜の頻度の増加や昇温	可能性が非常に高い	可能性が非常に高い
③	ほとんどの陸域で継続的な高温/熱波の頻度や持続期間の増加	世界規模で確信度が中程度、欧州、アジア、オーストラリアの大部分で可能性が高い	可能性が高い
④	大雨の頻度、強度、大雨の降雨量の増加	減少している陸域より、増加している陸域のほうが多い可能性が高い	確信度が中程度
⑤	干ばつの強度や持続期間の増加	世界規模で確信度が低い、いくつかの地域で変化した可能性が高い	確信度が低い
⑥	強い熱帯低気圧の活動度の増加	長期(百年規模)変化の確信度が低い1970以降北大西洋でほぼ確実	確信度が低い
⑦	極端に高い潮位の発生や高さの増加	可能性が高い(1970年以降)	可能性が高い

＜21 世紀末の予測＞

世界平均気温が上昇し続けることに伴い予測される気候の将来変化について、5 次評価報告書では気候モデルなどによる多数の科学文献を評価しています。

21 世紀末の予測として、①②の寒い日の減少、暑い日の増加についてはほぼ確実、③の熱波の頻度や持続期間の増加については可能性が非常に高い、④の大雨の頻度、強度、持続期間の増加については中緯度の大陸のほとんどと湿潤な熱帯域で可能性が非常に高い、⑤の干ばつの強度と期間増加については地域規模から世界規模で可能性が高い (確信度は中程度)、⑥の強力な台風については北西太平洋と北大西洋でどちらかといえば起こる、⑦の高い潮位の発生については可能性が非常に高いと述べています。

3.4. 温暖化による主要リスク

5 次評価報告書 WG2 では、温暖化による確信度の高い変化のうち、複数の

分野や地域に及ぶ主要なリスクとして、下記事項をあげています。なお、リスクとは不確実な危機のことです。

1) 高潮、沿岸域の氾濫及び海面水位上昇による、沿岸の低地並びに小島嶼開発途上国及びその他の小島嶼における死亡、負傷、健康障害、生計崩壊のリスク。

2) いくつかの地域における洪内陸部の氾濫による大都市住民の深刻な健康障害や生計崩壊のリスク。

3) 極端な気象現象が、電気、水供給並びに保健及び緊急サービスのようなインフラ網や重要なサービスの機能停止をもたらすことによるシステムのリスク。

4) 特に脆弱な都市住民及び都市域又は農村域の屋外労働者についての、極端な暑熱期間における死亡及び罹病のリスク。

5) 特に都市及び農村の状況におけるより貧しい住民にとっての、温暖化、干ばつ、洪水、降水の変動及び極端現象に伴う食料不足や食料システム崩壊のリスク。

6) 特に半乾燥地域において最小限の資本しか持たない農民や牧畜民にとっての、飲料水及び灌漑用水の不十分十分な利用可能性、並びに農業生産性の低下によって農村の生計や収入を損失するリスク。

7) 特に熱帯と北極圏の漁業コミュニティにおいて、沿岸部の人々の生計を支える海洋・沿岸生態系と生物多様性、生態系の財・機能・サービスが失われるリスク。

8) 人々の生計を支える陸域及び内水の生態系と生物多様性、生態系の財・機能・サービスが失われるリスク。

＜温暖化進展との関連＞

そして、平均気温が上昇するほどリスクが高まるとして、5 次評価報告書には、下記のように記載されています。

温暖化の程度が増大すると、深刻で広範囲にわたる不可逆的な影響が生じる可能性が高まる。気候変動リスクには、工業化以前の水準に比べて 1 又は

2℃の気温上昇でかなり高くなるものがある。世界平均地上気温が工業化以前の水準に比べて 4℃又はそれ以上上昇すれば、全世界の気候変動リスクは全ての懸念材料において、高い状態から非常に高い状態となり、リスクとしては、固有性が高く脅威に曝されるシステムへの深刻で広範な影響、多くの生物種の絶滅、世界及び地域の食料安全保障に対する大きなリスク及び通常の人間活動(例えば、ある地域のある時期における食料生産や野外活動など)を危険にさらす高温と多湿の複合などがある。(確信度が高い)。ティッピングポイント(急激で不可逆的な変化のしきい値)のきっかけとなるのに十分な気候変動の正確な水準は不確実なままであるが、地球システムあるいは相互に連結した人間及び自然システムにおいて、多重のティッピングポイントを越えることに関連するリスクは、気温上昇に伴って増加する(確信度が中程度)。

＜5 次評価報告書の部分転載＞

長期の温暖化防止として GHG ゼロまで取り組む必要があるかは、温暖化による異常気象発生の問題が係わってくると考えます。一方で、集中豪雨や強力な台風の発生を安易に温暖化のためとするマスコミ報道を耳にします。

殆どの人は、IPCC の評価報告書はエグゼクティブ・サマリーしか読んでいないと思います。極端な気象現象が温暖化によりどのように変化すると同報告書に書かれているのかサンプルを紹介しました。本章の最後に、気象庁が翻訳している下記 2 つの文書を転載して示しました。

① 5 次評価報告書 WG-1, FAQ：気候の極端現象に何か変化はあるのか?
② 5 次評価報告書 WG-1, 第 14 章の概要：気候現象及びそれらの将来の地域的な気候変動との関連性

3.5. IPCC の評価報告書に想うこと

IPCC の 5 次評価報告書に記載されている GHG 排出削減シナリオと温暖化の影響・リスクを紹介したのは、シナリオ RCP2.5 でなければいけないのか、それとも、RCP4.5 や RCP6.0 でもよいのかという問題意識があったた

めです。

パリ協定が求める平均気温上昇を 2℃未満 1.5℃に抑制しなければいけないなら、RCP2.5 に従う GHG 排出ゼロが必要になります。GHG ゼロの世界を構築することがどれ程大変かは、手間は掛かりますがエンジにアリング的な積算を行えば評価できることです。

もし、平均気温上昇が 3℃未満でよいのなら、RCP4.5 や RCP6.0 の選択肢が成り立ち、簡単ではないけれど何とか手が届く目標です。

何れの RCP シナリオを選択しなければならないかは、温暖化の影響やリスクがどれ程大きいかに掛かっています。しかし、21 世紀末の将来の問題ですから、IPCC の指摘は可能性であり確固としたものではありません。

分かり易い例は平均気温上昇です。表-3.3 に示したように、21 世紀末の気温上昇の予測には幅があります。1880 年基準に換算すると、21 世紀末の気温上昇の予測値は、RCP2.6 で 0.9～2.3℃、RCP4.5 で 1.7～3.2℃、RCP6.0 で 2.0～3.7℃です。RCP4.5 シナリオの GHG 排出量でも、気温上昇の下限予測値なら、1.5℃は越えますが 2℃未満です。平均気温上昇でも、将来の予測にはかなりの幅があります。

最も危惧される将来の極端な気象現象については、気候モデルによる予測結果です。IPCC の指摘は定性的には間違っていないのだと思います。しかし、平均気温上昇が 2℃の場合と 3℃の場合で、定量的に異常気象の強度や頻度にどれだけの違いが生じるかという問いに、気候モデルによる解析が信頼できる答えを提供できるレベルにあるようには思われません。

確固とした答えが示せない代わりに IPCC は、このまま温暖化が進展すると取り返しのつかない深刻な事態（非可逆的でティッピングポイントを超える）にいたる**可能性が高まる**と警告します。宗教団体の主張を想起させるものですが、断定せずに可能性が高まると表現するところは、科学者団体だからでしょう。

スウェーデンの少女は、IPCC が主張する可能性を心底信じているので、あのような発言になるのだと思います。

しかし、GHG 排出ゼロは、化石燃料をほとんど使用しない世界へ転換する

大事業であり、それに踏み出すだけの確証は、未だ IPCC の指摘にはないように思われます。

筆者は地球温暖化については信じているので、妥当な範囲で温暖化防止に努めつつ、温暖化防止に関する複数の長期シナリオの検討を先行しながら、IPCC の言い分が正しいのかを見極めるのが常識的な対応であると考えます。

3.6. 転載：5 次評価報告書の極端気象現象

5 次評価報告書 WG1

第 2 章　観測：大気と地表面

FAQ2.2 気候の極端現象に何か変化はあるのか?

20 世紀半ば以降、温暖化が気温にかかわる極端現象（熱波を含む）に変化をもたらしているという有力な証拠がある。この期間には大雨の増加もおそらく起こっていたが、地域によって異なる。もっとも、熱帯低気圧の頻度などのような他の極端現象については、一部の限られた地域を除き、観測された記録に識別できる変化があるかは、あまり明確ではない。

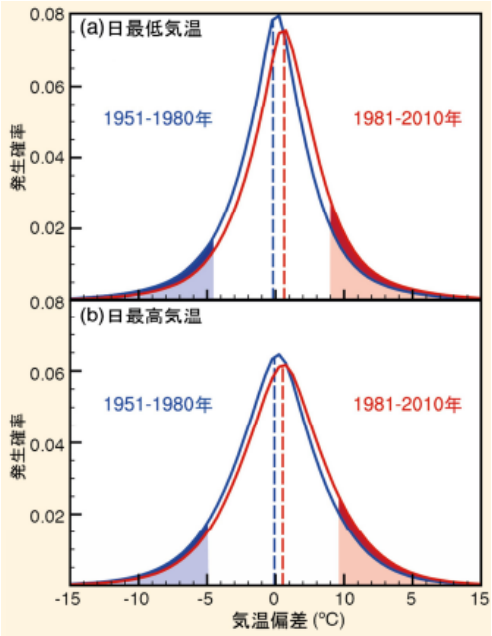
熱波から寒波まで、あるいは干ばつから洪水をもたらす豪雨まで、極端現象を記録し解析する際には、特有の課題が持ち上がる。その理由は、こうした現象がまれだからというだけではなく、必ず破壊的な状況に連動して生じるためである。さらに、極端な気候現象とは何かということについて、科学文献に一貫した定義がなく、このことが地球全体の相対評価を複雑にしている。

絶対的な感覚で言えば極端な気候現象は場所によって異なる。熱帯域で暑い日の気温は、中緯度域の暑い日の気温と多分異なるだろう。そのようなものではあるが、極端現象の監視に対する国際的な監視の取り組みによって、世界的に有意な変化がいくつか明らかになっている。

例えば、寒い日や寒い夜（10 パーセンタイル未満）及び暑い日や暑い夜（90 パーセンタイルを超える）について一貫した定義を用いると、世界のほとんどの地域において暑い日や暑い夜は増加し、寒い日や寒い夜は減少しているとの結果が得られる。少数の例外として北アメリカ中部と東部及び南アメリカ南部があげられるが、大部分が日中気温にのみ関係したものである。一般にこうした変化は、例えば暑い夜などの最低気温の極値に最もはっきりと見られる。データが限られているために、平均気温の上昇との因果関係をはっきりとさせることは難しいが、FAQ 2.2 図 1 は地球全体の日別気温の極値が確かに変化していることを示している。これらの変化が単に日平均気温の平均値の上昇（FAQ 2.2 図 1 の破線）と関連しているのか、あるいは他の

変化が日中や夜間の気温分布に起きているのか、まだ議論中である。

FAQ 2.2 図 1



1961～1990 年気候値に対する 1951～1980 年（青）と 1981～2010 年（赤）の 2 つの期間の（a）日最低気温偏差と（b）日最高気温偏差の分布。陰影部分は、1951～1980 年の期間における（a）夜と（b）昼の極端に寒い 10%（青）と極端に暑い 10%（赤）を示している。陰影のより濃い部分は、1951～1980 年の期間に比べて 1981～2010 年の期間に極端に寒い日と寒い夜の日数がどれだけ減少したか（濃い青）、及び極端に暑い日と暑い夜の日数がどれだけ増加したか（濃い赤）を表している。

継続的な高温又は熱波、すなわち、継続した極端に暑い日や暑い夜などの期間についても評価が行われているが、熱波の特性に関する研究は、単に暑い日や暑い夜の変化を比較する研究よりも数が少ない。データが入手できる世界の陸域のほとんどで、20 世紀半ば以降、熱波が増えている。例外は米国南東部で、熱波の頻度と持続期間の指標が総じて減少している。この状況は、いわゆる「温暖化の穴」と関連している。この地域では降水量も増加しており、陸と大気の相互作用や、大西洋と太平洋での長期的変動に関係があるのかもしれない。しかしながら、特にアフリカと南アメリカをはじめとして、多くの地域では熱波の変化に関する情報は限られている。

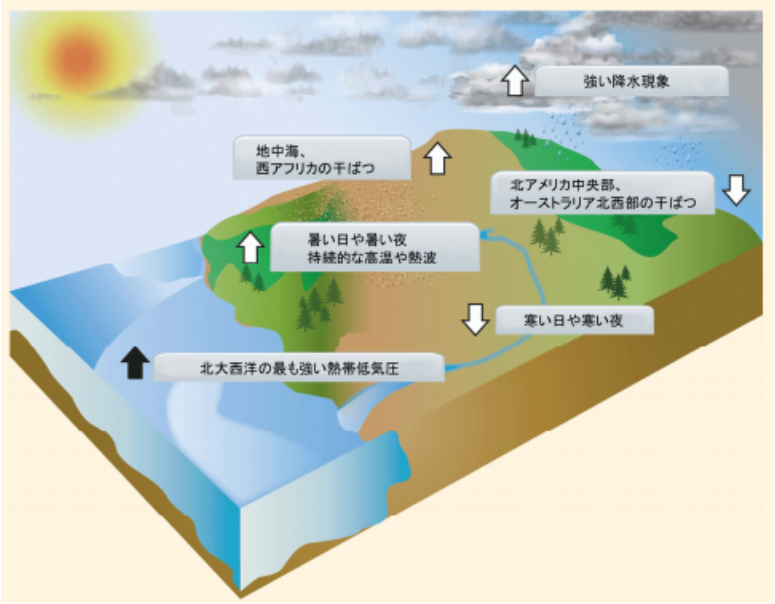
数百年前まで遡る過去の気温復元データがあるヨーロッパ等の地域については、一部の地域ではここ数十年に極端な熱波の発生数が過度に多かった。

その他の気候変数に関する極端現象の変化は、気温について観測された変化よりも総じて一貫性に劣る。その原因はデータが限られていることと、研究間や、地域及び／又は季節の間で矛盾があることにある。とはいえ、例えば極端な降水現象の増加は温暖化に伴う気候と整合している。十分なデータのある陸域の解析では、最近の数十年で極端な降水現象の頻度と強度が増加していることを示しているが、結果は地域及び季節によって大きく異なっている。例えば、北アメリカ、中央アメリカ、ヨーロッパで大雨が増加していることに対する証拠はきわめて有力だが、その他のある地域（オーストラリア南部やアジア西部など）では、減少している証拠がある。同様に、干ばつの研究は、地域間で変化傾向が異なるため、世界の変化傾向の符号は一致しないが、これは干ばつがどのように定義されているかに依存している。しかしながら、20 世紀半ば以降に干ばつが増加した地域もあれば（地中海など）、減少した地域もある（北アメリカ中央部など）という徴候は存在する。

熱帯低気圧など、その他の極端現象については、最新の評価では、過去の観測能力の問題のために長期的変化傾向について断定的に述べることは難しいとの結果を示している。しかしながら、1970 年代以降、北大西洋で熱帯低気圧の活動が増加していることを示す極めて強い証拠がある。

観測手法における不確実性を考慮したとしても、一世紀かそれ以上の期間にわたって、北大西洋及び南太平洋では熱帯低気圧の上陸頻度がわずかに減少していることを示唆する証拠がある。他の海域では、長期的な変化傾向を示す証拠はほとんど存在しない。温帯低気圧については、この 50 年間に南北両半球において極方向への移動が明白であり、中緯度域における暴風の頻度の減少を示すさらなる証拠も限定的ながら存在する。いくつかの研究は強度の増大を示唆しているが、データサンプリングの問題がこうした評価の妨げになっている。

FAQ 2.2 図 2 は、気候の極端現象について観測された変化の一部をまとめたものである。最も確実な気候の極端現象の世界的変化は日別気温の指標に全体的に見られ、熱波の指標でもある程度見られる。降水の極端現象も増加しているように見えるが、大きな空間的変動があり、干ばつについて観測されている変化傾向には、少数の地域を除いて、まだ不確実性がある。1970 年代以降、北大西洋における熱帯低気圧の頻度と活動度には確実な増加が見られるが、その理由についてはまだ議論されているところである。他の気候変数に関連した 20 世紀半ば以降の極端現象の変化については、証拠は限定されている。



FAQ 2.2 図 2

20 世紀半ば以降（観測対象の期間が 1970 年代以降であるため、北大西洋低気圧は除く）の様々な気候の極端現象の頻度（又は強度）の変化傾向（矢印の方向は変化の符号を表す）。

第 14 章　気候現象及びそれらの将来の地域的な気候変動との関連性

概要

本章では、世界平均気温が上昇し続けることに伴って、主要な気候現象において予測される変化及びそれらの現象の地域的な気候の将来変化とのより具体的な関連性について扱った科学文献を評価する。

地域気候は、場所によって大きく変動する諸過程の複雑な結果であり、地球規模の影響の変化に対して異なる応答をする。以下に挙げる大規模な気候現象については、気候モデルによる再現性がますます向上しており、将来の地域的な気候変動を理解し、信頼性を構築するための科学的根拠を提供している。ある現象が地域気候に影響を及ぼすという確信及び特に RCP4.5 シナリオやそれより高濃度シナリオのもとで、その現象が変化するという確信があるならば、その現象は地域気候変動に関連すると考えられる。

モンスーンシステム

世界全体のモンスーンの気候学的な特徴の再現において、気候モデルの能力が向上しているという証拠が増加している。将来変化に関して認識されたモデル間での一致した見解をまとめると、モンスーン循環は弱まるものの、全てのモンスーンシステムを総計した世界全体のモンスーンは、21 世紀には面積と強度の増加を伴って強まる可能性が高い。モンスーンの入りの日は早まるか、又はあまり変化しない可能性が高く、モンスーンの明けの日は遅くなる可能性が高い。その結果、多くの地域でモンスーン期が長期化する。

南アメリカ、アフリカ、東アジア、南アジア、東南アジア、オーストラリアでは、モンスーンに関連した極端な降水が将来増加する可能性が非常に高い。モンスーン関連の降水の年々変動が将来大きくなるという点については、モデルの一致度はそれより低く、確信度は中程度である。

モデルの地域ごとのモンスーンを再現する能力は、世界的なモンスーンに比べて低く、モンスーンシステムごとにばらつきがある。中程度の確信度でアジア・オーストラリアモンスーンに関連した全降水量は増加するが、南北の非対称性を伴う。すなわち、インド及び東アジアモンスーンの降水量は増

加する一方でオーストラリア夏季モンスーンの降水量変化は小さいと予測されている。インド夏季モンスーンの循環は弱まるが、大気中の水蒸気量の増加によって補われて降水の増加をもたらすであろうことの確信度は中程度である。東アジア夏季モンスーンについては、モンスーン循環及び降水量は増加すると予測されている。インド夏季モンスーンの降水量及び極端な降水の21 世紀を通じた増加が、あらゆるモンスーンの変化の中で最大のものであることの確信度は中程度である。

北アメリカ及び南アメリカモンスーンの降水量変化の予測についての確信度は低いが、年周期の中で、北アメリカモンスーンが遅れて始まり遅くまで持続することの確信度は中程度であり、南アメリカモンスーン域が拡大することの確信度は高い。

西アフリカの雨季の発達が少し遅れ、雨季末期の降雨が強まるとの予測の確信度は低い。西アフリカモンスーンの主要な特徴を再現することに関してモデルに限界があるため、将来予測の確信度は低くなっている。

熱帯現象

インド洋ダイポールの一般的特徴を再現するモデルの能力と将来予測における見解の一致度に基づくと、熱帯インド洋は、将来、東部において昇温量は抑えられて降水量は減少し、西部において昇温量が増加して降水量が増加するという、東西のパターンで変化するという特徴を持つ可能性が高く、東アフリカ及び東南アジアの降水量に直接影響する。

海洋における熱帯域の降水のモデルシミュレーションにおいて新たに特定された明確な特徴は、年間降水量の変化が「温暖化するほど湿潤化する」（ warmer-get-wetter）パターンに従い、海面水温の上昇が熱帯域の平均を上回る場所で増加し、その逆の場所で減少することについて中程度の確信度を与える。多くのモデルは熱帯収束帯（ITCZ）の再現において欠陥はあるが、中央アメリカ、カリブ海地域、南アメリカ、アフリカ、西アジアの一部に影響を与える熱帯収束帯の赤道側における季節平均降水量が増加するという予測の確信度は中程度である。南太平洋収束帯（SPCZ）が平均的な位置よりもかなり北東側にずれて位置し、SPCZ が東西方向を指向する現象の頻度が増

加し（SPCZ を現実的に再現できるモデルに共通する特徴である）、結果として南太平洋の多くの島嶼国の降水量を減少させるであろうことの確信度は中程度である。同様に、南大西洋収束帯が南方向に移動し、南アメリカ南東部の降水量の増加と、そのすぐ北側での降水量の減少をもたらすことの確信度は中程度である。

マッデンージュリアン振動の将来変化の予測については、この現象のモデルによる再現性が乏しく、海面水温の昇温パターンに敏感であるため、確信度は低い。したがって、西アジア、南アジア、東南アジア、オーストラリアにおける地域的な極端現象の将来予測については、マッデンージュリアン振動と関連する場合には不確実性が大きい。

熱帯大西洋の将来変化の予測については、現在気候のモデルシミュレーションに系統誤差があるため、平均場及び年々変動のモードのどちらも確信度は低い。したがって、大西洋のハリケーンと南アメリカ熱帯域及び西アフリカの降水量における将来変化に与える影響は不確実である。

気候モデルにおけるエルニーニョ・南方振動（ENSO）の再現性の現実性が増しており、それらのモデルは、現在の ENSO の変動が将来も続くことを示している。したがって、ENSO は将来も主要な年々変動であり続ける可能性が非常に高く、大気中の水蒸気量が増加することによって地域と規模での ENSO に関連する降水変動が強まる可能性が高いことの確信度は高い。エルニーニョとラニーニャに関連した北太平洋と北アメリカでの気温と降水量の変動の分布（テレコネクション）は、モデル間で一致して、将来東へ移動すると予測されているが、確信度は中程度である。一方、中央及び南アメリカ、カリブ海地域、アフリカ、アジアの大部分、オーストラリア、ほとんどの太平洋諸島など、他の地域に与える影響は、より不確かである。とはいえ、モデルでは ENSO の変動や空間分布の自然変調が非常に大きいため、21 世紀における ENSO の変動の変化についての具体的な予測の確信度は依然として低い。

低気圧

21 世紀の予測における過程の理解と一致度に基づくと、世界全体での熱帯

低気圧の発生頻度は減少するか、又は本質的には変わらないままである可能性が高く、それと同時に、世界平均した熱帯低気圧の最大風速及び降水量は増加する可能性が高い。将来、気候変動が熱帯低気圧に及ぼす影響は地域によって異なる可能性が高いが、変化の具体的な特徴はまだ十分に定量化されておらず、地域を特定した頻度と強度の予測における確信度は低い。とはいえ、特定の地域における過程の理解とモデルの一致度が向上していることから、オーストラリア及び多くの太平洋諸島のほか、北・中央アメリカ、東アフリカ、西・東・南・東南アジアに上陸する熱帯低気圧の中心付近では、より極端な降水が起こるであろうことの確信度は中程度である。モデルの解像度とダウンスケーリング技術の進歩によって、激しい暴風雨の予測に対する確信度が増しており、どちらかと言えば一部の海域では最も激しい暴風雨の発生頻度が大幅に増加するだろう。

低気圧経路のシミュレーションには系統的なバイアスが存在するにもかかわらず、ほとんどのモデルや研究は将来の温帯低気圧の数の変化において一致している。世界全体の温帯低気圧の数は数パーセント以上減少する可能性は低い。南半球の低気圧経路はわずかに極方向に移動する可能性が高い。予測に基づけば、どちらかと言えば北太平洋の低気圧経路は極方向に移動することの確信度は中程度である。しかし、北大西洋の低気圧経路の応答が単なる極方向への移動である可能性は低い。地域的な低気圧経路の変化の大きさと、その変化が地域的な地表での気候に与える影響についての確信度は低い。北極、北ヨーロッパ、北アメリカ、南半球における 21 世紀末（2081～2100 年）までの冬季降水量の増加は、暴風雨による降水がより極端になることに伴った、温帯低気圧による降水の増加によってもたらされている可能性が非常に高い。

ブロッキング

モデルでブロッキングを再現する能力が向上し、予測に関する一致度が高まっていることから、南北両半球のブロッキングの頻度は増加しないことの確信度は中程度である。一方、ブロッキングの強度と持続性の変化傾向は不確実なままである。したがって、北アメリカ、ヨーロッパ及び地中海、中央

及び北アジアにおけるブロッキング関連の地域的な変化も不確実である。

環状モードと双極子モードの変動

モデルは一般に、環状モードと双極子モードの大体の特徴を再現することができている。予測におけるモデルの一致度によれば、将来の北半球冬季の北大西洋振動は大きな自然変動と、過去に観測されたものと同程度の大きさの変化傾向を示す可能性が非常に高く、平均するとわずかに正の変化傾向が強まり、北極、北アメリカ、ユーラシアにおける冬季の気象条件に対して多少の（ただしあまり十分な裏付けのない）影響を伴う可能性が高い。21 世紀中頃までに成層圏オゾンが回復するにつれて、南半球環状モードにおける南半球の夏季／秋季の正の変化傾向はかなり弱まり、南アメリカ、アフリカ、オーストラリア、ニュージーランド、南極に対して多少の（ただしあまり十分な裏付けのない）影響を伴う可能性が高い。

大西洋数十年規模振動

古気候の復元とモデルシミュレーションから得た複数の証拠によれば、大西洋数十年規模振動（AMO）は、平均的な気候の変化につれて将来その挙動を変化させる可能性は低い。しかし、今後数十年にわたる大西洋数十年規模振動の自然変動は、大西洋の大型ハリケーンの数、西アフリカの雨季、北アメリカ及びヨーロッパの夏季の気象条件などの地域の気候に対して、人為起源の変化と少なくとも同程度の大きさで影響する可能性が高い。

4. 各国の GHG 排出量はいくらにすべきか

＜本章の目的＞

パリ協定は 2℃未満 1.5℃の温暖化防止を求めています。現状、世界各国はそれなりに温暖化防止に努めており、例えば日本は温暖化防止のために年間 3 兆円以上を投じていると言われます。しかし、現状のトレンドに従うなら、世界の平均気温上昇は 2100 年には 3℃近くに達することは確実です。

本章では、世界各国が常識的な範囲で精一杯温暖化防止に努めたら、2100 年の GHG 排出量はどこまで削減できるかを検討します。前章で紹介した 4 つの RCP シナリオの 2100 年の GHG 排出量を念頭に、2012 年の各国の排出実績と、2030 年の削減目標を基に考えます。

パリ協定の目標を達成するには、GHG 排出量をゼロにすることが必要です。そのためには、先ず石油・石炭・天然ガスの使用をほとんどゼロにする必要があります。しかし、化石燃料の使用をゼロにしても、GHG 排出量は 2/3 しか減少しません。詳しくは 5.3 項を参照下さい。

化石燃料の使用を無くすことは、社会全体を変革する大変なことです。先進国は現在の豊かさをかなりの程度犠牲にすれば実行できるかもしれません。しかし、今より豊かになろうとしている発展途上国や低所得国は、貧困が増し、難民が発生するかもしれないのです。

GHG の大幅削減に着手する場合、削減の程度に応じ、温暖化被害の甚大さに関する予測の確実さが必要とされます。加えて、温暖化による被害規模が、GHG 削減対策の経済負担と同等かそれ以上であることが求められるでしょう。更に、温暖化は世界全体の問題ですから、ほとんどの国の賛同を得て実施しなければ効果が上がりません。

これらの視点から、2100 年の各国の GHG 削減がどの程度になるかを考えます。なお、今後の温暖化の進展によっては異常気象の恒常化などのため、GHG 排出ゼロが不可避の事態が生じるかもしれませんが、その場合の問題は 5 章以降に記載します。

4.1. 1 人当たりの GHG 排出枠

3 章で世界全体の GHG 排出量と気温上昇等の予測を紹介しました。温暖化防止の困難さを理解するには、世界全体の GHG 排出目標を各国に割り振り、各国がどれだけの排出削減を実行しなければならないかを示す必要があります。GHG 排出削減は経済的負担を伴いますから、各国の削減割り当ては、合理的で納得できるものであることが不可欠です。

2.章に記載したように、人口 1 人当たりの GHG 排出量を等しくする各国の GHG 排出枠を基本とすべきと筆者は考えています。なぜなら、1 人当たりの GHG 排出量は、1 人当たりの GDP と相関があり、豊かさの尺度に繋がるからです。現状はどうであれ、どこの国の人々も等しく豊かになる権利があると考えます。

但し、1 人当たりの GHG 排出枠を、各国の状況に応じて 2 次的に調整することが必要でしょう。例えば寒冷地の国は、温帯の国よりもエネルギー消費が大きくなり、1 人当たりの GHG 排出量が増大します。同じ温帯でも、日本の夏は蒸し暑く、冷房負荷による GHG 排出が増加するから、その考慮も必要になるかもしれません。各国の気候風土に応じた排出枠の 2 次調整が必要です。

世界には、水力発電が総発電電力量の 96%を占めるノルウェーや、地熱と水力で総一次エネルギー供給の 86%を占めるアイスランドのような国があります。再生可能エネルギーの賦存量が豊富な国と乏しい国の違いを考慮しないのは不公平です。

2015 年の実績で日本の GHG 総排出量の 13.8%は、鉄鋼業から排出されたものです。GHG 排出量を減らすため、日本は鉄鋼業を止めるべきでしょうか。日本が鉄鋼生産を止めても、日本や日本の輸出先の鉄鋼需要が減るわけではありません。海外での鉄鋼生産が増加することになります。鉄鋼生産 1 トン当たりの GHG 排出量は、日本の鉄鋼業は世界で最も低い水準にあり、鉄鋼生産が海外に移行した場合、世界全体の GHG 排出は増加することになります。鉄鋼に限らず各国の輸出入量は、GHG 排出枠に対する 2 次的調整を必要とする事項です。

実際に各国の削減目標を協議する段階では、上記の他にも各国から種々の

要望が出されることでしょう。その調整では、大国や先進国の主張やエゴが発揮されることは避けられないでしょう。だからこそ、人口１人当たりの排出枠を等しくする基本が重要になります。

4.2. RCP シナリオと 2100 年の１人当たり排出量

＜GHG 排出削減の合意＞

2009 年の G8 ラクイラ・サミットで、世界全体の温室効果ガス排出量を 2050 年までに少なくとも 50%削減する目標を再確認するとともに、先進国全体として 80%またはそれ以上削減する目標が支持されました。日本からは当時の麻生首相が出席しました。

繰り返しになりますが、2015 年末の COP21 で採択されたパリ協定では、次の長期目標が合意されました。

◆世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする。

◆そのため、できるかぎり早く世界の温室効果ガス排出量をピークアウトし、21 世紀後半には、温室効果ガス排出量と（森林などによる）吸収量のバランスをとる。

これらの合意を念頭に、3 章で紹介した温暖化防止の RCP シナリオに従い GHG 排出削減を考えてみましょう。

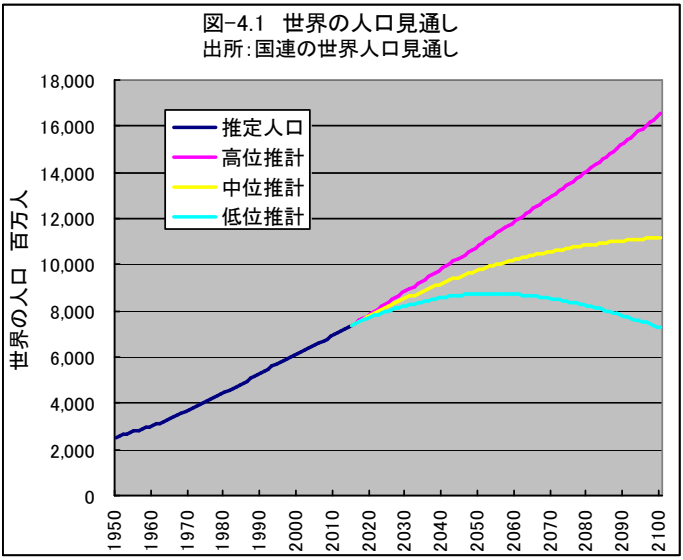
RCP シナリオは、2000～2100 年の GHG 排出経路を示したものですが、2100 年の世界全体の GHG 排出量から、人口１人当たりの GHG 排出量を検討することにします。なお、GHG 排出量の２次的調整を現時点で想定することは難しく、世界全体で１人当たりの GHG 排出量を等しくする仮定で検討します。

＜世界人口見通しと１人当たり排出量＞

１人当たりの GHG 排出量で議論するには、2100 年の人口データが必要です。人口予測は、国連の世界人口見通しのデータを用いました。同予測には、低位、中位、高位推計があり図-4.1 に示しました。ここでは、2100 年の世界

の人口として、中位推計の 111 億 8000 万人を使用することにします。2012 年と比較すると 2100 年の人口は約 1.6 倍に増加する推計になっています。なお、2100 年人口の低位推計は 2012 年とほぼ同じであるのに対し、高位推計では約 2.3 倍になっており驚異的です。

表-3.2 に示した 4 種の RCP シナリオに従う 2100 年の世界全体の GHG 排出量に基づき、表-4.1 と図-4.2 に人口 1 人当たりの GHG 排出量を示しました。



1 人当たりの GHG 排出量の絶対値を示しても、それが多いのか少ないかは判断できないと思います。表-4.1 と図-4.2 には、2012 年実績としては、図-2.7 に掲載した世界全体や OECD 諸国、EU-28 カ国の平均値と、前述した世界銀行による所得水準による各国分類の平均値を示しました。また、図-4.2 には、各 RCP シナリオについて、産業革命以降 2100 年の世界の平均気温上昇の予測平均値を併記しています。

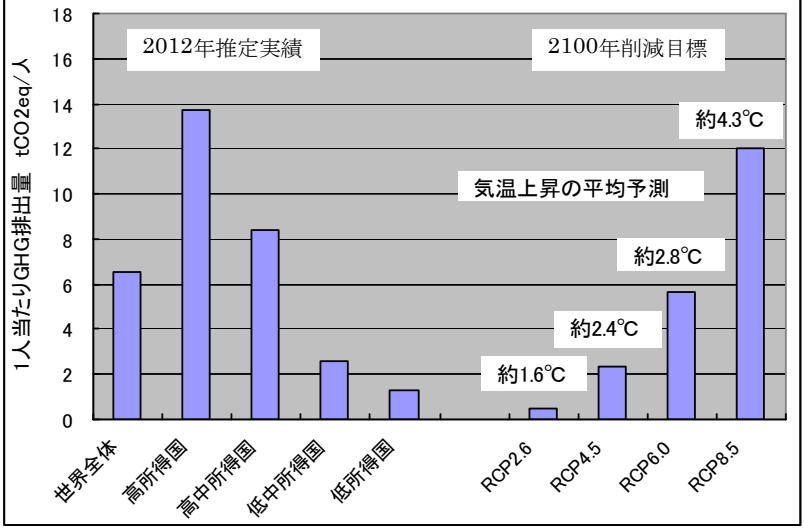
2012 年の実績では、前述したように、OECD 諸国など豊かな先進国の平均値の 1 人当たりの GHG 排出量は大きいことが分かります。一方、低所得国の GHG 排出量は、世界の平均に比べて随分少ない値です。

表-4.1　人口1人当たりのGHG排出量、
2012年実績とRCPシナリオの２１００年排出量

2012年の推定実績	
平均値の分類	GHG排出量 トンCO2eq/人
世界	6.5
OECD諸国	12.3
EU-28カ国	9.1
高所得国	13.7
高中所得国	8.4
低中所得国	2.6
低所得国	1.3

RCPシナリオの2100年の値	
シナリオ	GHG排出量 トンCO2eq/人
RCP2.6	0.4
RCP4.5	2.4
RCP6.0	5.7
RCP8.5	12.0

図-4.2　2012年の1人当たりのGHG排出実績と
RCPシナリオに基づく2100年のGHG排出目標



2100 年の GHG 排出量では、気温上昇の平均予測が約 1.6℃の RCP2.6 シナリオは、2012 年の世界全体の平均値と比較して極めて小さく、RCP2.6 シナリオに従う GHG 削減が極めて困難であることが想像できると思います。パリ協定の合意は、GHG 排出削減努力をすることでなく、社会全体の変革を求めているのです。

一方、2100 年の気温上昇の平均予測が約 4.3℃である RCP8.5 シナリオは、2100 年の 1 人当たりの GHG 排出量が、2012 年の世界全体の平均実績の 2 倍近くで、前述したように過大な排出量想定と言えるでしょう。

＜2100 年の GHG 削減率＞

GHG 排出削減は、一般に基準年からの削減率で評価されます。例えば、京都規定書で日本は 1990 年を基準に 6%削減、パリ協定では 2013 年を基準に 26%削減する 2030 年の GHG 排出計画を提出しました。

表-4.2 と図-4.3 には、表-4.1 のデータを用いて 2012 年を基準に RCP シナリオに従う 2100 年の 1 人当たりの GHG 排出量の削減率を示しました。

なお、削減率がマイナスで示されているケースは、2012 年よりも GHG 排出量が増加する場合です。例えば、低所得国の RCP8.5 シナリオに従う 2100 年の GHG 排出量は、2012 年の 8 倍以上になることを表しています。この仮定では、現在の低所得国は 2100 年には 2012 年よりも豊かになり、GHG 排出量が大幅に増加することが想定されています。

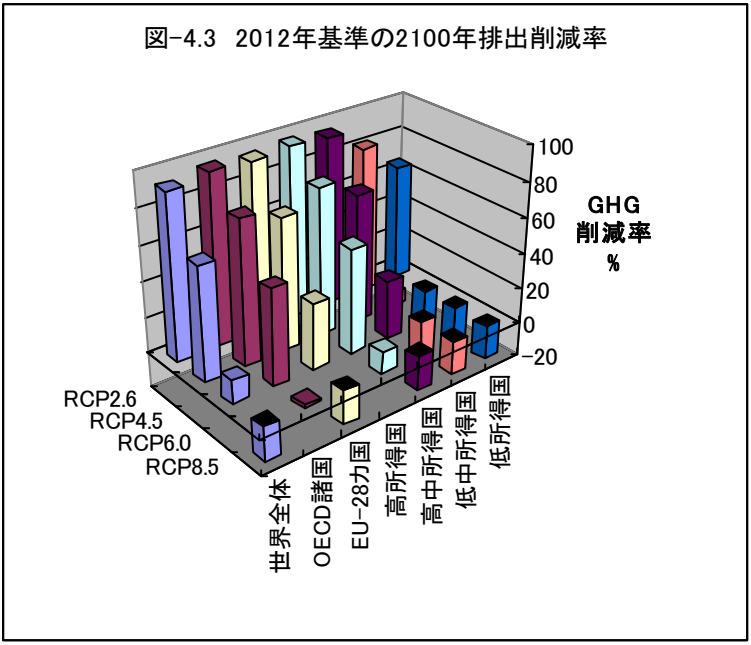
図-4.3 は表-4.2 を図示したものです。但し、GHG の増加を示しても温暖化防止としては意味が乏しいので、マイナス 20%までしか表示していないので注意して下さい。

以下に、4 つの RCP シナリオに従う 2012 年基準で 2100 年の GHG 排出削減率の概要を記載します。

表-4.2 RCPシナリオに基づく2012年基準とした2100年のGHG削減率

グループ	2012年実績基準の2100年排出削減率 %			
	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
世界全体	93.1	63.7	12.9	−84.4
OECD諸国	96.4	80.7	53.7	1.9
EU-28カ国	95.1	73.8	37.3	−32.9
高所得国	96.7	82.7	58.6	12.3
高中所得国	94.7	71.9	32.6	−42.7
低中所得国	82.6	7.6	−121.5	−369.1
低所得国	65.1	−84.9	−343.0	−838.4

図−4.3　2012年基準の2100年排出削減率



①RCP2.6 シナリオ

RCP2.6 シナリオに従う GHG 排出量では、2012 年を基準とする 2100 年の GHG 排出量の削減率は、低中所得国と低所得国を除くと、95%前後と極めて高い値です。

2012 年の GHG 排出量の 1/4 近くは、CH4 や N2O などの CO2 以外の温室効果ガスで、その半分位は農業や牧畜で発生するものです。農業や牧畜で発生する GHG は、広い土地から低密度で発生するのもが多く、一定限度以下に低減することは容易ではありません。そのため、GHG を 95%程度まで削減するには、エネルギー消費由来の CO2 は、ほとんどゼロにすることが必要になるでしょう。それらを考えれば、RCP2.6 シナリオの実行は極めて困難と言えると思います。

RCP2.6 シナリオは、産業革命以後の人為的気温上昇を 2℃未満に抑制するもので、パリ協定で合意された訳です。2100 年は先のことですが、世界各国が本当に実行するつもりなのかは疑問です。

②RCP8.5 シナリオ

一方、RCP8.5 シナリオの場合には、2012 年に比べて 2100 年の GHG 排出量が増加するケースが多くなっています。世界全体でも、84%増加する想定です。成り行きや、現状の延長線上のケースというよりも、前述のように 2100 年の GHG 排出量の想定が過大であるように思われます。何れにしても、温暖化防止を検討するケースではありません。

③RCP4.5 シナリオ

常識的に考えれば、実行可能な温暖化防止シナリオとしては、RCP4.5 か RCP6.0 ということになるでしょう。

RCP4.5 シナリオでは、2100 年の OECD 諸国と高所得国の GHG 削減率ではおよそ 80%です。前述した 2050 年までに先進国全体として温室効果ガスを 80%またはそれ以上削減するという目標と符合するものです。なお、先進国の中で EU は GHG 削減が進んでいるため、EU-28 の削減率は 74%です。

また、世界全体の GHG 削減率は 63%ですから、これも世界全体の温室効果ガス排出量を 2050 年までに少なくとも 50%削減するという目標と近いものです。RCP4.5 シナリオは、2050 年までに先進国は 80%、世界全体で 50%以上の GHG 削減を目指す目標を念頭に、設定されたシナリオのように思われます。

なお、日本では 2016 年に「地球温暖化対策計画」が閣議決定されました。2030 年度に、温室効果ガスを 2013 年度比 26%削減する中期目標について対策や国の施策を明らかにし、目標達成の道筋を付けるとともに、長期目標として 2050 年までに 80%の排出削減を目指すことを位置付けたものです。しかし、80%削減については、日本でも全く実行の目処は付いていません。

一方、世界全体での 50%削減については、発展途上国が今後豊かになりつつ、どのようにして GHG 削減を進めるのかも大きな問題です。

④RCP6.0 シナリオ

RCP6.0 シナリオでは、世界全体の GHG 削減率は 13%ですから、RCP4.5 と比べると実行の困難さにはかなりの違いがあります。それでも OECD 諸

国の GHG 削減率は 54%ですから、それを実行するには、社会全体を変えるような変革が必要になるでしょう。

一方、産業革命以後 2100 年の気温上昇は、表-4.4 に示したように、RCP4.5 では 2.4℃、RCP6.0 では 2.8℃と比較的小さい差異です。求められる GHG 削減の困難さを考えれば、RCP6.0 シナリオを選びたいと考えるのは当然のことのように思われます。また、産業革命以降の気温上昇を、なせ 2℃未満に抑えなくてはいけないのか、3℃では駄目なのかという素朴な疑問も生じます。

4.3. 2030 年の各国の削減目標

2100 年までに各国は、どのくらい GHG 排出量を削減できそうか考える前に、各国の 2030 年の削減目標を見ておきましょう。

表-4.3　主な国の2030年のGHG自主削減目標（INDC）

国名	基準年	削減率　%	備考
EU-28	1990	40	
ロシア	1990	30	
カナダ	2005	30	
米国	2005	28	2025年の削減目標
オーストラリア	2005	28	26-28%削減
ブラジル	2005	37	2025年の37%削減が公式、2030年の43%削減は参考値
日本	2013	26	
中国	2,005年のCO2/GDP	65	CO2/GDPを2005年比で60-65%削減する
インド	2,005年のGHG/GDP	35	GHG/GDPを2005年比で33-35%削減する
韓国	2030年のBAU	37	2030年のBAUは850.6 MtCO2eq
インドネシア	2030年のBAU	29	2030年のBAUは2881MtCO2eq、国際支援等を条件に41%削減
メキシコ	2030年のBAU	22	GHGとBlack Carbonの合計で25%削減(GHGを22%、BCを51%削減)、2030年のBAUはGHGが973 MtCO2eq、BCが137MtCO2eq
トルコ	2030年のBAU	21	2030年のBAUは1175 MtCO2eq
タイ	2030年のBAU	20	2030年のBAUは555MtCO2eq、適切な支援があれば25%に引き上げ
イラン	2030年のBAU	4	国際支援等を条件に12%削減
サウジアラビア	現状(2021年?)	約25	130MtCO2eqの削減
南アフリカ	2030年値を指定		2025年および2030年の排出量を398～614 MtCO2eq

注) BAUは成り行き値（Business As Usual）

パリ協定の合意に従い、各国は2030年の削減目標の約束草案(略称INDC)を提出しました。表-4.3にはGHG排出量が多い主な国の削減目標を示しました。

＜GHG削減の基準＞

先ず、GHG排出削減の基準ですが、京都議定書の1990年や2005年など過去の排出量を基準とするものと、2030年のBAU（削減努力をせずに成り行きに任せた排出量）を基準にする国があります。BAUを用いているのは、一般に発展途上国です。今後、経済成長して豊かになり、エネルギー消費とGHG排出量が増加する可能性があるためです。過去のGHG排出実績ではなく、成り行きに任せた場合のBAUを基準に、その値からどれだけ削減するかを申告しています。

その趣旨からすると、先進国の仲間入りした韓国が、相変らずBAU方式を用いているのは、少しみっともない感じがします。京都議定書の段階では、経済水準が充分でなく、付属書I国でなかったことを引き摺っているためでしょう。

＜2030年のGHG削減目標＞

日本は2013年という半端な年の排出量を基準にしています。東日本大震災により、日本中の原発が停止し火力発電で代替したため、GHG排出量が増大した年です。2013年の日本のGHG排出量は、1990年よりも10.8%増加しました。日本は見た目の削減率を大きく示したかったためと思いますが、2030年のGHG削減目標の約束草案として、2013年を基準に26%削減する計画を提出しました。

EU-28は1990年を基準に2030年にGHG排出量を40%削減する計画です。2005年基準に換算すると35%削減になります。どこの国も、削減率をできるだけ大きく見せたいのです。各国の約束草案からは、苦心の跡が窺われます。

2012年時点の1人当たりのGHG排出量が多いオーストリアと米国は、

2005 年を基準に 2030 年に GHG 排出量を 28%削減する計画、カナダは 30%削減する計画です。現時点で GHG 排出量が多い国々も、取り立てて高い削減目標を設定したようには思われません。

＜中国の GHG 削減目標＞

現状最大の GHG 排出国の中国は、中国語版の約束草案しか提出しておらず、非公式の英訳が添付されています。削減目標は 2005 年を基準に GDP 当たりの CO2 排出量を 65%削減する計画です。GHG でなく CO2 の削減目標としているのは、大国のため CO2 以外の GHG を正確に把握することが難しいためかもしれません。石炭の採鉱に伴う炭鉱メタンの放散はかなりの量と想像されますし、廃棄物関連や農業で発生するメタンや N2O も管理が不充分で排出量の把握は困難なのでしょう。

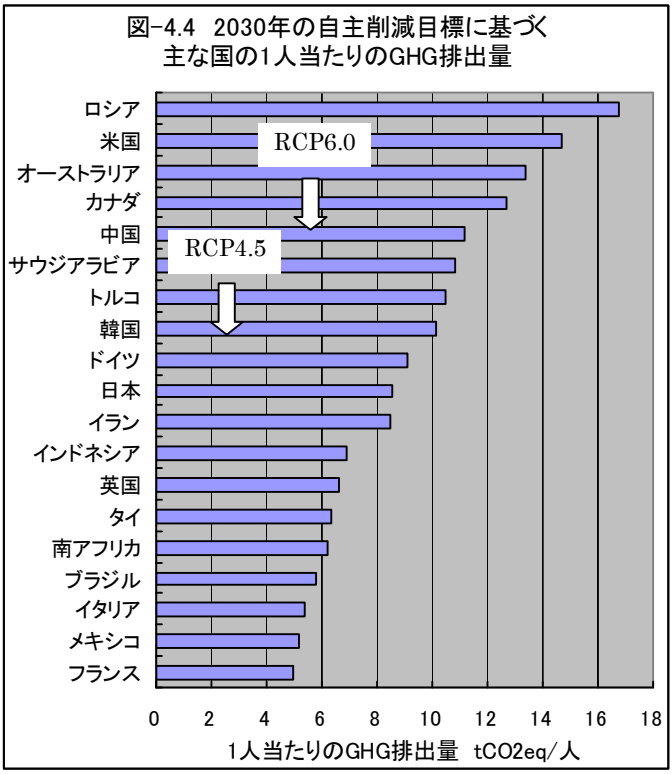
GDP 当たりの CO2 排出量を 65%削減すると言われると、GHG 排出量がいくら削減されるのか調べたくなります。それを知るには、先ず 2030 年の中国の GDP がいくらになるか推定しなければなりません。

GDP には幾つかの種類がありますが、中国国家統計局が発表している実質 GDP で評価するものと思います。2005 年と最新実績の 2018 年の実質 GDP の比率は 3 倍です。中国は 2001 年に WTO に加盟した後、急速な経済成長を果たしました。2019 年の GDP 成長率は 6.3%との予測がありますが、それ以降は信頼できる予測は無いように思われます。過去の GDP 成長率を見ると、2012 年以降ほぼ直線的に低下していることが分かります。そのトレンドに従うものと仮定し、2020 年代前半の平均の GDP 成長率を 5.5%、2020 年代後半の平均成長率を 4.5%と仮定すると、2030 年の中国の実質 GDP は 2005 年の 5.5 倍になります。

2005 年と比べ、2030 年の GDP 当たりの CO2 排出量が 65%削減（35%に減少）されても、CO2 は 1.9 倍（5.5×0.35）に増加します。GDP 当たりで CO2 を 65%削減すると申告していますが、排出量の絶対値は約 2 倍に増加する訳です。次項では、GHG も CO2 と同様な比率で増加するものと仮定して他国との比較を紹介します。

＜2030 年の各国の１人当たり GHG 排出量＞

図-4.4 に、GHG 排出量が多い主な国について、2030 年の人口１人当たり GHG 排出目標を示しました。



1) 中国の排出量は本文に記載したように、2005 年の約 1.9 倍とした。
2) サウジアラビアの排出量は、2012 年実績から 130MtCO2eq を減じた値とした。
3) イランの排出量は、2012 年実績の 4%削減値とした。
4) メキシコは、GHG のみの申告値とし、BC は考慮していない。

2030 年の各国の人口は、国連の中位推計値を用いています。GHG 排出量は、表-4.3 に示した各国の約束草案に基づいていますが、中国は前述の推定

に従い、2005 年の GHG 排出量の約 1.9 倍としました。サウジアラビアの INDC は基準年が不確かですが、2012 年の推定実績から 130 MtCO2eq を減じた排出量としました。イランの INDC には、2030 年の BAU 値が明記されていないようですが、2012 年の 1 人の当たり GHG 排出量は 10.3 tCO2eq/人と先進国並みに高い値であり、これ以上 BAU として増加するのはおかしいと考え、2012 年の推定実績の 4%削減を排出量としました。メキシコは温暖化対策として、GHG と Black Carbon の削減目標がありますが、図-4.4 には GHG 削減のみを考慮しました。

図-4.4 には、前述したシナリオ RCP4.5 と RCP6.0 の 2100 年の 1 人当たりの GHG 排出量レベルを矢印の先端の位置で示しました。2100 年までに、削減しなければならない水準を示したものです。なお、シナリオ RCP2.6 は、前述したように実行が困難と思われるため記載していません。

2100 年は先のことだとはいえ、2030 年の各国の削減目標からは、パリ協定で謳われている、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする、という意思は感じられません。現在 1 人当たりの GHG 排出量が多いロシア、米国、オーストラリア、カナダは、2030 年の排出目標も相変わらず高い値です。

現状 GHG 排出量が最大の中国は、2030 年の 1 人当たりの GHG 排出量も高いレベルであることが分かります。図-2.5 に示したように、2005 年に 6.3 tCO2eq/人、2012 年に 8.8 tCO2eq/人でしたが、2030 年には 11.2 tCO2eq/人に増加する想定です。北京、上海という大都市の 1 人当たりの GHG 排出量は既に充分高く、今後排出削減が必要でしょう。一方、西部地域や周辺地域には、発展途上国の経済水準の人達が多数おり、今後その経済成長と共に GHG 排出量が増加すると想定されているのでしょう。

＜シナリオ RCP4.5 と RCP6.0＞

図-4.4 に示した国々が、シナリオ RCP4.5 に基づく 2100 年の GHG 排出量である 2.4 tCO2eq/人まで排出削減することは、かなり困難であることが窺われます。

一方、シナリオ RCP6.0 の 5.7 tCO2eq/人の水準なら、排出量が多い一部の国々が合意すれば、実行できそうに感じられます。オーストラリアやカナダは、国際世論に反して自国の主張を押し通すことはないでしょう。従って、国際的な政治の問題と同様に、米国、中国、ロシアの動向が、温暖化防止を左右することになるでしょう。余談になりますが、環境保護団体も、誰を非難すべきかを認識すべきです。

図-4.4 に示されている BRICs の南アフリカやブラジル、インドネシアやタイなどの発展途上国の１人当たりの GHG 排出量は、概ねシナリオ RCP6.0 の水準であることが分かります。

図-4.4 に示されていない発展途上国や低所得国は、図-2.7 に示したように、現状の 1 人当たりの GHG 排出量は RCP6.0 よりかなり低い水準です。今後、如何にして経済成長を果たしつつ、GHG 排出量の増加を妥当な範囲に抑制するかが課題になります。

4.4. 2100 年の各国の GHG 削減量

＜RCP シナリオの削減目標＞

パリ協定の 2℃未満 1.5℃を満たそうとすれば、RCP2.6 シナリオに従う GHG 排出ゼロということになります。しかし、「世界は温暖化で全ての生態系が破壊されることによる大量絶滅の始まりにいる」と信じているスウェーデンの少女のような人を除けば、極めて困難な GHG 排出ゼロに取り組むべきと考える人は多くないと思います。

また、RCP2.6 シナリオは、RCP4.5 や RCP6.0 よりも平均気温上昇を 1℃余り低く抑制できますが、実施に要する経済負担は遥かに大きなものです。それでも RCP2.6 を実施しようという主張には充分な説得力が無いように思われます。

温暖化による甚大な被害として分かり易いのは、異常な大雨や台風などの異常気象ですが、気温上昇を 2℃未満に抑制しないと異常気象が多発・恒常化するという十分な根拠があるわけてはないことは、IPCC の 5 次評価報告書に記されています。

何より、前述した 2030 年の GHG 削減目標からも窺われることですが、GHG 排出ゼロには米国、中国、ロシアなどの大国の賛同が得られそうもないことです。温暖化による深刻な被害の予兆がもっと明確にならない限り、世界各国の賛同のもとにGHG排出ゼロを実施するのは難しいと考えます。

一方、RCP8.5 は、前述のように、GHG 排出量を過大に想定したシナリオです。従って、2100 年の世界各国の GHG 排出目標を考えるなら、RCP4.5 か RCP6.0 またはその中間ということになります。

＜削減目標の検討方法＞

前述の考え方に従い、世界各国の 1 人当たりの GHG 排出量を等しくする仮定のもとに、2100 年の各国の GHG 排出量を検討します。現実には、豊かな国や大国がより多くの GHG を排出することになると思います。その場合には、目標値まで GHG 排出量を削減できない大国は、GHG 排出量の少ない国にお金を払い、排出枠を買うことになるでしょう。

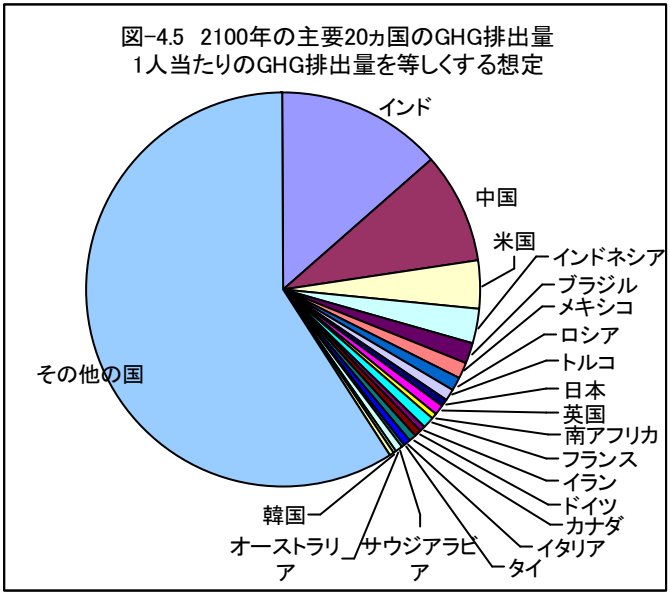
2100 年の 1 人当たりの GHG 排出量は、表-4.1 に示した RCP4.5 または RCP6.0 シナリオに従う値とします。2100 年の各国の人口は、図-4.1 に示した国連の世界人口見通しの各国の中位推計値を用いました。GHG 排出削減率は、2012 年を基準にした 2100 年の値としました。

日本を例に説明します。2012 年と 2100 年で世界全体の人口は 57%増加すると推計されていますが、日本の人口は 34%減少すると予測されています。人口が約 2/3 に減るわけです。2012 年の日本の 1 人当たりの GHG 排出量は 10.66 tonCO2eq/人であるのに対し、前述のように、RCP4.5 に従う 2100 年の排出量は 2.37 tonCO2eq/人、RCP6.0 では 5.68 tonCO2eq/人です。これらから、2012 年と比べた 2100 年の日本の GHG 排出量は、RCP4.5 シナリオに従うと 14.6%、RCP6.0 では 35.1%になります。GHG 排出削減率で示すと、RCP4.5 シナリオでは約 85%と大きな削減率になります。

＜20 カ国の GHG 排出量＞

図-2.2 に示した 2012 年の GHG 排出実績で上位 20 カ国について、図-4.5

に 2100 年の GHG 排出量を示しました。



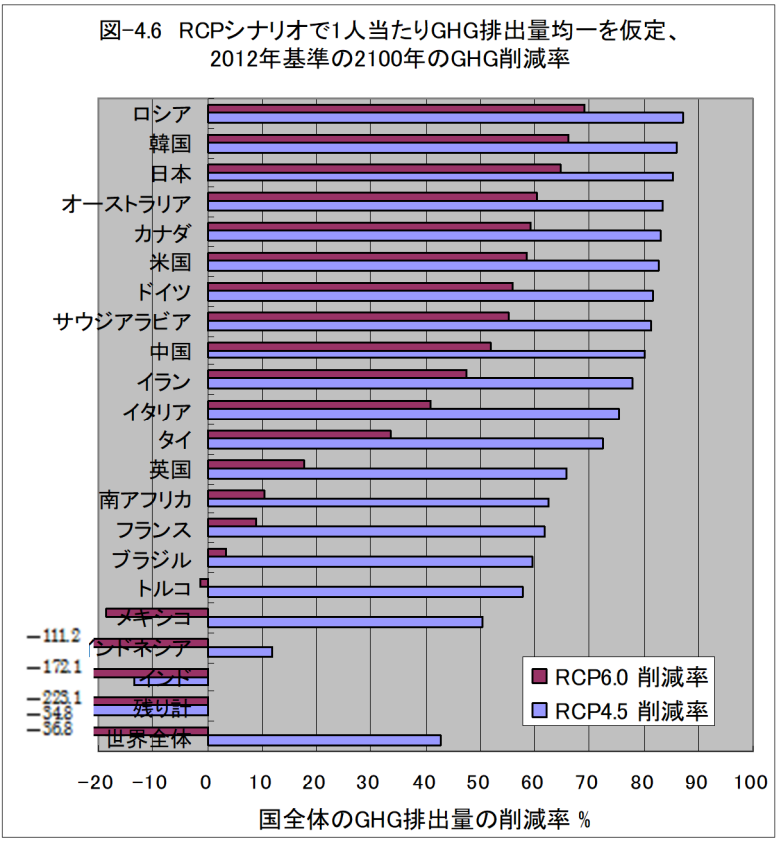
人口１人当たりの GHG 排出量を等しく仮定したグラフですから、図-4.5 は 2100 年の各国の人口比率を表しています。温暖化防止としては、情報量が乏しいデータですが、このグラフからも幾つかのことが読み取れます。

先ず、2012 年に世界の GHG 排出量の 3/4 以上を占めていた 20 カ国が、2100 年には世界全体の GHG 排出量の 40%に減少することを示しています。GHG 排出削減に関し、現在の先進国よりも発展途上国の方が将来重要になります。

2012 年に最大の GHG 排出国だった中国は、2100 年には人口は 74%に減少すると推計されています。一方、2100 年のインドの人口は 2012 年の 120%に増加すると予測され、最大の GHG 排出国になるでしょう。なお、インドの人口も、国連の中位推計によれば 2100 年にはピークを過ぎて減少に転じています。

＜各国の GHG 削減率＞

図-4.6 には、世界各国の 1 人当たりの GHG 排出量を等しくするという仮定のもとで、前述の 20 カ国について 2012 年を基準にした 2100 年の GHG 排出削減率を示しました。RCP4.5 と RCP6.0 シナリオに従う値を図示しています。同図にはマイナス側は−20%までしか表示していないため、削減率の数字を記載しました。



GHG 削減率の高いものから順に並べていますが、日本は高い削減率に位置し、RCP4.5 に従う場合は 85%です。これは、2100 年の日本の人口が約 2/3 に減少するという予測に基づくためです。人口が減少すれば、成り行きに任せても GHG 排出量は減少するはずですから、それ以上に GHG 削減す

ることが必要になります。日本は、他国と比べGHG削減の実行が極めて困難ということではありません。

シナリオRCP4.5とRCP6.0では、各国のGHG削減率には大きな違いがあります。また、世界全体のGHG削減率も、RCP4.5に従う場合は43%ですが、RCP6.0の場合は−37%で、世界全体では現状よりも37%増加してもよいことになります。なお、GHGが増加していいのは発展途上国や低所得国で、先進国ではないことは言うまでもありません。

繰り返しになりますが、表-3.4に示したように、産業革命以後の世界の平均地上気温上昇のIPCCによる予測の平均値は、RCP4.5シナリオでは約2.4℃であるのに対し、RCP6.0では約2.8℃と小さな違いです。世界の平均気温上昇のこの小さな違いにより、温暖化による被害がどれだけ増大するかを見極めることが必要です。

図-4.6は、2012年を基準とした2100年の国全体のGHG排出量の削減率ですが、日本のように人口が大幅に減少するケースでは、GHG削減率の高さが削減の困難さを的確に示しているとは言えないと思います。

＜1人当たりの排出量の削減率＞

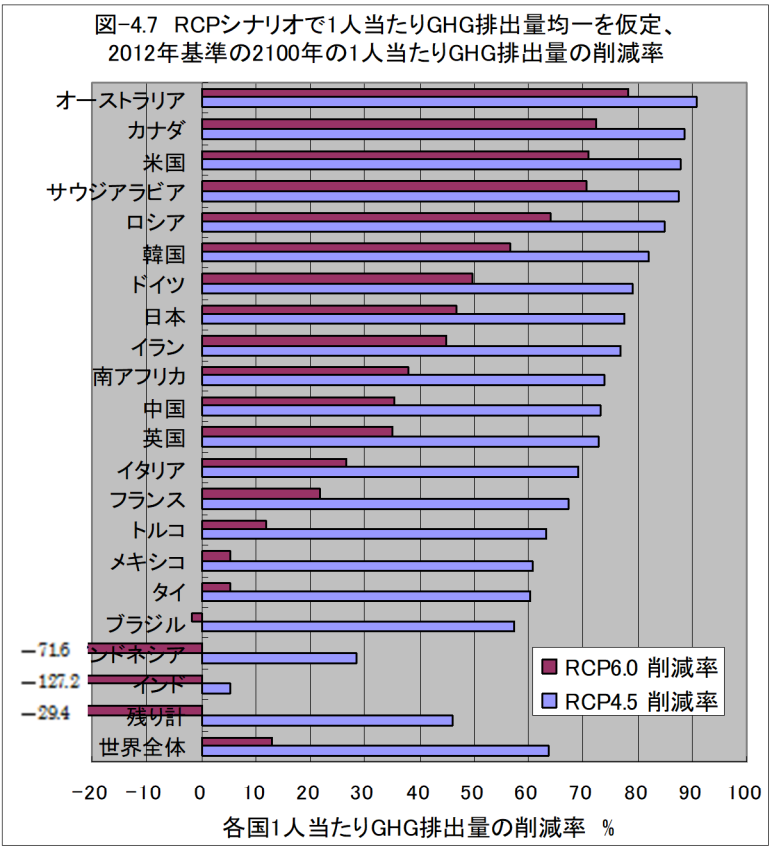
GHG排出削減の困難さを示すため、図-4.7には2012年を基準に2100年の各国の1人当たりのGHG排出量について削減率を図示しました。図-4.6は各国の総排出量の削減率で、図-4.7は各国の1人当たり排出量の削減率であることに注意して下さい。

日本のように2100年の人口の減少が大きい国については、図-4.6に比べて図-4.7のGHG削減率が小さくなっています。

図-4.7で、2012年時点で1人当たりのGHG排出量が多かったオーストラリア、カナダ、米国、サウジアラビアは、RCP4.5シナリオに従うなら、90%前後のGHG排出削減が必要になります。それに続くロシアの削減率も85%です。

ドイツのGHG削減率は79%、日本は78%です。GHG排出大国の中国でも73%のGHG削減率が求められます。EU諸国や日本がRCP4.5シナリオ

の実行に同意したとしても、米国、中国、ロシアなどが同意するかは疑問です。



2100 年には最大の GHG 排出国になると考えられるインドは、RCP4.5 に従うと削減率は 5%、RCP6.0 ならマイナス約 130%です。インドにとっては、2100 年に向けて豊かになり、GHG 排出量の増加を適度なレベルに抑制することが課題になるでしょう。

4.5. 常識的に考える 2100 年の削減目標

本項は温暖化防止に対する筆者の主観的な想いを綴ったものです。繰り返

しになりますが、2℃未満1.5℃の温暖化防止にはGHG排出ゼロとすることが必要で極めて困難な課題です。一方、最大の温暖化リスクは、異常気候の頻発・恒常化であると考えますが、気温上昇と異常気象増加の定量的知見は充分ではないと考えます。そのことが、以下の記載の背景になっています。

＜2℃未満－GHGゼロ＞

日本は今世紀後半のできるだけ早期に「脱炭素社会」の実現を目指すとともに、2050年までにGHG80%削減に大胆に取り組むことになっています。

一方、パリ協定に従い日本が提出した2030年のGHG自主削減目標は、1990年を基準にするなら15%削減です。2030年から2050年までには20年あるとはいえ、80%削減には遥かに及びません。しかし、GHGゼロの強い意思が感じられないのは、多くの国に共通したことです。

温暖化防止に熱心なEUでは、一部の国がGHG80%削減のシナリオを発表しています。しかし、GHG削減はあまり進展していないようで、本当に80%削減目標が達成されるのか疑問です。GHG排出大国が80%削減を実施しないのに、EUだけが実施することはありえないと思います。

各国が温暖化防止に熱心でないと非難しているのではありません。多くの国は、それなりに温暖化防止に取り組んでいます。温暖化防止に熱心な企業も多数あります。大きな経済的負担にならない範囲なら、温暖化防止に賛同して実施しているということでしょう。

もし、「温暖化により全ての生態系が破壊され、大量絶滅が起きる始まりにいる」と確信したなら、状況は違ってくるでしょう。しかし、国家でも企業でも責任ある立場の人たちは、そのように考えていません。しかし、それは環境意識が低いためではないと思います。

2100年の世界平均気温上昇は、2℃を超え2.5～3.℃となる可能性が非常に高いと思います。問題はそれにより、どれだけの温暖化被害が発生するかです。

人間や動植物の多くは、気温上昇になんとか対応でき、大量絶滅には至らないでしょう。海面上昇も数10cmの範囲と予測されており、堤防の嵩上げ

が必要であっても、GHG ゼロの温暖化防止対策の実施に比べれば容易なことです。

被害が大きいため最も危惧される異常気象の頻発・恒常化については、現時点で定量的知見は充分でないと思います。

今、GHG ゼロに拙速に取り組まないのは、見識があると言うべきでしょう。2030 年の GHG 自主削減に控えめな目標を設定し、この先 10 年間に温暖化リスクがどれだけ大きく確実なものかを見定めることは、間違った対応ではないと私は考えています。

但し、GHG ゼロは世界を変革する大事業です。移行すべき世界の姿を想定し、移行計画の原案を作成し、世界的な協議と調整を経て、実施計画が決まることになるでしょう。GHG ゼロの世界の構築作業にも長期を要します。恐らく、今すぐ検討に着手しても、2050 年までに GHG ゼロ社会を構築することは困難でしょう。

GHG ゼロが本当に必要になるかは不確かですが、GHG ゼロ世界構築の検討は今すぐ始めるべきです。その検討のため、IPCC とは別に国際組織を設けることが必要と考えます。GHG ゼロ世界の構想が出来上がれば、温暖化防止とはどのような事業で、どれだけ困難かも明確に見えるようになると思います。

＜約 2.4℃－シナリオ RCP4.5＞

シナリオ RCP4.5 は、2050 年までに少なくとも世界の GHG 排出を 50%削減するとともに、先進国全体として 80%またはそれ以上削減する、という前述した G8 ラクイラ・サミットの目標に概ね沿ったもののように思います。

図-4.7 に示したように、RCP4.5 に従うには、現状（2012 年）を基準として 2100 年までに、同図上部の GHG 排出量が多いオーストラリア、カナダ、米国、サウジアラビア、ロシアなどは、1 人当たりの GHG 排出量を 90%前後削減することが必要になります。韓国、ドイツ、日本などで 80%前後、EU 諸国でも 70%前後の GHG 排出削減が必要です。現在最大の GHG 排出国の中国も 73%の削減が必要になります。このように高い GHG 削減率は、再生

可能エネルギーの導入拡大だけでなく、社会システムの転換を必要とします。なお、日本の長期エネルギー計画の前提になっている夢のような革新的技術などは期待できないと思っています。

温暖化防止は世界全体で取り組むことが必要で、取り分け多量排出国の合意は不可欠です。パリ協定に基づく 2030 年の自主削減目標が 30%前後であることから考えると、高い GHG 削減率を要するシナリオ RCP4.5 の実行に、全ての国の合意が得られるとは思われません。

国際世論が形成されれば、EU や先進国の多くは従うと思われますが、米国、中国、ロシアなどは、豊かさを犠牲にする高い GHG 削減に合意するとは思われません。

シナリオ RCP4.5 レベルの温暖化防止の実行に合意が得られるとしたら、それは深刻な温暖化被害の予見が確実になった場合でしょう。百年に一度の異常気象の恒常化により、それによる損害額が温暖化防止による経済負担と比肩される水準になった場合です。

＜約 2.8℃－シナリオ RCP6.0＞

温暖化防止が必要と認識されたとしても、異常気象が恒常するという予測が確実視されるまでは、余程頑張っても実行できるのは、シナリオ RCP6.0 の GHG 削減水準だろうと考えます。

それに対し、温暖化防止として RCP6.0 程度でよいのかという意見が出されることでしょう。一方、気温上昇は 2℃未満でなければならないのか、3℃では駄目なのか、という素朴な疑問も生まれるでしょう。温暖化リスクに関する知見が未だ充分でないということであると思います。

①ドイツと日本

シナリオ RCP6.0 の実行について見ておきましょう。図-4.4 に示した 2030 年の各国の自主削減目標を見てください。シナリオ RCP6.0 に従う 2100 年の 1 人当たりの GHG 排出量が 5.7 tCO2eq であるのに対し、2030 年の削減目標は、例えばドイツは 9.1 tCO2eq、日本は 8.6 tCO2eq ですから、各々あと 60%と 51%削減すればよいわけです。ドイツや日本は工業製品輸出が多

く、前述したように輸出入に関するGHG排出枠の二次調整を考慮すれば、必要なGHG削減量は更に少なくなります。2030年からの70年間に削減すればよいわけで、簡単ではありませんが、手が届く削減目標であると思います。

②EU諸国

EU諸国の2030年の1人当たりのGHG目標値は、既にRCP6.0のGHGレベルに殆ど手が届く水準です。図-4.4に示していませんが、多くの発展途上国の現状の1人当たりのGHG排出量は、シナリオRCP6.0よりも低い水準です。

③オーストリア・カナダ・韓国

残る問題は、図-4.4で1人当たりのGHG排出量が多い8ヶ国ほどが、2100年までにRCP6.0の水準までGHGを削減できるかです。オーストラリア、カナダ、韓国は、GHG削減の国際世論が形成されれば、それに逆らわず削減努力をすると思います。

④アメリカ

残るのは、ロシア、米国、中国、サウジアラビア、トルコです。米国について考えてみましょう。2030年目標の14.7tCO2eq/人を更に5.7tCO2eq/人まで削減することが必要です。2012年排出実績との比較なら30%に削減することになり、社会システムの大幅な変更が必要になります。

先ず、アメリカン・ファーストなんて言う大統領が、環境保護を主張する大統領に代わる必要があるでしょう。GHG削減により、巨大資本の石油産業は大幅に縮小されることになります。CO2排出量が多い石炭産業は無くなるかもしれません。電力に関しては、米国は風力発電の賦存量は大きいのですが、恐らく、原子力発電に大きく舵を切ることになるでしょう。石炭火力の設備を廃棄し、原子力発電の設備を大幅に増やすことが必要になります。ガス産業も変容することになるでしょう。化石燃料を利用している自動車産業や航空機産業も影響を受けます。

米国では、産業界をどのように説得して温暖化防止を推進するかが大きな問題になると思います。

⑤中国

共産党一党独裁の中国では、産業界を説得する必要はないでしょう。前述した 2030 年の GHG 排出量の推定に従うなら 1 人当たりの排出量は 11.2 tCO2eq/人ですから、それを 2100 年までに半減することが必要になります。

GHG の大幅削減は、先進国が豊かさを犠牲にして行うものです。北京や上海などの臨海部の大都市は、先進国並みの経済水準に達し、1 人当たりの GHG 排出量は、恐らく先進国を超える水準になっているでしょう。しかし、広大な中国の周辺部は発展途上国の経済水準です。中国全域の経済水準が上がるまでは、中国政府には GHG 削減を優先して行うことはないと思います。中国全域が先進国の水準に達することは、金輪際来ないかもしれないのです。

なお、中国が温暖化防止に政策を転換する場合、技術的・社会的対応力は米国に比べかなり劣っていると思います。風力や太陽光発電などの再生可能エネルギーもそれなりに導入されると思います。しかし、2018 年の発電電力量の実績で原子力は総電力量の 4.3%に過ぎませんが、GHG 削減のためには、結局、エネルギー供給の大半を原子力発電による電力に依存することになると思われます。

⑥ロシア

先ず、温暖化により永久凍土の溶解などの不都合な問題もありますが、ロシアにとって概して 2～3℃の温暖化は悪いことではないと思います。

また、ロシアには、GHG 削減を本格的に行う経済的な余裕はないと思います。ロシア経済を支えているのは、天然ガスや原油の輸出です。今でも脆弱なロシア経済は、世界の化石燃料消費が減少したら財政破綻するでしょう。

国内の CO2 排出削減は、原子力にエネルギー転換することで対応できるでしょうが、経済問題は自国だけでは解決できないと思います。GHG の大幅削減を受け入れないと思われますが、そうしたとしても、エネルギー輸出の収入が回復するわけではありません。

大幅な GHG 削減の問題は、ロシアに限らず、原油、石炭、天然ガスの輸出に大きく財政を依存している国々にとって深刻な問題を引き起こすと思われます。とりわけ発展途上国の場合、飢餓、難民問題が発生するでしょう。

それを避けるには、国際的な経済支援の仕組みが必要になると思います。

⑦サウジ・トルコ

サウジアラビアは、人口 3,380 万人の中規模国であり、GHG 削減に関して注目されるのは産油国だからです。石油輸出による富の蓄積がかなりあるでしょうから、石油消費が無くなる時代を見据えて、社会の転換を加速させるべきです。いずれにしても、今までのような豊かな生活は維持できないでしょう。

トルコについて論じる知見を有していませんが、トルコは EU 加盟を目指しており、EU 加盟候補国に認定されています。EU の支援のもとで、GHG 削減を推進することが期待されます。

⑦インド

2100 年にインドは、世界最大の人口になっていることは確実で、最大の GHG 排出国になっているかもしれません。豊かになりつつ、GHG の増加を適切な範囲に抑制することが課題になります。

それは発展途上国に共通する課題です。多くの発展途上国にとって、それを実行するには、先進国による技術支援と経済支援が不可欠でしょう。

＜本章のまとめ＞

温暖化防止が必要であると世界が認識したとしても、温暖化による甚大な被害が明確に予見されない限り、実行できるのはシナリオ RCP6.0 の水準の GHG 削減だろうというのが本章のまとめです。

シナリオ RCP6.0 ではお話にならないと、環境保護に熱心な人達は思うかもしれません。しかし、それですら GHG 排出量が多い米国、中国、ロシアなどの合意が得られるかは不確かです。

温暖化防止は GHG 削減の程度に応じて、先進国が豊かさを犠牲にして行うものと思います。GHG ゼロの温暖化防止では、発展途上国やエネルギー輸出国には、大きな影響が及びます。高い環境意識があれば実行できるものではありません。世界的な支援の枠組みが不可欠と考えます。

5. GHG 排出ゼロとは何か

本章以降は、GHG 排出ゼロや GHG80%削減の問題を扱います。それが如何に困難であっても、異常気象の恒常化のように、温暖化被害が温暖化対策の経済負担を越えることが確実になれば、対策を実施しないわけにはいきません。

パリ協定で合意された 2℃未満の温暖化防止のためには、GHG 排出をゼロにすることが必要と言われます。また、日本は 2050 年までに GHG 排出を 80%削減し、今世紀後半の早期に GHG 排出を実質ゼロにすることになっています。

GHG 排出実質ゼロとは、大気中から GHG を吸収することも含め、排出量と吸収量の合計をゼロにすることです。それがどれ程大変なことか、充分に理解されていないように感じます。GHG 排出ゼロを達成するのには、世界を変革することが必要になると私は考えています。

5. 1. 現状の GHG 排出内訳

図-5.1 は、IPCC の 5 次評価報告書に記載されている 2010 年の GHG 排出量を示したものです。非 CO2 を含めた世界全体の GHG について、統計的に積み上げたデータはないでしょうから推定値です。

化石燃料の燃料利用と工業プロセスの原材料利用により排出される CO2 は、GHG 排出量全体の 65%に過ぎません。従って、石油・石炭・天然ガスの使用をゼロにしても、GHG 排出量は直接的には 65%しか減らないのです。

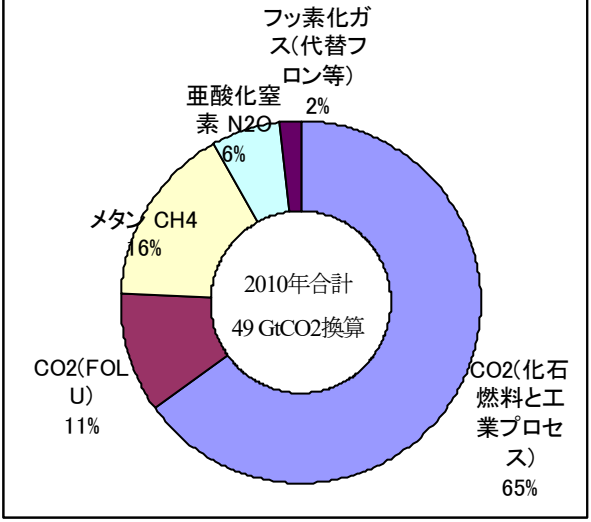
＜CO2（FOLU）＞

図-5.1 に CO2（FOLU）とあるのは、Forestry and Other Land Use の略で、林業及びその他土地利用のことです。森林が開墾され畑地などに土地利用が変更された場合、樹木などの地上および地下の部分に蓄えられていた炭素量が変化します。例えば、伐採された樹木を焼却すれば直ちに CO2 が排出され、長期間をかけて腐朽しても CO2 が排出されます。

林業及びその他土地利用の変更により、樹木等の形態で蓄えられていた炭

素の量が減少すればCO2の排出、逆に増加すればCO2の吸収と算定されます。化石燃料由来のCO2ほどには正確に把握されていないようですが、そのようなCO2排出量が11%あるということです。

図−5.1　温室効果ガス排出量の内訳（2010年）
出所：IPCCの5次評価報告書



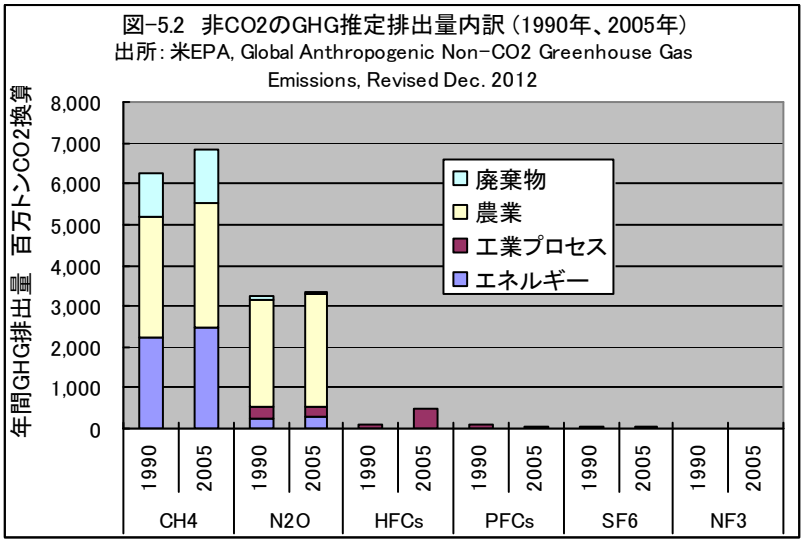
この種のCO2の排出国のほとんどは、熱帯の発展途上国です。概して先進国は、現在は森林等によるCO2の吸収国ですが、嘗て豊かになる過程で森林から農地への土地利用転換を多かれ少なかれ行ってきました。

＜非CO2のGHG＞

図-5.1では、非CO2のGHGとして、メタン（CH4）が16%、亜酸化窒素（N2O）が6.2%、フッ素を含むガス類が2%含まれることを示しています。

図-5.2には、1990年と2005年の排出量で、排出源の情報を含むデータを示しました。同データは、IPCCのデータをもとに、米国環境省（EPA）が推定したもののようです。1990年から2010年まで、微増したと推定されていますが、正確なデータなど入手できないでしょうから誤差範囲と言えるで

しょう。



フッ素を含むガス類としては、HFCs、PFCs、SF6、NF3 の 4 種が表示されています。それらは主に、HFCs はエアコンなどの冷媒、PFCs は IC 製造過程での使用や溶剤、SF6 は電気絶縁特性を利用してガス変圧器やガス遮断機などでの利用、NF3 は IC 製造でのエッチングガスとして利用されています。それらの排出量は、CH4、N2O に比べて少ないので、後者に絞って記載します。

CH4 の排出源はエネルギー分野、農業、廃棄物分野、N2O は主に農業分野を排出源としています。エネルギー分野から排出されるメタンは、化石燃料の生産・消費が無くなれば、ほとんど無くなることが期待されます。一方、農業や廃棄物分野から発生する CH4 と N2O は、先進国と発展途上国の両方から排出されているため、削減は厄介です。

表-5.1 に、CH4 と N2O の具体的な排出源を示しました。CH4 の最大排出源が家畜の腸内発酵（いわゆる牛のゲップ）であるのは驚きです。ゲップの少ない牛や羊の品種改良も行われていると報じられますが、データの信頼性にも少し疑問を感じます。稲作やその他農業分野の排出量が多いのは、日本

にも関係していますが、発展途上国の関連が大きく、排出削減の困難さが窺われます。

表-5.1　世界のCH4とN2Oの排出源と排出量　　百万トンCO2換算

部門	排出源	1990年	2005年
CH4			
エネルギー	天然ガス・石油システム	1,278	1,543
	石炭採鉱	530	522
	定置・移動燃焼	221	224
	バイオマス燃焼	176	198
農業	家畜の腸内発酵	1,764	1,894
	稲作	480	501
	肥料管理	233	219
	その他農業発生源	507	421
廃棄物	固体廃棄物の埋立	706	794
	排水	352	477
その他計		22	23
CH4計		6,269	6,815
N2O			
エネルギ	定置・移動燃焼	201	256
	バイオマス燃焼	41	48
工業プロセス	アジピン酸・硝酸製造	200	127
	その他工業プロセス源	81	77
農業	農業土壌	1,658	1,840
	肥料管理	204	179
	その他農業発生源	777	744
廃棄物	生活排水	68	82
その他計		12	15
N2O計		3,241	3,367

出所：米EPA, Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions:1990 - 2030, Revised December 2012

CH4 は廃棄物の埋め立てや排水からも発生します。有機物が主体の生ごみを埋め立てると、嫌気性バクテリアが分解してメタンが発生します。EU では温暖化防止の観点で、ごみの埋め立て処分を禁止する指令が出されています。しかし、世界的に見ると、日本のようにごみを焼却処分しているのは少

数派です。発展途上国の比重が大きい問題であり、解決は簡単ではありません。

N2O の最大の発生源は農業土壌であり、窒素を含む肥料が土壌中で微生物により変換される過程で副生物として生成するもののようです。N2O の排出削減対策としては、施肥管理の適正化が言われています。

農業と廃棄物分野を排出源とする CH4 と N2O は、世界の GHG 排出量のおよそ 15%を占め、排出源が広く分布し、発展途上国も大きく係わっているため排出削減には困難が伴います。

5.2. 化石燃料が無い世界

化石燃料を無くしても、上記のように GHG は 65%くらいしか減少しません。しかし、GHG 排出ゼロを目指すなら、先ずは、化石燃料由来の CO2 を無くすことが第一でしょう。

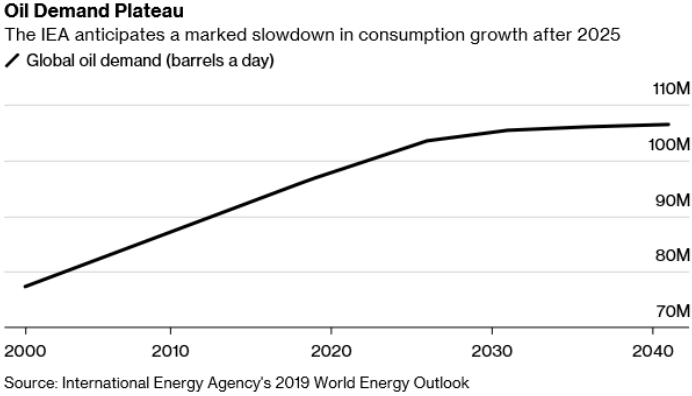
なお、正確には化石燃料をほとんど無くすと言うべきです。温暖化防止に関し、CO2 の回収・貯留技術（CCS や CCUS）が検討されています。詳しくは 6 章に記載しますが、火力発電のボイラ排ガスなどから、CO2 を回収し、地下 1,000 m 以深の帯水層などに貯留するものです。CCS 等の経済性や安全性が思惑通りなら、現状の CO2 排出量の 10 数%を回収・貯留することが想定されています。従って、GHG 排出ゼロであっても、現状の化石燃料の生産・消費がある程度残る可能性があります。但し、化石燃料の需要が大幅に減少したら、価格は暴落するでしょうから、化石燃料の産業的重要性は失われるでしょう。

＜化石燃料無しに想うこと＞

GHG ゼロが最近盛んに言われるのですが、一方で化石燃料が使われなくなることはほとんど聞きません。化石燃料は相変わらず重大ニュースです。最近もイランで世界 3 位の大油田が発見されたこと、ロシアから中国へパイプラインによる天然ガスの供給開始、ロシアから欧州への天然ガスパイプラインの建設、米国が世界一の産油国になったことなどが報じられています。

マスコミは化石燃料が使用されなくなることなど夢想もしていないようです。もしかしたら、マスコミはGHGゼロとはどのようなことか理解していないのかもしれません。

世界エネルギー機関（IEA）は、2019年11月に発表した世界の石油需要見通しで、下図のように、石油需要は2030年以降横ばいになり、2040年まで需要減少は訪れないと予測しています。



GHGゼロの困難さを理解しているIEAは、多くの国が2050年までにGHG排出ゼロを本当に実行するか、信じていないのかもしれません。

先進国の現在の豊かさは、産業革命以降、石炭、石油、天然ガス、そして原子力とエネルギーを大量に消費することに支えられたところが大きいと考えます。化石燃料を無くする場合、それに代わる適切な対策を講じなければ、現在の豊かさは失われることになるでしょう。化石燃料を無くすことは、極めて大きな社会の変革です。

＜化石燃料の輸出国＞

石油・石炭・天然ガスの輸出に財政を依存している国はかなりあり、大きな影響を受けるでしょう。表-5.2に化石燃料の輸出額が大きい30か国を示しました。名目USドルによるデータです。輸出と輸入がある国は、輸入額を差し引き正味輸出額として示しました。石油、天然ガス、石炭の合計輸出

額と GDP の比率を併記しています。

表-5.2 化石燃料輸出額上位30国 (2018年)

国名	化石燃料の正味輸出額 (輸出-輸入) 百万US$				合計/GDP %
	石油	天然ガス	石炭	合計	
ロシア	129,166	55,709	16,628	201,503	12.2
サウジアラビア	167,603	150	0	167,753	21.3
イラク	84,626	0	0	84,626	37.7
アラブ首長国連邦	67,226	4,792	0	72,018	17.4
ノルウェー	31,197	32,638	0	63,835	14.7
カナダ	51,946	5,077	5,002	62,025	3.6
イラン	57,204	1,445	0	58,649	12.9
ナイジェリア	49,648	6,125	0	55,773	14.0
カタール	18,086	35,702	0	53,788	28.1
オーストラリア	0	0	47,015	47,015	3.3
カザフスタン	37,794	1,466	347	39,607	22.1
アンゴラ	38,897	0	0	38,897	36.8
クウェート	34,971	0	0	34,971	24.9
インドネシア	0	10,592	19,734	30,326	2.9
アルジェリア	15,190	12,779	0	27,969	16.1
メキシコ	26,408	0	0	26,408	2.2
オマーン	21,669	3,604	0	25,273	31.9
ベネズエラ	24,933	0	11	24,944	35.3
リビア	19,941	885	0	20,826	43.1
コロンビア	13,655	0	6,576	20,231	6.1
ブラジル	20,088	0	0	20,088	1.1
アゼルバイジャン	16,219	585	0	16,804	35.8
米国	0	2,006	11,638	13,644	0.1
マレーシア	3,749	9,108	0	12,857	3.6
エクアドル	7,819	0	0	7,819	7.2
トルクメニスタン	216	6,585	0	6,801	16.7
コンゴ共和国	6,319	0	0	6,319	56.1
ブルネイ	2,757	3,244	0	6,001	44.2
南アフリカ	0	0	5,696	5,696	1.5
ガーナ	4,513	0	0	4,513	6.9

1) 石油、天然ガスはGLOBAL NOTE、石炭はWorld's Top ExportsのWEBデータ。

2) イランとベネズエラは2017年のGDPによる。

化石燃料輸出額が最大の国はロシアです。GDP 比で 10%を超える額であり、それが無くなったら、ロシア経済に対する影響はかなり大きいと思われます。温暖化による気温上昇でロシアは、永久凍土の融解など不都合なこともあるでしょうが、概して好ましい面も多いのではないでしょうか。余程代わりの条件でも示さない限り、ロシアが化石燃料を手放すことはないだろうと思われます。

カナダやオーストラリアの化石燃料輸出額は大きいのですが、GDP 比で 3%台であり、国際世論が化石燃料ゼロに向かえば、それに同調すると思われます。

問題は発展途上国です。GDP 比の化石燃料輸出額が 20%を超える国が多数あります。化石燃料をゼロにしたら、それらの国の多くは財政破綻し、飢餓、難民が発生することでしょう。発展途上国の多くは、飢餓から脱して、今より豊かになろうと努力している最中です。化石燃料ゼロは、それに反することです。加えて、これまで GHG を大量に排出してきたのは発展途上国ではなく先進国です。

それらを考慮すれば、化石燃料ゼロに移行しても、発展途上国が今より豊かになれるスキームが不可欠であると私は考えます。

＜化石燃料の輸入国＞

化石燃料の輸入国でも、原油タンカー、石油受入れ基地、ガソリン・スタンドなど多様な石油関連施設は不要になります。LNG や LPG 施設も同様です。石油や天然ガスを原料としている石油コンビナートは、工業プロセスの大幅な変更が必要になるでしょう。石油などを原料とするプラスチックは、恐らく無くならないでしょうが、石油コンビナートが存続するか疑問です。

巨大な石油メジャーは、総合エネルギー企業に変わろうとするでしょうが、遥かに貧弱な企業となるでしょう。都市ガス産業は水素産業に変容するかもしれませんが、都市に張り巡らされた都市ガス配管網は、水素用に転用することはできず、そのまま廃棄されるでしょう。化石燃料を原料に使用している鉄鋼業、セメント業などは、化石燃料を使用しない生産プロセスを開発し、

プラント設備を新設することが必要になります。

化石燃料を使用しなくなっても、エネルギー需要が無くなる訳ではありません。再生可能エネルギーによる発電設備の大幅な増強が必要になります。変動する太陽光や風力発電のため、膨大な容量の電力貯蔵設備が設けられ、送電網の増強も必要になるでしょう。発電電力量の季節変動対策として、電力ー水素変換の長期電力貯蔵設備が設けられるかもしれません。

自動車などの移動設備は可能な限り電動になります。大出力で長距離を走る大型貨物トラックでは、バッテリーが大きくなり過ぎるため、別途の対策が必要になるかもしれません。ガスを燃料としていた消費者用の機器も電気機器に変更されます。その他にも、温室効果ガスの排出をゼロにするための変更は、種々社会全体に及びます。

膨大な人達が従来の職を失い、新たな仕事を探すことになります。高齢の人は、かつて 1960 年代に石炭から石油へのエネルギー転換に伴い、日本で起きた炭鉱の閉山とそれに伴う労働争議を覚えているでしょう。その種のことが、遥かに大規模に世界中で進行します。

温室効果ガスの排出ゼロに伴う新規の設備投資は膨大なものになるでしょうから、能力のある人が仕事を探すことに苦労しないかもしれません。しかし、しわ寄せは常に弱者に及びます。

このような変化に対応できない国、地域、企業、そして多くの個人が生じます。世界的に強力な支援の枠組みが必要になるでしょう。

GHG 排出ゼロを唱える環境保護の人達は、どのように考えているのでしょうか。概して先進国の人達である環境保護主義者は、豊かさをある程度犠牲にして、自分だけが温暖化の被害から免れられればよいと考えているのでしょうか。

＜化石燃料無しに移行するには＞

各国が独自に化石燃料の無い社会への移行を進めることは無駄ではありませんが、それでは世界全体の GHG をゼロとする目標は達成できません。発展途上国には、技術支援、経済支援が不可欠ですから、各国がバラバラに

実施するのではなく、世界的な計画に従い実行すべきものと考えます。

先ず、化石燃料が無い世界全体の姿を明確にした上で、そこに移行する実行計画を立案することになります。そのためには、IPCC とは別に、この大問題を検討する国際的組織が必要になるでしょう。

国際的組織で検討されたプランは、世界各国による協議、調整、合意を経て実行されることになるでしょう。実行計画を決定するだけでも、大変な労力と時間を要することになります。化石燃料の無い社会に移行するためには、恐らく、数 10 年を要することになると思います。今から本格的に検討を始めても、2050 年には間に合わないでしょう。

化石燃料が豊富な国は、それを使用しないことになります。再生可能エネルギーの豊富な国は、自国の対策は相対的に容易に実施できるのですから、発展途上国に対してより多くの経済支援を行うことが求められるでしょう。化石燃料の無い社会へ移行は、大きな経済負担を伴う変革ですから、負担の公平性が重要になります。

＜中国とインドを例に＞

発展途上国が化石燃料ゼロへ移行するのは容易ではないと思います。中国とインドを例に思うところを記します。

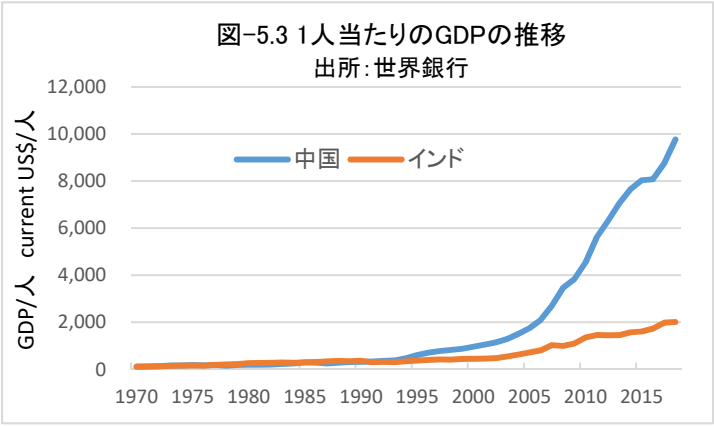
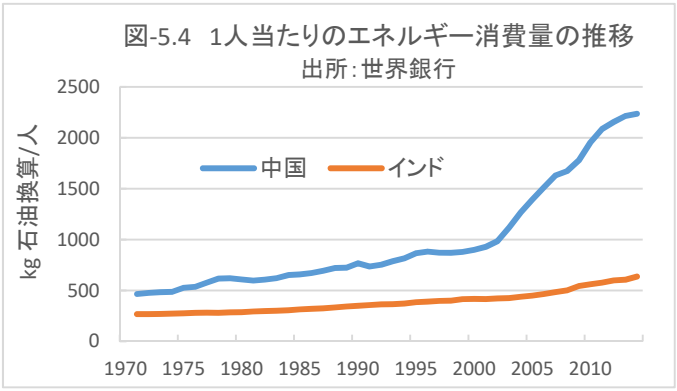


図-5.3 に、中国とインドの人口一人当たりの GDP の推移を示しました。1990 年代初めまで、中国もインドも共に非常に低い GDP でした。しかし、中国はその後、鄧小平の改革開放政策により、文化大革命の後遺症から立ち直り、2002 年の WTO 加盟を経て急速な経済成長を遂げました。

図-5.4、図-5.5 に、中国とインドの一人当たりのエネルギー消費量と CO2 排出量の推移を示しました。中国はエネルギー消費を拡大させ、CO2 排出量を増加させたことで、経済成長を遂げたことが分かります。



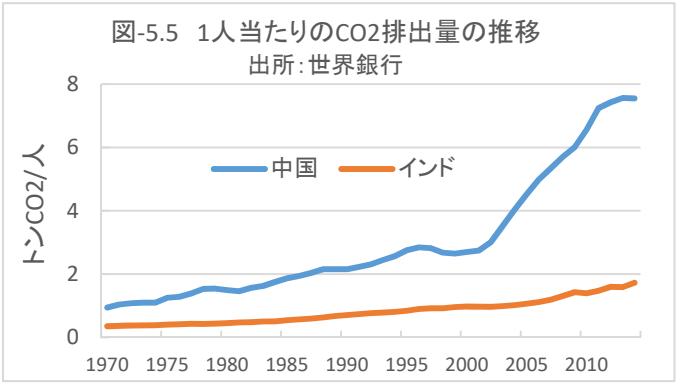


表-5.3 には、日本や米国との比較を示しました。一人当たりの GDP でインドの約 5 倍の中国も、日米と比べると、2014 年実績で日本の約 1/5、米国の約 1/7 です。

恐らく、北京や上海などの大都市は、先進国並みの豊かさになっているも

のと思います。エネルギー消費や CO2 排出量は、先進国の平均を超えているかもしれません。

表-5.3　1人当たりGDP、エネルギー消費、CO2排出 (2014年)
出所：世界銀行

項目	インド	中国	日本	米国
GDP/人　名目,米ドル	1,574	7,651	38,109	55,033
エネルギー消費量/人　kg石油相当	637	2,237	3,471	6,961
CO2排出量/人　CO2トン	1.73	7.54	9.54	16.50

しかし、広大な中国には、未だ貧しい人々が沢山おり、一人当たりの GDP の平均では日本の 1/5 になってしまうのでしょう。中国社会を維持するには、大都市と地方の大きな経済格差を解消することが不可欠です。今後、中国は成長率が低下しても、経済成長を続けることが必要でしょう。

一方、インドの技術政策レポートで、なぜ、中国とこのように大きな経済格差が生じてしまったのかと、嘆いている記述を目にしたことがあります。近年、中国の経済成長に陰りが見えてきたのに対し、インドの GDP 成長率が中国を超えるようになりました。インド旅行をすると多くの貧困を目にしますが、やっと豊かな中間層の形成が始まったのだと思います。中国もインドも経済成長を続けつつ、GHG 排出ゼロを求められることになります。

発展途上国は何処でも、まともな政権なら今よりも豊かな社会になることを目指していると思います。先進国は産業革命以降、石炭、石油、天然ガス、そして原子力と、エネルギーを大量に消費することで、豊かさを達成してきました。化石燃料を無くすることは経済成長に反することです。発展途上国が経済成長を続けつつ化石燃料を無くするには、支援の枠組みが必要でしょう。

5.3. 脱炭素エネルギー

＜再エネ・原子力・CCS＞

化石燃料を無くしても、エネルギー需要が無くなるわけではありません。そのため、CO2 を排出しない脱炭素エネルギーを利用することが必要になります。脱炭素エネルギーとしては、再生可能エネルギー、原子力、そして、

CO2 の回収・貯留付き（CCS や CCUS）の化石燃料利用が主なものです。

CCS 付き火力発電などを脱炭素エネルギーと呼ぶのには異議があるかもしれませんが、同様の機能を果たすものとして、本書では脱炭素エネルギーの一つとして扱います。CCS については、主に 6 章に記載します。

水素は CO2 を排出しないエネルギーですが、ほとんどの場合、水素は何らかのエネルギーを利用して製造される 2 次的エネルギーです。脱炭素エネルギーを利用して水素を製造すれば CO2 を排出しませんが、化石燃料を利用して水素を製造すれば、水素製造過程で CO2 を排出することになります。ここでは、水素については記載しません。

＜発電コスト検証 WG＞

脱炭素エネルギーについて考える場合、主な問題点となるのが発電コストです。先ず、現状の発電コストを紹介することから始めることにします。

日本の発電コストの情報としては、発電コスト検証 WG の報告が広く認められ、良く整理された情報と思います。東日本大震災後の 2011 年に出された報告を、2015 年に安全対策費等見直し、発電コストがアップした報告が出されています。2014 年と 2030 年モデルプラントの試算結果が報告されていますが、次頁に 2014 年モデルプラントの資料を示しました。

同資料の発電コストには、追加的安全対策費、CO2 対策費、事故リスク対応費、政策経費などが付加され、複雑なコスト構成になっています。なお、政策経費とは、発電事業者が発電のために負担する費用ではないが、税金等で賄われる政策経費のうち、発電に必要と考えられる社会的経費と説明されています。具体的には、原子力の場合は立地交付金、固定価格買取制度のある再生可能エネルギー電源の場合は、優遇された買取価格による利潤分です。原子力と固定価格買取制度のある再生可能エネルギー以外の電源については、政策経費は 0.01～0.04 円/kWh と比較的小さい値です。

各電源技術の本来の発電コストの意味合いから、固定価格買取制度の対象の再生可能エネルギー電源については、政策経費を除いた発電コスト、原子力その他の電源については、政策経費を含めた発電コストで、以下に 2014 年モデルプラントの比較を示します。

2014年モデルプラント試算結果概要、並びに感度分析の概要

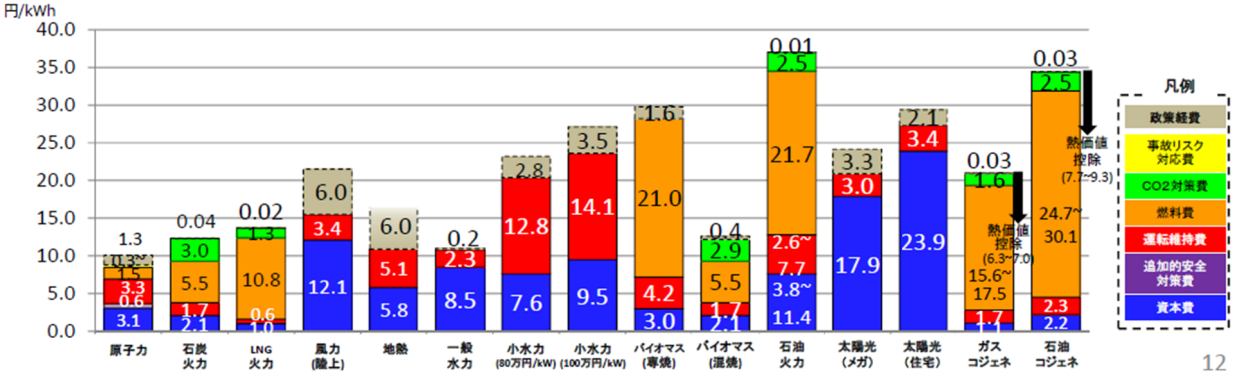
電源	原子力	石炭火力	LNG火力	風力（陸上）	地熱	一般水力	小水力 80万円/kW	小水力 100万円/kW	ﾊﾞｲｵﾏｽ（専焼）	ﾊﾞｲｵﾏｽ（混焼）	石油火力	太陽光（ﾒｶﾞ）	太陽光（住宅）	ｶﾞｽｺｼﾞｪﾈ	石油ｺｼﾞｪﾈ
設備利用率 稼働年数	70% 40年	70% 40年	70% 40年	20% 20年	83% 40年	45% 40年	60% 40年	60% 40年	87% 40年	70% 40年	30･10% 40年	14% 20年	12% 20年	70% 30年	40% 30年
発電ｺｽﾄ 円/kWh	**10.1～ (8.8～)**	**12.3 (12.2)**	**13.7 (13.7)**	**21.6 (15.6)**	**16.9※ (10.9)**	**11.0 (10.8)**	**23.3 (20.4)**	**27.1 (23.6)**	**29.7 (28.1)**	**12.6 (12.2)**	**30.6 ～43.4 (30.6 ～43.3)**	**24.2 (21.0)**	**29.4 (27.3)**	**13.8 ～15.0 (13.8 ～15.0)**	**24.0 ～27.9 (24.0 ～27.8)**
2011ｺｽﾄ等検証委	8.9～ (7.8～)	9.5 (9.5)	10.7 (10.7)	9.9～ 17.3	9.2～ 11.6	10.6 (10.5)	19.1 ～22.0	19.1 ～22.0	17.4 ～32.2	9.5 ～9.8	22.1 ～36.1 (22.1 ～36.1)	30.1～ 45.8	33.4～ 38.3	10.6 (10.6)	17.1 (17.1)

原子力の感度分析（円/kWh）	
追加的安全対策費2倍	+0.6
廃止措置費用2倍	+0.1
事故廃炉・賠償費用等1兆円増	+0.04
再処理費用及びMOX燃料加工費用2倍	+0.6

※1 燃料価格は足元では昨年と比較して下落。それを踏まえ、感度分析を下記に示す。

化石燃料価格の感度分析（円/kWh）			
燃料価格10%の変化に伴う影響（円／kWh）	石炭 約±0.4	LNG 約±0.9	石油 約±1.5

※2 2011年の設備利用率は、石炭:80%、LNG:80%、石油：50%、10%
※3 ()内の数値は政策経費を除いた発電コスト
※4 地熱については、その予算関連政策経費は今後の開発拡大のための予算が大部分であり、他の電源との比較が難しいが、ここでは、現在計画中のものを加えた合計143万kwで算出した発電量で関連予算を機械的に除した値を記載。



従来型電源として基準になる石炭火力が 12.3 円/kWh、LNG 火力が 13.7 円/kWh です。石油火力は 30.6～43.4 円/kWh で、最早石油は発電燃料に使うには高過ぎるということです。

原子力は追加的安全対策費や事故リスク対応費用を含んだものですが、10.1 円/kWh と石炭、LNG 火力よりも低い発電コストです。

＜再生可能エネルギー＞

再生可能エネルギーについて、発電コストを含め手短に紹介します。

一般水力は 11.0 円/kWh と石炭火力よりも発電コストが低いのですが、国内にはダム建設立地は、ほとんど残されていないでしょう。

以下は固定価格買取制度の対象電源で、政策経費を除いた発電コストを示します。小水力は規模により 20.4～23.6 円/kWh と高いのは、kW 当たりのメンテナンス費用が高くなるためでしょう。加えて、小規模発電を膨大な基数建設することで、まとまった電源比率とすることは困難でしょう。

バイオマス専焼は 28.1 円/kWh と高く、廃木材などが安価に入手できる場合以外は、経済的に成り立ちません。バイオマス混焼は 12.2 円/kWh ですから、バイオマスを膨大に入手できなくても、安価に入手できるなら、混焼する意義があると思います。

地熱は 10.9 円/kWh と安価ですが、地熱賦存量が乏しいことが問題です。国立公園法による規制を緩和すれば、ある程度増加の余地があるでしょう。但し、地熱熱水中のシリカの析出によるパイプの詰まりの問題があり、火力発電のように安定的に使える設備ではありません。過去に開発が行われた大深度地熱なら、賦存量は増加するでしょうが、発電コストも高くなることでしょう。

風力（陸上）は 15.6 円/kWh で、再生可能エネルギーとしては低い発電コストです。但し、これは現状の風力発電が設置されている風況の良い立地での発電コストです。残念ながら日本には、風況の良い立地は限られます。洋上なら風況の良い立地があるのですが、2030 年モデルプラントの風力（洋上）は 20.2～23.2 円/kWh とされています。なお、これも着床式の洋上風力

のコストです。着床式は水深 50m までと言われ、日本には遠浅の近海は少なく立地が限られます。浮体式の洋上風力は、発電コストは更に高くなり、新たな方式が開発されない限り、実用化は難しいと思います。

太陽光（メガ）は 21.0 円/kWh、太陽光（住宅）は 27.3 円/kWh です。2030 年モデルプラントでは、太陽光（メガ）は 11.0～13.4 円/kWh、太陽光（住宅）は 12.3～16.2 円/kWh まで低下すると想定されているようです。太陽光発電は、晴れの日でも発電するのは 1 日の 1/3 に過ぎません。昼間のピークロード用なら理に適っています。総発電電力量の数 10%を担う主要電力として使用するのには、昼夜の不均衡対策として蓄電池をセットで使用することが不可欠です。リチウムイオン電池を備えた場合、発電コストは倍増します。その場合にも、季節変動分の長期大容量電力貯蔵を別途に考えることが必要になります。

その他、発電コスト検証 WG の検討に含まれていないものとして、潮力や波力発電がありますが、特別に適した立地以外には実用化は難しいでしょう。

再生可能エネルギーは、どれをとっても否定的な評価になってしまいます。しかし、化石燃料を止めると決め、日本で火力発電を代替するとしたら何に依存すべきでしょうか。水力や地熱発電は、電源構成の数%程度しか増加の余地はないと思います。

バイオマスの実用性は、燃料を安価に入手できるかに掛かっており、主要電源となるのは難しいでしょう。6 章に記載するように、バイオマスは CCS と組み合わせて、大気中の CO_2 を回収貯留する機能が中心となるかもしれません。

世界全体の 2018 年推定実績で、再生可能エネルギーによる発電の 63%は水力発電です。風力発電が 19%、太陽光発電が 9%、バイオマスが 8%の順になっています。世界的に見ると、今後の再生可能エネルギーの拡大には、風力発電が大きな役割を果たすことになるでしょう。しかし、日本はそうならないでしょう。

風力発電は、恒常的に風が吹く場所でなければしようがありません。長さ 40～50m のブレードの風力発電を山岳部に運搬し設置することは多くの場

合困難です。日本周辺の洋上には風況の良い場所はありますが、水深 50m までと言われる着床式風力発電を設置できる遠浅の海は限られ、漁業権の問題や船舶航行の問題もあります。日本では、風力発電にそれほど多くを期待できません。

太陽光発電は 2030 年モデルでは、火力発電に近い発電コストになると予測されています。大量の太陽光パネルを設置する場所の問題はどうにかなると思います。最大の問題は、太陽光発電の大きい発電変動であり、基本的に電力貯蔵設備（バッテリー）とセットで使用することが必要でしょう。バッテリーは太陽光発電設備と同じくらい高価なものです。電力貯蔵の必要量を如何に少なくできるかが実用化の鍵になると考えます。水力やバイオマスなどの再エネ発電の変動運転で、太陽光発電の短期の発電変動をできるだけ平準化し、原発の運転により太陽光発電の発電量の季節変動を補うことにより、バッテリーの必要容量を小さくできるかが課題であると考えます。

高い電源比率の太陽光発電が実現できるかは、原発を含めてその他の電源との組み合わせ利用に掛かっていると考えます。

＜**原子力発電**＞

原子力について詳しく記載するだけの知見はありません。また、東日本大震災による福島第一原発の災害を経験し、多くの人が原発を撤廃したいと考えるのももっともと思います。原発に関連して一つだけ記載します。表-5.4 に、2018 年の化石燃料国別輸入額ベスト 5 を示しました。

表-5.4　化石燃料輸入トップ5（2018年）　　単位：百万US$

石油		天然ガス		石炭	
中国	251,898	日本	42,801	日本	25,400
米国	162,802	ドイツ	32,500	インド	24,600
インド	107,259	中国	31,745	中国	19,600
日本	80,582	韓国	23,189	韓国	16,500
韓国	80,393	イタリア	18,097	台湾	8,100

1）石油、天然ガスはGLOBAL NOTE、石炭はWorld's Top ExportsのWEBデータ。

日本は天然ガスと石炭の輸入額で世界一です。石油は中国、米国、インド

に次いで第 4 位です。中国やインドは、人口が日本の 10 倍ですから、比較の対象になりません。

現代社会でエネルギーは不可欠のものですが、日本は化石燃料をほとんど産出せず、大量の化石燃料を輸入することで社会が成り立っています。平時は資金さえあれば問題ないのでしょうが、国際紛争や自然災害などにより化石燃料輸入が途絶えるリスクがあります。そのため、安定供給の観点で石炭、石油、天然ガス、原子力とエネルギーの多様化を図ってきました。

化石燃料の使用が無くなった世界は、どのような社会になるか正確には想像し難いものです。しかし、再生可能エネルギーに全面的に支えられた社会は、世界トップの化石燃料輸入に依存する現在の日本よりも、エネルギーの安定供給の点でもっと脆弱になると思われます。せめて、再生可能エネルギーと原子力を併用することが望ましいと考えます。

6. CO2 回収貯留（CCS）

CO2 の回収貯留（Carbon dioxide Capture and Storage, 略称 CCS）は、火力発電のボイラ排ガスなどから CO2 を分離回収し、地下や海底下深くにに隔離貯留する技術です。2010 年頃から急速に関心が高まりました。

CO2 の分離回収技術には、化学吸収法を中心に、その他、物理吸収、膜分離、物理吸着、深冷分離などの方法があります。貯留場所としては、生産が終わった油井やガス井、地下や海底下 1,000m 以上の帯水層などが主なものです。高圧で液体などの状態の CO2 を、流動が無い深海に貯留することも検討されましたが、長期隔離の確実性が問題とされ、海洋汚染防止のための国際条約で禁止されています。

CCS のうち回収した CO2 を有効に利用する場合は、CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）と呼ばれます。CO2 の有効利用として、原油増進回収（EOR）は多数の実績があり、その他、化学原料としての利用などが検討されています。

6.1 CCS に対する懸念

CCS を付帯する火力発電の発電コストが、再生可能エネルギーと同水準なら、温暖化対策技術として検討に値することになります。

化石燃料に係わる仕事に携わっている人は沢山います。また、化石燃料による収入や財政収入を得ている個人、企業、国家も沢山あります。温暖化防止のために、化石燃料が無くなる時代が到来したら大変なことです。それらの人達にとって、温暖化防止と化石燃料の使用を両立させる CCS は願ってもない技術と言えるでしょう。CCS が期待通りの経済性を有するものなら、現在想定されている以上に広く普及するかもしれません。

しかし、温暖化防止は、100 年、200 年の長期の視点で取り組む課題です。膨大な量の CO2 を 1,000m 以上の地下深くに圧入貯留することを、長期に続けることが可能なのかという想いがあります。

世界全体では、かなり大きな CCS のポテンシャルがあると評価されているようです。日本については、日本海の海底に CCS のポテンシャルがあると

期待されています。しかし、石油が産出しない日本では、地質データが乏しく、確りした事前調査をもとに CCS プロジェクトを実施することが必要でしょう。後述する Snohvit プロジェクトのように、運転開始後に CO2 の貯留容量が想定より少ないことが分かった事例もあります。原油を輸入するように、回収した CO2 をタンカーで海外には運び、有償で地下貯留を頼むことになったのでは困ります。

加えて、安全性に関する知見も、EOR プロジェクトを除くと、未だ数件の運転経験に限られます。CCS の安全性についても真剣に議論されているようですが、未経験のリスクに対する想像力は乏しいものです。

＜膨大な CO2 貯留量＞

CCS に関する最大の問題は、想定されている CO2 貯留量の膨大さです。IEA は 2017 年のレポートで、2060 年時点で CCS により年間 49 億トンの CO2 削減を担うことが期待されていると記載しています。これは 2010 年の世界の GHG 排出量の約 10%、CO2 排出量の 15%に相当します。IPCC も 5 次評価報告書で、CCS の利用なしには 2℃未満の温暖化防止が難しいことを指摘しています。

日本を例に、GHG 排出の 10%の CO2 を CCS で貯留することを考えてみましょう。日本の 2018 年度の GHG 排出量は CO2 換算で 12 億 4,400 万トンと報告されています。その約 10%として、1 億 2,440 万トンの CO2 を CCS で貯留することを考えます。それがどれほど膨大な量か、比較を表-6.1 に示しました。

表-6.1　CCSによる日本のGHG排出量の10%貯留と各種量の比較

項　目	重量　トン	容積　m3	備　考
年間GHG排出量の10%	1億2,440万	1億4,000万*	2018年GHG排出実績による
福島第一原発汚染水貯蔵量	約114万	114万	2019年7月18日現在の値
年間都市ごみ排出量	4,600万		日本の都市ごみ排出は1人1日概略1kg
年間原油輸入量	1億5,040万*	1億7,700万	2018年度原油輸入実績

注）*貯留条件を常温20MPa前後としてCO2の比重0.9、原油の比重0.85で換算

日本で処分できずに膨大な量が溜まり困っている代表例は、福島第一原発

の汚染水でしょう。見渡す限りの貯蔵タンク群の写真を報道で目にします。汚染水貯蔵量は、2019 年 7 月 18 日現在で 114 万 5,800m3 と報じられています。汚染水 1m3 は約 1 トンですから、重量では約 114 万トンです。CCS により 1 年間に貯留する CO2 の量は、9 年間に福島第一原発に溜まった汚染水の 109 倍です。

別の例を紹介します。日本で都市ごみ排出量は、1 人 1 日に約 1kg と言われます。そのため、人口 30 万人の都市なら、1 日のごみ焼却量が 30 トンの焼却施設が設けられています。日本全体なら、年間の都市ごみ排出量は 4,600 万トンになります。CCS による年間の CO2 の貯留量は、日本全体の都市ごみ量の約 2.7 倍になります。

CCS により膨大な量の CO2 貯留が想定されていることが分かると思います。長期にわたり、膨大な CO2 を地下 1,000m を超える深部に貯留し続けることが可能か、というのが私の懸念です。

批判を覚悟でもう一つ比較例を紹介します。高レベル放射性廃棄物の問題です。処分場所が決まらず困っている問題で、原発をトイレの無いマンションと称する人もいます。高レベル放射性廃棄物は、ステンレス製容器（キャニスター）の中でガラス固化体とし、地下 300m 以深の安定な地層に処分する計画になっています。ガラス固化体を入れたキャニスターは、直径約 40cm、高さ約 1.3m、重量が約 500kg です。これまでに発生した高レベル放射性廃棄物と今後発生する分を合わせ、40,000 本分のキャニスターを地層処分できる場所を探しています。処分する総重量は約 2 万トンです。

悪い冗談と非難されるかもしれませんが、キャニスターに入れた 2 万トンの高レベル放射性廃棄物を 300m 以深の安定な地層に処分することと、毎年 1 億トン以上の CO2 を地下 1000m 以深の帯水層に貯留することでは、どちらが大変な事か、それほど明確ではないような気がします。

＜CCS コスト＞

CCS を付帯する発電コストがいくらになるか、特に日本については、まだ信頼できるデータは無いように思われます。

CO2 貯留立地の予備的調査により、日本海海底下に貯留立地のポテンシャルがあることが示されています。一方、CO2 の排出源である現状の火力発電所は、電力需要地に近い太平洋岸の都市部に集中しています。両者を結びつけるには、日本列島を横断する CO2 パイプラインが必要になります。

日本の都市部や山岳部を通るパイプラインは、中東の産油国などの場合と比べ驚くような建設費になります。そのため、CO2 の船舶輸送も検討されているようです。

火力発電所などの CO2 の発生場所、CO2 の貯留場所と、CO2 パイプラインのルートを決めなければ、信頼できる CCS コストは試算できません。とはいえ、コストが全く分からないことには議論になりません。

経済産業省の審議会資料などに紹介されている CCS コストの試算例としては、2005 年に試算（2005 年二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業成果報告書）された CCS コスト 7,300 円/トン CO2 があります。これは、距離 20km のパイプラインによる CO2 輸送を想定したものです。石炭火力の kWh 当たりの CO2 排出量を 0.864kg とすると、6.3 円/kWh になります。

また CO2 輸送に関し、20km のパイプラインに加え、船舶輸送として約 4,000 円/トン CO2 を想定した試算（CCS ワークショップ 2007 年、RITE）もあります。この場合は次のように、CCS コストは 9.8 円/kWh となります。

(7.3+4.0)×0.864kg/kWh = 9.8 円/kWh

5 章で紹介した発電コスト検証 WG の 2030 年モデルで、石炭火力の発電コストは CO2 対策費を除くと 8.9 円/kWh、CO2 対策費が 4.0 円/kWh と想定されています。CO2 対策費の代わりに CCS を設けることにすると、CCS を付帯した石炭火力（2030 年モデル）の発電コストは下記となります。

CO2 の船舶輸送なし 6.3 円/kWh + 8.9 円/kWh = 15.2 円/kWh

CO2 の船舶輸送あり 9.8 円/kWh + 8.9 円/kWh = 18.7 円/kWh

この CCS 付き石炭火力の発電コストは、現状の発電コストよりもかなり高く、また、5 章で紹介した発電コスト検証 WG の 2030 年モデルの太陽光発電よりも高いものです。しかし、太陽光発電のように発電変動がなく、電力貯蔵設備を必要としないこと考慮すれば、CCS は太陽光発電に劣らない利

点があります。CCS コストが高い場合には、LNG 火力に使用した方が CO2 貯蔵量は少なくて済むため、総合した発電コストは、石炭火力の場合より低くなるでしょう。

6.2 過去の経緯

＜EOR プロジェクト＞

温暖化問題に関心が持たれ始めた 1990 年前後から、温暖化防止のために CO2 を地下貯留する考えはありました。また、1970 年代から米国では、その種の商用設備が建設稼働していました。

20 世紀初期に油田が発見された米国テキサスでは、自噴しなくなり産出量の低下した油井に CO2 を圧入する原油増進回収法（EOR）が行われていました。主にコロラド山中の CO2 ガス田から得られた CO2 を超臨界状態で、パイプラインで数百 km 南下したテキサスの油井に輸送し圧入するものです。

＜2006 年の調査＞

2006 年に私は、仕事で CCS について技術調査を行ったことがあります。当時は、まだ CCS は温暖化防止に必須の技術と考えられていなかったように思います。

EOR の実施により、CO2 の輸送と貯留の基本的技術はあったのですから、火力発電のボイラ排ガスから、CO2 を経済的に回収する技術の開発が中心であったと思います。日本でも、発電プラントのメーカが研究開発結果を報告していました。

2006 年の調査で見られた商業・実証規模の CCS プロジェクトの多くは EOR を目的としたものでした。表-6.2 に示すように、ほとんどが北米のもので、30 件ほどの EOR のプロジェクトが見られました。経済合理性があったために実施されたものと思います。

表−6.2　北米のEOR用CO2パイプライン（2006年調査）

No.	パイプライン名	長さ km	配管径 in	設置場所
1	Anadarko Powder River Basin CO_2 PL	201	16	ワイオミング
2	Anton Irish	64	8	テキサス
3	Bravo	351	20	ニューメキシコ、テキサス
4	Canyon Reef Carriers	224	16	テキサス
5	Centerline	182	16	テキサス
6	Central Basin	230	26-16	テキサス
7	Chaparral	37	6	オクラホマ
8	Choctaw	177	20	ミシシッピ
9	Cordona Lake	11	6	テキサス
10	Cortez	808	30	テキサス
11	Dakota Gasification	328	12	ノースダコタ/カナダSask
12	Dollarhide	37	8	テキサス
13	El Mar	56	6	テキサス
14	Enid-Purdy (Central Oklahoma)	188	8	オクラホマ
15	Este I - to Welch, Tx	64	14	テキサス
16	Este II - to Salt Creek Field	72	12	テキサス
17	Ford	19	4	テキサス
18	Joffre Viking	13	6	カナダ−アルバータ
19	Llano	85	12-8	ニューメキシコ
20	Pecos County	42	8	テキサス
21	Raven Ridge	257	16	ワイオミング/コロラド
22	Sheep Mountain	656	24	テキサス
23	Shute Creek	48	30	ワイオミング
24	Slaughter	56	12	テキサス
25	Transpetco	177	8	テキサス
26	Val Verde	134	10	テキサス
27	W. Texas	97	12-8	テキサス、ニューメキシコ
28	Wellman	40	6	テキサス
29	White Frost	18	6	ミシガン
30	Wyoming CO_2	180	20-16	ワイオミング

EOR 以外で地下帯水層に CO2 を貯留する CCS プロジェクトとしては、下記が見られるだけでした。

Sleipner CO2 Injection　ノルウェー　運転開始 1996 年

In Salah CO2 Storage　アルジェリア　運転開始 2004 年

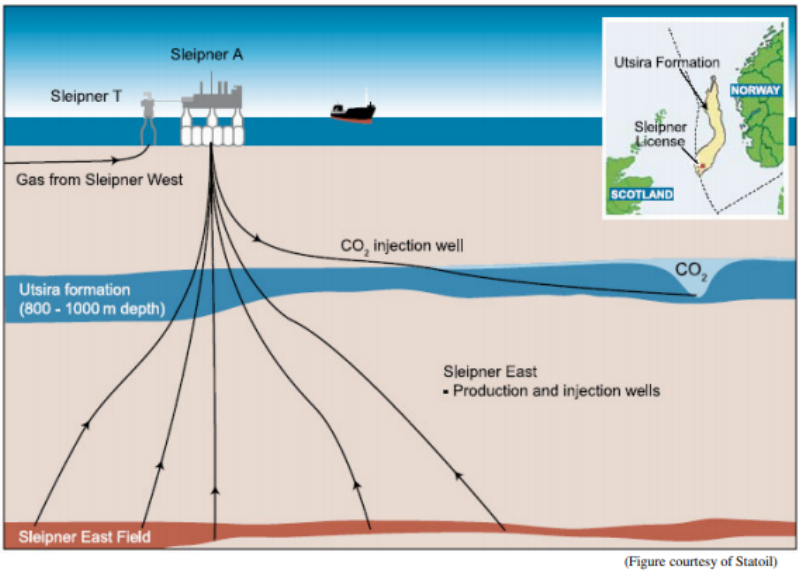
Snohvit CO2 Injection　ノルウェー　運転開始 2008 年

-- Sleipner プロジェクト

Sleipner プロジェクトは CCS の先駆的商用 CO2 貯留プロジェクトで、ノ

ルウェーStatoil 社が実施したものです。北海の Sleipner West フィールドで産出される天然ガスには約 9.5%の CO2 が含まれており、販売するには CO2 を除去する必要がありました。分離した CO2 を大気放散すると、ノルウェーの炭素税が掛かることを避ける目的で CO2 貯留が行われたものです。

Sleipner フィールドで、天然ガス産出層より上部に位置する海底下 800m 以上の帯水層に貯留されたものです。1996 年に運転開始し、年間約 100 万トンの CO2 が貯留されました。



出所：Statoil 社画像

-- Snohvit プロジェクト

Snohvit プロジェクトは、ノルウェー北部バレンツ海にある Snohvit フィールドを含む 3 つの海底ガス田からの天然ガスにより、年間 4,300 万トンの LNG を生産するプラントに関するものです。同プラントは、Statoil 社など 8 社の所有で、操業は Sleipner プロジェクトと同じ Statoil 社が行っています。

採取された天然ガスは 160km の海底パイプラインで陸上の LNG プラン

トに送られ、天然ガスに含まれている CO2 が分離され、CO2 を再び Snohvit フィールの海底下の帯水層に注入するものです。帯水層はメインの天然ガス層のおよそ 60m 下にあり、Snohvit LNG プロジェクトの 30 年間の運転により分離される およそ 23 百万トンの CO2 の貯蔵が可能と考えられました。

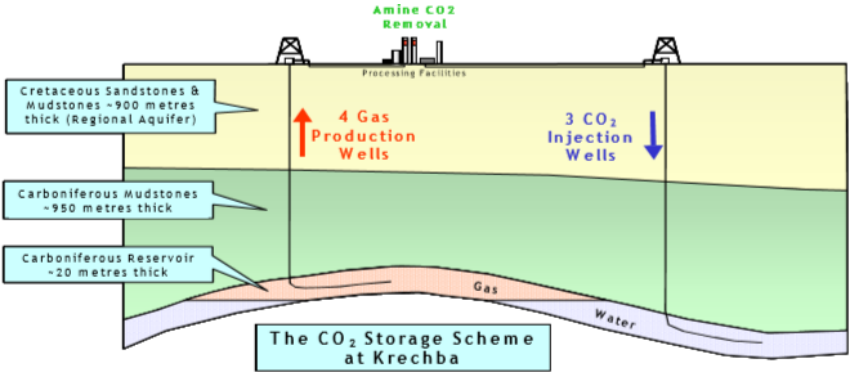
なお、2008 年から CO2 貯留運転が開始されましたが、2010 年の初めに Statoil 社は、Snohvit 注入サイトが想定よりも貯蔵容量が少ないことが分かったと発表しました。貯留容量を増やすために新規注入井の掘削や地層破壊の対策がとられているとのことです。

-- In Salah プロジェクト

In Salah プロジェクトは、アルジェリア中央部の 4 個所のガス田からの天然ガスから除去された CO2 を、圧縮、水分除去、パイプライン輸送し、3 箇所の注入井から深さ 1,900m の帯水層に貯留するものです。BP、Statoil 社、Sonatrach 社の 3 社の JV により実施されました。2004 年に貯留運転が開始され、380 万トン以上の CO2 が地下貯留されました。

前記 2 プロジェクトと異なり陸上の CCS であり、多様な地球物理・化学的方法を用いて CO2 の貯留性能がモニタリングされ、CCS に資する基礎データが得られた報告されています。モニタリング手法には、タイムラプス地震、微小地震、CO2 ガストレーサーを使用した坑口サンプリング、ダウンホールロギングおよびコア解析、地表ガスモニタリング、地下水帯水層モニタリング、衛星監視データが含まれるとのことです。

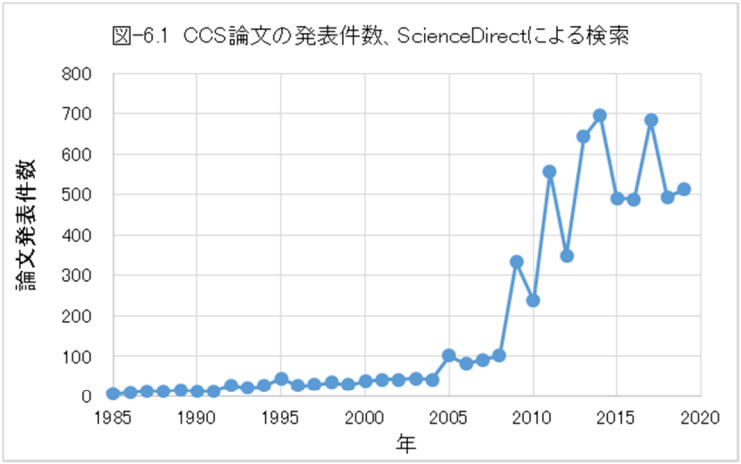
2006 年の筆者の技術調査では、その他、DF1 プロジェクト（Decarbonised Fuel Project）の情報もみられました。BP が計画中のもので、北海油田の天然ガスの改質で水素を製造、改質により生成する CO2 を回収、既設のガス火力発電所を水素を用いたカーボンフリー発電に転換し、CO2 を既設のオフショアパイプラインを使って海底油田に輸送し、EOR により油田の寿命をおよそ 20 年延長させるという興味深いものでした。しかし、補助金が得られず実行に至らなかったようです。他にも、計画段階に留まった CCS プロジェクトはあったものと思われます。



出所: UNFCCC SBSTA CCS Workshop, September 8th 2011

6.3 なぜCCSが注目されるのか

2006年の時点でCCSにそれなりに関心が持たれていましたが、温暖化防止に不可欠の技術であるとの認識は無かったように思います。しかし、2010年前後には、CCSに対する関心が急速に高まりました。



そのことを定量的に示すため、CCSに関する技術論文の発表件数の推移を調べてみました。科学技術論文検索としてポピュラーな検索システムであるScienceDirectを用い、論文タイトル、要約および検索システムのキーワード

に CCS が含まれる論文の発表件数を調べました。図-6.1 に調査結果を示しました。CCS という略称をキーワードに用いたため、見落とし論文もあるかもしれませんが、論文発表件数がどのような比率で変化したかを示すものと理解して下さい。

地球温暖化が一般に関心が持たれるようになったのは 1990 年前後ですが、2004 年頃までは、CCS に関する論文発表件数は少ない水準でした。2005 年に少し増加し、2009 年から急激に増加したことが分かります。

2005 年に IPCC の特別レポート"Carbon Dioxide Capture and Storage"が発行されたことや、前述した In Salah プロジェクトなどの運転結果の情報も影響したものと想像されます。

＜関心が高まった理由＞

なぜ CCS に関心が高まったのか、私は情報を持っておらず、以下に記載することは私の推測であることをお断りしておきます。

IPCC の 5 次評価報告書では、2℃未満 1.5℃に温暖化を抑制するには、GHG の排出をゼロとするだけでなく、既に大気中にある CO2 を減らすことも必要であることが記載されています。バイオマスを燃料に火力発電を行い、CCS によりボイラ排ガスから CO2 を分離回収し地下に貯留すれば、大気中の CO2 を削減することになります。バイオマスを焼却して CO2 が発生しても、CO2 は増加しないと算定されるためで、地下に貯留した CO2 の分だけ CO2 が減少することになります。

大気中の CO2 を減らす技術としては、植林の拡大など植物を利用する方法くらいで、バイオマス燃焼と CCS を組み合わせた方法は、数少ない大気中の CO2 を削減する技術です。そのことが、IPCC の 5 次評価報告書で CCS が温暖化防止に不可欠の技術と記載された理由と思います。

しかし、もう一つの理由として考えられるのは、もっと現実的な問題です。2000 年代に入った最初の 10 年間、世界を眺めても温暖化防止に熱心なのは EU くらいでした。GHG 排出量の多い米国は、ブッシュ政権の 2001 年に京都議定書からの離脱を宣言しました。また、カナダも 2011 年に正式に離脱

を表明しました。温暖化防止を推進している人たちは、その推進のためには巨体な国際石油資本や石炭産業の賛同を得ることが必要と考えたことでしょう。CCS を導入すれば、化石燃料の使用が無くならなくて済むのですから、温暖化防止に対する石油産業や石炭産業の協力を得易くなります。IPCC は 5 次評価報告書を作成する段階で、そのような方向に舵を切ったのではないかと私は想像しています。

＜CCS に関する私見＞

CCS を導入すれば、温暖化防止と化石燃料の使用が両立します。しかし、膨大な CO2 を長期に亘り持続的に地下深くに貯留し続けることは、まともな考えとは思われません。

CCS は、設備寿命が残っている火力発電を使い続けるためや、セメント製造や高炉製鉄など CO2 排出を無くすることが困難な産業プロセスに使用すべきです。例えば高炉製鉄では、酸化鉄である鉄鉱石をコークスで還元して銑鉄を製造するため、大量の CO2 が発生します。CO2 排出の大幅削減のため、水素による還元の開発も行われています。新プロセスを開発しても、削減できない CO2 の対応策として CCS を利用すべきです。

CCS のもう一つの用途は、電力供給を大幅に太陽光発電に依存する時代に、発電変動を平準化するための利用です。太陽光発電は、晴れた日でも 1 日の 1/3 しか発電しないのですから、蓄電池と一対で利用することが不可欠です。短期の発電変動は、主に揚水発電とリチウムイオン電池などにより平準化するとしても、太陽光発電には、発電電力量の季節変動があります。季節変動による大容量の電力を長期貯蔵するのにはリチウムイオン電池ではあまりにも不経済です。対策として、太陽光発電の余剰電力で、水を電気分解し、水素の形でエネルギー貯蔵して、発電量電力が足りない冬季に発電することが検討されています。しかし、水素貯蔵方式では、2/3 の電力がロスになります。その問題を解決するため、太陽光発電の発電電力量が足りない季節に、CCS 付きの火力発電を運転することで発電不足を補う方法が有効になります。太陽光発電による発電変動については 7 章に記載しました。

7. 高比率の太陽光発電シミュレーション

7.1. 概要

GHG 排出ゼロのためには、再生可能エネルギーに転換すべきと言われています。原子力という選択肢もありますが、多くの人は原発の廃止を強く望んでいます。

5.3 項の再生可能エネルギーにも記載しましたが、日本では、水力発電を増やす余地はあまりありません。地熱発電は主要電源の一つになることもないでしょう。また、風力発電に適した風況の良い立地も多くありません。再生可能エネルギーの発電量を大幅に増やすには、消去法的に太陽光発電に依存せざるを得ません。しかし、太陽光発電は、発電変動が大きい欠点があります。

本章では、太陽光発電の比率を大幅に増やした場合、どのような不都合が生じるかを定量的に示しました。発電量の変動問題を検討するための、日本の条件に基づくシミュレーションを探したのですが見つかりませんでした。そのため、近似的な手法ですが、全国電力需給の毎時変動シミュレーションを自分で試みました。気象庁は全国 41 箇所の地点で、1時間ごとの日射量（全天日射量）の測定データを公表しています。2018 年の1年間のデータを用い、日本の総電力量の 60%を太陽光発電が占める場合を想定し、1時間ごとの発電電力量の変動を試算しました。試算精度は少し悪くても、およその状況を見える形で定量的に示すことを目的としたものです。

シミュレーション結果からは、多くの問題が定量的に明らかになりました。また、検討結果は、太陽光発電のみに大幅に依存するのではなく、原発や CCS 付き火力発電を併用すべきことを示唆していると考えます。

7.2. 想定する電源構成

2050 年までに GHG を 80%削減するという長期目標に従い考えます。このシミュレーションの検討を始めた 2019 年初めの時点では、GHG80%削減に対応する日本の電源構成の想定は、殆ど見掛けなかったように思います。そのため、下記のように電源構成を想定してシミュレーションを行いました。

パリ協定の日本の「約束草案」では、2030 年の温室効果ガスを 2005 年度比で 26%削減することになっています。2030 年の電源構成は、再生可能エネルギーの水力、バイオ・廃棄物、地熱の合計は約 15%です。深部地熱のような新たな取り組みをしない限り、これ以上増やす余地は少ないと思われ、2050 年の時点でも、精々20%くらいと想定しました。

前章に記載した CCS の適用は、CO2 排出をゼロにできない工業プロセスを優先すべきと考えると、CCS 付き火力の電源比率は数%でしょう。このシミュレーションでは、単純化して太陽光発電の問題を明確にするため、CCS 付き火力は考慮しませんでした。

化石燃料発電を最低限の 5%くらいとし、原発をゼロにすると仮定すると、残りは太陽光発電と風力発電に依存することになります。

2030 年想定の太陽光発電は 7.0%、風力発電は 1.7%です。それを 2050 年までに、大幅に増加させなければなりません。太陽光発電が 60%くらい、風力発電が 15%くらいと想定しました。

風力発電が少ない理由は、日本には偏西風を有効に活用できる立地が乏しいためです。洋上なら立地はあるのですが、日本周囲に遠浅の近海は少なく、水深 50m までと言われる着床式風力発電を設置できる場所は限られます。浮体式の風力発電は開発途上で、経済的に成り立たないだろうと私は考えています。

消去法的に太陽光発電への依存が大きくなります。2050 年の日本の電源構成を下記のように想定してシミュレーションを行いました。

2050 年の日本の電源構成の想定例

化石燃料発電	5%
水力・バイオ・地熱	20%
太陽光発電	60%
風力発電	15%

7.3. 日射量と太陽光発電出力

太陽光発電（以下 PV と略）モジュールに到達する太陽光の波長別日射照

度は、太陽高度などにより変化するため、一定ではありません。また、PV モジュール表面での太陽光の反射もあります。それらは PV 出力に影響するため、一般的に測定されている全天日射強度と PV 出力は、正確には比例しないことが指摘されています。また、モジュール温度も PV 出力に影響します。なお、全天日射強度から精度良く PV 出力を予測する研究も行われていますが、その様な研究は、確りした研究機関が行う仕事でしょう。

一方、全天日射強度と PV 出力は、比例関係に近いことが報告されています。以下に示すシミュレーションでは、国内にある多様な PV 設備をそのままに、合計設備容量を 8 倍以上に増やすことで、PV による発電電力量の比率が総発電電力量の 60%に達した場合を想定したものです。

発電量のどれほど大きな変動が生じ、その対応策として、どれほど大容量の電力貯蔵が必要になるか、見える形で概略を示したいと試みたものです。近似計算ですが、それほど見当外れではないだろうと考えています。以下に具体的な方法を示します。

7.4. シミュレーション方法

① 国際エネルギー機関（IEA）の統計データには、2018 年の日本の正味総発電電力量は 1.04 兆 kWh、PV による発電電力量は 724 億 kWh と示されています。このシミュレーションでは、年間総発電電力量は区切りが良い 1 兆 kWh とし、PV は 60%の 6,000 億 kWh として検討しました。

② 同じ IEA の統計には、2018 年の月ごとの PV の発電電力量は、図-7.1 のように示されています。なお、2018 年の年初に比べて年末の PV 設備の設置容量は約 10%増加したと推定されます。年初の PV 設備設置容量に換算した毎月の発電電力量を基礎データとし、年間合計の PV 発電電力量が 6,000 億 kWh になるように、毎月の PV の発電電力量を設定しました。

③ 日本全体では晴れた地域もあれば曇った地域もあり、PV 発電量の変動は平準化されます。日射量が報告されている全国 41 地点について、各々PV 設

置容量のデータがあれば、日射量の荷重平均をすべきです。特に想定すべき日本全体の PV 設置容量分布が無かったため、シミュレーションで日射量は、41 地点の単純平均値を用いました。1 時間ごとの全天日射量のサンプルを図-7.2 に示しました。

図-7.1　日本の太陽光発電の月間発電電力量(2018年)
出所:IEA統計データ

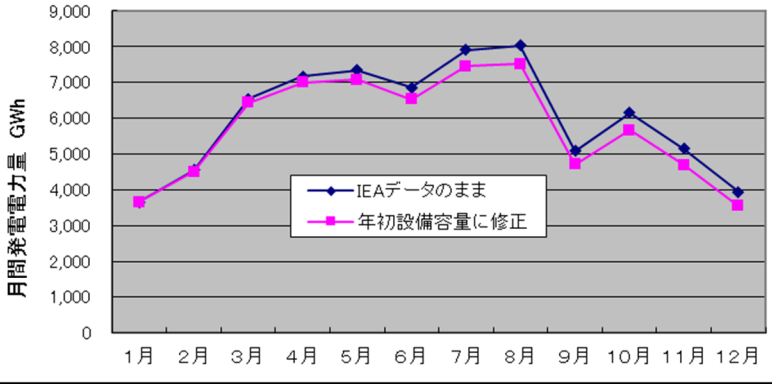
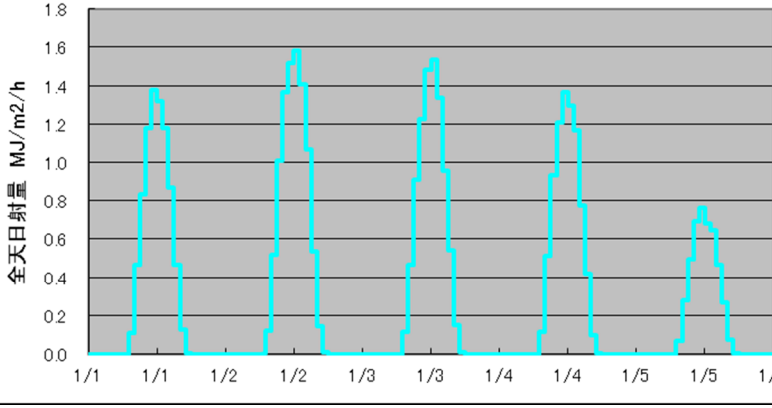


図-7.2　全国41箇所平均の全天日射量例
2018年1月1日～5日,　出所:気象庁 過去のデータ



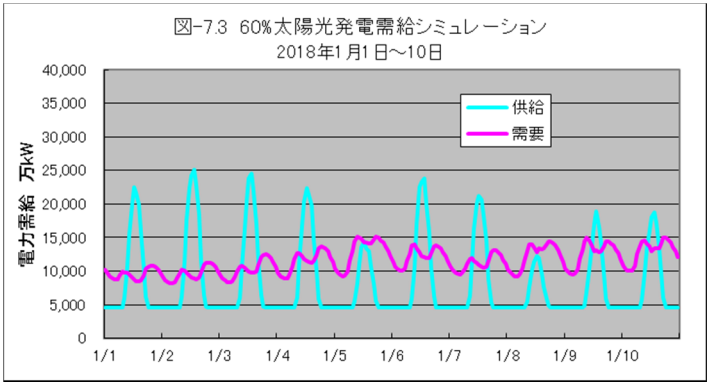
④ PV 発電電力量は、PV モジュール温度に依存します。モジュール温度は、気温の他に日射量や風速にも依存し、検討はそれほど簡単ではありません。

温度の影響などを考慮するため、月ごとの PV 総発電電力量を、月ごとの総日射量と 1 時間ごとの日射量の比率で比例配分することで、1 時間ごとの PV 発電電力量を試算しました。

⑤ 電力需要は、探せば全国のデータがあるのかもしれませんが、2018 年の東京電力での 1 時間ごとの電力使用実績データ（合計 2,912 億 kWh）を参考に、その比率で総電力量が 1 兆 kWh になるよう設定しました。

⑥ 総電力量の 60%を占める PV 電力量は、日射量に応じて変動するものとし、残りの 40%は、年間を通じて一定としました。40%は 7.2 項に記載したように、風力発電に、水力、地熱、バイオマス・廃棄物発電と、最小限の化石燃料発電を加えたものです。
40%を一定電源としたのは、主に単純化して PV による変動を示したかったためです。加えて、風力発電については、発電変動の適切な想定を思い付かなかったこともあります。また、水力発電のうち揚水発電は、変動運転を行うことになると思いますが、後述する電力貯蔵の一部を担うものと考えました。

7.5. 電力需給



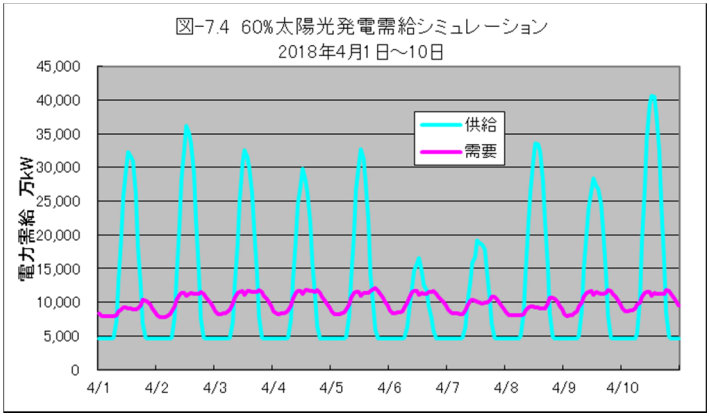


図-7.4 60%太陽光発電需給シミュレーション
2018年4月1日～10日
電力需給 万kW
45,000
40,000
35,000
30,000
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0
4/1
4/2
4/3
4/4
4/5
4/6
4/7
4/8
4/9
4/10
供給
需要

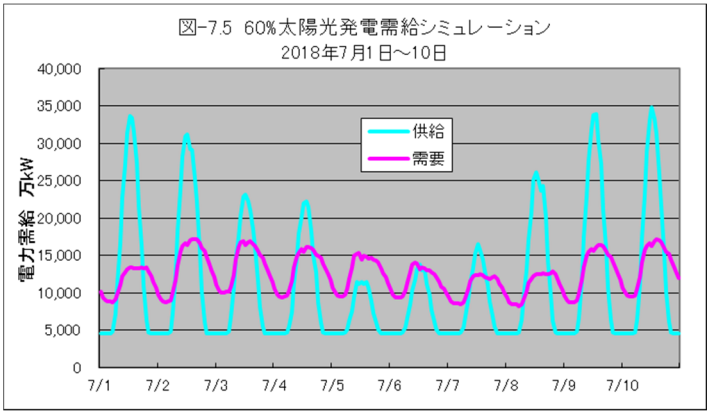


図-7.5 60%太陽光発電需給シミュレーション
2018年7月1日～10日
電力需給 万kW
40,000
35,000
30,000
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0
7/1
7/2
7/3
7/4
7/5
7/6
7/7
7/8
7/9
7/10
供給
需要

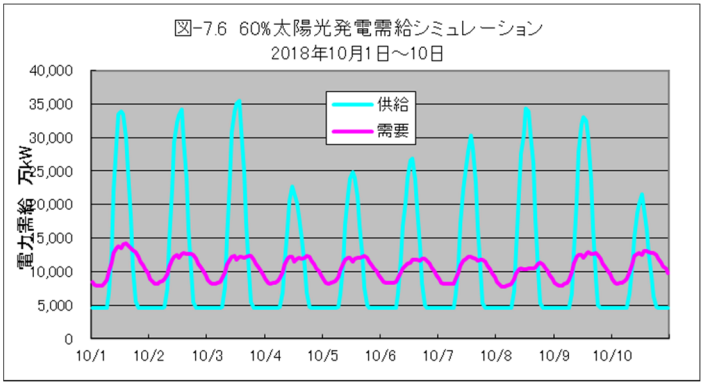
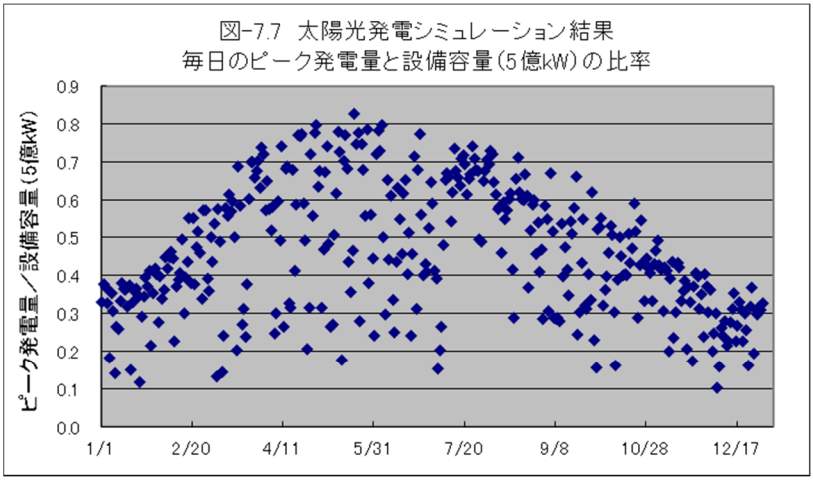


図-7.6 60%太陽光発電需給シミュレーション
2018年10月1日～10日
電力需給 万kW
40,000
35,000
30,000
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0
10/1
10/2
10/3
10/4
10/5
10/6
10/7
10/8
10/9
10/10
供給
需要

60%太陽光発電需給シミュレンーションの結果の一部を、図-7.3～図-7.6 に示しました。電力供給は夜間には不足し、昼間には正午頃を中心として大幅に過剰になります。

7.6. PV のピーク発電量

第一の関心は、PV のピーク発電量の大きさでしょう。毎日のピーク発電量と PV 設備 kW の比率の 365 日分のデータを図-7.7 に散布図で示しました。



日本に導入されている PV は、累積設備容量で約 1/4 が住宅用、約 3/4 がメガソーラーです。平均の設備利用率は、住宅用が約 12%、メガソーラーは約 14%と言われますので、両者を併せた全体の設備利用率は約 13.5%になります。設備利用率 13.5%で、年間 6,000 億 kWh を発電するには、逆算すると PV の設備容量は 5.07 億 kW になります。

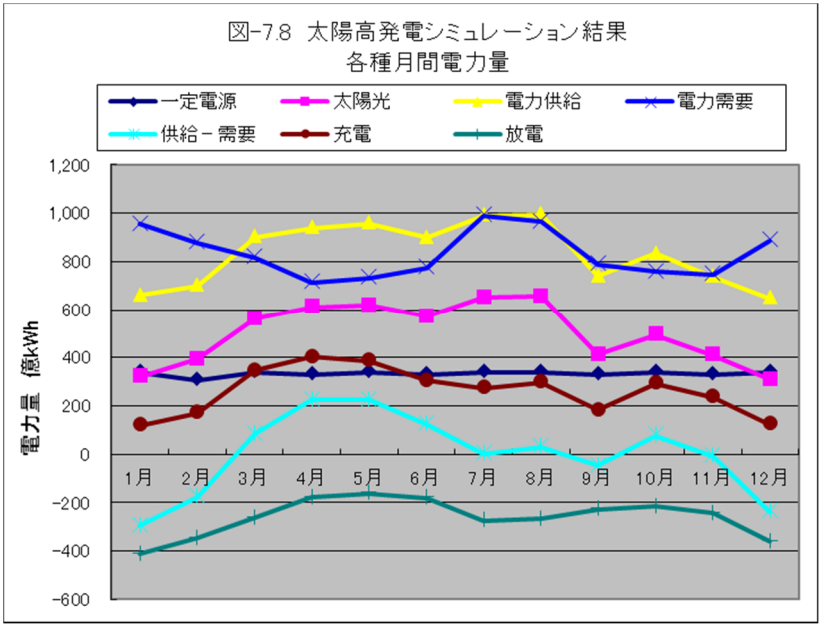
図-7.7 は、PV のピーク発電量を 5 億 kW で割ったグラフになっています。冬季のピーク発電量は、設備 kW の 0.4 以下であるのに対し、5 月前後に最大では設備 kW の 0.8 に達しています。

余談になりますが、2018 年の最大のピーク発電量は、5 月 20 日の 11 時から 12 時のものです。全天日射量が 3 MJ/m2/h 以下の地点は網走、静岡、松江、長崎、鹿児島の 5 箇所で、その他 36 箇所の平均値は 3.58 MJ/m2/h で

す。

7.7. 月ごとの各種電力量

図-7.8 には、月ごとの各種電力量を示しました。PV 発電電力量は、冬季の 12 月、1 月が低く、3 月から 8 月頃が高水準です。40%を占める一定電源は、時間当たり一定のため月間値は少し変動しています。



電力需要は、冬季の 12 月と 1 月、夏季の 7 月と 8 月が高水準です。その結果、12 月と 1 月に大きな電力供給不足が生じています。

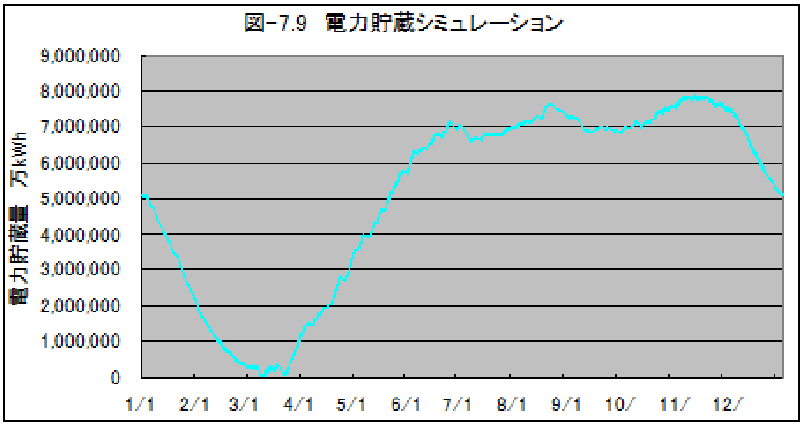
このシミュレーションで、1 月の電力不足は 300 億 kWh 近くに達し、約 320 億 kWh の 1 月の PV 発電電力量に匹敵する値です。一方、電力供給過剰は 4 月、5 月が最大です。PV 比率が高くなると、昼夜の電力変動に加え、発電電力量の季節変動も大きな問題になることが分かります。

電力需給が均衡しない場合には、電力貯蔵設備を設け、充電か放電で調整することが必要になります。図-7.8 には、月々の充電だけと、マイナスで示した放電だけを各々合計して示しました。年間の充電量と放電量は等しく、

このシミュレーションの場合、約 3,100 億 kWh になっています。PV の年間発電電力量は 6,000 億 kWh ですから、PV 発電量の約半分は、電力貯蔵設備への充放電を経た上で使用されることになり、電力貯蔵に伴う電力損失が問題になります。

7.8. 電力貯蔵の必要量

図-7.9 には、電力貯蔵設備を設け、充電・放電により電力需給の均衡を図るシミュレーションを示しました。冬季には PV 電力量が需要を下回り、電力貯蔵設備からの放電で補われ、4 月から 6 月頃は、PV 発力量が過剰で、電力貯蔵設備に充電されます。



なお、シミュレーションでは、電力貯蔵量がマイナス域に入らないよう、1 月初めの電力貯蔵量を約 500 億 kWh と高い値に設定しています。また、年間合計の電力需給は等しくしているので、年初と年末の電力貯蔵量は等しくなっています。

図-7.9 のデータには PV の昼夜の発電変動も含まれていますが、グラフでは殆ど認識できない小さなギザギザで示されています。それに対し、季節による電力貯蔵量の変動は 800 億 kWh（80,000GWh）近くで、非常に大きいことが分かります。

日本の既存の揚水発電の電力貯蔵容量は 130GWh と言われ、それより遥か

に大きな値です。また、日産自動車が 2019 年初めに発表した電気自動車で、航続距離 364km と発表された新型「リーフ E+」の電池は、62kWh のようですから、13 億台分くらいになります。なお、将来の電力需給変動の対策として、電気自動車のバッテリーを利用する考えがありますが、PV の余剰電力は昼間に発生するため、昼間使用している電気自動車は、PV 電力の需給均衡に有効に利用することはできません。

7.9. 電力貯蔵による損失

大容量の電力貯蔵が必要になることで生じる問題は、膨大な設備費が掛かることに加え、電力貯蔵に伴う電力損失です。

蓄電池の貯蔵効率は、使用劣化による効率低下を考慮すれば、平均的に 80%前後と考えるべきでしょう。電力を一旦蓄電池に貯蔵すると、損失で 20%が失われることになります。

しかし、貯蔵効率が高い蓄電池を、PV 発電の季節変動対策で必要となる 800 億 kWh 規模の電力貯蔵に利用することは、設備費が余りに膨大になるため不可能です。

表-7.1 大規模電力貯蔵技術の比較

電力貯蔵技術	電力定格 MW	充電時間	応答時間	設備寿命 年	貯蔵効率 %	設備費/kW ユーロ/kW
揚水発電	10-5,000	1-24 h	10s-2min	50+	70-85	470-2,200
圧縮空気エネルギー貯蔵	100-300	1-24 h	15min	30-40	42-54	450-1,150
先進的断熱圧縮空気エネルギー貯蔵	100-300	1-24 h	5-15min	30-40	-70	600-1,200
電解水素-洞窟貯蔵-CCGT発電	233充電 650放電	55 days	min	20	35	1,274 放電kW
電解水素メタン化-洞窟貯蔵-CCGT発電	343充電 650放電	45 days	min	20	24	1,824 放電kW
電解水素-圧力容器貯蔵-燃料電池発電	0.3充電 0.7放電	1.5 days	min	20	31	4,861 放電kW
電解水素液体燃料化-貯蔵-CCGT発電	200充電 360放電	60 days	min	20+	18-22	2300-2600 放電kW
大規模鉛蓄電池	0.001-50	s-h	ms	3-15	60-95	200-650
大規模リチウムイオン蓄電池	0.001-50	s-h	ms	5-20	95(DC)	700-3,000
大規模ナトリウム硫黄蓄電池	0.5-50	s-6 h	ms	15	85-90(DC)	700-2,000
大規模レドックスフロー蓄電池	0.01-10	s-10 h	ms	5-20	70-80(DC)	4000-9000

出所:“Assessment of the Potential, the Actors and Relevant Business Cases for Large Scale and Long Term Storage of Renewable Electricity by Hydrogen Underground Storage in Europe”, June 2014

表-7.1 は大規模電力貯蔵技術を比較したものです。一国の発電量の調整に使用できる大規模電力貯蔵技術は限られています。蓄電池は電力貯蔵効率は高いのですが、充電容量が小さく 1 日以内程度で使用するのが一般的で、価格もかなり高いものです。

揚水発電は、100 万 kW を超えるものも可能で、電力貯蔵効率も 70%程度と高いのですが、24 時間程度の充電期間で使用するものです。

圧縮空気エネルギー貯蔵（CAES）も、24 時間程度の充電時間で使用するもので、電力貯蔵効率は 42-54%と少し低くなります。

太陽光発電の季節変動に対応した大容量で長期間の電力貯蔵には、電気エネルギーを化学的エネルギーに変換して貯蔵することが必要になるでしょう。

その技術として、余剰電力で水を電気分解し、発生した水素を圧縮貯蔵するものや、水素をメタンや液体燃料に変換して貯蔵する技術があります。電力に戻す際には、水素焚きなどのガスタービン複合発電が用いられます。ガスタービン複合発電なら、単基で数 10 万 kW の発電が可能です。

この方式なら、貯蔵量が非常に大きくなっても、水素等の貯蔵設備が大きくなるだけなので、設備費が異常に大きくなることを避けられます。

しかし、電気分解による水素を利用した電力貯蔵で問題なのは、電力貯蔵効率が低いことです。水の電気分解と水素の圧縮貯蔵でのエネルギー損失があります。また、電力に戻すガスタービン複合発電の発電効率は 60%と想定されています。それらを総合すると、電力貯蔵効率は、精々35%程度になります。電力貯蔵することで、その 2/3 が失われることになります。

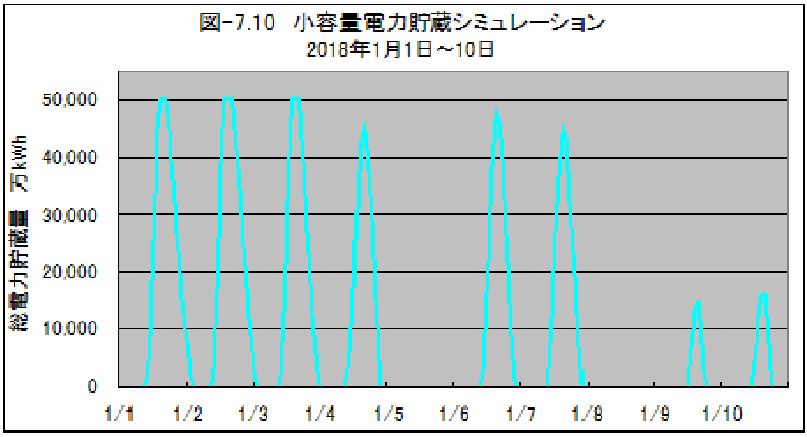
7.10. 電力貯蔵シミュレーション

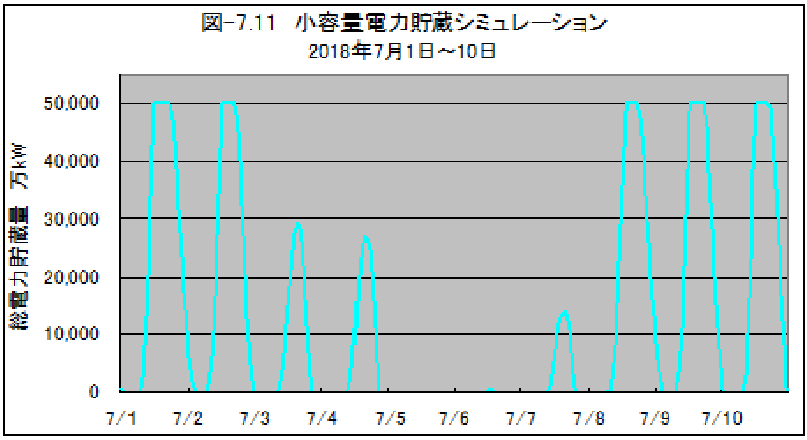
対策として、貯蔵効率が高い蓄電池などによる比較的小容量の電力貯蔵設備で、毎日の昼夜の充放電のかなりの部分をカバーし、残りの充放電用で主に季節変動対応として、貯蔵効率は低いが設備単価も低い大容量の電力貯蔵設備を組み合わせることです。それにより、貯蔵効率が低い大容量電力貯蔵設備の充放電量を減じることができます。

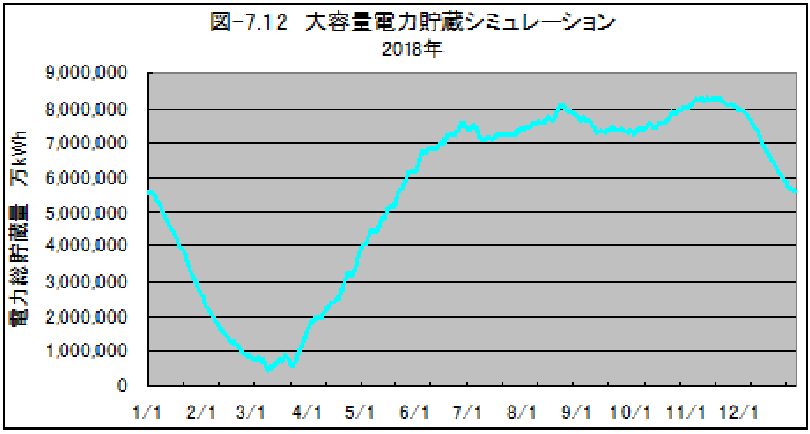
ここでは、合計の電力貯蔵容量が 5 億 kWh（500GWh）の小電力貯蔵設備

と、その電力貯蔵量が上限に達した場合の充電と、貯蔵量がゼロになった場合の放電は、大電力貯蔵設備で充放電するものとしてシミュレーションを行いました。図-7.10、図-7.11 は、小電力貯蔵シミレーションの例、図-7.12 は大電力貯蔵の年間シミュレーション結果です。

このシミュレーション結果では、各々小容量と大容量の電力貯蔵の年間の充放電量は、ほぼ同量の約 1,500 億 kWh になっています。







なお、小電力貯蔵設備の貯蔵容量を大きくすれば、大電力貯蔵設備の充放電量は小さくなりますから、設備計画の際には、2 種の電力貯蔵設備の容量比率の最適化が必要です。

前者の電力貯蔵効率が 80%、後者の貯蔵効率が 35%とすると、約 1,300 億 kWh の電力が貯蔵損失として失われることになります。電力貯蔵損失を考慮すると、60%太陽光発電に必要な発電量は、6,000 億 kWh ではなく、7,300 億 kWh であることになります。

7.11. 充放電速度

電力貯蔵設備としては、必要となる充電速度、放電速度の大きさも重要です。2018 年 1 年間の 1 時間ごとの充電量、放電量を図-7.13～図-7.16 の散布図で示しました。

大電力貯蔵では、充電は水の電気分解を想定していますが、最大部の一部を無視しても 3 億 kW くらいの大きな量になります。それは、PV の最大ピーク発電量が 4 億 kW に達するためです。

大電力貯蔵の放電の最大値は約 1.2 億 kW です。1.2 億 kW の水素ガスタービン複合発電か必要になることを意味します。

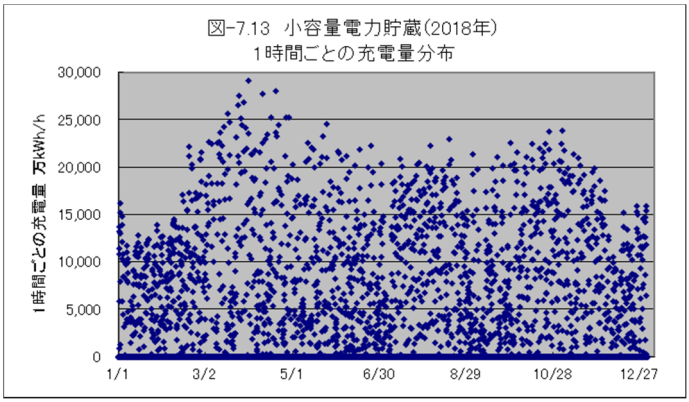


図-7.13 小容量電力貯蔵(2018年)
1時間ごとの充電量分布
1時間ごとの充電量 万kWh/h
30,000
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0
1/1
3/2
5/1
6/30
8/29
10/28
12/27

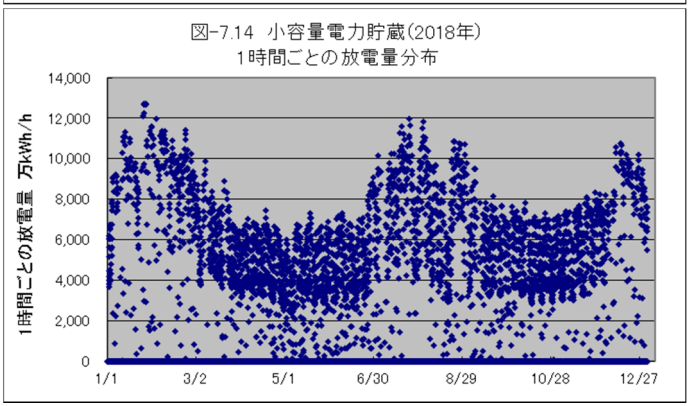


図-7.14 小容量電力貯蔵(2018年)
1時間ごとの放電量分布
1時間ごとの放電量 万kWh/h
14,000
12,000
10,000
8,000
6,000
4,000
2,000
0
1/1
3/2
5/1
6/30
8/29
10/28
12/27

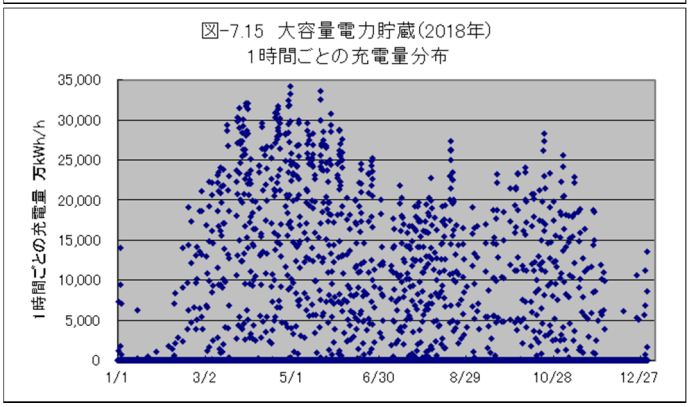
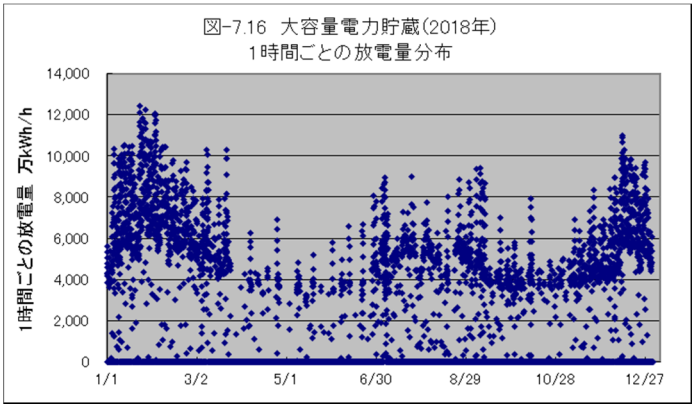


図-7.15 大容量電力貯蔵(2018年)
1時間ごとの充電量分布
1時間ごとの充電量 万kWh/h
35,000
30,000
25,000
20,000
15,000
10,000
5,000
0
1/1
3/2
5/1
6/30
8/29
10/28
12/27



7.12. 電力貯蔵を無くせるか

PV 出力の季節変動による大規模な電力貯蔵の必要性を指摘しましたが、PV の設備容量を大きくすることで、季節変動対応の大電力貯蔵を無くすことができるでしょうか。

そのためには、図-7.8 に示したように、電力供給量が最も不足する 1 月にも、不足が生じないようにする必要があります。1 月の PV の月間発電電力量は 320 億 kWh であるのに対し、不足電力は 295 億 kWh ですから、PV の発電量を 1.9 倍（=(320+295)/320）に増やす必要があります。そうしたとしても、昼夜変動対応の電力貯蔵と、雨天・曇天が何日も続く場合の電力供給手段の必要性は残るのですから、このような方法は得策でないと思います。

7.13. 検討結果のまとめ

以下に示す数値は、日本全体の合計の値です。

① PV 発電量の最大ピークは、PV 設備 kW の 80%に達します。

② PV 発電量の昼夜の変動に加え、季節変動のため、電力貯蔵が必要になります。

③ 年間の電力貯蔵量は、年間の PV 発電電力量の約半分(3,100 億 kWh)になります。

④ PV 発電電力量の季節変動に対応する電力貯蔵量は極めて大きく、800 億 kWh(80TWh)近くになります。
⑤ この検討では、合計の貯蔵容量が 5 億 kWh の主に昼夜の電力変動対応の小電力貯蔵と、主に季節変動対応の大電力貯蔵を組み合わせたシミュレーションを行いました。
⑥ 前者は蓄電池を想定。後者は、余剰電力で水を電気分解、水素やメタンなどの形態で圧縮貯蔵し、水素焚きガスタービン複合発電による再電力化を想定しました。
⑦ 前者の貯蔵容量を大きくすれば、後者の年間電力貯蔵量を小さくできるので、最適化の検討が必要です。
⑧ 5 億 kWh の小電力貯蔵を用いたシミュレーションでは、小電力貯蔵、大電力貯蔵とも、年間の電力貯蔵量は約 1,500 億 kWh となりました。
⑨ 小電力貯蔵の貯蔵効率が 80%、大容量貯蔵の効率が 35%とすると、電力貯蔵により約 1,300 億 kWh の電力損失が発生します。
⑩ 電力貯蔵損失を考慮すると、60%PV の年間発電量は 6,000 億 kWh ではなく、7,300kWh になります。その場合の PV の設備容量は約 6.2 億 kW になります。
⑪ 大電力貯蔵には、3 億 kW 規模の水の電気分解設備と、1 億 kW 規模の水素焚きガスタービン複合発電が必要です。
⑫ 大電力貯蔵を無くすため、冬季でも PV 発電量が不足しないよう、PV 容量を増大させる方法は、PV 容量があまりに大きくなるため得策ではありません。

7.14. 検討結果に基づく提案

＜経済負担＞

上述しませんでしたが、PV の過大なピーク電力のため、 送電網の増強が必要になるでしょう。また、電源周波数の制御に関する追加設備も必要になると思われます。

単に総電力量の 60%を PV で供給するだけなら、PV の年間発電量が 6,000

億 kWh、PV 設備容量が約 5.1 億 kW で、設備単価が 20 万円/kW に低下すれば、PV 設備費は約 100 兆円です。しかし実際には、電力貯蔵設備が必要になり、電力貯蔵損失が加わり、送電網の増強などの関連費用を含めれば、総設備費は 200 兆円近くになるかもしれません。

60%太陽光発電に膨大な設備費を要するとしても、今から 2050 年を目指し 30 年間をかけて行うなら、できないことではないでしょう。しかし、問題は太陽光発電の設備寿命が短いことです。火力発電の設備寿命は30～40年、原発は 40～60 年と想定されています。それに対し、太陽光発電の寿命想定は 20～25 年です。加えて、蓄電池の寿命は、リチウムイオン電池なら 10 年(充電回数 4,000 回)くらいです。

膨大な費用を投じ、2050 年を目標に総電力量の 60%を占める太陽光発電設備を整備しても、2050 年には順次寿命がきてスクラップになります。2070 年代を目指して再び太陽光発電設備を整備しなければなりません。

太陽光発電を悪く言うつもりはありませんが、変動の大きい再生可能エネルギーは、適切な使い方が必要です。

＜**提案**＞

このシミュレーションは、原発や CCS 付き火力発電を使用しない前提で行ったものです。原発については、多くの人が廃止することを望んでいます。CCS については、日本にどれだけの立地があるか不確かです。それらの利用を考慮しなかったため、日本で GHG80%削減を目指す場合は太陽光発電への依存が大きくなり、短期および季節的な発電電力量の大きな変動が生じ、電力貯蔵が必要になります。太陽光発電に大幅に依存して日本の電力供給を行うことは不可能ではありませんが、極めて不経済です。

電源構成に占める太陽光発電の比率が高くなった場合、発電電力量の短期変動の対策として揚水発電と共に、リチウムイオン電池などの蓄電池を併用することが不可欠であると考えます。

一方、発電電力量の長期の季節変動対策としては、CCS 付き火力発電や原発の利用を検討することが必要と考えます。国内の CCS 立地が限られる場

合、CCS は設備寿命が残っている火力発電を使い続けるためや、CO2 排出を無くすことが困難な工業プロセスでの利用、そして IPCC が主張している大気中から CO2 を除去するためのバイオマス火力での利用が優先されるでしょう。CCS 付き火力発電では、発電電力量の変動を平準化する機能を考慮すべきです。

原発については、その併用により太陽光発電の比率を抑制すると共に、季節的な発電電力量の変動を平準化することも果たせると考えます。原発は通常ベースロード運転されています。しかし、電源構成で 70%を超えるフランスの原発では、制御棒の種類を使い分けることなどで、電力需要に応じた出力調整も行われているとのことです。設備や規則の変更が必要かもしれませんが、季節的な長期の発電変動に対応した原発の柔軟な運転も技術的に可能と思われます。

原発の運転に関しては、経済性のために安全性に目を瞑ることはできない言う人もいると思いますが、GHG ゼロという社会の大きな変革に関し、安全についてもう一度考えてみることも必要と思います。

8. ドイツの GHG 削減長期シナリオ

ドイツは GHG 排出量を 80%もしくは 95%削減するシナリオを公表しています。CCS 付き火力発電や原発を使用しないシナリオです。また、エネルギー技術のイノベーションを前提としたものではありません。

ドイツと日本ではエネルギー事情が違いますから、ドイツのシナリオをそっくり真似ることはできません。日本には日本のシナリオが必要であり、その参考として紹介するものです。

8.1. 温暖化防止シナリオ 2050

＜情報の出所＞

本章は下記のレポートをもとにしています。

Climate Protection Scenario 2050

Summary of second final report

Berlin, 26.07.2016

ドイツ連邦環境・自然保護・建築・原子力安全省が、ドイツの環境関係研究 NPO である Öko-Institut と、ドイツを代表する研究機関 Fraunhofer へ委託した調査プロジェクトの報告書で、2050 年までの複数シナリオを作成し分析したものです。500 頁近いドイツ語レポート（Klimaschutzszenario 2050, 2. Endbericht）の英語概要版を参照しました。部門ごとの対策を記した 4 章 Sectoral contributions to fulfilment of the targets を詳しく紹介しました。

類似の文書として、Climate Action Plan 2050、があります。ドイツ政府の温暖化防止政策の原則と目標、というサブタイトルが付いています。
2016 年 11 月に発行され、ドイツ語版、英語版ともに 92 頁の文書です。パリ協定に沿って、ドイツがどのように温暖化防止の行動目標を達成するかを示したものです。例えば、日本の「エネルギー基本計画」のような内容です。

なお、Climate Protection Scenario 2050 も同様の計画に沿った内容ですが、GHG の削減対策の記載が定量的で詳しいことから、こちらの内容を紹

介することにしました。

＜3 種のシナリオ＞

以下の記載では、温暖化防止に関する 3 種のシナリオ EMS(2012)、CS 80、CS95 を紹介しています。

EMS (2012) （既存対策シナリオ 2012）：2012 年 10 月までに実施されたすべての措置がこのシナリオに組み込まれています。このシナリオは、エネルギーと気候政策の枠組みの現状を反映しています。

CS 80（気候保護シナリオ 80）：このシナリオでは、ドイツ政府の EnergyConcept に示された GHG 排出量、再生可能エネルギーおよびエネルギー効率の目標は、可能な限り達成されるとされています。温室効果ガス排出目標は、1990 年比で 80%削減の最低目標が適用されています。

CS 95（気候保護シナリオ 95）：このシナリオでは、1990 年レベルと比較して 95%の排出量削減が、2050 年までに達成されるものとされています。

8.2. エネルギー産業と発電所

本項には、需要側（電力消費）、発電、および、エネルギー産業の GHG 削減の主な項目と効果が示されています。

＜電力消費量＞

従来型の電力消費は、電力需要の効率対策により減少します。しかし、その後、新規の電力需要が生じるため、CS 95 では、電力消費量は増加することになります。

新規の電力需要については後述されていますが、主にエネルギー最終消費で従来、燃料が使用されていたものが電力に転換することによるものです。例えば、電気自動車やヒートポンプ暖房などの普及が該当します。

EMS（2012）では、総電力消費量は 2008 年から 2020 年にかけて 4%減少しますが、2050 年には 6%上回っています。

両気候保護シナリオにおいて、2030 年に最低の電力消費が達成され、CS 80 では−13%、CS 95 では−18%となります。CS 80 では、2030 年以降に発生する新規の電力消費量により、このマイナスは 2050 年にはほぼゼロに均衡しています。CS 95 の新規の電力消費の増加はより劇的で、2050 年の総電力消費量は 2008 年水準を 27%上回ります。

新規の電力消費は、他の分野の電化対策に依存します。CS 95 では、2050 年の新規電力消費は、総電力消費量の 44%を占め、そのうちの約 4 分の 3 が輸送部門で、直接的には電気自動車などの電気移動と、間接的には電力を利用する合成燃料を介したものです。また、約 5 分の 1 は、産業用、三次産業および家庭用の熱供給に関するもので、直接的にヒートポンプ、間接的に電気ボイラを用いた地域暖房ネットワークによるものです。

一方、CS 80 と EMS（2012）では、新規電力消費は、それぞれ総電力消費量の 25%と 15%を占めるだけです。

Figure 4-1 は、2008 年と比較して、CS 80 と CS 95 の電力消費量の変化を示しています。比較のため、EMS（2012）の総電力消費量の推移を併記しています。

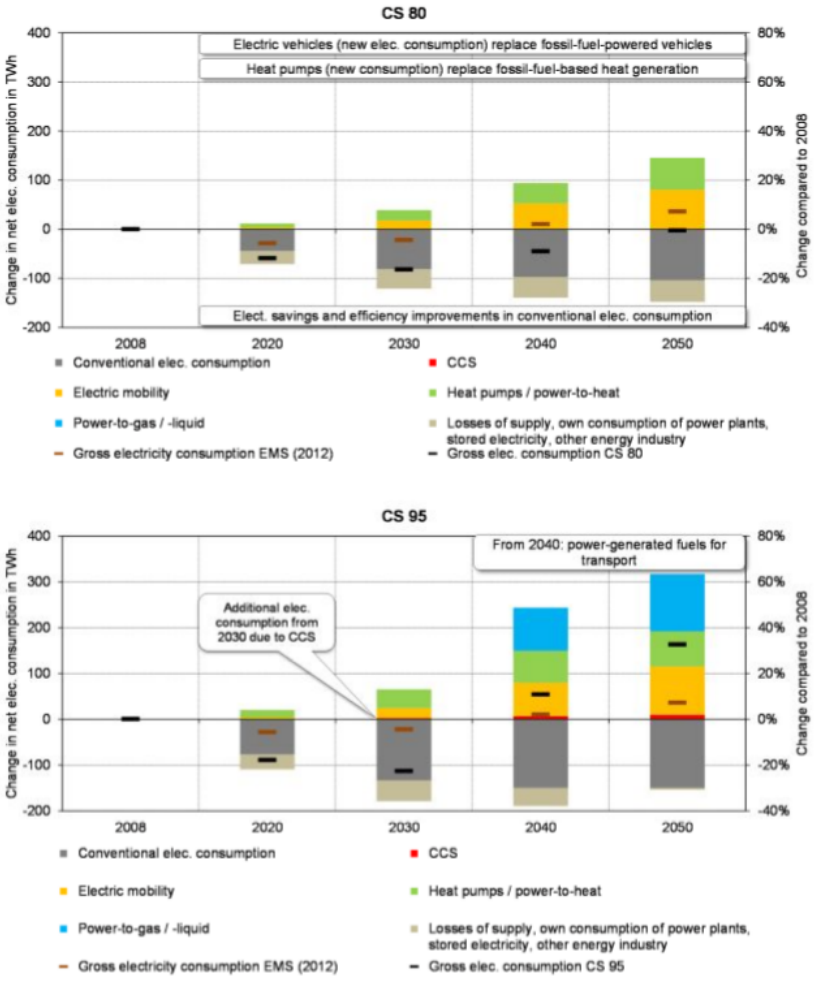
CS 80 では、2010 年から 2050 年までに、従来型の電力消費の効率改善により 105 TWh が削減されます。更に、その他の電力消費が 45 TWh 減少します。一方、電力による移動（電気自動車など）による 80TWh、ヒートポンプや地域暖房ネットワークのための電気ボイラの使用による約 65TWh など、電力消費における大きな増加があります。そのため、従来型電力消費の削減は、完全に打ち消されます。

CS 95 では、従来型電力消費は 150 TWh 削減されます。その他の電気消費は 5 TWh だけわずかに減少します。一方、電力による移動により約 105TWh、ヒートポンプと電気ボイラによる約 75TWh の電力消費の大きな増加があります。また、電力による燃料合成により、125TWh の追加の電力消費需要があり、最大の単一電力消費源です。

再生可能エネルギーの割合が非常に高いため、蓄電量の増大が必要になります。CS 95 では、水素とメタンの合成ガスが、電力貯蔵に用いられ、それ

らは電気に再変換されます。加えて、電力需要が全体的に高いため、ネットワーク損失も増加します。そのため、エネルギー産業に直接起因する電力消費は、2010 年とほぼ同じレベルに戻ります。

Figure 4-1: Change of electricity consumption in CS 80 and CS 95, 2008-2050



Note: The measures specified in CS 95 are in addition to those specified in CS 80.
Source: Authors' own calculations

2030 年までの電力消費の純削減量が 115 TWh に増加するにもかかわら

ず、2050 年の電力需要は、2010 年に比べて 165 TWh 増加します。

＜**発電**＞

Figure 4-2 は CS 80 と CS 95 シナリオの発電量の変化です。再生可能エネルギーが大幅に拡大します。2030 年までに、風力発電は最大の電力源で、それに続き太陽光発電も劇的に増加します。

既に建設中または計画中の能力を超える新設の石炭火力発電所の建設は必要ありません。また、発電部門で、CO2 回収・貯蔵（CCS）は必要とされません。

CS 80 で発電分野の主な推進事項は次のとおりです。

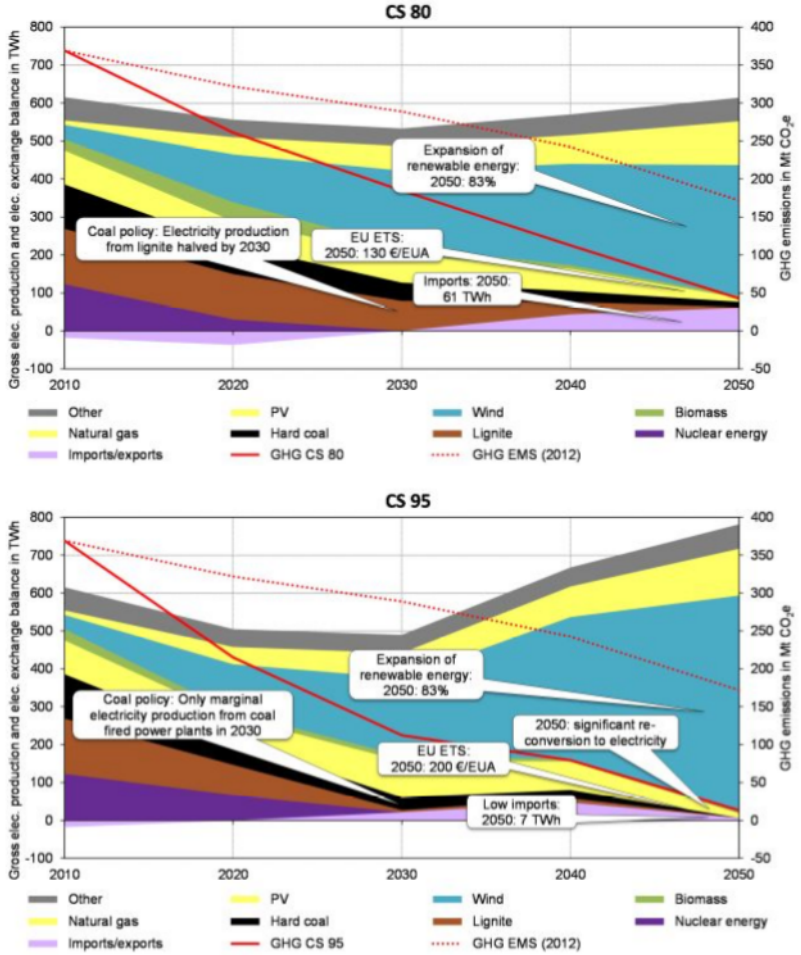
◆再生可能エネルギーの大幅拡大：2030 年の主な電力源は風力発電で、2010 年の 38 TWh から 2050 年には 344 TWh に増加します。太陽光発電も 2010 年の 12TWh から 2050 年には 115 TWh に増加し、2030 年には総発電量の 13%を占めます。バイオマスの重要性は著しく低下し、水力、地熱、廃棄物の焼却などの他の発電のシェアは、ほぼ一定のままです。再生可能エネルギーによる年間総発電量の増加は 7～15TWh /年に達します。

◆再生可能エネルギーは一貫して高い伸び率を示していることから、2030 年と 2040 年のシェアは、一時的に目標経路を 10%ポイント上回ります。しかし、2050 年には新規の電力消費が増加する結果、目標経路（83%）よりもわずか 3%高いだけです。

◆化石燃料発電のシェアは 2010 年の 352 TWh から 2050 年の 26 TWh に減少し、同時に CO2 インテンシティー（エネルギー消費量当たりの CO2 排出量）が減少します。これは再生可能エネルギーの増大とともに、全面的な競売制で 2050 年には 1EU 排出枠単位 EAU（1 トンの CO2 に相当）当たり 130 ユーロの引当価格の効果的な EU の排出権取引システム（ETS）によるものです。

指定された褐炭焚き火力発電所を 2020 年までに操業停止とする追加の石炭政策に基づき、褐炭による発電は 2010 年から 2030 年の間に半分になります。

Figure 4-2: **Electricity production and electricity imports in CS 80 and CS 95, 2010-2050**



Note: The left axis refers to the electricity production and the import-export balance, which are shown by the coloured areas; the right axis refers to the GHG emissions, which are shown by the lines. Other = oil, blast furnace gas, coke oven gas, waste, hydropower, geothermal energy, pumped storage and reconversion of power-to-gas.

Source: Authors' own calculations

◆2010 年のドイツの電力輸出は 18 TWh でしたが、2050 年には 61 TWh の純輸入国となっています。ノルウェーの揚水発電所と接続する海底ケーブ

ルが、10 年ごとに設置されると想定されています。

◆発電による GHG 排出量は、2010 年と比較して 88%減少します。1990 年と比較すれば 91%削減に相当します。

CS 95 で発電分野の主な推進事項は以下のとおりです。

◆再生可能エネルギーの拡大が CS 80 よりも強力である CS 95 では、風力発電は 2010 年の 38 TWh から 2050 年には 572 TWh に増加し、2030 年までに最も重要な電力源になります。太陽光発電は 2010 年の 12TWh から 2050 年までに 123TWh に増加します。バイオマスの重要性は著しく低下します。

◆2040 年までに再生可能エネルギーの比率を 65%に増やすというドイツの Energy Concept の目標は、10 年前に達成されます。2050 年までに 80%のシェアを達成する計画はかなりの成果を上げ、2050 年までに再生可能エネルギー発電は、総電力消費量の 95%に達します。

◆化石燃料発電量は 2050 年に 12 TWh をわずかに上回ります。石炭火力発電は、2030 年以降は取るに足りないものとなり、大幅な電力節減、再生可能エネルギーの強力な拡大と、強化された EU の排出権取引制度のもとでの野心的な石炭政策により、2050 年にはゼロになります。

排出権取引制度の排出枠価格は CS 80 よりも強く上昇し、2050 年までに 200 ユーロ/ EUA に達します。

◆CS 95 では、2050 年にドイツは、CS 80 ケースよりもはるかに少ない 7 TWh の電力を輸入しています。その理由は、国内での再生可能エネルギーの拡大と、それに伴い低い限界費用での電力の高生産により、欧州の電力市場からの輸入が可能になるためです。

◆CS 95 では 2040 年以降、余剰電力を用いて水の電気分解で製造された水素とメタンが電気に再変換されます。2050 年には、電気分解により製造された水素やメタンが、残存している天然ガス焚き火力発電所で使用される燃料の半分を占めることになります。

◆化石燃料発電はほぼ完全に終了するため、2010 年と比較して 96%以上の GHG 排出量が減少します。それは 1990 年比で 97%減少に相当します。

＜その他のエネルギー産業と漏洩による GHG 排出＞

エネルギー産業の残りの部分は、ヒートポンプ式でない地域暖房、石油およびバイオ燃料の製油所、および、露天掘りの褐炭炭鉱、瀝青炭炭鉱、ブリケット工場、コークス工場、その他の燃料転換・コーティング設備などの燃料変換のその他部門です。 温室効果ガスのインベントリ分類に従い、天然ガス圧送ステーションは、エネルギー変換ではなく、エネルギー輸送部門に分類されています。

その他のエネルギー産業のエネルギー需要は、EMS（2012）シナリオよりも、CS 80 や CS 95 シナリオの方が高くなることに留意すべきです。 これは、地域ネットワークに接続された熱とバイオ燃料に対する需要が高くなることが原因です。

同時に、化石燃料発電量の減少により、2030 年以降は熱電併給（CHP－コージェネーレーション）の選択肢が大幅に減少します。このエネルギー需要は他のエネルギー産業にシフトします。 EMS（2012）では、その他のエネルギー産業のエネルギー需要は 2020 年から 2050 年にかけて 11%減少します。ただし、CS 80 では 2%しか減少しません。CS 95 では、2050 年のエネルギー需要は再び 2020 年の水準になります。予定した CO2 排出削減を達成するため、2030 年以降の太陽熱利用の拡大が CS 80、CS 95 の双方で想定されています。2050 年には、設置された太陽熱利用の設備容量は、CS 80 が 35 GW、CS 95 が 61 GW に達します。電気式加熱も、地域暖房ネットワークにおける電極式ボイラの形で貢献します。

この部門における GHG 排出量に関しては、EMS（2012）が 1990 年と比較して 2050 年までに－14%であるのに対し、CS 80 では－84%、CS 95 では－72%と遥かに大きな違いがあります。この違いはエネルギー・ミックスに由来します。化石燃料の使用はすべてのシナリオで急激に減少しますが、EMS（2012）では燃料需要の半分を満たすために天然ガスが使用されています。CS 95 では天然ガスはエネルギー・ミックスの 5 分の 1、CS 80 では 4 分の 1 を占めるだけです。製油所ガスは EMS（2012）では 14%とかなりの

シェアを有しています。しかし、CS 80 や CS95 では、そのシェアはほとんど問題にならない程度です。

CS 80 や CS 95 シナリオでは、太陽熱利用や電力から熱変換する新技術（power-to-heat）が、併せて、エネルギー需要の約 50%のシェアを占めます。一方、バイオガスを含めたバイオマスは、CS 95 ではエネルギー使用の 4 分の 1、CS 80 では 40%を占めます。

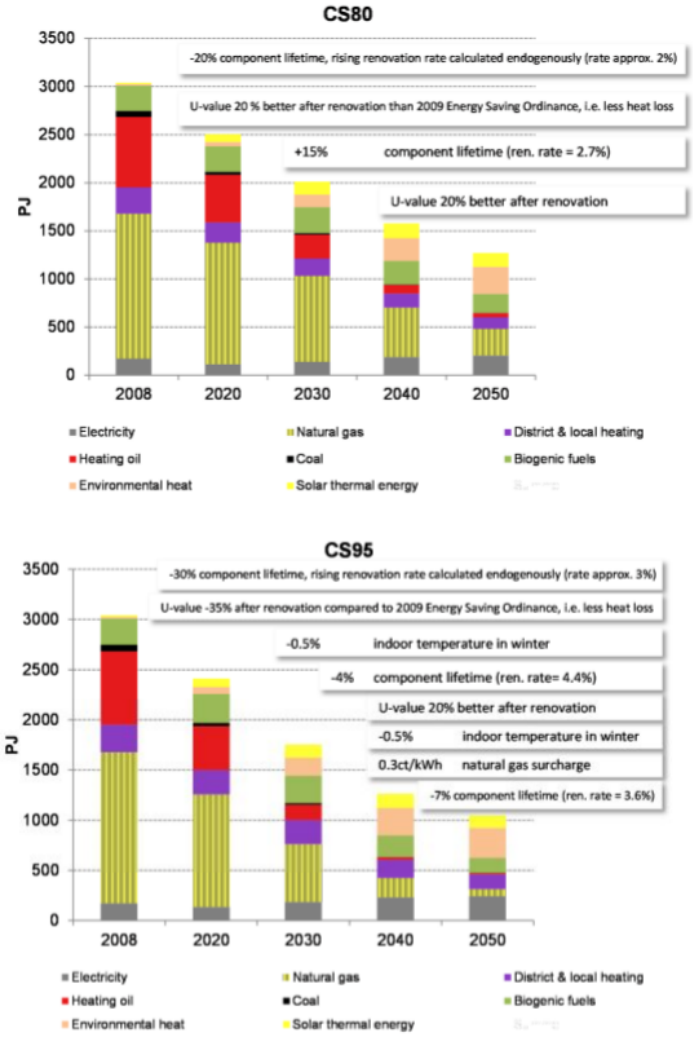
石油精製所での加熱によるエネルギー消費は、石油精製の生産量により決まりますが、EMS（2012）での 46%減少と比較して、CS 80 では 79%、CS 95 では 91%と大幅に減少します。その他の加熱装置は、バイオ燃料生産での使用が支配的であるため、多くのバイオ燃料が使用される CS 80 や CS 95 シナリオよりも、EMS（2012）の方がエネルギー消費量は低くなります。

エネルギー部門から漏洩する GHG 排出は、主に化石燃料の生産と処理に起因します。それらの排出量は、ドイツにおける石炭、ガス、石油生産の開発に支配されます。ハードコール（瀝青炭など）、石油、天然ガス生産の段階的廃止の前提は、各シナリオで同一であるため、GHG 漏洩量は、褐炭生産での排出量、製油所の活動、および、異なる燃料需要に対応する天然ガスの輸送によるわずかな差異しかありません。 全体として、ドイツのエネルギー部門の GHG の漏洩排出量は、2005 年と比較して、CS 80 では 2050 年までに 88%、EMS（2012）では 2050 年までに 83%減少します。CS 95 では、97%の削減が達成されます。

8.3. 建物部門の熱供給

2050 年までに古い建物を、断熱性の良い新しい建物に置き換えることで、シナリオ間で若干の違いはありますが、スペース暖房と温水のために現在必要とされている最終エネルギーの約 3 分の 1 が削減されることになります。これらの削減は、主にドイツの省エネ条例（EnEV）に定められている最低限の要件によってシナリオで推進されています。

Figure 4-3: Energy consumption of buildings in CS 80 and CS 95, 2008-2050



Note: The term environmental heat includes the heat extracted from surroundings by heat pumps and used for heating and hot water supply.
Source: Authors' own calculations

現在ある建物の残りの 3 分の 2 は、大半が 2050 年までに改装されるでしょう。これら既存の建物で、どのくらいのエネルギーが削減されるかは、建

物の改修工事がどれほど野心的で、どれだけの数の建物が改修されるかに依存します。ドイツの Energy Concept に定められた目標を達成するためには、高い改装率と意欲的な改修範囲が必要です。Energy Concept によると、2020 年の建物の熱需要は、2008 年の熱需要の 80%までしか減少していないはずです。建物の一次エネルギー需要は、2050 年までに 20%に減少させる必要があります。

居住用および商業用建物の最終エネルギー需要は、2008 年から 2050 年の間に CS 80 では、3,040 PJ から 1,269 PJ に減少します。これは 58%の減少です。CS 95 では、1,993 PJ から 1,047 PJ に減少し、これは 66%の減少です。エネルギー源の構成には、根本的な変化があります。

2008 年から 2050 年の期間では、Figure 4-3 に示されるように、CS 80 では建物部門でのエネルギー消費は 3 分の 1 をほんの少し超える程度に減少します。この時間枠内では、古い建物よりも後か、後から改装された新しい建物は既に熱保護対策を含んでいるため、省エネルギーはますます複雑かつ高価になります。従って、この期間にわたる年間の省エネ量は、10 年当たり約 500PJ から 300PJ へと低下します。

エネルギー源は、再生可能エネルギーに向かって着実にシフトし、2050 年には 50%のシェアを占めます。電力需要は、省エネにより 2020 年までは減少します。しかし、ヒートポンプの使用増加により、電力需要が再び増加し、2008 年と比較して 2050 年には、建物部門の熱供給に必要な電力は 20%増加します。

灯油や石炭のようなその他の従来型のエネルギー源は、ヒートミックスから置き換わります。天然ガスは、2050 年に最終エネルギー・シェアの 22%を占め、エネルギー・ミックスの中で、唯一の化石燃料として重要な役割を果たし続けます。

CS 95 での限定的な追加の最終エネルギー削減は、エネルギー消費量を更に削減することがどれほど難しいかを示しています。 最終エネルギー需要は、2050 年には更に 8%減少し、2008 年と比較すると 66%減少します。最初の 10 年間は、最終エネルギーの削減は、CS 80 の場合よりも 17%大きく

なります。最後の 10 年間では、CS 80 よりも低くなっています。このことは、CS 95 では改装は前倒しで実施され、節減ポテンシャルは、早期に限界になることを示しています。

建物部門では、CS 95 では 2050 年までに再生可能エネルギーが 55%に達します。一方、化石燃料の堅調な価格シグナルのため、天然ガスのシェアは 7%に急激に低下し、電力のシェアは 23%に増加し、地域暖房のシェアは 14%になります。

建物部門の主な成果は以下のとおりです。

◆CS 80 では、2030 年までに 建物の 2%は毎年改修されます。一方、CS 95 では、改修率は 3%です。2 つのシナリオで、再生可能エネルギーの絶対的使用はほとんど異なりません。2030 年に再生可能エネルギーは、CS 95 では熱供給に 665 PJ が、CS 80 では 609 PJ が使用されます。対照的に、熱生産のための電気の重要性は既に顕著です。CS 95 の電力に対する一次エネルギー需要は、CS 80 の値を 30%（81 PJ）上回ります。

◆改修率や改修範囲に依存する目標の達成のためには、先ず、そのデータを収集し、目標達成からズレていないかを早期に認識でき、障害が特定でき、それに対抗できるよう、目標達成への進展状況を観察することが必要です。

◆必要となる燃料代替に関しては、とりわけ CS 95 での CO2 追加課金は、最終エネルギー需要に対する天然ガス割合に影響を与えます。エネルギー・ミックスでは、2050 年の天然ガスシェアの大幅な削減が顕著になります。CS 80 の 300 PJ（20%）に対し、CS 95 では 80 PJ（7%）に減少します。この変化は、多額の CO2 追加賦課金により起きるものです。CS 95 では 2014 年以降、天然ガス価格は年間平均 3.6%上昇し、一方 CS 80 では年平均 2.5%増加します。2020 年以前に、天然ガスの利用は、価格上昇のため、例えば、地域熱供給よりも高価になります。この点から、熱生産価格の違いと、再生可能エネルギー普及に対する継続的な観察が必要になります。その結果、再生可能エネルギー普及の市場シグナルの有効性は、求められる目標の道筋を維持するよう、継続的に評価され、チェックすることができます。

◆EMS（2012）または CS 80 のいずれでも、2020 年までに暖房熱需要の

20%削減は達成されませんが、CS 95 では達成されます。CS 80 では、2015 年から 2020 年の間に 2.4%という非常に楽観的な住宅改修率で、最終エネルギーを 18%削減することが達成されます。住宅改修率が計画の 2%から 3.1%に増加すれば、効率対策と燃料転換の組み合わせで、2050 年までに総一次需要を 80%削減することが可能であることを、これらのシナリオは示しています。化石燃料に対する残りの一次エネルギー需要は、CS 95 では 182 PJ になります。それは 2008 年の最終エネルギー需要の約 5%です。更に 1002 PJ が再生可能エネルギーによって提供され、それは一次エネルギー需要の 85%を占めます。

◆実際の改修率と修復程度の収集には、関連データがローカルに収集されているかどうかに係わらず、労力が増えます。1 つの解決策は、この重要なデータをドイツ全土で照合できるように制度的に編成された中央データベースを確立することです。信頼できるデータがなければ、望ましくない進展を後まで検出できません。広範な措置は、通常、見積もりに基づいて実施することはできません。

◆改修率を目標の道程に移行させるため、努力、手段、対策を継続しなければなりません。改修の程度に関する最低限の要件は、ドイツ省エネルギー省令（EnEV）2014 年改正では変更されませんでした。しかし、目標を達成するには、平均でもより野心的な改修が必要です。

◆再生可能エネルギーへの移行に必要な範囲をもたらすためには、価格シグナルが必要です。さもなければ、天然ガスは長期的に支配的になります。社会的影響を緩和し、社会的苦難を回避するために、目標となる機器の使用が推奨されます。

8.4. 家庭部門と三次産業 – 家電機器とプロセス

家庭部門（スペース暖房と給湯を除く家電機器）では、CS 80 では、2050 年までに 2010 年と比較して約 86 PJ（−2%）の最終エネルギー需要の減少があります。最終エネルギー需要は、ガスを使用するストーブを別にして、家電機器にほぼ基づいています。この期間における電力需要の最も大きな減

少は、白物家電（大型電化製品）による約 58 PJ と、25 PJ の照明です。 CS 80 における積極的な施策は、古い家電品の返却措置とともに、エコデザイン指令（最も低いライフサイクルコストに基づき選択するという措置）と、エネルギー消費ラベルと高効率家電奨励のドイツ省令です。

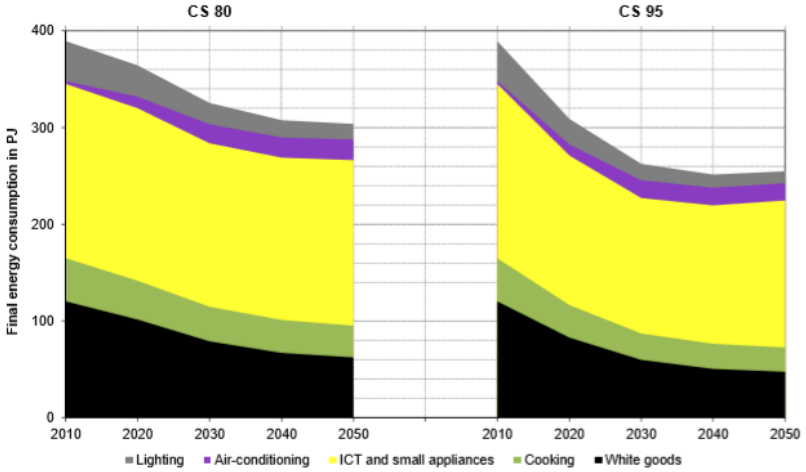
CS 95 では、CS 80 と比較して、2050 年までに家庭部門で、更に約 49 PJ の減少があります。両シナリオには、同じエネルギー政策措置が適用されます。しかし、CS 95 では、個々の家電機器について新しい効率クラスが導入すると仮定されています。更に、新規の設備と旧設備の更新の両方において、市場で入手可能な最も効率的な用途を支持するものと考えられています。CS 95 では、電力需要は 2030 年までに劇的に減少するため、効率化の可能性は早い段階で求められます。

三次産業（家電を含み、スペース暖房と給湯を除く）では、電力削減目標を達成するため、CS 80 では非常に野心的な削減対策が実施されます。従って、電力需要は 2050 年までに 2010 年と比較して約 10%減少します。この減少は、EMS（2012）で予想される傾向の逆転を反映しています。

電力需要に関しては、CS 95 では 2010 年に比べて 23%の節約が行われ、CS 80 よりも野心的になっています。これは、経済的でないとしても経済的に実現可能性の高い、より野心的な対策が実施されるためです。特に、照明、換気および空調の分野では、これらの措置により CS 80 よりも更に削減されます。

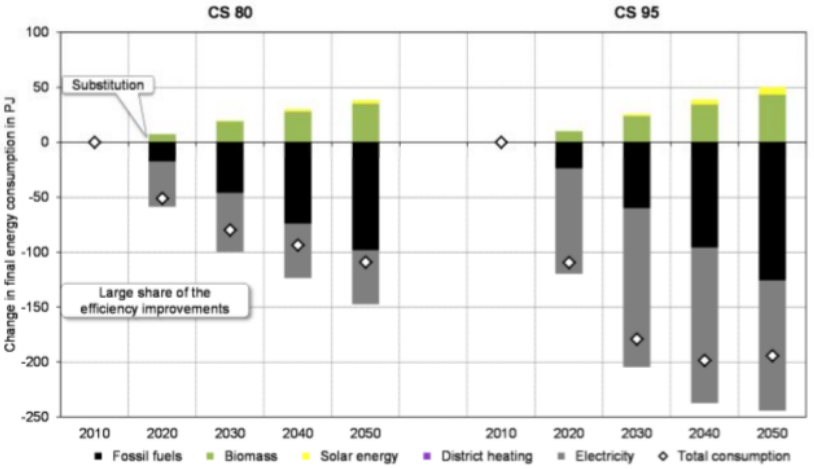
家庭と三次産業部門で追加のエネルギー削減を実現するため、すべての障壁を克服するために、現在よりもはるかに包括的な種々の政策手段が必要になるでしょう。CS 95 では、採算が取れない選択肢を、経済的に魅力あるものとするために、財政支援が必要になります。更に、最低限の標準と同様の措置は、技術的変化に継続的に適応し、更に推進し、それらの設計をより野心的にする必要があります。

Figure 4-4: Change in final energy consumption of appliances and processes in households, 2010-2050



Source: Authors' own calculations

Figure 4-5: Change in final energy consumption of appliances and processes in the tertiary sector, 2020 – 2050 compared to 2010



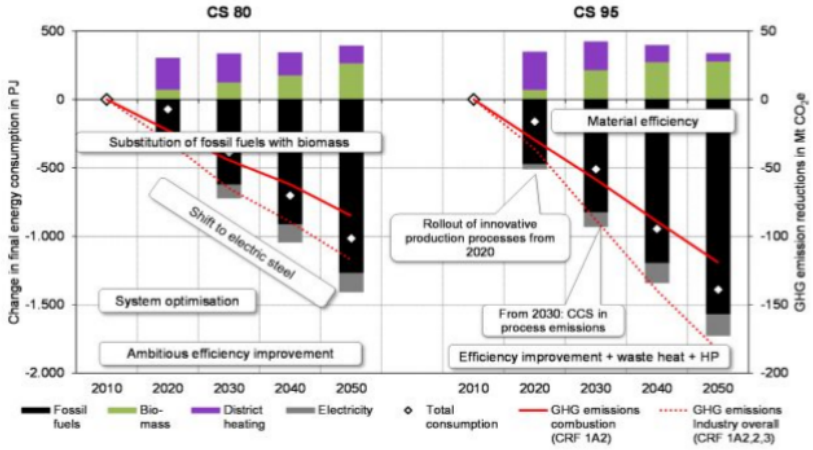
Source: Authors' own calculations

8.5. 産業部門

＜エネルギー消費と関連の GHG 排出＞

CS 80 では、産業部門（産業用発電所を含む）のエネルギー関連の GHG 排出量は、2010 年から 2050 年の間に 116 Mt から 34 Mt CO2e に減少します。これは 82 Mt CO2e または 71%の減少になります。CS 95 では、119 Mt CO2e だけ減少し、産業は以下に示すようにバランス上、約 3 Mt CO2e の炭素の吸収場所になります。 従って、計算された減少は 103%になります。しかし、EMS（2012）では、産業部門のエネルギー関連の GHG 排出量は、22 Mt CO2e 減少するだけで 93 Mt CO2e なります。それは、19%の減少です。

Figure 4-6: **Change in final energy consumption and reduction of GHG emissions in the industry sector, 2020 – 2050 compared to 2010**



Note: The left axis refers to the electricity production and the electricity exchange balance, which are shown by the coloured areas; the right axis refers to the GHG emissions, which are shown by the lines. Other = oil, blast furnace gas, coke oven gas, waste, hydropower, geothermal energy, pumped storage and reconversion of power-to-gas.

Source: Authors' own calculations

CS 80 では、エネルギー需要は 2010 年の 2,400 PJ から 2050 年の 1,750 PJ に減少し、約 27%の減少になります。2050 年には、中心的エネルギー源

は電力、地域暖房、再生可能エネルギー、天然ガス、石炭です。石炭は、銑鉄の製造（高炉製鉄）における鉄の還元に必要です。鉄鋼業では、高炉製鉄から電気鋼（電気加熱製鉄）への移行傾向が続きます。効率の可能性は、特に電力消費については、包括的なシステム最適化により可能な限り開発されます。

CS 95 では、より早期の効率改善が示され、ドイツの最終エネルギー需要は 2050 年までに 40%減少します。CS 80 の可能性は、特に低温熱に対する燃料需要と廃熱利用の分野で、ヒートポンプとの併用により利用されます。材料効率（歩留まり）の向上と効率の高い生産プロセスの普及の急速な進展が、また、このことに寄与します。非再生可能エネルギーから再生可能エネルギーへの移行は、より高い CO2 価格のため、はるかに速く進みます。天然ガスもほぼ完全に再生可能エネルギーに置き換えられます。2030 年以降、CCS は、鉄鋼やセメント産業のプロセスおよびエネルギー関連の大きな排出源に使用されます。石炭燃料をバイオマス燃料に置き換え CCS 技術と組み合わせることで、産業部門のエネルギー関連分野での炭素吸収源となります。

CS 80 と比較して、CS 95 には技術的により革新的な対策が包括的に含まれています。例えば、廃熱利用や高効率生産プロセスの領域です。更に、材料効率の改善が達成されます。従って、燃料需要は CS 80 より大幅に速く低下します。電力消費に関しては、システムの最適化や電気駆動システムの可能性は、CS 80 で既に大幅に活用されているため、CS 95 では同等の開発となります。

特に、寿命が長く、投資サイクルが長い発電所の場合、高効率の革新的な対策（例えば、低エミッションセメント生産、ニアネットシェイプ鋼の鋳造、塩素製造での酸素脱分極陰極の技術、革新的 製紙乾燥プロセス、アルミ加工における磁気ビレットヒーター技術）は、2030 年までに市場に出されなければなりません。従って、2020 年までに研究開発やパイロット、デモンストレーション発電所への投資を開始する必要があります。2030 年から 2050 年にかけて、高い排出削減を実現するためには、CCS 技術は 2030 年までに市場

に出す必要があります。廃熱の利用に関しては、潜在的な可能性を活用するのには、市場導入プログラムが、事業内外でも有用と考えられます。

同様に、燃料の切り替えは、ボイラや加熱炉の投資サイクルに依存します。15 年から 30 年の典型的な設備寿命のもとで、遅くとも 2030 年までに必要な財政的インセンティブ（CO2 価格）を実施しなければなりません。2040 年以降の CO2 価格上昇では遅すぎるため、投資計画の一部にしか影響しません。もしくは、信頼性が高く予想通りに上昇する価格経路により、投資の確実性が確保され、早期に必要な投資が可能になります。

大きな課題には、技術的実現可能性と、効率的かつ革新的な生産プロセスの市場導入、システム最適化の可能性掘り起こしに関連する事項が含まれます。燃料転換のための財政的インセンティブの点からは、CO2 税（または補助金）の執行可能性は重要な問題でしょう。

記載されている産業部門の変革を達成するために必要な手段には、2030 年以前の非 ETS（EU の排出権取引システム）セクターに対する価格シグナル（例えば CO2 税）や、EU の ETS における高い排出枠価格、研究開発の融資、低炭素産業プロセスの市場導入（2020 年以前）、長い償却期間（5 年以上）を伴う効率的な技術の財政的推進、包括的なエネルギー管理とエネルギーコンサルティングの義務化などが含まれます。

＜工業プロセス＞

エネルギー関連の CO2 排出と並んで、プロセス関連の CO2 排出は、エネルギー集約的産業で生産プロセスにおける原材料の必要な処理からも発生します。これらの排出の削減は、エネルギー関連の排出量よりもはるかに困難です。EMS（2012）と CS 80 では、産業プロセスが排出量削減に寄与する割合が低くなっています。CS 95 では、プロセス関連の排出は、CCS を使用してほぼ完全に削減することができます（95%の捕獲率が想定されています）。

プロセス関連の CO2 排出量については、3 つのカテゴリー（簡略化した形で）を区別する必要があります。

・銑鉄生産（高炉製鉄）では、プロセス関連の CO2 排出は、石炭を使用して酸化鉄を還元することから発生します。

・水素製造（アンモニアの前駆物質として）では、天然ガスが原料に使用されます。天然ガスは燃焼されず、水素への直接の化学反応が起きるため、プロセス関連の排出とみなされます。

・セメントおよび石灰生産では、CO2 は生産工程で石灰岩から放出されます。従って、これらの CO2 排出は、燃料使用に起因するものではありません。

・従来のセメント製造では、固化材を使用しない場合（例えば、コンクリートの代わりに木材を使用して建築する場合）、CCS はおそらく唯一の排出削減オプションとなります。銑鉄および水素に関しては、代替の排出削減オプションも考えられます。その場合、個々に異なるプロセス特性を考慮する必要があります。

・銑鉄生産では、電気、水素、または合成メタンを還元剤として使用することが、理論的に考えられます。そのためには、新しいプロセスを開発しなければなりません。

・水素製造では、電気分解を使用することができます。このプロセスは原理的には技術的に利用可能ですが、まだ大規模には使用されていません。

他の研究（例えば、ドイツ連邦環境庁の調査「2050 年のドイツー温室効果ガスーニュートラル国, “Germany in 2050 – A Greenhouse Gas-Neutral Country”」）では、そのような技術により、排出が回避されています。しかし、この研究は、緩和策を考慮に入れていません。なぜなら、産業での推定コストが高すぎると評価されるからです。大量の再生可能エネルギーによる電力が低コストで得られることが必要であり、電力貯蔵の問題が明確にされなければなりません。なぜなら、再生可能エネルギーは、必要なフルロード電力が年間 2,000～4,000 時間しか供給されないからです。再生可能エネルギーのコストがより急激に低下した場合や、CO2 の地下貯蔵が現在予測されているよりもかなり高価である場合や、CO2 貯蔵が技術的に機能しない場合には、評価が変わる可能性があります。産業におけるプロセス関連の排出削減につ

いて、国際競争力を考慮に入れた分析を含め、更に分析が必要です。セメントと鉄鋼の場合に CCS の社会的受容性がどの程度高いかという問題も取り上げるべきです。

産業に起因する全排出（産業用発電所、産業プロセスおよび製品使用を含めたエネルギー関連の排出）は、CS 80 の場合には 2010 年から 2050 年の間に 114 Mt CO2e 削減する減少します。それは、1990 年と比較して 74%の減少に相当します。CS 95 では GHG 排出削減は、2010 年と 2050 年の間で 183 Mt CO2e とかなり高く、1990 年比で 99%の減少に相当します。それと比較して、EMS（2012）では、GHG の減少は 2010 年から 2050 年の間に 54 Mt CO2e とかなり少なく、1990 年比では−52%です。

8.6. 輸送部門

ドイツの輸送部門の GHG 排出量は、1990 年比で CS 80 では 81%、CS 95 では 98.4%削減されます。

このようにして、ドイツの輸送部門は、国際輸送よりも著しく高い排出削減を達成します。国際的な航空および海上輸送を含めた輸送の GHG 排出量は、CS 80 では 2010 年から 2050 年の間に、184.5 から 66 Mt CO2e（1990 年比で−63%）に減少します。CS 95 では、これらの GHG 排出量は 15 Mt CO2e（1990 年比で−92%）に低下します。

他の研究およびシナリオと一致して、その結果からは次の結論を導き出すことができます。全セクター全体の削減目標が 80%なら、国内輸送に関して 60〜80%の排出削減で十分かもしれない。しかし、全体の削減目標が 95%の場合には、輸送部門はほぼ完全に GHG 排出を無くさなければならない。エネルギー源（例えばバイオマス）の間違った配分を避けるため、2050 年の最終エネルギー消費量を 2005 年に比べて−40%に削減するドイツのエネルギー・コンセプトに掲げられた目標を−60%に引き締めなければならず、2030 年には−30%の中間目標を追求する必要がある。

Figure 4-7 は、CS 80 の 2010 年と比較した最終エネルギー消費と GHG 排出量の変化を示しています。排出削減を達成するには、エコ・モビリティ

と鉄道の使用を強化し、それにより燃焼エンジンへの依存を減らす措置が2030年まで不可欠です。他の重要な措置は、従来のドライブに関する効率改善と、バッテリー電気駆動輸送の増加です。リバウンド効果を回避するため、この効率改善は、シナリオにおける燃料税の増加と組み合して行われます。

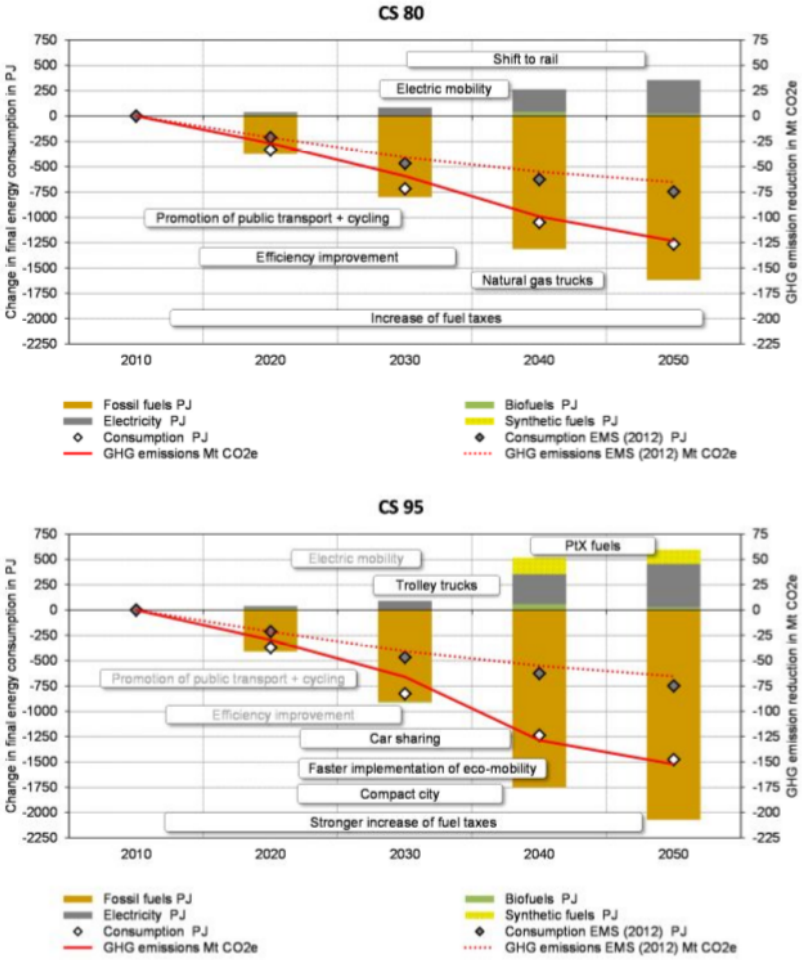
CS 80では、最終的なエネルギー需要は、これらの措置に基づいて2050年までに、2005年比で59%削減されます。持続可能なバイオ燃料と電力から製造された燃料の利用可能量が限られていることを考えると、部門間の排出目標を達成するためにはシナリオにおける最終エネルギー需要の大幅な削減が必要です。

Figure 4-7は、CS 95における最終的なエネルギー消費とGHG排出量の推移とその前提を示しています。エンジンの小型化率は、自家用車の私有に代わる優れた代替案とカー・シェア利用のため、このシナリオではEMS（2012）やCS 80よりも大幅に低くなります。2050年までに、旅行のためのプライベート輸送の割合は50%に落ち、自転車利用の割合は25%に増加します。適切な効果を得るためには、CS 80よりも燃料価格の大幅な上昇が必要です。トロリートラックの使用は、道路輸送の効率を大幅に向上させます。CS 95では、2005年と比較して2050年までにドイツの最終エネルギー需要が68%削減されます。また、2040年から2050年には、電力から製造された燃料（PtX燃料）が、必要なGHG排出削減のため、限られた範囲に使用されます。これらの燃料の50%だけが国内で生産され、残りは輸入されると仮定されていますが、電力需要は大幅に増加します。

全体的にみると、全部門で少なくとも80%の排出削減を追求し、95%以上の排出削減の可能性を維持するには、何十年も先の焦点は、効率的な輸送手段（公共交通機関、自転車、鉄道）の強化と、輸送車両の効率を高めることの対策に置かれるべきです。

従って、供給側と需要側の両方の手段が必要です（例えば、燃料税の調整と組み合わせて野心的な車両の排出目標）。更に、輸送の電化は非常に重要です。航空輸送では、効果的な排出権取引が確立されなければなりません。

Figure 4-7: **Change in final energy consumption and reduction of GHG emissions in transport in CS 80 and CS 95 (w/o internat. aviation and maritime transport), 2020 – 2050 compared to 2010**



Note: The left axis refers to final energy consumption, which is shown by the bars (and the balance by the diamonds). The right axis refers to the GHG emission reduction, which is shown by the lines. The fields with light grey text show the measures specified in CS 80; the additional measures specified in CS 95 are shown as black text.

Source: Authors' own calculations

長期的には、液体燃料は輸送部門（例えば、航空輸送）において必要なままである可能性が高い。ポスト化石燃料の可能性は限られており、持続可能

性を保証することが可能でなければなりません。ポスト化石燃料で持続可能燃料の製造コストの低下は、まだ市場に導入されていない技術に部分的に依存しています。意欲的な気候保護目標を達成するためには、ポスト化石燃料のエネルギー供給オプションが必要ですが、上記の理由から、輸送部門の効率改善の野望を減じる議論として使用すべきではありません。代わりに、2050 年までの輸送における最終エネルギー需要を削減する目標を少なくとも 60%に増やし、2030 年には少なくとも 30%の中間目標を導入すべきです。

更に、環境に配慮した輸送モード（例えば、2025 年までに）への移行のための追加的サブ目標を国レベルで確立すべきかどうかを検討する必要があります。交通手段別分担の目標を決める際には、潜在的に達成可能で、適切な措置により支援する必要があります。

自転車利用に関しては、2020 年までに自転車による旅行を 15%まで増やすため、ドイツ全国自転車利用計画に目標が設定されています。この目標は、対応する政策で強化され、その野心度は 2025 年と 2030 年の間に大幅に上昇します。ドイツの持続可能性戦略（Germany's sustainability strategy）には、貨物輸送のモーダルシフト目標もあり、目標は 2015 年に 25%、内陸水路では 18%に設定されています。しかし、目標達成への進展は明らかに不足しています。また、旅客輸送の目標はありません。国家目標を確立するには、既存の目標を州および地方自治体レベルで審査することが有用でしょう。例えば、バーデン・ヴュルテンベルク州では、すでに旅客輸送と貨物輸送の両方について野心的な目標があります。

8.7. 農業部門と LULUCF

＜農業＞

他の部門では、技術的対策に基づいて最大 100%の排出削減が可能ですが、農業生産には亜酸化窒素およびメタンの排出が発生する生物学的プロセスが含まれます。しかし、農業土壌は、LULUCF（土地利用・土地利用変化及び林業）セクター内でバランスのとれた大きな CO2 削減ポテンシャルを含ん

でいます。

Figure 4-8: GHG emissions of the agricultural sector in CS 80 and in CS 95

Source: Öko-Institut, authors' own calculations

肥料の使用、家畜の減少、有機農業の拡大における窒素効率の改善には、大きな排出削減の可能性があります。

EMS（2012）では、農業部門のGHG排出量は2010年レベルで2050年までほぼ一定です。1990年から2012年にかけて、農業部門のGHG排出量は22%削減することが可能でした。CS 80では、この部門の排出量は1990年から2050年には88から約51 Mtに減少し、1990年比で42%の削減に相当します。CS 95では、GHG排出量は、1990年比で59%削減に相当する35 Mt CO2eに減少します。

両シナリオにおいて、農業部門は主要な排出源になります。CS 95では、総排出量の60%（LULUCFと国際輸送を含む）のシェアを有し、CS 80では20%のシェアを占めます。これは、両シナリオで想定されている動物製品消費（肉食）の大幅な減少を含む食習慣の変化にもかかわらず、そうなっています。家畜の減少は、両シナリオにおける動物製品需要の減少を前提としています。肉摂取量に関しては、ドイツ栄養学会の勧告を基礎として採用されており、1週間に1人あたり300～600gの肉が推奨されています。CS 80では、1週間に1人あたり760gから450gへの肉消費の減少が想定されています。CS 95では、1週間に1人あたり300gの肉が想定されています。

窒素効率を高めることにより、全体的な割合と1ヘクタール当たりの窒素残量が減少します。CS 80では、余剰窒素の残量が2050年には約40 kgN/haになります。CS 95では、2050年の残高は約20 kgN/ha（現時点では約100 kgN/ha）です。ドイツの国家持続可能性戦略では、2010年までに80 kg N / haを目標としており、ドイツ連邦環境庁の農業専門家パネルは50 kg N / haを目標としています。これは、この分野のすべての削減可能性が、2回目のモデリングで疲弊（低下）したことを示しています。

CS 80では、2050年に有機農業が農地総面積の20%を占めています。CS 95では、2050年に25%（2012年には6%）に増加します。

農業部門の排出量を約50%削減するには、消費量の変化だけでなく、研究開発への投資も必要となります。技術的対策のさらなる進展とともに、より多くの研究資金が投資されるべき4つの大きな研究分野が特定されています。

＜有機農業＞

2050 年に 20～25%の有機農業目標を実現するには、農業研究の資金のかなりの部分を有機農業に割り当てる必要があります。さらなる収量の増加と品質の改善なしに、有機農業は将来的に重要な役割を果たすことはできません。革新的で持続可能な農法と家畜システムのさらなる研究が不可欠です。従来の育種や栽培よりも有機農作物や動物の生産において異なる育種目標が追求されるため、有機農業のための追加の研究プログラムが、とりわけ育種に関し、開始されなければなりません。一方的な高性能育種の代わりに、農薬を使用せずに栽培できる抵抗性があり耐性のある果物や野菜の品種と共に、二重目的の品種（例えは鶏）や丈夫で広範囲の窒素肥料に対応できる穀物に焦点を当てるべきです。

これらのシナリオでは、消費の変化に基づき、2050 年までにかなりの家畜減少が想定されています。草地の使用と維持はそれにより脅威にさらされるでしょう。しかし、家畜のための土地の強力なセットサイドを伴う有機農業の同時的な拡大のために、草地のかなりの部分は将来放牧と乾草生産のために使用されるでしょう。この経済活動の生産性が低いことを考えると、今後持続的に排出される製品単位当たりの GHG 排出量の削減可能性についてのさらなる研究が必要です。ミルク収量の増加や二重目的品種の開発が優先されるべき程度についての問題も検討する必要があります。

有機農業研究は、とりわけ、モデル地域とパイロット事業を対象とした農業研究に適しているはずです。

＜窒素効率＞

2010 年時点で 100 kg N / ha という高い窒素の余剰を考えると、窒素効率の分野で大幅な削減の可能性があります。現在の知識に基づき、CS 95 で想定されているように、わずか 20 kg N / ha の余剰窒素を有する植物生産は、収量の減少なしには不可能です。収量の安定化と同時に窒素損失の低減についてのさらなる研究が必要です。このためには、例えば秋の肥料が必要であり、それを避けることができる場合、有機農法の範囲内で窒素を豊富に含む穀物をどのように栽培するのかについて、科学的合意が必要です。実施には、

現在の肥料要求モデルの適切な調整と、専門家のコンサルタントの増加を伴わなければなりません。

＜食品の移行＞

農業部門における排出量半減は、家畜の削減なしには達成できません。これは、人々の食生活の変化を背景に、確かに起こるだけです。そうでなければ、不足する製品は家畜養殖国から輸入され、GHG 排出量のリーケージ（輸出国側での GHG 排出）の影響を伴うことになります。この目的のために、研究開発分野では様々な活動が必要です。

・「温暖化防止に最適化な」食品の健康への影響に関する証拠に基づく研究。

・変更された調製方法/レシピや、ケータリング施設や施設の人や、直接の消費者や教育機関（育児施設、学校）における食糧、環境、健康などの重要な関係についての背景情報の効果的な知識伝達の開発。

＜LULUCF＞

土地利用、土地利用変化および林業（LULUCF）を通じて、GHG 排出量が公表されています。一方、LULUCF 部門、特に森林地域では CO2 吸収も行われます。CO2 吸収が GHG 排出を上回る場合、LULUCF 部門は全体的にカーボン・シンクの機能を担います。ドイツの LULUCF 部門における GHG の最大排出源は、農耕地と有機土壌（泥土）に関する草地です。

全体的に、ドイツの LULUCF 部門は、2010 年に 9 Mt CO2e の GHG を発生させました。以下に述べる開発を通じて、LULUCF 排出量は 2050 年までに CS 80 では 1 Mt CO2e に減少します。CS 95 では、LULUCF 部門は、農業土壌の排出量が非常にシャープに減少し、その間に林業のシンク機能が維持されるので、全体ではカーボン・シンクになります。2050 年には、LULUCF 部門の純吸収量は約 23 Mt CO2e になります。対照的に、LULUCF 排出量は、EMS（2012）では 6～15 Mt CO2e だけ増加します。

CS 80 および CS 95 では、住宅地域への変更が、現在の 119 ha/日から、30ha/日に減少すると仮定されています。いずれのシナリオにおいても、泥炭

地の劣化は、2015 年から 2020 年に完全に停止すると想定されています。泥炭抽出の中止は、LULUCF 部門において 5%の削減可能性を有します。

更に、2015 年から 2030 年までの以下の措置は、CS 80 で 30%、CS 95 で 95%と想定されている実施範囲のみが、2 つのシナリオで異なるモデルに基づいています。

・有機土壌の農地と草地は、主に湿地に変換され、森林や低木地にはあまりなりません。有機土壌を有するその他の土地は、もはや農耕地や草地には転換されません。泥土のこの保護は有効な手段です。これにより、LULUCF 部門の現在の GHG 排出量の最大 80%が減少できます。GHG の排出削減可能性は、例えばバイオエネルギーの利用により同じ地域で達成できる GHG 削減よりもかなり高いものです。

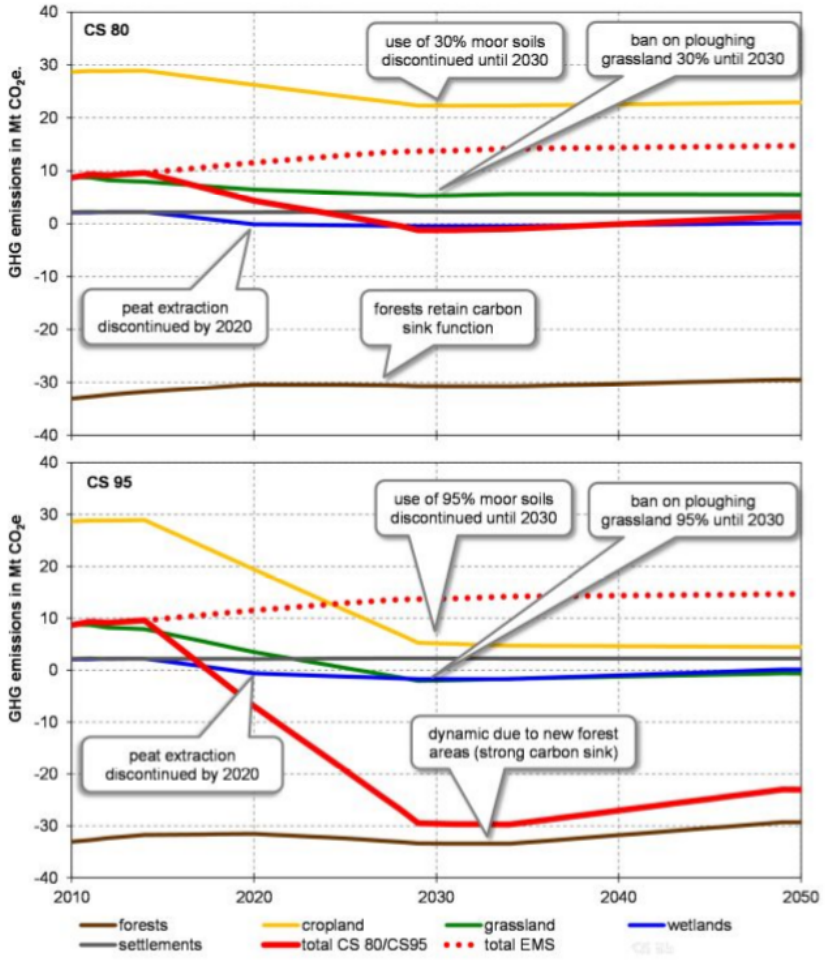
・鉱物土壌の草地の農耕地への転換は中止されます（4%の削減可能性）。

＜泥土の保護＞

定量的に言えば、LULUCF 部門における排出削減への最大貢献は、農業目的で有機土壌の使用を中止することに由来します。このシナリオでは、湿地や森林への転換が想定されています。いくつかの地域では、土地利用の完全な再構築が必要です。受け入れ、補償支払い、土地売却の創成に加え、土地利用の完全な再編は、地域計画に組み込まれる必要があります。この目的のために、モデル領域の開発は、この目的のために強く推進することができます。

農地を湿地や森林に転換するための代替利用概念についての更なる研究が必要です。研究プロジェクトは、現在、泥土で生産されたバイオマスの使用に関するキーワード「paludiculture」の下で実施されています。バイオマスの量と質については、エネルギーとしておよび材料としての可能な利用に関し、更なる研究が必要です。それは、湿潤または定期的に湿った場所での適切な樹種の生産や、可能な収穫技術です。

Figure 4-9: **GHG emissions and inclusion of LULUCF sector in CS 80 and CS 95, 2010-2050**



Source: Authors' own calculations

注) 8 章の図が不鮮明な場合は、下記の原典を参照下さい。

- Climate Protection Scenario 2050　Summary of second final report
- Klimaschutzszenario 2050, 2. Endbericht　（ドイツ語版レポート）

9. ドイツのシナリオで日本に役立つ事項

8 章に紹介した「ドイツの GHG 削減長期シナリオ」のうち、日本の参考となる注目事項を列記しました。

＜電力消費量＞

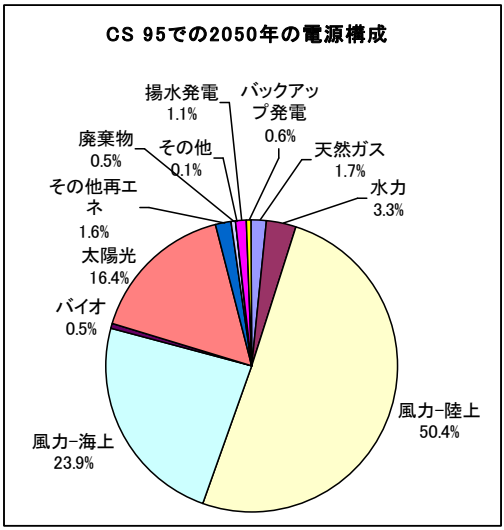
エネルギー消費量は減少しますが、多くの用途でエネルギー源が、燃料から電力に転換されるため、2050 年の電力消費量は増加します。燃料使用の暖房からヒートポンプ暖房への転換や、電気自動車の普及が代表例です。

CS 95 では、2050 年の電力消費は 2008 年レベルを 27%上回ります。2050 年での新規の電力消費は総電力消費量の 44%を占め、その 4 分の 3 が輸送部門です。それには、電気自動車などの直接的な電気使用に加え、水の電気分解で製造した水素を用いた合成燃料の使用も含まれています。

＜再生可能エネルギー発電＞

右図はCS 95 で想定されているドイツの 2050 年の電源構成です。原発や石炭火力は無くなっています。

陸上風力が 50%を占め、海上風力も 24%です。なお、海上風力の大半は、水深 50m までを目安とされる着床式と思われます。ドイツの北海沿岸には、着床式風力発電を設置できる遠浅の海があります。



ドイツの太陽光発電は、買取制度（FIT）により、2010 年から 2014 年頃に掛け急増しました。しかし、2050 年時点で太陽光発電は 16%程度で、風力発電の 2 割強に過ぎませ

ん。

太陽光発電の発電コストは低下しましたが、風力発電の方が発電コストがかなり低いためです。燃料価格がもう少し上昇すれば、風力発電の発電コストは火力発電と同等になります。

日本で再生可能エネルギーというと、先ず太陽光発電が取り上げられます。日本には風力発電に適した立地が乏しいためです。中緯度地域で風力発電は、偏西風を有効に利用できることが必要です。欧州の大西洋岸には、風力発電に適した立地が豊富です。ドイツの冬季の北海沿岸は強い風が吹きます。

偏西風に関し日本は、中国大陸の陰になっているため、有効な場所が多くありません。標高が高い山岳部には、風況の良い場所もありますが、多くの場所には国立公園の規制があります。また、山岳部に、長さ 50m に達する風力タービンのブレードを運搬するのは大変な作業です。山岳部では、設置コストに加え、落雷や台風による損傷による保守コストも高くなります。

海上風力については、日本の沿岸の大半は、5 km ほど沖合に出ると水深が 50m 以上になっていることが海図を見ると分かります。着床式の海上風力発電を設置する立地も限られています。浮体式風力発電は開発途上の技術で、将来的にも低コスト化できるとは考え難いように思います。

日本では、風力発電の立地が乏しいため、再生可能エネルギーとしては、発電コストが高い太陽光発電に依存せざるを得ない訳です。なお、ドイツは、日本より高緯度のため、太陽光発電は不利になる面もあります。

日本の太陽光発電は、近年、設備コストがかなり低下しました。しかし、海外に比べて未だ高い水準です。2012 年頃には、ドイツの太陽光発電のシステム価格は 20 万円/kW 前後まで低下していましたが、日本でのシステム価格は 70 万円/kW 前後と大きな差がありました。特に住宅の屋根設置の場合には、中間マージンが異常に多いことが高価格になる主な要因です。海外に比べ異常に高い太陽光発電の設備価格をそのままに、日本に FIT を導入したことが、その失敗の主な原因と思います。

その他、ドイツではバイオ関係の発電は、2012 年時点では 7%を占めていましたが、2050 年には 0.5%に減少すると想定されています。

＜**電力貯蔵**＞

風力や太陽光の再生可能エネルギーの比率が高くなると、電力貯蔵が必要になります。ドイツは、欧州の電力網に組み込まれているので、電力の輸出入により需給調整を行うことができます。例えば 2015 年実績でドイツは、電力の輸入と輸出が各々37 TWh、85 TWh で、それらは国内総発電量の各々 5.7%、13.2%に相当します。ドイツは冬季の風力発電による余剰電力を、安い電力価格で近隣諸国に輸出しています。日本は、将来的にもロシアや韓国と電力網で繋がることはないでしょうから、国際電力網により需給調整を行うことはできないでしょう。

電力貯蔵の主な手段として、日本では揚水発電が想定されています。2015 年実績で日本は、水力発電が総発電量の 8.7%を占め、今後揚水発電を追加できる設備もあると思われます。一方、ドイツは水力発電の比率が 3.8%と水力資源の乏しい国です。ドイツのシナリオ 2050 では、ノルウェーの揚水発電所と海底ケーブルで接続することが想定されています。2015 年実績でノルウェーは、水力発電が総発電量の 95.8%を占める水力大国です。恐らく、水力発電や揚水発電を新設できる立地も、まだあるものと思われます。

2050 年の CS 95 シナリオのように、風力と太陽光発電の比率が 90%以上に達すると、国際電力網と揚水発電による需給調整では不十分です。CS 95 では、風力発電などによる余剰電力を用いて水を電気分解し、発生した水素によるエネルギー貯蔵が含まれています。GW クラスの大電力貯蔵技術は、揚水発電と水素化エネルギー貯蔵くらいしかありません。水素化方式は、揚水発電に比べて放電時間が長く、季節的な電力需給の調整に対応できます。但し、電力貯蔵のサイクル効率が低いのが問題です。揚水発電は、ポンプ効率を 80%、水車効率も 80%とすると、サイクル効率は約 64%になります。電力貯蔵により電力の約 1/3 が失われるわけです。一方、水素化電力貯蔵では、電気分解してできた水素を圧縮貯蔵した後、水素を燃料にガスタービン複合サイクルで発電した場合には、サイクル効率は 35%前後と低いものになるでしょう。CS 95 では、電力の水素化は、電力貯蔵だけでなく、水素をメ

タン化して都市ガスとして利用することや、液体燃料に合成して輸送用に利用することも考えられているようです。

＜建物部門の熱供給＞

日本と異なりドイツは、冷房需要は殆どありません。燃料を燃やす暖房が主流です。GHG 排出削減策としては、建物の断熱を強化し、電動のヒートポンプによる熱供給に転換することになります。そのためには、建物の改修が必要になります。CS 80 では 2030 年までに毎年 2%の建物が改修され、CS 95 では 3%の建物が改修される想定です。実際の改修率と改修程度のデータを把握して対策を講じることが重要であり、ドイツ全土で照合できる制度的に編成された中央データベースの確立が必要と述べています。

日本では 1970 年代の石油危機以降、住宅の省エネ基準が制定され、数次の改正で断熱気密の基準が強化されてきました。しかし、欧州に比べて断熱基準が緩く、特に熱の出入りが大きい窓部の断熱性能が劣っていることが指摘されています。日本は暖房エネルギーの消費量が少ないため、住宅の断熱を強化しても、GHG 排出量の削減効果が低いことも影響しているようです。欧米では家全体を温かくするのに対し、日本は人がいる場所だけを冷暖房するため、快適性は劣りますが、エネルギー消費を抑制する考え方と言えるでしょう。日本では、暖冷房が必要な地域では、電動のヒートポンプ式空調が既に普及しています。

＜家庭部門の家電機器＞

大型電化製品や照明によるエネルギー需要の低減を主な目的に、エコデザイン指令、エネルギー消費ラベル、高効率家電奨励のドイツ省令により推進することが記載されています。

日本では、石油危機直後の省エネ法の制定・施行、トップランナー方式の導入、省エネラベルなど、ドイツと比べても進んでいるとように思います。

＜産業部門の省エネ＞

産業部門のGHG排出量の削減には、省エネの取り組みと、工業プロセスの開発があります。前者についてドイツのCS 80では、燃料を消費していた低温熱需要に対する廃熱利用やヒートポンプの併用、材料効率の向上（歩留まり向上）などが述べられています。

それらの技術は、日本の産業界が1970年代に始まる石油危機の時代に盛んに開発したものです。技術的に実用化の目途はついたけれど、経済的に成り立たないため、過半の技術は実用に供されずに今日に至っています。しかし、太陽光発電やCO2回収貯蔵技術（CCS）などと比べれば、少ない経済的負担でGHG排出削減を行える技術です。今後2050年に向けてGHG削減のため、埋もれているそれらの技術の活用も検討すべきでしょう。

＜工業プロセスの開発＞

工業生産で排出されるGHGの中には、熱エネルギー利用以外のものがあります。例えば鉄鉱石から鉄鋼を生産する場合、酸化鉄である鉄鉱石を、炭素が主体のコークスで還元する必要がありCO2が発生します。単にコークスの燃焼熱を利用するのではないため、再生可能エネルギーに転換してGHGを削減することはできません。また、石灰石を原料にセメントを生産する時にも、同種のCO2が排出されます。

日本の2015年の実績で、鉄鋼業からは日本のGHG総排出量の13.8%、セメント産業からは1.3%と、かなりのGHGが排出されており、そこには上述のGHGが含まれています。

この種のGHG削減は、エネルギー関連の排出削減よりもはるかに困難です。例えば、鉄スクラップを原料に、電気炉で溶融して鉄鋼を生産すれば、GHG排出量を大幅に削減できます。しかし、鉄スクラップには、種々の不純物が含まれており、溶融した鉄から不純物を分離除去することは一般に困難です。不純物を含む鉄鋼では、自動車用外板や高張力鋼など高級鋼を製造することはできません。

このようなエネルギー関連以外のGHGは、新規の工業プロセスを開発できない場合には、排出削減できず最後まで残る可能性があります。ドイツで

は、火力発電に CCS を付帯して CO2 を貯留することは想定されていませんが、工業プロセスなどで無くすことができない CO2 排出に CCS を用いることが考えられています。

＜輸送部門＞

2050 年に向けた輸送部門での GHG 排出削減計画では、トラック輸送から鉄道による貨物輸送へのモーダル・シフトを進めることや、旅行などでの自転車利用の拡大が考えられています。

乗用車が電気自動車とプラグイン・ハイブリッド車になることは、誰でも想定することですが、トラックによる長距離貨物輸送はどうなるのでしょうか。大型の長距離トラックを電気自動車にするにはバッテリーが過大になり、充電にも長時間を要します。対策の一つとして、トロリー式のディーゼル－電気ハイブリッド・トラックの高速道路での利用開発がスウェーデンとドイツで進められています。

船舶や航空機による国際輸送は、ドイツ国内規則が適用されないため、GHG 排出削減は遅れると考えられています。

＜農業部門の GHG＞

農業部門からのGHG排出量は、2015年実績でドイツが総排出量の8.5%、日本は 2.7%とそれほど多くはありませんが、排出実態についてあまり知られていないので紹介します。下表はドイツと日本の 2015 年の実績です。

ドイツと日本の農業部門のGHG排出量（2015年）

出所：UNFCCCデータ

単位 ：kt CO2 equivalent

国名	GHG	CO2	CH4	N2O	計
	地球温暖化係数	1	25	298	
ドイツ	消化管内発酵		24,782		24,782
	家畜排せつ物の管理		6,201	3,833	10,035
	稲作				0
	農用地の土壌			27,527	27,527
	農作物残渣の野焼き				0
	石灰施用	2,215			2,215
	尿素施肥	856			856
	その他		1,296	245	1,541
	計	3,071	32,279	31,606	66,955
日本	消化管内発酵		7,335		7,335
	家畜排せつ物の管理		2,335	3,985	6,319
	稲作		13,908		13,908
	農用地の土壌			5,454	5,454
	農作物残渣の野焼き		70	22	92
	石灰施用	370			370
	尿素施肥	189			189
	その他				0
	計	559	23,648	9,460	33,667

GHG のほとんどは、エネルギー由来のものではありません。CO2 よりもメタン（CH4）と二酸化窒素（N2O）が多くなっています。上表は CO2 換算の排出量を示しています。いずれも排出量は小さいのですが、地球温暖化係数が CH4 は CO2 の 25 倍、N2O は 298 倍と大きいため問題になります。

農業部門のメタンのほとんどは、有機物が嫌気性バクテリアで分解されて発生するものです。家畜の消化管内発酵は、いわゆる牛のゲップのことです。余談になりますが、有機物は主に炭素と水素から構成されています。焼却されると炭素は CO2 になります。埋め立てられ嫌気性雰囲気でバクテリアにより分解されると、炭素はCO2の25倍の温室効果を持つCH4になります。そのため、有機物を多く含む生ごみは、埋め立て処分でなく、焼却すべきと

されています。

N2O は、農耕地に施された窒素肥料から発生します。また、窒素を含む家畜の排せつ物からも発生します。

ドイツと日本を比較すると、ドイツでは牧畜による CH4 と、農用地土壌からの N2O が多く、日本は稲作による CH4 の排出が多いことが分かります。

ドイツのシナリオ 2050 には、農耕地での窒素効率を高め、窒素残量を減らすことが記されています。少ない窒素残量でも収穫が減らない育種の開発なども述べられています。2050 年に向けて、農業分野でも温暖化防止を考慮した育種や栽培方法の研究開発が求められることになるでしょう。

＜LULUCF＞

ドイツと日本のLULUCF部門のGHG排出量（2015年）

出所：UNFCCCデータ

単位 ：kt CO2 equivalent

	ドイツ	日本
森林	−57,761	−62,953
農地	14,885	4,046
草地	22,709	−122
湿地	4,072	52
開発地	3,445	−557
その他の土地	0	162
伐採木材製品	−2,124	−1,598
その他	94	0
合計	−14,580	−60,940

LULUCF とは、Land Use, Land Use Change and Forestry のことです。ドイツと日本のLULUCF部門の2015年実績のGHG排出量を示しました。森林については、ドイツも日本も同程度の CO2 吸収部になっており、ドイツはGHG 総排出量の 7.3%のシンク、日本は総排出量の 5.1%のシンクです。一方、ドイツの農地や草地は CO2 の排出源になっており、日本とは異なります。

＜本章のおわりに＞

8章と併せ、ドイツの温暖化防止の長期シナリオを紹介しました。前述したように、火力発電での CCS や原発を利用しないシナリオです。イノベーションを前提とした日本の長期計画と異なり、現状の延長線の技術で GHG を80%削減、95%削減するシナリオであることも注目して下さい。

ドイツと日本は、ともに産業に占める工業生産の割合が高く、多くの類似点があります。人口１人当たりの GHG 排出量も現状はほぼ同じです。しかし、両国のエネルギー事情を詳しく見れば、下記のように重要な相違点もあります。

・再生可能エネルギーについて、ドイツは風力発電が主体で、太陽光発電の比率はそれほど大きくありません。風況の良い立地に設置された風力発電の発電変動は、太陽光発電よりかなり小さいものです。

・欧州各国は送電網でつながっているため、発電電力量の時間的な変動を地域的な需給バランスで吸収する余地があります。

・ドイツは水力発電が乏しいのですが、北海を挟んで隣接するノルウェーは極めて豊富な水力資源を有しています。ドイツは、ノルウェーの揚水発電と接続する高圧ケーブルを順次増強する計画となっている。

GHG 削減に関し、日独の相違を認識した上で、ドイツのシナリオを参考に、日本シナリオを創出することが重要です。

10. 日本の GHG 削減長期戦略

GHG の長期戦略について本章で述べたいのは、主に次の 3 点です。

日本の温暖化対策の長期戦略は、イノベーションを前提にしています。しかし、エネルギー分野のイノベーションが生まれる可能性は低いと思います。それを待っていたのでは不都合が生じます。現状技術の延長線で、GHG 削減の長期シナリオを検討すべきです。

多くの人が原発の撤廃を望んでいます。しかし、廃止する前に、原発無しに GHG 削減の長期シナリオを描けるか確認すべきです。原発の有無二通りのシナリオを作成して比較すれば、答えが出るはずでする

CCS は原発のように反対が少ないからといって、GHG ゼロの逃げ口になっては困ります。日本にどれだけの CCS 立地があるか、また、CCS を長期に続けることが本当に可能なのか、データを基に検討することが重要です。

京都議定書以後の日本の GHG 削減長期戦略の検討経緯を見ることから始めます。

10.1. 日本での検討経緯

京都議定書以後、GHG 削減の長期戦略について日本ではこれまでどのような検討が行われてきたか紹介します。私の記憶の範囲で記載したので、抜けていることもあるかもしれません。

＜ラクイナ・サミット＞

日本からは当時の麻生首相が出席した 2009 年 7 月の G8 ラクイラ・サミットで、世界全体の温室効果ガス排出量を 2050 年までに少なくとも 50%削減する目標を再確認するとともに、先進国全体として 80%またはそれ以上削減する目標が支持されました。

それを受け同年 8 月に、環境大臣名で国民への問題提起を目的に「**温室効果ガス 2050 年 80%削減のためのビジョン**」が公表されました。どのように GHG80%削減を行ったらよいか、2 つのビジョン A、B が示されています。詳しい積算は公表されておらず、エネルギー消費と GHG 削減の枠組み

と、GHG 削減に係わる主な事項が記載されているだけです。

シナリオA～B で、原子力は 2005 年比で 1.4 倍(A)～1.2 倍(B)、太陽光発電の発電容量は 2005 年比で 120 倍(A)～140 倍(B)、風力・中小水力・地熱発電の総発電量は 2005 年比で 14 倍(A)～17 倍(B)とされています。その分、石炭・石油・LNG の火力発電を低減する電源構成です。GHG 排出量が 80%削減になるように、シナリオ A では全ての火力発電に CCS、シナリオ B では石炭火力に CCS を付帯する計画です。

シナリオ A、B は原子力をある程度増やし、太陽光発電を常識的な範囲で精一杯増やし、一方、火力発電を削減するものです。そして、GHG80%削減に辻褄が合うように、CCS の利用を設定していますが、国内にそれだけの CCS 立地ポテンシャルがあるかを検討したかは疑問です。CCS の想定を除けば、常識的なシナリオと言えるでしょう。

＜民主党政権での混乱＞

2009 年 8 月、衆議院選に勝利した民主党は、選挙で掲げたマニフェストに従い、2020 年までに温室効果ガスを 90 年比で 25%削減することを表明しました。産業界の懸念をよそに、鳩山首相は同年 9 月の国連気候変動サミットで 25%削減を誇らしげに発言しました。しかし、25%削減には積算根拠がないことが、やがて知られるようになります。

同年 12 月に予定されるコペンハーゲンでの COP15 に向け、急遽、タスクフォースが設置され、25%削減に必要なコストなどの検討が行われました。11 月下旬にタスクフォースの中間取りまとめが出されましたが、検討結果は政権の意向に沿ったものでなかった模様で、メンバーを変えて検討を続けることになりました。2010 年 3 月に「**地球温暖化対策に係る中長期ロードマップの提案**」が環境大臣の試案として出されました。2020 年に 25%、2050 年に 80%削減のロードマップを示すものですが、2050 年ついてはあまり詳しい記載はありませんでした。

2010 年 6 月には、25%削減に対応した「**エネルギー基本計画**」の見直し（第二次改定）が行われました。2030 年に向けた目標として、14 基以上の

原発の新増設と、電源構成に占める原子力及び再生可能エネルギー由来の比率を約70%とすることが記載されています。基本計画に記載されていませんが、総電力量の53%を原子力とする想定と言われます。エネルギー基本計画を閣議決定したのは、菅首相の内閣です。

2011年3月に東日本大震災が発生し、福島第一原発の事故が起き、国内の全ての原発が停止しました。福島第一原発の事故対応で、指揮官としての菅首相の資質が問われ、民主党内からも首相交代を求める意見が出されました。

同年5月のG8サミットに出席した菅首相は、冒頭、原子力の安全性向上とともに、再生可能エネルギーの飛躍的な普及について発言しました。太陽光発電の発電コストを2030年に6分の一まで引き下げ、日本中の設置可能な約1千万戸の屋根の全てに太陽光パネルの設置を目指すと唐突に表明しました。

首相交代の要求に対し、菅首相は再生可能エネルギーの買取制度創設を条件の一つにあげたと言われます。超党派の国会議員の推進で、再生可能エネルギーを全量固定価格で買取る制度の法律が成立しました。その附則には次のことが盛り込まれました。「集中的に再生可能エネルギー電気の利用の拡大を図るため、この法律の施行の日から起算して三年間を限り、調達価格を定めるに当たり、特定供給者が受けるべき利潤に特に配慮するものとする。」

太陽光発電コストのかなりをソーラーパネルが占めており、ソーラーパネルは国際的に取引される商品です。それにもかかわらず、当時日本での太陽光発電の設備単価がkW当たり70万円であったのに対し、ドイツではkW当たり20万円台と遥かに低い水準でした。そのことは、私のホームページで紹介し、かなりのアクセスがありました。

70万円/kWの太陽光発電の設備費に対応した、太陽光発電の高い電力買取価格が設定されたら、問題が起きることが予測されました。

5名の有識者による「調達価格等算定委員会」により、日本の高い太陽光発電の設備価格をそのままに、発電事業者の要望に概ね沿った高い買取価格

が設定されました。

同制度が開始された2012年から2019年までの8年間で、国民負担となる再エネ賦課金の合計は11兆円に達し、当初の想定を大幅に超えました。過大な賦課金を抑制するため、毎年買取価格の引き下げが行われ、2017年には同制度の法改正が行われました。しかし、初期に認定を受けた高い買取価格の太陽光発電案件の未稼働問題があり、20年の調達期間が終わるまでに賦課金の総額がいくらになるか予測できません。

記載が長くなりましたが、民主党以外にも「政治が脱原発を決めれば、代替策は知恵のある人が出してくれる」と言った元首相もいました。エネルギーは食料と同じくらい、国家にとって重要な事項です。データをもとに確りした検討を行って方針を決めてもらいものです。

＜パリ協定への対応＞

2015年12月のCOP21でパリ協定が採択されました。それに先立ち各国は、2020年以降の温暖化対策に関する目標提出を求められており、日本は2014年7月に「**日本の約束草案**」を国連に提出しました。2030年度のGHG排出量を2013年度比で26%削減する目標です。

日本では、地球温暖化に関する京都議定書が1997年に採択された後、1998年に「地球温暖化対策の推進に関する法律」が成立し、その後改正を繰り返しています。パリ協定の採択を受け、日本は同法律に基づき2016年5月に「**地球温暖化対策計画**」を閣議決定しました。日本の約束草案の達成に向け、GHG排出抑制の目標、事業者や国民等が講ずべき基本的事項、目標達成のために国・地方公共団体が講ずべき施策などが記載されています。

同対策計画には、長期的目標として2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指すと記載されていますが、温暖化対策と経済成長を両立させながら大幅な排出削減を行うには、従来の取組の延長では実現が困難で、革新的技術の開発・普及などイノベーションによる解決を最大限に追求することが必要とされています。

パリ協定は締約国に対し、GHG低排出型発展のための長期戦略を立案

し、報告する努力を求めています。その基礎とすべき考え方、特に、日本の役割を明らかにする理念、目指すべき将来像の「絵姿」を示すことを目的に、2017 年 3 月に中央環境審議会により「**長期低炭素ビジョン**」がとりまとめられました。脱炭素社会の構築を見据え、日本における 2050 年 80%削減を実現する社会の絵姿として、徹底した省エネ、再エネ等の活用による電力の低炭素化の推進とともに、電化・低炭素燃料への利用転換が対策の柱とされます。例えば、家庭や自家用車など、国民の生活からの CO2 排出量はほぼゼロとなること、エネルギー供給の 9 割以上が低炭素電源（再生可能エネルギー、CCS 付火力発電、原子力発電）となっていること、木材など地域資源やエネルギーが活用されていることなどの絵姿が示されています。

2018 年 7 月には、「**第 5 次エネルギー基本計画**」が閣議決定されました。東日本大震災後に改正された第 4 次計画を、2030 年度までの GHG26%削減と、パリ協定の発効を受けた 2050 年までの GHG80%削減を見据えた改正です。

パリ協定の招請に従い、2050 年に向けた日本の温暖化対策の長期戦略として「**パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略**」を 2019 年 6 月に閣議決定し、国連に提出しました。概要は次のようなものです。

最終到達点としての「脱炭素社会」を掲げ（GHG 排出実質ゼロを掲げるのは G7 で初）、今世紀後半のできるだけ早期に実現を目指すとともに、2050 年までに GHG80%削減に大胆に取り組む。ビジョンの達成に向け、ビジネス主導のイノベーションを通じた「環境と成長の好循環」の実現を目指す。エネルギー、産業、運輸、地域・くらし等の各分野のビジョンとそれに向けた対策・施策の方向性を示している。加えて、ビジョン実現のためのイノベーションの推進、グリーンファイナンスの推進、ビジネス主導の国際展開、国際協力といった横断的施策等を推進していく。

10.2. 日本の長期戦略から見えること

上述した GHG 削減に関する日本の長期戦略から見えることを整理してお

きます。

◆温暖化対策と経済成長の両立

日本の長期戦略は、温暖化対策と経済成長を両立させながら、大幅な GHG 削減を行うというものです。それができるのなら結構なことです。世界の GHG 排出ゼロのためには、エネルギー関連の膨大な投資が必要になります。エネルギー技術は日本の得意分野ですから、やりようによっては輸出を大幅に増やすことができるかもしれません。しかし、そのような輸出の可能性を除けば、GHG80%削減は、先進国が豊かさをかなりの程度犠牲にすることで実行できることと考えます。

IPCC の 5 次評価報告書（緩和経路の特徴、緩和費用の項）には、世界の気温上昇を 2℃未満に抑制する温暖化防止を行っても、温暖化対策を行わないベースラインシナリオと比較して、世界全体の消費の減少は数%である、と記載されています。しかし、私の理解が間違っていないのなら、温暖化防止に膨大な投資が必要になるのですから、教育や福祉などの本来必要な消費が大幅に削減されることになるのだと思います。そのため、発展途上国や低所得国は、温暖化防止により貧困が増大するのではないかというのが私の問題意識の一つです。

◆イノベーション

温暖化対策と経済成長を両立させるという難しい前提に立つため、その実現にはエネルギー分野のイノベーションが必要ということになります。私は 1970 年代の石油危機以来 50 年近く、エネルギー問題を見てきましたが、想像しなかったようなエネルギー技術が登場したことはありませんでした。マイクロエレクトロニクスやバイオテクノロジーなどの分野と異なり、エネルギー技術でイノベーションが生じる可能性は小さいと思います。イノベーションの可能性が皆無とは言いませんが、国家の戦略がそのように小さい可能性に賭けるものであるとしたら問題です。

◆再エネ・CCS 付き火力・原子力

脱炭素社会では、化石燃料の使用が大幅に減少するため、消費エネルギーに占める電力の割合が高くなります。日本の長期戦略で電力の殆どは、再生

可能エネルギー、CCS 付き火力発電、および原子力により供給されることになっています。東日本大震災の前なら、3 者のなかでも原子力への依存が最も大きくなったことでしょう。

しかし、福島第一原発の事故により、多くの人は原発の撤廃を望むようになりました。第 5 次エネルギー基本計画で、2030 年に向けたエネルギーミックスでは、原子力への依存をできるだけ低減するという方針の下、電源構成で原子力は 20～22%と想定されています。

GHG80%削減が求められている 2050 年に向けた計画では、電源構成に関する具体的な記載はなく、再生可能エネルギーや水素・CCS、原子力など、あらゆる選択肢を追求する「エネルギー転換・脱炭素化を目指した全方位での野心的な複線シナリオ」を採用すると記されています。これも、イノベーションを前提に長期戦略を描いているためと思われます。

◆原子力

原子力の課題は、手短に言えば安全と信頼性の獲得です。なお、第 5 次エネルギー基本計画の記載の中には、「現状の技術で安定的な脱炭素化のツールと言えるのは、主に水力と原子力であり、変動する再生可能エネルギーだけでは現時点では脱炭素化には及ばない、という事実が示唆される。」という本音と思われる至極当然な記載も見られます。日本で水力は、これ以上増やす余地は少なく、原子力に依存するしかないということになります。しかし、エネルギーの安定供給に責任を感じている政治家なら、安易に原子力を捨て去ることはできないと思いますが、原子力の必要性を強く主張することには慎重にならざるを得ないのでしょう。

◆CCS 付き火力

CCS については、6 章にどちらかというと否定的な考えを記載しました。地球温暖化は、100 年、200 年という長期の視点で取り組む問題です。膨大な量の CO2 を地下 1,000m 以深に継続的に貯留する考えは、率直に言ってまともなものとは思われません。

しかし、GHG ゼロが不可避であるとしたら、化石燃料の使用を止めなくて済む CCS は、エネルギー関係者には願ってもないお話です。再生可能エ

ネルギーの信奉者のなかには、CCS により化石燃料を使い続けることに異議を唱える人もいるかもしれませんが、原子力のように反対する人が少ないのが CCS の利点でしょう。

反対する人が少ないからといって、CCS が有効な手段であることにはなりません。CCS は上記のように基本的な考え方がおかしいと思います。それでも、CCS 付き火力の発電コストが妥当で、国内に CCS 立地が充分にあるのなら、反対する理由はないでしょう。

日本は原油生産がほとんど無いため、CCS に関する地下構造の地質調査データが乏しいと思います。日本の CO2 貯留ポテンシャルとして約 1,460 億トンというのを目にしますが、十分な基礎データに基づく推定ではないと記載されています。また、CO2 排出源である火力発電所は、電力消費地の太平洋岸の都市部に集中しているのに対し、CCS の有望な立地は日本海海底下と考えられています。CCS については、正確な情報を基に利用計画を策定することが重要です。

◆シナリオ

GHG80%削減にはイノベーションが必要と言っていたのでは、いつまで経っても GHG80%削減の具体的なシナリオは描けません。また、全方位での野心的な複線シナリオを採用すると言っても、具体的にいくつかのシナリオを用意しないままだと不都合が生じます。

原発を撤廃したい人が沢山いるのですから、先ず、原発無しに GHG80%削減が実行できるか、シナリオを検討すべきです。その際、根拠なく CCS への依存を高めることがないよう注意する必要があります。

IEA は今世紀中ごろに、現在の世界の GHG 排出量の 10%程度を CCS で削減することを想定しています。世界的にみて、日本の CCS ポテンシャルは小さいので、10%より小さい比率となるでしょう。高炉製鉄のように、CO2 排出を完全に無くすことが困難なプロセスの CO2 排出に CCS を優先すべきですから、長期シナリオの電源構成で想定する CCS 付き火力の比率は数%が妥当でしょう。現状の水力発電程度の比率か、それ以下でしょう。

併せて、原発ありのシナリオも検討する必要があります。両者を比較し、原発なしに妥当な経済負担でGHG80%削減のシナリオが描けるなら結構なことです。そうでないなら、原発を受け入れるしかないと考えます。そして、原発の安全性を高めることに努めることが必要になります。原発の要否を検討せずに原発を撤廃するのは正しい対応ではありません。

11. EU と日本の GHG 実質ゼロ（2021 年 2 月）

本書の初版は 2020 年 3 月に発行したものですが、同年 10 月に菅首相が所信表明演説で「2050 年までに GHG 実質ゼロを目指す」ことを表明したため、改定 1 版として 11 章を追加しました。なお、温暖化に対する筆者の考えは変わっていないため、10 章までの記載内容は殆ど変更していません。

11.1 菅首相の方針

2020 年 10 月 26 日菅首相は所信表明演説で、「温室効果ガス排出を 2050 年に実質ゼロを目指す」方針を表明しました。

前年 2019 年 9 月の国連気候行動サミットで、77 ヶ国が 2050 年に GHG 実質排出ゼロにすると誓った、という報告がありました。また、2020 年 9 月 22 日の国連総会で唐突に、習近平主席が「2060 年までに実質 CO2 排出ゼロを目指す」と表明したのには驚かされました。

菅首相の「温室効果ガス排出実質ゼロ」は、他国に遅れてはいけないという想いがあったのではないかと想像されます。これまで、2050 年までに温室効果ガス 80%削減を目指し、今世紀後半のできるだけ早期に脱炭素社会の実現を目指すことになっていたのですから、いずれ議論しなければならない事項ですが、コロナの今取り上げなければならない問題とは考えていませんでした。

なお、GHG ゼロを誓った 77 ヶ国は間違いで、表 11-1 に示す 66 の国と地域のようです。その内訳は EU 加盟国を除くと OECD 諸国が 8 ヶ国で、残りの 40 ヶ国以上は島嶼国や小国、発展途上国です。

日本の GHG80%削減計画も技術革新を前提としたもので、達成のシナリオはありません。GHG ゼロを誓った国々も、EU を除けば、GHG ゼロを表明しただけにすぎず、表明した国の多さに驚く必要はないように思います。

習主席の「2060 年までに実質 CO2 排出ゼロ」も、米中対立のもと、パリ協定からの離脱を表明したトランプ政権を念頭に、EU との繋がりを強めることを意識した政治的発言のように思われます。

人口 14 億の中国なら、GHG ゼロのシナリオを検討している研究者は沢山

いることでしょう。しかし、中国が本当にGHGゼロを目指すとしたら、風力や太陽光発電も 10 数%くらいは導入されると思いますが、エネルギー供給の大半を原発に依存することになると思われます。中国は世界のウラン資源を確保し、発展途上国のGHG削減のため、多数の原発輸出も行うことでしょう。

安全性が危惧される中国製原発が乱立する世界は、想像するのも恐ろしいことです。そのくらいなら、日本は原発に反対せず、日立や三菱重工などにもつと原発事業を頑張ってもらえば良かったと後悔するかもしれません。

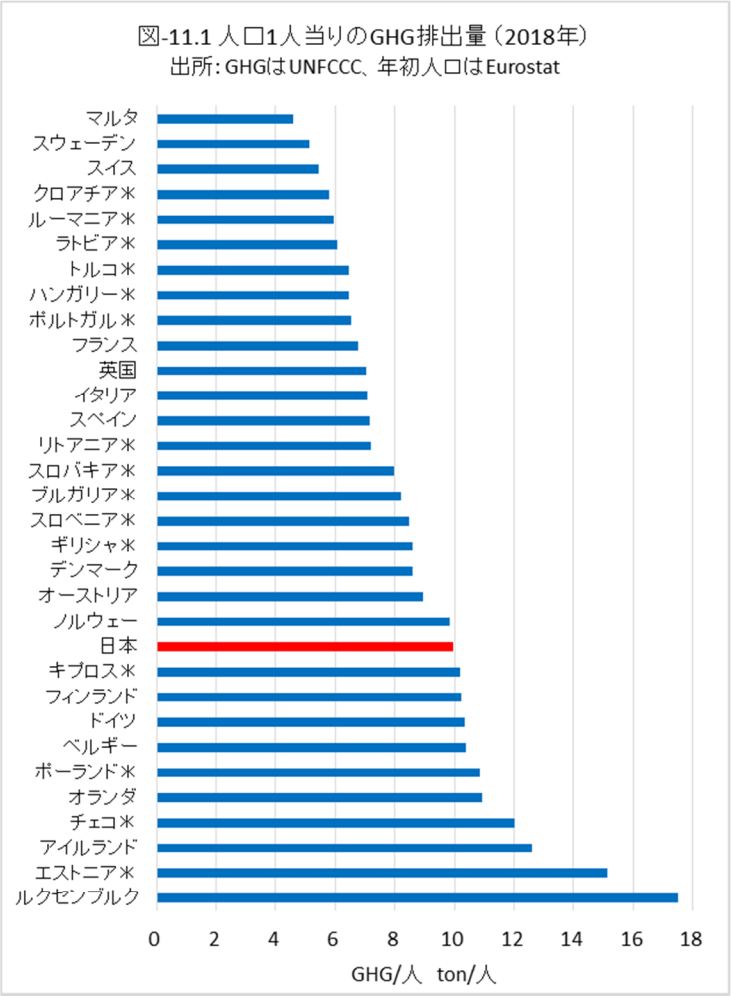
表-11.1 GHG実質排出ゼロを表明した66の国と地域（2019年9月時点）

EU諸国	EU	その他	アンティグア・バーブーダ	ナウル
	オーストリア		バハマ	ニカラグア
	ベルギー		バルバトス	ニウエ
	デンマーク		ベリーズ	パラオ
	エストニア		ペナン	パプアニューギニア
	フィンランド		カーボベルデ	マーシャル諸島
	フランス		コロモ	サモア
	ドイツ		クック諸島	セーシェル
	アイルランド		コスタリカ	ソロモン諸島
	イタリア		ドミニカ国	南スーダン
	ルクセンブルク		ドミニカ共和国	セントクリストファー・ネイビス
	オランダ		エチオピア	セントルシア
	ポルトガル		ミクロネシア連邦	セントビンセント・グレナディーン
	スペイン		フィジー	スリナム
	スウェーデン		グレナダ	東ティモール
その他OECD	英国		ガイアナ	トンガ
	スイス		ジャマイカ	トリニダート・トバコ
	アイスランド		キリバス	ツバル
	ニュージーランド		レバノン	ウルグアイ
	メキシコ		モルディブ	バヌアツ
	アルゼンチン		モーリシャス	
	チリ		モナコ	
	コロンビア		ナミビア	

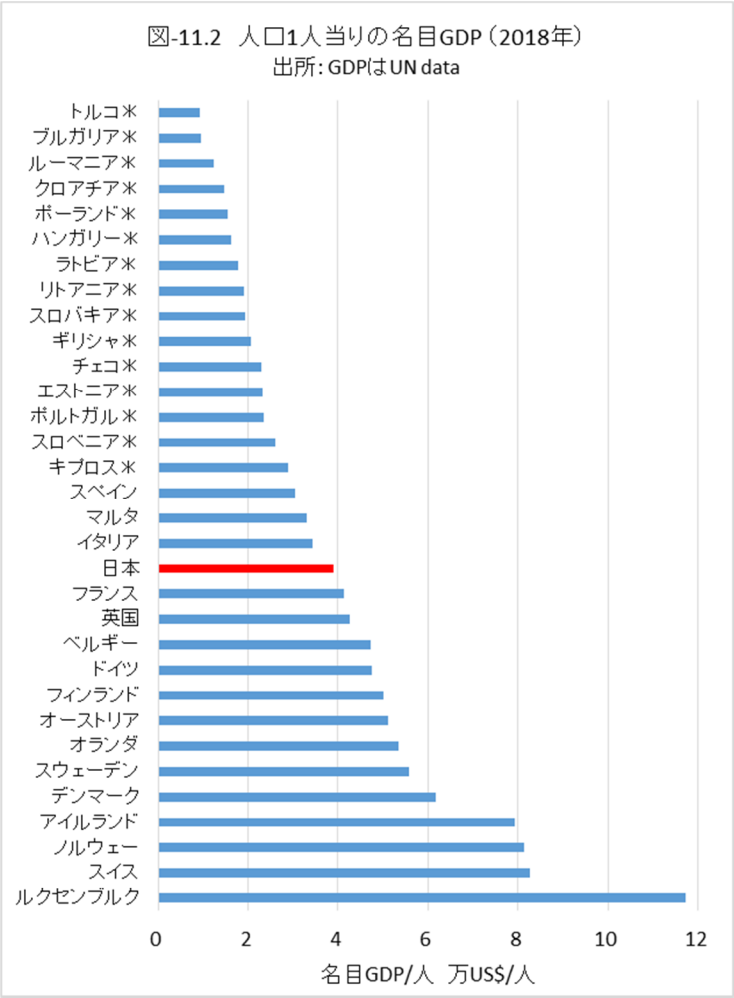
前置きが長くなりましたが、多くの国がGHGゼロを表明し、日本も乗り遅れてはいけないと心配している人もいるようですが、検討に値する計画を持っている国があるとすればEUくらいでしょう。但し、欧州人は本音と建て前を使い分ける人達ですから、単純に環境問題の視点だけではないかもしれないのです。先ずは、EUによるこれまでのGHG排出削減を見ることから始めましょう。

11.2 EU 加盟国の GHG 排出量

各国の GHG 排出量は、人口 1 人当たりで比較すべきです。図-11.1 に、EU 加盟 27 か国に英国、ノルウェー、スイス、トルコと、比較のために日本を加え、人口 1 人当たりの 2018 年の GHG 排出量を示しました。GHG 排出量は UNFCCC のデータで、土地利用分を含まない without LULUCF の値です。人口は Eurostat の年初の人口データを用いました。



赤の棒グラフで示した日本の GHG 排出量に比べ、排出量の少ない国が多いようです。但し、それらの国々の中には、EU 加盟国でも経済水準が低く、1 人当たりのエネルギー消費が低いために、GHG 排出量が低くなっている国もあります。それらの国々も経済成長すれば、GHG 排出量が増加するのですから、日本と比較するのは適当ではないと考えます。



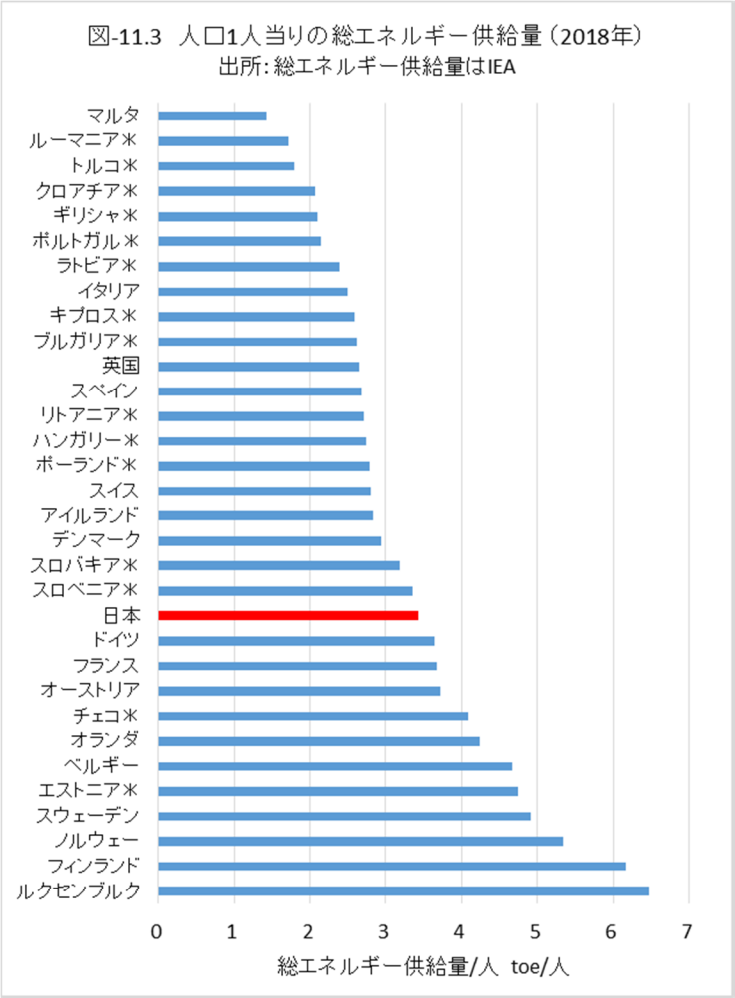


図-11.2 には 2018 年の 1 人当りの名目 GDP、図-11.3 には 1 人当りの総エネルギー供給量（TES）を示しました。図-11.2 に示した 2018 年の 1 人当りの名目 GDP で 3 万 US ドル/人以下の国名の後に＊印を付けて示しました。

＊印を付けた国の多くは、図-11.1 の GHG でも、図-11.3 の総エネルギー供給量でも、1 人当りの値が少ないことが分かります。以下の GHG 排出量の検討では、＊印を付けた国を除いて行うことにします。

11.3 GHG 排出量に係わる各種データ

本項では、検討する各国の GHG 排出量の低減に係わるデータを一通り紹介し、次項で各国の状況について論じることにします。

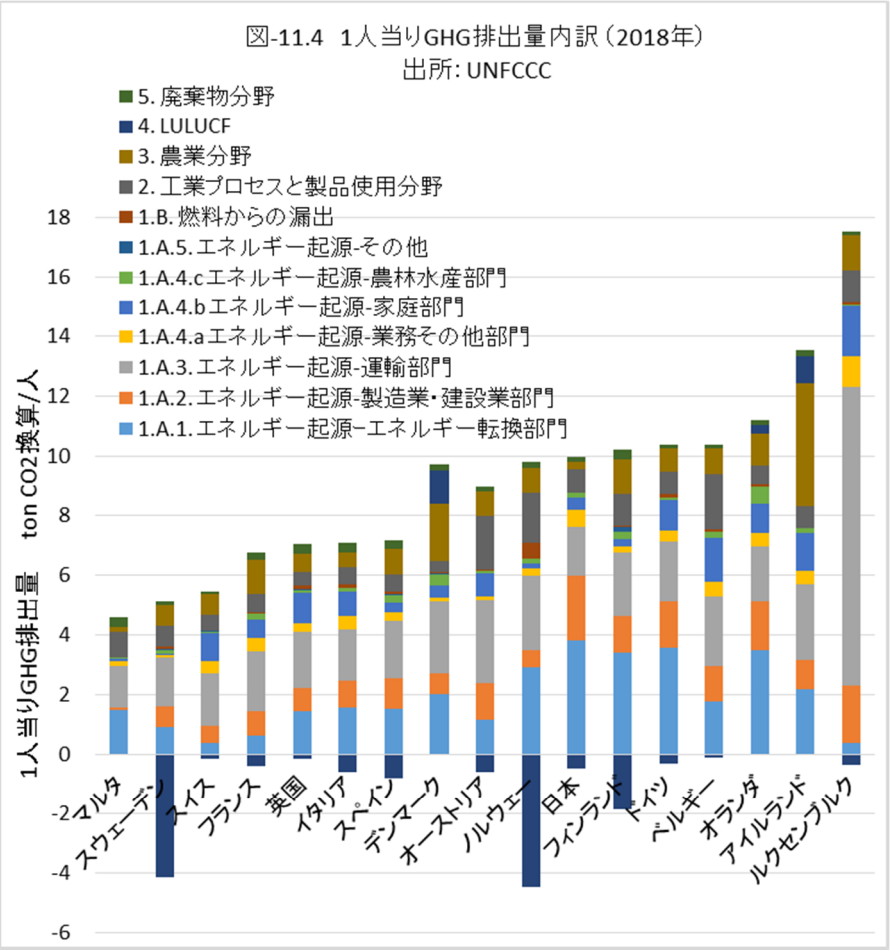


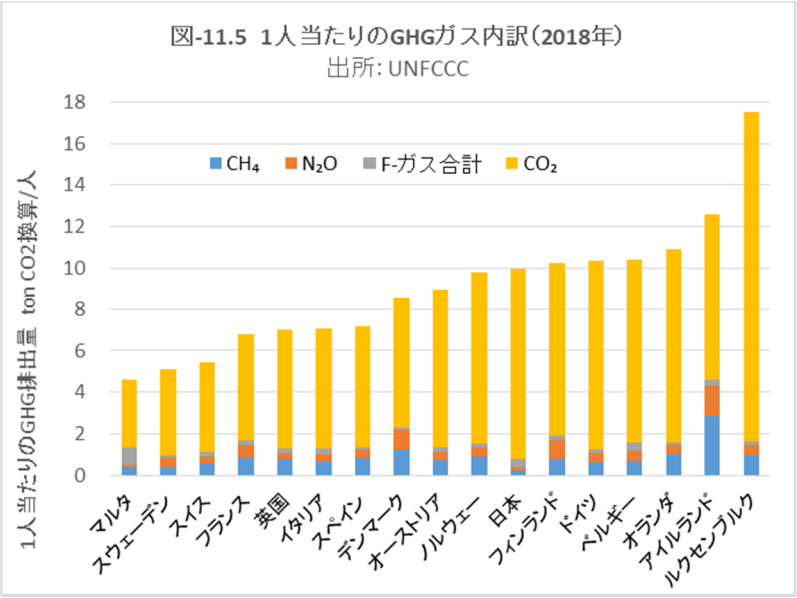
図-11.4 には、検討各国の 1 人当りの GHG の排出内訳を示しました。気候変動枠組条約（UNFCCC）事務局に各国が報告したデータです。森林吸収など土地利用に係わる LULUCF を除いた GHG 排出量の少ない順に並べてあります。グラフのマイナス側にあるのは、LULUCF が森林等による GHG の

吸収になっている国々です。

プラス側グラフの下から、エネルギー起源の GHG についてエネルギー転換部門、製造業・建設業部門、運輸部門、公共・商業部門、住宅（家庭）部門、農林水産部門、その他、燃料（生産など）からの漏出、工業プロセスと製品分野（原材料での使用による GHG など）、農業分野（農業に伴い排出される非 CO2 の GHG など）、LULUCF（GHG の森林吸収などの土地利用、土地利用変化及び林業分野）、廃棄物分野が示されています。日本は、図示した 17 ヶ国の中で 11 番目に位置しています。

GHG 排出量の多寡は、温暖化防止に熱心か否かだけによるわけではありません。GHG 削減が容易な国と、そうでない国があります。温暖化防止のためには世界全体の GHG 排出量を削減することが必要ですから、削減が容易な国は、削減が難しい国を支援する義務があると考えます。以下に示すグラフは、GHG 削減に係わる各国の国情を知るためのものです。

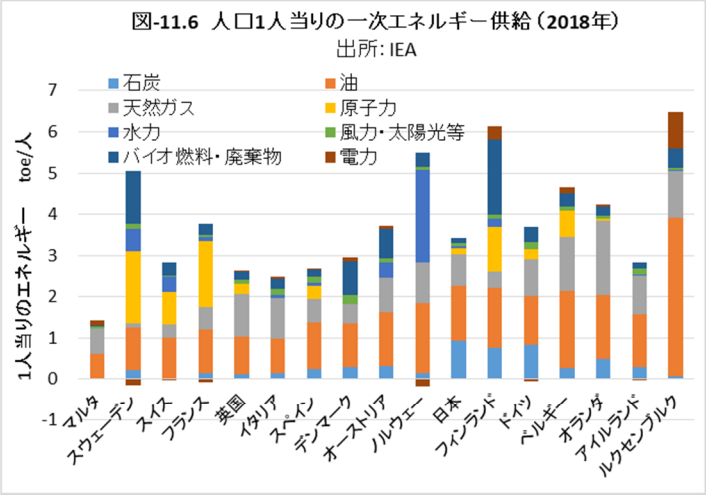
図-11.5 には、1 人に当たりの排出量の GHG ガスの内訳を示しました。



非 CO2 の GHG 排出量は、GHG 総量の 10%弱から 35%くらいの範囲に

あります。非 CO2 の GHG が多い国は、主に牧畜や農業によるものです。

エネルギー起源の CO2 は、再生可能エネルギーや原子力にエネルギー転換することで削減できます。しかし、非 CO2 の GHG は、各排出源に対応した対策が必要になります。農業分野のように低濃度で分散して排出される非 CO2 の GHG の削減は簡単ではありません。



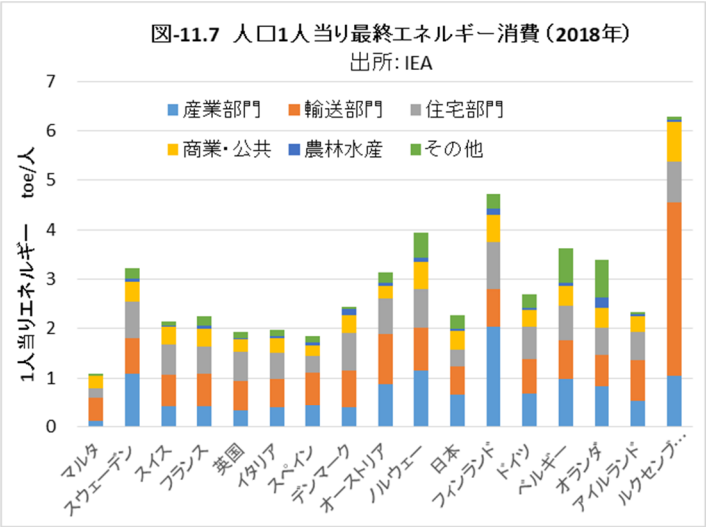


図-11.6 には 1 人当りの一次エネルギー供給量、図-11.7 には 1 人当りの最終エネルギー消費量を示しました。

前者にはエネルギー種類の内訳、後者には消費部門の内訳が示されています。エネルギー起源の GHG 排出量を論じるには、各国のエネルギー消費量と、使用エネルギーの脱炭素化について知ることが必要です。寒冷地の国は、概して住宅のエネルギー消費が多くなります。また、鉄鋼などのエネルギー多消費産業が多い国は、産業部門のエネルギー消費が多くなります。

図-11.8 には、1 人当りの発電電力量の電源内訳を示しました。詳しくは後述しますが、GHG ゼロを達成するには、エネルギー消費を低減するとともに、使用エネルギーを極力電化した上で、電力を脱炭素化することが基本になります。GHG 低減にとって、電源の脱炭素化は重要な事項です。

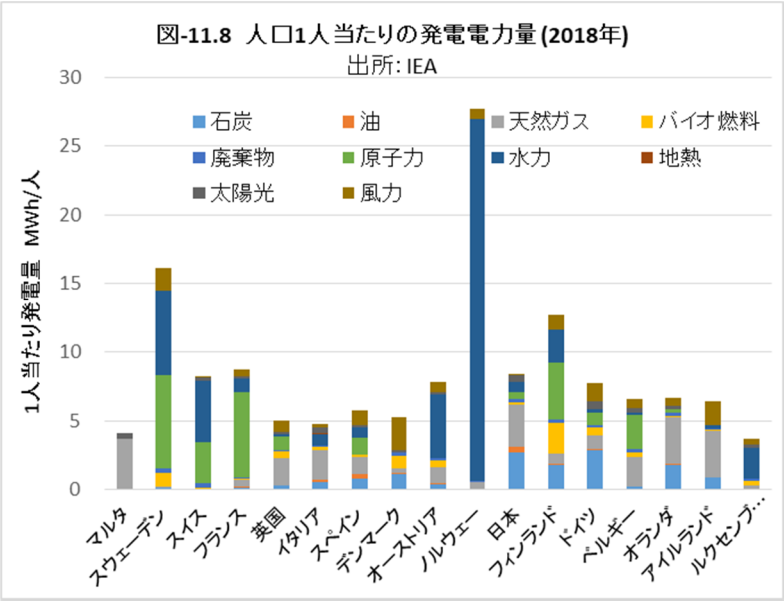


図-11.9 には人口 1 人当たりの値で、発電電力量と電力輸出入量を示しました。欧州では電力網で各国が繋がっているため、日本と異なり、電力の輸出入があります。例えば北海沿岸の風力発電は、冬季には発電量が高まり余剰電力が生じます。余剰電力は、欧州電力網を通し近隣諸国が安価に購入し、

恐らく、火力発電を減らして対応しているものと思います。なお、そのような対応は、火力発電が充分に残っている段階のことで、各国が GHG ゼロに近づけば、できないだろうと思います。その他、原発を廃止し、電力不足のためのために恒常的に電力を輸入している国もあります。

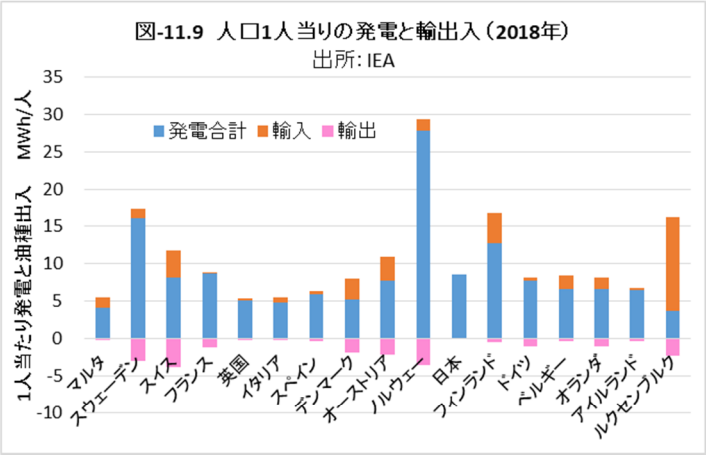
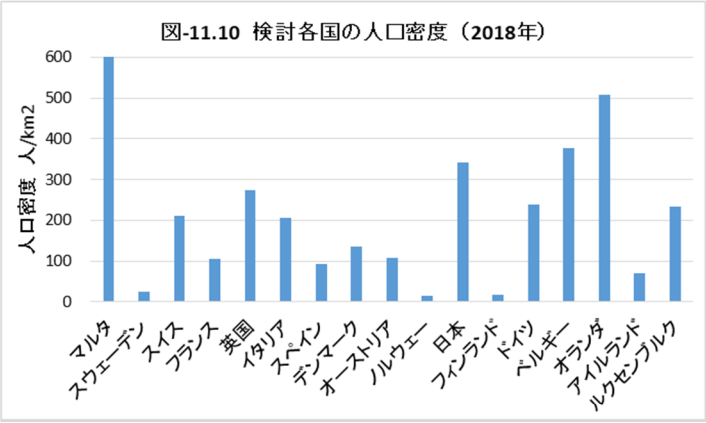
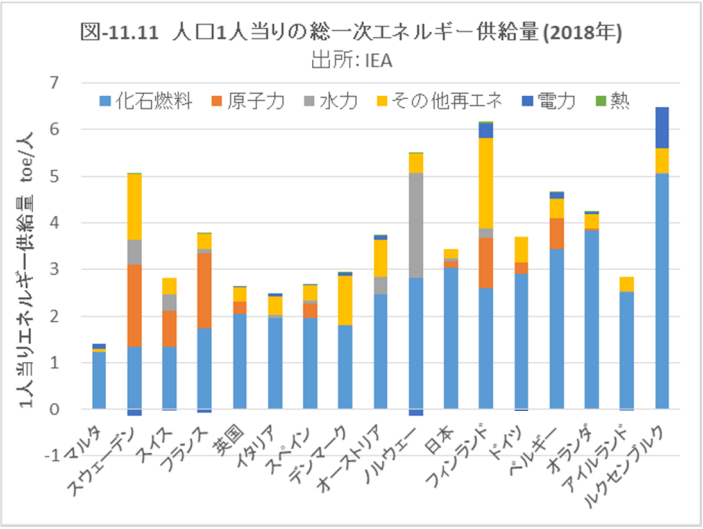


図-11.10 には、検討各国の人口密度を示しました。スカンジナビアのスウェーデン、ノルウェー、フィンランドは人口密度が格段に低いことが分かると思います。



1 国の GHG の総排出量は人口が多いほど増大し、LULUCF の森林等吸収

量は国土面積が広いほど大きくなります。そのため、人口密度の低い国は、GHG 排出量に対する LULUCF の森林等吸収量が相対的に大きくなり、GHG 排出実質ゼロの達成が容易になります。その他、人口密度の低い国では、概して間伐材などのバイオマスの利用が容易です。



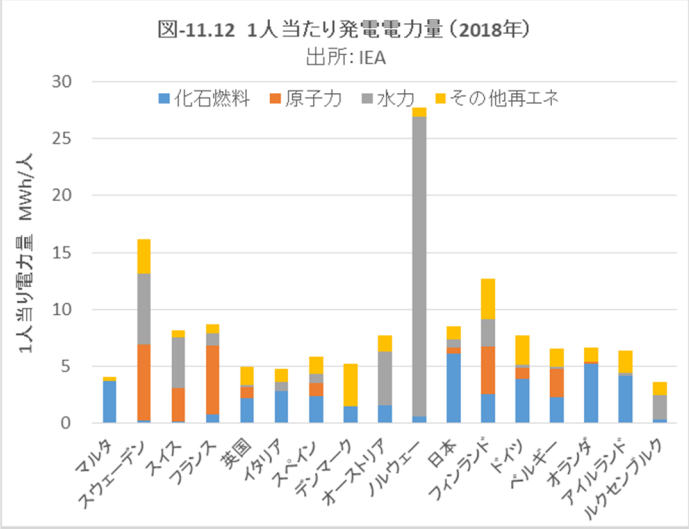


図-11.11 には、総一次エネルギー供給量を示した図-11.6 を直し、化石燃料

の割合が明瞭に分かるように示しました。

図-11.12 には発電の脱炭素化割合を示すため、1 人当りの電力量を化石燃料、原子力、水力、その他再エネの内訳で示しました。概して水力資源は開発が済んでおり、開発の余地は少ないと思います。原子力は国民の意見に違いがありますが、使う気になればできることです。風力は風況の良い立地があることが必要です、太陽光はコストは高いが立地の制約は少ないでしょう。バイオマスは、供給資源量の制約があるため、大幅に発電量を増やすことは難しいと思います。

図-11.13 には、工業分野の 1 人当り GHG 排出量を示しました。日本やドイツのように工業生産が多い国は、工業分野の GHG 排出量が多くなります。ある国が工業生産を減らしても、世界全体の需要が減る訳ではなく、他の国が生産することになります。その国の方が GHG 排出量が多ければ、世界全体では GHG 排出量は増加します。

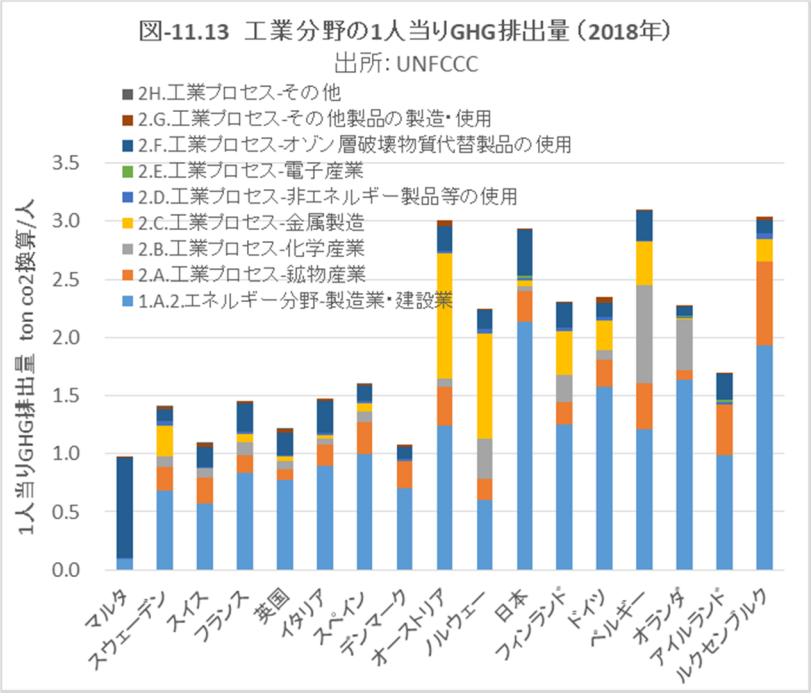
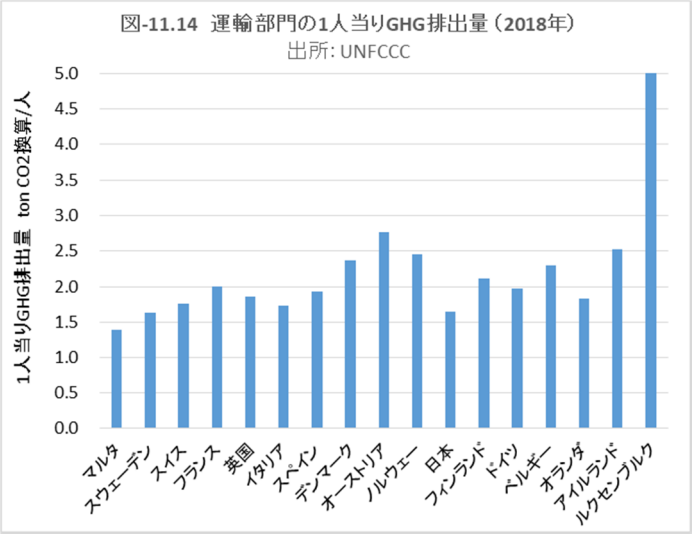


図-11.14 には、運輸部門の 1 人当り GHG 排出量を示しました。主に自動車などの移動体の使用で排出される GHG です。GHG 排出ゼロのためには、運輸部門の電化と発電の脱炭素化が図られることになります。現状各国は、同じような自動車、航空機、船舶、鉄道車両を用いています。そのため、各国の運輸部門の GHG 排出量の違いは、省エネの推進度合いの違いと考えることもできるでしょう。日本は運輸部門の GHG 排出が少ない国です。



11.4 各国の GHG 排出状況

図-11.4 に戻り、1 人当りの GHG 排出量が最も少ないマルタからコメントを記載します。なお、GHG 内訳の多寡は、特に断らない場合は日本との対比によるもので、前項に記載した 2018 年のデータを基にしています。

＜マルタ＞

マルタは人口 48 万人の地中海の小国です。1 人当りの GHG 排出量が少ないのですが、その要因はエネルギー消費量が少ないためです。主な原因は製造業が少ないことで、その他、住宅部門や農業部門のエネルギー消費が少ないこともあります。しかし、人口が 1 桁以上多い他の国々と比較して論じる

ことは適当ではないと考えます。

＜スウェーデン＞

スウェーデンは、GHG 排出量が少ないだけでなく、森林等の吸収分が GHG 排出量の 80%以上あり、容易に GHG 排出実質ゼロを達成できると考えられる数少ない国です。

スカンジナビアのノルウェーやフィンランドと同様に 1 人当りのエネルギー消費は多く、省エネが進んでいる訳ではありません。寒冷地のためエネルギー消費が多くなっています。それでも GHG 排出量が少ないのは、使用エネルギーの脱炭素化が進んでいるためです。

発電電力量では 38%が水力であり、原子力も 42%を占め、バイオ燃料、廃棄物、風力もあります。電力の脱炭素化率は 99%近くに達しています。

GHG 排出量の多いのは自動車などの運輸部門です。しかし、図-11.14 に示すように、スウェーデンの運輸部門の 1 人当りの GHG 排出量は、他国と比べて少なく部類です。

その他、図-11.4 でエネルギー変換部門の地域熱供給、製造業部門、工業プロセス部門、農業部門などからの GHG 排出がありますが、EU の他国と比べて多くはありません。

水力発電や LULUCF の森林吸収が多いのは、スウェーデン国土の特質ではありません。2018 年のデータで、スウェーデンの総水力発電量は日本の 70%、LULUCF の総 GHG 吸収量は日本の 73%に過ぎません。スウェーデンを人口 1 人あたりで評価して上述のようになるのは、日本の 1.1 倍の広さの国土に、日本の十二分の一の人口が住んでいる人口密度の低さによるものです。図-11.10 に、検討各国の人口密度を示しました。スウェーデン、ノルウェー、フィンランドの人口密度が格段に低いことが分かると思います。バイオマスの利用が進んでいるのも、人口密度の低さが関係しているでしょう。

スウェーデンは、下水汚泥のメタン発酵によるガス利用など廃棄物のエネルギー利用など、環境問題に熱心であることは否定しません。しかし、それに依る GHG 削減は一部に過ぎません。GHG 実質ゼロに近い要因は、人口

密度が低いためです。GHG 削減で他国がスウェーデンを見習える効果的な対策は、原子力を増やすことくらいなのです。

＜スイス＞

スイスも発電量の 55%が水力で、37%を原子力が占めています。風力は少ないのですが、2.8%の太陽光と 4.4%のバイオ燃料・廃棄物による発電があり、電力の脱炭素化は 99%に達しています。なお、スイスの人口密度は、スウェーデンのように低い訳ではありません。

スイスのエネルギー消費は検討諸国の中で少ない方です。エネルギー多消費産業が少ないこともありますが、省エネも進んでいると言えるでしょう。

GHG 排出量では運輸部門を除くと、住宅部門と農業部門が比較的多くなっています。住宅については冬季の暖房負荷、農業部門については農地の 4 分の 3 を草地と牧場が占める酪農による非 CO2 の GHG が多いものと思われます。

＜フランス＞

フランスは周知のように、発電電力量の 71%を原子力が占めることが GHG が少ない要因です。その他、水力が 12%、風力が 4.9%など、電力の脱炭素化は 92%に達しています。

1 人当りのエネルギー消費量は、検討諸国の中位の水準です。図-11.4 で GHG 排出量が多い項目としては、運輸部門の他には、農業部門が目立っており、西欧で最大規模の農業国であることを反映したものでしょう。

図-11.10 に示した人口 1 人当たりの総一次エネルギー供給に占める化石燃料の量は、マルタ、スウェーデン、スイスに続いて少ない値です。電力は脱炭素化が進んでいるため、運輸部門を電化すれば、風力発電等の再エネを増やすことで GHG 排出実質ゼロに手が届くかもしれません。そのことが、パリ協定の履行に熱心な理由であると思います。それもひとえに、原子力の比率が高いためです。

＜英国・イタリア・スペインの GHG 低減＞

英国、イタリア、スペインは、2018 年の 1 人当りの GHG 排出量が同水準です。エネルギー消費量も同水準で検討諸国の中で低い値です。これら 3 か国は 1990 年以降、温暖化防止に努めてきたのだと思いますが、その状況は各国で異なります。

表-11.2 に、1990 年比 2018 年の GHG 排出量と総一次エネルギー供給量の比率を示しました。英国は GHG 排出低減が顕著ですが、総一次エネルギー供給量もかなり減少しています。イタリアは GHG 排出量は低減しましたが、エネルギー供給量は僅かに増加しています。スペインは GHG 排出量もエネルギー供給量も共に増加し、エネルギーの増加は顕著です。

表-11.2　英・伊・スペインの GHG とエネルギー
出所：UNFCCC, IEA

項目	2018年/1990年比率　%		
	英国	イタリア	スペイン
GHG排出量	58.4	82.8	115.5
総一次エネルギー供給量	85.1	102.7	138.8

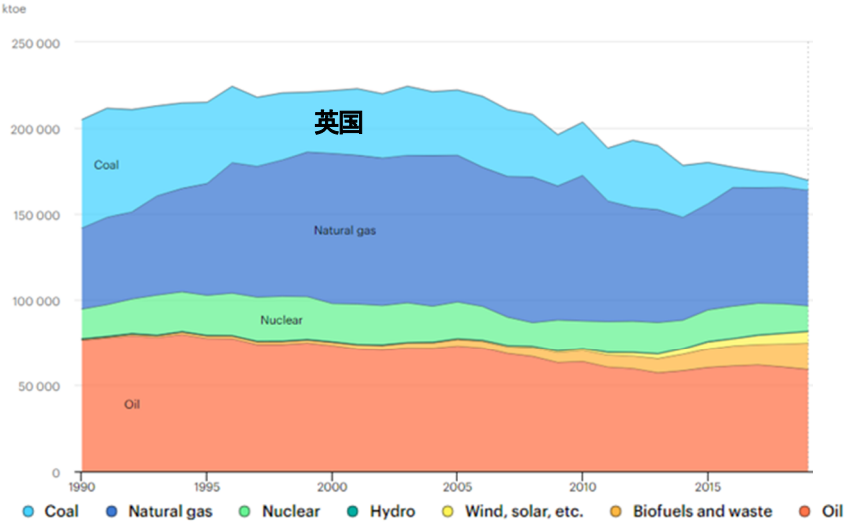
各国の違いの原因を見るため、IEA のデータで、1990 年から 2018 年までの総エネルギー供給量（TES）の推移を見ることにしましょう。

英国の TES は 1990 年以降 2003 年頃までほぼ一定か微増で、その後減少に転じ、リーマン・ショックによる景気後退によりエネルギー供給量も減少しました。

TES で 1990 年と比べ、石炭は 2018 年には 13%に大きく減少し僅かに残るだけになりました。また、石油も 2018 年には 79%に減少し、代わりに天然ガスが 2018 年には 1.44 倍に増加しました。その他、1990 年に TES の 0.3%だったバイオ・廃棄物は 2018 年の TES の 7.8%に増加し、ほとんどゼロだった風力・太陽光は 2018 年には TES の 3.4%に増加したことも GHG 排出低減に寄与しています。なお、その間発電量の約 20%を占める原子力と 2.4%の水力は、ほぼ横ばいでした。

図-11.11、図-11.12 に示したように、2018 年に TES に占める英国の化石燃料の比率は 78%、総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は 45%にな

っています。

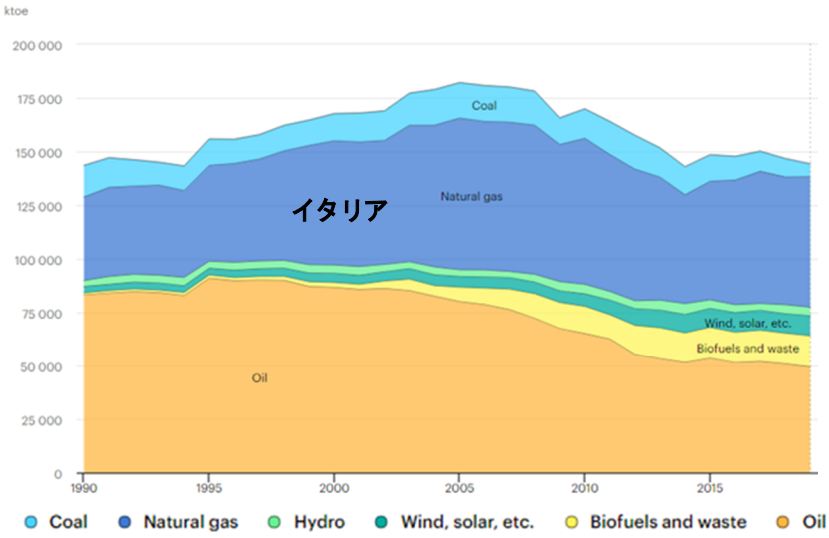


イタリアが他の二国と異なる点の一つは、チェルノブイリ原発事故の後の1987年、国民投票で原発廃止を決め、1990年までに全原発を封鎖したことです。以後、原発に依る発電は行われていません。

日本は東日本大震災による福島第一原発の事故により、過半の国民が原発の廃止を求めています。イタリアの事例は、原発の廃止が電力供給と2050年に向けたGHG排出ゼロにどのような影響を及ぼすか情報を提供してくれると思います。なお、イタリアは太陽光発電が風力発電を上回る欧州では数少ない国で、日本と同様に風力発電の立地が乏しい国である点も参考になると思います。

イタリアのTESは1990年以降2005年頃まで増加し、その後減少に転じ、リーマン・ショックによる景気後退によりエネルギー供給量も減少しました。1990年時点で既にTESの10%に減少していた石炭は、2018年にはTESの6%に減少しました。また、1990年に発電電力量の47%を占めていた石油は、2018年には4%に減少しました。代わりにTESで天然ガスは、2018年には1990年の1.52倍に増加しました。その他、1990年にはTESの0.6%だっ

たバイオ・廃棄物は2018年にはTESの3.8%に増加しました。また、発電量で1990年にほとんどゼロだった太陽光と風力は、2018年には各々7.8%と6.1%に増加したこともGHG排出低減に寄与しています。なお、1990年に発電量の16%を占めた水力はほぼ横ばいで推移しました。



なお、イタリアのGHG排出量を検討する時、発電電力量の正味約15%の電力輸入があることを考慮する必要があります。恒常的な電力不足は、原発を止めたことが大きいと思います。また、1990年になっても発電の半分近くを石油に依存していたのは原発を止めた影響でしょう。

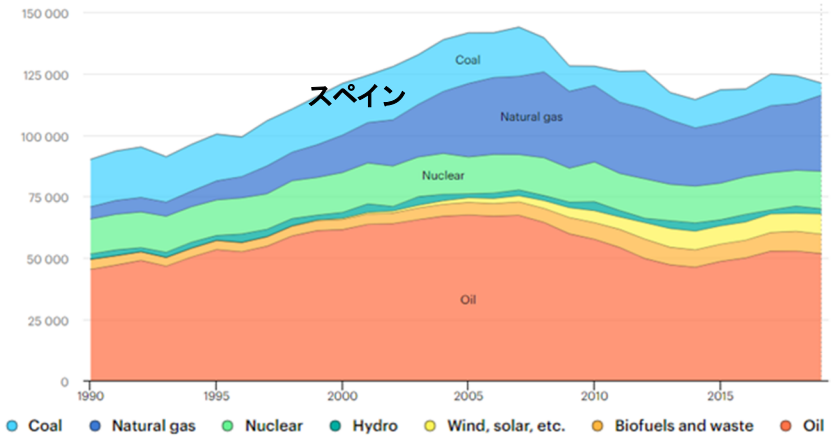
2018年にTESに占めるイタリアの化石燃料の比率は79%、総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は59%です。

スペインは1990年から2018年の間、TESはピークの2007年に1990年の1.6倍に達し、発電電力量は2008年に1990年の2倍に達した後、リーマン・ショック後の景気後退により、エネルギー供給量も発電電力量も減少しました。

スペインのエネルギー消費は、主に景気の影響に左右されて大きく変動し

ており、省エネやGHG排出低減の力が作用しているようには見えません。

分かり易い発電電力量の推移から紹介します。1990年に石炭が40%、原子力が36%、水力が17%を占めていました。天然ガスは1.0%しかありませんでした。その他、石油が5.7%、その他再生エネが0.5%でした。その後、増減がありますが、2018年には石炭は14%、原子力が20%に減少し、天然ガスは21%に増加しました。また、風力が19%と大幅に増加し、バイオ・廃棄物が2.5%　太陽光が2.9%　太陽熱が1.8%になりました。水力は13%に減少し、石油は概ね横ばいでした。



TESで見ると、1990年に石油が50%、石炭が21%、原子力が16%で、天然ガスは5.5%に過ぎませんでした。その後、TESは増減しましたが、2018年には石油はTESの42%、石炭は9%に減少し、天然ガスは22%に増加しました。

スペインは、他の二国と比べて、風力発電の増加は顕著ですが、石炭から天然ガスへの転換が不充分な状態に留まっています。1990年から2018年までに、エネルギー消費量が40%近く増加したため、GHG排出量も15%増加しました。

2018年にTESに占めるスペインの化石燃料の比率は73%、総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は41%です。

＜石炭から天然ガスへの転換＞

上記の英国など三国は高い原発比率でなく、水力資源にもそれほど恵まれていませんが、GHG 排出低減に頑張っています。GHG 排出量の低減要因は、石炭から天然ガスへの転換です。

天然ガスに関し、欧州と日本では事情が異なります。日本は、天然ガスをマイナス 164℃で液化した LNG として輸入しています。産出国側には液化プラントが必要になり、専用の LNG 船で輸送し、LNG 断熱タンクに貯蔵して利用しています。産出国、輸入国ともに多額の設備投資が必要になるため、LNG は多くの場合長期の購入契約を結んで輸入することになります。

一方、欧州で天然ガスは、2013 年のデータですが、北海油田など域内生産が 34%、ロシアからパイプライン輸入が 29%、ロシア以外からのパイプライン輸入が 28%で、LNG 輸入は 9%に過ぎません。天然ガス価格も LNG より安価です。EU の方針として温暖化防止が求められており、石炭から天然ガスへの燃料転換は自然な流れです。

なお、EU のこれら国々は、再エネの導入拡大は頑張っていると思いますが、省エネについては、日本の産業界ほど頑張っていないように感じられます。

＜デンマーク＞

デンマークについて多くの人が想い浮かべるのは、洋上に林立した多数の風力発電でしょう。デンマーク沿岸の北海は、風況が良い上に遠浅の海底であるため、着床式の風力発電の設置に適しています。日本と比べ、台風やハリケーンのような強風が少ないことも利点でしょう。

2018 年の電源構成で、風力は 46%に達し、バイオと廃棄物で 22%、太陽光は少ないが 3%あります。原子力は無く、水力もほとんどありません。一方、石炭が 22%残っており、天然ガスも 7%あります。

TES で注目されるのはバイオと廃棄物の多さで、TES の 27%を占めており、発電の他に熱供給にも利用されています。

しかし、図-11.4 に示したように、GHG 排出量がそれほど少なくないのは、

農業部門のGHG排出量が多いためです。デンマークは人口が約580万人で、九州とほぼ同じ広さの国土で、その約6割を農用地が占めています。酪農を中心とする大規模農業国です。農業用土壌から発生するN2O、家畜の腸内発酵（いわゆる牛のゲップ）によるCH4、肥料管理に係わるCH4やN2Oの排出が多いためです。また、同図デンマークの棒グラフの一番上はLULUCFで、EUではGHG吸収の国が多い中で、デンマークは1人当りの排出量が最も多くなっています。これは、LULUCFの耕作地の値が大きく影響しています。

2018年にTESに占めるデンマークの化石燃料の比率は62%、総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は29%です。化石燃料の割合は低いのですが、GHG実質ゼロを達成するには、LULUCF排出分とともに、農業分野の非CO2のGHGの排出低減が難しい問題になるでしょう。

＜オーストリア＞

オーストリアは水力資源に恵まれており、2018年の発電電力量で60%が水力です。その他、バイオと廃棄物で8%、風力が9%、太陽光が2%です。原子力はありません。化石燃料発電として天然ガスが14%、石炭が5%などです。2018年に総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は21%で、原発無しで電力の脱炭素化が進んでいます。また、TESに占める化石燃料の比率は66%です。

図-11.4に示されるように1人当りのGHG排出量は、それほど少なくありません。その原因は、GHG内訳の「工業プロセスと製品使用分野」が多く、具体的には鉄鋼業からのGHG排出が多いためです。

1990年と比べて2018年のTESは1.32倍に増加し、GHG排出量(without LULUCF)も僅かですが増加していますから、オーストリアは温暖化防止に注力しているとは言えないでしょう。

＜ノルウェー＞

ノルウェーは2018年の発電電力量の95%が水力です。その他、2.6%の風

力と、1.7%の天然ガスなどです。正味の電力輸出が発電電力量の 6.9%ですから、水力で全電力需要を賄える国です。恐らく、水力発電を追加する余地もあるものと思われます。そのような国は、他には南米のパラグアイくらいしかありません。

しかし、図-11.4 に示すように、1 人当りの GHG 排出量はそれほど少なくありません。また、図-11.6 と図-11.8 に示すように、1 人当りの TES は EU でトップラスの多さで、1 人当りの発電電力量は EU でも群を抜いて多いことが原因です。

GHG 排出で特筆すべきは、先ずエネルギー転換部門です。ノルウェーは北海油田から石油と天然ガスの生産を行っており、それに関連した GHG 排出です。恐らく、天然ガスの精製過程で分離された含有する CO2 を大気放散が大きいと思われます。なお、分離された CO2 の一部は、天然ガス生産フィールドの海底下に再貯留（CCS）も行われています。

燃料からの漏出の GHG も、石油と天然ガス生産に関するものです。また、工業プロセス等の分野で多い GHG 排出は金属産業に関するもので、水力発電の安価な電力を利用したアルミ精錬が最大の GHG 排出で、その他、合金鉄製造やマグネシウム製造からの GHG 排出もあります。

1 人当りの電力消費が極めて高い原因は、上記のような工業部門の電力消費が大きく、寒冷地であることに加え、電気料金が安価なことで、住宅部門や公共・商業部門の電力消費が大きくなっていることと思われます。

化石燃料の使用がほとんど無くなる時代が来れば、ノルウェーは経済的には大きな打撃を受けるでしょうが、石油や天然ガス生産に係わる GHG 排出は無くなります。また、輸送部門は電動化され、GHG は大幅に低減します。一方、LULUCF の吸収分が多く、北海油田のフィールが CCS 立地として有望と考えられるため、GHG 実質ゼロが可能と思われます。それは、スウェーデンと同様に人口密度が極めて低いことに起因しています。

＜日本・ドイツ＞

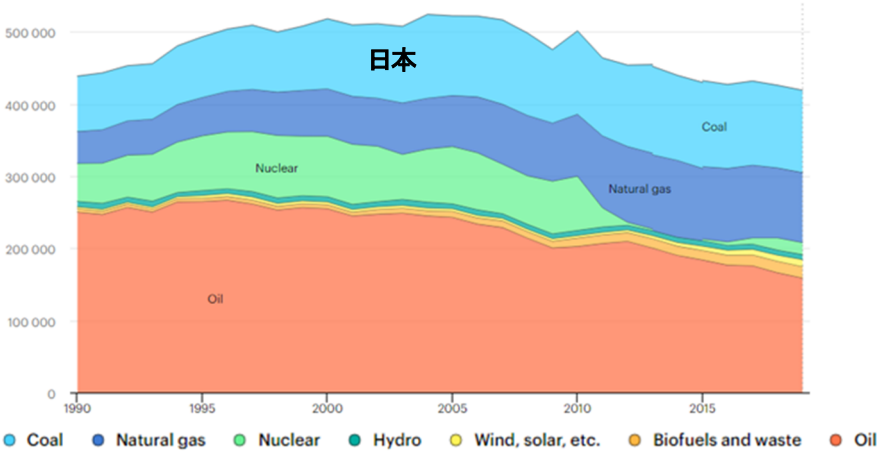
日本の人口はドイツの約 1.5 倍、国土面積はほぼ同じですが、図-11.4 に示

したように、1 人当りの GHG 排出量は似ています。また、1 人当りのエネルギー消費量や GDP も近い値です。それは、工業生産規模が大きいことなど、国情が似ているためと思います。

EU の検討諸国と比べ、日本とドイツは 1 人当りの GHG 排出量が多い国です。エネルギー転換部門と製造業等の部門の GHG が多いことが主な原因です。

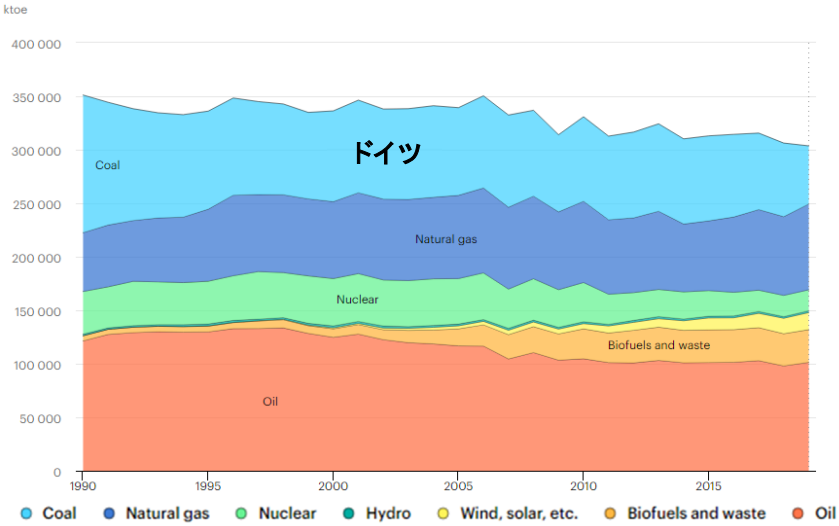
前者は、使用エネルギーの脱炭素化が進んでいないことが大きいと考えます。以下に、1990 年から 2018 年までの日本とドイツの TES の推移を示しました。前述の諸国のようには、石炭から天然ガスへの転換が進んでいないことが分かるでしょう。

特に日本の TES では、1990 年に比べて 2018 年の石炭が約 1.5 倍に増加しています。この原因は、エネルギー安定供給の点からのエネルギーの多様化、温暖化に対する日本の認識の違い、東日本大震災による原発の停止、電力の自由化など、複数の問題が関係していると思いますが、本章のまとめにに後述します。



ドイツでは、石炭使用は減少しましたが、まだ可成り残っています。ドイツの石炭火力は、主に国内で産出し他の用途が少ない低質の褐炭を使用しています。石炭火力の廃止計画が出されていますが、設備寿命が残っている設

備の廃止は計画通りに進まないようです。



製造業等の部門の GHG の多さについては、例えば英国やフランスと比べて、日本やドイツは、鉄鋼業などエネルギー多消費産業の規模が大きいためです。但し、1 人当りのエネルギー消費量では、検討諸国で中位なのは、省エネが進んでいるためと言えるでしょう。

前の章にも記載したことですが、エネルギー多消費の産業を止めれば GHG は減ります。しかし、その製品の需要が減る訳ではありません。製品産業量に対する GHG 排出量の割合（単位 GHG 排出量、GHG intensity）が高い国に生産が移行すれば、世界全体の GHG 排出量は増加します。日本やドイツは、概して工業生産の単位 GHG 排出量は低いと思います。なお、各国の GHG 排出量を比較する場合には、その点を考慮することが必要です。なお、各国の GHG 排出量を比較する場合には、工業生産だけでなく、農業や酪農での GHG 排出量や、気候や再生エネの賦存量の違いも考慮する必要があります。

この検討諸国の中では、日本やドイツの GHG 排出量が多いとはいえ、2 章に示したように世界的には、GHG 排出量がもっと多い先進国は沢山ありま

す。世界全体のGHG排出低減が問題であることを忘れてはいけません。

＜フィンランド＞

フィンランドは、図-11.10 に示すようにスウェーデン、ノルウェーと同様に人口密度が極めて低く、それら二国と類似の国情と思われます。しかし、１人当りのGHG排出量は、スウェーデンのように低くありません。

１人当りのエネルギー消費量は多く、産業部門と住宅部門の多さが目立ちます。産業部門でエネルギー消費が多いのは製紙・パルプ産業です。住宅部門は、寒冷地のため暖房負荷が高いためです。

電源構成で2018年実績は、化石燃料以外では原子力が32%、水力が19%、バイオ・廃棄物が19%、風力が8.3%などで、脱炭素化が79%とかなり進んでいます。但し、石炭が14%残っており、天然ガスは6%で、EU他国のように、石炭から天然ガスへの政策的転換は行われていないようです。

また、正味の電力輸入が発電電力量の28%に達しています。デンマークを含めた北欧４か国で1963年に北欧電力協議会が結成され、その後、各国で電力自由化が進んだことで電力取引が増加したためです。フィンランドは高い１人当りの電力需要の四分の一以上を輸入に依存しています。

2018年にTESに占める化石燃料の比率は42%、総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は21%です。LULUCFによる吸収分が、総GHG排出量の18%あります。

現状の１人当りGHG排出量はかなり多いのですが、スウェーデンやノルウェーと同様に、GHG排出実質ゼロを真剣に目指せば、達成は可能だろうと思われます。

＜ベルギー・オランダ＞

ベネルクス３国の二つベルギーとオランダは、狭い国土に高い人口密度で類似の国のように思われます。検討諸国の中では、１人当りのGHG排出量が多い国です。LULUCFは、ベルギーは僅かにGHG吸収ですが、オランダはGHG排出です。

ベルギーで GHG 排出が多い部門は、工業プロセス等の部門で、鉄鋼業と石油精製が GHG 排出を増加させる要因です。

ベルキーの電源構成では、2018 年実績で原子力が 38%あります。再生エネは、水力は 1.8%に過ぎませんが、バイオ・廃棄物 9.1%、風力が 9.9%、太陽光が 5.2%です。石炭は 3.1%に減少し、天然ガスが 32%です。また、正味の電力輸入が、発電電力量の 23%あります。

ベルギーの発電は、40%近い原子力を基幹電源とし、石炭から天然ガスへの転換と、まだそれほど多くはありませんがバイオ、風力、太陽光の導入を進めるという典型的な GHG 削減策を実行しています。

2018 年に TES に占めるベルギーの化石燃料の比率は 74%、総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は 35%です。

オランダは GHG 排出量が多い部門は、エネルギー変換部門で電力の脱炭素化が進んでいないためです。農業部門の GHG 排出量が多いのも、オランダの産業の特質を表しています。

オランダの電源構成では、2018 年実績で原子力が 3.1%と僅かであることが GHG 排出に影響しています。再生エネは、水力はほぼゼロで、バイオ・廃棄物 5.7%、風力が 9.2%、太陽光が 3.2%です。51%を占める天然ガスが基幹電源ですが、石炭もまだ 26%残っています。

EU の GHG 削減方針に、オランダはそこそこに対応しているという感を免れませんが、原子力と水力が無いと GHG 実質ゼロに向けて手の打ちようが無いということかもしれません。

2018 年に TES に占めるオランダの化石燃料の比率は 90%、総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は 79%と高く、日本の現状を見るようです。

＜アイルランド＞

アイルランドの GHG で先ず注目されるのは、農業部門の排出量の多さです。家畜の腸内発酵による CH4 が一番多く、農業用土壌からの N2O、肥料管理に係わる CH4 や N2O と続いています。これら非 CO2 の GHG は、広

い範囲に低濃度で発生するガスのため、更なる排出低減は容易でないでしょう。

アイルランドの電源構成は 2018 年実績によると原子力が無く、水力は少なく 3%しかありません。天然ガスが 51%を占め基幹電源になっています。風力が 28%、バイオ・廃棄物が 3.7%ですが、石炭も 14%残っています。

アイルランドは、風況の良い立地に恵まれています。風力発電設備が国土に林立することは望まないでしょうが、風力発電を増やすことが可能でしょう。

2018 年に TES に占めるアイルランドの化石燃料の比率は 89%、総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は 66%とかなり高い値です。

＜ルクセンブルク＞

正式名称はルクセンブルク大公国で、人口約 57 万人、面積が 2,586km2 と神奈川県より少し広い国土で、主要産業は金融業と鉄鋼業です。人口がデンマークの約十分の一、イタリアの百分の一である小国のルクセンブルクを、１人当りの GHG 排出量などで比較するのは適当ではないと思います。

ルクセンブルクは 1960 年代から鉄鋼業が経済を牽引してきたのですが、鉄鋼の不振により、金融業へシフトしており、１人当り GDP が世界で最も高い国です。

ルクセンブルクに本社を置いた鉄鋼業のアルセロール社が、2006 年にオランダのミタル社と合併し、世界最大の鉄鋼会社アルセロール・ミタルとなり、その本社もルクセンブルクにあります。殆どの事業所は国外にありますが、圧延工場など一部は、ルクセンブルク国内に残っています。小国のため１人当りで評価すると、エネルギーや電力消費、物流などに対する鉄鋼業の影響が大きく現れるものと思われます。

図-11.4 で、ルクセンブルクの GHG 排出量が大きくなっているのは、運輸部門のためです。UNFCCC のデータを調べると、大型トラックによる GHG 排出が一番多く、乗用車の排出が続いています。大型トラックによる GHG は、鉄鋼業関連の物流の影響が大きいものと思います。

2018 年に TES に占めるルクセンブルクの化石燃料の比率は 78%です。総発電電力量に占める化石燃料電力の比率は 9%と低いのですが、発電電力量の 2.8 倍の正味電力輸入があります。

各国の GHG 排出には、それぞれの国の事情化が係わっています。但し、ルクセンブルクの例は特殊で比較の対象にならないので、これ以上のコメントは必要ないと思います。

11.5 GHG 実質ゼロに関する要点整理

前項では、各国の GHG 排出低減状況を紹介しましたが、GHG 実質ゼロの達成に関し、私見を交えて要点を記載しました。

(1) GHG ゼロに近い国

現在、GHG 排出が実質ゼロ（GHG 排出と森林等の吸収で合計ゼロ）の国は、幸せの国ブータンとアマゾン熱帯雨林に隣接するスリナムの二国と言われます。EU 諸国では、スウェーデンが GHG 実質ゼロに最も近い国でしょう。

スウェーデンが温暖化防止に熱心であることは否定しませんが、GHG ゼロに近いのは、前述のように、発電電力量の 38%が水力で、48%が原子力、GHG 排出量の 81%の森林等の GHG 吸収があるためです。その要因は、人口密度が極めて低いために、国土の割に GHG 排出量が少ないからです。バイオマスの利用を可能にしているのも、人口密度が低いためと思います。

北欧のノルウェーやフィンランドは、現状の GHG 排出量はそれほど少なくありませんが、同様に人口密度が低く、水力資源に恵まれているため、GHG 実質ゼロを目指せば、達成可能と思われます。

EU における本格的な温暖化対策は、1990 年代初頭の北欧諸国による温暖化対策税導入に始まりますが、GHG 削減が容易であったことが同税導入に繋がったものと思います。温暖化防止について、他国がスウェーデンに見習えることがあるとしたら、発電での原子力の多さくらいなのです。

⑵ 水力と原子力

GHG 実質ゼロを達成するには、エネルギー利用の電化を進め、発電の脱炭素化を図ることが基本です。その上で、削減できなかった CO2 や非 CO2 の GHG を、森林等の吸収で相殺するか、CCS で地下に貯留することになります。

発電の脱炭素化のためには、先ず、水力と原子力の比率が高いことが重要です。スイスは発電の 55%が水力で 37%が原子力です。フランスは水力発電は 12%ですが、原子力が 71%です。フランスは電力輸出が多く、国内電力供給量との比率なら原子力は 80%になります。

両国の CCS 立地に関する知見はありませんが、ある程度の CCS の立地があれば、GHG 実質ゼロの達成が可能でしょう。フランスは、電力供給を全面的に原子力に依存する割切があるので、パリ協定の履行に熱心なのだと思います。

⑶ 風力資源

英国は電源構成で原子力が 20%、水力はほとんど無しに、GHG 排出量をかなり低減しました。石炭を天然ガスに転換した効果が大きかったのです。LNG で輸入している日本と異なり、欧州では天然ガスの大半はパイプラインで供給され、価格も比較的安価です。英国のこれまでの GHG 低減は、それほど大きな経済的負担になっていないと思います。

英国が GHG 実質ゼロを実現するには、風力発電を大幅に増やすことが必要になるでしょう。EU の中で英国は、風力資源が最も豊富な国です。国土に風力発電が林立することを許容するなら、必要な電力量を確保できると思われます。

問題は、風力発電の比率が大幅に高くなった場合に、発電変動を制御できるかです。電力網で各国がつながっている欧州で、現在は火力発電が沢山残っているため、火力発電を止めて余剰の安価な風力電力を購入する国があります。しかし、各国に火力発電がほとんど残っていない時代にも、風力や太陽光発電の変動を制御できるかは疑問です。場合によっては英国も、原子力

を増やす途を選ぶことになるかもしれません。

英国は北海油田をノルウェー等と保有しており、生産が減退したフィールドが CCS 立地に利用できれば、GHG 実質ゼロも可能かもしれません。豊富な風力資源と CCS 立地が、温暖化防止に熱心な理由であると思います。

(4) GHG ゼロが困難な国

水力発電が 10 数%かそれ以下で、風力発電の立地が乏しく、原子力は使いたくないと考える国は、GHG 実質ゼロの達成は恐らく困難でしょう。例えば、イタリアや日本などです。

太陽光発電があると考えるかもしれませんが、風力発電に比べて発電コストが高いだけでなく、発電変動が大き過ぎます。昼夜や天候による発電変動に加え、季節変動もあります。基幹電源とするには膨大な電力貯蔵設備が必要となり、それを加えると発電コストが過大になります。

また、バイオ燃料は供給量に限界がありますから、基幹電源になるのは難しいでしょう。

(5) 工業生産で排出される GHG

日本やドイツの GHG 排出量が多い要因の一つは、工業生産、特にエネルギー多消費産業の規模が大きいことです。例えば、日本の鉄鋼業は日本全体の約 13%の GHG を排出しています。鉄鋼生産を止めれば、図-11.4 で日本の 1 人当りの GHG 排出量は、デンマークとオーストリアの間くらいになります。

しかし、鉄鋼生産を止めても、日本の鉄鋼需要が大きく減るわけではなく、また輸出もしています。日本が生産を止めた分の鉄鋼は、他の国が生産することになります。鉄鋼 1 トン当の生産で排出される GHG が多い国や企業に生産が移行すれば、世界全体では GHG 排出が増加することになります。

なお、この種の問題は農業や牧畜でも起きることですが、農業や牧畜は簡単に生産国を変更することはできないでしょう。

世界的に炭素税を課すことで、各種産業を GHG 排出が少ない国に誘導す

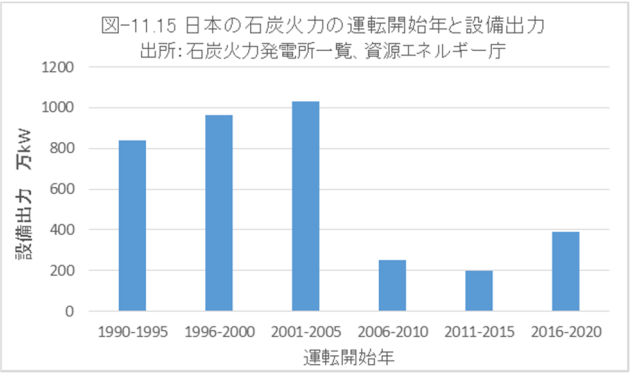
ることができます。産業により排出される GHG はゼロにすることが困難であることが多く、国ごとの GHG 排出量の比較では、別枠で評価すべきでしょう。また、CCS 立地が豊富な国に、産業が移転する事態も起きるかもしれません。

(6) 日本はなぜ石炭火力が増加したか

EU では GHG 排出低減のため、石炭から天然ガスへの転換が進みました。しかし、日本では 1990 年以降石炭消費が増加しました。日本で石炭は、50%余りが発電用で、約 30%が鉄鋼業、その他工業燃料等に使用されています。石炭の工業利用は(5)項に記載したような問題があり、発電について調べてみました。

図-11.15 は、1990 年以降に運転開始になった自家発を含む石炭火力の 5 年ごとの合計出力です。新たに沢山の石炭火力が建設され運転開始されています。特に 2005 年頃までは、新規石炭火力の運転開始が多かったことが分かります。

1970 年代の石油危機の教訓から、日本はエネルギーの安定供給のため、使用エネルギーの分散化を図ってきました。石油は発電燃料に使用するには価格が高くなり過ぎたことなどで削減し、石炭火力、LNG 火力、原発で、水力発電を除く凡そ三分の一ずつの電力を供給するのが基本的な考えです。



温室効果ガス削減の京都議定書で、日本は 6%の GHG 削減の義務を負っ

ていましたが、その程度の削減なら石炭火力が増加しても達成できると考えていたのでしょう。

例えば、2009 年の G8 ラクイラ・サミットで、世界全体の温室効果ガス排出量を 2050 年までに少なくとも 50%削減する目標を再確認するとともに、先進国全体として、80%またはそれ以上削減する目標が支持されました。2050 年はかなり先のことですが、本気で実行するならば大変な事ですが、あまり話題にならなかったように思います。日本では当時、GHG 排出ゼロを真剣に考えることは無かったように思います。

EU では、IPCC の 5 次評価報告書が発行された 2013、2014 年頃から、GHG ゼロの考えが高まり出したように思います。しかし、EU 以外の先進国が、それに同調したわけではありませんでした。

日本は、2008 年 9 月に始まるリーマン・ショックによる景気後退もあり、上記のように石炭火力の建設は抑制され始めていましたが、2011 年 3 月に東日本大震災が発生し、全ての原発が停止しました。不足した電力は、長期休止していた石油火力の運転で当座はしのぎましたが、LNG 火力の大幅増加と石炭火力により対応されました。

2016 年 4 月に日本では、電力小売完全自由化が始まりました。石炭火力の発電コストは LNG 火力より低いため、経済原理に委ねるなら、石炭火力が増加するのは当然の成り行きです。EU の動向をウォッチしていた筆者は、石炭火力の増加を放置していいのか、炭素税の導入が必要ではという想いがありました。

以上のように、石炭火力の増加には、それなりの理由があったわけです。温暖化は確かに進行していると考えますが、GHG 実質ゼロという極めて困難な課題に優先して取り組まなければいけない、という説得力のある根拠も充分に示されていないように思います。

11.6 EU 諸国の GHG 排出量低減の推移

本項では 1990 年から 2018 年までの GHG 排出量の推移を紹介します。森林等による吸収を考慮した GHG 実質排出量（GHG net emissions with

LULUCF）を示します。各国がUNFCCCに提出したデータです。各国を比較するため、上記と同様に人口1人当りの排出量を示しました。検討対象期間での各国の人口変化はそれほど大きくないため、簡単のため、2018年年初の人口で各年のGHG排出量を除した値になっています。1990年から2018年までのGHG排出量の変化により、検討各国を4グループに分けてみました。

図-11.15は、28年の期間にGHG排出量がほぼ一貫して減少している国です。温暖化防止に熱心な国と考えてよいかもしれません。

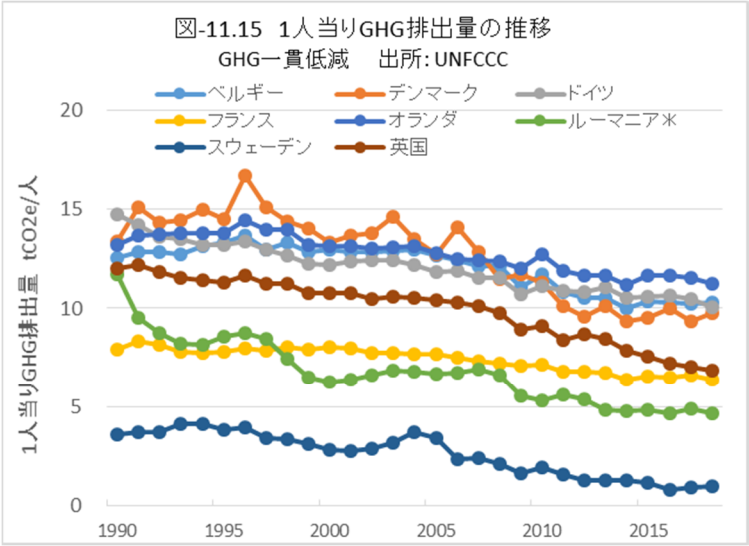


図-11.16には逆に、1990年に比べ2018年の排出量が増加した国を示しました。温暖化防止を無視したわけではないでしょうが、経済成長によりエネルギー消費が増加し、GHG排出が増加した国が多いと思います。

図-11.17は、1990年台前半にGHG排出量が急速に低減したが、その後顕著な低減が見られない国です。何れも東欧諸国で、旧ソ連圏の時代に省エネが遅れていた国々です。京都議定書によるGHG削減で、最初はGHG排出低減が急速に進みました。概して1人当りのGDPが低い国で、政策の重点が豊かさに置かれたためと思われますが、その後はGHG排出低減が進まなかった国です。

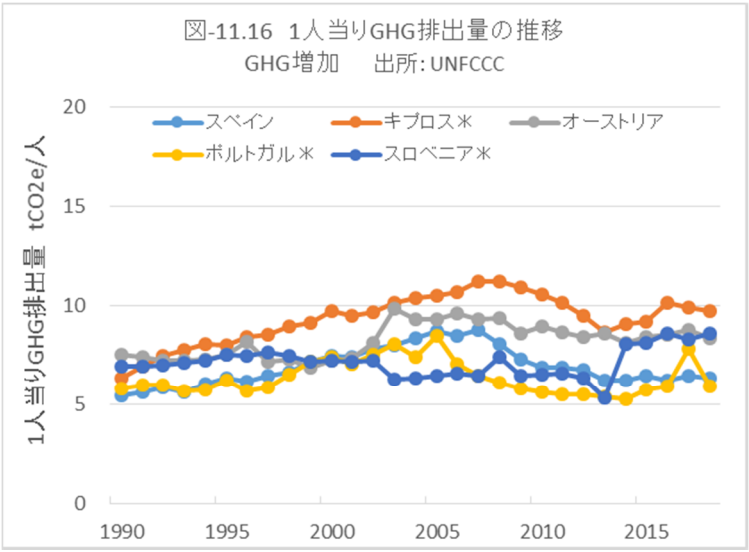


図-11.16 1人当りGHG排出量の推移
GHG増加 出所: UNFCCC
1人当りGHG排出量 tCO2e/人
スペイン
キプロス＊
オーストリア
ポルトガル＊
スロベニア＊
20
15
10
5
0
1990
1995
2000
2005
2010
2015

.

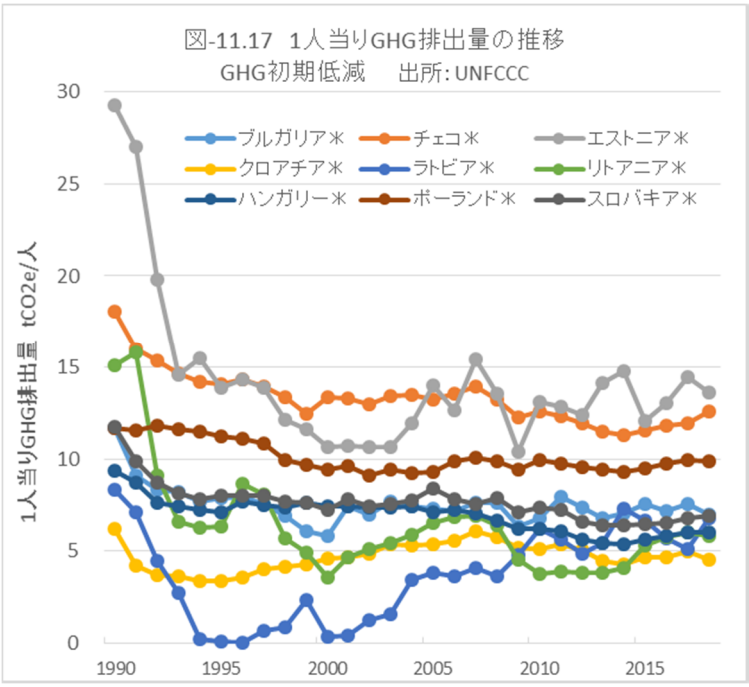
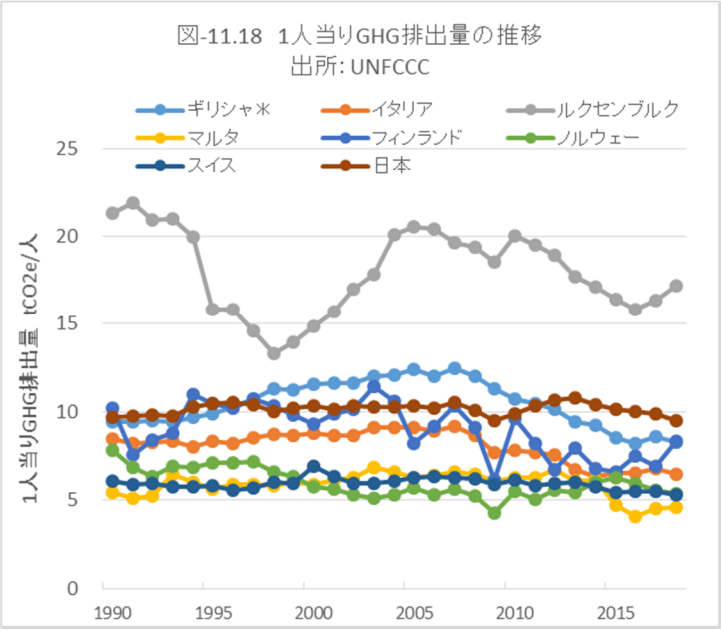


図-11.17 1人当りGHG排出量の推移
GHG初期低減 出所: UNFCCC
1人当りGHG抹出量 tCO2e/人
ブルガリア＊
チェコ＊
エストニア＊
クロアチア＊
ラトビア＊
リトアニア＊
ハンガリー＊
ポーランド＊
スロバキア＊
30
25
20
15
10
5
0
1990
1995
2000
2005
2010
2015

図-11.18は残りの国々で、ほとんどがGHGの排出低減が僅かだった国で、日本もそこに含まれています。

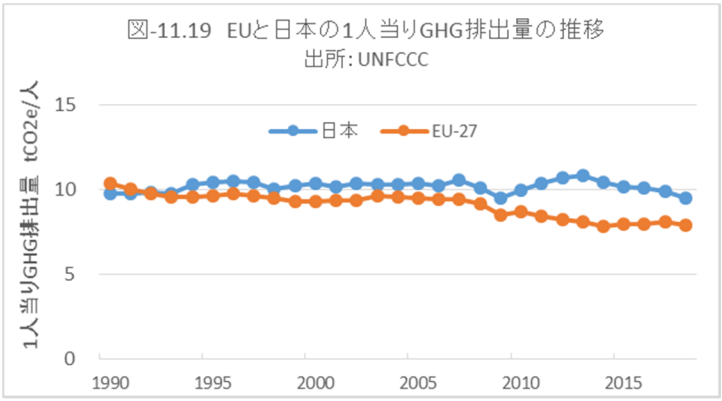


これらのグラフを眺めると、GHGの排出低減、特にGHG排出実質ゼロに向け真剣に取り組んでいるのは、EU加盟国の一部であるという想いがします。また、それらの国には、GHG排出低減が比較的容易な国が含まれています。

図-11.19には、EU27ヶ国の合計のGHGの人口1人当り排出量を示し、日本の排出量と比較しました。1990年に比べ2018年のEU-27のGHG排出量は24%減少したのに対し、日本の減少は2.2%に過ぎません。2018年のEU-27のGHG排出量は、日本より17%少なくなっています。欧州の温暖化防止に比べ、日本を周回遅れと批判する人もいますが、それなりに尤もと思います。

しかし、GHG実質ゼロの達成を目指すなら、GHG排出量が少なくなるほど、削減は益々困難になります。2050年までに30年しか残されていません

が、GHG 実質ゼロのゴールは遥か遠くです。



加えて、2018 年の値で日本の非 CO2 の GHG は総排出量の 9%であるのに対し、EU-27 では 21%もあります。これは、日本の産業は工業の比率が高いのに対し、概して EU-27 では農業や牧畜の比率が相対的に高いためです。農業や牧畜で排出される非 CO2 の GHG である CH4 や N2O は、広い範囲に低濃度で排出され、エネルギー由来の CO2 に比べて削減は難しくなります。そのことを考慮すれば、日本が GHG 実質ゼロを目指すとしても、EU に比べてそれほど遅れているわけではないと考えます。

最近は、カーボンニュートラルという表現がよく聞かれるようになりました。GHG 排出ゼロでなく、CO2 排出ゼロにすり替えが行われるかもしれません。

11.7 温暖化の危機感

GHG 排出実質ゼロを目指して真剣に取り組んでいるのは、EU 加盟国の一部であることを紹介しました。GHG 実質ゼロは、ほとんどの先進国にとって、豊かさをかなり犠牲にして行うことです。また、発展途上国や低所得国に GHG 実質ゼロの実行を求めたら、飢餓や難民が発生することは想像に難くありません。GHG 実質ゼロに取り組むのは、温暖化被害に対する強い危機感がある場合でしょう。

深刻な温暖化リスクとしては、異常気象が第一にあげられると思います。未曾有の集中豪雨や強力な台風の多発のような異常気象により、温暖化被害が、温暖化防止の経済負担を上回るようになれば、温暖化を放置するわけにはいきません。

異常気象が発生すると、マスコミは温暖化のためと報じます。しかし、IPCC の 5 次評価報告書 WG1 には、熱帯低気圧に対する温暖化の影響は「世界全体での熱帯低気圧の発生頻度は減少するか、又は本質的には変わらないままである可能性が高く、それと同時に、世界平均した熱帯低気圧の最大風速及び降水量は増加する可能性が高い。」と記載されています。また、温暖化が閾値を超えて高まると、取り返しのつかない事態になるという指摘もありますが、同様に不確かさを含むものです。本書の 3.3.項に「温暖化による極端な気象現象」、3.4.項に「温暖化による主要リスク」として、IPCC の 5 次評価報告書でどのように記載されているかを紹介しました。

異常気象に温暖化が影響しているとしても、主な原因であるかは不確かです。温暖化リスクとは不確実な危機のことで、IPCC の評価報告書は可能性・不確実性の評価付きで記載されており、全てが確実な事と考えるのは間違った理解です。

［**参考**］ 例えば、日本の気象庁のウェブページに掲載されている異常気象と温暖化について、次のように解説されています。

個々の異常気象を分析してみると、多くの場合、上空の偏西風が通常とことなる位置を流れる状態が続いたことや、熱帯地域の対流活動の影響が遠い場所に伝わったことなど、地球の大気と海洋の自律的な変動による自然のゆらぎが一方的に大きく振れたときに、平年と比べ著しい高温となることがわかります。このような自然のゆらぎは、地球の気候システムに元々備わった性質であり、地球温暖化が原因で発生したと言うことはできません。

一方、大気中の温室効果ガス濃度の増加に伴って、世界のほとんどの地域で長期的に気温が上昇しています。言い換えると、「平年」の気温が昔に比べ高くなっています。上述の自然のゆらぎによる平年の気温からのずれの程度

が同じであったとしても、平年の気温そのものが高くなっているために、過去にはほとんど経験されなかったような著しい高温が発生する確率が高まっていると考えられます。これはあくまで確率ですので、ある日の気温がたまたま高かったからといって、地球温暖化と関係があると断定することはできません。しかし、過去数十年にわたる観測データを分析すると、日本を含む世界各地で、顕著な高温の発生頻度が増えていることが分かっており、このような長期的な増加傾向は、地球温暖化の表れであると考えられます。

おわりに

タイトルに「常識的に考える」と付けたのは、「常識的に考えると温室効果ガス（GHG）の80%削減や実質ゼロが極めて困難な課題である」ためです。石油・石炭・天然ガスが無くなる世界に移行することを想像すれば分かると思います。

多くの人が、それまで携わっていた仕事を失います。化石燃料を原燃料に使用していた産業は設備変更を余儀なくされ、化石燃料を使用する民生機器は変更が必要になります。また、世界の10%近くの国は、GDPの10%以上を化石燃料の輸出に依存しており、財政破綻する国が多数発生し世界的な混乱が起きるでしょう。

現代社会ではエネルギーは食料と同じくらい不可欠なもので、それの供給が途絶えることは生死に係わる問題です。日本は石油危機での「油断」の教訓から、不測の事態でもエネルギー供給が途絶えることがないよう、使用エネルギーの多様化を図り、石油については200日分近い備蓄を行っています。

化石燃料を止めてもエネルギー需要が無くなるわけではありません。代わりのエネルギーは、太陽光発電や風力発電に依存せざるを得ず、それらは不測の事態でなくても供給が途絶えるものです。化石燃料に比べて発電コストが高いだけでなく、供給変動対策として膨大な設備・機器が必要になります。小出力で分散化した太陽光や風力発電設備の利点もありますが、大規模集中型の火力発電設備に比べ設備管理は難しくなるでしょう。設備寿命は半減し、約20年ごとに撤去、新設を繰り返さなければなりません。

化石燃料を無くすことは、一国の首相が号令を掛ければ達成できるような簡単なことではありません。化石燃料を止めることで、再生可能エネルギーの膨大な投資が発生するため、能力のある人は困らないでしょう。しかし、医療、高齢者福祉、教育など、以前からある多くの財政支出が圧迫され、しわ寄せは常に弱者に及びます。GHG 排出実質ゼロが必要なら、確りした実行計画が不可欠です。

GHG 排出実質ゼロが必要なのでしょうか。限りある化石燃料を使い続け

ることはできませんが、2050 年までに GHG を実質ゼロによる必要はないでしょう。温暖化の影響は確かに現れていますが、2100 年頃までなら、4 章に記載したように妥当な範囲の GHG 削減でよいように思われます。上記のような困難があっても、GHG 実質ゼロを目指すとしたら、深刻な温暖化リスクが確実に発生する場合です。

IPCC は 1880 年から 2012 年までに、世界の平均地上気温は 0.85℃上昇したと報告しています。現在のトレンドに従うなら、この先 2100 年までに更に 1.5~2.0℃上昇することは確実です。パリ協定の「産業革命前からの世界の平均気温上昇を 2℃未満に抑え、1.5℃未満を目指す」ことは守れないでしょう。しかし、平均気温が 1～1.5℃程度上昇すること自体は、一般にそれほど深刻な問題ではないと考えます。例えば、東京は明治維新以降、温暖化と都市化により約 3.5℃の平均気温上昇を経験していますが、致命的な問題は起きていません。

この先 2100 年までに 1.5~2.0℃の平均気温上昇があったとしても、海面上昇の予測は 40 cm 前後です。堤防の嵩上げは必要でしょうが、多くの国にとって、GHG 実質ゼロに取り組むほど深刻な問題ではないと思います。

氷河が解けて短くなることは地元にとって問題でしょう。最近のヒマラヤでの土石流発生のような事態も起きるかもしれません。しかし、批判を覚悟で言えば、それ自体は世界的にそれほど深刻な問題ではないように思います。

温暖化で白熊やトナカイの生存が脅かされている映像が紹介されます。生物多様性が損なわれるのは、深刻な問題と言われます。しかし、低所得国で GHG 実質ゼロを目指したら、飢餓や難民が発生することは想像に難くありません。どちらが深刻な問題かは簡単に答えられないように思います。

多くの日本人にとって、温暖化の深刻な被害は、未曾有の集中豪雨や強力な台風の多発、恒常化のような異常気象ではないかと思います。異常気象が発生すると、マスコミは温暖化のためと報じます。しかし、IPCC の 5 次評価報告書 WG1 には、熱帯低気圧に対する温暖化の影響は「世界全体での熱帯低気圧の発生頻度は減少するか、又は本質的には変わらないままである可能性が高く、それと同時に、世界平均した熱帯低気圧の最大風速及び降水量

は増加する可能性が高い。」と記載されています。異常気象に温暖化が影響しているとしても、主な原因であるかは不確かです。

GHG 排出実質ゼロの達成には、大きな経済負担を伴うことが確実であるのに対し、深刻な温暖化リスクが発生するかは不確実です。今必要なのは、次の 2 件であると考えます。

①パリ協定は「平均気温上昇を 1.5℃未満に抑えることを目指す」ことを要求しており、そのためには、GHG 排出実質ゼロが必要です。極めて困難な目標にもかかわらず、大半の国がパリ協定を批准しているのは、具体的行動として何が必要か充分に理解されていないためでしょう。GHG 実質ゼロや化石燃料の使用がほとんど無い世界は、どの様な世界になるのかを明らかにし、そこに移行するシナリオを示すことが重要と考えます。

②温暖化リスクの発生が不確実であるとしても、現実のものとなる可能性があります。深刻な温暖化リスクの発生をもっと明確にすることが必要です。IPCC とは別途のチームを設け、温暖化に懐疑的なメンバーも加え、気候モデルによる検討のため、せめて世界中のスーパーコンピュータを総動員するくらいのことを行う必要があると考えます。

【 著者略歴 】

開成高校、早稲田大学機械工学科、修士。1970 年に鉄鋼会社に入社、エンジニアリング部門で、主にエネルギー分野での設計業務、技術開発に従事。

常識的に考える日本の温暖化防止の長期戦略

2020 年 3 月 22 日　初版発行
2021 年 2 月 28 日　改訂 1 版発行

著　者　　田中雄三
発行者　　田中雄三
E-mail：websearch@nethome.ne.jp