

2020年3月22日

イギリスの2050年ゼロエミッションについて 目次

山口光恒

1、2050年ネットゼロ（GHG）エミッション決定の背景	p.1
2、2008年の2050年80%削減（1990年比）について	p.1
2-1 80%削減の根拠	p.1
2-2 イギリスの80%削減の内容と可能性	p.4
2-3 イギリスの炭素予算	p.6
3、2050年ネットゼロエミッションについて	p.8
3-1 ネットゼロの概要と淵源	p.8
3-2 ネットゼロ実現のシナリオ（技術面の検討）	p.10
3-2-1 80%削減目標と現状シナリオ	p.10
3-2-2 意欲的目標シナリオの内容	p.11
3-2-2-1 CCSおよびBECCS	p.13
3-2-2-2 業種別内訳	p.15
その1 発電	p.15
その2 陸上輸送	p.18
その3 航空・海運	p.20
その4 産業部門	p.21
その5 建物	p.23
その6 水素利用について	p.26
3-2-3 目標達成に向けての投機的選択肢	p.27
4、目標実現の政策等	p.30
5、2050年ネットゼロの費用便益分析	p.31
5-1 費用便益分析の放棄	p.31
5-2 IPCC報告書での費用便益分析の扱い	p.33
5-3 技術革新のコストへの影響	p.34
5-4 業種別限界削減費用と総削減費用	p.36
5-5 総削減費用と業種別内訳	p.38
6、政府に対するCCCの勧告とイギリス政府の対応	p.40
7、参考資料 日英部門別排出量比較（2017年）	p.41

イギリスの 2050 年ゼロ（GHG）エミッション決定（2019 年 6 月）について

2020.3.22

山口光恒

1、2050 年ネットゼロ（GHG）エミッション決定の背景

2019 年 6 月 26 日イギリス政府は気候変動法で定められた 2050 年の GHG（温室効果ガス）削減目標（1990 年比）を 80%から 100%（ネットゼロ）とすることを決定し、世界を驚かせた（UK 2019）。これはその前月政府とは独立した Committee on Climate Change (CCC)から政府に提出された勧告”Net Zero; The UK’s contribution to stopping global warming”-CCC 2019a) を一部修正の上政府が受け入れたものである¹。CCC (2019a)によれば、勧告の背景は IPCC1.5°C特別報告書 (IPCC 2018、以下 SR1.5) を含む最新の知見を踏まえて、気候変動に対する世界全体の挑戦の中でのイギリスの果たすべき役割を検討し、イギリスが更なる削減を掲げるべしとの結論に至り、この実行に向けての費用と便益の評価を行った。その結果ネットゼロ排出が必要で実現可能であり、費用効果的 (cost effective) であるとの結論に達したと明記されている。ここで費用効果的とは技術進歩により 2008 年に議会の承認を得た 80%削減と同等のコストでゼロエミッションが実現できるようになったことを指す。イギリスでは 2003 年に CO₂ の 1990 年比 60%削減を目指したがこの時のコスト計算は 2050 年時点で GDP の 0.5~2.0%であった。2008 年に GHG2050 年 80%減（基準年は同じく 1990 年）を法律で規定したが、この時のコスト試算は GDP 比 1~2% (2050 年) であった。今回はゼロエミッションをこれとほぼ同コストで達成可能と考えたと説明している。ここで注目すべきはイギリスの場合重要な気候変動政策の決定に際しては必ずコスト（GDP 比）を計算し、実現可能性をチェックしている点である。CCC は勧告に際して政府による適切な政策を前提条件としているが、建物の暖房、産業部門の排出、CCS（炭素回収・貯留）、運輸、農業、航空・海運を重点分野としている。このうち航空と海運からの排出については政府がゼロエミッションの対象外としたことは脚注 1 で述べたとおりである。

2、2008 年の 2050 年 80%削減（1990 年比）について

2019 年 6 月の 2050 年ゼロエミッション目標を理解するには、2008 年に法定した 2050 年 80%目標の理解が必須であるので、先ずこの点を CCC (2008)に沿って簡単に述べる。

2-1 80%削減の根拠²

今回のゼロエミッション目標制定に関して筆者が是非本稿の読者に知って貰いたいのは 2008 年の 80%削減の根拠である。ここには日本の気候変動政策との著しい相違がある。

イギリスの 2050 年目標制定の根拠は①まず世界全体として工業化以降の気温上昇限度目

¹ CCC の勧告と政府の決定が異なるのは国際オフセット（CCC は無し、政府はあり）と国際航空・海運（CCC は含める、政府は含めない）の 2 点のみでこれ以外は政府は CCC 勧告を全面的に受け入れている。

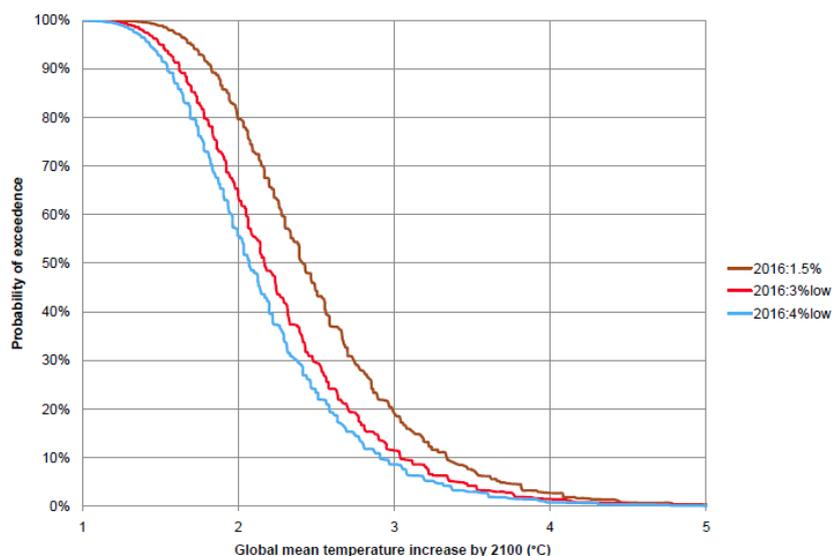
² 2050 年 80%削減目標制定の経緯や CCC と政府の関係等詳細は山口光恒（2017）参照

標を決め、次に②これを達成するための 2050 年時点の世界全体の排出目標を決め、その中で③イギリスが負担すべき排出量を推定し、これを以て 2050 年目標とするというものである。①は 2°C 目標 (2100 年時点)、②は 2050 年世界半減目標を充て、この結果として③が 80% 減となる。極めて論理的な決め方であるが、2°C 目標は当時 EU が世界の目標にするべく世界に働きかけていた目標である (最終的にそうなったのは 2015 年のパリでの COP21 である)。気温上昇による損害増などの図を示しているがなぜ 2°C でなければならないかについての論理的説明はない。この点はイギリス政府の価値判断である。これに関して興味深い点は、4°C 上昇の場合の損害は 2°C の倍を遙かに超えるとして今世紀中の 4°C 上昇を極めて危険な気温上昇とし、2°C に加えて 4°C を超える確率を 1% 以下に抑えよとの付帯条件を設けている点である。これは他国にはない目新しい条件である。以下順を追って説明する。

上記の通り 2°C 目標は所与とされ、これを達成する為の世界の 2050 年排出量はどの程度か。CCC は世界の GHG 排出量のピーク年として 2016 年と 2028 年の両年をとりそこから一定割合で排出を減らす場合の気温上昇をモデルで計算したが、2028 年ピークでは全てのケースで気温上昇が 2°C を超えてしまうのでこれを候補から外している (しかし世界の排出量は 2018 年時点でも増え続けているのでこの仮定的前提が揺らいでいることになる)。最終的に要件を満たすのは 2016 年をピークとし、以降の削減速度が年間 3% 以上のケースのみであった (図 1 参照)。

(図 1) 2100 年に所定の気温上昇に達する確率、2016 年排出ピークの場合

Figure 1.11 Probabilities of exceeding a given global mean temperature increase by 2100 for emissions trajectories peaking in 2016



出典：CCC 2008 25 頁、縦軸：超過確率、横軸：2100 年までの気温上昇。排出経路の上から年間削減率 1.5%、3%、4%。上記からいずれのケースでも 2100 年に 2°C を超える確率は 50% 以上あること、4°C を超える確率が 1% 程度になるのは削減率が 3% 或いは 4% の場合のみであること

が分かる。

とはいえ 2°Cを超える確率は年 3%削減だと 63%、年 4%削減でも 56%もある点に留意の必要がある³。この場合 2050 年の世界 GHG 排出量は 20-24 GtCO₂e、削減幅は 90 年比 34-46% (2008 年比で 50-59%) となる。これは当時の G7 の声明にある 50%削減 (但し起算年無し) にも合致するとして正当化している。

上記のうち (実現可能性を考慮して) 2050 年の GHG 排出量を 20-24Gt とし、同年の予想世界人口 90 億人で割ると一人あたり 2.1-2.6 tCO₂e となる。これをイギリスの予想人口にあてはめると 146-180 MtCO₂e となり、90 年比 78-82%の削減となる。CCC はこれを以ってイギリスの 2050 年 GHG 排出量として 90 年比 80%削減を勧告し、これが採用された。ここで重要なことは衡平性の観点から世界一人あたり均等排出量を採用した点である。これがイギリスの 2050 年 80%削減の淵源である。

CCC は IEA のシナリオを参照しながら世界半減目標は可能で、世界規模での排出権取引を前提に削減コストは GDP の 1-3%程度としている。CCC 勧告には発電、運輸等の技術と価格低下の見通しについて IEA の検討を参照しつつ更に分析を加えているが、この中で例えば CCS についてはコストや場所の制約などをかなり詳細に検討した結果、今世紀中に貯留場所が枯渇することはないとの IEA (Blue Scenario) の分析結果を受け入れている⁴。

CCC 勧告の本文は 480 頁と大部のものであるが、これに技術付録が付随しており、この中で 80%削減の費用便益分析を行っている (DICE、FUND など代表的なモデルを検討し、最終的にはイギリスの PAGE モデルを採用)。ただし非市場損害の金銭換算の不確実性から「最適」排出経路は求めている。計算の前提として気候感度は 2-5°C (最良推定値 3°C) を用い、気温上昇と損害の関係を表す損害関数については、更にモデルではとらえることが出来ない損害等を考えて 1、2、3 乗倍⁵にしている。不可逆の大災害が発生する気温上昇は不明であるが、PAGE では 5°Cと仮定し、以降気温が 1°C上昇する毎に発生可能性が 1 割ずつ増えると仮定している。次に将来損害の現在価値の計算に大きな影響を及ぼす割引率 (純時間選好率) について著名な学者 (Nordhaus、Weitzman など) の学説を引用しつつ高度に専門的な議論を展開し、結論として 0.1 (Stern Review)、0.6、1.5% (イギリス政府の Green Book)、それに時間と共に漸減する率を用いている。

上記を踏まえた費用と便益の現在価値を比較している (図 2)。それによると 2°C目標達成のための対策 (2016 年ピーク、以降年 3%或いは 4%で削減) による便益は想定した 4

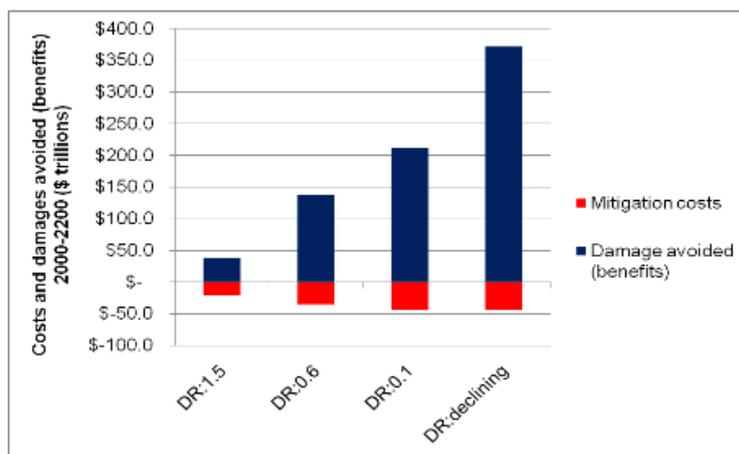
³ この試算は気候感度次第で大きく変わるものであるが、CCC (2008)の技術付録 18 頁には IPCC 他各種文献に当たった結果、2004 年の Nature 誌掲載の Murphy, J. M., et al. (2004) Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations のそれをとるとある。同頁の Figure 7 を見ると気候感度の幅は 2°C-5°C (5-95%の範囲) Median は 3°C弱となっている。この是非は別にしようとした点まで検討した上での CCC の勧告であるという点が重要と考える。

⁴ イギリスに関してはオフショアの廃油田・ガス田があるので場所についての心配はない (但しコストについては不確実性がある) としている。

⁵ 気温上昇が 2 倍と仮定すると、1 は損害も 2 倍、2 は損害が 2²で 4 倍、3 は 2³倍 (つまりに 8 倍) になることを示す。

つの割引率のいずれの場合もコストを遙かに上回る（つまり対策は正当化される）。図2は2016年以降毎年4%で削減する場合の費用（赤色）と便益（黒色）であるが削減率3%の場合も大同小異である。

(図2) 費用と便益の割引率ごとの割引現在価値 (2000-2200年)



出典：CCC 2008 技術付録 20 頁、赤がコスト、青が便益、DR は純時間選好割引率

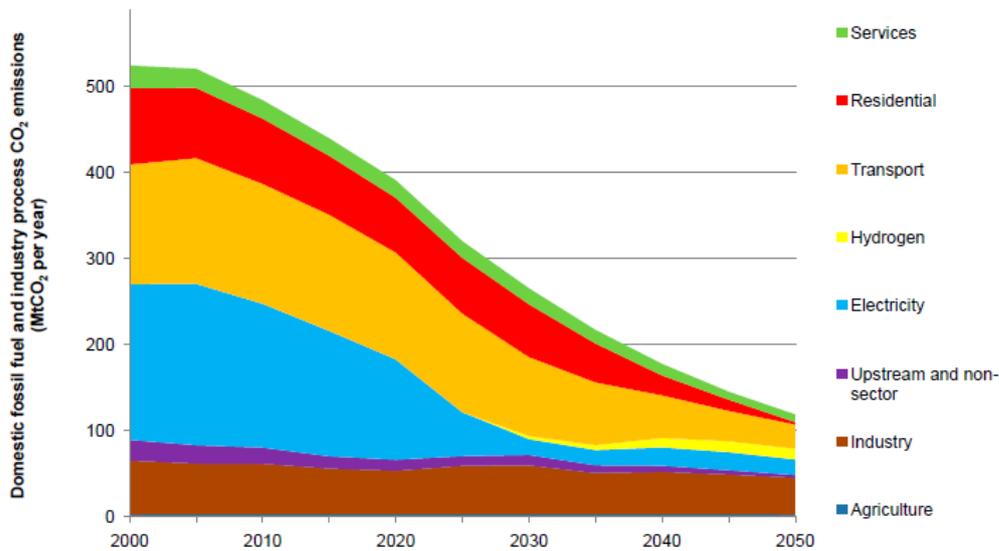
CCC は割引率がどこまで高くなると費用>便益となるかの試算を行っているが、その結果2.25%と2.5%の間が分岐点となった。Nordhaus の3%の場合には費用>便益となるので2°C目標を目指すべきではないということになる。割引率が如何に重要かを示す一つの例である。

2-2 イギリスの80%削減の内容と可能性

以上世界規模の話であるが、イギリス国内でどの様に80%削減目標が達成可能か。CCCはモデルを用いて8割削減は可能であり、コストはGDPの1-2%としている。この中で部門別CO2削減状況は図3の通りとなる。2030年までは発電部門からの減少が急で、その後運輸、住宅部門の減少が続く図となっている。また、産業部門はそれほど排出が減少しない。産業部門の削減の困難性を示唆したものである。

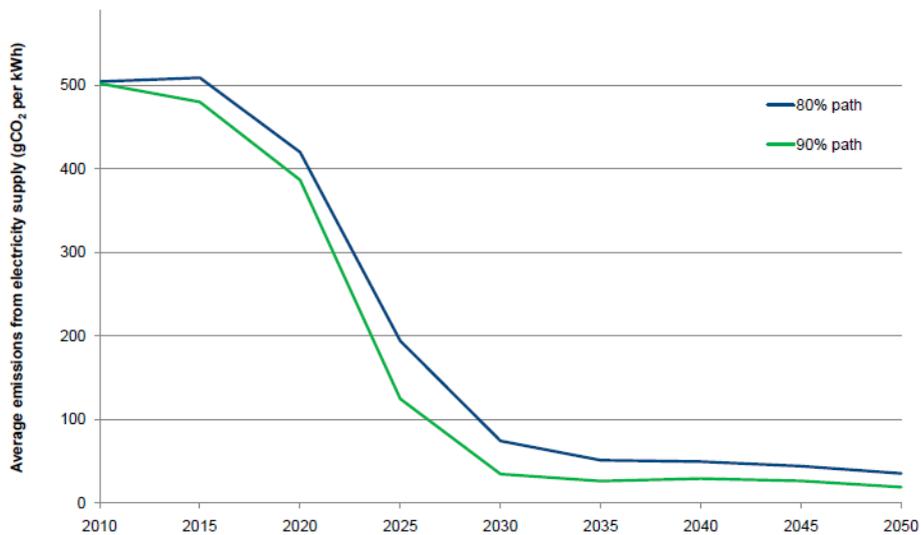
発電部門の2030年までの大幅削減の裏付けは図4のとおり発電の炭素集約度の急低下である。図にはないが、これと平行して2035年以降発電電力量が急増しているが、これは社会が急速に電化していくことを示している。

(図3) 2050年80%削減に向けての部門別CO2排出量 (単位 MtCO2/年)



出典：CCC 2008 79 頁 縦軸は化石燃料からの CO2 排出量。
 排出源は上からサービス、住宅、運輸、水素、発電、その他、産業、農業

(図 4) 2050 年にかけての発電の炭素集約度



出典：CCC 2008 80 頁

縦軸は炭素集約度 (gCO₂/kWh)、青が 80%削減、緑が 90%削減

上図は CCS と原子力も最小費用原則で総動員した結果で、2030 年にかけて急速に炭素集約度が低下していく絵となっている。この場合 2050 年の再エネ構成比は 28%程度 (対策無しだと 16%) であるが、仮に技術的理由或いは社会が CCS・原子力を許容しない場合に電源構成 (特に再エネ) はどうなるか。CCS が使えない場合再エネは 2025 年までに 30%に急上昇し以後はそのまま高止まり、加えて原子力がない場合は 60%を超えるだけでなく、大きな追加コストと大幅需要減が伴わない限り目標達成 (80%減) が不可能になるとし

ている（CCC 2008 81 頁）。しかし電化の進展の中で電力大幅需要減は非現実的である。とすると、イギリスにおいては再エネだけ増やすことで 80%削減を満たすことはほぼ不可能で、かつ、非常にコスト高になる点が良く認識されている点である。

2-3 イギリスの炭素予算

イギリスでは 2008 年の気候変動法（Climate Change Act、CCA）によって 2050 年 80%削減目標を法律で定めたが、この実現に向けて 5 年ごとの炭素予算を制定することも規定されている。この際は気候変動の科学的知見、対策技術の状況、経済的影響（特に経済全体および特定業種の国際競争力への影響）、エネルギー政策への影響等を考慮することが CCA に規定され、これに基づきあらゆる政策について必ず費用と便益面での分析が公表されている。現時点では下記の通り 2028-2032 年にかけての第 5 次炭素予算（5 年間合計の排出上限）までが定められている⁶。

表 1 炭素予算と 90 年比削減率

	第1炭素予算 (2008-2012)	第2炭素予算 (2013-2017)	第3炭素予算 (2018-2022)	第4炭素予算 (2023-2027)	第5炭素予算 (2028-2032)
排出量(5年間) MtCO ₂ e	3018	2782	2544	1950	1725
90年比	△23%	△29%	△34%	△50%	△57%

80%削減を制定は Blair 首相率いる労働党政権の下でなされたが、2010 年 5 月の総選挙での Cameron 保守党連立政権を経て 2015 年の保守党単独政権に至り同年 11 月、パリでの COP21 直前に CCS に対する 10 億ポンドの政府補助金の突然の撤回、2016 年 7 月の May 首相による DECC（エネルギー気候変動省）の解体（気候変動対策は新設のビジネス・エネルギー・産業戦略省- BEIS-所管となった）と政府による気候変動対策と経済成長の両立の明言、それに続く Brexit を巡る混乱と Johnson 首相の登場・総選挙などで第 4 次炭素予算以降本当に目標達成が可能かどうかやや疑問無しとしない中で、2019 年 6 月に政府は 2050 年ゼロエミッションを定めたものである。CCC はこの時点では上記炭素予算は見直さず、2020 年に第 6 次炭素予算（2033-2037 年）を政府に勧告する際に見直すとしているが（CCC 2019 30 頁）、上記第 5 次予算までは 80%削減を前提としており、この予算はおそらく更に強化されるものと思う。現時点では第 5 次炭素予算実現の政策の全てが策定されていない中で、イギリスは正に正念場を迎えることとなる。

イギリスの炭素予算は第 3 次（2018-2022 年平均で 90 年比 34%減）までは何とか目標達成が見通せる状況であるが⁷、第 4 次、5 次と進むにつれて 90 年代初めの北海油田からの

⁶ ここでは省略するが炭素予算提出に際して CCC は費用便益分析を行っている（詳細は山口光恒(2017) 25-28 頁参照）

⁷ 最新の数値である 2017 年のイギリスの GHG 排出量 505.4Mt は 90 年比 37.5%減で仮に 2022 年まで横ばいであっても第 3 次炭素予算は達成できる(Eurostat 2019)。

ガスの増加で CO2 排出が減少したことによる貯金を使い果たした後の削減なので、その達成は格段に厳しくなる。こうした中で注目すべきは、第 4 炭素予算およびその後の長期目標達成の為に政府の政策として電力市場改革（Electricity Market Reform、EMR）⁸、発電部門を中心とした下限炭素価格設定、それに技術開発支援が特記されている点である⁹。具体的には EMR では 2020 年代を通して 30–40GW の低炭素発電能力を新設することで発電の CO2 排出を当時の 500gCO₂/kWh を 2020 年に 300gCO₂/kWh、2030 年までに 50gCO₂/kWh とすること、低炭素発電への長期投資の誘因策導入、下限炭素価格としては 2020 年に 30 ユーロ/tCO₂ とし以降これを引き上げる¹⁰、技術革新支援の対象として発電と産業部門の CCS、電気自動車およびヒートポンプが列挙されている¹¹。なお、産業（および農業）部門の国際競争力への影響に関し、消費ベースでの排出の検討の必要性も示唆している点は興味深い。

CCC の勧告（CCC 2015）を受けて政府は、パリ合意の翌 2016 年には表 1 の通り第 5 次炭素予算を決定した（2028 年–2032 年平均で 90 年比 57%減。コストは GDP の 1%以下）。政府は基本的には CCC の勧告を受け入れたが、CCC が主張した海運部門の追加、消費ベースの排出の考慮、2030 年に向けての発電部門の炭素強度（100gCO₂e/kWh）を含む部門別の目標、の採用は見送った。なお、パリ合意後に CCC は書簡を發し、この時点ではイギリスの 2050 年 80%削減を変える必要は無いこと、そして CCS は脱炭素化の鍵を握る技術であるにもかかわらず、パリ会議直前に政府が CCS 商業化プログラムに充てる予定であった 10 億ポンドの資金支援を取りやめたことに遺憾の意を表している

CCC は各炭素予算の進捗状況について毎年議会に報告書（progress report）を提出することを義務づけられているが、2016 年 6 月の報告でイギリスの 2030 年目標（第 5 次炭素予算）の実現可能性を検討している。それによると 2030 年目標達成に必要な削減量のうち 47%（量にして 1 億トン）はそのための具体策が無い状況とある。特に指摘しているのは CCS 政策の後退（補助の取りやめ）、低炭素 Heat 利用と 2020 年以降の自動車燃費規制が全く進展していないことを挙げ、これらについて強力な政策を打ち出すことを要請している（CCC 2016）。

（図 5）イギリスの第 5 次炭素予算達成の可能性

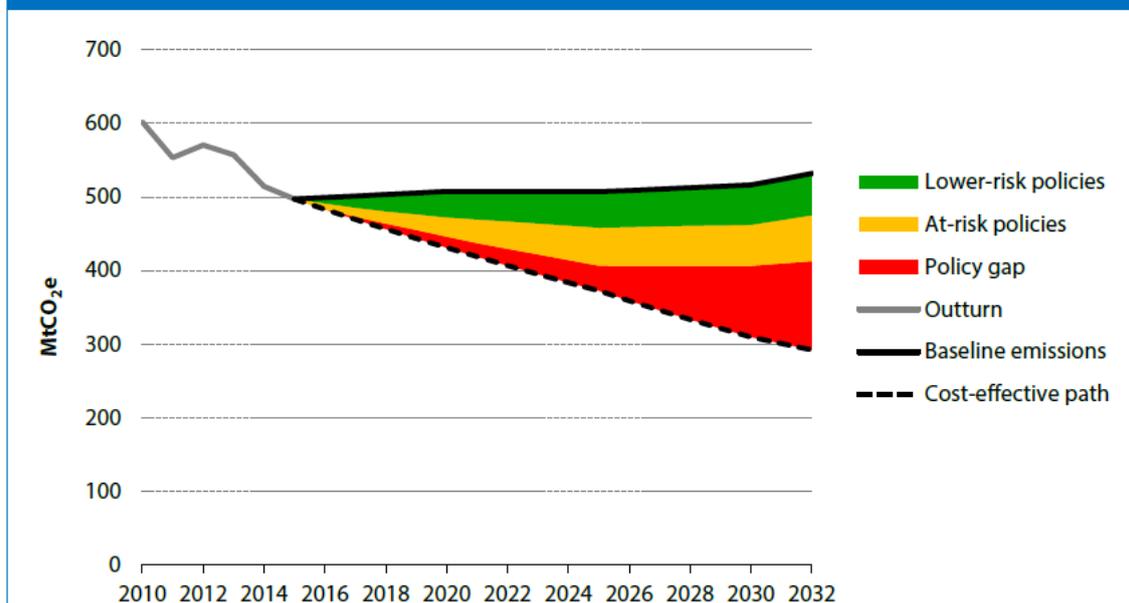
⁸ 実際政府は 2011 年 7 月に電力市場改革白書、同年 12 月には詳細を記述した Technical Update を発表し、2013 年 12 月には 2013 年エネルギー法（Energy Act 2013）を制定して EMR を強力に推進してきている。EMR の内容は変形 FIT（Cfd）による再エネ、原子力、CCS の促進、容量市場の創設、発電部門での下限炭素価格、それに火力発電の直接規制であるが、この概要については山口光恒（2014）参照

⁹ EMR のもう一つの目的としてサッチャー元首相の主導で始まった電力自由化による発電部門への投資低下対策もあった。

¹⁰ 実際には財務大臣オズボーンから待ったがかかり、2014 年 3 月の 18 ポンドで凍結された。この状態は現在も続いている。なお電力会社はこれ以外に EETS の下での Carbon Credit を購入の要がある。

¹¹ このほか産業部門の対策として製造プロセスの大変革が謳われ、その例として steel electrolysis（電気分解による鉄の製造）や alternative cement technologies（セメント製造代替技術）、さらに製品代替が挙げられている（CCC 2010、5 頁）

Figure 2. Assessment of current policies against the cost-effective path to meet carbon budgets and the 2050 target



出典：CCC (2016), 15 頁

図 5 で黒の実線は BAU、黒の点線が 2032 年までの目標（第 5 次予算は 2028-2032 年の年平均値）、緑は実施が確実な政策、黄色は政策があるがたとえば財源の確保がないなどや実現が危ぶまれる政策、赤は全く何の対策もない削減目標である。この赤の部分で 2030 年を中心とした 5 年間の 47%を占めると言うことである。つまり今後 CCS をはじめとする追加策がない限り目標達成が難しいことを示している。

上記進捗状況報告が出た同じ 6 月に Brexit を巡る国民投票で離脱派が勝利、それ以降今日までのイギリス政府と議会の混迷は万人の知るところで、こうした中で第 5 次予算の実現には黄信号が灯った状況である。こうした中でパリ合意での 1.5℃という努力目標を念頭に 2019 年 5 月に CCC が政府に 2050 年ネットゼロ目標を提案し（CCC 2019）、翌月政府は海運・航空の除外等一部修正はしたものの、これを受け入れたこと（UK 2019）は本稿冒頭に述べたとおりである。

3、2050 年ネットゼロエミッションについて

3-1、ネットゼロの概要と淵源

2019 年 6 月の 2050 年ゼロエミッション目標は 2008 年の 2050 年 80%削減目標(90 年比)を発展させたもので、基本的な考え方は 2008 年目標で確立していた。こうした事情から 2008 年 80%削減目標及び 2028-2032 年の第 5 次炭素予算についてやや詳しく説明してきた。以下 2050 年ネットゼロエミッションに焦点を当てる。

80%削減目標制定時と同様ゼロエミッションについても CCC は詳細な分析を行っている。先ず Net Zero; The UK's contribution to stopping global warming, Committee on

Climate Change (CCC 2019a, 全 275 頁) で全体像を述べ、Net Zero Technical report (CCC 2019b, 全 302 頁) で実現のための技術について検討し、太陽光と風力発電の電力システムへの統合については技術付録である Technical Annex: Integrating variable renewables into the UK electricity system (CCC2019c, 全 17 頁) で検討している。更にその前年にはバイオエネルギーに関する報告書 (Biomass in a low-carbon economy, CCC 2018a, 全 160 頁)、水素に関する報告書 (Hydrogen in a low-carbon economy, CCC 2018b, 全 126 頁) 及び土地利用に関する報告書 (Land use: Reducing emissions and preparing for climate change, CCC2018c, 全 99 頁) を公にしている。CCC はこれらの検討結果を踏まえて 2050 年ゼロエミッションを提案し、政府もこれを受け入れたものである。

CCC は政府に対する勧告の冒頭で、前年 (2018 年) の IPCC1.5°C 特別報告書を挙げつつ最近の科学的知見、イギリスでの更なる削減のポテンシャル、追加削減のイギリス経済へのコストと便益を検討の結果 2050 年ネットゼロ排出が「必要」且つ「実現可能」であり、それを目指すことが「費用効果的 (cost-effective)」と判断したとしている。ここで「必要」とは気候変動に対する GHG の影響が明らかなことに加えてパリ協定締約国としての立場であり、「実現可能」とはゼロエミッションへの技術が見えており政府の強い指導があれば実現可能と考えたこと、「費用効果的」とは主要技術のコストの下落で、GDP 対比コストが 2008 年当時の 80%削減と同程度と見込まれるからであると説明している (CCC 2019a p.8)。

続いて Executive Summary では上記内容を敷衍しているが、このうち特に注意が必要な点をまとめると次の通り。まず現在の対策では 2050 年 80%削減という従来からの目標の達成さえも困難とした上で、重点分野として低炭素電源への移行、建物と暖房効率向上、電気自動車普及、CCS、植林などを挙げている。その上で、各セクターは従来の 80%削減目標に単に Negative emission (NE) 分を上乗せするだけでは駄目で、それぞれが NE 無しでゼロエミッションに近づけねばならぬとして、例えば自動車については 2040 年以前にガソリンとディーゼル車をゼロにする必要を強調し、CCS については世界での進展のペースが遅いが、それでも世界で稼働中或いは稼働が予定されている大規模 CCS プロジェクトが 43 件あるのに対してイギリスはゼロであるとして危機感をあらわにしている。この他植林も年に 2 万 ha (2025 年からは 2.7 万 ha) の目標に対して過去 5 年平均では 1 万 ha 以下でこの分野では自主的な手段では目標達成は困難としている。各セクターでこのように努力はするもののどうしてもゼロ排出が困難な排出については CO₂ を永久に貯留しなければならないとして、CDR (Carbon Direct Reduction、この中心は BECCS – Bioenergy with CCS) を肯定的に捉えている (この辺り同年 11 月に公刊された国際エネルギー機関 – IEA – の World Energy Outlook 2019 の Sustainable Development Scenario が原則として BECCS を認めていないのとは一線を画している)。

続いてネットゼロの対象を CO₂ だけとするのか GHG とするのを取り上げ、Global には滞留期間の長い CO₂ をゼロにすれば、その期間の短いメタンなどの GHG はゼロにせず安定化させることで気温は安定化 (stabilize) するとしつつ、イギリスについては CO₂ を

中心とする長期滞留 GHG のみならずメタンもゼロにすることで 1990 年比 97% まで削減が可能で、この場合でも更なる削減余地が若干あるので目標としては 100% 削減（GHG ゼロエミッション）を目指すとしている。

次いでパリ協定との整合性を次の通り説明している。イギリスの気候変動政策の特徴はこうした観点を一貫して保持している点である。具体的には 2008 年当時の 80% 削減目標は（既に説明の通り）一人あたり排出量均等化から導き出したものである点に触れ、パリ協定にある Equity や Capacity の観点からはこれ（一人あたり排出均等化）では不十分とし、Equity の観点からはイギリスは消費ベースの排出量が多いこと、過去からの累計排出量も多いこと、人口が世界の 1% なのに排出量は 2~3% と大きくまた高所得国でもあるので従来の目標では不十分と分析し、Capacity の観点からはイギリスの一人あたり排出量は世界平均に近づいているが世界の排出量は増加を続けていること、加えてイギリスは高所得国なので追加行動の余地があることからパリ協定（の 2°C 目標）を上回る削減が必要との観点からゼロエミッションとすることが適当と述べている。これに続いて 2°C 及び 1.5°C 目標の場合の世界の一人あたり排出量とイギリスのそれを比較し、イギリスの方が厳しい目標である点を強調している。例えば一人あたり排出量均等化原則で 2°C 目標を達成するとしたら世界平均では 2050 年には 0.8~3.2tCO₂、1.5°C の場合には -0.4~+1.7tCO₂ となるが、イギリスはゼロなので先進国としての義務を果たしているとの論理である。

イギリスでは表 1（本稿 6 頁）の通り 80% 削減を前提として 2032 年にかけての第 5 次炭素予算（90 年比 57% 減）を既に決めている。この点に関しては当面は据え置き、2020 年時点で再考するとしている。

3-2、ネットゼロ実現のシナリオ（技術面からの検討）

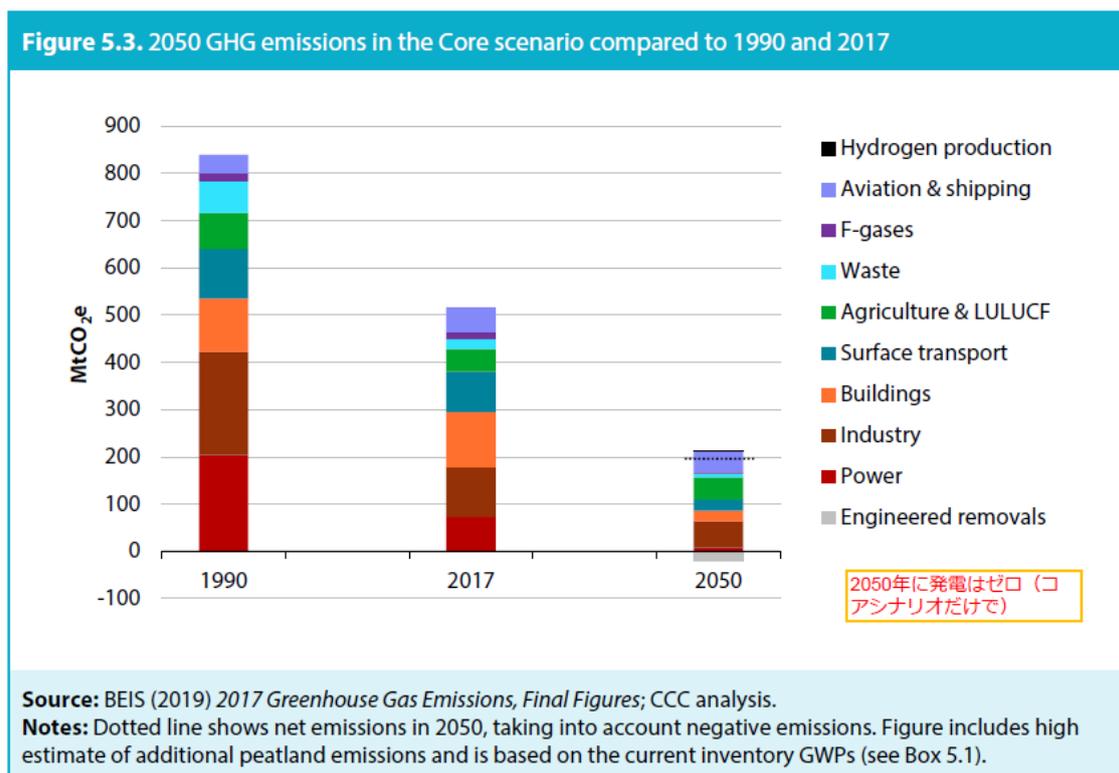
CCC は現状（Core Option）、意欲的目標（Further Ambition Option、96% 減）、投機的（当たるも八卦）目標（Speculative Option、100% 減）の 3 種の目標（選択肢）を示した上で、2050 年ゼロエミッションに向けて投機的目標を採用すべきとしている（政府が正式にこれに従ったのは冒頭記述の通りである）。CCC は目標提示に際して実現可能性、削減コスト、気候変動以外の要素（消費者のエネルギーへのアクセス、国際競争力）を考慮し、更に外部専門化の意見も聴取したとある。この辺り方法論としては見習うべき点が多い。以下この結果出てきた 3 つの目標について見るが、中心は 2 番目の意欲的目標なので、本稿でも自ずからこれが主となる点予めお断りしておく。

3-2-1 80%削減目標と現状シナリオ

詳細な検討の前にまずは現状を振り返っている。2017 年時点でのイギリスの GHG 排出量（国際航空海運を含む）は 503Mt で 90 年比 39% 減であるが、これは 80% 削減のパスに乗っていない。これを部門別に見たのが図 6 で、これを見ると 2017 年には発電と産業部門が大幅に排出を減らしている（前者は 64%、後者は半減）のに対して、陸上運輸は微増（+4%）、航空海運は大幅増と大きな差がある。2050 年の排出量が 90 年比 80% 減であるが、

2050年の排出量を見ると、発電部門では排出はゼロ（2017年の最下段の赤色がなくなっている）で、それ以外では農業と国際航空・海運からの排出が大きな比重を占めていること、少量ではあるが Negative Emissions（以下 NE）があることが分かる（図では Engineered removal とあるのがそれである）。CCC は現状政策のみではこの目標（80%削減）達成には不十分と判断している（CCC 2019a p.138）。

（図6）部門別削減状況



出典：CCC 2019a, p. 143

3-2-2 意欲的目標シナリオの内容

この目標は 2050 年 96%減を目指したものであるが、これに後述の投機的目標を加えてゼロエミッションを実現しようというものである。説明の前に目標の全体図を次頁に示す（表 2）。これは意欲的目標達成に向けての部門別対策を現状 80%減シナリオ（core scenario）と対比したものである。例えば発電部門では低炭素発電の割合が 2017 年には 50%であるのに対して、2050 年には現状シナリオでは 97%、意欲的シナリオでは 100%と余り変わりはない。しかし航空（海運）では持続可能なバイオ燃料（水素を利用したアンモニア）が現状シナリオの 5%（75%）に対して意欲的シナリオでは 10%（ほぼ 100%）に上昇する。両シナリオの乖離が大きいのは産業の CCS（50%→100%）、大型トラック（HGVs、heavy goods vehicles）の電化と FCV 化（13%→91%）と言ったところである。

なお、業種別限界削減費用については本稿 37 頁の表 6 参照

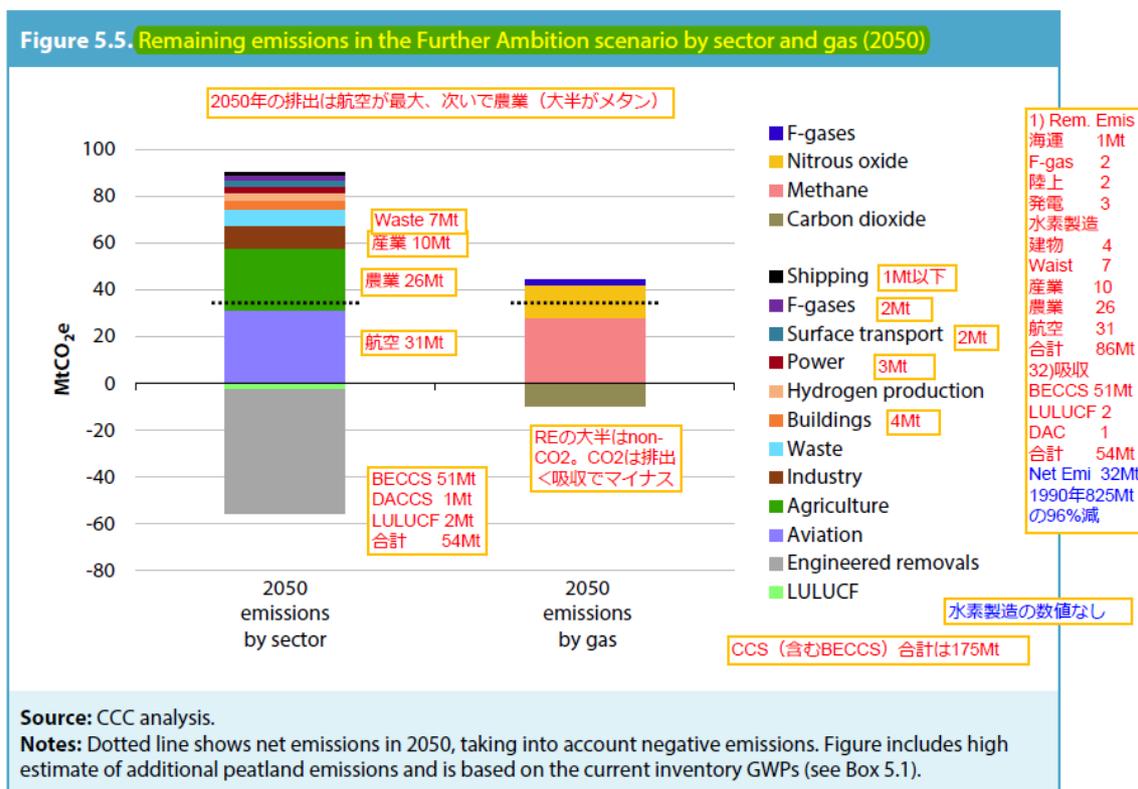
表 2 意欲的目標の部門別内容（現状目標との対比を含む）

Table 5.1. Measures required under the Core and Further Ambition scenarios in 2050				
Sector	Measure	2017	2050 scenario	
			Core	Further Ambition
Power	Share of low-carbon generation	50%	<u>97%</u>	100%
	Low-carbon generation (TWh)	155	540	645
Buildings (Share of low-carbon heat*)	Low-carbon heat in existing homes	4.5%	80%	90%
	Low-carbon heat in non-residential buildings		100%	100%
Industry	CCS**	0%	<u>50%</u>	100%
	Low-carbon heat***	<5%	10%	85%
Surface transport (Share of fleet)	Battery electric cars and vans	0.2%	80%	100%
	Electric and hydrogen HGVs	0%	13%	91%
Aviation	gCO ₂ per passenger-km	110	70	55
	Sustainable biofuel uptake	0%	5%	10%
Shipping	Ammonia uptake	0%	75%	~100%
Land use and forestry	Afforestation (% of UK land area)	13%	15%	17%
	Peatland restoration (% area in good condition)	25%	n/a	55%
Engineered removals (MtCO₂)	BECCS	0	20	51
	Direct air capture	0	n/a	1

出典：CCC 2019a p.154

意欲的シナリオを実施した場合に最終的にどの程度の排出が残るか（残留排出量、Remaining Emissions）を表すのが図 7 である。ここには CO₂ 以外の GHG も含まれている。

図 7 意欲的シナリオでの 2050 年の部門別、ガス別残留排出量



出典：CCC 2019a p. 155

上記のうち左が部門別 Gross 排出量、右はガス別 Gross 排出量である。黒の点線は Net の排出量 (32Mt) である。まず部門別について説明する。2050 年の Gross 排出合計は 86Mt でこのうち航空 31Mt、農業 26Mt、産業 10Mt、その他 19Mt（うち発電は 3Mt、陸上輸送 2Mt、海運は 1Mt）、これに対して negative emissions は植林・土地利用 (2Mt)、BECCS (51Mt)、DAC (1Mt) で合計は 54Mt となり、Net では 32Mt となる。残留排出量のうち最大のもは航空部門からの排出であるが、これには理由がある。この部門の排出削減にはバイオ燃料を用いるというのが誰しも考えることであるが、CCC によるとバイオマスは出来るだけ（発電などで）BECCS として negative emission に使いたいので、航空機の燃料としては全体の 10%をバイオ燃料の上限とするとの制約条件をおいているのが原因である (CCC 2019b p.174)。

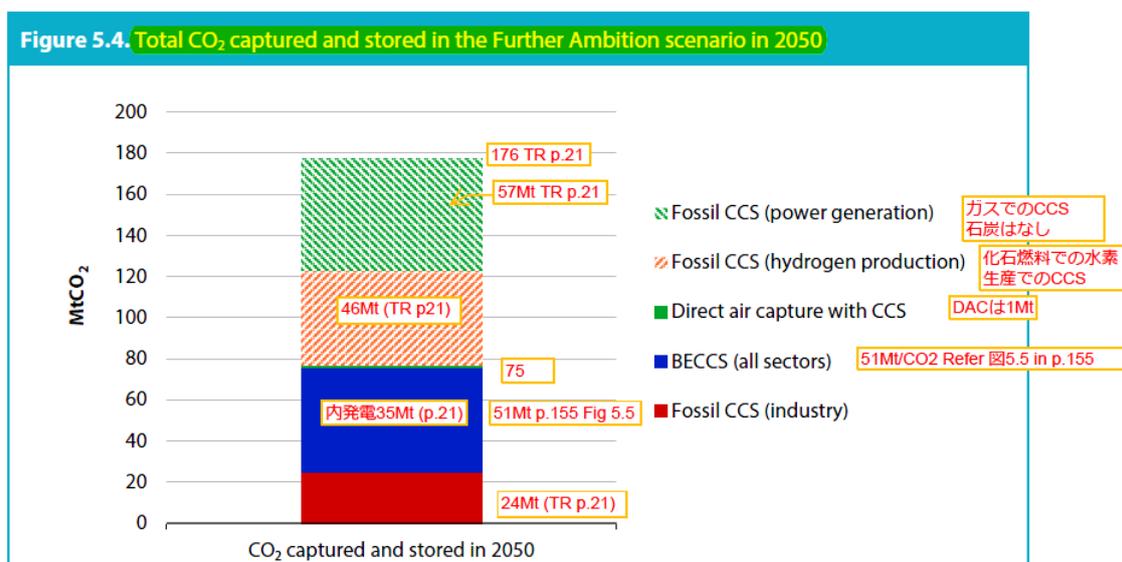
次にガス別である。図 7 の右欄の通り CO₂ の排出は（ゼロではなく）negative となっている。プラスの排出で最も多いのはメタン、次いで一酸化二窒素で、このうち特にメタンは農業部門で大きい点に注意が必要である。

3-2-2-1 CCS および BECCS (Bioenergy with CCS)

ここでもう一つ重要な要素として CCS がある。図 7 を参照願う。2050 年時点での CCS 総量は 176MtCO₂ に達している。2017 年のイギリスの総排出量 503Mt の 3 割以上の削減

をこの技術に頼っている。イギリスの 2050 年ゼロエミッションの成否は実に CCS が予定通り進展するか否かにかかっていると良い。実際 CCC の政府に対する勧告文書でも「CCS は option ではなく necessity である (CCC is a necessity not an option)」と強調している (CCC 2019a p.23)。

図 7 意欲的シナリオの下での 2050 年の CCS 及びその内訳



出典：CCC 2019a p. 150 (DAC も含まれているが negligible)

2050 年の CCS 総量(含む BECCS)は 176Mt であるが 2017 年の実績はゼロ (CCC 2019b p.21) であり技術的、経済的、社会的 (法的、国民の受容可能性など) 障害を考えるとかなり challenging な数値である。このうち 7 割が所謂 CCS、3 割が BECCS である。CCS の中最大は化石燃料による発電部門の 57Mt で全体の 32% を占め、化石燃料による水素生産が 26% となっている。産業部門も鉄鋼・セメントを中心に 24Mt 分が CCS 対象とされている。

ここで BECCS について付言しておく。Negative Emissions は BECCS の他 Direct Air Capture (DAC) 等複数の技術があるが、DAC は上図の通り 1Mt と無視できるほど小さいので、NE とは具体的に BECCS を指すといつて良い。

CCC は世界の貿易可能なバイオ資源量を 14~84EJ¹² と大きな幅で考えている。バイオマスは燃焼による CO2 はゼロとみなされ、さらに BECCS として Negative emissions に使われるので将来の需要は大きく供給を超過するとの見通しの下で、イギリス国内でもバイオ資源の有効利用に意を用いている。この観点から見ると Negative Emission が可能な BECCS がバイオマスの最有力用途となり、例えば BECCS が不可能な航空燃料としての(バ

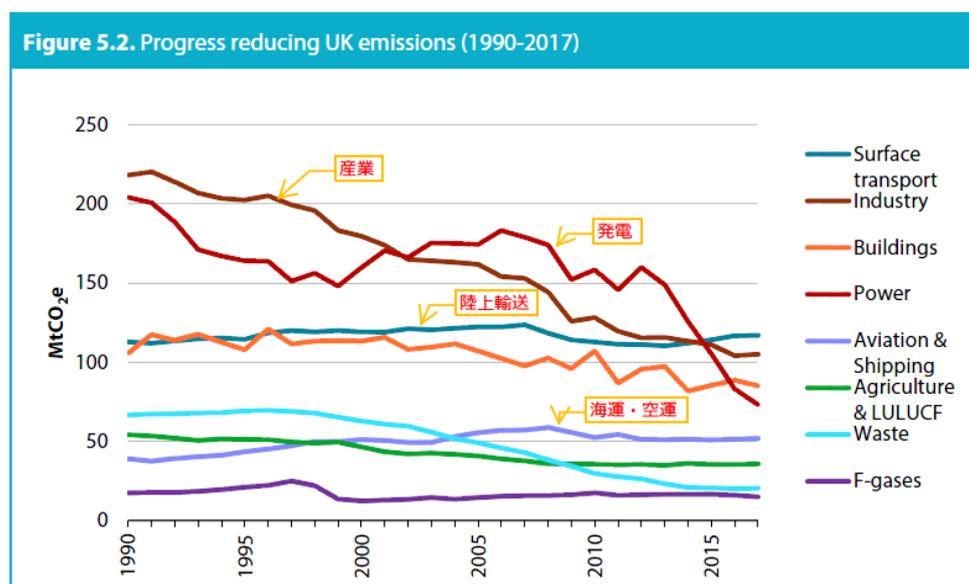
¹² IEA の ETP 2017 では 2 degree および below 2 degree の両シナリオとも現状の 63EJ に対して 2060 年には 145EJ の持続可能なバイオエネルギー供給が必要としている (IEA 2017 p.316) のでこれに比べると随分控えめな予測となっている。なお、CCC (2019a) ではバイオエネルギー供給量については IPCC 見通しよりも低く設定しているとある (CCC 2019a p.26)。

イオ資源の) 利用は航空燃料全体の 10%に抑えるべきであるとしている (CCC 2018a p.132)。この結果 2050 年のイギリスでの排出量の中最大のセクターが航空となっているのである。

3-2-2-2 業種別詳細

以下発電、運輸、産業、建物の 4 つの部門に分けてゼロエミッションに向けた対策を述べる。その前に各部門の過去の排出量の推移は図 8 の通りであり、電力は一旦排出増となったがその後は急速に減少、産業部門は過去 27 年間でコンスタントに排出減少が続いている。他方陸上輸送は横ばい乍ら若干の増加、海運・航空もほぼ同様である。

図 8 部門別過去の排出実績



出典 : CCC 2019a p.140

(その1 発電)

発電部門は電気自動車やヒートポンプの増による電力需要増に対処しつつ再エネと原子力・CCS¹³を現在の 50%から 2050 年に 95%に高めることと back-up 発電の (CCS や水素による) 脱炭素化で現在 (2017 年) の排出量 73Mt (全排出量の 15%) を 90 年比 97%減 (3Mt) 迄減らせる¹⁴。この 3Mt は CCS による補足漏れ相当分である。2050 年の平均削減費用は £ 20/tCO₂ である。バッテリー技術や相互接続、さらに需要抑制などの進歩で大容量の太陽光と風力の増強が低コストで可能になる。残りは CCS (ガス又は Biomass) で

¹³ 原子力と CCS の二つを firm low-carbon power と呼んでいる。これは再エネが variable low carbon power であるのに対比した概念として使われている (CCC 2019b p.34)。

¹⁴ 後述の通り CCS の回収率を 95%としているが、IEA では 98-99%迄は特段の追加コストがかからずに回収率向上が可能としているのを援用し、もし 99%回収ならば発電からの CO₂ の残留排出は 80%減の 0.6Mt 迄減らすことが可能としている (CCC 2019b p.45)。なお、送電ロス は 8.5%と仮定している。

対処して、発電の CO2 排出源単位を 2018 年の 475G から 23g/kWh に引き下げるシナリオを描いている。

2017年の発電量電源構成は化石燃料48%(内ガス41%、石炭7%)、原子力21%、VRE 19%、バイオ9%、水力2%(四捨五入の関係で合計が99%)となっている。政府はこのうち石炭火力を2025年までに廃止の意向である。

原子力発電の見通しであるが、現在1基(Hinckley Point)がFITの補助金を得て建設中であるが、それ以外の旧式な原子力は時の経過と共に閉鎖されていく。このままでは2030年には低炭素発電量が全体の33%にまで落ち込むが、VREと原子力新設で46%、更に洋上風力を加えて2030年までに57%にまで引き上げる(CCC 2019b p.24)

電力需要は輸送部門の電化、建物の冷暖房の電化、(電気分解による)水素製造¹⁵等により2017年の300TWh(因みに日本は1000TWh)から2050年には意欲的シナリオだと600TWhと倍増する(後述の投機的シナリオの場合には水素製造を全て水の電気分解で賄うことで2050年の電力需要が+305TWh、水の電気分解による水素とCO₂から製造する航空機用合成燃料—Synthetic fuelsの製造で更に200TWhの電力等合計1300TWh以上の電力を必要とする)とあるが—CCC 2019b p.25 Figure 2.3—これはあくまでSpeculative Scenarioである点に注意が必要)。

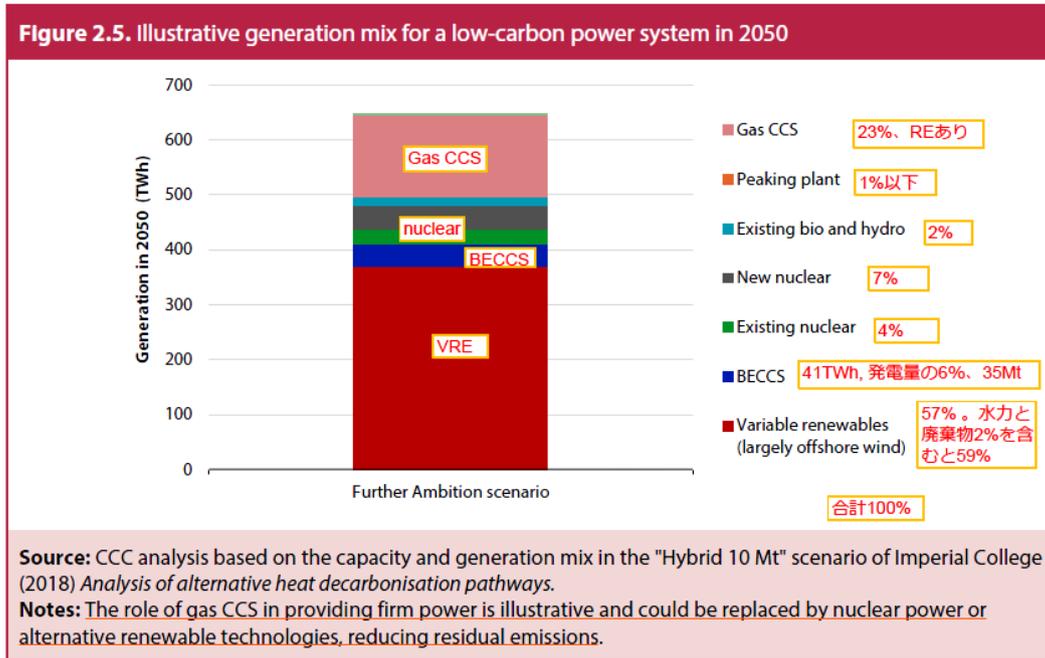
ここで発電とCCSの関係であるが、英国内の貯留潜在量は合計78Gtもあり、これは50Gwのガス発電所から排出される年間150MtのCO₂の500年分あるので、CCSが制約条件になることはないと楽観視している(CCC 2019b p.28)。なお、CCSについては回収率95%で計算されている(同、p.31)。

発電部門からの2050年のRemaining排出は現状(80%削減)では7Mt、意欲的シナリオでは3Mt(本稿12頁図7)となる。この内訳をもう少し見よう。先ず現状シナリオでは発電電力量の95%は再エネ、原子力、CCSつきガス火力で賄われる。電力需要増を考慮した上でCCS付き発電所からの補足漏れ分の2Mt(もしCCSが無ければガス火力からの排出が180Mtとなる)、それにガス発電のCCS無しのMid-merit発電(低稼働率)からの排出量5Mtを加えて7Mtとなる。この場合の発電の原単位は10gCO₂/kWh、平均削減費用は£17/tCO₂と見込まれる。意欲的シナリオではCCS付き発電所新設を80%削減シナリオの年間0.5~1GWから1~2GWに増やし、Mid meritガス発電所を廃止することでCCSなしガス火力からの排出をゼロとする(この場合の平均削減コストは£115~120である。こうなると低稼働率のガス火力は別途CCSを付帯して水素を生産しその水素で発電した方が安くなる)。結果として電力部門からの排出量はCCSによる補足漏れ分の3Mtとなり、平均削減コストは£19/tCO₂である。

意欲的シナリオの下での電源構成は図9の通りである。

¹⁵ 意欲的シナリオでは大量の水素製造の主力は、水の電気分解ではなくCCS付きガスで行うことを仮定している。もし水素製造の全てを水の電気分解で行うとした場合には電力需要が305TWhほど増加する(CCC 2019b p.26)。

図9 意欲的シナリオの下での電源構成



出典：CCC 2019b p.41

図の通り VRE57%¹⁶、BECCS6%、原子力 9%（内新設は 3 基で 7%）、CCS 付帯ガス火力 23%、その他 5%である¹⁷（図に加筆した割合は筆者が本文から拾ったそれである）。この結果 BECCS 発電容量は 5GW、年間 35Mt の negative emission となる。ここで興味があるのは以前の CCC の Biomass Review ではバイオマスは CCS 込みで BECCS として用いるべきとしたが、この報告書では BECCS を発電、水素製造、航空燃料のどちらに使うのが最も効率的かは不明であるが、ここでは発電を優先すべきとしたとの覚え書きがあることである（CCC 2019b p.40）。

次に発電部門の削減コストはどの程度か。CCC ではいくつかの研究結果に基づきそれを示している。

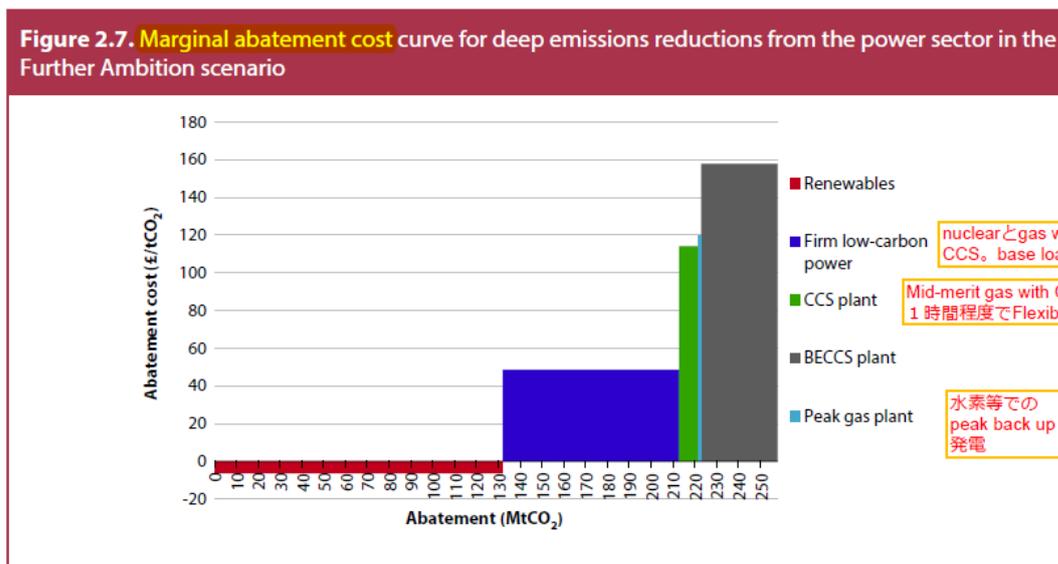
図 10 は削減技術別限界削減費用の図である。図から再エネはマイナスコスト（£ -6）、次いで原子力と CCS 付帯ガス発電（firm low-carbon power、15 頁脚注 13 参照）£ 48、CCS 付き Mid-merit gas £ 115-120、水素等低炭素燃料によるピーク時のバックアップ用ガス発電 £ 120、そして BECCS £ 125-158 の順となっている。この数値は CCC 2019b の表 2.2 及び表 2.3 から筆者がまとめたものである。横軸は CO₂ の削減量であるが、イギ

¹⁶ CCC の分析では VRE のコストが最も安いとしている。なお、以前の CCC の分析では間欠性発電電力量のシェアは 50%までは可能としていたが、ここでは水力と廃棄物発電計 2%分を加えて 2050 年の再エネシェアを 59%としている（CCC 2019b p.40）。

¹⁷ 図からは水素発電は見当たらない。2020 年 1 月 12 日付け日経社説「化石燃料を使い続けるなら」では石炭や石油を、水素と二酸化炭素（CO₂）に分離し、温暖化の原因となる CO₂ は地中に埋め戻したうえで水素を発電燃料などに使うアイデアとして川崎重工や千代田化工の例を紹介している（前者は石炭、後者は天然ガス）。これらはいずれも海外で水素を分離して輸入する案だが、本当に水素直接発電がどの程度か農家についてはこれからの検討課題である。

リスの発電部門の 2017 年の排出量は 73Mt であるが、削減のベース年は 1990 年でこの時点では 200Gt 強の排出があったので、一応の辻褃は合っている。本文中には再エネコストの急減に触れているが、それにしてもマイナスコストとは恐れ入った話である。また、CCS 付きのガスベース電源及び原子力が \$65 (£ 48) というもの安いのではないかとの印象を持つが、この点は専門家の意見を聞いてみたい。

図 10 意欲的シナリオでの発電部門の技術別限界削減費用



出典 CCC 2019b p.46、赤字は筆者による加筆

(その 2 陸上輸送)

13 頁図 7 の通り陸上輸送からの排出は 2050 年に 2Mt (大型トラック・鉄道/バス合計。90 年比 98%減) にまで減らす必要がある。2017 年の排出量は 15 頁図 8 の通り約 120Mt (全体の 23%で、全部門のトップ) であるから正に Drastic な削減が必要となる。23%の内訳は乗用車 14%、大型トラックと小型トラックがそれぞれ 4%、鉄道やバスが 1%である。バイオ燃料車が少数 (2017 年時点で走行距離の 2.3%) あるが排出はゼロとカウントされている。意欲的シナリオでは陸上輸送からの排出を電気自動車 (小型トラックを含む) を 2017 年の 0.2%から 100%へ、大型トラック (HGV) の電化と水素で 2017 年のゼロから 91%引き上げるとの案である。CCC によるとこれは在来車に比べて cost saving になるという (CCC 2019a p.145)。この一因として大気清浄化や騒音低減もある (CCC 2019b p.133)。実現の暁には道路輸送は正に様変わりとなる。残余排出量の 2MtCO₂ は僅かに残るディーゼルトラックと鉄道輸送である。この為には 2035 年以降乗用車 (小型トラック、ハイブリッドやプラグインハイブリッド車を含む) の新車は全て電気自動車にする必要があり (2050 年以降は電気自動車以外走行禁止)、これに備えて長距離輸送のための強力急速充電設備を 3500 カ所、街には 210000 の充電所 (現状の 10 倍) の設置が必要としている。大型トラックはゼロエミが極めて困難であるが、2050 年までに 800 の水素充填所と夜間充電設備

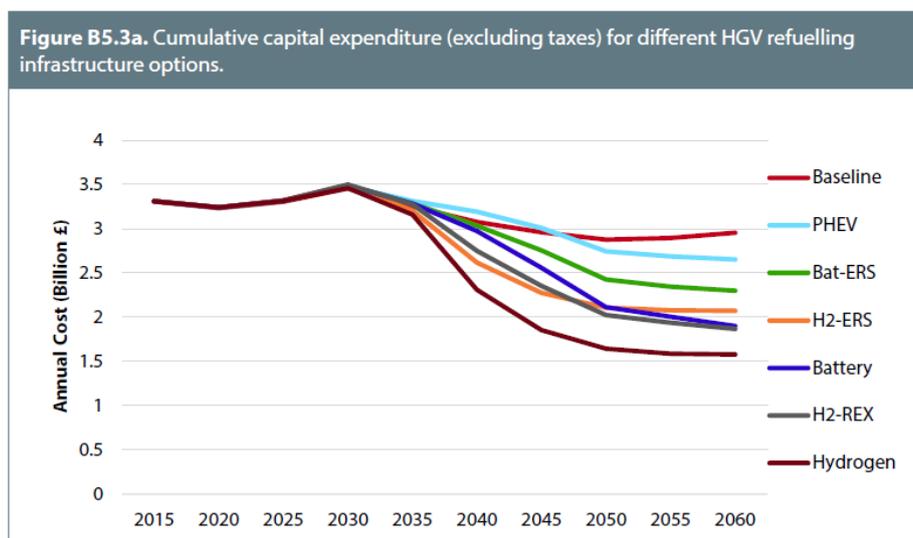
90000 が必要になると試算している。

削減の対策の内のいくつかは既に触れたが、これをまとめると基本的には直接規制で、それ以外は例えば自動車の移動を控え自転車に変えるための環境整備などである。直接規制の内容は CO2 排出規制の強化、電気自動車導入割合強制、在来車の一定時期以降の販売禁止、生活スタイルの変化（自動車から自転車や歩行へ、公共交通機関の利用）などとなっている。Brexit 後にイギリス独自の規制導入の必要があるが、これを EU と同等もしくはそれより厳しいものとする必要があるともしている。ここで興味深いのは大型トラックのゼロエミに向けて水素・電気トラックと共にトロリーバス方式（道路の上の架線にパンタグラフを接触させて動かす方法）が挙げられていることで、本当にこれが実現可能かどうかは不明である。

陸上輸送に関して興味深いのはバイオ燃料と水素の扱いである。バイオ燃料については上述の通り走行距離の 2.3%を占めているが、バイオは原則として CCS との組み合わせで用いるべきとして、陸上輸送でのバイオ燃料使用は 2030 年代に廃止すべきとしている。他方水素は長距離大型トラックのゼロエミに向けて大きな役割を果たせるとする一方で、乗用車は電気自動車とすべきとしている点である。

イギリスのレポートは常にコストの記述がある。これは本稿 6 頁で述べたとおり 2008 年の気候変動法（Climate Change Act、CCA）によって採用する政策の経済的影響等への考慮が義務づけられているからである。この一貫として長距離大型トラック輸送のゼロエミに向けた年間投資額の分析を行っている（図 11）。

（図 11） 長距離大型トラックのゼロエミに向けた技術別年間投資額比較



上から Baseline は在来のディーゼル車、PHEV はベースはバッテリーだが長距離分はディーゼルエンジン、Bat-ERS は幹線道路はトロリーバス方式だが一般道はバッテリー走行、H2-ERS は幹線道路はトロリー方式で一般道は水素燃料、Battery はバッテリー、H2-REX は基本はバッテリーだが長距離は水素燃料、Hydrogen は水素自動車の略。出典：CCC 2019b p.145

この図はそれぞれの技術のシステム全体のコスト（燃料費及びインフラ費）である。この図から大型トラックのゼロエミには水素燃料が最も費用効果が高く、逆にトロリーバス方式が最も高いということが分かる。但し現時点ではまだまだ不確実性が高いので特定技術に絞ることはしないとしている（CCC 2019b, p.146）。

（その3 航空・海運）

2017年のイギリスの航空・海運のGHG排出は全体の10%（約50Mt）、うち国際航空輸送からの排出（7%）が最大。意欲的シナリオでは航空部門を31Mt、海運は1Mt以下に抑えようというものである。現時点でゼロ炭素航空機は存在していないしこの状況は2050年にかけても（特に長距離国際輸送では）変わらないだろう。対策としては一層の効率化、飛行ルート変更、燃料転換、需要抑制がある。電気飛行機はバッテリー密度向上が鍵だが精々短距離止まりである。持続可能なバイオ燃料により排出削減は可能だが、バイオ資源自体の希少性からBECCSを優先せざるを得ず、航空燃料の1割以下に止めることとしている（CCC 2016b p.171）。合成燃料（synthetic fuel）はどうか。合成炭素フリー燃料とは例えばDACによって回収されるCO₂¹⁸を水を電気分解した水素と結合させ、jet燃料としてのケロシンに代替する手法、つまりCO₂のリサイクルである。しかしDACによるCO₂回収のコスト高、プロセスの熱力学上の低効率とプロセスの多さの故に、もし電力価格が低コストの再エネによるものであったとしても合成燃料コストは大変高くなるとして別の参照文献¹⁹を引用している（CCC 2019b p.170）。航空需要低減については特に長距離輸送の80%がレジャー目的なので鉄道への切り替えなどは余り期待できないとしている。

以上航空であるが、海運はどうか。

海運からの排出削減は効率向上（帆による走行を含む）、運行方法改善、代替燃料使用がある。ここで問題は代替燃料（燃料転換）である。燃料転換は水素かアンモニア、バイオ燃料、電化である。バイオ燃料は可能だがバイオには他に優先する用途（BECCS）がある。電化は近距離のみ。有力なのは低コストと低炭素で製造される水素（アンモニア）であり、このうち特にアンモニアは液体で保存できるので港での低炭素燃料補給の優先手法である。ただしアンモニアについては毒性の問題がある。

両部門の削減量とコスト/tCO₂であるが、意欲的シナリオでの排出量は航空が2017年の30.4Mtから2050年の30.4Mtへ、海運が同13.7Mtから0.6Mtで、2050年の限界削減コストは前者が-£10とマイナスコストであるのに対して後者は£200と相当高くなっている。海運のコストはGDP対比では0.1%程度である。

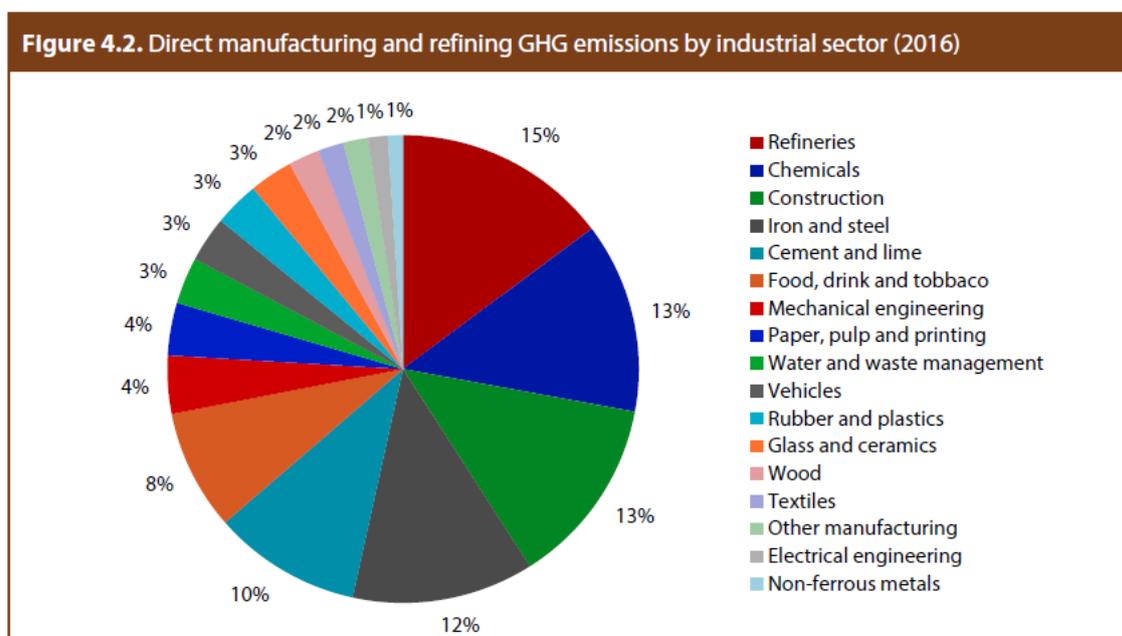
¹⁸ CCSでcaptureされたCO₂では燃料として使われた時点で再びCO₂が大気中に放出されるのでゼロエミッションとはならない。DACだとゼロエミッションとなる。

¹⁹ CCC, 'Net Zero' advice report which is the Committee's recommendation to the UK Government and Devolved Administrations on the date for a net-zero emissions target in the UK and revised long-term targets in Scotland and Wales.

(その4 産業部門)

2017年のイギリスの産業部門からのGHG排出量は105MtCO₂e（日本の約1/3²⁰）で全体の21%に当たる。日本の25%よりやや小さい。このうち製造業が60%（製造が11%、プロセスが2%、合計13%）、化石燃料採掘・精製が40%で、日本に比べるとエネルギー部門の比率が高い（図12）。ガス別では産業部門の排出の93%がCO₂となっている。製造部門の排出の15%はプロセス排出である（ただしここには鉄鋼はない。JFE手塚氏によると英国の粗鋼生産量は730万トンと日本とは桁違いに小さいが、このうち高炉が78%あるとのこと。プロセス排出量はないわけではないが、極小なのでここには出てこないということのようである）。産業部門の業種別排出割合は図12の通りである。鉄鋼からの排出が13Mt（105Mt×12%）、日本の鉄鋼業の2017年度排出量163Mtの1/10以下で、日本の数値が電気配分後であるとは言え、如何にイギリスの鉄鋼業が衰退しているのかが想像できる。

図12 イギリスの産業部門の業種別排出量内訳



出典：CCC 2019b p. 108

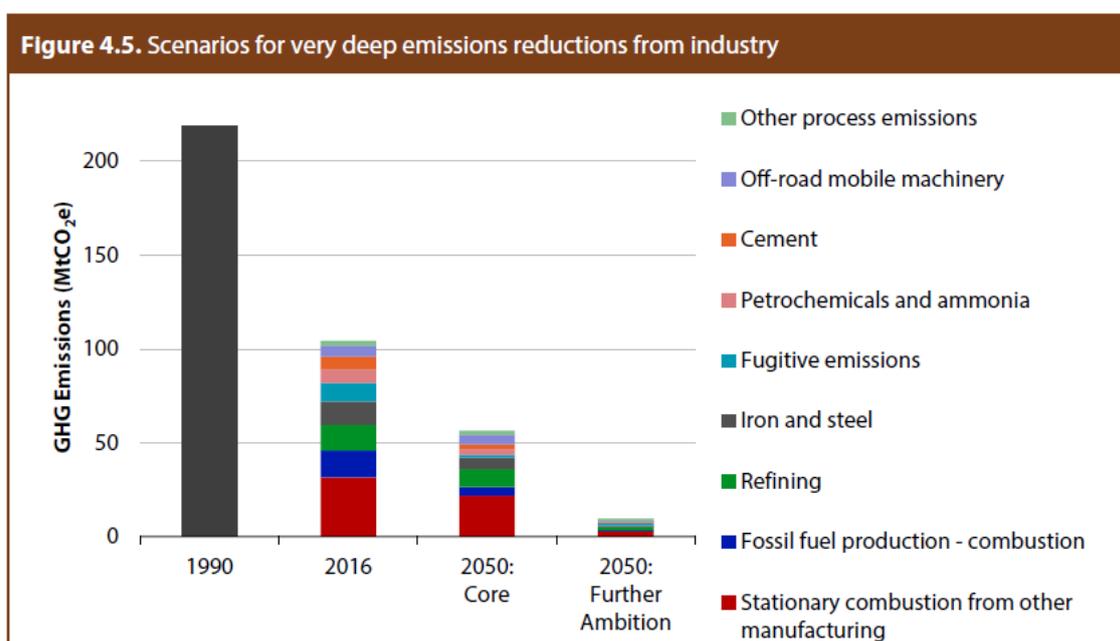
80%削減シナリオでは産業部門の Residual Emissions は45MtCO₂であるが、意欲的シナリオではこれを10Mtと9割減にする計画である。平均削減費用は£120/tCO₂である。削減の詳細はCCC 2019b（p. 111 図4-4）にあるが、水素・電化・バイオエネルギーで27Mt、化石燃料（及びプロセス排出）については全てをCCS付帯とするで24Mt、効率向上などが代表的なところである。このうちバイオはCCS付帯（つまりBECCS）、水素は石油精製、アンモニア製造に使われる。また、CCSに関連して一部はCCUとしてのCO₂再利用もある。

²⁰ 発電からの排出量を需要家に配分前の排出量296Mtとの比較（日本の数値はCO₂）

るとしつつ、貯留に比べてその潜在量は極めて僅少としている点（although the potential amount that could be used is expected to be substantially smaller than that which could be stored）が注目される（CCC2019b p.110）。ただし CCU の内燃料となる部分については実質的に削減にならない点については何も触れていない。

産業部門の業種別削減シナリオ（80%削減の core scenario と意欲的シナリオ）を参考までに下記に記す。

図 13 産業部門業種別 Remaining Emissions



出典：CCC 2019b p.119

上記のうち意欲的シナリオの業種別詳細シナリオ及びトンあたり削減コストは表 3 の通りである。コストは右の二つの欄に記載があるが、このうち右から 2 番目は省エネを伴わない場合、最右欄はそれを伴う場合のコストである。

なお、産業部門の対策に関し注目すべきは、それがイギリスの産業の海外逃避を伴わないようにすると明記してあることである。この場合にはイギリス経済への打撃になるだけではなく、世界レベルでの排出削減にならないとしている（CCC 2019b p.128）。

また、意欲的シナリオ実現には高い炭素価格が必要とし、必要な政策の一つとして国境税調整（border-tariff adjustment）を挙げている。ごく最近の EU の 2050 年ゼロ排出政策もこれを政策の正面に掲げており（CCC 2019b p.129）、今後このテーマについては更に突っ込んだ検討必要と思う。この他特に産業部門に有効な対策として国際的なセクターアプローチを挙げている点注目に値する。

表 3 産業部門の業種別 Remaining Emissions とトンあたり削減コスト

意欲的シナリオの場合

Table 4.3. Opportunities to reduce emissions from industry towards zero

Segment	Current emissions	Further Ambition residual emissions in 2050 (MtCO ₂ e)	Earliest date to reach zero or minimum Further Ambition emissions	2050 cost £/tCO ₂ e for abatement (further ambition)	2050 cost £/tCO ₂ e without efficiency measures (further ambition)
Iron and Steel	13	0.7	2050	102	174
Cement	7	0.5	2050	94	131
Refining	14	1.8	2050	132	165
Ammonia	2	0.1	2050	18	30
Petrochemicals	5	0.2	2050	113	184
Stationary combustion from other manufacturing sectors*	32	3.0	2055	119	156
Combustion associated with fossil fuel production	14	0.5	2050	291	299
Fugitive methane and CO ₂	10	1.2	2040	32	33
Off-road mobile machinery	6	0.5	2050	102	105**
Other process (non-combustion) emissions***	2	1.2	2050	113	152

出典：CCC 2019b p.124

(その5 建物 (buildings))

この部門の詳細は CCC 2019b 第3章にあるが、この報告で建物部門の記述 (38頁) は発電部門 (48頁)、農業 (46頁) に続く長さである。本稿ではエッセンスのみ紹介する。建物からの直接排出は 85MtCO₂e (2017年イギリスの排出量の17%²¹) で、うち家庭が77%と圧倒的 (残りは商業用及び公共建物)。意欲的シナリオでは2050年までに排出総量を

²¹ 電力使用に伴う間接排出を加えると26%となる。

4MtCO₂e にするとしている。建物からの排出の主たる要因は熱（暖房）で、このうちガスが 75%、石油 8%、残りは電気となっている。低炭素暖房は 2017 年には全体の 4.5%に過ぎないが、この 82%はバイオ燃料である。しかしバイオは資源制約からこれ以上増やすことは出来ない。低炭素熱の Heat Pump は暖房機器の販売額の 1%に過ぎない状況である。建物からの排出削減手段と残留排出量・トンあたり削減コストは表 4 の通り。

(表 4 建物からの排出削減手段と残留排出量・トンあたり削減コスト)

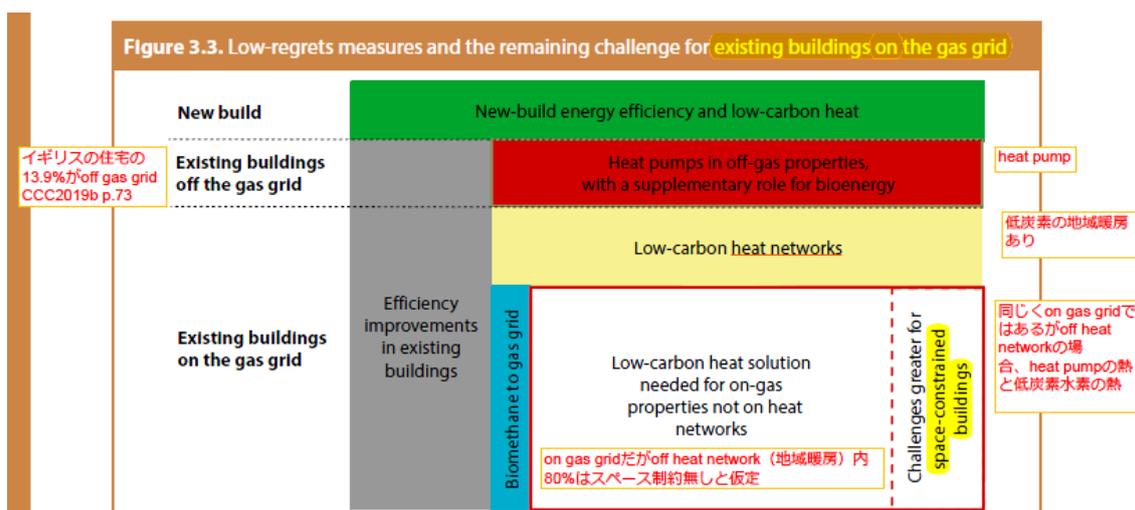
Table 3.1. Opportunities to reduce emissions from buildings towards zero				
Source	2030 5CB residual emissions (MtCO ₂)	Further Ambition residual emissions in 2050 (MtCO ₂ e)	Earliest date for Further Ambition emissions	2050 cost £/tCO ₂ e
Residential buildings				
New homes	62	0.0	2050	69
Cooking		0.0	2045	240
Heating in homes off the gas grid		1.4	2045	-18
Heat in homes in heat dense areas		2.0	2050	195
Heat in homes on the gas grid without constraints		6.2	2050	223
Heat in homes with space constraints		2.0	2050	311
Heat in heritage homes		0.9	2050	196
Conversion of gas peak demand to hydrogen for heat in existing homes		-7.4	2050	215
Conversion of off gas peak demand to biofuels for heat in existing homes		-1.4	2045	47
Non-residential buildings				
Heat in heat dense areas - core demand	11	0.0	2050	195
Heat in heat dense areas - peak demand		0.0	2050	144
Heat in less heat dense areas - displacing gas		0.0	2040	59
Heat in less heat dense areas - displacing oil		0.0	2035	-41
Catering and other non-heat uses		0.0	2050	189
N ₂ O as an anaesthetic		0.6	2050	

出典 CCC 2019b p.95

上表の上半分が居住用建物、下半分がオフィスや公共建物部門である。上記の 2050 年残留排出量（中央の欄）の合計が約 4Mt となるがその大部分は居住用建物からの排出である。建物部門からの削減は全体にコスト高（上表最右欄）である。その中で新築建物について

は£ 69/CO₂e と比較的 low cost となっている。CCC が新築については遅くとも 2025 年までにガスグリッドへの接続を禁止すべきと勧告したとあるが、最終的にこれがそのまま受け入れられるかどうかは要注視である。既設建物はどうか。当然のことながら更なるエネルギー効率改善を前提としつつ更にコストの高い対策が必要となる。居住用については heat pump²²、ガスから水素への転換²³、ガスグリッドへのバイオメタンの投入などで削減を図る（バイオメタン投入による削減効果は 0.2Mt と僅少—CCC2019b p.80）。この場合のコストは表 4 の通りガスグリッドにつながっていない住居（マイナスコスト）から、ガスグリッドに接続しているが低炭素熱技術（例水素）設置場所がない住宅（16m²以下）などいくつかの類型ごとにコストを試算している。後者の削減コストは£ 311 と DAC（£ 300）以上となっている。なお、既存住宅での熱のピーク需要のガスから水素への転換で 2050 年の排出量が -7.4Mt とあるが、これは水素への転換で残留排出がこれだけ減少するとの意味。建物の種類ごとの対策は下記の通りである。

図 14 建物部門からの削減対策の内容



出典：CCC 2019b p.74 及び CCC 2018b p.24 各 Bloc の面積は技術ごとの大凡の削減量を表す。

上記のうち low-carbon heat とはガス w. CCS からの水素、低炭素電気による heat pump が主たるもの。Low-carbon heat network とは低炭素地域暖房でこの場合には廃棄物熱、大規模 heat pump(例 water-source)、地熱、潜在的には水素を熱源とするもの、図の右下の白い部分は on-gas pipeline だが地域暖房に接続していない既設建物の対策で、ここでは hybrid heat pump system による低炭素電気による heat pump とピーク需要の back up 用の水素ボイラー設置が対策となる（最後の部分の詳細は CCC 2018b p.8 以下参照。また、

²² Heat pump 及び Hybrid heat pump の価格差については CCC 2019b p.86 に一覧表がある。後者は前者より低炭素熱の供給が可能とある（CCC 2019b p.15）。なお、ガス供給網につながっていない既存住宅は削減コストがマイナスになっている。石油暖房より heat pump の方が安いということかも知れない。

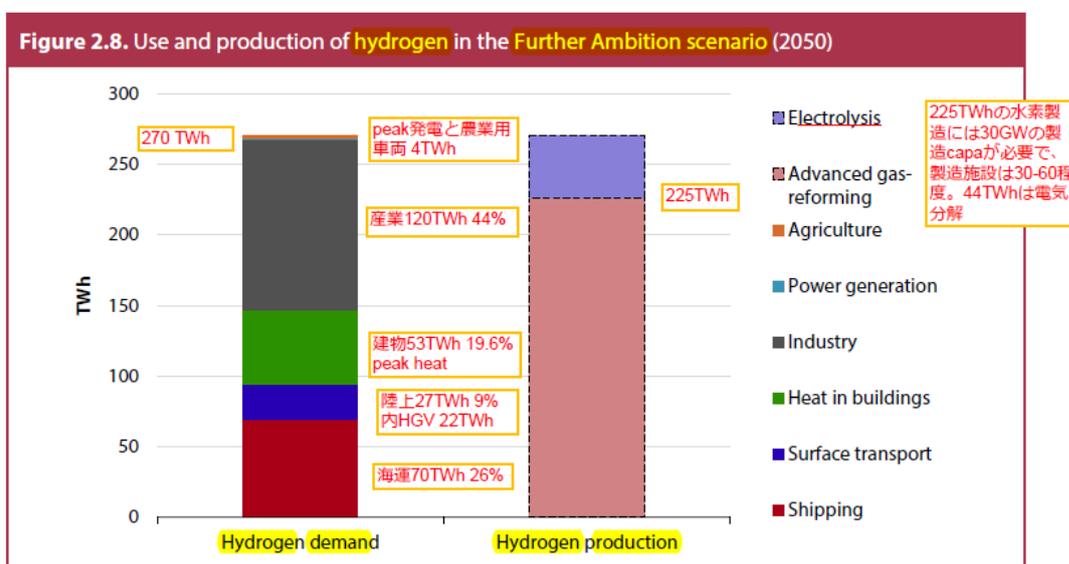
²³ CCC (2018b)では当面の建物の熱として通常は heat pump（つまり電気）、厳寒時の back up として水素 boiler を推奨。これを Hybrid Hydrogen pathways と呼ぶ(p.8-9)。2020 年代に最終方向決定の要。

都市ガスの将来にも大きく関係してくるがこの点は同じく CCC 2018b の p.119 以下参照)。水素についてはこのあとで全体像を述べるが、住宅用ガス需要の水素への切り替えにはそれ用の新たな水素供給パイプラインの設置、水素貯蔵施設（例として salt caverns が挙げられている）の建設、更に水素製造時点での大量の CCS が必要となるが、意欲的シナリオはこうした前提の下での試算である。いずれにしても大変詳細な分析²⁴であるが、日本の 2050 年 80%削減がこの辺りをどの程度まで掘り下げているのか、比較検討の価値がある。なお、行動変化の箇所賃貸住宅についての家主と借り手の問題にも触れている（CCC 2019 p.100）。この辺り実施に際しては大きな問題であろう。最後に建物での電化と水素の最適配分（例えば調理は電気が主で、代替手段として水素となっているが）については確定的なことは言えないとしている。今後の課題と思う。

（その6 水素利用について）

参考までに意欲的シナリオにおける水素利用について述べる（CCC 2019b、第2章）。ここでは水素の需要＝製造を 2050 年時点で 270TWh²⁵、このうちガスからの製造は 225TWh、電気分解での製造は 44TWh と、電気分解による（zero carbon）水素製造は全体の 17%と少ない。ガスから水素を製造する際 CO2 は発生するがこれは CCS で対処する（low carbon 水素）。需要面では産業が 44%とトップで海運（アンモニア）26%、建物 20%と続くが、発電はほとんど無い（ピーク発電用に 2TWh）のが注目される。

図 15 意欲的シナリオの下での水素の製造と利用



出典：CCC 2019b p.62。赤字部分は本文から筆者が追加

²⁴ CCC 2019b p. 97-99 には削減手段、障害、資金負担者、附随便益、Alternative Option も含めた詳細な表が掲載されている。

²⁵ CCC(2018b p.19)ではイギリスの水素製造は年間 0.7Mt (27TWh) と意欲的シナリオの 2050 年の 1/10 である。この時点ではエネルギーあるいは熱源としては用いられていない。

水素製造のコストはどうか。CCS 付きでガスから水素を製造する方法（gas-reforming with CCS）が最小費用での低炭素水素製造技術である。この水素使用により天然ガスに比べて life cycle での CO2 排出を 60-85%削減できる。この場合のコストは£ 27-46/MWh 程度、残留 CO2 排出量は 20-70Mt である。もし CCS 補足漏れ分のみの排出の場合には 95% まで削減可能である。

水の電気分解による水素製造はゼロカーボンを実現できるもののコストは高い。ここでのコスト削減の最大の要因は電気代で、これが£ 10/MWh 以下になればガスからの水素製造と同額程度になる。もう一つは電気分解によるエネルギー消費が大幅に節約できる場合である。VRE の余剰電力利用という手はあるが、水素の潜在需要に比べてこれでは量が少なすぎる。電気分解による水素製造は大きなチャレンジである。水素の輸入という手はあるが、コストと輸入可能量の両面から CCC ではこれに頼らないシナリオを描いている（日本では豪州からの水素輸入専用船の建造など low carbon 水素の輸入に相当量依存する姿勢であるが、国内でのガスからの製造とのコスト比較はどうか）。

水素の国内での輸送インフラであるが、ガスの配管を現在の鉄管からプラスチック管に変えることで水素 ready のネットワークになる。いずれにしても大量の水素を利用するには配管から CO2 輸送まで大規模なインフラが必要となる。

水素製造による残余排出は 2050 年に 3.1Mt であるがこれは補足率 95%を前提としており、もし 85%であるとすれば 9.3Mt となる。後述する投機的シナリオでは補足率の更なる向上とゼロエミ水素輸入を加えて、これを 0.6Mt 迄削減するシナリオを描いている。

CCC では水素は意欲的シナリオの鍵であり、それには CCS が top priority であるとしている点が注目される（CCC 2019b p.64）。

3-2-3 目標達成に向けての投機的選択肢 CCC 2019a p156 以降の記述による

11 頁以降意欲的シナリオ（90 年比 96%減）について解説してきたが、本稿 13 頁（図 7）の通り意欲的シナリオでも 86Mt の Gross 排出が残り、これを BECCS 等 negative emissions で相殺して、net で 32Mt の排出となる。イギリスはこれに更に投機的選択肢を加えて 2050 年ゼロを目指すことを法律で決めている。以下このオプションを検討する。言葉通りこれは Speculative option でいわば当たるも八卦的な対策を羅列し、このうちいくつかは実現可能になるであろうから、その結果としてゼロエミが実現できるだろうとのシナリオである。

86Mt のうち農業部門からの排出が 26Mt と航空（31Mt）に次いで大きい。農業分野での更なる削減の余地として真っ先に挙げられているのが食肉及び酪農製品の 50%消費減（Diet）で、これに加えて人造肉（synthetic meat）により追加的に 11Mt 分の削減が可能との試算である。最大の航空分野では意欲的シナリオで 2050 年の乗客需要を 2005 年比 60%増に抑える前提であるが（現時点で既に 30%増となっている）、人々の考え方や生活様式の変化で伸び率を 20-40%程度に抑えられれば、4-8Mt の排出減が可能となる。

以上生活様式の変化であるが、この他土地利用面で植林を年 3 万ヘクタール（意欲的シナリオ）から 5 万ヘクタールに増やすことで 11Mt の追加削減、Diet で浮いた土地をエネルギー用穀物の生産に回すなどで 7.5Mt 減、次に Negative emissions について、先ずバイオマス資源利用が意欲的シナリオの 200TWh ではなく 300TWh であれば BECCS により追加的に 32Mt の negative emission が可能、DACCS については物理的上限はないが、問題はコストである。イギリスの The Royal Society and the Royal Academy of Engineering の研究では DACCS を 25Mt 活用とある。意欲的シナリオでは DACCS は 1Mt 以下なので、この面でも更なる削減の余地があり得る。

次に合成燃料（Synthetic fuels）はどうか。基本的にはこの選択肢は技術的には可能であるものの熱力学及び経済的な観点から他の投機的選択肢に比べて相当高いとの判断を示しつつ、もしこうした障害が克服され、世界でこれが利用されるようになると大きな可能性を秘めていると位置づけている。その上で、合成燃料は（例えば DAC で回収される）CO₂ を大量のゼロカーボンエネルギー²⁶（例えば貯蔵された水素）と結合して製造するが、その結果出てくる炭化水素エネルギーは極めて小さい。合成燃料燃焼後 CO₂ は大気中に放出されるが DAC の場合には CO₂ 排出はゼロであるが、このように多くのプロセスを経るので熱力学的・経済的に非効率としている。例えばとして、航空部門からの排出をゼロにするには 115TWh の合成ジェット燃料が必要だが、それには 200TWh のゼロカーボン電気が必要で、この量は意欲的シナリオの下でのイギリスの全発電電力量の 33%に相当するとしている。さらに一旦捕捉した CO₂ を貯留するコストの方が、同量を合成燃料の材料として（ケロシンのような）化石燃料に代替することで排出削減するコストより安いともしている。上記の通り合成燃料には否定的であるが、もしこうした諸点が克服された場合には CCS 無しでの化石燃料燃焼の一部を合成燃料に代替することで 45Mt 分の CO₂ 排出削減の可能性を見込んでいる。

ゼロエミッションに向けての別の手段としては CCS の回収率引き上げがある。意欲的シナリオでは発電・産業・水素製造での CCS 回収率を 95%としているが、投機的オプションではこれを 99%に引き上げることで更に 7Mt の削減を見込んでいる。不確実性はあるが、99%までの回収率向上はコストの大幅増を招かず可能と判断している（CCC 2019b, p.158）。

13 頁図 7 及びその説明の通り意欲的シナリオでも 32Mt 程度の排出は残る。これをゼロにするための投機的オプションをして上記の検討を経て、イギリスでは次の 3 つのシナリオを提示している。

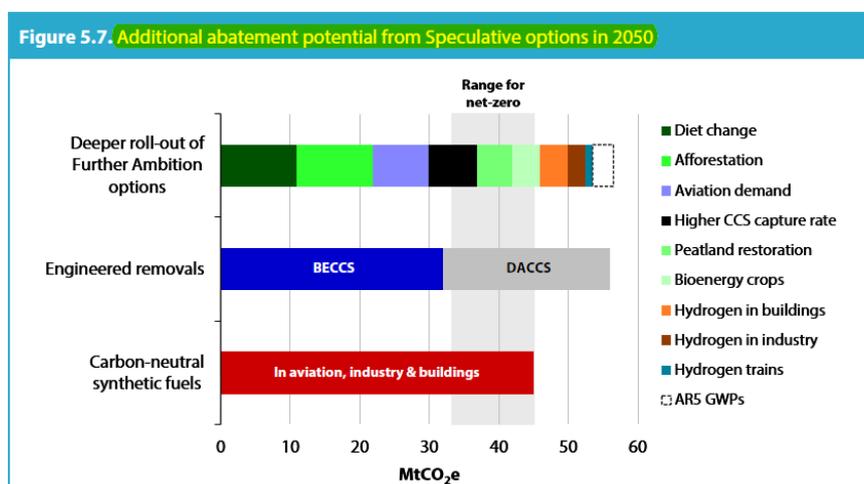
① 意欲的シナリオの深掘り

需要の更なる削減、植林増加、CCS 回収率の更なる向上、輸送や建物などでの更なる水素利用で追加的に 56.5Mt の削減

²⁶ イギリスの場合ゼロカーボン水素という場合、再エネ電気で水を電気分解した水素を指し、CCS 付きガスから製造される水素（low carbon hydrogen）は含まない点に注意が必要

- ② BECCS と DACCS の更なる活用による 56Mt の追加削減
- ③ 合成燃料の更なる活用（例えば航空燃料）、但し上記 2 つのオプションよりコスト高

図 16 投機的オプションによる 3 つの選択肢での削減見込み



出典：CCC 2019b p.159

この図でそれぞれのオプションの削減量が灰色の縦の棒の範囲まで進めばゼロエミッションが実現可能になる。実際にはこれらのうちできるものを総動員することになるだろうが、これが計算通り進む保証はなく、この意味でイギリスで本当にゼロエミが実現するかどうかは「投機的」である。

ここで DAC による削減コストに触れておく。本稿冒頭で 2008 年当時の 80%削減シナリオ (core scenario) のコストが GDP 比 1~2% (2050 年) であったが、今回は技術進歩の結果ゼロエミッションをこれとほぼ同コストで達成可能と考えたと説明したが、この説明を補強する記述がある。具体的には 80%削減とゼロエミッションの差は 170Mt であるが、DAC の削減コストは £ 300/tCO₂ 程度なので、仮に DAC でこれを全て埋めるとした場合の削減の追加コストは GDP の 1.5%程度 (これは極端なシナリオでそうでない場合には 1%の追加コスト) なので GDP 比では 0.5%の追加になる程度だとしている点である (CCC 2019a, p.28)。

こうした検討を経た後ゼロエミッション達成の鍵として既存分も含めた全ての建物の暖房の脱炭素化、低炭素水素活用 (産業、ピーク発電、海運、建物のピーク暖房、大型トラック)、産業部門は CCS 及び低炭素水素と電気分解、トラック輸送の脱炭素化 (水素、電化或いはその Mix)、生活様式の変化、BECCS 等が挙げられ、DAC も視野に入れている。続いて消費ベースではイギリスの排出が生産ベースに比べると減っていない点 (例えば 2016 年には消費ベースの排出量は生産ベースのそれよりも 70%も多かったこと) を指摘し、この原因の一つとして産業の海外移転を挙げているが、これについては省略する。

4、目標実現の方策等

上記は削減の技術的内容を検討している CCC 2019a の 5 章の内容であるが、第 6 章ではその実現の方策を探っている。この内容は 2019 年 6 月に公表された日本政府の長期ビジョン²⁷に相当するものであるが、残念ながら日本のそれには技術に関する第 5 章に相当する部分が欠如している点を特に指摘しておきたい。以下 6 章の内容をごく簡単に紹介する。

現状のままでは 80%削減も厳しい中で例えば運輸部門でのガソリンとディーゼル車は 2040 年廃止では遅すぎることに、イギリスの暖房システムの脱炭素化に向けた抜本的対策がとられていないこと、CCS については世界に計画の中に入れて 43 の大規模 CCS があるが UK はゼロと全く手つかずであること、植林も予定通り進んでいないこと等を挙げ、この他産業界や大型トラックの脱炭素化の遅れ、国際航空や海運での具体策の必要性、イギリスの農地の 1/5 はバイオマス生産増を含む脱炭素に向けた活動に向けられるべきことなどに関し、政府の明確なリーダーシップの必要性を強調している。この為に必要なこととして国民への啓発、必要なインフラ整備（例えば水素配給のためのガス管の再整備、EV 普及のための 2030 年までに幹線道路での 1200 の急速充電装置の設置や一般道路での 27000 の充電装置の設置）、新車の 2030 年までの ULEV (Ultra Low emission vehicle) 化、発電での低炭素電源新設の 2050 年までに 4 倍とすること、低炭素水素増産に向けて CCS 設備の拡充（既述の通り意欲的シナリオでは 175Mt の CCS が必要）、Sustainable BECCS の 2030 年までの実施等を列挙している。ここで特に Sustainable BECCS とことわっている点にイギリス或いは欧州の第 2 世代バイオマスへのこだわりを強く感じるところである。なお、この中で特に強調しているのは CCS はオプションではなく必須である (CCS is a necessity not an option for reaching net-zero GHG emissions. (CCC 2019a) p.178) との記述である。続いて 2020 年には最初のプロジェクトが実施されなくてはならないと背水の陣である。同じことは日本の気候変動対策でも言えるにも拘わらず、日英両国ともこの点についての進展が遅々としている点が気がかりなところである。続いて BECCS についても例えばとして 2030 年までに長期大量導入に向けた Start up が必要と強調している。

技術のイノベーションの重要性に関する記述もあり、例えば再エネとバッテリー技術の向上などにより 80%削減のコストが 1990 年当時の GDP の 1~2%から 1%以下に下がったことに触れている。ここで注目すべきは国としての削減目標は政府が定めるが、達成技術は指定すべきではないとしている点 (CCC 2019a p192) である。この辺り日本と若干ニュアンスが異なると思う。イノベーションと並列する形で社会的変化が取り上げられ、例えばライフサイクルの変化として肉食類の 20%削減等が列挙されている。

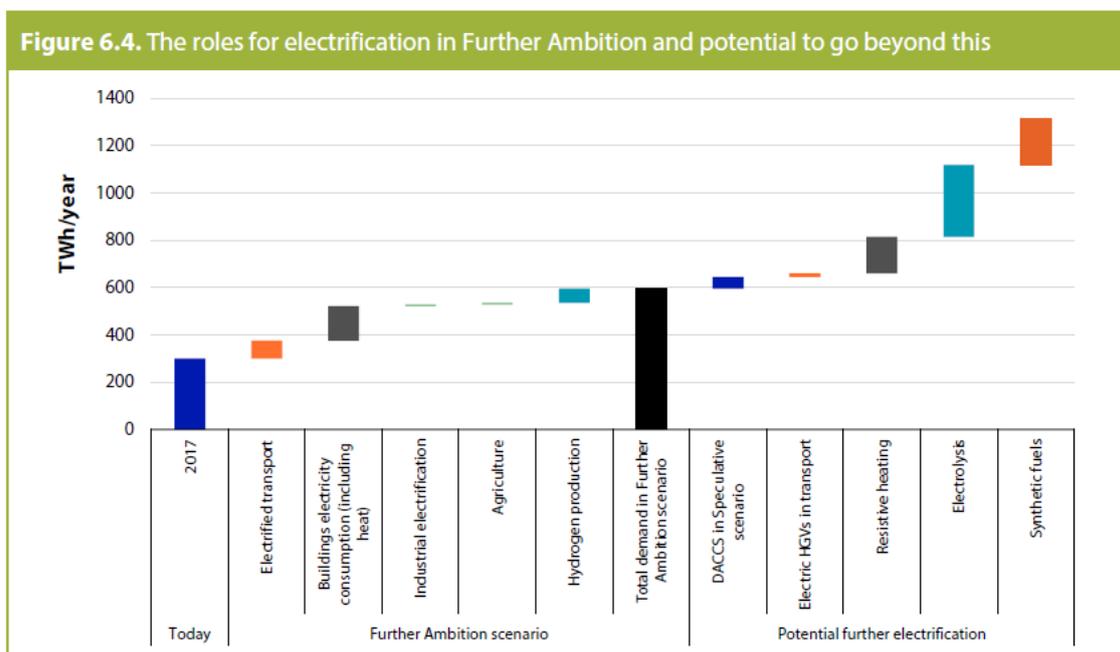
ゼロエミッションに向けた政策のうちでは直接規制の重要性が強調されている点が目新しいが、これに関連して特に産業部門では国際競争力への影響 (carbon leakage) が問題となる。ここでは鉄鋼など世界でも少数のメーカーが競争しているような業界については、

²⁷ パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略、2019 年 6 月 11 日閣議決定
<https://www.env.go.jp/press/111781.pdf>

昔日本が唱えた **Sectral Agreement** を推奨している点が注目される。今後世界で排出規制が厳しくなった場合の産業政策として考慮すべきものと思う。もう 1 点国境税調整（ここでは **border-tariff adjustment** と呼んでいる）が挙げられているが、この実現可能性やそれに伴う世界経済への経済的・法的影響については全く触れられていない。EU が 2019 年末に合意した 2050 年ゼロエミッションではこの点強い調子であるのと好対照である。

本文中に対策の前提としての電力需要増について興味深い図があるので再録する（図 17）。図の左欄は 2017 年の電力需要量（約 300TWh/年）であるが、意欲的シナリオの実施で輸送面での電化や建物の電化（暖房を含む）、水素製造などで需要は 2050 年には 600TWh にまで増える。更に投機的オプションの実施で特に電気分解と合成燃料製造で大量の電気を使うのでこれが 1200TWh 程度まで急増するとの図である。例えばわが国で政府が公約している 2050 年までに 80%削減を実現するには電力需要がどの程度になるか（勿論人口減少を考慮するのは当然であるが）の推計を行い、それに基づく政策を打ち出すことが是非とも必要ではないか。

（図 17）意欲的シナリオと投機的オプションでの電力需要増内訳 2050 年



出典：CCC 2019a p.204

5、2050 年ネットゼロの費用便益分析

5-1 費用便益分析の放棄

本稿 3~4 頁の通り CCC は 80%削減に関しては詳細な費用便益分析を実施しており²⁸、

²⁸ 気候変動法の下では 34 条(2)(b)で CCC に 2008~2012 の炭素予算について費用便益分析を義務づけて

2050年ネットゼロについてもこれを行っているが（CCC 2019a 第7章）、筆者の判断では内容的には後退したものとなっている。その理由は今回は本来の意味での費用便益分析を行っていないからである。

まず Key Message として下記が記載されているが、説得性に欠けると言わざるを得ない。第1は Action is preferable to inaction である。世界及びイギリスで2050年 net zero を目指す対策コストは対策無しの気候損害に比べると小さいであろう（likely）とあるが、その数値的根拠は示されていない。第2は洋上風力やEVのバッテリー技術の進歩によるコスト低下で、80%削減のコストと同様のコスト（2050年にGDPの1~2%）で net zero が達成されるとある。イギリスの目標は1.5°Cを念頭に置いたものであるが、IPCC第5次報告書では2°C（より正確には450ppmCO_{2e}）目標達成の2050年のGlobalなGDP比コストは3.4%（2~6%）となっており（IPCC/AR5/Synthesis report p. 26）、1.5°Cの場合には当然それよりかなり高くなるはずである。しかも先進国の方が一般的に削減が進んでいるのでコストが高いことを考えるとこのコスト自体が過小評価ではないかとの疑義がある。更に言えば、イギリスのコストの場合基本的には炭素税による最小費用での削減を前提にしているはずで、この意味でもCCCのコスト推定値は低すぎると考える。もし他国が協調して厳しい政策をとらなかったらどうするか。この場合には他国からのクレジットの購入も検討する（CCCの案は基本的に他国からのクレジットの購入を禁止している）、更に、必要なら2050年ゼロエミ目標自体の改定も法律上可能であるとしている（CCC 2019a p.213）。あまりにもコストが高い場合、イギリスだけが気候変動問題と心中するつもりはないと言うことであろう。

続いて大気清浄化、騒音減少、健康飲食、それに土地利用変化や農業慣習変化による水質改善、種の多様性への正の影響などゼロエミ目標実施に伴う付随的便益を列挙し、こうした便益がコストの一部或いは全部を相殺する可能性があるとしているが、ここでも数値の根拠は示されていない。しかし多くの学術論文が BECCS の大量利用による土地利用変化と種の多様性との Trade-off を指摘している中で、こうしたマイナス面に触れないのは納得がいかないところである。因みに IEA (2019 p. 123) では BECCS が種の多様性・食糧生産に悪影響を及ぼす点を明記し（その根拠となる研究の一つとして IPCC 2019 を挙げている²⁹）、自らの Sustainable Development Scenario では原則として Negative Emissions をゼロ（IPCC 2018 では2050年のNEの中央値が4.7Gtであるのに対してSDシナリオでは0.25Gtとされている）としている点を指摘しておく。

ここで費用便益分析（Cost Benefit Analysis、CBA）の結果に移る。まず断っておきたいのはここでCBAという場合2008年の80%削減を更に100%削減に引き上げる場合のそれである点である。ここで最も重要なのは全面的なCBAは不適當として退けていることで

いるが、実際にはその後の炭素予算、2050年に向けての80%削減長期目標についてもこれを行っている。
²⁹ この報告書は土地利用に関するもので、IPCCは従来BECCSとbiodiversityのTrade-offについては詳細な記述が無かったが、この報告書ではこの点明記がある（p.553-554）。

ある (CCC 2019a p.214)。その理由として追加的なコストと金銭価値で測った追加的便益を比較するのは意味が無い (not sensible) 点を挙げている。この説明として目標引き上げによる追加的なコストは Static (静的) なそれであるが現実とは異なる点を指摘している (この意味は不明確であるが、文脈からすると技術進歩によってコストが下がることを指しているものと思う)。しかしより重要なのは気候変動に特有の不確実性、不可逆性、複雑な政治経済関係の中で限界削減費用と限界便益で結果を判断する手法は不適切と断言していることで、この点は CCC が助言を求めた専門家の意見も同様であったとしている点である。続いて重要なのは全体としてのコストと便益の比較ではなく対策が社会の異なる部門にどの様に影響するかだともしている。しかし本稿 3 頁で指摘したように、80%削減の際には伝統的な CBA を行っている。勿論 CCC の上記の言い分も理解できるが、便益の金銭換算が困難な非市場損害については金銭以外の表示で表すことも可能であるし、CBA では衡平性の問題が考慮されない等 CBA に対する批判はいくらでも可能である。しかしそうした中で対策のコストを示しつつそれによる便益を金銭やそれ以外の数値を示すことは、政治家の意志決定には大いに役立つはずである。

上記から明らかなとおり、CCC 2019a の第 7 章は 2050 年ゼロエミッション目標の費用便益と銘打ってはいるものの、費用と便益の数値的比較は行っていない。この面から 2050 年ゼロエミッション目標を正当化する唯一の根拠は、技術進歩により 80%削減と同じコスト (GDP の 1~2%) で目標が実現可能で、しかも 80%削減は 2008 年に CBA で正当化されているので、同じコストでより高い目標が実現可能なのであれば実施すべきであるとのロジックだけである。既に指摘したとおりイギリスのコスト計算は最小費用でこれを実施していること、コスト計算は IPCC 報告書のそれに比べても低いこと、未だ実用化されていない CCS (含む化石燃料による水素製造に伴う CCS) に大量に依存していること (2017 年の排出量約 5 億トンの内 35%が CCS) から、単に 80%削減コストと変わらないとの理由のみでゼロエミッション目標が正当化されるかどうかは甚だ疑義のあるところである。

5-2 IPCC 報告書での費用便益分析の扱い

翻って IPCC での CBA での扱いを見ると、1995 年の第 2 次報告書では伝統的な CBA をそのまま適用することは困難としつつも、これは政策決定者にとって有用なツールであることに変わりはないとし、たとえば不確実性については sensitivity analysis で補ったり、あるいは経済効率以外 (たとえば衡平性等) との Trade-Off については唯一の最善策ではなくいくつかの選択肢を示す Multi-criteria Analysis (MCA) を併用すべきとしている³⁰。IPCC 第 2 次報告書では伝統的な CBA にこうした概念 (更に cost effective analysis、decision analysis) を加えた CBA を modern CBA とよび、結論としてこの方法論が政策決

³⁰ Multi-criteria の例としてアメリカ環境保護局 (EPA) の 14 の Criteria (irreversibility, consistency, economic efficiency, political feasibility, equity など 14 項目) を挙げ、このうち最重要なものは経済効率と衡平性であるとしている。

定者にとって最善の枠組みであるとし、種の多様性のような損害の金銭評価が不可能な場合には MCA が Trade-Off に関する何らかの数値を示すことが出来るとしている。その上で CBA を適用する最も重要な点は（仮定によって変わる）結果の数値ではなく、プロセスにあるとしている（the most important benefit of applying CBA is not necessarily the predicted outcome, which always depends on assumptions and the particular technique used, but the *process itself*...）。これは正に筆者の主張でもある。CBA の困難性を理由にこれを放棄するのではなく、意思決定に向けて少しでも選択肢に関する数量情報を充実させる、これこそが policy relevant な IPCC 報告書である。

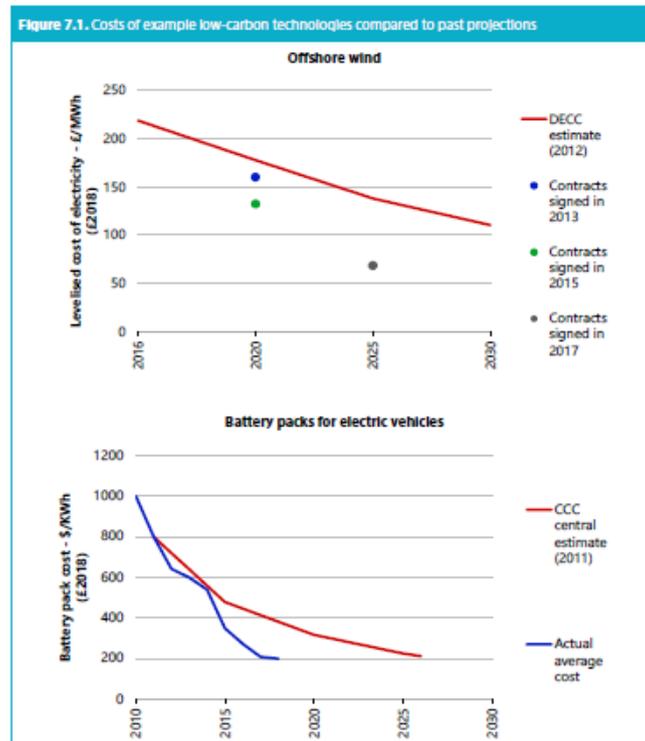
しかし IPCC 報告書は 2011 年の第 3 次報告書以降費用便益に懐疑的になり、とくに 2018 年の SR1.5 報告書では要約部分（SPM）では knowledge gap があるため 1.5°C 目標の費用便益分析はしていないと穏健な書き方をしているが（IPCC 2018 p.18）、第 1 章では損害の金銭評価の困難性や費用と便益の発生時点の相違などを挙げた上で費用便益分析は正当化するの難しいとし、その根拠となる 2 つの文献のうちの一つに 2014 年の IPCC/第 5 次報告書第 2 作業部会報告を挙げ、SR1.5 報告書ではこの手法は用いていないと明言している（同 p.76）。SPM とは全くニュアンスが異なり費用便益分析をばっさりと切り捨てた感じの文章である（第 2 章でも価値判断を伴うとの理由で CBA を取り上げない理由を詳細に述べている）。第 6 次報告書の内対策を扱う第 3 作業部会報告書は 2020 年 1 月現在第 1 次原案が専門家のレビューにかかっている段階で、この中で費用便益分析についての言及もかなりある。筆者は CBA だけで判断が可能とは思っていないが、各種ある判断基準の一つとして CBA が加えられるべきと主張しているが、結果が注目される場所である。

以上 IPCC 報告書における CBA の扱いであるが、今回のイギリスの 2050 年ゼロエミ目標についてイギリス政府がこれを放擲したことは極めて遺憾に思うところである。

5-3 技術革新のコストへの影響

上記に関連して技術革新とコストの関係が論じられている。主要な点をまとめてみる。技術革新によってコストが大方の予想を超えて下落した例として洋上風力、EV の為のバッテリーの例を挙げている（図 18）。

（図 18）コスト低下の予測と実際



出典：CCC 2019a p.219

図の上半分は洋上風力で、赤線が 2012 年当時の政府の将来のコスト低下見込み、それに対してその後のコスト見込みがそれを上回るスピードで進んだことを示している。例えば当初の政府見込みでは 2025 年に £ 135 程度/MWh(目測)であったが 2017 年に契約した 2025 年の価格は £ 70 程度(ねずみ色)という具合に価格低下が予想を上回る速度で進んだということを表している。下半分は EV 用バッテリーで赤線は 2011 年時点の CCC のコスト低下見込み、青線が実際値である。つまりこの図は、ある程度の技術進歩は見込んで将来コストの計算は行っているが、実際の技術革新のスピードはそれを上回ったことを印象づけるものである。他方コストダウンが進まなかった技術として原子力、CCS 等が挙げられている (CCC 2019a p.216)。こうした中で、現在の予想を基にした限界削減コストで費用便益分析を行うのは不適當で、また、大幅削減のコストと便益を正確に計測することは出来ないが、イギリスのような化石燃料輸入国には低コスト或いはマイナスコストもあり得るとの CCC への Advisory Group (AG) の見解を紹介している。最後の点は will とか likely という言葉を使っており、若干の wishful thinking が混入していると言わざるを得ない。また、ここではコストが予想より安いということだけで、それが便益を下回るという点には全く触れていない。その上で 80%削減のコストは技術革新により 2008 年に見込んだ GDP の 1~2%ではなく 1%以下だろうとしている。続いて net zero に必要な技術として省エネ、暖房・運輸の電化、水素(運輸部門等、水素製造技術は現在のガス火力と同程度のサイズが必要)、CCS、土地利用変化等を挙げ、それぞれ 2050 年に向けてのコスト低下見込みを示している。

(表 5) 主要低炭素技術のコスト低下見込み

Table 7.2. Assumed costs and cost reductions in key low-carbon technologies			
Technology	Cost in 2025	Cost in 2050	Percentage cost reduction
Power generation			
Offshore wind	69 (£/MWh)	51 (£/MWh)	26%
Solar PV	47 (£/MWh)	41 (£/MWh)	13%
Nuclear	98 (£/MWh)	71 (£/MWh)	28%
Gas CCS	79 (£/MWh)	79 (£/MWh)	0%
Heating			
Air source heat pumps	6,500 (£)	5,800 (£)	11%
Hybrid heat pumps			
With hydrogen	7,300 (£)	6,600 (£)	10%
With biofuels	7,500 (£)	6,900 (£)	8%
Transport			
Batteries (for electric vehicles)	73 (£/kWh)	50 (£/kWh)	32%
Fuel cells (for HGVs)	500 (£/kWh)	300 (£/kWh)	40%
Removals			
Bioenergy with CCS			
From UK biomass	125 (£/t)	125 (£/t)	0%
From imported biomass	300 (£/t)	300 (£/t)	0%
Direct air capture with CCS	450 (£/t)	300 (£/t)	33%
Hydrogen production			
	44 (£/MWh)	39 (£/MWh)	11%

出典：CCC 2019a p.223

表 5 の通り 2025 年と 2050 年を比較すると輸送部門でのコスト低下は大きいですが、BECCS およびガス CCS は低下率をゼロと見ている。原子力については従来はコストダウンは捗らなかったが 2050 年にかけては 28%Down を見込んでいる（おそらく小型の最新原子力発電を念頭に置いたものであろう）。なお、水素については主として CCS 付きガスからの製造を想定している点付言する。

5-4 業種別限界削減費用

興味深いのは業種別削減手段別（平均）限界削減費用が表示されている点である。

(表 6) 業種および手段別（平均）限界削減コスト

Table 7.3. Average abatement costs by sector and measures (2050)

Sector or measure	Abatement cost (£/tCO ₂ e)	Sector or measure	Abatement cost (£/tCO ₂ e)
Power	<u>20</u> <small>average MAC</small>	Agriculture	-55
Variable renewables	-5	Agricultural soils	-80
Firm low carbon power <small>firmの反対語はpeak</small>	50	Land use	85
CCS for mid-merit generation <small>左はfirm, 右はpeak power</small>	80 – 120	Tree planting	10
Residential buildings	<u>155</u>	Forestry management	-50
New homes	70	Peatland restoration	See note
Heat in space constrained homes	<u>310</u>	Waste	10
Heating in homes off the gas grid	-20	Transport	-35
Non-residential buildings	<u>95</u>	Cars	-40
Industry	<u>120</u>	Buses	<u>200</u>
Iron and steel	100	HGVs	-35
Cement	95	Aviation	-10
Stationary combustion	120	Fuel efficiency	-50
Engineered removals	<small>ここでは加重平均の£160を適用</small>	Biofuels	<u>125</u>
Bioenergy with CCS <small>左は国内, 右は輸</small>	125 – 300	Shipping	<u>200</u>
Direct air capture with CCS	<u>300</u>	F-gases	-10

出典：CCC 2019a p.225

ここで平均限界削減費用とは業種について複数の手段がある場合、技術ごとの限界削減費用を業種全体として平均したものである。例えば電力部門では CCS や（ここには表示がないが） peak power の水素のコストは高いが、MAC の安い再エネで相殺されて £ 20/tCO₂ となる。運輸はバスでは £ 200 と高いが EV が在来車より価格・維持費が安く、HGV の普及には障害があるが、燃料費が大きく下落するので、net では £ 35 のマイナスとなるという具合である。なお、需要面での対策のコストはゼロと仮定されている。航空はこうした点および biofuel は高価だが燃費効果がこれを上回るので差し引きマイナスコストとなる。発電の CCS の費用に幅があるが、高い方はピーク発電に CCS を適用した場合である。全体を眺めると業種別では高い順に海運 £ 200、Engineered removal (BECCS および DAC を指す) £ 160（この表には出ていないが本文中から拾った数字）、住宅 £ 155、産業 £ 120 で、低い順では農業・陸上運輸・航空はマイナスコスト（農業については対策による生産

性向上とコスト節約が効いている)、次いで廃棄物£10、電力£20となっている。日本でも大幅削減に関してもこのような情報が開示されることが待たれるところである。本稿13頁の図7の通り意欲的シナリオの **Remaining Emissions** のうち航空分野の31Mtが最大のものであるが、ここでの限界削減費用はマイナスである。この理由は既述(本稿13頁)の通りバイオマスを BECCS として用いるために航空燃料へのバイオマス使用を全体の10%に抑えているからである。

5-5 総削減費用と業種別内訳

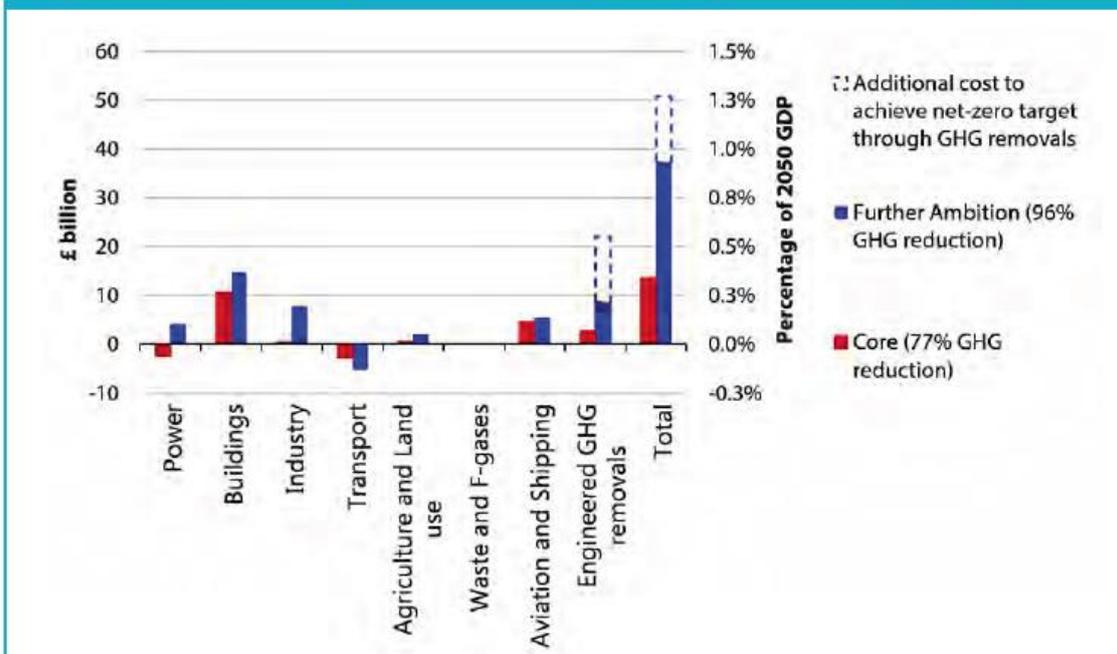
上記限界削減費用の数値を基に総削減コストを計算すると GDP あたり 1~2%となるとしている。80%削減シナリオから意欲的シナリオ(96%削減)に移行するための追加コストを GDP の0.6%程度とし、これをゼロにするための投機的選択肢のうち輸入バイオマスによる BECCS と DACCS の組み合わせ(£300/tCO₂)を用いた場合としてこれによる追加コストが GDP の0.3%と計算し、これに不確実性も加味して総合判断して2050年 net zeroのGDP当たり best estimateのコストをGDPの1~2%としたものである(CCC 2019a, p.228)。最後はエイヤ!の世界である。いずれにしても既に論じたとおりコストは安すぎるように思う。この原因の一つが長期のGDP成長率を年2.2%(この結果2050年のGDPは£3900B=550兆円)としている点にあるのではないかと思う。なお、長期化石燃料価格は政府の長期見通しの中庸値に従ったとあり、これより低ければコストは上昇し、逆もまた真なりとしている。

総コストの目標別業種別コスト総額は図19の通りである。赤は現行80%削減シナリオ³¹、青は意欲的シナリオ、点線は投機的選択肢の内 BECCS と DACCS で100%削減とした場合のコストである。一見して分かる通り80%削減シナリオでは電力と陸上輸送はマイナスコスト、業種別でははじめの二つのシナリオ共に建物が最大、次いで海運・航空、ゼロエミ達成のための BECCS と DACCS のコストがトンあたりでは極めて高くなっている。

図19 目標達成の目標別業種別コストの総額

³¹ 積み上げでは77%削減にしかならず、これを最後に80%に積み上げたものなので、ここでは77%削減シナリオ(core scenario)となっている。

Figure 7.2. Central estimates for annual resource cost of meeting a net-zero GHG target (2050)



出典：CCC 2019a p.229

興味深いのはコストの不確実性も論じている点で、その要素として技術進歩によるコストダウンのスピード³²、需要サイドの見通し、非効率な政策、政策導入の遅延、投資決定に伴うリスクを挙げているが、こうした点を勘案しても GDP の 1~2% というコストは **robust** としている。しかしすでに意欲的シナリオ達成のコスト自体を最小費用で計算しているとすると、これは現実を反映していないことになる。また、CCS や原子力など長期大型投資は余程の **incentive** が無ければ民間投資は発生しないことを考えると、総コスト見積もりはこの点からも安すぎるのではないかと考える。

CCC のゼロエミッション提案はこれに続いてこれを実行することによる経済効果や健康効果などに触れ、さらにイギリスの財政バランス、エネルギー支出、競争力への影響、エネルギー安全保障問題を取り上げている。この中で例えば財政バランスについては産業界の負担は 50-100 億ポンド、国際競争に曝される業種には **free allocation** や国境税調整などが必要かも知れない、マイナスコストの対策は 100 億ポンド以上になるがこの分は例えば航空などゼロエミを達成できない部門が負担すると仮定（その結果航空運賃上昇）、電力の低炭素化のコストは需用者負担等の記述があり、エネルギー支出面では例えば家庭でのエネルギー価格は上昇するがエネルギー使用量減で十分相殺可能、もしガス価格が上昇すればコスト節約は更に大きい等を挙げ、コスト増（熱）の部分と減（電気代、輸送コスト）の部分相殺されて差し引きゼロとなる図を載せている（CCC 2019a p.248）。競争力に関

³² 再エネとバッテリーのコスト低下を考えるとこの点控えめに見たとあるが、最大技術である CCS に触れていないのは納得がいかない

しては重工業の海外移転による排出減は好ましくないとした上で、産業部門の追加コスト £ 80 億（GDP の 0.2%）と巨額ではあるが、競争力で影響を受ける業種は少ないこと（こうした業種以外はコストの価格転嫁を前提にしていると読める）、他国も規制強化をするので leakage は少ないとは思いますが、何らかの対策が必要として、補償、低炭素製品市場創設、国際セクター別合意、国境税調整等のアイデアを列挙している。次いでエネルギー安全保障面では、対策実施により化石燃料への依存度を下げ安全保障上はプラスとしている。加えて電力安定供給面から PV と風力の VRE は最も安い発電技術であるがこの割合を 60% 以下に抑えているとしている。

続いてネットゼロ社会への移行に際し、それによる負担と便益を関係者間で公平に分担せねばならないとし、化石燃料業界を中心に雇用への影響を検討している。

以上 CCC（2019）の第 7 章（net-zero target の費用便益分析）の内容を中心に論じてきた。ここから明らかになったことは対策コストを過小評価している可能性が相当高いことであるが、それより重要なことは対策により減少する便益に関しては全く数値がないことである。上記から CCC の第 7 章は費用便益分析とは呼べない内容になっている。

6、政府に対する CCC の勧告とイギリス政府の対応

上記を踏まえて CCC はイギリス政府に 2050 年までの net zero GHG emissions の法制化を勧告している。ここでは国際航空・海運も対象にすべきこと、削減は国内を原則とし、国内対策で必要な政策措置を採用したにも拘わらず目標達成が困難な際には Contingency として海外からのクレジット購入もあり得ること、目標達成には政府中枢（首相のことと思う）の強い指導力が必要であること、特に対策が進んでいない低炭素熱源、水素、CCS、農業と土地利用についてはその普及と必要なインフラを整備すること、財務省は脱炭素経済への移行に伴う資金手当とその負担を検討し、この他影響を受ける労働者や消費者の保護にも意を用いること等を挙げている。

更に、この時点（2019 年 5 月）で気候対策に先導的な他の国も 2050 年 net GHG zero を決めたか或いはこれを目指そうとしている国もある中で、イギリスが目標を緩めたり達成期限を遅らせることがあると他国への悪影響のみならずこの分野でのイギリスの leadership も失われると政府に圧力をかけている。先導的な国で 2050 年 net GHG zero を採択し、net CO2 zero を目標とし、これに短期での大幅削減が加われば 50% の確率で 1.5°C 達成が可能であり、イギリス以外で若干の遅れがあっても well below 2°C は達成可能だとしている。つまり、イギリスの目標は正にパリ協定（そのうちでも 1.5°C）と整合的であることを強調している。以下にこの詳細があるが省略する。ただ炭素予算³³についての重要な記述があるのでこれについて採録する。本稿 6 頁の通りこの時点で第 5 次炭素予算（2028 年~2032 年平均で 90 年比 57% 減）までが決定しているが、第 6 次予算（2033~2037

³³ ここで言う炭素予算は IPCC でいう累計 CO2 排出量と気温上昇の関係ではなく、目標達成のためにイギリス政府の 5 年ごとの削減目標を指す。

年)については2020年に予定通り勧告するが、第4次及び第5次予算についてはその時点で必要に応じて見直しを勧告するとし、現在の内容は80%削減なのでこれよりは厳しいものになる可能性を滲ませている。しかし本稿8頁図5の通り第5次予算自体の実現の政策が出揃っていない現状で、この内容を更に厳しくしそれを実行することが可能かどうか疑問のあるところである。

CCCによる上記勧告を受けて翌月イギリス政府は一部修正(国際航空・海運の除外、国際クレジット利用の可能性を残す)の上この勧告を受けて気候変動法の目標修正を行った(UK 2019)。以上がイギリスの2050年 net-zero-emission target の内容である。

(参照文献)

CCC (2019a), “Net Zero; The UK’s contribution to stopping global warming”, Committee on Climate Change, May 2019

<https://d423d1558e1d71897434.b-cdn.net/wp-content/uploads/2019/05/Net-Zero-The-UKs-contribution-to-stopping-global-warming.pdf>

CCC (2019b), “Net Zero Technical Report”, Committee on Climate Change, May 2019

<https://d423d1558e1d71897434.b-cdn.net/wp-content/uploads/2019/05/Net-Zero-Technical-report-CCC.pdf>

CCC (2019c), “Technical Annex: Integrating variable renewables into the UK electricity system”, 2019

<https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2019/05/Net-Zero-Technical-Annex-Integrating-variable-renewables.pdf>

CCC (2018a), “Biomass in a low-carbon economy”, Committee on Climate Change, November 2018,

<https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Biomass-in-a-low-carbon-economy-CCC-2018.pdf>

CCC (2018b), “Hydrogen in a low-carbon economy”, Committee on Climate Change, November 2018,

<https://d423d1558e1d71897434.b-cdn.net/wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy.pdf>

CCC (2018c), “Land use: Reducing emissions and preparing for climate change”, Committee on Climate Change, November 2018

CCC (2016), “Meeting Carbon Budgets – 2016 Progress Report to Parliament”, Committee on Climate Change, June, 2016

<https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2016/06/2016-CCC-Progress-Report.pdf>

CCC (2015), “The Fifth Carbon Budget, The next step towards a low-carbon economy”, Committee on Climate Change, November 26, 2015

- <https://www.theccc.org.uk/publication/the-fifth-carbon-budget-the-next-step-towards-a-low-carbon-economy/>
- CCC (2010), “The Fourth Carbon Budget, Reducing emissions through the 2020s”, Committee on Climate Change, December 7, 2010
<https://www.theccc.org.uk/publication/the-fourth-carbon-budget-reducing-emissions-through-the-2020s-2/>
- CCC (2008), “Building a low-carbon economy –the UK’s contribution to tackling climate change”, December 2008, Committee on Climate Change
<https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2008/12/Building-a-low-carbon-economy-Committee-on-Climate-Change-2008.pdf>
- DECC (2009), “Impact Assessment of EU Climate and Energy package, the revised EU Emissions Trading System Directive and meeting the UK non-traded target through UK carbon budgets, Summary: Intervention & Options”, Department of Energy and Climate Change, April 22, 2009
http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20090908171815/http://www.decc.gov.uk/Media/viewfile.ashx?FilePath=77_20090423091800_e_@@_euclimateenergypackage.pdf&filetype=4
- Element Energy (2018), “Industrial carbon capture business models, Report for The Department for Business, Energy and Industrial Strategy”, October 2018
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/759286/BEIS_CCS_business_models.pdf
- Eurostat (2019), “Greenhouse gas emission statistics – emission inventories”, June 2019
<https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/1180.pdf>
- IEA (2019), “World Energy Outlook 2019”, International Energy Agency, 2019
- IEA (2017), “Energy Technology Perspective 2017, Catalysing Energy Technology Transformations”, International Energy Agency, 2017
- IPCC (2019), Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (SRCCL), August 2019
- IPCC (2018), “Global warming of 1.5°C, An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty” October 2018, <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- UK (2019), The Climate Change Act 2008 (2050 Target Amendment) Order 2019, June 26, 2019 <https://www.legislation.gov.uk/ukxi/2019/1056/introduction/made>

山口光恒 (2017), 「イギリスの気候変動政策」 2017 年 3 月 31 日

<http://www.m-yamaguchi.jp/others/20170331.pdf>

山口光恒 (2014), 「イギリスの電力市場改革と日本の再エネ政策への示唆」、2014 年環境
経済政策学会発表論文、http://www.m-yamaguchi.jp/papers/20140913_14.pdf