

2°C目標の実現可能性と今後の方向

－ EMF 22 International Scenario 及び Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6 を中心に－

東京大学 山口光恒

1、はじめに－2°C目標と国際交渉

IPCC 第4次報告を待つまでもなく、温暖化対策の究極目標として具体的にどの濃度を指すべきかについての学界の合意というものは当然のことながらないが、国際交渉の場としてはソフトな形ではあるが工業化以後の気温上昇を2°C以内に抑える事が重要であるとの認識が共有されている¹。本稿ではこれを仮に2°C目標と呼ぶ。以下この2°C目標の淵源について述べた上で、その実現可能性を検討することとしたい。なお、2°C目標とは2100年時点での気温上昇ではなく、その後の均衡点でのそれを指す（後者の方が高い）。

2°C目標が初めて具体的な形で表明されたのは京都会議の前年である1996年6月の1939回EU閣僚理事会においてである。ここではEUとしては工業化以降の気温上昇が2°Cを超えるべきではないとの認識が明示されている²。EUではこれを受けてG8サミットにおいてこの目標を共通の認識とするよう主張を続けたが特にアメリカの反対を受けて不成功に終わっていた。

局面が変わったのはIPCC第4次報告書が出た2007年にインドネシアのバリ島で開催されたCOP13である。ここで採択されたバリ行動計画（UNFCCC 2008, p.3）では「世界の排出量の大幅カットが気候変動枠組み条約の究極目標達成に向けて求められることを認識し、且つ、IPCC第4次報告書にあるように気候変動への取り組みの緊急性を強調しつつ」以下を決議したとして何点かが挙がっている。ここで「緊急性」の箇所に脚注がつけられ、IPCC第4次報告書第3作業部会の技術要約39および90頁、第13章の776頁とある³。次頁表1は技術要約39頁の表、表2は13章776頁の表である。

表1では気候感度3°Cを用いて⁴安定化濃度と気温上昇の関係や、それぞれに応じた2050年の世界の排出削減割合及びそれに到達するためのピーク年を一覧にしたものであり、CO₂等価濃度（CO₂e）としては350～790ppm、気温上昇は2.0～6.1°Cの6つのカテゴリーに分けられている。他方表2を見ると、表1のカテゴリーI、III、IVに対応する先進国

¹ 気候変動枠組み条約第2条によれば、温暖化対策の究極目標は「危険でない濃度」という形で示されているが、国際交渉ではもっぱら濃度ではなく「気温」上昇幅で語られている。濃度と気温上昇の間には気候感度という大きな不確定性があるが、ここではこの点はとりあえず気候感度を3°Cとして議論を進める。また、ソフトな形という意味は、2°C以下に抑えるというのは必ずしも国際合意にはなっていない点を指す。

² “Given the serious risk of such an increase and particularly the very high rate of change, the Council believes that global average temperatures should not exceed 2 degrees above pre-industrial level ---”

³ Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Technical Summary, pages 39 and 90, and Chapter 13, page 776

⁴ 気候感度（climate sensitivity）とは大気中のCO₂濃度が2倍になった際の気温上昇を指し、IPCC第4次報告（第1作業部会意思決定者のための要約12頁）では2°C～4.5°C、最良推定値は3°Cとされている（It is likely to be in the range 2°C to 4.5°C with a best estimate of about 3°C）。第3次報告までは1.5°C～4.5°C、最良推定値2.5°Cとされていた。

と途上国の 2020 年および 2050 年の排出削減割合（先進国については 1990 年比、途上国についてはベースラインからの削減割合）が書かれている。次に技術要約 90 頁を見ると、衡平性を優先させた解釈からすると、450~550ppmCO₂e という低中位の濃度を目指すには、先進国は全体として 2020 年までに 90 年比 10~40%減、更に 2050 年には 40~95%減が必要となろうとの記述がある。表 1 ではカテゴリ I と III、表 2 では上の二つの選択肢に相当する。これをあわせて考えると、ここで念頭にある目標値としては 450~550ppmCO₂e 程度と推測され、このうち 450ppmCO₂e は 2°C 目標にほぼ相当するものであるが（気候感度 3°C の場合）、そもそもこれは脚注からの類推解釈であり、加盟国を拘束するものではない。

表 1 安定化目標に応じた濃度および気温上昇等の関係

カテゴリー	放射強制力 上昇分(W/m ²)	CO ₂ 濃度 (ppm)	CO ₂ 等価濃度 (ppm)	均衡気温上昇幅 (工業化後、°C)	ピーク年 (CO ₂ 排出量)	CO ₂ 削減率 2050/2000(%)	シナリオ 数
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000-2015	-85~-50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000-2020	-60~-30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010-2030	-30~+5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020-2060	+10~+60	118
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050-2080	+25~+85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060-2090	+90~+140	5

均衡気温上昇幅は inertia により 2100 年のそれとは異なる。気候感度は最良推定値 3°C を適用。
 IPCC/AR4/WG3/Table TS-2 から抜粋

表 2 濃度別先進国・途上国の削減割合

Scenario category	Region	2020	2050
A-450 ppm CO ₂ e	Annex I	-25% to -40%	-80% to -95%
	Non-Annex I	Substantial deviation from baseline in Latin America, Middle East, East Asia and Centrally-Planned Asia	Substantial deviation from baseline in all regions
B-550 ppm CO ₂ e	Annex I	-10% to -30%	-40% to -90%
	Non-Annex I	Deviation from baseline in Latin America and Middle East, East Asia	Deviation from baseline in most regions, especially in Latin America and Middle East
C-650 ppm CO ₂ e	Annex I	0% to -25%	-30% to -80%
	Non-Annex I	Baseline	Deviation from baseline in Latin America and Middle East, East Asia

IPCC/AR4/WG3/Ch.13/Box 13.7 より抜粋

上記はアメリカも入った気候変動枠組み条約締約国会議での行動計画であるが、同時にアメリカが入らない京都議定書加盟国会議も開催され、そこでは次の通りやや踏み込んだ内容となっている。「(京都議定書) 臨時作業部会 (AWG) は IPCC 第 4 次報告第 3 作業部会報告書がこれまでに評価した最も低いいくつかの水準を達成して潜在的損害を軽減するに

は、先進国全体として2020年に90年比25-40%の削減が必要であると示唆していることを認識した」とある(下線筆者)。表2と組み合わせると、ここでは明らかに450ppmCO_{2e}、即ち2°C目標を指している。とはいえ、これを以て世界が2°C目標に合意したとする事は出来ない。理由は第1に、2°C目標で合意したとは書いていないこと(認識しただけである)、第2に、IPCC報告書の最も低い濃度水準に達するとしたらと言うことで、最も低い水準を目指すべきだとはIPCC報告書にも書いていないこと、第3にこれが最も重要なことであるが、上記の文章は京都議定書加盟国会議での認識であり、アメリカも入ったバリ行動計画では、既述の通り濃度水準にも幅があると共に、位置づけとしても脚注の扱いと言うことである。日本の政治家の中にはバリにおけるCOP13で世界が2°C目標に合意し、従って先進国は全体として最低でも25%削減する義務があると明言していた議員もいたが、これは明らかに間違いである。

G8で2°C目標が初めて取り上げられたのは2007年夏のハイリゲンダムサミットであったが、これが宣言に初めて入ったのはコペンハーゲンにおけるCOP15を数ヶ月後に控えたラクイラサミットであった。アメリカの大統領はオバマ氏に変わっていた。しかしここでも2°C目標は合意ではなく、それが大切であるとの**broad scientific view**を認識したに止まった。しかしこの宣言は直後に同じ場所で開催されたMEF(Major Economic Forum、ここには主要途上国も含む)では受け入れられず、**broad scientific view**は**scientific view**とされ、2050年までに地球規模で50%削減するとの目標も削除された。要は途上国の経済発展を少しでも阻害する可能性のある文言についての地球規模での認識の統一は出来なかったのである。

2°C目標が国連の交渉で初めて言及されたのは2009年のCOP15である。ここでは**base year**が明記されなかったが、翌年のカンクンでは工業化以前に比べてという形で明記された。しかし位置づけは従来通り「認識」に止まった。昨年(2009年)のダーバンでは工業化以降の気温上昇を2°C(或いは1.5°C)に抑えるための排出パスと各国の自主目標(Pledge)の間のギャップの大きさに留意して、2015年までに何らかの国際合意をえてこれを2020年に発効させることの合意が成立した。

以上国際政治・交渉の場における2°C目標の扱いについてみてきた。結論的にはEUの戦略が見事に成功して少なくとも政治の場では2°C目標が唯一の目標となった感がある⁵。しかしその中身はきわめてあやふやなものと言わざるを得ない。EUは2°C目標で国際的に合意をし、それに続いてトップダウンで各国が所定期間内で法的削減目標義務を負う方式を指向しているのに対し、アメリカや日本などは2°Cはあくまで努力目標で、これを念頭に置きつつ各国が出来る範囲で全力を尽くすと考えている⁶。これに対して例えば中国などは2°C目標は受け入れるものの、2050年半減は拒否をするという矛盾した態度をとるといっ

⁵ ダーバンでの決議に1.5°Cとの言葉が見えるが、これは島嶼国等へのリップサービスで、本気でこれを実現しようと考えている政治家はほとんどいないと思う。

⁶ 本年3月アメリカの交渉代表団No.2のJonathan Pershingと国務省で面談した際、同氏はこれがaspirational(努力目標)である点を明言した。

た状況で、ダーバン決議をよく読むとこうした意向が反映されていることがよく分かる。例えば2050年半減という数値がないなどはその例である。

2、2°C目標の実現可能性

2.1 IPCC第4次報告書以前

以下2°C目標の実現可能性の検討に移る。はじめはIPCC第4次報告書（AR4）時点でこの目標がどのように扱われていたかから始める。

ここでもう一度表1のカテゴリーI欄を参照願う。これが2°C目標に対応する欄で、濃度としては450ppmCO₂eに対応している。IPCC報告書はその時点で存在している文献を元にカテゴリー分けを行っているが、カテゴリーIの基になるシナリオはカテゴリーIの最右欄の通り6つのみ⁷で（圧倒的多数のシナリオはカテゴリーIVに対応）、このうち2100年の排出量で見ると3つのシナリオがマイナス、2つがゼロ、一つだけが若干のプラスとなっている。更にこれをよく見ると6つのうちAzar et al. (2006)が3つ、Riahi et al. (2007)が1つ、van Vuuren et al. (2007)が2つ⁸ということで実際には3つの文献（モデル）のみがこのように低い濃度安定化の可能性を試みているに過ぎなかった（van Vuuren et al. 2011）。ここではまず上記3つの文献の内容をレビューしておく。

2.1.1 Azar et al. (2006)の内容

まずAzar et al. (2006)であるが、論文のタイトル（Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass – costs and potential role in stabilizing the atmosphere）にあるとおり濃度安定化に際して、化石燃料およびバイオマスからの排出についてCCS（carbon capture and storage）の果たす役割とそのコストを考察している。目標濃度はCO₂のみで350 ppm および450 ppm とされている。ここで350 および450 ppmCO₂ only はCO₂等価濃度にするとはほぼ450 および550 ppmCO₂eに相当し、2°C目標に対応するのは前者である。従って2°C目標の可能性を検証する本稿においては350 ppmCO₂ only（Azar et al.については、以下特に断りがない限り濃度はCO₂ only で表記）のみを取り上げる。

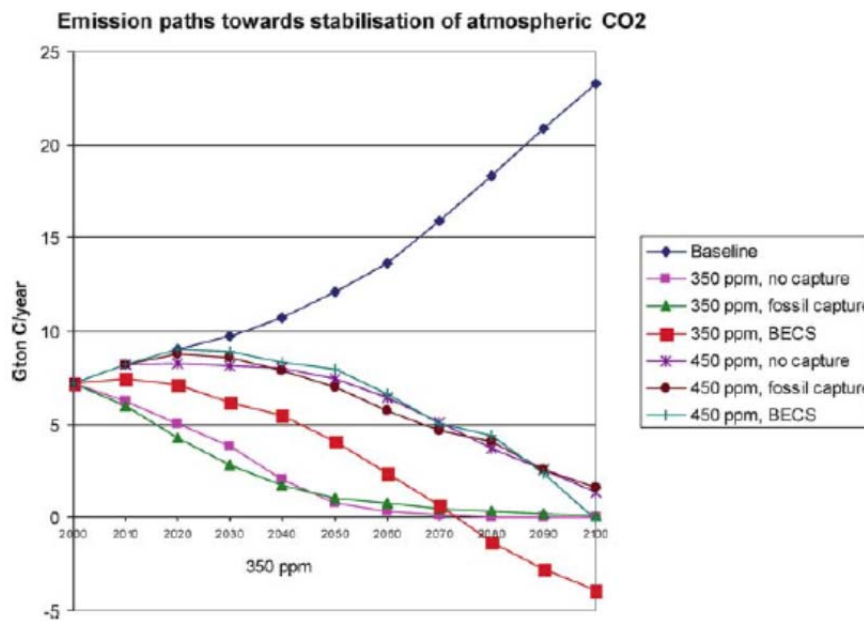
次頁図1の通り、Azar et al.は3つのケースを想定し、それに向けた350 ppm（および450 ppm）安定化への最適排出経路を示している。3つのケースとは、ケース1：全くCCSを用いない場合（no capture）、ケース2：化石燃料のみにCCSを用いる場合（fossil capture）、ケース3：化石燃料とバイオマスからのCO₂排出量の両方にCCSを用いる場合（BECS）である。図のうち下の3つが350ppmCO₂安定化シナリオである（黒はベースライン）。このうち赤はBECS、緑色はfossil capture、紫色はno captureを示す。当然のことながらバイオマスにCCSを用いる場合のみ全世界の排出量がマイナスとなり、その分だけ初期の排

⁷ カテゴリーIは2.0-2.4°Cの気温上昇なので、必ずしも全てが2°C目標に合致していない点に留意が必要

⁸ Van Vuuren et al. (2007)は放射強制力2.6W/m²と2.9W/m²の二つのシナリオをモデルで検討しているが、後者は2200年の450ppmCO₂e安定化を想定、前者はこれにBECSを加えることで2.6W/m²（2°C目標）が達成可能としている。

出量が大きくなる。

図 1 目標別最適排出経路



出典 : Azar et al. (2006) p.68

次にコストの計算であるが、コストはベースライン次第であるにも拘わらず、不思議なことにこれは 1 つしか示されておらず、その説明も何もない。図 1 から見る限りベースライン排出量の 2000 年から 2100 年にかけての伸び率は 3 倍強、2100 年の排出量はグラフからの目測で 840 億 tCO₂ (230 億 tC) 程度であるが、これは CO₂ only なので GHG としては当然これより高くなる。2°C 目標達成のための 2100 年のベースライン排出量は後述の Riahi et al. (2007) が CO₂ only で 184 億 tCO₂ と極端に低いので、Riahi et al. よりは相当高めである。また、同じく後述の van Vuuren et al. (2007) は CO₂ only では約 700 億トン CO₂ (GHG では約 830 億 tCO₂e) なのでこれよりも高い。つまり、特段低いベースラインを想定しているわけではない。

それではケース 1~3 でどの程度コストがかかるだろうか。Azar et al. では削減のシナリオのうち電気と熱に対する需要を外生とし、IIASA/WEC の C1 シナリオを仮定している (Nakicenovic et al. 1998)。このシナリオはエネルギーに対する需要が低位、再生可能エネルギーの大幅増、国際協調が進むというチャレンジングなシナリオである。これを選んだ理由として 450 ppmCO₂ 以下での安定化を目指す場合にはこうしたシナリオを仮定することは合理的 (reasonable) であるとしている。1 次エネルギー供給を見ると、no capture では 2030 年頃までは石炭・石油・天然ガスが過半を占めるが、その後バイオ燃料および特に太陽エネルギーによる電気分解等による水素エネルギー (solar hydrogen) が大きく伸び、2100 年には solar hydrogen (SH) だけで過半を占める。Fossil capture では SH の伸びは 2060 年代へと遅くなり、BECS では更にこの比率が下がるという構図である。CCS 無しでも (モデル上は) 350ppm 達成可能というこの論文の鍵は SH にある。No capture では SH

導入が2020年以前から始まっているが、これは技術的にきわめて **Challenging** な仮定である。

さて **350 ppm** 安定化のエネルギーシステムコスト⁹ (ベースラインと安定化シナリオとの差) であるが、論文では2000年から2100年にかけての累計コストは **no capture** で26兆ドル、**fossil capture** だと13兆ドルと半減し、**BECS** では6.1兆ドルである(5%の割引率で2000年の現在価値に換算したもの、**overshoot** を前提としている¹⁰)。なお、年間エネルギー需要増加率が想定よりも0.5%高い高エネルギー需要シナリオをベースラインとした場合には、**no capture** で46兆ドル、**BECS** で17.5兆ドルと大幅に高くなる。

GDP比で見ると、**no capture** だと2030年代にコストの急増(SHへの追加投資)で5%程度まで増加する(これは事実上許容不可の水準だと思う)など相当高い時期があるが、2100頃には3つのシナリオとも2~3%程度に収まる見込みと試算されている。

Azar et al.は結論として、**CCS** とりわけ **BEC** の導入による大幅コストダウンは「多くの人が実現可能と考えていたよりも更に低い濃度(例えば従来実現不能として検討対象から外されていた **350ppm**)の実現可能性を示唆するものである」としている。その上で、**BECS** はコストを大幅に下げる効果はあるものの、この場合初期の **CO2** 排出量がかなり大きくなることによる悪影響、また、**CCS** については安全性の問題(物理的場所及び社会的受容性)もある点に留意すべきであると結んでいる。

上記をまとめると、**CCS** 無しで **350 ppmCO2** 目標(2°C目標にほぼ対応)達成は、物理的・経済的に実現可能性がほぼ無いこと、**CCS** 有りの場合でも仮に高位エネルギー需要ケースでは、経済的に実現不能と考えていること、更に **BECS** の導入によりコストは大幅に下がるが、高位エネルギー需要ケースではコストが跳ね上がること、また、特に **BECS** には解決しなければならない問題が他にあること、となる。つまり **350ppmCO2 only** を達成する3つのシナリオのどれもが物理的・経済的に限界的なものであることが分かる。それにもかかわらず **IPCC** が表1で Azar et al.の3つのシナリオの全てをカテゴリー I に数えたと言うことは、実現可能性の吟味はなかったと言うことである¹¹。

2.1.2 Riahi et al. (2007)の内容

次に Riahi et al. (2007)では2°C目標はどのように可能となっているのだろうか。この論文はまず執筆時点での **CO2** 濃度が **380ppm** に迄上昇しているとの現状認識から始まる。対象としているのはエネルギー、産業、農業、森林の4部門である。その上で3つの排出量

⁹ ここでコストとはベースラインに比したエネルギーシステムの追加コストを指す(GDPロスではない)。

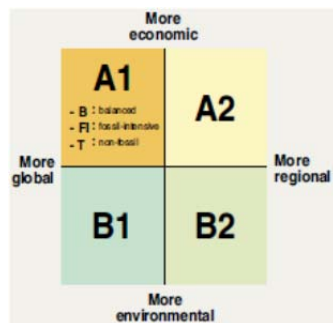
¹⁰ この他コスト計算に際しては、バイオエネルギー生産のために利用可能な土地(5億ヘクタール)とそれに伴うバイオエネルギーの最大潜在量(年間200EJ)、原子力(現状維持)、間欠性の太陽光と風力は合計して電力需要の30%以内など各種の仮定をおいているが、詳細については原文参照。なお、**overshoot** の度合いは **no capture** だと2030年に400ppm、**BECS** では2040年に430ppmがピークとなる。

¹¹ **IPCC** 報告書自体は査読つき論文であれば、特におかしなものでない限り基本的に引用が可能であるので、この点についての瑕疵があるわけではない。むしろ報告書を基にそれを直ちに目標にしようとした政治家の判断に問題があったと言うべきであろう。

ベースラインを設定し、2100年までに480~1390 ppmCO₂eで安定化する11のシナリオについてその実現可能性とコストの検討を行っている。この中で削減オプションとして（Azar et al.と同じく）従来のシナリオには含まれていなかったバイオマスとCCSの組み合わせ（BECS）を取り入れている。

3つのベースラインであるが、SRESベースラインシナリオが中心となるので先ずはこのイメージを下記に記す。図2で上方は経済成長重視、下側は環境重視、左はグローバル化、右は地域重視のシナリオである。A1は化石燃料中心のA1FI、非化石燃料中心のA1T、及びその中間のA1Bの3つに分かれている。排出量の多い順に並べるとA1FI、A2、A1B、B2、A1T、B1となる。

図2 IPCC/SRES ベースラインシナリオのイメージ



IPCC (2001)から抜粋

Riahi et al. (2007)では、上記IPCC/SRESのA2シナリオを修正したA2r、そしてB1、B2シナリオを用いている。このうち人口増加率が最も高いが技術進歩率は低く、資源効率も低くて排出が最も多いのはA2r(2100年の人口は120億人)、反対に人口はそれほど増加せず技術進歩率が早く、エネルギー原単位が低く排出が低いのはB1(同70億人)、この中間がB2(同104億人)である。ベースラインのCO₂排出量は図のみの表示なので正確な数字はつかめないが、2100年の排出量はA2rが1000億tCO₂、B2が510億tCO₂、B1は184億tCO₂程度で、B1はベースラインでの2100年の排出量が2000年の排出量に比べて4割以上も低いという極端なシナリオである。因みに2100年のCO₂e濃度はA2rが1630ppm、B2が983ppm、B1は792ppm、気温上昇は各4.0℃、3.1℃、2.7℃である¹²。

上記の3つのベースラインを基に、A2rについては1390~670の5つ、B1については670~480の4つ、B2については670と520の2つ(いずれもppmCO₂e)の安定化目標(この論文では2100年までとある。893頁)について技術的側面やコスト面からの検討をしている¹³。このうち本稿のテーマである2℃目標達成が何とか可能なのはB1を基にした

¹² 濃度と気温上昇の関係から見る限り気候感度はIPCC第3次報告書までの最良推定値2.5℃以下を用いたものと推定される(論文ではこの点に関する記述はない)。この場合、現在の最良推定値3℃を用いると気温上昇幅はこれより大きくなる。

¹³ ここで注意が必要なのはベースライン排出量の高いA2rシナリオでは最も低い安定化シナリオでも670ppmCO₂eが技術的に下限である反面、B1シナリオではこれが最も高い安定化シナリオとなっていること

480 ppmCO₂e 安定化ケースのみである¹⁴。この論文はこの分野で定評のあるウイーンの IIASA (International Institute for Applied System Analysis) の研究者によるものであるが、彼らのモデルでは社会の急速な脱炭素化によりベースライン排出量がこれほど低く低下しない限り、480ppmCO₂e (2°C目標) は困難と言うことではないかと思う。

各安定化シナリオについて 10 の技術の貢献度を計算しているが、このうち 480 ppmCO₂e 安定化シナリオに関してみると、風力・太陽光などの再生可能エネルギー、BECS、メタンの順となっている。つまり 2°C目標達成には再生可能エネルギーおよび BECS の大幅増が必須である (Riahi et al.では Azar et al.と異なり BECS なしでの 480ppmCO₂e の実現可能性の検討は行っていない。B1 のベースラインシナリオであっても BECS 無しでは不可能と言うことだと思う)。

次はコストである。まずエネルギーシステムコスト (2000-2100 年の累計、割引率 5%) は、B1 で 480ppmCO₂e 目標の場合には 44.3 兆ドルであるが、ベースラインシナリオの達成に既に 40.6 兆ドルもかかっている。しかし A2r で 670ppmCO₂e 安定化の場合にはベースラインでの安定化コストを加えると 52.0 兆ドルとなる。コストはあくまでベースライン次第であることが分かる。

次に GDP ロスはどうか。B1 で 480 ppm 達成コストは GDP の 0.3%程度ときわめて低い。これは B1 の 2100 年の GDP が例えば A2r のその 2 倍近くであるという点が影響している。さらに、A2r での最低値である 670 ppm、あるいは B2 でのその 520ppm に安定化するシナリオでは GDP の 4~4.5%に達する事を勘案すると、コストの多寡はまさにベースライン次第である。B1 で描くような社会を築けるかどうかは 480 ppm 安定化達成の鍵を握っている。

2.1.3 van Vuuren et al. (2007)の内容

IPCC /AR4 の 6 つのシナリオに含まれる最後の二つのシナリオについてごく簡単に触れておく。Van Vuuren et al. (2007) は前掲 IPCC/SRES の B2、B1、A1B ベースラインシナリオを基にこれを update したシナリオ (IMAGE2.3 の B2、B1、A1b シナリオと呼ぶ) を用いて 450 ppmCO₂e (2.9W/m²) あるいは更にそれを上回る 400 ppmCO₂e (2.6W/m²) の実現可能性とコストを検討している (両方とも overshoot あり)。ベースラインは SRES

である。ベースラインの仮定が如何に重要かを如実に示すものである。

¹⁴ 表 1 のカテゴリー I の 6 つのシナリオは 2100 年時点での 2°C目標達成のシナリオではなく、放射強制力上昇幅が 3.0W/m²以下のシナリオである。例えば Riahi et al. (2007)では B1 をベースラインとした 480ppmCO₂e (この場合の放射強制力は 2.8W/m²、2100 年の気温上昇幅は 1.6°C) 以外に、同じベースラインで 520ppmCO₂e、また、B2 ベースラインで 520ppmCO₂e の 2100 年の気温上昇幅はそれぞれ 1.8°C 及び 1.9°Cであるが、放射強制力上昇幅は両方とも 3.2 である (912 頁)。Den Elsen が 2008 年に東京大学の国際会議で発表した資料の中にカテゴリー I の 6 つのシナリオの明示があり、ここでは Riahi et al.からは B1 の 480ppmCO₂e のみが入っている。気温上昇幅については気候システムの慣性 (inertia) により均衡点に達するまで更に上昇を続けること、また、上昇幅は気候感度によって異なること (当時の最良推定値は現在の 3°Cではなく 2.5°Cであった)があるからではないかと思われる。こうしたことから本稿では、この論文のシナリオのうち 480ppmCO₂e のみを 2°C目標適格として扱う。これに関連して次頁の van Vuuren et al. (2007)の記述も参照。

シナリオ発表（2000年）以後の排出の伸びを勘案して、いずれも排出量を上方修正している。この論文で取り上げている3つのシナリオを排出量が大きい順に並べるとA1b、B2、B1である。B2ベースラインシナリオではGHG排出量は現時点での100億tCe（367億tCO₂e）から2100年には230億tCe（844億tCO₂e）に伸び、同年の濃度は925ppmCO₂e、気温上昇は3℃（但し気候感度2.5℃の場合）とされている。

Van Vuuren et al. (2007) は中庸シナリオであるB2ベースラインを用いて450、550、650 ppmCO₂e安定化の可能性とコストと検討しているが、ここでは450 ppmのみ取り上げる。この場合、一旦510 ppmまでovershootし、その後2200年までに450 ppmで安定化する事を想定している（気温上昇幅では2100年には1.7℃、この時の濃度は479ppmCO₂e、その後の均衡時点では2℃の上昇となる（同論文、表3）。これを前提にすると、450 ppmCO₂e安定化はBECSを利用しないでも達成可能であり（但し原子力と化石燃料のCCSは利用）、その場合のB2に比したGDPロス率は1.1%である（割引率5%、同論文、図8）。当然コストはベースラインによって異なる。なお、この論文ではエネルギーシステムコストの言及はないが、かわりに限界削減費用のグラフがある。それによると炭素価格は2050年までに急速に\$160/tCO₂ 迄上昇し、2100年には\$220/tCO₂ 程度になると試算している（同、図7）。なお、削減の技術としては化石燃料のCCS、太陽光・風力・原子力が大きく、2030年以前に排出のピークを迎えねばならない。

Van Vuuren et al.は更に続いて400 ppmCO₂eの達成の可能性を探り、B2ベースラインのままBECSのみを追加することで、GDPロス割合をほぼ変更することなくこれが可能だとしている。なお、450、400 ppmCO₂e安定化に関しては、CCSが確立した技術ではない上に、潜在削減量の面でも不確実性があることに注意が向けられている。さらに、より大きな要素として、このように大幅削減を可能とする社会・経済・政治条件の整備が唱われている。

以上IPCC/AR4以前の論文のうち曲がりなりにも2℃目標（表1のカテゴリーI）を可能とする6つのシナリオ（3本の論文）を検討してきた。このうち3つはBECSを用いてマイナス排出とするもの、あとの3つは早急に排出削減を開始し、このうちの2つは化石燃料のCCSを用い、残る1つはsolar hydrogenに頼ることで目標実現が可能とするものである。これらいずれも仮にベースライン排出量が高い場合には目標達成は不可能となる。しかしこれらすべてのモデルの前提は世界ベースで直ちに法的義務を負って排出削減対策を始め、しかも税または国際排出権取引ですべての国の炭素価格が均等化する（最小費用での目標達成）というものである。つまり最も実現可能性がない前提を基に450 ppmCO₂eの達成を可能とする研究で、現時点から見るといささか現実離れしている。このあたりに焦点を当て、国際交渉の実際を踏まえ、国際的なプロジェクトを組んで2℃目標の実現可能性を追求したのが次に述べるEMF22国際比較プロジェクトである。

2.2 EMF22 国際比較プロジェクト

AR4の公表と同年末のバリ行動計画に報告書から2つの表(本稿の表1及び2)が参照されたことから、表1のカテゴリーI(2°C目標に対応するシナリオ)への関心が急速に高まった。こうした中で2009年にEnergy Economics誌に発表されたのが10のモデルによるEMF22国際シナリオ比較プロジェクトの結果である(Cl Clarke et al. 2009)。この論文がプロジェクト全体の総括であるのでまずこの概要を紹介し、必要に応じて個別モデルの検討に進むこととする。

2.2.1 EMF22 国際比較プロジェクトの概要—Clarke et al. (2009)

このプロジェクトは世界の主要な10のモデルにより、

- 1) 温暖化対策の長期安定化濃度目標(CO₂eで表す)達成可能性
- 2) この目標達成に向けてのovershootの有無
- 3) 排出削減面での国際協調(途上国の参加遅延の影響)

という国際交渉上有益な要素に関する情報を提供することを目的にしている。具体的には長期安定化目標として450、550、650 ppmCO₂eを設定し(これらは放射強制力で見るとそれぞれ2.6、3.7、4.5W/m²に相当する¹⁵)、これを2100年までに達成する前提でモデルを解いている(なお、ここで450 ppmCO₂eは(均衡)気候感度を3°Cとすると2°C目標と整合的であるので、2°C目標の達成可能性は450 ppmCO₂eの達成可能性を見ればよい。これはCO₂濃度で見るとほぼ現在の濃度に相当する)。3種類の長期目標を設定した上で、当該濃度目標達成までに一度もその濃度を超えないケース(overshootなし)と途中で一旦この濃度を超えるが2100年までにはこの濃度で止まるケース(overshootあり)の2つのケースを設ける。その上で、当該目標に向けて2012年に全ての国が参加するケース(全ての国が絶対量での排出上限—Cap—を負うケース、以下full participationという意味でFP、この場合世界の炭素価格は同一)と、世界の国を3つのグループに分け、第1グループ(先進国からロシアを除いたグループ、以下先進国)は2012年に直ちにCapを負って炭素税により削減を開始、第2グループ(ブラジル、ロシア、インド、中国、以下BRICs)は2030年にCapを負って先進国グループに参加(炭素価格は当初は低く、2050年までに先進国と同一となる)、それ以外の途上国(以下第3グループ)は2050年にCapを負って国際枠組みに参加する(炭素価格は参加時点では低いが、2070年に先行の二つのグループに追いつく)ケース(以下delayed participationという意味でDP)に分ける。現実の交渉を見ると2012年どころか2020年においてもBRICsが排出絶対量のCapを受け容れて国際枠組みに参加することは考えにくく、先進国でも特にアメリカが2012年からCapを負って先進国間で排出権取引に参加するか、目標達成に必要な共通炭素税率を受け容れることはまずあり得ない。こうした点から特に3番目のDP(Delayed Participation)の仮定は、このプロジェクトの有用性を飛躍的に増している。

¹⁵ 濃度(ppmCO₂e)と放射強制力の関係は本稿を通して全て同じ。

上記から 3 種類の目標、overshoot の有無、枠組みへの参加については FP と DP の二つの合計 12 通りの組み合わせ（ただ、650ppm については overshoot の必要がなくこれを外しているため実際には 10 通り）につき各モデルの結果を比較している。なお、ここでは対象を京都議定書対象の 6 ガスに絞っている（つまりエアロゾルなどの寒冷化効果物質は除外している点に注意が必要）。

このプロジェクトについても 1 点重要な前提を指摘しておく。ここでは全てのシナリオについて次のような場合については目標達成を不能としている。

- A) 物理的実現不能性、遅れて参加の BRICs とその他途上国が削減を開始する前に放射強制力目標を超えてしまうので、この目標がモデルの上で実現不能となる場合
- B) モデル上の問題、CO₂ 価格が高かモデル上の上限値を超えてしまう、あるいはエネルギー部門のような基幹部門での変化率が一定範囲を超えるなどによりモデルが解けなくなる場合
- C) 初期の炭素価格、先進国の 2012 年の CO₂ 価格がトンあたり \$ 1000 を超える場合

上記の制約条件は十分合理的と思われる。例えば最後の条件についてみても、本年の(少なくとも先進国の)CO₂ 価格がトンあたり \$1000 を超えるなどと言うのは政治的に実現可能性は全くないという点について疑義を挟む人はいないであろう。

上記の制約条件をおいた上で 10 のモデルの 14 のシナリオ¹⁶について実現可能性を一覧にしたものが表 3 である。ただし 650ppm 目標は除いてある。

表 3 濃度目標別達成可能性とその条件

Model	550 CO ₂ -e				450 CO ₂ -e			
	Full P.		Delayed P.		Full P.		Delayed P.	
	Overshoot あり	Overshoot なし	Overshoot あり	Overshoot なし	Overshoot t あり	Overshoot なし	Overshoot t あり	Overshoot なし
1 ETSAP-TIAM	+	+	+	+	+	+	+	X
2 FUND	+	+	+	+	+	X	X	X
3 GTEM	+	+	+	X	+	X	X	X
4 IMAGE	+	+	+	+	X	X	X	X
IMAGE-BECS	N/A	N/A	N/A	N/A	+	X	X	X
5 MERGE Optimistic	+	+	X	X	X	X	X	X
MERGE Pessimistic	+	+	+	+	X	X	X	X
6 MESSAGE	+	+	+	X	+	X	X	X
MESSAGE-NoBECS	+	+	N/A	N/A	+	X	X	X
7 MiniCAM-Base	+	+	+	X	+	+	+	X
MiniCAM-LoTech	+	+	+	X	+	X	X	X
8 POLES	+	+	+	X	X	X	X	X
9 SGM	+	+	+	+	X	X	X	X
10 WITCH	+	+	+	+	X	X	X	X

出典：Clarke et al. (2009)より抜粋、
 +は実現可能性あり、Xは無し、モデルの水色は BECS ありを示す。

一見して明らかなおおりに、(気候感度が 3°C の場合に) 2°C 目標に相当する 450 ppmCO₂e での安定化は DP の場合 Overshoot なしでは不可能であり、Overshoot ありでも僅か二つ

¹⁶ 表 3 の 4、5、6、7 の 4 つのモデルがそれぞれ二つのシナリオで検討している。

のモデルがこれを可能としているに過ぎない（カナダの ETSAP-TIAM とアメリカの MiniCAM-Base）。事情は FP になると若干は好転し、この二つのモデルでは Overshoot 無しでも可能となるが、FP で overshoot ありだと半数を超えるシナリオで実現可能となる反面、6 つのシナリオでは相変わらず不可能とされている。表 1 のカテゴリーⅢに相当する 550ppm（気温上昇幅は 3 度程度）では FP では全てのシナリオが実現可能となるが、DP で Overshoot なしでは半数のシナリオが実現不能としている点は注意が必要である。

以上は表 3 の単なる解説であるが、国際交渉の現実を見ると、2012 年(或いはその数年遅れ)で、FP とは言わないまでもアメリカと BRICs を加えて絶対量の排出 Cap で合意すると考える専門家はほぼ皆無であろう。ましてや現下の経済状況を考えるに於いておやである。このように考えてくると、表 3 から FP を除外した方が状況ははっきり見える。この場合 450 ppmCO₂e はほぼ達成不可能、550 ppmCO₂e できえ、Overshoot 無しだとこれを可能とするシナリオは半分しかない。

ここで技術的側面の考察に移る。上記の 14 のシナリオのうち EU の FUND モデルは技術の内訳を示していないのでこれを除く 13 についてみると、原子力は全てのシナリオで採用しており、化石燃料からの CCS も MiniCAM の low-tech シナリオ以外は全て利用する形をとっている。しかし意欲的な目標の達成には今世紀後半で排出をマイナスにする手段が必要で、それに必要な技術は BECS である。実際 DP でも overshoot ありなら 450ppm 達成可能とした ETSAP-TIAM と MiniCAM-Base の二つはこの技術を想定している。しかし BECS を採用しているシナリオは他に 3 つあるので、BECS のみが DP、overshoot ありで 450ppm 達成が可能となる原因とは言えない。

実現可能性を見るもう一つの要素は排出削減の程度である。表 3 から FP、DP を問わず 450ppm 目標を可能としたシナリオは 12 あるが、これらについて 2050 年の CO₂ (GHG ではない) の 2000 年比の削減量を見ると、9 つが 6 割以上の削減率で、このうち 8 割以上も 5 つある (Clarke et al. 2009, p. S69)。FP で overshoot ありの場合豪州の GTEM と EU の MESSAGE の二つのシナリオでは 2050 年の削減割合が 2 割以下と少ないが、GTEM は土地利用による吸収を大きく見積もっているのでこの分 CO₂ への負担が少なく、MESSAGE は今世紀前半 overshoot の程度が最も大きく、2060 年には 590 ppmCO₂e まで overshoot するシナリオである。こうした点からは overshoot の程度も実現可能性に影響してくるが、逆にこれが大きいと環境への悪影響が大きくなるとの難点が表面化する。

上記以外に 450 ppmCO₂ の実現可能性に影響を及ぼす要因として、京都ガス以外のエアロゾル（厳密にはその一部である sulphate）のような寒冷化物質の影響を加味する考え方もある。しかし Clarke et al. では化石燃料の使用が激減する中で sulphate も減少するとの理由で大きな影響は及ぼさないとしている。

2.2.2 EMF22 国際比較プロジェクト—個別モデルの特徴

上記の通り 2 つのシナリオのみが DP であっても overshoot 許容ならば 2100 年に

450ppm が可能としているので、その理由をもう少し詳細に探ってみる¹⁷。

MiniCAM-Base モデル

まず MiniCAM-Base モデル (Calvin et al. 2009) から始める。これは Katherine Calvin が First Author となっているが、共同執筆者として Jae Edmonds や Leon Clarke などこの道の第一人者が加わったモデルである。

ベースライン (論文では Reference) シナリオは次の通りである (この点については特段の明記がない限り Calvin et al. (2009) の記述による)。人口は今世紀半ばで 90 億人に達するが、2095 年には 85 億人に減少する。世界の GDP は 2005 年価格で 1990 年の 27 兆ドルから 2095 年には 330 兆ドルにまで増加する (Clarke et al. 2008)。Renewables は伸びるものの化石燃料は 2095 年で 75% と相変わらず主流である。バイオエネルギーは廃棄物が主流で、土地利用としては主としてバイオエネルギーの拡張のために森林面積は今世紀を通して若干減少する。上記の結果 CO₂ 排出量は、土地利用変化に伴う排出は穀物の生産性向上に伴い 2005 年の 40 億トンから今世紀末には 10 億トン程度に減少し、エネルギー起源では約 280 億トンから 2095 年には 780 億トンに増える。この通り特に低いベースラインを想定しているわけではない。それなのに overshoot ありとはいえず、なぜ DP で 2.6W/m² = 450ppmCO₂e (≒2°C 目標、但し気候感度 3°C) が達成可能となるのだろうか。これを可能とする条件は次の通りである。

- 1) グループ 2 および 3 が遅れて義務を負う際の Cap は Dramatic な削減目標であること。
(なお、このシナリオではグループ 2 が義務を負うのは 2030 年ではなく 2036 年とされ、グループ 2 の構成もほかのシナリオとは異なっている¹⁸)
- 2) 先進国は 2050 年までに、全世界では 2100 年までにマイナス排出量を達成すること、
このためには BECS の広範な利用が必要
- 3) CO₂ 価格は 2012 年に \$50/t、最終的には \$2000/tCO₂ となる。土地利用を含めてすべての排出に課税

上記の 2) に関連して GHG およびエネルギー起源 CO₂ 排出量をみると図 3a、3b の通りで前者では 2060 年代前半、後者はそれよりも若干早めに世界の排出量がマイナスに転じる必要があることがわかる (少し見にくいですが黄色の点線、基準年 2005 年)。さらに、主要途上国であるグループ 2 が義務を負って国際枠組みに参加する 2035 年以後 GHG、CO₂ ともに排出量が激減するが、果たしてこれは可能であろうか。むしろこれが可能とならねば、DP では overshoot を許容したとしても 450ppmCO₂e は不可能であると言う明確なメッセージのように読める。

¹⁷ MiniCAM-LoTech シナリオでは CCS、電気・水素自動車、バイオ燃料なしで、DP の場合には 450ppm どころか 550ppmCO₂e も達成不能である。

¹⁸ このシナリオではグループ 2 としてロシア、インド、中国に加えて、ブラジルではなくラテンアメリカのすべての国が含まれる。

図 3a 目標達成に向けた GHG 排出量

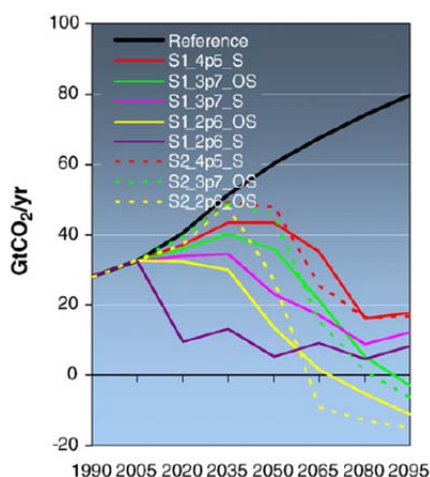
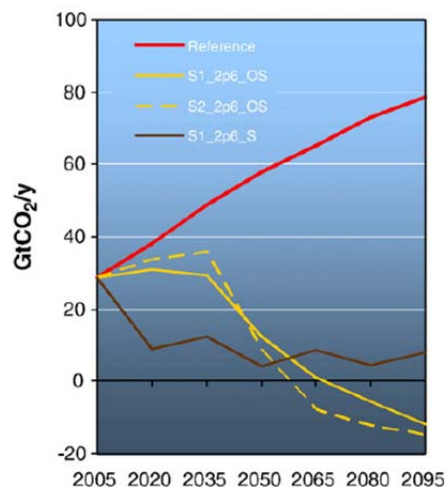


図 3b 目標達成に向けた CO2 排出量



出典：Calvin et al. (2009)

DP450ppmCO2e, overshoot シナリオは S2_2p6_OS で表される黄色の点線である。

図 3b (世界のエネルギー起源 CO2 排出量) に関してグループ別に排出削減割合を見たのが表 4 であるが、先進国は 2035 年には 92%削減、2050 年には排出量がマイナスに転じ、新興途上国を中心としたグループ 2 では Cap をかぶる前年の 2035 年には基準年比約 2 倍にまで伸ばすものの 2050 年には-150%と急激にマイナス排出に転じ、その他途上国であるグループ 3 は Cap をかぶる 2050 年には基準年比約 3.5 倍に達するが、15 年後の 2065 年には-122%とこちらはグループ 2 よりもさらに急速にマイナス排出に転じねばならない。果たしてこれは可能であろうか。

表 4 DP で 450ppmCO2e と達成するためのエネルギー起源 CO2 排出削減割合

	2005 年	2020 年	2035 年	2050 年	2065 年	2095 年
グループ 1	基準年	-32%	-92%	-107%	-115%	-122%
グループ 2	基準年	53%	106%	-150%	-143%	-168%
グループ 3	基準年	70%	160%	243%	-122%	-194%

出典：Calvin et al. (2009)

排出削減が-100%を超える場合は、マイナスの排出を示す

また、Clarke et al. (2009)では、overshoot ありで 2012 年からの FP シナリオのみが既存の資本ストックの減価償却前廃棄を強わず、資本設備を 15 年以内に大量に更新することを強いないシナリオであるとしている。ということは DP についてはこうしたことを強いるシナリオになっているのでコストはかなり高いはずである。実際目標達成コストの割引現在価値 (割引率 5%) は FP の 15.5 兆ドルに対して DP では 32.8 兆ドルと計算されている (Clarke et al. 2009, Table 6) ¹⁹。

¹⁹ ここではコストは限界削減費用曲線の下面積で計算している。

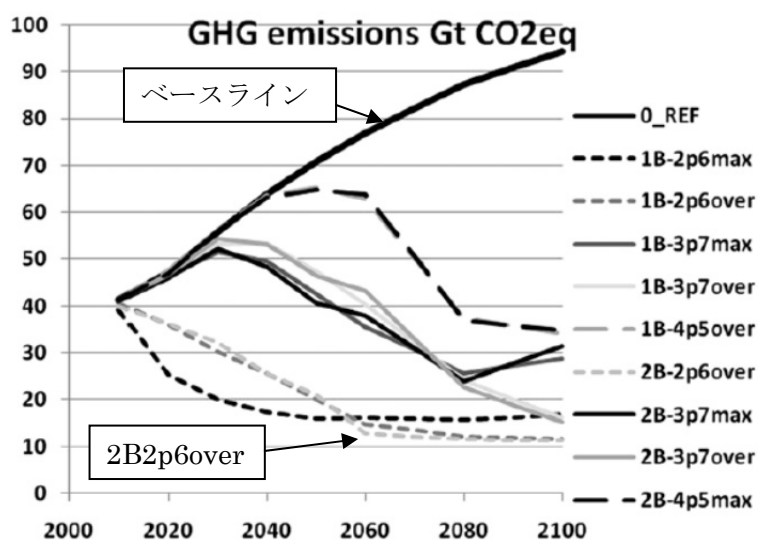
技術の観点はどうか。仮に FP で 450ppmCO₂e を達成する場合、2050 年までに 1 GW の原子力発電所累計 1938 基（うち新設 1590 基）、BECS を含む CCS で 349 億 tCO₂ 吸収（但し BECS については食糧生産との競合の問題は考慮していない）、1 MW の風力発電施設 280 万基増設（稼働率 35%、なお、原子力か CCS が活用できなければ 1400 万基）という途方もない増設が必要であるが、DP の場合にはこれを上回る技術開発が求められる。ベースライン排出量が高いだけにこれだけ技術依存度が高くなければ 450ppmCO₂e 目標の達成は困難と言うことである。実現可能性がゼロとは断言できないが、大変にきついシナリオである点を認識することが肝要である。

ETSAP-TIAM モデル

同じく Overshoot 可能であれば DP であっても 450ppmCO₂e が可能であるとしたもう一つのシナリオである ETSAP-TIAM モデルを検討してみる。このモデルでも 2.6、3.7、4.5W/m² の 3 つの目標達成のシナリオを取り扱っているが、以下では 2.6W（つまり 450ppmCO₂e）目標で DP の場合に焦点を当てる。

ベースライン排出量については京都議定書の下での先進国の目標や EU の 2020 年 20% 削減目標など、すでに決まった対策は考慮済みとあるだけで、具体的な説明はない。唯一 GHG 排出量のみが対策ごとの排出量とともにグラフの形で示されているのでこれをそのまま示す（図 4 の一番太い線）。これを見ると現在から 2100 年にかけて排出量が 2.3 倍程度に増える事とされており、この前の MiniCAM-Base に比べて若干低い程度で大差はない。なお、本稿で取り上げている DP 450ppmCO₂e, overshoot シナリオは図では凡例の上から 7 つめの 2B2p6over と表示されている薄い点線である。

図 4 ベースラインおよび濃度目標ごとの GHG 排出量



出典 : Loulou et al. (2009)

このシナリオでは原子力、CCS、BECSの活用も考慮されているにも拘わらず、図にあるようにDPで450ppm達成シナリオでもGHG排出量はマイナスにはなっていない。Clarke et al. (2009)の図4に各シナリオのCO₂排出経路があるのでそれを見ると、CO₂自体はBECSでマイナスにはなっているものの、その程度はMiniCAM-Baseに比べて遙かに少ない。その他のガスを合計して排出量がプラスになっている事がわかる。

次にコストである。ここでコストとは投資コストではなく、ベースラインに比した総余剰減少 (loss of total surplus) を指す。DP 450ppmCO₂e シナリオのコストの割引現在価値 (割引率5%) は43.1兆ドルと550ppmCO₂eの4兆ドルの10倍以上に達する。これを地域グループ別に見ると先進国 (グループ1) が5.8兆ドル、BRICs (グループ2) が23.7兆ドル、その他途上国 (グループ3) が13.7兆ドルと2030年に急激な排出減少を迫られるBRICsのコストが際立っている (その他途上国のコストがそれに次いで高いが、これは脱炭素化の進展に伴う化石燃料の需要減で輸出価格が下落するからである)。もう1点、DP 450ppmCO₂e シナリオとFP 450ppmCO₂e シナリオのコストを比べると43.1兆ドルと20.4兆ドルでDPのコストが倍以上となっている。このことから仮にDP 450ppmCO₂e シナリオがfeasibleとしても、相当なコストを覚悟する必要があることが分かる。

MiniCAM-Baseの割引現在価値のコストについては既述の通りMAC曲線の下側の面積での計算であるが、これと同じベースでETSAP-TIAMを比較すると、前者の328兆ドルに対して後者は786兆ドルと2.4倍となる。各種前提に相違があるので単純な比較はできないが、この差は前者がBECSを大幅に活用している点にあるのではないかと思う。

この点は炭素価格に如実に反映されている。Clarke et al. (2009) Table5に2020年時点のシナリオ別CO₂価格一覧表が掲載されているが、これを見るとMiniCAM-Baseが\$53であるのに対してETSAP-TIAMは\$1297と極端な差がある。2.2.1で述べたとおり、EMF22国際比較プロジェクトでは実現不能とする3つの条件があるが、このうちの 하나가先進国の2012年のCO₂価格がトンあたり\$1000を超える場合である。\$1297は2020年時点であるが、実現不能と判定されるのにかなり近いシナリオであったと推定できる。

以上DP、overshootありで450ppmCO₂e達成可能とした二つのシナリオについて検討してきた。結論としては、MiniCAM-Baseについては目標達成に必要な条件を満たすのがきわめて厳しいこと、ETSAP-TIAMについてはなんと言ってもコスト面から相当な無理を強いられ、数ある世界の緊急課題の中でそれほどまでに温暖化対策にコストをかけて450ppmCO₂eを実現することは政治的に困難と思われること、からいづれも実現は難しいと考えざるを得ない。

IMAGE モデル

EMF22国際比較プロジェクトに参加したシナリオのうち、もう一つきちんとみておく必要があるシナリオがある。それはvan Vliet et al. (2009)にあるIMAGEモデルのシナリオである。AR4以前に2°C目標を可能とした6つのシナリオのうち2つがIMAGEモデルに

よるものである。このときは SRES の中庸シナリオである B2 をベースラインとし、FP を前提に、原子力・化石燃料の CCS ありで 450ppmCO_{2e}、これに BECS を加えると 400ppmCO_{2e} も可能としていた。

Van Vliet et al. (2009)では FP と DP の両ケースを対象に、2100 年までに 4.5、3.7、2.9、2.6W/m² 目標達成のためのシナリオ分析を行っているが、ここでは 2°C目標との関連で 2.6W/m²のみを対象とする。ベースラインは van Vuuren et al. (2007)と同様原則として中庸シナリオである SRES の B2シナリオを用いている。BECS あり (IMAGE-BECS) となし (IMAGE) の 2 種類のシナリオを走らせているが、2.6W/m²=450ppmCO_{2e} については結論として、FP の場合で、overshoot あり、バイオエネルギーあり、CCS も使える場合 (IMAGE-BECS) のみ達成可能であるとしている。基本的に 2007 年の分析と同じ結果であるが、2009 年の分析での新たな知見としては DP の場合には BECS を活用しても達成不能としている点である²⁰。

論文の最後の方で EMF22 の限界を指摘している。このうちいくつかを挙げると、EMF22 が京都ガスのみを対象としているが、それ以外の温暖化物質を考慮すれば達成可能性が若干は向上するのではないかと、BRICs (グループ 2) が 2030 年、その他途上国が 2050 年から Cap を負って国際枠組みに参加との共通条件で計算したが、それまではベースラインで排出が増えるとしている。この点もう少し違う仮定をおいても良いのではないかと、IMAGE モデルには森林破壊による排出防止対策が含まれていないが、こうした点を入れると実現可能性が少しは向上するのではないかと、というような点である。今後の検討課題である。

上記から EMF22 国際比較プロジェクトに関する限り DP では overshoot ありであってもほとんどのモデル・シナリオが 450ppmCO_{2e}≒2°C目標達成は実現不能とし、これを可能とする二つのシナリオも実際には極めて困難であることが分かった。FP であれば可能性はかなり増すが、2013 年からアメリカ、中国等全ての国が 2°C目標実現に向けて排出絶対量の Cap を負い、国際排出権取引を行うという図は目下の状況から全く考えられない。とすると EMF22 プロジェクトの結果を見る限り、2°C目標は相当に非現実的であると言えよう。

3、Representative Concentration Pathways (RCP)と 2°C目標

IPCC 第 5 次報告に向けて IPCC の要請を受けて世界の気候モデルのグループが新たなシナリオ作りを開始し、その最初の段階として数ある論文のうちから典型的なものとして 4 つのシナリオが選定された。これらは Representative Concentration Pathways (一定の濃

²⁰ 1 点だけ注意が必要なのは、EMF22 プロジェクトで実現不能とする要件の一つとして炭素価格が \$1000/tCO₂ 以上になることがあった。しかし van Vliet et al. (2009)では \$1000/tC (= \$273/tCO_e) としている (p. S153 脚注の最終行)。この場合実現不能と判定される確率が高まる。ただし本文中に DP、450ppmCO_{2e} 目標シナリオでは炭素価格が \$273/tCO₂ を超えるばかりではなく、overshoot ありで BECS が投入されても途中参加のグループに極端なマイナス排出を強いることになるので物理的に不可能としているので DP の 450ppmCO_{2e} が実現不能である点は不変である (p. 153-154)。

度安定化に向けた典型的な排出経路、以下 RCP) と呼ばれる²¹。これは 2100 年の放射強制力 8.5、6.0、4.5 及び 2.6W/m² の 4 種の目標に向けた典型的な排出経路であり、それぞれオーストリアの IIASA、日本の国立環境研究所、アメリカの PNNL (Pacific Northwest National Laboratory) /メリーランド大学、そしてオランダの Environmental Assessment Agency の 4 つのチームの排出経路である。これらは RCP 8.5、RCP 6.0、RCP 4.5、RCP 2.6²² と呼ばれる。前述の EMF22 では京都議定書対象ガスに限定したが、RCP ではこれに加えてエアロゾルなど温暖化物質も対象としている点に相違がある。以下 4 つの RCP を整理した表を掲げておく。

表 5 RCP の 4 つのタイプ

名称	放射強制力 (W/m ²)	濃度 (CO ₂ e)	安定化の有無
RCP8.5	>8.5 W/m ² in 2100	>~1370 CO ₂ e in 2100	Rising
RCP6	~6 W/m ² at stabilization after 2100	~850 CO ₂ e (at stabilization after 2100)	Stabilization without overshoot
RCP4.5	~4.5 W/m ² at stabilization after 2100	~650 CO ₂ e (at stabilization after 2100)	Stabilization without overshoot
RCP3-PD	Peak at ~3 W/m ² before 2100 and then decline	Peak at ~490 CO ₂ before 2100 and then decline	Peak and decline

出典:Moss et al (2008)

以下本稿の目的から RCP2.6 として選ばれた IMAGE モデルの内容 (本稿 2.1.3 で紹介した van Vuuren et al. 2007 およびその前年の論文のうち BECS を利用した 400ppmCO₂e -2.6W/m²- を update したもの) について、そのモデルの開発者たちが執筆した van

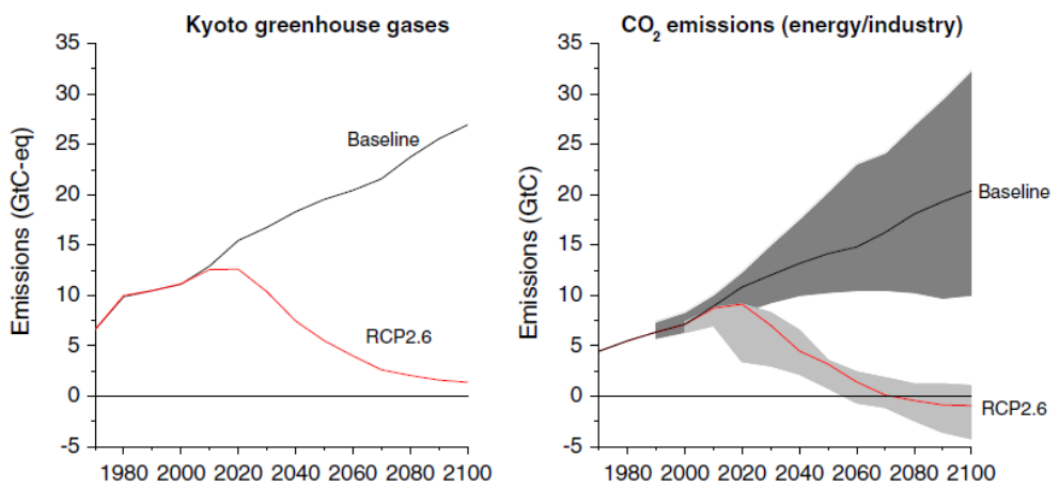
²¹ 従来は IPCC で人口や GDP 等の社会経済シナリオを作成し、それを基に対策をとらなかった場合の排出シナリオ (例えば SRES) を作成する。それに基づき温室効果ガスの濃度 (放射強制力) を求め、それに対応する気温上昇や降雨量の変化などを気候モデルで求め、それによる各種影響や適応という順序で作業が進んでいた。しかしこれには長い時間が必要である。例えば SRES は 1997 年に作業が開始され 2000 年に完成、これを使った気候モデルは 2001 年の IPCC 第 3 次報告に取り入れられたが、本格的に気候モデルで活用し、影響や適応にまで取り入れられたのは 2007 年の第 4 次報告であった。このときまでには新たな気候モデルもこの報告書の評価対象となり、矛盾した内容が併存することもあった。こうしたことを避け、且つ内容を充実するために並行アプローチ (parallel approach) が採用された。ここでは既存の文献から 2100 年の 4 つの放射強制力 (8.5~2.6W/m²) を抽出するが、これは特定の社会経済的背景や排出シナリオに直結するものではなく人口・技術その他異なる要素の組み合わせで到達可能という点が従来と違っている。これを気候モデルの専門家に渡すが、この際 4 つの放射強制力に到達する数あるシナリオのうちから各一つずつ代表的な排出及び濃度経路のシナリオを選び、これを RCP とよぶ。この 4 つを気候モデルと統合モデル (影響・緩和・安定化など) の専門家が (時系列ではなく) 同時並行的に作業することにより時間が短縮される。統合モデル専門家の作業は RCP に基づきいくつかの新たな社会経済 (土地利用を含む) および排出シナリオを開発する。これは RCP を補完するもので、4 つの濃度に到達する技術的・社会経済的・政策の組み合わせの範囲を示すものである。これにより政治家が目標を議論する素材の提供になる。また、統合モデルの専門家はこれ以外の放射強制力経路の開発や、地上や海洋の炭素循環などの不確実性に取り組むことも出来る (以上は Moss et al. (2010) による)。なお、この中で RCP8.5 は BAU シナリオの 90th percentile に入っているが、RCP2.6 は対策導入の際の 10th percentile よりも下であるとしている。相当思い切った対策シナリオであることが分かる (同論文図 5)。

²² 同じことを表すのに RCP3-PD という言い方もある。PD とは peak and decline のことで、3W/m² 程度まで途中で overshoot するが、その後 2100 年には 2.6W/m² に戻ることを表す。ここでは RCP3-PD と RCP2.6 は同じ意味とされている。つまり Overshoot 無しで 2.6W/m² を達成することは困難とみていると言うことである。

Vuuren et al. (2011b)を取り上げる²³。この論文ではベースラインとして前の論文で用いた IMAGE2.3 を update した IMAGE2.4 の B2 (中庸) シナリオを用いているので、基本的には van Vuuren et al. 2007 と同じである²⁴。土地利用 CO₂ を含む GHG 排出量は 2000 年の 11GtCe (40GtCO₂e) から 2100 年には 27GtCe (99GtCO₂e) へと 2.5 倍に伸びるとしている。2100 年の気温上昇は (気候感度 3°C であれば) 工業化以降 4°C である。

このベースラインを基に上昇幅を 2.6W/m² の水準にするには 2010 年から 2100 年の累計排出量を 70%削減する必要がある、2100 年の京都議定書対象ガス排出量はベースライン比 95%以上の削減が必要である。CO₂ について見ると、2100 年の排出量はマイナス 10 億 tC (36.7 億 tCO₂) となる (図 5)。この手段としてはエネルギー効率向上、化石燃料 CCS、再生可能エネルギー、原子力、それに BECS である (BECS による発電部門からの排出減の一部はバイオエネルギー生産のための土地利用変化で一部相殺される)。再生可能エネルギーのうち、風力と太陽光を見ると、発電部門でのシェアは増えるが実量では微増となる。発電からの排出減、CCS とのコスト競争、間欠性が原因とされている。

図 5 ベースライン排出量と RCP2.6 の比較



左：京都議定書対象ガス、右：エネルギー起源 CO₂ 排出量。右図のベースライン排出量の幅は既存の文献の幅、RCP2.6 の幅は 2.6W/m² を達成する既存の文献の幅を表す(10-90th percentile)。

出典：van Vuuren et al. (2011b) Fig. 3

削減費用及び炭素価格はどうか。炭素価格は 2010 年に炭素あたり \$25 (\$7/tCO₂)、2020 年に \$200 (\$60/tCO₂)、2030 年に \$300 (\$80/tCO₂) という具合に急騰するが、2050 年以後は \$700~900 (\$200~250tCO₂) 程度で推移する。ここで重要なことは 2010 年から全ての国が Cap を負い排出権取引に参加する FP を前提にしている点である。削減コストは 2050 年に向けて GDP 比 1.7%にまで上昇し、以後低下する。後半は GDP の伸びとそれに

²³ Van Vuuren et al. (2007)の 450ppmCO₂e (2.9W/m²) と 400ppmCO₂e (2.6W/m²) のどちらを最も低い RCP とするかについての途中経過については Moss et al. (2008)に興味深い記述がある。

²⁴ これ以外の相違としては、データの update (2000 年から 2007 年)、ブラックカーボンと organic carbon の追加等である。

占めるエネルギー部門のシェアが低下するからである。

上記の結果中庸のベースラインであれば、2100年に放射強制力を2.6Wに抑える排出経路に達することは技術的には可能 (technically feasible) であるとしている。しかし論文ではそのための条件も示している。その要点をまとめると、

- 1) 数十年にわたり排出量が毎年2000年のその4%程度の早さで削減しなければならない。これはGHG原単位の毎年5~6%の改善に相当するが、過去の実績は1~2%である。過大なovershootを防いだり、今世紀後半の急激な削減を避けるには、2010年代からの厳しい排出削減が要請されており、世界の排出量が2020年前後にピークを打つ必要がある(この点は2.6W/m²達成の他のモデルも同様)。そうした排出削減はアメリカや途上国も含めた幅広い国の参加(絶対排出量のCapを負っての排出権取引への参加)が不可欠である。
- 2) このためには主要な排出源で十分な削減余地が必要である。2.6W/m²の場合、化石燃料からの排出削減はエネルギー効率向上、Renewableと原子力の増加、CCSとバイオエネルギーにより行われる。ここで前提にしているのは新たな技術が早急に導入され、直ちに他国に普及するということである。必要とされる削減が、削減余地の限界に近いので、特定の技術を排斥したり、削減余地が減少することがあると、直ちに目標達成が不可能になる。ここで特に重要なのがマイナスの排出を実現するBECSであるが、食糧生産との競合など不確実な要素がある。
- 3) non-CO₂ガスの大幅削減。RCP2.6で分かったことは、2100年までにCO₂排出はなくなり、残りのほとんどはnon-CO₂ガスとなる。つまり、これ以上の削減はこの分野でどの程度いけるかにかかっている。

上記はいずれも厳しい条件であるが、特に最初の条件を満たすには全ての国が直ちに目標に向けて削減を開始することが必須である。この他にも全ての技術を投入する必要性、バイオエネルギーと食糧生産の関係など2.6W/m²(≒2°C目標達成)達成の道は想像以上に厳しいと言わざるを得ない。

4、結論

以上これまできちんとした根拠の検証無しに国際政治の場で唯一の目標となった感のある「2°C目標」について文献を基にその淵源と実現可能性を検討してきた²⁵。

IPCC第4次報告において工業化以降の気温上昇を2°C~2.4°Cに抑えることが可能なシナリオが6つあるとされていたが、よく見るとこれは3つのモデルによるものである(Azar et al. 2006が3つ、Riahi et al. 2007が1つ、van Vuuren et al. 2007が2つのシナリオを提示している)。しかしこのうちAzar et al.の3つのシナリオは物理的・経済的に限界的なものであること(特にCCS無しだとsolar hydrogenへの依存が6割にもなる)、Riahi et al.

²⁵ ここで検討した以外の側面からの2°C目標の実現可能性(例えば技術進歩率や先進国と途上国の一人あたり排出削減割合など)についてはYamaguchi et al. (2012)第2章参照。

のそれは2100年のCO₂排出量が2000年のそれを40%以上も下回るような非現実的ベアラインを前提としていること、から2°C目標達成には疑義がある。残るvan Vuurenについては2つのうち低位のシナリオがRCP2.6として採用されたのでそこで再述するが、いずれも世界のすべての国が直ちに2°C目標への経路に沿う形で絶対排出量のCapを負って国際排出権取引（あるいは国際共通炭素税）に参加することを前提としており、この点を考えただけでも実現可能性はほぼ無いと考えざるを得ない。

次に2009年に公表されたEMF International Scenarios比較プロジェクトでは濃度、overshootの有無、参加時期（参加遅延）について共通のルールに従い²⁶、10のモデルの14のシナリオについて炭素価格上限等一定の要件を設けた上で目標達成可能性の検討を行った。この結果明らかになったのは、途上国の遅延参加（BRICsが2030年、その他途上国が2050年に参加）の下ではovershootを認めなければ全てのシナリオで450ppmCO₂e（2°C目標）達成の可能性はなく、overshootありであっても一部例外（14シナリオのうち2つ）を除くとやはり実現可能性が無いことということである。

可能性ありとした2つのシナリオのうち先ずMiniCAM-Baseでは、先進国の排出量を2050年までにゼロとすること、グループ2の排出量は2035年には約2倍にまで伸びるが、2050年には-150%に急減させ、グループ3は2050年には3倍以上に伸びる排出量を2065年には-122%にまで激減させる（いずれも基準年は2005年）というシナリオである。次にETSAP-TIAMはBECSの活用程度はMiniCAM-Baseに比べてかなり低いのでこの点での実現性は高いが、2020年の限界削減費用が\$1297/tCO₂と極端に高いほか、全般に高コストが障害となり、経済的に実現困難と思われる。上記から途上国も含めたすべての国の即時参加無くしては、overshootの有無に関わりなく2°C目標の実現可能性はきわめて低いと言わざるを得ない。しかしこの条件は当分満たされることはない。

最後に放射強制力2.6W/m²を目指すvan Vuuren et al. (2011)のRCP2.6であるが、van Vuuren et al.は目標達成は「技術的には可能 (technically feasible)」としつつ、このためには、GHG原単位を毎年5-6%改善の必要があること（実績は1-2%）、2010年代からの厳しい排出削減が必要で、2020年前後に世界の排出がピークを打つ必要があること、再生可能エネルギー、原子力、バイオエネルギー、CCS（含むBECS）などすべての技術を動員する必要のあることなどきわめて厳しい条件がついている。このうち2020年代にピークを打つという条件一つとっても現下の国際経済状況と交渉、本年6月のRio+20の状況から考えて全くおぼつかない。また、長期的にはバイオエネルギーと食糧とのバランス問題も解決しなければならない。このように考えると2°C目標を絶対化しこれに固執することは却って途上国の反発を招き、実効的な温暖化対策を遅らせることとなる恐れが強い。特に先進国に余裕が無くなり、貧困、医療、経済・金融危機、失業など温暖化以外の重要課題も同時に組み込まなければならない現状では、気候変動対策の目標について白紙でもう一度

²⁶ IPCC第4次報告書以前のシナリオは前提条件もバラバラで比較がしにくかったこともあって、このように共通方式で計算を行ったことは大きな意味がある。

考え直すべきだというのが本稿の結論である。現在執筆中の IPCC 第 5 次報告がこうした面で貴重なデータを提供することを期待している。

なお、いずれにしても温暖化は必至であり、今後の課題としては適応面での検討に従来以上の力を注ぐことが肝要で、加えて万一に備えて Geo-engineering の R&D も積極的に進めるべきである。加えてバイオマスに関する食糧問題とのバランス、それに CCS に関する技術的・制度的・法的検討も早急に行うべきである。

参考文献

- Azar, C., Lindgren, K., Larson, E., Möllersten, K. (2006), Carbon capture and storage from fossil fuels and biomass—costs and potential role in stabilizing the atmosphere. *Climatic Change* 74, 47–79
- Calvin, K., Edmonds, J., Bond-Lamberty, B., Clarke, L., Kim, S.H., Kyle, P., Smith, S.J., Thomson, A., Wise, M. (2009), 2.6: Limiting climate change to 450 ppm CO₂ equivalent in the 21st century. *Energy Economics* 31, S107-S120
- Clarke, L., Edmonds, J., Krey, V., Richels, R., Rose, S. and Tavoni, M. (2009), International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios. *Energy Economics* 31, S64-S81
- Clarke, L., Wise, M.A., Edmonds, J.A., Placet, M., Kyle, P., Calvin, K., Kim, S., Smith, S., (2008), CO₂ Emissions Mitigation and Technological Advance: An Updated Analysis of Advanced Technology Scenarios (Scenarios Updated January 2009), Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-18075.
- IPCC (2001), Climate Change 2001: Synthesis Report, Watson, R. and the core writing team (ed.), Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Loulou, R., Labriet, M., Kanudia, A. (2009), Deterministic and stochastic analysis of

- alternative climate targets under differentiated cooperation regimes. *Energy Economics* 31, S131-S143
- Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T et al (2008), Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. IPCC Expert Meeting Report on New Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Noordwijkerhout
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK et al (2010), The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747–756
- Nakicenovic, N., Grubler, A., and McDonald, A. (1998), *Global Energy Perspectives*, Cambridge University Press, NY.
- Riahi, K., Grübler, A., Nakicenovic, N. (2007), Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74, 887–935
- UNFCCC (2008), Decisions adopted by the Conference of the Parties, in Part Two: Action taken by the Conference of the Parties at its thirteenth session, Report of the Conference of the Parties on its thirteenth session, held in Bali from 3 to 15 December 2007, FCCC/CP/2007/6/Add.1, 14 March 2008
- van Vliet, J., den Elzen, M.G.J., van Vuuren, D.P. (2009), Meeting radiative forcing targets under delayed participation. *Energy Economics* 31, S152-S162
- van Vuuren, D.P., Den Elzen, M.G.J., Lucas, P.L, Eickhout, B., Strengers, B.J. et al (2007), Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change* 81 (2), 119–159
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J. A., Kainuma, M., Riahi, K, Weyant, J. (2011a), "A special issue on the RCPs." *Climatic Change* 109 (1-4)
- van Vuuren, D.P., Stehfest, E., den Eksen, M.G.J., Kram, T., van Viliet, J., Deetman, S., Isaac, M., Goldewijk, K.K., Hof, A., Beltran, A.M., Oostenrijk, R. and van Ruijven, B., (2011b), RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change* 109, 95–116
- Yamaguchi, M., Akimoto, K., Amano, H., Inoue, H., Mimura, N., Ogimoto, K., Ohata, A., Okazaki, T., Toichi, T., Watanabe, H., (2012), *Climate Change Mitigation: A Balanced Approach to Climate Change*, Springer, London, U.K.