

温室効果ガス濃度制約の下での超長期エネルギー需給予測

— エネルギー需給、CO₂排出量、CO₂限界削減費用の見通し —

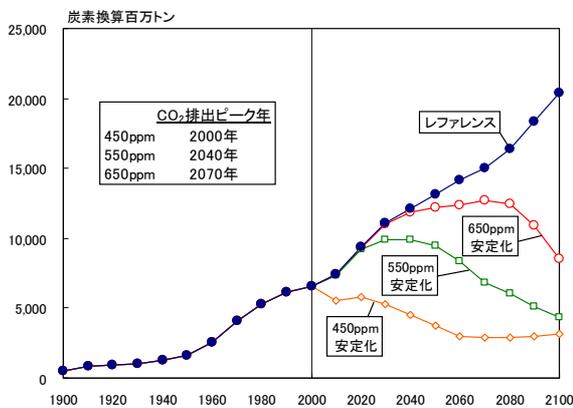
小宮山 涼一*

【要約】

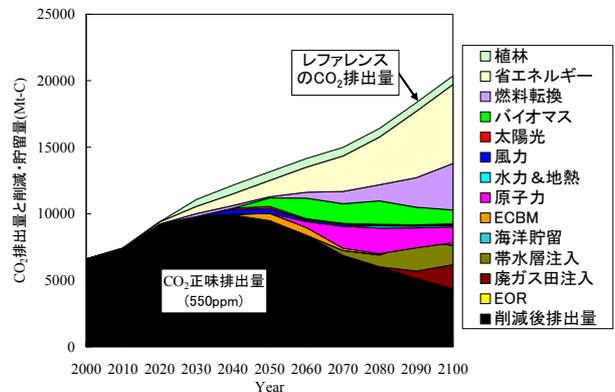
本報告では、温室効果ガス濃度の制約下における世界の最適なエネルギー需給について計算を行った。イギリス等の欧州各国政府における長期的な大気中温室効果ガス濃度の安定化目標を見ると、気温上昇を2℃以上以下に抑制するためには、地球温暖化対策の強化により450ppm～550ppmの範囲で安定化することが必要であるとされている。そこで、本論文では2100年の温室効果ガス濃度を450ppm、550ppm(産業革命前の2倍の濃度)、650ppmに安定化する場合の最適なエネルギー需給について、超長期経済・エネルギーモデル(WING-LDNEモデル)を構築し、予測を行った。

図1 世界のCO₂排出量の見通し(濃度安定化目標別)

図2 各技術によるCO₂排出削減効果(550ppm安定化、世界)



(出所) 筆者によるモデル計算結果



*EOR: Enhanced Oil Recovery, 石油増進回収, ECBM: Enhanced Coal Bed Methane, 炭層メタン増進回収

(出所) 筆者によるモデル計算結果

その結果、経済、技術の見通しには大きな不確実性が存在するが、温室効果ガス濃度を550ppmに安定化するためには、2040年付近をCO₂排出量のピークとして、2100年に向けてCO₂排出量を2000年比で約40%削減する必要がある。そのためには、省エネルギー、燃料転換、CO₂回収・貯留技術(ECBM、植林、帯水層貯留、廃ガス田貯留等)の導入を行い、非化石資源(原子力、バイオマス等)の一次エネルギー供給に占める割合を約3割～4割まで拡大する必要がある。なかでも省エネルギーが長期的に見てもCO₂排出削減に大きく貢献することが計算から示唆された。またCO₂限界削減費用(CO₂シャドウプライス)は、550ppmに安定化する場合、2030年において約70\$/t-C、2050年で約120\$/t-C、2100年で約570\$/t-Cとなる。

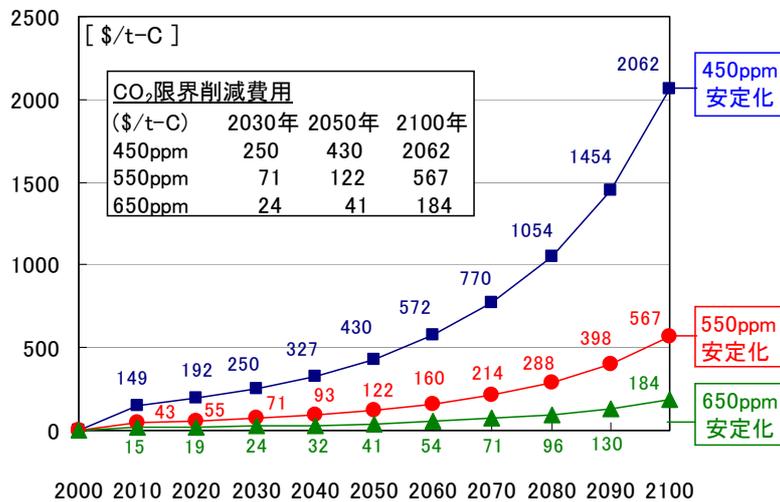
表1 2100年の温室効果ガス濃度、一次エネルギー供給、CO₂排出量、CO₂限界削減費用(世界)

温室効果ガス濃度	一次エネルギー供給				CO ₂ 排出量					
	供給量		供給構成		炭素換算トン	2000年比	ピーク年	CO ₂ 限界削減費用(\$/t-C)		
	石油換算トン	2000年比	化石資源	非化石資源				2030年	2050年	2100年
450 ppmv	157 億トン	1.8 倍	61%	39%	31 億トン	47 %	2000年	約 250	約 430	約 2,060
550 ppmv	172 億トン	2.0 倍	65%	35%	44 億トン	67 %	2040年	約 70	約 120	約 570
650 ppmv	179 億トン	2.1 倍	73%	27%	86 億トン	130 %	2070年	約 20	約 40	約 180
756 ppmv(レファレンス)	249 億トン	2.9 倍	95%	5%	204 億トン	309 %	—	—	—	—

(出所) 筆者によるモデル計算結果

また、2100年の温室効果ガス濃度を450ppmに安定化するためには、2100年に向けてCO₂排出量を2000年比で約50%の削減し、現時点から排出量の削減を徐々に進める必要がある。またCO₂限界削減費用は、2030年において約250\$/t-C、2050年で約430\$/t-C、2100年で約2060\$/t-Cとなることから、550ppmに安定化する場合に比較して、CO₂限界削減費用は大幅に上昇する。

図3 CO₂限界削減費用(CO₂シャドープライス)



(出所) 筆者によるモデル計算結果

今後、温室効果ガスの濃度上昇という地球規模のリスクを管理するためには、超長期的な視点で、先進国のみならず途上国も参加できる柔軟性を持った将来の枠組みを作ることが重要である。例えば、途上国においては、国の経済計画に温暖化対策を盛り込んだり、自主的な削減目標の設定や、部門別（産業、交通、家庭など）の排出の効率化目標などを設けることが有効になる。それにより、CO₂の排出抑制の必要性が一層高まれば、市場メカニズムの効果と公的な政策対応の拡充によって、石油代替エネルギーや省エネルギーなどの技術開発が自律的に促されていくことが期待される。京都議定書発効に伴い、2013年以降のいわゆるポスト京都の国際温暖化対策枠組みに関する議論が活発化してきている。一方、これら国際条約のもとでの枠組み以外にも、「クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ(APP)」のようなエネルギー効率目標等の導入による排出削減を目指した地域協定も動き出している。2013年以降における温室効果ガスの実質的削減のためには、温室効果ガス増加の中心となる発展途上国が参加可能な枠組みの検討が今後必要であり、これらの国々が積極的にコミットできる枠組みの構築が求められる。

1. はじめに

過去1万年以上にわたり、大気中に約280ppmという濃度で存在していた二酸化炭素の温室効果によって、地球は平均して約15度という人類が生存する上で適度な気温が維持されており、人類の発展を支えてきた。しかし、産業革命以降、1800年頃から大気中の二酸化炭素の濃度は徐々に上昇しており、現在、370ppm付近まで上昇している。この結果、20世紀の過去約100年で、0.5度程度の地球平均気温の上昇が観測されている。今後の地球の温度の変化に関する科学的知見にはまだ不確実性があるが、このまま放置した場合、地球温暖化により様々な影響が予測されている。このため大気中の温室効果ガス濃度をはじめとする地球温暖化問題は、エネルギー政策を考える上でも重要な関心事になっており、温暖化を防止するためには温室効果ガスの排出を削減することが重要であるとの認識が広まりつつある。

1988年に設立されたIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change、気候変動に関する政府間パネル)は、1990年、1996年、2001年、2007年とこれまで4回にわたり地球温暖化問題に関する科学的知見に関する報告書のとりまとめを行い、21世紀の温暖化の見通しについて、温室効果ガスの排出シナリオを複数設定して検討している。温暖化の将来シナリオには、大きな不確実性があるものの、気温は着実に上昇すると予測されている。IPCCの最新報告(第4次報告書)によれば、経済が順調に成長し、エネルギー需要を、主として化石エネルギーにより供給するシナリオでは、大気中のCO₂濃度は、21世紀末に540~970ppm(現状は約370ppm)に増加し、気温は約4度(可能性が高い予測幅2.4~6.4度)上昇すると見込まれている。またこのような大気中温室効果ガス濃度の上昇に対して、2006年10月に発表されたいわゆる「スターン・レビュー」では、温室効果ガス(GHG)の大気中濃度をCO₂換算にして450~550ppmで安定化する場合、気候変動が起こる危険性がかなり緩和されるため、この範囲内で大気中GHG濃度を安定化するには、排出量を2050年までに少なくとも現在のレベルの25%もしくはそれ以上を削減する必要があると指摘している。また、イギリスのエネルギー白書においても、大気中温室効果ガス濃度を550ppmに安定化することが必要であると指摘され、フランスやドイツでも450ppmに安定化することが重要であると指摘されるなど、大気中温室効果ガス濃度が、エネルギー政策を策定する上での一つの政策目標として検討され始めている。

1992年(平成4年)5月に国連で採択された気候変動枠組条約においても「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすことにならない水準で大気中の温室効果ガス濃度を安定化すること」が目標として掲げられている。温室効果ガスの大気中濃度をいくらで安定化するべきかが問題となるが、具体的な濃度の安定化目標について、国際的なコンセンサスが得られる結論は未だ見出されていない。そこで、本論文では、将来目標数値についての政策的議論が活発化している大気中温室効果ガス濃度の制約下における世界の最適なエネルギー需給構造について計算を行い、今後の温室効果ガス排出削減に向けたエネルギー政策のあり方についてのインプリケーションの提供を行う。

2. 大気中温室効果ガス濃度の安定化についての議論

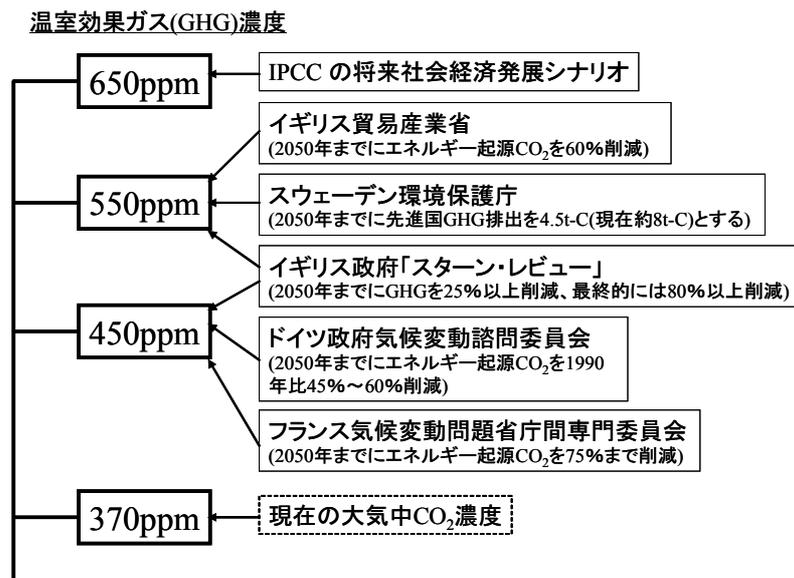
温室効果ガス濃度を安定化させることは、温室効果ガスの排出量と吸収量の均衡がとれた状態を保持することに相当する。大気中CO₂の濃度は、産業革命時点では約280ppm程度だったが、現在は370ppm程度まで上昇しており、将来的な安定化の目標水準を、産業革命時点の2倍である550ppm程度に抑えるのか、あるいはそれ以上、それ以下に制御するのが重要な論点となる。また濃度の安定化の達成に際しては、生態系が気候変動に適応し、経済開発が持続可能な形で進められる期間内に達成される必要があるとされており、どれくらいの早さで安定化させるべきかという点も重要となる。どのくらいの濃度で安定化させれば問題がないのかという点については、さまざまな研究がなされているものの、まだ確固たる見解は見出されていない。

イギリス政府は2006年10月、現状のまま推移する場合、地球の温室効果ガスは2035年に2倍に達し、干ばつなどの気候変動リスクが最大化し、経済的損失は、世界全体のGDPの20%にのぼる可能性があるとする報告書「スターン・レビュー」を発表した。同報告書は英国財務大臣 Gordon Brown 氏の委託を受けた Nicholas Stern 卿が率いる経済学者グループが作成し、同報告書では、地球温暖化に対処しない場合、毎年5%以上の経済的損失が発生すると予測し、GDP1%程度の対策費の支出が経済的合理性があることを主張している。そして、GHGの

レベルを CO₂ 換算にして 450～550ppm で安定化する場合、気候変動の最悪の影響が起こる危険性はかなり緩和されると報告し、この範囲内で安定化するには、排出量を 2050 年までに少なくとも現在のレベルの 25%以上削減し、長期的には 80%の削減を行う必要があると指摘している。

また、これまでスターン・レビューの他にも、ドイツ、フランス、スウェーデン等、欧州各国政府の長期的な大気中温室効果ガス濃度の安定化目標を見ると、気温上昇を 2 上昇以下に抑制するためには、地球温暖化対策の強化により 450ppm ～550ppm の範囲で安定化することが必要であり、そのためには年間 CO₂ 排出量を現在の水準から 50%～80%削減(一人当たり CO₂ 排出量を 1/5～1/4 まで削減)することが長期的に必要なであるとの見方がコンセンサスとなっている。

図2-1 欧米における温室効果ガス濃度の数値目標



そこで、本論文では、次章において説明する世界経済・エネルギーモデルにより、以下の温室効果ガス濃度の長期安定化各目標の下に、世界のエネルギー需給、ならびに、CO₂ 排出量を計算する。そして、温室効果ガス濃度制約下における世界の最適なエネルギー需給構造や、今後の温室効果ガス排出削減に向けたエネルギー政策のあり方について考えることとする。

表2-1 温室効果ガス濃度に関するケース設定

ケース名	備考
レファレンスケース	CO ₂ 排出に関する規制を課さない自然体ケース
550ppm 安定化ケース	2100 年以降の温室効果ガス濃度を 550ppm (産業革命前の温室効果ガス濃度の約 2 倍) 以下に規制するケース
450ppm 安定化ケース	2100 年以降の温室効果ガス濃度を 450ppm (産業革命前の温室効果ガス濃度の約 1.6 倍) 以下に規制するケース
650ppm 安定化ケース	2100 年以降の温室効果ガス濃度を 650ppm (産業革命前の温室効果ガス濃度の約 2.3 倍) 以下に規制するケース

*450ppm、550ppm、650ppm 安定化ケースにおいては、2010 年の CO₂ 排出量は、京都會議で合意された CO₂ 排出削減目標を満たす制約を置いている。

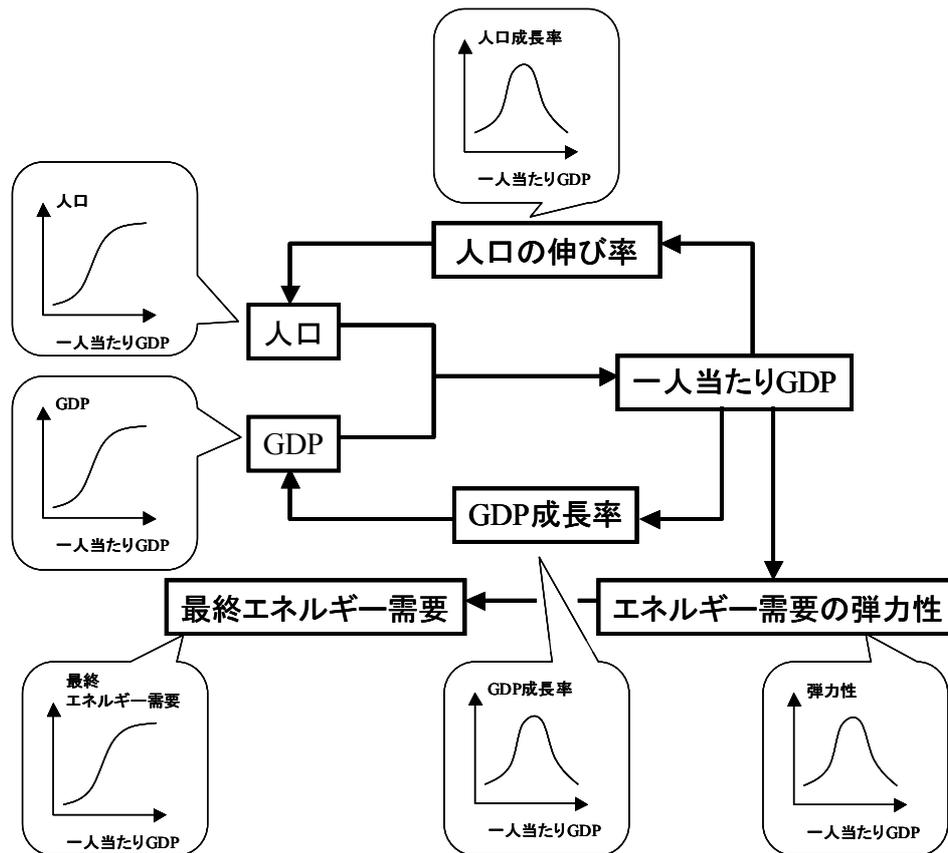
3. 世界経済・エネルギーモデル(WING-LDNE モデル)の概要

本論文では、世界経済・エネルギーモデルにより、2100年までの超長期での世界の経済、人口、ならびにエネルギー需給、CO₂排出量の見通しを試算する。以下にモデル構造の概要を説明する。本モデル(WING-LDNE モデル)は、2100年までの経済成長、人口、最終エネルギー需要を内生的に計算する WING モジュール¹と、この最終エネルギー需要を前提として、コスト最小化の基準の下で、エネルギー供給を決定する LDNE モジュール²から構成される。なお本分析では、世界を10地域に分割し、分析を進めている。すなわち、北米、西欧、日本、オセアニア、中国、その他アジア、中東・北アフリカ、その他アフリカ、中南米、旧ソ連・東欧である。このうち、北米、西欧、日本、オセアニア、旧ソ連・東欧、が京都議定書における Annex 国に属する。

3-1 WING モジュール

WING モジュールでは、経済発展段階論に基づき、2100年までの、経済、人口、ならびに最終エネルギー需要を決定する。経済発展段階論とは、経済は発展段階に応じて、その形態を変容させるという考え方である。つまり、経済発展段階により、人口の伸びや、経済成長率(量的拡大のスピード)ならびに、エネルギー需要の形態が変化するという考え方である。

図3-1 経済発展段階論のモデル化；一人あたり所得と人口の伸び、経済成長率、エネルギー弾力性の関係等



¹ (財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニットが作成した2100年までの超長期評価を目的にした経済・エネルギーモデル
² 長期の技術評価モデルとして、工学技術を詳細に扱っている DNE21 (Dynamic New Earth21) モデルの非線形関数(省エネルギー関数、再生エネルギー供給関数)を線形化した LDNE(Linearized Dynamic New Earth 21)モデルを採用する。参考文献：Yamaji, K. et al., Global energy system to maintain atmospheric CO₂ concentration at 550 ppm, Environmental Economics and Policy Studies, 3, 159, 2000年

従来のトップダウン型モデルの多くは、人口や所得を所与とし、弾力性を一定としてエネルギー需要やその内容を計算していた。これに対し、本モデルでは、経済発展段階を一人当たり所得で表現し、一人当たり所得の水準が高くなればなるほど経済発展が進んだと考え、人口の伸び、経済成長率、エネルギー弾力性が経済発展段階(一人あたり所得)によって変化する点に大きな特徴がある。

最終エネルギー需要は、需要形態別に、固体需要、液体需要、ガス需要、電力需要の4形態に分類する。そして、各形態の需要の規模、ならびにシェアの算出にあたっては、経済の発展段階(一人当たりGDPなど)を考慮している。すなわち、所得の向上に伴う流体化(非在来型燃料の消費から石油製品など液体燃料の消費へのシフト)の進展や、電力化(最終消費に占める電力需要のシェアの上昇)の進展を考慮に入れた上で、最終エネルギー需要の構成比を決定するものとする。

以下に、本モジュールのメカニズムのポイントを説明する。

- 人口：人口の伸び率は、一人当たり所得の増加につれ、まず上昇する(幼児死亡率の低下など)が、次第に出生率が低下するため、人口の伸びは徐々に低下する。
- GDP成長率：経済成長率は、工業化が始まる(ここでは一人当たり所得が約1,000ドル程度と想定)と急速に高まるが、一人当たり所得が3,000ドル程度になると落ち着き、その後、成長率は徐々に低下する。
- エネルギーの所得(GDP)弾性値：エネルギーの弾性値も発展段階によって変化する。すなわち工業化が加速的に進む際においては、弾性値は上昇し、以降、発展段階と共に、徐々に低下する。

一人当たり所得水準が与えられると、人口とGDPの水準が決定される。そして、それが今度は、「 $GDP \div 人口 = 一人あたり所得$ 」という形で、再度、一人当たり所得が決定され、フィードバックされる。この同時連立体系から得られる一人当たり所得とGDPの関係を表した曲線はS字型となる。また、人口やエネルギー需要もS字型をとる。

以上より、発展段階の代理指標として一人当たりGDPを用い、その変化によって、経済成長率、人口の伸び、エネルギーの所得弾力性が変化するメカニズムを用いることにより、人口、GDP、最終エネルギー需要、ならびに、最終エネルギー需要の構成比を決定する。

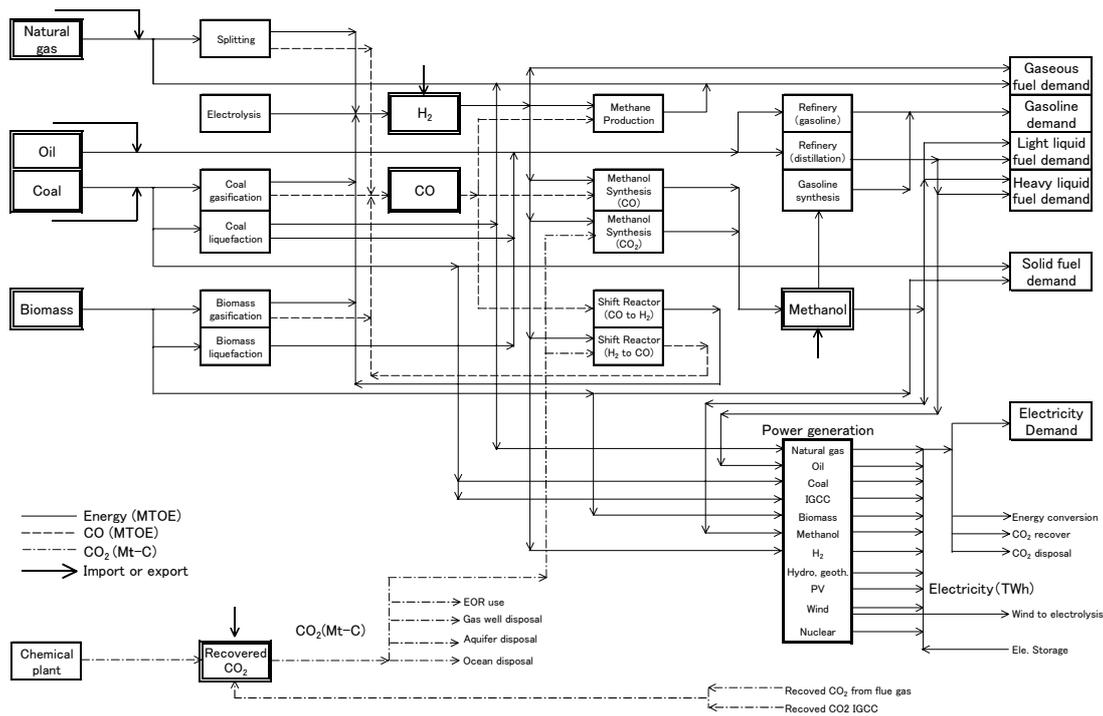
これまでの多くのモデルでは、人口、経済成長率などを外生値として与えているため、人口爆発などの問題を仮定から排除していた。また、経済社会環境の構造変化が無いが、あっても極めて緩やかな変化にとどまるという問題点があった。しかし、地球温暖化問題のように、対象が世界で、なおかつ100年間にもおよぶ超長期的な問題をこのような仮定のもとに、狭い範囲で考えることに対する疑問もあり、本モジュールが作成されている。

3-2 LDNE モジュール

長期世界エネルギーモデルとして、工学技術を詳細に扱っているDNE21(Dynamic New Earth21)モデルの非線形関数(省エネルギー関数、再生エネルギー供給関数)を線形化したLDNEモデルのエネルギーフローを図3-2に示す。化石エネルギー、再生可能エネルギー、原子力などで一次エネルギー供給を行い、各種化学プラント、発電プラントを通して一次エネルギーを転換することにより二次エネルギーを生産し、WINGモジュールにより予測された4種類の最終エネルギー需要(固体需要、液体需要、ガス需要、電力需要)を満たす。

このモデルは、割引率を考慮した対象期間内のシステム総コストを最小化する最適化モデルである。対象期間として1995年から2105年までの110年間(1期10年、11期)を評価しているが、終端効果を取り除くため、計算自体は2145年(15期)まで行っている。対象地域は以下に示す世界10地域である。

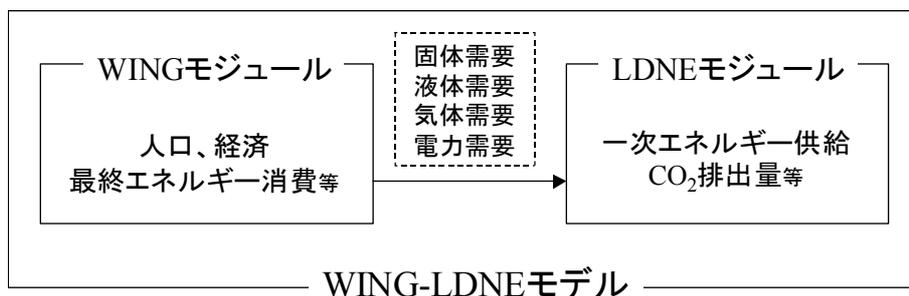
図3-2 LDNE モジュールのエネルギーフロー



3-3 WING-LDNE モデル

以下に、WING モジュール、LDNE モジュールを統合した WING-LDNE モデルの構造を説明する。まずはじめに、経済発展段階論に基づき、内生的に、経済成長、人口、最終エネルギー需要(固体需要、液体需要、気体需要、電力需要)を求め、そして、LDNE モジュールにおいて、この最終エネルギー需要に対するエネルギー供給(石炭、石油、ガス、原子力など)を、コスト最小化の基準の下で決定し、その上で、エネルギーシステムより発生するCO₂排出量をメカニズムとなっている。

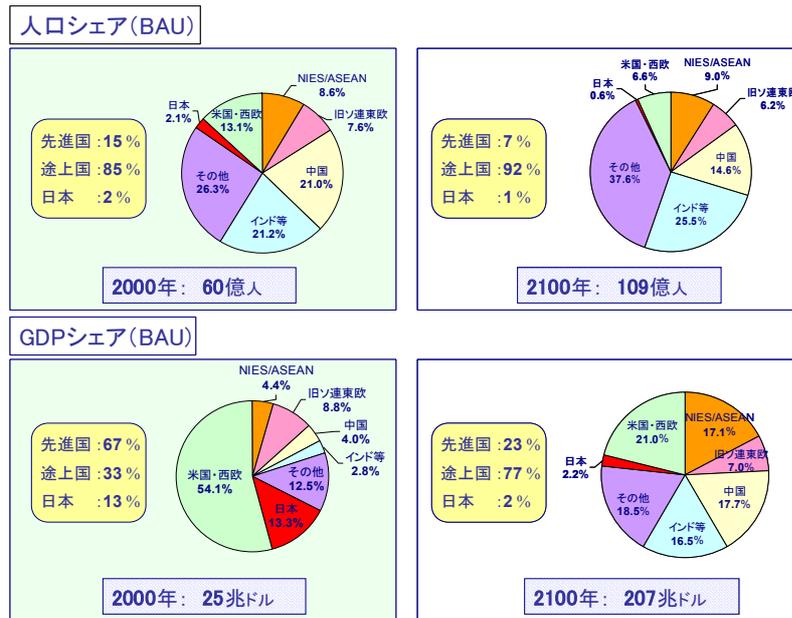
図3-3 WING-LDNE モデルの全体構造



(b) 経済、人口

試算結果によると、世界の人口は、2000年の約60億人から、2100年には110億人へほぼ倍増する。地域別の人口の構成比を見ると、2000年において先進国が約2割、途上国が約8割を占めるが、2100年には先進国が約1割、途上国が約9割となり、世界の人口は、発展途上国を中心に増加する。

図3-4 2100 年の世界の GDP と人口の見通し



(出所) 筆者によるモデル計算結果

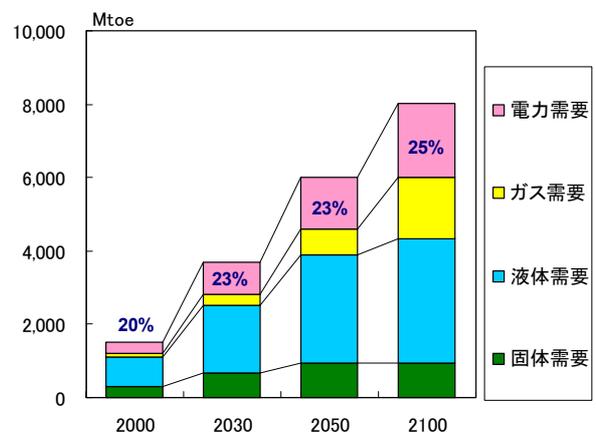
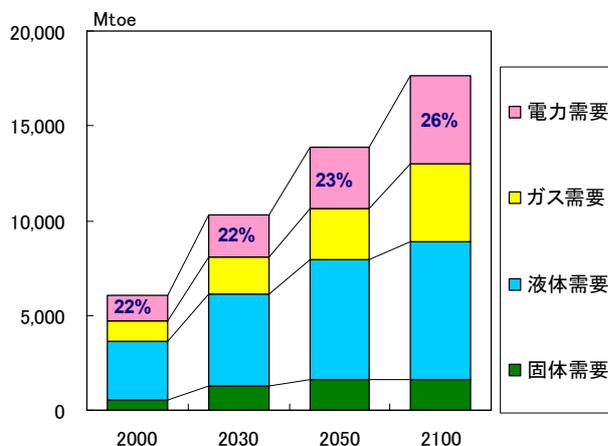
また、世界の GDP は、2000 年の 25 兆ドルから、年率 2.1% で増加し、2100 年には 10 倍の約 210 兆ドルへ拡大する。また、世界の一人当たり GDP も 2000 年の 4,000 ドル/人から、2100 年には、19,000 ドル/人へ約 5 倍まで拡大する。地域別の GDP の構成比を見ると、1990 年において先進国が約 7 割、途上国が約 3 割であるが、2100 年には先進国が約 2 割、途上国が約 8 割となり、世界の GDP は、発展途上国、なかでも中国、インドなどアジア地域を中心に増加する。

(c) 最終エネルギー需要

WING モジュールにおける最終エネルギー需要の試算結果を以下に示す。世界の最終エネルギー消費は、2000 年の約 61 億石油換算トンから、年平均 1.1% で増加し、2100 年には 176 億トンへ拡大する。

図3-5 最終エネルギー需要(世界)

図3-6 最終エネルギー需要(アジア)



(出所) 筆者によるモデル計算結果

その中で、電力消費量は、2000年の13億トン(約15兆kWh)から、2100年には46億トン(約53兆kWh)へ、年率1.2%で増加し、一次エネルギー消費に占める電力需要のシェアは、2000年の22%から2100年には26%へ拡大する。また、アジアの最終エネルギー消費は、2000年の約15億石油換算トンから、年平均1.7%で増加し、2100年には80億トンへ拡大する。その中で、電力消費量は、2000年の3億トン(約3.6兆kWh)から、2100年には20億トン(約23兆kWh)へ、年率1.9%で増加し、一次エネルギー消費に占める電力需要のシェアは、2000年の20%から2100年には25%へ拡大する。

また、最終エネルギー消費計を地域別に見ると、世界に占めるアジアのシェアは、2000年の25%から2100年には45%へ拡大し、電力消費も2000年の23%から2100年には44%へ拡大し、2100年という超長期的タイムスパンで見ても、世界に占めるアジアのエネルギー消費は、堅調に拡大する見通しである。

図3-7 最終エネルギー需要(地域別)

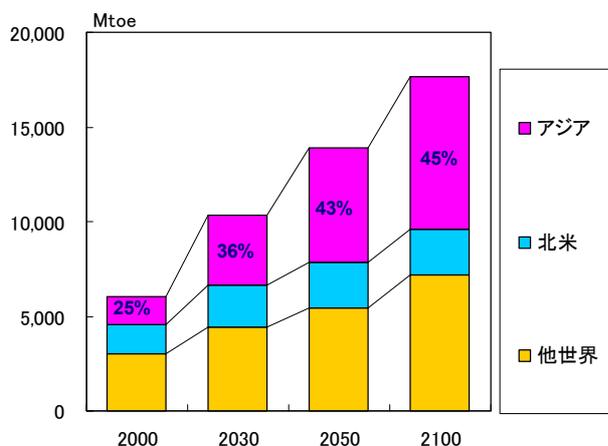
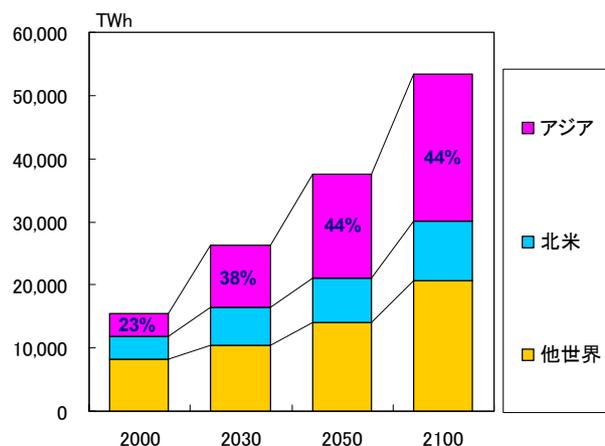


図3-8 電力需要(地域別)



(出所) 筆者によるモデル計算結果

4. 計算結果

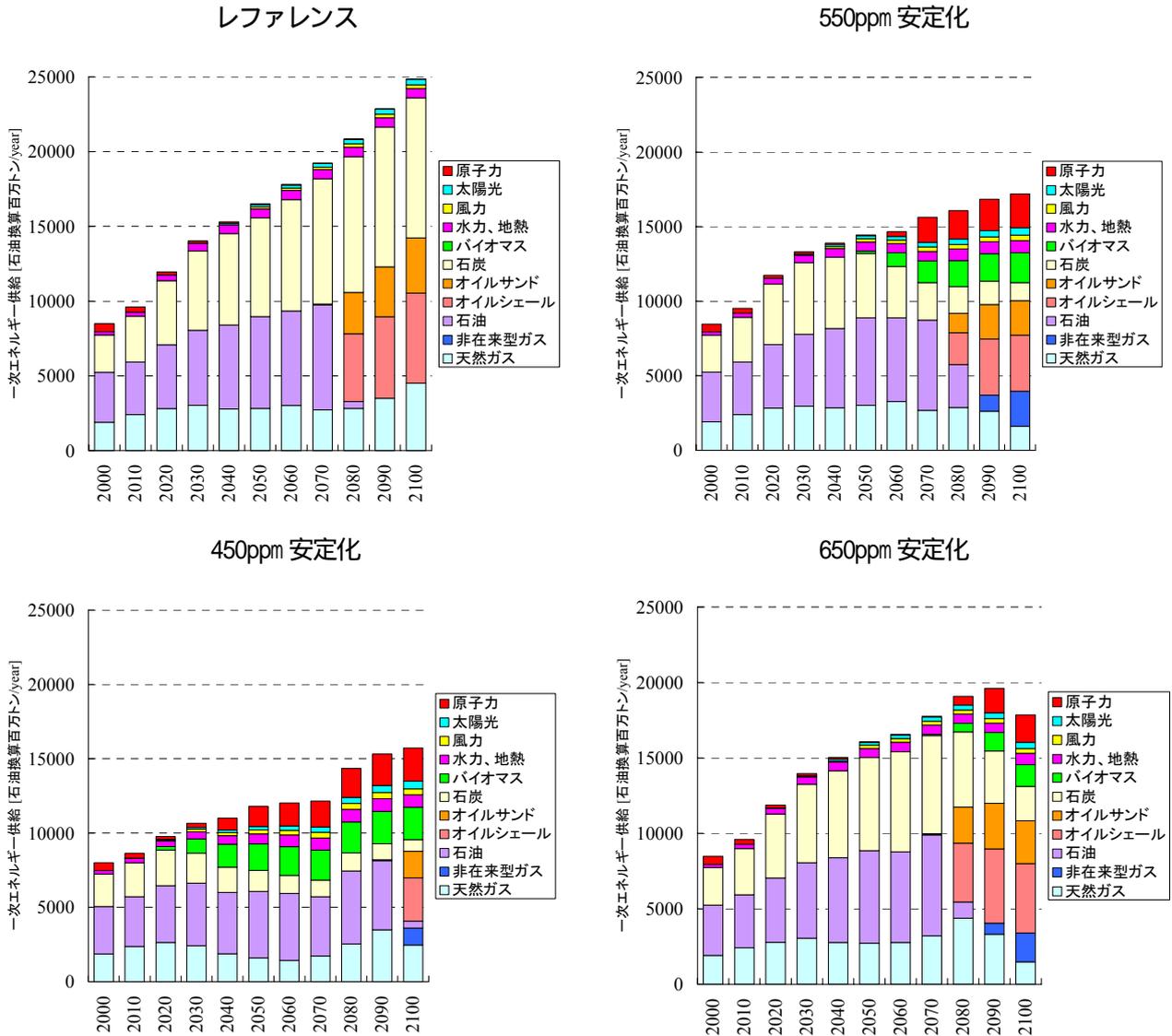
4-1 一次エネルギー供給

温室効果ガス濃度安定化に関する制約を課さないレファレンスケースでは、一次エネルギー供給の大半を長期的に石炭や石油に依存することになり、2100年にかけて、エネルギー供給の約9割を化石資源に依存することになる。石油供給は2080年からオイルサンドやオイルシェールなどの非在来型石油に依存する。

一方、温室効果ガス濃度を550ppmに安定化するケースでは、レファレンスケースに比較して、大幅な省エネルギーが行われ、エネルギー供給が減少する一方、今世紀後半から、バイオマスや原子力などのクリーンな燃料源の導入が拡大される。また、2100年の温室効果ガス濃度制約を一層厳しくした450ppmケースでは、これらのクリーンな燃料源の導入や本格的な省エネルギーの実施の開始時期が2030年からと早まり、温室効果ガス濃度制約を緩めた650ppmケースでは、今世紀後半の2080年からとなる。

一次エネルギー供給量で見ると、レファレンスケースでは、2100年の供給量は、2000年比で2.9倍まで増加する。一方、550ppm安定化の場合には、省エネルギーにより、エネルギー供給の伸びは、2000年比2.0倍まで抑制され、450ppmでは同1.8倍、650ppmでは2.1倍へ、伸びが抑えられる。また、一次エネルギー供給構成で見ると、レファレンスケースでは、2100年の供給構成は、化石資源約9割、非化石資源約1割となる。そして、550ppmならびに650ppm安定化ケースでは、化石資源約7割、非化石資源約3割となり、450ppm安定化ケースでは、化石資源約6割、非化石資源約4割となり、非化石エネルギーの導入が進展する。

図4-1 一次エネルギー供給の展望(世界)

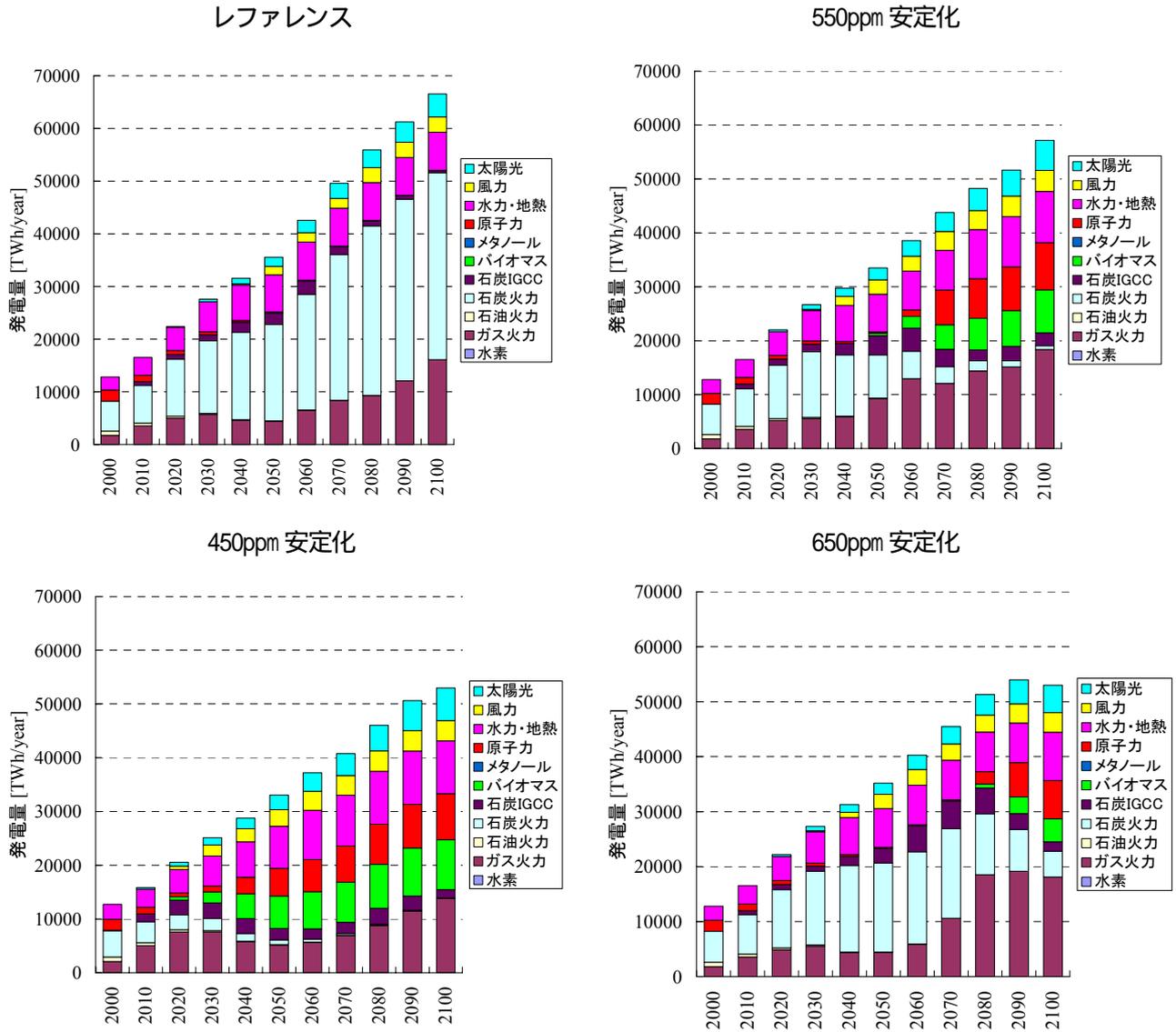


(出所) 筆者によるモデル計算結果

4-2 発電量の構成

温室効果ガス濃度安定化に関する制約を課さないレファレンスケースでは、電力供給の大部分を経済的競争力のある石炭火力に依存することになる。一方、温室効果ガス濃度を 550ppm に安定化するケースでは、レファレンスケースに比較して、電力消費の省エネルギーが行われ、発電量が減少する一方、今世紀後半から、CO₂ 排出原単位の大きい石炭火力に代わり、ガス火力、バイオマス、原子力、風力発電、太陽光発電などのクリーンな燃料源の導入が拡大される。また、石炭 IGCC の発電量もレファレンスに比較して増加する。2100 年の温室効果ガス濃度制約を一層厳しくした 450ppm ケースでは、これらのクリーンな燃料源の導入や本格的な省エネルギーの実施の開始時期が 2030 年からと早まり、温室効果ガス濃度制約を緩めた 650ppm ケースでは、今世紀後半の 2080 年からとなる。

図4-2 発電量の構成

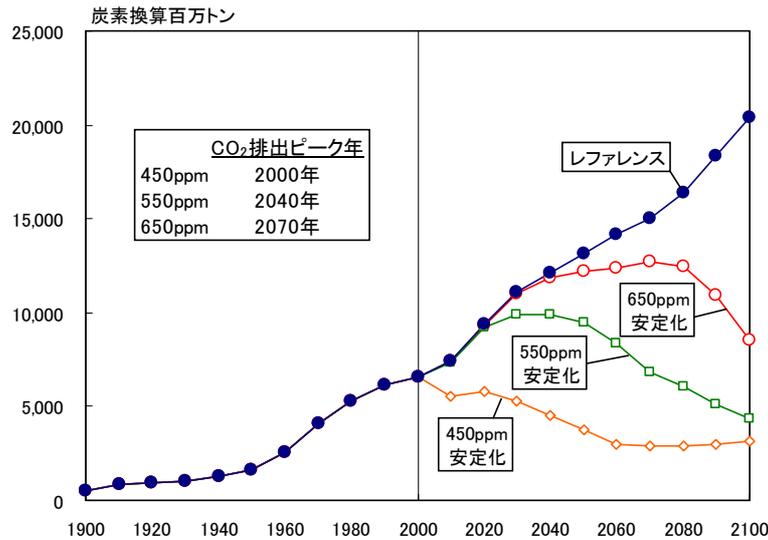


(出所) 筆者によるモデル計算結果

4-3 CO₂ 排出量

図 4-3 に各ケースの CO₂ 排出量の推移を示す。リファレンスケースにおける CO₂ 排出量は、2000 年の炭素換算 66 億トンから、2100 年には現在の約 3 倍の同 204 億トンまで増加すると予測される。一方、2100 年の大気中温室効果ガス濃度を 550ppm に安定化する場合、CO₂ 排出量のピークは 2040 年となり、それ以降、CO₂ 排出量の削減が必要となり、2100 年の CO₂ 排出量は、現在の排出水準より約 7 割程度まで抑制する必要がある。また、2100 年の大気中温室効果ガス濃度を 450ppm に安定化する場合には、CO₂ 排出量のピークは 2000 年となり、現時点から CO₂ 排出量を徐々に削減し、2100 年の CO₂ 排出量は、現在の排出水準より約 5 割まで抑える必要がある。そして、650ppm に安定化する場合には、CO₂ 排出量のピークは 2070 年となり、それ以降より CO₂ 排出量を削減し、2100 年の CO₂ 排出量を、現在の排出水準より約 1.3 倍まで抑える必要がある。

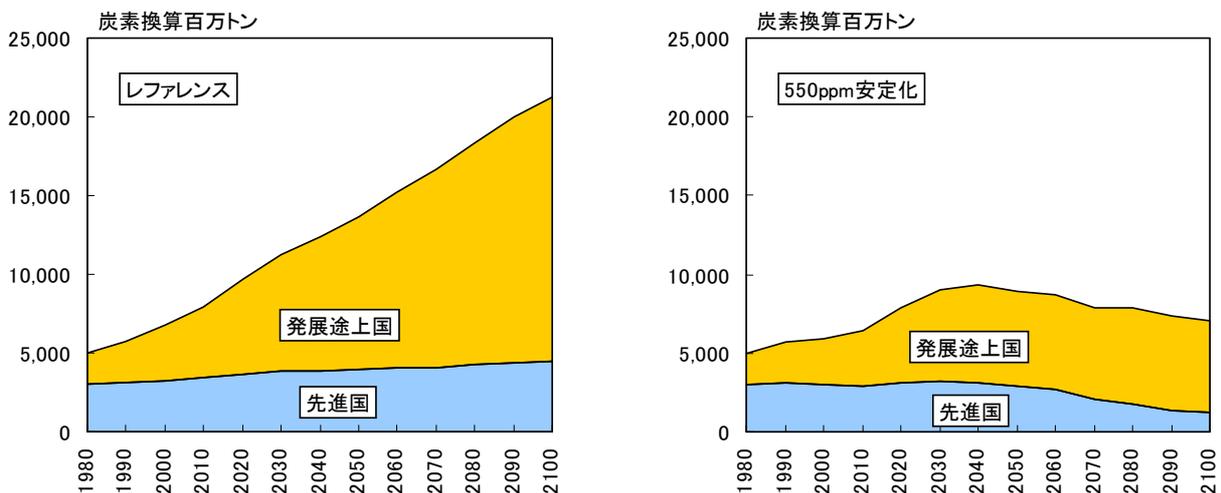
図4-3 CO₂ 排出量の見通し(世界、 ケース別)



(出所) 筆者によるモデル計算結果

図 4-4 に地域別の CO₂ 排出量を示す。レファレンスケースの排出量を見ると、世界の排出量は、発展途上国を中心に増加することがわかる。先進国の排出量は 2000 年の炭素換算 32 億トンから 2100 年には 1.4 倍増の 44 億トンまで増加する一方、途上国は 2000 年の 36 億トンから 2100 年には 168 億トンへ約 5 倍まで拡大する。このように先進国の排出量はそれ程大きく拡大しないことから、地球環境問題の解決を図るためには、発展途上国の CO₂ 排出量を削減することが重要な課題となる。2100 年の温室効果ガス濃度を 550ppm に安定化する場合、2100 年の先進国の CO₂ 排出量は、2000 年比で約 4 割、途上国は 2000 年比で約 2 倍まで排出量の増加が抑制される。

図4-4 CO₂ 排出量の見通し(世界、 地域別)

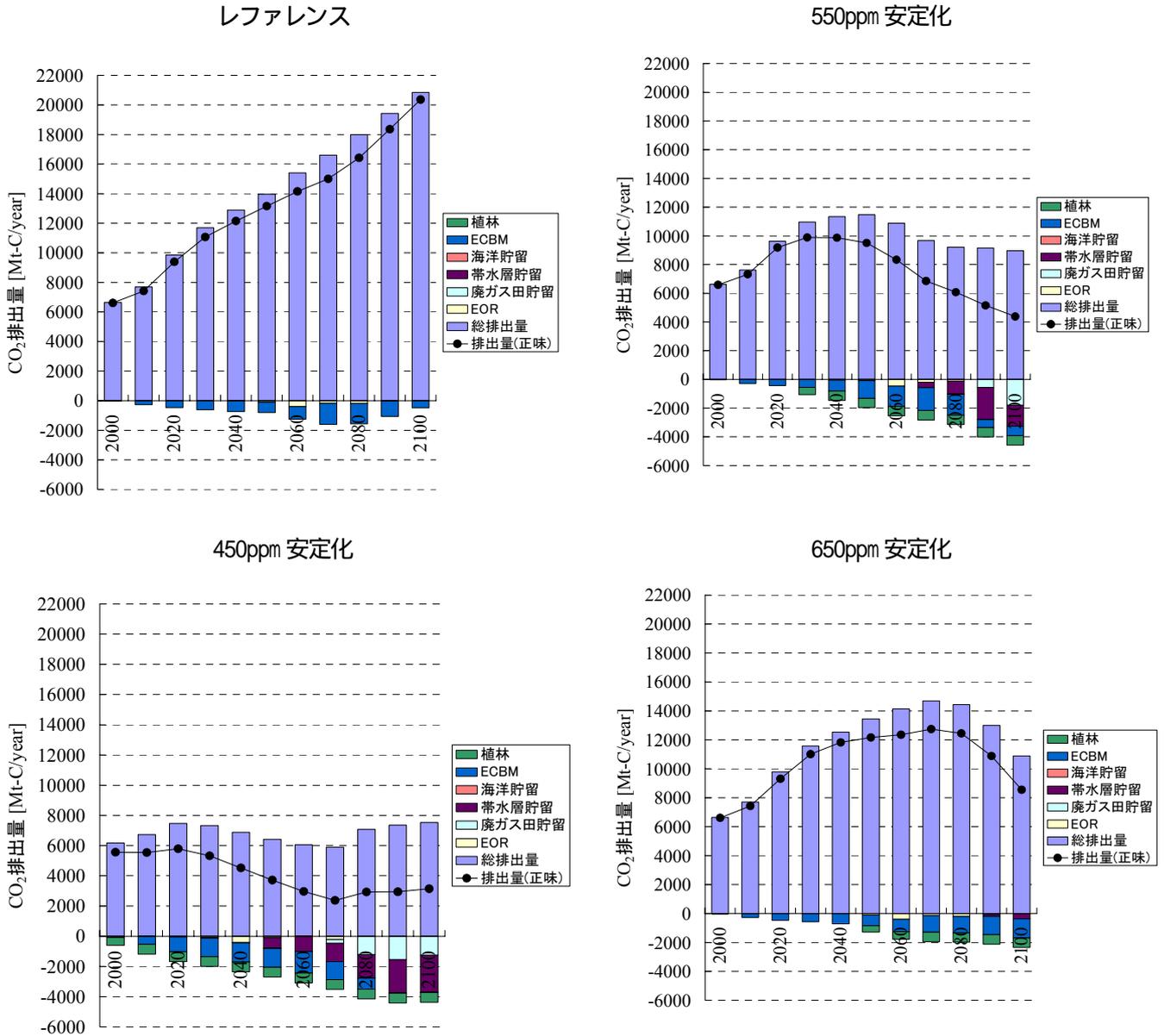


(出所) 筆者によるモデル計算結果

図 4-5 に CO₂ 排出量と CO₂ 貯留のバランスを示す。レファレンスケースにおいて、若干ではあるが石油増進回収(EOR)とともに炭層メタン増進回収(ECBM)も実施され、石油やメタンガスの回収率向上のために CO₂ が利用される。2100 年の大気中濃度を 550ppm に安定化する場合、ECBM とともに、植林や、今世紀後半から帯水層や廃ガス田への CO₂ 貯留が促進される。また、450ppm に安定化するケースでは、CO₂ 固定、貯留技術の導入時期が、550ppm ケースに比較して早まり、650ppm に安定化するケースにおいては、ほぼ ECBM と植林による

固定、貯留のみで大気中濃度を安定化できることがわかる。

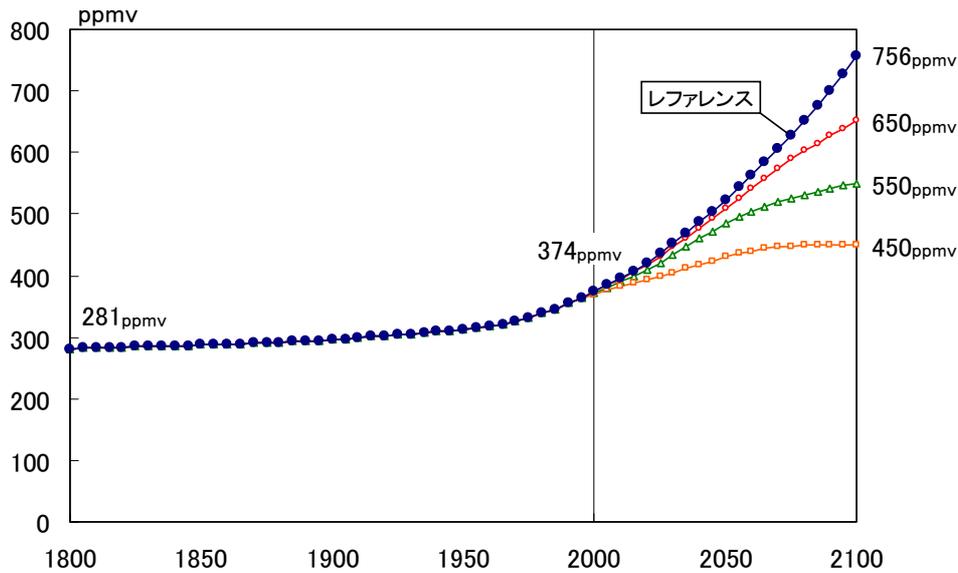
図4-5 CO₂排出量とCO₂貯留のバランス(世界)



*EOR:Enhanced Oil Recovery, 石油増進回収、ECBM:Enhanced Coal Bed Methane, 炭層メタン増進回収
(出所) 筆者によるモデル計算結果

図4-6に各ケースの大気中温室効果ガス濃度の推移を示す。レファレンスケースにおける2100年の大気中温室効果ガス濃度は、現在の水準(約370ppm)の約2倍の760ppm程度まで上昇する。本推計では、CO₂排出量から大気中濃度に変換する手法として、IPCC等で広く用いられている濃度推定モデル(MAGICC)を用いている。この温室効果ガス濃度推定モデルでは、あるCO₂排出量に対し、海洋吸収量を近似的な線形応答関数や、陸上植物吸収量を推定し、残存部分から大気中の温室効果ガス濃度を推定している。

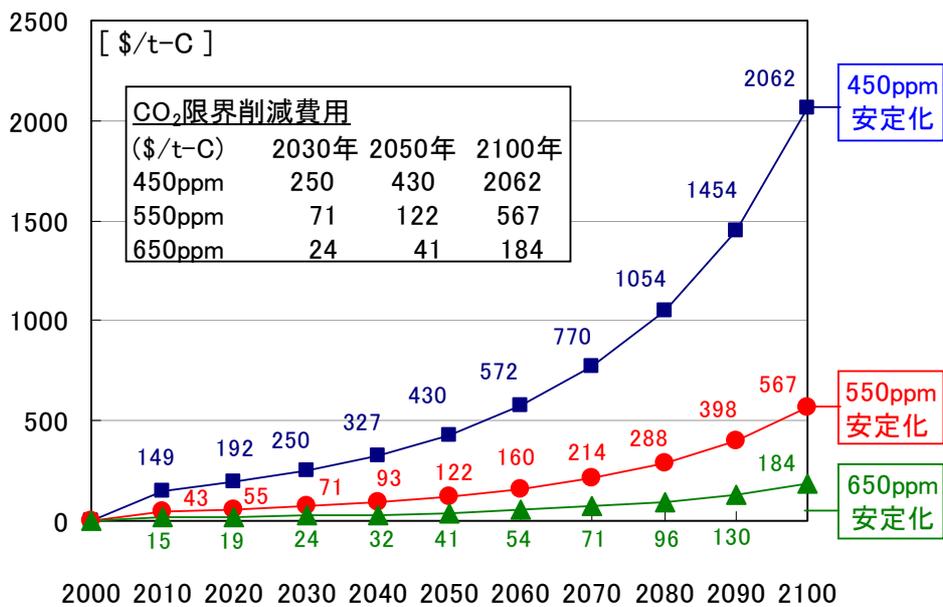
図4-6 温室効果ガス濃度の見通し(ケース別)



(出所) 筆者によるモデル計算結果

図 4-7 に CO₂ 限界削減費用(CO₂シャドープライス)の推移を示す。CO₂ 限界削減費用は、その時点において、さらに CO₂ 排出量を 1 単位削減する際に必要となるコストを意味する。2030 年における各ケースの CO₂ 限界削減費用を見ると、2100 年の温室効果ガス濃度を 550ppm に安定化する場合、約 70\$/t-C であるが、450ppm に安定化する場合、250\$/t-C まで上昇し、650ppm に安定化する場合、約 20\$/t-C まで減少する。また 2050 年、2100 年になるにつれて、安定化目標の間で CO₂ 限界削減費用の差が拡大する。550ppm の場合、2050 年約 120\$/t-C、2100 年約 570\$/t-C となるが、450ppm の場合、2050 年 430\$/t-C、2100 年 2062\$/t-C まで急速に上昇する。

図4-7 CO₂ 限界削減費用 (CO₂シャドープライス)

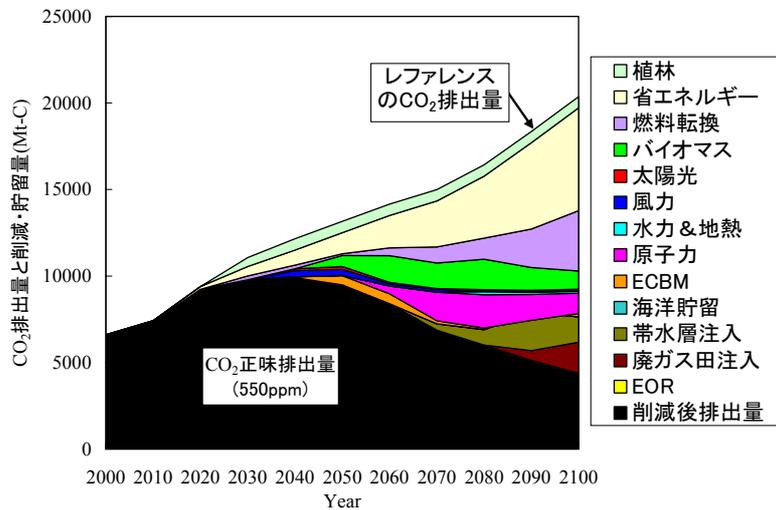


(出所) 筆者によるモデル計算結果

図 4-9、図 4-8 に各大気中温室効果ガス濃度安定化目標の下での世界全体の技術別の CO₂ 排出削減効果を示す。

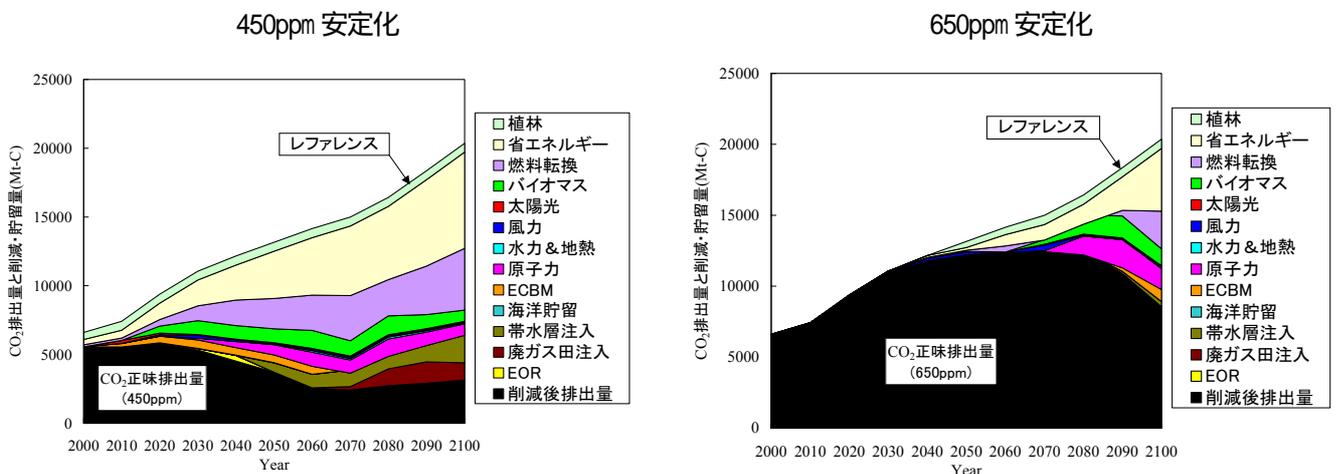
長期的に見ると、省エネルギーがCO₂排出削減に最も大きく貢献し、次いで燃料転換(石炭からガスへのシフト)、非化石エネルギーの導入(原子力、バイオマス等)、CO₂回収・貯留技術(廃ガス田、帯水層貯留等)の貢献が大きいことがわかる。とくに、2100年の大気中濃度を450ppm、550ppmに安定化するためには、CO₂回収・貯留技術が必要なことがわかる。

図4-8 各技術によるCO₂排出削減効果(550ppm安定化ケース)



*EOR: Enhanced Oil Recovery, 石油増進回収、ECBM: Enhanced Coal Bed Methane, 炭層メタン増進回収 (出所) 筆者によるモデル計算結果

図4-9 各技術によるCO₂排出削減効果(450ppm安定化ケース、650ppm安定化ケース)



(出所) 筆者によるモデル計算結果

5. まとめ

本報告では、大気中温室効果ガス濃度の制約下における世界の最適なエネルギー需給構造について計算を行った。イギリス等の欧州各国政府における長期的な大気中温室効果ガス濃度の安定化目標を見ると、気温上昇を2上昇以下に抑制するためには、地球温暖化対策の強化により450ppm～550ppmの範囲で安定化することが必要であるとされている。そこで、本論文では2100年の大気中温室効果ガス濃度を450ppm、550ppm(産業革命前の2倍の濃度)、650ppmに安定化する場合の最適なエネルギー需給を計算した。

その結果、経済、技術の見直しには大きな不確実性が存在するが、温室効果ガス濃度を450ppm、550ppmに安定化するためには、2100年に向けてCO₂排出量の大幅な削減(2000年比でそれぞれ約50%、約40%の削減)が必要となり、550ppmに安定化する場合は2040年以降、450ppmに安定化する場合は、現在から排出量の削減を進める必要がある。そのためには、省エネルギー、燃料転換、非化石資源の導入拡大(非化石資源のシェア:450ppmで39%、550ppmで35%)、CO₂回収・貯留技術(ECBM、植林、帯水層貯留、廃ガス田貯留等)の導入が重要となることがわかり、中でも省エネルギーが長期的に見てもCO₂排出削減に大きく貢献することが計算から示唆された。またCO₂限界削減費用は、2030年において、550ppmに安定化する場合、約70\$/t-C、450ppmに安定化する場合、約250\$/t-Cとなり、2100年の限界削減費用はそれぞれ、約570\$/t-C、約2,060\$/t-Cとなる。

表5-1 2100年の温室効果ガス濃度、一次エネルギー供給、CO₂排出量(世界)

温室効果ガス濃度	一次エネルギー供給				CO ₂ 排出量					
	供給量		供給構成		炭素換算トン	2000年比	ピーク年	CO ₂ 限界削減費用(\$/t-C)		
	石油換算トン	2000年比	化石資源	非化石資源				2030年	2050年	2100年
450 ppmv	157 億トン	1.8 倍	61%	39%	31 億トン	47 %	2000 年	約 250	約 430	約 2,060
550 ppmv	172 億トン	2.0 倍	65%	35%	44 億トン	67 %	2040 年	約 70	約 120	約 570
650 ppmv	179 億トン	2.1 倍	73%	27%	86 億トン	130 %	2070 年	約 20	約 40	約 180
756 ppmv(レファレンス)	249 億トン	2.9 倍	95%	5%	204 億トン	309 %	—	—	—	—

(出所) 筆者によるモデル計算結果

今後、温室効果ガスの濃度上昇という地球規模のリスクを管理するためには、超長期的な視点で、先進国のみならず途上国も参加できる柔軟性を持った将来の枠組みを作ることが重要である。例えば、途上国においては、国の経済計画に温暖化対策を盛り込んだり、自主的な削減目標の設定や、部門別(産業、交通、家庭など)の排出の効率化目標などを設けることが有効になる。それにより、CO₂の排出抑制の必要性が一層高まれば、市場メカニズムの効果と公的な政策対応の拡充によって、石油代替エネルギーや省エネルギーなどの技術開発が自律的に促されていくことが期待される。京都議定書発効に伴い、2013年以降のいわゆるポスト京都の国際温暖化対策枠組みに関する議論が活発化してきている。一方、これら国際条約のもとでの枠組み以外にも、「クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ(APP)」のようなエネルギー効率目標等の導入による排出削減を目指した地域協定も動き出している。2013年以降における温室効果ガスの実質的削減のためには、温室効果ガス増加の中心となる発展途上国が参加可能な枠組みの検討が今後必要であり、これらの国々が積極的にコミットできる枠組みの構築が求められる。

(参考文献)

伊藤浩吉：次世代のエネルギーシステム、「21世紀のエネルギー需給と原子力」、第41回原子力総合シンポジウム・プログラム(2003年)

Yamaji, K. et al., Global energy system to maintain atmospheric CO₂ concentration at 550 ppm, Environmental Economics and Policy Studies, 3, 159, 2000年

藤井康正：エネルギーシステムにおけるCO₂問題対策の評価、東京大学大学院博士論文(1992年)

お問合せ：report@tky.iecej.or.jp