

2.4 市場及び産業の発展の世界的及び地域的狀況

2.4.1 現在のバイオエネルギー生産及び展望¹⁸

バイオマスは、世界の年間一次エネルギー供給の約 10% (2008 年においては 50.3EJ) を供給している。表 2.1 で示すように、このバイオマスの約 60 (IEA による計算) ~70% (計上されていないインフォーマル部門を含む) は、地方で利用されており、調理、照明、及び空間暖房用の木炭、木材、農業残渣、及び肥料に関係している。これは、基本的に開発途上国の人口の中でも貧しい層に利用されている。近代的バイオエネルギーの利用 (発電及びコジェネレーション、熱、または輸送燃料) は、2008 年において 11.3 EJ の一次バイオマス供給を占めている (IEA, 2010a,b; 表 2.1 を参照)。これは、2004 年の 9.6EJ¹⁹ (IPCC, 2007d) 及び 2000 年における 8EJ (概算) (IEA Bioenergy, 2007) から上昇している。

エネルギー目的の固体バイオマスの利用は平均年間成長率 1.5% で増加しているが、液体及び気体燃料などの近代的バイオマスからの二次エネルギーキャリアは、1990 年から 2008 年にかけてそれぞれ 12.1% 及び 15.4% の平均年間成長率で増加している (IEA, 2010a)。結果として、2008 年には世界の陸上輸送燃料利用におけるバイオ燃料の割合は 2% になっていた。2009 年には、エタノール及びバイオディーゼルの生産がそれぞれ 10% 及び 9% 増加し、900 億 l に達した。2009 年には、1980 年以降初めて石油需要が低下し、バイオ燃料が世界の陸上輸送燃料利用の約 3% を供給した (IEA, 2010b)。様々な国における政策によって、世界のバイオ燃料生産は 2000 年から 2008 年にかけて 5 倍に増加した。バイオマス及び再生可能廃棄物発電は、2007 年及び 2008 年においてそれぞれ 259TWh (0.93EJ) 及び 267TWh (0.96EJ) で、世界の電力の 1% を占めている。これは、1990 年の数値 (131TWh または 0.47EJ) から 2 倍になっている。産業用バイオマス加熱は 8EJ を占めており、建築物で利用される空間暖房及び温水は 3.4EJ を占めている (IEA, 2010b; 表 2.1 を参照)。

2007 年及び 2008 年におけるバイオ燃料利用の増加の大部分は、OECD 諸国 (主に北アメリカ及びヨーロッパ) で発生したものである。多くの国における義務及び補助金に伴う需要の増加を見越して過剰設備が導入されたが、原材料及び石油価格の上昇及び信用危機の最中とその後の全体的な経済状況の悪化によって、これらの施設の多くが採算の取れない状態になった。その結果、その一部は十分に活用されておらず、その傾向はエタノールよりもバイオディーゼルの生産においてより顕著である。一部のプラントは稼働しておらず、一部の事業は失敗に終わっている。アジア太平洋及びラテンアメリカの市場は、経済発展によって主に開発途上国において成長を続けている。短期的な低迷が予想されているものの、世界における陸上輸送目的のバイオ燃料の利用は今後数年で回復すると予測されている (IEA, 2010b)。

2020~2035 年の WEO (IEA, 2010b) 予測は、世界のバイオマスからの一次エネルギー供給総量に関しては表 2.8、世界のバイオエネルギー需要 (二次エネルギー) に関しては表 2.9、世界の発電に関しては表 2.10 で要約している。これらはすべて、ベースラインケース (現在の政策) と大気二酸化炭素濃度が 2100 年までに 450ppm に達する緩和シナリオを比較している。

表 2.8: IEA の WEO シナリオ: 2020~2035 年のバイオマス予測 (EJ/年) からの世界の一次エネルギー供給総量 (IEA, 2010b)

年	2007	2008	2020		2030		2035	
シナリオ	実際の数値	実際の数値	ベースライン	450 ppm	ベースライン	450 ppm	ベースライン	450 ppm
EJ/年	48	50	60	63	66	83	70	95
差分、EJ	2		3		17		25	

450ppm 二酸化炭素安定化シナリオにおけるバイオマスからの全体的な一次エネルギー供給総量は、参照 (現在の政策) シナリオに 14 (12) EJ を加え、2030 年 (2035 年) に 83 (95) EJ/年まで増加する (表 2.8 を参照)。

¹⁸ 本小節は、主に WEO 2009 (IEA, 2009b) と 2010 (IEA, 2010b)、及び Global Biofuels Center の評価、ウェブページのバイオ燃料ニュース、報告書、貿易・市場情報 (Hart Energy Publishing, LP, www.globalbiofuelscenter.com/) に基づいている。

¹⁹ この 9.6EJ は、AR4 研究 (IPCC, 2007d) に含まれる非有機性生活系廃棄物または約 0.4EJ のプラスチック (続く IEA 2005 のデータに基づいて推定) を除いた推定等価一次バイオマスエネルギーである。

表 2.9: IEA の WEO シナリオ: IEA データ (IEA, 2010b) に基づく供給生産物の二次エネルギーに関する 2020～2035 年の世界のバイオ燃料需要予測 (EJ/年)

年	2008	2009	2020		2030		2035	
シナリオ	実際の数値	実際の数値	ベースライン	450 ppm	ベースライン	450 ppm	ベースライン	450 ppm
EJ/年	1.9	2.1	4.5	5.1	5.9	11.8	6.8	16.2
%世界の陸上輸送	2	3	4.4	7	4.4	11 (及び航空)	5	14 (及び航空)
%第二世代			展開			60		66

近代的バイオマスからの液体及び気体エネルギーキャリアの利用は特にバイオ燃料で増加しており、2006 年から 2009 年にかけて 37%増加している (IEA, 2010c)。現在、バイオ燃料に対して強い政策の支援がある地域は、2008 年から 2035 年にかけて発生するバイオ燃料市場の 8 倍の増加において最も大きな割合を占めると予測されている。この増加においては、アメリカ（増加の 3 分の 1 を担う）が先導し、それにブラジル、EU、中国が続く形になる。規模に着目すれば、先進バイオ燃料（第二世代）の 7EJ はインドの 2007 年における石油消費などよりも大きく、必要とされる技術の多くが 2011 年において実証～初期商業化段階に入っている（表 2.5 及び 2.15 を参照; IEA Renewable Energy Division, 2010）。

世界のバイオマス及び再生可能廃棄物発電も、両方のシナリオにおいて増加すると予測されており、表 2.10 で示すように 450ppm シナリオでは 2035 年までに世界の発電の 5.6%に達するとされている。気候変動動因は、現在の政策の継続によって、予測水準と比較してバイオ発電の予想される浸透水準は約 2 倍に押し上げる。

表 2.10: IEA の WEO シナリオ: 2030 年 (IEA, 2009, 2010b) 及び 2035 年 (IEA, 2010b) の一次バイオマス及び再生可能廃棄物発電予測

年	2008	2030		2035	
シナリオ	実際の数値	ベースライン、参照ケース	450ppm シナリオ	現在の政策	450ppm シナリオ
TWh/ 年 (EJ/年)	267 (0.96)	825 (3.0)	1380 (5.0)	1052 (3.8)	1890 (6.8)
%世界の電力	0.96	2.4	4.5	2.7	5.6
TWh/ 年 (EJ/年)		840 (3.0)	1450 (5.2)		
%世界の電力		2.4	4.8		

WEO (IEA, 2010b) において、プロセス蒸気及び建築物の空間及び温水暖房のためのバイオマス産業用熱用途は、2008 年の水準から、それぞれ絶対的に 2035 年までに 2 倍になるとされている。総熱需要は 2035 年には減少すると予測されているが、これによって熱カテゴリーの主要な要素（伝統的バイオマス）の予想される減少がいくらか相殺される。産業用熱及び建築物暖房は、継続的なバイオマスの増加の分野であると見られている。事実、バイオマスは、コジェネレーション・プラントでは非常に効率的に利用されており、地域暖房ネットワークを供給している。コジェネレーション・プラントにおける電力及び熱の生産のためのバイオマス燃焼は、効率的かつ成熟した技術であり、すでに特定の地域においては化石燃料に対して競争力を持っている (IEA, 2008a)。

発電目的の固体バイオマス（特にパルプ・製紙工場及びサトウキビ圧搾機からのもの）の利用は、重要である。総エネルギー消費におけるバイオエネルギー（発電目的の混焼、ペレットを用いた建築物暖房）の割合は G8 諸国（特にドイツ、イタリア、及びイギリス (IEA, 2009b)）で増加している。発電及びバイオマス加熱は、図 2.8 で示されている。先進国における世界的バイオマス加熱統計は不確実性が高い (Sims, 2007)。ヨーロッパにおいて、建築部門におけるバイオマス加熱用途はコスト競争力があり、図 2.8 に示されている。開発途上国の場合、インフォーマル部門からのデータ収集のツールが不足しており、統計は比較的発達していない（表 2.1 を参照）。

2009年の主要なペレット貿易フロー

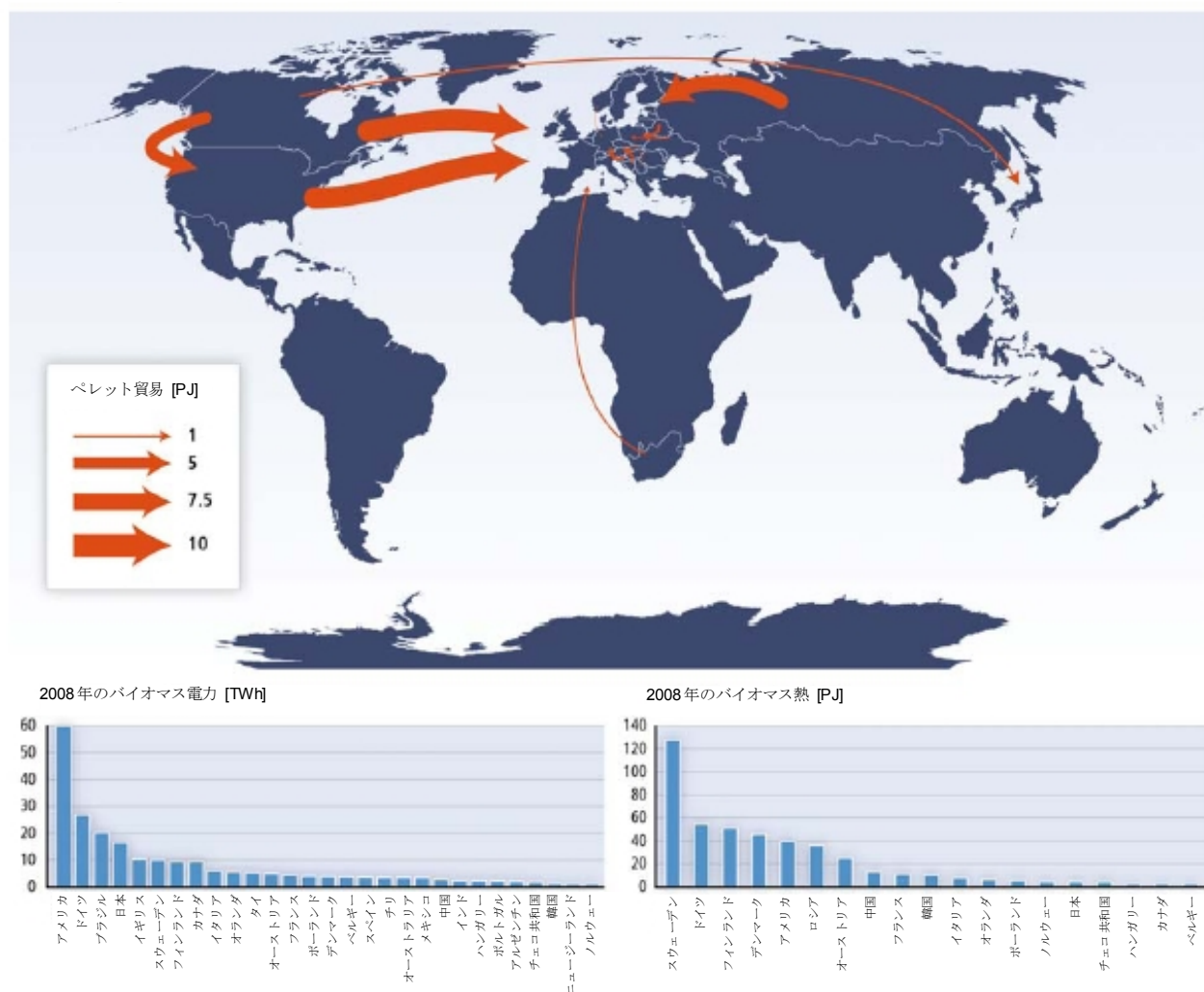


図 2.8: 2008 年の主要国におけるバイオマス発電と加熱及び木材ペレットの 2009 年の国際貿易の例。出典: 棒グラフのデータは IEA (2010c) に準拠。貿易フローのデータは、Society of Chemical Industry 及び John Wiley & Sons, Ltd. の許可の下 Sikkema et al. (2011) より複製。

2.4.2 伝統的バイオマス、改良された技術と手法、及び障壁

バイオマスは開発途上国で重要な伝統的燃料の 1 つであり、エネルギーの組み合わせにおいて平均 22% を占めており、²⁰ 最貧国においては 80% 以上を占めている (IEA, 2010c を参照)。バイオマスの伝統的な供給源は、ほとんど木材燃料だが、それだけでなく農業残渣及び家畜ふん尿も含んでおり、それらは基本的に家庭用暖房及び調理に寄与している。調理のためにバイオマスに依存する人の数は多く、その数は 27 億 (2008 年) と推定されており、2030 年までに 28 億まで増加すると予測されている (IEA, 2010b)。れんが製造、食料、木炭、パン類製造など、多くのバイオマスを利用した小規模な産業によって、人々に雇用及び収入が供給されている。これらの技術のほとんどは、資源集約的で汚染度も高く、効率も低い (表 2.1 及び 2.6 を参照; FAO, 2010b)。しかし、現在、改良された技術の市場は非常に大きく、成長を続けている。また、より効率の良い技術オプションの普及に向けて、いくつかの世界、国家、及び地域規模のプログラムが施行されている。

2.4.2.1 改良型のバイオマス調理ストーブ

開発途上国のほとんどは、1980 年代から何かしらの改良型の調理ストーブ (ICS) 計画に着手している。World Bank Energy Sector Management Assistance Program (World Bank, 2010) は、改良型のストーブに関する国際的な経験を入念に検討し、開発途上国における重要な教訓及び (特にバングラディッシュにおける) 研究の目的を要約している。東アフリカ諸国に関しては、Karekezi and Turyareeba (1995) を参照のこと。多くのプログラムが、開発機関、政府、

²⁰ 2008 年における再生可能・廃棄物可燃物からのエネルギーミックスへの平均的寄与は、OECD 諸国においては 4% に過ぎないが、アフリカ、ラテンアメリカ、インド、非 OECD アジア諸国、及び中国において、それぞれ 48%、20%、24%、27%、及び 10% となっている (IEA, 2010c)。

非政府組織（NGO）、及び民間部門による後援の下で進行中である。2009 年末までに、1.73 億の省エネストーブが中国で使用された。他の国では、改良型の調理ストーブの普及はそれほど成功を収めていない。過去 10 年間にわたって、全く新しい世代の先進バイオマスストーブ及び普及アプローチが開発されており、この分野はいま、イノベーションにあふれている（World Bank, 2010）。

直接燃焼、小規模ガス化、小規模嫌気性消化、液体燃料（エタノール）の直接利用、技術の組み合わせなど、様々な技術が利用されている²¹。その結果、燃焼効率は代替となる裸火と比べて大きく向上した。2007～2009 年のコスト幅データによれば、そのコストの幅は、簡易なモデルの 10US ドルまたは高度なモデルの 100US ドル以上から規格化されたストーブ（学校、病院、兵舎など）の 100～300US ドルとなっている。燃料節減は、現地の状況で測定した場合に 30～60%、最も高度なモデルのパイロット試験で測定した場合に 90%以上となった（Berrueta et al., 2008; World Bank, 2010）。また、温室効果ガス排出量及び屋内大気汚染物質の大幅な減少も見られる（2.5.4 節）。

2008 年までに、世界で推定 8.2 億人（調理において伝統的バイオマスに依存する 27 億人の約 30%。1.4.1.2 節を参照）が何かしらの改良型の調理ストーブを調理に利用しており（Legros et al., 2009）、160 以上のストーブ・プログラムが世界中で施行されている。例としては、インド、メキシコ、及びペルーで最近立ち上げられた大規模な国家プログラムに加え、アフリカにおける大規模な援助に基づくプログラムがある。UN Foundation-led Global Alliance for Clean Cookstoves は、2020 年までに 1 億の先進調理用ストーブを普及及び採用するために 2010 年に開始された²²。

技術開発の 2 つの主要な方向性が踏襲されてきた。大規模アプローチ（一部には最先端の製造施設が利用されている）は、複数の国まで含み得る流通経路を用いたストーブまたは重要な部品の集中型生産に重きを置いている。その結果、年間 100,000 以上のストーブを生産する企業も存在している（Bairiganjan et al., 2010）。もう 1 つのアプローチは、地方における雇用創出をより重視し、地域の能力を高めることに重きを置いている。ストーブは、メキシコの Patsari Stove やカンボジアの Groupe Energies Renouvelables, Environnement et Solidarités (GERES) などのように、市場で売られるのではなくオンサイトで設置されることもある（Bairiganjan et al., 2010）。消費者にアピールするための改良型のストーブの設計、市場細分化、及び小規模金融メカニズムも開発されている（Hilman et al., 2007）。

インセンティブ及び障壁

調理ストーブ・プログラムは、技術、調理機器、ユーザーの需要、及び制度的背景に関して、地域の需要が適切評価された国において成功を収めてきた。政府（中国など）による促進的な制度的環境も新しい技術の促進を助けてきたが、資金面のインセンティブは普及に貢献してきた。最終的には、正確な監視及び評価がストーブの採用及び利用を成功させる上で重要である（Bairiganjan et al., 2010; Venkataraman et al., 2010）。改良型の調理ストーブの採用のその他の動因としては、（1）ユーザーが煙を感じる調理環境における健康問題及び不快感、（2）短い消費者資本回収（数ヶ月）、（3）最低でも 5 年以上延長された資金提供者または政府の支援、及び（4）地方施設の建設及び地方の専門技術の開発に対する資金援助などがある。政府援助は、技術的助言及び品質管理においてより効果を発揮してきた。カーボン・オフセット・プロジェクトによるこれらの活動に対する新たな資金提供は増加している。その経路は、任意市場（金本位制）またはクリーン開発メカニズム（現在増加している）である。低コストで効率の良い改良型の調理ストーブを用いて成功したプログラムでは、地方の貧困層は燃料節減のため、プログラムの支援を受けていない調理ストーブを購入していたと報告されている（World Bank, 2010）。

改良型の調理ストーブの急速な普及を実現するためには、いくつかの障壁を乗り越える必要がある。（1）研究開発の大幅な増加²³、（2）ユーザーの需要のためのより多くの現地試験及びストーブ特注生産、（3）厳密な製品仕様及び試験と認証プログラムが必要である。最後に、複数の機器及び燃料に加え、その長期的な使用を助けるメカニズムを考慮し、ストーブの採用のパターンの理解を深めることが重要である。

2.4.2.2 バイオガス・システム

利便性の高い調理及び照明は、家庭規模のバイオ消化槽を用いたバイオガス生産による供給も受けている²⁴。バイオ消化槽には、人為的廃棄物の病原体リスクの減少に加えて、家畜ふん尿の肥料としての価値を高める明確な相乗便益がある。品質管理及び運用の問題のため、初期段階の結果は複雑になっており、多くの失敗につながった。ア

²¹ これらの改良型の調理ストーブ技術は、燃焼室（Rocket elbow など）、断熱材、熱伝導率、ストーブ形状、及び通気性の改善を含んでいる（Still et al., 2003）。これらの中でも最も信頼性が高い技術は、燃焼を安定させる小型電動送風機を使用しているが、自然の気流を利用した設計も存在する（World Bank, 2010）。

²² www.cleancookstoves.org を参照のこと。

²³ 特に新しい断熱材及び数年に及ぶ激しい使用と小規模ガス化に耐える堅牢性の高い設計のためのもの。

²⁴ 2009 年末までに、中国及びインドにおいて家庭用バイオ消化槽の個数は 3500 万に達した（Gerber, 2008; REN21, 2009, 2010）。ネパールにおいては、商業用バイオガス利用も多く実践されている。M. Iler（2007）は既存のバイオガス技術及び中国、タイ、インド、南アフリカ、ケニア、ルワンダ、及びガーナにおける寄与を用いたケーススタディを検討している。

フリカにおけるより小規模なバイオガスの経験は、必要とされる資本コスト、保守、及び管理支援が予想よりも大きかったため、家庭規模では不満が残ることが多かった。得られた経験、新しい技術開発（ジオメンブレンの利用など）、ユーザーが利用可能な資源（家畜ふん尿など）のより深い理解、及びより有効な市場細分化によって、新しいプログラムの成果が向上している（Kishore et al., 2004）²⁵。

インセンティブ及び障壁

プロジェクトの成功の主要因として、ユーザーの需要及び資源の正しい理解が挙げられる²⁶。たとえば、インドの地方におけるバイオガス・プラントの移転、キャパシティービルディング、拡張、及び採用における非政府組織、ネットワーク、及び団体の役割は、非常に重要であることが分かった（Myles, 2001）。クリーン開発メカニズムにおける小規模金融制度、カーボン・オフセット・プロジェクトなどの資金メカニズムも、家庭用バイオガス・プログラムの実行において重要である。バイオガス採用の増加の障壁としては、適切な技術基準の欠如、消化槽の投資、設置、及び機器コストに対して望ましい収益を達成するには不十分な資金メカニズム、及び比較的高い技術と労働のコストが挙げられる（適切な現場設置の地質調査など）。その他の関係する障壁としては、設計と建設の信頼性とパフォーマンスの不足、及び既存のプラントの運用から得た知識の新しいプラントへの不十分な応用などがある。

その他にも、エネルギー・電力の輸送及び生産利用を目的としたシステムなど、多くの小規模バイオエネルギー用途が登場している。市場への浸透はまだ限定的であるが、これらのシステムの多くは、生活、新しい収入、歳入、及び効率に関して重要な便益を示している（Practical Action Consulting, 2009）。

2.4.3 近代的バイオマス：大規模システム、改良された技術と手法、及び障壁

大規模バイオエネルギー・システムの展開は、様々な障壁に直面している。第二世代バイオ燃料などの開発途上の技術の場合は技術的障壁が大きい（Cheng and Timilsina, 2010）、原材料利用可能性、及び持続可能性要件を満たすために制約を受けている、現在商業化されている技術の場合、経済的障壁が最も顕著である（Fagnäs et al., 2006; Mayfield et al., 2007）。非技術的障壁は、展開政策（財政的インセンティブ、規制、及び公共財政支援）、市場創出、サプライチェーン、インフラ開発、コミュニティの関与、協調、及び教育に関係している（Mayfield et al., 2007; Adams et al., 2011）。他よりも決定的であると思われる単一の障壁はないが、様々な個別の障壁間の相互作用によって急速なバイオエネルギーの拡大が妨げられると考えられる。障壁の相対的な重要性は、考慮される特定のバリューチェーン及び文脈によって決定される。特に、バイオ電力の価格主導型固定価格制度、バイオ燃料の品質主導型混合水準義務などの国家規制は、公債または保証プログラムを通じた公共財政支援と並んで、大規模なプロジェクトの登場において大きな役割を果たしている（表 2.11; 11.5.3 節; Chum and Overend, 2003; Fagnäs et al., 2006）。その優先度は、バリューチェーンに関与するステークホルダー団体にも依存しており、原材料生産者から燃料生産者、そして最終消費者に至るまでにおいて異なっている（Adams et al., 2011）。国家によって認識される障壁は、ステークホルダー及びバイオエネルギー・プロジェクト付近のコミュニティが認識するものとは異なっているため、規模も問題となる²⁷。

技術的及び非技術的障壁は、適切な政策枠組みによって克服出来る可能性がある。例としては、投資リスクを下げるための先駆的な商業用プラントの民間投資支援と協調した政府支援などの経済的手段²⁸、継続的な研究開発と実証への取り組み、及び協調的な複数の民間部門活動の調整²⁹などがある（IATA, 2009; Regalbuto, 2009; Sims et al., 2010）。2009 年には、世界の公的研究開発と実証の取り組みは、エネルギー用のバイオ燃料及びバイオマスにおいてそれぞれ 6 億 US ドル及び 2 億 US ドル規模に達しており、バイオ燃料の公的資金は 2008 年から 88% 増加した。企業による研究開発と実証の取り組みは、この両分野でそれぞれ 2 億 US ドル規模になった（UNEP/SEFI/Bloomberg,

²⁵ たとえば、伝統的システムの高い初期コスト（システムによっては、消化槽ユニットを含めて最大 300US ドルに達する可能性がある）は、新しい設計によって大幅に削減することが出来る。その新しい設計は、消化時間が短縮して特定のメタン収率が増やし、代替または複数の原材料（葉の多い材料、食料廃棄物など）を利用し、消化ユニットのサイズ及びコストを大幅に小さくしている（Lehtomäki et al., 2007）。

²⁶ Hedon Household Network は、www.hedon.info でこの分野における経験の参考文献を挙げている（[www.hedon.info/docs/20060531_Report_\(final\)_on_Biogas_Experts_Network_Meeting_Hanoi.pdf](http://www.hedon.info/docs/20060531_Report_(final)_on_Biogas_Experts_Network_Meeting_Hanoi.pdf) など）。

²⁷ たとえば、バイオマスを供給するための地方交通の増加は地方の容認度を下げるため、景観に対するバイオエネルギー開発の影響は、一部の農家による新しいバイオエネルギー変換プラントの採用の障壁である（van der Horst and Evans, 2010）。温室効果ガス削減の効率及び他のエネルギー源に対するバイオエネルギーの競争力の増加に対してより敏感な政府もある。これは、規模の増加につながることが多いが（Adams et al., 2011）、技術が大きなコストペナルティーを伴わずに小規模用途に供給を行う処理能力を増加させることに成功した場合は例外である（2.6.2 節を参照）。

²⁸ 先駆的な商業用プラントを含むアメリカのエネルギー省の統合バイオリファイナリー・プロジェクトなどを参照のこと（www1.eere.energy.gov/biomass/integrated_biorefineries.html）。パイロット・実証・商業用バイオ燃料プラントを含む IEA Bioenergy Task 39 対話型サイトも参照のこと（biofuels.abcenergy.at/demoplants/projects/mapindex）。

²⁹ European Industrial Bioenergy Initiative（バイオエネルギーのバリューチェーン全体にわたる多産業パートナーシップ）などを参照のこと（www.biofuelstp.eu/eibi.html）。

2010)。ベンチャー・キャピタル及び未公開株式投資は、エネルギー用のバイオ燃料及びバイオマスにおいて、それぞれ 11 億 US ドル及び 4 億ドルと推定されている (UNEP/SEFI/Bloomberg, 2010)。ベンチャー・キャピタル投資の大部分はアメリカにおけるものである (Curtis, 2010)。アメリカ及びブラジルにおいて、大きな第一世代バイオ燃料産業再編が起こった。主要な世界的石油会社投資は、この両国及び EU で発生した (IATA, 2009; Curtis, 2010; IEA, 2010b; UNEP/SEFI/Bloomberg, 2010)。

2.5 節で述べているように、バイオエネルギー・システムの持続可能性における知識ギャップの克服は、公的及び民間意思決定を可能にし、社会の受容度を増加させる上で非常に重要であるという報告がなされている。このギャップの大部分は、原材料生産、及びそれに付随する土地利用、生物多様性、水と食料価格に対する影響に関係している (WWI, 2006; Adams et al., 2011)。他の提案された研究開発手段には、より持続可能な原材料と変換技術 (WWI, 2006)、変換効率の向上 (Cheng and Timilsina, 2010)、全体的なチェーン最適化 (Fagnäs et al., 2006) などがある。

その他の産業及び部門 (森林、食料及び飼料、電力、化学産業など) とのバイオエネルギー生産の統合によって、競争力が向上し、原料の活用がより効率的になることは確実である (Fagnäs et al., 2006)。たとえば、デンマークのカロンボーという街においては、共通の土地に位置する事業のコミュニティが政府当局との密接な協力の下で資源を共有している。これにより、環境及び資源問題の管理における環境的、経済的、及び社会的パフォーマンスを向上させるため自発的にいくつかの双務契約を結び、産業共生が 50 年間かけて発達した³⁰。Kalundborg の経験によって、長期にわたって関与した事業の実行可能性は向上し、他の多くの産業環境に応用可能なコミュニティの思考システム・アプローチが発達した (Jacobsen, 2006)。

2.4.4 バイオマス及びバイオエネルギーの国際貿易

バイオマス原材料 (木材チップ、粗植物油、農業残渣など)、特に近代的バイオエネルギーからのエネルギーキャリア (エタノール、バイオディーゼル、木材ペレットなど) の国際貿易は、急激に増加してきている。2000 年には実質上、液体バイオ燃料または木材ペレットはまったく取引されていなかったが、2009 年には液体バイオ燃料の世界における総取引量は 120~130PJ に達しており (図 2.9)、それに対し木材ペレットは約 75PJ になっている (図 2.8)。これらの生産物の国際的な取引量は、将来的に増加すると見られており、ラテンアメリカ及びサハラ以南のアフリカが潜在的な純輸出国、北アメリカ、ヨーロッパ、及びアジアが純輸入国になると予想されている (Heinimö and Junginger, 2009)。そのため、貿易は、バイオエネルギー部門の継続的成長の重要な要素となる可能性がある。図 2.9 は、バイオエタノール及びバイオディーゼルの国際貿易の流れの総量とともに、多くの国における 2009 年のバイオ燃料生産を示している (表 2.9 も参照)。2008 年には、世界のバイオ燃料生産の約 9% が国際的に取引されていた (Junginger et al., 2010)。これらの 3 つの商品の生産及び貿易については、以下でより詳細に解説している。

世界の燃料エタノール生産は、2000 年の約 0.375EJ から 2009 年の 1.6EJ 以上まで増加した (Lamers et al., 2011)。主要なエタノール生産国及び消費国であるアメリカとブラジルは、世界の生産量の約 85% を占めている。EU においては、2009 年における輸送用エタノールの総消費量は 94PJ (3.6Mt) であり、最大のユーザーはフランス、ドイツ、スウェーデン、スペインとなっている (Lamers et al., 2011; EurObserv'ER, 2010)。エタノールには様々な潜在的な最終用途 (燃料、産業、及び飲料への利用) があり、また国際貿易の統計におけるバイオ燃料の適切な符号が不足しているため、燃料用バイオエタノール貿易に関するデータは不正確である。推定では、2009 年における燃料用エタノールの総取引量は 40~51PJ とされている (Lamers et al., 2011)。

世界のバイオディーゼル生産は 2000 年の 20PJ 以下から始まり、2009 年には約 565PJ に達した (Lamers et al., 2011)。EU は 334PJ (世界の生産の約 3 分の 2) を生産しており、ドイツ、フランス、スペイン、イタリアが EU における主要な生産国となっている (EurObserv'ER, 2010)。EU27 ヶ国の生産率は 2008 年に近づくにつれ横ばい状態になっている (FAPRI, 2009)³¹。ヨーロッパ内のバイオディーゼル市場ではより競争が激化してきており、ドイツ、オーストリア、及びイギリスにおいて 2009 年の過剰生産能力によってバイオディーゼル・プラント (小型のもの、縦断的な統合度合いが低いもの、効率の低いもの、僻地のものなど) がすでに閉鎖されている。図 2.9 で示すよう

³⁰ 最近追加されたのは、石炭発電所、石油精製所、バイオ技術企業、地域暖房、魚類養殖、ガス回収を用いた埋め立てプラント、肥料生産、ジブサム (石膏)、土壌浄化・水処理施設などの複合施設に追加された麦わらを用いたエタノール実証プラントである。1 つの企業からの廃棄生成物 (熱、ガス、硫黄、灰、温水、酵母、肥料、廃棄物スラリー、固形廃棄物) は、うまく機能している産業用エコシステムにおいては、複数の企業及び近隣の町で利用出来る資源となる (www.kalundborg.dk/Erhvervsliv/The_Green_Industrial_Municipality/Cluster_Biofuels_Denmark_(CBD).aspx, www.inbicon.com/Biomass_Refinery/Pages/Inbicon_Biomass_Refinery_at_Kalundborg.aspx など参照)。

³¹ ほとんどの EU 加盟国 (MS) が生産量を増やす中、ドイツのバイオディーゼル市場は、政策枠組みの変更による純バイオディーゼル・ガソリンの税額控除の段階的な廃止のため、供給と需要両面において縮小した。同時に、主に 2006~2008 年の米国及び 2008~2009 年のアルゼンチンからの価格競争力の高いバイオディーゼルの輸入の割合が増加したことによって、他の EU 加盟国へのバイオディーゼル輸出は、ドイツ (及びその他の国の) 生産者にとってより実行しがたいものとなった (Lamers et al., 2011)。

に、その他の主要なバイオディーゼル生産国としてはアメリカ、アルゼンチン、ブラジルなどがある。EU におけるバイオディーゼル消費は約 403PJ (8.5Mt) (EurObserv'ER, 2010) であり、ドイツ及びフランスがその約半分を消費している。図 2.9 に示すように、国際バイオディーゼル貿易総量は、2005 年以前は 1PJ 以下であったが、この低い開始点から非常に早く増加し、2009 年には 80PJ を超えている (Lamers et al., 2011)。

木材ペレットの生産、消費、及び貿易は、過去十年間において大きく増加し、国際貿易量に関してはエタノール及びバイオディーゼルと肩を並べている。2009 年には、主にヨーロッパの 30 ヶ国、アメリカ、及びカナダにおいて概算で 13Mt (230PJ) の木材ペレットが生産されている (図 2.8)。消費は、多くの EU 諸国及びアメリカが高かった。EU 最大の消費国はスウェーデン (1.8Mt または 32PJ)、デンマーク、オランダ、ベルギー、ドイツ、及びイタリア (それぞれ約 1Mt または 18PJ) であった。主要な木材ペレット貿易経路は、カナダ及びアメリカからヨーロッパ (特にスウェーデン、オランダ、及びベルギー) 及びアメリカに通じている。2009 年には、オーストラリア、アルゼンチン、及び南アフリカから EU へのものなど、その他の小規模な貿易フローも報告されている。カナダの生産者は、日本へも少量の輸出を始めた。2009 年におけるヨーロッパ諸国による木材ペレットの総輸入量は、約 3.9Mt (60PJ) と推定されており、その約半分は EU 内貿易であると推測出来る (Sikkema et al., 2010, 2011)。

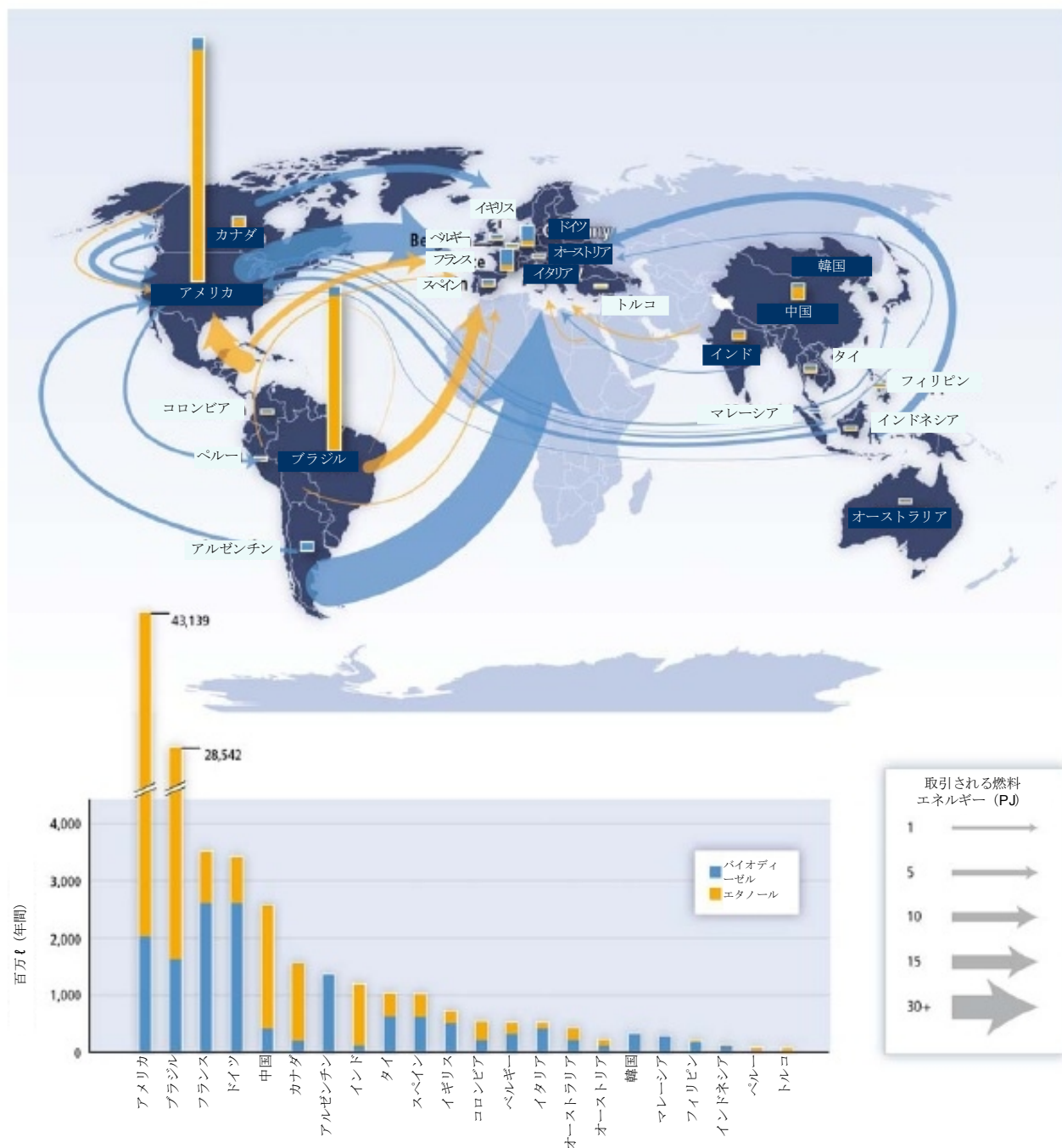


図 2.9: 2009 年における世界のバイオ燃料生産及び主要な国際貿易。バイオ燃料量の出典: GAIN (2009a,b,³² 2010a-j³³) ; EIA (2010a) ; EurObserv'ER (2010) ; RFA (2010) ;³⁴ REN21 (2010) ³⁵。貿易フロー: Lamers et al. (2010) ³⁶。EU 内バイオディーゼル・エタノール貿易総量はそれぞれ 78PJ 及び 116PJ に相当する (Lamers et al., 2011)。

³² 中国及びインドネシアのデータ

³³ アルゼンチン、オーストラリア、ブラジル、カナダ、インド、韓国、マレーシア、ペルー、フィリピン、タイ、及びトルコのデータ

³⁴ www.ethanolrfa.org/pages/statistics

³⁵ 様々な国におけるバイオ燃料の量・目標とその他の政策情報に関する最新の情報、及び対話型ツール (www.map.ren21.net) については www.ren21.net/REN21Activities/ を参照のこと。

³⁶ 図 2.9 で使用した貿易フローについては、www.chem.uu.nl/nws を参照のこと。詳細なデータについては、Lamers et al. (2011) を参照のこと。

2.4.5 バイオマス及びバイオエネルギーの支援政策の概要³⁷

支援政策の典型的な例を表 2.11 に示している。たとえば、液体バイオ燃料政策には、（旧）Brazilian Proálcool プログラム、多くの EU 諸国における義務形式による規制、及び税額控除、生産税額控除、加速償却などのアメリカの財政的インセンティブが含まれる（WWI, 2007）。ここ数十年におけるバイオマスからの熱目的の政策で成功したものの大部分は、地域暖房及び産業における熱またはコジェネレーションのより集中した用途に焦点を置いている（Bauen et al., 2009a）。これらの部門では、間接的なインセンティブと直接的な支援計画の組み合わせが、スウェーデンなどいくつかの国で成功を収めてきた（Junginger, 2007）。割り当て制度と固定価格制度の両方がバイオエネルギー 発電の支援のために施行されてきたが、固定価格制度の方が徐々に一般的になってきている。再生可能エネルギー生産の促進（バイオエネルギーを含む）における固定価格制度、割り当て制度の効果及び効率性は、徹底的に検証されてきた。これらの手段については、11.5.3 節で詳述している。バイオエネルギー開発の促進に成功したほとんどすべての国は、固定価格制度または割り当ての次に、財政措置とともに投資支援及びソフトローンに関係する追加的な公共財政支援を行っている（GBEP, 2008）。また、再生可能電力の系統へのアクセスも、取り組むべき重要な問題である。再生可能資源の優先的な系統へのアクセスは、バイオエネルギー技術の普及に成功した国のほとんどで実行されている（Sawin, 2004）。

表 2.11: 主要国における主要な政策手段。E は電力、H は熱、T は輸送、Eth はエタノール、BD はバイオディーゼルを示す（GBEP, 2008 から改訂；REN21 世界対話型地図（脚注 35 を参照）；GBEP の許可の下、複製）。

国	政策措置							
	拘束力のある目標及び義務 ¹	自発的目標 ¹	直接的インセンティブ ²	補助金	固定価格制度	強制的系統連系	持続可能性基準	関税
ブラジル	E, T		T					撤廃
中国		E, T ⁴	T	E, T	E, H	E, H		該当なし
インド	T, (E ³)	T (BD)	E	E, H, T	E			該当なし
メキシコ	(E ³)	(T)	(E)			(E)		Eth
南アフリカ	T, E	E, (T)	(E), T					該当なし
カナダ	E, T, H	E ⁴ , T ⁴	T	E, H, T				Eth
フランス		E ³ , H ³ , T	E, H, T		E			以下の EU と同様
ドイツ	E ³ , T		H	H	E	E	(E, H, T)	以下の EU と同様
イタリア	E ³	E ³ , T	T	E, H, T	E	E		以下の EU と同様
日本		E, H, T				E		Eth, B-D
ロシア		(E, H, T)	(T)					該当なし
イギリス	E ³ , T ³	E ³ , T	E, H, T	E, H, T	E		T	以下の EU と同様
アメリカ	T, T ⁴ , E ⁴	E ⁴	E, H, T	E, T	E			Eth
EU	E ³ , T	E ³ , H ³ , T	T	E, H, T		E	(T)	Eth, B-D

注:

¹ 混合または市場への浸透。² 財政的インセンティブ: 減税、公共財政支援: 融資支援及び保証。³ 全ての再生可能資源に目標を適用。⁴ 地方政府レベルで目標を設定。

支援政策（表 2.11 を参照）は、過去数十年において電力、熱、及び輸送燃料用のバイオエネルギーの成長に大きく貢献してきた。しかし、いくつかの報告では、バイオ燃料の支援政策に関連するコスト及びリスクも指摘されている。WEO (IEA, 2010b) によれば、2009 年、2008 年、及び 2007 年におけるバイオ燃料の世界の年間政府支援は、それぞれ 200 億 US ドル（2009 年）、175 億 US ドル（2009 年）、及び 140 億 US ドル（2009 年）で、そのうち EU の支出は 79 億 US ドル（2009 年）、80 億 US ドル（2009 年）、及び 63 億 US ドル（2009 年）、アメリカの支出は 81 億 US ドル（2009 年）、66 億 US ドル（2009 年）、及び 49 億 US ドル（2009 年）となっている。アメリカの支出は、エネルギー安全保障及び化石燃料輸入削減目標によるものである。食料価格に関する懸念、温室効果ガス排出量、及び環境への影響も、多くの国におけるバイオ燃料混合目標の再考につながっている。たとえば、ドイツは 2009 年の混合目標を 6.25% から 5.25% に引き下げた³⁸。これらの懸念に対する取り組みは、EU Renewable Energy

³⁷ 技術に固有ではない政策問題には、本報告書の第 11 章で触れている。

³⁸ 2008 年 10 月 22 日に発表された Bundesministerium f.r Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit decision。

Directive におけるバイオ燃料の環境的及び社会的持続可能性基準の統合につながった。気候変動及び安定したエネルギー供給の目標の達成におけるバイオ燃料政策の効果は、一見すると国内の農家の支援に有効に見えるが、より厳しい目にさらされ始めている。これらの政策はコストがかさみ、すでにかなり歪みかつ保護された農業市場をさらに歪めてしまう傾向があった（国内及び国際規模の両方で）と言われている。これは、バイオ燃料及びその原材料の効率的な国際生産パターンに望ましくないことが多かった（FAO, 2008a; Bringezu et al., 2009）。全体的なバイオマス戦略においては、食料及び非食料バイオマスのあらゆる利用法を考慮しなければならない（Bringezu et al., 2009）。

この部門への政府支援の背景にある主要な動因は、気候変動及びエネルギー安全保障に対する懸念及び農産物の需要の増加を通じた農業部門支援の要求である（FAO, 2008a）。REN21 世界対話型地図（脚注 35 を参照）によれば、2009 年において計 69 ヶ国が複数のバイオマス支援政策を施行していた（REN21, 2010; 11.2 節）。

2.4.5.1 バイオエネルギー政策及び標準化に関する交流のための政府間プラットフォーム

政策決定者がバイオエネルギーに関する政策決定に関する助言、支援、及び経験を交換する可能性を求めることが出来る多ステークホルダー・イニシアチブが存在している。バイオエネルギーの温室効果ガス緩和便益の評価のための持続性基準及び方法論的枠組みのさらなる発展を支援する国際組織及びフォーラムの例としては、グローバル・バイオエネルギー・パートナーシップ (G8+5 による GBEP)³⁹、IEA Bioenergy Agreement⁴⁰、International Bioenergy Platform at the Food and Agriculture Organization (FAO)⁴¹、OECD Roundtable on Sustainable Development⁴²、及び持続性基準の開発に向けて積極的に活動している欧州標準化機構⁴³及び国際標準化機構⁴⁴ (ISO) などの標準化組織などが挙げられる。

2.4.5.2 持続性枠組み及び標準

政府は、規制手段を実行するに当たって、十分な気候変動緩和を確保すること及びバイオエネルギーの受容出来ない悪影響を回避することの重要性を強調している。たとえば、Renewable Energy Directive (European Commission, 2009) は、液体輸送燃料向けの強制力のある持続可能性要件を与えている⁴⁵。また、アメリカでは、再生可能燃料基準 (2007 Energy Independence and Security Act (EISA, 2007) に含まれる) は、燃料のカテゴリーごとの温室効果ガス削減の閾値を設定するために、再生可能な燃料からの温室効果ガス削減の最小値を規定し、原材料としての食料及び飼料作物の利用を抑制して耕地の利用を許可し、（間接的）土地利用変化効果を推定している（EPA, 2010; 2.5 節も参照）。California Low Carbon Fuel Standard は、絶対的炭素強度削減基準及び新しい情報（間接的な土地利用の影響）の定期評価を設定している⁴⁶。その他の例としては、UK Renewable Transport Fuel Obligation、German Biofuel Sustainability Ordinance、及び Cramer Report (オランダ) がある。ベルギーを除いて、固体バイオマス（木材ペレットなど）向けの強制力のある持続性基準は施行されていない。欧州委員会は、2011 年末にこれについて検討する（European Commission, 2010）。

影響評価枠組み及び持続可能性基準の開発は、方法論、プロセス開発、及び統一に関する大きな課題を伴う。2010 年の検討までは、バイオエネルギー生産の原材料として利用されるものを含め農産物及び林産物の持続可能性を守るため、進行中の認証イニシアチブが約 70 存在した（van Dam et al., 2010）。EU 内において、より持続可能性の

www.bmu.de/pressearchiv/16_legislaturperiode/pm/42433.php で閲覧可能。

³⁹ GBEP は、政策形成枠組みの報告、持続可能なバイオマス・バイオエネルギー開発の推進、バイオエネルギーへの投資の促進、プロジェクトの開発及び実行の推進、及び研究開発・商業用バイオエネルギー活動の振興のためのフォーラムを提供している。メンバーには、個別の国、多国間組織、及び団体が含まれる。

⁴⁰ IEA Bioenergy Agreement は、研究開発と実証から政策までを含む話題に関心を持つ非 OECD 諸国を含む、バイオエネルギーの分野における集団的取り組みのための包括的組織・構造を提供している。それによって、加盟諸国全体にわたって、研究、政府、及び産業からの政策・意思決定者及び国家の専門家が結び付けられている。

⁴¹ ftp.fao.org/docrep/fao/009/A0469E/A0469E00.pdf を参照のこと。

⁴² www.oecd.org/dataoecd/14/3/46063741.pdf を参照のこと。

⁴³ 固体バイオ燃料標準については、www.cen.eu/cen/Sectors/TechnicalCommitteesWorkshops/CENTechnicalCommittees/Pages/default.aspx TC335、液体バイオ燃料については TC19、バイオ燃料の持続可能性基準については TC383 を参照のこと。

⁴⁴ バイオ燃料の持続可能性基準については、www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees/list_of_iso_technical_committees.htm TC 248、固体バイオ燃料については TC238、バイオガスについては TC255、液体バイオ燃料については TC28/SC7 を参照のこと。

⁴⁵ この要件は、特定の温室効果ガス排出量削減を達成すること、及び生物学的多様性に関して価値の高いまたは炭素ストックが大きい土地から得られる原材料から問題となっているバイオ燃料を生産しないことである。

⁴⁶ California Air Resources Board は、2020 年までに化石エネルギー源からの絶対的排出量の 10%削減を求め、バイオ燃料の直接的ライフサイクル排出量に加え間接的土地利用変化も法規制によって要求されるとしている（CARB, 2009）。

高いエネルギー作物の栽培及び近代的バイオマスからのエネルギーキャリアの生産を保証するため、多くのイニシアチブが認証制度を開始またはすでに設立している (ISCC⁴⁷、ドイツの REDCert⁴⁸ 2010、オランダの NTA8080/8081 (NEN⁴⁹) など)。Council for Sustainable Biomass Production、Better Sugarcane Initiative、Roundtable for Sustainable Biofuels (RSB)、及び Roundtable for Responsible Soy などのようにバイオエネルギー生産の明確な社会経済的効果を含むものも一部存在するが、多くのイニシアチブが基本的には環境的な原則を含む液体バイオ燃料の持続可能性に焦点を当てている。RSB のものなどの原則は、すでにプロジェクトの開発のために米州開発銀行が使用している Biofuels Sustainability Scorecard につながっている。

過去 4 年間にかけて起こり、現在も続いている標準の普及は、認証には直接的バイオエネルギー生産の環境的及び社会的影響に関係する地方の影響に働きかけるポテンシャルがあることを示している。関連する組織の多くは、効率的な認証システムの実現には、さらなる統一、信頼性の高いデータの利用可能性、及びマイクロ・メソ・マクロレベルでの指標の連携が必要であると結論付けている (表 2.15 を参照)。複数の空間規模を考慮すると、認証は、地域、国家、及び国際レベルでの追加的な測定及び手段と組み合わせる必要がある。

間接的土地利用変化におけるバイオエネルギー生産の役割は、いまだ不確実性が大きい。現在のイニシアチブがその標準において間接的土地利用変化の影響を捉えることは少なく、タイムスケールもそのような変化の評価において重要な変数の 1 つとなっている (2.5.3 節を参照)。望ましくない土地利用変化への取り組みは、生産物または原材料の最終用途に関わらず、なによりもまず全体的な持続可能農業生産及び良好なガバナンスを必要とする。

2.4.6 バイオエネルギーの市場への浸透と国際貿易の主な機会及び障壁

2.4.6.1 機会⁵⁰

陸上輸送用のバイオ燃料の見通しは、陸上輸送向けの競合する低炭素及び石油削減技術 (電気自動車など) における開発に依存している。バイオ燃料は、エネルギー密度の高い炭素燃料が必要な航空産業 (2.6.3 節を参照) 及び海運において長期的にはより多く利用される可能性がある。

バイオエネルギーの国際市場の発展は、世界の多くの地域において現在十分に活用されていない利用可能なバイオマス資源及び市場ポテンシャルの開発において極めて重要な動因となっている。これは、(利用可能な) 残渣と (エネルギー作物または農林業などの多機能システムを通した) 専用バイオマス生産の可能性両方に当てはまる。世界のエネルギー市場におけるバイオマス由来商品の輸出によって、多くの (開発途上) 国における地方コミュニティに安定的かつ信頼性の高い収入を提供することができ、それによって重要なインセンティブ及び市場へのアクセスが創出される⁵¹。

国際バイオエネルギー貿易によってインフラ及び変換能力への投資 (非常に大規模であることが多い) が可能になるため、需要側においてもバイオマスの安定した供給に依存する大規模なバイオマス・ユーザーはその恩恵を受ける可能性がある⁵²。

政策決定に基づくインセンティブの導入は駆動要因の 1 つであり、バイオエネルギー貿易拡大の引き金となる。たとえば、オランダ及びベルギーにおける木材ペレットの輸入は、それぞれ固定プレミアム・システム及びグリーン証書システムが誘引となっている。しかし、政策の成果は異なっている。部分的にはその政策の設計及び施行の性質がその原因であり、またインセンティブに関係する制度が異なることも原因である。政策外の要因 (制度、ネットワーク・アクセスなど) への影響に関する詳細な解説については、11.6 節を参照のこと。

他の動因としては、既存の商品の確立された物流の活用がある。大規模な発電所における木材ペレット共燃焼の例を再び取り上げると、石炭及びその他のドライバルク品を供給するための港及び貯蔵施設の既存のインフラは、(部分的に及び調整後) コスト効率の高い輸送及び取扱いを可能にし、木材ペレットにも利用することが出来る。統合されたサプライチェーンの他の形としては、輸入された丸太からの樹皮、おがくず、及びその他の残渣がある。これは、北ヨーロッパなどで一般的である。最後に、地域のバイオマス加工センターの概念は、供給側の課題を処理し、社会的持続可能性の懸念への取り組みを助けるために提案されてきた (Carolán et al., 2007)。

⁴⁷ International Sustainability and Carbon Certification (ドイツ、ケルン)、www.iscc-system.org/index_eng.html

⁴⁸ REDcert Certification System、www.redcert.org

⁴⁹ NTA 8080 - Sustainably Produced Biomass. Dutch Normalization Institute (NEN) (オランダ、デルフト)、www.sustainable-biomass.org/publicaties/3950

⁵⁰ 本小節は、主に Junginger et al. (2008) に基づいている。

⁵¹ ブラジルからのエタノール及びカナダからの木材ペレットの輸出は、輸出機会が (少なくとも部分的には) 供給側のさらなる発展の動因となっていた例である。

⁵² オランダ及びベルギーの電力会社は、国内のバイオマス資源が非常に限定的で品質にもばらつきがあるため、石炭との共燃焼用に大量の木材ペレットを輸入している。

2.4.6.2 障壁

主要なリスク及び展開の障壁は、バイオエネルギー・バリューチェーン全体に渡って見られ、全ての最終エネルギー製品（バイオ熱、バイオ電力、及び輸送用バイオ燃料）に関係している⁵³。供給側では、原材料の起源（エネルギー作物、廃棄物、または残渣）に関わらず、バイオマス原材料の量、質、及び価格の保証に関わる課題がある。バイオマス原材料の多様な物理的性質と化学成分に関する技術的課題、及び小規模における現在の電力及びバイオ燃料技術の貧弱な経済性に関連した課題もある。需要側では、特に商業規模での新技術の信頼出来る運用の実証、関連した資金面の課題克服に必要なその部門と技術の政策枠組み、投資家の信頼の安定性及び支援体制が主な課題となっている⁵⁴。電力及び熱部門においては、その他の再生可能エネルギー源との競合も問題となる可能性がある。エネルギー作物生産及びバイオエネルギー施設への支援の獲得においては、社会の受容及び一般認識も重要な要因である。

特にバイオエネルギー貿易に関して、Junginger et al. (2010) は多くの（潜在的な）障壁を発見している。

関税: 2007年1月時点では、多くの国において特にエタノール及びバイオディーゼルに輸入関税が適用されている。関税（現地通貨及び年次であらわされる）は、EU（ℓ当たり 0.192 ユーロ）とアメリカ（ℓ当たり 0.1427US ドル及び追加的な 2.5%の従価補助金）両方においてバイオディーゼル輸入に適用されている。一般的に、最恵国税率はOECDにおいては従価換算率で約 6～50%であり、インドの場合は最大 186%となっている（Steenblik, 2007）。バイオディーゼルは、以前はバイオエタノールよりも低い輸入関税が適用されており、その幅はスイスの 0%から EU 及びアメリカの 6.5%までであった（Steenblik, 2007）。しかし、2009年7月には、欧州委員会は、5年間にわたって一時的にアメリカのバイオディーゼル輸入に対して反ダンピング課税及び反補助金権課税を認めた。その納付金は、1 トンあたり 213～409 ユーロ（現地通貨及び年次）である（EurObserv'ER, 2010）。これらの貿易関税は、化石ディーゼルの「スプラッシュ」と混ぜられたバイオディーゼルに 1 ガロン当たり 1US ドル（300US ドル/t 相当）の補助金が適用される 2008～2009 年のいわゆる「スプラッシュ・アンド・ダッシュ」の実施に対する反応の結果である。世界の様々な関税、貿易体制、及び政策に関する詳細については、Lamers et al. (2011) を参照のこと。

技術標準は、燃料の物理的及び化学的性質を詳細に記述している。液体輸送燃料（バイオ燃料含む）の技術的特性に関する規制はあらゆる国に存在している。それらは、主に燃料の安全性を確保し、消費者が自身の自動車のエンジンを損傷する可能性がある燃料を購入してしまうことを防ぐために定められている。規制には、石油燃料に混ぜることが出来るバイオ燃料の割合の最大値及びバイオ燃料自体の技術的特性に関する規制が含まれる。バイオディーゼルの場合、後者は生産に利用される植物油に依存する可能性があるため、輸入原材料からのバイオディーゼルよりも国内原材料からのバイオディーゼルを優先するために規制が利用される可能性がある。バイオエタノール貿易の技術的障壁も存在している。たとえば、最大含水量に対する異なる需要は、貿易に対して悪影響を与える。しかし、実際にはほとんどの市場関係者は、技術標準を障壁としてではなく国際貿易を可能にする機会として見ていると述べている（Junginger et al., 2010）。

持続可能性基準とバイオマス及びバイオ燃料認証は、自発的及び義務的システムとして近年ますます開発の数が増えてきている（2.4.5.2 節を参照）。これまで、そのような基準は従来型の化石燃料には適用されていない。国際バイオエネルギー貿易に関する主要な懸念は以下の 3 つである。

- 1) 基準（特に環境的及び社会的問題に関するもの）は、開発途上の生産国における地方の環境及び技術条件に対して厳しすぎるまたは不適切である可能性がある（van Dam et al., 2010）。多くの開発途上国が恐れていることは、選択された基準が厳しすぎる、または認証制度を設立した国の一般的な条件に基づいている場合、その基準を満たせるのがそれらの国の生産者のみである可能性があるため、その基準は貿易障壁として働く可能性があるということである。基準は純粋な商業的目的から雨林保護まで非常に多様であるため、譲歩によって規則が詳細になりすぎて順守が困難になる、または逆に標準が一般的になりすぎて意味をなさなくなる危険性がある。強制要件の施行は、World Trade Organization の規則によっても制限されている。
- 2) 欧州委員会、様々なヨーロッパの政府、いくつかの民間部門イニシアチブ、及び円卓会議と非政府組織のイニシアチブによる現在の開発を考えれば、短期的には多くの多様かつ部分的に両立不可能なシステムが発生し、貿易障壁が形成されるリスクがある（van Dam et al., 2010）。それらが世界的にまたは相互承認のための明確な規則を用いて開発されなかった場合、そのような多くのシステムは、持続可能なバイオ燃料生産の利用を推進するのではなく、国際バイオエネルギー貿易の大きな障壁になる可能性がある。いくつかの方法論の開発（EU の法令など）における透明性の欠如も問題である。また、結果として生じる、地方

⁵³ 本パラグラフの残りの部分のほとんどは、Bauen et al. (2009a) に基づいている。

⁵⁴ 過去 5 年間には、民間部門との先駆的商業用技術開発に共同で出資していた政府もあったが、金融危機によって政府資金の獲得の継続に必要とされる民間金融を完了させることが難しくなっている。

で生産されたバイオマス資源及び輸入されたものの基準の順守を証明する様々な需要の存在も、潜在的な障壁である。最後に、国際的システムの欠如によっても、市場の歪みが発生する可能性がある。

「認証されていない」バイオ燃料原材料の生産は継続され、標準が低い国の市場または同標準が適用されない可能性がある非バイオ燃料用途の市場に入るだろう。「2 層」システムの存在は、想定された防護策（特に土地利用変化及び社会経済的影響に対するもの）の実現の失敗につながる場合がある。

- 3) 最後に、バイオマス商品が持続可能な形で生産されていることを保証するためには、何かしらの加工及び流通過程管理（CoC）方法を、生産から最終用途までのバイオマス及びバイオ燃料の追跡に利用しなければならない点に注意する必要がある。一般的に、加工及び流通過程管理方法には分離（履歴管理としても知られる）、証書方式、及び質量バランスの 3 種がある。これは必ずしも大きな障壁ではないが、追加コスト及び管理上の負担につながる可能性がある。

物流は、このシステムの重要な部分であり、大規模なバイオマスシステムのバイオマス燃料サプライチェーンの確立に不可欠である。様々な研究によって、エネルギー利用及び輸送コストに関して言えば船による長距離国際貿易は実行可能であることが示されている（Sikkema et al., 2010, 2011 など）。しかし、適した船舶の利用可能性及び方法論的条件（スカンジナビア及びロシアの冬など）を考慮する必要がある。技術は開発中であるが、輸送を容易にするための低コストな、バイオマスを圧縮する技術の技術的成熟度が全般的に低いことが物流障壁の 1 つである（2.3.2 及び 2.6.2 節）。

衛生植物検疫（SPS）措置は、国境で液体バイオ燃料の原材料または適用した技術規制に対して適用される。原材料が生物由来であるため、衛生植物検疫措置は主に害虫または病原体を運ぶ可能性がある原材料に影響する。残留農薬に対する制限は、最も一般的な衛生植物検疫措置の 1 つである。一般的に、残留農薬の制限を満たすことは難しいが、作物生産物の輸入出荷（特に開発途上国からのもの）の拒否につながる場合がある（Steenblik, 2007）。

2.4.7 統合

バイオマス市場・政策の検討によって、近年、液体や気体のエネルギー輸送用近代的バイオマスの使用など、バイオエネルギーは急速に発達していること（2006～2009 年にかけて 37%の増加が見られる）が示されている。特に IEA の予測に加えて多くの国家目標が、再生可能エネルギーの大幅な割合の増加を実現する、バイオマスに期待している。バイオマスやバイオ燃料の国際貿易も、近年さらに重要度を増してきており、2009 年にはバイオ燃料（エタノールとバイオディーゼルのみ）の約 6%（2008 年には最大 9%水準まで到達）そしてエネルギー利用のための総ペレット生産のうち 1/3 が国際的に取引されている。後者によって、供給の制約を受けている地域についてバイオマスの利用増加と、需要が不足している地域からの資源の移動の両面が促進された。それにも関わらず、持続可能性基準も同時に満たすバイオマスとバイオ燃料の有効な商品取引の発展には、多くの障壁が残っている。多くの国においてバイオエネルギー、特にバイオ燃料の政策的枠組みは、近年急速かつ大幅に変化している。食料と燃料の競合によるバイオマスをめぐる議論と、その他の対立による懸念が、持続可能性基準や枠組みの開発と施行に対する強い要求に加え、バイオエネルギーやバイオ燃料の目標とスケジュールの変化につながっている。さらに、バイオリファイナリーと第二世代バイオ燃料オプションの支援は、より持続可能な方向にバイオエネルギーを推進する。

持続的で安定的な政策支援は、バイオマスの生産の能力、時とともに競争が激しくなる市場、必要なインフラなど、変換の能力における主な要因となっている。これらの条件は、ブラジルにおいて、エタノール生産コストがガソリンより低くなっている点で、プログラムの成功を導いている。再生可能性が高く、外国からの石油輸入を最小化するエネルギー・ポートフォリオ構成では、サトウキビ繊維バガスは熱や電力を生産する。スウェーデン、フィンランドも、再生可能電力と統合された資源の管理において大幅な成長を見せた。これは、産業の産業共生などのイノベーションに堅実につながった。アメリカは、主要な生産国の石油価格と不安定性の上昇に伴い、農村開発と安全なエネルギー供給の促進のため、1980 年代から 1990 年代までは電力向け・1990 年代から現在まではバイオ燃料向けの国家・地方政策の調整を行い、迅速に生産を増加させることができた。しかし、石油価格が低下すると、バイオ電力に関しては政策支援及びバイオエネルギー生産が減少し、環境政策及び地方目標によって再び増加している。

各国において、バイオエネルギーの更なる発展に対する優先度、アプローチ、技術選択、及び支援制度は異なっている。これはバイオエネルギー市場の複雑性の増加を意味するが、これはバイオエネルギー展開に影響する多くの側面（農業及び土地利用、エネルギー政策と安全保障、地方開発、及び環境政策）も反映している。優先度、開発段階、資源への地理的アクセス、及びその利用可能性とコストは、国ごとに大きく異なっている。

バイオエネルギーとバイオ燃料に関する政策がより全体的になるにつれ、開始時点での持続可能性が、より強い基準になることが挙げられる。これは、EU、アメリカ、中国に加え、モザンビークやタンザニアなど、多くの開発途上国にも当てはまる。これは前向きな動きではあるが、まったく解決していない（2.5 節も参照）。バイオエネ

ルギーとバイオ燃料に加え、農業・林業向けの持続可能性枠組みや認証システムの開発・施行のために、2009 年までに世界で登録された 70 のイニシアチブは、取り組みの分裂につながる可能性がある（van Dam et al., 2010）。現在、統一化と、国際的及び多国間での協調と対話の必要性が広く強調されている。

2.5 環境的・社会的影響⁵⁵

最近の研究は、バイオエネルギー及び関連する農業・林業土地利用変化の好ましい環境的・社会経済的影響と、好ましくないもの両方に焦点を当てている（IPCC, 2000b; Millennium Ecosystem Assessment, 2005）。従来の農業・林業システムのように、バイオエネルギーは、森林の乱開発、過剰な作物・森林残渣除去、及び水の過剰利用に伴う土壌・植生退化を深刻化させる可能性がある（Koh and Ghazoul, 2008; Robertson et al., 2008）。作物または土地のバイオエネルギー生産への転用は、食料商品価格及び食料安全保障に影響する可能性がある（Headey and Fan, 2008）。適切な運用管理がなされた場合、好ましい影響には、生物多様性の強化（C. Baum et al., 2009; Schulz et al., 2009）、土壌炭素の増加と土壌生産性の向上（Tilman et al., 2006a; S. Baum et al., 2009）、表層崩壊・局所的な鉄砲水の減少、風食・水食の減少、及び堆積物量・河系に運ばれる栄養の減少（Börjesson and Berndes, 2006）が含まれる可能性がある。森林の場合、バイオエネルギーは、成長及び生産性を向上させて再植林の現地条件を改善し、野火のリスクを低下させる可能性がある（Dymond et al., 2010）。しかし、森林残渣収穫は、森林種にとって不可欠な生育環境を提供する粗い木質屑の喪失などの悪影響をもたらす可能性がある。

目的成長型農業原材料由来のバイオ燃料は水使用量が多い（再生可能電力源と非再生可能電力源の比較については、9.3.4.4 節を参照; Berndes, 2002; King and Weber, 2008; Chiu et al., 2009; Dominguez-Faus et al., 2009; Gerbens-Leenes et al., 2009; Wu et al., 2009; Fingerman et al., 2010）。水資源及びより幅広い水文学的サイクルに対するその影響は、バイオ燃料原材料が生産される場所、時間、及び方法に依存している。様々なバイオエネルギーのサプライチェーンの中でも、原材料の範囲、栽培システム、及び変換技術にわたって、水需要は大きく異なっている（Wu et al., 2009; Fingerman et al., 2010; De La Torre Ugarte, et al., 2010）。灌漑作物から作られたバイオ燃料は湖、河川、及び帯水層からの大量の水の引き入れを必要とするが、一般的にバイオエネルギー原材料としての農業残渣または林業残渣の利用は追加的な土地または水を多くは必要としない。天水による原材料生産は、水系からの取水を必要としないが、流出水及び地下水涵養からの降水を作物蒸散に向け直すことで下流域の水利用可能性を低下させる可能性がある。バイオエネルギーのための水の利用は、水が汲み出される資源基盤の状態によって、非常に多様な社会的・生物学的帰結をもたらす。

急速に発達しているバイオエネルギー源の多さ、物理的・化学的・生物学的転換プロセスの複雑性、複数のエネルギー製品、及び環境条件の多様性のため、現在導き出すことの出来る、バイオエネルギーの社会経済的・環境的影響に関する普遍的な結論は少ない。そのため、バイオエネルギーの好ましい・好ましくない影響は、社会経済的・制度的文脈、利用される土地と原材料の種類、バイオエネルギー・プログラムと生産活動の規模、変化過程、及び施行率の関数である（Kartha et al., 2006; Firbank, 2008; E. Gallagher, 2008; OECD-FAO, 2008; Royal Society, 2008; UNEP, 2008b; Howarth et al., 2009; Pacca and Moreira, 2009; Purdon et al., 2009; Rowe et al., 2008 など）。

バイオエネルギー・システム影響評価（IA）は、置き換えられるシステムの影響評価と比較しなければならない⁵⁶。環境的（2.5.1～2.5.6 節）・社会経済的（2.5.7 節）影響（この影響の例については表 2.12 を参照）の方法論及び根底にある前提は大きく異なっているため、これらの研究によって得られた結論は一致していない（H. Kim et al., 2009）。社会経済的影響評価に特有の課題の 1 つは、その境界が定量化しづらく、多くの相関する要因（その多くはよく分かっていない、または不明）の複雑な複合体であることである。社会過程には、信頼性の許容可能な水準で明確に定義することが難しいフィードバックがある。環境的影響評価には多くの定量化可能な影響カテゴリーが含まれるが、多くの地域においてデータが不足しており、不確実性が高い。環境的影響評価の結果は、まだ標準化されていない、または統一的に世界中で適用されている方法論的選択に依存している。

⁵⁵ 本報告書で扱うすべての再生可能エネルギー源の社会的及び環境的影響の包括的評価は、第 9 章で見ることが出来る。

⁵⁶ 「リバウンド効果」が含まれる可能性がある。一般的に化石燃料であるが、その他の一次エネルギー源もある（Barker et al., 2009）。

表 2.12: バイオエネルギーの環境的・社会経済的影響: 選択された影響カテゴリーに対する懸念領域の例 (van Dam et al., 2010 による文献レビューから統合)。

懸念領域の例	影響カテゴリーの例
世界、地域、及びオフサイトの環境的影響	温室効果ガス、アルベド、酸性化、富栄養化、水利用可能性と水質、地域大気質
地方・オンサイトの環境的影響	土壌の品質、局所大気質、水利用可能性と水質、生物多様性と生息地喪失
技術	危険性、排出、渋滞、安全性、遺伝子組み換え生物・植物
人権及び労働条件	結社の自由、社会保障へのアクセス、雇用創出と平均賃金、差別の回避、児童就労の禁止と労働者の最低年齢、労働の自由（強制労働の禁止）、原住民の権利、性別問題の認知
健康及び安全	労働者及びユーザーに対する影響、労働中の安全条件
食料安全保障	主要商品作物の交換、地方の食料安全保障の保護
土地及び財産権	土地所有者の慣習上の権利及び法的権利の認知、所有の証明、利用可能な補償システム、承認の下での契約
地方コミュニティの関与及び福祉	文化的・宗教的価値、地方経済・活動への貢献、伝統的知識の利用の補償、地方教育の支援、サービスと材料の現地調達、脆弱な団体を対象とする特別措置

2.5.1 環境的影響

一般的に、環境的影響の研究（エネルギー・バランス及び温室効果ガス排出バランスに焦点を当てたものを含む）は、9.3.4.1 節で解説するライフサイクル評価（LCA）の ISO 14040:2006・14044:2006 標準における原則、枠組み、要件、及びガイドラインと合致した方法論を採用している。バイオマス・バイオエネルギー・システムの温室効果ガス・バランス向けの初期の具体的な手法は、Schlamadinger et al. (1997) によって開発された。

バイオエネルギー・ライフサイクル評価の主な問題は、空間的・力学的境界、機能ユニット、参照システム、及びシステム境界全体にわたってエネルギー・材料フローを考慮する方法の選択を含むシステム定義である（Soimakallio et al., 2009a; Cherubini and Strömman, 2010）。カスケード・サイクルの一部として、多くのプロセスが複数の生産物を作り出している。たとえば、バイオマスはバイオマテリアルの生産に利用され、副産物及びバイオマテリアルそのものは使用可能な期間が過ぎるとエネルギーに利用される（Dornburg and Faaij, 2005）。環境的影響は数十年間にわたって様々な地理的位置に分散されるため、このようなカスケードは重大なデータ・方法論に関する課題につながる（Cherubini et al., 2009b）。

ブラジル、中国、及びその他の国でも研究が利用可能になってきているが、既存のバイオエネルギー・システムのライフサイクル評価研究に利用される前提及びデータの大部分は、第一世代バイオ燃料及びヨーロッパまたはアメリカの条件と慣行に関係している（表 2.7、2.13、及び 2.15 の例を参照）。バイオマス生産・変換技術の開発が進行中であるため、これらの商業用技術研究の多くは時代遅れになってしまった⁵⁷。将来のバイオエネルギー・オプションのライフサイクル評価研究は、技術性能の予測を伴い、不確実性が相対的に大きくなる（図 9.9 などを参照）。燃料生産へのサプライチェーン全体にわたる不確実性及びパラメータ感度の扱い方は、結果に大きく影響する（2.5.2～2.5.6 節）。いくつかのライフサイクル評価方法またはモンテカルロ分析を組み合わせた研究によって、バイオエネルギー・システムにいくつかのバイオエネルギーオプションにおける不確実性及び信頼性の水準が与えられている（Soimakallio et al., 2009b; Hsu et al., 2010; Spatari and MacLean, 2010 など）。

バイオエネルギー・システム・ライフサイクル評価のほとんどは、定義されたプロセスシステム境界に帰属するよう指定されている。帰結的なライフサイクル評価は、経済的相互作用、バイオエネルギー生産・利用の原因と結果の連鎖、バイオエネルギー生産・利用を増加させる政策またはその他のイニシアチブの影響の文脈において、これらの境界を越えてバイオエネルギー・システムを分析する。帰結的なライフサイクル評価は、バイオエネルギー拡大に対するシステムの反応を分析することが出来る（バイオ燃料原材料として利用される穀物の量が増えている場合の食料システムの変化の仕方、バイオ燃料生産の増加によって石油需要が減少する場合の石油市場の反応の仕方など（2.5.3 節及び図 2.13 を参照）。特定の利用を減少させる方法はどのようなものであれ、その結果はリバウンド効果に影響される可能性がある。バイオエネルギーの場合、固体・液体・気体バイオ燃料の生産の増加によって化石燃料の需要が低下すると、それが化石燃料価格の低下及び化石燃料需要の増加につながる可能性がある

⁵⁷たとえば、2002 年の産業システムを分析した 2006 年の参照値を利用した場合、2010 年の産業を示すことが出来ない。というのも、アメリカ、ブラジルなどにおいて生産量の大きな蓄積を示す商業用技術において学習が発生したためである。この産業において異なる技術が広く採用された例の 1 つとして、乾式製粉がエタノール生産への主要な経路であるアメリカが挙げられる（2.3.4 及び 2.7.2 節を参照）。

（Rajagopal et al., 2011; Stoft, 2010）⁵⁸。同様に、副産物を考えた場合、ライフサイクル評価は観念的に市場相互作用の動的結果としての代替生産物の置換をモデル化する必要がある。そのため、帰結的なライフサイクル評価には、経済均衡モデルなどの補助的手段が必要となる。

2.5.2 近代的バイオマス：土地利用変化の影響を除いた気候変動

バイオエネルギー・システム及び単位エネルギー生産量当たりの化石代替エネルギーの温室効果ガス排出量の範囲は、ライフサイクル評価方法に基づき計算された、いくつかの用途（輸送、電力、熱）に関して、図 2.10 に示されている（炭素ストック及び土地管理の影響における土地利用関連の正味の変化は除く）。バイオエネルギー・システムの気候への影響を定量化するメタ分析は複雑である。その複雑さの原因は、多数の既存及び急速に発展するバイオエネルギー源、物理的、化学的、生物学的な転換プロセスの複雑さ、場所により異なる環境条件におけるバイオマスの多様性と変動性に加えて、方法に対する解釈、仮定、データにおける研究間の差異である。このため、レビュー研究は、様々な温室効果ガス排出量の推定値を報告し、一時的かつ空間的な考察が一定のものである場合でさえ、同一のバイオエネルギーオプションに対して、幅広い結果が報告されている（以下の例参照: S. Kim and Dale, 2002; Fava, 2005; Farrell et al., 2006; Fleming et al., 2006; Larson, 2006; von Blottnitz and Curran, 2007; Rowe et al., 2008; Börjesson, 2009; Cherubini et al., 2009a; Menichetti and Otto, 2009; Soimakallio et al., 2009b; Hoefnagels et al., 2010; Wang et al., 2010, 2011）。

様々な技術による発電に関して、バイオマス発電ライフサイクル評価⁵⁹の広範なレビューのライフサイクル温室効果ガス排出量（炭素ストック及び土地管理の影響における土地利用関連の正味の変化は除く）からの広報された推定値に基づき、発電量 kWh 当たりの温室効果ガス排出量は、図 2.11 で詳細に述べられている。図 2.11 では、ライフサイクル温室効果ガス排出量の推定値の大半は、16～74g CO₂eq/kWh (4.4～21g CO₂eq/MJ) 周辺に集中しており、1つの推定値が 360g CO₂eq/kWh (100g CO₂eq/MJ)⁶⁰に達している。ここでもまた、変動性の原因は、研究方法、農作業、技術性能、及び開発の成熟度の違いである（2.3.3 節参照）。評価された各技術の範囲や中心傾向は、互いに類似している一方で、数値は成行き仮定に依存し、収穫とは無関係の（non-harvest）廃棄物や残渣からの温室効果ガス排出量（ここでは、多くの場合、埋め立て地からのメタン）回避が、バイオマスサプライチェーンに関連する温室効果ガス排出量を大きく上回ることを示している。転換効率の高い技術は、転換効率の低い技術よりも、発電量 kWh 当たりの温室効果ガス排出量が少ない。ここでは表示されていないが、コジェネレーション及び多くの生成物が伴うその他の統合システムは、一次エネルギー単位当たり（たとえば、一次エネルギーを単位として）の温室効果ガス排出量を最小化する効果的な方法となるだろう。ただし、副産物が温室効果ガス排出量の定量化と配分において考慮される方法は、ばらつきのある結果につながる可能性がある。結局、発電量の経済的価値は、決定的な役割を担うが、温室効果ガス排出量のコストに影響を与える気候政策は、生成物のバランスを変更する場合がある。

温室効果ガスの結果に対して特に重要であると認められているライフサイクル評価の側面は、以下の通りである。

（1）土地利用変化による排出量（2.5.3 節参照）や一酸化二窒素（亜酸化窒素）排出量が特に重要であるバイオマス生産からの温室効果ガス排出量に関する仮定、（2）副産物を考慮する際に使用される方法、（3）転換プロセスの設計、プロセスの統合、及びバイオマスの固体または液体燃料への転換時に使用されるプロセス燃料のタイプについての仮定、（4）最終消費技術の性能（つまり、自動車技術、発電所・火力発電所の性能）、（5）参照システム。

⁵⁸ 同一のリバウンド効果が、現在の化石燃料技術に代わるその他の再生可能エネルギー技術に適用される。

⁵⁹ 本図の推定値や文献のレビュー方法の説明を提供している参考文献の完全なリストについては Annex II 参照。

⁶⁰ 図 2.11 で示された分布は、可能性の評価を表していないことに留意する。数値は単純に、品質や関連性の審査を通過した、最近発表された文献の推定値の分布について報告している。

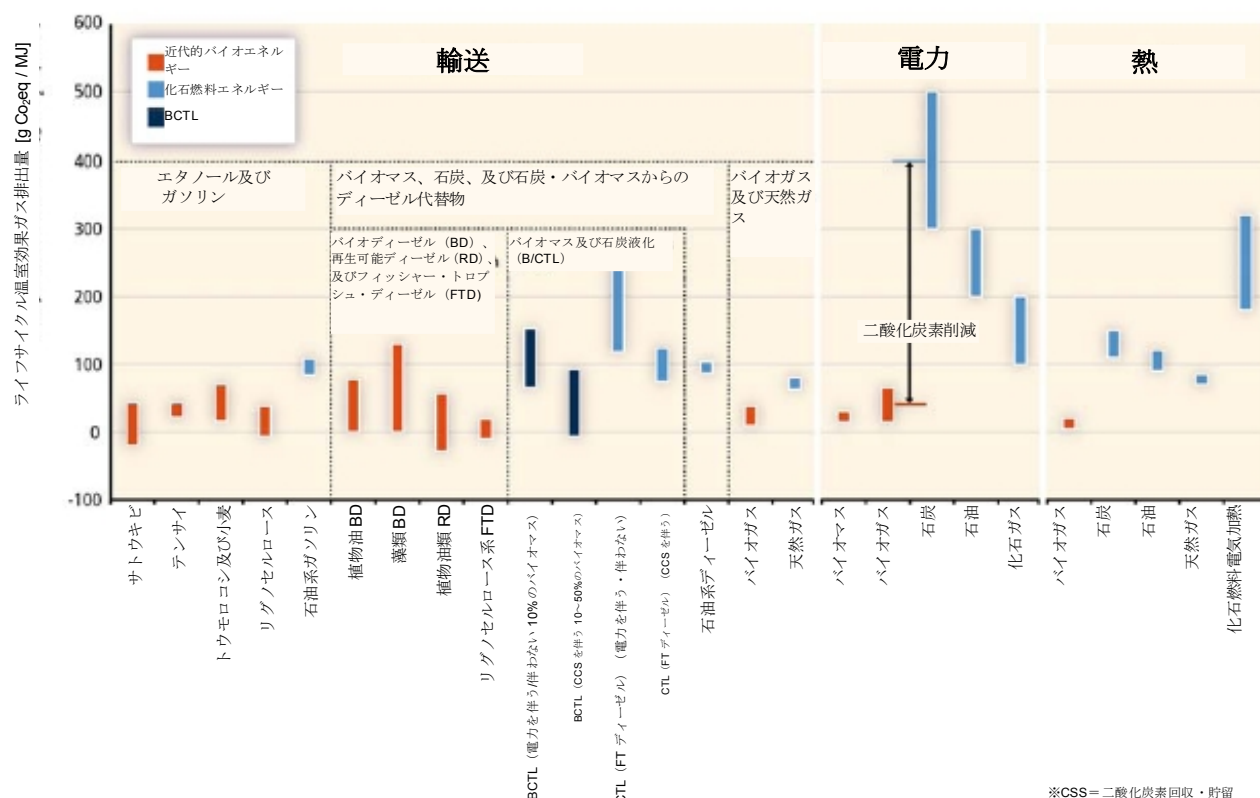


図 2.10: 現在における選択された先進的な化石燃料エネルギーシステムと比較した、主な近代バイオエネルギー・チェーンからの単位エネルギー生産量 (MJ) 当たりの温室効果ガス排出量の範囲 (土地利用に関連した炭素ストックの正味の変化及び土地管理による影響は除かれている)。ここでは、バイオマス・化石燃料技術のための商業化ならびに開発段階の (藻類バイオ燃料、フィッシャー・トロプシュなど) システムを示している。

出典: Wu et al. (2005); Fleming et al. (2006); Hill et al. (2006, 2009); Beer and Grant (2007); Wang et al. (2007, 2010); Edwards et al. (2008); Kreutz et al. (2008); Macedo and Seabra (2008); Macedo et al. (2008); NETL (2008, 2009a,b); CARB (2009); Cherubini et al. (2009a); Huo et al. (2009); Kalnes et al. (2009); van Vliet et al. (2009); EPA (2010); Hoefnagels et al. (2010); Kaliyan et al. (2010); Larson et al. (2010); 図 2.11 からのすべての値の 25~75 パーセンタイル

亜酸化窒素排出量は、バイオ燃料の温室効果ガスの全体的バランスに重要な影響を与える可能性がある (Smeets et al., 2009; Soimakallio et al., 2009b)。亜酸化窒素排出量は、土壌水分量、気温、土性、炭素利用可能性、そして最も大事な窒素肥料投入量などの環境的及び管理状況で大きく変化する (Bouwman et al., 2002; Stehfest and Bouwman, 2006)。排出係数は、窒素肥料投入量の関数として、亜酸化窒素排出量を定量化するために使用される。Crutzen et al. (2007) によると、排出されたばかりの人為的窒素からの亜酸化窒素排出量は、IPCC 推奨のティア 1 法に基づく結果よりもかなり多く、その結果として、バイオ燃料からの亜酸化窒素排出量は、3 分の 1 から 2 分の 1 に過小評価されていることが示されている。IPCC のティア 1 法と Crutzen et al. (2007) の推定値では、別の計算方法が使用されている。農業関連の亜酸化窒素排出量の約 3 分の 1 は、新たに投入された窒素肥料によるものであり (A. Mosier et al., 1998)、残りの窒素として発生する 3 分の 2 は、動物生産において、または肥料として植物残渣を使用することで内部で再利用される。Davidson (2009) による最近のモデリングの取り組みによって、Crutzen et al. (2007) に基づく排出係数が、排出量を多く見積もり過ぎているという結果が裏付けられた。Crutzen et al. (2007) からの亜酸化窒素排出係数を使用することによって、一定のバイオエネルギー植林が、その結果生じるすべての亜酸化窒素排出量、また、その他の農業システムへ再循環され、他の窒素投入に代用される一部の窒素の原因となっていることが明確になる。反応性窒素の排出量がライフサイクル評価に及ぼす影響の概要については、Bessou et al. (2010) を参照。

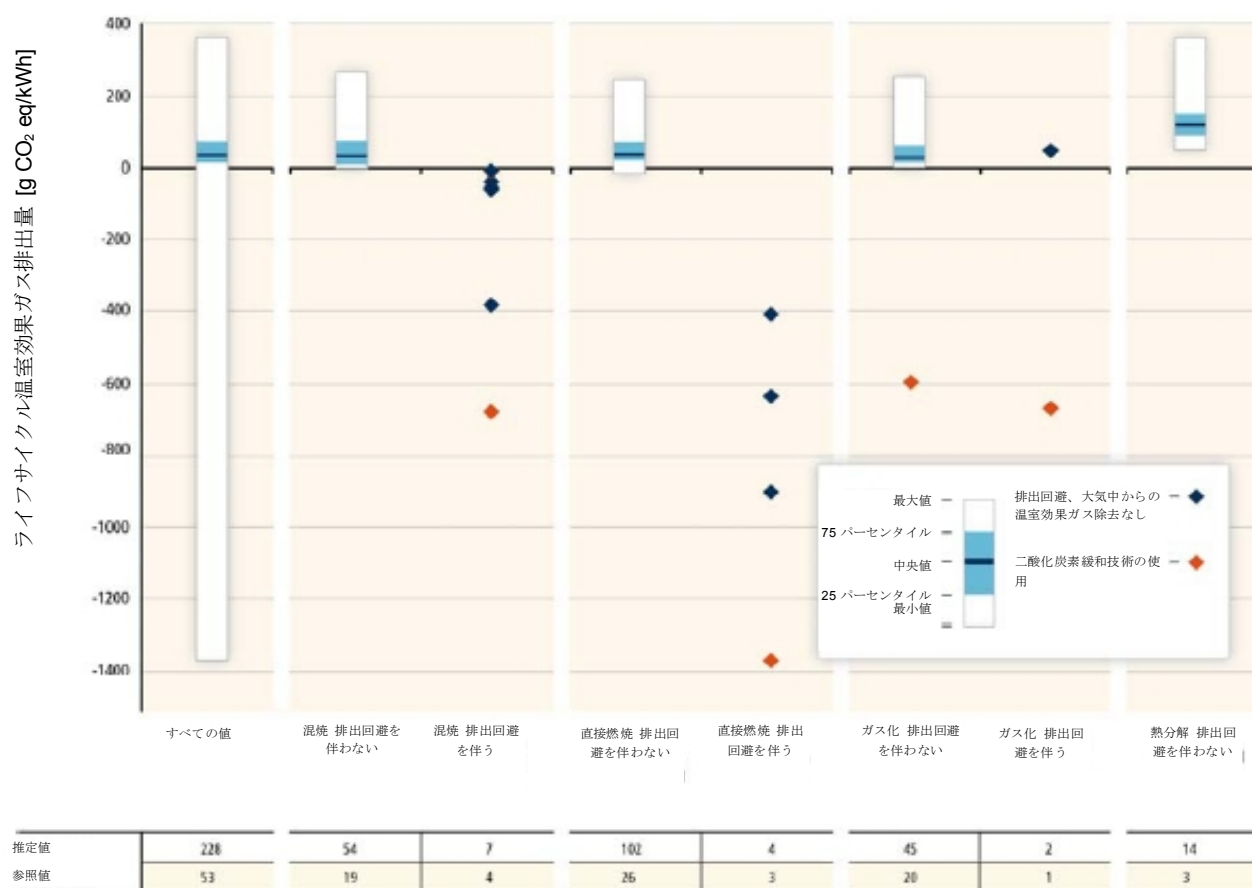


図 2.11: サプライチェーン排出量など、発電量単位当たりのバイオマス発電技術のライフサイクル温室効果ガス排出量（炭素ストック及び土地管理の影響における土地利用関連の正味の変化は除く）。混焼においてはバイオマス相当分のみが示される（石炭に関連する温室効果ガス排出量や電力生産量は除く）。温室効果ガス排出回避のカテゴリーには、原材料（たとえば、残渣や廃棄物）の使用が、たとえば埋め立て地からのメタンの排出回避という形で（文献では最も一般的）、排出回避につながる推定値のみが含まれる。⁶¹副産物生成からの排出回避を含む推定値は、温室効果ガス排出回避カテゴリーには含まれていない。個々のデータポイントは、高い変動性のために排出回避を伴う推定値のボックスプロットの代わりに使用される。赤いひし形は、炭素緩和技術（二酸化炭素回収・貯蔵または吸収による炭酸塩形成）が考慮されていることを示す。分布を生み出す推定値及び参照値の数は、数値の下に沿って、各列に並んでいる（括弧内は二酸化炭素回収・貯蔵推定値）。

プロセス燃料の選択は重大であり、特に石炭の使用はバイオエネルギーの気候的便益を大幅に減少する可能性がある。プロセスの統合、及びバイオマス燃料、または近くの発電所や工場からの余剰熱の使用によって、バイオマス転換プロセスからの正味の温室効果ガス排出量が低減される可能性がある。たとえば、Wang et al.（2007）によると、アメリカのトウモロコシ原料のエタノールに関する温室効果ガス排出量は大きく違っていることがわかる。石炭がプロセス燃料の場合は 3%増加し、木材チップが使用された場合や、改良型乾式製粉プロセスが使用された場合は、52%減少する（Wang et al., 2011）。同様に、スウェーデンの穀物原料のエタノール発電所に関して報告された化石燃料による温室効果ガス排出量の低減は、バイオマスを基盤としたプロセスエネルギーの使用によって説明される（Börjesson, 2009）。プロセス燃料として繊維状副産物のバグスをういたサトウキビ原料のエタノール発電所は、それ自体の発する熱、蒸気、電力を提供し、余剰電力を系統へ送ることが出来る（Macedo et al., 2008）。収穫残渣もエネルギーとして使用される可能性があるため、機械での収穫が確立された慣行となるにつれて、さらなる改良が可能である（Seabra et al., 2010）。

しかしながら、転換プロセスの余剰熱またはバイオマスを使用する限界便益は、地域の経済状況または余剰熱及びバイオマスの代替使用に左右される（たとえば、別の場所での石炭を基盤とした熱または発電と置き換えられるだろう）。バイオマスが、原材料として、そしてバイオ燃料への転換のためのプロセス燃料として使用される場合、バイオマス総計の重量単位当たりの温室効果ガス削減量は少ないだろう。これによって、バイオエネルギーのオプ

⁶¹ 本報告書で示されたライフサイクル評価の専門用語内の「負の推定値」とは排出回避のことである。二酸化炭素回収・貯蔵と組み合わせたバイオエネルギーの場合と違って、排出回避は、大気中から温室効果ガスを除去しない。二酸化炭素回収・貯蔵を導入しない隔離技術と、排出回避クレジットのうち埋め立て関連でない参照ケースを統合したため、ここに示された推定値は、図 9.8 の総計値とわずかに違っている。

ション評価において、いくつかの指標を使用することの重要性が強調される（9.3.4 節参照）。

プロジェクトの設計及び設置のための指標の実用的用途

上記に示されたように、気候変動の影響は、MJ 当たりの CO₂eq（図 2.10）、または kWh 当たり（図 2.11）のような指標に基づいて評価され、その指標に対する参照システムは非常に重要である（バイオエネルギーの温室効果ガス排出量と、石炭及び天然ガスからの排出量を比較）。その他の指標には、ヘクタール当たりのマイル数、バイオマスの重量単位当たり、または vehicle-km 当たり（8.3.1.3 節参照）⁶²がある。資源を限定することで、以下の指標を様々な状況の下で関連づけ、土地管理やバイオマス原料の燃料が気候変動緩和にどの程度貢献出来るのかを定義する場合もある（Schlamadinger et al., 2005）。

代替係数の指標は、使用されたバイオマスの単位当たりの代替されたエネルギーシステムからの温室効果ガス排出量の削減を示す（たとえば、削減を生み出したバイオマスに含まれる炭素のメートルトン当たりの炭素同等物のメートルトン）。これらの投入によって代替効率は上がるが、コストが考慮されない場合も、この指標はバイオエネルギー・チェーンに化石燃料の投入を妨げない。

関連した温室効果ガス削減指標は、特定のバイオマス使用に対する化石燃料代替エネルギーに関する排出量削減の割合を示す。⁶³温室効果ガス削減は、温室効果ガス排出量が少ないバイオマスオプションに有利に働く。しかしながら、この指標だけでは、どの用途が排出量を多く減らすのかを判断するために、輸送燃料、熱、電力、コジェネレーションなどの様々なバイオマス用途を区別することが出来ない。この指標は、必要なバイオマス、土地、または費用の総量を考慮せず、各用途には様々な関連するシステムがあるため、歪められる可能性がある。

土地 1 ヘクタール（または m²、km²）当たりの温室効果ガス削減指数は、バイオマス収量や転換効率に有利に働くが、コストは配慮しない。⁶⁴関連する温室効果ガス排出量を増加させる、集中的な土地利用（たとえば、多量な肥料投入など）によって、生産されたバイオマスの量が十分に増加した場合は、依然として指標値を改善することが出来る。

投入通貨単位当たりの温室効果ガス削減指標は、コスト低下、商業的に利用可能なバイオエネルギーオプションに有利に働く傾向がある。通貨指標に基づく優先順位は、現在の技術を固定化し、短期的なコストが高いため、将来のより費用対効果の高い、または温室効果ガス排出削減効率が高いバイオエネルギーオプションを先延ばしにする（排除する）可能性がある。

地域的なバイオエネルギーオプションを考慮する 2 つの指標の有用性は、表 2.13 に示されている。フィンランドの研究では、置き換えられた化石燃料源が石炭か天然ガスかには関係なく、近代的コジェネレーション発電所における伐採残渣の使用は、関連する温室効果ガス削減においては非常に効果的であった。しかし、代替係数は、石炭が置き換えられた場合のみ高く、天然ガスが置き換えられた場合は、中位を示す。一年生作物オプションからのバイオディーゼルはどちらの指標でも、最低値（1 未満）であったのに対し、フィッシャー・トロプシュ・ディーゼルの場合は、木材残渣からの電力の有無にかかわらず、指標や発電所の構造によって数値が違っているが、すべてのケースにおいて、作物原料のバイオディーゼルよりも高い数値である。独立型発電所は、関連する温室効果ガス削減の観点からみると、最良のオプションである。しかし、代替係数が使用される場合、統合された発電所が望ましい。発電所所有者の観点では、地域的な通貨指標は、統合発電所の追加コスト、バイオマス対電力の相対価格、化石燃料ディーゼル対二酸化炭素排出量の相対価格、また既存の政策支援（及びその期間）の評価を可能にする。特定の場所でバイオエネルギー・プロジェクトを計画している場合、2 つの指標の差異は、バイオマスシステムを考慮する必要性を強調する。たとえば、代替係数が 1 未満の場合、化石燃料を置き換えるためにバイオマスを使えば、（地球規模の炭素吸収源ベースラインに関しては）少なくともこの数十年以内は、正味の排出量が増える。このようなバイオマス資源は持続可能であるが、その期間中は気候または排出量はニュートラルではない。化石燃料からの追加的な炭素削減には、低い温室効果ガス濃度安定レベルに到達する必要があるかもしれない。

北アメリカのトウモロコシ原料のエタノールに関して、1995～2005 年にかけての技術改良は、両方の指標に反映されている。既存のコジェネレーションシステムを伴う発電所効率における改良の実施により、双方の指標は中間範囲になるが、代替係数指標よりも温室効果ガス削減を改善する。開発中の二酸化炭素回収・貯蔵の応用により、両方の指標を大幅に改善し、温室効果ガス削減指標を高くすることが予想される。ブラジルのサトウキビ原料のエ

⁶² たとえば、エタノール車と比較すると、バイオ電力を使用した電気自動車の土地利用効率は高くなるが（Campbell et al. (2009) により報告）、その一部は、エタノールオプションではなく、バイオ電力オプション用の未来の新型動力伝達部の想定される利用可能性によるものである。

⁶³ たとえば再生可能エネルギーに関する EU 指令（the EU Directive on Renewable Energy）における関連する温室効果ガス削減などが使用される（European Commission, 2009）。

⁶⁴ 特定の国々における様々なバイオマス及びバイオ燃料に必要な地域に応じたライフサイクル評価排出量の例として、Bessou et al. (2010) を参照。

タノールの場合にはすべて、温室効果ガス削減指標が高く、一方で代替係数は低～中間の値を示す。石炭ではなく、周辺天然ガスが、代替された化石燃料であり、これは場所の特徴であるため、このように予測される (EPE, 2010)。土地利用指標は、それぞれ 3,500ℓ /ha 及び 7,500ℓ /ha を生産するトウモロコシ、及びサトウキビ原料のエタノールシステムを区別する。2020 年までに、バイオマス生産は増加し、コジェネレーションも、トウモロコシ及びサトウキビ原料のエタノールシステムの土地利用指標をそれぞれ 4,500ℓ /ha、12,000ℓ /ha に増加させると予測される (Möllersten et al., 2003; Macedo et al., 2008; (S&T)² Consultants, 2009)。これらの傾向を裏付ける最新のデータについては、Wang et al. (2011) も参照。

表 2.13: 温室効果ガスパフォーマンスの 2 つの指標は、森林残渣を利用した新技術の順位付けや、現在の農業バイオ燃料との比較を促す。2 つの指標は、商用エタノールシステムの時期と併せて技術パフォーマンスの改良を示し、技術改良の影響も予測する。順位: 高 (70 超)、低 (30 未満)

		化石燃料エネルギー参照	代替係数 ¹	関連する温室効果ガス削減量 ² (%)
フィンランドの近代的 CHP 発電所（伐採残渣利用）		石炭	78	86 ^e
		天然ガス	30	86 ^e
独立型発電所としての、またはパルプ製紙工場と統合したフィンランドのフィッシャー・トロプシュ・ディーゼル ³ （電力の有無にかかわらない）	独立型発電所	化石燃料ディーゼル	39 ^a	78 ^f
	統合型発電所、バイオマス最小		50 ^b	55 ^g
	統合型発電所、電力最小		50 ^c	78 ^h
フィンランドバイオディーゼル(菜種油)		化石燃料ディーゼル	-9 ^d	-15 ⁱ
天然ガス (NG) 乾式粉碎機を装備した北アメリカのエタノール（トウモロコシ原料） 1995 年 2005 年 2015 年 CHP ³ あり、2015 年 CHP 及び CCS ³ あり		化石燃料ガソリン	18 24 31 51	26 39 55 72
ブラジルのエタノール（サトウキビ） 2005～2006 年（平均 44 製粉機） 2020 年 CHP ³ （機械による収穫） 2020 年 CHP 及び CCS ³		化石燃料ガソリン、電力、周辺天然ガス	29 36 51	79 120 160

注:

¹ バイオマスにおけるバイオマス炭素のメートルトン当たりの置換された炭素相当量のメートルトン

² 化石燃料代替エネルギーに関するもの (土地利用変化を除く)

³ 予測パフォーマンス

不確実性の範囲: 代替係数に関して ^a 35~46、^b 21~61、^c 45~57、^d -107~7

関連する温室効果ガス削減量に関して ^e 60~94、^f 67~90、^g 31~86、^h 69~89、ⁱ -150~5

参照: Finland, Soimakallio et al. (2009b); North America, (S&T)² Consultants (2009); and Brazil, Möllersten et al. (2003) and Macedo et al. (2008).

2.5.3 近代的バイオエネルギー: 土地利用変化による影響などの気候変動

バイオエネルギーは、それが地球の炭素循環の一部であるという点で、他の再生可能エネルギー技術とは異なる。バイオエネルギーの使用により排出された二酸化炭素は、早い段階で大気から隔離され、バイオエネルギー・システムが、持続可能な方法で管理された場合、再び隔離される。ただし、排出と隔離は、互いに一時的にバランスを保っているというわけではない (たとえば、森林の長期伐採期間が原因)。大気中の炭素における変化に加え、バイオエネルギー使用は、地球の炭素ストックにおける変化を引き起こす場合もある。土地利用や土地利用変化 (Leemans et al., 1996 など) 及び森林伐採期間 (Marland and Schlamadinger, 1997) の重大性は、直接的土地利用効果も、ライフサイクル評価の研究に考慮されていた (Reinhardt, 1991; DeLuchi, 1993 など) 1990 年代に実証された。

DeLuchi (1993) もまた、間接的効果と間接的土地利用変化の考慮を要求した。こうした効果は、約 10 年後に初めて考慮されたが (Jungk and Reinhardt, 2000)、大部分のライフサイクル評価研究は間接的土地利用変化を考慮に入れていなかった。土地利用変化は、以下の場合を含む多くの方法において、温室効果ガス排出量に影響を与え得る。土地開墾時にバイオマスが現地で燃焼される場合、土地管理慣行が変化したために、土壌や植生における炭素ストックが変化し、二酸化炭素以外の排出量（亜酸化窒素、アンモニア (NH_4^+)）が変化した場合、土地利用変化が結果的に炭素隔離率の変化、つまり、土地利用変化がない場合と比較した土地増減による二酸化炭素同化につながる場合などである。

Schlamadinger et al. (2001) によって、バイオエネルギーは、生物圏の炭素ストックに直接的・間接的、肯定的・否定的な影響を与える可能性があり、クリーン開発メカニズムの下でのクレジットは炭素吸収源として機能するシステムの開発を刺激するということが示された。最近、否定的な影響が再び強調され、研究によって、土地利用変化の排出量が、主に輸送用バイオ燃料に関連していることが推定された。その他のバイオエネルギー・システムと影響の分類（たとえば、生物多様性、富栄養化など、2.2.4 節参照）は、それほど注目されていない（9.3.4 節）。類似の懸念事項、たとえば直接的な環境的、社会経済的影響やリーケージを部分的に取り扱った土地利用、土地利用変化、森林の領域における初期の研究とはほとんど関連性がない (Watson, 2000b)。

バイオエネルギー原材料生産のために使用される場所で発生した直接的土地利用変化の正味の温室効果ガス効果の定量化には、関連した土地タイプに関する参照の土地利用や炭素ストックのデータの定義が必要である。炭素ストックのデータは不確かである可能性があるが、指導的な政策に対して十分な確信を持って、直接的土地利用変化関連の排出量の定量化を依然として可能にするようである (Gibbs et al., 2008 など参照)。

間接的土地利用変化の温室効果ガスによる影響の定量化は、さらに不確かである。間接的土地利用変化の影響を研究する既存の方法は、以下のうちのどちらかを採用する。(1) 世界規模の土地利用変化が特定の土地のタイプで成長する特定のバイオ燃料・バイオマスに割り当てられる決定論的な方法 (Fritzsche et al., 2010)、(2) 生物物理学の情報と生物物理学のモデルを統合する経済均衡モデル (Edwards et al., 2010; EPA, 2010; Hertel et al., 2010a,b; Plevin et al., 2010)。2 番目の方法では、一定量のバイオエネルギーを生産するのに必要な新たな土地の規模（及び近似位置）を通常予測する。次に、この土地を、過去の土地利用変化パターンに照らし合わせ、土地被覆カテゴリーに分配し、間接的土地利用変化に関する排出量を、直接的土地利用変化に関する排出量と同じ方法で計算する。モデルは過去のデータに対して測定されており、既存の生産システムや土地利用レジームを研究するのに最適であるため、この方法には、元来不確実性が備わっている。モデルにおける難しい側面には、現在ほとんど使用されていないバイオマスや、2.3 及び 2.6 節で説明されている混合生産システムなど、土地利用におけるイノベーションやパラダイムシフトが含まれる。バイオエネルギー拡大に関連する土地利用変化を導き出すバイオエネルギーの増加に関係なく、シナリオを比較する研究もある (Fischer et al., 2009 など)。不確実性に関わらず、この研究から重要な結論が導き出される可能性がある。

バイオエネルギーの生産及び使用は、以下の要因による気候変動に影響を与える。

- ・ 二酸化炭素以外の温室効果ガスなどのバイオエネルギー・チェーンからの排出量、及びバイオ燃料チェーンにおける補助エネルギー使用による化石燃料由来の二酸化炭素排出量
- ・ 関連した土地利用変化によって多くの場合もたらされる生物圏の炭素ストックにおける変化に関連した温室効果ガス排出量
- ・ 小規模のバイオエネルギー使用による微粒子及びブラックカーボン排出量などその他の温室効果ガス以外に関連する気候強制力因子 (climatic forcings) (Ramanathan and Carmichael, 2008)、森林に関連するエアロゾル排出量 (Carslaw et al., 2010)、及び表面アルベドにおける変化。多年生植物の緑の植被を導入したことに起因するアルベドの減少は、積雪またはサバンナなど乾季が伴う地域において、バイオエネルギーの気候変動緩和便益を弱める可能性がある。反対に、森林のエネルギー作物（たとえば、一年生作物及び一年草）への転換に関連したアルベドの増加は、森林減少からの正味の気候変動効果を低減させる場合がある (Schwaiger and Bird, 2010)。
- ・ 消費レベルに影響を与える石油への価格効果のような、バイオエネルギー使用に起因する影響。正味の影響は、バイオエネルギー・システムの影響と、置き換えられたエネルギーシステム（多くの場合化石燃料を基盤としたもの）の影響との差である。現在の化石燃料のエネルギー・チェーンや、発展する非従来型エネルギー源は、土地利用の影響を伴うが (Gorissen et al., 2010; Liska and Perrin, 2010; Yeh et al., 2010)、土地利用変化は、農林業と密接に関連があるため、バイオエネルギーとの結びつきも強い。
- ・ その他の要因には、バイオエネルギー生産のための使用が終了した場合の耕作地への転換の程度及び時期や、現在の影響と比較した、将来の気候変動の影響の扱われ方などが含まれる (DeLucchi, 2010)。

今後 20～30 年にわたる緩和への取り組みは、安定レベルの低下を達成する見込みに影響を与える (van Vuuren et al., 2007; den Elzen et al., 2010)。たとえば、土地利用変化における地球の炭素ストック、及び長期伐採の森林の動力学は、エネルギー使用のためのバイオマス産出と、時間をかけてより多くの炭素をさらに隔離する炭素蓄積としてバイオマスを放置するための代替エネルギーとの温室効果ガス緩和のトレードオフにつながる (Marland and Schlamadinger, 1997; Marland et al., 2007; Righelato and Spracklen, 2007)。観測によると、原生林 (old forests) は正味の炭素吸収源であるが (Luyssaert et al., 2008; Lewis et al., 2009)、火災、昆虫大量発生、及びその他の自然攪乱が、森林を正味の吸収源から排出源に急速に転換する可能性がある (Kurz et al., 2008a,b; Lindner et al., 2010)。

短期的及び長期的指標

炭素債務 (carbon debt) (Fargione et al., 2008) や生態系炭素回収時間 (ecosystem carbon payback time) (Gibbs et al., 2008) のような指標は、土地をバイオエネルギー生産へ変換することから生じる先行する土地使用変化関連の排出に焦点を置く。短期及び長期的な排出のバランスやバイオエネルギー事業の気候便益は、たとえば温暖化の累積的影響ないし潜在的地球温暖化可能性 (cumulative warming impacts or global warming potential) (Kirschbaum, 2003, 2006; Dornburg and Marland, 2008; Fearnside, 2008) など、温室効果ガス排出の動的影響を示す指標に反映される (9.3.4 節参照)。このような指標は、限定的に、バイオエネルギーの動的气候効果を表すのに使用されてきた (Kendall et al., 2009; Kirkinen et al., 2009; Levasseur et al., 2010; O'Hare et al., 2009)。

図 2.12 は、生態系炭素回収時間指標を用い、液体バイオ燃料の温室効果ガス・バランスに与える直接土地利用変化の影響を示す。左のダイアグラムは、現在の収量や転換効率と併せて回収時間を示し、右のダイアグラムは、より高い収量 (面積加重収量の上位 10%と等しくなるよう設定) の影響を示す。図 2.12 の回収時間は、輸送燃料の生産及び配給と関連した温室効果ガスの排出を無視する。こうした排出量は、現在、バイオ燃料に関しては、ガソリンやディーゼルに関してより高くなる傾向があるため、回収時間は過小評価されている。図 2.12 の回収時間は、ガソリン・ディーゼル代替による一定の温室効果ガス削減を仮定して、計算されている。温室効果ガスのさらなる削減、つまり回収時間の削減は、バイオ燃料転換効率が改善された場合、より多くの炭素集約型輸送燃料が代替された場合、または生産されたバイオマスが、熱・電力に関して炭素集約型化石オプションに取って替わった場合、達成されるだろう (図 2.10)。バイオマス収量がさら増加すれば、回収時間が減るが、温室効果ガス排出、特につまり亜酸化窒素の増加につながる農業への投入の増加が必至となる。バイオマス生産が結果的に長時間にわたる土地の劣化につながり、収量レベルに影響を与え、収量レベルを維持するために投入が必要になる場合、回収時間は増加するだろう。

示されたように、すべてのバイオ燃料オプションは、密林がバイオエネルギー植林に転換される場合、多大な回収時間がある。星印の付いた点は、熱帯泥炭湿地林におけるアブラヤシ生育に関する非常に長い回収時間を示す。なぜなら、排水が泥炭の酸化につながり、数十年間にわたって発生し、化石ディーゼルの代替排出量の数倍多くの排出量になる可能性のある二酸化炭素排出を引き起こすからである (Hooijer et al., 2006; Edwards et al., 2008, 2010)。自然の状況の下で、これらの熱帯泥炭湿地林には、ごくわずかな二酸化炭素排出量と少量のメタン排出量が伴う (Jauhiainen et al., 2008)。荒廃地または耕作地が使用された場合、回収時間は実質的にゼロであり、草原及び木の生えたサバンナが使用された場合、回収時間は、ほとんどの生産システムに関して、比較的少ない (これらの土地が、たとえば放牧など、もともと用いられていた場合、生じる可能性がある間接的土地利用変化は考慮に入れない)。

よって、使用されていない限界耕作地及び荒廃地をバイオエネルギー生産の対象とすることによって、直接的土地利用変化の排出量を緩和することが出来る。いくつかのオプション (たとえば、多年生草、木本植物、機械で収穫されたサトウキビなど) に関しては、土壌及び地上炭素の正味の増加が得られる可能性がある (Tilman et al., 2006b; Liebig et al., 2008; Robertson et al., 2008; Anderson-Teixeira et al., 2009; Dondini et al., 2009; Hillier et al., 2009; Galdos et al., 2010)。この状況において、熱分解により生産されたバイオ炭の土地応用は、より安定した形態で炭素を隔離し、土壌の構造や肥沃度を改善するオプションとなるだろう (Laird et al., 2009; Woolf et al., 2010)。

バイオエネルギーは常に土地利用変化をもたらすわけではない。バイオエネルギー原材料は、食料や繊維と組み合わせ生産することができ、土地使用転換を回避し、土地の生産的使用を改善する (2.2 節)。こうした可能性は、リグノセルロースバイオマスを使用出来るバイオエネルギーオプションだけでなく、廃油やジャトロファのような油糧種子を使用するその他のいくつかのオプションにも当てはまるだろう (2.3 節)。これらのバイオマス資源が廃棄物である場合、つまり、これらが代替目的のために使用されていなかった場合は、再利用された有機性廃棄物や農林業からの副産物を使用しても、土地利用変化を引き起こさない。反対に、これらがバイオエネルギーに使用されない場合は、一部のバイオマス資源 (たとえば、森林に放置された収穫残渣) は、エネルギーに使用される場合よりもより長い時間、有機炭素を留保するだろう。こうした遅延温室効果ガス排出は、短期の温室効果ガス緩和に関する便益と考えることができ、これは、長期的に見て、バイオマスの劣化がゆっくりである (たとえば、北方林など) 地域にとりわけ関連のある要因である。しかしながら、上記で述べられたように、自然攪乱は、森林を正味の吸収源から温室効果ガスの正味の排出源へと転換する可能性があり、森林に放置された枯死木は火災で焼失する可能性がある。周期的な火災の影響を受けやすい林地では、適切な植林法が実施されることで、火災の頻度と強

度が弱まり、森林の成長率と土壌炭素貯留を加速する。バイオエネルギーに関するこのような実施において除去されたバイオマスを使用することで、温室効果ガスや微粒子排出削減を実現することが出来る。

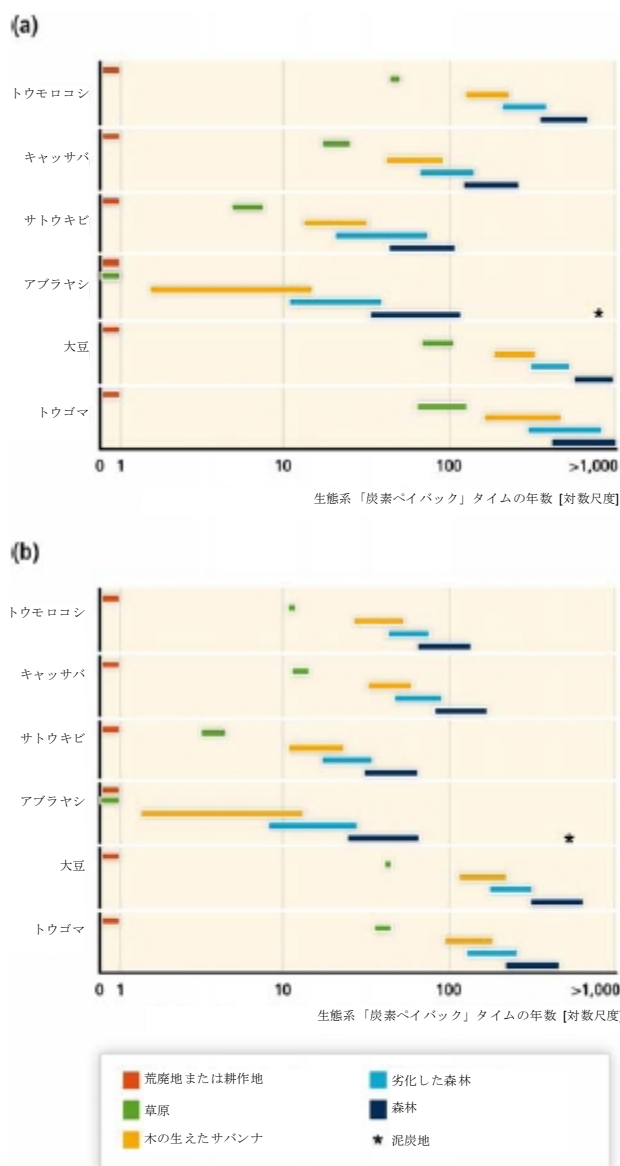


図 2.12: (a) に示された 2000 年の農業システムと、面積加重収量の上位 10%と等しくなるよう設定された将来のさらに高い収量シナリオである (b) を比較し、熱帯地方全体の潜在的なバイオ燃料作物拡大の道筋に対する、生態系炭素回収時間。星印は、泥炭地で栽培されたアブラヤシの収穫高を示す。回収時間は、作物生産高が 10% 増加する 600 年と比較して、2000 年では 900 年より長くなる。Gibbs et al. (2008) に基づき、IOP Publishing Ltd. の許可を得て複製された。

世界の別地域では、Edwards et al. (2010) により、6 つの均衡モデルの比較が示されている。この 6 つのモデルは、基準年と比較して、第一世代エタノールまたはバイオディーゼルに対する需要のわずかな増加として定義された、標準的なバイオ燃料ショック (biofuel shock) に関連する土地利用変化を定量化するためのものである。⁶⁵すべてのモデルは、土地利用変化の程度、及び地域や作物への分布の観点からモデルごとのばらつきと共に、重大な土地利用変化 (直接的土地利用変化と間接的土地利用変化は別々には出来ないものとみなされた) を示していた。Hiederer et al. (2010) による後続研究は、特定の研究に対する「バイオ燃料ショック」(0.2~1.5EJ) の関数として、一般

⁶⁵ バイオ燃料ショック (Hertel et al., 2010a,b) は、既定量のレベル (つまり、特定年の政府指令 (government mandates) の総和) に達するために、一部の経済的パラメータ (たとえば、エタノール生産への補助金など) を変えることによって、一般的な均衡モデルにおいて導入されている。新しい均衡及び以前に決定された均衡との比較によって、直接影響を受けた土地面積の変化の推定値が指令を達成し、間接的に関連する推定値がすでに利用不可能である農業生産、その副産物、また世界規模の経済的チェーン全体にわたるその影響を補うことが可能になる。これらの研究は、不確かさの度合いが高い。不完全な均衡モデルも、Edwards et al. (2010) に含まれていた。

的なバイオ燃料作物に関して、図 2.13 で示された土地利用変化に関連する排出量の範囲を比較した。図 2.13 は、サトウキビエタノールに関して土地利用変化に関する中程度の排出量（5～10g CO₂eq/MJ）を招く、ブラジルの土地利用分布⁶⁶の比較的高い分解能と共に、2010 年の EPA モデルの結果も示している。これは、ヨーロッパの研究（Al-Riffai et al., 2010）による推定値（12g CO₂eq/MJ）と類似している。Nassar et al. (2010) による 2005～2008 年の間の一般的な作物や原生植物に関する測定された土地利用変化の動力学と併せて、ブラジルの研究は、間接的土地利用変化と直接的土地利用変化に関して 8g CO₂eq/MJ（後者に関してはほぼゼロ）を得た。Fischer et al. (2010) は、決定論的方法論を用い、森林減少の高いリスクを仮定して、28g CO₂eq/MJ を得た。図 2.13 からのモデル結果は、サトウキビが原料のエタノールよりも高い土地利用変化値を出すようなその他のすべての作物を示している。アメリカのトウモロコシが原料のエタノールの場合は、Plevin et al. (2010) が、様々なモデルのパラメータと仮定の不確実性の分析に基づき、25～150g CO₂eq/MJ という妥当な範囲を報告している。

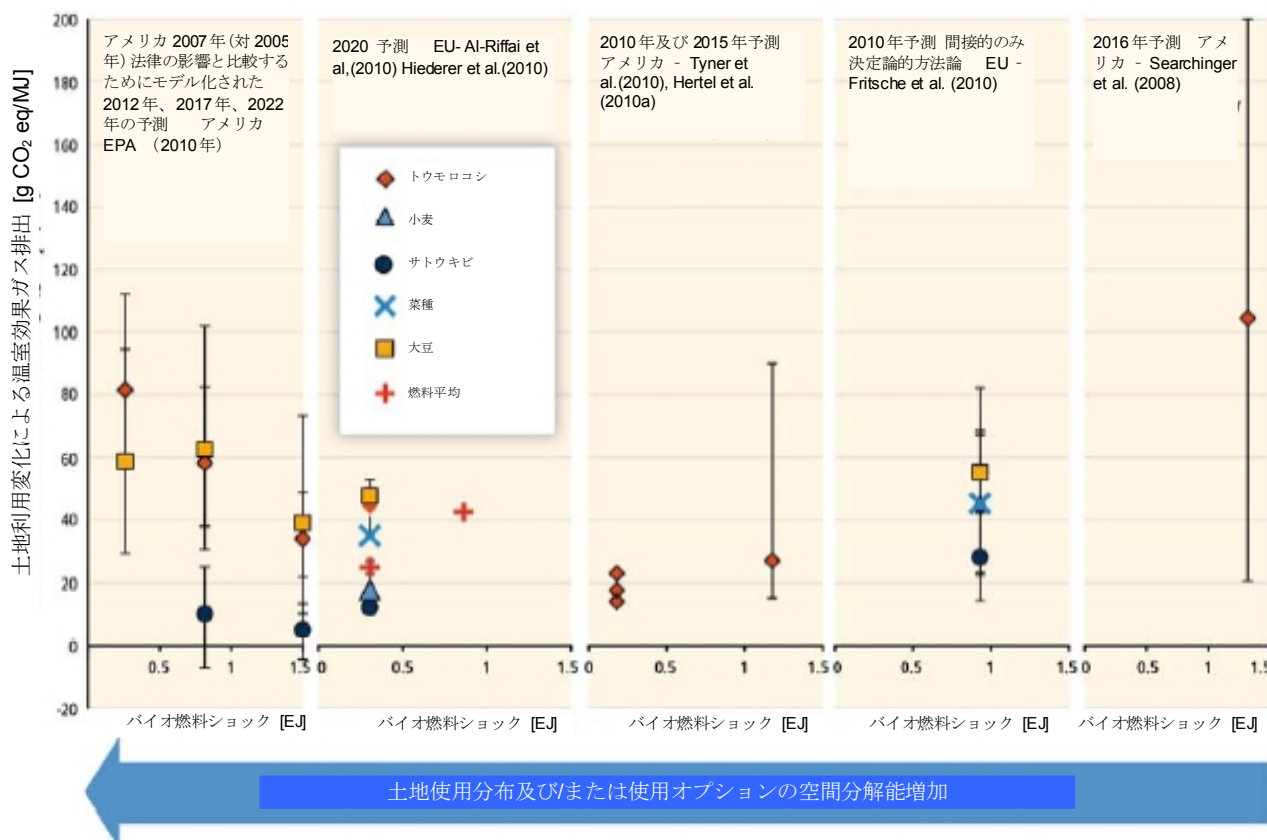


図 2.13: EJ（30 年算定枠組み）において示された一定レベルの需要、バイオ燃料ショックを考慮して、主なバイオ燃料作物に関する土地利用変化関連の排出量モデルに基づく推定値を選択する。複数の研究の中間値（g CO₂eq/MJ）：高い分解能モデルを持つアメリカのトウモロコシを原料としたエタノールでは 14～82、初期のモデルでは 100、サトウキビを原料としたエタノールでは 5～28、ヨーロッパの小麦では 18～45、大豆を原料としたバイオディーゼル（不確か）では 40～63、菜種を原料としたバイオディーゼルでは 35～45。Tyner et al. (2010) 及び Hertel et al. (2010a) における点は、バイオマス収量や人工増加などの最低値とともに、モデルの改善を示している（ベースライン 2006 年）。Fritsche et al. (2010 年) の値域は、間接的な土地利用変化を計算するために、森林減少の増加など土地利用変化の理論上の最悪なケースが 25%及び 75%の危険値を表している決定論的な方法論を元としている。

⁶⁶ Nassar et al. (2009) のブラジルの土地使用モデルに基づく。このモデルは、森林減少が原因の土地使用変化の割合が低いことを示す。最近になって、Nassar et al. (2010) は、長年にわたって土地利用代替の（統計的な及び衛星を利用した）直接的データを利用したモデルに対して弾力性を得た。様々な地域における主要作物のマトリクス弾力性の結果によって、サトウキビを原料とするエタノール約 8g CO₂eq/MJ の、直接的及び間接的土地利用変化の決定論的な推定値が示された。大豆から在来の植生への代替係数では、より高い数値が見られる。

シナリオを研究するためのこれらのモデルの有用性は、モデルに基づいた土地利用変化の推定値における貿易に不可欠な要因に関する仮定に加えて、作物収量の増加に対して、収量や土地面積における変化がもたらした関連する貢献の分析と共に例示されている (D. Keeney and Hertel, 2009)。その後のモデル改善は、作物収量、副産物の市場相互作用、及び貿易や政策の仮定を組み込み、過去を分析し、現在 (2010 年) の EU 及びアメリカの政策と共に将来の使用を推定し、ラテンアメリカやオセアニアなどのその他の国々における土地利用変化が、主として放牧地、次に商業林を犠牲にしたものであることを明確にする (Hertel et al., 2010a,b)。

Lywood et al. (2009b) は、生産量の変化がどの程度、作物収量の増加に由来するか、または土地面積の変化は、作物と地域の間でどの程度変化するかを報告している。収量の増加が、1961~2007 年までの EU における穀物及びアメリカにおけるトウモロコシの漸進的生産量増加の、それぞれ 80%及び 60%に貢献していると推定される。逆に、面積の増加が、EU の菜種、ブラジルのサトウキビ、南アメリカの大豆、東南アジアのアブラヤシの生産量増加の 60%以上に貢献した。複数の研究によって、価格と収量の関係が報告されており、油の価格上昇と燃料の税額控除は、アメリカや EU においてそれぞれ強い相関関係があるが、価格と収量の関係を引き出す基盤は弱い (D. Keeney and Hertel, 2008)。Edwards et al. (2010) には、特定のバイオ燃料の追加単位生産量当たりの耕作限界地の必要条件は、バイオ燃料原材料生産へ転換した追加的な土地の生産性の低下が原因で、増加するはずだと述べられている (たとえば R. Keeney and Hertel, 2005; Tabeau et al., 2006 にも反映)。しかしながら、Lywood et al. (2009b) には、EU の穀物やアメリカのトウモロコシの場合、平均収量が、多くの土地が利用されることで低下するという証拠はないと述べられている。餌として使用されたプロセス副産物の想定された、またはモデル化された置き換え効果も、土地利用変化値に大きな影響を与え得る。

ヨーロッパのバイオ燃料に関して、飼料用大豆ミールと穀物が置き換えられれば、EU のシリアル、菜種、テンサイからバイオ燃料を生産するのに必要な土地の純面積は、土地総所要量よりもずっと少なくなる (たとえば、北西ヨーロッパにおける飼料用小麦からのエタノールに関してはわずか 6% (Lywood et al., 2009a))。Lywood et al. (2008) によると、家畜飼料としての輸入大豆を代替する副産物に基づくヨーロッパの穀物エタノールや菜種バイオディーゼル正味の温室効果ガス削減において、大きな改善が達成された。これにより、ブラジルにおける森林減少や大豆栽培に関するその他の土地利用変化を減らす。反対に、アメリカでのエタノール需要の増加に対応して、大豆栽培を犠牲にした、トウモロコシ栽培の増加が、ブラジルなどのその他の国々において大豆栽培を増加させたと報告された (Laurance, 2007)。貿易の想定は重大であり、様々なモデルにおいて異なる。さらに、たとえば、さらにバイオ燃料を生産するような新しい使用法が開発されるかもしれないが (Yazdani and Gonzalez, 2007)、副産物の限界置換効果は、飽和レベルである (McCoy, 2006; Edwards et al., 2010)。

リグノセルロース原材料を使用するバイオエネルギーオプションは、第一世代バイオ燃料のオプションよりも、土地利用変化値が低いと予測される (以下の例参照。EPA, 2010; Hoefnagels et al., 2010; 図 9.9 参照)。上記に示されたように、これらの原材料源の一部は、土地利用変化を引き起こすことなく、使用することが出来る。高いバイオマス生産性や複数の生産物 (たとえば、家畜飼料など) のおかげで、またはより多い耕作限界地を用いることによって、主要な耕作地をめぐる争いが回避されたために、土地利用変化の低い値が推測される (2.2 及び 2.3 節)。しかしながら、限界耕作地の低い生産性は、結果的に、一定のバイオマス生産量当たりのより高い土地所要量につながり、2.2 節で述べられているように、特定の課題を示す。また、多くのリグノセルロース植物がより長期の循環の下で成長するにつれて、樹木の生存期間にわたっての平均収量は、農業的手法 (特に肥料投入量の増加) を通して、また移植の時期に様々な選択をすることによってのみ影響を与えることが出来るため、それらの植物は、価格上昇にますます対応しなくなるはずである。よって、増加する需要に対応する生産量増加は、面積の拡大によってより簡単に獲得することが出来る。

特定の温室効果ガスの大気寿命次第で、現在の多い排出量と将来の少ない排出量とのトレードオフは、一般的に相関的ではない。しかし、二酸化炭素との関係は、実質的に相関的であるため、今日排出された二酸化炭素が 1 トン増えた (少なくとも) 場合は、1 トン、将来削減することが必要となる (将来増加する余地がある)。この関係は、二酸化炭素排出量が気候に及ぼす影響が不可逆的に近いことが原因である (Matthews and Caldeira, 2008; M. Allen et al., 2009; Matthews et al., 2009; Solomon et al., 2009)。

統合されたエネルギーと工業と土地利用・土地被覆のモデルによって、社会において、拡大するバイオエネルギー部門が他の部門とどのように相互作用し、長期的なエネルギー部門の発展、土地利用、生物圏の炭素ストックの管理、地球規模の累積的温室効果ガスの排出量に影響を与えるかについてよく理解出来る。初期の研究についての 1 つの例において、Leemans et al. (1996) は、IMAGE モデル (世界的な環境を評価するための統合モデル: Integrated Model to Assess the Global Environment) において、Less (二酸化炭素低排出のエネルギー供給システム: low CO₂-emitting energy supply system) シナリオを実行する。このシナリオは、IPCC 第二次評価報告書のために作成された (IPCC, 1996)。この研究によって、バイオマス原材料を提供するために必要とされた土地利用の拡大によって、重大な食料とバイオエネルギーとの競合が発生し、生物多様性のような環境問題に関する重大な結果を伴う森林減少率に影響を与える可能性があること、またその結果は、地域的な排出量や炭素サイクルにおけるフィードバックに敏感であるということが示された。最近になって、連鎖した経済的及び地球の生物地球化学モデルを使用し、

Melillo et al. (2009) によって、21 世紀にわたって拡大した地球規模のセルロースバイオ燃料プログラムによる、土地利用変化と関連した累積的二酸化炭素排出量の類似レベルがわかった。その研究によって、間接的土地利用変化は、直接的土地利用変化よりも、炭素ロスの大きな原因であること、肥料からの亜酸化窒素の排出量は、地球温暖化の実質的な原因であること、窒素肥料の使用を最良の形で実行することで、バイオ燃料生産に関連する排出量を劇的に削減出来るだろうということが結論付けられた。

Wise et al. (2009) によって、地球の炭素排出量を制限することの重要性も強調されており、緩和レジームの設計が、バイオエネルギー発展の性質と、バイオエネルギーによる正味の温室効果ガス削減など関連する環境的結果にも大きく影響を与えることも示された。化石燃料による排出量にのみ課税する代わりに、炭素税レジームに化石燃料及び土地利用変化双方の排出量を含むことが、環境的な目標に対応するためのコストを低減することにつながるということがわかった。しかしながら、この税のレジームは、食用作物及び家畜の価格上昇も、非管理の生態系及び森林の拡大も促すことがわかった。作物生産量の改善は、二酸化炭素以外の排出量（モデル化なし）が考慮される必要があるという警告とともに、温室効果ガス排出量削減に対する潜在的に重要な方法として提案された。

森林保護に必要なメカニズムとしての生物圏の炭素価格付けは、Wise et al. (2009) により提案され、Venter et al. (2009) やその他により支持された。Persson 及び Azar (2010) は、土地利用変化による炭素排出量の価格付けにより、潜在的に、現在の森林減少に至る直接的な原因の大部分が収益性のないものとなるだろうと認めた（たとえば、大規模な牛の放牧、小規模な焼畑農業、薪の使用など）。しかし、一般的な原材料の生産性やバイオ燃料の転換効率に関する Wise et al. (2009) の仮定によると、これらのバイオエネルギー・システムは、非常に生産的であるため、それが、バイオエネルギー生産に関する森林減少を収益性のないものとするのに十分であるかどうか疑問を抱いている。より高い炭素価格により、森林開拓のコストだけでなく、一定のバイオエネルギー生産システムからの収益も増加する。バイオエネルギー産業が、植林地開発の第一歩として、森林皆伐から木材の収益を得ようとする木材パルプ工業と手を結べば、土地転換に関する前払いの費用も削減される場合がある (Fitzherbert et al., 2008)。

3 つの仮定的結論は以下の通りである。

(1) 追加的且つより強力な保護対策は、熱帯雨林保護の目的に対応するために必要とされるだろう。生態系保護の気候便益を厳密に重視することによって、比較的低い炭素密度を持つ貴重な生態系に不当な圧力をかける場合がある。これは、気候変動緩和に関しては、あまり影響を与えない一方で、生物多様性や地下水面などの生態系のその他の部分には否定的な影響を与える可能性がある。

(2) 厳密な気候とコスト効率の観点から、一部の場所では、一定レベルの先行する土地利用変化に関する排出量は、それに続く継続的なバイオ燃料生産及び化石燃料置換の気候便益のために、森林を生産性の高いバイオエネルギー植林地へ転換する際には、許容範囲である場合がある。バイオエネルギーの拡大便益と土地利用変化の生物多様性、水、及び土壌保全への影響との間のバランスには、細心の注意が必要である。気候変動緩和は、生態系保護に対する多くの論理的根拠の 1 つにすぎない。

(3) 間接的な土地利用変化の効果は、大いに（全面的に）農業や家畜管理における改善率、及びバイオエネルギー生産の普及率に左右される。最終的に、効果的な持続可能性の枠組みに付随し、農業管理における同時改善から始まるバイオエネルギー生産やエネルギー作物計画の実施により、衝突を緩和し、たとえば、地方の発展、土地改善、及び複数の適応対策を組み合わせる機会などを含む気候変動緩和における、肯定的な結果の実現を可能にするだろう。

2.5.4 伝統的バイオマス：気候変動の影響

伝統的なたき火や簡単な低効率調理ストーブは低燃焼効率であり、気候変動と地方における大気汚染に否定的な結果を及ぼす不完全燃焼生成物（一酸化炭素、メタン、粒子状物質、非メタン揮発性有機化合物、その他の生成物など）を大量に生成する (Smith et al., 2000; 9.3.4.2 節の Box 9.4 も参照)。バイオマスを、たとえば立木または農業残渣から再生可能な方法で収穫した場合、すでに大気中に排出された二酸化炭素は、バイオマスが再生する際に、隔離される。不完全燃焼生成物にも寿命の短い温室効果汚染物質やブラックカーボンが含まれるため、持続可能な収穫でさえ、このような燃焼サイクルを温室効果ガスニュートラルにしない。世界的には、家庭での燃料燃焼によって、人為的な排出源からのブラックカーボン及び一酸化炭素の排出による昇温の約 30%、オゾン生成化学物質の約 15%、メタン及び二酸化炭素排出量の数パーセントが引き起こされると推定されている (Wilkinson et al., 2009)。

改良型の調理ストーブ、及びその他の調理用新型バイオマスシステムは、エネルギー使用削減や気候変動緩和において大きな効果を上げるのに費用対効果が高く、30～60%の燃料節約が報告されている (Berrueta et al., 2008; Jetter and Kariher, 2009)。これらの効率的な調理ストーブと関連する温室効果ガス排出削減は、燃料タイプ、ストーブの設計、調理慣習、世界中の環境状況により、達成するのが困難である。しかしながら、小型ガス化ストーブやバイオガスストーブのような新型バイオマスシステムは、設計が改善され、燃焼効率が高まり、伝統的ストーブと比

較すると、最大で 90% まで寿命の短い温室効果ガスの生成を劇的に削減することが出来る。こうした新型ストーブの一部は、液体プロパンガスと同じ性能レベルにさえも達する (Jetter and Kariher, 2009)。メキシコの地方で用いられる改良型 Patsari ストーブは、再生可能な、または非再生可能なバイオマス収穫をそれぞれ用いたたき火と比較して、年間、ストーブ 1 台当たり 3 から 9 トンの間の CO₂eq (CO₂eq/stove/yr) を削減している (M. Johnson et al., 2009)。

Venkataraman et al. (2010) の推定によると、インドで 1 億 6 千万台普及している改良型の調理ストーブによって、80Mt CO₂eq/年の緩和、つまり、インドの温室効果ガス全排出推定量の 4% 以上の削減に加え、インドにおける人為的なブラックカーボン排出量の 30% 削減につながる可能性がある。世界的に見て、伝統的なたき火と比較して、年間ストーブ 1 台当たり 1~4t CO₂eq (CO₂eq/stove/yr) で単位当たりの温室効果ガス緩和を伴い、改良型の調理ストーブの世界的緩和ポテンシャルは、年間 0.6~2.4Gt CO₂eq/年になると推定される。この推定値は、ブラックカーボン排出量の追加的な削減可能性を考慮していない。実際の数値は、バイオマス燃料生産の再生可能性、ストーブや燃料の性質、改良型の調理ストーブの実際の導入と持続的使用に左右される。改良型の調理ストーブの導入による、薪と木炭の削減は、森林への圧力減少の一助となり、地上バイオマスのストックや、土壌及び生物多様性保全の改善にも役立つ (Ravindranath et al., 2006; Garcia-Frapolli et al., 2010)。

2.5.5 温室効果ガス排出以外の環境的影響

2.5.5.1 大気質及び水資源への影響

バイオエネルギー生産からの大気汚染物質の排出量は、技術、燃料特性、プロセス条件、導入された排出削減技術によって決まる。石炭及び石油の定置用途と比較すると、バイオエネルギー用途からの二酸化硫黄 (SO₂) や窒素酸化物 (NO_x) の排出は、多くの場合少ない (9.3.4.2 節も参照)。バイオ燃料が、輸送部門においてガソリンとディーゼルに取って替わる場合、SO₂ は減少するが、NO_x 排出量における変化は、置換パターンと技術によって決まる。ガソリンをエタノールやバイオディーゼルで置き換える効果も、エンジン特性に左右される。バイオディーゼルは、NO_x 制御触媒を装備していない従来の直接噴射式ディーゼルエンジンにおける石油ディーゼルよりも、NO_x 排出量が多い (Verhaeven et al., 2005; Yanowitz and McCormick, 2009 など)。

バイオエネルギー生産は、水資源にプラス及びマイナスの効果を及ぼし得る (9.3.4.4 節も参照)。バイオエネルギー生産は、一般的にガソリン生産よりも多くの水を消費する (Wu et al., 2009; Fingerman et al., 2010)。しかしながら、この関連性とバイオエネルギー生産の水への影響は、場所、特定の原材料、生産方法、及びサプライチェーンの要素に大きく左右される。

バイオマス栽培は、水圏生態系の富栄養化を高める栄養素の浸出及び排出につながる可能性がある (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; SCBD, 2006; Spranger et al., 2008)。水域への農薬排出も水生生活に悪影響を与える場合がある。数種類のエネルギー作物は、複数年交代で草食動物または木質作物を育てる牧草地として一時的に使用されている耕作地で栽培されている多年生植物であることを考えれば、バイオエネルギー需要の増加によって、土地使用を、かなり高い水生生産性を備えたシステムへと推し進めることになるだろう。一方、需要を代替のバイオエネルギー (主としてリグノセルロース) に転換すれば、水競争が沈静化する可能性がある。多年草作物と短期輪作木質作物は、一般的に農業投入をあまり必要とせず、一年生作物と比較すると影響も少ない。ただし、大規模な生産の場合は、高レベルの栄養投入を必要とする (2.2.4.2 及び 2.3.1 節参照)。水への影響は、通水で栄養素を捉えるための植生フィルタとしての農地において、リグノセルロース原材料を統合することによって、緩和される可能性がある (Börjesson and Berndes, 2006)。長期にわたる生育期間によって、非生産的な土壌蒸発や流出を植物の蒸散に方向転換することが出来るかもしれない (Berndes, 2008a,b)。年間を通して持続的に土地を覆っている作物も、降水や流出からの浸食作用を減少させることによって、一年生作物の生育期間外の土壌を保全することが出来る (Berndes, 2008a,b)。多くのバイオエネルギー作物は、従来の食物や飼料作物に適さない広範囲の種類の土地で栽培することが可能である。これらの耕作限界地、牧草地、及び草原は (もし下流域への悪影響が緩和出来るのであれば)、持続可能な管理慣行の下で、原材料の生産に利用することが出来るだろう。

原材料をバイオ燃料及び電力に転換する次のプロセスによって、廃水からの化学的及び熱による汚染負荷を増加させ、水系に廃棄物を発生させる可能性がある (Martinelli and Filoso 2007, Simpson et al., 2008)。これらの環境的影響は、適切な装置が導入されれば、軽減することが出来る (Wilkie et al., 2000; BNDES/CGEE, 2008)。

バイオエネルギーに対する水の需要量は、プロセス変更や再利用を介して、大幅に減らすことが出来る (D. Keeney and Müller, 2006; BNDES/CGEE, 2008)。現在、ほとんどの水が、栽培される原材料の生産期間中に蒸発散によって、大気中に失われる (Berndes, 2002)。原材料を燃料や電力へ加工する際に必要な水の量は、はるかに少ないが (Aden et al., 2002; Berndes, 2002; D. Keeney and Müller, 2006; Phillips et al., 2007; NRC, 2008; Wang et al., 2010)、水は、湖や川、その他の水域から取り出される必要がある。

2.5.5.2 生物多様性及び生息地の喪失

生息地の喪失は、地球規模の生物多様性減少の主要な動因の1つで、生物多様性喪失の主要動因となり、これから先50年間にわたって減少すると予測されている (Sala et al., 2000; UNEP, 2008b; 9.3.4.5 及び 9.3.4.6 節参照)。バイオエネルギーのためのバイオマス生産量の増加は、自然の生態系をバイオエネルギー植林に転換したり、森林管理を変えることによって、直接的に野生の生物多様性に影響を与える。エネルギー作物に取って替わられた生産的な土地利用が、自然の生態系を各地で耕作地や牧草地に転換することによって、再構築された場合などに、生息地及び生物多様性の喪失も間接的に発生する場合がある。バイオマスは一般的に熱帯地方で最も効率的に生産されるため、熱帯の自然生態系 (その多くは高い生物多様性価値を持つ) に取って替わる強い経済的インセンティブが存在する (Doornbosch and Steenblik, 2008)。しかしながら、森林開拓は、ほとんどの場合、現地の社会的、経済的、技術的、生物物理学的、政治的、人口統計学的な力に影響される (Kline and Dale, 2008)。

油糧種子の需要増加は、一部の OECD 加盟国における保全区域に圧力をかける (Steenblik, 2007)。同様に、パームオイルの需要増加は、東南アジアの一部における森林減少の一因となってきた (UNEP, 2008a)。パームオイル農園は、それらが取って替わった森林よりもずっと数の少ない種を支えている (Fitzherbert et al., 2008)。

バイオエネルギー・システムが従来の食物や飼料作物に基づいている限り、農薬や栄養負荷による生物多様性の影響は、バイオエネルギーの拡大から予測することが出来る。少量の遺伝物質のストックに基づく大規模な単一種栽培が、伝統的な多様性の使用を減少させる場合、バイオエネルギー生産は、農業生物多様性にも影響を与える。

様々な要因に左右されるが、バイオエネルギーの拡大も生物多様性のプラスの結果につながる可能性がある。化石燃料を代替するためにバイオエネルギーを使用することで、気候変動を軽減することが出来るが、これが生息地喪失の主要な動因となることが予想される。農地における多年草植物、または短期輪作木質作物の形成が、生物多様性を改善させることが明らかになった (Lindenmayer and Nix, 1993; Semere and Slater, 2007; Royal Society, 2008)。植生フィルタとして栽培されたバイオエネルギー植林は、水域における栄養負荷や富栄養化を減少することによって、生物多様性を改善することができ (Foley et al., 2005; Börjesson and Berndes, 2006)、多様な景観を生む。

バイオエネルギー植林は農地に見出すことができ、生態学的回廊を提供しているが、それを介して、動植物は、空間的に分離した自然の生態系と半自然の生態系の間を移動している。それゆえ、バイオエネルギー植林は、農地の障壁効果を軽減することが出来る (Firbank, 2008)。しかしながら、一部のアブラヤシ植林で発生したように、バイオエネルギー植林は、生息地崩壊の一因となり得る (Danielsen et al. 2009; Fitzherbert, 2008)。

適切に配置されたバイオマス植林は、近隣の自然林への圧力を軽減することにより、生物多様性も保護することが出来る。インドのオリッサからの研究によると、村にバイオマス植林を導入することで、周辺の自然林への圧力を軽減しながら、(増加した利用可能性の結果として) バイオマス消費を増加したことが示された (Kohlin and Ostwald, 2001; Francis et al., 2005)。

森林伐採地域、または劣化した耕作地及び草原など、荒地または放棄地に作物が栽培された場合、バイオ燃料の原材料生産は、土壌、生息地、生態系機能の回復または保全によって、生物多様性にプラスの影響を与えるだろう (Firbank, 2008)。たとえば、特定の樹木を使用したいいくつかの試みや、劣化が深刻なインドの荒地 (アルカリ性、塩質、または塩分の影響を受けた土地など) の集中管理によって、8年以内に土壌炭素、窒素、及び利用可能なリンの増加が見られた (Garg, 1998)。

2.5.5.3 土壌資源における影響

増加したバイオ燃料生産の土壌への大きな影響には、土壌の炭素酸化、土壌浸食率の変化、養分溶脱が含まれる。しかしながら、これらの効果は、農業技術や対象となるバイオマスに大いに左右される (UNEP, 2008a)。栄養分の需要と同様、バイオマス生産に必要なとされる整地は、原材料ごとに大きく異なる。たとえば、小麦、菜種、トウモロコシは、アブラヤシ、サトウキビ、スウィッチグラスと比較して、かなり多くの耕作地を必要とする (FAO, 2008a; UNEP, 2008a)。サトウキビ生産において、土壌の質は、製糖所や蒸留廃水からの再利用された栄養分から大いに恩恵を受ける (IEA, 2006)。

適切な管理をせずに農業残渣を使用すれば、浸食増加により、土壌有機物への有害な影響につながり得る。しかしながら、この影響は、管理、収量、土壌の種類や位置に大きく依存する。一部の地域では、残渣除去の影響は最小であるかもしれない。

保全耕うん、及び輪作などの一定の栽培方法は、悪影響を緩和し、時としてバイオ燃料生産の環境的便益を改善する可能性がある。たとえば、ジャトロファは、成長する間に、土壌を安定化し、水分を蓄える (Dufey, 2006)。荒地や限界耕作地におけるバイオマス栽培のその他の潜在的な便益には、養分溶脱の減少、土壌生産性の増加、炭素含有量の増加などがある (Berndes, 2002)。現在のバイオ燃料システムと比較して管理強度や化石エネルギー投

入があまり必要でない、リグノセルロースのエネルギー作物の栽培地が、放棄農地、または荒廃地に作られた場合、土壌炭素及び土壌の質は徐々に上がるだろう。この有益な効果は、多年生植物種には特に重大であるだろう。

2.5.6 環境衛生と安全性の示唆

2.5.6.1 原材料の課題

現在、燃料エタノール製造に使用される作物の多くは、伝統的な飼料源でもある（トウモロコシ、大豆、菜種、小麦など）。ただし、燃料エタノール生産を強化するもの（高でんぷんのトウモロコシなど）か、伝統的な食用作物または飼料作物に該当しないもの（スイッチグラスなど）のいずれかである新たな作物に対して、かなり集中的な取り組みが行われている。これらの新たな作物から結果として生じた穀物蒸留残渣は、家畜の飼料として使用されるか、あるいは何らかの事情で結局は家畜の飼料に使用され得る場合、燃料エタノール生産に使用する前に、飼料におけるその受容性を市場導入前に評価する必要がある（Hemakanthi and Heller, 2010）。

他家受粉、交配、害虫への耐性、生態系機能の攪乱に関する懸念（FAO, 2004; FAO, 2008; IAASTD, 2009）のため、一部の地域では遺伝子組み換え（GE）作物の使用が制限されている。作物自体またはその近縁野生種の雑草性または侵入性につながる遺伝子導入の動きがあることが、その大きな理由である（Warwick et al., 2009）。文献では、明確性、予測可能性、確立されたリスク評価プロセスが遺伝子組み換え作物使用に対する懸念を緩和すると勧告している（Warwick et al., 2009）⁶⁷。1996年以降のアメリカにおける遺伝子組み換え作物使用の影響を初めて評価したもの（NRC, 2010）では、農家の便益として、農薬取り扱い時の労働者の安全性の向上、遺伝子組み換え作物による水質向上が示されるとともに、特に水質への影響を測定するインフラの設置、雑草管理の慣行の発展、遺伝子組み換え形質の有無に左右される市場に属する農家のニーズへの対応について、さらに取り組みが必要であることが確認された。

バイオ燃料生産の候補である複数の草種と木質種には、侵入生物種に共通して見られる形質がある（Howard and Ziller, 2008）。これらの形質には、急速な成長、高い水利用効率、長期の着葉期（canopy duration）などがある（Clifton-Brown et al., 2000）。これらの作物が導入された場合、侵入生物種となり、固有種を駆逐して生物多様性を低下させかねないという懸念がある。たとえば、ジャトロファ（ナンヨウアブラギリ）はいくつかの国（インド、アメリカの南部州の多く）で雑草性があると見なされている（Low and Booth, 2007）。ススキとスイッチグラス（*Panicum virgatum*）に対しては、警鐘が鳴らされている。*Sorghum halepense*（ジョンソングラス）、*Arundo donax*（ダンチク）、*Phalaris arundinacea*（リードカナリーグラス）は、アメリカでは侵入種として知られている。種の導入については、多数の手順が考案され、関連する固有リスクの体系的な評価が可能である（McWhorter, 1971; Randall, 1996; Molofsky et al., 1999; Dudley, 2000; Forman, 2003; Raghu et al., 2006）。DiTomaso et al. (2010) は、たとえばバイオ燃料植物の栽培前と栽培中の予防措置など、これらの農業経済システムを牽制しつつ、望ましい作物を開発する政策に取り組んでいる。

2.5.6.2 バイオ燃料生産の課題

世界規模で、バイオ燃料の大半は、多くの産業で長年使用されてきた従来の生産技術（2.3 節参照）で生産されている（Gunderson, 2008; Abbasi and Abbasi, 2010）。これらの技術の大半にまつわる危険の特徴ははっきりしており、既存の知見と標準を適用すればリスクを非常に低いレベルに抑えることが出来る（Astbury, 2008; Hollebone and Yang, 2009; Marlair et al., 2009; Williams et al., 2009 などを参照）。また、その類型論も開発中である（Rivière and Marlair, 2009, 2010）。

文献は、新たな技術（2.6 節参照）の開発を背景に（Madsen et al., 2004; Madsen, 2006; Vinnerås et al., 2006; Narayanan et al., 2007; Gunderson, 2008; McLeod et al., 2008; Hill et al., 2009; Martens and Böhm, 2009; Moral et al., 2009; Perry, 2009; Sumner and Layde, 2009 など）、環境衛生と安全性の分野に対するさらなる評価に着目している。主要な分野は以下のとおりである。

- ・ 組み換え微生物やその代謝産物を使用する労働者の健康リスク
- ・ 組み換え微生物の放出が生態系に潜在的に与える影響
- ・ 中間製品、残渣、製品（使用済みの穀物、油糧種子など）の加工時に蓄積する農薬やマイコトキシンによる労働者、バイオ燃料の消費者、または環境への影響
- ・ 生産施設で原材料を汚染する可能性のある感染性病原体による、労働者のリスク
- ・ 有害物質への暴露。特に、バイオマス熱化学変換施設で働く労働者。これらの施設では、化石燃料産業が現在実用していない変換経路を使用している。

⁶⁷ 他の懸念として、作物の多様性の低下、除草剤使用の増加、除草剤の耐性（雑草性の上昇）、農家側の種子選択の自由の喪失、遺伝子導入の起源をめぐる倫理的懸念、民間部門が保有する知的所有権へのアクセスの欠如、遺伝子組み換え作物（GMO）の一時的禁止による市場の喪失がある（IAASTD, 2009）。

- ・ 一時的な空気中への排出と現場の製造過程で除去される不良品が、公衆衛生、空気の質、水質、生態系に与える影響
- ・ 有害物質への暴露。特に、生産施設が埋立地、天然ガスを使用した発電所と同様にごく一般的な存在になる場合
- ・ 同一の大気分水界または分水界で、複数のバイオ燃料とバイオエネルギー生産施設が環境に与える累積的影響

2.5.7 社会経済的な側面

バイオエネルギーの大規模で世界規模な開発には、地域的な課題（所得創出と雇用創出、健康状態の改善、土地所有の構造、土地保有、土地利用の競合、地域経済の強化など）から国家的な課題（食料安全保障、エネルギーの安定供給、貿易収支など）に到るまで、社会経済的な課題とトレードオフが複雑に絡み合う。バイオエネルギープロジェクトの社会経済的便益を確保するには、地域のステークホルダー、特に小規模農家や貧困層の家庭の参画が不可欠である。

2.5.7.1 社会経済的な影響の研究とバイオエネルギー・システムの持続可能性の基準

バイオエネルギーは、多数の転換経路があり、社会経済的な潜在的影響も多面的であることもあり、その複雑な性質の影響を全体的に分析するのは難しい。また、影響の多くは、金銭的、数値的に容易に定量化出来ない。これらの問題を克服するために、ステークホルダーの関与に基づく半定量的方法を用いて、社会的な製品便益や社会的対話といった社会的基準が評価されてきた⁶⁸（von Geibler et al., 2006）。

経済的な影響に関しては、最も頻繁に報告される変数はバリューチェーンをめぐる民間の生産コストである。これは、主要農産物（化石燃料や肥料など）の価格が変動しないとの想定に基づく。バイオエネルギーのコストは通常、潜在的な競争力を判断するため、既に市場に投入されている（石油系）代替物と比較される。バイオエネルギー・システムは、ミクロ経済のレベルで分析されるケースが大半であるが、土地や他の資源の競合があるため、他部門との相互作用は無視出来ない。機会費用は、食料とバイオエネルギーの相互作用を考慮するため、食料品価格と粗利益から計算される場合がある。社会的影響を示す指標には、地域の雇用の結果などがあるが、化石エネルギーとバイオエネルギーのチェーン間で相殺の可能性があるため、この影響は評価が難しい。マクロ経済レベルの影響には、バイオエネルギーのチェーンを支える財政措置（税免除など）に起因する社会的コストを含む（DeLucchi, 2005）。化石エネルギーの負の外部コストも評価が必要である（Bickel and Friedrich, 2005）。

バイオエネルギー・システムの社会経済的な影響について、特にプロジェクトレベルでの文書化と統合を改善するために、持続可能性の枠組みと認証システムが複数提案されている（Bauen et al., 2009b; WBGU, 2009; van Dam et al., 2010; 2.4 節も参照）。具体的には、これらの課題に対して、液体バイオ燃料の開発に関する基準と指標が提案されている。このなかには、人権（ジェンダーの問題を含む）、労働条件と賃金条件（健康、安全性の課題を含む）、地域の食料安全保障、貧困緩和に特に関連した地方と社会の発展、土地の権利が含まれる（表 2.12）。今までのところ、持続可能性の枠組みには、地方と地域の開発は含まれるが、プロジェクトのコスト効率、補助金の水準、その他の財政的側面に関する特定の経済的基準は含まれていない。この枠組みの大半は今も開発途上である。認証システムの進捗については van Dam et al. (2008, 2010) が検討している。FAO の Bioenergy and Food Security Criteria and Indicators プロジェクトでは、バイオエネルギーの持続可能性の取り組みを取り纏めている（2.4.5.1 及び 2.4.5.2 節も参照）。

2.5.7.2 小規模システムの社会経済的な影響

暖炉などの伝統的な装置でバイオマスを非効率的に使用すると、燃料を得るための単純な重労働、調理のニーズを満たすコスト、重度の屋内の空気汚染による健康への大きな影響（特に女性と子どもへの影響）など、大きな社会経済的な影響が生ずる（Masera and Navia, 1997; Pimentel et al., 2001; Biran et al., 2004; Bruce et al., 2006; Romieu et al., 2009）。屋内の空気汚染には、吸引粉塵、一酸化炭素、窒素酸化物、硫酸酸化物、ベンゼン、ホルムアルデヒド、1,3-ブタジエン、ベンゾピレンなどの多環芳香族化合物が含まれる（Smith et al., 2000）。木の煙に曝露することで、呼吸器系の症状や問題が増加する可能性がある（Thorn et al., 2001; Mishra et al., 2004; Schei et al., 2004; Boman et al., 2006）。家庭内の曝露では、世界保健機関のガイドラインや国の基準よりも高い測定値が出ることが多い（Smith et al., 2000; Bruce et al., 2006）（9.3.4.3 及び 9.4.4 節）。過去 20 年に行われた 200 以上の研究で、固体燃料を使用する家庭で室内の空気汚染度を評価している。関連する疾病負担は、毎年 160 万人以上の死亡者（5 歳未満の子ども 90 万人を含む）と 386 万人以上の障害調整生存年数（Disability Adjusted Life Year）と推定された（Smith and Haigler, 2008）。この規模は、マラリアと結核の疾病負担とほぼ同じである（Ezzati et al., 2002）。

適切に設計、実施された改良型の調理ストーブ導入プロジェクトは、新世代のバイオマスストーブに基づいており、

⁶⁸ 多基準分析法は、過去 15 年間バイオエネルギーの分野に適用されている（Buchholz et al., 2009）。

大幅な健康改善につながっている（von Schirnding et al., 2001; Ezzati et al., 2004）。改良型の調理ストーブの健康便益として、屋内の空気汚染の 70～90%緩和、人間の曝露の 50%低下、呼吸器系その他の病気の減少などが見られた（Armendáriz et al., 2008; Romieu et al., 2009）。屋内の空気汚染曝露の緩和レベルが中程度であっても、健康便益は大幅に向上させることが出来る。たとえば、グアテマラでは、曝露レベルの 50%低下で、子どもの肺炎が 40%改善している。インドでは、新型の改良型の調理ストーブの普及による健康便益は、2020 年の肺がん負担全体をほぼ半減させる効果に匹敵する可能性があると推定されている。こうした健康便益には、24 万人の 5 歳未満の子どもの急性下気道感染症による早死、180 万人の若年層の虚血性心疾患、慢性閉塞性肺疾患による死亡を回避できたことも含まれている（Bruce et al., 2006; Wilkinson et al., 2009）。

図 2.14 は、世界疾病負担の 40%を占める 8 つの主要なリスク要因を治療する選択肢について、そのコスト効率を示す（Glass, 2006）。改良型の調理ストーブは、障害調整生存年数回避当たりのコストという点では、最もコスト効率が良い。全体的に、改良型の調理ストーブとその他の小規模なバイオマスシステムは、非常にコスト効率の良い治療介入であり、コストに対する便益の比率は、マラウィでは 5.6 倍、ウガンダで 20 倍、メキシコで 13 倍となっている（Frapolli et al., 2010）。

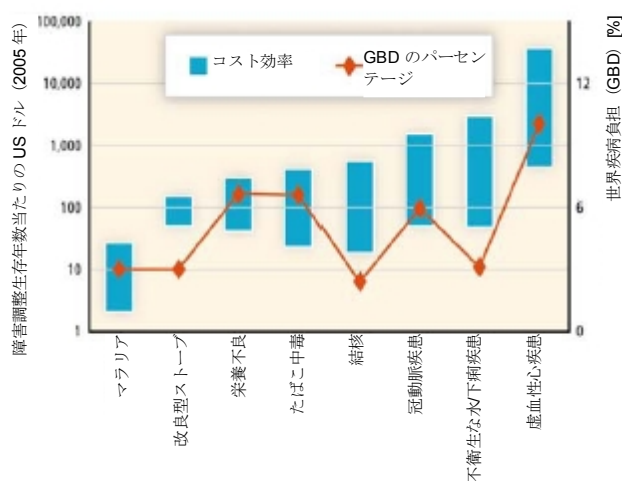


図 2.14: 治療介入のコスト効率。左軸（対数尺度）は障害調整生存年数当たり（DALY）（Glass, 2006）を US ドルで、右軸は 8 つの主要なリスク要因と疾病の世界疾病負担（GBD）に対する貢献を%で示した。図から、改良型のバイオマスストーブの普及（薪の使用による屋内の空気汚染が健康に与える影響の緩和としての治療介入として）は、栄養不良、結核、心臓病その他といった主要な健康問題と疾病との闘いを目的とした治療介入のコストとうまく対比されている点が見られる（Bailis et al., 2009. Elsevier B.V.の許可を得て）。

改良型の調理ストーブの使用拡大により、女性は所得創出活動に携わる自由時間を持てる。調理時間の短縮化により、地方の子ども、特に女兒の教育に時間を割くことも可能である（Karekezi and Majoro, 2002）。改良型の調理ストーブの使用で、地域の生活条件、台所と住宅、生活の質は改善する（Masera et al., 2000）。世界の各地域で営まれる多数の小規模事業にとって、改良型の調理ストーブの製造と普及は重要な所得源であり雇用の場である（Masera et al., 2005）。同様の影響は、小規模なバイオガスプラントでも見られ、世帯や村に照明が導入され生活の質が向上するという付加的な便益もあった。小規模産業で使用中の技術以上に効率の良い技術が使用可能になれば、仕事の生産性、製品の質、労働条件全般も向上する（FAO, 2006, 2010b）。

2.5.7.3 大規模なバイオエネルギー・システムの社会経済的な側面

大規模なバイオエネルギー・システムでは、食料安全保障、所得創出、地方の開発、土地保有をめぐる激しい論争が起きている。この論争で、大規模なバイオエネルギー・システムの開発を進めるうえで、その特性、地域の事情、実行モードによってはメリットとデメリットがある可能性が明確になっている。

雇用創出と所得創出への影響

特に、農業と森林から生ずる廃棄物（残渣）が焼却または埋立されていた場合であれば、これら廃棄物への需要増大で農家と森林労働者の所得を補完出来る。バイオエネルギーも雇用創出が可能である。一般に、バイオエネルギーは、他のエネルギー源に比べ、配送エネルギー当たりの雇用数は多い。これは特に、開発途上国や地方における原材料の生産によるところが大きい（FAO, 2010b）。

地方の多くの貧困層の生計に重要な貢献を果たすのは、賃金収入である（Ivanic and Martin, 2008）。バイオエネルギー関連の雇用の便益は、同一の土地で過去に栽培した作物と原材料作物の相対的な労働集約度による。たとえば、

多年生のエネルギー作物の栽培は、穀物栽培に比べ労力は少なくなるため、この転移効果を考慮すべきである (Thornley et al., 2009)。雇用拡大も重要な潜在的便益であるが、(労働と資本の相対的価格によっては) 労働集約度の高い運営も競争力を削ぐだろう (9.3.1.3 節)。

創出された雇用数は、地域性が強く、プラント規模、原材料生産の機械化の程度 (Berndes and Hansson, 2007)、需要対応に対する輸入の貢献度 (Nusser et al., 2007; Wydra, 2009) によってかなり異なる。バイオエネルギーの選択肢が持つ雇用創出のポテンシャルについては、その推定値は大きく異なるが、伝統的な農作物を用いた液体バイオ燃料は、特にバイオ燃料の変換プラントが小規模な場合に最大の雇用創出効果があるように思われる (Berndes and Hansson, 2007)。液体バイオ燃料の選択肢のなかであっても、様々な作物を使用することで幅広い差異が生ずる。直接・間接の雇用数は、エタノールの場合エタノール PJ 当たり 45 (トウモロコシ) ~2,200 (サトウキビ) で、バイオディーゼルの場合、バイオディーゼル PJ 当たり 100 (大豆) ~2,000 (パームオイル) である (Dias de Moraes, 2007; Clayton et al., 2010)。発電の場合、機械化の程度が低いシステム (25MW) を使用する開発途上国の中規模プラントでは、プラント当たり約 400、PJ 当たり 250 の雇用創出数が見込まれる。このうち 94%は原材料の生産と収穫に従事する。たとえば、イギリスの詳細な研究では、専用作物 (木質または ススキ) を使用する 25MW_e の発電所では、発電に関して、GWh 当たりの雇用数は 1.27 という結果が出ている。ライフサイクル全体では 4,000~6,000 人年の雇用が創出され、年間で PJ 当たり 200 となる (15%が発電プラント、73%が原材料の生産と配送、12%が誘発) (Thornley et al., 2008)。

ヨーロッパでは、EU25 のシナリオに従う場合、Berndes and Hansson (2007) は、エネルギー用のバイオマス生産で農業全体の雇用に比べて大幅な雇用創出が可能であると推定する (特定の国々で最大 15%) が、一国の産業全体の雇用に比べるとその規模は小さい。最新の分析でも、一部のトレードオフ (たとえば、液体バイオ燃料に関する農業の選択肢) でさらに雇用が創出出来るが、発電・熱に関する森林系の選択肢では気候変動の便益がより大きくなる。2001 年、ブラジルの地方において、バイオ燃料部門は約 100 万の雇用を創出した。この大半は、サトウキビの焼畑後に人力による収穫に携わっていた非熟練労働者向けの雇用だった (Moreira, 2006)。実際に、(ブラジルの収穫高の 90%を占める) 中南部地域の生産の約 50%では既に機械化が進み、人力による収穫作業に必要な非熟練労働者への需要は減少したが、環境上の便益は生じている。それと同時に、労働者の生産性も向上し続け、労働人口の一部は機械操作に必要な賃金条件の良い技能職に就くため、再教育を受けている (Oliveira, 2009)。

2.5.7.4 食料安全保障のリスク

原材料を放棄地で栽培するか、かつては経済的に無価値だった残渣を使用するかしない限り、液体燃料生産により食用作物と農産品に対する需要は増加し、土地や水などの天然資源にさらに負荷がかかり、食料品の価格も上昇する (Chakravorty et al., 2009; B. Wright, 2009)。リグノセルロース系バイオ燃料は、食料生産に不向きな土地での栽培がより簡単であることから、競合は緩和出来るが、なくせるわけではない (Chakravorty et al., 2009)。国内の食料市場が国際的な食料市場と連動する限り、バイオエネルギー非生産国であっても価格上昇の悪影響を受けるだろう。

物価は様々な要因が絡み合って決まり、バイオ燃料もその要因の 1 つに過ぎないため、将来の物価予測は非常に不確かである。それにもかかわらず、一部の研究では、バイオ燃料の生産拡大が 2000 年代半ばの食料価格の急騰に寄与した点を検証している。これらの研究は様々な分析方法を使用し、その結果も様々な方法で報告している (これらの研究を包括的にレビューしたものとして、DEFRA, 2009 を参照)。たとえば、OECD-FAO Agricultural Outlook (OECD-FAO, 2008) のモデルでは、バイオ燃料の生産が 2007 年のレベルに留まる場合、バイオ燃料生産が予測どおり拡大し続ける場合に比べ、2017 年に粗粒穀物 (coarse grains) の価格は 12%、植物油の価格は 15%安くなるとしている。Rosegrant et al. (2008) は、既存の国家的な開発計画に従いバイオ燃料の拡大が継続するとのシナリオに基づき、世界のトウモロコシ価格は 26%上昇するとした。また、バイオ燃料の需要が最初のシナリオに比べ倍増するというバイオ燃料が劇的に拡大するシナリオに基づく、70%以上上昇すると推定した (これらのシナリオは、大半の国でバイオ燃料生産が 2010 年レベルに留まるという、バイオ燃料の成長が中程度のベースラインに関連する)。IFPRI (2008) は、世界の穀物価格上昇を加重平均した場合、2000~2007 年の間、その 30%はバイオ燃料に帰属すると推測している。Elobeid and Hart (2007) は、バイオ燃料活用の障壁が存在する場合と存在しない場合のモデル化シナリオを比較し、活用の障壁がなくなればトウモロコシと食料のバスケット価格は予想の 2 倍になると結論付けている。これらの研究は概して、バイオ燃料の生産拡大は食料価格上昇に一定の役割を果たすが、その規模について一致は見られないことで合致している (FAO, 2008a; Mitchell, 2008; DEFRA, 2009; Baffes and Hanjotis, 2010)。他の要因として、US ドル安、エネルギーコストの上昇、農業生産コストの上昇、商品の投機、悪天候などがある (Headey and Fan, 2008; Mitchell, 2008; DEFRA, 2009; Baffes and Hanjotis, 2010)。バイオ燃料が価格に与える最終的な影響は、とりわけ使用される特定の技術、バイオ燃料使用に関する政府の義務化のレベル、バイオ燃料の非効率的な生産方法に有利な貿易政策の設計、石油価格に左右される。

価格上昇が貧困層の福祉に与える影響は、貧困層が (価格上昇の恩恵を受ける) 食料の最終販売者か、あるいは (価格上昇の影響を受ける) 最終購入者であるかに左右される。結局のところ、農家には価格上昇のメリットがあると

いう点を考慮したとしても、価格上昇は開発途上国の貧困と食料安全保障に悪影響を与えることが、証拠によって示されている（Ivanic and Martin, 2008; Zezza et al., 2008）。液体燃料の拡大による社会経済的な影響に関する主なFAOの研究（FAO, 2008a）では、都市部の貧しい消費者と地方の貧しい最終購入者が特にリスクにさらされる点が示されている。Rosegrant et al.（2008）は、上記の2つのシナリオで栄養不良の子ども数は2倍になると推測している。

バイオエネルギー用の作物栽培が大幅に拡大した場合、エネルギー市場と食料市場が密接に関連するようになり（Schmidhuber, 2008）、世界銀行の分析（2009年）では、石油価格が1バレル45USドル（2005年）を超えた場合における食料価格とエネルギー価格の強い相関が確認されている。このように、エネルギー価格の上昇が食料市場に波及し、食料安全保障を不安定化させる場合がある。

世界的な人口増加に伴う食料需要に対応するには、世界の食料生産を2050年までに70%増加させる必要がある（Bruinsma, 2009）。同時に、FAO（2008b）は、2005～2050年の耕作地の増加は5%にとどまると推定している（Alexandratos et al., 2009）。このように耕作地の増加が限定的であるということは、経済的に活用可能な耕作地の不足を示している。バイオマス生産は土地集約的であり、農地使用をめぐる食料と燃料で大きな競合が生じる（Chakravorty et al., 2009）。バイオ燃料生産の増加で、バイオ燃料の原材料生産に転用される水の量が増えることから、食料生産の水利用可能性も減少しかねない（Chakravorty et al., 2009; Hoekstra et al., 2010）。

2.5.7.5 地方の開発と社会的発展への影響

バイオ燃料への需要が増加した結果、農産品価格が上昇すれば、開発途上国の農業発展と地方の開発を推進する好機となる可能性がある（Schmidhuber, 2008）。開発ポテンシャルは、バイオエネルギー市場が政府の補助金なしに経済的に持続可能であるかに、決定的に依存する。長期的な補助金が必要であれば、たとえば農業研究、地方の道路、教育といった、経済、社会的な発展に不可欠なその他の幅広い公共財に使用出来る公的資金が乏しくなる。短期的な補助金であっても、補助金というものは一度実施すると簡単には廃止出来ないため、非常に慎重な検討を要する。ラテンアメリカの経験によると、公共財への投資に農業の予算を使用する政府は、補助金を適用する政府に比べ、成長と貧困緩和が速く進むが、環境悪化も急速に進む（López and Galinato, 2007）。

バイオエネルギーは、化石燃料輸入への依存度を低下させ、エネルギー供給の安定性を高めるだろう。多くの場合、こうした便益は大きくない可能性が高いが、一人当たりの耕作地が広い国々では、その貢献は大きくなり得る（FAO, 2008a）。現地資源の使用についての最近の分析によると、エネルギー関係の支出の多くは地域で保持され、地域経済で還流しているが、考慮すべきトレードオフが存在する。たとえば、発電にバイオマス使用が拡大すると、それに応じて一部の種類のバイオマス（ペレットなど）への需要が増加し、高需要期にバイオマス供給が一時的に不足しかねない。家庭はこの市場の歪みには特に脆弱である。

バイオ燃料の生産技術と生産制度も、地方の開発成果には重要な決定要因である。場合によっては、民間の投資家がバイオ燃料のプランテーションを設立して供給の安定化を模索する。プランテーションが非生産的な土地に環境を害することなく設立されるのであれば、経済にとって便益が存在するはずである。貧困層に重要な、土地の使用を見落とさないことが不可欠である。政府は、土地が耕作限界地か生産的かを決定する明白な基準を定める必要があるだろう。これらの基準は、脆弱なコミュニティや土地の権利の安定性に劣る女性農家を保護するものでなくてはならない（FAO, 2008a）。モザンビークの研究では、より資本集約的なプランテーションの手法に比べ、バイオ燃料生産に契約栽培農家（out-grower）を活用する手法は貧困緩和に役立つとされている。非熟練の労働者の活用拡大が図れ、小規模な土地保有者には地代が発生するためである（Arndt et al., 2010）。

バイオ燃料がプラスの開発原動力であるためには、地方への投資増加も重要である。政府が、短期的かつ農場レベルの供給サイドの経済的な反応にのみ依存する場合、食料価格上昇の負の影響が目立つようになる。食料価格上昇が、公的部門、民間による農業への投資（地方の道路や教育、研究開発など）を拡大するきっかけになる場合、地方の中・長期的な開発を刺激する計り知れないポテンシャルがある（De La Torre Ugarte and Hellwinckel, 2010）。その一例として、モザンビークへのバイオ燃料関係の投資が提案されているが、2003～2015年の12年で年間経済成長が0.6%増加し、貧困発生率は約6%低下するだろう（Arndt et al., 2010）。

2.5.7.6 社会的な側面と環境的な側面のトレードオフ

環境の基準と社会的基準の間には一部の重要なトレードオフが存在する。これは将来のバイオエネルギー開発で検討する必要がある。サトウキビの場合、認証の枠組みが推進する環境の持続可能性の基準（Roundtable for Sustainable Biofuels など）は、機械による収穫に賛成している。人力による収穫の際に必要なサトウキビの焼畑による排出の回避が可能なためである。その他の複数の機関は、こうした新たなシステムで代替される労働者数が多数にのぼる点に懸念を示している。また、機械化のモデルも、土地保有をさらに集中化させることに賛成する傾向があり、中小規模の農家を排除し、地方の労働者の雇用の機会を減少させる可能性がある（Huertas et al., 2010）。

こうした懸念を解決する戦略には、認証機関の要件に対応する能力のない小中規模のステークホルダーへの支援、また、現在サトウキビ収穫で年間収入のかかなりの部分を得ている季節労働者に対する代替的な収入の可能性の開発といったことが考えられる（Huertas et al., 2010）。単純労働から熟練労働者に移行させるための再教育（トラック運転など）は既に、ブラジルの中南部で行われている（Oliveira, 2009）。

2.5.8 統合

近代的バイオマスは、非常に広範な世界の農業システムや森林システムの構成要素として、健康や貧困から、生物多様性や水質に到るまでの、社会、環境上の課題に影響を与える。土地と水資源は、各地域特有の経済発展状況とバイオエネルギーの適切な種類に合わせて適切に管理する必要がある。バイオエネルギーは、気候変動の緩和にプラスの貢献を果たし、先進国と開発途上国におけるエネルギー供給と多様性の目標、経済発展を確保する機会を持つ。しかしながら、バイオエネルギーが環境の持続可能性に与える影響は、多くの要因のなかでも、地域の事情、基準の定め方、実際のプロジェクトの設計、実施方法によってはマイナスの場合もある。

- ・ 気候変動とバイオマス生産は、マイクロからマクロにまたがる規模で、土地と水使用、エネルギーと気候の相互作用とフィードバックに影響される可能性がある（図 2.15 参照）。社会的、環境的なトレードオフは存在するだろうが、妥当なプロジェクト設計と実施でかなりの程度最小化することが出来る。
- ・ バイオマス燃料源として栽培される作物は現在、世界の 1%以下の耕作地しか使用していないが、大規模なバイオエネルギー・システムが拡大すると、重要な社会経済上の課題が生ずる。この課題として、食料安全保障、所得創出、地方の開発、土地保有、特定の地域の水不足が挙げられる。
- ・ 土地利用変化の効果の推定値には、分析の時間的尺度、「行動なし」を想定したシナリオに基づく土地利用、長期的に予想される利用、長期の多様な使用での影響の分配について、価値判断が必要である。それにもかかわらず、一貫的かつ正確なインベントリを保証するシステムと炭素ストックに関する報告は、土地利用変化の炭素計算に向けた重要な最初のステップと見なされる。
- ・ 一般に、バイオエネルギーの場合、二酸化硫黄や窒素酸化物などの汚染物質の排出は石炭、ガソリン、ディーゼルに比べ少ない。ただし、バイオディーゼルの場合、窒素酸化物の排出はより変動的である。このため、バイオエネルギーは空気の質に与える負の影響を緩和出来る。バイオエネルギーが水資源に与える影響は、プラスの場合もあればマイナスの場合もあり、特定の原材料、サプライチェーンの要素、加工の方法論に左右される。従来の食料作物や飼料作物のシステムと類似したバイオエネルギー・システムは、生息環境や生物多様性の喪失につながる可能性があるが、バイオエネルギーのプランテーションは、養分喪失にフィルタを設ける、生態的回廊（ecological corridor）として機能する、天然の森林への圧力を緩和する、荒廃地や放棄地を回復するという設計に出来る。遺伝子組み換え作物や侵入種となる可能性のあるバイオエネルギー作物が、懸念されている。新種や改良種の導入を監視、評価するためには、さらに調査と協定が必要である。
- ・ 従来型のバイオマス使用のための改良型の調理ストーブは、温室効果ガス排出を大量かつコスト効率良く緩和出来る（0.6～2.4Gt CO₂eq/年の温室効果ガス緩和ポテンシャル）。特に、世界の 27 億人の最貧困層には、健康状態と生活状況に大きな相乗便益がある。調理用の効率的な技術はコスト効率が良く、たばこ中毒、栄養不良、結核などの主要な健康上の治療介入に匹敵する。
- ・ バイオ燃料生産は、食料価格の上昇に寄与しているが、気象条件、食料需要の変化、エネルギーコストの上昇といった追加的な要因も食料価格に影響を与えている。貧しい農家にとっては価格上昇の利益がある点を考慮したとしても、食料価格上昇は、貧困、食料安全保障、子どもの栄養不良に悪影響を与える。他方、バイオ燃料は、地方の開発と農業発展を進展させる機会も開発途上国に提供出来る。これは特に、この成長が経済的に持続可能な場合に当てはまる。適切な設計、実施、監視、持続可能性の枠組みの順守が実現されれば、特に地域の住民にとっての社会経済的な負の影響を最小化し、便益を最大化出来るだろう。
- ・ これらの社会的、環境的な影響は、代替されるエネルギーシステムが与える社会的、環境的な影響と比較すべきである。多くのライフサイクル評価では、バイオ燃料生産に使用される化石エネルギーと比較して、提供される再生可能エネルギーの量の特徴を示し、参照システムと比較している。これらの評価では、バイオ燃料は温室効果ガス排出を削減することが示されている。これらの研究を拡大し、複数の指標を使用したり、原材料からエネルギーの最終使用に到るチェーン全体をより包括的に分析したりすることが出来る。

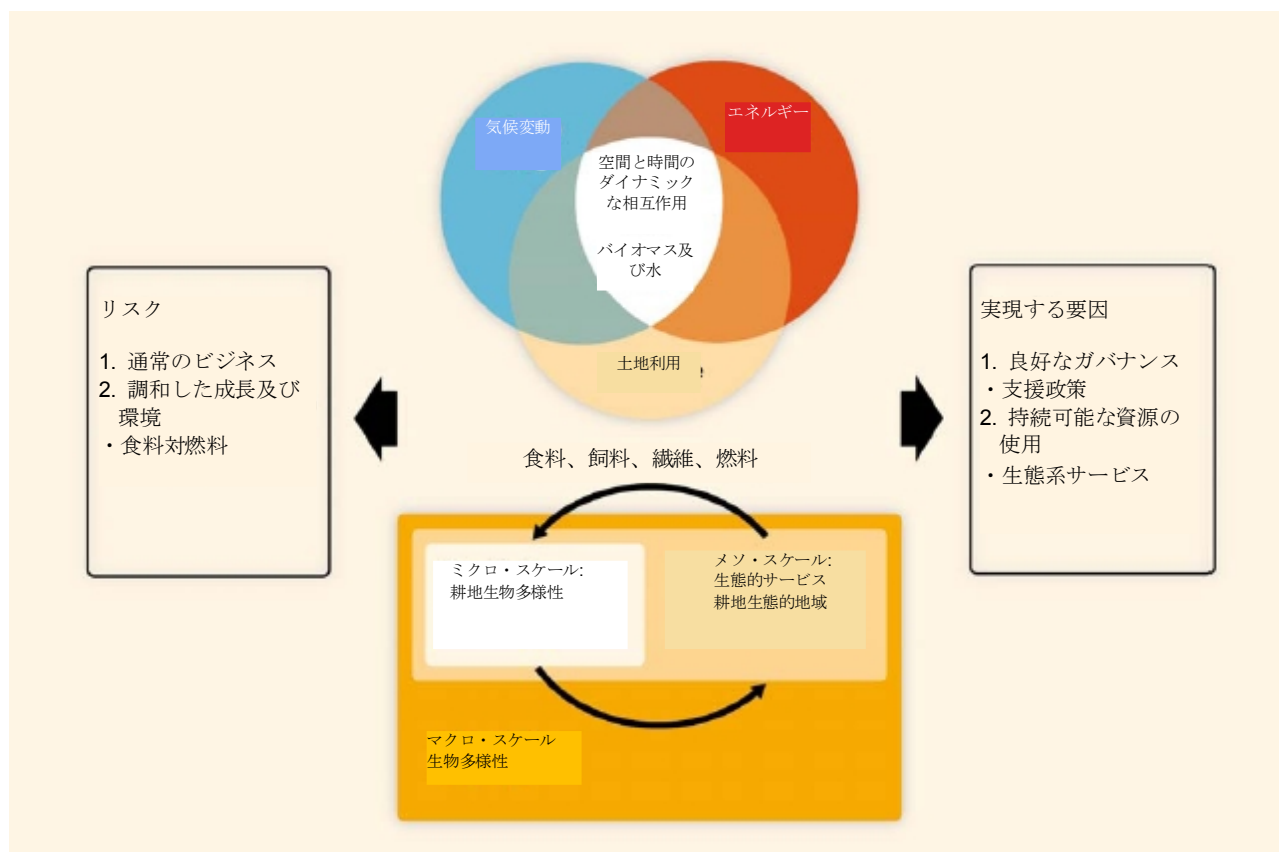


図 2.15: 社会、エネルギー、環境間におけるバイオエネルギーの複雑かつダイナミックな相互作用。このなかには、気候変動のフィードバック、バイオマス生産、食料、飼料、繊維及びエネルギーに関するあらゆる資源使用に対し様々な空間的・時間的尺度で直接・間接的な影響を与える土地利用が含まれる（Dale et al., 2011）。バイオマス資源は、その影響がマイクロからマクロの各スケールで感度がある可能性があるため、持続可能な方法で生産される必要がある（van Dam et al., 2010）。リスクは、通常のビジネス、食料と燃料生産の調和が取れていない状態で維持することである。機会は多く、持続可能な生態系のサービスにもつながる有効な政策を形成する良好なガバナンスと持続可能性の枠組みが含まれる。

2.6 技術改良とイノベーションの見通し⁶⁹

本節では、開発中の技術、その性能の特性、バイオマス原材料のコストパフォーマンスの見込み、物流とサプライチェーン、バイオ燃料単体または熱や発電、またはその他のバイオ系製品と組み合わせた場合の多様なバイオ燃料への転換経路をまとめた文献の概要を示す。新型の電力変換利用も議論される。図 2.2 と表 2.5 に示すとおり、こうした多くのバイオマスエネルギーの新型サプライチェーンは、商用化されているか、あるいはサプライチェーンの各構成要素の小規模な研究開発から商用化間近といった様々な段階で開発中である。これには、統合システムの例もいくつか含まれる。様々な用途、原材料の供給者（都市または地方の残渣である可能性あり）、バイオマスを製品に転換する産業（既存及び発展中）に関連がある。バイオマスエネルギーや関連製品を電力、天然ガス、熱（住居及び地区、商用及び公的なサービス）、輸送部門向けの産業システムや化石燃料システムに統合することについては、第 8 章でより徹底した議論を行う。本節の構造は、2.3 節に類似しており、原材料（2.6.1 節）から始まり、物流（2.6.2 節）、多様な転換技術による最終製品（ガスまたは液状での様々な新型の二次エネルギーキャリア）（2.6.3 節）に到るバイオエネルギーサプライチェーンで締めくくられる。

2.6.1 原材料の改良

2.6.1.1 収量の増加

土地の生産性向上は、エネルギー向けのバイオマスを将来的に大規模に普及させる重要な前提条件になる。これは、目的が食料かエネルギーかのいずれかを問わない。それは、バイオマスの栽培に使用可能な土地が拡大し、関連する土地需要も低下するためである。過去 50 年、農業生産性の向上は、その大部分が植物育種、土地管理の改善（灌漑、肥料、農薬の使用を含む）を通じて実現された。開発途上国でこれらの技術を適用し、最も発展が見られたの

⁶⁹ 10.5 節では、再生可能エネルギー全体の技術進歩について、駆動要因と傾向を包括的に提示している。

はアジアで、過去 50 年で生産性は大幅に向上した。また、ブラジルのサトウキビでも同様のことが言える。こうした技術の適用が遅れている他地域、特にサハラ以南のアフリカ、ラテンアメリカ、東ヨーロッパ、中央アジアに同様の適用例を拡大すれば、かなりのポテンシャルが存在する (Evenson and Gollin, 2003; FAO, 2008a)。FAO による最近の長期的な予想では、世界規模の農業生産は向こう 30 年間で年 1.5% 増加し、人口増加の見込みを依然として大きく上回る (World Bank, 2009)。主要な食料生産物の場合、達成可能な最大収量は、天水栽培から灌漑や最適な雨水使用による生産に切り替えれば 30% 以上増加するだろう (Rost et al., 2009)。一方、中間投入技術から高投入技術への移行により熱帯地域では 50%、亜熱帯地域と温暖気候の地域では 40% の増加となるだろう。低投入レベルから中投入レベルに移行時、疫病の管理と適切な栄養供給がなされるため、適切な収量は、小麦が 100%、コメが 50%、トウモロコシが 60%、それぞれ増加する可能性がある (表 2.14)。しかしながら、重要な環境上のトレードオフが農業集約化に関わる場合もあり、また、より持続可能な管理の慣行への手段も、模索と適用が必要になる場合がある (IAASTD, 2009)。

バイオテクノロジーまたは従来の植物育種は、エネルギー生産に関連する形質に注力すれば、バイオマス生産を改善し得る。この形質には、ヘクタール当たりのバイオマス、油糧または発酵可能な砂糖の収量増加、エネルギー最終製品への転換を容易にするその他の特性などがある (Sannigrahi et al., 2010 など)。また、干ばつに強い植物の場合は、遺伝子改良も依然としてかなり可能である (Nelson et al., 2007; Castiglioni et al., 2008; FAO, 2008b)。

生産性向上の予測は、現在の知見と技術を反映している (Duvick and Cassman, 1999; Fischer and Schrattenholzer, 2001)。また、世界の地域で異なる (FAO, 2008a)。作付けシステムで既に投入強度が高い開発途上国では、生産性の向上はより限定的である。また、予測は多くの地域で見られる環境上の強い制限 (水や気温など) を常に考慮しているわけではない (Nelson et al., 2007; Castiglioni et al., 2008; FAO, 2008b)。

多年生植物の現在の収穫高の倍増は、マーカー使用選抜 (marker-assisted breeding) などの遺伝子操作で達成可能と思われる (Turhollow, 1994; Eaton et al., 2008; Tobias et al., 2008; Okada et al., 2010)。持続可能な農業慣行への移行、作物と残渣の収量の大幅な改善により、耕地作物の残渣産出量は増加することができる (Paustian et al., 2006)。

原材料生産の将来的なコスト予測は、十分とはいえない。この理由として、(すべての商品として、変動性があり不確かである) 食料市場との関連性や、候補となる原材料の種類の多くは今も研究開発段階にあることが挙げられる。これらの原材料の種を営利農場で栽培するコスト数値は、今でもあまり理解されていない。だが、ブラジルの過去の事例のように、農家が学習曲線を低下させる時間の経過とともに、低下する可能性が高い (van den Wall Bake et al., 2009)。

温暖な気候の条件下では、多年生植物か短期輪作の雑木林に由来するリグノセルロース系バイオマスの農家庭先供給 (farm-gate supply) または森林庭先供給 (forest-gate supply) の費用は、現在の 3~16US ドル (2005 年) /GJ から、2020 年までに 2.5US ドル (2005 年) /GJ 以下 (WWI, 2006) に低下すると予測されている (表 2.6、地代を除く)。しかしながら、限界費用が存在し、バイオマスへの需要増加に伴い、他部門や市場との土地をめぐる競争のために単位当たりのコストが上昇する点は考慮されていない。これは供給曲線には反映されている (2.2 節及び図 2.5 (b))。北アメリカにおける近年の研究では、土地関連のコストが盛り込まれているため、若干高い予測となっている。その範囲は、草本植物が 2~7.5US ドル (2005 年) /GJ、木質バイオマスが 1.5~6US ドル (2005 年) /GJ である (Ericsson et al., 2009; de Wit and Faaij, 2010)。多年生の種の場合は、農家からのエネルギー用原材料の供給を安定させるために必要な取引コストが、生産コストを 15% 上昇させるだろう (Ericsson et al., 2009)。図 2.5 (d) はアメリカにおける草本作物の配送コストを示したものであり、約 8EJ は 5US ドル (2005 年) /GJ で転換施設に配送され得る。

表 2.14: 表 2.4 に示した 2007～2009 年のデータと比較した場合の、2030 年までの収量増加の予測

原材料の種類	地域	収量の傾向 (%/年)	2030 年までの潜在的な収量増加 (%)	改善経路	参照
専用作物					
小麦	温暖	0.7	20-50	新たなエネルギー用変種植物	1, 10
	亜熱帯		30-100	投入率の上昇、灌漑	
トウモロコシ	北アメリカ	0.7	20-35	新たな変種植物、遺伝子組み換え作物、栽培密度の増加、耕作地の減少、投入率の上昇、灌漑	
	亜熱帯		20-60		
	熱帯		50		
大豆	アメリカ	0.7	15-35	育種	2, 3, 10
	ブラジル	1.0	20-60		
パームオイル	世界規模	1.0	30	育種、機械化	3
サトウキビ	ブラジル	1.5	20-40	育種、遺伝子組み換え、灌漑の投入	2, 3, 8, 10
SR ヤナギ	温暖	-	50	育種、遺伝子組み換え	3
SR ポプラ	温暖	-	45		
ススキ	世界規模	-	100	最低投入のための育種、管理改善	
スイッチグラス	温暖	-	100	遺伝子操作	
植林	ヨーロッパ	1.3	20	種の選択、育種、受精、輪作の短期化、根の深度の増加	4, 9, 11
	カナダ		20		
穀物わら	世界規模		15	収穫機器の改良、収量に対する残渣率を向上させる育種（大豆）	5, 6
大豆わら	北アメリカ		50		
森林残渣	ヨーロッパ	1.0	25	灰のリサイクル、伐採の増加、丸太の増加、生産性	4, 7

注:

省略形: SR = 短期輪作、GMO = 遺伝子組み換え作物

参照: 1: Fischer and Schrattenholzer (2001); 2: Bauen et al. (2009a); 3: WWI (2006); 4: Nabuurs et al. (2002); 5: Paustian et al. (2006); 6: Perlack et al. (2005); 7: EEA (2007); 8: Matsuoka et al. (2009); 9: Loustau et al. (2005); 10: Jaggard et al. (2010); 11: APEC (2003)

温暖地域と寒帯地域における森林の生産性は、二酸化炭素濃度と窒素堆積、または施肥率の上昇を受け、ここ数十年で年 1%以上上昇している（表 2.14）。この傾向は、気温上昇に対応した樹齢の上昇と呼吸速度の増加のために生産性が頭打ちになるであろう 2030 年まで続くと予測されている（Nabuurs et al., 2002）。しかしながら、収量は、気候地帯全体を詳細に見るとばらつく傾向がある。地中海や半乾燥の環境では水が限定的にしか存在しないため、2030 年までのバイオマス収量の増分はゼロかマイナスになる（Loustau et al., 2005）。このため、水ストレスへの耐性が高い種の選択や適切な間伐の枠組みの使用といった適応策が取られるだろう（Loustau et al., 2005）。水に制限がない場合、より集約的な林業慣行（輪作の短期化、植林列の最適化、施肥、育種の在庫の改善など）で、生産性は最大になる（Loustau et al., 2005; Feng et al., 2006）。丸太伐採の増加は、共同便益としての余剰な伐採残渣と森林土壌における炭素隔離につながり、管理慣行による温室効果ガス排出の数倍になる（Markewitz, 2006）。

2.6.1.2 水生バイオマス

水生光合成生物は、世界の海洋に集中しており、年間のバイオマス生産量は 3,500～5,000 億トンで、微細藻類（クロレラ や スピリルナ など）と大型藻類（海草）の双方、シアノバクテリア（アオコ）などの「藻類」を含む（Garrison, 2008）。シズキトリウム や ナンノクロロプシス などの油性微細藻類は、種油のトリアシルグリセロールに類似した中性脂肪をその乾燥細胞重量の 50%超蓄積出来る（Chisti, 2007）。Weyer et al. (2009) は、赤道地域で成長し油分を 50%を含有するバイオマス由来の未精製の藻類油で、 $40 \times 10^3 \sim 50 \times 10^3 \text{ l/ha/年}$ ($0.04 \sim 0.05 \text{ l/m}^2/\text{年}$) の収量があると報告している。中性脂肪の収量が 30～50%と想定すると、藻類の生産性はパームオイルの生産性の数倍にあたる $4.7 \times 10^3 \text{ l/ha/年}$ ($0.0047 \text{ l/m}^2/\text{年}$) に達する可能性がある。栄養補給食品を商用生産する際に使用される光合成シアノバクテリア（J. Lee, 1997; Colla et al., 2007）も、水素などの燃料を直接生産出来るだろう（Hu et al., 2008; 3.3.5 及び 3.7.5 節）。

大型藻類は微細藻類と異なり、脂肪は蓄積せず、多様な燃料を製造し得る多糖類を合成する（図 2.6 参照）。未栽培の大型藻類は、陸上植物に比べ、多糖類の収量が多い可能性がある（単位面積当たり）（Zemke-White and Ohno, 1999; Ross et al., 2009）。また、海洋の環境でも生息可能である。光合成生物の別属である好塩菌は、塩分濃度が高い環境で生息する。

微細藻類は、汽水や高塩類の土壌などの非耕作地で化学物質、燃料、原材料を光合成出来る。数十万種の微細藻類のうち、数百は産業目的で試験または使用されている。遺伝的ポテンシャルの理解、脂質の生産性、成長率と成長管理、遺伝子組み換えの使用を行えば、土地利用の幅が広がり、バイオ燃料生産による土地利用変化の影響も低下する (Hu et al., 2008)。微細藻類はオープンポンドや閉鎖型の光バイオリアクタ (PBR) で栽培出来る (PBRs) (Sheehan et al., 1998a; van Iersel et al., 2009)。しかし、規模を拡大するには物流上の課題が生じうる。また、バイオマス生産に高いコストが必要になる可能性や、水の消費量を最小化する必要が出てくる可能性がある (Borowitzka et al., 1999; Molina Grima et al., 2003)。生産性が低いシナリオ、高いシナリオを用いた生産コストの範囲は、オープンポンドで約 30~80US ドル (2005 年)/GJ、閉鎖型の光バイオリアクタで約 50~140US ドル (2005 年)/GJ である (EPA, 2010)。

大型藻類は一般に、洋上の栽培システムで成長するため (Ross et al., 2009; van Iersel et al., 2009)、光が透過する浅水域が必要になる (Towle and Pearse, 1973)。バイオ燃料生産が競合使用 (漁業、レジャー) と海洋生態系に与える影響については、評価が必要である。アオコの収穫による水生バイオマスは、複数の便益をもたらすだろう (Wilkie and Evans, 2010)。

通常、水生植物のバイオエネルギーのポテンシャルは資源ポテンシャルの決定から除外される。こうした評価に利用可能なデータが不十分なためである。しかしながら、微細藻類の栽培生産が高収量のポテンシャル (最大で 150 乾燥重量/ha/年、0.015t/m²/年) を有することから、ポテンシャルは従来のエネルギー作物に比べ大きくなるだろう (Khesghi et al., 2000; Smeets et al., 2007)。世界には多様な藻類の種が多数存在し、生産性のポテンシャルの上限範囲は、微細藻類で最大数百 EJ、大型藻類で最大数千 EJ になる (Sheehan et al., 1998a; van Iersel et al., 2009) と報告されている。図 2.10 は、代替される化石燃料と比較した場合の、温室効果ガス削減の範囲をかなり近似で示している。研究開発と商用化に成功すれば、作物のバイオディーゼルと比較して、比較可能な排出削減または排出削減の増加が可能である (EPA, 2010)。

現在の取り組みから得られた主要な結論を以下に紹介する (US DOE, 2009; IEA Bioenergy, 2010; Darzins et al., 2010)。

(1) 微細藻類の生産性は、陸上植物で可能な生産性のレベルを超える可能性がある。(2) 現在のところ、普及拡大には複数の大きな障壁があり、改善とブレイクスルーには情報不足と機会も多く存在する。(3) 様々な種類の藻類生物、気候条件、製品に適した多様なシステムは、今も検討中である。(4) ゲノム、産業設計、性能に関する基本情報も必要である。(5) 藻類バイオ燃料生産に必要なコストの推定値は非常に幅広いが、最善の推定値では、技術開発の初期段階で有望である。(6) 燃料生産のみに藻類を加工するコストは依然として高過ぎる。食料、飼料、燃料の各市場に向けた様々な製品を生産することで、藻類バイオリファイナリーを経済的に操業する機会が生ずる。(7) 持続可能な燃料生産システムを今後開発していくため、ライフサイクル評価が必要である。

2.6.2 バイオマスの物流とサプライチェーンの改善

サプライチェーンの最適化には、輸送、前処理、転換技術における規模の経済の達成が含まれる。関連する要因には、原材料の空間分布や季節的な供給パターン、輸送、貯蔵、処理、前処理の各コスト、大規模な集中的プラントによる規模の経済が挙げられる (Dornburg and Faaij, 2001; Nagatomi et al., 2008)。原材料を長期にわたり組み合わせ賢く活用すれば、通年のバイオマス供給を通じて転換プラントが、規模の経済を達成しやすくなり、これにより投資コスト (Junginger et al., 2001; McKeough et al., 2005; Nishi et al., 2005; Ileleji et al., 2010; Kang et al., 2010) と技術移転 (Asikainen et al., 2010) の有効活用につながる可能性がある。

長期的には、より低コストのバイオマス残渣資源は枯渇が進み、より割高な (栽培された) バイオマスでバイオエネルギーへの需要増加を補う必要がある。この需要増加の一部は学習と最適化で対応されるだろうが、たとえば、イギリスのペレットによる熱生産は将来的に、地域に存在した原材料が輸入に切り替わるため、現在に比べ割高になるだろう (2020) (E4tech, 2010)。同様の影響が、ヨーロッパでバイオ燃料を大規模に導入した場合のシナリオで見受けられる (Londo et al., 2010)。

過去 10~20 年間、ヨーロッパ (特に北ヨーロッパとバルチック諸国)、北アメリカ、ブラジル、様々な開発途上国で見られた学習と最適化からは、市場発展とバイオマス供給のコスト低下が着実に進んでいることが示されている (2.7.2 節; Junginger et al., 2006)。バイオマスの有効な国際市場と物流能力への大幅な投資が、これを達成する重要な前提条件である (2.4 節も参照)。

前処理技術

半炭化 (トレファクション) 木材は、木炭生産と同様のプロセスで木材を加熱して製造される。木材の水分は最高 160°C で失われるが、木材の物理的性質と機械的性質は維持され、当初の重量の 70% とエネルギー量の 90% は一般に維持される (D. Bradley et al., 2009)。半炭化木材は 1~6% の水分しか吸収しない (Uslu et al., 2008)。半炭化により、均質な原材料を生産出来るため、まちまちな原材料を処理する非効率で割高な方法は省略でき、より良い転換効率 (Badger, 2000) やより良い生産予測が可能になる。

熱分解では、固体バイオマスと酸素含有炭素水素の複合混合物である液体バイオ油に転換する。この液体製品は有毒で、長期保存のためには安定化が必要であるが、バイオ油は比較的輸送しやすい。熱分解による油生産は、配送エネルギー単位で見た場合、木材ペレットの半炭化に比べ割高で効率性は劣る。2.3.4 節では、Bain (2007) に基づき複数の国々のコストデータについて論じる。McKeough et al. (2005) でも、6.2～7.0US ドル (2005 年) という似たような数値を提示している。この加工により、バイオマスの栄養を含む固体部分 (バイオ炭) を分離出来る。こうしたバイオ炭は、適切に処理すれば、土壌の質と生産性の改善、栄養の循環に使用され得るし、長期間にわたる土壌への炭素貯蔵の可能性も出てくる (Laird, 2008; Laird et al., 2009; Woelf et al., 2010)。

2.6.3 近代的バイオマスから二次エネルギーキャリアへ転換する技術の向上

図 2.2 に示すとおり、様々な潜在的な原材料を幅広い二次エネルギーキャリアに転換するには、機械的、熱化学的、バイオケミカルの、化学的なステップなど、様々な転換技術 (またはそれらの組み合わせ) が必要である。図 2.16 に示すとおり、製品としての電力と熱に加え、液体やガスの様々な燃料や製品がバイオマスから製造出来る。この図では、エネルギーキャリア、化学物質、資材としての同一、類似または新たな製品を製造し得る重要な化学中間物がハイライトされている (さらに詳細が必要な場合は 2.6.3.4 節参照)。

- ・ **砂糖**。リグノセルソース物質由来の 5 炭糖または 6 炭糖の混合物で、主にバイオケミカルまたは化学的なプロセスを経て、液体燃料またはガス燃料、様々な化学製品に転換される。
- ・ 熱化学的なガス化プロセスによる**合成ガス**。ガス化複合発電 (IGCC) で電力に、様々な熱・触媒プロセスを通じてガス燃料または液体燃料に、低温の生物学的なプロセスを通じて水素またはポリマーに転換出来る。
- ・ 熱分解または水熱処理による**油**。様々な燃料と化学物質に改良出来る。
- ・ 植物油、種子、微細藻類の**脂質**。ディーゼル燃料やジェット燃料などの幅広い燃料と化学物質に転換出来る。
- ・ **バイオガス**。有機物の嫌気性分解により放出されたメタンと二酸化炭素で、熱量はその改質形態であるメタンを主成分とするバイオメタンに比べ低い。改質すると、天然ガス供給網に添加したり輸送に使用したり出来る。

表 2.15 には、複数の出典による様々な研究の参照に基づき、プロセスの効率性と予測される改良が示されている。様々な開発段階のいくつかのバイオエネルギー・システムとサプライチェーンでは、US ドル (2005 年) /GJ でコストが表示されている。表 2.15.A はアルコールのプロセスの詳細を示し、表 2.15.B は、微細藻類の燃料についてまとめている。表 2.15.C は炭化水素燃料、表 2.15.D はガス燃料、ガス化複合発電の電力について説明している。財政的な前提は表の最後に示す。参照群の一部では同一の前提を用いているが、すべてではない。Kazi et al. (2010) と Swanson et al. (2010) を Bauen et al. (2009a) または Foust et al. (2009) と比較して示したとおり、同種のものとしては初めての植物は、経路中の化学的、バイオケミカルの、熱化学的、機械的な成分段階に技術的な不確実性があるため割高になる。こうした段階を組み合わせると、固体バイオマスの特性上、類似した石油産業プロセスに比べて非常に複雑になるケースが多い。ベンチスケールの初回実験後にはスケールアップが実施され、初期の技術経済的な評価が進められる。プロセス運用、設計修正、パラメータ運用の経験を得るなか、コスト評価が実施され、コストがゆるやかに低下するまでプラントは運用される。現時点では、プラントの技術経済的なリスクは低下しており、生産コストはいわゆる第 n 代プラントの状態に達している。これらの研究の不確実性は変動し、後発開発コンセプトのものほど高い (Bauen et al., 2009a)。

33 か国で実施された新型のパイロット、実証、商用規模のバイオエネルギープロジェクトについて、Bacovsky et al. (2010a,b) が概要を示している。これらのプロジェクトには、デンマークのカロンボーも含まれている。カロンボーでは 2010 年、パイロットプラントで小麦わらからエタノールを製造し、ガソリン販売業者に販売している⁷⁰。パイロットから実証規模に移行した実際のプロジェクト数は、おそらくもっと多い。参照では、表 2.15 に示した開発プロジェクトの大半について言及している。輸送部門について世界規模の持続可能な第二世代の技術と今後の見通しを示した IEA (Renewable Energy Division, 2010) の報告、最近公開されたバイオ燃料の技術ロードマップも参照のこと (IEA, 2011)。

本節では、2.3 節で取り上げた (たとえば、ガス化などの熱化学技術で多様な燃料生産や発電が可能といった) 技術解説の繰り返しを避け、バイオエネルギー製品に注目する。同様に、様々な最終製品が糖類から製造出来る。

⁷⁰ IEA Bioenergy Task 39 が双方向のウェブサイト biofuels.abcenergy.at/demoplants でこの情報を管理する。

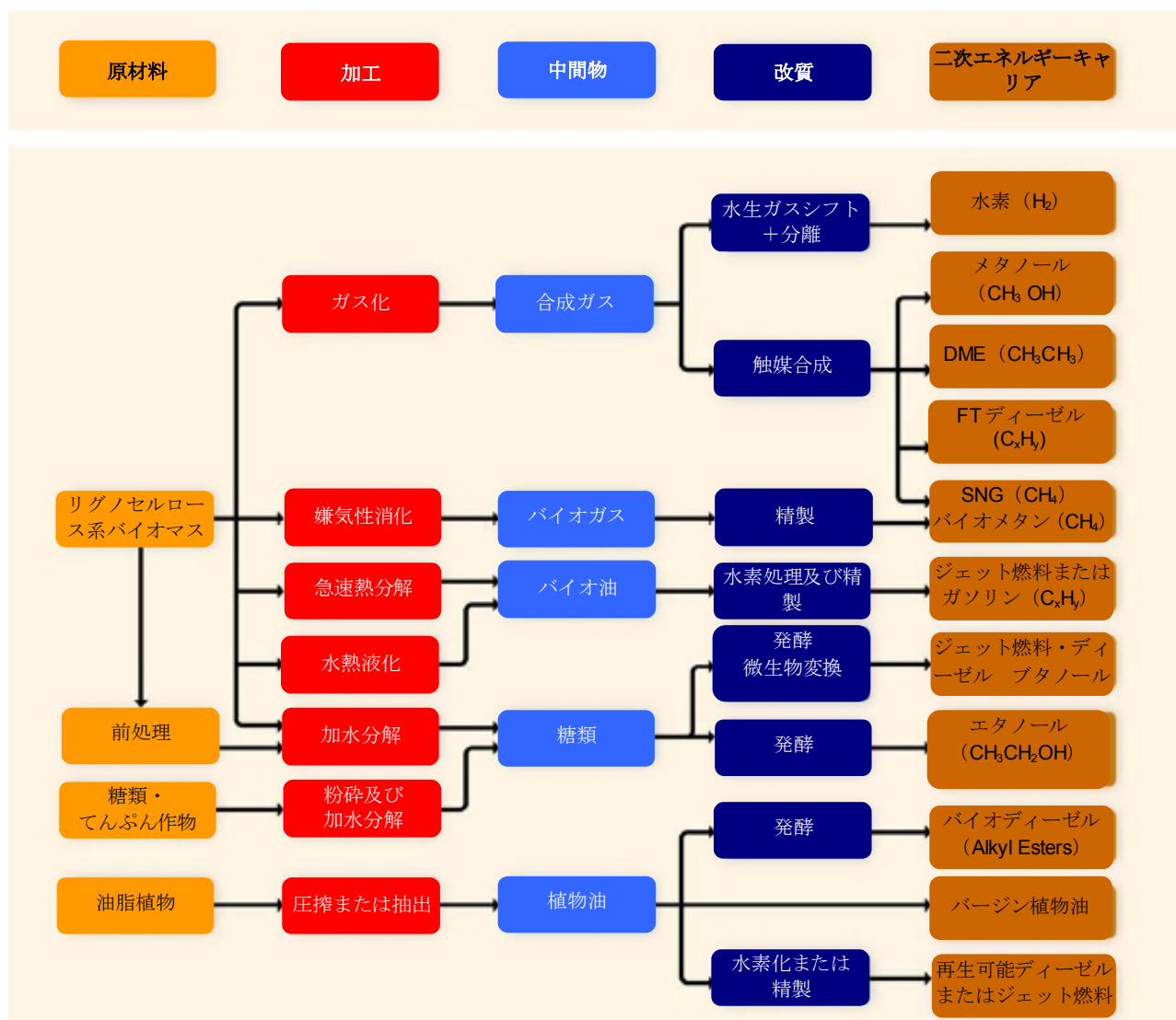


図 2.16: リグノセルロース系バイオマス、糖類・でんぷん作物、油脂植物（原材料）と主要中間物の加工経路の概要。様々な経路を通じて、液体バイオ燃料やガスバイオ燃料といった二次エネルギーキャリアに改質出来る。燃料製品の例として、（1）現在のガソリンとディーゼル燃料を混合する酸化バイオ燃料、または、エタノール、ブタノール、メタノール、液体エーテル、バイオディーゼル、ガス化ジメチルエーテル（DME）といった純粋な形態で使用する含酸素バイオ燃料。（2）炭化水素バイオ燃料。フィッシャー・トロブシュ（FT）液体、再生可能ディーゼル燃料、一部の微生物燃料（現在の液体燃料のインフラと互換性がある。化学組成が、ガソリン、ディーゼル、ジェット燃料と類似しているためである（表 2.15.C 参照））、または、ガス化、嫌気性消化によるバイオメタンから得られる、天然ガス代替物用の最も単純な炭化水素メタン（SNG）。（3）将来の輸送用の水素（Hamelinck and Faaij, 2006 から採用。Elsevier B.V.の許可を得て複製）。

注:

微生物燃料には、天然ゴムの成分であるイソプレン由来の炭化水素、炭素原子 3~6 個を含む多様な非発酵アルコール（炭素原子 4 個を含むブタノールなど）、植物油として炭化水素化出来る脂肪酸（Rude and Schirmer, 2009）⁷¹。糖類作物とでんぷん作物の場合、上図の糖類は六炭糖を含む糖類を示す。リグノセルロース系バイオマスの場合、上図の糖類はさらに複雑で、五炭糖と六炭糖の混合物になり、その比率は原材料の種類による。硬材と農業残渣には、グルコースを生産し六炭糖を持つセルロースに加え、キシランと五炭糖を持つその他のポリマーが含まれる。

新型の転換経路（Hamelinck and Faaij, 2006）に関する初のメタ分析が、メタノール、水素、フィッシャー・トロブシュ液体、リグノセルロース系バイオマスから生産されるバイオケミカル・エタノールを対象に、比較可能な財政的想定のもとで実施された。この分析では、これらのシステムは、でんぷん系バイオ燃料と遜色がなく、長期的にはより競争力のある燃料価格と機会を提供することが示されている。その理由としては、本質的に原材料は低コストである点、リグノセルロース系バイオマスは穀物生産の残渣や森林残渣などの多様な資源を使用出来る点が挙げられている。メタ分析で使用された原材料のコストの範囲は、2.6.1.1 節のコストと図 2.5 の供給曲線の低い範囲に

⁷¹ 植物油と炭水化物画分と同一種類の加工を活用出来る水生植物（2.6.1.2 節参照）は、示されていない。

沿っている。EUの研究では、北ヨーロッパの生産コスト予測は、草本植物の場合が2~7.5US ドル (2005 年) /GJ、木質バイオマスの場合が1.5~6US ドル (2005 年) /GJである (土地関連のコストも含む)。多年生種の場合、農家からエネルギー用原材料の供給を安定的に受けるために、取引コストは15%上昇する必要があるだろう。この追加コスト (転換プラントへの輸送、原材料確保のための支払いなど) は既に、国レベルのデータに基づくアメリカの供給曲線の価格に織り込まれている。転換施設への予測配送価格は、森林残渣やその関連の残渣の場合、1~3US ドル (2005 年) /GJ、最大1.5EJであり、木質植物と草本植物、ソルガムの場合は2~4US ドル (2005 年) /GJ、最大約5EJ (またはそれ以上の価格) である。

2.6.3.1 液体燃料

アルコール。様々な燃料プロセスの推定生産コストは、表 2.15.A にまとめた。その範囲は13~30US ドル (2005 年) /GJである。

バイオマス由来の一部のメタノール、ブタン、その他のアルコール生産は、技術開発の段階が様々であり、主流のアルコール生産の道筋は、エタノールをその最終製品とする。リグノセルロース系エタノールの技術は、可能な変換チェーンを多数有している (たとえば Sánchez and Cardona, 2008; Sims et al., 2010)。糖類の収量が最も高く、環境への影響が低いものが、より有望と考えられ (Wooley et al., 1999)、化学/バイオケミカルの、機械的/化学的/バイオケミカルの、生物学的/化学的/バイオケミカルの加工段階が関係している。これらのチェーンの大半は、植物の細胞壁の強固さを克服する前処理段階が関係する。セルロースやヘミセルロースの繊維を分離あるいは一部加水分解し、発酵するための五炭糖または六炭糖を持つ糖類の複雑な流れを実現する。同時糖化発酵 (SSF)、同時糖化並行発酵 (SSCF)、加水分解、発酵、酵素生産段階のすべてを統合した CBP プロセス (consolidated bioprocessing) (CBP) は、短期、中期、長期のアプローチとしてそれぞれ定義された。CBP プロセスの場合、効率と収量は増加すると見込まれ、同時糖化発酵と同時糖化並行発酵に比べ、それぞれコストが35%、66%低下すると予想される (Hamelinck et al., 2005a。表 2.15 参照)。

前処理は、高コストの原因となる重要な技術上の障壁の1つであり、可能な選択肢は多数存在する。これまでのところ、「最適」技術はまったく特定されていない (da Costa Sousa et al., 2009; Sims et al., 2010)。前処理を行うことで、木質残渣、草本残渣、農業残渣の細胞壁の強固さを克服し、炭水化物ポリマーを (酵素などで) 加水分解出来るようにし、一部のケースでは糖類の一部を発酵用に取り出したり、エタノール (またはブタノール) にしたり、プロセス熱や発電用に適したリグニンにしたりする。もう1つの方法として、複数の段階 (前処理を含む) を他の下流の転換段階と組み合わせることも出来る。同時に、原料は複数の有機物でバイオ変換出来る。前処理の選択肢を評価するには⁷²、共通の原材料、共通の分析方法論 (Wyman et al., 2005) を使用することが、多数のチェーンの性能と組み合わせを差別化するために必要である。トウモロコシ茎葉の場合、アンモニア繊維爆砕法 (AFEX)、希酸や熱水による前処理という評価された選択肢のなかで、コストは、希酸による前処理が最も安く、熱水プロセスが最も高く25%割高だった。しかしながら、この順位は、他の原材料の場合は異なる (Elander et al., 2009)。オンサイトで酵素を生産すると、希酸による前処理のコストは4.5%上昇する (Kazi et al., 2010)。前処理とは別に、酵素は重要な別の変動コストであり、研究開発・実証とコスト削減に対する世界規模の主要な取り組みにおいて、重点となっている (たとえば Himmel et al., 2010; Sims et al., 2010)。最終的には、重要な個々の転換段階のすべて (前処理、酵素による加水分解、発酵など) は、相互依存が高い。このため、多くの段階が最適化されておらず、完全に統合されたプロセスでも最適化されていない状況では、加工の統合は非常に重要な別の重点分野と言える。

アメリカの国立アカデミーがバイオマス由来の液体輸送燃料の分析を行い (NRC, 2009a)、そのコスト分析から、2020 年におけるセルロース系エタノールの損益分岐点は原油価格100US ドル (2005 年) /バレル (0.64US ドル (2005 年) /l) で、18~22US ドル (2005 年) /GJになることが示された。この推定は、2022 年に23.5US ドル (2005 年) /GJという Bauen et al. (2009a) の推定と近似している⁷³。米国学術研究会議 (NRC, 2009a) の予測では、2035 年までに、プロセスの改良によりプラント関連のコストは最大40%低下しうる。これは12~15US ドル (2005 年) /GJの範囲内で、15.5US ドル (2005 年) /GJという第n代のプラントコストの推定に沿っている (Foust et al., 2009)。一部のプロセスでは、バガスを経たエタノールに転換すれば、さらにコスト削減が見込めるだろう。バガスは、原材料は既に転換施設にあり、ブラジルの土地面積当たりのエタノール収量を30~40%増加させるポテンシャルを有しているためである (Seabra et al., 2010)。現在、同様の戦略がアメリカで展開されており、エネルギー省により開発された初の商用セルロース系エタノールプラントの2つで、作物残渣の回収と、第二次世代 (残渣) と第一世代 (トウモロコシ) のエタノール施設の連結が追求されている⁷⁴。

⁷² バイオマス前処理と低コストのエタノールの分野は、不可欠なものとして2009年に出現した。このとき、14の中核となる論文が生物学・バイオケミストリ・バイオマス化学分析の集中分野を確立している

(sciencewatch.com/dr/tt/2009/09-octtt-BIO/)。アメリカやカナダの複数機関における前処理研究の調整、共通サンプルと分析方法論の調査、これらのプロセスの技術経済的な性能についての定期的な共同評価の実施などが含まれる。

⁷³ 同一ではない財政的推定については、表 2.15 参照。Bauen et al. (2009a) と Foust et al. (2009) は情報を明らかにしていない。

⁷⁴ この類としては初である、穀物エタノールの施設を連結したトウモロコシ茎葉と穂軸由来の商用エタノールの影響評

同時糖化発酵 (Himmel et al., 2010)、同時糖化並行発酵 (Dutta et al., 2010 など)、CBP プロセス (van Zyl et al., 2007; Himmel et al., 2010) に用いられる酵素生産の効率性を向上させるため (FAO, 2008b)、微生物のいくつかの菌株が選択され、遺伝子組み換えが行われている。現在商用可能な酵素の多くは、遺伝子組み換え (GM) 微生物由来の閉鎖された発酵槽で生産される。酵素の最終製品には、遺伝子組み換え微生物は含まれていないため (Royal Society, 2008)、その方法が容易に受容されている (FAO, 2008b)。

微生物燃料。 バイオ変換機能を加速させる遺伝子導入を伴う産業用の微生物⁷⁵ (Rude and Schirmer, 2009) は、炭化水素燃料、濃度の高いアルコール、脂質、化学物質を糖類から製造出来る。合成生物学の研究者は、代謝経路を導入し、より直近では人工の生物学を用いて微生物の中に代替的な生物学的代謝経路を設計している。これらは、燃料生産と化学物質生産の効率性向上につながるだろう (Keasling and Chou, 2008; S. Lee et al., 2008)。別の経路としては、微生物の持つ既存の機能を代謝工学のツールで代替する方法が考えられる。詳細な生産コストは文献では利用出来ないが、Regalbuto (2009) と E4tech (2009) がデータをいくらかまとめている⁷⁶。さらに、一部の微細藻類は光がない場所で (従属栄養的に) 糖類を変化させ、(植物油に類似した) 脂質を生産出来る。この脂質は、下流で容易にバイオディーゼル、再生可能なディーゼル燃料やジェット燃料に転換される。遺伝子組み換えを追加することで、微生物は脂質を排出出来るようになり、生産コストの低下につながる。微生物のバイオ燃料と化学物質は、活発な開発が行われている (Alper and Stephanopoulos, 2009; Rude and Schirmer, 2009)。

ガス化由来の製品 (表 2.15.A 及び B 参照)

バイオマスを合成ガス (一酸化炭素と水素) に**ガス化**し、その後に触媒を用いてエタノールかブタノールのいずれかに改質する場合、先述のバイオケミカル・チェーンと比較可能な生産コスト (12~20US ドル (2005 年) /GJ が推定されている。最も低コストな液体燃料は (発電と組み合わせで生産した) メタノールで、7~10US ドル (2005 年) /GJ である (燃料のみの場合は 12~18US ドル (2005 年) /GJ)。ガス化による燃料生産コストをさらに低下出来るかは、実用経験の獲得と技術上のリスク低減のためのガス化複合発電の大幅な開発に左右される (現在は 5~10MW_e の実証段階である)。30~300MW_e のプラントの場合、コストは 13~19US ドル (2005 年) /GJ (4.6~6.9US セント (2005 年) /kWh) と予測されている (表 2.15 参照; Bauen et al., 2009a)。一部の設計では、プロセスの信頼性は今も課題ではあるが、ニッチ市場は発展しつつある (Kirkels and Verbong, 2011)。

コストベースは完全に比較可能なわけではないといっても、フィッシャー・トロプシュ (FT) の合成ディーゼルについての最近の推定値として、石炭とバイオマスを US ドル (2005 年) /GJ で比較した場合、Bauen et al. (2009a) の 20 対 29.5、van Vliet et al. (2009) の 16 対 22、NRC (2009a) の 25 対 30、Larson et al. の 28 という数値がある。損益分岐点は、80~120US ドル (2005 年) /バレル (0.51~0.74US ドル (2005 年) /ℓ) 前後である。ポリジェネレーションとフィッシャー・トロプシュ燃料の組み合わせの場合、特に高い効率性が得られると見込まれる (Hamelinck and Faaij, 2006; Laser et al., 2009; Williams et al., 2009)。

プロセス強化 (Process intensification) とは、化学プラントの複数のユニット操作を統合し、それによりそのフットプリントと資本コストを削減し、プラントがより小規模でコスト効率良く運営出来るようにさせるものである。このため、以前は非常に大規模でなければ不可能だった化学・熱プロセスは、バイオマスコストの供給に効率良く合致させるため、現在は規模を縮小出来るだろう。マイクロチャンネル・リアクタ内で熱と質量を効率的に移動出来ないかを、従来の天然ガスまたは石炭ガス化の流れを対象に、規模を 1~2 回りコンパクト化したリアクタで、水生ガスシフト、流れの改良、フィッシャー・トロプシュ・プロセスが調査され (Nehlsen et al., 2007)、大幅に資本コストが低下している (Schouten et al., 2002; Sharma, 2002; Tonkovich et al., 2004)。プロセス強化は、資本上の要件が大幅に低下するため (石炭液化油 (CTL) またはガス液化油 (GTL) も対象になるため)、バイオマス液化油 (BTL) 生産の分散化につながり得る (Shah, 2007)。メタノールとジメチルエーテルの合成も同様に強化出来るだろう。さらに、バイオマスと石炭のガス化複合の選択肢も、バイオマスが持つ有利な二酸化炭素緩和ポテンシャルを活用しつつ、ある程度の規模の経済を獲得するだろう。

例は Integrated Bioenergy Projects により実施されている。アメリカのエネルギー省 Golden Field Office のウェブサイトは以下のとおり。

www.eere.energy.gov/golden/Reading_Room.aspx;

www.eere.energy.gov/golden/PDFs/ReadingRoom/NEPA/Final_Range_Fuels_EA_10122007.pdf;

www.eere.energy.gov/golden/PDFs/ReadingRoom/NEPA/POET_Project_LIBERTY_Final_EA.pdf; and

www.biorefineryprojecteis-abengoa.com/Home_Page.html.

⁷⁵ 大腸菌 や 出芽酵母 などは、定番の遺伝子ツールであり、産業用に用いられる。

⁷⁶ Rude and Schirmer (2009) は化学量論的なデータを報告している。たとえば、グルコースのトン当たりリットル数は、エタノール (ガソリン用) が 648 なのに対し、ファルネセン (ディーゼル用) が 297、微生物バイオ原油 (ジェット燃料用) が 384 である。代謝の質量収率は、エタノール 51% に対し、ファルネセンが 25%、バイオ原油が 30% である。代謝経路は、中間細胞集団を成長させてから、バイオ燃料または中間物の生産を開始する。これらの段階は通常は嫌気性であり、全体的なエネルギー効率を低下させる大気と攪拌が必要になる。

その他の中間品: 植物油または熱分解・水熱変換油 (pyrolysis/hydrothermal processing oil)

ディーゼルの代替の場合、2011 年、水素化技術で既に、植物油を再生可能なディーゼルに水素化し、直接的な炭化水素のディーゼル代替の商用生産が行われている⁷⁷。コストは、植物油の価格と補助金に左右される (表 2.15.C 及び 2.3.4 節)。植物油生産で生ずるリグノセルロース系残渣は、水素化単独設備にエネルギーを供給出来るだろう。油脂や植物油を最終燃料にする下流のプロセスは、石油リファイナリを併用して行われることが多い。この場合、ジェット燃料やその他の製品も製造出来る。

バイオマスの迅速な**熱分解**プロセスまたは**水熱液化**プロセスでは、中間油製品を低コストで製造出来る (Bain, 2007; Barth and Kleinert, 2008; 2.7.1 節)。Holmgren et al. (2008) は、ベンチスケールのデータをもとに、リグノセルロース系熱分解でブレンド基材 (リファイナリでガソリンと混合可能な構成要素) に改質する生産コストを 14~24US ドル (2005 年) /GJ と推測した。

水熱改質の緩やかな条件のもとで、多機能な担持金属触媒がある場合、バイオマス由来の糖類やその他の含酸素有機物は、(炭素と水素を保持したまま) 結合と化学的な再配列により、炭化水素燃料を製造可能である。このプロセスでは、中程度の温度と圧力で水素も生産出来る (Cortright et al., 2002; Huber et al., 2004, 2005, 2006; Davda et al., 2005; Gurbuz et al., 2010)。これらの開発はパイロット・実証段階に達している (Regalbuto, 2009)。

光合成藻類を用いた二酸化炭素、水、光エネルギーに由来するもの (表 2.15.B)

微細藻類の脂質 (微細藻類油) は研究開発の初期段階で、現在は、原材料生産と変換のコストが 30~140US ドル (2005 年) /GJ と、かなり高い (EPA, 2010)。微生物の組成とその本質的な微生物代謝経路のために、微生物の生物多様性を探求すれば、塩分濃度の高い土地、汽水、産業排水を使用出来るため、食料作物との土地をめぐる競合は回避出来るが、微細藻類のポテンシャルは非常に不確かである。

予測。短~中期的には、バイオ燃料産業は、見解の一致した環境的・経済的持続可能性と政策目標に対応する第一世代と第二世代の技術を網羅し、着実に成長する。第一世代と第二世代の技術を統合したバイオ燃料の展望への移行には、さらに 10~20 年かかる可能性がある (Sims et al., 2008, 2010; NRC, 2009a; Darzins et al., 2010)。

⁷⁷ 再生可能ディーゼルは現在、シンガポールの Neste Oil がマレーシア産のパームオイルを原料に生産し、ドイツに輸出している (biofuelsdigest.com/bdigest/2011/03/11/neste-oil-opens-giant-renewable-diesel-plant-in-singapore/を参照)。
www.climatechange.ca.gov/events/2006-06-27+28_symposium/presentations/CalHodge_handout_NESTE_OIL.PDF (nesteoil.com/) に掲載された原理の証明によると、この工程の開発には約 10 年を要した。

表 2.15: 開発中の技術に関する 2030 年のバイオ燃料生産コスト予測と 2010 年産業開発レベルの概要。近々建設される先駆的なプラントの性能を使用すると、コストは上昇する。参照の大多数は、技術学習が開発中に生じ、第 n 代プラントコストとして表示される。コストは US ドル（2005 年）建てである。

A: 燃料 - バイオケミカルとガス化のプロセスによるアルコール

プロセス	原材料	効率性とプロセスの経済性。 Eff.=エネルギー生産/バイオマスエネルギー。要素のコストは US ドル（2005 年）/GJ で表示	化石燃料と対比した場合の温室効果ガス削減（%）	潜在的な技術進歩及び課題	2030 年までの生産コスト（US ドル（2005 年）/GJ）	産業発展 (Bacovsky et al., 2010a, b 参照)
CBP プロセス (CBP)	リグノセルロース	Eff.木質の場合 49%以下、わら（エタノール）+5%電力の場合 42% ¹⁹	シナリオ分析 ³⁰	リグニン工学でセルロースへのアクセスが容易に ⁷ 。CBP 生物の開発 ⁴⁴ 。	15.5 ¹⁹ 将来	実証・パイロット段階 酵素と前処理のコスト低下 多数の国で複数のパイロット 初の商用プラント リグニン残渣の混焼 ³²
同時糖化並行発酵		Eff. エタノール+10%電力の場合 39%以下 ¹		五炭糖類の効率的な転換 ^{2,3} 。研究開発への投資 ⁵ 。新型の酵素 ⁶ 。	25 ¹ -27 ¹⁹ 28-35 ⁴⁸	
個別での糖化と発酵	大麦わら	蒸気爆砕、酵素加水分解、エタノール発酵 ⁹ 。高固体 15%	データ無し	システム統合、高固体、発酵の毒性低下	パイロットデータより 30 ⁹ （フィンランド）	
同時糖化発酵	トウモロコシ葉茎	希酸加水分解、260 百万 l/年、エタノールの場合 ²⁴ FC:6.6, CC*:10.1, CR: 1.1	83-88 共同製品クレジットの 方法による ²⁵	前処理、プロセス統合、酵素のコスト ²⁴	15.5（アメリカ）第 n 代プラント、将来 ²⁴	
	リグノセルロース 多様な Eff.35%エタノール+4%電力 ¹	ジェネリック: 90 百万 l/年の場合、FC:14, CC*:14, CR: 1.1。360 百万 l/年の場合、FC:14, CC*:10, CR: 0.5 ⁴⁵		メタ分析の条件 ⁴⁵	28（2015） ⁴⁵ 23.5（2022） ⁴⁵	
		Eff. kg/l エタノール（ポプラ、ススキ、スイッチグラス、トウモロコシ葉茎、小麦: 3.7, 3.2, 2.6, 2.6, 2.4）。プラントの規模 1,500~1,000t/日。FC は全体の 50% ¹⁰		プロセス統合 - 設置済みの製品 l 当たりの資本コストは、150~380 百万 l/年のプラントの場合 0.9~1.3US ドル（2020 年の推定）。2025 年までに 25%の運転コスト低下、2035 年までに 40%の運転コスト低下の見通し ¹⁰ 。	18-22 ¹⁰ （2020 年） 損益分岐点 100US ドル/バレル、+CCS 95US ドル/バレル、50US ドル/t CO ₂	

	バガス	独立プラント ³⁵ で 370ℓ/t 乾燥（エタノール）+0.56kWh/ℓ エタノール（elec.）	86 新型コジェネレーション：120%（NG ピーク電力） ³⁶	機械による収穫の向上（発生した）サトウキビ残渣 ^{35, 36}	6 ³⁵ -15 ³⁵ FC（固定費）がある場合・ない場合	
ガス化/触媒合成エタノール	リグノセルロース	（プラントの規模によって異なるが） ¹⁸ プラントで年間 170 百万 ℓ。副産物のプロパノール・ブタノール	90 ³⁸	触媒開発と合成ガス精製の改良	12 ⁴⁹ -15 ¹⁸ 14.5 ²⁴	研究開発・実証、パイロット
発酵：ガソリンのインフラと互換性のある製品であるブタノール、特にバイオブタノールへ	糖類・でんぷん	バイオブタノールの統合生産の開発、溶媒を生産するバクテリア（クロストリジウム）を遺伝子組み換えして用いた除去システム ²⁹ 。初期のアセトン、ブタノール、エタノール（ABE）発酵はコスト高	5-31 共同製品クレジットの方法による ²⁹	バイオブタノールに対する高い選択性の場合 （1）バイオブタノールの選択性増加とコスト低下を図るための、クロストリジウム・ベエージェリンキー BA101 の変異株または大腸菌 のたんぱく質組み換え ^{15,16} （2）酪酸への複式発酵とブタノールへの削減	ABE の場合 29.6 ¹⁸ 変異 クロストリジウムの場合 25.2 ¹⁷ デュアルプロセスの場合 21.6 ¹⁷	様々な代謝経路の大小のベンチャー企業（酵母宿主を含む）。炭化水素の先駆体
ブタノールへのガス化	リグノセルロース	主にブタノール合成用の触媒プロセス	データなし	生産コストの推計値には資本収益率が含まれる ¹⁷	13 ¹⁷	データなし
燃料または電力用のメタノールへのガス化・合成	リグノセルロース	Eff. 55%燃料のみ ¹⁹ Eff. 48%燃料と 12%電力 ¹⁹	90 ²⁷	メタノール（及びジメチルエーテル）の生産は、電力を同時生産する様々な構成で可能	12-18（燃料） ¹⁹ 7.1-9.5（燃料及び電力） ¹⁹	パイロット、デモ、初の商用化

B: 燃料 - 藻類

プロセス	原材料	効率性とプロセスの経済性。 Eff.=エネルギー生産/バイオマスエネルギー。要素のコストは US ドル（2005 年）/GJ で表示	化石燃料と対比した場合の温室効果ガス削減（%）	潜在的な技術進歩及び課題	2030 年までの生産コスト（US ドル（2005 年）/GJ）	産業発展
脂質の生産、抽出、微細藻類の天然脂質をバイオディーゼルまたは再生可能ディーゼルに転換。他のプロセスで消化発酵または使用される藻類の残渣	微細藻類の脂質。 2.6.1.2 節参照	バイオマス生産能力を 10,000t/年と想定する場合、kg 当たりの生産コストは 0.47US ドル（光バイオリアクタ）、0.6US ドル（水路） ²³	オープンポンドとバイオリアクタのシナリオの場合、28-76 ³⁴	バイオマスが重量当たり 30%の油を含有すると想定する場合 ³⁴ 、1ℓの油を生産するバイオマスのコストは、生産性の低い藻類（2.5g/m ² /日）の場合 1~3US ドル、生産性の高い藻類（10g/m ² /日）の場合 1.5~5US ドル。生産性は、オープンポンドまたは光バイオリアクタの中で計測。	予備的な結果は 95 以上 ²³ 生産性の低～高は、オープンポンドの場合 30-80 ³⁴ 光バイオリアクタの場合 50-140 ³⁴	大小の企業による活発な研究開発。ジェット燃料やディーゼル燃料の代替を追求するパイロットも含む。

C: 燃料 - 植物油及び廃棄物のガス化、熱分解、水素化、異性化による炭化水素

合成ディーゼルへ、ガス化後に、フィッシャー・トロプシュ・プロセス。バイオマス液化油とも呼ばれる。二酸化炭素回収・貯留がある場合とない場合。プロセスで炭化水素燃料を製造（括弧内は炭素原子数を示す）。ガソリン（5-10）、ケロシン（ジェット燃料）（10-15）、ディーゼル（15-20）、燃料油（20-30）	リグノセルロース	Eff. = 燃料のみの場合 0.42、燃料+電力の場合 0.45 ¹⁹	91 ²⁷ (EU)	加工により生じた二酸化炭素の二酸化炭素回収・貯留	14-20（燃料のみ）、8-11（燃料/電力） ¹⁹ 、15.2-18.6 ⁴³	初の商用プラント（木質）が進行中。世界で多数の実証プロセス、パイロットプロセスが進行中
		80 百万 t/年: FC:12, CC*17 (2015) ; 280 百万 t/年: FC:12, CC*8 (2022) ⁴⁵		メタ分析の条件 ⁴⁵	20-29.5 ⁴⁵	
		Eff. = 二酸化炭素回収・貯留なしの場合 0.52、0.5w の二酸化炭素回収・貯留 + 35 と 24MW _e 。4000t/日のスイッチグラス。プラントコスト~650 百万 US ドル ¹⁰	90 ²⁶ (アメリカ)	ガス精製コストと規模・量。損益分岐点は、原油価格 122US ドル/バレル（二酸化炭素回収・貯留ありの場合 113US ドルで、50US ドル/t CO ₂ ） ¹⁰	25 ¹⁰ （二酸化炭素回収・貯留なし、アメリカ）、30 ¹⁰ （二酸化炭素回収・貯留あり、アメリカ）。コスト明細（2020）を参照 ³⁸	
		Eff. = 0.52 + 22 MW _e 。初期建設は 500 百万 US ドル。加工のために EU に輸入される幅広い高密度化原材料 ³⁹	一次エネルギーの採掘から車両走行による消費までを詳細に分析した EU ³⁹ とアメリカ ¹⁴ のシナリオ	損益分岐点は 1 バレル 75US ドル。バイオマスと石炭を 50%混合させると、気候変動に中立になる	16-22.5 ³⁹	
		石炭とバイオマスの同時ガス化	図 2.10 参照	スイッチグラスと様々なプレーリー植物	29 ³⁸	
再生可能ディーゼルへの水素化	植物油、動物の脂肪、廃棄物	良く知られた技術。原材料のコストが障壁	63-130 ²⁶ 共同製品の処理方法による	原材料のコストがこのプロセスを左右する。プロセスは、石油化学製品の運用で一般的なもの	17-18 ³⁴	商用のものとして、大規模なものが 1 つ、小規模なものがいくつかある（本文の脚注 77 参照）。実証段階のものは多数ある
ディーゼル燃料 ³² やジェット燃料に改質するバイオマス熱分解と	バイオマス・廃棄物、植物油、動物の脂肪、廃棄物油	リファイナリ ³³ 用の混合ストックへの熱分解 ^{8,13} プロセスの開発（水熱プロセスからも）。ボイラーでの直接の混		触媒の開発、バイオマスでの加工量の改善	リファイナリの混合用の分解油の場合 14-24 ⁴⁷	実証、燃料の製品テストがアメリカ、ブラジル、EU で実施。植物油から製造したバイオジ

触媒。リファイナリに直接加工される植物油 ³³		焼（石炭との混焼など） ³² または最終製品用				エット燃料を使用したテスト飛行も実施済み ³³ 。
------------------------------------	--	------------------------------------	--	--	--	--------------------------------------

D: ガス化によるガス燃料、電力、熱

プロセス	原材料	効率性とプロセスの経済性。 Eff.=エネルギー生産/バイオマスエネルギー。要素のコストは US ドル（2005 年）/GJ で表示	化石燃料と対比した場合の温室効果ガス削減（%）	潜在的な技術進歩及び課題	2030 年までの生産コスト（US ドル（2005 年）/GJ）	産業発展
水素を燃料と電力にするためのガス化・合成ガスプロセス	リグノセルロース	Eff. 60%（燃料のみ）。液体の場合、GJ H ₂ 当たり 0.19GJ の電力が必要で推定値は 11～14US ドル/GJ（長期）。木質の場合、2.4US ドル/GJ で、568US ドル/kW _{th} の設備 ¹⁹	88 ³⁰	長期的には、水素と電力の併産（燃料効率 55%、電力 5%） ¹⁹ 。426US ドル/kW _{th} の設備 ¹⁹	4-5 ¹⁹ （長期） 6 ²⁰ -12 ¹² 5.5-7.7 ⁴¹	研究開発段階
燃料、熱、電力生産のためのガス化・メタン生成	リグノセルロース	Eff. 60%以下（乾燥原材料の場合、60%以上）。燃料と電力生産の組み合わせが可能	98 ²⁷	ガス精製とメタン生成触媒に関する研究開発・実証。含水原材料の湿式ガス化（wet gasification）が開発中	10.6-11.5 ⁴² 木質の場合、 2.8US ドル/GJ	研究開発・実証段階
嫌気性消化、ガス改質、液化	有機廃棄物、汚泥	Eff. ～20～30%。動物と農業の残渣混合物を含む		新たなメタゲノムツールを伴う技術の堅実性の改善、コスト低下	15-16 ²¹	
コージェネレーション用のガス化複合発電	リグノセルロース	地域暖房：電力と熱の比率は 0.8 対 1.2。発電の効率性は 40～45%で、全体の効率性は 85～90%。投資は 1,200US ドル/kW _{th} 。フィンランドの木質残渣 ²²	96 ³¹	ガス精製、効率的な発電の増加、コスト低下 30～300MW ⁴⁵ のガス化複合発電。資本コストは 1,150～2,300US ドル/kWe、割引率 10%で、プラントの耐用年数が 20 年、3US ドル/GJ。メタ分析の条件。	8-11 ¹¹ 13-19 ⁴⁵ または 4.5～6.9US セント/kWh	5～10MW の実証段階。コスト予想は、29～38US ドル/GJ または 10～13.5US セント/kWh ⁴⁵

注：省略形：*転換コスト（CC）には、初期建設コストと運転コストが含まれる。CR = 共同製品の収益。FC = 原材料のコスト。CC = 転換コスト。CC、CR、FCのコストはすべて US ドル（2005 年）/GJ で表示される。

システムの境界：多くの参照は、割引率 10%、プラント耐用年数 20 年をメタ分析の条件としている。¹⁷ 生産コストには、資本収益率が含まれる。²⁴ IRR（内部収益率）10%、税率 39%、プラント耐用年数 20 年。倍率残高逓減償却法（Double-declining-balance depreciation method）、100%持分、第 n 代プラント、バイオケミカル変換の場合、コストは FC: 6, CC*: 10.6, CR: 1.1 で、熱化学的変換の場合、コストは FC: 6.7, CC*: 10, CR: 2.5。³⁰ 内部収益率 12%、税率 39%、プラント耐用年数 25 年。修正加速減価償却法（Modified Accelerated Cost Recovery System depreciation method）（MACRS 償却法）、持分と債務の割合 65: 35、債務の利率 7%、n 倍のプラント、FC: 8.2, CC*: 16.9, CR: 2.6。³⁷ 先駆的な（この種としては初の）プラントの例：内部収益率 10%、税率 39%、プラント耐用年数 20 年、MACRS 償却法、100%持分、FC: 12.2～20.7, CC*: 27.3～38, CR: 0～6。³⁸ 割引率 7%、税率 39%、プラント耐用年数 20 年、MACRS

償却法、持分と債務の割合 45: 55、債務の利率 4.4%、第 n 代プラント、二酸化炭素回収・貯留ありの FC: 16、二酸化炭素回収・貯留なしの FC: 8.8、二酸化炭素回収・貯留ありの CC*: 14.7, 二酸化炭素回収・貯留なしの CC*: 15.7, 二酸化炭素回収・貯留ありの CR: 2、二酸化炭素回収・貯留なしの CR: 2.1。³⁹ 割引率 10%、プラント耐用年数 10 年。⁴⁰ 先駆的なプラントの例: 内部収益率 10%、税率 39%、プラント耐用年数 20 年、MACRS 償却法、100%持分、FC: 9.5, CC*: 24.5, CR: 1.1。⁴¹ 内部収益率 10%、プラント耐用年数 15 年

参照: ¹ Hamelinck et al. (2005a) ; ² Jeffries 2006) ; ³ Jeffries et al. (2007) ; ⁴ Balat et al. (2009) 及び IEA Bioenergy Pyrolysis Task (www.pyne.co.uk) 参照; ⁵ Sims et al. (2008) ; ⁶ Himmel et al. (2010) ; ⁷ Sannigrahi et al. (2010) ; ⁸ Bain (2007) ; ⁹ von Weyman (2007) ; ¹⁰ NRC (2009a) ; ¹¹ IEA Bioenergy (2007) ; ¹² Kinchin and Bain (2009) ; ¹³ McKeough et al 2005; ¹⁴ Wu et al. (2005) ; ¹⁵ Ezeji et al. (2007a) ; ¹⁶ Ezeji et al. (2007b) ; ¹⁷ Cascone (2008) ; ¹⁸ Tao and Aden (2009) ; ¹⁹ Hamelinck and Faaij (2006) ; ²⁰ Hoogwijk (2004) ; ²¹ Sustainable Transport Solutions (2006) ; ²² Helynen et al. (2002) ; ²³ Chisti (2007) ; ²⁴ Foust et al. (2009) ; ²⁵ Wang et al. (2010) ; ²⁶ Kalnes et al. (2009) ; ²⁷ Edwards et al. (2008) ; ²⁸ Huo et al. (2009) ; ²⁹ Wu et al. (2008) ; ³⁰ Laser et al. (2009) ; ³¹ Daugherty (2001) ; ³² Cremers (2009) (IEA の混焼データベース www.ieabcc.nl/database/cofiring.php を参照) ; ³³ IATA (2009) ; ³⁴ EPA (2010) ; ³⁵ Seabra et al. (2010) ; ³⁶ Macedo et al. (2008) ; ³⁷ Kazi et al. (2010) ; ³⁸ Larson et al. (2009) ; ³⁹ van Vliet et al. (2009) ; ⁴⁰ Swanson et al. (2010) ; ⁴¹ Hamelinck and Faaij (2002) ; ⁴² Mozaffarian et al. (2004) ; ⁴³ Hamelinck et al. (2004) ; ⁴⁴ van Zyl et al. (2007) ; ⁴⁵ Bauen et al. (2009a) ; ⁴⁶ Elliott (2008) ; ⁴⁷ Holmgren et al. (2008) ; ⁴⁸ Dutta et al. (2010) ; ⁴⁹ Phillips et al. (2007) 。

2.6.3.2 ガス化燃料

表 2.15.D では、リグノセルロース系バイオマスと様々な廃棄物に由来するガス化燃料の推定生産コストを比較している。

嫌気性消化。様々な廃棄物や、単独の農業残渣またはそれらの併用によるメタン生産は、様々な性能のレベルごとに世界各国で実施されている。推定の生産コストはその用途に大きく影響される。埋立地ガスの場合は 1~2US ドル（2005 年）/GJ、天然ガスまたは輸送用途の場合は 15~20US ドル（2005 年）/GJ、農場での消化槽／小型エンジンの場合は 50~60US ドル（2005 年）/GJ、配電用の発電の場合は 100~120US ドル（2005 年）/GJ である（表 2.6 及び 2.15）。個々の技術と統合化システムの信頼性、予測可能性、コストは、新型のメタゲノム⁷⁸、微生物形態、母集団構造を使用すれば減少するだろう（Cirne et al., 2007）。また、用途の拡大につながる天然ガス配管への注入が認められるためには、制御技術と自動化技術、ガスの精製と改質、品質基準が必要になる。メタン排出回避は、エネルギーと他の製品を同時に生産でき、気候に大きな便益を与える。

合成ガス由来のメタン（天然ガスの代替）、メタノールジメチルエーテル（DME）、水素は、5~18US ドル/GJ の範囲で生産が予測されるバイオマスガス化によるガス製品である。適切なガス精製とタール除去が行われた後、使用する触媒とリアクタの種類を設計することで（たとえば、ニッケルとマグネシウムの触媒で合成天然ガスができ、酸化銅と酸化亜鉛でメタノールとジメチルエーテルが選択的に出来る）、合成ガスは触媒合成リアクタで他の製品に転換される。様々な比率で多様な原材料を使用するために開発されるプロセスは、年間を通じて原材料を継続的に利用可能にさせるとともに気象や気候への脆弱性を低減させることで、投資リスクを低下出来る。天然ガス（及び石炭）からのメタノール合成は実用され、バイオマスからの合成も実証プラントや初の商用プラントが開発中である。水素生産は潜在的なコストは最も安い、輸送用途にはさらに発展的なインフラが必要である（Kirkels and Verborg, 2011）。ジメチルエーテルは、ガス化と改質による別の製品である（メタノールと一緒に生産される）。木質残渣や黒液から製造でき、輸送用燃料として追求されている。スウェーデンは、複数のバイオエネルギー製品のシナリオを検討したが、このなかには、ディーゼル燃料とガソリンをジメチルエーテルとメタノールで大幅に代替するシナリオが含まれていた（Gustavsson et al., 2007）。

有機物をエネルギー源として使用する**微生物燃料電池**が、直接発電用に開発中である。微生物学的に媒介された酸化反応を通じて、発電が行われる。この事実から、微生物燃料電池の全体的な転換効率は、他のバイオ燃料プロセスに比べ潜在的に高いことが示唆される（Rabaey and Verstraete, 2005）。微生物燃料電池は、液体廃棄物の処理にも適用しうる。Cusick et al. (2011) は、初期のパイロットワイナリーの排水処理について説明している。

2.6.3.3 二酸化炭素回収・貯留とバイオマスの併用。大気からの温室効果ガスの長期的な除去

バイオエネルギー技術を二酸化炭素回収・貯留と併用すれば（Obersteiner et al., 2001; Möllersten et al., 2003; Yamashita and Barreto, 2004; IPCC, 2005; Rhodes and Keith, 2008; Pacca and Moreira, 2009）、二酸化炭素回収・貯留の地質学的技術が開発、実証され、長期にわたり二酸化炭素貯留を維持出来ると検証できた場合、バイオマス関連の温室効果ガス緩和の役割が大幅に高まるだろう。これらの技術は、たとえば直接緩和するには割高な排出源の相殺を通じて、コスト効率の良い間接的な緩和策になるだろう（IPCC, 2005; Rhodes and Keith, 2008; Azar et al., 2010; Edenhofer et al., 2010; van Vuuren et al., 2010）。

アメリカにおけるトウモロコシ原料のエタノール製造で、炭酸飲料、瞬間冷凍肉、枯渇した油田での EOR（石油（原油）増進回収）のために二酸化炭素を供給しているが、二酸化炭素市場の商業的価値が低く、地域的に近接する必要性があるため、エタノールプラントの大多数は二酸化炭素を大気中に放出している。このため、糖類発酵からエタノールを生産する際の二酸化炭素回収は可能であり（Möllersten et al., 2003）、現在は炭素隔離に使用される場合がある。そして、これらの技術の実証は進んでいる⁷⁹。この技術の影響は、化石燃料エタノール代替と比べ、天然ガス使用のエタノールプラントのライフサイクル温室効果ガス排出を 39~70%削減すると予想されていた一方、エネルギー収支は 3.5%しか低下していない（様々な機能単位の性能については、表 2.13 参照）（（S&T）² Consultants, 2009）。

同様に、van Vliet et al. (2009) は、バイオマスガス化と二酸化炭素回収・貯留が産業規模で機能し、原材料が気候中立的に取得される場合、バイオマス液化油を 50%、石炭液化油を 50%の割合で使用し、二酸化炭素回収・貯留を併用すれば、気候変動の影響は純粋に中立化出来ると推定した（図 2.10）。おそらく、Larson et al. (2009) が示すように、（荒廃地などで）土壌の炭素含有量を増加させる作物を使用すれば、さらに除去が出来るだろう。

⁷⁸ たとえば www.jgi.doe.gov/sequencing/why/99203.html 参照。

⁷⁹ sequestration.org/report.htm 及び www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/database/index.html 参照。アメリカでは、Midwest Geological Sequestration Consortium を通じ、石炭を動力とする湿式粉碎のエタノールプラントが 3 年にわたり計画中である。実証段階の試験プロジェクトで、中央イリノイのマウントサイモンにある砂岩含塩層の地下約 2km に二酸化炭素 1Mt を注入する。監視、検証、計算が含まれ、特性評価の段階でもある（June 2010）。

2.6.3.4 バイオリファイナリー

バイオリファイナリーの概念は、液体燃料、化学物質、その他の製品 (Kamm et al., 2006) などの幅広い製品を生産出来る石油精製と類似している。現在の第一世代のバイオリファイナリーでさえ、多様な製品を製造しており (表 2.7 参照)、これらは食料や飼料の生産と関連している。たとえば、サトウキビエタノールのバイオリファイナリーでは、複数のエネルギー製品を生産している (EPE, 2008, 2010)。持続可能なリグノセルロース系バイオリファイナリーも、エネルギー・フローと原料のフローの統合を強化出来る (Cherubini and Strohmman 2010 など)。これらのバイオリファイナリーは、バイオマスと資源 (水と栄養物を含む) の使用を一般に最適化しつつ、温室効果ガス排出を緩和する (Ragauskas et al., 2006)。世界経済フォーラム (King et al., 2010) では、バイオリファイナリーの収益ポテンシャルは、バリューチェーン全体に沿った既存の政策を伴えば大きくなるだろうとし、2020 年までに 2,950 億 US ドル (2005 年) に達し得ると予測している⁸⁰。

2.6.3.5 バイオベースの製品

バイオベースの製品は、バイオマス由来の非食料の製品と定義される。この用語は一般に、バイオベースのプラスチック、潤滑油、界面活性剤、溶媒、化学的成分などの新たな非食料の製品と原料に使用される。プラスチックは石油化学製品の組み合わせ全体の 73% を占め、合成繊維、溶媒、洗浄剤、合成ゴムがそれに次ぐ (2007 年のデータ; Gielen et al., 2008)。このため、バイオベースの製品は、これらの製品カテゴリ、とりわけプラスチックや繊維のカテゴリで極めて重要な役割を果たすと予測出来る。

バイオマスからポリマーや他の有機化学原料を生産する方法は、主に 4 つある。(1) 自然発生した複数のポリマーを直接使用する。通常、いくらかの熱処理、化学変換または混合で改質する。(2) 熱化学的転換 (熱分解やガス化など) し、その後合成したり、さらに加工したりする。(3) バイオマス由来の糖類や他の中間品の発酵 (大半の大量生産品) または酵素転換 (主に特殊ケミカルやファインケミカル)。(4) 遺伝子組み換えの農作物 (ポテトやススキなど) におけるポリマーや先駆体のバイオ生産。

近年拡大するバイオベースのプラスチックの生産は世界的に成長し、2007 年には 0.4Mt 以下だったが、2020 年には 3.45Mt に成長すると推測される (Shen et al., 2009)。コスト効率の良いバイオベースの製品は、単に再生可能というには留まらない従来の原料に比べ優れた性質があり、市場に浸透すると予測されている (King et al., 2010)。合成有機原料生産の場合、シナリオ研究では、0.15ha/t の生産性で世界規模の面積が 7,500 万ヘクタールであれば、付加価値製品の 15~30EJ に相当する供給を行えるだろうとしている (Patel et al., 2006)。

開発が初期段階である点を踏まえると、温室効果ガス軽減コストは大幅に異なる。現在の軽減コストは、ポリ乳酸の場合、100~200US ドル (2005 年) /t の二酸化炭素軽減と推定される。バイオベースのポリエチレンの場合、サトウキビ系エタノールから生産される場合、現在の軽減コストは 100US ドル (2005 年) /CO₂ の規模かそれ以下だろう。すべてのプロセスについて言えることだが、化学的、バイオケミカルの転換とバイオエネルギーの複合生産で技術的な進歩があれば、軽減コストは中期的に 50~100US ドル (2005 年) /CO₂ 低下する可能性が高い (Patel et al., 2006)。

2.6.4 統合

リグノセルロース系原材料は、以下の理由から非常に有望である。その理由は、1) 食料生産とは直接競合しない。2) エネルギー (またはエネルギー専用商品) を目的とした品質改質が可能であり、土地面積当たりの生産を向上出来る。また、非常に大きな製品市場が見込まれる。3) 作物生産や他のシステムから残渣として収穫出来るため、土地利用の効率性が高まる。4) 様々なその他の産業で廃棄物管理運用を統合出来るため、地域レベルで産業の共生関係が見込める。

バイオマスを燃料、電力、熱、多様な製品に転換していくうえで、その駆動要因と課題は、経済成長と経済開発、環境意識、社会的ニーズ、エネルギー安全保障と気候安全保障である。現在の政策のもとでは、バリューチェーン全体に沿った収益ポテンシャルの推定値は 2020 年に 2,950 億 US ドル (2005 年) 規模になるだろう (King et al., 2010)。

作物収穫の残渣や植林の残渣は、2007~2009 年と比較した場合、2030~2050 年までに平均で約 20% 増加すると予測される。多年生植物または短期輪作の雑木林に由来するバイオエネルギーの生産コストは、現在の 3~16US ドル (2005 年) /GJ に対し、2020 年までに 2.5US ドル (2005 年) /GJ 以下 (WWI, 2006) に低下すると推測される。

⁸⁰ バリューチェーンの様々な部分の事業ポテンシャルについて、その近似値 (2020 年までに 10 億 US ドル (2005 年)) は以下のとおり推定されている。農業投入 (15)、バイオマス生産 (89)、バイオマス取引 (30)、バイオリファイニング投入 (10)、バイオリファイニング燃料 (80)、バイオリファイニング化学薬品及び製品 (6)、バイオマスの発電と熱 (65)。

特定の場所で利用可能なコストと量の予測した供給曲線が必要になる。また、この供給曲線は、図 2.5 の例に示したように、競合使用も考慮するべきである。たとえば、EU とアメリカのリグノセルロース供給曲線では、2025～2030 年までに合理的な配送コストで 20EJ 以上となることが示されている。

新世代の藻類原材料は、ディーゼル、ジェット燃料あるいは太陽光と二酸化炭素や水からの高付加価値製品となる、藻類の脂質を生産する。藻類は汽水、栽培に適さない土地、及び産業排水でもで成長出来るため、土地利用の影響を緩和する戦略が展開可能である。現在の生産コストの推定は非常に不確かで、オープンポンドと光リアクタで 30～140US ドル（2005 年）/GJ である。

微生物の多くは、マイクロサイズの工場として、特定の製品、燃料、または原料を生産し、化石燃料源に対する社会の依存を低下出来るだろう。

技術的進歩は目覚ましいものがあるが、リグノセルロース系バイオマスにはより複雑なプロセスが必要であり、新たな段階を多数統合することから、実証プラント、初期のプラント、初期の商用段階において、「Valley of Death」における開発をもたらす時間や支援が必要となる。幅広い原料とプロセスの変動性によるコスト予測は、非常に原材料コストの影響を受けやすく、10～30US ドル（2005 年）/GJ の間で変動している。アメリカ国立アカデミーは、2035 年までにバイオケミカル経路の運営コストは 40%削減され、12～15US ドル（2005 年）/GJ まで下がると予測している。

多くの国で展開されるガス化複合発電のパイロットプラントについては、コストが 13～19US ドル（2005 年）/GJ（4.6～6.9US セント（2005 年）/kWh、原材料コストは 3US ドル（2005 年）/GJ）である。電力供給に加え、合成ガスも幅広い範囲の燃料（メタノール、エタノール、ブタノール、及び合成ディーゼル）供給に使用出来る。あるいは、電力と燃料の複合的な方法にも使用することが出来る。メタノール、エタノール、ブタノール、合成ディーゼルの推定コストは、12～25US ドル（2005 年）/GJ である。様々な廃棄物に由来するバイオガスの生産と、バイオメタンガスへの改質は、既に様々な用途の小規模な市場に浸透しており、スウェーデンの輸送、北ヨーロッパ諸国やヨーロッパ諸国の熱や電力などが事例として挙げられる。鍵となる要因は、廃棄物と農業残渣の組み合わせであり、改質の向上とさらなるコスト削減が今も必要である。

熱分解や水熱油は低コストで輸送可能な油であり、熱または熱電供給用途に使用される。これは、単独の施設または石油化学リファイナリーと併用して改質する原材料になるだろう。熱分解油の推定生産コストは約 7US ドル（2005 年）/GJ と低く、発電、熱、化学製品生産に選択肢を提供する。熱分解油の安定化とその後の改質には、コスト削減の余地があり、活発な研究が行われている。

多くのバイオエネルギーとバイオ燃料変換経路は、二酸化炭素回収・貯留を用いれば、排出量削減・吸収の大きな可能性がある。二酸化炭素回収・貯留技術がさらに開発が進み検証されているなか、発酵による濃縮二酸化炭素流や、電力用のガス化複合発電、フィッシャー・トロプシュ・プロセスを通じたバイオマス液化油や石炭液化油を二酸化炭素回収・貯留と併用することにより、向こう 35 年以内に、炭素中立的な燃料、一部のケースでは炭素排出がマイナスの燃料を達成する機会が生ずる。この目標の達成は、バイオマス選択の幅を適切に設計したシステム、原材料の供給システム、二次エネルギーキャリアへの転換技術、既存及び将来のエネルギーシステムへのこのキャリアの統合により、円滑に進められる。

2.7 コストの傾向⁸¹

2.7.1 決定要因

バイオマスからエネルギー（または原料）を生産するコストの決定は複雑である。それは、原材料の生産・供給コストの地域差だけでなく、バイオマス転換技術の組み合わせの展開や可能性も幅広い差があるためである。バイオエネルギー生産のコストに影響を与える主要な要因は以下のとおりである。

- ・ 作物生産の場合: 土地と労働力のコスト、作物の収量、多様な投入（肥料など）の価格、水供給、管理システム（たとえば、収穫の機械化または人力による収穫）（2.3.1 及び 2.6.1 節; 地域特有の例として Wiskerke et al., 2010 参照）。
- ・ 転換施設へのバイオマス配送の場合: バイオマス資源の空間分布、輸送距離、輸送モード、サプライチェーンにおける前処理技術の導入（及びタイミング）。サプライチェーンの範囲は、幅広いオンサイト利用（薪または製糖業におけるバガス使用、または他の転換施設におけるバイオマス残渣など）からペレット

⁸¹ 本節のコストに関連する議論は、二次エネルギーキャリアを生産する民間投資家の見方に大きく限定される。第 1 章、第 8～11 章で、コスト上の課題に関する補足的な見方を提示し、その対象は統合コスト、外部コストと便益、経済全体のコスト及び政策コストなどである。

やエタノールなど液体燃料の出荷に伴う国際的なサプライチェーン（2.3.2 及び 2.6.2 節）に及ぶ。電力の地域配電については Dornburg and Faaij (2001)、国際的なサプライチェーンについては Hamelinck et al. (2005b) を参照。

- ・ エネルギーキャリア（またはバイオ原材料）への最終転換の場合：転換の規模、財政的メカニズム、負荷率、副産物の生産と価値、（生産施設における）最終的な転換コスト。これらの主要な要因は技術と場所而异する。転換プロセスで使用するエネルギーキャリアの種類は、気候変動緩和のポテンシャルに影響する（Wang et al., 2011）。

Hoogwijk et al. (2009) の分析では、様々な IPCC SRES シナリオ（IPCC, 2000）の（多年生の作付けシステムに注目して）バイオマス生産の潜在的コストについて世界規模の長期的見解を示している。これらのシナリオについては 2.8.4 及び 2.8.5 節で取り上げている（表 2.16 及び図 2.17 参照）。地代は、世界の大半の地域ではコスト要因としては小さいが、基礎となるシナリオにおける土地利用の集約度に依存する。資本コストは、機械化の度合いが様々なため異なる。これらの分析に基づくと、多年生植物の作付けシステムに基づく長期の技術ポテンシャルのかかなりの部分（100～300EJ）で、そのコストは約 2.3US ドル（2005 年）/GJ になるだろう。このコスト範囲はシナリオの想定条件に左右され、図 10.23（Hoogwijk et al., 2009; 短期的な生産に関しては、図 2.5 に示すコストの供給曲線とポテンシャルも参照）に示されている。一年生と多年生双方のエネルギー作物生産のコストについては、2.3.1 及び 2.6.1 節で詳述する。

バイオマス供給は、あらゆる商品と同様、複雑な価格メカニズムの対象になる。バイオマス供給は化石燃料価格（OECD-FAO, 2008; Schmidhuber, 2008; Tyner and Taheripour, 2008）、農産品と林産品の市場の影響を強く受ける。理想的な状況では、需給は均衡し、価格レベルは実際の生産コストと供給コストを示す優れた評価基準になる（土地利用変化に関する議論を示した 2.5.3 節参照）。現在は、トウモロコシ、菜種、パームオイル、サトウキビといった最も重要なバイオ燃料原材料のコストを決定しているのは、市場のダイナミクスである。木材ペレットは、近代的なバイオエネルギー生産に関して国際的に取引される別の重要な原材料であるが、価格は石油価格の影響を強く受ける。これは、木材ペレットは部分的には暖房用の灯油を代替していること、混焼を対象とした固定価格買取制度などのグリーン発電を刺激する支援策が、その理由として挙げられる（2.4 節; Junginger et al., 2008）。それに加え、固体バイオ燃料と液体バイオ燃料の価格は、国の設定で決定され、特定の政策と代替的な用途があるだろうバイオマス残渣の市場価値は、国の政策に影響を受けるその他の市場の価格メカニズムで決まることも多い（タイの特殊な例については Junginger et al., 2001 を参照）。

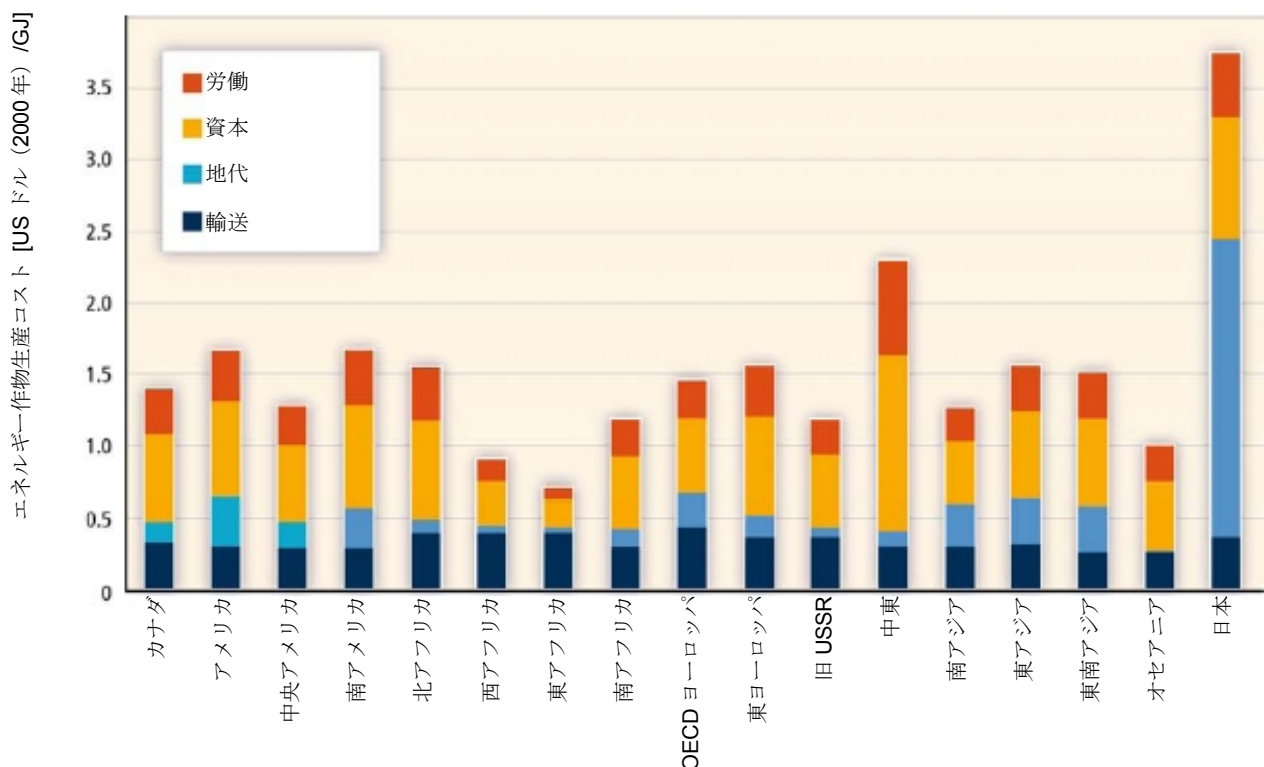


図 2.17: 地域メッシュ方式によるエネルギー作物の生産コスト内訳。コストは、2050 年の SRES A1 シナリオ（IPCC, 2000）の各地域内の最低生産コストを用いた（US ドル（2005 年）ではなく US ドル（2000 年）を使用）（Hoogwijk et al., 2009; Elsevier B.V.の許可を得て複製）。

表 2.16: SRES で極端な土地利用を示した 2 シナリオ (A1 及び A2) を対象に、2050 年、放棄農地とその他の土地におけるエネルギー作物の技術ポテンシャルを様々な削減コストで地域別に推定 (US ドル (2005 年) /GJ 収穫されたバイオマス。地域の輸送を含む) (Hoogwijk et al., 2009; Elsevier B.V.の許可を得て複製)。

地域	A1: 作付け密度が高く、国際取引も最大の場合 (2050 年)			A2: 作付け密度が低く、国際取引が最低で、技術開発も低調な場合 (2050 年)		
	<1.15 US ドル/GJ	<2.3 US ドル/GJ	<4.6 US ドル/GJ	<1.15 US ドル/GJ	<2.3 US ドル/GJ	<4.6 US ドル/GJ
カナダ	0	11.4	14.3	0.0	7.9	9.4
アメリカ	0	17.8	34.0	0.0	6.9	18.7
中央アメリカ	0	7.0	13.0	0.0	2.0	2.9
南アメリカ	0	11.7	73.5	0.0	5.3	14.8
北アフリカ	0	0.9	2.0	0.0	0.7	1.3
西アフリカ	6.6	26.4	28.5	7.9	14.6	15.5
東アフリカ	8.1	23.8	24.4	3.6	6.2	6.4
南アフリカ	0	12.5	16.6	0.1	0.3	0.7
西ヨーロッパ	0	3.0	11.5	0.0	5.6	12.5
東ヨーロッパ	0	6.8	8.9	0.0	6.2	6.3
旧 USSR	0	78.6	84.9	0.8	41.9	46.6
中東	0	0.1	3.0	0.0	0.0	1.3
南アジア	0.1	12.1	15.3	0.6	8.2	9.8
東アジア	0	16.3	63.6	0.0	0.0	5.8
東南アジア	0	8.8	9.7	0.0	6.9	7.0
オセアニア	0.7	33.4	35.2	1.6	16.6	18.0
日本	0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
世界	15.5	271	438	14.6	129	177

2.7.1.1 特定の商用システムに関する電力、熱、燃料の最近の均等化原価

先述の要因により、世界規模で有効なバイオエネルギーの一般的なコスト情報を作成するのは明らかに難しい。それにもかかわらず、本節では、特定の商用バイオエネルギー・システムの典型的な最近の均等化発電原価 (LCOE)、熱の均等化原価 (LCOH)、燃料の均等化原価 (LCOF) の推定値を提示している。これらのシステムの一部については、2.3.4 節で技術的な詳細を取り上げている⁸²。均等化原価を計算する方法論は Annex II で説明し、これらの数字を算出する際に用いたデータと前提は Annex III で提示する。これらの前提は、以前にまとめられた文献から部分的に引用されている。

商用可能なバイオエネルギーの特定の選択肢に関する均等化発電原価、熱の均等化原価、燃料の均等化原価の結果は、最近のコストに基づいており、図 2.18 にまとめられ、以下で論じられる。

均等化発電原価を計算する際、原材料コストの標準的な範囲は (高位発熱量 (HHV) に基づき) 1.25~5US ドル (2005 年) /GJ と想定された。発電と熱の双方が行われるコジェネレーションプラントの均等化発電原価の計算の際、熱は副産物として計算され、収益は熱の想定品質と用途に左右された。大規模なコジェネレーションプラントでは、プロセス熱のために蒸気が生産され、この副産物の収益は 5US ドル (2005 年) /GJ に設定された。

他方、小規模なコジェネレーションプラントでは、収益は温水のコストに従い効率的に設定され、13US ドル (2005 年) /GJ に設定された (たとえば北ヨーロッパ諸国やヨーロッパに適用可能)。

⁸² 均等化発電原価は耐用年数内でのエネルギー生産システムのコストを指す。収支を耐用年数内で考えたとき、特定のエネルギー源を用いて発電を行う必要がある場合の単位あたり価格で計算される。バリューチェーンの上流で発生するすべての民間コストを含むが、最終消費者への配送、統合コスト、環境その他の外部コストを含まない。補助金や税控除なども含まない。

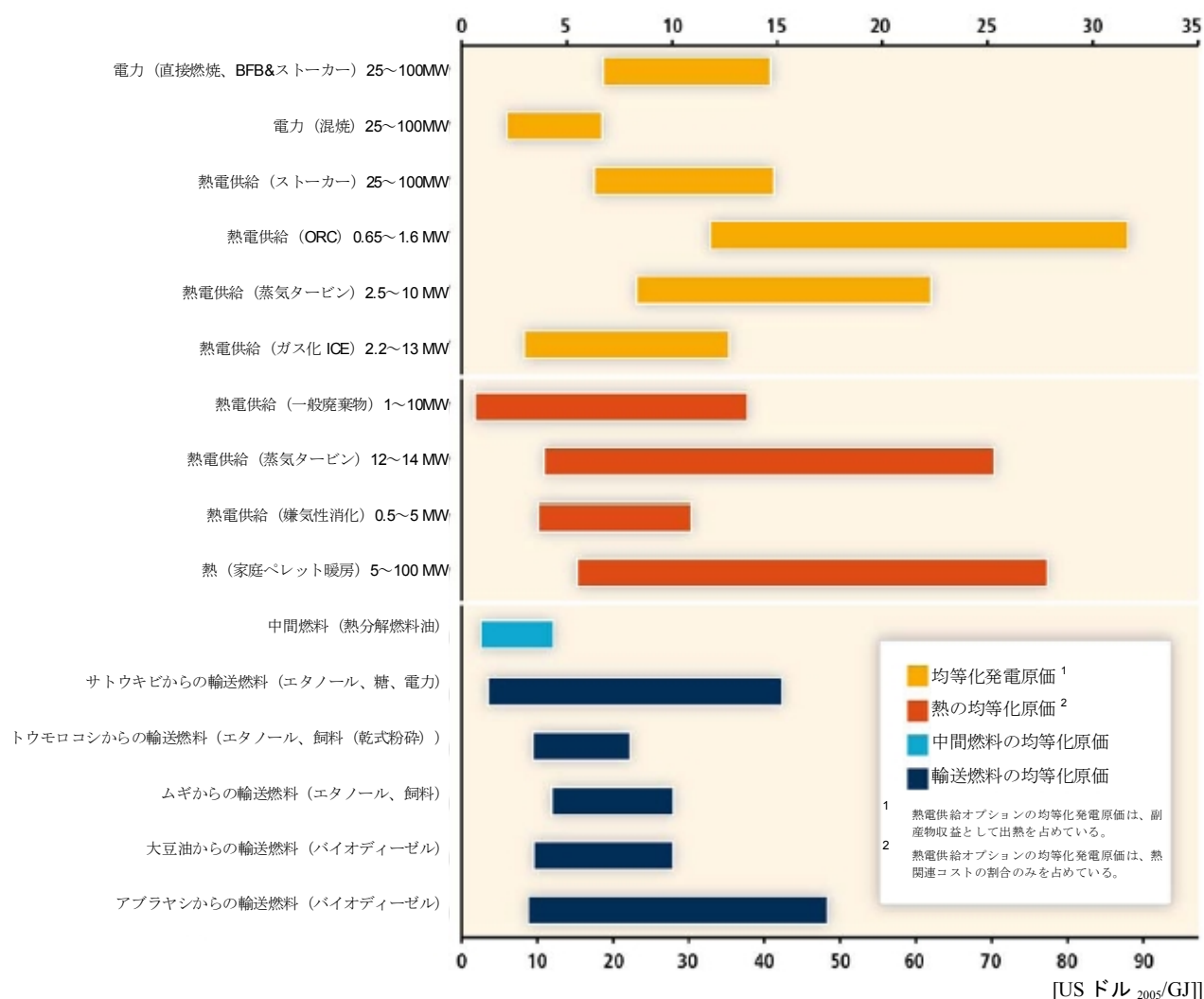


図 2.18: 割引率 7%の商業化されているバイオエネルギー・システムからのエネルギーのサービスの典型的な最近の均等化コスト。原材料コストは技術間で異なる。その他の割引率（3%及び 10%）が適用される場合の均等化コストについては、Annex III と 10.5 節を参照。バイオ燃料の場合、均等化発電原価及び熱の均等化原価はデータが利用可能な技術の主要ユーザ市場にのみ与えられるが、燃料の均等化原価の幅は様々な国における生産を表している。そして、計算に用いられる基礎となるコストと性能の想定は、Annex III に概要を示す。計算は高位発熱量に基づいている。

注: BFB: バブリング流動層、ORC: 有機ランキンサイクル、ICE: 内燃機関

暖房システムの熱の均等化原価は図 2.18 の水色の棒で示されているが、利用可能な文献がより限定的なため、確かさには欠ける。暖房用途の場合、投資コストの想定は基本的に、主に暖房を使用するヨーロッパと北ヨーロッパの諸国の文献を引用している（図 2.8 参照）。原材料コストの範囲も同一の文献から引用したため、世界の他地域を代表しない場合がある。原材料コストは、一般廃棄物と低コストの残渣の場合 0～3.0US ドル（2005 年）/GJ、嫌気性消化の場合 2.5～3.7US ドル（2005 年）/GJ、蒸気タービンの場合 3.7～6.2US ドル（2005 年）/GJ、ペレットの場合が 10～20US ドル（2005 年）/GJ である。このため、熱の均等化原価の数字はヨーロッパのシステムをほぼ代表していると言える。

燃料の均等化原価の推定値は、複数の国々におけるバイオ燃料生産の技術経済評価から引用した（Bain, 2007）⁸³。基礎となる原材料コストの想定は、各地域の最近の最小値と最大値を示し、Annex III に掲載されている。バイオ燃料生産のすべての生産経路は、様々な副産物の収益を時として考慮している。この収益は、燃料の均等化原価を計算するため、支出から差し引かれた。サトウキビ由来のエタノールの場合、たとえば糖類の収益を 4.3US ドル（2005 年）/GJ_{feed} とすると、糖類の市場価格によってこの数値は異なるが、最大で 5.6US ドル（2005 年）/GJ_{feed} に上昇す

⁸³ この研究は、南北アメリカ、中国、インドの原材料供給曲線の経済的な事前特性評価（preliminary economic characterization）に沿って行われた（Kline et al., 2007）。この曲線については 2.2.3 節で説明されている。これらの計算に関連するバイオマス市場のポテンシャル（Alfstad, 2008）は図 2.5(c) に示される（これらの国々の事例で、高成長が 45EJ、ベースラインが 25EJ、低成長が 8EJ である）。

る可能性がある。しかしながら、燃料の均等化原価を計算する場合、平均的な副産物の収入が想定された。エタノールや糖類と同様（及び将来のその他のバイオマテリアルも潜在的に）、第三の副産物は電力であり、収益も燃料の均等化原価計算の際に差し引かれると想定された。同様の方法は、他のバイオ燃料の生産経路にも使用された（Annex III 参照）。ただし、この単純な例は、バイオ燃料生産のコスト評価の複雑性を物語っている。

最終的に、高密度のエネルギーキャリアである熱分解油の均等化原価も、中間燃料として評価された。熱分解油は既に暖房やコジェネレーションの用途に使用され、定置電力や輸送用途にも投資されているためである（2.3.3.2, 2.6.2 及び 2.6.3.1 節参照）。

図 2.18 は、原材料コストだけでなく、投資コスト、効率性、プラント耐用年数その他の要因のばらつきにより決定された、幅広い数値を示している。ただし、原材料コストは、地域で大きく異なる上、多くのバイオエネルギー用途を対象にした均等化原価全体のかなりの部分を占める。本報告書で検討された様々な原材料コストのレベルが発電技術の均等化原価に与える影響は、図 2.19 により明確に示されている。図では、投資コストと設備利用率も示されており⁸⁴、同様の影響は図 2.20 のバイオ燃料の均等化原価（燃料の均等化原価）にも現れている（暖房システムの数字は示されていないが、同様の関係が存在する）。コストデータ作成に使用した参照は、図の脚注に示した。

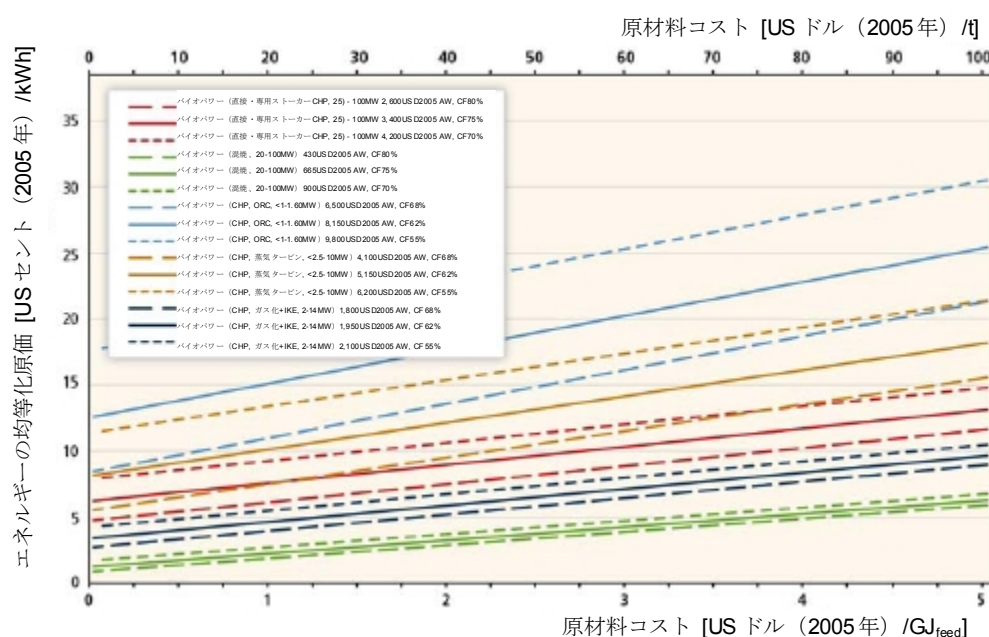


図 2.19: 様々な投資コストとプラントの設備利用率（CF）の原材料コストに対する均等化発電原価の感度。均等化発電原価は割引率 7%、中程度の運転保守（O&M）、耐用年数の範囲も中程度である（Annex III 参照）。計算は高位発熱量に基づく。

参照: DeMeo and Galdo (1997) ; Bain et al. (2003) ; EIA (2009) ; Obernberger and Thek (2004) ; Sims (2007) ; McGowin (2008) ; Obernberger et al. (2008) ; EIA (2010b) ; Rauch (2010) ; Skjoldborg (2010) ; Bain (2011) ; OANDA (2011) 。

⁸⁴ 大規模な電力のみとコジェネレーション技術は図 2.18 にまとめられているが、図 2.19 にも個別表示されている。

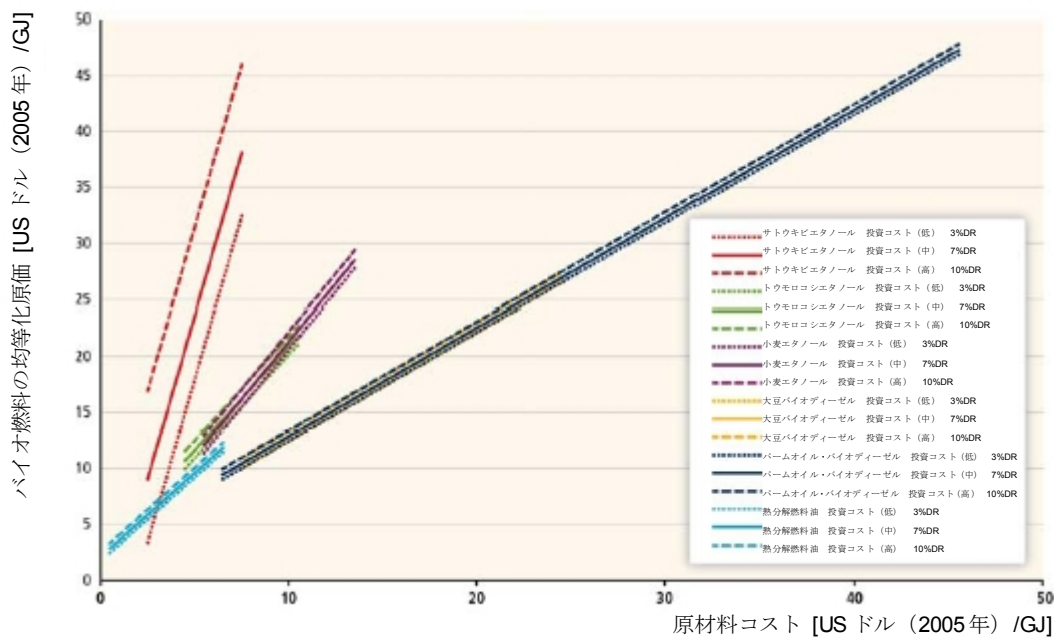


図 2.20: 複数の国家における様々な割引率とその他の中程度のコスト要素の原材料コストに対する燃料の均等化原価の感度 (Annex III 参照)。計算は高位発熱量に基づく。

参照: Delta-T Corporation (1997) ; Sheehan et al. (1998b) ; McAloon et al. (2000) ; Rosillo-Calle et al. (2000) ; McDonald and Schrattenholzer (2001) ; Ibsen et al. (2005) ; Jechura (2005) ; Bohlmann (2006) ; CBOT (2006) ; Haas et al. (2006) ; Oliverio (2006) ; Oliverio and Ribeiro (2006) ; Ringer et al. (2006) ; Shapouri and Salassi (2006) ; USDA (2006) ; Bain (2007) ; Kline et al. (2007) ; USDA (2007) ; Alfstad (2008) ; RFA (2011) ; University of Illinois (2011) 。

2.7.2 バイオエネルギー・システムの技術的学習

バイオエネルギー・システムのコスト傾向と技術的学習は、太陽エネルギーや風力エネルギーの技術に比べ、詳しく説明されているわけではない。しかしながら、最近の文献では、様々なバイオエネルギー・システムの学習曲線により詳しい洞察が示されている。表 2.17 及び図 2.21 では、学習を定量化した多数の分析についてまとめている。これらは、3 つの商用バイオマスシステムを対象に、学習率 (LR) と学習 (または経験) 曲線で表わされる。

1. サトウキビ系エタノールの生産 (van den Wall Bake et al., 2009)
2. トウモロコシ系エタノールの生産 (Hettinga et al., 2009)
3. 北ヨーロッパ諸国における木質燃料チップ及びコジェネレーション (Junginger et al., 2005 及びその他の多数の出典) 。

学習率とは、累積生産量の各倍増に関連する単位コストの率である (より詳細な議論については 10.2.5 節参照) 。たとえば、累積生産量の倍増が 1 回見られた後の学習率 20% は、単位コストはもとのコストに比べ 20% 低下すると示唆される。「単位」の定義は研究によって異なる。

表 2.17: 累積生産量の倍増当たりのコスト（または価格）の削減（％）として表したバイオエネルギー・システム及び最終エネルギーキャリアの主要な要素の経験曲線。

学習システム	LR (%)	期間	地域	N	R ²
原材料生産					
サトウキビ（トンごとのサトウキビ） ¹	32±1	1975～2005	ブラジル	2.9	0.81
トウモロコシ（トンごとのトウモロコシ） ²	45±1.5	1975～2005	アメリカ	1.6	0.87
物流チェーン					
森林木材チップ（スウェーデン） ³	12～15	1975～2003	スウェーデン・フィンランド	9	0.87～0.93
投資及び運用・保守コスト					
熱電供給工場 ³	19～25	1983～2002	スウェーデン	2.3	0.17～0.18
バイオガス工場 ⁴	12	1984～1998		6	0.69
サトウキビからのエタノール生産 ¹	19±0.5	1975～2003	ブラジル	4.6	0.80
トウモロコシからのエタノール生産（運用・保守コストのみ） ²	13±0.15	1983～2005	アメリカ	6.4	0.88
最終エネルギーキャリア					
サトウキビからのエタノール ⁵	7	1970～1985	ブラジル		
	29	1985～2002		～6.1	該当なし
サトウキビからのエタノール ¹	20±0.5	1975～2003	ブラジル	4.6	0.84
トウモロコシからのエタノール ²	18±0.2	1983～2005	アメリカ	7.2	0.96
バイオマスからのエタノール CHP ⁴	8-9	1990～2002	スウェーデン	～9	0.85～0.88
バイオマスからの電力 ⁶	15	不明	OECD	該当なし	該当なし
バイオガス ⁴	0-15	1984～2001	デンマーク	～10	0.97

注: 省略形: LR: 学習率, N: 累積生産量の倍増の回数, R²: 統計データの相関係数

参照: ¹van den Wall Bake et al. (2009) ; ²Hettinga et al. (2009) ; ³Junginger et al. (2005) ; ⁴Junginger et al. (2006) ; ⁵Goldemberg et al. (2004) ; ⁶IEA (2000) 。

学習曲線の研究には精度の制約がある（Junginger et al., 2008; 10.5.3 節も参照）。しかし、コスト削減を牽引する一般的な要因の多数は特定可能である。糖類作物（サトウキビ）やでんぷん作物（トウモロコシ）など、エタノール生産用のバイオマス原材料の場合、収穫量の増加がコスト削減の原動力になっている。

- ・ サトウキビの場合、コスト削減はスクロース含有量の高い変種を開発しエタノール増量に結びつける研究開発の取り組みの結果である。再作付けの前に（新芽を用いた）再生作による収穫回数を増加させ、人力による収穫の効率性や輸送用の大型トラックの使用度を高めている。より最近では、サトウキビは人力による収穫の機械化が進み、発電用の残渣量は増加している（van den Wall Bake et al., 2009; Seabra et al., 2010）。
- ・ トウモロコシ生産の場合、2005 年まで資本、土地、肥料のコストで最大の削減が見られた。コスト削減の追加的な駆動要因として、組合を通じた栽培規模の拡大により、生産量の増加、効率的な原材料収集、政府の融資を通じた投資リスクの低下、効率的な天然ガス火力のエタノールプラントが実現できたことが挙げられる。この種類のプラントは、アメリカではエタノール生産のほぼ 90%を賄っている（Hettinga et al., 2009）。トウモロコシのハイブリッド遺伝子組み換えにより、病害虫への抵抗性が向上し、無耕農業の慣行の適用が拡大したこと、水質が改善し、高い収量が実現した（NRC, 2010）。これらの要因の影響を定量化するのは難しいが、（植物の変種改良の実現に向けた）研究開発の取り組み、技術向上、実践による学習（より効率的な収穫など）が重要な役割を果たしたことは明確と思われる。

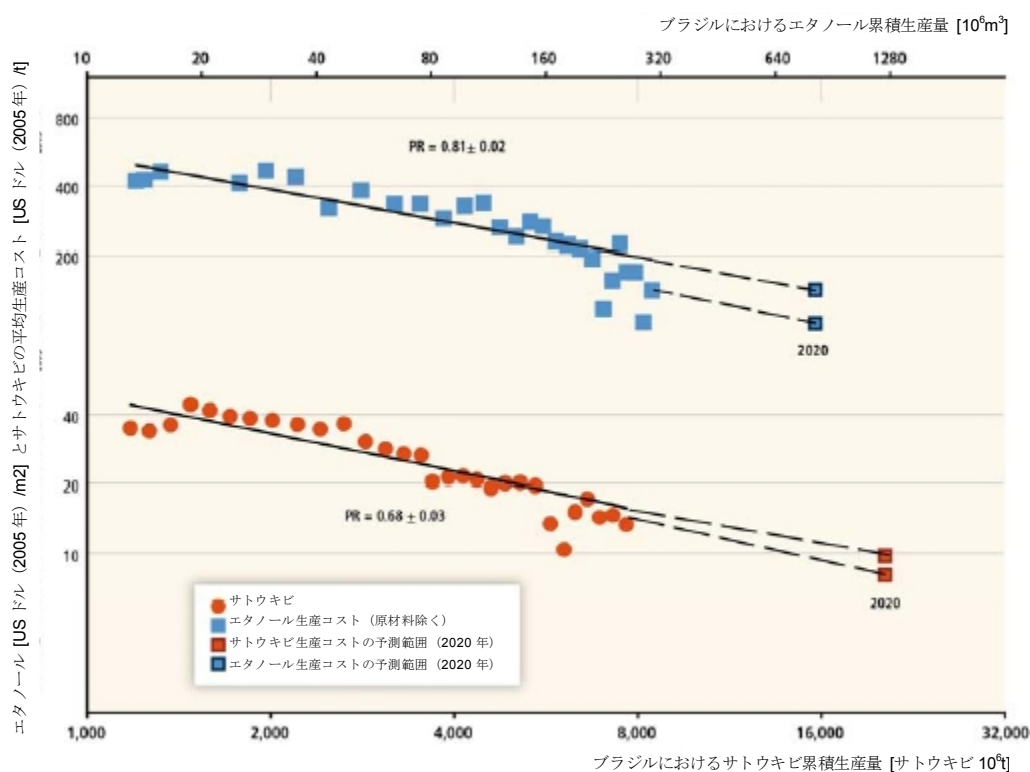


図 2.21: ブラジルにおけるサトウキビ及びエタノールの生産コスト学習曲線。1975～2005 年の間と 2020 年（推定）を US ドル（2005 年）で示した。進捗率（PR=1-学習率）はデータへの最良適合により取得している（van den Wall Bake et al., 2009; Elsevier B.V.の許可を得て複製）。

エタノール生産に関しては、エタノールプラントの規模拡大を受け、サトウキビ、トウモロコシ双方の製造コストが主に減少した。

- ・ サトウキビ生産プロセスのコスト内訳からは、1975～2005 年にかけてすべてのサブプロセスで約 60%のコストが削減されたことが示されている。エタノールの生産コスト（原材料コストを除く）は 1975～2005 年の間に 3 分の 1 減少した（実質で、つまりインフレ加味）。投資及び運転保守コストは、主に規模の経済を受け、減少した。管理費や税などの他の固定コストは大幅に減少していないが、コスト削減は自動的な管理システムで説明がつく。減少したコストは主に、規模の拡大と負荷率の増加によって説明出来る（van den Wall Bake et al., 2009）。
- ・ トウモロコシ由来のエタノールの場合、転換コスト（トウモロコシのコストは除く）は、1980 年代前半の 240US ドル（2005 年）/m³ から 2005 年には 130US ドル（2005 年）/m³ と、45%減少した。エネルギー、労働力、酵素のコストが特にコストの全体的な削減に貢献した。これらの減少の追加的な駆動要因としては、エタノール収量の増加、自動制御技術の導入による必要なエネルギーと労働力の減少、平均的な乾燥粉碎工場の規模拡大が挙げられる（Hettinga et al., 2009）。

2.7.3 コスト削減ポテンシャルの将来的なシナリオ

2.7.3.1 商用バイオエネルギー・システムの将来的なコスト傾向

サトウキビやトウモロコシからのエタノール生産の場合、経験曲線の直接分析に基づく将来の生産コストのシナリオが文献で示されている。

ブラジルのサトウキビ由来エタノールの場合（van den Wall Bake et al., 2009）、2005 年の生産コスト総額は 340US ドル（2005 年）/m³（16US ドル（2005 年）/GJ）だった。図 2.21 のコスト要素（原材料及びエタノール。原材料コストは除く）に対する経験曲線に基づく、エタノール生産コスト総額は 2020 年は 200～260US ドル（2005 年）/m³（9.2～12.2US ドル（2005 年）/GJ）だった。ブラジルの場合、これらのコストは表 2.7 で、現在の生産コスト推定値（14.8US ドル（2005 年）/GJ）、2020 年の予測（9～10US ドル（2005 年）/GJ）と分かりやすく比較されている。エタノールの生産コスト（原材料除く）は 2005 年に 139～183US ドル（2005 年）/m³（6.5～8.6US ドル（2005 年）/GJ）で、サトウキビ 1 トン当たりの含水エタノールの定数を 82m³と想定した場合、2020 年までに 113US ドル

ル (2005 年) /m³ (6.6US ドル (2005 年) /GJ) に達するだろう。

アメリカのトウモロコシ由来エタノールの場合 (Hettinga et al., 2009)、2020 年までのトウモロコシ生産とエタノール加工のコストはそれぞれ、75US ドル (2005 年) /t、60~77US ドル (2005 年) /m³と推測される。エタノールの生産コスト総額は 2020 年までに、現在の 310US ドル (2005 年) /m³から 248US ドル (2005 年) /m³ (14.7~11.7US ドル (2005 年) /GJ) に減少するだろう。この推定値は、投資コストと将来のトウモロコシ価格の影響が除かれている。EPA (2010) Regulatory Impact Analysis of the Renewable Fuel Standard 2 では、現在のトウモロコシエタノール産業を詳細にモデル化し、表 2.7 に示した原材料とプロセスの改善、副産物収入の予想を考慮して、生産コスト総額が 2022 年までに 17.5~16US ドル (2005 年) /GJ 減少すると予測した。

傾向を確認し、2020 年に向けた予測を支持しつつ、表 2.13 で環境的な性能を対象に重要な指標を示した。バイオマス原材料 (代替要因) の炭素含有量当たりの温室効果ガス排出、生産地域における比較対象となる化石燃料に対する排出削減 (温室効果ガス削減)、土地利用の効率性 (単位面積当たりの生産量) の観点から、北アメリカのトウモロコシ乾燥粉砕式天然ガス火力工場、ブラジルのベンチマークとなるサトウキビ工場 44 箇所について示した。北アメリカの商用システムのパフォーマンスは時の経過とともに向上した。たとえば、相対的な温室効果ガス削減の場合、1995 年は 26%で 2005 年は 39%だった。また、商用コージェネレーションシステム適用を通じた効率性向上は 2015 年までに、コージェネレーション単独の場合が 55%、二酸化炭素回収・貯留を併用する場合は 72%の排出削減につながると予測されている。同様に、ブラジルのサトウキビエタノール・電力・砂糖工場でも、相対的な温室効果ガス削減は 2005~2006 年のベースラインの場合 79~120%、コージェネレーションと二酸化炭素回収・貯留のシナリオでは 160%と見込まれている。

Renewable Fuels for Europe プロジェクトでは、ヨーロッパにおけるバイオ燃料普及に重点を置いていたが (de Wit et al., 2010; Londo et al., 2010)、なかでも、リグノセルロース系バイオマス技術の学習が将来のコスト予測に与える影響に対して関心が向けられていた。分析では、以下の 2 つの重要なポイントが示された。

- ・ リグノセルロース系バイオマスは、作物生産、供給システム、転換技術の分野で改善のポテンシャルがかなりある。特に転換の場合、明確な資本コストが削減可能であることから (転換効率の向上も部分的にはある)、規模の経済が将来のコスト削減ポテンシャルの非常に重要な要素である。バイオマス資源は、長期的には (コストの安い) 残渣の割合が減るため、いくらか割高になるだろう。リグノセルロース系バイオマスの生産コストは、2030 年までに 60~70US ドル (2005 年) /バレル (0.38~0.44US ドル (2005 年) /ℓ) で石油系のガソリンやディーゼルと競合出来るだろう (Hamelinck and Faaij, 2006)。
- ・ リグノセルロース系バイオマスの選択肢の浸透は、学習率にかなり左右される。この学習率は、市場への浸透が高まると独立的になってくる (大規模な生産施設での生産が可能になる) ため、市場への浸透の初期段階では、学習率は市場の支持や義務化から部分的に独立的になる。

IEA Energy Technology Perspectives の報告 (IEA, 2008a) 及び WEO (IEA, 2009b) では、2020 年以降にすべてのバイオマスが漸進的に増加することから、特に 2020~2030 年の間、リグノセルロース系バイオ燃料の急激な生産拡大を予測している。バイオ燃料の分析では、2030 年以降、穀物系とトウモロコシ系のエタノールの生産や、食用菜種系のバイオディーゼルがほぼ完全に撤廃されると予測している。リグノセルロース系バイオ燃料生産に特化した現在の実証プロジェクトから将来の商用規模の施設に移行する際の潜在的なコスト削減は、図 2.22 に示されている。こうした潜在的なコスト削減については、Hamelinck and Faaij (2006) と van Vliet et al. (2009) も定量化している。

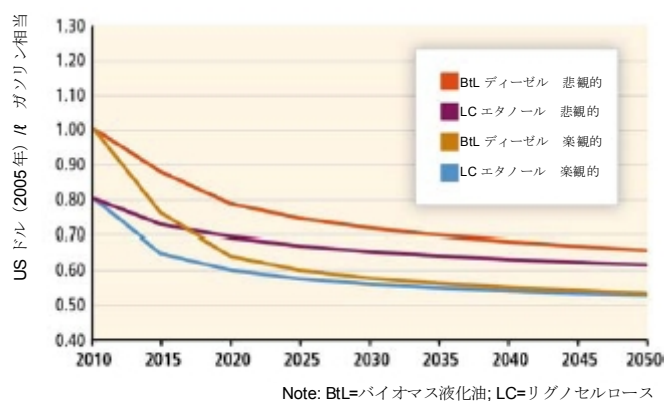


図 2.22: リグノセルロース系エタノールと BTL ディーゼルのコスト予測（Energy Technology Perspectives 2008, © OECD/IEA, 図 9.11, IEA（2008a）の 335 ページ; さらに将来のコストを検討する場合、Sims et al.（2008）、IEA Renewable Energy Division（2010）及び IEA（2011）を参照）。

2.7.3.2 商用前のバイオエネルギー・システムの将来のコスト傾向

バイオエネルギー・システムの多数は、図 2.2 と 2.6 節で示したとおり、発展している。近代的バイオマスからバイオエネルギーを生産出来る重要な中間製品として、合成ガス、糖類、植物油と脂質、バイオマス由来の熱化学油（熱分解または他の熱処理）、バイオガスが挙げられる。これらの中間製品は、2.6 節で説明した開発中のバイオリファイナーで、発電と熱、幅広い液体炭化水素燃料、アルコール（より高密度なものも含む）、エーテル、化学製品、及びポリマー（バイオ系の原料）の生産をより効率よく行える。炭化水素燃料生産に関する初期の研究開発が糖作物とでんぷん作物で開始され、ガソリン、ディーゼル、ジェット燃料などの高エネルギー量の輸送燃料、化学物質がその対象になっている。第一世代の作物の改良、多年生のサトウキビ由来製品、特に第二世代のプラントは、従来は石油化学産業が行っていた特定の地理的地域に適した様々な製品、大容量の化学製品と原料を提供し、原材料単位の最終製品の生産高を最大化させるポテンシャルを有している。

表 2.18 は、効率良い発電やガス化（合成ガス）由来の燃料生産を行うための開発中の技術を対象に、その生産コストの範囲を予測した。この例として、ガス化複合発電、ディーゼル、ジェット燃料、水素、メタン、ジメチルエーテル、及び合成ガスの触媒改質を通じたその他の含酸素燃料などがある。糖類の中間製品（リグノセルロースなど）は、バイオケミカル的な変換経路を通じ、石油系燃料の性質を持つ様々な燃料に転換出来る。同様に、熱分解油系の炭化水素燃料も開発中である。油糧作物や樹木種子の油の開発も、炭化水素に容易に改良出来ることから、石油系燃料の性質を持つ燃料製品の拡大につながるだろう。最終的に、バイオマス生産用の藻類は光合成を行い、二酸化炭素、水、太陽光を用いて生物学的に様々な炭水化物、脂質、プラスチック、化学物質や水素などの燃料を酸素とともに生産する。それに加え、ある種の藻類など、従属栄養微生物は遺伝子操作により、暗闇でも糖類の代謝や脂質の分泌が出来る。微生物やそのコンソーシアは、様々な加工段階を統合出来る。遺伝子組み換えの酵母やバクテリアは、合成生物学のツールか代謝工学を通じて開発され、炭化水素や脂質などの特定の燃料製品を生産出来る（IEA, 2011 も参照）。

表 2.18: 開発中の技術の予測生産コスト幅（2.6.3 節参照）。

選択されたバイオエネルギー技術	エネルギー分野 (電力、熱、輸送) ※	2020～2030 年の予測生産コスト (US ドル/GJ (2005 年))
統合ガス化コンバインドサイクル発電 ¹	電力や輸送	12.8～19.1 (4.6～6.9 セント/kWh)
油脂植物ベース再生可能ディーゼル・ジェット燃料	輸送及び電療	15～30
リグノセルロース系糖ベース・バイオ燃料 ²	輸送	6～30
リグノセルロース系合成ガス・ベース・バイオ燃料 ³		12～25
リグノセルロース系熱分解ベース・バイオ燃料 ⁴		14～24 (燃料混合成分)
気体バイオ燃料 ⁵	熱及び輸送	6～12
水生植物由来燃料・化学物質	輸送	30～140

注: ¹ 供給コストは 3.1US ドル/GJ (2005 年)、統合ガス化コンバインドサイクル発電 (将来) は 30～300MW、耐用年数は 20 年、割引率は 10%。² 糖料・でんぷん作物及びリグノセルロース糖からのエタノール、ブタノール、及び微生物炭化水素。³ 合成ディーゼル、メタノール、ガソリンなど (エタノールへの合成ガス発酵変換経路)。⁴ ガソリン・ディーゼル混合成分またはジェット燃料へのバイオマス熱分解・触媒アップグレード。⁵ 合成天然ガスになる合成燃料、メタン、ジメチルエーテル、バイオマス熱化学的・嫌気性消化からの水素 (大規模)。

※いくつかの用途において二酸化炭素回収・貯留との併用は、その技術 (二酸化炭素回収・貯留を含む) が成熟している場合には可能であり、それによって大気から温室効果ガスを除去することが出来る。

2.7.4 統合

バイオエネルギー・システムは、その経済的パフォーマンスと地域的な特性を特定するには複雑性が伴うが、利用可能な経験と文献からは、重要な結論がいくつか導き出せる。

- いくつかの重要なバイオエネルギー・システムは現在、競争力を持って展開出来る。中でも注目すべきは、サトウキビ系エタノール、残渣と廃棄物による熱と発電である。
- 本章で論じられるすべてのバイオエネルギーの選択肢が、技術的学習に関して詳細に調査されているわけではないが、いくつかの重要なバイオエネルギー・システムでは時間の経過とともに、コストが低下し環境的なパフォーマンスも改善した。これらのシステムは今も、経済発展、貧困緩和、安定的かつ多様なエネルギー供給、その他の理由で実施される政府の補助金を必要としている。
- 発電技術のさらなる向上、多年生の作付けシステムの生産、供給システムの発展により、多くの地域でバイオマスによる発電 (及び熱) のコストが低下し、魅力的なコストレベルに出来るという明確な証拠がある。バイオマスは多くの場合、最高で 50US ドル (2005 年) /t の炭素税導入で、石炭発電と競合出来る。それにもかかわらず、競争力のあるバイオ発電は、風力エネルギーや太陽エネルギー、石炭と併用する二酸化炭素回収・貯留、原子力といった代替物のパフォーマンスにも左右される (10.2.2.4 節及び第 8 章)。
- エタノール用のバイオエネルギー・システムとバイオマス発電生産の場合、その他の再生可能エネルギー技術の技術的学習と学習率に関連するコスト削減と比較可能であることが分かっている。これは作付けシステム (一年生作物の農業管理の進歩に続く)、供給システムと物流 (北ヨーロッパ諸国、国際物流で明確に観察される)、転換 (エタノール生産、発電、及びバイオガス) に当てはまる。
- リグノセルロース系バイオ燃料に関しては、最近の分析から、改善ポテンシャルは 60～70US ドル (2005 年) /バレル (0.38～0.44US ドル/l) の石油価格で競合出来るほど大きい。現在利用可能なシナリオ分析では、短期の研究開発と市場の支援が強力であれば、(石油価格の発展と炭素価格のレベルにもよるが) 技術的進歩で 2020 年頃の商用化が出来るだろうとしている。競争力のある生産で政策目標 (義務) の導入が切り離され、バイオマス需要が食糧作物からバイオマス残渣、森林バイオマス、及び多年生の栽培システムに変わることから、一部のシナリオでも、これはエネルギー用のバイオマス普及で大きなシフトとなることが示されている。こうした (急速な) シフトから示唆されることについては、研究されていない。
- バイオ材料の生産に関するデータとバイオマス由来の化学製品のコスト推定値は、ピア・レビューされた文献では稀にしか提示されていない。将来の予測と学習率については、成功したバイオベースの製品が市場に投入されつつある段階のため、さらに稀である。2 つの例は、化石由来ではない製品 (糖類発酵由来

のプロパンジオールをベースにしたポリ（1,3）-プロピレンテレフタル酸エステル類など）の一部の構成要素として、または糖類発酵由来の乳酸をベースにしたポリラクチドなどの完全に新しい合成ポリマーとして、挙げられる。これも二酸化炭素回収・貯留（2.6.3.3 節参照）のコンセプトと併用したバイオマス転換の例であり、現時点で開発されておらず、コスト傾向も文献では利用出来ない。エタノール発酵由来の二酸化炭素は、炭酸飲料、急速冷凍肉、石油増進回収用に商用販売されている。二酸化炭素回収・貯留の実証は継続中である（2.6.3.3 節参照）。それにもかかわらず、最近のシナリオ分析では、新型のバイオマテリアル（及びバイオマスの連鎖的な使用）、二酸化炭素回収・貯留と併用するその他のバイオマス転換が、中期的な緩和の選択肢として魅力的になるだろう。このため、これらの選択肢を今後より詳細に分析出来るように、経験を得ることが重要である。

2.8 潜在的な普及段階⁸⁵

2.8.1 バイオエネルギーの現在の普及

近代的バイオマスの使用（電力部門の発電及びコジェネレーション。近代的な住居、商用建築物、公的建築物の暖房。または輸送燃料）は既に、50.3EJ のバイオマス由来の一次エネルギー総供給量（2008 年）から、約 11.3EJ（表 2.1 参照；IEA, 2010a,b）という大きな貢献を果たしている。バイオマス供給全体の 60～70%は地方で使用され、調理、照明、空間暖房用途の木炭、木質、農業残渣、家畜ふん尿に関連し、一般に開発途上国の最貧困層によって使用される。1990～2008 年にかけて、バイオエネルギー用の固体バイオマス使用の年間平均成長率は 1.5%で、近代的な液体バイオ燃料とガス化燃料の場合は同時期にそれぞれ 12.1%、15.4%だった（IEA, 2010c）。この結果、石油需要が 1980 年以来初めて減少するなか、世界の自動車燃料需要に占めるバイオ燃料の割合は 2008 年に約 2%に、2009 年にはおよそ 3%になった（IEA, 2010b）。様々な国々における政府の政策により、2000～2008 年にかけて世界のバイオ燃料の生産が 5 倍になり、バイオマスと再生可能廃棄物の発電は、2007 年に 259TWh（0.93EJ）、2008 年に 267TWh（0.96EJ）だった。これは世界の電力の 1%に相当し、1990 年（131TWh、0.47EJ）から倍増している（2.4.1 節）。そして、近代的バイオエネルギーの暖房用途（地域暖房用の空間暖房システムや温湯暖房システムなど）は、3.4EJ だった（表 2.1 及び 2.4.1 節参照）。

近年、バイオマス及びバイオ燃料の国際貿易もかなり重要になってきている。バイオ燃料（エタノールとバイオディーゼルのみ）の約 6%（2008 年には最大 9%水準まで到達）が国際的に取引されており、2009 年には全ペレット生産のうち 3 分の 1 がエネルギー目的で使用されている（図 2.8 及び 2.9；Junginger et al., 2010；Lamers et al., 2010；Sikkema et al., 2011）。後者については、供給が限定的な地域におけるバイオマスの利用の増加と、需要が乏しい地域からの資源の移動の増加の促進において、重要な推進要因として証明されている。

2000 年代半ばから、多くの国で、バイオエネルギー及びバイオ燃料（特に後者）の政策上の状況は急速かつ大幅に変化してきている。食料対燃料競合におけるバイオマスをめぐる議論及びその他の対立に関する懸念の高まりによって、持続可能性基準や枠組みの開発・施行に加え、バイオエネルギーやバイオ燃料の目標レベル及びスケジュールの変更への要求が強くなってきている。加えて、バイオリファイナリー及び次世代バイオ燃料オプションの支援によって、バイオエネルギーの持続性向上が促進されている。

ブラジル、スウェーデン、フィンランド、及びアメリカなどの国々では、継続的で安定的な政策支援がバイオマス生産能力と有効な市場の構築において重要な要因であること、競争力のあるインフラと転換能力が必要となること（2.4 節も参照）、かなりの経済活動が結果としてもたらされることが示されている。

2.8.2 短期的な予想

さらなるバイオエネルギー開発における優先度、アプローチ、技術選択、及び支援体制は、国によって異なっている。一方で、市場の複雑性はあるものの、バイオエネルギー普及に悪影響を与える側面が多数あることの現れとも言える。この側面として、たとえば、農業と土地利用、森林開発と産業の発展、エネルギー政策とエネルギー安全保障、環境政策などがある。優先度、技術開発段階、資源への地理的アクセス、資源の利用可能性、資源のコストは、国や様々な設定によって大きく異なる。

短期的な予想は、表 2.11 に示した実施中の政策が現在の予想を牽引している点を反映している。たとえば、WEO（IEA, 2010b）プロジェクトは、（旧参照シナリオを代替する）現行の政策シナリオで、バイオエネルギー産業は過去 5 年で見られた成長を継続し、二酸化炭素 2020 年までに約 60EJ に達すると予測している。これは、より意欲的な新規政策シナリオと二酸化炭素 450-ppm のシナリオで提示された最大 63EJ をわずかに上回るレベルである（2.4.1 節）。2008 年の 50EJ/年を起算点と見なす場合、これは、10 年間でバイオエネルギー消費の 10～13EJ 増加

⁸⁵ エネルギーシステムのモデル化をベースにした莫大な数のシナリオの包括的評価に基づく潜在的な普及について、補足的な見方が本報告書の 10.2 及び 10.3 節に提示されている。

に相当する。提示された 3 つのシナリオによれば、この増加分の大半は輸送部門で生じ、バイオ燃料の消費量は 2009 年の 2.1EJ から、2020 年には 4.5～5.1EJ に増加する。このため、この成長の大半は既に、既存の政策によるものと推測され、新規政策に依存する追加的な成長は、さらに 10% の増加のみが見込まれる。このバイオ燃料の量を実現するために必要な世界の一次バイオマス供給（第一世代バイオ燃料の約 65% の効率性）は、7.4～8.4EJ である。世界規模での増加に伴い、バイオ燃料適用がさらに地域で多様化する。ブラジル、アメリカ、EU で現在優位なバイオ燃料市場は、2020 年までに消費がおおよそ 2 倍になると推測される一方、現在バイオ燃料の消費がごくわずかか、あるいは皆無であるその他の多くの地域では、バイオ燃料政策の適用により大幅な成長が推測される。なかでも注目すべきは、アジアである。現行の政策シナリオでは、発電は 2008 年の 265TWh/年（0.96EJ/年）から 85% 増加し、493TWh/年（1.8EJ/年）になる。再度言及するが、より意欲的な政策シナリオでは、中程度の追加的な成長（20%）（最大 594TWh/年または 2.1EJ/年）となる（表 2.10）。

2.8.3 炭素緩和における長期的な普及

AR4(IPCC, 2007d) では、輸送燃料生産用の一次バイオマスの需要予測を示しているが、これは主に WEO(IEA, 2006) の世界規模の予測に基づいており、2030 年における一次バイオマスは約 14～40EJ、バイオ燃料は 8～25EJ と比較的幅広い。しかしながら、2030 年には発電用の一次バイオマス需要が 45～48EJ（おおよそ 30～50EJ のバイオ燃料に相当）という、高い推定値も含まれていた。熱と電力に対するバイオマス需要は、二酸化炭素回収・貯留、原子力、非バイオマスの再生可能エネルギーといった競合技術（利用可能性と導入）に強く影響されることが示された。2030 年におけるバイオマスの需要は、AR4 では約 28～43EJ と推定された。これらの推定は発電を重視している。（AR4 が基礎にしている）WEO では、熱は明確にはモデル化も推定もされていない。このため、バイオマスの需要全体を低く推定している。また、産業における将来の潜在的な需要（特にバイオケミカルなどの新たな使用や、鉄鋼生産における木炭使用の拡大）や建物環境（暖房や建築材としてのバイオマス使用の拡大）が重要な項目として取り上げられたが、中長期的な潜在的な需要では、定量的な推定はまったく含まれていなかった。

様々な温室効果ガス安定化シナリオに基づき、世界規模のエネルギーのニーズに対応する再生可能エネルギー供給の将来の潜在的な貢献をまとめた文献があり、その要約が第 10 章に示されている。図 2.23 は特にバイオエネルギーに焦点を置き、(a) バイオマスによる世界の一次エネルギー供給と (b) 二次エネルギーの観点における世界的なバイオ燃料生産のモデリング結果を示している。図 2.23（10.2 節）の基礎をなしているのが約 100～140 の異なる長期的シナリオである。これらのシナリオ結果は、多様なモデリング・チームから出され、変数のなかでもとりわけ、エネルギー需要の成長、競合する低炭素技術のコストと利用可能性、及び再生可能エネルギー技術（バイオエネルギー含む）のコストと利用可能性といった幅広い範囲の想定を対象にしている。シナリオが対象とした文献についての説明（10.2.2 節）、これらの変数が再生可能エネルギー普及に与える影響の一部がどのように変化するかについて、図 10.9 に示した。

図 2.23 では、2020 年、2030 年、2050 年のシナリオに基づくエネルギーにおけるバイオマス普及の結果について、AR4 に基づく 3 つの温室効果ガス安定化範囲を対象に示している。この範囲は、カテゴリ I 及び II（二酸化炭素 440ppm 未満）、カテゴリ III 及び IV（二酸化炭素 440～600ppm）、ベースライン（二酸化炭素 600ppm 超）で、すべて 2100 年までである。結果は、中央値のシナリオ、シナリオ全体の 25～75 パーセンタイルの範囲、シナリオ結果の最小値と最大値として表示されている。図 2.23 (a) では、ベースラインシナリオで時間の経過とともにバイオマスによる世界の一次エネルギー供給が明確に増加しており、中央値の場合で 2020 年に約 55EJ/年、2030 年に約 62EJ/年、2050 年に約 77EJ/年に達することが示されている。同時に、固体バイオマスの伝統的使用は大半のシナリオで減少すると予測されている。これはつまり、バイオマスから生産される液体バイオ燃料、バイオガス、電力、水素といったバイオマスの近代的使用が、先述の一次エネルギーの数値で提示された以上にさらに強い伸びを示す傾向があるということである。この傾向は、図 2.23 (b) の右側にある液体燃料の生産の例でも示されている。温室効果ガス濃度安定化レベルが意欲的になるほど、バイオエネルギー供給は増加することから、バイオエネルギーは世界規模の温室効果ガス排出削減に大きな長期的役割を果たし得ると示唆される。最も厳格な緩和カテゴリである I 及び II（2100 年までの大気中の二酸化炭素濃度が 440ppm 未満）では、エネルギー用のバイオマス普及の中央値のレベルはベースラインに比べ大幅に高まり、2020 年には 63EJ/年、2030 年には 85EJ/年、2050 年には 155EJ/年になる。

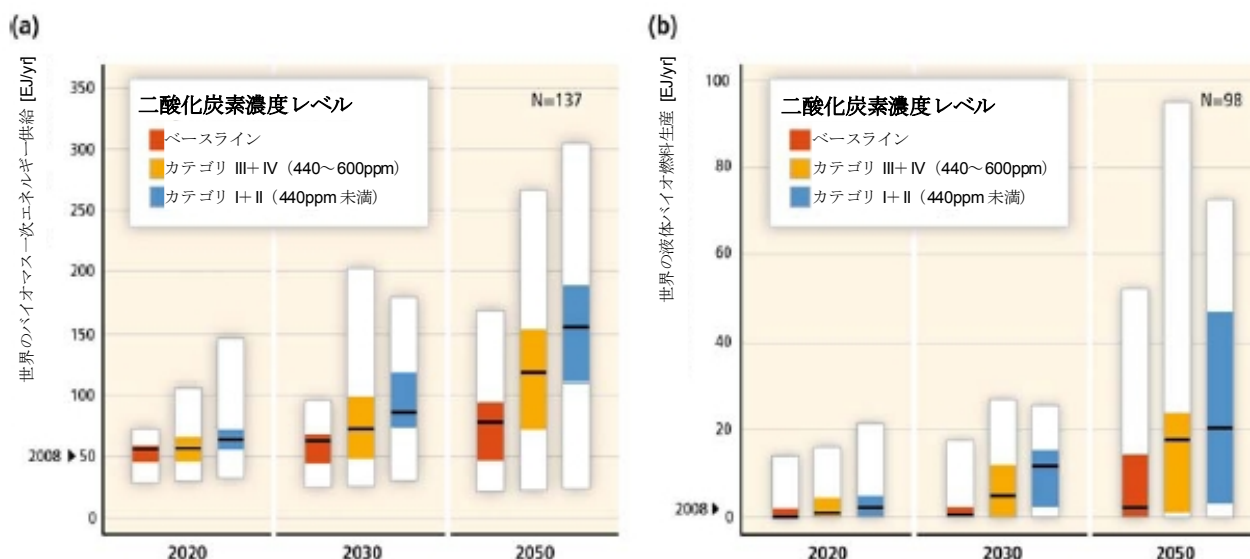


図 2.23: (a) 一次エネルギーとして扱われている電力、熱、及びバイオ燃料の長期的シナリオにおけるバイオマスからの世界的一次エネルギー供給、(b) 配送された製品の二次エネルギーの観点から報告された長期的シナリオにおける世界のバイオ燃料生産（シナリオ結果の中央値、25～75 パーセンタイルの範囲、全範囲。色別の分類は 2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリを示す。上部右に数字の基礎となるシナリオ数を示す）（Krey and Clarke, 2011 より適用）。比較のため、2008 年における過去の水準を左の軸上に小さい黒矢印で示している。

これらの堅調な傾向にもかかわらず、シナリオ全体でバイオエネルギーの正確な将来の役割について合意はまったく見られず、様々な温室効果ガス安定化カテゴリで普及の範囲がかなり幅広くなっている。2030 年の場合、バイオマスの一次バイオマス供給の推定値を得られた結果の全範囲で示すと、30～200EJ（四捨五入）とばらついている。25～75 パーセンタイルでは 45～120EJ の範囲で、ベースラインの範囲は 44～67EJ/年とかなり狭くなっている。また、440～600ppm の安定化カテゴリでは 47～98EJ、440ppm 未満のカテゴリでは 73～120EJ/年とかなり広がっている。2 つの温室効果ガス安定化カテゴリで、2050 年までの一次エネルギー供給に対するバイオマスの貢献は、25 パーセンタイルで 70～120EJ/年であり、70 パーセンタイルで約 150～190EJ/年、最も高い範囲で約 265～300EJ/年である。様々な選択肢が温室効果ガスを削減し、削減は土地利用の管理方法に左右されることから、バイオエネルギー普及のプラスの温室効果ガス緩和効果は直接的ではない点を留意するべきである。なお、これらは安定化シナリオで範囲が幅広くなる主な理由である。

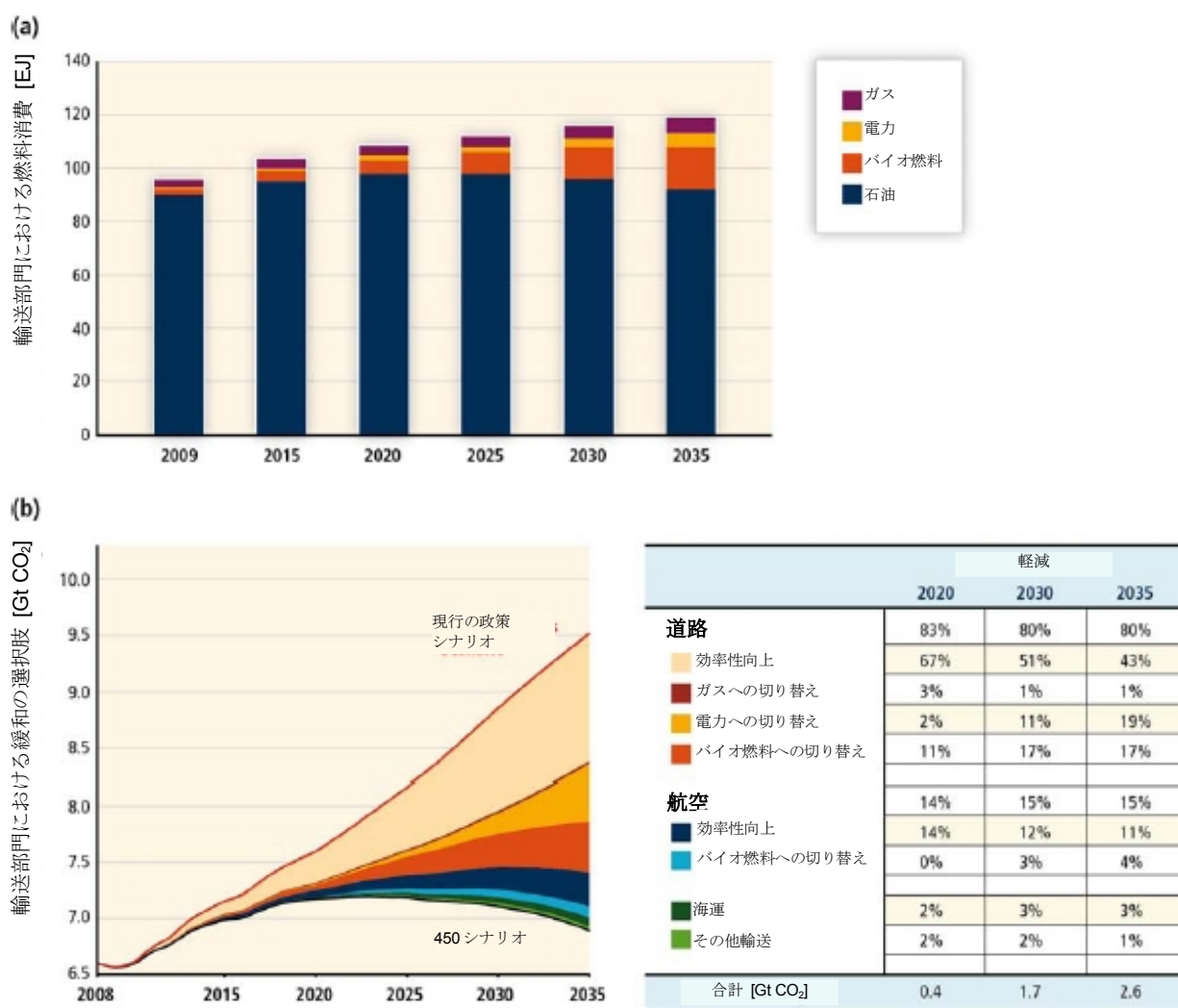


図 2.24: (a) バイオ燃料を含む輸送部門における燃料消費の展開（*World Energy Outlook 2010*, © OECD/IEA, 図 14.12, IEA (2010b) の 429 ページ）及び (b) 様々な技術による炭素緩和の割合。現行の政策のベースライン（上部の赤線）から、緩和シナリオの 450ppm の基本線に到るまでの、陸上輸送と航空輸送用のバイオ燃料を含む（*World Energy Outlook 2010*, © OECD/IEA, 図 14.14, IEA (2010b) の 432 ページ）

バイオエネルギーの部門レベルでの浸透は、従来型・近代的バイオマス利用もモデル化し、第二世代のバイオ燃料の進展も盛り込んだ WEO (IEA, 2010b) など、詳細な運輸部門の説明がある単一モデルを使用することで、最も的確に説明される。このモデルでは、近代的バイオエネルギーの大きな増加及び伝統的バイオマスの使用の減少が予測されている。これらの予測は、第 10 章の結果と量的には整合している。IEA は、WEO の 450ppm 緩和シナリオの場合、2030 年には世界の輸送燃料の 11%が第二世代バイオ燃料を使用したバイオ燃料によって供給され、予測されている 12EJ の 60%を占めるとされており、この半分は現行の政策の継続によって供給されると予測されている（表 2.9 参照）。バイオマス及び再生可能廃棄物は、世界の発電量の 5%または 1,380TWh/年（5EJ/年）（この内 555TWh/年（2EJ/年）は 2030 年までの 450ppm 戦略の結果）を供給するだろう（表 2.10 参照）。プロセス蒸気及び空間向けのバイオマスの産業暖房利用、及び建築物の温水暖房は、それぞれ絶対的には 2008 年の水準から倍増するだろう。しかし、想定される従来型バイオマスの減少によって、総暖房需要は減少すると予測されている。暖房は、継続的な近代的バイオエネルギーの発展にとって重要な分野であると見られている。

輸送部門におけるバイオ燃料の展開は図 2.24a に示されている。バイオ燃料は、世界的な道路輸送と航空輸送の双方で大幅に浸透すると予測されている。450ppm のシナリオでは、第二世代の技術は 2035 年までに、バイオ燃料の 66%と世界の輸送エネルギー需要の 14%を供給すると予測される（図 2.24a 及び表 2.9 参照）。図 2.24b は、現行の政策から 450ppm のシナリオに到るまでの、道路輸送と航空輸送の用途の見込みに関連し、バイオ燃料の温室効果ガス排出緩和の予測を示している。たとえば、450ppm 安定化シナリオでは、2030 年までに、道路輸送による排出の 17%と航空輸送による排出の 3%が緩和できる。バイオ燃料技術のロードマップは最近策定された (IEA, 2011)。

原料用のバイオマスの潜在的な需要は、シナリオの多くでは明確に対応されていないが、拡大し、合計で数十 EJ になるだろう（2.6.3.5 節; Hoogwijk et al., 2003）。

2020～2050 年間のエネルギー用のバイオマス普及の推測は、研究によってかなり異なる。これは、関連するモデルでバイオエネルギー・システムの描写の詳細がばらついていることも一因である。利用可能な洞察のレビューから、重要な示唆として、大規模なバイオマス普及は資源基盤の持続可能な開発、土地利用のガバナンス、インフラの開発、重要な技術のコスト削減に強く影響を受けることが示されている。たとえば、最も有望な第一世代の原材料や第二世代のリグノセルロース系バイオマスによるエネルギー用の一次バイオマスを、効率良く完全に使用することなどがある。先述の結果は、*Energy Technology Perspectives* の報告 (IEA, 2008a) と合致している。この報告は、2010 年以降に第二世代のバイオ燃料が急速に浸透し、穀物系やトウモロコシ系のエタノール、油糧系のバイオディーゼルの生産は 2030 年以降ほぼ完全になくなると予測している⁸⁶。

2.8.4 条件及び政策: バイオエネルギーの資源ポテンシャル、技術と経済、環境上の影響と社会的影響の統合

2.8.4.1 資源ポテンシャル

バイオマス資源固有の複雑性により、その複合的な技術的ポテンシャルの評価は意見が分かれる問題であり、特性化が難しい。文献の研究では、地球規模のモデリングによると、技術的ポテンシャルなし（エネルギー生産に利用可能なバイオマスなし）から、最大理論技術的ポテンシャル約 1,500EJ までの幅がある。モデリング研究にも基づく陸生バイオマスの理論的ポテンシャルは、有利な条件の最も幅広いポテンシャルの範囲を調査している (Smeets et al., 2007)。

図 TS.2.25 は、世界的な一次エネルギー総供給量（予測）と比較した第 10 章のシナリオ分析からの潜在的な普及に関するデータを含め、主要な研究で見出された技術的ポテンシャルの概要を示している。技術的ポテンシャルを視野に入れると、現在、エネルギーに使用されている世界のバイオマスは約 50EJ/年に達しており、食料、飼料、繊維、及び林産品に使用したバイオマス収穫分すべてには、カロリーに直すと合計 219EJ/年（2000 データ）が含まれている（2000 年のデータ、Krausmann et al., 2008）。このことから、2050 年までにバイオエネルギーで 200EJ/年の普及レベルを達成するには現在の世界のバイオマス収穫のほぼすべてが必要になる（2.2.1 節）。

詳細な評価からは、残渣であっても他の使用に対して大幅な競争力を有していた場合、バイオマスの技術的ポテンシャルの上限は約 500EJ で、下限は約 50EJ である。Dornburg et al. (2008, 2010) が各貢献カテゴリに対して行ったこの評価は、最長で 2007 年までの文献に基づいており（図 2.25 の積み重ね棒）、おおまかには IPCC SRES の A1 と B1 ストーリーラインでスケッチされた条件に沿っている (IPCC, 2000)。また、土地利用の優良なガバナンス及び農業管理の大幅な改善を確実にする持続可能性と政策の枠組みを前提としている（図 2.26 の概要）。使用される資源は以下のとおりである。

- ・ 林業、農業、及び有機性廃棄物から発生する残渣（一般廃棄物、家畜ふん尿、プロセス残渣などを含む）は、約 100EJ/年と推定された。技術的ポテンシャルのこの部分は比較的現実的なものであるが、利用方法の競合によってエネルギー利用の総合的な可能性が範囲の最低値に近づいてしまう可能性がある。
- ・ 林業廃棄物以外から発生した余剰林産物には、約 60～100EJ/年の追加的技術的ポテンシャルがある。
- ・ 作付けシステムで生産されたバイオマスの場合、潜在的な質の高い余剰農地及び牧草地におけるエネルギー作物生産の低い推定値は 120EJ/年である。水が乏しい耕作限界の荒廃地の潜在的な寄与によって、最大で 70EJ/年追加出来る可能性がある。ここでは、水不足による制限があり、土壌の劣化がかなり厳しい、広い地域を含んでいる。農業・家畜類管理の改善のために農業技術が十分に研究されれば、140EJ/年追加される可能性がある。

これらのカテゴリを同時に加算すると、技術ポテンシャルは 2050 年に最大で約 500EJ になる。バイオマスのポテンシャル開発の一時的データでは、2020 年の 290～320EJ/年から 2030 年に 330～400EJ/年に急拡大している (Hoogwijk et al., 2005, 2009; Dornburg et al., 2008, 2010)。

本章における利用可能な科学文献に基づく専門家による検討からは、2050 年までのエネルギー用バイオマスの潜在的な普及レベルは、100～300EJ の範囲に収まる（2.2.1, 2.2.2, 及び 2.2.5 節）。

この範囲の数値については van Vuuren et al. (2009) で説明されている。ここでは、SRES シナリオ群の中間的な開発シナリオに重点が置かれた。Smeets et al. (2007) 及び Hoogwijk et al. (2005, 2009) の低い推定値はこれらの数値にそっており、こうした範囲は Beringer et al. (2011) でさらに裏付けられている。Beringer et al. (2011) は 2050

⁸⁶ 2007 年と 2008 年の WEO の研究 (IEA, 2007b, 2008b) とこれらの予測を対比。これらの研究では、第二世代のバイオ燃料はシナリオ分析の対象外であったため、バイオ燃料全体が 2030 年の予測で最低限の役割しか果たしていない。

年に灌漑を行わない場合のエネルギー作物だけで 26～116EJ の範囲を報告している（灌漑を行う場合は 52～174EJ）。Haberl et al. (2010) は、すべてのバイオマスカテゴリ全体で 2050 年に 160～270EJ/年とした。Seidenberger et al. (2008) に続く Krewitt et al. (2009) も、強い持続可能性の基準を用いて、2050 年に技術的ポテンシャルが 184EJ/年になると推定した。このなかには残渣による 88EJ/年が含まれている。技術的ポテンシャルは、2020 年の約 100EJ/年から 2030 の約 130EJ/年に急上昇すると予測されている。

利用可能な科学文献に基づく専門家による検討の結論は以下のとおりである（2.2.2～2.2.5 節）。

- ・ 重要な不確実性として以下が挙げられる。
 - 人口、経済的・技術的發展、食料・飼料・繊維需要（食事を含む）、及び農業と林業における開発
 - 適応能力を含めた将来的な土地利用に対する気候変動の影響（IPCC, 2007a; Lobell et al., 2008; Fischer et al., 2009）
 - 土壌劣化、水不足、及び生物多様性・自然保護要求の程度（Molden, 2007; Bai et al., 2008; Berndes, 2008a,b; WBGU, 2009; Dornburg et al., 2010; Beringer et al., 2011）。
- ・ 農業と林業における残渣の流れ、及び使用されていない（または大々的な利用により耕作限界になっている・劣化している）耕地は、短期的にも長期的にもエネルギー用バイオマス生産拡大の重要な源である。生物多様性による制限、及び良好な生態系と土壌の劣化の回避を確実にする必要性によって、農業及び林業における残渣収獲に制限がかかっている（Lal, 2008; Blanco-Canqui and Lal, 2009; WBGU, 2009）。
- ・ 適切な（特に多年生の）作物と草本の作付けによって、より高い技術的ポテンシャルを実現することが出来る。これらの作物により、従来型の食用作物には適さない土地におけるバイオエネルギーの生産が可能になるが、そのような土地における従来型の作物の栽培が多年生の作物と草本の栽培に比べ高い土壌炭素排出につながる。農業・林業システムに、バイオエネルギー生産を統合した多機能的な土地利用システムは、生物多様性の保護に貢献し、土壌の生産性や良好な生態系の回復及び維持を助ける（Hoogwijk et al., 2005; Berndes et al., 2008; Folke et al., 2009; IAASTD, 2009; Malézieux et al., 2009; Dornburg et al., 2010）。
- ・ 水不足を経験した地域では、生産が限定的になる場合がある。バイオマス植林地への土地の転換によって、下流の水利用が減少する可能性を考慮する必要がある。乾燥耐性のある適切なエネルギー作物の利用によって、水不足に適応出来る。バイオマス資源ポテンシャルの評価においては、より注意深く、水利用可能性や競合する利用法についての制約や機会を、検討する必要がある（Jackson et al., 2005; Zomer et al., 2006; Berndes et al., 2008; de Fraiture and Berndes, 2009）。

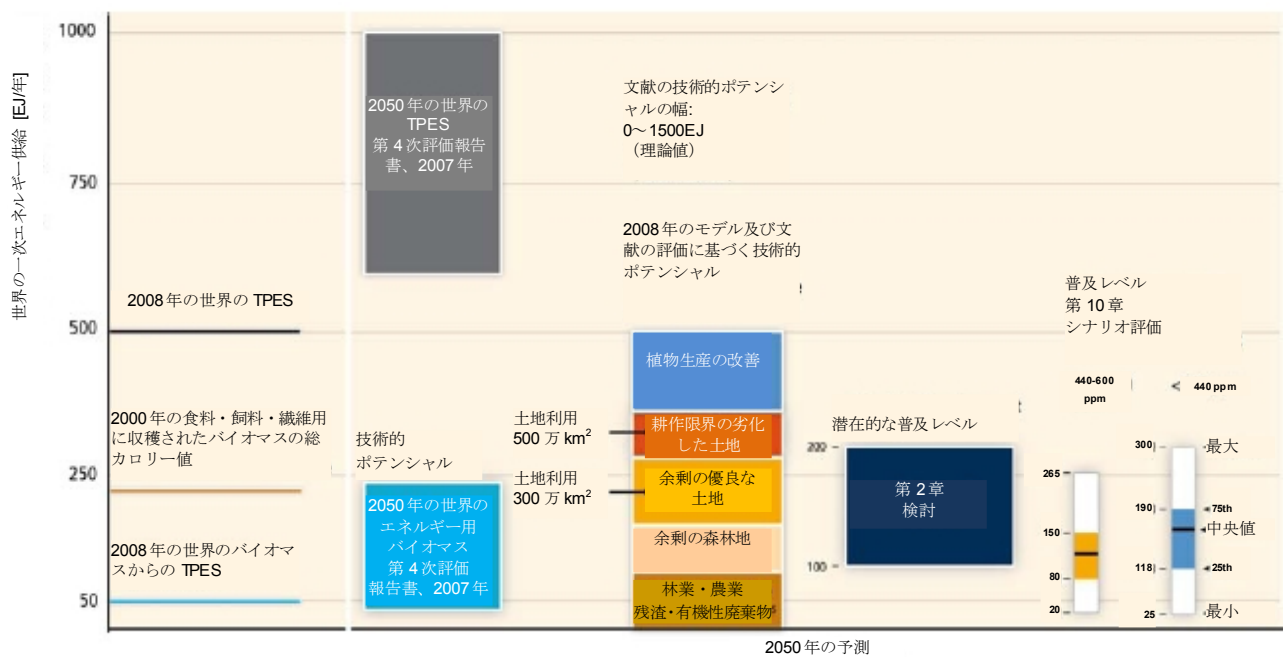


図 2.25: 左側の線は、バイオマスによる世界の総一次エネルギー供給（2008 年）、一次エネルギー供給、食料、飼料、繊維用の世界の総バイオマス収穫量の等価エネルギー（2000 年）を示す。バイオマスによる一次エネルギー供給に関する主要な 2050 年予測の概要は、左から右に示されている。

(1) 世界的な AR4 (IPCC, 2007d) では、一次エネルギー供給とエネルギー用の一次バイオマスの技術的ポテンシャルを推定している。

(2) 5 つの資源カテゴリを用いた世界的な総合評価の研究に基づき、エネルギー用の一次バイオマスの理論的ポテンシャルとバイオマスの技術的ポテンシャルの上限。生物多様性の保護、水の制限、土壌劣化に関する制限と基準が、積み重ね棒で示された。土地利用の優良なガバナンス及び農業管理の大幅な改善を確実にする持続可能性と政策の枠組みを前提としている (Dornburg et al., 2010, Royal Society of Chemistry の許可を得て複製)。

(3) 利用可能な科学文献に基づく専門家による検討からは、2050 年までのエネルギー用陸生バイオマスの潜在的な普及レベルは、100～300EJ の範囲に収まる。

(4) 気候緩和レベルの 2 つのケースにおいて、10 章で評価された長期的シナリオによるエネルギー用のバイオマスの普及レベル（2100 年までの二酸化炭素濃度 440～600ppm（オレンジ）または 440ppm 未満（青）の棒か線。図 2.23 (a) 参照）。(4) で説明されたモデル研究によるエネルギー用のバイオマス開発レベルは、(3) で描写されたエネルギー用の潜在的なバイオマス普及レベルの専門家による検討と一致している。最も可能性が高い範囲は 80～190EJ/年で、上限は 265～300EJ/年である。



図 2.26: 本報告書に適応させた 2050 年の描写の基礎となるバイオマスとバイオエネルギーのモデル、及び図 2.25 におけるバイオマスの技術的ポテンシャル IPCC SRES (IPCC, 2000) を示す積み重ね棒グラフの導出に使用される、主な SRES シナリオ変数のストーリーライン。Hoogwijk et al.による (2005, Elsevier B.V.の許可を得て複製)。

図 2.25 で示した専門家の検討による 300EJ/年の 普及レベルの範囲で高い水準を達成するには、特に農業部門や優良な土地の利用・管理（区画化など）の改善及び効率性向上を目的とした大規模な政策的取り組みが必要となるだろう。

レビューシナリオの研究では（Dornburg et al., 2008 にあるとおり）、エネルギー需要が様々な炭素税の枠組みに対してコスト効率よく供給される場合のバイオマス使用量を計算しており、それによると、2050 年には約 50～250EJ/年のバイオマスが使用されると推定される（図 2.25 参照）。これは第 10 章で検討されたシナリオにおおよそ沿ったものである（図 2.23 参照。ここでは、需要の最大値が 300EJ、中央値が約 155EJ である。最も高い範囲はカテゴリ I+II（二酸化炭素 440ppm 未満）の最も厳しいシナリオのみに基づいた場合に限り達成されることに留意）。

2.8.4.2 バイオエネルギー技術、サプライチェーン、及び経済性

幅広い技術とバイオエネルギー・システムが存在し、商用段階または開発段階で熱、発電、輸送用の燃料生産を行っている。さらに、バイオマスのエネルギー転換は、投入原材料と土地利用当たりの最終製品の生産量を最大化するスキームを連結し、バイオ材料やバイオケミカルの生産と統合出来る。

現在の重要な商用技術は、家庭の調理から地域暖房の規模での熱、バイオマスと化石燃料の燃焼、コジェネレーション、混焼による発電、油糧作物（バイオディーゼル）とでんぷん作物（エタノール）による第一世代の液体燃料である。

近代的なバイオマスシステムには、専用作物や専用樹木、農業残渣と森林残渣、様々な有機廃棄物など、幅広い範囲の原材料が関係する。既存のバイオエネルギー・システムは、熱と発電用の木質、残渣と廃棄物、及び液体燃料の農作物にほぼ依存している。原材料の経済的側面及び生産力は、世界の地域及び原材料の種類によって大きく異なる。単位面積当たりのエネルギー収量は、作物と油糧種子（バイオ燃料の原材料）が 16～200GJ/ha（1.6～20.0TJ/km²）、リグノセルロース系バイオマスが 80～415GJ/ha（8.0～41.5TJ/km²）、残渣が 2～155GJ/ha（0.2～15.5TJ/km²）であり、コストで言えば 0.9～16US ドル（2005 年）/GJ の幅がある（2005～2007 年のデータ）である。原材料生産は、林業・食料部門と競合するが、アグロフォレストリーや混作などの統合的生産システムによって、追加的な環境サービスの追加に加えて相乗効果が得られる可能性がある。

生産地から変換施設へのバイオマスの出荷及び輸送は、バイオエネルギー生産の総コストの 20～50%を占める可能性がある。規模拡大、イノベーション、及び競争激化などの要素によって、サプライチェーンの経済的及びエネルギーコストを 50%以上削減させることが出来る。輸送距離が 50km を超える場合、ペレット化またはブリケット

ングを通した高密度化が必要となる。高効率キルンの採用によって便益を得ることが出来るはずである。

様々な最終使用用途は、原材料の物理的性質と化学組成によって、様々な転換ステップを通じたバイオマス加工を必要とする。コストは、地域、原材料の種類、原材料の供給コスト、バイオエネルギー生産の規模、及び年間における生産時期（主に季節の問題）によって異なる。推定される商業バイオエネルギーの均等化コスト幅としては、液体・気体バイオ燃料では約 2~48US ドル/GJ (2005 年)、2MW 以上の電力またはコジェネレーションシステムでは（原材料コストが高位発熱量に基づき 3US ドル/GJ (2005 年)、蒸気の発熱量では 5US ドル/GJ (2005 年) /GJ、温水では 12US ドル/GJ (2005 年) の場合）約 3.5~25US セント/kWh (2005 年) (10~50US ドル/GJ (2005 年))、家庭・地域暖房システムでは原材料コストの幅が（固形廃棄物から木材ペレットまで）0~20US ドル/GJ (2005 年)、約 2~77US ドル/GJ (2005 年) となっている。これらの計算値は 2005~2008 年のデータを参照しており、7%の割引率の US ドル (2005 年) で表示している。今日の重要なバイオエネルギー・システムのいくつかは、特にサトウキビエタノール及び廃棄物と残渣からの熱・発電は、競合的に展開される可能性がある。その他のバイオ燃料でもコスト削減と環境的な影響の低減が実現しているが、まだ補助金を必要としている。

中期的には、既存のバイオエネルギー技術の成果にはまだ大幅な改善の余地があり、新たな技術によってエネルギー（及び材料向け）のバイオマスのより効率的かつ競争力の高い展開の可能性が生まれている。バイオエネルギー・システム、具体的にはエタノール及びバイオ発電向けのものは、学習率で他の再生可能エネルギー技術に匹敵する、学習率の技術的学習曲線及び関連コスト削減を示している。これは、表 TS.2.2 で示すように、作付けシステム（サトウキビ及びトウモロコシの農業管理の進捗に続く）、供給システム・物流（北ヨーロッパ諸国及び国際物流で見られる）、及び変換（エタノール生産、発電、及びバイオガス）に対して当てはまる。技術的学習曲線に関して本章で触れたバイオエネルギー・オプションがすべて調査されたわけではないが、いくつかの重要なバイオエネルギー・システムはコストを削減してきており、環境的成果も改善してきている（2.3.4.2 節及び 2.7.2 節；表 2.13）。しかし、通常の場合、まだこれらは、経済開発（貧困削減、安全なエネルギー供給など）及びその他の国ごとの理由のために政府支援を必要としている。

発電技術（バイオマス IGCC 技術を経由するなど）、バイオマス供給システム、多年生の作付けシステムがさらに向上すれば、バイオマスによる発電（及び、熱または燃料生産）のコストは多くの地域で魅力的なコストレベルに低下させることが出来る。それにもかかわらず、バイオ電力の（メタンまたはバイオ燃料を通した）競争力のある生産は、最終用途システム（8.2 及び 8.3 節）、風力・太陽エネルギーなどの代替エネルギーの成果、石炭変換と連携した開発中の二酸化炭素回収・貯留技術、及び原子力との統合に依存している（10.2.2.4, 10.2.2.6, 9.3, 及び 9.4 節）。バイオマス変換と組み合わせて二酸化炭素回収・貯留を上手く導入することで、大気からの温室効果ガスの除去及び緩和コストの魅力的な水準を達成出来る可能性がある。しかし、これまでのところあまり注目を集めてはいない（2.6.3.3 節）。

リグノセルロース系バイオ燃料に関しては、最近の分析で、60~80US ドル (2005 年) /バレル (0.38~0.44US ドル (2005 年) /l) の石油との競合において十分な改善ポテンシャルがあると示された。現在利用可能なシナリオ分析は、より短期的な研究開発・市場支援が強ければ、技術の進捗によって 2020 年ぐらいには商業化出来る可能性があることを示している（石油・炭素価格に依存）。また、これによってエネルギー用バイオマスの普及に大きな転換が発生するとしているシナリオもある。その理由は、競争力のある生産によって政策目標（義務）から普及が切り離され、バイオマスの需要が食用作物からバイオマス残渣、森林バイオマス、及び多年生の作付けシステムに移動すると考えられることである。これまで、そのような（急激な）変化の影響は十分に研究されてこなかった。

バイオマスガス化複合発電は、ガソリン、ディーゼル、ジェット燃料に相当する性質を持つ様々なバイオ燃料の開発にとって主な手段である（炭化水素燃料の組成については表 2.15.C 参照）。文献で有望として強調された選択肢は、合成ガスが触媒リアクタを一度しか経由しない形の燃料製品の生産である。この形態では、未反応のガスが触媒リアクタ経由で循環するのではなく、発電システムに送り込まれる。バイオマス熱分解変換及び水熱変換コンセプトも期待されている（Laser et al., 2009）。石油産業と連動して発展しており、技術的にはガソリンまたはディーゼルの混合材料、さらにはジェット燃料品質の生成物への石油のアップグレードも可能であることが実証されている（IATA, 2009）。

リグノセルロース系エタノールの開発及び実証は、いくつかの国で継続されている。重要な開発ステップの 1 つとして、木材・草類・農業残渣の細胞壁の抵抗性を抑える前処理が挙げられる。酵素の分野における進歩の検討では、プロセス改善によって 2025 年までに 40%のコスト削減が見込まれており、それによって、パイロットプラントの推定生産コストが 18~22US ドル (2005 年) /GJ から 12~15US ドル/GJ となり（Hamelinck et al., 2005a; Foust et al., 2009; NRC, 2009a）、競争力のある水準まで落ちるとされている。

藻類などの光合成生物は、様々な炭水化物と脂質、化学製品、水素などの燃料、高い光合成効率と高いポテンシャルの可能性を持つその他の分子や酸素を、二酸化炭素、水、及び太陽光を用いて生物学的に生産する（2.6.1, 3.3.5, 及び 3.7.6 節）。水生植物による潜在的なバイオエネルギー供給の推定値は、その評価に使用するデータが不十分

であることから、非常に不確かである（Kheshgi et al., 2000; Smeets et al., 2009）。それでも、これらの種の調査はさらに進める必要がある。その開発によって汽水及び塩分の高い土壌も利用で出来るため、その利用は土地利用変化の影響を低下させる戦略の1つとなっている（Chisti, 2007; Weyer et al., 2009）。藻類系の燃料と化学製品の見通しは現段階では不確かだが、文献では潜在的な生産コストの幅広い範囲が報告されている。

バイオ材料の生産に関して言えばデータの利用可能性は限定的であり、バイオマスからの化学製品のコスト推定値はピア・レビューされた文献の中では少なく、将来予測や学習率に至ってはさらに少なくなっている。この状況は部分的には、成功しているバイオ由来の生産物が、本来化石燃料由来である生成物の成分の一部として、または糖発酵由来の乳酸をベースにしたポリラクチドなどの全く新しい合成重合体として市場に入っているという事実とも関係している。分析によると化石燃料を代替するバイオ燃料の生産に加えて、バイオ材料の連鎖的な使用及びそれに続くエネルギー向けの廃棄物の使用によって、使用されるバイオマスのヘクタール及びトン当たりのより効率のかつ大きな緩和効果が実現出来るとされている（Dornburg and Faaij, 2005 など）。

バイオマスガス化と二酸化炭素回収・貯留またはバイオマスガス化と二酸化炭素回収・貯留と石炭の併用による便益は、大きい（図 2.10 及び 2.11 参照）。同様に、発酵プロセスから二酸化炭素を回収すれば、世界の多くの地域で重要な選択肢になる。二酸化炭素回収・貯留との併用は中期的に魅力的な緩和の選択肢となるだろう。しかしながら、こうしたコンセプトは現時点では導入されておらず、コスト傾向も文献で利用出来ないため、バイオマス（または石炭）ガス化技術への投資にリスクが生ずる。また、地中隔離の信頼性と規制環境の不確実性が、さらなる障壁となる。この分野におけるより詳細な分析が待ち望まれる。

2.8.4.3 社会的及び環境的影響

バイオエネルギーが社会的・環境的問題に与える影響は、健康及び貧困から生物多様性及び水質に及ぶが、地域状況、特定の原材料の生産システム、選択された技術的経路、基準と代替シナリオの定義方法、及び実際のプロジェクトの設計及び実行などの多くの要素に依存して、プラスであることもあればマイナスである場合もある（9.2～9.5 節）。おそらく、農業（及び家畜類）生産からの食料及びその他の需要を満たすことに加え、エネルギー目的でバイオマスが生産される際に、土地利用の全体的管理・ガバナンスは最も重要である。バイオマス生産による土地利用の増加に農業管理の改善が伴う場合、望ましくない間接的土地利用変化の影響を避けることが出来る。しかし、管理されない状態で放置された場合、これらに対立が発生する可能性がある。そのため、バイオエネルギー生産システムの全体的な成果は、土地・水資源利用の管理と相互に関係している。これらの間にはトレードオフが存在し、適切な戦略及び意思決定を通して管理する必要がある。これらの戦略は、バイオエネルギー生産の持続可能性枠組み・認証制度の導入（2.4.5 節も参照）、温室効果ガスのパフォーマンス基準の設定（土地利用変化の影響を含む）を目的とした多くの取り組みにより、拡大し、環境的問題に対応するとともに、多数の社会的側面を考慮している。

ほとんどのバイオエネルギー・システムは、それによって大量の温室効果ガス排出を招く化石燃料利用が置き換えられる場合と、バイオエネルギー生産による排出量（土地利用変化、土地利用に関連する炭素ストックの正味の変化の一時的不均衡によるものを含む）が低く抑えられる場合、気候変動緩和に寄与することが出来る（2.3 及び 2.6 節の例）。バイオマス変換過程における原材料生産と炭素強度の高い化石燃料の使用からの高い N_2O 排出量は、温室効果ガス削減に大きく影響を与える可能性がある。最善の肥料管理の慣行、損失を最小化するプロセス統合、余剰熱の利用、及びプロセス燃料としてのバイオマス使用により、温室効果ガス排出量を低下させることが出来る。しかし、寒冷な気候では、バイオマスが原材料として、また転換プロセスで燃料で使用される場合の双方で、代替効率（2.5.3 節参照）は低くなる可能性がある。

バイオマス資源が様々な需要部門にどのように分配されるだろうかに関しては、研究が不足していることから、様々な用途に対して様々なバイオマス供給を行うかを詳細な分配はまったく提示されていない。さらに、バイオマス使用を対象にした二酸化炭素トン当たりの純排出回避のコストは、バイオマス資源と供給（物流）コスト、転換コスト（改良型または新型の技術の利用可能性に左右される）、化石燃料価格、とりわけ石油価格など、様々な要因に左右される。

様々な計算方法を用いて、主要な第一世代・第二世代バイオ燃料の温室効果ガス排出量を評価する方法が、利用可能である（2.5.2, 2.5.3 及び 9.3.4 節; Hoefnagels et al., 2010）。最近の洞察では、特に発電及び熱にリグノセロース系バイオマスが使用される場合、技術が商業化されると、適切な管理がなされたバイオエネルギー生産と活用チェーンにより、化石燃料の代替物と比較して温室効果ガス排出量を大幅に（80～90%）減らすことが可能であり、農業残渣及び有機性廃棄物（主として動物性残渣）をエネルギーに使用することで、こうした良好なパフォーマンスを得ることが出来る。現在のバイオ燃料生産システムのほとんどは、温室効果ガスの収支はプラスであり、間接的土地利用変化の大幅な影響を取り込んだとしても、これらの一部ではこの状況が持続する（後述参照）。

土地利用変化はこれらのスコアに強い影響を与える可能性がある。また、炭素が大量に蓄積された土地をバイオ燃料の生産を目的に転換すると、排出の便益は短期的にはマイナスのレベルに推移する可能性がある。これは、パー

ムオイル系のバイオディーゼル生産で最も顕著に見られる。泥炭地が干拓されパームオイルに転換された場合、極端な炭素排出になる (Wicke et al., 2008)。このため、エネルギー（及び原料）用のバイオマス使用による温室効果ガス緩和効果は、場所（特に、炭素量の多い土地を炭素量の少ない作付けシステムに転換させないこと）、原材料の選択、間接的土地利用変化の回避に大きく左右される（後述参照）。対照的に、多年生の作付けシステムを使用すると、大量の炭素の蓄積、耕作限界地や荒廃地での炭素隔離の強化が可能になり、バイオ燃料生産も化石燃料使用を代替出来る。土地利用の適切なガバナンス（適切な区画化など）及びバイオマス生産システムの選択は、良好な成果を達成するために非常に重要である。

利用可能な間接的土地利用変化に関する文献の評価（図 2.13, 9.10, 及び 9.11）では、初期モデルは、使用のためのその他の土地（ブラジルの牧草地など）を設けていなかったことから、地理的分解能の不足によって、土地利用の割り当ての大部分が森林減少とされている。Searchinger et al. (2008) の初期の論文は、間接的土地利用変化の要素が 0.8（バイオエネルギーに利用される土地のヘクタールごとに森林地が 0.8ha 減少）と示しているが、マクロ経済を生物物理学的モデルに結合した後の（2010 年の）研究の報告では 0.15~0.3 まで減少している (Al-Riffai et al., 2010 など参照)。間接的土地利用変化の推定に使用されたモデルは、土地置換 (land displacement) の推定値が異なっている。一部均衡モデルや一般均衡モデルは様々な想定に基づいており、様々な時間枠を反映しているために、程度の差はあるが、調整がなされている。より詳細な評価（たとえば Al-Riffai et al., 2010; Lapola et al., 2010; 2.5.3 節参照）では実際、重要な間接的土地利用変化を推定しているが、どのような間接的土地利用変化でも強く（完全に）、農業管理や家畜管理の改善率や、バイオエネルギー生産率に依存することも示されている。開発におけるこの均衡は、ヨーロッパのバイオマス資源のポテンシャル分析で、その基礎となっている。農業における生産性漸増の予測が、(Fischer et al. (2010) 及び de Wit and Faaij (2010) ; 図 2.5 (a) 参照) の報告のとおり、潜在的な土地の利用可能性の基礎であり、食料（または自然）との競合の最小化を起点としている。主なバイオ燃料生産国における、分析の複雑な種別に適用するモデルの高度化が増せば、土地分配の実際のダイナミクスに関する必要かつ改善されたデータ、土地利用変化の全体的影響の低下（図 9.11）、全体的な土地利用管理が重要であるという結果を生みつつある (Berndes et al., 2010)。

バイオエネルギープロジェクトは、直接的土地利用変化と間接的土地利用変化の双方で、関連する増加にも減少にもつながる。間接的土地利用変化は本質的に定量化が難しい。たとえそうであったとしても、土地利用変化は温室効果ガスの収支に複数の方法で悪影響を与える可能性があり、気候変動の緩和に対するバイオエネルギーの貢献にとって、条件と背景によっては有益な結果にも有害な結果にもなる。

炭素量が多い土地（特に森林、中でも水はけの悪い泥炭土の森林）がバイオエネルギー生産に向けて改質された場合、正味排出量削減を達成する前に先行する排出によって数十年～数世紀のタイムラグが発生する場合がある。逆に、耕地限界の劣化土壌におけるバイオエネルギー植林地の構築は、土壌及び地上バイオマスへの二酸化炭素の蓄積につながる可能性があり、エネルギー生産用に収穫されると、化石燃料の使用を置き換えることになる。森林の炭素蓄積に関する長期的な正味の影響は、(昆虫の大発生や火事などの攪乱も含む) 自然条件や森林管理の慣行によって、プラスにもマイナスにもなる。農業及び林業からの使用済み有機性廃棄物及び副生成物の使用は、これらのバイオマス資源が代替目的に利用されなかった場合、土地利用変化を発生させない。バイオエネルギーの原材料は食料や繊維と組み合わせて生産でき、土地利用の置換を回避し、土地の生産的使用を向上させる。バイオエネルギー用のリグノセルロース系原材料は、優良な栽培地への圧力を低減させることができる。土地利用のあらゆる形式での生産性の向上を促進することでも、土地利用の変化は減少する。

バイオエネルギーの空気汚染の影響は、バイオエネルギー技術（汚染管理技術を含む）と代替エネルギー技術の両方に依存する（図 9.12）。伝統的なバイオマスを使用したためのバイオマス調理用ストーブの改善によって、健康及び生活の質に関し、調理・暖房用に伝統的なバイオマスに依存している 27 億人に対して大きな相乗便益をもたらし、大規模かつ費用対効果の高い温室効果ガス排出の緩和を実現することが出来る（2.5.4, 9.3.4, 9.3.4.2, 及び 9.3.4.3 節）。調理の効率性の良い技術は、健康における他の主要な介入（たばこ、栄養不良、結核などに対応するもの）に比べ、さらにコスト効率が良い（図 2.14 及び 9.13）。

他の重要な環境的影響は、水使用、生物多様性、及びその他の排出である（2.5.5 及び 9.3.4 節）。まさしく温室効果ガスの影響の場合、適切な管理が水、大気、土壌への排出レベルを決定する。枠組み及び基準の開発（と継続的な改善プロセス）によって、バイオエネルギー生産の排出量を減少させ、現在のシステムよりも高い効率性を実現する。

水は、植生・土地利用管理の変化の完全な影響を理解するため、地域的レベルでより良く分析する必要がある重要な問題である。最近の研究 (Berndes, 2002; Dornburg et al., 2008; Rost et al., 2009; Wu et al., 2009) では、保水性の改善及び土壌からの直接的蒸発の低下によって、従来の農業、バイオエネルギー作物、及び場所・気候に依存する永続的な作付けシステムにおける水利用の効率には大幅な改善の余地があることが示されている（図 9.14）。それにもかかわらず、適切な管理が行われない場合、バイオマス生産の増加によって重要な地域における水の競合が増加してしまう可能性があるが、これは非常に望ましくない事態である (Fingerman et al., 2010)。

生物多様性への影響の評価に関する現在の議論によれば、科学的不確実性は大きいとは言え、生物多様性に関しても同じことが言える。明らかに、自然地域を犠牲にした大規模な単一栽培の開発は、2007 年の生物多様性条約で強調されるように、生物多様性に対して有害である。しかし、2.5 節で論じたように、バイオエネルギーはプラスの影響にもつながる可能性がある。異なる多年生牧草及び木質作物の農地への統合は、土壤炭素及び生産性の増加、表層崩壊及び地域的「鉄砲水」の減少、生態的回廊の供給、風食と水食の減少、及び河川系に輸送される堆積物と栄養源の減少させることができる。森林バイオマス収穫によって、移植の条件の改善、生産性と残る群生の成長の改善、及び野火のリスクの減少が可能になる。

これらの全分野の影響評価は、政府や円卓会議での継続的な活動（脚注 74 参照）とパイロット研究⁸⁷で裏付けられるように、さらに研究、データ収集、適切なモニタリングを行う価値がかなりある。

バイオエネルギー生産の大規模な拡大と関連した社会的影響は、非常に複雑で定量化することが難しい。バイオ燃料の原材料として栽培される作物は現在、世界の農地の 1%以下しか使用していないが、バイオ燃料の需要は、農業・林業部門における需要上昇の 1 つのドライバーとなっているため、世界の食料価格の上昇に寄与する。食料と飼料への需要上昇、石油価格の上昇、国際的な食料市場への投機、異常気象による偶発的な収穫不良が、世界規模の食料価格に影響を与えてきた可能性の高い例として挙げられる。貧困な農家への価格上昇の便益を考慮しても、食料価格の上昇は貧困水準、食料安全保障や子供の栄養不足に対して悪影響を与える。一方で、バイオ燃料によって、開発途上国が農村開発の進展に加え、特にそれが経済的に持続可能である場合に農業成長を進展させる機会を得ることが出来る。

一般に、バイオエネルギーの選択肢は、他のエネルギー源に比べ、たとえば 50～2,200 雇用/PJ など、地方における雇用創出に非常に大きなプラスの影響を持っている（2.5.7.3 節）。また、従来型農業の集約化でバイオエネルギーに使用できそうな土地ができた場合、地方で創出された雇用への影響全体と付加価値は、バイオエネルギー生産が拡大すると増加する。効率的な牧草や農業の土地利用管理は、天水栽培のポテンシャルを大幅に高めるだろう（表 2.3 参照; Wicke et al., 2009）。多くの開発途上国の場合、雇用を創出するバイオエネルギーのポテンシャル、地方の経済活動、燃料供給の安全性が重要な駆動要因である。加えて、（輸入）化石燃料に対する経費も（大きく）減少させることが出来る。しかし、そのような便益が農村の農家に届くかどうかは、生産チェーンの構成及び土地利用の統治の方法に大きく依存している。

開発されたバイオエネルギーの選択肢、その開発方法、どのような条件に基づくと、影響が主にプラスかマイナスかに対して多大な影響を持つか（アルゼンチンのシナリオ; van Dam et al., 2009a,b）。基準の開発及び継続的な改善プロセスで、現在のシステムに比べ、バイオエネルギー生産の影響を低くしたりプラスにしたり、効率性を高めることが出来る。バイオエネルギーは、先進国と開発途上国で同様に気候変動緩和、安全かつ多様なエネルギー供給と経済成長に寄与する可能性がある。しかし、環境持続可能性に対するバイオエネルギーの効果は、他にもある多くの要素の中でも特に、地域的な条件、基準の定義方法、及びプロジェクトの設計・実施方法に依存し、良くも悪くもなり得る。

2.8.5 普及に関する結論: バイオエネルギーに関する重要な示唆

バイオエネルギーは現在、最大の再生可能エネルギー源であり、今世紀前半は引き続き最大の再生可能エネルギー源の 1 つである可能性が高い。成長ポテンシャルはかなりあるが、積極的な開発が必要である。

- 最近の文献における評価では、エネルギー用バイオマスの技術的ポテンシャルは 2050 年までに 500EJ/年の水準になる可能性があるとし示している。しかし、このポテンシャルに影響する市場・政策条件などの重要な要素に関して大きな不確実性が存在している。
- 本章における専門家の評価は、2005 年までの潜在的導入の水準としては 100～300EJ/年を示している。このポテンシャルの実現は主な課題を表し、2050 年における世界の一次エネルギー需要に大きく寄与するだろう。これは、農業及び林業における現在の世界規模のバイオマス産出相当の熱容量とほぼ同じである。
- バイオエネルギーは、資源が持続的に開発され、効率的な技術が提供された場合に温室効果ガスを緩和する大きなポテンシャルを持っている。多年生作物、林産物、バイオマス残渣・廃棄物などの特定された現行のシステムと主要な将来のオプション、及び先進変換技術によって、大きな温室効果ガス緩和パフォーマンス（化石エネルギー・ベースラインから 80～90%削減）を実現することが出来る。しかし、炭素ストックの重大な損失及び間接的土地利用変化の効果につながる土地転換及び森林管理によって、正味の温室効果ガス緩和影響が減少し、場合によっては相殺・逆転してしまう可能性がある。

⁸⁷ www2.epfl.ch/energycenter-jahia4/page65660.html に掲載の「パイロット研究 Roundtable on Sustainable Biofuels」を参照。

- ・ エネルギー用のバイオマスの高い潜在的な導入水準を達成するには、競合する食料・繊維需要を抑えて土地を適切に管理し、農業・林業収獲を大幅に増加させなければならない。土地利用の監視及び良好な管理がなされていない場合のバイオエネルギーの拡大は、食料供給、水資源、生物多様性に関する重大な対立のリスクに加え、温室効果ガスの便益が低くなるリスクが生じる。逆に、効果的な持続可能性の枠組み確立後に実施することで、適応策を組み合わせる機会を含め農村開発、土地改良、及び気候変動緩和などにおいて、そのような対立を緩和し、前向きな成果が実現出来る可能性がある。
- ・ バイオマス生産・使用の影響及びパフォーマンスは、地域・場所により異なる。そのため、土地利用及び農村開発の良好なガバナンスの一環として、バイオエネルギー政策は農業（作物及び家畜類）・林業部門と協調し、地域条件・優先度を考慮する必要がある。バイオマス資源ポテンシャルは、気候変動影響に影響を受け、またそれと相互に作用するが、具体的な影響はまだほとんど解明されていない。この点については、地域差も大きいだろう。バイオエネルギー及び新しい（多年生）作物システムも、バイオマス資源の生産と適応策（土壌保護、水貯留、農業の近代化など）を組み合わせる機会を実現する。
- ・ いくつかの重要なバイオエネルギー・オプション（ブラジルのサトウキビ・エタノール生産、優良な廃棄物エネルギー利用システム、効率的なバイオマス調理レンジ、バイオマス・ベースの熱電供給）は、現在すでに競争力があり、長期的オプションとの重要な相乗効果を発揮する可能性がある。ガソリン、ディーゼル、ジェット燃料の代替となるリグノセルロース系バイオ燃料、先進バイオ電力オプション、及びバイオリファイナリー概念によって、2020～2030年の期間において競争力のあるバイオエネルギーの導入を実現出来る可能性がある。二酸化炭素回収・貯留とバイオマス変換の組み合わせによって、長期的な大気からの温室効果ガス除去（大幅な温室効果ガス排出量削減に必要である）の実現の可能性が高まる。先進バイオ材料はバイオエネルギー生産の経済性及び緩和においても将来性があるが、そのポテンシャルは、非常に不確かな水生バイオマス（藻類）の高い潜在的役割と同様にあまり解明されていない。
- ・ 急速に変化している政策環境、最近の市場に基づく活動、先進バイオリファイナリーとリグノセルロース系バイオ燃料オプションへの支援の増加、そして特に持続可能性の基準と枠組みの発達はすべて、持続可能性の実現へ向けてバイオエネルギー・システム及びその普及を促すポテンシャルを持っている。この目標の達成には、主要技術のコスト削減のための投資、バイオマス生産・供給インフラの改善、及び公的・政治的承認を得られる実施戦略が必要となるだろう。

結論として、シナリオ変数（図 2.26 を参照）、バイオエネルギー生産能力が開発される主要な前提条件、及び生じる可能性がある影響の相互関係の説明のため、図 2.27 に 2050 年までの世界規模でのエネルギー向けのバイオマスの普及の異なる 4 つのスケッチを示している。資源ポテンシャルの検討から導かれた 100～300EJ の幅は、普及の下限及び上限を視覚的に示している。想定されるストーリーラインはおおよそ、IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES) の定義に従ってバイオエネルギーに適用され、図 TS.2.9 でまとめられている。その定義は、図 2.25 の積み重ね棒グラフで示されている技術的ポテンシャルの導出にも使用されている（Dornburg et al., 2008, 2010）。

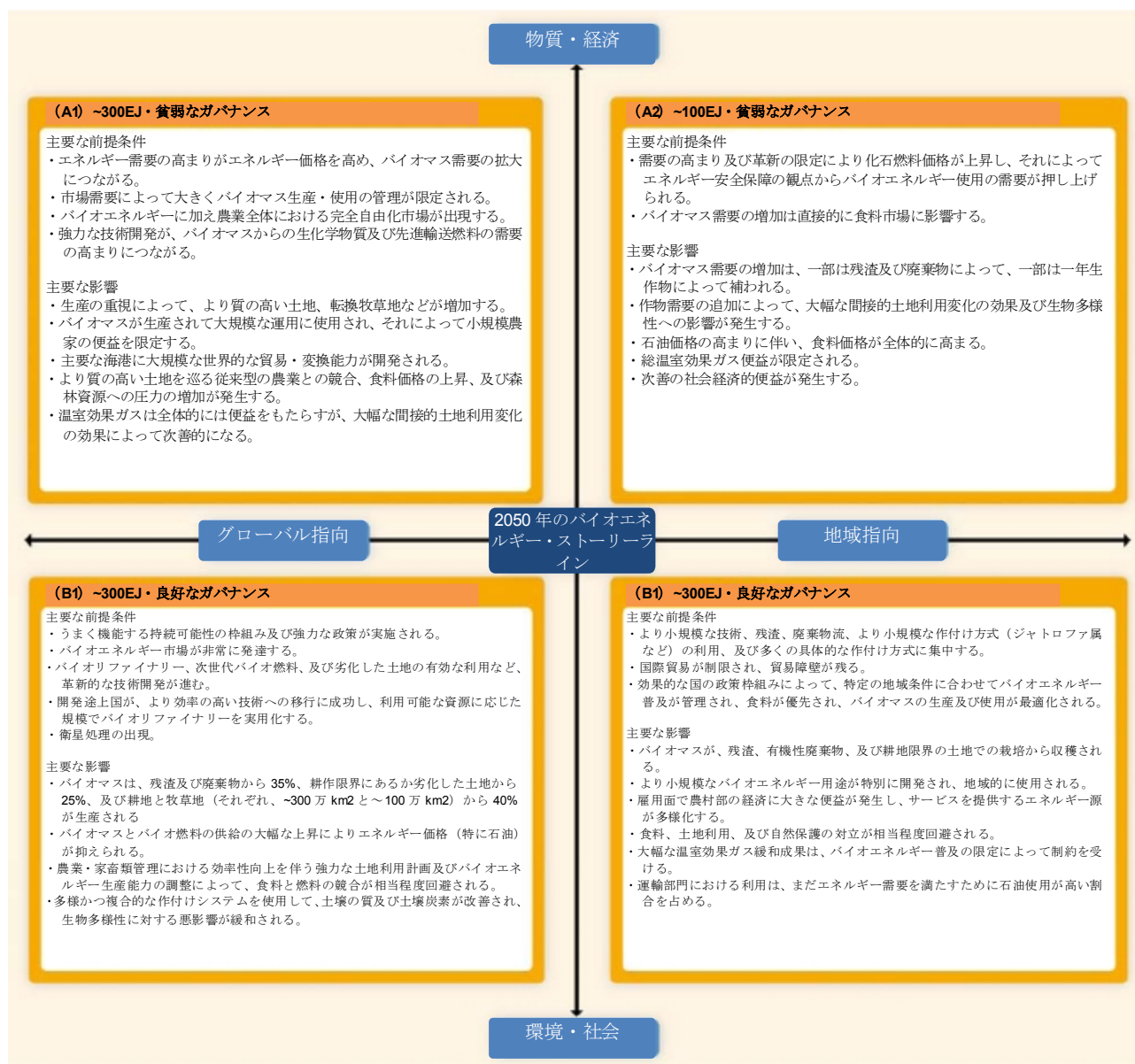


図 2.27: エネルギー用バイオマス普及の想定する未来像（2050 年）。図 2.26 でまとめられた IPCC SRES ストーリーライン(IPCC, 2000)に、特定の世界の条件に基づく主要な前提条件及び影響を説明した 4 つの比較描写。

バイオマス及びその複数のエネルギー生成物は、持続可能なやり方と持続不可能なやり方両方で、食料、飼料、繊維、及び林産物と同時に開発が可能である。IPCC シナリオ・ストーリーライン及び描写を通してみると、持続可能な開発及び気候変動緩和の方針を考慮するかどうかで達成出来る浸透水準の高低も変わってくる。これらのストーリーラインから、バイオエネルギー技術開発及び統合システムに関する洞察を得ることが出来る。

REFERENCES

- Abbasi, T., and S.A. Abbasi (2010).** Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(3), pp. 919-937.
- Adam, J.C. (2009).** Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort-kiln (Eco-charcoal). *Renewable Energy*, **34**(8), pp. 1923-1925.
- Adams, P.W., G.P. Hammond, M.C. McManus, and W.G. Mezzullo (2011).** Barriers to and drivers for UK bioenergy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(2), pp. 1217-1227.
- Aden, A., M. Ruth, K. Ibsen, J. Jechura, K. Neeves, J. Sheehan, B. Wallace, L. Montague, A. Slayton, and J. Lukas (2002).** *Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis for Corn Stover*. NREL/TP-510-32438, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA, 154 pp.
- Ahrens, T.D., D.B. Lobell, J.I. Ortiz-Monasterio, Y. Li, and P.A. Matson (2010).** Narrowing the agronomic yield gap with improved nitrogen use efficiency: a modeling approach. *Ecological Applications*, **20**(1), pp. 91-100.
- Ainsworth, E.A., and S.P. Long (2005).** What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, **165**(2), pp. 351-372.
- Al-Riffai, P., B. Dimaranan, and L. Laborde (2010).** *Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate*. Project Report - Specific Contract No SI2.537.787 implementing Framework Contract No TRADE/07/A2, International Food Policy Research Institute, Washington, DC, USA, 123 pp.
- Alexandratos, N. (2009).** World food and agriculture to 2030/50: highlights and views from mid-2009. In: *Proceedings of the Expert Meeting on How to Feed the World in 2050*, Rome, Italy, 24-26 June 2009. Economic and Social Development Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, pp. 78. Available at: www.fao.org/docrep/012/ak542e/ak542e00.htm.
- Alfstad, T. (2008).** *World Biofuels Study: Scenario Analysis of Global Biofuels Markets*. BNL-80238-2008, Brookhaven National Laboratory, New York, NY, USA, 67 pp.
- Allen, J., M. Browne, A. Hunter, J. Boyd, and H. Palmer (1998).** Logistics management and costs of biomass fuel supply. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, **28**(6), pp. 463-477.
- Allen, M.R., D.J. Frame, C. Huntingford, C.D. Jones, J.A. Lowe, M. Meinshausen, and N.**
- Meinshausen (2009).** Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature*, **458**(7242), pp. 1163-1166.
- Alper, H., and G. Stephanopoulos (2009).** Engineering for biofuels: exploiting innate microbial capacity or importing biosynthetic potential? *Nature Reviews Microbiology*, **7**(10), pp. 715-723.
- Anderson-Teixeira, K.J., S.C. Davis, M.D. Masters, and E.H. Delucia (2009).** Changes in soil organic carbon under biofuel crops. *Global Change Biology Bioenergy*, **1**(1), pp. 75-96.
- APEC (2003).** *The New Brunswick Forest Industry: The Potential Economic Impact of Proposals to Increase the Wood Supply*. Atlantic Provinces Economic Council, Halifax, Canada.
- Armendáriz, C.A., R.D. Edwards, M. Johnson, M. Zuk, L. Rojas, R.D. Jiménez, H. Riojas-Rodriguez, and O. Masera (2008).** Reduction in personal exposures to particulate matter and carbon monoxide as a result of the installation of a Patsari improved cook stove in Michoacan Mexico. *Indoor Air*, **18**(2), pp. 93-105.
- Arndt, C., R. Benfica, F. Tarp, and R. Uaiene (2010).** Biofuels, poverty, and growth: A computable general equilibrium analysis of Mozambique. *Environment and Development Economics*, **15**(1), pp. 81-105.
- Asikainen, A., H. Lii, S. Peltola, T. Karjalainen, and J. Laitila (2008).** *Forest Energy Potential in Europe (EU 27)*. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute, No. 69, Finnish Forest Research Institute, Helsinki, Finland, 33 pp.
- Asikainen, A., P. Anttila, J. Heinimö, T. Smith, I. Stupak, and W. Ferreira Quirino (2010).** Forest and bioenergy production. In: *Forest and Society – Responding to Global Drivers of Change*. G. Mery, P. Katila, G. Galloway, R.I. Alfaro, M. Kanninen, M. Lobovikov, and J. Varjo (eds.). International Union of Forest Research Organizations, Vienna, Austria, pp. 183-200.
- Astbury, G. (2008).** A review of the properties and hazards of some alternative fuels. *Process Safety and Environmental Protection*, **86**(6), pp. 397-414.
- Ausubel, J.H. (2000).** The great reversal: nature's chance to restore land and sea. *Technology in Society*, **22**, pp. 289-301.
- Azar, C., K. Lindgren, M. Obersteiner, K. Riahi, D. van Vuuren, K. den Elzen, K. Möllersten, and E. Larson (2010).**

- The feasibility of low CO₂ concentration targets and the role of bio- energy with carbon capture and storage (BECCS). *Climatic Change*, **100**(1), pp. 195-202.
- Bacovsky, D., M. Dallos, and M. Worgetter (2010a).** *Status of 2nd Generation Biofuels Demonstration Facilities in June 2010*. T39-P1b, IEA Bioenergy Task 39, 126 pp. Available at: www.ascension-publishing.com/BIZ/IEATask39-0610.pdf.
- Bacovsky, D., W. Mabee, and M. Wörgetter (2010b).** How close are second-generation biofuels? *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **4**(3), pp. 249-252.
- Badger, P. (2000).** New process for torrefied wood manufacturing. *Bioenergy Update*, **2**(4), pp. 1-4. Available at: www.bioenergyupdate.com/magazine/security/NL0400/gbinl0400.pdf.
- Badgley, C., J. Moghtader, E. Quintero, E. Zakem, M.J. Chappell, K. Avilés-Vázquez, A. Samulon, and I. Perfecto (2007).** Organic agriculture and the global food supply. *Renewable Agriculture and Food Systems*, **22**(02), pp. 86-86.
- Baffes, J., and T. Haniotis (2010).** *Placing the 2006/08 Commodity Price Boom into Perspective*. Policy Research Working Paper 5371, The World Bank Group, Washington, DC, USA, 42 pp.
- Bai, Z.G., D.L. Dent, L. Olsson, and M.E. Schaepman (2008).** Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, **24**(3), pp. 223-234.
- Bailis, R., A. Cowan, V. Berrueta, and O. Masera (2009).** Arresting the killer in the kitchen: The promises and pitfalls of commercializing improved cookstoves. *World Development*, **37**(10), pp. 1694-1705.
- Bain, R.L. (2007).** *World Biofuels Assessment, Worldwide Biomass Potential: Technology Characterizations*. NREL/MP-510-42467, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 140 pp.
- Bain, R.L. (2011).** *Biopower Technologies in Renewable Electricity Alternative Futures*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, in press.
- Bain, R.L., W.P. Amos, M. Downing, and R.L. Perlack (2003).** *Biopower Technical Assessment: State of the Industry and the Technology*. TP-510-33123, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 277 pp.
- Bairiganjan, S., R. Cheung, E.A. Delio, D. Fuente, S. Lall, and S. Singh (2010).** *Power to the People: Investing in Clean Energy for the Base of the Pyramid in India*. Centre for Development Finance, c/o Institute for Financial Management and Research, World Resources Institute, Washington, DC, USA, 74 pp.
- Balat, M. (2011).** Potential alternatives to edible oils for biodiesel production - A review of current work. *Energy Conversion and Management*, **52**(2), pp. 1479-1492.
- Ball, B.C., I. Bingham, R.M. Rees, C.A. Watson, and A. Litterick (2005).** The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, **85**, pp. 557-577.
- Balmford, A., R.E. Green, and J.P.W. Scharlemann (2005).** Sparing land for nature: exploring the potential impact of changes in agricultural yield on the area needed for crop production. *Global Change Biology*, **11**(10), pp. 1594-1605.
- Barker, W.T., C.L. Lura, and J.L. Richardson (2009).** Soil organic matter and native plant production on the Missouri Coteau. *North Dakota Farm Research*, **44**(2), pp. 14-21.
- Barth, T., and M. Kleinert (2008).** Motor fuels from biomass pyrolysis. *Chemical Engineering & Technology*, **31**(5), pp. 773-781.
- Bauen, A., G. Berndes, M. Junginger, M. Londo, F. Vuille, R. Ball, T. Bole, C. Chudziak, A. Faaij, and H. Mozaffarian (2009a).** *Bioenergy: A Sustainable and Reliable Energy Source: A Review of Status and Prospects*. IEA Bioenergy: ExCo:2009:06, 108 pp.
- Bauen, A., F. Vuille, P. Watson, and K. Vad (2009b).** *The RSB GHG accounting scheme. Feasibility of a meta-methodology and way forward*. E4tech version 4.1, Roundtable on Sustainable Biofuels., Lausanne, Switzerland, 91 pp. Available at: rsb.epfl.ch/files/content/sites/rsb2/files/Biofuels/Documents%20and%20Resources/09-10-08_E4Tech%20Report%20GHG%20Accounting_V4%201_08October09.pdf.
- Baum, C., P. Leinweber, M. Weih, N. Lamersdorf, and I. Dimitriou (2009).** Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. *Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research*, **59**(3), pp. 183-186.
- Baum, S., M. Weih, G. Busch, F. Kroiher, and A. Bolte (2009).** The impact of Short Rotation Coppice plantations on phytodiversity. *Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research*, **59**(3), pp. 163-170.
- Beer, T., and T. Grant (2007).** Life-cycle analysis of emissions from fuel ethanol and blends in Australian heavy and light vehicles. *Journal of Cleaner Production*, **15**(8-9), pp. 833-837.
- Beer, T., T. Grant, R. Brown, J. Edwards, P. Nelson, H. Watson, and D. Williams (2000).** *Life Cycle Emissions Analysis of Alternative Fuels for Heavy Vehicles*. Atmospheric Research Report C/0411/1.1/F2, Australian Commonwealth Scientific and Research Organization, Aspendale, Australia, 148 pp.
- Beer, T., T. Grant, G. Morgan, J. Lapszewicz, P. Anyon, J. Edwards, P. Nelson, H. Watson, and D. Williams (2001).** *Comparison of Transport Fuels*. EV45A/2/F3C, Australian Commonwealth Scientific and Research Organization,

- Aspendale, Australia, 485 pp.
- Beringer, T.I.M., W. Lucht, and S. Schaphoff (2011).** Bioenergy production potential of global biomass plantations under environmental and agricultural constraints. *Global Change Biology Bioenergy*, doi:10.1111/j.1757-1707.2010.01088.x.
- Berndes, G. (2002).** Bioenergy and water--the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. *Global Environmental Change*, **12**(4), pp. 253-271.
- Berndes, G. (2008a).** Future biomass energy supply: The consumptive water use perspective. *International Journal of Water Resources Development*, **24**(2), pp. 235-245.
- Berndes, G. (2008b).** *Water Demand for Global Bioenergy Production: Trends, Risks and Opportunities*. Report commissioned by the German Advisory Council on Global Change. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin, Germany, 46 pp.
- Berndes, G., and J. Hansson (2007).** Bioenergy expansion in the EU: Cost-effective climate change mitigation, employment creation and reduced dependency on imported fuels. *Energy Policy*, **35**(12), pp. 5965-5979.
- Berndes, G., M. Hoogwijk, and R. van den Broek (2003).** The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy*, **25**(1), pp. 1-28.
- Berndes, G., F. Fredrikson, and P. Börjesson (2004).** Cadmium accumulation and Salix-based phytoextraction on arable land in Sweden. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **103**(1), pp. 207-223.
- Berndes, G., P. Börjesson, M. Ostwald, and M. Palm (2008).** Multifunctional biomass production systems – an overview with presentation of specific applications in India and Sweden. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **2**(1), pp. 16-25.
- Berndes, G., N. Bird, and A. Cowie (2010).** *Bioenergy, Land Use Change and Climate Change Mitigation*. IEA Bioenergy: ExCo:2010:03, International Energy Agency, Whakarewarewa, Rotorua, New Zealand, 20 pp. Available at: www.ieabioenergy.com/LibItem.aspx?id=6770.
- Berrueta, V.M., R.D. Edwards, and O.R. Masera (2008).** Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, **33**(5), pp. 859-870.
- Bessou, C., F. Ferchaud, B. Gabrielle, and B. Mary (2010).** Biofuels, greenhouse gases and climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, doi:10.1051/agro/2009039, 132 pp.
- Bhagwat, S.A., K.J. Willis, H.J.B. Birks, and R.J. Whittaker (2008).** Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution*, **23**(5), pp. 261-267.
- Bhojvaid, P.P. (2007).** Recent trends in biodiesel production. In: *Biofuels: Towards a Greener and Secure Energy Future*. P.P. Bhojvaid (ed.), The Energy and Resources Institute (TERI) Press, New Delhi, India, pp. 119-136.
- Bickel, P., and R. Friedrich (eds.) (2005).** *ExternE - Externalities of Energy: Methodology 2005 Update*. European Commission, Brussels, Belgium, 270 pp.
- Biran, A., J. Abbot, and R. Mace (2004).** Families and firewood: A comparative analysis of the costs and benefits of children in firewood collection and use in two rural communities in sub-Saharan Africa. *Human Ecology*, **32**(1), pp. 1-25.
- Blanco-Canqui, H., and R. Lal (2009).** Corn stover removal for expanded uses reduces soil fertility and structural stability. *Soil Science Society of America Journal*, **73**(2), pp. 418-426.
- Blanco-Canqui, H., R. Lal, W.M. Post, R.C. Izaurralde, and L.B. Owens (2006).** Rapid changes in soil carbon and structural properties due to stover removal from no-till corn plots. *Soil Science*, **171**(6), pp. 468-482.
- BNDES/CGEE (2008).** *Sugarcane-Based Bioethanol: Energy for Sustainable Development*. Brazilian Development Bank and Center for Strategic Studies and Management Science, Technology and Innovation, Rio de Janeiro, Brazil, 304 pp.
- Bohlmann, G.M., and M.A. Cesar (2006).** The Brazilian opportunity for biorefineries. *Industrial Biotechnology*, **2**(2), pp. 127-132.
- Boman, C., B. Forsberg, and T. Sandström (2006).** Shedding new light on wood smoke: a risk factor for respiratory health. *European Respiratory Journal*, **27**(3), pp. 446-447.
- Bon, E.P.S., and M.A. Ferrara (2007).** Bioethanol production via enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass. In: *FAO Symposium on the Role of Agricultural Biotechnologies for Production of Bioenergy in Developing Countries*, 12 October 2007, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 11 pp. Available at: <http://www.fao.org/biotech/docs/bon.pdf>.
- Börjesson, P. (2000).** Economic valuation of the environmental impact of logging residue recovery and nutrient compensation. *Biomass and Bioenergy*, **19**(3), pp. 137-152.
- Börjesson, P. (2009).** Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – What determines this? *Applied Energy*, **86**(5), pp. 589-594.
- Börjesson, P., and G. Berndes (2006).** The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, **30**(5), pp. 428-438.

- Borowitzka, M.A., R. Osinga, J. Tramper, J.G. Burgess, and R.H. Wijffels (1999).** Commercial production of microalgae: ponds, tanks, and fermenters. *Progress in Industrial Microbiology*, **35**, pp. 313-321.
- Bouwman, A.F., L.J.M. Boumans, and N.H. Batjes (2002).** Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles*, **16**(4), 13 pp.
- Bradley, D., F. Diesenreiter, M. Wild, and E. Tromborg (2009).** *World Biofuel Maritime Shipping Study*. IEA Bioenergy Task 40, IEA, Paris, France, 38 pp.
- Bradley, R.L., A. Olivier, N. Thevathasan, and J. Whalen (2008).** Environmental and economic benefits of tree-based intercropping systems. *Policy Options*, February, pp. 46-49. Available at: www.irpp.org/po/archive/feb08/bradley.pdf.
- Bravo, R., O. Masera, T. Chalico, D. Pandey, E. Riegelhaupt, and A. Uhlig (2010).** *Case-studies from Brazil, India and Mexico*. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 80 pp.
- Bridgwater, A., S. Czernik, J. Diebold, D. Meier, A. Oasmaa, C. Peacocke, J. Piskorz, and D. Radlein (2003).** *Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook*. CPL Press, Berks, UK, 180 pp.
- Bridgwater, A. Ed. (2007)** *Success & Visions for Bioenergy: Thermal processing of biomass for bioenergy, biofuels and bioproducts*. CPL Scientific Publishing Services Ltd., CD-ROM, ISBN 9781872691282.
- Bringezu, S., H. Schuetz, M. O'Brien, L. Kauppi, R. Howarth, and J. McNeely (2009).** *Towards Sustainable Production and Use of Resources: Assessing Biofuels*. United Nations Environment Programme, Paris, France, 102 pp.
- Bruce, N., E. Rehfuess, S. Mehta, G. Hutton, and K.R. Smith (2006).** Indoor air pollution. In: *Disease Control Priorities in Developing Countries*. 2nd ed. World Bank Group, Washington, DC, USA, pp. 793-815.
- Bruinsma, J. (2009).** The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? In: *Expert Meeting on How to Feed the World in 2050*, 24-26 June 2009, Economic and Social Development Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 33 pp.
- Brunner, A.M., S.P. DiFazio, and A.T. Groover (2007).** Forest genomics grows up and branches out. *New Phytologist*, **174**(4), pp. 710-713.
- Buchholz, T., E. Rametsteiner, T. Volk, and V. Luzadis (2009).** Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments. *Energy Policy*, **37**(2), pp. 484-495.
- Bureau, J.-C., H. Guyomard, F. Jacquet, and D. Tréguer (2010).** European biofuel policy: How far will public support go? In: *Handbook of Bioenergy Economics and Policy*. M. Khanna, J. Scheffran, and D. Zilberman (eds.), Springer, Heidelberg, Germany, pp. 401-423.
- Bush, D.R., and J.E. Leach (2007).** Translational genomics for bioenergy production: There's room for more than one model. *The Plant Cell*, **19**(10), pp. 2971-2973.
- Calder, I., J. Amezcaga, J. Bosch, B. Aylward, and L. Fuller (2004).** Forest and water policies: the need to reconcile public and science conceptions. *Geologica acta*, **2**(2), pp. 157-166.
- Campbell, J.E., D.B. Lobell, and C.B. Field (2009).** Greater transportation energy and GHG offsets from bioelectricity than ethanol. *Science*, **324**(5930), pp. 1055-1057.
- CARB (2009).** *Proposed Regulation to Implement the Low Carbon Fuel Standard*. California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, Stationary Source Division, Sacramento, California, 374 pp.
- Carlsson-Kanyama, A., and H. Shanahan (2003).** Food and life cycle energy inputs: consequences of diet and ways to increase efficiency. *Ecological Economics*, **44**(2-3), pp. 293-307.
- Carolan, J., S. Joshi, and B.E. Dale (2007).** Technical and financial feasibility analysis of distributed bioprocessing using regional biomass pre-processing centers. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, **5**(2) Article 10, 29 pp. Available at: www.bepress.com/jafio/vol5/iss2/art10.
- Carpita, N.C., and M.C. McCann (2008).** Maize and sorghum: genetic resources for bioenergy grasses. *Trends in Plant Science*, **13**(8), pp. 415-420.
- Carslaw, K.S., O. Boucher, D.V. Spracklen, G.W. Mann, J.G.L. Rae, S. Woodward, and M. Kulmala (2010).** A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the Earth system. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **10**(4), pp. 1701-1737.
- Cascone, R. (2008).** Biobutanol: a replacement for bioethanol? In: *Chemical Engineering Progress Special Edition Biofuels*, **104**, pp. S4-S9.
- Cassman, K.G. (1999).** Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **96**(11), pp. 5952-5959.
- Cassman, K.G., A. Dobermann, D.T. Walters, and H. Yang (2003).** Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*, **28**(1), pp. 315-358.

- Castiglioni, P., D. Warner, R.J. Bensen, D.C. Anstrom, J. Harrison, M. Stoecker, M. Abad, G. Kumar, S. Salvador, R. D'Ordine, S. Navarro, S. Back, M. Fernandes, J. Targolli, S. Dasgupta, C. Bonin, M.H. Luethy, and J.E. Heard (2008). Bacterial RNA chaperones confer abiotic stress tolerance in plants and improved grain yield in maize under water-limited conditions. *Plant Physiology*, **147**(2), pp. 446-455.
- CBOT (2006). *CBOT® Soybean Crush Reference Guide*. Board of Trade of the City of Chicago, Chicago, IL, USA.
- Chakravorty, U., M. Hubert, and L. Nostbakken (2009). Fuel versus food. *Annual Review of Resource Economics*, **1**(1), pp. 645-663.
- Chapotin, S.M., and J. Wolt (2007). Genetically modified crops for the bioeconomy: meeting public and regulatory expectations. *Transgenic Research*, **16**(6), pp. 675-688.
- Chapple, C., M. Ladisch, and R. Meilan (2007). Loosening lignin's grip on biofuel production. *Nature Biotechnology*, **25**(7), pp. 746-748.
- Cheng, J.J., and G.R. Timilsina (2010). *Advanced Biofuel Technologies: Status and Barriers*. Policy Research Working Paper 5411, The World Bank, Washington, DC, USA, 47 pp.
- Cherubini, F., and A.H. Strømman (2010). Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, **102**(2), pp. 437-451.
- Cherubini, F., N.D. Bird, A. Cowie, G. Jungmeier, B. Schlamadinger, and S. Woess-Gallasch (2009a). Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, **53**(8), pp. 434-447.
- Cherubini, F., G. Jungmeier, M. Mandl, M. Wellisch, C. Philips, and H. Joergensen (2009b). *Biorefineries: Adding Value to the Sustainable Utilisation of Biomass*. IEA Bioenergy Publication T42:2009:01, IEA Bioenergy Task 42 on Biorefineries, 16 pp.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, **25**(3), pp. 294-306.
- Chiu, Y.-W., B. Walseth, and S. Suh (2009). Water embodied in bioethanol in the United States. *Environmental Science & Technology*, **43**(8), pp. 2688-2692.
- Chum, H.L., and R.P. Overend (2003). Biomass and bioenergy in the United States. In: *Advances in Solar Energy: An Annual Review of Research and Development*. Vol. 15. D.Y. Goswami (ed.), American Solar Energy Society (ASES), Boulder, CO, USA, pp. 83-148.
- Cirne, D.G., A. Lehtomäki, L. Björnsson, and L.L. Blackall (2007). Hydrolysis and microbial community analyses in two-stage anaerobic digestion of energy crops. *Journal of Applied Microbiology*, **103**(3), pp. 516-527.
- Clayton, R., G. McDougall, M. Perry, D. Doyle, J. Doyle, and D. O'Connor (2010). *A Study of Employment Opportunities from Biofuel Production in APEC Economies*. APEC#210-RE-01.9, APEC Energy Working Group, Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC), Singapore, Singapore, 82 pp.
- Clifton-Brown, J.C., and I. Lewandowski (2000). Water use efficiency and biomass partitioning of three different *Miscanthus* genotypes with limited and unlimited water supply. *Annals of Botany*, **86**(1), pp. 191-200.
- Clifton-Brown, J., P.F. Stampfl, and M.B. Jones (2004). *Miscanthus* biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. *Global Change Biology*, **10**(4), pp. 509-518.
- Cline, W.R. (2007). *Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country*. Peterson Institute for International Economics, Washington, DC, USA, 201 pp.
- Colla, L.M., C. Oliveira Reinehr, C. Reichert, and J.A.V. Costa (2007). Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. *Bioresource Technology*, **98**(7), pp. 1489-1493.
- Cortright, R.D., R.R. Davda, and J.A. Dumesic (2002). Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water. *Nature*, **418**(6901), pp. 964-967.
- Cremers, M.F.G. (2009). *Deliverable 4, Technical Status of Biomass Co-firing*. 50831165- Consulting 09-1654, IEA Bioenergy Task 32, Arnhem, The Netherlands, 43 pp.
- Crutzen, P., A. Moiser, K. Smith, and W. Winiwarter (2007). N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **7**, pp. 11191-11205.
- Curtis, B. (2010). *2008-2009 Review U.S. Biofuels Industry: Mind the Gap*. Concentric Energies & Resource Group, Inc., Los Gatos, CA, USA, 52 pp.
- Cusick, R.D., B. Bryan, D.S. Parker, M.D. Merrill, M. Mehanna, P.D. Kiely, G. Liu, and B.E. Logan (2011). Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **89**, pp. 2053-2063.
- da Costa Sousa, L., S.P.S. Chundawat, V. Balan, and B.E. Dale (2009). 'Cradle-to-grave' assessment of existing

- lignocellulose pretreatment technologies. *Current Opinion in Biotechnology*, **20**(3), pp. 339-347.
- Dale, B.E., M.S. Allen, M. Laser, and L.R. Lynd (2009).** Protein feeds coproduction in biomass conversion to fuels and chemicals. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **3**(2), pp. 219-230.
- Dale, B.E., B.D. Bals, S. Kim, and P. Eranki (2010).** Biofuels done right: Land efficient animal feeds enable large environmental and energy benefits. *Environmental Science & Technology*, **44**(22), pp. 8385-8389.
- Dale, V.H., R.A. Efroymsen, and K.L. Kline (2011).** The land use-climate change-energy nexus. *Landscape Ecology*, in press.
- Damen, K., and A. Faaij (2006).** A greenhouse gas balance of two existing international biomass import chains. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **11**(5), pp. 1023-1050.
- Danielsen, F., H. Beukema, N.D. Burgess, F. Parish, C.A. Brühl, P.F. Donald, D. Murdiyarso, B.E.N. Phalan, L. Reijnders, M. Strubig, and E.B. Fitzherbert (2009).** Biofuel plantations on forested lands: Double jeopardy for biodiversity and climate (Plantaciones de biocombustible en terrenos boscosos: Doble peligro para la biodiversidad y el clima). *Conservation Biology*, **23**(2), pp. 348-358.
- Dantas, D.N., F.F. Mauad, and A.R. Ometto (2009).** Potential for generation of thermal and electrical energy from biomass of sugarcane: A exergetic analysis. In: *11th International Conference on Advanced Materials*, Rio de Janeiro, Brazil, 20-25 September 2009, p. 131.
- Darzens, A., P. Pienkos, and L. Edye (2010).** *Current Status and Potential for Algal Biofuels Production*. Report T39-02, IEA Bioenergy Task 39, 128 pp.
- Daugherty, E. (2001).** *Biomass Energy Systems Efficiency Analyzed through a LCA Study*. Masters Thesis, Lund University, Gothenburg, Sweden, 45 pp.
- Davda, R.R., J.W. Shabaker, G.W. Huber, R.D. Cortright, and J.A. Dumesic (2005).** A review of catalytic issues and process conditions for renewable hydrogen and alkanes by aqueous-phase reforming of oxygenated hydrocarbons over supported metal catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, **56**(1-2), pp. 171-186.
- Davidson, E.A. (2009).** The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience*, **2**(9), pp. 659-662.
- de Boer, J., M. Helms, and H. Aiking (2006).** Protein consumption and sustainability: Diet diversity in EU-15. *Ecological Economics*, **59**(3), pp. 267-274.
- de Fraiture, C., and G. Berndes (2009).** Biofuels and water. In: *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use*. R.W. Howarth and S. Bringezu (eds.),
- Proceedings of the SCOPE - Scientific Committee on Problems of the Environment International Biofuels Project Rapid Assessment, Gummersbach, Germany, 22-25 September 2009, pp. 139-152.
- de Fraiture, C., M. Giordano, and Y. Liao (2008).** Biofuels and implications for agricultural water uses: blue impacts of green energy. *Water Policy*, **10**(S1), pp. 67-81.
- De La Torre Ugarte, D.G., and C.C. Hellwinckel (2010).** The problem is the solution: The role of biofuels in the transition to a regenerative agriculture. In: *Plant Biotechnology for Sustainable Production of Energy and Co-products*. P.N. Mascia, J. Scheffran, and J.M. Widholm (eds.), Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, Germany, 475 pp.
- De La Torre Ugarte, D.G., L. He, K.L. Jensen, and B.C. English (2010).** Expanded ethanol production: Implications for agriculture, water demand, and water quality. *Biomass and Bioenergy*, **34**(11), pp. 1586-1596.
- de Wit, M., and A. Faaij (2010).** European biomass resource potential and costs. *Biomass and Bioenergy*, **34**(2), pp. 188-202.
- de Wit, M., M. Junginger, S. Lensink, M. Londo, and A. Faaij (2010).** Competition between biofuels: Modeling technological learning and cost reductions over time. *Biomass and Bioenergy*, **34**(2), pp. 203-217.
- DEFRA (2009).** *The 2007/08 Agricultural Price Spikes: Causes and Policy Implications*. Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA), HM Government, London, UK, 123 pp.
- Delta-T Corporation (1997).** *Proprietary information*. Williamsburg, VA, USA.
- DeLucchi, M.A. (2005).** *A Multi-Country Analysis of Lifecycle Emissions from Transportation Fuels and Motor Vehicles*. UCD-ITS-RR-05-10, Institute of Transportation Studies, University of California at Davis, Davis, CA, USA, 205 pp.
- DeLucchi, M.A. (2010).** *A Conceptual Framework for Estimating Bioenergy-Related Land-Use Change and Its Impacts over Time*. Biomass and Bioenergy, 1-24, doi:10.1016/j.biombioe.2010.11.028 (2010).
- DeLuchi, M.A. (1993).** Greenhouse-gas emissions from the use of new fuels for transportation and electricity. *Transportation Research Part A*, **27A**(3), pp. 187-191.
- DeMeo, E.A., and J.F. Galdo (1997).** *Renewable Energy Technology Characterizations*. TR-109496, U.S. Department of Energy and Electric Power Research Institute, Washington, DC, USA, 283 pp.

- Demirbas, A. (2009).** Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, **50**, pp. 14-34.
- den Elzen, M., D. van Vuuren, and J. van Vliet (2010).** Postponing emission reductions from 2020 to 2030 increases climate risks and long-term costs. *Climatic Change*, **99**(1), pp. 313-320.
- Dias de Moraes, M.A.F. (2007).** Indicadores do mercado de trabalho do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar do Brasil no período 1992-2005. *Estudos Econ. (São Paulo)*, **37**(4), pp. 875-902.
- Diaz-Balteiro, L., and L.C.E. Rodriguez (2006).** Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration – A comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecology and Management*, **229**(1-3), pp. 247-258.
- DiTomaso, J.M., J.K. Reaser, C.P. Dionigi, O.C. Doering, E. Chilton, J.D. Schardt, and J.N. Barney (2010).** Biofuel vs. bioinvasion: seeding policy priorities. *Environmental Science & Technology*, **44**(18), pp. 6906-6910.
- Dominguez-Faus, R., S.E. Powers, J.G. Burken, and P.J. Alvarez (2009).** The water footprint of biofuels: A drink or drive issue? *Environmental Science & Technology*, **43**(9), pp. 3005-3010.
- Dondini, M., A. Hastings, G. Saiz, M.B. Jones, and P. Smith (2009).** The potential of Miscanthus to sequester carbon in soils: comparing field measurements in Carlow, Ireland to model predictions. *Global Change Biology Bioenergy*, **1**(6), pp. 413-425.
- Donner, S.D., and C.J. Kucharik (2008).** Corn-based ethanol production compromises goal of reducing nitrogen export by the Mississippi River. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**(11), pp. 4513-4518.
- Doornbosch, V., and R. Steenblik (2008).** Biofuels: Is the cure worse than the disease? In: *Round Table on Sustainable Development*, 11-12 September 2007, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- Dornburg, V., and A.P.C. Faaij (2001).** Efficiency and economy of wood-fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies. *Biomass and Bioenergy*, **21**(2), pp. 91-108.
- Dornburg, V., and A.P.C. Faaij (2005).** Cost and CO₂-emission reduction of biomass cascading: methodological aspects and case study of SRF poplar. *Climatic Change*, **71**(3), pp. 373-408.
- Dornburg, V., and G. Marland (2008).** Temporary storage of carbon in the biosphere does have value for climate change mitigation: a response to the paper by Miko Kirschbaum. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **13**(3), pp. 211-217.
- Dornburg, V., J. Vandam, and A. Faaij (2007).** Estimating GHG emission mitigation supply curves of large-scale biomass use on a country level. *Biomass and Bioenergy*, **31**(1), pp. 46-65.
- Dornburg, V., A. Faaij, P. Verweij, H. Langeveld, G. van de Ven, F. Wester, H. van Keulen, K. van Diepen, M. Meeusen, M. Banse, J. Ros, D. van Vuuren, G.J. van den Born, M. van Oorschot, F. Smout, J. van Vliet, H. Aiking, M. Londo, H. Mozaffarian, K. Smekens, E. Lysen, and S. van Egmond (2008).** *Assessment of Global Biomass Potentials and their Links to Food, Water, Biodiversity, Energy Demand and Economy*. WAB 500102 012, The Netherlands Environmental Assessment Agency, Bilthoven, The Netherlands, 108 pp.
- Dornburg, V., D. van Vuuren, G. van de Ven, H. Langeveld, M. Meeusen, M. Banse, M. van Oorschot, J. Ros, G.J. van den Born, H. Aiking, M. Londo, H. Mozaffarian, P. Verweij, E. Lysen, and A. Faaij (2010).** Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy. *Energy & Environmental Science*, **3**, pp. 258-267.
- Drigo, R., G. Chirici, B. Lasserre, and M. Marchetti (2007).** Analisi su base geografica della domanda e dell'offerta di combustibili legnosi in Italia. (Geographical analysis of demand and supply of woody fuel in Italy). *L'Italia Forestale e Montana*, **LXII**(5/6), pp. 303-324.
- Drigo, R., A. Anschau, N. Flores Marcos, and S. Carballo (2009).** *Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina – WISDOM Argentina*. Project TCP/ARG/3103 of FAO Dendroenergy, FAO Forestry Department, Rome, Italy, 102 pp.
- Dudley, T.L. (2000).** Arundo donax. In: *Invasive Plants of California's Wildlands*. C. Bossard and J. Randall (eds.), University of California Press, Berkeley, CA, USA, pp. 53-58.
- Dufey, A. (2006).** *Biofuels Production, Trade and Sustainable Development: Emerging Issues*. International Institute for Environment and Development, London, UK, 62 pp.
- Dupraz, C., and F. Liagre (2008).** *Agroforestry: Trees and Crops*. La France Agricole, Paris, France.
- Dutta, A., N. Dowe, K.N. Ibsen, D.J. Schell, and A. Aden (2010).** An economic comparison of different fermentation configurations to convert corn stover to ethanol using *Z. mobilis* and *Saccharomyces*. *Biotechnology Progress*, **26**(1), pp. 64-72.
- Duvick, D.N., and K.G. Cassman (1999).** Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the north-central United States. *Crop Science*, **39**(6), pp. 1622-1630.

- Dymond, C.C., B.D. Titus, G. Stinson, and W.A. Kurz (2010).** Future quantities and spatial distribution of harvesting residue and dead wood from natural disturbances in Canada. *Forest Ecology and Management*, **260**(2), pp. 181-192.
- E4tech (2009).** *Review of the Potential for Biofuels in Aviation*. Committee on Climate Change (CCC) of the U.K. Government, London, UK, 117 pp.
- E4tech (2010).** *Biomass Prices in the Heat and Electricity Sectors in the UK*. Report prepared for the UK Department of Energy and Climate Change. URN 10D/546, E4tech, London, UK, 33 pp.
- Easterling, W.E., J. Morton, J.F. Soussana, J. Schmidhuber, F.N. Tubiello, P.K. Aggarwal, P. Batima, K.M. Brander, L. Erda, S.M. Howden, and A. Kirilenko (2007).** Food, fibre and forest products. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (eds.), Cambridge University Press, pp. 273-313.
- Eaton, J., N. McGoff, K. Byrne, P. Leahy, and G. Kiely (2008).** Land cover change and soil organic carbon stocks in the Republic of Ireland 1851–2000. *Climatic Change*, **91**(3), pp. 317- 334.
- Ecobilan (2002).** *Energy and Greenhouse Gas Balances of Biofuels' Production Chains in France*. Ecobilan, Neuilly-sur-Seine Cedex, France, 9 pp.
- Econ Poyry (2008).** *Current Bioenergy Application and Conversion Technologies in the Nordic Countries*. 2008-052, Nordic Energy Research, Copenhagen, Denmark, 37 pp.
- Edenhofer, O., B. Knopf, M. Leimbach, and N. Bauer (2010).** The economics of low stabilization. *The Energy Journal*, **31**(Special Issue 1), pp. 57-90.
- Edgerton, M.D. (2009).** Increasing crop productivity to meet global needs for feed, food, and fuel. *Plant Physiology*, **149**(1), pp. 7-13.
- Edwards, R., D. Mulligan, and L. Marelli (2010).** *Indirect Land Use Change from Increased Biofuel Demand. Comparison of Models and Results for Marginal Biofuels Production from Different Feedstocks*. EUR 24485 EN-2010, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, Ispra, Italy, 150 pp.
- Edwards, R., J.F. Larivé, V. Mahieu, and P. Rouveiolles (2007).** *Well-To-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power Trains in the European Context*. Version 2c, Joint Research Center, Brussels, Belgium, 88 pp.
- Edwards, R., J.F. Larivé, V. Mahieu, and P. Rouveiolles (2008).** *Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and power trains in the European context*. Version 3, Joint Research Center, Brussels, Belgium, 43 pp.
- EEA (2006).** *How Much Bioenergy can Europe Produce without Harming the Environment?* European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Denmark, 72 pp.
- EEA (2007).** *Estimating the Environmentally Compatible Bio-energy Potential from Agriculture*. European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Denmark.
- Egsgaard, H.U., P. Hansen, J. Arendt, P. Glarborg, and C. Nielsen (2009).** Combustion and gasification technologies. In: *Risø Energy Report 2*. Risø, Roskilde, Denmark, pp. 35-39.
- EIA (2009).** *2006 Energy Consumption by Manufacturers – Data Table 7.2*. U.S. Energy Information Administration, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA.
- EIA (2010a).** *Annual Energy Review*, DOE/EIA-0384(2009) updated August 2011, Energy Information Administration, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA.
- EIA (2010b).** *Updated Capital Costs for Electricity Generation Plants*. U.S. Energy Information Administration, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA.
- EISA, 2007.** *Energy Independence and Security Act*, United States Congress, Public Law 110-140. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA.
- Eisenbies, M., E. Vance, W. Aust, and J. Seiler (2009).** Intensive utilization of harvest residues in southern pine plantations: Quantities available and implications for nutrient budgets and sustainable site productivity. *BioEnergy Research*, **2**(3), pp. 90-98.
- Elander, R., B. Dale, M. Holtzapple, M. Ladisch, Y. Lee, C. Mitchinson, J. Saddler, and C. Wyman (2009).** Summary of findings from the Biomass Refining Consortium for Applied Fundamentals and Innovation (CAFI): corn stover pretreatment. *Cellulose*, **16**(4), pp. 649-659.
- Elferink, E.V., and S. Nonhebel (2007).** Variations in land requirements for meat production. *Journal of Cleaner Production*, **15**, pp. 1778-1786.
- Elliott, D.C. (2008).** Catalytic hydrothermal gasification of biomass. *Biofuels, Bioproducts, Biorefining*, **2**, pp. 254-265.
- Elobeid, A., and C. Hart (2007).** Ethanol expansion in the food versus fuel debate: How will developing countries fare?

- Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, **5**(2), pp. 1- 21.
- EMBRAPA (2010).** *Brazilian Sugarcane Agroecological Zoning (in English), Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar (in Portuguese)*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Brazilian Agricultural Research Corporation, EMBRAPA), Brasília, Brazil, 58 pp.
- EPA (2010).** *Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis*. EPA-420-R- 10-006, Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 1120 pp.
- EPE (2008).** *Plano Decenal De Expansao De Energia 2008 – 2017*. Ministry of Mines and Energy Secretariat of Planning and Energy Development, Brasília, Brazil, 354 pp.
- EPE (2010).** *2010 Balanco Energetico Nacional - Ano Base 2009*. CDU 620.9:553.04(81), Ministry of Mines and Energy and Energy Planning Enterprise (EPE), Brasília, Brazil, 271 pp.
- EPRI (2008).** *Technical Performance Indicators for Biomass Energy*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA, 86 pp.
- Ericsson, K., and L.J. Nilsson (2006).** Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach. *Biomass and Bioenergy*, **30**(1), pp. 1-15.
- Ericsson, K., H. Rosenqvist, and L.J. Nilsson (2009).** Energy crop production costs in the EU. *Biomass and Bioenergy*, **33**(11), pp. 1577-1586.
- Erikson, S., and M. Prior (1990).** *The Briquetting of Agricultural Wastes for Fuel*. FAO paper No. 11, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- EurObserv'ER (2010).** Biofuels barometer/Baromètre Biocarburant Observ'ER. *Systèmes Solaires le journal des énergies renouvelables*, Paris, France, pp. 72-96.
- European Commission (2009).** *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources*. European Commission, Brussels, Belgium.
- European Commission (2010).** *Report from the commission to the council and the European parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling*. SEC(2010) 65, European Commission, Brussels, Belgium, 20 pp.
- Evans, L.T. (2003).** Agricultural intensification and sustainability. *Outlook on Agriculture*, **32**(2), pp. 83-89.
- Evenson, R.E., and D. Gollin (2003).** Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, **300**(5620), pp. 758-762.
- Ezeji, T., N. Qureshi, and H.P. Blaschek (2007a).** Butanol production from agricultural residues: impact of degradation products on *Clostridium beijerinckii* growth and butanol fermentation. *Biotechnology and Bioengineering*, **97**(6), pp. 1460-1467.
- Ezeji, T.C., N. Qureshi, and H.P. Blaschek (2007b).** Bioproduction of butanol from biomass: from genes to bioreactors. *Current Opinion in Biotechnology*, **18**(3), pp. 220-227.
- Ezzati, M., A. Lopez, S. Vander Hoorn, A. Rodgers, and C.L.J. Murray (2002).** Comparative Risk Assessment Collaborative Group. Selected major risk factors and global regional burden of disease. *The Lancet*, **360**(9343), pp. 1347-1360.
- Ezzati, M., R. Bailis, D.M. Kammen, T. Holloway, L. Price, L.A. Cifuentes, B. Barnes, A. Chaurey, and K.N. Dhanapala (2004).** Energy management and global health. *Annual Review of Environment and Resources*, **29**(1), pp. 383-419.
- Faaij, A. (2006).** Modern biomass conversion technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **11**(2), pp. 335-367.
- Fagnäs, L., A. Johansson, C. Wilén, K. Sipilä, T. Mäkinen, S. Helynen, E. Daugherty, H. den Uil, J. Vehlow, T. Kåberger, and M. Rogulska (2006).** *Bioenergy in Europe: Opportunities and Barriers*. VTT Res. Notes 2532, VTT, Espoo, Finland, 122 pp.
- Fallot, A., L. Saint-Andre, G. Le Maire, J.-P. Laclau, Y. Nouvellon, C. Marsden, J.-P. Bouillet, T. Silva, M.-G. Piketty, and O. Hamel (2009).** Biomass sustainability, availability and productivity. *Revue de Métallurgie Paris*, **106**(10), pp. 410-418.
- FAO (1985).** Industrial charcoal making technologies. In: *Industrial Charcoal Making*. FAO Forestry Paper 63, FAO Forestry Department, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. Available at: www.fao.org/docrep/X5555E/x5555e02.htm#1.1%20what%20are%20industrial%20charcoal%20making%20methods.
- FAO (2004).** *The State of Food and Agriculture 2003-2004 – Agricultural Biotechnology: Meeting the Needs of the Poor?* 0081-4539, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 196 pp.
- FAO (2005).** *World Forest Assessment*. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 166 pp.

- FAO (2006).** *Energy and Gender in Rural Sustainable Development*. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 46 pp.
- FAO (2008a).** *The State of Food and Agriculture 2008 – Biofuels: Prospects, Risks, and Opportunities*. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 138 pp.
- FAO (2008b).** The role of agricultural biotechnologies for production of bioenergy in developing countries. In: *Background Document to Conference 15 of the FAO Biotechnology Forum*, 10 November to 14 December 2008, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- FAO (2010a).** *What Woodfuels can do to Mitigate Climate Change*. 0258-6150, Food and Agricultural Organization (FAO), Rome, Italy, 98 pp.
- FAO (2010b).** *Criteria and Indicators for Sustainable Biofuels*. FAO Forestry Paper 160, Food and Agricultural Organization (FAO), Rome, Italy, 102 pp.
- FAOSTAT (2011).** *FAOSTAT*. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. Available at: faostat.fao.org/default.aspx.
- FAPRI (2009).** *FAPRI 2009: U.S. and World Agricultural Outlook*. Food and Agricultural Policy Research Institute, Ames, Iowa, 411 pp.
- Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, and P. Hawthorne (2008).** Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, **319**(5867), pp. 1235-1238.
- Farley, K.A., E.G. Jobbagy, and R.B. Jackson (2005).** Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, **11**(10), pp. 1565-1576.
- Farrell, A.E., R.J. Plevin, B.T. Turner, A.D. Jones, M. O'Hare, and D.M. Kammen (2006).** Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science*, **311**(5760), pp. 506-508.
- Fearnside, P.M. (2008).** The roles and movements of actors in the deforestation of Brazilian Amazonia. *Ecology and Society*, **13**(23), pp. 23-55.
- Feng, Z., K.J. Stadt, and V.J. Lieffers (2006).** Linking juvenile white spruce density, dispersion, stocking, and mortality to future yield. *Canadian Journal of Forest Research*, **36**, pp. 3173-3182.
- Field, C.B., J.E. Campbell, and D.B. Lobell (2008).** Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends in Ecology & Evolution*, **23**(2), pp. 65-72.
- Fingerman, K.R., M.H. Torn, M.S. O'Hare, and D.M. Kammen (2010).** Accounting for the water impacts of ethanol production. *Environmental Research Letters*, **5**(1), 014020 (7pp.).
- Firbank, L. (2008).** Assessing the ecological impacts of bioenergy projects. *BioEnergy Research*, **1**(1), pp. 12-19.
- Fischer, G., and L. Schrattenholzer (2001).** Global bioenergy potentials through 2050. *Biomass and Bioenergy*, **20**(3), pp. 151-159.
- Fischer, G., H. van Velthuizen, M. Shah, and F. Nachtergaele (2002).** *Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. RR-02-02, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 156 pp.
- Fischer, G., F. Nachtergaele, S. Prieler, F. Teixeira, H. van Velthuizen, L. Verelst, and D. Wiberg (2008).** *Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008)*. Version 2, International Institute for Applied Systems Analysis and Food and Agriculture Organization, Laxenburg, Austria and Rome, Italy, 43 pp.
- Fischer, G., E. Hitznyik, S. Prieler, M. Shah, and H. van Velthuizen (2009).** *Biofuels and Food Security*. The OPEC Fund for International Development (OFID) and International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA), Vienna, Austria, 228 pp.
- Fischer, G., S. Prieler, H. van Velthuizen, G. Berndes, A. Faaij, M. Londo, and M. de Wit (2010).** Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures, Part II: Land use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, **34**(2), pp. 173-187.
- Fitzherbert, E.B., M.J. Struebig, A. Morel, F. Danielsen, C.A. Brühl, P.F. Donald, and B. Phalan (2008).** How will oil palm expansion affect biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution*, **23**(10), pp. 538-545.
- Fleming, J.S., S. Habibi, and H.L. MacLean (2006).** Investigating the sustainability of lignocellulose-derived fuels for light-duty vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **11**(2), pp. 146-159.
- Foley, J.A., R. DeFries, G.P. Asner, B. Carol, G. Bonan, S.R. Carpenter, F.S. Chapin, M.T. Coe, G.C. Daily, H.K. Gibbs, J.H. Helkowski, T. Holloway, E.A. Howard, C.J. Kucharik, C. Monfreda, J.A. Patz, I.C. Prentice, N. Ramankutty, and P.K. Snyder (2005).** Global consequences of land use. *Science*, **309**(5734), pp. 570-574.
- Folha (2005).** Bagaço da cana será usado para fabricação de papel. *Folha da Região - Araçatuba*. São Paulo, Brazil.
- Folke, C., S. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Elmqvist, L. Gunderson, and C.S. Holling (2004).** Regime shifts,

- resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **35**(1), pp. 557-581.
- Folke, C., F.S. Chapin, and P. Olsson (2009).** Transformations in ecosystem stewardship. In: *Principles of Ecosystem Stewardship: Resilience-Based Natural Resource Management in a Changing World*. F.S. Chapin III, G.P. Kofinas, and C. Folke (eds.), Springer Verlag, New York, NY, USA, pp. 103-128.
- Forman, J. (2003).** The introduction of American plant species into Europe: issues and consequences. In: *Plant Invasions: Ecological Threats and Management Solutions*. L. Child, J. H. Brock, G. Brundu, K. Prach, P. Pysek, P. M. Wade, and M. Williamson (eds.), Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands, pp. 17-39.
- Foust, T.D., A. Aden, A. Dutta, and S. Phillips (2009).** Economic and environmental comparison of a biochemical and a thermochemical lignocellulosic ethanol conversion process. *Cellulose*, **16**, pp. 547-565.
- Francis, G., R. Edinger, and K. Becker (2005).** A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. *Natural Resources Forum*, **29**(1), pp. 12-24.
- Fritsche, U., K. Hennenberg, and K. Hünecke (2010).** *The "iLUC factor" as a Means to Hedge Risks of GHG Emissions from Indirect Land Use Change*. Öko Institute, Darmstadt, Germany, 64 pp.
- Fulton, L., T. Howes, and J. Hardy (2004).** *Biofuels for Transport - An International Perspective*. Organization for Economic Cooperation and Development and International Energy Agency, Paris, France, 210 pp.
- GAIN (2009a).** *Biofuel's Impact on Food Crops (China)*. CH9059, Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 14 pp.
- GAIN (2009b).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Indonesia)*. ID9017, Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, 7 pp.
- GAIN (2009c).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Thailand)*. TH9047, Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 11 pp.
- GAIN (2010a).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Argentina)*. Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 15 pp.
- GAIN (2010b).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Brazil)*. BR10006, Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 52 pp.
- GAIN (2010c).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Canada)*. CA0023, Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 34 pp.
- GAIN (2010d).** *Biofuel's Impact on Food Crops (India)*. IN1058, Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 11 pp.
- GAIN (2010e).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Korea)*. KS1001, Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 6 pp.
- GAIN (2010f).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Malaysia)*. MY0008, Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 9 pp.
- GAIN (2010g).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Peru)*. Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 7 pp.
- GAIN (2010h).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Philippines)*. Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 21 pp.
- GAIN (2010i).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Thailand)*. TH0098, Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 15 pp.
- GAIN (2010j).** *Biofuel's Impact on Food Crops (Turkey)*. Global Agriculture Information Network, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 6 pp.
- Galdos, M.V., C.C. Cerri, R. Lal, M. Bernoux, B. Feigl, and C.E.P. Cerri (2010).** Net greenhouse gas fluxes in Brazilian ethanol production systems. *Global Change Biology Bioenergy*, **2**(1), pp. 37-44.
- Gallagher, E. (2008).** *The Gallagher Review of the Indirect Effects of Biofuels Production*. Renewable Fuels Agency, London, UK, 92 pp.
- Gallagher, P., M. Dikeman, J. Fritz, E. Wailes, W. Gauthier, and H. Shapouri (2003).** *Biomass from Crop Residues: Cost and Supply Estimates*. Agricultural Economic Report No. 819, Economic Research Service, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 30 pp.
- Gan, J. (2007).** Supply of biomass, bioenergy, and carbon mitigation: Method and application. *Energy Policy*, **35**(12), pp. 6003-6009.

- Gan, J., and C. Smith (2010).** Integrating biomass and carbon values with soil productivity loss in determining forest residue removals. *Biofuels*, **1**(4), pp. 539-546.
- García-Frapolli, E., A. Schilman, V.M. Berrueta, H. Riojas-Rodríguez, R.D. Edwards, M. Johnson, A. Guevara-Sanginés, C. Armendariz, and O. Masera (2010).** Beyond fuelwood savings: Valuing the economic benefits of introducing improved biomass cookstoves in the Purépecha region of Mexico. *Ecological Economics*, **69**(12), pp. 2598-2605.
- Garg, V.K. (1998).** Interaction of tree crops with a sodic soil environment: potential for rehabilitation of degraded environments. *Land Degradation & Development*, **9**(1), pp. 81-93.
- Garrison, T. (2008).** *Essentials of Oceanography*. 5th ed., Brooks/Cole Cengage Learning, Belmont, CA, USA, 464 pp.
- GBEP (2008).** *A Review of the Current State of Bioenergy Development in G8+5 Countries*. Global Bioenergy Partnership (GBEP), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 278 pp.
- Gerasimov, Y., and T. Karjalainen (2009).** *Estimation of supply and delivery cost of energy wood from Northwest Russia*. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute Number 123, Finnish Forest Research Institute, Vantaa, Finland, 21 pp.
- Gerbens-Leenes, P., and S. Nonhebel (2002).** Consumption patterns and their effects on land required for food. *Ecological Economics*, **42**(1-2), pp. 185-199.
- Gerbens-Leenes, W., A.Y. Hoekstra, and T.H. van der Meer (2009).** The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**(25), pp. 10219-10223.
- Gerber, N. (2008).** *Bioenergy and Rural Development in Developing Countries: A Review of Existing Studies*. Discussion Papers On Development Policy No. 122, Center for Development Research (ZEF), Bonn, Germany, 58 pp.
- Gerten, D., W. Lucht, S. Schaphoff, W. Cramer, T. Hickler, and W. Wagner (2005).** Hydrologic resilience of the terrestrial biosphere. *Geophysical Research Letters*, **32**(21), L21408.
- Gibbs, H.K., M. Johnston, J.A. Foley, T. Holloway, C. Monfreda, N. Ramankutty, and D. Zaks (2008).** Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. *Environmental Research Letters*, **3**(3), 034001 (10 pp.).
- Gielen, D., J. Newman, and M.K. Patel (2008).** Reducing industrial energy use and CO₂ emissions: The role of materials science. In: *MRS Bulletin Harnessing Materials for Energy*, **33**, pp. 471-477.
- Gisladottir, G., and M. Stocking (2005).** Land degradation control and its global environmental benefits. *Land Degradation & Development*, **16**(2), pp. 99-112.
- Glass, R. (2006).** Disease control priorities in developing countries. *The New England Journal of Medicine*, **355**(10), pp. 1074-1075.
- Godfray, H.C.J., C. Toulmin, J.R. Beddington, I.R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J.F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, and S.M. Thomas (2010).** Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, **327**(5967), pp. 812-818.
- Goldemberg, J., S.T. Coelho, P.M. Nastari, and L. O (2004).** Ethanol learning curve - the Brazilian experience. *Biomass and Bioenergy*, **26**, pp. 301-304.
- Gorissen, L., V. Buytaert, D. Cuypers, T. Dauwe, and L. Pelkmans (2010).** Why the debate about land use change should not only focus on biofuels. *Environmental Science & Technology*, **44**(11), pp. 4046-4049.
- Grann, H. (1997).** The industrial symbiosis at Kalundborg, Denmark. In: *The Industrial Green Game. Implications for Environmental Design and Management*. D.J. Richards (ed.), National Academy Press, Washington, DC, USA, pp. 117-123.
- Grassi, G., A. Nardi, and S. Vivarelli (2006).** Low cost production of bioethanol from sweet sorghum. In: *Proceedings of the 14th European Biomass Conference*, Paris, France, 17-21 October 2005, pp. 91-95.
- Green, R.E., S.J. Cornell, J.P.W. Scharlemann, and A. Balmford (2005).** Farming and the fate of wild nature. *Science*, **307**(5709), pp. 550-555.
- Gronowska, M., S. Joshi, and H.L. MacLean (2009).** A review of U.S. and Canadian biomass supply studies. *BioResources*, **4**(1), pp. 341-369.
- Grove, S. and J. Hanula (eds) (2006).** *Insect Biodiversity and Dead Wood: Proceedings of the 22nd International Congress of Entomology*. Report SRS-93, United States Department of Agriculture, Asheville, NC, USA, 109 pp.
- Guille, T. (2007).** *Evaluation of the Potential Uses of Agricultural Residues for Energy Purposes*. Master's Thesis, Montpellier SupAgro, Paris, France.
- Gunderson, P. (2008).** Biofuels and North American agriculture - Implications for the health and safety of North American

- producers. *Journal of Agromedicine*, **13**(4), pp. 219-224.
- Gurbuz, E.I., E.L. Kunkes, and J.A. Dumesic (2010).** Dual-bed catalyst system for C–C coupling of biomass-derived oxygenated hydrocarbons to fuel-grade compounds. *Green Chemistry*, **12**(2), pp. 223-227.
- Gustavsson, L., J. Holmberg, V. Dornburg, R. Sathre, T. Eggers, K. Mahapatra, and G. Marland (2007).** Using biomass for climate change mitigation and oil use reduction. *Energy Policy*, **35**(11), pp. 5671-5691.
- Haas, M.J., A.J. McAloon, W.C. Yee, and T.A. Foglia (2006).** A process model to estimate biodiesel production costs. *Bioresource Technology*, **97**(4), pp. 671-678.
- Haberl, H., K.H. Erb, F. Krausmann, V. Gaube, A. Bondeau, C. Plutzer, S. Gingrich, W. Lucht, and M. Fischer-Kowalski (2007).** Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**(31), pp. 12942-12947.
- Haberl, H., T. Beringer, S.C. Bhattacharya, K.-H. Erb, and M. Hoogwijk (2010).** The global technical potential of bio-energy in 2050 considering sustainability constraints. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **2**(5-6), pp. 394-403.
- Hakala, K., M. Kontturi, and K. Pahkala (2009).** Field biomass as global energy source. *Agricultural and Food Science*, **18**, pp. 347-365.
- Hamelinck, C.N. (2004).** *Outlook for Advanced Biofuels*. Master's Thesis, University of Utrecht, Utrecht, The Netherlands, 232 pp.
- Hamelinck, C.N., and A.P.C. Faaij (2002).** Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass. *Journal of Power Sources*, **111**(1), pp. 1-22.
- Hamelinck, C.N., and A.P.C. Faaij (2006).** Outlook for advanced biofuels. *Energy Policy*, **34**(17), pp. 3268-3283.
- Hamelinck, C.N., A.P.C. Faaij, H. den Uil, and H. Boerrigter (2004).** Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential. *Energy*, **29**(11), pp. 1743-1771.
- Hamelinck, C.N., G.v. Hooijdonk, and A.P.C. Faaij (2005a).** Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy*, **28**(4), pp. 384-410.
- Hamelinck, C.N., R.A.A. Suurs, and A.P.C. Faaij (2005b).** International bioenergy transport costs and energy balance. *Biomass and Bioenergy*, **29**(2), pp. 114-134.
- Hartley, M.J. (2002).** Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests. *Forest Ecology and Management*, **155**(1-3), pp. 81-95.
- Headey, D., and S. Fan (2008).** Anatomy of a crisis: the causes and consequences of surging food prices. *Agricultural Economics*, **39**, pp. 375-391.
- Heggenstaller, A.H., R.P. Anex, M. Liebman, D.N. Sundberg, and L.R. Gibson (2008).** Productivity and nutrient dynamics in bioenergy double-cropping systems. *Agronomy Journal*, **100**(6), pp. 1740-1748.
- Heinimö, J., and M. Junginger (2009).** Production and trading of biomass for energy – An overview of the global status. *Biomass and Bioenergy*, **33**(9), pp. 1310-1320.
- Helynen, S., M. Flyktman, T. Mäkinen, K. Sipilä, and P. Vesterinen (2002).** *The possibilities of bioenergy in reducing greenhouse gases*. VTT Tiedotteita 2145, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 110 pp.
- Hemakanthi, D.A., and D.N. Heller (2010).** Multiclass, multiresidue method for the detection of antibiotic residues in distillers grains by liquid chromatography and ion trap tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, **1217**(18), pp. 3076-3084.
- Herrero, M., J. van de Steeg, J. Lynam, P.P. Rao, S. Macmillan, B. Gerard, J. McDermott, C. Sere, M. Rosegrant, P.K. Thornton, A.M. Notenbaert, S. Wood, S. Msangi, H.A. Freeman, D. Bossio, J. Dixon, and M. Peters (2010).** Smart investments in sustainable food production: Revisiting mixed crop-livestock systems. *Science*, **327**(5967), pp. 822-825.
- Hertel, T.W., A.A. Golub, A.D. Jones, M. O'Hare, R.J. Plevin, and D.M. Kammen (2010a).** Effects of US maize ethanol on global land use and greenhouse gas emissions: Estimating market mediated responses. *BioScience*, **60**(3), pp. 223-231.
- Hertel, T.W., W.E. Tyner, and D.K. Birur (2010b).** Global impacts of biofuels. *Energy Journal*, **31**(1), pp. 35-100.
- Hettinga, W.G., H.M. Junginger, M. Hoogwijk, A. McAloon, and T. Hickler (2007).** Technological learning in U.S. ethanol production. In: *15th European Biomass Conference and Exhibition*, Berlin, Germany, 7-11 May 2007.
- Hettinga, W.G., H.M. Junginger, S.C. Dekker, M. Hoogwijk, A.J. McAloon, and K.B. Hicks (2009).** Understanding the reductions in US corn ethanol production costs: An experience curve approach. *Energy Policy*, **37**(1), pp. 190-203.
- Hiederer, R., F. Ramos, C. Capitani, R. Koeble, V. Blujdea, O. Gomez, D. Mulligan, and L. Marelli (2010).** *Biofuels: A New Methodology to Estimate GHG Emissions from Global Land Use Change, A methodology involving spatial allocation of agricultural land demand and estimation of CO₂ and N₂O emissions*. EUR 24483 EN - 2010, Joint Research Center,

- European Commission, Ispa, Italy, 168 pp.
- Hill, J. (2007).** Environmental costs and benefits of transportation biofuel production from food- and lignocellulose-based energy crops. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **27**(1), pp. 1-12.
- Hill, J., E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky, and D. Tiffany (2006).** Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **103**(30), pp. 11206-11210.
- Hill, J., S. Polasky, E. Nelson, D. Tilman, H. Huo, L. Ludwig, J. Neumann, H. Zheng, and D. Bonta (2009).** Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**(6), pp. 2077-2082.
- Hillier, J., C. Whittaker, G. Dailey, M. Aylott, E. Casella, G.M. Richter, A. Riche, R. Murphy, G. Taylor, and P. Smith (2009).** Greenhouse gas emissions from four bioenergy crops in England and Wales: Integrating spatial estimates of yield and soil carbon balance in life cycle analyses. *Global Change Biology Bioenergy*, **1**(4), pp. 267-281.
- Hilman, H.J., E. Gidwani, P. Morris, S. Sagar, and S. Chowdhary (2007).** *Using Microfinance to Expand Access to Energy Services: The Emerging Experiences in Asia of Self-Employed Women's Association Bank (SEWA), Sarvodaya Economic Enterprise Development Services (SEEDS), Nirdhan Utthan Bank Limited (NUBL), and AMRET.* The SEEP Network, Washington, DC, USA, 124 pp.
- Himmel, M.E., Q. Xu, Y. Luo, S.-Y. Ding, R. Lamed, and E.A. Bayer (2010).** Microbial enzyme systems for biomass conversion: emerging paradigms. *Biofuels*, **1**(2), pp. 323-341.
- Hoefnagels, R., E. Smeets, and A. Faaij (2010).** Greenhouse gas footprints of different biofuel production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(7), pp. 1661-1694.
- Hoekstra, A.Y., P.W. Gerbens-Leenes, and T.H. Van der Meer (2010).** The water footprint of bio-energy. In: *Climate Change and Water: International Perspectives on Mitigation and Adaptation*. C. Howe, J.B. Smith, and J. Henderson (eds.), American Water Works Association, IWA Publishing, London, UK, pp. 81-95.
- Hollebone, B.P., and Z. Yang (2009).** Biofuels in the environment: A review of behaviours, fates, effects and possible remediation techniques. In: *Proceedings of the 32nd Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar on Environmental Contamination and Response*, Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, Canada, pp. 127-139.
- Holmgren, J., R. Marinangeli, P. Nair, D. Elliott, and R. Bain (2008).** Consider upgrading pyrolysis oils into renewable fuels. *Hydrocarbon Processing*, **87**(9), pp. 95-113.
- Hoogwijk, M. (2004).** *On the Global and Regional Potential of Renewable Energy Sources.* PhD Thesis, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 257 pp.
- Hoogwijk, M., A. Faaij, R. van den Broek, G. Berndes, D. Gielen, and W. Turkenburg (2003).** Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. *Biomass and Bioenergy*, **25**(2), pp. 119-133.
- Hoogwijk, M., A. Faaij, B. Eickhout, B. de Vries, and W. Turkenburg (2005).** Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, **29**(4), pp. 225-257.
- Hoogwijk, M., A. Faaij, B. de Vries, and W. Turkenburg (2009).** Exploration of regional and global cost-supply curves of biomass energy from short-rotation crops at abandoned cropland and rest land under four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, **33**(1), pp. 26-43.
- Hooijer, A., M. Silvius, H. Wösten, and S. Page (2006).** *PEAT- CO₂, Assessment of CO₂ Emissions from Drained Peatlands in SE Asia.* Delft Hydraulics report Q3943, WL Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, 41 pp.
- Howard, D., and S. Ziller (2008).** Alien alert – plants for biofuel may be invasive. *Bioenergy Business*, July/August, pp. 14-16.
- Howarth, R.W., S. Bringezu, L.A. Martinelli, R. Santoro, D. Messem, and O.E. Sala (2009).** Introduction: biofuels and the environment in the 21st century. In: *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use*. R.W. Howarth and S. Bringezu (eds.), Proceedings of the SCOPE - Scientific Committee on Problems of the Environment International Biofuels Project Rapid Assessment, Gumpersbach, Germany, 22-25 September 2009, pp. 15-36.
- Hsu, D.D., D. Inman, G.A. Heath, E.J. Wolfrum, M.K. Mann, and A. Aden (2010).** Life cycle environmental impacts of selected u.s. ethanol production and use pathways in 2022. *Environmental Science & Technology*, **44**, pp. 5289-5297.
- Hu, Q., M. Sommerfeld, E. Jarvis, M. Ghirardi, M. Posewitz, M. Seibert, and A. Darzins (2008).** Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*, **54**, pp. 621-639.
- Huber, G.W., R.D. Cortright, and J.A. Dumesic (2004).** Renewable alkanes by aqueous-phase reforming of biomass-derived oxygenates. *Angewandte Chemie*, **116**(12), pp. 1575-1577.
- Huber, G.W., J.N. Chheda, C.J. Barrett, and J.A. Dumesic (2005).** Production of liquid alkanes by aqueous-phase processing of biomass-derived carbohydrates. *Science*, **308**(5727), pp. 1446-1450.

- Huber, G.W., S. Iborra, and A. Corma (2006).** Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. *Chemical Reviews*, **106**(9), pp. 4044-4098.
- Huertas, D.A., G. Berndes, M. Holmen, and G. Sparovek (2010).** Sustainability certification of bioethanol. How is it perceived by Brazilian stakeholders? *Biomass and Bioenergy*, **4**(4), pp. 369-384.
- Huo, H., M. Wang, C. Bloyd, and V. Putsche (2009).** Life-cycle assessment of energy use and greenhouse gas emissions of soybean-derived biodiesel and renewable fuels. *Environmental Science & Technology*, **43**(3), pp. 750-756.
- IAASTD (2009).** *Agriculture at a Crossroads*. International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development, Washington, DC, USA, 606 pp.
- IATA (2009).** *Report on Alternative Fuels*. International Air Transport Association, Montreal, Canada, 92 pp.
- Ibsen, K., R. Wallace, S. Jones, and T. Werpy (2005).** *Evaluating Progressive Technology Scenarios in the Development of the Advanced Dry Mill Biorefinery*. FY05-630, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 35 pp.
- IEA (2000).** *Experience Curves for Energy Technology Policy*. International Energy Agency, Paris, France, 133 pp.
- IEA (2006).** *World Energy Outlook 2006*. International Energy Agency, Paris, France, 601 pp.
- IEA (2007a).** *World Energy Outlook 2007*. International Energy Agency, Paris, France, 600 pp.
- IEA (2007b).** *Biomass for Power Generation and CHP*. Energy Technology Essentials ETE03, International Energy Agency, Paris, France, 4pp.
- IEA (2008a).** *Energy Technology Perspectives 2008. Scenarios and Strategies to 2050*. International Energy Agency, Paris, France, 646 pp.
- IEA (2008b).** *World Energy Outlook 2008*. International Energy Agency, Paris, France, 578 pp. **IEA (2009).** *World Energy Outlook 2009*. International Energy Agency, Paris, France, 696 pp. **IEA (2010a).** *World Energy Statistics 2010*. International Energy Agency, Paris, France.⁸⁸
- IEA (2010b).** *World Energy Outlook 2010*. International Energy Agency, Paris, France, 736 pp.
- IEA (2010c).** *Renewables Information 2010 with 2009 Data*. International Energy Agency, Paris, France, 428 pp (ISBN 978-92-64-08416-2).
- IEA (2011).** *Technology Roadmap: Biofuels for Transport*. International Energy Agency, Renewable Energy Division, Paris, France, 52 pp.
- IEA Bioenergy (2007).** *Potential Contribution of Bioenergy to the World's Future Energy Demand*. IEA Bioenergy: ExCo: 2007:02, 12 pp.
- IEA Bioenergy (2009).** *Bioenergy: A Sustainable and Reliable Energy Source. Main Report*. IEA Bioenergy: ExCo:2009:06, 108 pp.
- IEA Bioenergy (2010).** *Algae – The Future for Bioenergy? Summary and conclusions from the IEA Bioenergy ExCo64 Workshop*. IEA Bioenergy: ExCo: 2010:02, 16 pp.
- IEA Renewable Energy Division (2010).** *Sustainable Production of Second-Generation Biofuels: Potential and Perspectives in Major Economies and Developing Countries*. International Energy Agency, Paris, France, 217 pp.
- IFPRI (2008).** *High Food Prices: The What, Who, and How of Proposed Policy Actions*. International Food Policy Research Institute, Washington, DC, USA, 12 pp.
- Ileleji, K.E., S. Sokhansanj, and J.S. Cundiff (2010).** Farm-gate to plant-gate delivery of lignocellulosic feedstocks from plant biomass for biofuel production. In: *Biofuels from Agricultural Wastes and Byproducts*. H.P. Blaschek, T. Ezeji, and J. Scheffran (eds.), Wiley- Blackwell, Oxford, UK, pp. 117-159.
- Imhoff, M.L., L. Bounoua, T. Ricketts, C. Loucks, R. Harriss, and W.T. Lawrence (2004).** Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature*, **429**(6994), pp. 870- 873.
- IPCC (1996).** *Climate Change 1995: Impacts, Adaptation, and Mitigation: Scientific-Technical Analyses*. R.T. Watson, M.C. Zinyowera, and R.H. Moss (eds.), Cambridge University Press, 878 pp.
- IPCC (2000a).** *Special Report on Emissions Scenarios*. N. Nakicenovic and R. Swart (eds.), Cambridge University Press, 570 pp.
- IPCC (2000b).** *Land Use, Land Use Change and Forestry*. R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo and D.J. Dokken (eds.), Cambridge University Press, 375 pp.
- IPCC (2005).** *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and

⁸⁸ 4 つの IEA の報告書から成る：1960 年~2008 年（及び 2009 年見積）の主な OECD 諸国についての IEA エネルギー・バランス及び統計データベース、1971 年~2008 年の 100 以上の非 OECD 諸国のエネルギー統計及びバランス。

- L. Meyer (eds.), Cambridge University Press, 431 pp.
- IPCC (2007a).** *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (eds.), Cambridge University Press, 979 pp.
- IPCC (2007b).** *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contributions of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Core Writing Team, R.K. Pachauri, and A. Reisinger (eds.), Cambridge University Press, 104 pp.
- IPCC (2007c).** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, 996 pp.
- IPCC (2007d).** *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, 851 pp.
- IUCN (2009).** *Guidelines on Biofuels and Invasive Species.* IUCN, Gland, Switzerland, 20 pp. (ISBN: 978-2-8317-1222-2).
- Ivanic, M., and W. Martin (2008).** Implications of higher global food prices for poverty in low- income countries. *Agricultural Economics*, **39**, pp. 405-416.
- Jackson, R.B., B.C. Murray, E.G. Jobbagy, R. Avissar, S.B. Roy, D.J. Barrett, C.W. Cook, K.A. Farley, D.C. le Maitre, and B.A. McCarl (2005).** Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, **310**(5756), pp. 1944-1947.
- Jacobsen, N.B. (2006).** Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology*, **10**(1-2), pp. 239-255.
- Jaggard, K.W., A. Qi, and E.S. Ober (2010).** Possible changes to arable crop yields by 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **365**(1554), pp. 2835- 2851.
- Jauhainen, J., S. Limin, H. Silvennoinen, and H. Vasander (2008).** Carbon dioxide and methane fluxes in drained tropical peat before and after hydrological restoration. *Ecology*, **89**(12), pp. 3503-3514.
- Jechura, J. (2005).** *Dry Mill Cost-By-Area: ASPEN Case Summary.* National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 2 pp.
- Jeffries, T.W. (2006).** Engineering yeasts for xylose metabolism. *Current Opinion in Biotechnology*, **17**(3), pp. 320-326.
- Jeffries, T.W., I.V. Grigoriev, J. Grimwood, J.M. Laplaza, A. Aerts, A. Salamov, J. Schmutz, E. Lindquist, P. Dehal, H. Shapiro, Y.-S. Jin, V. Passoth, and P.M. Richardson (2007).** Genome sequence of the lignocellulose-bioconverting and xylose-fermenting yeast *Pichia stipitis*. *Nature Biotechnology*, **25**(3), pp. 319-326.
- Jensen, E.S., 1996:** Grain yield, symbiotic N₂ fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops. *Plant and Soil*, **182**(1), pp. 25-38.
- Jetter, J.J., and P. Kariher (2009).** Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions. *Biomass and Bioenergy*, **33**(2), pp. 294-305.
- Johansson, D., and C. Azar (2007).** A scenario based analysis of land competition between food and bioenergy production in the US. *Climatic Change*, **82**(3), pp. 267-291.
- Johnson, J.M.F., D. Reicosky, B. Sharratt, M. Lindstrom, W. Voorhees, and L. Carpenter- Boggs (2004).** Characterization of soil amended with the by-product of corn stover fermentation. *Soil Science Society of America Journal*, **68**(1), pp. 139-147.
- Johnson, M., R. Edwards, A. Ghilardi, V. Berrueta, D. Gillen, C.A. Frenk, and O. Masera (2009).** Quantification of carbon savings from improved biomass cookstove projects. *Environmental Science & Technology*, **43**(7), pp. 2456-2462.
- Johnson, T.M., C. Alatorre, Z. Romo, and F. Liu (2009).** *Low-Carbon Development for Mexico.* The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, Washington, DC, USA.
- Johnston, M., and T. Holloway (2007).** A global comparison of national biodiesel production potentials. *Environmental Science & Technology*, **41**(23), pp. 7967-7973.
- Johnston, M., J.A. Foley, T. Holloway, C. Kucharik, and C. Monfreda (2009).** Resetting global expectations from agricultural biofuels. *Environmental Research Letters*, **4**(1), 014004.
- Jongschaap, R.E.E., W.J. Corré, P.S. Bindraban, and W.A. Brandenburg (2007).** *Claims and Facts on Jatropha curcas L. Global Jatropha curcas Evaluation, Breeding And Propagation Programme.* Report 158, Plant Research International BV, Wageningen, The Netherlands and Stichting Het Groene Woudt, Laren, The Netherlands, 66 pp.
- Junginger, M. (2007).** *Lessons from (European) Bioenergy Policies; Results of a Literature Review for IEA Bioenergy Task*

40. Utrecht University, Utrecht, Netherlands, 14 pp. Available at: www.bioenergytrade.org/downloads/jungingerlessonsfromeuropeanbioenergypolicies.pdf.
- Junginger, M., A. Faaij, R. van den Broek, A. Koopmans, and W. Hulscher (2001).** Fuel supply strategies for large-scale bio-energy projects in developing countries. Electricity generation from agricultural and forest residues in Northeastern Thailand. *Biomass and Bioenergy*, **21**(4), pp. 259-275.
- Junginger, M., A. Faaij, R. Björheden, and W.C. Turkenburg (2005).** Technological learning and cost reductions in wood fuel supply chains in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, **29**(6), pp. 399-418.
- Junginger, M., E. de Visser, K. Hjort-Gregersen, J. Koornneef, R. Raven, A. Faaij, and W. Turkenburg (2006).** Technological learning in bioenergy systems. *Energy Policy*, **34**(18), pp. 4024-4041.
- Junginger, M., T. Bolkesjø, D. Bradley, P. Dolzan, A. Faaij, J. Heinimö, B. Hektor, Ø. Leistad, E. Ling, M. Perry, E. Piacente, F. Rosillo-Calle, Y. Ryckmans, P.-P. Schouwenberg, B. Solberg, E. Trømborg, A.d.S. Walter, and M.d. Wit (2008).** Developments in international bioenergy trade. *Biomass and Bioenergy*, **32**(8), pp. 717-729.
- Junginger, M., A. Faaij, J. van Dam, S. Zarrilli, A. Mohammed, and D. Marchal (2010).** *Opportunities and Barriers for International Bioenergy Trade and Strategies to Overcome Them*. IEA Bioenergy Task 40, 17 pp. Available at: www.bioenergytrade.org/downloads/t40opportunitiesandbarriersforbioenergytrade.pdf.
- Jungk, N., and G. Reinhardt (2000).** *Landwirtschaftliche Referenzsysteme in Ökologischen Bilanzierungen: eine Basis Analyse*. Institute für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, Germany.
- Kaliyan, N., R.V. Morey, and D.G. Tiffany (2010).** Reducing life cycle greenhouse gas emissions of corn ethanol by integrating biomass to produce heat and power at ethanol plants. *Biomass and Bioenergy*, **35**(3), pp. 1103-1113.
- Kalnes, T.N., K.P. Koers, T. Marker, and D.R. Shonnard (2009).** A technoeconomic and environmental life cycle comparison of green diesel to biodiesel and syndiesel. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **28**(1), pp. 111-120.
- Kamm, B., P.R. Gruber, and M. Kamm (eds.) (2006).** *Biorefineries - Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions*. Wiley-VCH, Weinheim, UK, 949 pp.
- Kang, S., M. Khanna, J. Scheffran, D. Zilberman, H. Önal, Y. Ouyang, and Ü.D. Tursun (2010).** Optimizing the biofuels infrastructure: Transportation networks and biorefinery locations in Illinois. In: *Handbook of Bioenergy Economics and Policy*. M. Khanna, J. Scheffran, and D. Zilberman (eds.), Springer New York, New York, NY, USA, pp. 151-173.
- Karekezi, S., and L. Majoro (2002).** Improving modern energy services for Africa's urban poor. *Energy Policy*, **30**(11-12), pp. 1015-1028.
- Karekezi, S., and P. Turyareeba, 1995:** Woodstove dissemination in Eastern Africa - a review. *Energy for Sustainable Development*, **1**(6), pp. 12-19.
- Karlen, D.L. (2010).** Corn stover feedstock trials to support predictive modeling. *Global Change Biology Bioenergy*, **2**(5), pp. 235-247.
- Karp, A., and I. Shield (2008).** Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge. *New Phytologist*, **179**(1), pp. 15-32.
- Kartha, S., P. Hazel, and R.K. Pachauri (2006).** *Environmental effects of bioenergy*. In: *Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges*. P.B.R. Hazell and R.K. Pachauri (eds.), International Food Policy Research Institute, Washington, D.C., USA, 2 pp.
- Kazi, F.K., J.A. Fortman, R.P. Anex, D.D. Hsu, A. Aden, A. Dutta, and G. Kothandaraman (2010).** Techno-economic comparison of process technologies for biochemical ethanol production from corn stover. *Fuel*, **89**(Supplement 1), pp. S20-S28.
- Keasling, J.D., and H. Chou (2008).** Metabolic engineering delivers next-generation biofuels. *Nature Biotechnology*, **26**(3), pp. 298-299.
- Keeney, D., and T.W. Hertel (2008).** *Yield Response to Prices: Implications for Policy Modeling*. Working paper 08/13, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 37 pp.
- Keeney, D., and T.W. Hertel (2009).** The indirect land use impacts of United States biofuel policies: The importance of acreage, yield, and bilateral trade responses. *American Journal of Agricultural Economics*, **91**, pp. 895-909.
- Keeney, D., and M. Muller (2006).** *Water Use by Ethanol Plants: Potential Challenges*. Institute for Agriculture and Trade Policy, Minneapolis, MN, USA, 7 pp.
- Keeney, R., and T. Hertel (2005).** *GTAP-AGR : A Framework for Assessing the Implications of Multilateral Changes in Agricultural Policies*. GTAP Technical Paper No.24, Center for Global Trade Analysis, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 61 pp.
- Kendall, A., B. Chang, and B. Sharpe (2009).** Accounting for time-dependent effects in biofuel life cycle greenhouse gas emissions calculations. *Environmental Science & Technology*, **43**(18), pp. 7142-7147.

- Keys, E., and W. McConnell (2005).** Global change and the intensification of agriculture in the tropics. *Global Environmental Change*, **15**(4), pp. 320-337.
- Kheshgi, H.S., R.C. Prince, and G. Marland (2000).** The potential of biomass fuels in the context of global climate change: Focus on transportation fuels. *Annual Review of Energy and the Environment*, **25**(1), pp. 199-244.
- Kim, H., S. Kim, and B.E. Dale (2009).** Biofuels, land use change, and greenhouse gas emissions: Some unexplored variables. *Environmental Science & Technology*, **43**(3), pp. 961-967.
- Kim, S., and B. Dale (2002).** Allocation procedure in ethanol production system from corn grain i. system expansion. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **7**(4), pp. 237-243.
- Kim, S., and B.E. Dale (2004).** Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy*, **26**(4), pp. 361-375.
- Kinchin, C. and R.L. Bain (2009).** *Hydrogen Production from Biomass via Indirect Gasification: The Impact of NREL Process Development Unit Gasifier Correlations*. NREL Report No. TP- 510-44868. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 27 pp.
- King, C.W., and M.E. Webber (2008).** Water intensity of transportation. *Environmental Science & Technology*, **42**(21), pp. 7866-7872.
- King, D., O.R. Inderwildi, and A. Williams (2010).** *The Future of Industrial Biorefineries*. 210610, World Economic Forum White Paper, Cologn/Geneva, Switzerland, 40 pp.
- Kirkels, A., and G. Verbon (2011).** Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(1), pp. 471-481.
- Kirkinen, J., A. Sahay, and I. Savolainen (2009).** Greenhouse impact of fossil, forest residues and Jatropha diesel: a static and dynamic assessment. *Progress in Industrial Ecology, An International Journal*, **6**, pp. 185-206.
- Kirschbaum, M.U.F. (2003).** To sink or burn? A discussion of the potential contributions of forests to greenhouse gas balances through storing carbon or providing biofuels. *Biomass and Bioenergy*, **24**(4-5), pp. 297-310.
- Kirschbaum, M.U.F. (2006).** Temporary carbon sequestration cannot prevent climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **11**(5), pp. 1151-1164.
- Kishore, V.V.N., P.M. Bhandari, and P. Gupta (2004).** Biomass energy technologies for rural infrastructure and village power – opportunities and challenges in the context of global climate change concerns. *Energy Policy*, **32**(6), pp. 801-810.
- Kituyi, E. (2004).** Towards sustainable production and use of charcoal in Kenya: exploring the potential in life cycle management approach. *Journal of Cleaner Production*, **12**(8-10), pp. 1047- 1057.
- Kline, K.L., and V.H. Dale (2008).** Biofuels: Effects on land and fire. *Science*, **321**(5886), pp. 199- 201.
- Kline, K.L., G. Oladosu, A. Wolfe, R.D. Perlack, and M. McMahon (2007).** *Biofuel Feedstock Assessment for Selected Countries*. ORNL/TM-2007/224, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, 243 pp.
- Knothe, G. (2010).** Biodiesel and renewable diesel: a comparison. *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**(3), pp. 364-373.
- Knowler, D.J. (2004).** The economics of soil productivity: local, national and global perspectives. *Land Degradation & Development*, **15**(6), pp. 543-561.
- Koh, L.P., and J. Ghazoul (2008).** Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities. *Biological Conservation*, **141**(10), pp. 2450-2460.
- Köhlin, G., and M. Ostwald (2001).** Impact of plantations on forest use and forest status in Orissa, India. *AMBIO*, **30**(1), pp. 37-42.
- Koizumi, T., and K. Ohga (2008).** Biofuels policies in Asian countries: Impact of the expanded biofuels programs on world agricultural markets. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, **5**(2), Article 8, 22 pp.
- Koning, N. (2008).** Long-term global availability of food: continued abundance or new scarcity? *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, **55**(3), pp. 229-292.
- Körner, C., J.A. Morgan, and R.J. Norby (2007).** CO₂ fertilization: When, where and how much? In: *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Springer, Berlin, Germany, pp. 9-22.
- Koukouzas, N., A. Katsiadakis, E. Karlopoulos, and E. Kakaras (2008).** Co-gasification of solid waste and lignite - A case study for Western Macedonia. *Waste Management*, **28**(7), pp. 1263-1275.
- Krausmann, F., K.-H. Erb, S. Gingrich, C. Lauk, and H. Haberl (2008).** Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: A comprehensive assessment of supply, consumption and constraints. *Ecological Economics*, **65**(3), pp.

471-487.

- Kreutz, T.G., E.D. Larson, G. Liu, and R.H. Williams (2008).** Fischer-Tropsch fuels from coal and biomass. In: *Proceedings of the 25th International Pittsburgh Coal Conference*. Princeton Environmental Institute, Pittsburgh, PA, 29 September – 2 October 2008.
- Krewitt, W., K. Nienhaus, C. Kleßmann, C. Capone, E. Stricker, W. Graus, M. Hoogwijk, N. Supersberger, U. von Winterfeld, and S. Samadi (2009).** *Role and Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply*. ISSN 1862-4359, Federal Environment Agency, Dessau-Roßlau, Germany, 336 pp.
- Krey, V., and L. Clarke (2011).** Role of renewable energy in climate change mitigation: A synthesis of recent scenarios. *Climate Policy*, in press.
- Krich, K., D. Augenstein, J.P. Batmale, J. Benemann, B. Rutledge, and D. Salour (2005).** *Biomethane from Dairy: A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California*. Report prepared for Western United Dairymen with funding from USDA Rural Development, Washington, DC, USA, 282 pp. Available at: www.suscon.org/cowpower/biomethaneSourcebook/Full_Report.pdf.
- Kumar, B.M. (2006).** Agroforestry: the new old paradigm for Asian food security. *Journal of Tropical Agriculture*, **44**(1-2), pp. 1-14.
- Kumar, L.N.V., and S. Maithel (2007).** Alternative feedstock for Bio-ethanol production in India. In: *Biofuels: Towards a Greener and Secure Energy Future*. P.P. Bhojvaid (ed.), The Energy Resources Institute Press (TERI Press), New Delhi, India, pp. 89-104.
- Kurz, W.A., G. Stinson, and G. Rampley (2008a).** Could increased boreal forest ecosystem productivity offset carbon losses from increased disturbances? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **363**(1501), pp. 2259-2268.
- Kurz, W.A., C.C. Dymond, G. Stinson, G.J. Rampley, E.T. Neilson, A.L. Carroll, T. Ebata, and L. Safranyik (2008b).** Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, **452**(7190), pp. 987-990.
- Kuuva, K., and L. Ruska (2009).** *Final Report of Feed-in Tariff Task Force*. 59/2009, Ministry of Employment and the Economy of Finland, Helsinki, Finland, 101 pp.
- Laird, D.A. (2008).** The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, **100**(1), pp. 178-181.
- Laird, D.A., R.C. Brown, J.E. Amonette, and J. Lehmann (2009).** Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **3**(5), pp. 547-562.
- Lal, R. (2003).** Offsetting global CO₂ emissions by restoration of degraded soils and intensification of world agriculture and forestry. *Land Degradation & Development*, **14**(3), pp. 309-322.
- Lal, R. (2004).** Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, **304**(5677), pp. 1623-1627.
- Lal, R. (2005).** World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International*, **31**(4), pp. 575-584.
- Lal, R. (2008).** Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Management*, **28**(4), pp. 747-758.
- Lal, R., and D. Pimentel (2007).** Bio-fuels from crop residues. *Soil & Tillage Research*, **93**(2), pp. 237-238.
- Lamers, P., C. Hamelinck, M. Junginger, and A. Faaij (2011).** International Bioenergy, Trade - A Review of Past Developments in the Liquid Biofuels Market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(6), pp. 2655-2676.
- Lapola, D.M., R. Schaldach, J. Alcamo, A. Bondeau, J. Koch, C. Koelking, and J.A. Priess (2010).** Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**(8), pp. 3388-3393.
- Larson, E. (2006).** A review of life-cycle analysis studies on liquid biofuel systems for the transport sector. *Energy for Sustainable Development*, **10**(2), pp. 109-126.
- Larson, E.D., G. Fiorese, G. Liu, R.H. Williams, T.G. Kreutz, and S. Consonni (2009).** Co- production of synfuels and electricity from coal + biomass with zero net carbon emissions: An Illinois case study. *Energy Procedia*, **1**(1), pp. 4371-4378.
- Larson, E.D., G. Fiorese, G. Liu, R.H. Williams, T.G. Kreutz, and S. Consonni (2010).** Co- production of decarbonized synfuels and electricity from coal + biomass with CO₂ capture and storage: an Illinois case study. *Energy & Environmental Science*, **3**(1), pp. 28-42.

- Laser, M., E. Larson, B. Dale, M. Wang, N. Greene, and L.R. Lynd (2009). Comparative analysis of efficiency, environmental impact, and process economics for mature biomass refining scenarios. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(2), pp. 247-270.
- Lattimore, B., C.T. Smith, B.D. Titus, I. Stupak, and G. Egnell (2009). Environmental factors in woodfuel production: Opportunities, risks, and criteria and indicators for sustainable practices. *Biomass and Bioenergy*, 33(10), pp. 1321-1342.
- Laurance, W.F. (2007). Switch to corn promotes Amazon deforestation. *Science*, 318(5857), pp. 1721-1724.
- Lawrence, C.J., and V. Walbot (2007). Translational genomics for bioenergy production from fuelstock grasses: Maize as the model species. *Plant Cell*, 19(7), pp. 2091-2094.
- Lee, D.R., C.B. Barrett, and J.G. McPeak (2006). Policy, technology, and management strategies for achieving sustainable agricultural intensification. *Agricultural Economics*, 34(2), pp. 123-127.
- Lee, J. (1997). Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. *Journal of Biotechnology*, 56(1), pp. 1-24.
- Lee, S.K., H. Chou, T.S. Ham, T.S. Lee, and J.D. Keasling (2008). Metabolic engineering of microorganisms for biofuels production: from bugs to synthetic biology to fuels. *Current Opinion in Biotechnology*, 19(6), pp. 556-563.
- Leemans, R., A. van Amstel, C. Battjes, E. Kreileman, and S. Toet, (1996). The land cover and carbon cycle consequences of large-scale utilizations of biomass as an energy source. *Global Environmental Change*, 6(4), pp. 335-357.
- Legros, G., I. Havet, N. Bruce, and S. Bonjour (2009). *The Energy Access Situation in Developing Countries: A Review Focusing on the Least Developed Countries and Sub-Saharan Africa*. United Nations Development Programme and the World Health Organization, New York, NY, USA, 142 pp.
- Lehtomäki, A., S. Huttunen, and J.A. Rintala (2007). Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(3), pp. 591-609.
- Leng, R., C. Wang, C. Zhang, D. Dai, and G. Pu (2008). Life cycle inventory and energy analysis of cassava-based fuel ethanol in China. *Journal of Cleaner Production*, 16(3), pp. 374-384.
- Levasseur, A., P. Lesage, M. Margni, L. Deschênes, and R. Samson (2010). Considering time in LCA: Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. *Environmental Science & Technology*, 44(8), pp. 3169-3174.
- Lewis, S.L., G. Lopez-Gonzalez, B. Sonke, K. Affum-Baffoe, T.R. Baker, L.O. Ojo, O.L. Phillips, J.M. Reitsma, L. White, J.A. Comiskey, M.-N.D. K, C.E.N. Ewango, T.R. Feldpausch, A.C. Hamilton, M. Gloor, T. Hart, A. Hladik, J. Lloyd, J.C. Lovett, J.-R. Makana, Y. Malhi, F.M. Mbago, H.J. Ndangalasi, J. Peacock, K.S.H. Peh, D. Sheil, T. Sunderland, M.D. Swaine, J. Taplin, D. Taylor, S.C. Thomas, R. Votere, and H. Woll (2009). Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, 457(7232), pp. 1003-1006.
- Li, W., R. Fu, and R.E. Dickinson (2006). Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. *Journal of Geophysical Research*, 111(D2), D02111.
- Liebig, M., M. Schmer, K. Vogel, and R. Mitchell (2008). Soil carbon storage by switchgrass grown for bioenergy. *BioEnergy Research*, 1(3), pp. 215-222.
- Lindenmayer, D.B., and H.A. Nix (1993). Ecological principles for the design of wildlife corridors. *Conservation Biology*, 7(3), pp. 627-631.
- Lindner, M., M. Maroschek, S. Netherer, A. Kremer, A. Barbati, J. Garcia-Gonzalo, R. Seidl, S. Delzon, P. Corona, M. Kolström, M.J. Lexer, and M. Marchetti (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), pp. 698-709.
- Lioubimtseva, E., and J.M. Adams (2004). Possible implications of increased carbon dioxide levels and climate change for desert ecosystems. *Environmental Management*, 33(Supplement 1), pp. S388-S404.
- Liska, A.J., and R.K. Perrin (2010). Securing foreign oil: A case for including military operations in the climate change impact of fuels. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 52(4), pp. 9-12.
- Lobell, D.B., and M.B. Burke (2008). Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environmental Research Letters*, 3(3), 034007.
- Lobell, D.B., M.B. Burke, C. Tebaldi, M.D. Mastrandrea, W.P. Falcon, and R.L. Naylor (2008). Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319(5863), pp. 607-610.
- Londo, M., A. Faaij, M. Junginger, G. Berndes, S. Lensink, A. Wakker, G. Fischer, S. Prieler, H. van Velthuisen, and M. de Wit (2010). The REFUEL EU road map for biofuels in transport: Application of the project's tools to some short-term policy issues. *Biomass and Bioenergy*, 34(2), pp. 244-250.
- López, R., and G.I. Galinato (2007). Should governments stop subsidies to private goods? Evidence from rural Latin America. *Journal of Public Economics*, 91(5-6), pp. 1071-1094.

- Lotze-Campen, H., A. Popp, T. Beringer, C. Müller, A. Bondeau, S. Rost, and W. Lucht (2009).** Scenarios of global bioenergy production: The trade-offs between agricultural expansion, intensification and trade. *Ecological Modelling*, **221**(18), pp. 2188-2196.
- Loustau, D., A. Bosc, A. Colin, J. Ogee, H. Davi, C. Francois, E. Dufrene, M. Deque, E. Cloppet, D. Arrouays, C. Le Bas, N. Saby, G. Pignard, N. Hamza, A. Granier, N. Breda, P. Ciais, N. Viovy, and F. Delage (2005).** Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree Physiology*, **25**(7), pp. 813- 823.
- Low, T., and C. Booth (2007).** *The Weedy Truth about Biofuels*. Invasive Species Council, Melbourne, Fairfield, Australia, 46 pp.
- Luyssaert, S., E.D. Schulze, A. Börner, A. Knohl, D. Hessenmöller, B.E. Law, P. Ciais, and J. Grace (2008).** Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, **455**(7210), pp. 213-215.
- Lywood, W. (2008).** *Indirect Effects of Biofuels*. Renewable Fuels Agency, East Sussex, UK.
- Lywood, W., J. Pinkney, and S.A.M. Cockerill (2009a).** Impact of protein concentrate coproducts on net land requirement for European biofuel production. *Global Change Biology Bioenergy*, **1**(5), pp. 346-359.
- Lywood, W., J. Pinkney, and S.A.M. Cockerill (2009b).** The relative contributions of changes in yield and land area to increasing crop output. *Global Change Biology Bioenergy*, **1**(5), pp. 360- 369.
- Macedo, I.C., and J.E.A. Seabra (2008).** Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol. In: *Sugarcane Ethanol: Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment*. P. Zaubier and J. van de Vooren (eds.), Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp. 95-112.
- Macedo, I.C., J.E.A. Seabra, and J.E.A.R. Silva (2008).** Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, **32**(7), pp. 582-595.
- Madsen, A.M. (2006).** Exposure to airborne microbial components in autumn and spring during work at Danish biofuel plants. *Annals of Occupational Hygiene*, **50**(8), pp. 821-831.
- Madsen, A.M., L. Martensson, T. Schneider, and L. Larsson (2004).** Microbial dustiness and particle release of different biofuels. *Annals of Occupational Hygiene*, **48**(4), pp. 327-338.
- Maes, W., W. Achten, and B. Muys (2009).** Use of inadequate data and methodological errors lead to a dramatic overestimation of the water footprint of *Jatropha curcas*. *Nature Precedings*, hdl:10101/npre.2009.3410.1, 3 pp.
- Malézieux, E., Y. Crozat, C. Dupraz, M. Laurans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontaine, B. Rapidel, S. de Tourdonnet, and M. Valantin-Morison (2009).** Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, **29**(1), pp. 43-62.
- Malmer, A., D. Murdiyarso, L.A.S. Bruijnzeel, and U. Lstedt (2010).** Carbon sequestration in tropical forests and water: a critical look at the basis for commonly used generalizations. *Global Change Biology*, **16**(2), pp. 599-604.
- Markewitz, D. (2006).** Fossil fuel carbon emissions from silviculture: Impacts on net carbon sequestration in forests. *Forest Ecology and Management*, **236**(2-3), pp. 153-161.
- Marlair, G., P. Rotureau, S. Breulet, and S. Brohez (2009).** Booming development of biofuels for transport: Is fire safety of concern? *Fire and Materials*, **33**(1), pp. 1-19.
- Marland, G., and B. Schlamadinger (1997).** Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. *Biomass and Bioenergy*, **13**(6), pp. 389-397.
- Marland, G., M. Obersteiner, and B. Schlamadinger (2007).** The carbon benefits of fuels and forests. *Science*, **318**(5853), pp. 1066.
- Martens, W., and R. Böhm (2009).** Overview of the ability of different treatment methods for liquid and solid manure to inactivate pathogens. *Bioresource Technology*, **100**(22), pp. 5374- 5378.
- Martinelli, L.A., and S. Filoso (2007).** Polluting effects of Brazil's sugar-ethanol industry. *Nature*, **445**(7126), pp. 364-364.
- Masera, O.R., and J. Navia (1997).** Fuel switching or multiple cooking fuels: Understanding interfuel substitution patterns in rural Mexican households. *Biomass and Bioenergy*, **12**(5), pp. 347-361.
- Masera, O.R., B.D. Saatkamp, and D.M. Kammen (2000).** From linear fuel switching to multiple cooking strategies: A critique and alternative to the energy ladder model. *World Development*, **28**(12), pp. 2083-2103.
- Masera, O.R., R. Diaz, and V. Berrueta (2005).** From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, **9**(1), pp. 25-36.
- Masera, O., A. Ghilardi, R. Drigo, and M. Angel Trossero (2006).** WISDOM: A GIS-based supply demand mapping tool for woodfuel management. *Biomass and Bioenergy*, **30**(7), pp. 618- 637.

- Matsuoka, S., J. Ferro, and P. Arruda (2009).** The Brazilian experience of sugarcane ethanol industry. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, **45**(3), pp. 372-381.
- Matthews, H.D., and K. Caldeira (2008).** Stabilizing climate requires near-zero emissions. *Geophysical Research Letters*, **35**(4), L04705.
- Matthews, H.D., N.P. Gillett, P.A. Stott, and K. Zickfeld (2009).** The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature*, **459**(7248), pp. 829-832.
- Maués, J.A. (2007).** Maximizacao da geracao eletrica a partir do bagaco e palha em usinas de acucar e alcool. *Revista Engenharia*, **583**, pp. 88-98.
- Mayfield, C.A., C.D. Foster, C.T. Smith, J. Gan, and S. Fox (2007).** Opportunities, barriers, and strategies for forest bioenergy and bio-based product development in the Southern United States. *Biomass & Bioenergy*, **31**, pp. 631-637.
- McAloon, A., F. Taylor, W. Lee, K. Ibsen, and R. Wooley (2000).** *Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks*. NREL/TP-580-28893, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 43 pp.
- McCoy, M. (2006).** Glycerin surplus. *Chemical & Engineering News*, **83**(4), pp. 21-22.
- McDonald, A., and L. Schrattenholzer (2001).** Learning rates for energy technologies. *Energy Policy*, **29**(4), pp. 255-261.
- McGowin, C. (2008).** *Renewable Energy Technical Assessment Guide*. TAG-RE:2007, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- McKeough, P., and E. Kurkela (2008).** *Process Evaluations and Design Studies in the UCG Project 2004-2007*. VTT Research Notes 2434, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 49 pp.
- McKeough, P., Y. Solantausta, H. Kyllönen, A. Faaij, C. Hamelinck, M. Wagener, D. Beckman and B. Kjellström (2005).** *Technoeconomic Analysis of Biotrade Chains: Upgraded Biofuels from Russia and Canada to the Netherlands*. VTT Research Notes 2312, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 65 pp.
- McLeod, J.E., J.E. Nunez, and S.S. Rivera (2008).** A discussion about how to model biofuel plants for the risk optimization. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering 2008, Vol. II*, London, UK, 2-4 July 2008, pp. 1214-1219.
- McWhorter, C., 1971:** Introduction and spread of johnsongrass in the United States. *Weed Science*, **19**(5), pp. 496-500.
- Melillo, J.M., J.M. Reilly, D.W. Kicklighter, A.C. Gurgel, T.W. Cronin, S. Paltsev, B.S. Felzer, X. Wang, A.P. Sokolov, and C.A. Schlosser (2009).** Indirect emissions from biofuels: How important? *Science*, **326**(5958), pp. 1397-1399.
- Menichetti, E., and M. Otto (2009).** Energy balance and greenhouse gas emissions of biofuels from a product life-cycle perspective. In: *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use*. R.W. Howarth and S. Bringezu (eds.), Proceedings of the SCOPE - Scientific Committee on Problems of the Environment International Biofuels Project Rapid Assessment, Gummertsbach, Germany, 22-25 September 2009, pp. 81-109.
- Metzger, J.O., and A. Hüttermann (2009).** Sustainable global energy supply based on lignocellulosic biomass from afforestation of degraded areas. *Naturwissenschaften*, **96**(2), pp. 279-288.
- Milbrandt, A., and R.P. Overend (2008).** *Future of Liquid Biofuels for APEC Economies*. NREL/TP-6A2-43709, report prepared for Asia-Pacific Economic Cooperation by the National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 103 pp. Available at: www.biofuels.apec.org/pdfs/ewg_2008_liquid_biofuels.pdf.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005).** *Ecosystems and Human Well-being*. Island Press, Washington, DC, USA, 36 pp.
- Mishra, V., X. Dai, K. Smith, and L. Mike (2004).** Maternal exposure to biomass smoke and reduced birth weight in Zimbabwe. *Annals of Epidemiology*, **14**(10), pp. 740-747.
- Mitchell, D. (2008).** *A Note on Rising Food Prices*. Policy Research Working Paper 4682, The World Bank Group, Washington, DC, USA, 22 pp.
- Molden, D. (ed.) (2007).** *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Earthscan, London, UK.
- Molina Grima, E., E.H. Belarbi, F.G. Acien Fernandez, A. Robles Medina, and Y. Chisti (2003).** Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, **20**(7-8), pp. 491-515.
- Möllersten, K., J. Yan, and J. R. Moreira (2003).** Potential market niches for biomass energy with CO₂ capture and storage – Opportunities for energy supply with negative CO₂ emissions. *Biomass and Bioenergy*, **25**(3), pp. 273-285.
- Molofsky, J., S.L. Morrison, and C.J. Goodnight (1999).** Genetic and environmental controls on the establishment of the invasive grass, *Phalaris arundinacea*. *Biological Invasions*, **1**(2), pp. 181-188.
- Moral, R., C. Paredes, M.A. Bustamante, F. Marhuenda-Egea, and M.P. Bernal (2009).** Utilisation of manure composts by high-value crops: Safety and environmental challenges. *Bioresource Technology*, **100**(22), pp. 5454-5460.

- Moreira, J.R. (2006).** *Bioenergy and Agriculture, Promises and Challenges: Brazil's Experience with Bioenergy*. International Food Policy Research Institute, Washington, DC, USA, 2 pp.
- Mosier, A., C. Kroeze, C. Nevison, O. Oenema, S. Seitzinger, and O. van Cleemput (1998).** Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **52**(2-3), pp. 1385-1314.
- Mosier, N., C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y.Y. Lee, M. Holtzapple, and M. Ladisch (2005).** Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, **96**(6), pp. 673-686.
- Mozaffarian, H., R.W.R. Zwart, H. Boerrigter, and E.P. Deurwaarder (2004).** Biomass and waste-related SNG production technologies; technical, economic and ecological feasibility. In: *2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, Rome, Italy, 10-14 May 2004. Available at: www.biosng.com/fileadmin/biosng/user/documents/reports/rx04024.pdf.
- Mukunda, H.S., S. Dasappa, P.J. Paul, N.K.S. Rajan, M. Yagnaraman, D.R. Kumar, and M. Deogaonkar (2010).** Gasifier stoves - science, technology and field outreach. *Current Science (Bangalore)*, **98**(5), pp. 627-638.
- Müller, C. (2007).** *Anaerobic Digestion of Biodegradable Solid Waste in Low- and Middle-Income Countries - Overview Over Existing Technologies and Relevant Case Studies*. Eawag Aquatic Research, Dübendorf, Switzerland, 63 pp.
- Myles, R. (2001).** Implementation of Household Biogas Plant by NGOs in India- Practical Experience in Implementation Household Biogas Technology, Lessons Learned, Key Issues and Future Approach for Sustainable Village Development. In: *VODO International Conference on Globalisation and Sustainable Development*, Antwerp, Brussels, 19-21 Nov 2001, 19 pp. Available at: www.inseda.org/Additional%20material/Lessons%20learnt%20NGOs%20Biogas%20programme.pdf.
- Nabuurs, G.-J., A. Pussinen, T. Karjalainen, M. Erhard, and K. Kramer (2002).** Stemwood volume increment changes in European forests due to climate change—a simulation study with the EFISCEN model. *Global Change Biology*, **8**(4), pp. 304-316.
- Nabuurs, G.J., O. Masera, K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsiddig, J. Ford-Robertson, P. Frumhoff, T. Karjalainen, O. Krankina, W.A. Kurz, M. Matsumoto, W. Oyhantcabal, N.H. Ravindranath, M.Z. Sanz Sanchez, and X. Zhang (2007).** Forestry. In: *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, pp. 541- 584.
- Nagatomi, Y., Y. Hiromi, Y. Kenji, I. Hiroshi, and Y. Koichi (2008).** A system analysis of energy utilization and competing technology using oil palm residue in Malaysia. *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, **29**(5), pp. 1-7.
- Narayanan, D., Y. Zhang, and M.S. Mannan (2007).** Engineering for Sustainable Development (ESD) in bio-diesel production. *Process Safety and Environmental Protection*, **85**(5), pp. 349- 359.
- Näslund-Eriksson, L., and L. Gustavsson (2008).** Biofuels from stumps and small roundwood – Costs and CO₂ benefits. *Biomass and Bioenergy*, **32**(10), pp. 897-902.
- Nassar, A., L. Harfurch, M.M.R. Moreira, L.C. Bachion, L.B. Antoniazzi, and G. Sparovek (2009).** *Impacts on Land Use and GHG Emissions from a Shock on Brazilian Sugarcane Ethanol Exports to the United States using the Brazilian Land Use Model (BLUM)*. EPA HQ OAR 2005 0161, Institute for International Negotiations, Geneva, Switzerland, 32 pp.
- Nassar, A., L.B. Antoniazzi, M.R. Moreira, L. Chiodi, and L. Harfurch (2010).** *An Allocation Methodology to Assess GHG Emissions Associated with Land Use Change*. Institute for International Negotiations, Geneva, Switzerland, 31 pp.
- NRC (2008).** *Water Implications of Biofuels Production in the United States*. National Research Council, The National Academies Press, Washington, DC, USA, 88 pp.
- NRC (2009a).** *Liquid Transportation Fuels from Coal and Biomass Technological Status, Costs, and Environmental Impacts*. National Research Council, National Academies Press, Washington, DC, USA, 50 pp.
- NRC (2009b).** *America's Energy Future: Electricity from Renewable Resources: Status, Prospects, and Impediments*. National Research Council, The National Academies Press, Washington, DC, 367 pp.
- NRC (2010).** *Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States, 2010*. Committee on the Impact of Biotechnology on Farm-Level Economics and Sustainability; National Research Council, Washington, DC, USA, 35 pp.
- Nehlsen, J., M. Mukherjee, and R.V. Porcelli (2007).** Apply an integrated approach to catalytic process design. *Chemical Engineering Progress*, **103**(2), pp. 31-41.
- Nelson, D.E., P.P. Repetti, T.R. Adams, R.A. Creelman, J. Wu, D.C. Warner, D.C. Anstrom, R.J. Bensen, P.P. Castiglioni, M.G. Donnarummo, B.S. Hinchey, R.W. Kumimoto, D.R. Maszle, R.D. Canales, K.A. Krolikowski, S.B. Dotson, N. Gutterson, O.J. Ratcliffe, and J.E. Heard (2007).** Plant nuclear factor Y (NF-Y) B subunits confer drought

- tolerance and lead to improved corn yields on water-limited acres. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**(42), pp. 16450-16455.
- NETL (2008).** *Development of Baseline Data and Analysis of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Petroleum-Based Fuels*. DOE/NETL-2009/1362, National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA, USA.
- NETL (2009a).** *An Evaluation of the Extraction, Transport and Refining of Imported Crude Oils and the Impact on Life Cycle Greenhouse Gas Emissions*. DOE/NETL-2009/1362, National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA, USA.
- NETL (2009b).** *Affordable, Low Carbon Diesel Fuel from Domestic Coal and Biomass*. DOE/NETL-2009/1349, National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA, USA.
- Neumann, K., P.H. Verburg, E. Stehfest, and C. Müller (2010).** The yield gap of global grain production: A spatial analysis. *Agricultural Systems*, **103**(5), pp. 316-326.
- Nguyen, T.L.T., and S.H. Gheewala (2008).** Life cycle assessment of fuel ethanol from Cassava in Thailand. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **13**(2), pp. 147-154.
- Nishi, T., M. Konishi, and S. Hasebe (2005).** An autonomous decentralized supply chain planning system for multi-stage production processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **16**(3), pp. 259-275.
- Nohrstedt, H.O. (2001).** Response of coniferous forest ecosystems on mineral soils to nutrient additions: A review of Swedish experiences. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **16**(6), pp. 555-573.
- Nusser, M., B. Hüsing, and S. Wydra (2007).** *Potenzialanalyse der Industriellen, Weißen Biotechnologie, Karlsruhe*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, Germany, 426 pp.
- O'Hare, M., R.J. Plevin, J.I. Martin, A.D. Jones, A. Kendall, and E. Hopson (2009).** Proper accounting for time increases crop-based biofuels' greenhouse gas deficit versus petroleum. *Environmental Research Letters*, **4**(2), 024001 (7 pp.).
- OANDA (2011).** *Historical Exchange Rates*. Oanda Corporation, New York, NY, USA. Available at: www.oanda.com/currency/historical-rates/.
- Obernberger, I., and G. Thek (2004).** *Techno-economic evaluation of selected decentralised CHP applications based on biomass combustion in IEA partner countries*. BIOS Bioenergiesysteme GmbH, Graz, Austria, 87 pp.
- Obernberger, I., G. Thek, and D. Reiter (2008).** *Economic evaluation of decentralised CHP applications based on biomass combustion and biomass gasification*. BIOS Bioenergiesysteme GmbH, Graz, Austria, 19 pp.
- Obersteiner, M., K. Mollersten, J. Moreira, S. Nilsson, P. Read, K. Riahi, B. Schlamadinger, Y. Yamagata, J. Yan, J.P. Ypsierle, C. Azar, and P. Kauppi (2001).** Managing climate risk. *Science*, **294**(5543), pp. 786-787.
- OECD-FAO (2008).** *Agricultural Outlook 2008-2017*. Organisation for Economic Cooperation and Development and Food and Agriculture Organization, Paris, France, 73 pp.
- Okada, M., C. Lanzatella, M.C. Saha, J. Bouton, R. Wu, and C.M. Tobias (2010).** Complete switchgrass genetic maps reveal subgenome collinearity, preferential pairing and multilocus interactions. *Genetics*, **185**(3), pp. 745-760.
- Oliveira, F.C.R. (2009).** *Ocupação, emprego e remuneração na cana-de-açúcar e em outras atividades agropecuárias no Brasil, de 1992 a 2007*. Master's Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 168 pp.
- Oliver, R.J., J.W. Finch, and G. Taylor (2009).** Second generation bioenergy crops and climate change: a review of the effects of elevated atmospheric CO₂ and drought on water use and the implications for yield. *Global Change Biology Bioenergy*, **1**(2), pp. 97-114.
- Oliverio, J.L. (2006).** Technological evolution of the Brazilian sugar and alcohol sector: Dedini's contribution. *International Sugar Journal*, **108**(1287), pp. 120-129.
- Oliverio, J.L., and J.E. Ribeiro (2006).** Cogeneration in Brazilian sugar and bioethanol mills: Past, present and challenges. *International Sugar Journal*, **108**(191), pp. 391-401.
- Openshaw, K. (2000).** A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. *Biomass and Bioenergy*, **19**(1), pp. 1-15.
- Pacca, S., and J.R. Moreira (2009).** Historical carbon budget of the Brazilian ethanol program. *Energy Policy*, **37**(11), pp. 4863-4873.
- Patel, M.K., M. Crank, V. Dornburg, B. Hermann, L. Roes, B. Hüsing, L. van Overbeek, F. Terragni, and E. Recchia (2006).** *Medium and Long-Term Opportunities and Risks of the Biotechnological Production of Bulk Chemicals from Renewable Resources*. Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Utrecht, The Netherlands, 420 pp.
- Paustian, K., J.M. Antle, J. Sheehan, and A.P. Eldor (2006).** *Agriculture's Role in Greenhouse Gas Mitigation*. Pew Center on Global Climate Change, Arlington, VA, USA.
- Peksa-Blanchard, M., P. Dolzan, A. Grassi, J. Heinimö, M. Junginger, T. Ranta, and A. Walter (2007).** *Global Wood Pellets Markets and Industry: Policy Drivers, Market Status and Raw Material Potential*. IEA Bioenergy Task 40

- Publication, 120 pp. Available at:
www.canbio.ca/documents/publications/ieatask40pelletandrawmaterialstudynov2007final.pdf.
- Perlack, R.D., L.L. Wright, A.F. Turhollow, R.L. Graham, B.J. Stokes, and D.C. Erbach (2005).** *Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply*. ORNL/TM-2005/66, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, 78 pp.
- Perry, J.A. (2009).** Catastrophic incident prevention and proactive risk management in the new biofuels industry. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **28**(1), pp. 72-82.
- Persson, U.M., and C. Azar (2010).** Preserving the world's tropical forests – A price on carbon may not do. *Environmental Science & Technology*, **44**(1), pp. 210-215.
- Petersson, A. and A. Wellinger (2009).** *Biogas Upgrading Technologies – Developments and Innovations*. IEA Bioenergy Task 37 publication, Malmö, Sweden, 20 pp. Available at: www.biogasmax.com/media/iea_2biogas_upgrading_tech_025919000_1434_30032010.pdf.
- Phillips, S., A. Aden, J. Jechura, D. Dayton, and T. Eggeeman (2007).** *Thermochemical Ethanol via Indirect Gasification and Mixed Alcohol Synthesis of Lignocellulosic Biomass*. NREL/TP- 510-41168, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 132 pp.
- Pimentel, D., S. McNair, J. Janecka, J. Wightman, C. Simmonds, C. O'Connell, E. Wong, L. Russel, J. Zern, T. Aquino, and T. Tsomondo (2001).** Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **84**(1), pp. 1-20.
- Pimentel, D., P. Hepperly, J. Hanson, D. Douds, and R. Seidel (2005).** Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience*, **55**(7), pp. 573-582.
- Pingali, P.L., and P.W. Heisey (1999).** *Cereal Crop Productivity in Developing Countries: Past Trends and Future Prospects*. Working Paper 99-03, International Maize and Wheat Improvement Center, Texcoco, Mexico, 34 pp.
- Plevin, R.J. (2009).** Modeling corn ethanol and climate. *Journal of Industrial Ecology*, **13**(4), pp. 495-507.
- Plevin, R.J., O.H. Michael, A.D. Jones, M.S. Torn, and H.K. Gibbs (2010).** Greenhouse gas emissions from biofuels indirect land use change are uncertain but may be much greater than previously estimated. *Environmental Science & Technology*, **44**(21), pp. 8015-8021.
- Practical Action Consulting (2009).** *Small Scale Bioenergy can Benefit Poor: Brief Description and Preliminary Lessons on Livelihood Impacts from Case Studies in Asia, Latin America and Africa*. Food and Agriculture Organization and Policy Innovation Systems for Clean Energy Security, Rome, Italy, 142 pp.
- Purdon, M., S. Bailey-Stamler, and R. Samson (2009).** Better bioenergy: Rather than picking bioenergy “winners,” effective policy should let a lifecycle analysis decide. *Alternatives Journal*, **35**(2), pp. 23-29.
- Rabaey, K., and W. Verstraete (2005).** Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, **23**(6), pp. 291-298.
- Ragauskas, A.J., C.K. Williams, B.H. Davison, G. Britovsek, J. Cairney, C.A. Eckert, W.J. Frederick, Jr., J.P. Hallett, D.J. Leak, C.L. Liotta, J.R. Mielenz, R. Murphy, R. Templer, and T. Tschaplinski (2006).** The path forward for biofuels and biomaterials. *Science*, **311**(5760), pp. 484-489.
- Raghu, S., R.C. Anderson, C.C. Daehler, A.S. Davis, R.N. Wiedenmann, D. Simberloff, and R.N. Mack (2006).** Adding biofuels to the invasive species fire? *Science*, **313**(5794), pp. 1742.
- Rajagopal, D., G. Hochman, and D. Zilberman (2011).** Indirect fuel use change (IFUC) and the lifecycle environmental impact of biofuel policies. *Energy Policy*, **39**(1), pp. 228-233.
- Ramanathan, V., and G. Carmichael (2008).** Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, **1**(4), pp. 221-227.
- Randall, J.M. (1996).** Plant Invaders: How Non-native Species Invade & Degrade Natural Areas Invasive Plants. In: *Weeds of the Global Garden*. J. Marinelli and J.M. Randall (eds.), Brooklyn Botanic Garden, Brooklyn, NY, pp. 7-12.
- Ranius, T., and L. Fahrig (2006).** Targets for maintenance of dead wood for biodiversity conservation based on extinction thresholds. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **21**(3), pp. 201-208.
- Rauch, R. (2010).** *Indirect Gasification*. In: *IEA Bioenergy Joint Tasks 32 & 33 Workshop, State-of-the-Art Technologies for Small Biomass Co-generation*, International Energy Agency, Copenhagen, Denmark, 7 Oct 2010. Available at: www.ieabcc.nl/meetings/task32_Copenhagen/09%20TU%20Vienna.pdf.
- Ravindranath, N.H., P. Balachandra, S. Dasappa, and K. Usha Rao (2006).** Bioenergy technologies for carbon abatement. *Biomass and Bioenergy*, **30**(10), pp. 826-837.
- Regalbuto, J.R. (2009).** Cellulosic biofuels – got gasoline? *Science*, **325**(5942), pp. 822-824.

- Reijnders, L. (2008).** Ethanol production from crop residues and soil organic carbon. *Resources, Conservation and Recycling*, **52**(4), pp. 653-658.
- Reinhardt, G. (1991).** *Biofuels: Energy and GHG balances: Methodology and Case Study Rape Seed Biodiesel*. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Heidelberg, Germany.
- Reinhardt, G., S. Gartner, A. Patyk, and N. Rettenmaier (2006).** *Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Einschätzung*. 2207104, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg, Germany, 108 pp.
- REN21 (2007).** *Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France, 54 pp.
- REN21 (2009).** *Renewables Global Status Report: 2009 Update*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France, 42 pp.
- Rendleman, C.M., and H. Shapouri (2007).** *New Technologies in Ethanol Production*. Report Number 842, United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- RFA (2010).** *U.S. Cellulosic*. Renewable Fuels Association, Washington, DC, USA. Available at: www.ethanolrfa.org/pages/cellulosic-ethanol
- RFA (2011).** *Biorefinery Plant Locations*. Renewable Fuels Association, Washington, DC, USA. Available at: www.ethanolrfa.org/bio-refinery-locations/.
- Rentizelas, A.A., A.J. Tolis, and I.P. Tatsiopoulos (2009).** Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(4), pp. 887-894.
- Reynolds, M.P., and N.E. Borlaug (2006).** Applying innovations and new technologies for international collaborative wheat improvement. *The Journal of Agricultural Science*, **144**(02), pp. 95-95.
- Rhodes, J.S., and D.W. Keith (2008).** Biomass with capture: negative emissions within social and environmental constraints: an editorial comment. *Climatic Change*, **87**(3-4), pp. 321-328.
- Righelato, R., and D.V. Spracklen (2007).** Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests? *Science*, **317**(5840), pp. 902.
- Ringer, M., V. Putsche, and J. Scahill (2006).** *Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis*. TP-510-37779, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 93 pp.
- Rivière, C., and G. Marlair (2009).** BIOSAFUEL®, a pre-diagnosis tool of risks pertaining to biofuels chains. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **22**(2), pp. 228-236.
- Rivière, C., and G. Marlair (2010).** The use of multiple correspondence analysis and hierarchical clustering to identify incident typologies pertaining to the biofuel industry. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **4**(1), pp. 53-65.
- Robertson, G.P., V.H. Dale, O.C. Doering, S.P. Hamburg, J.M. Melillo, M.M. Wander, W.J. Parton, P.R. Adler, J.N. Barney, R.M. Cruse, C.S. Duke, P.M. Fearnside, R.F. Follett, H.K. Gibbs, J. Goldemberg, D.J. Mladenoff, D. Ojima, M.W. Palmer, A. Sharpley, L. Wallace, K.C. Weathers, J.A. Wiens, and W.W. Wilhelm (2008).** Sustainable biofuels redux. *Science*, **322**(5898), pp. 49-50.
- Rockström, J., M. Lannerstad, and M. Falkenmark (2007).** Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**(15), pp. 6253-6260.
- Rockström, J., L. Karlberg, S.P. Wani, J. Barron, N. Hatibu, T. Oweis, A. Bruggeman, J. Farahani, and Z. Qiang (2010).** Managing water in rainfed agriculture – The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management*, **97**(4), pp. 543-550.
- Romieu, I., H. Riojas-Rodriguez, A.T. Marron-Mares, A. Schilmann, R. Perez-Padilla, and O. Masera (2009).** Improved biomass stove intervention in rural Mexico: Impact on the respiratory health of women. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **180**(7), pp. 649- 656.
- Rosegrant, M.W., T. Zhu, S. Msangi, and T. Sulser (2008).** Biofuels: Long-run implications for food security and the environment. *Review of Agricultural Economics*, **30**(3), pp. 495-505.
- Rosillo-Calle, F., S.V. Bajay, and H. Rothman (eds.) (2000).** *Industrial Uses of Biomass Energy: The Example of Brazil*. Taylor & Francis, London, UK.
- Ross, A.B., K. Anastasakis, M. Kubacki, and J.M. Jones (2009).** Investigation of the pyrolysis behaviour of brown algae before and after pre-treatment using PY-GC/MS and TGA. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **85**(1-2), pp. 3-10.
- Rost, S., D. Gerten, H. Hoff, W. Lucht, M. Falkenmark, and J. Rockstrom (2009).** Global potential to increase crop production through water management in rainfed agriculture. *Environmental Research Letters*, **4**(4), 044002 (9 pp.).
- Rowe, R., J. Whitaker, J. Chapman, D. Howard, and G. Talor (2008).** *Life-Cycle Assessment in Bioenergy Sector: Developing a Systematic Review Working Paper*. UKERC/WP/FSE/2008/002, UK Energy Research Centre, London, UK,

20 pp.

- Royal Society (2008).** *Sustainable Biofuels: Prospects and Challenges*. Policy document 01/08, The Royal Society, London, UK, 90 pp.
- Rude, M.A., and A. Schirmer (2009).** New microbial fuels: a biotech perspective. *Current Opinion in Microbiology*, **12**(3), pp. 274-281.
- (S&T)² Consultants (2009).** *An Examination of the Potential for Improving Carbon/Energy Balance of Bioethanol*. T39-TR1, (S&T)² Consultants Inc., Delta, Canada, 72 pp.
- Saarinén, V.-M. (2006).** The effects of slash and stump removal on productivity and quality of forest regeneration operations – preliminary results. *Biomass and Bioenergy*, **30**(4), pp. 349-356.
- Saarsalmi, A., and E. Mälkönen (2001).** Forest fertilization research in Finland: A literature review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **16**(6), pp. 514-535.
- Sala, O.E., A. Kinzig, R. Leemans, D.M. Lodge, H.A. Mooney, M. Oesterheld, N.L. Poff, M.T. Sykes, B.H. Walker, M. Walker, D.H. Wall, F.S. Chapin, J.J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L.F. Huenneke, and R.B. Jackson (2000).** Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, **287**(5459), pp. 1770-1774.
- Sánchez, Ó.J., and C.A. Cardona (2008).** Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*, **99**(13), pp. 5270-5295.
- Sannigrahi, P., A.J. Ragauskas, and G.A. Tuskan (2010).** Poplar as a feedstock for biofuels: A review of compositional characteristics. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **4**(2), pp. 209- 226.
- Sawin, J.L. (2004).** *National Policy Instruments: Policy Lessons for the Advancement and Diffusion of Renewable Energy Technologies around the World*. World Watch Institute, Washington, DC, USA.
- SCBD (2006).** *Global Biodiversity Outlook 2*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada, 92 pp. (ISBN-92-9225-040-X).
- Schei, M.A., J.O. Hessen, K.R. Smith, N. Bruce, J. McCracken, and V. Lopez (2004).** Childhood asthma and indoor woodsmoke from cooking in Guatemala. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **14**, pp. S110-S117.
- Schlamadinger, B., F. Bohlin, L. Gustavsson, G. Jungmeier, G. Marlandii, K. Pingoudt, and I. Savolaine (1997).** Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems. *Biomass and Bioenergy*, **13**(6), pp. 359-375.
- Schlamadinger, B., M. Grubb, C. Azar, A. Bauén, and G. Berndes (2001).** Carbon sinks and the CDM: could a bioenergy linkage offer a constructive compromise? *Climate Policy*, **1**, pp. 411- 417.
- Schlamadinger, B., B. Bosquet, C. Streck, I. Noble, M. Dutschke, and N. Bird (2005).** Can the EU emission trading scheme support CDM forestry. *Climate Policy*, **5**, pp. 199-208.
- Schmidhuber, J. (2008).** Impact of an increased biomass use on agricultural markets, prices and food security: A longer-term perspective. In: *Energy Security in Europe: Proceedings from the Conference 'Energy Security in Europe'*, Lund, Sweden, 24-25 September 2007, Lund University, Lund, Sweden, pp. 133-170. Available at: www.cfe.lu.se/upload/LUPDF/CentrumforEuropaforskning/Confpap2.pdf.
- Schneider, U.E., B. A. McCarl, and E. Schmid (2007).** Agricultural sector analysis on greenhouse gas mitigation in US agriculture and forestry. *Agricultural Systems*, **94** (2), pp. 128-140
- Schouten, J.C., E.V. Rebrov, and M.H.J.M. de Croon (2002).** Miniaturization of heterogeneous catalytic reactors: prospects for new developments in catalysis and process engineering. *CHIMIA International Journal for Chemistry*, **56**(11), pp. 627-635.
- Schulz, U., O. Brauner, and H. Gruss (2009).** Animal diversity on short-rotation coppices – a review. *Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research* **3**, **59**(3), pp. 171-182.
- Schwaiger, H.P., and D.N. Bird (2010).** Integration of albedo effects caused by land use change into the climate balance: Should we still account in greenhouse gas units? *Forest Ecology and Management*, **260**(3), pp. 278-286.
- Schwilch, G., F. Bachmann, and H. Liniger (2009).** Appraising and selecting conservation measures to mitigate desertification and land degradation based on stakeholder participation and global best practices. *Land Degradation & Development*, **20**(3), pp. 308-326.
- Scolforo, J.R. (2008).** *Mundo Eucalipto – Os Fatos E Mitos De Sua Cultura*. Editora Mar de Ideias, Rio de Janeiro, Brazil, 72 pp.
- Seabra, J.E.A., L. Tao, H.L. Chum, and I.C. Macedo (2010).** A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering. *Biomass and Bioenergy*, **34**(8), pp.

1065-1078.

- Searchinger, T., R. Heimlich, R.A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes, and T.H. Yu (2008).** Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, **319**, pp. 1238-1240.
- Seidenberger, T., D. Thran, R. Offermann, U. Seyfert, M. Buchhorn, and J. Zeddies (2008).** *Global Biomass Potentials*. Report prepared for Greenpeace International by the German Biomass Research Center, Leipzig, Germany, 137 pp.
- Semere, T., and F. Slater (2007).** Ground flora, small mammal and bird species diversity in miscanthus (*Miscanthus×giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields. *Biomass and Bioenergy*, **31**(1), pp. 20-29.
- Sepp, S. (2008).** *Analysis of Charcoal Value Chains – General Considerations*. GTZ Household Energy Programme, Eschborn, Germany, 11 pp.
- Shah, S. (2007).** Modular mini-plants: A new paradigm. *Chemical Engineering Progress*, **103**(3), pp. 36-41.
- Shapouri, H., and M. Salassi (2006).** *The Economic Feasibility of Ethanol Production in the United States*. United States Department of Agriculture, Washington, DC, USA, 69 pp.
- Sharma, M.M. (2002).** Strategies of conducting reactions on a small scale. Selectivity engineering and process intensification. *Pure and Applied Chemistry*, **74**(12), pp. 2265-2269.
- Sheehan, J., T. Dunahay, J. Benemann, G. Roessler, and C. Weissman (1998a).** *A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae*. NREL/TP- 580-24190, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 295 pp.
- Sheehan, J., V. Camobreco, J. Duffield, M. Graboski, and H. Shapouri (1998b).** *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus*. NREL/SR-580-24089, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, 314 pp.
- Sheehan, J., A. Aden, K. Paustian, K. Killian, J. Brenner, M. Walsh, and R. Nelson (2003).** Energy and environmental aspects of using corn stover for fuel ethanol. *Journal of Industrial Ecology*, **7**(3-4), pp. 117-146.
- Shen, L., J. Haufe, and M.K. Patel (2009).** *Product Overview and Market Projection of Emerging Bio-based Plastics: PRO-BIP 2009*. Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation for the European Polysaccharide Network of Excellence (EPNOE) and European Bioplastics, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 78 pp.
- Sikkema, R., M. Junginger, W. Pichler, S. Hayes, and A.P.C. Faaij (2010).** The international logistics of wood pellets for heating and power production in Europe: Costs, energy-input and greenhouse gas balances of pellet consumption in Italy, Sweden and the Netherlands. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **4**(2), pp. 132-153.
- Sikkema, R., M. Steiner, M. Junginger, W. Hiegl, M.T. Hansen, and A. Faaij (2011).** The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, doi:10.1002/bbb.277.
- Simpson, T.W., A.N. Sharpley, R.W. Howarth, H.W. Paerl, and K.R. Mankin (2008).** The new gold rush: Fueling ethanol production while protecting water quality. *Journal of Environmental Quality*, **37**(2), pp. 318-324.
- Simpson, T.W., L.A. Martinelli, A.N. Sharpley, R.W. Howarth, and S. Bringezu (2009).** Impact of ethanol production on nutrient cycles and water quality: the United States and Brazil as case studies. In: *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use*. R.W. Howarth and S. Bringezu (eds.), Proceedings of the SCOPE - Scientific Committee on Problems of the Environment International Biofuels Project Rapid Assessment, Gummersbach, Germany, 22-25 September 2009, pp. 153-167.
- Sims, R. (ed.) (2007).** *Renewables for Heating and Cooling. An Untapped Potential*. Joint report for the Renewable Energy Technology Deployment Implementing Agreement and the Renewable Energy Working Party published by the International Energy Agency, Paris, France, 210 pp.
- Sims, R., M. Taylor, J. Saddler, W. Mabee, and J. Riese (2008).** *From 1st-to 2nd Generation Biofuel Technologies. An overview of current industry and R&D activities*. IEA Bioenergy, Paris, France, 124 pp.
- Sims, R.E.H., W. Mabee, J.N. Saddler, and M. Taylor (2010).** An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology*, **101**(6), pp. 1570-1580.
- Skjoldborg, B. (2010).** Optimization of I/S Skive District Heating Plant. In: IEA Joint Task 32 & 33 Workshop, *State-of-the-Art Technologies for Small Biomass Co-generation*, International Energy Agency, Copenhagen, Denmark, 7 Oct 2010. Available at: www.ieabcc.nl/meetings/task32_Copenhagen/11%20Skive.pdf.
- Smeets, E.M.W., and A.P.C. Faaij (2007).** Bioenergy potentials from forestry in 2050. *Climatic Change*, **81**(3-4), pp. 353-390.
- Smeets, E.M.W., A. Faaij, I. Lewandowski, and W. Turkenburg (2007).** A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. *Progress in Energy and Combustion Science*, **33**(1), pp. 56-106.
- Smeets, E.M.W., L.F. Bouwman, E. Stehfest, D.P. van Vuuren, and A. Postuma (2009).** Contribution of N₂O to the

- greenhouse gas balance of first-generation biofuels. *Global Change Biology*, **15**(1), pp. 1-23.
- Smil, V. (2002).** Worldwide transformation of diets, burdens of meat production and opportunities for novel food proteins. *Enzyme and Microbial Technology*, **30**(3), pp. 305-311.
- Smith, K.R., and E. Haigler (2008).** Co-benefits of climate mitigation and health protection in energy systems: Scoping methods. *Annual Review of Public Health*, **29**(1), pp. 11-25.
- Smith, K.R., R. Uma, V.V.N. Kishore, J. Zhang, V. Joshi, and M.A.K. Khalil (2000).** Greenhouse implications of household stoves: An analysis for India. *Annual Review of Energy and the Environment*, **25**(1), pp. 741-763.
- Soimakallio, S., R. Antikainen, and R. Thun (2009a).** *Assessing the Sustainability of Liquid Biofuels from Evolving Technologies*. VTT Research Notes 2482, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 268 pp.
- Soimakallio, S., T. Mäkinen, T. Ekholm, K. Pakkala, H. Mikkola, and T. Paappanen (2009b).** Greenhouse gas balances of transportation biofuels, electricity and heat generation in Finland – Dealing with the uncertainties. *Energy Policy*, **37**(1), pp. 80-90.
- Solomon, S., G.K. Plattner, R. Knutti, and P. Friedlingstein (2009).** Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**(6), pp. 1704-1709.
- Sparovek, G., G. Berndes, A. Egeskog, F.L.M. de Freitas, S. Gustafsson, and J. Hansson (2007).** Sugarcane ethanol production in Brazil: an expansion model sensitive to socioeconomic and environmental concerns. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, **1**(4), pp. 270-282.
- Spatari, S., and H.L. MacLean (2010).** Characterizing model uncertainties in the life cycle of lignocellulose-based ethanol fuels. *Environmental Science & Technology*, **44**(22), pp. 8773- 8780.
- Spranger, T., J.P. Hettelingh, J. Slootweg, and M. Posch (2008).** Modelling and mapping long- term risks due to reactive nitrogen effects: An overview of LRTAP convention activities. *Environmental Pollution*, **154**(3), pp. 482-487.
- Steenblik, R. (2007).** *Subsidies: The Distorted Economics of Biofuels*. Discussion Paper No. 2007- 3, International Transport Forum, Organisation for Economic Co-operation and Development, Geneva, Switzerland, 66 pp.
- Stehfest, E., and L. Bouwman (2006).** N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **74**(3), pp. 207-228.
- Stehfest, E., L. Bouwman, D.P. Vuuren, M.G.J. Elzen, B. Eickhout, and P. Kabat (2009).** Climate benefits of changing diet. *Climatic Change*, **95**(1-2), pp. 83-102.
- Still, D., M. Pinnell, D. Ogle, and B. van Appel (2003).** Insulative ceramics for improved cooking stoves. *Boiling Point*, **49**, pp. 7-10.
- Stoft, S. (2010).** *Renewable Fuel and the Global Rebound Effect*. Research Paper No. 10-06, Global Energy policy Center, Berkeley, CA, USA, 19 pp.
- Strengers, B., R. Leemans, B. Eickhout, B. Vries, and L. Bouwman (2004).** The land-use projections and resulting emissions in the IPCC SRES scenarios as simulated by the IMAGE 2.2 model. *GeoJournal*, **61**(4), pp. 381-393.
- Sulser, T.B., C. Ringler, T. Zhu, S. Msangi, E. Bryan, and M.W. Rosegrant (2010).** Green and blue water accounting in the Ganges and Nile basins: Implications for food and agricultural policy. *Journal of Hydrology*, **384**(3-4), pp. 276-291.
- Sumner, S.A., and P.M. Layde (2009).** Expansion of renewable energy industries and implications for occupational health. *Journal of the American Medical Association*, **302**(7), pp. 787-789.
- Sustainable Transport Solutions (2006).** *Biogas as a Road Transport Fuel: An Assessment of the Potential Role of Biogas as a Renewable Transport Fuel*. National Society for Clean Air and Environmental Protection, London, UK, 66 pp.
- Swanson, R.M., A. Platon, J.A. Satrio, and R.C. Brown (2010).** Techno-economic analysis of biomass-to-liquids production based on gasification. *Fuel*, **89**(Supplement 1), pp. S11-S19.
- Tabeau, A., B. Eickhout, and H. van Meijl (2006).** Endogenous agricultural land supply: estimation and implementation in the GTAP model. In: *Ninth Annual Conference on Global Economic Analysis*, Addis Ababa, Ethiopia, 15-17 June 2006. Available at: https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=2007.
- Tao, L., and A. Aden (2009).** The economics of current and future biofuels. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, **45**(3), pp. 199-217.
- Thorn, J., J. Brisman, and K. Toren (2001).** Adult-onset asthma is associated with self-reported mold or environmental tobacco smoke exposures in the home. *Allergy*, **56**(4), pp. 287-292.
- Thornley, P., J. Rogers, and Y. Huang (2008).** Quantification of employment from biomass power plants. *Renewable Energy*, **33**(8), pp. 1922-1927.

- Thornley, P., P. Upham, Y. Huang, S. Rezvani, J. Brammer, and J. Rogers (2009). Integrated assessment of bioelectricity technology options. *Energy Policy*, **37**(3), pp. 890-903.
- Tilman, D., K.G. Cassman, P.A. Matson, R. Naylor, and S. Polasky (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, **418**(6898), pp. 671-677.
- Tilman, D., J. Hill, and C. Lehman (2006a). Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science*, **314**(5805), pp. 1598-1600.
- Tilman, D., P.B. Reich, and J.M.H. Knops (2006b). Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, **441**(7093), pp. 629-632.
- Titus, B.D., D.G. Maynard, C.C. Dymond, G. Stinson, and W.A. Kurz (2009). Wood energy: Protect local ecosystems. *Science*, **324**(5933), pp. 1389-1390.
- Tobias, C.M., G. Sarath, P. Twigg, E. Lindquist, J. Pangilinan, B.W. Penning, K. Barry, M.C. McCann, N.C. Carpita, and G.R. Lazo (2008). Comparative genomics in switchgrass using 61,585 high-quality expressed sequence tags. *The Plant Genome*, **1**(2), pp. 111-124.
- Tonkovich, A.Y., S. Perry, Y. Wang, D. Qiu, T. LaPlante, and W.A. Rogers (2004). Microchannel process technology for compact methane steam reforming. *Chemical Engineering Science*, **59**(22-23), pp. 4819-4824.
- Towle, D.W., and J.S. Pearse, 1973: Production of the giant kelp, *Macrocystis*, estimated by in situ incorporation of ^{14}C in polyethylene bags. *American Society of Limnology and Oceanography*, **18**(1), pp. 155-159.
- Turhollow, A., 1994: The economics of energy crop production. *Biomass and Bioenergy*, **6**(3), pp. 229-241.
- Tyner, W.E., and F. Taheripour (2008). Policy options for integrated energy and agricultural markets. *Applied Economic Perspectives and Policy*, **30**(3), pp. 387-396.
- Tyner, W., F. Taheripour, Q. Zhuang, D. Birur, and U. Baldos (2010). *Land Use Changes and Consequent CO₂ Emissions due to U.S. Corn Ethanol Production: A Comprehensive Analysis*. GTAP Resource 3288, Department of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 90 pp.
- UN-Water (2007). *Coping with Water Scarcity: Challenge of the Twenty-First Century*. Prepared for World Water Day 2007, United Nations, New York, NY, USA, 29 pp.
- UNECE/FAO TIMBER Database (2011). Market Presentations at [http: timber.unece.org/](http://timber.unece.org/). United Nations Economic Commission for Europe and Food and Agricultural Organization.
- UNEP (2008a). *UNEP Year Book 2008: an Overview of Our Changing Environment*. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- UNEP (2008b). *The Potential Impacts of Biofuels on Biodiversity, Notes by the Executive Secretary*. UNEP/CBD/COP/9/26, United Nations Environment Programme, Bonn, Germany, 16 pp.
- UNEP/SEFI/Bloomberg (2010). *Global Trends in Sustainable Energy Investment 2010*. DTI/1186/PA, Sustainable Energy Finance Initiative, United Nations Environment Programme and Bloomberg New Energy Finance, Geneva, Switzerland, 61 pp.
- UK DfT (2003). *International Resource Costs of Biodiesel and Bioethanol*. AEAT/ENV/ED50273/R1, United Kingdom Department for Transport, Oxfordshire, UK, 51 pp.
- University of Illinois (2011). *farmdoc: Historical Corn Prices*. University of Illinois, Urbana, Illinois, USA. Available at: www.farmdoc.illinois.edu/manage/pricehistory/price_history.htm.
- US DOE (2009). *National Algal Biofuels Technology Roadmap*. U.S. Department of Energy Biomass Program, Washington, DC, USA, 214 pp.
- US DOE (2011). *Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: An Update to the Billion-Ton Annual Supply*. R.D. Perlack and B.J. Stokes (Leads), ORNL/TM-2010/xx. U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, in press.
- USDA (2006). *Oil Crops Yearbook/OCS-2006/Mar21*. Economic Research Service, US Department of Agriculture (USDA), Washington, DC, USA.
- USDA (2007). *Wheat Data: Yearbook Tables*. Economic Research Service, US Department of Agriculture (USDA), Washington, DC, USA.
- Uslu, A., A.P.C. Faaij, and P.C.A. Bergman (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, **33**(8), pp. 1206-1223.
- van Dam, J., M. Junginger, A. Faaij, I. Jürgens, G. Best, and U. Fritsche (2008). Overview of recent developments in sustainable biomass certification. *Biomass and Bioenergy*, **32**(8), pp. 749-780.

- van Dam, J., A.P.C. Faaij, J. Hilbert, H. Petruzzi, and W.C. Turkenburg (2009a). Large-scale bioenergy production from soybeans and switchgrass in Argentina: Part A: Potential and economic feasibility for national and international markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(8), pp. 1710-1733.
- van Dam, J., A.P.C. Faaij, J. Hilbert, H. Petruzzi, and W.C. Turkenburg (2009b). Large-scale bioenergy production from soybeans and switchgrass in Argentina: Part B. Environmental and socio-economic impacts on a regional level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(8), pp. 1679-1709.
- van Dam, J., A.P.C. Faaij, I. Lewandowski, and B. Van Zeebroeck (2009c). Options of biofuel trade from Central and Eastern to Western European countries. *Biomass and Bioenergy*, **33**(4), pp. 728-744.
- van Dam, J., M. Junginger, and A.P.C. Faaij (2010). From the global efforts on certification of bioenergy towards an integrated approach based on sustainable land use planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(9), pp. 2445-2472.
- van den Wall Bake, J.D. (2006). *Cane as Key in Brazilian Ethanol Industry*. Master's Thesis, Copernicus Institute, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 83 pp.
- van den Wall Bake, J.D., M. Junginger, A. Faaij, T. Poot, and A. Walter (2009). Explaining the experience curve: Cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane. *Biomass and Bioenergy*, **33**(4), pp. 644-658.
- van der Horst, D., and J. Evans (2010). Carbon claims and energy landscapes: Exploring the political ecology of biomass. *Landscape Research*, **35**(2), pp. 173 - 193.
- van Iersel, S., L. Gamba, A. Rossi, S. Alberici, B. Dehue, J. van de Staaij, and A. Flammini (2009). *Algae-Based Biofuels: A Review of Challenges and Opportunities for Developing Countries*. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 59 pp.
- van Loo, S., and J. Koppejan (eds.) (2002). *Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*. 1st ed. Twente University Press, Enschede, The Netherlands, 442 pp.
- van Minnen, J.G., B.J. Strengers, B. Eickhout, R.J. Swart, and R. Leemans (2008). Quantifying the effectiveness of climate change mitigation through forest plantations and carbon sequestration with an integrated land-use model. *Carbon Balance and Management*, **3**(3), 20 pp.
- van Vliet, O.P.R., A.P.C. Faaij, and W.C. Turkenburg (2009). Fischer-Tropsch diesel production in a well-to-wheel perspective: A carbon, energy flow and cost analysis. *Energy Conversion and Management*, **50**(4), pp. 855-876.
- van Vuuren, D., M. den Elzen, P. Lucas, B. Eickhout, B. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, and R. van Houdt (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, **81**(2), pp. 119-159.
- van Vuuren, D.P., J. van Vliet, and E. Stehfest (2009). Future bio-energy potential under various natural constraints. *Energy Policy*, **37**(11), pp. 4220-4230.
- van Vuuren, D.P., E. Bellevrat, A. Kitous, and M. Isaac (2010). Bio-energy use and low stabilization scenarios. *The Energy Journal*, **31**(Special Issue), pp. 192-222.
- van Zyl, W., L. Lynd, R. den Haan, and J. McBride (2007). Consolidated bioprocessing for bioethanol production using *Saccharomyces cerevisiae*. *Advanced Biochemical Engineering Biotechnology*, **108**, pp. 205-235.
- Vandermeer, J., and I. Perfecto (2006). Response to comments on "A Keystone Mutualism Drives Pattern in a Power Function". *Science*, **313**(5794), pp. 1739.
- Venkataraman, C., A.D. Sagar, G. Habib, N. Lam, and K.R. Smith (2010). The Indian National Initiative for Advanced Biomass Cookstoves: The benefits of clean combustion. *Energy for Sustainable Development*, **14**(2), pp. 63-72.
- Venter, O., E. Meijaard, H. Possingham, R. Dennis, D. Sheil, S. Wich, L. Hovani, and K. Wilson (2009). Carbon payments as a safeguard for threatened tropical mammals. *Conservation Letters*, **2**(3), pp. 123-129.
- Verhaeven, E., L. Pelkmans, L. Govaerts, R. Lamers, and F. Theunissen (2005). Results of demonstration and evaluation projects of biodiesel from rapeseed and used frying oil on light and heavy duty vehicles. In: *2005 SAE Brasil Fuels & Lubricants Meeting*. SAE International, RioDe Janeiro, Brasil, May 2005, 7 pp., doi:10.4271/2005-01-2201.
- Vinnerås, B., C. Schönning, and A. Nordin (2006). Identification of the microbiological community in biogas systems and evaluation of microbial risks from gas usage. *Science of the Total Environment*, **367**(2-3), pp. 606-615.
- von Blottnitz, H., and M.A. Curran (2007). A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, **15**(7), pp. 607-619.
- von Geibler, J., C. Liedtke, H. Wallbaum, and S. Schaller (2006). Accounting for the social dimension of sustainability: experiences from the biotechnology industry. *Business Strategy and the Environment*, **15**(5), pp. 334-346.
- von Schirnding, Y., N. Bruce, K. Smith, G. Ballard-Tremer, M. Ezzati, and K. Lvovsky (2001). *Addressing the Impact*

- of Household Energy and Indoor Air Pollution on the Health of the Poor - Implications for Policy Action and Intervention Measures*. WHO/HDE/HID/02.9, Commission on Macroeconomics and Health, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 52 pp.
- von Weyman, N. (2007).** *Bioetanolia maatalouden selluloosavirroista (Bioethanol from agricultural lignocellulosic residues)*. VTT Tiedotteita 2412, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, 48 pp.
- Walmsley, J.D., and D.L. Godbold (2010).** Stump harvesting for bioenergy - A review of the environmental impacts. *Forestry*, **83**(1), pp. 17-38.
- Walsh, M.E. (2008).** *U.S. Cellulosic Biomass Feedstock Supplies and Distribution*. Ag Econ Search - Research in Agricultural and Applied Economics, University of Minnesota, St. Paul, Minnesota, 47 pp. Available at: ageconsearch.umn.edu/bitstream/7625/2/U.S.%20Biomass%20Supplies.pdf.
- Walter, A., F. Rosillo-Calle, P. Dolzan, E. Piacente, and K. Borges da Cunha (2008).** Perspectives on fuel ethanol consumption and trade. *Biomass and Bioenergy*, **32**(8), pp. 730-748.
- Wang, M., C. Saricks, and D. Santini (1999).** *Effects of fuel ethanol use on fuel-cycle energy and greenhouse gas emissions*. ANL/ESD-38, Argonne Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA, 39 pp.
- Wang, M., M. Wu, and H. Huo (2007).** Life-cycle energy and greenhouse gas emission impacts of different corn ethanol plant types. *Environmental Research Letters*, **2**(2), 024001.
- Wang, M., H. Huo, and S. Arora (2010).** Methods of dealing with co-products of biofuels in life-cycle analysis and consequent results within the U.S. context. *Energy Policy*, in press, doi:10.1016/j.enpol.2010.03.052.
- Wang, M.Q., J. Han, Z. Haq, W.E. Tyner, M. Wu, and A. Elgowainy (2011).** Energy and greenhouse gas emission effects of corn and cellulosic ethanol with technology improvements and land use changes. *Biomass and Bioenergy*, **35**(5), pp. 1885-1896.
- Warwick, S.I., H.J. Beckie, and L.M. Hall (2009).** Gene flow, invasiveness, and ecological impact of genetically modified crops. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1168**(1), pp. 72-99.
- WBGU (2009).** *World in Transition – Future Bioenergy and Sustainable Land Use*. German Advisory Council on Global Change (WBGU), Berlin, Germany, 393 pp. (ISBN 978-1-84407- 841-7).
- Weyer, K., D. Bush, A. Darzins, and B. Willson (2009).** Theoretical maximum algal oil production. *BioEnergy Research*, **3**(2), pp. 204-213.
- Wicke, B., V. Dornburg, M. Junginger, and A. Faaij (2008).** Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications. *Biomass and Bioenergy*, **32**(12), pp. 1322-1337.
- Wicke, B., E. Smeets, A. Tabeau, J. Hilbert, and A. Faaij (2009).** Macroeconomic impacts of bioenergy production on surplus agricultural land – A case study of Argentina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(9), pp. 2463-2473.
- Wilhelm, W.W., J.M.F. Johnson, J.L. Hatfield, W.B. Voorhees, and D.R. Linden (2004).** Crop and soil productivity response to corn residue removal: A literature review. *Agronomy Journal*, **96**(1), pp. 1-17.
- Wilhelm, W.W., J.M.E. Johnson, D.L. Karlen, and D.T. Lightle (2007).** Corn stover to sustain soil organic carbon further constrains biomass supply. *Agronomy Journal*, **99**, pp. 1665-1667.
- Wilkie, A.C., and J.M. Evans (2010).** Aquatic plants: an opportunity feedstock in the age of bioenergy. *Biofuels*, **1**(2), pp. 311-321.
- Wilkie, A.C., K.J. Riedesel, and J.M. Owens (2000).** Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, **19**(2), pp. 63-102.
- Wilkinson, P., K.R. Smith, M. Davies, H. Adair, B.G. Armstrong, M. Barrett, N. Bruce, A. Haines, I. Hamilton, T. Oreszczyn, I. Ridley, C. Tonne, and Z. Chalabi (2009).** Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: household energy. *The Lancet*, **374**(9705), pp. 1917-1929.
- Williams, R.H., E.D. Larson, G. Liu, and T.G. Kreutz (2009).** Fischer-Tropsch fuels from coal and biomass: Strategic advantages of once-through (“polygeneration”) configurations. *Energy Procedia*, **1**(1), pp. 4379-4386.
- Wirsenius, S. (2003).** Efficiencies and biomass appropriation of food commodities on global and regional levels. *Agricultural Systems*, **77**(3), pp. 219-255.
- Wirsenius, S., C. Azar, and G. Berndes (2010).** How much land is needed for global food production under scenarios of dietary changes and livestock productivity increases in 2030? *Agricultural Systems*, **103**(9), pp. 621-638.
- Wise, M., K. Calvin, A. Thomson, L. Clarke, B. Bond-Lamberty, R. Sands, S.J. Smith, A. Janetos, and J. Edmonds (2009).** Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science*, **324**(5931), pp. 1183-1186.
- Wiskerke, W.T., V. Dornburg, C.D.K. Rubanza, R.E. Malimbwi, and A.P.C. Faaij (2010).** Cost/benefit analysis of

- biomass energy supply options for rural smallholders in the semi-arid eastern part of Shinyanga Region in Tanzania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(1), pp. 148-165.
- Wolf, J., P.S. Bindraban, J.C. Luitjen, and L.M. Vleeshouwers (2003).** Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy. *Agricultural Systems*, **76**, pp. 841-861.
- Wooley, R., M. Ruth, D. Glassner, and J. Sheehan (1999).** Process design and costing of bioethanol technology: A tool for determining the status and direction of research and development. *Biotechnology Progress*, **15**(5), pp. 794-803.
- Woolf, D., J.E. Amonette, F.A. Street-Perrott, J. Lehmann, and S. Joseph (2010).** Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, **1**(56), pp. 1-9.
- World Bank (2009).** *The World Bank - Global Economic Prospects - Commodities at the Crossroad*. The World Bank, The International Bank for Reconstruction and Development, Washington, DC, USA, 196 pp. (see page 73).
- World Bank (2010).** *Improved Cookstoves and Better Health in Bangladesh: Lessons from Household Energy and Sanitation Programs*. The World Bank, The International Bank for Reconstruction and Development, Washington, DC, USA, 136 pp.
- Wright, B. (2009).** *International Grain Reserves and Other Instruments to Address Volatility in Grain Market*. Policy Research Working Paper 5028, World Bank Group, Washington, DC, USA, 61 pp.
- Wright, D.H. (1990).** Human impacts on energy flow through natural ecosystems, and implications for species endangerment. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, **19**(4), pp. 189-194.
- Wu, M., Y. Wu, and M. Wang (2005).** *Mobility Chains Analysis of Technologies for Passenger Cars and Light Duty Vehicles Fueled with Biofuels: Application of the GREET Model to Project the Role of Biomass in America's Energy Future (RBAEF) project*. ANL/ESD/07-11, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA, 84 pp.
- Wu, M., M. Wang, J. Liu, and H. Huo (2008).** Assessment of potential life-cycle energy and greenhouse gas emission effects from using corn-based butanol as a transportation fuel. *Biotechnology Progress*, **24**(6), pp. 1204-1214.
- Wu, M., M. Mintz, M. Wang, and S. Arora (2009).** Water consumption in the production of ethanol and petroleum gasoline. *Environmental Management*, **44**(5), pp. 981-997.
- WWI (2006).** *Biofuels for Transportation – Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century*. World Watch Institute, Washington, DC, USA, 417 pp.
- Wydra, S. (2009).** *Production and Employment Impacts of New Technologies – Analysis for Biotechnology*. Discussion Paper 08-2009, Forschungszentrum Innovation und Dienstleistung, Universität Hohenheim, Stuttgart, Germany, 31 pp.
- Wyman, C.E., B.E. Dale, R.T. Elander, M. Holtzapple, M.R. Ladisch, and Y.Y. Lee (2005).** Coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. *Bioresource Technology*, **96**(18), pp. 1959-1966.
- Yamashita, K., and L. Barreto (2004).** *Biomass Gasification for the Co-production of Fischer-Tropsch Liquids and Electricity*. Interim Report IR-04-047, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria, 50 pp.
- Yanowitz, J., and R.L. McCormick (2009).** Effect of biodiesel blends on North American heavy-duty diesel engine emissions. *European Journal of Lipid Science and Technology*, **111**(8), pp. 763-772.
- Yazdani, S.S., and R. Gonzalez (2007).** Anaerobic fermentation of glycerol: a path to economic viability for the biofuels industry. *Current Opinion in Biotechnology*, **18**(3), pp. 213-219.
- Yeh, S., S.M. Jordaán, A.R. Brandt, M.R. Turetsky, S. Spatari, and D.W. Keith (2010).** Land use greenhouse gas emissions from conventional oil production and oil sands. *Environmental Science & Technology*, **44**(22), pp. 8766-8772.
- Yokoyama, S., and Y. Matsumura (eds.) (2008).** *The Asian Biomass Handbook: A Guide for Biomass Production and Utilization*. The Japan Institute of Energy, Tokyo, Japan, 326 pp.
- Zabowski, D., D. Chambreau, N. Rotramel, and W.G. Thies (2008).** Long-term effects of stump removal to control root rot on forest soil bulk density, soil carbon and nitrogen content. *Forest Ecology and Management*, **255**(3-4), pp. 720-727.
- Zemke-White, L., and M. Ohno (1999).** World seaweed utilisation: An end-of-century summary. *Journal of Applied Phycology*, **11**(4), pp. 369-376.
- Zeza, A., B. Davis, C. Azzarri, K. Covarrubias, L. Tasciotti, and G. Anriquez (2008).** *The Impact of Rising Food Prices on the Poor*. ESA Working Paper No. 08-07, Agricultural Development Economics Division, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 37 pp.
- Zhang, X., R.C. Izaurralde, D. Manowitz, T.O. West, W.M. Post, A.M. Thomson, V.P. Bandaru, J. Nichols, and J.R. Williams (2010).** An integrative modeling framework to evaluate the productivity and sustainability of biofuel crop production systems. *Global Change Biology Bioenergy*, **2**(5), pp. 258-277.
- Zomer, R.J., A. Trabucco, O. van Straaten, and D.A. Bossio (2006).** *Carbon, Land and Water: A Global Analysis of the Hydrologic Dimensions of Climate Change Mitigation through Afforestation/Reforestation*. IWMI Research Report 101,

International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 48 pp.