

Ⅱ-3 ネガティブ・エミッション

執筆担当

テーマ 2

独立行政法人国立環境研究所

加藤悦史

独立行政法人国立環境研究所

伊藤昭彦

テーマ 4

一般財団法人エネルギー総合工学研究所

黒沢厚志

一般財団法人エネルギー総合工学研究所

都筑和泰

一般財団法人エネルギー総合工学研究所

森山亮

一般財団法人エネルギー総合工学研究所

石本祐樹

東京大学 政策ビジョン研究センター

杉山昌広

独立行政法人海洋研究開発機構

増田耕一

Ⅱ-3- i これまでの知見

(1) ネガティブ・エミッション概要

CO₂などの温室効果ガスの排出量は伸び続けている一方で、気候システムの不確実性はあるものの、専門家の間では国際的な緩和策や適応策が十分でない場合、気候変動影響が危険な水準に達するリスクに関しての認識が深まっている。気候変動対策は、緩和策、適応策、および気候工学と大別される。気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第一作業部会の第5次評価報告書では、温室効果ガス累積排出量と世界平均気温上昇との関連性が指摘されているが

(IPCC, 2013)、これは、今世紀前半のCO₂排出量を急激に下げることができない中で厳しい温度上昇制約を実現するのであれば、今世紀後半において、気候を直接制御する規模でCO₂排出量をマイナスとする、いわゆる「ネガティブ・エミッション」を実現すること、または太陽放射の反射を増やす「太陽放射管理」が必要である可能性を示唆している。これらの技術オプションは、まとめて気候工学と呼ばれている。

そのうち前者のネガティブ・エミッションを実現するためには、直接的または間接的に大気中からCO₂を除去する必要がある。その実現のための技術は、二酸化炭素除去技術(CDR; carbon dioxide removal)あるいはネガティブ・エミッション技術と呼ばれ、自然界のCO₂吸収を増大させる方法と化学工学的技術を使って大気中からCO₂を除去する方法がある(IPCC, 2013)。下記にネガティブ・エミッション技術の代表的例を示す。

- ・ 鉄散布による海洋肥沃化：熱帯東部太平洋、南極海、北部北太平洋などの海域で重要な海洋微量栄養素である鉄を散布し、光合成によるプランクトンの発生増加を促進し、大気中からのCO₂吸収を増やす。
- ・ リン・窒素による海洋肥沃化：栄養素であるリン・窒素を散布することで、鉄散布の場合と同様に光合成を促進する。リンや窒素は鉄と異なり主要栄養素(macronutrient)であるため投入量は大きくなる。
- ・ 湧昇流・沈降流の促進：海洋の深いところからの栄養素の供給を増やすためにわき上がり(湧昇流)を促進させる。例えば一方向に水が流れるパイプを海洋に設置する。また北大西洋の沈降流を増加して、大気からのCO₂を吸収した海水が下層に沈むのを促進する手法も考えられる。
- ・ 風化反応の促進(土壌へのアルカリ物質の散布、海洋のアルカリ性化(石灰石・ケイ酸塩・水酸化カルシウムの散布)、地中でのケイ酸塩の炭酸化)：非常に長い地質学的時間スケールで地球が大気中のCO₂を吸収する化学風化という仕組みを加速することで、大気中のCO₂を除去する。
- ・ バイオ炭：木材などのバイオマスを乾留して得られる木炭(バイオ炭)を、燃焼させることなく土壌に混ぜたり地中に埋めたりして炭素を長期間貯留する。
- ・ バイオマス地中埋設：枯死した樹木あるいは選択的に収穫した木材などのバイオマスをそのまま地中に埋設保管し、分解を遅らせことにより炭素を長期間貯留する。
- ・ CO₂直接空気回収：アルカリ物質などを用いた化学工学的手法でCO₂を大気から吸収し、回収したCO₂を地中(帯水層)などに隔離する。
- ・ バイオエネルギー・二酸化炭素回収貯留(Bio-energy with Carbon Capture and Storage, BECCS または Bio-energy with Carbon Storage, BECS)：バイオマス発電やバイオ燃料製造プロセスに二酸化炭素回収貯留(CCS)を組み合わせる。バイオマスは大気中のCO₂を取り込んでできているため、燃焼時や発酵時に発生するCO₂をCCSで回収することで大気からCO₂を除去する。
- ・ 植林・土地利用改善：植物は成長している間CO₂を大気から吸収し、固定する。小規模の植林は緩和策に分類するが、非常に大規模な植林は副作用も否定できず気候工学と分類できる。

なお、現時点では、地球環境研究を行っているコミュニティの中でも、二酸化炭素除去技術のいずれのオプションについても、その実施を積極的に行うべきであるという意見の一致には至っていない。IPCC 気候工学専門家会合の報告書をもても、評価の視点として、科学的側面からの環境リスク、社会的な側面からの倫理的問題、国際枠組におけるガバナンス、研究開発に対するガバナンスや社会的受容可能性の問題が指摘されており、実施を慎重に検討すべき研究領域であることが認識されている。

ここでは、上記二酸化炭素除去技術のうち、特にポテンシャルが大きいBECCS、植林およびCO₂直接空気回収を中心に、まず科学的な観点から、技術成立性、ポテンシャル、コスト、環境リスクを

明確化し、その上で、社会的問題を整理していく。そうすることで、実施の判断に資する材料を提供していくことを目標としている。

(2) 植林について

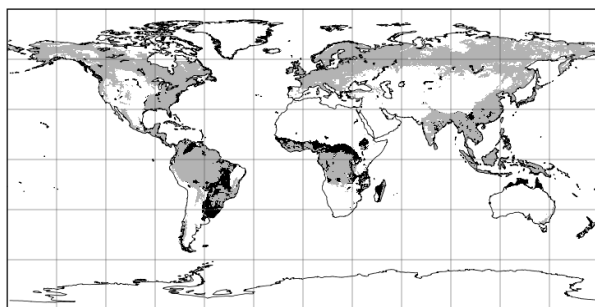
植林 (afforestation) は、人工林造成における最初の施業過程として広く実施されてきた。林業的な植林を行う目的は、良質な木材の収穫に加え、水源涵養や斜面安定化などの公益的機能の活用であった。近年の環境問題の深刻化を受けて、砂漠化防止 (いわゆる緑化)、生物多様性保全、そして温暖化緩和のために植林が各地で実施されている。ここでは、温暖化緩和とメカニズムとしての植林について科学的知見をまとめる。なお、森林を伐採した後の再植林は検討内容から外し、裸地や草地・耕作放棄地など森林以外の土地利用に対する植林について検討する。

1) 植林地の炭素吸収固定ポテンシャル

植林による炭素固定量は、植林前後の炭素ストックの差から求めることができる。例えば IPCC Good Practice Guidance ではアジア地域の湿潤な人工林について、地上部と地下部をあわせたバイオマスは広葉樹林で 143 t C/ha 、その他の種で 85 t C/ha とされている (拡大係数は 1.3 を使用)。草原のバイオマスは $3.2 \sim 8.1 \text{ t C/ha}$ とされているので、草原への植林による炭素固定ポテンシャル (バイオマス分) は $77 \sim 140 \text{ t C/ha}$ と概算される。仮に樹木が成熟状態になるのに 50 年かかるとすれば、平均して年間 $1.5 \sim 2.8 \text{ t C/ha}$ の正味吸収となる。実際には、土壌炭素としての炭素固定も生じると考えられるが、その評価には大きな不確実性を伴う。Post and Kwon (2000) のメタ分析によると、植林後の土壌への正味炭素固定量は、平均して年間 0.338 t C/ha とされる。上記のバイオマス分と合わせると、年間 $1.8 \sim 3.1 \text{ t C/ha}$ 程度が植林地の炭素吸収ポテンシャルという概算値になるが、これはフラックス観測による世界各地での CO_2 固定速度と比較しても妥当な範囲である。しかし、京都議定書における森林吸収源など実務的に評価が必要な場合、森林や植林・施業の定義によって炭素固定量 (そしてそれに伴い発生するクレジット) の評価に不確実性が伴う点には注意が必要である (Yamagata and Alexandrov 2001)。また、バイオマスと土壌有機物ともに、炭素固定の速度は一定では無い。一般に、植林直後は残存有機物の分解が卓越して炭素の放出が起こり、植栽された樹木の成長回復に伴って吸収源へと転換されていく。その吸収速度は壮齡林の頃にピークとなり、老齡林へと移行するに従って漸減して最終的には炭素収支が均衡状態に至ると考えられている。ただし、最近になって、老齡林・老齡木でも相当量の正味 CO_2 吸収をしている可能性を示す研究成果 (例えば Luyssaert *et al.* 2008) も出されている。

2) 潜在的に植林可能な面積

現在の森林面積は、FAO の調査レポートなどによると 2007 年時点で約 4,050 万平方キロとされている。人為が加わる前の自然状態 (潜在植生) での森林面積 (図 II-3-1 の灰色部) については 5,527 万平方キロという推定 (Ramankutty and Foley 1999) があり、森林を拡大可能な面積に対する 1 つの答えはその差分 (1,477 万平方キロ) ということになる。ただし、その土地は相当部分が都市・住宅・耕作地などに利用されており、現実には植林が可能とは限らない。上記の研究で示された耕作放棄地の推定面積は 235 万平方キロ (1992 年時点) であり、その方が植林可能な面積に近いと考えられる。その一方、乾燥や寒冷などストレス耐性の高い樹種の開発や灌漑・施肥により、潜在的には森林が成立し得ない土地にも植林地を拡大できる可能性がある。試算として、技術的に克服可能な生育環境の範囲を年平均気温 0°C かつ年降水量 $1,000\text{mm}$ とすると、非森林地への植林可能な面積 (図 II-3-1 の黒色部) は 1,007 万平方キロとなる。

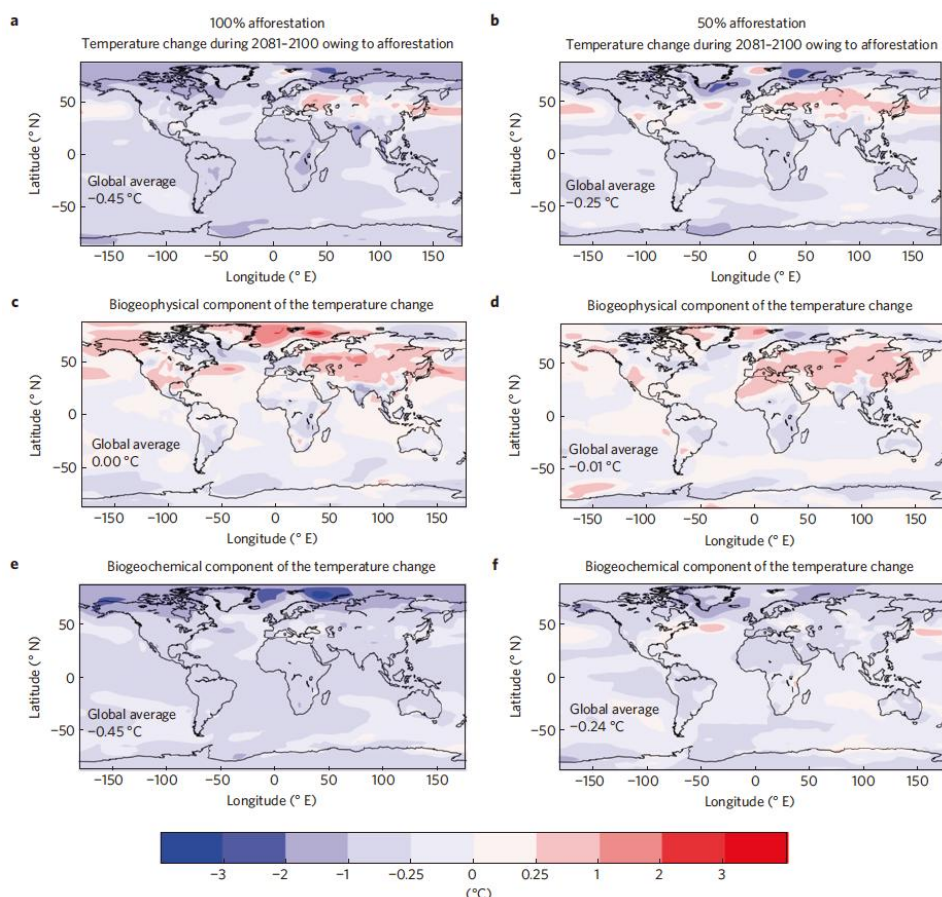


※Ramankutty and Foley (1999)および CRU 気象データを使用。詳細は本文参照。

図 II-3-1 潜在植生での森林分布 (灰色) と、植林により拡大可能な土地分布 (黒色)

3) 植林による温暖化緩和効果

植林地は二酸化炭素を吸収固定するだけでなく、その他の微量ガス放出やエネルギー収支を介して気候システムに影響をもたらす。それら生物地球化学的 (biogeochemical) フィードバックと生物物理学的 (biogeophysical) フィードバックの正味の効果について、両プロセスを組み込んだ陸域モデルおよびそれを気候モデルと結合した統合モデルで研究が行われるようになっている (Bathiany *et al.* 2010 など)。一般に、裸地を植林地に転換すると、日射に対する反射率が低下するためにより多くのエネルギーを吸収して地表温度を高める方向に作用するが、その一方で植生からの蒸散により潜熱輸送が増加して温度を低下させる作用も同時にはたらく。これまでのモデル研究によると、低緯度では植林による CO₂ 吸収効果の寄与が上回るが、高緯度では反射率の高い雪面を植生で覆うことで多くの日射エネルギーが吸収されるようになり、CO₂ 吸収による緩和効果よりも加温効果の方が量的に勝る場合もあるとされている。Arora and Montenegro (2011)は、カナダで開発された地球システムモデル CanESM2 を用いて、耕作地の植林転換による正味効果を推定している。そこでは、現存する耕作地（ここでは 2,020 万平方キロ）を 2060 年までに 50%または 100%の割合で植林地に転換する設定で実験を行っており、その結果として累計で 120 Pg C または 240 Pg C の CO₂ が植林地に吸収固定されていた。しかし、前記のような日射吸収効果により、全球平均気温を低下させる効果はそれぞれの場合で -0.25℃または -0.45℃に留まっており、温暖化に対する根本的な緩和策としては不十分であることが示唆された (図 II-3-2 は温度変化の分布)。このようなドラスティックな植林ですら緩和効果は限定的であるという知見は、ネガティブ・エミッションを含む今後の温暖化対策・陸域の最適利用を検討する上で非常に重要と考えられる。



※土地利用変化を考慮しないコントロール実験との差で示されている。左：100%植林、右：50%植林。下：生物地球化学的效果、中：生物物理学的効果、上：合計の正味効果。
図 II-3-2 CanESM2 による耕作地の植林転換に伴う将来 (2081-2100 年) の正味の温度変化

4) 植林に伴うリスク

緩和策として大規模な植林が実施される可能性を検討するには、その潜在的なリスクを把握しておく必要がある。統合評価モデルを用いた検討として、例えば Calvin *et al.* (2014)は GCAM によるシナリオ研究を実施している。そのうち森林の炭素に化石燃料と同程度の炭素税を課するシナリオでは、森林減少が抑えられるだけで無く、森林面積が 500 万 km² 以上も増加するという推定が得られてい

る。これは極端な例としても、このような大規模な植林活動は緩和効果以外にも様々な影響をもたらす可能性がある。

多くの植林地は単一樹種で構成されており、天然林と比較して生物多様性は顕著に低下している。日本国内でも、戦後の拡大造林期に広大な人工林造成が行われたが、それは林床植生や動物相の多様性低下につながったと考えられる。また、植林地周辺の動物（例えばシカ・クマなど）が採餌などを行う生息域が狭められ、人家や耕地に出没して被害を与える「負の生態系サービス」が生じていることも指摘されている。さらに、森林（木材）の価格低下とともに管理放棄された森林が増え、景観悪化や病虫害発生などの被害を及ぼしている例もあるが、これは植林に伴う将来的なリスク要因としても検討を要する課題であろう。大規模で急激な植林活動は、もとの植生が草原や低木であったとしても、固有の動植物相の生息地を狭めることで生物多様性を低下させる危険性がある。それは、炭素吸収固定以外の、花粉媒介・水源涵養・産物供給といった生態系機能・サービスの劣化につながり、特にそれに依存する地域住民の生活に悪影響を及ぼす恐れがある。また、単一樹種で構成された植生は、気候変動や攪乱への耐性と適応性が低く、環境変動に対する生態系の脆弱性を高める恐れがある。さらに、プランテーションなどに用いられる一部の樹種（ポプラ、ヤナギ、ユーカリなど）は、イソプレンなど生物起源の揮発性有機物質を多量に放出することが指摘されているが、それは対流圏オゾンの生成を促し、大気汚染を悪化させることで健康被害や農作物の収量低下を招く可能性がある

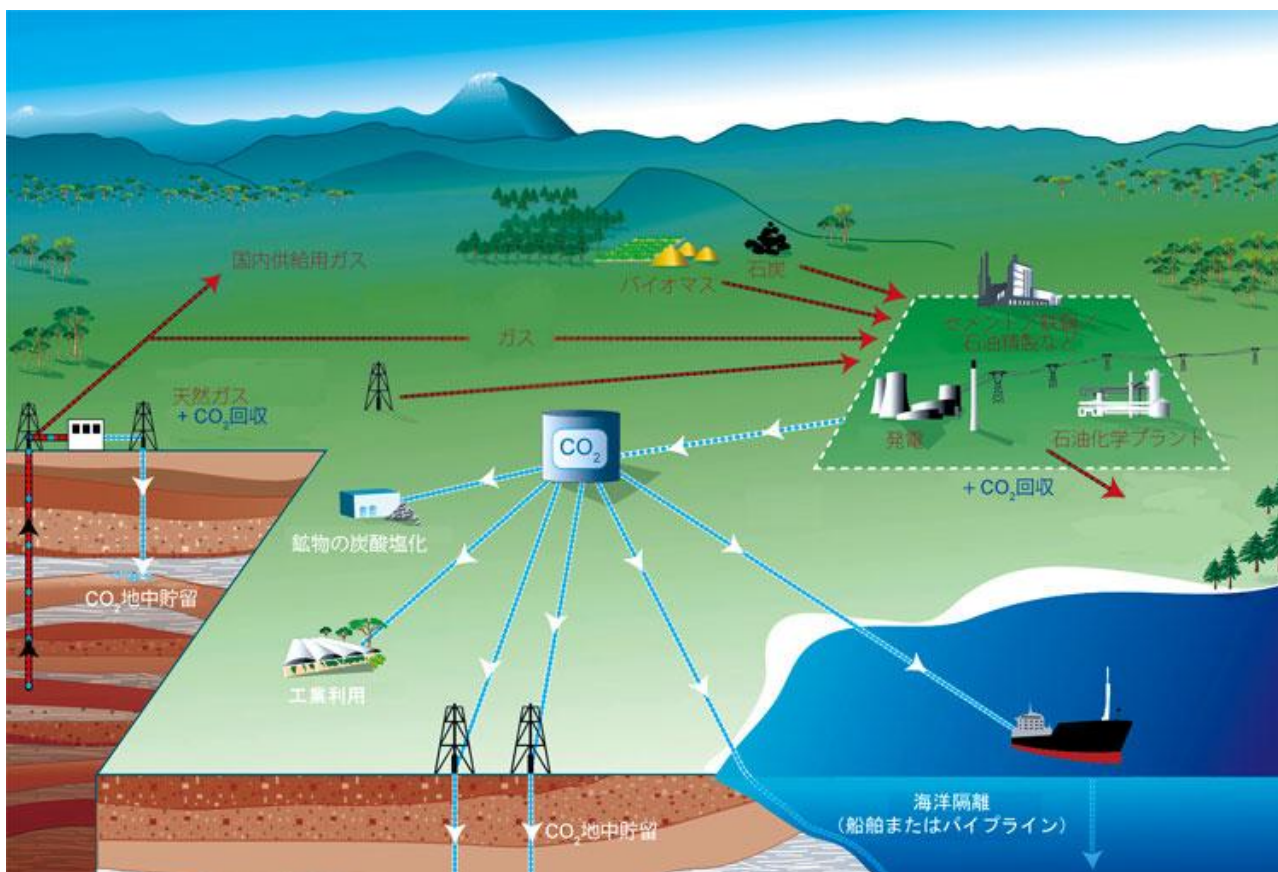
(Ashworth *et al.* 2013)。植林地がもたらす正負の生態系サービスを総合的に評価し、他セクターとのコベネフィットやトレードオフを精査することが必要であろう。

(3) BECCS について

バイオマス CCS (BECCS) はバイオマスを燃焼することによるエネルギー生成と炭素回収貯留(CCS)の2つの緩和オプションを組み合わせた技術である。バイオマスのエネルギー利用プロセスを CCS と組み合わせることによって、大気中の CO₂を植物によって回収し、エネルギー転換において発生する CO₂を地層に恒久的に貯蔵することによってネガティブ・エミッションを生み出すことになる。バイオマスによるエネルギー利用において、バイオマス単体を燃料として利用することに加え、石炭と混合し燃焼させることもある。このプロセスにおいてネガティブ・エミッションは副次的なものであり、エネルギー生成が主要な生産物と考えることができる。このような性質のため、BECCS はネガティブ・エミッション技術の選択肢の中で、近い将来の利用において、コスト・技術的な面で最も潜在能力がある技術である。このような観点からネガティブ・エミッションの柱として多くの統合評価モデルの温暖化対策シナリオにおいて用いられている(Azar *et al.* 2013)。

CCS (Carbon capture and storage) はCO₂を分離・回収し、それを地中や海洋等に長期間にわたり安定的に貯留・隔離することにより、大気中へのCO₂放出を抑制し、地球温暖化を防止する技術である。CCSは、CO₂の分離・回収、輸送、圧入、及び貯留というプロセスから構成される。そのうち、CO₂の分離・回収は、CCSの技術開発の中核の1つにあげられる技術で、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法、物理吸着法、及び深冷分離法がある。

もう1つの中核技術であるCO₂貯留には地中貯留と海洋隔離がある。地中貯留には、帯水層貯留、石油・ガス増進回収、枯渇油・ガス層田貯留、及び炭層固定がある。海洋隔離には希釈溶解法や深海底貯留法があるが、廃棄物その他の投棄による海洋汚染の防止に関する条約（通称ロンドン条約）のため、海洋底地下を除き、海洋への直接隔離は実施されていない。



(出典) 産業総合技術研究所 web ページ

※原典：IPCC CO₂回収貯留に関する特別報告書（産総研和訳）

図 II-3-3 CCS の仕組み

1) バイオマス供給源

BECCS 実施に用いるバイオマスとしてさまざまなものが利用可能である。主なものをあげると食用作物による第 1 世代バイオエネルギー作物（サトウキビ、トウモロコシ、ナタネなど）、非食用である第 2 世代エネルギー作物（Miscanthus, Switchgrass などの多年生草本、ナンヨウアブラギリ、短期伐採のヤナギやポプラなど）、廃棄物（廃食用油、食品廃材、下水汚泥）、農作物の残渣（稲わらやトウモロコシの茎など）、木材および林業での残渣、そして研究開発中ではあるがバイオ燃料向け藻類などがある。バイオマスエネルギーの供給量は 2008 年で 50.3EJ yr⁻¹ と全一次エネルギー供給量の約 10.2% となっている。将来的にはその値は増加すると考えられており、2050 年で 100 から 300EJ yr⁻¹ と専門家によって推測されている（Chum *et al.* 2011）。しかしその値はバイオマスエネルギーの利用方法に関する仮定に大きく依存するため、さらに大きな不確実性が存在する。持続可能性を考慮すると 50-150EJ yr⁻¹ と典型的に推定され、生物多様性の損失を起こさないために自然林などの利用を厳しく制限する場合には 100EJ yr⁻¹ 以下になると考えられている（van Vuuren *et al.* 2010）。また、BECCS に利用できるバイオマス量は、食糧需給との関係、またエネルギー効率やコスト的に BECCS に見合わない場合など様々な要因によって影響を受ける。政策決定の議論に向け、空間的に詳細な実データに基づいたボトムアップ手法によるバイオマス供給量の推計が必要であると指摘されている（Slade *et al.* 2014）。

2) エネルギーへの変換と CO₂ 回収

バイオマスのエネルギーへの変換方法は使用する原料の性状およびエネルギーの利用形態に応じて様々なものがある。各方法は直接燃焼やガス化といった熱化学的変換と、発酵による生物化学的変換に大別でき、熱化学的変換では目的生産エネルギーとして電気、熱もしくは水素やメタンなどの可燃性ガスが製造され、生物化学的変換ではエタノールやメタンなどの燃料が製造される（図 II-3-4）。

熱化学的変換と生物学的変換では、CO₂の回収工程や回収率が大きく異なる。熱化学的変換の中でも直接燃焼による発電の場合は、バイオマス専焼発電やバイオマス・石炭混焼発電の燃焼時に発生した排ガス中に含まれるCO₂を分離・回収する。生成物が熱や電気であり需要端でのCO₂発生はない

め、排ガス中のCO₂を高効率で回収できれば、全体として高いC回収率可以实现できる。一方、生物化学的変換である発酵によるバイオエタノール製造の場合、サトウキビなどのバイオマスに含まれる糖質成分が微生物によってエタノールに変換される際に発生するCを回収する。この場合、液体であるエタノールと気体のCO₂が主として生成するため、排ガス中のC濃度は高く、脱水工程以外の特別なCO₂の分離・回収工程を必要としないことが特徴的である。ただし、エタノールを燃料として使用する際にCO₂を排出してしまうことから、回収率は中程度にとどまる。以上をまとめて、特徴を表 II-3-1に示す。

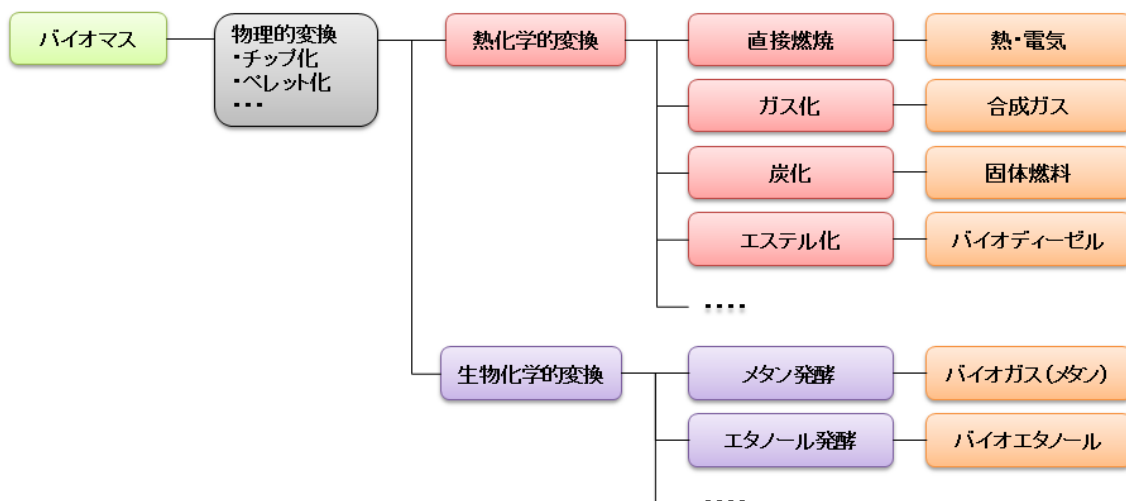


図 II-3-4 主要なバイオマスのエネルギー変換方法

表 II-3-1 バイオマスのエネルギー変換方法と潜在的 CO₂ 回収率

分類	変換方法	目的生産エネルギー	潜在的CO ₂ 回収率
熱化学的変換	直接燃焼	電気	高
		熱	高
	ガス化	液体燃料、バイオSNG、水素	中～高
生物化学的変換	メタン発酵	バイオガス、水素	中～高
	エタノール発酵	バイオエタノール	中

3) BECCS プロジェクトの現状（黒沢他，2013）

いくつかの国や地域において、すでに BECCS の試みがなされている。オーストラリア政府が資金を提供して設立した Global CCS Institute (GCCSI) は、Global Status of BECCS Projects 2010 で 2010 年時点での世界の BECCS プロジェクトの状況をまとめている。対象となったのは、欧米およびアフリカの計 15 件のプロジェクトである。化石燃料 CCS プロジェクトとして継続したドイツの Ketzin プロジェクトを除けば、プロジェクトの 14 件の状況は、完了 1 件、運転 4 件、評価 3 件、構想 3 件、中止 3 件である。化石燃料を対象とした CCS プロジェクトにもみられるが、地域合意、補助金獲得失敗などでプロジェクトが中止となったケースがある。

適用分野は、エタノール 10 件、パルプ工場 2 件、バイオガス 1 件、汎用的ガス化パイロット 1 件であり、対象貯留層は、石油増進回収(Enhanced Oil Recovery, EOR) 3 件、温室 1 件、塩水層 10 件となっている。アメリカでは、バイオエタノール生産と EOR の組み合わせによる 3 つのプロジェクトがある。原油価格が高騰している条件下では、石油製品と競合できるバイオエタノール生産、追加的原油生産につながる EOR の両者が経済的に成立するため、導入が進んでいるものと考えられる。年間 CO₂ 貯留量規模は年間数百トンの小規模のものから、数十万トンの中規模のものまで様々である。

バイオエタノールが先行している感もあるが、バイオマスのエネルギー用途は、液体燃料以外にも、

発電、水素を含む気体燃料など多岐にわたる。これらの技術は長期的にみて多様なエネルギー利用に導入されていく可能性があり、温室効果ガス排出制約がより強く求められるようになった場合は、CCS との組み合わせは、気候変動対策の有力なオプションとなりうる。GCCSI レポートでは、パルプ、エタノール、発電などが大規模プロジェクトとしての可能性があるとしている。

(4) CO₂ 直接空気回収の現状

大気からの CO₂ 回収そのものは、それほど新しい技術ではない。歴史的には空気分離機の熱交換器が CO₂ によって閉塞するのを防止するために実用化され、小規模なものでは、宇宙船や潜水艦といった閉鎖空間における C を回収するために用いられた。ただし、これらは、設備が小規模かつ生産や生存に必要不可欠なためコストはさほど重視されていなかったこと、また回収した CO₂ は系外に放出が可能であるという点が、気候工学としての CO₂ 直接空気回収とは異なる。

CO₂ 直接回収の技術としては、吸着剤を樹木のように広げて受動的に回収する方法と、ファンを利用して能動的に回収する方法がある。C 回収工程は後述する NaOH と Ca(OH)₂ を用いる方法など既存の技術の延長上のものが一般的である。また、いくつかの検討事例はあるものの、概念設計や実験レベルの段階であり、本格的な実証事業には至っていない。また、実施コストについて統一的な見解も出されていない。

II-3-ii ICA-RUS より明らかにされた知見

(1) 2°C目標達成に必要な BECCS potential 評価

IPCC 第5次報告書の WGI では、4つの濃度経路シナリオを用い、気候モデルによる将来温暖化予測実験がなされた (IPCC 2013)。このシナリオのうち、産業化以降の全球平均気温上昇を 2°C に抑えることを目指した最も排出削減を行うシナリオが RCP2.6 である。RCP2.6 では、2°C 目標の達成のため大規模な BECCS がシナリオ内で用いられている。BECCS に用いられるバイオエネルギーは今世紀半ばで約 80EJ、2100 年では約 140EJ (それぞれ 1 次エネルギー供給量) と、2010 年において世界で利用されているバイオエネルギー(約 50EJ、主に開発途上国での熱利用)に比べ多くのバイオエネルギーが BECCS に利用され、そのエネルギー利用による CO₂ 排出のほぼ全てが回収貯留される必要がある。RCP2.6 はこのネガティブ・エミッション技術を用い、21 世紀末には人為的化石燃料利用による CO₂ 排出は正味でマイナス、つまり CO₂ を大気から吸収するシナリオである。

このような大規模 BECCS を達成するためには、現状の土地利用を変化させ、バイオエネルギー作物を広域に栽培する必要がある。現在地球上に農地は約 15 億ヘクタール存在するが、RCP2.6 シナリオの農地は 2100 年には約 21 億ヘクタールまで達し、その増加する農地の 83% がバイオエネルギー作物に利用されるシナリオとなっている。2°C 目標を達成するための社会経済シナリオの多くでは、RCP2.6 と同様な BECCS 利用が仮定されているが、実際の生態系の制約でどれだけ現実的に BECCS が達成可能といった検討はあまりなされていないのが現状である。ICA-RUS テーマ 2 では、RCP2.6 で仮定されているバイオエネルギー作物の土地利用の制約下で、現実的に実現可能な BECCS 量をプロセススペースの作物モデルを用い、気候変動、二酸化炭素濃度の変化、肥料投入量等を考慮し、ボトムアップ的に推定をおこなった。

推定において、現状用いられている第 1 世代バイオエネルギー作物 (サトウキビ、ビート、トウモロコシ、ナタネ) によるバイオエタノールおよびバイオディーゼル利用、将来利用が期待されている第 2 世代バイオエネルギー作物 (Switchgrass, Giant Miscanthus) 由来リグノセルロースを利用したガス化における BECCS の二種類の実施方法を考慮した。第 1 世代バイオエネルギー作物を利用した場合での BECCS 達成可能量は、肥料投入量に依存して不確実性が存在するものの、RCP2.6 で必要とされる量の 34%-43% と推定され、肥料投入量を 160 kgN ha⁻¹ yr⁻¹ まで増加させるといった高肥料シナリオにおいても、必要量の半分にも満たないことがわかった。また、第 2 世代バイオエネルギー作物を栽培し、ガス化による BioSNG 生産の過程で BECCS を行った場合、2100 年までに約 80Pg C 固定できることがわかったが、これも必要量の約半分の吸収量である。これに加え BioSNG 燃焼後の回収技術を仮定した CCS を行う場合では、必要量の 95% ほどを満たすことが可能であった。現状の技術において、空気燃焼後の CO₂ 回収技術においては排出ガスの CO₂ 濃度が低いためにコストとエネルギーが比較的多くかかる点があり、これらの技術革新あるいは、ガス化による水素エネルギーの利用など、CO₂ 回収率の高い技術の利用が重要となることがわかった。

(2) 土地利用影響評価

上で示したように、バイオエネルギー利用および回収技術の進歩が進まない場合、つまり第 2 世代バイオエネルギー作物の広域生産およびコスト的に見合うようなバイオ燃料利用における燃焼後回収技術の高度化が進まない場合には、2°C 目標に必要な大規模バイオエネルギー生産による BECCS を達成するためには、さらなるバイオ燃料作物栽培の土地を増やす必要がある。この場合、RCP2.6 で仮定されているバイオエネルギー作物生産面積の倍以上に増やす必要があり、食料生産の農地との競合がおこることが考えられる。また、RCP2.6 の土地利用変化において、農地拡大による森林伐採による 21 世紀中の炭素排出は、不確実性が大きいものの 80±34 Pg C ほどと量と推定され、食用作物の農地と競合させない場合には、さらなる森林伐採によって BECCS で達成した吸収量をオフセットしてしまうことが考えられる。

(3) CO₂ 直接空気回収のコスト評価

CO₂ 直接空気回収については、技術やコストについて、体系的な整理は不十分という状況であった。House *et al.* (2011) はレビューを行ったが、プロセスの詳細に踏み込んだ分析は行っていない。またコスト以外の技術側面、例えば資源投入量などは細かく分析されていない。

まず、文献を幅広く調査することにより、CDR のコスト評価の現状を整理した。その結果、図 II-3-5 に示すとおり、10¹ ~ 10³ ドル/t-CO₂ と、不確実性が非常に大きいことが明らかになった。

文献を評価手法で大別すると、特定のシステムや物質等を想定せずに原理的なアプローチでコスト試

算している文献と実在またはあるシステムを想定してコスト試算をしている文献がある。前者の例である Ranjan (2011)は、大気中の CO₂ と発電設備の CCS は回収対象の CO₂ の濃度が 300 倍程度異なることに着目し、濃度とコストのスケールリング則から直接回収コストを概算した。そのコストは発電設備の CCS の 100 倍程度となると推定し、直接大気回収は非現実的なコストであると指摘している。さらに、CO₂ 回収のために熱力学的に必要なエネルギー 20kJ/molCO₂ からエネルギーコストを概算する方法でも同等の値を得ている。

最も安価である Heidel (2011)の検討は積み上げ型の試算例であり、ベンチャー企業である Carbon Engineering 社が開発している大気からの CO₂ 回収設備を対象としてコスト評価をしている。設備の外観は巨大な換気扇のようである。積算に際しては、構造材、溶媒、ファンの速度などについて、試験装置による実験検討を含む具体的な検討を実施し、コスト削減を進めてきている。CO₂ 回収コストは、49～80 ドル/t・CO₂ と試算されており、内訳は、建設コストが 29～49 ドル/t・CO₂、人件費、水、ファンやポンプの動力に 20～31 ドル/t・CO₂ である。このコストは CO₂ の回収のみであり、CO₂ の圧縮、貯留のコストは含まれていない。Carbon Engineering 社は断面積が約 1m² の装置を開発、運転試験を実施しており、さらなるスケールアップやそれに伴う投資が課題であるとしている。

このように、CO₂ 直接空気回収のコストは現状では評価が大きく分かれており、今後 CO₂ 直接空気回収を気候変動対策のオプションの一つとして検討していく上では、それぞれの論文の計算の前提条件についてより詳細に比較し、コストに対する我々なりの見解を出していくことが必要である。

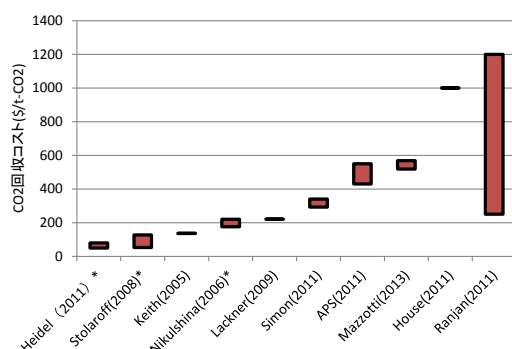


図 II-3-5 CO₂ 直接空気回収の実施コストの不確実性(*はシステムの一部の評価)

この状況を踏まえつつ、先行研究が比較的多い図 II-3-2 の NaOH と Ca(OH)₂ を用いた CO₂ 直接空気回収技術について、簡易モデルを作成し、実施コストの試算を行った。

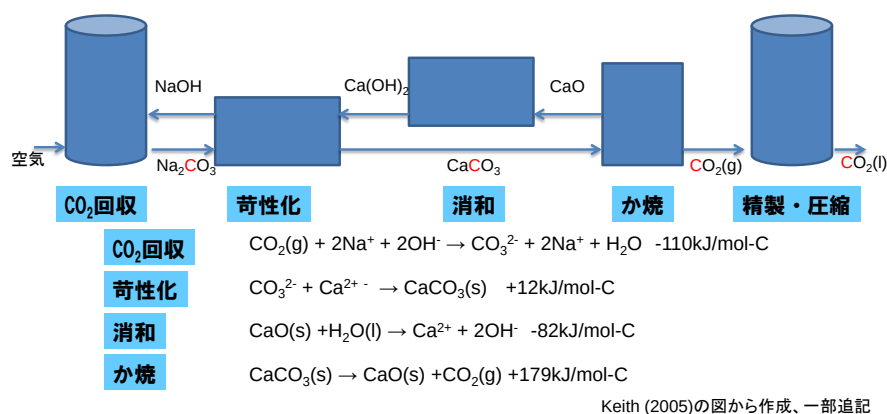


図 II-3-6 NaOH と Ca(OH)₂ のサイクルを用いた CO₂ 直接空気回収技術プロセスの例

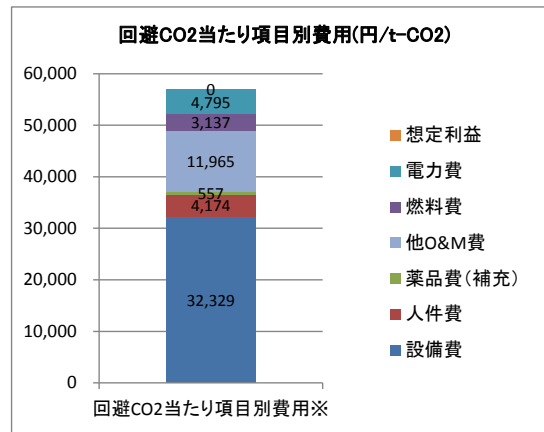


図 II-3-7 CO₂直接空気回収技術の実施コストの試算例

図 II-3-7 に 1Mt・CO₂/年の CO₂ 直接空気回収技術の実施コストの試算例を示す¹⁾。標準的と考えられる条件での回避できる 1 トン当たりの費用は、約 57,000 円/t・CO₂ であり、CCS 等、他の緩和技術に比較して 1 桁程度高いが、既存技術で実施できるため技術的な観点からは実現可能と考えられる。世界の CO₂ 排出量削減に寄与できる規模として、1Gt の CO₂ 回収に必要なコストは 41 兆円/年、燃料は 210Mtoe/年、電力は、511TWh/年程度であると試算された。このように CO₂ 直接空気回収技術を用いてグローバルな CO₂ 削減に寄与するには膨大なエネルギーが必要であることがわかる。また、プロセスにおける副反応やリサイクルの程度に依存するが、膨大な水やケミカルの供給を示唆する結果も得られた。

(4) 二酸化炭素除去に係わるリスク分析

リスク評価に際しては、気候工学として考えられる対策の網羅性を重視し、幅広い対策オプションをカバーする文献 (Royal Society (2009), Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2012)) をベースに対策オプションおよび考えられるリスク要因を総括した。

BECCS の導入に関しては、通常のバイオエネルギー導入時の注意点に加えて、CCS の実施に関する注意点に気を付ける必要がある。例えば、バイオエネルギー大規模利用に関しては、土地利用、食糧競合などの持続可能性に関するリスクに注意する必要がある。エネルギー変換時のユーティリティ使用や原料の収集活動によって化石燃料が消費され、CO₂ が発生する場合もあるため、カーボンニュートラルに対するライフサイクル的視点も重要となる。さらに、CCS の有望貯留地選定に対する地域住民の理解や長期にわたる CO₂ 貯留のリスクモニタリングなどにも留意して実施していく必要がある。

大気直接回収の場合には、土地利用、食糧競合などのリスクは小さいが、CO₂ 貯留にかかわるリスクは BECCS と同等である。海洋肥沃化については、海洋生態系への影響が大きなリスク要因となる。

また重要となるのは、これらの技術の多くは CCS インフラの開発に依存していることである。これらの技術が大気濃度に影響を与えるまでスケールアップさせるには短期間では難しい可能性があるため、一般的な緩和努力が依然として重要となる。表には含めていないが、またネガティブ・エミッション技術の保険的な役割から大規模 CDR を想定して 21 世紀前半で削減量を緩めることは、ある意味排出削減を先送りする。この結果将来世代が CDR の利用せざるをえない状況を作り出すことは、世代間倫理の問題および政策決定者が効果的な緩和プログラムや低炭素技術開発を促進しない口実を与えるといった、モラルハザードの問題ももたらす。

表 II-3-2 気候工学に関する対策とリスクの例

対策技術 気候工学(ジオエンジニアリング)			主要なリスク(潜在的なものを含む)
大分類	中分類	小分類	
CDR	土地利用管理	植林、再植林、森林減少対策	土地利用競合、改変、生物多様性への影響
		バイオ炭貯留	追加エネルギー消費、土壌への影響
	風化促進	バイオマス利用CCS	CCSのリスク(リーケージ、地震の誘発、海洋生態系への影響)
		陸域、海洋	採掘、輸送による環境破壊、海洋生態系への影響
	空気からのCO ₂ 直接回収		CCSのリスク(リーケージ、地震の誘発、海洋生態系への影響)
	海洋肥沃化		CO ₂ 吸収量の不確実性、生態系への影響
SRM	全般		全球・地域的な気候の変化、終了問題
	アルベド増加	地表面	農作物、地域の人々、生態系への影響
		雲	海流等の変化、半球間の循環の変化
		成層圏エアロゾル	地球規模水循環の変化、オゾン層破壊、酸性雨
		宇宙太陽光シールド	南北温度傾度の減少と大気循環の変化

Ⅱ-3-iii 今後 ICA-RUS が明らかにすること

(1) CDR の課題総括

前述のように、CDR には直接空気回収と、間接的除去（バイオエネルギーCCS、バイオ炭、植林、海洋肥沃化、化学風化など）がある。いずれのオプションであっても、大規模実施時には、土地利用、水や必要物質の確保などに伴う環境影響が考えられるため、その評価にあたっては注意が必要である。

BECCS についていえば、バイオエネルギー利用の原料が草本系か木質系にかかわらず、設備規模を大きくして経済性を確保するためには、広大な面積からの原料収集運搬が必要である他、CCS に関する制度的・経済的なインセンティブが課題である。

BECCS プロジェクトの例でもわかるように、CCS プロジェクトについては、炭素税や排出権取引のような CO₂ への規制が導入されない場合、回収した CO₂ に経済的価値をもたせるべく、EOR、温室利用、化学原料利用などのプロジェクトが試みられている。このようなプロジェクト群は、CCS の中でも、CO₂ 回収・利用・貯留（CO₂ Capture, Utilization and Storage, CCUS）と呼ばれており、先行実施される可能性が高い。

また、バイオエネルギーCCS の大規模導入には、化石燃料 CCS 実証や CCS を伴わないバイオエネルギー利用が前段階として必要である。これらの大規模導入も合わせて進めることが、バイオエネルギーCCS の積極導入に対しての前段階として有効である。

(2) BECCS の課題

大規模 BECCS の影響評価として、水・食料・エネルギー間の相互作用（NEXUS）の観点からのリスク評価が今後望まれる。特に、気候変動下での水資源変動によるバイオエネルギー生産に必要な水の制約、また肥料投入による生態系への影響などを統合的に把握する必要がある。また、農地の利用だけに限らず、森林での持続的な木材利用と林業における残渣の BECCS 利用ポテンシャルを空間詳細的に考慮することも重要となる。

(3) 大規模植林の課題

植林に関することでは、耕作地から植林地への大規模な転換が、炭素固定（CDR）だけでなく別の生態系サービスに及ぼす影響を明らかにすることが重要な課題である。最適利用の観点から、地域の水収支、気候調節、可能であれば生物多様性などの多様な評価軸を検討する必要がある。

過去の研究例から、大規模な植林が気候に与える影響は地域差があることが示唆されている。高緯度と低緯度での差だけでなく、湿潤地と半乾燥地域の差違、大陸別の植林影響の違いなど、より地域性を考慮した解析を行うべきであろう。

(4) 直接空気回収の課題

図 Ⅱ-3-7 に示すように、CO₂ 直接空気回収技術の実施コストの半分は設備費に起因する。また、薬品や水の再利用率によっては薬品費が大きな割合を占める可能性を示唆する結果を得た。今後は、実施コストに大きな影響を与えると考えられる建設費や薬品・水の再利用率を精査し、さらに不確実性の幅を小さくすること、また、今回評価した NaOH と Ca(OH)₂ を利用する技術とは異なる技術のサーベイも進める必要がある。

これまで CO₂ 空気回収技術は、比較的实施地域を選ばないと考えられてきたが、実施に必要なエネルギーや薬品の供給の観点から、実施可能な地域等が制限される可能性が出てきた。したがって、これらを考慮した CO₂ 直接空気回収技術の実施可能性に制約を与える要因についての考察を行う。

今後は、上記の課題を明らかにすることでこれらの影響等を考慮した CO₂ 直接空気回収技術の定式化を行い、統合評価モデルにて評価するための技術情報を整備する。

(5) CCS の課題（社会受容、制度）

世界の CCS プロジェクトは、現段階では化石燃料を対象としたものがほとんどであるが、計画段階で中止となったものが数多くみられるなど、順調に進んでいるとは言い難い。二酸化炭素除去の実施にあたっては、CCS が順調に進まない原因を分析し、その改善策を考えていく必要がある。

政策的要因としては、経済性が確保できなかったもの、ステークホルダーの合意形成が困難であったもの、などがあると考えられる。また、政策的要因としては、欧州 CCS 指令は、CCS の環境リスクとそれに対する責任を管理する法的枠組みを確立するように加盟国に求めていたが、その法制化が困難となったドイツの事例などが知られている。また、経済性確保については、フィージビリティスタディの

結果プロジェクトコストが上昇した、回収 CO₂ の EOR への販売先やクレジット価格が不確定と判断された、合成ガス製造を含んだプロジェクト計画であったがシェールガス開発に起因する価格低下から中止となったなどの事例がある。また、ステークホルダー合意については、地域住民が CO₂ 地中貯留に反対したオランダやドイツの例がある。

これらのことを踏まえつつ、政策としての補助金、炭素税、排出権価格、制度や法規制（長期的責任など）の確立、コスト低減のための技術開発やプロジェクト管理、ステークホルダー合意のためのプロジェクトの初期段階からの CCS 技術や CCS の CO₂ 削減への貢献への理解促進のあり方等を検討する。

（6）リスク情報の整理

CDR を含む気候工学への関心が高まっているのは、気候変動影響リスクに対する対策オプション研究の広がりにとらえるべきで、そのこと自身が気候変動リスクおよびその対策リスクに対して、総合的に深く再考する必要性を示唆している。特に、導入規模そのものを慎重に決めねばそれ自体がリスクとなる、という点が一つの注意点となる。

参考資料

- Arora, V. K., and A. Montenegro (2011), Small temperature benefits provided by realistic afforestation efforts, *Nature Geoscience*, 4, 514–518.
- Ashworth, K., O. Wild, and C. N. Hewitt (2013), Impacts of biofuel cultivation on mortality and crop yields, *Nature Climate Change*, 3, 492–496.
- Azar, C., D.J.A. Johansson, and N. Mattsson (2013), Meeting global temperature targets-the role of bioenergy with carbon capture and storage, *Environ. Res. Letter.*, 8, 034004.
- Bathiany, S., M. Claussen, V. Brovkin, T. Raddatz, and V. Gayler (2010), Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI earth system model, *Biogeosciences*, 7, 1383-1399.
- Calvin, K., M. Wise, P. Kyle, P. Patel, L. Clarke, and J. Edmonds (2014), Trade-offs of different land and bioenergy policies on the path to achieving climate targets, *Clim. Change*, 122, 401-414.
- Chum, H., A. Faaij, J. Moreira, G. Berndes, P. Dhamija, H. Dong, and B. Gabrielle, A. Goss Eng, W. Lucht, M. Mapako, O. Masera Cerutti, T. McIntyre, T. Minowa, and K. Pingoud (2011), Bioenergy, in *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, edited by O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, and C. von Stechow, pp. 209-331, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Heidel, K., D. Keith, A. Singh, and G. Holmes (2011), Process design and costing of an air-contactor for air-capture, *Energy Procedia*, 4, 2861-2868.
- House, K. Z., A.C. Baclig, M. Ranjan, E.A. van Nierop, J. Wilcox, and H.J. Herzog (2011), Economic and energetic analysis of capturing CO₂ from ambient air, *PNAS*, 108, 20428–20433.
- ICA-RUS (2013), ICA-RUS REPORT 2013, NIES, Tsukuba, Ibaraki, Japan
- IPCC (2012), *Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Geoengineering*, edited by O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, C. Field, V. Barros, T.F. Stocker, Q. Dahe, J. Minx, K. Mach, G.-K. Plattner, S. Schlömer, G. Hansen, M. Mastrandrea, pp. 99, IPCC Working Group III Technical Support Unit, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.
- IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, IPCC, Geneva
- Lenton, T.M., and N. E. Vaughan (2009), The radiative forcing potential of different climate geoengineering options, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 5539-5561.
- Luyssaert, S., E.-D. Schulze, A. Börner, A. Knohl, D. Hessenmöller, B. E. Law, *et al.* (2008), Old-growth forests as global carbon sinks, *Nature*, 455, 213-215.
- Post, W. M., and K. C. Kwon (2000), Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential, *Global Change Biol.*, 6, 317-327.
- Ramankutty, N., and J. A. Foley (1999), Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992, *Global Biogeochem. Cycles*, 13, 997-1027

Ranjan, M., and H. Herzog (2011), Feasibility of air capture, *Energy Procedia*, 4, 2869-2876.

Royal Society (2009), *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*, Royal Society, London, UK.

Slade, R., A. Bauen, and R. Gross (2014), Global bioenergy resources, *Nature Climate Change*, 4, 99-105.

van Vuuren, D., E. Vellevrat, A. Kitous, and M. Isaac (2010), Bioenergy use and low stabilization scenarios, *Energy Journal*, 31, 193-221.

Yamagata, Y., and G. A. Alexandrov (2001), Would forestation alleviate the burden of emission reduction? An assessment of the future carbon sink from ARD activities, *Climate Policy*, 1, 27-40.

杉山昌広, 西岡純, 藤原正智 (2011), 気候工学 (ジオエンジニアリング) , *天気*, 58, 577-598.

杉山昌広, 黒沢厚志, 増田耕一, 都筑和泰, 森山亮, 石本祐樹 (2012), 気候工学と気候政策: レビュー, 環境経済・政策学会 2012 年度大会, 東北大学, Miyagi, Japan

黒沢厚志, 森山亮, 村上嘉孝 (2013), バイオエネルギーCCS, *日本エネルギー学会誌*, 92, 211-215

石本祐樹, 黒沢厚志, 杉山昌広, 増田耕一, 都筑和泰, 森山亮 (2014), 気候工学のコスト分析 ～二酸化炭素直接空気回収, 第 32 回エネルギー・資源・経済コンファレンス, 2014 年 1 月 24 日, Tokyo, Japan.

産業総合技術研究所 Web ページ,

http://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_today/vol08_01/vol08_01_p12_p13.pdf