

再生可能エネルギーと原子力による

**カーボン ネガティブ
エネルギー システム**

地球環境の回復と持続的エネルギー供給

堀 雅夫

一般社団法人 日本原子力産業協会

原子力システム研究懇話会

刊行のことば

原子力システム研究懇話会 (Nuclear Systems Association, NSA) は、平成 2 年に (社) 日本原子力産業会議 (現・日本原子力産業協会) のなかに設立され、その活動の一つとして、平成 5 年から毎年「NSA コメンタリー」を刊行しています。

「NSA コメンタリー」シリーズでは、関連の会員の方が担当して、時宜にかなった原子力・エネルギーに関するトピックスについて、一般の人も視野に入れた解説を編集・刊行してまいりましたが、これとは別に、個人の見解をまとめたものを別冊として刊行しています。

平成 18 年に発行いたしました内藤奎爾先生著「原子力のリスクと安全の確保」が別冊の第 1 号にあたりますが、今回これに続き別冊の第 2 号を発行することになりました。

前回同様に、本書が、原子力関係者のみならず、エネルギーや環境関係の多くの方にとってお役に立つことを願ってやみません。

平成 27 年 6 月

原子力システム研究懇話会

運営委員会委員長 田畑 米穂

まえがき

ここ数年、世界的に異常気象が続いており、その原因を人為起源二酸化炭素（CO₂）排出と考える人が増加している。

地球全体の居住性を維持・改善する学問を地球工学と言うが、とくに温暖化対策を目的とするのは気候工学と呼ばれている。これには太陽の入射光を減らすための成層圏へのエアロゾル散布などの方法があるが、副作用が心配される。

気候工学では、温暖化の原因である CO₂ を大気中から除去する方法も検討されている。その一つとして、バイオマスから炭（すみ）をつくる方法がある。このバイオ炭は地上に放置しても数百～数千年間安定なので、地球規模炭素循環の外と考えられる。

私は 2007 年に原子力を利用してバイオマスを炭化してバイオ炭をつくり材料利用し、同時に出る揮発性の炭素成分から合成燃料をつくり化石燃料代替とする、大気中炭素除去とバイオ合成燃料供給が行える方法を木質炭化学会に発表して以降、国内外の原子力・気候工学・エネルギーの会議に発表してきた。

このプロセスは原子力なしでも可能であるが、炭化・燃料化のエネルギーをバイオマス自身の燃焼により供給するために、処理量に対する炭素除去効果が低くなる。原子力利用によって、バイオマス処理量に対する炭素除去効果を格段に向上できる。

地球上のバイオマス成長による炭素吸収量は、現在の世界のエネルギー消費による CO₂ 排出量より約一桁大きいので、バイオマス成長量の 1 割程度を上のプロセスで処理できれば、大気中 CO₂ を減少に向けることができる。

バイオマスは広く薄く分布しているためにその集積が大変なので、未利用地の利用や近年進んでいる藻類などのエネルギー植物栽培と組み合わせるなど、工夫が必要と考える。

大気中の CO₂ をバイオ炭として地上に固定することは、これまでの人類による化石燃料の燃焼・排出に対する復元の作業であり、世界全体による大規模な努力が必要となる。

現在の地球温暖化の進行状態から、世界が必要とするエネルギーを持続的に供給しつつ大気中から CO₂ を除去して CO₂ 濃度を許容範囲に調整していくことが可能な「地球環境保全・世界エネルギー供給統合システム」の構築・運用は喫緊の課題と考える。

本書がこの目的に役立つことを願っている。

堀 雅夫

原子力システム研究懇話会

目次

再生可能エネルギーと原子力による カーボンネガティブ・エネルギーシステム 地球環境の回復と持続的エネルギー供給

刊行のことば

まえがき

第1章	全体要約	1
第2章	C02 の排出抑制から C02 の除去へ	13
第3章	主な C02 の回収方法と貯留方法	25
第4章	バイオマスと原子力による協働的 C02 除去方法	35
第5章	カーボンネガティブ・エネルギーシステム	53
第6章	C02 除去事業実施の資金・仕組み	71

あとがき

第1章 全体要約

再生可能エネルギーと原子力による カーボンネガティブ・エネルギーシステム 地球環境の回復と持続的エネルギー供給

1. CO₂の排出抑制から大気中CO₂の除去へ

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次評価報告書（AR5）では、気候システムの温暖化については疑う余地がなく、人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高いことなどが記述されている。

このような気温上昇に対して、その主因であるCO₂などの温室効果ガスの排出を削減するCO₂回収貯蔵（CCS）などの「緩和策」と、緩和策が功を奏しても一定の気候変動による影響は避けられないので、その影響に対して予見的に対策をとる「適応策」が進められている。

一方、緩和策をさらに進めて積極的に地球気候を改善・回復する「気候工学」（Geoengineering）技術の提案・研究も行われている⁽¹⁾。これには、既に大気中に出ているCO₂を回収して濃度の上昇抑制/低下をさせる「CO₂除去」（Carbon Dioxide Removal, CDR）およびCO₂除去による温暖化緩和と同様の効果をもたらす「太陽放射管理」（Solar Radiation Management, SRM）がある。「CO₂除去」技術は大気からCO₂を除くので「負排出」（Negative Emission）とも呼ばれている。

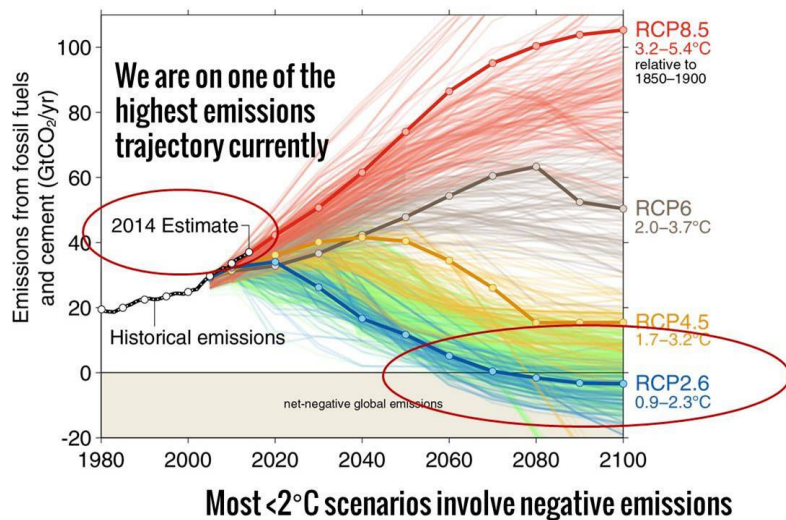


図1 IPCCの評価では気温上昇を2°C未満に抑えるには負排出が必要⁽²⁾

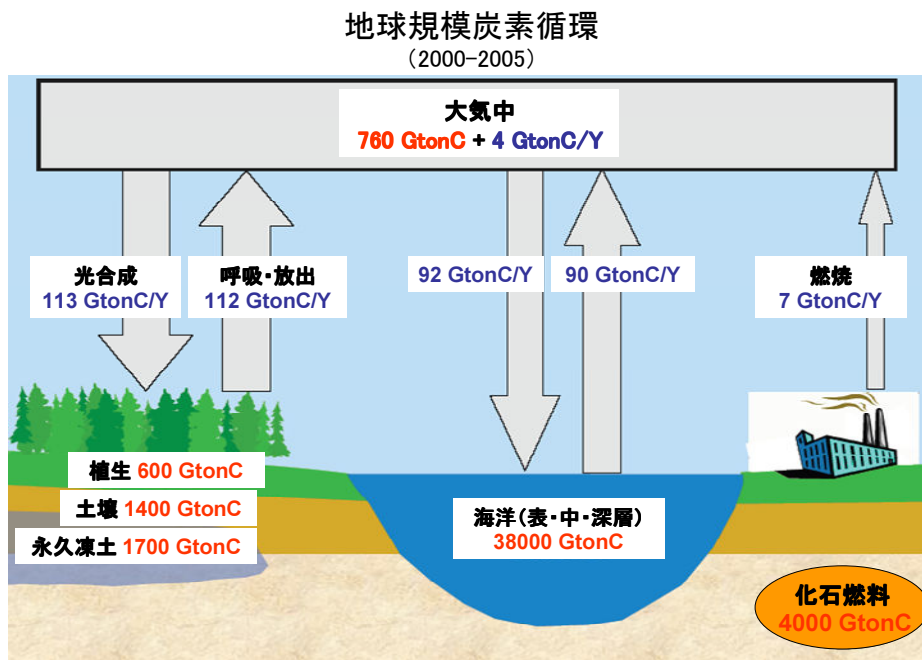
IPCC-AR5 (WG3) による2100年までの1000以上の排出経路による評価 (Fig. 1) では、

気温上昇を産業革命前に比べて2°C未満に抑える可能性が高い緩和シナリオの大部分は21世紀の後半に地球規模で実質負排出を想定しており大気中CO2除去の必要性を示唆している。

2. 大気中CO2を除去する方法

図2の地球規模の炭素循環において、光合成によるバイオマスの成長量（約60 GtonC/年、GtonCは炭素量にして10億トンの単位）の約10年分の炭素が森林などの植生に、約30年分の炭素が土壌中には存在し、自然の状態ではこれらの有機炭素の分解によるCO2放出が光合成に伴うCO2吸収と均衡して大気中CO2濃度は安定してきた。しかし化石燃料燃焼による人為起源CO2排出の増加によって大気中のCO2濃度は上昇している。

海洋は大気より2桁大きい炭素を貯留し、大気との間で大量のCO2を交換し現在は約2 GtonC/年のCO2吸収になっている。そのため海洋の酸性化が進んでいる。



参考: IPCC-AR4 2007 Report, Kevin Schaefer (NSIDC), Charles Koven (Berkeley Lab)

図2 地球規模の炭素循環

このような地球規模の炭素循環メカニズムからCO2を除去する多くの方法が研究されている。大別すると；

- ①大気中からCO2を回収・貯蔵
 - ・大気中からCO2を直接回収して貯蔵

- ・自然の CO2 吸収作用（風化）を加速（陸上）
- ②バイオマス中の炭素分を CO2 または C として回収・貯蔵
 - ・バイオマスで発電して CO2 を回収・貯蔵
 - ・バイオマスから炭を製造・貯蔵、残りを発電/燃料製造
- ③海洋の CO2 吸収を促進
 - ・自然の CO2 吸収作用（風化）を加速（海洋）
 - ・海洋の肥沃化による CO2 吸収の促進

CO2 を臨界状態に圧縮して地層に貯留する「CCS」方式は、貯留可能量の限界や CO2 漏出の可能性といった不安要素、CO2 回収・貯留時のエネルギー消費量の大きさなどの経済性、貯留場所の選定・社会的受容性などの問題などがあり、貯留すべき CO2 量の規模を考えるとより難度の低い方式の検討が望まれる。

3. バイオマスと原子力を利用する CO2 除去方法

バイオマスと原子力を利用して大気中 CO2 除去する方法は、バイオマスを炭化して「バイオ炭」（木炭、Biochar）を生成するプロセスと残りの揮発成分を含む炭素を炭化水素燃料に転換するプロセスから構成されており、バイオ炭による CO2 除去とバイオ燃料によるエネルギー供給を同時に行うことができる^{(3)~(6)}。(図 3)

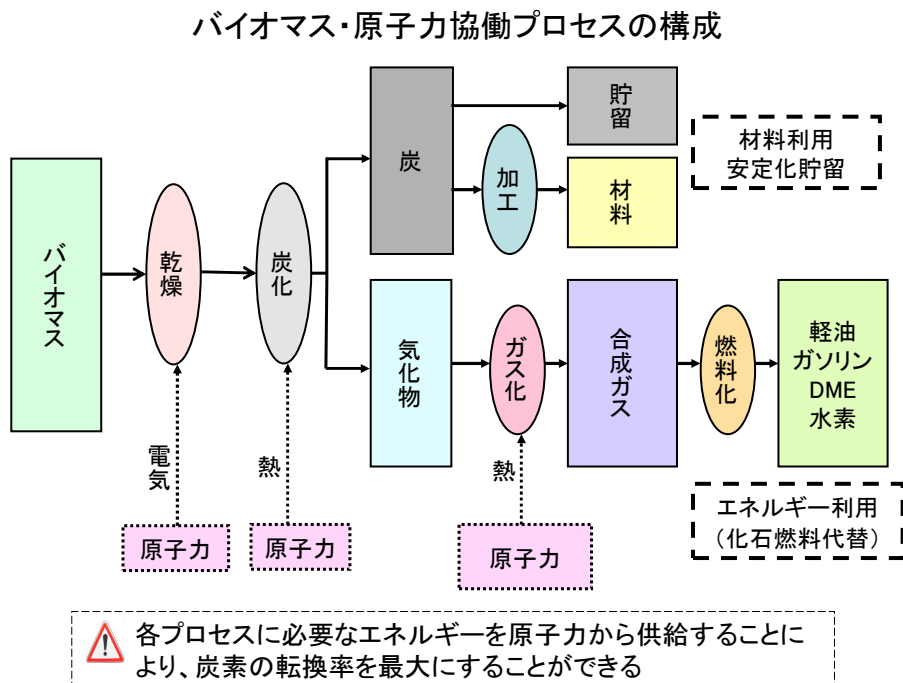


図 3 大気中 CO2 除去のためのバイオマス・原子力協働プロセス

- ◆ バイオマスの炭化反応では、温度条件によりバイオマス中の炭素量の 50 %程度までをバイオ炭にすることができる。バイオ炭は地上・空気中で数百年～数千年安定であり、工業材料や農業の土壌改良に使用しつつ炭素貯留を行うことが可能である。
- ◆ バイオ炭製造時に発生する気体成分中の炭素分は水蒸気ガス化反応により合成ガス（CO+H₂）を経て炭化水素燃料に転換することが可能である。この反応に必要な熱エネルギーを原子力から供給することによりバイオマス処理量あたりの燃料製造量を大きくすることができる。
- ◆ この方法はバイオ炭による炭素の安定貯留とバイオベースの合成燃料の化石燃料代替の両方の効果を合わせて大気中 CO₂ を除去できる。このようなプロセスはバイオマスのみでも可能であるが、プロセスに必要なエネルギーを原子力から供給することにより、処理するバイオマス量に対する炭素除去量を 60 %程度向上させることができる。

4. 地球環境保全と世界エネルギー供給の統合システム

現在の地球温暖化の進行状態から、世界が必要とするエネルギーを持続的に供給しつつ大気中から CO₂ を除去して CO₂ 濃度を許容範囲に調整していくことが可能な「地球環境保全・世界エネルギー供給統合システム」の構築・運用は喫緊の課題と考える。

本書で説明する「カーボンネガティブ・エネルギーシステム」は、この大気中 CO₂ 除去とエネルギー供給を統合的に行う環境・エネルギーシステムのことで、このようなシステムを 21 世紀の中葉までに導入・運用することを想定する。

このシステムのエネルギー供給における主眼は；

- ◆ 供給する一次エネルギーは、現在の化石燃料主体に代わって再生可能エネルギーと原子力のみとする。
- ◆ エネルギーキャリアー（二次エネルギー）の構成を現在の燃料主・電力従から電力主・燃料従に変えてエネルギー効率を向上させ、エネルギーキャリアー生産に使用する一次エネルギーの使用量を抑制する。
- ◆ 定置用のエネルギー需要は熱需要を含めて電力で供給してエネルギー使用効率を向上させる。
- ◆ 運輸用のエネルギー需要は電動化により燃料需要を削減した上、配送インフラおよび取扱の便益から炭化水素の液体燃料を主として使用する。燃料成分中の炭素はバイオマスベースとする。なお、特別な用途には水素を使用する。

現在と将来の社会が使用する一次エネルギーとエネルギーキャリアー（二次エネルギー）の構成を表 1 に比較して示す。現在は化石燃料を主に使用しているので「化石燃料社会」と呼ぶことができるが、21 世紀中葉に実現すべき将来の社会は大気中 CO₂ 除去・

調整とエネルギー供給を統合的に行うので「カーボンネガティブエネルギー社会」と呼ぶことができよう。

表1 世界が使用する主なエネルギー：現在と将来

	エネルギー社会	主な 一次エネルギー	主な エネルギー キャリアー (二次エネルギー)	エネルギーキャリアーの製造に使用される 一次エネルギー 量の大小
現在	化石 燃料 社会 ----- 大気中CO ₂ の 増加	化石燃料 再生可能 原子力	化石燃料ベースの 燃料 (ガソリン、軽油、灯 油、都市ガス、...) 電気	製造に使用される 一次エネルギーは 燃料>電力
将来	カーボンネガティ ブ・エネルギー 社会 ----- 大気中CO ₂ の 除去・制御	再生可能 原子力	電気 バイオマスベースの 燃料 (一部水素)	製造に使用される 一次エネルギーは 電力>燃料

5. カーボンネガティブ・エネルギーシステム

21世紀の中葉までに導入・運用する「カーボンネガティブ・エネルギーシステム」のイメージとして、50年後の2065年時点のエネルギー供給ビジョンを以下定量的に示す。なお、実績データにはBP統計に基づく値を使用した。

① カーボンネガティブエネルギーの供給

2065年時点の世界の一次エネルギー供給は再生可能エネルギーと原子力により化石燃料使用量はゼロとし、さらに地球規模で循環している炭素の一部を安定隔離することにより大気中CO₂を除去して、実質マイナスCO₂排出(Net negative carbon emission)を実現する。

② 電力・主、非電力・従に電力化率を逆転

エネルギーキャリアーを電力と非電力エネルギー(液体、気体燃料など)に分けると、現在世界全体では電力(発電)に一次エネルギーの41%が供給されており、非電力エネルギーには同59%が供給されている。

今後、運輸用エネルギーの電動化、電気エネルギー貯蔵利用、熱供給へのヒートポンプ利用などを進めてエネルギー利用の効率を向上させるとともに、燃料の消費を削減す

る。

結果的に、電力の割合（電力化率）が上昇し、非電力の割合が低下する。2065年の電力化率（発電に使用される一次エネルギーの割合）は75%、非電力エネルギー（燃料製造）に使用される同割合は25%とする。（GtonOEは石油換算10億トン、エネルギーの単位）

電力化率（一次エネルギーベース）[%]

	電力	非電力
2000	38 %	62 %
2013	41 %	59 %
2065	75 %	25 %

③ 一次エネルギー（再生可能・原子力）の供給量

以下に述べる発電・燃料製造・エネルギー利用における変革を踏まえて、2065年の一次エネルギー供給量を20.8 GtonOEと想定する。

一次エネルギーの供給源と供給量 [GtonOE]

	化石燃料	再生可能	原子力	合計
2000	8.1	0.7	0.6	9.3
2013	11.0	1.1	0.6	12.7
2065	0.0	14.4	6.4	20.8

発電・燃料製造への一次エネルギー供給量 [GtonOE]

	発電	燃料製造	合計
2000	3.5	5.8	9.3
2013	5.3	7.5	12.7
2065	15.7	5.1	20.8

④ 再生可能エネルギーと原子力による発電

- ◆ 発電の一次エネルギーは再生可能エネルギー（水力、風力、太陽光、太陽熱など）と原子力から供給し、2065年の発電量の3/4（11.7 GtonOE）は再生可能エネルギー、1/4（4.0 GtonOE）は原子力からとする。
- ◆ 再生可能エネルギーと原子力発電から成る系統の需給の安定化・調整は、従来からの揚水発電などに加え、電動自動車と電力系統の双方向電力流通・統合制御、分散ヒートポンプ蓄熱制御、定置用電池、水素製造などの電力貯蔵により行う。

⑤ バイオマスと原子力による合成燃料製造

- ◆ 2065年のバイオマス処理量は年6 GtonCを標準ケースとして想定する。(GtonCは炭素10億トン、質量の単位)
- ◆ 非電力需要のための燃料製造はバイオマス中の炭素の水蒸気ガス反応→シフト反応→フィッシャートロプシュ反応により合成し、必要なエネルギーは原子力から供給する。
- ◆ 2065年の燃料需要に対しては、バイオマス処理量6 GtonCの20%をバイオ炭にした残りの80%(4.3 GtonC)の炭素含有分(発熱量にして2.7 GtonOE)と原子力(1.7 GtonOE)から製造する。
- ◆ 燃料は軽油相当の炭化水素合成燃料(発熱量2.8 GtonOE)として供給する。
- ◆ 2065年時点の炭素およびエネルギーのフローと収支を図4に示す。

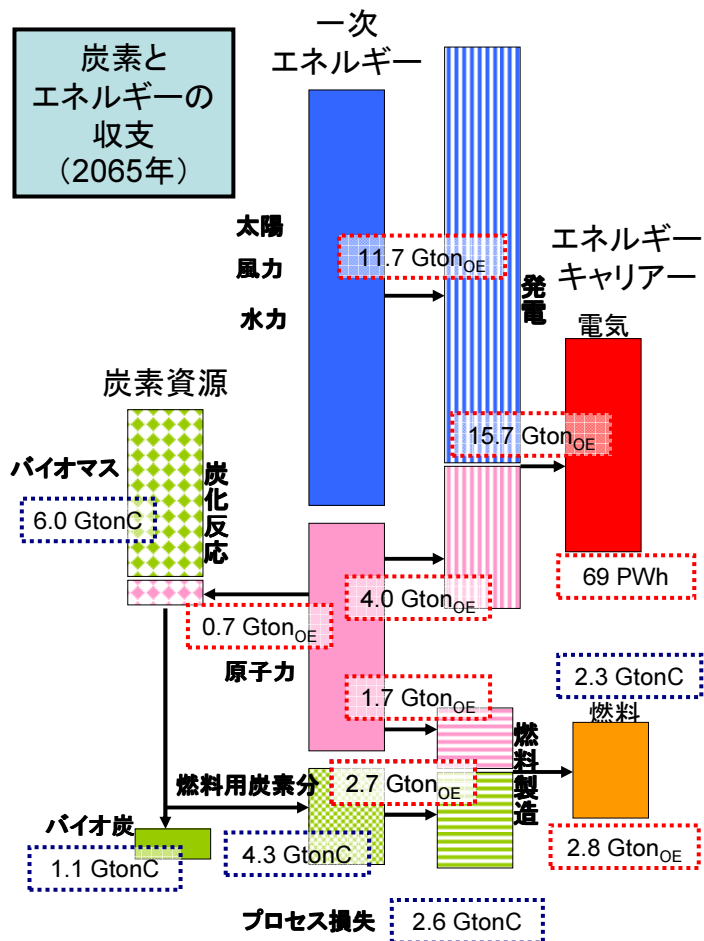


図4 炭素とエネルギーの収支 (地球規模、2065年)

⑥ 輸送用・産業用の非電力エネルギー供給

- ◆ 運輸部門のエネルギー消費の約70%を占める自動車は現在の約3倍に増加すると見込

まれているが、プラグイン自動車（PHEV と BEV）の導入によって液体燃料消費率を現在の 9 %（ハイブリッド化で 40%減、電力走行割合 0.85 のプラグイン化でさらに 85%減）にできるので、3 倍に増加する自動車の液体燃料消費量は 0.3 倍と減少する。なお、自動車の走行距離当たりの液体燃料+電力の全エネルギー消費量も 5 割以上減るので、3 倍に増加する自動車の全エネルギー（電力+燃料）消費量は 1.4 倍に抑えることができる。

- ◆ 液体燃料の移動用・分散型の動力用途への利用には燃料電池（SOFC）を用いて効率向上を図る。
- ◆ 増加する航空輸送の燃料は水素に切り換え、成層圏での CO2 排出を避ける。この供給には電力系統需給調整のために製造する電気分解水素を使用する。
- ◆ 産業用の大規模エネルギー利用（製鉄用還元、プロセス熱）はコンビナートなどに集中化し原子力から供給する。

⑦ バイオ炭による炭素循環からの隔離

- ◆ 大気中 CO2 の削減は、バイオマスを炭化して地上・空気中で安定なバイオ炭（固体炭素）にして利用／貯蔵して地球規模カーボンサイクルから隔離することにより行う。バイオ炭は炭化の条件により最大でバイオマス含有炭素分の 50%まで生成可能だが、2065 年の標準ケースでは 20%とした。
- ◆ 2065 年のバイオマス処理量 6 GtonC・バイオ炭生成量 20%の場合、炭素循環から隔離する炭素量は 1.1 GtonC となる。すなわち、必要なエネルギーを供給しつつ 1.1 GtonC の負排出を達成できることになる。因みに、2000-2005 年の大気中炭素増加量（正排出）は 4 GtonC。
- ◆ 生成する大量のバイオ炭（固体炭素）は、現在の工業用途以外に農業・林業（土壌改良材）、建設業（黒鉛構造材/炭素繊維などとして木材・プラスチック・コンクリート・金属などに代わる材料として利用）など、炭素・黒鉛材料の用途を拓げる。

⑧ バイオマスの量的確保

このプロセスに使用するバイオマス・有機炭素は、農業残渣、森林廃材、植林の成長分、エネルギー植物（藻類を含む）のほか、必要に応じて土壌中有機炭素、将来は人口光合成などを考える。

2050 年時点のバイオエネルギーの生産ポテンシャルについて Smeets ら⁽⁷⁾は、図 5 に示すように 4 つのシナリオによる評価で年 273~1471EJ の値を提示している。この中で廃材・残渣類による量は 58~75 EJ なので大部分は未利用地でのエネルギー植物による生産量となる。WEC、WEA、IPCC などの機関による 2050 年の推定量は 250~450 EJ 程度になっている。

今回の検討で想定した 2065 年のバイオマス処理量 6 GtonC は熱量にして 197 EJ な

ので、上記生産ポテンシャルの範囲内に入っている。

また、図 5 のバイオマス生産可能量から見て標準ケースの年 6 GtonC を超える年 10 GtonC のバイオマス処理も可能と考えられ、その場合にバイオマス中炭素の 50 %炭化により合成燃料 2.9 GtonOE 製造・バイオ炭 4.5 GtonC 生成という大きな CO2 除去効果が達成可能となる。この場合の原子力使用量は 2.9 GtonOE と 0.5 GtonOE 増加するのみ。

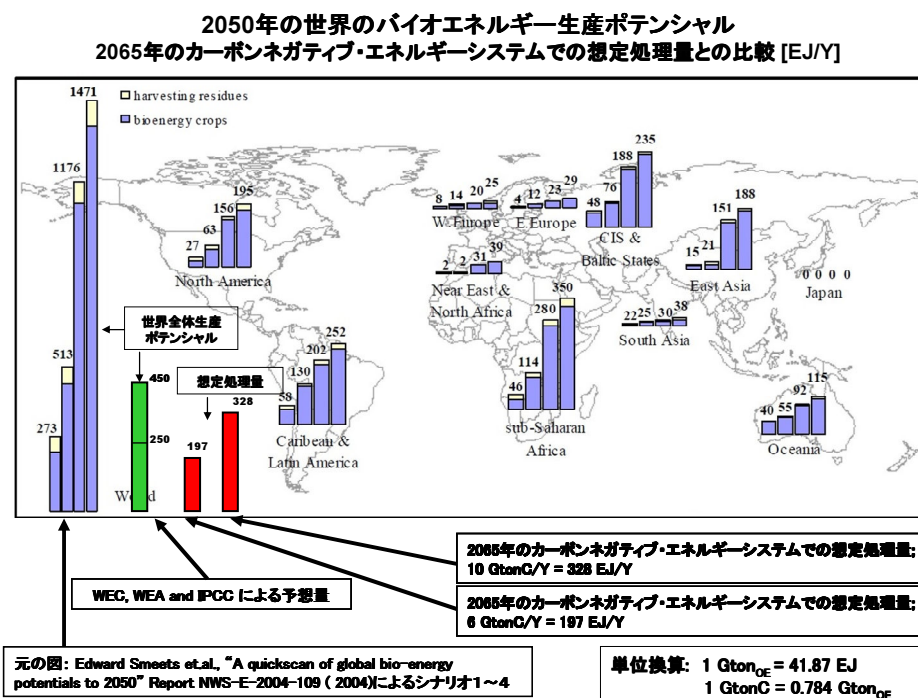


図 5 世界のバイオエネルギー生産ポテンシャルと想定処理量

⑨ 原子力エネルギーの持続的供給確保

- ◆ 発電とバイオマス処理に必要な原子力エネルギーの持続的供給確保のために、適切な燃料増殖性能を有する高速炉・燃料サイクルシステムを適時に導入する。
- ◆ 現実的条件による燃料サイクル評価⁽⁸⁾による 2065 年の原子力最大供給量は 7.2 GtonOE と評価されており、このビジョンにおける発電とバイオマス処理に要する原子力量 $4 + 2.4 = 6.4$ GtonOE の供給は可能と考えられる。(図 6)

⑩ システム運用の事業・資金・体制・産業

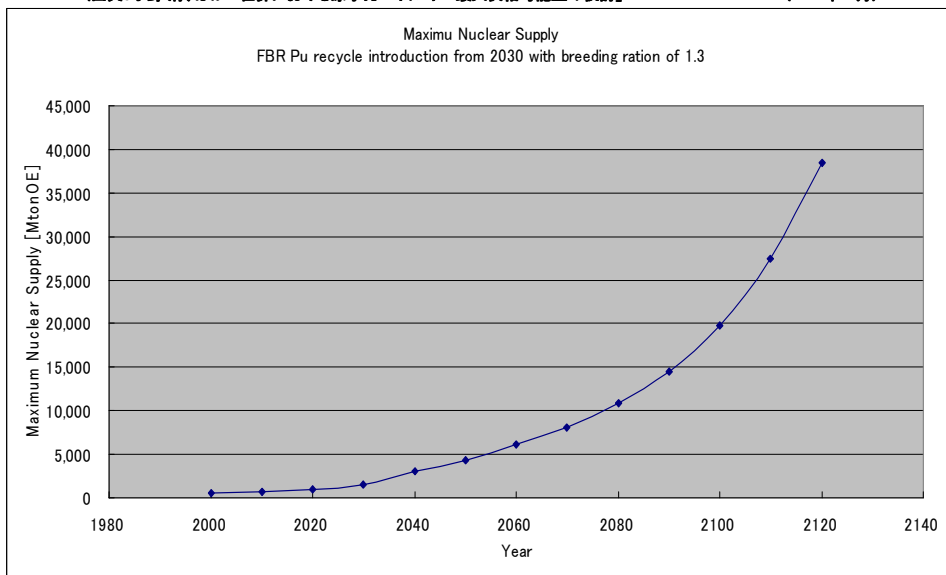
地球温暖化対策としての大気中 CO2 除去事業は世界規模の巨大な公共事業であり、国際的な資金確保流通・制度運用の仕組みを新たに構築していく必要がある。CO2 除去と統合的に運用される炭化水素燃料供給と合わせて、新たな環境・エネルギー産業の展開

が予見される。

原子力によるエネルギー最大供給可能量

FBR・Puリサイクル導入2030年、増殖率1.3

(出典:小野 清、ほか「世界における原子力エネルギー最大供給可能量の検討」JNC TN9400 2001-028(2000年12月)



換算: 一次エネルギー消費量(原子力分)(Mtoe) = $\sum \text{炉型}i [(\text{炉型}i \text{の発電設備容量}(\text{GWe})) \times 10E9 \times 24 \text{時間} \times 365 \text{日} \times (\text{炉型}i \text{の稼働率}) / 10E12 / (\text{熱効率}0.4) \times (\text{TWh} \rightarrow \text{Mtoe} \text{換算係数}0.086)]$

図6 原子力の最大供給ポテンシャル

6. まとめ

- ◆ エネルギーを持続的に供給しつつ大気中から CO2 を除去し CO2 濃度を許容範囲に調整可能な「カーボンネガティブ・エネルギーシステム」について検討した。
- ◆ 現在の地球温暖化の進行状態から、このようなシステムを 21 世紀の半ば頃までに構築・運用することが必要と考える。
- ◆ 提示したシステムでは、バイオマスと原子力からバイオ炭と炭化水素合成燃料を製造するプロセスを用いて、地球規模炭素循環から CO2 を効果的に除外すると同時に必要な燃料供給を行う。
- ◆ 構築した 2065 年時点のビジョンでは、一次エネルギー供給は再生可能エネルギーと原子力のみ、電力化率（一次エネルギーベース）は 75 %、非電力エネルギー供給はバイオマス・原子力ベースの炭化水素合成燃料、CO2 除去量（バイオ炭製造量）は 1.1 ~ 4.5 GtonC となる。
- ◆ 想定したバイオマス処理量は WEC などの評価による 2050 年生産可能量の範囲内、また原子力使用量は高速増殖炉・Pu リサイクル利用による原子力供給可能量評価の範囲

内である。

- ◆ このシステムの運用は、CO₂ 除去を行う世界規模の巨大な公共事業、同時に燃料供給を統合的に行うので新たな環境・エネルギー産業となり得る。

参考文献

- (1) The Royal Society Working Group (Chair; John Shepherd), “Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty” The Royal Society (September, 2009)
- (2) Fuss, S., et.al., “Betting on negative emissions” Nature Climate Change 4, 850–853 (2014), Adapted by Noah Deich at <https://carbonremoval.wordpress.com>
- (3) 堀 雅夫 「バイオマスの原子力炭化・ガス化による大気中炭酸ガスの削減」 木質炭化学会・第5回研究発表会 (2007年5月)
- (4) Hori, M., “Nuclear Carbonization and Gasification of Biomass for Removing Atmospheric CO₂” 2007 American Nuclear Society/European Nuclear Society International Meeting (Washington DC, November, 2007)
- (5) Hori, M., “Nuclear Carbonization and Gasification of Biomass for Effective Removal of Atmospheric CO₂”, Progress in Nuclear Energy (Published by Elsevier) Volume 53 Issue 7, p.1022–1026 (September, 2011)
- (6) Hori, M., “Nuclear Carbonization/Gasification of Biomass to Produce Biochar and Biofuel for Effective Removal of CO₂ from Atmosphere”, Oxford Conference on Negative Emissions Technologies (Oxford, UK, September 2013)
- (7) Smeets, E., et.al, “A Quicksan of Global Bioenergy Potentials to 2050” Progress in Energy and Combustion Science, Volume 33, Issue 1, p. 56–106 (February, 2007)
- (8) 小野 清ほか「世界における原子力エネルギー最大供給可能量の検討」 JNC TN9400 2001-028 サイクル機構 (2000年12月)

第2章 CO2の排出抑制からCO2の除去へ

本章では、地球温暖化への対策として実施されている「緩和」策と「適応」策に加えて、さらに積極的に地球気候の改善・回復を図る方策である「気候工学」技術について説明する。

1. 地球温暖化の進行と対策

2013年に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）から第5次評価報告書（AR5）の第1ワーキンググループ（WG1）報告書（自然科学的根拠）の政策決定者向け要約（SPM）が公表された⁽¹⁾。

このIPCC報告書は2007年の第4次評価報告書以来6年ぶりの改定で、この間に出された新たな研究結果に基づく地球温暖化に関する最新の知見がまとめられており、今後の議論に科学的根拠を与える資料となる。

主要な結論は

- 観測事実：気候システムの温暖化は疑う余地がない。1880～2012年において世界平均気温は0.85℃上昇した。
- 温暖化の要因：人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の主要な要因であった可能性が極めて高い。

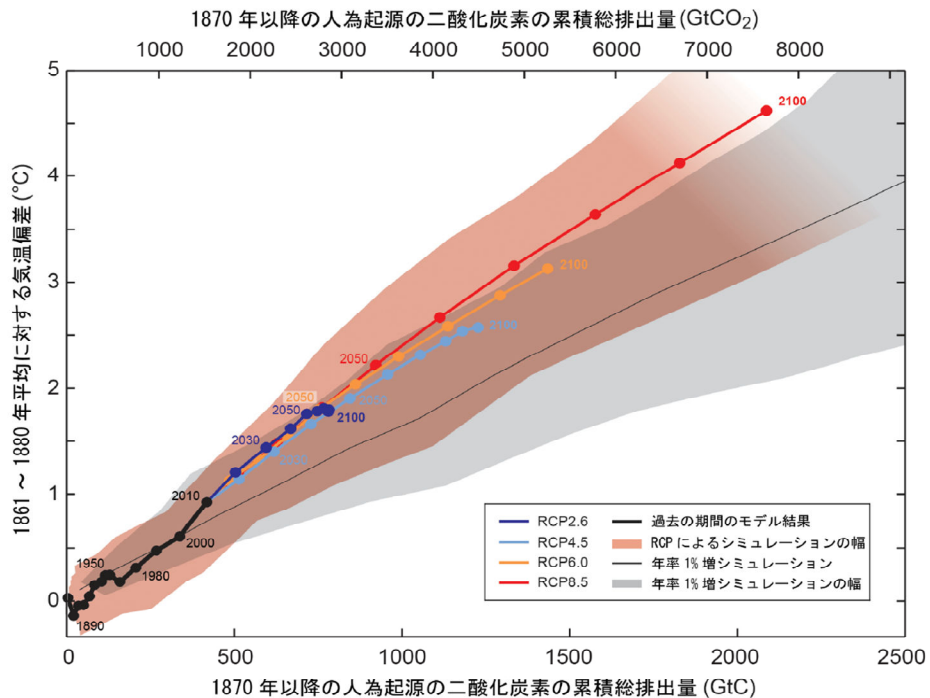


図1 CO2累積排出量と気温上昇⁽¹⁾

- 将来予測：世界平均気温の上昇（図1）に伴って、ほとんどの陸上で極端な高温の頻度が増加することはほぼ確実である。中緯度の大陸のほとんどと湿潤な熱帯域において、今世紀の末までに極端な降水がより強く、頻繁となる可能性が非常に高い。海洋へのさらなる炭素蓄積の結果、海洋酸性化が進行するであろう。

このような気温上昇に対して、その主因であるCO₂などの排出を削減して温暖化を抑制する「緩和」(mitigation)と、この緩和策が功を奏しても一定の気候変動による影響は避けられないのでその影響に対して予見的に社会経済的な対策を講じる「適応」(adaptation)の2つの対策が進められている。このために各種のエネルギー節減・CO₂排出抑制と並んで、化石燃料利用の際に出るCO₂を回収・貯留するCCS(Carbon Capture and Storage)などの技術開発が進められており、異常気象に備えて洪水対策や予報・避難対策などが進められている。

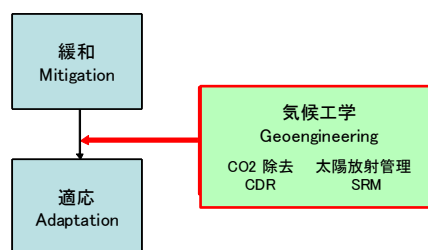
一方で、このような地球温暖化を抑制する「緩和」策を踏まえて、さらに積極的に地球気候を「改善・回復」する方策として、大気中からCO₂を除去する技術、およびそれと同様の効果が期待される技術の研究が行われている。

2. 地球気候を改善する技術 - 気候工学

地球環境を「改善・回復」するための技術は「(Climate) Geoengineering」と呼ばれている。Oxford English Dictionary (2010)で「Geoengineering」は”The deliberate large-scale manipulation of an environmental process that affects the Earth’s climate, in an attempt to counteract the effects of global warming”（地球温暖化効果を防止する試みとして地球の気候に影響する環境プロセスへの計画的で大規模な操作）と定義されており、杉山昌広著の「気候工学入門」⁽²⁾では従来の「地球工学」と区別する意味で「気候工学」なる言葉を用いている。

この気候工学には、大別して、①大気中からCO₂を回収してその炭素分を固定して地球規模の炭素循環から隔離する「大気中CO₂除去」(Carbon Dioxide Removal, CDR)と、②太陽からの入射を制限したり宇宙空間への放射を促進したりする「太陽放射管理」(Solar Radiation Management, SRM)の2つの方法がある。

(図2) 前者のCDRはCO₂を除去するので、マイナスの排出の意味で「ネガティブエミッション」(Negative Emission)とも呼ばれている。

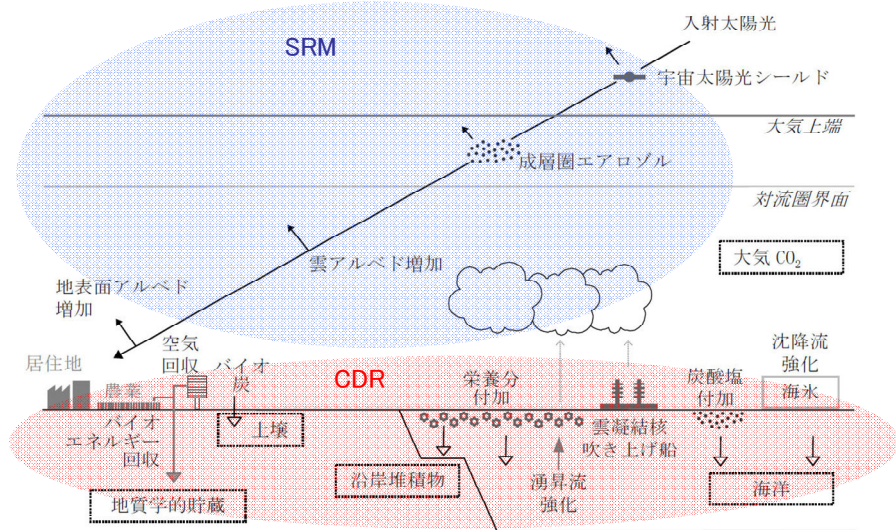


「緩和」策を踏まえて、さらに積極的に地球気候を「改善・回復」する方策として、大気中からCO₂を除去する技術およびそれと同様の効果が期待される技術が研究されている。

図2 地球温暖化対策

図3は、現在提案されている気候工学的技術、すなわち大気中CO₂除去(CDR)と太陽放射管理(SRM)の主な方法を一覽的に示したものの。

地球気候を改善/復元するための技術 太陽放射管理(SRM)と大気中CO₂除去(CDR)



杉山 昌広「気候工学(ジオエンジニアリング)に関する文献調査」電力中央研究所調査報告:Y09003(2010年)掲載の図を編集
原図の出所: Lenton TM & Vaughan N. "Radiative Forcing potential of climate geoengineering". Atmos. Chem. Phys. 9, 5539-5561 (2009)

図3 地球気候を改善・回復するための技術

気候工学の研究には各国政府や科学財団などが資金的に支援している。民間でも英国のVirginグループ創業者のRichard Bransonやマイクロソフト社創業者のBill Gatesの財団などが資金的な支援を行っている。この中でもVirginグループによる「Virgin Earth Challenge」は大気中のCO₂を除去する実用技術の実証に対し2500万ドル(30億円)の賞金を提供するコンペを2007年に開始して注目された。(右の記事はVirgin Earth Challengeの賞金提供を報じるBBC Newsサイト)

気候工学技術については、欧米を中

BBC NEWS | Science/Nature | Branson launches \$25m climate bid

Home News Sport Radio TV Weather Languages

UK version International version About the versions

BBC NEWS

The News in 2 minutes

Last Updated: Friday, 9 February 2007, 10:41 GMT

E-mail this to a friend Printable version

Branson launches \$25m climate bid

Millions of pounds are on offer for the person who comes up with the best way of removing significant amounts of carbon dioxide from the atmosphere.

Virgin boss Sir Richard Branson launched the competition today in London alongside former US vice-president Al Gore.

A panel of judges will oversee the prize, including James Lovelock and Nasa scientist James Hansen.

Sir Richard said humankind must realise the scale of the crisis it faced.

Existing options for carbon storage

"The Earth cannot wait 60 years," he said at the news conference. "I want a future for my children and my children's children. The clock is ticking."

He said if the planet was to survive, it was vital to find a way of getting rid of the greenhouse gas carbon dioxide.

He said he believed offering the \$25m (£12.5m) Earth Challenge Prize was the best way of finding a solution.

Moral challenge

Overseeing the innovations are James Hansen, the noted climate scientist and head of the Nasa Institute for Space Studies; the inventor of Gaia theory James Lovelock; UK environmentalist Sir Crispin Tickell; and Australian

心に多種多様な研究・開発が進められているが、この技術の効果・影響に利害関係を有する地域・国・産業などが広範なため、単に科学技術的課題の解決のみならず、社会的・倫理的・経済的・政治的・国際的な多岐にわたる課題の克服が必要と考えられている。とくに気候工学技術の実証・実施においては国際的な合意が必要な場合が多いと考えられ、適切な統治（Governance）メカニズムを確立する必要がある。そのために気候工学に関する国際的な会合では科学技術的な情報交流のほか、上にあげた広範な課題についても意見交換が行われている。

国際的な情報交流・意見交換

筆者は、気候工学に関する国際会合の一つ、2013年9月に英国で開催された「Oxford Conference on Negative Emission Technologies」に参加する機会を得た。この会議の議題は、CO₂除去技術のレビュー、政策化の準備、新技術への社会の反応、研究のネットワーク化、エネルギー・環境への影響、研究優先度・技術評価のクライテリアなど。各国から招かれた専門家約100人が参加し、17世紀に建造された由緒ある大学構内で2泊3日5食の合宿・会食で討論を行った。

筆者は2007年からバイオマスと原子力を用いたCO₂除去技術について研究し、国内外のバイオマスや原子力の学会で発表してきたのでこのオックスフォード会議に招かれたようだが、主催者の話では日本から招待したのは私一人とのことであった。

この会議は、大気中CO₂除去（CDR）を対象にしており、成層圏へのエアロゾル散布などの太陽放射管理技術は対象外となっていた。

なお、会議の進行はChatham House Ruleで行われた。これは「参加者はこの会議で得た情報は自由に公開して良いが、話した人などの所属・名前は公開しない」というルールで、公開性・情報共有・自由な討論を目指したもの。本書にはこの会議で得た情報も含めている。

3. 大気中CO₂除去の各種技術

地球規模の炭素循環（図4）において、光合成量から呼吸量を差し引いた約60GtonC/年（GtonCは炭素量にして10億トンの単位）の炭素量がバイオマス成長に伴って吸収される。森林などの植生中にはこのバイオマス成長の約10年分の炭素が存在し、土壌中にはバイオマス成長量の約30年分の炭素が存在し、自然の状態ではこれらの有機炭素の分解によるCO₂放出が光合成に伴うCO₂吸収と均衡して大気中CO₂濃度は安定してきた。しかし化石燃料燃焼による人為起源CO₂排出の増加によって大気中のCO₂濃度は上昇している。

海洋は大気より 2 桁大きい炭素を貯留し、大気との間で大量の CO₂ を交換し現在は約 2 GtonC/年の CO₂ 吸収になっている。そのため海洋の酸性化が進んでいる。

なお、地中の永久凍土の中には土壌中より大量の炭素が閉じ込められており、もしこれが気温上昇により融解すると分解して CO₂ を発生しポジティブ・フィードバックで大量の CO₂ が炭素循環に加わることが心配されている。

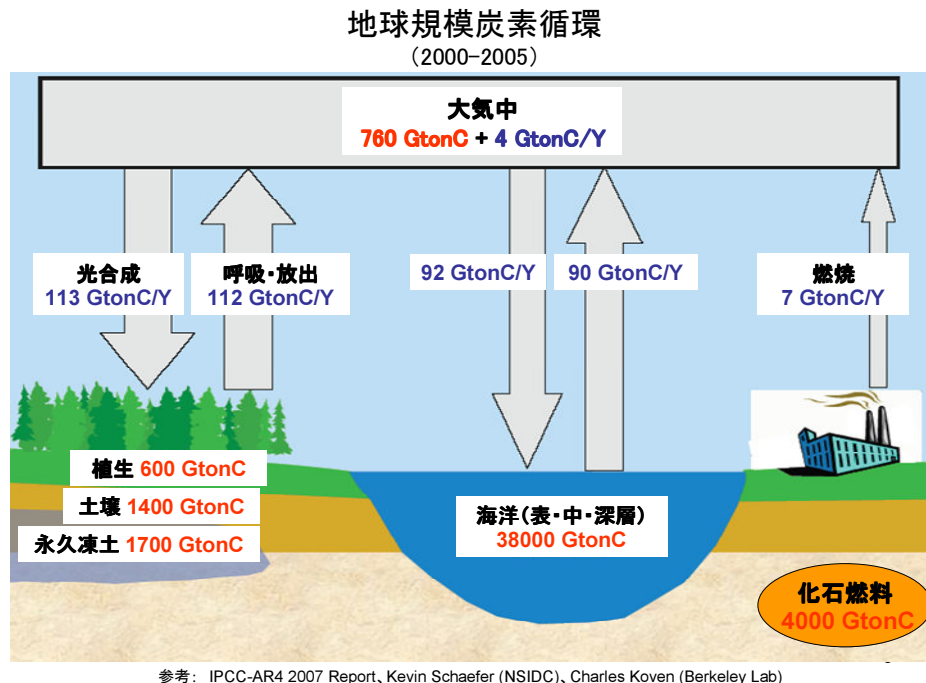


図 4 地球規模の炭素循環

このような地球規模の炭素循環メカニズムから CO₂ を除去する多くの方法が考えられ、研究が行われている。大別すると；

- ①大気中から CO₂ を回収・貯蔵
 - ・大気中から CO₂ を直接回収して貯蔵
 - ・自然の CO₂ 吸収作用（風化）を加速（陸上）
- ②バイオマス中の炭素分を CO₂ または C として回収・貯蔵
 - ・バイオマスで発電して CO₂ を回収・貯蔵
 - ・バイオマスから炭を製造・貯蔵、残りを発電/燃料製造
- ③海洋の CO₂ 吸収を促進
 - ・自然の CO₂ 吸収作用（風化）を加速（海洋）
 - ・海洋の肥沃化による CO₂ 吸収の促進

英国王立協会は 2009 年にそれまでに提案された気候工学技術を評価して、主な技術に

ついて表1のように効果・経済性・適時性・安全性の観点から評点を付けている⁽³⁾。

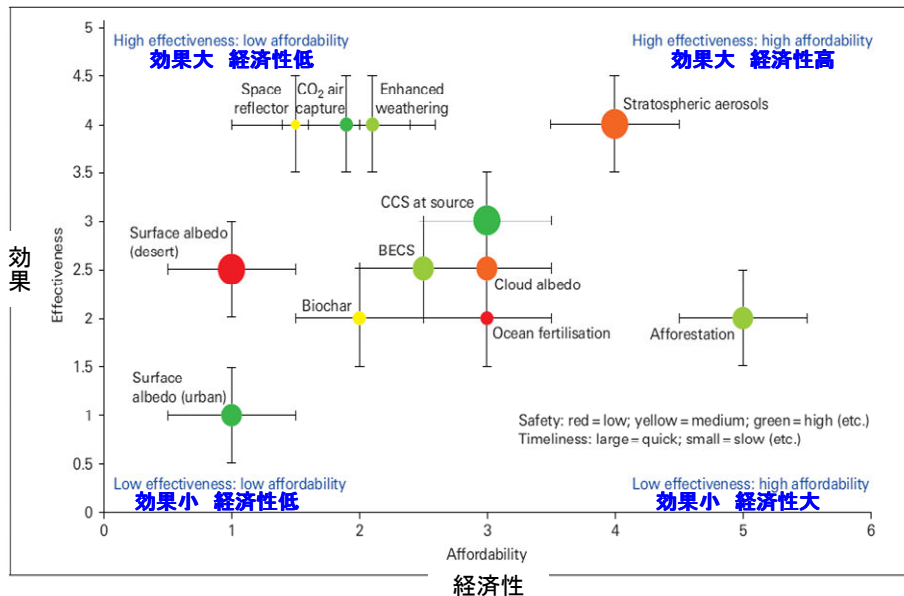
表1 Royal Societyによる気候工学技術の総合評価

気候工学技術の総合評価例

技術		効果	経済性	適時性	安全性
緩和	発生源でのCO ₂ のCCS	3	3	4	5
	植林	2	5	3	4
CDR	バイオ発電+CCS	2.5	2.5	3	4
	バイオ炭+バイオ発電	2	2	2	3
	加速風化	4	2.1	2	4
	大気中CO ₂ 直接回収	4	1.9	2	5
	海洋の肥沃化	2	3	1.5	1
SMR	都市部の反射率増加	1	1	3	5
	砂漠の反射率増加	2.5	1	4	1
	雲の反射率増加	2.5	3	3	2
	成層圏エアロゾル散布	4	4	4	2
	宇宙太陽光シールド	4	1.5	1	3

データ出所: The Royal Society, "Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty" (September, 2009)

気候工学技術の効果・経済性の評価例



図の出所: The Royal Society, "Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty" The Royal Society (September, 2009)

図5 Royal Societyによる気候工学技術の効果と経済性評価

図5は表1の評価結果を図示したもので、効果と経済性の評価値を縦軸と横軸の大ききで表し、適時性を点の大きさ、安全性を点の色（青が安全性高、赤が安全性低）で表している。

この Royal Society 評価項目は、Effectiveness（技術的に達成可能な効果）、Affordability（経済性、達成効果当たりのコスト）、Timeliness（適時性、必要なタイミングで実施可能か）、Safety（安全性、予想外の事象や環境への副作用がないこと）の4つ。

表1と図5にはCO2除去（CDR）技術5方法と太陽放射管理（SRM）技術5方法が掲載してあるほか、IPCCで緩和策に分類されている「発生源でのCO2のCCS」と「植林」を示しており、気候工学技術と緩和技術の特徴を理解する参考となる。

気候工学技術を地球規模で実施する場合に最も心配されるのは、「意図した効果」に付随する「意図せぬ影響」すなわち副作用である。図6において、濃色の矢印で示したCDR技術とSRM技術の適用による「意図した効果」に対して、薄色の矢印で示す「意図せぬ影響」が大きくなれば結局はエコシステムや人間社会に危険を及ぼす恐れがある。「安全性」の項目はこの点を評価したもの。

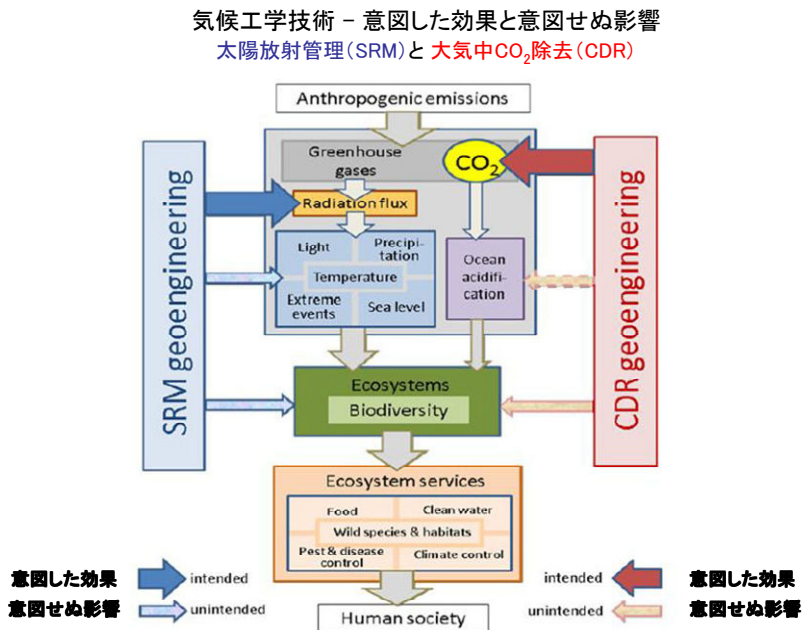


図6 意図した効果と意図せぬ影響 - 安全性の問題

上述の Royal Society の評価結果から主な気候工学技術について次のように言うこと

がだきる。

- SMR 技術の「成層圏エアロゾル散布」は、効果大・経済性高・適時性高だが安全性が低い。
- CDR 技術の「大気中 CO2 直接回収」(Direct Air Capture, DAC) は、効果大・安全性高だが経済性と適時性が低い。
- CDR 技術の「バイオマスエネルギー利用+CCS」(BECCS、BECS) は、安全性高だが、効果と経済性と適時性は中くらい。
- CDR 技術の「バイオ炭+バイオマスエネルギー利用」は、効果・経済性・適時性・安全性の 4 項目とも中くらい。

因みに前述の Virgin Earth Challenge では応募で集まった千件以上の提案を選考して、現在最終候補 11 件まで絞っている⁽⁴⁾。その内訳は、大気中 CO2 直接回収 5 件、バイオ炭 3 件、バイオマスエネルギー利用+CCS、加速風化、総合生態系各 1 件となっている。

今後、気候工学技術の研究・開発・実証が進むに従ってよりの確な評価が可能になっていくと考える。

ジオエンジニアリング（気候工学）に関するレポート

気候工学に関しては、関連する広範な学術分野における科学技術刊行物やマスメディアの記事、インターネットサイトによる情報交流・意見交換などが活発に行われている。

総合的なレビューレポートとしては、本章で参照している英国 Royal Society の 2009 年の報告書はその時点までの調査分析として参考になる。

一方、米国科学アカデミーが 2015 年 2 月に公表した「気候介入」に関する 2 部作は、最新の調査分析報告レポートとして参考になる。このレポートでは「Geoengineering」を使用せず「気候介入 (Climate Intervention)」という用語を使用している。

CDR 篇： National Research Council, “Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration” 140 pages (2015)

SRM 篇： National Research Council, “Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth” 234 pages (2015)

(何れも <http://www.nap.edu/> のサイトからダウンロードできる)

このレポートのサマリーに勧告として次の 6 項目が挙げられている。

1. 気候変動対策はおもに緩和策と適応策によるべきである。何故ならば、これらの方策には不完全に定義・定量化されたリスクがなく技術的な準備状態も良い。
2. CDR の技術の研究開発に投資すべきである。その場合に、温暖化減少に地球規模のインパクトがあるようなスケールの技術で、必要なエネルギー・材料消費の最小化、

リスクの定量化、コスト低下、隔離・監視の信頼性などに主眼をおくべきである。

3. 現段階では気候に変化をおこす規模での SRM は実施すべきではない。
4. SRM の研究計画作成・実施はすべきで、その際は気候システムやそのヒューマンディメンションの理解促進などの複合的利得に重点を置くべきである。
5. 米国は放射強制力の変化とそれによる気候の変化を検知し測定する能力を改善すべきである。
6. SRM の研究に関して次のような事項を検討する本格的審議プロセスを開始すべきである。(a) どのようなタイプの研究が既存の研究ガバナンスに加えてさらにガバナンスを必要とするか？ (b) 放射強制力への期待効果、あるいは有害な直接・間接的影響、その他の考慮に基づくときに、ガバナンスが必要な研究のタイプは？

3. CO2 除去による実質ネガティブエミッションのタイミング

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 5 次評価報告書 (AR5) では、気候システムの温暖化については疑う余地がなく、人間活動が 20 世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高いことなどが記述されている。

このような気温上昇に対して、その主因である CO2 などの温室効果ガスの排出を削減する CO2 回収貯蔵 (CCS) などの「緩和策」と温暖化の影響に対して予見的に対策をとる「適応策」が進められ、さらに本書の主題である温室効果ガスの CO2 を地球規模炭素循環から除去・隔離するネガティブエミッション技術の研究・開発が進められている。

IPCC 第 5 次評価 (AR5) の第 3 ワーキンググループ (WG3) 報告書には、「RCP シナリオ」に基づいた気候の予測や影響評価結果が示されている。RCP シナリオとは「代表濃度経路シナリオ」(Representative Concentration Pathways) のことで、代表的な濃度経路を下記のように複数設定して各経路について将来の気候を予測している。(RCP の後の数字は放射強制力 W/m^2 の値)

RCP 2.6 低位安定化シナリオ (将来の気温上昇を $2^{\circ}C$ 以下に抑える)

RCP 4.5 中位安定化シナリオ

RCP 6.0 高位安定化シナリオ

RCP 8.5 高位参照シナリオ (最大排出量に相当するシナリオ)

IPCC-WG3 の 1000 以上の排出経路による 2100 年までのシナリオ評価は図 7 のように整理される⁵⁾。図に示されているように 2014 年までの気温上昇実績は最も高い RCP 8.5 シナリオの線上に乗っている。

気温上昇を産業革命前に比べて $2^{\circ}C$ 未満に抑える RCP 2.6 シナリオの評価の大部分 (101/116 シナリオ) は 21 世紀の後半に地球規模で実質ネガティブエミッション (Net

Negative Emission) を想定したものである。また、中位安定化の RCP 4.5 シナリオにもかなりの割合 (235/653 シナリオ) で実質ネガティブエミッションを想定したものが含まれている。

このことは気温を低位安定化するには2070年頃から十分な量のCO2除去による実質ネガティブエミッションが必要なことを示唆している。

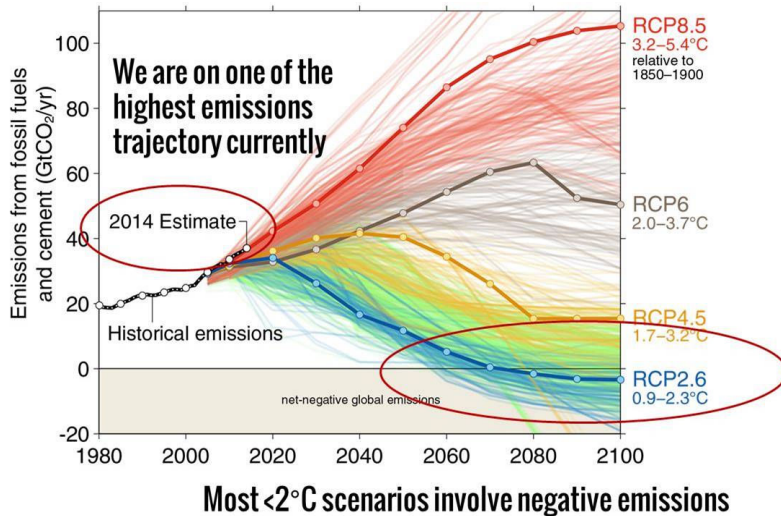


図7 IPCCシナリオ評価で気温上昇を2°C未満に抑えるには負排出が必要⁽⁵⁾

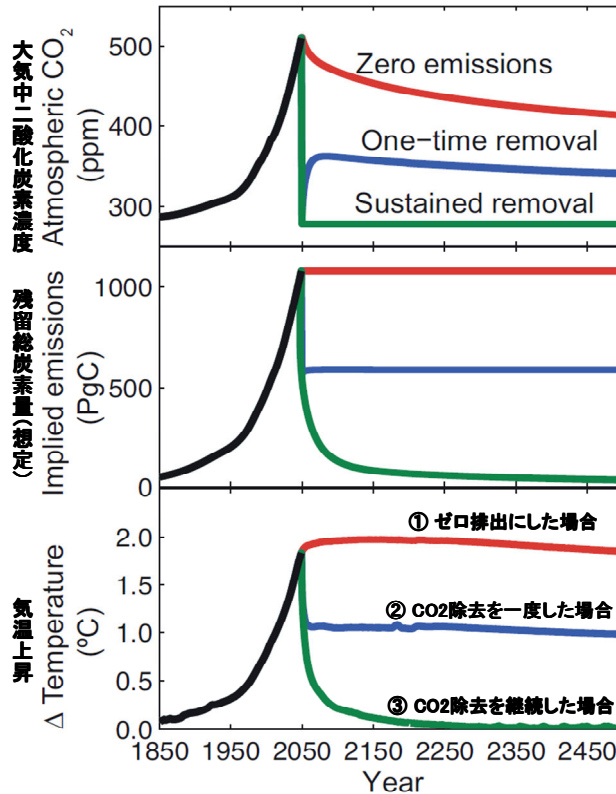
図7の評価ではネガティブエミッション技術として BECCS (バイオマスエネルギー利用+CCS) を想定している。この論文⁽⁵⁾では、BECCS 中の CCS (CO2 の地中貯留) について IEA の CCS ロードマップを引用して気温が安定化する規模の CCS の実施には莫大な努力が必要であり、その他の不確定性を含めてネガティブエミッション技術については現在検討中のもの以外を含めたより徹底した技術把握が必要と述べている。

大気中の過剰CO2を除去した場合に大気中以外の海洋や陸上に蓄積しているCO2が大気中CO2濃度の低下により放出されるために濃度のリバウンドが生じると考えられている。1750年の工業化以降、化石燃料燃焼により排出したCO2の約半量が海洋や陸上に蓄積している。そのため、大気中の過剰CO2(工業化以降の排出CO2の約半量)を全部除去しても気温の低下は工業化以前水準からの気温上昇巾の半分程度にしかならない。海洋などから放出されるCO2を長期継続的に除去する場合に気温を工業化以前の水準に戻すことが可能となる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

図8は、単純化したモデルを用いて大まかな傾向を評価した例⁽⁶⁾で、①2050年にCO2排出をゼロにした場合、②2050年に大気中のCO2を全部除去した場合、③海洋などからの放出CO2を継続的に除去した場合の3ケースについて、大気・海洋・陸上に残留する

CO₂ 総量を想定して、大気中 CO₂ 濃度と工業化以前水準からの気温上昇巾の変化を計算したもの。

①の「2050年にCO₂排出をゼロにした場合」は、気温上昇は2050年レベルの2°Cで高止まりする。②の「2050年に大気中のCO₂を全部除去した場合」は、半量のCO₂が除去されるがCO₂濃度はリバウンドし温度もそれに相当した値になる。大気中CO₂濃度と気温を工業化以前に戻すには、③の「海洋などからの放出CO₂を継続的に除去」する必要があり、このCO₂除去の総量は大気中CO₂量の約2倍となる。



原図: Ciais, P., et. al., "Carbon and Other Biogeochemical Cycles" IPCC-AR5 Chapter 6 (2014)
元のデータ: Long Cao and Ken Caldeira, "Atmospheric carbon dioxide removal: long-term consequences and commitment" ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS Vol.5 (2010) 024011 (6pp)

図8 CO₂除去による気温上昇の長期変化 (モデル計算結果)

要するに、CO₂除去による実質ネガティブエミッションを開始する時期は21世紀後半の早い時期が望ましく、工業化以前の気温レベルに戻すには大気中のCO₂のみならず海洋などからの放出CO₂も長期継続的に除去する必要がある。

参考文献

- (1) IPCC, "CLIMATE CHANGE 2013, The Physical Science Basis, Summary for

Policymakers” November, 2013 (気象庁訳、「気候変動 2013 自然科学的根拠 政策決定者向け要約」2015.1)

(2) 杉山昌広著「気候工学入門」(日刊工業新聞社 2011年)

(3) The Royal Society Working Group (Chair; John Shepherd), “Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty” The Royal Society (September, 2009)

(4) Virgin Earth Challenge “Removing Greenhouse Gases from the Atmosphere -- The Finalists” <http://www.virginearth.com/finalists/>

(5) Sabine Fuss, et. al., “Betting on negative emissions” Nature Climate Change 4, 850-853 (2014) 引用した図は Noah Deich (<https://carbonremoval.wordpress.com>) により加筆編集されたもの

(6) Long Cao and Ken Caldeira, “Atmospheric Carbon Dioxide Removal: Long-Term Consequences and Commitment” ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS Vol.5 (2010) 024011 (6pp)

(7) IPCC-AR5, “Climate Change 2013: WG I. The Physical Science Basis, Chapter 6. Carbon and Other Biogeochemical Cycles” Section 6.5 (2013)

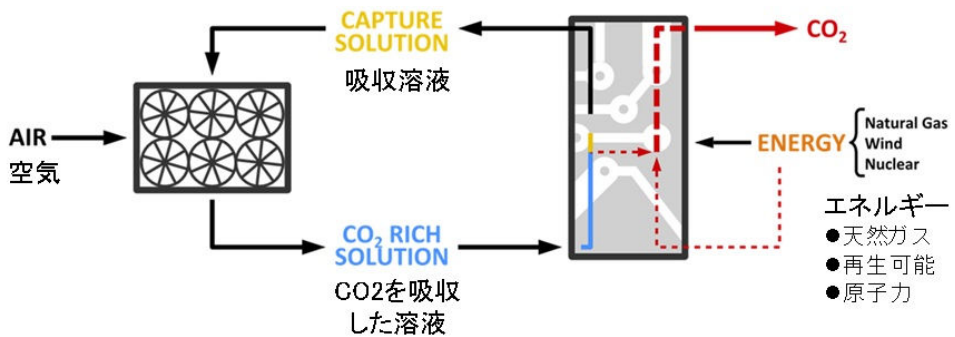
第 3 章 主な CO2 の回収方法と貯留方法

本章では、主な CO2 回収方法である「直接空気回収」(DAC) 方式、バイオマス利用の「バイオマスエネルギー利用+CCS」方式 (IPCC では BECCS と呼称)、同じくバイオマス利用の「バイオ炭生成+バイオマスエネルギー利用」(Biochar) 方式について説明する。

また、CO2 を回収した後の炭素の貯留方法として、CO2 を圧縮して地中に安定貯留する CCS 方式とバイオ炭を利用/貯蔵する方式について説明する。

1. 直接空気回収 (DAC)

空気中から直接 CO2 を回収する「直接空気回収」(Direct Air Capture, DAC) の方法は、図 1 および図 2 に示すように、空気中から CO2 を苛性ソーダ、苛性カリ、アミンなどのアルカリ溶液で吸収し、次にこの CO2 を溶液から脱着して、分離した CO2 を CCS の場合と同様に地中に安定的に貯留処分することから成る。



出所: <http://carbonengineering.com/air-capture/> の図を編集

図 1 直接空気回収の原理

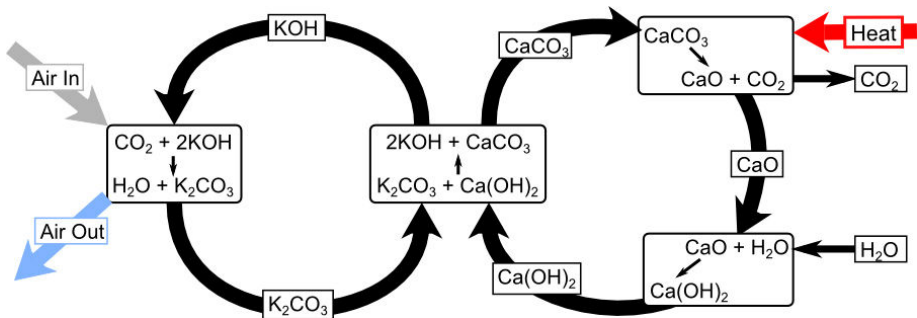


図 2 直接空気回収の吸着・脱着の化学反応 (Carbon Engineering 社の例)

火力発電所の排ガス中の CO2 濃度が 5%~15%程度であるのに対して大気中の CO2 濃度

は現在 400 ppm 即ち 0.04 % と 2 桁以上小さく、このような希薄な CO₂ の分離にはより大きなエネルギーを必要とする。ただ、気体中に混合している分圧 P の気体を分離するために必要な自由エネルギーは下式のように圧力比の対数に比例するので、理論的には空気からの分離に必要なエネルギーは煙道ガスからの分離エネルギーの 2 倍程度となる。

$$\Delta G = RT \ln(P/P_0)$$

実際には理論的に必要な分離エネルギーの数倍以上のエネルギーが必要であり、直接空気回収の評価例では必要なエネルギーとして 50～150 KJ/molCO₂ の値が示されている。

このような空気中から CO₂ を除去する技術は、以前から潜水艦や宇宙船で使用されているが、気候工学として使用する場合はその施設は桁違いに大規模なものになり、必要なエネルギーも莫大なものになる。(図 3、表 1)

一方この方式の利点は、直接空気回収の施設を CO₂ 排出場所と独立に回収・貯留操作に最適の場所に最適の規模で設置することが出来る点にある。回収した CO₂ の利用として地中貯留のほかにバイオ燃料用の藻類成長や油田の EOR (石油増進回収法) などへの供給も挙げられている。

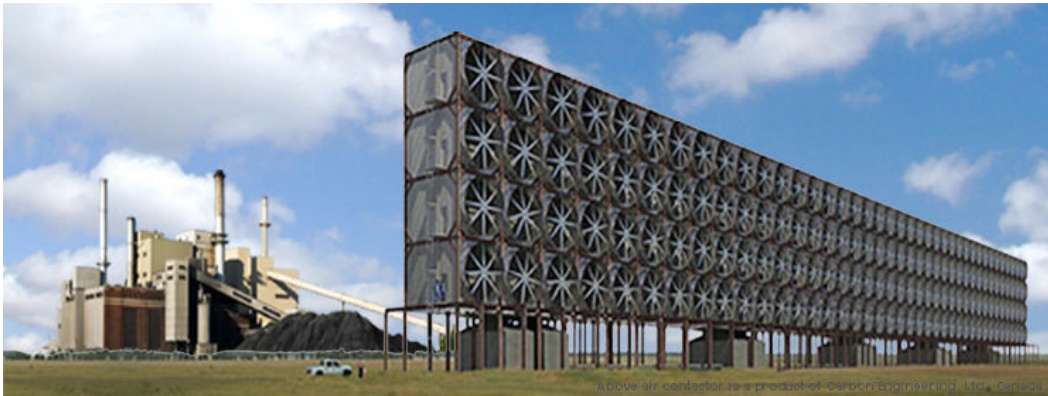


図 3 吸収液と空気を接触させる装置 Air Contactor のイメージ (Carbon Engineering 社)

2 章で述べたように Virgin Earth Challenge⁽¹⁾ の最終選考に残っている 11 件の CO₂ 除去プロジェクトの内の 5 件が直接空気回収方式であるが、その中でも表 1⁽²⁾⁽³⁾ に示す Carbon Engineering、Kilimanjaro Energy、Global Thermostat の 3 社はこの分野のバイオニアとして積極的に開発・実証を進めている。

直接空気回収方式の課題として挙げられているのは、①エネルギー必要量が多い ②除去のコストが高い ③回収した CO₂ の地中貯留の問題 ④資金確保の方法 ⑤社会的受容性 などであるが、この内、③は CO₂ の地中貯留の他の CCS 方式にも共通の課題であり、④と⑤は他の気候工学技術にも共通の課題である。

表 1 主な直接空気回収 (DAC) 方式

会社名	Carbon Engineering	Kilimanjaro Energy	Global Thermostat
開発リーダー	David Keith (ハーバード 大学教授)	Klaus Lackner (コロンビア 大学教授)	Peter Eisenberger (プリンストン大学 →コロンビア 大学教授)
資金源	Bill Gates などプライ ベートファンド	ベンチャー キャピタル	プライベート ファンド
CO2 吸収 /脱着	アルカリ溶液 /温度スィング	アミン溶液 /湿度スィング	アミン溶液 /温度スィング
開発段階	2012 年からプロトタ イプで実証試験中	ラボスケールで実証 試験中	2013 年から小規模モ デュールで日 2 トンの CO2 捕集試験中
CO2 除去コスト (開発者による)	長期的には\$100 /tonCO2 以下	理論推定\$25-\$40 /tonCO2、ビジネスプ ラン\$200-\$300 /圧縮 純化 CO2	不明 \$25 /tonCO2 に基づく モデル検討あり
CO2 除去コスト (評価者による)	\$165-600 /tonCO2	\$40-300 /tonCO2	
24 GtonCO2/年*の 除去に必要なエ ネルギー (評価者 による整理)	世界の全エネルギー 消費の 64 %	世界の全エネルギー 消費の 8 %	世界の全エネルギー 消費の 12 %
<p>本表は下記文献記載情報から編集</p> <p>McLaren, Duncan “A Comparative Global Assessment of Potential Negative Emissions Technologies.” Process Safety and Environmental Protection 90(6): 489 - 500 (2012)</p> <p>McLaren, Duncan “Capturing the Imagination. Prospects for Direct Air Capture as a Climate Measure” Case Study, Geoengineering Our Climate Working Paper and Opinion Article Series (2014)</p> <p>* 24 GtonCO2/年は現在の世界の CO2 排出量 (C 排出量では 6.5 GtonC/年)</p>			

表 1 に示されている CO2 除去に要するエネルギー量 (およびそれで左右される処理コスト) が直接空気回収技術固有の課題で、これらの値の見積では開発者と評価者 (米国物理学会、その他の研究者など複数) の間の差が大きく不確実であるが、世界の全エネルギー消費量の 8%~60%を要する点がこの技術の最大の問題点と言えよう。

2. バイオマスエネルギー利用+CCS (BECCS)

バイオエネルギー (Bio-energy, BE) 利用と CO₂ 回収貯留 (CO₂ Capture and Storage, CCS) を組み合わせて大気中 CO₂ 除去 (CDR) を行う技術を、IPCC 第 4 次評価報告書 (IPCC-AR4) では「BECCS」と呼称し CO₂ 濃度目標のためのキーテクノロジーとして取り上げており、IPCC-AR5 では WG3 のシナリオ評価に BECCS を取り入れている。なお、この技術は「BECS」とも呼ばれている。

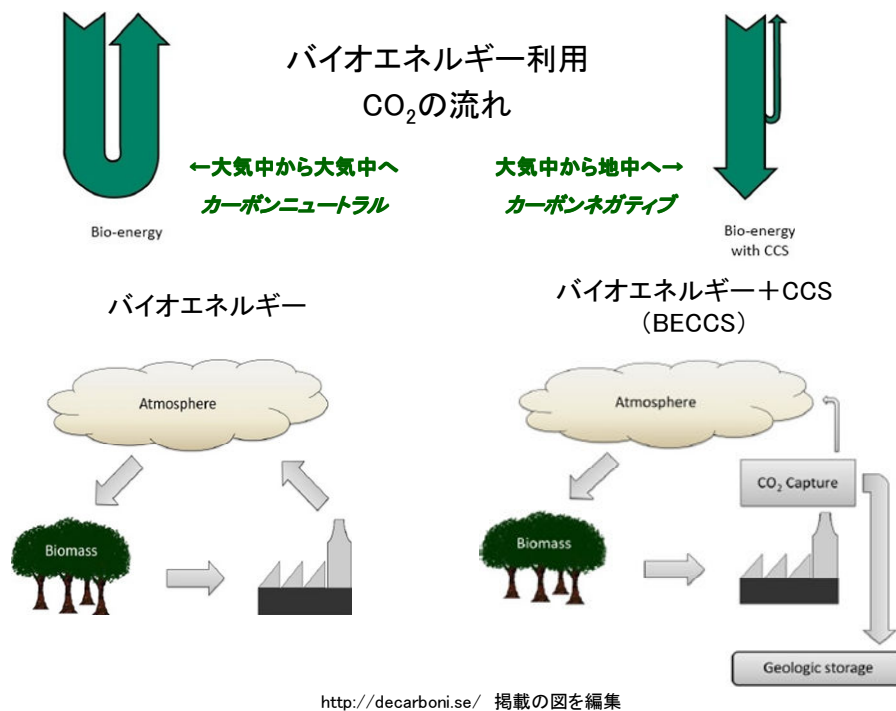


図 4 バイオエネルギー利用 - CO₂ 排出または CO₂ 貯留

図 4 に通常の「バイオエネルギー利用」と「バイオエネルギー+CCS 利用」の CO₂ の流れを比較して示している。「バイオエネルギー利用」では光合成で大気中からバイオマスに取り込まれた CO₂ はバイオマスでのエネルギー利用 (酸化・燃焼) によって CO₂ となって大気中に戻るため大気中の CO₂ の増減を生じない「カーボンニュートラル」となる。一方、「バイオエネルギー+CCS 利用」ではバイオマスのエネルギー利用の際に発生する CO₂ は回収して地中に貯留するので大気中から CO₂ を削減する「カーボンネガティブ」となる。

BECCS におけるバイオマスのエネルギーは熱供給、発電、バイオ燃料製造などに利用される。

図5は Virgin Earth Challenge の最終選考に BECCS 技術で残っている Biorecro 社⁽⁴⁾による世界最初の BECCS 試験プロジェクトの写真。このプロジェクトは USDOE の資金で 2011 年から実施中のものでエタノール製造プラントの排出 CO₂ を CCS で地中に注入している。



図5 2011 年から CCS 試験中の Biorecro 社の BECCS プロジェクト

3. バイオ炭生成+バイオマスエネルギー利用 (Biochar)

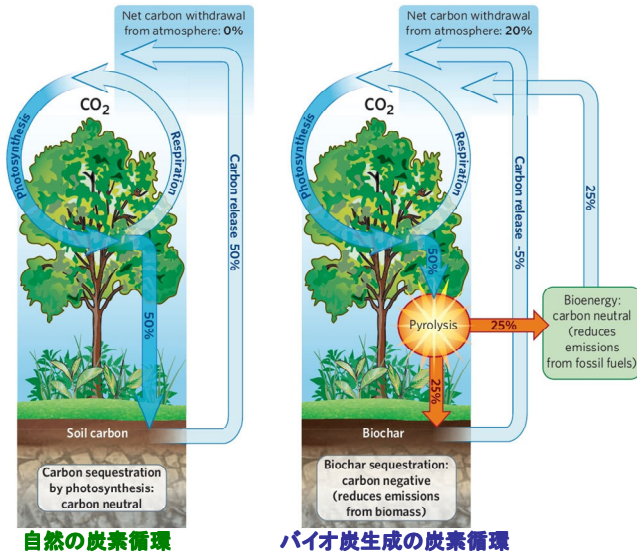
バイオマスから炭化反応（空気を遮断した状態での熱分解）によりバイオ炭をつくりこれを固体の炭の状態を利用・貯蔵し、炭になる以外の炭素分をエネルギー目的に使用すれば、バイオマスをエネルギー利用しつつ地球規模の炭素循環から CO₂ を除去することができる。

図6に自然の炭素循環とバイオ炭生成の炭素循環を比較して示す。

自然の炭素循環では、光合成の炭素の半分が呼吸で大気へ戻り、残りの半分の炭素がバイオマス成長に使われる。バイオマス中の炭素は植生から土壌へ移り、土壌中で有機炭素が分解して大気中に戻り、定常的な炭素循環が行われる。

一方、バイオ炭生成の炭素循環では、光合成の炭素の半分が呼吸で大気へ戻り半分のバイオマス成長に使われるところまで同じである。このバイオマスを炭化（熱分解）プロセスへ移して処理すると、条件により最大半分の炭素がバイオ炭になり、残りの気化物中の炭素がプロセス加熱、発電、燃料製造などに使用される。バイオ炭は地中・空气中で数百年から数千年の長期間安定なので炭素循環から隔離され、循環する炭素量が減少して、大気中の二酸化炭素濃度が低下する。

自然の炭素循環 光合成の炭素の半分が呼吸で大気へ戻り、半分がバイオマス成長に、バイオマスは植生から土壌へ、土壌中で有機炭素が分解して大気にもどり、定常的な炭素循環が行われる。



地球の温暖化 産業革命以降、石炭・石油・天然ガスなどの化石燃料の燃焼により、循環する炭素量が増加し、大気中のCO₂濃度が上昇し、温室効果により地球の温暖化を進んでいる。

バイオ炭生成の炭素循環 光合成の炭素の半分が呼吸で大気へ戻り、半分がバイオマス成長に、バイオマスは植生から炭化(熱分解)プロセスへ条件により最大半分の炭素がバイオ炭生成に、残りの(気化物中の)炭素が発電や燃料製造に使用される。バイオ炭は地中・空気中で数百年から数千年の長期間安定なので炭素循環から隔離され、循環する炭素量が減少して、大気中の二酸化炭素濃度が低下する。

図の出所: Lehmann, J. "A handful of carbon" Nature, p.143-144, Vol. 447 (10 May 2007)

図 6 自然の炭素循環とバイオ炭生成の炭素循環

木材などのバイオマスを酸素のない状態で 300~600℃の温度に加熱すると炭化反応(低温熱分解)により固体の炭と気化物 (Volatiles) が生成する。この固体の炭 (Charcoal) はバイオマスから生成するのでバイオ炭 (Biochar) と呼ばれている。

気化物の内、温度を下げた凝縮する成分はタールなどを含む乾留液 (Condensibles) と、酢酸・メタノール・アセトンなどを含む木酢液 (Pyroligneous Acid) になる。気体は木ガス (Wood Gas) と呼び、CO、メタン、水素、CO₂、酸素、窒素などから成る。



(写真⁽⁶⁾は森林廃材から生成したバイオ炭、バイオ炭によるCO₂除去研究のパイオニアのCornel 大学 Lehmann 教授)

上述の生成物の成分と分量は、バイオマスの種類、炭化の条件などで変わる。炭化反応の生成物のエネルギー量は、典型的な炭化条件では 1000kg の乾燥木材からバイオ炭 9500MJ、木ガス 1500MJ、乾留液など 8000MJ となり、バイオ炭以外の気化物は約半分のエネルギーを有するのでプロセス熱、発電、燃料製造などに使用できる。バイオ炭として利用・貯蔵する量を減らせば、その分エネルギー目的に使用する割合を増加させるこ

とができる。

なお、Virgin Earth Challenge の最終選考 11 件中には Biochar のプロジェクトが 3 件残っている。

4. 各回収・貯留方法の得失

4.1 直接空気回収とバイオマス利用

直接空気回収とバイオマス利用の特長の比較を表 2 に示す。直接空気回収が 400ppm 濃度の希薄な CO₂ を大気中から人為操作で物理化学的に回収する際に大きなエネルギーを必要とするのに対し、バイオマス利用は太陽光エネルギーが光合成により CO₂ を C₆(H₂O)₆ まで還元したものの採取するので、捕集/回収過程におけるエネルギー必要性が全く異なり、さらに回収したバイオマスからは酸化反応によりエネルギーを得ることができる。直接空気回収で回収した CO₂ はエクセルギー・ゼロなので基本的に再資源化などのエネルギー利用は得策ではない。

表 2 直接空気回収とバイオマス利用の比較

CDR技術		CO ₂ 直接空気回収 DAC	バイオ発電 +CCS BECCS	バイオ炭生成 +バイオ発電 Biochar
CO ₂ 捕集 回収	プロセス	物理化学的 人為的	生物学的 自然	
	方法	大気強制循環 化学吸収・脱着	光合成 バイオマス	光合成 バイオマス
転換 操作	化学反応	--	酸化燃焼	熱分解・炭化
	エネルギー利用	*	プロセス熱、発電	プロセス熱、発電
炭素隔離方法		臨界圧縮CO ₂ 地中貯留(CCS)	臨界圧縮CO ₂ 地中貯留(CCS)	単体C(バイオ炭) 地上・利用・貯蔵
備考		*油田EOR利用など。 *CO ₂ の再資源化は可能だがエネルギーリターンは負	エネルギー利用では 燃料製造も可能	エネルギー利用では 燃料製造も可能

一方、捕集方法に関しては、直接空気回収は回収操作と回収後の CO₂ 処理操作に最適な場所で空気を吸引すれば良いので地理的自由度があり工業的操作が可能であるが、バイオマスは農業残渣・森林廃材・エネルギー植物栽培・人工栽培藻類などを使用する場

合、この採取・集積・乾燥などのバイオマス調達・調整の段階で手間がかかる。

バイオマスのエネルギー利用は、これまではプロセス熱としての利用が最も多いが、今後バイオマス利用を大規模に行っていくときは、発電が主流になると考えられる。

バイオ炭生成+バイオマスエネルギー利用 (Biochar) のエネルギー利用としては燃料製造が考えられ、これを大規模に行う場合はバイオマスの熱分解生成物を水蒸気ガス化反応によって合成ガス (CO+H₂, Synthetic Gas) に転換して Fischer-Tropsch 反応による軽油合成などによって炭化水素燃料を製造する方法を普通用いることになる。このプロセスでは水蒸気ガス化反応が吸熱反応のために熱供給が必要であり、化石燃料を使用しないとするとバイオマス自身の燃焼で熱供給することになる。バイオマスから水素を工業的に製造するときもこの水蒸気ガス化反応を使用するので反応への熱供給は必要である。

次章で述べるバイオマスと原子力の協働プロセスでは、燃料製造のための水蒸気ガス化反応へ原子力から熱供給を行ってバイオマスの燃焼を不要にしてバイオマスから燃料製造の収率の向上と CO₂ 除去効率の向上を図っている。

4.2 CO₂ 地中貯留とバイオ炭利用貯蔵

本章で説明した CO₂ 除去方法の内、「直接空気回収」(DAC) と「バイオマスエネルギー利用+CCS」(BECCS) では、回収した CO₂ を地中に貯留する処分方式を採用しているが、「バイオ炭生成+バイオマスエネルギー利用」(Biochar) では、バイオマスの炭化によって生成したバイオ炭を地上で利用または貯蔵する方式を採用している。

CO₂ 隔離貯留技術 (CCS) は、火力発電所などの大規模 CO₂ 発生源の CO₂ を回収して隔離する技術として既に多くの実証試験が行われている。現在は、EOR (石油増進回収法) 利用も含めて油田や天然ガス田に貯留する方法や石炭層に注入する方法などが進められている。将来は、より広く貯留に適した地層構造を持つ場所を選定していくことになる。

CO₂ 除去 (CDR) 技術で回収した CO₂ を地中貯留する場合の最大の困難さは、その量の大きさである。図 7 に示すように、石油の年生産量 40 億トン・47 億 m³ に対してその燃焼により排出する CO₂ は重量が 124 億トンと約 3 倍になり、その CO₂ を 73 気圧の臨界状態に圧縮した体積は 265 億 m³ と約 6 倍になる (CO₂ の密度として臨界点の 304.1 度 K、7.38MPa の密度 0.469g/cm³ を使用)。すなわち、CO₂ 地中処分の取扱いの規模は石油供給の場合よりはるかに大きなものになる。CCS は現在は緩和策 (Mitigation) として行うことで進めているが、これを CDR により回収した CO₂ の処分まで拡大した時は処理量がさらに大きくなり、CCS はさらに巨大な事業になることが想定される。

石油とその燃焼から排出するCO₂の体積の比較

バイオ炭にすると体積は小さく地上で安定に貯留できる

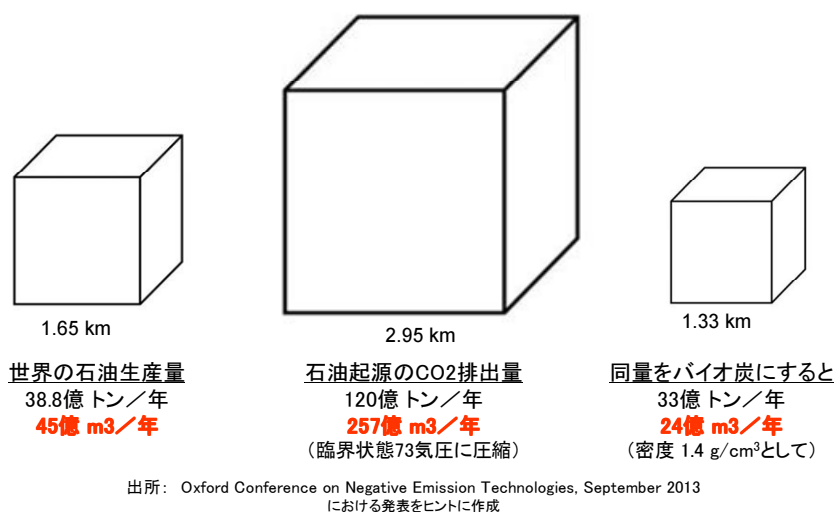


図7 石油と排出CO₂およびバイオ炭の規模の比較

図7に生産石油および排出CO₂に含まれる炭素と同量の炭素をバイオ炭とした場合の重量・体積も示してある。バイオ炭は圧縮CO₂の重量1/4・体積1/11と小さく、またバイオ炭は元の石油と比べても重量15%減、体積49%減と小さい。(バイオ炭の密度⁽⁷⁾として400°Cで炭化した場合の平均的な骨密度(Skeletal density)の1.4g/cm³を使用)

バイオエネルギー利用のCDRの内、「バイオ炭生成+バイオマスエネルギー利用」(Biochar)の場合にこのバイオ炭方式の処分が可能である。バイオ炭(木炭)は古来からエネルギー用途に使用され、現在は次のような各種用途に使用されている。身近な生活関連では水質浄化・調湿・消臭・鮮度保持・断熱・防音・融雪など、農業では土壌改良・無機質肥料・地温上昇材、工業では電極材・電磁波遮蔽材・炭素繊維、など。

CDRで生成されるバイオ炭については、農業・林業の土壌改良材としての用途が主に取り上げられているが、将来バイオ炭が大量に製造される場合には、上記の炭(Charcoal)としての用途のほか、炭を高温熱処理して黒鉛(Graphite)にして、構造材料・電気材料として建設業界や工業界に用途を拡大する可能性がある。

バイオ炭を地上・空气中・土壌中に放置した条件で酸化せずに存在する正確な期間については議論があるが、自然状態に存在するバイオ炭の年代推定から数百年から数千年間貯留可能と推定されている。エネルギー用途以外の用途に使用する場合は、酸化反応でCO₂を発生する条件でない場合が多くあり、バイオ炭は主用途とされている土壌改良材以外の各種用途でも利用しながら貯留の役割を果たすことができると考える。

参考文献

- (1) Virgin Earth Challenge “REMOVING GREENHOUSE GASES FROM THE ATMOSPHERE — THE FINALISTS” <http://www.virginearth.com/finalists/>
- (2) McLaren, Duncan “A Comparative Global Assessment of Potential Negative Emissions Technologies.” *Process Safety and Environmental Protection* 90(6): 489 - 500 (2012)
- (3) McLaren, Duncan “Capturing the Imagination. Prospects for Direct Air Capture as a Climate Measure” Case Study, *Geoengineering Our Climate Working Paper and Opinion Article Series* (2014)
- (4) Biorecro Company, “BECCS Project Illinois, USA” <http://biorecro.com/>
- (5) Lehmann, J. “A Handful of Carbon” *Nature*, p.143-144, Vol. 447 (10 May 2007)
- (6) Kurt Kleiner, “The Bright Prospect of Biochar” *Nature Report Climate Change*, 21 May (2009)
- (7) Catherine Brewer, “Controls on the Density and Porosity of Biochar” *USBI North American Biochar Symposium* (October, 2013)

第4章 バイオマスと原子力による協働的 CO2 除去方法

本章では、筆者が提案しているバイオマスと原子力の両方を使用して協働的に大気中の CO2 を除去する方法について解説する。

1. バイオマス・原子力協働プロセスのコンセプト

1.1 プロセスの構成

バイオマスと原子力の両方を協働的に用いて CO2 を除去するプロセス⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾を図1に示す。この方法は、原子力熱を利用してバイオマスを炭化する反応とその際発生する気化物を水蒸気ガス化する反応から構成される。

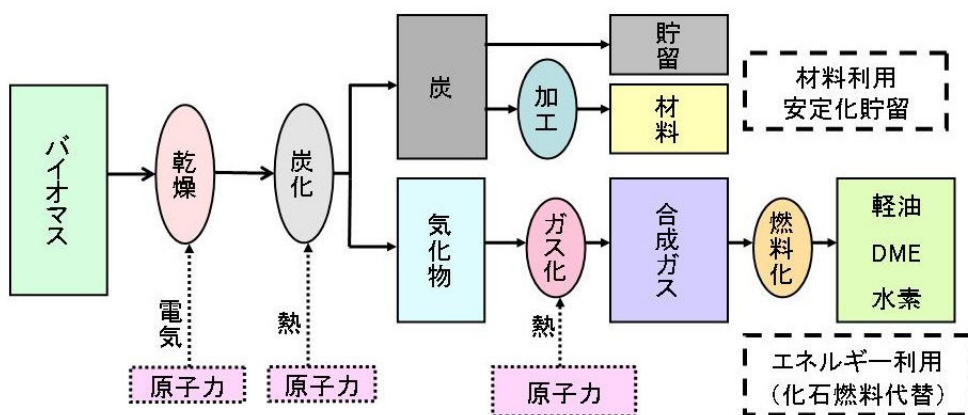


図1 バイオマス・原子力協働による CO2 除去プロセスの流れ

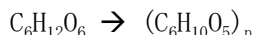
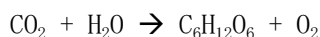
炭化プロセスで生成する安定固体の炭素（バイオ炭）の材料利用・貯留と、水蒸気ガス化プロセスで生成する合成ガス（CO+H₂O）の燃料化による化石燃料代替の両方の効果によって、地球規模炭素循環における大気中の炭素の除去が可能になる。

プロセスに必要なエネルギーを原子力から供給することは、処理するバイオマスに対する CO2 除去の効果を格段に大きくすることができる。本方法は第3章3節で説明した「バイオ炭+バイオマスエネルギー利用」方式と基本的に同じだが、プロセスに必要なエネルギーを原子力から供給するところが本方法の特長である。

1.2 炭素の反応

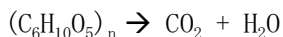
このプロセスにおける炭素の関わる反応を単純化して説明する。

大気中の CO2 と水から太陽光をエネルギーとして光合成反応でグルコース(ブドウ糖)と酸素を生成し、グルコースはバイオマスを構成するセルロースなどの炭水化物（多糖類）になる。

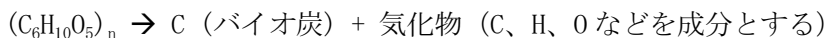


ここで、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ はグルコース、 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ はバイオマスを構成する炭水化物。

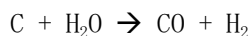
自然の炭素循環では、バイオマスは土壌中で微生物などにより分解して CO_2 になって大気中に戻る。



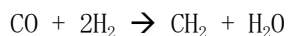
本プロセスでは、放置すれば分解して CO_2 になるバイオマスを炭化反応（空気を遮断した状態での熱分解）により炭素（固体の炭素、バイオ炭）と気化物にする。バイオマス中の炭素は条件により最大約 50%までバイオ炭になる。



気化物は、温度を下げると凝縮して乾留液・木酢液になる成分と CO ・メタン・水素などの気体から成り、この成分中の C（炭素）を水蒸気ガス化反応させると合成ガス（ $\text{CO} + \text{H}_2$ ）になる。



合成ガスは、そのまま気体燃料であるが、この水素分を調整してフィシャートロプシュ（Fischer-Tropsch、FT）合成反応などで液体燃料にすることができる。



ここで、 CH_2 は液体燃料（FT 軽油）の代表的組成比。

1.3 プロセスに必要なエネルギー

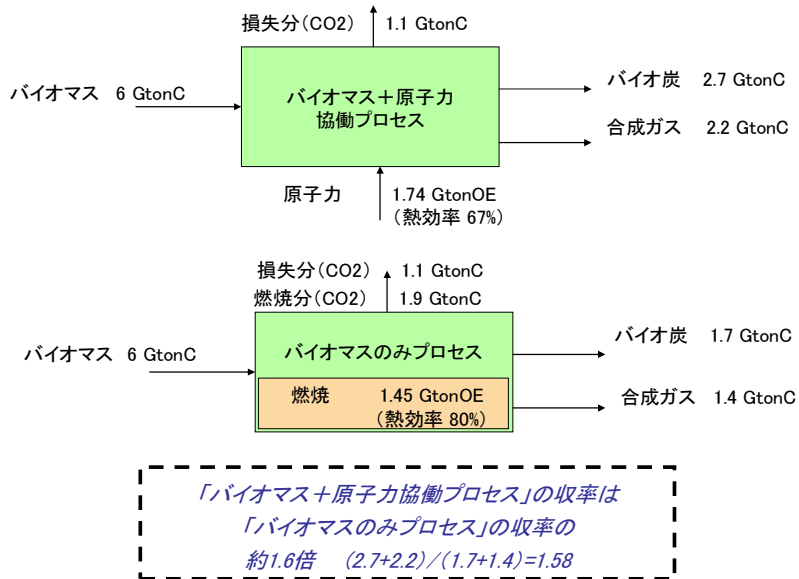
上のプロセスでは、通常はバイオマスの乾燥・炭化反応・水蒸気ガス化反応・液体燃料製造の各プロセスでエネルギーを必要とする。その中でも、水蒸気ガス化反応は大きな吸熱反応であり、これらのプロセスに熱供給する際に CO_2 排出を避けるには、再生可能エネルギーまたは原子力を使用することになる。バイオマスから燃料を製造するプロセスにおいてバイオマスの燃焼により必要エネルギーを供給する場合は製品である燃料の収率が燃焼した分低下する。このバイオマス処理プロセスが必要とするエネルギーを原子力から供給すれば、プロセスでの CO_2 排出量を削減し製品の収率を向上できる。

原子力利用の効果

「バイオ炭生成+バイオエネルギー利用」のプロセスの必要エネルギーを原子力から供給する協働的方法の効果について、簡単なモデルで評価してみる。下の図で「バイオマス+原子力協働プロセス」と「バイオマスのみプロセス」を比較したもので、原子力熱供給の場合の熱利用効率を 67%、バイオマス燃焼熱供給の場合の熱利用率を 80%と仮定した場合、「バイオマス+原子力協働プロセス」の収率は「バイオマスのみプロセス」の

収率の 1.58 倍となる。すなわち、同じ CO2 除去効果を得るのに、バイオマス処理量が約 6 割で済むことになる。

原子力によるエネルギー供給の効果



原子力によるエネルギー供給は CO2 排出がなく、多くの場合に熱コストが化石燃料や再生可能エネルギー（バイオマス）より低いので、化石燃料やバイオマスのエネルギー転換プロセスに原子力を協働的に使用する方法が検討されている。

協働的エネルギー転換プロセス ^{(5) (6) (7) (8) (9)}

協働的エネルギー転換プロセスとは、原子力から化石燃料・バイオマスなどの炭素資源に熱を供給し、高効率のエネルギー転換や炭素資源のノーブルユースを図る方法である。

一次エネルギーを転換 一次エネルギーの化石燃料（石炭、石油、天然ガスなど）、原子力、再生可能エネルギー（太陽、バイオマス、風力、水力など）は、通常はより使いやすいエネルギー形態の電気、ガソリン・灯油・軽油・都市ガスなどの「エネルギーキャリアー」（エネルギーを運ぶ媒体のこと、二次エネルギー～最終エネルギーとも呼ばれる）に転換されて、エネルギー利用に供されている。

エネルギーキャリアーには水素や合成燃料も 現在のエネルギーキャリアーは、石油や天然ガスなどの化石燃料から製造されるガソリン・灯油・軽油や都市ガスなどの「炭化水素」と、化石燃料・原子力・水力により発電される「電気」が主であるが、将来は

石炭や天然ガスの液化による「合成燃料」やバイオマスから製造される「バイオ燃料」、あるいは各種一次エネルギーから製造される「水素」もエネルギーキャリアーとして重要になってくると見られている。

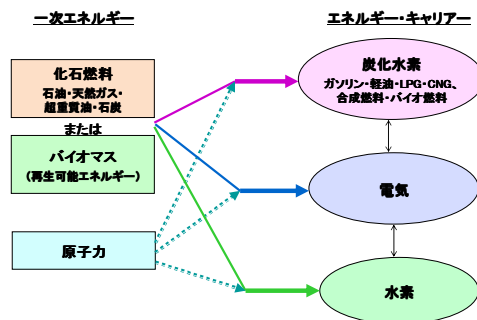
これまでのエネルギー転換方法 一次エネルギーからエネルギーキャリアーへの転換には、これまで、個々の一次エネルギーを単独に使用する「個別的」方法が用いられてきた。化石燃料や原子力を夫々単独で炭化水素燃料や電気に転換される。

協働的方法とは これに対して原子力+化石燃料あるいは原子力+バイオマスの様に両方を使用してエネルギー転換を行わせる方法を「協働的」プロセスと呼んで、そのメリット、可能性などを調べてきた。下の図では、協働的プロセスの中で原子力が絡む組み合わせ6通りを示している。原子力と化石燃料またはバイオマスの両方を夫々の特長を生かして使用する協働的プロセスを創出することによって、高い効率で炭化水素、水素、電気などのエネルギー・キャリアーに転換できる可能性がある。

エネルギーの転換・利用の流れ

一次エネルギー	→	エネルギーキャリアー (二次～最終エネルギー)	→	エネルギー利用
化石燃料 原子力 再生可能	エネルギー転換プロセス	炭化水素 (合成燃料、バイオ燃料を含む) 電気 水素	エネルギー利用	熱 動力・運輸 照明 電子・通信

協働的エネルギー転換プロセス
Synergistic Energy Conversion



原子力熱を化石燃料・バイオマスへ供給 原子力をエネルギー目的に使用する場合、利用可能なエネルギー形態は実際的には熱のみである。熱エネルギーをタービン発電機や熱化学分解法によって電気や水素に転換する場合、熱力学的サイクルを経るために、高熱源と低熱源の温度で決まる効率の制限を受ける。協働的プロセスの狙いは、発電、水素製造、合成燃料製造プロセスにおいて、熱を必要とする化学反応に原子力熱を供給し、これを反応生成物の化学エネルギーに転換し、その後のプロセスで有効に利用していかうと言うものである。原子力熱供給がなければこれらの熱は化石燃料の燃焼などにより供給されるものなので、その分の化石燃料の節減に資する

期待される効果 化石燃料やバイオマスと原子力の協働によるエネルギー転換プロセスにより、次の効果が期待できる。

- 化石燃料やバイオマスの燃焼不要によるこれら炭素資源の使用量の節減と CO2 排出量の削減、炭素資源のノーブル・ユースの増進

- 化石燃料/バイオマスと原子力の両方を高効率で利用するので両資源の節約
- 高効率の資源利用と安価な原子力熱コストによる経済性

原子力を使用した合成燃料製造の研究開発⁽¹⁰⁾

石油を精製してできるガソリン・軽油などの液体燃料は運搬・貯蔵が楽で輸送用として扱い易い。このため、天然ガス・石炭・バイオマスなどを原料として合成燃料・バイオ燃料の製造が行われている。

合成燃料（炭化水素燃料）はエンジンでの使用段階でのCO₂排出は避けられないが、合成燃料の製造段階での排出を減らす方策として、精製・合成・転換などの製造プロセスで必要な熱や水素などを原子力から供給する方法が検討されている。

原子力による合成燃料などの製造
プロセス検討例

プロセス	原料・炭素源	原子力供給	中間製品	最終製品例	検討者	備考
水分解	H ₂ O	熱 (1)	水素 H ₂	下記のプロセスの原料	各国	
超重質油回収・軽質化	CH _{1.5}	熱(水蒸気) 水素	合成原油SCO (CH ₂)	ガソリン 軽油など	加、南阿 米、日	オイルサンドから水蒸気でBitumen抽出、これに水素添加Upgrading
石炭ガス化	CH _{0.1}	熱 (2) 水素	合成ガス (CO+H ₂)	FT油 (4)	南阿、米GA	製造プロセスにおけるCO ₂ 排出は全体の半分、原子力により削減
バイオマスガス化	(C ₆ H ₁₂ O ₆) _n	熱 (2) 水素	合成ガス (CO+H ₂)	FT油 (4)	(日)	原子力使用により燃料転換率向上、CCSで大気中CO ₂ 削減
炭酸ガス還元	CO ₂	熱 水素 (3)	合成ガス (CO+H ₂)	FT油 (4)	日(東工大)、米GA	車上改質排出CO ₂ の循環利用。火力発電排出CO ₂ から燃料製造

- (1) 水分解水素製造 $H_2O \rightarrow H_2 + (1/2)O_2$ ・これらの化学プロセスでは、反応平衡から高温の方が好ましい場合が多い。→ 高温原子炉
- (2) 水蒸気ガス化反応 $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
- (3) 水性ガス逆シフト反応 $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$ ・炭素源側との整合上、とくにバイオマスの場合などは小型プラントの方が好ましい場合が多い。→ 小型炉
- (4) Fischer-Tropsch反応 $CO + 2H_2 \rightarrow 1/n(CH_2)_n + H_2O$

例えば、石炭から合成燃料を製造する場合、原子力による水素や熱の供給によって全排出の半分以上を占める製造段階でのCO₂排出を無くすることができるため最終段階までの全CO₂排出量を半減することができる。

合成燃料は原理的に炭素・水素（水）・エネルギーがあれば製造できるので、上の表に示すように石炭・バイオマスなどを原料として、これに原子力利用による水素・酸素・熱などを供給して中間製品の合成ガス（CO+H₂）を経てFT反応などにより炭化水素燃料を合成する。CO₂を炭素源として原子力などをエネルギー源とする合成燃料製造はエネルギー収支比（EPR、EROI）から得策ではないが技術的には可能である。

2. 定量的評価

地球の光合成によるバイオマスへの炭素固定量は年約 60 GtonC とし、この 1/10 を上記のプロセスで処理する場合について、炭化・ガス化による炭素の安定化量・燃料供給量およびプロセスに必要な原子力熱供給量の年あたりの概略値を評価する⁽³⁾。使用する単位は、バイオマス中の炭素の重量は GtonC (10 億トン炭素)、使用するエネルギー量は熱量に換算して GtonOE (石油換算 10 億トン)。

① 炭化処理するバイオマス中の炭素量 60 GtonC / 10 = 6 GtonC

このバイオマスは植生中のものである必要はなく、過去の成長の残渣など有機炭素であればよい。

② バイオマスの乾燥に要するエネルギー 0.22 GtonOE

バイオマスの水分含有量は水分量/乾燥バイオマス=0.5、1 トンの乾燥バイオマスは 0.4 トンの炭素を含有、乾燥は蒸気圧縮・凝縮加熱による潜熱回収で COP=6 を想定。このエネルギーは圧縮機動力として原子力電力で供給する。

③ バイオマス炭化に要するエネルギー 0.24 GtonOE

バイオマス炭化に要するエネルギーは生成する炭素熱量の 5%と想定。

④ 炭化プロセスの生成物 バイオ炭 2.7 GtonC 気化物 2.7 GtonC

炭化プロセスの収率は 90%と想定

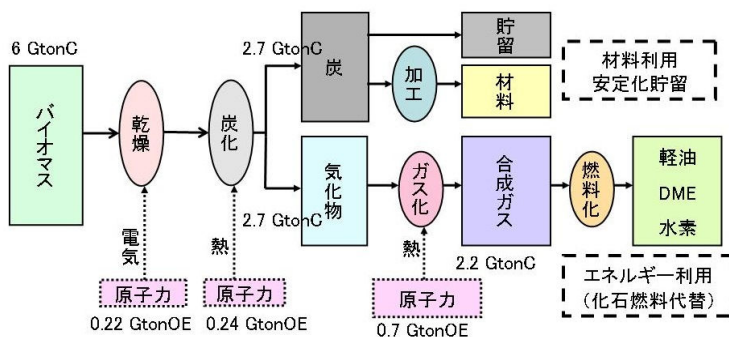
⑤ 気化物の水蒸気ガス化反応に要するエネルギー 0.7 GtonOE

水蒸気ガス化反応 $[C + H_2O \rightarrow CO + H_2]$ の吸熱量 131 kJ/mol を使用。

⑥ 水蒸気ガス反応で生成する合成ガス (CO + H₂) 中の炭素量 2.2 GtonC

水蒸気ガス化反応の収率は 80%を想定

(上記評価における想定・仮定の根拠については参考文献(3)を参照されたい)

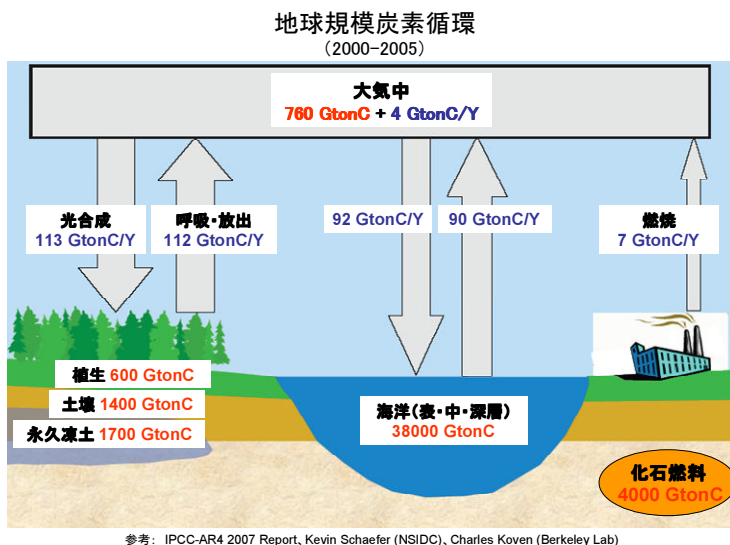


上の定量的評価における炭素収支をまとめると、光合成によるバイオマス年成長量 60 GtonC の 1/10 相当の 6 GtonC のバイオマスの処理によって、バイオ炭 2.7 GtonC とバイオ燃料 2.2 GtonC を生成する。

炭化によって生成するバイオ炭は、炭素化・グラファイト化して各種材料としての利用および炭のままでの利用・貯蔵の両方の場合とも、酸化・燃焼処分などをしない限り炭素の安定化した状態と考え、長期的には陸上・土壌からの腐敗・分解による炭素循環から除外して、その炭素量（年間 2.70 GtonC）を大気中から除去したと看做することができる。

一方、気化物のガス化を経てバイオマス起源燃料として循環使用する炭素量（年間 2.2 GtonC）は化石起源燃料を置き換えるので、その分量に相当する化石起源の CO2 排出を削減する。

それ故、長期的スパンで見るとこの CO2 除去プロセスを使用しない場合に比べて年間 $2.70 + 2.2 = 4.9$ GtonC の CO2 を削減することになり、これは下図（第 2 章図 4）に示す大気中 CO2 増加量の年間 4 GtonC より大きく、大気中 CO2 は減少に向かう。



なお、上記の評価において炭化プロセスの収率から 10% (0.6 GtonC) と水蒸気ガス化プロセスの収率から 20% (0.5 GtonC) の炭素は途中で失われることになる。これらの損失炭素は最終的に CO2 になって大気へ排出されると想定した。

3. エネルギー必要量と燃料供給量

3.1 プロセスが必要とするエネルギー

このプロセスで必要とするエネルギーは全て原子力から供給する。

上記定量的評価の場合の必要エネルギー（熱量単位 GtonOE）は次のとおり。

乾燥	0.22 GtonOE
炭化	0.24 GtonOE
水蒸気ガス化	0.70 GtonOE
小計	1.16 GtonOE
補器類・損失等	0.58 GtonOE (小計 x50%)
合計	1.74 GtonOE

すなわち、年 6 GtonC のバイオマス进行处理するのに原子力 1.74 GtonOE の熱量を必要とし、これは電気出力 100 万 kW の原子力発電所 900 基分の出力（設備利用率 85 %として）に相当する。なお、熱量換算は 1 GtonOE=1.163x10¹⁰ MWh、発電効率は 33 %（1000 MWe=3000 MWt）。

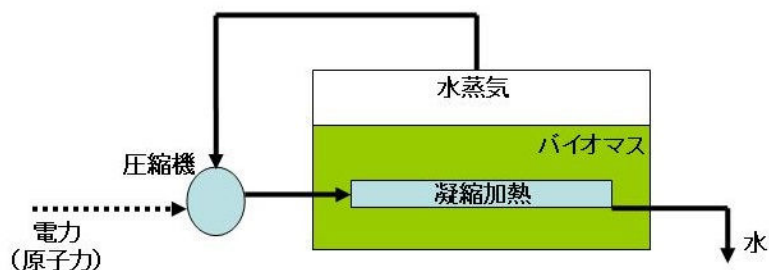
これから、1 tonC のバイオマス进行处理するのに必要な原子力熱量は 0.30 tonOE（3.5 MWh）、1 tonC のバイオ炭生成（炭素固定）するのに必要な原子力熱量は 0.67 tonOE（7.8 MWh）となる。

バイオマスの乾燥

このプロセスではバイオマスの乾燥に「蒸気再圧縮法」と呼ばれている蒸気圧縮凝縮乾燥法を用いた。この方法は、蒸発した水分（水蒸気）を圧縮して凝縮させて凝縮熱を乾燥加熱に使用するので、潜熱として使われた熱が回収され、乾燥量あたりのエネルギー消費量を小さくできる。乾燥のエネルギーは圧縮機駆動の電気動力として入力される。

本プロセスの場合には、この蒸気再圧縮法の成績係数（COP）の値として 8 程度が想定されるが、上の評価では COP=6 を使用した。それでも熱による通常の加熱乾燥の半分以下のエネルギー消費量で済む。

なお、新しく開発された潜熱と顕熱の両方を回収する「自己熱再生方式」⁽¹²⁾⁽¹³⁾を本プロセスに使用すると COP=20 以上が期待できるので、エネルギー必要量はさらに小さくなる。



3.2 プロセスが供給する燃料のエネルギー

このプロセスでは、水蒸気ガス化反応 $[C + H_2O \rightarrow CO + H_2]$ で合成ガス $[CO + H_2]$ を生成する。この合成ガスは気体の燃料であるが、これを FT 反応 $[CO + 2H_2 \rightarrow CH_2 + H_2O]$ などで軽油などの液体燃料を製造して供給することができる。

上記の定量評価におけるこれらプロセスが供給する燃料のエネルギーは；

合成ガス $[CO+H_2]$ のエネルギー量 2.26 GtonOE

FT 軽油 $[CH_2]$ のエネルギー量* 1.72 GtonOE

(* 合成ガスから FT 軽油を製造するときの水素量の調整をシフト反応 $[CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2]$ で行った場合)

この定量評価のケースでは、プロセスに供給した原子力熱量 (1.74 GtonOE) に対して、ほぼ同じ熱量 (1.72 GtonOE) の合成燃料を製造・供給することになる。パラメーターを変えて計算した結果では、バイオマス処理量 2~10 GtonC、バイオ炭の生成率 20%~50% の条件では、プロセスに供給する原子力熱量と製造される合成燃料の熱量は同程度 (差は 16%以内) となっている。

4. バイオマスの供給可能性

このプロセスに使用するバイオマス・有機炭素は、農業残渣・森林廃材・植木の成長分・エネルギー植物 (藻類を含む) のほか、必要に応じて土壌中有機炭素、将来は人工光合成などが考えられる。

将来どの程度の量のバイオマスをエネルギー目的に利用可能かについて多くの推定が発表されており、推定値に大きな差がある。例えば 2050 年時点のバイオエネルギー量では、年約 30 EJ から約 1500 EJ (0.72~36 GtonOE) のように 2 桁の差⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾がある。(1 EJ = 0.02388 GtonOE)

2050 年時点のバイオエネルギーの生産ポテンシャルでは、Smeets ら⁽¹⁶⁾は図 2 に示すように 4 つのシナリオによる評価で年 273~1471 EJ と巾のある値を提示している。この図で棒グラフの上部の薄色の部分は収穫残渣 (Harvesting residues) の量 (58~75EJ) なのに対して、棒グラフの下部の濃色の部分は未利用地でのエネルギー植物 (Bioenergy crops) による生産量で、どのシナリオでもエネルギー植物栽培が大部分を占めている。

IPCC の再生可能エネルギー源・気候変動緩和の特別レポート (IPCC-SRREN) における 2050 年時点のバイオエネルギーの生産ポテンシャルの評価⁽¹⁷⁾でも図 3 のように、巾のある値を提示している。IPCC-SRREN 自身のシナリオ評価では~300EJ/年、引用している WAB-Dornburg の評価⁽¹⁸⁾では~500EJ/年の値が示されている。

本章におけるバイオマス・原子力協働プロセスの定量評価においては 197 EJ/年 (年 6 GtonC) のバイオマス処理を想定している。また、第 5 章では 197 EJ/年 (年 6 GtonC)

から 328 EJ /年 (年 10 GtonC) の処理を想定している。これらの「想定処理量」の値は図 2 と図 3 の中に比較のために記入してあるが、IPCC などの機関の 2050 年の供給ポテンシャル推定範囲から見て可能性のある想定値と考える。

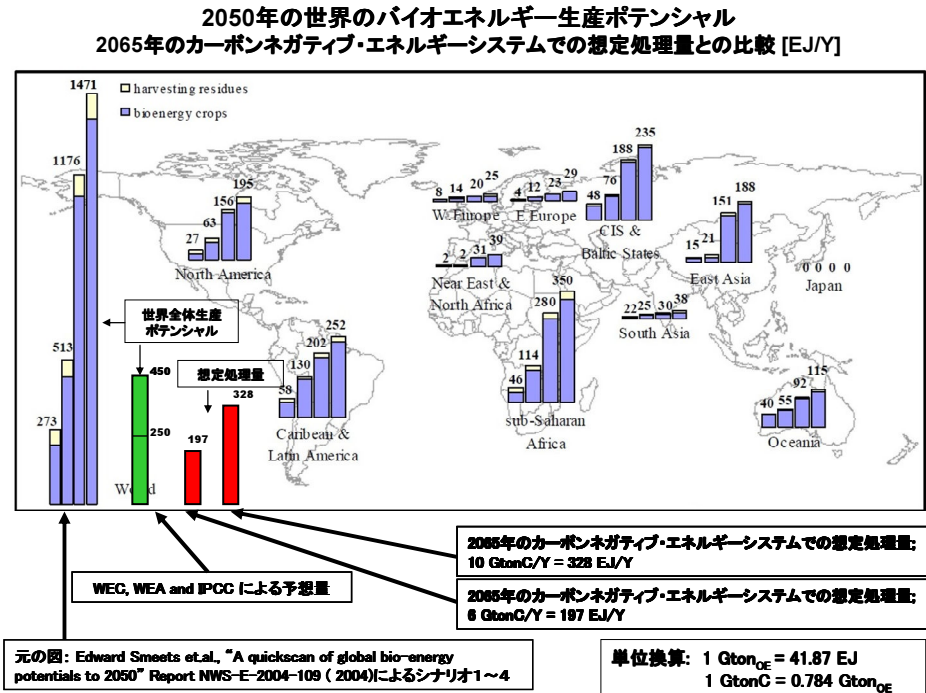


図 2 2050 年のバイオエネルギー供給ポテンシャル (16)

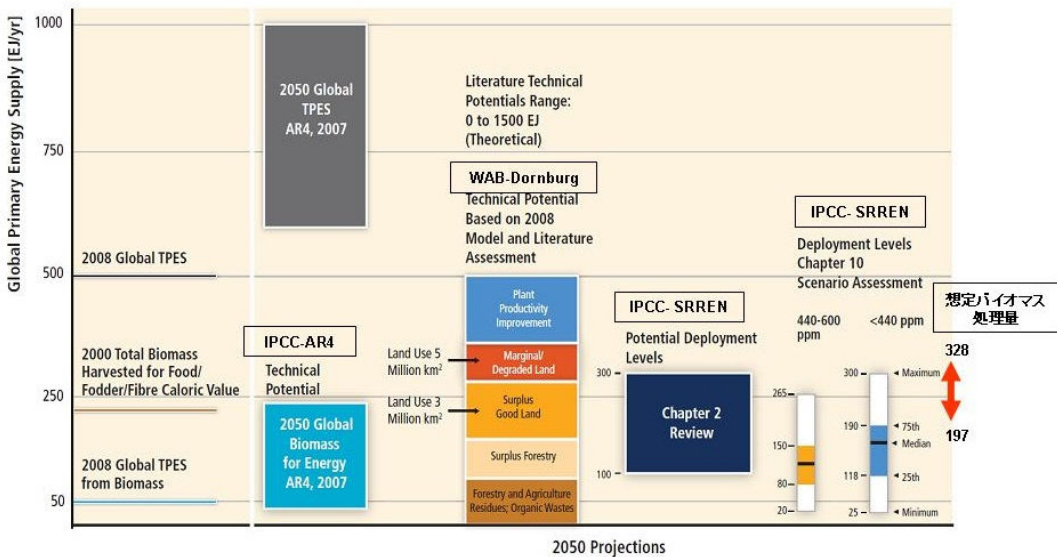


図 3 2050 年のバイオエネルギー供給ポテンシャル (17)

5. 原子力の供給可能性

5.1 原子力の供給量

このバイオマス・原子力協働プロセスが必要とするエネルギー量を原子力が発電への供給量に加えて 21 世紀後半に供給する可能性について考察する。

軽水炉のような熱中性炉による原子力利用では、21 世紀のようにエネルギー消費量が急激に増加する場合、原子燃料（天然ウラン中の核分裂性物質 U-235）の資源量（現実的に入手可能な量）から 21 世紀後半には原子力供給量に限度がくると見られている。

一方、高速中性子を利用した増殖炉で燃料の増殖・リサイクル利用を行えば、資源利用効率が 100 倍以上に増加するので、同量の燃料から 100 倍位上のエネルギーを取り出せる。ただし、21 世紀のようにエネルギー消費量が急激に増加する場合、高速増殖炉の導入が集中すれば燃料インベントリー（原子炉と燃料サイクルを動かすために必要な初装荷燃料などの在庫容量）が増加するために、原子力による持続的供給を維持するためには、計画的な軽水炉-高速炉移行戦略が必要になってくる。

原子力エネルギー最大供給可能量

原子炉の炉型によって供給量は変わる

原子力の核分裂反応によるエネルギー供給量は、使用する原子炉の炉型と燃料利用の方式によって異なる。炉型・利用方式としては、軽水炉でのワンスルー（ウラン燃料を 1 回だけ使用する）、軽水炉でのプルサーマル（ウランの核分裂で出来たプルトニウムをウラン燃料に混ぜて軽水炉で使用する）、高速増殖炉でのプルトニウムのリサイクル利用（プルトニウムを高速増殖炉の燃料としてリサイクルして増殖して使用する）などが代表的なものである。

これらの原子炉型・燃料利用方式のどれを使うか、あるいはどのように組み合わせて使うかによって、原子力によるエネルギー供給可能量は変わる。

原子燃料の量

世界の天然ウラン資源（経済的に採取可能なもの）は、確認された量がウラン金属にして約 400 万トン、これにまだ確認されていないが採掘が期待できるものを含めた資源量は約 1600 万トンと推定されている。

天然ウランに約 0.7%含まれる核分裂性物質のウラン 235 と、この核分裂反応がもとになって生成される核分裂性プルトニウムが、核分裂エネルギーの主な発生源として使用できる。

軽水炉の中で出来るプルトニウムの一部はその炉内で核分裂し、残りのプルトニウムは使用済み燃料を再処理して取り出し、軽水炉のプルサーマルや高速増殖炉の燃料とし

てリサイクル利用することが出来る。

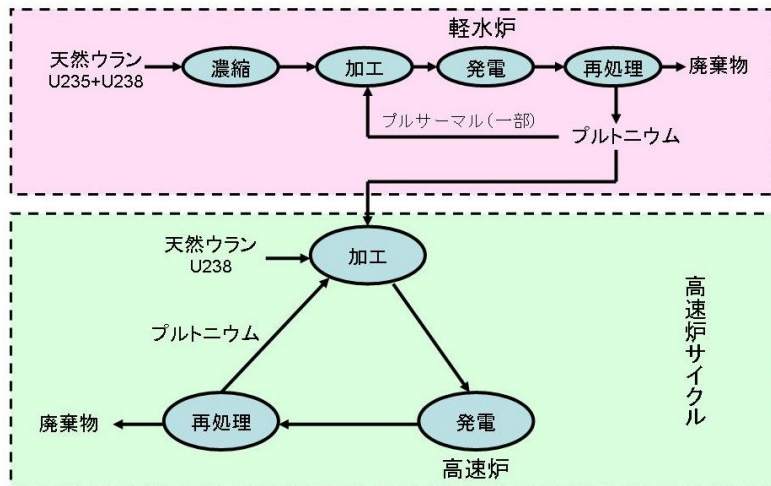
高速増殖炉が必要

世界的に地球環境保護のために温暖化ガスを出さない原子力の供給量を今後増やしていく必要があるが、軽水炉での利用では 21 世紀の半ば過ぎ頃からウラン資源が不足してくると見通されている。

高速増殖炉が実用化されればウランの有効利用により原子力による持続的なエネルギー供給が可能になるが、このためには予想される原子力の需要増加に応えるために軽水炉システムから高速増殖炉システムへの移行のタイミングと高速増殖炉の性能が重要になってくる。

プルトニウムリサイクル

高速増殖炉によるプルトニウム利用を本格的に開始するには、図のように最初は軽水炉の使用済み燃料を再処理して得られるプルトニウム（核分裂性物質）を使用する。一旦、高速増殖炉により発電・再処理・加工のサイクルが回りだした後は、エネルギー発生量に見合う少量のウラン 238（天然ウラン、劣化ウランなどの核原料物質）だけを補給すれば良い。（過渡的には高速炉でも U235 を核分裂性物質として使用）



プルトニウム燃料の必要量

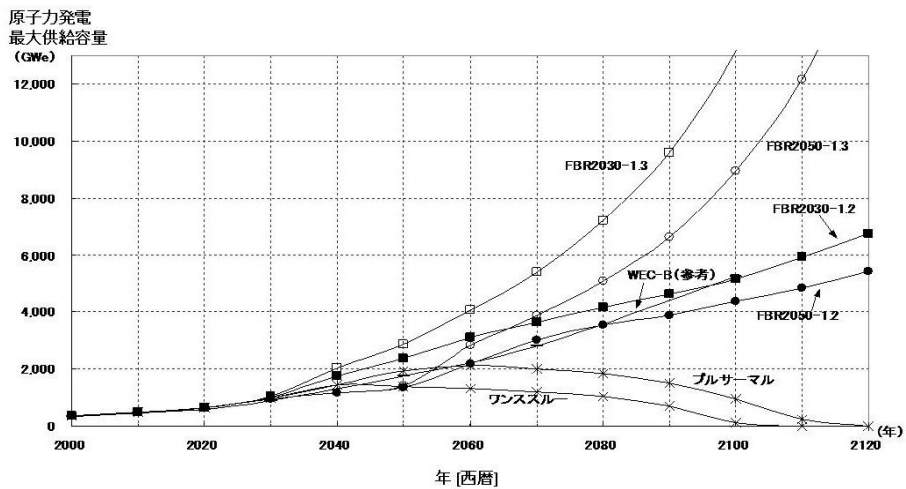
代表的な値としては、電気出力 100 万 KW（1 GW）の高速増殖炉には核分裂性プルトニウム 3.6 トンが炉内装荷用として必要であり、炉外での再処理、加工のために炉内量の約半分のプルトニウムが必要なので、合計で 5.4 トン程度のプルトニウムが 100 万 KW の高速増殖炉をその燃料サイクルとともに始動するのに必要になる。このプルトニウム量は同じ 100 万 KW 出力の軽水炉での核分裂プルトニウムの生成量(0.1~0.12 トン/年)の約 50 年分に相当する。

すなわち、軽水炉から高速増殖炉への移行において、高速増殖炉サイクルを始動させるに必要なプルトニウムを得るためには、軽水炉の相当[基数 x 期間]の運転が前提となる。

高速増殖炉による原子力エネルギー供給可能量

現実的な条件で高速増殖炉システムを使用する場合の今後 100 年間の原子力供給可能量を計算してみると下図のようになる⁽¹⁹⁾。使用する燃料は、世界の天然ウラン資源と使用済み燃料、それに解体核兵器などに含まれるウラン 235 やプルトニウムとした。縦軸は原子力発電所の設備容量 GW で、この数値が 100 万 KW の発電所の基数になる。供給量は高速増殖炉の導入年と増殖比をパラメーターとして示してあり、例えば FBR2030-1.3 は 2030 年から増殖比 1.3 の高速増殖炉を導入する場合を示している。

図の中の WEC-B の線は世界エネルギー会議 (WEC) が予測した標準ケースの原子力発電規模で、この WEC-B ケースの原子力供給を行うには、増殖比 1.2 の高速増殖炉を 2030 年～2050 年に導入すれば可能になる。これに対してワンスルー軽水炉を利用し続けると 21 世紀の半ば頃には供給不足になる。



高速増殖炉の導入年が早いほど、また増殖比が高いほど、原子力供給量は大きくなる。上の図の最大ケースでは、原子力供給量は 2050 年には WEC-B ケースの 1.6 倍、2100 年には同 2.5 倍程度に増加する。この原子力によるエネルギー供給余力をバイオマス・原子力協働プロセスによる CO2 除去に利用することになる。

上のコラムで説明した 2100 年までの原子力最大供給容量を熱量 (GtonOE) に換算すると表 1 の「原子力の最大供給可能量」の上の欄の値になる。一方、世界エネルギー協議会による長期・グローバルのエネルギー展望 (中庸の B ケース) によると、原子力は 2100 年には一次エネルギーの約 1/4 を電力として供給するとしており、この「原子力発電に

よる必要量」(熱量に換算)は表1の中の欄の値になる。表1の下の欄に、上の欄と中の欄の差を「非電力用途へ供給可能量」として示してある。

バイオマス・原子力協働プロセス(参考ケース)における必要原子力エネルギー量(熱量)は1.74 GtonOEなので、21世紀後半にはこのCO2除去プロセスへの原子力供給の余力が出るものと考えられる。

なお、第5章ではこの「原子力の供給可能量」について、原子力の発電への供給とCO2除去プロセスへの供給を統合して評価している。

原子力の供給可能量(2000-2100年)

単位: GtonOE/年 [10⁹ ton石油換算]

	2000年	2050年	2100年
原子力の最大供給可能量 *2	—	4.0	18.3
原子力発電による必要量 *1	0.5	2.7	8.3
非電力用途への供給可能量	—	1.3	10.0

バイオマス・原子力協働プロセス(参考ケース)の必要熱量= 1.74 GtonOE/年

*1 IASA-WEC "Global Energy Perspective" (1998) のMiddle Course

*2 小野 清、ほか「世界における原子力エネルギー最大供給量の検討」
JNC TN9400 2001-028 (2000年12月) 最適Puリサイクルの場合

表1 原子力の供給可能量

5.2 熱供給に使用できる原子炉

バイオマス・原子力協働プロセスにおいて、炭化およびガス化プロセスに熱供給可能な原子炉としては、ヘリウムガスを原子炉冷却材として使用する高温ガス炉が最も適している。この炉は国際協力の「第4世代原子力システム」(GenIV)研究開発では「超高温炉」と呼ばれ、原子炉出口温度 950°Cを達成しており、中間系を介してプロセス系に 800°C~900°Cの熱を供給可能である。その他、この炉よりは熱供給温度が低い、表に示す第4世代原子力システムの各原子炉がバイオマス・原子力協働プロセスに適用可能と考えられる。

バイオマス・原子力協働プロセスに 熱供給の可能性がある原子炉型 (第4世代原子力システム)

炭化プロセス(400~500°C) および ガス化プロセス(700~850°C)

超高温炉(VHTR) 出口温度 800~950°C

ガス冷却高速炉(GFR) 出口温度 850°C

鉛冷却高速炉(LFR) 出口温度 550~800°C

炭化プロセス(400~500°C)

ナトリウム冷却高速炉(SFR) 出口温度 550°C

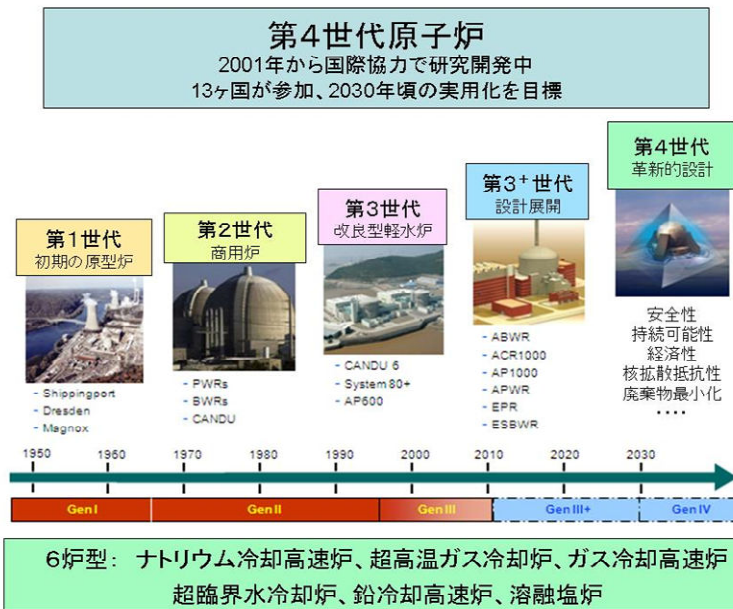
参考文献:

"The Generation IV International Forum. Introduction to Generation IV Nuclear Energy Systems and the International Forum"
http://www.gen-4.org/PDFs/GIF_introduction.pdf (2008)

なお、原子炉とプロセスプラントは、処理すべきバイオマスが広域に分布していることから定置式のほか移動式も考えられる。

第4世代原子力システム

「第4世代原子力システム」とは、2030年頃までに実用化・導入を目指す革新的な原子力システムのことです。その特徴として持続可能性・経済性・安全性・信頼性・核拡散抵抗性を持ち、先進国のみならず途上国への導入も視野に入れ、発電・水素生産・海水淡水化・熱利用などの用途を含むものである。



第4世代原子力システムは、2000年始めから米国エネルギー省の主唱で国際共同研究開発の検討が始まり、2001年にGenIV国際フォーラム(GIF)の憲章が制定され、現在、米国、フランス、日本など10ヶ国以上が加盟している。

GIFでは、候補システムの技術評価・費用評価などに基づき2002年に6概念を選定し、これらのシステムを実用化するに必要な研究開発を総括してロードマップにまとめた。

以来現在まで、各国がそれぞれ関心のあるシステムの国際共同研究開発に参加し、これを自国の原子力開発利用計画に組み入れて、国際協力による技術開発は着実に進展してきている。しかし、まだ次のステップの実証炉の建設など先が見透せる段階までは来ていない。

参考文献

(1) 堀 雅夫 「バイオマスの原子力炭化・ガス化による大気中炭酸ガスの削減」 木質炭

化学会・第5回研究発表会 (2007年5月)

(2) Hori, M., "Nuclear Carbonization and Gasification of Biomass for Removing Atmospheric CO₂" 2007 American Nuclear Society/European Nuclear Society International Meeting (Washington DC, November, 2007)

(3) Hori, M., "Nuclear Carbonization and Gasification of Biomass for Effective Removal of Atmospheric CO₂", Progress in Nuclear Energy (Published by Elsevier) Volume 53 Issue 7, p.1022-1026 (September, 2011)

(4) Hori, M., "Nuclear Carbonization/Gasification of Biomass to Produce Biochar and Biofuel for Effective Removal of CO₂ from Atmosphere", Oxford Conference on Negative Emissions Technologies (Oxford, UK, September 2013)

(5) Masao Hori, "Synergy of Fossil Fuels and Nuclear Energy for the Energy Future", OECD/NEA Third Information Exchange Meeting on the Nuclear Production of Hydrogen: Presentation (October, 2005)

(6) 堀 雅夫 「原子力は化石燃料に熱を供給しよう！！ 高効率エネルギー転換、化石燃料ノーブルユース」 月刊エネルギー Vol. 39 No. 02 p. 26-31 (2006)

(7) 堀 雅夫 「化石燃料による協働的エネルギー転換プロセス」 日本原子力学会誌、Vol. 49, No. 5, p. 359-364 (2007)

(8) Masao Hori, "Synergistic Energy Conversion Processes Using Nuclear Energy and Fossil Fuels" Proceedings of International Symposium on Peaceful Applications of Nuclear Technologies in the GCC Countries, Jeddah, Saudi Arabia (November, 2008)

(9) Masao Hori, "Synergistic Energy Conversion Processes Using Nuclear Energy and Fossil Fuels", International Journal of Nuclear Governance, Economy and Ecology (IJNGEE), Vol. 2, No. 4, pp362-374 (2009) <http://www.inderscience.com>

(10) 堀 雅夫 「原子力による水素で新しいエネルギー社会に」 月刊エネルギーレビュー (2009年5月号)

(11) Masao Hori, "Application of Nuclear Produced Hydrogen for Energy and Industrial Use" OECD/NEA Fourth Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen, Chicago, Illinois, USA (April 2009)

- (12) 伏見千尋ほか「自己熱再生方式による革新的バイオマス乾燥技術の開発」化学工学学会 第75年会 (2010年3月)
- (13) Fushimi, et. al., “Novel Drying Process Based on Self-Heat Recuperation Technology” Drying Technology. 29, 105~110 (2011)
- (14) Helmut Haberl, et.al., “Bioenergy: How Much Can We Expect for 2050?” Environmental Research Letter, Vol.8, 031004 (2013)
- (15) European Biomass Association “World bioenergy Potential, Biomass Resources and Production Potential” <http://www.eubia.org/>
- (16) Smeets, E., et.al, “A Quicksan of Global Bioenergy Potentials to 2050” Progress in Energy and Combustion Science, Volume 33, Issue 1, p.56-106 (February, 2007)
- (17) IPCC, “IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation” Chapter 2 Bioenergy (2011)
- (18) Veronika Dornburg, et.al., “Assessment of Global Biomass Potentials and their Links to Food, Water, Biodiversity, Energy Demand and Economy” WAB 500102 012, The Netherlands Environmental Assessment Agency (2008)
- (19) 小野清、ほか 「世界における原子力最大供給可能量の検討」 JNC TN9400 2001-028 核燃料サイクル開発機構 (2000年12月)

第5章 カーボンネガティブ・エネルギーシステム

本章では、地球環境保全と世界エネルギー供給を統合的に行うカーボンネガティブ・エネルギーシステムについて、その主眼と具体的なイメージとして 2065 年時点の CO₂ 除去・エネルギー供給のビジョンを定量的に示す。

1. 地球環境保全・世界エネルギー供給統合システム

現在の地球温暖化の進行状態から、世界が必要とするエネルギーを持続的に供給しつつ大気中から CO₂ を除去して CO₂ 濃度を許容範囲に調整していくことが可能な「地球環境保全・世界エネルギー供給統合システム」の構築・運用は喫緊の課題と考える。

本書の主題である「カーボンネガティブ・エネルギーシステム」は、この大気中 CO₂ 除去とエネルギー供給を統合的に行う環境・エネルギーシステムのことで、このようなシステムを 21 世紀の中葉に導入・運用することを想定する。

このシステムのエネルギー供給における主眼は；

- ◆ 供給する一次エネルギーは、現在の化石燃料主体に代わって再生可能エネルギーと原子力のみとする。
- ◆ エネルギーキャリアー（二次エネルギー）の構成を現在の燃料主・電力従から電力主・燃料従に変えてエネルギー効率を向上させ、エネルギーキャリアー生産に使用する一次エネルギーの使用量を抑制する。
- ◆ 定置用のエネルギー需要は熱需要を含めて電力で供給してエネルギー使用効率を向上させる。
- ◆ 運輸用のエネルギー需要は電動化により燃料需要を削減した上、配送インフラおよび取扱の便益から炭化水素の液体燃料を主として使用する。燃料成分中の炭素はバイオマスベースとする。なお、特別な用途には水素を使用する。

将来の社会が利用するエネルギー

エネルギーの利用においては、化学、熱、光、位置、運動などのいろいろな形態の一次エネルギーを、精製、化学反応、発電などの転換プロセスを経て、利用に便利なエネルギーキャリアーにして、これを利用プロセスに供給している。現在は、化石燃料から製造する「炭化水素」類と、各種一次エネルギーからつくられる「電気」が主要なエネルギーキャリアー（エネルギーを運ぶ媒体）である。

1 次エネルギーのうち発電に使われている割合（電力化率）は、BP 統計（2013 年）によると日本やフランスでは 52%、OECD 加盟国では 44%、世界全体では 41%となっている。将来、地球環境とエネルギー供給を両立させるために電力化率を 70~80%程度まで

上げると想定して、残りの非電力エネルギーをどのようなエネルギーキャリアーによって運ぶのが良いかを考察してみる。

社会が使用する主なエネルギー：現在と将来

	社会	主なエネルギーキャリアー	備考
現在	化石燃料社会	化石燃料製品 + 電気 ガソリン、軽油、灯油、都市ガスなど	世界の一次エネルギーの内発電に使用されている割合は現在約4割。
将来？？？	1 水素社会	電気 + 水素	現在の化石燃料製品の役割を水素が置換。
	2 オール電化社会	電気	高性能電池の実用化で運輸部門も電化。殆ど電気のみを使用する社会。
	3 合成燃料社会	電気 + 合成燃料	利便性の高い液体燃料を使用。長期的には燃料をバイオマスと原子力から合成。

上の表に示すように、現在の社会はエネルギーキャリアーとして電力+化石燃料製品（ガソリン、軽油、灯油、都市ガス、など）を主に使用している「化石燃料社会」であるが、将来は地球環境からの必要度とエネルギー技術の今後の進展・ブレークスルーによって次のような社会が考えられる。

- ① 電力+水素を主に使う「水素社会」（電力+水素から'Hydricity' という造語もある）
- ② 殆ど電気のみを使う「オール電化社会」
- ③ 電力+合成燃料を主に使う「合成燃料社会」。この場合の「合成燃料」とは取扱いの便利な液体燃料で、将来はCO2 排出をゼロまたはマイナスにできるバイオマスから製造するバイオ合成燃料（炭化水素）を想定

これらのエネルギーキャリアーの特徴を考察してみる。

- エネルギーの脱炭素化を達成し、低炭素社会へ移行するには、エネルギーキャリアーとしての水素をCO2 排出を抑制しつつ製造・使用していく「水素社会」の実現が必要との考えがある。
- 「水素社会」によって達成し得ることに、エネルギー利用端での排出が水のみというクリーン性、燃料電池による動力への変換の高効率性などがある。これと同じ目的のことが、例えば高密度・軽量の電池などの電力貯蔵方法が開発されたら、殆ど電気のみをエネルギーキャリアーとして使用する「オール電化社会」によって、達

成することができる。

- 水素は製造・輸送・貯蔵・利用の各段階で体積エネルギー密度が小さいことによる高圧などの取扱技術上の難しさとコスト高などの課題がある。バイオマス起源の合成燃料（とくに液体燃料）は体積エネルギー密度が高く取扱いが容易で、再生可能エネルギー起源の水素と同様の環境性を有し、燃料電池で動力化する場合は水素燃料電池に匹敵する効率・性能が期待される。
- 水素は利用時に CO₂ 排出がない特長から閉空間や成層圏などでの利用で有用である。

以上から 21 世紀の半ば以降を考えると、エネルギーキャリアーとして定置用には電力を主に使用し、移動用には陸上は充電電力+バイオ合成燃料（主に液体の炭化水素）、航空は水素（液体）を使用し、これらの電力・炭化水素・水素などのエネルギーキャリアーを生産（発電、製造などのエネルギー転換）する一次エネルギーとしてはバイオマス・太陽光・風力・原子力などを使用することになると考える。

現在と将来の社会が使用する一次エネルギーとエネルギーキャリアー（二次エネルギー）の構成を表 1 に比較して示す。

表 1 世界が使用する主なエネルギー：現在と将来

	エネルギー社会	主な一次エネルギー	主なエネルギーキャリアー（二次エネルギー）	エネルギーキャリアーの製造に使用される一次エネルギー量の大小
現在	化石燃料社会 ----- 大気中CO ₂ の増加	化石燃料 再生可能 原子力	化石燃料ベースの燃料（ガソリン、軽油、灯油、都市ガス、…） 電気	製造に使用される一次エネルギーは 燃料＞電力
将来	カーボンネガティブ・エネルギー社会 ----- 大気中CO ₂ の除去・制御	再生可能 原子力	電気 バイオマスベースの燃料（一部水素）	製造に使用される一次エネルギーは 電力＞燃料

現在は化石燃料を主に使用しているので「化石燃料社会」であるが、21 世紀中葉に実

現すべき将来の社会はCO2 排出ゼロの一次エネルギーを電力・合成燃料・水素に転換してエネルギー供給と大気中CO2 除去・調整を統合的に行うので「カーボンネガティブ・エネルギー社会」と呼ぶことができよう。そして地球規模の炭素循環が自然に戻った後はカーボンニュートラルを維持していくことになる。

2. カーボンネガティブ・エネルギーシステム

21 世紀の中葉に導入・運用する「カーボンネガティブ・エネルギーシステム」のイメージとして、50 年後の 2065 年時点のエネルギー供給ビジョンを以下定量的に示す。

以下のCO2 除去と燃料製造には第4 章で説明した「バイオマスと原子力による協働的CO2 除去方法」を使用する。

なお、実績データにはBP 統計⁽¹⁾に基づく値を使用した。

① カーボンネガティブエネルギーの供給

2065 年時点の世界の一次エネルギー供給は再生可能エネルギーと原子力により化石燃料使用量はゼロとし、さらに地球規模で循環している炭素の一部を安定隔離することにより大気中CO2 を除去して、実質マイナスCO2 排出 (Net negative carbon emission) を実現する。

② 電力・主、非電力・従に電力化率を逆転

エネルギーキャリアーを電力と非電力エネルギー（液体・気体の燃料など）に分けると、現在世界全体では電力（発電）に一次エネルギーの41%が供給されており、非電力エネルギーには同59%が供給されている。

今後、運輸の電動化、電気の貯蔵利用、熱供給へのヒートポンプ利用などの電力化を進めて、エネルギー利用の効率を向上させるとともに燃料の消費を削減する。

結果的に、電力の割合（電力化率）が上昇し、非電力の割合が低下する。2065 年の電力化率（発電に使用される一次エネルギーの割合）は75%、非電力エネルギー（燃料製造）に使用される同割合は25%とする。（GtonOE は石油換算10 億トン、エネルギーの単位）

電力化率（一次エネルギーベース） [%]

	電力	非電力
2000	38 %	62 %
2013	41 %	59 %
2065	75 %	25 %

③ 一次エネルギー（再生可能・原子力）の供給量

以下に述べる発電・燃料製造・エネルギー利用における変革を踏まえて、2065 年の一

次エネルギー供給量を 20.8 GtonOE と想定する。

一次エネルギーの供給源と供給量 [GtonOE]

	化石燃料	再生可能	原子力	合計
2000	8.1	0.7	0.6	9.3
2013	11.0	1.1	0.6	12.7
2065	0.0	14.4	6.4	20.8

発電・燃料製造への一次エネルギー供給量 [GtonOE]

	発電	燃料製造	合計
2000	3.5	5.8	9.3
2013	5.3	7.5	12.7
2065	15.7	5.1	20.8

④ 再生可能エネルギーと原子力による発電

- 発電の一次エネルギーは再生可能エネルギー（水力、風力、太陽光、太陽熱など）と原子力から供給し、2065年の発電量の3/4（11.7 GtonOE）は再生可能エネルギー、1/4（4.0 GtonOE）は原子力からとする。
- 再生可能エネルギーと原子力発電から成る系統の需給の安定化・調整は、従来からの揚水発電などの電力貯蔵方式に加え、電動自動車と電力系統の双方向電力流通・統合制御、需要側のヒートポンプの蓄熱制御、定置用電池、水素製造などの電力貯蔵方式により行う。

電力貯蔵

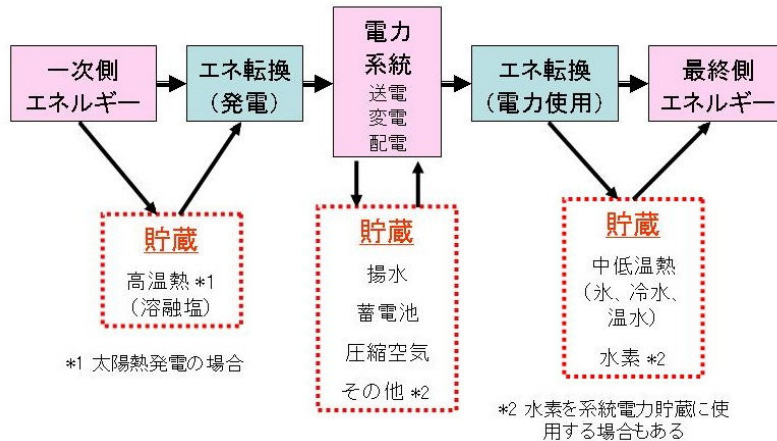
「電力貯蔵」は、揚水発電・蓄電池・圧縮空気貯蔵などのエネルギー貯蔵システムと電力系統との間の双方向の電力流通によって、電力系統の周波数・電圧の維持や負荷調整などを目的としている。

図に示すような電力系統の上流の一次側エネルギーでの貯蔵や下流の最終（需要）側エネルギーでの貯蔵も、系統からの電力供給指令・電力使用指令などの「指令可能な」（dispatchable）方式であれば「電力貯蔵」の目的を充たしているので同等の役割を担える。

一次側（上流側）での貯蔵は、太陽熱発電所（水蒸気タービン発電、スターリングエンジン発電など）の発電に使用する前の熱を熔融塩などに貯蔵し、必要に応じて系統側の指令により熱を取り出し発電する方法である。

下流側（需要）での貯蔵は、必要に応じて系統側からの指令で最終エネルギーの形態（暖房給湯用の温水、冷房用の冷水、冷蔵用の氷、エネルギー利用のための水素など）で貯蔵し、需要側の必要に応じて利用する。なお、水素は燃料電池で電気に戻す貯蔵方式もある。

各種の電力貯蔵方式



電力貯蔵方式の中で揚水発電が貯蔵量で現在 99%を占めているが、その容量は世界の発電量の約 3%、120GW である。今後、太陽・風力などの変動電源が増加していくので揚水以外の電力貯蔵容量の大幅な増強が必要になっている。

電動自動車と電力系統の双方向電力流通・統合制御

電動自動車と電力系統の双方向電力流通・統合制御は、自動車とグリッドの統合の意味で VGI (Vehicle-Grid Integration)、または自動車から電力を出すという意味で V2G (Vehicle-to-Grid) などと呼ばれている。世界の再生可能エネルギー発電の増加と自動車の電動化が進んでいく中で、この自動車の持つ電力（パワーの kW とエネルギーの kWh の両方）を系統側と統合して制御することが重要になっている。

VGI に用いられる車種

電力系統と電氣的に接続可能な車種は「電動自動車」に分類されているハイブリッド車 (HEV)、プラグインハイブリッド車 (PHEV)、電気自動車 (BEV) および燃料電池自動車 (FCV) の 4 車種である。

電動自動車の中でも系統電力を自動車駆動用電池に充電して走行する PHEV と BEV は設備および設定の追加により系統との双方向の電力流通が可能になるので、自動車・電力系統の連系における最も重要な車種と見なされている。なお、PHEV と BEV の 2 車種を合わせて「プラグイン自動車」(Plug-in Electric Vehicle, PEV) と呼ばれている。

自動車電力の特長： kWh（エネルギー）より kW（パワー）

自動車電力の特長は、電池が保有するエネルギー（kWh）より電池が供給できるパワー（kW）の大きさにある。表は1台のプラグイン自動車の電池が供給できるパワーを15kWとして乗用車全部がプラグイン自動車になった場合の全供給電力を計算したもの。各国の自動車が持つパワーは系統の全発電電力（GW=100万kWの単位）の7倍以上の大きさになる。平均的に1日23時間駐車している自動車のこの大きなパワーを電力系統へのサービスに利用する価値は大きい。

プラグイン自動車を持つパワー[kW]

- 全乗用車の電力(KW)は系統の全発電電力(KW)の7倍！
- 自動車は1日23時間駐車中！[1日の平均走行時間は62.3分(米国統計)]

主要国の乗用車V2G電力と全発電電力との比較

国	乗用車 台数 [万台]	V2G電力 @15KW/台 [GW]	全発電電力 (平均) [GW]	V2G/全発電 電力 [--]
フランス	2922	438	50	8.85
ドイツ	4465	670	58	11.49
イギリス	2845	427	40	10.81
米国	19100	2865	417	6.86
日本	5444	817	115	7.10

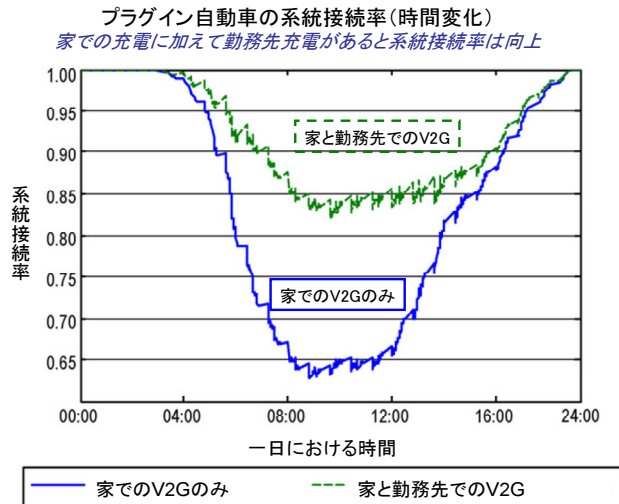
Kempton, W. and A. Dhanju, "Electric Vehicles with V2G: Storage for Large-Scale Wind Power"
Windtech International 2 (2), pp 18-21 (March 2006)の図に日本のケースを加筆・編集

これに対して電動自動車が消費する電力の大きさ（kWh）は全発電量の数%程度である。例えば日本の自動車が将来電動化された時の使用電力は、乗用車が全部 BEV になった時が全発電量の 8%程度、全部 PHEV になった時が全発電量の 6%程度である⁽²⁾。ただし、充電が集中しないような制御は必要であり、これは自動車・電力系統統合システム（VGI）に組み入れて調整・制御を行なっていく必要がある。

自動車と系統との接続

車の定置場所（普通は家）と勤務先に充電設備があるとプラグイン自動車の系統との接続時間が増加するので、充電の機会・時間の増加とともに自動車の電力サービスに利用可能な時間も増加する。図は米国の自動車の走行統計から推定した自動車の系統接続率（ある時間に系統に接続されている車の全体に対する割合）の時間変化を示したもので、家での充電に加えて勤務先充電があると系統接続率の最低値が63%から83%に20ポイント向上する。すなわち、勤務先にも充電設備を設けると最低でも80%以上の車の自

動車電力を系統側が利用できるようになる。



出典： Casey Quinn, et.al., Journal of Power Sources 195 (2010) 1500-1509) 米国NHTSのデータから推定

自動車の電力サービスの対価

自由化された電力取引市場においては、電池からの早い応答の電力サービスに対してそのサービス価値に見合う対価が支払われる仕組みになっている。定常的サービスで最も価値が高いのは電力系統の周波数などを安定化する「アンシラリーサービス」である。

米国の独立電力系統運用期間 (ISO) におけるアンシラリーサービスの取引価格の実績では、自動車電池が可能な早い応答の周波数制御へのサービスが最も高価となっている。これらの対価は流通電力量ではなく接続している時間に対して支払われる値である。

米国の地域送電機関におけるアンシラリーサービス価格の例
 (取引市場需給均衡化価格、2006年平均)

- 応答の速い電力供給ほど価値が高い
- 接続待機している時間に対価が支払われる

アンシラリーサービス 地域送電機関	周波数制御 (Regulation) [\$/MW-h]	瞬動予備力 (Spinning Reserve) [\$/MW-h]
PJM	32.69	14.94
NY ISO	51.26	8.25
CAISO	36.04	9.61

出典： W. Kempton, et.al., A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage and Frequency Regulation in the PJM System (2008)

このような自動車の電力サービスへの対価によって自動車所有者は自動車保有の総費

用 (Total Cost of Ownership、TCO) を削減することが可能となり、これが自動車所有者の VGI 参加へのインセンティブになる。再生可能エネルギーによる発電が急増しているカリフォルニア州では、既に電力会社の PG&E 社が通信で BEV の充電制御を行いピークカットし、自動車所有者へは対価を支払う計画を始めている。

ヒートポンプ

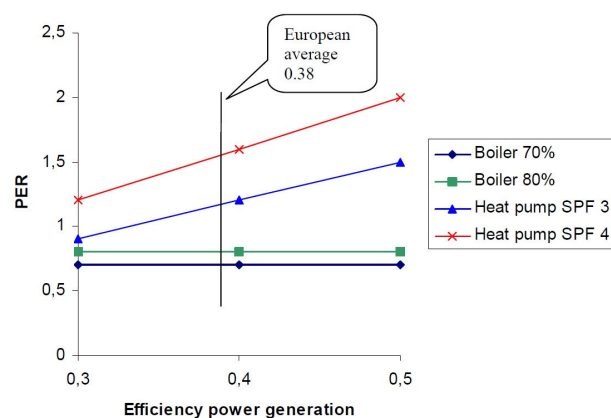
温水加熱や暖房に電力駆動のヒートポンプを使用すると、燃料を燃焼させて加熱する方法に比べて効率が高くなるため、エネルギー消費量を削減することができる。

例えば、ヒートポンプで 0°C の熱を 35°C まで汲み上げる場合ヒートポンプの性能である成績係数 COP=5 ならば、1kWh の電力で 5kWh の加熱ができる。火力発電・送電効率が 40% とすると 2.5kWh 熱量の燃料を発電に使用して 5kWh の加熱ができたことになり、燃焼加熱（熱効率 100% として）に比べて 50% の燃料削減になる。

このヒートポンプによる省エネルギー効果は低熱源の温度や目的の加熱温度などの条件によって変わるが、下記の例のように数十%の一次エネルギー削減が期待できる場合が多い。

ヨーロッパの例⁽³⁾

図の横軸は発電効率、縦軸の PER (Primary Energy Ratio) は使用した一次エネルギーに対して加熱に有効に使用できた割合で、上の 2本の線はヒートポンプ温水器で期間平均 COP (SPF) が 3 と 4 の場合の値、下の 2本の線は熱効率 70% と 80% のボイラの値を示す。欧州の平均発



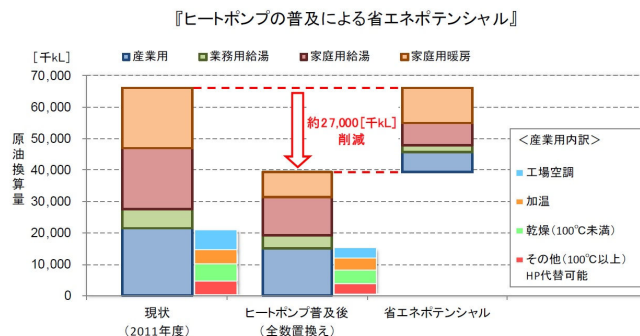
電効率は 38% なので、この交点の PER 値からヒートポンプの効果が判る。この場合はヒートポンプにより大凡 40% 強の燃料削減が可能となる。

日本の例⁽⁴⁾

ヒートポンプ・蓄熱センターが日本におけるヒートポンプ普及拡大による一次エネルギー削減ポテンシャルを試算した結果を発表している。それによると、民生部門や産業用の熱需要を賄っているボイラをヒートポンプで代替した場合、原油消費量を約 40% 削減でき、この一次エネルギー削減効果は日本の化石燃料年間輸入額の約 11% に当たると

している。

なお、この計算では家庭用暖房、家庭用給湯、業務用給湯、産業用加熱の内、ヒートポンプで代替可能な温度帯のみを抽出し、産業用ボイラは消費エネルギーで49%を対象としている。



⑤ バイオマスと原子力による合成燃料製造

- 2065年のバイオマス処理量は第4章と同様に年6 GtonCを標準ケースとして想定する。(GtonCは炭素10億トン、質量の単位)
- 非電力需要のための燃料製造はバイオマス中の炭素の水蒸気ガス反応→シフト反応→フィッシャートロブシュ反応により合成し、必要なエネルギーは原子力から供給する。
- 2065年の燃料需要に対しては、バイオマス処理量6 GtonCの20%をバイオ炭にした残りの80% (4.3 GtonC)の炭素含有分(発熱量にして2.7 GtonOE)と原子力(1.7 GtonOE)から製造する。
- 燃料は軽油相当の炭化水素バイオ合成燃料(発熱量2.8 GtonOE)として供給する。
- 2065年時点の炭素およびエネルギーのフローと収支を図1に示す。

⑥ 輸送用・産業用の非電力エネルギー供給

- 運輸部門のエネルギー消費の約70%を占める自動車は現在の約3倍に増加すると見込まれているが、プラグイン自動車(PHEVとBEV)の導入によって燃料消費率を現在の9%(ハイブリッド化で40%減、電力走行割合0.85のプラグイン化でさらに85%減)にできるので、3倍に増加する自動車の液体燃料消費量は0.3倍と減少する。なお、自動車の走行距離当たりの液体燃料+電力の合計のエネルギー消費率も5割以上減るので、3倍に増加する自動車の全エネルギー(電力+燃料)消費量は1.4倍に抑えることができる。
- 液体燃料(バイオ合成燃料)の移動用・分散型の動力用途への利用には燃料電池(SOFC)を用いて効率向上を図る。
- 増加する大型航空機による航空輸送の燃料は水素に切り換え、成層圏でのCO2排出を避ける。この供給には電力系統需給調整のために運転する水の電気分解で生成する水素を使用する。

- 産業用の大規模エネルギー利用（製鉄用還元、プロセス熱）はコンビナートに集中化し原子力から供給する。

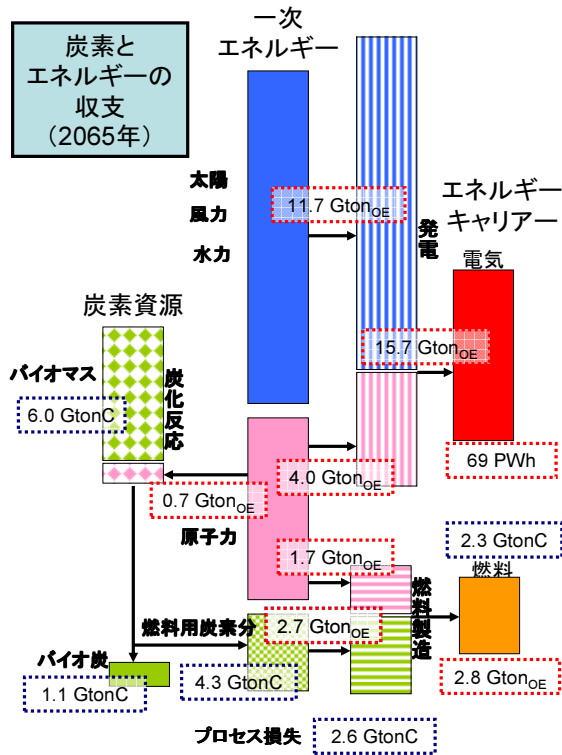
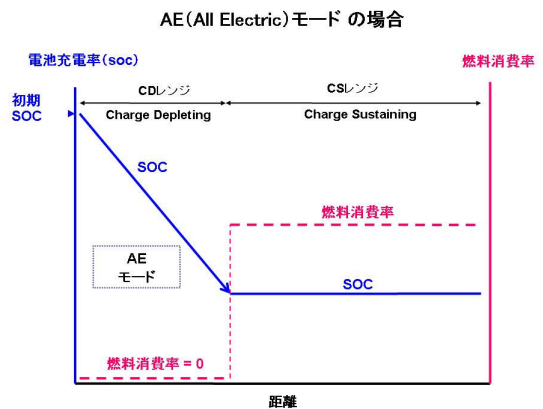


図1 炭素とエネルギーの収支（地球規模、2065年）

プラグインハイブリッド車による燃料消費の削減

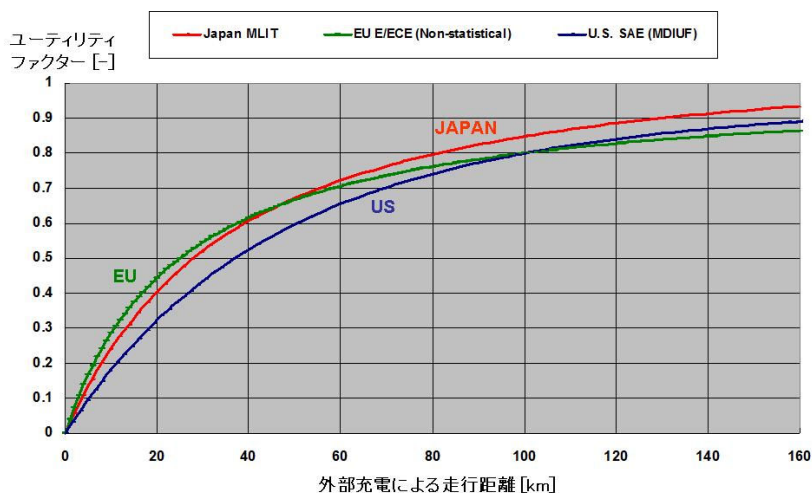
プラグインハイブリッド車 (PHEV) は、最初の一定距離 (CD レンジ) は外部電力によって充電した電気による電力走行をし、電池の充電率 (SOC) が一定値まで減少した後 (CS レンジ) はエンジン駆動のハイブリッド走行に切り替わる。エンジン自動車 (ICEV) やハイブリッド車 (HEV) では駆動エネルギー源はすべてガソリンなどの燃料であるのに対して、PHEV の駆動エネルギー源は外部から充電した電力とガソリンなどの燃料の二種類になる。



PHEV のエネルギー消費を評価する場合、全走行距離に占める外部充電電力によって走行する距離の割合を想定する必要がある。この電力走行の割合は「ユーティリティファクター」(UF) と呼ばれている。UF の値は自動車の「ドライブパターン」(車が実働した日の1日当たりの走行距離の頻度分布) で決まってくるので、自動車走行に関する統計調査値から例えば国全体の平均的 UF を計算することになる^{(5) (6)}。

電力走行の割合は、車が外部充電で走行する距離 (図の CD レンジの大きさ) によって変わる。下の図は、日・米・EU が PHEV の燃費を決めるときに使用している UF の値で、この中の日・米の UF は車の走行統計データから算出したものだが、EU の値は燃費算出のための便宜的なものなので参考程度。

日・米・EUのユーティリティファクター



本文の運輸部門のエネルギー消費の見積で使用した PHEV の仕様の UF=0.85 は、上の図から外部充電による走行距離が 100km~130km なら達成でき、搭載電池は 20kWh~26kWh 程度が必要になる。現在市場に出ている PHEV では「BMW i3 REx」が搭載電池 22kWh (定格) で米国 EPA の審査では UF=0.834 となっており、このような仕様の PHEV を将来車の主流にすることは実現可能と考える。

航空機燃料としての水素の利用

航空機の排出ガスによる温暖化影響は全排出の数%程度であるが、航空輸送量は増大傾向にあり、その環境影響⁽⁷⁾ に対する懸念が出てきている。そのため、航空機のエネルギー効率の改善努力が進められる一方で、大型機の航空燃料として水素の利用可能性が欧州共同体・エアバスによって「Cryoplane」プロジェクト⁽⁸⁾ などで検討されてきた。

液体水素は重量エネルギー密度が大きいので航空燃料のケロシンに比べて同じ重量で熱量が約 2.8 倍と大きく、離陸重量を減らし最大積載量を大きくできる。しかし体積エネルギー密度が小さいので燃料搭載のスペースを設けたり、その他構造的な変更は必要である。これまでに水素燃料のジェットエンジン航空機の飛行実績があるので、15 年～20 年の準備期間で可能と考えられている。

水素の燃焼で排出する H₂O も温暖化ガスだが、CO₂ に比べて滞留する時間が格段に短く、その他の効果も含めてケロシンから水素燃料に変えることは環境上のメリットが大きい。

水素の航空機燃料としての利用目的が CO₂ 排出削減にあるので、地上における水素の製造も当然 CO₂ を排出しない方法になる。再生可能エネルギー発電による電力系統の変動調整のために水の電気分解を行えば、系統安定化と航空機用水素製造の両方の役割を担える。

⑦ バイオ炭による炭素循環からの隔離

- 大気中 CO₂ の削減は、バイオマスを炭化して地上・空気中で安定なバイオ炭（固体炭素）にして利用／貯蔵して地球規模カーボンサイクルから隔離することにより行う。2065 年の標準ケースでは 20%としたが、バイオ炭は炭化の条件により最大でバイオマス含有炭素分の 50%まで生成可能である。
- 2065 年のバイオマス処理量 6 GtonC・バイオ炭生成量 20%の場合、炭素循環から隔離する炭素量は 1.1 GtonC となる。すなわち、必要なエネルギーを供給しつつ 1.1 GtonC の負排出を達成できることになる。因みに、2000-2005 年の大気中炭素増加量（正排出）は 4 GtonC。
- 生成する大量のバイオ炭（固体炭素）は、現在の工業用途以外に農業・林業（土壌改良材）、建設業（黒鉛構造材/炭素繊維などとして木材・プラスチック・コンクリート・金属などに代わる材料として利用）など、炭素・黒鉛材料の用途を拓げる。

⑧ バイオマスの量的確保

- このプロセスに使用するバイオマス・有機炭素は、農業残渣、森林廃材、植木の成長分、エネルギー植物（藻類を含む）のほか、必要に応じて土壌中有機炭素、将来は人口光合成などを考える。
- 2050 年時点のバイオエネルギーの生産ポテンシャルについては、第 4 章 4 節の「バイオマスの供給可能性」に示してあるように、Smeets らの 273～1471EJ、IPCC-SRREN のシナリオ評価の～300EJ、WAB-Dornburg の～500EJ などに対して、今回の検討で想定した 2065 年のバイオマス処理量 6 GtonC は熱量にして 197 EJ なので、上記生産

ポテンシャルの範囲内に入っている。

- さらに、標準ケースの年 6 GtonC (197EJ) を超える年 10 GtonC (328EJ) のバイオマス処理も可能と考えられ、その場合にバイオマス中炭素の 50 %炭化により合成燃料 2.9 GtonOE 製造・バイオ炭 4.5 GtonC 生成という大きな CO2 除去効果が達成可能となる。この場合の原子力使用量は 2.9 GtonOE と 0.5 GtonOE 増加するのみ。

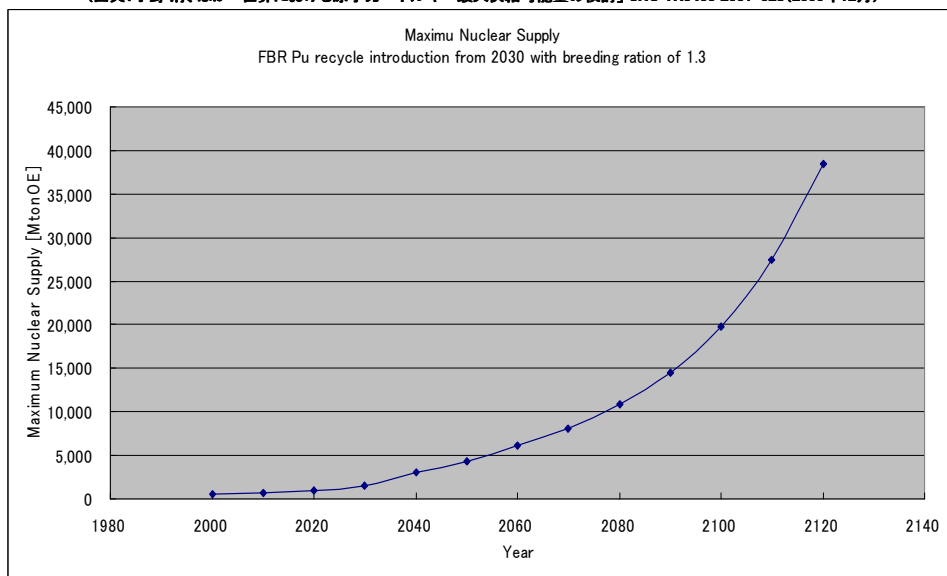
⑨ 原子力エネルギーの持続的供給確保

- 発電とバイオマス処理に必要な原子力エネルギーの持続的供給確保のために、適切な燃料増殖性能を有する高速炉・燃料サイクルシステムを適時に導入する。これについては第 4 章 5.1 節原子力の供給量を参照されたい。
- 現実的条件による燃料サイクル評価⁽⁸⁾による 2065 年の原子力最大供給量は 7.2 GtonOE と評価されており、このビジョンにおける発電とバイオマス処理に要する原子力量は 6 GtonC ケース 4 + 2.4 = 6.4 GtonOE および 6 GtonC ケース 4 + 2.9 = 6.9 GtonOE の両ケースとも供給は可能と考えられる。(図 2)

原子力によるエネルギー最大供給可能量

FBR・Puリサイクル導入2030年、増殖率1.3

(出典:小野 清、ほか「世界における原子力エネルギー最大供給可能量の検討」JNC TN9400 2001-028(2000年12月)



換算: 一次エネルギー消費量(原子力分)(Mtoe)= \sum 炉型i[(炉型iの発電設備容量(GWe)) \times 10E9 \times 24時間 \times 365日 \times (炉型iの稼働率)/10E12/(熱効率0.4) \times (TWh \rightarrow Mtoe換算係数0.086)]

図 2 原子力の最大供給ポテンシャル

⑩ システム運用の事業・資金・体制・産業

地球温暖化対策としての大気中 CO2 除去事業は世界規模の巨大な公共事業であり、国際的な資金確保流通・制度運用の仕組みを新たに構築していく必要がある。CO2 除去と

統合的に運用される炭化水素燃料供給と合わせて、新たな環境・エネルギー産業の展開が予見される。これについては第6章で考察する。

3. カーボンネガティブ・エネルギーシステムのまとめ

前節で説明した具体的なイメージとしての2065年時点のCO₂除去とエネルギー供給のビジョンを表2まとめて示す。

カーボンネガティブ・エネルギーシステム
CO₂除去とエネルギー供給 -- 2065年のビジョン

	2000	2065		参考データ
一次エネルギー	10 GtonOE	標準ケース バイオマス 6 GtonC処理 一次エネルギー 20.8 GtonOE 内訳 化石燃料 0 % 再生可能 69 % 原子力 31 %	加速ケース バイオマス 10 GtonC処理 一次エネルギー 21.4 GtonOE 内訳 化石燃料 0 % 再生可能 68 % 原子力 32 %	21.0 GtonOE (WEC-Jazz 2050) 内 化石燃料 77 % 18.5 GtonOE (Z650 2050) 内訳 化石燃料 5 割 再生可能 3 割 原子力 2 割
電力化率	38 %	75 %	73 %	67 % (Z650 2100)
電力	3.8 GtonOE 15PWh 内訳 化石燃料 78% 2.96 GtonOE 再生可能 17% 0.65GtonOE 原子力 5% 0.19 GtonOE	15.7 GtonOE 69 PWh 内訳 化石燃料 0% 0 GtonOE 再生可能 75% 11.7 GtonOE 原子力 25% 4.0 GtonOE		53 PWh (WEC-Jazz 2050) 電源構成 化石燃料 63% 再生可能 31% 原子力 6% 42 PWh (Z650 2050) 電源構成 化石燃料 28 % 再生可能 41 % 原子力 31 %
非電力割合	62 %	25 %	27%	
非電力	6.2 GtonOE 化石燃料ベースの 液体・固体・気体 燃料	5.1 GtonOE 内訳 バイオマス(燃料分) 2.7 GtonOE 原子力 2.4 GtonOE 合成液体燃料 2.8 GtonOE	5.7 GtonOE 内訳 バイオマス(燃料分) 2.8 GtonOE 原子力 2.9 GtonOE 合成液体燃料 2.9 GtonOE	バイオマスエネルギー ポテンシャル 2.4~7.2 GtonOE (IPCC-SRREN 2050)
CO ₂ 排出	大気 +4 GtonC 海水 +2 GtonC	-1.1 GtonC	-4.5 GtonC	+5.2 GtonC (Z650 2050) +12 GtonC (WEC-Jazz 2050)

参考データ

➢Z650: 氏田博士ほか「地球温暖化防止のための長期エネルギービジョン」日本原子力学会誌 Vol.56, No9 およびNo.10 (2014)

➢WEC-Jazz: World Energy Council "World Energy Scenarios - Composing energy futures to 2050" WEC Report 288p (2013)

➢IPCC-SRREN: IPCC "IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation" Chapter 2 (2011)

表2 カーボンネガティブ・エネルギーシステムの2065年のビジョン

表2で2065年時点において必要なエネルギー供給量の参考になるものとして、世界エネルギー協議会(WEC)の世界エネルギーシナリオ⁽¹⁰⁾とキャノングローバル戦略研究所のZ650モデルによるシナリオ評価⁽⁹⁾の2050年時点の値を参考データ欄に示した。

このカーボンネガティブ・エネルギーシステムのビジョン作成では、エネルギー需要を削減する幾つかの方策は示したが、これらによるエネルギー需要の積算は行っていない。2065年時点の一次エネルギー量として今回想定した20.8 GtonOEは、WEC-JazzシナリオとZ650シナリオにおける2050年時点の一次エネルギー量の21.0 GtonOEと18.5 GtonOEと比較して想定可能な範囲にあると考える。

以上、エネルギーを持続的に供給しつつ大気中からCO₂を除去しCO₂濃度を許容範囲に調整可能な「カーボンネガティブ・エネルギーシステム」について構想し、具体的イメージとして2065年時点のビジョンを描いてきた。

- 現在の地球温暖化の進行を抑えて地球の気候を改善するには、CO₂を除去するシステムを21世紀の半ば頃までに構築・運用することが必要と考えている。提示したシステムでは、バイオマスと原子力からバイオ炭と炭化水素合成燃料を製造するプロセスを用いて、地球規模炭素循環からCO₂を効果的に除外すると同時に必要な燃料供給を行うものである。このようなバイオマスと原子力を用いる別のCO₂除去プロセスも考えられ、より効果的なプロセスの検討は必要と考えている。
- 構築した2065年時点のビジョンでは、一次エネルギー供給は再生可能エネルギーと原子力のみ、電力化率（一次エネルギーベース）は75%、非電力エネルギー供給はバイオマス・原子力ベースの炭化水素合成燃料、CO₂除去量（バイオ炭製造量）は1.1～4.5 GtonCとなる。バイオマス処理量とバイオ炭生成割合を変えるとCO₂除去量とバイオ合成燃料供給量を変えることができるので、地球環境や世界エネルギー需給の状況から適切な条件を選定することになる。
- 想定したバイオマス処理量はIPCCなどの評価による2050年生産可能量の範囲内、また原子力使用量は高速増殖炉・Puリサイクル利用による原子力供給可能量評価の範囲内なので、このプロセスによって地球/世界規模の効果をあげることは可能と考える。
- このシステムの運用は、CO₂除去を行う世界規模の巨大な公共事業、同時に燃料供給を統合的に行うので新たな環境・エネルギー産業となり得るものとする。これらの事業実施における国際的なガバナンス（統治）は重要である。

参考文献

(1) BP p.l.c. “Statistical Review of World Energy” <http://www.bp.com>

- (2) 堀 雅夫ほか「HEV, PHEV 導入によるエネルギー需給変化と CO2 削減の効果」自動車技術会論文集 Vol.40, No.4, p.1101-1106 (2009)
- (3) Martin Forsen "Heat Pumps Technology and Environmental Impact" The Swedish Heat Pump Association Report 120p (2005)
- (4) ヒートポンプ・蓄熱センター 「ヒートポンプ普及拡大による一次エネルギー削減ポテンシャル試算結果について」 ヒートポンプ・蓄熱センタ報道資料 (2013)
- (5) 堀 雅夫「プラグインハイブリッド車導入の環境・エネルギーへの効果」自動車技術会論文集, Vol.38, No.2, p.265-269, (2007) (4) Biorecro Company, "BECCS Project Illinois, USA" <http://biorecro.com/>
- (6) 堀 雅夫ほか「電力とガソリンの等価合成による PHEV 燃料消費率の表示」自動車技術会論文集 Vol.43, No.6, p.1401-1405 (2012)
- (7) IPCC "Summary for Policymakers; Special Report Aviation and the Global Atmosphere" IPCC Working Groups I and III (1999)
- (8) Airbus Deutschland GmbH "Liquid Hydrogen Fuelled Aircraft System Analysis (CRYOPLANE)" Final Technical Report 80p (2003)
- (9) 氏田博士ほか 「地球温暖化防止のための長期エネルギービジョン」 日本原子力学会誌 Vol.56, No9 およびNo.10 (2014)
- (10) WEC-Jazz: World Energy Council "World Energy Scenarios - Composing Energy Futures to 2050" WEC Report 288p (2013)

第6章 CO2 除去事業実施の資金・仕組み

この章では、地球温暖化対策としてCO2除去（CDR）事業を世界規模で実施していく場合の資金の拠出、CDRの運用、CDRの費用・規模などの実施の資金・仕組みについて考察する。

1. 考え方

CO2除去（CDR）は負の排出なので、CO2削減努力によって排出ゼロに到達後の延長として制度を考えることができる。この場合は現行の「排出権取引」（Carbon emission trading）制度に基づくことになる。すなわち、国家や企業ごとに温室効果ガスの排出枠を定め、排出枠が余った国や企業と排出枠を超えて排出した国や企業との間で取引する京都メカニズムの制度に基づく運用である。

一方、CDRを効果的に実施していくための資金源や運営方法について考察すると、CDRではCO2排出削減のための「排出権取引」と異なった制度を採用する考え方も出てくる。

例えて言えば、各家からゴミの排出が増えて町のゴミ処理が追いつかなくなった場合を想定してみる。

- 先ず町全体のゴミ排出量を減らすことを考えて、各家の排出枠（キャップ）を定め、排出枠が余った家と排出枠を超えて排出してしまった家との間で取引（トレード）する制度を用いることにした。
- この制度を運用してゴミの排出量を減らしたがゴミの排出は続くので、町中のゴミ量の増加が続き住み難くなったため、溜まったゴミを緊急処理する必要が出てきた。既に町中に散らばって排出者を特定出来ないゴミをどのような資金負担と実施体制で処理するか？
- 各家のこれまでのゴミ排出量は把握できるので、各家は累積排出量に比例した資金を負担する。緊急ゴミ処理を経済的に行うために競争入札で業者を決める。このために町に担当部署を設けて運用させる。

このような考え方で以下のCDR事業実施の資金・仕組みを構想する。

2. 実施の資金・仕組み

2.1 事業実施の仕組み

CDR事業運用の基本的考え方は以下の通り。

- 21世紀後半に地球規模で実質ネガティブエミッション（Net Negative Emission）を達成する（構築したエネルギーシステムとの総合で）
- 排出者は国単位、CDR実施者（事業者）は企業単位とする

- 累積 CO2 排出量に応じた排出者の費用負担で、CDR 実施者が CDR を実施する
- 資金運用は排出者代表から構成される国際機関が行う
- CDR の事業実施は競争的環境で行う

2.2 CDR 資金の拠出

各国の累積排出量は以下の式に示すように算出する。

$$E_i = \int_{e_i} dt \quad (t=t_0 \sim t=t) \quad (i \text{ は各国})$$

E_i : 各国の累積 CO2 排出量 [tonC]

e_i : 各国 CO2 排出量 [tonC/year]

t_0 : 累積計算開始年 [year]

t : 費用負担の年 [year]

累積計算開始年は、例えば世界各国が地球環境問題の重大性を認識したリオの「地球サミット」の年（1992 年）とする*。

各国の CDR 費用負担割合は、世界全体の累積排出量（E）に対する各国の累積排出量（ E_i ）の比（ E_i / E ）を基準とする。

$$E = \sum E_i$$

* 世界各国が地球環境問題の重大性を認識した年・イベント

1985 UNEP/WMO/ICSU Villach Statement

1992 UNFCCC Earth Summit, Rio de Janeiro

1995 UNFCCC COP1 The Berlin Mandate

1997 UNFCCC COP3 The Kyoto Protocol on Climate Change

2.3 CDR の運用

① CDR 実施の公募・契約

各国代表で構成する CDR 国際運用機関が一定期間ごとに CDR 実施者を公募し契約する。公募は、例えば 2020 年から 5 年毎に行い、下記の例のように実施者を決めて契約する。

[例]

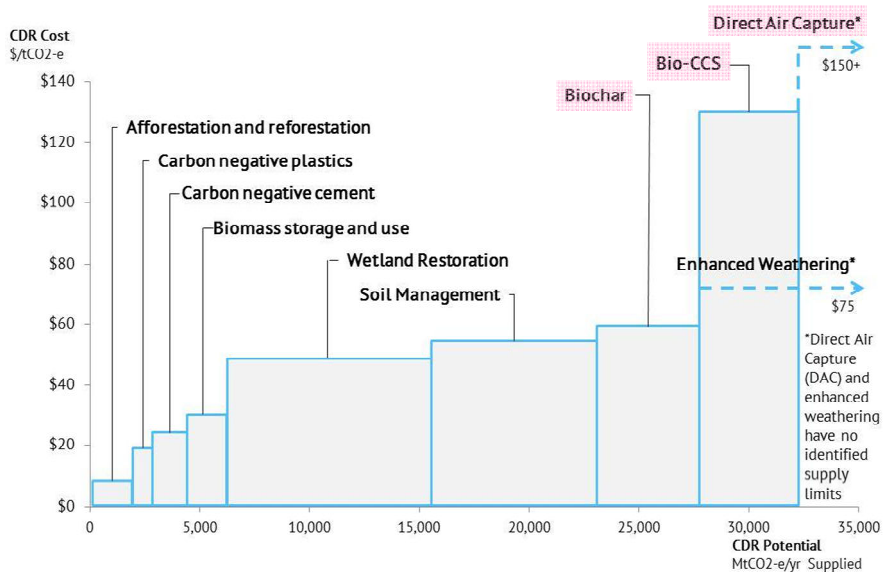
- 2020 年に 2030 年～2050 年の 20 年間に CDR を実施する企業を決定し、契約する。
- CDR 国際運用機関は予め CDR 実施に対して支払う上限金額（\$/tonC）と契約予定 CDR 量を提示し CDR 実施者を公募する。
- 応募量が予定 CDR 量を超過した時は、金額の低い順に予定 CDR 量まで契約する。
- 応募量が CDR 予定量に未達の場合は上限金額を上げての再公募を検討する。

CO2 除去の契約の考え方

自由化された電力取引市場では「メリットオーダー」(Merit order) と呼ばれる調達方式が用いられている。これは系統運用機関が単価の安い順に発電量を契約する方式で全費用を最小にできる。下の図は、IPCC 報告書にある CO2 除去 (CDR) の推定コスト・可能量とその他の温室効果を緩和する方法の推定コスト・可能量のデータを用いて、処理量 (横軸) と除去コスト (縦軸) の関係でメリットオーダーと同じように整理した図。図の作成に当っては粗い仮定を用いているのでこれらの数値は今後の研究開発の進展で変わり得るものとしている⁽¹⁾。

CDR の公募・契約の際に一つの除去方式による除去可能量が契約予定量より小さい場合には、電力取引における「メリットオーダー」と同様な CO2 除去の全費用が最小になる契約をすることが想定される。

A “Backstop Price” for Climate Programs:



図出所: Noah Deich's Blog on "All Things Carbon Dioxide Removal" <https://carbonremoval.wordpress.com/>
元データ: Lomax and Addison (Virgin Earth Challenge), IPCC-AR5-WG1 Chapter 6

② CDR の実施・費用支払い

CDR 事業の実施に関わる契約上の取り決めは通常の商取引に準じる。

- CDR の実績量に応じて CDR 国際運用機関から実施企業に CDR 費用を支払う。
- 契約量を達成できない場合、契約をキャンセルする場合は CDR 実施者は CDR 国際運用機関に所定のペナルティを支払う。
- CDR 実施者間の契約量の融通を当事者間の合意の料金で行うことは認める。

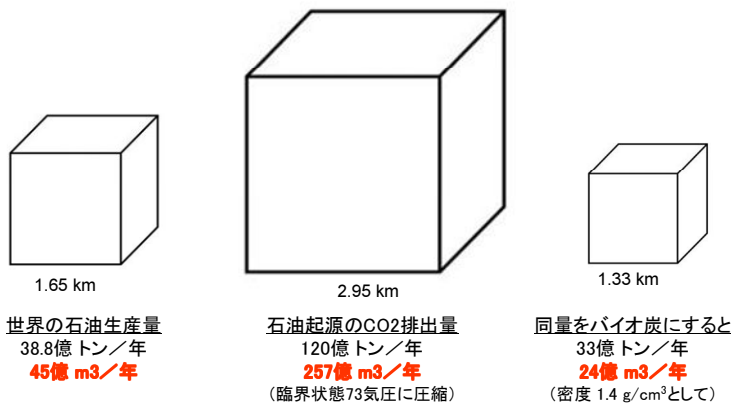
2.4 CDR の料金・規模

CDR の料金・規模などに関する CDR 国際運用機関、各国、CDR 実施者の対応について考察する。

- CDR 技術の進歩に応じて、CDR の契約金額は下がり、契約量は増加することが想定される。
- CDR 国際運用機関は、温暖化による世界の損害と CDR 技術進展から予想される CDR 費用を勘案して各時点における契約 CDR 量を適切に設定する。
- CDR 実施者にとっては早い時期の CDR 料金が高いので早い時期の契約を取るために開発を進めるので、CDR 技術開発は促進される。
- 国は、自国産業の振興のために、また拠出金の自国への還流のために、CDR 技術の開発を支援することになる。
- CDR は世界規模の公共事業で規模・金額が巨大になるので、この CDR 事業を競争的環境で実施する仕組みができると多くの産業分野からの参入が想定⁽²⁾され、経済的な実施が可能になる。石油産業など化石燃料産業の参入も考えられ、これに対して排出と除去の両方の役割を担って利益を上げること（日本で言うマッチポンプ）は倫理上問題という意見⁽³⁾もあるが、その時代の要請に応じてエネルギー供給そして CO₂ 除去で適正に事業を行う限り問題ないとも言える。
- 下の図は現在の世界の石油生産量の体積とその燃焼で排出される CO₂ を CCS するために臨界状態まで圧縮したときの体積を比較したものの（第3章図7の再掲）。CO₂ での CCS は巨大量を扱うことになるので、CCS を用いる CDR 事業の規模は非常に大きなものになる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

石油とその燃焼から排出するCO₂の体積の比較

バイオ炭にすると体積は小さく地上で安定に貯留できる



出所: Oxford Conference on Negative Emission Technologies, September 2013
 における発表をセントに作成

課題についてのコメント・討論

C : CO2 排出者と CDR 事業者、これまでの削減技術と CDR 技術を制度としてどう区別するか？

A : CO2 排出者は国単位、CDR 事業者は企業単位で考える。CO2 排出者（国）は国内の排出量を抑えるような制度をつくる。CDR 事業者（企業）は各国を代表した国際運営主体との契約で事業をする。

CDR 費用の負担は、国単位での排出量の累積値の割合になるので、その国の中で削減すればその分は累積値に反映される。

C : どのようにして競争的にするか、予定価格の意味は？

A : CDR 事業者は企業単位で複数の企業を想定している。複数企業が CDR 国際運用機関から競争的に契約をとることになる。例として示した初回の 2020 年の場合に予定価格を決めたのは、CDR 事業者に事前に目安価格を提示した方がチャレンジし易いから。実際は予定価格での応募量が予定 CDR 量より多くなれば価格競争になる。

C : CDR 契約価格や CDR 契約量の経時的変化は？

A : CDR 単価 (\$/tonC) は研究開発・習熟改良効果などで経時的に下がると想定してる。CDR 事業者は、良い技術を早く開発して価格の高い内に利益を出したいと考えるはずであり、また先行する事業者は経験により改良することも出来る。

CDR 国際運用機関は、地球環境影響と全費用との兼ね合いで、全費用対効果を考えて計画するので、初期よりも後の方で CDR 量を増やすと思う。

C : 各国が原子力発電のような大幅な CO2 削減効果のあるものを導入するインセンティブは保持されるか？

A : 原子力のような大幅効用・大幅削減能力のあるものを導入すると、その国の CO2 排出量が減り CO2 排出量累積値が減るので CDR 負担金が減る効果がある。しかし、もし削減のために過大な費用がかかるならば、CDR 負担金を払った方が得という選択はあり得る。これは、国内で企業などが炭素税を払っても排出を選択するのと同じ考え方。

C : 石油の生産量より CO2 排出量が重量・体積とも圧倒的に大きいことの意味は？、

A : 石油の体積よりもそれを燃焼した時に排出する CO2 は CCS 時に臨界圧まで圧縮しても体積が圧倒的に大きいことは、CO2 による CCS 事業が石油産業より巨大なことを示唆しているとともに、CCS の取扱量の大きさから量的な限度や難しさを感じさせる。CO2 での CCS 処分のほかにバイオ炭 (Biochar) 方式や海洋・陸上安定化処分方式などへ期待するのもそのため。いずれにしても、CDR 事業が競争的な環境で進められるならば、価格の安い順に CDR 量が積み上がっていく「メリットオーダー」で入ってくることになる。

C : CDR はどのくらいのタイムスパンで考えているか？

A : IPCC_AR5 の RCP シナリオ評価では、気温を工業化以前の 2°C 以内の上昇におさえるには、2070 年頃から十分な量の CO₂ 除去による実質ネガティブエミッションが必要とされている。(第 2 章 3 節参照)。

参考文献

- (1) Virgin Earth Challenge, “Costs and Supply of Greenhouse Gas Removal: Is GGR Affordable and Available at Scale?” <http://www.virginearth.com/>
- (2) Ken Caldeira, “Geoengineering: It Could Be a Money-Making Opportunity for Business” Guardian Sustainable Business (2015.2.11)
- (3) Clive Hamilton, “Geoengineering Is No Place for Corporate Profit Making” Guardian Sustainable Business (2015.2.17)
- (4) Keith Whiriskey, “Scaling the CO₂ Storage Industry: A Study and a Tool” Report of Bellona Europa, 44 pages (November, 2014)
- (5) Marianne Fay, et. al., “Decarbonizing Development; Three Steps to a Zero-Carbon Future” Report of the World Bank, 182 pages (May, 2015)

あとがき

2007年2月、大気中CO₂除去の実用技術の実証に\$25M(30億円)の賞金を出すというVirgin Earth Challengeのニュースを見てこの研究を始めた。

それ以前の1999年アルゴンヌ国立研究所にVisiting Scientistとして滞在した時に天然ガスと原子力を用いて水素を製造する研究を始め、帰国後これを発展させて石炭・石油・天然ガスなどの炭素資源と原子力の協働的プロセスによって発電・水素製造・合成燃料製造を行うプロセスを研究・発表していたので、「CO₂除去」にも関心を持った。

大気中CO₂除去のために、バイオマスと原子力の両方を用いてバイオ炭とバイオ合成燃料をつくり、炭素貯留と化石燃料代替をさせるアイデアは直ぐに出てきた。

早速、木材炭化の技術を調べエネルギー・物質収支の計算をして可能性がありそうなので、この分野の専門学会である「木質炭化学会」の2007年5月の年会で発表した。この時にバイオマスの乾燥について有益なコメントを頂き、プロセスに改良を加えて米国原子力学会などで発表した後、2011年にElsevierの”Progress in Nuclear Energy”誌に論文を掲載した。

バイオマスのみでバイオ炭生成とエネルギー利用を行わせるプロセスについては、それ以前から研究がありCO₂除去ではメジャーな方法になっている。気候工学技術に関する英国王立協会や米国科学アカデミーのレビューでは、バイオ炭についての説明はあるが、私の提案のような原子力を使用する方法への言及はない。

2013年に英国のオックスフォード大学で開催されたCO₂除去の国際会議に出席した時、原子力の熱コストについて質問を受けた。CO₂除去には大量のエネルギーを使用する方法があり、原子力を含めて可能性を探ることは重要と思う。

原子力は発電のみならずCO₂除去やバイオ合成燃料の製造など、広く地球環境の改善と世界のエネルギー供給に役立つと考えている。

2015年6月5日



堀 雅夫

Email: mhori@mx.mesh.ne.jp

本書の追加情報は <http://hori.way-nifty.com/> 「研究開発」欄に掲載

- ◆ 本書は下記 2015 年 6 月発行の NSA/COMMENTARIES-S: No.2 の複製
- ◆ 本書に関するご意見・コメントは著者の堀 雅夫<mhori@mx.mesh.ne.jp>まで
- ◆ 本書のカラー版 PDF ファイルのダウンロード案内は下記

<http://hori.way-nifty.com/synthesist/2015/06/21-ed59.html>

- ◆ 本書の英文サマリーのダウンロード案内は下記

<http://hori.way-nifty.com/synthesist/2015/12/carbon-negative.html>

再生可能エネルギーと原子力による

カーボンネガティブ・エネルギーシステム

地球環境の回復と持続的エネルギー供給

—NSA/COMMENTARIES-S:No.2—

平成 27 年 6 月 16 日発行

編集・発行 (一社) 日本原子力産業協会

原子力システム研究懇話会

〒105 - 0001 東京都港区虎ノ門 1-7-6 升本ビル 4 階

電話 : (03) 3506-9071

URL : <http://www.syskon.jp>

E-mail: syskon@syskon.jp

印刷 アサヒビジネス株式会社

ISBN978-4-88911-310-5
