

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

バイオマス混焼発電を用いた BECCS による 炭素排出量削減のライフサイクル評価

令和 4 年 5 月

Life Cycle Evaluation of CO₂ Emission Reduction of BECCS
in the Coal-Biomass Co-Firing Power Plant

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2021-PP-16

概要

バイオマスエネルギーの利用と CO₂ 回収貯留を組み合わせた BECCS (Bio-Energy with Carbon Dioxide Capture and Storage) は、大気中の CO₂ を削減する技術として期待されている。しかし、正味の CO₂ 排出量を負にするには、BECCS に関わる各プロセスの条件の影響を把握し、全体を適切に設計する必要がある。本提案書では、石炭火力発電の低炭素化と、バイオマスエネルギーの有効利用の観点から、木質バイオマスの微粉炭火力発電所での混焼発電に注目し、これに CO₂ 回収貯留を組み合わせた場合の正味の CO₂ 排出量を LCA の手法を用いて評価した。

原料木質バイオマスの収集、チップ製造、発電所までの輸送、および発電所での乾燥、粉砕、石炭の粉砕、それらの燃焼による発電、脱硝、脱硫の排ガス浄化、排ガスからの化学吸収法による CO₂ 回収、および輸送・貯留のための圧縮プロセスに伴う温室効果ガス排出量を LCA により算定した。その結果、550 MWe の微粉炭火力発電所において、CO₂ 回収率が 90% のとき、正味の CO₂ 排出量が負になるためには、バイオマスの混焼率を 13.6% (熱量ベース) 以上にする必要があることが明らかとなった。また、CO₂ 回収率の低下に伴い、正味の CO₂ 排出量を負にするための混焼率が増大することが明らかとなった。

Summary

BECCS, bio-energy with carbon dioxide capture and storage, is expected to be a promising technology for reducing atmospheric CO₂. However, to achieve negative net CO₂ emissions through BECCS, it is necessary to understand the impact of the conditions of each process involved in BECCS and design the entire process properly. This report focuses on co-firing of woody biomass in a pulverized coal-fired power plant from the perspective of reducing the carbon footprint of said plant and effectively utilizing biomass energy, and evaluated the net CO₂ emissions from coupling the co-firing power plant with CCS based upon LCA.

GHGs emissions associated with the collection of raw woody biomass, chip production, transportation to the power plant, and drying, grinding, and coal pulverization at the power plant, power generation from their combustion, flue gas purification including denitrification and desulfurization, CO₂ capture from the flue gas using chemical absorption, and CO₂ compression processes for transportation and storage, were calculated using LCA. The results showed that for a 550 MWe pulverized coal-fired power plant with a CO₂ capture rate of 90%, a biomass co-firing ratio higher than 13.6% (by heat) is required to achieve negative net CO₂ emissions. It was also found that the co-firing ratio required to achieve negative net CO₂ emissions increases as the CO₂ capture rate decreases.

目次

概要

1. 本提案／報告の位置づけ 1

 1.1 ネガティブエミッション技術としての BECCS の必要性 1

 1.2 石炭火力発電所の低炭素化とバイオマス混焼 1

 1.3 LCA による BECCS の炭素排出削減評価 2

2. バイオマスー石炭混焼発電 BECCS プロセスの LCA 3

 2.1 想定したプロセスと評価手法 3

 2.2 想定した BECCS プロセスの正味 CO₂ 排出量 6

3. 結論 9

4. 政策立案のための提案 9

参考文献 10

1. 本提案／報告の位置づけ

1.1 ネガティブエミッション技術としての BECCS の必要性

2015 年のパリ協定により、産業革命以前からの気温上昇を 2°C よりも十分に低く抑え、さらに 1.5°C 未満に抑えるよう努力することが国際目標として掲げられた。IPCC により発表された 1.5°C 特別報告書 [1] では、 1.5°C の温度上昇に抑えるためには、2050 年までに CO_2 排出量をネットゼロにする必要があると報告された。また、IPCC 第 6 次評価報告書（第 I 作業部会）[2] によれば、既に気温は工業化以前に対して 1.09°C （2011-2020 年）上昇しており、このままの排出量が続けば、2040 年以前に 1.5°C に達すると予測される。 1.5°C 目標を達成するためには、今すぐ効果的な CO_2 排出削減策を講ずる必要がある。

そのような限られた期間のなかで化石燃料から完全に脱却し CO_2 排出量をゼロにすることは、資源的、経済的、制度的な面からも極めて困難であると思われ、引き続き化石燃料の使用およびそれによる CO_2 排出が継続すると予想される。また、農業から排出されるメタンや亜酸化窒素などの非化石由来の温室効果ガスの排出も懸念される。これらを相殺し、正味の温室効果ガス排出をゼロにするためには、大気中からの CO_2 除去 (CDR: Carbon Dioxide Removal) が必要不可欠である。

CDR 技術としては、植林、バイオマスエネルギー CO_2 回収貯留 (BECCS)、直接空気回収貯留 (DACCS)、バイオ炭、土壌炭素固定、風化促進、海洋肥沃化などが提案されており、これらはネガティブエミッション技術 (NETs: Negative Emissions Technologies) とも呼ばれている。その中でも BECCS はポテンシャルの大きさと比較的低コストであることから、多くの統合評価モデル (IAMs: Integrated Assessment Models) が温度目標達成のためのシナリオの中で採用している [1, 3]。

図 1 に BECCS の概念図を示す。大気中の CO_2 を植物が光合成により固定し、その植物体（バイオマス）を利用しエネルギーを得る（図では発電を想定）とともに、排出される CO_2 を回収し大気から隔離する技術である。ただし、図では、発電所からの排ガス中の CO_2 の全てが回収されずに、一部大気へ戻る図となっている。エネルギーを得る方法としては、発電以外にもバイオマスの発酵により液体燃料を得ながら、生成する CO_2 を回収貯留する方法もある。

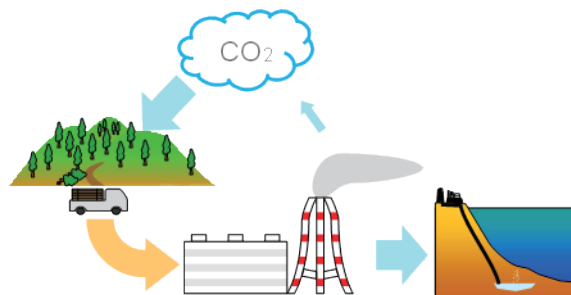


図 1 BECCS の概念図

1.2 石炭火力発電所の低炭素化とバイオマス混焼

石炭火力発電は世界の発電量の約 37% を供給しているが、発電量当たりの CO_2 排出量が天然ガス火力に比べて約 2 倍と大きく、発電部門からの CO_2 排出量の約 70% を占めている。2050 年のネットゼロに向けて、先進国を中心とする世界の多くの国が石炭火力発電所の新規建設の禁止、現有施設の廃止を掲げている。しかし、アジアや電力需要が増加する途上国では価格競争力を持つ石炭火力に依存せざるを得ず、依然として石炭の利用は続くと思われ。

石炭火力発電の低炭素化の一つの手段として、バイオマスとの混焼が挙げられる。CO₂ 排出削減以外にも、石炭とバイオマスの混焼には次のような利点がある。まず、石炭火力発電所でバイオマス燃料を使用するために大きな装置変更を伴わないため、初期投資が抑えられ経済的である。また、数百 MW 以上の大規模な石炭火力発電所で混焼した場合、40%近い高い効率で発電することができる。さらに、バイオマスへの代替により、脱硫、脱硝装置が縮小、あるいは不要となる。

石炭火力発電所の低炭素化の要求により、国内外で石炭火力発電所におけるバイオマス混焼が行われている。国外では主に北欧を中心として導入が進んでおり、世界全体の 4 分の 3 の混焼発電プラントが欧州に存在する。我が国では、2003 年に施行された「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（RPS 法）」（2012 年 7 月「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」施行に伴い廃止）により、火力発電所でのバイオマスの混焼利用が進んだ。しかし、混焼率は熱量ベースで数%程度であった。さらに、2016 年の電力小売市場の自由化に伴い、環境アセスメントを必要としない 112 MW 未満の石炭火力発電所が増加した。これらの小規模な発電所では、国が新設の石炭火力発電所に課した 42%の発電効率を達成することは困難である。そこで、バイオマス混焼した場合には、発電効率の計算の分母の投入熱量からバイオマス分を減算して計算する方式が認められたため、これらの新設の小規模石炭火力発電所ではバイオマス混焼が採用されている。さらに、2019 年度に石炭火力におけるバイオマス混焼が FIT の対象となったために、FIT 認定のバイオマス混焼発電所が増加している。

このように、国内外で石炭火力発電所におけるバイオマス混焼が進められているが、さらに CO₂ 回収貯留を行うことができれば、CO₂ 排出削減に大きく貢献すると期待される。

1.3 LCA による BECCS の炭素排出削減評価

BECCS はバイオマスのエネルギー変換プロセスと、排出される CO₂ を回収・貯留するプロセスに大きく分けることができる。ここでは、バイオマスのエネルギー変換プロセスとして、木質バイオマスの直接燃焼による発電を考える。木質バイオマス発電を行うためには、まず、燃料となる木を造林し、それを伐採・収集し、丸太のまま、あるいは、チップ等に加工し、発電所まで輸送する必要がある。その過程で乾燥やさらなる粉砕が必要になる場合もある。これらの各工程ではエネルギーの投入が必要であり、CO₂ が排出される。発電所で排ガスから CO₂ を回収し、貯留サイトまで輸送し、貯留する各工程においても、外部からのエネルギー投入、それに伴う CO₂ 排出が予想される。また、CO₂ 回収プラントでは排ガス中の CO₂ を 100%回収できるとも限らない。さらに、輸送や貯留工程で回収した CO₂ が漏れ出すことも考えられる。加えて、石炭との混焼の場合では、石炭の調達、粉砕に伴う CO₂ 排出や、排煙脱硫に伴う CO₂ 排出も考慮に入れる必要がある。バイオマス専焼発電に CCS を組み合わせた場合では、バイオマスが成長過程で固定した CO₂ 量が、上記の各工程で排出される CO₂ 量の合計を上回れば、正味の CO₂ 排出量は負となるが、石炭混焼の場合では、バイオマスで代替した分の燃焼由来の CO₂ は削減されるが、その他の工程で排出される CO₂ 量をバイオマスが固定した CO₂ 量が上回るか、つまり、正味の CO₂ 排出量を負にできるかは、混焼率や CO₂ の回収率に大きく依存する。そのため、バイオマスと石炭の混焼による BECCS がネガティブエミッション技術となり得るかは、各工程での CO₂ の収支を一つ一つ把握し、評価しなければならない。そのためには、ライフサイクルアセスメント（LCA）の手法が有効である。

そこで、本提案書では、石炭火力発電所においてバイオマスを混焼し、生成する CO₂ を分離回収・貯留する BECCS プロセスについて、LCA により正味の CO₂ 排出量を算出し、ネガティブエミッションとなる条件を明らかにする。

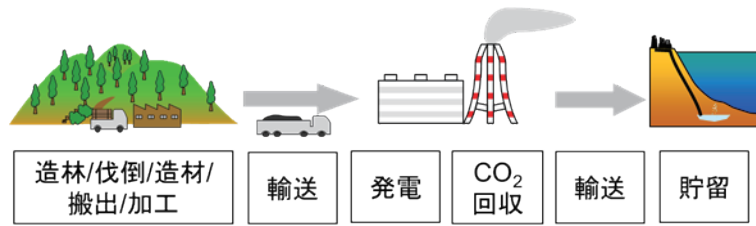


図 2 BECCS の工程

2. バイオマス-石炭混焼発電 BECCS プロセスの LCA

2.1 想定したプロセスと評価手法

図 3 に本提案書が対象とした、バイオマスと石炭混焼 BECCS プロセスと、LCA のシステム境界を示す。大きく分けて、チップ製造、発電所までのチップ輸送、発電所内における発電および CO₂ 回収を評価対象とした。チップ製造のための原木の造林については、文献 [4] により、温室効果ガス排出への寄与が小さく無視できると報告されており、本評価からも除外することとした。チップ製造のための原材料とは、丸太や枕木などの木材原料が含まれ、その製造工程には作業路開設、伐倒・造材、搬出が含まれる。その原材料をチップ製造工場まで輸送し、チップ製造を行う。製造されたチップを発電所まで輸送し、そこで乾燥・粉砕を行う。一方、石炭については、輸入された燃料用の一般炭を使用することとし、沿岸に立地した発電所を想定し、石炭の発電所までの輸送は考慮しない。発電所におけるチップの乾燥・粉砕、石炭の粉砕工程、発電時のチップおよび石炭の燃焼により生成した CO₂ の回収、輸送および貯留に必要な圧力への圧縮工程を対象とした。ただし、その具体的な輸送および貯留工程は考慮していない。

機能単位は発電電力 1 kWh（送電端）とした。環境影響物質としては、文献 [4] のデータを利用する都合上、CO₂、CH₄、N₂O の 3 種類の温室効果ガスを対象とした。IPCC の温暖化係数（AR4, 100 年値）を使用し CO₂ 等価排出量（CO₂eq）として評価した。

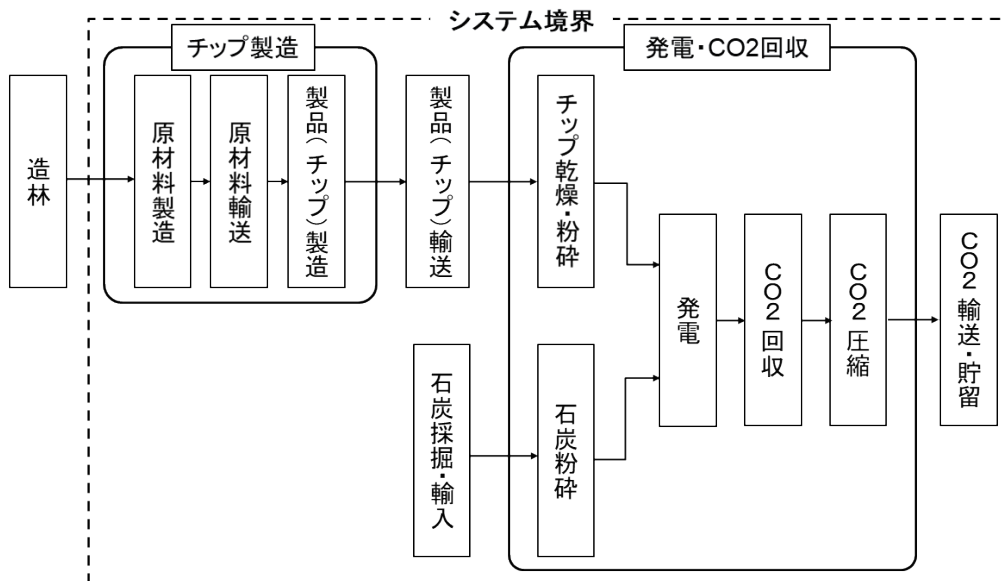


図 3 本報告が対象とした石炭混焼 BECCS プロセスと LCA のシステム境界

原材料製造・輸送、製品製造工程のインベントリデータ、環境影響物質排出量については、文献 [4] のデータに基づき算出した。

発電および CO₂ 回収工程については文献 [5] に基づいた。文献 [5] では、発電容量 550 MWe の超臨界型の微粉炭火力発電所を想定し、石炭のみ / 石炭+バイオマス混焼の 2 ケースに対して、それぞれ CO₂ 回収なし / ありの場合について、Aspen Plus を用いて発電および CO₂ 回収を統合したプロセスシミュレーションを行い、正味発電量、発電効率、CO₂ 排出量等が推定されている。発電プラントは、燃料を燃焼するボイラーと、ボイラーからの排ガスを洗浄するユニットから構成され、排ガス洗浄ユニットは NO_x を除去する選択的触媒還元 (SCR)、フライアッシュを除去するバグハウス (BH)、SO_x を湿式石灰-石膏法により除去する排煙脱硫 (FGD) ユニットの構成されている (図 4)。発電用の蒸気タービンは高圧 (HP)、中圧 (IP)、低圧 (LP) の 3 種類のタービンで構成され、共通のシャフトで発電機に接続されている。

排ガス洗浄ユニットから排出されたガスは CO₂ 回収プラントに送られる。図 5 に文献 [5] で想定された CO₂ 回収プラントの構成を示す。排ガスからの CO₂ 分離には 30 wt% のモノエタノールアミン (MEA) 水溶液による化学吸収法が用いられ、排ガスと吸収液の接触により CO₂ を吸収する吸収塔と、CO₂ を吸収した吸収液から CO₂ を放散し、吸収液を再生する放散塔から構成され、吸収液は吸収塔と放散塔を熱交換器を介して循環する。放散塔下部にはリボイラーが設けられており、CO₂ 放散に必要な熱エネルギーを供給するための蒸気が導入される。この蒸気には IP タービンから LP タービンへ送られる蒸気の一部を抽気し利用する。放散塔上部から排出された CO₂ と水蒸気の混合ガスは冷却され脱水された後、高純度の CO₂ が輸送・貯留のために 110 bar まで 7 段で圧縮される。これらの発電プラント、および、CO₂ 回収プラント内のサブシステムで必要な電力は発電電力により賄われる。文献 [5] では、バイオマスの混焼率を 10% (熱量ベース) に固定し、吸収液の MEA 濃度 30 wt%、CO₂ 回収率 90%、CO₂ 放散に必要な熱負荷 3.5 MJ/kg-CO₂ を基準の条件とし、正味 CO₂ 排出量が推定されている。また、アミン濃度 (20, 30, 40 wt%)、CO₂ 回収率 (90 ~ 50%)、放散熱負荷 (3.5 ~ 2.0 MJ/kg-CO₂) を変えた感度分析も行われている。

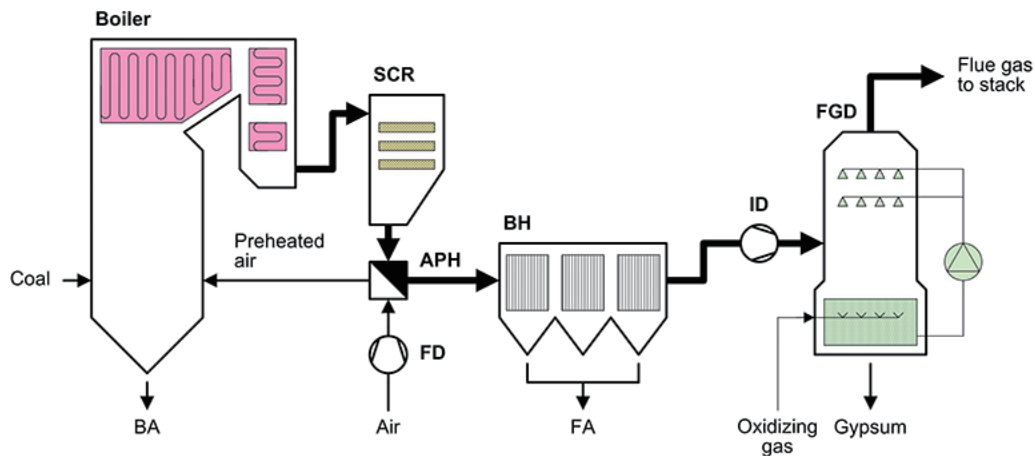


図 4 想定した石炭火力発電プラントの構成 [5]

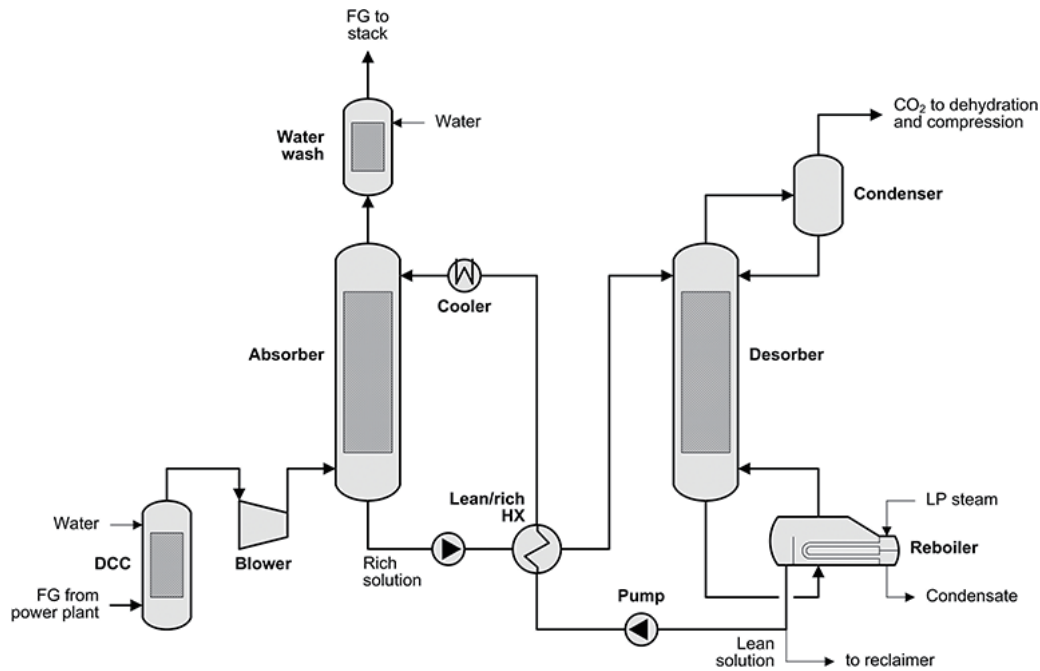


図 5 想定した CO₂ 回収プラントの構成 [5]

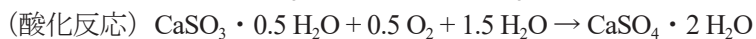
本提案書では、この研究の計算結果を利用し、図 3 に示したシステム境界の範囲で LCA を行った。正味の排出量がゼロとなる混焼率に注目し、それと CO₂ 回収率との関係を把握するために、文献 [5] の CO₂ 回収率を変えた計算に対して、混焼率を 0 ～ 50%（熱量ベース）と変化させ、正味 CO₂ 排出量を推定した。

バイオマスは国内で収集することを想定し、以下の仮定を用いた。

- 1) バイオマス生産速度は日本国土平均として 1.47 t/ (ha y) とする [6]。
- 2) 発電所は沿岸にあり、発電所を中心とした半円形のエリアからバイオマスを収集する。
- 3) 半径 10 km ごとにチップ製造工場を配置し、その範囲内のバイオマスを収集し、チップ化する。
- 4) チップは製造工場から発電所まで輸送することを想定するが、輸送距離は半円形の収集面積内の平均距離とする。輸送には 20 t トラックを使用し、積載率 100% とする。

必要なバイオマス量は、混焼率によって変化し、それに伴い収集面積・距離も変化する。バイオマスは国内収集を想定しているが、文献 [5] の計算結果を利用する都合上、バイオマスの種類は文献 [5] で想定されているハイブリッドポプラとする。計算に使用したバイオマスと石炭の性状を表 1 に示す。

また、文献では発電プラントにおいて、ボイラーからの排ガスに含まれる SO_x を湿式石灰－石膏法により除去することが想定されている。石灰－石膏法は以下の反応式で表される。



上記のように、SO₂ の吸収反応に伴い CO₂ が発生するため、本提案書ではこれを CO₂ 排出量として計上した。また、石灰石 CaCO₃ の製造に伴う GHGs 排出量を考慮した。一方で、NO_x の還元に伴う触媒や還元剤については、その種類や使用量が文献には明記されていないため、これらの

製造に伴う GHGs 排出量は無視することとした。

また、CO₂ 回収プラントにおいて、吸収液の MEA は循環利用されるが、MEA の揮発や、難溶性の塩の生成などで徐々に失われるため、補充が必要である。この補充量を文献 [7] を参考に、2.54 g-MEA/kg-CO₂ とした。この MEA の補充に伴う GHGs 排出量を計上した。

チップ製造工程の GHGs 排出量は文献 [4] に基づき計算した。発電所までのチップのトラック輸送の GHGs 排出量原単位はライフサイクルインベントリデータベース IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis) v3.0 の値を使用した。発電および CO₂ 回収に伴う燃料燃焼由来の CO₂ 排出量は燃料消費量および CO₂ 回収率に基づき計算した。石炭（一般炭、輸入）、排煙脱硫用の石灰石、CO₂ 吸収用の MEA の製造に伴う GHGs 排出量は、IDEA v3.0 のインベントリデータを使用し計算した。

表 1 燃料の性状 [5]

		Bituminous coal Illinois no. 6	Hybrid poplar
Moisture	% ar*	11.12	50.00
Ash	%	10.91	1.48
Carbon	%	71.73	52.36
Hydrogen	%	5.06	5.60
Oxygen	%	7.74	40.16
Nitrogen	%	1.41	0.37
Chlorine	%	0.33	-
Sulfur	%	2.82	0.03
Higher heating value	MJ/kg	30.53	19.63
Lower heating value	MJ/kg	29.45	18.46

* as received

2.2 想定した BECCS プロセスの正味 CO₂ 排出量

表 2 に、CO₂ 回収なし / 混焼なし、CO₂ 回収あり / 混焼なし、CO₂ 回収あり / 混焼率 10 ～ 50% のときの計算結果をまとめた。CO₂ 回収ありのケースでは CO₂ 回収率を 90% とした。

まず、ベースケースとして CO₂ 回収なし / 混焼なしの場合では、正味の発電効率は 40.67% (LHV 基準) であった。正味 CO₂ 排出量は石炭燃焼分に加え、石炭製造および排煙脱硫用石灰石製造に伴う CO₂ 排出量を含み、さらに CH₄、N₂O の温室効果も考慮したため、文献の値 (803 g-CO₂/kWh) よりも 9% 大きな値となった。次に、CO₂ 回収あり / 混焼なしの場合では、CO₂ 回収プラントにおける CO₂ 放散のために IP タービンから LP タービンへの蒸気が一部利用されることにより、タービンの総出力が低下している。この蒸気利用量は、CO₂ 回収なしの場合の約 50% と報告されている [5]。これに加え、CO₂ 回収プラント内の液循環や圧縮のためのエネルギー消費により、正味の発電効率は 30.47% (LHV 基準) となり、CO₂ 回収なしに比べて 10 ポイント低下している。CO₂ 排出量は、石炭燃焼による CO₂ 排出量の 90% が回収されるが、石炭や排煙脱硫用の石灰石製造に伴う CO₂ 排出量を計上し、さらに、正味の発電量が減少しているため、発電量当たりの正味の CO₂ 排出量は回収なしの場合の 90% 減とはならず、24% となった。

次に、バイオマス混焼の場合について見ると、混焼率の増大に伴いタービン出力がわずかに低下している。これは燃料性状の違いによると推測される。バイオマスチップは 10% まで乾燥さ

れているが、石炭に比べ水分が多いこと、また、バイオマス混焼率の増大とともに石炭の粉碎や脱硫に要するエネルギー量は減少するが、バイオマスの乾燥・粉碎に要するエネルギー量がそれよりも増加している。また、表 2 中にあるように、CO₂ の回収・圧縮に伴う消費電力も混焼率とともに増加している。これは表 2 中の回収後の CO₂ 排出量が混焼率とともに増大していることから理解できる。この理由としては、石炭とバイオマスの発熱量当たりの炭素量が異なるためであると考えられる。表 1 中の数値から求めた発熱量 (HHV) 当たりの炭素量は、石炭とバイオマスで、それぞれ 0.02349、0.02681 kg-C/MJ と、後者の方が 14%ほど大きい。そのため、熱量ベースで石炭をバイオマスに置き換えた場合、発生する CO₂ 量がその分多くなる。

上記のような理由により、バイオマスを混焼することにより発電効率が低下したと推測される。しかし、その低下率は混焼率 10%に対して 0.5% (LHV 基準) 程度であった。この低下幅は NETL のデータ (文献 [8]) と同等であり、本提案書の推定結果は妥当であると考えられる。

チップ製造および輸送に伴う CO₂ 排出量はチップの燃焼による排出量の約 8%程度であった。混焼率の増大とともにチップの使用量が増加し、収集距離も増加するが、チップ輸送に伴う CO₂ 排出量は小さく、距離の増大の影響は小さかった。混焼率の増大とともに CO₂ 排出量が増加しているが、これは正味の発電出力の低下の影響もあるが、前述のように、主には石炭とバイオマスの発熱量当たりの炭素率の差に起因していると考えられる。しかし、その増加幅は、バイオマスによる CO₂ 吸収量の増加幅よりも小さい。結果として、CO₂ 排出量からバイオマスによる CO₂ 吸収量を減算した正味 CO₂ 排出量は混焼率の増大とともに減少する。表より、混焼率 10%と 20%の間に正味 CO₂ 排出量がゼロになる混焼率が存在することが分かる。

混焼率と正味 CO₂ 排出量の関係を図 6 に示す。回収率 90%では、正味 CO₂ 排出量は混焼率に対してほぼ直線的に減少した。混焼率 10%と 20%の間で正味 CO₂ 排出量が直線的に変化すると仮定すると、正味 CO₂ 排出量がゼロとなる混焼率は 13.6%となった。このことより、ネガティブエミッションとするには、CO₂ 回収率 90%の場合では、バイオマスの混焼率を 13.6%以上にする必要があることが分かった。

表 2 CO₂ 回収付き微粉炭火力発電所の性能 (CO₂ 回収率 90%)

CO ₂ capture efficiency	%	0	90	90	90	90	90	90
Cofiring ratio	% heat	0	0	10	20	30	40	50
Fuel input:								
Coal consumption	kg/s ar	51.69	51.69	46.60	41.51	36.42	31.33	26.24
Biomass consumption	kg/s ar	0	0	14.67	29.34	44.01	58.68	73.35
Heat input	MWth LHV	1353	1353	1355	1357	1360	1362	1364
Power generated/consumed:								
Gross power output	MWe	580.4	485.1	483.3	481.5	479.6	477.8	476.0
CO ₂ capture and compression	MWe	0	-43.03	-43.69	-44.35	-45.01	-45.67	-46.33
Other auxiliary loads	MWe	-30.14	-29.88	-33.49	-37.09	-40.69	-44.30	-47.90
Net power output	MWe	550.2	412.1	406.1	400.0	393.9	387.9	381.8
Net plant efficiency	% LHV	40.67	30.47	29.97	29.47	28.98	28.48	27.99
CO ₂ balance:								
CO ₂ emission	g-CO ₂ eq/kWh	874.2	206.3	214.1	226.5	239.4	252.7	266.6
CO ₂ uptake by tree	g-CO ₂ eq/kWh	0	0	160.9	326.7	497.5	673.8	855.6
Net CO ₂ emission	g-CO ₂ eq/kWh	874.2	206.3	53.2	-100.2	-258.2	-421.0	-589.0

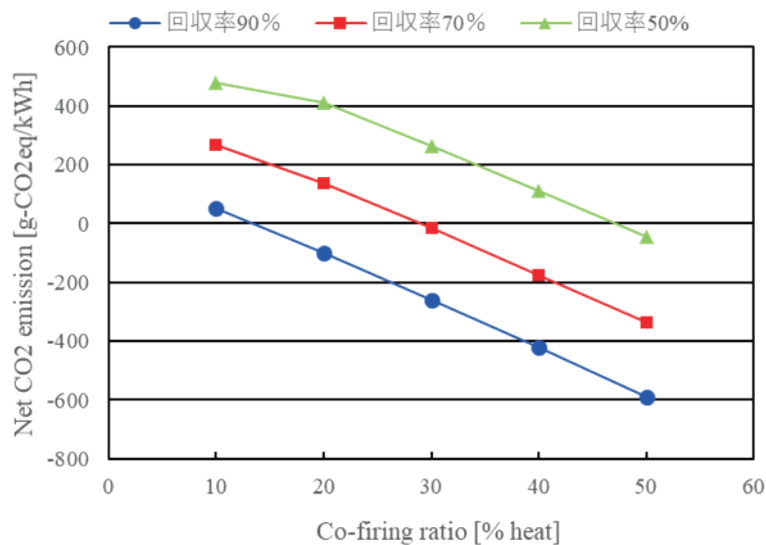


図 6 正味 CO₂ 排出量と混焼率の関係 (CO₂ 回収率別)

文献 [5] では、発電ボイラーからの排ガスのうち、CO₂ 回収プラントに供給される排ガス量の割合を変えることにより、CO₂ 回収率を 90 から 50% まで変えてシミュレーションを行っている。そこで、その結果を利用し、CO₂ 回収率 50、70% についても、混焼率を変えた場合の正味の CO₂ 排出量の推定を行った。その結果を図 6 に合わせて示した。

図より、CO₂ 回収率が低下するにつれて、正味 CO₂ 排出量が上方へシフトしていることが分かる。正味 CO₂ 排出量がゼロとなる混焼率は CO₂ 回収率に大きく依存し、CO₂ 回収率が 90% のときには 13.6% (熱量ベース) であったが、CO₂ 回収率 70、50% で、それぞれ 28.9、47.1% (熱量ベース) に上昇した。

このように、CO₂ 回収プラントでの回収率が低下すると、ネガティブエミッションを達成するための混焼率が上昇し、達成が困難になる。MEA などのアミンによる化学吸収法は CO₂ との反応速度が高いため、90%以上の高い CO₂ 回収率を期待することができるが、吸着法や膜分離法による CO₂ 分離では、原理的に CO₂ 回収率を 90%近くまで高めることが困難である。そのため、BECCS によりネガティブエミッションを達成するためには、使用する CO₂ 分離技術の選択が重要である。また、化学吸収法でも、CO₂ を吸収した吸収液から CO₂ を放散するためのリボイラーの熱負荷を低減することは、発電出力の低下を防ぎ、正味の CO₂ 排出量を削減する上で重要である。

また、本提案書では、バイオマスの種類を Hybrid poplar としたが、発電効率や CO₂ 排出量はバイオマスの性状によって大きく変化する。一例として、日本のスギの場合では、炭素率は 50.8%、高位発熱量は 21.17 MJ/kg（いずれも乾量基準）と報告されている [9]。これより、発熱量当たりの炭素量は 0.0240 kg-C/MJ となり、先述の石炭の値より 2%大きい値に留まる。したがって、石炭とスギを混焼した場合には、Hybrid poplar に比べて、混焼に伴う CO₂ 排出量の増加は小さくなり、発電効率の低下も抑えられると予想される。ただし、その他にも粉碎性は粉碎エネルギーに影響し、灰分や硫黄分は灰の処理や脱硫に要するエネルギーやコストなどに影響するため、実際に使用するバイオマスの性状を考慮に入れ、総合的に評価を行う必要がある。

3. 結論

木質バイオマスを混焼した石炭火力発電において CO₂ 回収貯留を行う BECCS プロセスについて、バイオマスの伐採、収集、チップ製造および輸送も含めた LCA を行い、正味の GHGs 排出量を評価した。その結果、CO₂ 回収率 90%において、正味 GHGs 排出量がゼロとなるバイオマス混焼率は 13.6%と推定された。また、正味 GHGs 排出量がゼロとなる混焼率は、CO₂ 回収率に大きく依存し、CO₂ 回収率が低くなるほどその混焼率は高くなる。

4. 政策立案のための提案

BECCS は大気から CO₂ を除去できるネガティブエミッション技術として期待されているが、本提案書で示したように、石炭との混焼において、ネガティブエミッションを達成するためには、ある程度の混焼率以上が必要である。また、その混焼率は CO₂ 回収率だけでなく、バイオマスや石炭の性状、発電方法や CO₂ 分離方法の各種技術、さらには、バイオマス生産地、加工工場、発電所、および貯留場所間の位置関係など、多くのパラメータに依存している。BECCS をネガティブエミッション技術として成立させるためには、LCA の手法を用いてこれらのパラメータや条件の影響を十分に考慮し、予め CO₂ 収支を把握し、十分な排出削減効果が得られる条件を探索し、設計することが求められる。

また、BECCS による炭素除去効果を高めるためには、混焼率が高いことが望ましい。しかし、バイオマスを石炭と高い割合で混焼するには可燃性や粉碎性の課題を克服する必要がある。IHI がバイオマス専用の粉碎机やバーナを開発し、50% (heat) まで混焼率を高められる見通しを得ている [9] が、そのような、高混焼率を達成するための技術開発も必要である。

また、本提案書では CO₂ 分離回収技術として化学吸収法を想定したが、化学吸収法を用いた CO₂ 回収の実用化のためには、吸収液の再生プロセスにおける熱負荷の削減が大きな課題である。今回の報告でも、CCS なしに対して CCS ありの場合では発電効率が 10%近く低下した。化学吸収法の熱負荷削減については研究が進められており、今後は将来技術を考慮した評価を行いたい。さらに、バイオマス原料については国内で調達することを想定したが、現在のバイオマス発電所の多くは海外からの輸入バイオマスに頼っているところが多い。輸入バイオマスを使用した場合の CO₂ 排出削減効果についても検討したい。

参考文献

- [1] IPCC, “Special Report on Global Warming of 1.5°C”, (2018).
- [2] IPCC, “The Sixth Assessment Report (Working Group I)”, (2021).
- [3] IPCC, “The Fifth Assessment Report”, (2014).
- [4] 森のエネルギー経済研究所, “平成 23 年度林野庁補助事業”, 木質バイオマス LCA 評価事業報告書, (2012).
- [5] Cebrucean, D., Cebrucean, V., and Ionel, I., “Modeling and Evaluation of a Coal Power Plant with Biomass Cofiring and CO₂ Capture. In (Ed.), Recent Advances in Carbon Capture and Storage”, IntechOpen, <https://doi.org/10.5772/67188>, (2017).
- [6] 機械システム振興協会, “革新的バイオマス利用システム有望シナリオに関する調査研究報告書”, (2008).
- [7] Koornneef, J., van Keulen, T., Faaij, A., Turkenburg, W., “Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂”, Int. J. Greenh. Gas Con, 2, 448-467, (2008).
- [8] Fout, T., “Plant and Process Level Carbon Capture Techno-Economic Analysis at NETL”, https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/20VPRCC_Fout.pdf, (アクセス日 : 2022 年 2 月 1 日).
- [9] 田村雅人他, “微粉炭火力の木質バイオマス高比率混焼技術の開発”, IHI 技報, 52(4), 23-29, (2102).

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

バイオマス混焼発電を用いた BECCS による 炭素排出量削減のライフサイクル評価

令和 4 年 5 月

Life Cycle Evaluation of CO₂ Emission Reduction of BECCS in the Coal-Biomass Co-Firing Power Plant

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2022.5

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 特任研究員 高橋 伸英 (TAKAHASHI Nobuhide)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ 8 階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2022 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。