13.脱炭素化の選択肢：応用一般均衡モデルを用いたバイオマスと直接大気回収の比較研究

西浦　理[1]*・藤森　真一郎[1]・大城　賢[1]

[1]京都大学大学院工学研究科(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスターC-1-367)

＊ E-mail: *nishiura.osamu.56s@st.kyoto-u.ac.jp*

脱炭素社会の達成には，輸送部門や製造部門といったCO_2の排出削減が困難な部門への対処が重要となる．本研究は，応用一般均衡モデルにおいて，大気回収技術(DAC)によるCO_2回収と，そのCO_2を用いた炭素除去および合成燃料の製造を新たに考慮した．そして，排出削減が困難な部門への対処方法としてバイオマスを利用した場合とDACを利用した場合の違いを，エネルギー，経済，土地利用の観点から定量化した．結果は， DACを利用した場合には，家計の厚生が4.1%悪化する一方，森林面積が2.8%増加し，食料価格が4.0%低下することが示された．この結果から，バイオマスはDACよりも経済的であるが，その差は小さく，食料生産や生態系への影響を考慮すると，DACを代替技術として採用することは選択肢の一つと考えられる．

Key Words : *Climate change, Paris Agreement, Biomass, Synthetic fuel, Direct Air Capture*

1. はじめに

世界の平均気温上昇を2度より十分低く保ち，1.5度未満に抑制するという，世界共通の長期目標を達成するためには，今世紀後半における脱炭素社会の達成が必要となる[1]．エネルギー供給部門における再生可能エネルギーの利用とエネルギー需要部門における電化を組み合わせることで，温室効果ガスの排出を大きく削減することが可能である．一方で，輸送部門や製造部門は高いエネルギー密度や高温の熱を必要とすることから，電化による削減が困難である．これらの部門はhard-to-abate (HTA)部門と呼ばれ，HTA部門への対処は脱炭素社会を達成するための大きな課題の一つである．

バイオマスはHTA部門の対策として，脱炭素社会の達成に重要な役割を果たすことが期待されている．例えば，バイオマスを転換することで得られる液体燃料は，主要な排出源の一つである輸送部門での排出を削減できる．また，バイオマスを転換する際に排出されるCO_2を回収し，地下に貯留する技術(Bioenergy with Carbon Capture and Storage; BECCS)は，大気中のCO_2を除去することで排出削減が困難な部門での削減を代替することができる．しかし，バイオマスの過度な利用は，農地面積拡大に伴う生態系への影響や，農作物生産との競合から農産物価格の高騰，飢餓のリスクの上昇につながることが指摘されている[2]．

HTA部門の対策することができる新しい削減技術の一つとして，大気中からCO_2を直接回収する技術であるDAC (Direct Air Capture)も近年注目を集めている．回収したCO_2は，油田や塩水帯水層に貯留することで大気中のCO_2を除去することができる(Direct Air Carbon Capture and storage; DACCS)ほか，水素と反応させることで，使用時にCO_2の排出を伴わない合成燃料の製造(Direct Air Carbon Capture and Utilization; DACCU)に利用される．バイオマスを利用する削減技術と比較して，DACは大規模な土地利用変化を必要としない一方で，CO_2回収のために大量のエネルギーを必要とするほか，転換効率が低く生産コストが高いため，経済的な損失が大きい[3]．

IPCCの第五次評価報告書以前に行われた排出削減シナリオについての研究のほとんどは，DACを利用した排出削減策を考慮していない．しかし，近年の脱炭素社会達成に対する関心の高まりとCO_2の回収や利用技術の発展を背景として，DACを考慮した排出削減シナリオを分析した研究は増加しつつある[4]．2度や1.5度目標といった厳しい気温目標を達成するための排出削減シナリオにおいて，DACによる削減効果を分析した先行研究では，DACを利用した削減策はバイオマスを利用した

削減策と比較して，食料生産や水資源に対する影響が少ないという利点を持つことや[5]，削減コストを減少[6]させることを明らかとしてきた．しかし，先行研究の多くはエネルギーシステムモデルをベースとした統合評価モデルを用いて行われてきたため[5-7]，GDPや家計消費の損失といった経済的な指標はほとんど報告されていない．また，統合評価モデルの多くはバイオマスを利用した削減技術をモデルに組み込んだ後に，DACを利用した削減技術を新たに考慮した．そのため，HTA部門に対処する手段として，バイオマスを考慮した場合と，バイオマスとDACを考慮した場合の排出削減シナリオは比較的多く分析されてきた．しかし，HTAに対処する手段としてDACのみを考慮することで，バイオマスを用いた場合とのシナリオの特徴を比較分析した研究は少ない．

電化やバイオ燃料と比較して，削減費用の面で劣るDACを利用した削減策は，ほかの削減策が自由に利用できる場合は限定的な導入にとどまる[7]．しかし，DACを利用した削減策は，食糧生産や生態系への影響が少ないという利点を持つため[3]，気候変動対策と持続可能性を同時に考慮した政策を立案するにあたっては，多少の削減コストの増加を許容し，DACを利用した削減策を導入することが考えられる．本研究は，世界の平均気温上昇を1.5度未満に抑制する排出削減策を実施する際に，HTA部門への対処方法としてバイオマスを利用した場合(第二世代バイオ燃料，第二世代バイオマス発電，これら転換技術に対するCCSの適用)とDACを利用した場合(DACCS，合成燃料)の違いを，エネルギー，経済，土地利用の観点から定量化する．これにより，政策決定者が脱炭素化政策を立案する際に，持続可能性を考慮するための情報を提供することを目的とする．本研究は，全世界を対象として，パリ協定で示された1.5度目標にもとづくCO_2排出削減シナリオを，複数部門および財を明示的に考慮する応用一般均衡モデルであるAsia–Pacific Integrated Modeling/Hub (AIM/Hub)モデルを用いて推計する．

2. 研究の手法

(1) 手法の概要

本研究では，応用一般均衡モデルであるAIM/Hubモデルにおいて，DACによりCO_2を回収する技術，回収したCO_2を地下に貯留することでCO_2を大気から除去する技術，回収したCO_2を燃料の製造に利用する技術を表現し，1.5度目標にもとづく排出削減シナリオを推計する．HTA部門への対策として，バイオマスを利用した対策(第二世代バイオ燃料と第二世代バイオマス発電およびこれら転換技術に対するCCSの適用)を実施する場合とDACを利用した対策(DACCSとDACCU)を実施する場合を比較するため，2つの技術制約シナリオを設定する．モデルは，設定された社会状況や制約条件のもとで，エネルギー需給量，土地利用の変化，生産と消費活動の変化などを経済の均衡構造をもとに計算する．2つの技術制約シナリオの計算結果を比較することで，バイオマスを利用した削減策とDACを利用した削減策の違いをエネルギー，経済，土地利用の観点から評価する．

(2) AIM/Hubモデル

AIM/Hubモデルは，2005年を基準年として1年毎に均衡解を求める逐次均衡型の応用一般均衡モデルをベースとした統合評価モデルである[8]．モデルは43の産業部門，政府部門，家計部門および投資部門を持ち，各部門はそれぞれの資本ストックを持つ．この資本ストックは，毎期投資および年間4％の資本減耗を行う．

図-1はAIM/Hubモデルにおける部門間での合成燃料と大気由来のCO_2および財・生産要素のフローを示している．DAC部門は，生産要素と天然ガスを投入することで，大気由来のCO_2を生産する部門として表現している．貯留部門では，生産要素と大気由来のCO_2が投入され，CO_2の貯留サービスが産出される．そして，投入された大気由来のCO_2の量だけ大気中のCO_2を除去する部門としてモデル化されている．産出された貯留サービスは，最終消費の一つとして政府部門で消費される．貯留部門は，DACCSが持つ他の排出削減技術に対するバックストップ技術としての役割を想定し，炭素価格がDACによるCO_2の単位回収・貯留量当たりのコストと一致するまで炭素貯留を行う．合成燃料製造部門は生産要素と系統電力から生産される水素および大気由来のCO_2を投入し，民生部門，製造部門および輸送部門で利用可能な合成燃料を生産する．

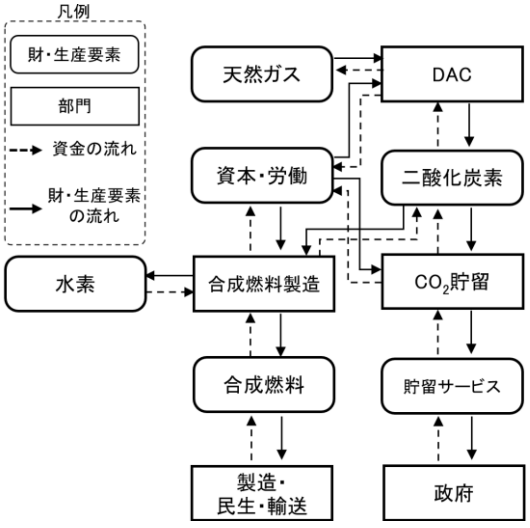


図-1 AIM/Hubモデルでの合成燃料生産フロー

表-1 推計を行うシナリオ

シナリオ名	排出削減シナリオ	利用する削減技術
Baseline	なし	-
1.5C_BIO	1.5度目標	第二世代バイオ燃料・ 第二世代バイオ発電(w/wo CCS)
1.5C_DAC	1.5度目標	DACCS・ 合成燃料(液体・気体)

(3) 技術データ

本節では各種技術のモデル化を行うために使用したデータとモデルにおける設定を報告する．CO_2の回収コストについては，Carbon Engineering社におけるDACプラントの運転実績からKeith et al. (2018)[3]が推計したコストをもとに設定した．合成燃料のコスト設定については，IEA (2020)[9]をもとに，資本コストを565ドル/kW，運転コストを20ドル/kW/年，耐用年数を25年，転換効率を73%，中間投入財 (大気由来のCO_2) の需要量を0.2t/MWhと設定した．AIM/Hubモデルにおいて，エネルギー需要部門におけるエネルギー財の選択はロジット関数に基づく．合成燃料の広範な利用を表すため，ロジット関数のパラメータは，合成液体燃料については石油製品のパラメータと等しく，合成気体燃料についてはガス製品のパラメータと等しく設定した．

(4) シナリオ

表-1に本研究で推計するシナリオをまとめる．本研究で設定するシナリオは，世界の平均気温上昇を1.5度未満に抑制するCO_2排出削減シナリオと，排出削減技術の利用についての設定を組み合わせて作成する．また，Baselineシナリオとして，現状の気候変動に関連した政策を継続し，追加の排出削減を行わないシナリオを設定する．すべてのシナリオにおいて，将来の社会経済状況を，気候変動関連の研究において広く用いられている共通社会経済経路 (Shared Socioeconomic Pathways; SSPs)[10]から中庸なシナリオであるSSP2シナリオに基づき設定する．本研究におけるCO_2排出削減シナリオは，Riahi et al. (2021)[11]から1.5度目標に相当する排出経路として2018年から2100年までの累積CO_2排出量を500Gt-CO_2に抑制する経路をもとに設定した．このシナリオでは，2020年から排出削減を開始し，2050年においてCO_2排出量がほとんど0に達する．本研究では，DACを利用した削減策とバイオマスを利用した削減策の影響を分析するため，それぞれの技術の利用を制限したシナリオ設定した．1.5C_BIOシナリオでは，DACCSと液体および気体の合成燃料を利用しない．1.5C_DACシナリオでは，第二世代のバイオ燃料転換技術とバイオマス発電技術を利用しない．

3. 結果

(1) 二酸化炭素排出量

1.5度目標を達成する2つのシナリオ(1.5C_BIO，1.5C_DAC)では，2050年におけるCO_2排出量がほとんど0となることが確認された(図-2)．HTA部門の排出に対処する方法としてDACを利用する場合には，DACCSが2050年に10.8Gt-CO_2のCO_2を大気中から除去し，エネルギー供給，製造，輸送部門における残存排出を相殺した．HTA部門の排出に対処する方法として，バイオマス関連の技術を利用した場合には，エネルギー供給とCO_2回収が同時に行われるため，CO_2除去への依存度が低くなった．結果として，BECCSにより2050年において8.01Gt-CO_2のCO_2が回収され，製造部門と輸送部門における残存排出を相殺した．

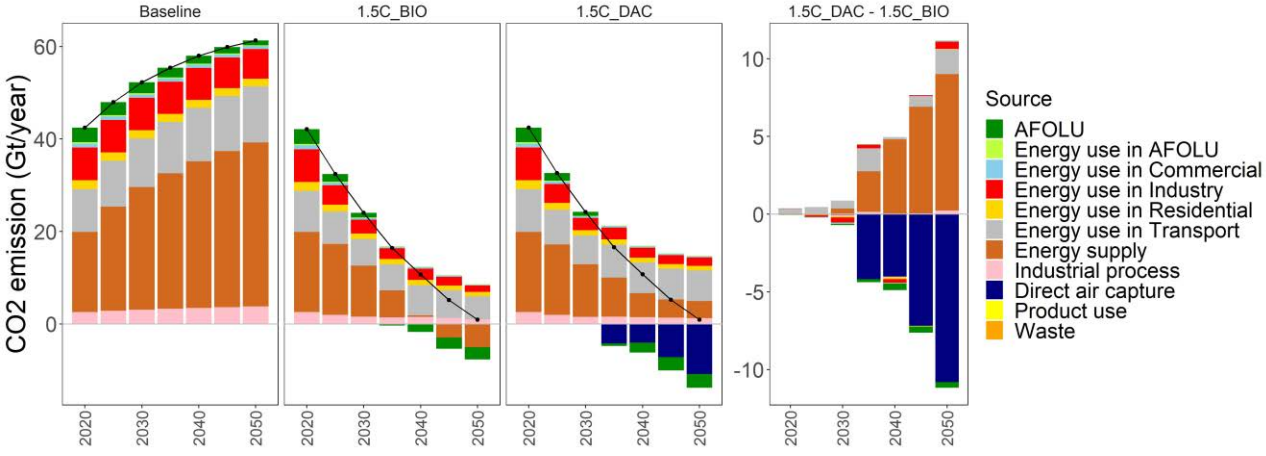


図-2 CO_2排出及び回収量．棒グラフ各部門の排出量を示し，折れ線グラフはすべての部門の排出量の合計を示す．

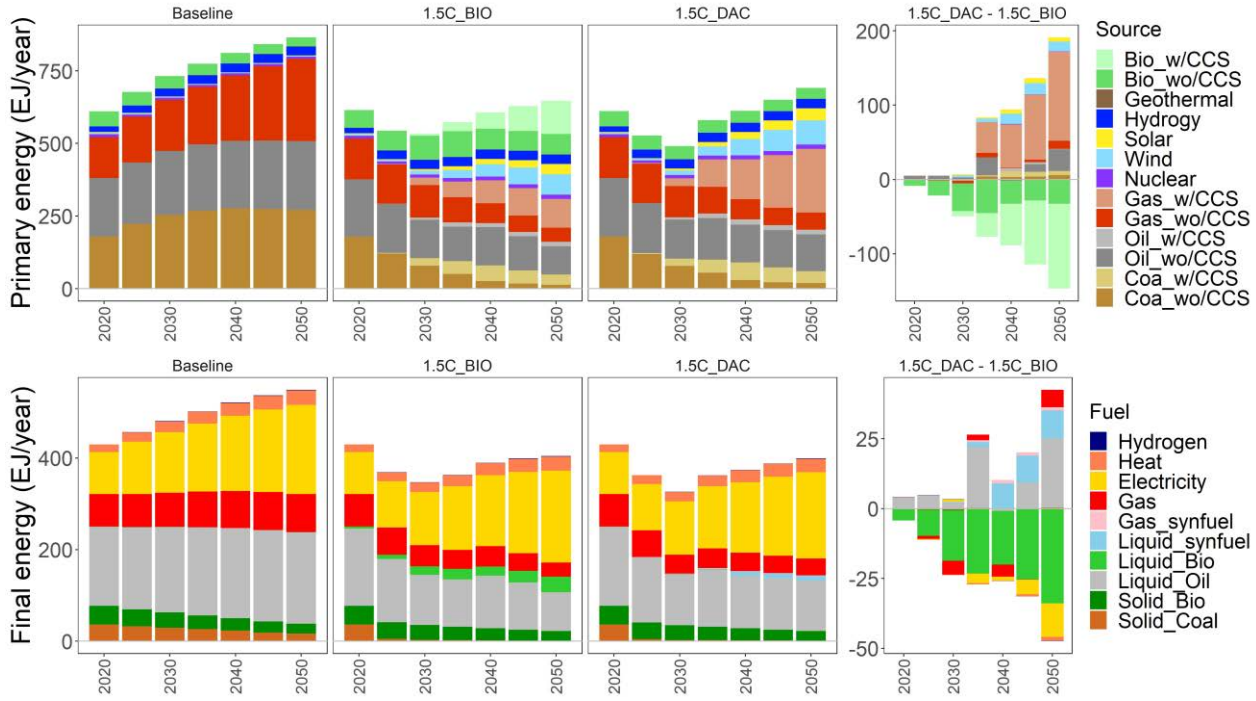


図-3 一次エネルギー供給量および最終エネルギー消費量

(2) エネルギー

1.5度目標を達成する2つのシナリオでは，再生可能エネルギーが大規模に導入され，電力の消費が増加した(図-3)．DACを利用する場合，DACの運転に必要なエネルギーと合成燃料の低い変換効率が一次エネルギー供給を増加させた．また，バイオマスを利用する場合と比べ，DACを利用する場合にはエネルギー価格が高く，エネルギー消費部門での需要を減少させた．その結果，DACを利用する場合には，化石燃料を多く消費し，2050年において年間一次エネルギー供給量を44.4EJ増加させた．エネルギー供給源とエネルギー財の消費量に注目すると，バイオマスを利用した場合では，2050年にはバイオマスによって年間185EJのエネルギーが供給され，バイオ液体燃料が34.1EJ消費された．DACを利用する場合では，DAC設備の稼働のために2050年に年間101EJのエネルギーが消費され，合成燃料は11.2EJ消費された．また，大気中からのCO_2の除去量が多いDACを利用するシナリオでは，化石燃料由来の液体および気体燃料の消費量が多い．

(3) 土地利用

1.5度目標を達成する2つのシナリオでは，植林によるCO_2除去のため森林面積が増加し，代わりに農畜産物を生産する土地の面積が減少した(図-4)．バイオマスを利用してHTA部門に対応する場合には，DACを用いる場合と比較すると，2050年のエネルギー作物を生産するために，森林面積を2.79%，エネルギー作物を除く耕作地面積を7.19%減少させた．

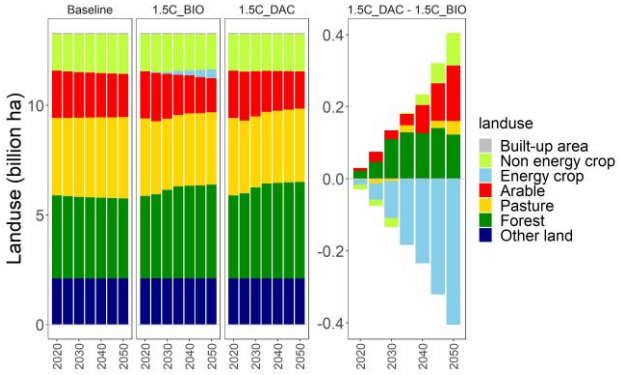


図-4 土地利用変化

(4) 経済

表-2は，ベースラインと比較した2050年のGDP損失，等価変分，価格変動の観点から，各シナリオの経済的影響を示している．DACを利用する場合と比較すると，バイオマスを利用する場合には，排出削減に伴うGDP損失が68.6%増加し，食料価格は3.99%上昇した一方で，等価変分の損失は4.05%減少した．

表-2 2050年での排出削減による経済影響

	1.5C_BIO	1.5C_DAC
GDP損失	6.56%	3.89%
等価変分	9.14%	9.52%
農畜産物の価格変化	28.3%	23.3%
バイオ液体燃料，合成液体燃料価格 (baselineの石油製品価格比)	133%	699%

5. 考察

1.5C_BIOシナリオと1.5C_DACシナリオを比較すると，GDPの損失は1.5C_BIOシナリオでより大きく，等価変分で定量化された家計の厚生の損失は1.5C_DACシナリオでより大きい．1.5C_DACシナリオでは，DAC運用のための投資とエネルギー消費がGDPの構成要素とみなされるため，GDPの損失は減少した．しかし，これらは最終消費に関わらないため家計の厚生を増加させない．また，DACの利用によって，エネルギー財とエネルギー多く消費する産業で生産される財の価格は上昇したため，家計の厚生は減少した．1.5C_BIOシナリオでは，CO_2の除去とエネルギー転換が同時に行われ，双方がより経済的に実行された．その結果，エネルギー財やエネルギー多消費産業で生産される財の価格上昇は抑制され，厚生が1.5C_DACシナリオの水準を上回ったと考えられる．

6. おわりに

本研究は，AIM/HubモデルにおいてDACと合成燃料の生産を表現し，1.5℃目標を達成する際にバイオマスに関連した技術を利用するシナリオとDACに関連した技術を利用するシナリオの2つの気候変動緩和シナリオを推計した．その結果，バイオマスを利用する場合と比較して，DACを利用する際には家計の厚生が悪化し，化石燃料の消費，CO_2除去への依存が増加する一方で，森林面積は増加し，食料価格は低下することが示された．これらの結果は，バイオマスに関連した技術を利用した削減策は，エネルギーと経済的な観点からは，DACに関連した技術よりも効率的であることを示している．しかし，その差はわずかであるため，食料生産や生態系への影響を考慮すると，DACを代替技術として採用することは，選択肢の一つとして考えられる．

謝辞：本研究の実施に当たり，藤森，大城は (独)環境再生保全機構環境研究総合推進費(JPMEERF20211001)，JST 低炭素社会実現のための社会シナリオ研究事業 JPMJCN2301，公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金の支援を受けた．西浦は JSPS 特別研究員奨励費(22KJ1905)の支援を受けた．

REFERENCES

1) Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kheshgi, H., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., Séférian, R., & Vilariño, M. V., Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (edit), Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, World Meteorological Organization, 2018.

2) Hasegawa, T., Fujimori, S., Havlík, P., Valin, H., Bodirsky, B. L., Doelman, J. C., Fellmann, T., Kyle, P., Koopman, J. F. L., Lotze-Campen, H., Mason-D'Croz, D., Ochi, Y., Pérez Domínguez, I., Stehfest, E., Sulser, T. B., Tabeau, A., Takahashi, K., Takakura, J., van Meijl, H., … Witzke, P., Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy, Nature Climate Change, Vol.8(8), pp.699–703, 2018.

3) Keith, D. W., Holmes, G., Angelo, D. S., & Heidel, K., A Process for Capturing CO2 from the Atmosphere, Joule, Vol.2(8), pp.1573–1594, 2018.

4) Riahi, K., Schaeffer, R., Arango, J., Calvin, K., Guivarch, C., Hasegawa, T., Jiang, K., Kriegler, E., Matthews, R., Peters, G. P., Rao, A., Robertson, S., Sebbit, A. M., Steinberger, J., Tavoni, M., & Van Vuuren, D. P., Mitigation pathways compatible with long-term goals, P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. A. Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (edit), Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter03.pdf

5) Fuhrman, J., McJeon, H., Patel, P., Doney, S. C., Shobe, W. M., & Clarens, A. F., Food–energy–water implications of negative emissions technologies in a +1.5 °C future, Nature Climate Change 2020 10:10, Vol.10(10), pp.920–927, 2020.

6) Akimoto, K., Sano, F., Oda, J., Kanaboshi, H., & Nakano, Y., Climate change mitigation measures for global net-zero emissions and the roles of CO2 capture and utilization and direct air capture, Energy and Climate Change, Vol.2, pp.100057, 2021.

7) Oshiro, K., & Fujimori, S., Role of hydrogen-based energy carriers as an alternative option to reduce residual emissions associated with mid-century decarbonization goals, Applied Energy, Vol.313, pp.118803, 2022.

8) Fujimori, S., Hasegawa, T., & Masui, T., AIM/CGE V2.0: Basic feature of the model, Post-2020 Climate Action: Global and Asian Perspectives (pp. 305–328), Springer Singapore, 2017. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-3869-3_13

9) IEA, CCUS in Clean Energy Transitions, IEA, 2020.

10) O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & Vuuren, D. P. van, A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways, Climatic Change, Vol.122(3), pp.387–400, 2014.

11) Riahi, Keywan, Bertram, C., Huppmann, D., Rogelj, J., Bosetti, V., Cabardos, A. M., Deppermann, A., Drouet, L., Frank, S., Fricko, O., Fujimori, S., Harmsen, M., Hasegawa, T., Krey, V., Luderer, G., Paroussos, L., Schaeffer, R., Weitzel, M., Zwaan, B. van der, … Zakeri, B., Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot, Nature Climate Change 2021 11:12, Vol.11(12), pp.1063–1069, 2021.