



### <目次>

#### 特集：Carbon Removal & Recycle (CR2)の LCA 算定 WG 報告会

#### 事例紹介【詳細版】

- 信州大学

LCA 算定事例① BECCS . . . . . 2

- 太平洋セメント株式会社

LCA 算定事例② 低炭素型炭酸化養生コンクリート製品 . . . . . 9

- 立命館大学

LCA 算定事例③ バイオ炭 . . . . . 20

- 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

LCA 算定事例④ ブルーカーボン . . . . . 25

- 早稲田大学

LCA 算定事例⑤ 風化促進 . . . . . 30



# 木質バイオマス混焼発電による BECCS の LCA

信州大学 高橋伸英

## 1. 算定の目的と評価対象技術の設定

バイオマスエネルギーの利用と CO<sub>2</sub> 回収貯留を組み合わせた BECCS (Bio-Energy with CO<sub>2</sub> Capture and Storage) は、大気中から CO<sub>2</sub> を除去できる技術として期待されている。しかし、正味の CO<sub>2</sub> 排出量を負にし、大気からの CO<sub>2</sub> 除去を確実にするためには、BECCS に関わる各プロセスを適切に設計し、組み合わせる必要がある。一方、炭素強度の高い石炭火力発電の低炭素化が求められている。石炭火力発電所でのバイオマスの混焼は経済性の観点から、および、大規模火力発電の高い発電効率によるバイオマスエネルギーの有効利用の観点から、望ましい方法であると言える。さらに、これに CO<sub>2</sub> 回収貯留を組み合わせることにより、大気からの炭素除去も期待できる。

本報告では、木質バイオマスの微粉炭火力発電所での混焼発電と CO<sub>2</sub> 回収貯留を組み合わせた BECCS システムを対象とし、正味の CO<sub>2</sub> 排出量を LCA の手法を用いて推定した。また、比較対象として、石炭火力発電 (CCS なし/あり) システムについても正味 CO<sub>2</sub> 排出量を推定し、CO<sub>2</sub> 排出削減効果を評価した。さらに、BECCS システムにおいて、正味 CO<sub>2</sub> 排出量が負となるバイオマスの混焼率を明らかにした。

## 2. 機能単位の設定

発電電力 1 kWhe (送電端) とする。

## 3. 評価範囲 (システム境界) の設定

図 1 に、評価対象とした (a) 石炭専焼/CCS なしシステム、(b) 石炭専焼/CCS ありシステム、および、(c) 石炭-バイオマス混焼/CCS あり (BECCS) システムの構成とシステム境界を示す。

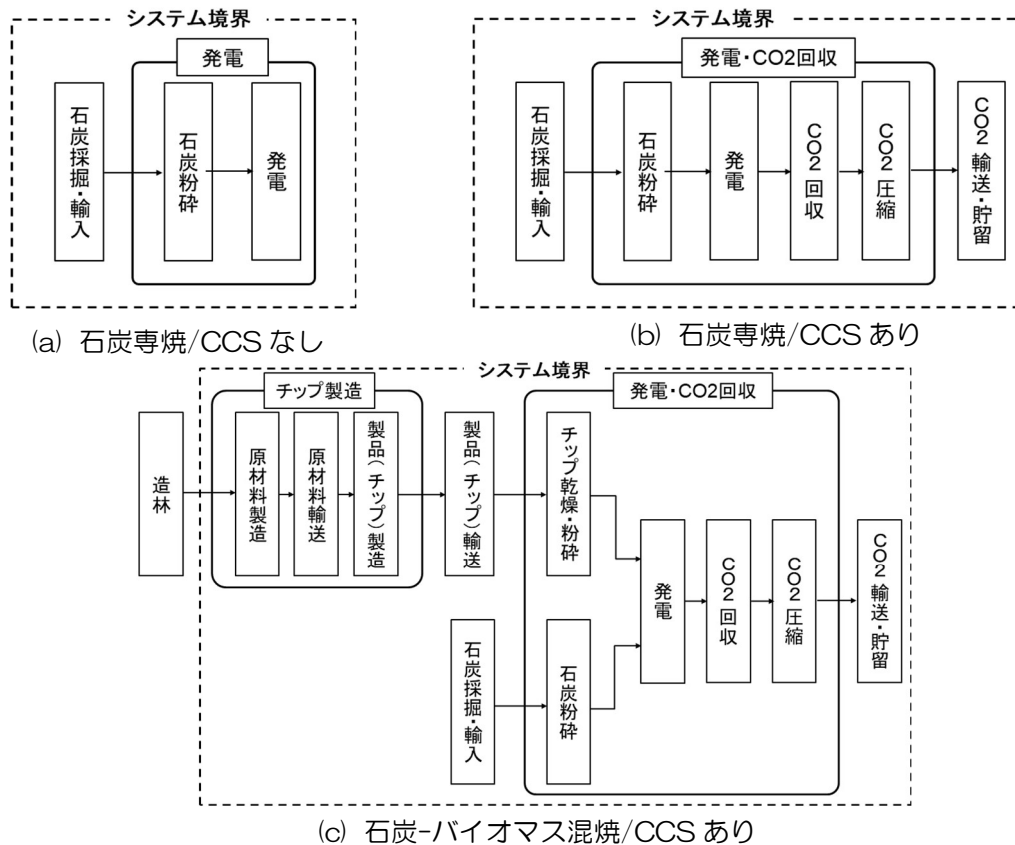


図 1 算定対象とした発電システムとシステム境界

燃料の石炭については、輸入炭を想定し、海外での採掘から日本までの輸送を考慮する。バイオマスについては、立木の伐採、丸太や枕木などの原材料製造・輸送、チップ製造・輸送をシステム境界内として考慮した。ただし、参考文献 1)による、造林に伴う温室効果ガス排出量は微量であるとの報告に基づき、本報告ではシステム境界外とした。

#### 4. 算定の対象とする GHG と温室効果係数

チップ製造に伴う GHG 排出量は参考文献 1)に基づき算定する。この文献では、GHG のうち二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、メタン (CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) の 3 種類を算定対象としている。そこで、本報告でもこれら 3 種類の GHG を算定対象とした。温室効果係数には、本報告では IPCC の第 5 次評価報告書の 100 年値を使用する。ただし、チップ製造については、文献 1)では IPCC の第 4 次評価報告書の 100 年値が使用され、それをを用いて計算された結果を本報告では引用するため、温室効果係数の違いによる誤差を含んでいることに注意が必要である。

#### 5. 算定方法

##### 5.1 燃料製造および輸送工程

原料となる木質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<sup>2)</sup>。
- 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。

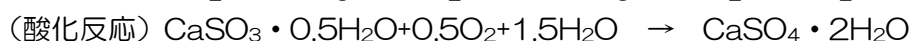
チップ製造のための原材料である丸太や枕木などの製造工程には作業路開設、伐倒・造材、搬出が含まれる<sup>1)</sup>。その原材料をチップ製造工場まで輸送し、チップを製造し、発電所まで輸送する。チップ製造工程の GHGs 排出量は文献 1)に基づき計算した。発電所までのチップのトラック輸送の GHGs 排出量原単位は IDEA v3.0 のインベントリデータを使用した。

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。輸入炭の GHGs 排出量原単位は IDEA v3.0 のインベントリデータを使用した。

## 5.2 発電および CO<sub>2</sub> 回収工程

発電および CO<sub>2</sub> 回収工程については文献 3)に基づいた。この文献では、発電容量 550 MWe の超臨界型の微粉炭火力発電所を想定し、石炭専焼、石炭-バイオマス混焼の 2 つのケースに対して、それぞれ CO<sub>2</sub> 回収なし/ありの場合について、Aspen Plus を用いて発電および CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 排出量等を推定している。発電プラントは、燃料を燃焼するボイラーと、発電用の蒸気タービン、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る。排ガス洗浄ユニットは NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> を湿式石灰-石膏法により除去する排煙脱硫 (FGD) ユニットで構成されている。洗浄された排ガスからの CO<sub>2</sub> 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ている。CO<sub>2</sub> を吸収する吸収塔と、CO<sub>2</sub> を吸収した吸収液から CO<sub>2</sub> を放散し、吸収液を再生する放散塔の間を、熱交換器を介して吸収液が循環する。放散塔下部のリボイラーでは、蒸気タービンから抽気された蒸気が導入され、CO<sub>2</sub> 放散に必要な熱エネルギーを供給する。放散塔上部から排出された CO<sub>2</sub> と水蒸気の混合ガスは冷却・脱水された後、高純度の CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 回収プラント内の所用電力、および、石炭とバイオマスの粉碎に必要な電力は発電電力により賄われる。

文献 3) では、バイオマスの混焼率を 10 % (熱量ベース) に固定し、CO<sub>2</sub> 回収率 90%、吸収液の MEA 濃度 30 wt%、CO<sub>2</sub> 放散に必要な熱負荷 3.5 MJ/kg-CO<sub>2</sub> を基準の条件とし、正味 CO<sub>2</sub> 排出量が推定されている。本報告では、発電および CO<sub>2</sub> 回収工程の CO<sub>2</sub> 排出量は同文献のデータを使用する。ただし、文献ではボイラーからの排ガス中の SO<sub>x</sub> を、下記の反応式で表される湿式石灰-石膏法により除去することが想定されているが、この反応に伴う CO<sub>2</sub> 排出量が考慮されていないため、本報告ではこれを算入する。さらに、石灰石 CaCO<sub>3</sub> の製造に伴う GHGs 排出量も算入する。



また、CO<sub>2</sub> 回収に使用される吸収液の MEA は、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 2.54 g-MEA/kg-CO<sub>2</sub> とし<sup>4)</sup>、MEA の消費に伴う GHGs 排出量を計上した。排煙脱硫用の石灰石、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た。

本報告では、回収された CO<sub>2</sub> の輸送および貯留時の漏洩はないものとし、永久の隔離期間

を想定した。また、資本財に伴う GHG 排出量は運転に伴う排出量に比べて十分に小さいと考え、算定の対象外とした。

## 6. 算定結果

### 6.1 混焼発電 BECCS システムの CO<sub>2</sub> 収支

図 2 に、石炭-バイオマス混焼発電 BECCS システムの CO<sub>2</sub> 収支を示す。森林による CO<sub>2</sub> 吸収量は 160.9 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe であり、その炭素はバイオマスとしてシステム内に投入される。チップ製造・輸送、石炭製造・輸送に伴う CO<sub>2</sub> 排出量はそれぞれ 12.3、72.9 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe と計算された。バイオマスおよび石炭の燃焼により排出される CO<sub>2</sub> のうち 90% が回収・貯留されるが、残りの 10% に相当する 110.6 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe が未回収として大気中に放出される。また、発電プラントの脱硫プロセスに伴い 14.0 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe が、CO<sub>2</sub> 吸収のための MEA の消費に伴い 4.1 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe の CO<sub>2</sub> がシステム外へ排出される。これらより、大気中への正味の CO<sub>2</sub> 排出量は 53.2 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe となった。

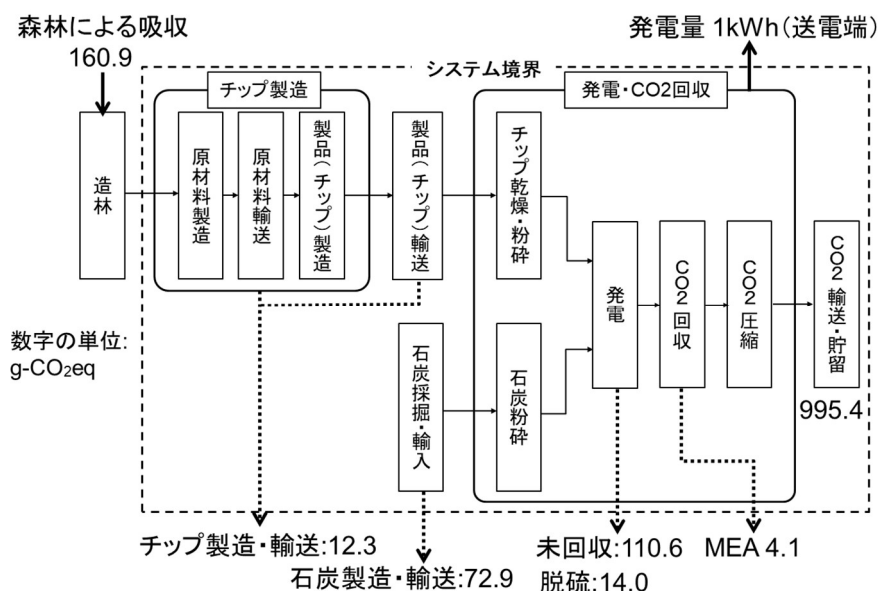


図 2 石炭-バイオマス混焼発電 BECCS システムの CO<sub>2</sub> 収支

### 6.2 各システムの CO<sub>2</sub> 排出量と CO<sub>2</sub> 排出削減貢献量

算定された各システムの CO<sub>2</sub> 排出量の内訳を図 3 に示す。排出量を正、吸収または回収・貯留量を負の値として示した。この正負の差し引きにより正味の CO<sub>2</sub> 排出量が求められる。横軸の各見出しの下の括弧内の数値が正味 CO<sub>2</sub> 排出量を表す。

石炭専焼/CCS なしの場合の正味 CO<sub>2</sub> 排出量は 874.2 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe となった。一方、石炭専焼/CCS ありの場合では、CO<sub>2</sub> 分離回収や回収した CO<sub>2</sub> の圧縮に発電量の一部が使用されるため、送電端での発電量が減少する。そのため、燃料燃焼由来、燃料燃焼由来以外にも 1 kWhe 当たりの CO<sub>2</sub> 発生量は増加する。一方、燃料燃焼由来の CO<sub>2</sub> の 90% が回収されるため、正味 CO<sub>2</sub> 排出量 206.3 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe となり、CCS なしに比べて 667.9 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe 減少する。

バイオマス混焼/CCS ありの場合では、バイオマスの乾燥・粉砕に発電量の一部が消費されること、バイオマスと石炭の性状の違いにより、発電効率が若干低下し、発電量が減少す



ることにより、石炭専焼/CCS ありの場合よりも CO<sub>2</sub> 発生量は微増する。一方、前項で示した通り、原料となる木材が大気中から 160.9 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe の CO<sub>2</sub> を吸収するため、正味 CO<sub>2</sub> 排出量は 53.2 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe と大きく減少する。石炭専焼/CCS なし、および、石炭専焼/CCS ありの場合に比べて、それぞれ -821.0、-153.1 g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe の CO<sub>2</sub> 排出削減貢献量となる。

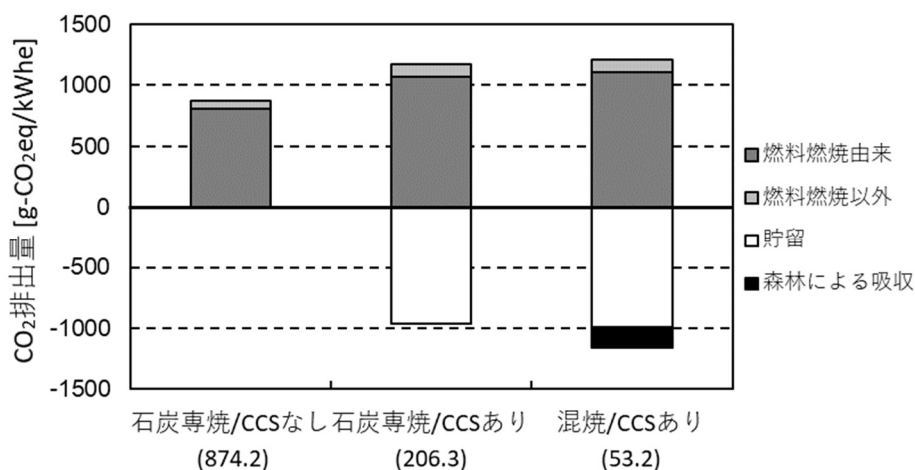


図3 各システムの CO<sub>2</sub> 排出量の内訳と正味 CO<sub>2</sub> 排出量  
(括弧内数値は正味 CO<sub>2</sub> 排出量 [g-CO<sub>2</sub>eq/kWhe])

### 6.3 バイオマスの混焼率と正味 CO<sub>2</sub> 排出量

前節で示した通り、混焼率 10% (熱量ベース) の条件では正味 CO<sub>2</sub> 排出量は正の値となり、ネガティブエミッションとはならなかった。そこで、混焼率を変化させて正味 CO<sub>2</sub> 排出量を算出し、ネガティブエミッションを達成できる混焼率を調査した。

図4に混焼率と正味 CO<sub>2</sub> 排出量の関係を示す。正味 CO<sub>2</sub> 排出量は混焼率の増大とともに減少する。正味 CO<sub>2</sub> 排出量がゼロとなる混焼率は 10-20%の間にあることが分かる。その2点間で直線的に変化すると仮定し、正味 CO<sub>2</sub> 排出量がゼロとなる混焼率を求めたところ、13.6%となった。今回の条件では、石炭と木質バイオマスの混焼発電による BECCS によりネガティブエミッションを達成するためには、混焼率を 13.6%以上にする必要があ

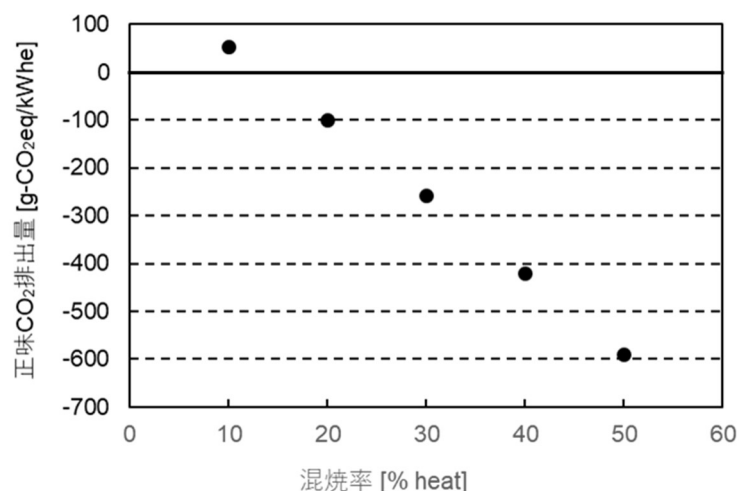


図4 混焼率と正味 CO<sub>2</sub> 排出量の関係

る。

## 7. データの品質および解釈と検証

本報告でチップ製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量は文献 1) に基づいて計算を行っている。文献 1) ではフォアグラウンドデータに IDEA v1.0 のインベントリデータを使用しているが、本報告で他の物質の製造やチップ輸送の CO<sub>2</sub> 排出量の算定に使用した v3.0 よりも古い。本来は同じデータベースに基づいた数値を使用することが望ましい。

発電および CO<sub>2</sub> 回収・輸送・貯留工程のプラントデータは文献 3) に基づいた。文献 3) では燃料の組成と使用量から燃料由来の CO<sub>2</sub> 排出量のみを算出していたが、本報告では加えて、燃料の製造・輸送に伴う CO<sub>2</sub> 排出量、脱硫工程での CO<sub>2</sub> 排出や消費される石灰石の製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量、さらに、補充される CO<sub>2</sub> 吸収液の製造に伴う CO<sub>2</sub> 排出量も計上しており、より正確な CO<sub>2</sub> 排出量が算定されていると考えられる。

混焼率を変えて正味 CO<sub>2</sub> 排出量を算定した結果、本報告では 13.6% 以上の混焼率でゼロエミッションとなると推定された。この正味 CO<sub>2</sub> 排出量がゼロとなる混焼率については多くの報告がある。IEA(2009)では、循環流動床を用いた石炭とバイオマスの混焼発電において、混焼率 10% でも正味排出量が負となると報告した<sup>5)</sup>。また、Yang et al.(2019)は、600 MW の超臨界石炭火力発電所において、燃料の半分にスイッチグラスを使用し、残りの半分には農業および林業残渣を用いた場合、ゼロエミッションとなる混焼率は 25% であると報告した<sup>6)</sup>。一方、Wang et al.(2021)は、中国の湖北省において、実際のバイオマスの生産地分布、石炭火力発電所の位置に基づき、収集と輸送経路を考慮して、石炭-バイオマス混焼発電 BECCS の GHG 排出量を算出した結果、ゼロエミッションとなる混焼率は 40-50 % の範囲にあると報告した<sup>7)</sup>。このように、対象とするバイオマスの種類、その生産地の分布と発電所との位置関係、発電や CO<sub>2</sub> 回収方法、CO<sub>2</sub> 貯留場所の位置、その方法などによって、CO<sub>2</sub> 排出量は大きく影響を受け、ネガティブエミッションを達成する混焼率も大きく変化する。

本報告のゼロエミッションとなる混焼率は文献で報告されているこれらの数値と比較すると低い値となっている。本報告では具体的な地域や発電所を想定せず、平均的なバイオマス生産密度を使用し、バイオマス収集範囲を決定している。また、CO<sub>2</sub> 貯留場所についても具体的な地域を想定せず、発電所に隣接した貯留地を仮定している。さらに、CO<sub>2</sub> の輸送・貯留時の漏洩についても無視している。そのため、バイオマスの製造・輸送、CO<sub>2</sub> 貯留に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を過小評価し、結果、ゼロエミッションとなる混焼率を低めに評価している可能性がある。

## 8. まとめ

木質バイオマスと石炭の混焼発電 BECCS について、LCA の手法を用い、正味 CO<sub>2</sub> 排出量を算定した。大気から CO<sub>2</sub> を除去できると期待されている BECCS であるが、本報告の結果からも、条件によってはネガティブエミッションを達成できないことが明らかとなった。BECCS によるネガティブエミッションを確実にするためには、LCA の手法を用い、正味の CO<sub>2</sub> 排出量が十分負となる条件を明らかにし、全体を設計することが重要である。

## 参考文献

- 1) 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)
- 2) 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)

- 3) Cebrecan, D., Cebrecan, V., and Ionel, I., Modeling and evaluation of a coal power plant with biomass cofiring and CO<sub>2</sub> capture. In Recent advances in carbon capture and storage (pp. 31-55). London: InTech. (2017)
- 4) 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 CO<sub>2</sub>, *Int. J. Greenh. Gas Con.*, 2, 448-467 (2008)
- 5) IEAGHG, Biomass CCS Study IEA Greenhouse Gas R&D Programme (2009)
- 6) Yang, B., Wei, Y. M., Hou, Y., Li, H., & Wang, P., Life cycle environmental impact assessment of fuel mix-based biomass co-firing plants with CO<sub>2</sub> capture and storage, *Applied Energy*, 252, 113483 (2019)
- 7) Wang, R., Chang, S., Cui, X., Li, J., Ma, L., Kumar, A., Nie, Y., Cai, W., Retrofitting coal - fired power plants with biomass co - firing and carbon capture and storage for net zero carbon emission: A plant - by - plant assessment framework, *GCB Bioenergy*, 13(1), 143-160 (2021)





# コンクリート製品による カーボンリサイクル技術のCO<sub>2</sub>削減貢献量の算定

太平洋セメント株式会社 星野 清一

## a. 算定の目的

### 1) 背景と目的

太平洋セメントでは、2020～2021 年度に国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の課題設定型産業技術開発費助成金事業として「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」（JPNP20013）を実施した。本事業では、セメント産業における脱炭素技術の革新的なイノベーションを創出するため、セメント工場及び近隣地域において、セメント製造工程のCO<sub>2</sub>を再資源化し、セメント原料や土木資材等の建設資材として再利用する技術を開発するものとなっている。本事業における技術開発の概略を図1に示す。本事業では、セメント製造から排出されるCO<sub>2</sub>を分離・回収設備（図2）によって回収するとともに、回収したCO<sub>2</sub>については廃コンクリートやコンクリートスラッジ等のセメント系材料を活用した技術によって固定化、活用することで有効利用を図っていくものとなっている。セメント系材料による有効利用技術についてはいくつかの技術開発を実施しているが、このうちの一つに低炭素型炭酸化養生コンクリート製品によるCO<sub>2</sub>の有効利用技術がある。本技術では、コンクリート製品の一例として、従来のセメントと比較して低炭素化したセメントを用いるとともに、製品の養生過程では炭酸化養生を行うことによりCO<sub>2</sub>の固定化を図ったインターロッキング（IL）ブロック（図3。以下、低炭素型炭酸化養生ILブロックと称す）の技術開発を行っている。

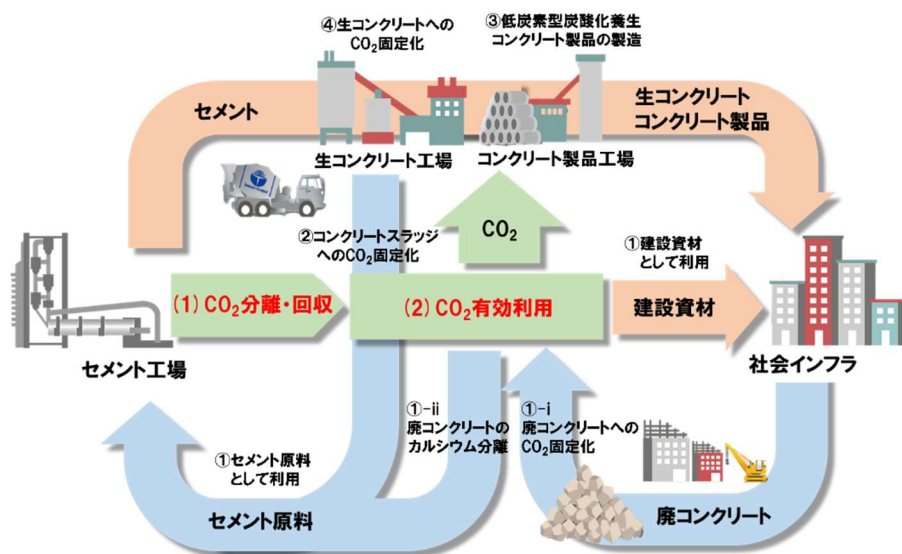


図1 炭素循環型セメント製造プロセス技術開発の概略



図2 CO<sub>2</sub>分離・回収設備（当社熊谷工場）



図3 低炭素型炭酸化養生ILブロック

本報では、Carbon Removal and Recycle (CR2) 技術として、従来のILブロックに代わってこの低炭素型炭酸化養生ILブロックを適用した場合のCO<sub>2</sub>削減貢献量を、「ライフサイクルアセスメント(LCA)によるCarbon Removal and Recycling (CR2) Technologiesの温室効果ガス排出量算定ガイドライン」に従って算定、報告する。

## 2) 算定する時点

現時点において技術を適用した場合について算定する。

また併せて、感度（影響）分析として、将来的に電力や輸送がカーボンフリー化に向かって進行した場合を想定し、それらのCO<sub>2</sub>排出係数が2030年目標値相当、および完全カーボンフリー化しゼロとなった場合についても算定する。

## 3) 算定する期間

低炭素型炭酸化養生ILブロックが製造され、使用先に輸送されるまでのプロセス、期間とした。

また、g. 3) (ii) 項の影響分析では、ILブロックが供用された後、解体され再利用されるまでの期間を想定した評価についても行った。

## 4) 対象となる地域

同様の技術を適用した場合には、国内外のいずれの地域も対象となる。なお、日本以外の地域に適用する場合には、その地域に応じたインベントリを用いることは必要となる。

## b. 評価対象技術の設定

図1の③低炭素型炭酸化養生コンクリート製品の製造では、炭酸化養生を行うことによって硬化する特性を持つとともに、CO<sub>2</sub>排出量を従来のポルトランドセメントより低減した低炭素型セメントを新たに開発している。本算定では、コンクリート製品のひとつとして、この低炭素型セメントを使用し、炭酸化養生（CO<sub>2</sub>吸収・固定）を行うことでCO<sub>2</sub>をリサイクルする低炭素型炭酸化養生ILブロックの製造を評価の対象とした。また、炭酸化養生に用いるCO<sub>2</sub>は、セメント製造設備からの排ガスをアミン系化学吸収法による分離・回収設備によって回収したCO<sub>2</sub>を用いるものとした。

削減貢献量の算定におけるリファレンスは、普通ポルトランドセメントを使用した一般的なILブロックの製造とした。

#### c. 機能単位の設定（隔離期間および地理的範囲等を含む）

ILブロック1tの製造を機能単位とした。また、ILブロックに吸収されたCO<sub>2</sub>は、炭酸カルシウムとなって長期にわたって安定的に存在すると考えられることから、隔離期間は将来にわたる期間とした。

#### d. 影響領域の設定

CO<sub>2</sub>削減貢献量の算定を行うこととし、地球温暖化のみを対象とした。

#### e. 評価範囲の設定

評価におけるシステム境界を図4に示す。CO<sub>2</sub>リサイクル技術を適用したプロセス（以下、「適用プロセス」）では、以下に示すプロセスを評価範囲とした。

- ① セメント工場の排ガスからCO<sub>2</sub>を分離・回収する工程
- ② 分離・回収したCO<sub>2</sub>を液化する工程
- ③ 液化したCO<sub>2</sub>をコンクリート製品工場に輸送する工程
- ④ 低炭素型セメントをセメント工場からコンクリート製品工場まで輸送する工程
- ⑤ 炭酸化養生を行うことによって低炭素型炭酸化養生ILブロックを製造する工程
- ⑥ 製造したILブロックを使用先まで輸送する工程

また、セメント工場からの当該技術利用分の排出CO<sub>2</sub>についても評価に加えた。

リファレンスとした現状のプロセス（以下、「リファレンスプロセス」）では、以下に示すプロセスを評価範囲とした。

- ① セメント（普通ポルトランドセメントを想定）をセメント工場からコンクリート製品工場まで輸送する工程
- ② 通常のILブロックを製造する工程
- ③ 製造したILブロックを使用先まで輸送する工程

また、適用プロセスと評価範囲を統一するため、適用プロセスにおいて設定しているセメント工場からの当該技術利用分の排出CO<sub>2</sub>についても評価に加えた。

## f. 算定の対象とした GHG と温室効果係数

CO<sub>2</sub>のみを算定の対象とした。他の温室効果ガスについては、CO<sub>2</sub>に比べて発生量が少なく結果への影響が軽微であると考えられたこと、また一部のプロセスではインベントリデータの入手が困難であり、正確な評価とはならない可能性が考えられたことから評価の対象外とした。

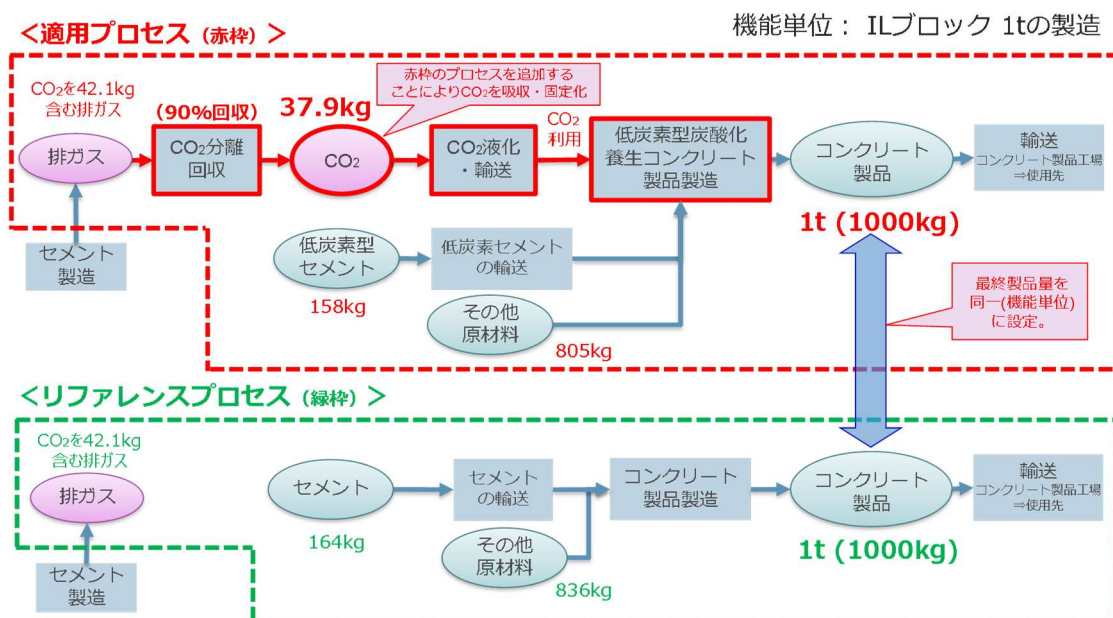


図4 評価におけるシステム境界  
(図中の数値は、後述のインベントリデータに基づく)

## g. GHG 削減貢献量の算定方法および算定結果

## 1) 算定方法

図4のシステム境界に基づき、適用プロセス、リファレンスプロセスそれぞれのCO<sub>2</sub>排出量を算定した。算定において設定したインベントリ項目およびデータを表1に示す。算定では、電力のCO<sub>2</sub>排出係数には0.47 kg-CO<sub>2</sub>/kWh<sup>1)</sup>を、輸送によるCO<sub>2</sub>排出量にはIDEA v2による値を用いた。

適用プロセスでは、CO<sub>2</sub>分離・回収にはアミンを用いた化学吸収法を設定し、回収率90%でCO<sub>2</sub>を回収するものとした。本算定における機能単位はILブロック1tの製造としているが、別途求めた結果、この時に固定化されるCO<sub>2</sub>の量は37.9kgであり、そのためには42.1kgのCO<sub>2</sub>が含まれるセメントキルン排ガスが必要と見積もられた。分離・回収設備の稼働によるCO<sub>2</sub>排出量は、設備で消費される電力および熱エネルギーを基に算出した。CO<sub>2</sub>の液化は、文献<sup>2)</sup>をもとに、1tのCO<sub>2</sub>を液化する際に要する電力量を求め、系統電力の利用によって製造されるものと想定してCO<sub>2</sub>排出量を算定した。液化CO<sub>2</sub>の輸送は積載量10~15tトラックを利用し、1回でのCO<sub>2</sub>輸送量は8,750kgを想定した。輸送距離は50kmを設定した。



表1 インベントリ項目およびデータ (機能単位: ILブロック 1tの製造)

プロセス	インベントリ項目 または条件項目	インベントリデータまたは条件		その他条件等	CO <sub>2</sub> 排出量の算定に用いた係数等
		リファレンス プロセス	適用プロセス		
セメント工場	CO <sub>2</sub> 排出量 (当該技術利用分)	42.1 (kg)	42.1 (kg)		
	電力	-	2.272 (kWh)		0.470 kg/kWh <sup>1)</sup>
CO <sub>2</sub> 分離回収設備 (CO <sub>2</sub> 処理量: 42.1kg)	熱エネルギー	-	153.5 (MJ)		天然ガス CO <sub>2</sub> 排出原単位: IDEAV2 による。
	電力	-	3.620 (kWh)	文献2)の平均値による。	0.470 kg/kWh <sup>1)</sup>
CO <sub>2</sub> 液化・輸送 (CO <sub>2</sub> 液化・輸送量: 37.9kg (※))	トラックの大きさ	-	10~15 (t)		左記条件および軽油 CO <sub>2</sub> 排出原単位 2.64 kg-CO <sub>2</sub> /L より CO <sub>2</sub> 排出量を算 定。
	燃費	-	(km/L) 4		
	輸送距離	-	(km) 50		
	1回の輸送量 (片道)	-	(t) 8.75		
製品用セメントの輸送	輸送量	164.2 (kg)	157.9 (kg)		IDEAV2-トラック輸送サービス, 10 トン車, 積載率 50%。
	トラックの大きさ	10 (t)	10 (t)		
	輸送距離	50 (km)	50 (km)		
	積載率	50 (%)	50 (%)		
コンクリート 製品製造 (コンクリート 製品量: 1t)	材料 (セメント)	164.2 (kg)	157.9 (kg)	片道の積載率 100%の想定による。 適用プロセス: 低炭素型セメント リファレンス: 普通ポルトランド セメント	
	材料 (セメント以外)	836.2 (kg)	804.6 (kg)	骨材、水。	砕石、工業用水道水 CO <sub>2</sub> 排出原単位: IDEAV2による。
	電力	66.25 (kWh)	66.25 (kWh)		0.470 kg/kWh <sup>1)</sup>
	A 重油	8.45 (L)	8.45 (L)	インベントリは、IDEAV2-建築用 コンクリートブロックによる。	A 重油 CO <sub>2</sub> 排出原単位: IDEAV2に よる。
製造/CO <sub>2</sub> 利用	設備電力(CO <sub>2</sub> 供給)	-	(kWh) 0	必要電力は上記に比べて非常に小さい と考えられることから 0 を仮定。	
	CO <sub>2</sub> 固定量	-	(kg) -37.9		
	トラックの大きさ	10 (t)	10 (t)		IDEAV2-トラック輸送サービス, 10 トン車, 積載率 50%。
	輸送距離	50 (km)	50 (km)		
積載率	50 (%)	50 (%)	片道の積載率 100%の想定による。		

(※) CO<sub>2</sub>分離回収設備での CO<sub>2</sub>の回収率は 90%を設定。

コンクリート製品製造の“製造”に係わるインベントリには、IDEA v2 の建築用コンクリートブロックのインベントリを代用した。また、各材料の量は、セメント、セメント以外の材料および固定化されるCO<sub>2</sub> (37.9 kg) の合計が 1 t となるように設定した。各材料のCO<sub>2</sub> 排出原単位については、セメントには別途得た低炭素型セメントのCO<sub>2</sub> 排出量を、セメント以外の材料についてはIDEA v2 によるCO<sub>2</sub> 排出量を適用した。また、CO<sub>2</sub> 養生では養生時にCO<sub>2</sub> ガスを送入する必要があるが、それに要するエネルギーは微小なものと考えられることから、電力量は0 (kWh) を仮定した。炭酸化養生の過程では低炭素型炭酸化養生 IL ブロックにCO<sub>2</sub> が吸収・固定化されるが、このCO<sub>2</sub> 量を固定量として与えた。IL ブロックに使用する低炭素型セメントのセメント工場からコンクリート製品工場までの輸送、および製造したコンクリート製品の使用先までの輸送は 10 tトラックを想定し、また輸送距離は 50km を想定した。

リファレンスプロセスでは、コンクリート製品製造の“製造”に係わるインベントリには、適用プロセスと同様のインベントリを用いた。IL ブロックに使用するセメントのセメント工場からコンクリート製品工場までの輸送、および製造したIL ブロックの使用先までの輸送は、適用プロセスと同様に 10 tトラックを想定し、また輸送距離は 50km を想定した。

## 2) 算定結果

低炭素型炭酸化養生 IL ブロック 1 t あたりのCO<sub>2</sub> 排出量と削減貢献量の算定結果を図 5 に示す。リファレンスプロセスでは、セメント工場排ガス、コンクリート製品 (IL ブロック) の製造におけるセメント等材料起源分とエネルギー分、および輸送からの排出により、CO<sub>2</sub> 排出量は 225.0 kg/t-製品と算定された。一方、適用プロセスではリファレンスプロセスと比較してCO<sub>2</sub> 分離・回収設備による排出が増加するものの、コンクリート製品製造におけるセメント等材料起源分のCO<sub>2</sub> 排出量が低減したこと、またCO<sub>2</sub> 固定化による削減効果によって、CO<sub>2</sub> 排出量としては 166.7 kg/t-製品とリファレンスプロセスより小さくなった。なお、コンクリート製品製造におけるセメント等材料起源分のCO<sub>2</sub> 排出量の低減は、セメントに低炭素型セメントを使用したことに起因する。これらCO<sub>2</sub> 排出量の差分から、低炭素型炭酸化養生 IL ブロック 1 t の適用による削減貢献量は、58.3 kg/t-製品と算定された。

また、本削減貢献量の算定結果は、前述のとおりセメントを低炭素化したことによる効果と、炭酸化養生によってCO<sub>2</sub> をリサイクルしたことによる効果の両者を含んだものとなっている。今回の算定の趣旨は、ガイドラインに基づいた Carbon Removal and Recycling の効果の算定である。この点も考慮し、CO<sub>2</sub> のリサイクルに関わる削減分を求めると 26.6 kg/t-製品であり、削減貢献量に対する寄与割合は 46%と算定された。なお、CO<sub>2</sub> のリサイクルに関わる削減分は、CO<sub>2</sub> 固定化、CO<sub>2</sub> 分離・回収、CO<sub>2</sub> 液化・輸送の合計量として求めた。



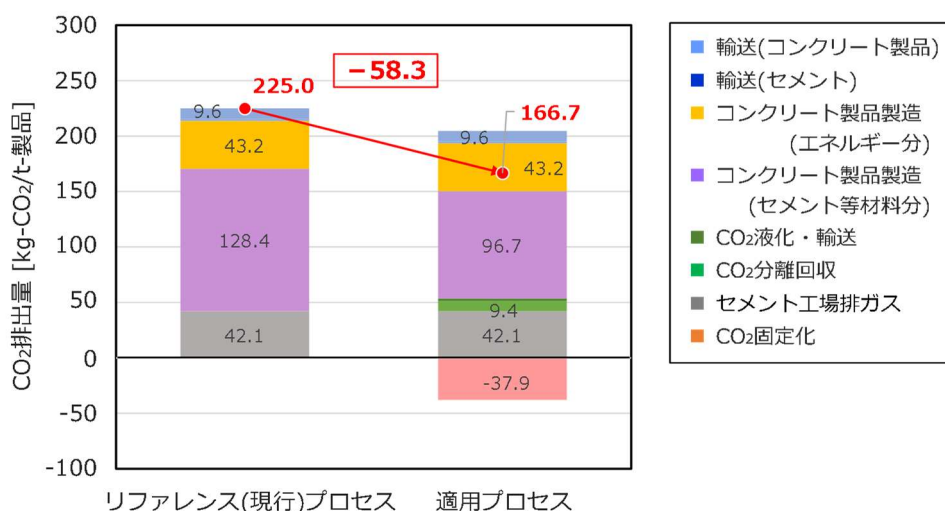


図5 低炭素型炭酸化養生ILブロック 1tあたりのCO<sub>2</sub>排出量と削減貢献量

### 3) 感度（影響）分析

#### (i) 電力および輸送のCO<sub>2</sub>排出係数の影響分析

ここでは感度（影響）分析として、将来的に電力や輸送のカーボンフリー化が進行した場合を想定し、それらのCO<sub>2</sub>排出係数が低下した際のCO<sub>2</sub>排出量や削減貢献量を算定した。算定で与えた電力および輸送のCO<sub>2</sub>排出係数を表2に示す。CO<sub>2</sub>排出係数には、2030年の目標値および完全にカーボンフリー化した時期を想定した値を与えた。なお、完全にカーボンフリー化した時期の値としては、電力、輸送のいずれとも0を与えた。

電力・輸送のCO<sub>2</sub>排出係数の変化の影響を図6に示す。カーボンフリー化が進行するに従い、電力や輸送に起因するCO<sub>2</sub>排出量が低減した結果として、リファレンスプロセス、適用プロセスともにCO<sub>2</sub>排出量は低下する結果となった。また、両者の差分である削減貢献量は、ILブロックの製造1tあたり、現状では58.3kgであるのに対し、2030年相当では59.2kg、完全カーボンフリー化時期には69.6kgと、カーボンフリー化が進行するに従い、より大きな効果が得られるようになると算定された。

表2 感度解析の算定で与えた電力および輸送のCO<sub>2</sub>排出係数

	現状	2030年 目標相当	カーボン フリー化時期
電力 (kg-CO <sub>2</sub> /kWh)	0.47	0.37 <sup>3)</sup>	0
輸送 (kg-CO <sub>2</sub> /t·km)	現在の係数		0

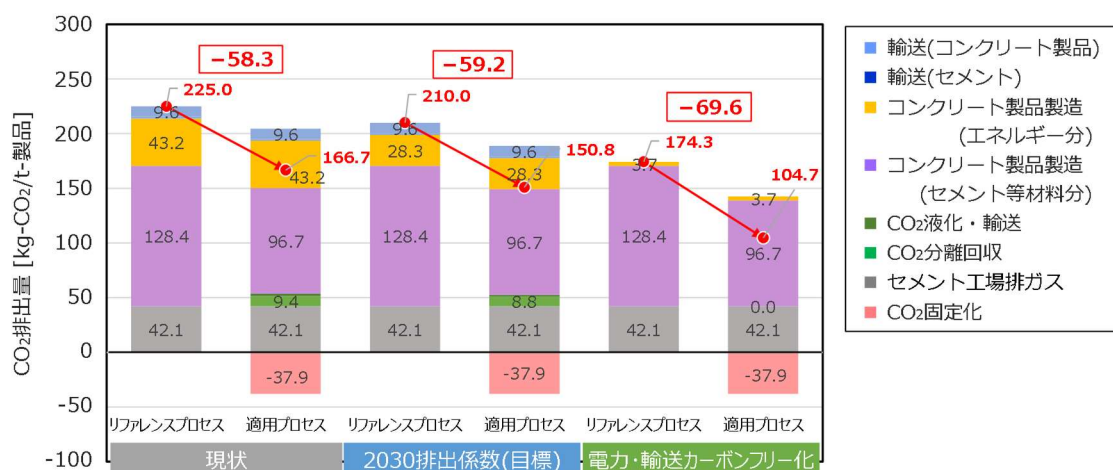


図6 電力・輸送のCO<sub>2</sub>排出係数の変化の影響

### (ii) コンクリート製品供用後のCO<sub>2</sub>吸収の影響分析

コンクリートは構造物や製品となった以降も、供用過程や解体・廃棄過程、再利用過程において、自然炭酸化によって大気中のCO<sub>2</sub>を吸収することが知られている<sup>4)</sup>。本項では、供用過程以降の自然炭酸化によるCO<sub>2</sub>吸収も加味した場合の評価結果への影響を分析した。なお、一般的なILブロック、低炭素型炭酸化養生ILブロックの供用過程以降のCO<sub>2</sub>吸収量については、十分なインベントリデータが得られていないと思われることから、本項は参考までの算定、分析とした。

低炭素型炭酸化養生ILブロックについては、現時点では供用過程以降のCO<sub>2</sub>吸収に関する知見はほとんどなく、その効果や量は明らかになっていない。しかしながら、同製品は養生過程で既にCO<sub>2</sub>の吸収処理を行っており、その後の供用過程以降におけるCO<sub>2</sub>吸収量は、一般的なポルトランドセメントを用いた製品と比較すると小さい可能性も考えられる。そこで、低炭素型炭酸化養生ILブロックの算定では、供用過程以降の自然炭酸化によるCO<sub>2</sub>吸収は無いものと仮定し、0を設定した。

一方、リファレンスプロセスとして与えた普通ポルトランドセメントを用いたILブロックについても供用過程以降のCO<sub>2</sub>吸収量のデータはほとんど見られなかった。そこで、ここでは一般的なコンクリートを対象とした供用過程以降のCO<sub>2</sub>吸収量の見積もり値<sup>5)</sup>を代用し、セメントの脱炭酸起源CO<sub>2</sub>排出量の19.5%が吸収・固定化されるものと仮定した。なお、今回の算定のシステム境界(図4)では、製造した製品の使用先までの輸送を評価範囲としている。製品の供用以降の過程まで想定した場合には、製品であるILブロックの敷設から解体・再利用までの工程や、それらに伴う輸送なども考慮する必要が生じる。しかしながら、これらのプロセスはリファレンスプロセス、適用プロセスで共通する項目であり、考慮の有無による削減貢献量への影響はないことから、ここでは算定から除外した。

リファレンスプロセスに対して供用過程以降のCO<sub>2</sub>吸収を考慮した場合の低炭素型炭酸化養生ILブロックのCO<sub>2</sub>削減貢献量を図7に示す。リファレンスプロセスでは、供用過程以降のCO<sub>2</sub>吸収を考慮しなかった場合(図5)には、CO<sub>2</sub>排出量は225.0 kg-CO<sub>2</sub>/t-製品であったのに対し、これを考慮した場合には24.4 kg-CO<sub>2</sub>/t-製品の吸収が見込まれ、排出量としては200.5 kg-CO<sub>2</sub>/t-製品となった。また、低炭素型炭酸化養生ILブロックの削減貢献量としては、リファレンスプロセスに供用過程以降のCO<sub>2</sub>吸収を考慮しなかった場合

(図5)には58.3 kg-CO<sub>2</sub>/t-製品であったのに対して、これを考慮した場合には33.8 kg-CO<sub>2</sub>/t-製品となった。本結果では、リファレンスプロセスに対して供用過程以降のCO<sub>2</sub>吸収を考慮した場合、考慮しなかった場合のいずれのケースにおいても、低炭素型炭酸化養生ILブロックはCO<sub>2</sub>削減貢献としての効果が得られることが示された。

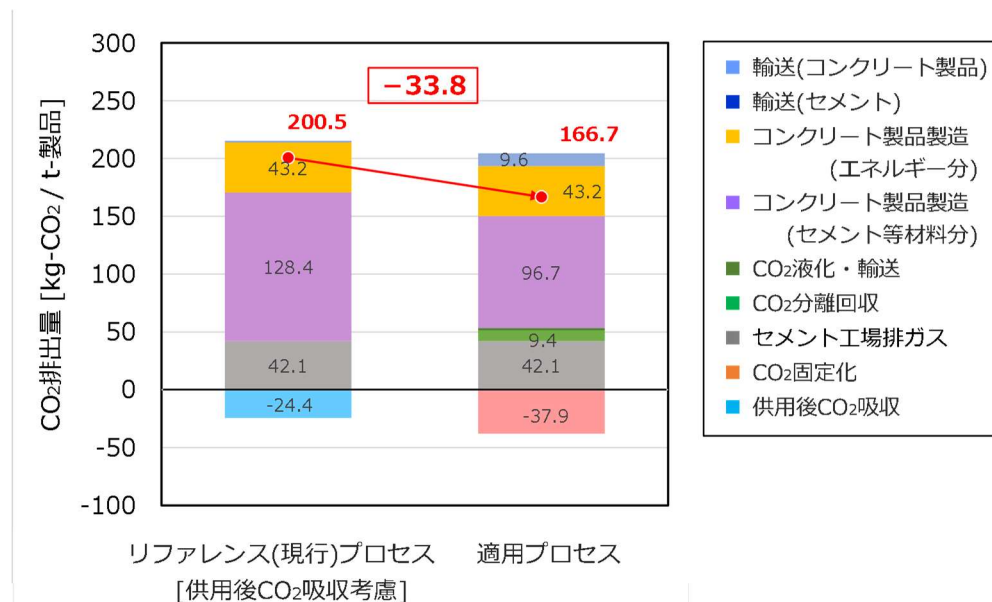


図7 供用過程以降のCO<sub>2</sub>吸収を考慮した低炭素型ILブロックのCO<sub>2</sub>削減貢献量(現状)

#### h. データの収集方法

g.1)項および表1に記載のとおり、実際の試験設備のスペックや材料の特性値、および既存のインベントリデータベースや統計値、文献によりデータを収集した。

#### i. データ品質

データ品質は、表3に記載のとおりである。

#### j. 解釈

g.2)項の算定結果および3)項の感度(影響)分析に記載のとおりである。

表3 データ品質

項目	評価結果
時間的範囲	インベントリデータには現時点で得られた実際の試験設備のスペックや材料データ、およびIDEA v2によるデータを使用した。
地理的範囲	インベントリデータには、日本国内のデータを使用した。
技術的範囲	技術や評価の基本的な考え方は、国内外等の地域を問わない。
精度	データベース等の精度は不明であるが、試験設備のスペックや材料データは、実測値、公表値、または所定の規格等に基づいて求めた値であるため、本目的を達成するための十分な精度は確保されていると考えられる。
代表性	従来にはない独自の技術を対象としていることや、また特定の設備や材料、輸送の設定に基づいていることから、得られた結果はここで示した条件設定に限られる。
再現性	試験設備データや材料特性の変動は小さいこと、またインベントリデータベースの値や統計値の不確実性は小さいと考えられることから、再現性は高いと判断される。

## まとめ

Carbon Removal and Recycle (CR2) 技術として、従来のILブロックに代わって低炭素型炭酸化養生ILブロックを適用した場合のCO<sub>2</sub>削減貢献量を、「ライフサイクルアセスメント (LCA) による Carbon Removal and Recycling (CR2) Technologies の温室効果ガス排出量算定ガイドライン」に従って算定、報告した。得られた結果は、以下のとおりであった。

- (1) CO<sub>2</sub>排出量は、リファレンスである現在のILブロック製造では225.0 kg-CO<sub>2</sub>/t-製品、低炭素型炭酸化養生ILブロックでは166.7 kg-CO<sub>2</sub>/t-製品と算定された。これらの差分から、低炭素型炭酸化養生ILブロック1tの適用によるCO<sub>2</sub>削減貢献量は、58.3 kg/t-製品と算定された。
- (2) 上記の削減貢献量の算定結果は、セメントを低炭素化したことによる効果と、炭酸化養生によってCO<sub>2</sub>をリサイクルしたことによる効果の両者を含んだものとなっている。このうち、CO<sub>2</sub>のリサイクルのみによる削減貢献量は26.6 kg/t-製品であり、全削減貢献量に対する寄与割合は46%と算定された。
- (3) 感度（影響）分析では、低炭素型炭酸化養生ILブロック1tあたりの削減貢献量は、現状では58.3 kg/t-製品であるのに対し、将来的に電力や輸送がカーボンフリー化に向かいCO<sub>2</sub>の排出係数が低下した場合には、2030年目標値相当では59.2 kg/t-製品、完全カーボンフリー化時期には69.6 kg/t-製品とより大きな削減効果が得られると算定された。

## 参考文献

- 1) 環境省・経済産業省：電気事業者別排出係数（特定排出者の温室効果ガス排出量算定用）—令和元年度実績一、2021。
- 2) S. Jackson and E. Brodal: Optimization of the CO<sub>2</sub> Liquefaction Process-Performance Study with Varying Ambient Temperature, Applied Science, MDPI, 2019. DOI:10.20944/preprints201910.0109.v1

- 3) 電気事業連合会ほか：「電気事業における低炭素社会実行計画」の策定について、2015.
- 4) 土木学会：コンクリート構造物の補修・解体・再利用における CO<sub>2</sub> 削減を目指して、コンクリートライブラリー、No. 134、2012.
- 5) 兵頭彦次ほか：ライフサイクルを通じたコンクリートの CO<sub>2</sub> 吸収量算定に関する研究、セメント・コンクリート論文集、Vol. 74、pp.333-340、2020.

<謝辞>

本算定は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業「炭素循環型セメント製造プロセス技術開発」（JPNP20013）の成果を活用して実施したものである。また算定では、みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)様に多大なるご協力をいただいた。記して謝意を表します。





# バイオガス発電所由来のバイオ炭の 農地施用による温室効果ガス削減効果

立命館大学 中野勝行

## 1. 算定の目的

固定価格買取制度（FIT）により、日本各地に木材等のバイオ燃料を用いたバイオガス発電所が多く建設された。バイオガス発電所ではバイオ燃料をガス化させ、当該ガスにより発電をしているが、残渣としてバイオ炭が発生している（図 1）。これらバイオ炭は一部産業廃棄物として最終処分されていることもあり、適切な用途開発が求められている。

そこで、本評価ではバイオガス発電所由来のバイオ炭の農地への施用に伴う温室効果ガス（GHG）削減効果を定量化する。ただし、産業廃棄物として処理されている実態があるものの、性状によってはバイオ炭は農業資材として販売されることもあり得る。また、バイオ炭の農地施用によって削減される GHG は J-クレジット制度にて販売することが可能である [1]。そのため、有価物としてバイオ炭を販売される場合は、原料調達段階の GHG 排出量を何らかの形で配分する考え方も成り立つ。そこで、原料調達段階の排出量を評価に含めたケースも分析し、システム境界や配分基準の違いによる結果への影響についても考察する。



図 1 バイオガス発電所で発生するバイオ炭

## 2. 評価対象技術の設定

本評価で対象とする技術は、木質ペレットを原燃料としたバイオガス発電所でのバイオ炭製造である。本評価では 3 か所の操業中の発電所データを用いた。

## 3. 機能単位の設定（隔離期間および地理的範囲等を含む）

機能単位はバイオ炭 1kg の鈹質土壤農地への施用とする。バイオ炭は時間とともに徐々に分解されるため、J-クレジット制度方法論（AG-004 ver.1.2） [1]をもとに、100 年後の炭素残存率を設定して評価した。地理的範囲は日本国内である。

## 4. 影響領域の設定

地球温暖化への影響のみを評価対象の環境影響領域とした。



## 5. 評価範囲の設定

本システムは発電を主目的として運用されており、バイオ炭は副産物である。そこで、システム境界は原燃料である木材の調達からペレット製造、バイオガス発電、バイオ炭の農地施用までを含めたシステム境界①と、バイオ炭の輸送・農地施用のみを評価するシステム境界②の2パターンを評価対象とした。

システム境界①はバイオ炭を共製品 (Co-product) と捉え、サプライチェーン上流側の環境負荷を含める考え方である。本評価では市場価格基準と熱量基準を用いて電力と配分を実施した。

システム境界②はバイオ炭を廃棄物として捉え、バイオ炭発生時点システム境界とした。バイオ炭の農地への輸送、農地施用をシステム境界とした。

何れのケースにおいてもデータ収集が困難であったため資本財の影響は除外している。

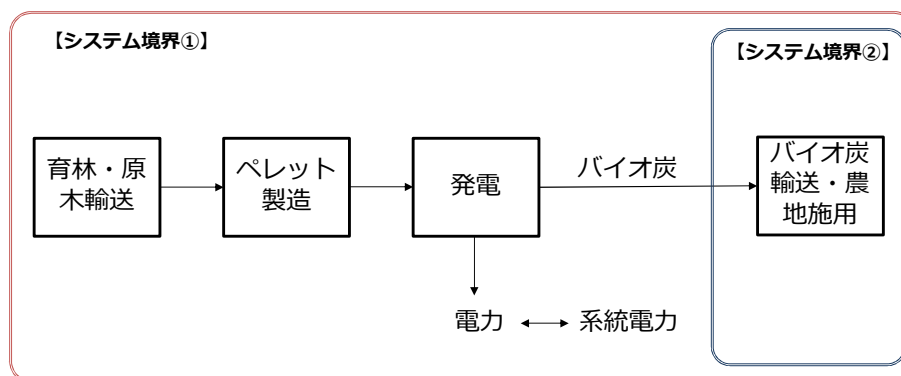


図2 システム境界

## 6. 算定の対象とした GHG と地球温暖化係数

バックグラウンドデータベースとして IDEA ver.3.1 を用いたため、CO<sub>2</sub>(発生源不特定、化石資源由来)、CH<sub>4</sub>(発生源不特定、生物由来、化石資源由来)、HFC-134a、N<sub>2</sub>O、SF<sub>6</sub>、PFC-14)を対象とした。地球温暖化係数は IPCC 第四次報告書の 100 年指数である。

なお、より新しい地球温暖化係数は存在しているが、将来的に他の環境影響領域も含め LIME2 を用いた評価を実施する可能性があるため、LIME2 の方法論に合わせている。

## 7. GHG の貯留・隔離量の算定方法および算定結果

### 7.1. GHG の貯留・隔離量の算定方法

バイオ炭中の炭素含有率および 100 年後残存率は J-クレジット方法論[1]よりそれぞれ 52%、65%とした。即ち、バイオ炭重量の 34%が 100 年後に固定炭素として残存するとして算定した。これは 1.24kg-CO<sub>2</sub>e/kg-バイオ炭の貯留効果を意味する。

### 7.2. 算定結果

システム境界①(熱量・価格基準に配分)、システム境界②のそれぞれにおける GHG 排出量およびバイオ炭農地施用による貯留効果を算定した結果を図 3 にまとめた。貯留効果による負の効果が大部分を占めた。システム境界②では炭輸送・農地施用の影響のみが評価されている。配分手法による上流側の排出量は若干異なるものの、その影響は小さい。

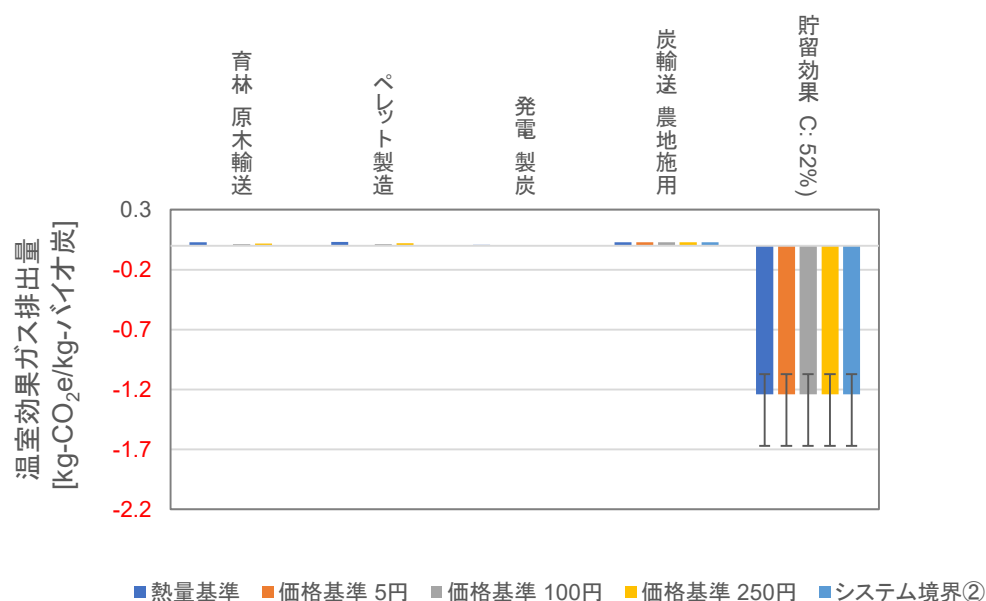


図3 GHG 排出・貯留量の算定結果

上流側の影響をカットオフしたシステム境界②に対し、バイオ炭の原料調達段階を考慮したシステム境界①の影響は数%程度である。最も差が生じたのは熱量基準のケースで、5%減少した。価格基準の場合は上方値として仮定した90円のケースで3%の減少であった。

表1 算定結果

評価範囲・配分基準		算定結果 [kg-CO <sub>2</sub> e/kg-バイオ炭]	
システム境界①	熱量基準	-1.15	
	価格基準	5円	-1.21
		55円	-1.19
		90円	-1.17
システム境界②		-1.21	

## 8. データの収集方法

### 8.1. 基本条件

国内でバイオ炭を副産物として算出しているバイオガス発電所から2021年度の年間稼働実績データをヒアリングした。3か所のデータは算術平均値をもとめ、これを各プロセスの入出力データとした。なお、全発電所とも近隣より原燃料である木材を調達していたため、丸太の輸送距離は20kmとした。また、バイオ炭は近隣で利用されると想定し、輸送距離は50kmとした。農地施用時における軽油消費量は施肥時の燃料消費量[2]より0.035L/kg-バイオ炭とした。

バックグラウンドデータベースは本算定時に利用可能な最新版であったIDEA ver.3.1を利用した。

## 8.2. 配分基準

システム境界①では電力と熱量基準と価格基準で配分を行った。条件を表 1 にまとめた。バイオ炭の発熱量は実測していないため、木材を用いるある国内バイオガス発電プラントの設計値を用いた。バイオ炭の価格は前述の通り廃棄物として負の値を持つこともあるが、農業資材としての用途開発や J-クレジットとしての価値が見直され、有価物として取引される可能性がある。そのため有価物として取引可能な下方価格として 5 円/kg を用いた。粉炭の国内の一般的な価格は統計がなく不明であるが、統計[3]より輸入単価が把握可能である。本評価では当該単価（55 円/kg）を仮定値として採用した。

J-クレジットは 2022 年現在約 1000~2000 円/t-CO<sub>2</sub>e で取引されている。これは 1~2 円/kg-バイオ炭に相当するため、市場価格に対する影響は小さい。しかし、J-クレジットは相対取引により販売することも可能である。相対取引では地域指定が可能であるため、自治体・地域企業が寄付的な性格をもたせてより高価格による調達を行う可能性がある。そこで、上方値として数万円/t-CO<sub>2</sub>e を想定し、90 円/kg を設定した。

表 2 配分基準

配分基準		電力	バイオ炭
熱量基準		3.6MJ/kWh	14.1MJ/kg <sup>*2</sup>
価格基準	下方値	40 円/kWh <sup>*1</sup>	5 円/kg <sup>*3</sup>
	仮定値		55 円/kg <sup>*4</sup>
	上方値		90 円/kg <sup>*5</sup>

\*1: FIT 制度における間伐材等由来の木質バイオマス発電（2,000kW 未満）単価

\*2: 特定プラントにおける設計値

\*3: 有価物として販売可能な下方価格

\*4: 貿易統計（粉炭、粒炭）での平均輸入価格

\*5: J-クレジット単価上昇時等に期待される上方価格

## 9. データ品質

バイオガス発電所における入出力データは国内 3 か所の直近 1 年間の実データを用いており、一定の妥当性がある。また、丸太およびバイオ炭の輸送距離はモデルに基づく値であるが、調査対象とした 3 か所の実態をおおむね反映しており、妥当性があると考えた。ただし、国内には数十か所のバイオガス発電所が稼働していると考えられるため、代表性はあまり高くない。バイオ炭の分解率は 100 年後を想定して設定している。

## 10. 解釈

本評価で対象としたバイオガス発電所において副産物として発生するバイオ炭の農地施用は炭素貯留に有効であると評価された。GHG 削減効果は 1.15~1.21kg-CO<sub>2</sub>e と算定された。原料調達段階を考慮することによりその効果は減少するが、全体に対する寄与は最大でも 5%程度であり、大きな影響はないと評価された。ただし、本評価で対象としたバイオガス発電所は全て原燃料を近隣の山林より間伐材・未利用材を調達しているケースである。国内では海外から原燃料を調達しているケースもあるため、その場合は異なった結果になることが考えられる。

## 11. クリティカルレビュー

クリティカルレビューは実施していない。

### 参考文献

- [1] J-クレジット制度(2021) 『バイオ炭の農地施用, AG-004 ver.1.2』, p.1-13
- [2] 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 IDEA ラボ LCI (2021) データベース IDEA version 3.1.0
- [3] 林野庁 (2022) 『令和 2 年特用林産物生産統計調査』



# CR2 技術研究プロジェクト LCA-WG ブルーカーボン 報告書

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所  
ジャパンプルーエコノミー技術研究組合 (JBE)  
桑江朝比呂

## 1. 算定の目的

横浜港（横浜市金沢区鳥浜町地先，（横浜ベークサイドマリナー横）では平成 22～25 年度に港湾事業として，覆砂（海底に砂を投入し底質を改善）や潜堤設置が国の事業として実施された。その後，平成 28 年度に，当該箇所においてブルーカーボンを増やす取り組みが，NPO 等や漁業者によって実施された。具体的には NPO 等活動によって砂地にアマモ場が創出され維持管理された。また，漁業活動の一部として潜堤と護岸にガラモ場（アカモク場）が創出され，ブルーカーボンの取り組みとして，その藻場を適切に維持管理する活動が実施された。

そこで本報告では，このアマモ場とガラモ場に関する活動を算定対象とし，令和 3 年 1 月にジャパンプルーエコノミー技術研究組合 (JBE) が J ブルークレジット®を当該活動に対して認証した事例をケーススタディとして，CO<sub>2</sub> の LCA を試みることを目的とする<sup>1)</sup>・<sup>2)</sup>。

## 2. 評価対象技術の設定

藻場創出活動によるブルーカーボン（大気中の CO<sub>2</sub> が海洋生物によって取り込まれ，海洋に貯留された炭素）の増加技術（大気中 CO<sub>2</sub> 除去技術）

## 3. 機能単位の設定

藻場 1ha における 1 年間の活動（藻場 1ha・年）

## 4. 評価範囲（システム境界）の設定

藻場1haにおける1年間の活動によるCO<sub>2</sub>吸収 (t-CO<sub>2</sub>/ha/年)

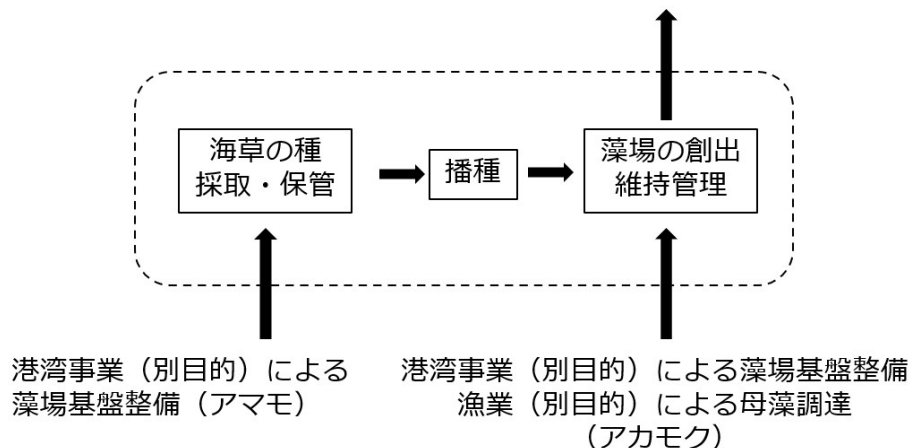


図-1 システム境界とインプット・アウトプット

22～25年度に実施された港湾事業は、算定対象とするブルーカーボン事業よりも以前に別目的として実施されたため算定対象外とした。また、ガラム場についても、漁業活動の一部として実施されたため、算定対象外とした。

なお、港湾事業や漁業活動と連動してブルーカーボンの取り組みが実施されるのが通例となっていること、かつ、ブルーカーボンの取り組みを主目的あるいは単一目的とした港湾事業や漁業活動は当面実施されないと予想される。したがって、国内におけるブルーカーボンのLCAを検討するうえで、本報告のシステム境界の設定や取り上げた事例は一般的であるとみなすことが可能である。

## 5. 算定の対象とする GHG と温室効果係数

二酸化炭素 (t-CO<sub>2</sub>)

## 6. 算定方法

### 6.1 アマモ場創出活動のインプット

#### 6.1.1 与条件

- 種の採取・保管・播種時に投入する材料（別添表参照）<sup>3), 4)</sup>
- 播種時に投入するエネルギー（別添表参照）<sup>3), 4)</sup>
- 活動実施人員の移動に伴う CO<sub>2</sub> 排出
- 播種ですべての工程は完了。栽培、収穫、加工、出荷などもない
- 種の採取・保管、播種は毎年実施すると仮定（実際は変動がある）

#### 6.1.2 算定

##### 6.1.2.1 種苗の播種時に投入するエネルギー

###### (1) 使用船舶の燃料使用量

- 曳航船（11 トン 630PS）延べ航行距離約 14.6km（稼働 20 分）
- 曳航船（19 トン 630PS）延べ航行距離約 14.6km（稼働 20 分）
- 調査船（0.8 トン 40PS）2 隻延べ航行距離約 1.2km（稼働 45 分）

###### (2) 算定式

海域調査に係る船舶の燃料使用による CO<sub>2</sub> 排出量 (t-CO<sub>2</sub>) = 稼働時間 (h) × 出力 (kW) × 燃料消費率 (l/kWh) × 1/1000 × 排出係数 (t-CO<sub>2</sub>/kl)

###### (3) 算定式に用いた排出係数

- (環境省) 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧<sup>5)</sup>
- (国土交通省) 港湾請負工事積算基準 令和 3 年度版<sup>6)</sup>

###### (4) 算定の詳細：別添表参照

###### (5) 算定量

0.1385 t-CO<sub>2</sub>/年

##### 6.1.2.2 種の採取・保管・播種時に投入する材料

(1) PE 製 野菜袋 (50cm\*30cm, 15 g) × 50 袋 = 750 g/年

(2) 炭酸カルシウム製 紙粘土 (1 kg) × 10 個 = 10 kg/年

###### (3) 算定係数

- PE 製 野菜袋はレジ袋 (HOPE 製) と同一と仮定<sup>7)</sup>

5.1 g CO<sub>2</sub>/g × 750 g/年 = 3.85 kg CO<sub>2</sub> = 0.00385 t-CO<sub>2</sub>/年



- ・炭酸カルシウム紙粘土は石灰石と同一と仮定<sup>8)</sup>

$$0.748 \text{ g CO}_2/\text{g} \times 10 \text{ kg/年} = 7.48 \text{ kg} = 0.00748 \text{ t-CO}_2/\text{年}$$

(4) 算定量

- ・上記の合計値 **0.01133 t-CO<sub>2</sub>/年**

### 6.1.2.3 人員の移動に伴う CO<sub>2</sub> 排出

(1) 与条件

- ・鉄道を利用して 20 km の距離を移動し、本活動のためだけに活動場所を訪れたと仮定

(2) 算定係数

鉄道による移動 22 g CO<sub>2</sub>/人/km と仮定<sup>9)</sup>

(3) 算定量

$$22 \text{ g CO}_2 \times 160 \text{ 人} \times 20 \text{ km/年} = 54.4 \text{ kg CO}_2/\text{年} = 0.0704 \text{ t-CO}_2/\text{年}$$

### 6.1.2.4 算定

- ・上記の合計 **0.22023 t-CO<sub>2</sub>/年**

・活動量：ドローンによる空撮写真画像によるアマモ分布面積推定ならびに潜水・水上からの目視による確認<sup>2)</sup>、**10.25 ha**

- ・よって、 $0.22023 \text{ t-CO}_2/10.25\text{ha/年} = 0.02148585 \text{ t-CO}_2/\text{ha/年}$

## 6.2 アマモ場創出活動のアウトプット

### 6.2.1 与条件

- ・ベースラインの考え方：事業前にアマモ場は存在していなかったことから、ベースライン吸収量はゼロ。したがって CO<sub>2</sub> 吸収量全量を算定

### 6.2.2 算定

- ・吸収係数：桑江ほか（2019）<sup>10)</sup> 10 頁の表-4（15 頁）に記載されているアマモ場の吸収係数の利用、**4.9 t-CO<sub>2</sub>/ha/年**

## 6.3 ガラム場創出活動のインプット

### 6.3.1 与条件

- ・藻場創出に投入するエネルギーと材料はすべてシステム境界外（漁業のついでに実施したため、別添表参照）
- ・同理由により活動実施人員の移動に伴う CO<sub>2</sub> 排出量もシステム境界外

### 6.3.2 算定

- ・排出は **0 t-CO<sub>2</sub>/年**
- ・活動量：ドローンによる空撮写真画像によるガラム場面積推定ならびに潜水・水上からの目視による確認、**0.2590935 ha**
- ・よって **0 t-CO<sub>2</sub>/ha/年**

## 6.4 ガラム場創出活動のアウトプット

### 6.4.1 与条件

- ・ベースラインの考え方：事業前にガラム場は存在していなかったことから、ベースラ

イン吸収量はゼロ。ガラム場創出活動による正味 CO<sub>2</sub> 全量をアウトプットとする

#### 6.4.2 算定

- 吸収係数：桑江ほか（2019）<sup>10)</sup> 10 頁の表-4（15 頁）に記載されているガラム場の吸収係数の利用。2.7 t-CO<sub>2</sub>/ha/年

### 7. データの品質、解釈、クリティカルレビュー

#### 7.1 データの範囲や期間

本報告で使用した活動量、吸収係数、排出係数、算定係数について、データの範囲や期間の詳細については、すべて上述の引用文献を参照されたい<sup>2, 5-10)</sup>。

#### 7.2 吸収量の算定

本報告で使用した吸収係数は、森林（3.2～6.6 t-CO<sub>2</sub>/ha/年）<sup>11)</sup> と同レベルとなっている。文献値（全国平均値）が使用されており、現地での実測でない部分に不確実性がある。また、活動量（面積）の算定については、深い場所など空中ドローンの画像で不明瞭なエリアが存在する点の不確実である。

以上の不確実性を勘案し、Jブルークレジット®の認証においては、第三者委員会の審査を経て、クレジット認証量を大幅に減らしている<sup>2)</sup>。

#### 7.3 排出量の算定

インプットの算定については、項目については網羅されていると考えるが、用いた係数、特に材料については、より適切な参照値が存在するかもしれない。しかしながら、材料に関連したアウトプット量は、使用船舶の燃料使用量や、人員の移動に投入されたエネルギー量と比較して小さいことから、アウトプット全体に及ぼす影響は少ないと考えられる。

人員の移動に投入されたエネルギー量をアウトプットとして計上するかは、議論の余地がある。

藻場創出活動に伴い排出される CO<sub>2</sub> 量は、藻場創出でブルーカーボンが増加することによって除去される CO<sub>2</sub> 量と比較すると無視できる量である。

#### 7.4 まとめ

本報告において、横浜港において実施されたブルーカーボン（アマモ場とガラム場）に関する活動を算定対象とし、CO<sub>2</sub> の LCA を試みた結果を表-1 にまとめた。機能単位とした藻場 1ha における 1 年間の活動（藻場 1ha・年）は、2.70～4.88 t-CO<sub>2</sub>/ha/年となり、吸収量に対する排出量の比率は 0～0.4%とごくわずかとなった。したがってブルーカーボンというネガティブエミッション技術のうち、藻場の創出・維持管理活動は LCA の観点からみて有効な技術であると期待される。

表-1 本報告での算定結果のまとめ

	アマモ場	ガラム場
排出 (t-CO <sub>2</sub> /ha/年)	0.02	0.00
吸収 (t-CO <sub>2</sub> /ha/年)	4.90	2.70
正味吸収 (吸収 - 排出) (t-CO <sub>2</sub> /ha/年)	4.88	2.70
排出/吸収 (%)	0.4	0.0

## 参考文献

- 1) 国交省プレス資料 <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001391079.pdf>
- 2) JBE ホームページ <https://www.blueeconomy.jp/files/20210202JBC-bases.pdf>
- 3) van Oirschot, R., Thomas, J. B. E., Gröndahl, F., Fortuin, K. P., Brandenburg, W., & Potting, J. (2017). Explorative environmental life cycle assessment for system design of seaweed cultivation and drying. *Algal Research*, 27, 43-54.
- 4) Thomas, J. B., et al (2021) A comparative environmental life cycle assessment of hatchery, cultivation, and preservation of the kelp *Saccharina latissima*. *ICES Journal of Marine Science*, 78(1), 451-467.
- 5) 環境省：算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧（環境省）  
[https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran\\_2020\\_rev.pdf](https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf)
- 6) 国土交通省：港湾請負工事積算基準 令和3年度版
- 7) プラスチック循環利用協会 <https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf6.pdf>
- 8) 環境省：温室効果ガス排出・吸収量等の算定と報告  
[https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/methodology/material/methodology\\_2A2.pdf](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/methodology/material/methodology_2A2.pdf)
- 9) 経済産業省：  
[https://www.meti.go.jp/press/2020/07/20200701002/20200701002-4\\_2.pdf](https://www.meti.go.jp/press/2020/07/20200701002/20200701002-4_2.pdf)
- 10) 桑江朝比呂・吉田吾郎・堀正和・渡辺謙太・棚谷灯子・岡田知也・梅澤有・佐々木淳（2019）浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計. 土木学会論文集 B2-75(海岸工学), 10-20.  
([https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/75/1/75\\_10/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/75/1/75_10/_article/-char/ja/))
- 11) Egusa, T., Kumagai, T. O., & Shiraiishi, N. (2020). Carbon stock in Japanese forests has been greatly underestimated. *Scientific reports*, 10(1), 1-9.



## 風化促進

早稲田大学 中垣隆雄

### 1. 算定の目的

本項では CR2 技術のうち、天然の岩石を利用した風化促進（Enhanced Rock Weathering, ERW）のライフサイクル評価に基づく実質固定量の算定を試みる。文献によると図 1 中の D のゾーンに位置し、100~200 \$/t-CO<sub>2</sub> のコスト、ポテンシャルは 2~4 Gt-CO<sub>2</sub>/y あるとされる。技術成熟度は選鉱くずなどに限られているが、2050 年以降に向け、コストは大幅に下げられる余地があると判断されている。一方で、Side-effect として耕作地散布によるコベネフィットだけでなく、様々な自然環境へのマイナスの影響も指摘されており、地下水・河川・海洋まで境界を広げ、自然の炭素循環も含んだ評価は現時点では不明確な点も多く、正確な算定は困難である。そこで、CO<sub>2</sub> 固定量に対するクレジットで収益を得る工業的な風化促進事業を仮定し、比較的確度の高い温室効果ガス排出量算定を目的とする。

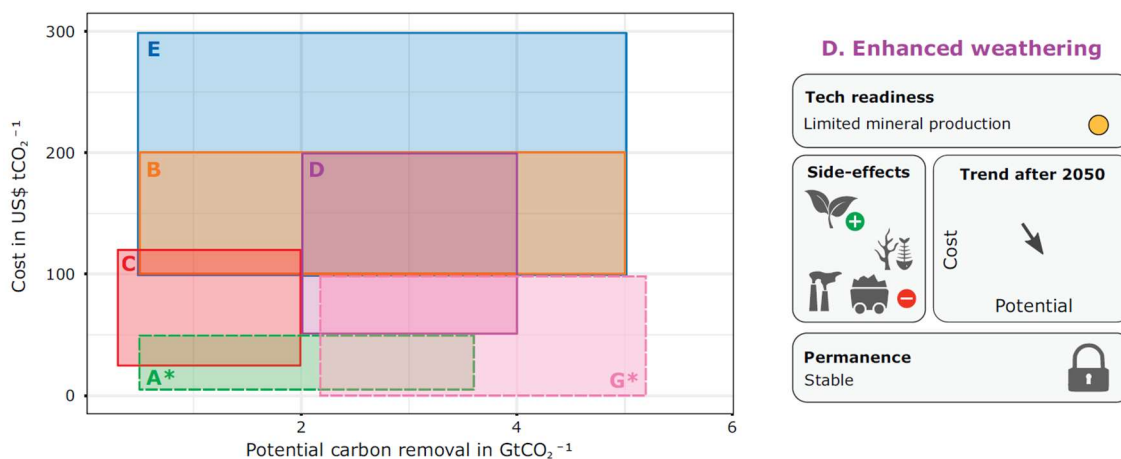


図 1 ERW の位置づけ

### 2. 評価対象技術の設定

ERW は図 2 や図 3 などに引用される通り、耕作地への粉碎玄武岩散布のイメージが強い。ERW の温室効果ガス削減対象としては大気中の CO<sub>2</sub> の除去（CDR）技術であり、そのメカニズムは「風化（Weathering）」と「CO<sub>2</sub> 鉱物化（炭酸塩化、CO<sub>2</sub> mineralization）」から成る。風化は岩石が自然環境の下で破碎・溶解し、新しい物質が沈殿するプロセスを指し、物理的な構造崩壊と構成元素の化学的作用による溶脱で千年・万年単位で自然に進行する現象である。一方、CO<sub>2</sub> 鉱物化は岩石中の Ca/Mg を含む鉱物（ケイ酸塩など）によって大気中の CO<sub>2</sub> を化学的に炭酸塩鉱物として固定化する現象を指す。大気中の CO<sub>2</sub> は風化した岩石の表面での気固反応と、雨水へ溶解した CO<sub>2</sub> 由来の炭酸水素イオンや炭酸イオンと、同様に岩石から溶解した Ca/Mg イオンとの水溶液中の反応など、複数の反応経路があると考えられている。



図2 ERWとして紹介される耕作地への粉碎鉱物散布<sup>ii</sup> (Nature)

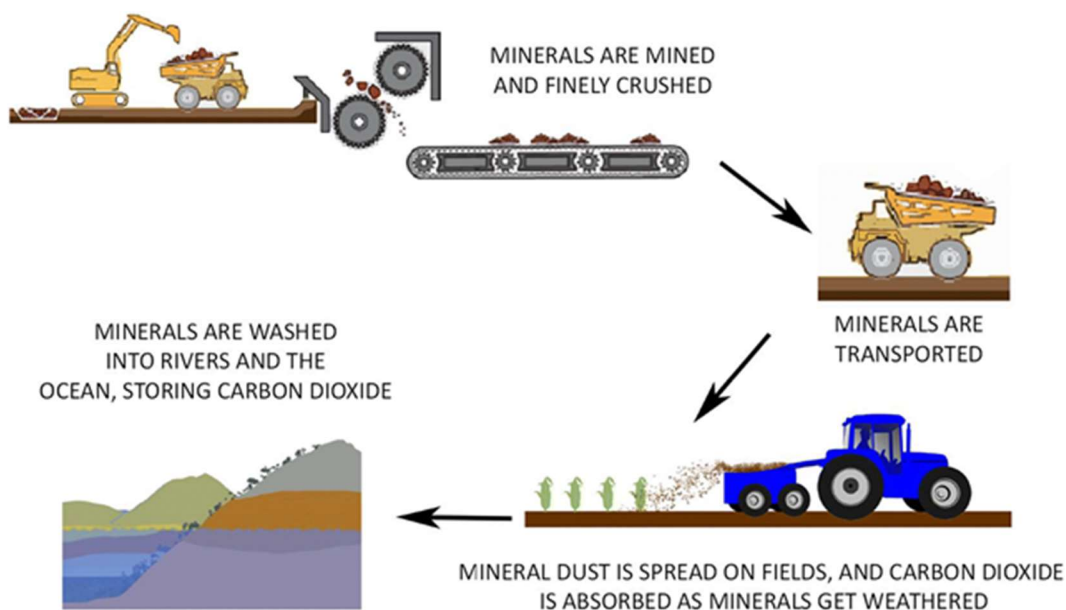


図3 ERWの説明図の例<sup>iii</sup>

一方、CO<sub>2</sub>固定量のアカウントिंगが認証されない限り ERW の商用化は困難であり、何らかの Co-benefit が求められる。Beerling<sup>iv</sup>らの論文によると、粉碎した玄武岩やバガス灰など耕作地へ散布することで、土壌のアルカリ化に伴う地質改良、Si/K/Ca などの吸収による作物の強化と収量アップなどの農家の収益に直結するベネフィットだけでなく、溶脱した Ca/Mg の一部は地下水・河川を通じて海洋に輸送され、海洋のアルカリ化促進に伴う炭素包蔵能力の維持やサンゴなどによる炭酸カルシウムとしての固定量増加にも貢献するとされる。岩石中の Ca/Mg の溶脱や炭酸塩化の地化学反応は、土質を模擬したカラム試験など



の結果を基にモデリング可能であり、前述の論文でも同様のアプローチを取っている。しかしながら、定性的なプラスの効果への期待は理解するが、以下の点で自然の炭素循環に対するインパクトを正確に数値化するのは困難であると考えられる。

- ・ 岩石の採掘地と耕作地との位置関係はケースバイケースであり、支配要因の一つである輸送に係る GHG 排出にも影響する
- ・ 塩基性岩石の散布が土壤中の微生物による有機物の分解（特に GWP の高いメタンなど）に与える影響が不明であり、ロケーションや土質によっては炭素固定量に対して負の影響を与えかねない
- ・ Ca/Mg 成分の地下水、河川および海洋への流出量、特に自然環境での間欠的で不均一な降水量に対しての地下水の動きや時間遅れなど、ロケーションのみならず地下の地層構造によっても異なる
- ・ 仮にある河川の河口付近の沿岸部で海水のアルカリ度が変化し、それによる CO<sub>2</sub> 吸収量が増加したとしても、流域には様々な自然および人為起源由来の Ca/Mg の流入があり、アルカリ度の変化が岩石散布によるものであるとの立証は事実上困難

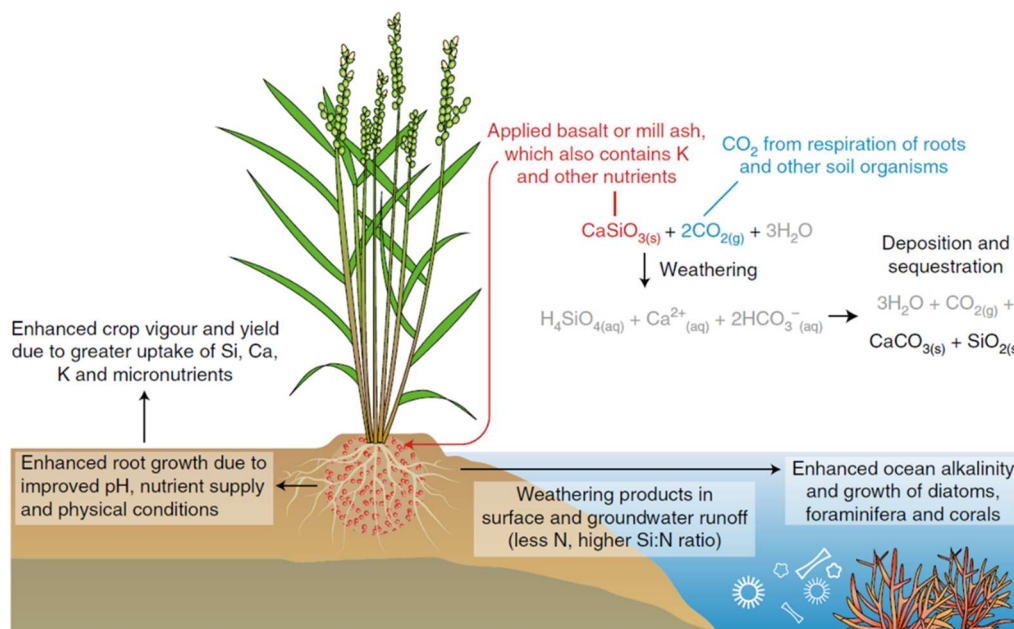


図 4 耕作地散布 ERW による海洋まで含めた Co-benefit の影響範囲<sup>5</sup>

このような分析を基に、Myers らは自然作用による不確実性を極力排除し、シンプルかつ精度の高いアカウンティングが可能な工業的 ERW についての論文<sup>6</sup>を発表しており、事例として当該技術を ERW の評価対象として選定した。なお、耕作地散布のアカウンティングの不確実性を下げるためには、地球科学的あるいは農学的な研究によるデータの蓄積が待たれる。

### 3. 機能単位の設定（隔離期間および地理的範囲等を含む）

ERW の CO<sub>2</sub> 固定先は岩石であり、固定量は ERW 適用前後での重量変化で定量可能である。また、その重量変化が CO<sub>2</sub> 鉱物化による炭酸塩形成であることも化学組成を分析すれば立証可能である。本技術では、CO<sub>2</sub> 以外の GHG の関与はほぼ無視できるため、機能単位としては、岩石質量当たりの CO<sub>2</sub> の固定重量、すなわち [kg-CO<sub>2</sub>/kg-Rock] で算定する。CO<sub>2</sub> 鉱物化反応は ΔG < 0 であり、強酸性雨などに晒されない限り半永久的に固定化される。ま



た、岩石を採掘し、最終的に元の場所への埋設を仮定すれば、地理的範囲も採掘場所と CO<sub>2</sub> 鉱物化で利用した土地などに限定される。

#### 4. 影響領域の設定

ERW のケーススタディは地球温暖化のみを影響領域として設定した。

#### 5. 評価範囲の設定

工業的 ERW では以下のプロセスで構成される。

##### 5.1. 岩石の採掘と粉砕

ERW に適した日本国内に広く分布している。岩石は図 5 に示すように類別化されるが、このうち ERW に適するのは苦鉄質あるいは超苦鉄質の岩石である。火成岩で塩基性の岩石、例えば玄武岩、斑糲岩、橄欖岩が代表的であるが、一部それらから派生した変成岩、例えば蛇紋岩にも適した岩石がある。岩石中に CO<sub>2</sub> と化学的に結合する可能性のある Ca/Mg の含有量は化学分析で定量化でき、それらが全て CO<sub>2</sub> 鉱物化に利用されたと仮定、すなわち鉱物化率 100%での最大 CO<sub>2</sub> 固定化量が鉱物化ポテンシャルとして算定される。

ポテンシャルの大きな岩石層が事業化対象となるが、岩石層は図 6 に示す通り、産業技術総合研究所が公開する地質調査データを用い、既に土地利用の実態がある人口密集地や工業地域、法律で開発が制限される国立公園などは除外することで候補地を選定した。なお、試掘調査や周辺住民への説明などに係る活動等に対する GHG 排出は今回の算定では含んでいない。

採掘された岩石はローラーミルなどを用いて <10 μm 以下になるまで粉砕（研削）する。岩石の研削エネルギーは鉱物種ごとの単位面積当たりの表面エネルギー  $\gamma$  [J/m<sup>2</sup>] に、1 粒子から等体積の微粒子（個数と平均体積の積が元の 1 粒子に相当）へ研削による表面積の拡大分 [m<sup>2</sup>] を乗することで理論的な最小必要仕事算定できる。実際にはそれ以上のエネルギーをかけて研削するが、理論最小仕事を研削効率  $\eta$  (<1) で除して実際の投入仕事（電力など）を求める。

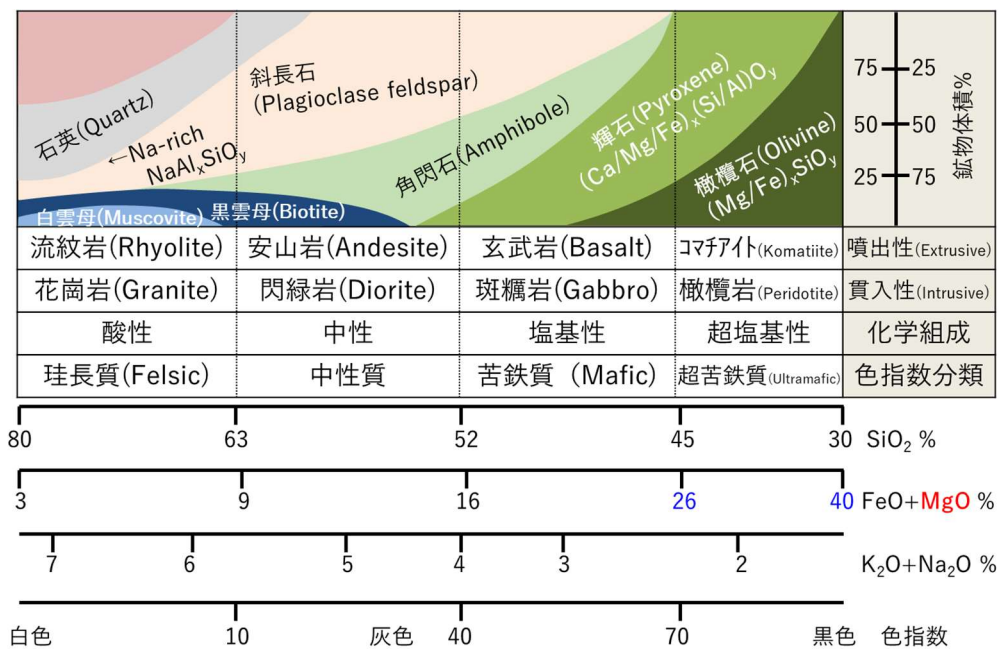


図 5 岩石の分類

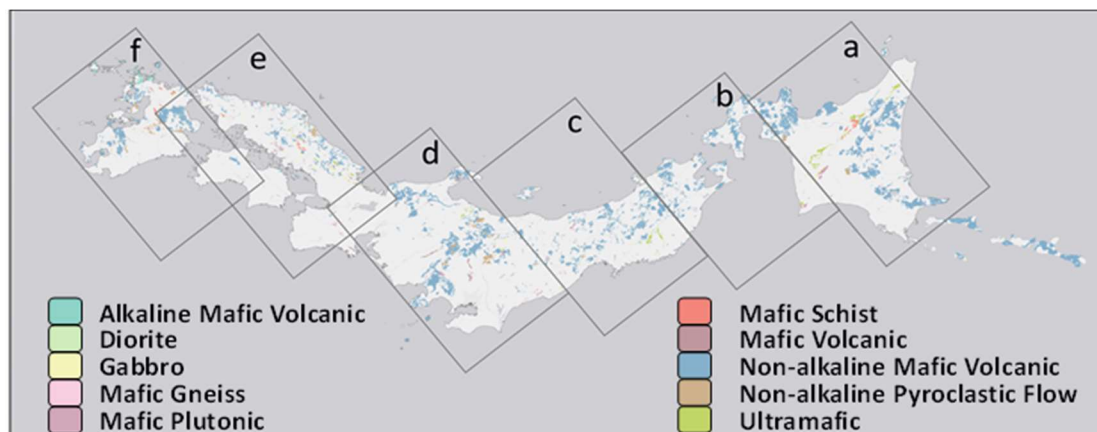


図6 産総研地質調査公開情報に基づいた適地推定

## 5.2. 輸送

原則として図7a)のように採掘場のごく近傍に工業的 ERW のためのスペースが確保できると仮定し、輸送は最小限に止める。

## 5.3. CO<sub>2</sub> 鉱物化

CO<sub>2</sub>は図7b)に示す通り、専用の「鉱物化ハウス」内で岩石との気固接触によって鉱物化する。コンクリート基礎と耐荷重を考慮した鉄骨構造で、厚手のポリエチレンシート上に粉碎した岩石を3 mm 程度に薄く広げ、それらを多層化する。ポリエチレンシート間は20 mm 程度に設定し、ドラフトファンにて大気を誘引して気固接触にてCO<sub>2</sub> 鉱物化を1年程度の期間で促進させる。鉱物化終了後は元の場所に埋設するため新たな粉碎岩石と入れ替え、一連の作業を、設備の耐用年数期間として20年間繰り返すとした。したがって、初期投入の機材に関するGHGは20年均等に排出するものとして計算する。

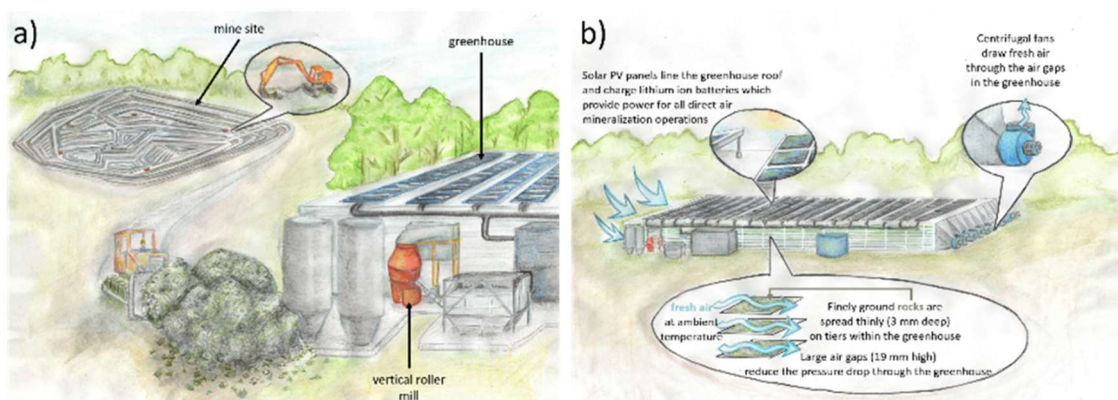


図7 採掘と輸送 (a 図) および鉱物化ハウスによる岩石風化促進 (b 図) のイメージ

## 6. 算定の対象とした GHG と温室効果係数

本試算での GHG は入手可能なものについては IPCC AR4 (第4次評価報告書, 100年間の計算値) に基づいて CO<sub>2</sub> 換算されたインベントリデータを用い、燃料や電力については CO<sub>2</sub> 排出係数を基に CO<sub>2</sub> のみを考慮した。

## 7. GHG の貯留・隔離量の算定方法および算定結果

### 7.1. 算定方法の概要

図 8 に算定方法の概要を示す。機能単位は単位岩石質量当たりの CO<sub>2</sub> 固定量[t-CO<sub>2</sub>/t-Rock]である。岩石の CO<sub>2</sub> 固定量として、質量増加と化学的な分析のみ評価可能な量をここでは総固定量と称する。総固定量は天然岩石の地層ごとのポテンシャル算定、すなわち、CO<sub>2</sub> と反応可能な Ca/Mg の含有総量に、所定時間（ここでは 1 年とする）経過後の反応率、すなわち、CO<sub>2</sub> 鉱物化率（<1）を乗じて求める。鉱物化率は微粉化などの前処理条件を揃えた岩石ごとのサンプルを用い、鉱物化ハウス内の温度・湿度や通風量など、気相側の条件変化を考慮した鉱物化試験および物質輸送・反応連成の数値モデルによる予測によって求められる。

一方、総固定量から人為的操作による GHG のリーケージを差し引くことで実質の正味固定量が求まる。人為的操作には岩石の採掘と破碎、粉砕、研削などの微粉化の前処理、鉱物化ハウス内での気固接触操作、終了後の埋め戻しなどに係るすべての動力と、これらの工業資材製造時に排出される GHG を考慮する。工業的な動力や資材はデータを入手可能であるのに対し、土地利用の人為的变化による元々の自然状態からの炭素固定量の変化も考慮する必要があり、掘削地とそれに隣接する鉱物化ハウス建設地の双方の植生の変化として光合成と土壤固定量の変化を見込むこととする。

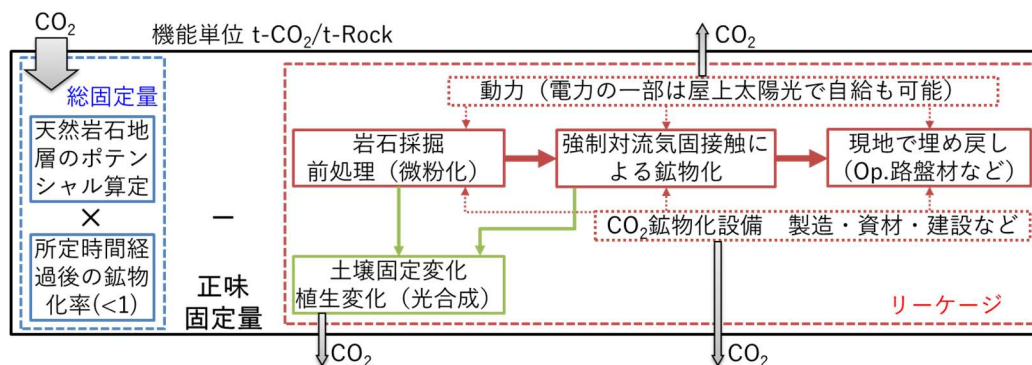


図 8 評価対象とした風化促進技術における評価範囲および算定方法の概要

### 7.2. プロセスごとの算定方法とインベントリデータ

#### 7.2.1. 岩石の採掘

日本の陸地において CO<sub>2</sub> 鉱物化に適した岩石の採掘エリアおよび削減ポテンシャルを評価した。前述の通り、産業総合技術研究所・地質調査総合センターの Geomap Navi を基に、表面の岩石の種類によって陸地を 157,915 区画に分類し、1 km<sup>2</sup> 以下の陸地、環境省公開の自然環境保全地域や国土交通省公開の人口密度が 1,000 人/km<sup>2</sup> 以上のエリアを除外した。さらに、Ca/Mg 含有量が少ない岩石と大気噴出で急冷された火山岩は鉱物化に適さないとして除外した。選定された適地マップを図 9 に示す。同図の適地において、規模を設定して算定することとした。

仮想的な事業面積として 1 km<sup>2</sup>、当該岩石層を年間 2 m ずつ採掘する。岩石の密度を 3 t/m<sup>3</sup> とすれば、6Mtpa (Mtpa は百万トン/年の単位) の岩石重量を処理することになる。採掘にかかる重機等の機材とそのエネルギーについては表 1 の通りとした。

表 1 採掘関連の諸数値

	数値	単位	備考
採掘用重機重量	15	トン	リファレンスの 10.71 倍
リファレンス用自動車重量	1.4	トン	
リファレンスの製造にかかる排出係数	0.269	kg/台	JLCA_LCA データベース 311111 000760
採掘用重機台数	20	台	
鉱物採掘動力	4.73	kWh/t-rock	CIPEC, BENCHMARKING THE ENERGY CONSUMPTION OF CANADIAN OPEN-PIT MINES, 2016



図 9 適地マップ

### 7.2.2. 粉砕・研削・微粉化

図 10 に研削エネルギーの算定方法を示す。掘削後には岩石が半径 $r_0=25$  mmまで粉砕されていると仮定し、それを半径 $r=3$   $\mu$ mまで研削して微粉化する。真球平滑面に対して粗さ係数を $RF=1.65$ と設定し、面積拡大分 $\Delta SA=65.4$   $m^2$ について表面エネルギー $\gamma=3.8$   $J/m^2$ として最小研削仕事を求める。表面エネルギーは岩石中の鉱物種によって異なり、さらに結晶粒子内や、同一あるいは異なる結晶粒子境界面などでも異なるが、Myers の鉄鋼スラグの実験的研究<sup>vi</sup>を基に代表値として設定した。最小仕事に対し、現状の研削効率 $\eta$ は極めて悪い。Beerling らはラボレベルの機器から推定したと考えられる 1%以下の数値を用いているが、ここでは $\eta=2\%$ と設定した。その他、研削機製造に起因する GHG 等は表 2 の通りで、リファレンスは同じく機械製造一般として表 1 の自動車製造を重量倍した。今回の事例では、動力は系統電力のみとしたが、鉱物化ハウス屋上に太陽光パネルを敷設し、蓄電池と組み合わせることで半分程度自給可能である。その場合、電力自給機材の GHG も算定に組み込む必要がある。



表2 微粉化関連の諸数値

	数値	単位	備考
採掘用重機重量	365	トン	リファレンスの260.8倍
研削機能力	40	t/h	
研削機台数	18	台	
系統電力	0.462	kg-CO <sub>2</sub> /kWh	

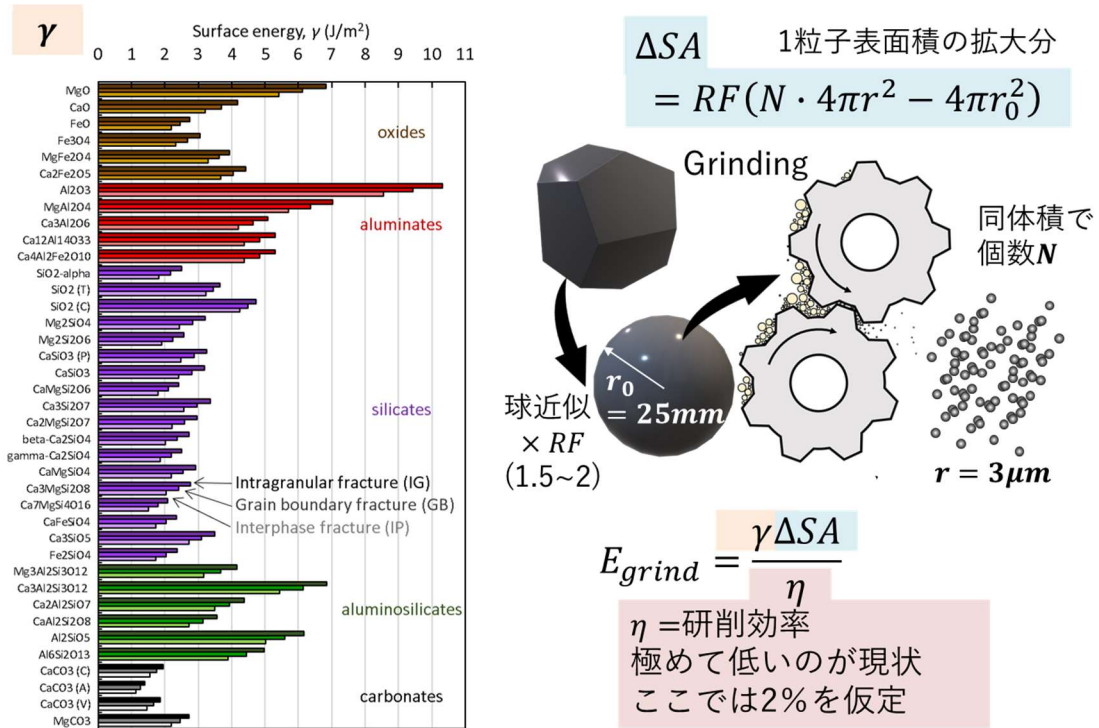


図10 研削に係るエネルギーの算定方法

7.2.3. 輸送

輸送は10トン積み（積み下ろした後にも荷台分として0.5トン残存）のディーゼルトラック2台、輸送距離は片道500mとした。輸送に係る使用データは表3の通りで、軽油のエネルギーとして算出した。

表3 輸送関連の諸数値

	数値	単位	備考
10 トントラックの輸送に係る軽油の燃焼消費率	0.0237	kg/(t·km)	JLCA_LCA データベース 8721 000553
軽油発熱量	37.7	MJ/L	環境省, 算定方法及び派出係数一覧, 2020
軽油の密度	0.84	kg/L	



## 7.2.4. 鈇物化ハウス

鈇物化ハウスの敷地面積も 1 km<sup>2</sup>とし、6 Mtpa の微粉化鈇物进行处理するのに必要な資材を表 4 の通りとして算定した。送風ファンの動力も系統電力として運転に係る GHG を算定した。表 5 に建設資材の製造由来 GHG 排出の算定結果を示す。

表 4 鈇物化ハウス関連の諸数値

	数値	単位	備考
RC 建築物製造	13	kWh/m <sup>2</sup>	JLCA_LCA データベース 0951 000016 (電力)
	2.3	L/m <sup>2</sup>	JLCA_LCA データベース 0951 000016 (軽油)
ポリエチレン製造	0.896	kg-CO <sub>2</sub> /kg	JLCA_LCA データベース 203716 000053
コンクリート床製造	0.223	kg-CO <sub>2</sub> /kg	JLCA_LCA データベース 252119 000158
ポリカーボネート製造	3.928	kg-CO <sub>2</sub> /kg	JLCA_LCA データベース 203729 000762
ファン製造	1.14	kg-CO <sub>2</sub> /kg	JLCA_LCA データベース 283221 000081
鉄鋼フレーム構 造材	1.809	kg-CO <sub>2</sub> /kg	World Steel Association

表 5 鈇物化ハウス製造にかかる GHG 排出量の算定

	面積 km <sup>2</sup>	厚さ m	体積 m <sup>3</sup>	密度 kg/m <sup>3</sup>	質量 t	製造由来 CO <sub>2</sub> 排 出 t
HDPE シート	1,334	0.3 10 <sup>-3</sup>	× 406,203	950	385,893	345,686
コンクリート 床	1.0	0.15	150,000	2300	345,000	76,935
ポリカ壁材	2.193	0.01	21,931	1200	26,318	103,386
鉄骨フレーム	9 階建相当・面積あたり鉄筋			122kg/m <sup>2</sup>	1,084,987	1,962,741
合計						2,488,748

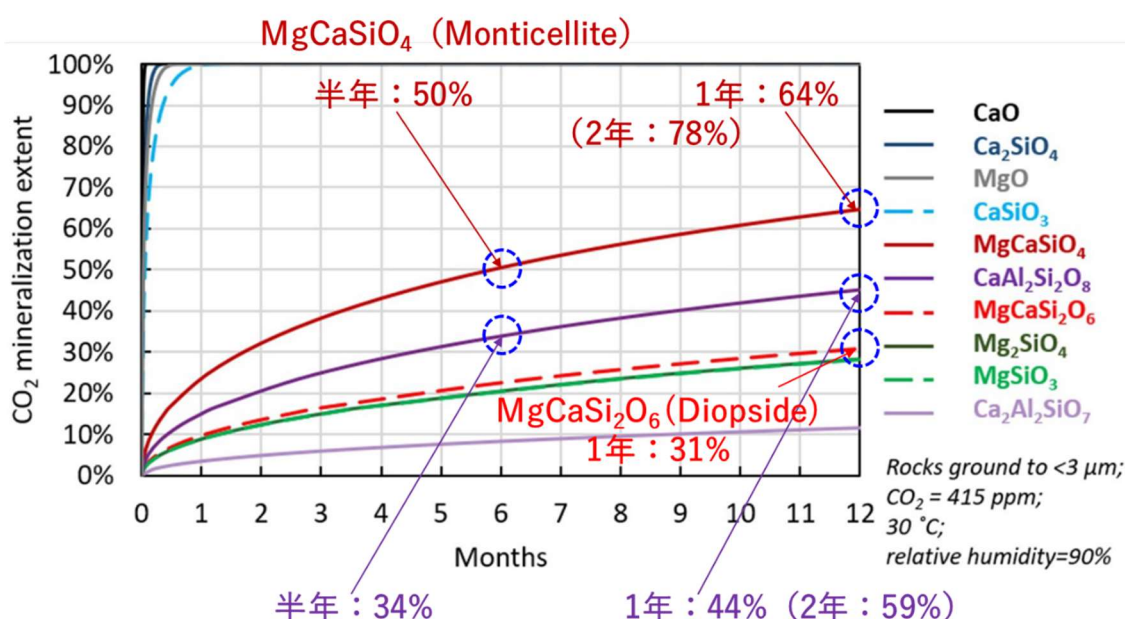
## 7.2.5. 総鈇物化の算定

岩石の物性に関する文献を整理すると表 6 の通りのポテンシャルとなった。今回は場所を特定することなく代表値として 0.5 kg-CO<sub>2</sub>/t-rock を用いることとした。

表6 文献を基にした鉱物化ポテンシャル

	単位	愛媛 <sup>vii</sup>	岡山 <sup>viii</sup>	菅島 <sup>ix</sup>	長野 <sup>x</sup>	北海道 <sup>xi</sup>
岩石の種類		蛇紋岩・ 橄欖岩	蛇紋岩・ 斑輝岩	橄欖岩・蛇紋 岩・普通角閃石	超苦鉄 質岩	橄欖岩
鉱物化ポテ ンシャル	kg- CO <sub>2</sub> /kg- rock	0.485	0.579	0.494	0.595	0.602

自然環境下の通風操作で気固接触による1年間の鉱物化率は、図11の通り、鉱物種によって大きく異なる。例えば  $MgCaSi_2O_6$  の元素で構成される橄欖岩に含まれる鉱物でも Monticellite ( $MgCaSiO_4$ ) と Diopside ( $MgCaSi_2O_6$ ) では1年後の鉱物化率が2倍ほど異なる。今回は玄武岩・斑輝岩に含有の  $CaAl_2Si_2O_8$  (灰長石) のプロフィールで代表させた。

図11 鉱物種ごとのCO<sub>2</sub>鉱物化率の経時変化

#### 7.2.6. 土地利用の変化による自然の炭素収支への影響

土地利用の変化として、その場に森林があったと仮定して光合成による固定量 (NEP) を  $0.88 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^2/\text{年}$ 、また土壌の蓄積量<sup>xii</sup>を  $35 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$  として、単位面積あたり深さ 1 m 分を算入した。

#### 7.2.7. 正味固定量の算定

図12に  $1 \text{ km}^2$  のエリアで年に深さ 2 m ずつ掘削し、事業継続期間 20 年間で均等化した正味固定量の算定結果を示す。正味の固定量は  $1.096 \text{ Mt}/\text{年}$  であり、岩石採掘量  $6 \text{ Mtpa}$  で除せば、機能単位として  $0.183 \text{ t-CO}_2/\text{t-rock}$  と求まる。同図に示す通り、正味固定量に減じる主な要因は 6.1% の研削動力であり、これは排出係数が下がれば線形的に減少する。一方、9.5% を占める資材は鉄骨 (79%) やポリエチレンシート (14%) などが支配的であり、これらの調達をグリーン化することでのみ低減可能である。一方、土壌固定や森林の光合成の変化は無視できるほど小さく、今回の事例研究の目的である不確実な要因の排除の点では功を奏し、算定数値に一定の品質を与えたと考えられる。

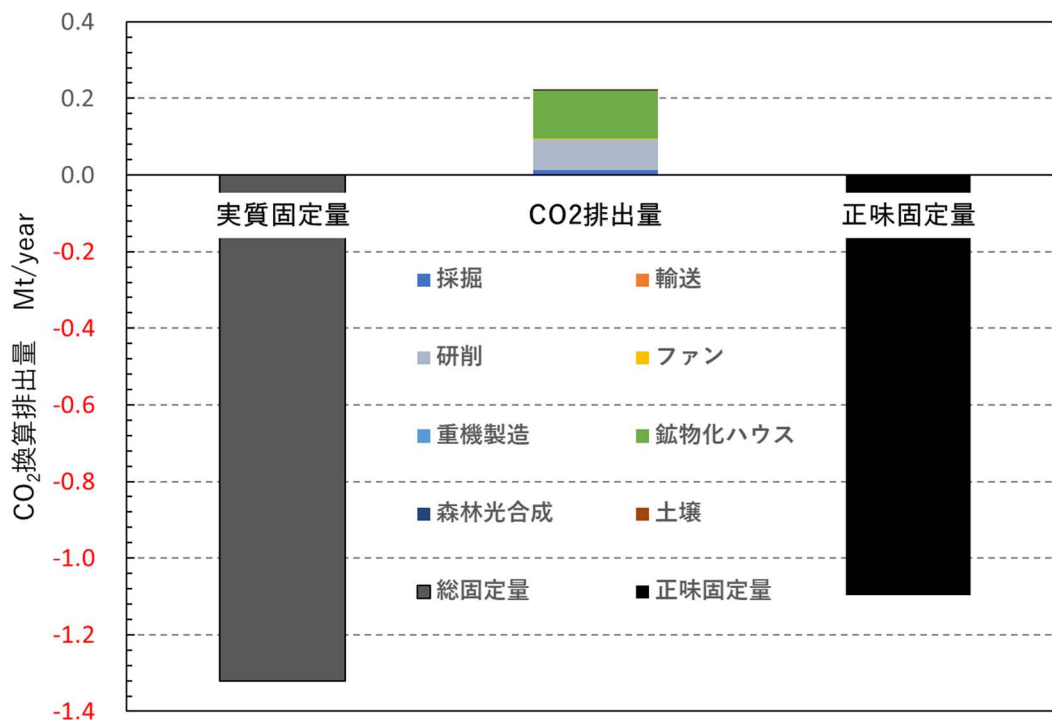


図 12 実質固定量に対する正味固定量の内訳と算定結果

## 8. データの収集方法

前述の通り、工業資材や消費エネルギーについては鉱物化速度については JLCA のデータベースや公的機関の公表データを基にした。鉱物種ごとの CO<sub>2</sub> 鉱物化速度は早稲田大学中垣研究室にて取得したデータを基に、未反応核モデルによって近似し、類似の鉱物を含む岩石を代表して算定に供した。土地利用の変化による自然の炭素収支への影響は論文等から引用したが、土壌環境は場所によって異なる。したがって、CO<sub>2</sub> 鉱物化と土地利用の変化に絡むデータは代表値であり、算定数値の確度向上のためには、今後の研究によって情報基盤の整備が必要と考えられる。

## 9. データ品質

引用した数値のうち、JLCA の LCA データベース、公的機関の排出係数以外のデータ品質については、文献の数値自体の品質となる。また、早稲田大学で実験的に評価した数値は、岩石によってばらつきが大きいいため、今後のさらなる研究成果が待たれる。

## 10. 解釈

粉碎岩石は、風化促進時間が長いほど CO<sub>2</sub> 鉱物化率は向上する。一方で、反応速度は低下して鉱物化量があまり増えないにもかかわらず設備を長時間占有するため、時間当たりの鉱物化量を稼ぐ意味では、鉱物化率が低くても短期間で新たな粉碎岩石に頻繁に入れ替えた方がよい。半年、1 年および 2 年サイクルでの入れ替えのケースで、2 年間の正味の固定化量と固定化率を試算した結果を図 13 に示す。正味の鉱物化率はわずかではあるが 1 年サイクルが最も高くなったことから、岩石によって最適な鉱物化期間があると解釈される。

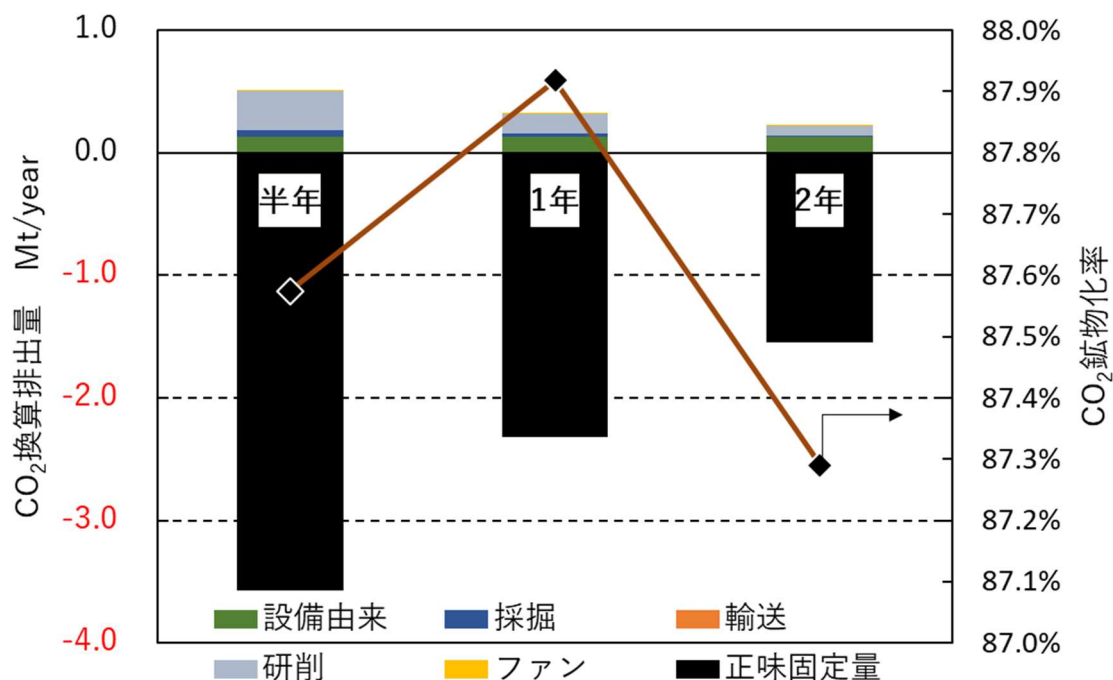


図 13 2年間の正味の固定化量と固定化率の試算結果

## 参考文献

- <sup>1</sup> Jan C Minx et al., 2018 Environ. Res. Lett. 13 063001
- <sup>2</sup> <https://www.nature.com/articles/d41586-020-01965-7>
- <sup>3</sup> Spence, et al., Climatic Change vol. 165, 23 (2021)
- <sup>4</sup> David J. Beerling, Nature Plants, vol. 138, No.4 Mar. 2018 pp. 138-147
- <sup>5</sup> Corey Myers and Takao Nakagaki 2020 Environ. Res. Lett. 15 124018
- <sup>6</sup> Corey Myers, 早稲田大学博士論文, (2019) <http://hdl.handle.net/2065/00063313>
- <sup>7</sup> Ichiyama et al., 2015,  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmps/110/1/110\\_140625/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmps/110/1/110_140625/_pdf/-char/ja)
- <sup>8</sup> Inoue et al., 2005,  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmps/100/4/100\\_4\\_150/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jmps/100/4/100_4_150/_pdf/-char/ja)
- <sup>9</sup> Mizukami et al., 2001,  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/gkk/31/2/31\\_2\\_87/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/gkk/31/2/31_2_87/_pdf/-char/ja)
- <sup>10</sup> Nozaka et al., 2005,  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1525-1314.2005.00605.x>
- <sup>11</sup> Komatsu et al., 1975,  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/geosoc1893/95/4/95\\_4\\_311/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/geosoc1893/95/4/95_4_311/_pdf/-char/ja)
- <sup>12</sup> SOILGRIDS( SoilGrids250m 2.0 - Soil organic carbon density),  
<https://data.isric.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/713396fe-1687-11ea-a7c0-a0481ca9e724>

### <著作権について>

本成果報告書に掲載されているあらゆる内容の無許可転載・転用を禁止します。

すべての内容は日本の著作権法及び国際条約によって保護を受けています。

### <投稿編集のご案内>

LCA日本フォーラムニュースレターでは、会員の方々のLCAに関連する活動報告を募集しています。活動のアピール、学会・国際会議等の参加報告、日頃LCAに思うことなどを事務局(lca-project@jemai.or.jp)までご投稿ください。

### <発行 LCA日本フォーラム>

一般社団法人 産業環境管理協会内

〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町2-2-1

E-mail : lca-project@jemai.or.jp Tel: 03-6694-5381

URL: <http://lca-forum.org/>

(バックナンバーが上記URLからダウンロードできます)