

沿岸漂着ゴミ由来のバイオメタノールによる
沿岸域水産施設への熱・電力・燃料併給の可能性の検討
(第2報；CO₂削減効果、経済性評価の追加)

石田武志[†]

Feasibility study of combined heat, power, and fuel supply system using bioethanol derived from marine debris
for coastal fisheries facilities

(Second report: Added evaluation of CO₂ reduction effect and economic efficiency)

Takeshi Ishida[†]

国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産大学校海洋機械工学科
(Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

[†] 責任著者 (corresponding author) : ishida@fish-u.ac.jp

※本論文は、以下の論文に対して、計算の設定値の見直し、CO₂削減効果の計算、経済性評価を加えてまとめ直したものです。

石田武志、“沿岸漂着ゴミ由来のバイオメタノールによる沿岸域水産施設への熱・電力・燃料併給の可能性の検討”，水産大学校研究報告，73巻4号，109–123（2025）

<https://fra.repo.nii.ac.jp/records/2014038>

Abstract

The author has previously developed and published energy and resource flow models focusing on the post-collection process of marine debris. These models were designed to examine the technical and economic feasibility of establishing businesses with energy systems. One of the previous studies examined the economic feasibility of a microgrid system combining a styrene oil conversion device from drifted styrofoam and a cogeneration system (CGS). The current study focuses on the “biomass gasification furnace and methanol synthesis furnace” technology, which has a proven track record with woody biomass. If this methanol synthesis furnace could be applied to drifting marine debris, it would be an option for providing energy to coastal facilities. In this study, an energy flow model was developed that can easily calculate the energy flow of a methanol synthesis furnace, CGS, and fuel supply system using biomethanol obtained from coastal biomass such as marine debris. If only marine debris is taken into account, the amount of biomass will be insufficient. For this reason, discarded fish and food residues from fishing ports and fish processing plants were also evaluated. Furthermore, this biomethanol can be used together with waste cooking oil to synthesize biodiesel fuel (FAME), enabling various applications including marine fuel. Using this energy model, the potential for energy self-sufficiency for coastal fisheries facilities (fishing ports, fish processing plants, and fishing boats) was calculated. The calculation results show energy self-sufficiency as a function of changes in biomass volume. However, they also found it difficult to be self-sufficient in electricity, heat, and fuel at the same time. Additionally, an optimization model was developed to determine the optimal size of the CGS, demonstrating the potential to improve the energy self-sufficiency of coastal fishery facilities.

Key words: marine debris, bio-methanol, bio-diesel fuel, FAME, cogeneration system (CGS), system simulation model, optimization model

1. 緒言

1-1 沿岸漂着ゴミの状況

マイクロプラスチック等の海洋プラスチックゴミの問題がクローズアップされ、廃プラスチックが海洋生態系へ与える影響の調査や、プラスチックゴミの削減への取り組みが始まってきている。しかし、既に海洋に放出された廃棄物は膨大な量と考えられ、九州東シナ海側や北海道東部の離島では、沿岸部が大量の漂着ゴミで埋まる状況も続いているなど、沿岸部での漂着ゴミの問題解決には長期間の取り組みが必要である。2009 年 7 月には「美しく豊かな自然を保護するための海岸における良好な景観及び環境の保全に係る海岸漂着物等の処理等の推進に関する法律」（海岸漂着物処理推進法）が施行され、漂着ゴミの発生抑制や回収処理が進められている[1]。しかし日本全国に漂着するゴミの総量は、環境省報告書[2]の推計によれば、約 22 万 t～42 万 t（2017 年時）であると報告されている。また回収については、環境省報告書[3]によれば、令和 4 年度（2022 年度）海岸漂着物地域対策推進事業による漂着ごみの回収重量の合計は 54,264 t、清掃延べ距離は 16,742 km であり、多くの漂着ゴミは回収されていない状況であると考えられる。さらに令和 4 年度の全国の漂着ごみ組成調査結果の集計結果[3]によると全国で 123,898 個（7,939 kg）の漂着ごみ（人工物）が回収・処理され、人工物のうち占める割合が大きい上位 10 位を整理した結果、10 品目は全てプラスチック（発泡スチロールを含む）であった。このうち発泡スチロールは漂着したのち、波力などで破碎され、そのプラスチック片が沿岸部岩場の間に堆積し、集計にカウントされていないものも多くあると考えられる。そしてこのプラスチック片の破碎が進むと、5 mm 以下のマイクロプラスチックとなると考えられている。近年、マイクロプラスチックによる生態系への影響が懸念されるようになり、その実態調査や海洋へのプラスチックの流出を防ぐ対策も近年始められている[2]。

これに加え、回収された漂着ゴミの処理についても課題が残されている。特に離島においては島内処分施設の不整備のため島外処理を行う必要があり、島外への運搬費が非常に高くなる。対馬市の事例では、1.05 m³の袋 1 袋当たり、島外への運搬費が約 1 万円と報告されている[4]。このように、漂着ゴミの回収・処理においては補助金に頼る部分が多く、回収量や事業の継続性は、補助金の規模により決まる形となる。補助金が不足した場合、回収が進まなくなると共に、回収されたゴミについても、最も費用がかからない山間地への埋立て処分方式になることが危惧されている。漂着ゴミは塩分や化学物質を吸着している場合が多く、そのまま山間地に埋め立て処分を行うと、土壤汚染などの 2 次汚染につながる可能性も考えられる。このため今後は、浮遊状態も含めた漂着ゴミの効率的な捕捉・回収技術と、事業採算性を踏まえた処理・再資源化システムを検討していくことが必要である。

1-2 沿岸ゴミの処理技術についての検討経緯

筆者は、漂着ゴミの回収について、特に回収後の再資源化処理のプロセスに注目して、事業として

成立するための技術的、制度的、経済的条件をエネルギー・資源フローモデルなど様々な数理モデルを構築して検討してきている。

2018年には、漂着発泡スチロールの油化装置とコージェネレーションシステム（CGS）、太陽光発電を組み合わせたマイクログリッドによる経済性の最適化モデルの検討を行った[5]。このモデルによりスチロール油化装置からのスチレン油が CGS の経済性を向上させ、その利益を、漂着ゴミ回収へと投じることで、経済的な自立性を確保しつつ資源循環が成立できる可能性を示すことができた。

また 2021 年には、様々な変動要因下においても漂着ゴミ回収が長期的にかつ経済的に継続されるシステムの稼働方策を導出できる基礎モデルを構築するために、深層強化学習の一つである深層 Q 学習（DQN）の手法を検討した。具体的には、一定規模の漂着ゴミを削減していくために、CGS から生み出される利益を、システムの運用上のどのプロセス（CGS 容量の拡張、漂着ゴミの回収の推進、利益のストックなど）に投入すれば、短期間でより多くの漂着ゴミの処理が可能なのかについて検討した[6]。

さらに 2023 年には、マイクログリッド・エネルギーをひとつのエージェントを考え、そのエージェントが地域のバイオマス資源を「捕食」しながら、電力と熱エネルギーを「創出」していく単位として考え、電力と熱をバランス良く消費できる場所に「生息」して、「増殖」していくというプロセスをマルチエージェント型のシミュレーションモデルとして考案した[7]。このモデルを用いて、地域に広がった複数のバイオマス資源とエネルギーシステムを自己組織的に連携させることにより、地域全体が循環型社会へ移行していくプロセスの基礎をシミュレーションすることができた。

また筆者らとは別に、漂着ゴミの再資源化については、発泡スチロールの油化装置の導入などが長崎県対馬市や沖縄県鳩間島などで試みられている[8]。油化されたスチレン油は、油化装置の加熱用燃料に用いられるとともに、重油などと混焼して燃料として利用できる。また輸送費がかさむ発泡スチロールは、植物油を用いた脱塩・減容化技術の開発が川原、山口ら[9-10]により行われ、容積を 1/50 程度にできると報告されている。しかし漂着ゴミの効果的な処理を行う技術開発はこれら以外はあまり行われていない状況である。漂着ゴミ中のプラスチックの再使用が進まない原因の一つが、プラスチックに付着している汚れや海特有の臭いである。この海特有の臭いは洗浄するだけでは落ちず、再生利用の過程でも臭いが落ちない状況となっている。Ishida[11]は、沿岸漂着発泡スチロールゴミの油媒によるリサイクル過程において、魚の臭い成分が植物油に移行するかどうかを、ハンセン溶解度パラメータにより評価を行っている。

一方で海洋漂着ゴミをエネルギー資源として再利用する取り組みは、いくつかの事例や研究があり、例えば官民の取り組みとして「クリーンオーシャンプロジェクト 2050」が進行中であり、漂着プラスチックごみをエネルギー資源として活用するシステムが検討されている。これは、漂着プラスチックを圧縮しペレット化して燃料として利用する樹脂ボイラー実証実験を行い（2016 年）、東町漁業協

同組合（鹿児島県長島町）にて、廃フロートをペレット燃料にして水産加工（ワカメの湯通し作業）に必要な 90～95 °C のお湯の供給に成功している[12]。また北海道では、海岸漂着物のリサイクルモデルが検討され、特に流木のリサイクルに焦点を当て、流木を燃料として利用するための処理方法が模索されている[13]。沖縄県竹富町では、漂着した発泡スチロールを油化するプロジェクトが実施されており、発泡スチロールを移動式油化装置で処理し、スチレン油に変換している。このスチレン油は、焼却炉やディーゼルエンジンの燃料として利用可能であり、実証実験では 104 kg の発泡スチロールから 74 リットルのスチレンが生成されたと報告されている[13]。

1－3 研究目的

以上のように漂着ゴミについては回収後の処理についてもコストがかかる状況であり、筆者らは、それらのゴミからエネルギーを回収するなどにより少しでも経済性が確保できる可能性を探っている。本研究では、木質系のバイオマスなどで既に実績のある「バイオマスガス化炉＋メタノール合成炉」（以下バイオメタノール合成炉）に注目して、これらの技術によるエネルギー回収の可能性について試算を行った。バイオメタノール合成炉については、海洋漂着ゴミ（プラスチック、バイオマスゴミ）の処理を行った事例は確認できないが、技術的には可能であると考えられる。この技術が利用できれば海洋漂着ゴミからバイオメタノールの合成が可能となるとともに、このバイオメタノールは廃食油と共に用いてバイオディーゼル燃料(FAME)の合成も可能になるなど、船舶燃料を始めとして様々な用途に用いることができる。また同時に、沿岸の水産施設から生じる廃棄魚や食品残渣なども同時に処理することが可能であると考えられる。

メタノールの利用については、ノーベル化学賞を受賞したジョージ・オラー氏が「メタノール経済社会」を提唱している[14]。これはエネルギーの媒体としてメタノールを中核とする概念である。近年、メタノールは、基礎化学品としての幅広い用途や、船舶・ボイラー燃料などの用途への展開ができるなどの点から注目されている。沿岸部の漁港や水産加工施設からの食品廃棄物や廃棄魚などのバイオマスも含めてバイオメタノールを製造することが可能となれば、バイオメタノール合成プロセスによる漁港・水産施設のエネルギー自給を達成するとともに資源循環も実施できるシステムを構成することが可能であると考えられる（Fig.1）。本研究は、沿岸水産施設において、漂着ゴミや水産系廃棄物から製造したバイオメタノールを用いて、漁港や食品事業所、漁船などへの熱・電力・燃料併給システムの可能性を検討したものである。

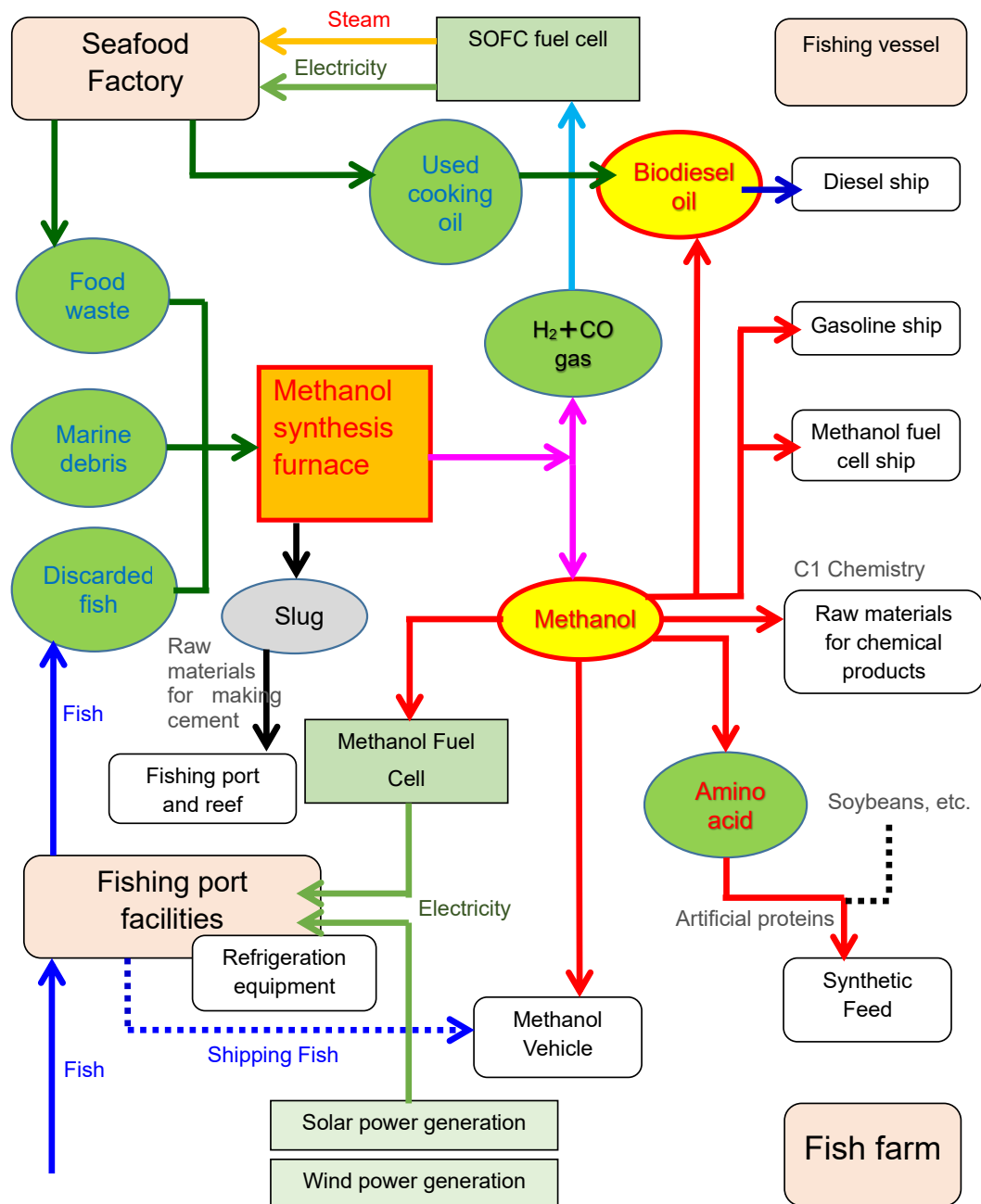


Fig. 1. Network for the utilization of biomass methanol in coastal areas.

1-4 バイオメタノールの沿岸水産施設・船舶での利用可能性

バイオマスからメタノールの合成は、バイオマスの熱化学変換により、「バイオマスのガス化・メタノール合成プロセス」で製造される。有機物であるバイオマスをガス化炉により、CO、CO₂、CH₄とH₂に転換したのち、メタノールを合成するものであり、このプロセスは、バイオマスの種類を選ば

ず、メタノールの収率が高いという特徴がある。国内では新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）などの主導により試験炉がつくられ、長崎バイオメタノール事業[15]などのように、商業生産も開始されている。

漂着ゴミや水産系廃棄物を利用したバイオメタノールの合成の実績はまだ報告されていないが、沿岸部や漁港などから出る有機物を利用したバイオメタノール合成プロセスが可能となれば、Fig.1のように沿岸部の漁港・水産施設のエネルギー供給を実現するとともに資源循環が実現できるシステムを考えることができる。Fig.1に示すようにこのシステムで生成されたメタノールは、以下のような様々な用途に利用することができる。

- 1) バイオマスガス化炉からの $H_2 + CO$ は、メタノールを合成するだけではなく、直接燃焼してエンジンを稼働させて発電するなど、燃料電池の発電燃料として利用でき、漁港や水産加工場の電力の自給が可能となる。
- 2) メタノールは小型漁船の燃料であるガソリンや軽油に直接添加することも可能であり、燃料費の削減が可能である。またメタノール自動車の燃料としても利用できる。近年はメタノールは船舶の主燃料として注目されてきている。例えばトヨタ自動車の子会社のトヨフジ海運（愛知県東海市）は、メタノールを主燃料に使う自動車運搬船 2 隻を 2027 年度に導入すると発表している[16]。既存の化石燃料で稼働する船舶と比較し、二酸化炭素（ CO_2 ）排出量を約 20%削減できると報告されている。
- 3) 水産加工場から出る廃食油とメタノールを利用することにより、バイオディーゼル燃料(FAME)を生成することが可能であり、中大型漁船に A 重油代替燃料として供給することもできる。さらに超臨界メタノールとの反応を利用すると石けんなどの副生成物なしでバイオディーゼル燃料が精製できる研究[17]もおこなわれている。
- 4) バイオマスガス化炉から出る最終的なスラグも、セメント材料として用いることができ、沿岸部土木工事や漁場形成などに利用することができる。
- 5) メタノールは様々な化学製品製造の起点となる基礎物質であり、プラスチックの精製など、様々な工業材料を製造することができる。
- 6) メタノールを栄養源とする C_1 微生物によるタンパク質の精製も、海外では技術的な事業例があり、養殖用の餌として大豆などの合成試料に添加することができる[8]。
- 7) メタノール燃料電池の発電燃料として利用でき、漁港や水産加工場の電力の自給が可能となる。

このように、メタノール合成炉は、漁港や沿岸水産施設のエネルギー自給やゼロエミッション化を可能にするだけでなく、化学基礎製品や人工飼料もつくりだすことができる可能性がある。

1-5 船舶燃料としてのバイオメタノール利用の現状と将来展望

1-5-1 海運業界における脱炭素化の要請と代替燃料

国際海運業界は、地球規模の気候変動対策において重要な役割を担っており、温室効果ガス（GHG）排出削減への圧力は非常に高くなっている。この動向に対応するため国際海事機関（IMO）は、2050年頃までに国際海運からの GHG 排出量を実質ゼロにするという目標を採択した[18]。これにより、従来の重油に代わるクリーンな代替燃料の導入が急務となっている。アンモニアや水素など様々な選択肢が検討される中、メタノールは有望な候補の一つとして注目されている[19]。特に、生物由来の資源（バイオマス）を原料とする「バイオメタノール」は、ライフサイクル全体でカーボンニュートラルを実現しうる燃料として、その重要性を増している。以下にバイオメタノールの製造方法、船舶燃料としての導入状況、その優位性と課題について概説する。

1-5-2 バイオメタノールの概要と製造方法

バイオメタノールは、生物由来の有機資源（バイオマス）を原料として製造される再生可能メタノールである[20]。その製造プロセスは、原料の調達から最終的な燃焼に至るまでのライフサイクル全体で評価した際に、温室効果ガスの排出量が従来燃料と比較して大幅に削減される点に特徴がある。

(1) 原料の多様性

バイオメタノールの原料は多岐にわたり、主なものとして、家畜の糞尿、木くず、下水汚泥、都市ごみなどの廃棄物系バイオマスが挙げられる。また、バイオディーゼル生産時の副産物である廃グリセリンや、製紙工場のパルプ廃液（黒液）なども原料として利用されている[21, 22]。これらの原料は、持続可能な航空燃料（SAF）など他の用途とも競合する可能性があるため、安定的な確保が課題の一つとなっている[23]。

(2) 主要な製造方法

バイオマスからメタノールを製造する技術経路は、主に以下の手法に大別される。

- ①バイオマスのガス化：木材や農業残渣、都市ごみなどの固形バイオマスを高温で熱分解し、水素と一酸化炭素を主成分とする合成ガスを生成する。この合成ガスを触媒反応させることでメタノールを合成する[23]。カナダの Enerkem 社は、世界で初めて都市ごみを原料とするガス化法を商用化し、年産約 3 万トンのプラントを稼働させた実績を持つと報告されている[23]。
- ②バイオガスの利用：家畜糞尿や有機性廃棄物を嫌気発酵させて得られるバイオガス（主成分はメタンと CO₂）を利用する手法である。バイオガスを精製してメタン濃度を高めたバイオメタンを、従来の天然ガス由来メタノールプラントの原料として投入することが可能である[23]。
- ③副産物の再資源化：バイオディーゼル製造時に生じる廃グリセリンをガス化・改質してメタノールを製造する技術がある[21]。オランダの BioMCN 社（現 OCI 社）はこの分野の先駆けであり、

このプロセスにより化石原料由来の製法に比べ CO₂ 排出を約 70%削減できると報告されている[21]。また製紙工場の黒液に含まれるメタノールを精留・回収する方法も実用化されており、スウェーデンの Södra 社が世界初の商用設備を稼働させている[23]。

(3) 主な商用プロジェクト

バイオメタノールの生産プロジェクトは世界中で立ち上がり始めているが、生産量はまだ限定的である。世界全体のメタノール生産量に占める再生可能由来の割合は 0.2%にも満たないと推計されている[19]。Södra 社のプロジェクトは、世界初の「化石資源ゼロ」でのメタノール量産プラントとして注目された[23]。また、オランダの LowLands Methanol 社は、バイオマスと廃棄物の混合ガス化による年産 12 万トンのプラントを計画しており、生成されるメタノールは海運燃料として供給される予定である[23]。多くの大型プロジェクトはまだ計画・建設段階にあり、本格的な供給体制の構築は今後の課題となっている。

1-5-3 船舶への利用状況と導入事例

バイオメタノールを含むグリーンメタノールの船舶燃料としての利用は、まだ初期段階にありながらも、大手海運会社を中心に具体的な導入事例があらわれてきている。

(1) 主要な導入事例

メタノール燃料船の導入を牽引しているのが、デンマークの海運大手 A.P. モラー・マースク社である[23]。同社は 2023 年に世界初のメタノール燃料コンテナ船を就航させ、すでに 19 隻以上のメタノール二元燃料エンジン搭載船を発注している[23]。これらの船舶で必要となるグリーンメタノールを確保するため、同社は燃料サプライヤー各社と長期購入契約を締結している。

日本の海運大手もこの動きに追随しており、商船三井 (MOL) はメタノールと重油の両方を使用できる二元燃料エンジンを搭載した輸送船を運航している。また、スウェーデンの Stena Line 社は、2015 年に大型フェリー「ステナ・ゲルマニカ」を世界初のメタノール燃料対応船として改造し、10 年近くにわたり安定運航を続けている[23]。

さらに、小型船舶での実証も進んでいる。EU のプロジェクトでは、パイロットボートをバイオメタノール 100%で航行させる試験に成功し、「世界で最もクリーンな船の一つ」と評価された[24]。これらの事例は、小型船から大型船まで幅広い船種でメタノール燃料の利用が技術的に可能であることを示している。

(2) バンカリングインフラの整備

船舶への需要増加に伴い、燃料供給インフラの整備も進んでいる。シンガポール、ロッテルダム (オランダ)、蔚山 (韓国) といった世界の主要港では、すでにメタノール燃料の船舶への供給 (バンカリ

ング) が商業的に開始されている。

1-5-4 船舶燃料としての優位性と課題

(1) 優位性

- ①環境性能: メタノールは硫黄分を含まないため、硫黄酸化物 (SO_x) や粒子状物質 (PM) の排出をほぼゼロにできる。また、窒素酸化物 (NO_x) の排出も大幅に削減可能である。バイオメタノールを利用した場合、植物が成長過程で CO_2 を吸収しているため、燃焼時に CO_2 を排出してもカーボンニュートラルと見なされる。
- ②取り扱いの容易さ: 常温・常圧で液体であるため、高圧タンクや極低温設備が不要であり、既存の燃料タンクや供給インフラを比較的少ない改造で活用できる。万が一海に流出しても、水に溶解しやすく生分解性が高いため、重油のような深刻な海洋汚染リスクが低いとされている。

(2) 課題

- ①供給量の不足とコスト: 現状ではバイオメタノールの生産量は非常に少なく、海運業界全体の需要を満たすには程遠い状況である。また、製造コストが従来の化石燃料由来のメタノールに比べて高く、価格競争力が課題となっている。
- ②エネルギー密度の低さ: 重油と比較してエネルギー密度が半分以下であるため、同じ航続距離を確保するにはより大きな燃料タンクが必要となる。
- ③安全性: 引火点が約 12°C と低く、毒性を持つため、取り扱いには二重隔壁の設置やガス検知器の配置など、適切な安全対策と乗組員への訓練が不可欠となる。

1-5-5 船舶燃料としての将来展望

バイオメタノールは、多くの課題を抱える一方で、海運業界が 2050 年のカーボンニュートラル目標を達成するための、最も現実的で有力な選択肢の一つである。常温常圧で液体という取り扱いの容易さは、他の代替燃料に対する大きなアドバンテージとなる。今後は、再生可能エネルギー由来の水素と回収した CO_2 から製造される「e-メタノール」の実用化も期待されており、これが実現すれば原料の制約が緩和され、供給量の大幅な増加が見込まれる。世界中でバイオメタノールの生産プロジェクトが計画されており、これらが軌道に乗ることで供給量とコストの問題は徐々に解決に向かうと期待されている。課題解決に向けた技術革新と国際的な連携が進むことで、バイオメタノールの利用は今後ますます本格化していくと考えられる。

2. バイオメタノールによる熱・電力・燃料供給システムシミュレーションモデルの構築

2-1 検討対象のシステム

本研究では、沿岸水産施設（漁港、水産加工場、漁船）における電力・熱・燃料を供給する Fig.2 に示すバイオメタノールシステムについて、定量的な検討を行うための基礎的なエネルギー・物質フローモデルを構築した。システムは主として、メタノール合成炉、バイオディーゼル油製造装置、CGS（コージェネレーションシステム）の3つより構成されるシステムを対象とした。そして沿岸水産施設に対して、エネルギー供給の自給率の向上の観点から定量的な検討をした。これに加え、本検討では、CO₂の削減可能性、経済性の初期的な評価も併せて実施した。

本研究では漂着ゴミをバイオマス資源として利用することを目指しているが、投入される資源としては木質系の漂着ゴミのみでは、回収量が少なくメタノール合成炉を稼働できる規模にはないと考えられるため、水産施設から生じる食品残渣や廃棄魚もバイオマス資源として検討対象とした。これにより水産施設からの廃棄物もエネルギー資源として有効に利用できる可能性を検討できると考えられる。また漂着ゴミのうち発泡スチロールなどのプラスチック系のゴミも漂着ゴミの処理という視点からメタノール合成炉に投入すると設定した。

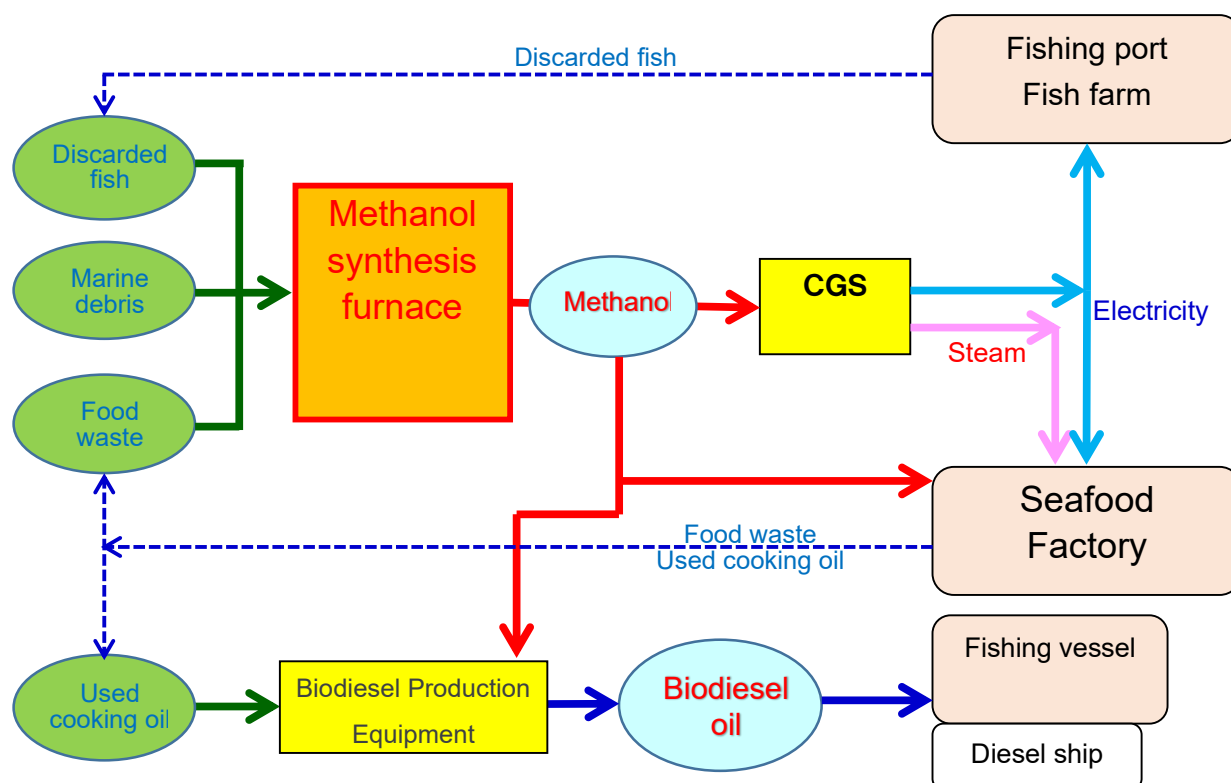


Fig. 2. Flow diagram of the energy system to be analyzed and evaluated.

2-2 システム構成要素の設定

2-2-1 バイオマス投入系の設定

想定したエネルギーシステムに投入されるバイオマス資源は、水産加工工場から出る食品残渣、漁港から出る廃棄魚、漂着ゴミ（プラスチック系、木質系）とした。食品残渣と廃棄魚の設定は、モデル食品工場の設定、およびモデル漁港の設定の部分に示す。

漂着ゴミは、沿岸距離に対する回収量を以下に示す方法により推計した。環境省の平成 30 年度の海洋漂着ゴミの調査[25]において、2018 年度の全国の回収重量と清掃延べ距離の関係式が提示されており、回収量 $y(t) = 4.674 \times \text{回収延べ距離 } x \text{ (km)} + 268.13$ と報告されている。この式は距離が 100 km オーダーの相関式であり、これに直接 $x = 1$ を代入して 1 km 当たりの回収量を求めると誤差が大きくなると考えられるため、100 km の推計値を 100 で割ることにより、沿岸 1 km 当たりの回収量の原単位を求め、7.36 t/km が得られた。仮に沿岸 10 km を想定すると、海洋ゴミの回収量は、7.36 t/km \times 10 km = 73.6 t/年となる。また同調査[26]において、下関などのいくつかの地域の回収ゴミの分類別重量や構成比が示されている。これからいくつかの地域の一般的な漂着ゴミの規模や組成をまとめると Table 1 のようになる。下関などでの回収ゴミのうち、プラスチックと木材系をあわせると 8 割から 9 割程度となることが読み取れる。このため、本推計では回収ゴミのうち、バイオマス資源として利用できるものは 8 割として、沿岸 10 km 当たりのバイオマス系の漂着回収ゴミは 73.6 t/年 \times 0.8 = 58.9 t/年となる。これより、本推計では 10 km 長の海岸の平均回収量は 58.9 t/年としてエネルギー収支の計算に用いた。仮に 10 km 長の海岸の漂着ゴミの平均回収量は 58.9 t/年をバイオメタノール反応炉に投入すると、次に示すバイオメタノール合成炉の製造原単位 0.2 t-メタノール/t-バイオマスより、58.9 t/年 \times 0.2 = 11.8 t-メタノール/年となる。この規模ではメタノール合成炉を常に稼働させるためのバイオマス量の規模とはならないため、水産加工工場から出る食品残渣、漁港から出る廃棄魚を加えて推計を行った。

Table 1. Size and composition of marine debris in Japanese some regions

Region	Plastic rate	Wood rate	Sum
Shimonoseki	40%	58%	98%
Amami	70%	11%	81%
Kouchi	33%	47%	80%
Matsue	66%	27%	93%

2-2-2 バイオメタノール反応炉の条件

(1) バイオメタノール反応炉の収率

バイオマス熱分解炉およびメタノール合成炉により、バイオマス 1 トンから得られるバイオメタノ

ール量の調査を行った。Table 2 は 2 つのバイオマスプラント（事例 1 は京都バイオサイクルプロジェクト[27]，事例 2 は三菱重工業[28]）におけるメタノール製造量の事例である。

Table 2. Example of methanol production volume in biomass plants

	Biomass input amount	Methanol yield
Case study 1 [27]	500 kg/day	40 – 50 L
Case study 2 [28]	2000 kg/day	400 kg

バイオマス資源（またはバイオマスを含む廃棄物）をガス化してメタノールを製造するプロセスは、世界的に見てもまだ「商業化の初期段階」や「実証プラント」のレベルが多く、大規模に稼働している事例は限られている。海外での代表的な事例は以下のとおりである。

(1) Enerkem Alberta Biofuels（エネルケム・アルバータ・バイオ燃料）

世界で初めて都市ごみから商業規模でメタノール（およびエタノール）を製造することに成功した最も有名なプラントである。

- ・設備の所在地: カナダ、アルバータ州 エドモントン（Edmonton, Alberta, Canada）
- ・バイオマス処理量: 約 300 t/日（年間 10 万トン）
- ・バイオマス種類: 一般廃棄物（MSW：リサイクル不可能な固形ごみ）

※バイオマス比率が高いごみ

- ・メタノール製造量: 推定 約 100 t/日 相当

補足: 年間生産能力は 3,800 万リットル（エタノール換算）。メタノールは中間生成物として製造され、最終的にエタノールに変換される場合が多いが、メタノールとしての出荷も可能な設計である。

（出典）Enerkem 公式サイト（Edmonton Facility）

<https://enerkem.com/facilities/enerkem-alberta-biofuels/>

内容: 所在、廃棄物処理量（100,000 dry metric tons/year）、生産能力（38 million litres/year）等の基本スペックが記載されている。

(2) Chemrec DP-1 Plant（ケムレック DP-1 プラント）

製紙工場の副産物である「黒液」をガス化してメタノールや DME（ジメチルエーテル）を製造する技術のパイロット/実証プラントである。

- ・設備の所在地: スウェーデン、ピーテオ（Piteå, Sweden）
- ・バイオマス処理量: 約 20 t/日（黒液固形分として）

- ・バイオマス種類: 黒液 (Black Liquor : パルプ製造時の廃液バイオマス)
- ・メタノール製造量: 約 4 t/日 (BioDME として製造する場合もあり)

補足: この技術をスケールアップした商業プラント (Domsjö Fabriker など) の計画が断続的に検討されている。

(出典) Chemrec 公式サイト (Technology / Pilot Plant)

<https://www.chemrec.se/plant/>

内容: DP-1 プラントの能力 (ガス化能力 3MW、メタノール/DME 生産量 約 4 トン/日) や、稼働実績 (累計運転時間など) が記載されている。

(3) VärmlandsMetanol (ヴェルムランド・メタノール)

木質バイオマスのガス化によるメタノール製造を目指したパイロットプラントである。

- ・設備の所在地: スウェーデン、ハーグフォシュ (Hagfors, Sweden)
- ・バイオマス処理量: パイロット規模 (詳細な日量は試験によるが小規模)
- ・バイオマス種類: 森林残渣 (木質チップ)
- ・メタノール製造量: 日産数トンレベル (商業機での計画値は日産 300t 以上を目指しているが、資金調達等の課題あり)

(出典) VärmlandsMetanol AB 公式サイト

<http://www.varmlandsmetanol.se/>

内容: トップページおよび「Teknik (技術)」、「Om oss (会社概要)」のページに、計画されている商業プラントのスペック (バイオマス入力 111MW、メタノール出力 75MW=約 300 トン/日規模) が記載されている。

この他に、世界の代表的な「バイオマスガス化・メタノール製造」設備一覧をまとめると Table 3(1)(2) のようになる。Table 2、Table 3 の調査結果より、バイオメタノールの製造原単位 (バイオマス 1 トンに対するバイオメタノールの製造量) の設定としては、平均的に 0.35 t・メタノール/t・バイオマス程度が妥当であると考えられ、本研究ではこの値を採用した。

Table 3(1). List of representative "biomass gasification to methanol" facilities around the world

Facility / Project Name	Location (City, Country)	Biomass Type	Processing Capacity (t/day)	Methanol Production (t/day)	Remarks	Yield
Enerkem Alberta	Edmonton, Canada	Municipal Solid Waste (MSW)	~300	~100 (equivalent)	World's first commercial unit. Final product is mainly ethanol.	0.33
Chemrec DP-1	Piteå, Sweden	Black Liquor (Pulp waste liquor)	~20	~4	Demonstration unit for high-efficiency gasification technology.	0.2
VärmlandsMetanol	Hagfors, Sweden	Wood chips	-	(Test scale)	Representative example of pure wood gasification.	
Gidara Energy (Advanced Methanol Amsterdam)	Amsterdam, Netherlands	Waste / Biomass	~480 (planned)	~240 (planned)	Large-scale project currently under construction/planning.	0.5

Average

0.34

Table 3(2). List of representative "biomass gasification to methanol" facilities around the world

Facility Name / Operator	Location (City, Country)	Status	Biomass Processing Capacity (t/day)	Biomass Type	Methanol Production Capacity (t/day)	Yield
Ecoplanta (Repsol + Enkern)	El Morell, Spain	FID secured / Start expected 2029	Approx. 1,096 t/d (400,000 t/y non-recyclable MSW)	Non-recyclable Municipal Solid Waste (MSW)	Approx. 658 t/d (240,000 t/y methanol)	0.6
Varenes Carbon Recycling (VCR, Enkern + Shell et al.)	Varenes, Quebec, Canada	Under construction (Start expected 2025)	Approx. 548 t/d (200,000 t/y forest residue + non-recyclable waste)	Forest residue + Non-recyclable MSW	Approx. 271 t/d (99,000 t/y methanol)	0.49
Waste to Methanol (ENI + NextChem JV)	Livorno, Italy	Planned (First-of-a-kind commercial)	550 t/d (RDF + Plastic mix "PLASMIX")	Mixed RDF & Waste Plastic (Waste-derived biomass + fossil fraction)	300 t/d Methanol (as published)	0.55
Enkern Westbury commercial demonstration facility	Westbury, Quebec, Canada	Operational (Demonstration)	48 t/d (specified as processing amount)	Treated wood (poles, sleepers, etc.), wood waste, MSW	Approx. 2.7 t/d (1,000 t/y methanol)	0.06
Enkern Sherbrooke pilot plant	Sherbrooke (near Montreal), Quebec, Canada	Pilot	Unknown (Small-scale processing of various wastes)	MSW, wood chips, treated wood, sludge, waste plastics, straw, etc.	Approx. 1.0 t/d (475 m ³ /y x density 0.79 ≈ 375 t/y ≈ 1.0 t/d)	
Enkern Alberta Biofuels (Edmonton Waste-to-Biofuels Project)	Edmonton, Alberta, Canada	Demonstration -> Role completed/Closed in 2024	Approx. 274 t/d (100,000 t/y MSW)	Sorted MSW (textiles, plastics, wood, etc.)	Methanol capacity not explicitly stated (listed as 30,000 t/y Ethanol + Methanol etc.)	0.3
LTU Green Fuels DP1 + DME pilot (Chemrec Process)	Piteå, Sweden	Demonstration / Currently idle	Biomass input in MW only; t/d unknown (3 MWth Black liquor + Pyrolysis oil)	Pulp mill black liquor + Bio-oil (wood-based)	4 t/d Methanol (Synthesized with 4 t/d DME)	
2 t/d Scale Biomass Gasification/Methanol Synthesis Test Facility (MHI + Chubu Electric + AIST, NEDO Project)	Kawagoe Thermal Power Station grounds (Kawagoe, Mie), Japan	Test Plant (R&D)	2 t/d (Dried woody biomass)	Driftwood, cedar/bark, etc. (6 types of woody/biomass waste)	>200 kg methanol yield per 1 t air-dried wood -> Est. >0.4 t/d (2 t/d x 0.2 t/t)	0.2
SunGas Renewables Biomethanol Plant (JM Technology)	Rapides Parish, Louisiana, USA	Planned (FEED in progress, construction start late 2026)	Biomass processing amount unpublished (Uses "biomass gasification")	Biomass such as forest residues (assumed)	> Approx. 1,370 t/d (500,000 t/y biomethanol planned)	

Average

0.37

(2) バイオメタノール反応炉の建設コスト

バイオメタノール反応炉の建設は設備投資額が非常に大きく、化石燃料由来（天然ガス等）のメタ

ノールと比較して、製造コストが **1.5 倍～3 倍**程度になるのが現在の相場である。主なバイオメタノール反応炉の建設費と単価試算をまとめると Table 4 のようになる。建設費単価の目安としては、スタンドアローン（独立型）でガス化設備を建設する場合、メタノール製造能力 1 トン/日 あたり「1.5 億円 ～ 2 億円」の建設費がかかるというのが一般的な目安となる（例：日産 100 トンのプラントを作る場合、建設費は 150 億～200 億円規模）。

本推計では、年間 1000 t（3 t /日）のプラントの建設費を 5.25 億円と設定して計算を行った。

Table 4. Estimated construction costs of major biomethanol reactors and unit costs of methanol production

（※為替レートは直近の概算値 1EUR=160 円、1CAD=110 円、1SEK=14 円 で換算）

Facility Name (Country)	Biomass Type	Methanol Capacity (t/day)	Total Construction Cost (Approx.)	Unit Construction Cost (100 Million JPY /[t- MeOH/day])	Remarks
VärmlandsMetanol (Sweden)	Wood chips	315 t/day	350 Million Euros (Approx. 56 Billion JPY)	Approx. 1.8	Representative estimated value for a standalone wood gasification facility.
Enerkem Alberta (Canada)	Municipal Solid Waste (RDF)	~100 t/day (equivalent)	100 Million CAD * (Approx. 11 Billion JPY)	Approx. 1.1	* Facility cost at the initial pilot stage. For current commercial units (approx. 25 Billion JPY+), the unit cost tends to be higher.
Gidara Energy (AMA) (Netherlands)	Waste	~250 t/day	Undisclosed (Est. 40-50 Billion JPY)	Approx. 1.6 - 2.0	Received approx. 18 Billion JPY (110 Million Euros) in subsidies alone. Total amount is estimated to be 2-3 times that.
Södra Mönsterås (Sweden)	Pulp waste liquor (recovery)	~15 t/day	100 Million SEK	Approx. 0.9	[Reference] Low cost because it is installed as an "ancillary facility" of an existing pulp mill.

(3) バイオメタノール製造単価

原料費、設備償却費、運転費を含んだバイオメタノールの製造コスト（LCOE）は、現在のメタノール市場価格（化石燃料由来：約 50～70 円/kg）と比較して高額となる。様々な実績を総合すると、バイオメタノール製造単価の目安は 75 円 ～ 150 円 / kg（75,000 ～ 150,000 円/t）となり、市場価格の 約 1.5 倍 ～ 3 倍 のコストとなっている。本推計では、バイオメタノールの製造コストを 35 円/kg から 130 円/kg の範囲で設定して、それぞれの場合の経済性を試算した。

2-2-3 バイオディーゼル油製造の設定

(1) バイオディーゼル油製造の収率

バイオマスからバイオディーゼル燃料を生成する技術には、以下のようなものがある[29-30]。

- 1) FAME (Fatty Acid Methyl Ester, 脂肪酸メチルエステル) : 廃食油などを原料として製造される最も一般的なバイオディーゼル燃料であり、既存のディーゼルエンジンでそのまま使用できるため、導入が容易である。この中には菜種油などの植物性油脂をメチルエステル化して、ディーゼルエンジン用燃料を得る技術や、家庭の使用済みてんぷら油を回収し、バイオディーゼル燃料を製造する技術も存在している。

補足：水産加工残渣（魚油）の活用について

一般的な BDF 製造装置は植物油（てんぷら油）を想定しているが、魚油（フィッシュオイル）も化学的には BDF 化が可能である。ただし、魚油は植物油に比べて「固まりやすい成分」や「酸化しやすい成分」が多いため、寒冷地での利用には、燃料ヒーターの設置や軽油との混合利用といった対策が必要になるケースがある。

- 2) HVO (Hydrotreated Vegetable Oil, 水素化処理油) : 植物油を水素化処理して製造されるバイオディーゼル燃料であり、FAME よりも安定性が高く、低温での流動性も優れている。
- 3) SVO (Straight Vegetable Oil) : 植物油をそのまま燃料として利用するもので、バイオディーゼル燃料の一種である。主に廃食油などが利用され、精製処理を最小限にとどめることで、製造コストを低く抑えられる点が特徴である。

本研究では廃食油からバイオディーゼル燃料を製造する最も一般的な技術である FAME を推計の対象とした。FAME を生成する一般的な方法は以下の通りとなる。

- ① 原料となる廃食用油の準備（使用後の食用油や飲食店などから回収）。
- ② エステル交換反応：廃食用油にメタノールを反応させる。これにより、廃食用油の主成分であるトリグリセリドが低分子化され、粘度の低い脂肪酸メチルエステル（FAME）へと変換される。この FAME がバイオディーゼル燃料として利用できる。
- ③ 副産物の除去：エステル交換反応の過程で生成される副産物であるグリセリンを除去する。
- ④ 精製：生成されたバイオディーゼル燃料をさらに精製し、不純物を取り除く。
- ⑤ 品質確認：最終的に得られたバイオディーゼル燃料の品質を確認する。

以上の工程を経て、廃食用油からバイオディーゼル燃料が生成される。ただし、具体的な製造方法や条件は、使用する設備や原料の種類、品質などにより異なる。廃食油に対する、メタノールの使用量、バイオディーゼル燃料の製造量の比率としては、植田油脂株式会社[31]による情報を基にまとめた Table 5 の値を用いた。また廃食油の回収量については統計的なデータが得られなかったため、モデル食品工業あたり月 10 t として年間 120 t/年と仮定して計算を行った。

Table 5. Biodiesel production ratio (weight ratio when waste cooking oil is taken as 100)

Waste cooking oil	100
Methanol Consumption	20
Biodiesel fuel production	70

(2) バイオディーゼル油製造装置の設置単価（円/kg ※日産能力あたり）

バイオディーゼル油製造装置本体価格を、その装置が1日に処理できる能力（kg）で割った「能力あたりの投資単価」の目安は以下ようになる。本推計では、年間 100 t（0.3 t/日）のプラントにおいて、6.5 万円 /（kg/日）と仮定して、建設費を $6.5 \times 300 = 1950$ 万円として計算した。

①小規模装置（バッチ式）：5 万 ～ 8 万円 /（kg/日）

- ・想定規模：日産 50kg ～ 200kg（飲食店、小規模食品工場、自治体実証実験など）
- ・装置価格帯：300 万円 ～ 1,500 万円程度
- ・特徴：手動工程が含まれることが多く、安価ですが人件費等のランニングコストがかかる傾向がある。

②中・大規模装置（連続式）：3 万 ～ 5 万円 /（kg/日）

- ・想定規模：日産 1,000kg ～ 10,000kg（産廃処理業者、大規模食品工場など）
- ・装置価格帯：3,000 万円 ～ 数億円
- ・特徴：自動化が進んでおり、スケールメリットにより能力あたりの設置単価は割安になる。

(3) バイオディーゼル燃料の単価（円/kg）

バイオディーゼル油の製造にかかるランニングコスト（製造原価）の目安は以下のとおりである。本推計では、原料が無償の場合を想定し、40 円/kg を用いて計算を行った。

① 原料（廃食油）が無償の場合：30 円 ～ 50 円/kg

- ・内訳：メタノール・触媒代（約 20 円）、電気・水道代（約 10 円）、メンテナンス費など。
- ・水産加工場などで自社から出る油（残渣油など）を使う場合は、この圧倒的な低コストが実現できる。軽油（約 150 円/L）や重油（約 100 円/L）の代替として大きな削減効果がある。

②原料を有価で購入する場合：100 円 ～ 150 円/kg

- ・内訳：上記製造コスト + 原料購入費（50 円～100 円/kg）。
- ・現在、輸出用 SAF（航空燃料）の原料として廃食油の買取価格が高騰しており、外部から油を調達して製造するメリットは薄れつつある。

2-2-4 コージェネレーションシステム（CGS）の設定

(1) CGS の規模・効率の設定

CGS はエンジン式のものと燃料電池式のものがあるが、本推計ではエンジン式のものを想定し、発電規模は、100 kW 程度、発電効率 0.4（低位発熱量基準）、排熱回収効率 0.3（低位発熱量基準）、年間稼働時間 3000 h のシステムを考え、バイオメタノールで駆動するとした。最適化モデルにおいては CGS 発電容量を変数とした。

現在メタノールでエンジンを駆動する CGS の事例はほとんどないと考えられるが、船舶燃料において、North-C-Methanol プロジェクト[32]など、メタノールを船舶燃料として利用することが計画されるなどしており、CGS でのメタノール利用に関しては、技術的障壁は低いと考えられる。また、メタノールを燃料とする燃料電池は現在までの多くの実証や製品化の事例があり、比較的小型のものが多い。具体的な事例としては SFC Energy AG 社の直接メタノール型燃料電池[33]などがあり、メタノール燃料電池による CGS も技術的に可能であると考えられる。

(2) CGS 設置単価（円/kW）の設定

CGS について、システム本体価格に工事費を含んだ概算コストは以下ようになり、規模が大きくなるほどスケールメリットにより kW 当たりの単価は下がる。本推計では 100 kW 規模の CGS を想定しているため、CGS の設置単価としては、以下の目安により中規模の CGS の中央あたりの単価として、25 万円/kW を用いて推計を行った。

①小規模（< 10kW）：150～250 万円/kW

- ・家庭用燃料電池（エネファーム等）が該当する。
- ・機器価格が高額（1 台 100 万円前後～）であり、補助金なしでは投資回収が長くなる。

②中規模（数 10kW ～ 数 100kW）：20～40 万円/kW

- ・業務用・産業用の小型ガスエンジン（マイクロコージェネなど）が該当する。
- ・パッケージ化された製品が多く、設置工事が比較的簡易である。
- ・事例：35kW 機で約 1,000 万円～1,500 万円程度。

③大規模 (> 1,000kW) : 15~25 万円/kW

- ・大型ガスエンジンやガスタービンが該当します。工場や地域冷暖房などで採用される。
- ・排熱利用設備（ボイラ等）の仕様により変動するが、kW あたりの単価は最も安くなる。
- ・出典：経済産業省 発電コスト検証ワーキンググループ資料、各自治体導入調査等より推計

2-2-5 モデル漁港の設定

日本国内の漁港におけるエネルギー消費量については、漁港の規模別・魚種別のエネルギー内訳などは、既存の統計として一元管理されたものは存在しない状況である。これらを求める場合は、統計値は各漁港の断片的なデータの積み上げと推計モデルの作成によって、近似値を推計するしかない状況である。

そのため、具体的な個別の漁港における参考となるデータを探した。一般的な規模の漁港の事例として、高知県の田ノ浦漁港（第2種漁港）について文献[34-35]を参照し、漁港の電力消費量、漁獲量、船舶数を把握し、これをモデル漁港として、本計算では使用した。この漁港での年間電力消費量は1,550 GWh/年（平成22年）[34]である。廃棄魚は漁獲量12,847 t[35]と廃棄率9.1 % [36]から1,169 t/年と設定した。

参考データとして、水産庁「令和4年度 漁港漁場のカーボンニュートラル化推進調査」から、1種～特定3種別の漁港あたりのエネルギー消費原単位を推計した結果をまとめたものがTable 6である。この報告書においては、漁港種類別のエネルギー消費原単位がCO₂排出量ベースで整理されているため、そこから逆算してエネルギー原単位などを推計している。

Table 6. Average energy consumption per fishing port by type of fishing port

Fishing Port Type	Scale / Characteristics		Number of Ports	Electricity Consumption(kWh/port/year)	Fuel Consumption(k L/port/year)	Landing Volume per Port(t/year)	Registered Powered Vessels per Unit*(Boats per port)	Registered Vessel Tonnage per Unit*(Gross tonnage per port)
Type 1	Small-scale / Coastal fishery based	Mainly local small boats; landing volume is limited.	2,069	57,000	22	513	36	85
Type 2	Medium-scale / Regional hub	Approx. 3.4 times the scale of Type 1. Relatively consolidated landings.	524	500,000	223	1,730	99	347
Type 3	Large-scale / National use	More than double the scale of Type 2. Extensive freezing/refrigeration facilities; high energy consumption.	101	6,300,000	99	3,936	119	918
Specific Type 3	Ultra-huge hubs (13 domestic ports)	Overwhelming scale. Approx. 19 times the landing volume of Type 3.	13	41,850,000	1,308	74,788	158	6,302
Type 4	Remote islands / Remote areas	Scale is intermediate between Type 1 and Type 2.	99	1,170,000	61	1,021	81	326

2-2-6 モデル食品工場の設定

日本国内の水産加工食品工場のエネルギー消費量について、工場の規模別（売上または出荷製品のトン数別）データは、公開されている Web 情報や統計データだけで完全に整理するのは困難な状況である。そのためいくつかの統計データを組み合わせ、平均的な食品加工工場の値を以下のように推計した。

平均的な規模の水産食品工場の想定として、消費エネルギーについては「令和 4 年度エネルギー消費統計調査」[37]の食品製造業の 1 事業所当たりの数値を用いた (Table 7)。生産量については、「2022 年経済構造実態調査 製造業事業所調査（品目別統計表データ）」（1. 製造品に関する統計表，第 1

表 品目別出荷及び産出事業所数（全事業所）[38]の鯖缶詰，まぐろ缶詰の出荷数量と事業所数のデータから，事業所当たりの生産量を算定した（Table 7）。食品残渣量は，生産量，食品残渣率から 99t/年と推計した。食品残渣率は，「食品製造業の食品ロス削減対策に対する調査事業」報告書【概要版】[39]の記述「冷凍食品製造業全体では「製品生産量」に対するロスの発生率は合計で 3.5%となった。」より 3.5%を利用した。

Table 7. Specifications of the model food factory

Electricity	520,429	kWh/factory
Fuel	2,583	GJ/factory
Steam	1,089	GJ/factory
Production	2,830	t/factory
Discard Residual Rate	0.035	
Food waste amount	99	t/factory

また、水産加工工場のエネルギー消費量の事例をインターネットで検索し、北海道の「カーボンニュートラル・ファーストステップ計画」報告書にいくつかの水産加工工場のエネルギー消費量等がまとめられていることがわかった。具体的には以下の企業である。この報告書からデータをまとめると Table 8 のようになる。

- ・株式会社ヤマイチ水産
- ・株式会社ワイエスフーズ
- ・佐藤水産株式会社

Table 8. Examples of energy consumption in seafood processing plants

	Yamaichi Suisan Co., Ltd.(FY2022)			YS Foods Co., Ltd.Head Office Factory (FY2023)			Sato Suisan Co., Ltd.(FY2023)		
	Primary Energy Consumption	Unit	Share (%)	Primary Energy Consumption	Unit	Share (%)	Primary Energy Consumption	Unit	Share (%)
Fuel Oil A	33,477	GJ/y	53.75%	10,581	GJ/y	30.56%	5,368	GJ/y	9.56%
Electricity	7,106,944	kWh/y	-	4,894,000	kWh/y	-	11,986,000	kWh/y	-
(Electricity in GJ)	25,585	GJ/y	41.08%	17,619	GJ/y	50.89%	43,149	GJ/y	76.85%
Diesel Oil	3,221	GJ/y	5.17%	886	GJ/y	2.56%	759	GJ/y	1.35%
LPG	Negligible	GJ/y	-	4,252	GJ/y	12.28%	3,861	GJ/y	6.88%
Kerosene	-	GJ/y	0.00%	734	GJ/y	2.12%	925	GJ/y	1.65%
Gasoline	-	GJ/y	0.00%	552	GJ/y	1.59%	1,176	GJ/y	2.09%
City Gas	-	GJ/y	0.00%	-	GJ/y	0.00%	908	GJ/y	1.62%
TOTAL	62,283	GJ/y	100%	34,624	GJ/y	100%	56,146	GJ/y	100%
Employees	-	-		120	persons		354	persons	
Total Fuel	36,698	GJ/y		17,005	GJ/y		12,997	GJ/y	

（出典）北海道「カーボンニュートラル・ファーストステップ計画」報告書

Table 8 のデータと Table 7 のモデル工場を比較してみると、3つの事例の工場のほうが、モデル工場より 10 倍程度規模が大きいことがわかる。しかし、3つの事例は環境対策などが実施できる大規模な工場の事例である可能性が高く、食品加工工場を代表する平均的な工場ではないとも考えられる。小規模工場も含めた平均はさらに小さくなる可能性もあり、モデル工場の値も妥当性があると考えられる。

2-2-7 漁船の燃料消費量

水産庁の研究調査において、いくつかの漁船の実態調査が「沖合漁船の動力構成および燃料消費実態の調査」[40]にまとめられており、漁船の燃料消費量の実績として、沖合底びき網漁船（板びき 105 GT, A 丸）の月別燃料消費量などが掲載されているが、これを集計して、年間の t 数に変換すると、658 t/年（A 重油）となる。このほかに沖合底びき網漁船（かけまわし 144 GT, B 丸）、大中型まき網漁業網船（北まき 199 GT, C 丸）、大中型まき網漁業網船（遠まき 199 GT, D 丸）の実態調査結果が掲載されている。しかしこの調査では特定の漁船の実績のみで、これらの数値を漁船全体に一般化したデータとして取り扱うことが難しい。

本研究では、漁船における燃料使用量は、経済産業省が PRTR（Pollutant Release and Transfer Register；化学物質排出移動量届出）制度のもとで推計・公表しているものを利用した[41]。Table 9 に漁船の大きさ別の燃料消費量を抜粋したものを示す。この推計では、「沿岸漁船（12 海里以内）」及び「沖合漁船（12～200 海里）」のみが推計対象となっており、「主たる操業水域が陸地から 200 海里以遠である遠洋漁業の漁船」については、推計の対象外とされている。

Table 9. Estimated fuel consumption per fishing vessel in 2022

Tonnage	Number of ships (2022)	Fuel consumption (kg/ship・year)
With outboard motor	53,257	2,404
Less than 1t	3,540	1,721
1~3t	15,469	3,644
3~5t	24,213	7,226
5~10t	10,799	14,754
10~15t	3,844	19,699
15~20t	3,164	30,977
20~30t	49	51,724
30~40t	33	74,135
40~50t	22	64,620
50~60t	11	145,953
60~70t	25	113,021
70~80t	49	153,844
80~90t	47	149,112
90~100t	31	148,679
100~150t	98	297,032
150~200t	160	288,621
200~350t	115	466,455
350~500t	177	548,899
500~1000t	9	1,397,997

2-2-8 CO₂ 排出係数の設定

CO₂ 削減効果の検討において用いる CO₂ 排出係数は以下の値を用いた。バイオマスガス化炉・メタノール合成炉稼働時、およびバイオディーゼル製造時での CO₂ 排出量は 0 と仮定して計算した。

・ 廃プラ燃焼 : 2765 kg- CO₂/t

(出典) <https://www.injection-molding.jp/report/seminar-report-20230124>; ハーモウェブセミナーレポート『樹脂リサイクルによる CO₂ 削減に貢献する粒断機』2023/1/24 開催

・ メタノール燃焼 : 1375 kg- CO₂/ t

(出典) https://www.jstage.jst.go.jp/article/kanrin/81/0/81_5/_pdf; 高崎講二、各種代替燃料の可能性(燃焼面から)、日本船舶海洋工学会誌 第 81 号(平成 30 年 11 月)

・ A 重油燃焼 : 2710 kg- CO₂/ t

(出典) https://www.j-lpgas.gr.jp/nenten/data/co2_ichiran.pdf; "燃料の発熱量・CO₂ 排出係数の一覧表"

・ 電力の CO₂ 排出係数 0.408 kg- CO₂/ t (東京電力)

また、電力、燃料の単価は以下の設定を用いた。電力単価は、消費電力量に対する基本料金と従量料金を合わせた額の平価である。また燃料の単価の目安を Table 10 に示す。

住宅： 35 円/kWh

事業所： 25 円/kWh

軽油： 3.8 円/MJ

A 重油： 2.5 円/MJ

灯油： 3.2 円/MJ

Table 10. Estimated fuel unit prices

Fuel Type	1. Est. Unit Price (JPY/L)	2. Calorific Value (MJ/L)	3. Cost per Heat Unit (JPY/MJ)	Usage / Remarks
Fuel Oil A	95 - 105 JPY	39.1	2.4 - 2.7 JPY	Large boilers, ships, medium-to-large generators
Kerosene	110 - 120 JPY	36.7	3.0 - 3.3 JPY	Small boilers, hot water supply
Diesel Oil (Industrial)	140 - 150 JPY	38.2	3.7 - 3.9 JPY	Diesel vehicles, small construction machinery, emergency generators

2-3 システムシミュレーションの設定

Fig. 2 のシステム構成について、各構成要素の入出エネルギー量の計算を行うための Excel を用いたシステムシミュレーションシートを作成した。シートの概観を Fig. 3 に示す。このシートによりバイオマス投入量に対して、メタノールの製造量、さらにそれから派生的に生成される、電力、熱、バイオディーゼル油の量が簡易に計算できるものとなっている。

シート上に入力項目として、食品残渣量、漂着ゴミ回収量、廃棄魚量、廃食油量、CGS 発電容量を設定すると、バイオメタノール生産量、それによる CGS 発電量、熱回収量、バイオディーゼル燃料量が算出される。CGS と漁船のバイオディーゼル燃料に利用されなかったバイオメタノールは、食品工場の燃料として利用するとしている。

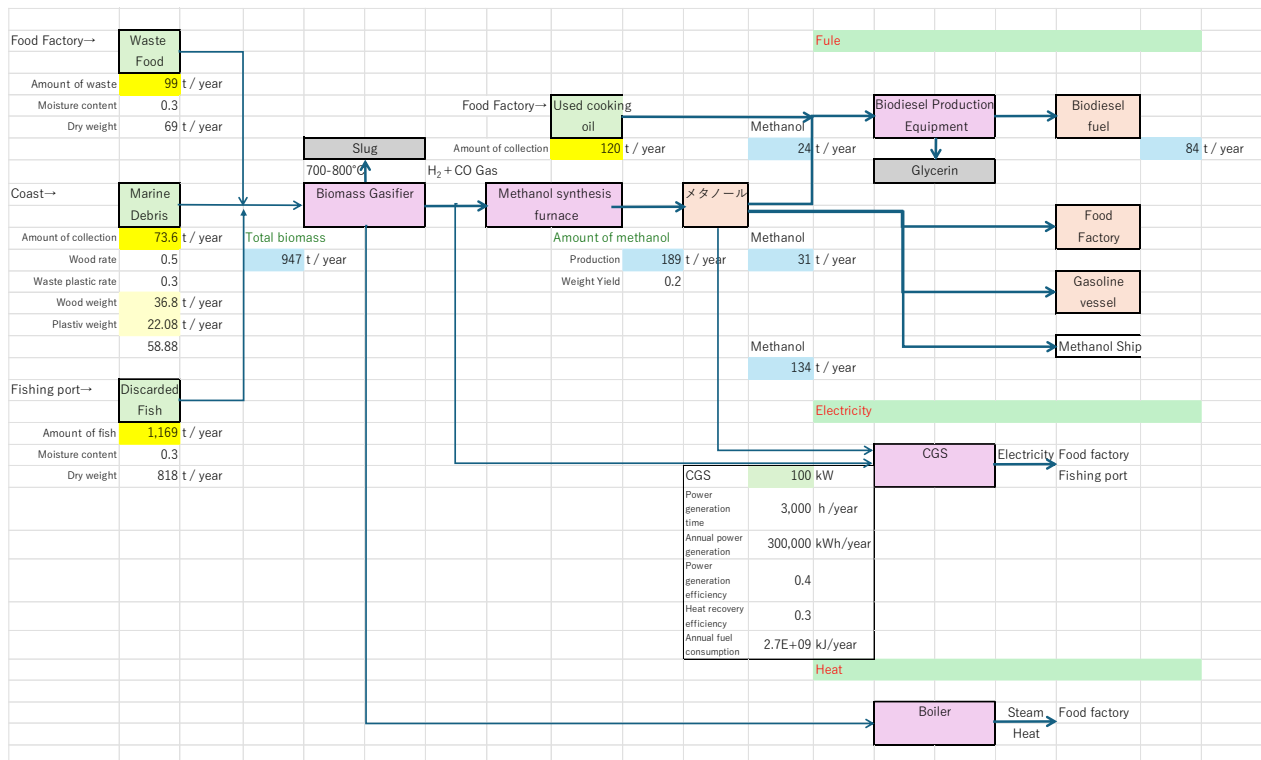


Fig. 3. Overview of system simulation sheets.

2-4 最適化モデルの設定

Fig. 3 のシステムシミュレーションシートを基礎として、Excel のソルバーを用いた最適化モデルもあわせて構築した。システムシミュレーションの設定で CGS を稼働させた場合、CGS から回収される熱を食品工場だけでは使いきれず余ってしまう可能性があり、全体のエネルギー効率が低減してしまう。しかし電力、熱、燃料をバランスよく供給するための CGS 容量などを決定することが困難である。このためモデル漁港とモデル食品工場に対して、どの程度の規模の食品工場（本推計でのモデル食品工場がいくつ分）と漁港（本推計でのモデル漁港がいくつ分）があれば、エネルギー需給がバランスするか、自給率を高く保つことができるかを推計できる最適化モデルを構築した。これにより、沿岸水産施設の需要の変動に対応できるシステムが構築できるかの検討を行うことができる。最適化モデルの概要は以下の通りである。

（目的関数）自給率の合計の最大化

$$\text{自給率の合計} = \text{電力の自給率} \times \alpha + \text{熱の自給率} \times \beta + \text{燃料の自給率} \times \gamma$$

$$\text{電力の自給率} = \text{CGS 電力発電量} / \text{電力消費量（食品工場+漁港）}$$

$$\text{熱の自給率} = \text{CGS 熱回収量} / \text{熱消費量（食品工場）}$$

$$\text{燃料の自給率} = \text{バイオマス燃料量（CGS, バイオディーゼル燃料の生産の分を除いた量）}$$

／ 燃料消費量（食品工場）

ただし α , β , γ はどの自給率を重視するかの重み係数（標準ケースではそれぞれ 1 を設定した）。

（制約条件）

変数は全て非負数という条件に加え，以下を設定

$$0.5 \leq \text{工場規模} \leq 10$$

$$0.5 \leq \text{漁港規模} \leq 10$$

$$\text{CGS 容量} \geq 50$$

$$\text{エネルギー自給率（電力）} \leq 1.2$$

$$\text{エネルギー自給率（熱）} \leq 1.2$$

$$\text{余剰熱量} \leq 0 \text{（ケース 3 のみ）}$$

（最適化ソルバー） GRG 非線形

3. 定量的評価の結果とまとめ

3-1 システムシミュレーションの結果

(1) エネルギー需給計算

以上に述べた条件の設定値に基づいてシステムフロー計算を行った結果は Table 11, Fig. 4 のとおりである。これより，生産できるバイオメタノールは，331 t/年であり，100 kW の CGS で消費されるバイオメタノールは 134 t/年であり，300 MWh/年の電力と 810 GJ/年の熱を生み出すことが可能である（Fig.4）。また年間 120 t の廃食油からバイオディーゼル油を生成した場合，24 t のメタノールを消費し，84 t /年のバイオディーゼル油を精製できる。これは 100 トンクラスの漁船の年間燃料消費量 297 t/年に対して，28.3 %に相当する。食品工場の燃料供給が 100 %を超え，メタノールが余ることがわかる。Table 11 より電力全体の自給率は 14.5%となり，モデル工場，モデル漁港の規模に対しては，一部の電力の代替にとどまることがわかる。

Table 11. Energy production and self-sufficiency with standard case parameters

Biomass input t /year		Methanol production and consumption t /year		Energy production		Energy self-sufficiency rate	
Used cooking oil	120	Total production	189	CGS electricity	300,000 kWh/year	Electricity(Factory+Fishing port)	14%
Food waste	99	CGS consumption	134	CGS heat	810 GJ/year	Food factory (Heat)	74%
Marine debris	59	Factory fuel consumption	31	Methanol fuel	31 t /year	Food factory (Fuel)	233%
Discarded fish	1,169	FAME production	24	FAME	84 t /year	Fishing vessel (100t, Fule)	28%

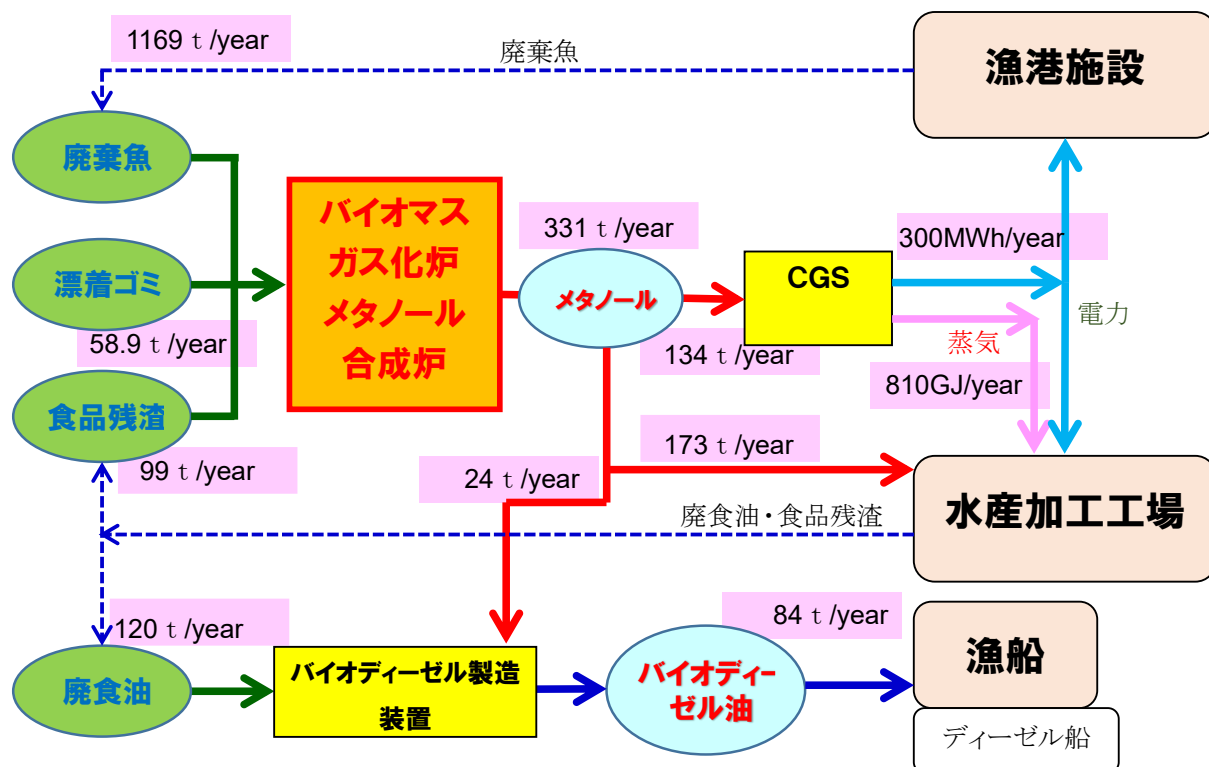


Fig. 4. Flow diagram of input resources and energy production (standard case).

Table 12 は、漂着ゴミ回収量、CGS 発電容量、食品工場の規模をそれぞれ変化させた場合の結果を示す。漂着ゴミを回収する沿岸の延長を長くした場合は、漂着ゴミ量が大きくなるためバイオメタノールの生産量は増加するが、CGS は発電容量が変わらないので発電量、熱量とも同じになり、自給率は変化しない。食品工場の燃料供給が 100 %を超え、メタノールが余ることがわかる。また、投入される廃食油量が変わらないので、バイオディーゼル燃料の生産量も同じであり、自給率も同じとなる。

標準ケースに対して、CGS 発電容量を 150, 200 kW と大きくした場合、電力の自給率が向上するとともに、CGS からの熱の供給も増加し、自給率が 100 %を超える状態となるが、CGS の稼働でほとんどのバイオメタノールが消費されるため、食品工場への燃料としての供給は低下してしまう状況となる。

食品工場の規模をそれぞれ 2, 3 倍とすると、それにともない食品残渣、廃食油量が増加するため、メタノール生産量も増加するが、CGS の発電容量が変わらないため、電力と熱の自給比率は変化しない。一方で廃食油の量が増えるため、バイオディーゼル燃料の生産量も増加し漁船への燃料供給比率も増加する。逆にバイオディーゼル燃料の生産にメタノールが消費されてしまうため、食品工場へ

の燃料の供給比率が低下してしまう。

漁港の規模をそれぞれ 2, 3 倍とすると、それにともない廃棄魚が増加するため、メタノール生産量も増加するが、CGS の発電容量が変わらないため、電力と熱の自給比率は変化しない。廃食油の量も同じなので、増加したメタノールは食品工場の燃料用となるが、自給率が 100%を超え、余剰となることがわかる。

Table 12. Energy production and self-sufficiency results of each calculation case

	Standard Case	Total distance of marine debris collection		CGS Capacity		Food Factory Size		Fishing port size	
		50 k m	100 k m	150kW	200kW	2x	3x	2x	3x
Electricity(Factory+Fishing port)	14.5%	14.5%	14.5%	21.7%	29.0%	14.5%	14.5%	14.5%	14.5%
Food Factory (Heat)	74.4%	74.4%	74.4%	111.6%	148.8%	74.4%	74.4%	74.4%	74.4%
Food Factory (Fuel)	232.6%	343.5%	482.2%	142.3%	51.9%	233.0%	233.4%	618.0%	1003.3%
Fishing Vessel(100t, Fule)	28.3%	28.3%	28.3%	28.3%	28.3%	56.6%	84.8%	28.3%	28.3%

(2) CO₂ 削減効果の計算結果

投入される廃棄物における廃プラスチックの比率が 2.3%であり、残りはカーボンニュートラルのバイオマス資源であるため、メタノールの CO₂ 排出係数は、石油から製造されるメタノールに比べ、97.2%削減され、32.1 kg-CO₂/t となる。これをベースに標準ケースにおける漁船（1 隻当たり）、食品工場、漁港における従来型の燃料による CO₂ 排出量と、バイオメタノールを用いた場合の CO₂ 排出量を比較して削減量を計算した結果は Table 13 のようになった。漁船の場合は 100%をバイオメタノールに代替するという設定ではなく、また食品工場、漁港においても CGS の電力・熱の供給バランスにより、すべてをバイオメタノールに代替できないので、97.2%削減とはならないが大きな削減効果があることがわかる。食品工場の燃料は、自給率が 100%以上となるため、削減率も 100%を超える結果となる。

Table 13. Potential for CO₂ reductions on fishing boats, food factories, and fishing ports (t-CO₂/year)

Category	Sub-category	CO ₂ Emissions	CO ₂ Reduction	CO ₂ Reduction Rate
Fishing Vessel (100t class, 1 vessel)	-	805	226	28%
Food Processing Plant	Electricity	228	33	14%
	Fuel	180	419	233%
	Heat	76	59	77%
Fishing Port	Electricity	679	98	14%

3-2 最適化モデルの結果

CGS 発電容量，モデル漁港の数（規模），およびモデル食品工場の数（規模）を変数として，エネルギー自給率の合計が最大になるように最適化計算をした結果を Table 14 に示す。

標準ケース； エネルギーフロー計算の標準ケース (Table 11 の Base Case)

ケース 1 ； 最適化モデルの計算結果 ($\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 1$)

ケース 2 ； 目的関数において，電力の自給率に重み ($\alpha = 50$) をかけた場合
($\alpha = 50, \beta = 1, \gamma = 1$)

ケース 3 ； 熱供給がバランスするように余剰熱がでないような制約をかけた場合
($\alpha = 40, \beta = 1, \gamma = 1$)

最適化の結果，ケース 1 ではモデル食品工場 0.5 個，モデル漁港 10 個，CGS 容量 50 kW で，自給率の合計が最大となると計算された。しかし結果をみると，食品工場の規模が小さくなるため燃料が大きく余剰となっていることがわかる。これは熱の余剰を下げる方向に最適化が進んでしまうためであると考えられる。このため，ケース 2 として，目的関数において，電力の自給率に重み ($\alpha = 50$) をかけることで電力の自給率を達成することを優先させた場合は，食品工場規模が 10 倍となり，電力の自給率は向上するものの，食品工場の燃料は逆に不足する形となる。一方で漁船の燃料も過剰となっているため，この分を食品工場に回すことも可能であると考えられる。ケース 3 は，食品工場の熱の需給を 100 % に近づくように制約を行ったものである。食品工場規模 0.8 倍，漁港規模 0.5 倍，CGS が 112 kW と標準ケースに規模に近い形となり，ほぼ熱を使いきる状況となり電力自給率も標準ケースに対して向上しているが，食品工場の燃料供給が不足する形となった。また電力を 100 % とする制約での最適化を行ったが，最適解を得ることはできなかった。

Table 14. Energy production and self-sufficiency rate using the optimization model

		Base case	Case 1	Case 2	Case 3
Energy self-sufficiency rate	Electricity(Factory+Fishing port)	14.5%	5.1%	80.9%	27.8%
	Food Factory (Heat)	74.4%	120.0%	120.0%	100.0%
	Food Factory (Fuel)	41.6%	1000.0%	-292.7%	-105.9%
	Fishing Vessel(100t, Fule)	28.3%	14.1%	282.8%	23.6%
Optimization parameters	Food Factory Size	1.0	0.5	10.0	0.8
	Fishing port size	1.0	2.9	0.5	0.5
	CGS Capacity	100	81	1,613	112
	Weighting factor (electricity) α	-	1	50	20
	Weighting factor (heat) β	-	1	1.0	1.0
	Weighting factor (fuel) γ	-	1	1.0	1.0

3-3 経済性評価の結果

標準ケースにおいて、バイオメタノールの製造単価を 30 円/kg から 130 円/kg まで変化させた場合の経済性評価結果を Table 15 から Table 17 に示す。

廃食油を無償として、バイオエタノール 24 t/年を利用して、バイオディーゼル燃料を製造して、漁船燃料の軽油を代替した場合の経済性を Table 15 に示す。バイオメタノールの製造単価が 110 円/kg を下回ると、燃料代替コストがプラスになることがわかり、50 円を下回るとバイオディーゼル製造装置の設置費用の回収も短期間で可能となることがわかる。

イオエタノール 173 t/年を利用して、漁船燃料やボイラーなどの軽油を直接代替した場合の経済性を Table 16 に示す。イオメタノールの製造単価が 70 円/kg を下回ると、燃料代替コストがプラスになることがわかる。バイオメタノール 173 t/年がすべて使いきれた場合、軽油とバイオメタノールの価格の差だけ利益になるがバイオメタノールの製造単価が 30 円/kg の場合は年間の利益は 802 万円となる。これを加味しても、メタノール合成炉の投資回収を行う場合は、長期の回収年数が必要となる。

CGS 運営の部分の経済性の評価結果を Table 17 に示す。バイオメタノールの製造単価が 70 円/kg を下回ると、CGS においても運用コストがプラスになることがわかる。また、この場合の CGS 設置コストの投資回収年数を算定すると、単価 50 円/kg 以下の場合は、回収年数も 6 年以下となり、実現可能性が高くなる可能性がある。一方で、CGS の運用差益のみでメタノール合成炉の投資回収を行う場合は、非常に長期の回収年数となり実現可能性は低いことがわかる。

Table 15. Evaluation of economic feasibility with biomethanol production unit costs (Biodiesel Fuel Production Process)

	Biomethanol production cost (yen/kg)					
	30	50	70	90	110	130
Cost reduction through diesel substitution (¥10 ⁴ /year)	233	185	137	89	41	-7
Payback year	8	11	14	22	47	-

Table 16. Evaluation of economic feasibility with biomethanol production unit costs (Direct use as fuel)

	Biomethanol production cost (yen/kg)					
	30	50	70	90	110	130
Cost reduction through diesel substitution (¥10 ⁴ /year)	802	456	110	-236	-582	-928

Table 17. Evaluation of economic feasibility with biomethanol production unit costs (CGS operation)

	Biomethanol production cost (yen/kg)					
	30	50	70	90	110	130
CGS operating costs (¥10 ⁴ /year)	403	672	941	1,209	1,478	1,747
Conventional system costs (¥10 ⁴ /year)	1,092	1,092	1,092	1,092	1,092	1,092
Difference (annual profit) (¥10 ⁴ /year)	689	420	151	-117	-386	-655
CGS installation cost (¥10 ⁴ /year)	2,500	2,500	2,500	-	-	-
CGS payback year	4	6	17	-	-	-
Methanol synthesis furnace installation cost (¥10 ⁴ /year)	52,500	52,500	52,500	-	-	-
Methanol synthesis furnace payback year	76	125	347	-	-	-

4. 考察

計算結果に示すように、エネルギーフローモデルの各パラメータを変更させた場合の検討が可能になった。本研究においては、入手できるデータに基づいて、漂着ゴミの回収規模、食品工場の規模、漁港の規模を変数として計算したが、これらの想定では、電力、熱、燃料の自給率を同時に 100% 近くにするのは困難であることがわかる。漂着ゴミの回収規模、食品工場の規模、漁港の規模は、地域の特性として外生的に決まるものであり、これらのパラメータは簡単には変更できない。変更できるパラメータは、CGS 容量などであるが、CGS 容量のみの調整では、電力、熱、燃料の自給率を総じてバランス良く向上させることは難しい可能性が示唆された。CGS が作り出す電力は売電や蓄電が可能である。しかし売電の単価や安くなる傾向であり、蓄電システムの導入はコストが増加しシステムの経済性が低くなる。また熱は余剰になると蓄熱しておくことが困難であるため、その場での消費が求められ、熱を余らせると全体のエネルギー効率が低下してしまう。このため、熱を 100 % 使いきる形で、CGS 発電規模を調整していくことが現実的である。最適化モデルのケース 3 などであれば、燃料不足分は外部から投入するために現実的であると考えられる。

また、検討したシステムでは、食品工場向けのバイオメタノールが余った場合、漁船への燃料供給やボイラー等で工場に必要な熱に変換することも可能である。本推計システムの構成では、最適化モデルの構成が複雑になるため計算を行っていないが、今後、蓄電システムの導入、燃料の貯蔵・融通なども含めた最適化モデルを構築していくことにより、自給率をバランスよく向上させることが可能な解が見つかる可能性があると考えられる。

また、本推計シートを利用することで、CO₂削減量や経済性を評価することが可能となった。本検討では、単純な回収年数のみの算定となったが、CO₂削減量も加味することで、CO₂排出権取引などによる収入も考慮することでより経済性を向上させることが可能であると考えられる。現在、日本のカーボンクレジット（CO₂排出枠）の価格は、1トンあたりおよそ3,000円～5,000円前後で取引されている。海外市場では、EU排出量取引制度（EU ETS）では1トンあたり約80～90ユーロ（約13,000円～15,000円）に達している。Table 13のCO₂削減量は835 t/年となっており、排出権取引により、大きく経済性を向上させる可能性もあると考えられる。

5. 結論

バイオメタノール合成炉により、漂着ゴミからメタノールが製造できた場合、どの程度の規模で電力や燃料が供給可能であるかについて、CO₂削減効果や経済性も含めた基礎的な推計を実施した。具体的には漂着ゴミなどの沿岸バイオマスから得られたバイオメタノールによる熱・電力・燃料併給システムのエネルギーフローを簡易に計算する表計算シートを作成した。またCGS規模などを求める最適化モデルをあわせて構築することが可能となり、沿岸水産施設のエネルギー自給率の向上の可能性を示すことができた。しかしバイオメタノール合成炉での漂着ゴミを処理事例は未だないため、今後技術的な条件を検討していく必要があると考えられる。今後、漂着ゴミの利用が可能となれば、船舶や沿岸施設での燃料供給可能性が広がっていくと考えられる。また経済性評価については、CGSの投資回収は比較的短期間となる可能性があるが、バイオマスが無償で利用できたと仮定した場合でもバイオメタノール合成炉も含めた投資回収年数は相当な長期にわたることが示された。今後、CO₂削減枠の売買のような経済手法も加味した評価を行っていく必要があると考えられる。

以上のように本研究においては、入手できるデータに基づいて基礎的な計算のみを実施したが、今後より詳細なケーススタディを実施するなどの検討を行っていく必要がある。

引用文献

[1] 環境省ホームページ：海岸漂着物処理推進法関係

https://www.env.go.jp/water/marine_litter/law.html (2024.10.21 確認)

[2] 内外地図株式会社：環境省委託業務 平成 28 年度 漂着ごみ対策総合検討業務報告書、II-105 (2017)

<https://www.env.go.jp/content/900543551.pdf> (2024.10.21 確認)

[3] 日本エヌ・ユー・エス株式会社：令和 5 年度 海洋ごみの実態把握及び効率的な回収に関する総合

検討業務報告書，Ⅱ-5（2024）

<https://www.env.go.jp/content/000220884.pdf> (2024.10.21 確認)

- [4] 石田雅照, 三原 悠, 三原 伊文: 漂着ゴミに関する規制の動向. 日本マリンエンジニアリング学会誌 **52**, 560-565 (2017)
- [5] 石田武志, 石田雅照, 津田稔, 生駒信康: 発泡スチロール系漂着ゴミの資源循環システムのための経済性評価基礎モデル. 水産大学校研究報告, **67**(2), 79-90 (2018)
- [6] 石田武志: 深層強化学習による発泡スチロール系漂着ゴミの資源循環方策の導出. 日本マリンエンジニアリング学会誌 **56**, 816-823 (2021)
- [7] 石田武志: 多要素型セルオートマトンモデルによる持続型地域エネルギーシステムの創発シミュレータ. 第 93 回マリンエンジニアリング学術講演会 講演論文集, 263-264 (2023)
- [8] 宇野秀敏: 発泡スチロールから燃料 ～宝の島を夢みて～. 食品と容器, **52**, 496-501 (2011)
- [9] Kawahara H, Yamaguchi S, Mihara Y: Attempts to desalt and shrink foaming polystyrene waste by using oil bath. *Journal of the JIME*, **52**, 569-573 (2017)
- [10] Yamaguchi S, Mihara Y, Fujita H, Kawahara H, Kita Y, Nishinotsuji T, Murakami N: On volume reduction of foam polystyrene for local supply and local consumption, *Journal of the JIME*, **49**, 185-187 (2014)
- [11] Ishida T: Removal of fish odors form styrofoam packaging to improve recycling potential using Hansen solubility parameters, *Recycling*, **2020-5**,30 (2020)
- [12] 株式会社エルコムホームページ: https://www.elcom-jp.com/company/sdgs_initiatives (2024.10.21 確認)
- [13] 内外地図株式会社: 漂着ごみ対策総合検討業務海洋ごみ対策に関する事例集 (環境省資料), 平成 30 年 3 月, <https://www.env.go.jp/content/900543464.pdf> (2024.10.21 確認)
- [14] ジョージ・オラー: メタノールエコノミー CO₂をエネルギーに変える逆転の発想, 化学同人 (2010): George A. Olah, Alain Goeppert, G. K. Surya Prakash: Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy, Wiley-VCH; 第 1 版 (2006.3), Wiley-VCH; 第 3 版 (2018.10)
- [15] 株式会社中央環境ホームページ: <https://www.chu-ou.co.jp/jigyo/biomethanol> (2024.10.21 確認)
- [16] 日本経済新聞 (朝刊) 2024 年 6 月 18 日, トヨタ系海運, 27 年度にメタノール船導入 排出 2 割減
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOFD17BFW0X10C24A6000000/> (2024.10.21 確認)
- [17] 住友化学工業(株)ホームページ: 超臨界メタノールを用いた脂肪酸メチルエステルの製造方法, 住友化学 2001-II
https://www.sumitomo-chem.co.jp/rd/report/files/docs/20010206_rss.pdf (2024.10.21 確認)

- [18] Baum Consult Japan. 「国際海事機関(IMO) が海運業界のネットゼロ規制を強化」 .
(2025). <https://baumconsult.co.jp/2025/04/21/%E5%9B%BD%E9%9A%9B%E6%B5%B7%E4%BA%8B%E6%A9%9F%E9%96%A2%EF%BC%88imo%E9%9A%9B%E6%B5%B7%E9%81%8B%E6%A5%AD%E7%95%8C%E3%81%AE%E3%83%8D%E3%83%83%E3%83%88%E3%82%BC%E3%83%AD%E8%A6%8F%E5%88%B6/> (2025.10.6 確認)
- [19] World Economic Forum. 「Is green methanol the clean fuel the world is forgetting?」 .
(2023). <https://www.weforum.org/stories/2023/08/green-methanol-clean-fuel/>
(2025.10.6 確認)
- [20] Argus Media. 「Global bio-, e-methanol projects on the rise」 (2024).
<https://www.argusmedia.com/en/news/2545819-global-bio--e-methanol-projects-on-the-rise>
(2025.10.6 確認)
- [21] Renewable Energy World. 「BioMCN Successfully Produces Bio-methanol」 . (2008).
<https://www.renewableenergyworld.com/energy-business/new-project-development/biomcn-successfully-produces-bio-methanol-52202/> (2025.10.6 確認)
- [22] Bioenergy International. 「Södra first in the world with fossil-free biomethanol」 . (2018).
<https://bioenergyinternational.com/sodra-first-world-fossil-free-biomethanol/>
(2025.10.6 確認)
- [23] Industry Decarbonization Newsletter. 「How to make Green Fuels for Shipping: Bio-Methanol」 . (2022). <https://industrydecarbonization.com/archive/how-to-make-green-fuels-for-shipping-bio-methanol.html> (2025.10.6 確認)
- [24] Ocean News & Technology. 「FASTWATER Successfully Demonstrates Methanol-Powered Pilot Boat」 . (2021). <https://oceannews.com/news/energy/fastwater-successfully-demonstrates-methanol-powered-pilot-boat/> (2025.10.6 確認)
- [25] 環境省資料：令和元年度 漂着ごみ対策総合検討業務報告書，令和元年度環境省請負業務，日本エヌ・ユー・エス株式会社，2020 年 3 月，Ⅱ章 漂着ごみ等の回収実態把握調査等の実施結果
<https://www.env.go.jp/content/900539025.pdf> (2024.10.21 確認)
- [26] 環境省資料：令和元年度 漂着ごみ対策総合検討業務報告書，令和元年度環境省請負業務，日本エヌ・ユー・エス株式会社，2020 年 3 月，Ⅲ章 漂着ごみの種類・組成等に関する調査，表 2.3-2 調査結果の地点間の比較：人工物の大分類別の組成（Ⅲ-59 頁）
<https://www.env.go.jp/content/900543448.pdf> (2024.10.21 確認)
- [27] 京都バイオサイクルプロジェクト：
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsmcwm/23/4/23_1111101/_pdf/-char/ja (2024.10.21 確認)

[28] 三菱重工業ホームページ：

<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/423/423130.pdf> (2024.10.21 確認)

[29] 国土交通省 船舶におけるバイオ燃料取り扱いガイドライン：

<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001732712.pdf> (2024.10.21 確認)

[30] ClassNK CHART THE FUTURE 船舶におけるバイオ燃料の使用に関する取り扱い：

https://www.classnk.or.jp/hp/ja/info_service/bio/ (2024.10.21 確認)

[31] 植田油脂株式会社ホームページ：

<https://uedayushi.co.jp/service/%e3%83%90%e3%82%a4%e3%82%aa%e3%83%87%e3%82%a3%e3%83%bc%e3%82%bc%e3%83%ab%e7%87%83%e6%96%99/> (2024.10.21 確認)

[32] 経済産業省カーボンリサイクルロードマップ検討会資料【別冊 2】産業間連携の事例：

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/pdf/20230623_04.pdf
(2024.10.21 確認)

[33] 豊田通商 燃料電池事業：<https://www.ttc-fuelcell.com/partner/sfc/> (2024.10.21 確認)

[34] 水産庁 漁港のエコ化推進のための技術検討会資料：

<https://www.jfa.maff.go.jp/j/study/keikaku/pdf/shiryou1-5.pdf> (2024.10.21 確認)

[35] 田ノ浦地区漁業地域 BCP 策定・運用協議会：『田ノ浦地区における水産物の生産・流通に関する業務継続計画』（令和 4 年 11 月）（2022）

https://www.pref.kochi.lg.jp/doc/2021030300272/file_contents/file_20221284145949_1.pdf (2024.10.21 確認)

[36] 三菱総合研究所資料：<https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20230124.html> (2024.10.21 確認)

[37] 政府統計の総合窓口 e-stat：エネルギー消費統計調査，令和 4 年度エネルギー消費統計調査結果

https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00551005&tstat=000001042017&cycle=8&tclass1=000001216724&stat_infid=000040172481&tclass2val=0 (2024.10.21 確認)

[38] 政府統計の総合窓口 e-stat：経済構造実態調査，2022 年経済構造実態調査（製造業事業所調査）https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200555&tstat=000001207540&cycle=0&tclass1=000001207542&stat_infid=000040082442&tclass2val=0

(2024.10.21 確認)

[39] 一般財団法人食品産業センター：「食品製造業の食品ロス削減対策に対する調査事業」報告書【概要版】，令和 5 年 3 月（2023）

https://www.maff.go.jp/j/shokusan/recycle/syoku_loss/attach/pdf/161227_8-42.pdf (2024.10.21 確認)

[40] 水産庁：令和4年度 ゼロエミッション漁船等技術調査事業 報告書，令和5年3月，一般社団法人海洋水産システム協会（2023.3）

https://www.jfa.maff.go.jp/j/kenkyu/pdf/attach/pdf/130515gizyutsukaihatsu_a-4.pdf (2024.10.21 確認)

このうち「第3章 沖合漁船の動力構成および燃料消費実態の調査」

https://www.jfa.maff.go.jp/j/kenkyu/pdf/attach/pdf/130515gizyutsukaihatsu_a-37.pdf (2024.10.21 確認)

[41] 経済産業省 PRTR 制度：令和4年度 届出外排出量の推計方法等に係わる資料，(2022)

https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/r4kohyo/todokedegaisanshutudata.html (2024.10.21 確認)

このうち「詳細版，I．推計方法の詳細 14. 船舶に係る排出量（PDF 形式：1,327KB）」中の「表 14-28 全国における漁船のトン数規模別の燃料消費量の推計結果（2022 年度）」

https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/law/prtr/r4kohyo/05todokedegaiyou/syousai/14.pdf (2024.10.21 確認)