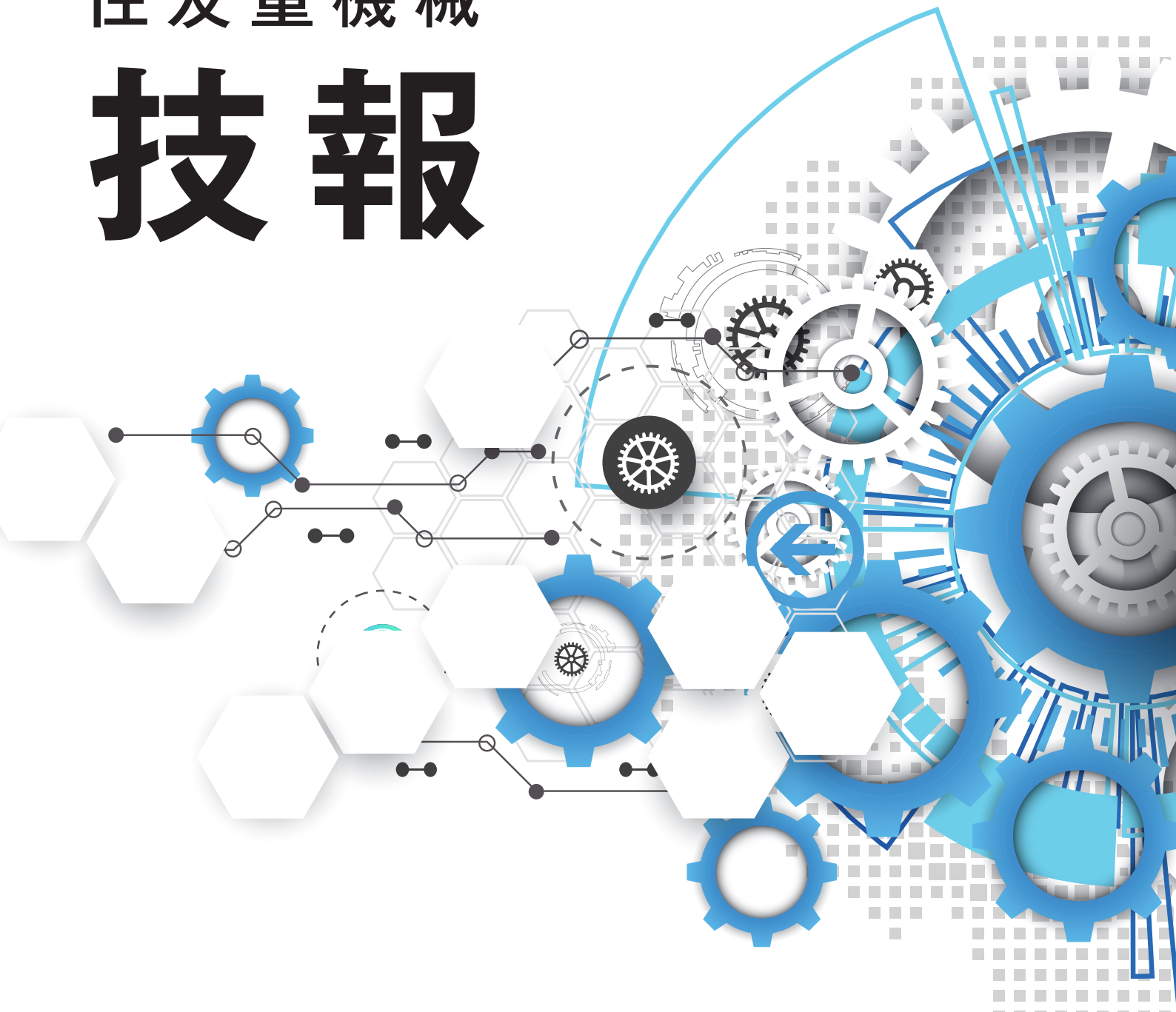


Sumitomo Heavy Industries Technical Review

Jul.2026

No.219 ISSN 2760-8018

住友重機械 技報



環境・エネルギー技術特集

Special Issue for Environment and Energy Technology

住友重機械技報 No. 219 2026

巻頭言 219号「環境・エネルギー技術特集」発行に当たって 山本 章

環境・エネルギー技術特集

論文・報告	高負荷担体式嫌気処理技術の開発	長田啓司	1
	移動層化学蓄熱システム	西村宗樹, 岸 佳佑	5
	GM冷凍機を用いた液化水素の蒸発ガス抑制技術の開発	小池祐太朗, 森江孝明	11
	ダイヤモンド電極を用いたCO ₂ 電気化学還元 of 長期安定化技術	荒木沙李, 湯村正典, 永田陽平	15
技術解説	流動床ガス化炉による脱炭素と合成燃料製造	渡邊建聖	21
	燃料評価モジュールによるCFBボイラ発電設備向け流動不良・停止リスク評価技術	大村湧生, 阿川隆一, 鉄山一州, 加藤木瞭	25
	CO ₂ 分離回収技術の背景と熱炭酸カリウム(HPC)方式の開発	田岡智浩	27
	使用済紙おむつのマテリアルリサイクル技術	安村宜之	29
	プライムカーボン(リン吸着バイオ炭)を用いた下水からのリン回収および炭素貯留技術	田口真太郎	31
	分流式小規模下水道のAIによる雨天時流入水量予測	鈴木 茂, 野口直之	33
	112MW級バイオマス専焼発電設備		35
取組み紹介			
	ソフトウェア人材育成	長井健太郎	37
新商品紹介			
	アスファルトフィニッシャ HA60W-11/HA60C-11		39

Message for "Special Issue for Environment and Energy Technology"

Akira YAMAMOTO

Special Issue for Environment and Energy Technology

T/PAPERS	Development of High-Load Carrier Anaerobic Treatment System	Keiji NAGATA	1
	Moving-bed Thermochemical Energy Storage System	Motoki NISHIMURA, Keisuke KISHI	5
	Development of Boil-Off Gas Suppression Technology for Liquid Hydrogen Using GM Cryocooler	Yutaro KOIKE, Takaaki MORIE	11
	Long-Term Stable Formic Acid Production via Electrochemical Reduction of CO ₂ Using Boron-Doped Diamond Electrodes	Sari ARAKI, Masanori YUMURA, Yohei NAGATA	15
	Pathways to Decarbonization and Synthetic Fuel Production Using CFB Gasification	Takemi WATANABE	21
	Development of Fuel Evaluation Module for Predicting De-fluidization in CFB Boilers	Yusei OMURA, Ryuichi AGAWA, Isshu TETSUYAMA, Ryo KATOOGI	25
T/INVITATIONS	Background of CO ₂ Separation and Capture Technologies and Development of Hot Potassium Carbonate (HPC) Process	Tomohiro TAOKA	27
	Material Recycling Process for Used Disposable Diapers	Yoshiyuki YASUMURA	29
	Phosphorus Recovery and Carbon Storage Technology from Sewage Using Phosphorus-Adsorbed Biochar	Shintaro TAGUCHI	31
	AI-Based Prediction of Wet-Weather Inflow Volume in Small-Scale Separate Sewerage Systems	Shigeru SUZUKI, Naoyuki NOGUCHI	33
	112 MW Dedicated Biomass-Fired Power Boiler		35
INITIATIVES			
	Software Engineering Capability Development	Kentaro NAGAI	37
NEW PRODUCT			
	Asphalt Paver HA60W-11/HA60C-11		39

219号「環境・エネルギー技術特集」 発行に当たって

執行役員
技術本部長

山 本 章



COP21での合意以降、カーボンニュートラルへの取組みは各国の政府、企業を中心にさまざまなかたちで進められています。この活動は「地球規模の気候変動問題への対応」であると同時に「持続可能な社会・経済を築くための不可欠な戦略」であると考えられ、当社グループでも2050年カーボンニュートラルを掲げ、2030年に向けた削減目標を設定し、国際的枠組みである SBTi の認証も取得しました。これに向け、省エネ設備の導入、再生可能エネルギー電力の積極的な調達、燃料のLNG転換や物流効率化など多面的な対策を進めています。加えて、製品ライフサイクル全体で環境負荷を低減するためCSR調達ガイドラインを策定し、省資源・リサイクル、有害物質削減、サプライチェーン排出量の把握などを取引先とともに推進しています。

新商品・新事業への取組みにおいては、カーボンニュートラル事業、再エネ促進事業の育成を重点投資領域に設定し、多様な技術開発と事業を通じて社会課題の解決への貢献を進めています。特にエネルギー分野では、次世代の中核技術への新たな取組みとして液化空気エネルギー貯蔵(LAES)の商用実証で広島ガスと協業し、再エネの出力変動対策や系統安定化に寄与する技術として期待されています。

一方で、多様な事業部門でこれまでに培った技術をカーボンニュートラルの実現に向けて活用する活動も積極的に推進しています。たとえばバイオマス発電向け流動層ボイラや廃棄物発電、排ガス処理などを技術基盤とした燃料転換・資源循環のための技術開発を推進し、設備の効率向上や環境負荷の低減を追求しています。また、水処理関連でも同様に蓄積した技術を新たな技術と組み合わせることで、紙おむつのマテリアルリサイクルやバイオ炭でのカーボン貯留などの発展分野へも貢献していきます。

さらに、水素社会の実現に向けて液化水素の貯蔵・供給インフラ能力を高めるため極低温冷凍技術を応用し、その実用化を進めています。この技術により、液化水素をより安全・効率的に利用できるインフラ構築が進み、水素エネルギーの普及を阻む課題の解決に大きく貢献することが期待されています。

このように当社ではエネルギー機器の高効率化から次世代蓄エネ、水素活用、サプライチェーン全体の環境管理まで、広範な技術と事業領域でカーボンニュートラル実現に向けた活動を推進しています。2026年にはこれら複数の事業領域、技術領域を跨ぐ開発を促進するための組織改正を行い、技術研究所での物理現象解析や電気化学的評価、微生物制御技術も活用しこの活動を加速していきます。

本特集号で当社の取組みの一端を紹介させていただき、関係機関の皆様方と共にさらに活動を発展させていくことを願い、巻頭言とさせていただきます。

高負荷担体式嫌気処理技術の開発

Development of High-Load Carrier Anaerobic Treatment System

●長 田 啓 司*
Keiji NAGATA

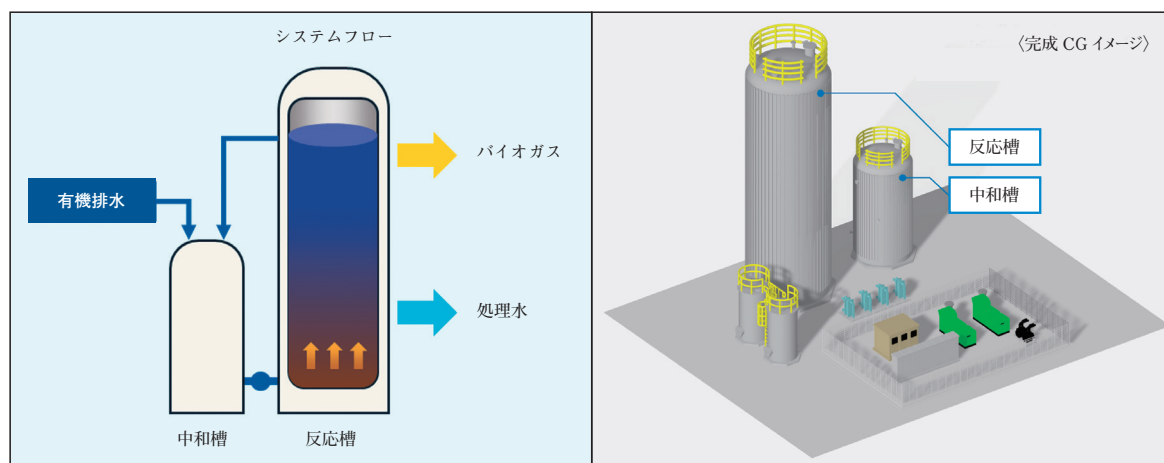


図 1 高負荷担体式嫌気処理装置 (BIOIMPACT-AC) の概念図
Conceptual illustration of high-load carrier anaerobic treatment system (BIOIMPACT-AC)

当社の技術研究所で開発を進めた高負荷担体式嫌気処理技術が、2025年8月に当社グループの住友重機械エンバロメント株式会社より嫌気性処理システム「BIOIMPACT-AC」として上市された(図1)。

従来の嫌気性排水処理は、微生物の自己凝集および造粒によって形成される「グラニュール」を中核として有機物除去機能を発現させる方式が主流であった。本システムも「嫌気性処理」という原理自体は従来技術と共通するが、微生物の保持・高密度化の核として高負荷担体を用いる点に本質的な特徴を有する。

本報では、高負荷担体を用いた嫌気処理技術の反応器コンセプト、装置構成およびラボ試験・パイロット試験による裏付け結果について報告する。

A high-load carrier anaerobic treatment system is an anaerobic wastewater treatment technology commercialized by Sumitomo Heavy Industries Environment Co., Ltd. in August 2025 under the product name BIOIMPACT-AC. Conventional anaerobic wastewater treatment systems predominantly rely on microbial self-aggregation and granulation (“granules”) as the core mechanism for organic matter removal. While the fundamental anaerobic treatment principle of the present system is common to conventional technologies, its essential and distinguishing feature lies in the use of a proprietary carrier material as the core medium for microbial retention and high-density biomass formation. This paper reports the reactor concept, system configuration, and technical validity of the high-load carrier anaerobic treatment system, as demonstrated through laboratory-scale investigations and pilot-scale verification tests.

1 はじめに

嫌気性排水処理技術は、酸素のない環境で生存する嫌気性微生物の代謝により排水中の汚れ成分を分解する。液中に空気を吹き込む曝気が必要としない省エネルギー型のプロセスであるとともに余剰汚泥の発生量が少なく、代謝生成物であるメタンガスの回収が可能な処理技術として、産業排水分野において広く導入されてきた。特に、排水の水質および流量が比較的安定している食品産業、とりわけビール生産工場などを中心に国内で急速に普及し、成熟した処理技術として確固たる地位を築いてきた。

こうした市場が成熟する一方で、水量・水質変動が大きい

排水、処理性の低い難分解性排水、汚泥分散により汚泥が流出しやすく微生物保持が困難な排水など、従来型の嫌気性排水処理技術では対応が難しい分野が依然として残されている。これらの排水に対しては、エネルギー投入型の好気処理や、薬品消費量および廃棄物発生量の多い物理化学処理、あるいはそれらを組み合わせた統合プロセスが選択されるケースも多く、排水処理の省エネルギー化・高度化の観点から新たな技術的ブレイクスルーが求められている。

これらの背景のもと、高ロバストかつ高性能な省エネルギー技術として嫌気性排水処理を再定義し、従来技術では適用が困難であった排水分野へ展開することができれば排水処理事業における大きな転換点となり、その社会的意義も極めて

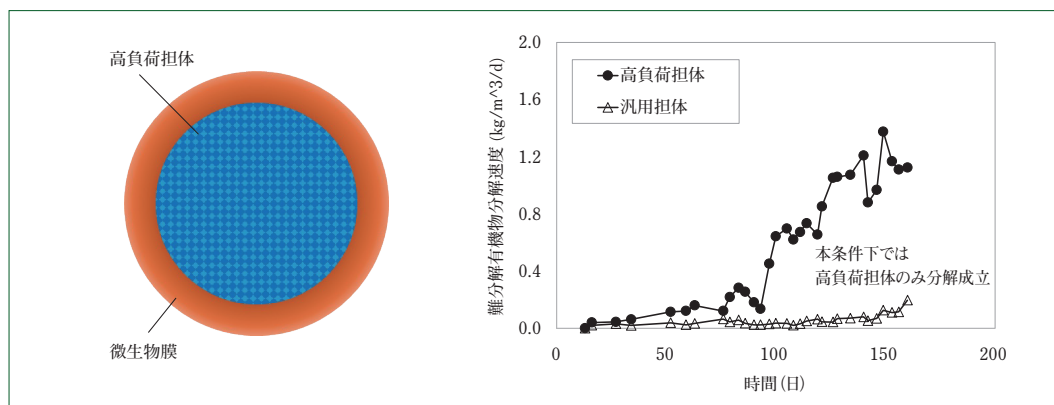


図2 高負荷担体を核としたバイオフィーム形成と技術的特徴の概念図
Conceptual illustration of biofilm formation on high-load carriers and associated technical features

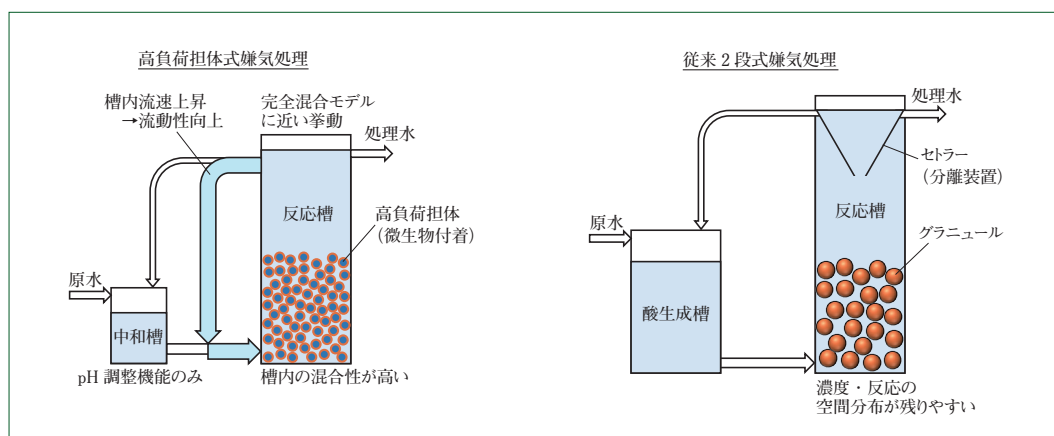


図3 高負荷担体システム(左)と従来2段式嫌気処理(右)の反応器構成比較
Comparison of reactor configurations between high-load carrier system (left) and conventional two-stage anaerobic treatment (right)

大きいと考えられる。加えて、高効率な有機物分解に基づくメタンガス生成により排水からエネルギーを回収・有効利用できることは、排水処理プロセスに資源・エネルギー創出という価値を付加するものであり、エネルギー調達コストの低減の観点からも重要な価値を有する。

本報で紹介する高負荷担体式嫌気処理技術は、嫌気性処理という基本原理を踏襲しつつ、微生物保持の核として生物親和性の高い特殊担体(高負荷担体)を用いる点(図2左)に本質的な特徴を有する。高負荷担体は単なる支持体ではなく、微生物保持の核として反応場そのものを規定する役割を担う。難分解有機物を対象とした評価において、高負荷担体においてのみ実用に耐える分解挙動が確認されたことは(図2右)、担体としての適用範囲そのものを拡張し得ることを示している。従来の嫌気性排水処理が抱えていた適用範囲および運転安定性の制約を克服し得る、次世代型嫌気性排水処理技術として位置付けられる。

2 高負荷担体の流動条件がもたらした反応器コンセプトの転換

微生物を表面に保持した高負荷担体を安定的に機能させるには、担体を適切に流動化させる液流速の確保が不可欠である。本システムでは、高負荷担体の流動条件を満足させるべく槽内循環率を高く維持する設計を採用した(図3左)。

この高い循環率は、単に担体の流動安定性を確保するだけ

でなく、結果として反応器内部の混合性を大きく向上させた。すなわち、従来2段式嫌気処理(図3右)において問題となっていた酸生成反応に起因する局所的なpH低下が槽内で顕在化しにくい反応環境を形成できる。

従来法ではこうした局所的pH低下に対処するため、酸生成槽と反応槽を反応段として物理的に分離し、さらにアルカリ薬品を投入することでpHを調整する必要があった。しかし、本システムでは高循環率による均一な反応環境の形成により反応段としての分離を必須とせず、単一反応器内で安定したメタン生成を実現している(図3左)。

これは高負荷担体の採用とそれを成立させる流動条件の設計が、反応器コンセプトの転換および装置構成の合理化に寄与した好例である。

3 高負荷担体特性を前提とした装置構成コンセプト

3.1 高負荷担体流動を前提とした装置構成

本システムでは、高負荷担体を微生物担体として用いることで、槽底部からの液供給によって担体を安定的に流動化させる構成を採用し、槽底部には高負荷担体の均一な流動を促す独自の液分散機構(ディストリビュータ)を配置している。

3.2 高負荷担体保持性能に基づくセトラ非搭載設計

従来の嫌気性流動床反応器では、微生物や担体の流出を防止する分離装置にセトラが重要な構成要素として用いられ

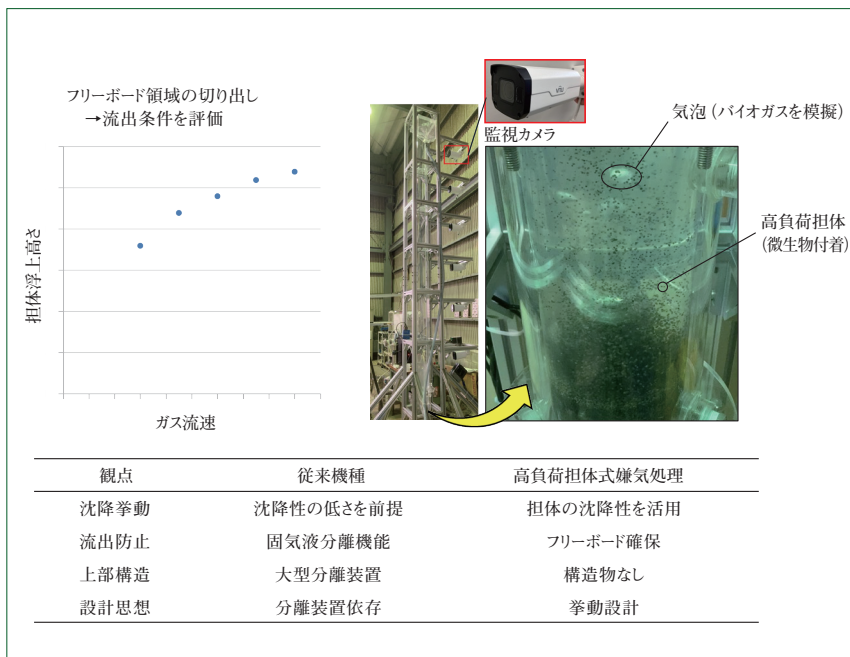


図4 セトラー非搭載を可能とする高負荷担体システムの構造的ロジック
Structural rationale enabling settler-free operation in high-load carrier systems



図5 高負荷担体式嫌気処理のパイロット試験装置外観
Pilot-scale experimental setup for high-load carrier anaerobic treatment

てきた。一方、本システムでは、比重が大きく沈降性に優れた高負荷担体を用いることで、担体流出リスクが本質的に低減される。この特性から、本システムではセトラーを搭載しない反応器構成を採用している。

3.3 高循環がもたらす薬品使用量低減効果

前述のとおり、高負荷担体を高い液循環率で流動化させることで反応器内部の混合性を大きく向上させ、酸生成反応に起因する局所的なpH低下が槽内で顕在化しにくい反応環境を形成する。

この反応環境の形成により、従来2段式嫌気処理において酸生成槽で必要とされていたアルカリ薬品によるpH調整が恒常的な運転操作としては不要、もしくは最小限に抑えることが可能となった。その結果、薬品使用量の削減に加えて薬品供給設備や運転管理が簡素化され、運用コスト低減および運転負荷の軽減に寄与している。

このように、高負荷担体の採用とそれを成立させる高循環型の装置構成は、反応成立性の向上に加え、運転管理性および経済性の面においても明確な副次的メリットをもたらしている。

4 ラボ検証およびパイロット検証による設計妥当性の確認

4.1 高負荷担体保持性に基づくセトラー非搭載設計の検証

3章で述べた高負荷担体の保持性能に基づくセトラー非搭載設計について、その妥当性を検証するため試験を実施した(図4)。

具体的には、実機反応器における「担体層上部に形成され、担体の流出防止を担う液相領域(フリーボード)」を切り出したベンチスケール検証を実施し、バイオガスの発生および液流速による上昇効果で高負荷担体が浮上する際の到達距離を評価した。この検証により、想定される最も厳しい運転条件下で担体が到達し得る高さを把握し、これに安全率を加味す

ることで担体流出防止に必要なフリーボード高さを設計要件として設定した。

これらの担体挙動を定量的に把握したうえで設計要件を定義することにより、従来不可欠とされてきたセトラーを非搭載とし、フリーボードによって従来と同等の担体流出防止機能を有する反応器が成立した。その結果、セトラーに起因する機構コストの削減だけでなく、上部構造の合理化を通じて反応器全体のコンパクト化を実現している。

4.2 ラボ試験による基礎検証

4.1節では、高負荷担体保持性に基づくセトラー非搭載設計について、実機条件を想定したベンチスケール検証の一例を示した。本研究では、このような実機適用時に懸念され得る要素を事前に洗い出し、段階的なラボ試験および実機模擬試験(ベンチ試験)によって潰し込んだうえで、パイロット試験による性能確認へと接続するという検証方針を採用している。

ここでは、その検証方針に基づいて実施した担体技術に関する基礎的なラボ試験について述べる。

具体的には、高負荷担体の流動挙動、微生物付着後の物性変化ならびに高液循環条件下における摩耗や流出の有無について評価を行い、担体技術としての適用可能性を確認した。これらの検証により、高負荷担体は嫌気性微生物の保持に適した担体であり、適切な流動条件を与えることで安定した運転が可能であると示された。

4.3 パイロット試験による実証

基礎検証で得られた知見をもとに、実排水条件を想定したパイロットスケールでの試験を実施した(図5)。本試験はアサヒビール株式会社茨城工場の場内排水処理区画において、住友重機械エンバイロメント株式会社の主導のもと実施し、高負荷担体の長期保持性、負荷変動に対する応答性(ロバスト性)、連続運転下での処理性能および運転安定性を重点的に評価した。

表1 パイロット試験に基づく高負荷担体式嫌気処理の成立性評価マトリクス
Feasibility evaluation matrix of high-load carrier anaerobic treatment based on pilot-scale tests

項目	結果
担体流動性	良好
長期保持性	良好
摩耗・流出	問題なし
負荷変動応答	安定
セトラー非搭載	成立

その結果、高液循環率を維持した運転条件下においても高負荷担体の著しい摩耗や流出は確認されず、安定した処理性能を継続的に得ることができた。また、セトラーを搭載しない構成においても担体保持および運転安定性の確保が実証され、本システムの装置構成の妥当性が裏付けられた(表1)。

4.4 商品設計への反映と判断

前述のラボ試験、ベンチ試験およびパイロット試験の結果を踏まえ、本システムでは高負荷担体の保持性能を前提としたセトラー非搭載の反応器構成を採用するとともに、高液循環率による混合性の向上を積極的に活用した設計とした。

この設計により、従来2段式嫌気処理で独立した反応プロセスとして位置付けられていた酸生成槽については、酸生成反応を主目的とする構成からシステム全体のpH調整機能を担う位置づけへと再定義された。これにより、酸生成槽の機能をpH調整に限定し、滞留時間を最小限とした運用が可能となった。これに伴い、pH調整を目的としたアルカリ薬品の恒常的な投入を最小限に抑えることができ、装置構成の簡素化および運用コスト低減を同時に実現している。

4.5 実機適用における運転再現性と長期信頼性の考え方

本技術を実機に適用するに当たっては、設計段階で想定した反応器性能が運転条件のばらつきや排水性状の長期的な変動下においても再現できることを技術成立の前提条件として位置づけている。そのため、単位容積当たりの有機物負荷やガス発生速度といった定量的な処理性能指標に加え、運転状態そのものを表す指標も併せて管理・評価するという考え方を設計思想に組み込んだ。

高負荷担体を用いた嫌気処理では、運転の進行に伴って微生物付着やバイオフィルムの増殖が進み、担体の見かけ密度や粒径分布が変化していく。これらの変化は、担体の流動挙動や槽内混合状態に影響を与え、初期設計時とは異なる反応環境を形成する要因になり得る。

そこで本技術では、処理水質やガス発生量といったアウトプット指標に加え、担体ゾーンの膨張状態や流動の均一性といった運転状態を直接反映する項目も継続的に把握・評価すべき管理指標としている。これらの運転指標を相互に関連づけて評価することで、処理性能の低下が顕在化する前段階において、流動状態の悪化や担体状態の劣化といった兆候を把握可能な設計とした。

このように、本技術では、反応器構成や処理性能の達成にとどまらず、運転再現性と長期信頼性を含めた実機実装性を重視し、実機運用を見据えた運転管理思想を設計段階から織



図6 実機実装を見据えた高負荷担体式嫌気処理の研究開発アプローチ
Research and development approach for establishing the practical implementability of high-load carrier anaerobic treatment system

り込んでいる点に大きな特徴がある(図6)。

5 むすび

- (1) BIOIMPACT-ACは、嫌気性処理という従来原理を踏襲しつつ微生物保持の核として高負荷担体を用いることで、反応器性能と運転安定性を質的に向上させた商品である。
- (2) 高負荷担体を安定的に機能させる担体流動条件は、高い槽内循環率を必然的に導き、結果として排水中の有機物と微生物との接触効率を飛躍的に高め、反応性を向上させる。
この反応条件により、従来2段式嫌気処理で課題となっていた酸生成反応に起因する局所的なpH低下が槽内で顕在化しにくくなり、単一反応器による安定運転が可能となった。
- (3) 高負荷担体の高い保持性能を前提とすることで、担体流出防止機能をセトラーに依存しない反応器構成が成立し、装置構成の簡素化と運用上の信頼性向上を両立している。さらに、槽内混合性の向上による反応環境の均一化は、酸生成槽を酸生成反応の場としてではなく、システム全体のpH調整機能を担う位置づけへと再定義し、pH調整を目的とした薬品使用量の低減および運用コスト低減という副次的メリットをもたらした。
- (4) 本システムの妥当性は、技術研究所における基礎検証および実排水を用いたパイロット試験によって段階的に確認された。一連の検証結果は本システムの商品化に大きく貢献した。実機適用においては、処理性能指標に加え担体状態や流動状態といった運転管理指標を併せて評価・管理する考え方を設計段階から想定して織り込んでおり、その性能を長期にわたって再現可能な実用技術として成立させている。

※「BIOIMPACT」は、住友重機械エンパイロメント株式会社の登録商標です。

移動層化学蓄熱システム

Moving-bed Thermochemical Energy Storage System

●西村 宗樹* 岸 佳佑*
Motoki NISHIMURA Keisuke KISHI



移動層化学蓄熱反応器ユニット
Bench-scale reactor of moving-bed thermochemical energy storage

脱炭素社会実現に向けて産業分野の徹底した省エネルギー化が求められている。エネルギーを無駄なく使うという点で廃熱の有効利用は重要だが、廃熱と熱需要の間に存在する空間差あるいは時間差で利用が進まないこともあり、500℃を超える利用価値の高い高温熱でさえ捨てられる場合も少なくない。このような未利用廃熱に対しては、一時的に熱を蓄える蓄熱技術の活用が有効である。当社では、エネルギー密度が高く熱輸送への展開が期待できる化学蓄熱に着目し、移動層化学蓄熱システムを提案している。本報では、システムのコンセプトと反応器構造、ベンチスケール機による実証試験ならびに実用化に向けた技術課題について報告する。

Achieving a decarbonized society requires substantial energy-efficiency improvements in the industrial sector. Although effective utilization of waste heat is essential for minimizing energy losses, its deployment is often hindered by spatial and temporal mismatches between heat sources and demand. As a result, even high-grade waste heat above 500℃—despite its high potential value—is frequently discharged without recovery. Thermal energy storage (TES) technologies, which enable temporary heat buffering, provide a promising solution for harnessing such underutilized heat. We focus on thermochemical energy storage, which offers high energy density and the potential for heat transport, and propose a moving-bed thermochemical energy storage system. This paper presents the system concept and reactor configuration, reports demonstration results obtained using a bench-scale unit, and discusses key technical challenges toward practical deployment.

1 まえがき

気候変動などによる世界平均気温の上昇を抑制する国際条約・パリ協定を踏まえ、日本政府は2050年までに温室効果ガス排出を実質ゼロとする脱炭素社会（カーボンニュートラル）の実現を目指すことを表明した。これを受け、化石燃料

から再生可能エネルギーなどの持続可能なエネルギー源への転換や、徹底的な省エネルギー化が各分野に求められている。産業部門においては、これまでにさまざまな省エネルギー技術が開発・実用化されているが、依然として500℃を超える未利用の高温廃熱も少なくない。この背景には、大きく3つの要因がある。第1に、一般的に高温熱の熱輸送は熱ロス

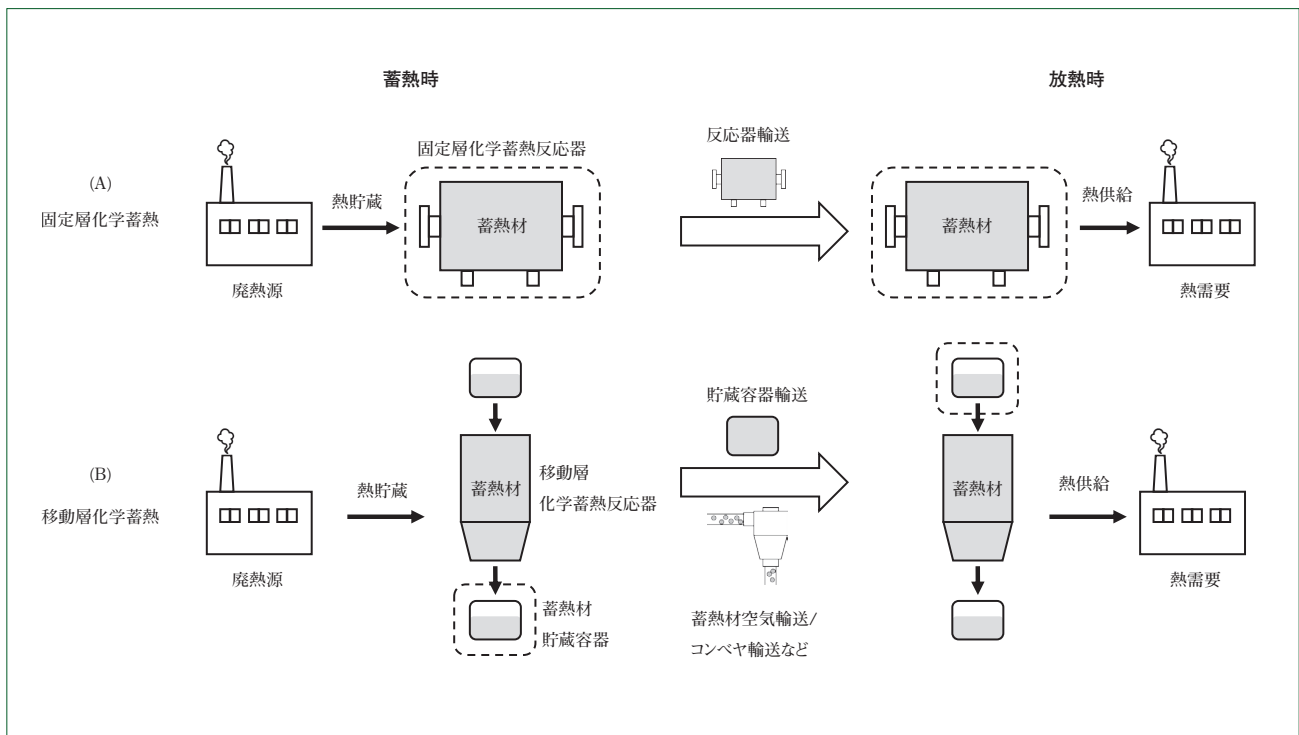


図1 化学蓄熱による熱輸送方法 (A)固定層化学蓄熱 (B)移動層化学蓄熱
Heat transport by thermochemical energy storage (A) Fixed-bed reactor (B) Moving-bed reactor

が大きくなるため、廃熱の発生源付近に熱需要がなければ使えないという「空間差」の問題。第2に、廃熱発生が間欠的であるなど、廃熱発生と熱需要のタイミングが必ずしも一致しない「時間差」の問題。第3に、高温廃熱は不純物を多く含んだガスである場合が多いのでダスト付着、腐食性雰囲気、耐熱性などの技術的制約により、そもそも廃熱の回収が困難という「熱回収技術」の課題である。これら3つのうち、空間差と時間差に対しては廃熱を一時的に貯蔵し、必要な地点・時間に熱として取り出すことができる蓄熱技術が有効と考えられる。残る熱回収技術については、熱交換器や高温集塵機、高機能材料などの技術発展が期待されている。

当社ではこうした状況を踏まえ、蓄熱技術の一つである $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 系化学蓄熱に着目して研究開発を進め、住友重機械技報206号⁽¹⁾では動作原理実証や蓄熱材反応の数値解析について報告している。近年は、廃熱利用を妨げる廃熱と熱需要の空間差・時間差の解消を目的として、工場廃熱などの熱輸送を想定した移動層化学蓄熱システムを提案し、ベンチスケール機による実証試験を行った。

2 移動層化学蓄熱システム

2.1 移動層化学蓄熱システムによる熱輸送

化学蓄熱は、物質の可逆的な吸熱および発熱反応を利用して熱エネルギーを一時的に蓄え、必要ときに放出する技術である。蓄熱材に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や $\text{Mg}(\text{OH})_2$ などを用いる水和物系化学蓄熱では、加熱された蓄熱材の脱水反応によって発生した蒸気を分離することで蓄熱が完了する。反対に、放熱時には蓄熱材へ蒸気を供給することで水和反応の発熱が得られる。

この性質を利用すれば、廃熱などで蓄熱した蓄熱材を常温・常圧の状態でも熱需要地まで輸送し、熱を取り出して利用する熱輸送が可能となる。さらに、化学蓄熱においては反応気体圧力を高めることで、蓄熱時の温度以上で放熱することもできる(ケミカルヒートポンプ効果)。

国内において化学蓄熱による熱輸送は数件の実証事業が先行して報告されている⁽²⁾⁽³⁾。これらのシステムでは、蓄熱材が充填された固定層化学蓄熱反応器をそのまま運搬する方式を採用している。しかしこの場合、反応器が貯蔵および輸送容器の機能を兼ねているという性質上、反応器のスケールアップには輸送車両などの大きさによる制約を受ける。そこで当社では、スケールアップ化にも対応すべく反応器は据置き型とし、蓄熱材のみを輸送可能な移動層化学蓄熱反応器を採用した(図1)。この熱輸送方式では熱貯蔵側と熱利用側の両方に反応器が必要になるが、蓄熱材の輸送方法として貯蔵容器の輸送に加え、輸送距離に応じて蓄熱材の空気輸送またはコンベア輸送なども選択できるほか、大型貯蔵サイロとの組み合わせなどが可能でシステム設計の自由度が高くなる。

2.2 移動層化学蓄熱反応器と蓄熱材

反応器に蓄熱材を通過させている間に蓄放熱反応を完了させる移動層化学蓄熱反応器を考案した(図2)。反応器には、当社のエバポレータのヒーティングエレメント(HE)、反応蒸気の通路となる蒸気ディストリビュータ(SD)がそれぞれ垂直に配置され、上下に蓄熱材の投入・排出を担うロータリーバルブを備えた構造となっている。蓄熱材は重力によってHEとSDの間を移動する。蓄熱時は放熱状態の蓄熱材 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を反応器内部に充填し、HEに高温熱媒を導入することで間接的

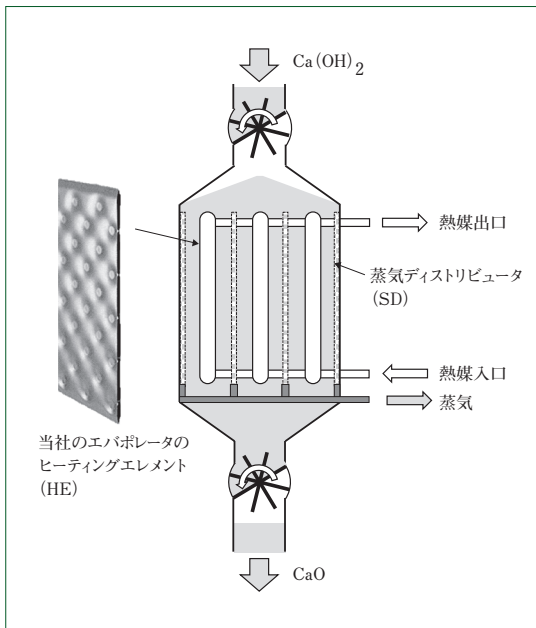


図2 移動層化学蓄熱反応器のコンセプト図(蓄熱時)
Reactor concept of moving-bed thermochemical energy storage (Charging mode)

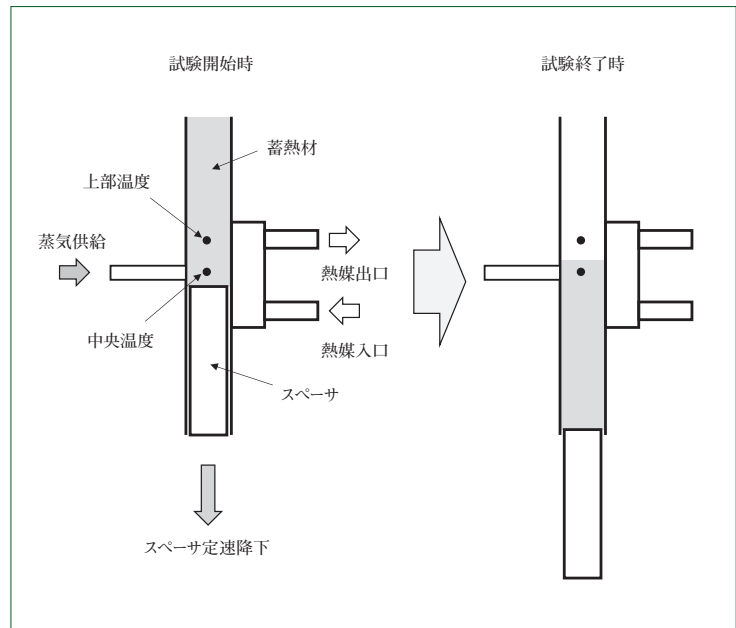


図4 移動層化学蓄熱反応器の小型模擬試験装置
Mock test apparatus of moving-bed reactor



図3 ペレット型蓄熱材
Pellet of heat storage material

に蓄熱材を加熱して脱水反応を起こす。蓄熱材から発生する蒸気はSDを介して反応器外部へ放出される。蓄熱状態となった蓄熱材CaOは、下部のロータリーバルブから排出され蓄熱運転が完了する。HEを用いた間接熱交換方式ではHE内を通る熱媒と蓄熱材が接触しないことから、 CO_2 やダスト、水蒸気を含んだ燃焼排気ガスなどを熱源として想定した設計となっている。同じ反応器を用いて蓄熱状態の蓄熱材CaOに蒸気を供給し、水和反応の発熱を回収することで放熱運転にも使用できる。

移動層化学蓄熱において蓄熱材の流動性は反応器内を滞りなく通過させるという点で極めて重要である。しかしながら、水和物系化学蓄熱では蓄放熱反応に伴う蓄熱材の凝集や体積膨張による微粉化が課題となっており、対策として成形体の作成⁽²⁾や多孔体への担持⁽⁴⁾などの開発が行われている。当社

では、高蓄熱密度、低コスト化、反応器内での流動性、ハンドリングなどを勘案し、工業用消石灰と水のみで構成された $\phi 2\text{ mm}$ のペレット型蓄熱材を製作した(図3)。この蓄熱材は、蓄放熱を繰り返すと凝集や微粉化が避けられないが、消石灰以外の不純物を含まないことから、破損あるいは微粉化した場合でも燃焼排ガスの脱硫・脱塩処理や溶銅中の不純物除去、製紙の苛性化工程などに再利用できる。廃棄物が発生しないという点でこの蓄熱材はプラントとの親和性があると判断した。蓄熱材の蓄熱状態での充填密度は 0.7 kg-CaO/L であった。

2.3 移動層における水和反応特性

2.2節で述べた通り、移動層化学蓄熱反応器において蓄熱材の体積膨張に起因する微粉化や凝集体形成は、流路閉塞を引き起こす可能性があり、今回製作した蓄熱材を用いる場合はそのコントロールが重要になる。流路閉塞のリスクを回避する運転条件を検討すべく、小型の模擬試験装置(図4)を用意し、移動層内におけるペレット型蓄熱材の水和反応特性を評価した。この装置は、移動層化学蓄熱反応器のコンセプトと同様に蒸気供給、熱媒での熱交換、蓄熱材の連続移動を再現可能な構造となっている。蓄熱材温度の把握を目的に蒸気配管付近の中央温度と、そこから15mmの高さの上部温度を測定した。水和試験では蒸気供給と蓄熱材の定速降下を同時に開始した。図5に、水和反応に対する蒸気供給量の影響を示す。蓄熱材降下速度から求めた理論蒸気吸収量と同等の蒸気供給量を蒸気適量、それより多い条件を蒸気過多、少ない条件を蒸気不足とした。試験開始直後から蒸気配管に近い中央温度が水和反応により上昇し、その昇温速度および到達温度は蒸気供給量に比例していることが分かる。一方、上部の昇温は中央に比べて遅く、蒸気適量および蒸気不足の条件では 250°C

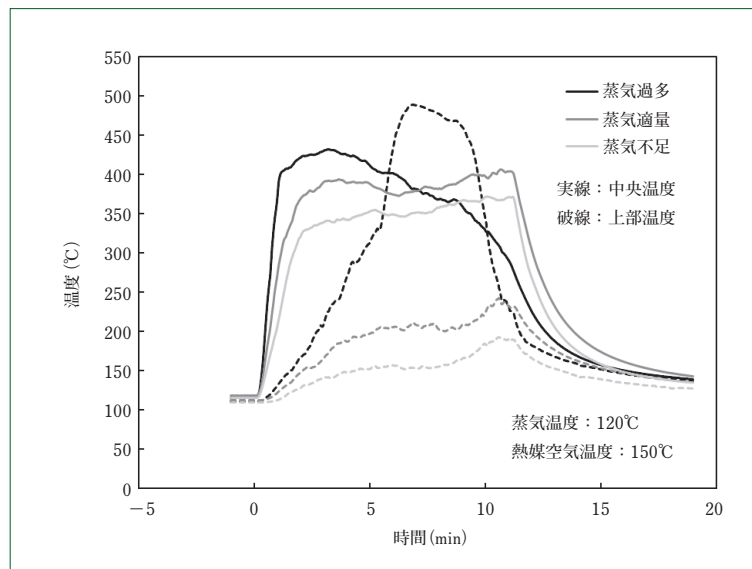


図5 移動層内での水和反応に対する蒸気供給量の影響
Effect of steam supply rate for hydration reaction in moving-bed reactor

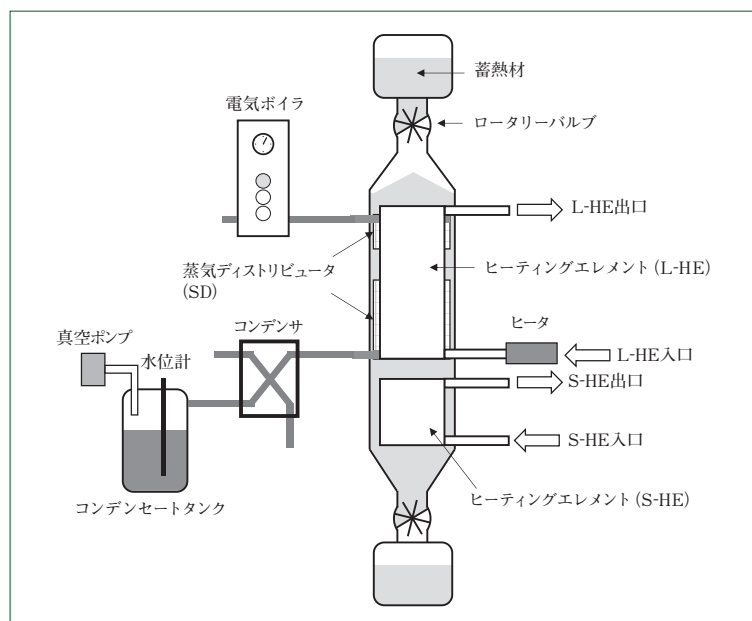


図6 ベンチスケール試験機の構成
Configuration of bench-scale reactor

以下を維持した。これは、水和反応による温度上昇ではなく、高い中央温度が蓄熱材充填層内での伝熱や装置部材を介した伝熱で上部に伝わった影響と考えられる。蒸気過多の条件では、試験開始後6分程度で上部温度が中央温度を越え、489℃まで上昇した。これは、高い昇温速度と到達温度から水和反応によるものと示唆される。この結果から最適な蒸気供給量以下では、供給した蒸気が流下してくる蓄熱材にすべて吸収されるので、蒸気が広がらずに水和反応を狭い範囲に限定できていることが分かる。水和反応の範囲を限定することは、意図しない場所での蓄熱材の膨張を防ぐという意味で重要なことである。また、使用したペレット型蓄熱材には、水和反応により20～30%の体積膨張が見られた。図5で示した実験

よりも蒸気供給量が多い条件下では、蓄熱材の急激な膨張による圧密で流路閉塞が起こったことから、放熱運転の際は蓄熱材の膨張量も加味しつつ流下速度、蒸気供給量を最適にコントロールすることの必要性が確認された。

3 ベンチスケール試験

3.1 ベンチスケール試験機

移動層化学蓄熱反応器の実証用として、蓄熱時の熱入力が10kW程度のベンチスケール反応器および周辺機器を製作した(図6)。反応器は図2のコンセプトと基本構造は同様であるが、蓄熱時に高温蓄熱材から顕熱回収を行うので、蓄熱反応用HE (L-HE) と顕熱回収用HE (S-HE) の2段構成とした。

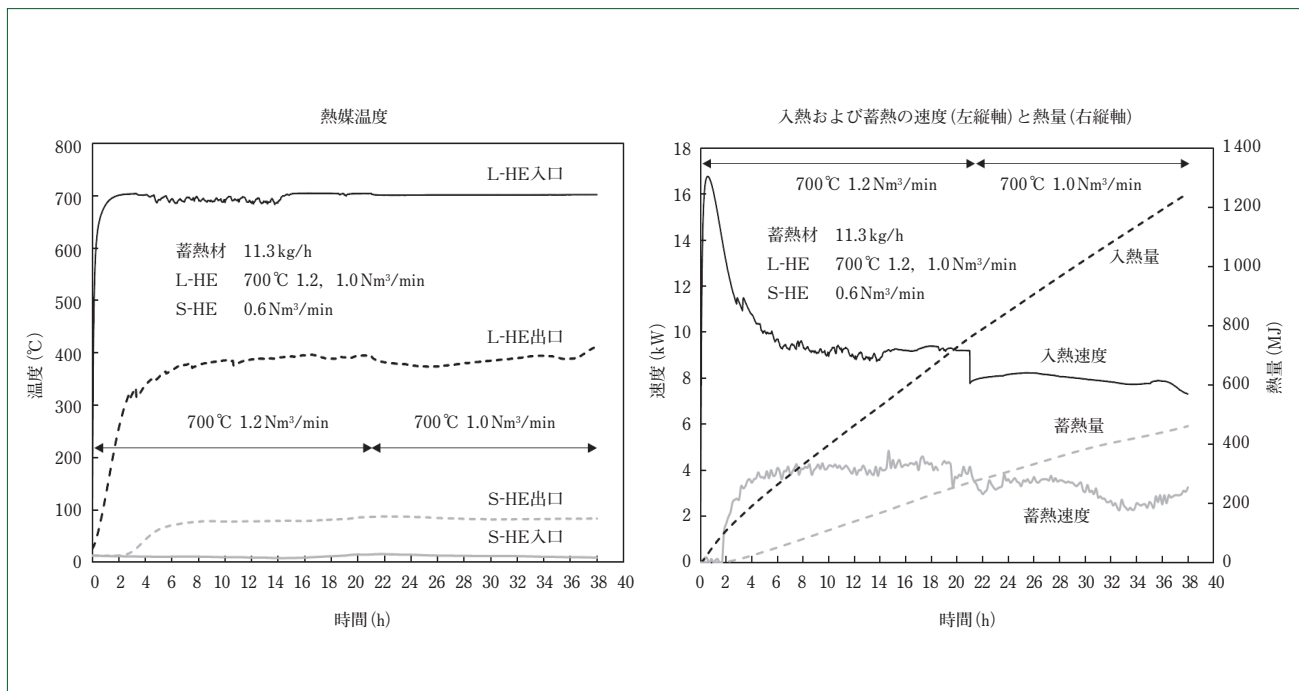


図7 蓄熱試験結果
Result of heat charging test

また、SDについても蓄熱時の蒸気排出用で使用する下部と、放熱時に蒸気供給用で使用する上部の2段構成としている。周辺機器には蓄熱時に発生する蒸気を凝縮するコンデンサー、凝縮した反応水を回収するコンデンセートタンク、コンデンサへの蒸気流入を促進する真空ポンプ、放熱時に蒸気供給用として用いる小型電気ボイラなどが備えられている。蓄熱材の貯蔵容器および投入用ロータリーバルブに接続する一時ホッパとして専用のホッパタンクも用意した。

3.2 蓄熱試験

蓄熱試験には、ベンチスケール試験機とペレット型蓄熱材を用いた。蓄熱の熱源として高温排ガスを模擬し、電気ヒータで加熱した700℃の空気を上部のL-HEに、試験前半は1.2Nm³/min、試験後半は1.0Nm³/minの流量を供給した。事前に蓄熱材を充填した状態から、熱媒供給開始と同時にロータリーバルブを運転し、蓄熱材の投入および排出を連続的に行った。図7に、蓄熱試験結果を示す。L-HEの入口と出口の温度差から計算した入熱は開始から6時間程度で定常状態となり、熱媒流量1.2Nm³/minでは約9kW、1.0Nm³/minでは約8kWであった。それぞれの流量条件において、反応水の生成速度から換算した蓄熱速度は前半で約4kW、後半では約3.5kWであった。この試験から、定常運転時の入熱と蓄熱速度の比である定格蓄熱効率率は43～44%という結果が得られた。試験中に排出された蓄熱材を定期的にサンプリングし、マッフル炉加熱による重量変化から推定した脱水反応率は80～100%であった。このことから反応器内での脱水反応は連続的に行われていたことが確認できた。また、S-HEでの回収熱量は定常時で0.9kW程度であったが、L-HE通過直後の蓄熱材は平均的に550℃程度であり、それを常温まで顕熱回

収した場合の熱量は1.0kWに相当する。このことから、S-HEでの顕熱回収も目的通りに行っていたと推察される。入熱に対する蓄熱速度およびS-HE顕熱回収から算出した熱ロスは45～46%となり、最終的な入熱量に対する蓄熱量の比は37%であった。

3.3 放熱試験

放熱試験では、電気ボイラで生成した蒸気を上部のSDのみから反応器内へ供給した。蒸気の供給量は2.3の模擬試験装置による検討結果から、反応器内での流路閉塞を抑制すべく最適流量以下に設定した。また、蓄熱材の発熱を効率的に回収することを目的にL-HEとS-HEを配管で連結し、熱媒の空気はS-HEから供給した。図8に、蒸気供給および蓄熱材の投入・排出を4時間半継続して行った放熱試験の結果を示す。空気は13時間まで供給し熱回収を行った。試験開始後からL-HE出口温度が緩やかに上昇し、4時間半で269℃を記録した。反応器内に設置した熱電対から、蓄熱材の温度は最大で490℃まで上昇していたことが確認された。今回の試験では、4時間半の時点で定常状態と判断したため蒸気供給を停止し、定格出力は8.8kWとした。蓄熱材流量と蒸気供給量から計算される理論発熱は11.5kWであった。したがって理論発熱に対する定格出力の比である定格放熱効率率は76%となり、熱ロスは24%であった。蓄熱時より熱ロスは減少する結果となったが、これは反応器全体の温度が比較的低いことで環境放熱が抑えられたと考えられる。最終的な蓄熱材の理論発熱量と放熱量の比である放熱効率率は79%であった。

4 課題と展望

移動層化学蓄熱のベンチスケール試験により、700℃の高温

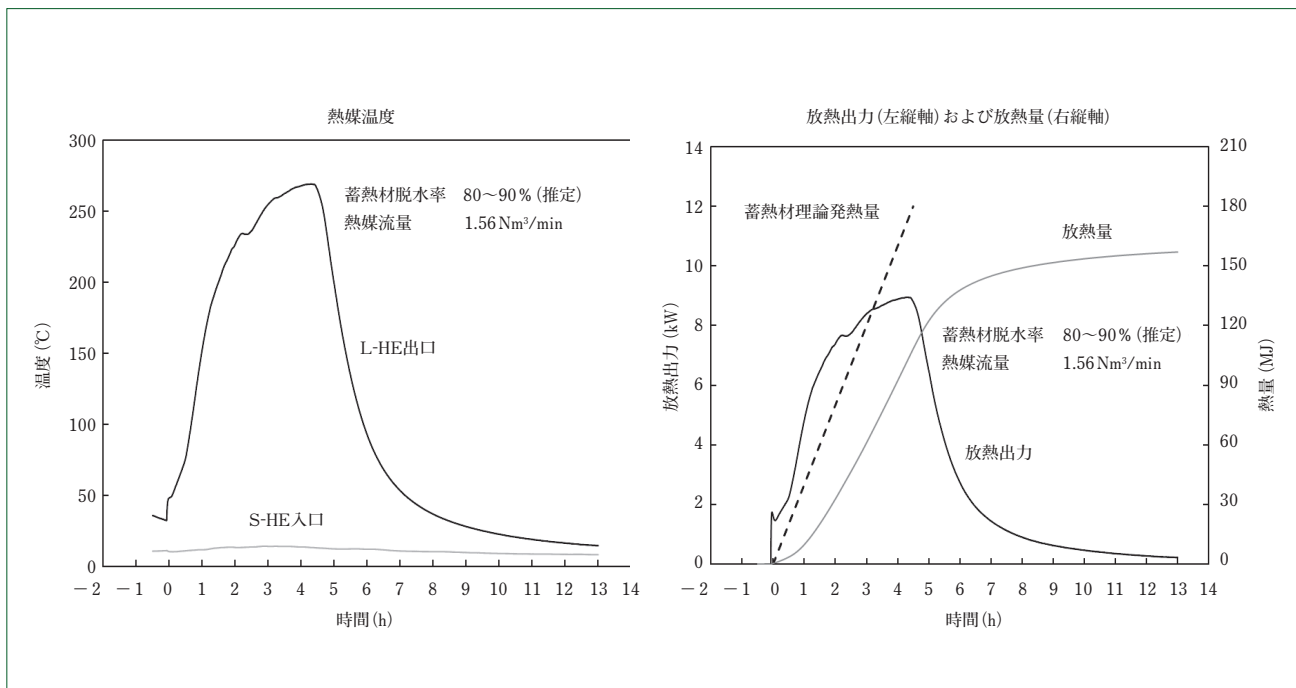


図8 放熱試験結果
Result of heat discharging test

ガスから38時間という長時間の連続蓄熱運転が実証できた。蓄熱時の蓄熱材は体積収縮傾向であることから、重力落下方式の移動層は水和時のような流路閉塞のリスクが低く、より蓄熱運転に適している。一方、今回の蓄熱試験では蓄熱時の熱ロスが定格時で45~46%と大きく、蓄熱効率の低下を招いており、断熱設計の改善が必要であることが分かった。ただし蓄熱効率の低下は、試験機がまだ小さく、扱う蓄熱材量に対して装置表面積および部材量が比較的大きいことも一因と思われる。故に今後の大型化においては、スケールメリットとして環境放熱が少なからず抑えられることが見込まれている。

放熱試験においては比較的高い効率で熱回収ができた。しかし、最大出力を得るまでに4時間以上を要しており、出力応答が遅い。これは、蒸気供給を反応器上部のみから行ったため、水和反応で高温化した蓄熱材がHE全体に広がるまで4時間程度かかったことによる。ペレット型蓄熱材が膨張性を有しており、開始時から広範囲に蒸気供給を行うと流路閉塞のリスクが高まるのが根本的な問題である。出力応答性の向上には、膨張性の低い蓄熱材を利用する、あるいは蓄熱材が膨張しても流路閉塞が起りにくい形状の反応器設計とすることが適切である。

5 むすび

- (1) 熱輸送の実現に向け移動層化学蓄熱システムを考案し、10kWのベンチスケール試験機を製作した。
- (2) 工業用消石灰を原料に、充填密度0.7kg-CaO/Lのペレット型蓄熱材を作成した。
- (3) 700℃の高温ガスにより38時間の連続蓄熱運転を実証

し、約4kWの蓄熱速度を確認した。定格蓄熱効率は43%であった。

- (4) 放熱試験により最大8.8kWの放熱出力が得られ、定格放熱効率は76%と試算された。蓄熱材は水和反応により最大490℃に発熱していることを確認した。
- (5) 移動層化学蓄熱反応器による蓄熱および放熱運転が実証され、化学蓄熱による大規模な熱輸送の可能性が示された。

現在は、低膨張性・高耐久性を有する新規の化学蓄熱材や放熱専用反応器を開発中である。また、現場で想定される多様な熱輸送あるいは蓄熱用途に対応するための高効率システム設計を進めており、本技術の早期社会実装を目指している。

(参考文献)

- (1) 西村宗樹, 平田一弘, 中條晃伸, 酸化カルシウムを用いた化学蓄熱技術の開発, 住友重機械技報, 206 (2022), 17-22.
- (2) 堀井雄介, 大塚泰弘, 角田暉平, 化学蓄熱材を用いた熱輸送事業の概要と今後の展開について, 都市環境エネルギー, 123 (2019), 4-9.
- (3) 令和5年度脱炭素化・先導的廃棄物処理システム実証事業(ごみ焼却施設の排熱を熱源とする化学蓄熱材を用いた熱輸送技術の実証事業)委託業務成果報告書.
- (4) 渡辺藤雄, 津曲俊, 黄宏宇, 架谷昌信, 小林敬幸, 坪内修, 塩見仁郎, カーボン多孔体Ca(OH)₂担持化学蓄熱材の性能評価, 化学工学論文集, 39-4 (2013), 378-383.

GM冷凍機を用いた液化水素の蒸発ガス抑制技術の開発

Development of Boil-Off Gas Suppression Technology for Liquid Hydrogen Using GM Cryocooler

●小 池 祐太郎*
Yutaro KOIKE

森 江 孝 明**
Takaaki MORIE



液化水素の蒸発ガス抑制装置の外観
Photograph of boil-off gas suppression unit for liquid hydrogen

水素社会推進法の施行などを背景に、水素のエネルギーキャリアとしての社会実装に向けた取組みが進められている。液化水素 (LH₂) はガス状態の水素と比べて高密度であり効率的な水素の貯蔵・輸送が可能である。一方で、沸点が -253°C (20 K) と極低温であることから蒸発が生じ、ボイルオフガス (BOG) が継続的に発生する。よって液化水素は、貯蔵時の安全性および経済性の観点から、BOG発生による損失を抑制するゼロボイルオフ (ZBO) 技術が求められている。

本開発では、当社製の20K単段式GM (ギフォード・マクマホン) 冷凍機を用いた試験装置を製作し、水素の液化およびBOGの再凝縮試験を実施した結果、加熱条件下においても10時間以上にわたり容器内の圧力上昇を完全に抑制することに成功した。さらに、再凝縮時の効率を評価し、本システム導入時の投資回収期間を試算したところ、短期 (数年以内) での回収が可能であり、経済性の面でも十分な利点が得られることが明らかとなった。

Against the background of the enactment of the Hydrogen Society Promotion Act and related developments, efforts are underway toward the social implementation of hydrogen as an energy carrier. Liquid hydrogen (LH₂) has a much higher density than gaseous hydrogen, enabling efficient storage and transportation. However, because its boiling point is extremely low at -253°C (20 K), evaporation occurs and boiloff gas (BOG) is continuously generated. Therefore, from the perspective of both safety and economics during storage, zero boil-off (ZBO) technology is required to suppress losses caused by BOG generation. In this development, a test apparatus equipped with an SHI 20 K single-stage Gifford-McMahon (GM) cryocooler was constructed, and experiments on hydrogen liquefaction and BOG recondensation were conducted. As a result, even under heated conditions, we successfully suppressed the pressure rise inside the vessel completely for more than ten hours. Furthermore, by evaluating the recondensation efficiency and estimating the payback period when introducing this system, it was found that the investment could be recovered within a short period of a few years, demonstrating sufficient economic advantages.

1 まえがき

カーボンニュートラルな社会の実現に向け、使用時にCO₂を排出しないエネルギーキャリアとして水素の利活用が期待

されている。水素のキャリア形態には圧縮水素ガス、液化水素 (LH₂)、アンモニアなど複数の種類があり、使用条件やインフラの制約に応じて適切に選択する必要がある。なかでも LH₂は高い密度を有するうえに、利用時に化学的な精製工程

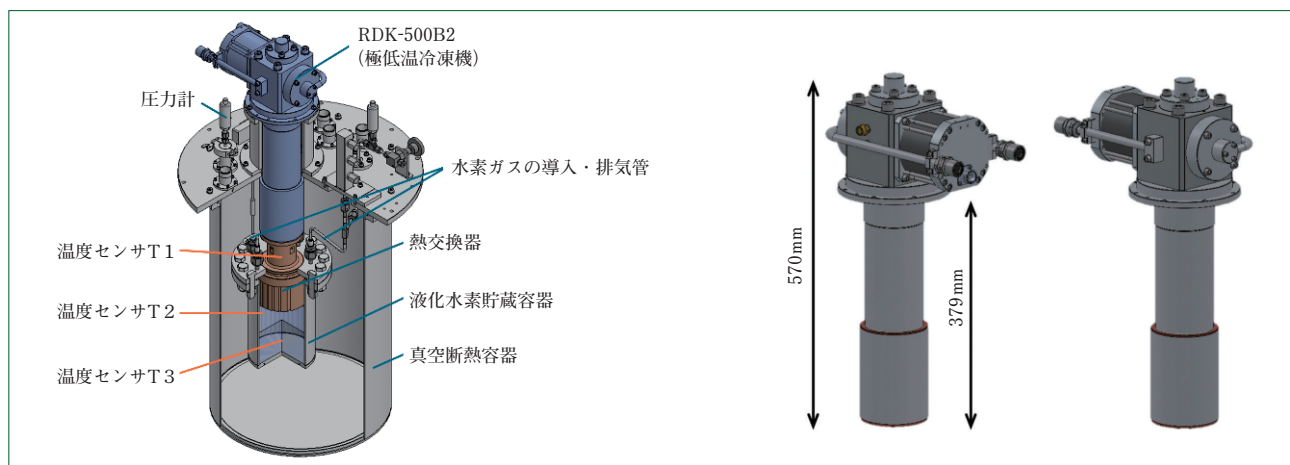


図1 左：再凝縮試験装置の概略構成図，右：本試験で使用したSHI製単段GM冷凍機
Left: Schematic configuration of recondensation test apparatus; Right: SHI single stage GM cryocooler used in this study

を必要としないことから、高純度水素が要求される燃料電池用途での利用が注目されている。

一方で、 LH_2 は沸点が約20 K (−253℃) と極低温であることから、外部からのわずかな入熱によりBOGが継続的に発生する。BOGの発生は貯蔵容器内の圧力上昇を引き起こすので定期的な放散が必要となり、大気へ放散すればそのまま経済的損失につながる。エネルギーキャリアとしての安全性および経済性の観点からBOG発生に対策する技術が必須となる。

容器内の圧力上昇を抑制する方法として、発生したBOGを極低温冷凍機を用いて再凝縮するZBO技術が検討されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。このZBO技術はBOGの放散を抑制できる一方で、その運転には電力消費を伴うことから再凝縮工程における効率は省エネルギー性の観点で重要となる。

そこで、当社製の20 K単段GM冷凍機を利用した LH_2 再凝縮試験装置を製作し、ZBOの実証に取り組んだ。また、再凝縮時の効率を評価し、得られた結果に基づいて本方式による経済性の検討を行い、社会実装に耐え得る技術であるかを検証することとした。

2 試験装置の構成

図1に、今回準備した試験装置の構成を示す。左側は装置全体の外観および断面図、右側は使用した当社製単段GM冷凍機RDK-500B2 (50 W@20 K)⁽³⁾の外観である。本試験では効率評価を行う都合上、冷凍機と組み合わせる圧縮機には出力可変型を選定した。

冷凍機の冷却ステージ先端にはBOGを再凝縮する熱交換器と、 LH_2 を貯蔵する小型貯蔵容器(内容積約3 L)を取り付けた。これらを真空断熱層内に配置し、外部からの侵入熱を十分に低減した条件下で、容器内で発生するBOGおよび再凝縮挙動を適切に評価できる構成とした。冷凍機で発生した冷熱は熱交換器を介してBOGへ伝達され、容器内で発生したBOGは再凝縮される。熱交換効率を高めるべく、熱交換器はフィン形状に近い独自構造とし、伝熱面積を増大させている。

貯蔵容器の外部に2本の配管を設け、それぞれ水素ガスの導入および排気に使用した。一方の配管には圧力計を取り付け、容器内圧力を常時監視できる構成としている。さらに、

両配管には手動バルブを設けており、閉操作により容器を完全に密閉できる。この密閉状態で外部から容器を加熱すると LH_2 の蒸発が促進され、容器内圧力が上昇する。同時に、冷凍機を運転しZBO状態が実現している場合には、BOG発生量と再凝縮量が釣り合い、容器内圧力は上昇せずに平衡状態が維持される。つまり、本試験では容器内圧力の経時変化を観測することで、BOG発生量と再凝縮量のバランスを評価できる。また、容器内部の状態を把握できるよう装置内の3カ所に温度センサを配置した(図1左)。熱交換器と冷凍機ステージ間(T1)、容器上部の気相部(T2)、容器下部の液相部(T3)に設置された温度センサにより、それぞれの温度と容器内圧力情報から内部状態の推定が可能である。

さらに、外部から意図的に加熱できる機構も備えており、所定量の液化水素生成後、容器を密閉・加熱することでBOGの発生を促進し、冷凍機運転時に圧力上昇が抑制されるかを検証した。これらの消費電力と再凝縮に伴う吸熱量の比が、再凝縮効率を示す指標となることから、冷凍機運転時の電力消費量を別途設置した電力計により計測した。

本試験における水素の液化および貯蔵は高压ガスの製造行為に該当するので、試験の実施に当たっては本装置を高压ガス保安法に基づく製造装置として、事前に神奈川県へ届け出を行った。また、水素は可燃性ガスであり、試験で使用する電気機器には防爆仕様が求められることから、防爆に関しても県の確認を得て安全性を確保し、設計を完了させた。試験開始に当たっては想定される事故や災害への対策を十分に検討し、運転手順と監視体制を明確にしたうえで安全に配慮して実施した。

3 水素の液化と再凝縮の試験および試験結果

本試験では、冷凍機を用いた液化水素を生成する液化工程、BOGの再凝縮工程および冷凍機停止時の挙動確認までを一連のシーケンスとして実行した。具体的には、まず冷凍機を運転した状態で室温の水素ガスを容器内に導入し、冷却・液化して LH_2 を生成・貯蔵する液化工程に入る。その後、約2 Lの LH_2 を貯蔵した状態で容器を密閉し、外部から加熱してBOGの発生を促進させた条件下で、冷凍機によりBOGを再凝縮して圧力上昇を抑制する再凝縮工程に進む。最後にZBO

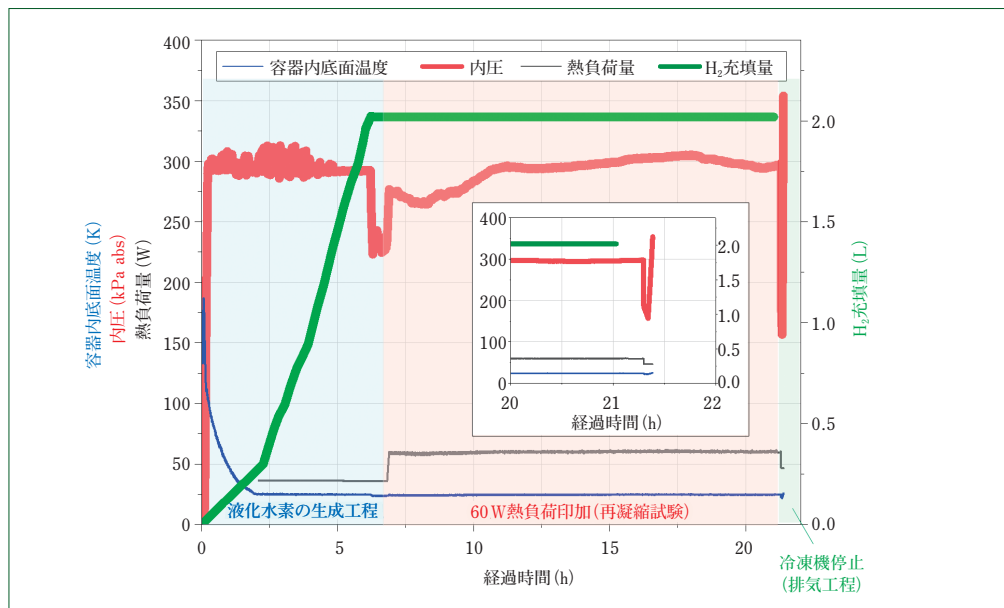


図2 液化、再凝縮および冷凍機停止を含む一連の試験における温度・圧力の時系列結果
Time-series results of temperature and pressure during sequence of tests, including liquefaction, recondensation and cryocooler shutdown

状態が安定している段階で冷凍機を停止し、密閉状態における容器内圧力の応答を確認した。これら一連の工程における各所の温度、容器内圧力および貯蔵されているLH₂量の時系列データを図2に示す。次に、図2に基づき、各工程の挙動を考察する。

液化工程では、排出ライン側のバルブを閉じた状態で冷凍機の初期冷却を進め、十分に温度が低下した段階で水素ガス導入ラインのバルブを開放した。室温（約300K）の水素ガスをゲージ圧0.2MPaに調整しつつ導入すると、ガスは冷凍機で連続的に冷却され、導入開始から約1.5時間後に容器下部の液相部温度（T₃）が水素の沸点（0.2MPaG条件で約25K）に到達した。以降は水素ガスボンベの減圧量が生成されたLH₂量に対応し、最終的に容器的内容積の約65%に相当する約2LのLH₂が生成・貯蔵されたことを確認した。なお、生成量はボンベ残圧の変化に基づく推定値であり、直接液量を測定しているわけではない。

再凝縮工程では、ガス供給ラインのバルブを閉じて容器を密閉状態とし、ヒータにより所定の熱負荷を与えてBOGを意図的に発生させた。発生したBOGは熱交換器近傍で冷凍機により再凝縮され、容器内の圧力上昇は抑制される。図2に示すように、約60Wの加熱条件下においても10時間以上にわたり容器内圧力が上昇しないZBO状態に維持されていた。これは、加熱により生成されるBOGの量と、冷凍機による再凝縮量がほぼ釣り合っていることを示す。また、試験中に容器からの水素ガスの漏洩は観測されず、気液界面付近の温度は水素の沸点（約25K）に安定して維持されていることも確認できた。本試験に基づく装置の再凝縮能力は約7.9 L/hと算出された。

工程の最後に、冷凍機によるBOG抑制効果を明確にすべく、圧力が一定に保たれているZBO状態で冷凍機を停止し、容器内圧力の変化を観測した。冷凍機停止前には、安全確保のため外部熱負荷を一時的に低下させた。そのため、容器内圧力に一時的な低下が見られた。その後、冷凍機を停止すると、

停止直後から、外部からの入熱に伴う蒸発（BOG生成）は継続するが再凝縮は起きないので、容器内圧力は直ちに上昇へと転じる挙動が確認された（図2挿入図）。この結果は、ZBO状態が冷凍機の運転によって成立していることを裏付けるものである。

4 試験結果および経済性に関する考察

最後に、本試験で得られた再凝縮（ZBO）システムの効率評価および経済性について考察する。一般に冷凍機単体の効率はCOP（Coefficient of Performance：成績係数）で表され、式(1)で定義される。ここで、COPは得られる冷凍能力Qを消費電力Pで割った比である。

$$\text{COP}(\%) = \frac{Q}{P} \times 100 \quad \text{..... (1)}$$

一方、BOGを再凝縮する際には、BOGとの熱交換過程で必ず伝熱損失が発生する。そこで、この損失も含めた再凝縮工程の効率COP_Zを式(2)のように定義した。

$$\text{COP}_Z(\%) = \frac{Q \times \text{熱交換効率}}{P} \times 100 \quad \text{..... (2)}$$

熱交換効率は、理想的には100%が上限であり、再凝縮効率は必ず冷凍機単体のCOPより低い値となる。再凝縮効率を基に、液化水素設備で発生するBOGを本ZBOシステムにより抑制した際の経済性を検証する。BOGを大気放散した場合の損失と、ZBOシステム運用時の電力コストを比較し、水素のBOGのコスト回収効率を式(3)のように定義した。

$$\text{コスト回収効率}(\%) = \text{再凝縮効率} \times \frac{\text{水素単価}}{\text{電気代}} \times \frac{1}{h_L} \quad \text{..... (3)}$$

ここで、 h_L は液化水素の蒸発潜熱を表し、圧力条件に依存して変化するパラメータである。BOG回収効率が100%を超える場合、電力を消費してZBOシステムを運転しても回収される水素の金銭的価値が電力コストを上回るため、経済的メリットが得られる。しかし、100%未満では経済的には不利となる。実際には装置導入時には初期投資が発生するので、本指

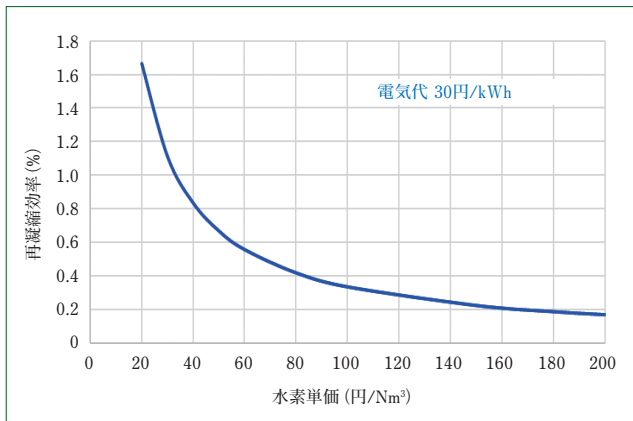


図3 再凝縮運転における電力コストと水素単価に基づく損益分岐ライン
Break-even lines based on electricity cost and hydrogen unit price during recondensation operation

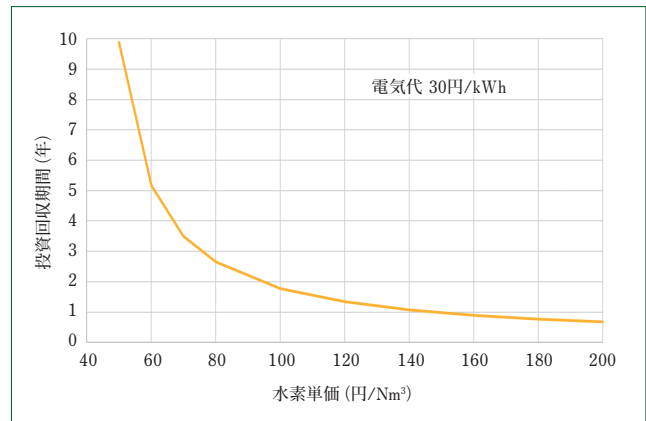


図5 水素単価に対する投資回収期間の試算結果
Estimated payback period as function of hydrogen unit price

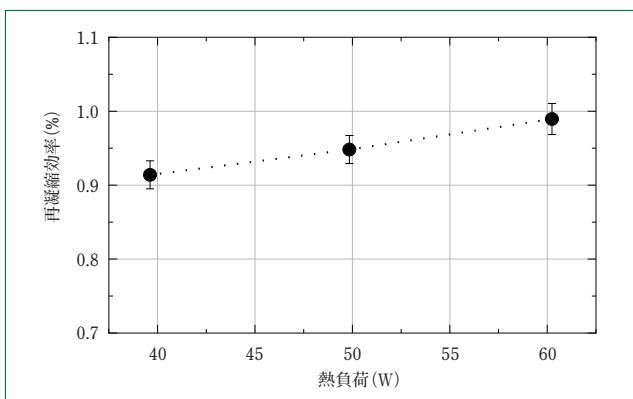


図4 外部入熱40~60 Wにおける再凝縮効率の測定結果
Measured recondensation efficiency under external heat loads of 40~60 W

標が高いほど投資回収期間は短くなる。図3に、横軸を水素単価とし、BOG回収効率が100%となる再凝縮効率を示す。この曲線は損益分岐を表し、曲線より上の領域では運用による経済的利点が見込める。水素単価が安価になるほど、コストメリットを得るために必要な再凝縮効率が高くなることが分かる。

現状(2026年3月時点)では、水素単価が約180円/Nm³と高いので、再凝縮効率が0.2%程度でも経済的メリットが得られる。将来水素単価が50円/Nm³程度まで低下した場合、損益分岐に必要な再凝縮効率は約0.65%となる。

今回構築した装置の再凝縮効率を評価するに当たり、外部から印加する熱負荷を40~60 Wの範囲で変化させ、条件に応じて冷凍機出力を調整し、LH₂貯蔵容器の内圧を0.2 MPaG付近に維持した。この状態で外部入熱と再凝縮による吸熱が釣り合っており、ZBO状態が成立している。このときの吸熱量と消費電力の計測値から再凝縮効率を算出した。図4に、測定結果を示す。熱負荷40~60 Wの全条件において再凝縮効率は0.9%を上回り、特に60 W印加時には本試験で最高値となる0.99%を得た。この結果は、外部入熱が変動する実際の液化水素設備においても、本装置が幅広い条件で高い効率を維持し最小限の電力で圧力上昇を抑制できることを裏付けている。また、事前に実測した結果から冷凍機単体のCOPが約1.0%であることを加味すると、本装置の熱交換器にお

ける損失は十分に小さく、冷凍機性能がほぼそのまま有効活用できていることを表す。

最後に、設備導入時の投資回収期間について評価した。投資回収期間は、装置導入に必要な初期費用を運転によって得られるBOG回収量に相当する利得で除することにより算出される。図5に、実測した再凝縮効率および電気代30円/kWhを用いて算出した結果を示す。現行の水素単価180円/Nm³では、1年未満で投資回収が可能であり本装置導入の経済的メリットは大きい。また、本試験では保持圧力を0.2 MPaGと比較的低い条件としたが、設備によってはより高压での運用も可能である。保持圧が上がれば水素の沸点は蒸気圧曲線に従って上昇し、それに伴い冷凍機のCOPも向上する。仮に冷却温度が5 K程度上昇した場合、水素単価が50円/Nm³に低下した場合でも数年以内の投資回収が可能である。

液化水素を扱う設備においてBOG発生が課題となる場合、再凝縮装置の導入によって、運用効率と経済性の双方を大きく改善できることが明らかとなった。

5 むすび

- (1) 当社製の単段GM冷凍機を用い、安全性を確保したうえで高効率な液化水素ZBOシステムを構築した。
- (2) 外部から約60 Wの熱負荷を印加した条件において、容器内の圧力上昇を10時間以上にわたり完全に抑制できることを確認し、GM冷凍機による液化水素のZBO状態が成立することを実証した。
- (3) 本装置の再凝縮効率は、最適条件において約1%を示した。
- (4) 再凝縮効率を基に投資回収期間を試算した結果、現行の水素価格においては経済性の観点から本装置の導入効果が十分に期待できることを明らかにした。

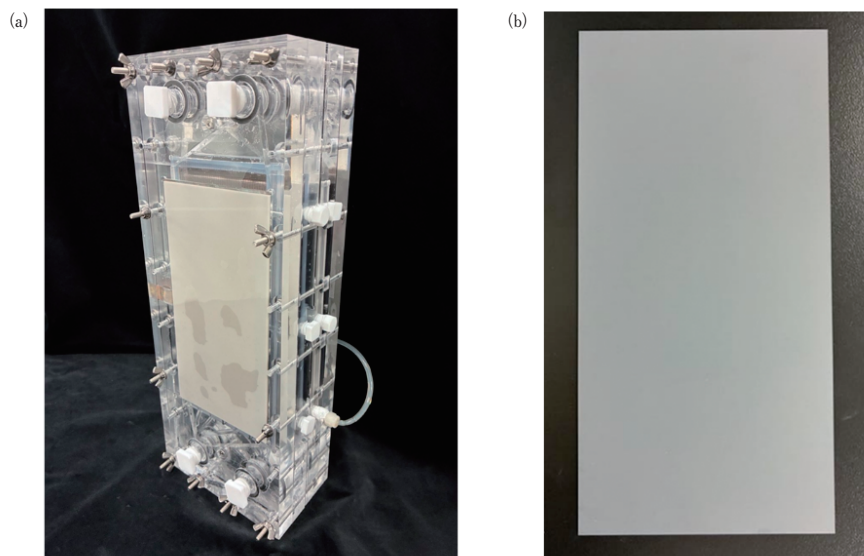
(参考文献)

- (1) Notardonato, W. U., et al., Zero boil-off methods for large-scale liquid hydrogen tanks using integrated refrigeration and storage, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 278 (2017), 012012.
- (2) Plachta, David W. Hybrid thermal control testing of a cryogenic propellant tank, NASA/TM-1999-209389 (1999).
- (3) 精密機器事業部, 大型20K単段GM冷凍機 RDK-500B2, 住友重機械技報, 216 (2025), 15.

ダイヤモンド電極を用いたCO₂電気化学還元 of 長期安定化技術

Long-Term Stable Formic Acid Production via Electrochemical Reduction of CO₂ Using Boron-Doped Diamond Electrodes

● 荒 木 沙 李* 湯 村 正 典* 永 田 陽 平*
Sari ARAKI Masanori YUMURA Yohei NAGATA



CO₂電解セル外観(a)とダイヤモンド電極(b) ※どちらの写真も本報用に筆者が新規撮影
Photographs of CO₂ electrolysis cell (a) and diamond electrode (b) ※Both photographs were newly taken by author specifically for this report.

脱炭素社会の実現に向けて、排出された二酸化炭素(CO₂)を資源として再利用するカーボンリサイクル技術が注目されている。電気化学的CO₂還元(CO₂電解)は、再生可能エネルギー由来の電力を活用して有用化学品を製造できる有望な手法である。得られる化学品のなかでも、特に、液体で取り扱いやすいギ酸(HCOOH)は水素キャリアとしての応用が期待されている。本報では、ボロンドープダイヤモンド(BDD)電極を用いたCO₂電解において、長期運転時の性能変動要因をイオン輸送の観点から解析し、イオン輸送制御により反応環境を安定化する手法を提案した。この手法に運転管理を組み込むことで1264時間にわたる連続ギ酸生成と高濃度化を実証し、CO₂電解プロセスの実用化に向けた設計指針を示した。

本報の内容は、アメリカ化学会の許可を得て、文献(1)の論文を改変した日本語版である。著作権は2025 American Chemical Societyに帰属する。

Toward the realization of a decarbonized society, carbon recycling technologies that convert emitted carbon dioxide (CO₂) into valuable resources are attracting increasing attention. Electrochemical CO₂ reduction is a promising approach because it enables the production of useful chemicals using electricity, which can be supplied from renewable energy sources. Among the possible products, formic acid is particularly attractive due to its liquid state, ease of handling, and potential application as a hydrogen carrier. This report describes long-term CO₂ reduction using boron-doped diamond electrodes and clarifies the mechanism of performance fluctuation from the viewpoint of ion transport in the electrolyte. By controlling cation concentration to stabilize the reaction environment, continuous formic acid production for 1264 hours and concentration enhancement were achieved. The results provide practical design guidelines for stable and durable CO₂ electrolysis systems.

This report is a Japanese version of the article cited in Reference (1), adapted with permission from the American Chemical Society. Copyright 2025 American Chemical Society.

1 まえがき

地球温暖化問題の深刻化に伴い、温室効果ガス排出量の削減は世界的な最重要課題となっている。再生可能エネルギーの導入が拡大するものの、産業活動や輸送分野におけるCO₂排出を短期間で完全にゼロにすることは困難である。このため、排出されたCO₂を回収して資源として利用するCCU

(Carbon Capture and Utilization)やカーボンリサイクル技術が、排出削減と並ぶ重要な選択肢として近年位置づけられている。

CO₂を化学品へ変換する方法のうち、CO₂電解は常温常圧付近の比較的温和な条件で反応を進行でき、外部から与える電圧・電流により反応を制御できるという特長がある。電力を反応の駆動力として直接用いるプロセスであること

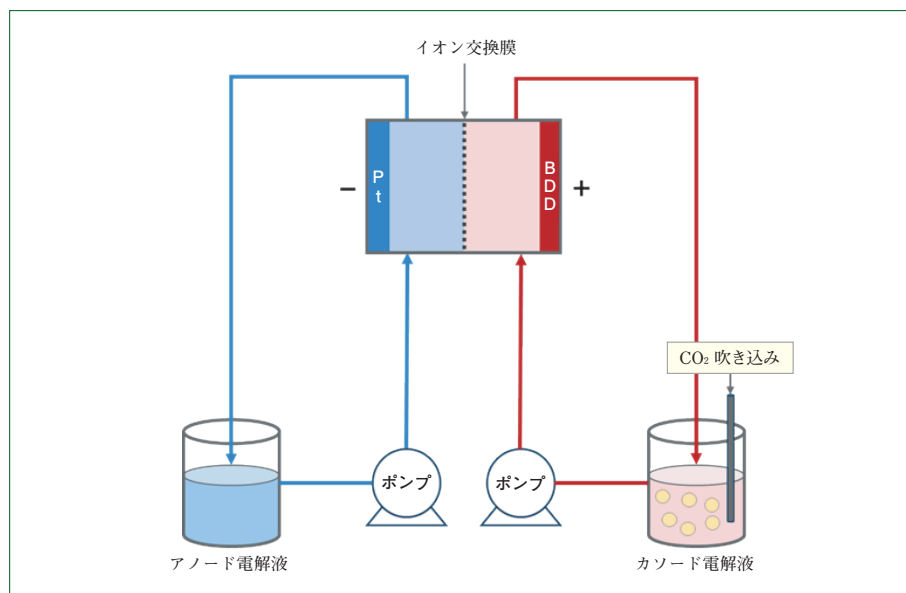
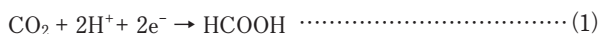


図1 電解実験に用いた2室型フローセルの模式図
Schematic illustration of two-compartment flow cell used for electrolysis

から、再生可能エネルギー由来の電力と組み合わせて、CO₂を循環的に利用するプロセス構築が可能となる。

CO₂電解における生成物は電極材料、触媒、電位、電解液組成などに依存し、その生成物は一酸化炭素、ギ酸、炭化水素類などが知られている。そのなかでもギ酸は、CO₂電解で得られる代表的生成物であり、常温常圧下で取り扱いやすい特性を有することから既存の工業用途に加え、水素キャリアとしての応用が期待されている。また、直接ギ酸形燃料電池の燃料としても注目されており、エネルギー分野にも展開できる可能性を持つ化学品である。ギ酸生成反応は比較的単純な2電子反応であり、式(1)で表される。



理論上、2電子が1分子のギ酸生成に必要であり、通電量から生成量を定量的に見積もることが可能である。実際の反応では副反応が存在することから、生成物に使われた電荷割合をギ酸生成ファラデー効率として評価する。CO₂電解における重要な副反応として式(2)で示される水素発生反応(HER: Hydrogen Evolution Reaction)がある。



HERは、作用電極近傍における水素イオン濃度が高くなるにつれ優勢となり、ギ酸生成の選択性が低下する。したがって、CO₂電解の長期安定運転には触媒・電極材料の選択だけでなく、電解液のpHとイオン環境を時間とともにどう管理するかが重要となる。

CO₂電解によるギ酸製造を実用化するには、高い反応選択性を維持したまま長時間安定して運転できることが不可欠であり、その結果として得られるギ酸の高濃度化が求められ

る。特にギ酸の高濃度化は、下流における電解液の分離・濃縮工程の負荷が製造コストを支配し得るという観点から重要であり、長時間にわたり高効率な電解を継続できるかどうか、コスト低減に直結する。本報では、CO₂電解の基礎を整理したうえで、長期運転時におけるイオン輸送の挙動が反応選択性および運転安定性を左右する要因であることを明らかにし、イオン輸送制御に基づく高効率な長期安定運転の設計指針を技術報告として示す。

2 ダイヤモンド電極を用いたCO₂電解

CO₂電解の生成物種と選択性は電極材料に強く依存する。ギ酸の高選択生成を狙ううえで重要となるのが、水素発生反応を抑えつつCO₂還元を進められる電極材料である。ダイヤモンドは絶縁体であるが、ホウ素(B)を添加(ドーブ)することで金属的導電性を示し、電気化学用途の電極として利用できる。このような導電性ダイヤモンド電極は、一般にBDD電極と呼ばれる。

BDD電極は広い電位窓、小さなバックグラウンド電流、高い化学・機械的耐久性を持つことで知られる優れた機能材料である。BDDをCO₂電解における作用電極として用いた場合、ホウ素のドーブ量によって水素発生過電圧をコントロールできる点が特に有効であり、副反応となるHERを抑制して目標生成物の高い選択性を実現することができる。現段階では、常温常圧下において高い効率でギ酸を生成できることが実証されている。さらに、ダイヤモンド材料としての化学・機械的耐久性は電解反応によって劣化しやすい触媒を要する電極や金属電極に対し高い優位性を持つことから、工業的な利用が期待されている。

しかし、実用化に際しては「電極が化学的に安定している」だけでは不十分である。長時間電解を続けると、電解液中の各種イオン濃度や生成物蓄積によるpH変動などの反応環境

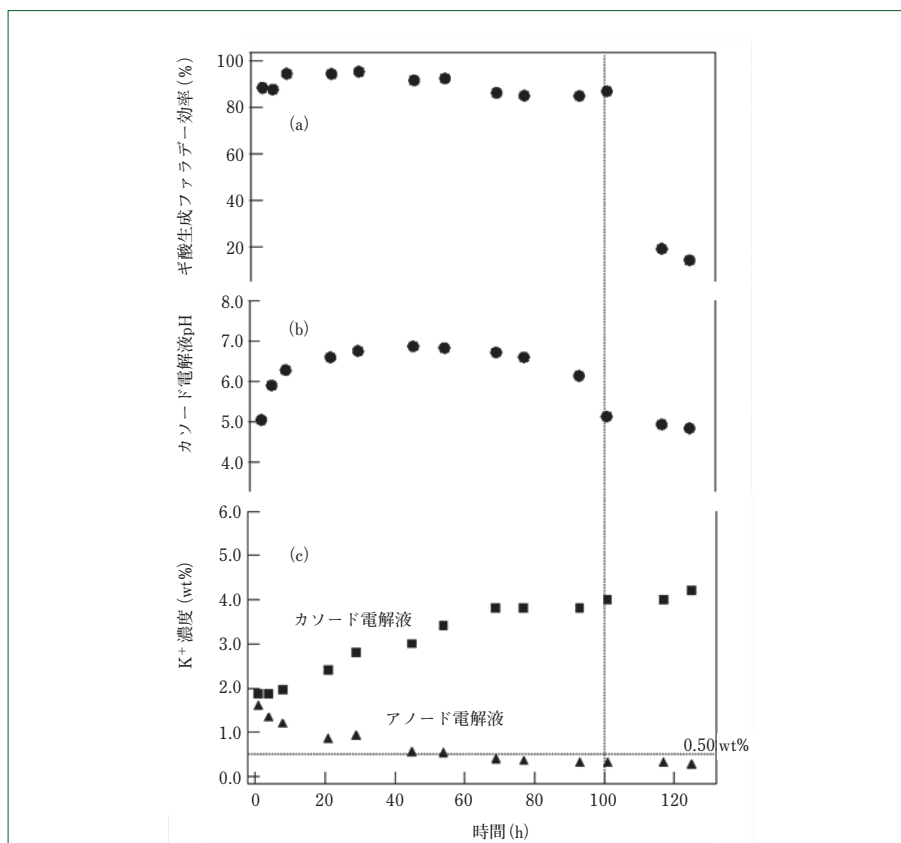


図2 BDD電極を用いた長期CO₂還元における、(a)ギ酸生成ファラデー効率、(b)カソード電解液pH、(c)アノード電解液(▲)およびカソード電解液(■)中のK⁺濃度の時間変化
Changes in (a) faradaic efficiency of formic acid production, (b) pH of catholyte, and (c) K⁺ concentration in anolyte (▲) and catholyte (■) during long-term CO₂ reduction with a boron-doped diamond (BDD) electrode

変化が重なり、電極を取り巻く環境が経時的に変化すると想定される。したがって、電解液組成はどのように変化していくのか、またそれがギ酸生成にどれくらい影響を及ぼすのかを理解することが、プロセス成立性の観点から重要となる。

3 実験系の概要

本報では、2室型フローセルを用いてCO₂電解を実施した(図1)。セルはカソード室とアノード室に分かれ、両者はイオン交換膜で隔てられている。作用電極にBDD、対極にPt板、参照電極にAg/AgClを用いて定電流で電解を行った。カソード電解液には0.5mol/L KCl水溶液、アノード電解液には0.25M K₂SO₄水溶液あるいは0.5mol/L KOH水溶液などを用い、電解液は循環させながらCO₂を一定流量で供給した。生成したギ酸は高速液体クロマトグラフィーで定量し、同時に電解液pHと含有カリウムイオン(K⁺)濃度を測定して、電解中のイオン挙動を追跡した。

なお、隔膜となっているイオン交換膜は、カソードとアノードの溶液を分離するが陽イオン(カチオン)は通すことができる。故に外部回路を流れる電子と対応して、電荷の釣り合いを保つよう溶液間でカチオンの移動(電荷補償)が起こる。

4 BDD電極を用いたCO₂電解における長期電解

長期CO₂電解を行いギ酸生成効率、電解液pH・K⁺濃度を

時間追跡したところ、電解開始からしばらくは高いギ酸選択性が維持されるが、100時間を超える付近でギ酸生成効率が顕著に低下する現象が確認され(図2(a))、このときのギ酸濃度はおよそ2.0wt%に達していた。同時に、カソード電解液のpHは初期には上昇するものの、運転が進むにつれて低下へと転じ、100時間付近で急速に酸性状態へ戻る挙動が観測された。なお、実験開始直後のカソード電解液pHが低いのは、電解液前処理におけるCO₂飽和操作に伴う弱酸性化によるもので、高い遊離プロトン(H⁺)濃度とは性質が異なる点に留意されたい(図2(b))。

電解初期のpH上昇は、ギ酸生成反応(式(1))でH⁺が消費されるので合理的である。一方で、100時間付近でpHが酸性側へ急落するのは、カソード電解液中のH⁺が生成反応による消費を上回って増加していること、すなわち膜を介したH⁺供給移動が顕在化した可能性を示唆する。事実、本系ではpHの急変とギ酸生成効率の急落が同時に観測されており、カソード側の酸性化に伴ってHERが競合し、ギ酸選択性が低下したと解釈できる。問題は「この酸性化がなぜ100時間付近という特定の時間スケールで顕在化したのか」である。この時間スケールは単なる偶然ではなく、アノード電解液中に存在するカチオン量と、運転中に流した通電量との関係によって決まると考えられる。一定電流条件下では、電荷補償のために膜を通過するカチオン量は単位時間当たりほぼ一定となる。

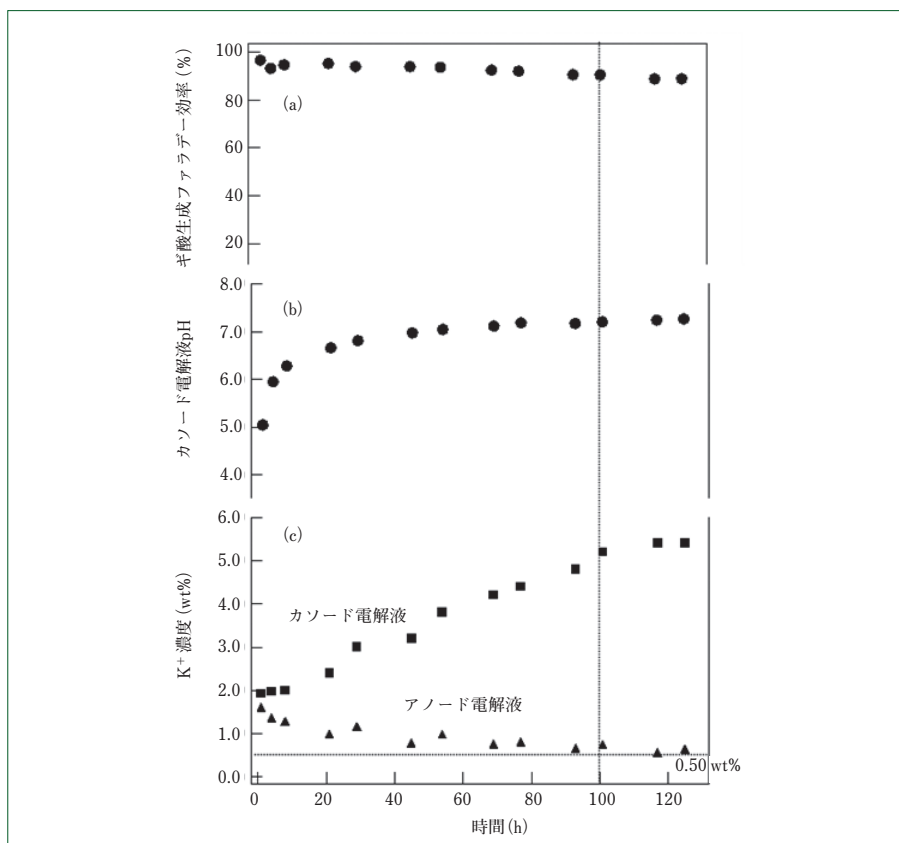


図3 アノード電解液に2.5M KOH水溶液を添加することでカソード電解液のpHを制御した条件下での長期CO₂還元における (a) ギ酸生成ファラデー効率, (b) カソード電解液pH, (c) アノード電解液 (▲) およびカソード電解液 (■) 中のK⁺濃度の変化
Changes in (a) faradaic efficiency of formic acid production, (b) pH of catholyte, and (c) K⁺ concentration in anolyte (▲) and catholyte (■) during long-term CO₂ reduction with addition of 2.5M KOH aqueous solution every few hours to anolyte to control pH of catholyte

故に、運転の進行とともに電解液中のイオン環境が徐々に変化し、ある時点で電荷補償を担う主体が切り替わる転換点に到達し得る。

このように性能急変は時間依存現象であると同時に、電流・電解液濃度・膜特性の組合わせで決まる系固有の挙動であると整理できる。

5 原因説明

本報では長期運転中のイオン輸送に着目し、特にK⁺濃度の変化を追跡した。K⁺濃度の測定結果から、アノード電解液中のK⁺が時間とともに低下し、膜を透過してカソード側へ移動していることが確認できた(図2(c))。また、カソード電解液中のK⁺濃度は一定時間以降ほぼ一定に保たれる挙動も示されており、アノード側からの供給が止まる(枯渇する)時点が存在することが示唆される。ここで重要なのは、電荷中性を保つよう何らかのカチオンが膜を通して移動し続ける点である。

電解初期には、電荷補償としてK⁺が優先的に移動しやすい。現に0~50時間程度で、カソードpH上昇とK⁺移動が同時に観測されている。この段階では、K⁺が移動することでH⁺の移動が相対的に抑えられ、カソード電解液の酸性化は起こりにくい。結果としてHERが抑制され、ギ酸の高い選

択性が維持されている。しかし運転が進み、アノード電解液中のK⁺が一定値以下になると、電荷補償を担うカチオンがK⁺からH⁺へと切り替わる。

実験結果から、アノード電解液中のK⁺濃度が約0.50wt%を下回る時点以降にカソード電解液pHの低下が始まる傾向が確認されたことで、K⁺がほぼ枯渇した後にH⁺が膜を通してカソード側へ移動して、酸性化とギ酸生成効率の低下が顕在化したと解釈できる。

つまり、性能低下の要因は、長期運転によりイオン輸送の担い手が変わり、カソード環境が酸性化して反応選択性が変わったことにありと推測される。これは工学的には重要な示唆であり、その対策は運転管理によるイオン輸送制御で可能であることを意味している。

6 対策

5章の理解に基づけば、長期安定運転の鍵となる点はアノード電解液中のK⁺枯渇を防ぎ、膜を通る主なカチオンをK⁺のまま維持することである。本報では、アノード電解液に高濃度KOH水溶液を適宜添加し、K⁺濃度が0.50wt%を下回らないよう制御した。この条件下では、100時間を超えてもカソード電解液pHの急激な低下は起こらず、ギ酸生成効率の急落が抑制された(図3)。この制御により、膜を介した電

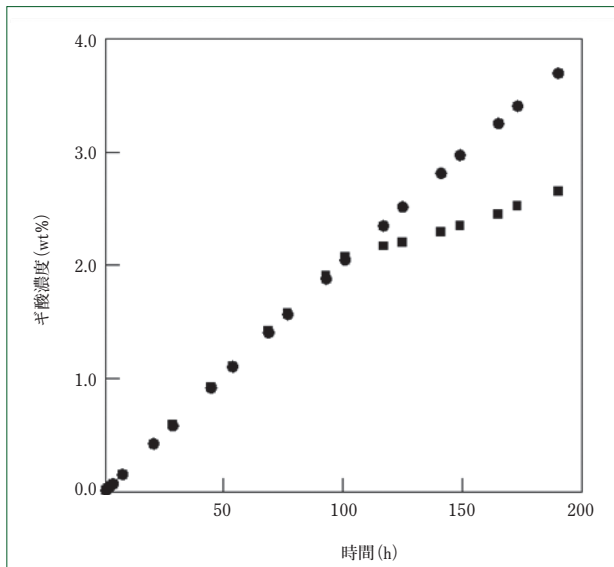


図4 BDD電極を用いたCO₂還元におけるギ酸濃度の推移
(●): K⁺添加あり (■): 添加なし
Concentration of formic acid in catholyte during CO₂ reduction with (●) and without (■) adding K⁺

荷補償がK⁺移動で優先的に成立することでH⁺の過剰な移動が抑制される。その結果として、カソード電解液の酸性化が抑えられ、HERとの競合が低減し、ギ酸の高い選択性が維持された。

さらに、K⁺制御の有無によってギ酸濃度の時間変化が大きく異なることが認められた(図4)。K⁺制御を行うと高効率ギ酸生成が継続し、150時間程度で3.0wt%を超える濃度に到達するが、制御がない場合には100時間以降に生成が鈍化した。これは、分離・濃縮コスト低減に資する濃度域へ到達するにはイオン輸送制御が有効であることを示す結果である。また、カソード電解液のpHを意図的に変化させた試験により、pH上昇に伴ってギ酸生成ファラデー効率が回復する相関も確認されており、pH≥5が望ましいという結論が得られている(図5)。すなわち、K⁺制御によるカソード電解液のpH安定化が、選択性維持の本質条件であることを裏づけている。

7 実証性検証

実用プロセスを考えると、電解液中にギ酸が蓄積し続けるため、一定のギ酸濃度で溶液を交換しながら連続運転する運用が現実的である。本報では、ギ酸濃度が3.0wt%に達した時点でカソード電解液を新しいものに交換し、同一装置で運転を継続するセミバッチ方式の検証を行った。

この検証の目的は、電解液更新がギ酸選択性に与える影響と、BDD電極を含むシステム全体の長期耐久性を同時に確認する点にある。

検証の結果、電解液を複数回交換しながら運転を継続してもギ酸生成ファラデー効率は70%以上を維持し、合計1264時間にわたる連続生成が達成された(図6)。さらに、最終サイクルでは電解液を交換せずに運転を延長し、最大8.8wt%

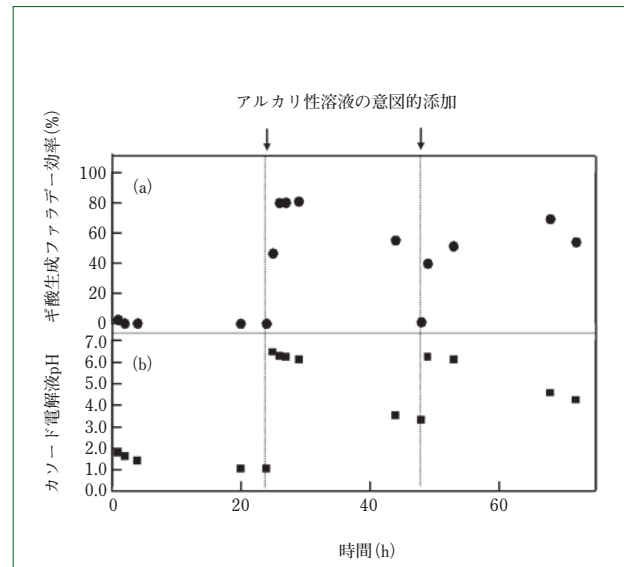


図5 BDD電極を用いたCO₂還元における (a) ギ酸生成ファラデー効率と (b) カソード電解液pHの相関
Correlation between (a) Faradaic efficiency of formic acid production and (b) pH of catholyte during CO₂ reduction using BDD electrode.

のギ酸濃度が確認されている。本成果は短時間の高選択性にとどまらず、イオン輸送制御を組み込んだ系として長期運転が成立し得ることを明示している。

特に注目すべきは、電解液交換後も電極性能が再現性よく維持された点である。これは、性能低下の主因が電極表面の不可逆的変質ではなく、溶液側の条件変化であることを裏づけるとともに、適切な運転管理を行えば同一装置で繰り返し安定した生成が可能であることを表している。工業プロセスの観点からは、性能変動要因を材料と運転条件に切り分けて捉えられることを意味し、運転管理を含めたプロセス設計の自由度向上につながる。具体的には、要求されるギ酸濃度や電解質イオン濃度といったアウトプット仕様に応じて、電解条件や運転条件をあらかじめ設定し、目的に合わせて柔軟に運用できる。つまり、本手法は目的とする生成液仕様に応じた運転設計を可能にし、実プロセスへの適用性を高めるものである。

8 今後の展望

今後の展開としては、実用化に向けた高速ギ酸生成を目指し、より高い電流密度での運転成立性を高めることが重要である。したがって、電解性能向上に向けた電解条件の最適化を進めるとともに、電解セルの大型化やセルのスタッキングなど、装置側のスケールアップ技術を検討する必要がある。また、生成液の分離・濃縮工程を含む下流プロセスとの統合最適化を行い、系全体のエネルギー効率とコストを評価したうえで、社会実装シナリオを具体化していくことが求められる。

イオン輸送制御は、材料開発と並行して実装可能な運転設計の手段であり、CO₂電解の産業化に向けた有効な設計思想を提供するものである。

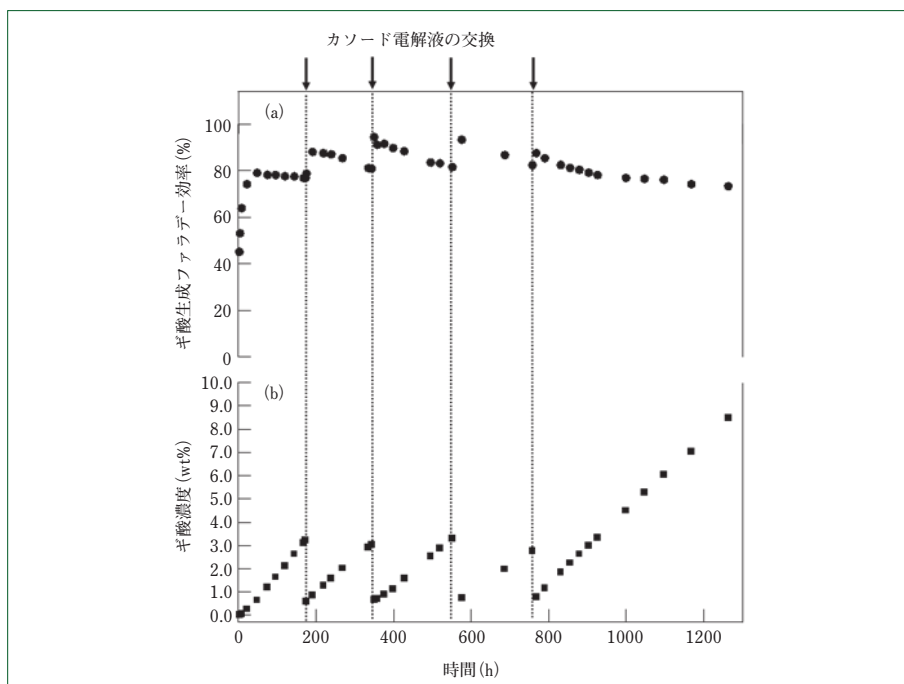


図6 半永久的なギ酸水溶液生成を目的としたBDD電極によるCO₂還元の長期運転結果 (a) ギ酸生成のファラデー効率, (b) ギ酸濃度
Long-term CO₂ reduction at BDD electrode for semi-permanent production of formic acid solution
(a) Faradaic efficiency of formic acid production and (b) concentration of formic acid

9 むすび

- (1) CO₂電解は、再生可能エネルギー由来の電力を活用してCO₂を有用化学品へ転換できる技術である。得られる化学品のなかでも、特に、液体で取り扱いやすいギ酸は水素キャリアや燃料用途への展開が期待されている。本報では、その長期安定運転と高濃度化の成立性について整理した。
- (2) BDD電極を用いた2室型フローセルにおいて、長時間電解時の性能急変は電極劣化ではなく、膜を介したカチオン輸送における支配的なカチオン種の変化に起因する可能性が高いことを立証した。アノード電解液中のK⁺枯渇によりカソード電解液が酸性化し、水素発生反応が競合することがギ酸選択性低下の主因である。
- (3) アノード電解液中のK⁺濃度を一定以上に維持する運転制御によってカソード電解液pHを安定化し、ギ酸の高選択性を維持したまま濃度上昇を継続できることを立証した。さらに、セミバッチ方式により1264時間の連続ギ酸生成を実証し、最大8.8wt%のギ酸濃度を達成した。
- (4) 今後は、高電流密度条件への展開、装置側スケールアップ技術の確立、ならびに分離・濃縮工程との統合最適化を進めることで、CO₂電解によるギ酸製造プロセスの実装可能性をさらに高めていく。

本技術の検討を行うに当たり、ご指導いただいた慶應義塾大学 栄長泰明教授およびご協力いただいた栄長研究室の皆様

様に心より感謝申し上げます。

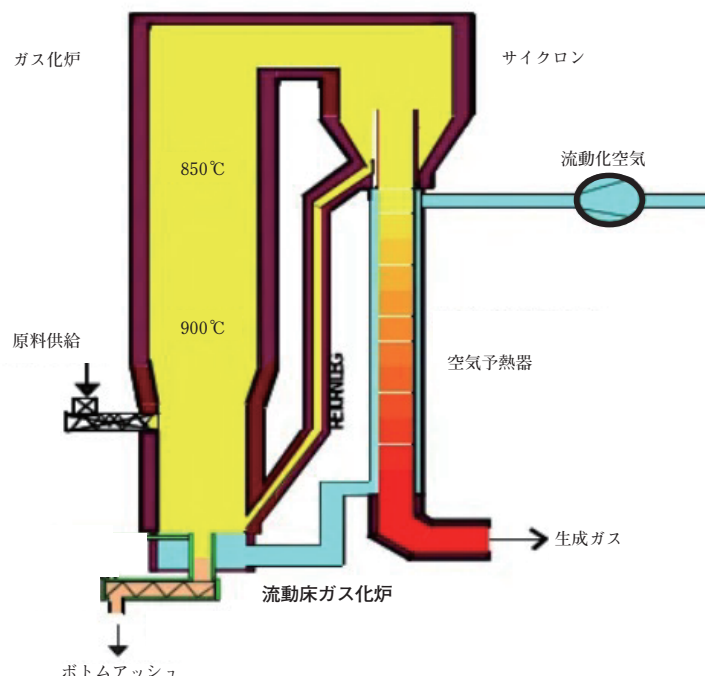
(文献)

- (1) Araki, S., and Einaga, Y., Semipermanent Continuous Formic Acid Production from CO₂ by Controlling Ion Transport Using Boron-Doped Diamond Electrodes, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2025, Vol. 13, No. 3, 1227-1232. DOI: 10.1021/acssuschemeng.4c06705.

流動床ガス化炉による脱炭素と合成燃料製造

Pathways to Decarbonization and Synthetic Fuel Production Using CFB Gasification

● 渡 邊 建 聖*
Takemi WATANABE



当社は、循環流動層 (CFB) ボイラを活用したバイオマス発電設備において豊富な実績と経験を有している。このCFB技術を流動床ガス化炉に応用し、バイオマスのガス化による燃料製造など、カーボンニュートラル社会の実現に向けて取り組んでいる。特に、持続可能な航空燃料 (SAF : Sustainable Aviation Fuel) の製造に不可欠な非化石由来の炭素源などの原料をガス化技術によって供給することで、脱炭素化に大きく貢献できると考えている。当社は、こうした取り組みを通じて、持続可能なエネルギーの未来を切り開いていく。

本報では、バイオマス由来の合成ガスを利用した燃料転換によって化石燃料使用比率を低減した事例と、バイオマスからの合成燃料製造について報告する。

Sumitomo Heavy Industries, Ltd. (SHI) has extensive experience in biomass power generation using circulating fluidized bed (CFB) boilers. SHI is applying its CFB technology to gasifiers and developing biomass gasification and fuel-production technologies to help realize a carbon-neutral society. SHI aims to contribute to decarbonization by gasifying carbon-neutral feedstocks to produce sustainable aviation fuel (SAF) and other low-carbon products. Through these efforts, SHI strives to shape the future of sustainable energy. This report presents cases in which the use of biomass-derived syngas has reduced the share of conventional fossil-fuel consumption, and introduces SHI's experience in producing synthetic fuels from biomass feedstocks.

1 はじめに

近年、世界のエネルギー情勢は急速に変化している。国際エネルギー機関 (IEA) の報告によれば、再生可能エネルギーの導入は加速しているものの、依然として化石燃料が1次エネルギー供給の約80 %⁽¹⁾を占めており、脱炭素化の進展は十分とはいえない。特に新興国では経済成長に伴うエネルギー需要の増加が顕著であり、エネルギー安全保障と環境負荷低減の両立が喫緊の課題となっている。一方、日本においてはエネルギー自給率が約15.2 %⁽²⁾と低く、輸入依存度の高さが構造的なリスクを生んでいる。加えて、2050年カーボンニ

ュートラルの達成に向け、電化や再生可能エネルギーの拡大のみならず、熱利用や輸送分野における代替エネルギーの導入が不可欠である。

このような背景の下で重要なのは、S+3E (安全性の確保、エネルギー安定供給、経済効率性、環境適合性) の視点からエネルギー政策を考察することである。「安全性の確保」は言うまでもないが「エネルギー安定供給」は、地政学的リスクを回避するとともに多様な供給源の確保を意味する。「経済効率性」は、コスト競争力を維持しつつ低炭素化を進め、技術革新を促す要素である。さらに「環境適合性」は、温室効果ガス排出削減を通じて持続可能性を担保する視点となる。

表 1 流動床ガス化炉納入実績
Delivery record of Fluidized Bed Gasifier

	運開年	納入先	国名	熱容量(MW)	主原料	適用
11	2009	NSE Biofuels	フィンランド	12	バイオマス	FT バイオディーゼル
10	2002	Electrabel	ベルギー	50	バイオマス	PC ボイラ *1 燃料ガス
9	2000	Corenso United	フィンランド	50	廃プラ	リサイクル&蒸気供給
8	1997	Lahti Energia	フィンランド	50	バイオマス・廃棄物	PC ボイラ燃料ガス
7	1993	Sydkraft	スウェーデン	18	バイオマス	バイオ専焼 IGCC *2
6	1986	Kemira	フィンランド	4	石炭・泥炭	試験機
5	1985	Portucel	ポルトガル	15	バイオマス	石灰焼成キルン
4	1984	ASSI Karlborg	スウェーデン	27	バイオマス	石灰焼成キルン
3	1984	Norrundet Bruks	スウェーデン	25	バイオマス	石灰焼成キルン
2	1983	Oy W. Schauman	フィンランド	35	バイオマス	石灰焼成キルン
1	1981	Alhstrom Lab	フィンランド	3	化石原料・バイオ・廃棄物	試験機

* 1 微粉炭ボイラ * 2 ガス化複合発電

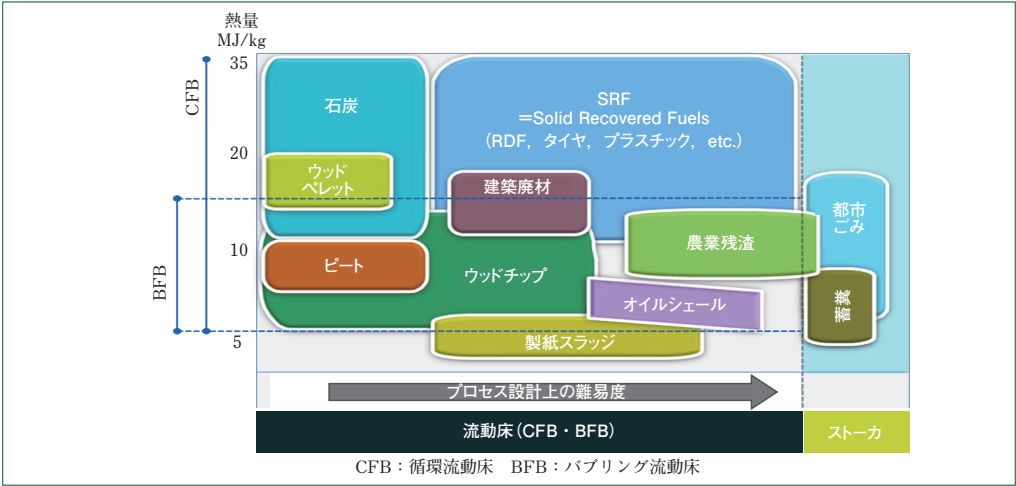


図 1 流動床ガス化炉で利用できる原料
Feedstocks that can be used in Fluidized Bed Gasifier

これらS+3Eの4要素を総合的に満たすには、さまざまな方策が考えられるが、なかでもバイオマス利用の拡大と廃プラスチックの活用は、その有力な選択肢である。バイオマスはカーボンニュートラルの特性を有し、地域資源の活用によるエネルギー自給率向上に寄与する。特に、木質バイオマス燃料を使用することは再生可能エネルギーの利用拡大に大きく貢献できる。木質バイオマス燃料は我が国の貴重な森林資源も活用できることから、林業の活性化を担う地域分散型かつ地産地消型のエネルギー源としても期待されている。一方、廃プラスチックは化石資源由来であるものの、ガス化や熱分解によるリサイクル燃料化により、廃棄物削減と資源循環の両立を可能にする。こうした技術は既存の産業インフラとの親和性が高く、輸送・発電・化学原料など多用途での利用が期待される。さらに、バイオマスと廃プラスチックの活用は、再生可能エネルギーの変動性を補完し、安定供給を確保する点でS+3Eの要件を満たす。

脱炭素化の加速と資源循環型燃料の活用は単なる環境対策にとどまらず、世界と日本のエネルギー転換においてエネルギー安全保障と経済効率を両立する戦略的選択である。

本報では、流動床ガス化炉が燃料利用を支える技術としてどのように貢献できるかを詳述する。

2 流動床ガス化炉について

流動床ガス化炉は、原料の微粉化や水分調整といった大規模な前処理を必要とせず、粗破碎した原料をそのまま炉内に供給できる点に大きな特長がある。炉内には珪砂、石灰石、原料灰分から構成される大量の循環材が保持されており、原料とこの循環材が強い攪拌状態で混合されながら反応し、ガス化反応が効率的に進行する。

炉下部で循環材と混合された原料は反応を続け、その後サイクロンによりガスと固形分(チャーおよび循環材)に分離される。分離された固形分は再び炉下部へ戻され、原料と循環材が連続的に循環するループを形成する。この循環により、原料および生成チャーはガス化に適した温度帯で十分な滞留時間を確保でき、原料の化学的エネルギーを最大限に取り出すことが可能となる。

また、循環材は大きな熱容量を持つことから、水分を多く含むバイオマス原料をそのまま使用しても炉内温度や生成ガス組成に悪影響を与えにくい。さらに、炉内に供給する石灰石などによるタールクラッキング効果も知られており、流動床ガス化炉はバイオマスをはじめとする固体原料のガス化に適した方式といえる。

表 1 に、流動床ガス化炉納入実績を示す。

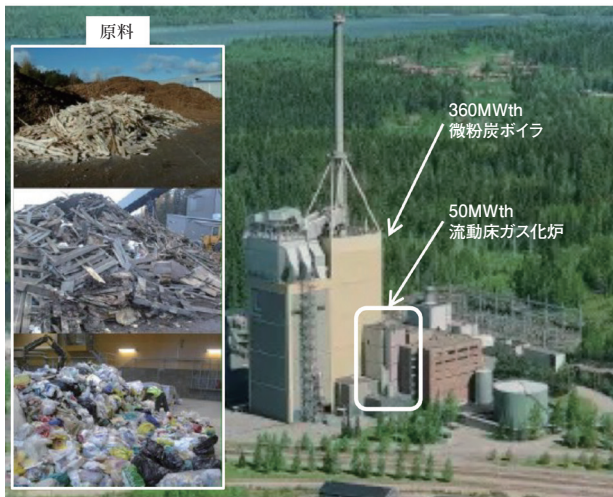


図2 Lahti Energia社の空気式流動床ガス化炉
Air fluidized Bed Gasifier of Lahti Energia (Finland)



図4 Stora Enso社の酸素-蒸気式流動床ガス化炉
Oxy-steam Fluidized Bed Gasifier of Stora Enso (Finland)

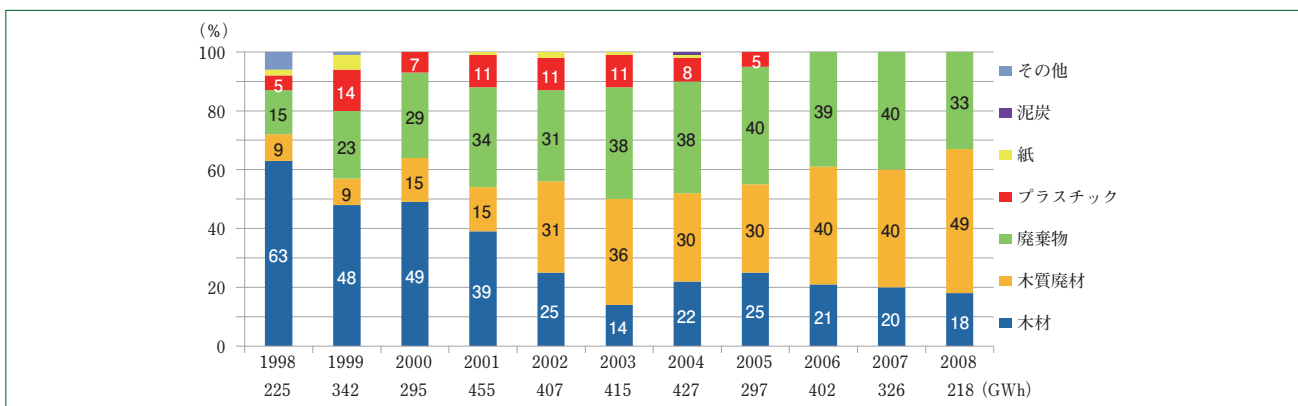


図3 Lahti Energia社のガス化原料の混合比率の推移
Yearly mixing ratios of gasification feedstocks

3 原料の多様性

流動床ガス化技術の特長は、多様な原料に対応可能であり、各種バイオマスや廃棄物を幅広く取り扱うことができることにある。原料の柔軟性は、ガス化炉の連続かつ安定した運転を確保するうえで極めて重要な要素となる。柔軟性が高いということは、事業者が入手可能な原料やコストメリットのある原料を組み合わせ使用できることを意味する。地域ごとに入手しやすい原料を活用し、安定した連続操業を実現できる。

また、上述のとおり、大規模な原料の前処理も不要である。さらに、バイオマス由来のカーボンニュートラルなガスを利用できることから脱炭素化にも寄与する。このように、流動床ガス化炉は幅広い原料に対応し、経済性と持続可能性を両立できるガス化技術である。

図1に、一般的に流動床ガス化炉で対応可能な原料を示す。

4 流動床ガス化炉の事例

4.1 空気式流動床ガス化炉による脱炭素エネルギー利用

フィンランドのLahti Energia社では、1985年に導入した計画入熱容量50MWの空気式流動床ガス化炉(図2)において、木くずや木質系廃材、プラスチックなど多様な原料を利用し

た生成ガスの一部を既設の微粉炭ボイラの燃料として供給した。その結果、石炭供給量の約15%を代替し、化石燃料の削減に大きく貢献した。

図3に、同社の各年のガス化原料の混合比率の変遷を示す。1998年当初は木材が63%を占めていたが、年々その比率は低下し、代わって木質廃材や廃棄物の利用が増加した。2008年には木質廃材が49%、廃棄物が33%を占め、原料構成は大きく変化している。また2000年代前半になると、プラスチックが最大11%まで利用されるなど、入手可能な原料を柔軟に組み合わせる運用が行われてきた。こうした変遷は、流動床ガス化炉が多様な原料に対応できる技術であることを表す好例である。

さらに、運用面では次の特性が挙げられる。第1に、収集可能な原料種を適時混合し、原料を柔軟に組み合わせた運用ができること。第2に、炉内循環材が大きな熱容量を持つので、原料変化に対しても安定した運転ができることである。同社はこれらの事例から、原料供給の多様化と運転信頼性の両立を達成した。

4.2 酸素-蒸気式ガス化炉によるバイオディーゼルの製造

ガス化剤として酸素と蒸気でガス化(酸素-蒸気式ガス化)した事例を紹介する。

2000年代初頭、欧州では輸送用燃料を再生可能燃料へと

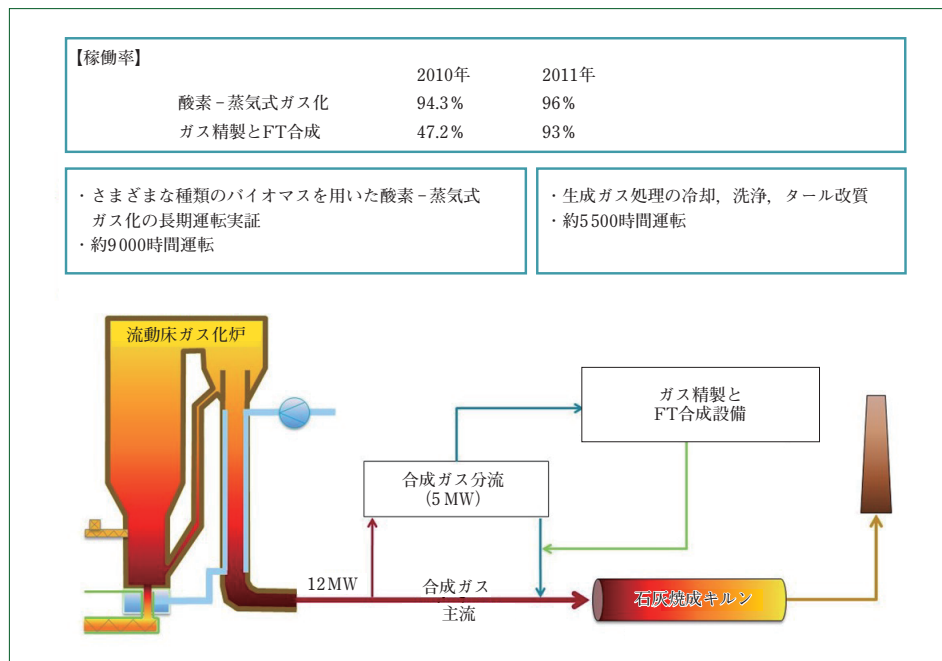


図5 酸素-蒸気式流動床ガス化炉を用いた生成ガスの改質とFT合成実証試験
Overall schematic of syngas reforming and Fischer-Tropsch synthesis demonstration test with Oxy-steam Fluidized Bed Gasifier

転換・推進する政策の下でバイオマスガス化技術への関心が高まりつつあった。Sumitomo SHI FW 社 (当時 Foster Wheeler社) は、Neste Oil社 (現 Neste社)、Stora Enso社、フィンランド技術研究センター (VTT) と連携し、バイオマスからクリーンかつ多用途な合成ガスを製造するという高度なプロセス開発に取り組んだ。この取組みは「Ultra Clean Gas (UCG)」プロジェクトとして2004年に開始された。

このプロジェクトで開発されたプロセスは、酸素-蒸気式流動床ガス化炉と、革新的な触媒ガス改質技術を組み合わせるというもので、2008年よりフィンランドにあるStora Enso社のVarkaus工場(図4)にて長期の実証試験が行われた。

実証試験は、計画入熱容量12MW規模の酸素-蒸気式流動床ガス化炉を中心に行われ、同ガス化炉で生成されたガスは、石灰焼成キルン工程の重油代替燃料として利用された。

流動床ガス化炉では木質バイオマス、泥炭、わら、農業残渣、さらには廃棄物由来原料など幅広い原料を用いた。ガス化剤として酸素と水蒸気を用い、原料を部分燃焼させることで、ガス化反応に必要な熱を供給する。さらに、ガス化剤に空気をを用いないことで、生成ガス組成の窒素による希釈を回避し、高品質な合成ガスを得ることができる。

ここで生成ガスの一部(熱量ベースで5 MW) は分岐され、冷却・ろ過・触媒改質を経て精製された(図5)。改質工程では、タールや重質炭化水素が水蒸気と反応し H_2 、 CO 、 CO_2 などの軽質ガスに転換される。この改質により生成ガス中の H_2/CO 比の調整が可能となり、フィッシャー・トロプシュ(FT)合成やメタノール、SNG、水素製造など多様な用途に適するガスが得られるようになった。

Oxy-steamガス化炉を用いたこの実証試験は9000時間にわたって実施され、液体バイオ燃料の製造における技術的な実現可能性を成功裏に実証した。

5 むすび

- (1) 流動床ガス化炉技術は、高効率・低環境負荷で多様な原料種を利用できるガス化プロセスである。
- (2) Lahti Energia社の空気式流動床ガス化炉では、既設微粉ボイラの燃料転換に貢献し、石炭消費量15%の削減に寄与した。
- (3) Stora Enso社の酸素-蒸気式流動床ガス化炉においては、多様なバイオマス原料を用いて酸素-蒸気式流動床ガス化炉の長期運用実証を行った。約9000時間の安定運転を通じて、高品質合成ガスによる液体バイオ燃料製造が可能であることを実証した。
- (4) 流動床ガス化技術は、バイオマスや廃棄物由来の合成燃料製造に有効な手段である。特に、持続可能な航空燃料(SAF)を含む低炭素型合成燃料の供給基盤として、カーボンニュートラル社会実現に貢献する。
- (5) 今後、さらなるスケールアップやプロセス最適化を進め、SAFやメタノール製造などで商業化への取り組みをさらに加速していく。

(参考文献)

- (1) 国際エネルギー機関(IEA), World Energy Outlook 2024 (2024), p.24, International Energy Agency.
- (2) 経済産業省, 令和5年度(2023年度)エネルギー需給実績(速報). 経済産業省ウェブサイト, 2024年11月22日, <https://www.meti.go.jp/press/2024/11/20241122001/20241122001.html>
- (3) Yasuo, O., Fumiko, Y., Phoumin, H., Study on the Biomass and Coal Co-Combustion in the ASEAN Region (2019), p. 40, Economic Research Institute for ASEAN and East Asia.

燃料評価モジュールによる CFB ボイラ発電設備向け流動不良・停止リスク評価技術

Development of Fuel Evaluation Module for Predicting De-fluidization in CFB Boilers

●大村 湧生*
Yusei OMURA

阿川 隆一*
Ryuichi AGAWA

鉄山 一州*
Isshu TETSUYAMA

加藤木 瞭*
Ryo KATOGLI

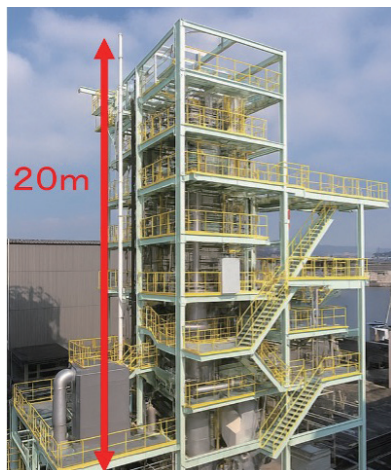


図1 CFBパイロット試験設備
CFB pilot-scale test facility

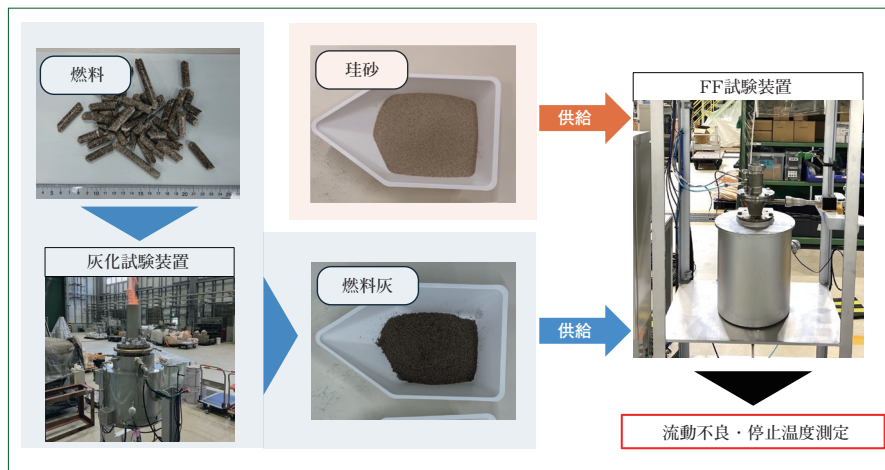


図2 燃料評価モジュールの装置構成と試験概要
Schematic of fuel evaluation module and overview of test procedure

1 はじめに

当社では脱炭素社会実現への貢献として、エネルギー＆ライフラインセグメントミッションの「資源とのあたらしいつきあいかたを創り出し、環境をひきかえにしない豊かさを。」をもとにCO₂および廃棄物を削減し、環境にやさしい「ゼロ」未来に向けて、世界および国内トップシェアのCFB（Circulating Fluidized Bed：循環流動層）ボイラ発電設備を提供している。

近年、カーボンニュートラル社会を推進すべく再生可能エネルギーのさらなる導入拡大が求められている。なかでも、カーボンニュートラル燃料として位置づけられるバイオマス燃料を活用したバイオマス発電は、化石燃料への依存を低減しつつ安定電源としても機能し得ることから、多様な産業分野においてその利用が進んでいる。また、燃料調達コストの観点から、低品位バイオマス燃料のCFBボイラ発電設備への適用も進んでいる。しかし、低品位バイオマス燃料に多く含まれるアルカリ金属成分（Na, K）は、流動材（珪砂）の表面で低融点物質を生成し、大きな塊となるアグロメレーションなどによる流動不良・停止を引き起こす要因となる。この流動不良・停止は計画外停止に直結する重大リスクであることから、事前評価が不可欠である。

今回、流動不良・停止リスクを少量の燃料で迅速に評価することが可能な「燃料評価モジュール」を開発した。

2 従来の流動不良・停止リスク評価方法

図1に、CFBパイロット試験設備を示す。

当社ではこれまで、流動不良・停止リスクの評価方法としてCFBパイロット試験機を活用してきた。CFBパイロット試験機は、流動不良・停止リスク評価のほか排ガス性状、灰性

状、腐食摩耗傾向など多面的なリスクを評価できる装置である。

さらに、実機で実際に使用する燃料や流動材を用いて燃焼試験を実施できることから、流動不良・停止リスクを信頼性高く再現することができる。

このパイロット試験では、数百kg/h規模の燃料を実際に投入して燃焼挙動を評価でき、複数燃料の混合条件を含めた詳細な燃料評価が可能である。しかし、試験準備から実施、さらに試験後の設備点検までを含めると、全体で6～12カ月という期間を要していた。

一方、流動不良・停止は、短期間で発生し得る極めて重大なトラブルであり、運転の継続性や設備の健全性に甚大な影響を及ぼすことから、燃料ごとの「流動状態の事前予測」と「リスク評価」を迅速に行う手法の必要性が高まりつつあった。

このような背景の下、限られた試料量で短期間に燃料由来リスクを把握できる新たな事前評価装置として燃料評価モジュールを開発した。

3 燃料評価モジュールの概要

燃料評価モジュールは2つの装置で構成される。

図2に、燃料評価モジュールの装置構成と試験概要を示す。

3.1 灰化試験装置

バイオマス燃料中のアルカリ成分（Na, K）の揮発を抑制する温度条件で燃料を灰化し、実機流動材表面に形成されるコーティング層の生成挙動を再現可能な燃料灰を作製する。得られた燃料灰は後段のFF試験に供し、流動不良・停止リスク評価に用いる。

3.2 流動不良評価装置（FF試験装置）

FF試験装置は、円筒容器・加熱ヒータ・流動ガス供給系で構成され、流動材を流動化しつつ燃料灰を供給し、昇温に

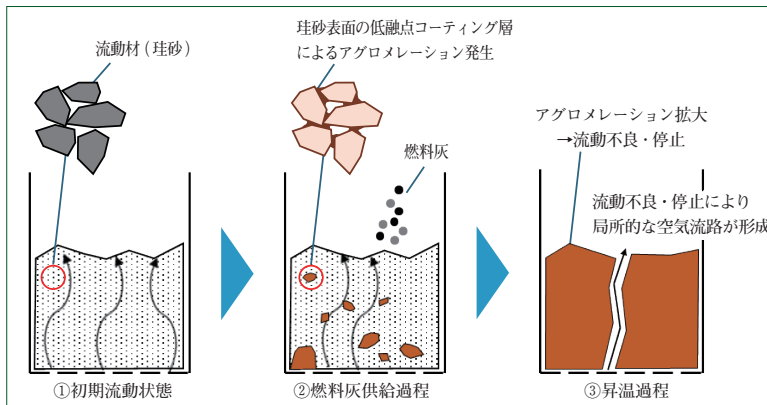


図3 FF試験機における事象の模式図
Schematic overview of phenomena observed in FF test

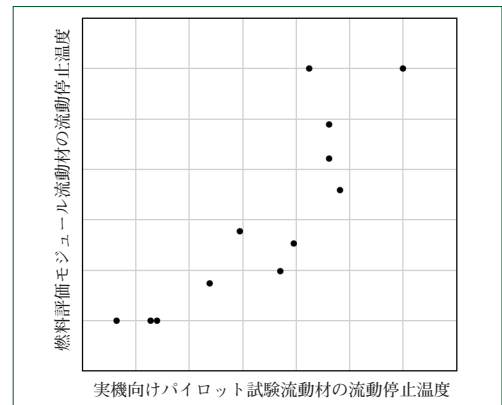


図5 実機向けパイロット試験機と燃料評価モジュール流動材の流動停止温度の比較
Comparison of de-fluidization temperatures of bed materials measured using fuel evaluation module and pilot-scale test facility

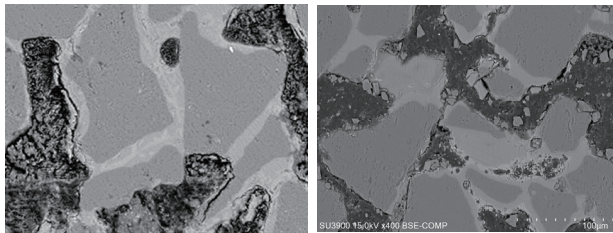


図4 SEM像 左：実機向けパイロット試験機流動材 右：燃料評価モジュール流動材
SEM micrograph Left: Bed material from pilot-scale test unit Right: Bed material from fuel evaluation module

に伴う流動不良・停止の発生を評価する。

試験手順を次に示す(図3)。

- ① 初期流動
所定温度で流動材を充填し、流動状態を確立する。
- ② 燃料灰の供給
燃料灰を一定量・一定間隔で供給する。
- ③ 昇温評価
昇温に伴い灰中アルカリが珪砂表面と反応し、低融点コーティング層が形成され、アグロメレーションが進行する。流動不良・停止が発生した温度を「流動停止温度」として記録する。

本モジュールの妥当性は、実機向けパイロット試験で採取した流動材を用い、FF試験結果との比較により確認した。

4 評価結果

4.1 SEM観察

図4に、SEM像を示す。

実機向けパイロット試験流動材および本モジュール流動材をSEM観察した結果、流動材表面に形成されたコーティング層が同等であることが確認された。これにより、本モジュールにおいて実機向けパイロット流動材での流動不良・停止の挙動を再現できることが認められた。

4.2 FF試験結果

図5に、実機向けパイロット試験機流動材の流動停止温度と、燃料評価モジュール流動材の流動停止温度の比較を示す。

燃料評価モジュールによる流動材の流動停止温度と、実機向けパイロット試験で採取した流動材の流動停止温度は良好な正の相関を示した。燃料の燃焼と流動材表面でのアルカリ

反応(コーティング層形成)とを分離した手法でありながら流動不良・停止の挙動を再現できることが明らかとなり、本モジュールの高い評価精度が確認され、流動停止温度を定量指標とするリスク評価が可能となった。

5 燃料評価モジュールによるプロセス改善の広がり

本モジュールは、CFBボイラ発電設備製品実現プロセスにおいて、次の4つの段階で活用方法が見出され、プロセス改善が進んでいる。

(1) 見積り応札段階

案件顧客に対し効率的に本モジュールで試験を実施し、重要な流動不良リスクを低減することで受注確度を向上させる。

(2) 調達・工事段階

受注工事段階の顧客による燃料変更に対して本モジュールで試験を実施し、顧客への引渡し時の流動停止を回避する。

(3) 引渡し後段階

既存の納入顧客への脱炭素(燃料転換)対応として本モジュールで試験を実施し、最適な燃料提案からサービス案件の実現拡大へつなげる。

(4) 案件発掘段階

新たな燃料に加え砂の評価結果を蓄積し、最適な燃料提案により見込み顧客を案件顧客へ変えて受注拡大へつなげる。

6 むすび

- (1) 少量燃料・短期間で流動材の流動不良・停止リスクを評価できる強力なツールとして燃料評価モジュールを確立した。
- (2) CFBボイラ発電設備における見積り応札段階における効率化だけでなく、強力なツール取得により、CFBボイラ発電設備製品実現プロセスの各段階において活用方法が見出され、プロセス改善が広がっている。
- (3) 当社では燃料評価モジュールをCO₂および廃棄物を削減し、環境にやさしい「ゼロ」未来の実現ために活用していく。

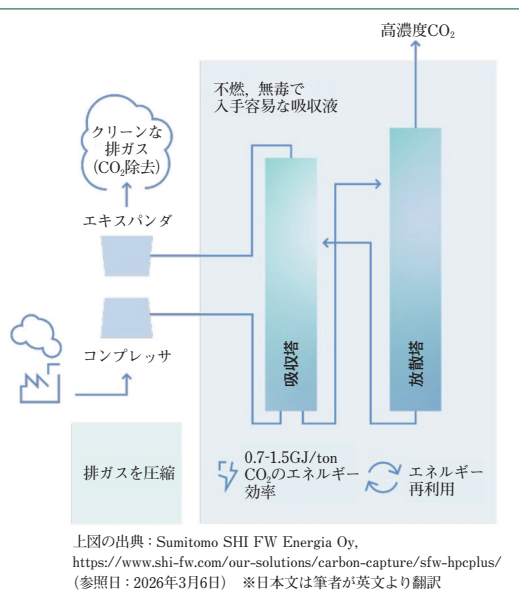
CO₂分離回収技術の背景と熱炭酸カリウム(HPC)方式の開発

Background of CO₂ Separation and Capture Technologies and Development of Hot Potassium Carbonate (HPC) Process

●田 岡 智 浩*
Tomohiro TAOKA



Sumitomo Heavy Industries Ltd. collaborates with Capsol Technologies to incorporate their patented CapsolEoP® heat recovery technology into SFW's HPC+ system



デモ機CapsolGo3ユニット外観とHPCフロー図
Demonstration unit CapsolGo3 Exterior and HPC flow diagram

1 はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向け、再生可能エネルギーの活用、省エネ対策および温室効果ガスの排出抑制など、さまざまな取り組みが世界的に進められている。特に発電所や鉄鋼・セメントといったCO₂排出の回避が困難な産業(Hard-to-Abate)では、排出されるCO₂を回収し、地中貯留やe-Fuel・持続可能な航空燃料(SAF：Sustainable Aviation Fuel)などへ有効利用するCCUS(Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)が重要な手段となっている。これは国内外の政府方針やCOP28の合意文書でも、カーボンニュートラル達成に向けた主要施策の一つとして位置づけられている。

当社では、バイオマスボイラの提供を通じてカーボンニュートラルに貢献しているが、当社の子会社 Sumitomo SHI FW (SFW) が所在する欧州では、さらに進んだ取組みとしてバイオマスボイラにCO₂を回収・貯留・有効利用するBECCUS(Bioenergy with Carbon Capture, Utilization and Storage)を組み合わせ、排出量より吸収量が上回るカーボンネガティブ技術としての活用検討が行われ、それを支えるカーボンクレジット制度が整備されつつある。

日本国内でも2026年4月から排出量取引制度(GX-ETS)が本格的に開始され、その算定にはGHG(Greenhouse Gas)プロトコルのSCOPEが採用されるなど、バイオマスボイラからのCO₂回収は有効な手段として注目されている。このような状況を踏まえ、当社では熱炭酸カリウム(HPC：Hot Potassium Carbonate)を用いた化学吸収法によるCO₂回収技術の開発に取り組むこととした。

2 HPC について

CO₂分離回収技術にはさまざまな方式があり、それぞれ特徴が異なる。代表的な方式と特徴を表1に示す。

このなかで最も商用化が進んでいる方式の一つが化学吸収法である。1960～70年代はこの化学吸収法のアミン方式とHPC方式が石油・ガス精製などの大規模プラントを中心に用いられてきた。アミン方式は吸収液へのCO₂吸収と加熱再生による温度操作を用いるのに対し、HPC方式は昇圧下で吸収液にCO₂を吸収した後、減圧操作によりCO₂を放出する圧力操作型のプロセスである。HPC方式の吸脱着反応は、



で表される。

その後、エネルギー効率で優位であったアミン方式が原油回収率向上(EOR：Enhanced Oil Recovery)での活用やCCUS・BECCUSを目的とした実証や商用プラントで主に採用されてきた。しかし近年、HPC方式は、圧力操作を担う部分に熱回収システムを組み合わせることで、高いエネルギー効率を実現できることが分かってきた。

また、アミン溶液は毒性と揮発性の高さから環境影響が懸念されるほか、溶液劣化による廃液増加や改良型アミンでの高価格化により運用コストが増大する傾向にある。一方HPC方式の炭酸カリウムは食品用途でも使用される物質であり、アミンと比べて環境負荷が低い。さらに劣化が少なく低コストで調達できる利点もある。

当社は、2023年よりCO₂回収方式の調査を進めてきたが、

表1 代表的なCO₂分離回収技術とその特徴
Major CO₂ separation and capture technologies and their characteristics

方式	排ガス圧力	回収CO ₂ 純度	分離回収方式	操作方法
物理吸収	高压	高純度	ガス中CO ₂ を高压液体に溶解	圧力変化
膜分離	高压	低純度	膜にガスを透過し透過速度でCO ₂ を選択分離	圧力変化(昇圧)
化学吸収	低压	高純度	CO ₂ と反応・吸収する溶液を用いてCO ₂ を選択分離	温度・圧力変化
物理吸着	低压	低純度	固体の吸着材にCO ₂ を吸着させ圧力変化によりCO ₂ を分離	圧力変化

当社製バイオマスボイラとの親和性、ガス条件、回収量、そして前述の利点を踏まえてHPC方式を採用することとした。なお、バイオマスボイラ排ガスを対象としたHPC商用機の報告はないため、まずはデモ機による評価を目的に研究開発を開始した。

3 開発概要と結果

2023年12月、当社とSFWによる共同研究としてHPC方式のデモ試験を実施することで合意した。欧州はCCUSやBECCUSに関する導入事例が国内に比べて多く、具体案件も複数進行していることから、SFWが納入したスウェーデンの2ヶ所の発電所にCO₂回収装置および液化装置のデモ機を設置し、試験を行った。

デモ機はノルウェーのCapsol Technologies社製CapsolGo 3ユニットをリースした。同社はこの分野のフロントランナーであり、自社技術のCapsolGoユニットを用いて、CO₂回収のエネルギー効率向上、CAPEX (Capital Expenditure：設備投資費)およびOPEX(Operating Expenditure：運転費・運営費)の削減、さらにはプロセス全体の性能向上を目的としたデモ試験を実施し、HPCの商用スケール機への展開を進めている。デモ機の設計・製作、現地オペレーション、遠隔監視は当社が担当した。遠隔運転を併用し省人化、試験時間短縮、運転安定性およびデータ精度の向上を図った。当社は試験計画の立案とデータ評価・考察を担当した。試験中は関係者で定例のオンライン会議を実施し、情報共有を密に行うことでスムーズな試験運営を実現すべく連携して取り組んだ。

試験の概要を次に示す。

- (1) 試験の実施期間・場所
 - ・2024年7～10月 Växjö Energi社(バイオマスボイラ)
 - ・2024年11月～2025年4月 Mälarenergi社(廃棄物ボイラ)
- (2) 主な試験内容
 - ・圧力、ガス量、吸収液循環量など性能に関わるパラメータ変更
 - ・フラッシュシステムの有無
 - ・炭酸カリウム溶液特性の変化
- (3) 考察項目
 - ・CO₂回収率やエネルギー効率
 - ・回収ガス中の不純物分析
 - ・吸収液が装置へ与える影響
 - ・基本設計に用いるシミュレーションモデルの妥当性検証

試験開始当初はデータ監視や機器不具合、プラント安定性などに問題が発生したが、それも1ヶ月程度で解消した。そ

表2 HPC方式のデモ試験結果
Demonstration test results of HPC process

項目	アミン方式	HPC方式
CO ₂ 回収率(%)	90以上	90以上 ^{*1}
エネルギー効率(GJ/t CO ₂ CO ₂ 回収率90%以上)	2.5前後 ^{*2}	1.84 ^{*3}

- *1 95%以上を達成
- *2 最新のアミン溶液では2 GJ/t CO₂ 前半との報告がある
- *3 試験結果からの換算値で、試験中の最も高効率の数値

の後は順調に進み、当初の予想を大きく上回る条件数で評価を行うことができた。

試験の結果、HPC方式は一般的な目標である90%以上のCO₂回収率を達成するとともに、エネルギー効率もアミン方式と比較して十分に高いという結果を複数確認できた(表2)。回収CO₂の純度、不純物濃度から商用展開に向けた有用な知見が得られた。また、吸収液が装置に与える影響も認められなかった。シミュレーションモデルについてもテスト結果と整合性が取れ、基本設計に活用できる見通しが得られた。さらに、SFWが実施した最新のOPEX試算では、アミン方式より優れた経済性を示す例が見られた。

4 おわりに

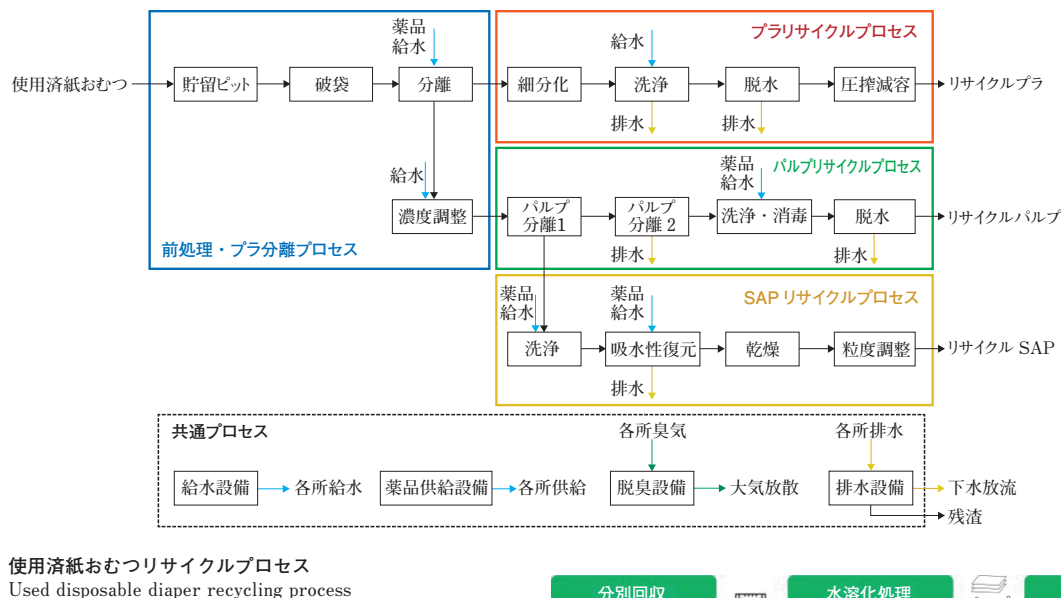
- (1) カーボンニュートラル社会の実現に向け、CO₂回収技術としてHPC方式の開発を進めた。アミン方式に比べ環境負荷やOPEX面で利点があり、エネルギー効率も比較的高い。2024～25年に欧州2拠点でデモ試験を実施し、CO₂回収率90%超、エネルギー効率も想定以上の良好な結果となり今後有益となるデータや知見を得ることができた。
- (2) 試験を通じて得られた知見に基づき、SFWはCCUS・BECCUSやe-Fuel/SAF向けの基本設計(FEED：Front-End Engineering Design)に着手し、当社ではCO₂回収技術のFS(Feasibility Study)へ進んでいる。ボイラ排ガスを対象としたHPC商用機に向けて、また他方式も改良が進むと予想されることから、今後はさらなる改良と商用機実績の積み上げをめざしていく。

地球温暖化抑制に向けた社会的要請は今後さらに高まると考えられ、CO₂分離回収技術の重要性は増す一方である。当社としても、HPC方式を含むCO₂回収技術の開発・適用を今後も積極的に進めていく所存である。

使用済紙おむつのマテリアルリサイクル技術

Material Recycling Process for Used Disposable Diapers

● 安 村 宜 之*
Yoshiyuki YASUMURA



1 はじめに

高齢化社会が進むにつれ、介護の必需品である紙おむつの使用量が年々増加しており、一般廃棄物発生量に占める割合は乳幼児用と合わせて2030年度には7%程度になると予想されている。

現在、使用済紙おむつのほとんどは焼却処理されており、最終処分量の削減や資源の有効活用の観点から、リサイクルの推進が課題となっていた。

しかし「回収体制の整備不足」「予算・費用の確保」「汚物の付着に伴う衛生的・心理的な問題」「複合素材が持つ分離・選別の難しさ」「リサイクル品の受入れ先が限定される」「リサイクルコストがかさむ」などが普及の阻害要因となっている。

環境省は、2024年の「第五次循環型社会形成推進基本計画」⁽¹⁾で、2030年までにリサイクル利用の実施、検討を行った自治体数を150にするという数値目標を掲げ、自治体に対して専門家によるコンサルティングや実証支援（伴走支援）を行っている。

住友重機械エンバイロメント株式会社(SHI-EV)は、トータルケア・システム株式会社、TOPPAN株式会社との3社協業で2019年に使用済紙おむつリサイクルシステムの構築を開始し、回収・処理・再製品化に継続的に取り組んできた。

SHI-EVはリサイクル施設の設計・施工を役割とし、株式会社日本触媒を加えた4社連携体制の下でおむつを構成する主要3素材の「パルプ」「高吸水性樹脂(SAP)」「プラスチック(プラ)」のすべてをリサイクルできる新しいマテリアルリサイクルプロセスを構築するとともに、CO₂排出削減効果のLCA(ライフサイクルアセスメント)を実施した⁽²⁾⁽³⁾。

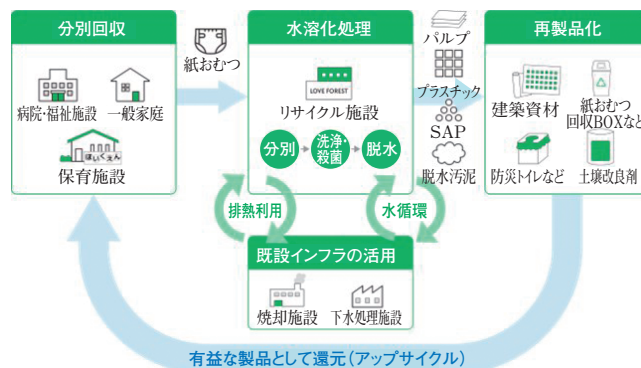


図1 使用済紙おむつマテリアルリサイクルシステム
Used disposable diaper material recycle system

2 使用済紙おむつのリサイクルシステムの概要(図1)

2.1 プロセスの特長

本プロセスはTCSが2005年より運営しているパルプリサイクルプロセス(処理能力20t/d)を基盤としている。これは使用済紙おむつに対して多くの水を利用して分離・洗浄を行うプロセスで、水溶化処理と称し、排水処理設備の処理水を再利用して排水量を削減している。このプロセスの効率化を図るとともに、SAPとプラのリサイクルプロセスを加えた主要3素材のすべてをリサイクル可能とした。

また、大量の水の使用と排出を考慮し、下水処理水を再利用して排水を下水放流(下水連携)したり、焼却施設の排熱を乾燥などの熱源として活用(焼却連携)することで既存インフラと連携し、衛生面・コスト面・環境面の課題を改善している。

2.2 リサイクル素材の活用用途

図2に、リサイクル素材の活用用途を示す。リサイクル素材を活用して製造された各種製品は、図2の用途で地域社会に還元され、住民の環境意識の醸成や行動変容を促す効果が期待できる。

リサイクルパルプ	リサイクルSAP	リサイクルプラ
建材(内装,外壁材), トイレトーパー	災害用トイレ, 土壌改良材など	資源回収ボックス, 紙おむつ専用回収袋など
		

図2 リサイクル素材の活用用途
Proposed upcycling opportunities for recycled materials

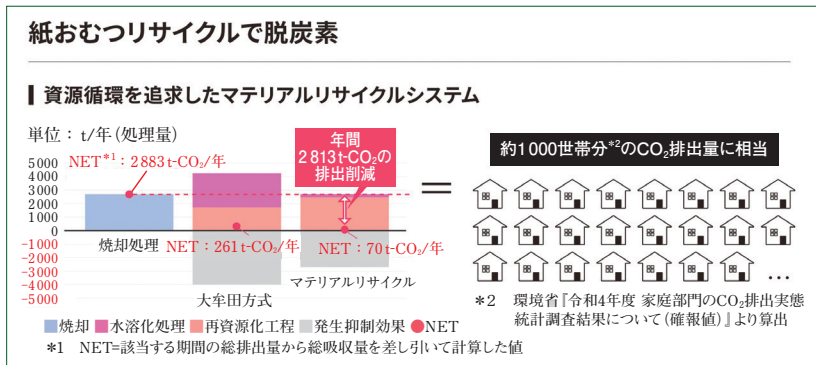


図3 使用済紙おむつリサイクルのCO₂排出量削減効果
CO₂ emission reduction effects of used disposable diaper recycling

2.3 使用済紙おむつリサイクルプロセス

使用済紙おむつのSAPは、し尿由来の汚濁成分と水分を吸収しており、パルプとプラには汚濁成分が付着している。それらは病院、介護施設、保育園などから丸められた状態で収集袋に入れられ、リサイクル施設に搬入されて冒頭の図に示したプロセスでリサイクルすることができる。

2.3.1 前処理・プラ分離プロセス

使用済紙おむつを受け入れ、破袋装置で中身をバラバラにした後に分離装置に投入し、再利用水を用いて所定の濃度に調整する。スラリー状になったものに多価金属塩を添加し、混合攪拌してSAPと多価金属塩を効率的に反応させ、吸収した水や汚濁物を放出(脱水)し脱水SAPとする。

その結果、脱水SAPとパルプは混合状態で過分離され、ろ過されないプラは別途回収される。

次にパルプと脱水SAPの混合物に再利用水などを加え、分離プロセスに適合する濃度にまで調整する。プラについても同様にリサイクルに必要な処理を加える。

2.3.2 パルプリサイクルプロセス

脱水SAPはパルプより比重が大きいため、この差を利用してパルプ分離装置により脱水SAPとパルプに分離され、脱水SAPはリサイクルプロセスへと移送される。

分離されたパルプは、さらに選択的に分離できる2段階目のパルプ分離装置により、残留するプラやSAPなどの異物を分離(精製)する。精製されたパルプは清水による洗浄と消毒を経て脱水され、リサイクルパルプとなり、シート状あるいはバラ状態で出荷される。パルプ、脱水SAP以外の成分はほかの排水と併せて分離され、脱水後に残渣となる。

2.3.3 SAP リサイクルプロセス

一般的に紙おむつに使用されるSAPの多くは、網目状の分子構造を持つポリアクリル酸(塩)系架橋ポリマーであり、網目構造が膨らむことで多量のし尿を吸水する能力を有している。前処理で多価金属塩と反応した脱水SAPはこの吸水性が失われているので、これを再利用可能な状態に戻すべく次の2段階のプロセスでリサイクルされる。

- ① 脱水SAPの汚濁成分除去を目的に、清水による洗浄で汚濁成分の分離操作を行う。
- ② 脱水SAPの吸水性を回復・復元する処理を行うことで、新品と同等の吸水性能を持つ高含水のゲル状SAPを得ることができる。

この高含水のゲル状SAPは非常に乾燥が難しい物質であることから、プロセスと機器に種々の対策を講じて乾燥・粒度

調整した後、優れた吸水性を持ったリサイクルSAPとなる。

2.3.4 プラリサイクルプロセス

分離装置にかけられた破袋プラは形状が様々でなく、そのままでは移送・分離・脱水に適さないため破碎して細分化し、洗浄・分離・脱水プロセスを経て汚濁成分が除去され、含水率を低減した細分化プラとなる。これを高圧で圧搾減容化することにより、有用性の高いプラ製品にリサイクル(アップサイクル)可能な原料となる。

2.3.5 共通プロセス

下水および焼却連携の設備や脱臭設備を備えており、リサイクルプロセスで発生する汚濁負荷の低い排水を循環水として再利用し、排水量を削減している。

3 CO₂排出量のLCA結果⁽²⁾⁽³⁾

本システムのCO₂排出量削減効果を焼却処理した場合と比較すると、年間5000t処理した場合で2813t-CO₂/年(一般家庭の約1000世帯分)である(図3)。

4 おわりに

- (1) 使用済紙おむつからのパルプ、SAP、プラ3素材のマテリアルリサイクルにおける基本プロセスを構築した。
- (2) 施設規模やリサイクル品の用途、リサイクルコストなどを総合的に考慮し、リサイクル対象と処理能力を多様化させた各種提案により、事業化提案を継続している。
- (3) 本プロセスは、従来の焼却処理に代わる持続可能な選択肢であり、CO₂排出削減という環境的価値だけでなく、既存インフラの有効活用や地域のリサイクル教育といった社会的価値も提供している。

プロセス構築等で連携したトータルケア・システム株式会社、TOPPAN株式会社、株式会社日本触媒の関係者に感謝する。

(参考文献)

- (1) 環境省、循環型社会形成推進基本計画～循環経済を国家戦略に～、環境省、2024、<https://www.env.go.jp/content/000242999.pdf> (参照日：2026年3月10日)。
- (2) 李 雅娟、松本 亨、藤山淳史ら、使用済み紙おむつの水溶化処理によるマテリアルリサイクルのライフサイクル評価、LCA学会研究発表会講演要旨集、令和7(2025)年3月、162-163(ページ番号：1D2-01)。
- (3) 住友重機械工業株式会社、使用済紙おむつマテリアルリサイクルにおけるCO₂排出削減効果の算出結果について、住友重機械工業株式会社、<https://www.shi.co.jp/info/2025/6kgpsq000000nukj.html> (参照日：2026年3月10日)。

プライムカーボン(リン吸着バイオ炭)を用いた下水からのリン回収および炭素貯留技術

Phosphorus Recovery and Carbon Storage Technology from Sewage Using Phosphorus-Adsorbed Biochar

●田 口 真太郎*
Shintaro TAGUCHI



開発技術のコンセプト
Development technology concept
※図は株式会社フジタに許可を得て掲載

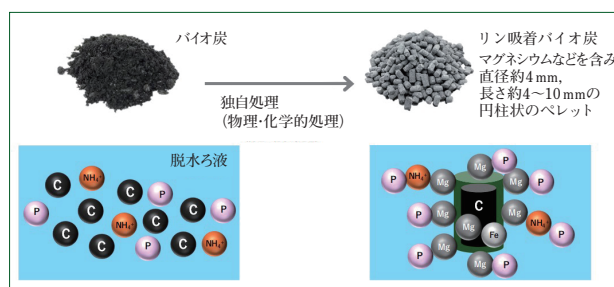


図1 リン吸着バイオ炭とメカニズム
Phosphorus adsorption biochar and mechanism

1 はじめに

近年、ウクライナ情勢などの地政学的リスクや、世界的なパンデミック、急激な円安などの影響により日本の食料安全保障は大きな脅威にさらされている。

現状では日本の食料自給率(カロリーベース)は4割以下であり、生産資材である化学肥料の原料(リン、カリウムなど)はほぼ全量を、家畜飼料も大部分を輸入に依存しているという脆弱な構造である。この危機的な現状を打破すべく、食料安全保障強化政策大綱では「過度な輸入依存からの脱却」と「環境に配慮した持続可能な農業への転換」を大きな柱として打ち出した。そして堆肥・下水汚泥資源の肥料利用を倍増させ、2030年までに肥料(リンベース)に占める国内資源の利用割合を40%まで拡大するという明確な国家目標が設定された。

これに連動し国土交通省は、これまで主に焼却・埋立て処分やバイオガスエネルギー利用が中心だった下水汚泥の処理方針を「肥料化の最優先・最大限の利用を行うこと」という方向へ大転換した。下水汚泥資源に豊富に含まれるリンを効率良く回収し、安全な肥料として利用するための施設整備や民間ノウハウの活用促進を目指し、2023年3月17日付け国水企第99号において自治体などに対する技術的な助言を提示した。

本報では、これらの課題を解決すべく、国土交通省が主導する下水道革新的技術実証事業(B-DASH プロジェクト)において採択された実証事業(以下、本実証事業)について報告する。この技術は、木質バイオマスガス化発電由来のバイオ炭もしくは下水汚泥由来の汚泥炭を原料としたリン吸着バイオ炭(プライムカーボン)を用い、下水処理場の脱水ろ液からリンを回収して、安定的かつ経済的に下水汚泥資源の肥料利用を図るものである。

2 リン回収技術と実証事業概要

2.1 プライムカーボン概要

プライムカーボンとは、株式会社フジタが独自に開発した革新的なバイオ炭をいう。木質バイオマスガス化発電の副生物であるバイオ炭もしくは下水汚泥炭化物に、マグネシウムや鉄を混合して特殊処理を施し、ペレット状に成型されたものがプライムカーボンである。ペレット化することで水中での流出を防ぎ、リン酸イオンの選択的な吸着回収が可能となる(図1)。故にハンドリングも向上する。

リンを吸着したバイオ炭はリン含有バイオ炭(プライム肥料)としてそのまま肥料利用するか、さらに家畜糞尿に腐熟促進材として混合し、リン含有バイオ炭混合堆肥(プライム堆肥)として肥料や土壌改良材に利用される。

2.2 B-DASHプロジェクトにおける実証事業の概要(図2)

本実証事業は、株式会社フジタを代表機関とし、住友重機械エンバイロメント株式会社(SHI-EV)、国立大学法人東北大学、国立研究開発法人国際農林水産業研究センター、福山市で構成される共同研究体として、2023年度補正予算採択事業の枠組みで開始している。

実証フィールドは福山市にある松永浄化センター(下水処理施設)とし、敷地内に汚泥炭化設備、リン吸着バイオ炭製造設

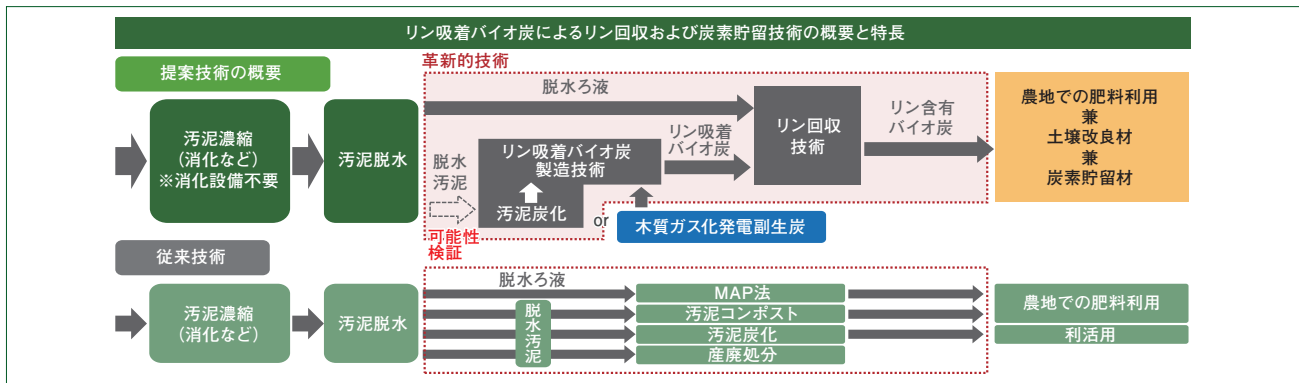


図2 B-DASH プロジェクトにおける実証事業の技術概要
Technical overview of B-DASH demonstration project

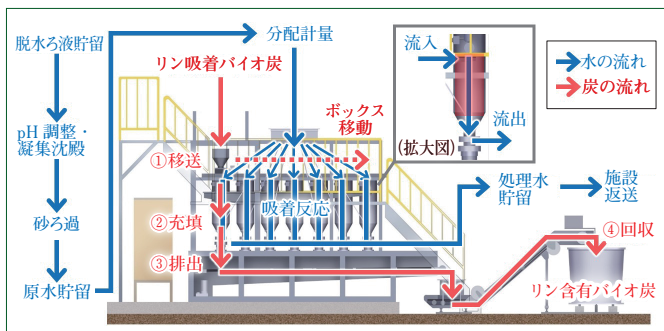


図3 リン回収設備の概要
Overview of phosphorus recovery equipment



図4 リン回収棟とリン回収設備
Phosphorus recovery building and phosphorus recovery facility system

備、リン回収設備を整備して実証研究を行っている。SHI-EVの所掌としては、既設処理場における接続方法の計画・設計、リン回収設備に対する省コスト化の検討である。

本実証事業の検証事項を次に示す。

- ・バイオ炭から製造したリン吸着バイオ炭の使用による下水からのリン回収の実証と省コスト化の推進
- ・リン含有バイオ炭の肥効実証および農地から発生する温室効果ガス発生量の解析
- ・リン含有バイオ炭を使用した農地土壌における肥料成分などの動態解析

2.3 リン回収装置の概要

図3に、リン回収装置の模式図を示す。リン吸着バイオ炭製造設備で製造されたリン吸着バイオ炭は、貯留ホッパを経由し、吸着反応槽に充填される。吸着反応槽で脱水ろ液を一定時間通水させることでリンが吸着され、リン含有バイオ炭となる（図中の赤線）。リン回収率の向上と安定化を考え、反応槽は多連反応槽式を採用し、時間差でリン吸着バイオ炭を交換する方式となっている。

脱水ろ液は、前処理装置でろ液中に含まれるSS分（浮遊物質）の除去とpH調整を行い、分配計量槽から各吸着反応槽へ均等通水され、その処理水は下水処理施設へ返送される（図中の青線）。

製造されたリン含有バイオ炭は、水切りを行った後に回収され肥料や土壌改良に利用される。本設備は24時間連続稼働し、夜間は無人で自動運転を行っている。

2.4 実証試験状況

2024年度に汚泥炭化設備、リン吸着バイオ炭製造設備およびリン回収設備が建設され（図4）、2025年度から実証試験を開始した。木質バイオマスガス化発電副生炭を原料としたリ

ン含有バイオ炭については肥料登録を終え、すでに一般農地で肥効実証を行っている。現時点の結果は良好で、従来の肥料と比較して、収量・温室効果ガス発生量ともに遜色がないことが確認された。2026年度は汚泥炭についても実証を行う計画である。

3 おわりに

- (1) 我が国の食料安全保障上の課題を踏まえ、下水汚泥資源を肥料として有効利用する技術開発について、実証事業(B-DASH)での取組みを紹介した。
- (2) 本技術の特長をまとめる。
 - ① 従来技術の薬剤を用いた晶析法ではなく、リン吸着バイオ炭による吸着法である。
 - ② 100mg/L以上のリンを含有する排水に適用可能である。
 - ③ 汚泥消化設備が不要である（＝低アンモニア濃度でも適用可）。
 - ④ 回収物は肥料だけでなく土壌改良や炭素貯留の効果も期待できる高付加価値製品である。
 - ⑤ リン吸着バイオ炭の原料として、脱水汚泥の炭化物を利用することで、汚泥処分費用の削減につながる。
 - ⑥ プライム堆肥の使用により、収穫量を減少させずに化学肥料使用量の削減が可能である。

本実証事業については、2024年から下水道展に出展し、多くの関心が寄せられており、2026年も出展を予定している。

SHI-EVは、今回紹介した株式会社フジタとの共同開発技術を通して、食料調達問題の解決、脱炭素社会の実現を目指すとともに、貴重な水資源を生かすことで社会・産業を支え、快適な生活・環境を創り出す「水環境を未来世代へつなぐ企業」を目指していく。

※「プライムカーボン」「プライム肥料」および「プライム堆肥」は、株式会社フジタの登録商標です。

分流式小規模下水道のAIによる雨天時流入水量予測

AI-Based Prediction of Wet-Weather Inflow Volume in Small-Scale Separate Sewerage Systems

● 鈴木 茂* 野口 直之*
Shigeru SUZUKI Naoyuki NOGUCHI

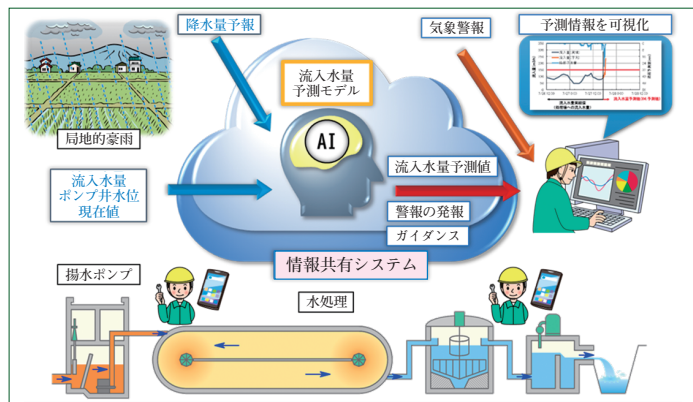


図1 情報共有システムの概要
Overview of information sharing-system

表1 対象施設概要
Overview of target facility

施設名	氷上中央浄化センター
排除方式	分流式
処理方式	オキシデーションディッチ法
晴天時1日最大処理量	3548m ³ /日 (平成30年下水道統計より)

1 はじめに

近年、ゲリラ豪雨や線状降水帯といった局地的・集中的な降雨はますます増加傾向にあり、分流式下水処理場においては、流入管渠などの老朽化により降雨時の浸入水量が増加し、施設浸水のリスクを高めている。特に、処理区域が複数点に在する地域の分流式下水処理場では、降雨時の対応に時間を要することから施設浸水のリスクはさらに高くなる可能性がある。これに対して、老朽化した施設でも容易に導入でき、大幅な改築更新を必要としないソフト面での対応策は一層重要度を増している。住友重機械エンパイロメント株式会社(SHI-EV)は、降水量予報値からAIを使って流入水量の増加を予測する技術を開発し、実運用での評価を行ったのでここに報告する。

2 流入水量予測技術の開発および評価

2.1 情報共有システム

流入水量を予測するAIは、図1に示す情報共有システムに内蔵される。本システムに送られてくる下水処理場に関する情報と気象会社からの情報、さらにAIによる予測情報は下水処理場関係者と共有され、いつでも確認することができる。流入水量の増加によって下水処理場の浸水リスクが閾値を超えると予測された場合には、警報および運転支援ガイダンスが発報され、下水処理場関係者は実際に流入水量が増加する時刻や施設の保全に必要な操作内容を把握することができる。

2.2 対象下水処理場

表1に、予測対象の下水処理場の概要を示す。本下水処理場のある丹波市は、近年増加する大規模で突発的な降雨による施設浸水をリスクとして警戒している。しかし、局所的・集中的な降雨時の異常流入水量に対して、流入ゲートの自動制御およびハード面での対策は有効としながらも、高額な費用と時間を費やすという課題があった。

そこで、多くの既存施設でも容易に導入でき、大規模な改築更新を必要としないソフト面での対応策の確立が急務とな

る。特に、市内広域に複数点に在する小規模下水処理場は、休日・夜間は無人となる施設が多く、緊急時の体制構築に時間を要したり、出動の優先順位付けが難しいことから雨天時浸入水量予測はさらに重要である。

2.3 流入水量予測技術概要

浸入水量予測に必要なAIモデル構築には、汎用ソフトウェアを用いた。予測に必要なデータは下水処理場への流入水量実績値および気象会社からの降水量予報値といった比較的入手が容易なデータのみである。体制の構築に必要な時間は50分であったが、10分の余裕を加味して60分後の流入水量を予測した。学習には、2021年4月～2023年6月のデータを用いた。構築したAIモデルは、2023年7月～10月のデータを使用して実運用の評価を行った。

2.4 評価指標および目標

AIで予測された流入水量は、3種類の指標により評価を行った(表2)。警報発報時間差は、短時間大雨(表3)と短時間大雨以外とに分けて、短時間大雨以外を評価対象とし、降雨時の体制構築に必要な50分以上を指標とした。短時間大雨は、降水量予報値の精度が高くないことから参考値とした。各指標の目標は、気象警報・注意報で雨天時対応を行っていた従来の施設管理方法による場合の値以上(または以下)とした。

3 結果および考察

評価期間に流入水量実績値が閾値を超えた日時と降雨種類を表4に、評価期間全体の流入水量の実績値・予測値ならびに降水量実績値を図2に示す。また、流入水量実績値が閾値を超えた代表的な結果として2023年7月9日、8月14日の流入水量の実績値・予測値ならびに降水量実績値を図3に、評価指標の目標達成状況を表5に示す。

評価期間中の閾値超は12回発生し、その内訳は短時間大雨以外3回、短時間大雨9回であった。3回のうち2回の短時間大雨以外において警報発報時間差は50分以上であり、その割合は66.7%で目標を達成した。見逃しは閾値超12回に対して

表2 評価指標および目標
Evaluation metrics and targets

評価指標		目標
項目	内容	
警報発報時間差50分以上 (短時間大雨以外)	流入水量実績値が閾値を超えた時刻とAIが閾値超を予測した時刻との差が50分以上であった閾値超回数の割合	60%以上 (従来 ^{*1} : 17%)
見逃し率	実際には閾値を超える流入水量があったが流入水量予測値は閾値を超えず警報を発報しなかった確率	52%以下 (従来 ^{*1} : 52%)
空振り率	流入水量予測値が閾値を超え警報を発報したが流入水量実績値が閾値以内であった確率	69%以下 (従来 ^{*1} : 69%)
警報発報時間差30分以上 (短時間大雨) [参考]	流入水量実績値が閾値を超えた時刻とAIが閾値超を予測した時刻との差が30分以上であった閾値超回数の割合	[50%以上] ^{*2} [[従来 ^{*1} : 20%]]

*1 従来: 気象警報・注意報により雨天時対応を行っていた施設管理方法 *2 []内は参考

表3 短時間大雨の定義
Definition of short-duration heavy rainfall

①降り始め(10mm/h以上)からピークまでの時間	30分以内
②降り始めから降り止み(10mm/h未満)までの時間	120分以内
③10mm/h以上の降雨からの経過時間	60分以上

以上3つの条件をすべて満たす場合、短時間大雨と定義する。

表4 評価期間の閾値超日時
Threshold-exceedance date-times during evaluation period

No.	日時	降雨種類
1	2023/7/8 21:40	短 ^{*3}
2	2023/7/9 2:20	短
3	2023/7/9 8:10	短
4	2023/7/19 17:30	短
5	2023/7/28 17:30	長 ^{*4}
6	2023/8/14 23:50	長
7	2023/8/15 9:30	長
8	2023/8/21 19:10	短
9	2023/8/26 20:40	短
10	2023/8/27 17:30	短
11	2023/8/28 17:50	短
12	2023/9/8 0:10	短

*3 短: 短時間大雨 *4 長: 短時間大雨以外

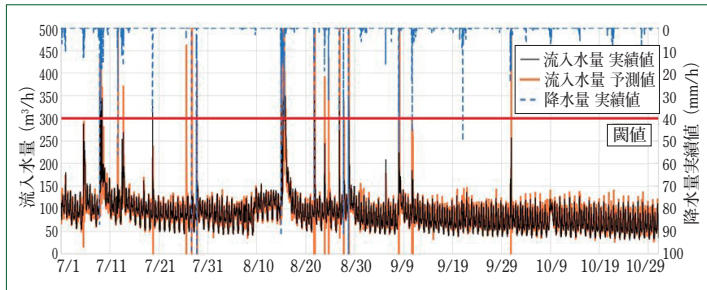


図2 評価期間全体の流入水量の実績値、予測値ならびに降水量実績値
Actual and predicted influent flow and actual precipitation over entire evaluation period

表5 評価指標の目標達成状況
Target attainment status for evaluation metrics

評価指標	結果	目標	目標達成状況
警報発報時間差50分以上 (短時間大雨以外)	66.7% (=2/3)	60%以上	達成
見逃し率	25% (=3/12)	52%以下	達成
空振り率	55% (=11/20)	69%以下	達成
警報発報時間差30分以上 (短時間大雨) [参考]	[83.3% (=5/6)] ^{*2}	[50%以上]	[達成]

*2 []内は参考

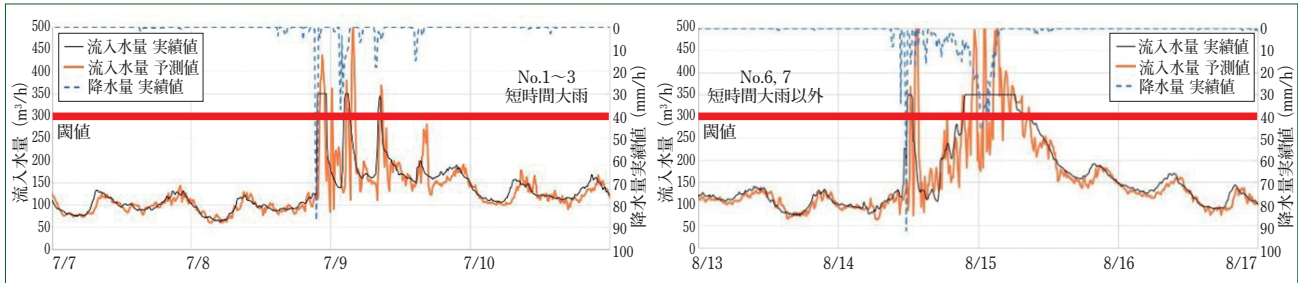


図3 閾値超日時の流入水量の実績値、予測値ならびに降水量実績値
Actual and predicted influent flow and actual precipitation at threshold-exceedance date-times

3回(いずれも短時間大雨)であり、見逃し率は25%で目標を達成した。空振りは11回発生したが、警報を発報した閾値超9回に空振り11回を加えた20回に対して11回であり、空振り率は55%で目標を達成した。短時間大雨の警報発報時間差30分以上の割合は参考値であるが、9回の短時間大雨から見逃し(3回)を除いた6回に対して5回であり、その割合は83.3%で目標を達成した。

本技術は従来の気象警報・注意報より浸水リスクの大きい流入水量到達を高精度に予測できるので、従来の管理手法より待機時間が削減でき、余裕のある人員配置計画や現場作業が可能となる。

4 おわりに

(1) 汎用ソフトウェアを用い、入手が容易な下水処理場への流入水量実績値および気象会社からの降水量予報値の

みを入力データとし、約2年半分のデータから1時間後の流入水量を予測するAIモデルを構築することができた。

(2) 本技術は、従来の気象警報・注意報より高精度で流入水量到達を予測できることから、待機時間の削減や余裕のある人員配置、現場作業の効率化を実現した。

今後もデータを蓄積し、AIによる予測精度の向上に取り組むとともに、小規模下水以外にも適用範囲を広げ、雨天時浸入水による下水処理場の被害軽減に取り組んでいきたい。

本開発は、国土交通省の令和3年度下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)に採択された「分流水下水道の雨天時浸入水量予測及び雨天時運転支援技術に関する実証事業」により実施した。ご指導いただいた国土技術政策総合研究所、共同研究体の丹波市ならびに関係者各位に感謝の意を表す。

112MW級バイオマス専焼発電設備

112MW Dedicated Biomass-Fired Power Boiler



地球温暖化対策の強化が国際的に求められるなかで温室効果ガス、とりわけ二酸化炭素(CO₂)の排出削減は、エネルギー分野における最重要課題となっている。近年は石炭を主体とする化石燃料から脱却すべく、カーボンフリーもしくはカーボンニュートラルなエネルギー源への転換が世界的に加速している。特にバイオマスは再生可能資源であり、燃焼時に排出されるCO₂は成長時に吸収されたCO₂に由来することからカーボンニュートラルとみなすことができ、持続可能なエネルギーシステムを構築するうえで重要な選択肢として位置付けられている。

2050年カーボンニュートラル宣言やGX(グリーントランスフォーメーション)政策の下、日本においても再生可能エネルギーの導入が進められ、なかでも再生可能エネルギーの固定価格買取制度(FIT/FIP)はバイオマス発電の普及を後押しし、すでに既存の火力発電設備でもバイオマスを混焼・専焼する取組みが全国的に拡大している。さらに近年、バイオマス利用は従来の「化石燃料の一部を置き換える」という段階から、燃料の安定調達・サプライチェーンの強化、カーボンネガティブを目指したBECCS(Bioenergy with Carbon Capture and Storage)への展開など、より高度で戦略的なフェーズに入りつつある。今後も技術開発や燃料の多様化、地域資源の活用を通じて、バイオマスエネルギーの重要性は一層高まると考えられる。

112MW級バイオマス専焼発電設備は、仙台港バイオマスパワー合同会社(住友商事株式会社、住友商事東北株式会社、北陸電力株式会社、プロミネットパワー株式会社出資)向けの木質ペレットを主燃料とする木質バイオマス専焼の発電設備である。

当社は、循環流動層(CFB)ボイラおよび補機的设计・製作・建設を日揮株式会社より受注し納入した。ボイラ蒸発量は370t/h、発電出力は112MWで、年間発電電力量は約8億kWh、

一般家庭約26万世帯分の電力供給に相当し、木質バイオマス専焼の発電設備として国内最大級の出力規模を有する。

再生可能エネルギーである木質ペレットを主燃料として蒸気再熱システムを組み合わせ、燃焼効率に優れたCFBボイラによって、高効率かつCO₂排出抑制に配慮した発電設備となっている。

2022年4月より当社所掌のボイラ設備工事に着手し、2025年11月から商業運転を開始した。当社は本製品を通じて、今後もカーボンニュートラル・資源循環型社会の実現および地球環境の保全に貢献していく。

主要仕様

ボイラ形式	循環流動層(CFB)ボイラ
主燃料	木質ペレット、PKS、木質チップ
発電出力	112MW
最大連続蒸発量	370t/h
主蒸気温度	541℃
主蒸気圧力	12.8MPa

特長

- (1) 化石燃料を使用しないバイオマス専焼の発電設備である。
- (2) バイオマス専焼設備として国内最大級となる112MWの発電出力を有する。
- (3) CFBボイラの採用による高い燃料適応性を持つ。
- (4) 炉内脱硝・脱硫による優れた環境性能を有する。
- (5) カーボンニュートラル社会の実現に貢献する発電設備である。

(エネルギー環境 SBU 加畑 裕志)

INITIATIVES

取組み紹介

NEW PRODUCTS

新製品紹介

ソフトウェア人材育成

Software Engineering Capability Development

● 長 井 健太郎*
Kentaro NAGAI

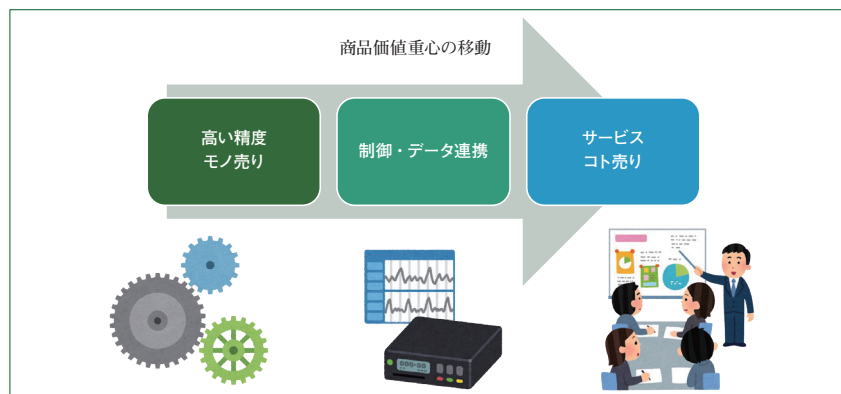


図1 商品価値の重心はソフトウェアを使ったサービス・コト売りへとシフトしている
Core of product value is shifting toward software-driven services and experiential value

DX時代の潮流とともに、当社グループの製品価値は精度や完成度の差（モノ売り）だけで決まるという枠組みを超え、制御の賢さ、データ連携の滑らかさ、そして運用まで含むサービス体験（コト売り）で判断される段階に入っている（図1）。製品を「売って終わり」ではなく、継続的に価値を提供するサービスとして捉えることが近年のビジネスの共通認識になりつつある。DX時代のサービスを支えるソフトウェアで重要なことは、全体が一貫してアップデートを進め、運用・保守・改良という長いライフサイクルでその価値を提供し続けることである。

1 ソフトウェア人材育成の課題

当社グループにおいては機械系技術者が大半を占め、ソフトウェア技術者が少なかったこともあり、システム全体の組立て方（アーキテクチャ）やテスト手法といった、品質を保つための基礎を体系的に学ぶ機会には十分であったとは言い難い。その結果、設計やレビューが個人の経験や手法に依存しやすく、要求・設計・コードの間に生じた食い違いが見逃され、後の工程で不具合が発覚して手戻りになり得る。さらに、修正しにくい設計は仕様変更や機能追加のたびに余分な工数を生み、納期・コスト・信頼性に継続的な負荷を与える。これらは特定個人の努力だけで解決できる性質のものではない。明確な設計指針と技術文書の作成、網羅的なチェック観点（レビュー観点）といった仕組みで克服すべき領域であり、属人化から脱却し、誰でも再現できるソフトウェア開発の進め方を確立することが急務である。

2 ソフトウェア教育の目的

現在の状況を変えるため、我々は個人の暗黙知に頼らない設計手法を体得し、それを現場で使いこなせる人材を計画的に育成する方針を定めた。育成したい人材は主に3種類に分類される（図2）。

(1) 基礎ソフトウェアエンジニア

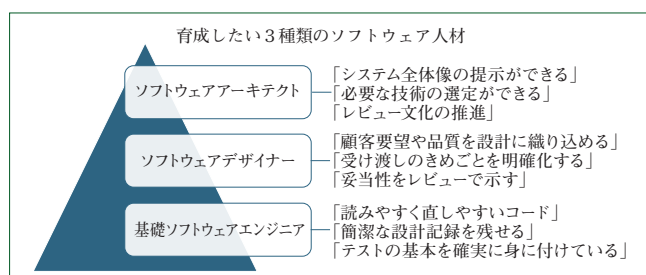


図2 基礎ソフトウェアエンジニア・ソフトウェアデザイナー・ソフトウェアアーキテクトの3種類にわたる人材を育成する
Our program trains three types of engineers: Foundation Software Engineers, Software Designers, and Software Architects

ソフトウェアエンジニアリングの基礎知識をはじめ、読みやすく直しやすいコード、簡潔な設計記録、テストの基本を確実に身に付けている。

(2) ソフトウェアデザイナー

顧客の要望や前提に加え、安全性・速さといった品質の条件を設計に織り込み、モジュール間の受け渡しの決めごと（境界）を明確にして、妥当性をレビューで示すことができる。

(3) ソフトウェアアーキテクト

複雑なシステム全体を見取り図にまとめ、技術の選方を示し、レビュー文化を現場に根付かせる役割を担う。こうした考え方と方法を組織に根付かせることが、当社グループのソフトウェア教育の目的でもある。

3 ソフトウェア人材育成の施策

人材育成の第一歩として、全社員が受講可能な専門技術教育一般コース⁽¹⁾のメニューを拡充している（図3）。たとえば基礎を俯瞰する「ソフトウェアエンジニアリング講座」は、開発の全体像と考え方、設計・実装・テスト・レビューの関係を整理する講座である。「ソフトウェアアーキテクチャ設計実践」では、実務で直面する設計の判断に焦点を当て、なぜそう決めたのかを明確にし、図にする姿勢を身に付ける。

現在の専門技術教育一般コース（ソフトウェア）の構成				
	仕様	設計	プログラミング	テスト
実践	要求モデリング	ソフトウェアアーキテクチャ設計実践		
	構造化分析設計【ロボット演習】			
	仕様の漏れない 要求仕様書【USDM】	構造化モデリング【動的】		
		構造化モデリング【静的】		
		凝集度と結合度		
		リファクタリング実践		
座学		リバースモデリング	マイコン制御 システム開発技術	
		新人向け設計技法基礎		ソフトウェアテスト実践
		UML入門		
		ソフトウェアアーキテクチャ設計基礎		ソフトウェアテスト基礎
E-learning		OSSライセンス管理基礎講座		
		外注管理基礎講座		
		ソフトウェア品質保証入門		
		ソフトウェアエンジニアリング講座（経験者・マネージャー向け）		
			オブジェクト指向開発基礎【C++】	

図3 現行ソフトウェア教育体系の構成。各講座を「仕様・設計・プログラミング・テスト」の技術領域と「実践・座学・E-learning」の学習形態で整理したもの
Structure of current software training program. Each course is organized by technical domain — specification, design, programming, and testing — and by learning format: practical training, lectures, and e-learning

「構造化分析設計【ロボット演習】」では、手を動かして開発の流れを体験し、その方法を体得する。現在は約20種類の講座を提供し、入門から実践まで段階的に学べる構成としている。今後は、オブジェクト指向、アジャイル、CI/CD（テストや配布の自動化）といった開発・マネジメント手法の講座を強化し、要求のまとめ方、レビューのやり方といった横断テーマも取り込む。

ただし、講座を用意するだけでは実力にならず、文化として定着させることは難しい。そこで専門技術教育にプラスして次に示す2つの施策を拡充することを進めている(図4)。

(1) ソフトウェア基礎講座

上述の専門技術教育一般コースを拡充した講座である。この講座は複数の講座を束ねた半年間のプログラムとして設計し、前半は設計・実装の基本とレビューの進め方を順序立てて学ぶ。重要なのは暗記ではなく、作って確かめる実習を繰り返し、どの段階で何を確認するかという進め方を体で覚える点にある。後半は「ガレージシステム」を題材に、設計から動くプログラムの作成までを実課題解決型（PBL）で体験し、チームでの見直し（レビュー）を通じて、実務に近い文脈で知識を定着させる。最後に成果発表と振り返りを行い、学びを共有する。主な対象は入社1年目から3年目程度の若手であり、将来は各部門へソフトウェア開発の進め方をボトムアップで広げていく起点となることを期待している。

(2) 専門技術教育 選抜コース

中堅技術者向けの専門技術教育選抜コースに2026年度から「ソフトウェア」のコースを追加した。各部門から推薦された将来開発をリードする人材が受講者となり、自部門のソフトウェアの実課題を研修のテーマとする。研修は6カ月にわたり、月1回の集中セッションと中間メンタリングで進めていく。初回にテーマと到達目標を明確にし、その後は計画に沿って要求の整理から設計までを段階的に構築する。そして、現場の関係者を巻き込み、設計の判断理由を記録し、レビューで設計の質をさらに向上させる。修了後は受講者がリードアーキテクトとして現場を牽引し、成果を事例として整理するとともに各部門で使えるかたち、いわば「資産」として残す。個人のスキル向上にとどまらず、設計の根拠やレビュー

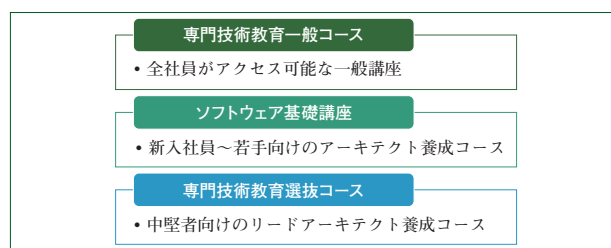


図4 現行の3つのソフトウェア育成コースの概要
Overview of three current software development training courses

での議論が社内の共有資産として蓄積される点が重要である。

4 育成施策のさらなる発展

これらの教育施策の効果を継続させるには、交流の場と知見の蓄積が重要である。当社グループはSBU (Strategic Business Unit) ごとに技術者がいる体制なので、これらの人材がつながることでシナジーが期待できる。勉強会や読書会など、エンジニア同士がつながるコミュニティづくりにも力を入れたい。こうした仕組みによって、学びが部門内にとどまらず水平展開されることで、当社グループのソフトウェア開発力は「個のスキル」から「組織としての設計力」へと段階的に高まっていくことが期待できる。こうした基本動作の徹底が、再現性のある開発プロセスと後戻りの少ない開発につながると考えている。

5 おわりに

- (1) ソフトウェア教育で目指すのは「設計で語り、レビューで磨き、測定で進化するソフトウェア開発文化を定着させる」ことである。
- (2) そのために専門技術教育一般コースで裾野を広げるとともに、ソフトウェア基礎講座で土台を固め、中堅の選抜コースで設計力を養いつつ、コミュニティで知見を残す活動を行う。
- (3) この一連の取組みを着実に実践していくことで、組織として持続的に製品の価値を高めるソフトウェア基盤を確立できると考える。

(参考文献)

- (1) 佐々木靖彦, 鈴木由衣, 人材育成センターの紹介, 住友重機械技報, 2025, 215, 29-32. https://www.shi.co.jp/tech/tech_report/pdf/215.pdf

アスファルトフィニッシャー HA60W-11/HA60C-11

Asphalt Paver HA60W-11/HA60C-11



欧州で販売している中型アスファルトフィニッシャーのクローラ式HA60C-11と、ホイール式HA60W-11を新たに日本国内でも展開することとなったのでここに紹介する。

本アスファルトフィニッシャーは、日本国内で評価を得ているHA60W-10をベースとして顧客要望に対応するかたちで改善を図った。

特 長

(1) 輸送性の改善(ホイール式HA60W-11)

当社独自の3連スクリードである「J・Paver2360」は、他社にない伸縮性を有する反面、スクリードが3連となるため構造上どうしても全長が長くなるという課題があった。

そこで、本機ではホッパ高さとウェイト形状を見直し、従来機に比べて300mm全長を短くして輸送性の改善を図った。

(2) 電気加熱時の舗装能力制限の解消

(ホイール式HA60W-11、クローラ式HA60C-11)

従来の発電システムはコンベヤ、スクリュ用ポンプから作動油を供給し、油圧モータで発電機を作動させていた。そのため電気加熱時に発電機を稼働させる場合は、能力がそちらに分散されコンベヤ、スクリュの能力を落とさざるを得なかった。新アスファルトフィニッシャーでは、従来機より20%出力アップした新規エンジンと発電機専用のポンプを搭載し、独立した回路にすることにより本来の舗装能力を落とすことなく発電できるようにした。

(3) 作業性、機能性の改善(ホイール式HA60W-11)

① 折り畳みリテーニングプレート

従来のホイール用リテーニングプレートは、取り外し式または内側のみスライド式が採用されてきたが、取り外し式は脱着の煩わしさ、スライド式には合材が固着すると引き出せないといった問題があった。本機においては、内側1段目のみを折り畳み式、外側の2段目は脱着式とし、サポートを追加することにより段取り作業の利便性向上を図った。

② ブレーキステアならびにデフロック

本機の走行システムには、ブレーキステアに加えて、デフロックシステムを装備している。

ホイール式は、前輪切れ角の制限から通常の回転半径が7mと大きい。それに対してブレーキステアは、低速モード時に内側後輪の走行モータのブレーキをかけることにより3.5mという小旋回が可能となる。

また、ホイール式の走行システムは、前輪・後輪ともに1ポンプ・2モータ方式であることから、たとえば軟弱路盤などでは片側が空転した場合、負荷の軽い空転側に油が流れて機械はスタックを起こす。デフロックシステムは、フローバイダにより左右後車輪モータおよび前輪モータへ流入する作動油の量を左右ほぼ均等に供給できる。このシステムにより軟弱路盤などで車輪の片側が空転してしまうような場合でも、逆側の車輪モータへ作動油が供給され有効な牽引力を得ることができる。

※「J・Paver」は、住友建機株式会社の登録商標です。

(住友建機株式会社 溜池 晃志)

住友重機械技報第219号発行に当たり

住友重機械技報第219号をお届け致します。

本誌は、当社が常々ご指導いただいている方々へ、最近の新製品、新技術をご紹介申し上げ、より一層のご理解とご協力をいただくよう編集したものです。

本誌の内容につきましては、さらに充実するよう努めます。今後ともよろしくご支援下さるよう、お願い申し上げます。

2026年7月

〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)

住友重機械工業株式会社

技術本部 技報編集事務局

製品・ソリューション

メカトロニクス

- ギヤモータ
- 大型ギヤボックス
- 精密制御用減速機
- モータ・インバータ
- ドライブシステム
- AGV/AMR ドライブソリューション
- 自律移動ロボット
- 極低温冷凍機
- クライオポンプ
- 真空ロボット
- 精密位置決め装置
- モーションコンポーネント

インダストリアル マシナリー

- イオン注入装置
- レーザ関連装置
- イオンビーム照射技術サービス
- PET 用サイクロترونシステム
- PET 用薬剤合成システム
- 陽子線治療システム
- BNCT
- 電子線照射サービス
- 検査診断技術サービス
- 真空成膜装置
- 鍛造プレス
- STAF (Steel Tube Air Forming)
- リフティングマグネット
- 圧延用ロール
- クーラント処理装置

- 航空機ジェットエンジン用ブレード
- 射出成形機
- ラミネータ装置
- スピニングマシン
- クリーンルームシステム
- 集塵装置
- 混練機
- クーリングタワー

STAFは、住友重機械工業株式会社の登録商標です。

ロジスティックス&コンストラクション

- 運搬荷役機械
- 物流システム
- 機械式駐車場
- クローラクレーン
- 基礎工事用機械 (アースドリル、地盤改良機など)
- 移動式クレーン
- 油圧ショベル
- 道路機械
- フォークリフト

エネルギー&ライフライン

- 液化空気エネルギー貯蔵 (LAES)
- 流動床ガス化炉
- 循環流動層 (CFB) ボイラ
- バブリング流動床 (BFB) ボイラ
- 廃棄物発電プラント
- 廃熱ボイラ
- 電気集じん機
- バグフィルタ式排ガス処理装置

- 灰処理設備
- 蒸発・晶析装置
- CFB スクラバ
- 排煙脱硝装置
- デジタルサービス (プラント運用支援システム)
- ロータリーキルン式再資源化設備
- 攪拌槽
- 蒸留・抽出設備
- プラントエンジニアリング
- コークス炉機械
- コークドラム・反応容器
- 鋼構造物
- 下水処理施設
- 用水・純水処理設備
- 産業排水処理施設
- 食品機械
- 洋上風力事業
- 風力推進コンポーネント

その他

- IT ソリューション
- 警備業務

(2026 年 6 月 30 日時点の情報を一部含みます)

事業所

本社	〒141-6025	東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)	技術研究所	〒237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地
関西支社	〒541-0041	大阪市中央区北浜4丁目1番1号 (淀屋橋ゲートタワー)	技術研究所	〒792-8588	愛媛県新居浜市惣開町5番2号
中部支社	〒461-0005	名古屋市東区東桜1丁目10番24号 (栄大野ビル)			(新居浜)
九州支社	〒812-0025	福岡市博多区店屋町8番30号 (博多フコク生命ビル)			
田無製造所	〒188-8585	東京都西東京市谷戸町2丁目1番1号			
千葉製造所	〒263-0001	千葉市稲毛区長沼原町731番1号			
横須賀製造所	〒237-8555	神奈川県横須賀市夏島町19番地			
名古屋製造所	〒474-8501	愛知県大府市朝日町6丁目1番地			
岡山製造所	〒713-8501	岡山県倉敷市玉島乙島 8230 番地			
愛媛製造所					
新居浜工場	〒792-8588	愛媛県新居浜市惣開町5番2号			
西条工場	〒799-1393	愛媛県西条市今在家1501番地			

本号に関するお問い合わせは、技術本部技報編集事務局(電話番号は下記)宛お願い致します。

住友重機械工業株式会社のホームページ <https://www.shi.co.jp/>

技報編集委員

委員長	牧野 健一	委員	金 鐘剛
委員	梶井 宏樹		阿部 昌博
	廣田 真人		宮島 司
	井上 千晶		藤本 典之
	梶谷 純平		加藤木 暁
	針ヶ谷 崇		田中 哲平
	有吉 政博		横田 和幸
	石川 賢治		前田 憲男
	諏訪 義和		山崎 勝彦
	幾島 悠喜		山室 征也
		事務局	技術本部
		編集協力	(株)千代田プランニング

住友重機械技報	
第219号 非売品	
2026 年 7 月 20 日発行	
発行	住友重機械工業株式会社
	〒141-6025 東京都品川区大崎2丁目1番1号 (ThinkPark Tower)
	お問い合わせ電話 横須賀 046-869-2300
発行人	山本章



住友重機械工業株式会社
Sumitomo Heavy Industries, Ltd.