

KOBELCO

技報

Vol.22
(通巻41号) No.1

ENGINEERING REPORTS
KOBELCO ECO-SOLUTIONS CO.,LTD.



Keep the Earth Sky-blue

神鋼環境ソリューション

目	次	CONTENTS
---	---	----------

- | | | |
|----|--|---|
| 1 | <巻頭言>
神鋼環境ソリューション技報
対談：金のユーグレナ [®] 免疫機能性表示食品へ | |
| 4 | 日本初！金のユーグレナ [®] で
“免疫”の機能性表示食品化を達成 | First in Japan! Achievement of Foods with
Function Claims for “Maintains Immune Function” with
Golden Euglena. |
| 10 | 湿式炭化による下水汚泥の燃料化技術の実証 | Demonstration of Hydrothermal Carbonization Process for
Fuel Production from Sewage Sludge |
| 16 | 下水汚泥燃料の自然発熱性低減技術の実証 | Demonstration of Technology to Reduce Self-Heating in
Sewage Sludge Fuel |
| 22 | 上ヶ原浄水場再整備等事業（PFI）における
粒状活性炭接触池のCFD解析 | CFD Analysis of a Granular Activated Carbon Contact
Basin in the Uegahara Water Treatment Plant
Redevelopment Project (PFI) |
| 27 | ごみクレーン自動運転システムの高度化 | Advancement of an automated waste
crane operation system |
| 33 | 中赤外線カメラとAI・画像処理を活用した
回転ストーカ炉内ごみ状況の定量化 | Using Mid-Infrared Cameras, AI, and Image Recognition to
Quantify the Status of Waste in Rotary Combustors |
| 37 | 糸状菌高密度培養での
フルゾーン [®] 翼適用による改善効果 | Improvement effect of applying Fullzone [®] impellers in
high-density filamentous fungal cultivation |
| 42 | 施設・技術紹介 | |
| 44 | TOPICS | |

神鋼環境ソリューション技報

対談：金のユーグレナ[®] 免疫機能性表示食品へ



- ◆京都府立医科大学大学院 医学研究科 教授 内藤 裕二 氏
- ◆東京薬科大学 名誉教授 大野 尚仁 氏
- ◆株式会社 神鋼環境ソリューション 取締役 執行役員 技報編集委員長 桑村 純司 氏

桑村：本日はお忙しいなか、対談にお越しくださりありがとうございます。

これまで神鋼環境ソリューション技報の巻頭言では各界のご著名な方々にご寄稿いただき掲載させて頂く形式としていましたが、今年、当社の金のユーグレナ[®]に多く含まれる食物繊維「パラミロン」が「免疫機能維持」を表示内容とする機能性表示食品として消費者庁に受理されましたことを受けて、対談形式に変えて専門的な内容から消費者目線の内容まで幅広いお話を伺えればと考えております。よろしくお願いたします。

「免疫」とは

桑村：まず、今世間で注目を集めている「免疫」については、何が期待されているのでしょうか。また、世の中の「免疫」に対するニーズをどのようにお考えでしょうか。



内藤先生

内藤先生：免疫が一般的に注目され始めたのは、コロナの流行があったことが大きく影響していると考えています。それまで関心が薄かった人々が、免疫とは何かを考えるようになり、現在、一般的な認識になりかけ

ています。「疫病などから免れる」と言うのが「免疫」ですから、単純に風邪などの感染症になりにくくなるといったことだけではなく、例えば、癌に対して抵抗できることも免疫です。基本、免疫がなければ我々は生きていくことができません。ただ、コロナで免疫が暴走し止められなくなり肺機能が低下し亡くなられたケースもあり、良い面と悪い面を持ち合わせた微妙なバランスの下に成り立っているのが免疫であることも忘れないで欲しい。

また、免疫が上がれば病気にならないわけではなく、例えばコロナや肺炎球菌などの感染症を予防するためにはワクチン接種が有効であるなど、正しい知識を持って選択する必要があります。健康で長生きをするためには、年齢を重ねれば落ちてくる「免疫の機能維持」が必要だと考えます。巷では「免疫力アップ」といった表現を目にしますが考えものです。「免疫を維持する」一助となるのが免疫の機能性表示食品であり、期待されるどころだと考えます。

大野先生：消費者に「免疫」をわかりやすく説明するのは難しい。薬剤師としては、健康な方なのか、病気を抱えての相談なのかを分けて考えなければいけません。病院には、内科、



大野先生

外科、呼吸器、皮膚、消化器、循環器など様々な診療科があり、大きな施設では、さらに細分化されています。免疫はそれぞれの科で、検査・診断・治療のあらゆる面で関係しているのです。役割は多面的で複雑です。また、健康な方にとっては、生活習慣や予防とも関係するので、免疫はさらに広がりを持っています。その中で、食品と免疫の関係は、食品免疫学という領域として整理されますが、この領域は最近になって発展してきたものですから、免疫学の発展の中での位置づけは、さらに複雑です。食薬区分という言葉が知られていますが、20世紀後半の健康食品ブームの折に、食品なのに医薬品的な効果があると偽り薬事法違反で逮捕される事例が多発しました。食品と医薬品を正しく分ける必要性から食品の第3次機能が定義され、特定保健用食品や機能性表示食品が生まれました。

「特定保健用食品」と「機能性表示食品」——

桑村：特定保健用食品と機能性表示食品は何が違うのでしょうか。一般的な消費者は何を信頼して選択すればよいのか迷うと思われ、どのように訴求すればよいとお考えでしょうか。また、今後どのような機能がトレンドになるとお考えでしょうか。

内藤先生：一般的な消費者は、区別がつかないでしょう。例えば、血圧や血糖値などの上昇を少しだけでも下げれば、特定保健用食品になっているのが現状で、そのための莫大な開発投資を食品業界は行っています。医者立場から言うと、血圧や血糖値のコントロールを行う手段や医薬品は既に多く世に出ており、食品に期待することは少ない。もっと、医者が手を出せない領域に進めば、この制度は発展性があるでしょう。認知機能、免疫機能、抗疲労はその分野の1つです。

免疫を維持する作用があることに関しても単なるインフルエンザ予防だけでアピールするだけでなく、健康で幸せな長寿を目指すためとして、ここにあるような食品とのコラボなどでアピールできればよいのではないかと考えます。

国内の食品はどの省庁がリードして、国民の食に対する健康を支えていくのかグレーな部分があります。機能性表示食品に関しては消費者庁が届出の受付を行っていますが、アメリカのように、薬と食品を同じ省庁でコントロールすることが必要だと考えます。

大野先生：免疫をアピールするとき、「健康長寿」をポイントにあげれば対象者には高齢層が多くなります。「長寿」が20代や30代にどれだけ刺さるが分かりませんので、ターゲット層ごとに、アピールの仕方を変えるのが大事だと考えます。ミカレアのWEBサイトで「元気スイッチプロジェクト」を掲載していますが、スポーツをしている比較的若手層が多く、運動後の疲労回復などをアピールしており、面白い取組みだと思います。



食の認識は時代と共に変わっていく。——

内藤先生：昨年発表されたヒトの研究データが大変興味深く、アメリカで10万人を30年間追跡し、70歳

到達時点で、11種類の病気に罹患しておらず、認知度や運動機能が高く健康に年齢を重ねた方が全体の9%しかいなかったと発表していました。この9%の人々に関して30年前から何をしていたから良かったのかを分析した結果、食生活が大きく関わっていました。主な食事として肉や肉の加工品、植物由来製品でも粉状に加工した小麦や砂糖、ポテトチップスなどを多く摂取していなかったのです。

こういったヒトのデータによる結果は非常に大事で説得力がありますが、何十年も先に起こる体調の変化のために今日の買い物をすること



はなかなか無く、肉食を止めることは難しい。しかし、国際癌研究機関において決めている発癌物質の中で、胃癌の原因と言われているピロリ菌と共にグループIに含まれているのが、ソーセージなど肉の加工品です。レッドミート（牛、豚、羊）はグループII aです。これからはレッドミートと一緒に食べれば発癌性物質を消すことができる食品の研究開発が行われるでしょう。

メーカーとしてできることは——

桑村：機能性表示食品を取得したことで、食品業界で認知度が上がったように感じているが、薬を作っているわけではない我々が、メーカーとしてできることは何だとお考えでしょうか。



桑村編集委員長

内藤先生：今まで、既存の論文を活用したシステマティックレビューで届出を行い、機能性を取得する方法がほとんどでした。パラミロンはそれとは違ったヒトの二重盲検比較試験を行ったことで免疫の機能性表示を取得しました。私が知る限り、かなり業界がザワついたのは確かです。恐らく、他社も同じような試験を行って目指すと思われます。

大野先生：現在は分析技術のレベルが特段に上がってきており、様々なヒト試験が次々と行われ、免疫関連の機能性表示の要求するデータも精密化してくることになるでしょう。高度な分析技術の汎用性が高まることで、試験にかかる価格破壊が起き、どこでも誰でも高度な試験ができるようになると、機能性を示すための水準も上がり、製品の競争の激化も起こる可能性もあります。パラミロンは特徴的なβ

グルカンですので、物質的な優位性も味方にして、健康増進に貢献されることを期待します。

内藤先生：メーカーとしては、何らかの新しい指標をつくるべきだと考えています。例えば、老化に関する指標として、人のDNAに傷がつくメチル化を利用し、メチル化DNAの蓄積によって人の老化年齢がわかります。日本人のデータベースを基にDNAの傷の度合いから生物学的年齢を測定できるようになると、どうすれば若返るかという興味につながっていきます。若返りに貢献する食品を評価する指標となってきたのです。何においても指標をつくるのが大事だと考えています。



パラミロン製品を前に、大野先生、内藤先生

未来への投資・研究者の育成

桑村：当社でも研究開発のテーマ出しや研究に関わる人材の育成など課題としてありますが、大学の学生時代に興味を持たせて研究者として育てるにあたってご苦労されていることをお聞かせください。

内藤先生：現在、大変難しくなっている時代。学生時代は興味のあるテーマを独自に見つけてきて解決のための研究を行っていても、医者になり安定した収入が得られると、研究への興味は薄れていく者が多い。何のために医者になったのか、医学部に入ったのかを根本から問い直さないといけない。興味がありそうな研究をさせたとしても長続きせず、博士号をとれば終了となるケースが増えてきています。圧倒的に昨今の日本の研究力は落ちており、危機感を感じています。若い時代に研究していることが、自分の後々の人生にいかに関わっていくか、自分自身、現在もなお『今からでも遅くはない』と思いながら研究を続けていることをどうやって伝えるのが難しい。

大野先生：研究に対する動機付けは、学生時代の卒論研究や大学院の研究によるところが大きいものと思います。同期・先輩、若手の教員などと、寝食を共にして研究に没頭する期間はなによりも大切です。学会発表や論文執筆することを経験すること、そして演者や著者として自分の名前が公の場にでる

ことは、最もすぐれた教育手法でもあります。そのような経験をした学生の中から、研究の道を希望する学生が現れます。数は少ないですが、この経験なしに研究に興味を抱くのは難しいことと思います。さらに、研究者として海外と勝負すること、海外の研究者と仲間をつくり交流することは刺激となり、世界で一番になることを目指すモチベーションを生み出すものと思います。若手の研究者に多くのチャンスを与えていただくことを期待します。

今後、パラミロンに期待すること

桑村：本日は長時間ご対談いただきありがとうございます。最後に、当社の「パラミロン」に期待するところをお伺いできますでしょうか。

内藤先生：この粒子は大変興味深い作用として抗疲労、免疫維持に関わります。βグルカンの一種である多糖類ですが、今後新たな作用機序が解明されていくのではないかと楽しみにしています。私たちもがんばりますので、期待してください。

大野先生：βグルカンは、様々な生物が生産しています。直鎖ペレット状のパラミロン粒子は、特徴的な構造をしています。免疫機能の一部が明かされたところですので、詳細な解析を続ける必要があるでしょう。また、どのような応用展開ができるのか、チャレンジは始まったばかりと思います。免疫学の発展に並走して研究が発展することを期待します。

【プロフィール】

内藤先生：1983年京都府立医科大学卒業、2001年米国ノースカロライナ州立大学医学部分子細胞生理学教室客員教授として渡米。帰国後は、2008年京都府立医科大学大学院医学研究科消化器内科学准教授を経て、2021年から現職。農林水産省農林水産技術会議委員、2025大阪・関西万博大阪パビリオンアドバイザー、若狭おばま御食国大使を兼務している。著書、健康の土台をつくる腸内細菌の科学（日経BP 東京 2024年）が話題に。

大野先生：1977年東京薬科大学薬学部卒、薬剤師、1982年同薬学研究科修了、薬学博士。同薬学部第1微生物学教室助手、講師、助教授を経て、2000年同薬学部免疫学教室教授。2020年同定年退職、名誉教授。内毒素・LPS研究会世話人、日本医真菌学会評議員・理事・名誉会員、日本生体防御学会運営委員、βグルカン協議会会長、千葉県薬剤師検査センター理事、など務める。

対談写真撮影：隅 晃彦、編集：吉本 真由美

日本初！金のユーグレナ®で“免疫”の機能性表示食品化を達成

First in Japan! Achievement of Foods with Function Claims for “Maintains Immune Function” with Golden Euglena.

河野高德*博士(生命科学)・内藤淳子*・西田典永*
Takanori Kawano・Junko Naito・Norihisa Nishida

当社の食品用オリジナル素材「金のユーグレナ（ユーグレナグラシリス EOD-1株）」で、日本初となる「免疫機能の維持」を表示内容とする機能性表示食品化を達成した。環境ビジネスを主とする当社が、新たな事業として取り組んでいる食品事業において、免疫の機能性表示食品化に必要なヒト試験のデータなど科学的根拠を取得して消費者庁への届出を行い、2025年1月29日、受付完了となった。

Our original food ingredient, Golden Euglena (*Euglena gracilis* EOD-1), has successfully become one of the Foods with Function Claims, bearing the claim “Maintains Immune Function.” It has also marked several industry firsts in Japan. As part of our new food business initiative, our company, which primarily focuses on environmental business, obtained the necessary scientific evidence, including clinical trial data, to submit a notification under the Foods with Function Claims system for the claimed effect. We presented the required documentation to the Consumer Affairs Agency, and it was officially received on January 29, 2025.

Key Words :

金のユーグレナ	Golden Euglena
ユーグレナグラシリス EOD-1株	<i>Euglena gracilis</i> EOD-1
パラミロン	Paramylon
機能性表示食品	Foods with Function Claims
免疫	Immunity

【セールスポイント】

- ・ユーグレナで日本初の免疫の機能性表示食品
- ・新たな免疫の作用機序での届出受付完了
- ・免疫指標の網羅的解析

まえがき

当社は KOBELCO グループとして初めて食品事業に取組み、企業理念の一つである「踏み込む。挑む。やり抜く。」という考えの下に、金のユーグレナで“免疫”の機能性表示食品化を達成した。タイトルにある「日本初」、これは当社が、①ユーグレナグラシリス EOD-1株由来パラミロンで“免疫”をサプリメントの商品パッケージに初めて表示できるようになったこと、②食物繊維（パラミロンは食物繊維の仲間に入る）で初めて“免疫”を表示できるようになったこと、③これまでの免疫訴求とは異

なる作用機序で機能性を初めて表示できるようになったこと、④臨床試験による届出というパターンで初めて“免疫”を表示できるようになったこと、⑤免疫機能の維持+精神的疲労感の軽減+身体的疲労感の軽減というトリプルの機能性を訴求できる、など複数の意味合いがある。本稿では、この結果に至る道のり、金のユーグレナの免疫機能・作用機序について紹介する。

1. 免疫の機能性表示食品化に至る道のり

1.1 金のユーグレナ

金のユーグレナは、当社独自の株・培養技術で生

*技術開発センター 藻類事業推進室

産する微細藻類ユーグレナグラシリス EOD-1株の乾燥粉末のことで、粉末中に有効成分であるパラミロンを70%以上含む。密閉したタンク内で培養を行うため、その色は緑色ではなく、黄白色をしていることから「金のユーグレナ」という商標を取得し食品用の素材として販売を行っている。金のユーグレナの特徴成分であるパラミロンは、 β -1,3-グルカンの一種で、キノコや酵母がつくる β グルカンとは異なり、3~5 μm 程度の粒子構造をしている。この粒子がヒトの健康機能に有用な効果をもたらすことがわかってきている¹⁾。当社は、この金のユーグレナで、機能性表示食品としてこれまでに「精神的・身体的疲労感の軽減」という機能性で商品化を実現しており²⁾、その後、2025年1月に「免疫機能の維持」という表示化を新たに達成した³⁾。本品はミカレア（販売子会社）より2025年6月30日より発売されている。（図1）

1.2 機能性表示食品とは

食品（特定保健用食品、栄養機能食品は除く）は、医薬品のような効果効能をパッケージに表示することはできなかったが、2015年4月1日に食品表示法（平成25年法律第70号）の施行に伴い、「機能性表示食品」制度が新たに創設され、事業者の責任において、科学的根拠に基づき、特定の保健の目的が期待できる旨の表示が食品にできるようになった。これは特定保健用食品のような国の許可を要するものではなく、販売前に安全性および機能性の根拠に関する情報等を盛り込んだ書類を作成し、消費者庁へ届け出るという届出制である。届出制と聞くと、審査が伴う許可制ほどのハードルがないように思えるかもしれないが、実際は、消費者庁が形式上の確認はもとより関連省庁の意向を含めて納得できる届出内容



図1 ミカレアのパラミロン（商品）

になっているまで受付完了とすることはしない。特に免疫はこのハードルが高く、食品企業が非常に苦慮していた。

1.3 免疫の機能性表示食品の届出

2020年8月、日本で最初の「免疫」を標榜した機能性表示食品の届出が公表された。その2年後に、新たに2成分が公表された。3成分はいずれも細菌（乳酸菌、酢酸菌）が有効成分で、免疫を活性化する作用機序は、樹状細胞の一種であるプラズマサイトイド樹状細胞（plasmacytoid dendritic cell; 以下pDC）に作用するというものであった。そのような状況において、2025年1月29日に、当社の金のユーグレナ（ユーグレナグラシリス EOD-1株由来パラミロン）で、免疫の機能性表示食品の届出の受付が完了となった。機能性表示食品制度は、2015年の施行当初から特定保健用食品（トクホ）では許可が難しいとされてきた「免疫機能」に期待が寄せられてきたが、制度が10年経過して免疫で届出が受付られた成分は、2025年6月現在で6成分であり、まだまだ多いとはいえない状況である。なかなか届出の受付が完了されず公表に至らなかった背景には、免疫だけは機能性表示食品の届出等に関するガイドライン（現在は手引き）の中に表現できない例として、「限られた免疫指標のデータを用いて身体全体の免疫に関する機能があると誤解を招く表現」⁴⁾と明示されてきたからである。これだけでは、企業の担当者も対応していくことが難しいこともあり、日本抗加齢協会が2021年9月に公表した「免疫関係の機能性表示の科学的根拠に関する考え方について」の中で、免疫指標は複数動いていることが望ましい、それら指標が免疫全体を調整することを科学的に説明できることが重要、自然免疫・獲得免疫双方を調整していることが望ましい、免疫指標と体調の変化を同じ臨床試験で評価することが望ましい、など具体的に示された⁵⁾。これらの情報を基に我々は、2022年1~4月にかけて免疫のヒト試験を実施した。他社の免疫のヒト試験では、消費者庁の受付実績のあるpDCとその下流の免疫指標に絞った試験がよく見られたが、当社は、免疫の専門家の先生方ともよく協議して、免疫細胞やサイトカインを網羅的に測定する方法を採用した。これにより、金のユーグレナを継続摂取することで、どのような免疫細胞、サイトカインが変動するのかということが明確にわかった。得られた結果を論文化し⁶⁾、論文掲載後、2023年10月に臨床試験のパターンで消費者庁へ届出を行った。その後、消費者庁からの指摘事項に対する対応のやりとりを数回繰り返し、2025年1月末に「本

品は、ユーグレナグラシリス EOD-1株由来パラミロン (β -1, 3-グルカンとして) を含むので、日常生活の一時的な精神的・身体的疲労感を軽減する機能があります。また、免疫細胞 (単球, ナイブ T 細胞) の働きを助け健康な中高年の方の免疫機能の維持に役立つ機能があります。」という届出表示で届出の受付完了に至った (届出番号: J814)。2025年6月現在で臨床試験での届出実績は本届出のみである。これは、表示として「製品に含まれる機能性関与成分に機能が報告されている」ではなく、「製品に機能がある」とできるのは、本届出のみであることを意味する。次の章では、金のユーグレナのヒト試験の具体的な結果およびその作用機序について紹介する。

2. 金のユーグレナの免疫機能維持

2.1 免疫機能維持のヒト試験結果

冒頭に述べたようにパラミロンは、粒子構造をとった β -1, 3-グルカンである。 β -1, 3-グルカンには、生体内に Dectin-1 というパターン認識受容体が存在し、Dectin-1 は免疫調節に関与していることが知られている。パターン認識受容体とは、特定の構造に結合することで病原体や異物の侵入を検知し、自然免疫と呼ばれる非特異的な免疫反応を活性化させるセンサーである。実は、 β -1, 3-グルカンはカビなどの真菌類の細胞壁の主要成分であることから、特徴的な分子パターンとして生体内で認識され、免疫系を活性化させることが報告されている。

これまでに我々は、ユーグレナグラシリス EOD-1 株由来パラミロンが Dectin-1 と直接結合するリガンドであることを示唆しており⁷⁾、細胞実験において

も Dectin-1 を介して起こると報告されている免疫応答を引き起こすことを確認していた。よって、ユーグレナグラシリス EOD-1 株由来パラミロンには、ヒトにおいて十分に免疫機能を調節し、体調の維持に働くことが期待できると考えられた。そこで、免疫機能維持の機能性表示食品化を見据え、ヒト試験により、金のユーグレナの摂取が実際にヒトの体調を維持できるのか、またその時、生体内においてどのような影響を与えているのかを検証した。

試験デザインは、厳密な試験方法であるランダム化二重盲検プラセボ対照並行群間比較試験とした。被験者は健康な50歳以上65歳未満の男女24名で、金のユーグレナ (パラミロン350mg) または金のユーグレナを含まないプラセボを12週間毎日摂取した。試験期間中は、体調を評価するアンケートとして健康状態および風邪様の自覚症状について毎日記録を取得した。また、摂取前後の検査日において血液を採取し、マスサイトメトリーを用いた多項目測定とバイオインフォマティクス解析による免疫細胞プロファイリングや定量プロテオミクスを活用した多種類の血中サイトカイン濃度の測定などを実施することで、免疫マーカーの網羅的な解析を行った。

2.1.1 体調に関する自覚症状の評価

体調に関する自覚症状の評価では、金のユーグレナ群はプラセボ群と比較して、健康状態が良いと回答した日の累積日数が有意に多かった (図2 (a))。また、全身や特定の部位に関する自覚症状 (寒気・悪寒、熱っぽさ、頭痛、咳、喉の痛み) において、金のユーグレナ摂取群の自覚した有症日数がプラセボ群と比較して少なかった (図2 (b))。これらの

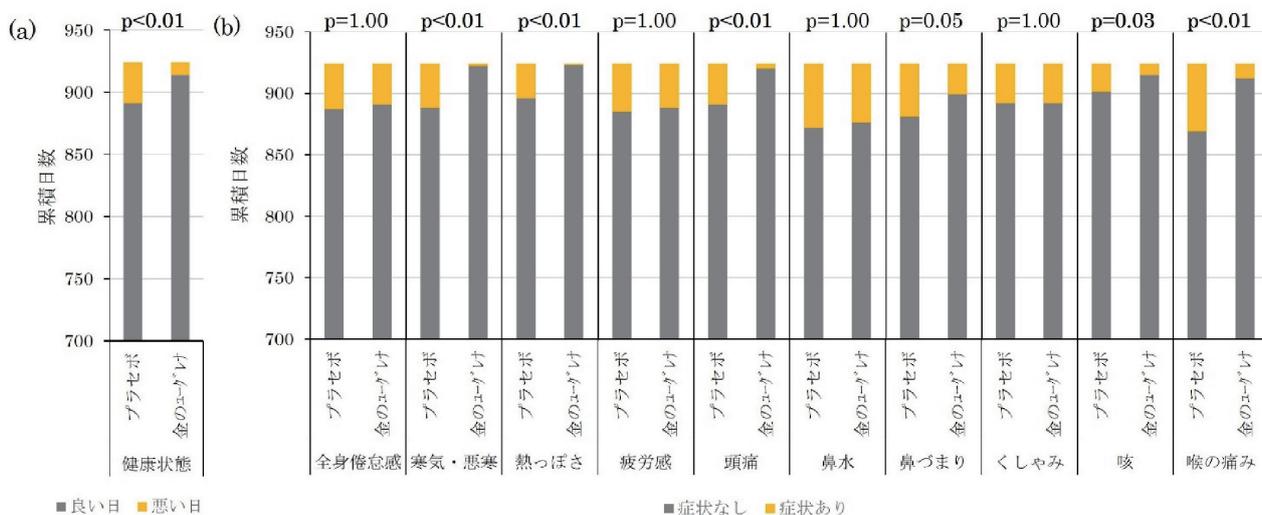


図2 体調のアンケート結果

(a) 健康状態, (b) 風邪様症状 $p < 0.05$ を統計学的に有意とし群間の差を評価した引用文献⁶⁾より引用・改変

結果から、金のユーグレナ摂取が自覚症状の有症日数を抑え、健康状態を良好に維持したと考えられる。

2.1.2 血中免疫マーカーの網羅的解析

血中サイトカインについては、45種類と多数のサイトカインの定量を行った。測定濃度の倍率変化を比較したところ、金のユーグレナ群においてIL-17AやCSF2などのサイトカインの分泌が促進されていた。さらに、有意に変動したサイトカイン群を用いたKEGGおよびReactome Pathway解析により、変動した経路を特定したところ、Th17細胞の分化やIL-17の分泌などの経路の変動が確認された。Th17細胞の活性化やCSF2の分泌促進などはDectin-1の下流で起こる反応として知られており、これらの結果はDectin-1を介した作用を捉えている可能性が考えられた。

続いて、免疫細胞プロファイリングでは、多種類の免疫細胞の割合について解析を実施したが、大きく変動した細胞集団は確認されなかった。しかし、大きな変動がなかったということは、逆に食品として安全であることを示していると考えている。一方で、詳細を確認するとT細胞や単球の一部のサブセットで変動が確認されたことから、単球やT細胞の質的な評価、つまり細胞としての活性化状態を評価・解析した結果に注目した。

単球は、自然免疫に働く細胞であり、病原体や異物を飲み込んで破壊したり、破壊した断片をT細胞に受け渡すことで獲得免疫と呼ばれる異物特異的な免疫反応を開始したりする免疫の第一線での防御を担っている細胞である。フローサイトメトリーを用いて単球の活性化状態を表すマーカーであるCD80という分子を測定した結果、金のユーグレナ群はプラセボ群と比較して有意に高値を維持していた(図3)。このことから、金のユーグレナの摂取は単球の活性化状態を高く維持したと考えられた。

続いて注目したT細胞についてであるが、T細胞は単球などの抗原提示細胞から異物を受け取り活性化することで、異物特異的な生体防御に働く獲得免疫の中心となる細胞である。CD4陽性T細胞はヘルパーT細胞、CD8陽性T細胞はキラーT細胞と呼ばれる細胞に分化・活性化する。その中でも、特に病原体などの異物にこれまで出会ったことがなく、様々な異物に対して応答することが可能なナイーブT細胞に着目した結果をご紹介します。マスサイトメトリーを用いてCD4陽性ナイーブT細胞、またはCD8陽性ナイーブT細胞の活性化状態を表すCD28、CD38という分子の発現量を測定したところ、金のユーグレナ群はいずれの細胞においてもプラセ

ボ群と比較して両分子の発現が高まっていた(図4)。このことから、金のユーグレナの摂取は、CD4陽性ナイーブT細胞およびCD8陽性ナイーブT細胞を活性化状態にしていると考えられた。

2.2 免疫機能維持の作用機序

以上のヒト試験の結果から、まず、金のユーグレナの摂取は、風邪様症状を自覚した累積日数を抑え、健康状態を良好に維持したと考えられる。つまり、金のユーグレナの摂取には免疫機能を維持する効果があると考えられる。では、その時に生体内で起こっている現象について、以下に考察したい。

まず、サイトカインの結果から、Th17細胞の分化やCSF2の分泌促進が起こっており、これらはEOD-1株由来パラミロンによるDectin-1を介した結果を示している可能性が考えられる。続いて、金の

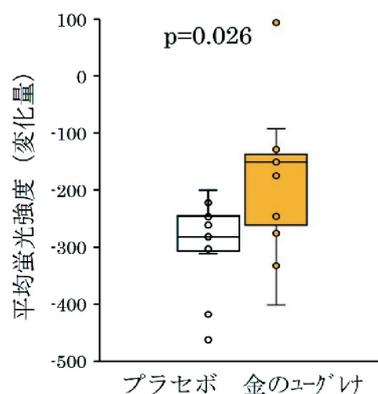


図3 単球におけるCD80の平均蛍光強度の比較
 $p < 0.05$ を統計学的に有意とし群間の差を評価した
 引用文献⁶⁾より引用・改変

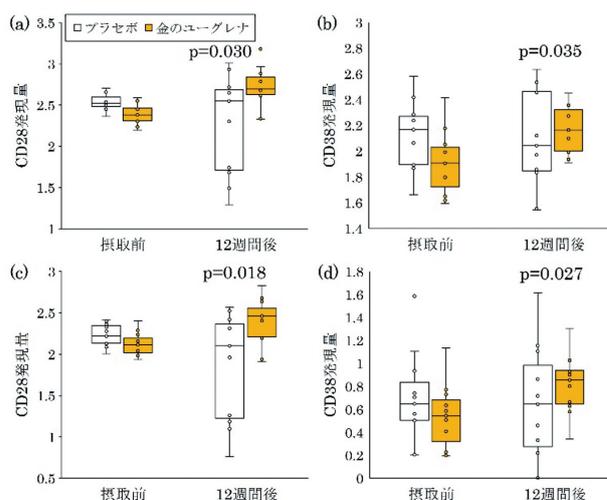


図4 ナイーブT細胞における表面抗原の発現量の比較
 CD4陽性ナイーブT細胞における(a)CD28および(b)CD38の発現量の比較
 CD8陽性ナイーブT細胞における(c)CD28および(d)CD38の発現量の比較
 $p < 0.05$ を統計学的に有意とし群間の差を評価した
 引用文献⁶⁾より引用・改変

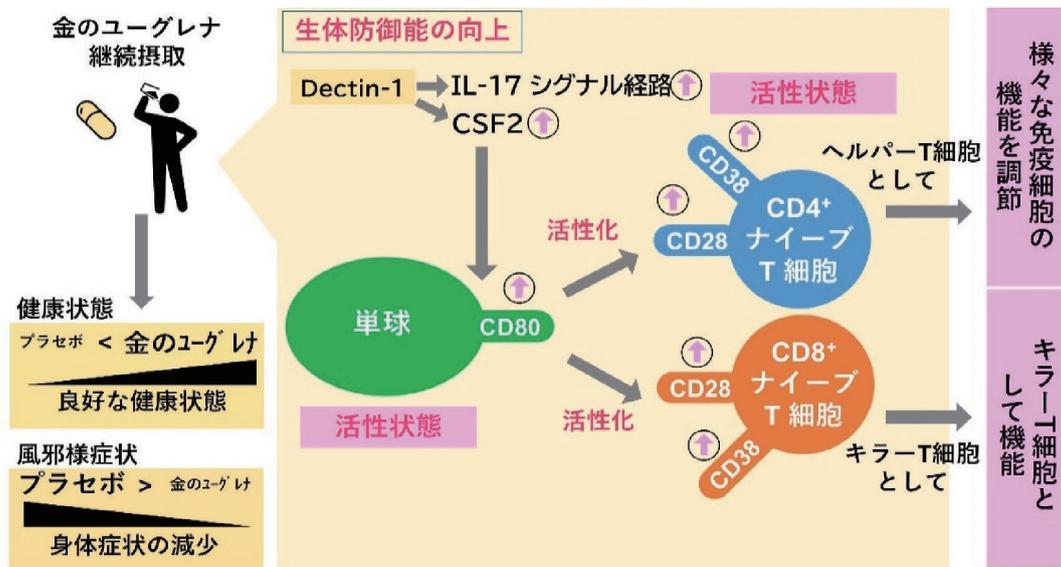


図5 金のユーグレナ摂取による免疫機能への影響
引用文献⁶⁾より引用・改変

ユーグレナの摂取は単球の活性状態を高く維持しており、既報の文献からCSF2の分泌促進が関与している可能性が考えられる。続いて、CD4陽性ナイーブT細胞およびCD8陽性ナイーブT細胞が活性状態になっていた。発現の高値が確認された単球のCD80とT細胞のCD28は共刺激分子と呼ばれ、互いが結合することで抗原提示によるT細胞の活性化に必要なシグナルがT細胞に供与される。また、活性状態にある単球は、T細胞を活性化することが知られていることから、この結果は高い活性状態の単球による活性化の刺激を受け、ナイーブT細胞が活性状態となったことを示していると考えられる。そして、活性化の刺激を受けたCD4陽性ナイーブT細胞はヘルパーT細胞となり、マクロファージや好中球、ナチュラルキラー細胞、B細胞など様々な自然免疫、獲得免疫に働く細胞の機能を調節すると考えられる。またCD8陽性ナイーブT細胞は、キラーT細胞として生体防御に働くと考えられる。実際に、別の試験において金のユーグレナの摂取により、ヘルパーT細胞の下流で起こりうる分泌型IgAの分泌が促進されることも確認されている⁸⁾。以上のように、金のユーグレナの摂取は、ヒトにおいてもDectin-1を介して作用している可能性があり、さらに単球を起点とし、ナイーブT細胞を介して、T細胞以降の様々な免疫細胞の機能を調節するポテンシャルを高めていると考えられる(図5)。

むすび

今回、新規事業として食品事業に取り組んだ当社が、他の食品企業とは異なる手法で、「免疫」機能

を訴求できる商品の開発に成功し、世に出すことができたのは大きな業績である。当社の免疫の届出が公表されたあと、多くの方々から驚きの声や、免疫の届出をあきらめかけていた企業の方からは勇気もらったなどの声をいただき、反響は大きかった。加えて、色々な学会で講演をさせていただける機会も増えて、まだまだ金のユーグレナのことを知らないアカデミアの方や、企業の研究・開発系の方、さらには健康意識の高い最終消費者の方々へのよい啓発となっている。2025年4月、法令化等により機能性表示食品制度は新たな転換期を迎えている。今後はこの制度を活用していくうえで、事業者には有効性、安全性などに関して、さらなる質の向上および責任が求められていく。金のユーグレナの免疫研究に関しても、今後も各大学との連携を引き続き継続して、基礎的知見を集積し、利用していただく方々にとってよりよいものにしていくとともに、次の新たな知見への発掘にも繋げていきたい。

最後に、免疫の研究や機能性表示食品の届出に際して多大なるご助言・ご協力をいただいた東京薬科大学 大野尚仁先生(現在 名誉教授)、京都府立医科大学 内藤裕二先生、東京薬科大学 安達禎之先生、菅野峻史先生、女子栄養大学 石橋健一先生、東京大学 新藏礼子先生、城西大学 和田政裕先生、株式会社エム・エイチ・ビー 細山浩氏、株式会社アイメックRD 比良義忠氏、三浦徳氏に深謝いたします。

[参考文献]

1) パラミロン EOD-1健康ラボ <https://eod1-paramylon.com/>

- 2) <https://www.kobelco-eco.co.jp/topics/news/2020/20210316.html>
- 3) <https://www.kobelco-eco.co.jp/topics/news/2024/20250203.html>
- 4) 機能性表示食品の届出等に関する手引き（令和7年3月25日）https://www.caa.go.jp/policies/policy/food_labeling/foods_with_function_claims/notice/assets/food_labeling_cms205_250415_02.pdf
- 5) <https://www.ko-karei.com/wp/wp-content/uploads/2021/09/2021%E5%B9%B4%E6%9C%81%E6%97%A5%E5%85%AC%E8%A1%A8%E5%85%8D%E7%96%AB%E9%96%A2%E4%BF%82%E3%81%AE%E6%A9%9F%E8%83%BD%E6%80%A7%E8%A1%A8%E7%A4%BA%E3%81%AB%E3%81%A4%E3%81%84%E3%81%A6%E5%85%AC%E8%A1%A8%E7%94%A8%EF%BC%89.pdf>
- 6) Kawano T. ほか：Journal of Functional Foods, 109 (2023), 105804.
- 7) Ishibashi K. ほか：Biological Pharmaceutical Bulletin, 45, 9 (2022), p1394-7
- 8) Ishibashi K. ほか：Nutrients, 11, 5 (2018), 11051144

[免疫関連の用語解説]

- ・プラズマサイトイド樹状細胞
免疫の司令塔の一つとして知られている免疫細胞。一部の乳酸菌により活性化されることが知られており、近年、免疫機能の維持を訴求するうえで注目されている。
- ・サイトカイン
主に免疫細胞から分泌されるたんぱく質で、細胞間の情報伝達を担う物質の総称。細胞の増殖など様々な生理作用を引き起こす。IL-17A は感染防御、CSF2は免疫細胞の分化などに関与することが知られている。
- ・自然免疫
生まれつき体に備わっている免疫の仕組み。病原体などの異物が体内に侵入したとき、いち早く反応して排除する。
- ・獲得免疫
一度感染した病原体などの異物の断片（抗原）を記憶し、同じ異物が体内に侵入したときにより迅速かつ効果的に排除する異物特異的な仕組み。
- ・単球
白血球の一種で、自然免疫に働く。病原体や異物を飲み込んで破壊したり、破壊した断片をT細胞に受け渡すことで獲得免疫と呼ばれる異物特異的な免疫反応を開始したりする免疫の第一線での防御を担う細胞である。
- ・ナイーブT細胞
抗原（異物）に遭遇したことの無いT細胞のこと。T細胞はリンパ球の一種で、体内の異物を認識して活性化される。活性化によりCD4陽性T細胞（CD4を高発現する）はヘルパーT細胞、CD8陽性T細胞（CD8を高発現する）はキラーT細胞となる。
- ・ヘルパーT細胞
他の様々な免疫細胞の機能を調節する細胞。幅広い免疫の司令塔のような役割を担う。
- ・Th17細胞
ヘルパーT細胞の一種で、真菌や細菌の排除などに働く細胞。IL-17Aなどのサイトカインを分泌する。
- ・キラーT細胞
ウイルス感染などにより抗原提示された抗原を持つ細胞を直接攻撃し、破壊する細胞。
- ・抗原提示
単球などの免疫細胞が体内に侵入した病原体などの異物を飲み込んで分解し、その断片を細胞表面に提示する現象。これをT細胞などが認識することで情報伝達が行われ、活性化された細胞による異物を認識した特異的な攻撃が可能となる。

湿式炭化による下水汚泥の燃料化技術の実証

Demonstration of Hydrothermal Carbonization Process for Fuel Production from Sewage Sludge

田中裕大*・隅 晃彦*技術士(上下水道部門)・佐藤朋弘*・井上智行**・宮本博司***

Yasuhiro Tanaka・Akihiko Sumi・Tomohiro Sato・Tomoyuki Inoue・Hiroshi Miyamoto

下水処理場に湿式炭化の実証設備を設置し、汚泥燃料化への適用可能性を検証した。その結果、水分蒸発を伴わず少ないエネルギーで含水率30～40%の炭化物が得られ、これを養生処理することでJIS規格を満足する燃料化物を製造することができた。また、肥料規格への適合性、バイオガス発生量の増加、放流水CODの上昇の抑制効果を確認した。さらに、従来技術に対して、エネルギー自立性・温室効果ガス削減の面で優位性があり、脱炭素化と資源循環に資する技術であることを明らかにした。本技術は2025年3月に日本下水道事業団の新技术I類に選定された。

A pilot-scale hydrothermal carbonization (HTC) system was demonstrated at a municipal wastewater treatment plant for processing sewage sludge. The HTC process converted sludge into fuel that meets the JIS Z 7312 standard by achieving a carbonized sludge with a water content of 30-40% with low energy input and without water evaporation, and by curing this. The system demonstrated its conformity with fertilizer standards, improved biogas yield, mitigated increases in effluent COD, and achieved a high level of energy self-sufficiency and carbon-negative performance. This technology was selected by the Japan Sewage Works Agency (JS) as New Technology Category I in March 2025.

Key Words :

湿式炭化
汚泥燃料化
エネルギー自立
脱炭素
下水汚泥肥料化

Hydrothermal carbonization
Fuel production from sewage sludge
Energy self-sufficiency
Decarbonization
Fertilizer production from sewage sludge

まえがき

我が国では、2030年度に2013年度比で温室効果ガスを46%削減し、2050年にはカーボンニュートラルを達成するという目標が掲げられており、下水道分野においても温室効果ガスの削減が求められている。

下水処理では、微生物が有機物を分解することで水が浄化される。この過程で、増殖した微生物および下水中に含まれる固形物を主体とする「汚泥」が生じる。温室効果ガスの排出削減のためには、水の浄化過程に加え、汚泥処理時の排出抑制も課題となる。汚泥は脱水処理を行っても多くの水分が残るた

め、焼却処分する場合には補助燃料による加熱などが必要となり、焼却時には温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)および一酸化二窒素(N₂O)が発生するという課題がある。

これを解決する手段として、汚泥を焼却せず燃料として化石燃料の代わりに利用する技術が注目されているが、従来技術では、その製造過程でのエネルギー消費を考慮すると、温室効果ガスの削減効果は限定的であった。本報では、低エネルギーで固形燃料を製造可能な「湿式炭化」に着目し、その適用可能性を検証することを目的に、湿式炭化を用いた下水汚泥の利活用技術の実証を行ったので報告する。なお、

*技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室

**環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部 開発室

***環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部

本報の内容は、日本下水道事業団（JS）との共同研究「循環型社会の実現に向けた下水汚泥資源の利活用技術の開発～水熱炭化を用いたカーボンニュートラルの達成に向けた実証～」の成果の一部である。

1. 湿式炭化技術

1.1 従来の汚泥燃料化技術の課題

従来の汚泥燃料化技術としては、乾燥や熱分解炭化がある。汚泥は生物由来のバイオマスであり、汚泥燃料はカーボンニュートラル燃料と位置付けられ、利用先における化石燃料の使用量を削減できる。なお、汚泥燃料の製造にもエネルギーが必要であるため、実質的な温室効果ガスの削減効果を評価する上では注意が必要である。

下水汚泥の主成分は、前述の通り増殖した微生物などであり、細胞内に水分が保持されている。脱水機による圧搾では細胞内の水分を除去することは難しく、含水率70～80%程度の汚泥しか得られないため、そのままでは焼成が困難であり乾燥処理が必要となる。しかし、水の蒸発に多大なエネルギーを要するため、含水率の高い汚泥は、燃料化においてエネルギー収支の面で不利となる。

1.2 湿式炭化の原理と特徴

100℃以上、大気圧以上、かつ、臨界点以下の亜臨界領域で行う処理は、水熱処理または亜臨界水処理、熱水処理などと呼ばれる。1913年、Bergiusが亜臨界領域でセルロースを石炭のような物質に人工的に変換することができるプロセスを発見した¹⁾。このプロセスは、バイオマス中の有機物の炭素割合が高まる炭化反応によって固形物が得られることから、水熱処理のなかでも、液化やガス化と区別して、

水熱炭化または湿式炭化（Hydrothermal Carbonization, HTC）と呼ばれている（以下、湿式炭化と呼称）。

図1は下水汚泥における湿式炭化の原理を模式的に表したものである。脱水汚泥を加圧状態で加熱処理することで、微生物の細胞が破壊され、水分が細胞外に放出される。同時に、炭化反応により有機物が炭化し、それが水中に分散した炭化スラリー（写真1(a)）が生成される。これによって炭化スラリーの固液分離性が向上するため、圧搾によって容易に固液分離できる。このようにして得られる固形物を、炭化物（写真1(b))と呼称する。湿式炭化では、水分の蒸発を伴わずに炭化物が得られるため、必要

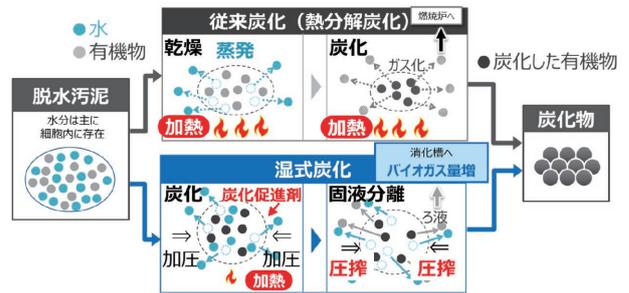


図1 湿式炭化の原理

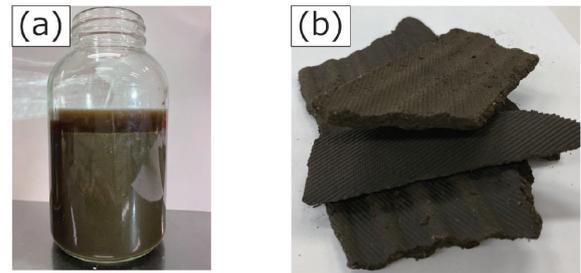


写真1 (a) 湿式炭化スラリー, (b) 炭化物

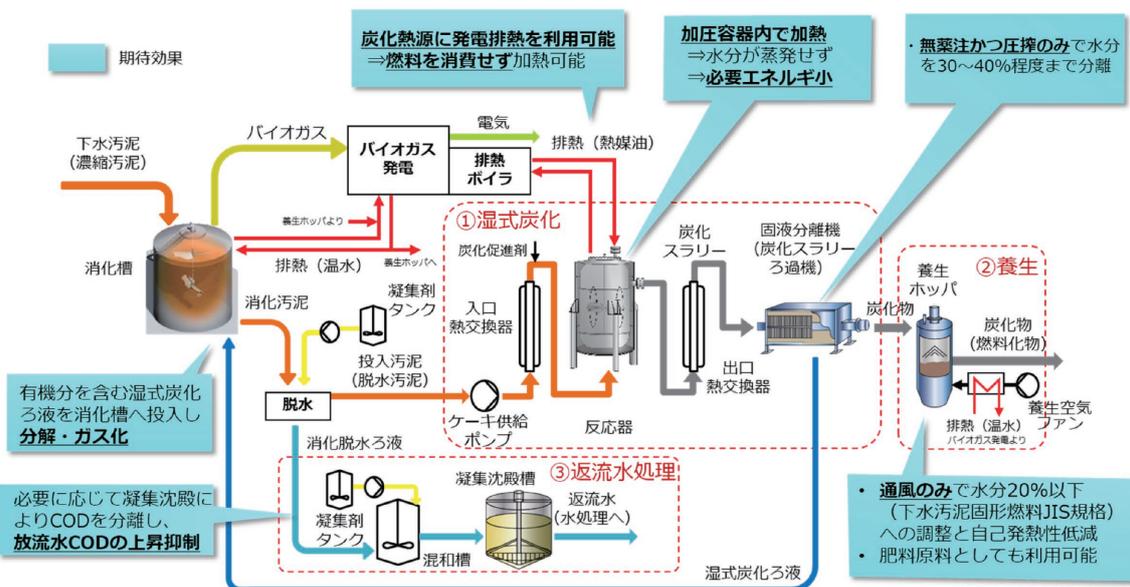


図2 湿式炭化設備まわりのフローおよび期待される効果

エネルギーが小さいことが特徴である。また、この反応は炭化促進剤の添加により促進され、より低温・低圧・短時間で完結させることができる。

1.3 湿式炭化による下水汚泥燃料化の概要と特徴

図2に湿式炭化設備まわりの詳細フローおよび期待される効果を示す。本技術は湿式炭化、養生、返流水処理の工程からなる。

湿式炭化は、湿式炭化反応器で投入汚泥を加圧状態で加熱処理した後、固液分離機により圧搾することで含水率約30～40%の炭化物を得る工程である。本技術では、代表的な下水汚泥のエネルギー化技術である嫌気性消化（メタン発酵）およびバイオガス発電との組み合わせを基本とする。これによって、バイオガス発電の排熱を利用することができ、規模によっては外部燃料を消費せずに湿式炭化反応器を加熱することができる。

養生は通風により炭化物の含水率および自己発熱性を低減させる工程である。この処理によって得られるものを本報では「燃料化物」と呼称する。

返流水処理は、消化液の脱水工程で発生する消化脱水ろ液を凝集沈殿処理する工程である。湿式炭化の固液分離で発生するろ液（湿式炭化ろ液）には、反応により溶出した有機物が含まれる。湿式炭化ろ液は消化槽へ返送され、分解されることでバイオガスとして回収されるが、有機物の一部は未分解のままとなる。消化脱水ろ液は未分解の有機物とともに下水処理工程へ返流され、処理された後に下水処理場から放流されるため、放流水の水質悪化の要因となりうる。したがって、必要に応じて返流水処理を適用してあらかじめ有機物を除去することで、それを抑制することができる。

加えて、本技術は燃焼工程を含まないため、従来の炭化や焼却技術と異なり燃焼炉を必要としない。そのため安全性が高く、無人化および省人化への対応が比較的容易であることも特徴である。

2. 方法

2.1 実証設備

富士市西部浄化センターに湿式炭化、養生、返流水処理の各設備からなる実証設備を設置した（写真2）。設備の概要を表1に示す。設備能力は5 t-wet/日であり、浄化センターで発生する脱水汚泥の約3分の1を処理可能な規模である。四季を通じた実証試験を行うことにより、湿式炭化の省エネ・創エネ性、温室効果ガス削減効果を検証した。

2.1.1 湿式炭化設備

湿式炭化反応器は、攪拌機付きの鋼製円筒形压力容器である。槽内の汚泥を加熱するため、バイオガ



写真2 湿式炭化実証設備

表1 湿式炭化実証設備の概要

設備名	処理量	標準運転条件等
湿式炭化	脱水汚泥 5 t-wet/日	反応器温度: 170℃ 反応器圧力: 1 MPa未満 反応器滞留時間: 6時間 固液分離機圧搾圧力: 2.0 MPa
養生	炭化物 1.3 t-wet/日 →燃料化物 0.9 t-wet/日	滞留日数: 3日
返流水処理	消化脱水ろ液 180 m ³ /日	凝集沈殿

ス発電機の排熱から熱回収した熱媒油を流すジャケットを備えている。この反応器は連続式反応器であり、脱水汚泥を投入ポンプと引抜ポンプにて連続的に供給および引抜が可能である。加圧状態（1 MPa 未満）で約6時間加熱（170℃）することで炭化スラリを生成した。固液分離性の良好な炭化スラリを得るため、反応器への投入汚泥には炭化促進剤（実証では硫酸）を添加した。

さらに、得られた炭化スラリをフィルタプレス式の固液分離機にて圧搾することで炭化物を得た。

2.1.2 養生設備

養生設備は鋼製円筒形ホップであり、炭化物を養生空気（約70℃）と約3日間接触させることによって、含水率および自己発熱性が低減した燃料化物を製造した。

2.2 方法

2.2.1 実証設備による評価方法

実証設備にて、平日昼間運転または24時間連続運転により脱水汚泥を処理し、炭化物および燃料化物を製造し、それらの性状を分析した。湿式炭化の特徴である、蒸発を伴わない固液分離機による圧搾によって含水率を約30～40%まで低減できることを検証するため、脱水汚泥と炭化物の含水率を測定した。また、下水汚泥固形燃料のJIS規格（JIS Z 7312）を満足する燃料化物が得られることを検証するために、燃料化物の含水率および高位発熱量を測定した。

燃料化物は常温で酸素と反応して自己発熱するた

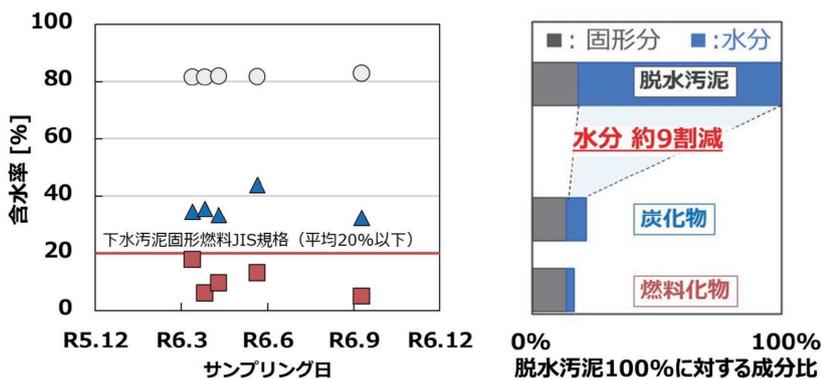


図3 脱水汚泥、炭化物、燃料化物の含水率と、水分のイメージ図

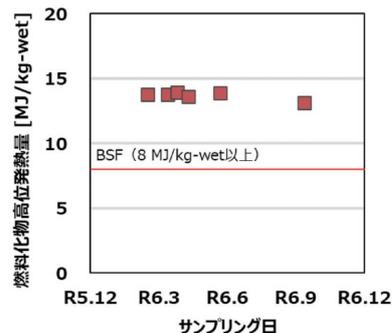


図4 燃料化物の高位発熱量 (含水率20%換算)

め、酸素消費速度 (OCR, Oxygen Consumption Rate) が自己発熱性の大小の目安となる。そこで、燃料化物を容器に密閉して恒温器内で所定時間静置した後、容器内の酸素濃度を測定し、OCRを算出して、自己発熱性を評価した。

2.2.2 ラボスケール試験方法

実証設備では処理場で発生する汚泥の一部のみを処理するため、湿式炭化ろ液の発生量が全量処理の場合と比べて少なくなる。そのため既設の消化槽や実証設備の返流水処理設備では、全量処理を想定した評価ができないことから、全量処理を想定したラボスケールの消化試験と凝集沈殿処理試験をそれぞれ実施した。

湿式炭化ろ液の分解性とバイオガス発生量を評価するため、2系列の50 L ジャー試験装置にて、消化試験を実施した。消化日数25日に相当する濃縮汚泥を投入する対照系と、同量の濃縮汚泥に汚泥全量を湿式炭化処理した場合に相当する量の湿式炭化ろ液を添加した試験系の2系列を設け、有機物の指標である揮発性固形物 (VS) の分解率およびバイオガス量を比較した。この消化試験で得られる試験系の消化汚泥は、汚泥全量処理を模擬したものであり、以下「消化汚泥 (全量処理を模擬)」と呼称する。

返流水処理による放流水のCOD (化学的酸素要求量。水中の有機物量を表す水質指標) の上昇抑制を検証するため、消化汚泥 (全量処理を模擬) を固液分離し、上澄みを原水とした凝集沈殿処理試験を実施して、COD除去率を求めた。pH調整には硫酸を使用し、凝集剤として塩化第二鉄を使用した。

3. 結果

3.1 湿式炭化による炭化物含水率と燃料化物のJIS規格適合性の検証

図3に脱水汚泥、炭化物および燃料化物の含水率を示す。含水率約80%の脱水汚泥から、含水率約

30～40%の炭化物が得られた。これは、脱水汚泥中の水分の約9割が蒸発を伴わずに除去されたことに相当する。さらに、養生処理によって炭化物の水分を調整した結果、下水汚泥固形燃料 (JIS Z 7312) の基準を満足する、含水率20%以下の燃料化物が得られることを確認した。

図4に燃料化物の高位発熱量 (含水率20%換算) を示す。高位発熱量は平均で14 MJ/kg-wetであり、JIS Z 7312のBSF (8 MJ/kg-wet以上) を余裕をもって満足することを確認した。

3.2 燃料化物の自己発熱性の評価

表2に養生工程後の燃料化物のOCRの結果を示す。いずれも亜瀝青炭相当のOCRである5 mg-O₂/(g-DS・日)相当²⁾よりも低い値であった。よって、養生ホッパで炭化物に空気を通風することで、自己発熱性の低い燃料化物が得られることを確認した。

3.3 湿式炭化ろ液の分解性およびバイオガス発生量の評価

図5に、小型消化試験における濃縮汚泥と湿式炭化ろ液のVS投入量および処理結果を示す。湿式炭化ろ液由来のVS分解率は65%であり、湿式炭化ろ液の有機物が分解することを確認した。

また、有機物の分解に伴い発生するバイオガスの量についても比較した結果、湿式炭化ろ液を添加した試験系では、非添加の対照系に対してバイオガス発生量が5.6%増加 (湿式炭化ろ液のVSおよび添加量による補正後では6.3%) することも確認した。

3.4 返流水処理による放流水CODの上昇抑制確認

図6に凝集沈殿処理試験の結果を示す。pH5に調整した場合およびpH調整なしの場合ともに、消化脱水ろ液のCODを除去できることを確認した。ここで、COD除去率25%は、放流水CODの上昇を1 mg/L以下に抑えられたことに相当する。

表2 燃料化物のOCR [mg-O₂/(g-DS・日)]

冬季	春季				夏季
R6.2.16	R6.3.14	R6.3.27	R6.4.11	R6.5.23	R6.9.10
4.4	2.8	0.53	1.9	2.7	0.30

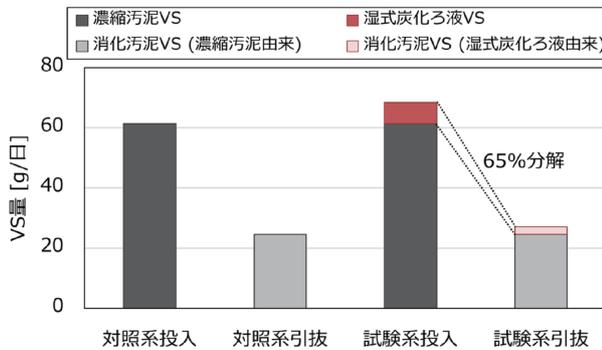


図5 濃縮汚泥と湿式炭化ろ液のVS投入量と処理結果

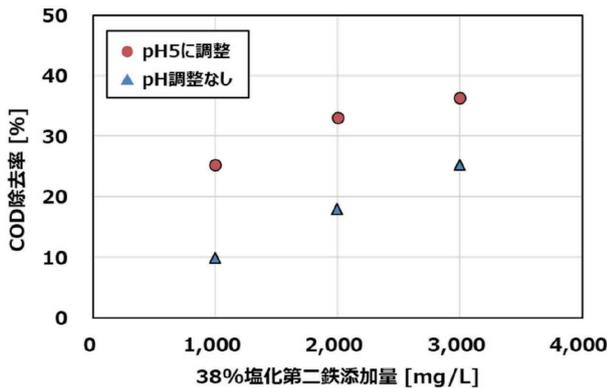


図6 消化脱水ろ液の凝集沈殿試験結果

表3 各試算の対象プロセス範囲

	主ポンプ 水処理	汚泥 処理	汚泥 燃料化	バイオガス 利用	汚泥 燃料利用	検証項目
エネルギー 収支	-	-	○	-	○	燃料化のエネルギー自立
CO ₂ 収支	○	○	○	○	○	下水処理のCO ₂ 収支≤0

表4 試算条件

項目	条件
試算規模	投入汚泥処理量：25 t-wet/日
脱水汚泥（消化汚泥）※1	含水率：81% 高位発熱量：17.23 MJ/kg-dry
CO ₂ 排出係数 ※2	電気：0.00025 t-CO ₂ /kWh 都市ガス：0.00223 t-CO ₂ /m ³ 石炭：2.33 t-CO ₂ /t
温暖化係数 ※3	CH ₄ ：28, N ₂ O：265
主ポンプ/水処理/汚泥処理（燃料化除く）必要エネルギー ※2	
比較技術必要エネルギー ※4	

- ※1：実証結果等に基づき設定
- ※2：下水道における地球温暖化対策マニュアル等
- ※3：地球温暖化対策推進法施行令
- ※4：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン-平成29年度版-
下水汚泥固形燃料化システムの技術評価に関する報告書等

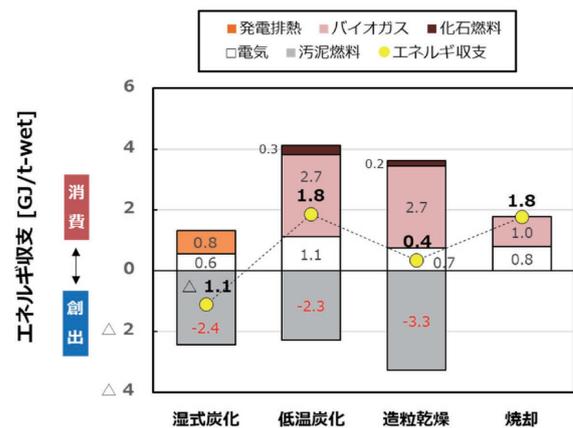


図7 エネルギー収支

4. 下水処理場への導入効果試算

4.1 試算方法

湿式炭化による汚泥燃料化のエネルギー収支、CO₂収支を試算した。燃料化物のエネルギーとその製造に要するエネルギー、および下水処理場の運転で発生するCO₂と汚泥燃料やバイオガス利用によるエネルギー回収により削減されるCO₂の関係を検証・評価するとともに、従来技術である低温炭化、造粒乾燥および焼却との比較を行った。全ての技術において既設の消化槽があることを前提として、消化脱水汚泥を燃料化の対象として試算した。各試算が対象とするプロセスの範囲を表3に、試算条件を表4に示す。試算における処理規模（投入汚泥量）のベース条件は、国内で比較的処理場数が多い範囲を考慮し、日平均25 t-wet/日とした。

4.2 試算結果

4.2.1 湿式炭化のエネルギー自立と発電排熱による熱自給

図7にエネルギー収支を示す。燃料化に必要な熱、電気（一次エネルギー換算値を計上）および製造した汚泥燃料が生み出す発熱量からエネルギーを試算した結果、湿式炭化において、汚泥燃料のエネルギーが燃料化に要するエネルギーを上回り（エネルギー収支<0）、燃料化のエネルギー自立が可能であることが示された。

また、低温炭化、造粒乾燥、焼却などの蒸発による水分除去が必要なプロセスの熱エネルギーより、圧搾による水分除去が可能な湿式炭化の方が、必要な熱エネルギーが小さいことが示された。さらに、湿式炭化において熱収支を試算したところ、発電機から

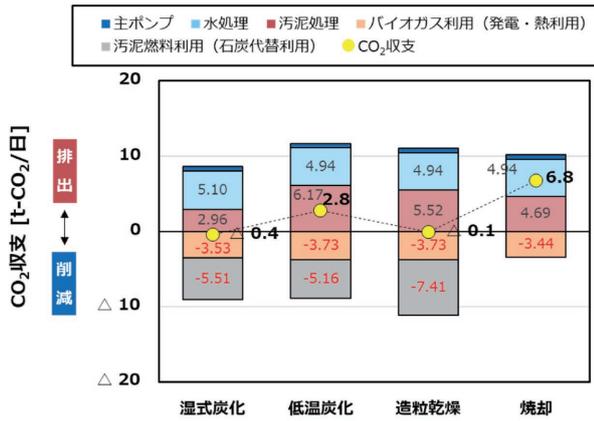


図8 CO₂収支

回収可能な排熱の合計は、消化槽加温熱量および燃料化工程（湿式炭化+養生）に要する熱量の総和を上回ると試算された。よって、汚泥処理（消化および燃料化）に必要な熱は、発電排熱により自給可能であることが確認された。

4.2.2 湿式炭化導入による下水処理のCO₂収支

図8に、処理場外での燃料化物利用を含む下水処理のCO₂収支の試算結果を示す。消化との組み合わせにより、下水処理（水処理、汚泥処理および主ポンプ）に伴う温室効果ガス排出量を上回る排出削減量が得られ、下水処理のCO₂収支 ≤ 0 の実現が可能であると試算された。これは、湿式炭化の必要なエネルギーが小さいことにより、汚泥処理に伴うCO₂排出量が抑制されるためと考えられる。

5. 炭化物の肥料利用

炭化物の肥料利用の可能性を検証するために、公定規格である菌体りん酸肥料の規格に基づき、肥効成分（りん酸）および重金属の含有量を測定するとともに、植害試験を実施した。

表5に、各シーズンにおける炭化物の肥効成分（りん酸）および重金属の含有量を示す。これらの結果は公定規格である菌体りん酸肥料の基準値をいずれも満足した。さらに、炭化物を用いた植害試験の結果（写真3）、植害は認められず、肥料登録の届出が可能であることを確認した。

表5 菌体りん酸肥料基準値との比較

単位	基準値	冬季 R6.2.13	春季 R6.4.11	夏季 R6.9.10	秋季 R6.11.15	
りん酸全量	%	≥ 1.0	5.36	7.76	11.6	8.18
As	mg/kg-DS	≤ 50	9.6	7.2	3.9	6.2
Cd		≤ 5	0.8	0.8	0.8	1.1
Hg		≤ 2	0.15	0.26	0.44	0.20
Ni		≤ 300	32	27	34	41
Cr		≤ 500	44	34	49	68
Pb		≤ 100	14	14	16	16

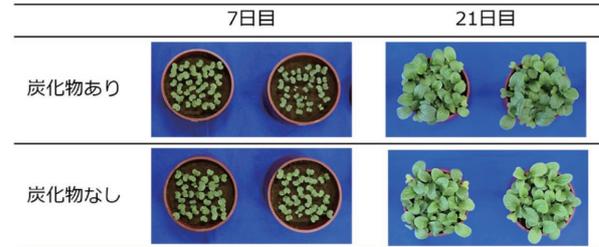


写真3 植害試験の発芽・生育状況の様子

むすび

本研究では、下水処理場に実証設備を設置し、湿式炭化による下水汚泥の利活用技術の実証を行った。湿式炭化技術はエネルギー自立性・温室効果ガス削減の面で優位性を有し、下水処理場と地域双方の脱炭素化、ならびにリン循環の促進に資することが示された。本技術は2025年3月にJSの新技術I類に選定されており、今後JS受託建設事業等への導入が見込まれる。本技術の普及促進に努め、2030年度温室効果ガス削減目標達成、および2050年カーボンニュートラル実現に貢献することをめざす。

最後に、本技術の共同研究者である日本下水道事業団ならびに、フィールドの提供をはじめ試験実施にご協力をいただいた富士市上下水道部関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) Tengfei Wang et al.: "Renewable and Sustainable Energy Reviews", Vol. 90 (2018), p223-247
- 2) 朴ら：R&D 神戸製鋼技報, Vol.64, No.1 (2014)

下水汚泥燃料の自然発熱性低減技術の実証

Demonstration of Technology to Reduce Self-Heating in Sewage Sludge Fuel

島村育幸*・福富裕太*・竹田尚弘**

Yasuyuki Shimamura・Yuta Fukutomi・Naohiro Takeda

本研究では、下水汚泥燃料の自然発熱性を低減する養生処理技術の実証試験を実施し、安全な利用に向けた技術的知見を得た。加湿空気の温度、流量、湿度および汚泥燃料の初期含水率を適切に制御することで、酸化反応による温度上昇を抑制し、酸素消費速度（OCR）を亜瀝青炭並みに低減できることを確認した。本技術は、下水汚泥燃料の安定供給と脱炭素化の両立に貢献するものであり、今後の社会実装に向けた有効な手段となる。

This study conducted a demonstration test of an aging process to reduce the self-heating of sewage sludge fuel, aiming to ensure its safe utilization. By appropriately controlling the temperature, flow rate, and humidity of humidified air, as well as the initial moisture content of the fuel, it was confirmed that temperature rise due to oxidation can be suppressed and the oxygen consumption rate (OCR) reduced to the level of sub-bituminous coal. This technology contributes to both stable fuel supply and decarbonization, and offers a practical solution for future implementation.

Key Words :

下水汚泥燃料
自然発熱性
養生処理
加湿空気制御

Sewage sludge fuel
Self-heating
Aging process
Humidified air control

【セールスポイント】

- ・下水汚泥燃料の自然発熱性を、亜瀝青炭と同等の水準まで低減
- ・養生処理中の下水汚泥燃料の温度上昇を、加湿空気制御により効果的に抑制

まえがき

近年、2050年カーボンニュートラルの実現に向けた取組みが国内外で加速しており、日本政府も「グリーン成長戦略」や「新下水道ビジョン」などを通じて、再生可能エネルギーの導入拡大と廃棄物資源の有効活用を推進している。特に国土交通省は、下水道分野における温室効果ガス排出量の削減を目指しており、令和4年度には「下水道脱炭素化推進事業」を創設し、下水汚泥の炭化処理による固形燃料化を含むエネルギー利用の促進を図っている¹⁾。

こうした政策的背景のもと、下水汚泥を炭化処理して得られる下水汚泥燃料（以降、汚泥燃料と記載）は、石炭代替燃料として発電所での利用が進んでおり、資源循環と温室効果ガス削減の両面で高い効果が期待されている。

一方で、汚泥燃料は、100℃以下の低温度域においても酸化反応により発熱が進行するという自然発熱性を有しており²⁾、製品として取り扱う際に十分な注意が必要である。令和4年12月3日には、大阪市の下水汚泥固形燃料化施設において、汚泥燃料を貯留するホップ内にて少量の汚泥燃料の異常発熱により可燃性ガスが発生し、さらに発熱した汚泥燃料自体が着火源となり、爆発事故が発生した例も報告されている³⁾。

このような事故事例も踏まえ、汚泥燃料の安全な利用に向けて、自然発熱性の低減処理や、貯留、搬送を含むハンドリング方法の確立は、より一層重要な課題となっている。

当社では、電熱スクリュ式炭化炉を用いた下水汚泥からの汚泥燃料化技術の開発を進めており⁴⁾、今

*環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部 水環境技術部 脱炭素技術室

**技術開発センター 技術開発部 資源循環技術室

後下水処理場で製造した汚泥燃料を石炭代替燃料として発電に利用する計画である。この汚泥燃料の自然発熱性低減技術を確立すべく、当社技術研究所に実証設備を設置し、実証試験を実施した。

本報では、本実証試験結果、および試験を通じて得られた汚泥燃料の安全利用に向けた技術的知見について報告する。

1. 汚泥燃料の自然発熱性とその低減技術

1.1 汚泥燃料の自然発熱性

汚泥燃料の自然発熱は、燃料表面の活性点（メチレン基、アルキル基などの不安定な活性点）が酸化反応することで起こりうる。またこの反応は、時間経過と共に活性点が安定化していくことで低下することが知られている²⁾。一例として、本報の実証試験で使用した自然発熱性低減前の汚泥燃料の酸素消費速度 OCR（Oxygen Consumption Rate）の経時変化を図1に示す。ここで OCR とは、汚泥燃料の単位重量、単位時間あたりの酸素消費量を表しており、酸素消費量に比例して酸化発熱することから、自然発熱性の程度を示す指標となる。図1より空気と接触させる時間の経過とともに OCR が低減することを確認できる。このような汚泥燃料の特性により、汚泥燃料と酸素を反応させることで自然発熱性を低減させることができる。

1.2 自然発熱性低減技術（養生処理）

当社では、汚泥燃料を酸素と十分に反応させるための設備として、炭化炉の後段に養生ホッパを導入した。図2に養生ホッパの概略図を示す。養生ホッパは、下部から加湿空気を供給し、上部から排気できる構造を有している。汚泥燃料は、養生ホッパ上部から供給されて、ホッパ内で一定期間（通常3～4日間）滞留した後、ホッパ下部から排出される。この滞留期間で、汚泥燃料を加湿空気中の酸素と十分に接触させることで、自然発熱性を低減できる。

一方で、汚泥燃料の酸化反応によりホッパ内で汚泥燃料が発熱するため、処理中の発熱を抑制する必要がある。そこで、養生処理プロセスでは、加湿空気温度、流量、湿度およびホッパに投入する汚泥燃料の初期含水率を適切に制御することで、汚泥燃料の酸化反応を促しつつ、発生する熱量を汚泥燃料中の水分の蒸発潜熱によって相殺する。これにより、汚泥燃料の自然発熱性低減と養生処理中の発熱抑制を両立することが可能となる。

以上を踏まえ、下記2点を目的に本実証試験を実施した。

- ①養生処理中の汚泥燃料の発熱を抑制可能な加湿空気および汚泥燃料の初期含水率の制御指針を

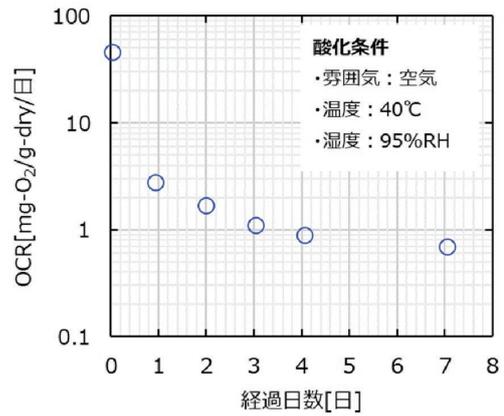


図1 汚泥燃料の OCR 経時変化

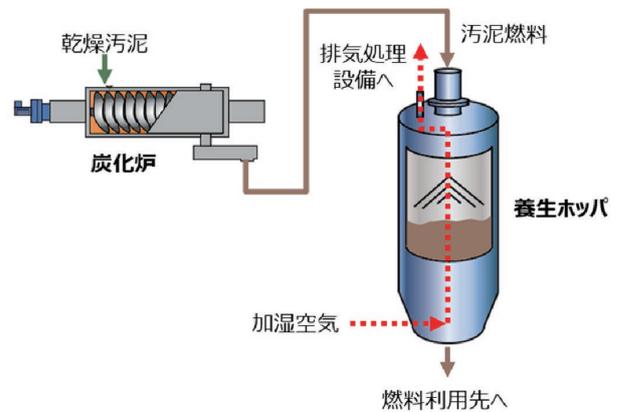


図2 養生ホッパの概略図

確立すること

- ②養生処理によって汚泥燃料の OCR を、市場で広く受け入れられている亜瀝青炭並みの水準（1.3～5.3 mg-O₂/g-dry / 日⁵⁾）まで低減すること

2. 実証試験

2.1 試験設備

本実証設備は、養生ホッパ実証機、加湿空気製造設備、およびホッパ内の異常発熱を抑制するための安全対策設備で構成されている。

図3および4に当社技術研究所内に設置した養生ホッパ実証機の外観写真および機器構成を示した。実証機は、所定の含水率に調製した汚泥燃料を供給ホッパを通じて養生ホッパ内に投入し、ホッパ下部から排出できる構造とした。また、ホッパ下部から上部にかけて加湿空気を通気できるように、加湿空気の供給口と排気口をそれぞれ設けた。

さらに、ホッパ内の汚泥燃料層温度および加湿空気温度を計測するため、熱電対をホッパ内に高さ方向に沿って10点、加湿空気供給口付近に1点設置した。



図3 実証機の外観

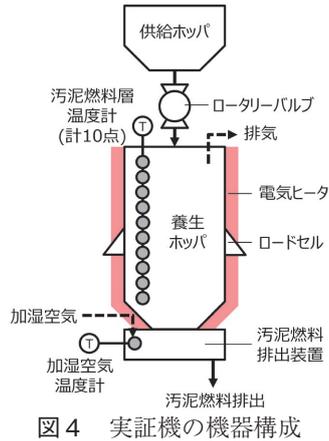


図4 実証機の機器構成

表1 実証機の規模

	実証設備	商用機(一例)
汚泥処理量(定格) [kg-dry/h]	1.52	510
養生空気流量(定格) [m ³ _N /h]	2.5	700
養生ホッパ寸法 [m]	2.5×Φ0.4	16.7×Φ2.8

表2 試験条件

項目	条件No.										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
加湿 空気	温度 [°C]	37	41	42	45	41	42	44	41	42	50
	流量 [m ³ _N /h]	2.5	2.5	2.5	2.5	1.1	2.5	3.6	2.5	2.5	2.5
	湿度 [%RH]	92	98	100	100	100	100	100	100	78	80
試験期間 [h]	22	35	122	27	24	128	24	164	122	92	

表1に実証機と商用機の設備規模の比較を示した。実証機は商用機と同一形状を維持したままスケールダウンした構造であるが、比較的小型であるため、ホッパ壁面からの放熱の影響を受けやすい。このため、ホッパ壁面には電気ヒータを設置し、内壁面近傍と外壁面の温度を一致させるよう制御することで、放熱の影響を抑制した。

加湿空気製造設備は、汚泥燃料層入口での加湿空気の温度、湿度、流量を個別に制御可能な構成とした。

安全対策設備として、ホッパ下部からの窒素供給設備およびホッパ上部からの散水設備を備えており、万一の温度上昇に対して迅速な対応を可能とした。

2.2 試料

ある下水処理場で製造され、ボイラ燃料や肥料として使用されている乾燥汚泥を当社技術研究所にて炭化処理および調湿処理し、汚泥燃料を製造した。製造後は、常温での酸化による意図しないOCRの低下を防ぐため、酸素不透過性の保管袋に窒素を封入した密封状態で保管した。

2.3 試験条件

本実証試験では、表2に示す10通りの条件で試験を実施した。これらのうち、No.1～4で加湿空気温度、No.5～7で加湿空気流量、No.1～4、8～

10で加湿空気湿度の影響を評価した。

また、養生処理による自然発熱性の低減効果については、No.10で得られた養生後の汚泥燃料を用いて詳細に評価した。

3. 試験結果および考察

3.1 加湿空気が汚泥燃料層温度に及ぼす影響

図5に、加湿空気温度と汚泥燃料層の平均温度との相関を示した。図5より、加湿空気温度と汚泥燃料層の平均温度との間には正の相関が認められた。このことから、加湿空気温度の制御は汚泥燃料層全体の温度調整に有効であると考えられる。

また、すべての試験条件において、汚泥燃料層の上層部が下層部より高温となる傾向が確認された。特に、試験条件によっては上層部と下層部の温度差が顕著に現れる場合と、比較的小さい場合があり、条件に応じた温度分布の違いが示唆された。図6～8には、加湿空気の温度、流量、湿度と汚泥燃料層内の温度差との相関を示し、図9には温度差が大きい条件 (No.8) と小さい条件 (No.9) における温度分布を示した。図6の結果から、加湿空気温度と温度差との明確な相関は認められなかった。一方図7, 8からは、加湿空気の流量が少なく、湿度が高いほど、温度差が大きくなる傾向が確認された。図9に示す温度分布では、湿度が高いNo.8では1～8段目にかけて、湿度が低いNo.9では5～8段目

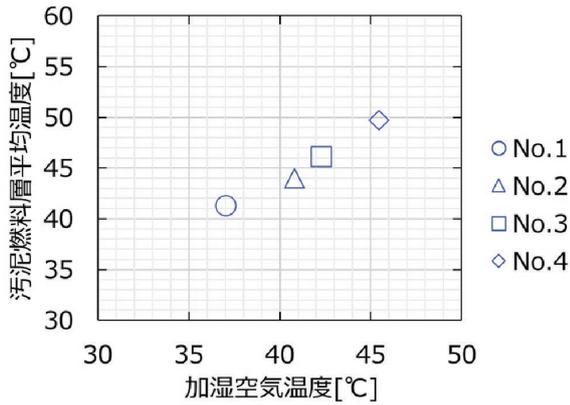


図5 空気温度と汚泥燃料層平均温度

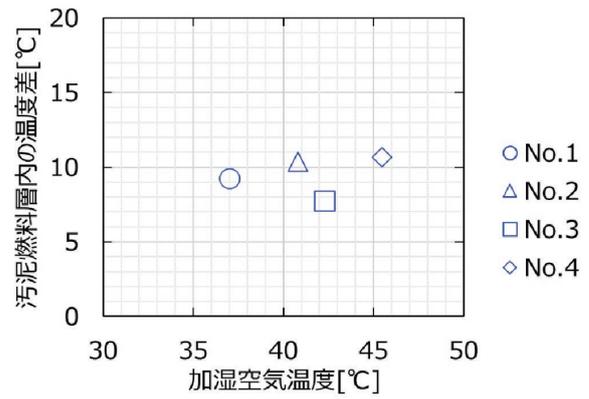


図6 空気温度と汚泥燃料層内の温度差

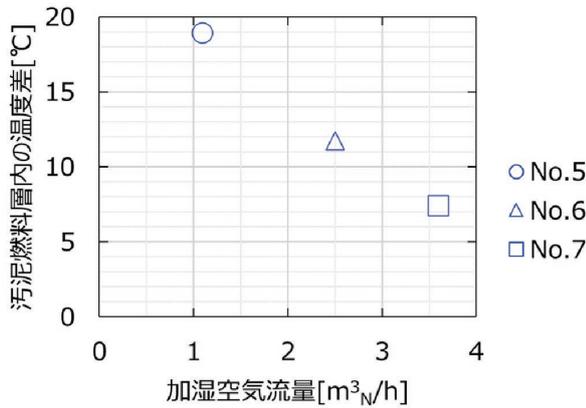


図7 空気流量と汚泥燃料層内の温度差

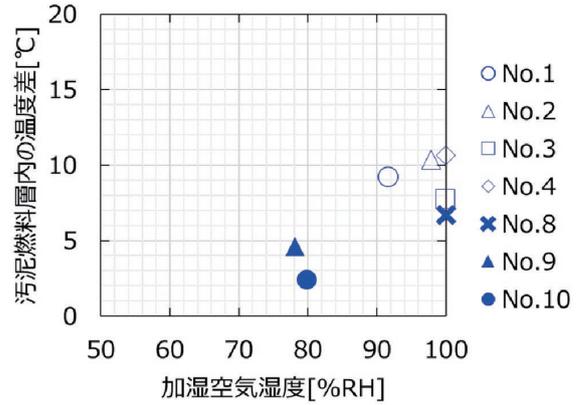


図8 No. 8, 9の汚泥燃料層の温度分布

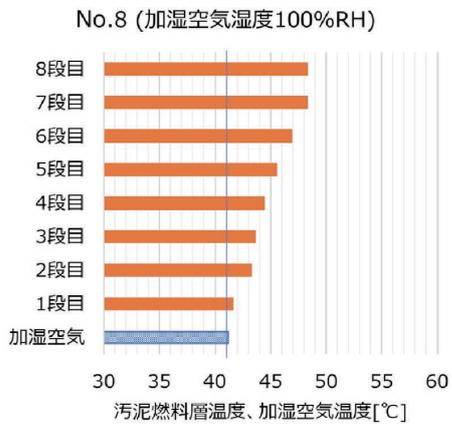


図9 空気湿度と汚泥燃料層内の温度差

にかけて汚泥燃料層温度が上昇する傾向が見られた。

この温度上昇は、汚泥燃料の酸化反応による発熱量が水分の蒸発潜熱によって十分に相殺されず、残余の熱が顕熱として汚泥燃料層に蓄積されたためと考えられる。表3には、汚泥燃料がホッパ内に72時間以上滞留し、排出時の含水率が安定していた試験条件 (No. 3, 6, 8, 9, 10) における、養生前後の含水率を示した。なお、含水率は乾燥重量基準で算出した。表3より、加湿空気湿度が高く温度上昇が大きい条件 (No. 3, 6, 8) では、加湿空気湿度が低い条件 (No. 9, 10) と比較して、水分の蒸発量が少ない傾向が確認されており、温度上昇との関連性が示唆された。

以上の結果から、養生処理中の汚泥燃料層温度を安定化させるためには、加湿空気の流量および湿度を、汚泥燃料からの水分蒸発を十分に促進可能な条件に設定することが重要であると考えられる。

3.2 養生処理による自然発熱性低減効果

図10には、図1の汚泥燃料のOCR経時変化をElovichモデル⁶⁾で近似した曲線上に、No.10における実際の養生前後のOCR測定値をプロットした。図10に示すとおり、養生処理によりOCRが10.5

表3 養生前後の汚泥燃料含水率

条件No.	含水率[%]		養生前後の含水率差[%pt]
	養生前	養生後	
3	17.7	16.2	1.5
6	12.5	11.1	1.4
8	18.6	17.0	1.5
9	17.7	15.3	2.4
10	17.6	14.7	2.9

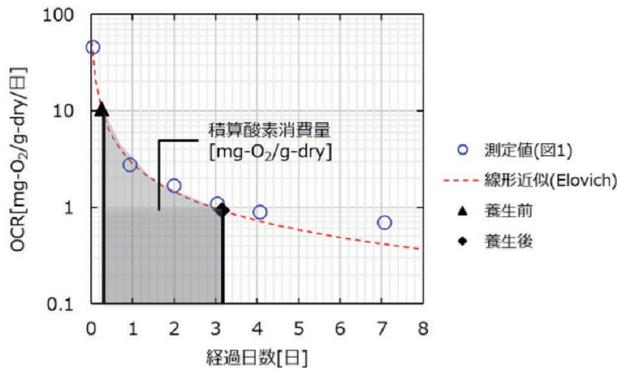


図10 養生処理での汚泥燃料の積算酸素消費量（模式図）

mg-O₂/g-dry/日から0.93 mg-O₂/g-dry/日（反応温度40℃）へと大幅に低減したことが確認された。亜瀝青炭のOCRは反応温度30～50℃の範囲で1.3～5.3 mg-O₂/g-dry/日⁵⁾であることから、本養生プロセスにより汚泥燃料の自然発熱性を亜瀝青炭と同等以下のレベルまで抑制できる可能性が示唆された。

4. 初期含水率および加湿空気条件の制御指針

3項までの試験結果から、養生処理中の汚泥燃料の発熱を抑制するためには、酸化反応による発熱量を把握したうえで、それを相殺できるだけの蒸発潜熱が得られるよう、汚泥燃料の初期含水率と加湿空気条件を適切に設定する必要があると考えられる。

4.1 初期含水率条件

まず、養生処理前後のOCR変化をもとに、養生期間中に発生した酸化反応による発熱量を試算するため、図10より養生処理中に汚泥燃料が消費した積算酸素消費量を求めた。解析の結果、養生処理中の汚泥燃料の積算酸素消費量は7.2 mg-O₂/g-dryと算出された。

この積算酸素消費量に対し、酸化発熱係数を石炭と同等の8 000 kJ/kg-O₂⁷⁾、水の蒸発潜熱を2 260 kJ/kg-H₂Oと仮定した場合、(1)式より、養生処理中の酸化反応による発熱によって蒸発した水分量は、汚泥燃料の含水率の約2.6%ptに相当すると試算さ

れた。この試算結果は、表3に示したNo.10の養生前後の含水率の測定結果と概ね一致しており、試算の妥当性が裏付けられた。

蒸発量相当の含水率 [%]=

$$\frac{\text{積算酸素消費量 [kg-O}_2\text{/kg-dry]} \times \text{酸化発熱係数 [kJ/kg-O}_2\text{]}}{\text{蒸発潜熱 [kJ/kg-H}_2\text{O]}} \times 100 \dots (1)$$

さらに、上記試算結果を踏まえ、養生処理プロセスにおける汚泥燃料の初期含水率の必要条件を検討した。本実証試験で使用した汚泥燃料の水蒸気吸脱着等温線を図11に示す。なお、水蒸気吸脱着等温線とは、測定対象が一定温度下で水蒸気を吸着および脱着する際の相対湿度に対する吸着量の変化を示す曲線である。図11より、汚泥燃料が100%RHの雰囲気下において含水率5.8%を下回る場合、水分の蒸発が困難となるため、酸化反応による発熱により周囲の湿度を低下させつつ、脱着線に沿って含水率がさらに低下することが予想される。したがって、養生処理中の酸化発熱による温度上昇を抑制するためには、汚泥燃料が少なくとも8.4% (=5.8% + 2.6%pt) 以上の初期含水率を有することが必要と考えられる。

4.2 加湿空気条件

汚泥燃料の発熱を抑制するためには、汚泥燃料が十分な初期含水率を有していることに加え、汚泥燃料中の水分が滞りなく蒸発できるような加湿空気条件設定も重要である。特に、養生ホッパ内に供給される加湿空気湿度が100%RHである場合、空気中の水蒸気量が飽和しているため、汚泥燃料が水分を保持していたとしても蒸発が進まず、結果として汚泥燃料の温度上昇を招く可能性がある。このため、加湿空気は、汚泥燃料から蒸発する水分を十分に受入れ可能な状態、すなわち加湿空気湿度に余裕がある状態で供給される必要がある。

そこで、第4.1章で求めた汚泥燃料からの蒸発量相当の含水率をもとに、以下の(2-1)式および(2-2)式を用いて、汚泥燃料からの蒸発水分量および、それを受入れ可能な加湿空気湿度を試算した。試算に用いた条件は、表4に示した。

汚泥燃料からの蒸発水分量 [g/h]=

$$\text{汚泥燃料処理量 [g-dry/h]} \times \frac{\text{蒸発量相当の含水率 [\%pt]}}{100} \dots (2-1)$$

蒸発水分を受入れ可能な加湿空気湿度 [%RH]=

$$100 - \frac{\text{汚泥燃料からの蒸発水分量 [g/h]} \times 100}{50\text{℃の飽和水蒸気量 [g/m}^3\text{]} \times \text{加湿空気流量 [m}^3\text{/h]}} \dots (2-2)$$

試算の結果、汚泥燃料からの蒸発水分量を十分に受

入れ可能な加湿空気湿度は84%RH以下と算出された。この結果は、本実証試験において加湿空気湿度を80%RHに設定した条件下で、汚泥燃料の温度上昇が抑制されたという結果と整合しており、試算の妥当性が確認された。

なお、汚泥燃料の性状（積算酸素消費量、水蒸気吸脱着等温線）は、汚泥処理に使用する凝集剤等の影響により、下水処理場毎に大きく異なる場合がある。そのため、下水処理場毎にそれらを分析したうえで、上記と同様の手順で、汚泥燃料の初期含水率と加湿空気条件を決定する必要がある。

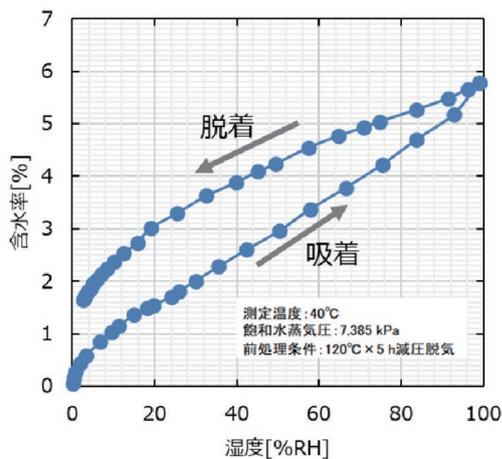


図11 汚泥燃料の水蒸気吸脱着等温線

表4 汚泥燃料からの蒸発水分を受入れ可能な加湿空気湿度の試算条件

項目	数値	
汚泥燃料	処理量 [g-dry/h]	1520
	蒸発量相当の含水率 [%pt]	2.6
温度	[°C]	50
加湿空気	流量 [m³ _N /h]	2.5
	50°Cの流量 [m³/h]	3.0
	50°Cの飽和水蒸気量 [g/m³]	83

むすび

本実証試験により、下水汚泥燃料の養生処理に関して、以下の2点の知見を得た。

- ①養生処理中の汚泥燃料における酸化反応による温度上昇を抑制するための、加湿空気条件および初期含水率の制御指針を確立した。
- ②養生処理を施すことで、汚泥燃料の自然発熱性を亜瀝青炭と同程度まで低減できることを確認した。

これらの成果により、汚泥燃料の安全な製造・貯留・搬送が可能となり、石炭代替燃料としての実用性が向上することが示された。

得られた知見は、現在当社が建設を進めている兵庫東流域下水汚泥広域処理場、琵琶湖湖南中部浄化センター、福知山終末処理場の下水汚泥燃料化プラントにおける安全かつ安定した汚泥燃料製造の実現に寄与し、下水汚泥の有効利用と脱炭素化の両立に向けた社会実装を加速するものと期待される。

なお、本研究の遂行にあたり、多大なるご協力を賜りました、委託研究先の(株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 資源プロセス研究室の皆様、ならびに(株)アントレポの重久様に深く感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 国土交通省：令和5年度 第一回エネルギー分科会 資料5 「国土交通省における脱炭素に向けての取組について」, (2023年), p.15
- 2) 日本下水道事業団 技術戦略部：下水汚泥固形燃料発熱特性評価試験マニュアル, (2008年), p.8
- 3) (株)バイオコール大阪平野：「大阪市平野下水処理場汚泥固形燃料化事業施設内における爆発事故 事故原因と再発防止策および施設の再稼働に向けての取組み」, (2023年)
- 4) 竹田尚弘ら：神鋼環境ソリューション技報, Vol. 18, No.1, (2021年), p.2-7
- 5) 朴海洋ら：神戸製鋼技報, Vol. 64, No.1, (2014年), p.24
- 6) Wu, F.-C. et al.: Chemical Engineering Journal, 150, (2009年) p.366
- 7) 池田志保ら：日本エネルギー学会石炭科学会議発表論文集 (Web), 59, (2022年), p.27

上ヶ原浄水場再整備等事業（PFI）における粒状活性炭接触池のCFD解析

CFD Analysis of a Granular Activated Carbon Contact Basin in the Uegahara Water Treatment Plant Redevelopment Project (PFI)

森藤昭博*技術士(上下水道部門)・吉田忠広**・藤本瑞生*技術士(上下水道部門)・谷澤 謙*

Akihiro Morito・Tadahiro Yoshida・Mizuki Fujimoto・Yuzuru Tanizawa

2020年から進められている上ヶ原浄水場の再整備事業は、PFI方式により設計・建設および15年間の維持管理を行うものである。本事業では、カビ臭除去を主目的とした高度浄水処理が求められ、粒状活性炭接触池を含む処理フローの最適化を検討した。同水源の上流にある千苺浄水場の運用情報を活用し、原水水質に応じた粒状活性炭接触池のバイパス運用を導入する。また、敷地制約による構造上の課題に対し、CFD（数値流体力学）解析により流動の均等性を検証し、処理性能への影響が無いことを確認した。

The redevelopment of the Uegahara Water Treatment Plant, launched in 2020 under the PFI scheme, includes design, construction, and 15 years of operation and maintenance. The project involves advanced treatment technologies primarily targeting musty odor removal, optimized through a process that incorporates a granular activated carbon (GAC) contact basin. Using operational data from the upstream Sengari Plant, the GAC basin could be bypassed depending on raw water quality. CFD analysis was also conducted to address site-related structural constraints, confirming flow uniformity and unaffected treatment performance.

Key Words :

民間資金等活用事業
粒状活性炭接触池
カビ臭
CFD解析
流動均等性

PFI: Private Finance Initiative
Granular Activated Carbon (GAC) Contact Basin
Musty odor
CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis
Flow Uniformity

まえがき

上ヶ原浄水場は、神戸市の自己水源を担う浄水場として1917年に運用を開始した。施設の経年化に伴い、2020年から浄水場の再整備事業がPFI方式により進められている。本事業は、上ヶ原浄水場の設計・建設業務、その後15年間の維持管理業務を行うもので、当社（代表企業）を含む4社でJVを組織、共同出資しSPC（特別目的会社）を設立、市とSPCが事業契約を締結している。本稿は、上ヶ原浄水場再整備における処理システムの各種検討について報告するものである^{1),2)}。

1. 処理システムの検討

1.1 水質条件について

本浄水場は千苺貯水池を水源としており、サービス対価の評価項目でもあるカビ臭が主な高度浄水処理対象である。カビ臭原因物質は主に微生物の活動によって生成し、代表的なものとして2-MIB（2-Methylisoborneol）やジェオスミンがある。要求水準では、想定する原水水質として2-MIBは30 ng/L、ジェオスミンは50 ng/L、これに対して要求される浄水水質は各々5 ng/L（管理目標値2 ng/L）である²⁾（表1）。

*環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部 水環境技術部 上水技術室

**環境エンジニアリング事業本部 水環境事業部 水環境技術部

表1 水質条件

水質項目	単位	過去10年の原水水質		要求する浄水水質	
		平均	想定する原水水質	要求水準値	管理目標値
ジェオスミン	ng/L	3	50	5	2
2-MIB	ng/L	1	30	5	2
アンモニア態窒素	mg/L	0.02	0.25 以下	—	—
鉄及びその化合物	mg/L	0.19	1.5 以下	0.03	0.03
マンガン及びその化合物	mg/L	0.091	0.8 以下	0.005	0.005
濁度	-	4.4	300 以下	0.1 以下	0.1 以下
pH	-	7.0	6.2~8.3	6.5~8.0	7.3~7.7

1.2 処理フローについて

本事業では、基本処理フローを凝集沈殿+ろ過とすることが要求水準で示されており、これに粒状活性炭接触池を組み込むことが条件となっている。粒状活性炭接触池の配置は提案によるようになっており、処理フローのどの位置に配置するか検討した。水源を同じくする千苺浄水場では、水頭差をいかした上向流で処理する粒状活性炭吸着槽が採用されている(図1)。処理フロー上、塩素処理前のため、生物活性炭機能もあると想定される。なお、4槽ある吸着槽のうち、2槽が自動洗浄(空気・気水洗浄)機能を備えている³⁾。

上ヶ原浄水場は、水源の千苺貯水池から離れてお

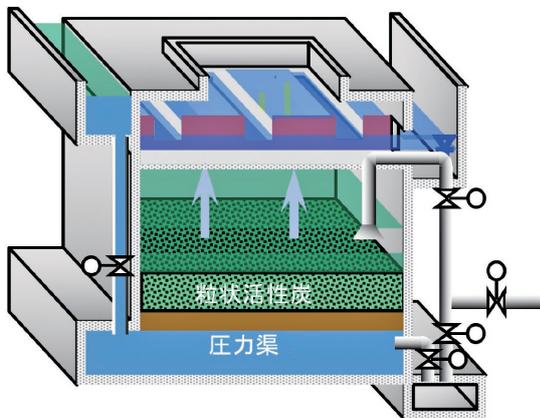


図1 上向流式粒状活性炭接触池

り、千苺浄水場から原水カビ臭濃度や変動等、原水水質の情報を入手する体制を構築する。その情報を基にカビ臭が低濃度または不検出時は、粒状活性炭接触池をバイパスして活性炭の寿命を確保する運用も可能とした。また、藻体内のカビ臭を、前塩素で藻体外へ放出させてから除去できるように、沈澱池の後に粒状活性炭接触池を配置した。その後段の急速ろ過池の前には、ピコプランクトン対策やろ過水濁度上昇抑制を目的として、再凝集槽を配置した(図2)。上ヶ原浄水場においては、西宮市条例による躯体等高さ制限があり、水頭差にあまり余裕がとれなかったため、必要水頭差が小さく、また目詰まり抑制と粒状活性炭接触池の接触効率を考慮し、千苺浄水場と同じ上向流式を採用した。

1.3 粒状活性炭接触池のバイパスについて

上ヶ原浄水場は、水源の千苺貯水池から15 km ほど下流にあり離れているため、千苺浄水場から原水カビ臭濃度やその変動等、原水水質の情報を適時入手し、その情報をもとに、カビ臭が低濃度、または不検出時は、粒状活性炭接触池をバイパスして活性炭の寿命を出来るだけ確保する運用を行う予定である。以下に現状検討しているバイパス運用方法について説明する。

上ヶ原浄水場の水源の千苺貯水池、また千苺浄水場原水のカビ臭は、年間の6割程度の期間で発生、

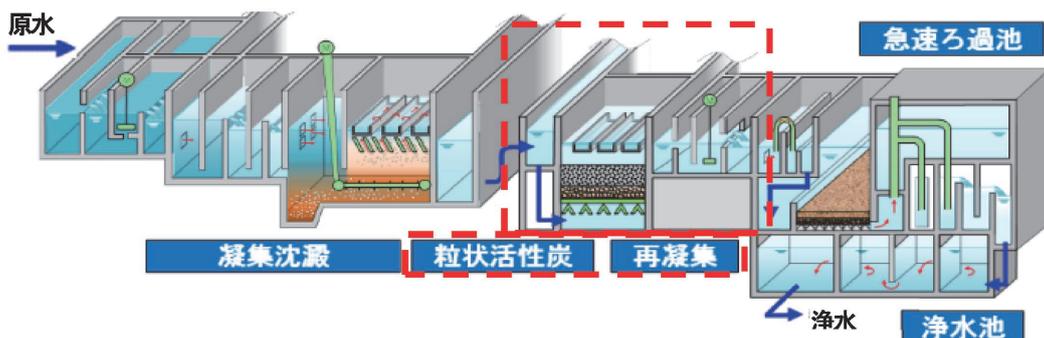


図2 上ヶ原浄水場フロー

濃度が高まる状況となっている²⁾(表2)。

粒状活性炭接触池の運用方法は、千苺浄水場からの水質情報を適時入手する体制を構築した上で、上ヶ原浄水場の原水水質予測を行い、粒状活性炭接触池の通水、バイパスを行う。千苺貯水池および千苺浄水場の原水カビ臭濃度が低いときは、粒状活性炭接触池をバイパスし、濃度の上昇傾向がみられると通水に切り替える。今回、沈澱池の後に粒状活性炭接触池を配置するため、前塩素で藻体内のカビ臭を外へ放出させ、粒状活性炭で確実に除去する²⁾。

暫定管理値については、過去の原水カビ臭濃度の発生状況を整理し、発生時濃度やその上昇速度を勘案して定めている(以下)。

＜暫定管理値＞

「千苺貯水池カビ臭濃度が10 ng/L を超える、また

は上ヶ原浄水場の原水カビ臭濃度が3 ng/L 以上で通水開始」 ※この管理値の実効性が確認できるまでは、粒状活性炭接触池は全池常時通水する。

ハード面では、粒状活性炭や砂利の支持装置として、ステンレス製の下部配水装置を採用している(図3)。本装置は、表流水などの上水原水を直接上向流で通水する生物接触ろ過設備(U-BCF[®])に適用されている構造で、目詰まりしにくく、水、空気の均等性を長期間確保できる。

＜下部配水装置の特徴＞

- ・粒状活性炭、砂利を支持(強度3 t/m²以上)
- ・目詰りしにくい
- ・点検、清掃が容易(下面から実施)
- ・圧損が小さい(≒0.02 m)²⁾

表2 千苺浄水場 千苺浄水場のカビ臭発生状況

		4月		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月		1月		2月		3月			
		2MIB	Geos	2MIB	Geos	2MIB	Geos	2MIB	Geos	2MIB	Geos																
H25 2013	浄水場貯水池 原水	0	3	0	2	0	5	2	5	6	2	4	4	2	3	2	3	1	5	0	3	0	2	0	3		
	取水塔	0	2	0	3	2	11	5	39	5	1	8	5	3	3	2	3	1	4	0	2	0	2	0	2		
H26 2014	浄水場貯水池 原水	0	2	0	1	1	2	8	3	11	6	1	6	4	12	1	5	データ無し									
	取水塔	1	1	1	2	6	4	5	10	7	3	2	16	4	150	2	9	データ無し									
H27 2015	浄水場貯水池 原水	0	1	0	1	0	9	1	2	2	2	2	0	3	1	3	9	3	26	0	1	0	2	0	0		
	取水塔	1	2	1	2	1	145	2	3	2	4	2	2	4	2	4	39	0	44	0	1	0	1	0	1		
H28 2016	浄水場貯水池 原水	0	2	0	1	0	3	1	3	4	3	7	42	1	2	2	2	2	2	2	3	0	3	0	0		
	取水塔	0	2	0	2	0	28	3	420	10	2	5	30	1	2	2	2	4	2	2	2	0	3	0	3		
H29 2017	浄水場貯水池 原水	0		0	1	0	27	3	6	7	2	6	2	4	3	0	2	0	3	0	3	0	3	0	3		
	取水塔	0	2	1	2	4	51	4	190	12	4	5	2	3	2	0	2	1	3	0	2	0	3	0	2		

※上表の数値は、当該月の最大濃度を示す。水色以外の期間が粒状活性炭接触池を通水する期間と想定。

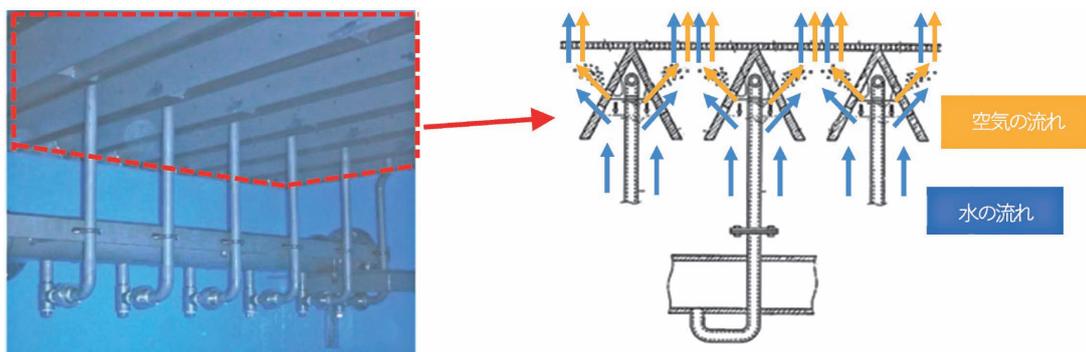


図3 下部配水装置

2. 流動解析

本浄水場は、敷地内の高地に再整備することで、送水にポンプ圧送が必要であった工程を、導水-浄水-送水の流れを自然流下方式に変更し、送水効率の向上をはかっている(図4)。この方式を実現す

るためには、限られた敷地内において、施設の適切な配置が求められる。狭小な敷地のため、全体配置において粒状活性炭接触池の躯体構造が長方形(W4.2 m × L12.9 m, 4池)となり(図5赤枠部)、池下部(圧力渠)への原水流入の均等性に懸念があ

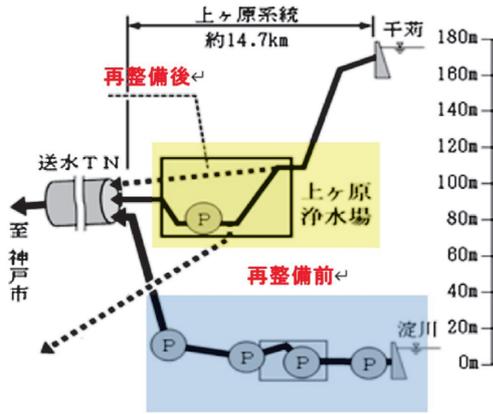


図4 再整備前後の差¹⁾

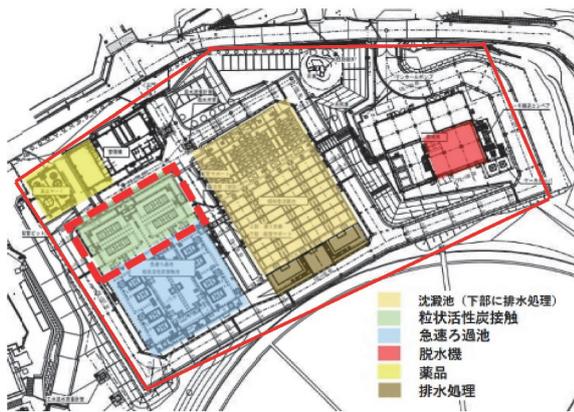


図5 粒状活性炭接触池(破線赤枠部)

った。そこで、流動解析 (CFD 解析) を行って影響を検証した。極力正確な流動を再現するため、流入部 (圧力渠) に設置する空洗配管, サポート類も障害物として設定した。解析条件は、通水や洗浄, また季節ごと通水量の変化により運転条件が変わるため、季節変化による水温の変動や水量変化による通水速度の変動を考慮し、次の条件を設定した。

- ・流速: 20 m/h および13 m/h
- ・水温: 30℃ および12℃

また、水温で変化する水の密度, 粘度を設定した。

2.1 各解析条件の結果

<解析条件①>

「LV20 m/h, 水温12℃, 池底付近～パネル (下部配水装置) 直下」(図6)

「パネル (下部配水装置) 直下～砂利～活性炭直下」(図7)

流速が早く、水温が低い条件として「LV20 m/h, 12℃」の解析結果を示す。左から池底～下部配水装置の直下 (パネル下650 mm～パネル下50 mm) となる (図6)。流入部が池の長辺に対して偏心した位置にあり、流入直後は流速の偏りが見受けられたが、上方向に流れるに従って偏りが減少し、均等性

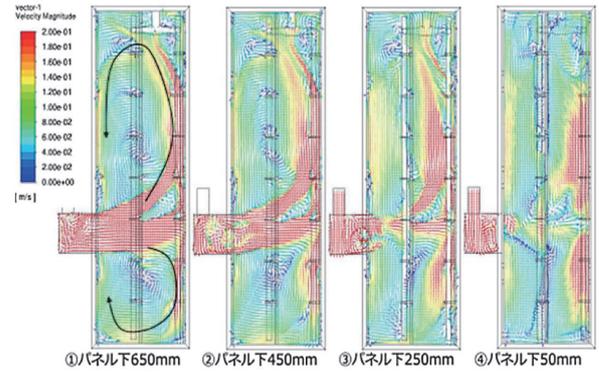


図6 LV20 m/h, 水温12℃
池底付近～パネル (下部配水装置) 直下

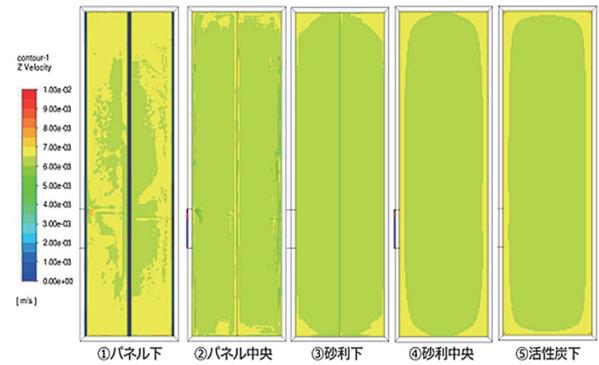


図7 LV20 m/h, 水温12℃
パネル (下部配水装置) 直下～砂利～活性炭直下

への影響は小さいことが確認できた。

次に、同じ条件下で下部配水装置の直下から砂利層を経て、活性炭層の直下までの解析結果を示す (図7)。下部配水装置の直下では流れに偏りがあるが、上方向に流れる間に均等化しており、活性炭層での偏りについては、ほぼ無いと判断できる。

<解析条件②>

「LV20 m/h, 水温30℃, 池底付近～パネル (下部配水装置) 直下」(図8)

「LV20 m/h, 水温30℃, パネル (下部配水装置) 下～砂利～活性炭下」(図9)

池底～下部配水装置の直下 (図8) では、水の粘度, 密度が小さくなり、特に均等性を確保するために設置する下部配水装置での圧損が低下して、流れの偏りが大きくなると想定したが、結果として、12℃の結果と差は見られなかった。

下部配水装置の直下から活性炭層の直下 (図9) では、12℃に比べて、下部配水装置の直下で偏りが少し大きくなったが、活性炭層の直下に向けて、流れは均等化されている。

<解析条件③>

「LV13 m/h, 水温30℃, 池底付近～パネル (下部配水装置) 直下」(図10)

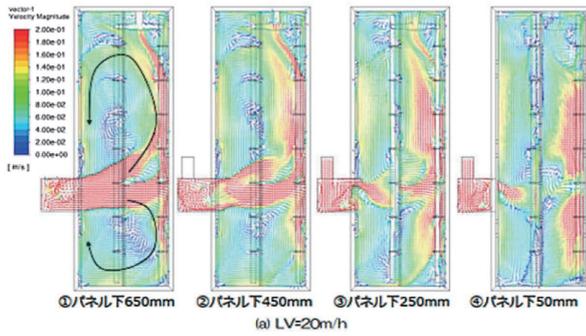


図8 LV20 m/h, 水温30℃
池底付近～パネル(下部配水装置)直下

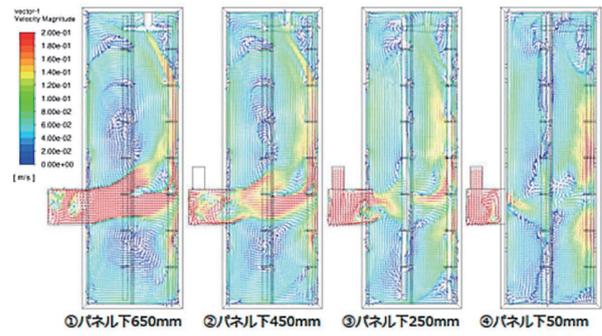


図10 LV13 m/h, 水温30℃
池底付近～パネル(下部配水装置)直下

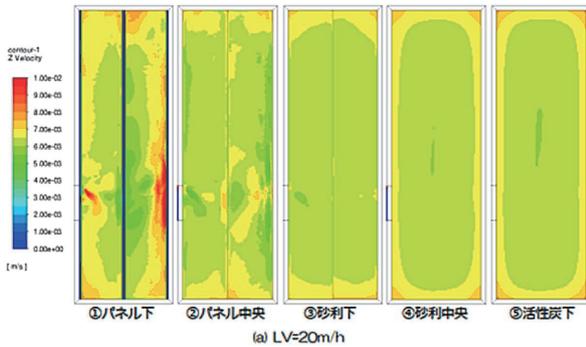


図9 LV20 m/h, 水温30℃
パネル(下部配水装置)下～砂利～活性炭下

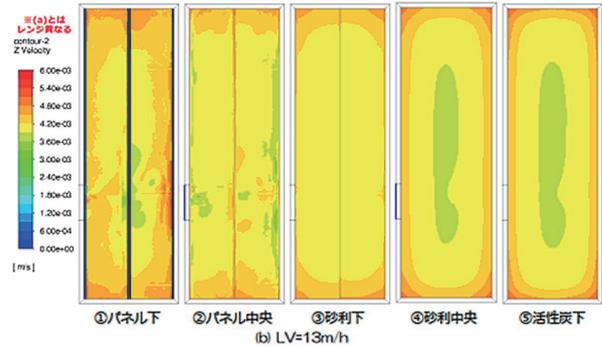


図11 LV13 m/h, 水温30℃
パネル(下部配水装置)下～砂利～活性炭下

「LV13 m/h, 水温30℃, パネル(下部配水装置)下～砂利～活性炭下」(図11)

LV20 m/h (解析条件①②) に対し, 各部圧損が小さくなり, 均等性が悪化すると想定される LV13 m/h の条件で解析した結果を示す。均等性が悪くなると想定される, 12℃より高い30℃でのみ, 流速を変えて実施した。池底～下部配水装置の直下(図10)では, 流速の低下で均等性の悪化が想定されたが, 下部配水装置の直下では, LV20 m/h より改善傾向となった。

下部配水装置の直下から活性炭層の直下(図11)では, LV20 m/h に比べて活性炭下での偏流が大きいが, 池の中心部と周辺の流速の差は数 mm/s のため, 処理性能への影響は無いと判断できる²⁾。

2.2 まとめ

各技術課題と検討結果を以下にまとめる。

- ・カビ臭除去に最適な粒状活性炭接触池のフロー配置を検討した。
- ・敷地制約によって, 粒状活性炭接触池の躯体形状が長方形となり, 池の下部への原水流入の均等性に懸念があったが, 流動解析(CFD解析)を行い影響が無いことを確認した。

2.3 今後の取り組み

以下について, 2026年度から運転開始予定の上ヶ

原浄水場の試運転および維持管理運転で確認し, 安定操業に展開していく。

- ・粒状活性炭接触池を沈澱池の後に配置し, 再凝集槽の後に急速ろ過池を配置するフローの有効性
- ・長方形の躯体構造による粒状活性炭接触池の処理性への影響が無いこと
- ・カビ臭の発生状況に合わせて, 粒状活性炭接触池を通水・停止(バイパス)を行うための暫定管理値「浄水場原水 3 ng/L または貯水池 10 ng/L 超で通水」の実効性

むすび

今回の検討を含め, 本事業においては, 要求水準に示される浄水水質を確保するため, また15カ年の維持管理運転で問題が生じないように, 各種データや情報を参考に工夫して設計した。今後建設, 試運転を行い, 維持管理が始まるが, 検討の成果が得られることを期待したい。

[参考文献]

- 1) 佐藤 匠ほか: 2021年度全国会議(2-23)「上ヶ原浄水場の再整備(PFI事業)
- 2) 森藤 昭博ほか: 2024年度全国会議(4-25)「長方形型粒状活性炭接触池における各種検討」
- 3) 八木 祐機ほか: 日本水道協会 関西地方支部 第59回研究発表会「洗浄装置付き粒状活性炭吸着槽における処理性について

ごみクレーン自動運転システムの高度化

Advancement of an automated waste crane operation system

渡邊 圭*・福川宙季*・谷田克義*博士(工学)・清水克哉**

Kei Watanabe・Hiroki Fukukawa・Katsuyoshi Tanida・Katsuya Shimizu

ごみ焼却施設ではピットや操炉状況に応じたごみクレーン操作により、ごみ性状の均一化と焼却炉への投入が行われる。一方、ごみ焼却施設では労働人口減少に伴い、熟練運転員の確保が困難になることが考えられる。従来のごみクレーン運転機能では、ごみピットの状況に応じたクレーン操作内容の自動決定ができないため、運転員のノウハウを取り入れた、より高度な自動運転機能が望まれている。当社は省人化・省力化の一環として、ピット内のごみ高さやごみの攪拌度、操業に必要な情報から、自動で最適な操作内容を決定してごみクレーンを動作させられるようにごみクレーン自動運転システムを高度化した。

In waste incineration plants, waste cranes are operated according to the pit and furnace conditions to ensure uniformity in waste characteristics and its input into the incinerator. However, with the decreasing labor force, it is anticipated that securing skilled operators will become challenging. Traditional waste crane operation functions cannot automatically determine crane operation details based on the conditions of the waste pit, so there is a demand for more advanced automatic operation functions that incorporate the expertise of operators. As part of efforts to reduce manpower and labor, our company has enhanced an automated waste crane operation system to automatically determine optimal operation details based on waste height, waste agitation level, and other necessary operational data, allowing the crane to operate accordingly.

Key Words :

ごみ焼却施設
ごみクレーン
自動運転

Incineration Plant
Waste Crane
Automatic Operation

まえがき

近年、ごみ焼却施設においてはDBO（Design, Build and Operation）による長期包括案件が一般的であり、資源の有効活用や競争力の向上の観点からLCC（Life Cycle Cost）の低減が求められている。加えて、労働人口の減少に伴い、熟練運転員の確保が困難になることが懸念される。これらを解決する手段として、IoT / AI 技術を活用した操業自動化による省人化 / 省力化が求められている。

ごみ焼却施設の操業には、各所で人手が関わる作業があるが、その1つに安定燃焼に影響するごみピットでの攪拌や積替え、炉内へのごみ投入といったクレーン操作作業があり、これらは熟練運転員のごみクレーン操作に依存している。ごみクレーンには、

クレーンメーカーが提供する自動運転機能も実装されているが、量や性状が変動する一般廃棄物を対象とするごみクレーンでは、しばしば自動運転機能を使用できない状況が発生する。例えばごみ搬入の多い時間帯では、搬入されたごみのごみ投入扉レベルまで積み上がる前に別の場所へ積み替える必要があり、自動運転では作業が間に合わない状況が発生するため、クレーン運転員が操作しなければならない。

この課題に対し当社では、(株)神戸製鋼所と共同でごみクレーン自動運転機能の高度化を目指し、2018年より技術開発を進めてきた。本報では、開発したごみクレーン自動運転システムの概要および要素技術、実プラントでの評価試験の結果について報告する。

*技術開発センター 基盤技術室

**株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター メカトロニクス研究室

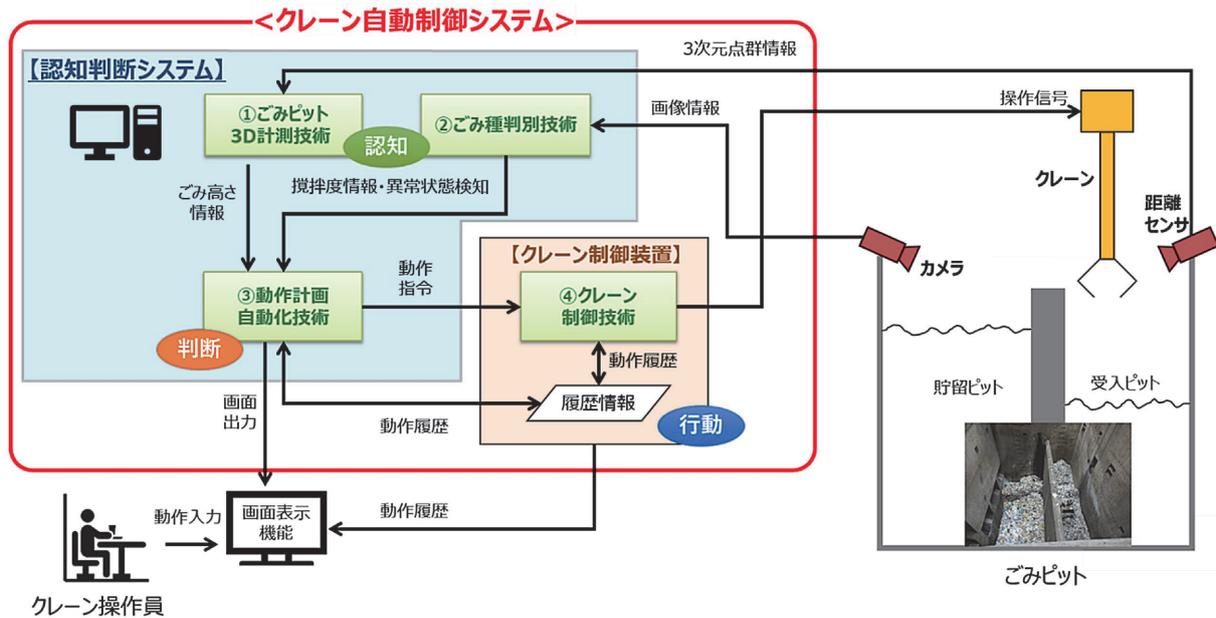


図1 ごみクレーン全自動運転システム概要

1. ごみクレーン自動運転システムの概要

図1に本システムの概略を示す。図1ではダブルピット形式（受入ピット／貯留ピット）のごみ焼却施設を例として示しており、基本的なシステムの開発はダブルピットにて行った。クレーン運転員の認知／判断／操作スキルを代替するために、ごみ高さを計測する距離センサとごみ面の画像を取得するためのカメラの情報を基にごみピットの状態を認知する機能、認知したごみピットの状態からクレーンの次の動作を決定する判断機能、および決定された動作に従いクレーンを制御する制御機能から構成されている。

2. ごみクレーン自動運転システムの要素技術

ごみクレーン自動運転システムは、1) ごみピット3D計測技術、2) ごみ種判別技術、3) 動作計画自動化技術、4) クレーン制御技術の4つの技術で構成される。

1) ごみピット3D計測技術

従来のシステムでは、クレーンのバケットがつかみ動作を行った際にごみの高さ情報を得ている。具体的には、ピット内を粗い番地に分割し、バケットがつかみ動作を行った箇所に該当する番地の高さ情報を一律に更新する。しかしながら、この方式では粗い分割による情報の分解能や情報更新のリアルタイム性（その番地でのつかみ動作時点で更新）の点で信頼性に欠ける問題があった。

そこで、高分解能でリアルタイムにごみ高さを計

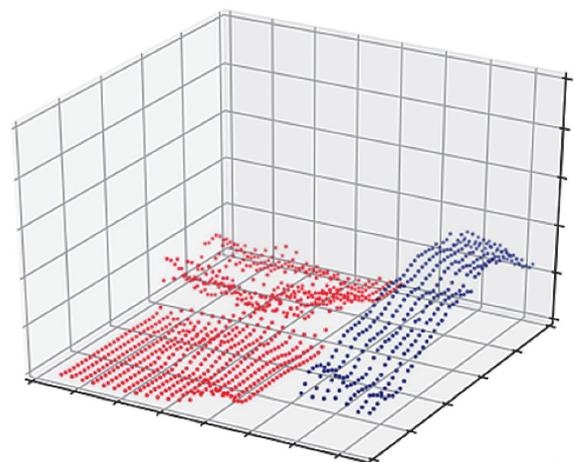


図2 ごみピット3D点群データの一例

測するため、図2のような3D点群データが得られるレーザ式距離センサによる連続計測方法を採用した。具体的には、死角ができるだけ少なくなるようピット対面に2台のセンサを設置し、各センサで取得した3D点群データに対してごみピット座標系に合わせた回転・平行移動処理を施し合成する。その後、外れ値の除去処理と内挿補間処理を行うことで、クレーンの映り込みや死角領域が存在してもごみピット全面のごみ高さを安定的に取得できるようになった。本技術によりごみ高さデータの信頼性が向上し、高精度なクレーン制御が可能となった。

2) ごみ種判別技術

焼却炉にてごみを安定的に燃焼させるためには、ごみ質を均一化することが重要である。そのために

は最適なクレーン動作を決める指標となるごみの種類を判別する機能や、焼却炉に投入するごみを適切に決定する判断基準となるごみの攪拌度合いを定量的に把握する機能が必要となる。本技術ではピット画像から袋ごみや汚泥などのごみ種を学習させ、学習モデルの推論結果を基に攪拌度としてごみ攪拌状態の定量指標を定義した。

過去に実施したごみ種判別結果を図3に示す。図中の緑色の矩形は未攪拌の袋ごみと判別されている箇所を示している。図3(a)では、未攪拌ごみが多く検出されているが、図3(b)では検出が少ない。このように、ごみ種判別の検出量によって攪拌度合いを把握する。

3) 動作計画自動化技術

動作計画では、まずピット内および操炉状況を把握するため、ごみピット3D計測技術およびごみ種判別技術により計測したピット内視覚情報(ごみ高さ、ごみ種、攪拌度)および運転情報(投入要求、搬入扉開閉情報など)を取得する。取得した情報から動作計画ロジックによりクレーン操作を判断し、操作命令に関する信号をクレーン制御装置へ送信することで、自動運転を実現する。

動作計画ロジックは、熟練運転員へのヒアリングや過去のクレーン操作履歴データから操作ノウハウを抽出したフローチャートによって構築される。本技術では、クレーンの動作種類(攪拌/積替/投入)およびクレーンによるごみのつかみ、放しなどの動作目標位置を算出することで、ピット内情報および操炉状況を基に最適なクレーン動作をリアルタイム

に自動選択/実行することが可能となる。

4) クレーン制御技術

本技術では、動作計画自動化技術による所与の動作を実現するためのクレーン移動経路生成とクレーン動作制御を行う。

まず、図4のように動作計画自動化技術によって算出された目的値へ向かうためのクレーンの移動経路が生成される。この時、ピット内のごみや進入禁止エリアといった障害物を回避し、かつ移動距離が最も短くなる経路が生成される。

次に、クレーン制御信号(速度指令等)を決定する。目標値フィルタ(2次遅れ要素)とPID制御方式を採用し、振れ量を抑制しつつ生成された経路上を通るよう動作させる。従来のシステムではPLC(Programmable Logic Controller)を用いたラダー言語によるクレーン制御を行っていたが、クレーン制御の高度化に対応するため、C言語にて制御を行えるC言語コントローラ(三菱電機製)を採用した。これにより巻き上げ下げ・横行・走行・バケット開閉の複合同時制御を可能とした。

移動経路生成と動作制御を組み合わせることで、従来よりも高速でクレーンの移動が可能となった。

3. 汎用性向上のための技術開発

各要素技術の他、さまざまな施設に導入可能とするため、汎用性を向上させるための拡張技術の開発を行った。

3.1 シングルピット対応

要素技術開発は受入ピットと貯留ピットが分離されたダブルピット形式のごみ焼却施設を対象として

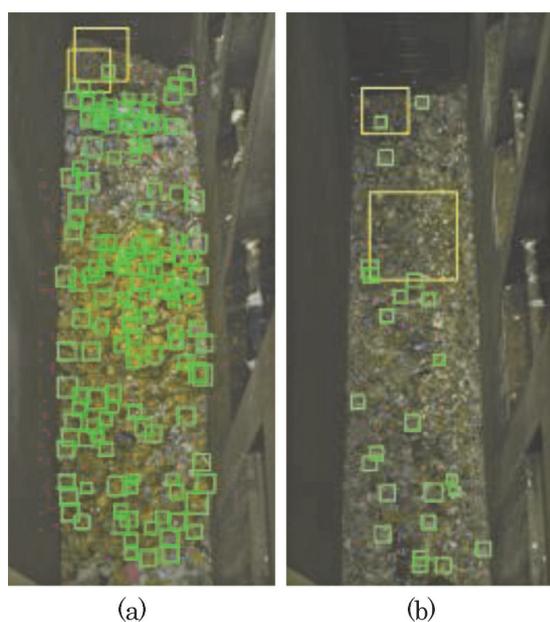


図3 ごみ種判別結果の一例
(図内緑矩形枠:未攪拌袋ごみ検出箇所)

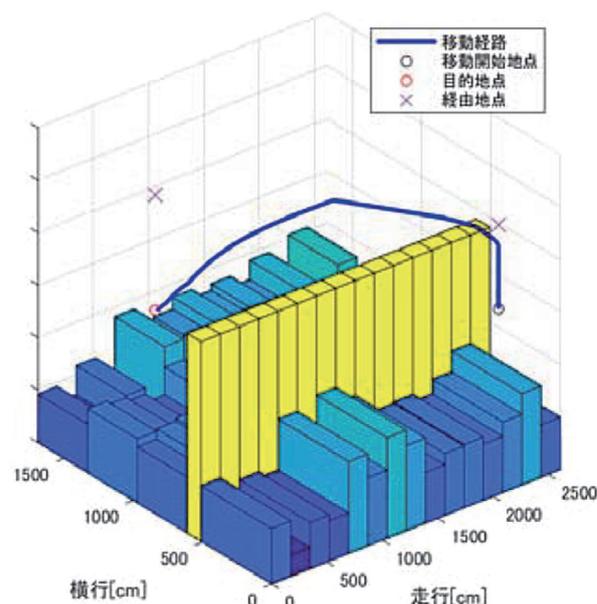


図4 クレーン移動経路生成の一例

いたが、受入ピットと貯留ピットの分離がないシングルピット形式にも対応できるよう改良を行った。

シングルピット形式では受入エリアと積替エリアの間に壁が無い場合、図5のように積み上げたごみが崩れないような土手を作る必要がある。本システムではクレーン運転員の土手作成手順を参考にしてプログラムに落とし込み、自動運転であっても土手を作成可能とした。

3.2 ごみクレーン2台同時運転技術

ごみクレーン自動化システムは動作計画ロジックの行動選択により現在のタスクに対して最適な対応を行うが、より迅速な操作が必要になる可能性を考慮して、ごみクレーンの2台同時自動運転技術を開発した。2台同時自動運転では一度に複数の動作プランを用意し、動作プラン毎にクレーン操作に割り振られた得点を計算する。その結果、最も得点の高い動作プランを実行することで、1台ずつ動作を決めるよりも全体最適化が図られる。

4. 実プラント評価試験結果

高度化したクレーン自動運転システムの有効性を評価するため、操業中の実施設（回転ストロカ炉、シングルピット、3炉中2炉稼働時）にて、約6日間の評価試験を実施した。なお、本試験では状況に応じてクレーン2台同時運転を行った。

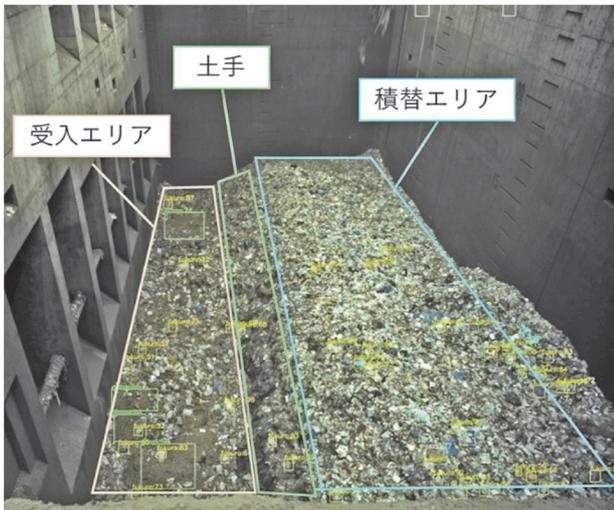


図5 シングルピットの運用

4.1 自動運転における積替速度

搬入時間帯は、図6に示すように搬入扉前の受入エリアのごみを積替エリアに積み替える作業が優先される。高度化したクレーン自動運転システムによる積替速度を評価するため、各曜日における搬入時間帯での積替エリアのごみ高さの上昇速度でごみの積替速度を評価した。

評価結果を表1に示す。表1は手動運転での積替速度を1とした時の相対的な積替速度を示しており、日によって自動運転による積替速度にばらつきが生じていることがわかる。本システムはごみ投入扉の高さまでの猶予や、その日に搬入されるごみ量の予測値などから総合的に作業内容を決定しており、ピットの状況によっては積替えよりも攪拌を優先するため、ばらつきが生じたと考えられる。なお、自動運転中にごみのごみ投入扉の高さまで積みあがることは無く、問題なく積替作業を完遂できている。

以上より、ピットの状況に応じた作業判断ができており、必要に応じて手動運転と遜色のない速度での積替えが可能であることを確認できた。

4.2 自動運転割合と手動介入操作

試験期間中に自動運転を行った時間の割合を評価した結果を表2に示す。試験中のクレーンが動作していた時間のうち、99%以上の時間を自動運転で対応できた。バケットと壁の衝突を回避するために設けた自動運転中のインターロックにより、クレー

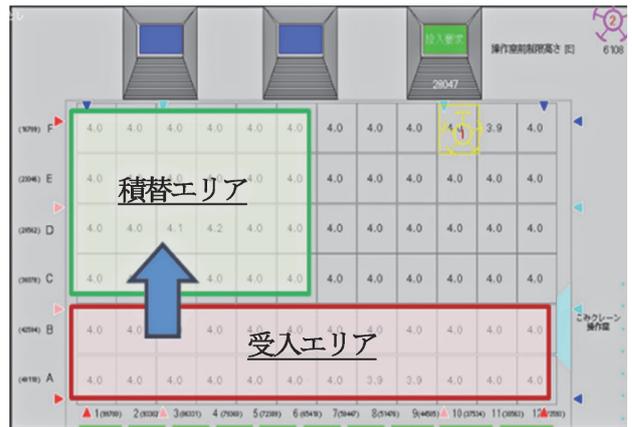


図6 搬入時間帯の作業

表1 積替速度評価結果

	月曜	火曜	水曜	木曜	金曜	土曜
手動運転	1	1	1	1	1	1
自動運転	1.05	0.92	0.66	0.86	1.02	1.10

ンが侵入できないピット壁際エリアのごみの除去作業のみ運転員が手動操作で行っており、その割合は0.4%であった。

4.3 土手形成技術

評価試験を行った施設はシングルピットであったので、土手形成技術についても評価を行った。土手とはシングルピットにおける受入エリアと積替エリアの間の斜面部分であり、各エリアを広く使うために、手動と同等の角度の土手を作る必要がある。クレーン運転員の手動操作による土手形成と、自動運転による土手形成の角度を比較した結果を図7および図8に示す。自動運転でも手動と同等の角度で土手を形成できることが確認できた。

4.4 消費電力量

ごみクレーンの動作に係る消費電力量の評価結果を表3に示す。全ての試験期間において消費電力量が低下し、平均で13%低下したことを確認した。なお通常運転時、日中はクレーン運転員による手動操作、夜間は従来の自動運転システムによる操作を行っていた。消費電力量が低下した理由は、日中はクレーン運転員の手動操作と同等のクレーン操作を実現し、夜間においては従来の自動運転システムと比較してクレーンの移動経路やバケット開閉動作が最適化されクレーンの動作効率が向上したため、1日のトータルで消費電力量が低下したと考えられる。以上の結果から、本技術は手動運転と遜色のない作業速度を有しながら、省エネルギーにも貢献できることがわかった。

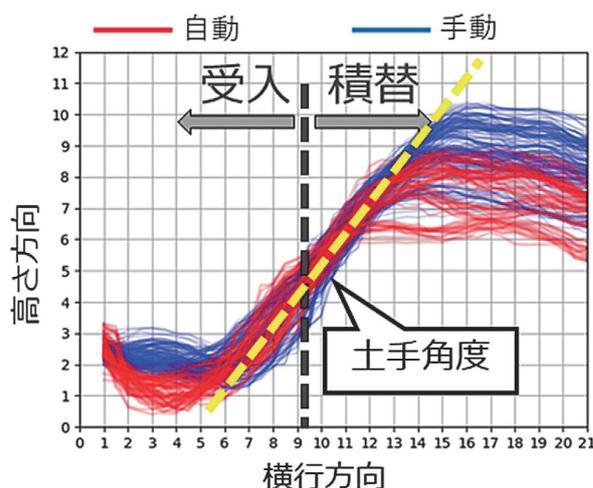


図7 ごみピット高さレベル

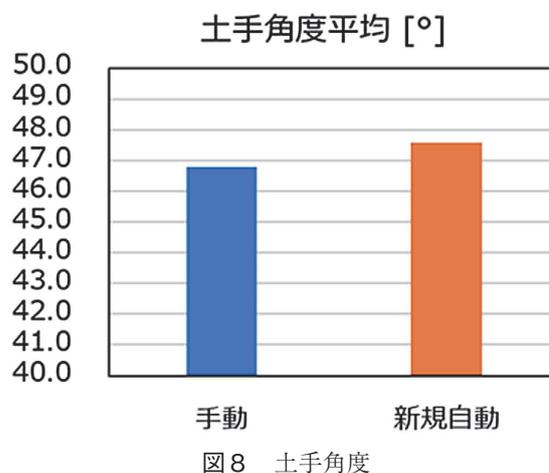


図8 土手角度

表2 自動運転割合評価結果

運転モード	運転台数 [台]	運転時間 [h]	割合 [%]	備考
自動運転	2	19.0	15.0	自動運転割合 99.6%
	1	106.6	83.9	
手動運転	1	0.5	0.4	壁際ごみ除去
停止	0	0.9	0.7	クレーン切替
合計	—	127.0	100.0	—

表3 消費電力量評価結果

	月曜	火曜	水曜	木曜	金曜	平均
通常運転時	1	1	1	1	1	1
試験期間	0.986	0.785	0.843	0.756	0.980	0.870
低下率[%]	1.4	21.5	15.7	24.4	2.0	13.0

む す び

クレーン運転員の認知／判断／操作スキルを代替する4つの要素技術と、汎用化を目的とした拡張技術により、ごみクレーン自動運転システムの高度化を完遂した。このごみクレーン自動運転システムの高度化により、手動運転と遜色のない速度での自動運転が可能となり、クレーン動作時間の99%以上の自動運転を実現した。さらに、従来と比較して消

費電力量が削減され、ごみクレーン自動運転を通じて環境負荷の低減にも貢献できることを確認した。今後、本格運用の検討を進めていく

[参考文献]

- 1) 眞野文宏ほか：神鋼環境ソリューション技報, Vol.17, No1, p.10-14 (2020)
- 2) 渡邊圭ほか：環境浄化技術, Vol.21, No.4, p.52-56 (2022)

中赤外線カメラと AI・画像処理を活用した 回転ストーカ炉内ごみ状況の定量化

Using Mid-Infrared Cameras, AI, and Image Recognition to Quantify the Status of Waste in Rotary Combustors

尾崎圭太*博士(理学)・工藤貴洋**・梶原吉郎***技術士(衛生工学部門)・谷田克義***博士(工学)

Keita Ozaki・Takahiro Kudo・Yoshio Kajihara・Katsuyoshi Tanida

国内労働人口減少の課題に対応するごみ焼却施設の運転自動化・操業安定化の一方策として、当社では中赤外線カメラを用いて回転ストーカ炉内を火炎越しに撮影し、画像 AI・解析技術を活用した炉内ごみ状況の定量化に取り組んでいる。中赤外線カメラ画像から得られる情報として、炉内ごみ量やごみ攪拌状況があり、それらの定量化による焼却炉の燃焼制御の高度化や運転補助への活用が期待される。今回、ごみ量はディープラーニングによるセグメンテーション手法、ごみ攪拌状況はオプティカルフローにより数値化する手法を活用して炉内ごみ状況を定量化する技術を開発し、実施設でその有効性を確認した。

Automatic operation of waste treatment facilities with stabilized combustion is an important way of handling the labor shortage problems. In response to this, we have been working to improve combustion control for the rotary combustor. By using a mid-infrared camera, the state of the waste layer in the rotary combustor is shown in an image. We developed a way to quantify waste status inside the furnace leveraging both waste volume using a deep-learning-based segmentation and waste agitation using an optical-flow-based method. Its effectiveness was confirmed in the implementation facility.

Key Words :

回転ストーカ式焼却炉	Rotary combustor
中赤外線カメラ	Mid-infrared camera
画像処理	Image processing
ディープラーニング	Deep learning
セグメンテーション	Segmentation
オプティカルフロー	Optical flow

【セールスポイント】

- ・焼却炉内の状況を火炎越しに観察して、炉内ごみ状況の定量化が可能である。
- ・燃焼制御の高度化や焼却炉立ち上げ時の運転補助などへの活用が期待される。

まえがき

国内労働人口の減少に伴う廃棄物処理施設の運転員確保が難しくなることが懸念されている。このため、操業安定化・運転自動化技術の開発は急務となっている。

これまで当社では、DCS (Distributed Control System, 分散型制御システム) 操作の自動化や燃焼

制御の改良に取り組み、回転ストーカ式焼却炉 (以下、回転ストーカ炉) の操業安定化に効果をあげてきた¹⁾。一方で、焼却炉内のごみの燃焼状態は炉内温度などの各種プロセス値や火炎画像を用いて推定しているのが現状であり、より直接的に炉内ごみ状況を定量化できれば、さらなる燃焼制御の高度化が期待される。

*株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター 計測技術研究室 **環境エンジニアリング事業本部 環境プラント事業部 プラント技術部 機能開発室
***技術開発センター 基盤技術室

焼却炉内のごみ燃焼状態の観察には、火炎や粉塵の影響を受けにくい波長帯である中赤外線（波長 $3.9\ \mu\text{m}$ 帯）が有効である。今回、中赤外線カメラを用いて回転ストーカ炉内を撮影することで、回転ストーカ炉の特長であるごみが反転を伴いながら攪拌される状況を火炎越しに観察可能にするとともに、最新の画像AI・解析技術を活用したごみ量やごみ攪拌状況の定量化手法を開発したので紹介する。

1. 開発背景

焼却炉内はごみの燃焼に伴う熱放射が火炎として観察されるため、目視では炉内のごみ堆積状況や攪拌状況を確認することは難しい。炭素や酸素、水蒸気が燃焼時に生成される主たるガス成分の場合、火炎の放射強度が低くガスによる吸収が少ない波長帯として、中赤外線にあたる $3.9\ \mu\text{m}$ が火炎越し観察に適していることが知られている²⁾。

今回、回転ストーカ炉（図1、処理能力:65t/日・炉）の下流側にある巡回点検用の観察窓に中赤外線有感な撮像素子が搭載されたカメラを取り付け、毎秒30フレームで炉内の撮影を行った。図2は回転ストーカ炉内の中赤外線カメラ画像である。炉内のごみ堆積状況が火炎越しに観察可能であることが分かる。また、動画で見ると傾斜したストーカ炉の回転に伴ってごみが三次元的に移動し攪拌される状況が観察された。

回転ストーカ炉内のごみ量や攪拌状況が数値化されると、焼却炉の燃焼制御や運転補助に活用できる可能性がある。そこで、これら炉内ごみ状況の定量化手法を検討した。

2. 炉内ごみ量の定量化

回転ストーカ炉には燃焼制御システムの給じん量制御に基づいてごみが供給され、1時間に1～2回の速度で同じ向きに回転することで炉内にごみ層が形成されているが、実際の炉内ごみ量は、ごみの性

状や炉内温度などの各種プロセス値によって変動する可能性がある。そこで、炉内ごみ層分布がごみ量に応じて変化することに着目し、中赤外線カメラ1台の画像情報を用いたごみ量の相対変化の定量化に取り組んだ。

2.1 画像セグメンテーション

中赤外線カメラの炉内映像はごみ層を遮るようにして連絡管が常時回転して映るため、様々な状態の画像に対して安定・高精度にごみ層分布を識別する必要がある。これに対応するため、画像中の物体領域を識別する手法であるディープラーニングを用いた「セグメンテーション³⁾」を採用した。炉内画像に映るごみ層、連絡管、炉壁を識別対象として、それら識別対象の領域を教示した学習用データ155枚を作成し、教師あり機械学習によりセグメンテーションモデルを作成した。

学習に用いていない炉内画像を学習済みモデルに入力して得られたセグメンテーション結果を図3に示す。セグメンテーションモデルにより、ごみ層や連絡管、炉壁の領域を精度よく識別可能なことが確認された。

2.2 ごみ量の定量化方法

回転ストーカ炉は常時同じ方向に回転しているため、炉内ごみ量に応じごみ層の右端位置が変化する特徴がある。そこで、図3に示すセグメンテーションにより識別したごみ層の右端位置を用いることで、炉内ごみ量の相対変化をピクセルとして数値化した。なお、炉内映像には連絡管がごみ層右端を数分間、遮るタイミングがあり、その間はごみ層右端を測定することができない。そこで、連絡管のセグメンテーション結果を用いて、ごみ層の前を連絡管が通過していることを判定するロジックを構築し、連絡管通過時は正しくごみ層右端が測定された前回値を保持する処理とした。

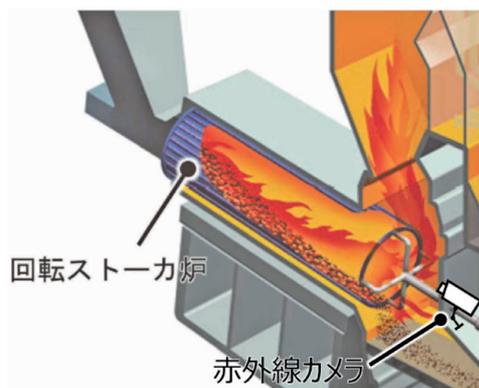


図1 回転ストーカ炉



図2 回転ストーカ炉内の中赤外線カメラ画像

2.3 ごみ量指標の測定結果

図4はごみ層右端の解析領域を回転ストーカ炉の上流側と下流側の二つの領域に設定し、開発した方法で定常運転中の回転ストーカ炉内ごみ量指標の連続測定を行った結果である。本測定期間においてごみ量指標は15:00頃まで安定しており、その後上流側のごみ量が減少して指標が低下し、約1時間遅れで下流側のごみ量が減少して指標が低下するトレンドが見られた。本測定結果より、炉内ごみ量の相対変化および上流から下流へのごみ送りの状況を定量化できることを確認できた。

3. 炉内ごみ攪拌状況の定量化

回転ストーカ炉内に形成されたごみ層は、回転する過程で安息角をこえると崩れる。ごみ崩れの大きさや発生頻度はごみの量や性状、ごみ送り速度（回転ストーカ炉回転速度）によって変動すると考えら

れる。特に大きなごみ崩れが発生すると、燃焼空気との接触面が大きく変化する（攪拌される）ことから、プロセス値変動と関係する可能性がある。そこで、時系列の中赤外線カメラ画像からごみ崩れ（ごみ攪拌）状況の定量化に取り組んだ。

3.1 オプティカルフロー

時系列画像データから移動物体を検知する画像処理手法の一つである「オプティカルフロー⁴⁾」を中赤外線画像に適用し、ごみ崩れ検知を行った。オプティカルフローでは、物体の移動方向と移動量の情報がベクトルとして得られる。

図5は中程度のごみ崩れ発生時の画像に対し、オプティカルフローにより検知された移動物体ベクトルを重ね合わせたものである。ごみ崩れ発生部のオプティカルフローによりごみ崩れを検知可能なことが確認された。本時系列画像から移動物体として検

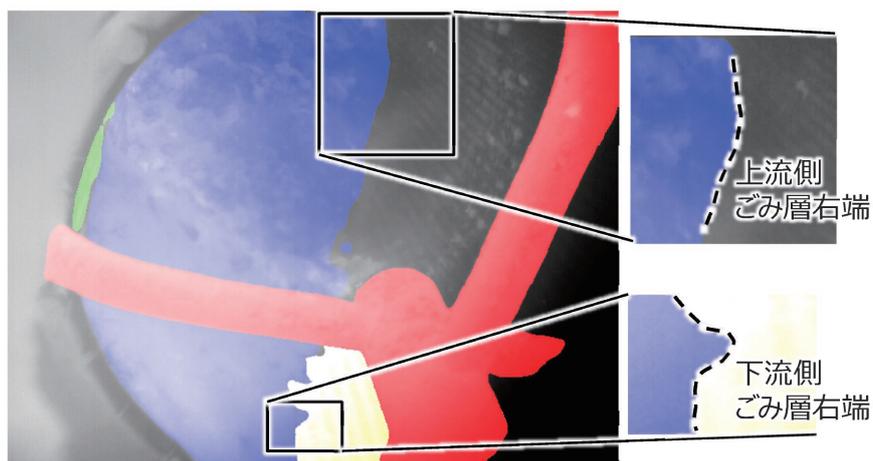


図3 セグメンテーションによる領域識別結果および上流側、下流側のごみ層右端位置
(青:ごみ層, 赤:連絡管, 黄・黄緑:炉壁)

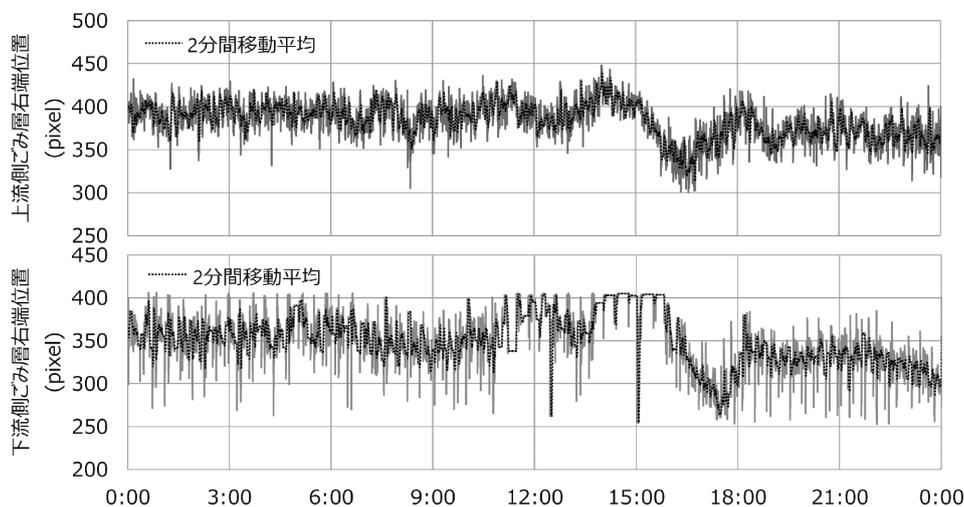


図4 ごみ層右端位置(ごみ量指標)の測定結果

知された画素（ピクセル）数は5 000 pixelであり、ピクセル数をごみ崩れの大きさを示す指標として用いていることとした。

3.2 ごみ攪拌状況の定量化方法

炉内ごみ層は不連続に大小さまざまに崩れる。そこで、ごみ崩れの大きさごとの発生頻度を算出し、定常なごみ攪拌状況と非定常なごみ崩れを識別するようにした。今回、移動物体ピクセル数が5 000以上のときごみ崩れ発生を定義して、10分間ごとのごみ崩れ発生頻度を算出した。

3.3 ごみ攪拌状況の定量化結果

図6は定常運転における回転ストーカ炉上流側のごみ崩れおよびごみ崩れ頻度の定量化結果である。

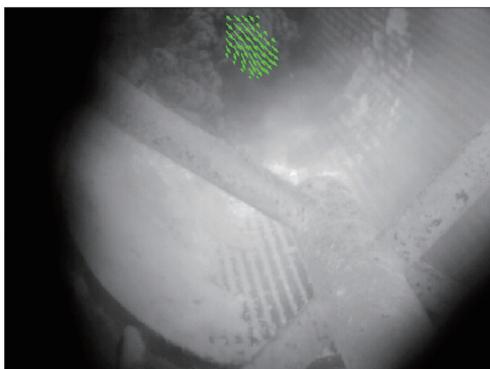


図5 オプティカルフローによる検知結果

ピクセル数の小さなごみ崩れが繰り返し発生するなかで、4：10～4：20頃にピクセル数が大きいごみ崩れがときおり発生している状況が分かる。このことから、開発した方法により炉内ごみ攪拌状況を定量化できることを確認した。

むすび

中赤外線カメラを用いることで回転ストーカ炉内ごみ状況が観察でき、AI・画像処理を活用し炉内ごみ状況を定量化する手法を確立した。今後は炉内ごみ状況の定量化情報を用いた焼却炉の燃焼制御の高度化や運転補助への活用を検討していく所存である。

[参考文献]

- 1) 工藤ら：インテリジェント制御システムの改良による長期間の手動介入操作ゼロ運転，第46回全国都市清掃会議研究・事例発表会講演論文集（2025），p.49-51
- 2) I. E. Gordon, L. S. Rothman, R. J. Hargreaves, R. Hashemi, E. V. Karlovets, F. M. Skinner, et al., The HITRAN2020 molecular spectroscopic database, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 277, 107949 (2022).
- 3) B. Cheng et al., Masked-attention Mask Transformer for Universal Image Segmentation. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2022), p.1290-1299
- 4) Gunnar Farneback, Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion, SCIA'03 Proceedings of the 13th Scandinavian conference on Image analysis, July (2003), pp.363-370.

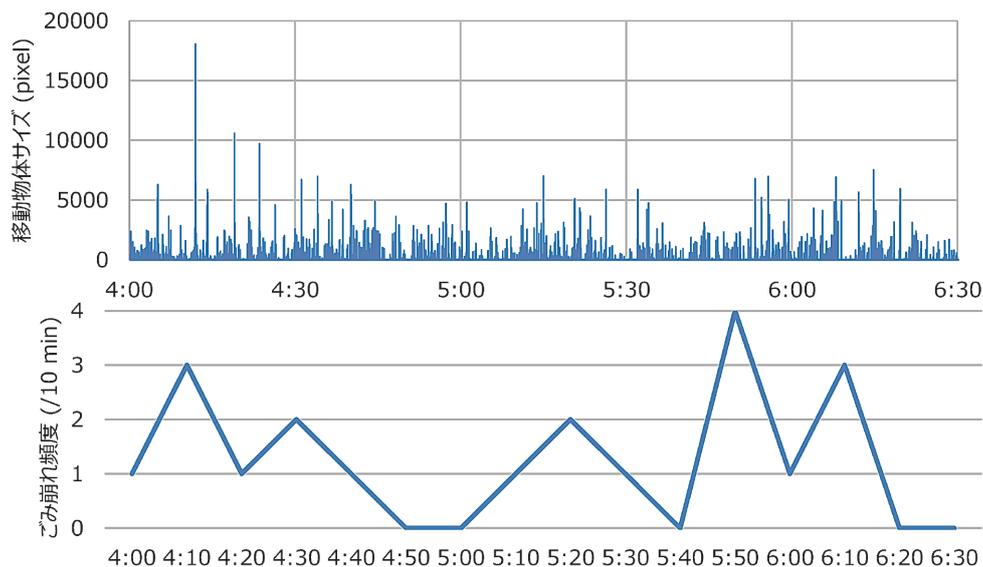


図6 ごみ崩れの検知結果(上)およびごみ崩れ頻度の算出結果(下)

糸状菌高密度培養でのフルゾーン® 翼適用による改善効果

Improvement effect of applying Fullzone® impellers in high-density filamentous fungal cultivation

山上典之*・山部 芳*

Noriyuki Yamagami・Kaoru Yamabe

糸状菌の培養では、反応槽内が高密度・高粘度の状態になることが多い。培養が進むにつれて、従来のディスクタービン翼では攪拌流動状態が悪化する。その結果、十分な混合や酸素供給ができず、菌体の増殖及び活性が低下するという問題が発生することがある。高効率攪拌翼であるフルゾーン翼を用いて一般的な糸状菌の培養を行い、従来のディスクタービン翼と比較して高い菌体濃度および菌体活性が維持できることを確認した。

In the cultivation of filamentous fungi, the interior of the reactor often reaches a highly dense, highly viscous state. As cultivation progresses, the mixing flow conditions deteriorate with traditional disc turbine impellers. Consequently, adequate mixing and oxygen supply may not be achieved, leading to decreased mycelial growth and activity. This study confirmed that by using the highly efficient Fullzone impellers for the cultivation of common filamentous fungi, higher mycelial density and activity can be maintained compared to traditional disc turbine impellers.

Key Words :

高 密 度 培 養
攪 拌
糸 状 菌

high cell density cultures
mixing
filamentous fungi

まえがき

小型ジャーファーマンタ（10L以下）およびパイロットおよび大型培養槽（10L～100 m³規模）による微生物の培養では、一般的に低粘度で通気攪拌が行われ、ディスクタービン翼（DRT）による攪拌とスパーチャによる通気が多く用いられている。しかし、糸状菌の培養では高密度・高粘度の培養になることが多く、培養が進むにつれてDRTでは攪拌流動状態が悪化し、十分な混合や酸素供給ができなくなり、その結果、菌体の増殖及び活性が低下するという問題が発生する場合がある。この様な課題に対して糸状菌培養にフルゾーン翼（FZ）を用いることで攪拌状況が改善され生産性が向上した事例報告もあるが¹⁾、ただし攪拌翼形状に着目した報告は少ない。本稿では、一般的な糸状菌を用いて培養実証試験を行い、FZとDRTを比較することで、攪拌翼形状による溶存酸素濃度(DO)の変化や乾燥菌体濃度、菌体活性などの培養過程と結果の違いを確認した。

1. フルゾーン翼について

1.1 フルゾーン翼

FZは上下にそれぞれ異なる機能を持つ特殊ワイドパドルを立体的に組み合わせた形状の攪拌翼である（図1）。混合効率の向上や槽内全体に及ぶ大きな一つの循環流の形成を通じて広い粘度範囲で効率の良い均一混合をできるなど優れた攪拌性能をもつ²⁾³⁾。



図1 フルゾーン翼攪拌機

*プロセス機器事業部 技術部 攪拌設計室

1.2 FZのガス吸収性能

培養において、ガス吸収性能は重要な因子のひとつである。ガス吸収性能の測定は、次の方法により行った。まずテスト液にスパージャから窒素を通気して液中の酸素を置換した後、攪拌および通気しながらDOを測定し、次式にて液側物質移動係数(k_La)を算出した。

$$k_La = \frac{\ln(C_1 - C_0) - \ln(C_1 - C)}{t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで

- C_1 : ガス飽和溶解濃度
- C_0 : 初期ガス溶解濃度
- C : 任意の時刻におけるガス溶解濃度
- t : 任意の時刻

である。

またガス吸収性能の測定テストで使用したテスト装置の概略図は図2に示す。DOの測定には蛍光式溶存酸素計(WTW製 光学式DO電極FDO925型)を用いた。

図3にFZと2段DRTの水-空気系での k_La と単

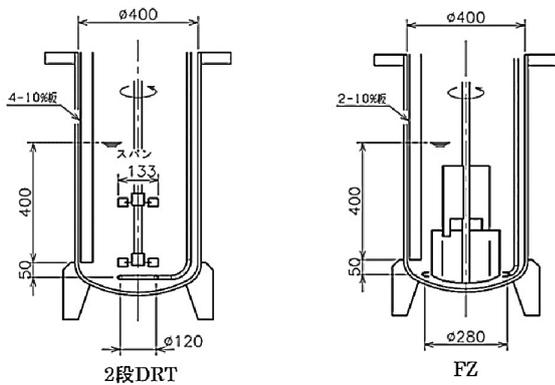


図2 テスト装置概略図

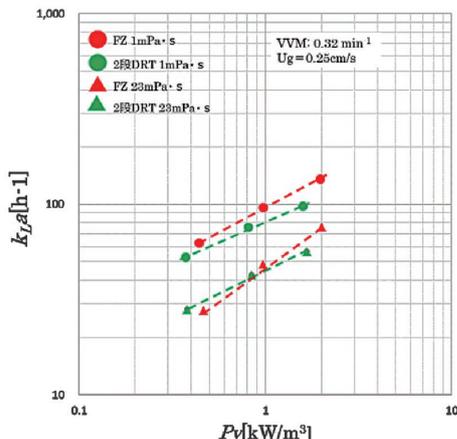


図3 FZおよび2段DRTのガス吸収性能比較

位体積当たりの攪拌動力(P_v)の関係を示す。

P_v が 1.0 kW/m^3 付近の領域において、FZでは2段DRTと同等程度の k_La が得られた。2段DRTは高いせん断力で気泡を微細化することで高い k_La を実現する攪拌翼である。一方FZは表面ガス吸収に極めて優れた性能を持っているため⁴⁾ 2段DRTと同等の k_La が得られたと考える。また同じ k_La での周速を評価すると、 k_La が 100 h^{-1} 程度ではDRTでは約 2.8 m/s 、FZでは約 2.0 m/s とFZは2段DRTにくらべ約30%低減できた。これによりせん断の影響が大きい培養系での適用が有効と考えられる。

2. 糸状菌培養実証試験

2.1 培養条件

使用する糸状菌には、ゲノム解析が行われており、標準的な糸状菌として知られる *Aspergillus oryzae* NBRC100959株を採用した。上記の糸状菌を表1に示す前培養液に植菌し、 30°C で3日間振とう培養を行った。本培養では初期仕込み量を 1.5 L とし、前培養液を 15 mL 添加した。培養槽内は 30°C に維持し、培養を開始した。また栄養源であるグルコースを培養開始24時間後から流加し、48時間(計72時間)流加培養を行った。

2.2 実験方法

図3に示すFZ(翼スパン:86 mm)、2段DRT(翼スパン:55 mm)をジャケット付透明ガラス製ジャーファーマンタ(内径143 mm 全容3 L)に取

表1 培養液の組成

前培養		
Glucose		3 g
KCL		0.2 g
KH_2PO_4		0.1 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		0.05 g
ハイポリペプトン		1 g
Yeast extract		0.5 g
イオン交換水		
		100 mL定容

本培養		
Glucose		45 g
KCL		3 g
KH_2PO_4		1.5 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		0.75 g
ハイポリペプトン		15 g
Yeast extract		7.5 g
イオン交換水		
		1.5 L定容
+でんぷん(溶性)		150 g
+SI(消泡剤)		100 μL

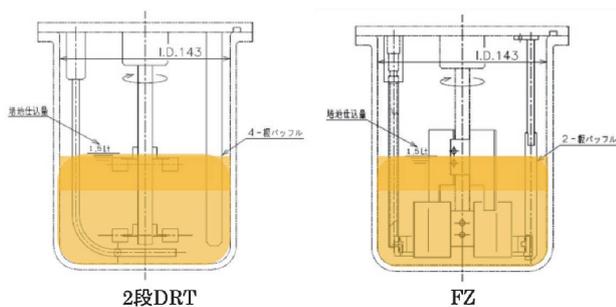


図3 テスト装置概要

付けた。また FZ には2枚の幅10 mm バッフルとリング型スパージャを取付け、2 段 DRT では4枚の幅13 mm バッフルと U 字型スパージャを取付けた。通気量は1.5 L/min (VVM: 1 min⁻¹, 空塔速度 (U_g): 0.31 cm/s), とし攪拌条件は両攪拌翼の培養初期での P_v が同等となる回転数を計算し, FZ では285 rpm, 2 段 DRT では475 rpm に設定した。また培養液は pH を5.5に制御し, DO を記録した。培養結果については培養液をサンプリングし, 菌体の乾燥菌体濃度およびジニトロサリチル酸法により遊離還元糖を定量する方法で培養上清の α-アミラーゼ濃度を測定し評価した。

3. 結果と考察

3.1 培養パラメータの比較

3.1.1 DO の比較

図4に培養中のDO経時変化を示す。両翼とも培養開始12時間後まではDOが徐々に減少する。

FZは12時間以降も培養が進行するにつれ、徐々にDOが減少する傾向を示した。これはFZでは菌体濃度が高まり、液粘度が上昇しても槽内全域を攪拌でき、混合・ガス分散出来ているためと考えられる。一方DRTではDOは不安定で、特に培養開始後40時間程度でDO=0程度を6時間示した。この2段DRTでDOが安定しない理由としては以下のことが考えられる。培養が進行するにつれ菌体濃度が上昇し、非ニュートン流体に近い槽内状況となることで、攪拌翼周辺のみ流動・攪拌し2段DRT翼から離れたDOセンサを設置している領域の流動性が悪くなったと考えられる。上記結果よりFZは、菌体増殖に伴い液粘度が上昇した場合でも、安定した培養液混合と酸素供給を可能にすると考えられる。

3.1.2 グルコース濃度の比較

図5に培養中のグルコース濃度変化を示す。本培養では栄養源であるグルコースを培養開始24時間後から流加した。両翼とも培養開始から24時間までは

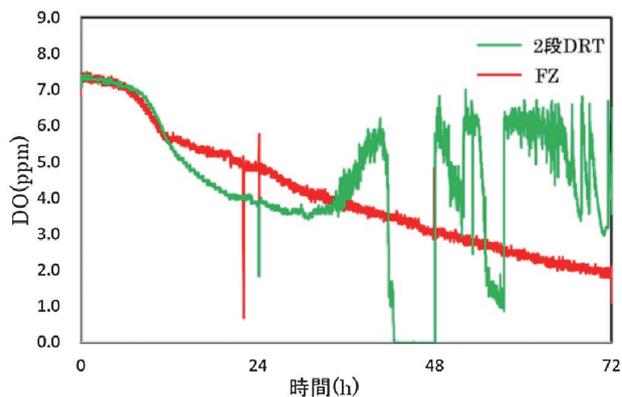


図4 DOの経時変化

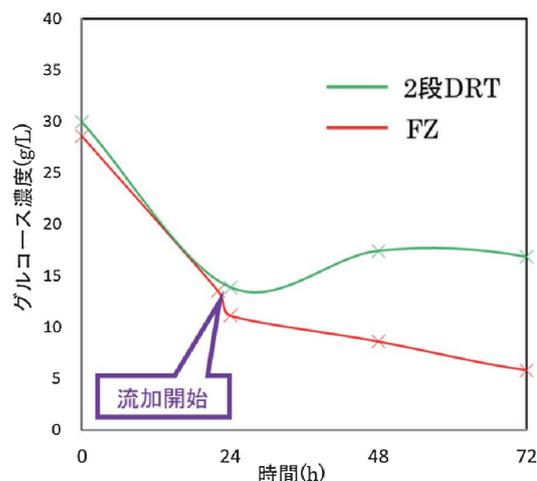


図5 グルコース濃度の経時変化

グルコース濃度が徐々に減少するが、その後はFZでのみグルコース濃度がさらに減少し、2 段 DRT では減少しない傾向が見られた。理由としては、上述の様に培養が進行するにつれ菌体濃度が上昇し、流動性が悪くなった結果、糸状菌とグルコースの会合が不十分となり、グルコースを効率的に消費できていないためと推測する。一方FZでは菌体増殖に伴い液粘度が上昇した場合でも、安定的にグルコースを消費できていると考えられる。

3.2 菌体活性の比較

3.2.1 菌体形状および菌体直径の比較

サンプリングした培養液より菌体を採取し、菌体直径の測定および菌体形状の観察を行った。図6に72時間後の菌体形状、図7に菌体平均直径の経時変化を示す。各時間において、2 段 DRT はFZ に比べて平均菌体直径が約1.5-2.5倍大きい結果となった。また2 段DRTでは菌体直径のばらつきが大きく、72時間後の菌体直径は0.51-6.46 mmと最大と最小で5.95 mmの差があった。一方FZではばらつきが小さく、72時間後の菌体直径は0.86-2.17 mmと最大と最小で1.31 mmの差であった。さらに菌体直径



図6 培養開始72時間後での菌体形状
左写真：2段DRT 右写真：FZ

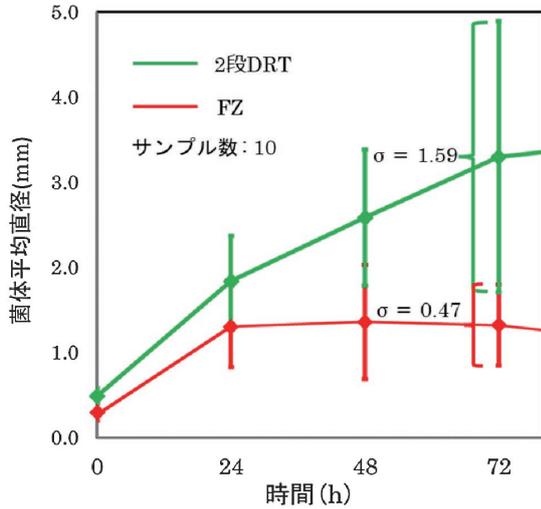


図7 菌体平均直径の経時変化

のばらつきを数値化するために、72時間後の菌体直径のばらつきを標準偏差 (σ) で表した。2段DRTでは1.59, FZでは0.47となり、FZを用いることで菌体直径のばらつきを約1/3に改善できると考えられる。

3.2.2 乾燥菌体濃度の比較

サンプリングした培養液を乾燥させ、乾燥物の重量から乾燥菌体濃度を算出した。図8に乾燥菌体濃度の経時変化を示す。培養開始48時間後の乾燥菌体濃度は2段DRTでは約14 g/L に対し、FZでは約17 g/L と約1.2倍多い結果となった。またグルコースを流加開始した24時間後から48時間後までの菌体増殖速度についてはDRTで0.32 dry-g/ (L・h) に対し、FZでは0.47 dry-g/ (L・h) と約1.4倍の速度となった。これは上記で述べたDOの経時変化およびグルコース濃度の変化とも関連していると推測される。2段DRTでは、24時間後から48時間後までのDOの挙動が不安定であり、またグルコース濃度が増加していることから、糸状菌が酸素およびグルコースを効率的に消費できていないと考えられる。一方FZでは、DOおよびグルコース濃度が菌体増殖に伴い減少しているため、糸状菌が酸素およびグルコースを効率的に消費できていることが示唆される。その結

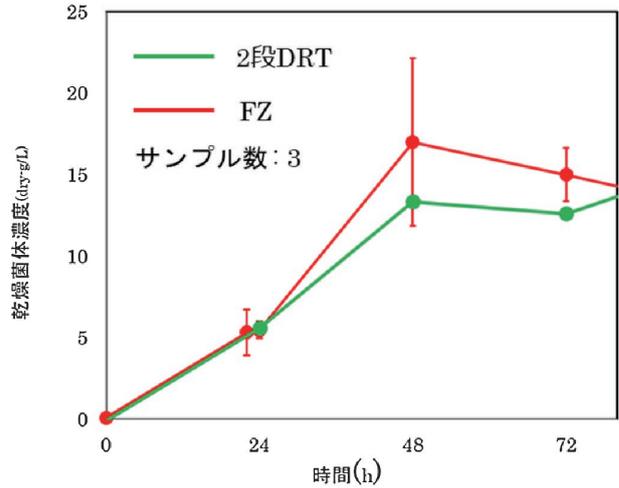


図8 乾燥菌体濃度の経時変化

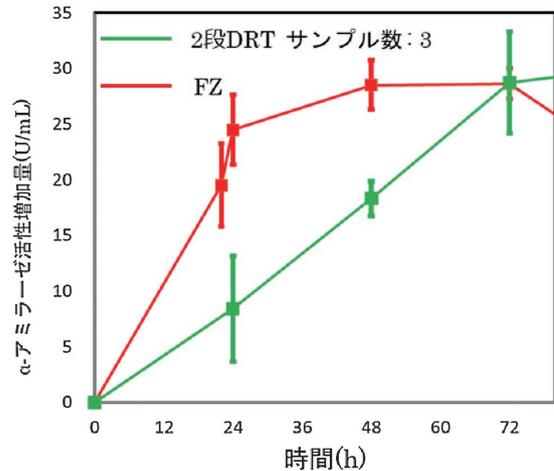


図9 α -アミラーゼ活性増加量の経時変化

果FZでは、2段DRTに比べて乾燥菌体濃度および菌体増殖速度が高くなったと考えられる。

3.2.3 α -アミラーゼ濃度増加量の比較

ジニトロサリチル酸法を用いて遊離還元糖を定量することで、培養上清中の α -アミラーゼ濃度を測定し評価した。図9に α -アミラーゼ活性増加量の経時変化を示す。なお試験によっては前培養時にすでに α -アミラーゼ活性が生じているケースもあるため、初期状態の差をなくすために、本培養開始時から各時間での α -アミラーゼ活性の増加量を評価した。

培養開始48時間後の α -アミラーゼ活性の増加量は、2段DRTでは18.3 U/mL に対し、FZでは28.5 U/mL と約1.5倍高い結果となった。また、2段DRTでは培養開始72時間後にFZと同程度の α -アミラーゼ活性を示したが、FZは48時間後ではその活性値に到達しており、FZを用いることで2段DRTに比べて培養時間を約30%短縮できると推測される。ま

た一般的に培地中にグルコースが存在すると、でんぷん分解酵素である α -アミラーゼ生産が抑制されることが知られている⁵⁾。そのため α -アミラーゼ活性の差についても、前述のグルコース濃度の変化が関連していると考えられる。2段 DRT では、グルコース流加開始後もグルコース濃度が減少せず、そのため2段 DRT では α -アミラーゼ活性の阻害が生じたと考えられる。一方 FZ では、グルコース流加後もグルコースを効率的に消費できており、 α -アミラーゼ活性を阻害することなく培養を進行できたと考えられる。

4. 今後の展望

培養プロセスでは、従来からガス吸収性能不足、混合性能不足、伝熱性能不足などの課題が指摘されている。さらに、菌体の代謝物や培養基質による発泡も問題であり、仕込み量の制限や菌体活性に影響を与える消泡剤の添加など、様々な問題が発生して

いる。今後当社の攪拌技術を用いてこれらの問題を改善できるよう、詳細な調査と改善策の検討を進めていきたい。

むすび

本稿では、一般的な糸状菌培養での攪拌翼の効果について紹介した。これらがユーザ各位の設備検討の参考になれば幸いである。最後に本稿の培養実証試験についてご協力いただいた Bio-energy 株式会社 濱真司様にこの紙面を借りて深くお礼申し上げる。

[参考文献]

- 1) 小林猛ほか, 生物化学工学 バイオプロセスの基礎と応用 2 版 東京化学同人 (2021) 7
- 2) 菊池雅彦ほか 神鋼パンテック技報 Vol.35 No.1 (1991)
- 3) 小林哲男 神鋼パンテック技報 Vol.38 No.2 (1994)
- 4) 今中照雄 神鋼パンテック技報 Vol.41 No.2 (1998)
- 5) Carlsen M. et al Influence of carbon source on alpha-amylase production by *Aspergillus oryzae.*, Appl. Microbiol Biotechnol.,3,346-349 (2001)

「廃棄物処理施設の基幹的設備改良工事」の受注と完了 ～施設の長寿命化とCO₂削減に貢献～

廃棄物処理施設は竣工後の年数が進むにつれて経年劣化による不具合や性能低下が起こってきますが、これに対して将来も安定的にごみ処理事業を継続していく必要から、後継となる新しい施設の建設という方法の他に、「基幹的設備改良工事」という既存施設の主要設備・機器の更新や改良を行って施設の延命化を図ることが行われています。

当社ではこのお客様のニーズに応えるべく、基幹的設備改良工事を通して、延命後の長期的な安定稼働の確保と最新技術の導入によるCO₂排出量の削減を行い、これまで蓄積してきた運転ノウハウを最大限活用して施設を適切な管理のもと長期間にわたり使用可能とすることで、廃棄物処理施設の整備に係わるトータルコストの縮減と平準化に寄与し、安定した安心・安全な廃棄物処理の実現に貢献します。

基幹的設備改良工事では、現在の施設がごみ処理運転に伴って排出するCO₂量を、改良工事を行うことで一定割合以上の削減を達成する等の要件を満たすことで、環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金ならびに循環型社会形成推進交付金を受けることが可能となっています。本稿で紹介する事業ではいずれもこれら補助金／交付金を活用することで事業費を抑制できております。

当社は、「今を越える発想で、健やかな環境と暮らしを次世代へ」をミッションとするなかで、これまで培ってきた計画から設計・建設・運営・維持管理までの一連の基盤技術に最新の技術を導入し、新設工事のみならず高いニーズの基幹的設備改良工事へ最適な提案で応え、2030年度に目指すべき事業像として掲げる「カーボンニュートラルのトップ企業」を目指し、今後も廃棄物処理関連事業を通じてSDGs実現に向けて取組んでいきます。

【基幹的設備改良工事の受注】

1. 岩出クリーンセンター 基幹的設備改良工事

- ①施設竣工：2008年12月（受注時 約16年経過）
- ②工 期：2024年9月から2028年2月まで
- ③焼却方式：流動床式ガス化燃焼炉
（既設：流動床式ガス化溶融炉）
- ④施設規模：65 t/日（32.5 t/24 h × 2 系列）
- ⑤本工事の特徴：

- ・稼働後約16年経過した同施設の機能を回復させると同時に、工事後15年以上の施設延命化を図ります。
- ・大幅な機器更新を行うことなく既存機器を最大限有効利用し、焼却方式をガス化溶融からガス化燃焼に変更することで、ライフサイクルコストの最小化を実現します。
- ・最新設備の導入、プレミアム高効率モータ採用、インバータ化により省電力化を図るとともに、焼却方式の変更により大幅な化石燃料の削減（省エネルギー化）を図ります。
- ・上述設備改善での省電力化、省エネルギー化によりCO₂排出量を5%以上削減することで、環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金を活用します。



2. 下関市奥山工場 180 t 炉基幹的設備改良工事

- ①施設竣工：2002年11月（受注時 約22年経過）
- ②工 期：2025年4月から2028年2月まで
- ③焼却方式：ストーカ式焼却炉
- ④施設規模：180 t/日（180 t/24 h × 1 系列）



⑤本工事の特徴：

- ・稼働後約22年経過した同施設の機能を回復させると同時に、工事後15年以上の施設延命化を図ります。
- ・最新設備の導入、プレミアム高効率モータ採用、インバータ化により省電力化を図ります。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂ 排出量を3%以上削減することで、環境省の循環型社会形成推進交付金を活用します。

【基幹的設備改良工事の完了】

1. 中津川市環境センター ガス化溶融施設基幹的設備改良工事

①施設竣工：2004年3月（受注時約17年経過）

②工 期：2021年6月から2025年2月まで

③焼却方式：流動床式ガス化溶融炉

④施設規模：98 t/日（49 t/24 h × 2 系列）

⑤本工事の特徴：

- ・稼働後約17年経過した同施設の機能を回復させると同時に、工事後10年以上の施設延命化を図りました。
- ・最新設備の導入、プレミアム高効率モータ採用、インバータ化により省電力化を図りました。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂ 排出量を5%以上削減することで、環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金を活用しました。
- ・工事は停止中の系列で順次実施することで、通常操業に影響なく進めました。



2. 生駒市清掃センター 基幹的設備改良工事

①施設竣工：1991年3月（受注時約31年経過）

②工 期：2022年3月から2025年2月まで

③焼却方式：流動床式焼却炉

④施設規模：220 t/日（110 t/24 h × 2 系列）

⑤本工事の特徴：

- ・稼働後約31年経過した同施設の機能を回復させると同時に、工事後15年以上の施設延命化を図りました。
- ・最新設備の導入、プレミアム高効率モータ採用、インバータ化により省電力化を図りました。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂ 排出量を5%以上削減することで、環境省の二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金を活用しました。



3. 西条市道前クリーンセンター 基幹的設備改良工事

①施設竣工：1991年10月（受注時約30年経過）

②工 期：2021年6月から2025年3月まで

③焼却方式：流動床式焼却炉

④施設規模：焼却施設 200 t/日（100 t/24 h × 2 系列）
粗大ごみ処理施設 30 t/5 h

⑤本工事の特徴：

- ・稼働後約30年経過した同施設の機能を回復させると同時に、工事後10年以上の施設延命化を図りました。
- ・プレミアム高効率モータ採用、インバータ化により省電力化を図りました。
- ・上述設備改善での省電力化により CO₂ 排出量を3%以上削減することで、環境省の循環型社会形成推進交付金を活用しました。

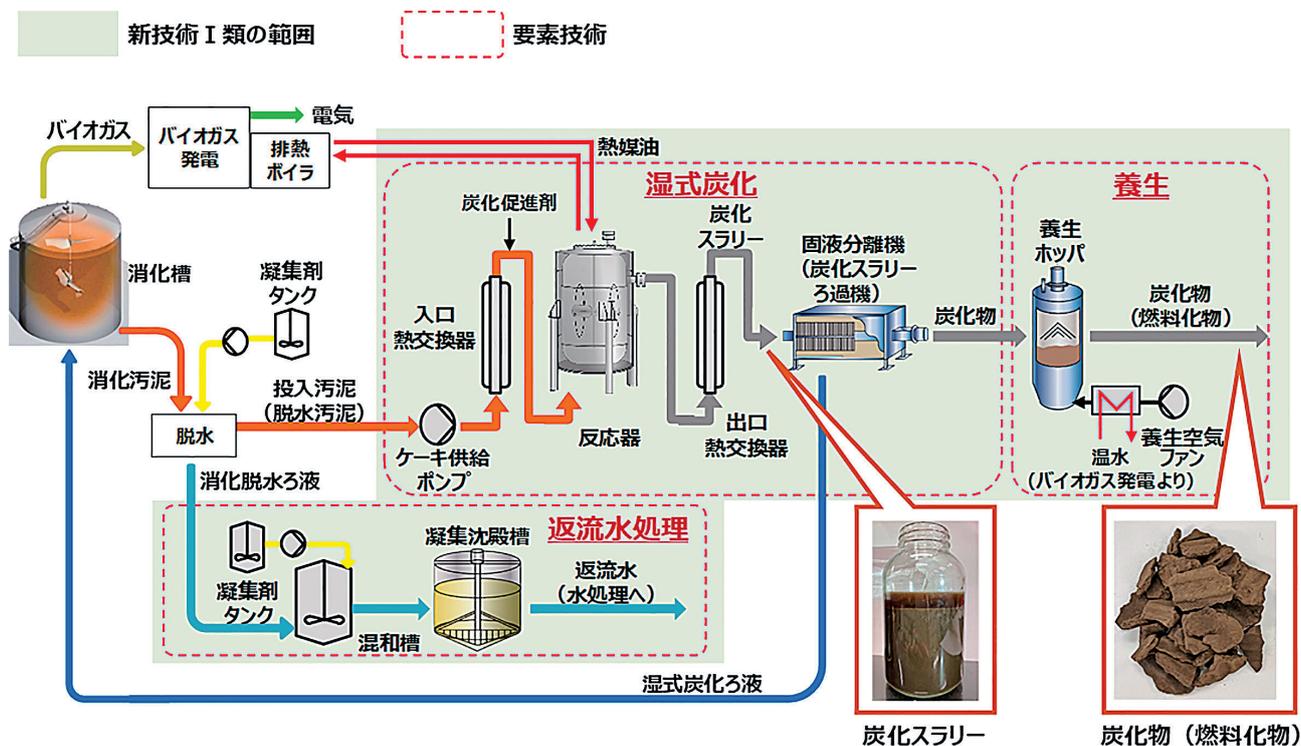


「湿式炭化による下水汚泥利活用技術」 が日本下水道事業団の新技术 I 類に選定

当社は、地方共同法人日本下水道事業団（以下、JS）と「湿式炭化による下水汚泥利活用技術」（以下、「本技術」）を共同研究・開発し、2025年3月28日、JSの新技术 I 類^{*1}に選定されました。

湿式炭化とは、脱水汚泥を反応器内で加圧・加熱して、スラリー状態（湿式状態）で炭化する方式であり、本技術はメタン発酵との組み合わせによるシステムとして、従来よりも省エネルギーで燃料や肥料利用が可能な炭化物を製造する技術です。製造された炭化物は、利用先に応じたかたちで製造することが可能であり、従来の炭化技術と比べて経済性が高いという特徴があります。また、下水処理におけるカーボンニュートラルの実現も期待できます。

本技術の選定により、今後 JS 受託建設事業等での導入が期待されます。当社は今後、本技術をはじめカーボンニュートラルに資する技術を全国のお客様へ発信、導入を目指し、2030年度に目指すべき事業像として掲げる「カーボンニュートラルのトップ企業」を実現できるよう取り組んでまいります。



本技術の概略フロー

本技術について

- (1) 技術名 : 湿式炭化による下水汚泥利活用技術
- (2) 選定日 : 2025年3月28日
- (3) 技術概要 : 従来よりも省エネルギーで、燃料や肥料利用が可能な炭化物を製造します。バイオガス発電排熱等を利用して効率的に炭化物を製造することで、下水処理の脱炭素化に貢献します。
- (4) 技術の特徴 : ①湿式炭化を用いた省エネルギーな技術
炭化促進剤を添加して湿式炭化した後、圧搾により固液分離します。炭化物から塩素等の溶解成分の分離が可能であるほか、水分蒸発に係るエネルギーが不要となる

ため炭化の省エネルギー化を実現します。

②製造された炭化物の燃料または肥料利用が可能

製造された炭化物は投入汚泥と同等の固形分発熱量を有し、JIS^{※2}を満足する固形燃料として利用が可能です。菌体りん酸肥料の基準値も満足し、肥料としての利用が可能^{※3}です。

本技術の適用条件

対象汚泥 嫌気性消化汚泥
投入汚泥濃度 含水率70～90%
施設規模 投入汚泥量 5 t-wet/ 日以上

・ 75 t-wet/日以下：反応器は原則 1 系列
・ 75 t-wet/日超：反応器は原則複数系列

適用条件外の原料を受け入れる場合は、試験機による試験を実施し、想定される炭化物性状の確認を行うこと。



実証設備の外観（施設規模：脱水汚泥処理能力 5 t-wet/日）

- ※ 1 JS が共同研究等により開発に関与した技術のうち、開発が完了、または実用化に一定の目途が立った技術について、共同研究者からの申請に基づき、JS の受託建設事業における適用性について審査、選定すること
- ※ 2 JIS Z7312「下水汚泥固形燃料」
- ※ 3 炭化物の重金属濃度は、令和 5 年 4 月 20 日付け国土交通省事務連絡「下水汚泥資源の肥料利用の拡大に向けた検討について」に示された方法により概算可能

CO₂を固定化する高速炭酸化技術「Carbonel[®]」で製造した コンクリート資材が大阪・関西万博のパビリオン外装材に採用

当社の高速炭酸化技術「Carbonel」を用いて製造したコンクリート資材（Carbonel 資材）が、2025年日本国際博覧会（大阪・関西万博）のシグネチャーパビリオン「いのちめぐる冒険」（河森館）の外装材用 HPC[®] 製パネル（※1）の原料として採用されました。



河森館で使用される HPC 製パネル



Carbonel 資材
(HPC 製パネルの材料として使用)

■ 「Carbonel」とは

英 O.C.O Technology 社の技術を基に、技術研究所と共同で改良をした高速炭酸化技術「Carbonel」は、カルシウム (Ca)、カリウム (K)、マグネシウム (Mg) などを含む飛灰やスラグといった産業副産物を原料に、わずかな水が存在する条件下に二酸化炭素 (CO₂) ガスを加え攪拌・反応させることで、炭酸カルシウム (CaCO₃) などの炭酸塩として CO₂ を固定化する技術です。自然界では数カ月を要する炭酸化反応を、高効率ミキサーを用いることにより数分～数十分で行うことが可能です。

Carbonel のユニット装置を木質バイオマス発電所などへ設置することで、排ガス中の CO₂ を燃焼副産物である木質バイオマス飛灰等に固定化し、コンクリート材料を製造することが可能となります。これにより、廃棄物の有効活用と CO₂ 排出量削減の両立に貢献してまいります。

■ Carbonel ユニット 1 号機を受注

当社は、CO₂ 有効活用と資源循環への貢献を目指し、高速炭酸化技術「Carbonel」のユニット装置販売を 2024 年より開始。このほど、灰処理能力約 3,000 t/年規模の Carbonel ユニット 1 号機を受注しました。

■ Carbonel 資材の試作・試験施工

Carbonel 資材は、歩道などの舗装等に用いられるインターロッキングブロック原料としても使用でき、当社播磨製作所内の歩道にも試験施工し、長期安定性などを評価しています。また、車止めブロックや U 字側溝などのコンクリート製品にも使用でき多くのユーザに試作や強度評価を実施いただいています。

Carbonel の普及を通じて、木質バイオマス発電所などから排出される産業副産物と排ガスを活用し、CO₂ を固定化した資源として活用することで、脱炭素を推進しカーボンニュートラル社会の実現に貢献します。



透水性インターロッキングブロック



車止めブロック



U字側溝

■ EXPO2025大阪・関西万博 シグネチャーパビリオン「いのちめぐる冒険」の概要

発注者	: 公益社団法人2025年日本国際博覧会協会
プロデューサー	: 河森正治
基本設計	: 株式会社小野寺匠吾建築設計事務所
実施設計	: 鹿島建設・小野寺匠吾建築設計事務所グループ
施工	: 鹿島建設
建築面積	: 756 m ²
延床面積	: 971 m ²
規模	: 鉄骨造2階

(※1) HPC 製パネルとは

株式会社 HPC 沖縄が開発した、鉄筋の代わりに炭素繊維のカーボンワイヤーを使用した、薄くて錆びない高強度コンクリートパネルです。CO₂濃度約15%に調整した模擬排ガスをを用いて当社技術研究所の実証試験装置で製造した Carbonel 資材を用い、郡家コンクリート工業株式会社（鳥取県）で HPC 製パネル約100枚が製造されました。

- ・ HPC コンサルタント：細矢仁建築設計事務所
- ・ “HPC” は、(株) HPC 沖縄の登録商標です。

沖縄初！水素ステーション実証事業に 水電解式高純度水素発生装置「HHOG[®]」を納入

当社は、株式会社りゅうせきが沖縄県うるま市に設置した水素ステーション実証施設内に、水電解式高純度水素発生装置「HHOG」を納入しました。沖縄県内での水素ステーション実証は今回が初めてです。

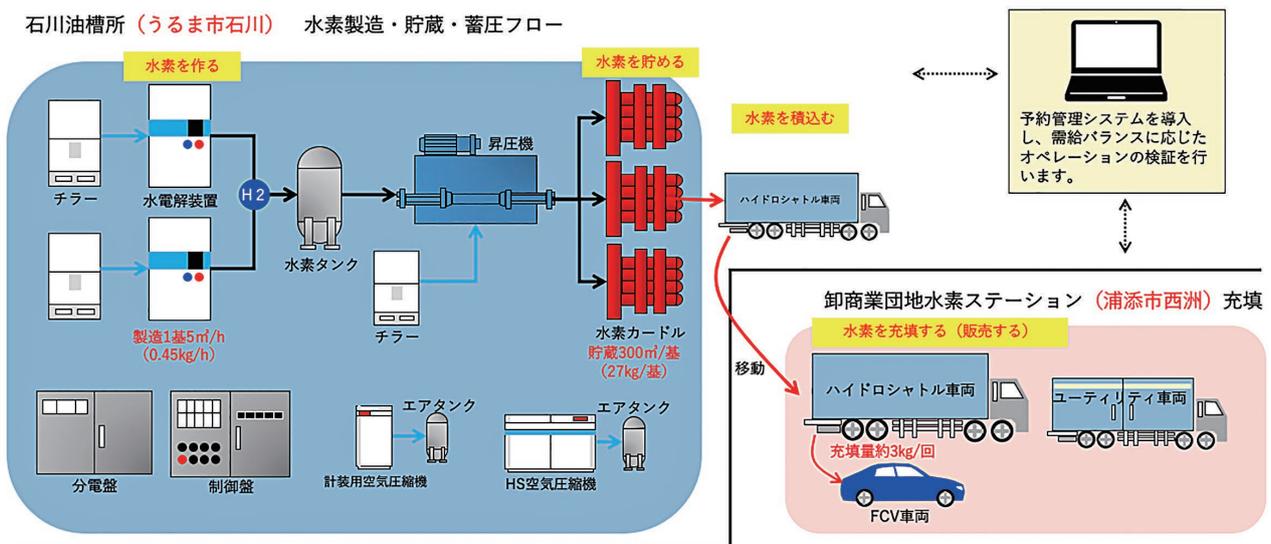
HHOGは固体高分子電解質膜（PEM）を利用して純水を電気分解し、水素ガスをオンサイトで発生させる水素発生装置です。1993年にHHOGを開発・商品化し、これまで電子産業、金属熱処理の工業ガス・水素エネルギー用途等に260基を超える納入実績を有しています。CO₂を排出せず再生可能エネルギー由来で生成されるグリーン水素は「環境にやさしいエネルギー」として注目されており、HHOGの納入事例も年々増加しております。当社は企業理念である「Keep the Earth Sky-blue」というスローガンの下、環境問題を解決に導くための確かな技術力や、これまで培ってきた経験を駆使し、今後も次世代エネルギーとして期待される水素を利活用した取組みを積極的に進めてまいります。

◆株式会社りゅうせき 石川油槽所（うるま市石川）/卸商業団地水素ステーション（浦添市西洲）実証事業
今回納入のHHOGは、株式会社りゅうせきが内閣府沖縄総合事務局と取り組む「沖縄型クリーンエネルギー導入実証事業費補助金」を活用し、整備された水素ステーション実証向けに利活用されます。これにより、県内での燃料電池車（FCV）や水素関連機器の普及促進を支えるインフラ整備の前進に貢献します。

【概要】

- 注文主： 株式会社りゅうせき（納入場所：株式会社りゅうせき 石川油槽所内）
- 名称： 水電解式高純度水素発生装置「HHOG」
- 用途： 燃料電池自動車（FCV）*一般車両への水素供給は行っていません
- 型式： CH-5D × 2基（1基あたりの本体寸法：W 900 mm × D 1 700 mm × H 1 850 mm）
- 能力：（1基あたり）：水素供給量 5 Nm³/h，水素供給圧力 0.82 MPa，水素純度 99.999 %

1. 事業フロー図



石川油槽所で水素を製造～貯蔵 → ハイドロシャトル車両に水素を積込 → 卸商業団地水素ステーションでFCVへ充填する

2. 今回納入したHHOG:CH-5D (左写真) 移動式水素ステーション車両:ハイドロシャトル (右写真)



本 社 / 〒651-0072 神戸市中央区脇浜町1丁目4-78	☎ (078)232-8018 FAX(078)232-8051
〒651-0086 神戸市中央区磯上通2丁目2番21号(三宮グランドビル)	☎ (078)232-8018 FAX(078)232-8051
技術研究所 / 〒651-2241 神戸市西区室谷1丁目1-4	☎ (078)992-6500 FAX(078)997-0550
東京支社 / 〒141-0033 東京都品川区西品川1丁目1番1号(住友不動産大崎センター)	☎ (03)5931-3700 FAX(03)5931-5700
大阪支社 / 〒541-8536 大阪市中央区備後町4丁目1-3(御堂筋三井ビル)	☎ (06)6206-6751 FAX(06)6206-6760
北海道支店 / 〒060-0004 札幌市中央区北四条西5丁目1-3(日本生命北門館ビル)	☎ (011)241-4647 FAX(011)241-5759
東北支店 / 〒980-0811 仙台市青葉区一番町1丁目2-25(仙台NSビル)	☎ (022)716-6651 FAX(022)263-2049
名古屋支店 / 〒451-0045 名古屋市西区名駅2丁目27-8(結屋ファミセントラルタワー)	☎ (052)581-9876 FAX(052)563-2313
北陸支店 / 〒910-0859 福井県福井市日之出2丁目17-13	☎ (0776)27-7645 FAX(0776)27-0460
九州支店 / 〒812-0012 福岡市博多区博多駅中央街1-1(新幹線博多ビル)	☎ (092)474-6565 FAX(092)441-4440
北九州営業所 / 〒802-0005 福岡県北九州市小倉北区堺町2丁目1-1	☎ (093)531-1861
播磨製作所 / 〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島19	☎ (079)436-2500 FAX(079)436-2506
プノンペン事務所 / Level 5, OHK Tower, Street 110 and Corner Street 93, Phum 3, Sangkat Srah Chak, Khan Doun Penh, Phnom Penh, Kingdom of Cambodia	☎ +855-23-232-051
ロンドン事務所 / Building 3, Chiswick Park, 566 Chiswick High Road, London, W4 5YA, United Kingdom	☎ +44-208-849-5558

神鋼環境ソリューション