



VOL.33
NO.2
2025年12月発行
(通巻第65号)

TAKUMA TECHNICAL REVIEW

タクマ技報

寄 稿

- [ご挨拶] ESG 経営の推進により技術と人材の価値を高める 59
濱田州朗

巻頭論説

- GX ビジョンに基づく CN に向けたエネルギー貯蔵
および炭素循環システム 60
加藤之貴

解 説

- 下水汚泥資源の肥料利用拡大の取り組み 70
Efforts to Expand the Use of Sewage Sludge Resources as Fertilizer
芹澤佳代 Kayo SERIZAWA

報 告

- オンサイト触媒再生設備の実機運転報告 79
Report on the Operation of Actual On-site Catalyst
Regeneration Equipment
大山 譲・原田 等・鎌田全一
Yuzuru OYAMA, Hitoshi HARADA, Masakazu KAMADA

- パワーエイド三重シン・バイオマス® 松阪発電所の運転報告 86
Operation Report on the Power Aid Mie Shin-Biomass™
Matsusaka Power Plant
永山瑞起 Mizuki NAGAYAMA

- さいたま市 見沼環境センター 運転報告 92
Operation Report on Saitama City Minuma Environmental Center
松廣和樹・川人英二郎・上野紘暉
Kazuki MATSUHIRO, Eiji KAWAHITO, Hiroki UENO

- 画像解析を活用した汚泥乾燥機の制御 98
Control of a Sewage Sludge Dryer Using Image Analysis
杉井祥吾・河野孝志・坂口孝瑛・水野孝昭
Syogo SUGII, Takashi KAWANO,
Takaaki SAKAGUCHI, Takaaki MIZUNO

海外視察

- ノルウェーにおける世界最大規模 CCS の視察報告 105
松本和正 Kazumasa MATSUMOTO



表紙説明

さいたま市 見沼環境センター

見沼環境センターは、さいたま市が掲げる「最終処分量の低減」、「高効率発電」、「施設の強靭化」、「安全性に留意した施設運営」を目的として、既存施設である東部環境センターを部分的に解体し、同一敷地内に新たに建設されたごみ処理施設である。本施設は、高効率ごみ発電施設とマテリアルリサイクル推進施設で構成され、高効率ごみ発電施設では蒸気の高温・高圧化(5 MPa, 430°C)や低空気比燃焼などを組み合わせた高効率な発電をおこなうほか、隣接する健康福祉センターへ温水による熱供給をおこなっている。

本施設の整備事業では、施設建設時に残された東部環境センターの解体・造成工事が含まれており、安全対策を徹底しながら新施設の運営と既存施設の解体工事が同時に進められている。

[寄 稿]

[ご挨拶] ESG 経営の推進により 技術と人材の価値を高める

代表取締役社長 濱田州朗

平素は当社グループへのご理解とご協力を賜り、厚く御礼申し上げます。2025年4月からの社長就任にあたり、ご挨拶申し上げます。当社は創業者の田熊常吉が発明した純国産ボイラーの開発・製造からスタートし、その技術を活かして今では一般廃棄物処理プラントや水処理プラント、エネルギー・プラントなどのプラントエンジニアリングとそのアフターサービスを手掛けております。80年以上にわたって事業を続けることができましたのも、技術を磨き、お客様との真摯なお付き合いを通じて、ご信用・ご信頼を頂けたことによるものと考えております。



当社グループの2030年に向けた長期ビジョン「Vision2030」では、再生可能エネルギーの活用と環境保全の分野を中心にリーディングカンパニーとして社会に必須の存在であり続けることを掲げ、「ESG 経営の推進」によりお客様や社会とともに持続的に成長していくことをめざしています。現在、環境とエネルギーの分野においては、社会インフラの老朽化、非化石エネルギーの活用、脱炭素社会や循環経済の実現に向けた取り組みなど、社会課題やお客様のニーズは多様化しております。ビジョンの実現に向けてはこれらの課題やニーズに対応した技術を生み出し磨いていくことが重要ですが、この技術を支える人材もまた重要です。

「ESG 経営の推進」にはさまざまな意味合いがありますが、そのうちの1つとして、「技術と人材を大切にすること」、すなわち、お客様に製品やサービスをお納めすることで得られる当社グループの売上や利益は、これまで培ってきた有形無形の技術やノウハウと、これらを身につけた人材の力によって得られるものであり、これらの価値を高めて経営をおこなうことを改めて表明したものといえます。先人たちの技術・ノウハウを継承する人材を育て、その技術と人材の力で社会課題やお客様のニーズに応えつつ、さらに技術を発展・継承していくことによって、当社グループだけでなくお客様や社会とともに持続的に成長していくことができるものと考えております。

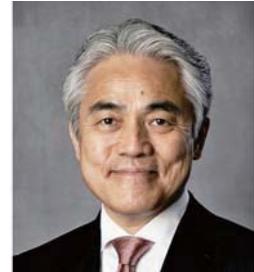
当社グループでは、知的財産を蓄積・強化するほか、外部の企業や団体などと連携したオープンイノベーションによる研究開発や事業を推進して技術・ノウハウと人材の力を高め、お客様や社会の課題を解決し、世の中に価値があると認められるものを提供してまいります。加えて、これらの成果をこのタクマ技報や学会等を通じて発信し、世の中に有用な技術・知見・ノウハウを提供していくことで、社会に貢献し、企業としての価値を高めてまいります。引き続き、皆さまのさらなるご指導、ご協力をお願い申し上げます。

以上

[卷頭論説]

GX ビジョンに基づく CN 向けた エネルギー貯蔵および炭素循環システム

東京科学大学総合研究院
ゼロカーボンエネルギー研究所 所長/教授 加藤之貴



1. はじめに

人類史のわずか最近の 300 年ほどでの化石エネルギー消費にともなう大量の二酸化炭素 (CO_2) 排出と、最近の気候変動の激甚化との関係性がより顕在化しつつある¹⁾。 CO_2 排出削減は環境保護と同時に社会の持続的な発展、経済的な繁栄、エネルギー供給安全保障の観点から必須である。カーボンニュートラル (Carbon Neutrality, CN) (あるいは脱炭素、Net-Zero) の実現には努力と時間を要するが、エネルギー利用の変化として対応が必要である。日本政府は 2022 年にグリーン・トランスフォーメーション (GX) 実行会議を設置し、GX を「産業革命以来の化石燃料中心の経済・社会、産業構造をクリーンエネルギー中心に移行させ、経済社会システム全体を変革すべく、エネルギーの安定供給・経済成長・排出削減の同時実現を目指す」と定義し、国をあげて CN 向けの GX を推進している²⁾。その一方で、例えば米国は 2025 年 1 月の政権交代にともない、地球温暖化対策の国際枠組み「パリ協定」の 2026 年離脱を表明し、化石燃料の増産に転じている。社会は常に動搖し短期的には不安定であるが、現状を長期的に俯瞰して CN 社会のあるべき姿を展望し、その実現のための具体的な課題技術を抽出し、その技術の実現が必要である。この実現は個人、一組織で成し得るものではなく、社会全体の連携と協力が必要である。

筆者らは、東京科学大学グリーン・トランスフォーメーション・イニシアティブ (Science Tokyo GXI, GXI) 事業を展開し、産官学が連携した CN 実現を目指している³⁾。本稿では、GXI の示す 2050 年を目指した GX ビジョンの紹介と GX 技術の新たな展開事例としてエネルギー貯蔵、炭素循環システムについて示す。

2. 日本における CN 展望

GX を検討するにあたり日本のエネルギー系統の現状を俯瞰する。図 1 に日本のエネルギーの流れを基としたカーボンニュートラル達成のための量的関係 (2023 年度基準) を示す⁴⁾。一次エネルギーの 81% は化石燃料であり、ほぼ全量が輸入である。この部分が CO_2 発生源であり 10.2 億 t- CO_2 /年排出と約 26 兆円/年の購入費用をともなっている。非化石エネルギーは 19% であり、そのうち再生可能エネルギー (再エネ) が 8%，水力発電が 4%，原子力発電 (原発) は再稼働がはじまり 4% 程度である。今後、CN 達成には化石燃料の大幅な低減とそれを代替するための非化石エネルギー、すなわちゼロカーボンエネルギーが必要であり、太陽光発電 (PV)，風力発電のさらなる導入、原発の利用増大が必要である。

利用側の最終エネルギー消費は電力と非電力に分類される。熱量基準で電力は 28% に過ぎず、非電力が大半である。現在 CN 向け電源構成が活発に議論されているが、対象が主に電力分野に限られており、非電力分野の検討が後手になっている傾向がある。非電力は燃料の熱エネルギーを運輸、鉄鋼など日本の基幹産業で利用し、国富を得ている。例えば非電力の運輸部門 (同 24%) の電動化が技術的に可能になったと

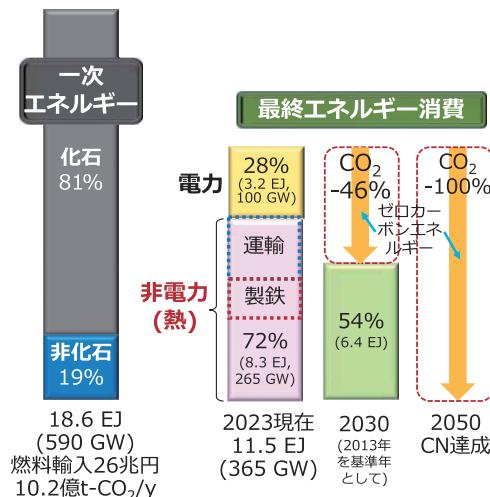


図 1 日本の CN 達成にむけたエネルギーの量的推移の関係 (2023 年度基準)

しても必要な電力供給には、現状の日本の全電力量にほぼ相当する発電設備を新規に準備する必要がある。日本は 2030 年度に温室効果ガス 2013 年度比 46% 削減を目指しており、2030 年において電力の完全な非化石化に加えて他部門の非化石化も実現する必要がある。このためには早急に非電力分野にもゼロカーボンエネルギーの導入と GX が必要である。

3. Science Tokyo GXI

Science Tokyo GXI は、文部科学省ミッション実現加速化経費事業として旧東京工業大学科学技術創成研究院ゼロカーボンエネルギー研究所を本部とし、2022 年から活動を進めている。2024 年 10 月 1 日に東京工業大学は東京医科歯科大学と統合し東京科学大学 (Science Tokyo) が誕生した。大学名の変更にともない呼称を Tokyo Tech GXI から Science Tokyo GXI へと変更している。GXI の組織構成を図 2 に示す。GXI で

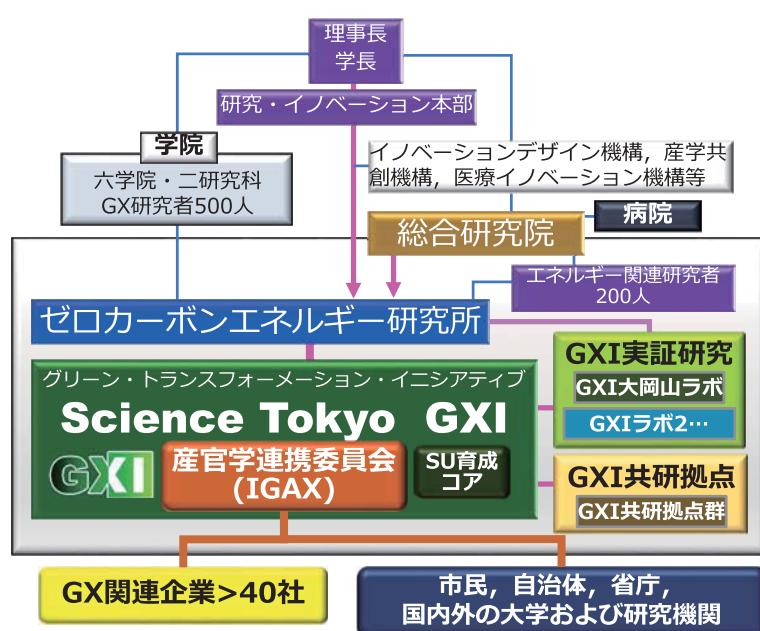


図 2 Science Tokyo GXI のオープンイノベーションネットワーク

はエネルギー関連企業、行政、自治体とともに産官学連携委員会（IGAX, The Industry-Government-Academia Collaboration Committee for GX）を組織し、その組織はGX関連企業会員約40社が参画する我が国随一のGX産官学連携組織と判断される。IGAXを起点に産官学・社会が連携し、新しいGX技術創成をオープンイノベーションにより進めている。2024年度はEPRI（Electric Power Research Institute, 米国電力研究所）、BASF（ドイツの総合化学メーカー）などもメンバーとなり国際連携も進んでいる。

CN達成にはゼロカーボンエネルギーである再生可能エネルギー、原子力を一次エネルギーとしたエネルギーシステムが必要である。特に日本は他国とエネルギー環境が異なり、他国の事例の模倣だけでは達成困難であることの意識共有が必要である。また、GXIではゼロカーボンエネルギーを駆動源とした社会のCN化をGXと定義し、事業を進めている。GXIではGXビジョンを描き、GX技術開発によるCN実現を目指し、IGAXを通して産官学、さらに地域、社会が連携したオープンイノベーションで検討を進めている。

4. GXI VISION 2050

CN実現には従来の化石燃料依存のエネルギー社会からの応用的な達成は困難であり、非線形な技術的、社会的改革としてのGXが求められると予想される。GXIではCN実現のためのGXのあるべき姿=グランドデザイン構想を産官学、社会が密に連携し立案、解決を目指している。GXIのGXグランドデザインとして提案するグリーン社会ビジョンを図3に示す⁵⁾。日本では一次エネルギーにおける化石燃料利用の削減にともない、ゼロカーボンエネルギー（ZCE）としてPVなどの変動性再エネ（VRE）の主電源化が検討されている。VREは天候に依存し、出力変動が大きく稼働率が低い点が課題である。そのため、蓄電池のみならず安価で大量のエネルギー貯蔵として、熱貯蔵や燃料変換（エネルギーキャリア製造）が必要となる。また電気供給であれば、周波数、電圧の整った質の高い電力供給が必要となるため、各蓄エネから出力される電力の高品位な調整力が必要である。一方、利用側では合成炭化水素で在来エンジンを駆動しつつ排出CO₂を回収し、再度、合成炭化水素を再生する炭素循環エネルギー系統も新たなGX技術分野となる。

これまでのGXIにおける産官学連携活動において日本企業・大学の有する技術は優れており、その社会貢献ポテンシャルは国際基準で非常に大きいことが確認されている。そこで上記の状況を鑑み、GXIの活動を基礎として日本政府の第7次エネルギー基本計画の立案に際し（その後、2025年2月に閣議決定）、2050年を見据えてのポジションペーパーを2024年9月にWebページにおいて日本語版、英語版にて表明した⁵⁾。

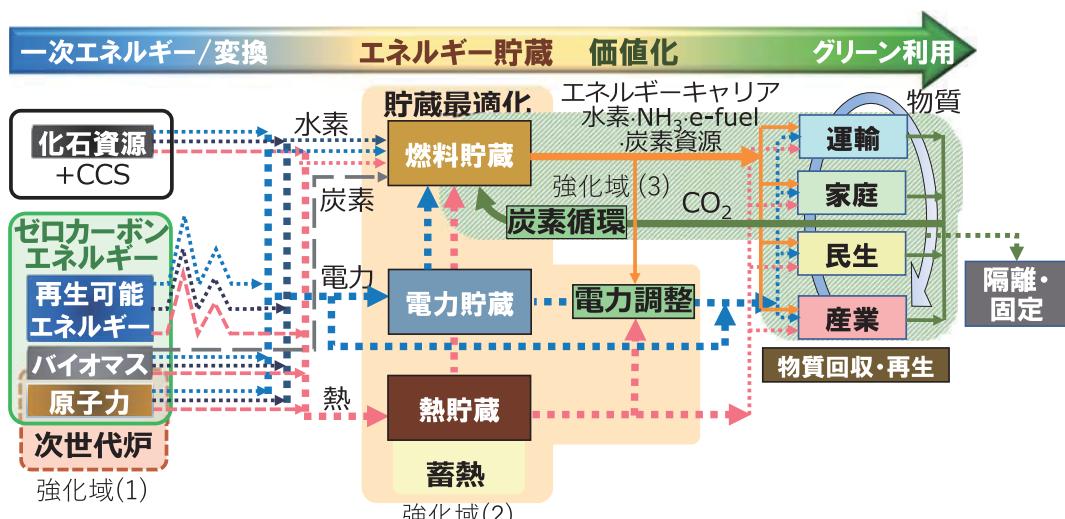


図3 CN達成のためのScience Tokyo GXIが目指すグリーン社会ビジョンと、その実現に向けたGXI VISION 2050で提案する技術強化域⁵⁾

ペーパーは「社会的慣性[†]を見越したアフォーダブル^{‡‡}な移行でカーボンニュートラルを達成」を主張点として 2050 年に向けた GX 技術展開のビジョンを提示した。著者グループが GX 実現に向けて日本の産官学が連携して取り組むべき必要な GX 技術を 9 か月にわたり検討した結果、次の三点を主張したものである。

- (1) 十分なゼロカーボンエネルギーの確保
- (2) エネルギー貯蔵システムの合理的な大容量化と調整力の確保
- (3) 炭素循環による GX 強化

図 3 に上記三点に応じた技術強化域が示されている。

強化域（1）：日本では一次エネルギーにおける化石燃料利用の削減にともない、ゼロカーボンエネルギーとして VRE の主電源化が検討されているが、VRE は天候に依存し、出力変動が大きく稼働率が低い点が課題である。そのため、十分なゼロカーボンエネルギーの確保には安全な次世代原子炉の計画的な利用普及が必要である。

強化域（2）：近年、余剰の VRE 発電を抑止するための出力制御が頻発している。VRE 導入が進むほどに出力制御は増え、VRE が 2050 年に 50% 程度のシェアとなった場合の出力制御は 70 TWh/年程度と予測され、2 兆円/年規模の経済損失に相当する。そのため出力制御の克服に向け、安価で大量のエネルギー貯蔵として熱貯蔵や燃料変換貯蔵としてのエネルギーキャリア製造技術が必要となる。VRE 電力から水の電気分解で得られるグリーン水素が VRE のエネルギーキャリアの候補である。ただし、水素は低密度のため、産業排出される CO₂ とグリーン水素から合成される炭化水素燃料 e-fuels に変換されて貯蔵される可能性がある。持続可能なエネルギーといわれる航空燃料（SAF）と e-fuels は水素のエネルギーキャリアであり、これらの活用は水素による CN に貢献する。そして需要側には高品質なエネルギーの同時同量の供給が求められ、そのためには製造エネルギーの価値化とそれを実現する調整力の確保が必要である。

強化域（3）：エネルギー需要側は多くの分野で炭化水素燃料を必要としている。製鉄業やディーゼルエンジンから電動化への代替が困難な大型移動体、重機械、船舶などの候補対象がある。そこで、在来の鉄還元やエンジン使用を許容し、還元材や燃料に e-fuels を用い、排出される CO₂ を回収し、ゼロカーボンエネルギーで再度 e-fuels に変換して循環再利用する炭素循環が望まれる。

5. CN のためのエネルギー貯蔵

5.1 VRE のための蓄エネ

前述のとおり VRE は主力電源として大量導入が進んでいる。導入において再エネの不安定電力の効率的な受入れが重要な課題である。ドイツなどで再エネの普及が進んでいるが、CO₂ 排出係数 [g-CO₂-eq./kWh] の削減が進んでいない⁶⁾。PV、風力発電などの再エネは秒単位で変化する非同期電力である。電力利用側の電気の質の保証、すなわち安定した周波数と電圧の維持は電力供給、需要の変動に関わらず一定であることが近代社会の必須要件である。再エネの出力変動を補うには、現在の所、火力発電により再エネ出力に追従した運転調整が現実的な対策である。なぜなら、火力発電はタービン発電による慣性力を有した同期電力であり、電力変動に対して電気の質を物理的に保持できる機能を有しているためである。発電出力変動および待機運転では発電効率の低下を招くこととなり、火力発電の追従運転が CO₂ 排出を増やし、ドイツなどの排出係数の高さの一因となっている。一方、近年、再エネ普及が過剰に進み、需要側が再エネ電力を受けきれない余剰発電のリスクが高まっている。このため、PV を計画的に停止する出力抑制が頻発しつつある。例えば、九州電力管内では 2021 年度に出力抑制が 82 日間おこなわれている⁷⁾。この現象は日本の

[†] 社会的慣性（social inertia）：質量に比例する力学的な慣性とのアナロジーで、長期利用を前提としたインフラ、巨額な生産設備、複合的で総体的に巨大なサプライチェーンなど、さまざまな要因で急激な変化が困難なことを表す。

^{‡‡} アフォーダブル（affordable）：手頃で十分受容可能な、の意味。単純に安価や導入のハードルの低さだけを追求しない姿勢のこと。

各地域のみならず欧米など再エネ先進国においても発生している。2025年4月28日にスペイン、ポルトガルにおいて大規模停電(31GW程度)が発生したが、これは系統電圧の上昇が直接の原因とされ、非同期電力であるVREの導入(8.5GW)が進み同期電力の不足が原因と示唆されている⁸⁾。これらの課題に対して、再エネの有効利用にはGWhオーダーの余剰電力を貯蔵できる蓄エネのGX技術が今後求められると予想される。再エネの蓄エネとしては電池が候補の一つであるが、原料、製品の海外依存とそれにともなう高コストのリスクがあるため、国産化率を高めた低コストの蓄エネの普及が重要である。以下では蓄エネ分野のGX技術と期待される熱エネルギー貯蔵、炭素循環エネルギーシステムの開発動向を示す。

5.2 热エネルギー貯蔵

変動電力に対して、安価かつ高効率に対応できるエネルギー貯蔵技術として、P2H2P(Power-to-Heat-to-Power、電力蓄熱発電)の実用検討が進んでいる。図4に構成例を示す。再エネの余剰発電分を電熱変換し熱として貯蔵(蓄熱およびケミカルヒートポンプ(CHP)機能)し、必要時に蓄熱エネルギーを蒸気に変換しタービン発電で電力を出力する。タービンは発電所などの施設を利用することも想定できる。入力余剰電力からタービン発電電力への変換効率は35%程度であり、電池を用いた蓄電方式の90%程度に対して効率が劣る。しかし、近年の再エネ電力卸価格は大きく変動し、再エネ余剰電力発生時にはその価格はゼロ近くまでに低下している。再エネ価格が安価な際に蓄熱し、電力価格が高くなった段階で売電することで経済性が担保できる。また、タービン発電を用いることで電力供給に対して物理的に慣性力を有しており、電力幹線に同期した高質な電力が供給できる点は電池にない長所である。すなわちP2H2Pは慣性力を有しているため、負荷追従運転向けの火力発電を代替でき、CO₂排出なしで調整力を有したグリーン同期電源となることが重要な利点といえる。

また、産業界では大量の熱需要があるため、P2H2Pからの直接熱供給により、産業間の熱融通をおこなうとセクターカップリングが可能になり、さらにエンタルピーベースの熱効率はコジェネレーションと同程度とすれば80%程度まで期待でき、産業の低炭素化に貢献可能である。

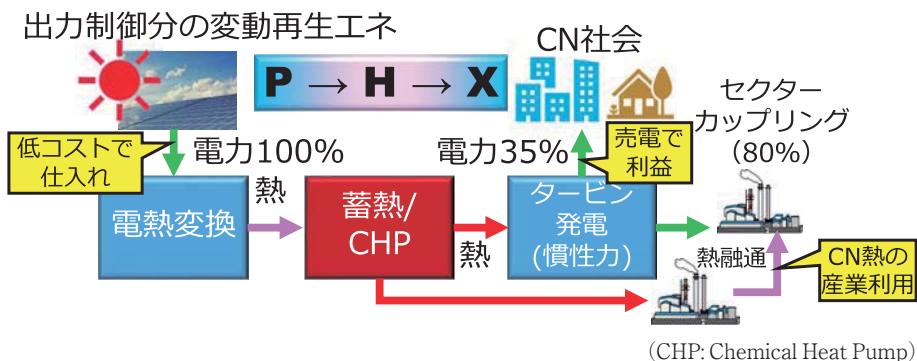


図4 P2H2P（電力蓄熱発電）の構成

5.2.1 化学蓄熱・ケミカルヒートポンプ

P2H2P向けの蓄熱方法には顕熱、潜熱、化学蓄熱がある。蓄熱密度は概ね高い順に化学蓄熱（電池と同程度）、潜熱、顕熱となる。現在普及している顕熱、潜熱蓄熱の課題は性能が物性に強く依存するため広温度域化、高蓄熱密度化には限界があり、また装置からの放熱により長期間の蓄熱が困難な点である。これに対し、化学蓄熱は相対的にエネルギー密度が高く、反応条件の選択で幅広い温度域に対応できる。化学蓄熱は可逆的な化学反応を利用し吸熱反応で蓄熱、発熱反応で温度変換をともなう熱出力がおこなわれる。P2H2Pシステムにおいては高温の蓄熱技術が望まれ、装置容器を金属とすれば最高温度は600°C程度が現実的である。現在の碎石などを用いた顕熱蓄熱や潜熱蓄熱に比べて、より高密度な酸化カルシウム/水/水酸化カルシウム系(CaO/H₂O/Ca(OH)₂)化学蓄熱が一候補である⁹⁾。



この系は (i) 材料が安全で安価、(ii) 資源制約がなく、(iii) 蓄熱密度が、顯熱、潜熱蓄熱の蓄熱密度 500 kJ/kg 前後に比べて 1,850 kJ/kg-CaO 程度と高く、かつ、(iv) 反応物質として長期間蓄熱が可能である。図 5 に化学蓄熱の操作原理を示す。(a) 蓄熱操作では 500°C の温熱 (T_d [°C]) で水酸化カルシウム脱水反応をおこなう。発生水蒸気を水容器 (T_c) 内に水として保存する。(b) 热出力操作で T_c より高温の T_e の水蒸気を発生させると水蒸気圧 P_e [Pa] は P_c より高圧になり、酸化カルシウム水和反応は 500°C より高温 (T_h) (600°C 程度) で熱出力できる。蓄熱温度より熱出力温度を高くできる昇温機能がケミカルヒートポンプ (CHP) であり、ほかの蓄熱方法にない長所である。機械式ヒートポンプが電力を必要するのに対し、CHP は熱だけで昇温でき、機械的 COP を極めて大きくできる利点がある。さらに反応圧力で反応温度が一意にきまるため、反応圧力の制御だけで任意の温度で温度一定の出力ができる、下流の利用側プロセスの安定稼働に貢献できる。

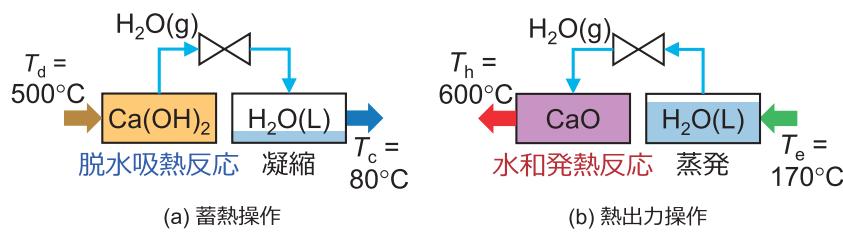
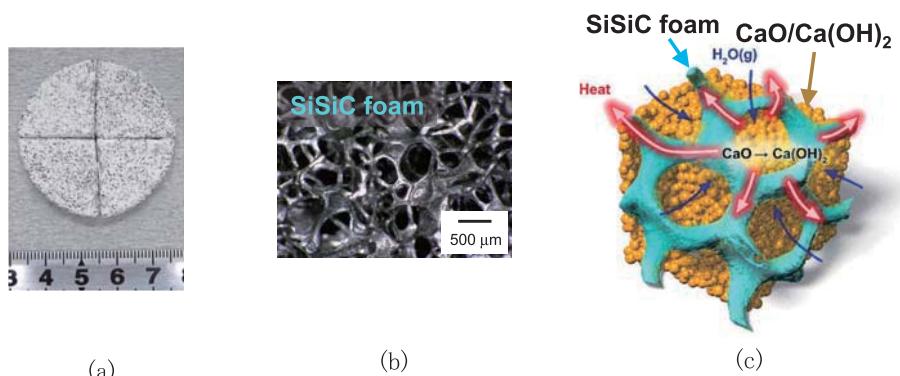


図 5 CaO/H₂O/Ca(OH)₂ 系化学蓄熱・ケミカルヒートポンプの作動原理

5.2.2 化学蓄熱の材料開発

化学蓄熱は材料に課題がある。CaO 系では繰り返し反応で粒子同士が凝集し、水蒸気の移動が遅くなり反応速度が下がること、また、材料の熱伝導性が悪く短時間での迅速な蓄熱、熱出力ができない課題があつた。これに対して近年、材料研究が進められ、凝集性の少ない CaO 材料とケイ素含浸炭化ケイ素 (SiSiC) の多孔性フォーム材料を混合した、複合化学蓄熱材料が開発されている^{9,10)} (図 6(a))。熱伝導性が高く堅牢である SiSiC を、フォーム空間直径 300 μm 程度で多孔フォーム化する技術 (図 6(b)) が開発されており、水酸化カルシウムをスラリー化してこの SiSiC フォーム内に充填し、乾燥することで複合化学蓄熱材料を得る (拡大イメージが図 6(c)) 技術である。この複合材料は蓄熱、熱出力速度が従来材料より 2 倍以上高く、かつ繰り返し反応においても反応性が維持され、実用性が向上している。

化学蓄熱については開発材料を充填した充填層反応器の合理的な設計、そして P2H2P システムとしての最適化が必要である。充填層反応器は伝熱律速になることが多く、材料および反応器の伝熱促進およびシス



(a) 開発された複合化学蓄熱材料、(b) SiSiC フォーム、(c) 複合化学蓄熱材料拡大イメージ

図 6 SiSiC/CaO 複合化学蓄熱材料^{9,10)}

テムのコンパクト化が不可欠であり、この実現にはセラミックス材料の開発が求められる。今後、各種の温度域での化学蓄熱材料、システムの開発が進むことで蓄熱の適用範囲が拡大することが期待できる。

5.2.3 化学蓄熱システム、HyTES

筆者は SiSiC/CaO 複合化学蓄熱材料を活用した P2H2P 向け CHP システム (HyTES, chemical heat pump and sensible heat storage Hybrid Thermal Energy System) を開発した (図7)。HyTES (図7(a)) では熱輸送に溶融塩を用い、気体熱輸送よりコンパクトで高効率な熱輸送をおこなう。表記温度は HyTES 装置 (図7(b)) を用いた研究に基づく値である¹⁰⁾。蓄熱過程では、VRE を電熱変換し、得られた高温熱は化学蓄熱で貯蔵し、出口の低温熱を顯熱蓄熱で貯蔵する。先行普及している顯熱蓄熱は熱出力過程の後半で温度の降下が不可避である。これに対して、HyTES では開発した複合化学蓄熱材料により 500°C の低温熱を CHP で 600°C に昇温し発電、プロセス熱として利用でき、その CHP 機能は反応平衡を利用し反応圧力により熱駆動で出力温度を自由にかつ一定温度で出力できる。さらに、産業プラント毎の需要に応じた電気・熱供給が実現でき、機械式ヒートポンプに比べ装置がシンプルで温度調整が可能である。この CHP 技術は世界最高水準である上に、P2H2P は国産原料で製造でき、環境 LCA 基準ではリチウムイオン電池 (LIB) に比べ環境影響が一桁小さい。さらにコストは電池の 1/2、水素システムの 1/3 と見積もられる。蓄熱は一見古典的な技術に見えるが、コスト、材料の国産性、安全性、社会実装性が極めて高く、ほかの蓄エネシステムに対して多くの利点があることが見い出されている。

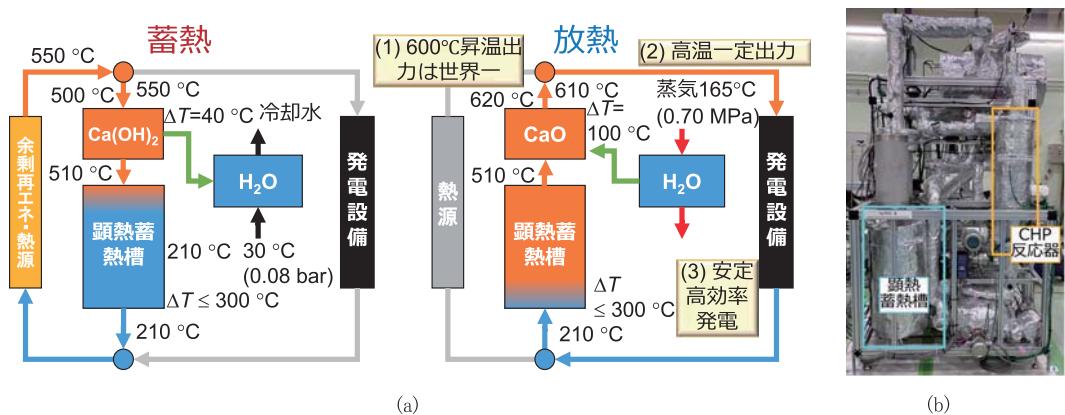


図7 (a) CaO/H₂O CHP と顯熱蓄熱槽を連携した HyTES を用いた P2H2P システム、(b) HyTES 装置外観¹⁰⁾

5.3 炭素循環エネルギーシステム

5.3.1 能動的炭素循環エネルギーシステム、ACRES

CN 化に向けては、一次エネルギーの非化石化、そしてエネルギーキャリアとして水素、アンモニアなどが検討されている。産業面においては、炭素から非化石エネルギーへエネルギーキャリアに代替できないプロセス、または代替すると効率が下がるプロセスが多くある。そこで、ゼロカーボンエネルギーを用いて CO₂ を資源化し、炭素を循環利用する炭素循環産業システムの構築が望まれる。これも蓄エネ技術の重要な手段といえる。

図8にCN社会に向けての炭素の道筋を示す。CO₂回収貯留 (CO₂ Capture and Storage, CCS) は貯留用地が明確でなく、また、CCS 実施に必要なエネルギーは炭素が有するエネルギーの 30% 程度に相当するため、効率性、経済性の面で課題が残る。他方、CO₂回収利用 (CO₂ Capture and Utilization, CCU) として CO₂ のメタン、e-fuel への変換利用が検討されている。しかし、CCU で製造された合成メタンを火力発電等で利用すれば二次的な CO₂ が発生し、最終的な CO₂ 大気放出は半減に留まる。そこで、究極の CN のためには

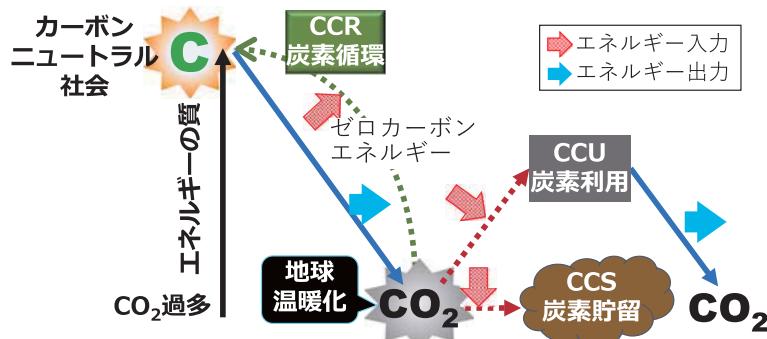


図8 CN社会に向けての炭素の道筋とACRES

CO₂回収循環 (CO₂ Capture and Recycling, CCR) が望まれる。すなわち炭素利用プロセスで発生する CO₂を回収し、ゼロカーボンエネルギーを用いて炭素材料に再生し、エネルギーキャリアとして循環利用することで CO₂を排出せざかつ炭素が利用できるシステムが成立する。このプロセスは能動的炭素循環プロセス (ACRES, Active Carbon Recycling Energy System) と定義され検討がおこなわれている¹¹⁾。ACRES を製鉄業、輸送分野などに応用することで炭素の利用が許容され、在来技術を生かせる革新的な CN 産業システムの構築が期待できる。

5.3.2 ACRES の産業応用

ACRES を鉄鋼分野へ応用した炭素循環製鉄システム (iACRES, smart Ironmaking based on ACRES) を図9に示す¹²⁾。現製鉄プロセスでは、原料鉄の酸素分を除く（還元）ために炭素材料、主に一酸化炭素 (CO) が用いられ、純鉄の製造時に CO₂が発生する。iACRES はゼロカーボンエネルギーを駆動源として CO₂を回収し、CO などに資源化し循環利用して CO₂の大気放出なく鉄を還元する究極の CN 技術である。iACRES ではゼロカーボンエネルギーが炭素材料、さらに鉄製品へとエネルギー貯蔵されることから、変換された GX 技術とみなすことができる。この技術概念は移動体やほかのエネルギー消費型製造プロセスにも応用可能である。

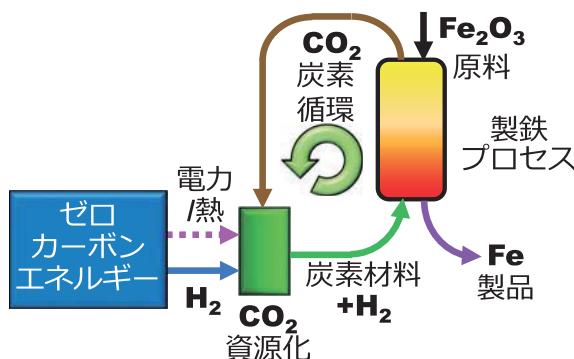


図9 炭素循環製鉄 iACRES の構成

鍵となる GX 要素技術は CO₂資源化である。さまざまなオプションがある中、ゼロカーボンエネルギーを用いた CO₂電気分解



が熱力学的に効率的な手段であり、固体酸化物電気分解セル (Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC) で実現が可能である。電力を印加することでカソード、アノードから CO, O₂を個別に製造でき、生成物を iACRES で活用できる。

一方で、課題は大面積化である。構成材料がセラミックス支持のため熱応力に脆弱で面積拡大が困難である。

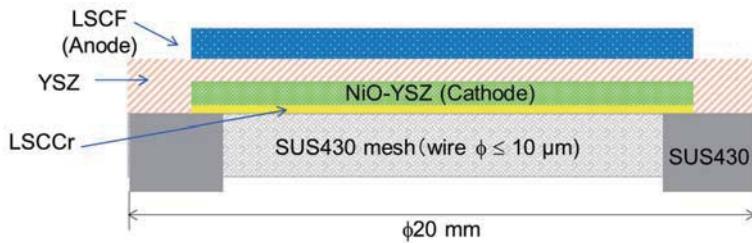


図10 金属基盤支持形固体酸化物電気分解セル (MS-SOEC) の断面構成例

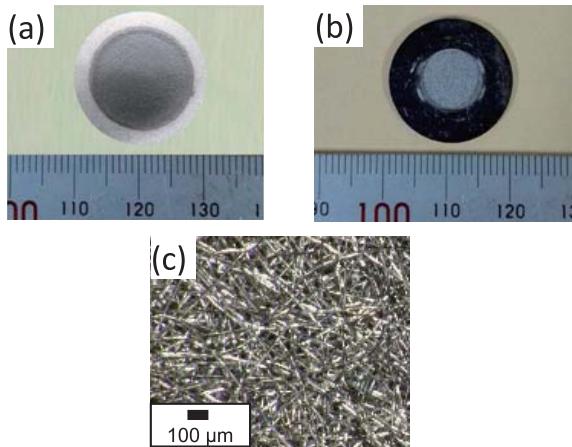


図11 金属基盤支持形固体酸化物電気分解セル (MS-SOEC) 外観

り、最新技術を用いても100mm四方程度が上限である。そこで、金属支持基盤上にSOECを形成した金属基盤支持SOEC (MS-SOEC, Metal Supported-SOEC) が検討されている¹³⁾。MS-SOECの断面構成を図10に示す。適切な金属材料選択と溶射技術で800°C域までの利用でもセラミックス面が安定的に維持されたCO₂分解が実証されており、今後セルの大面積化実証が予定されている。作製されたMS-SOEC向けセルを図11に示す。セルの最適化には電極層での物質移動、熱移動、電子移動の最適化を図ることがポイントであるのでセラミックス技術の応用展開が重要である。

6. ま と め

CNの実現には、求められる社会ビジョンを構築し、課題を合理的に示し、課題解決のためのGX技術の提示と技術開発が必要である。CNエネルギーの主力電源であるVREの大量導入には、非定常出力を有効に貯蔵するエネルギー貯蔵が重要である。エネルギー貯蔵の一つである蓄熱は、安価で大規模な貯蔵ができる蓄熱温度域が広い化学蓄熱、CHPに可能性がある。その実用化に向けては反応耐久性と伝熱促進が重要であり、これを克服する複合材料開発が不可欠である。さらに、能動的炭素循環エネルギーシステム、ACRESもVREの産業利用のための新たなGX技術である。その炭素循環に必要なCO₂資源化のためのSOECにはセル材料の高性能化、物質移動・伝熱移動の促進が重要である。MS-SOECに可能性があり、製鉄業、化学産業さらにe-fuels合成などにも活用できる。

GX技術は材料およびその利用システムの最適化が基本である。日本の有する技術は優れており、GX技術への貢献ポテンシャルは国際基準で極めて高く、今後の日本発のGX技術のさらなる進展が期待される。

参考文献

- 1) 国際連合広報センター：気候変動についての「思い込み」を検証する
https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/climate_change/un/mythbusters/ (2025年8月15日確認)
- 2) 経済産業省：GX（グリーン・トランスフォーメーション）
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/index.html (2025年4月26日確認)
- 3) 東京科学大学：Science Tokyo GXI
<https://www.gxi.iir.titech.ac.jp/> (2025年8月15日確認)
- 4) 資源エネルギー庁：令和5年度（2023年度）エネルギー需給実績（確報）（令和7年4月25日公表）
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2023fykaku.pdf (2025年8月15日確認)
- 5) 東京科学大学：Science Tokyo GXI, GXI VISION 2050, “社会的慣性を見越したアフオーダブルな移行でカーボンニュートラルを達成” (2024年9月24日公開)
<https://www.gxi.iir.titech.ac.jp/research/gxi-vision-2050/> (2025年8月15日確認)
- 6) 電気事業連合会：CO₂排出実績の分析・評価, CO₂排出係数（発電端）の各国比較
https://www.fepc.or.jp/resource_sw/20_environment_02.gif (2025年8月15日確認)
- 7) 日本経済新聞：太陽光で広がる「電気余り」東北電など出力抑制 (2022年5月6日),
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC0258P0S2A500C2000000/> (2025年8月15日確認)
- 8) 永田真幸, 電力中央研究所, イベリア半島における大規模停電 —— 判明していること・解明が期待されること —— (2025年6月3日)
<https://criepi.denken.or.jp/koho/seminar/250603/pdf/report.pdf> (2025年8月15日確認)
- 9) S. Funayama, Y. Kato, *et al.*, Maximization of thermal discharge power density of composite foam for thermochemical energy storage using calcium hydroxide and silicon-impregnated silicon carbide, *Appl. Therm. Eng.*, 274 (2025) 126575
- 10) S. Funayama, Y. Kato, *et al.*, Hybrid thermal energy storage system using thermochemical energy storage with calcium hydroxide and molten salt thermocline storage, *Appl. Therm. Eng.*, 238, 121947 (2024)
- 11) Y. Kato, "Carbon recycling for reduction of carbon dioxide emission from iron-making process, *ISIJ Int'l*, vol. 50, No. 1, pp. 181–185 (2010)
- 12) Y. Kato, *et al.*, "Application of Carbon Recycling Iron-making System in a Shaft Furnace", *ISIJ Int'l*, vol. 55, No. 2, pp. 359–364 (2015).
- 13) H. Takasu, Y. Maruyama, Y. Kato: "Development of Metal Supported SOEC for Carbon Recycling Iron Making System", *ISIJ Int'l*, vol. 60, No. 12, pp. 2870–2875 (2020)

下水汚泥資源の肥料利用拡大の取り組み

Efforts to Expand the Use of Sewage Sludge Resources as Fertilizer



芹澤佳代*

Kayo SERIZAWA

【要旨】日本における農業生産に必要不可欠な肥料は、その原料の多くを海外に依存しており、国際市況や原料産出国の輸出に関する動向の影響を強く受けやすい状況にある。政府は、持続可能な食料システムの構築と、食料品の物価高騰への緊急対応として、下水汚泥・堆肥などの未利用資源の利用拡大により肥料の国産化と安定供給を図るという方針を打ち出した。本稿では、下水汚泥資源の肥料利用拡大に向けた政策、技術、取り組みについて紹介する。

キーワード：下水汚泥資源、国産肥料、肥料法、菌体りん酸肥料

Abstract

We depend on supplies from overseas for most of the raw materials of fertilizers, which are essential for agricultural production in Japan, and they are highly sensitive to international market conditions as well as trends in exports of the countries that produce the raw materials. As an urgent measure to construct a sustainable food system and to respond to soaring food prices, the government has announced a policy to promote domestic production and stable supply of fertilizer by expanding the utilization of unused resources such as sewage sludge and compost. This article introduces policies, technologies, and initiatives to expand the utilization of sewage sludge resources as fertilizer.

Keywords: sewage sludge resources, domestically produced fertilizer, Act on the Quality Control of Fertilizer, micro phosphate fertilizer

* 水処理技術部
Sewerage Engineering Dept.

1. はじめに

日本において農業生産に必要不可欠な肥料は、その原料の多くを海外に依存しており、国際市況や原料産出国の輸出に関する動向の影響を強く受けやすい状況にある。農林水産省は、日本の食料の安定供給を図るため、災害や温暖化に強く、また生産者の減少やポストコロナも見据えた行政を推進していく必要があることから、持続可能な食料システムの構築に向け、2050年の目指す姿と具体的な取り組みを定めた「みどりの食料システム戦略」を2021年5月に策定した¹⁾。

また、内閣に設置されている食料安定供給・農林水産業基盤強化本部が2022年9月に開催した第1回会議において、食料品の物価高騰に緊急に対応していくため、下水汚泥・堆肥などの未利用資源の利用拡大により、肥料の国産化と安定供給を図るという方針が打ち出された²⁾。

本稿では、近年の下水汚泥資源の肥料利用拡大に向けた動向と取り組みについて紹介する。

2. 肥料をめぐる情勢

2.1 肥料の現状

植物が成長するために必要な栄養成分である肥料の三要素は、窒素、りん酸、カリウムである。日本では、主な化学肥料の原料である尿素、りん酸アンモニウム（りん安）、塩化カリウム（塩化加里）のほぼ全量を輸入に依存している。R5肥料年度（2023年7月～2024年6月）における肥料原料の輸入量および輸入相手国を図1に示す。これらの資源は世界的に偏在しているため、輸入相手国が限られており、各原料とも輸入量の7割程度を一か国からの輸入に

頼っている。

肥料原料の価格の推移を図2に示す。平成20（2008）年頃に、原油価格の高騰および世界人口増加による食料増産とバイオ燃料増産による肥料需要の増加に加え、投機資金が流入したことにより肥料原料の価格が高騰したが、その後安定していた。しかし2021年半ば以降、穀物相場の上昇による肥料需要の増加、中国による肥料原料の輸出検査の厳格化、ロシア・ウクライナ戦争による供給不安などにより、世界の肥料原料の需給バランスが崩れ、国際価格が上昇している。

2.2 肥料問題への対応

政府は現在、このような肥料を取り巻く問題に対し、国内資源の活用、原料の安定調達、価格急騰対策の3つの観点から、以下に挙げる対策を構築し、推進している³⁾。

①国内資源の活用等

- ・堆肥や下水など肥料成分を含有する国内資源の利用拡大・広域流通

・肥料の適正施肥

- ・国内外の肥料原料価格等の動向把握

②肥料の安定調達

- ・資源外交をはじめとする、調達国の多角化対応
- ・輸入肥料原料の備蓄

③価格急騰対策

- ・（価格急騰時）肥料コスト上昇分の一部を補填する対策

このうち国内資源の活用については、農林水産省が2021年5月に策定した「みどりの食料システム戦略」において、2050年に輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料の使用量を30%低減するという目標値が掲げられた。その後2022年6月には、

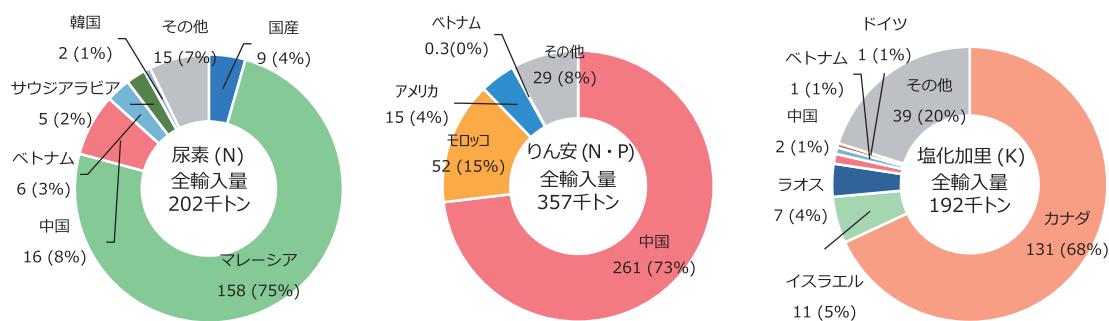
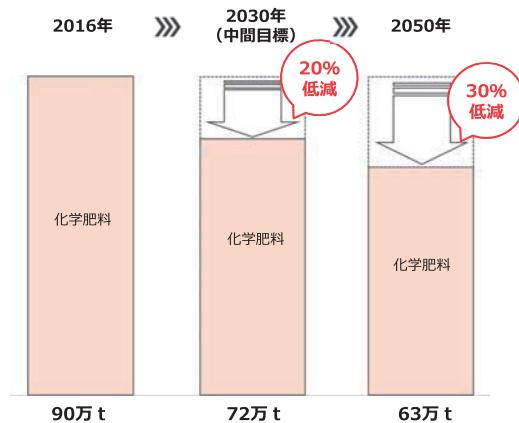


図1 化学肥料原料の輸入相手国、輸入量³⁾

図2 肥料原料の輸入通関価格³⁾

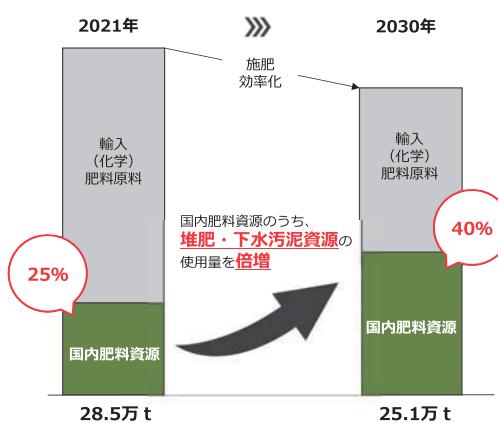
みどりの食料システム戦略（抄）
(令和3年5月12日、令和4年6月21日みどりの食料システム戦略本部決定)

2050年までに、輸入原料や化石燃料を原料とした**化学肥料の使用量を30%低減**。（成分ベース（NPK））



食料安全保障強化政策大綱（抄）
(令和4年12月27日食料安定供給・農林水産業基盤強化本部決定)

2030年までに、堆肥・下水汚泥資源の使用量を倍増し、
肥料の使用量（リンベース）に占める国内資源の利用割合を40%まで拡大。

図3 国内肥料資源の利用に関する政府の目標値⁴⁾

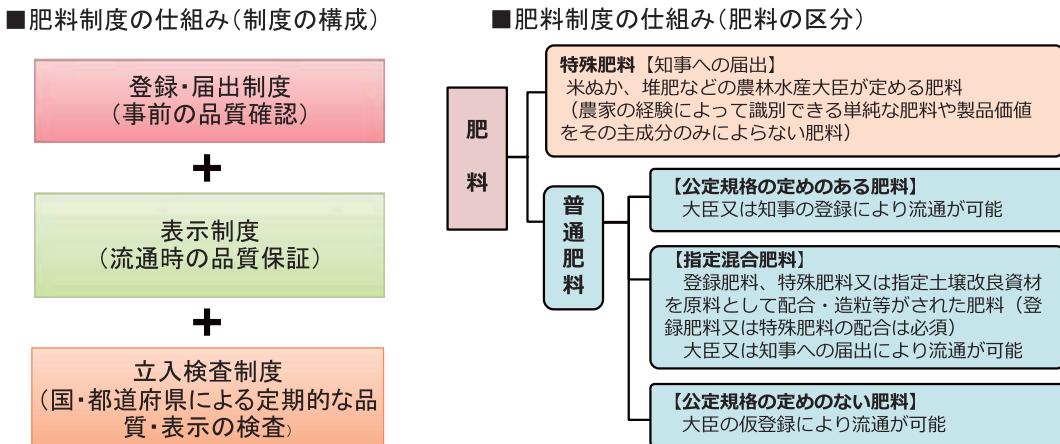
2030年に20%低減するという中間目標が追加された。

また、食料安定供給・農林水産業基盤強化本部が2022年12月に策定した「食料安全保障強化政策大綱」においては、2030年までに堆肥・下水汚泥資源の使用量を倍増し、肥料の使用量（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目標値が設定された。政府によるこれらの目標値を図3に示す。

3. 肥料制度における下水汚泥資源の位置付け

3.1 肥料の規格

肥料とは、「肥料の品質の確保等に関する法律」（以下、肥料法と記す）において、①植物の栄養に供すること又は植物の栽培に資するため土壤に化学変化をもたらすことを目的として土壤に施される物、②植物の栄養に供することを目的として植物に施される物、と定義されている。肥料法により、肥料

図4 肥料制度の仕組み⁷⁾

の生産等に関する規制をおこない、その品質等を確保している⁵⁾。

肥料は特殊肥料と普通肥料に大別される。特殊肥料は、肥料の価値または施肥基準を含有主成分量に依存しない肥料で、「米ぬか」「肉かす」などのようにもの（物質）で指定される⁶⁾。普通肥料については、農林水産省告示「肥料の品質の確保等に関する法律に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件」（以下、公定規格と記す）により、含有すべき肥料成分の最小量、有害成分の含有許容値、その他の制限事項などが定められている。肥料制度の仕組みを図4に示す。

3.2 下水汚泥資源を原料とする肥料の種類⁸⁾

下水汚泥は、下水処理の過程で除去された微細な固形物や、下水処理に用いた微生物からなる泥状の物質で、リンや窒素を含んでいるため肥料として利用することができる。下水汚泥を原料とする肥料は普通肥料に分類され、以下の種類がある。

①汚泥肥料

下水汚泥を原料とする肥料の多くはコンポスト化されて利用されているが、乾燥汚泥や脱水汚泥、炭化汚泥、燃焼灰の形態でも施用することができる。これらは公定規格では汚泥肥料に該当し、含有すべき主成分の最小量は定められていないが、有害成分（ひ素、カドミウム、水銀、ニッケル、クロム、鉛）の含有許容最大量が定められている。汚泥肥料は一般的に成分のばらつきが大きいため、肥料成分が保証できず、ほかの肥料と混合して生産・販売することは認められていない。また、汚泥を原料とすること

を表示する必要がある。

②菌体りん酸肥料

2023年10月、農林水産省は、国内資源として下水汚泥の肥料への有効活用を推進するため、下水汚泥などの汚泥を原料とする肥料のうち、品質管理が徹底され肥料成分であるりん酸を保証できるものについて、菌体りん酸肥料という新たな公定規格を創設した。

菌体りん酸肥料は、汚泥肥料と同じく有害成分の含有許容最大値が定められているほか、肥料成分としてりん酸全量を現物重量あたり必ず1.0%以上含有することを保証しなければならない。肥料成分を保証できることから、ほかの肥料と混合して不足する成分を補うなどして生産・販売することも可能である。加えて、公定規格で定められる、く溶性[†]りん酸や窒素全量などのその他の成分についても、任意で含有率を保証することができる。

菌体りん酸肥料の製造方法は従来の汚泥肥料と同様であるが、品質管理の徹底が求められる。具体的には、品質管理計画を定めて農林水産大臣の確認を受け、当該計画に基づいて製造しなければならない。また菌体りん酸肥料の原料として、原料規格に新たに「排水処理活性沈殿物」が追加された。これは、汚泥のうち、品質管理計画により管理され、性状が安定しているものを指す名称で、汚泥という名称に代わって表示される⁹⁾。

[†]く溶性とは、2%クエン酸溶液に溶けることを指す。水には溶けにくいが、植物の根から分泌される有機酸（根酸）によって徐々に溶け出すため、肥料成分をゆっくりと長期間にわたって供給できるという特徴がある。

③熔成複合肥料、熔成けい酸りん肥

下水汚泥の燃焼灰に、副原料を加え、溶融して肥料として製造する。熔成複合肥料はマグネシウム分、カルシウム分、コークス、熔成けい酸りん肥はさらにケイ素を副原料として加えたものである。おのおの含有すべき主成分の最小量が定められており、ほかの肥料と混合して生産・販売することも可能である。

④その他

下水や下水汚泥に含まれる肥料成分（りん酸やアンモニア）を化学反応、抽出、吸着、沈殿等の手法により回収し、肥料またはほかの肥料の原料として利用する。副産肥料、液状肥料、吸着複合肥料、家庭園芸用複合肥料等の種類がある。

4. 下水汚泥の肥料利用の状況

4.1 下水汚泥の発生量とリサイクル

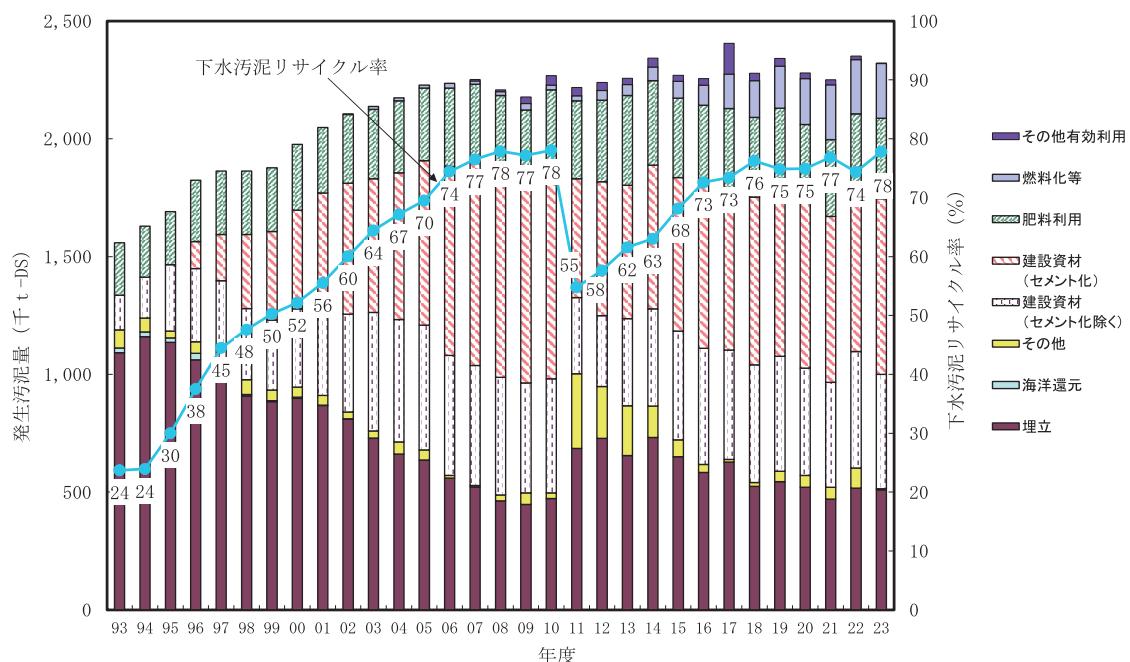
下水汚泥の発生量は産業廃棄物の約2割を占めており、減量化および有効利用の取り組みが進められてきた。下水汚泥の発生量と処理状況の推移を図5に示す。

図中の「下水汚泥リサイクル率」とは、下水汚泥

のマテリアル利用を示す指標であり、2022年9月に閣議決定された「バイオマス活用推進基本計画（第3次）」において、2030年に約85%とする目標が掲げられている¹¹⁾。2011年度以降、東日本大震災の影響により埋立処分や場内ストックが増え、下水汚泥リサイクル率は減少したが、現在は震災前と同程度に回復した。2023年度におけるリサイクル率は78%で、用途としては建築資材利用が半分以上を占めている。

さらに、下水汚泥の固形分の約80%が有機物であることから、新規指標として「下水道バイオマスリサイクル率」が追加され、2030年に約50%とする目標値が設定された。バイオマスの有効利用として、エネルギー利用及び緑農地利用への期待が高まっていることを踏まえ、下水汚泥に含まれる有機物重量のうち、エネルギー・緑農地利用した割合を示すもので¹²⁾、2023年の実績値は37%となっている¹³⁾。

なお、2015年9月に閣議決定された第4次「社会資本整備重点計画」（計画期間：2015～2020年度）において、下水汚泥が有する有機物のエネルギーに着目した指標として「下水汚泥エネルギー化率」が設定され、2020年度に約30%とする目標が掲げら



※ 汚泥処理の途中段階である消化ガス利用は含まれない。

※ 肥料利用については、土壤改良材、人工土壤としての利用を含む。

※ 2011年度のその他は、97.6%が場内ストックである。

図5 下水汚泥の発生量とリサイクル状況¹⁰⁾

れた。その後、この目標値は「下水道バイオマスリサイクル率」に包含されるものとして整理された¹⁴⁾が、下水汚泥のエネルギー利用の指標として毎年公表されている。2023年度の実績値は26%である¹⁵⁾。

4.2 下水汚泥の肥料利用の現状

下水汚泥は有機物と水分を多く含むため、衛生処理と減容化を目的として多くが焼却処理され、灰は埋立または建設資材等に利用されている。

下水汚泥の肥料利用については、主にコンポスト化とリン回収の2種類の方法でおこなわれており、民間企業等への汚泥の処理委託を含め、全国にある約2,000の処理場のうち約1,000の処理場で実施している。しかし、焼却や燃料化などほかの利用・処分も併用しながら肥料利用を実施する処理場が多く、全汚泥発生量に対する肥料利用の割合は2022年時点では14%（固形物（DS）ベース）にとどまっている¹⁶⁾。

コンポスト化の課題としては、下水汚泥における重金属の含有リスクや、重金属等も含めた下水道へのネガティブイメージ、および散布・施肥方法に関するノウハウ不足による流通経路の確保等がある。イメージアップを図るため、国土交通省では2013年より、食と下水道との連携により下水道資源の農業利用の効果や安全性をアピールする「BISTRO下水道」の取り組みをおこなっている。

リン回収については、汚泥をメタン発酵した後の消化汚泥から回収する方法や、燃焼灰から回収する方法等がおこなわれているが、リン回収施設のコストが高い等の課題により、現状、5自治体（6処理場）での実施にとどまっている¹⁷⁾。

しかしながら下水汚泥は、年間発生汚泥量約235万t-DSあたり約5万tのリンを含有している。そのポテンシャルを活かした肥料利用の拡大は、日本の農林水産業の持続性に貢献するものとして期待されている⁸⁾。

5. 下水汚泥資源の肥料利用拡大に向けて

政府より、「肥料の国産化と安定的な供給、資源循環型社会の構築を目指し、農林水産省、国土交通省、農業分野、下水道分野が連携し、安全性・品質を確保しつつ、消費者も含めた理解促進を図りなが

ら、各関係者が主体的に、下水汚泥資源の肥料利用の大幅な拡大に向けて総力をあげて取り組む」という方針が示されている。各関係者の役割は以下の通りである¹²⁾。

①国

関係者の取組支援、ネットワーク化等により、下水汚泥資源を活用した肥料の需要・供給拡大に取り組む

②自治体（下水道事業者（下水道部局））

安全安心かつ肥料製造業者や農業者のニーズに応じた品質の肥料原料の供給に取り組む

③自治体（農政部局）

地域特性に応じて、下水汚泥資源の肥料利用の拡大に取り組む

④肥料製造業者（メーカー）

安全性・品質が確保された下水汚泥資源を原料として、農業者のニーズに応じた肥料の製造に取り組む

⑤農業者・JA等

地域特性に応じて、下水汚泥資源の肥料利用の拡大に取り組む

以下に、主に下水道事業に関連した取り組みについて紹介する。

5.1 国の取り組み

国土交通省は2023年3月、今後、発生汚泥等の処理をおこなうにあたっては、肥料としての利用を最優先し、最大限の利用をおこなうことを基本方針とするという通知を発出した。焼却処理や燃料化は、コンポスト化や乾燥による肥料利用が困難な場合に限り選択することとし、焼却灰や炭化汚泥の肥料利用、汚泥処理過程でのリン回収等を検討することとしている¹⁸⁾。また農林水産省と連名で、地方公共団体に対し、地域特性に応じてコンポスト化、リン回収等、下水汚泥資源を肥料として最大限に利用するよう、農政部局、下水道部局の緊密な連携体制を確保するとともに、安全性・品質の確保、農業者・消費者の理解促進等の取組を実施するよう通知した¹⁹⁾。これに先立ち2023年2月には農林水産省を事務局とした「国内肥料資源の利用拡大に向けた全国推進協議会」が設立され、以降、肥料の原料供給者、製造事業者、利用者間のマッチングフォーラム等が開催されている。

同時期に国土交通省では、「下水汚泥資源の肥料利用を促進するための大規模案件形成支援事業」を開始し、2023年度は20団体、2024年度は19団体の地方公共団体に対して支援を実施した。支援事業により検討した結果はほかの自治体の参考となるよう、事例集としてとりまとめ公表している。また下水汚泥や燃焼灰の成分分析支援も開始し、2023～2024年度に分析を実施した累計118処理場のデータを整理して公開している²⁰⁾。

さらに2024年3月、国土交通省は、地方公共団体が下水汚泥資源の肥料利用を検討することができるよう、「下水汚泥資源の肥料利用に関する検討手順書(案)」を公表した。マニュアルでは、肥料化手法の選定から、流通経路の検討、肥料登録、事業開始後の継続的な取り組みに至るまで、幅広い内容を記載している²¹⁾。

5.2 下水汚泥資源の肥料化技術の開発

国土交通省では、下水道事業において革新的技術の普及展開を図るため、国が主体となって実規模レベルの設備を設置し、技術検証をおこなう「下水道革新的技術実証事業(B-DASHプロジェクト)」(国土交通省への水道行政の移管にともない令和7(2025)年度からは「上下水道一体革新的技術実証事業(AB-Cross)」)を実施している。公募により採択した技術について、提案者である民間企業が地方公共団体や大学などと必要に応じて連携し、国の委託を受けて実規模で実証をおこなう事業である。令和4(2022)年度補正～令和6(2024)年度のB-DASHプロジェクトにおいては、下水汚泥の肥料化を促進するためコスト低減や高効率化を目指した7件の技術が重点的に採択され、実証事業が実施されている。

上記7件中5件が消化汚泥または汚泥脱水ろ液からリンを回収する技術で、うち3件がMAP(Magnesium Ammonium Phosphate: りん酸マグネシウムアンモニウム)法に関するものである。MAP法とは、リンを含む排水にりん酸イオン、マグネシウムイオン、アンモニウムイオンを添加し、りん酸マグネシウムアンモニウム(MAP)を種結晶としてリンを析出させる方法で、反応式を以下に示す。従来から知られた技術だが、汚泥の高濃度化や制御の改善、運動力の削減などにより、コスト低減を図っている。



ほかの2件のリン回収技術は、汚泥脱水ろ液から吸着材を用いてリンを回収する技術である。リンを吸着した資材は肥料原料として使用することができる。

またリン回収技術以外の2件は、高速発酵乾燥によるコンポスト化技術と、超高温炭化による肥料等の高付加価値化技術である。

B-DASHプロジェクトでは、実規模実証の前段階として、普及可能性や技術性能を検討するFS調査についてもほかに1件採択されているが、これは燃焼灰の高温集じんや水洗浄による重金属低減技術に関するもので、ラボ試験による調査研究となっている。

5.3 下水汚泥資源を使用した肥料の新たな展開

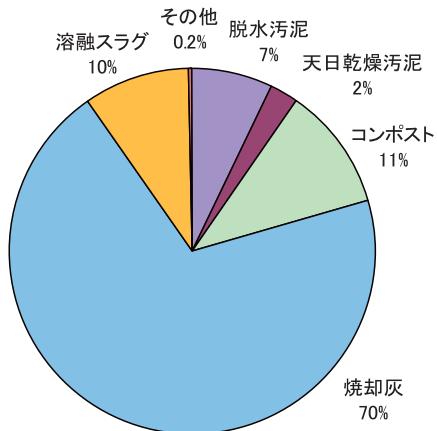
2025年8月現在、26件の菌体りん酸肥料が登録されており、そのうち7件が下水処理場を事業場とする肥料である²²⁾。乾燥汚泥が3件、固形燃料化物(乾燥造粒物)が2件、堆肥が1件、燃焼灰が1件となっている。

菌体りん酸肥料として登録することで、ほかの肥料の原料とすることが可能になるため、肥料原料としての利用に関心のある肥料製造業者を募り、販路拡大を図る自治体もある。全国の自治体ではじめて菌体りん酸肥料として登録された埼玉県の下水汚泥燃焼灰は、その焼却灰を原料とする肥料が肥料製造業者により製品化されており、作物栽培試験の結果を確認した上で、一般販売を開始する予定である。

そのほかにも、農業協同組合(JA)等と協力して、下水汚泥資源を原料とする肥料の製品化や販売に取り組んでいる自治体もある。福岡市や岐阜市では、下水汚泥から回収した再生リンを原料とした肥料製品をJA等が開発し、販売している。また、B-DASHプロジェクトで実証事業を実施中の東京都や横浜市においても、JA等と下水汚泥資源の肥料利用促進のための連携協定を締結している。

6. おわりに

肥料原料のほとんどを輸入に頼る我が国にとって、昨今の供給不安定にともなう肥料の国産化は喫緊の

図6 最終の汚泥形態別リン量²³⁾

課題であり、下水汚泥に含まれるリンの利用拡大が強く求められている。

下水汚泥は日々大量に発生し、腐敗性が高いため、現在は大半が焼却処理されている。焼却には下水汚泥を衛生的に処理し、減容化と安定化によりハンドリング性を向上させるという利点がある。少し古い資料だが、下水汚泥の最終形態に含まれるリンの70%が焼却灰に含まれているという推計があることから、下水汚泥の焼却灰の肥料利用は、汚泥処理とリン資源の活用を両立し、国産肥料化を早期に実現できる有効な手段であると考える。

当社は下水処理・汚泥焼却設備のメーカーとして、より低コストで簡便な肥料化技術、肥料使用者や消費者が安心できる肥料原料を確保する技術について、開発と普及促進に尽力する所存である。そして下水道事業者から肥料使用者に至る関係者の連携の一環となり、我が国の持続可能な食料システムの実現に貢献したい。

参考文献

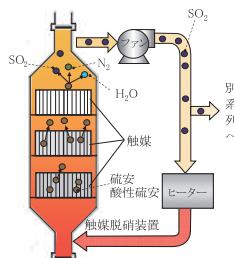
- 1) 農林水産省：みどりの食料システム戦略
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/index-10.pdf> (2025年8月8日確認)
- 2) 首相官邸：食料安定供給・農林水産業基盤強化本部（2022年9月9日）
https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/actions/202209/09honbu.html (2025年8月8日確認)
- 3) 農林水産省：肥料をめぐる情勢（令和7年8月）
<https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/shiryo/attach/pdf/index-207.pdf> (2025年9月1日確認)
- 4) 農林水産省：国内肥料資源利用拡大対策の推進、2023年11月15日
https://www.maff.go.jp/chushi/seisan/kankyo/attach/pdf/chusi_nettw-3.pdf (2025年8月8日確認)
- 5) 農林水産省 消費・安全局 農産安全管理課：肥料制度の解説、令和4年7月
https://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome_k_hiryo/attach/pdf/220706hiryo_setsumei-10.pdf (2025年8月8日確認)
- 6) 独立行政法人農林水産消費安全技術センター（FAMIC）：登録Q&A #A3
http://www.famic.go.jp/ffis/fert/sub2_qa/sub2_qa.html (2025年8月8日確認)
- 7) 農林水産省 消費・安全局 農産安全管理課：肥料法の概要等について、令和7年6月30日
<https://syokuri.jp/top/wp-content/uploads/2025/05/pdf2-hiryoushou.pdf> (2025年8月8日確認)
- 8) 國土交通省：下水汚泥資源の肥料利用に関する検討手順書（案）令和6年3月
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001730285.pdf> (2025年8月8日確認)
- 9) 農林水産省 消費・安全局：「肥料の品質の確保等に関する法律に基づき普通肥料の公定規格を定める等の件の一部を改正する件等についての意見・情報の募集」の結果について、提出意見及び意見考慮結果・理由等（別紙1）、2023年9月1日
<https://public-comment.e-gov.go.jp/pcm/download?seqNo=0000258958> (2025年8月8日確認)
- 10) 國土交通省：上下水道 脱炭素化／資源・エネルギー利用
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000124.html (2025年8月8日確認)
- 11) バイオマス活用推進基本計画（第3次）：
<https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/index-22.pdf> (2025年8月8日確認)
- 12) 農林水産省：下水汚泥資源の肥料利用に向けた動きについて、令和5年8月
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/230808_8-6.pdf (2025年9月3日確認)
- 13) 國土交通省：下水道バイオマスリサイクル率（令和5年度実績）
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001880830.pdf> (2025年8月8日確認)
- 14) 國土交通省：下水汚泥のリサイクル指標について
<https://www.mlit.go.jp/common/001265066.pdf> (2025年8月8日確認)
- 15) 國土交通省：下水汚泥エネルギー化率（令和5

- 年度実績)
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001880831.pdf> (2025年8月8日確認)
- 16) 国土交通省 水管理・国土保全局 上下水道企画課：下水汚泥資源の肥料利用の拡大に向けた取組について、令和7年1月
https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryo/kokunaishigen/zenkokukyoutougikai/attach/pdf/kaigi-51.pdf (2025年8月8日確認)
- 17) 国土交通省：上下水道 下水汚泥資源の肥料利用
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage Tk_000555.html (2025年8月8日確認)
- 18) 発生汚泥等の処理に関する基本的考え方について、令和5.3.17、国水下企第99号
- 19) 下水汚泥資源の肥料利用に向けた活動推進について、令和5.3.24 (4環バ第462号、4消安第7171号、4農産第5216号、4農振第3425号、4農会第836号、国水下企第100号)
- 20) 国土交通省：下水汚泥資源の重金属・肥料成分分析
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage Tk_000882.html (2025年8月8日確認)
- 21) 国土交通省 水管理・国土保全局下水道部下水道企画課：下水汚泥資源の肥料利用に関する検討手順書（案）について、令和6年3月
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001730447.pdf> (2025年8月8日確認)
- 22) 独立行政法人農林水産消費安全技術センター（FAMIC）：菌体りん酸肥料の品質管理計画大臣確認肥料の名称等一覧
<http://www.famic.go.jp/ffis/fert/obj/sub11.pdf> (2025年8月8日確認)
- 23) 国土交通省：下水道におけるリン資源化の手引き、平成22年3月、p.16
<https://www.mlit.go.jp/common/000113958.pdf> (2025年8月8日確認)

報 告

オンサイト触媒再生設備の実機運転報告

Report on the Operation of Actual On-site Catalyst Regeneration Equipment



大山 譲* 原田 等*

Yuzuru OYAMA Hitoshi HARADA

鎌田 全一*

Masakazu KAMADA

【要旨】 都市ごみ焼却施設で採用される脱硝技術の1つに、触媒脱硝方式がある。触媒脱硝方式は、厳しい排出 NOx 規制に対応できる技術であるが、装置の設置コストおよび設置スペースとメンテナンススペースの確保、活性低下による触媒の取替、装置入口排ガスを再加熱するための熱エネルギーが必要等の課題がある。これらの課題に対応すべく開発したのが、オンサイト触媒再生設備である。オンサイト触媒再生設備は、触媒脱硝装置内から触媒を取り出すことなく短時間で新品同等まで再生するシステムである。当社は 2014 年 5 月に都市ごみ焼却施設へ本システムの初号機を納入し、その後、3 施設に本設備を納入している。本稿では、オンサイト触媒再生設備導入のメリットを説明するとともに、最新施設での納入事例を紹介する。また、触媒再生の状況と、初号機の繰り返し再生の状況についても報告する。

キーワード：触媒脱硝方式、NOx、触媒、劣化、オンサイト触媒再生

Abstract

Selective catalytic reduction is one of the denitrification technologies used in municipal waste incineration facilities. While selective catalytic reduction is a technology that can meet the stringent NOx emission regulations, there are problems such as system installation cost, securing spaces for installation and maintenance, replacement of the catalyst when its activity decreases, and the need for thermal energy to reheat the exhaust gas at the inlet of the system. An on-site catalyst regeneration facility was developed to address these issues. It is a system that regenerates the catalyst to a level equivalent to a new one in a short time without taking out the catalyst from the catalyst denitrification unit. Our company delivered the first unit of this system to a municipal waste incineration facility in May 2014 and has since delivered the equipment to three other facilities. This article explains the advantages of the on-site catalyst regeneration facility and introduces an example of delivery to the latest facility. We will also report on the status of catalyst regeneration, and the status of repeated regeneration at the first unit.

Keywords: selective catalytic reduction, NOx, catalyst, deterioration, on-site catalyst regeneration

* 装置技術部

Mechanical Design & Engineering Dept.

1. はじめに

近年、都市ごみ焼却施設の窒素酸化物除去設備は、装置が簡易でありスペースを必要としない無触媒脱硝設備を採用されることが多い。一方、厳しい排出 NOx 規制に対応するために触媒脱硝装置の設置が必要な施設も多くある。しかしながら触媒脱硝装置は、設置コスト、設置スペースとメンテナンススペースが必要であり、また、活性低下による触媒の取替、排ガスを再加熱するために熱エネルギーを消費するなどのデメリットがある。これらのデメリットを払拭すべく開発したものがオンサイト触媒再生設備である。

本設備は、2008 年に基礎試験、2012 年に実証試験をおこない^{1,2)}、2014 年 5 月にクリーンセンターかしらへ初号機を納入している。その後、3 件の都市ごみ焼却施設へ納入しており、すべての設備が現在も稼働中である。

本稿では、オンサイト触媒再生設備導入のメリットを説明するとともに、最新の納入設備を含む納入事例と触媒再生の運転実績について報告する。

2. オンサイト触媒再生設備

2.1 触媒再生の原理

触媒脱硝技術は、排ガス中に含まれる窒素酸化物（以下、NOx と記す）を、脱硝薬剤であるアンモニア（以下、NH₃ と記す）と触媒上で反応させて無害な窒素と水に転換する技術である。このとき、排ガス中

に硫黄酸化物（以下、SOx と記す）が含まれていると、SOx と NH₃ が反応して硫安 ((NH₄)₂SO₄) や酸性硫安 (NH₄HSO₄) が副生成物として生成し、これらが触媒の細孔を目詰まりさせることで触媒の活性を低下させる。これが、都市ごみ焼却施設における経年的な触媒の劣化の主な原因である。

劣化した触媒の再生方法には、触媒上に生成した副生成物である硫安、酸性硫安が熱分解する温度まで加熱する加熱再生方法や、水で洗浄する水洗方法などがある。今回報告するオンサイト触媒再生設備は、触媒を触媒脱硝装置から取り出すことなく加熱することで副生成物を熱分解し、触媒の活性を回復させる加熱再生方法である。なお、触媒を加熱再生すると硫安、酸性硫安の分解生成物である NH₃、SOx が発生するため、これら分解生成物の除去が必要となる。

2.2 設備概要

オンサイト触媒再生設備による触媒の再生は、触媒を再生する系列の焼却炉の休炉に合わせて実施する。図 1 は、本設備の模式図である。本設備は、ヒーターで加熱した 380°C 以上の温風を触媒脱硝装置に循環供給することで触媒を加熱再生する。この際、硫安および酸性硫安の熱分解（式 1、式 2）によって SOx、NH₃ が生ずるため、これら分解生成物を以下に記載の方法で除去する。

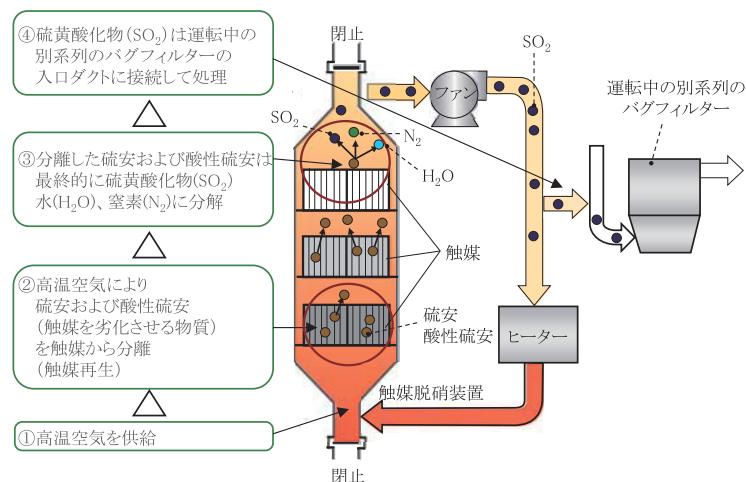
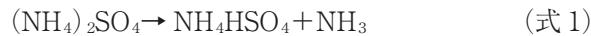


図 1 オンサイト再生設備模式図

【副生成物の分解機構】

硫酸の分解反応



酸性硫酸の分解反応

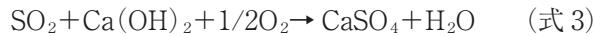


(i) SOx の除去

都市ごみ焼却施設では、バグフィルター入口に消石灰を供給して焼却排ガス中の塩化水素、SOx を除去していることが多い。触媒再生により生じた SOx を含むガスを、運転中である別系列のバグフィルター入口へと導入し、消石灰と反応させて（式3）SOx を除去する。

【分解生成物（SO₂）と消石灰の反応機構】

消石灰による SO₂ の除去

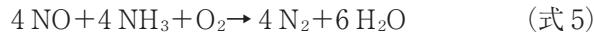


(ii) NH₃ の除去

触媒再生により生じた NH₃ は、触媒再生の過程で高温となった触媒の酸化作用によってその一部が NOx となる（式4）。生成された NOx は、循環系内で触媒のはたらきにより残存 NH₃ と反応して無害な窒素と水に転換される（式5）。

【発生ガス（NH₃）の分解機構】

触媒による NH₃ の分解反応



2.3 オンサイト触媒再生の利点

都市ごみ焼却施設で採用される脱硝技術には、触媒脱硝方式や無触媒脱硝方式があり、触媒脱硝方式は NOx 排出濃度 30 ppm 以下（乾き O₂=12% 換算）といった低 NOx 濃度の排出規制に対応可能である。また、無触媒脱硝方式は反応効率が高くないため NH₃ を多く使用するのに対し、触媒脱硝方式は噴霧した NH₃ のすべてが脱硝反応に寄与するため、NH₃ の使用量が少なく維持管理費が低減できるという長所がある。さらに、触媒は排ガス中のダイオキシン類を分解する能力も有している。

一方、無触媒脱硝方式と比べて触媒脱硝方式には

以下の短所がある。

- ・触媒を充填した触媒脱硝装置を必要とし、その設置コスト、設置スペースの確保が必要となる。
- ・経年的に触媒が劣化し、活性低下が生じる。そのため、触媒の取替・触媒メーカーの工場へ持ち帰っての再生に係る費用と期間が必要であり、触媒を取り出すメンテナンススペースの確保も必要となる。
- ・触媒は使用温度が高いほど活性が高く、都市ごみ焼却施設では 200~220°C 程度で運転される。一方、その上流側のバグフィルターは 200°C 未満で運転されることが一般的であり、排ガスを再加熱するために熱エネルギーを投入する必要がある。
- ・触媒の劣化を抑えるため、前処理として排ガス中の SOx が低濃度となるよう除去する必要がある。

上述のとおり、触媒脱硝装置は 200~220°C 程度で運転されることが多い、「高効率ごみ発電施設整備マニュアル」³⁾にも記載があるとおり、触媒脱硝装置の運転温度の低温化によってガス再加熱用の熱エネルギーを発電に利用できるため、ごみ発電の効率を高める手段の一つとして強く求められている。ただし、運転温度を低温化するにあたっては、触媒劣化を見越して触媒量を大幅に増やす必要がある。

図2は、触媒脱硝装置が必要とする触媒量を従来の運転温度 200°C の場合（CASE 1）、180°C にまで低温化した場合（CASE 2）、低温化かつオンライン触媒再生設備を設けた場合（CASE 3）で比較したものである。触媒脱硝装置に充填する触媒量は、求められる性能を発揮させるために最低限必要な触媒量である“基礎触媒量”に、運転期間中の触媒の劣化分に相当する量（以下、劣化触媒量と記す）を加えた量である。オンライン触媒再生設備を設置しない場合は触媒の取替頻度を低減するため、3~5 年間程度は触媒の取替なく運用できるだけの触媒量を初期充填する必要がある。ただし、図2に示すとおり、運転温度の低温化には触媒活性の低下による基礎触媒量の増加、さらには硫酸や酸性硫酸の生成量が増えることによる劣化触媒量の増加という課題があり、触媒量を大幅に増やさざるを得ない。それに対し、オンライン触媒再生設備を導入すれば、年1回の定期整備時にあわせて触媒再生を実施することができ、

CASE	1	2	3	
	従来	低温化	低温化 + オンサイト 触媒再生 (1年毎に再生)	
触媒量		1年分 1年分 1年分 1年分 1年分	1年分 1年分 1年分 1年分 1年分	1年分
運転温度	200°C	180°C	180°C	
触媒交換周期	5年	5年	なし	

運転条件: いずれの CASE も SOx 濃度 15 ppm, NOx 除去率約 70%

図 2 必要触媒量のイメージ

初期充填の触媒量を大幅に低減することが可能である。図 2 のケースでは、触媒脱硝装置を低温化して 5 年ごとに触媒交換する CASE 2 に比べて、1 年ごとに触媒再生をおこなう CASE 3 は、触媒量を CASE 2 の 25% 程度に大幅な削減が可能である。また、触媒量が減ると圧力損失が小さくなるので誘引通風機の消費電力の低減にもつながる利点がある。

そのほかに、オンサイト触媒再生設備を設けることで、触媒の取替、または装置外へ取り出して触媒メーカーの工場に持ち帰っての再生に必要な長い工期、工事費は不要となる。図 3 に触媒脱硝装置の配置イメージ図を示す。数年ごとに触媒の取替をおこなう計画であれば、搬出入用の動線や触媒脱硝装置まわりのメンテナンススペースを確保しておく必要があるが、オンサイト触媒再生装置の導入によって触媒の取替作業が不要となり、メンテナンススペースの削減が可能となる。また、触媒脱硝装置そのものの構造も、側面からの触媒の出し入れが不要となり、柔軟な機器配置が可能となる。

このようにオンサイト触媒再生技術を導入すると、触媒量を必要量のみ増加するだけで済み、労力のかかる触媒取替などからも解放されることで、大幅にコストアップすることなく運転温度の低温化、すなわち経済性に優れた発電効率向上を実現することが可能となる。

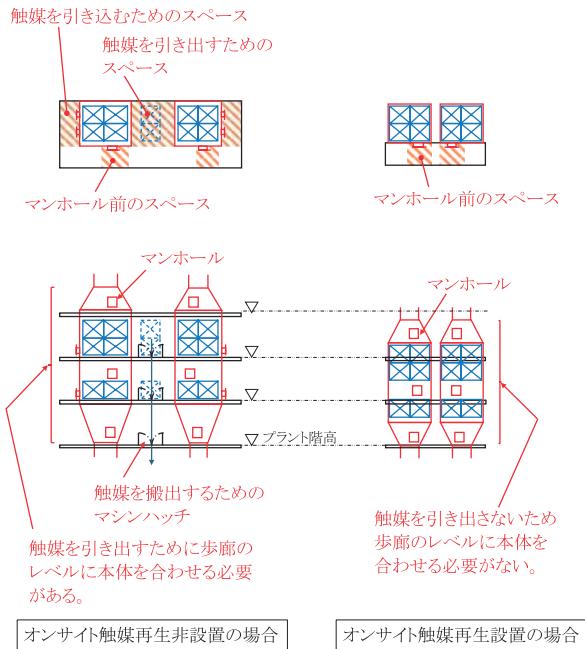


図 3 触媒脱硝装置配置イメージ図 (2 炉構成)

3. 納 入 実 繢

表 1 は、当社のオンサイト触媒再生設備の納入実績表である。これまで都市ごみ焼却施設 4 施設に納入しており、加えて現在 1 施設に対して設計中である。いずれの施設も年 1 回程度のオンサイト触媒再生をおこなうことで、触媒を取替することなく運転を継続できている。

クリーンセンターかしらに納入した初号機は、既存の触媒脱硝装置に本設備を追加設置したものである。触媒取替費用の削減に加えて、本設備納入を契機に触媒脱硝装置の運転温度を下げてガス再加熱器への投入エネルギー削減を実現している。

その後の 3 施設は、いずれも新設炉にオンサイト触媒再生設備を設置したものであり、設計の初期段階から本設備の導入を前提として最小量の触媒で設計をしている。町田市バイオエネルギーセンターおよび西知多クリーンセンターは、排出 NOx 濃度 20 ppm 台で安定運転できており、低温化による触媒量の増加を抑えつつ、ガス再加熱器への投入エネルギーの最小化も実現している。

表1 オンサイト触媒再生設備の納入実績

納入先施設名	納入月	触媒脱硝装置	
		運転温度	NOx 施設保証値 ^{注3}
クリーンセンターかしはら ^{注1} [施設規模：85 t/24 h × 3 炉]	2014年5月	190°C ^{注2}	80 ppm
バリクリーン (今治市クリーンセンター) [施設規模：87 t/24 h × 2 炉]	2018年3月	200°C	45 ppm
町田市バイオエネルギーセンター [施設規模：129 t/24 h × 2 炉]	2021年12月	185°C	30 ppm
西知多クリーンセンター [施設規模：92.5 t/24 h × 2 炉]	2024年6月	180°C	30 ppm

注1 既設施設へ追加納入。

注2 初期は 210°C で運用していたが、オンライン触媒再生設備導入後、190°C に変更。

注3 乾きガス酸素濃度 12% 換算値。

4. オンサイト触媒再生の実施例

4.1 最新納入案件における運用

図4は、最新の納入事例である西知多クリーンセンター向けオンライン触媒再生設備の運転データの一例である。触媒再生時には電気ヒーターを用いて触媒脱硝装置へ温風を送り、硫安や酸性硫安の分解温度まで触媒を昇温する。昇温完了後は一定時間、分解温度を保持し続けて触媒を再生する。本施設では、設計初期段階から本設備の導入を前提としていたため、ひとたび昇温操作を開始すれば、昇温・温度保持・冷却までのすべての工程を自動で完遂する仕様となっており、準備から再生作業完了までの日数は、おおむね1週間となっている。

表2に再生前後の触媒活性データを示す。これは、再生前後の触媒の一部を採取し、ラボ試験装置で脱硝性能を評価した結果である。ここで、kは採取時

点の触媒の反応速度定数[†]、k'は再生後の反応速度定数の目標値である。再生後の k/k' が 1 以上であれば、触媒を十分に再生できていると判断される。表2の結果から、再生前の触媒の k/k' は 1 号が 0.77、2 号が 0.58 まで低下していたが、再生後の触媒の k/k' は 1 号が 1.09、2 号が 1.00 であり、目標値以上の活性に回復していることがわかる。また、図5は、触媒再生運転の前後における触媒の外観写真である。劣化した触媒は硫安や酸性硫安の付着により表面が緑がかった色に変色していたが、再生後は新品と同様に触媒本来の五酸化バナジウムの黄橙色となっており、外観からも再生できていることが

表2 西知多クリーンセンターにおける再生前後の触媒の活性評価

ガス流れ	↑	k/k' ^{注1,注2}				
		1号炉		2号炉		
		再生前	再生後	再生前	再生後	
ガス流れ	↑	3段目	0.96	1.09	0.96	1.00
		2段目	0.90	1.10	0.51	1.05
		1段目	0.45	1.07	0.26	0.95
全 体		0.77	1.09	0.58	1.00	

注1 k/k'=1 以上であれば、再生後の目標となる活性に達しており、逆に、k/k' の値が 0 に近づくほど触媒が劣化していることを示す。

注2 k/k' はサンプリングした触媒を用いてラボ試験装置で測定した脱硝率から下記の式によって算出した。

$$k/k' = \ln(1-\eta)/\ln(1-\eta')$$

η：採取時点の脱硝率

η'：再生後の目標脱硝率

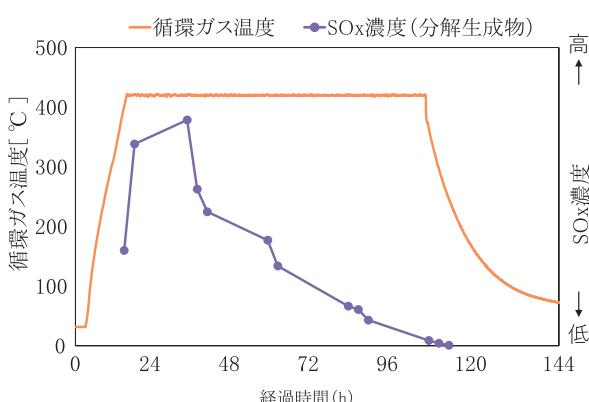


図4 触媒再生時の運転データ（西知多クリーンセンター）

[†] 反応速度を r としたとき、脱硝反応の反応速度定数 k は、 $r = k \cdot P_{NOx}$ で表される。ここで、 P_{NOx} は NOx の分圧である。

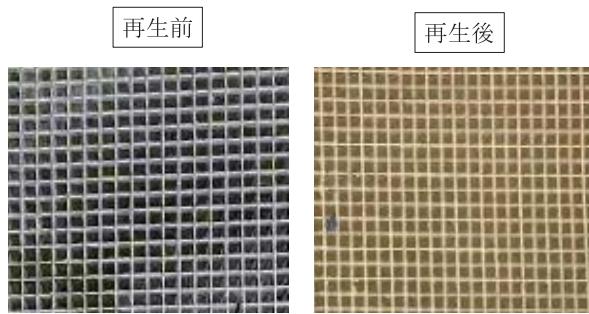


図5 再生前後の触媒の外観（西知多クリーンセンター）

確認できる。

本施設では触媒脱硝装置を運転温度180°Cで運用している。低温運転は触媒劣化を促進させるリスクをともなうが、現場で計画的に触媒再生が可能なオンライン触媒再生設備を備えることで、そのリスクを解消している。その結果、ガス再加熱器における蒸気使用量を削減でき、触媒脱硝装置の運転温度を200°Cとした場合と比べて、ごみ1トン当たりの発電量が583 kWhから598 kWhへと約2.5%増加しており、年間の売電量における収益増加につながっている。

4.2 長期にわたる繰り返し再生事例

オンライン触媒再生設備の初号機をクリーンセンターかしらに納入してから11年が経過した。本設備設置後、触媒脱硝装置の運転温度を210°Cから190°Cに低温化してエネルギー回収量を増やす一方で、触媒の劣化が進みやすくなることから1年毎に触媒再生をおこなっている。また、1回の再生で k/k' が1以上にまで再生するための分解温度の保持時間は、設置初期に実施した運転の結果から定めている。

表3に2017~2024年度の触媒再生後の触媒活性データを示す。再生後の触媒の k/k' は毎回安定して1.0を上回っており、本設備設置から10回に及

ぶ繰り返しのオンライン触媒再生をおこなっているが、再生する度に目標値以上の活性に回復している。また、触媒の破損等の強度劣化の問題も生じていないことが確認できている。

5. まとめ

本稿ではオンライン触媒再生設備の特徴および納入事例について紹介した。設計の初期段階からオンライン触媒再生設備の導入を前提として設計をおこなうことで触媒量を最小化することができる。また、最新の施設では昇温から再生、その後の冷却までの触媒再生工程を自動化しており、再生結果について良好である。また、初号機において、10年以上と長期間にわたって触媒再生を繰り返しても安定的に再生できていることを確認している。

触媒脱硝方式は、NOx濃度・ダイオキシン類濃度の排出規制が厳しい施設の排ガス規制遵守に有効な高度技術であるが、一方で、設置コスト、設置スペースの確保、活性低下による触媒の取替、排ガスを再加熱するための熱エネルギーが必要であるなどの課題も抱えていた。オンライン触媒再生技術を導入することで、これらの課題を大きく改善しつつ、低NOx濃度規制対応やNH₃の使用量削減の両立が可能である。

最後に本設備の導入にあたり、多大なご協力を頂きました権原市殿、西知多医療厚生組合殿をはじめとする関係各位に厚く御礼申し上げます。

表3 クリーンセンターかしらの繰り返し再生後の触媒の活性評価

3号炉		触媒再生後の k/k' ^{注1,注2}							
		2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	
ガス流れ ↑	3段目	1.09	1.12	1.14	1.17	1.12	0.98	1.20	1.03
	2段目	1.13	1.07	1.09	1.20	1.12	1.02	1.17	1.07
	1段目	1.10	1.04	1.12	1.21	1.12	1.00	1.14	1.07
全 体		1.11	1.08	1.12	1.19	1.12	1.00	1.17	1.06

* 注1, 注2は表2と同じ

参考文献

- 1) 美濃谷広, 鈴木賢, 倉田昌明, 前田典生: 脱硝触媒の現場再生方法の開発, タクマ技報, Vol. 21, No.1, pp.28-32 (2013)
- 2) 鈴木賢, 美濃谷広, 鎌田全一, 田口彰: 「タリーンセンターかしさら」における脱硝触媒のオンサイト再生の実績報告, タクマ技報, Vol. 23, No.2, pp.28-34 (2015)
- 3) 環境省: 高効率ごみ発電施設整備マニュアル, pp.24-25 (2018)

パワーエイド三重シン・バイオマス[®] 松阪発電所の運転報告

Operation Report on the Power Aid Mie Shin-BiomassTM Matsusaka Power Plant



永 山 瑞 起 *

Mizuki NAGAYAMA

【要旨】 2025年3月、パワーエイド三重合同会社殿向けにパワーエイド三重シン・バイオマス[®] 松阪発電所の発電設備を納入した。本発電所は、FIT制度を活用せず、木質バイオマスに建設資材廃棄物チップやRPFを混合したものを燃料として使用している。今回の納入設備では、当社の2MW級バイオマス発電設備の標準仕様をベースに、RPF混焼に対応するため一部設備仕様を変更した。本稿では設備概要に加え、二次燃焼空気吹込みパターンの検討を含む運転結果およびその考察について報告する。

キーワード：Non-FIT, 2 MW, RPF混焼, 二次燃焼空気吹込みパターン検討, DXNs 対策

Abstract

In March 2025, we delivered a power generation system to Power Aid Mie LLC for Power Aid Mie Shin-BiomassTM Matsusaka Power Plant. This power plant operates without utilizing the Feed-in Tariff (FIT) scheme and uses a mixed fuel consisting of woody biomass, waste construction material chips and Refuse Paper and Plastic Fuel (RPF). For this delivery, the equipment was based on our standard 2MW-class biomass power generation system, with partial modifications to accommodate RPF co-firing. This paper presents an overview of the equipment as well as the operational results and discussions, including an examination of the secondary combustion air injection patterns.

Keywords: Non-FIT, 2 MW, RPF co-firing, secondary combustion air injection patterns, DXNs reduction

* エネルギー技術 2 部
Energy Engineering Dept. 2

1. はじめに

2012年に再生可能エネルギー（以下、再エネと記す）導入促進を目的として固定価格買取制度（以下、FIT制度と記す）が開始された。これにより、日本国内の年間発電電力量のうち再エネが占める割合は、2011年度の10.4%から2023年度には22.9%へと増加した¹⁾。当社の2MW級バイオマス発電設備（以下、2MWシリーズと記す）も、FIT制度における2,000kW未満のバイオマス発電（間伐材等由来の木質バイオマス）の区分をターゲットとして商品化し、2025年8月現在で延べ16件の受注に至っている^{2,3)}。

資源エネルギー庁は、引き続き再エネの導入拡大に向けてあらゆる政策を総動員するという方針を掲げながらも、再エネの主力電源化のためにはFIT制度などの政策支援から自立しつつ再エネ導入が進むことが重要と捉えている⁴⁾。しかし、木質バイオマス発電は、近年の木材価格高騰（ウッドショック）の影響により、燃料となる木材チップの安定的な調達が難しくなっており、事業採算性の確保に課題を抱えている。

こうした社会的背景下において、パワーエイド三重合同会社殿（以下、PAM殿と記す）の代表社員であるバイオマスパワーテクノロジーズ株式会社殿（以下、BPT殿と記す）は、FIT制度を活用しないバイオマス発電事業の構想を開始した。この事業のコンセプトは、これまで燃料利用が困難だった発熱量が低く安価な木質バイオマスに、発熱量が高い建設資材廃棄物（以下、建廃と記す）由来のチップやRPFを混合して燃料利用可能とすることで、燃料調達コストを低減することである。BPT殿は、当社2MWシリーズの初号機である「松阪木質バイオマス発電所」を操業しており、これまで多種の燃料の試験運用に取り組んできた。その経験から得られた知見を活用できることに加え、2MWシリーズが有する「機器・配置標準化による設計期間の短縮および設計・建設コストの低減」という利点を活用可能なため、RPF混焼に対応した2MWシリーズ建設の事業計画がはじまった。

一方、当社は木質燃料とRPFの混焼ボイラーおよびRPF専焼ボイラーの納入実績を有しており、燃料搬送・燃焼・排ガス処理に関するノウハウを蓄積してきた。これらの知見を活用し、木質チップ専

焼を標準仕様とする2MWシリーズをベースに、客先ニーズであるRPF混焼に対応できるよう一部仕様を変更した発電設備を2025年3月に納入した。本稿では、当該事業および設備の概要、2MWシリーズからの変更点、ならびに運転結果について報告する。

2. 事業の概要

PAM殿は、パワーエイド三重シン・バイオマス[®]松阪発電所（以下、本発電所と記す）の建設および運営をおこなうことを目的に、2021年7月に設立された合同会社である。本事業では、地域の製造業由来の有機系副産物（建廃、RPFおよび木質バイオマスなど）を組み合わせた「シン・バイオマス[®]」を、燃料として有効活用することをコンセプトに掲げている。これはBPT殿が松阪木質バイオマス発電所で掲げる「廃棄されていた地域の未利用木材を余すところなく活用する」という理念から、対象を有機系副産物にまで拡張・発展させたものである。

本発電所は、三重県の「地域経済牽引事業計画」に採択された事業として、国産材の総合流通加工拠点である木材コンビナート「ウッドピア松阪」の敷地内に新たに建設された。発電された電力は、オフサイトPPA（Power Purchase Agreement：電力購入契約）により燃料供給事業者の工場に供給されている。

3. 設備の概要

本発電所の設備概要を表1に、外観および設備フローをそれぞれ図1、図2に示す。ボイラーについては、RPF混焼において出口蒸気条件が2MWシリーズと同一となるように設計した。蒸気タービン発電機および補機類については、2MWシリーズの仕様・配置をそのまま適用した。

4. 2MWシリーズからの変更点

本発電所の設計は基本的に2MWシリーズを踏襲している。ただし、2MWシリーズの標準仕様では計画燃料が木質チップのみであるのに対し、本事業ではRPF混焼による燃料特性の違いに対応するために各種設計変更をおこなった。本章ではその主

表1 設備概要

項目	仕様
ボイラー	型式 自然循環式水管ボイラー
	常用圧力 (過熱器出口) 4.2 MPa
	常用温度 (過熱器出口) 405°C
	最大蒸発量 12.0 t/h
	燃焼装置 逆走トラベリングストーカ
	燃料 木質チップ： <u>90%</u> <u>RPF：10%</u>
蒸気タービン 発電機	出力 (発電機端) 1,990 kW
	入口蒸気圧力 4.0 MPa
	入口蒸気温度 400°C

※ 2 MW シリーズと異なる箇所を太字下線としている。



図1 発電所全景写真

な変更内容について示す。

4.1 燃料搬送・供給設備

本発電所では、木質燃料と RPF を受入ヤードで混合して燃料搬送・供給系統に投入する。そのため、両燃料を搬送・供給可能な設備が必要である。

チップ供給フィーダは、木質燃料を定量供給できる 2 MW シリーズの構造を基本としつつ、木質燃料に比べて高密度で寸法の大きい RPF がフィーダ内で排出不全を起こさないよう、過去に納入した RPF 専用の供給フィーダを参考に構造の一部を変更した。

また、将来的に多様な性状の燃料使用も想定されるため、燃料搬送設備については、腐食・摩耗対策として必要箇所にステンレス鋼を採用した。

4.2 ボイラー

RPF に含まれる塩素による高温腐食を防ぐため、過熱器の一部にステンレス鋼管を採用した。また、建廃および RPF は灰分が多く、過熱器への灰の付着量増加によるガス流路の閉塞が懸念されるため、過熱器の管ピッチを 2 MW シリーズと比べて広くした。

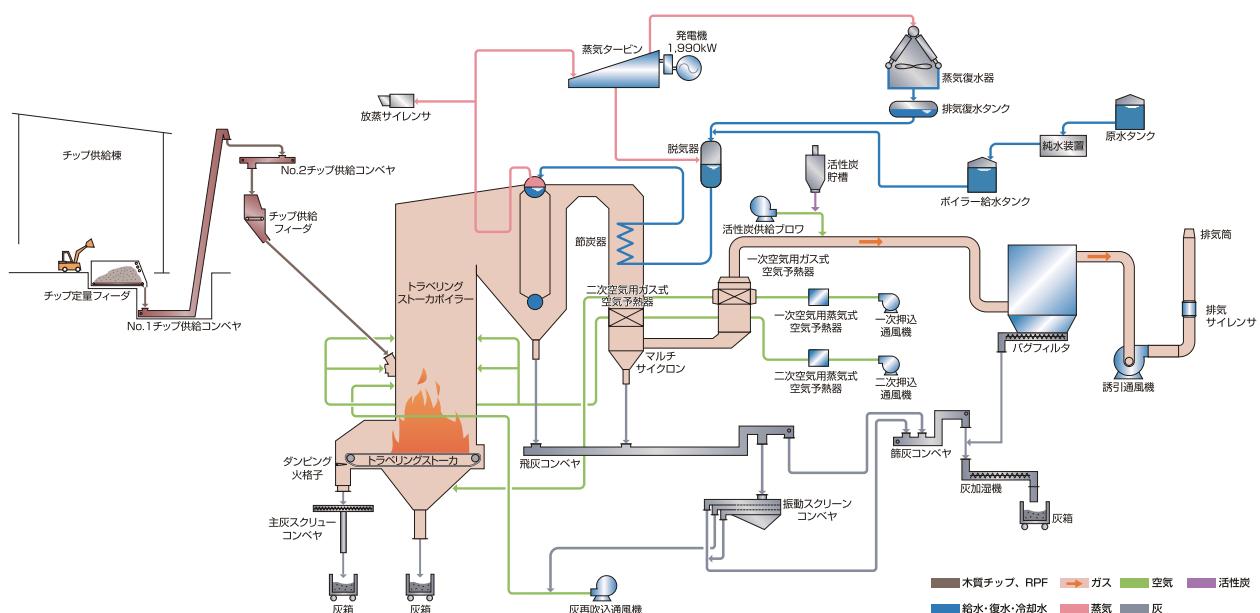


図2 設備フロー

4.3 有害物質対策

RPFに含まれる塩素化合物の燃焼によりダイオキシン類（以下、DXNsと記す）が生成される可能性がある。この対策として、RPFの塩素含有量の管理を目的に、排ガス中の塩素濃度を常時監視するためのHCl濃度計を排気筒に設置した。

また、不完全燃焼がDXNs生成の一因となるため、燃焼調整の自由度を高める目的で、二次燃焼空気の吹込みノズルを増設し、それぞれに流量調整用ダンパーを設けた。

さらに、万が一DXNs発生量の増加が懸念される場合に備え、大気への排出を防止できるよう、バグフィルタ上流のガスダクトから活性炭を吹込む装置を設置した。

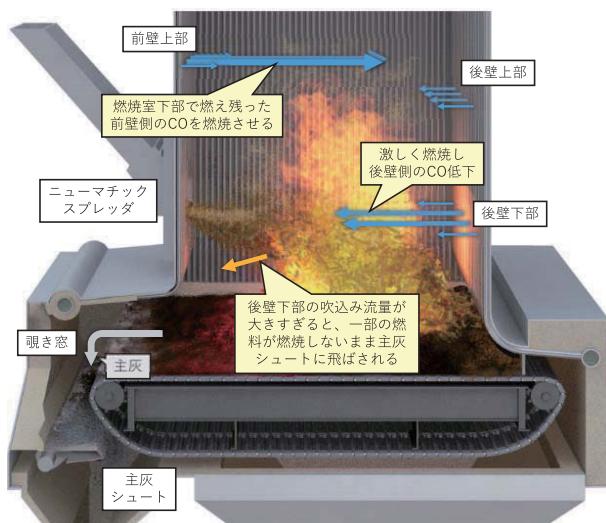


図3 二次燃焼空気吹込みと燃焼状態のイメージ図

5. 運転結果

5.1 二次燃焼空気吹込みパターンの検討

燃焼ガス中のDXNs濃度は連続測定が困難なため、一酸化炭素(CO)濃度を良好な燃焼状態の指標とし、さまざまな二次燃焼空気吹込みパターンによる検討をおこなった。結果を表2、燃焼状態のイメージ図を図3に示す。

本発電所でのDXNs対策の基本方針はRPFの塩素含有量を規定量内に管理することであり、燃焼による対策はこれを補完する位置づけである。そのため、ボイラーとしての制御性や操作性といった基本的な機能を損なわない範囲で、可能な限りCO濃度を低減する方針とした。

実運転による検討において、CO濃度が特に顕著に低下した吹込みパターンは、後壁下部の中央2箇所への吹込み流量を増加させたパターンであった(パターン①と②の比較)。図4の写真的とおり、パターン②では一次燃焼中の火炎の側面から空気が吹



図4 二次燃焼空気後壁下部吹込み口での燃焼状況 (パターン②)

表2 二次燃焼空気吹込みパターンと結果

吹込み パターン	二次燃焼空気吹込み流量 [m ³ N/h]												CO濃度 [ppm (dry)]	未燃のまま 主灰シートに 飛ばされた燃料	二次燃焼空気 吹込みノズル への燃料の逆流			
	前壁上部			後壁上部			後壁下部											
	左	中央左	中央右	右	左	中央左	中央右	右	左	中央左	中央右	右						
①	10	660	660	10	10	660	660	10	10	10	10	10	530	ほとんど無し	—			
②	10	660	660	10	10	10	10	10	10	660	660	10	120	多	—			
③	10	900	900	10	10	10	10	10	10	250	250	10	137	少	多			
④	10	10	10	10	10	890	890	10	10	250	250	10	370	少	多			
⑤(最終)	40	850	850	40	40	40	40	40	40	240	240	40	150	少	少			

* 流量はダンパー開度からの計算値。

* CO濃度は1時間平均値。

* パターン①、②実施時には、二次燃焼空気吹込みノズルへの燃料の逆流は確認せず。

* 木質燃料専焼時に実施。

表3 性能試験の運転結果

項目	運転結果		備考
混合割合	木質燃料 : 89.1%	RPF : 10.9%	
燃 料	水 分	43.1%	
	低位発熱量	10,030 kJ/kg	
	塩 素	0.27%	乾きベース
主蒸気	圧 力	4.2 MPa	5 時間平均
(過熱器出口)	温 度	395°C	〃
	流 量	11.2 t/h	〃
蒸気タービン	出 力	1,990 kW	〃
発電機	(発電機端)		
	ばいじん (O ₂ =6% 換算)	<0.0009 g/m ³ _N	規制値 : 0.3 g/m ³ _N
排ガス性状	窒素酸化物 (O ₂ =6% 換算)	81 ppm	規制値 : 350 ppm
	硫黄酸化物	K 値換算値 0.6	規制値 : K 値 17.5
	ダイオキシン類 (O ₂ =12% 換算)	0.019 ng-TEQ/m ³ _N	規制値 : 1.0 ng-TEQ/m ³ _N
	塩化水素 (O ₂ =12% 換算)	50 mg/m ³ _N	規制値 : 700 mg/m ³ _N

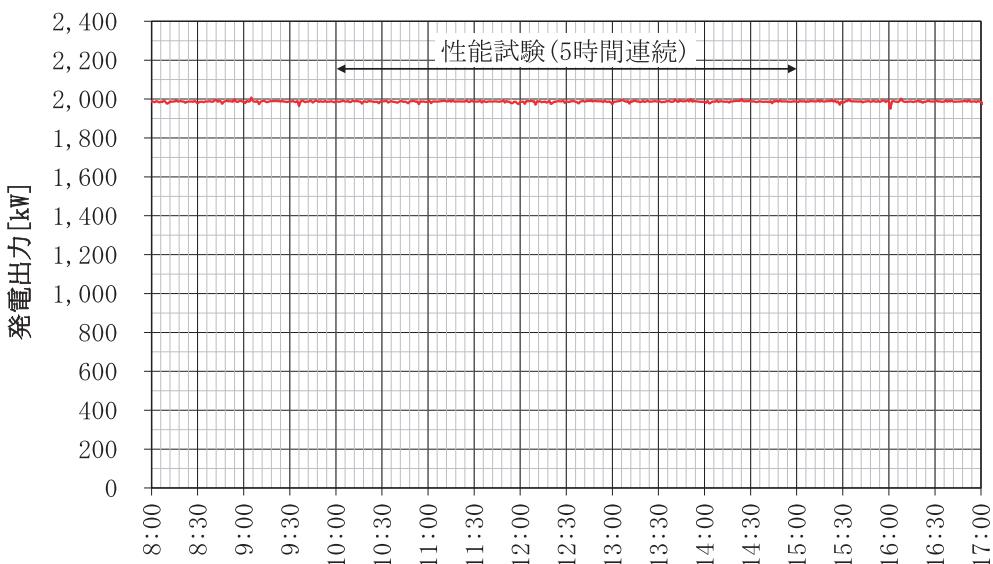


図5 性能試験当日の発電出力の推移

込まれることで、その周囲が激しく燃焼し、CO の燃焼が促進されたものと推測する。ただし、後壁下部の吹込み流量を一定以上に増やすと、比重の小さい燃料が前壁側（主灰シュート側）に吹き飛ばされて、ほとんど燃焼することなく排出されてしまった。そのため、後壁下部の吹込み流量はノズル 1 か所あたり 250 m³_N/h を上限とし、これをパターン③とした。

また、前壁上部への吹込み流量を増やしたパターン③の方が、後壁上部への吹込み流量を増やしたパターン④より CO 濃度が低下した。これは、後壁下

部での燃焼が促進されたことにより後壁上部を流れる不完全燃焼ガスが減少しており、不完全燃焼ガスが残った前壁側燃焼ガスに多くの空気を吹込むことで、燃焼室全体としての燃焼性向上が図られた結果と考えられる。

なお、パターン③で吹込み流量を 10 m³_N/h とした後壁下部のノズルに、燃料の逆流・堆積が確認されたため、すべての二次空気ノズルについて 1 ケ所あたりの最低流量を 40 m³_N/h とし、これを最終状態のパターン⑤とした。

5.2 性能試験

性能試験の運転結果を表3に、性能試験当日の発電出力の推移を図5に示す。発電出力は安定して推移し、計画を満足する設備であることを確認した。また、排ガス性状について、すべての環境規制値を満足する結果であった。

6. おわりに

木質チップの価格が高騰する一方で、政策支援から自立した再エネの導入が求められる昨今においては、事業コストを低減しつつ、さまざまな種別・性状の燃料に対応可能な発電設備が求められる。2 MWシリーズのコンセプトを継承しつつ、RPF混焼に対応した今回の発電設備は、その要求に応えるものである。

当社はお客様とともに作り上げた本発電所から得られた知見を有効に活用させていただき、持続可能な再エネ導入に貢献すべく、より柔軟な設備の計画・設計に取り組んでいく所存である。

謝辞

本発電所の計画・設計から建設・試運転、お引渡しに至るまで、多大なるご協力をいただきましたバイオマスパワーテクノロジーズ株式会社殿ならびにパワーエイド三重合同会社殿をはじめ、関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：令和5年度（2023年度）におけるエネルギー需給実績（確報）（2025）
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2023fykaku.pdf (2025年8月5日確認)
- 2) 引田浩之：2 MW 級木質バイオマス発電設備の運転実績報告、タクマ技報、Vol. 26, No. 2, pp. 31-38 (2018)
- 3) 堀内周：2 MW 級木質バイオマス発電に関する制度の変遷とその対応、タクマ技報、Vol. 32, No. 2, pp. 49-55 (2024)
- 4) 資源エネルギー庁：令和6年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2025）（2025）
https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2025/pdf/whitepaper2025_all.pdf (2025年8月5日確認)

報 告

さいたま市 見沼環境センター 運転報告

Operation Report on Saitama City Minuma Environmental Center



松 廣 和 樹 * 川 人 英二郎 *

Kazuki MATSUHIRO Eiji KAWAHITO

上 野 紘 噴 *

Hiroki UENO

【要 旨】 2025年3月に竣工した見沼環境センターは、最新の高性能ストーカ炉や先行型燃焼制御により安定稼働を実現するとともに、高効率ごみ発電システムにより高水準の発電をおこなう高効率ごみ発電施設と資源循環に資するマテリアルリサイクル推進施設の運営事業を継続している。本稿では、本施設の概要、特徴および運転結果について報告する。

キーワード：ごみ処理、高効率ごみ発電、先行型燃焼制御、マテリアルリサイクル

Abstract

Minuma Environmental Center, which was completed in March 2025, has achieved stable operation with the latest high-performance stoker-type incinerator and advanced ACC. It continues business operations as a high-efficiency waste power generation facility that generates high levels of electricity through a highly efficient waste-to-energy system, and as a material recycling promotion facility that contributes to resource recycling. This article gives an overview of this facility, and its characteristics and operation results.

Keywords: waste treatment, high-efficiency waste power generation, advanced ACC, material recycling

* 環境技術 3 部
Environmental Design Dept. 3

1. はじめに

見沼環境センター（以下、本施設と記す）は、さいたま市の既存施設である東部環境センターを部分的に解体し、同一敷地内に新たに建設されたごみ処理施設である（残された東部環境センターは2027年3月にかけて解体造成工事中）。本施設は、さいたま市が掲げる「最終処分量の低減」、「高効率発電」、「施設の強靭化」、「安全性に留意した施設運営」を具現化することを目的に計画された。本事業はDBO（Design：設計、Build：施工、Operate：運営）方式にて実施され、設計施工は「タクマ・西松特定建設工事共同企業体」、運営は「さいたまハイトラスト株式会社」が請け負っている。建設工事は2020年3月に契約・工事に着手し、2025年4月より本事業の運営を開始した。運営期間は2040年3月31日までの15年間である。

本施設（図1）は、もえるごみを焼却処理し蒸気タービン発電をおこなう高効率ごみ発電施設と、もえないごみや粗大ごみを破碎・選別する破碎設備、およびびん・かんを選別する選別設備から構成されるマテリアルリサイクル推進施設で構成される。高効率ごみ発電施設で作られた蒸気はタービン発電に使われるほか、本施設と同時期に整備された健康福祉センター東楽園への温水供給熱源として利用されている。

本稿では、高効率ごみ発電施設の特徴および運転状況を中心に報告する。



図1 見沼環境センターの施設全景

2. 施設概要

2.1 施設規模

- 1) 高効率ごみ発電施設：420 t/日 (140 t/日 × 3炉)
- 2) マテリアルリサイクル推進施設：49 t/5時間
- ・内訳 破碎設備：28 t/5時間
選別設備（びん）：14 t/5時間
選別設備（かん）：7 t/5時間

2.2 設備構成

1) 高効率ごみ発電施設

- (1) 受入供給設備 ピット & クレーン方式
- (2) 燃焼設備 ストーカ方式
(焼却灰は資源化)
- (3) 燃焼ガス冷却設備 廃熱ボイラ方式
- (4) 排ガス処理設備 ロ過式集じん器、有害ガス除去装置（乾式除去方式）、無触媒脱硝方式、ダイオキシン類除去装置、水銀用活性炭投入装置
- (5) 余熱利用設備 発電、場外余熱供給
- (6) 通風設備 平衡通風方式
- (7) 灰出し設備 ピット & クレーン方式
- ・主灰 半湿式搬出
- ・飛灰 乾灰直接搬出、薬剤処理方式の両方
- (8) 排水処理設備 合併処理浄化槽
- ・生活排水 MF膜ろ過方式
- ・プラント排水 特別高圧受電
- (9) 電気設備 分散型自動制御システム方式（DCS）
- (10) 計装設備

2) マテリアルリサイクル推進施設

破碎設備：

- (1) 受入供給設備
 - ・粗大ごみ 粗大ごみ受入貯留ヤード →供給設備
 - ・もえないごみ もえないごみ受入貯留ピット →破袋→異物除去
 - ・有害危険ごみ 有害危険ごみ等受入ヤード

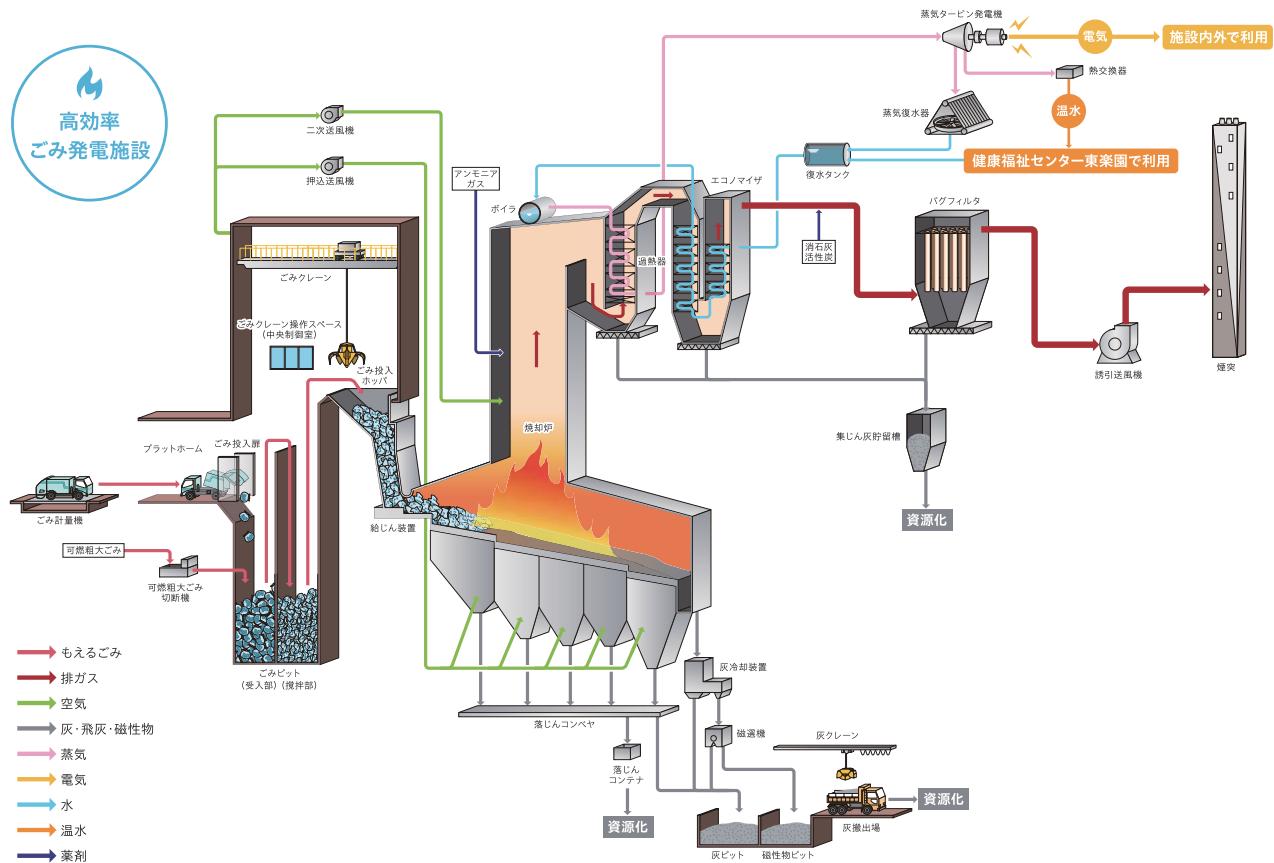


図2 高効率ごみ発電施設 ごみ処理フロー

(2) 破碎設備

- 粗大ごみ（可燃粗大） 切断機
- もえないごみ、粗大ごみ（不燃粗大） 粗破碎機、高速回転破碎機
- 有害危険ごみ 蛍光管破碎機、ライター処理機

(3) 搬送・選別設備

搬送コンベヤ、磁選機、アルミ選別機、
破碎物選別機

(4) 貯留・搬出設備

- 破碎鉄 ヤード方式
- 破碎アルミ バンカ方式
- 破碎可燃残渣 搬送コンベヤ→高効率ごみ発電施設ごみピットへ
- 破碎不燃残渣 搬送コンベヤ→高効率ごみ発電施設ごみピットへ

(5) 電気計装設備

分散型自動制御システム
方式 (DCS)

選別設備：

- (1) 受入供給設備
 - びん 受入貯留ヤード→供給コンベヤ+破除袋機
 - かん 受入貯留ピット→供給コンベヤ+破除袋機
- (2) 搬送・選別設備 手選別コンベヤ、磁選機、アルミ選別機
- (3) 貯留・搬出設備 金属プレス機、各品目のストックヤード、各搬送コンベヤ

保管設備：

- (1) 貯留・選別設備 手解体物ストックヤード、手解体ヤード、手解体残渣ストックヤード、適正処置困難物ストックヤード、特定適正処理困難物ストックヤード

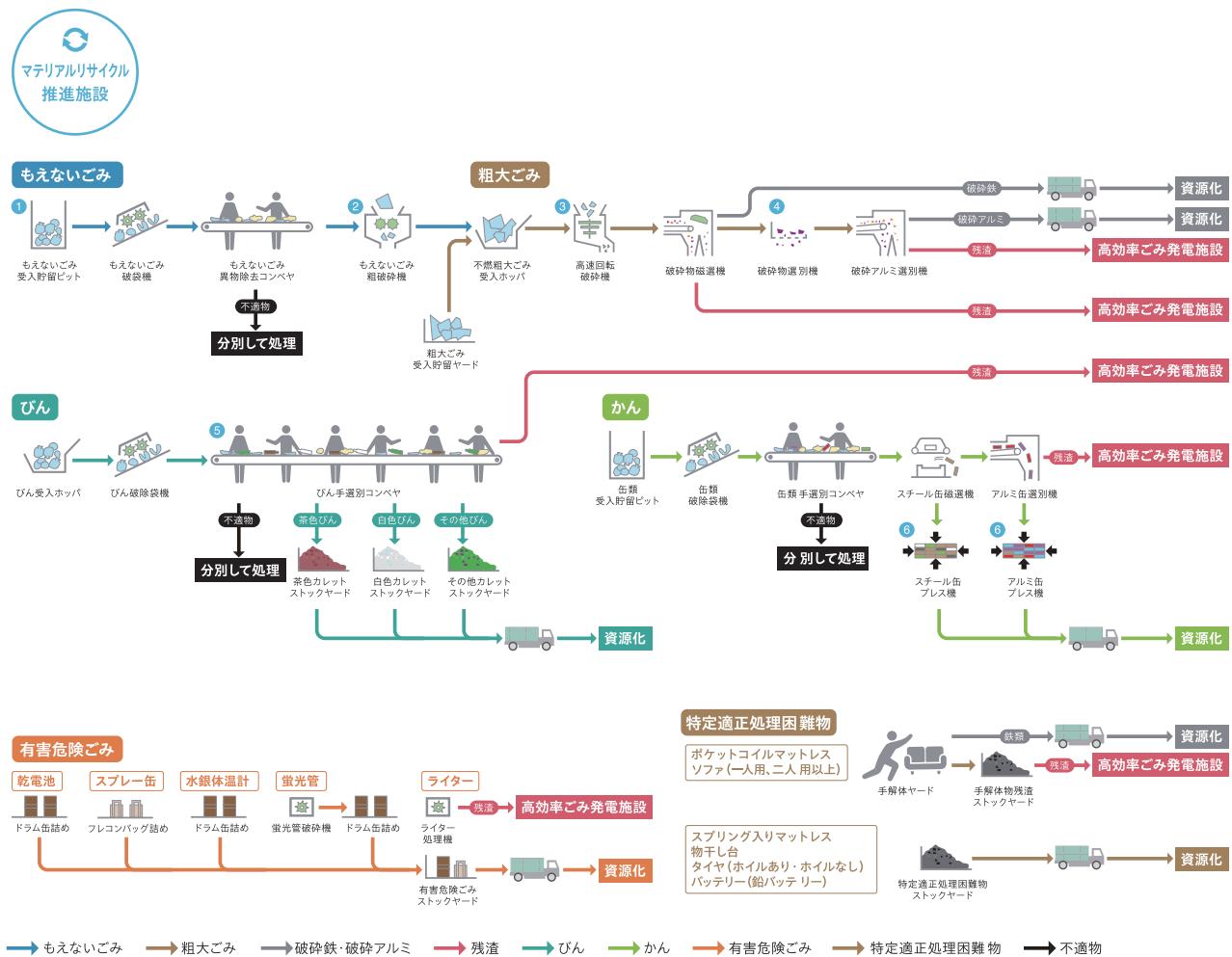


図3 マテリアルリサイクル推進施設 ゴミ処理フロー

2.3 計画ごみ質

表1 計画ごみ質

項目	ごみ質			
	低質ごみ	基準ごみ	高質ごみ	
低位発熱量 (kJ/kg)	6,400	9,600	12,800	
三成 分	可燃分 (%)	35.5	44.5	53.4
水 分	(%)	56.5	45.8	35.2
灰 分	(%)	8.0	9.7	11.4

2.4 排ガス基準 (乾きガス O₂=12% 換算値)

- ① ばいじん 0.01 g/m³以下
- ② 塩化水素 30 ppm 以下
- ③ 硫黄酸化物 20 ppm 以下
- ④ 硝素酸化物 50 ppm 以下
- ⑤ ダイオキシン類 0.01 ng-TEQ/m³以下
- ⑥ 一酸化炭素 30 ppm (4時間平均値)
100 ppm (1時間平均値)
- ⑦ 水銀 30 µg/m³以下

3. 本施設の特徴

3.1 最終処分量の低減

本施設から発生する焼却灰・飛灰は全量、灰資源化事業者にてセメント等に資源化されており、年間最大 22,719 t までごみ量が増加しても最終処分量をゼロにできる。また、飛灰はキレート薬剤処理せず乾灰で搬出するため、飛灰搬出量が低減され、資源化コストおよび搬送コストの削減に貢献できる。さらに、即応型水銀除去システムや飛灰循環システムにより排ガス処理の効率化を図るとともに、排ガス再循環システムを備えた高性能ストーカ炉による低空気比完全燃焼 ($\lambda=1.25$) を実現し、高温燃焼によって未燃灰やダイオキシン類の発生を抑えることで、消石灰・活性炭使用量や灰発生量の低減を図っている。

3.2 高効率発電

エコノマイザ出口ガスを従来よりも低温化することで排ガスからの熱回収量を増加させるとともに、前述の低空気比燃焼により排ガス量を削減し、ボイラの熱回収量を向上させている。また、主蒸気条件を過熱器出口にて 5 MPa, 430°C とすることで、蒸気タービンで従来より高効率な発電を実現している。

3.3 施設の強靭化

日常点検・定期検査のデータや運転データを ICT 運営支援システム（以下、POCSYS と記す）で一元管理している。POCSYS は統計解析・傾向分析に基づく余寿命診断機能を備えており、高精度な機器の余寿命予測に基づき維持管理計画の PCDA サイクルを継続することで、機器の状態に即した適切な維持管理を実現できる。また、現在解体整備中の東部環境センター跡地は災害廃棄物の仮置き場としての機能も有する計画であり、見沼環境センター側においても災害時の早期再稼働・処理継続の備えとして必要なユーティリティの確保、各種マニュアルの作成および訓練を実施している。

4. 運転結果

4.1 本施設の電力

3日間の引渡性能試験（3炉運転）における電力の推移を図4に示す。蒸気タービン発電電力は約 10,580 kW（定格 10,640 kW）であり、発電効率は約 18.8%（試験と同条件ごみ質における計画発電効率は約 17.1%）となった（タービン設計点ごみ質 8,500 kJ/kg、引渡性能試験時ごみ質約 11,400 kJ/kg）。なお、消費電力は 2,000 kW 前後で推移しており、送電電力は約 8,500 kW であった。

4.2 高効率ごみ発電施設の運転評価

最新の高性能ストーカ炉による先行型燃焼制御および安定稼働の実現評価として、引渡性能試験時の運転評価を図5に示す。

前章「3. 本施設の特徴」で述べた高性能ストーカ炉により、炉出口 O₂ 濃度を従来の 5.1 %-wet ($\lambda=1.45$) から平均 3.3 %-wet ($\lambda=1.25$) への削減を達成し、低空気比かつ炉内温度 850°C 以上による完全燃焼を安定して実現したことがわかる。また、エコノマイザ出口ガス温度も従来の 200°C に比べ低温化を実現した。



図4 引渡性能試験時の蒸気タービン発電電力と消費電力、送電電力

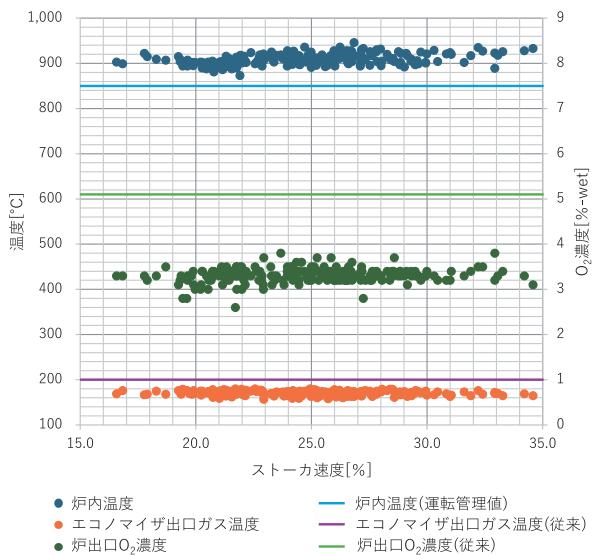


図 5 引渡性能試験時の運転評価

4.3 高効率ごみ発電施設の排ガス性状

高効率ごみ発電施設の引渡性能試験時の排ガス測定結果を表 2 に示す。いずれも基準値を満足する結果が得られた。

表 2 引渡性能試験時の測定結果（乾きガス O₂=12% 換算値）

項目	単位	1号炉	2号炉	3号炉	基準値
ばいじん	g/m ³ _N	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.01 以下
硫酸化物	ppm	12	11	8.2	20 以下
塩化水素	ppm	21	18	26	30 以下
窒素酸化物	ppm	38	33	37	50 以下
ダイオキシン類	ng-TEQ/m ³ _N	0.000011	0.0000064	0.0000087	0.01 以下
一酸化炭素 (4時間平均)	ppm	8	6	13	30 以下
水銀	μg/m ³ _N	0.09	0.07	0.07	30 以下

表 3 引渡性能試験時の破碎鉄、破碎アルミ、びん、缶の純度・回収率測定結果

項目	単位	測定結果	保証値	目標値
破碎鉄純度	%	95.69	95 以上	—
破碎鉄回収率	%	99.30	—	90 以上
破碎アルミ純度	%	97.67	95 以上	—
破碎アルミ回収率	%	80.48	—	70 以上
びん(白)回収率	%	96.49	—	60 以上
びん(茶)回収率	%	99.31	—	60 以上
びん(その他)回収率	%	94.17	—	60 以上
スチール缶純度	%	99.59	98 以上	—
スチール缶回収率	%	100.00	—	98 以上
アルミ缶純度	%	100.00	97 以上	—
アルミ缶回収率	%	99.90	—	97 以上

4.4 破碎鉄、破碎アルミ、びん、缶の純度・回収率
マテリアルリサイクル推進施設の引渡性能試験時の破碎鉄、破碎アルミ、びん、缶の純度・回収率測定結果を表 3 に示す。いずれも保証値、目標値を満足する結果が得られた。

5. おわりに

本施設は 2025 年 4 月の運営開始以降、安定的なごみ処理をおこなっている。なお、本事業では東部環境センターの解体および造成工事を引き続き実施しており、2027 年 3 月に完了予定である。

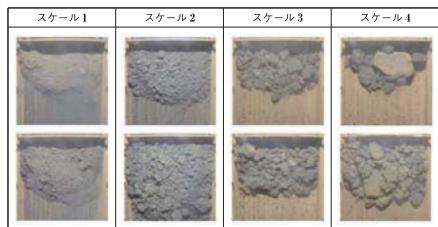
今後も当グループは、本施設の運営を通じて、さいたま市が掲げる「最終処分量の低減」、「高効率発電」、「施設の強靭化」、「安全性に留意した施設運営」の具現化に向けて尽力していく所存である。

最後に、さいたま市様をはじめ関係者の方々には本施設の建設工事にあたり、多大なるご尽力を賜りましたこと御礼申し上げます。

報 告

画像解析を活用した汚泥乾燥機の制御

Control of a Sewage Sludge Dryer Using Image Analysis



杉井 祥吾 * 河野 孝志 *

Syogo SUGII Takashi KAWANO

坂口 孝瑛 ** 水野 孝昭 **

Takaaki SAKAGUCHI Takaaki MIZUNO

【要旨】 2023年3月に竣工した河北郡クリーンセンターでは、ごみの焼却と下水汚泥の集約処理による合理化がおこなわれており、ごみ焼却時に発生する蒸気の一部を利用し、4か所の下水処理場から発生する下水汚泥を蒸気間接加熱型の下水汚泥乾燥機で乾燥させている。乾燥した汚泥はごみとともに混焼して、汚泥乾燥や発電の熱源に利用している。この乾燥機において、固定された運転条件下では汚泥性状や処理量の変動により、乾燥した汚泥の含水率が変動するが、乾燥機の各種パラメータ設定の変更により含水率を調整できることを確認した。本稿では、このパラメータ変更におけるさらなる省力化を目指して画像解析による自動制御手法を導入し、安定運転ができるることを確認したので、その報告をおこなう。

キーワード：汚泥乾燥機、乾燥汚泥含水率、画像解析、機械学習

Abstract

At Kahoku County City Clean Center, which was completed in March 2023, they carry out rationalization (streamline processes) through waste incineration and consolidated sludge treatment. Specifically, they dry the sewage sludge generated from four different sewage treatment plants in a steam indirect-heating-type sewage sludge dryer by utilizing part of the steam generated in waste incineration. They put the dried sludge in mixed combustion with waste for utilization as a heat source for drying sludge and generating power. While the moisture content of the dried sludge fluctuates due to differences in the sludge properties and treatment volume in this dryer when the operating conditions are fixed, we have confirmed that the moisture content can be adjusted by changing various parameter settings of the dryer. This article reports on our confirmation that stable operation of the dryer is possible by introducing an automatic control method using image analysis to further save labor in adjusting these parameters.

Keywords: sewage sludge dryer, dry sludge moisture content, image analysis, machine learning

* デジタル技術推進部

Digital Technology Advancement Dept.

** 水処理技術部

Sewerage Engineering Dept.

1. はじめに

河北郡市クリーンセンター（以下、本施設と記す）は、これまでかほく市、津幡町、内灘町のごみを処理していた RDF 製造施設の老朽化、ならびに石川北部 RDF センター（RDF 専焼炉）が 2022 年度（令和 4 年度）末をもって稼働停止することにともない、河北郡市広域事務組合殿が「エネルギー回収型廃棄物処理施設建設工事」において建設した一般廃棄物処理施設（図 1 参照）である¹⁾。本施設の概要を以下に示す。

- ・発注者名：河北郡市広域事務組合
(石川県かほく市、津幡町、内灘町)
- ・事業名称：エネルギー回収型廃棄物処理施設建設工事
- ・建設場所：石川県河北郡津幡町字能瀬地内
- ・受入規模：118 t/24 h (88 t/24 h (ごみ) + 30 t/24 h (下水汚泥))
- ・焼却規模：98 t/24 h (49 t/24 h × 2 炉)
- ・竣工日：2023 年 3 月 10 日

本施設では、「エネルギー回収の促進」、「下水汚泥の集約処理（混焼）による合理化」を目的として、下水汚泥とごみを混焼して処理しているが、ごみ量に対する下水汚泥量の割合が 30% 以上（重量ベース）と高く、下水汚泥をそのまま直接焼却炉に投入する方法では安定燃焼させることが困難である。そこで、当社製の蒸気間接加熱型汚泥乾燥機（図 2 参照）にて下水汚泥を乾燥させたのち、ごみとの混焼をおこなっている。乾燥機の熱源は、ごみ焼却設備の廃熱を利用して発生させた蒸気であり、乾燥用の燃料は使用していない²⁾。

既報告³⁾では汚泥性状や処理量の変動により、乾



図 1 河北郡市クリーンセンター全景¹⁾



図 2 下水汚泥乾燥機外観³⁾

燥機にて乾燥された汚泥（以下、乾燥汚泥と記す）の含水率が変動することに対し、乾燥機の各種パラメータ設定の変更により含水率を調整できることを報告したが、本稿では含水率の調整に対しさらなる省力化を目指して、画像解析による自動制御手法を導入した経緯と、導入後の運転結果について報告する。

2. 下水汚泥乾燥機の概要

2.1 下水汚泥乾燥機の構造

下水汚泥乾燥機の概略図を図 3 に示す。ケーシングの接泥部はジャケット構造、本体部のシャフトとパドル羽根を中空構造とし、その中に蒸気を供給して、間接的に下水汚泥に熱を与える構造となっている。機内に投入された下水汚泥は、パドル羽根によって攪拌混合作用を受けながら加熱乾燥され、乾燥された汚泥は、徐々に入口から出口側へ移動し、順次排出される仕組みとなっている。

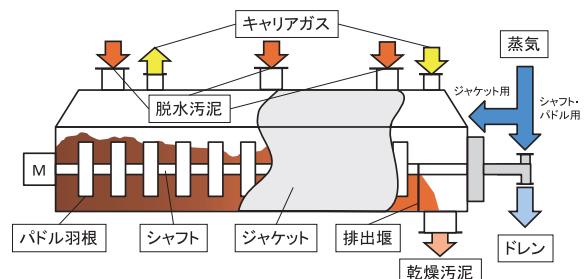


図 3 下水汚泥乾燥機概略図

下水汚泥乾燥機の運転に影響を与える因子を表 1 に示す。本乾燥機は、下水汚泥の供給量や性状が変動しても、乾燥汚泥の性状が安定するよう、パドル

表1 汚泥乾燥機の運転に影響を与える因子

項目	運転への影響
下水汚泥供給量	汚泥供給量が少ないほど乾燥しやすい
パドル羽根の回転数	パドル羽根の回転数が高いほどパドル羽根と汚泥の接触頻度が上がるため、乾燥しやすくなる
排出堰の高さ	排出堰は上下に可動する構造になっており、堰が高いほど乾燥機内の汚泥滞留時間が長くなるため、乾燥しやすくなる
汚泥分散投入割合	投入弁の開タイマー時間の設定に応じて各投入口からの下水汚泥投入割合が決定され、排出堰付近での汚泥含水率を調整することができる

羽根の回転数および排出堰の高さを調整する機能を有している。また、複数箇所の汚泥投入口から下水汚泥を分散投入することで、投入された下水汚泥が効率よく混合・分散・乾燥される仕組みであり、排出堰付近での調湿も可能となっている。

2.2 処理フロー

下水汚泥乾燥設備の処理フローを図4に示す。下水汚泥は、下水汚泥供給ポンプにて所定量が下水汚泥乾燥機に供給される。下水汚泥乾燥機にて蒸発した水分を含むキャリアガスは、焼却炉内に吹き込んで燃焼脱臭をおこなっている。乾燥された汚泥は乾燥汚泥貯留槽に一時貯留された後、ごみホッパに供給され、ごみと混焼処理される。

3. 画像解析の導入検討

3.1 導入の背景

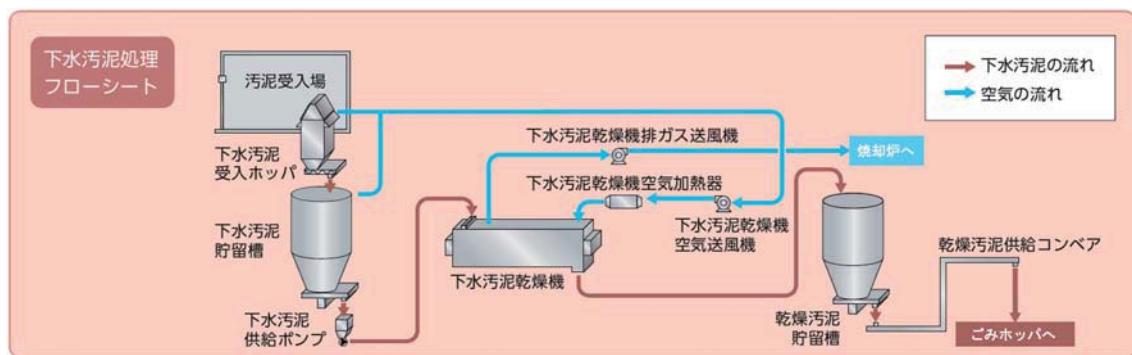
乾燥機の各種パラメータを調整した後に、蒸発水分量[†]の調整範囲を実運転で確認した結果を表2に示す。

表2 蒸発水分量データ

項目	単位	設計値	最大値	最小値
下水汚泥供給量	kg/h	1,250	1,250	570
下水汚泥含水率	%	82.4	83.5	83.4
乾燥汚泥含水率	%	20.0	12.7	37.0
排出堰の開度	%	0	0	100
パドル羽根の回転数増減率	%	100	138.9	37.5
蒸発水分量	kg/h	975	1,014	420

乾燥機の各種パラメータの変更により乾燥汚泥含水率を調整できることを確認したが、投入される汚泥性状や処理量が変化した場合には、排出される乾燥汚泥含水率も変動することから、運転員の判断によって各種パラメータを変更する必要があった。そこでさらなる省力化・自動化を目指して排出乾燥汚泥の画像解析による自動制御の導入を検討した。

乾燥機出口に設置したNo.1乾燥汚泥搬送コンベア内の含水率が異なる乾燥汚泥の映像を図5に示す。これまでの運転から、乾燥汚泥は含水率の上昇にともない、粒径が大きくなることが明らかになっており³⁾、画像から乾燥汚泥の粒径を数値データとして取り出すことができれば、乾燥機内の運転状況や含水率の判定がおこなえるのではないかと想定した。

図4 下水汚泥乾燥設備フローシート³⁾

[†] 蒸発水分量：間接加熱乾燥方式における、単位時間あたりに蒸発させられる水分量のこと。下水汚泥供給量、下水汚泥含水率および乾燥汚泥含水率の分析値を用いて算出。



図5 No.1 乾燥汚泥搬送コンベア内乾燥汚泥映像（左：含水率 20%，右：含水率 35%）

3.2 仮設カメラによるコンベア画像の数値化

3.2.1 仮設カメラの画像取得方法

No.1 乾燥汚泥搬送コンベアに流れる乾燥汚泥の画像を取得するため、当該コンベアに設置されているITVカメラと同じ位置に仮設カメラを設置した（図6）。そしてカメラで撮影した画像をレコーダで記録し、その画像を用いて画像解析をおこなった。



図6 仮設カメラ設置状況

3.2.2 画像の前処理、機械学習によるスケール設定

No.1 乾燥汚泥搬送コンベアはライトコンベアである。乾燥汚泥の画像解析にあたり、仮設カメラで撮影したコンベア動画からライト搬送部のみを抽出対象とした。ライトコンベアは一定周期で乾燥汚泥を搬送しており、搬送される乾燥汚泥の画像解析に必要なエリアが適切に抽出できるように工夫を施している（図7）。

画像解析で乾燥汚泥を粒径ごとに分類する手法として、ラベル付け不要な教師なし学習を採用した。教師なし学習は、画像から特徴量を抽出し、類似した特徴を持つ画像同士を自動的に粒径毎のクラスに分類（クラスタリング）する。この教師なし学習の手法で30クラスにクラスタリングした結果の一部

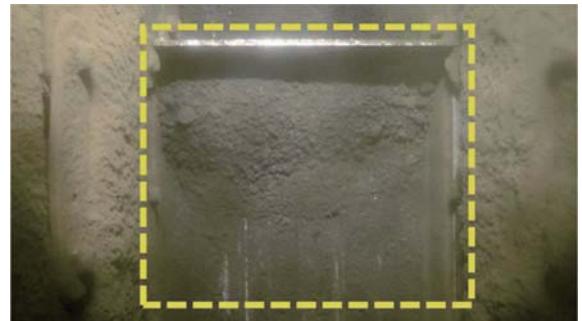


図7 仮設カメラのコンベア画像（画像の切り取り範囲）

を表3に示す。その結果、クラス2, 6, 11やクラス9, 12では粒径が近いにもかかわらず別のクラスに分類されている。

そこで、教師なし学習を用いて出力された30クラスの画像を、人が判断し、乾燥汚泥の粒径の小さい方から順に5段階に分類（これを0~4のスケールと呼ぶ）した（表4）。なお、ライト部に乾燥汚泥が存在しない場合をスケール0としている。

教師なし学習で分類したクラスにスケールを紐づけることにより、画像から乾燥汚泥の粒径を数値として出力することを可能とした。

3.2.3 画像のスケール出力のトレンドグラフ

一定周期で取得したライト上の乾燥汚泥画像に対してスケール分類処理をおこない、1分平均したスケール出力のトレンドグラフを図8に示す。なお、スケール0（汚泥が存在しない状態）は平均処理から除外している。

0~9時間はスケール2.5~3.5であり、比較的大きな粒径の汚泥が搬送されていたことが確認される。これに対して、19~24時間ではスケール2.0程度の低スケール値であり、汚泥の粒径が小さい傾向にある。特に12~16時間ではスケール1程度の出現頻度が高く、細かな汚泥の状態であることが示唆され

表3 教師なし学習によるクラス分け結果

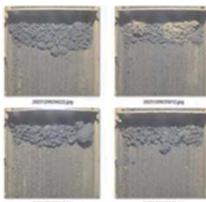
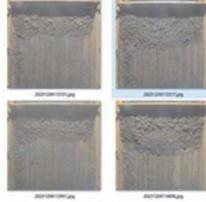
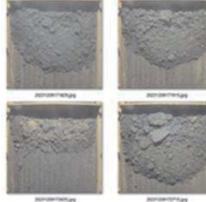
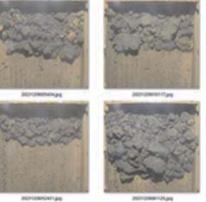
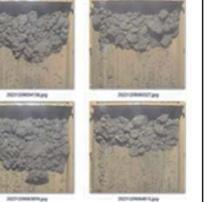
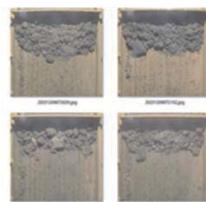
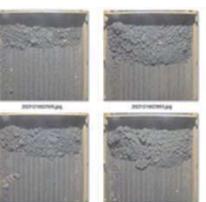
クラス1	クラス2	クラス3	クラス4
			
クラス5	クラス6	クラス7	クラス8
			
クラス9	クラス10	クラス11	クラス12
			

表4 各スケールにおける乾燥汚泥の状況

スケール1	スケール2	スケール3	スケール4
			
			

る。

このように、スケール（粒形）は時間帯によって明確な変動傾向を示しており、設備の運転状態や処理条件、入口汚泥条件の変化が乾燥汚泥の状態に反映されている可能性が高い。

3.3 画像解析データと乾燥汚泥含水率の相関

数値化された乾燥汚泥の大きさと、その時の乾燥汚泥含水率との相関を図9に示す。当初想定した相関が概ね得られていることを確認できた。

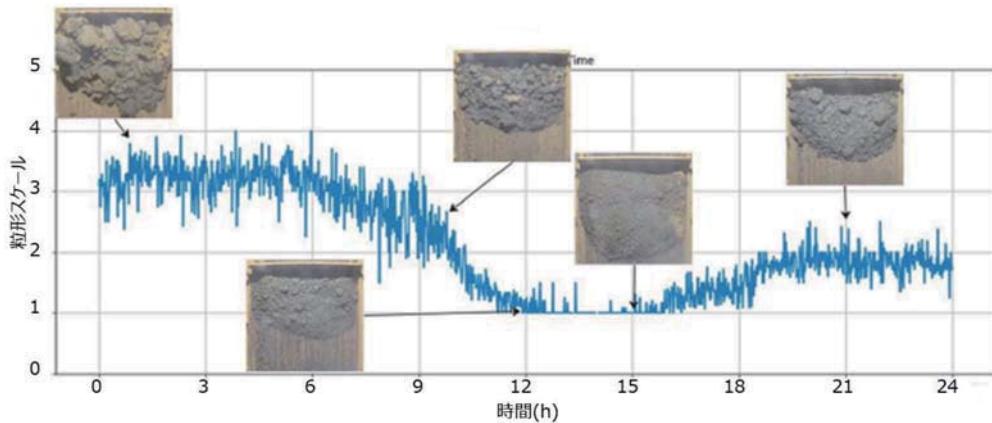


図 8 乾燥汚泥画像解析による乾燥汚泥数値化の1分平均のトレンドグラフ

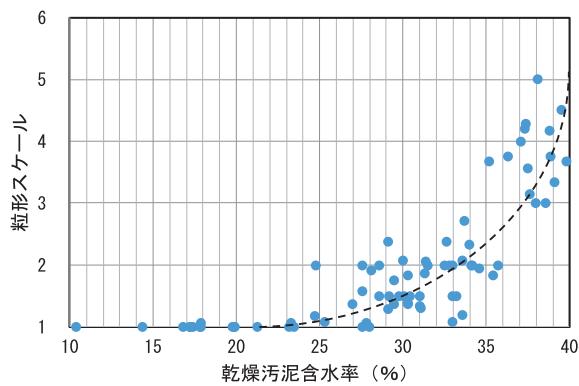


図 9 乾燥汚泥含水率と粒形スケールの相関

4. 画像解析データを用いた乾燥機の制御

ITV 画像をスケール分類処理で数値化することで、乾燥汚泥の状態の傾向をリアルタイムで捉えられることが確認できたため、次のステップとして、PC に乾燥汚泥の粒形スケールに上限・下限の閾値を設定し、閾値を超えた場合にアラームを出すシステムを導入した。

さらに、数値化した粒形スケールに対応した乾燥汚泥の調湿制御を導入した。その制御内容は、粒形スケールの移動平均値が「粒形下限設定値」以下の場合を過乾燥状態とし、乾燥性能を低下させる目的で乾燥機の回転数を下げ、「粒形上限設定値」以上の場合は乾燥不足として乾燥機の回転数を上げるものとしている。なお、排出堰の高さや汚泥分散投入割合も乾燥機の運転に影響を与えるが、制御を単純化させる点から今回の運転では回転数のみを使用した。

4.1 実機導入後の運転結果

本制御導入後の運転結果の一例を図 10 に示す。

この日は午前 7 時 20 分に乾燥機へ投入する汚泥の系列を変更し、さらに汚泥貯留量との兼ね合いから午前 9 時に乾燥機の運転負荷を 60% から 50% へと低下させた。運転負荷の変更にともない粒形スケール（移動平均）は減少、それに応じて乾燥機の回転数が自動的に低下した。午前 5 時、午後 5 時（17 時）には粒形スケール（生値）がそれぞれ 3.5, 4.0 を記録したことで乾燥機の回転数が自動的に上昇した。これにより粒形スケールの上昇が抑えられ安定した運転が維持された。

一日を通して乾燥機の電流値は 50~60 A 程度で安定して推移しており、本制御の導入によって安定した運転が実現されていることが確認された。

4.2 制御上の課題

本制御を導入後、2か月間の検証の結果、下記の課題が確認された。

- ・ITV 用の観窓が運転継続にともなって汚れ、画像認識不良が発生する
- ・下水汚泥の供給量等、入口条件の急激な変動に対しては自動制御が間に合わず含水率が上昇し、乾燥汚泥の粒径が増加する

今後、さらなる運転検証とその他の調整機構を組み入れた適正な制御方法によりこれらの課題を解決していく予定である。

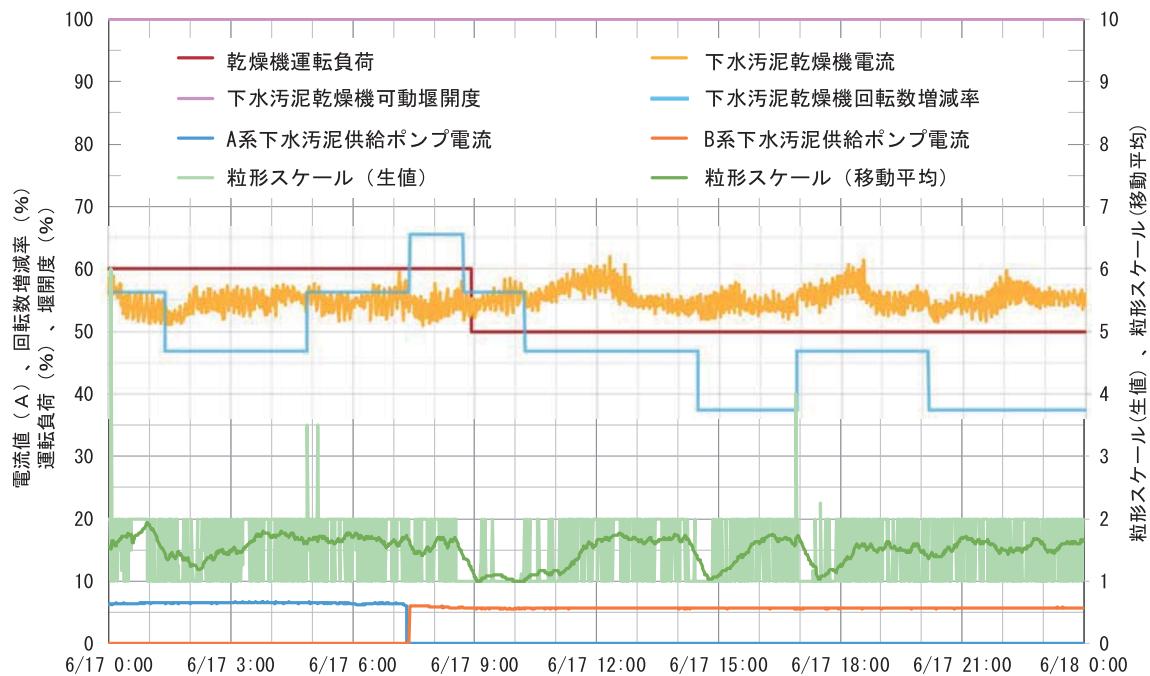


図 10 実機導入後の運転結果の例

5. おわりに

本稿では、河北郡市クリーンセンターに納入した下水汚泥乾燥機の含水率を安定させるための画像解析を活用した制御の紹介と、運転状況について報告した。本制御の導入により、下水汚泥の燃焼性を安定させ、一般廃棄物との集約処理を実現するとともに、乾燥機の運転における省力化を図ることができた。当社は今後もデジタル技術の活用により、各種プラントの省力化を実現していく所存である。

最後に、本制御の導入および検証に、多大なるご助力を賜りました河北郡市広域事務組合殿、株式会

社中央設計技術研究所殿をはじめ、関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安藤周平：河北郡市クリーンセンター 運転報告、タクマ技報、Vol. 31, No. 2, pp. 75-80 (2023)
- 2) 堀井靖生、水野孝昭、株丹直樹、宍田健一：蒸気間接加熱型汚泥乾燥機の開発、タクマ技報、Vol. 27, No. 1, pp. 52-57 (2019)
- 3) 坂口孝瑛：河北郡市クリーンセンターにおける下水汚泥乾燥機の運転報告、タクマ技報、Vol. 32, No. 1, pp. 65-70 (2024)

海外視察

ノルウェーにおける世界最大規模 CCS の視察報告

松本和正*

Kazumasa MATSUMOTO

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラル実現に向けて、世界各国で CO₂ の回収・貯留・有効利用 (CCUS) 技術の開発・実証が加速している。特にノルウェーは、25 年以上も前から CO₂ の海底貯留（以下、CCS と記す）に取り組んできた先進国であり、2025 年 8 月に本格稼働を予定する世界最大規模の CCS プロジェクト「Longship」は、国際的に注目を集めている。このような背景のもと、日本環境衛生施設工業会は海外環境事情調査の一環としてノルウェーを訪問し、Longship プロジェクトに参画する 4 社と意見交換をおこなうことができた¹⁾。その中で、日本の CCS 推進に有益な知見が得られたため、その調査内容を以下に報告する。

2. Longship プロジェクトの概要

2.1 ノルウェーの CCS 戦略

ノルウェーが CCS に積極的に取り組む背景として、石油産業で培われた高い技術力と資金力、さらにヴァイキング時代から続く海洋貿易で形成された輸送インフラを持つ点があげられる。北海油田の発見により石油産業は急成長したが、その一方で化石燃料による温室効果ガス排出増加という課題に直面している。これを受け、ノルウェー政府は CCS 技術の研究・開発・実証を目的とした国家プログラム CLIMIT を設立し、2012 年には世界最大

規模の公開型テストセンター TCM (Technology Centre Mongstad) を稼働させた。同センターはアミン系プラント（年間 75,000 トン）と未完成技術用プラント（年間 18,000 トン）を備え、商業化直前の実証の場を国内外の企業・研究機関に提供している。なお、CCS プロジェクトでは 1996 年の Sleipner で年間 100 万トン、2008 年の Snøhvit では年間 70 万トンの海底貯留を達成し、現在は年間 500 万トンの Longship 稼働を目前に控えている（図 1）。

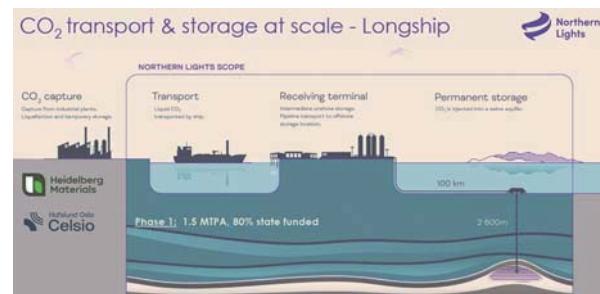


図 1 Longship プロジェクトの全体フロー

2.2 Longship プロジェクトの特徴

Longship は、セメント製造施設や廃棄物発電施設の排ガスから CO₂ を回収し、北海海底に貯留するプロジェクトである。特徴的なのは、回収した CO₂ の輸送に船舶を活用する点で、7,500m³ の CO₂ 輸送能力をもつ船舶 4 隻を運行する。海洋国家としての強みを活かした輸送方法により、EU 全域からの CO₂ 輸送が計画されている（図 2）。

当初 2024 年末の稼働を予定していたが、予算超過や新型コロナウイルス流行、ウクライナ情勢の影響により遅延し、2025 年 8 月の開始予定に変更さ

* 技術企画推進部

Technology Research & Planning Enhancement Dept.



図2 船舶を活用したCO₂輸送計画

れた。初期段階は年間150万トン規模で稼働し、将来的には年間500万～700万トン規模への拡張が見込まれている。

2.3 プロジェクトの実施体制と役割分担

ノルウェーのCCSプロジェクトは、日本のように商社が全体管理を担う方式ではなく、国営企業のGassnovaがエネルギー省の管轄下で各社と直接契約を締結して統括するとともに、運搬・貯留の支援もおこなう。プロジェクトに参加する企業のうち、Heidelberg Materials（セメント工場）とHafslund Celsio（廃棄物発電所）はCO₂の分離・回収を担い、Northern Lightsは回収されたCO₂の海上輸送とパイプラインによる海底貯留を担う。EU諸国からは、Yara（オランダ、アンモニア・肥料製造）とØrsted（デンマーク、電力）が顧客として参加予定で、国内2社と合わせて年間150万トン超のCO₂貯留が見込まれる。

2.4 事業費と資金補助の仕組み

Longshipプロジェクトの総事業費と政府補助の概要を表1に示す。運営費(OPEX)への補助期間は10年間とされ、初年度に最も高い補助率を設定し、段階的に縮小する仕組みとなっている。この制

表1 政府からの資金補助(2025年度予算)

項目	企 業	総費用	資金補助
		億円*	億円*
CAPEX (設備投資)	Northern Lights	2,390	1,802
	Heidelberg Materials		
	Hafslund Celsio		
OPEX (運営費)	Northern Lights	1,001	814
	Heidelberg Materials		
	Hafslund Celsio		

* 1 NOK=13.35 円 (2025年3月1日のレート)

度は、将来的にCO₂市場が拡大し、補助なしで事業継続が可能になることを見据えたものである。

3. 調査訪問先の紹介

3.1 Heidelberg Materials

(セメント工場からのCO₂回収)

3.1.1 会社概要

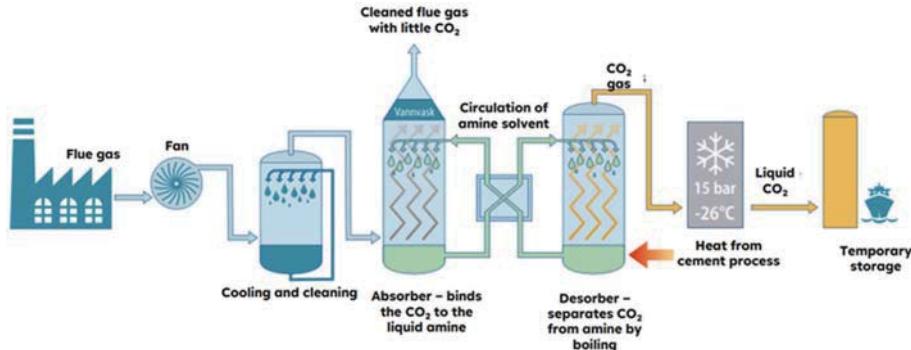
Heidelberg Materialsは、ドイツに本社を置く世界第4位のセメントメーカーである。世界のCO₂排出量の5～7%がコンクリート製造に起因しており、「燃料の代替、原材料の転換、CCUSの導入」を柱として排出削減を進め、2030年までに石炭使用ゼロを目指している。また、同社が運営するBrevikセメント工場では、2025年より世界初のCO₂排出ネットゼロのCCSセメント「evoZero」を生産する(図3)。



図3 Brevikセメント工場の外観

3.1.2 CO₂回収設備の仕様

本設備はアミン吸収方式を採用し、全排出量の約半分に相当する年間40万トンのCO₂を回収する計画である。排ガス中のCO₂濃度は20～22%と比較的高く、効率的に回収できる。さらに、セメントケルン炉およびCO₂圧縮機から計46MWの廃熱を取り、廃熱ボイラ9基を稼働させる。これにより、CO₂分離に必要な蒸気を供給し、外部エネルギーの購入を抑えている。回収後のCO₂は16barに圧縮し、-26℃に冷却して液化された後、貯蔵タンクに一時貯留される。タンクは5,000m³×6基で構成され、輸送船の運行間隔に合わせて最大4日分を貯蔵

図4 CO₂回収および貯留フロー

できる（図4）。

3.2 Hafslund Celsio

（廃棄物発電所からのCO₂回収）

3.2.1 会社概要

Hafslund Celsioは、オスロ市内にある15か所のプラントから、年間約2TWhの熱を市内へ供給する地域暖房システムを運営している。その中核施設が、今回視察したKlemetsrud廃棄物発電所（最大熱供給55MW）である。

3.2.2 発電所の仕様

同発電所にはストーカ式焼却炉が3炉あり、1985年に2炉、2011年に1炉が稼働を開始した（図5）。廃棄物の年間処理量は35万トンで、内訳は家庭系49%、事業系49%、有害廃棄物2%で、バイオ・化石由来の比率はほぼ1:1である。



図5 Klemetsrud 廃棄物発電所の外観

2011年に稼働した炉の仕様は以下のとおり。

- ・処理能力：480トン/日（年間15万トン）
- ・焼却炉形式：ストーカ炉
- ・蒸気条件：41.5 bar/402°C

- ・発電出力：最大13MW

- ・地域熱供給：最大55MW

施設の職員は約100名で、3交代制を採用している。メンテナンスは1系統につき約1か月実施し、地域暖房の需要が低下する夏季は3系統のうち2系統を停止させ、常時いずれかを運転する体制をとっている。さらに、夏季には発電出力を増加させ、余剰熱は空冷コンデンサで処理している。また、夏季の余剰熱を岩石に蓄熱し、冬季に利用する「岩石蓄熱システム」の導入も検討されている。

3.2.3 CO₂回収計画

事業コンペの結果、政府からの支援が一部補助にとどまり、残りの資金を株主および市場から調達する必要があった。さらに、2023年には約21億NOKのコスト増により計画が一時中断された。主なコスト増の要因として、以下があげられる。

- ・陸上輸送（内陸から港湾まで）の発生
- ・オスロ港の利用料負担
- ・為替影響による輸入機器の高騰
- ・オスロ市近郊特有の物価高
- ・排ガス中CO₂の低濃度に伴う回収効率の低下
- ・地域暖房利用による余剰エネルギー不足

その後、設備の標準化・モジュール化によって約10億NOKの削減を実現し、2025年1月24日に投資決定され、27日に計画再開が正式に発表された。CO₂回収設備は2029年に運用開始予定であり、年間35万トンのCO₂を回収する。技術はSLB Capturi社のアミン吸収方式を採用し、熱回収効率を高めるためにヒートポンプの設置も計画されている。排ガス中の全CO₂に対する回収率は最大90%で、定期点検などを含めた年平均は85%となる。技術的には100%に近づけることも可能であるが、消

図 6 CO₂回収設備の完成イメージ

費電力が増大するため経済性を考慮して回収率を抑えている(図6)。回収したCO₂は液化し、1,000~1,200トン/日を一時貯留した後、EVローリー車(5~7台)で12km離れたオスロ港ターミナルへ輸送される。ターミナルの貯蔵容量は5,400m³(4~5日分)であり、Northern Lightsによる海上輸送と北海海底への貯留がおこなわれる。将来的にはこのターミナルを地域のCO₂ハブとして活用する構想がある。

3.3 Northern Lights

(回収されたCO₂の輸送・貯留)

3.3.1 事業概要

Northern Lightsは、Equinor、TotalEnergies、Shellの3社がそれぞれ3分の1ずつ出資する合弁企業(JV)で、回収されたCO₂の輸送・貯留を担う。CO₂は2か所の排出源近傍の港から船舶で中間貯蔵施設に輸送され、パイプラインにて約100km離れた北海海底2,600mの塩水帶水層(トロール油ガス田南部)に年間150万トン規模で注入される。貯蔵施設の運転期間は25年間を計画している(図7)。



図 7 Northern Lightsの中間貯蔵施設

3.3.2 モニタリングと安全管理

受け入れるCO₂は事前に定められた品質基準を満たす必要があり、供給者は品質証明書を提出し、受入施設でも検査を実施する。漏洩監視は坑口とパイプラインの流速計測によっておこない、予測値との不一致時は警報発報とバルブ遮断を実施する。監視は、①坑口での圧入量・流速や坑井内の温度・圧力を監視する一次監視と、②地震探査による貯留状況把握をおこなう二次監視に分かれ。これらの管理体制により、漏洩リスクは極めて低く、環境影響も限定的と評価されている。

3.3.3 経済性と資金支援

ノルウェー政府はCAPEXとOPEXの両面で支援をおこなっており、CAPEXは最大80%、追加船舶や圧入井については50%の補助が予定されている。日本のRITE(地球環境産業技術研究機構)の推定によれば、操業5年目に黒字化し、10年目には安定した黒字基盤を確保できるとされる²⁾。

3.3.4 輸送計画

輸送は液化CO₂輸送船4隻によっておこなわれ、うち3隻は川崎汽船の子会社“K”LINE LNG Shipping(UK) Ltd.が管理する。2025年1月時点で2隻は中国・大連で建造を終えノルウェーへ航行中であり、残り2隻は2025年11月と2026年5月に竣工予定である(図8)。

図 8 液化CO₂輸送船

3.3.5 受入・圧入施設

- (1) 受入桟橋：液化CO₂輸送船が接岸する設備とローディングアーム3基(受入用1、返送用1、予備1)を有し、最大能力800m³/hで1隻分のCO₂を約10時間で受入可能。受入時には分析計で純度を確認する。

- (2) 中間貯蔵タンク：12 基、総容量 $8,250 \text{ m}^3$ （船 1 隻分+10%）。タンクは連通して一体運用され、気化装置で圧力を維持する。
- (3) 注入ポンプ・海底接続トンネル：ブースターポンプとエクスポートポンプで圧入圧力 50~90 bar に昇圧し、1 隻分の CO₂ を 2 日で注入する。パイプラインは長さ 680 m・深さ 266 m の海底トンネル内を通じ、凍結防止の海水循環システムと電気ヒータを備える。施設全体の消費電力は約 3 MW である。
- (4) 将来拡張エリア：受入規模を 500 万~700 万トンに拡張する計画があり、同時に 2 隻受入対応の桟橋、タンクの増設、陸上ターミナルの整備、圧入井の追加が検討されている。

3.3.6 地下貯蔵

圧入は口径 12 インチの海底パイプライン 2 本（うち 1 本は予備）を通じておこなわれ、沖合 100 km・深さ 2,600 m のトロール油田付近の圧入井に接続される。耐用年数は 25 年で、Oseberg 油田の遠隔監視下にある。地下貯蔵層は Cook 層および Johansen 層（砂岩）で構成され、上部には一次・二次遮蔽層が存在する。一帯には 1.3 億トンの CO₂ 貯留ポテンシャルが見込まれ、最終的に井戸を閉鎖するが、その後も圧力監視は継続される。

3.3.7 顧客契約状況

現在、国内企業 2 社、海外企業 2 社と CO₂ 受入契約を締結済みで、海外企業（オランダの Yara、デンマークの Ørsted）とは商業契約である。CO₂ 輸送には二国間協定を締結し、EU 規制をクリアしている。さらに、EU 域内 15 か国から商談があり、潜在需要は年間 1 億トンに上る。

3.4 Gassnova (Longship プロジェクトの管理)

3.4.1 組織概要

Gassnova は、エネルギー省の管轄下で 2005 年に設立された国営企業であり、CCS 政策における政府の実行機関として位置づけられている。従業員は約 30 名と小規模ながら、技術開発の推進、政策提言、国際協力、知識共有を通じて CCS 分野の発展

に重要な役割を果たしている。

3.4.2 主要プロジェクト

同社の代表的なプロジェクトを以下に示す。

- (1) CLIMIT プログラム：CCS 技術の研究・開発・実証を支援する国家プログラム
- (2) TCM の運営：世界最大級の CO₂ 回収試験センターを国内外の企業や研究機関に開放
- (3) CCS の推進：Longship プロジェクトを統括

これらの取り組みを通じて得られた CCS に関する知識や経験を国内外の関連機関と共有することも重要な使命であり、ウェブサイト (gassnova.no, ccsnorway.com) を通じて情報を公開し、国際的な知見の交流を促進している。

4. おわりに

本調査では、ノルウェーの Longship プロジェクトに参画する 4 社との意見交換を通じ、CCS に関する最新の知見を得ることができた。ノルウェーの北海沿岸域には発電、セメント、鉄鋼、製油といった多様な二酸化炭素排出源が立地しており、これらを対象とする CCS の取り組みは、沿岸工業地帯が発達した日本にとっても極めて示唆に富むものである。特に、回収から輸送・貯留に至るチェーン全体を国家主導で整備し、民間企業の参入を促す仕組みは、日本の CCS 推進にも重要な参考事例となる。

最後に、本調査の実施にあたり、快く受け入れご対応いただいた各社の関係者、団長の田中先生、事務局の牧谷様をはじめ、多大なご協力を賜ったすべての方々に深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本環境衛生施設工業会：第 22 回海外環境事情調査団報告書, pp.1-43 (2025)
- 2) 公益財団法人 地球環境産業技術研究機構：資料 4 海外 CCS プロジェクトにおける事業取支事例、総合資源エネルギー調査会 資源・燃料分科会カーボンマネジメント小委員会(第 4 回), p.7 (2023)



快適な都市環境…
タクマの技術はエンドレス。

循環型社会の形成および地球温暖化防止のために、廃棄物の有効活用が求められています。発電システムや余熱利用、有価物の回収、灰の再生利用など、廃棄物の持つ潜在価値を引き出し、よりよい都市環境づくりへつなげたい…タクマは、先進の技術で、地域社会への貢献の環を広げ、豊かな社会を目指します。

ごみ焼却プラント
ごみ資源化プラント
産業廃棄物処理プラント
メタン発酵プラント
バイオマス発電プラント
水処理プラント
下水汚泥焼却プラント
その他

株式会社 タクマ

本社 兵庫県尼崎市金楽寺町2-2-33 〒660-0806 電話(06)6483-2609 ㈹
大阪事務所 大阪府大阪市福島区福島7-15-26 JMFビル大阪福島01 〒553-0003 電話(06)7670-6110 ㈹
東京支社 東京都港区芝浦3-9-1 芝浦ルネサイタワー 〒108-0023 電話(03)5730-9200 ㈹
支店 北海道 東北 中部 九州 台北 工場 播磨

[編集後記]

本号の巻頭論説では、日本におけるカーボンニュートラルの達成に必要なグリーン・トランスポーメーション（GX）技術の一つとして、東京科学大学の教授であり、かつ同大学のゼロカーボンエネルギー研究所で所長を務められている加藤先生に、研究所で取り組んでおられるエネルギー貯蔵に関する研究について紹介いただきました。太陽光発電などの時間帯や天候によって出力が変動する変動性再生可能エネルギー（VRE）を効率的に利用するため、P2H2P（電力蓄熱発電）用途に適したケミカルヒートポンプの高温対応を目指し、新材料の開発とその実用化に取り組まれている、という内容です。

ケミカルヒートポンプは、主に100°C未満の低温熱の有効活用を目的に研究開発が進められてきました。しかし、産業部門の脱炭素化や廃熱の高度利用が求められる中で、100°C以上の広い温度領域で性能を発揮する高温対応型のケミカルヒートポンプの重要性が増しています。脱炭素化というと、再生可能エネルギーや水素、CCUS（二酸化炭素の回収・有効活用・貯留）といった新技術に注目が集まりがちですが、既存技術の高性能化や用途拡大もエネルギー転換の重要な柱といえます。

既存技術の改良は「持続的イノベーション」とも呼ばれ、安全性やコスト、環境配慮などを踏まえた安定的な発展を実現し、将来的な革新の基盤を築く大切な取り組みです。本号では当社が取り組む既存技術の改良事例として、オンライン触媒再生設備の導入による触媒脱硝装置の改良や、当社の2MWバイオマス発電設備（2MWシリーズ）における燃料種の拡大対応などを掲載していますので、ぜひご一読いただきたい。（S.I）

タクマ技報編集委員会

委員長	竹口 英樹
リーダー	池田 広司
委員	前田 典生 倉田 昌明（兼事務局） 増田 孝弘 鎌田 全一 小野 徳重 山下 雅英 芹澤 佳代 樋口 直樹 佐野 泰久
事務局	印藤 信哉

タクマ技報 第33巻第2号（通巻第65号）

（無断複写および転載を禁ず） 2025年12月25日 印刷

（乱丁および落丁はお取替えいたします） 2025年12月30日 発行

編集兼発行人 竹口 英樹

発行所 兵庫県尼崎市金楽寺町2-2-33（〒660-0806）

株式会社 タクマ

タクマ技報編集委員会

TEL 06-6483-2603 FAX 06-6483-2753

印刷所 京都市南区吉祥院池ノ内町10（〒601-8316）

明文舎印刷株式会社

非売品

TAKUMA

主な営業品目

- ごみ焼却プラント
- ごみ資源化プラント
- 産業廃棄物処理プラント
- メタン発酵プラント
- バイオマス発電プラント
- 水処理プラント
- 下水汚泥焼却プラント
- その他

大切なものを、
次世代へ。

持続可能な社会の構築
それは、私たちの永遠のテーマです。
循環型社会と脱炭素社会を実現するため
タクマは廃棄物処理分野とエネルギー分野を通じて
健全な地球環境づくりに貢献してまいります。

技術を大切に 人を大切に 地球を大切に

株式会社 タクマ

本 社／ 兵庫県尼崎市金楽寺町2丁目2番33号
電話(06)6483-2609 FAX(06)6483-2751
大阪事務所／ 大阪府大阪市福島区福島7丁目15番26号(JMFビル大阪福島01)
電話(06)7670-6110 FAX(06)7670-6113
東京支社／ 東京都港区芝浦3丁目9番1号(芝浦ルネサイトタワー)
電話(03)5730-9200 FAX(03)5730-9255
支 店／ 北海道、東北、中部、九州、台北
工 場／ 播磨

TAKUMA TECHNICAL
REVIEW

タクマ技報

