



TAKUMA TECHNICAL REVIEW

VOL.34 No.1

2026年6月発行

(通巻第66号)

タクマ技報



表紙説明

駒岡清掃工場

駒岡清掃工場は、老朽化した既存施設の再整備を目的に建設され、「環境・エネルギー・地域融和を次世代に繋ぐ廃棄物処理施設」を基本理念としている。本施設は焼却施設と破砕施設で構成され、高効率な廃棄物発電（蒸気条件 6 MPa・450℃）だけでなく、国内でも数少ない地域熱供給をおこなうごみ処理施設であり、周辺地域の集合住宅や区役所、商業施設などの給湯・暖房の熱源として利用されている。

さらに本施設は「指定緊急避難場所」兼「基幹避難所」に指定されており、防災拠点としての機能を備えるほか、夏祭りや地元自治体向け防災教室の開催など地域のまちづくりにも貢献しており、より地域に根ざした幅広い役割を担う施設となっている。

巻頭論説

カーボンニュートラルの実現に向けた廃棄物の
適材適所での高効率利用…………… 1
藤井 実

解 説

日本のエネルギー史を考える…………… 10
A Review of the Energy History of Japan
金田武司 Takeshi KANEDA

報 告

燃焼ガス浄化技術による
一般廃棄物処理施設由来 CO₂の農業利用…………… 19
Agricultural Use of CO₂ Derived from Municipal Solid Waste
Treatment Facilities with Combustion Gas Purification Technology
岡部潤輝・藤川宗治・佐藤和宏・増田孝弘
Junki OKABE, Muneharu FUJIKAWA, Kazuhiro SATOH,
Takahiro MASUDA

省エネルギー型 CO₂分離回収技術の実証（第2報）…………… 25
Demonstration of Energy-Saving Carbon Dioxide Capture
and Recovery Technology (Second Report)
万ノ友哉・美濃谷広・巽 圭司・鎌田全一
Tomoya MANNO, Hiroshi MINOYA, Keiji TATSUMI,
Masakazu KAMADA

X線を用いた不燃ごみ中のリチウムイオン電池 (LiB)
検出技術の開発…………… 31
Development of a Technology to Detect Lithium-ion Batteries (LiBs)
in Non-combustible Waste Using X-rays
角崎青周・的崎克規・河村洋佑
巽 圭司・鎌田全一
Seishu TSUNOZAKI, Katsunori MATOZAKI, Yosuke KAWAMURA,
Keiji TATSUMI, Masakazu KAMADA

圧力波式ダスト除去装置 (VSPTS) への都市ガスおよび
プロパン (LP ガス) 利用拡大に向けた取り組み…………… 38
Efforts to Expand the Use of City Gas and Propane (LP Gas)
in Pressure Wave Boiler Dust Removal System (VSPTS)
安藤秀隆・巽 圭司
Hidetaka ANDOH, Keiji TATSUMI

燃焼排ガス再循環法による窒素酸化物低減効果の
シミュレーション…………… 44
Simulation of Nitrogen Oxides (NO_x) Reduction Effect
with Exhaust Gas Recirculation (EGR)
福井淳平・伊藤竜生・増田孝弘
水野孝昭・芹澤佳代
Junpei FUKUI, Ryusei ITOH, Takahiro MASUDA,
Takaaki MIZUNO, Kayo SERIZAWA

450℃超ボイラーの実現に向けた実機ばく露試験…………… 50
Exposure Testing on an Actual Boiler for the Development of Boilers
Operating Above 450℃
今井大樹・萩田 諭
Daiki IMAI, Satoshi HAGITA

札幌市駒岡清掃工場 運転報告…………… 56
Operation Report of Komaoka Incineration Plant
鈴木 賢 Masaru SUZUKI

[巻頭論説]

カーボンニュートラルの実現に向けた 廃棄物の適材適所での高効率利用

国立研究開発法人 国立環境研究所 室長 藤井 実



1. はじめに

気候変動がその規模を拡大していると考えられる災害が国内外で増加しており^{1,2)}、持続可能な未来のために、カーボンニュートラル（以下、CNと記す）の早期実現が求められている。そのために各国でさまざまな対策が進められているが、現在CN目標とはなお大きな乖離がある状況である。さまざまなCO₂排出源がある中で、鉄鋼、化学、セメント、製紙といった素材産業はHard-to-abate産業と言われ、CO₂排出の削減が困難な対象とされている。本稿では製造やリサイクル方法が多様な化学産業の中でも、特にプラスチック（合成繊維やゴムも同様に扱うことができる）の製造から廃棄、循環利用に渡るライフサイクルを、どのように効率的にCNに転換することができるのかについて述べる。一見すると矛盾するように見えるかもしれないが、化学産業のCN化のプロセスには、廃棄物焼却技術も密接に関わることになる。

2. エネルギー効率の観点から見たリサイクル困難な廃棄物の適材適所での利用

化学産業のCN化には、化石資源への依存度が大きい現状に対し、エネルギーと原料の双方をCNに転換する必要がある。遠い将来の理想像としては、理屈としてはすべてをCNな再生可能エネルギー（以下、再エネと記す）や資源に転換すればよいのだが、現状はそのような理想像とはかけ離れた状態にあり、今後どのようにトランジションするかが最大の課題である。

効率的と思われる選択肢は、素材毎に分別されておらずリサイクル困難な低品位廃棄物をエネルギー源として活用することであるが、その供給量は全体のエネルギー需要から見れば限定的である。したがって、廃棄物の特性を踏まえた上で、再エネでは非効率になりがちな用途に最大限有効利用することが重要である。ただし、CNの達成のためには、廃棄物の燃料利用に対して、二酸化炭素の回収・利用・貯留（CCUS）を組み合わせることが必須となる。

すべての産業熱需要をカバーする訳ではないが、ここでは代表例としてセメントキルン（1,400℃超）、発電と熱供給を併用するコジェネレーション用の蒸気（500～600℃）、化学や製紙プロセスで多用される300℃未満のプロセス蒸気、そして洗浄等に用いられる100℃未満の温水の各温度帯の熱需要、そして電力について、その効率的な供給方法について考察する（図1）。図の縦方向はエネルギーの質を表す指標の一つであるエクセルギー率（エネルギーのうち有効に仕事として取り出せる割合）を模式的に表している。熱の場合、高温であるほど（より正確には環境との温度差が大きいほど）、エクセルギー率が高い。

電力はエクセルギー率100%の理想的なエネルギーであり、再エネが主流化する将来においても基幹的役割を担うはずである。しかし、再エネの出力変動への対応には蓄電が必要であり、蓄電池は充放電ロスが少ないために高効率である一方、コストや資源制約から長期、あるいは大規模な出力変動にこれを活用するこ

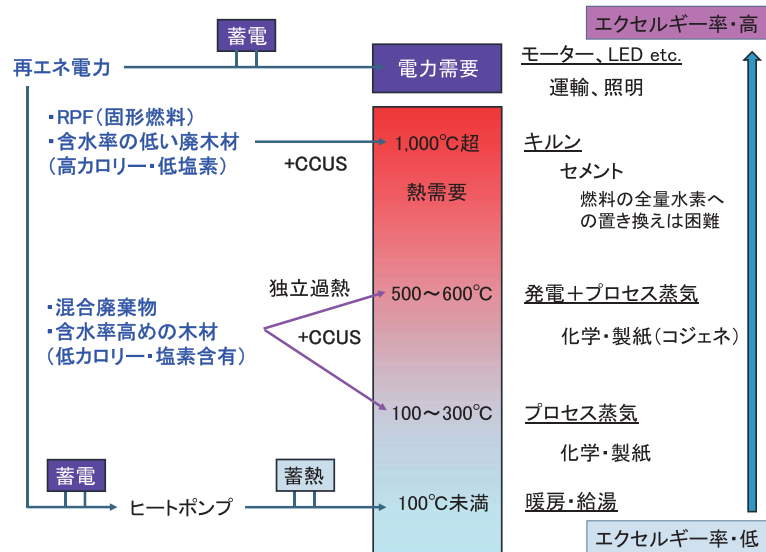


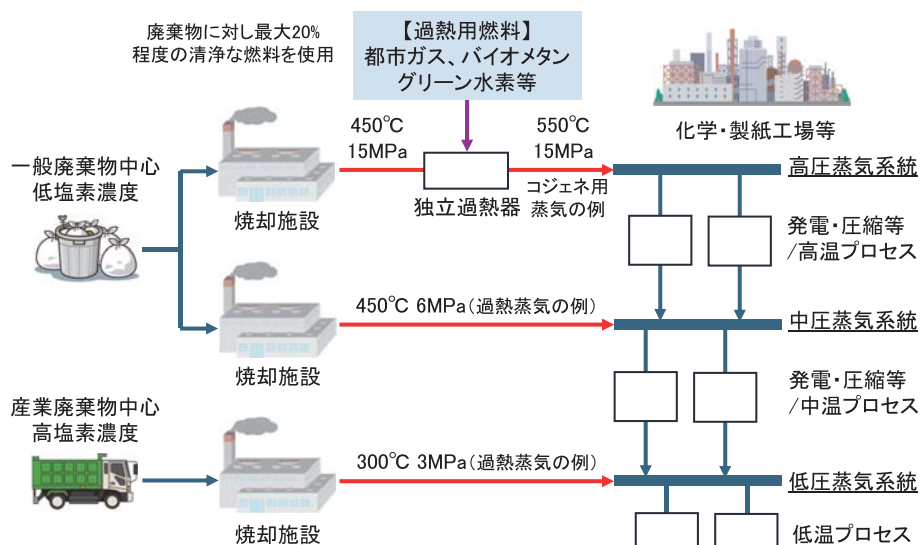
図1 エネルギー源と変換プロセスの特性に合わせた適材適所での利用による最適化

とは難しい。そのため、電力の一部を水素などの化学エネルギーに変換して貯蔵するバックアップシステムの併用が必要となるが、総合効率は低下するため最小限の併用が望ましい。

セメントキルンは超高温の熱を大量に必要とする代表例である。理論的には再生電力を抵抗で熱に変えるなどの方法で、高温の熱供給は可能である。セメント産業の電化を試みている事例は複数存在するが^{3,4)}、大規模かつ安定的な熱供給が必要なため、特に費用面での課題が大きいと考えられる。超高温域では蓄熱が難しいため、電力供給側で安定させる必要があり、大規模蓄電と組み合わせることになれば、高コストになりやすい。一方、セメントキルンの加熱をCNな水素でおこなう選択肢もあるが、石炭とは燃焼特性が大きく異なり、炉内での水蒸気の発生量も多くなるなどの課題がある。そのため、水素は20%から多くても40%程度の混焼に留まるようである⁵⁾。したがって過渡期においては、素材としての利用が難しい低品位な廃棄物の中で、発熱量の高いプラスチックやバイオマスを優先的に超高温用途へ配分することが合理的である。例えば廃プラスチックのフラフやRPF (Refuse derived paper and plastics densified fuel) と呼ばれる廃棄物固形燃料、廃タイヤ等は石炭代替として高効率で利用可能で、現在も利用されているが、今後もこの用途はエネルギー効率と経済性の両面から有効である。セメント産業のエネルギー需要の大きさを考慮すれば、高発熱量を有する低品位な代替燃料を超高温産業に優先配分することが、限られた資源で最大のCO₂削減効果を得る観点から重要である。

次にコジェネレーションに用いられる500℃、10 MPaを超えるような高温・高圧の蒸気は、廃棄物焼却ボイラーで製造しようとするボイラーチューブの高温腐食が懸念されるため、一般的な焼却施設では対応が困難である。コジェネレーションは、発電に利用した後の低温低圧の蒸気を近隣の熱需要を満たすために利用することで、エネルギー効率を高めてきた。しかし、再生電力が主流化する将来においては、そもそもものを燃焼させて発電する必要性が薄れるため、コジェネレーションの意義も低下する。したがって遠い将来においては、廃棄物焼却で高温・高圧の蒸気を製造する必要性も低下すると思われるが、過渡期において、既にコジェネレーションを利用している工場に大規模に蒸気供給しようとするケースでは必要となる場面も考えられる。

化学工場等にあるコジェネレーション用の石炭焚ボイラーでは既にRPF等の高発熱量の廃棄物燃料が利用されているが、上述のようにこれらはセメント工場などの1,000℃を超える超高温の熱需要を満たすために優先的に利用されるべきである。一方、500℃級の蒸気の供給は、現在自治体の焼却施設で処理されているような、より発熱量が低い一般廃棄物の焼却ボイラーでも供給することができる。具体的には、焼却ボイラーに独立過熱器を追加し、どこまで昇温するかにも依存するが、廃棄物の持つ低位発熱量に対して最大で



※ 低温～高温、低圧～高圧は相対的な表現であり、工場毎にどの温度・圧力帯を指すかは異なる

図2 焼却炉から化学工場等への蒸気供給

2割程度の清浄な燃料（例えば都市ガスや将来であればグリーン水素など）を用いて追い炊きすることで可能になる（図2）。この場合、廃棄物焼却ボイラーの高圧化にともない耐腐食性能や耐圧性能の強化といった費用面での課題があるものの、工場側の既存ボイラーを代替できる意義は大きい。また独立過熱器での制御により、化石燃料に比べると不安定になりがちな廃棄物焼却施設からの電力・蒸気供給を安定化することにも役立つと考えられる。現在、日本国内において風力発電の拡大に苦戦している状況もあり、特に太陽光発電の出力が低下する夜間において、廃棄物焼却施設でグリーン水素やアンモニアを併用するコージェネレーションが、将来も引き続き有効である可能性もある。

続いて、化学や製紙産業の製造プロセスで大量に利用されている100°C以上、300°C未満程度の低圧蒸気系統は、低品位廃棄物の焼却熱を利用した熱供給に最も適した利用先となる。後述する化学コンビナートでの設備構成の変化や、CO₂の分離回収のための熱需要が新たに生じることなどから、この温度帯の蒸気は今後益々必要になる可能性が高い。また300°C未満であれば、塩素濃度が高い産業廃棄物（建築系、自動車系、家電系等）であっても、その多くを燃料として利用することができる。蒸気温度の低い一般的な廃棄物焼却・発電では、エクセルギー率の低さと施設規模の小ささから必然的に発電効率が低くなってしまいが、熱効率自体は産業側のボイラーに対してほとんど遜色がない。発電効率では最新のガス火力発電（低位発熱量基準の発電端効率では70%に迫る効率）には遠く及ばないが、蒸気供給に限定すれば1GJの廃棄物が産業ボイラーの1GJに近い燃料の節約に繋がるため、非常に効率的である。

最後に、100°C未満の低温熱はエクセルギー率が低く、燃料の直接燃焼や電気の熱への変換では大きなエクセルギーロスが生じる。それに対し、熱を発生させるのではなく移動させる装置であるヒートポンプは、電力を用いて低温熱を効率的に供給することが可能であり、特に再エネ電力が主流となる将来においてその意義は大きい。現在のヒートポンプの効率は熱力学的な理想値からはかけ離れているが、それでも燃料や電力を直接熱に変換するのに比べてエクセルギー効率を大きく改善することができる。お湯であれば蓄熱も容易であり、再エネ電力を利用する場合でも必ずしも蓄電池に頼る必要がない。プロセス蒸気の供給にもヒートポンプを利用できるとよいが、温度差が大きくなるほど効率が低下してしまう。しかし、温度が高めの排熱が利用できる環境であれば、比較的低温の蒸気を部分的に供給することは可能であると思われる。

以上のように、再エネ電力や廃棄物をその特性に合わせて温度帯別に最適配分し、超高温には高発熱量廃棄物燃料、低温にはヒートポンプを活用するといった資源の質に応じた利用が化石燃料依存を最小化し、CO₂削減効果を最大化する鍵となる。将来的に再エネが主流化すれば、廃棄物で代替することの環境面での

意義は相対的に低下するが、資源の適材適所での利用はエネルギー効率と経済合理性の面で重要性を持ち続けることが期待される。

3. 化学コンビナートにおける蒸気需要と CN に向けて想定される変化

日本では、石油精製の際に得られるナフサから有機化学品を製造するのが主流である。化学コンビナートでは、ナフサ分解炉（エチレンプラント）においてナフサを熱分解して基礎化学原料を生産しているが、同時にコンビナートに蒸気を供給する機能も担っている。分解炉ではナフサを 800℃ 超で熱分解した後、エチレンからキシレンまでといった目的生成物の範囲で反応を止めて収率を確保するために分解ガスを急冷するが、その際に回収される高温顕熱を高温・高圧蒸気として回収・利用している。一方で、2020 年時点で、国内のナフサ分解炉に由来する CO₂ 排出が約 1,000 万 t あり、全化学産業のエネルギー消費に対しても 17% を占めるなど、大きな割合を占めている⁶⁾。ナフサ分解炉の熱だけで化学コンビナートの蒸気需要を満たせる訳ではないが、その寄与度はある程度大きい。しかし現在、施設の老朽化や世界的な化学原料の供給過剰を背景に、国内ではナフサ分解炉の統廃合が進んでいる。2014 年以降に 15 基中 3 基のプラントが廃止されたが、さらに 4 プラントの集約が決定もしくは検討されている状況にある⁶⁾。こうした統廃合は、コンビナート内の蒸気の需給バランスに大きく影響する可能性がある。今後、国内のコンビナートの生産品目や生産量によって熱の需給状況は変化し得るが、誘導品（基礎化学原料を用いて製造する製品）の製造は今後も継続するとすれば、熱の供給源が一部なくなることによって、その代替となる新たな熱源が必要になる可能性が高まると思われる。したがって、廃棄物を利用した化学コンビナートへの熱供給は、今後その必要性和効果がさらに高まる可能性がある。

化学コンビナートの CN 化に向けて、カーボンニュートラルコンビナート研究会では、CN の実現に必要な設備・インフラについて、水素やアンモニアの共同調達・利活用、CO₂ の共同回収・利活用、バイオマス原料や廃棄プラスチックの共同調達・利活用、省エネルギー・省資源の取り組み強化、CCS（二酸化炭素の回収・貯留）の共同実施などをあげており⁷⁾、エネルギーと原料の双方を CN にする取り組みが進められることになる。リサイクルも重要な構成要素となるが、材料リサイクルには収率や品質の劣化が避けられない課題があり、ケミカルリサイクルは多くの場合、最終的にプラスチックに戻る炭素の収率が 50% 未満、

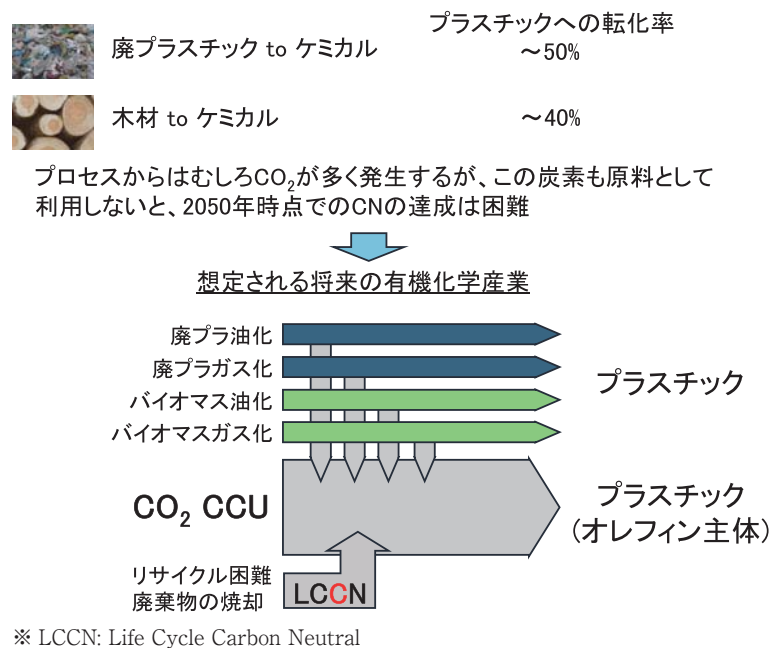


図3 将来の化学産業における CCU の位置づけ

あるいはそれを大きく下回る場合もある⁸⁾。つまり、含有炭素の半分以上はCO₂として排出されてしまうため、CCUSとの組み合わせでなければケミカルリサイクルでのCNの達成は困難である。また、国内では木材が比較的豊富なバイオマス資源であり、これを原料とするプラスチック製造も検討されているが、バイオマスは分子構造に酸素を含むため、ポリエチレンやポリプロピレンといったプラスチックのケミカルリサイクルに比べると、炭素収率はさらに低下しがちである。特にこれまで定常的に利用されていない森林のバイオマスを新たに伐採し、再造林・育林を繰り返して利用する場合、2050年までといった短期間では、一時的にCO₂排出の増加に繋がる可能性もある⁹⁾。このような状況を踏まえると、将来のCN時代のプラスチック等の有機化学品製造は、CO₂を原料とするCCUで製造することが主流化されると思われる(図3)。CCSの併用も考えられるが、CCSのポテンシャルは現時点では必ずしも明確ではない。CCSの容量が無限ではないとすれば、鉄鋼やセメントなど、製品に炭素をほとんど含有しない素材産業から排出されるCO₂を優先的に回収・貯留するべきであり、有機化学製品はCCUで炭素を製品へと循環させることが望ましい。CCUによる化学品製造が主流化すれば、エチレンプラントの果たす役割は世界各国でも低下することが想定され、化学コンビナートにおける低品位廃棄物を利用した蒸気供給の役割は、国内に留まらず拡大してゆくと思われる。

4. 循環経済への転換における廃棄物焼却による蒸気供給とCCUによる化学品製造の合理性

ここで仮に、投入する費用よりも得られる便益が小さくなるものを廃棄物と定義する。ただしその際、費用や便益には環境価値や資源利用の持続性の観点を組み込むことが必要である。このように考えた場合、一般には「分ければ資源」と言われるが、しかし「分け過ぎれば廃棄物」ということにも十分なり得る。ちょうどよい程度に廃棄物を分別して、最も効率的に利用しなければ、付加価値を生み続ける真の循環経済の達成は困難であると思われ、経済合理性をもってCNを達成することもできないだろう。

LCCN (Life Cycle Carbon Neutral) は、リサイクル困難な低品位廃棄物の焼却熱を化学産業のプロセス用蒸気として高効率に活用し、同時に発生するCO₂をCCUにより化学原料として循環利用することで、ライフサイクル全体でカーボンニュートラルを達成しようとする統合的なコンセプトである(図4)。前述のように化学産業はhard-to-abate分野の代表例であり、大規模・安定供給が求められるエネルギーと原料炭素の双方を脱化石化しなければ、CNは実現しない。特にプラスチック等の有機化学製品は炭素を骨格とするため、



※ CN: Carbon neutral

図4 ライフサイクルカーボンニュートラル (LCCN) の概要

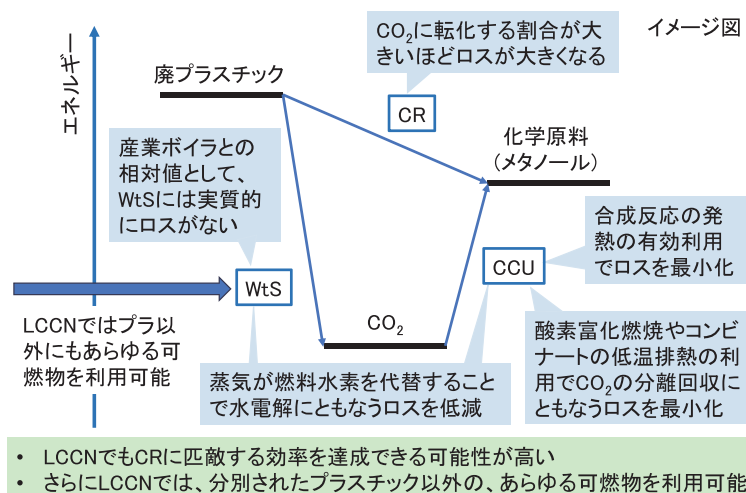
単に燃料を再エネ化するだけでは不十分であり、使用後にやむを得ず焼却される際のCO₂を回収・循環させる仕組みがライフサイクル全体のCNには不可欠となる。

LCCNは、材料リサイクル、ケミカルリサイクルを補完する形で、廃棄物焼却による蒸気供給（以下、焼却・蒸気供給と記す）+CCUを位置付ける多層構造で整理される。材料リサイクルは環境と経済の両面で優先されるべきだが、分別収集費用が高額になりがちであり、品質劣化が避けられない点も課題である。モノマー化によるケミカルリサイクルは品質維持に有効だが、油化やガス化のように化石原燃料に相当する中間生成物を経由するケミカルリサイクルでは、炭素収率やエネルギー投入の観点で必ずしも最適とは限らない。これに対しLCCNでは、リサイクル困難な可燃廃棄物を高効率で蒸気利用し、その際に発生するCO₂からメタノール等の基礎原料を合成してふたたび有機化学品へ戻すことで、炭素を閉ループで循環させる。

化学工場では原料や製品の精製のための蒸留プロセスを筆頭に、300℃未満の蒸気を大量に消費しているが、現状ではその多くを化石燃料に依存している。低温域の蒸気は廃棄物焼却によって十分供給可能であるにもかかわらず、現状ではエクセルギー率の低い廃棄物焼却施設の蒸気の多くが、発電用途に使われている。廃棄物焼却発電（以下、焼却・発電と記す）の効率は国内事例で最大25%程度に留まり、最新のガス火力発電と比較すると、化石燃料代替効果は50%未満にとどまる。これに対し、焼却・蒸気供給であれば産業ボイラー並みの約90%の熱効率に達し、化石燃料代替効果はほぼ100%に近づく。すなわち焼却・蒸気供給は、焼却・発電に比べて現状でも2倍以上効率的である。将来的に再エネ電力が主流化すれば、化学工場側では電力を直接熱に変えるか、いったん水素やアンモニアに変換して、それらを燃料として蒸気を供給することになる。そのような状況下では、焼却・発電に対して焼却・蒸気供給が4倍前後の優位性を持つ可能性がある。

CCUは安定な化学物質であるCO₂を経由するため、ケミカルリサイクルに比べて効率が悪いと考えられがちであるが、熱力学的にはトータルの反応熱は途中の反応経路には依存しない。実際には存在するさまざまなエネルギーの無駄をどれだけ削減できるかに効率の良否が掛かっている。従来の焼却・発電では致命的なエネルギー損失を生じていたが、焼却・蒸気供給は産業ボイラーによる蒸気供給の効率と比べて遜色がないため、実質的な（相対的な）ロスが存在しない。この部分の改善が非常に大きいとともに、ほかにもエネルギー効率を改善する複数の対策と組み合わせることで、ガス化のようなケミカルリサイクルに匹敵する効率を達成することは、十分可能であると考えられる（図5）。

現在、一般廃棄物だけでも約3,000万t/年の廃棄物が焼却されている。今後は人口減少やリデュース、リサイクル等の推進で焼却量が減少することが予想される一方で、経済合理性の観点から産業廃棄物との混合



※ WtS: Waste to Steam, CR: Chemical Recycling, CCU: Carbon Capture and Utilization

図5 LCCNによる基礎化学品製造とケミカルリサイクル（ガス化）のエネルギー効率の定性的な比較

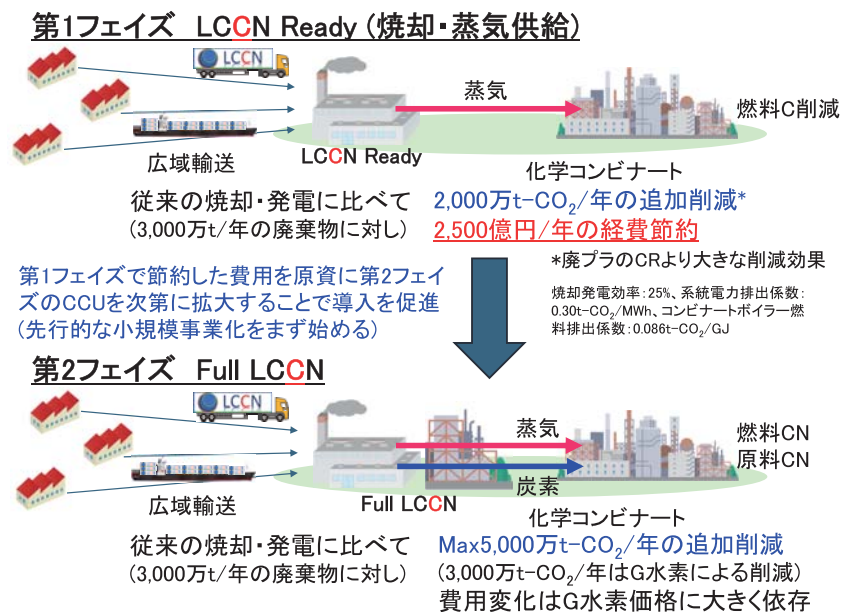


図6 LCCNの2段階での導入によるCNに向けた効果の最大化

焼却が拡大する可能性も考えられる。図6は、極端な例ではあるが、一般廃棄物、産業廃棄物を併せて3,000万t/年焼却するケースを想定し、従来型の焼却・発電（ベースライン）と、すべてがLCCNで処理・利用した場合の追加的なCO₂排出削減効果や経済的な評価をおこなったものである。LCCNでは蒸気供給をおこなうため、必然的に大規模な蒸気需要がある工業地帯が適地となる。化学コンビナートであれば、1,000~2,000t/時を超える大規模な蒸気の需要があるため、海外では実例が増えつつある5,000t/日を超えるような大規模な焼却施設であっても、発生する蒸気を十分に利用可能である。すなわち、LCCNでは、焼却・発電から焼却・蒸気供給への転換による効率の大幅な改善に加えて、大規模化によっても効率性と経済性の両面で優位性を発揮する。立地場所は必ずしも化学コンビナートの近隣でなくてもよく、製紙工場であれば蒸気の有効利用とともに、回収したCO₂をその場でメタノール合成に利用すれば合成時の発熱も製紙プロセスに有効利用できる。なお、メタノールの輸送や貯蔵は比較的容易である。

しかし、CCUの実施には大量の水素が必要であり（1molのCO₂に対して、3molのH₂が必要）、現状ではグリーン水素が高価かつその供給体制も整っていないことから、直ちにCCUをフルスケールで実施することは現実的ではない。そのためLCCNの導入は、2段階に分けて実施することが想定される。第1段階は、蒸気需要のある工業地域にできるだけ大型の廃棄物焼却施設を建設して低品位廃棄物を集積し、蒸気供給をおこなって将来のCCUの実施に備えるLCCN Readyの段階である。従来の数百t/日規模の焼却・発電に対し、2,000~4,000t/日程度に拡大されることによる規模の効果とエネルギー効率の飛躍的向上により、集約化のための廃棄物の輸送費の増大を加味しても2,500億円/年程度の節約に繋がり、工場が化石燃料に依存している場合であれば2,000万t-CO₂/年程度の追加的削減効果が得られる。工場側のエネルギー利用の脱炭素化が進めばCO₂削減効果は薄れるものの、一般的に脱炭素化はエネルギー費用の増加に繋がるため、焼却・蒸気供給の経済性はさらに高まることになる。第2段階では最終的にフルスケールでのCCUへ移行し、完全なCN（廃棄物セクターの視点からは、バイオマス由来廃棄物のCO₂を利用したCCUにより、カーボンネガティブも可能）を目指す。まずはLCCN Readyによって創出される2,500億円/年の便益を原資として、現状では高コストなCCUを開始、拡大することで、コスト削減とCCU普及拡大を促す正のスパイラルが構築されることを期待したい。CO₂削減1tあたり数万円の市場価値を持つ社会になり、グリーン水素がそれに対応する価格で供給されるようになれば、LCCNの効率性と経済性の高さによりこれまで価値のなかったりサイクル困難な低品位廃棄物でも、CNを達成しつつ全体の便益が費用を上回ることが期待される。すなわち、これまで廃棄物だったものが、発生時点で有価な資源となる可能性もある。今後さらなる詳細な検

討が必要であるが、LCCN が真の循環経済と CN を達成する有力な手段になり得ると考えられる。

5. お わ り に —— CN への早期転換と定着に向けて

国内では 2050 年の CN 達成を目標としているが、気候変動の影響を緩和するためにより重要なのは、2050 年までの累積 CO₂ 排出量を最小化することである。化石燃料依存度の高い現状において、低品位廃棄物の焼却・蒸気供給によって先行的に大規模な削減効果を発揮する LCCN は、過渡期戦略として合理的である。将来は CCU に必要なグリーン水素の調達が課題となるものの、焼却・蒸気供給が化学工場等の高価な CN エネルギーを代替するため、全体として費用の低減に貢献する。質の高いリサイクルを推進しつつ、LCCN によって補完的に CN 化と循環経済への移行を進めることには、安定性、効率性、安全性、先導性の 4 観点から次の利点があげられる（図 7）。

- ・リサイクル残渣を含む可燃物を大規模・安定的に集約処理することで高い事業性を確保し、社会に閉じた循環を構築してバイオマスへの過度な依存を防ぐこと。
- ・低品位廃棄物も最高効率で利用し、プラスチックへ再生できること。
- ・CO₂ 経由のカーボンリサイクルにより有害物質の残留を回避し、食品容器用途にも対応できる安全性を確保すること。
- ・焼却・蒸気供給の経済性を活かして CCU へ先行投資し、水素低価格化とともに CCU を拡大する先導的モデルとなること。

また LCCN を大規模集約拠点で実施する副次的な効果として、各市町村等では焼却処理を自らおこなう必要がなくなることから、厨芥類の分別回収と有効活用が地域で促進されやすくなり、肥料成分の循環も進むかもしれない。適材適所での効率的な利用によって、価値のなかった廃棄物が有価な資源に代われば、回収・利用されないことに起因する、海洋プラスチック問題をはじめとする環境問題の解決に資することも期待される。

現在、LCCN または LCCN Ready の事業化に向けた詳細な検討が国内の複数地域で実施されており、同時にアジアへの展開も図られている。また、2024 年 12 月には一般社団法人 LCCN 推進研究会が設立され、技術や制度面の研究と事業化に向けた活動がおこなわれている。焼却施設を工業地帯に新設するなどの抜本的な変更をとるために、LCCN の実現には時間を要するが、これから建設するプラントは 2050 年にも稼働している可能性が高いものになるため、今から CN に最も効率的に対応できる仕組みへと変更していくことが求められる。

【安定性】リサイクル残渣も含めてほとんどの可燃物を利用可能

- ・大規模に安定して廃棄物を収集可能⇒高い事業性を確保
- ・社会に閉じた循環でバイオマスへの過度の依存を防止
- ・廃棄物セクターと化学産業の最大限の CN 化に貢献



【効率性】低品位の廃棄物やバイオマスを最高効率で利用

- ・大規模集約処理による高い経済性
- ・焼却・蒸気供給との組み合わせでケミカルリサイクルに匹敵する高い効率で、混合廃棄物をプラスチックに再生



【安全性】CO₂ を経由するカーボンリサイクル

- ・廃プラスチック等に含まれる有害物質の残留がない
- ・再生されるプラスチックは食品容器にも利用可能



【先導性】蒸気供給の経済性で CCU へ先行投資

- ・焼却・蒸気供給の利益を投資に向けて水素需要をけん引
- ・水素の低価格化・供給体制強化に合わせて CCU を拡大



図 7 LCCN の複数の視点から見た効率性の整理

参考文献

- 1) World Meteorological Organization (世界気象機関) : State of the Global Climate 2024 (2025)
- 2) 国土交通省 : 令和4年版 国土交通白書 2022, pp.4-8 (2022)
- 3) Volaity S. S., Aylas-Paredes B. K., Han T., Huang J., Sridhar S., Sant G., Kumar A., Neithalath N.: Towards decarbonization of cement industry: a critical review of electrification technologies for sustainable cement production, *Materials Sustainability*, Vol. 3, No. 23 (2025)
- 4) Parra S. Q., Romano M. C.: Decarbonization of cement production by electrification, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 425, 138913 (2023)
- 5) Mineral Products Association, VDZ gGmbH, Cinar Ltd, Hanson, Tarmac: State of the art fuel mix for UK cement production to test the path for Net Zero: a technical, environmental and safety demonstration, Summary Report (2022)
- 6) 石油化学工業協会 : 第1回 製造業ベンチマーク検討 WG 石油化学工業協会説明資料, 第1回 産業構造審議会イノベーション・環境分科会排出量取引制度小委員会製造業ベンチマーク検討ワーキンググループ (2025年7月24日), 資料5, pp.5-6
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/emissions_trading/benchmark_wg/pdf/001_05_00.pdf (2026年3月20日確認)
- 7) カーボンニュートラルコンビナート研究会 : カーボンニュートラルコンビナートの実現に向けた論点整理 (概要), 総合資源エネルギー調査会第1回省エネルギー・新エネルギー分科会水素政策小委員会/資源・燃料分科会アンモニア等脱炭素燃料政策小委員会合同会議 (2022年3月29日), 資料4, p.6
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/001_04_00.pdf (2026年3月20日確認)
- 8) Matthias Maier *et al.*: Chemical recycling of plastic waste via production of ethylene from gasification syngas, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2025, Vol. 64, pp. 575-589 (2024)
- 9) Xinru Hu *et al.*: Comparison of greenhouse gas emission reductions in wood-based plastics production in Japan, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 545, 147723 (2026)

解説

日本のエネルギー史を考える

A Review of the Energy History of Japan



金田 武司*

Takeshi KANEDA

【要旨】明治維新の後、日本は化石燃料の確保に翻弄された。日本には化石燃料が殆どなく、その調達に国の発展を左右した歴史である。第二次世界大戦および2度のオイルショック、湾岸戦争、ホルムズ海峡危機など日本が受けた影響は諸外国とは本質的に異なったものであった。ここでは、ペリー来航による石炭時代の幕開けと富国強兵、大正時代の電力利用、アメリカ、中東の石油資源に依存してきた日本固有の特殊な歴史とそれともなう産業発展のプロセスを整理した。特にオイルショック後の脱中東に向けた政策はその後の省エネルギー機器の開発・商用化および輸出を通じ経済復興に大きな役割を果たしている。禍転じて福と為した事例でもある。中でも原子力政策の推進、LNG（液化天然ガス）の利用は世界、アジア諸国の中でもとりわけ日本が先進的な役割を果たし、エネルギー安定供給に向けた基盤的な役割を果たしている。その結果として今の電源構成が形作られているとも言える。本稿は、そういったエネルギー調達にかけた歴史と国内産業発展の歴史を記したものとした。

キーワード：エネルギー政策、歴史、石油ショック、電源構成、戦争

Abstract

After the Meiji Restoration, Japan faced persistent challenges in securing stable supplies of fossil fuels. Japan has almost no naturally occurring fossil fuel resources, and the need to procure them has influenced the country's development. World War II, the two oil shocks, the Gulf War, and the Strait of Hormuz crisis had impacts on Japan that essentially differed from those on other countries. This article examines the beginning of the coal age in Japan following Commodore Perry's arrival and how coal contributed to the country's industrial development. It also covers how Japan's military policy was strengthened and how electricity came into use in the Taisho era. In addition, it discusses Japan's unique history of dependence on oil resources from the United States and the Middle East, and the process of industrial development that occurred in association with that dependence. In particular, policies aimed at reducing dependence on the Middle East after the oil shocks played a significant role in the economic recovery of Japan through the subsequent development, commercialization and export of energy-saving equipment. This also illustrates how a national crisis can create opportunities for technological and industrial advancement. Particularly noteworthy is the fact that Japan played a leading role in promoting nuclear energy policy and the use of liquefied natural gas (LNG) in the world, especially in Asia, and that it played a fundamental role in securing stable supplies of energy. It can be said that the current power generation mix was formed as a result of these efforts. Overall, this article reviews the history of energy procurement and related industrial development in Japan.

Keywords: energy policy, history, oil shock, power generation mix, war

* 株式会社ユニバーサルエネルギー研究所
Universal Energy Research Institute, Inc.

1. はじめに

1853年横須賀にペリーが来航した。黒船（戦艦）4隻を引き連れて太平洋を渡って日本までやってきたという。大砲を搭載した戦艦であった。さらにその大砲を「ぶっ放した」というのだからただ事ではない。さて、「何しに来たのか？」という問いに対して学校で十分な回答を教えられた記憶がない。教科書には「開国を迫った」と記載されていたと記憶するが、目的がハッキリしないので納得感がない。

主な目的は石炭の要求であった。当然アメリカにも石炭はある。ではなぜ？という疑問が残る。産業革命の当時、欧米では建物内で作業をするための灯火、機械を動かすための潤滑油の需要が急激に高まった。その油は鯨油（クジラの油）を原料としており、鯨油を取るためにはまずクジラを捕獲する必要がある。そしてクジラを捕獲するためには石炭船が太平洋を3か月程度航海する必要がある、燃料（石炭）がなくなるとは困る。太平洋における対岸の国である日本には北にも、南にも石炭があるらしいので、開港してもらいその燃料（石炭）を捕鯨船に積み込ませて欲しいということが本音だったようである。

日本人がこれまで見たこともない巨大な船が煙を吐いてやってきた。大砲を見た剣の達人はかなうはずがないと悟っただろう。「泰平の眠りを覚ます上喜撰たつた四杯で夜も眠れず」とはよく言ったもので、江戸中大騒ぎになったという。エネルギー資源を巧みに利用した西欧文明を目の当たりにした日本人は剣では太刀打ちできないことを悟り、すぐ翌年（1854年）日本ははじめての国際条約「日米和親条約」を締結することとなる。これが我が国の文明開

化のはじまりであった。咸臨丸による米国文明の視察はそのわずか3年後のことで、エネルギー資源争奪戦の第一幕である。

その後、日本のエネルギーはどうなったのか。今のエネルギーミックス（電源構成）が確立した日本の歴史をたどってみたい。

2. 再生可能エネルギーから鯨油・石炭へ

江戸時代のエネルギー源は主に再生可能エネルギーである。石炭も利用されていたが、再生可能エネルギーに比べて圧倒的に少量である。「川へ洗濯、山へ芝刈り」という時代が江戸時代であり、泰平の世が260年間継続できたのは「足るを知る」（江戸時代の僧侶良寛和尚による）日本文化が持続可能なエネルギー資源に支えられていたからに違いない。当時の日本国内では、灯火は菜種油など再生可能エネルギーを（図1-(a)）、欧米では鯨油など海洋資源（図1-(b)）を利用していた。明らかに鯨油の方が明るい、乱獲すれば必ずしも再生可能ではない。

さて、圧倒的な武力（戦艦・大砲・銃）が登場した江戸末期に、幕府は占領されないことを第一に政策を進めた。まずは、ペリーがやってきた江戸湾入口にできる限りの大砲を設置し、敵艦の来航に備えた。東京湾に一步でも踏み込まれたら日本は勝ち目がないからであり、その努力は明治政府になっても続けられ、第二次世界大戦まで継続された。なお、横須賀、観音崎には今でもこれらの砲台跡がたくさん残されている。

当時の日本は国の存続をかけて、否が応でも「鉄の文明」に飛び乗る以外に選択肢はなかった。それが急速な時代の流れを引き起こし、鉄を作るために



(a) 菜種油の燈明



(b) 鯨油によるカンテラ

図1

石炭を大量生産、大量消費する時代へと突入することとなる。

ペリーはまた「蒸気機関車」なるものの模型を持ってきて、走ることを実演して見せた。日本人は石炭文明に飛び乗り、鉄を作ることをはじめた。横須賀に我が国初の製鉄所「横須賀製鉄所」が建設され、そのすぐ脇には鉄による造船を開始した横須賀造船所が建設された（図2、現在は米軍横須賀基地内）。新橋（汐留）、横浜（桜木町）間には日本初の鉄道が敷かれ、途中には品川などの駅が作られた。ここで興味深いのは、用地取得とともに海岸に迫る住宅が機関車からの排煙を嫌ったことなどから、田町、品川駅間は海上に土を盛り、木の杭を打ち、地盤を固め、石垣で堤防を築いて線路を敷いたらしいということである。



図2 日本初の横須賀造船所¹⁾（現在は米軍横須賀基地内）

3. 石炭が日本を救った

日本が石炭を本格的に利用しはじめたころ、時を同じくしてロシア・欧州が日本の領土を狙っていた。まずはじめの脅威は、すぐに現れた「ロシアバルチック艦隊」の襲来である。当時強力に国防に力を注いでいたものの、圧倒的な戦力と経験をもつロシアバルチック艦隊が日本を狙っていることは幕府の時代から気づいていたといわれる。また、そのための軍備拡張を幕府に進言したのが小栗上野介忠順であった。彼の進言のお陰で、日本はロシアに占領されずに済んだことになる。

当時の日本には十分な財源がなく、いきなり鉄製の戦艦をつくる技術もなかったため、軍資金も戦艦も海外に頼ることとなる。軍資金の一部はイギリス・米国のロスチャイルド系金融機関から当時5億

円を借り入れることができた（当時の大蔵大臣高橋是清による）。ユダヤ人であったロスチャイルド家の人たちはイギリスが勝つことができなかったロシアと戦うならという条件で出資をしてくれた。戦艦三笠をはじめ多くをイギリスからの購入に頼った。

さて、戦艦はすべて石炭駆動であり、石炭の発熱量が戦艦の駆動力を支える。また、煙突からの煙が敵艦を発見する（日露戦争では巡洋艦信濃丸が第一発見者）唯一の手段であったことから、イギリスが戦艦とともに提供した高カロリー・無煙炭「カージフ炭」と日本の「無煙炭」（大嶺炭田、舞鶴炭田）の利用が勝敗を分け、敵艦が日本の艦船を発見する前に、日本の艦船はより多くの煙を吐く敵戦艦を簡単に見つけることができたのである。結果として、世界最強とされたロシアバルチック艦隊は全滅し、ロシア革命により帝政ロシアが滅びたのはこの敗戦も原因の一つとされている。これはペリー来航により石炭船を知ってわずか52年後、1905年のことである。当時の技術革新もさることながら、日本の総合力・戦略には驚かされる。なお、戦艦三笠を建造したイギリスのパロー・イン・ハーネス市西部の造船所には、今でも戦艦三笠を建造したドックが誇り高く保存されている。イギリス人にとって戦艦三笠は誇りなのである。そこに至る道路は「Mikasa Street」と道路表示されている。

4. 水力発電が産業を興した

石炭の利用で鉄を治め、欧米列強に肩を並べた日本は次に水力開発に力を注ぐこととなる。1891年には日本初の一般用水力発電所となる蹴上発電所が稼働しているが、当時プライベートでの発電所も建設され、紡績機の電源として工場に併設した発電所として三居沢発電所（宮城県）が日本初の水力発電所として1888年に稼働し、1892年には三菱財閥の創始者（岩崎家）の箱根の別荘（現在は旅館として営業）にプライベートの水力発電所が建設されている。このように、日本の水力開発は世界的にも早い段階から進められていたことがわかる。世界初のアメリカの水力開発（1882年）のわずか数年後に日本でも水力開発がおこなわれたのである。

日本での水力発電の普及は偶然だったわけではない。日本には急峻な山があり、急流の川がある。こ



図3 福沢桃介 (1868年～1938年)²⁾

のため水流をせき止めることで比較的多くの電力を得ることができる地理的な特徴があった。しかし、山の奥深くにダムを建設することは並大抵のことではない。水力発電の黎明期には福沢桃介(図3、福沢諭吉の娘婿)が木曾川水系の水力開発(8箇所のダム建設)をおこない、電力の普及に大きな貢献を残しているが、彼が水力発電ブームに火をつけたと言える。桃介が最初に開発した八百津発電所は1911年に竣工している。日本には水力発電に適した地形があったとともに、開発に意欲を燃やした先人がいたことが石炭から水力の時代に切り替わる大きな切っ掛けとなっている。桃介は発電と同時に発電した電力を利用する産業を興し、その二つを両輪として事業を展開したことが事業成功の切っ掛けであった。愛知電気鉄道(名古屋鉄道の前身)、博福電気軌道(西日本鉄道の前身)、東海電極製造(東海カーボンの前身)など電力を利用する産業を創業し、明治から大正にかけて日本の工業化は水力開発と並行して推進された。

大正時代はこの水力発電により多くの産業や一般家庭が電力(電灯)を利用できる時代となった。「大正ロマン」というが、これは電力の利用により夜になってもなお明るい社会が形成されたことによるものに違いない。

5. 電灯の普及と東京電灯

電力の利用を知った日本の猛進撃は凄まじいものであった。石炭文化を取り込み、鉄による富国強兵を実現した時と同様の勢いを感じる。何しろ、エジソンがニューヨークで世界初のアーク灯を灯した翌

年1882年には銀座二丁目にアーク灯が灯っている。今では想像もつかないスピード感で経済が循環をはじめたのが大正時代だと感じる。その原動力となったのは紛れもなく電力であった。

銀座のアーク灯はその明るさゆえに「一にお天道様、二にお月さま、三に銀座のアーク灯」と言われ東京の夜の名所となった。銀座のアーク灯の成功は瞬間に電気事業へと発展する。わずか4年というスピード感で1886年日本最初の電気事業者「東京電灯(株)」(東京電力(株)の前身)が誕生する。なんと、アメリカで世界初の水力発電所が運転を開始した1882年から見てわずか4年後のことである。東京電灯設立の1年後には日本橋に日本初の石炭火力発電所(出力25kW、直流210V)が設置され、広く全国へ電灯事業が普及する切っ掛けとなった。東京電灯設立の翌年には名古屋電灯、京都電灯、大阪電灯が相次いで設立された。

6. 松永安左衛門

福沢桃介の門下生として電気事業について学び、国内の電気事業の規範をつくりあげたのが松永安左衛門である。「電力の鬼」と称され、東邦電力(九州電力の前身)の社長として九州、中部、関東などの全国の電力・ガス会社を合併・統合することにより成長基盤を確立した。戦後、GHQ(連合国軍最高司令官総司令部)の電力国家管理に抵抗して国策会社「日本発送電」を分割し、現在の9電力体制を確立した。

戦後の混乱期には「電力を安く豊富に供給すれば、日本人は自分で産業を興し、そして豊かになる」との信念のもと自由主義経済の根幹を電気事業とし、国に頼らず発電所の建設資金を確保するために、世論の猛反対にも拘わらず電気代7割アップという前代未聞の値上げを断行した。結果として日本は水力などの電源開発を推進することができ、豊富な電力を基に見事戦後の復興を成し遂げた歴史がある。

7. 石油の時代

さて、石炭、水力と進んできた日本のエネルギー供給であるが、昭和の時代に大きな転機を迎える。それは石油が世界のエネルギーの潮流を担う時代が

やってきたことであり、日本には石油資源がなかったことが悲劇を生んだ。昭和天皇の回顧録には「昭和という時代は石油に始まり石油に終わった」と記載されている。それほどまでに日本は石油に翻弄された。

アメリカで最初の商業的な油田（ペンシルベニア州タイタスビル）が発見されたのは1859年であり、ペリーが鯨油を求めて来航した1853年からわずか6年後のことである。もし、先に油田が発見されていればペリー来航はなかったかも知れない。その後、1901年テキサス州スピンドルトップにて大規模な油田が発見され、アメリカの石油覇権は決定的なものとなる。この石油がいかに便利であり、政治的に利用し得る資源かはその後の歴史が証明している。

戦闘機や戦艦はもはや石炭では動かず、国を守るため、経済を回すために必要なエネルギーは石炭から石油となった。石油の世紀の到来であり、石油資源のない日本は非常に大きな代償を払うこととなる。当時、世界の中でエネルギー資源を持たない主要国といえばイタリア、ドイツ、日本であった（今でもそうである）。1941年、米国による「対日石油全面禁輸政策」によりこれまで100%アメリカに依存していた石油が完全に封鎖された。また、ABCD包囲網[†]による海上封鎖は海外（南方）の油田を独自に開発する以外の道を閉ざした。

第二次世界大戦はこのように勃発したが、戦後中東の油田が発見されるまでは、多くの油田を持つアメリカ主導の石油に基づく世界経済が確立する。

8. ニクソンショック

1971年8月15日、ニクソン大統領が緊急声明を発する。日本人なら誰でも知っている「8月15日」に発した声明であり、日本人に対する声明であることがだれの目にも明らかであったものは次の2つであった。一つは「円とドルの為替レート固定化の廃止」、もう一つは「金本位制の廃止」ということである。これだけでは何が言いたいのかやりたいのか

[†] ABCD包囲網：第二次世界大戦前夜、日本が東南アジアへの進出を強める中、America（アメリカ）、Britain（イギリス）、China（中国）、Dutch（オランダ）の4国が、石油や屑鉄などの戦略物資の輸出禁止・規制によって日本を経済的に封鎖した包囲網

わからない。

一つ目の真意はこうである。「日本は戦後十分豊かになった。奇跡とも言える高度経済成長を成し遂げつつある。それはアメリカが1ドル360円という日本の輸出産業にとってとてつもなく有利な為替レートを守っていたからにはほかならない。それは今や不公平である。もう、対等に競争しようではないか。これからは経済力に応じた変動型の為替レートとして、固定した為替レートは廃止する」。ということである。この緊急声明を聞いた日本政府・経済界は極度のパニック（円高恐怖症）に陥っていたようであるが、昭和天皇は非常に冷静に「円の価値が高まることは、日本の国力や信用が世界に認められた証である」という極めて現実的な視点を持っていたと伝えられている。

もう一つの「金本位制の廃止」は、その後の世界のエネルギー争奪戦につながる大きな発言となった。背景は泥沼と化したベトナム戦争であった。なんと1955年からはじまり、いつ終わるかわからない（実際には1975年まで20年間闘いアメリカの撤退後、北ベトナムによる南ベトナム政権の崩壊により終結した）ベトナム戦争を抱え、アメリカはお金を使い果たしていたのである。当時のアメリカは「金とドルの兌換（交換）」を約束していたのだから、金を持ち込まれれば相当のドルと交換しなければならず、また外国がドルを持ち込めばアメリカは相当の金と交換しなければならなかった。戦争によってドルも金も使い果たしてしまったアメリカには、もはやそれ（兌換）を実現する財力がないということがこの声明により露呈してしまうこととなった。すなわち、アメリカのドルは崩壊寸前（金により価値が支えられていたドルシステムの崩壊）であり、ドルは暴落を免れないだろうというのが各国金融機関の見方であった。

9. ペトロダラーとキッシンジャー

ニクソン大統領はこの声明により、ベトナム戦争に続く次の戦争の引き金を引いた。アメリカは兌換停止によるドルの暴落を何としても防がなければならない。そのために中東の石油を利用した。「中東の石油は米ドルでしか取引をしてはならない」（これを「ペトロ（石油）ダラー（米ドル）」と言う）とい

う国際ルールを世界に押し付けることとした。金本位制の時と同様、ドルの価値は油の価値、油の価値はドルの価値となったわけである。交換できるのだから米ドルと原油は等価となる。

当時の世界情勢からすると中東の石油なしで豊かになれる国はなかった。したがって、豊かになるためには中東の石油を購入できる唯一の通貨である米ドルを争って調達する必要があった。こうしてアメリカは、米ドルの価値を中東の石油によって支えることに成功した。さらに具体的に表現すると「アメリカと取引のある国（米ドルが手に入る国）のみが豊かになれる」という世界ルールであり、ついに米ドルは豊かになるための手形となったのである。

さて、このような荒手の政策に中東が従ったのはなぜだろうか。ロジックはこうである。「中東・サウジアラビアの油田はいまや世界から狙われている。同時にその油田を支配する国王の命も狙われている。そこで米軍が油田を守り、王族の命を守って差し上げましょう」という理屈である。これを実現するためにアメリカの軍隊を中東の油田の周りに配備することが必須条件となる。裏を返せば中東・サウジアラビアの油田はアメリカ軍が支配し、王族の殺害はいつでもできるという事でもある。この政策を考え、実行に移したのは当時大統領補佐官であったヘンリー・キッシンジャーであった。

キッシンジャーはユダヤ人として1923年ドイツ

のゲットー[†]で生まれ、そこで育ったが、1938年15歳で家族とともにナチスから逃れ、アメリカに亡命した。その後アメリカの市民権を得、米陸軍に入隊の後ハーバード大学で博士号を取り、同大学で教鞭を取る。事実、ベトナム戦争の終結に貢献した。

言うまでもなく、アラブの国は怒り心頭、「カンカン」となる。自国の石油をアメリカの言うがまま米ドルでしか売ることができないことは受け入れがたい。しかも、国の財産である油田を米軍が管理するような事態は受け入れがたいことから、予想通り戦争が勃発した。ユダヤ人の国イスラエルに占領された領土を取り返すべくアラブの国々が結託して、戦争となる。第四次中東戦争の勃発である。

10. オイルショック

中東諸国は一致団結して石油戦略（減産・禁輸）を発動し、西側諸国に対して制裁を加えることとなる。一致団結というのはいわゆる談合である。OPEC（石油輸出国機構、1960年設立）の出番である。談合により産油国は一気に石油の減産をはじめた。当然の結果として原油の価格は4倍に跳ね上がった。いわゆる第一次オイルショック（1973年）である。図4に日本の石油の中東依存度の推移を示す。当時の日本は原油輸入のかなりの部分（77.5%、1973年）を中東に依存していたのだからこれはとんだとばっ

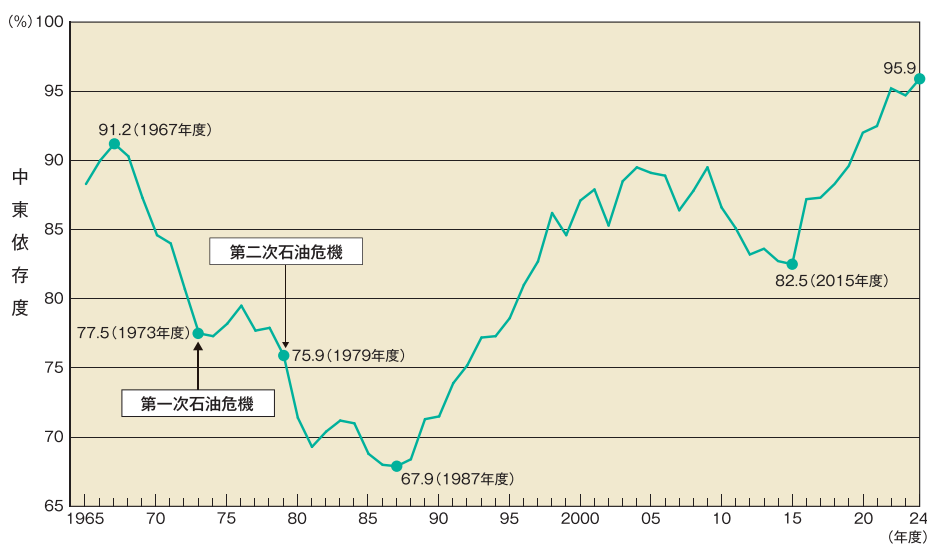


図4 石油の中東依存度の推移³⁾

[†] ゲットー：ヨーロッパの都市においてユダヤ人が強制的に隔離され住まわされた居住区

ちりだった。数か月間で原油の価格が4倍に跳ね上がり、日本経済は奈落の底に落とされることとなる。ちなみに、2024年時点ではさらに中東依存率が上昇し、95.9%を記録している。

オイルショックは外国に極度に依存する日本にとって非常に多くの教訓を残した。とにかく、石油が不足すると生産と流通が止まるだけでなく、石油火力発電に依存（64%、1973年）していた電力供給に大きな制約を受け、電力危機を引き起こした。日本経済は安価な中東の石油に余りにも依存する構造になっていたのである。第二次世界大戦勃発時に100%の原油をアメリカに依存しており、輸入が途絶えることで大変な目にあったことと同じ轍を踏む結果となった。

中東・サウジアラビアとキッシンジャーの約束（米ドル以外で原油を売らないこと）は1974年10月であった。キッシンジャーはサウジアラビアを訪問して合意を取り付けた。その約束は50年間という期限付きで、ペトロダラー契約は2024年6月で事実上の終了を迎えたことで、ドル一強の時代は終わりを告げたのである。これに先立ちキッシンジャーは2023年11月29日、コネチカット州の自宅で100歳の生涯を閉じた。

11. エネルギー政策の大転換

オイルショックからの立ち直りを模索する日本に残された手はかなり限られていたが、良かれと思われる政策をすべて実行に移してこの難を逃れた。エネルギー政策の大転換を迫られ、そして諸外国には見られない以下に示すような日本独自の取り組みや工夫がおこなわれたのである。このような事態に備えて石油を備蓄すること（国家石油備蓄の開始）、再生可能エネルギーの開発（NEDOの設立と本格的な技術開発の推進）、エネルギー資源は極めて重要なので大切に使う（省エネルギー技術開発の推進）。そして決定的だったのは原子力発電の本格導入であった。原子力発電は一度核燃料を装荷すると3年から4年の間、燃料を交換する必要がない。これは100万kW（約30万世帯分の需要）級の電気エネルギーを何と3年から4年もの間貯蔵していることに等しい。当時はCO₂削減が目的ではなく、単純にエネルギーセキュリティの観点からエネルギー源の多く

を原子力発電にシフトする必要があった。

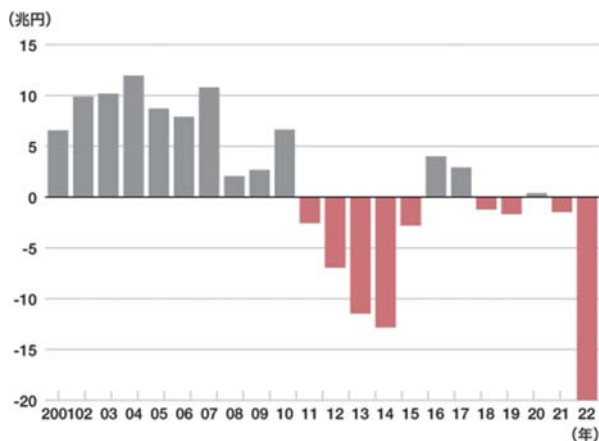
オイルショックにより日本経済は破綻寸前まで落ち込み、連動して税収が落ち込み本格的な赤字国債の発行がはじまる。日本の国債発行残高は積みもって1,129兆円（2025年度末、財務省）にもものぼり、主要先進国の中で最も高い水準となっている。そもそもこの赤字国債（政府の国民・金融機関からの借金）は1971年以降オイルショックによる景気対策を背景として増加を続け、現在の大量発行体制に至っている。この経験をもとに我が国は中東依存からの脱却、石油依存からの脱却を最優先とするエネルギー政策を推進し今に至る。その中核といえるのが何と言っても原子力発電の利用である。

戦後の復興とオイルショックからの復興に対して、日本のエネルギー政策がいかに機能したかアジア諸国は常にウォッチしていた。原子力発電による日本の経済復興の成功を見て、アジア諸国は次々と本格的な原子力発電の導入を開始した。安価・安定な原子力発電の利用は日本経済を急速に強く生まれ変わらせた。日本では1963年に動力試験炉（JPDR）が運転を開始、1966年に東海発電所が商業運転を開始した。その後インド、タラプール原子力発電所が1969年に運転開始、台湾でも1970年代後半から日本の技術協力により次々と原子力発電所が運転を開始した。韓国は大分遅れて1978年に古里発電所が、中国はさらに遅れて1991年にはじめての秦山原子力発電所の運転を開始することとなる。これらアジアの原子力発電所建設には日本の技術が生かされている。

12. 災い転じて福となす

もしもオイルショックがなかったとしたら、日本は原子力発電所の建設をこれほどまで急ぐことはなかったと思う。その後、日本経済の足跡を見る限り原子力発電所が稼働していることが貿易黒字の条件となる。つまり、原子力発電所が止まることがない限り日本の貿易は黒字を記録し続けたのである。

図5に日本の貿易収支の推移を示す。東日本大震災による2011年3月11日福島第一原子力発電所の事故を切っ掛けとしてすべての原子力発電所は停止し、日本全体の経済が止まり、発電所停止後数年間は極端な貿易赤字を記録した。オイルショック以来



※出典：財務省「貿易統計」を基に執筆者にて作成

図5 日本の貿易収支の推移（東日本大震災前後）⁴⁾

の赤字幅である。当時、原油価格は低値安定していたのでふつうに考えればものづくり産業は活況を呈し、日本経済は豊かであったはずである。このようなエネルギー環境にもかかわらず、原子力発電が停止したことが日本経済赤字の最大要因であった。原子力発電所が発電した時と同じ電力を供給するためには、今度は液化天然ガスを購入しなければならない。日本の経済がこれほどまでエネルギーと密接に結びついていたことをはじめて知ることとなる。ちなみに、100万kWの電力を供給する原子力発電所を工場に例えるならば、1日あたりざっと5億円(24円/kWh×24時間×100万kW)の売上を実現できる。このような発電所が国内に60基ほどあったことを考えると、すべて止めれば年間10兆円のオーダーの損害となる。

東日本大震災の後、日本経済が復活できていないことをこのグラフは雄弁に物語っている。原子力発電所を止めている限り、従来買わなくて済んだ天然ガスを大量に購入する必要があるからであり、産業も家計も火の車と化した。2022年の極端な赤字は多くの原子力発電所が停止しているうえに、エネルギー価格高騰と円安のトリプルパンチによるものであり、日本経済は本当に弱くなってしまった。

さて、一方、もしオイルショックがなかったとしたら、日本の製造業は強くなれただろうか。実は、日本の製造業はオイルショックにより大きく・強く変化したといえる。それは省エネを意識した製品を開発し、商品化したということである。日本製の冷蔵庫、空調、照明、自動車、工場、住宅は電力・エネルギー不足の中、徹底的に省エネにこだわり、省

エネ製品をつくりそれを世界に売った。これが当たったのである。オイルショック後の世界は省エネを求めているということを日本の技術が実証したといえる。日本の製造業は結果としてオイルショック以前のレベルをはるかに上回る成長を遂げており、トヨタ、ソニー、ナショナル、シャープなど自動車、家電などの製造業は省エネ製品を通じて、海外展開をはかり軒並み大きな成長を果たした。既に1ドル360円の魔法が解けていたにも関わらずである。

13. 天然ガスの時代

エネルギー資源のない日本では、東日本大震災後に原子力発電所が停止したことにより急速に天然ガスの時代にシフトした。まさか中東に依存し、CO₂排出の大きな石油に戻るわけにもいかず、日本に残された道はこれしかない。しかし、天然ガスは突然追加で購入する場合には不安定な価格となり、かつ高額な燃料でもある。このような燃料を円安下で日本は購入し続けなければ国が持続できない状況であった。また日本の場合、海外のガスを輸入するには液化が条件となる。天然ガスパイプラインがインフラとして海外と接続されていないためである。先進国で石油・天然ガスパイプラインが海外と接続されていない国はほとんどないと言ってよい。たとえ北朝鮮であっても隣国とは石油パイプラインでつながっている。このように考えると日本のエネルギー事情はかなり特殊といえる。液化し、タンカーで輸送することが前提であればなおのこと高額となる。

さて、ロシアによるウクライナ侵攻により欧州にもエネルギー危機が訪れた。欧州は環境に優しい国が多く、CO₂排出量の少ない天然ガスの需要が多い。ウクライナ侵攻の前は欧州への天然ガス供給は大半(45%程度)をロシアからの供給に頼っていた。この状況が一変することになる。ウクライナに軍事物資を送り、ウクライナを支援する欧州諸国に対してロシアはエネルギーでの制裁を課すこととなった。ガスパイプラインでガスを供給するロシアがそのバルブを半分絞めて売値を3倍にするだけで、欧州の国々は極度なエネルギー危機と価格高騰に悩まされることとなった。パン屋がパンを焼けない状況が報道されるなど、現在欧州の経済は危機的状況に瀕しているといえる。日本にとってのオイルショックを

彷彿とさせる事態である。すかさず米国は自国の天然ガスの売り込みに躍起である。かつて日本が液化天然ガスを購入しはじめた時代に「液化してタンカーで運ぶなどあり得ない」と批判していた国々が、今度は先を急いで液化天然ガスをアメリカから輸入する事態となっている。ウクライナ戦争によりアメリカは「漁夫の利」を謳歌しているのである。

14. ま と め

このように、これまでの日本、世界を取り巻くエネルギー事情を見る限り、明らかに歴史は繰り返されていることが良くわかる。世界の金融機関がロシアのルーブルに対して金融制裁を課したことでルーブルは暴落した。しかし、プーチンは余裕の表情を見せ、ルーブルのみでの天然ガスの販売を宣言した。その1か月後ルーブルの価値は元に戻った。ちょうど、米国が中東の原油の取引を米ドルのみに制限したことで米ドルの暴落を防いだ過去の歴史を知ってのプーチンの判断である。しかし、歴史は繰り返すことを知らなかった多くの金融機関は危機を迎えた。

日本の液化天然ガス利用に対して批判を繰り返した欧州は、いま自ら急激に液化天然ガスにシフトせざるを得ない状況を考えれば明日は我が身だと言える。福島での原子力事故は発電所の安全性・安全基準を飛躍的に高めて再稼働を進めている。間違いなくこれが世界の原子力安全のスタンダードになるものと思う。原子力の再稼働が日本の貿易赤字を大きく改善し得ることは歴史が証明しており、日本が辿って来た数奇な歴史はまさに、多くの国がまだ経験したことのない事態を先取りしているのかも知れない。

オイルショックで定めた1970年代の日本の国家石油備蓄政策はいまになってエネルギー危機にある欧州ではじまっている。2009年に前年の輸入量の90日分の備蓄を維持することを義務化して、2022年以降この基準に基づき2025年時点で1億トン以上の原油が備蓄されることとなったそうである。一方で、原子力発電所の多くが停止しているにもかかわらず、原油の中東依存率はオイルショックをはるかに超えるものとなっており、現在の日本は昔の手痛い経験を忘れてしまったかのように感じる。このような状況がいかに危険極まりないか早く気付くべきである。

オイルショックの経験を踏まえて、世界の中で先取りした省エネ化を進めた日本の製品・規格は、いまや世界のスタンダードとなっている。それはエネルギー資源がないからこそその仕組みと工夫をもって乗り越えてきた日本独自の歴史でもある。過酷な事業環境の中で戦って来た日本の企業と製品がこれからも世界の先端であり続けることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 横須賀市：横須賀の誇り！横須賀製鉄所（造船所）（2026年3月1日）
<https://www.city.yokosuka.kanagawa.jp/2120/seitetsuzyo/main.html>（2026年4月1日確認）
- 2) 福沢桃介翁伝記編纂所：福沢桃介翁伝（1939）
- 3) 日本原子力文化財団：原油輸入の中東依存度の推移，エネ百科（2025年10月7日）
<https://www.ene100.jp/zumen/1-2-5>（2026年4月1日確認）
- 4) 財務省：貿易統計
<https://www.customs.go.jp/toukei/info/index.htm>（2026年4月1日確認）

報 告

燃焼ガス浄化技術による 一般廃棄物処理施設由来 CO₂ の農業利用

Agricultural Use of CO₂ Derived from Municipal Solid Waste Treatment Facilities
with Combustion Gas Purification Technology



岡部 潤輝*	藤川 宗治*
Junki OKABE	Muneharu FUJIKAWA
佐藤 和宏*	増田 孝弘*
Kazuhiro SATOH	Takahiro MASUDA

【要旨】 当社は、バイオマス発電施設において実績を複数有する燃焼ガス浄化設備「t-CarVe(ティー・カーブ)[®]」の適用範囲を一般廃棄物処理施設へ拡大すべく、町田市バイオエネルギーセンターにて実証試験を実施した。本設備は、燃焼ガス中のCO₂を分離回収することなく、有害成分の除去により安全にCO₂を園芸施設へ供給するものである。約400日間にわたる連続運転を通じて、一般廃棄物燃焼ガスにおいてもCO、NO_x、HCl、ダイオキシン類などを、農業利用に適した濃度まで浄化できることを実証した。また、園芸施設内の大気環境分析では、浄化ガス施用区と液化炭酸ガス施用区との間に有意差は認められず、いずれも一般的な大気と同等であった。さらに、栽培したいちごを用いた動物実験および微量成分分析においても有害な影響は認められなかった。これらの結果から、当社の燃焼ガス浄化設備により、一般廃棄物の燃焼ガス由来のCO₂が農業利用可能であることが示唆された。

キーワード：燃焼ガス浄化，トリジェネレーション，農業利用，カーボンニュートラル，一般廃棄物処理施設

Abstract

In order to expand the application range of the combustion gas purification system “t-CarVe[®],” which has a proven track record in biomass power generation facilities, to municipal solid waste treatment facilities, our company conducted a demonstration test at the Machida City Bio-Energy Center. This equipment safely supplies CO₂ to greenhouses by removing harmful components instead of capturing and recovering CO₂ from combustion gas. Through continuous operation for approximately 400 days, it was demonstrated that combustion gas from municipal solid waste could be purified and CO, NO_x, HCl, dioxins, and other harmful substances reduced to concentrations suitable for agricultural use. Analysis of the atmospheric environment in the greenhouse showed no significant difference between the purified gas enrichment and the liquefied carbon dioxide gas enrichment, and both were equivalent to the general atmosphere. In addition, no adverse effects were observed in animal experiments or trace component analyses using the strawberries cultivated. These results suggest that CO₂ recovered from municipal solid waste combustion gas using our company’s purification system can be put to agricultural use.

Keywords: combustion gas purification, trigeneration, agricultural use, carbon neutral, municipal solid waste treatment facility

* 研究部
Energy & Environmental Research Dept.

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向け、廃棄物分野においてもCO₂の排出削減と有効利用に関する取り組みが加速している。当社では、廃棄物処理施設などから排出される燃焼ガス中CO₂の分離回収技術、回収したCO₂の利用技術、および燃焼ガスを浄化してCO₂を直接利用する技術の研究開発に注力している。

CO₂の直接利用先の一つとして有力なのが農業分野である。大規模なハウス園芸栽培施設（以下、園芸施設と記す）において、光合成に必要なCO₂濃度を大気より高めることで農作物の生育を促進し、収量増加や品質向上を図るCO₂施用技術（以下、CO₂施用と記す）が広く活用されている。一般的に園芸施設内へ供給されるCO₂は、液化炭酸ガスを直接供給する方式と、灯油やLPガスを園芸施設内の装置で燃焼し、その燃焼ガスを供給する方式の2通りがある。しかしながら、これらの方式は化石資源由来のCO₂を供給するケースがほとんどであるため、カーボンニュートラルの観点で課題が残る。また、化石資源の燃焼ガスにはNO_x（窒素酸化物）などが含まれる場合があり、農作物の品質への影響に注意を要する。加えて、近年の燃料価格高騰が農業経営を圧迫している現状もあり、持続可能な農業の実現に向けて新たなCO₂供給源の確保が求められている。

そこで当社は、バイオマス発電所の燃焼ガスを園芸施設に利用することを目的として、燃焼ガスを浄化したカーボンニュートラルなCO₂を、安全性を高めながら安価に園芸施設へ供給する「燃焼ガス浄化装置（t-CarVe・ティー・カーブ[®]：以下、浄化装置と記す）」を開発した^{1,2)}。当社の浄化装置は既に複数のバイオマス発電施設への納入実績を有し、現在も安定稼働を継続している。今回はこのバイオマス発電施設向け浄化技術を一般廃棄物処理施設の燃焼ガ

スにも適用することを目的として、2023年11月に町田市バイオエネルギーセンター（熱回収施設：ストロカ式焼却炉、処理能力258トン/日）にて実証試験を開始した。本稿では、同センターの燃焼ガスを利用した実証試験について報告する。

2. 燃焼ガス浄化技術の概要

2.1 基本コンセプト

園芸施設内のCO₂施用に必要なCO₂濃度は400~1,500 ppm程度であり、燃焼ガス中のCO₂濃度（10~15%）の1/10ほどの低濃度である。この濃度差に着目すれば、必ずしもCO₂を高純度に分離回収する必要はない。そのため、燃焼ガスに含まれる農作物および作業環境に有害となる微量成分を許容値以下に低減し、CO₂を含んだまま直接供給する浄化技術を採用した。本技術は、化学吸収法などの分離回収技術と比較して設備コストやエネルギー消費を大幅に抑えることができ、特にCO₂排出源と園芸施設が近接している場合には大幅なコスト削減が可能となる。

一方、園芸施設では、農作物育成のための適切な温度管理に必要な熱や、設備稼働のための電力も不可欠である。一般廃棄物処理施設では、浄化技術によるCO₂供給に加えて、ごみ燃焼熱由来の蒸気熱および、ごみ発電やバイオガス発電で生み出される電力をハウス園芸に活用することができる。すなわち、これらのCO₂、熱、電力という3つのユーティリティを一括して有効利用する「トリジェネレーション」を実現することで、園芸施設における化石資源消費を大幅に抑制することが可能となる（図1）。

2.2 浄化設備の構成と燃焼ガスの浄化原理

浄化設備は、一般廃棄物処理施設などにおける多くの実績を通じて培われた当社の排ガス処理技術を

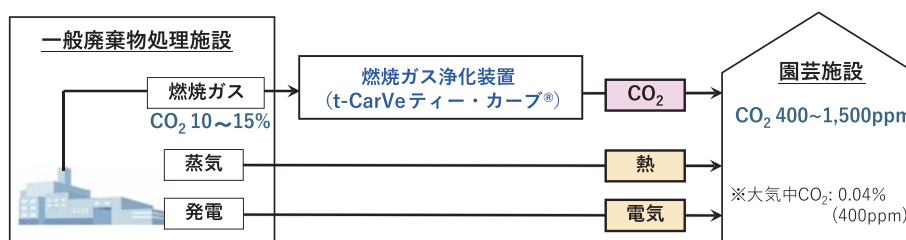


図1 トリジェネレーション概念図

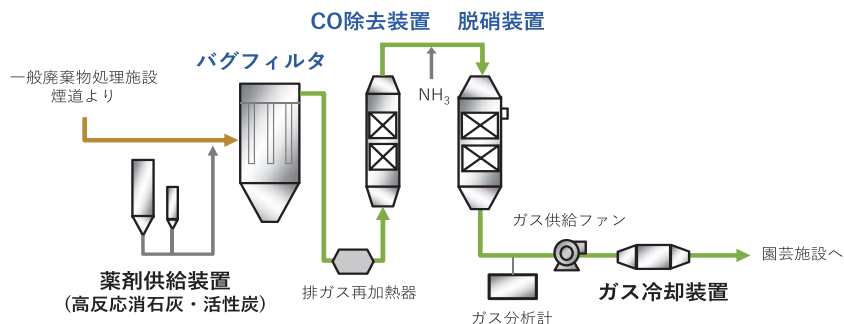


図2 燃焼ガス浄化設備の機器構成図

応用して開発したものである。主な構成機器は、薬剤供給装置、バグフィルタ、CO 除去装置、脱硝装置、ガス冷却装置である（図2）。

バグフィルタでは燃焼ガスに含まれる各成分を通常の一般廃棄物処理施設よりも低濃度まで除去する必要があるため、反応層初期形成方式を採用している。本方式は、十分な量の高反応消石灰および活性炭をあらかじめろ布上にコーティングすることで、燃焼ガス中の酸性ガス成分、有機化合物、重金属類に突発的な濃度変動があっても常時安定して除去することができる。

CO 除去装置は優れた分解性能を有する酸化触媒を充填しており、CO（一酸化炭素）を酸化するとともに、微量であっても農作物の生育阻害となるエチレンなどの炭化水素類を十分に低減する役割を担う。触媒充填量は定常運転時の必要量に対して十分な余裕を持たせた設計としており、安定した処理性能を継続的に発揮できる構成となっている。

脱硝装置は脱硝触媒とアンモニア供給により NO_x を窒素に還元する。NO_x の急激な濃度変動にも追従できるよう、フィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせた制御方式を採用している。

また、作業環境や農作物に対する安全性確保の観点から、浄化ガス中に含まれる各成分濃度の連続的な監視を実施している。万が一これらの濃度が基準を超えた場合には、速やかにガスの供給を停止するインターロック機能を備えており、安全性に十分配慮した設計としている。

3. 実証試験の概要

3.1 浄化技術の適用範囲拡大に向けて

バイオマス発電施設での適用実績を踏まえ、浄化技術の適用範囲を一般廃棄物処理施設へ拡大すべく、2023 年度に町田市バイオエネルギーセンターにて実証試験を開始した。一般廃棄物処理施設は全国に約 1,000 か所存在しており、浄化技術の導入展開により地方自治体における地域循環型カーボンリサイクルへの貢献が期待される。一般廃棄物処理施設から排出される燃焼ガスは、バイオマス発電施設と比較して廃棄物の組成変動に起因する燃焼ガス成分の変動幅が大きいという特徴がある。また、塩化ビニルなどのプラスチック類に由来する HCl（塩化水素）や、重金属類が微量に含まれている場合もある。このため、浄化技術の一般廃棄物処理施設への適用にあたっては、これらの変動要因に対応できる浄化性能と安定した運転を実証することが不可欠となる。

3.2 実証設備と栽培条件

試験で利用した燃焼ガスは、熱回収施設の排ガス処理設備を通過した後の誘引通風機出口より一部を引き抜き、同センター内に設置した浄化設備（概略寸法 6.0×3.4×3.0 m、CO₂ 供給能力：70 m³N/h、14 kg-CO₂/h）にて処理した浄化ガスを試験用の園芸施設へ供給した（図3）。

園芸施設は 2 棟設置し（各 28 m²）、浄化ガスを施用する棟を実験区、従来技術である液化炭酸ガスを施用する棟を比較対照区として、いちご（品種名：章姫）の栽培試験を実施した（図4）。実験区では、一般廃棄物処理施設で常時発生する燃焼ガス中の CO₂ を浄化技術によって安価に継続供給できる利点を活かし、生育促進を優先した CO₂ 管理（常時



図3 燃焼ガス浄化設備外観



(外観)



(内観)

図4 園芸施設

1,000~1,500 ppm に維持) をおこなった。一方, 対照区では慣行栽培方式[†]に準じた CO₂管理 (800~1,000 ppm に間欠的に維持) をおこなった。

4. 試験結果

4.1 浄化装置の稼働状況と浄化ガスの性状

浄化装置は, 2023 年 11 月の稼働開始以来, 熱回収施設の定期休炉期間およびいちご栽培の休耕期間を除き, 約 400 日間にわたり定常運転を継続した。この間, 浄化ガス中の各成分濃度は安定して推移し, 基準値超過による浄化ガスの供給停止 (インターロックの作動) はなかった。

図5に連続ガス分析計で測定した浄化ガスの日間トレンドの代表例を示す。いずれの成分も許容値を十分に下回る数値で安定的に推移しており, 浄化設備が良好な処理性能を発揮していることを確認した。CO₂供給先である園芸施設内の作業環境への影響が特に懸念されるCOについては, 出口濃度を5 ppm未滿に維持しており, CO除去装置が安定した分解性能を有していることを示した。また, HCl や SO_x (硫黄酸化物) などの酸性ガス成分についても, 反応層初期形成方式の採用により高い除去性能を達成した。

表1に, その他の代表的な有害成分を手分析により測定した結果を示す。微量有害物質である水銀およびダイオキシン類については, いずれも極めて低い濃度であり, 高い安全性を確保することが可能で

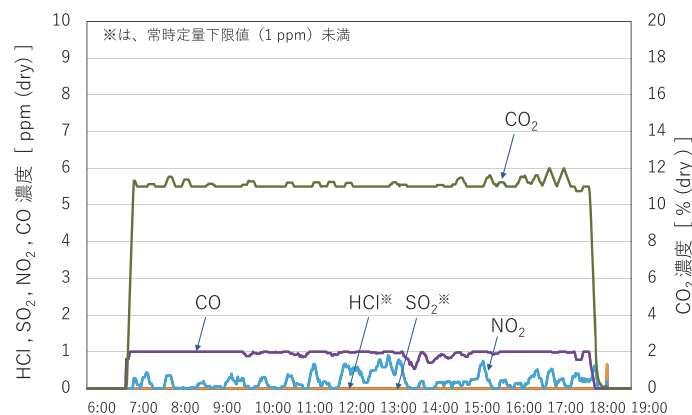


図5 浄化ガス中の各成分トレンド

[†] 特定の明確な基準や定義が存在しないものの, 農業従事者が地域の慣習や法律に基づいて農薬や肥料や CO₂管理濃度などを適切に活用し, 一般的におこなわれている農業の方法。

表1 手分析法による浄化ガスの分析値

ガス成分	単位	浄化ガス分析値
アンモニア	ppm	<0.7
エチレン	ppm	<0.005
水銀	μg/m ³	<0.06
ダイオキシン類	pg-TEQ/m ³	<0.001

あることを確認した。また、農作物の生育阻害因子として知られるエチレンについては検出下限値未満に抑えられていることを確認した。アンモニアについても同様に検出下限値未満であり、浄化装置における脱硝工程でのNO_x制御が適切におこなわれ、未反応アンモニアのリークがないことが示された。

これに加え、未知成分を含む複合的な農作物への影響を評価する観点から、浄化ガスの変異原性の有無について Ames 試験[†]を実施した。焼却燃焼ガスの変異原性試験に関する先行研究³⁾を参考に、浄化ガス中の成分を幅広く捕集するため、溶解特性の異なる3種の溶媒（水、アセトン、DMSO）を用いたが、いずれの溶媒においても変異原性は認められなかった。

さらに、浄化ガスを実際に施用した環境条件を評価するため、供給先である園芸施設内の大気環境を分析した。表2にその結果を示す。浄化ガスを施用した実験区と液化炭酸ガスを施用した対照区を比較したところ、両区の大気環境に有意な差は認められず、浄化ガス施用下においても園芸施設内環境が一

般的な大気と同等であることを確認した。また、実際の農園の大気環境や東京都内の大気中濃度の年平均値とも同等であることが確認できた。

以上より、一般廃棄物処理施設の燃焼ガスにおいても、本浄化技術により各成分を十分に低い濃度に低減できることが実証された。加えて、浄化ガスを施用した園芸施設内の環境が一般大気と同等であることから、農業利用への安全性も確認された。

4.2 農作物（いちご）の育成試験結果

本試験における各栽培区でのいちごの可販果（8g以上の果実）の収穫結果を表3に示す。実験区は対照区と比較して積算収量で18%、可販果の果実数で13%上回る結果であった。この収量増加は、CO₂施用による光合成促進効果に起因すると考えられる。実験区ではCO₂管理濃度を対照区よりも高く維持したことで光合成が活発化し、同化産物^{††}の生成量が増加したことで花芽分化や着果の促進に寄与し、可販果の果実数の増加につながったと推察される。また、光合成の活発化により、果実数が増加しても各果実への同化産物の供給が維持されたため、可販果の平均重量も同等以上の水準を保ったと考えられる。

収穫したいちごの外観品質および糖度についても対照区と同等以上であり、浄化ガスの施用が品質面に影響を与えないことを確認した。また、栽培期間

表2 園芸施設内の大気環境分析結果

CO ₂ 施用方法	単位	浄化方式	慣行栽培方式	慣行栽培方式	東京都内 大気中年平均値 ^{※2}
		(本実証「実験区」)	(本実証「対照区」)	(実農園 ^{※1})	
		浄化ガス	液化炭酸ガス	燃焼ガス	
CO	ppm	<0.1	0.1	<0.1	
HCl	ppm	0.001	0.009	0.019	
SO ₂	ppm	<0.001	<0.001	<0.001	0.001
NO	ppm	0.016	0.008	0.003	
NO ₂	ppm	0.015	0.013	0.010	0.012
アンモニア	ppm	0.010	0.010	0.010	
エチレン	ppb	<5	<5	<5	
水銀	mg/m ³	<0.0001	<0.0001	<0.0001	
ダイオキシン類	pg-TEQ/m ³	<0.01	<0.01	<0.01	0.013~0.021

※1：イオンアグリ創造(株)千葉柏農場イチゴハウス

※2：東京環境局報告値(2022)より

[†] 細菌を用いて、化学物質が遺伝子を損傷する性質（変異原性）の有無を調べる試験。変異原性と発がん性には高い相関があることから、食品添加物や医薬品などの発がん性スクリーニングに広く用いられている。陰性対照（溶媒のみの添加）との比較により、被験物質の変異原性を評価する。

^{††} 植物が光合成により二酸化炭素（CO₂）と水から合成する有機物の総称。主成分はグルコース（ブドウ糖）で、これがデンプンやスクロース（ショ糖）に変換され、植物体の成長、果実の肥大・糖度向上、根の発達などに利用される。

を通じて病害虫の発生も認められなかった。

さらに、各栽培区で収穫したいちごを用いて、ラットによる経口毒性試験等の動物実験およびいちごに含まれる微量成分分析を実施した結果、両栽培区とも有害な影響は認められず、成分分析結果も同等であった。これらの結果から、浄化ガスを施用して栽培したいちごは、一般的に流通するいちごと同等の品質であることが示された。

表3 各試験区でのいちご収穫結果

	単位	実験区	対照区
CO ₂ 管理濃度	ppm	1,000~1,500 (常時制御)	800~1,000 (間欠制御)
積算収量	kg	59.2	50.1
可販果の平均重量 ^{*1}	g	18.1	17.3
可販果実数	個数	3,278	2,892

※1：収穫した果実1個当たりの平均重量

5. 今後の展望

従来の施設園芸における慣行栽培では、CO₂施用に化石資源由来のCO₂を使用することが一般的である。これに対して、本浄化技術では廃棄物由来のカーボンニュートラルなCO₂の利用を可能とする。試算によれば、本浄化装置を利用したトリジェネレーションへの転換により、いちご園芸施設1haあたり、約300t-CO₂/年（電力・熱の供給含む）の脱炭素化が見込まれる。また、ハウス栽培される農作物の多くは、農作物ごとの固有なCO₂濃度の適用範囲内において、CO₂濃度が高いほど光合成が促進される傾向がある。そのため、適切なCO₂管理のもとで高濃度施用をほかの農作物に適用した場合、本実証と同様に収量の増加が期待でき、農業経営の収益向上に寄与する可能性がある。

当社では、本技術の一般廃棄物処理施設への適用による事業化に向け、2027年度の実現を目標に取り組んでいる。2025年10月から2026年4月にかけては、同センター内に併設されたバイオガス化施設[†]（乾式高温メタン発酵方式、処理能力50トン/日）のバイオガスエンジン発電機から発生する燃焼ガスの浄化ガスを園芸施設へ供給する実証試験を実施している。今後は、本稿で報告した一般廃棄物処理施設由来の燃焼ガスに加え、バイオガスエンジン燃焼ガスへの本技術の適用も含めた包括的な展開を進め、一般廃棄物処理施設でのCO₂農業利用事業の早期実現を目指す。本技術の普及を通じて、地域循環共生圏の創出や持続可能なまちづくりに貢献するとともに、2050年カーボンニュートラル社会の実現に貢献していく所存である。

謝辞

本実証試験を実施するにあたり、多大なるご協力をいただきました町田市殿および、農作物育成についてご指導いただきましたイオンアグリ創造株式会社殿に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) タクマ技報編集事務局：バイオマス発電施設CO₂供給設備、タクマ技報、Vol. 29, No. 1, pp. 43-45 (2021)
- 2) 内山慎也, 藤川宗治, 谷口哲也：燃焼ガス浄化設備によるバイオマス燃焼ガス中CO₂の有効利用、タクマ技報、Vol. 30, No. 2, pp. 58-63 (2022)
- 3) Yoshino, H., Urano, K.: Mutagenicity of exhaust gas from incineration plants of municipal waste, Science of the Total Environment, Vol. 162, pp. 23-30 (1995)

[†] 生ごみなどを発酵させて生成したバイオガスを燃料にガスエンジンで発電を行う施設

報 告

省エネルギー型 CO₂分離回収技術の実証 (第2報)

Demonstration of Energy-Saving Carbon Dioxide Capture and Recovery Technology (Second Report)



万ノ友哉* 美濃谷 広*
Tomoya MANNO Hiroshi MINOYA
巽 圭司* 鎌田 全一*
Keiji TATSUMI Masakazu KAMADA

【要旨】 化学吸収法による CO₂分離回収は、ガス量が多く CO₂濃度が低い燃焼排ガスからの CO₂分離回収に適しているが、CO₂再生工程で大量の熱エネルギーを消費することが課題である。当社では、省エネルギー型 CO₂分離回収技術の実用化に向けて、2024 年から低熱量で CO₂の分離が可能な非水系の新規吸収液を用いた実証試験を開始し、実用化に必要なデータ取得を進めてきた。本稿では、バイオマス発電施設、一般廃棄物処理施設において二つの吸収液耐久性評価試験をおこない、新規吸収液がこういった施設での CO₂分離回収技術に適用可能であることを確認した。

キーワード：CO₂分離回収，カーボンニュートラル，化学吸収法，非水系吸収液，オンサイト実証

Abstract

While carbon dioxide capture and recovery using the chemical absorption method is suitable for treating combustion exhaust gas with large gas volumes and low CO₂ concentrations, there is the issue of a large amount of thermal energy being required for the CO₂ regeneration process. Aiming to achieve practical application of this energy-saving carbon dioxide capture and recovery technology, our company started a demonstration test in 2024 using a new non-aqueous absorption liquid capable of capturing CO₂ with low energy consumption, and has been collecting data necessary for practical application. This article describes two durability evaluation tests conducted on the absorption liquid at a biomass power generation facility and a municipal solid waste treatment facility. The results confirmed that the new absorption liquid is suitable for carbon dioxide capture and recovery in these facilities.

Keywords: carbon dioxide capture and recovery, carbon neutral, chemical absorption method, non-aqueous absorption liquid, on-site demonstration test

* 装置技術部
Mechanical Design & Engineering Dept.

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラルの実現のためには、燃焼排ガスなどのCO₂排出源からCO₂を分離回収し、貯蔵・固定化することが必要不可欠であると言われている。当社が主力とするバイオマス発電施設や一般廃棄物処理施設などの燃焼排ガスに含まれる低濃度のCO₂を選択的に分離し、高純度で回収する方法として「化学吸収法」が適している。しかしながら、吸収液再生工程にて大量の熱エネルギーを消費することからプラント全体での省エネルギー化が課題とされている。

当社では、化学吸収法におけるエネルギー消費量削減を目指して、国立研究開発法人産業技術総合研究所（AIST）と共同で、新規の非水系吸収液（以下、新規吸収液）を開発した。新規吸収液の特長を図1に示す。この新規吸収液の特性を活かしたCO₂分離回収プロセスの実用化に向けて、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業における技術調査や、当社実験センターで吸収液評価試験をおこなうなどの取り組みを進めてきた^{1,2)}。また、稼働中のバイオマス発電施設の燃焼排ガスを用いたオンサイトでの実証試験を2024年7月から開始した³⁾。この実証試験では、プロセス最適化に必要なデータの取得と吸収液の耐久性評価を目的として、前報のとおり、さまざまな運転条件での試験から得られたデータにより、本シス

テムの実用化に向けてスケールアップした規模における吸収装置の寸法や吸収液の循環量等の最適化を図っている。

本稿では、プロセス実用化に向けて実施した以下の二つの試験結果について報告する。

- (1) バイオマス発電施設からの燃焼排ガスを用いた実運転条件下での新規吸収液の耐久性評価（第1報の続報）
- (2) 一般廃棄物処理施設からの燃焼排ガスに含まれる酸性成分や重金属類などが新規吸収液のCO₂吸収性能に及ぼす影響を評価

2. バイオマス燃焼排ガスを用いたCO₂分離回収実証試験

2.1 試験内容

当社が2015年に納入し、現在稼働中である「真庭バイオマス発電所」（所在：岡山県真庭市）の敷地内にCO₂分離回収試験装置を設置し、バイオマス発電施設からの燃焼排ガスを用いたオンサイトでの実証試験を2024年7月から開始した。CO₂分離回収試験装置のフローを図2に示す。本試験では、実用化に向けたプロセス最適化に必要なデータの取得と実運転条件下における吸収液の耐久性評価を目的としている。

前報より、これまでの試験で以下の点が確認されている。

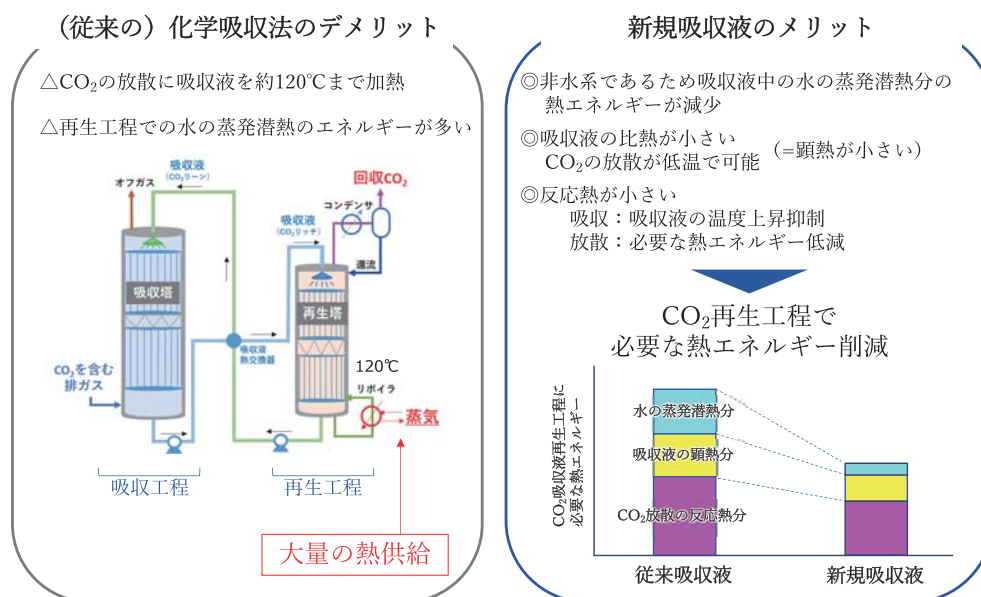


図1 新規吸収液の特長

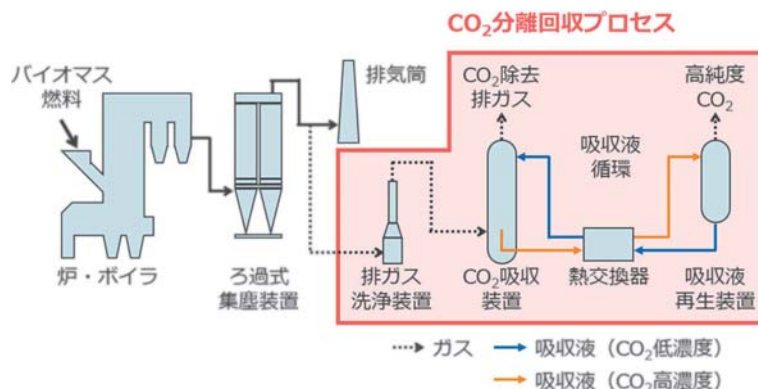


図2 CO₂分離回収試験装置フロー

- ・新規吸収液は、吸収液の再生装置の温度を従来の吸収液（モノエタノールアミン水溶液）より低く（水の沸点以下）しても安定してCO₂を放散し、かつ連続循環運転が可能である。
- ・排ガスからのCO₂吸収量は吸収装置入口のガス中CO₂濃度に応じて変動するが、バイオマス発電施設からの排ガスにおいて、本設備での目標能力である1日当たり最大500 kg以上のCO₂回収能力を有する。
- ・入口ガス中CO₂濃度が10%以上であれば、本システムにおいてCO₂回収率90%以上を達成できる。
- ・累積約1,000時間の運転をおこない、吸収装置出口のガス中CO₂濃度に大きな変化はなく、吸収液のCO₂吸収性能は安定している。

これらの成果により、スケールアップした規模における吸収装置の寸法や吸収液の循環量等の最適化を図ることが可能となっている。

本稿では、吸収液の耐久性評価をおこなうため、

前報より継続して、吸収装置へ供給するガス量や吸収液量などを最適条件にて固定して運転をおこない、吸収液のCO₂吸収性能の変化を確認する長期試験を実施した。

2.2 試験結果

運転条件固定下における吸収装置の入口および出口ガス中CO₂濃度およびCO₂吸収量のトレンドを図3、吸収装置の入口ガス中CO₂濃度およびCO₂吸収量の相関を図4にそれぞれ示す。なお、図3のデータブランク期間は、装置設計に資するデータ収集を実施しており、同一運転条件下ではないため除外した。図3に示すとおり、吸収装置の入口ガス中CO₂濃度はバイオマス発電施設の運転状況に応じて変動があり、それにともないCO₂吸収量にも多少変動がみられた。累積4,000時間（実機半年間に相当）以上の長期運転の結果、吸収装置入口ガス中CO₂濃度に対するCO₂吸収量はわずかながら低下しているが想定範囲内であり、図4に示すとおり、

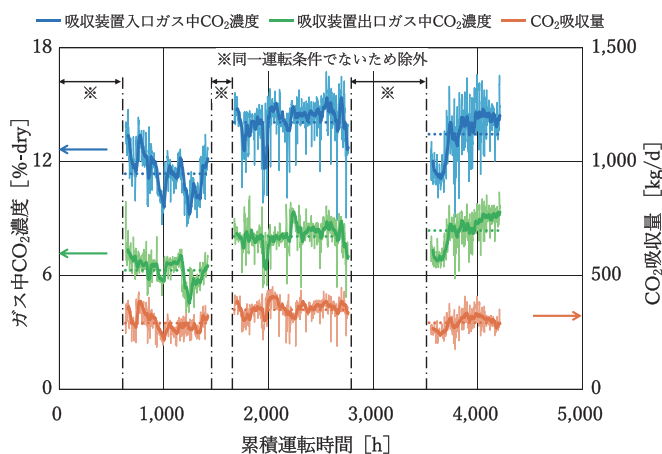


図3 吸収装置ガス中CO₂濃度およびCO₂吸収量のトレンド（運転条件固定下）

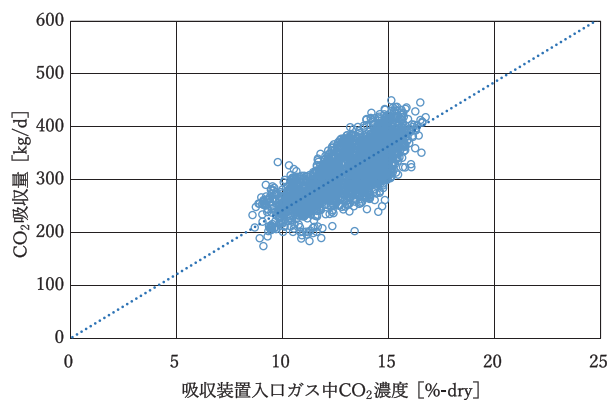


図4 吸収装置入口ガス中CO₂濃度およびCO₂吸収量の相関（運転条件固定下）

吸収装置入口ガス中 CO₂濃度と CO₂吸収量に相関がみられることから、新規吸収液が長期運転下でも安定した CO₂吸収性能を示すことを確認した。

一方、新規吸収液について、吸収装置からの放散ロスおよびアミンの一部が分解・変性する課題も確認されている。放散ロスに関しては、吸収装置出口に回収装置を設置することで大気への排出は抑制できており、今後、回収装置から吸収液成分を系内に返送することを検討している。アミンの分解・変性に関しては、メカニズムの解明およびその抑制方法を検討中である。

3. 一般廃棄物処理燃焼排ガスをを用いた吸収液曝露試験

3.1 試験内容

一般廃棄物処理施設の燃焼排ガスに含まれる酸性ガスや重金属類など微量成分の新規吸収液への蓄積挙動と、それらが CO₂吸収性能に及ぼす影響の評価を目的として、大阪広域環境施設組合・西淀工場内にて新規吸収液の排ガス曝露試験を実施した。本試験は、CO₂分離回収設備で想定される運転条件と比べて、吸収液量に対する通ガス量を大きく設定し、排ガス成分との接触頻度を高めた加速試験としておこなった。

一般廃棄物処理施設からの燃焼排ガスによる曝露

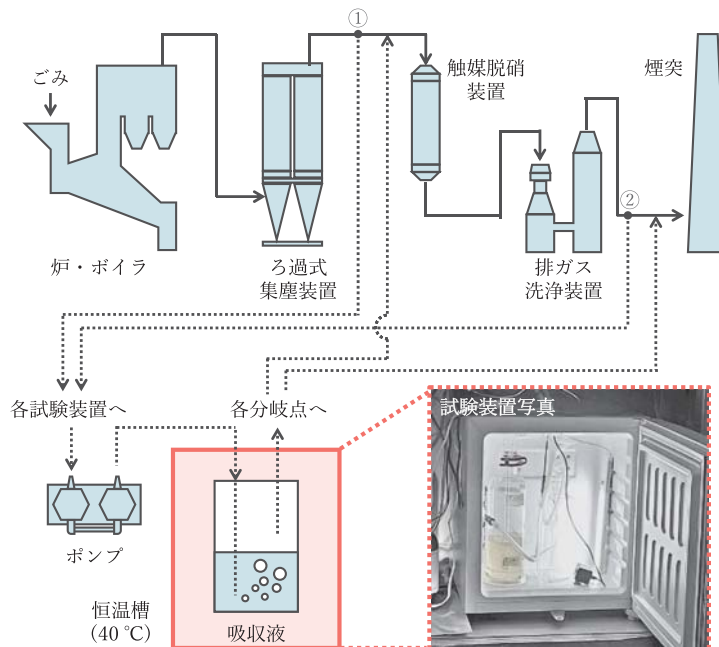


図5 一般廃棄物処理施設からの燃焼排ガス曝露試験のフロー

表1 曝露試験条件

項目	条件①	条件②
排ガス引抜箇所	ろ過式集塵装置出口 (図5の①)	排ガス洗浄装置出口 (図5の②)
排ガス前処理	乾式処理	乾式処理+湿式処理
曝露ガス条件* (吸収液入口)	温度 : 160 → 40℃ HCl : <0.4 ppm-dry SOx : 1.2 ppm-dry NOx : 29 ppm-dry	温度 : 40℃ HCl : <0.4 ppm-dry SOx : <0.3 ppm-dry NOx : 15 ppm-dry
曝露時間	2,160時間 (90日)	4,320時間 (180日)

* 条件①は、排ガスを試験装置入口で40℃ (実機でのCO₂吸収装置を模擬)まで冷却したことで発生するドレン水に排ガス中の酸性ガスが溶解しており、当初想定より酸性ガス濃度が低濃度であったが、実機においても同様に排ガスを40℃まで冷却しドレン水が発生すると想定されるため、実機の条件を模擬できていると判断した。

試験のフローを図5、試験条件を表1に示す。燃焼排ガスは、ろ過式集塵装置と触媒脱硝装置の間(図5の①)、および、排ガス洗浄装置と煙突の間(図5の②)からそれぞれ分岐し、試験装置へ供給した。これにより、条件①(乾式処理のみ実施した排ガス)と、条件②(乾式処理に加え湿式処理を実施した排ガス)で、吸収液に及ぼす影響を比較評価した。なお、条件①は、条件②と比較してガス中微量成分の濃度が高いため、条件②の加速試験とするとともに、乾式処理の適用可否検討の一助となる。

各試験装置は、実機でのCO₂吸収装置条件を模擬するため、所定量の吸収液を充填したガラス製吸収瓶を恒温槽内(40℃)に設置し、排ガスを通気した。試験期間中は、定期的に吸収液のサンプリングをおこない、吸収液成分の組成および酸性ガスや重金属のイオン濃度を分析した。

3.2 試験結果

条件①および②の吸収液中への酸性ガス成分(硫酸イオン、硝酸イオン、および塩酸イオン)の蓄積挙動を図6に示す。条件①は、2,160時間(90日間)排ガス曝露をおこない、主に硫酸イオンと硝酸イオンの蓄積がみられた。条件②は、4,320時間(180日間)排ガス曝露をおこない、主に硝酸イオンの蓄積がみられた。

これらの酸性成分の蓄積は、吸収液中のアミン成分が排ガス中の酸性成分との中和反応により、陰イオン1つにつきアミン1つが消費され塩を形成したことで発生したものであり、CO₂吸収性能の低下に繋がると考えられる。

曝露2,160時間ベースにおいて、湿式処理は乾式処理と比べて排ガス中の硫酸成分が低減されており、

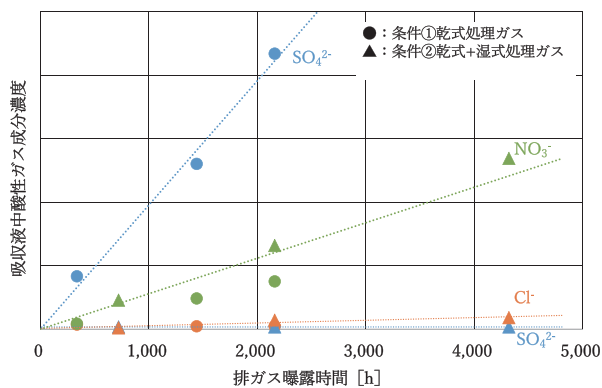


図6 吸収液中への酸性ガス成分の蓄積挙動

吸収液中への酸性ガスの総蓄積量から算出したアミン消費量は7分の1程度まで抑制されることを確認した。

条件②では、吸収液中に蓄積した酸性ガス成分はほとんどが硝酸イオンであり、曝露4,320時間での蓄積量は、吸収液中のアミン量に対し0.2 wt%程度と微量であった。本試験におけるガス負荷(=通ガス量/装置合計吸収液量)は実機の約4倍であり、排ガス曝露時間は実機での約2年間に相当するため、CO₂吸収性能への酸性ガス成分の影響はほとんどないと考えられる。なお、曝露後の吸収液のCO₂吸収性能については別途評価を実施中である。

また、吸収液中の重金属類の含有量は、条件①および②で排ガス処理方式による有意な差はみられず、いずれも1 ppm未満と極微量の蓄積であった。吸収液中のアミンに及ぼす影響は引き続き調査をおこなう予定である。

以上より、一般廃棄物処理施設からの燃焼排ガスを湿式処理することで、新規吸収液中のアミン成分に対する排ガス中の微量成分の影響は非常に小さいことを確認した。一方、乾式処理のみでは酸性ガスとの反応によるアミン消費量の増加が想定されるが、吸収性能に及ぼす影響については引き続き検討していく。

4. おわりに

新規吸収液を用いたCO₂分離回収技術の実用化に向けて、バイオマス発電施設および一般廃棄物処理施設からの燃焼排ガスを用いた吸収液の耐久性評価試験を実施した。

バイオマス発電施設における試験では、実運転条件下にて累積4,000時間以上の長期運転をおこなっても安定したCO₂吸収性能を示し、実機への適用可能性が高まった。

一般廃棄物処理施設からの燃焼排ガスにおいても、湿式処理することで吸収液中のアミン成分への影響はほとんどないレベルであり、CO₂分離回収技術として適用可能性が十分高いことを確認した。

本稿および前報で得られた結果を基に、一般廃棄物処理施設の燃焼排ガスを対象とし、泉北クリーンセンター(大阪府和泉市)内に6 t-CO₂/日を分離回収可能な実証設備を設置し、2027年度から実証試

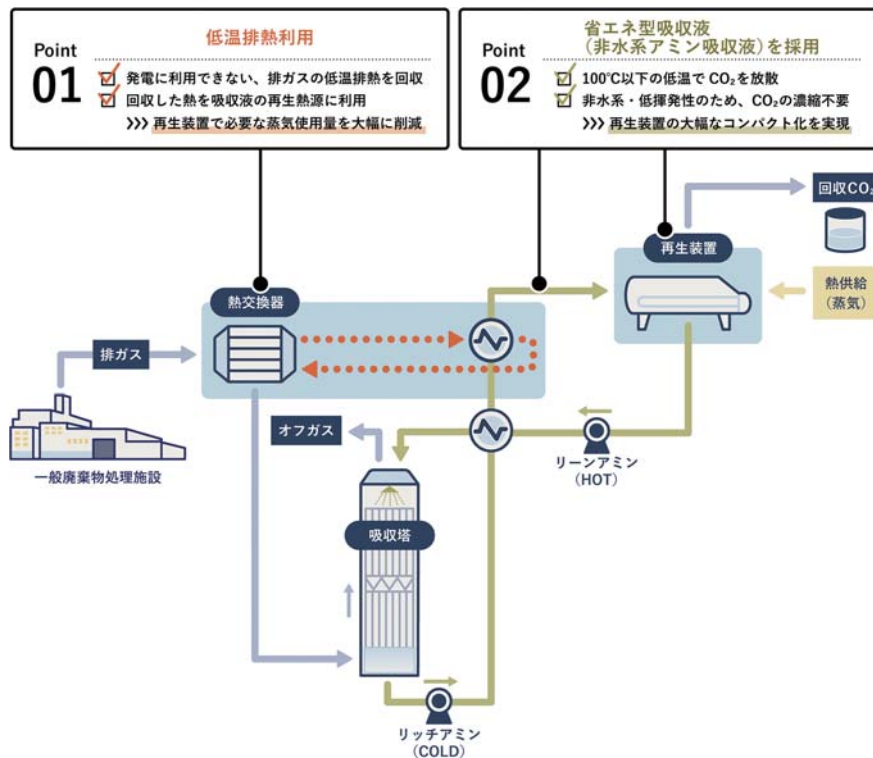


図7 一般廃棄物処理施設でのCO₂分離回収実証試験設備の概略フロー

験をおこなう予定である（概略フローを図7に示す）。本設備では、低温で再生できる新規吸収液の特長を活かし、燃焼排ガスからの熱回収をおこない、再生装置の熱源に使用することで、CO₂分離回収プロセスのさらなる省エネルギー化を目指している。なお、当事業は、環境省公募の「令和7年度地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業」に「省エネルギー型CO₂分離回収技術開発実証」として採択されており、泉北環境整備施設組合および株式会社ユニバーサルエネルギー研究所と共同で2025年度から3年間実施する。

当社は、カーボンニュートラル技術の実装による脱炭素社会の早期実現に貢献できるよう、当事業を通じてCO₂分離回収技術の実用化に向けた取り組みをさらに進める所存である。

謝辞

本試験の実施にあたりご協力頂いております関係各位に深く感謝申し上げます。

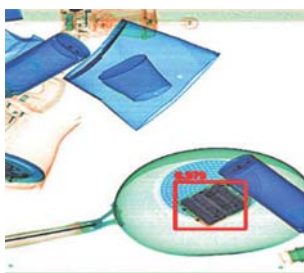
参考文献

- 1) 藤川宗治, 釦持恭平: 省エネルギー型CO₂分離回収技術の開発, タクマ技報, Vol. 31, No. 2, pp. 43-47 (2023)
- 2) 藤川宗治, 釦持恭平, 佐藤和弘, 増田孝弘: 省エネルギー型CO₂分離回収技術の開発 (第2報), タクマ技報, Vol. 32, No. 1, pp. 22-29 (2024)
- 3) 美濃谷 広, 万ノ友哉, 巽 圭司, 鎌田全一: 省エネルギー型CO₂分離回収技術の実証, タクマ技報, Vol. 33, No. 1, pp. 23-27 (2025)

報 告

X線を用いた不燃ごみ中のリチウムイオン電池 (LiB) 検出技術の開発

Development of a Technology to Detect Lithium-ion Batteries (LiBs) in Non-combustible Waste Using X-rays



角 崎 青 周* 的 崎 克 規*
 Seishu TSUNOZAKI Katsunori MATOZAKI
 河 村 洋 佑* 巽 圭 司*
 Yosuke KAWAMURA Keiji TATSUMI
 鎌 田 全 一*
 Masakazu KAMADA

【要 旨】 リサイクル施設において、リチウムイオン電池の発火による火災が増加している。リチウムイオン電池による火災事故は、施設や設備の焼損によるごみ収集の停止や多額の復旧費用の発生など、市民生活に多大な影響を及ぼしており、早急な対策が求められている。

当社では 2023 年度より産業技術総合研究所と、X 線撮影と画像認識 AI を組み合わせた LiB 検出 AI を共同開発しており、実機を想定した実証試験を実施した結果、AI が実用化レベルの性能であることを確認した。今後は、開発した LiB 検出 AI に加えて適切な通知方法を組み合わせた LiB 検出システム全体としての最適化に取り組む。

キーワード：リサイクル施設、リチウムイオン電池、火災、X 線撮影、画像認識 AI

Abstract

An increasing number of fires caused by the ignition of lithium-ion batteries (LiBs) are occurring in recycling facilities. Such fires have a significant impact on public life, including the suspension of waste collection due to damage to recycling facilities or equipment, as well as substantial restoration costs. Urgent countermeasures are therefore required.

Since FY2023, our company and the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) have jointly developed a LiB detection AI (Lithium-ion battery detection AI) that combines X-ray imaging and image recognition AI. A demonstration test simulating actual operating conditions confirmed that the AI's performance is now at a level suitable for practical application. In the future, we will work on optimizing the entire LiB detection system (Lithium-ion battery detection system) by combining the developed LiB detection AI (Lithium-ion battery detection AI) with an appropriate method of alerting operators when an LiB is detected.

Keywords: recycling facility, Lithium-ion Battery (LiB), fire, X-ray imaging, Image recognition AI

* 装置技術部
 Mechanical Design & Engineering Dept.

1. はじめに

近年、リサイクル施設において、リチウムイオン電池（以下、LiBと記す）の発火による火災事故が増加している。

LiBは小型で軽量、エネルギー効率が高く、経済性に優れていることから、近年さまざまな製品に組み込まれている¹⁾。市区町村は「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（廃掃法）に基づき、住民が排出したLiBの処理責任があるが、LiB製品の回収に取り組んでいる市区町村は約7割に留まっている²⁾。加えて、回収体制が整備されている市区町村においても、不燃ごみや可燃ごみにLiBが混入しており、全てのLiBを適切に回収することは困難な状況にある。

LiBは衝撃に弱く、リサイクル施設の処理工程において、破砕機で強い衝撃が加えられると圧壊して発火することが知られている。また、圧壊後すぐに発火するだけでなく、後段処理工程にて時間差で発火することもある。リサイクル施設において、発火を検知するシステムは存在するが、発火後に検知できたとしても火災のリスクをとまなうため、発火前にLiBを検出し、除去することが効果的である。

そこで、当社では2023年度より、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研と記す）と共同研究で、不燃ごみのX線画像を撮影し、画像認識AIでLiBを検出する「LiB検出AI」を開発し、AIおよびシステム全体の高性能化に取り組んでいる。

本稿では、兵庫県のクリーンパーク北但にて実際の不燃ごみを用いたLiB検出AIの実証試験について報告する。

2. LiB検出システム概要

2.1 システムフロー

図1にリサイクル施設における従来の不燃ごみ処理フローの一例と、当社の提案する新たな不燃ごみ処理フローを示す。従来のフローでは、手選別コンベヤや土間選別でLiBを取り除いた不燃ごみが破砕機に投入されるが、LiBがほかの不燃ごみに隠れて目視できない場合や、LiBが内蔵された製品であることを作業者が判別できない場合に取りこぼしとなり、破砕機へ投入され、圧壊・発火する。

そこで当社は、不燃ごみが破砕機へ投入される前にLiBを除去するために、不燃物供給ラインでX線装置によって撮影した不燃ごみのX線画像からLiB検出AIによりLiBを自動検出し、手選別で除去するシステムを開発した。

2.2 LiB検出AI

LiB検出には、産総研が開発したLiB検出AI「Xeek[®]（クロシーク）」³⁾の技術をベースに、産総研との共同開発で、当社が使用するX線装置専用にチューニングしたAIを用いている。Xeek[®]は、複数のAIを組み合わせた多段階の処理アルゴリズム³⁾と、教師データ作製の半自動化（バーチャル教師データを用いた学習）を特徴とする。

一般に、画像認識AIは事前に「教師データ」による学習が必要であり、AIに学習させる教師データはある一定量以上（数千～数万）必要となることが知られている。教師データの作製には、実際に使用する環境と同等の環境で撮影した画像に対し、「アノテーション」と呼ばれる検出対象物を矩形で囲みラベル付けする作業が必要となる。そのため、教師データの作製にはかなりの労力と時間を要することになる。これに対し、産総研で開発された技術

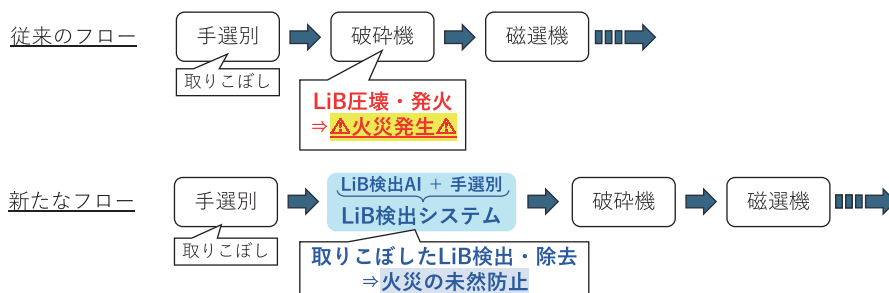


図1 従来のフローと新たなフロー

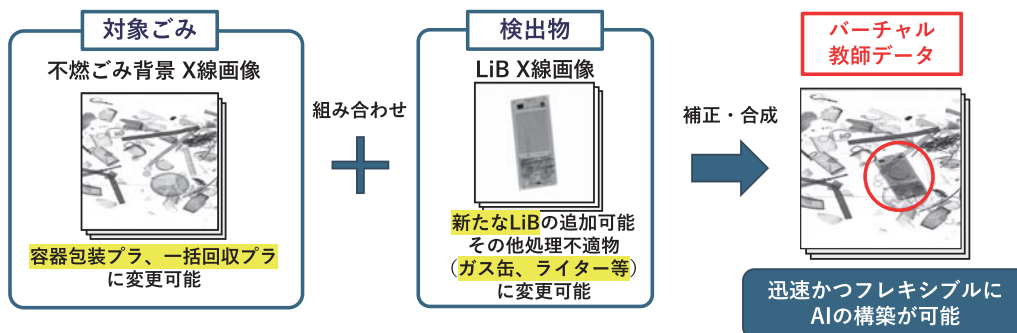


図2 バーチャル教師データの作製

「バーチャル教師データ」を利用し効率的に教師データを作製することで、大幅な省力化による開発期間の短縮を図った。

バーチャル教師データ作製のイメージを図2に示す。バーチャル教師データは、処理対象である「不燃ごみ」のX線画像と、検出対象である「LiB」単体のX線画像を個別に撮影し、X線装置の特性やX線透過量の計算値に基づいて各画像を補正後、合成して作製される。これにより、従来は人の手でおこなわれていたアノテーション作業が自動でおこなわれる。このように、教師データ作製を一部自動化できるため、作業にかかる労力と時間を大幅に削減することができる。

また、本技術では、新たなLiB製品を追加する場合、「LiB」単体のX線画像を追加するだけで迅速にAIをアップデートできる。さらに、処理対象を容器包装プラや一括回収プラ等に変更することや、検出対象をガス缶やライター等の処理不適物に変更するなど、目的に応じてフレキシブルにAIを構築することも可能である。

2.3 X線装置

本システムに用いるX線装置は、空港の手荷物検査等に用いられるような一般的に流通している市

販品をベースとして、リサイクル設備に合わせて、コンベヤベルトの耐久性の向上やコンベヤのサイズ変更などのカスタマイズを想定している。本装置は、ベースとなるX線装置が市販品のため、安価であることに加え、漏洩放射線量は $1\mu\text{Sv/h}$ 以下であることから管理区域の設定や取り扱いに関する資格が不要で、誰でも取り扱いやすいものとなっている。

3. LiB検出AI実証試験

3.1 試験装置

本実証試験では、作業員が手選別作業で取りこぼしたLiBを検出・除去することを想定した。

実証試験装置の概略を図3に示す。実証試験装置はX線装置本体、AI搭載PC、通知モニタ、手選別コンベヤの4点で構成される。

事前に破袋した不燃ごみをX線装置に投入し、AIによりLiBが検出されると、通知モニタ上に表示したX線画像にLiBの検出位置が示される(図4、図5)。作業員はコンベヤを止めずに通知モニタ上のLiBの検出位置を参考にLiBを除去する。

なお、本試験はX線装置の標準仕様のコンベヤから手選別コンベヤへ乗り継ぐ形で実施したが、リサイクル施設へ実機導入する際は、作業員が指示箇

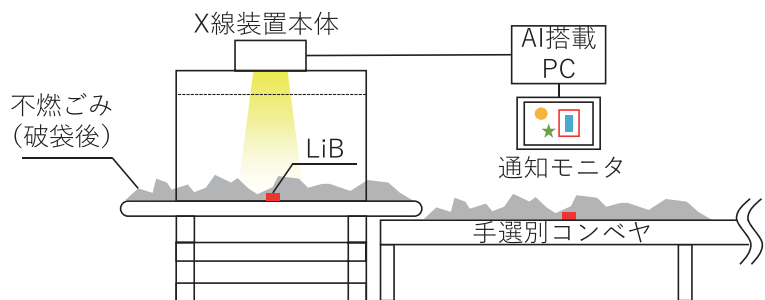


図3 実証試験装置概略図

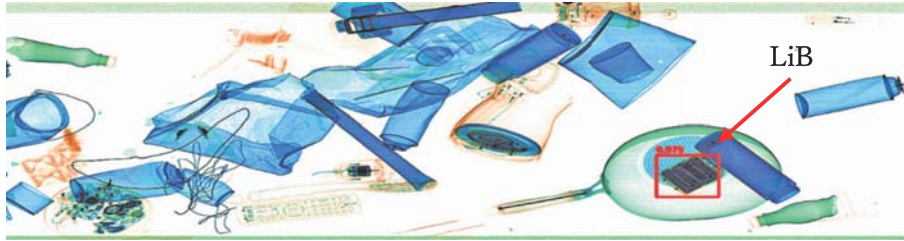


図4 LiB 検出時の X 線画像



図5 LiB 除去作業の様子

所を認識しやすくするために、X線装置のコンベヤを延長して乗り継ぎがなく、ごみ位置が変わらないこととしている。

3.2 試験方法

本実証試験は、実際にリサイクル施設に搬入された不燃ごみおよびLiBを用いておこなった。

不燃ごみ処理量は5.4 t/h (=27 t/5h ※リサイクル施設の1日の処理量)に設定し、同等の処理量となるようにごみ投入量を調節した。また、破袋後にLiBを一旦全量除去した不燃ごみを連続投入しながらLiBを一定間隔で混入し、コンベヤ速度は連続運転でLiBの人手による除去が可能な速度として12 m/minとした。

性能検証は、LiB含有製品（モバイルバッテリー、加熱式たばこ等）30品目、LiB投入個数1,392個、投入ごみ量7.08 t（総量）の条件において実施した。

AIの検出性能評価には、一般的な物体検出AIの評価で用いられるRecall（再現率）とPrecision（適合率）を用いた。表1に混同行列（confusion matrix）を示す。不燃ごみ中にLiBが実際に含まれており、AIがLiBの存在を予測（検出）したときはTrue Positive（TP）、AIがLiBの存在を予測できなかったときはFalse Negative（FN）としてその回数をカウントし、また、不燃ごみ中に実際には

表1 混同行列

		予測	
		陽性 (Positive)	陰性 (Negative)
実際	陽性 (Positive)	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	陰性 (Negative)	False Positive (FP)	True Negative (TN)

LiBが含まれていないが、AIがLiBの存在を予測（誤検出）したときはFalse Positive（FP）としてカウントする。なお、不燃ごみ中にLiBがなく、AIもLiBの存在を予測していないTrue Negative（TN）については、評価に使用していない。

RecallとPrecisionは、一般的に下記の式で算出される。

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}}$$

Recallは0から1で示され、取りこぼしの少なさを表す指標であり、いわゆる検出率である（1=検出率100%）。Precisionは0から1で示され、誤検出の少なさを表す指標である（1=誤検出ゼロ）。

本試験では、1つのLiBがX線装置の検査範囲を通過する間に、AIによるLiBの有無判定が複数回おこなわれる。そのため、AIにより正しく検出できた回数（正解回数）は検査個数の総合計よりも多くなる。

そこで、1つのLiBに対する複数回の判定で1回でも正しく検出された場合、検出個数としてカウントし、各品目の検査個数と検出個数を基に、各品目のRecallを算出した。また、Precisionについては全品目の判定回数と正解回数を基に算出した。本試験での各品目のRecall、全品目のPrecisionの算出

式を下記に示す。

$$\text{各品目のRecall} = \frac{\text{各品目の検出回数}}{\text{各品目の検査回数}}$$

$$\text{全品目のPrecision} = \frac{\text{全品目の正解回数}}{\text{全品目の判定回数}}$$

【Recall・Precisionの算出例】

不燃ごみ中にLiBを計100個投入し、100個中90個を検出した場合、 $\text{Recall} = 90/100 = 0.90$ となる。そのときのAIの誤検出回数が10回の場合、 $\text{Precision} = 90/(90+10) = 0.90$ となる。

3.3 実証試験結果

各品目の再現率の結果一覧を表2に示す。

No.1~12の品目は環境省通知⁴⁾により「火災事故の主な原因である」とされた9品目（以下、環境

省通知品目と記す）であり、モバイルバッテリー、コードレス掃除機、電動式玩具については、独自に小品目に分類した。また、作業服用ファンは現場の不燃ごみへの混入数が少なく、検査サンプルを確保できなかったため評価できなかった。No.13~No.30の品目は、当社が独自に追加分類した品目である。なお、本試験においてはLiBについてのみを評価対象とし、手選別作業時に除去されるその他の品目（乾電池等）は評価対象外とした。

環境省通知品目は、スティック型コードレス掃除機を除く各品目で $\text{Recall} \geq 0.90$ と高い再現率であり、また、それ以外の品目についても、概ね高い再現率であった。

環境省通知品目の合計651個のLiBに対して、611個のLiBが検出できたことから、環境省通知品目の平均Recallは $611/651 = 0.94$ と算出される。ま

表2 各品目の再現率の結果一覧

No.	品目	小品目	検査回数	検出回数	Recall
1	モバイルバッテリー	円筒型	60	57	0.95
2		パウチ型	60	58	0.97
3	加熱式たばこ		60	57	0.95
4	コードレス掃除機	スティック型	60	49	0.82
5		お掃除ロボット	33	33	1.00
6	スマートフォン		60	56	0.93
7	電気かみそり		60	58	0.97
8	電動工具		60	58	0.97
9	ハンディファン		60	55	0.92
10	電動式玩具	携帯ゲーム機	60	56	0.93
11		コントローラ	60	56	0.93
12	作業服用ファン		18	18	1.00
13	ガラケー		60	58	0.97
14	電話子機		60	59	0.98
15	電動歯ブラシ		60	52	0.87
16	カメラ		57	53	0.93
17	タブレット端末		60	56	0.93
18	ワイヤレスイヤホン	ケース有	60	40	0.67
19		ケース無	24	7	0.29
20	バリカン		60	57	0.95
21	LiB	円筒型	60	57	0.95
22		パウチ型	60	49	0.82
23	ノートパソコン		13	12	0.92
24	DVDプレーヤー		15	14	0.93
25	ポータブルカーナビ		15	11	0.73
26	モバイルWi-Fiルーター		15	15	1.00
27	携帯音楽プレーヤー		15	9	0.60
28	スマートウォッチ		15	8	0.53
29	美顔器		15	15	1.00
30	その他雑多品		77	67	0.87
総合計			1,392	1,250	0.90

環境省
通知品目

当社独自
分類品目

た、当社独自に追加した品目を合わせた総合計 1,392 個の LiB に対して、1,250 個の LiB が検出できたことから、全品目の平均 Recall は $1,250/1,392=0.90$ と算出できる。

なお、AI の判定回数 3,398 回のうち、正解回数は 3,107 回であったことから、全品目の Precision は $3,107/3,398=0.91$ と算出される。

上記の検証では、現場搬入ごみから可能な限り回収した LiB から抽出したサンプルを使用したため、品目ごとの検査個数にばらつきがあり、実際の不燃ごみに混入している LiB の品目割合とは異なる。そのため、実際の不燃ごみを検査する場合は、各品目の不燃ごみへの実際の混入比率を考慮した評価をおこなう必要がある。

そこで、サンプリングした現場搬入ごみにおける各品目の実際の混入比率を調査した結果を図 6 に示す。図 6(a) は表 2 に示す全品目の混入比率を示し、

図 6(b) は環境省通知品目のみでの混入比率を示す。図中の番号は、表 2 の各品目の番号を示す。

図 6 の混入比率と表 2 の各品目再現率を用いて、実際の不燃ごみを想定した評価結果を表 3 に示す。

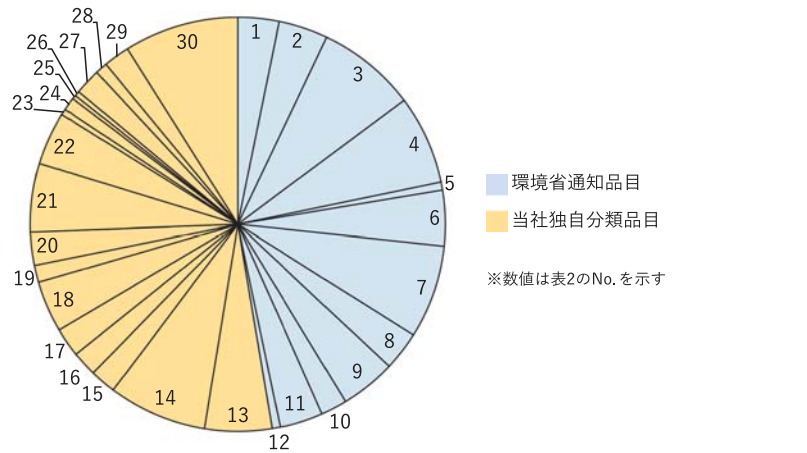
なお、表中の着色した列の混入比率を考慮した Recall (全品目)、Recall (環境省通知品目) はそれぞれ下記の式より算出した。

$$\text{Recall(全品目)} = \sum(\text{各品目の Recall} \times \text{各品目の混入比率})$$

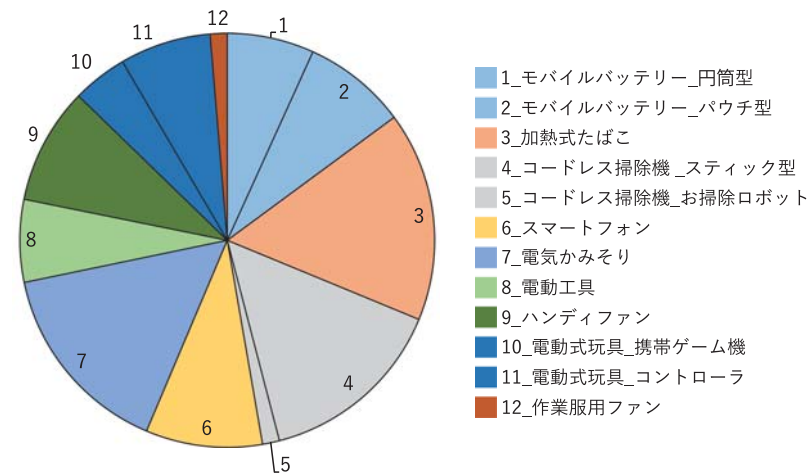
$$\text{Recall(環境省通知品目)} = \sum(\text{No. 1} \sim \text{No. 12 の各 Recall} \times \text{No. 1} \sim \text{No. 12 の各混入比率})$$

表 3 混入比率を考慮した評価結果

	平均	混入比率考慮
Recall (全品目)	0.90	0.90
Recall (環境省通知品目)	0.94	0.94



(a) 全品目に占める環境省通知品目と当社独自分類品目の混入比率



(b) 混入していた環境省通知品目の内訳

図 6 各品目の LiB 混入比率調査結果

混入比率を考慮した全品目の Recall は 0.90 となり、全品目の平均 Recall と同様に高い再現率であることを確認した。また、環境省通知品目に着目した Recall は 0.94 となり、除去の重要度が高いとされる品目においても非常に高い再現率であることを確認した。Precision は 0.91 となり、誤検出は一定程度発生するものの、検出漏れが少ないことから十分に実用化レベルであると判断した。

以上より、実際の不燃ごみを用い、実機と同等レベルの連続評価試験において、開発した AI は実機プラントにおいても有効な LiB 検出ツールとして導入可能なレベルであることが確認できた。

4. ま と め

リサイクル施設において、実際の不燃ごみを用いた LiB 検出 AI の実証試験をおこなった結果、開発した AI は実プラントにおける有効な LiB 検出ツールとしての機能を有しており、X 線画像と AI を組み合わせることで、不燃ごみに隠れた LiB の検出に有効であることを確認できた。

今後は、新たな LiB 内蔵製品への対応を含む AI の継続的なアップデートを続けるとともに、開発した LiB 検出 AI のさらなる機能向上と適切な手選別者への通知方法を組み合わせた LiB 検出システム全体としての最適化に取り組む。さらに、当社のプラントメーカーとしての知見を活かし、リサイクル

設備ごとに異なる要件に合わせた最適なシステムを構築し、ごみ処理施設の火災発生撲滅に向けて懸命に対応していく所存である。

謝 辞

本試験の実施にあたり、ご協力いただきましたクリーンパーク北但の関係者の皆様ならびに、共同研究先である産業技術総合研究所の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 環境省：リチウムイオン電池による火災防止のための啓発強化の取組について、p.3 (2025)
https://lithium.env.go.jp/recycle/waste/lithium_1/torikumi.pdf (2026年4月1日確認)
- 2) 総務省：リチウムイオン電池等の回収・再資源化に関する調査結果(概要)、p.1 (2025)
https://www.soumu.go.jp/main_content/001016974.pdf (2026年4月1日確認)
- 3) 産業技術総合研究所：作業員の経験に頼らずに廃棄物内のバッテリーの有無を自動で判別(2023)
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230522/pr20230522.html (2026年4月1日確認)
- 4) 環境省：市町村におけるリチウム蓄電池等の適正処理に関する方針と対策について(通知)(2025)
<https://www.env.go.jp/content/000307249.pdf> (2026年4月1日確認)

圧力波式ダスト除去装置 (VSPS) への都市ガスおよびプロパン (LP ガス) 利用拡大に向けた取り組み

Efforts to Expand the Use of City Gas and Propane (LP Gas) in Pressure Wave Boiler Dust Removal System (VSPS)



安藤 秀隆* 巽 圭司*
Hidetaka ANDOH Keiji TATSUMI

【要旨】当社が独自に開発・商品化した圧力波式ダスト除去装置 (VSPS) は、これまでメタンを燃料ガスとして運転されてきた。今回、メタンに比べて調達コストの面で優れる都市ガスおよびプロパン (LP ガス) が適用可能か確認するため、実験室における各燃料の運転特性の確認と実機でプロパン (LP ガス) を用いた長期連続運転を実施した。その結果、VSPS の燃料ガスとして都市ガスおよびプロパンが適用可能であることを確認した。

キーワード：ボイラー，ダスト除去技術，圧力波

Abstract

The Pressure Wave Boiler Dust Removal System (VSPS) developed and commercialized by our company has so far been operated using methane as fuel. In this study, we evaluated the operating characteristics of various fuels in the laboratory, and conducted a long-term continuous operation test with propane (LP gas) on an actual VSPS unit to determine whether city gas and propane can be used in VSPS since they are cheaper than methane to procure. The results confirmed that city gas and propane are suitable fuels for VSPS.

Keywords: boiler, dust removal technology, pressure wave

* 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ボイラーダスト除去装置について、従来の蒸気式スートブロワ（以下、MSBと記す）に代わる新たな装置として、装置から炉内に圧力波を放出しダストを除去する圧力波式ダスト除去装置が注目され導入が進んでいる。当社では、ボイラー毎に異なる付着範囲や性状を持つダストに対し、最適な威力の圧力波でダストを除去することが、ボイラーの運転および維持管理にとって重要と考え、威力の調整を可能とする独自の圧力波式ダスト除去装置（以下、VSPS：Variable Shock Pulse Soot blowerと記す）を開発し、その有効性を実証してきた¹⁻⁴⁾。現在は、都市ごみ焼却施設へのVSPS導入を推進し、運用を開始している。

従来、VSPSの燃料ガスには工業用メタンを利用してきた。しかし、工業用メタンはメタン濃度を高めるために追加的な製造工程をとるものガスであり、より調達性に優れる都市ガスとLPガス（以下、プロパンと記す）を適用できれば、用役費が低減・入手性が向上することから、これらの燃料ガスの利用拡大に向けて評価試験を実施した。

2. 装置の概要

図1に装置の全体フローおよび本体概略図を、図2に装置本体の外観を示す。燃料ガス（メタン）と酸素ガスの供給はボンベからおこない、バルブユニットを介して燃焼容器に供給し、瞬間的に着火・燃焼させることでガスをシールする膜を破り、圧力波を炉内に放出する仕組みになっている。ガスのシールに消耗品である膜を使用することを特徴とし



図2 装置本体の外観

ており、これにより圧力波放出部の構造をシンプルにでき、装置の維持管理を容易にしている。

3. 都市ガスとプロパン利用の効果

図3に、代表的な単価を用いて算出した1回の運転あたりのガス用役費（酸素の用役費含む）を示す。図より、都市ガスはメタンと比較して72%、プロパンは63%の大幅な用役費低減の効果があることがわかる。

表1に各燃料ガス（メタン、都市ガス、プロパン）

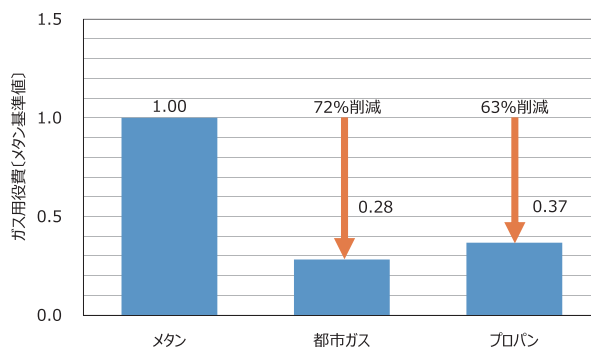


図3 ガス用役費の低減効果（酸素用役費含む）

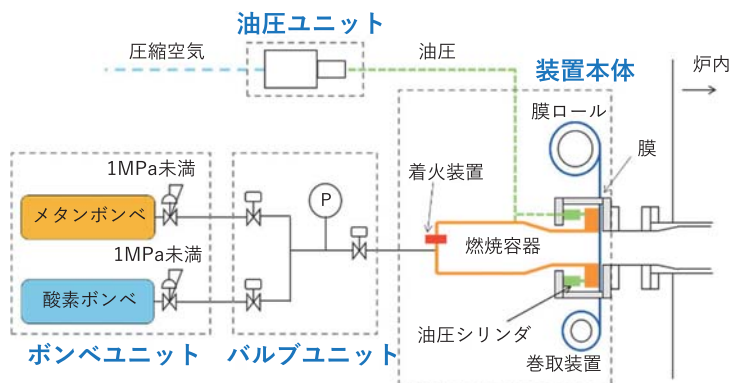


図1 全体フローと本体概略図

表1 各燃料ガスの特徴と物性値（代表値）

項目	主成分	供給方法	発火点 [°C]	高位発熱量 [MJ/m ³ _N]	理論酸素比 [酸素/燃料ガス]
メタン	CH ₄	ボンベ	537	39	2.0
都市ガス	CH ₄	ガス導管	537	45	2.2
プロパン (LPガス)	C ₃ H ₈	ボンベ	450 (プロパン)	99	5.0

の特徴と物性値を示す。

都市ガスとプロパンは、それぞれ家庭や産業用に確立された既存のインフラがあり、用役費低減以外にも次のようなメリットがある。

- ・都市ガスは、ガス事業者のガス導管で利用者に供給される。従来はメタンと酸素のボンベ交換作業が必要であったが、都市ガスに代替することで、酸素ボンベのみとなり、ボンベの交換頻度を低減できる。
- ・プロパンは、液体で貯蔵されるため、ボンベ1本あたりで利用できるガス量が多い。47Lメタンボンベと比較して50kgプロパンボンベは3倍以上のガスを供給できるため、燃料ガスのボンベ交換作業を低減できる。さらに、プロパンは、メタンに比べて流通量が多く、入手性（調達先の多様性、即納性）も優れている。

4. 試 験

VSPSに都市ガスやプロパンを適用するには、成分の違いによる圧力波の特性（威力）把握と、運転による装置の異常が生じないことやダスト除去性能に影響しないことの検証が必要である。そのため、まず実験室で圧力波の威力評価試験をおこなった。

また、都市ガスは主成分がメタンであるため、工業用メタンと同等の運転が可能と推測されるが、プロパンは主成分が異なるため、装置に異常が生じないことやダスト除去性能への影響の有無を確認するべく、実機での長期実証試験をおこなった。

4.1 威力評価試験

4.1.1 試験方法

ダスト除去性能は、装置から放出される圧力波の威力と相関があると考えられる。威力を定量評価するために、図4に示すようにVSPSからの圧力波の放出先に設置した圧力センサで圧力波の静圧を測

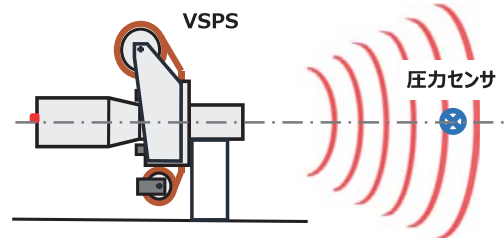


図4 実験室設備概要

定し、静圧の時間積分により算出した力積（以下、正相インパルス）を評価指標とした。試験条件は、燃料ガス種を3種（メタン、都市ガス、プロパン）、燃焼容器へのガス充填圧力（燃料ガスと酸素の全圧）を3条件（0.3, 0.6, 0.9 MPa）の計9条件とし、それぞれ10回の運転で比較評価をおこなった。なお、燃料ガスと酸素の混合比は、同じ当量比として試験を実施した。

4.1.2 試験結果

図5に、燃焼容器へのガス充填圧力と正相インパルスの関係を示す。それぞれ10回測定した平均値とそのばらつきの範囲（エラーバー）を示している。ガス充填圧力が増加するにつれて正相インパルスは線形に増加する傾向が見られ、ガス種による差異として、都市ガスの正相インパルスはメタンと同等、プロパンはメタンの1.3倍程度であることを確認した。

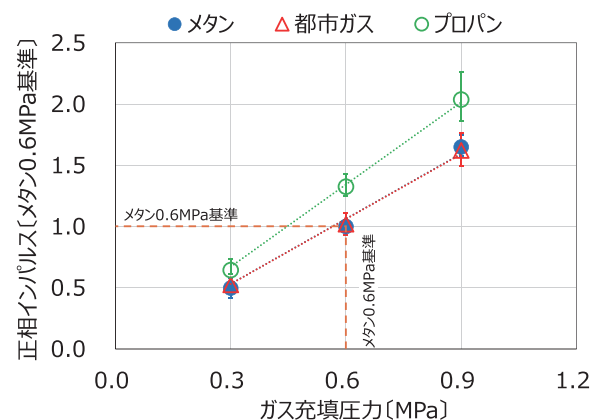


図5 ガス充填圧力と正相インパルスの関係

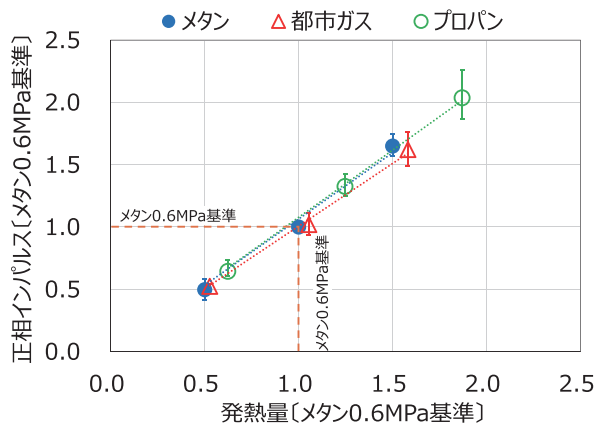


図6 発熱量と正相インパルスの関係

図6に、1回の運転あたりのガスの発熱量と正相インパルスの関係を示す。図より、すべての結果が同様の比例関係となっていることから、VSPSの威力（正相インパルス）は、充填されたガスの発熱量に強く依存することを確認した。

また、運転性については、いずれの燃料ガスもいずれのガス充填圧力においても着火不良などの運転上の問題はなく、運転後の装置点検においても異常は認められなかった。

以上より、VSPSに都市ガスとプロパンを用いた運転において、メタンと同等以上の威力が確認されたことから、ダスト除去性能についても同等以上と考えられる。また、装置に問題が見られなかったことから、実験室環境下の短期的な運転においては、VSPSに都市ガスとプロパンを適用しても問題がないことを確認した。

4.2 実機における長期実証試験

4.2.1 試験方法

都市ごみ処理量100t/日・炉クラスのストーカ式焼却炉を2炉運用する施設において、1炉はMSBで運転し、もう1炉は既存のMSBを停止させ、VSPSを運転した。図7に示すようにMSBが2パスの管群毎に配置されているのに対し、VSPSは3

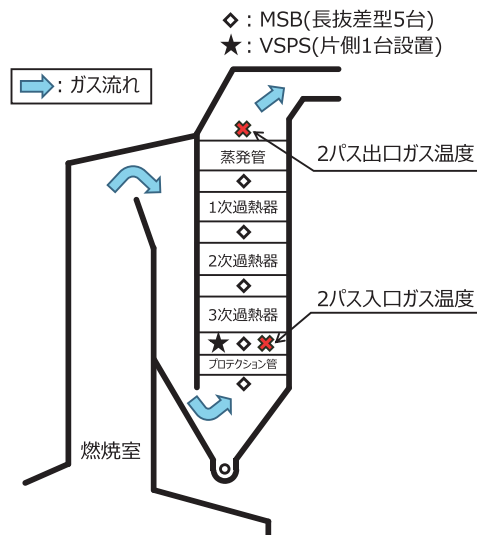


図7 VSPS設置状況

次過熱器入口に1台設置して、2パスにおけるプロパンを用いたVSPSのダスト除去性能（以下、VSPS/プロパンと記す）を比較した。なお、VSPSは、ガス種によるダスト除去効果の違いを確認するため、参考として過去に実施したメタンを用いた運転（以下、VSPS/メタンと記す）との比較評価もおこなった。

表2に、MSB、VSPS/プロパン、VSPS/メタンの各運転条件を示す。MSBは全5台を1台ずつ順次運転する工程を48時間毎におこなうのに対し、VSPSは1回で2パス全体のダストを落下させる効果を有することから、ボイラーの安定稼働に有効と考えられる4時間毎の運転としている。

VSPS/プロパンのダスト除去性能の比較は、運転時間の経過によるダストの付着にともなって徐々に上昇する2パス入口と2パス出口のガス温度で評価した。ボイラーの汚れ状態の影響を最小限として評価するため、プロパンで運転した4か月間のうち、ボイラー清掃および炉の立上げからの運転経過日数が同程度となる70日間（VSPS/メタンは66日間）のトレンドデータを抽出し、VSPS/プロパンのダスト除去効果およびVSPSの燃料ガスの差異（プロパ

表2 ダスト除去装置の運転条件

項目	ダスト除去方式	運転台数	充填圧力	運転間隔	評価期間
MSB	蒸気式	5台	—	48時間	2025/1/19~3/29
VSPS/プロパン	圧力波式	1台	0.6MPa	4時間	2025/2/10~4/20
VSPS/メタン	圧力波式	1台	0.6MPa	4時間	2022/11/15~2023/1/19

※ MSBの運転間隔は全台数分を示す。

ンとメタン)を比較評価した。なお、ごみ質の変化の影響を最小限とするため、VSPS/プロパンとMSBについては、同じ時期のデータを抽出して比較評価した。

4.2.2 試験結果

図8に、2パス入口・2パス出口ガス温度、主蒸気流量・温度の運転トレンドを示す。主蒸気流量(≒焼却負荷)の変動にあわせて、2パス入口と2パス出口のガス温度も変動していることが確認でき、主蒸気温度は概ね安定して推移していることがわかる。

主蒸気流量の変動による影響を考慮した比較をおこなうため、図9に示す主蒸気流量と2パス入口・2パス出口ガス温度の分布を評価した。

〈VSPS/プロパンのダスト除去効果の評価〉

同じ主蒸気流量において、VSPS/プロパンの2

パス入口・2パス出口ガス温度は、MSBに比べて同等以下であることを確認した。なお、2パス入口ガス温度が低下した要因は、VSPSが輻射パス(ガス流れ上流側)のダストも除去したためと考えられ、この2パス入口ガス温度低減化により、2パスの過熱管の腐食低減に効果があると想定される。また、VSPS使用時の2パス出口ガス温度がMSB使用時より低く、輻射パスと2パスの伝熱管による吸収熱量が大きくなったことから、VSPS/プロパンがMSBと比較して十分なダスト除去性能を有することが確認された。

〈VSPSの燃料ガスの差異の比較〉

メタンとプロパンの2パス入口・2パス出口ガス温度分布は概ね同じであり、ダスト除去性能に明確な差異は確認できなかった。この結果は、威力評価試験で得られた充填ガスの発熱量が高いプロパンの

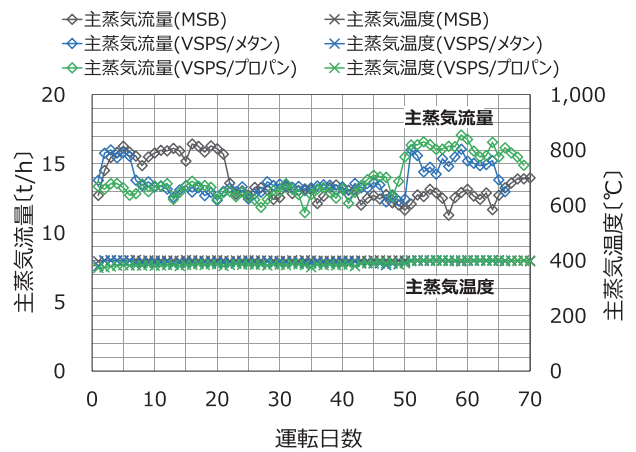
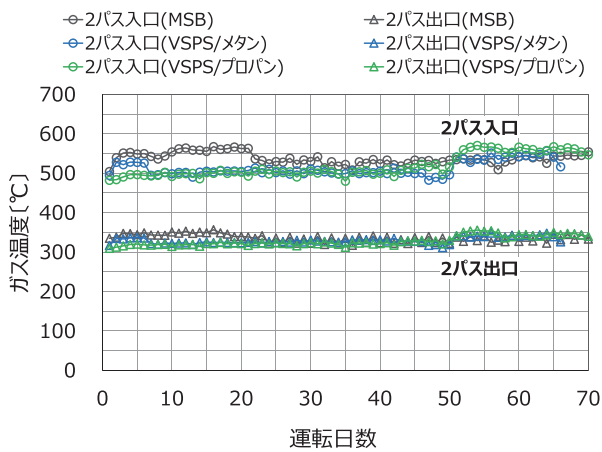


図8 2パス入口・2パス出口ガス温度、主蒸気流量・温度の推移

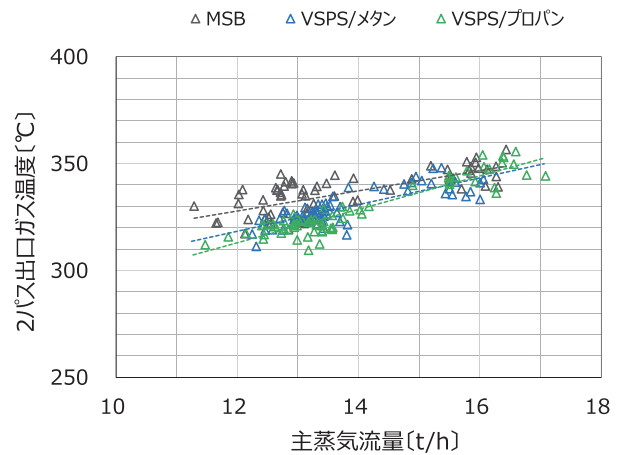
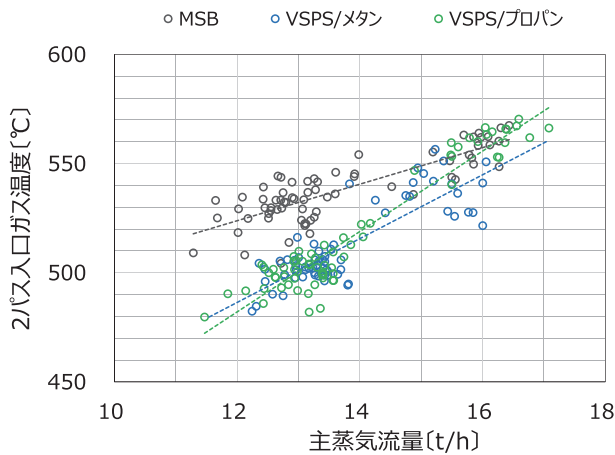


図9 主蒸気流量とガス温度の関係

方がダスト除去性能は向上するとの予想と異なるものである。これは、実証試験施設においてメタンを用いた運転でも十分にダストを除去でき、プロパンを用いた威力増加分の効果が限定的になったと推測される。このことから、プロパン使用時にはガス充填圧力を低くすることや運転間隔を長くして、ガス用役費の低減に寄与できる可能性があると考ええる。しかし、実運転ではダスト落下時の灰排出能力等に十分に配慮した長期間の検証が必要である。

以上より、プロパンの長期運転においてダスト除去性能はMSBより高く、その運転性も問題ないことが確認でき、VSPSの燃料ガスにプロパンを適用可能であることが実証された。

5. ま と め

実験室レベルでの評価試験および実機での長期実証試験をおこない、いずれの試験結果からもVSPSに都市ガスとプロパンを用いても性能・運転に支障はなく、VSPSの燃料ガスとして適用可能であることを確認した。都市ガスやプロパンの適用により、大幅な用役費の低減が期待できるだけでなく、ボンベ交換頻度の低減や供給の安定性といった運用面での効率化にも大きく寄与するものと考ええる。なお、

都市ガスの利用にあたっては、導入施設に引き込まれているガス圧力によっては昇圧装置が必要であり、引き続きその費用対効果について検討していく予定である。

当社では今後、VSPSに最適な燃料ガスを選定し、ボイラー設備全体の性能や運用面の向上に資する最適なシステム構築を進めていく所存である。

謝 辞

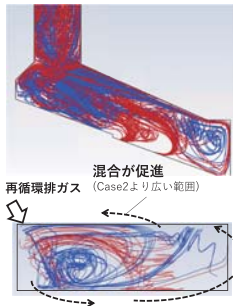
本試験の実施にあたり、多大なるご協力をいただきました関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 田井 宏：圧力波式ダスト除去装置の開発および運転報告，タクマ技報，Vol. 29, No. 1, pp. 26-30 (2021)
- 2) 岩本敬弘，中西英夫：圧力波式ダスト除去装置の開発および運転報告（第二報），タクマ技報，Vol. 29, No. 2, pp. 33-37 (2021)
- 3) 林 京平，加藤考太郎，藤田泰行：ボイラーエコノマイザへの圧力波式ダスト除去装置（VSPS）適用の実証試験報告，タクマ技報，Vol. 30, No. 1, pp. 23-27 (2022)
- 4) 巽 圭司，山崎翔平，林 京平，高橋広光：圧力波式ダスト除去装置（VSPS）への合成樹脂膜の適用，タクマ技報，Vol. 31, No. 1, pp. 51-55 (2023)

燃焼排ガス再循環法による窒素酸化物低減効果のシミュレーション

Simulation of Nitrogen Oxides (NO_x) Reduction Effect with Exhaust Gas Recirculation (EGR)



福井 淳平* 伊藤 竜生*
Junpei FUKUI Ryusei ITOH
増田 孝弘* 水野 孝昭**
Takahiro MASUDA Takaaki MIZUNO
芹澤 佳代**
Kayo SERIZAWA

【要旨】 ストーカー式下水汚泥焼却炉は一酸化二窒素の排出量が少ない一方、そのほかの窒素酸化物の排出量が高い傾向がある。既報¹⁾では燃焼排ガス再循環法による窒素酸化物の低減効果を実証試験により確認した。本稿では、既報¹⁾の実証試験を対象としたシミュレーションモデルを構築し、窒素酸化物の低減メカニズムの解明をおこなった。シミュレーション結果は実証試験における窒素酸化物濃度の変化傾向を良好に再現した。また、炉内の温度分布およびガス流動のシミュレーション結果から、再循環排ガスの供給位置の違いによって高温領域の縮小とガス混合促進の効果が異なることを示し、適切な供給位置の選択が窒素酸化物低減に寄与することを確認した。本モデルは新設炉設計における机上検討ツールとしての活用が期待される。

キーワード：下水汚泥焼却、窒素酸化物、燃焼排ガス再循環、数値流体力学、ストーカー式焼却炉

Abstract

Stoker-type sewage sludge incinerators emit low levels of nitrous oxide (N₂O) but tend to produce considerable concentration of other nitrogen oxides (NO_x). The effect of exhaust gas recirculation (EGR) on NO_x reduction was demonstrated in a previous study¹⁾. In this study, we developed a simulation model to elucidate the mechanisms of NO_x reduction and validated it against experimental data. The simulation results successfully reproduced the NO_x concentrations observed in the demonstration test. In addition, analysis of the simulated temperature distribution and gas flow in the incinerator showed that both the reduction of high-temperature regions and the enhancement of gas mixing depended on the EGR injection location. Selecting an appropriate EGR injection location reduces NO_x emissions. The model is expected to serve as a simulation tool for design of new incinerators.

Keywords: sewage sludge incineration, nitrogen oxides (NO_x), exhaust gas recirculation (EGR), computational fluid dynamics (CFD), stoker-type incinerator

* 研究部
Energy & Environmental Research Dept.
** 水処理技術部
Sewerage Engineering Dept.

1. はじめに

下水汚泥焼却における一酸化二窒素（以下、 N_2O と記す）由来の温室効果ガス排出量は、下水道施設からの温室効果ガス排出量の約20%を占めており、その低減が課題となっている。下水汚泥焼却で広く用いられている流動床式焼却炉と比較して、当社が採用しているストーカ式焼却炉は脱水汚泥を乾燥機で前処理した後に炉に投入することから燃焼温度が高く、 N_2O 排出量が少ないという特長がある（流動床式焼却炉は脱水汚泥を直接燃焼させる方式が主流であり、ストーカ式焼却炉と同等の高温燃焼を実現して N_2O を低減するためには汚泥の乾燥設備の追加や廃熱回収方式の変更など既存システムの大幅な改修が必要となる）。下水道機構の報告では、一般的なストーカ式焼却炉における N_2O 排出係数（焼却した汚泥量あたりの N_2O 排出量）は流動床式焼却炉の10分の1程度である²⁾。一方で、高温燃焼は窒素酸化物（以下、 NO_x と記す）を生成しやすいため、 NO_x 排出量が増加する傾向にある。ストーカ式焼却炉で汚泥を焼却すると排ガス中の NO_x 濃度は最大170 ppm程度となり²⁾、大気汚染防止法に基づく排出基準値である250 ppmを上回ることはないものの、環境負荷低減の観点からは NO_x 低減技術の導入が求められる。

当社はこれまでにストーカ式焼却炉排ガス中の NO_x 低減を目的として、低空気比燃焼法および燃焼排ガス再循環法（以下、EGRと記す）に着目し、その開発を進めてきた。EGRは、排ガス処理後の燃焼排ガスを焼却炉内へ吹込む方法であり、低温かつ酸素濃度の低い排ガスを炉内に供給することで、局所的な高温燃焼を抑制して高温領域を縮小させるとともに、低空気比燃焼により生じた還元性ガスとの混合攪拌を促進して還元ゾーンを拡大し、 NO_x の生成・分解の両面から排ガス中の NO_x 濃度を低減することができる。既報¹⁾では、実際の施設における実証試験でEGRによる NO_x 低減効果を確認し、低空気比燃焼法との組み合わせにより、空気比1.22にて NO_x 濃度42 ppm-dry ($O_2=12\%$ 換算)まで低減可能であることを報告した。

一方、実証試験では炉内各所の温度や流動状態を直接計測することが困難であり、 NO_x 低減メカニズムの詳細な把握には限界がある。しかしながら、近年は計算機の高性能化にともない、焼却炉内の複

雑な燃焼ガス流動・燃焼状態をシミュレーションにより把握できるようになってきた。このようなシミュレーションを活用することで、実炉では把握が困難な炉内の温度分布やガス流動を詳細に可視化でき、 NO_x 低減メカニズムの考察に役立てることができる。さらに、実測データとの比較によりシミュレーションモデルの妥当性が検証されれば、新設炉の設計開発段階においてEGRの再循環排ガス供給位置の最適化が机上検討で可能となり、設計開発の大幅なスピードアップが期待できる。

本稿では、既報¹⁾の実証試験における運転条件を対象としてシミュレーションモデルを構築し、実測された NO_x 低減効果の再現性を検証するとともに、炉内の温度分布および燃焼ガス流動の解析から NO_x 低減メカニズムの解明を図った。

2. 実証試験

シミュレーションの対象は既報¹⁾の実証試験とした。試験は札幌市西部スラッジセンター3号炉で実施されており、その施設の概要を表1に示す。本施設では、蒸気間接加熱型汚泥乾燥機より排出された含水率30~40%-wetの乾燥汚泥をストーカ式焼却炉にて燃焼させている。焼却炉の概略図を図1に示す。本炉は乾燥エリア、燃焼エリアの2ユニットのストーカから構成され、乾燥エリアの上流から汚泥を供給するとともに、各エリアのストーカ下部から一次燃焼空気を、燃焼室上部から二次燃焼空気を供給する。本稿では表2に示す既報の実証試験における三つの運転条件についてシミュレーションとの比較をおこなった。なお、既報¹⁾の実証試験は多数の運転条件で実施されており、本稿で取り上げる三条件には既報に掲載されていない条件も含まれる。Case 1はEGRを採用しないベース条件、Case 2およびCase 3はEGRにおける再循環排ガスを炉内の

表1 下水汚泥焼却設備の概要

脱水汚泥処理量	100 t/日
炉投入汚泥量	45 t/日 (含水率40%-wet)
乾燥設備	蒸気間接加熱型汚泥乾燥機
燃焼設備	ストーカ式焼却炉
熱回収方式	廃熱ボイラー
排ガス処理設備	マルチサイクロン式集塵機 排煙処理塔 湿式電気集塵機

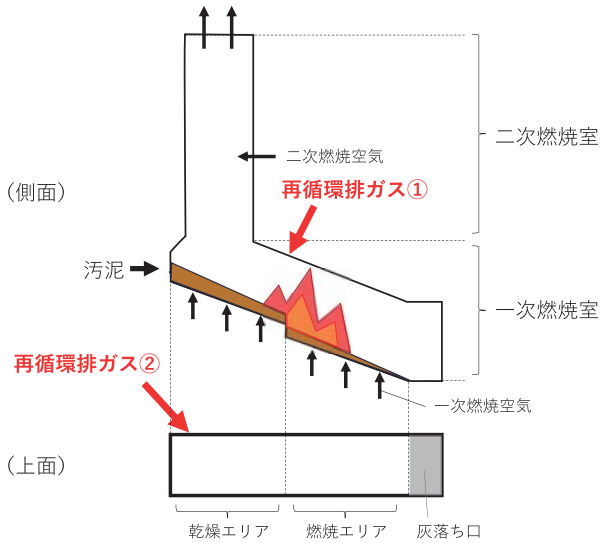


図1 汚泥焼却炉の概略図

表2 運転条件

	Case 1	Case 2	Case 3
再循環排ガス 供給位置	なし	①	②
再循環排ガス 循環率	0%	10%	10%
総空気比	1.4	1.3	1.3

異なる位置から供給した条件である。再循環排ガスの供給による混合攪拌の効果で低空気比運転が可能となるため、Case 2 および Case 3 では Case 1 に比べて総空気比が低い条件となっている。

3. シミュレーションモデル

3.1 シミュレーションモデルの概要

実証試験を模擬したシミュレーションでは、汚泥の熱分解により発生するガス成分が炉内で燃焼すると仮定し、気相燃焼のみを考慮したモデルを作成した。熱分解ガスの組成は、汚泥の投入量および元素分析結果に基づいて決定した。実炉ではストーカの間隙から一次空気が流入することから、ストーカユニットごとに熱分解ガスと一次燃焼空気の流入境界を交互に配置した。計算格子にはポリヘドラルメッシュを採用し、総メッシュ数は約 57 万とした。

3.2 物理モデル

シミュレーションには Ansys® Fluent® を使用し、表 3 に示す物理モデルを適用した。乱流モデルには SST k- ω モデルを採用した。SST k- ω モデルは壁面近傍では k- ω モデル、主流域では k- ϵ モデルの

表3 シミュレーション設定

時間	定常
乱流モデル	RANS, SST k- ω
燃焼モデル	有限速度/渦消散モデル (総括反応)
輻射モデル	DO (Discrete Ordinates) モデル

特性を持ち、広い流速範囲で予測精度が高いことから、複雑な循環流をとまなう本シミュレーションに適している。燃焼モデルには有限速度/渦消散モデルを採用し、総括反応により燃焼反応を表現した。輻射モデルには DO (Discrete Ordinates) モデルを採用した。DO モデルは輻射伝達方程式を離散方向について解くモデルであり、高温の燃焼ガスや火炎からの輻射伝熱を考慮できる。

3.3 NO_x モデル

NO_x シミュレーションは、Ansys® Fluent® に搭載の NO_x モデルを用いたポスト処理によって計算した。NO_x の生成経路として、燃料中の窒素分由来するフューエル NO_x、高温場での窒素と酸素の反応によるサーマル NO_x、および炭化水素ラジカルを経由するプロンプト NO_x の 3 種類を考慮し、NO_x の主成分である NO の生成量を評価した。

4. シミュレーション結果および実証試験との比較結果

4.1 炉出口 NO_x 濃度の比較

図 2 に、実証試験およびシミュレーションにおける炉出口 NO_x 濃度を示す。実証試験では、EGR を適用していない Case 1 で NO_x 濃度が 117 ppm (O₂ = 12% 換算) であったのに対し、再循環排ガスを供給した Case 2 では 92 ppm、Case 3 では 49 ppm ま

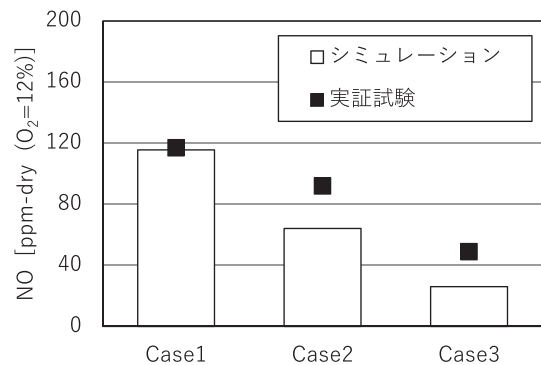


図2 炉出口における NO_x 濃度の比較

で低減し、最大 58% の NO_x 低減効果が得られた。シミュレーションにおいても、Case 1 に対して Case 2, Case 3 で段階的に NO_x 濃度が低下する結果が得られ、実証試験の傾向を良好に再現した。これにより、傾向算出における本モデルの妥当性が示された。以下、EGR による NO_x 低減メカニズムについて、炉内温度低下による NO_x 生成抑制、混合促進による NO_x の還元反応強化、の二つの観点から考察する。

4.2 炉内温度低下による NO_x 生成抑制

一般に、燃焼温度の上昇にともなう NO_x 生成量の増加は、1,200~1,300℃ 以上の温度域でサーマル NO_x の発生が急増することが原因として説明される。一方で、1,000℃ 未満の温度域で検証した既往研究³⁾において、燃焼温度が高くなるほどフューエル NO_x の生成量についても増加することが報告されている。そのため、燃焼温度が 800~1,100℃ 程度である汚泥焼却炉においても、燃焼温度の低下に

よって NO_x 生成が抑制されることが期待される。図 3 に炉内温度のシミュレーション結果を示す。EGR を適用していない Case 1 では燃焼エリアから二次燃焼室にかけて広く高温領域が存在している。これに対し、EGR による再循環排ガスを供給した Case 2, Case 3 では二次燃焼室の温度が低下している。また、Case 2 と Case 3 を比較した場合、Case 2 は乾燥エリアに再循環排ガス供給による高温領域が見られるが、Case 3 では乾燥エリアの温度も低く抑えられた。そこで、炉内温度が 1,000℃ 以上の領域を高温領域と定義し、Case 1~Case 3 の条件で高温領域の体積を比較した。図 4 に、Case 1 における高温領域の体積を 100% として高温領域の体積を比較した結果を示す。高温領域の体積は Case 1, Case 2, Case 3 の順に減少しており、NO_x 排出量の減少と同様の傾向を示した。このことから、再循環排ガス供給により炉内高温領域が縮小し、NO_x 生成量が低減されたものと考えられる。

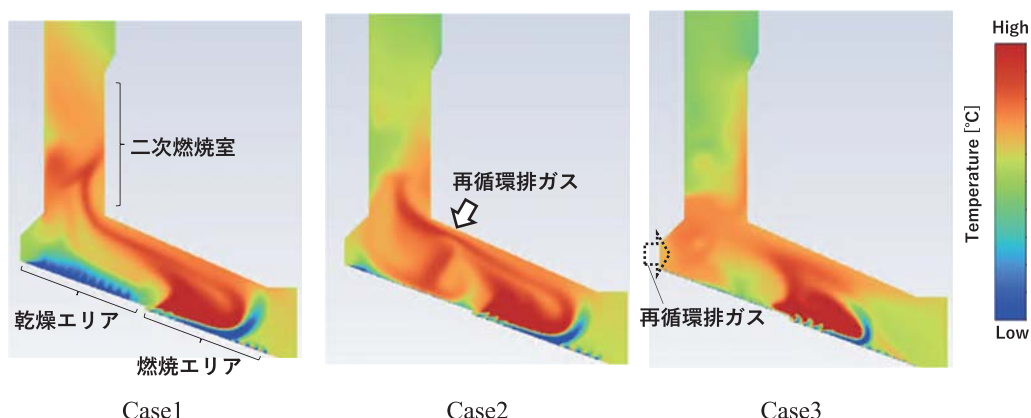


図 3 シミュレーション結果 (炉内温度)

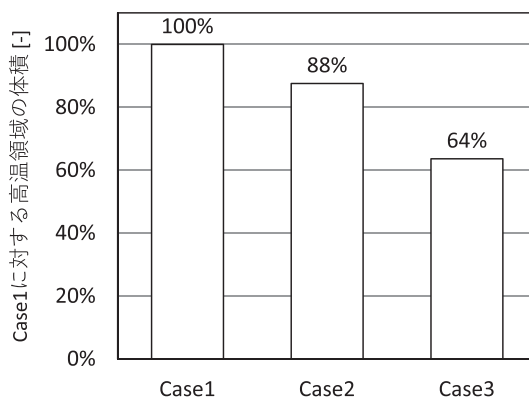


図 4 高温領域 (≥1,000℃) の体積の比較

4.3 混合促進によるNO_xの還元反応強化

次にNO_xの還元反応について考察する。焼却炉におけるNO_x還元反応として、生成されたNO_xが乾燥エリアから発生する一酸化炭素(CO)、シアニ(HCN)、アンモニア(NH₃)等の還元性ガスと混合されることで窒素ガスに還元され、排出NO_x濃度が低減することが知られている。ストーカ式汚泥焼却炉においては還元性ガスとNO_xの生成位置が異なるため、両者の混合促進がNO_x低減に重要な役割を果たす。

図5は各運転条件でのストーカ面からの燃焼ガス流れのシミュレーション結果を示しており、上段が側面断面図、下段が俯瞰図である。Case 1は、乾燥エリアと燃焼エリアから発生した燃焼ガスが層状に流れ、十分な混合がおこなわれなまま二次燃焼室へ流入している。一方、Case 2では炉天井からの再循環排ガス供給により乾燥エリアでのガス混合が促進されている。最もNO_x濃度が低かったCase 3では、側壁からの再循環排ガス供給により一次燃焼室全体で強い循環流が形成され、より均一な混合状態が確認された。NO_xの還元反応は酸素が希薄な場において効率的に進行するとされており⁴⁾、酸素希薄な一次燃焼室内で再循環排ガスによってNO_xと還元性ガスが混合攪拌されたことでNO_xの還元が促進され、最終的なNO_x排出量の低減につながったものと推察される。以上より、再循環排ガスの供給位置の違いによるガス混合状態の変化がNO_x低減に寄与していることが、シミュレーション結果から示唆された。

5. ま と め

本稿では、既報¹⁾の実証試験で得られたストーカ式汚泥焼却炉におけるEGRによるNO_x低減効果について、シミュレーションによる再現および炉内現象の詳細解析をおこない、以下の知見を得た。

- (1) 構築したシミュレーションモデルは、実証試験における再循環排ガスの供給位置の違いによるNO_x濃度の低減傾向を良好に再現し、傾向把握における本モデルの妥当性が示された。
- (2) 炉内温度分布のシミュレーション結果から、再循環排ガス供給により高温領域が縮小し、NO_x生成量が低下することを確認した。
- (3) ガス流動のシミュレーション結果から、再循環排ガスの供給位置の違いにより炉内の循環流の形成状態が異なり、NO_xと還元性ガスの混合促進の程度がNO_x排出量に影響することが示唆された。

今後は、実機検証を通じてシミュレーション精度のさらなる向上を図るとともに、シミュレーションを活用した机上検討を充実させることで、実試験の削減による設計開発期間の短縮およびコスト削減を実現していく。さらに、本技術の実装を加速させることで、下水汚泥焼却にともなう温室効果ガスおよびNO_x排出量の低減を通じた社会課題への貢献を目指していく所存である。

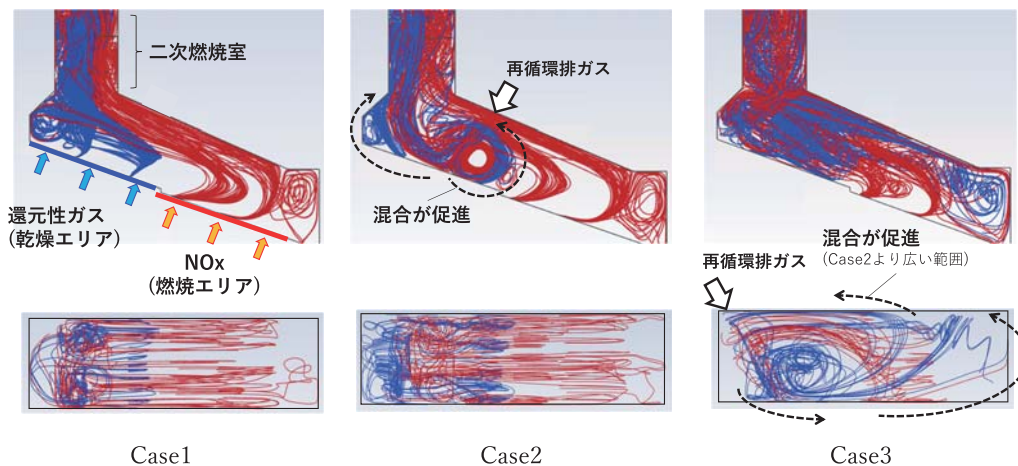


図5 シミュレーション結果(汚泥の燃焼ガス流れ)

参 考 文 献

- 1) 村岸弘基，中西 譲，水野孝昭，株丹直樹：階段式汚泥焼却炉における窒素酸化物の低減方法の検討（その2），タクマ技報，Vol. 27, No. 2, pp. 39-44 (2019)
- 2) 日本下水道新技術機構：汚泥焼却炉からの N₂O 削減に関する技術資料，pp. 31-35 (2012)
- 3) 安田憲二，大塚幸雄：都市ごみの焼却にともなう窒素酸化物の排出挙動 実験用焼却炉による基礎的研究，廃棄物学会論文誌，Vol. 8, No. 5, pp. 217-224 (1997)
- 4) 環境省ほか：窒素酸化物排出削減対策技術の導入に係るガイドライン，p. 66 (2024)

報 告

450℃超ボイラーの実現に向けた実機ばく露試験

Exposure Testing on an Actual Boiler for the Development of Boilers Operating Above 450℃



今井 大樹* 萩田 諭*

Daiki IMAI

Satoshi HAGITA

【要旨】 一般廃棄物処理施設における高効率発電を目的としたボイラーの高温高圧化が進められているが、大きな課題として過熱管の腐食速度の増大があげられる。既報¹⁾では、稼働中の廃棄物発電ボイラーに供試材（管材）を設置し、管内壁温度 350℃～450℃における過熱管の腐食状況を調査した結果について報告した。本稿ではさらなる蒸気高温化を見据えて管内壁温度 360℃～510℃の範囲で制御して腐食状況を調査した結果を報告する。

SUS310S 系鋼管の減肉量は、管内壁および排ガス温度の両方に依存して増加する傾向が確認された。また、SUS310S 系鋼管と高 Cr,Mo 系 Ni 基肉盛溶接管の比較では、すべての温度条件において高 Cr,Mo 系 Ni 基肉盛溶接管の減肉量の方が大幅に小さい結果が得られた。

キーワード：廃棄物発電ボイラー、過熱管、高効率化、高温腐食、肉盛溶接

Abstract

Efforts are being made to increase boiler temperature and pressure in municipal solid waste treatment facilities to achieve power generation with efficiency improvement. However, increased corrosion of superheater tubes remains a major challenge. In the previous report¹⁾, corrosion behavior in superheater tubes was investigated at tube wall temperatures of 350℃ to 450℃ by installing test material (tubes) in an operating boiler for waste incineration power generation. This article reports the results of investigating corrosion behavior at tube wall temperatures of between 360℃ and 510℃ with the aim of further increasing the steam temperature.

We confirmed that wall thinning of SUS310S steel tubes due to corrosion increased as both tube wall temperature and exhaust gas temperature rose. In addition, a comparison between a SUS310S steel tube and a high Cr and Mo Ni-based overlay welded tube showed that the latter's wall thinning was significantly smaller under all temperature conditions.

Keywords: boiler for waste incineration power generation, superheater tube, efficiency improvement, high-temperature corrosion, overlay welding

* 環境技術 1 部
Environmental Engineering Dept. 1

1. はじめに

一般廃棄物発電施設は、従来捨てられていた一般廃棄物が持つエネルギーを有効活用して発電をおこなう施設であり、地球温暖化対策に寄与している。また近年では、地域のエネルギー拠点としても重要な施設となりつつある。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が中心となり、1990年代に取り組みされた蒸気条件 9.8 MPa×500℃を目標とした「高効率廃棄物発電技術開発」プロジェクト、さらに内閣府が設置した地球温暖化対策推進本部にて2002年3月に決定された「地球温暖化対策推進大綱」²⁾を契機に、一般廃棄物処理施設では高効率発電を目的としたボイラーの高温高压化が進められてきた。数年前までは蒸気条件 4 MPa×400℃までの施設が主流であったが、現在では蒸気条件 6 MPa×450℃の施設も竣工している。

しかし、廃棄物発電ボイラーの高温高压化の大きな課題として、過熱管の腐食速度が増大することがあげられる。過熱管の腐食は、ごみに含まれる塩化物、硫化物系の化合物による高温腐食が原因と考えられている³⁾。そのため、蒸気条件のさらなる高温高压化により、高温腐食がより助長され、過熱管の短寿命化を招く恐れがある。

既報¹⁾では、高温高压化による過熱管の腐食耐久性の知見を得るため、稼働中の廃棄物発電ボイラーに供試材（管材）を設置し、腐食状況を調査した結果を報告している。当該試験では管内に冷却空気を流すことで管内壁温度を 350℃～450℃に制御した管材を4か月間ばく露した。

今回は蒸気温度 450℃超のさらなる高温化を見据え、既報と同じ施設で管内壁温度を既報よりも高い 360℃～510℃の範囲で制御し、ばく露試験を実施した。本稿では、2024年11月～2025年3月の5か月間実施した試験内容及び結果を報告する。

2. 試験概要

表1に試験を実施した施設の概要を示す。供試材はそれぞれ3次過熱器（以下、3次SHと記す）入口部、出口部に設置した。排ガス温度はそれぞれ3次SH入口部で約730℃、3次SH出口部で約650℃で

表1 施設概要

処理規模	240 t/日×2 炉
処理対象物	一般廃棄物
	リサイクル残渣
処理方式	ストーカ式
ボイラー形式	縦型自然循環式
排ガス温度	3次SH入口：約730℃
	3次SH出口：約650℃
灰除去装置	蒸気式ストブロー

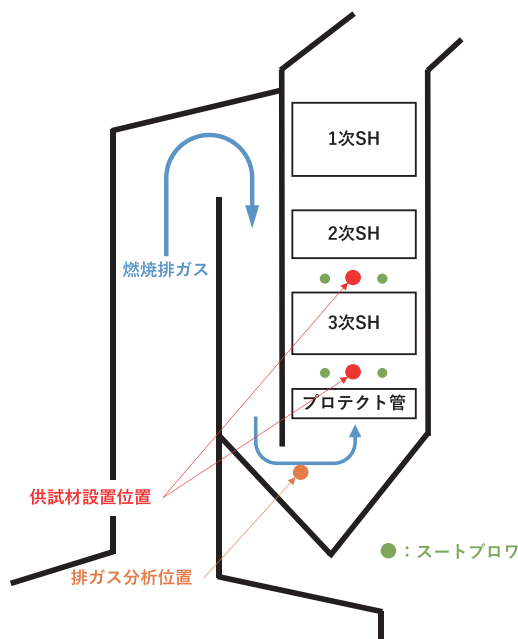


図1 ボイラー断面概略図

あった。

また、供試材は図1に示すように蒸気式ストブローの噴霧蒸気が管に与える影響も考慮して噴霧蒸気の影響を受ける位置に設置した。

2.1 供試材

供試材は 25Cr-20Ni オーステナイト系ステンレス鋼管（以下、SUS310S系鋼管と記す）と、SUS310S系鋼管に高Cr,Mo系Ni基材料を肉盛溶接した鋼管（以下、高Cr,Mo系Ni基肉盛溶接管と記す）の2種類を設置した。

2.2 試験方法

図2に試験装置の概略図を示す。装置は供試材、流量計、調整弁、温調ファン、熱電対、制御盤、配管類より構成されている。

図3に供試材の概略図、図4に実際の供試材の外観を示す。

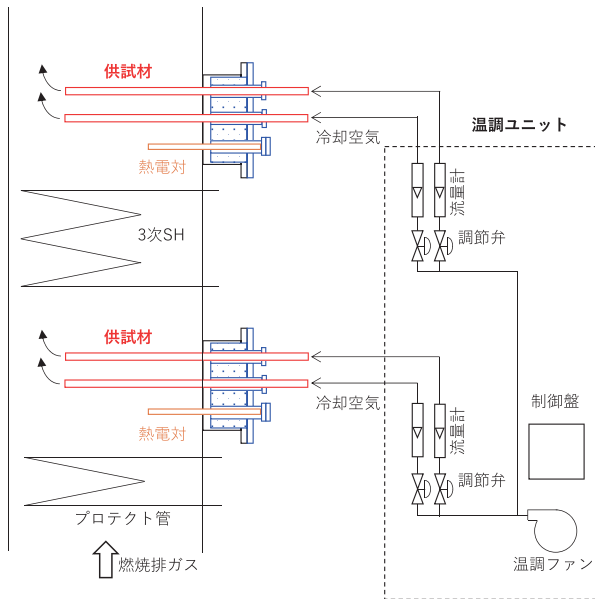


図2 試験装置概略図

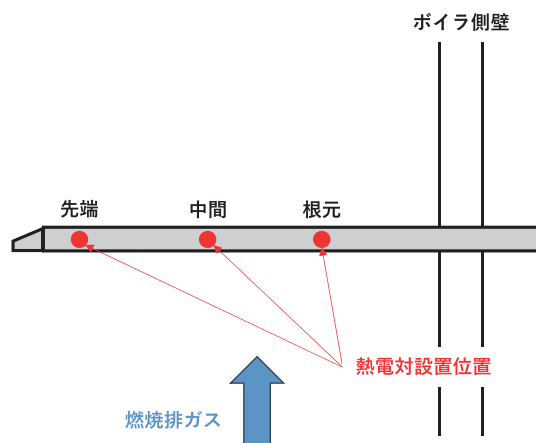


図3 供試材概略図



図4 供試材外観

供試材の管内側の先端、中間、根元の3点にK型熱電対を取付けて常時管内壁温度を測定し、最も高温となる管先端の熱電対の温度が一定となるよう

に冷却空気量を調節弁で制御した。また、排ガス温度は、供試材近傍に設置したK型熱電対で連続測定した。

上記の試験設備にて5か月間のばく露を実施し、供試材のばく露前後の肉厚を比較し減肉量を算出した。

また、腐食雰囲気を確認するため、3次SH入口部の排ガスを適時採取して組成分析をおこなうとともに、供試材表面に付着した灰（以下、付着灰と記す）についても、腐食への影響を確認するため、管表面に近い供試材側と管表面から遠い排ガス側に分けてそれぞれ採取し、蛍光X線元素分析法による組成分析と熱重量・示差熱分析をおこなった。加えて、管内壁温度の違いによる付着灰の性状の違いを調べるため、供試材側の付着灰は供試材の先端付近と中間付近の灰を採取し、分析をおこなった。

3. 試験結果

3.1 管内壁温度

図5に、3次SH入口部、出口部に設置した供試材の管内壁温度を示す。図示した期間は試験期間内の10日間の抜粋である。

冷却空気量の自動制御により、3次SH入口部、出口部ともにほぼ目標とした管内壁温度に制御することができた。図中に見られる短周期の温度変化はストロブロー（2回/日の運転）の影響である。

3.2 排ガスの組成

排ガスは、図1に示すプロテクト管下部の排ガス分析位置の管台から採取し、HCl、SO_x、H₂O、O₂濃度を分析した。HClおよびSO_xはイオンクロマトグラフ法で分析した。結果を表2に示す。

2回の分析でHClが340、250 volppm-dry、SO_xが0.4、1.2 volppm-dry（いずれも酸素12%換算前の生値）であった。既報では4回の分析でHClが370~610 volppm-dry、SO_xが1.0 volppm-dry未満であり、HClについては既報よりも低下している傾向が見られた。

3.3 付着灰の性状

3次SH入口部（排ガス温度約730℃）と3次SH出口部（排ガス温度約650℃）に設置した供試材表面

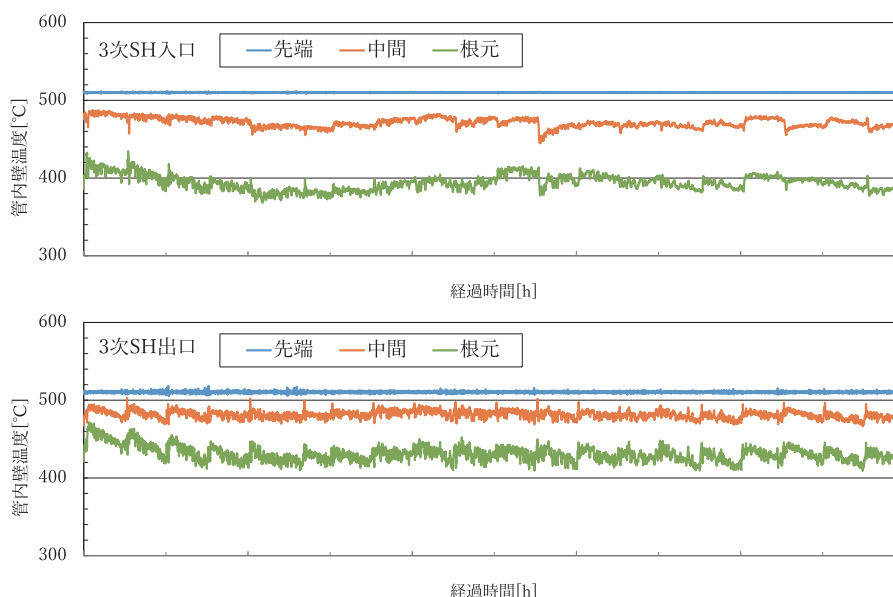


図5 3次SH入口，出口部の管内壁温度

表2 排ガス分析結果

		1回目	2回目
O ₂	vol%-dry	5.4	4.7
H ₂ O	vol%	21.3	17.7
HCl	volppm-dry	340	250
HCl (酸素12%換算)	volppm-dry	190	130
SO _x	volppm-dry	0.4	1.2
SO _x (酸素12%換算)	volppm-dry	0.2	0.6

表3 付着灰の組成分析結果 (mass%)

	3次SH入口側			3次SH出口側		
	供試材側		排ガス側	供試材側		排ガス側
	先端	中間		先端	中間	
O	28.5	10.4	31.6	5.6	19.1	28.3
Ca	28.0	23.2	28.6	23.9	29.2	27.6
Si	3.2	1.1	3.9	0.4	2.2	3.0
Al	2.8	0.9	3.4	0.2	2.0	2.5
Cl	16.9	40.1	13.8	48.5	26.8	18.4
S	4.4	1.7	4.3	1.1	2.7	3.6
Na	5.1	4.5	3.5	1.5	4.3	5.8
K	4.7	14.6	3.7	16.2	8.4	3.9
P	0.7	0.2	0.8	0.1	0.5	0.6
Mg	1.1	0.4	1.3	0.1	0.7	1.1
Ti	1.3	0.6	1.4	0.2	1.2	1.3
Cu	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
Fe	0.9	0.5	1.1	0.5	1.0	0.9
Zn	0.7	0.5	0.8	0.6	0.8	0.7

の付着灰を採取し，分析をおこなった。蛍光X線による組成分析結果を表3に示す。

各組成の割合は，Cl: 13.8~48.5%，S: 1.1~4.4%，Na,K: 合計7.2~19.1%，Zn: 1%未満であり，既報

と同様に以下の傾向が見られた。

- ・供試材側と排ガス側で付着灰の成分を比較すると，供試材側の方がK，Cl濃度が高い傾向にあった。
- ・ClとNa，Caの割合に相関はなかった。
- ・Znは1%以下であり，1%前後であった既報と同程度であった。

既報と異なる傾向としては以下の傾向が見られた。

- ・既報のサンプルのCl濃度が14~24%であったのに対して，今回は40%を超える非常に高いCl濃度のサンプルが存在した。

3次SH入口部と出口部では，排ガス温度で約80℃の差があったが，灰の組成には大きな違いはなかった。

また，組成分析と同じ灰サンプルにおいて熱重量・示差熱分析をおこなった結果では，すべての灰において520~550℃の温度域に吸熱ピークが見られた。これは既報の吸熱ピークの範囲である530~560℃とほぼ同等である。また，本試験において一部の灰では600℃台の温度域にて重量減少をとまわらない吸熱ピーク，800℃超の温度域にて重量減少をとまなう吸熱ピークが見られた。

3.4 減肉傾向

供試材のばく露前とばく露後の肉厚を測定し，減

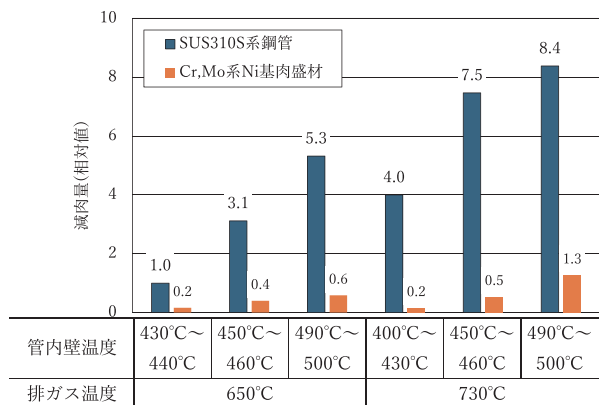


図6 SUS310S系鋼管と高Cr, Mo系Ni基肉盛溶接管の管内壁温度、排ガス温度による減肉量(相対値)

肉傾向を評価した。図6に供試材の各位置の管内壁温度および排ガス温度による減肉量の比較を示す。

排ガス温度650°C・管内壁温度430°C~440°CのSUS310S系鋼管の減肉量を1.0として、そのほかの温度条件でばく露した供試材の減肉量(相対値)を示した。なお、管内壁温度については各供試材で若干差があったため、温度に幅を持たせて記載している。

まずSUS310S系鋼管に注目すると、既報と同様に、管内壁温度に依存して減肉量が増加する傾向が確認された。

本試験ではこれに加えて、排ガス温度に依存して減肉量が増加する傾向も確認された。排ガス温度650°Cと730°Cの減肉量を比較すると、管内壁温度450°C~460°C域では約2.4倍、管内壁温度490°C~500°C域では約1.6倍の差があった。

次に高Cr, Mo系Ni基肉盛溶接管に注目する。SUS310S系鋼管と比較して、各供試材のすべてのばく露条件において、減肉量が抑えられていることを確認した。例えば、排ガス温度650°C・管内壁温度490°C~500°C域の条件では、高Cr, Mo系Ni基肉盛溶接管の減肉量はSUS310S系鋼管の約0.1倍であった。

4. 考 察

まず、付着灰の分析結果に関する考察を述べる。川原らの発表論文によると、共晶塩に含まれる塩素濃度が高くなるほど灰の融点が低下する傾向が報告されており⁴⁾、本試験の付着灰分析でCl濃度が40%を超えるサンプルにおいては灰の融点の低下

が想定された。しかし、示差熱分析の結果では、すべての灰において520~550°Cの温度域に吸熱ピークが見られ、Cl濃度に関わらず吸熱ピークの温度は同程度であった。したがって、灰の性状から見た溶融塩腐食の生じやすさについては既報と大きく変わらないと考えられる。また、600°C台の温度域の吸熱ピークに関しては、重量減少をとまなわないことからアルカリ金属(Na, K)の塩化物の融点であり、一方で800°C超の温度域の吸熱ピークは、重量減少をとまなうことから塩化物の揮発によるものと考えられる。600°C台、800°C台いずれの吸熱ピークも管内壁温度の制御域とは異なる温度域であるため、本試験での腐食には影響していないものと推察される。なお、200~400°C台に吸熱ピークがなかったことから、Zn, Pb等の重金属に起因する溶融塩腐食はなかったと推察される。

次に減肉傾向に関する考察を述べる。

SUS310S系鋼管では、既報と同様に、管内壁温度に依存して減肉量が増加する傾向が見られたが、その要因として、灰付着速度の増加が考えられる。川原の発表論文によると、管表面温度の上昇により灰成分の一部が溶融し、その結果、固体粒子の接着・捕捉が促進され、灰付着速度が増加し、それによって、腐食性物質の供給速度が増加することで、腐食速度が高まるとされている⁵⁾。本試験では、灰の付着速度を直接確認することはできなかったものの、管内壁温度の上昇にとまなない減肉量が増加する傾向は認められ、灰付着速度の増加が影響している可能性が示唆される。

本試験における先端の管内壁温度は既報の450°Cよりも高い510°Cで制御していた。そのため、管表面温度が520°Cに近いと推測される管先端付近では、520°C付近に融点を持つ塩による溶融塩腐食が進行し、管内壁温度の上昇にとまなない加速度的に減肉量が増加する可能性も考えられた。しかし、SUS310S系鋼管の減肉傾向を見ると、排ガス温度約650°Cにおいて、管内壁温度430°C~440°C域から管内壁温度450°C~460°C域で減肉量が約3.1倍の増加、管内壁温度450°C~460°C域から管内壁温度490°C~500°C域では約1.7倍の増加となり、減肉量は増加してはいるものの、加速度的に増加しているとはまな言えず、今回の付着灰における溶融塩腐食に切り替わる温度域は、試験温度域よりもさらに高い温

度域にあると推察される。

本試験では排ガス温度に依存して減肉量が増加する傾向についても確認された。水野らの発表論文によると、SUS310S系鋼管で同じ試料温度において、雰囲気温度の上昇にともなう腐食量の増大が確認されている⁶⁾ことから、本試験においても排ガスと管表面との間の温度差が過熱管の減肉量の増大に影響を与えている可能性が示唆される。

SUS310S系鋼管と高Cr,Mo系Ni基肉盛溶接管の比較では、すべての温度条件において高Cr,Mo基Ni型肉盛溶接管の減肉量の方が大幅に小さい結果となった。高Cr,Mo系Ni基合金については、既に450℃以上の蒸気条件において優れた耐食性を示すことが確認されており⁷⁾、本試験においても高Cr,Mo系Ni基合金の優れた耐食性を実機において確認できる結果となった。

5. ま と め

本試験において、以下の結果を得た。

- 1) 既報同様、SUS310S系鋼管において、管内壁温度に依存して減肉量が増加する傾向が確認された。
- 2) 同じ管内壁温度において、排ガス温度に依存して減肉量が増加する傾向も確認された。SUS310S系鋼管における排ガス温度650℃と730℃の減肉量を比較すると、管内壁温度450℃～460℃域では約2.4倍、管内壁温度490℃～500℃域では約1.6倍の差があった。
- 3) 高Cr,Mo基Ni型肉盛溶接管とSUS310S系鋼管の減肉量を比較した結果、排ガス温度650℃以上・管内壁温度450℃～460℃域、490℃～500℃域いずれの条件においても、肉盛溶接管SUS310S系鋼管に比べて高Cr,Mo基Ni型肉盛溶接管の減肉量の方が大幅に小さい結果となった。

当社では、現在本稿で報告した試験に続いて新たな供試材を設置した試験を実施している。

また、今回発表した過熱管の減肉量の測定による定量的な評価に加え、腐食を定性的に評価する断面解析等も進めており、過熱管の腐食速度予測および腐食機構に関する知見のさらなる拡充を進め、廃棄物発電ボイラーの高温高压化、および長寿命化を追求していく所存である。

謝 辞

本試験の実施にあたり、多大なるご協力を頂きました自治体様をはじめ、関係各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中本明信，巽 圭司，高橋広光，柴田 清：廃棄物発電ボイラーの高温蒸気化への取り組み，タクマ技報，Vol. 26, No. 1, pp. 44-52 (2018)
- 2) 地球温暖化対策推進本部：地球温暖化対策推進大綱，2002年3月19日
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/taiko/all.pdf> (2026年3月6日)
- 3) 吉葉正行：先進型廃棄物発電プラント環境における耐熱合金システムの複合型高温腐食損傷と対策，日本金属学会会報「まてりあ」，Vol. 38, No. 3, pp. 203-211 (1999)
- 4) 川原雄三，吉良雅治：廃棄物燃焼環境における合金の高温腐食挙動に及ぼす熔融燃焼灰の物理的性質の影響，腐食防食学会「材料と環境」，Vol. 46, No. 1, pp. 8-15 (1997)
- 5) 川原雄三：廃棄物燃焼環境における腐食性燃焼灰付着の電気化学的 in-situ 計測，日本金属学会誌，Vol. 66, No. 6, pp. 583-589 (2002)
- 6) 水野真悟，林 重成，古垣孝志：模擬灰埋没試験におけるオーステナイト系耐熱鋼の高温腐食に及ぼす灰中の温度勾配の影響，日本金属学会2021年秋期講演（第169回）大会，p. 99 (2021)
- 7) 川原雄三，折田寛彦，高橋和義，中川裕二：高効率廃棄物発電ボイラ用新耐食合金管の実証試験，日本鉄鋼協会「鉄と鋼」，Vol. 87, No. 8, pp. 24-31 (2001)

札幌市駒岡清掃工場 運転報告

Operation Report of Komaoka Incineration Plant



鈴木 賢*

Masaru SUZUKI

【要旨】 駒岡清掃工場は、稼働後30年以上が経過し老朽化が進む旧駒岡清掃工場の代替施設として更新するもので、2025年7月に竣工した。本施設は、最新の高性能ストーカ炉と高度燃焼・運転制御技術による安定稼働を実現するとともに、高効率発電システムにより国内最高水準の発電効率を達成し、同年8月より供用を開始している。本稿では、本施設の特徴と運転状況について報告する。

キーワード：ごみ処理、高効率ごみ発電、高性能ストーカ炉、避難所機能、環境学習

Abstract

The new Komaoka Incineration Plant was completed in July 2025 to replace the previous facility that had been in operation for more than 30 years and had deteriorated. The new facility has achieved stable operation by adopting the latest high-performance stoker-type incinerator combined with advanced combustion and operation control technologies, and has also achieved the highest level of power generation efficiency in Japan thanks to its high-efficiency power generation system. Commercial operation started in August of the same year. This article reports on the features and operational status of this facility.

Keywords: waste disposal, high-efficiency waste power generation, high-performance stoker-type incinerator, functions of evacuation shelters, environmental learning

* 環境技術3部
Environmental Design Dept. 3

1. はじめに

駒岡清掃工場（以下、本施設と記す）は、稼働後30年以上が経過し老朽化が進む既存施設の再整備を目的として建設された一般廃棄物処理施設である（図1）。本施設は、「環境・エネルギー・地域融和を次世代に繋ぐ廃棄物処理施設」を基本理念とし、①環境に対して安全、安心を約束する施設、②高効率なエネルギー回収を行う施設、③地域への融和に貢献する施設を施設整備の基本方針として計画された。本事業は、DBO（Design：設計、Build：建設、Operate：運営）方式により実施され、設計および施工は、「タクマ・極東・岩田地崎・伊藤・岩倉・田中・丸彦渡辺特定建設工事共同企業体」、運営は、「駒岡ハイトラスト株式会社」がおこなっている。2020年5月に契約した後、建設工事に着手し、2025年7月に竣工、同年8月1日より供用を開始した。運営期間は、2045年3月末までのおよそ20年間である。本施設は、“燃やせるごみ”を焼却処理し、発生する熱エネルギーの回収をおこなう「焼却施設」、 “大型ごみ”， “燃やせないごみ”を破碎・選別し、資源の回収をおこなう「破碎施設」から構成される。焼却施設で回収した熱エネルギーから得られた蒸気は、蒸気タービン発電機による発電に使用される。また、本施設は国内でも数少ない地域熱供給をおこなうごみ焼却施設であり、発生した蒸気の一部は本施設の周辺地域の集合住宅や区役所、商業施設などの給湯・暖房の熱源として利用されている。

本稿では、本施設の特徴と焼却施設の運転状況について報告する。



※ 写真奥の煙突と建屋は旧駒岡清掃工場

図1 駒岡清掃工場の施設全景

2. 施設概要

2.1 施設規模

焼却施設 600 t/日（300 t/日×2 炉）
 破碎施設 130 t/日（剪断破碎ライン：80 t/日、
 回転破碎ライン：50 t/日）

2.2 設備構成

1) 焼却施設

- | | |
|--------------|---|
| (1) 燃焼設備 | ストーカ式焼却炉 |
| (2) 燃焼ガス冷却設備 | 廃熱ボイラ方式
ボイラ蒸気条件
常用圧力：6.0 MPa
常用温度：450℃ |
| (3) 排ガス処理設備 | ろ過式集じん器，有害ガス除去設備（乾式除去方式），無触媒脱硝装置 |
| (4) 余熱利用設備 | 蒸気タービン発電機，場内給湯，場内冷暖房，場外余熱供給 |
| (5) 灰出設備 | ピット&クレーン方式
主灰：半湿式
飛灰：薬剤固化処理 |
| (6) 排水処理設備 | MF膜ろ過方式
処理水：場内利用
余剰水：下水道放流 |
| (7) 電気設備 | 特別高圧受電（66,000 V）
コージェネレーション発電設備（非常用発電設備と兼用） |

2) 破碎施設

- | | |
|-------------|--|
| (1) 破碎設備 | 燃やせないごみ，不燃性大型ごみ：低速回転破碎機，高速回転破碎機
可燃性大型ごみ：二軸剪断破碎機，縦型剪断破碎機 |
| (2) 搬送・選別設備 | 搬送コンベヤ，磁力選別機，アルミ選別機，破碎物用選別機 |

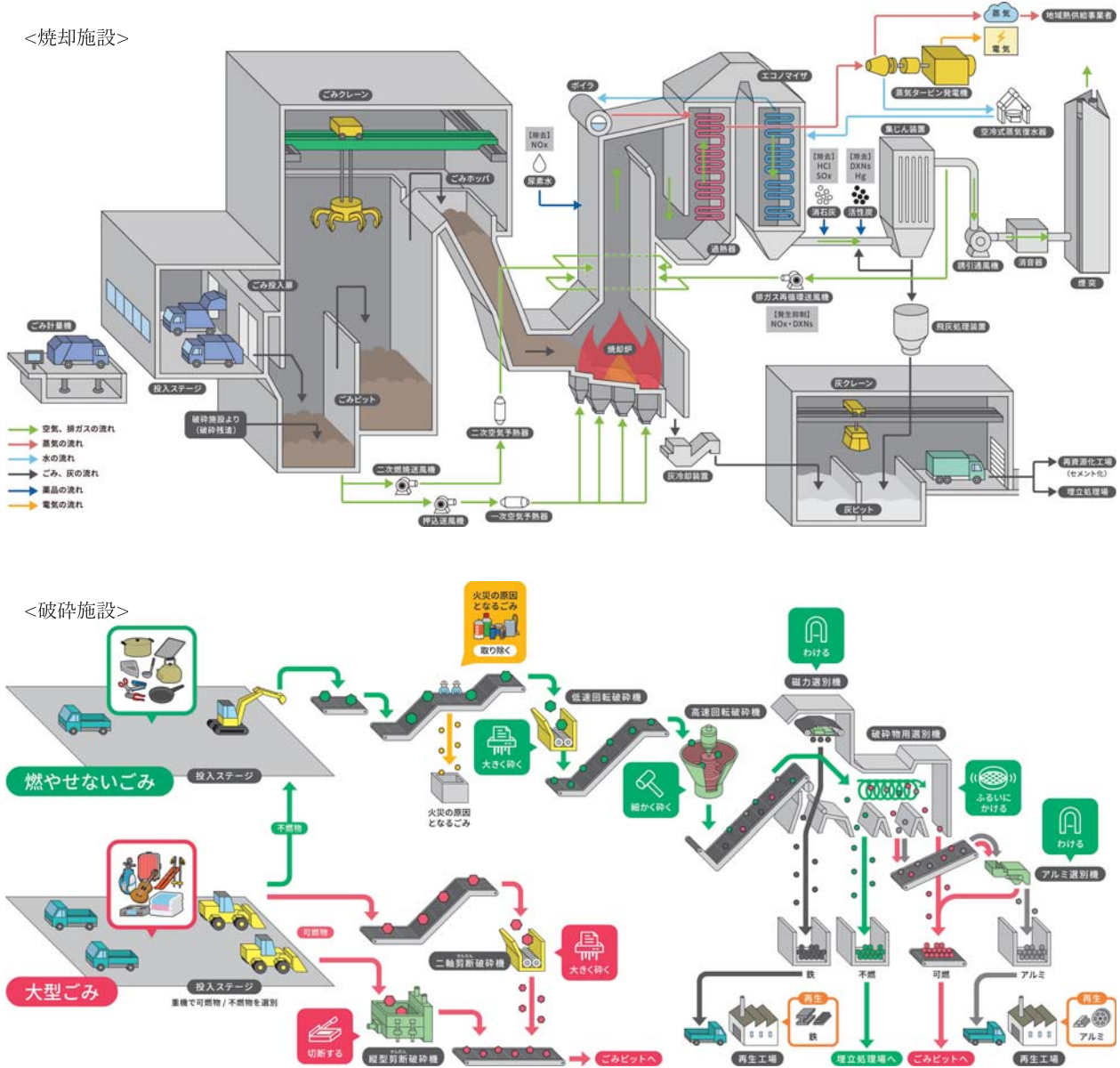


図2 処理フロー

3. 本施設の特徴

3.1 環境に対して安全、安心を約束する施設

(1) 高性能ストーカ炉と高度燃焼・運転制御技術

燃焼性能に優れた当社独自のハイブリッドストーカや排ガス再循環システム、リアルタイムに演算したごみ質から燃焼状態を予測して燃焼制御をおこなう先行型燃焼制御システムにより、低空気比 ($\lambda=1.25$) であっても、ごみ質の変動にかかわらず安定した燃焼の継続が可能で、安定的なごみ処理を実現する。

表1 計画ごみ質

項目	単位	高質ごみ	基準ごみ	低質ごみ
低位発熱量	kJ/kg	12,000	9,000	6,000
三成分	水分	40.7	48.6	56.4
	可燃分	51.2	42.7	34.3
	灰分	8.1	8.7	9.3

3.2 高効率なエネルギー回収を行う施設

(1) 高温高圧ボイラ

蒸気の常用圧力・温度を 6 MPa、450℃ と高温・高圧化することで、蒸気タービンでの熱落差を大きくとり、発電効率を向上させている。ボイラは 30 年以上の施設利用を見据え、過熱器には耐久性に優

れた材質を採用するとともに、ボイラ各所の排ガス・蒸気温度を長寿命化に最適な設計としている。

(2) 3段抽気タービン

蒸気タービンは3段抽気タービンを採用し、ごみの焼却負荷に応じて変動する抽気蒸気圧力を使用先で必要な圧力に過不足なく調整ができるよう、第1抽気ポートと第2抽気ポートの切り替え運転をおこなっている。また、第3抽気ポートから取り出した蒸気を脱気器給水の予熱や場内の給湯、暖房設備に使用することで、発電に使用した蒸気を効率的に余熱利用に用いている。

(3) 低温エコノマイザ

エコノマイザの伝熱面積を従来よりも大きくとることで、エコノマイザ出口ガス温度を160℃以下まで減温させ、減温塔を非設置とし、排ガスからの熱回収量を増加させている。

(4) 圧力波式ダスト払落し装置

ボイラのダスト払落し装置の一部に自社開発の圧力波式ダスト払落し装置を採用することで、蒸気式スートブロワで懸念されるドレンアタックによる過熱管の摩耗なく効果的にダスト除去をおこない、ボイラの長寿命化を図るとともに、蒸気式スートブロワにて使用していた蒸気を発電などの余熱利用設備で有効利用している。

(5) 常用発電設備の採用

非常用発電設備に対し、常用発電設備を兼ねたコージェネレーション発電システム（以下、CGSと記す）を採用し、破碎施設のプラント消費電力や建築設備の消費電力をCGSの発電電力で賄うことで、価値の高い廃棄物（バイオマス）に由来する余剰電力量の最大化を図っている。

さらにCGSのガスエンジンの冷却水からも熱回収をおこない、場内暖房や給湯設備に利用することで、蒸気タービンで発電に寄与する蒸気量を増やし、廃棄物由来の発電量を増加させている。

3.3 地域への融和に貢献する施設

(1) 防災拠点

本施設は「指定緊急避難場所」兼「基幹避難所」に指定されており、洪水や地震などの災害に加え、周辺で大規模な火事が発生した際にも避難者を受け入れることが可能な施設となっている。平常時、本施設の運営・管理のために使用する管理棟内の会議

室や焼却施設の運転員が使用するスペースを、緊急時には避難者用のスペースとして使用するフェーズフリー[†]設計となっている。

プラント設備では災害時等の停電への対応として、CGSの常用発電機を焼却炉1炉の立上げが可能な容量としている。また、災害時のインフラ断絶に備え、施設の稼働に必要なプラント用水や薬品の7日分を施設内に常備している。

(2) 環境学習

本施設は、ごみの適正処理やごみをエネルギーとして有効活用する取り組みの紹介を通じて、持続可能な循環型社会・脱炭素社会実現に向けた環境意識を高めることを目的とした環境学習機能を備えている。焼却炉運転体験設備（図3）や手選別ゲーム（図4）、VR映像などの参加型・体験型の見学プロ



図3 焼却炉運転体験設備



図4 手選別ゲーム

[†] フェーズフリー（Phase Free）とは、「平時と非常時の境界」（フェーズ）を「解放」（フリーに）するという意味で、平時と非常時どちらの状況でも活用できる商品やサービスを提供するという考え方

グラムは見学者の記憶に残りやすく、環境問題への当事者意識の醸成に貢献している。

(3) 各種イベントの実施

本施設の建設期間中から地元自治会の催しに参加・協働することで、地元との良好な関係性および協働体制を構築している。具体例として、運営開始初年度から夏祭りやマルシェといった催しに加え、地元自治会向けの防災教室といったワークショップなどを定期的に開催し、地域のまちづくりに貢献している。

4. 運 転 実 績

4.1 性能試験結果

本施設の引渡性能試験における煙突排ガス測定結果を表2に示す。

いずれの項目についても、排ガス基準値以下を十分に満足する結果となった。

4.2 NOx 濃度

本施設の引渡し性能試験時の煙突におけるNOx濃度を図5に示す。公害防止基準値150ppm(乾きガスO₂=12%換算値,以下同様)に対して平均54.6ppmであり、尿素水等の還元剤を使用することなく、燃焼管理と排ガス再循環システムによりNOxの発生が低く抑えられている。

4.3 発電効率および余剰電力量

竣工後5か月間(2025年8月~12月)の発電効率の推移を図6に示す。日によって入熱量や外気温度等によりばらつきはみられるものの、発電効率の平均値は2炉運転時24.4%,1炉運転時は20.5%であった。また、同期間におけるごみ処理量あたりの電力量に関する運転実績を表3に示す。余剰電力量の実績値は、2炉運転時603kWh/t-ごみ,1炉運転時474kWh/t-ごみであった。外気温度や余熱供給量により余剰電力量の計画値に幅はあるが、竣工後

表2 引渡性能試験における煙突排ガス濃度測定結果 (乾きガスO₂=12%換算値)

項目	単位	1号炉				2号炉				排ガス基準値
		1日目		2日目		1日目		2日目		
		1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	
ばいじん	g/m ³ _N	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
塩化水素	ppm	11	27	29	29	23	21	28	18	40
硫黄酸化物	ppm	4	9	9	8	9	8	9	6	100
窒素酸化物	ppm	44	48	56	59	53	50	50	58	150
水銀	μg/m ³ _N	2.4	0.89	1.2	1.0	1.7	0.79	2.0	1.1	30
ダイオキシン類	ng-TEQ/m ³ _N	0.00000024		0.00000018		0.00000018		定量下限値未満		0.1
一酸化炭素(4時間平均値)	ppm	5		4		4		4		30

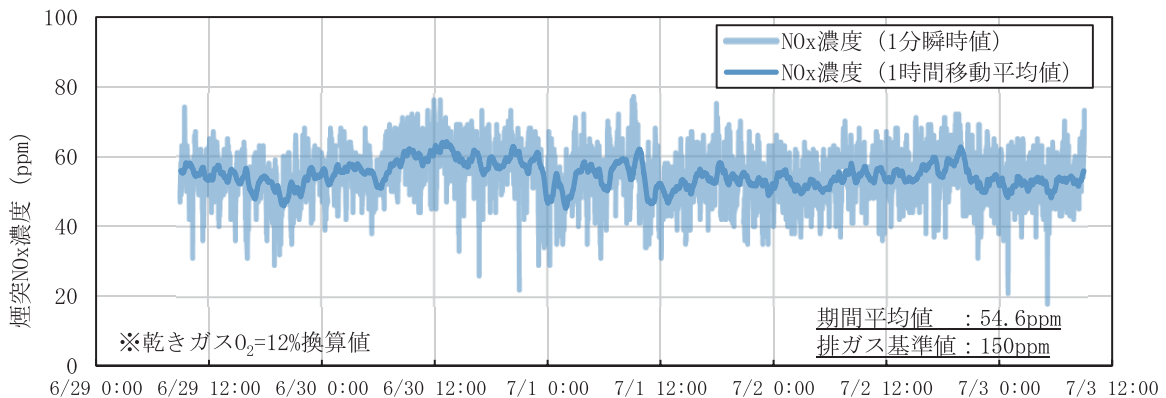


図5 引渡性能試験時の煙突NOx濃度の推移

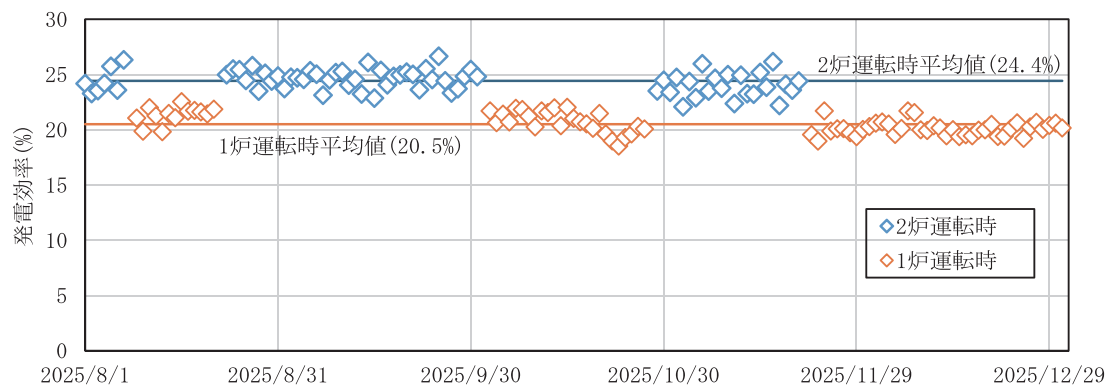


図6 竣工後5か月間の発電効率の推移

表3 竣工後5か月間の電力量データ

運転炉数	発電電力量 (kWh/t)	消費電力量 (kWh/t)	余剰電力量 (kWh/t)
2炉運転時	694 (626~657)	105 (89~104)	603 (530~561)
1炉運転時	600 (599~707)	152 (126~156)	474 (448~565)

※ () は実績ごみ入熱量ベースに換算した計画値を示す。
消費電力量には管理棟および破碎施設の消費分を含む。

5か月間の余剰電力量の実績値は計画値と同等以上であることを確認した。

5. さ い ご に

本施設は、2025年8月の供用開始以降、操炉計画通りの安定的なごみ処理を継続するとともに、高効率なエネルギー回収をおこなっており、余剰電力量についても計画値と同等以上を創出している。また、各種イベントを開催するなど、地域のまちづくりにも貢献している。今後も当グループは、本施設の運営を通じて札幌市様が掲げる「環境・エネルギー・地域融和を次世代に繋ぐ廃棄物処理施設」の基本理念の具現化に向けて尽力する所存である。

最後に、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札幌市様をはじめとする関係者の皆様に対し、深く御礼を申し上げます。

じわり。ひろがる。夢づくり。

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
下水污泥焼却プラント
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 代
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 代
東京支社 東京都港区芝浦3-9-1 芝浦ルネサイトタワー 〒108-0023 電話(03)5730-9200 代
支店 北海道 東北 中部 九州 台北 工場 福屋

〔編集後記〕

本号の巻頭論説では、国立環境研究所の藤井氏に化学産業のカーボンニュートラル転換について、ご自身の研究成果を交えながら紹介いただいた。化学産業は、使用エネルギーと原料、双方の化石資源への依存度が高く、CO₂削減が困難な産業の一つである。しかしながら、化学工場においては幅広い温度帯の熱需要があることから、リサイクル困難な廃棄物の焼却熱を効率的に利用することによりCO₂排出量を大幅に削減でき、さらに焼却排ガス中のCO₂をCCUで原料利用することで、さらなる削減が期待されることである。経済産業省のGX戦略地域制度の公募においては、山口県では廃棄物のセメント原燃料化という化学産業での廃棄物の活用が具体的に検討されている。廃棄物のエネルギーを余すことなく活用する点で非常に興味深く、その動向を注視する必要がある。

解説はユニバーサルエネルギー研究所の金田氏に、江戸時代から現代に至るまで、各時代を支えた鯨油、石炭、石油、天然ガス、原子力といったエネルギー資源の移り変わり、社会情勢、世界情勢や経済事情との関係をわかりやすく解説いただいた。本解説で同氏が危惧する日本の石油の中東依存度の高さが、今まさにホルムズ海峡の閉鎖にともなう石油不足によって、さまざまな産業での停滞や製品不足、物価の上昇などを引き起こしている。

2015年のパリ協定以降、世界的にカーボンニュートラルの実現に向けた取り組みが広く進められているが、世の中に流通する多くのものやエネルギーが化石資源に深く依存していることを改めて思い知らされ、カーボンニュートラル実現の難しさを再認識するとともに、ホルムズ海峡を巡る問題の早期解決を願うばかりである。

報告記事では、脱炭素技術の一つであるCO₂分離回収技術の当社における開発状況を掲載しているほか、一般廃棄物燃焼ガス由来CO₂の農業利用、リチウムイオン電池検出技術の開発など当社の研究開発に関連した記事を多く掲載しているため、ぜひ一読いただきたい。(S.I)

タクマ技報編集委員

委員長	竹口英樹
リーダー	池田広司
委員	山下雅英
	倉田昌明(兼事務局)
	佐藤和宏
	鎌田全一
	小野徳重
	井藤宗親
	水野孝昭
	樋口直樹
	佐野泰久
事務局	印藤信哉

タクマ技報 第34巻第1号(通巻第66号)

(無断複写および転載を禁ず) 2026年6月25日 印刷

(乱丁および落丁はお取替えいたします) 2026年6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
- 下水污泥焼却プラント
- 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

