

[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

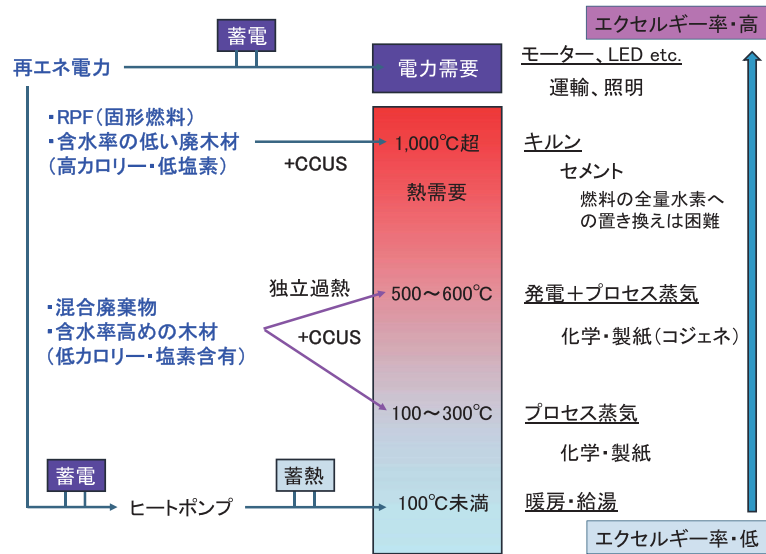


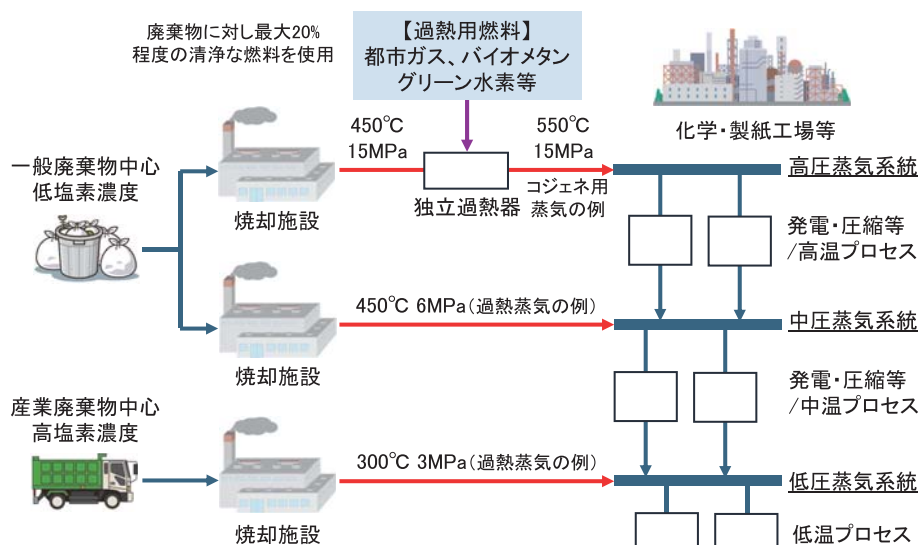
図1 エネルギー源と変換プロセスの特性に合わせた適材適所での利用による最適化

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ま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℃以上、300℃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℃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℃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、

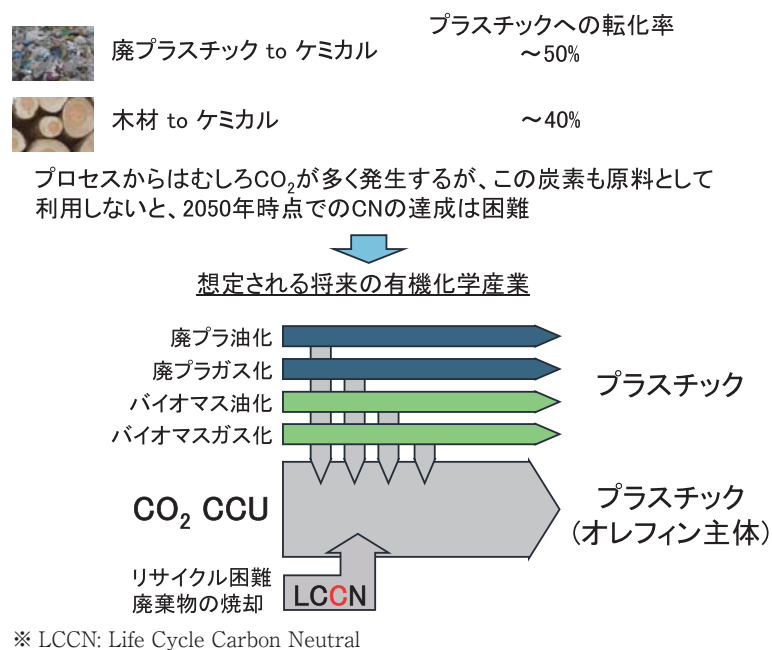


図3 将来の化学産業における CCU の位置づけ

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

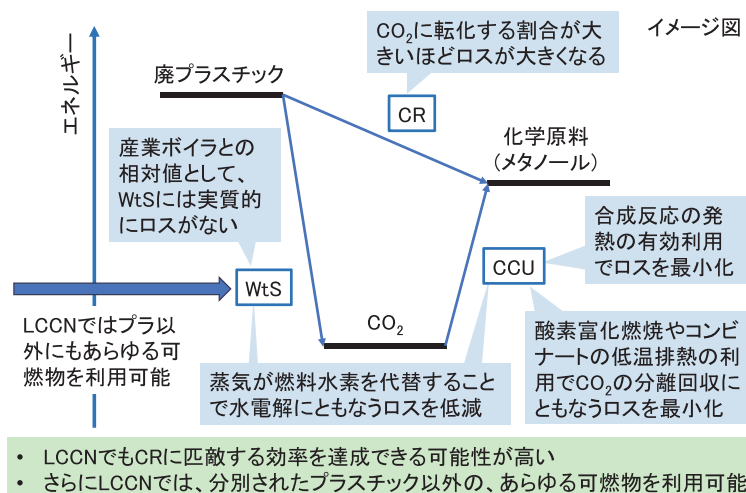
単に燃料を再エネ化するだけでは不十分であり、使用後にやむを得ず焼却される際のCO₂を回収・循環させる仕組みがライフサイクル全体のCNには不可欠となる。

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

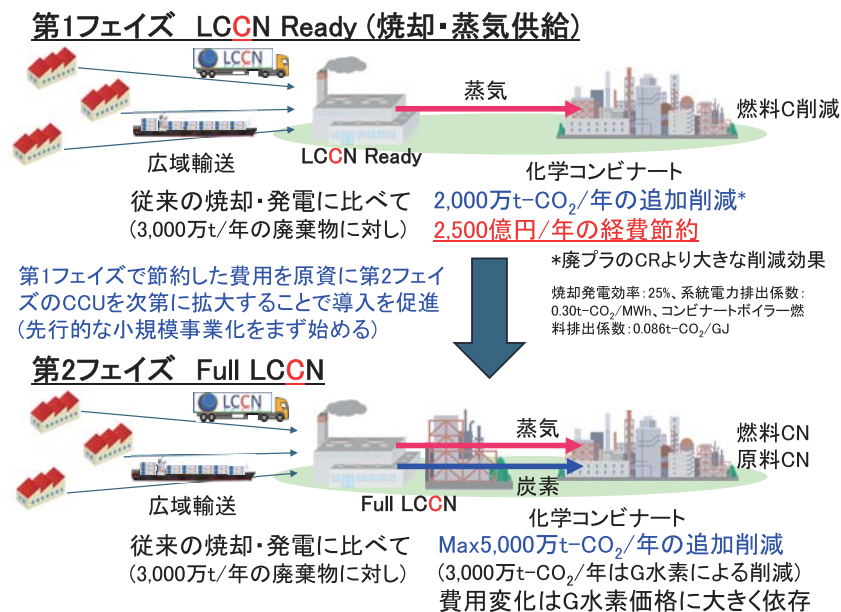


図6 LCCNの2段階での導入によるCNに向けた効果の最大化

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)