

日本学術会議公開シンポジウム
「カーボンニュートラルに向けた熱エネルギー分野の展望」

廃棄物の特性に合わせた 焼却熱の効率的な産業利用



藤井 実
国立環境研究所社会システム領域・システムイノベーション研究室・室長
名古屋大学大学院環境学研究科・客員教授
東京大学大学院新領域創成科学研究科・客員教授

m-fujii@nies.go.jp

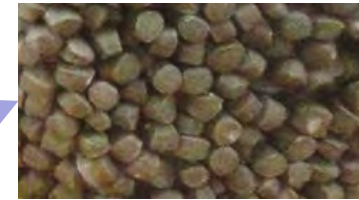
廃棄物焼却＋高効率熱利用＋CCUによる補完の必要性

※数値は目安

材料リサイクル



50%



再生
プラスチック

50%

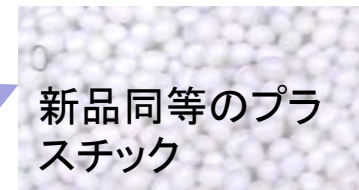


CO₂

ケミカルリサイクル



30 - 40%



新品同等のプラ
スチック

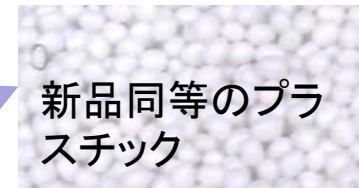
60 - 70%

CO₂

バイオマスプラスチック



30%

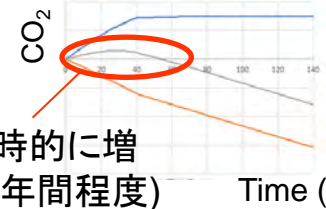


新品同等のプラ
スチック

70%

CO₂

大気中CO₂が一時的に増加する可能性(50年間程度)



Site Zero(スウェーデン) 世界最大級のプラスチック選別施設



Site Zero(スウェーデン) 世界最大級のプラスチック選別施設

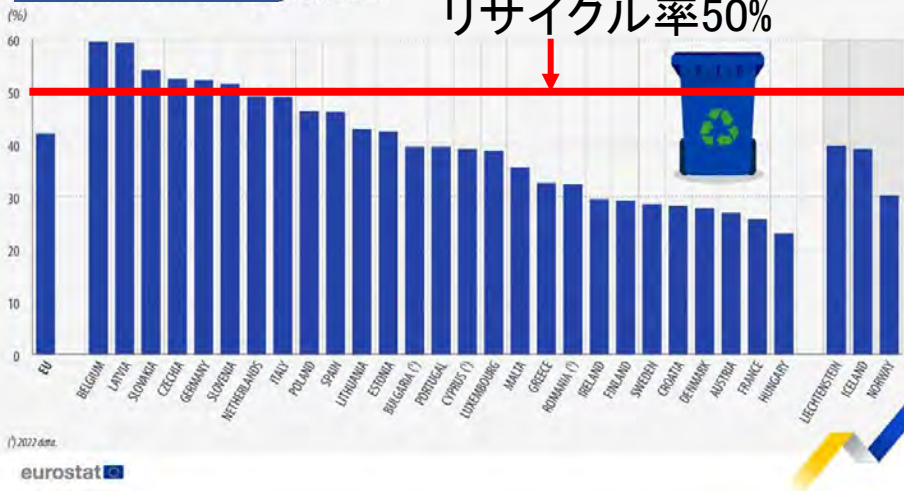


欧州のプラスチックリサイクルの状況

欧州(2023)

Plastic waste, 2023

プラスチック
リサイクル率50%



ドイツ(2023)

Deutschland 2023

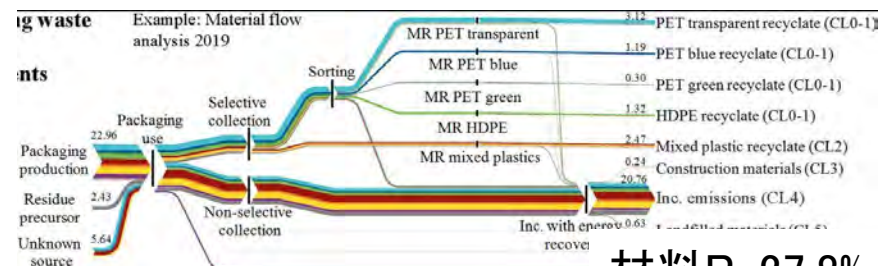
Stoffstrombild Kunststoffverarbeitung und -verbrauch 202



<https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv/studien/Kurzfassung%20Stoffstrombild%202023.pdf>

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20251022-1>

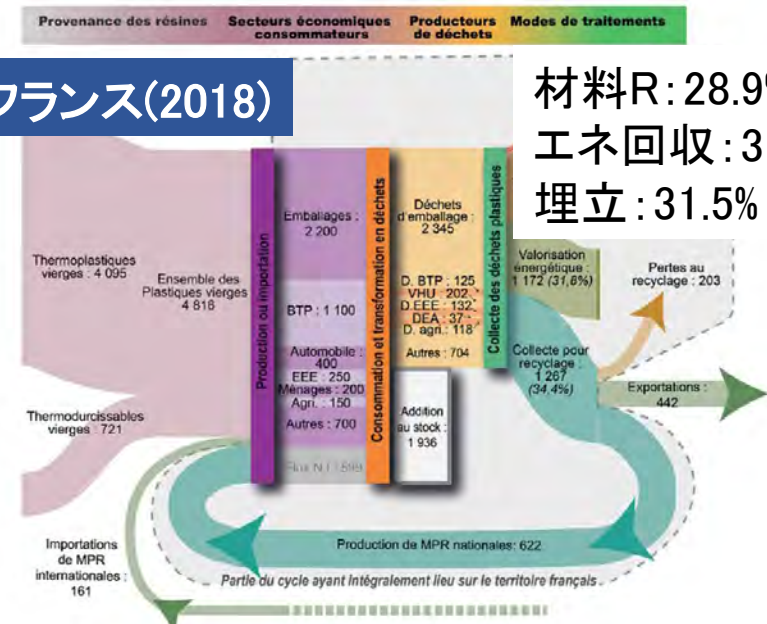
ベルギー・フランドル(2019)



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X22002252>

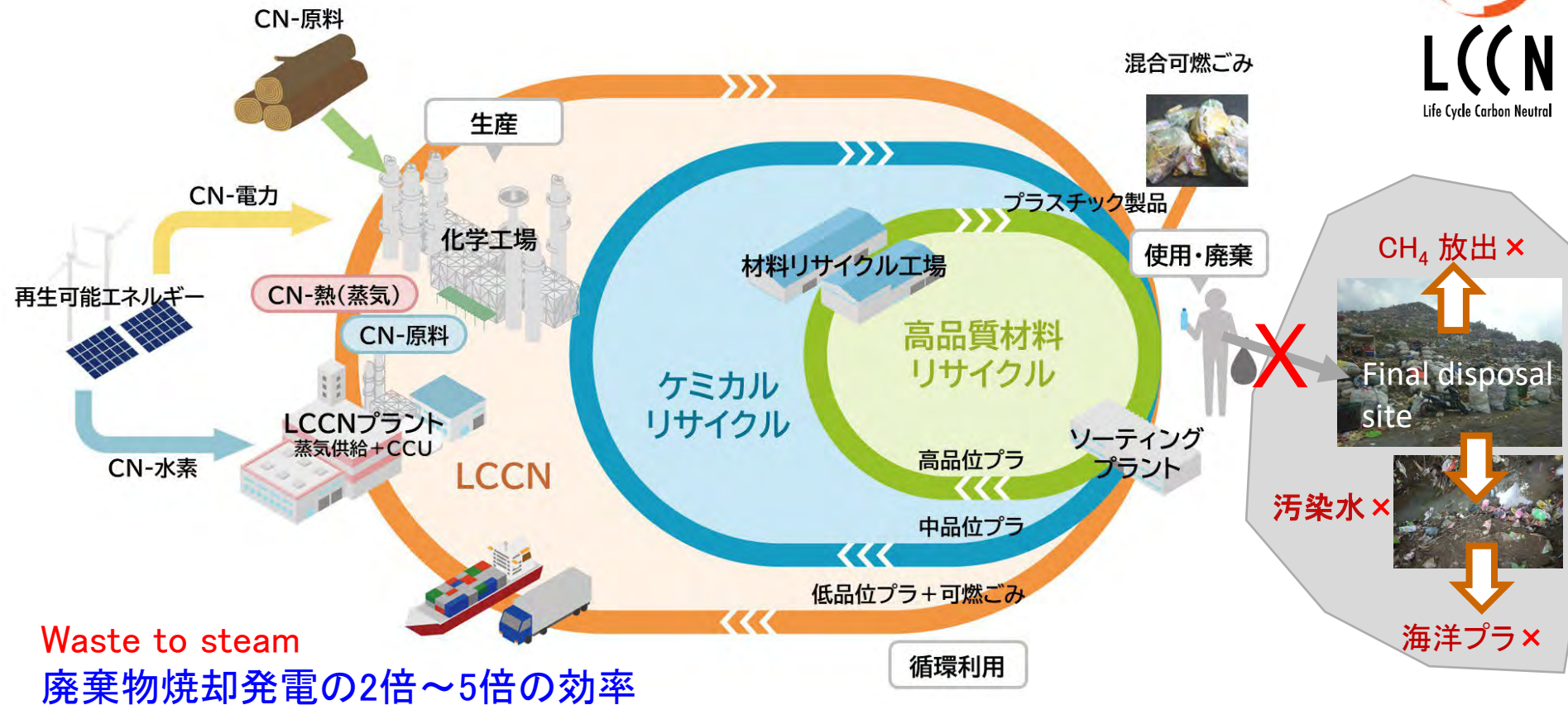
フランス(2018)

材料R: 28.9%
エネ回収: 31.8%
埋立: 31.5%



<https://shs.cairn.info/revue-flux-2024-4-page-55>

ライフサイクルカーボンニュートラル(LCCN)



※CN: Carbon neutral

複数のSDGsへの貢献が期待される



埋立量の大幅削減



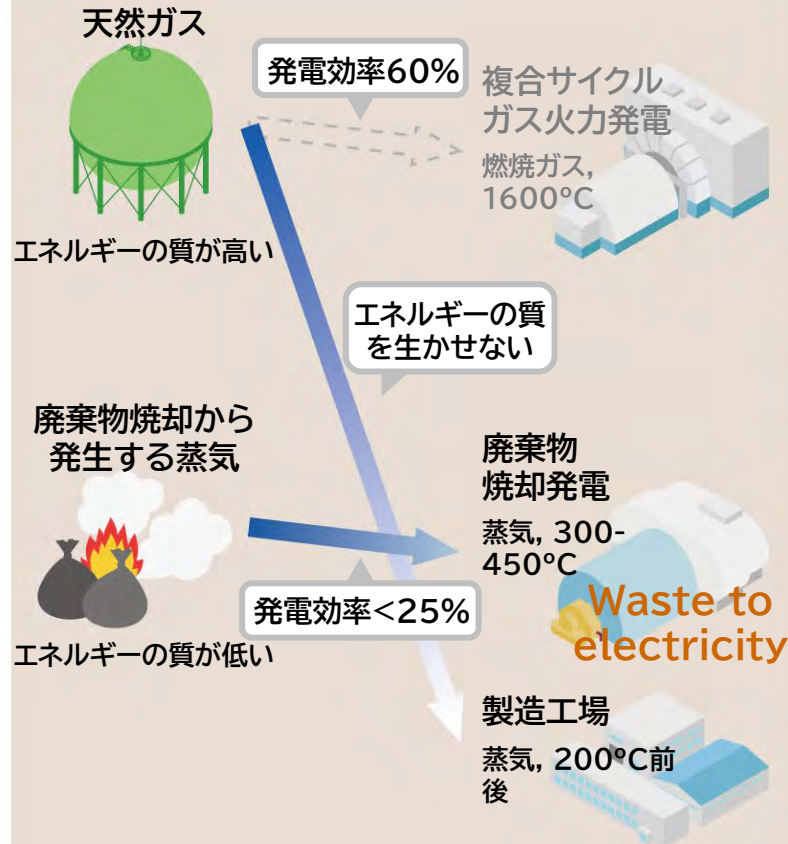
水域の清浄化

残渣を発生させず、総てを利用・カーボンリサイクルできることが重要

廃棄物発電(Waste to Electricity)に対する産業蒸気供給(Waste to Steam)の効率性

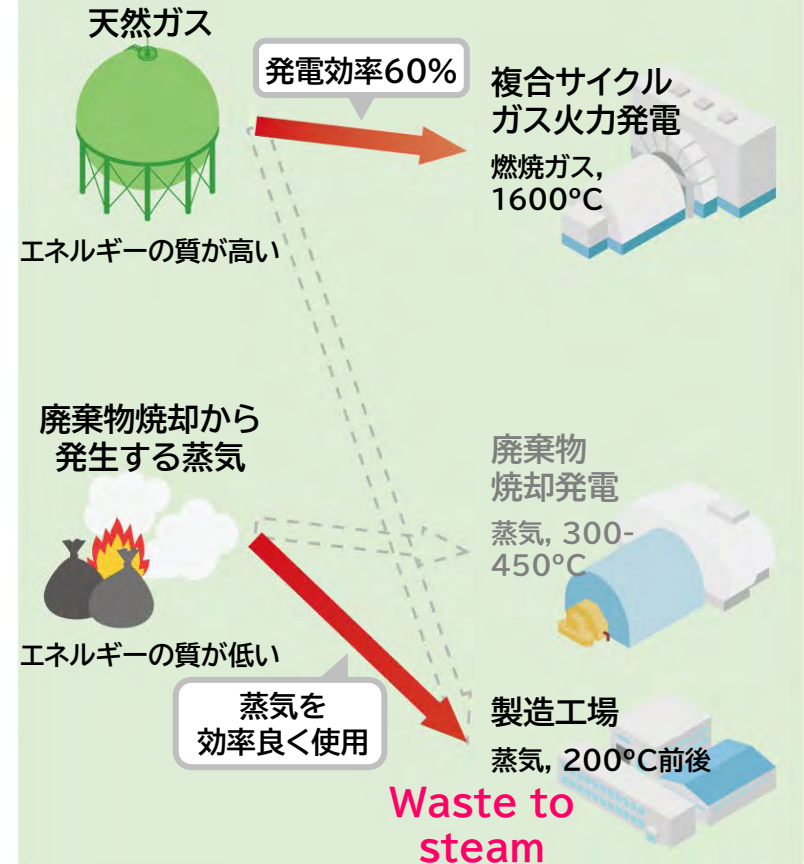
現状

廃棄物で発電・ガスで蒸気供給



改善

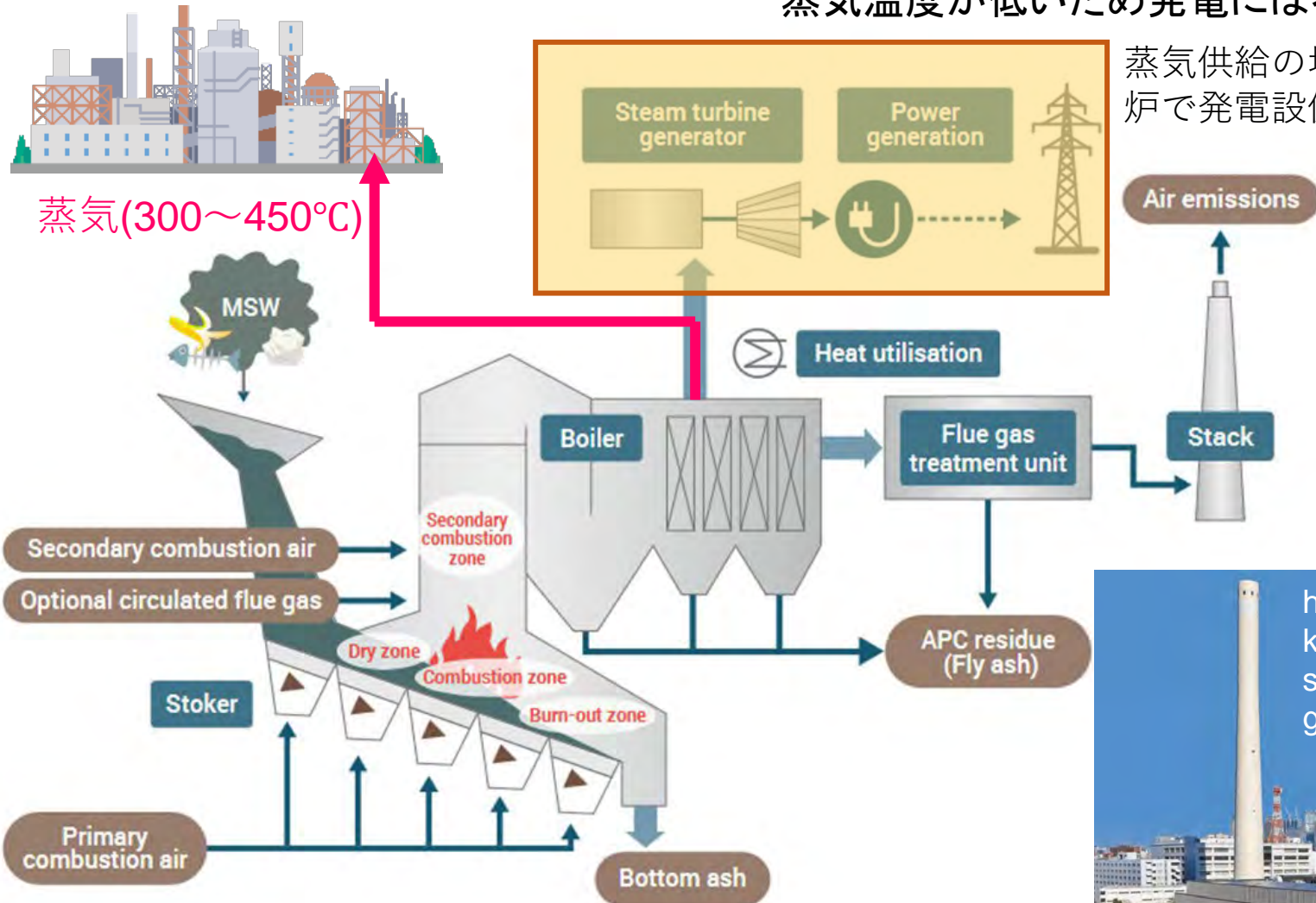
廃棄物で蒸気供給・ガスで発電



廃棄物焼却施設

蒸気温度が低いため発電には不向き

蒸気供給の場合は焼却炉で発電設備が不要

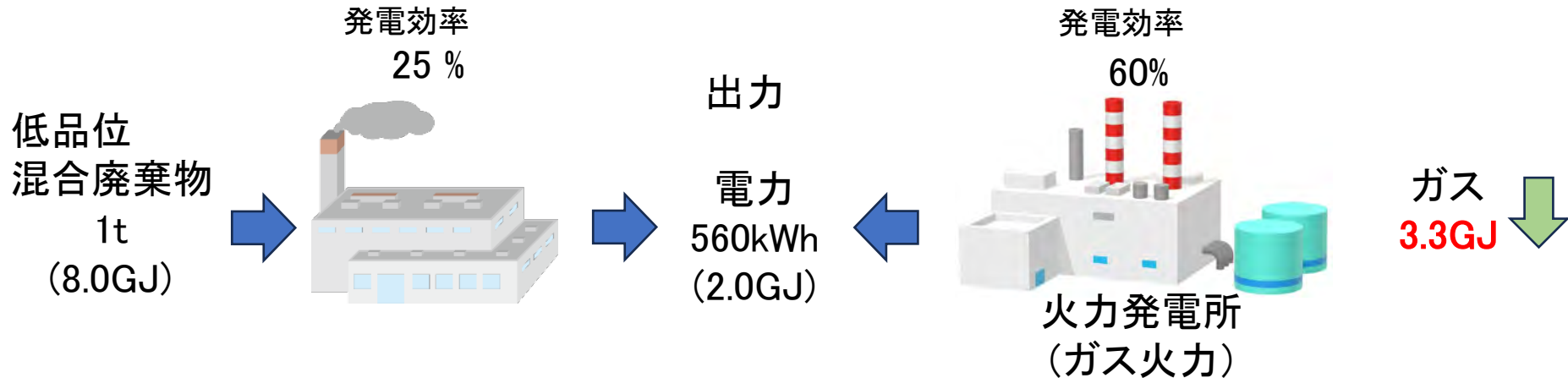


Source:

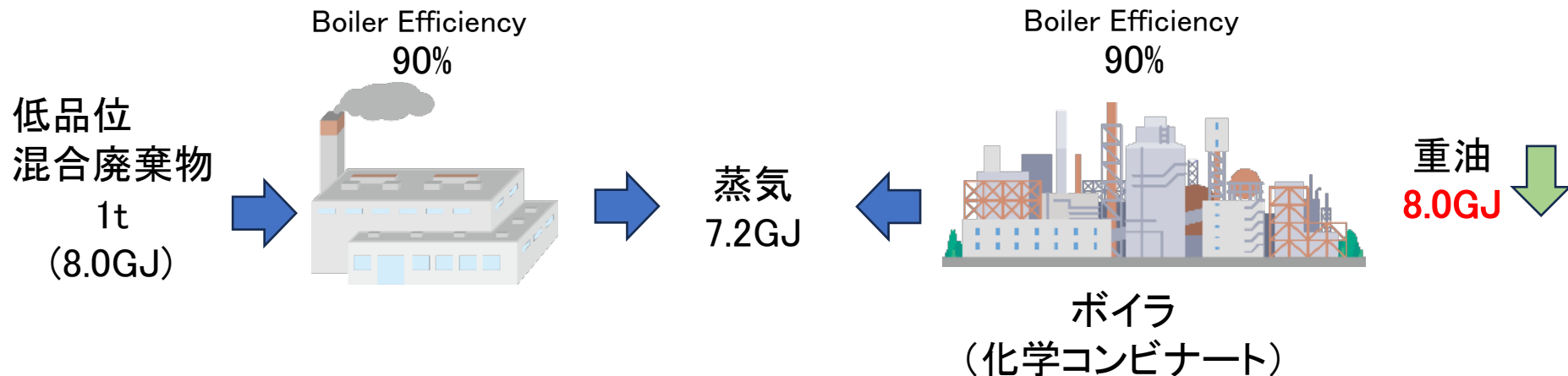
https://www.iges.or.jp/en/publication_documents/pub/policysubmission/en/10877/WtEI_guideline_web_200615.pdf

焼却・蒸気供給の焼却・発電に対する効率性

焼却発電 (Waste to Electricity)



焼却・蒸気供給 (Waste to Steam)



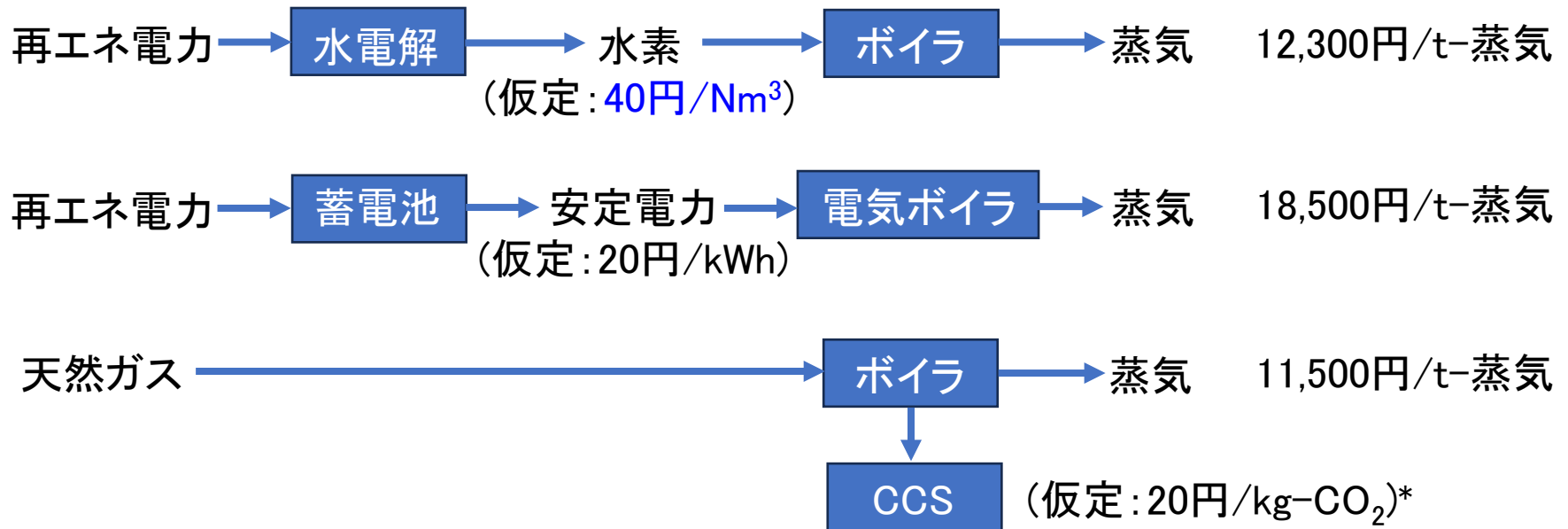
カーボンニュートラル時代の産業プロセス蒸気の価値

現状は、1Jの蒸気より1Jの電力の価値が高い

天然ガス: 15USD/Mbtuのとき、**7600円/t-蒸気** (燃料費のみ)

CNな形で蒸気供給を行うとすると

蒸気製造コスト
(燃料・電力費のみ)



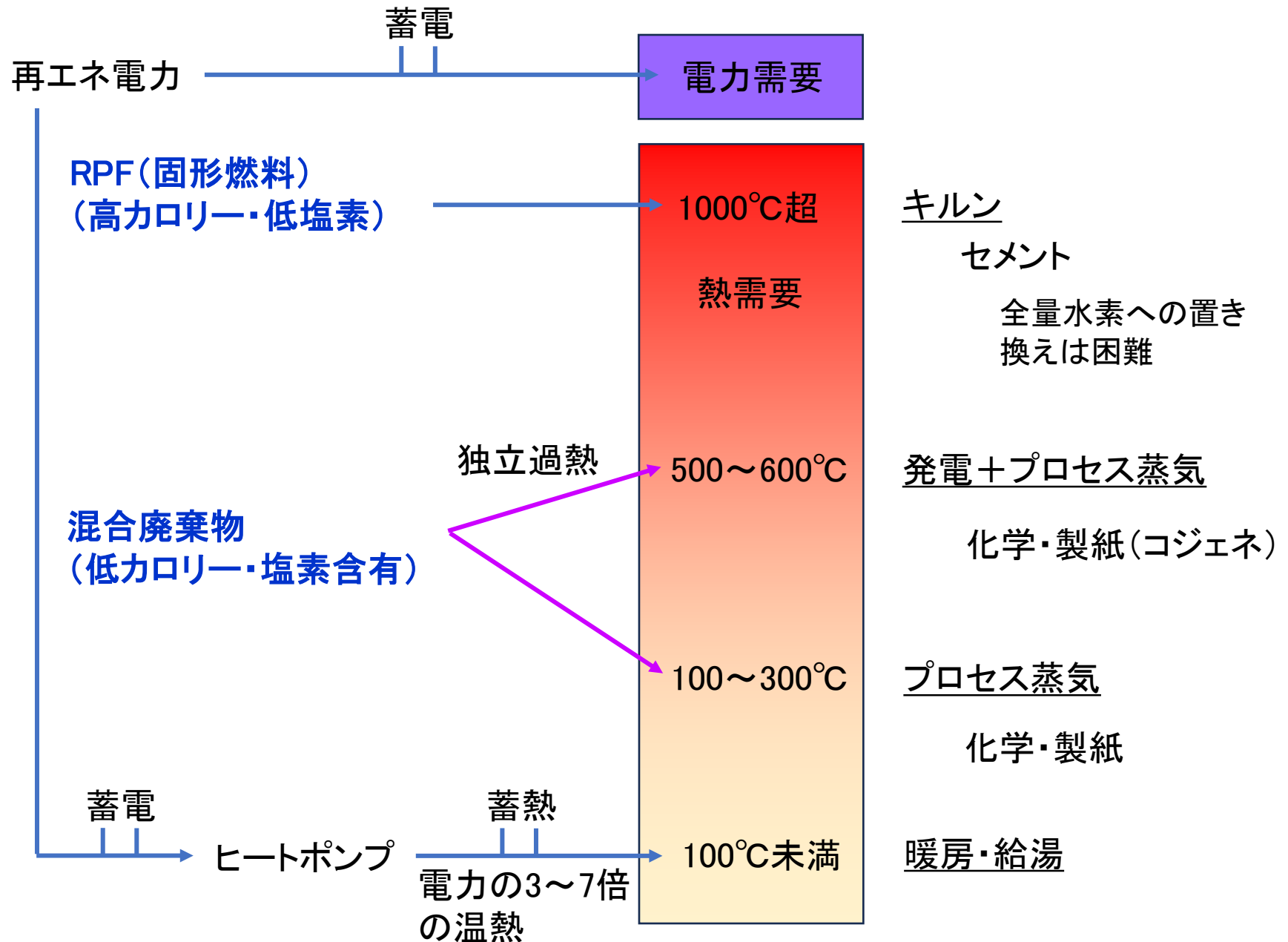
【前提条件】

電気ボイラの効率: 98%、燃料ボイラの効率: 90%

蒸気熱量: 3.0GJ/t

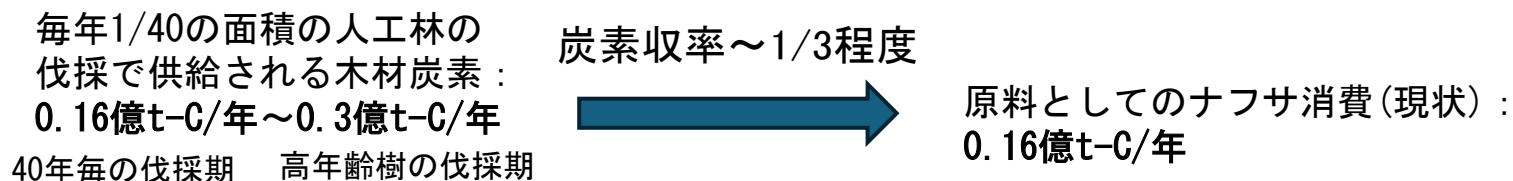
*参考資料: https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/jisshi_kento/pdf/003_04_00.pdf

リサイクル困難な可燃廃棄物の効率的な利用先(CCUS付きが前提)



木材炭素の利用と森林の蓄積量の変化

投影のみ



森林の適切な整備は必要！しかし、ある程度抑制的に木材を利用する必要がある。
転換プロセスから発生するCO₂を含め、炭素を徹底的に利用することが求められる。

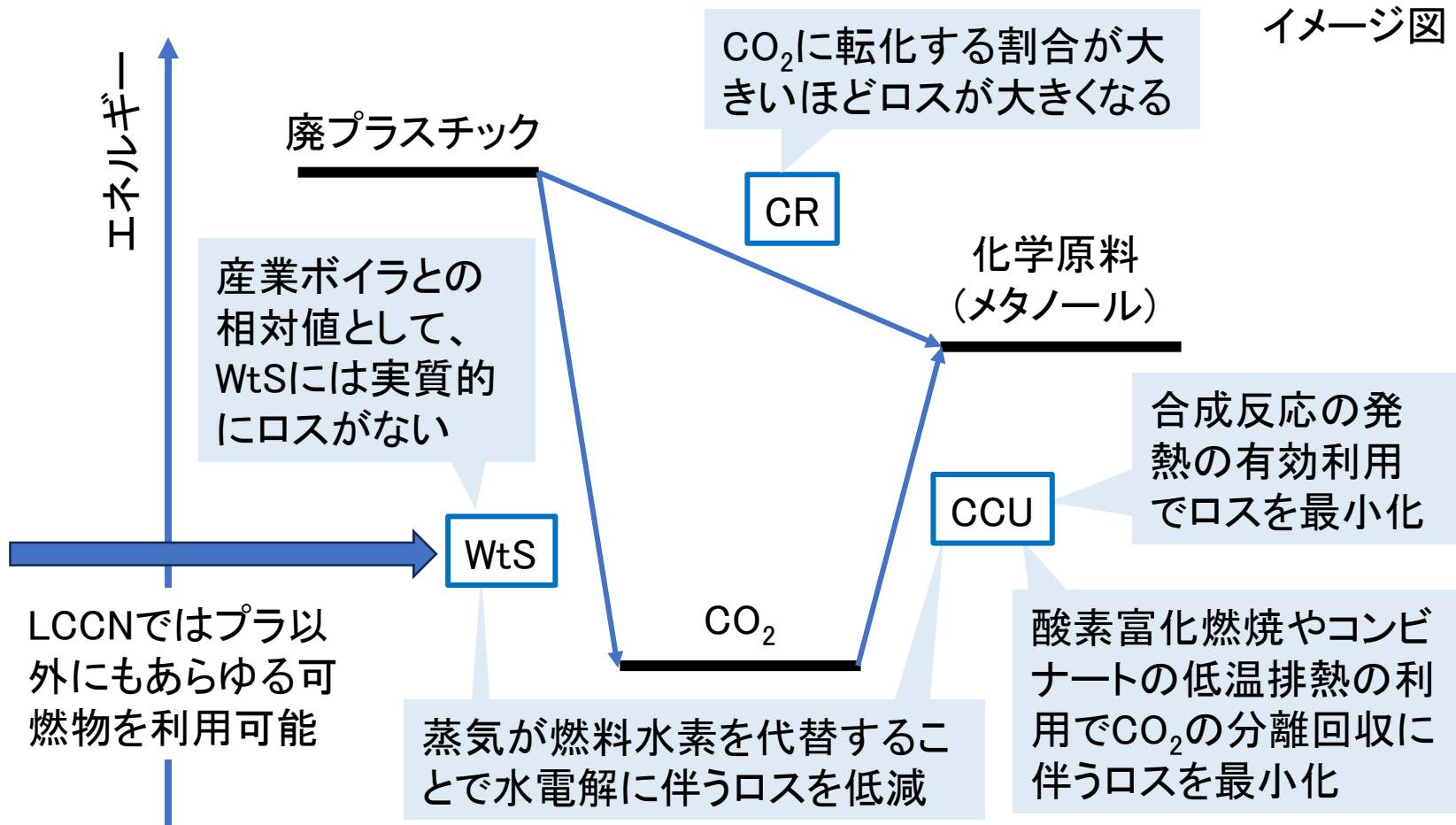
参考資料：<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/r4/attach/pdf/2-2.pdf>

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/022_04_00.pdf

胡ほか, 日本LCA学会研究発表会, 2024

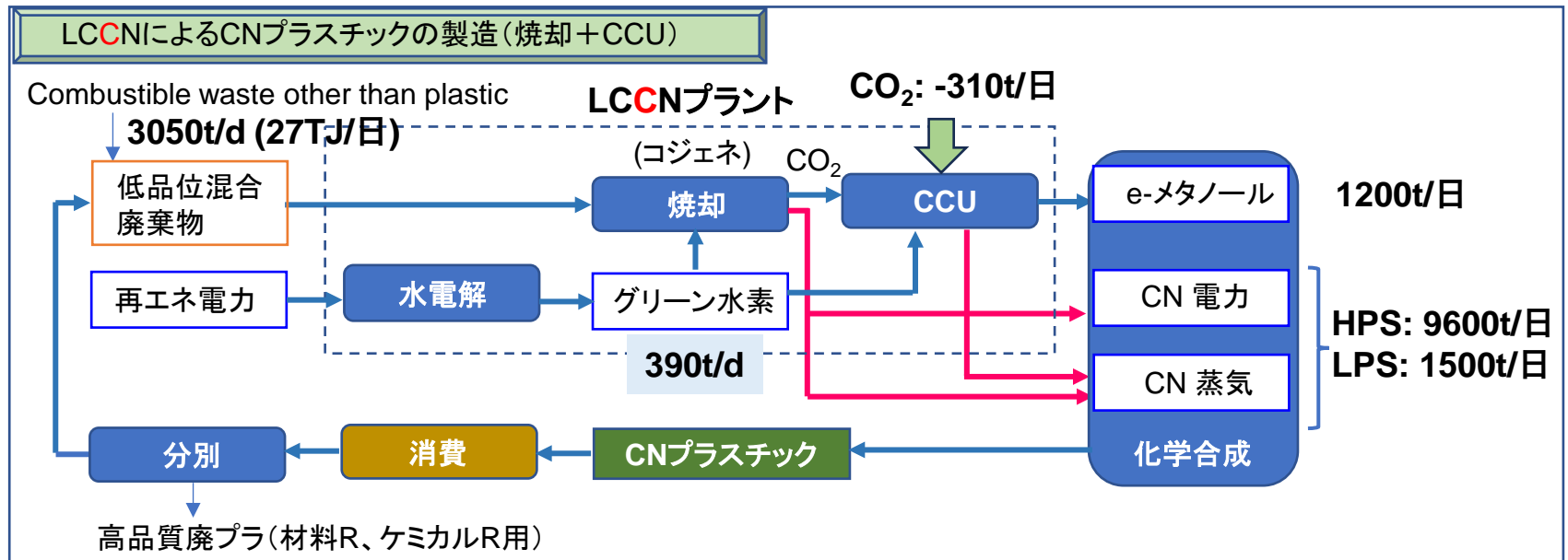
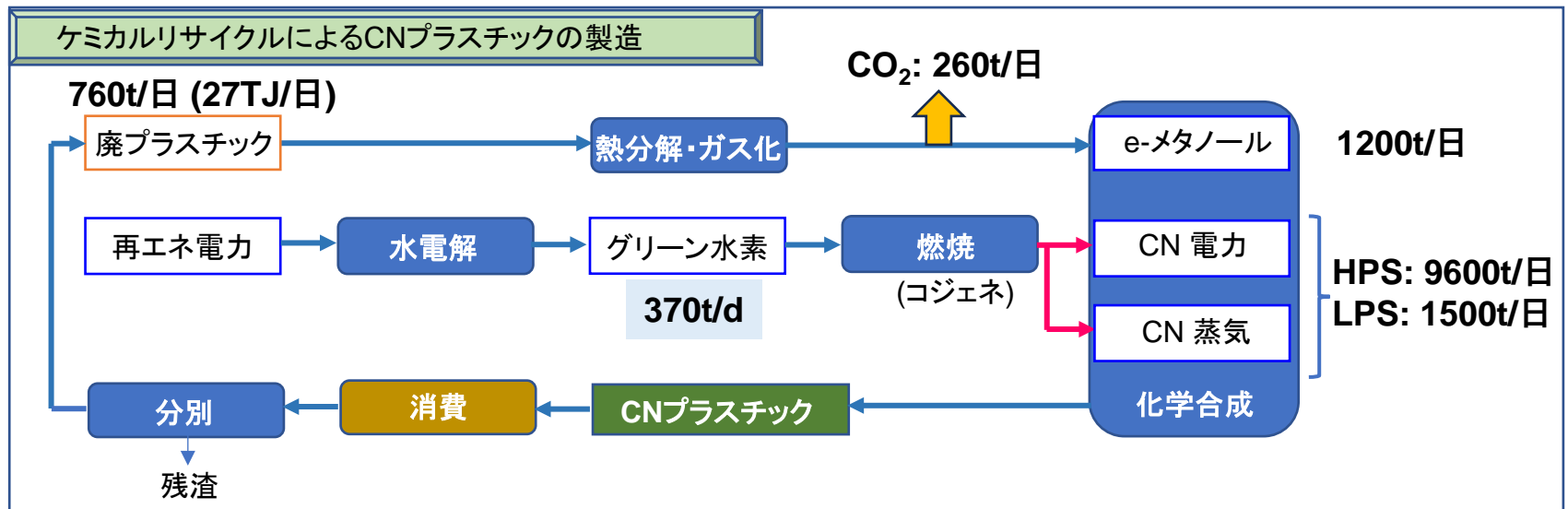
LCCN(焼却・蒸気供給+CCU)とCR(ガス化)の比較

トータルの反応熱は、反応経路によらず同じ(ヘスの法則)。重要なのは、エネルギーロスを如何に小さく抑えることができるか。



- LCCNでもCRに匹敵する効率を達成できる可能性が高い
- 更にLCCNでは、分別されたプラスチック以外の、あらゆる可燃物を利用可能

LCCNの高い効率性(プラスチックのガス化・ケミカルRとの比較)



LCCNでは焼却熱が高効率に利用されることで、ケミカルリサイクルに匹敵するエネルギー効率でカーボンリサイクルが可能

LCCN実施のポテンシャル

【供給側】

廃棄物焼却施設での焼却

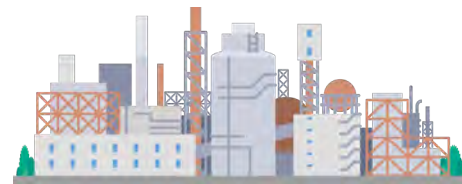


エネ
ルギー

一般廃棄物だけで
約300PJ/年を焼却
焼却コスト: 約1兆円/年

【需要側】

化学産業のエネルギー消費



重油換算で
約800PJ/年*1を消費
2000万kL/年相当
(1.6兆円/年*2相当)

再エネ電力の利用、ナフサ分解炉の減少等で化学産業の熱エネルギー需要は減少すると思われる



炭素
資源

廃プラスチック(炭素換算)

約7,000 kt-C/年*3

一廃・産廃可燃合計(炭素換算)
(プラを含む, 再生紙分を含まず)

約20,000 kt-C/年*3

ナフサ消費量(炭素換算)

約23,000 kt-C/年*4



*1 化学産業のCO₂排出量約6000万t/年(日本化学工業協会, 2023)をC重油として換算

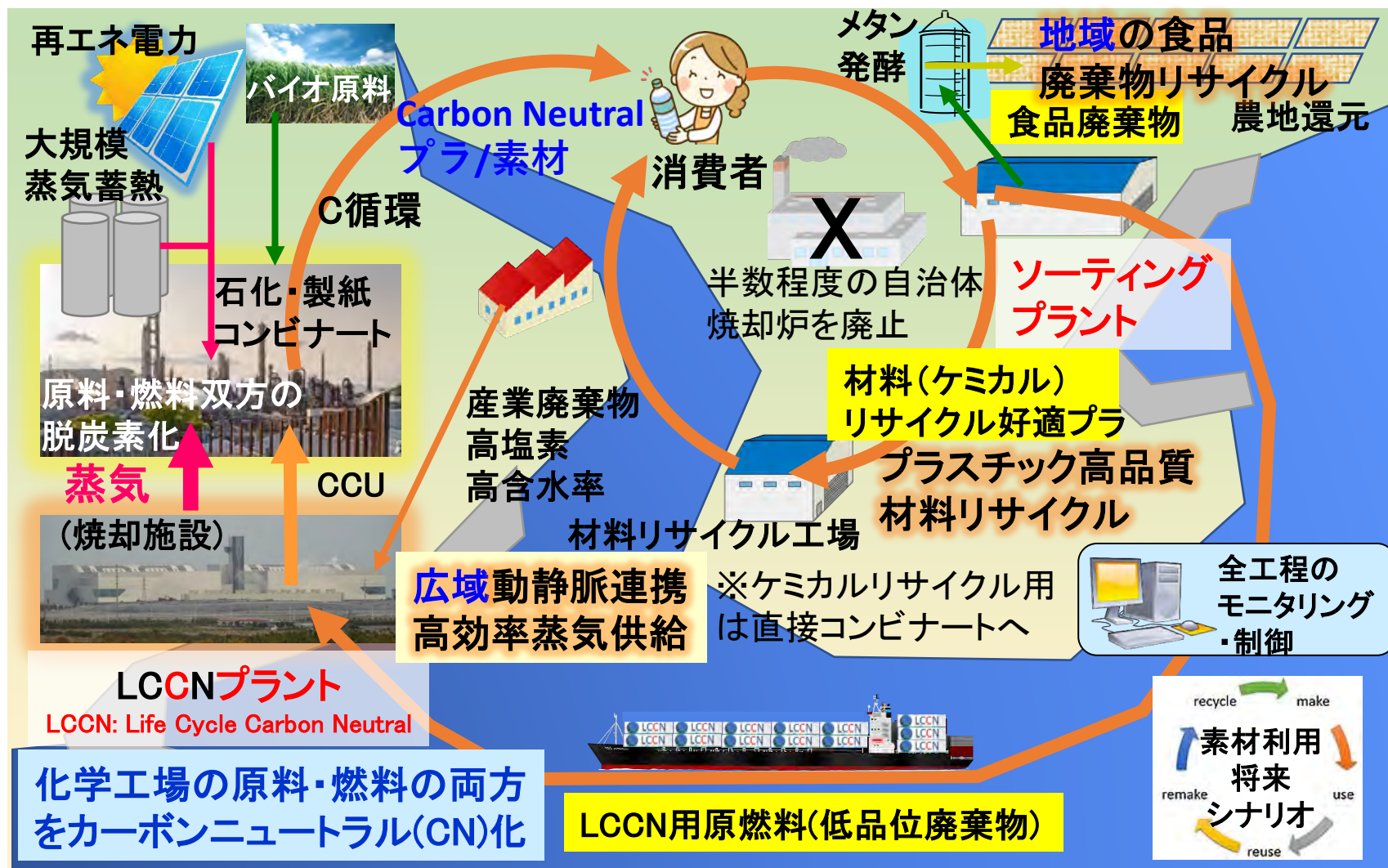
*2 80,000円/kLで換算

*3 化学工学会地域連携カーボンニュートラル推進委員会, カーボンインディペンデンスビジョン, 2024

*4 経済産業省石油製品需要想定検討会, 2024~2028年度石油製品需要見通し, 2024

低品位廃棄物の化学コンビナートでの広域資源循環(LCCN) と厨芥類の地域での循環の組み合わせ

地域



広域

Waste to steamの実例

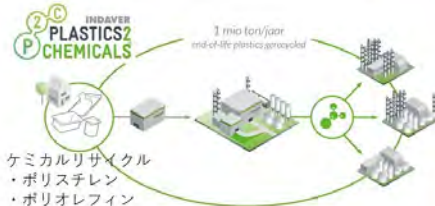
ECLUSE
a channel for green energy

グリーンヒートプロジェクト
通称「エクルーゼネットワーク」

- ・地上4km、地中1kmの配管を設置
- ・近隣の化学工場5社に400℃、4MPaのグリーン蒸気を供給
- ・2019年3月から稼働

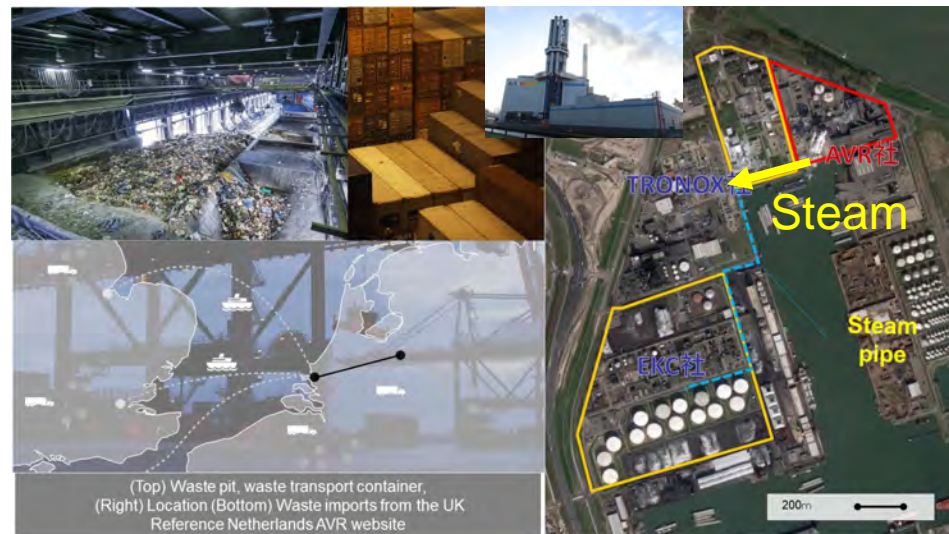


新構想ECLUSE2:
工場からのCO2排出量を年間10万トン削減しているが、
ECLUSE 2（右図）に拡張すると15万トン/年の削減となる。
ケミカルリサイクルの導入計画がある。（下図）



エックス都市研究所・土井氏提供資料

アントワープ・ベルギー



ロッテルダム・オランダ



Incinerator
Waste incineration capacity:
1500t/day
Steam: 225 t/hour, 400℃, 4MPa

ベルンブルク・ドイツ



ウルサン・韓国

横浜市・鶴見清掃工場から近隣化学工場への蒸気供給



<https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/sumai-kurashi/gomi-recycle/shokai/shokyaku/kojo-tsur/turukou.html>

廃棄物の効率的な輸送方法



ルツェルン(スイス)



ロンドン(イギリス)

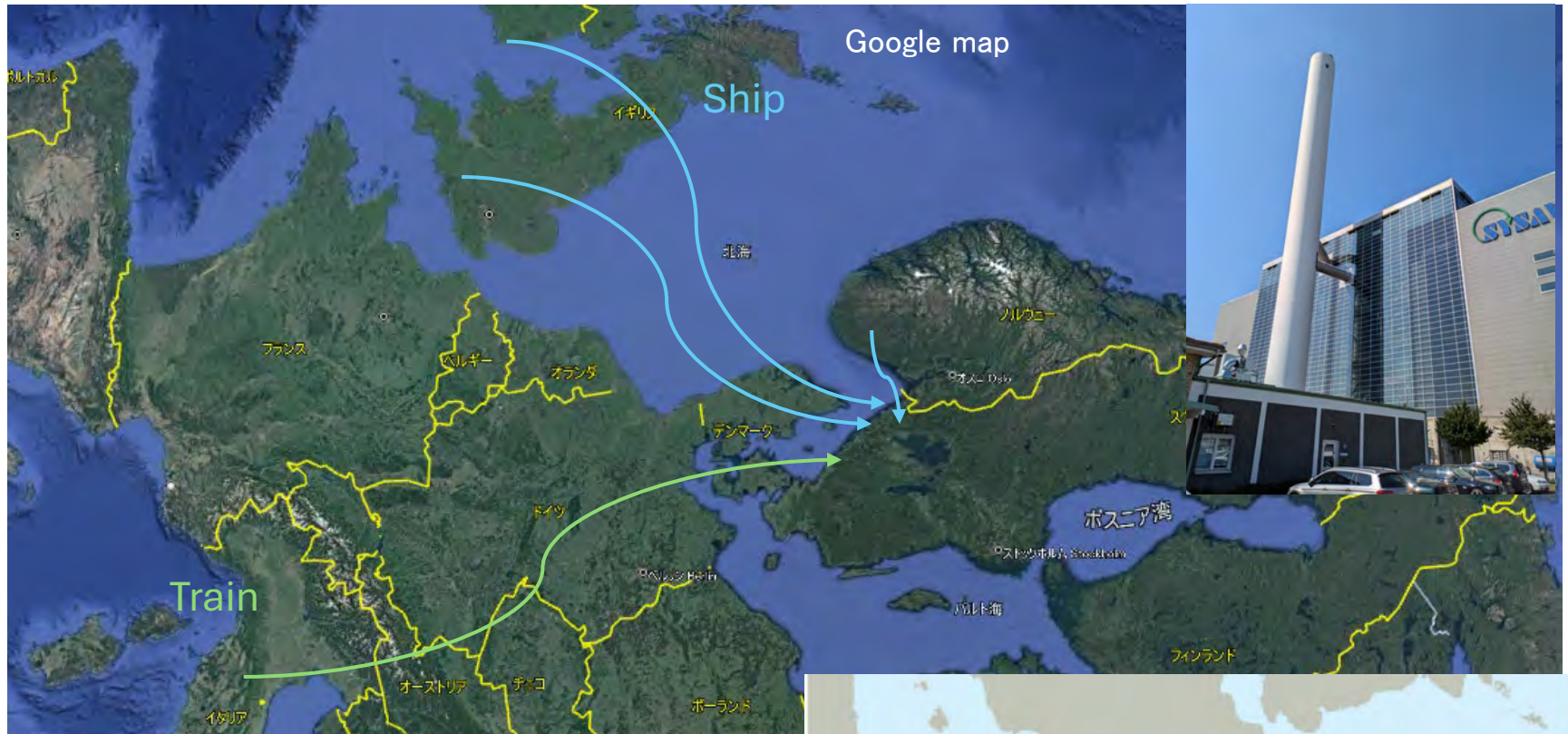


ロッテルダム(オランダ)



上海(中国)

スウェーデンでの焼却廃棄物の広域輸送



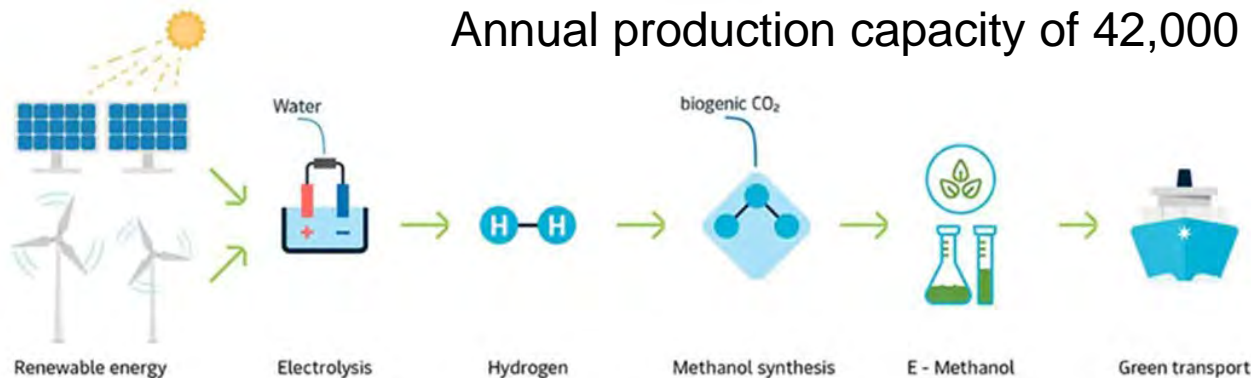
Train : Freight transport route
"Scandinavian-Mediterranean Corridor"

エックス都市研究所・土井氏提供資料を加工

Kassø e-methanol facility in Denmark

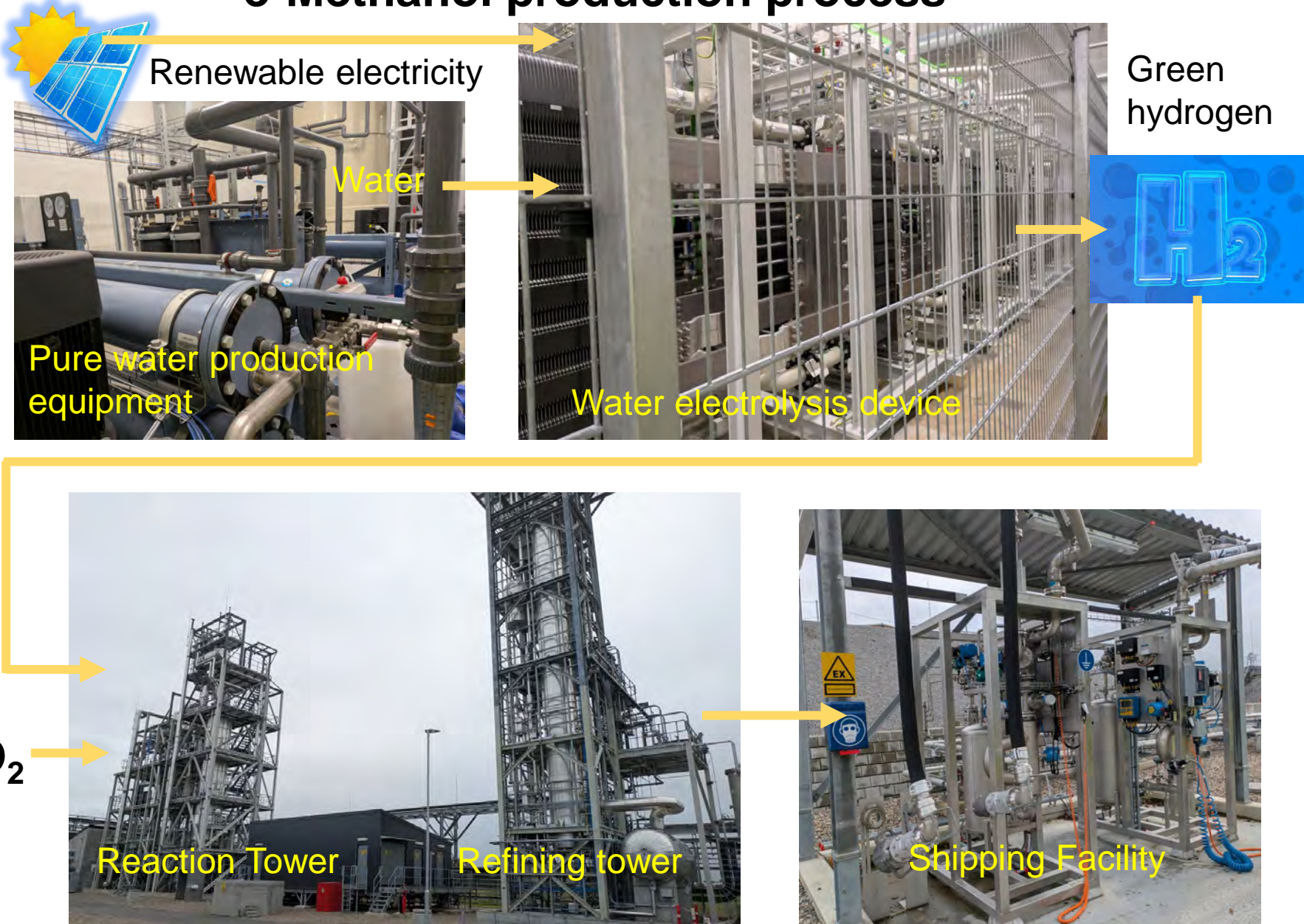


Annual production capacity of 42,000 tons of e-methanol



The investment in the facility is 150 million euros (including investment from Japanese companies)

e-Methanol production process



The technologies to build the LCCN already exists; all that's left is to act.

LCCNの段階的な導入

第1フェイズ LCCN Ready (Waste to steam)



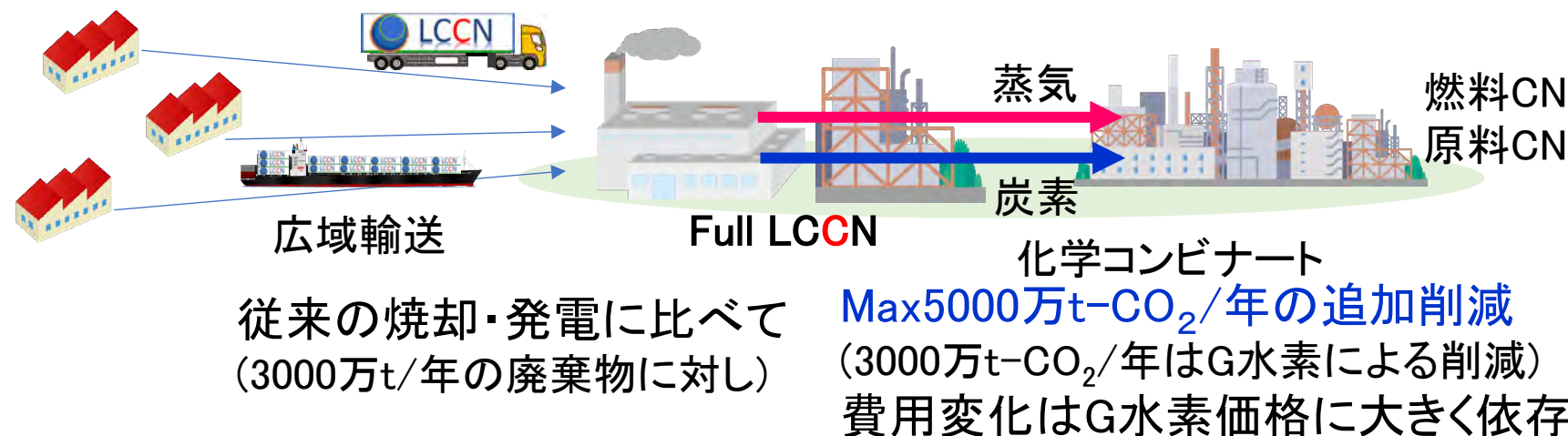
第1フェイズで節約した費用を原資に第2フェイズのCCUを次第に拡大することで導入を促進
(先行的な小規模事業化は必要)

*廃プラのCRより大きな削減効果

焼却発電効率: 25%、系統電力排出係数:
0.30t-CO₂/MWh、コンビナートボイラ燃料
排出係数: 0.086t-CO₂/GJ



第2フェイズ Full LCCN

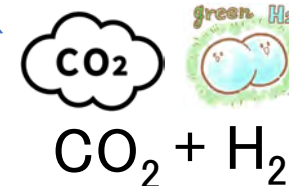
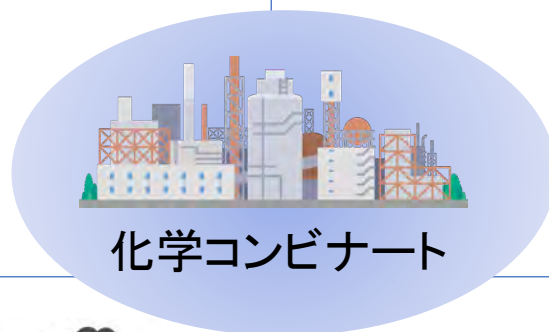


社会情勢の変化に併せてCO₂排出削減を常に効率的に実現

LC^{RED}Nの
フェーズ 第1フェーズ(～2040年頃)
Waste to steam

第2フェーズ(2040年頃～)
FULL LCCN
(Waste to steam + UUC)

プラ製造
原料



プラ製造
エネルギー



化石燃料削減(CO₂削減)



H₂削減分を
CCUに活用

蒸気供給によって
化石燃料由来CO₂を
効率的に削減

蒸気



LC^{RED}N Ready
プラント

燃料としてのグリー
ン水素を削減し、そ
れをCCUに活用

蒸気



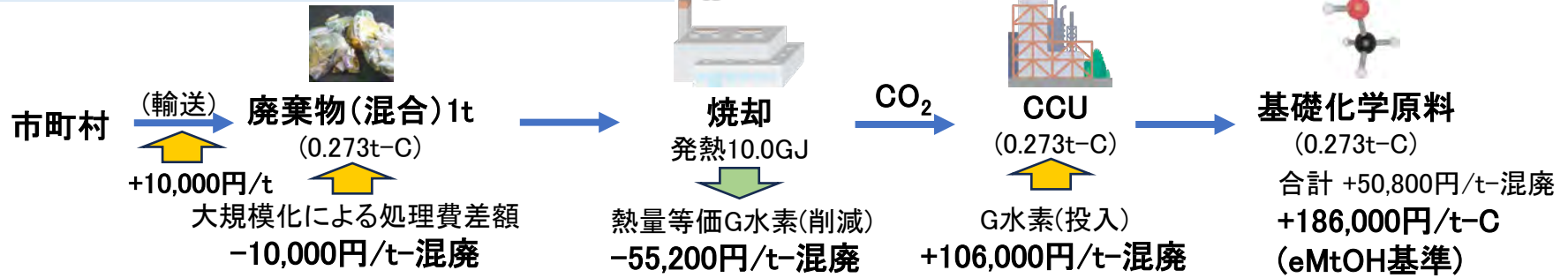
LC^{RED}Nプラント

CO₂

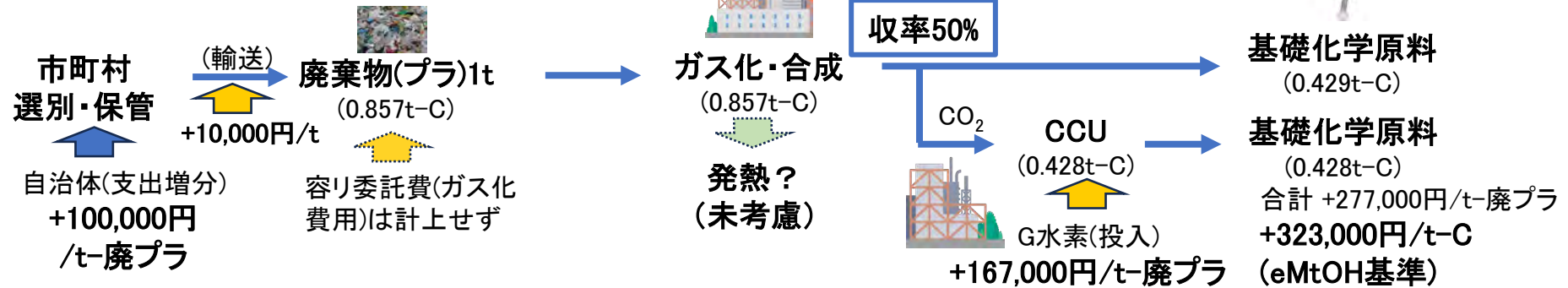
LCCNとケミカルリサイクル・バイオマス(木材)原料利用の比較

※炭素原料調達及びCCUに関わるH₂調達費用の変化分のみ評価。総費用の比較ではない
 グリーンH₂価格60円/Nm³の場合

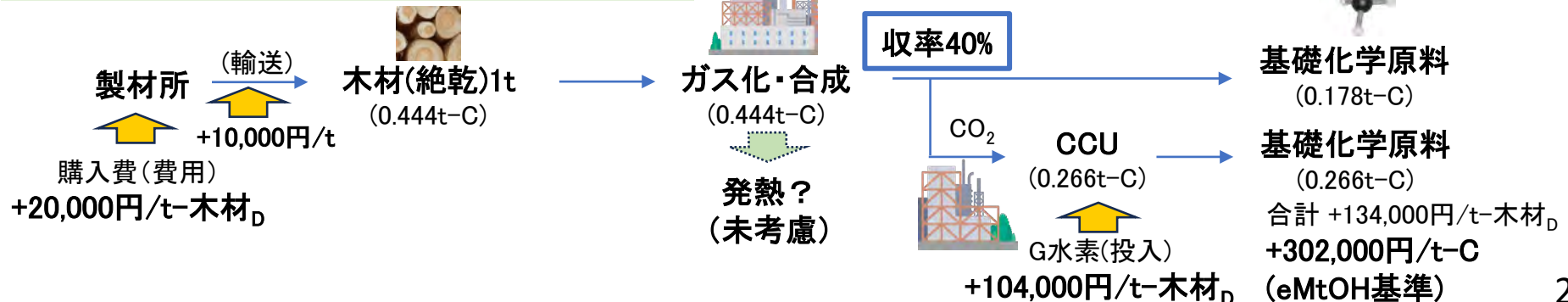
①混合焼却・熱供給+CCU(LCCN)シナリオ



②分別プラケミカルR(ガス化)+CCUシナリオ




③木材化学原料化(ガス化)+CCUシナリオ



LCCNプラントへの転換によるポテンシャル



将来3000万t/年の一廃・産廃をコンビナートのLCCNプラントに集約した場合のおおよその経済性の変化(焼却発電との比較) +: 費用増加 -: 費用削減

LCCN Ready Plant	輸送費の増加 	+3500億円/年
	焼却炉の建設・運転経費の削減(LCCN Ready)	-4000億円/年
	蒸気供給と発電との差額	-2000億円/年
LCCN Plant	2400万t/年(80%)のCO ₂ の回収費用(カーボンマイナス)	+500億円/年
	反応させる水素の価格(20円/Nm ³ の場合)	+7000億円/年
	生産されるエチレン・プロピレン(580万t/年*)の現在価値	-7000億円/年
	CCUのための装置の建設・運転経費	削減額不明

合計 カーボンリサイクルまで行った上で(廃棄物については300万t-CO₂/年程度のカーボンマイナス)、2000億円/年以上の経済的メリットが得られる可能性がある。

藤井, INDUST, 2023

*現在のエチレン+プロピレンの生産量: 約1200万t/年で、その約半数を供給可能

LCCNによるプラスチック再製造の利点

【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
- Waste to steam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

【転換を牽引】蒸気供給の経済性でCCUへ先行投資

- 水素の低価格化・供給体制強化に合わせて拡大(同時に水素需要をけん引)
- 再生されるプラスチックは食品容器にも利用可能

LCCN・LCCN Readyの社会実装に向けた活動(1)

国内3地域、海外数地域のコンビナートでLCCN Readyの事業化について関係者間で検討中

【国内】

国内の3地域のコンビナートにおいて、焼却施設を新たに建設し、蒸気供給を行う事業について、検討を進めている。また、複数の都道府県と、一般廃棄物の広域処理・利用についての相談を行っている。



日本の石油化学コンビナート

【海外】



ケララ州(インド)



バンテン州(インドネシア)

LCCN・LCCN Readyの社会実装に向けた活動(2)

社会実装を加速するため(一社)LCCN推進研究会(代表理事:藤井実)を設立(2024.12月)

Life Cycle
Carbon Neutral

(一社)LCCN推進研究会

<https://lccn.or.jp/>



代表理事:藤井実(国立環境研究所)

理事:大迫政浩(国立環境研究所), 小野努(岡山大学), 小野田弘士(早稲田大学)

高岡昌輝(京都大学), 高橋若菜(宇都宮大学), 辻佳子(東京大学)

野口貴文(東京大学), 橋本征二(立命館大学), 松本亨(北九州市立大学)

事務局:寺田愛, 藤井成厚

1期(10年程度)

“LCCN循環システム”実証に向けた連携、準備、国への働きかけ

自治体・国民・企業への啓蒙活動

広域化、連携構築支援

自治体・国民・企業への啓蒙活動

会員・オブザーバへの迅速な情報共有



モデル事業・実証事業の案件化

需給者マッチング支援

パイロット事業の開始



“LCCN循環システム”の調査研究・技術開発等

・エネルギー収支(蒸気供給とCCU)

・効率輸送(廃棄物・eメタノール)

・プラスチック製造(“eメタノール”利用)

・ポテンシャル評価

・具体化のための調査

・収集体制、広域輸送、受入態勢の検討



2期以降

事業の拡大、国内外への水平展開へ



LCCN推進研究会設立シンポジウムの様子(国環研HP)

<https://lccn.or.jp/>

環境省の関連施策

環境省の環境審議会・循環型社会部会における**廃棄物処理施設整備計画**、**廃棄処理法に基づく基本方針**、**循環型社会形成推進基本計画**の検討を通じて、「必要に応じて2以上の都道府県の区域における広域化・集約化(整備計画p.6、基本方針p.39)」「都道府県域を越える広域的な廃棄物処理体制の構築(整備計画p.15)」「供給可能な蒸気条件に応じ、産業施設における大規模熱利用(整備計画p.11)」「産業施設における大規模熱利用や農業、商業施設との連携(基本計画p.41)」「**廃棄物エネルギーの需要を踏まえた立地**(整備計画p.12、基本方針p.37)」等が示されている。

まとめ

- カーボンニュートラルの実現に向けて、産業で必要な高温の熱をどのように供給するかは大きな課題。リサイクル困難な廃棄物の焼却熱が有効に利用できる。
- 廃棄物を完璧に選別することは困難であり、リサイクルできない廃棄物が一定量発生する前提で、カーボンニュートラルを達成する仕組みを構築する必要がある。
- 効率的な対策として、リサイクル困難な低品位可燃廃棄物をコンビナートに集約し、蒸気供給とCCUを行う仕組み(LCCN)の導入が想定される。
- 産官学で連携して、LCCNの仕組みの実現に向けた活動を加速したい(一般社団法人LCCN推進研究会を設立)。

<https://lccn.or.jp/> (会員募集中)



【謝辞】本研究の一部は環境省及び(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20223C02)により実施されました。ここに謝意を表します。