

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

令和 4 年 3 月

カーボンニュートラルコンビナート研究会

1. はじめに	1
2. カーボンニュートラルコンビナート（CNK）の形成に向けて取り組む背景と必要性.....	2
1） 多量の温室効果ガスを排出する鉄鋼・化学などの産業活動.....	2
2） 温室効果ガス排出が集中し対策効率の高いコンビナート	3
（1） 将来に向けた経済性向上と温室効果ガス排出量削減との両立	3
（2） 海外とのハブ、循環型社会におけるハブとしての立地面・機能面での重要性	5
（3） 海外でも先行する臨海部における産業集積地域の脱炭素化に向けた取組	6
（4） 地域での取組.....	9
3） コンビナートの脱炭素化を推進することで温室効果ガス多量排出産業の効果的な脱炭素化を目指す必要	12
3. CNK の目指す姿	14
1） CNK を目指す意義.....	14
2） 2050 年の CNK が果たすべき役割	14
（1） 脱炭素エネルギーの受入／生産／供給.....	16
（2） 炭素循環マテリアルの受入／生産／供給	17
（3） 脱炭素技術のテストベッド	18
4. CNK 実現に向けた技術メニューと産業間連携ポテンシャル	19
1） 2050 年 CNK の実現に向けた手段	19
2） CNK 実現に向けて必要となる連携ポテンシャル	22
（1） 水素やアンモニアの共同調達・利活用【ポテンシャル①】.....	23
（2） CO ₂ の共同回収・利活用【ポテンシャル②】.....	23
（3） バイオマス原料や廃棄プラスチックの共同調達・利活用【ポテンシャル③④】	24
（4） 省エネルギー・省資源の取組強化【ポテンシャル⑤】	24
（5） CCS の共同実施【ポテンシャル⑥】.....	25
5. CNK 実現に向けた提言.....	26
1） 取組の方向性.....	26
2） 国に求められる役割	26
3） 自治体に求められる役割	27
4） 企業に求められる役割	27
5） 金融に求められる役割	28
6） アカデミアに求められる役割	28
6. CNK 研究会（参考）	29
1） 構成員	29
2） 開催実績	29

1. はじめに

2020 年以降の温室効果ガス排出削減等のための新たな国際枠組みであるパリ協定（2015 年 12 月採択、2016 年 11 月発効）では、今世紀後半のカーボンニュートラルの実現が目標とされており、2021 年 4 月時点で 125 か国・1 地域が 2050 年までのカーボンニュートラル実現を表明している¹。

我が国では、2020 年 10 月の第 203 回国会における菅内閣総理大臣（当時）の所信表明演説において、「2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」という目標設定を行うとともに、2021 年 4 月には、2030 年度に温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することを目指し、さらに、50%の高みに向け、挑戦を続けていくことを表明した。これを受けて、経済産業省では、関係省庁と連携し、2020 年 12 月に「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定、また、2021 年 6 月に「2050 年のカーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を改訂²、その中では、燃料アンモニアの導入、合成燃料や合成メタンなどの技術開発や、CCS やカーボンリサイクルのためのバリューチェーン構築に向けた取組課題の整理など、脱炭素社会の実現に向けた個別分野での様々な検討を行っていくこととしている。

さらに、「第 6 次エネルギー基本計画」（2021 年 10 月閣議決定）では、再生可能エネルギーへの最大限の取組、水素・CCUS の社会実装など 2050 年にカーボンニュートラルを実現できるようにあらゆる選択肢を追求することが謳われている³。また、分野別の選択肢の追及に加えて、J-クレジット制度の活性化や脱炭素に資する都市・地域づくりの推進など、分野横断取組を含めた「地球温暖化対策計画」（2021 年 10 月閣議決定）の策定もなされている。

このように、戦略、計画、個別分野の取組方針、具体的な技術開発支援まで様々な側面から日本社会や経済の脱炭素化に向けての取組が進められている。

具体的な脱炭素技術の開発については、グリーン成長戦略において実行計画を策定している重点 14 分野について、野心的な 2030 年の CO₂ 削減量等を目指すプロジェクトに対して最長 10 年間にわたり研究開発から実証、そして社会実装まで継続的な支援を行うグリーンイノベーション基金事業が立ち上げられており、既に、幾つかの技術分野で取組が始まっている。

¹ 令和 2 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2021）（令和 3 年 6 月閣議決定）

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-2.html>

² 「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（令和 3 年 6 月）

https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf

³ 「第 6 次エネルギー基本計画」（令和 3 年 10 月閣議決定）

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_02.pdf

2. カーボンニュートラルコンビナート（CNK）の形成に向けて取り組む背景と必要性

1) 多量の温室効果ガスを排出する鉄鋼・化学などの産業活動

このような様々な政策・取組の一方で、足元の温室効果ガス排出量は依然として大きい。特に、2019 年時点で各部門の CO₂ 直接排出量の 39.2%はエネルギー転換部門（発電所・製油所等）から、25.2%は産業部門から排出されている⁴。産業部門のエネルギー起源 CO₂ 排出量のうち鉄鋼業からの排出が 40%、化学工業（含む石油石炭製品）からの排出が 15%、窯業・土石製品製造業からの排出が 8%となっている⁵。

これらの産業部門からの温室効果ガス排出削減は喫緊の課題であり、既に、各産業においても低炭素化・脱炭素化に向けた取組が行われている。

例えば、電力業界では、2021 年 5 月に電気事業連合会から「2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて」⁶が公表されており、供給側では再生可能エネルギー、原子力、脱炭素火力、水素の各分野での電源の脱炭素化に取り組むことが表明されている。また、需要側では、電化の取組の強化が謳われている。

鉄鋼業界では、2018 年 11 月に一般社団法人日本鉄鋼連盟から「日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン『ゼロカーボン・スチールへの挑戦』」⁷が公表されており、製造プロセスでの省エネルギーの取組により 2030 年度のエネルギー起源 CO₂ 排出量を 2013 年比 30%削減する取組（エコプロセス）や、高機能鋼材の提供により使用段階での CO₂ 排出削減貢献を目指すなど（エコプロダクト）、水素還元製鉄や直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術開発などの革新的技術開発、電炉に置き替えることによる鉄リサイクルの推進などの取組が行われている⁸。

石油業界では、2021 年 3 月に石油連盟から「石油業界のカーボンニュートラルに向けたビジョン（目指す姿）」⁹が公表されており、高効率型熱交換器の利用による加熱炉のエネルギー消費量削減やコンピュータによる高度制御の導入、圧縮機の動力源を蒸気タービンから高効率モーターに置き換えなどの省エネルギー対策に取り組んでいる。2050 年に向けても、廃食油、廃棄プラスチックリサイクルの推進、バイオマス原料の活用、持続可能な航空燃料

⁴ 国立研究開発法人国立環境研究所「2020 年度(令和 2 年度)の温室効果ガス排出量(速報値)について」(2021 年 12 月)
<https://www.nies.go.jp/whatsnew/jqjm100000140ugt-att/jqjm100000140v3y.pdf>

⁵ 環境省「2019 年度（令和元年度）温室効果ガス排出量（確報値）について」
https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/yoin_2019_1.pdf

⁶ 電気事業連合会「2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて」 <https://www.fepc.or.jp/sp/carbon-neutral/>

⁷ 一般社団法人日本鉄鋼連盟「日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン『ゼロカーボン・スチールへの挑戦』」
https://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/zerocarbon_steel_JISF.pdf

⁸ 一般社団法人日本鉄鋼連盟「カーボンニュートラル行動計画」他

⁹ 石油連盟「石油業界のカーボンニュートラルに向けたビジョン（目指す姿）」
https://www.paj.gr.jp/from_chairman/20210319_02.pdf

(SAF) の製造、CO₂ フリー水素の製造・利用を通じた合成燃料の製造などの革新的技術の開発にも取り組んでいる¹⁰。

化学業界では、2021 年 5 月に一般社団法人日本化学工業協会から「カーボンニュートラルへの化学産業としてのスタンス」¹¹が公表されており、プロセスの合理化や電化等の革新技術の導入、自家発電設備の燃料転換、再生可能エネルギーの利用、バイオマスの原料利用や廃棄プラスチック等の炭素源としての廃棄物を活用した原料の炭素循環、エネルギー利用極小化へのプロセスや構造の転換、バリューチェーン全体のイノベーションにつながる新素材の開発などの取組が進められている。

セメント業界では、2020 年 3 月に一般社団法人セメント協会から「脱炭素社会を目指すセメント産業の長期ビジョン」¹²が公表されており、クリンカ比率の低減、投入原料の低炭素化、省エネルギーの推進、鉱化剤使用等による焼成温度低減、CO₂ 回収・利用・貯留 (CCUS) への取組、供用中の構造物及び解体コンクリートによる CO₂ の固定もしくは吸収などの取組が進められている。

このように、エネルギー多消費型産業では温室効果ガスの排出量は非常に多くなっているが、一方で、脱炭素化に向けた取組も着実に進められている。

2) 温室効果ガス排出が集中し対策効率の高いコンビナート

(1) 将来に向けた経済性向上と温室効果ガス排出量削減との両立

日本最初の石油化学コンビナートは、1958 年に岩国、愛媛で造成され、エチレン、ポリエチレンなどを国産化した。それ以降、コンビナートは、石油精製、化学、鉄鋼、発電などの多様な産業が、設備の共有等を通じた連携を行いながら効率的な生産活動を行う有機的集合体として、地域の中核的な産業集積・経済活動拠点として発展してきた。主要なものは、海運による原材料の搬入の便利さと埋め立てによる用地取得の容易さから、臨海部に立地している。

コンビナートを構成する、石油精製、化学、鉄鋼、発電などの産業は温室効果ガス多量排出産業でもあり、空間的に見たときに温室効果ガスの日本における一大排出拠点になっている。次の図は製品出荷額を基に推計した 2018 年時点での製造業からの CO₂ 排出量を示したものである (図 1)。

¹⁰ 石油連盟「石油業界のカーボンニュートラル行動計画」

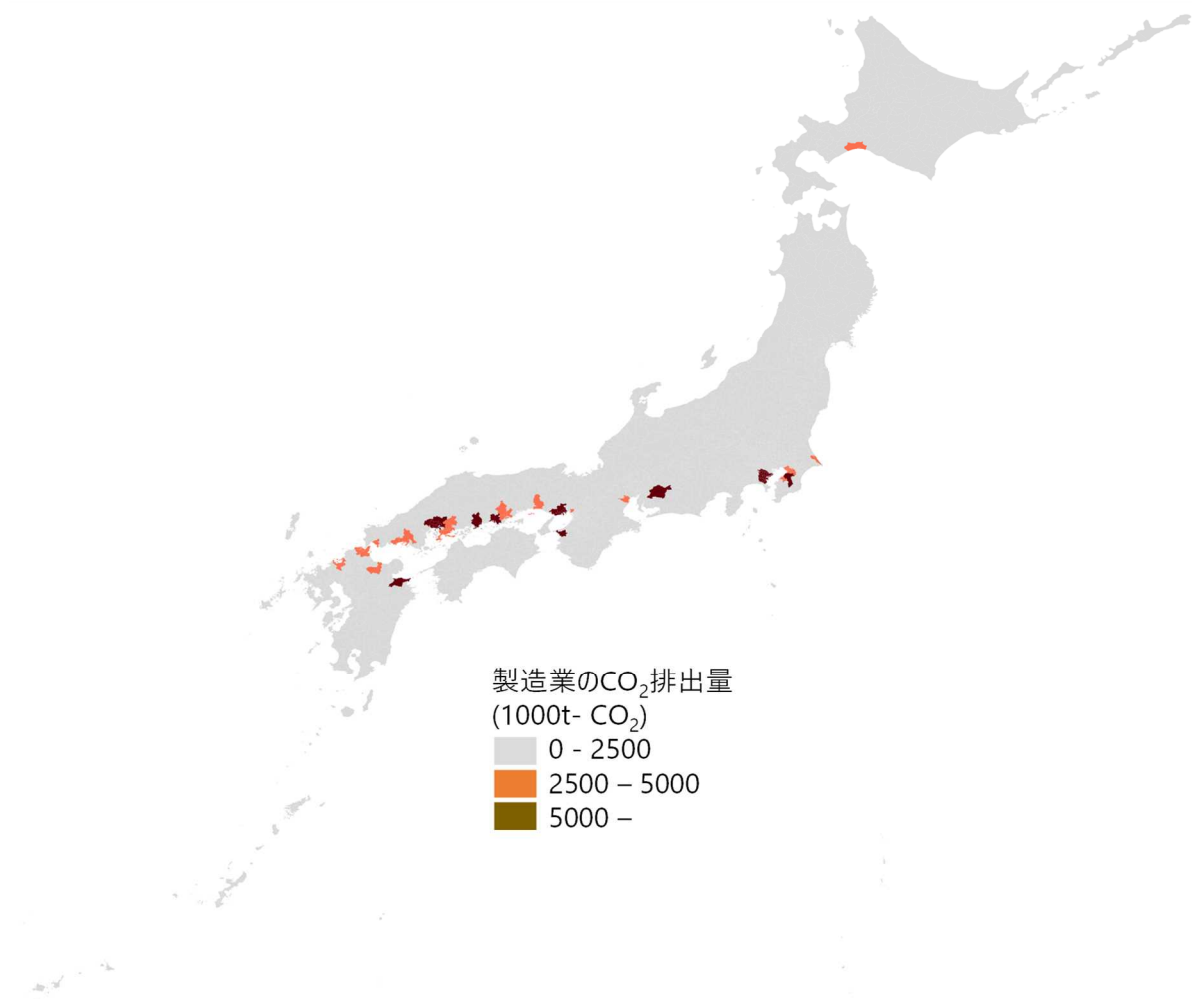
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/shigen_wg/pdf/2021_001_06_01.pdf

¹¹ 一般社団法人日本化学工業協会「カーボンニュートラルへの化学産業としてのスタンス」

<https://www.nikkakyo.org/system/files/20210518CN.pdf>

¹² 一般社団法人セメント協会「脱炭素社会を目指すセメント産業の長期ビジョン (2020)」

<https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/200326.html>



出所) 環境省「部門別 CO₂ 排出量の現況推計」¹³より野村総合研究所作成

図 1 2018 年の製造業の CO₂ 排出量

多くのコンビナートが立地しているいわゆる太平洋ベルト地域は、日本の工業製品生産額の 2/3 を占めるといわれており、地域の雇用の中心となっている。太平洋ベルト以外の地域においても、コンビナートには港湾施設、鉄道施設、道路、発電所・高圧送電線、LNG 基地・ガスパイプライン網など、多くの産業基盤が既に整備されている。さらに、技術者をはじめとする産業人材の集積も見られる。これらの地域資産は、脱炭素社会においても引き続き地域経済や地域社会にとって必要不可欠であり、温室効果ガス排出量が多いことのみを理由にしてスクラップすることは、社会的損失が大きいと考えざるを得ない。将来にわたり社会、経済、環境のバランスの良い社会経済開発を目指す持続可能な開発の観点からも、既存のコンビナートの地域資産を有効活用しつつ、脱炭素社会への適応を行っていく必要がある。

¹³ 環境省「部門別 CO₂ 排出量の現況推計」 https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/tools/suikei.html

日本には、全国で主要なコンビナートが 9 か所あり、コンビナート以外にも臨海部に石油精製、化学、鉄鋼、発電などの重厚長大産業が集積している。鹿島、千葉、川崎、中京、水島、大分には製鉄所があるが、堺・泉北、岩国・大竹、周南には製鉄所は存在していない。また、岩国・大竹ではエチレンは生産されていない（表 1）。

表 1 日本の主要コンビナート

		鹿島	千葉	川崎	中京	堺・泉北	水島	岩国・大竹	周南	大分
鉄鋼	粗鋼生産量 (万トン/年)	716 (2019)	日本製鉄 802 (2018) JFEスチール 322 (2020)	347 (2020)	600 (2020)		700 (2020)			875 (2018)
	企業名	日本製鉄	日本製鉄 JFEスチール	JFEスチール	日本製鉄		JFEスチール			日本製鉄
石油精製	原油処理能力 (バレル/日2021.3)	203,100	639,000	317,000	501,000	241,000	350,200	120,000	0	136,000
	企業名	鹿島石油	コスモ 出光興産 大阪国際石 油精製 富士石油	ENEOS 東亜石油	コスモ 出光興産 昭和四日市	コスモ ENEOS	ENEOS	ENEOS		ENEOS
化学	エチレン生産量 (千トン/年2020.7)	485	2,097	895	493	455	496		623	618
	企業名	三菱ケミカル JSR等	出光興産 丸善石油化 学 三井化学 住友化学 京葉エチレン JSR等	ENEOS 東燃化学 旭化成 昭和電工 日本ゼオン 等	東ソー 三菱ケミカル 三菱ガス化 学 JSR等	三井化学 大阪石油化 学 旭化成等	三菱ケミカル 旭化成 クラレ 日本ゼオン 等	三井化学等	出光興産 トクヤマ 東ソー 日本ゼオン 帝人等	昭和電工 住友化学 日本ゼオン 等
(発電所など)	発電所発電能力 (万Kw 2015)	785	2,004	774	145* (四日市のみ)	200	224		83	339
	企業名	鹿島(火力) 鹿島共同(火 力)等	富津(火力) 千葉(火力) 袖ヶ浦(火力) 君津(火力) 等	川崎(火力) 東扇島(火 力) 横浜(火力) 磯子(火力) 等	四日市(火 力)等	堺港(火力) 南港(火力) 等	玉島(火力) 水島(火力) 等	下松(火力) 等	新小野田(火 力)等	新大分(火 力)等

出所) 各種統計資料等より野村総合研究所作成

(2) 海外とのハブ、循環型社会におけるハブとしての立地面・機能面での重要性

脱炭素輸入エネルギーと想定されているグリーン水素、ブルー水素やグリーンアンモニア、ブルーアンモニアなどの脱炭素燃料¹⁴を輸入する場合、主に海外から輸入することが想定されており、その輸入後の貯蔵、利用を考える際に、港湾機能との連携や、臨海部という立地は重要である。

港湾分野においては、水素や燃料アンモニア等の大量・安定・安価な輸入や貯蔵等を可能とする受入環境の整備や、脱炭素化に配慮した港湾機能の高度化、集積する臨海部産業との連携等を通じて温室効果ガスの排出を全体としてゼロにすることを目指す、カーボンニュートラルポート（以下 CNP）の形成に向けた検討が進められている。

¹⁴ 水素は、液化水素、水素とトルエンを結合させた MCH（Methylcyclohexane メチルシクロヘキサン）、または水素キャリアとしてのアンモニアとして輸入されることが想定される。

また、一定量の脱炭素エネルギーや炭素循環マテリアルはリサイクル原料としての利用が想定されるが、回収された廃棄物等の保管、分別、原材料・製品として再度利用するための前処理、仕分けには十分に広い空間が必要である。また、屑鉄や廃棄プラスチックなどを大量かつ効率的に輸送するためには、廃棄物の発生源である都市に近く、海運による原材料の搬入が容易という立地特性を兼ね備えた空間の活用が有効である。

コンビナートを含む臨海部の産業集積地域は、港湾施設や都市への近接性、廃棄物等に関する施設・設備が立地可能な用途規制地域であり、脱炭素エネルギーや炭素循環マテリアルの貯蔵・利用のための処理・仕分けのための施設・設備立地のための条件を備えているといえる。

このような立地特性から、内陸部の工業団地への供給や、林業などの一次産業とも連携してバイオ原料も含むケミカルリサイクルハブ機能を実現することが可能となる。また、関連するサービス事業者も呼び込むことで、コンビナートは一次・二次・三次産業の結節点として、循環型社会に貢献していくポテンシャルを有している。

(3) 海外でも先行する臨海部における産業集積地域の脱炭素化に向けた取組

国際エネルギー機関（IEA）作成の「水素の未来」¹⁵には、「水素利用拡大のためコンビナートが隣接する工業集積港をクリーン水素の利用拡大の中核にする」と記載されており、欧州でも臨海部の産業集積地域は、産業の脱炭素化の取組において先行する取組地域となっている。

オランダのロッテルダム港では、ロッテルダム港湾局、ガスニー社、EBN 社（国営の石油・ガス会社）が事業主体になり、石油関連 4 社（エクソンモービル、シェル、エア・リキード、エア・プロダクツ）の各社が参画し、ロッテルダム港の工業地帯で排出された CO₂ をパイプラインで輸送し、北海の空のガス田に貯蔵する「Port of Rotterdam CO₂Transport Hub and Offshore Storage（略称：ポルトス（Porthos））プロジェクト」を開発している。このプロジェクトの年間の CO₂ 処理能力は 2.5 百万トン（15 年間で計約 37 百万トンを予定）であり、臨海部及び内陸部で発生した CO₂ を洋上の CCS に向けて積み出すための拠点整備が進められている（図 2）。複数の企業から排出される CO₂ を対象としており、単独の企業による整備と比較してコスト的なメリットが大きいといわれている。

¹⁵ 国際エネルギー機関(IEA)「The Future of Hydrogen」(2019 年 6 月)

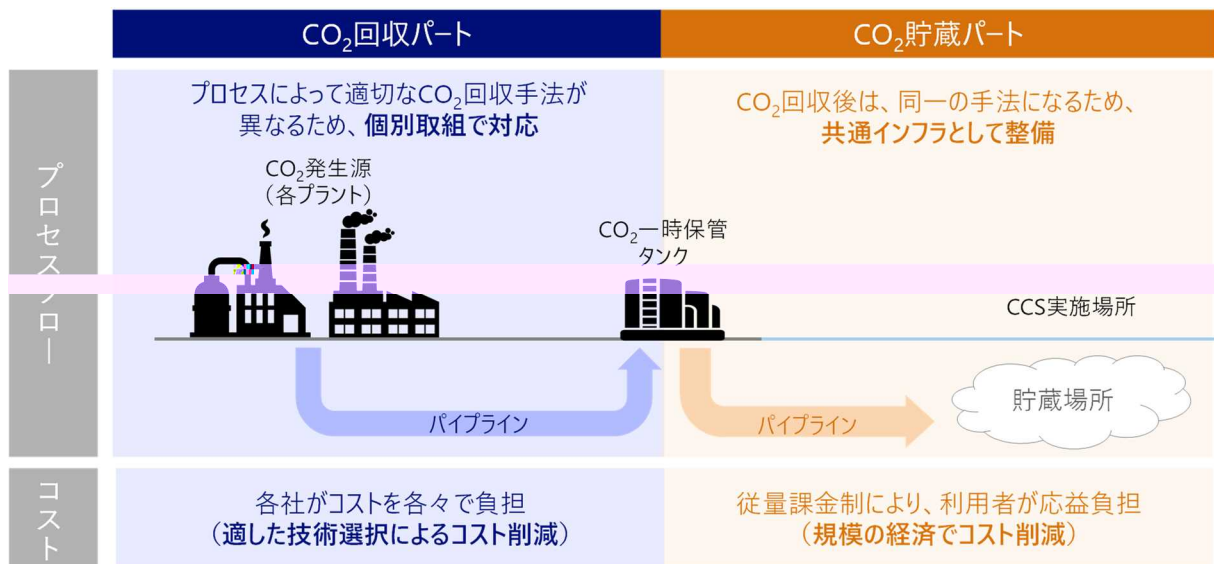


出所) ポルトスプロジェクト説明資料より野村総合研究所作成

図 2 北海洋上 CCS ポルトスプロジェクトの概要

ポルトスプロジェクトのもう一つの特徴が、技術特性を踏まえた個別取組と共通インフラについて異なる費用負担構造を取り入れている点である（図 3）。産業集積地域からリサイクルできない CO_2 を回収し、廃坑に埋めるプロジェクト（CCS）は、 CO_2 の回収部分（Carbon Capture）と CO_2 を埋める部分（Carbon Storage）は異なる経済性を備えたプロジェクトであるため、費用の負担方法を変えている。

既に多くの脱炭素関連のプロジェクトが動き出している欧州では、脱炭素対策の設備・インフラ整備における経済性を考慮した事業モデルの設計が行われ始めている。日本においても、個社の取組を超えて複数のバリューチェーンで協働して取り組むプロジェクトや、面的、空間的な取組が必要なプロジェクトにおいては、ポルトスプロジェクトのような事業モデルの設計、資金支援のあり方、主体間の役割分担について議論していく必要がある。



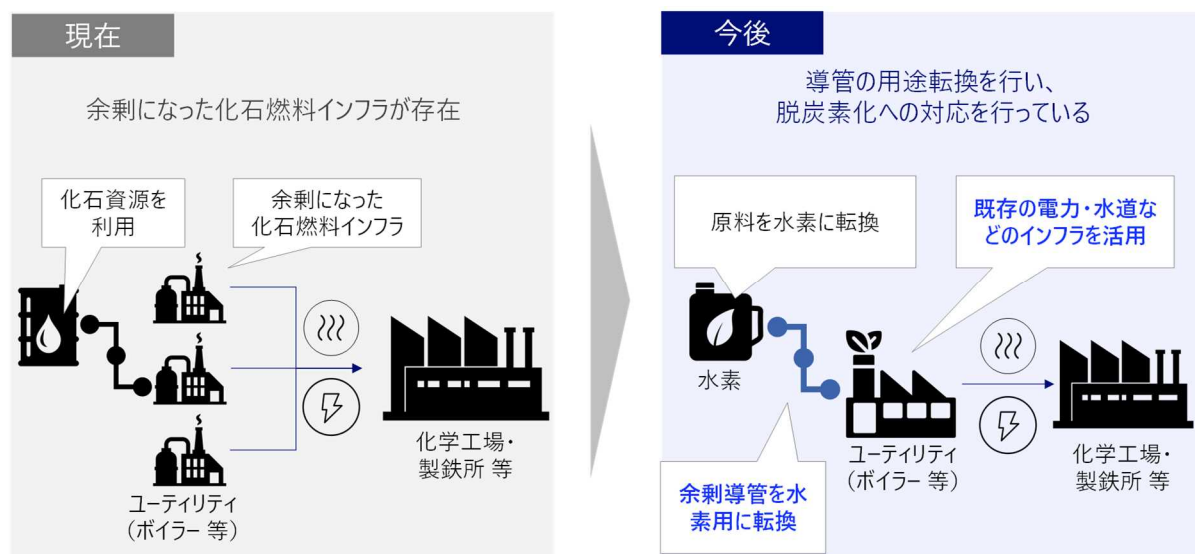
出所) 野村総合研究所作成

図 3 洋上 CCS ポルトスプロジェクトにおける個別取組と共通インフラ

ポルトスプロジェクトがパイプラインによって CO₂ を輸送するのに対して、ノルウェーでは回収した CO₂ を液化し、輸送船で埋設のための受け入れ基地まで輸送する「ノーザンライツプロジェクト」¹⁶も実現に向けて建設工事が進められている。各国の地理的特性に応じた脱炭素燃料、回収した CO₂ の輸送インフラを構築する必要性を示唆している。

欧州大陸内陸部の産業集積地であるドイツのノルトラインヴェストファーレン州では、低炭素・脱炭素対策として、余剰の天然ガス高圧導管を水素導管に用途転換することで、地域における水素利用を推進している。ドイツでは、2021 年 5 月に「気候保護法改正法案」を閣議決定し、2021 年 6 月にドイツ連邦議院で承認されている。同法では 2030 年には 1990 年比で温室効果ガス排出量の少なくとも 65%削減、2045 年に気候中立達成を目指すこととされている。この目標に対応するため、レバークーゼン、ドルマーゲン、クレーフェルト-ウアーディンゲンに工場用地を管理しているケムパーク (CHEMPARK) では既存の電気・蒸気・圧縮空気・水などの既存地域資産を利用しながらオンサイト型のグリーン水素の製造・利用プロジェクトを開発している。既存のインフラを活用することで、的を絞った脱炭素対策を可能にしており、既存の地域資産が集積している地域において効率的に脱炭素化の取組を推進できることを示している事例と考えられる (図 4)。

¹⁶ Northern Lights「Accelerating decarbonisation」 <https://northernlightsccs.com/>



出所) 野村総合研究所作成

図 4 ドイツの産業集積地域における脱炭素対応の進め方イメージ

ポルトスプロジェクトの例にみられるように、産業集積地域に隣接した主要港湾が、産業集積地域内での脱炭素化の取組だけでなく、産業集積地域を超えた脱炭素化取組のための基点になっている。四方を海に囲まれた日本では、陸上だけで脱炭素化の取組が完結することは難しく、海洋や諸外国との連携による脱炭素化の取組が必要である。この際に、先行する欧州での産業集積地が隣接する港湾も含めた取組は参考になる。

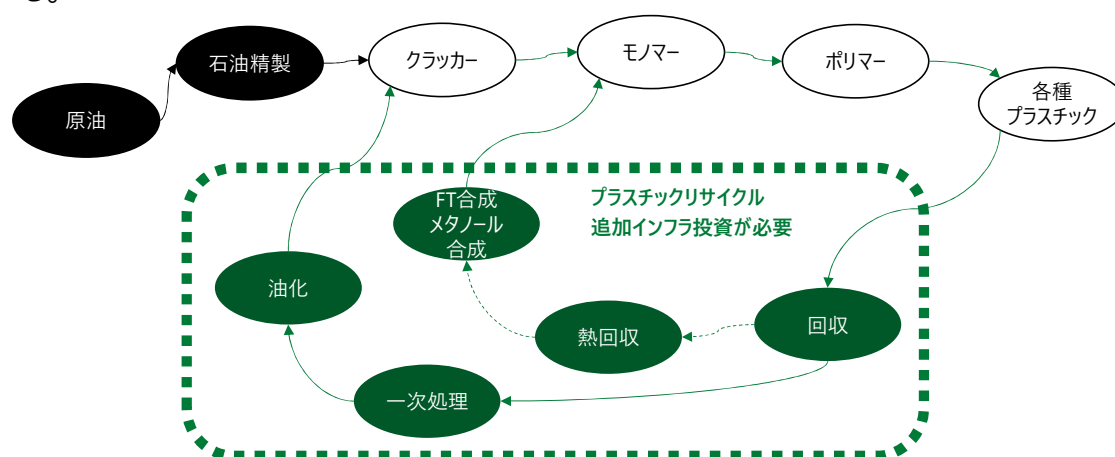
また、欧州における複数の産業集積地域における低炭素・脱炭素プロジェクトには既に港湾管理者や国営や民間エネルギー企業、民間化学企業など複数の主体が参画している。このプロジェクトを推進する際に、各参加主体の意思決定者で構成されるステアリングコミッティや複数の主体の実務者で構成されるプロジェクトチームの組成、ステアリングコミッティとプロジェクトチームの定期的な課題設定・報告会の実施などが行われている。個社の取組を超えて複数のバリューチェーンで協働して取り組むプロジェクトや、面的、空間的な取組が必要なプロジェクトにおいては複数の主体が参画することが当然であり、海外の先行事例は利害関係の異なる複数主体間で円滑に意思疎通・検討・意思決定を行っていくような体制作りも重要であることを示唆している。

(4) 地域での取組

既に、地域の産業集積地である鹿島、川崎、周南の各コンビナートにおいて産・学・官の連携による先行的な取組が始まっている。

例えば、鹿島コンビナートでは、茨城県によって「鹿島臨海工業地帯競争力強化検討会

議」が立ち上げられており、「鹿島臨海工業地帯の競争力強化に向けた将来ビジョン」¹⁷が策定されている。また、石油精製と化学共同による廃棄プラスチック油化事業への取組が始まっている。この取組では、使用済みプラスチックをケミカルリサイクルし、油化した上で原油から精製されるナフサを分解するナフサクラッカーに投入し、プラスチック製品の CO₂ 排出量の削減を行うことを目指している（図 5）。プラスチックリサイクルのためには、回収設備、保管設備を整備する必要があり、また、回収したプラスチックを資源として再生するために一次処理・油化設備が必要になる。さらに、大量の廃棄プラスチックを収集するためには遠隔地から船舶で輸送する必要も生じる。この観点から、今まで以上に港湾機能の活用も必要になると考えられる。



出所）野村総合研究所作成

図 5 鹿島コンビナートにおけるプラスチックリサイクルフロー

廃棄プラスチックの有効活用に向けた取組として、サーマルリサイクルと排気ガスから回収した CO₂ を用いてプラスチック原料を作ることも考えられる。既に、グリーンイノベーション基金プロジェクトとして、CO₂ を原料とするパラキシレンなど化学品製造のカーボンリサイクル技術の開発に着手している¹⁸。

また、川崎コンビナートでは、川崎市が「川崎カーボンニュートラルコンビナート検討会議」を立ち上げ、2022 年 2 月に「川崎カーボンニュートラルコンビナート構想（案）」¹⁹が公表されている。そこでは、水素を軸としたカーボンニュートラルエネルギーの供給拠点、炭素循環型コンビナートの形成、エネルギーが地域最適化され立地競争力のある産業地域などが謳われている。川崎市では「水素社会実現に向けた川崎水素戦略」として水素利用に取り組んでおり、例

¹⁷ 茨城県「鹿島臨海工業地帯の競争力強化に向けた将来ビジョン」

https://www.pref.ibaraki.jp/kikaku/jisui/kashima/plan/documents/kashima-vision_zentai.pdf

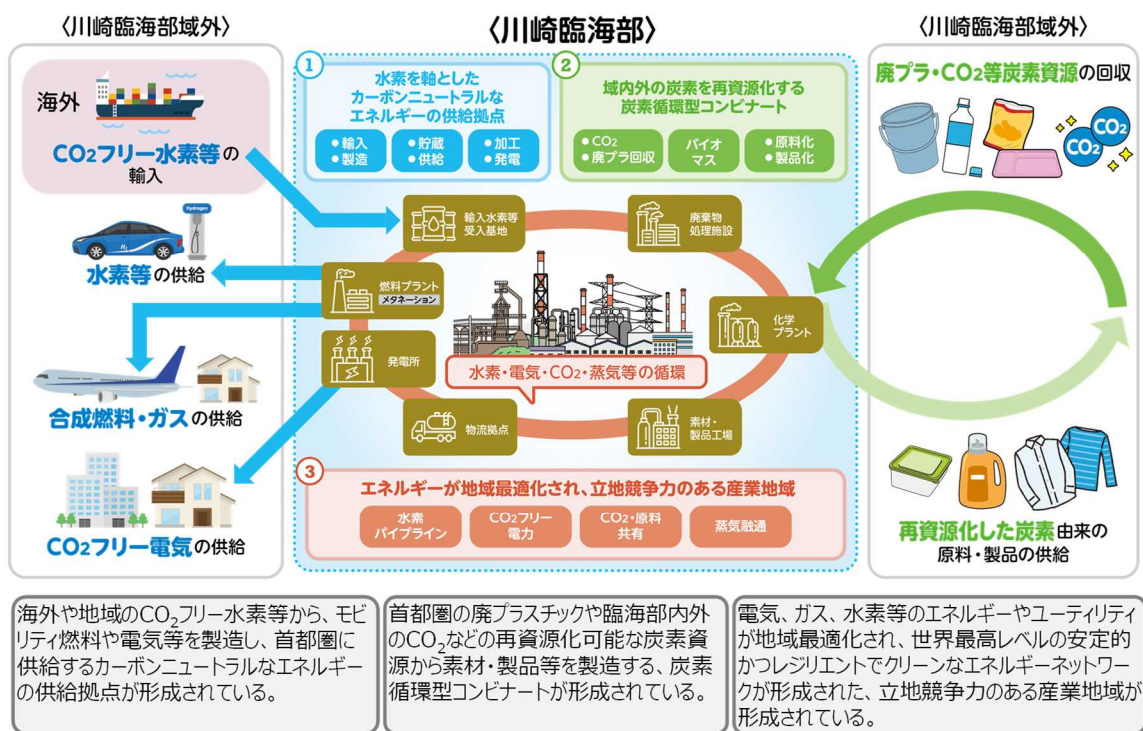
¹⁸ 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「CO₂ を原料とする化学品（パラキシレン）製造の技術開発に着手」

2020 年 7 月 https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101331.html

¹⁹ 川崎市「川崎カーボンニュートラルコンビナート構想（案）の概要」

<https://www.city.kawasaki.jp/590/cmsfiles/contents/0000137/137266/CNKgaiyou.pdf>

例えば、ブルネイからメチルシクロヘキサン（MCH）を輸入し発電所で使用する実証実験を行い、使用済みプラスチック由来の低炭素水素をホテルの燃料電池で使用し、燃料電池自動車向けの水素ステーションを整備し、水素ハイブリッド電車の走行実験を実施している（図 6）。

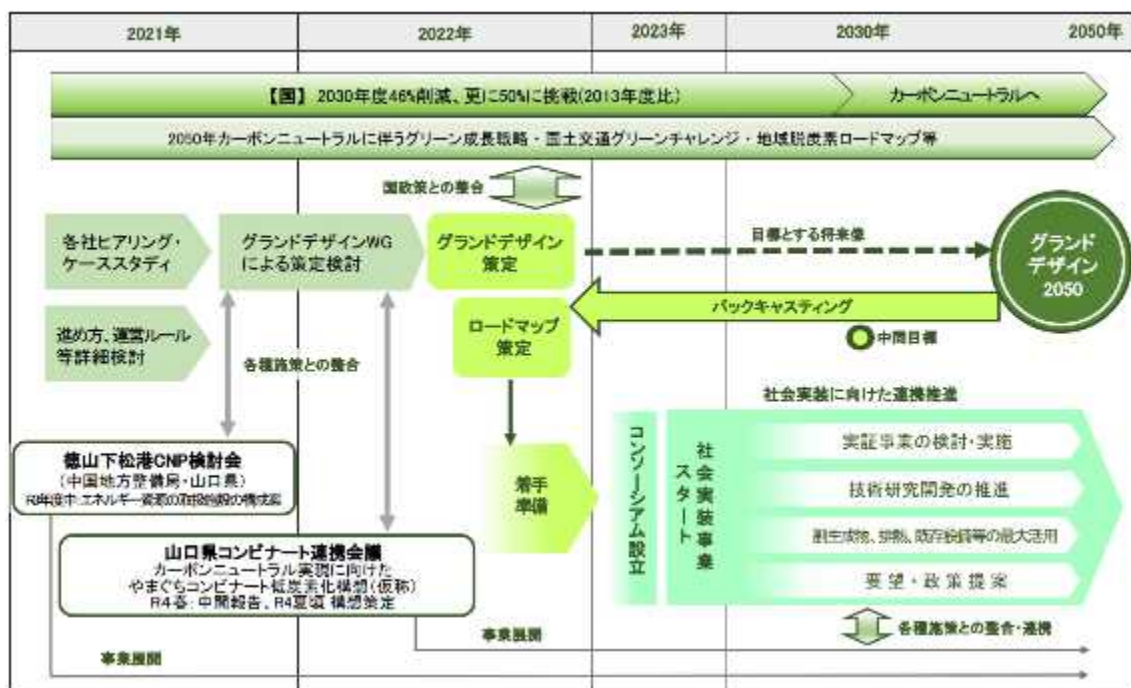


32

出所）川崎市資料

図 6 2050 年の川崎臨海部のコンビナートのイメージ図

周南コンビナートは、化学工学会、周南市及びコンビナートに立地する民間企業が連携し、「周南コンビナート脱炭素推進協議会」として 2022 年 1 月から活動を開始している。地域産業の連携による CO₂ フリー社会実践プロジェクトへの取組を行おうとしており、「徳山下松港カーボンニュートラルポート検討会」や、「山口県コンビナート連携会議」と協力しながら 2022 年中のグランドデザインとロードマップの策定を目指し、検討を進めている（図 7）。



出所) 周南市資料

図 7 周南コンビナートの脱炭素化に向けた取組

鹿島、川崎、周南の各コンビナートにみられるように、既に、自治体や民間企業、学会がそれぞれコンビナートの脱炭素化に向けた取組を開始している。これらの活動の特色は、それぞれの主体が単独で取り組んでいるわけではなく、複数の企業や、産学、産官など様々な組み合わせで活動を推進している点である。

各コンビナートが、それぞれの特色を生かして地域や企業、大学などの教育機関と連携しながら脱炭素化に向けた取組を推進していくことは、人口減少時代における地域づくりの観点からも重要である。コンビナートは、既存の豊富な地域資産を出発点にできるという観点から取組上有利であるとも考えられる。

さらに、これらのコンビナートが、臨海部の機能・ポテンシャルに着目して検討が進められているCNPとも水素・アンモニア等脱炭素エネルギーの利活用などを通じて連携していくことは、脱炭素社会の実現に向けて、より効率的・効果的であると考えられる。

3) コンビナートの脱炭素化を推進することで温室効果ガス多量排出産業の効果的な脱炭素化を目指す必要

上述のように、社会・経済・環境のバランスをとる持続可能な開発、循環型社会との結節、海外先進事例の存在、国内の一部地域での取組など、様々な観点からコンビナートにおける脱炭素化に向けた取組は 2050 年の日本において重要であるといえる。

一方で、個別の脱炭素エネルギーや、炭素循環マテリアルに関する技術開発や再生可能エネルギーに関する既存の議論は、それぞれの分野で行われており、空間的に束ねられた議論が行われていない。

従来のコンビナートの存在意義が、連産品（同一原料を同一工程で加工して、主副の関係がない 2 種以上の製品が生産される場合の生産品）を上流と下流で共有し、原材料の輸送効率を上げ、熱や蒸気のカスケード利用（品質は下がるが何度も利用）することでエネルギーコストを引き下げることにあつたとすれば、脱炭素社会におけるコンビナートも、脱炭素という文脈に合わせた新たな意義、対応策を確立する必要がある。ただし、これらについては、まだ、十分な議論が行われているわけではない。既に分野別で 2050 年に向けた議論が行われている合成燃料や燃料アンモニア、水素などの脱炭素燃料や、各業界団体から公表されている石油精製、化学、鉄鋼などの業界別の脱炭素の取組と同様に、コンビナートを切り口として 2050 年に向けたカーボンニュートラル対策を議論する必要がある。

本論点整理は、カーボンニュートラルコンビナート研究会において委員から出た様々な意見や論点を整理し、カーボンニュートラルコンビナート（CNK）のイメージや各主体に求められる役割とともに記載をしたものであり、今後、コンビナートを構成する事業者・立地自治体・アカデミアといった関係者が、カーボンニュートラルの実現に向けて議論を深めていく際のコミュニケーションツールあるいは議論のたたき台として活用いただくことを念頭に置いたものである。特に着目すべき点としては、CNK を目指すことを通じて CO₂ の大幅な削減につながるのみならず、CNK が社会構造を転換する起爆剤／戦略拠点となって地域経済や日本経済の活性化に貢献していくことである。

3. CNK の目指す姿

1) CNK を目指す意義

2050 年にカーボンニュートラル社会を実現するためには、脱炭素エネルギーや炭素循環マテリアルへの転換をはじめとして、社会構造を大きく変える必要がある。この構造転換の起爆剤／戦略拠点として、コンビナートが持つポテンシャルを最大限活用することこそが、CNK を目指す意義である。

日本のコンビナートは、基幹産業が高度に融合した生産拠点であり、主要需要地である大都市の周辺に立地しており、税収や雇用などで地域経済と密接な関係を有しているという特徴を持つ。この特徴を活かして、脱炭素エネルギーや炭素循環マテリアルへの転換を進めるにあたり投資を呼び込むためには、CNK を構築していくに際して、“守り”（既存の産業の維持・保護）ではなく“攻め”（産業の新陳代謝と新たな価値創造）の姿勢で臨むことが重要である。

カーボンニュートラル化を進めることは、一見するといわば“コスト”に他ならないが、「コスト＝投資」と捉え、新たな価値を生むところに積極的な投資していく、新たな価値を生まないところには積極的な投資はしない、といった大胆な判断を下していくことも必要である。そのためには、コンビナート間の競争と協調を促し、選択と集中を進めていく必要がある。

こうした点を踏まえながら、各コンビナートにおいてそれぞれの立地条件に応じた、産業や企業の誘致や企業間連携の促進が行われるなどして、それぞれに適したトランジションを経て、CNK へと変貌を遂げるべきである。

2) 2050 年の CNK が果たすべき役割

これまで見てきたように、温室効果ガス多量排出企業が集積するコンビナートは、将来に向けた経済性向上と温室効果ガス排出量削減との両立を通して、脱炭素社会への適応が求められている。

そのためには、港湾を介した海外との結節点、需要地の近くで循環型社会との結節点を持つという既存のコンビナートの立地特性や、多くの産業の設備・調達・技術企業が集積するメリットを活かして、脱炭素化に向けた取組を進めていく必要がある。

具体的には、コンビナートが有する集積効果や立地優位性等を活かして、コンビナート内の設備やインフラの共有、水素・アンモニア・バイオ燃料等の共同調達、脱炭素技術のスタートアップの呼び込みやスケールアップのための実証・実装を進めていく必要がある。

2050 年におけるコンビナートは、こうした取組を通じて、コンビナート全体でのカーボンニュートラル化を実現するだけでなく、「脱炭素エネルギーの受入／生産／供給」、「炭素循環マテリアル

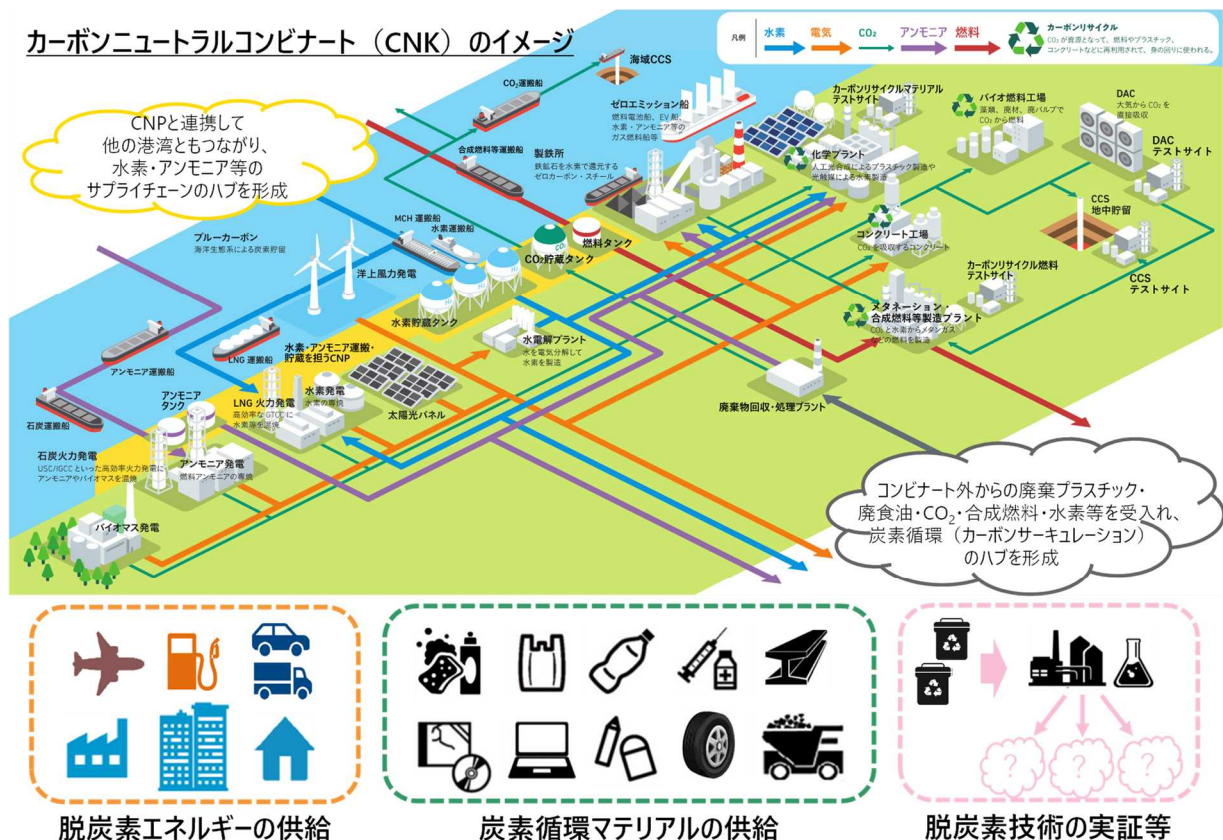
アル²⁰の生産／供給」、「脱炭素技術のテストベッド」といった機能を提供することにより、カーボンニュートラル社会の持続的な発展に寄与するとともに、製造事業者等の競争力強化や地域経済・日本経済の活性化を下支えする存在であり続けることを目指すべきである。

こうした CNK の姿は、図 8 のようになる。このように多様な産業が、設備の共有等を通じた連携を行いながら、有機的な産業連携を実現することを目指すべきである。ただし、CNK として記載している設備や機能は、地域特性により様々な企業・産業の組み合わせがあり得ることは留意すべき点である。

また、CNK は、海外から大量にアンモニアや水素等の調達を行うハブとなるだけでなく、コンビナート外からも CO₂ や廃棄物を受け入れるハブとなることで周辺地域の環境整備やカーボンニュートラル化に貢献する。さらに、CNK では、これまでのコンビナートの持つ立地・設備・技術等の資産の上に新たな技術・人材が加わり、既存コンビナートのリノベーションをハード・ソフトの両面から具現化する。これらの取組を、CNP の検討など親和性の高い取組と連携しながら行うことで、CNK の機能をより効率的・効果的に高めることが可能となる。

こうした、CNK の社会的意義・存在意義を明確にすることで、企業や自治体などの主要ステークホルダーが連携しやすい組織・仕組みを構築していく。

²⁰ CO₂ 排出量削減につながるマテリアルを指し、炭素成分が存在しないマテリアルという言葉ではない。



出所）「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」広報資料「カーボンニュートラルの産業イメージ」²¹を基に

野村総合研究所作成

図 8 CNK のイメージ

（１） 脱炭素エネルギーの受入／生産／供給

エネルギーの脱炭素化に向けて、従来の化石燃料ではなく、水素・アンモニア・バイオマス・再生可能エネルギーを受入、生産し、供給する拠点となる。既存の主たる発電設備である石炭火力などの CO₂ 排出量削減のために、当面はガス転換・バイオマス混焼などを行い、最終的には CO₂ 排出量ゼロに向けてアンモニアや水素の専焼などが求められる。

脱炭素エネルギー源であるバイオマスや再生可能エネルギーも、その原料として用いられる木材や、太陽光や風力といった自然条件の制約はあるが、共同での開発・調達を進める。

また、CNK では、コンビナート内の多様な業種間でのエネルギー設備の共有・共同調達などにおいて集積効果を発揮していくことも可能である。例えば、脱炭素エネルギーである水素やアンモニアなどの共同調達、それを活用するための貯蔵や配送設備などの共有など、多くの産業が活用する共有機能を集積することで、一社当りの設備投資負担の削減や、共同調達による原料の調達価格の削減など、集積効果が高まるほどコスト削減のメリットが大きくなることが期待される。

²¹ 「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」 <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>

さらに、集積効果により、水素やアンモニアなどの調達量は非常に大きくなる。それを海外から獲得するためのサプライチェーン構築と、コンビナートへの受入体制として港湾設備の拡充が必要となる。そのためには、水素やアンモニアなどの大量受入を検討している CNP と連携し、海外輸入から活用までのシームレスに行う体制を構築する必要がある。大量の水素やアンモニアの調達に向けて、国内の再生可能エネルギー活用した生産やオフガス（石油精製、化学などのプロセスにて発生する副生水素等）の活用などが考えられるものの、十分な量の確保は難しく、海外からの調達は重要となる。

加えて、バイオマス燃料の原料となる木材を内陸部から受け入れることで一次産業と連携し、エネルギー関連の自動化技術や AI 技術の活用を行うことで三次産業を呼び込むなど、CNK が一次産業・二次産業・三次産業をつなぐハブとなる。

（２） 炭素循環マテリアルの受入／生産／供給

脱炭素エネルギーと同様に、コンビナートは水素や CO₂ などの炭素循環マテリアルの安定供給拠点としての役割を担うことになる。脱炭素化やガソリンの国内需要減少による化石燃料の輸入量減少見通しに伴い、化学品製造のための炭素源の減少が懸念されており、水素とコンビナートにて回収した CO₂ を原料として合成することで、CO₂ 排出量を抑えた合成プラスチックなどの製造と供給が可能となる。

コンビナートにてカーボンニュートラル化した原料を製造することで、川下工程の製品のカーボンニュートラル化をもたらすことが可能となる。また、より多くの産業が集積し、より多くの製品に炭素循環マテリアルが用いられれば、カーボンニュートラル化への貢献につながると期待される。

さらに、コンビナート内の多様な業種同士での設備共有やマテリアルの共同利用などにおいて集積効果が発揮される。コンビナートへの集積のメリットとして、炭素循環マテリアルの製造者にとっては水素や CO₂ など原料の獲得しやすさ（accessibility）がある。水素と CO₂ を原料とした合成製品は、メタネーション²²（メタン）、FT 合成²³（合成燃料）、MTO 法²⁴（合成プラスチック）などの技術開発が行われている。製鉄所では水素還元製鉄のための水素が必要であることなど、より多様な業種での水素や回収した CO₂ の共同利用が可能となる。

CO₂ 以外では、廃棄プラスチックを炭素源として油化の上、改めてリサイクルナフサや化学原料への再利用が期待されており、CO₂ 原料同様に多様な業種での利用が可能となる。こうした用途でもエネルギー源と同様に、多くの産業が活用する共有機能や合成製品の生産を集積することでスケールメリットが実現できる。

²² メタネーション：水素と CO₂ から天然ガスの主成分であるメタンを合成する技術。

²³ FT 合成：フィッシャー・トロプシュ合成。合成ガス（一酸化炭素と水素の混合ガス）から軽油など石油代替燃料及び化学品を合成する触媒反応。

²⁴ MTO 法：Methanol To Olefine 法。メタノールからオレフィン系炭化水素を合成する方法。

また、コンビナート内でマテリアルを近距離でつなぐことで、効率的な生産活動が期待できる。加えて、一社当りの設備の投資負担の削減や、共同調達による原料の調達価格の削減など、集積が進むほどコスト削減のメリットが大きくなることが期待される。

さらに、周辺地域からの廃棄物を回収・処理プラントを共有することで、コンビナート外も含めた炭素を循環させるカーボンサーキュレーションが形成される。例えば、廃棄プラスチックを活用したエタノールやメタノール、エチレン、合成燃料の製造のために、コンビナート外の地域から廃棄プラスチック・廃食油・CO₂ 等を受入れ、コンビナート内で廃棄物回収場所を確保することでケミカルリサイクルハブとなり、周辺住環境の改善や地域のカーボンニュートラル化にも貢献する。

加えて、林業など一次産業とも連携してバイオマスの回収も行うことで、バイオマスの利活用・再利用のハブともなる。なお、余剰の CO₂ については、CCS で処理することが想定される。

(3) 脱炭素技術のテストベッド

水素と CO₂ を原料とした合成製品（合成ガス、合成燃料、合成プラスチックなど）の製造は、現在、実証実験段階のものが大半であり、実用化に向けたスケールアップが求められている。このスケールアップを実現する場としてコンビナートの活用が期待される。脱炭素化した製品を作る場として、既存設備など技術的なインフラは整っており、今後大量生産に向けた実装のためのテストベッドとして、コンビナートの活用は最適といえる。

コンビナートへの集積のメリットは、イノベーション・価値創出を誘発する環境である。合成製品の技術課題がまだ数多く残っている現状では、技術力の高いスタートアップ企業などもコンビナートに集積することで、実装に向けた技術開発がスピードアップすることが期待される。また、原料を扱うサプライチェーン上流からカーボンニュートラル化を推進することで、日本の製造業のカーボンニュートラル化の取組を普及させ、日本生産の製品の脱炭素化や、コンビナート内で生産した原料の輸出により海外でのカーボンニュートラル化に貢献し、地域経済のみならず日本経済にとっても有益な活動となる。

需要地に近い立地、多様な産業が集積、燃料や製品供給拠点としての高い生産能力、海外から大量の原料調達が可能という特徴に加え、これらの特徴を活用して生産活動を担うノウハウのある人材がいることが CNK の存在意義といえる。

以上より、カーボンニュートラル化が進むことでテストベッドの取組や集積効果が進み、新たな企業が加わることで新たな製品・サービスの価値創出が起こり、新たな産業のイノベーション・創出が可能となる。

4. CNK 実現に向けた技術メニューと産業間連携ポテンシャル

1) 2050 年 CNK の実現に向けた手段

2050 年における CNK を実現するためには、図 9 に示すように多様な技術メニューが用いられる。主に、脱炭素エネルギー、炭素循環マテリアル、省エネルギー・省資源そして CCUS や CCS を用いた手段が挙げられる。図 8 と同様に、これら全ての技術メニューを実施する必要はなく、各コンビナートが自らのリソースと原料やエネルギーの供給条件、更に製品等の市場受容性とを照らし合わせて適切な技術を組み合わせることで、実際の CNK の形成が行われると考えられる。

	技術メニュー (主な手段)	概要	発電	石油 精製	化学・素材			金属		
					石油 化学	ガス 化学	無機 化学	高炉	電炉	非鉄
脱炭素エネルギー	水素混焼・専焼	✓ ガスタービン発電燃料（発電所及び自家発としての利用）	●	●	●	●	●	●	●	●
	アンモニア混焼・専焼	✓ NO _x 対策した石炭混焼/専焼設備発電、ナフサクラッカーでの活用	●		●					
	CO ₂ 回収 (CCU)	メタネーション	●			●				
		合成燃料の活用	✓ 水素とCO ₂ から液体燃料を製造	●	●					
	バイオマスの活用	✓ 植物や廃棄物等からバイオ燃料を製造	●	●	●	●				
	再生可能エネルギー	✓ バイオマス発電、太陽光発電、風力発電（陸上、洋上）	●							
脱炭素マテリアル	水素還元製鉄	✓ Super COURSE50(還元剤のコースの一部を水素で代替) ✓ 100%水素直接還元プロセスの組合せ						●		
	CO ₂ 回収 (CCU)	MTO/ETO	✓ メタノールやエタノールからオレフィン（エチレンなど）を生成		●					
		機能性化学品	✓ CO ₂ からポリカーボネート、ポリウレタン原料、DMCなど生成		●					
	コンクリート	✓ 炭酸塩化を活用したCO ₂ 吸収コンクリート					●			
		プラスチックのリサイクル	✓ 廃プラスチックのリサイクル（油化/ガス化）、ゴムのリサイクル（サルファー等）	●	●	●				
	バイオマス	バイオナフサ	✓ 下流側の化成品生成	●						
		機能性化学品	✓ バイオマスプラスチックを利用したバイオポリマー		●					
省エネルギー・省資源	合成プロセスにおける低消費電力化	✓ 合成製品生成に必要な消費エネルギーの低消費電力化		●	●	●				
	オフガス利用	✓ 石油精製、ガス化学、製鉄などの工程で生じる副生水素活用(純度向上)		●	●				●	
		✓ オフガスマンの原料化		●	●	●	●	●		
	蒸気/排熱の利活用	✓ 一般廃棄物、産業など（ガス化/油化できない）から得られる蒸気や廃熱の利活用		●	●	●				
	コンビナート内各設備の排熱利活用	✓ 合成製品生成に必要なエネルギーとして他設備の排熱活用		●	●	●	●	●	●	●
	プロセス改革	✓ 大型電炉での高級鋼製造でCO ₂ 削減			●				●	
		✓ 石化の分離技術の省エネルギー化								
	CCUS	✓ EGS(地熱増産システム)へのCO ₂ 活用 ✓ 火力発電所(回収しきれないCO ₂)のCCUS活用(含EOR)	●							
	CCS	✓ CO ₂ の埋設	●	●	●	●	●	●	●	●

出所) 各種資料等より野村総合研究所作成

図 9 2050 年 CNK の実現に向けた手段

脱炭素エネルギーの手法

- 水素混焼・専焼：LNG 火力に水素を混焼することで CO₂ 排出量を抑制する。更に水素の混焼率を高めて水素専焼にすることで CO₂ 排出量をゼロにすることができる。既存の設備を活用した水素発電には、水素をガスタービンの燃料として用いる発電と、水素を蒸気タービン用のボイラーの燃料として用いる発電とがある。いずれも従来の LNG などの燃料に水素を混ぜて混焼することで、燃料燃焼からの CO₂ 排出量を削減することができる。ガスタービン燃焼では水素のみの原料での燃焼（専焼）が可能となり、その実現により CO₂ 排出量をゼロにすることができる。
- アンモニア混焼・専焼：石炭火力にアンモニアを混焼することで CO₂ 排出量を抑制する。更にアンモニアの混焼率を高めて専焼にすることで CO₂ 排出量をゼロにすることができる。

技術的には石炭火力のボイラーで混焼する技術と、アンモニアを直接燃焼させるガスタービン発電が挙げられる。また、アンモニアは今後、工業炉やナフサクラッカー向けの燃料にも活用すべく技術開発を進めている。

- メタネーション：CO₂と水素を原料としてメタンを合成する技術。触媒を用いて発熱反応で合成されたメタンは、従来の都市ガスのインフラを活用して燃料として利用することができる。
- 合成燃料の活用：CO₂と水素を合成して製造される燃料。FT 合成、サバティエ反応等の製造方法があり、液体合成燃料と気体合成燃料に大別される。前者には、高温下における触媒反応により炭化水素化合物の混合物、いわゆる人工的な原油を製造し、ガソリン、軽油などを精製するものなどがある。後者には、合成メタンなどがある。
- バイオマスの活用：木材や廃棄物などを原料とする燃料。発酵、ガス化、熱分解、水素化处理などの技術を用いて、バイオディーゼル、バイオエタノール、バイオジェット燃料、バイオガスなどの合成が可能となる。再生可能な生物由来であるバイオマスを燃料とすることで化石由来の燃料を代替し、CO₂排出量を抑制することができる。
- 再生可能エネルギー：バイオマス発電や太陽光発電、洋上・陸上風力発電など、エネルギー発生時に CO₂を排出しない発電技術。そのまま電力としての活用と、水素などの脱炭素燃料を製造する際の電力源としても用いられる。

炭素循環マテリアルの手法

- 水素還元製鉄：製鉄の際に必要となる還元反応を、従来のコークスではなく水素で行うことで CO₂ 排出量削減を実現する。還元反応を全て水素で行う直接水素還元製鉄、還元反応の一部を水素で実施する COURSE50 や Super COURSE50 などの新しい製造方法がある。COURSE50 では、製鉄所内で発生する副生水素を活用した還元反応を用いた部分水素還元（2030 年までの実現予定）、2050 年では外部から調達する水素を活用した還元反応を用いた Super COURSE50 を用いて CO₂ 排出量を抑制することができる。
- MTO：Methanol to Olefin。メタノールからエチレン、プロピレン、ブテン等のオレフィン（不飽和炭化水素。熱却しても塩化水素などの有害ガスを発生しない）を作る技術。オレフィンは合成プラスチックの原料となるため、CO₂を原料とすることで合成プラスチック内に CO₂を固定化させることになり、CO₂削減が可能となる。
- ETO：Ethanol to Olefin。エタノールからプロピレン、ブテン、ブタジエン等のオレフィンを作る技術。MTO 同様に、合成プラスチック内に CO₂を固定化させることで CO₂削減が可能となる。

- 機能性化学品：CO₂を原料として作られるポリカーボネート、ポリウレタン原料、DMC²⁵などを指す。これら製品から合成プラスチックを作ること、合成プラスチック内にCO₂を固定化させることでCO₂削減が可能。合成反応の途中でメタノールやフェノールなどとの合成が必要となる。
- コンクリート：CO₂を用いてコンクリートを生成する技術。コンクリートにCO₂を吸着させることでCO₂削減が可能となる。廃棄コンクリートなどから酸化カルシウム（CaO）を抽出し、炭酸塩（CaCO₃）を製造する際にもCO₂を吸着することができる。
- プラスチックのケミカルリサイクル：廃棄プラスチックのケミカルリサイクル（油化もしくはガス化）することで合成燃料を製造するもの。廃棄プラスチックを油化することでリサイクルナフサを製造する手法、熱分解することでオレフィンを製造する手法、ガス化することで水素や一酸化炭素（CO）の合成ガスを生成してエタノールを製造する手法などがある。また、廃タイヤを分解しゴムチップとして再利用すること、カーボンブラックを抽出して再利用することなども含まれる。
- バイオナフサ：バイオマス製品（廃食油など）からバイオナフサ（再生可能炭化水素）を製造する技術。それを石油由来ナフサに混合することでバイオポリエチレンやバイオポリプロピレンを製造することができる。
- 機能性化学品（バイオマス）：バイオマスプラスチックからバイオポリマーを製造する取組。バイオマスプラスチックに生分解プラスチック成分を混合することで、再度バイオポリマーとして活用することができる技術。
- 合成プロセスにおける低消費電力化：合成製品（合成ガス、合成燃料、合成プラスチック）を製造する際に必要となる非常に大きなエネルギーについて、低消費電力化を図るもの。

省エネルギー・省資源の手法

- オフガス利用：石油精製、化学などのプロセスにて発生する副生水素、メタン、エタンなどを利活用するもの。副生水素はその純度を上げることで、プロセス内での燃焼のみならず、CO₂などとの合成反応に用いることができる。各プロセスで発生したCO₂を副生水素と反応させて合成製品を製造することでCO₂排出量を削減した生産活動が可能となる。
- 蒸気／排熱の利活用：コンビナート内各設備の排熱利活用：プロセスで発生する排熱や蒸気を熱源としてヒートポンプなどを用いて利活用することで、CO₂排出量を削減した生産活動が可能となる。
- プロセス改革：製鉄プロセスを高炉法から電炉法に切り替えるなどのプロセス改革により、

²⁵ DMC：Dimethyl carbonate 炭酸ジメチル。

CO₂ 排出量の削減を図るもの。他にも、圧縮機の動力源を蒸気タービンから高効率モーターに置き替えによる省エネルギー化などもある。

CCUS、CCS の手法

- CCUS：コンビナート内で利活用しきれない余剰の CO₂ を、地熱増産システム（EGS）²⁶ として地中に圧入して高温の CO₂ を回収や、EOR²⁷として CO₂ を地中に圧入して原油を獲得する手法などがある。
- CCS：上記各種用途で活用できない CO₂ は、回収及び貯留して CCS として地中に埋設することになる。

2) CNK 実現に向けて必要となる連携ポテンシャル

CNK の実現に際して、特に着目すべきが、産業間連携である。多様な産業の集積による連携効果がコンビナートの最大の特徴であり、カーボンニュートラル化に向けて複数産業が連携し集積効果が期待できる施策がいくつか挙げられる。それら産業間連携の中でも代表的な取組を図 10 に示す。

	技術メニュー (主な手段)	概要	発電	石油 精製	化学・素材			金属		
					石油 化学	ガス 化学	無機 化学	高炉	電炉	非鉄
脱炭素エネルギー	水素混焼・専焼	✓ ガスタービン用発電燃料（発電所及び自家発としての利用）	●	●	●	●	●	●	●	●
	アンモニア混焼・専焼	✓ NO _x 対策した石炭混焼/専焼設備発電、ナフサクラッカーでの活用	●	●	●	●	●	●	●	●
	CO ₂ 回収 (CCU)	メタネーション ✓ 水素とCO ₂ からメタンを合成 合成燃料の活用 ✓ 水素とCO ₂ から液体燃料を製造	●	●	●	●	●	●	●	●
	バイオマスの活用	✓ 植物や廃棄物等からバイオ燃料を製造	●	●	●	●	●	●	●	●
	再生可能エネルギー	✓ バイオマス発電、太陽光発電、風力発電（陸上、洋上）	●	●	●	●	●	●	●	●
炭素循環マテリアル	水素還元製鉄	✓ Super COURSE50(還元剤のユークスの一部を水素で代替) ✓ 100%水素直接還元プロセスの組合せ	●	●	●	●	●	●	●	●
	CO ₂ 回収 (CCU)	MTO/ETO ✓ メタノールやエタノールからオレフィン（エチレンなど）を生成 機能性化学品 ✓ CO ₂ からポリカーボネート、ポリウレタン原料、DMCなど生成 コンクリート ✓ 炭酸塩化を活用したCO ₂ 吸収コンクリート	●	●	●	●	●	●	●	●
	プラスチックのケミカルリサイクル	✓ 廃棄プラスチックのケミカルリサイクル（油化/ガス化）、ゴムのリサイクル（サルファー等）	●	●	●	●	●	●	●	●
	バイオマス	バイオナフサ ✓ 下流側の化成品合成 機能性化学品 ✓ バイオマスプラスチックを利用したバイオポリマー	●	●	●	●	●	●	●	●
	合成プロセスにおける低消費電力化	✓ 合成製品生成に必要な消費エネルギーの低消費電力化	●	●	●	●	●	●	●	●
省エネルギー・省資源	オフガス利用	✓ 石油精製、ガス化学、製鉄などの工程で生じる副生水素活用(純度向上) ✓ オフガスマンの原料化 ✓ 工業炉や高炉などでのオフガスの水素利活用	●	●	●	●	●	●	●	●
	蒸気/排熱の利活用	✓ 一般廃棄物、産廃など（ガス化・油化できない）から得られる蒸気や廃熱の利活用	●	●	●	●	●	●	●	●
	コンビナート内各設備の排熱利活用	✓ 合成製品生成に必要なエネルギーとして他設備の排熱活用	●	●	●	●	●	●	●	●
	プロセス改革	✓ 大型電炉での高級鋼製造でCO ₂ 削減 ✓ 石化の分離技術の省エネルギー化	●	●	●	●	●	●	●	●
	CCUS	✓ EGS(地熱増産システム)へのCO ₂ 活用 ✓ 火力発電所(回収しきれないCO ₂)のCCUS活用(含EOR)	●	●	●	●	●	●	●	●
省エネルギー・省資源	CCS	✓ CO ₂ の埋設	●	●	●	●	●	●	●	●

出所）各種資料等より野村総合研究所作成

図 10 2050 年 CNK の実現に向けた手段と産業間連携ポテンシャル

²⁶ 地熱増産システム(EGS)：Enhanced Geothermal Systems 人工的に水の代わりに CO₂ を地下に注入・循環することで、地熱流体の生産を維持・増産する技術。

²⁷ EOR：Enhanced Oil Recovery：CO₂ を地下に圧入して石油回収率を高める技術。

(1) 水素やアンモニアの共同調達・利活用【ポテンシャル①】

カーボンニュートラル社会の実現にあたっては大量の水素・アンモニアを用いることでエネルギーの脱炭素化（燃料としての活用）、マテリアルの炭素循環（原料としての活用）が可能となる。

CNK は、その集積効果を活かし、水素・アンモニアを大規模かつ安価に受け入れ、これらを利活用し、様々な脱炭素エネルギーや炭素循環マテリアルの供給拠点として、水素・アンモニアのサプライチェーンの一端を担うことが可能になる。

既存設備・インフラの活用や CNP で検討されている大量の水素やアンモニアの受入設備などとの連携等も踏まえて、コンビナート内で共同して大量の水素やアンモニアの調達・利活用を行うための共有設備が必要となる。

具体的には、コンビナート隣接の火力発電所や各社が保有している火力の自家用発電設備なども束ね、発電設備全体としての集積効果が期待される。このために海外からの原料輸入サプライチェーン構築を行い、海外からアンモニアや水素を搬送する船舶などの輸送手段開発、貯蔵・搬送するための共有設備が必要となる²⁸。

特に、水素は海外からの調達のみならず、再生エネルギーを用いて水電解での生成する水素やコンビナート内で発生した副生水素があるため、まとめて貯蔵し、エネルギー利用及びマテリアル利用として各需要地に水素搬送するための共有設備も必要となる。こうした副生水素の活用では、既に用いられている水素用のタンクやパイプラインをはじめとする既存インフラを活用することで、用途拡大や需要拡大に対応することが求められる。

いずれの場合においても、水素やアンモニアを貯蔵・搬送する共有設備としてタンクやパイプラインなどの設備が必要となる。水素は、比重が軽くタンクなどの設備が大きくなってしまうこと、水素脆性による配管の腐食が懸念されることから、専用の設備が必要となるため、一社当りの投資負担を削減するためにも、これらの共有設備が必要となる。

(2) CO₂の共同回収・利活用【ポテンシャル②】

原油調達量減少に伴い不足する炭素源として、水素との合成により大量の合成燃料を製造するために、コンビナート内の各プロセスからの発生する大量の CO₂ を回収・配送するための共同利用設備が必要となる。

合成メタンや合成燃料等、炭素循環マテリアルの製造に必要となる炭素源を確保するため、コンビナート内で発生した CO₂ を一元的に管理し、最適配分していくことが求められる。また、コンビナート内にて共同で CO₂ を回収し利活用するための共有設備が必要となる。

²⁸ ただし、集積効果検討のためのものあり、実際には、発電所に港湾設備を直接設置できる場合なども想定されるため、最終的には経済性も含めて事業者判断となる点には留意が必要。

効率的な回収のみならず、CO₂の純度を上げるための設備や、コンビナート内でのCO₂回収効率を上げるための最適なタンクやパイプラインの敷設なども共通して必要となる。

(3) バイオマス原料や廃棄プラスチックの共同調達・利活用【ポテンシャル③④】

バイオ燃料製造やバイオマス発電を行うにあたり、原料となる植物や廃棄物等の確保が重要となる。発電や燃料合成に必要な原料確保のためのサプライチェーン構築（原料となる農林業由来の木材や都市又は産業由来の廃棄物などの共同調達等）と、共同での貯蔵スペースの確保や集約が必要となる。発電設備としての規模が他手法と比較して相対的に小さく、コスト高になる傾向があることから、バイオマス発電のための設備の集積が重要となる。同様にバイオ燃料もコスト削減のために集積が求められる。

一方、ケミカルリサイクル等を行うにあっても、原料となる廃棄プラスチックの確保が重要となる。コンビナート内で共同して安定的な数量のプラスチック生産を行うため、大量の廃棄プラスチック回収が必要となる。

こうした取組に対して、設備を集約し、バイオマス原料や廃棄プラスチックの共同調達・利活用を行うための貯蔵施設の共同利用が必要となる。

(4) 省エネルギー・省資源の取組強化【ポテンシャル⑤】

カーボンニュートラルの実現には、脱炭素化への取組のみならず、これまでも実施してきた低炭素化への更なる強化も必要になる。個社単位ではなくコンビナート内で連携して省エネルギーや省資源の取組を行うことで、その集積・連携による相乗効果が期待できる。

既にコンビナート内の熱を発生するプロセスや廃棄物燃焼から得られる蒸気や排熱は利活用されているものの、脱炭素化に向けて更なる排熱活用が求められる。こうした熱源利活用に向けて、蒸気搬送設備やヒートポンプ等の整備が必要となる。

また、コンビナート内で発生した副生水素を合成製品の反応に用いることでCO₂排出量の削減が期待されている。石油精製、化学工場から発生する副生水素を高効率で回収して高純度化するためにPSA設備²⁹、及び回収した副生水素を集約して各用途に配送するためのタンクやパイプラインも必要となる。

²⁹ PSA設備：Pressure Swing Adsorption 圧力変動吸着法を用いた設備で、水素含有ガスなど改質ガスから純水素を精製する。

(5) CCS の共同実施【ポテンシャル⑥】

今後コンビナートのカーボンニュートラル化を推進する中で、処理しきれない CO₂ が発生し、それを回収して埋める CCS も必要となるケースがある。海外では産業クラスターで CCS を進める動きがあり、国内コンビナートにおいても、各社が連携して CCS を行うことが求められる。欧州のコンビナートが実施している CCS 設備を共有設備として活用する取組は日本にとっても有効と考えられ、コンビナート内各社が協調して投資・活用する運用が求められる。なお、コンビナート内にて CCS を行うのみならず、場合によっては海外の CCS 活用のために CO₂ 輸出を行うことも想定される。

CCS を実施するためには、既に尿素やメタノールなどの化学製品製造や CCUS 向けに用いられている CO₂ 回収設備やインフラを最大限活用し、更に追加で必要となるパイプライン、CO₂ 貯蔵施設等については、共同での設備投資や整備が必要となる。

5. CNK 実現に向けた提言

1) 取組の方向性

コンビナートは、日本の基幹産業が高度に融合している生産拠点であるだけでなく、主要需要地の周辺に立地し、更には地域経済との密接な関係を有している。コンビナートが持つこうした特徴に着目しながら、カーボンニュートラル社会の持続的発展、製造事業者等の競争力強化、地域経済ひいては日本経済の活性化にどう貢献していけるかについての検討を進めていくことが重要となる。

カーボンニュートラル社会の実現に向けては、大量の水素やアンモニア等を安価に調達し、これらを活用した脱炭素エネルギーや炭素循環マテリアルの安定供給を確保することが必要となる。こうした中で、コンビナートでは、その集積効果や立地優位性等を活かして、水素やアンモニア等を大規模かつ安価に調達し、脱炭素エネルギーや炭素循環マテリアルを効率的に供給する仕組みを確立することが重要となる。

また、各コンビナートにおける立地企業、地理的特性、カーボンニュートラルに向けたアプローチ等の違いにより、多様な CNK の姿が想定される。こうした違いに応じた CNK を実現する必要があることから、地域において、企業・自治体等が参加する“地域協議会”を活用しつつ、学識経験者等の有識者を交えながら、客観的な議論・検討を進めていくことが重要となる。

さらに、CNK の実現に向けては、企業・自治体・国がそれぞれで取組を進めるのではなく、3 者が一体となって取組を進めていくことが必要となる。これらの主体の連携を促すような組織や仕組みも重要となる。

2) 国に求められる役割

国においては、まず、全体最適を図ることが求められる。特に、エネルギー・マテリアルの安定供給を確保することを大前提とし、戦略的かつ計画的に、CNK の実現を後押ししていくことが求められる。

その上で、脱炭素エネルギー・炭素循環マテリアルの供給・利活用拠点や脱炭素化技術のテストベッドの整備を促進すること、また、脱炭素エネルギー・炭素循環マテリアルの需要と供給を喚起することが求められる。

脱炭素エネルギー・炭素循環マテリアルの供給・利活用拠点や脱炭素化技術のテストベッドの整備を促進するためには、拠点整備に必要な設備投資や脱炭素化技術の実証等に対する支援が必要となる。具体的には、カーボンニュートラルに関する政府方針を明確にするなどして企業の投資予見性を高めることに加え、設備投資や技術実証等に対する費用補助やファイナンス支援等を積極的に進めることが求められる。

また、社会全体でコスト負担する仕組みを構築することも必要となる。脱炭素エネルギー・

炭素循環マテリアルの需要と供給を喚起するため、脱炭素エネルギー・炭素循環マテリアルの調達を進める企業に対する支援や、脱炭素エネルギー・炭素循環マテリアルの供給を担う企業に対する支援が必要になる。具体的には、これらの企業へのインセンティブやビジネスモデルの確立支援等を検討することが求められる。

3) 自治体に求められる役割

自治体においては、まず、「脱炭素エネルギーの供給」「炭素循環マテリアルの供給」「脱炭素化技術のテストベッド」のいずれの機能に重点を置いた CNK を実現するのか、その方向性を検討の上、ステークホルダー間の調整等を行いながら、地域内連携を促進していくことが求められる。

そのためには、住民や地域社会に対して、CNK への理解・啓蒙を促すことが重要である。地域における CNK の実現に向けた方向性の検討を加速化、また地域内・地域間の連携を促進していくためには、自治体が中心となり、コンビナート及びその周辺に立地する企業等を巻き込んだ協議会等を設置することが求められる。既に水素やアンモニアの活用等に関する地域の協議会が設置されている場合もあるが、CNK の実現に向けては、分野横断的に検討を行う場が必要であり、こうした場を新たに設けることで、地域における連携促進・事業化推進体制の強化が期待される。加えて、CNK に参加する事業者だけでは解決困難な廃棄プラスチックの収集や規制見直し等の問題への協力も期待される。

また、現在、カーボンニュートラルの実現に資する多くの技術が開発段階にあることに加え、カーボンニュートラルに至るには、多様なトランジションの経路が想定される。こうした中で、CNK の実現に向けた長期的な取組を進めていくためには、カーボンニュートラルに関する幅広い知見を蓄積し、それを共有・継承し、取組の連続性を確保するための仕組みを構築することも必要となる。

さらに、カーボンニュートラルを実現することのみを目的とすることなく、カーボンニュートラルの実現を通じて、地域経済の活性化を図ることまでを目的とする必要がある。そのためには、既存の産業集積の維持・強化のための施策のみならず、地域内に新たな産業集積を呼び込むための施策を検討することも求められる。

4) 企業に求められる役割

企業においては、まず、カーボンニュートラルを経営における中核テーマと位置づけて取組を進めることが重要で、そのためには本社と事業所間の連携強化が求められる。CNK の実現に向けて多様な取組が想定されることから、カーボンニュートラルのための社会実装の場である事業所のモチベーションとイニシアティブが不可欠であり、本社と事業所がこれまで以上に密なコミ

ニケーションを行い、事業所の取組ニーズも踏まえた企業戦略を策定することなどにより、本社と事業所が一体となって取組を進めていく必要がある。

また、資本の壁を越えた連携を積極的に行うことも求められる。コンビナートでは、これまでも共同火力など限定的な連携が行われてきたが、CNKを実現するためにはこうした連携を一層強化し、個々の企業の設備投資を抑えて全体最適を図るとともに、エネルギー・マテリアルの共同利活用・調達により集積効果を最大限発揮していくことが必要となる。

さらに、スタートアップの呼び込み、開発した技術のスケールアップ、イノベーションの推進等を行うために、産学連携に積極的に取り組むことが求められる。

こうした取組の連続性を確保するためには、カーボンニュートラルに関する幅広い知見を蓄積し、これを共有・継承する仕組みを構築することが求められる。また、そのために必要となる人材育成にも積極的に取り組む必要がある。

5) 金融に求められる役割

金融においては、トランジションを見据えながら、ビジネスモデル構築に向けた議論に積極的に参加していくことが求められるとともに、2050 年を見据えた、既存設備の用途転換やカーボンニュートラル化、企業間の共同利用設備の整備に対して、中長期目線でのファイナンス提供が求められる。

2050 年を見据えて、既存施設の用途転換、カーボンニュートラル化や企業間の設備共同利用、事業転換支援のための、中長期目線でのファイナンス・リスクマネーを供給すること。そのために、事業性評価能力や調査能力を向上させる必要がある。また、地域においては、事業化や資金調達に関する議論も誘発するべく、企業・自治体等が参画する“地域協議会”に積極的に参加することも求められる。

6) アカデミアに求められる役割

大学をはじめとするアカデミアにおいては、まず、脱炭素化技術の実証やスケールアップ等に積極的に関与し、コンビナートにおけるイノベーション創出に貢献することが求められる。また、コンビナートを切り口とする産学連携に積極的に取り組むとともに、自治体や企業の相談役になることも求められる。これらの取組を進めるにあたっては、必要となる知見を蓄積すべく、人材育成にも積極的に取り組む必要がある。

加えて、企業における本社・事業所間の連携、企業間の連携、更には産業間の連携等を促すような役割を果たすことも求められる。

6. CNK 研究会（参考）

1) 構成員

（座長）

平野 正雄 早稲田大学 教授

（委員）

平野 創 成城大学 教授

竹内 純子 NPO 法人国際環境経済研究所 理事・主席研究員

辻 佳子 東京大学環境安全研究センター長

近藤 元博 愛知工業大学総合技術研究所 教授

重竹 尚基 ボストンコンサルティンググループ シニアパートナー

奥田 真弥 石油連盟 専務理事

進藤 秀夫 日本化学工業協会 専務理事

志村 勝也 石油化学工業協会 専務理事

奥田 慶一郎 石油コンビナート高度統合運営技術研究組合 専務理事

松井 泰宏 日本政策投資銀行 企業金融第 5 部長

2) 開催実績

第 1 回：令和 3 年 12 月 22 日（水）13:30～15:00

第 2 回：令和 4 年 1 月 28 日（金）10:00～12:00

第 3 回：令和 4 年 2 月 16 日（水）13:30～15:30

第 4 回：令和 4 年 3 月 15 日（火）10:00～12:00