

**「IoE社会のエネルギーシステム」
エネルギーマネジメント研究会
産業・熱低炭素化検討グループ成果報告書（要約版）**

**「産業分野、熱エネルギーの脱炭素化に向けた
エネルギーシステムの展望」**

2020年3月31日

（一財）エネルギー総合工学研究所

<はじめに>

第2期SIPの1テーマとして2018年度に発足した「脱炭素社会のエネルギーシステムの実現」は、そのテーマ(A)の「エネルギーマネジメント研究会」において、脱炭素社会を支えるエネルギーシステムにおける統合的なエネルギーマネジメントのグランドデザインを行うことに着手した。それは再生可能エネルギーの大量導入によって電力のみならず、産業部門、運輸部門でCO2排出の大幅削減を可能とするエネルギーマネジメントシステムのあり方を描く試みである。こうした目的のもとに、脱炭素社会のエネルギーマネジメントシステム構築に資する既往研究を調査し、次年度以降、実施する技術課題（ボトルネック課題）を特定することを目的にその活動を開始した。

その中で、2018年度において研究会は、需要面では、まず、運輸部門に焦点を当て、電力セクターと交通セクターの連携の展望、供給面ではエネルギー貯蔵・輸送技術に焦点を当て、重要な取り組み課題を抽出した。

2019年度からは、SIPのテーマ名が「IoE社会のエネルギーシステム」と変更され、テーマ(A)も「IoE社会のエネルギーシステムのデザイン」に変更され、研究の目的全体が、(脱炭素化を含む) Society5.0におけるエネルギーシステム実現におけるIoT技術の適用、データ連携の研究に重点が置かれることになった。

こうしたなかで、研究会としては、2018年度に行った研究に加え、エネルギー需要面での重要分野である産業分野と、産業分野で大きなウェイトを占める熱エネルギーの将来展望を行い、同分野におけるIoT技術の適用、データ連携に係る検討を行うことも併せ重要と考え、2019年8月から2020年3月まで、「産業・熱低炭素化検討グループ」を設けて検討を行った。

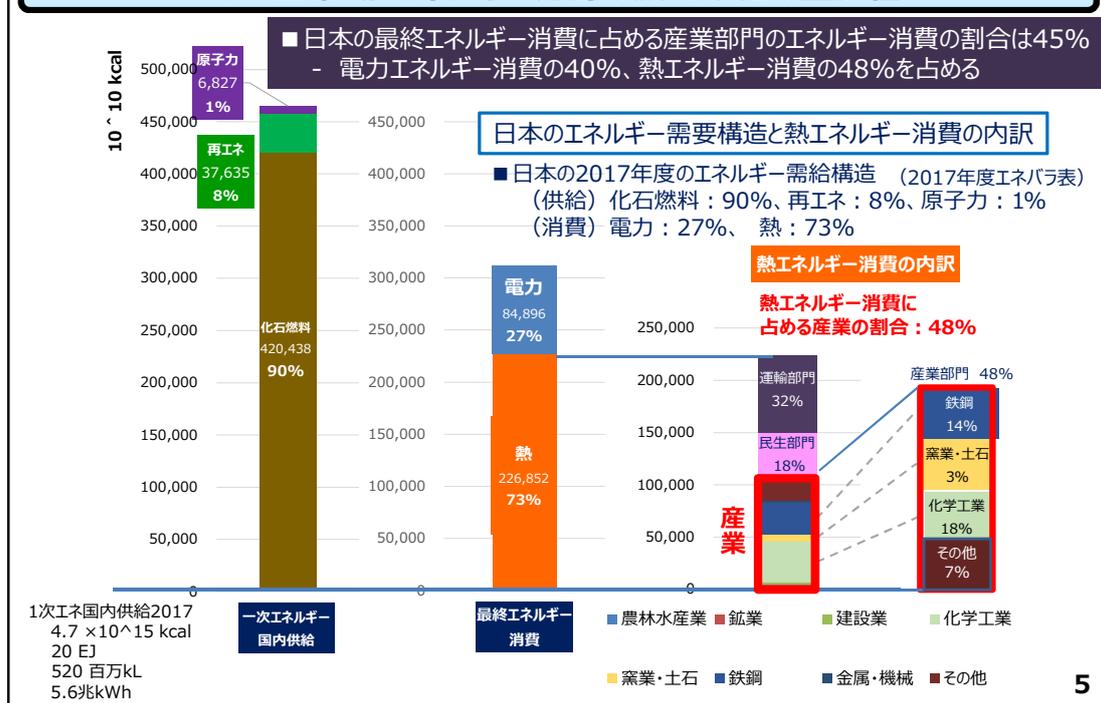
この成果報告書は、「産業・熱低炭素化検討グループ」の研究結果を取りまとめたものである。

産業・熱低炭素化検討グループ

<目次>

- 1. 産業・熱エネルギー分野の脱炭素化の重要性**
- 2. 産業・熱エネルギー分野の脱炭素化の方向性**
- 3. 産業の熱利用の方向性**
- 4. 鉄鋼、化学、セメントにおけるCO2排出プロセスと対策**
- 5. 産業・熱エネルギー分野におけるエネルギーマネジメント**
- 6. まとめ**

1. 産業・熱エネルギー分野の脱炭素化の重要性



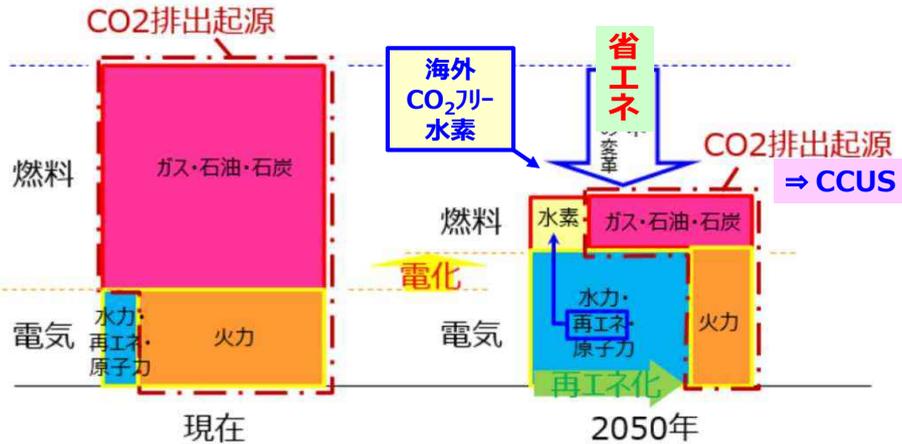
【産業・熱エネルギー分野の脱炭素化の重要性】

- 我が国は、2017年度において一次エネルギー供給量の90%を化石燃料に依存しているのが現状である。2050年までにGHGの排出量の80%削減を実現するためには、化石燃料の大幅な削減と再生可能エネルギーの大量導入が必要となる。
- 一方、エネルギー需要面からみると、我が国はその最終エネルギー消費の73%を広義の熱などで消費していることから、電源の脱炭素化のみならず、熱源の脱炭素化は脱炭素社会の実現にとって大きな課題である。
- 熱などとしてのエネルギー消費のうち、運輸、民生部門の占める割合は、それぞれ32%、18%である。これらの分野では、自動車の電動化、給湯・冷暖房の電化等のエネルギー消費形態の変化が進みつつあり、電源の脱炭素化によってその脱炭素化が可能であるが、熱エネルギー消費の48%を占める産業分野における熱需要は現在、そのほとんどを化石エネルギー源に依存しており、この脱炭素化の方策が脱炭素社会の実現にとって大きな課題となる。

2. 産業・熱エネルギー分野の脱炭素化の方向性

省エネ・電化・燃料転換（水素など）

エネルギー・環境技術の
ポテンシャル・実用化評価検討会
経産省、文科省 2019.6



CO₂排出削減方法

- ①エネルギー消費量の削減 ⇒ 省エネ、未利用熱(廃熱など)利用
- ②エネルギー利用の転換 ⇒ 電化促進 (CO₂フリー電力)
- ③燃料の低炭素化 ⇒ 燃料転換 (CO₂フリー水素、バイオマス)
- ④CCUS

6

- ・脱炭素化の方向性は、
 - ①省エネによるエネルギー消費量の削減、未利用熱の利用拡大
 - ②エネルギー利用の転換（低炭素化が容易な）電力の利用拡大（電化の推進）
 - ③エネルギーの低炭素化（再エネの利用拡大）
 が基本的な方策として挙げられるが、それらに加えて
 - ④化石エネルギーからのCO₂排出のCCSによる除去
 - ⑤水素エネルギーの形での海外からの再エネの導入
 という方策が考えられる。

- ・産業・熱エネルギーの脱炭素化を図るに当たっては、こうした基本的なアプローチに即しつつ、エネルギー利用の用途、用途ごとに求められる特性、エネルギーの利用環境等をもとに、その具体的な方策が考案される必要がある。

3. 産業の熱利用の方向性（未利用熱エネルギー量と温度の帯）

◆「年間 1 兆kWhもの未利用エネルギーのほとんどが排熱として廃棄」

そのうち、**産業分野の未利用エネルギーは約0.3兆kWh。**

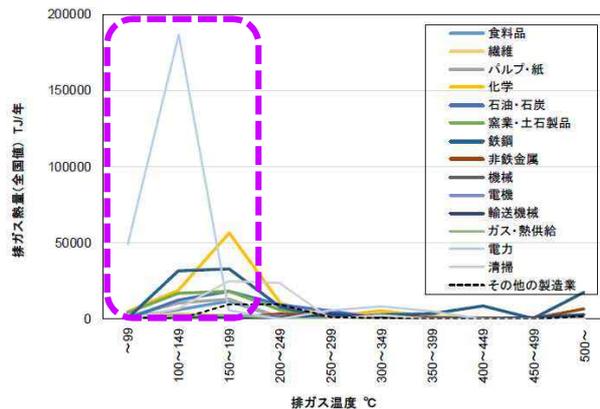
(出所：物質変換とCO2排出削減その現状と課題、2017.9.19、日本学術会議化学委員会他報告、藤岡恵子)

参考)
我が国の2017年の1次エネルギー供給量は、約20EJ≒5.6兆kWh

◆未利用放出熱のうち**200℃未満の温度帯が76%。**

⇒現状、効率的な回収・利用を妨げている理由

- ・未利用熱の温度や形態は、多様で広く分散している。
- ・需要側と供給側の熱の「質」と「量」とが、時間的/空間的に不一致である。

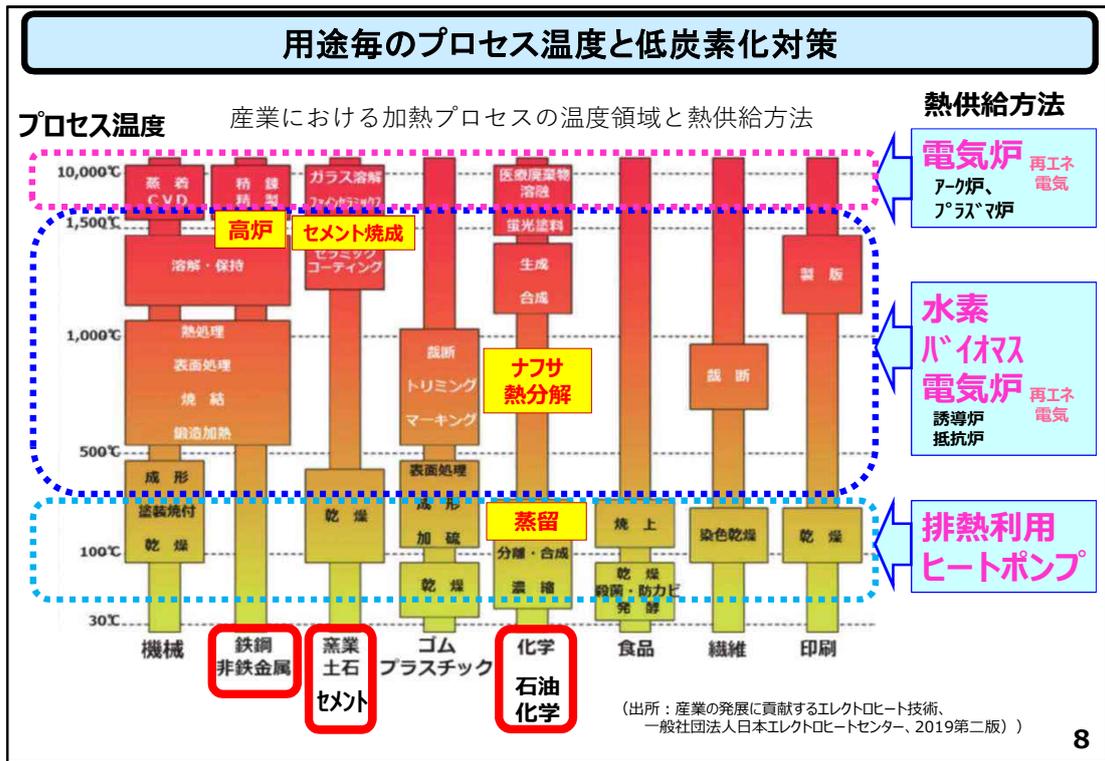


温度帯別の業種別全国推定値より

未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合
産業分野の排熱実態調査
2019年3月

我が国では、年間 1 兆kWhもの未利用エネルギーのほとんどが排熱として廃棄されており、そのうち、産業分野では約0.3兆kWhと報告されている。また、別の報告によれば、未利用熱のうち200℃未満の温度帯が76%と大半を占めている。

排熱が有効利用されていない理由としては、未利用熱の温度や形態が多様で広く分散していること、需要と供給の熱の「質」と「量」が、時間的、空間的に不一致であることが指摘されている



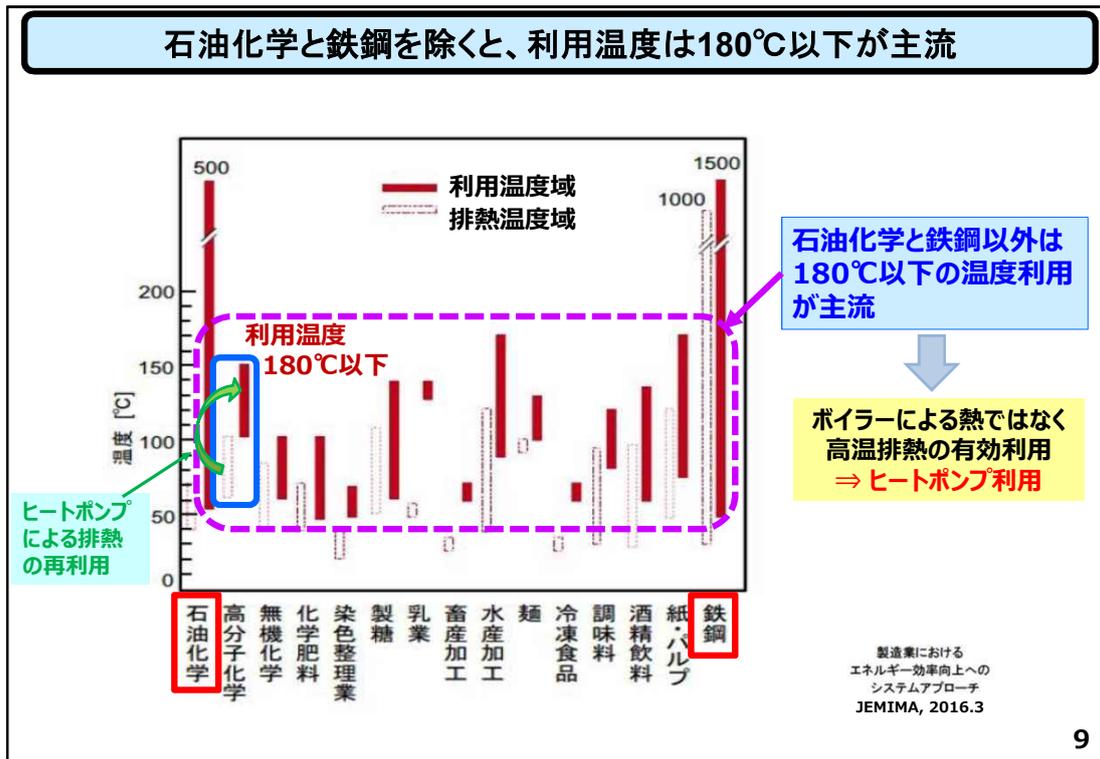
鉄鋼、セメント、化学などの産業の用途毎のプロセス温度帯を示す。

- ・ 鉄鋼の高炉は2200℃程度、セメント焼成は約1500℃の高温を利用しており、ナフサ熱分解は850℃の中高温、蒸留は200℃程度の中低温を利用している。

低炭素の熱供給方法としては次のように考えられる。

- ・ 300℃～2200℃の高温は「水素」「バイオマス」や「再生可能エネルギー由来の電気を利用した電炉」などが挙げられる。
- ・ 1500℃以上の超高温は、燃焼では難しい面もあり、アーク炉やプラズマ炉などの電炉を利用する方法が挙げられる。
- ・ 200℃台以下では、排熱を利用したヒートポンプを利用すると、化石燃料の使用が削減でき、CO2排出量も削減できると期待される。

石油化学と鉄鋼を除くと、利用温度は180℃以下が主流



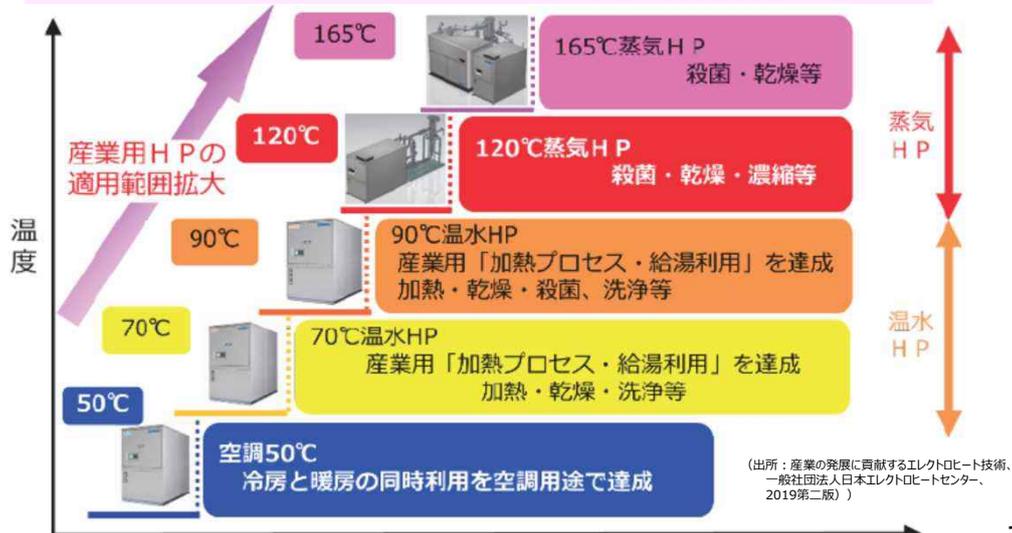
このグラフは、各産業における利用温度域と排熱温度域を示している。

- ・ 石油化学と鉄鋼を除くと、利用温度域は180℃以下が主流であることがわかる。
- ・ 180℃以下の温度利用にもかかわらず、ボイラーで化石燃料を燃やし、燃焼の熱を水蒸気で供給することは効率が悪い。化石燃料を燃やしたボイラーによる熱ではなく、高温排熱を利用したヒートポンプによる熱を利用することがエネルギーの利用効率面から好ましい。

排熱を利用したヒートポンプ(HP)による低炭素化

ボイラーによる熱供給から排熱を利用したヒートポンプの熱に代替することによりCO₂を削減する。

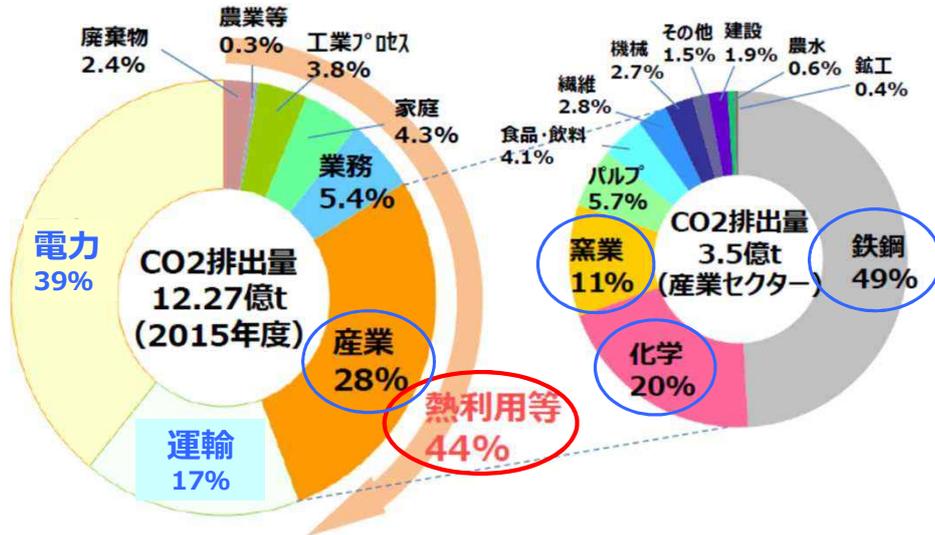
- 産業用ヒートポンプは**165℃**が商品化。現在、**200℃**対応がNEDOで開発中
⇒石油化学と鉄鋼以外は、ほとんどの熱需要が**180℃**以下である



- ボイラーによる熱供給から、排熱を利用したヒートポンプの熱に代替することによりCO₂を削減する。
- ヒートポンプは現在165℃までの高温タイプが商品化されており、NEDOプロジェクトで200℃の高温ヒートポンプが開発されている。
- ヒートポンプは、排熱を利用しながらも、熱移動による低温熱の生成も可能であり、現状マイナス60℃の低温生成を可能とする技術が商品化されている。

4. 鉄鋼、化学、セメントにおけるCO2排出プロセスと対策

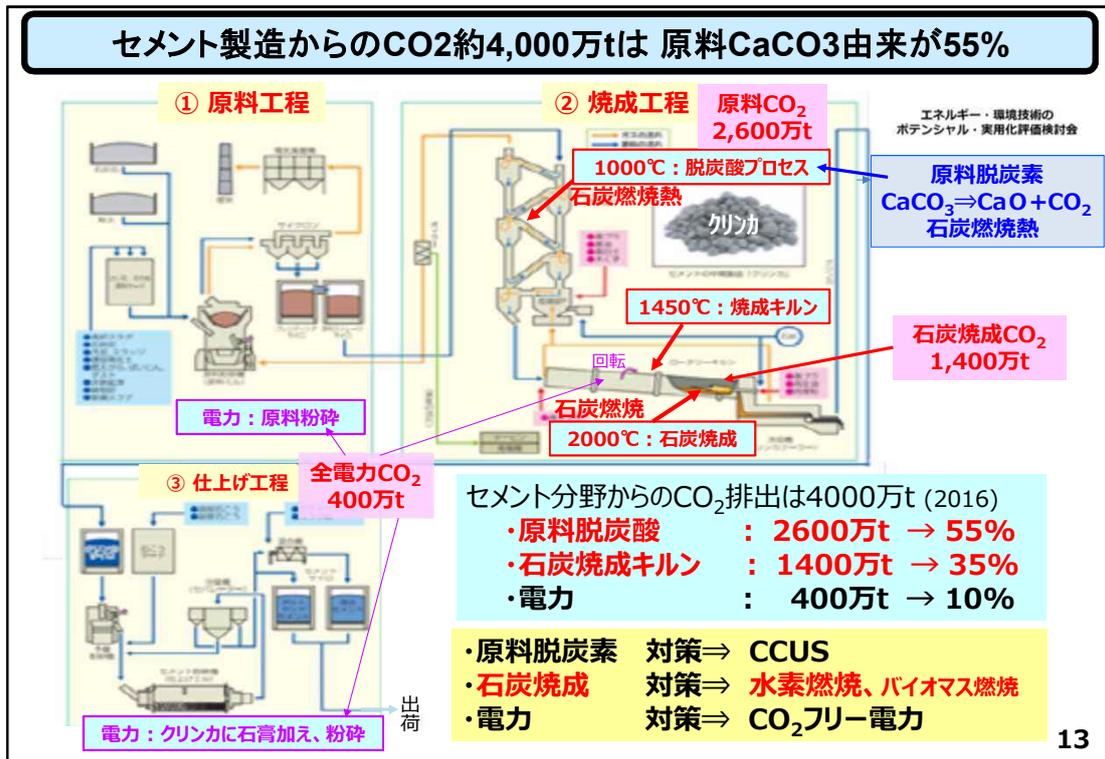
出所：エネ庁 CO2フリー水素WG2017.10.02



産業からのCO₂排出が約30%、そのうち鉄鋼、化学、窯業(セメント)で80%を占める

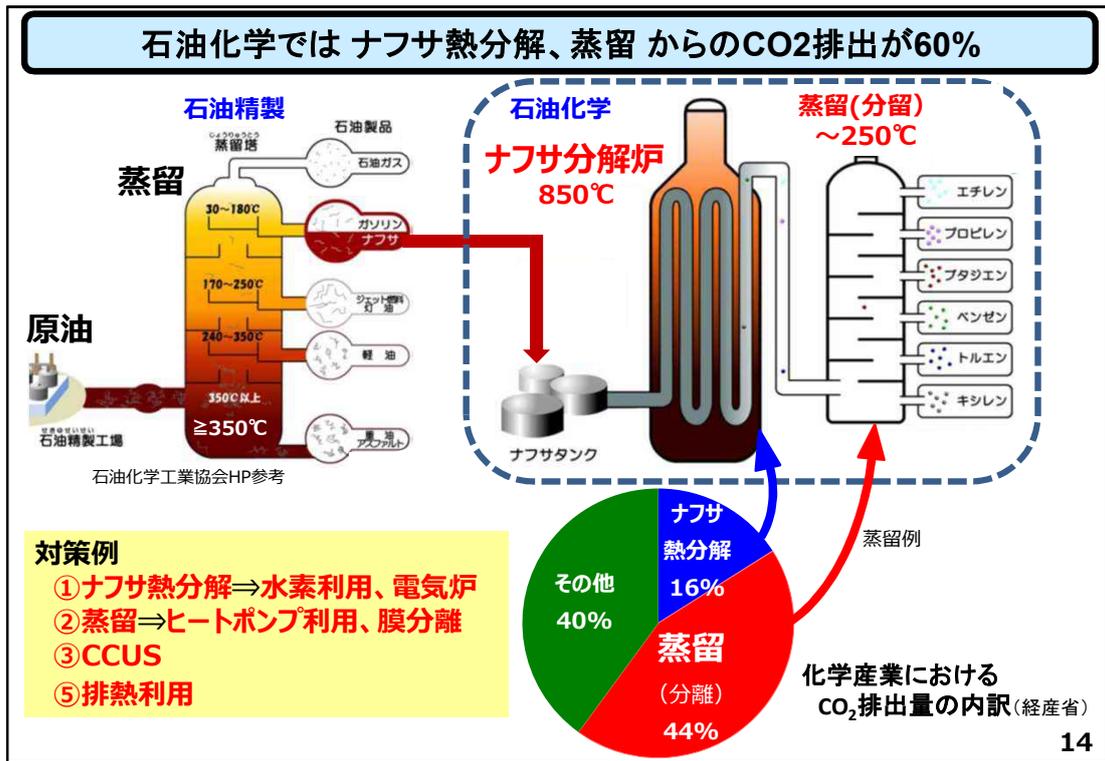
11

- ・我が国のCO₂排出が、どのセクターから、どの程度排出されているのかを把握するためにセクター別のCO₂排出量を示す。産業分野からのCO₂排出が約3割を占め、電力の次に多いことがわかる。さらに産業では、鉄鋼、化学、セメントなどの窯業で、産業全体の80%を占めている。
- ・従って、産業分野のCO₂排出の調査対象として、鉄鋼、化学、セメントの3分野を取り上げることとした。



次に、我が国のセメント業におけるCO₂排出に関し、プロセスに分けてCO₂排出量を調査した。

- 原料である炭酸カルシウム由来のCO₂が2600万tと、セメント製造におけるCO₂排出の55%を占める。
- 次は、約1450℃のキルン焼成プロセスのための石炭燃焼による加熱で発生するCO₂が1400万tで35%を占める。その他、焼成の前段の原料石灰石を粉砕するプロセスと、焼成キルンプロセスで得られたクリンカに石膏を加えて粉砕するプロセスにおける、電力由来のCO₂が合計400万tである。
- セメント製造におけるCO₂削減策は、粉砕の電力は再生可能エネルギー由来の電力に代替し、石炭焼成キルンプロセスの燃料は水素やアンモニアに代替が可能と思われる。
- ただし、炭酸カルシウムからの脱炭酸した原料由来のCO₂の2600万tは、CCUSで対応する必要があり、課題と認識する。



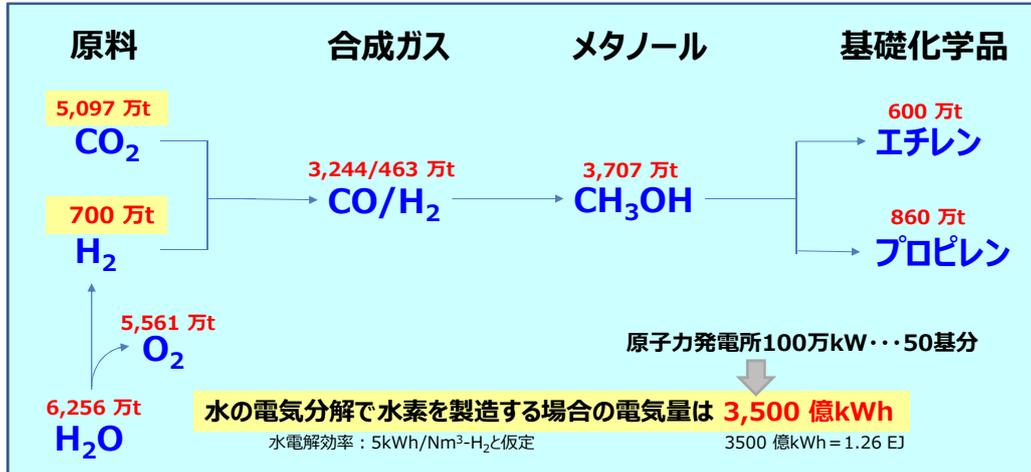
- 化学産業においては、蒸留プロセスが約44%、ナフサ熱分解が約16%と、両者で化学産業でのCO₂排出の60%と大部分を占める。化石燃料の燃焼による熱由来のCO₂排出量が多く、化石燃料からのCO₂を削減する必要がある。
- 対策としては、蒸留プロセスのCO₂削減としてヒートポンプ、膜分離が提案されている。また、ナフサ熱分解ではナフサ分解炉の燃料として水素利用や、分解炉の電化が挙げられる。

化学：CO₂からエチレン・プロピレン製造に必要な水素は700万t

日化協あるべき姿具現化SWG180307参考

仮定：回収CO₂から基礎化学品のエチレン、プロピレンをメタノール経由で製造

エチレンは国内生産量600万t/年をベースに、メタノールからエチレンをSAPO触媒で副生するプロピレン量を想定



- 化学産業からのCO₂排出量：6,500万t/年
- CO₂回収エネルギーを現行4GJ/t-CO₂とした場合、上記5,097万tのCO₂回収に204PJ必要

15

- また、化学産業におけるCO₂排出削減として、化学産業ならではの化学反応を利用した排出CO₂の固定化も検討されている。
- 例えば、工場から排出されるCO₂を回収し、回収したCO₂を水素で還元し、エチレンやプロピレンなどの基礎化学品に化学変換する方法が検討されている。触媒とプロセス開発が鍵であるが、例えば我が国の年間エチレン生産量の約600万tを、回収CO₂を原料とし、メタノールを中間体として製造する場合、原料の必要量はCO₂が年間約5100万t、水素が年間700万t 必要となり量の確保が課題である。
- ここで、水素700万t/年を水の電気分解で製造する場合、必要な電力は3500億kWh/年となり、我が国の年間消費の約3分の1と非常に大量の再エネ電力が必要となる。

鉄鋼、セメント、化学のCO2多排出プロセスと脱炭素化対策

	CO ₂ 多排出 プロセス	CO ₂ 排出量 万t/年 (2016)	CO ₂ 割合	CO ₂ 削減対策案	電気消費量 億kWh(推定)	水素必要量 万t(推定)
鉄鋼	コークス炉	490	3%	水素・電気の場合不要		
	焼結鉱等	1860	11%	水素・電気の場合不要		
	高炉銑鉄 (2,200℃)	9000	54%	水素還元、電気還元	353	700
	転炉 (1,800℃)	500	3%	水素・電気の場合不要？		
	圧延・鋼管	2000	12%			
	その他	2850	17%			
	合計	16700	-			
セメント	原料脱炭酸 (1,000℃)	2600	55%	CCUS		
	石炭焼成 (1,450℃)	1400	35%	水素、アンモニア燃焼		
	電力	400	10%	再エネ、水素発電		
	合計	4000	-			
化学	蒸留 (~250℃)	2860	44%	電化(ヒートポンプなど)		
	ナフサ分解 (850℃)	1040	16%	水素燃焼、電化		
	合計	6500		青：水素利用、紫：電気利用		

電化、水素利用の可能性の定量化が課題

出所：インタビュー内容を元にSIPで作成（鉄鋼：ポテンシャル検討会資料、セメント：インタビュー、化学：経産省資料、電力：電気新聞・電中研、水素：ポテ研報告） **16**

- この表は、鉄鋼、セメント、化学分野でのCO₂を多く排出するプロセスと、そのCO₂削減案を一覧にしたものである。
- CO₂削減方法は、基本的に再生可能エネルギー由来の「電化」と「水素利用」が中心になると考えられ、それらを思料する技術開発が今後の課題である。
また一方で、個々のプロセスで必要な電力量と水素量の試算、および、それらの経済性と量を両立する調達も課題である。

5. 産業・熱エネルギー分野におけるエネルギーマネジメント

- **IoT/AI利用による省エネ、電化、水素利用のスマート化**
 - 未利用熱エネルギーの有効利用（ヒートポンプによる排熱リサイクル）
 - 熱プロセスを電化することによるデジタル制御化
 - プロセスの見える化・データ化
 - プロセス間、生産-動力間、異なるセクター間のデータ連携
 - 省エネ価値の市場化：Energy Service Company (ESCO) , Energy Service Provider (ESP) の登場

- **空間、時間の扱う範囲の拡大**
 - ・空間
 - プロセス間、生産-動力間、企業間、地域内・間の異なるセクター間のデータ連携
 - ・時間
 - 事業所内から企業間、地域へ、電力をはじめとするエネルギーシステムの活用
 - 再エネ電源出力変動へのデマンドレスポンス対応を含めた時間間隔短縮

17

産業において省エネルギー化は時代とともに変遷し、特に1970年代のオイルショック以降では、個々の装置やプロセス単位ではかなりの省エネ化が図られ、現在では個別事業所やコンビナート単位でエネルギー使用の見える化や省エネ価値の市場化などが展開されている。しかし、前述の通り年間1兆kWhもの未利用エネルギーのほとんどが排熱として廃棄され、そのうち産業分野の未利用エネルギーは約0.3兆kWhであるのが現状である。これら排熱の有効利用に省エネ化・脱炭素化に向け、産業・熱エネルギー分野のエネルギーマネジメントはさらに発展させていく必要があり、そのためには次の2点がポイントであると考えられる。

- ① IoT/AI利用による省エネ、電化、水素利用のスマート化
- ② 空間、時間の扱う範囲の拡大

①については具体的には、ヒートポンプ利用の拡大、熱プロセスの電化・見える化・デジタル制御化、プロセス間・地域内の異なるセクター間のデータ連携・最適化、省エネ価値の市場化（ESCO、ESP）が挙げられるが、次ページ以降でこれらに関して着目される事例を取り上げていく。

なお、②において「空間的」とは、例えば、異なる生産プロセス間、生産部門と動力部門、廃棄物処理部門といった工場内の異なる部門間、企業の枠を超えた連携、地域社会と企業の連携、そして隣接するエネルギー面で補完関係にある地域間を指す。また、「時間的」とは、エネルギー貯蔵、エネルギー需要の時間的調整等を指す。

事例：電化を利用した排熱のリサイクル

□ 電化のメリット

- 通信、センサー、制御機器との相性がよい
- (相対的に) 空間および時間についての詳細なデータを集めやすい

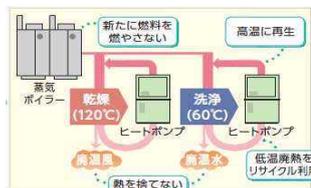
□ ヒートポンプ加熱

● メリットと効果

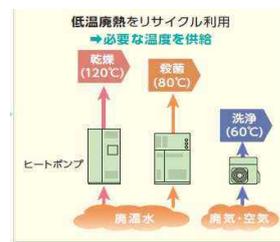
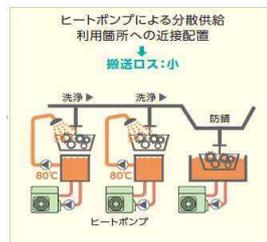
- 省エネルギー / 低温廃熱の有効利用, 蒸気ロスの削減
- 最適熱源配置 / プロセスに合わせた熱供給
- DR資源 / 外部との通信機能をもつ制御システムを採用し, オンラインモニタリングやメンテナンスの利便性を向上させるとともに, DR資源として活用

- 課題 圧縮機動力効率*, 冷媒, コスト低減, 蓄熱による柔軟運転 など

* 高温に適した冷媒選定とシステム設計、高温・高圧対応の圧縮機・熱交換機および高温の熱ロスを防ぐ断熱技術の開発



Source: 産業用ヒート活用ガイド、前川製作所ヒアリング



18

事例：電化を利用した排熱のリサイクル

時間・空間のプロセスデータ連携のポイントとなるのは、“電化”であると考えられる。

電化のメリットとしては通信やセンサー、制御機器との相性が良く、相対的に空間および時間より詳細なデータを集めやすい等がある。

ヒートポンプでは、【左図・右図】リサイクルにより低温排熱の有効利用や蒸気ロスの削減により省エネにつながる、【中図】最適熱源配置によりプロセスに合わせた細かな熱制御ができる。

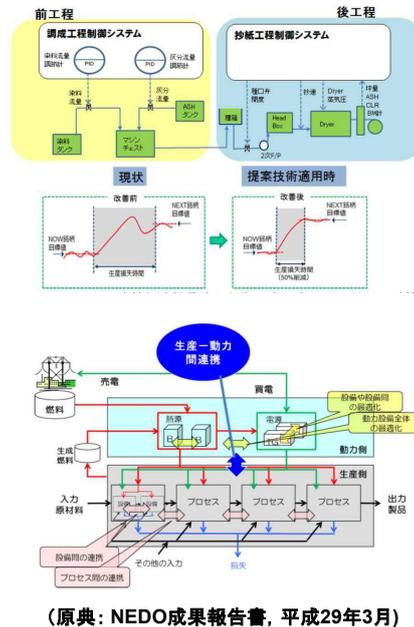
運転情報を外部でモニタリングすればデマンドレスポンス資源として活用できる。

なお、産業用ヒートポンプは現在165°Cまでの高温タイプが商品化され、NEDOプロジェクトで200°Cのヒートポンプが開発されており、今後の用途拡大が期待されるが、コンプレッサーや冷媒等にも課題があり、高温に適した冷媒選定とシステム設計、高温・高圧対応の圧縮機・熱交換機および高温の熱ロスを防ぐ断熱技術の開発が必要である。

事例：製紙産業におけるプロセス間、生産-動力間のデータ連携

□ 戦略省エネ(NEDOプロ)

- 横河ソリューションサービス・横河電機へのヒアリング
- **プラント・ビッグデータによるプロセス連携**
 - 500ポイント, 1秒周期, 1ヶ月以上
 - 調成工程と抄紙工程の連携を考慮した最適制御パラメータの同定
 - **生産損失時間短縮および省エネ効果を確認**
- **生産-動力 連携最適化**
 - 断紙情報による断続中の**蒸気連携最適化と蒸気圧最適化**を検討
- **個別プロセスのDR可能性を検討**
 - メカニカルパルプ, 碎木パルプは**ステップ多段変化が可能**
 - 抄紙機は**連続変化が理論上は可能**



19

事例：製紙産業におけるプロセス間、生産-動力間のデータ連携

製紙産業におけるプロセス連携“生産-動力連携最適化の事例”として横河ソリューションサービス、横河電機にヒアリングした内容を紹介する。
この事例はプラントのビッグデータとプロセスを連携させ省エネを目指したものである。

内容としては次のように整理される。

- ・複数の連続するプロセスで構成される工程に対し、プラントビッグデータに基づいて制御性改善を検討、一定の生産損失時間短縮（主として銘柄変更制御の時間短縮）と省エネ効果を示した。
- ・生産-動力間の連携制御において、抄紙機の断紙位置情報等による蒸気連携最適化と蒸気圧の最適化の検討、一定量の省エネルギー効果、蒸気削減効果を示した。
- ・個別プロセスのDR（デマンドレスポンス）の可能性調査では、需要側の特に顕著に電力を使用する設備の電力使用特性を把握。いくつかの設備の組み合わせによりメガワットオーダーでのDRポテンシャルがあることを確認した。
ただし、生産への影響を最小限にするための具体策検討も必要である。

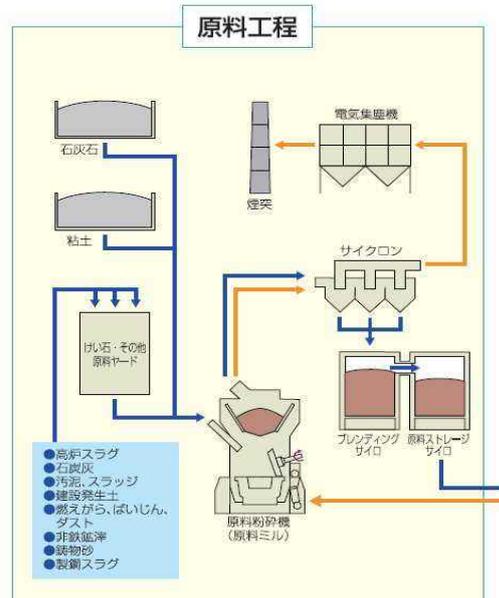
事例：余剰電力を素材加工することによる電力調整

□ 製造業における投入素材加工などの電力消費に着目。

● エネルギーではなく「モノ」として貯蔵することで電力の調整力として利用する

□ セメントや製紙の原料破碎などで適用可能性あり

□ 上流工程以外にも、下流工程で「モノ」としてバッファがある場合も想定される



Source: セメント協会Webページ

20

事例：「モノ」としての余剰電力の貯蔵

セメント分野では上流工程で1/3の電力が消費され、特に破碎工程が大きい。粉砕物は原料（モノ）として溜まっていくが、これはエネルギーではなくモノとして電力調整ができると考えることもできる。

製紙工程でもパルプ破碎があり、同様に適用できる可能性がある。

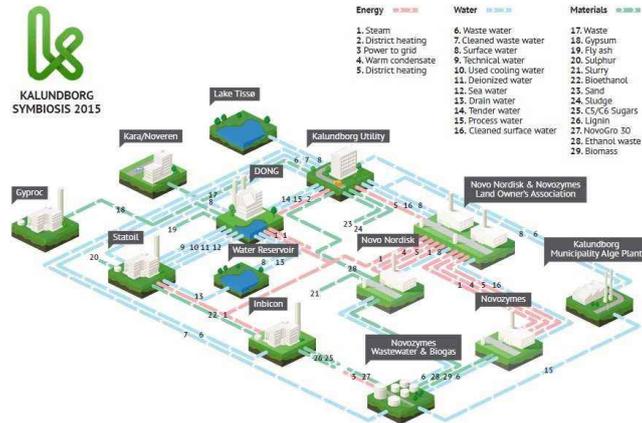
エネルギーではなく「モノ」として貯蔵することで電力の調整力として利用する考え方があり、製造業における投入素材加工などの電力消費が着目される。

事例：異なるセクター間の連携による効率化

- 現在、8機関が参加
(私企業と公営機関)
- 約50種類のエネルギー、
水、各種素材などを交換

- エネルギー：
蒸気、熱、電力
- 水：
排水、再生水、表層水、
冷却排水など
- 素材(物質)：
廃棄物、石膏、石炭灰、
硫黄、スラリー、砂、
スラッジ、C5/C6糖、
リグニン、バイオマス、
バイオエタノール、
エタノール製造残渣

デンマークKalunborg Symbiosis (産業共生)における 異業種ネットワーク融通 (エネルギー、水、素材)



Source: Nordregio web page, **21**

<https://www.nordregio.org/nordregio-magazine/issues/industrial-symbiosis/industrial-symbiosis-in-kalunborg/>

事例：異なるセクター間の連携による効率化

異なるセクター間の連携による効率化として、デンマークKalunborg Symbiosisにおける異業種ネットワーク融通について紹介する。

Kalunborg Symbiosisは、近隣の私企業や公的機関が参加し、約50種類のエネルギー、水、各種素材を融通しあうことで、様々なメリットを生み出そうということで構成されている。本スライドはその構成を示すイメージ図であり、赤ラインはエネルギー、青ラインは水、緑ラインは素材(物質)の動きを示している。

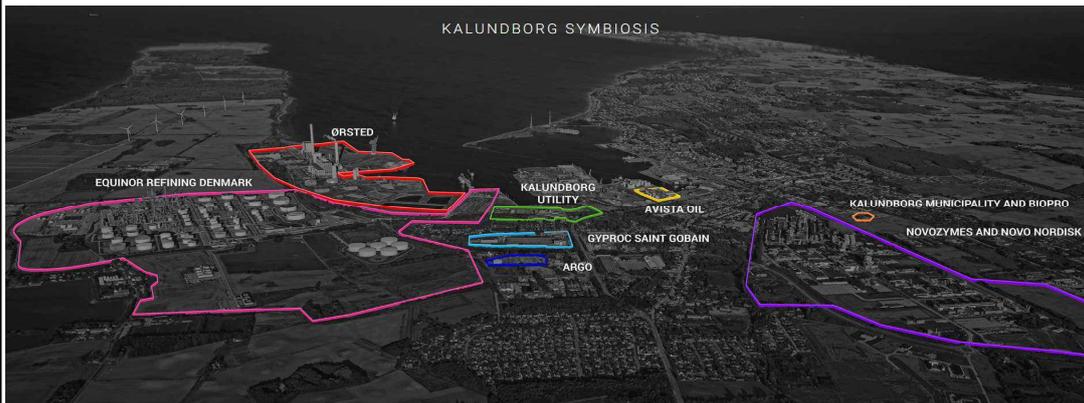
このネットワークには現在、8機関の参加があり、この連携を適切に行うことで、経済価値やCO2削減効果の面で大きな効果が確認されている。

なお、連携の主な内容は次の通りである。

- ・エネルギー：蒸気、熱、電力、水
- ・水：上水下水の両方
- ・素材(物質)：廃棄物、石膏、石炭灰、硫黄、スラリー、バイオエタノール、砂、スラッジ、C5/C6糖、リグニン、エタノール製造残渣、バイオマス

(参考) Kalundborg Symbiosis デンマーク

- | | |
|-------------------------------|---|
| □ Equinor Refining Denmark 石油 | □ Avista Oil 廃油処理 |
| □ Ørsted 電力 | □ Kalundborg Municipality and Biopro
Kalundborg市&バイオ |
| □ Karlundborg Utility 水, 熱供給 | □ Novozymes and Novo Nordisk バイオ
産業 (医薬, 燃料など) |
| □ Gyproc Saint Gobain 石膏 | |
| □ ARGO 廃棄物 | |



Source: Symbiosis web page, <http://www.symbiosis.dk/en/>

22

現在の協業企業は次の通り。地図的には、各企業が占めるそれぞれの敷地（石油精製、電力会社、バイオ産業が大きく敷地を占める）に対し、これらが有機的にネットワークで繋がれている。ここでは関係する8機関でエネルギー（蒸気、熱、電力）、水（上水および下水、廃水・再生水・表層水・冷却廃水など）、物質（廃棄物、石膏、石炭灰、硫黄、スラリー、バイオエタノール、砂、スラッジ、C5/C6糖、リグニン、エタノール製造残渣、バイオマス）の連携・共有が行われている。

- ・ Equinor Refining Denmark（石膏、石油精製）
- ・ Ørsted（電力会社）
- ・ Karlundborg Utility（水、熱供給）
- ・ Gyproc Saint Gobain（石膏）
- ・ ARGO（廃棄物処理）
- ・ Avista Oil（廃油処理および石油製品製造）
- ・ Kalundborg Municipality and Biopro（地方自治体（市）の廃棄物処理、バイオ処理）
- ・ Novozymes and Novo Nordisk（第2世代のバイオ燃料（酵素）を製造）

なお、Novozymesは、第二世代のエタノールをつくる際に必要な特殊発酵をする酵素の製造を行う企業である。（現在はアメリカ企業に買収）
酵素企業として、このネットワークに加わった理由としては港があること、ユーティリティがあること、残渣が売れる等が考えられる。

(参考) Kalundborg Symbiosis デンマーク

□ 1970年代

- Statoil オフガスをGyprocの石膏生産用に提供
- Dong Energy Statoilの給水パイプライン接続

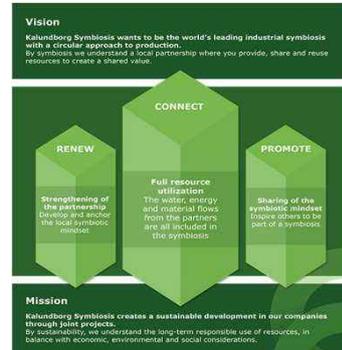
□ 1989 多企業が参加するようになり、Industrial Symbiosisが協力を示す共通用語に。

□ 生産－循環の産業共生の世界のリーダーを目指す

- 目標 1 資源の有効利用
- 目標 2 地域パートナーシップ強化
- 目標 3 環境と経済価値の地域&国家レベル共有

□ 実施中のEUプロジェクト

- バルチック産業共生(BIS)
 - ある企業からの発生廃棄物を、他企業がエネルギーや原料として利用。(デンマーク、スウェーデン、ノルウェー、フィンランド、ポーランド、ロシア)
- Value Waste
 - 廃棄物処理によるタンパク質、肥料の生産。6か国から17パートナー機関参加。スペインにも実証都市あり。



Source: Symbiosis web page, <http://www.symbiosis.dk/en/>

23

参考まで、Kalundborg Symbiosisの詳細を説明する。

デンマークでは1970年代から物質、エネルギー等の連携が活発に行われているが、Kalundborg Symbiosisは、そのひとつとして、発電所および石膏や石油精製などの関係からアナログ的に立ち上げられたものである。現在はIndustrial Symbiosisをキーワードとして生産・循環を含めた産業共生が進められている。目標としては“資源の有効利用”、“地域パートナーシップ強化”、“環境と経済価値の地域&国家レベル共有”の3つを挙げている。

EUプロジェクトは次の2つが稼働している。

- ・バルチック産業共生(BIS)では、ある企業の発生廃棄物の他企業での利用についてデンマーク以外の数か国と連携し活動をしている。
- ・Value Wasteでは廃棄物処理によるタンパク質、肥料の生産が行われ、6か国から17パートナー機関が参加、スペインにも実証都市がある。

(参考) Kalundborg Symbiosis デンマーク

□ 立ち上げの経緯

- 近隣企業が協力する自主的活動としてスタート
 - ユーティリティ共有, 廃棄物処理などのメリットを追求
- 契約は当事者ベース(2者間)

□ 付随的便益

- GHG削減, 省エネ, 社会的便益(雇用等)など

□ 資金源 詳細は不明

- 参加企業が中心
- EU, 国, 自治体が支援(プロジェクトベースが中心?)

□ 関係者調整とSymbiosis Center Denmarkの役割

- プロセスマッチング, ビジネスモデルの検討
- 公的機関, 自治体, 参加企業の調整

Source: The Industrial Green Game, National Academy Press (1997)
Washington Industrial Waste Coordination (Industrial Symbiosis) Program Recommendations,
Washington State Department of Commerce (2019)
Symbiosis Center Denmark Webpage, <https://symbiosecenter.dk/en/> などを参考にエネ総研作成

24

立ち上げについては、1970年代に近隣企業がユーティリティの共有や廃棄物処理などのメリット追求を目的とし、自主的活動としてスタートしたものであった。

契約は当事者ベース（2者間）によるものが主体であるが、調整役として機能するSymbiosis Center Denmarkによるプロセスの組み合わせ（マッチング）・ビジネスモデルの検討、EU・国・自治体によるプロジェクトベースの資金支援等により、2者間協力の集合体としてネットワークが拡大、現在に至っている。

付随的便益としてはGHG削減, 省エネ, 社会的便益などで別途評価されている。

IoT/AIを利用したデータ連携による全体最適化

□ 熱、電気、水素、情報のエネルギーネットワークのデジタル制御

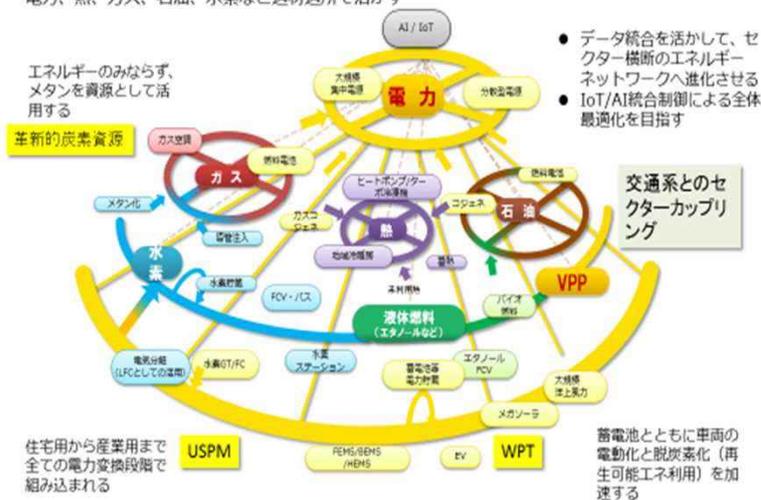
● IoT/AIを利用したエネルギーマネジメントによる全体最適化



将来の脱炭素型エネルギーネットワークのイメージ：
電力、熱、ガス、石油、水素など適材適所で活かす

エネルギーのみならず、
メタンを資源として活
用する

革新的炭素資源



- データ統合を活かして、セクター横断のエネルギーネットワークへ進化させる
- IoT/AI統合制御による全体最適化を目指す

住宅用から産業用まで
全ての電力変換段階で
組み込まれる

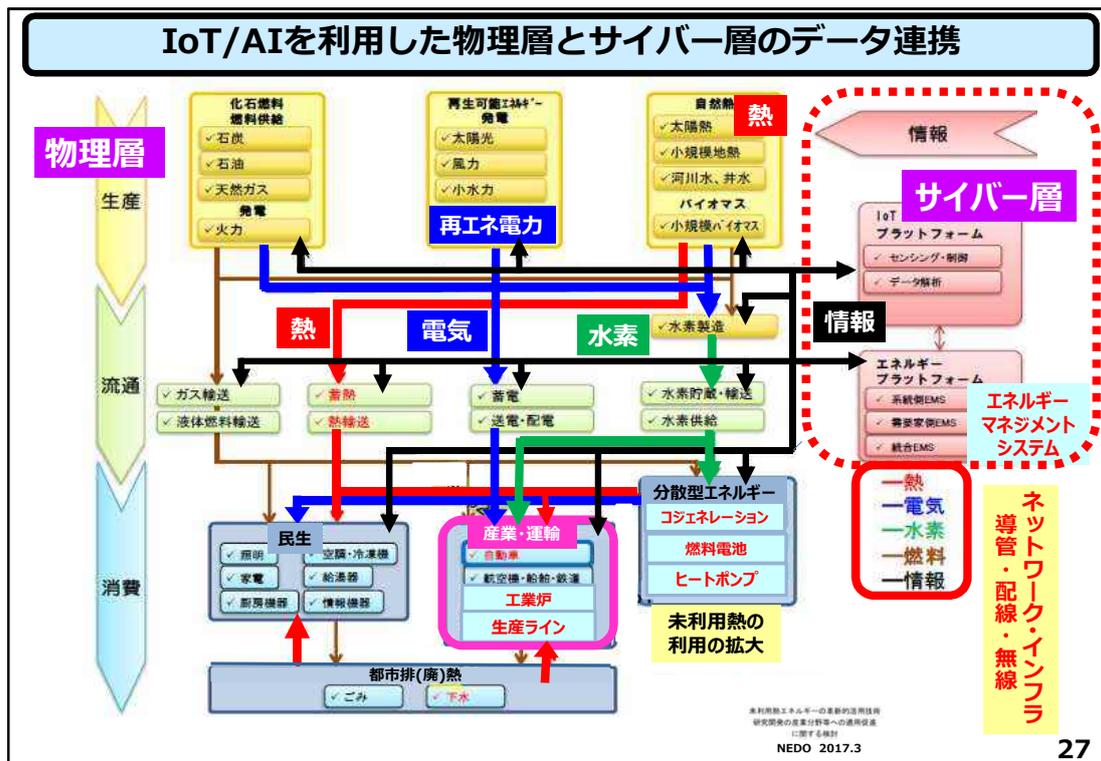
© CRIEPI

出所：電力中央研究所報告C16011を基に作成

26

このスライドは、昨年度の研究会で提示された将来のエネルギーグリッド像であり、System of Systemsとして統合的なエネルギーマネジメントのグランドデザインを示したものである。将来的には電力、熱、ガス、石油、水素等を適材適所で活かすことができるよう、“データ統合を活かしたセクター横断のエネルギーネットワーク、IoT/AI統合制御による全体最適化”が実現された姿がイメージされている。

将来のエネルギーグリッドは、電力グリッドを中心に、ガス・水素・熱・石油・液体燃料等のグリッドが相互に融合したエネルギーグリッドになり、これらを時間的、空間的に細かく制御されて全体最適運用が行われていくものと考えられる。産業分野においては、電気以外はネットワーク化（特に熱）は、あまり進んでいない状況であるが、今後、交通系とのセクターカップリング等も含め、トータル的なデータ連携が必要である。



IoE技術の適用に必要となるデータ連携の内容について、そのシステム構成の考え方を関係図として整理した。

エネルギーシステムの構成として、

- ①産業分野の製造ラインで化石燃料、再エネ、自然熱から得られる熱、電気、水素に対し、
- ②流通（貯蓄、輸送）を通して、
- ③産業・運輸、民生で消費されるというモデルが物理層として整理される。

IoEを利用したエネルギーマネジメントは、この物理層で流通する熱、電気、水素、燃料、情報を有機的に結びつけ（ネットワーク、インフラ、導管、配線、無線）、サイバー層（IoTプラットフォーム、エネルギープラットフォーム）で時間的、空間的に最適制御を実施、結果として省エネ化や低炭素化等のメリットを生み出すものである。

どのようなデータを取得・連携し、制御するか、そこに熱をどのように組み込むか（特に化学産業）、そのためにどのように組み立てライン型や異業種連携型のエネルギーマネジメントシステムを構築していくかについては、今後定量的な検討を進める必要がある。

6. まとめ ①

- 日本の経済社会の脱炭素化（2050年GHG排出80%削減）に向けて、**産業分野、熱エネルギーの脱炭素化は必須の課題。**
 - ・ 最終エネルギー消費の70%以上が、ほぼ熱として消費され、電力の占める割合は30%以下。
 - ・ 熱その他の約50%が、産業分野で消費。鉄鋼、化学産業等での消費が大きい。
- 産業分野の脱炭素化の手段は、
 - ・ **未利用熱、排熱の有効利用**を含む省エネ
 - ・ (CO₂フリー電力による) **電化**
 - ・ CO₂フリー**水素**の大量導入
 - ・ (可能であれば) **CCUS**の活用
- 鉄鋼、化学、セメント産業等の熱エネルギー多消費製造プロセスの脱炭素化の課題
 - －省エネ： CO₂フリー電力利用の**ヒートポンプ**による排熱の有効利用
 - －プロセスの電化： **安価なCO₂フリー電力が必要** (1~5円/kWh)
 - －水素導入： **安価で大量のCO₂フリー水素が必要**
(例：鉄鋼用還元水素 約 ϕ 7.7/Nm³-H₂、700万トン/年)
- 熱エネルギーの脱炭素化においては、以下に留意が必要
 - ・ 必要なプロセス温度によって、利用可能な脱炭素エネルギー源が限られる
 - ・ 鉄鋼、化学産業以外では、必要な熱は180℃以下が主流

28

日本が2050年にGHG排出を80%削減し、エネルギーシステムの脱炭素化を図るためには、最終エネルギー消費の70%以上が、ほぼ熱として消費されていること、その約50%が産業分野（特に鉄鋼業、化学工業等）で消費されていることから、産業分野の熱エネルギーの脱炭素化を図ることが必須の課題である。そのためには、以下①～④の対策が必要である。

- ① 未利用熱、排熱の有効利用
- ② (CO₂フリー電力による) 電化の拡大
- ③ CO₂フリー水素の大量導入
- ④ そして、可能であればCCUSの活用

この対策には、(CO₂フリー電力による) ヒートポンプの利用拡大、製造プロセスの電化、燃料への水素エネルギーの導入が必要となるが、産業の競争力を維持するためには、電化のための電力コストは1~5円/kWh、例えば高炉燃料として水素を導入するためには、 ϕ 7.7/Nm³-H₂という安価な水素が約700万トン必要となる。このように、電力、水素コストの大幅な低減、そして大量の水素エネルギーの導入を可能とする必要がある。特に、大量の安価な水素エネルギーの導入のためには、SIP「エネルギーキャリア」の成果を活用し、海外からの水素エネルギーの導入を進めることが必要である。

なお、熱エネルギーの脱炭素化にあたっては、用途ごとに必要とされる温度領域が異なることに留意することが必要である。(例えば、鉄鋼、化学プロセス、およびセメント以外で必要とされる熱の温度領域は180℃以下が中心)

6. まとめ ②

- 日本のエネルギーシステムでは、**大量の未利用エネルギーが存在⇒この活用が重要**
 - ・ 未利用排熱の量は年間1兆kWh（1次エネルギー供給量の約20%）
 - ・ 未利用放出熱の70%以上が200℃未満の温度帯（産業分野の未利用エネルギーは0.3兆kWh）
- 【未利用熱の有効利用が進まない理由】
 - ・ 未利用熱の温度や形態は、多様で広く分散している。
 - ・ 需要と供給の「質」と「量」とが、「時間的／空間的」に不一致である。
- 産業分野、熱エネルギーの脱炭素化に向けて必要となるこれらの取り組みにおいては、
 - ① **空間（プロセス間、生産・動力間、企業間、地域内・間の異セクター間の連携→セクターカップリング**
 - ② **時間（エネルギー貯蔵、電力を始めとするエネルギーシステムの活用等）**を超えた、エネルギーマネジメントが重要となる。
- IoT/AIを利用した上記の**データ連携、データ活用も重要である。**
(Demand Response、プラント・ビッグデータの活用)

29

日本では、年間の1次エネルギー供給量の約2割（1兆kWh）に相当する量のエネルギーが排熱（その70%以上が200℃以下の熱）として捨てられていることから、この有効利用を図ることが重要である。

こうした未利用熱の有効利用が進んでいないことについては、

- ① 未利用熱の温度や形態が多様でかつ分散して存在している
- ② 「供給」と「需要」の質と量が、時間的、空間的にマッチしない等の理由によると分析されている。

産業分野では、0.3兆kWhの未利用エネルギー量があると分析されているが、この有効利用のためには、上記の分析結果から、従来の取り組みを超えた空間的、時間的要素を加味した新たなエネルギーマネジメントの導入が必要になると考えられる。こうしたエネルギーマネジメントにおいては、IoT/AI技術の活用が可能であり、それにより、省エネ、エネルギーの有効利用が大幅に進む可能性がある

6. まとめ データ連携のメリットと課題

- データ連携のメリット
 - 個別最適から全体最適の実現が可能
 - 資源の有効利用（エネルギー、物質）
- データ連携の課題
 - ① 技術的課題
 - データ連携システムの基本設計（柔軟性、冗長性、頑健性、運用ルール）
 - システムの頑健性（情報セキュリティ、プライバシー）
 - ② 社会的課題
 - 合理的な連携範囲の特定
 - ③ 経済課題
 - 経済性（初期投資、運用経費、費用便益判断）
 - ④ 上記①～③を踏まえた政策課題（政策的後押し）
 - 連携の主体間の調整（範囲、バウンダリー、調整ルール）
 - 市場メカニズムの補完機能のあり方
(連携による外部利益の顕在化、主体間の利害調整)

30

産業分野、熱エネルギーのエネルギーマネジメントへのIoTの導入により、一般的に言って、個別最適からエネルギーシステム全体の最適化が図れるようになり、より効率的かつ有効な資源（エネルギー、原料）の有効利用が図れるという明らかなメリットがある。しかし、そのためには、以下の課題を克服し、あるいは、メリットが課題克服の困難性を上回ることを示していく必要がある。

- ① 技術的課題
 - ・ データ連携システムの基本設計（柔軟性、冗長性、頑健性、運用ルール）
 - ・ システムの頑健性（情報セキュリティ、プライバシー）
- ② 社会的課題
 - ・ 合理的な連携範囲の特定
- ③ 経済課題
 - ・ 経済性（初期投資、運用経費、費用便益判断）

さらに、各主体、関係者間による上記①～③の課題の検討を促進するためには、④公的または第三者的な機関による以下のような関与が必要となると考えられる。

- ・ 連携の範囲、バウンダリー、調整ルール等の面での各連携主体間の調整
- ・ 連携による外部利益の顕在化、
- ・ 連携主体間の利害調整

6. まとめ 今後の検討課題

- 産業分野、熱エネルギー利用分野への電力、水素の導入における需要と供給の最適化
 - ・ 必要導入量、導入許容価格（需要側）
 - ・ CO₂フリー電力および水素の供給可能量と価格（供給側）
- 排熱の有効利用
 - ・ ヒートポンプの価格の低下
 - ・ 企業内、地域全体のエネルギーシステム全体を俯瞰した排熱の有効利用方策の検討
- IoT/AIを利用したエネルギーマネジメントによる全体最適化
 - ・ 空間を超えたエネマネ： プロセス間、企業間、地域内・間の異セクター間の連携（セクターカップリング）
 - ・ 時間を超えたエネマネ： エネルギー貯蔵、電力システムの活用とDR
 - ・ エネルギー・ビッグデータの活用と制御
- IoT/AIを利用したエネルギーマネジメントのためのデータの連携
- 上記検討課題を実現する事業形態の検討
 - ・ Society5.0を実現するエネルギーサービス、電気、熱、水素、セクターカップリングのあり方
 - ・ 総合的なエネルギーサービス会社や機構等

31

産業分野、熱エネルギー利用分野の脱炭素化に向けて、さらに以下の問題について検討のみならず、必要となる対策の進め方について明らかにし、早急に具体的な取り組みを始める必要がある。

- ・ 産業分野、熱エネルギー分野の脱炭素化に必要なCO₂フリー電力、水素エネルギーの必要量と価格要件、その確保のための具体的方策に係るさらなる検討
- ・ ヒートポンプ利用の経済性向上のための研究開発の推進と企業内、地域のエネルギーシステム全体を俯瞰した排熱の有効利用方策の検討
- ・ 「空間」、「時間」を超えたエネルギーマネジメントの導入と、マネジメントを可能とするIoT技術の積極的活用・導入

なお、これらの検討課題に対応したエネルギーマネジメントシステムの実現にあたっては、実際には異業種間で生じる熱やエネルギーの供給保証の問題が複雑に絡み合い、支障が生じるようなことも想定される。これをクリアするにはSociety5.0を実現するエネルギーサービス、電気、熱、水素、セクターカップリングのあり姿、総合的なエネルギーサービス会社や機構等の検討も必要となってくるであろう。