「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

「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CO_2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。

2

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

3

＜調査研究方法＞

○内外の調査研究情報、関係業界団体および企業へのヒアリングを通じて情報収集を行うとともに、関係者を交えたディスカッション等により調査研究を行った。

○また、ヒアリングのとりまとめ結果を含む本研究調査結果の全般について、研究機関、業界団体会、企業の有識者にフィードバックし、追加情報や意見等を頂いた。

○エネルギーマネジメント研究会の、IoE化によるエネルギーシステム全体の横断的な最適化と大幅な省エネルギーという目標に対して，産業部門が抱える問題点と同時に導入事例も示し、提言を行った。

4

「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

イノベーション戦略コーディネーター
塩沢　文朗 住友化学株式会社 主幹

JSTフェロー
黒田　俊也 住友化学株式会社 主席部員

エネルギー総合工学研究所
黒沢 厚志 プロジェクト試験研究部　部長　副主席研究員
山中 俊幸 プロジェクト試験研究部　参事
藤川 英明 プロジェクト試験研究部　主管研究員

5

＜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

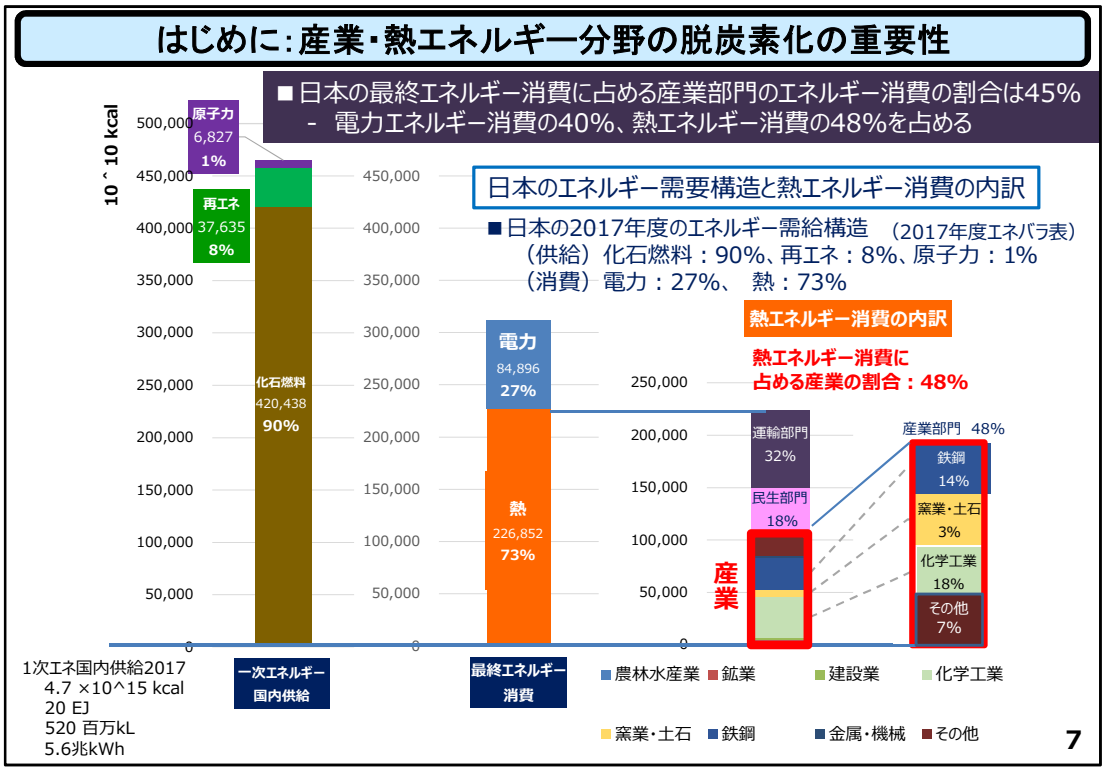
５．産業・熱エネルギー分野におけるエネルギーマネジメント

６．まとめ

付録1．ヒアリング結果

付録2．個別技術集

6



【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見ると、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。

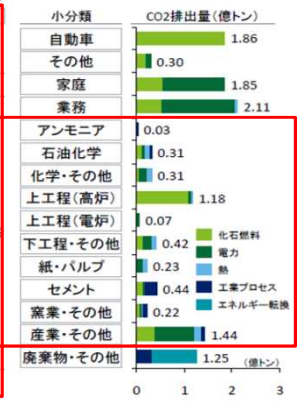
熱などとしてのエネルギー消費のうち、運輸、民生部門の占める割合は、それぞれ32%、18%である。これらの分野では、自動車の電動化、給湯・冷暖房の電化等のエネルギー消費形態の変化が進みつつあり、電源の脱炭素化によってその脱炭素化が可能であるが、熱エネルギー消費の48%を占める産業分野における熱需要は、現在、そのほとんどを化石エネルギー源に依存しており、この脱炭素化の方策が脱炭素社会の実現にとっては大きな課題となる。

産業分野では鉄鋼、セメント、化学のCO2排出量が多い

【我が国の各セクターのCO_2排出量】

（単位：億トン）

セクター	大分類	小分類	石油等	電力	熱（蒸気等）	工業プロセス等	[illegible]	総排出量	割合	
運輸	自動車	自動車	1.86	-	-	-	-	1.86	18%	
	その他	その他	0.21	0.09	-	-	-	0.30		
家庭	家庭	家庭	0.56	1.29	0.001	-	-	1.85	15%	
業務	業務	業務	0.53	1.55	0.04	-	-	2.11	18%	
産業	化学	アンモニア	0.003	0.004	0.005	0.02	-	0.03	39%	
		石油化学	0.12	0.06	0.11	0.03	-	0.31	5%	
		その他	0.05	0.18	0.09	-	-	0.31		
	鉄鋼	上工程（高炉）	1.08	0.08	0.02	-	-	1.18	14%	
		上工程（電炉）	0.01	0.06	-	-	-	0.07		
		下工程・その他	0.14	0.20	0.08	-	-	0.42		
	紙・パルプ	紙・パルプ	0.01	0.13	0.09	-	-	0.23	2%	
	窯業・土石	セメント	0.14	0.04	-	0.26	-	0.44	5%	
		その他	0.07	0.06	0.01	0.08	-	0.22		
	その他	その他	0.38	0.84	0.15	0.08	-	1.44	12%	
廃棄物・その他	廃棄物・その他	廃棄物・その他	-	-	-	0.33*1	0.93*2	1.25	10%	
計			5.15	4.57	0.58	0.79	0.93	12.0	100%	



*1)内訳：焼却などの廃棄物処理（0.29億トン）、農業+燃料からの漏出+間接CO2（0.03億トン）
*2)内訳：事業用自家発電（0.44億トン）、石油精製（0.34億トン）、および石炭製品＋ガス製造＋地域熱供給＋誤差。

【出典】国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ」、資源エネルギー庁「総合エネルギー統計2016年」を基にDeloitte作成

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

CO_2を大量に排出するプロセス・製品

鉄鋼(高炉) ：1.2 億t-CO_2
石油化学(ナフサ分解) ：0.3 億t-CO_2
窯業・土石(セメント) ：0.4 億t-CO_2

8

実際、CO2排出量で見ても、産業分野からのCO2排出量が約40%と大きく、日本の脱炭素化のためには、産業分野の脱炭素化が大きな課題である。

産業分野の中では、鉄鋼、セメント、化学セクターのCO2排出量が多い。具体的には、我が国全体の年間のCO2排出量12億トンのうち、鉄鋼業（高炉）が 約1.2億トン、石油化学（ナフサ分解）が 約0.3億トン、セメントが 約0.4億トンを排出している。

<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

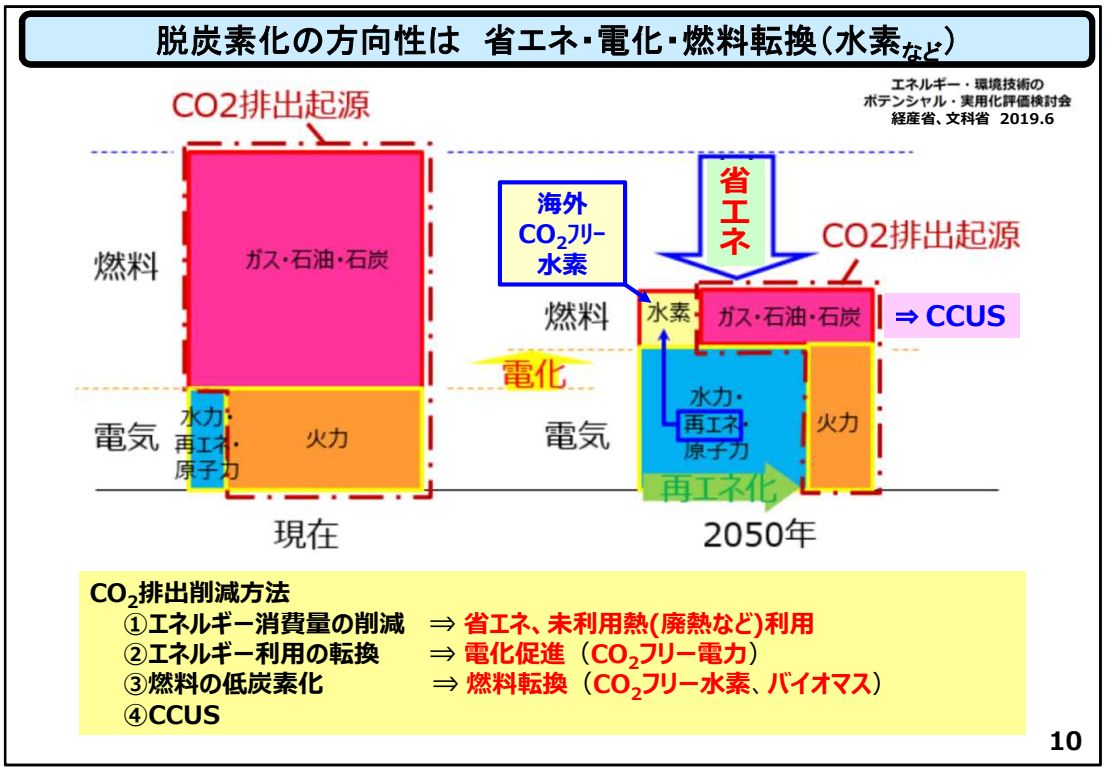
４．鉄鋼、化学、セメントにおけるCO2排出プロセスと対策

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

付録1．ヒアリング結果

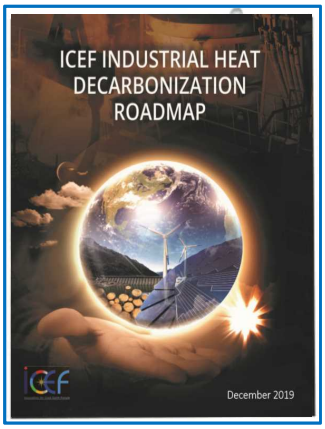
付録2．個別技術集



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。

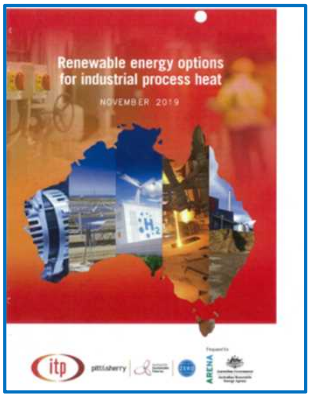
産業・熱エネルギーの脱炭素化を図るに当たっては、こうした基本的なアプローチに即しつつ、エネルギー利用の用途、用途ごとに求められる特性、エネルギーの利用環境等をもとに、その具体的な方策が考案される必要がある。

産業プロセス・熱の脱炭素化の可能性・ポテンシャル



ICEF Industrial Heat Decarbonization Roadmap
2019.12

産業分野で使用される熱エネルギーの使用実態の分析、産業毎に必要とされる熱エネルギーの特徴、低炭素熱源となるエネルギーの種類と特徴、産業分野の熱エネルギーの低炭素化のために必要となる政策等について調査、提言。



Renewable energy options
for industrial process heat
Australia ARENA November 2019

オーストラリアの工業プロセス（エネルギー需要の42%，熱需要の52%）の再エネ化の方策をプロセス毎のエネルギー需要の特徴、再エネ毎のプロセス・エネルギーとしての利用可能性、産業立地と再エネ資源の分布の実態を考慮して分析。

11

最近になって、国際的に産業・熱分野の脱炭素化の重要性についての認識が高まり、以下のレポートがまとめられている。

① “Industrial Heat Decarbonization Roadmap” (ICEF) December 2019

産業分野毎に必要とされる熱エネルギーの使用実態の分析、産業毎に必要とされる熱エネルギーの特徴、低炭素熱源となるエネルギーの種類と特徴、産業分野の熱エネルギーの低炭素化を図るために必要となる政策等について、調査、提言している。

② “Renewable Energy Options for Industrial Process Heat Australia” (ARENA) August 2019

オーストラリアの工業プロセス（エネルギー需要の42%、熱需要の52%）の再生可能エネルギー化の方策をプロセス毎のエネルギー需要の特徴および再生可能エネルギー毎のプロセスエネルギーとしての利用可能性、産業の立地状況と再エネ資源の分布の実態を考慮して分析している。

これらのレポートには、我が国の産業・熱エネルギー分野の脱炭素化を考えるにあたって、以下のような参考となる重要な指摘が含まれている。

産業プロセスで必要とされる温度領域とその割合

出典: Renewable energy options for industrial process heat （November 2019, ARENA）

Sector	<150 ℃ (%)	150-250 ℃ (%)	250-800 ℃(%)	>800 ℃ (%)
Alumina and other non ferrous	0	50	0	50
Food and beverage	39	46	15	0
Iron and steel	0	0	0	100
Oil and gas extraction	0	90	10	0
Petroleum refining	10	40	40	10
Ammonia and other chemicals	0	0	10	90
Cement, lime production	0	14	5	82
Pulp and paper	12	18	70	0
Commercial and services	30	70	0	0
Bricks and ceramics	0	0	10	90
Wood and wood products	24	16	60	0
Other mining	17	22	22	39
Glass and Glass products	0	0	10	90
Textile, clothing and footwear	6	34	60	0
Other hydrocarbon products	10	30	30	30
Other non metallic mineral	9	30	30	30
Solvents, lubricants, greases and bitumen	11	30	30	30
Agriculture, forestry and fishing	43	57	0	0
Construction	30	70	0	0
Machinery and equipment	4	36	60	0
Fabricated metal products	0	22	61	17
Water and sewerage	29	64	0	7
Other manufacturing	0	50	50	0

12

例えば、” Renewable Energy Options for Industrial Process Heat Australia” (ARENA)では、各産業プロセスで必要とされる温度領域とその割合を分析し、整理している。このように、産業・熱エネルギー分野の脱炭素化を考えるにあたっては、各産業プロセスで必要とされる温度領域を考慮することが必要である。

CO_2フリーエネルギーの高温供給適性
（ICEF Industrial Heat Decarbonization Roadmap 2019.12）

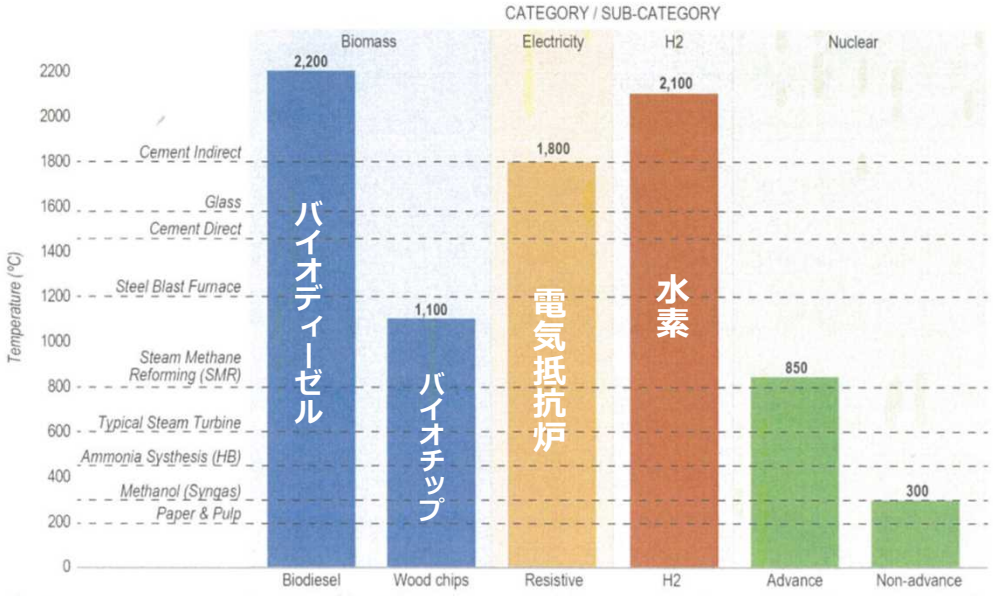
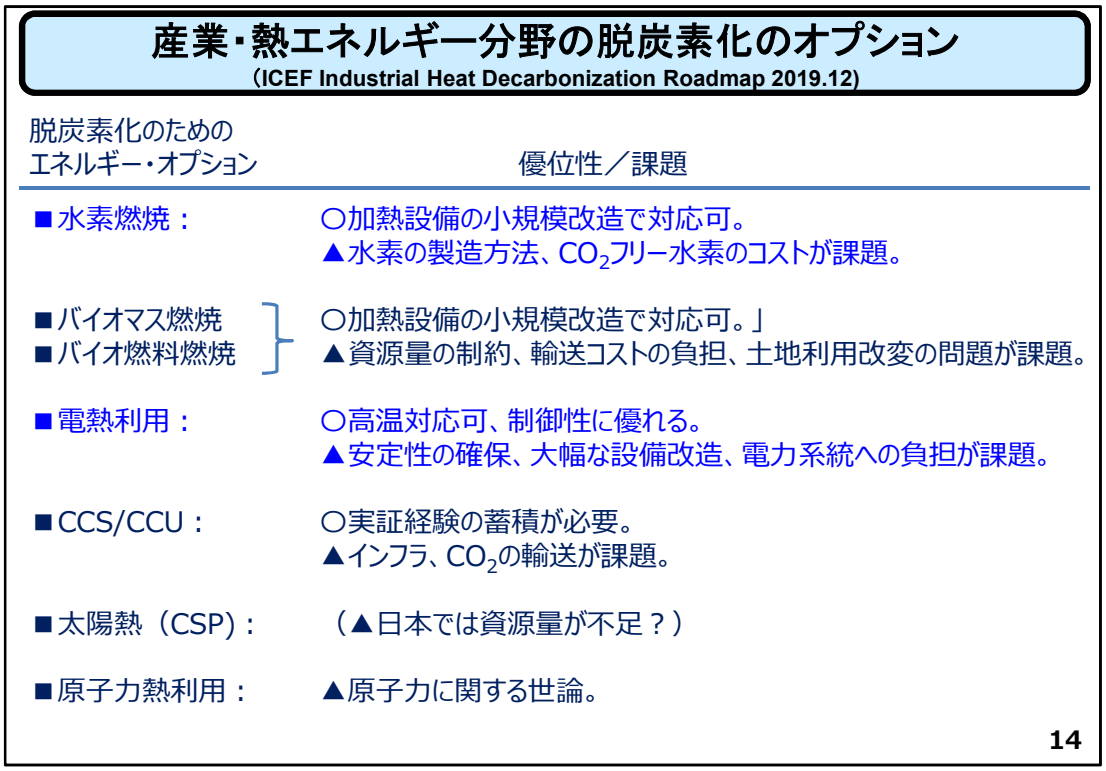


Figure 1.1: Temperature requirements of key industrial process and the temperature limits provided by some options for low-carbon heat source replacements.[6]

13

同様に、“Industrial Heat Decarbonization Roadmap” (ICEF)では、産業のプロセスに必要な温度域と、使用の可能なCO2フリー燃料との関係を示している。このように、産業・熱エネルギー分野の脱炭素化を考えるにあたっては、各産業プロセスで必要とされる温度領域の熱を供給可能なCO2フリーのエネルギー源を考えることが必要である。



さらに、“Industrial Heat Decarbonization Roadmap” (ICEF)では、産業・熱エネルギー分野の脱炭素化のオプションを、その優位性／課題とともに図のような整理をしている。

この整理では、我が国において適用が可能であり、実現性、実効性が大きいと考えられる対策として、熱エネルギー源として水素エネルギーの利用と電力の活用を図ることが有効であることが示唆されている。

産業分野の消費エネルギーの脱炭素化のオプションと適用可能技術/エネルギー（ARENA)

■産業分野の脱炭素化は、鉄鋼、非鉄金属、石油・ガス採掘、化学産業の脱炭素化が重要。（オーストラリアのケース）

■長期的に脱炭素化に大きな効果を発揮するのは、水素エネルギーと電化技術。

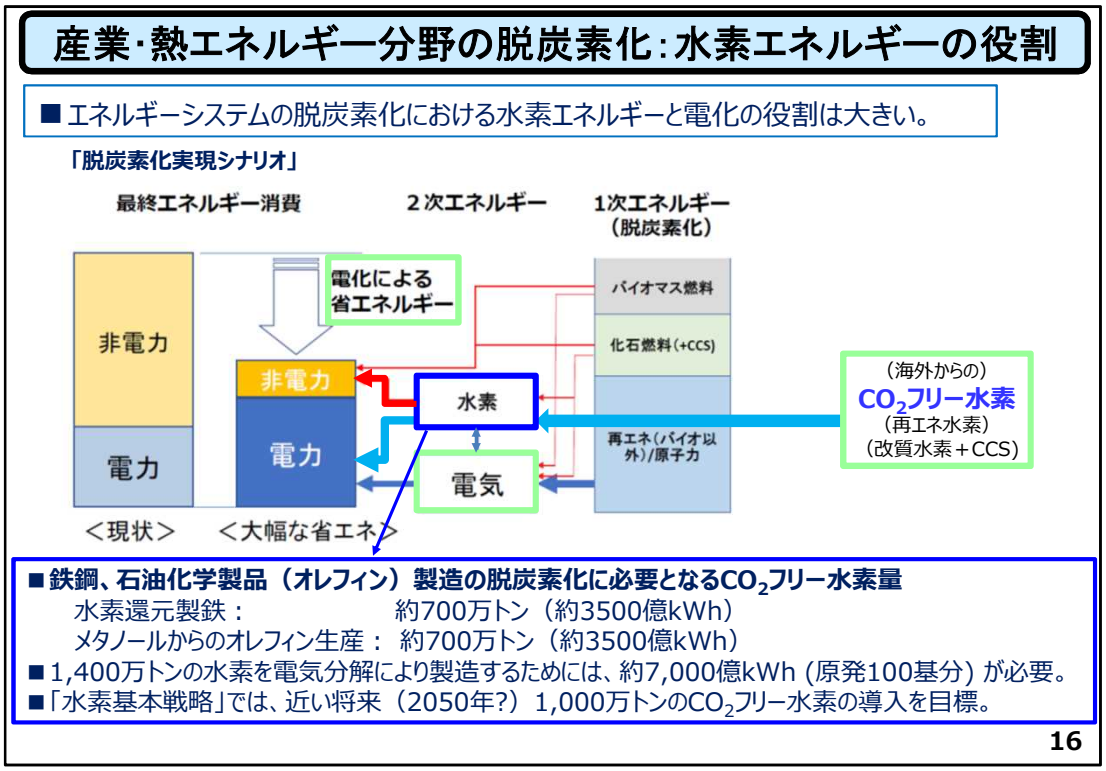
	Sector	Total fossil heat use in PJ/year	Opportunity potential: ST - 0 to 5 yrs potential / MT - 5 to 10 yrs potential / LT- 10 to 20+ yrs	Key process	Key renewable technologies: Bioenergy	Geothermal	Heat pump	Other electric	Solar thermal	Hydrogen	Comments
	Alumina and other non-ferrous	169	ST 9 / MT 67 / LT 93	Alumina digestion, calcination			✓		✓		Low temperature portion is accessible in medium term if barriers overcome. High temperature processes need R&D and global demand for zero emissions product
							✓		✓	✓	
鉄鋼	Iron and steel	94	ST 0 / MT 5 / LT 89	Iron ore reduction, steel production	✓					✓	Needs global demand for zero emissions products, will require major investment in new plants
								✓			
	Oil and gas extraction	87	ST 4 / MT 18 / LT 65	CO2 scrubbing regeneration, steam			✓		✓		If drives are electrified, low temperature heat can be addressed by other techs. In LT, linked to future of transport fuels
										✓	
	Petroleum refining	65	ST 3 / MT 13 / LT 49	Distillation, hydrogen use	✓		✓	✓	✓		Some MT opportunities at medium temperatures. LT linked to future of transport fuels
										✓	
化学	Ammonia and other chemicals	42	ST / MT 8 / LT 34	Steam reforming of methane, steam					✓		Needs global demand for zero emissions products, could be first segment to adopt renewable hydrogen as energy input.
										✓	
	Food and beverage	37	ST 7 / MT 19 / LT 11	Hot water, frying, steam, baking	✓	✓	✓	✓	✓		Low temperatures first, all RE technologies have a role
					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
セメント	Cement, lime products	34	ST 10 / MT 16 / LT 8	Calcining, roasting	✓						Strong existing use of bio waste can grow. Long term future of the sector unknown
										✓	
	Commercial and services	18	ST 9 / MT 9 / LT	Steam	✓	✓	✓	✓	✓		Low temperatures first, all RE technologies have a role
					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Bricks and ceramics	16	ST 3 / MT 8 / LT 5	Kiln heating	✓						Well suited to bioenergy if resource is available. Some electrification potential also
					✓					✓	
	Pulp and paper	14	ST 2 / MT 6.3 / LT 6	Hot water, process steam	✓						Strong use of bioenergy already, Progress may be limited by biomass supply, leverage other RE technologies for lower temperature processes
						✓	✓	✓	✓		
						✓	✓	✓	✓		
	Other mining	14	ST 3 / MT 4 / LT 7	-	✓	✓	✓	✓	✓		Low temperatures first, all RE technologies have a role
					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Glass and glass products	7	ST 0 / MT 3 / LT 4	Glass melting	✓			✓			Progressive switch to electric resistance heating plus bioenergy
								✓		✓	
	Other sectors	31	ST 6 / MT 9 / LT 16	-	✓	✓	✓	✓	✓		Low temperatures first, all RE technologies have a role
					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Total	628	ST 56 / MT 185.3 / LT 387								

出典： Renewable energy options for industrial process heat (November 2019, ARENA)

15

同様のことが、” Renewable Energy Options for Industrial Process Heat Australia” (ARENA)の分析においても示唆されている。この図は、オーストラリアの主要な産業プロセス毎に、短期（ST)、中期（MT）、長期（LT)の観点から、バイオエネルギー、地熱エネルギー、ヒートポンプ、他の電力を活用した熱、太陽熱、水素エネルギーの脱炭素化に向けた効果の大きさを分析しているものであるが、長期的な対策ではあるものの、これらの中では（ヒートポンプを含む）電力の活用、水素エネルギーの活用の効果が大きいと評価されている。

特に、日本でCO2排出量の多い鉄鋼、化学、セメント産業については、（ヒートポンプを含む）電力の活用、水素エネルギーの活用の効果が大きいと評価されており、これは、先のICEFのReport で示唆されていることと同様である。

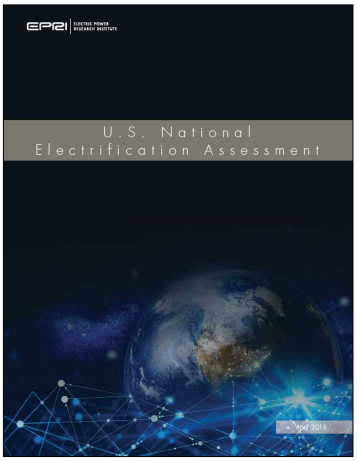


以上のことから、産業・熱分野の脱炭素化においては、電化と水素エネルギーの導入が重要な手段になると考えられる。

電化、水素エネルギーの導入には、CO2フリーの一次エネルギー源として再エネ、化石エネルギー＋CCS、バイオマス燃料の活用が必要となるが、これらの一次エネルギーの国内資源賦存量及び国内でのCCS可能量は限られている。

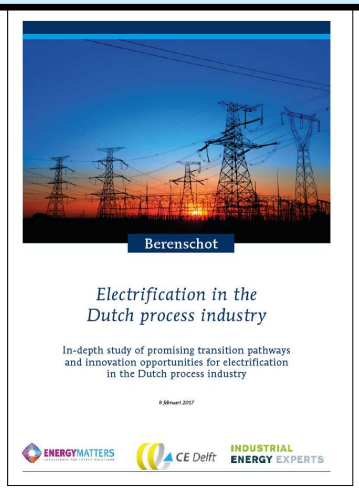
これらの制約を克服する手段として、海外からのCO2フリー水素エネルギーの導入が重要となる。水素の大量輸送、貯蔵を可能とするためのエネルギーキャリアに関する研究開発は、SIP「エネルギーキャリア」やNEDOにより実施されており、具体的なサプライチェーンの構築に向けた取り組みが始まっている。

産業プロセス・熱の脱炭素化のための電化の可能性/ポテンシャル



US National Electrification Assessment
(EPRI) 2018

電化の可能性を　①Conservative
②Reference　③Progressive
④Transformation の4ケースで想定。
③、④では漸増型の炭素税の導入を想定。



Electrification in the Dutch Process Industry
RVO (2017)
(by Netherlands Enterprise Agency (RVO) & Top Consortia
for Knowledge and Innovation (TKI) Energy and Industry)

産業プロセスの電化可能性について、技術成熟度
ボトルネック課題、ロードマップなどを掲載。

17

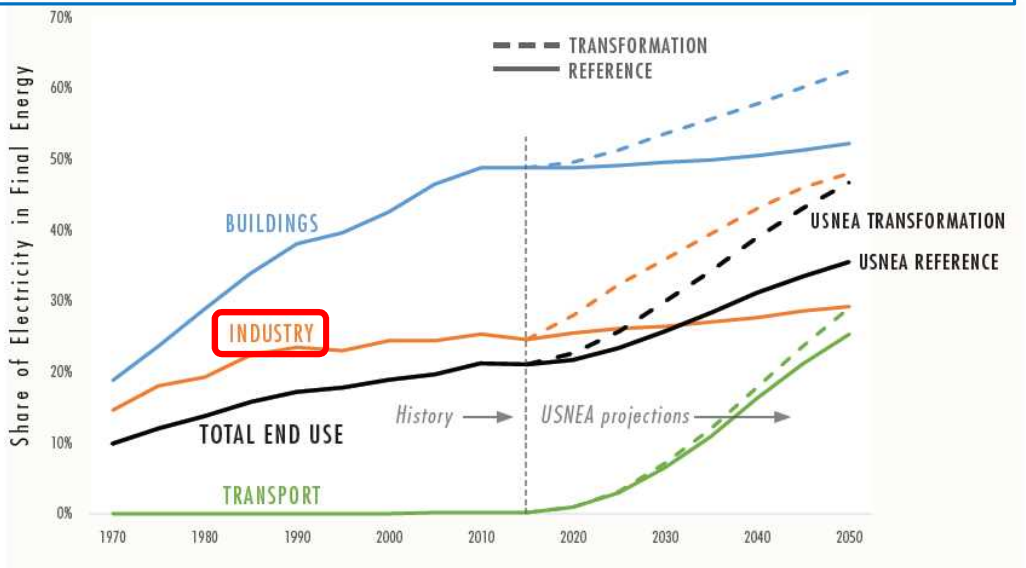
「産業プロセス・熱の脱炭素化のための電化の可能性/ポテンシャル」については、以上のほかにも米国EPRIとオランダのRVOも以下のような研究レポートを公表している。

①米国EPRI：”US National Electrification Assessment“ 2018
　米国内のエネルギーシステムを対象に、エネルギー需要分野ごとの電化の可能性を複数のシナリオをもとに検討している。

②オランダRVO：”Electrification in the Dutch Process Industry” 2017
　産業プロセスの電化の可能性について、主な産業プロセス、設備に適用可能な技術、その成熟度、適用にあたってのボトルネック課題などを整理している。

産業･熱エネルギー分野の脱炭素化：電化の役割

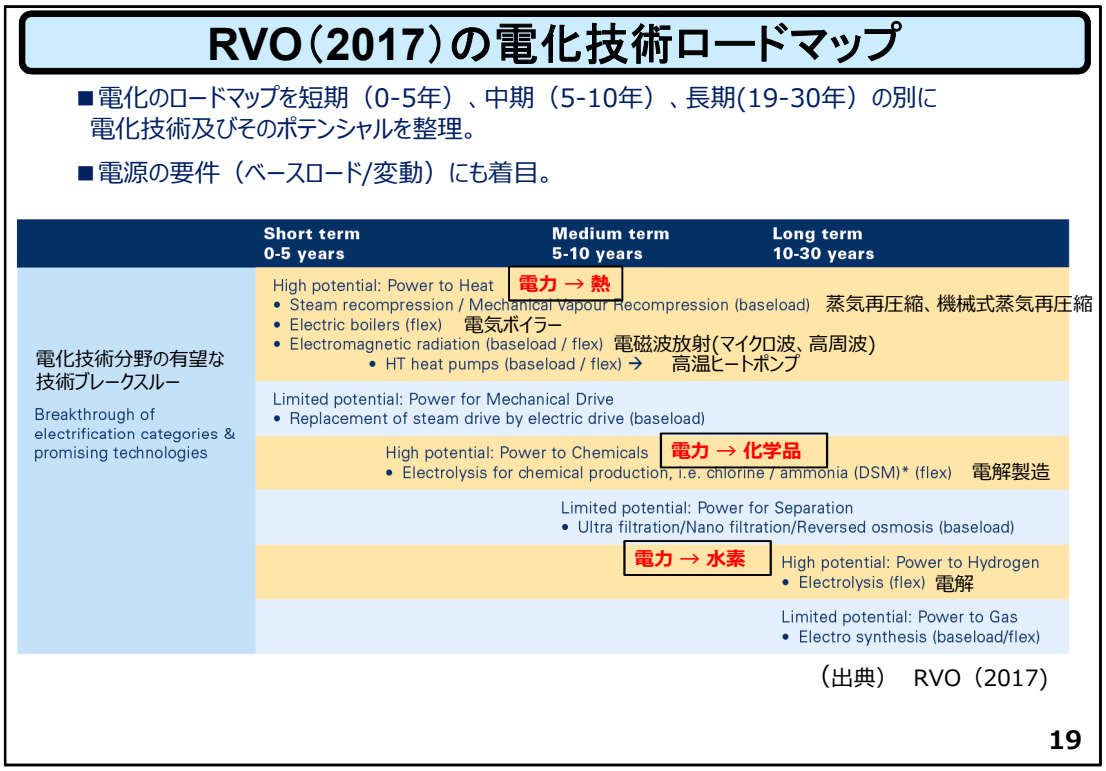
■最終エネルギー需要の電化率　　2050年　47%　　（2017年　21%）
■産業分野のエネルギー需要の電化率　　2050年　50%程度　（2017年　25%）



出典：”US National Electrification Assessment“ EPRI, 2018

18

米国EPRIでは、革新加速ケースにおいて、アメリカにおける2050年頃に最終エネルギー需要の電化率を47%、産業分野のエネルギー需要の電化率を50%程度と予測している。



【オランダRVO：”Electrification in the Dutch Process Industry” 2017の分析例】

オランダRVOは、電化可能な技術について、短期/中期/長期の視点から、および、供給可能電源の要件としてベースロード電源/変動電源の視点から、電化を進めるために期待される技術のブレークスルー課題に関する技術ロードマップを作成している。短期的にはCO2フリー電力から電気ボイラー、マイクロ波や高周波などの電磁波利用、高温ヒートポンプなどにより熱を利用する方法を、中期的にはCO2フリー電力による電解を利用し塩素やアンモニアなどの化学品を製造する方法を、また、長期的にはCO2フリー電力から水電解による水素を製造する方法を提案している。

<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

付録1．ヒアリング結果

付録2．個別技術集

20

産業における未利用熱エネルギーの量と温度帯

◆「**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）

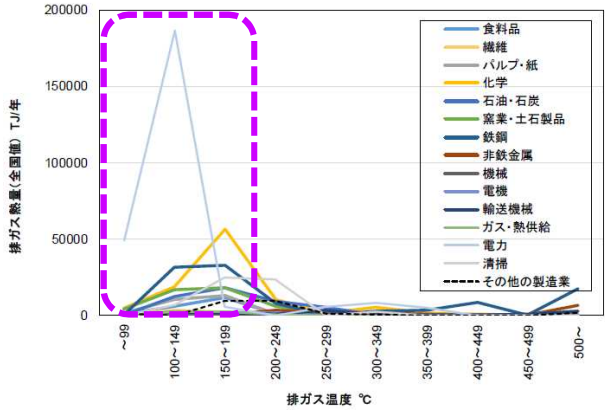
参考)
我が国の2017年の１次エネルギー
供給量は、約20EJ≒5.6兆kWh

◆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

21

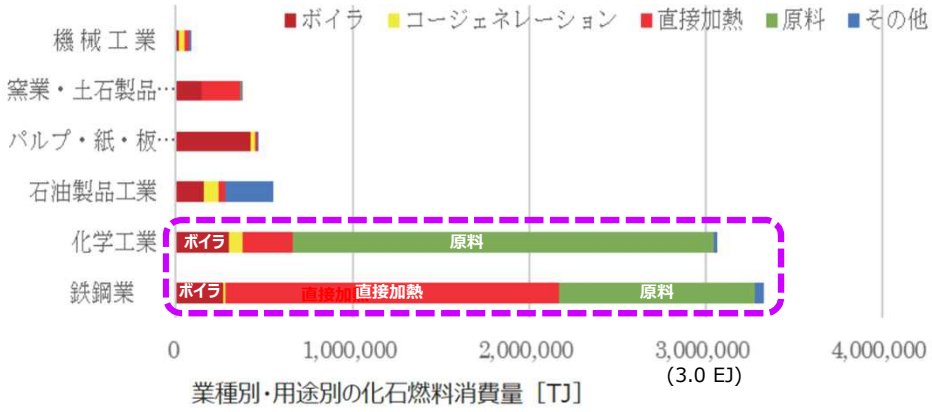
我が国では、年間１兆kWhもの未利用エネルギーのほとんどが排熱として廃棄されており、そのうち、産業分野では約0.3兆kWhと報告されている。また、別の報告によれば、未利用熱のうち200℃未満の温度帯が76%と大半を占めている。

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

製造業における化石燃料消費の用途

◆製造業の化石燃料消費は、**鉄鋼業と化学工業が製造業全体の8割**。
両者の消費量の44%は原料用。
・熱利用の大半は直接加熱と、自家用蒸気(150℃以下)の消費。

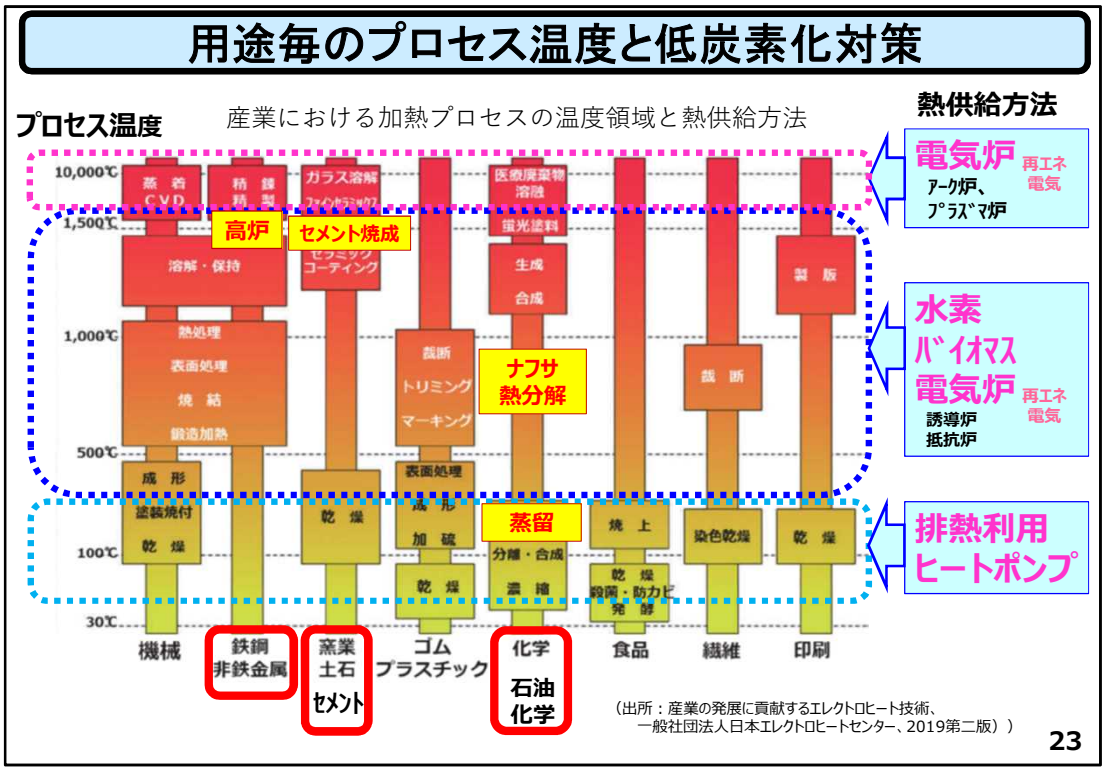
直接加熱　　：31%（6,500万kL）
ボイラ　　：17%（1900万kL）
コジェネレーション：　3%



（出所：産業の発展に貢献するエレクトロヒート技術、
一般社団法人日本エレクトロヒートセンター編、2019第二版））

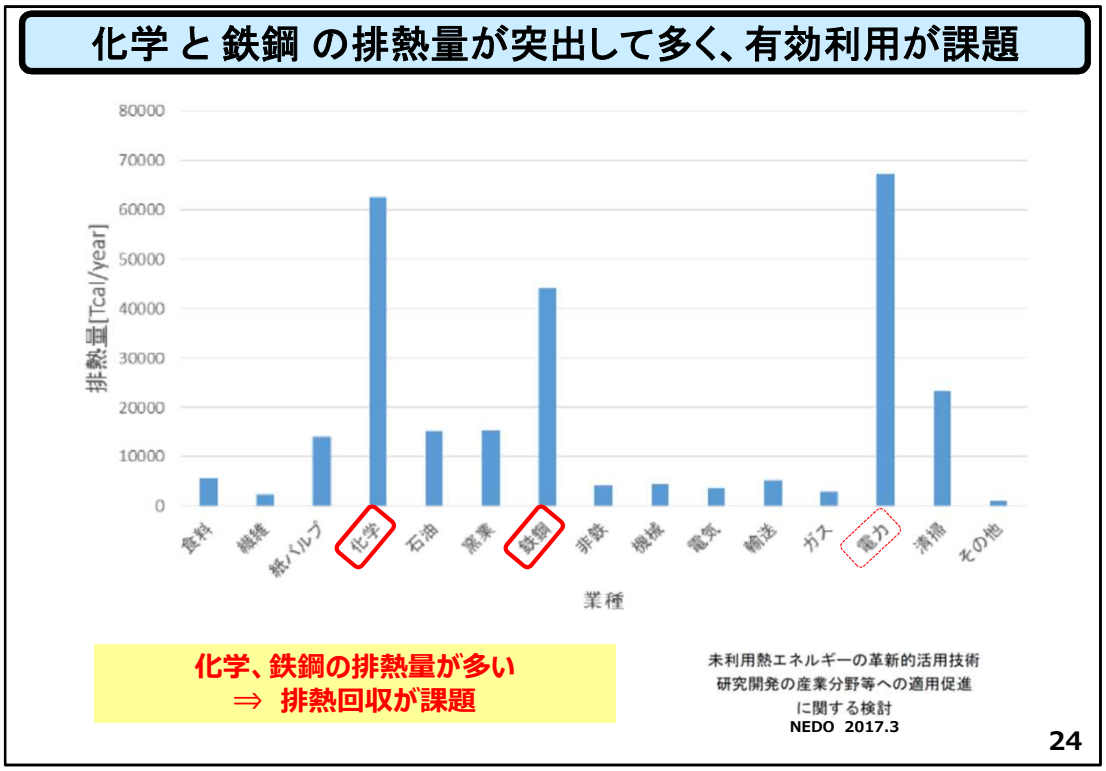
22

化石燃料の消費の視点から見ると、鉄鋼業と化学工業が製造業全体の消費量の８割を占めている。そのうちの44%は原材料として消費されているもので、燃料利用の大半は、直接加熱と、150℃以下の自家用蒸気で消費されている。

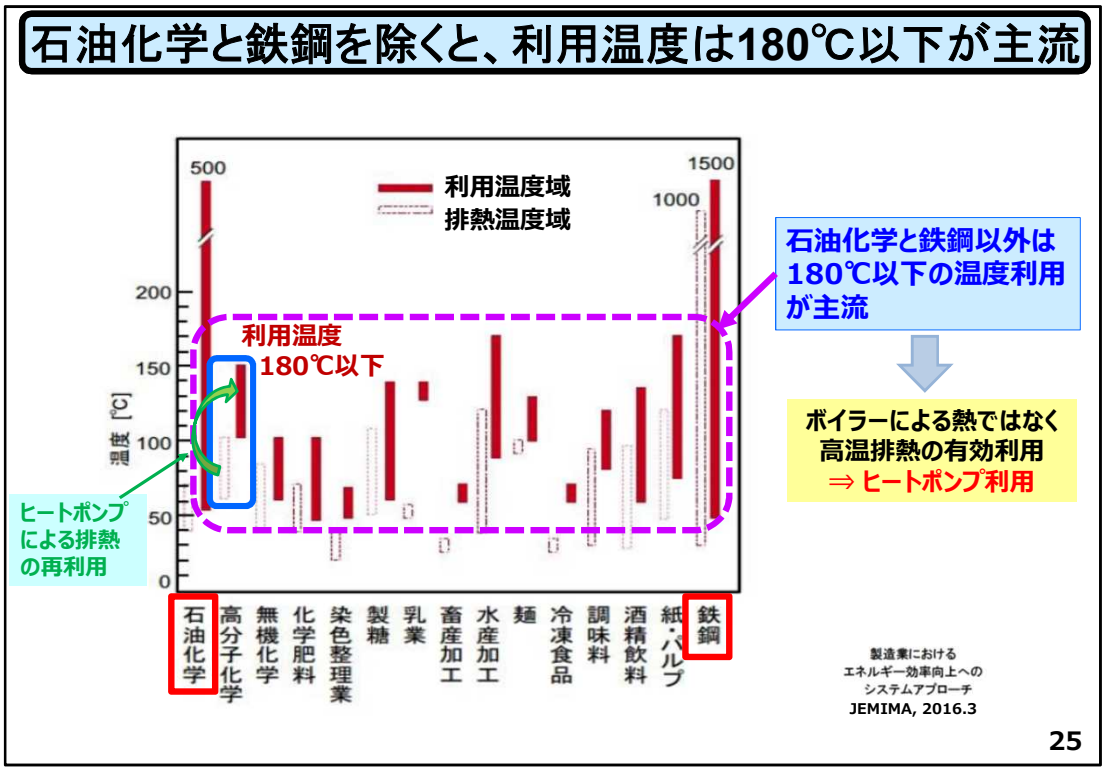


ここで、鉄鋼、セメント、化学などの産業の用途毎のプロセス温度帯を示す。鉄鋼の高炉は2200℃程度、セメント焼成は約1500℃の高温を利用しており、ナフサ熱分解は850℃の中高温、蒸留は200℃程度の中低温を利用している。

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。



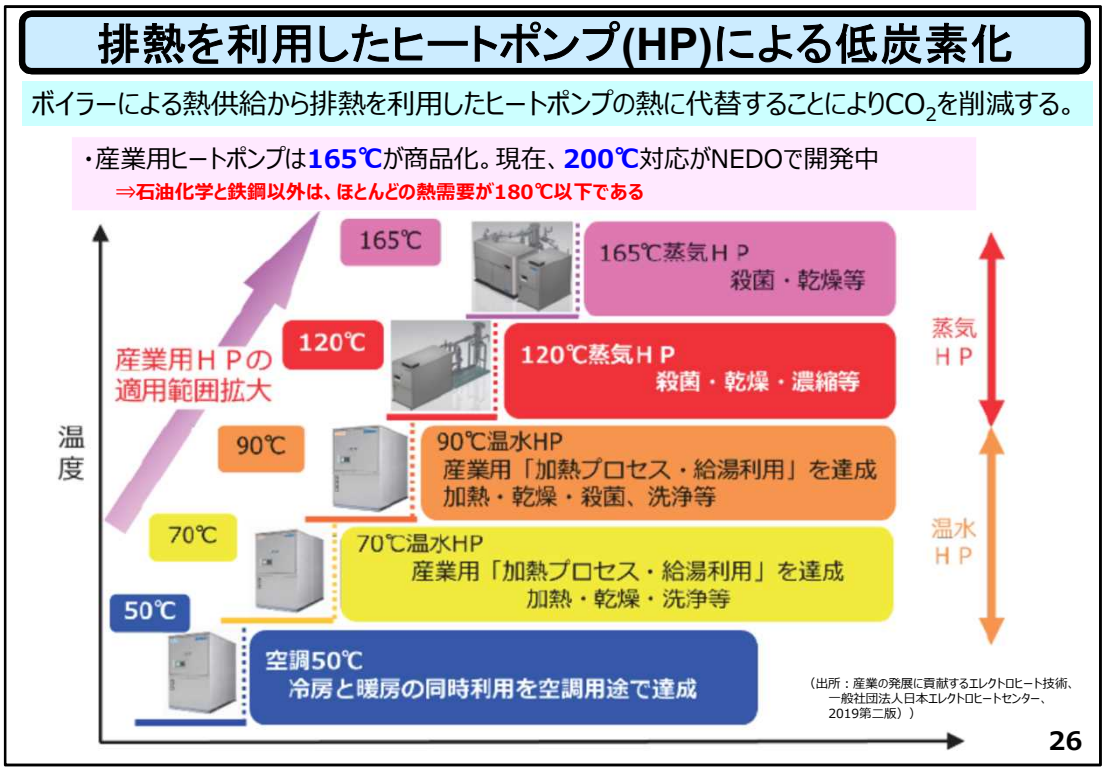
産業の用途毎の排熱量を示す。電力、鉄鋼、化学分野の排熱量が多い。特に化学は鉄鋼より排熱量が大きく、排熱量の低減および排熱の回収利用が課題と言える。



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。



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。

<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

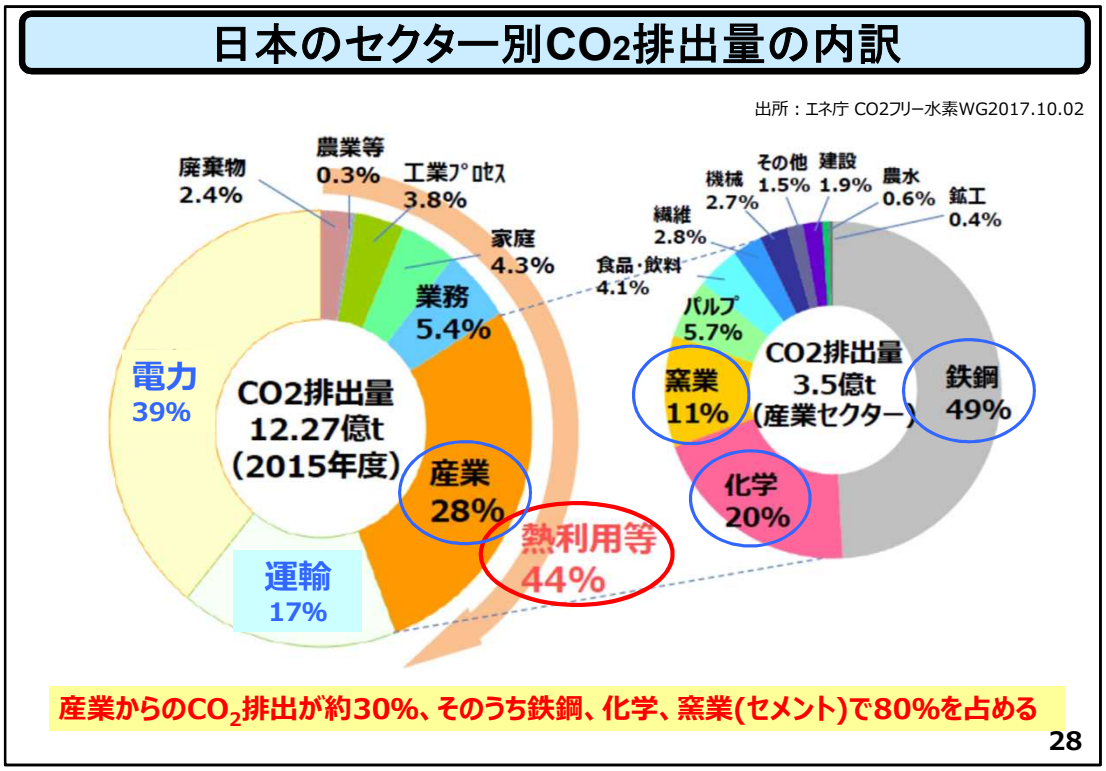
５．産業・熱エネルギー分野におけるエネルギーマネジメント

６．まとめ

付録1．ヒアリング結果

付録2．個別技術集

27



ここで、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。

産業における脱炭素化オプションの分類と調査範囲

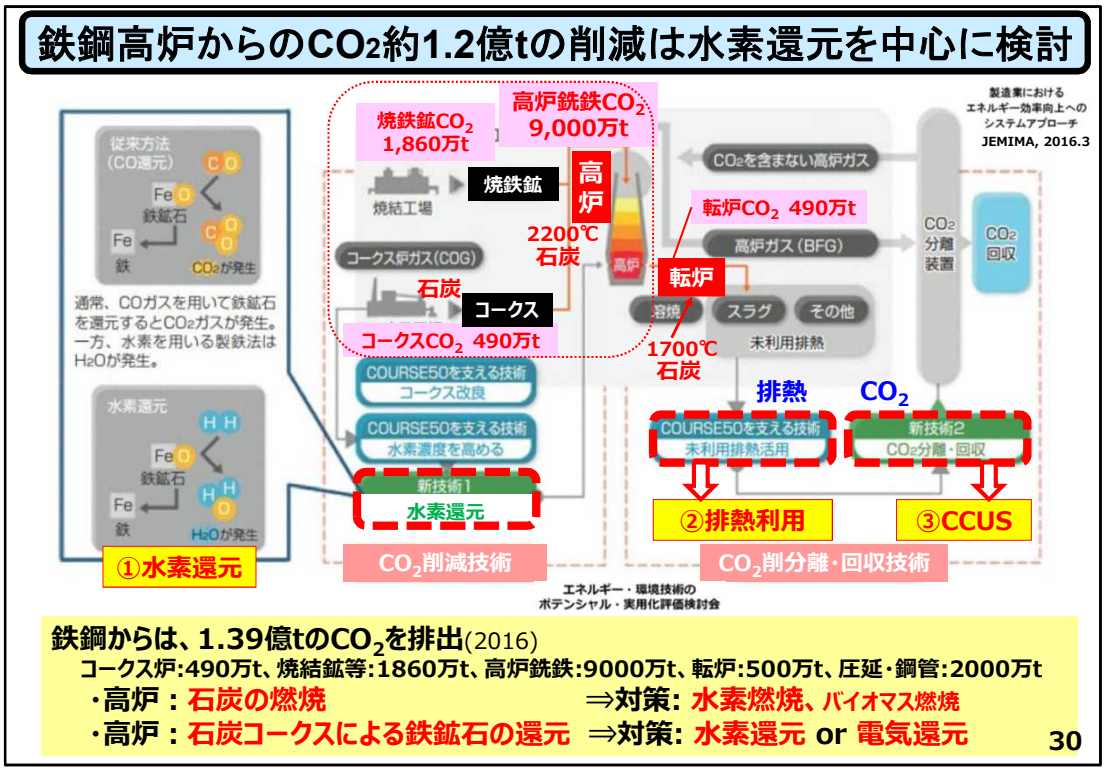
- **省エネルギー**
  - **プロセス**
  - **事業所全体**
  - **地域**
  - **未利用熱の利用（排熱など）**
- **エネルギーキャリア変更**
  - **電化**
  - **水素**
  - **バイオマス　国内ポテンシャルが少ないので今回調査の対象外**
- **IoT利用とセクターカップリング**
  - **ビッグデータ、AI 利用**
  - **デマンドレスポンス (DR)**
- **今回、詳細な調査の対象としなかったもの**
  - **バイオマス，CCS，太陽熱**

29

今回の産業のCO2排出に関する調査に当たっては、次の３つの視点で進めた。

①省エネルギー
②エネルギーキャリア
③IoTとのセクターカップリング

また、今回の調査では、バイオマスは量の確保に難しい面があることから、調査対象から外している。



鉄鋼からは、1.39億tのCO2を排出(2016)

コークス炉:490万t、焼結鉱等:1860万t、高炉銑鉄:9000万t、転炉:500万t、圧延・鋼管:2000万t

- **高炉：石炭の燃焼** ⇒**対策: 水素燃焼、バイオマス燃焼**
- **高炉：石炭コークスによる鉄鉱石の還元** ⇒**対策: 水素還元 or 電気還元**

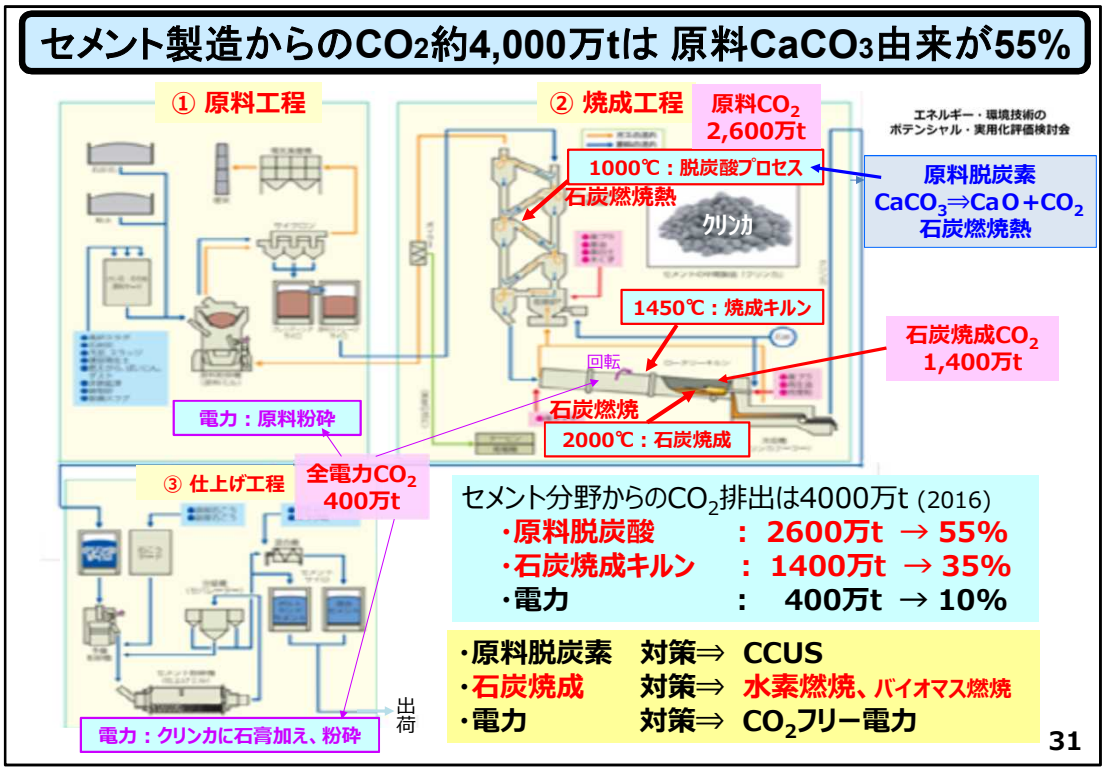
30

我が国の鉄鋼業におけるCO2排出に関し、プロセスに分けてCO2排出量を調査した。

・鉄鋼業としては約1.4億tのCO2を排出しており、高炉プロセスが9000万tと約65%を占める。高炉プロセスの前段である鉄鉱石の焼結プロセスは約2000万t、石炭からのコークス製造プロセスが490万tと、鉄鋼業の高炉に関するプロセスから大半のCO2が発生している。その他のCO2排出として、転炉が500万t、圧延・鋼管プロセスが2000万t程度を占める。

・鉄鋼業におけるCO2削減方法としては、水素利用と電化が提案されている。高炉での2200℃加熱は水素を利用し、石炭コークスによる鉄鉱石の還元は水素による還元を提案している。

・（社）日本鉄鋼連盟は、自身が行った調査研究により、水素目標価格を7.7￠/Nm3-H2と試算。また、同調査研究から必要水素量は700万t/年と推計されるので量の確保と価格の達成が今後の大きな課題である。



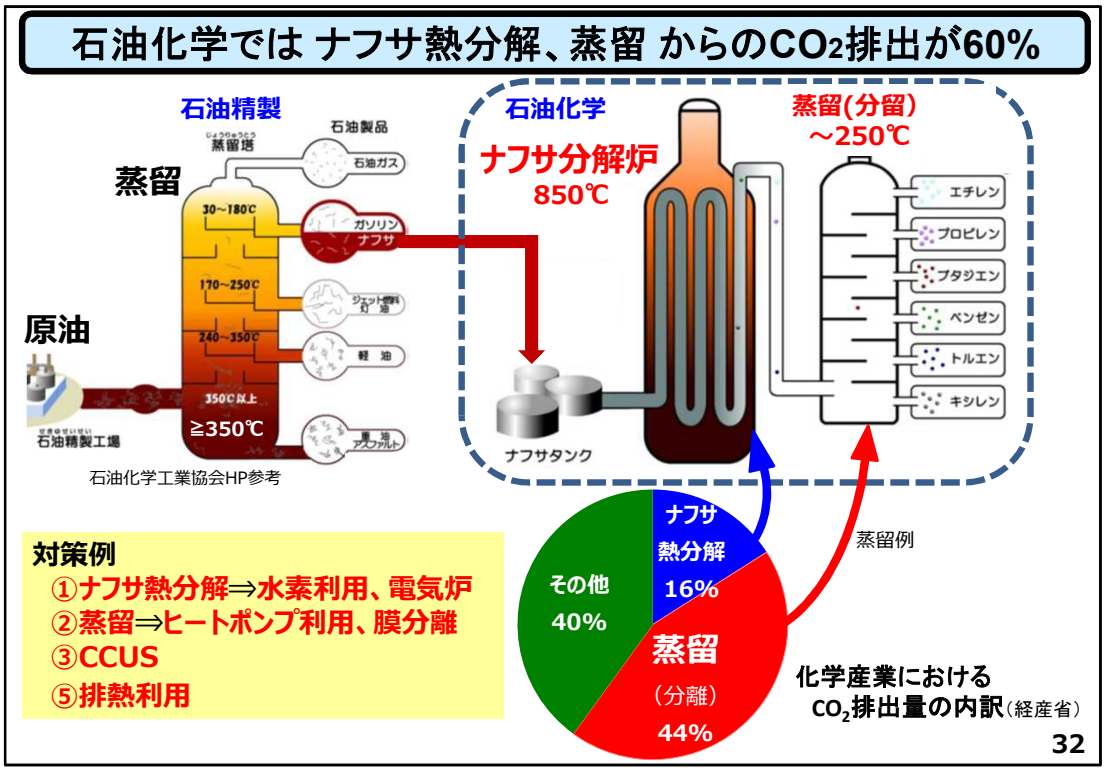
次に、我が国のセメント業におけるCO2排出に関し、プロセスに分けてCO2排出量を調査した。

・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、課題である。



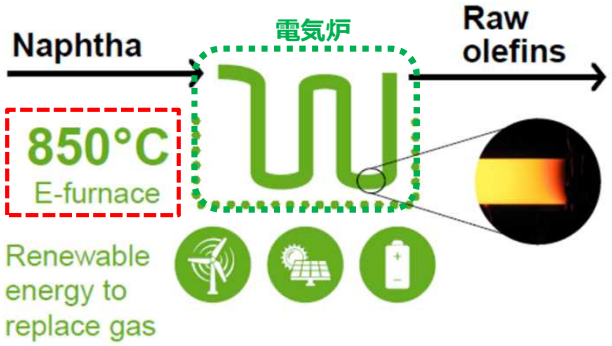
化学産業においては、蒸留プロセスが約44%、ナフサ熱分解が約16%と、両者で化学産業でのCO2排出の60%と大部分を占める。化石燃料の燃焼による熱由来のCO2排出量が多く、化石燃料からのCO2を削減する必要がある。

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。

BASFはナフサ熱分解を再エネ電気炉による低炭素化を検討中

出所：BASF HP

化石燃料による熱から
再エネ利用の電気炉による熱分解に転換を検討



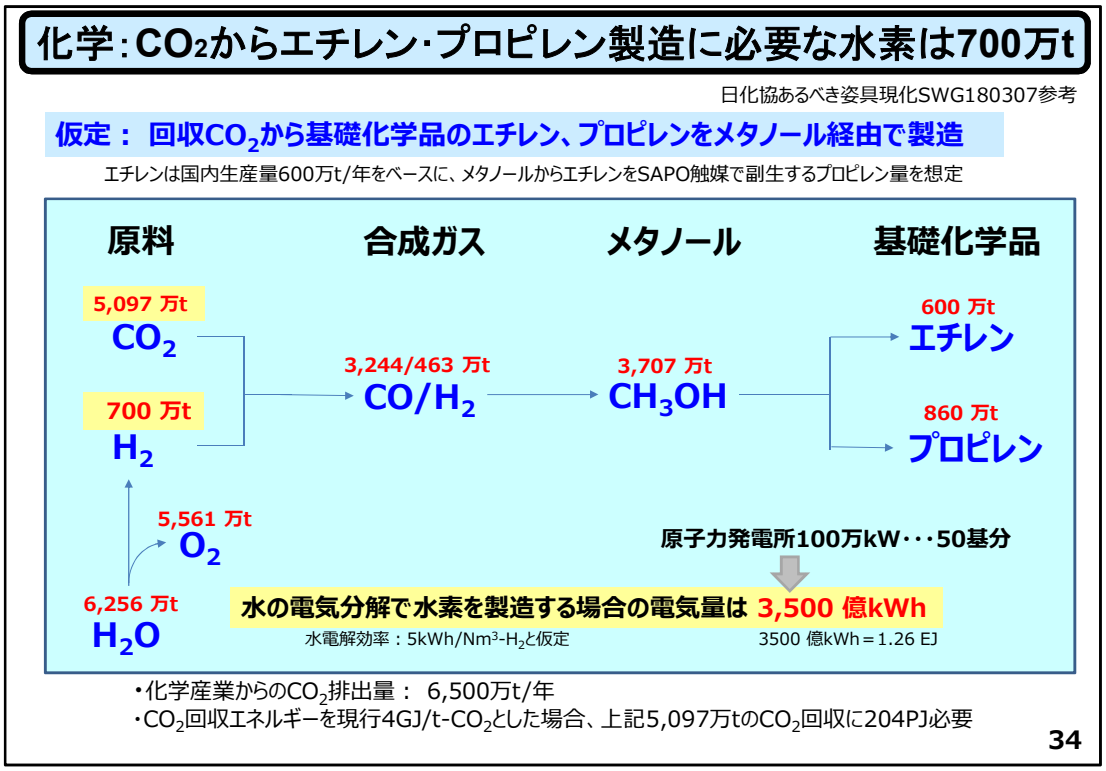
高温、大電流、化学品への耐性の高い炉素材、電気炉を2023年めどで開発中

- Switch steam cracker coil heating from natural gas to electrical resistance heating, combining high current with low voltage
- Integrate an E-furnace into the steam cracker in Ludwigshafen
- Redesign of the entire furnace required, from the alloy composition to electric connectors and transformers
- BASF aims to develop the world's first electrical heating concept for steam crackers within the next five years[1]

33

ドイツのBASFはナフサ熱分解炉におけるCO2排出削減検討として、再生可能エネルギーを利用した「電化」の検討を2023年目標に進めている。

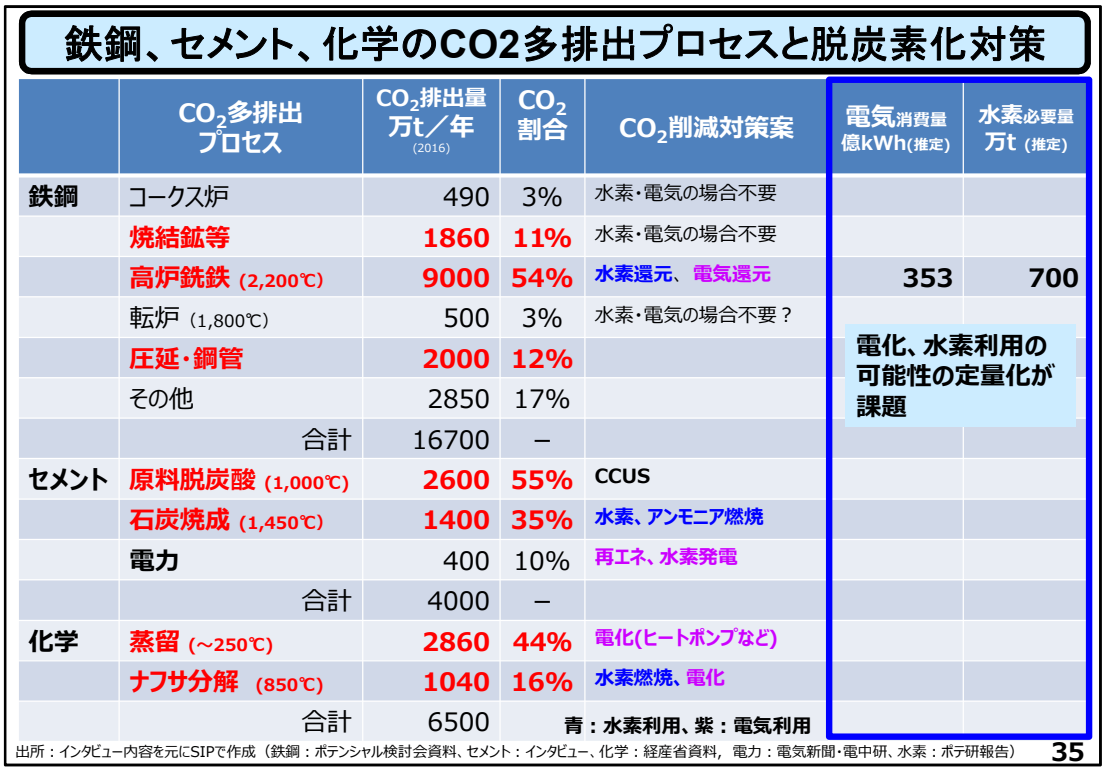
電気炉に大電流を流し高温化するため、高温、大電流、化学品への耐性の高い金属素材の開発が課題と報告されている。



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の固定化の検討も検討されている。

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、例えばわが国の年間エチレン生産量の約600万tを、回収CO2を原料として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				

電化、水素利用の可能性の定量化が課題

青：水素利用、紫：電気利用

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） 35

ここで、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。

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」が中心になると思われ、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、それらを経済性と量を両立する調達も課題である。

<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

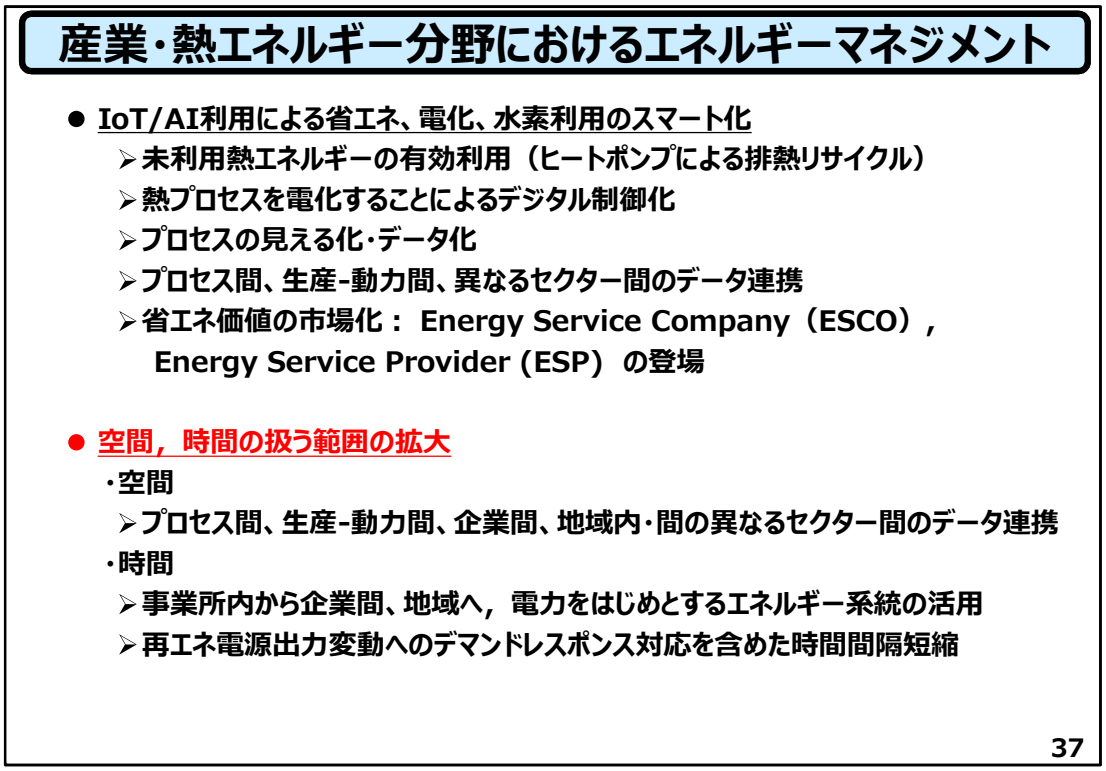
５．産業・熱エネルギー分野におけるエネルギーマネジメント

６．まとめ

付録1．ヒアリング結果

付録2．個別技術集

36



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。

①IoT/AI利用による省エネ、電化、水素利用のスマート化

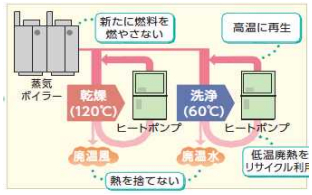
②空間，時間の扱う範囲の拡大

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。

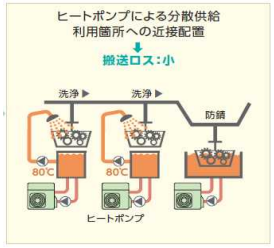
事例：電化を利用した排熱のリサイクル

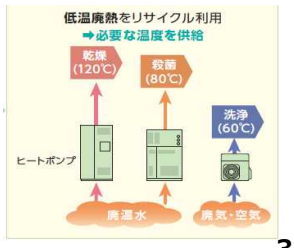
- 電化のメリット
  - 通信，センサー，制御機器との相性がよい
  - （相対的に）空間および時間についての詳細なデータを集めやすい
- ヒートポンプ加熱
  - メリットと効果
    - 省エネルギー ／ 低温廃熱の有効利用，蒸気ロスの削減
    - 最適熱源配置 ／ プロセスに合わせた熱供給
    - DR資源 ／ 外部との通信機能をもつ制御システムを採用し，オンラインモニタリングやメンテナンスの利便性を向上させるとともに，DR資源として活用
  - 課題 圧縮機動力効率*，冷媒，コスト低減，蓄熱による柔軟運転 など

＊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





38

事例：電化を利用した排熱のリサイクル

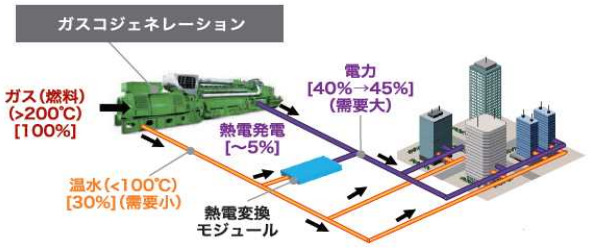
時間・空間のプロセスデータ連携のポイントとなるのは、“電化”であると考えられる。

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廃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℃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。

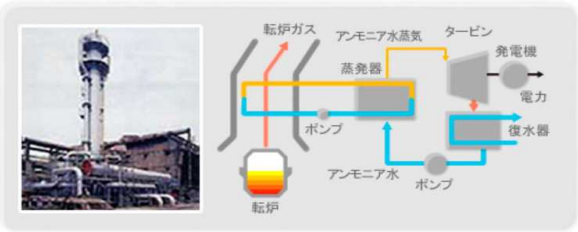
事例：排熱の電化利用（排熱→電気）

□ コージェネシステム効率向上
- 中高温排熱と低温排熱を利用し発電する
- シリコンベースの熱電変換材料の開発により、システムの電力効率1%向上を実現
- 2030年度15億kWh/年の省エネ効果が期待される



排熱発電によるガスコジェネ装置のシステム効率向上
Source: NEDOが取り組む未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発

□ 鉄鋼分野利用（CO2分離・回収用）
- 100℃前後の低温排熱より高出力電力を得るカリーナサイクル発電の利用を検討
- カリーナ発電は水-アンモニア混合物を媒体として作動．温泉熱利用技術として注目されるが設備コストや排熱回収効率に課題



鉄鋼COURSE50　カリーナサイクル発電システムの検討
https://www.jisf.or.jp/course50/tecnology03/#point3

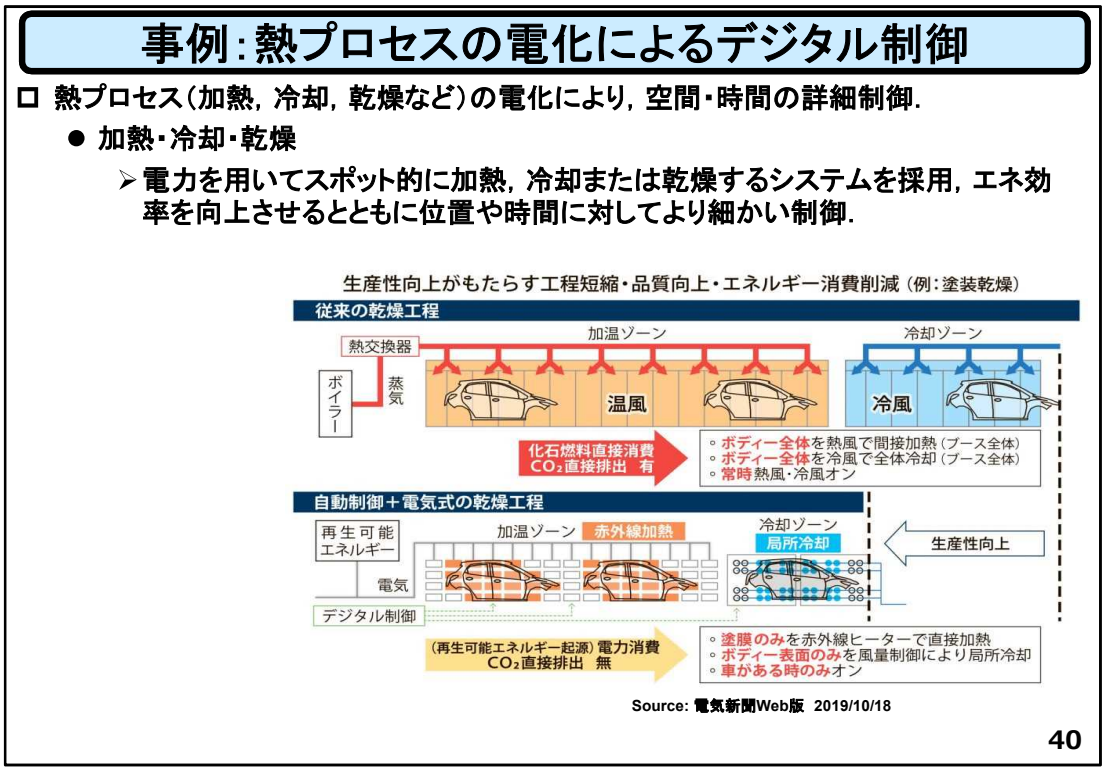
39

事例：排熱の電化利用（排熱→電気）

工場からの排熱や地熱等様々な温度レベルの未利用エネルギーから、有効な発電出力を得ようとする動きもある。産業分野では次のような取り組み事例がある。

【上図】
ガスエンジンコージェネシステムで発生する中高温および低温の排熱を利用して発電するもので、コージェネシステム全体としての発電効率を向上させようとするものである。シリコンベースの熱電変換材料の開発により、システムの電力効率を1%向上させることができている。

【下図】
鉄鋼分野ではCOURSE50においてCO2分離・回収のための電力を確保するための排熱発電（100℃前後の低温排熱より高出力電力を得るカリーナサイクル発電）が検討されている。



事例：熱プロセスの電化によるデジタル制御

熱プロセスの電化によるデジタル制御について、自動車製造（塗装）の乾燥工程で示されている。
従来、ボイラー蒸気系で行われていた各専用ゾーンでの“ボディ全体の加温”、“ボディ全体の冷却”の工程は、化石燃料を直接消費するとともに、常時熱風や冷風が出ていて効率が悪いものであった。新しい制御方式では、これを再生可能エネルギーによる電気式とし、自動制御＋電気式の乾燥工程を導入することによって局所的な加温・冷却が行うことが可能となった。これによりエネルギー効率を向上させることができている。

事例：塗料生産企業のフルデジタル工場

- Dulux社はオーストラリア最大の塗料生産企業.
- Merrifiel新プラント
  - 敷地面積22,600m2，年間7500万Lの生産能力
  - フルデジタル化(End-to-end digitalization)含め1億6500万AUD投資.
  - 小バッチ工場と大バッチ工場で構成.
  - 75,000の手動作業削減し（ロボット大量導入，ラインはほぼ無人？），ペーパーレスで運用.
- 新しい生産プラットフォーム
  - Siemens社のシステム採用.
  - 計画よりも25%以上の省エネを達成.
  - 少量バッチによる柔軟＆高速多品種大量生産が可能（従来比でバッチサイズ1/50，8倍高速）.
- バーチャル訓練
  - ルーチンメンテナンス作業訓練はバーチャル環境で実施（世界初）．緊急時訓練も可能.

Source: Siemens Web page https://new.siemens.com/global/en/company/stories/industry/any-color-desired.html

41

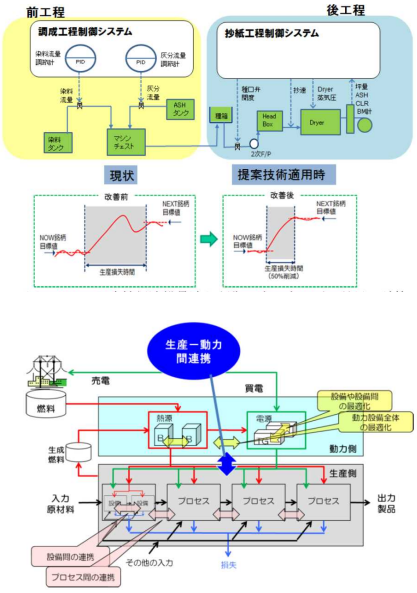
事例：Dulux社のフルデジタル工場

シーメンスが制御システムを開発し、オーストラリアの塗料企業であるDulux社に提供・新しいプラントに反映、計画よりも25%以上の省エネを達成した。フルデジタル化が行われ、無人化およびペーパーレスを基本とし、ロボットが大量に稼働、高速多品種生産が可能となっている。また、生産効率の向上とともに、バーチャル環境で訓練（メンテナンス等）ができるようになっている。

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，砕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



（原典：NEDO成果報告書，平成29年3月）

42

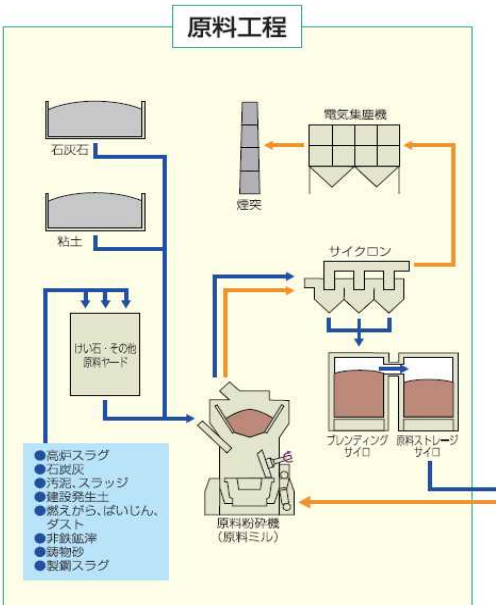
事例：製紙産業におけるプロセス間、生産-動力間のデータ連携

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のでその内容を紹介する。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砕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」としてバッファーがある場合も想定される．



Source: セメント協会Webページ

43

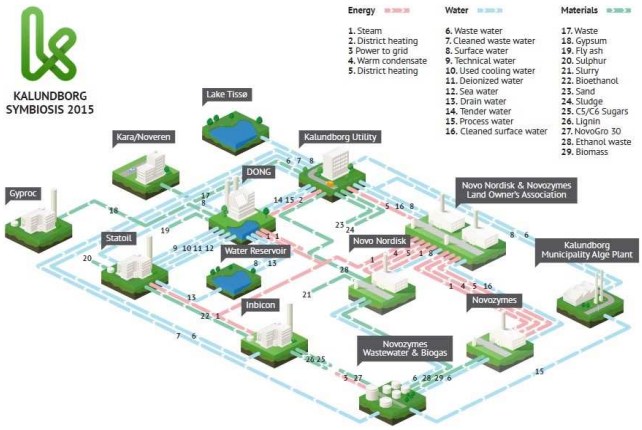
事例：「モノ」としての余剰電力の貯蔵

セメント分野では上流工程で1/3の電力が消費され、特に破砕工程が大きい。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砕があり、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であり、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,
https://www.nordregio.org/nordregio-magazine/issues/industrial-symbiosis/industrial-symbiosis-in-kalundborg/ 44

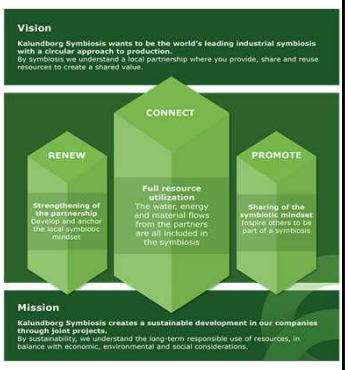
事例： 異なるセクター間の連携による効率化

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。図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

- 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: Synbiosis web page, http://www.symbiosis.dk/en/

45

参考まで、Kalunborg 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、Kalunborg 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

46

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。

（参考）Kalundborg Symbiosis　デンマーク

ロ 1990年代前半のネットワーク（丸囲み数字は時系列順）

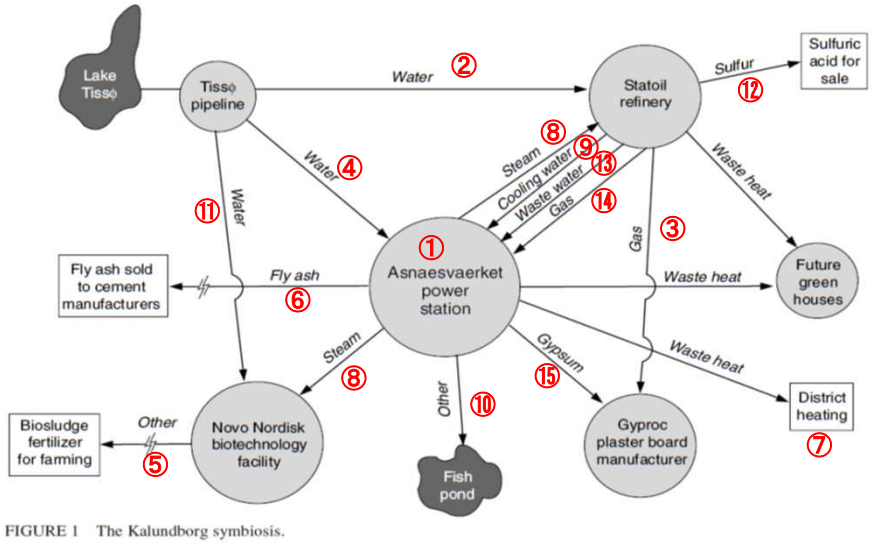


FIGURE 1　The Kalundborg symbiosis.

Source: The Industrial Green Game (1997), National Academy Press

47

1990年代前半のKalunborg Symbiosisのネットワーク構成を示す。

異業種ネットワークの中心にあるのは、①Asnaesvaeket Power Station（石炭火力発電所）である。この発電所は、コミュニティや他のいくつかの企業との材料およびエネルギーのリンクを持っている。この発電所からの余剰熱は地域を熱供給を通じた近隣住居や⑩養魚場で使用され、蒸気はStatoil（現在Equinor）製油所や⑧Novo Nordisk（医薬品および酵素のメーカー）に販売されている。また、脱硫プロセスの副産物に含まれる石膏は⑮Gyproc plaster board manufacturerに販売され、発電所からのフライアッシュとクリンカーは、⑥セメント生産に使用されている。

（参考）Kalundborg Symbiosis　デンマーク

□ 1990年代初頭までのステップ

- ① 1959 発電所運転開始
- ② 1961 石油精製プラントのための用水パイプライン
- ③ 1972 石膏ボード生産用に石油精製からガス供給
- ④ 1973 発電所出力増　用水パイプラインへの接続
- ⑤ 1976 バイオ企業（製薬等）が廃スラッジを近隣農業に提供
- ⑥ 1979　発電所がフライアッシュを供給
- ⑦ 1981 自治体が発電所排熱を利用する熱供給ネットワーク確立
- ⑧ 1982 バイオ企業と石油精製が発電所からの蒸気パイプラインを接続
  （あわせて，効率の悪いボイラーを廃止）
- ⑨ 1987 石油精製排水を発電ボイラーに提供
- ⑩ 1989 発電所排水を近隣養殖に提供
- ⑪ 同年バイオ企業が用水パイプライン接続の契約締結
- ⑫ 1990 石油精製の脱硫プラントから硫黄を外部供給（硫酸原料）
- ⑬ 1991 石油精製から発電所に排水供給（フライアッシュ処理等）
- ⑭ 1992 石油精製から発電所にフレアガス供給
- ⑮ 1993 発電所脱硫プロセスから石膏を提供

Source: The Industrial Green Game (1997), National Academy Press

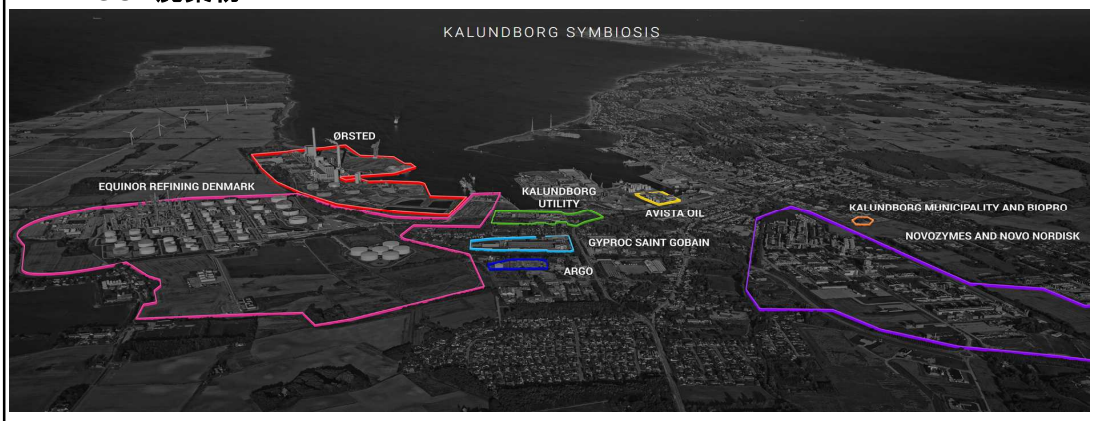
48

Kalunborg Symbiosisの1990年代初頭までの経緯は次の通りである。
（丸囲み数値は前ページの時系列順にリンク）

立ち上げは1959年の発電所運転開始で、1961年の石油精製プラント用の用水パイプラインまでは単独企業の活動である。以降、近隣企業が協力する自主的活動として、石油精製からガス供給、発電と用水パイプラインの接続、バイオ企業の用水パイプラインの使用、Symbiosisによる廃スラッジの近隣農業への提供、発電所のフライアッシュ供給、発電所排熱を利用した熱供給ネットワーク等が行われた。

（参考）Kalundborg Symbiosis　デンマーク

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



Source: Synbiosys web page, http://www.symbiosis.dk/en/

49

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（石油精製）
・Örsted（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。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

□ 成果と主要指標
- 2015年からライフサイクル評価を実施（水，エネルギー，素材）し，Symbiosisの有無を仮定したケース分析によりインパクト評価
- 経済価値
  - 企業費用削減　DKK 182 Mil(約29億円,1DKK=16円換算)
  - 社会経済便益　DKK 106 Mil(約17億円,同)
- CO2削減効果
  - 発電所の石炭からバイオ燃料転換後で，63.5万トン

□ その他の最近の動き
- 発電所の燃料転換　石炭からバイオマスへ
- バイオガスプラント　NovozymeとNovo Nordiskの廃棄物を利用しバイオガス生産，その後天然ガス化．残渣は肥料として農業利用．
- 産業排熱利用ヒートポンプにより地域暖房利用
- 第2世代バイオエタノールプラント

Source: Prestigious award for circular production in Kalundborg, Symbiosis web page, http://www.symbiosis.dk/wp-content/uploads/2018/06/Press-text-Kalundborg-Symbiosis-Win-Win-Gothenburg-Sustainability-Award_ENG_final.pdf

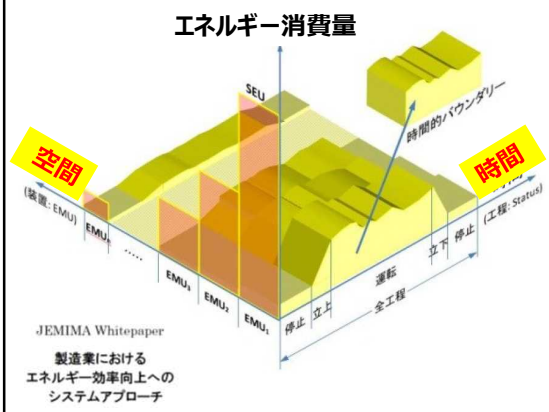
50

2015年のデータに基づき全ての既存フローのライフサイクル分析を実施し（水、エネルギー、素材）、Symbiosisを使用した場合と使用しない場合の2つのケースにおいて比較分析を行った結果、主要指標とする経済価値やCO2削減効果の面で大きな効果があることが確認された。企業における競争力の確保や公的資金の節約に貢献するものである。

その他、最近の主な動きとしては次の通りである。
・Ørstedの複合火力発電所を石炭からバイオマスに転換が2019年に完了。地域暖房や企業へのプロセス蒸気供給にも利用される。
・Novozyme、Novo Nordisk、Ørsted 、Biogadanの連携によるバイオガスプラントが2018年6月に運用開始された。NovozymeとNovo Nordiskの廃棄物はバイオガスに変換、バイオ天然ガス化、脱気の後、バイオマスは農地の肥料として使用される。これにより廃棄物リサイクルが倍増される。
・Kalundborg Forsyningは産業排熱利用の新しいヒートポンプを構築、地域暖房需要の30%を満たしている。
・Ørstedが第2世代バイオエタノールプラント（デモ施設）を設置、Kalundborg Forsyningは排水からの藻植物生産を実施している。（企業間連携によりデモの実施）

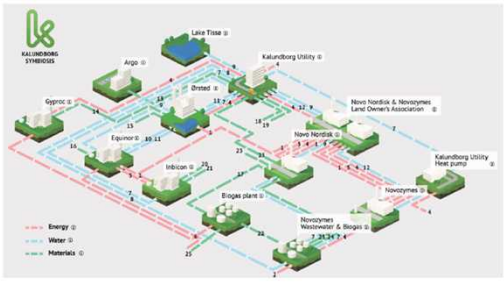
時間と空間のデジタル制御によるデータ連携の最適化

組み立てライン型



異業種連携型

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



source:
http://www.symbiosis.dk/en/

Source: Kalundborg Symbiose.

**生産プロセスにおいて、エネルギーの生産と動力を、時間と空間でデジタル制御し、
エネルギー消費量の最小化をシステム・マネジメントすることが課題**

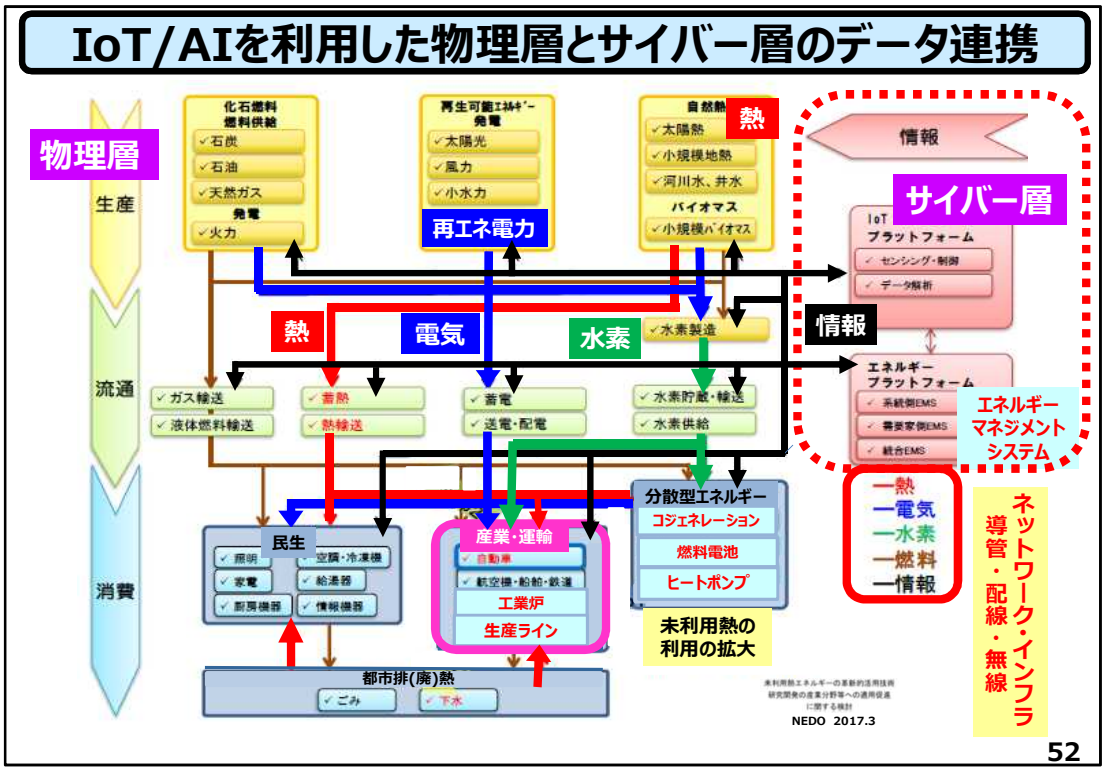
51

デジタル制御・データ連携の最適化による、エネルギー消費量の最小化を目指す生産プロセスのエネルギーマネジメントとしては、①組み立てライン型、②異業種連携型の２種類でパターン化できると考えられる。

左図は①組み立てライン型を示すものである。グラフは生産ラインにおける各工程（「停止」、「立上げ」、「運転」、「立下げ」、「停止」）を時間軸とし、これを各製造パターン毎に総エネルギー消費量が多い順に空間軸上に並べたものであり、ここで示されるエネルギー消費量を、時間と空間でデジタル制御し、最小化を図るようシステム・マネジメントするものである。

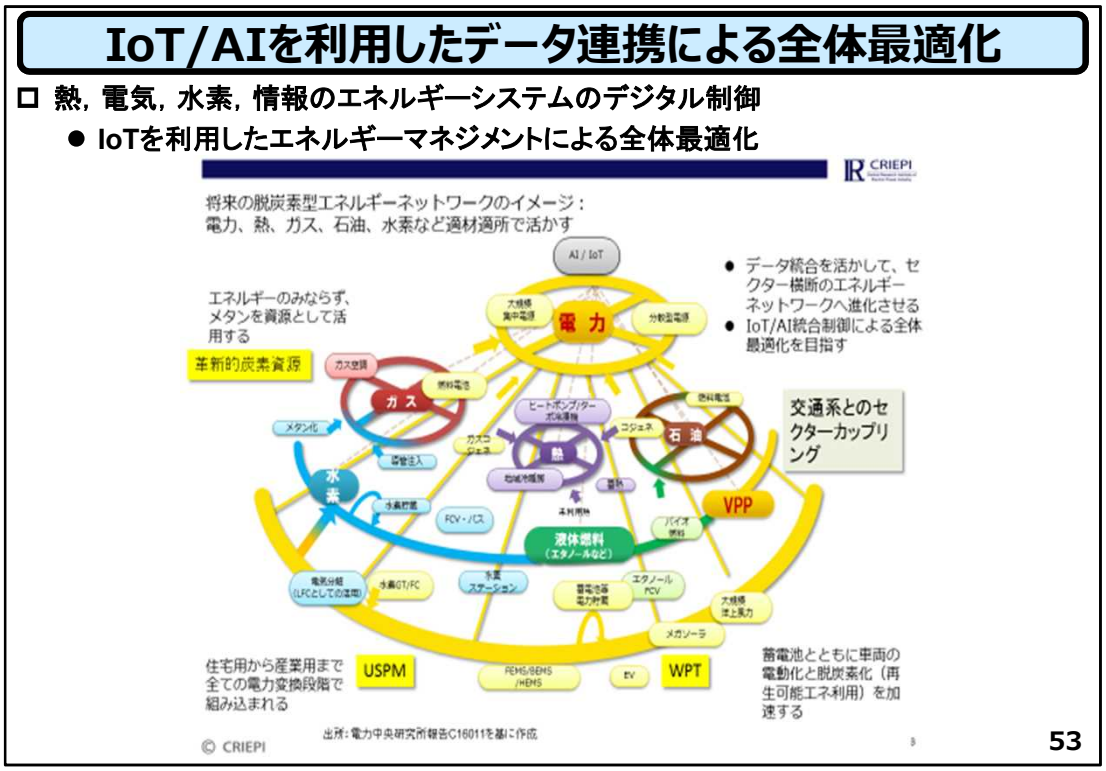
右図は②異業種連携型を示すものである。事例としてはデンマークKalunborg Symbiosisの産業共生ネットワークを前述した。化学コンビナートの概念を基本とし、エネルギーとモノを回していこうとするものであり、地域の企業が協力して互いの副産物を使用したり、リソースを共有したりする等の異業種間のネットワーク融通を行うものである。

これらの例は、デジタル制御・データ連携の最適化による時間、空間を超えたエネルギーマネジメントの姿ともいえる。



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。



図は、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。

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）

54

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官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

<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

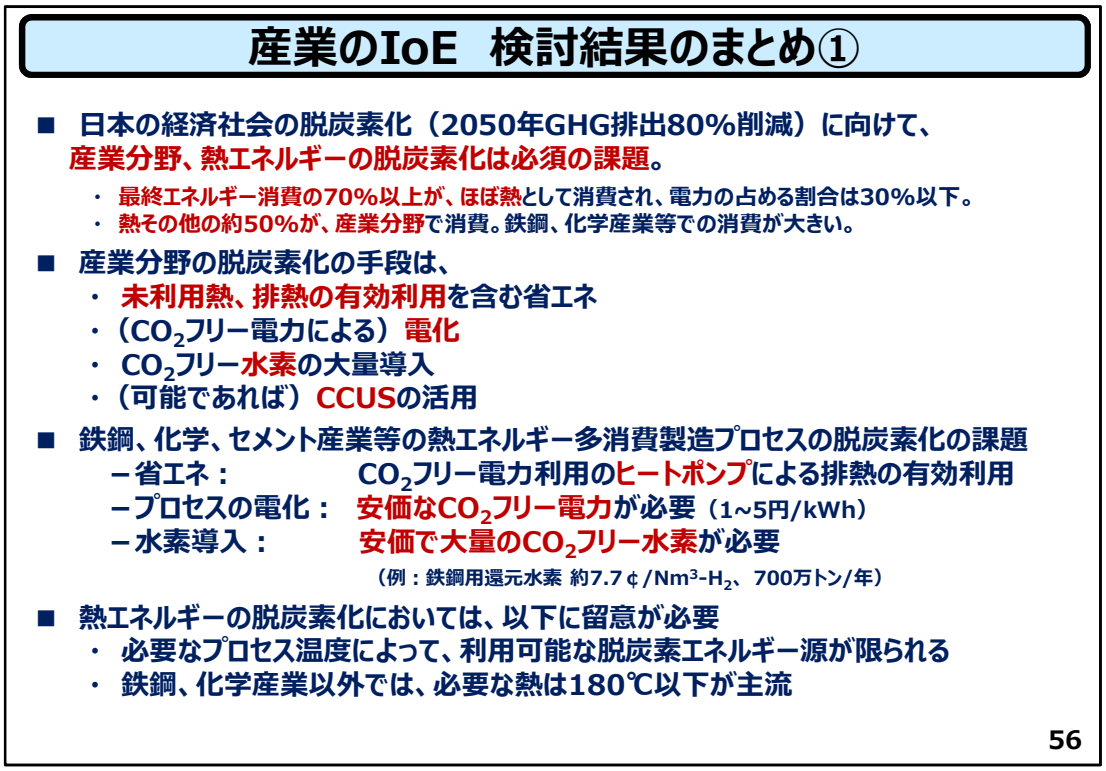
５．産業・熱エネルギー分野におけるエネルギーマネジメント

６．まとめ

付録1．ヒアリング結果

付録2．個別技術集

55



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、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）

産業のIoE　検討結果のまとめ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系統の活用等）
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）

57

また、日本では年間、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。

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）**
  - **CO_2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、電力系統の活用とDR**
  - **エネルギー・ビック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**
- **上記検討課題に対応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姿**
  - **総合的なエネルギーサービス会社や機構等**

58

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、必要となる対策の具体的な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となる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。これをクリアにするには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。

<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

付録1．ヒアリング結果

付録2．個別技術集

59

ヒアリング概要（技術分野・日時など）

日	技術・分野	ヒアリング先	概要
9月26日	産業分野、熱エネルギーの電化とIoEの可能性	東京電力ホールディングス	素材産業プロセス、熱エネルギーの電化の可能性
10月7日	ピンチテクノロジー	エネルギー総合工学研究所	コンビナート等の脱炭素化に向けたピンチテクノロジーの適用の可能性
10月9日	地域エネルギーマネジメント	東北大学・新居浜市	地域エネルギーシステムの脱炭素化の方策
10月15日	化学製造プロセス	三菱化学	化学品製造プロセスの脱炭素化方策
11月5日	産業分野のエネルギーマネジメント	横河電機	連続製造プロセスにおける制御性改善の取組み
11月11日	化学及びセメント	宇部興産	セメント化学の両分野を主とする会社のCO_2削減方策
11月12日	セメント	セメント協会	セメント製造の脱炭素化の方策
11月14日	製鉄	日本製鉄	製鉄プロセスの脱炭素化の方策
11月28日	石油化学蒸留技術	東洋エンジニアリング	最先端省エネルギー蒸留システム
12月6日	熱マネジメント	未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合	排熱の利用についての技術動向
12月11日	化学	日本化学工業協会	化学産業分野としての脱炭素化のための方策
1月８日	熱利用	前川製作所	産業用ヒートポンプの技術動向
1月15日	産業分野の電化	電力中央研究所	産業分野における電化のポテンシャル検討

鉄鋼業	①	ヒアリング先	日本製鉄（株）、日鉄総研（株）

プロセス	高炉	CO_2排出量（百万トン）	118	CO_2排出量の日本の総排出量に占める割合	9.9%

要留意事項

・鋼材の世界需要は今後とも増大：**スクラップだけでは鋼材需要を満たすことはできない。**天然資源を利用した鉄鋼蓄積の拡大が必要であり、世界の銑鉄の必要生産量は今世紀中は現在レベルで推移。
・日本の鉄鋼需要は、現在、国内需要が年間7,000万トン（間接輸出を含む）、輸出が3,000万トン。マーケットもサプライチェーンもグローバル化していること考えると、**よりマーケットに近い地域や、安価なエネルギーへのアクセス可能な地域での生産もあり得る。**

新プロセス技術

技術名	技術内容	CO_2削減ポテンシャル(1)	技術成熟度	実装に要するコスト等
エコプロセス化	・プロセス革新（次世代コークス炉等） ・副生ガス効率利用（ガスホルダー、ガスタービン複合発電） ・排エネ回収（リジェネバーナー等） ・廃棄物資源、バイオマス利用	▲約20%	成熟技術 2030年までに全世界に導入完了	
COURSE50（水素還元）	・所内水素（COG)利用による高炉内水素還元比率アップ	▲約10%	2030年頃の導入開始	
Super COURSE50	・外部水素利用*高炉内水素還元比率アップ	▲10%超目標	2030年以降の導入開始	
CCS	・副生ガスからのCO_2回収**	2050年想定 ▲約42%（低位） ▲約64%（中位） ▲約85%（高位）	2030年頃の導入	
水素還元製鉄	・石炭を利用しない水素還元製鉄*		2050年頃の導入	
CCU	・副生ガスからのカーボンリサイクル**		2040年代半ば	

注(1)：2050年時点でのBAU排出量からの世界での削減ポテンシャルの割合。（ ）内の数字は、粗鋼生産増加によるCO_2排出増分も考慮した場合。日本鉄鋼連盟作成の「長期温暖化対策シナリオにおけるCO_2排出量の推移」をもとにポテンシャル値を導出。

上記の前提条件

・CO_2フリー電力の入手： **CO_2フリー電力が100%利用可能であること。（IEA 2DSでは2060年に100%CO_2フリー電力を想定）**
・CO_2フリー水素の入手： **低コスト、大量のCO_2フリー水素の利用が可能であること。**水素還元製鉄のためには、7.7c/Nm^3（0.85$/kg）の水素が1,2兆$Nm^3$（1.1億トン）必要。（世界全体、日本はその約6～7%）
・CCS/CCUの導入： **CCS/CCUの実施が技術的、経済的、社会制度的に可能となること。**

61

鉄鋼業 ②

ヒアリング先 日本製鉄（株）、日鉄総研（株）

電化の可能性

・米国で７~10年後に10万t級のプラント構築の構想あり。
電力需要3,400億kWh/年。 １t 当たり必要な電力量(推定値)@3,400kWh/t、粗鋼 1億t/年。
従来方式とのパリティ：4円/kWh＋炭素税3000円/t、 (ポテンシャル検討会資料より)
・マサチューセッツ工科大学が電気溶融還元を検討。酸化鉄をそのまま還元するプロセス。
現状の製造可能規模は１トン以下。 （エネルギー総合工学研究所資料・個別技術説明シートより）
・**電気溶融還元の場合、不純物の除去をスラグなどで対応できないため、不純物除去が困難**。 （日本製鉄連盟）

日本鉄鋼連盟が描くロードマップ

鉄鋼分野における技術開発

		2020	2030	2040	2050	2100
COURSE50	所内水素（COG）利用による高炉内の水素還元比率アップ 高炉ガスからのCO2分離	R&D	導入			
Super COURSE50	外部水素利用による高炉によるさらなる水素還元比率アップ （大量の水素供給が可能となる前提）	ステップアップ	R&D			
水素還元製鉄	石炭を利用しない水素還元製鉄	ステップアップ	R&D		導入	
CCS	副生ガスからのCO2回収	R&D			導入	
CCU	副生ガスからのカーボンリサイクル		R&D		導入	

社会共通基盤としての技術開発

		2020	2030	2040	2050	2100
カーボンフリー電力	脱炭素電源（原子力、再生可能、化石＋CCS） 次世代電力系統、電力貯蔵等	R&D			導入	
カーボンフリー水素	低コスト・大量水素の製造・輸送・貯蔵技術開発	R&D			導入	
CCS/CCU	CO2分離貯留・利用技術開発 社会的課題の解決（貯留場所、パブリックアクセプタンス等）	R&D			導入	

62

窯業			ヒアリング先	セメント協会、宇部興産
プロセス	セメント	CO_2排出量（百万トン）	44	CO_2排出量の日本の総排出量に占める割合	3.7%

要留意事項

・工場は石灰石生産地のそばに立地するのが基本（セメント1t製造するにあたり石灰石は1.2t必要）で中国、九州地区に多く立地している。最近では大量の廃棄物を処理している実績がある。CO2排出量は年間4,000万トン強でその約60%がプロセス起源であるが、これまで最も効率の良い製造方式への転換が完了するとともに、省エネを進めてきた経緯があり、エネルギー原単位では世界トップクラスの実績を有し、省エネの余地は少ない。

・CO2排出削減に向けての考え方は①省エネ、②代替エネルギー、③混合セメント、④CCSの順であり、**「省エネ設備の普及」と「エネルギー代替廃棄物の使用拡大」**を主に考えている。**電化について例えばセメントキルンは大規模であり、かつ回転を伴うことにより実用化は難しい**。水素導入については現時点ではコスト面から難しい。

・セメントの売価は約9000円/t、CCSは10000円/t-CO2を想定。

新プロセス技術

技術名	技術内容	CO_2削減ポテンシャル(1)	備考
焼成工程	・焼成温度の低減化	8.2万kL	・セメントキルン内高精度温度計測
原料工程	・廃棄物の使用拡大	—	・廃棄物混入は、水分を含みエネ原単位悪化要因。必ずしもエネルギーや環境性能が向上する訳ではない
混合セメント	・クリンカー含有比率の削減（高炉スラグ，フライアッシュ等の混入）		・初期強度の低下、中性化をはじめとした耐久性等の課題
CCS	・キルン排ガスからのCO2回収		
CCU	・コンクリート養生、骨材製造		

注(1)：2030までの省エネ効果料（原油換算）

上記の前提条件

・混合セメントの導入： **ユーザに受け入れられるため、国として様々な政策手段が必要。**

・CCSの導入： **コストおよび立地の問題をクリアしCCSの実施が可能となること（日本海にCCSのポテンシャルあり【調査中】）**

電化の可能性

・セメントキルンの加熱： **部分的利用（前処理を電気で廃棄物加熱と合わせるハイブリッド加熱）**

63

化学産業　　**ヒアリング先**　日本化学工業協会

プロセス	化学品製造プロセス	CO_2排出量（百万トン）	60（2017年度）	CO_2排出量の日本の総排出量に占める割合	約5%

要留意事項

・化学製品の需要は今後とも増大。
・化学品の製造プロセスは、きわめて多様。**石油化学（エチレン、プロピレン、BTX、ポリオレフィン）生産で日本のCO2排出量の約2%。**
・化学産業の脱炭素化にあたっては、①原料の炭素循環、②プロセス。構造の転換に分けて考える必要あり。

脱炭素化のアプローチ

技術名	技術内容	CO_2削減ポテンシャル(1)	技術成熟度	実装に要するコスト等
原料の炭素循環	・**CCU（水素が必要）** ・廃棄物資源利用、バイオマス利用	廃プラ900万T/年の炭素循環への適用性を検討中		
プロセス、構造の転換	・**蒸　留** → 膜分離 ・**熱供給** → 電化/水素　等	低炭素社会実行計画 2030年度削減目標設定： 650万T-CO2/年 （2013年度基準）		
熱の有効管理	・**企業を越えたエネルギー管理** ・**ヒートポンプ、ケミカルヒートポンプ等の活用**			
ライフサイクルを通じたGHG削減	・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提供。 ・ライフサイクル全体を通じたGHG排出削減に貢献する製品の提供。	17品目（実装ﾍﾞｰｽ）のc-LCA評価（2020年度での貢献量）を実施済み。2030年度での貢献量を再評価中。		

上記の前提条件

・CO2排出量の実績値：低炭素社会実行計画に参画している個社別の排出量がベースであり、製品別、単位操作（分解、蒸留等）別のエネルギー消費量／CO2排出量の内訳は把握されていない。
・脱炭素化のアプローチ：NEDOで取り組まれている代表的プロジェクトの具体的な技術、その効果、進捗について、低炭素社会実行計画報告書に記載されている。

参考

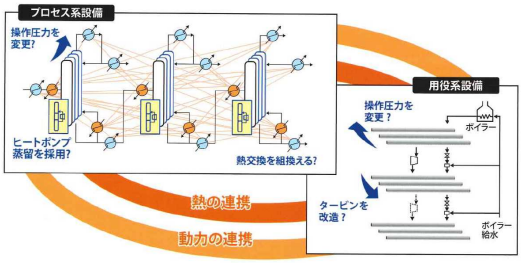
・**日本のエチレン、プロピレン生産の脱炭素化のためには、約700万トンの水素が必要。**（CO_2とH_2を利用してCH_3OHから生産）**64**

化学産業		ヒアリング先	東洋エンジニアリング株式会社

プロセス	石油化学品製造プロセス	CO_2排出量（百万トン）	–	CO_2排出量の日本の総排出量に占める割合	–

要留意事項

・石油化学プラント全体の省エネを提案する手法、新しい方法論としてHERO（Hybrid Energy system Re-Optimization）を開発。プロセス系・用役系を含めた全体として数理最適化問題（用役系を対象とし、莫大なデータ・組み合わせの中から数学的に理論的に最適な解を求める）としてとらえ、省エネ・GHG削減を図る。触媒の活性変化などで物質収支が変わる場合などでも適用化。
・SUPERHIDICは従来からの内部熱交換型の蒸留塔である「HIDiC」のコンセプトを応用した最先端の蒸留システム。サイド熱交換器の利用や塔の濃縮部と回収部の配置等により、**蒸留塔内部熱交換を最適化することで省エネ性を高めている**。商業生産を行っている蒸留塔に適用され既実証済みの技術。
・SUPERHIDICで再生可能エネルギーを使うことができるとCO2削減量も1.5~2倍となることが想定される。**排熱をヒートポンプで温度を上げて使うこともポイントで一般的には180℃程度までであるが、コンプレッサーの構造工夫などにより250℃の実現も見えてきている**。

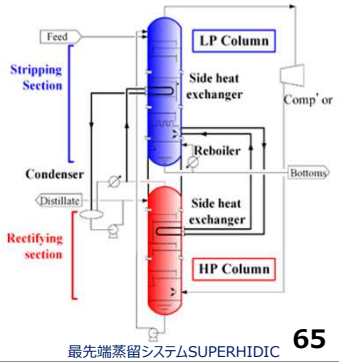


プラント全体の省エネ提案手法 HERO

新プロセス技術

技術名	技術内容	CO_2削減ポテンシャル
プロセス系・用役系最適化技術	・HERO 数理最適化技術を応用したプロセス、用役系の全体最適化による省エネ・GHG削減技術	スチームボイラー熱負荷39.7%減、中圧スチーム外販量473%増、熱媒油加熱量22.8%減(1)
最先端蒸留システム	・SUPERHIDIC：ヒートポンプ方式で最も高い省エネ性能。コンプレッサー構造を工夫することで運転温度250℃も可能性あり。	**省エネ性能50%超** （従来型蒸留塔に対し）

注(1)：改善検討例より



最先端蒸留システムSUPERHIDIC

上記の前提条件

・使用者側の制約：設備投資、既設設備からの入れ替えの可能性

65

FEMS				ヒアリング先	横河ソリューションサービス（株）
プロセス	プロセス制御	CO_2排出量（百万トン）	—	CO_2排出量の日本の総排出量に占める割合	—

要留意事項

・紙パルプの製造をベースに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た連続製造プロセスにおける制御性改善**への取組みと省エネ効果の算定を実施。テストツールを用いたトライアルによって銘柄変更制御の時間短縮の目途が立ち、これによる**エネルギー削減効果として400kL/年程度**のポテンシャルが見込まれることがわかった。
・**生産－動力間の連携制御**においては、抄紙機の断紙位置情報等による蒸気最適化利用の有効性について調査、連携最適化方策の検討を行った。結果、省エネルギー化が可能なこと、蒸気削減量として原油換算で100kL/年程度のポテンシャル 効果が見込まれることがわかった。
・デマンドレスポンスの実現性に向けた調査では、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でのDRポテンシャルがある**ことを確認した。（生産への影響を最小限にするための具体策検討も必要）

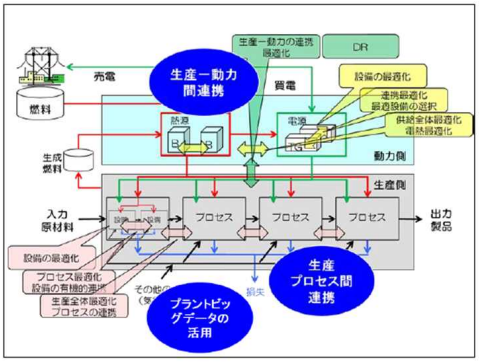
新プロセス技術

技術名	技術内容	CO_2削減ポテンシャル(1)
「生産-動力間」、「生産プロセス間」連携最適化技術	・プロセスデータ収集ツール ・プラントビッグデータ解析ツール ・プロセス最適化ツール ・プロセスシミュレータ	モデル工場において約▲4500kL/年（▲約11000t/年）

注(1)：蒸気削減量として原油換算

ビジネス化に向けた検討

・紙パルプ製造プロセスへの水平展開を図る。
・石油化学プロセスでは原料投入・化学反応・分離を行う連続プロセスが大半。**石油化学コンビナートを構成する大半のプラントに対し本技術は有効であり、石油化学プロセスを中心とした化学業種全体にビジネス展開を図る。**（国内では2,000のプロセスがターゲットとして試算）
・熱自体の低炭素化については、**熱のカスケード利用**であるピンチテクノロジーの活用も想定している。



「生産-動力間」、「生産プロセス間」連携の概念図

66

電力			ヒアリング先	東京電力ホールディングス
プロセス	電化	CO_2排出量（百万トン）	460	CO_2排出量の日本の総排出量に占める割合	38%

要留意事項

・再エネ電源の増加により発電側の脱炭素化が進むため、需要の電化が低炭素化に繋がると考えている。我が国の最終エネルギー消費に占める電化の割合（電化率）は現状25%程度であり、残りの75%は化石燃料直接消費の需要である。この20年の伸びは大きくない。国内では電化率向上は長期的対応に捉えられる傾向。今後、20~30年で電化率70%程度まで引き上げるためには、電化に公益性や付加価値の高さを具備させることが必要。電化の定着には単なる熱源転換ではなく、“生産性向上”、“CO2排出０”等で価値が向上するという考え方が必要。**電動（EV等）や電脳（コンピュータ等）等、付加価値が高まったものにシフトしていくと結果としてエネルギー源が電気になる可能性が高い**。

・電化バリアとしては技術不全、経済性、需要者ニーズ等があげられる。**生産工程の変革（3Dプリンター利用等）、電炉による加熱技術・リサイクル技術の向上、電動（ロボット化）など**が今後の電化技術で期待される。工場の生産設備も蒸気集中熱源式から個別分散電気式とし、設備投資の軽減・平準化、デジタル制御による双方向のコントロール等で、生産工程の柔軟化を図るメーカーも出はじめている。その電気も**地方に再エネ発電所を設置し、電線を使って運び自社工場で利用する方法もある**。再エネの大量導入には、系統安定性を考えると近くに電力需要を作ることが現実的。さらに**素材のシフト（鉄からCFRP）や素材自体を電気から作る（製鉄の電解方式や再エネ電気で作った水素による水素還元方式、化学分野での再エネ水素からの合成など）**技術も研究が始まっている。自家消費が増え、余った電気で水素を作り、その水素を素材系生産に使うことである。

・また、電気を消費することが環境負荷に影響を与える等による社会一般の思い込み(先入観)があるのではないか。再エネ電源の普及に伴い電力消費による環境負荷は減っているのだが、それでも発電に対するイメージは石炭や石油などの火力発電である。電力を消費することは化石燃料の直接消費より環境負荷が大きいと思いこんでいる消費者の心理を排除することなど行動学に基づく視点（啓発・アピールなど）も重要と思われる。

新プロセス技術

技術名	技術内容	備考
電解炉・電気炉	・コンパクトな電解炉実証（EU: ULCOS 米：MIT）	小さい炉を適宜組み合わせることで柔軟に設備対応ができる。電極やトランプエレメントの調整に技術開発の余地あり
水素還元炉・水素合成	・水素による直接還元炉（スウェーデン:SSAB） ・水素から化学原材料の合成	欧米で増加している高炉より小型の天然ガス還元炉(DRI)の還元剤を再エネ由来のCO2フリー水素で行う製鉄技術。 CO2フリー水素と窒素/炭素からアンモニアやエチレンを合成する原油蒸溜代替技術
熱回収	・VRC（Vapor ReCompression）	ボイラー加熱技術ではなく圧縮技術（ヒートポンプ応用）を主とし高い温度で熱回収できる。蒸溜や化学合成の全工程または一部で使える可能性がある。
赤外線加熱・乾燥	・赤外線ヒータによる車の塗装（マツダ）	塗装ブース全体を加温する従来方式に対し、IOTでヒーターを制御し赤外線で被乾燥物を局所乾燥させる技術

上記の前提条件 ・**コスト**：**電気は1~2円/kWh、水素は5円/Nm³以下（電化および水素利用で1.6倍程度の電力需要増加）**

全般				ヒアリング先	TherMAT
プロセス	熱利用	CO_2排出量（百万トン）	―	CO_2排出量の日本の総排出量に占める割合	―

要留意事項

・平成25年10月設立。経産省の未来開拓プロジェクトとして10年かけて進める主旨でチャレンジングな技術開発に取り組むとし、各種の産業，自動車，民生の分野で使われていない熱を減らす，再利用，リサイクルして省エネ化することを目的にスタート（現在はNEDOプロジェクト）。現在は16企業が参加し、**技術開発分野としては蓄熱，遮熱，断熱，熱電変換，排熱発電，ヒートポンプ，熱マネジメント、基盤の８つを対象**としている。
・省エネ及びCO2削減目標値は現在策定中。低温ヒートポンプは、すでに上市され。ドイツに納入実績もあり、排熱利用の空調や食品加工分野での利用拡大が期待される。**熱マネジメント開発（シミュレーションソフト開発）の動きもあり、今後ヒートポンプ導入促進等に役立つ可能性がある**。

新プロセス技術

技術名	技術内容	備考
熱電変換	・熱電材料，熱電モジュールおよび熱電発電システム（古河機械金属）	500-600℃で発電効率15%以上、2W/cm2の発電モジュールを目指す。10,000時間作動で劣化10%以内の耐久性を達成。
	・ガスコジェネ装置のシステム効率向上を可能にする熱電変換技術（日立製作所）	ガスコジェネからの排熱、特に100℃以下の排温水を利用した発電により、発電効率の５%向上を目指す。
	・中高温域での熱電変換を実現する高性能クラスレート焼結体（古河電気工業）	熱に強く安定した熱電変換素子として開発。さらに違う材料を入れることで変換効率を高めるとともに成型技術の向上も検討中。
	・資源量が豊富で環境低負荷材料で高出力密度の熱電モジュール（安永、日本サーモスタット）	350-600℃の中高温での使用に適したシリサイド系材料を用いたモジュールを開発し、1.5W/cm2を実現。
排熱利用	・自動車排熱を冷熱に変換／冷房利用する『吸着式冷凍システム』（マレリ）	自動車の排熱を利用し、エアコンを使わず冷房することを目指す。
	・自動車排熱を回収／冷房利用する小型吸収冷凍機（アイシン精機）	排熱利用した小型吸収冷凍機により冷房を行う。トラックへ搭載するプロトタイプを実現済み。乗用車搭載に向け小型化を目指す。
高温ヒートポンプシステム	・最高200℃加熱を実現する産業用高効率高温ヒートポンプ（前川製作所）	一般的に工場での**100℃以下の排熱をヒートポンプで200℃まで上げることができる**。（従来は160℃程度）
	・環境負荷の低い冷媒を使用した高温熱供給ヒートポンプシステム（三菱重工サーマルシステムズ）	
排熱発電	・高効率小型排熱発電技術（パナソニック）	オーガニックランキンサイクル，排熱発電，200度くらいの温熱を持ち込み発電する。1kW級で発電効率14%が目標。

全般

ヒアリング先 （株）前川製作所

プロセス	熱利用 産業用ヒートポンプ	CO_2排出量 （百万トン）	―	CO_2排出量の日本の 総排出量に占める割合	―

要留意事項

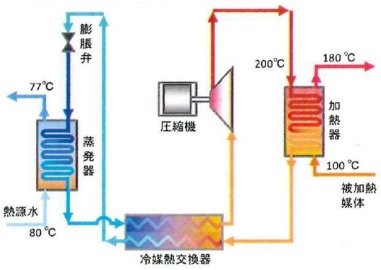
・産業部門における大量の蒸気（蒸気ボイラーの燃料消費量は1.13×10^{12}MJ/年）および排熱の発生に対し、熱利用設備から発生する排熱を熱源として～200℃加熱を実現させることを目的とした産業用高効率ヒートポンプ（最高温度200℃、COP=3.5)を開発、蒸気ボイラーの代替により1.75倍の熱効率での加熱可能なシステムを目指している。現時点で遷臨界システム、冷媒、ターボ圧縮の３つを主とした開発により高COPは達成、2020年代前半の実用化に向けて試作機の性能評価試験、要素技術の最適化等を実施している。
・普及に向けて、産業部門に特化した未利用熱の調査（ボイラーからヒートポンプに置き換えるときにどのような熱需要があるか等）を開始している。産業用の場合、効率やCO2排出低減を考えると一定出力のベースロード運転が基本と考えるが、変動する熱需要への対応として蓄熱やハイブリッド使用（ボイラーとの併用）、デマンドレスポンス対応として部分負荷運転（効率を考えると許容範囲はあり）や複数台の組み合わせON/OFF運転も検討できる可能性はある。一方で、ヒートポンプは温度差が大きい場合の使用（例：室温から200℃）は効率（COP）が低下するため、CO2排出量削減効果が少なくなる。またハード面の制約（バルブ等の部品・材料やコストの検討）もある。さらなる小型化や高温化については不適であると考えられる。

一次試作試験機の概観

新プロセス技術

技術名	技術内容	CO_2削減 ポテンシャル(1)
産業用高効率 高温ヒートポンプ	・オイルフリーターボ圧縮機 ・高温高圧熱交換器 ・冷媒およびシステムの最適化 統合解析シミュレーション技術	▲72.8万kL/年

注(1)：2050年の省エネルギー効果試算（原油換算、国内）



遷臨界ヒートポンプシステム

上記の前提条件

・産業分野を対象としたボイラーをヒートポンプに置き換えるときの熱需要の把握
・試作機の評価、圧縮機・熱交換器等の要素技術の最適化
・非可燃性冷媒を含めた新規冷媒の適用可能性検討

69

全般				ヒアリング先	電力中央研究所
プロセス	電化	CO_2排出量（百万トン）	—	CO_2排出量の日本の総排出量に占める割合	—

要留意事項

・将来のエネルギー需給や、その背景となる社会像を検討する取り組みの一環として、産業部門の電化技術の動向について調査し、電化のポテンシャルを評価。
我が国のエネルギー消費量の多い主要な産業部門を複数抽出し、将来に最大限電化技術が普及した場合に電力消費量に及ぼす影響を概算した。
・本概算とは直接の関連はないが、再エネの大規模導入等を考慮した電源構成については別途議論中。
2050年のCO2排出80%削減に向けての総発電量は1兆2千億kWh程度と想定。
・最大限の電化に向けて政策的な面等、ソフト的な視点での研究も始めていく。

電化ポテンシャル

業種	電力消費量(現状)	電力消費量(試算)	電力消費量増分	概要
紙・パルプ	31	62	31	乾燥工程の一部をヒートポンプに置換
無機化学	11	23	11	直接加熱（焼成）の電化、ボイラ（濃縮等）の置換
有機化学	30	295	265	ヒートポンプによるボイラの置換と原料代替
医薬品	3	15	12	ヒートポンプによるボイラの置換
石油・石炭製品	2	7	5	一部の蒸気駆動が電気駆動に置換
窯業・土石	18	26	8	ガラス溶融の一部が全電気溶融に置換
鉄鋼（高炉）	58	353 *352-396	295 *294-338	水素還元に置換 ＊は電解採取に置換した参考ケース
鉄鋼（電炉）	12	14	2	圧延前加熱の電化
非鉄金属	13	23	10	ボイラの置換、プロセス直接加熱の電化
輸送機械	26	32	5	塗装工程等のボイラの置換、浸炭工程の置換
合計	204	850	646	

我が国の産業部門の電化ポテンシャル（TWh）

注：現状の電力消費量は総合エネルギー統計の2016年値を引用。コストが大きく低減したと仮想し、
最大限電化が進んだ場合の電力消費量を試算。1TWh=10億kWh

（出展）電気新聞 2019年12月18日掲載
電力中央研究所 産業部門の脱炭素化に向けて新たな電化分野はあるか？

70

<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

付録1．ヒアリング結果

付録2．個別技術集

71

文献調査　対象とした文献リスト

	文献名	概要
DECHEMA	Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry	カーボンニュートラルへの移行に向け、欧州の化学産業が直面する機会と課題（経済的制約、投資、研究および革新技術等の要件を含む）が整理されている。本調査技術の実施により、2050年では大幅なCO2排出量削減が可能となる（最大シナリオで210Mt/年）。
IEA	The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities	クリーンで安全なエネルギーとして重要な役割を果たとされる水素について、G20議長国の日本政府の要請によりIEAが作成したレポート。水素の現状分析および将来に向けた開発状況についてまとめられている。
	Exploring Clean Energy pathways, The role of CO2 storage	2060年までを対象に、CO2貯留量が制限されたと仮定した場合の、電力、産業、輸送および建築部門で必要となる追加の対策および技術がまとめられている。
	Innovation gaps in industry	産業におけるCO2排出低減に向け、主に鉄鋼、化学およびセメント分野における主要な革新技術に焦点をあて、現状及び実現に向けたギャップがまとめられている。
経済産業省	平成30年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業（ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査）報告書	イノベーション促進の公的イニシアティブ「ミッション・イノベーション」に関連した調査。調査の一部として，産業の電化，熱利用に対する技術サーベイを実施.
NEDO	平成30年度今後の省エネルギー技術開発等のあり方に関する検討報告書	我が国の省エネルギー型経済社会の構築及び産業競争力の強化に寄与することを目的としたもの。国内外の政策・技術動向を把握しつつ、我が国が中長期的に取り組むべき革新的な省エネルギー技術開発等のあり方に関する検討を行っている。
経済産業省 文部科学省	エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会報告書	エネルギー・環境イノベーション戦略やエネルギー基本計画などで言及される主要革新的技術について、2050 年のあるべき社会像に対する実用化の進捗状況の確認、実用化を阻害している内的・外的要因の抽出、個別技術シーズのポテンシャル評価などを行っている。
European Cement Research Academy	CSI/ECRA-Technology Papers 2017	現在および中長期的な視点で、世界のセメント生産におけるエネルギー効率の向上と温室効果ガスの排出削減に貢献する技術の整理が行われている。

72

産業低炭素化技術について調査対象とした文献リストを示す。

引用した文献等については次の通り。
○DECHEMA
　Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry
○IEA
　・The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities
　・Exploring Clean Energy pathways, The role of CO2 storage
　・Innovation gaps in industry, "https://www.iea.org/topics/innovation/industry/"
○経産省
　・地球温暖化対策における国際機関等連携事業（ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査）報告書
○NEDO
　・今後の省エネルギー技術開発等のあり方に関する検討　報告書
○経産省、文科省
　・エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会　報告書
○European Cement Research Academy
　・CSI/ECRA-Technology Papers 2017

プロセス排出のCO2の割合が高く、またCO2削減難易度も高い素材系産業を中心に調査を実施し、その結果を鉄鋼分野（P73）、化学分野（P74）、セメント分野（P75）に整理している。また、該当する個別事例の一部についてはP76以降で紹介をしている。

■鉄鋼分野・主要プロセス

分野	プロセスまたは製品	項目	低炭素技術 内容	事例	技術成熟度	LCA（エネルギー需要）	CO2削減コスト	CO2削減ポテンシャル（原単位低減）
鉄鋼	高炉	石炭ベースの新しい製鉄生産プロセス フェロコークス技術	・Hisarna フェロコークス中に含まれる金属鉄の触媒作用を活用し高炉内の還元効率を高める。 パイロット工場を大規模に拡張中		TRL6*3			約10%超
		直接還元製鉄の天然ガスへの水素の混合	・SALCOS 水素ベースの還元を部分的に実施。天然ガス供給プロセス設計を利用し水素の割合を徐々に増やす。パイロット運転。				400～1100USD/t *4	革新技術最大導入シナリオ(2050) *2
			・COURSE50 還元剤として使用される水素（所内）の割合を高める。2030年代に本格デモを計画	P76	2030年代頃導入*2			
			・SuperCOURSE50 外部水素を利用し、高炉内水素還元比率アップ		2030年代以降導入開始*2			
		水素による直接還元	・Hybrit SSAB、LKAB、Vattenfallのジョイントベンチャープロジェクト パイロットプラントは2020年までにスウェーデンで稼働予定	P76	TRL5*3*5			低位ケース:約42% 中位ケース:約64% 高位ケース:約85%
		電気を直接利用した還元	・マサチューセッツ工科大学、Boston Metal 様々な金属生産のための溶融酸化物電解プロセスを開発	P77	TRL4*5			
			・∑iderwin、ArcelorMittal 欧州連合によって資金提供された研究プロジェクト。電解採取を使用して鉄鋼を生産					超革新技術開発シナリオ(2050) *2
	CCS	製鉄所への一般的な適用 高炉ガスからのCO2の捕捉	・STEPWISE 燃焼前吸着CO2除去プロセス（SEWGS)を使用して高炉ガスからCO2を捕捉		TRL5*3			
		石油回収を強化するためのCO2回収による天然ガスベースのDRI生産	・天然ガスベースのDRIと統合された最初の商用CCUSプロジェクト 2016年にアラブ首長国連邦で稼働		TRL8*3			
	CCU	スチール製WAGの発酵によるエタノール生産	・2018年中国で最初の商業実証プラントにより鉄製WAGをエタノールに変換 ・Steelanol（バイオエタノール製造会社）は 2018年にベルギーでパイロットプラントの建設を開始		TRL6*3			
		鋼製WAGからの化学物質生産	・Carbon2Chem、Steelanol、Vulcanolプロジェクト、および日本の三井化学プロジェクト 鉄鋼生産および発電からのCO2/COを活用しメタノールなどの化学物質を生産。	P78 P79	TRL8*3			
		高炉ガスからのCOを利用したエタノールを生成	・ArcelorMittal、LanzatechによるSteelanolプロジェクト 工場からの排煙を使用してパイロット規模で実証、2012年に5 Mt統合プラントのエタノール生産性と技術の拡大を図る。	P80	TRL5–7*1			
	その他	・副生ガス効率利用 ・排エネ回収 ・廃棄物利用	・ガスホルダー、ガスタービン複合発電 ・リジェネバーナー ・廃棄物資源（廃プラ・タイヤ、ダスト・スラッジ）、バイオマス利用		既存技術*2			約20%
		既存の先端小エネルギー技術の最大限導入	・コークス乾式消火設備技術（CDQ） ・高炉炉頂圧発電機（TRT）					先端省エネルギー技術最大導入シナリオ（2050) *2

*1：DECHEMA 「Technology study Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry」より参照
*2：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」より参照。数値は2050年時点でのBAU排出量からの世界での削減ポテンシャルの割合。粗鋼生産増加によるCO2排出増分も考慮。
日本鉄鋼連盟作成の「長期温暖化対策シナリオにおけるCO2排出量の推移」をもとにポテンシャル値を導出。
*3：IEA「Innovation gaps in industry」より参照
*4：IEA「The Future of Hydrogen」より参照
*5：IEA「Exploring Clean Energy pathways The role of CO2 storage」より参照

73

鉄鋼分野は各プロセス単位で整理した。

個別技術の実現に向け、①技術成熟度、②LCA、③CO2削減効果、④CO2削減ポテンシャルの４つの観点で整理した。
各技術の引用先は表下に記載している。表現については引用先の記載に準じている。

なお、技術成熟度TRL（Technology Readiness Levels, TRLs)は、アメリカ航空宇宙局（NASA）によって考案されたもので、NASA、米国の国防総省、エネルギー省等の技術開発事業や欧米の政府機関や企業等の研究開発事業において、開発事業の技術評価・管理ツールとして幅広く活用されている（環境省Webページより）。定義については次の通り（EUの定義Horizon 2020Webページより）

TRL 1 – basic principles observed
TRL 2 – technology concept formulated
TRL 3 – experimental proof of concept
TRL 4 – technology validated in lab
TRL 5 – technology validated in relevant environment
(industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
TRL 6 – technology demonstrated in relevant environment
(industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
TRL 7 – system prototype demonstration in operational environment
TRL 8 – system complete and qualified
TRL 9 – actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)

■化学分野・主要５製品

分野	プロセスまたは製品	項 目	低炭素技術 内 容	事例	技術成熟度	LCA（エネルギー需要）	CO2削減コスト	CO2削減ポテンシャル（原単位低減）
化学	メタノール製造	再エネ水素、電力からのメタノール製造	・再エネ水素の製造（電解）およびCO2回収 炭素源としてのCO2の利用、再エネ電力による合成 ・2011年、アイスランドでパイロット規模のジョージオラ再生可能メタノール工場が稼働	P81	TRL7	39.7GJ/tメタノール	約600€/tCO2(2035) →約180€/tCO2(2050)	約150% (1.49→-0.67tCO2/tメタノール)
		バイオメタノールの製造	・バイオマス原料のガス化（COやH2） CO／H2／CO2の合成 ・2012年、スウェーデンのVärmlandsMetanolABが最初の商業規模のバイオメタノールプラントを発表 ・メタノールは、バイオガス（BioMCN、2019）および都市固形廃棄物（Enerkem、2019）からも生産		TRL6-7	14.6 GJ /tメタノール	3.1～7.8kgCO2/€	24% (例：0.84→0.56tCO2/tメタノール)
	エチレン製造	再エネ水素からのエチレン製造	・再エネ水素を原料とするメタノール製造およびオレフィンへの合成（MTO） ・商業運用は中国、ヨーロッパではMTOプラントは運用なし		TRL8-9	95.5GJ/tHVC	1500～11500€/tCO2 (2030～)	約350% (0.76→-1.89tCO2/tエチレン)
		バイオエチレンの製造	・バイオエタノールの製造 ・バイオエタノールの脱水によるエチレン製造 ・2014年、Axens、Total、およびIFP Energies Nouvellesは、ポリマーグレードのバイオエチレンを製造するために、技術ブランド名Atolでバイオエタノールを脱水してバイオエチレンを製造する技術を発表		TRL8-9	85.5GJ / tエチレン	1.1～1.3kgCO2/€	約170% (1.15→-0.8tCO2/tエチレン)
	プロピレン製造	再エネ水素からのプロピレン製造	・再エネ水素を原料とするメタノール製造およびオレフィンへの合成（MTO）		TRL8-9	95.5GJ/tHVC	1500～11500€/tCO2 (2030～)	約350% (0.76→-1.89tCO2/tプロピレン)
		バイオプロピレンの製造	・バイオエチレンを原料とし、バイオメタノール→バイオエチレンからの合成		TRL6-7	95.5GJ/tHVC	0.4～0.45kgCO2/€	
	BTX製造	再エネ水素からのBTX製造	再エネ水素を原料とするメタノール製造および芳香族化合物プロセス（MTA）		TRL7	176 GJ/tBTX	1500～11500€/tCO2 (2030～)	約410% (0.55→-1.7tCO2/tBTX)
		バイオマスからのBTX製造	・バイオマスのガス化 ・メタノール合成→芳香族化合物		TRL6-7	72GJ/tBTX	～0.46kgCO2/€	
	アンモニア製造	再エネ水素、電力からのアンモニア製造	・原料としての再エネ水素の製造（電解） ・合成時の再エネ電力使用（コンプレッサ）		TRL7	45.1GJ/tアンモニア	490～570€/tCO2(2030) →60～90€/tCO2(2050)	約93% (1.83→0.12tCO2/tアンモニア)

*：各数値はDECHEMA 「Technology study Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry」より参照

74

化学分野は主要５製品（メタノール、エチレン、プロピレン、BTX、アンモニア）で整理した。

■セメント分野・主要プロセス

分野	プロセスまたは製品	項 目	低炭素技術 内 容	事例	技術成熟度	LCA（エネルギー需要）	CO2削減コスト	CO2削減ポテンシャル（原単位低減）
セメント	製造プロセス（焼成工程）	セメント生産の熱効率	・予熱装置(プレヒータ)を有する乾式キルン（SP、NSP）への転換（国内では実施済み）		既存技術*2	3,510MJ/tcli(2014) 3,300～3,400MJ/tcli(2030) 3,150～3,250MJ/tcli(2050) *2		
			・セメントキルン内温度高精度計測システム	P82				
		代替燃料	・廃棄物の利用 ・バイオマスの利用					
	製造プロセス（粉砕工程）	セメント生産の電力効率	・垂直ローラーミル（VRM）、高圧粉砕ロール（HPGR）への移行 ・微細研削アプリケーションとの組合せ、粉砕工程の運転/停止の容易化		既存技術*2	電気：104 kWh/tcem(2014) →約100kWh/tcem(2030) →90～95 kWh/tcem(2050) *2		
	その他	クリンカー代替・低減	・ペライトカルシウムスルホアルミネート（BCSA）クリンカー ・小規模バッチ生産を限定的に実施（中国とEUの一部）		TRL7*1			
			・スルホアルミン酸カルシウム（CSA）クリンカー ・クリンカープロセスCO2強度を44%削減。主に中国で商業生産					
			高炉水砕スラグ（GBFS）			熱：最大1590MJ/tcem減 電気：最大10kWh/tcem増 *2	11.7€/tcem減～ 1.1€/tcem増*2	390kgCO2/tcem減*2
			顆粒状製品高炉スラグ（GBFS）					
			フライアッシュ（FA）			熱：0～360MJ/tcem減 電気：2～15kWh/tcem減 *2	0.3～0.6€/t cem減*2	0～90kgCO2/tcem減*2
			天然ポゾラン			熱：最大360MJ/tcem減 電気：最大3kWh/tcem減 *2	最大4.1€/t cem減*2	最大90kgCO2/tcem減*2
			石灰石					
		セメント代替	ケイ酸カルシウムの炭酸化（CACS）に基づくセメント					
			水和ケイ酸カルシウム（PHCS）に基づくセメント					
			ペライトカルシウムスルホアルミネート（BCSA）クリンカーに基づくセメント					
			ケイ酸マグネシウム（MOMS）に由来する酸化マグネシウムに基づくセメント					
			石灰石焼成粘土セメント		TRL9*1			
		コンクリート養生	・産業副産物を結合材としたセメントレスコンクリート ・普通ポルトランドセメント使用せず、製造工程省略・省エネ効果	P83				
			・CO2 の炭酸塩化を利用したコンクリート製品（SUICOM）	P84				
		産業廃棄物の建築材料利用	・アルカリ性産業廃棄物のCO2反応による骨材（建築材料）利用	P85				
	CCUS	化学吸収による燃焼後のCO2回収	・アミンベースの吸着剤による化学吸収試験に成功(Norcem社) ・セメント工場からのCO2をNaHCO3等へ変換(スカイオニック社) ・CEMCAPプロジェクトは、ヨーロッパのセメント産業における大規模なCO2回収の基礎を築くことを目的。		TRL8*1	熱：1,000～3,500MJ/tcli増 電気：50～90kWh/tcli増加 *2	10～40€/tcem*2	0～740kgCO2/tcli減*2
		カルシウムルーブプロセス	・不活性化された吸着剤をクリンカー燃焼プロセスに利用 ロータリールーブキルンの予熱器に組み込む			熱：700～1,400MJ/tcli増加 電気：不明 *2		760～800kgCO2/tcli減*2
		セメントキルン酸素燃焼プロセス	・ECRA CCSプロジェクト、CEMCAPプロジェクト ・酸素燃料クリンカー燃焼プロセス設計、品質・コストの影響調査			熱：200MJ/tcli減～250MJ/tcli増 電気：117～180kWh/tcli増 *2	9～16.5€/tcem増*2	530～835kgCO2/tcli減*2
		燃焼前の酸素燃料の補足	・FLSmidth、Lafarge、Air Liquideにより、デンマークのDaniaにあるセメントか焼炉で、酸素燃料の捕捉のパイロットテストが成功。		TRL5*1			
		ミネラル炭酸化	CaCO3やMgCO3としての建材利用					
		微細藻類生産のCO2再利用	・セメントキルンからの煙道ガスを使用したパイロットプロジェクト					

*1：IEA「Innovation gaps in industry」より参照
*2：European Cement Research Academy「CSI/ECRA-Technology Papers 2017」より参照

75

セメント分野はプロセス単位で整理した。

鉄鋼　水素還元

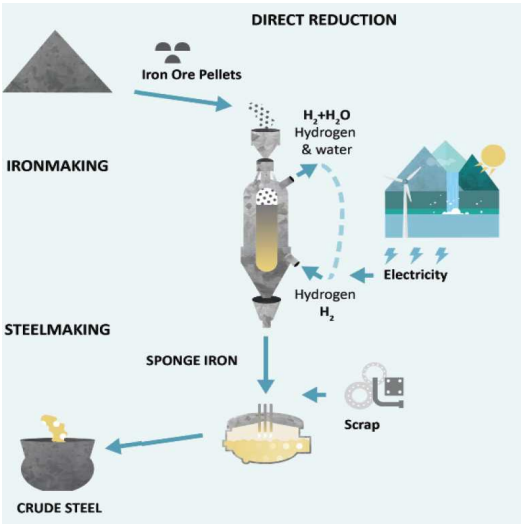
□ 日本のCOURSE50

- 部分的に水素を混合した還元プロセスとCO2の分離・回収
  2030年頃に技術確立，2050年までの普及を目指す

□ 直接水素還元
  スウェーデン　HYBRIT

- 還元鉄はスポンジ状のため，さらに電炉プロセスを経た生産プロセスが必要．

技術成熟度	LCA エネルギー需要	CO2削減コスト	CO2削減ポテンシャル
2030導入～TRL5		400～1100USD/t	低位ケース:約42% 中位ケース:約64% 高位ケース:約85%



SAAB社　HYBRIT紹介Webページ
https://www.ssab.com/company/sustainability/sustainable-operations/hybrit

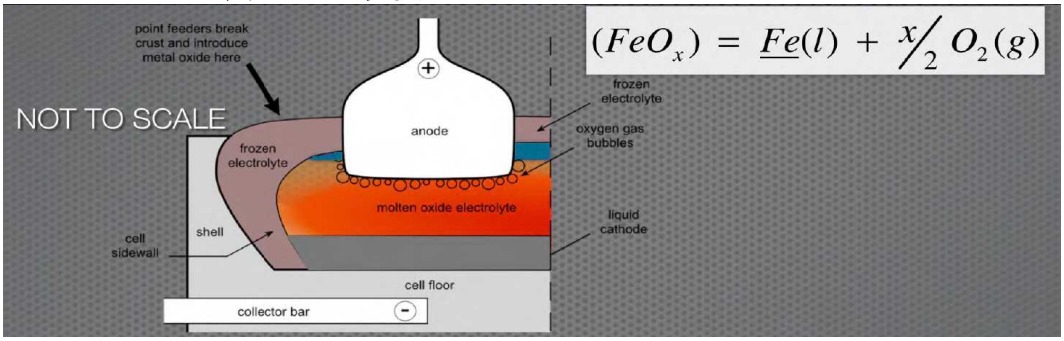
76

鉄鋼　電気溶融還元

技術成熟度	LCA エネルギー需要	CO2削減 コスト	CO2削減 ポテンシャル
TRL4			低位ケース:約42% 中位ケース:約64% 高位ケース:約85%

□ 電気溶融還元

● マサチューセッツ工科大学
酸化鉄をそのまま鉄に還元するプロセス
ニッケル，クロム合金，マグネシウム合金，およびチタン製造
現状の製造可能規模は1トン以下



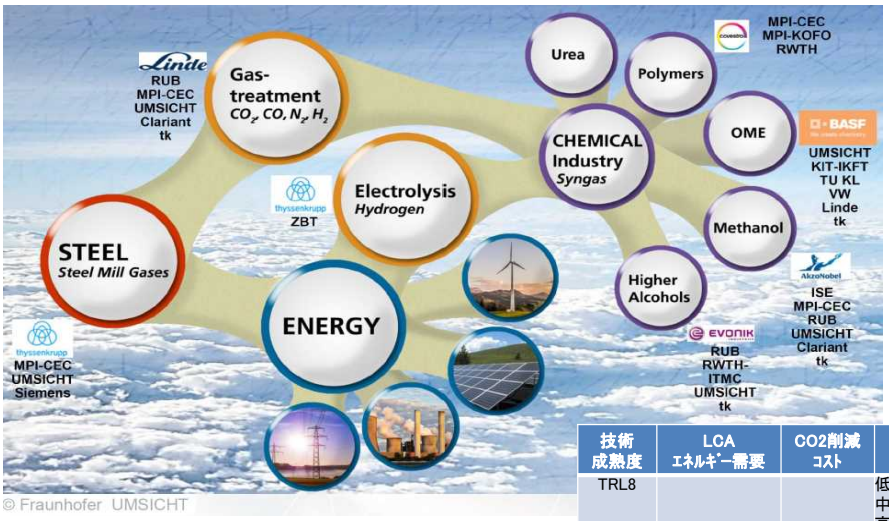
https://www.iea.org/media/workshops/2017/ieaglobalironsteeltechnologyroadmap/ISTRM_Session3_Sadoway_201117.pdf

77

CO2利用　製鉄CO2利用化成品製造　Carbon2Chem

□ 原料回収から製品化までのコンソーシャム形成（ドイツ）

- 尿素，ポリマー，OME，メタノール，高級アルコールなどを生産する構想



技術 成熟度	LCA ｴﾈﾙｷﾞｰ需要	CO2削減 ｺｽﾄ	CO2削減 ﾎﾟﾃﾝｼｬﾙ
TRL8			低位ケース:約42% 中位ケース:約64% 高位ケース:約85%

Source: MPI-CECプレゼン資料

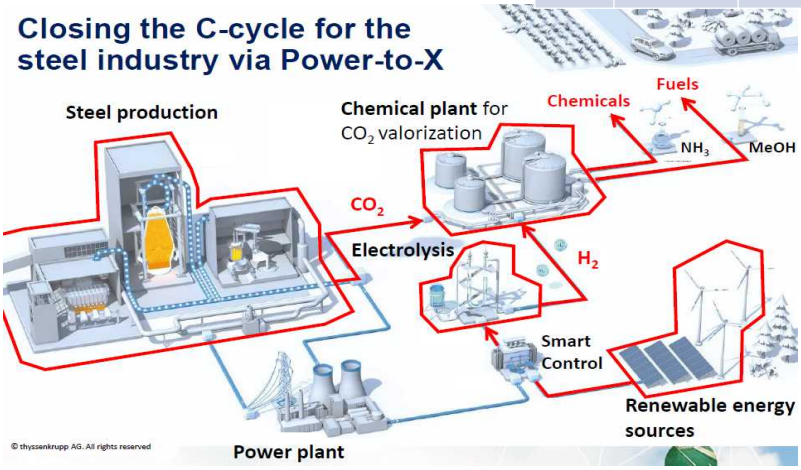
78

製鉄CO2からの化成品製造　Carbon2Chem

□ 製鉄プラントからの回収CO2が原料，At Scaleを指向

- 燃料，化成品の生産を計画
- 電解水素を利用

技術成熟度	LCA エネルギー需要	CO2削減 コスト	CO2削減 ポテンシャル
TRL8			低位ケース:約42% 中位ケース:約64% 高位ケース:約85%



(source) MPIプレゼン資料

79

CO2利用　製鉄CO2からの燃料製造

□ Lanzatech社

- 無機栄養細菌である古細菌(acetogen)を利用したガス発酵
- 首鋼製鉄　唐山市　曹妃甸地区にある製鉄所の排気利用
- 燃料製造（年産45,000トン）

技術成熟度	LCA エネルギー需要	CO2削減コスト	CO2削減ポテンシャル
TRL5−7			低位ケース:約42% 中位ケース:約64% 高位ケース:約85%

(source) Lanzatech社， Shougang Steel mill in Caofeidian, China

80

CO2利用　メタノール生産　George Olah Renewable Methanol Plant

□ Carbon Recycling International社（アイスランド）

- 地熱蒸気の随伴CO2分離　5,500tonCO2/yrを回収利用
- 安価な電力を利用した電解水素
- CO2＋水素の直接反応　メタノール生成　5,000kL/yr以上

技術成熟度	LCA エネルギー需要	CO2削減コスト	CO2削減ポテンシャル
TRL7	39.7GJ/tメタノール	約600€/tCO2(2035) →約180€/tCO2(2050(1.49→−0.67tCO2/tメタノール)	約150%

(source) CRI

81

窯業（セメント） NEDO戦略省エネプロ

ロセメントキルン内高精度温度計測

戦略的省エネルギー技術革新プログラム 平成27年度第1回公募 テーマ概略

テーマ名：セメントキルン内温度高精度計測システムの開発
助成事業者：三菱マテリアル(株)、(株)チノー
共同研究・委託先：岐阜大学

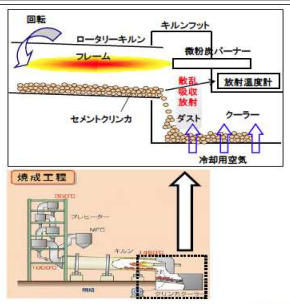
開発フェーズ
実用化2年

重要技術
製造プロセス省エネ化技術

対象技術の背景
我が国のセメント製造業は世界的には最も省エネが進んでいるが、地球温暖化に対する社会的要請からさらなる省エネが求められている。既存技術による省エネはほぼ限界に達しているため、新たな省エネ技術の開発が必要である。

目的
鉱化剤使用によるセメントクリンカの省エネ焼成を確実なものとするため、高ダスト濃度環境下のセメントキルン内で温度計測できる高精度計測システムの装置化を行う。

現状の課題
放射温度計を用いた計測において、キルン内ダストの影響を除去する手法の高度化・実用化に向け、次の課題に取り組む。①温度算出モデルの高精度化、②高精度温度計測システムの開発、③実機での耐久性の検証



セメントキルンにおける現行の温度測定装置

省エネ効果量	製品化から3年後	2030年
	2.4万kL	8.2万kL

省エネルギー開発のポイント
セメントキルン内の温度を高精度に計測する技術の開発であり、これにより鉱化剤使用による焼成温度低減効果を最大にして省エネルギーを達成するものである。

82

窯業（セメント） NEDO戦略省エネプロ

ロセメントレスコンクリート

戦略的省エネルギー技術革新プログラム　平成29年度第1回公募　テーマ概略

テーマ名：産業副産物を結合材としたセメントレスコンクリートの開発
助成事業者：株式会社大林組，株式会社マキノ
共同研究・委託先：名古屋工業大学，北海道大学，大阪府立大学

開発フェーズ
実用化3年＋実証2年

重要技術
製造プロセス省エネ化技術

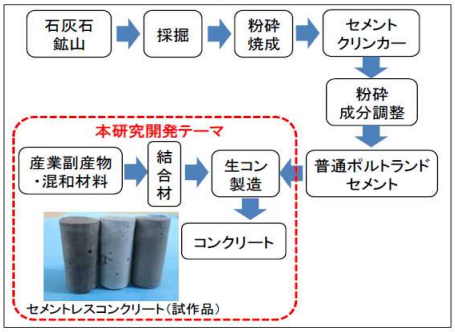
予算
1億円～3億円未満

対象技術の背景
構造物の多くは、コンクリートを用いて建造される。コンクリートの結合材は、石灰岩を加工して製造される普通ポルトランドセメントが用いられている。その製造工程には高温処理など、エネルギーが大量消費され、その低減が課題となっている。

テーマの目的・概要
産業副産物を結合材として用い、普通ポルトランドセメントを用いない新たなコンクリートの製造技術を開発する。これにより、普通ポルトランドセメントの製造工程などを省略することができるため、高い省エネルギー効果が期待できる。

省エネ効果量（原油換算）（国内）	製品化から3年後	2030年
	1.1万kL	5.4万kL

見込まれる成果の説明
【必須】開発品を市場導入することによって90%の省エネ効果が見込まれる。
【その他】シェアとして見込んでいるのは対象マーケットの5%程度である。

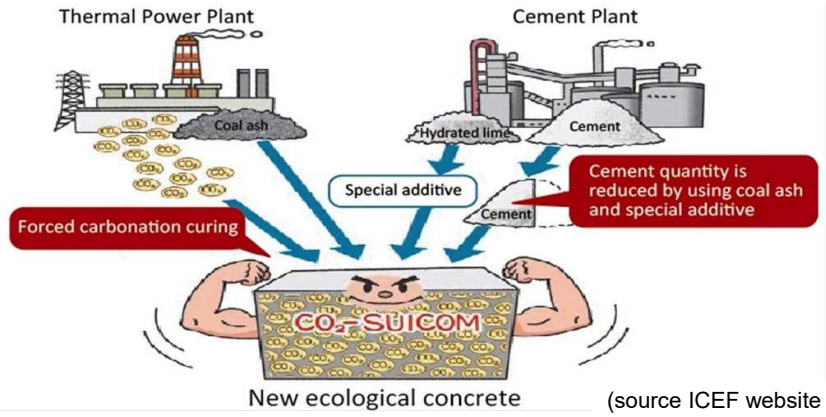


省エネルギー開発のポイント
産業副産物を主材とした普通ポルトランドセメントを用いない「セメントレスコンクリート」を開発し、省エネルギー化を実現するものである。

83

CO2利用　コンクリート養生

- CO_2-SUICOM is an abbreviation of CO_2-Storage Under Infrastructure by COncrete Materials
- It is the world's first concrete product that makes CO_2 emission from the production of cement below zero by utilizing coal ash and special additive as substitute of cement and absorbing CO_2 from power plant



(source ICEF website – IEEJ

84

CO2利用　建築材料　GreenOre Project

□ 採掘残滓のアルカリ性産業廃棄物（中国　内モンゴル）

- 今までは野積みだったが，環境規制強化
- CO2と反応させて骨材（建築材料）として利用

(source) GreenOre project: Baotou, China

85

参考文献(1)

Webページのアドレスはいずれも2020年3月時点

〇BASF Webページ　https://www.basf.com/jp/ja.html
〇CO2フリー水素WG資料　2017年10月 資源エネルギー庁
〇COURSE50の概要　https://www.jisf.or.jp/course50/tecnology03/#point3
〇CSI/ECRA-Technology Papers 2017　2017年3月　European Cement Research Academy
〇Electrification in the Dutch Process Industry　2017年2月　RVO
〇Exploring Clean Energy pathways, The role of CO2 storage　2019年7月 IEA
〇Industrial Heat Decarbonization Roadmap　2019年12月　ICEF
〇Innovation gaps in industry　IEA　https://www.iea.org/topics/innovation/industry/
〇Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry　DECHEMA
〇NEDOが取り組む未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発　2019年1月
　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）
〇Nordregio Webページ
　https://www.nordregio.org/nordregio-magazine/issues/industrial-symbiosis/industrial-symbiosis-in-kalundborg/
〇Renewable energy options for industrial process heat　2019年11月 Australia ARENA
〇Siemens Webページ　https://new.siemens.com/global/en/company/stories/industry/any-color-desired.html
〇Symbiosis Center Denmark　Webページ　https://symbiosecenter.dk/en/
〇Synbiosis Webページ　http://www.symbiosis.dk/en/
〇The Future of Hydrogen, Seizing today’s opportunities　2019年6月 IEA
〇The Industrial Green Game　National Academy Press　1997年
〇US National Electrification Assessment　2018年4月　EPRI
〇Washington Industrial Waste Coordination (Industrial Symbiosis) Program Recommendations　2019年
　Washington State Department of Commerce

参考文献(2)

Webページのアドレスはいずれも2020年3月時点

〇あるべき姿具現化SWG　2018年3月　日本化学工業協会
〇エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会　報告書　2019年6月　経産省、文科省
〇高度EMSによる生産最適化技術の開発に関する調査検討成果報告書　2017年3月
　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）、
　横河ソリューションサービス株式会社、横河電機株式会社
〇今後の省エネルギー技術開発等のあり方に関する検討　報告書　2018年12月
　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）、みずほ情報総研、エネルギー総合工学研究所
〇産業の発展に貢献するエレクトロヒート技術（第2版）　2019年3月　一般社団法人日本エレクトロヒートセンター
〇産業分野の排熱実態調査　2019年3月　未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合
〇産業用ヒートポンプ活用ガイド　一般社団法人日本エレクトロヒートセンター
〇製造業におけるエネルギー効率向上へのシステムアプローチ　2016年3月日本電気計測器工業会(JEMIMA)
〇石油化学工業協会 Webページ　https://www.jpca.or.jp/
〇セメント協会 Webページ　http://www.jcassoc.or.jp/index.html
〇地球温暖化対策における国際機関等連携事業（ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査）報告書
　2019年3月　経産省、エネルギー総合工学研究所
〇電気新聞Web版　2019年10月18日
〇未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発の産業分野等への適用促進に関する検討　報告書　2017年3月
　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）