

地域連携・産業連携で挑む カーボン・インディペンデンスの実現

東京大学 環境安全研究センター 教授
化学工学会 地域連携CN推進委員会委員長

辻 佳子

E-mail: tsuji@esc.u-tokyo.ac.jp

Tel & Fax 03-5841-0909



辻 佳子

Yoshiko Tsuji



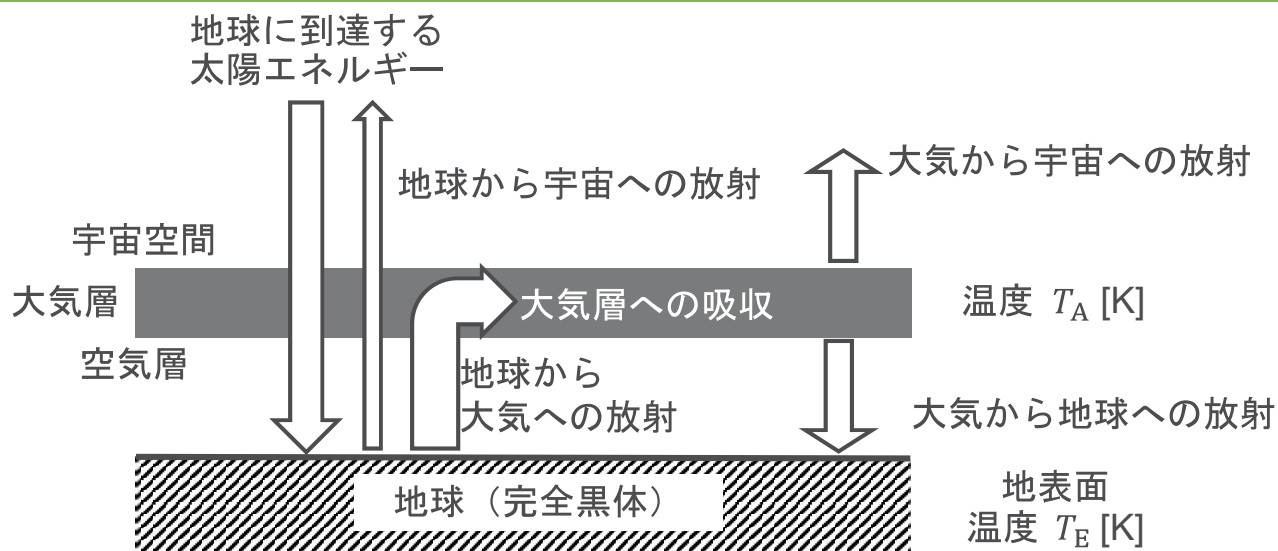
経歴

1990年	東京大学大学院工学系研究科工業化学専攻修士課程修了
同年	株式会社東芝研究開発センター
1996年	California Institute of Technology
1999年	東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻
2006年	博士（工学）（東京大学 大学院工学系研究科化学システム工学専攻）
2011年	東京大学環境安全研究センター（大学院工学系研究科化学システム工学専攻 兼任）
2017年	同上 環境安全研究センター教授（同上）、現在に至る
2019-2024年	同上 環境安全研究センター長
2023年	同上 エネルギー環境イノベーション実現社会連携講座 特任教授 現在に 至る

社会貢献

日本学術会議 連携会員（第24期、第25期、26期）
日本工学会 理事
化学工学会 地域連携カーボンニュートラル推進委員会 委員長
周南コンビナート脱炭素推進協議会 副会長
京葉臨海コンビナート カーボンニュートラル推進協議会 有識者
苫小牧CCUS・ゼロカーボン推進協議会 ゼロカーボングランドデザイン検討部会 有識者

地球温暖化

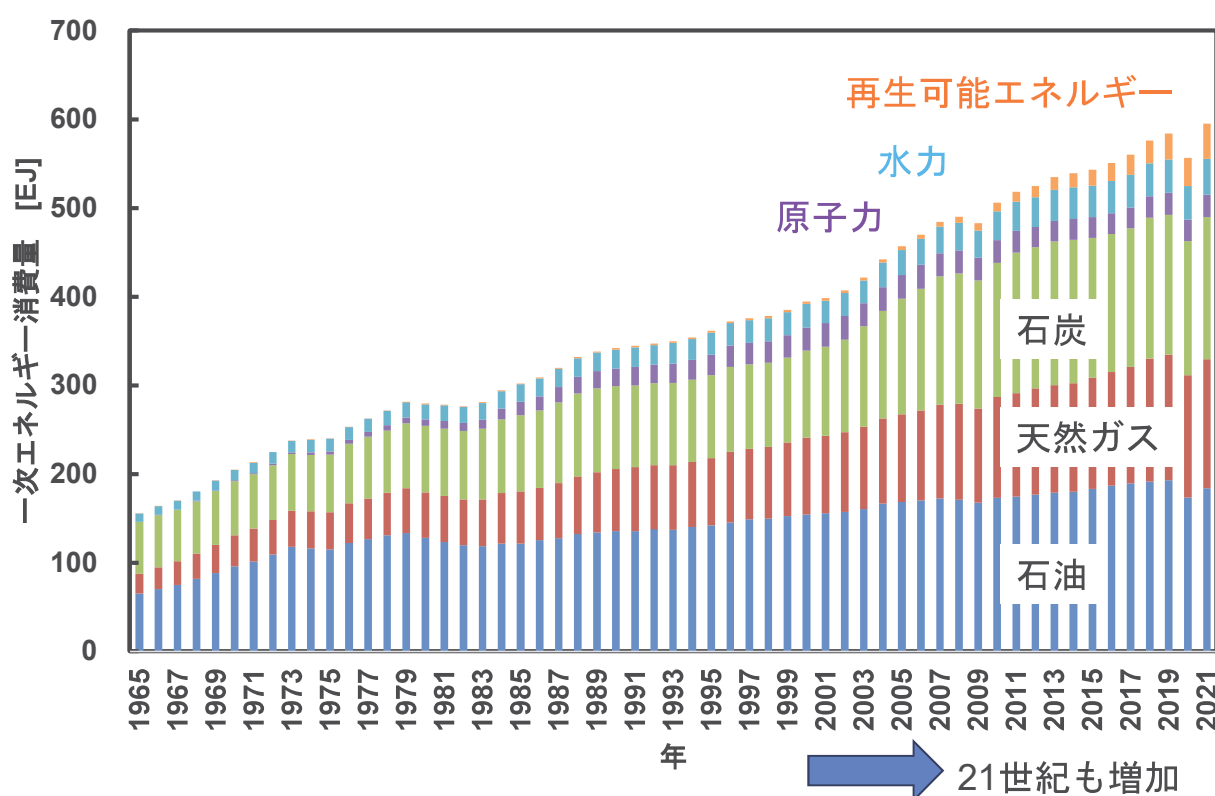


水蒸気、二酸化炭素、メタンなどの温室効果ガスがなければ T_E はマイナス19℃
地球温暖化が進むと・・・

- ・海面が最大82センチ上昇する
- ・現在絶滅の危機にさらされている生物が更に絶滅に近づく
- ・マラリヤなどの感染症の発生範囲が広がる
- ・砂漠化、台風などによる洪水などの被害拡大
- ・病虫害の増加で穀物生産量が減り、深刻な食糧難

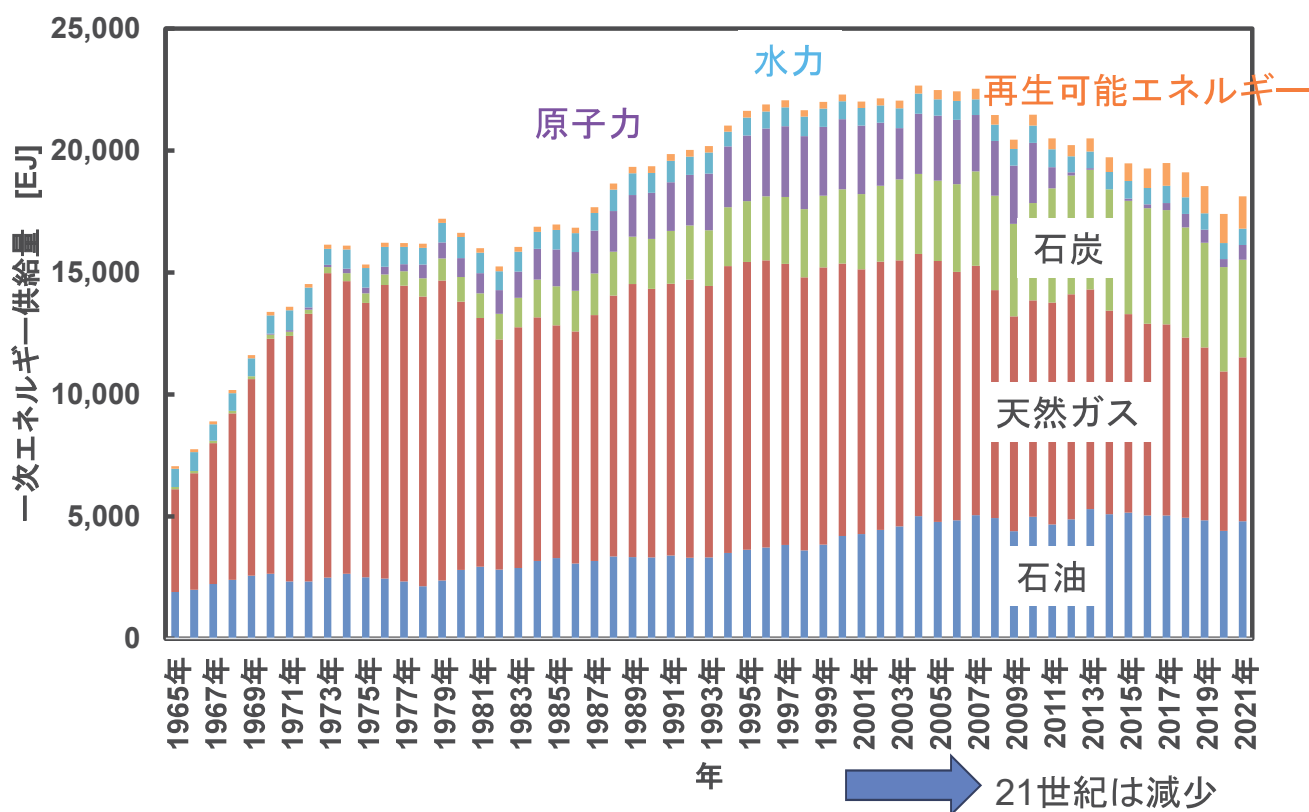
世界の一次エネルギー消費量の推移

資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」



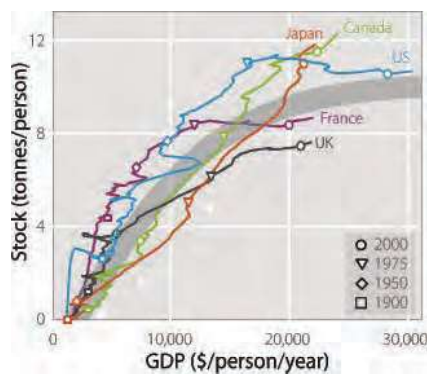
日本の一次エネルギー供給実績の推移

資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」



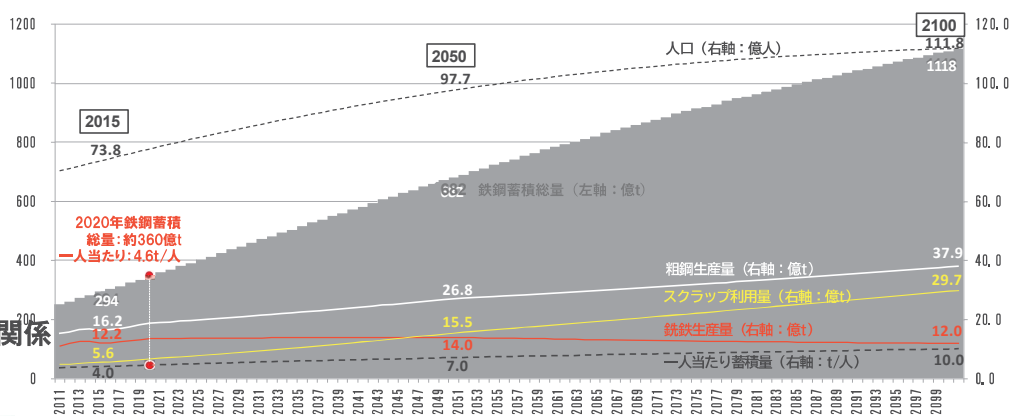
ものづくり -世界の鉄鋼-

<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2/r02/kakuho/sangyo/pdf/2020-k3-gaikyo-j.pdf>



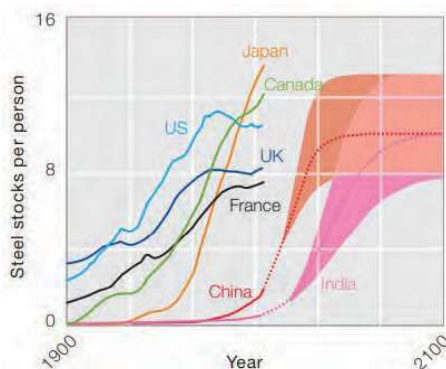
一人当たりGDPと鉄鋼蓄積との関係

出典：Muller, et.al, "Patterns of Iron Use in Societal Evolution", Environ. Sci. Technol. 2011, 45



将来の鉄鋼需給想定

- ◆ 鉄鋼蓄積拡大に應えるため、少なくとも今世紀中は現状並みのプライマリー鉄の供給が不可欠
- ◆ 鉄鋼蓄積拡大に伴いスクラップ発生量が増加し、今世紀半ばにはプライマリー生産量と逆転

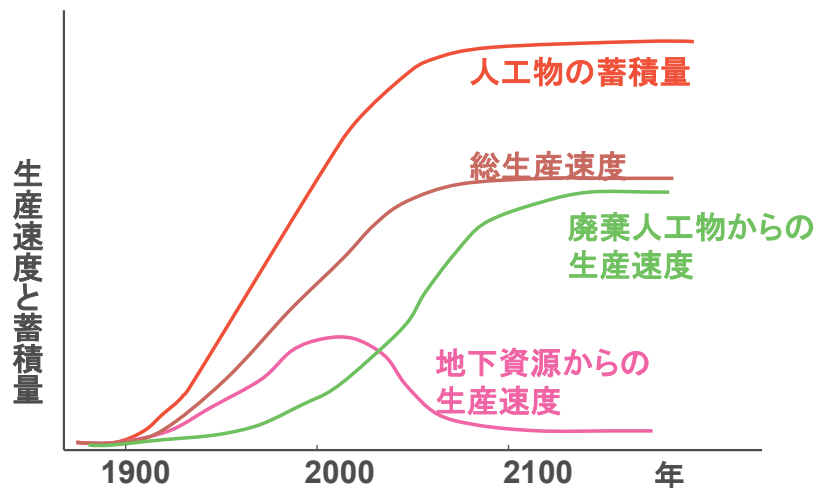
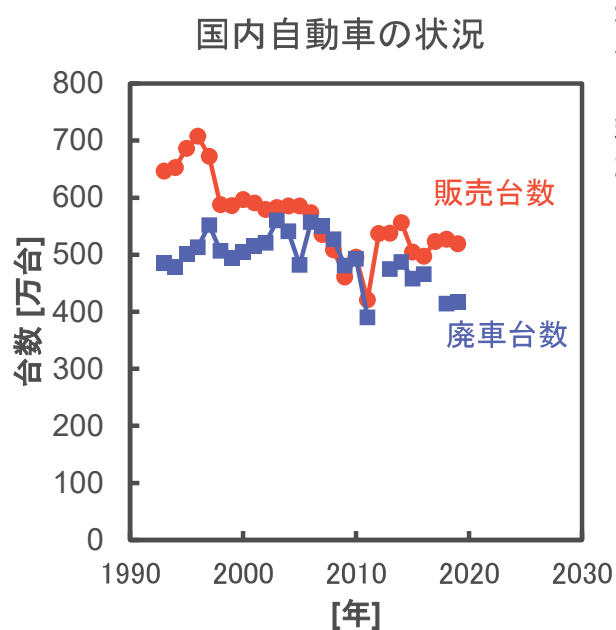


中国・インドの将来想定

出典：“Sustainable steel: at the core of a green economy”, World Steel Association, 2012

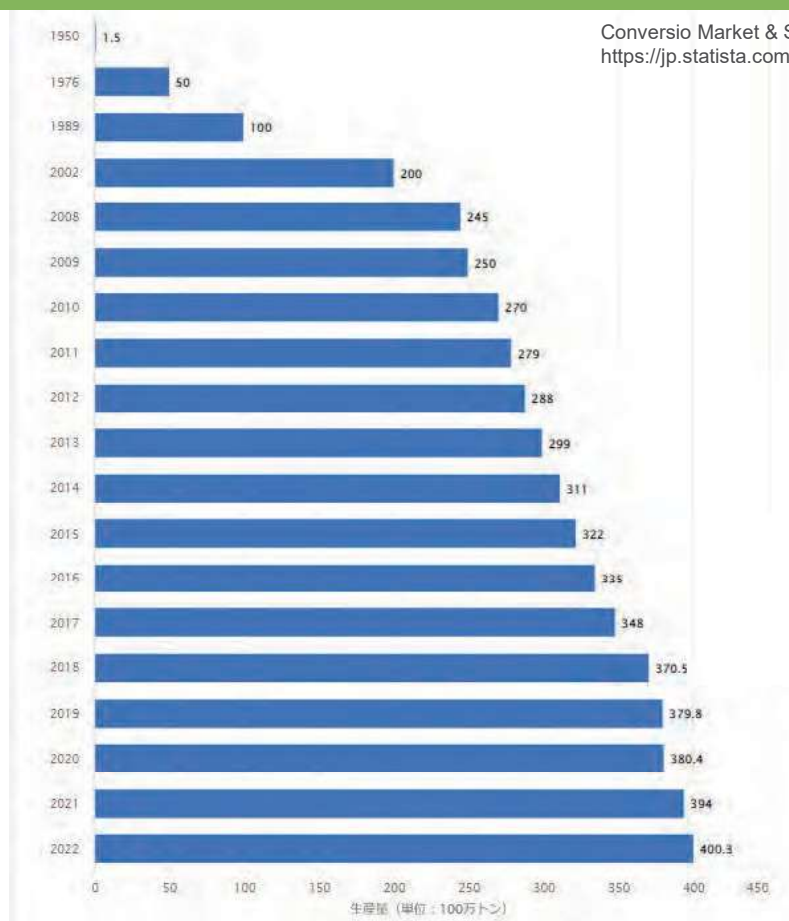
日本の自動車産業の状況

元東大総長・三菱総研 小宮山氏最終講義資料より



飽和している
→循環社会へ移行可能

ものづくり —世界のプラスチック—



Conversio Market & Strategy; nova-Institute; PlasticsEurope
<https://jp.statista.com/statistics/1357364/global-production-of-plastics-since-1950>

日本のプラスチック生産の状況

<https://www.env.go.jp/content/900515691.pdf>



飽和している

→循環社会へ移行可能

現状はサーマルリサイクル。物質循環していない。

カーボンニュートラル施策



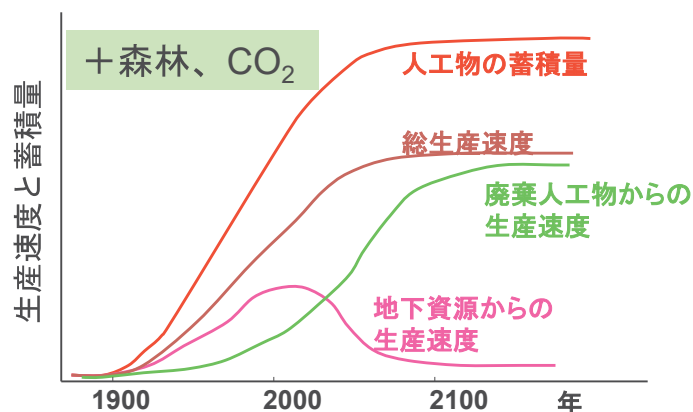
□ エネルギー



化石燃料からの脱却→脱炭素

□ 3R

(リデュース・リユース・リサイクル)
循環型社会形成推進基本法



人工物の飽和→循環社会へ移行可能

2050年CN社会実現のために

[1] Efficiencyから人と社会のSufficiencyへ

<https://www.scej.org/sapporo/indexSD.html>

経済的な豊かさの追求

経済と環境の両立

心の豊かさの追求

化石資源からの大量生産

循環型社会

1940

1960

1980

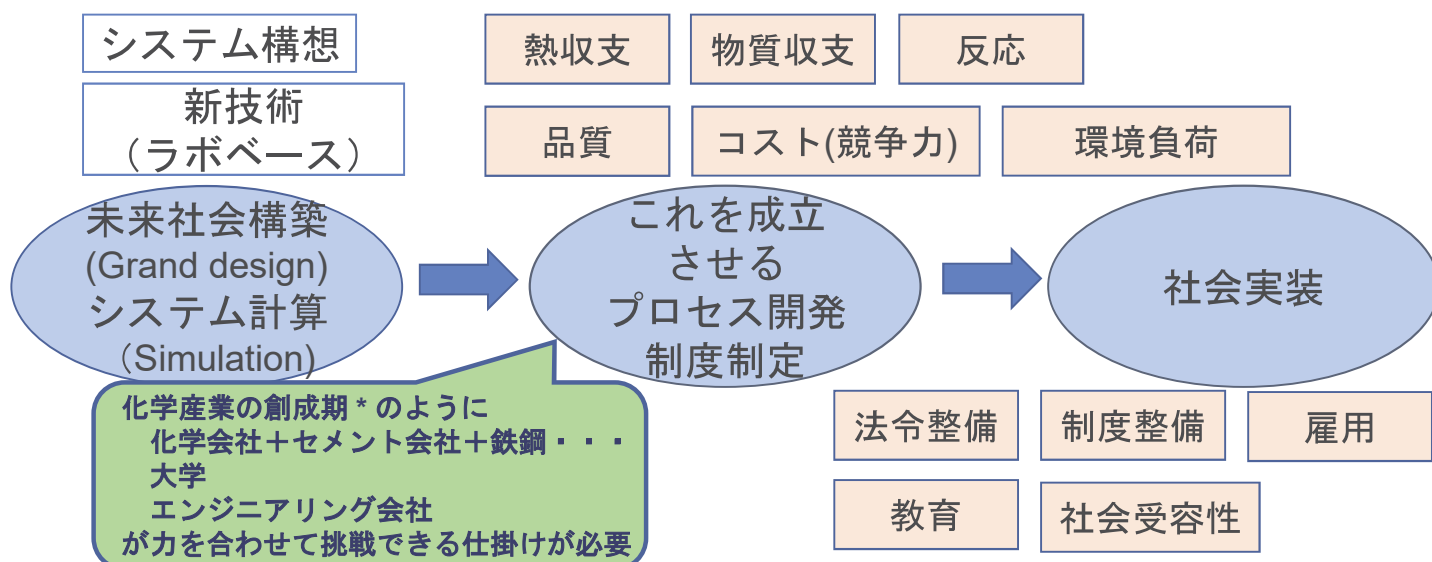
2000

2020

2030

持続可能な社会

[2] 社会構造・産業構造の変革も含めた未来社会をデザインする



2050年CN社会実現のために

[1] Efficiencyから人と社会のSufficiencyへ

<https://www.scej.org/sapporo/indexSD.html>

経済的な豊かさの追求

経済と環境の両立

心の豊かさの追求

化石資源からの大量生産

循環型社会

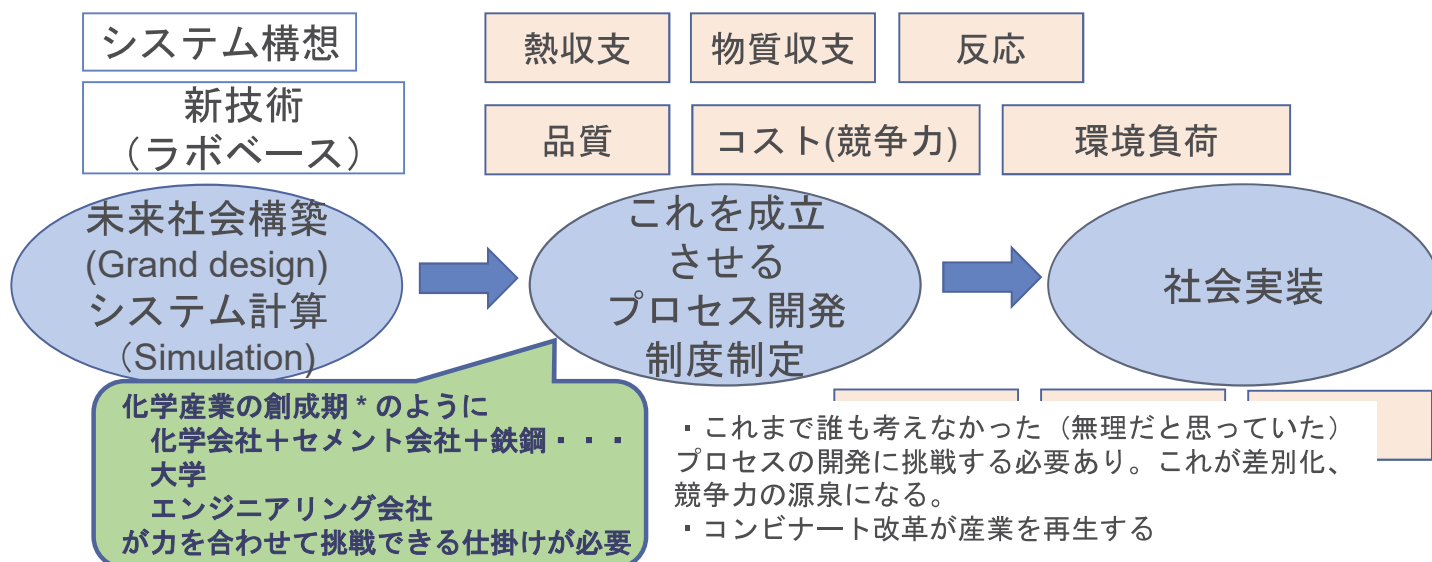
1940

地域、コミュニティが動くことが
カーボンニュートラル推進にとって大切

2030

持続可能な社会

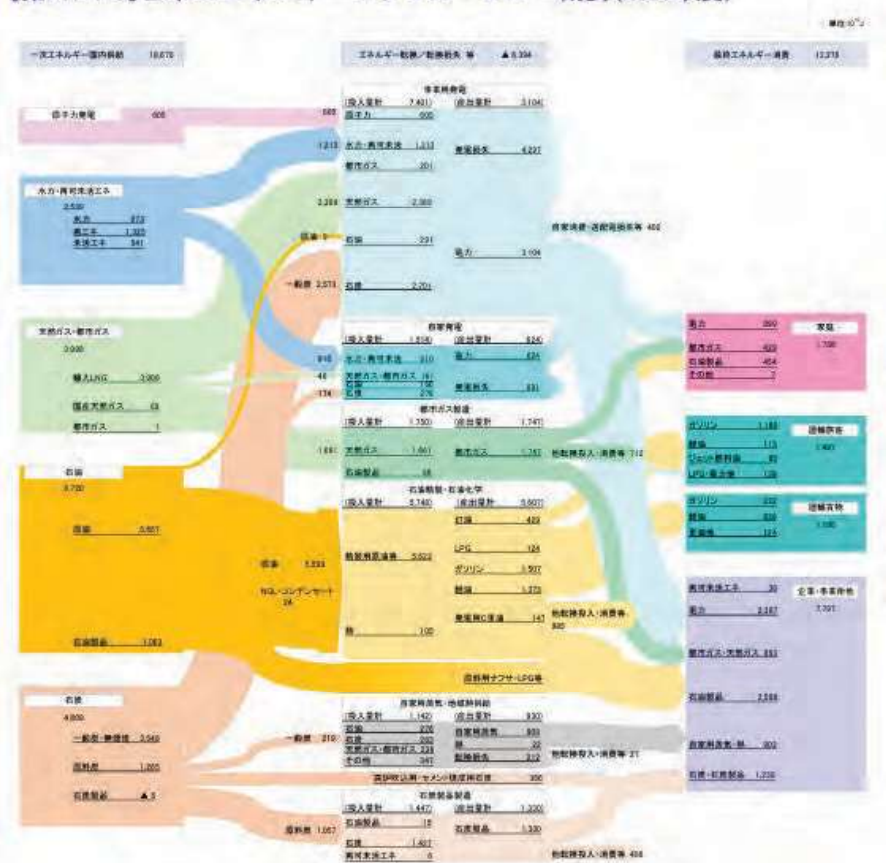
[2] 社会構造・産業構造の変革も含めた未来社会をデザインする



日本のエネルギーバランス・フロー

エネルギー白書2023より <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/pdf/>

【第211-1-3】日本のエネルギーバランス・フロー概要(2021年度)



($\times 10^{15}$ J)

電力事業者
899+2,400=3,300

運輸旅客
1,498+1,195=2,700

製造業
7,797-2,400-2,598+ α =3,000

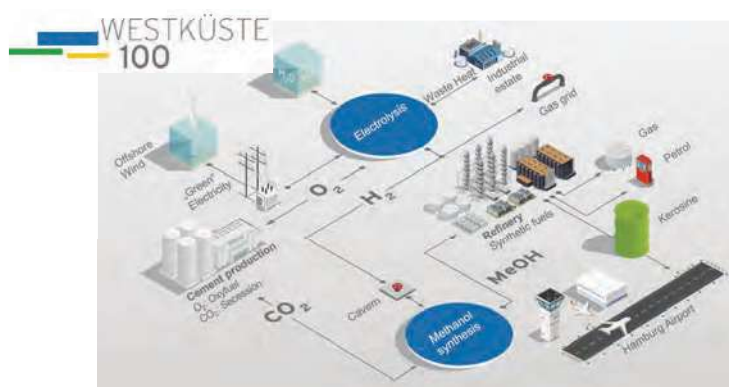
カーボンニュートラルへの取り組み (意識の変化)

地域、コミュニティが動くことが
SDGs、カーボンニュートラル推進にとって大切

“Think Globally, Act Locally” → “Think Locally, Act Globally”

地域、市民が主導するカーボンニュートラルに向けた活動の例

- ① 種子島：バイオマス J. Life Cycle Assessment, Japan Vol 15, 360 (2019).
- ② バロセロナ：2020年1月に市政府、市民が共同で「気象非常事態宣言」
 - ・生産／消費のモデル、文化とライフスタイルを考え直す。
 - ・9の分野で100以上の具体的なActionを定め、活動開始。
- ③ Westkuste100プロジェクト：北ドイツのHeide地区での産・学・官・地域連携プログラム
 - ・再エネ/電解(水素、酸素)/セメント工場(CO₂)/航空機用e-Fuel製造/地域の空港で使用
 - ➡ 地域で発生するCO₂を減らし、航空輸送のグリーン化にも寄与。



Green hydrogen and decarbonization
on an industrial scale

Heide地方政府
大学

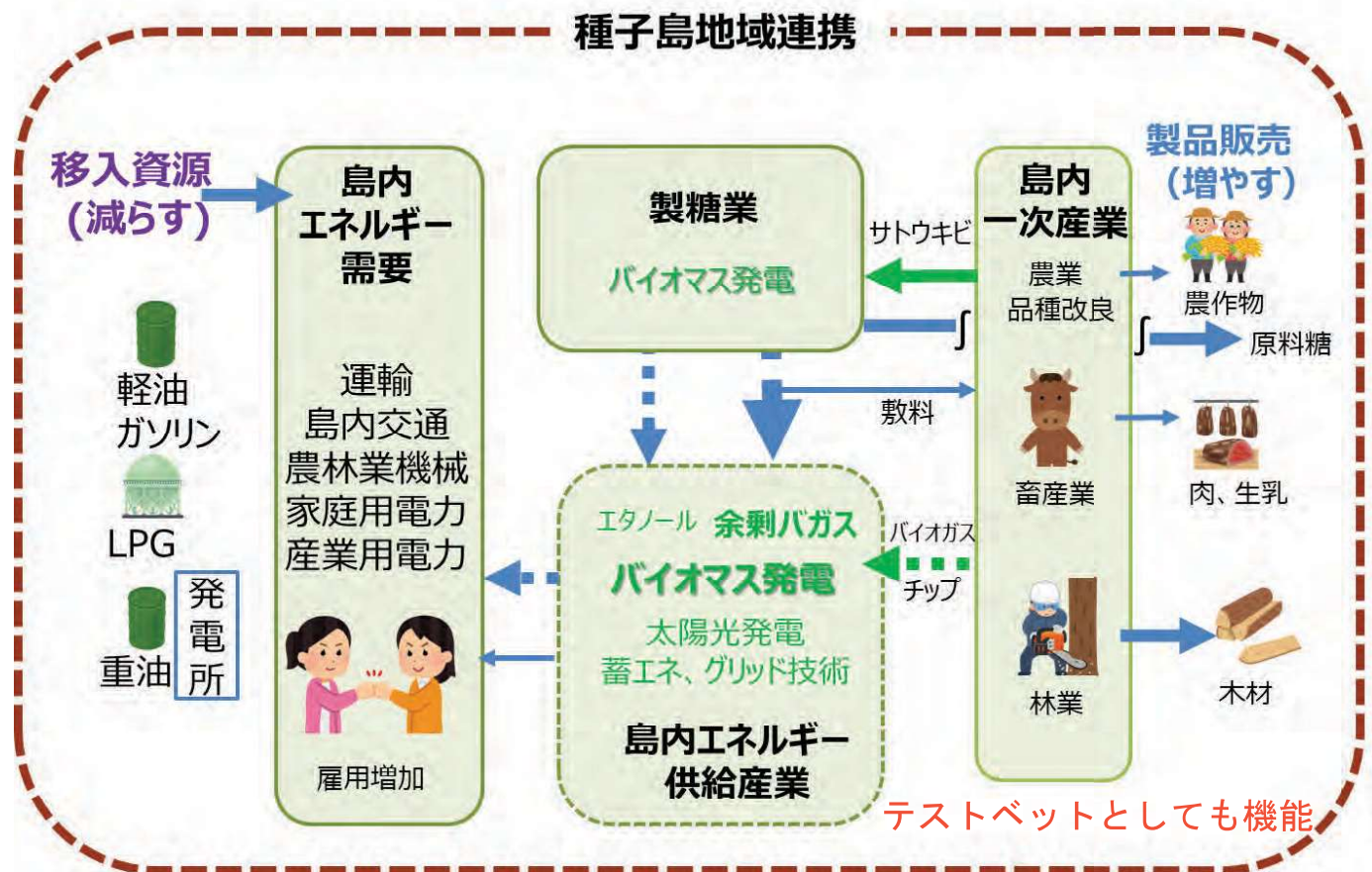
電力会社、セメント工業、石油精製会社、
プラント会社等による連携プロジェクト

<https://www.westkuste100.de/en/>

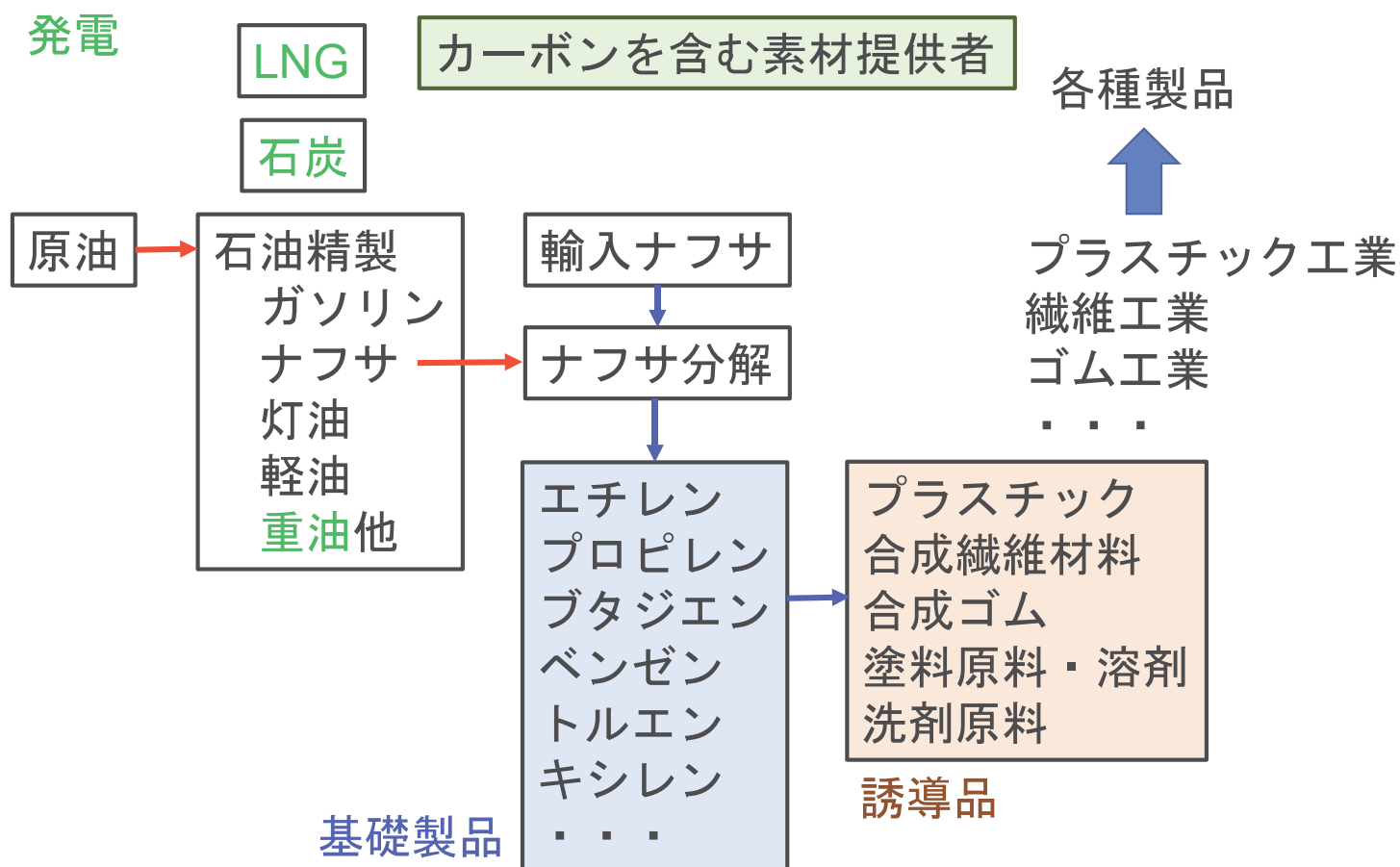
化学工学会の地域連携の取組事例 (1)

化学の日パネルディスカッション資料より抜粋

種子島地域連携

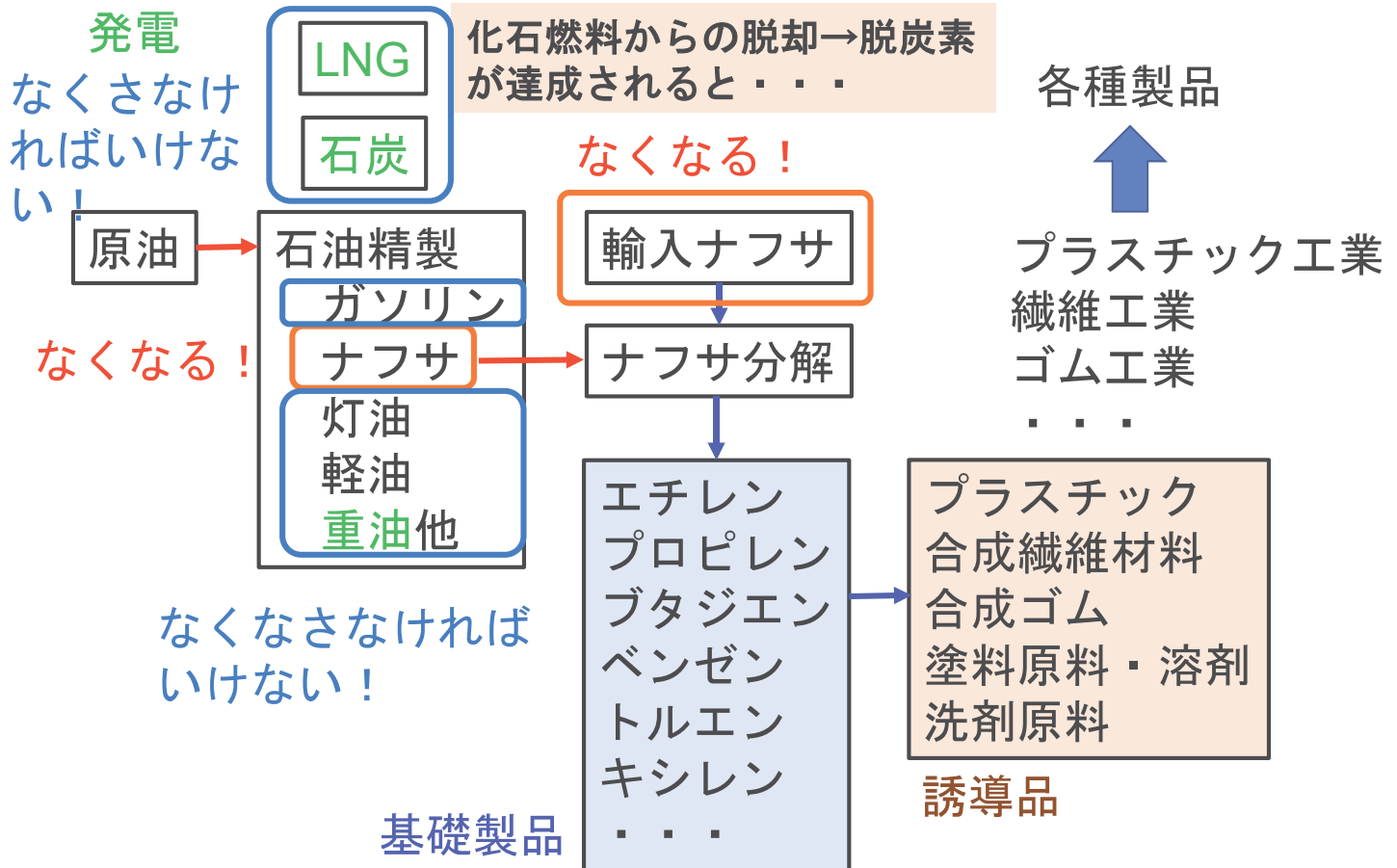


化学産業の役割 (Role of Chemical Industry)



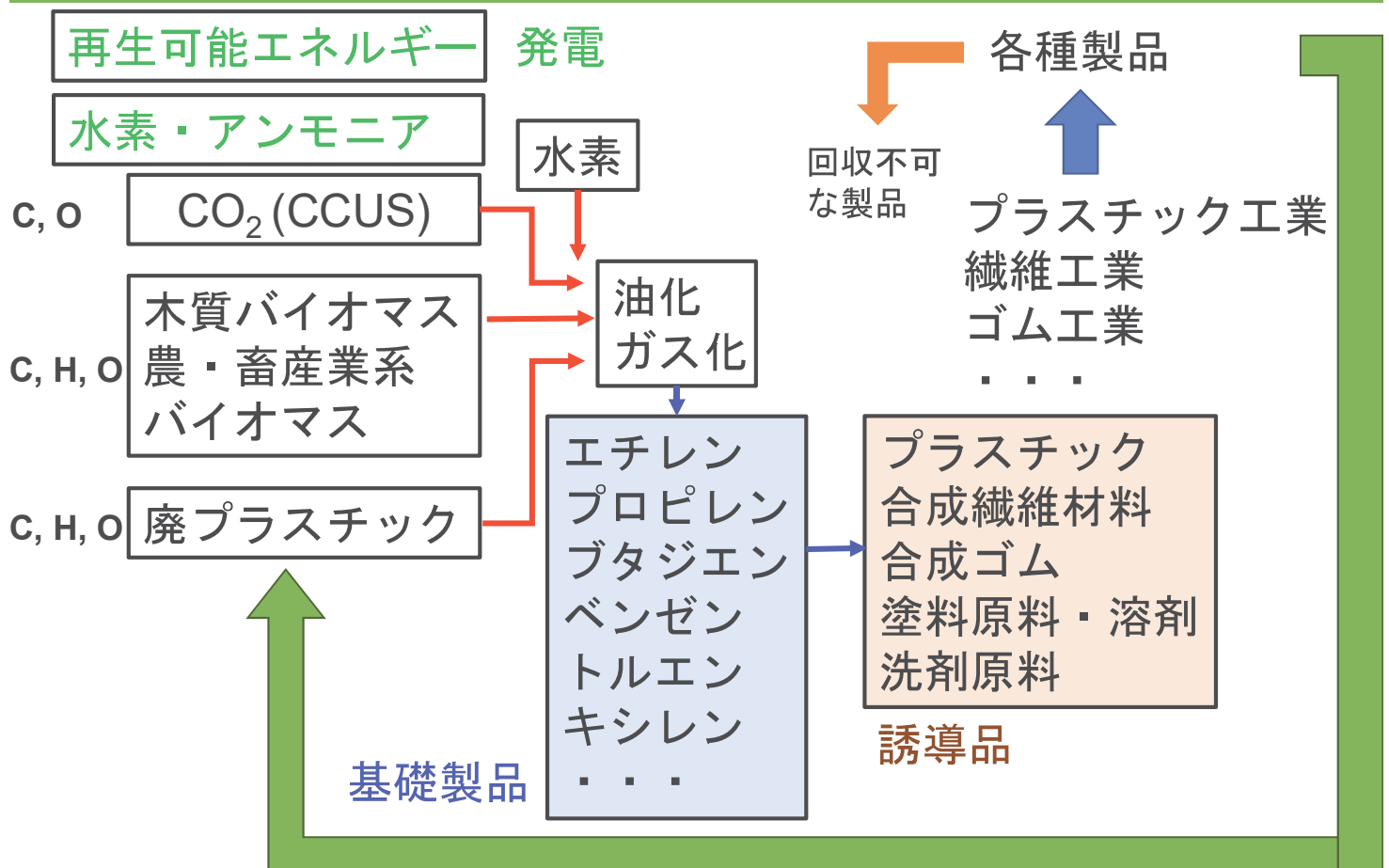
化石燃料からの脱却→脱炭素 が達成されると・・・

19



カーボンニュートラル化学産業

20



原油 CH_2 26 M t-C/y → 化学品 CH_2 15 M t-C

プラスチック
8 M t-C

他の化学品
7 M t-C

廃プラ 7.3Mt
 CH_2

(0.8 M t-C)

廃食油
 $\text{CH}_2\text{O}_{0.1}$

バイオマス廃棄物

木質バイオマス
 $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.7}$

CO_2

輸出入量は同程度
(輸4.3 出5.2)



ポテンシャル

27 M t-C 木質バイオマス

24 M t-C 廃棄物系バイオマス

カーボンニュートラルな日本の化学産業

原油 CH_2 26 M t-C/y → 化学品 CH_2 15 M t-C

プラスチック
8 M t-C

他の化学品
7 M t-C

廃プラ 7.3Mt
 CH_2

5 M t-C

廃食油
 $\text{CH}_2\text{O}_{0.1}$

バイオマス廃棄物

木質バイオマス
 $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.7}$

CO_2

10 M t-C

輸出入量は同程度
(輸4.3 出5.2)



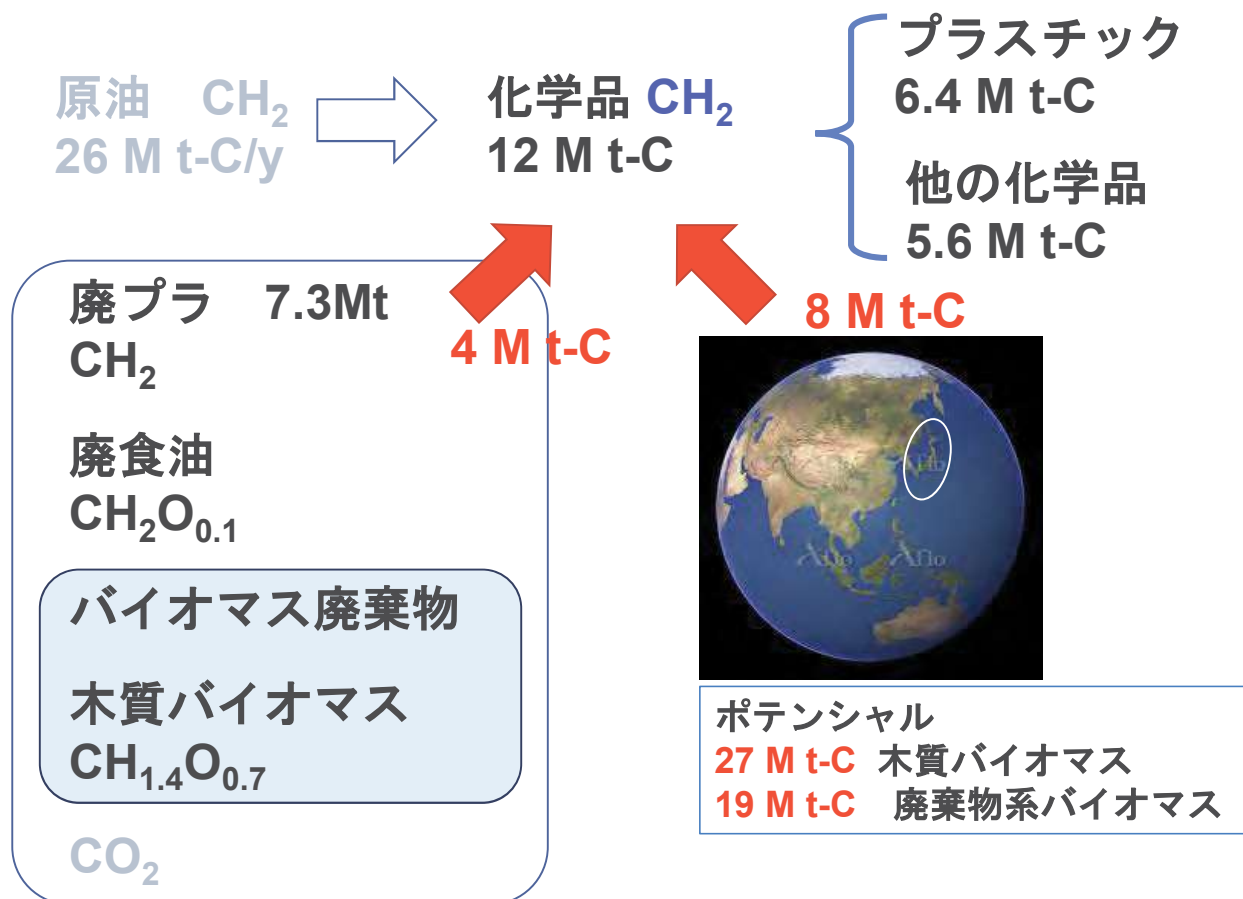
ポテンシャル

27 M t-C 木質バイオマス

24 M t-C 廃棄物系バイオマス

人口減を考慮したカーボンニュートラルな²³ 日本の化学産業

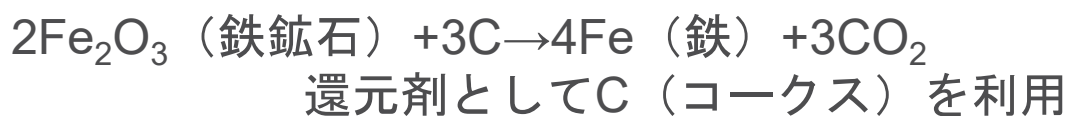
阿尻、水口、辻



炭素に関する産業

24

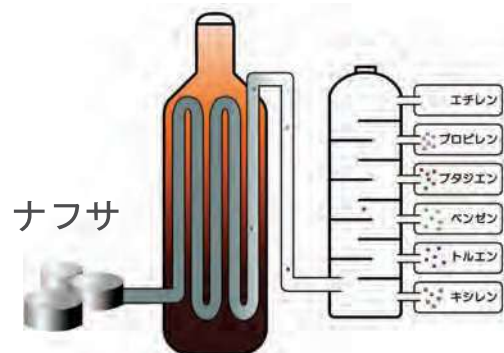
鉄鋼産業



セメント産業



化学産業



製紙産業



カーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン2.0 : CO₂排出削減が困難な産業の循環経済への変革

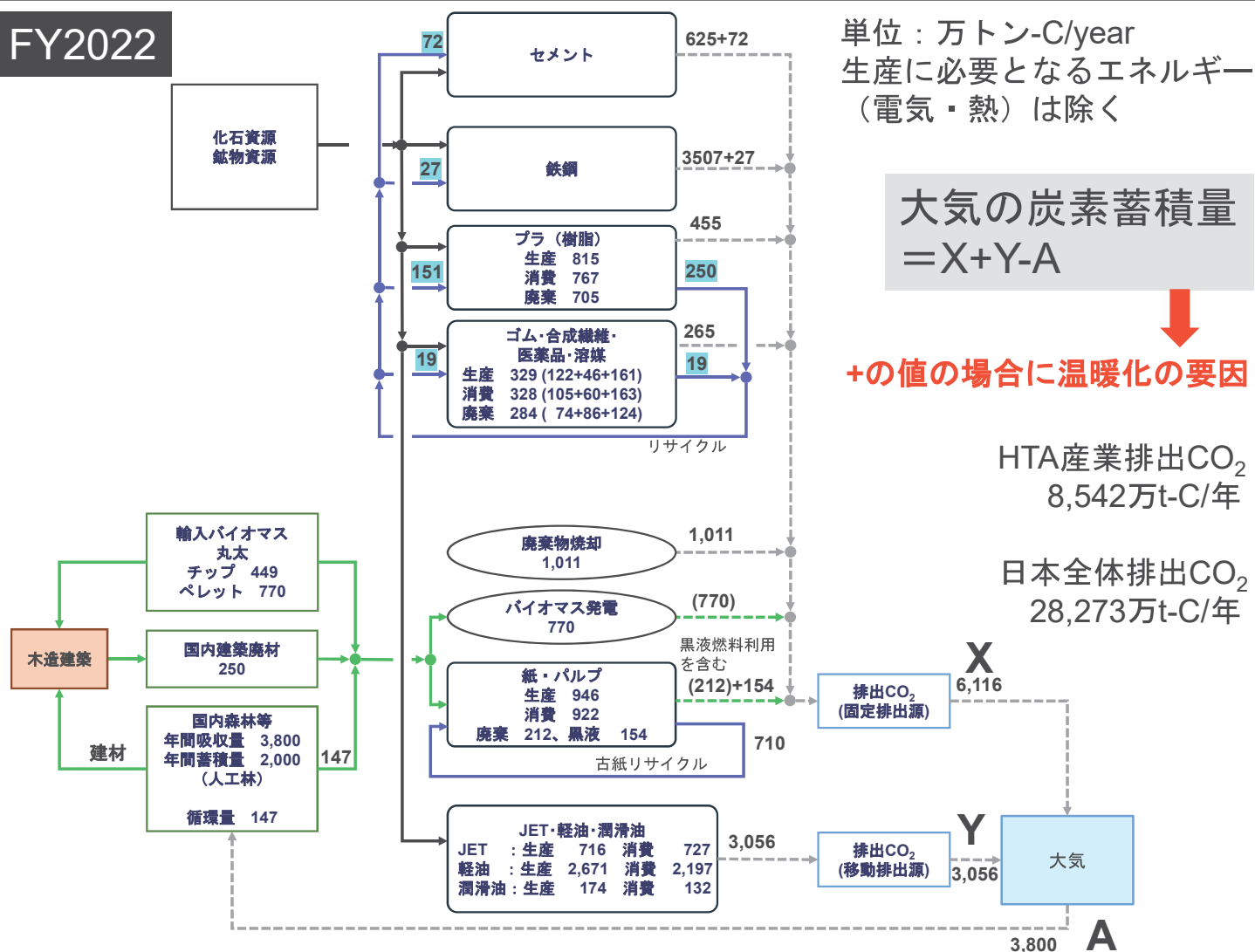
Carbon Independence Vision 2.0: Circular Transformation from Hard-to-Abate Industries

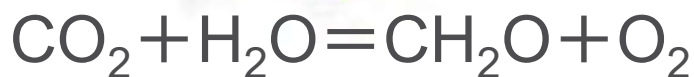


https://www.cn.scej.org/activity/grand_design_working/

25

FY2022





太陽光エネルギー

CO₂吸収

大気
46%

陸地
28%

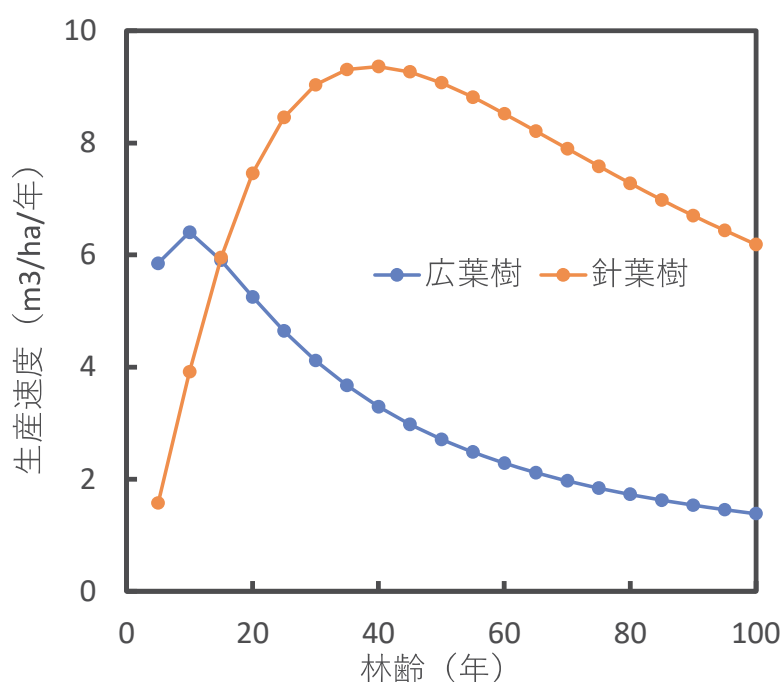
海洋
25%

地球

日本は森林面積67%

日本の森林現況

Dr. Tana Qian private communication



■針葉樹の成長曲線

○数式

Mitscherlich, E.A., The Law of the Minimum and the Law of Diminishing Soil Productivity (in German), Landwirtschaftliche Jahrbuecher 38, 537-52, 1909

○数式のパラメータ決定

Ministry of the Environment, Japan, Greenhouse Gas Inventory Office of Japan (GIO), Center for Global Environmental Research (CGER), and National Institute for Environmental Studies (NIES), National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN, Center for Global Environmental Research, 1-6, 2.

1-2.19, 2016

■広葉樹の成長曲線

Ooba, Makoto, Qinxue Wang, Shogo Murakami, and Kunio Kohata, Biogeochemical Model (BGC-ES) and Its Basin-Level Application for Evaluating Ecosystem Services under Forest Management Practices." Ecological Modelling 221(16), 1979-94, 2010

日本の森林ポテンシャル

(前提条件)

人工林を対象

30年周期で伐採→植林

幹材積の平均比重

0.5 dry-t/m³

炭素含有量

0.5

木材利用率

0.5

枝葉

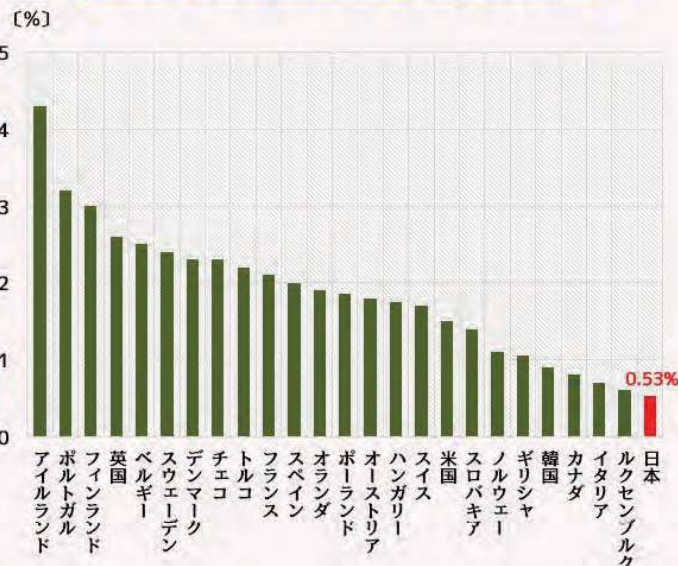
伐採炭素含有量の0.2

	現況	30年周期で伐採→植林		木材利用率 0.5	枝葉＝伐採 炭素含有量 の0.2
	総蓄積量 [× 10 ³ m ³]	伐採可能量 [m ³ /y]	炭素含有量 [C-t/y]	幹材積のみ [C-t/y]	枝葉込み [C-t/y]
FY2017	3,308,000	110,267	27,566,667	13,783,333	19,296,667
FY2022	3,545,493	118,183	29,545,775	14,772,888	20,682,043

日本の森林現況

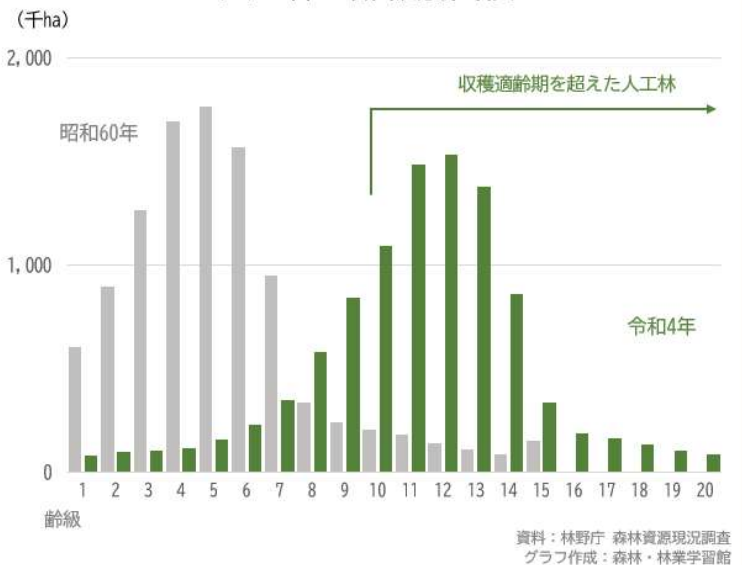
https://www.shinrin-ringyou.com/forest_japan/koutai.php

自国の森林資源に対する年間伐採量



林野庁「森林・林業白書」をもとに作成
(C) 森林・林業学習館

人工林の齢級別面積



資料：林野庁 森林資源現況調査
グラフ作成：森林・林業学習館

二酸化炭素

回収できないCO₂

炭素循環に

組み込むべき/組み込み得るCO₂

農業・畜産	畜産 農業機械・肥料等	セメント 約630万t-C/年	ブルー水素
農業・森林・ その他土地利用	農業機械・肥料等	鉄鋼* 約3,500万t-C/年	燃焼排ガス
輸送	航空（ジェット燃料） 自動車・二輪（e-fuel） 船舶	廃棄物	DAC
家庭	暖房 ガスコンロ	化学プロセス	バイオマス発電
		発酵CO ₂	

*https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/tekko_wg/pdf/2020_001_04_01.pdf

将来像

35

□ エネルギー：脱化石資源を前提とし、生産に必要な電気・熱に係る炭素は考慮しない

□ 化石資源・鉱物資源

セメント原料CaCO₃、鉄鋼高炉還元剤Cのみ残す

□ 森林バイオマス

国内

C吸収量 5,000万t-C/年（立木、海洋）

C蓄積量 2,000万t-C/年（人工林）

海外からの輸入 ネットゼロ前提/前提せず

ものづくり

生産量 セメント、鉄鋼は公開推定値
化学は維持
紙は-40%、段ボール等板紙は維持
(液体燃料は根拠に基づき推定)

消費量 人口減 (-16%) に併せて減少

廃棄量 人口減 (-16%) に併せて減少

Recycle セメントは一部

→recycleされない分はコンクリート

吸収などで固定化

化学は80%

→recycleされない分はCO₂排出

パルプ産業による黒液は化学産業

将来像

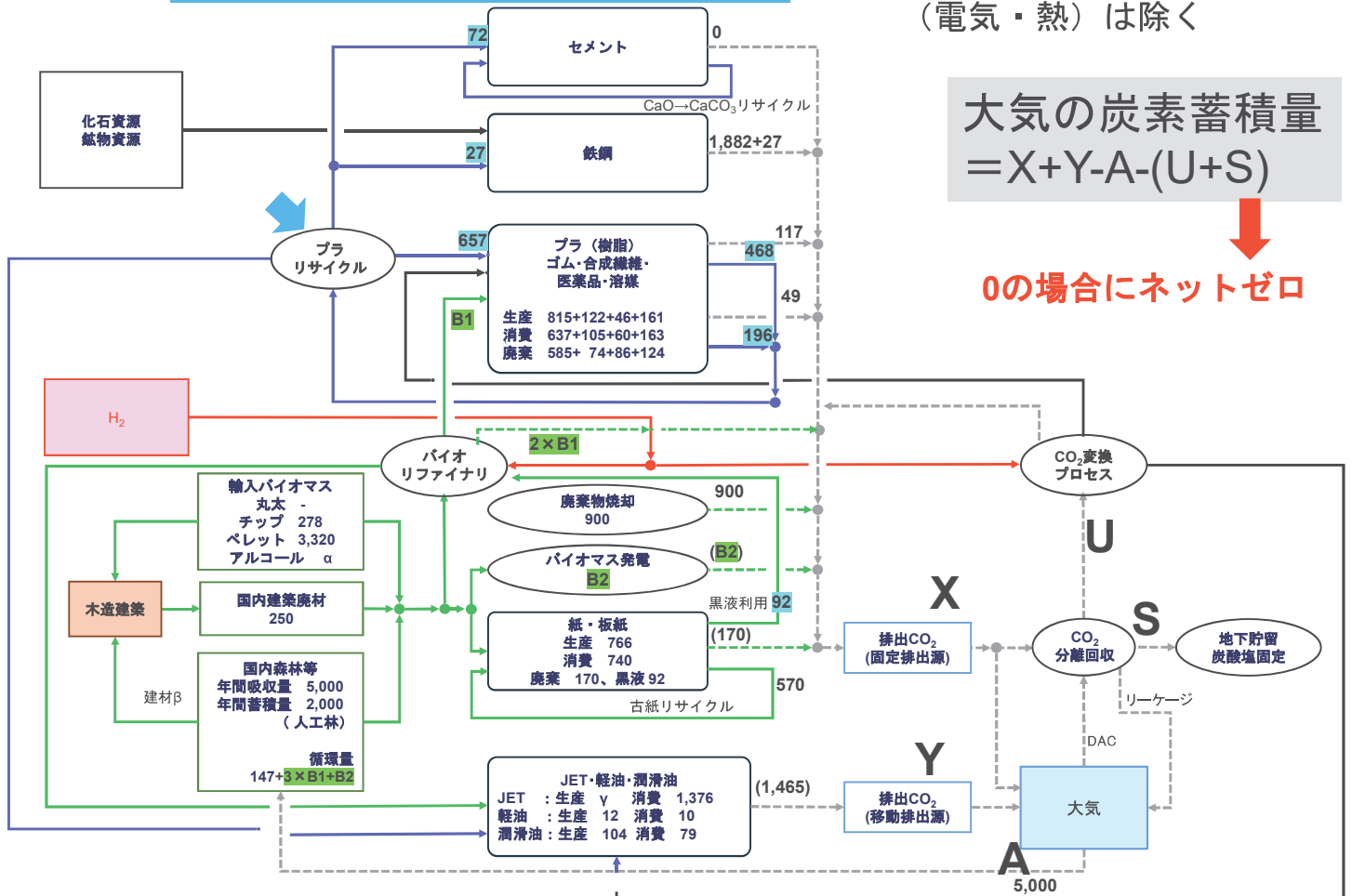
プラスチック等の
マテリアル/ケミカルリサイクル 80%

単位：万トン-C/year

生産に必要なエネルギー
(電気・熱)は除く

大気の炭素蓄積量
 $= X + Y - A - (U + S)$

0の場合にネットゼロ



想定する炭素循環のケース

	国内バイオマス利用	CO ₂ 利用
ケース1 国内森林バイオマス素材優先活用	素材を優先し、余剰分を発電に利用	化学産業起因はCCU
ケース2 国内森林バイオマス発電優先活用	発電を優先 素材には用いない	プラ等リサイクルで足りない分はすべてCCU
ケース3 海外サステナブル輸入木材活用	素材のみ利用 (発電は海外)	—
ケース4 海外非サステナブル木材活用・CCSオフセット	素材のみ利用 (発電は海外)	—
ケース5 国内森林バイオマス抑制	プラ等リサイクルおよびCCUで足りない分を素材に利用 (発電は海外)	化学産業起因はCCU

各ケースのまとめ

	炭素源（万t-C/年）					必要 水素量 （万t- H ₂ /年）	CCS すべき CO ₂ （万t- C/年）
	廃プラ スチック等	黒液	CO ₂	国内森林 バイオマス			
				化学	発電		
1	657	92	166	687	1,166	137	0
2	657	92	395	0	1,853	213	0
3	657	92	0	1,185	0	81	0
4	657	92	0	1,185	0	81	2,085
5	657	92	166	687	0	137	1,587

炭素自立実現に向けた課題と論点

◆ 炭素種類に合わせた技術開発

◆ 必要なエネルギー

◆ 供給ポテンシャル

廃棄物

静脈産業と動脈産業の連携

森林バイオマス

木の成長速度に鑑みた伐採・植林

CO₂

莫大なエネルギーと水素

◆ 地域（空間的）ギャップ

供給源と生産場所の不一致

→どの形でどのように運搬するか

◆ 経済的ギャップ

社会システム全体としての総コストの観点から設計

炭素自立実現に向けた課題と論点

◆ 炭素種類に合わせた技術開発

◆ 必要なエネルギー

◆ 供給ポテンシャル

廃棄物

静脈産業と動脈産業の連携

森林バイオマス

木の成長速度に鑑みた伐採・植林

CO₂

莫大なエネルギーと水素

◆ 地域（空間的）ギャップ

供給源と生産場所の不一致

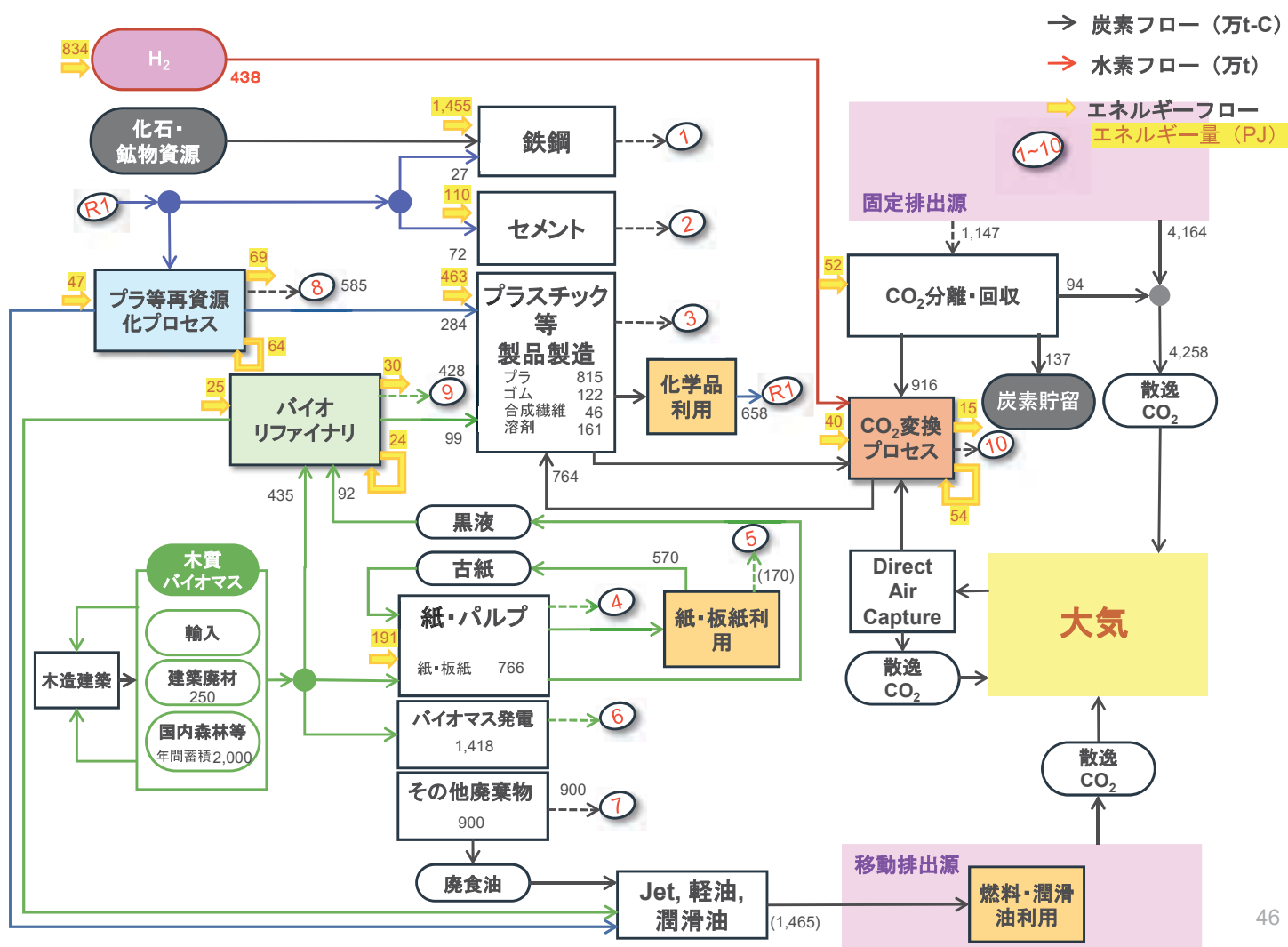
→どの形でどのように運搬するか

◆ 経済的ギャップ

社会システム全体としての総コストの観点から設計

想定する炭素循環のケース

	国内バイオマス利用	CO ₂ 利用
ケース1 国内森林バイオマス素材優先活用	素材を優先し、余剰分を発電に利用	化学産業起因はCCU
ケース2 国内森林バイオマス発電優先活用	発電を優先 素材には用いない	プラ等リサイクルで足りない分はすべてCCU
ケース3 海外サステナブル輸入木材活用	素材のみ利用 (発電は海外)	—
ケース4 海外非サステナブル木材活用・CCSオフセット	素材のみ利用 (発電は海外)	—
ケース5 国内森林バイオマス抑制	プラ等リサイクルおよびCCUで足りない分を素材に利用 (発電は海外)	化学産業起因はCCU



炭素循環と必要エネルギーのまとめ

	炭素源（万t-C/年）					必要 水素量 （万t- H ₂ / 年）	CCS するべ きCO ₂ （万t- C/年）	大気放 出CO ₂ （万t- C/年） [HTA 全体]
	廃プラ スチック 等	黒液	国内 森林 バイオ マス	CO ₂	副生 ナフサ			
投入量	869 ↓ 658	92	435	877	214	438	137	15
生産物	284	99	61	8	17	エネルギー（PJ）		
CO ₂ 排出	559	415	8	17	113	化学産業（除く水素製造） 717		
副生ナフサ	26	13	17	113	113	化学産業 1,551		
						CO ₂ 分離・回収 52		
						CO ₂ 貯留 0.4		
						=====		
						外部からの投入 1,462		
						外部への供給 113		

炭素自立実現に向けた課題と論点

◆ 炭素種類に合わせた技術開発

◆ 必要なエネルギー

◆ 供給ポテンシャル

廃棄物

静脈産業と動脈産業の連携

森林バイオマス

木の成長速度に鑑みた伐採・植林

CO₂

莫大なエネルギーと水素

◆ 地域（空間的）ギャップ

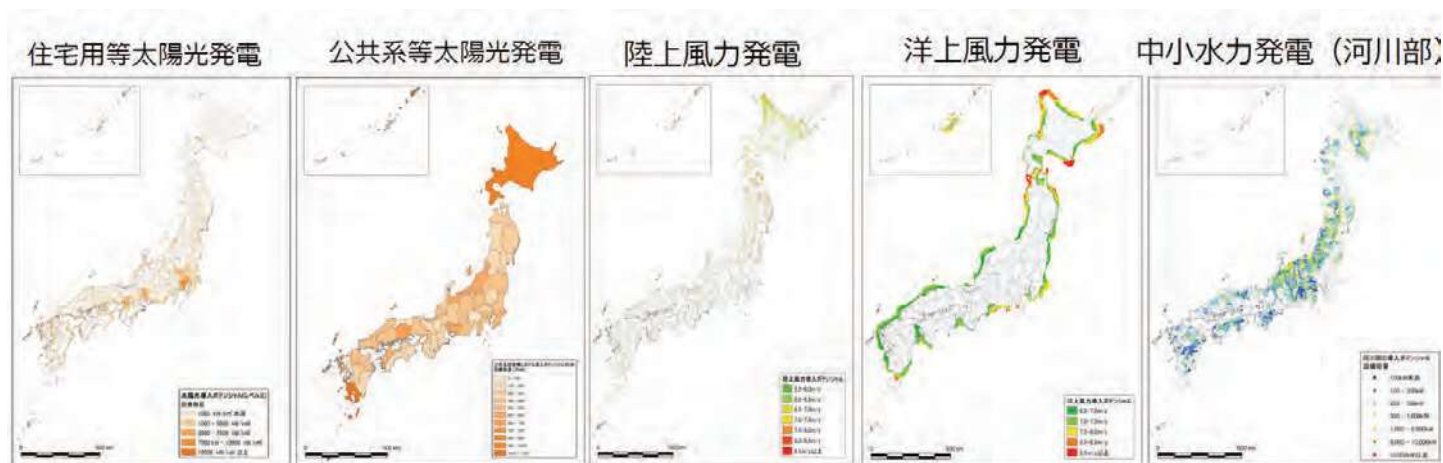
供給源と生産場所の不一致

→どの形でどのように運搬するか

◆ 経済的ギャップ

社会システム全体としての総コストの観点から設計

再生エネ導入ポテンシャル



都道府県別炭素源ポテンシャル

千トン/年

524

35

製品設計
市民
廃棄物産業
輸送

廃プラポテンシャル
（一般＋産業廃棄物）

千トン/年

2,197

13

森林産業
木材産業
廃棄物産業
輸送

バイオマス供給ポテンシャル
（乾燥ベース重量）

都道府県別炭素源ポテンシャル

千トン/年



鉄鋼（高炉）
廃プラ利用
CCU
輸送（配管）

千トン/年



セメント産業
廃プラ利用
輸送（配管）

高炉由来CO₂

セメント由来CO₂

confidential

既存炭化水素産業ポテンシャル

製油所能力(BPD)



エチレン能力(千トン/年)



製油所処理能力

エチレン生産能力

空間軸の議論

ケース1 周南：ファーストムーバーコンビナート

既存コンビナートのインフラあり
エネルギーの完全脱炭素を目指している地域
炭素源としてバイオマス、CO₂が豊か

ケース2 京葉臨海：首都圏型

既存コンビナートのインフラあり
首都圏に位置しているため、炭素源として廃棄物が豊か
HTA産業・空港（国内75%の燃料需要）あり

ケース3 北海道：日本の縮図

再エネが豊か
炭素源としてバイオマスが豊か
HTA産業・都市・空港あり
何もかも、運搬の距離を考慮すべき

空間軸の議論

ケース1 周南：ファーストムーバーコンビナート

既存コンビナートのインフラあり
エネルギーの完全脱炭素を目指している地域
炭素源としてバイオマス、CO₂が豊か

ケース2 京葉臨海：首都圏型

既存コンビナートのインフラあり
首都圏に位置しているため、炭素源として廃棄物が豊か
HTA産業・空港（国内75%の燃料需要）あり

ケース3 北海道：日本の縮図

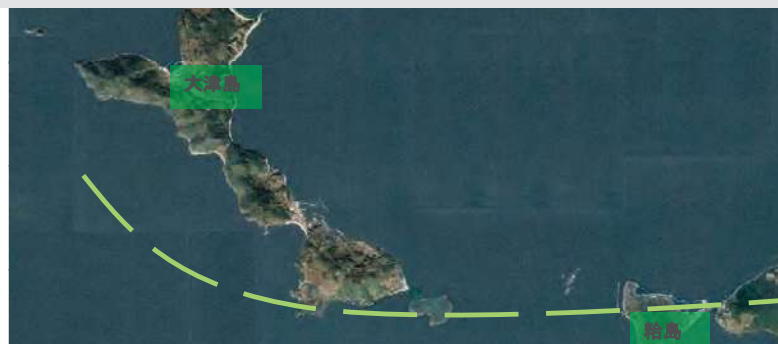
再エネが豊か
炭素源としてバイオマスが豊か
HTA産業・都市・空港あり
何もかも、運搬の距離を考慮すべき

化学工学会の地域連携の取組事例 (2)

化学の日パネルディスカッション資料より抜粋



自家発電が石炭火力
苛性ソーダを軸とする無機化学とオレフィン系の有機化学が融合
石油化学・ソーダ・セメント・ゴム・鉄鋼などの多彩な素材型産業が集積
副生水素がある



工学的なモデル
地域産業政策的なモデル
連携体制構築のモデル
として確立
→日本、そして世界に展開

周南コンビナート脱炭素推進協議会

周南コンビナート脱炭素推進協議会 (2022.1～)

構成員 出光興産、東ソー、トクヤマ、日鉄ステンレス、日本ゼオン、化学工学会、周南市
オブザーバー 経済産業省、国土交通省、環境省、林野庁、山口県、有識者
具体的な取組 周南コンビナートのグランドデザイン、バックキャストによるロードマップ策定
 企業間連携による推進体制の構築、技術研究開発、実証事業
 既存施設、産業インフラ、資源の有効活用、国・県への支援要望、政策提案等
 市民と共に考えるシンポジウム開催

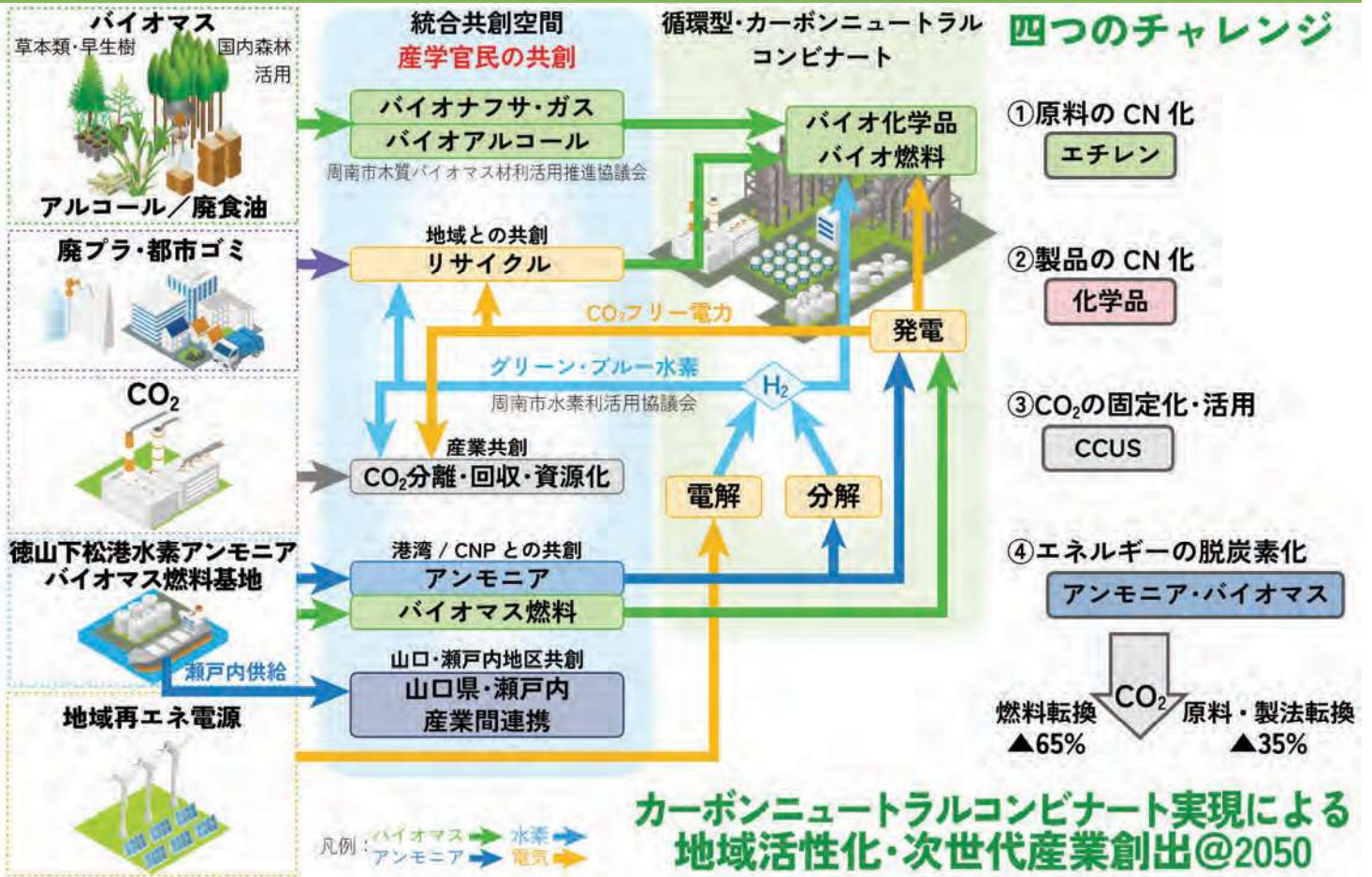


周南コンビナートのカーボンニュートラル化実現による
地域活性化と次世代産業創出

周南カーボンニュートラルコンビナート構想 (未来共創センター化)

57

©周南コンビナート脱炭素推進協議会

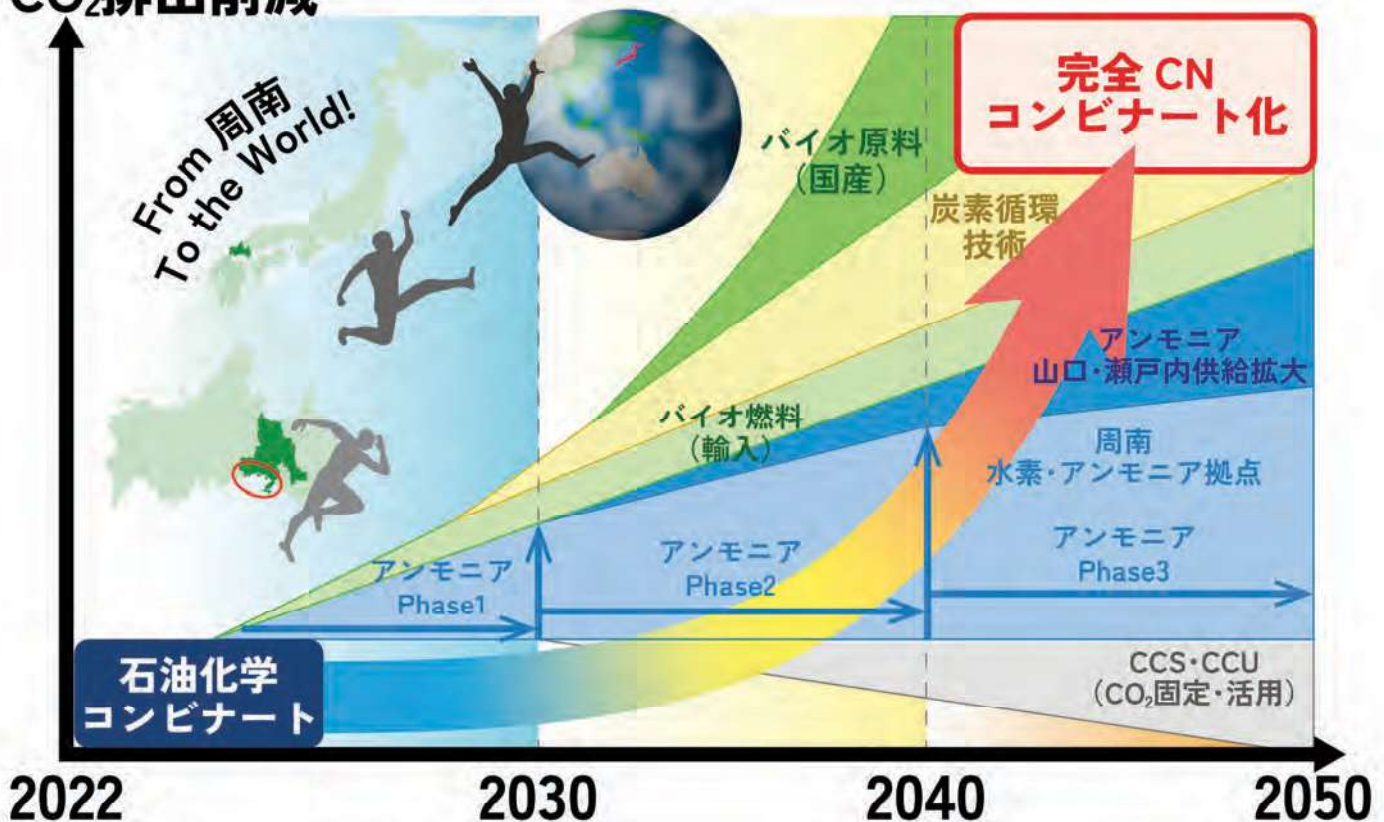


周南コンビナートカーボンニュートラルロードマップ

58

©周南コンビナート脱炭素推進協議会

CO₂排出削減



2023年5月31日プレス発表



日鉄ステンレス

日本ゼオン

化学学会

辻（副会長）

藤井市長（会長）

東ソー

トクヤマ

出光興産

空間軸の議論

ケース1 周南：ファーストムーバーコンビナート

既存コンビナートのインフラあり

エネルギーの完全脱炭素を目指している地域

炭素源としてバイオマス、CO₂が豊か

ケース2 京葉臨海：首都圏型

既存コンビナートのインフラあり

首都圏に位置しているため、炭素源として廃棄物が豊か

HTA産業・空港（国内75%の燃料需要）あり

ケース3 北海道：日本の縮図

再エネが豊か

炭素源としてバイオマスが豊か

HTA産業・都市・空港あり

何もかも、運搬の距離を考慮すべき

北海道のポテンシャル

- ・ 国内有数の貨物取扱量を誇る港湾と空の玄関
新千歳空港のダブルポートを有する
- ・ 製紙、自動車部品、石油精製/備蓄、製鉄、
セメントに加え、近年は
半導体、データセンターの誘致が進む
- ・ 国内屈指の第一次産業

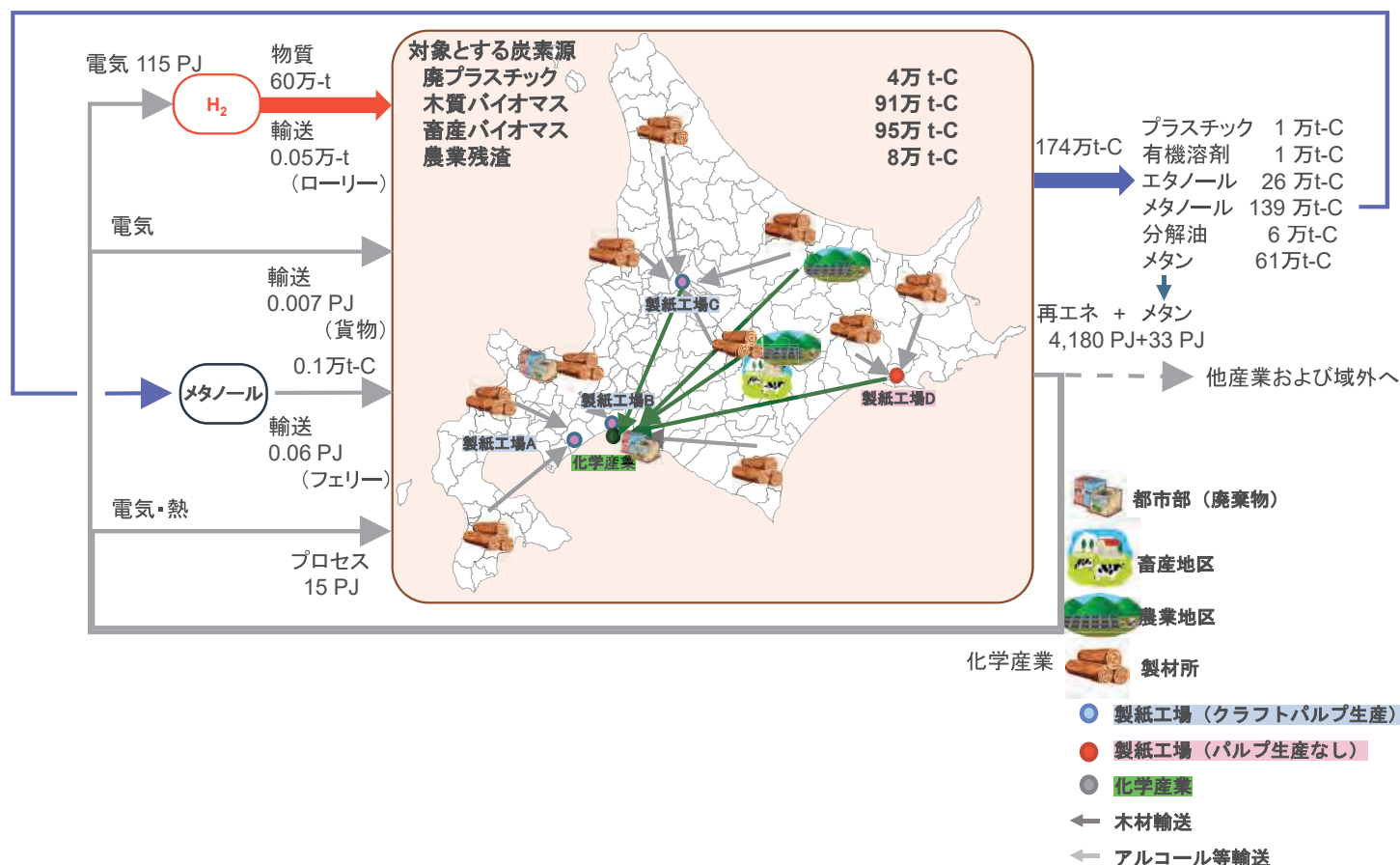


苫小牧の特徴

再エネ+原発
バイオマス資源
を利用した

- 1) 水素・e-fuel拠点
- 2) 基礎化学品原料拠点
- 3) 陸・海・空の物流拠点

北海道における炭素循環およびエネルギー循環



まとめ

- HTA産業のうち、化学産業におけるプラスチック等再資源化、バイオリファイナリー、CCUについて、具体的なプロセスを想定し、その収率および副生物を考慮した上で、炭素フローと必要となるエネルギー量を算出
 - プラスチック等リサイクルにおいて生成される副生物質およびCO₂に起因する炭素量を十分に考慮する必要がある
 - バイオマスからの化学素材生産技術とCCU技術の成熟度の進展を考慮した社会実装の姿を描くことが重要
 - 各工程の収率向上、バイオマスからの化学原料生産過程で副生されるリグニンの有効活用技術などの新技術のインパクトが大きい
- 北海道を例として立地と輸送を具体的に考慮した炭素のフローと必要なエネルギー量に関して検討
 - 新たな産業を創成するとともに、産業間の連携に最適な立地や輸送法を検討する必要

社会実装に向けて

- 化学産業に必要なエネルギーは現行化学産業の1割増程度であるが、CCUに必要な水素製造に係るエネルギーは莫大である。
- 再生可能エネルギーからの水素製造拠点の立地とCCUによる化学原料生産拠点への移送の考慮。
- 時間軸の議論を加速することで、人財・資本を優先的に投入すべき分野を明確化することができ、他国に先んじてGXを実現できる。

CN実現	原因・影響
実現できないリスク	原因1：社会的合意の未成立
	原因2：産業の移行の課題が解決できない
	原因3：技術開発に関する事項
	原因4：個人の選択の問題
CN施策の達成がもたらすリスク	影響1：産業構造
	影響2：エネルギー
	影響3：炭素を主原材料とする産業
	影響4：気候変動以外の環境影響
	影響5：生活・地域・国・国際
	影響6：気候変動抑制未達成
	影響7：移行期間

人々・組織の安心感

70

正確な市民への情報発信、正しい安心感、社会受容性

1. 上記評価の正確な情報を適切な形で発信
2. ライフサイクルを通じた環境リスクを考慮した考え方の普及
「植物由来の製品を使えばいくら使って燃やしても大丈夫」
というような短絡的思考への懸念
3. 人や国によってリスクの視点・多寡も大きく異なることを
考慮した適切な安心感の評価

可視化

1. リスクの定量評価の可視化

技術各論・産業構造変革・社会構造変革が社会実装される際の
安全・安心・リスク評価を自分自身の問題として考える

ACT NOW !

2050年CNに向けて社会変革、産業変革
国際的な課題に対して
日本が世界をリード + 国内産業の活性化

プラスチックなど化学品のリサイクル率の向上
森林バイオマスを最大活用した素材の生産
CO₂の回収と利用および貯留の拡大

産業間の連携による必要な炭素資源を自立的に循環確保

産業間連携

地域内連携

技術力強化