

環境・エネルギー分野へ貢献するバイオ産業 ～バイオものづくりの課題と可能性～

2021年2月3日
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター
バイオエコノミーユニット

- 新型コロナウイルス（COVID-19）感染症は、人々の健康、経済に大きなダメージを与え、大きな社会変化をもたらそうとしている。
- 持続可能な社会実現に向けた地球温暖化対策などの大型投資を行うことで、コロナ禍後の経済復興と持続可能な社会への転換の両立を目指すことの重要性が世界的に高まっており、日本も2020年10月に2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを宣言している。
- バイオ技術やバイオ資源を活用したものづくり“バイオものづくり”は、カーボンニュートラル・カーボンネガティブの点からも大きく貢献が期待されている。
- 本レポートでは、“バイオものづくり”の環境への貢献度に対する理解の状況や社会実装や普及のための現状と課題についてファクト分析を行い、バイオ製品の普及に向けた課題を分析し、課題解決に向けた考察を行う。

1. “バイオ”への期待
2. “バイオ”の環境貢献度の可視化状況（LCA）
3. 環境・エネルギーに貢献する“バイオ製品”の普及に向けて
 - 3.1. バイオものづくりにおけるコスト高要因の分析
 - 3.2. 安価・安定的な原料入手の観点からの考察
 - 3.3. 生産技術の課題の観点からの考察
 - 3.4. ターゲット市場領域の観点からの考察
 - 3.5. 継続的なバイオ産業化の観点からの考察
4. バイオ製品普及に対する各国の取り組み状況
5. おわりに

1. “バイオ”への期待

- 「デジタル」と「バイオ」は、第4次産業革命において重要な役割を演じ、豊かな社会や持続可能な社会の実現につながることを期待されており、世界各国が“バイオエコミー*”の実現を目標に掲げた国家戦略を策定して推進（日本もバイオ戦略2019/2020を展開）。
- 健康・医療・生活に加えて、環境調和・融和型（Nature-based）の循環型社会形成に向けてバイオへの期待が高まっている。
*バイオエコミー：バイオマスやバイオテクノロジーの活用により気候変動等の地球規模の問題を解決し、長期的に持続可能な成長をめざす概念

世界各国もバイオエコミー振興に力をいれている



21世紀は、デジタルとバイオが注目されるとともに指数的な成長を示しており、第4次産業革命につながる（WEF）

出所：World Economic Forumホームページ
(WEF報告書2017,2019)



AIと生物工学は歴史上の何よりも世界を変えるだろう

“We still have some choice about what kind of impact AI and bioengineering engineering will have on the world, but they will change the world, maybe more than anything that happened previously in history.”

出所：ハラリ氏公式ホームページ
(21 Lessons for the 21st Century)

各国のバイオエコミー政策



アメリカ（2012年、2016年）

「National Bioeconomy Blueprint」「Federal Activities Report on the Bioeconomy」

- 2030年に10億トンのバイオマスを用い、石油由来燃料36%を代替
- 2,300万トンのバイオマス由来製品と920億 kWhの電力を供給
- 170万人の雇用と2,000億ドル（約23兆円）の市場創出



EU（欧州委員会）（2012年、2020年）

「Innovation for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe」, 「Horizon Europe」

- 7年間で5,180億円を投資し、2030年までに石油由来製品の30%を、2030年までにEUにおける輸送燃料の25%を生物由来に置換、そのためにバイオマス増産（森林、海洋など）
- 世界課題解決/産業競争力強化：100億ユーロ予定（2021-27）



英国（2015年、2016年）
「Building a high value bioeconomy」「Biodesign for the Bioeconomy」



フィンランド（2014年）
「The Finnish Bioeconomy Strategy」
森林バイオマス

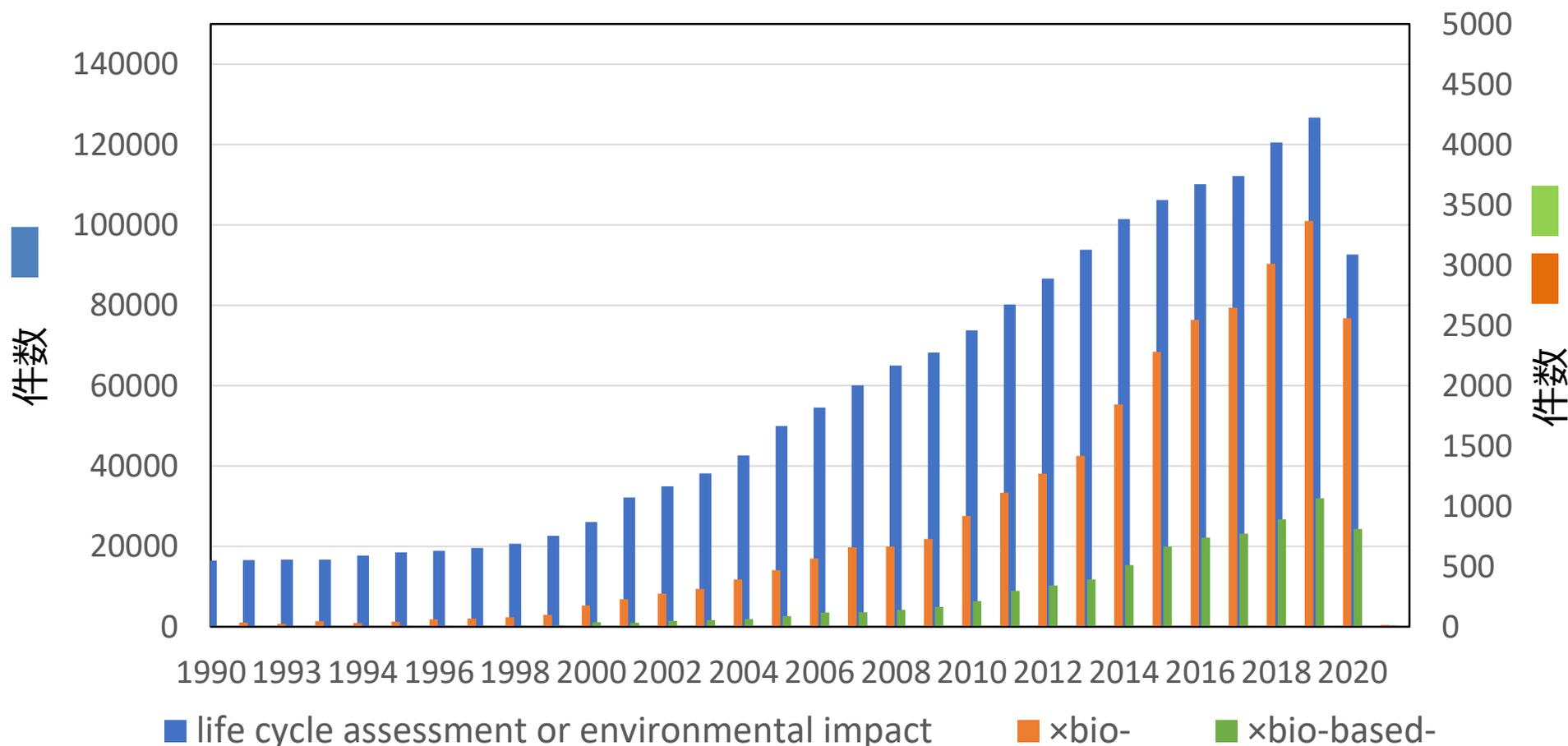


マレーシア（2013年）
「Bioeconomy 熱帯バイオマス Transformation Programme-Biotech Corp」

2. “バイオ”の環境貢献度の可視化状況（LCA）

- 環境影響を可視化する取り組みとして、Life Cycle Assessment（LCA）の報告例が増加、特に“バイオ”については、2010年以降急加速、関心が高まっている。
- “バイオ”については、コスト指標の分析が大半で、評価項目の選定にばらつきもみられるが、社会的評価も含めた環境影響評価に関する報告^{参考(1)}が増加傾向（バイオ産業に重要）。

Life Cycle Assessment関連の論文数



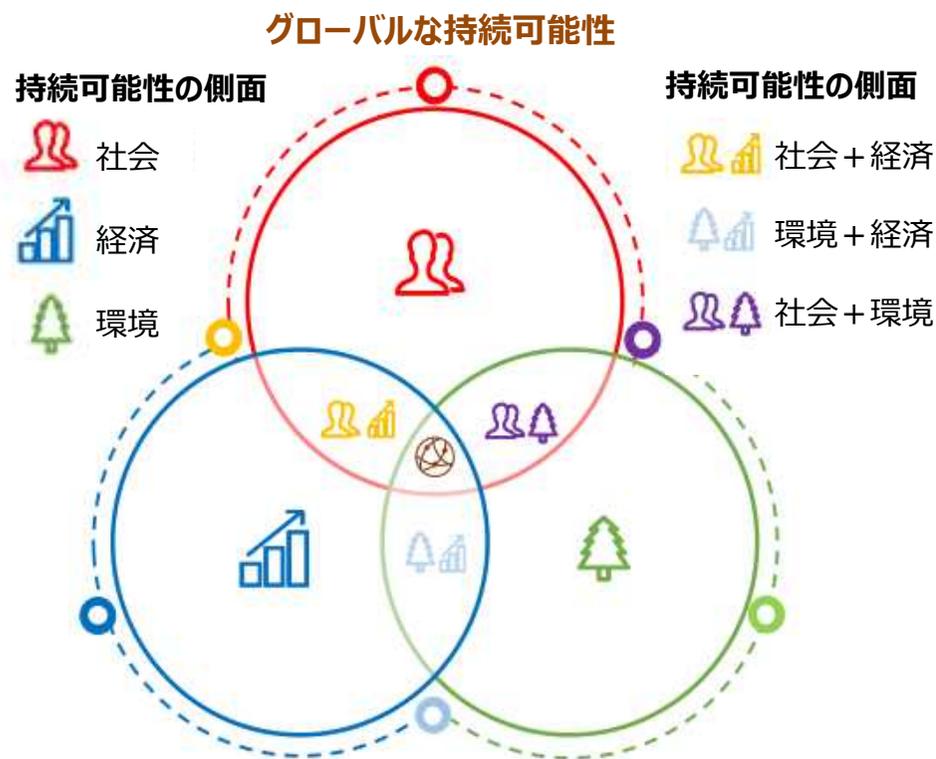
- コスト指標の分析に加え、「社会」「経済」「環境」の複合的な評価報告事例が出始めている。
- バイオ製品のLCA評価をさらにグローバルな評価指標へと深化させるためには、社会的影響を分析するツール「社会的評価（S-LCA SIA）」を取り入れることが重要。

木質バイオマスのLCA評価例

バイオマス	生産物	持続可能性の側面		
		経済	環境	社会
ポプラ	水素	LCC*	E-LCA*	S-LCA*
森林バイオマス	オキシメチレンエーテル	コスト指標	E-LCA*	SIA*
木材	メタノール	コスト指標	CO ₂ 排出量	-
木質チップ	・エタノール ・高級アルコール ・熱 ・電気	コスト指標	-	-
木材	メタン	コスト指標	-	-
ポプラ木質チップ	エタノール	-	E-LCA*	-
ポプラ木材チップ	エタノール	コスト指標	-	-
木材	・ジメチルエーテル ・メタノール	コスト指標	-	-
木材	合成天然ガス	コスト指標	-	-
ハイブリッドポプラ材	・エタノール ・高級混合アルコール ・熱 ・電気	コスト指標	-	-

* LCC(Life cycle costing):ライフサイクルコスト
 * E-LCA(Environmental Life Cycle Assessment):環境ライフサイクルアセスメント
 * S-LCA(Social Life Cycle Assessment):社会的評価
 * SIA(Social Impact Assessment):社会的影響評価

持続可能性評価の側面



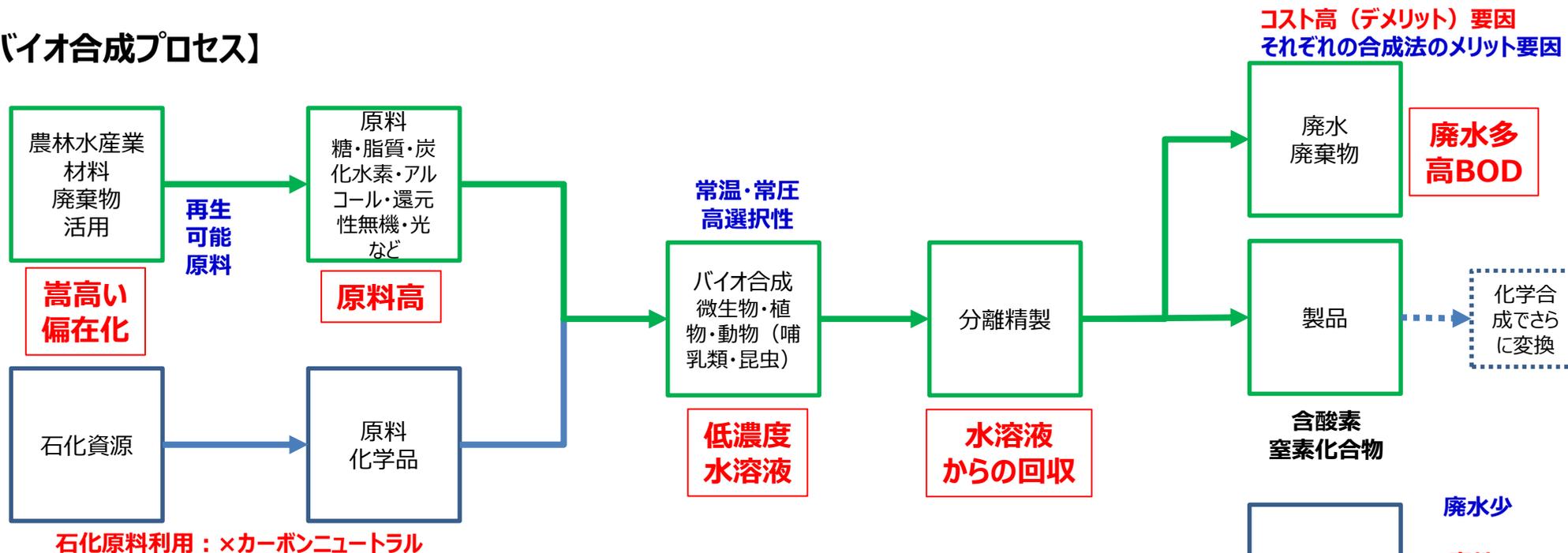
出所：Thermochemical processing of woody biomass: A review focused on energy-driven applications and catalytic upgrading

- 前章にて、環境・エネルギー分野での“バイオ”の貢献における社会的意義（環境影響度）についての文献分析により、可視化の状況や“バイオ”に対する関心の高まりを示した。
- 本章では、環境・エネルギーに貢献する“バイオ製品”の普及において大きな課題になるコストについて、プロセスフローにおけるバイオ製品のコスト構造の分析を実施して、課題の可視化を行う。
- バイオ製品のコスト負荷要因において、原料の安価・安定的な入手、生産技術（バイオ合成やバイオプロセスの生産性、ダウンストリーム技術）に改善が必要と考えられることから、課題を整理するとともに課題を解決するための切り口についてまとめる。
- さらに、バイオ製品の市場導入のために、“バイオ”の特徴を活かしたターゲット市場領域の選定の重要性について考察し、環境・エネルギー分野に貢献するために、規模感を伴った産業創出や産業持続性の観点から“連携・地域産業共生圏”などの事例を考察する。

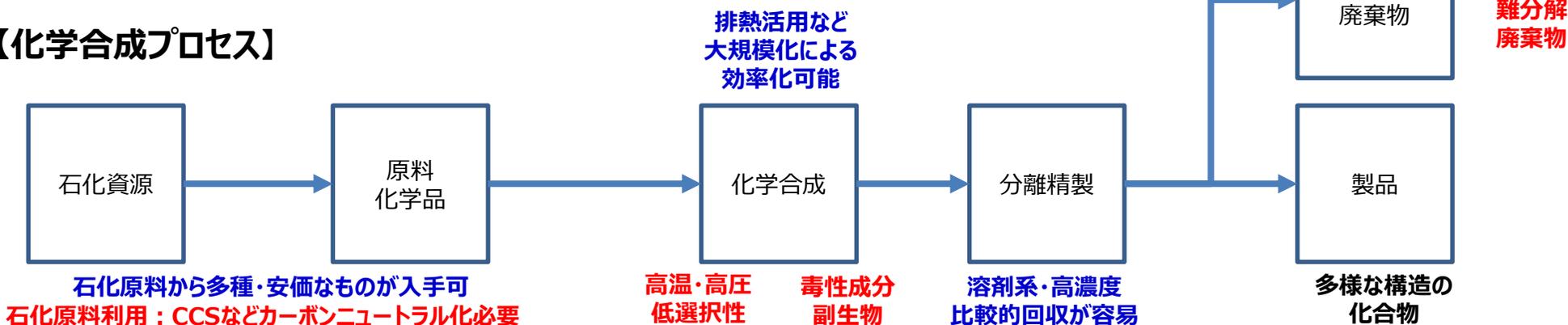
3.1. バイオものづくりにおけるコスト高要因の分析

- 化学合成とバイオ合成プロセスの比較を実施 ⇒ 安価・安定的な原料入手や生産技術の課題（バイオ合成・生産プロセスの効率、ダウストリーム負荷）などにコスト高の要因あり。
- “バイオ”の特徴を活かしたターゲット市場の選定が重要。

【バイオ合成プロセス】



【化学合成プロセス】



- バイオ製品の原料面での課題整理
 - バイオマス原料は、嵩高く、水分を多量に含み移動コストが課題。^{参考(2)}
 - 国内に賦存するバイオマスは、一定の規模感で存在するものの偏在していることもあり、焼却処理の割合が高い（収集・移動コストが課題）。^{参考(3)}
 - 直接原料となる糖類は、輸入時に糖価調整制度^{参考(4)}の対象。

- 課題解決の切り口
 - 低コストで移動可能な流通形態やオンサイトでの活用（地産地消）
 - 国内に賦存するバイオマス（、都市ゴミなども含めた廃棄物）の徹底的な有効利用による資源循環を考慮した産業化（及び、産業化を可能とする技術開発）
 - 技術を軸とした国際連携（バイオマス資源国など）
 - 食糧生産との非競合や地域の特性を考慮した上での効率的なバイオマス増産（ゲノム編集等を用いた技術開発を含む）

- 嵩高く、水分等不要含量が多いバイオマスは輸送コスト（CO₂排出量）が課題であり、経済合理的に輸送可能なバイオマスの存在量に応じて設備規模が決まる。
- 一方、分散型生産システムの観点からはメリットとなり得る（規模の事業適正は要検討）。

原料グルコースの輸送によるCO₂排出量の比較（コスト代替指標として）

- 原料グルコースの輸送について、原料産地からの輸送シナリオを想定し、輸送に係るCO₂排出量を推計
輸送距離の増加はCO₂排出量に影響し、最大（ケース③）でライフサイクルトータルのCO₂排出量が約4割増加（図1）

<ケース①：中国で製造・出荷
⇒日本国内輸送>

<ケース②：国内製造・出荷)>

<ケース③：ブラジルで製造・出荷⇒日本国内輸送)>
<ケース④：ケース③でコンテナ船（4千TEU以上)>

注：TEU（Twenty-foot Equivalent Unit、20フィートコンテナ換算）

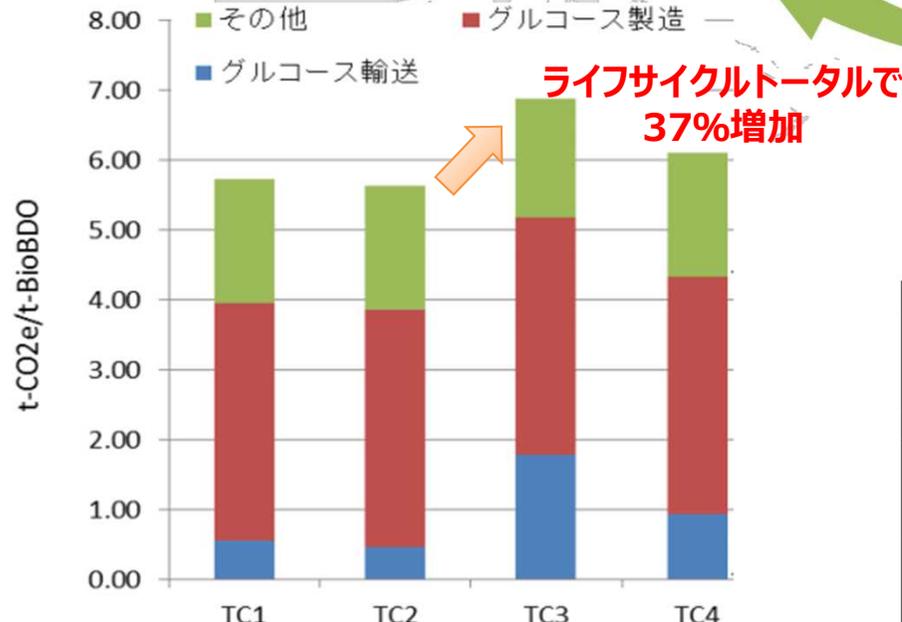


図1：原料グルコース輸送によるCO₂排出量の比較
(例：1,4-ブタンジオール (14BDO))

原料産地からの輸送シナリオ

ケース	製造地・輸送地	輸送モード	距離
TC1	中国製造・出荷	トラック10トン	1000 km
		コンテナ船<4000TEU	2111 km
TC2	北海道製造・出荷	トラック10トン	1200 km
TC3	ブラジル製造・出荷	トラック10トン	1000 km
		コンテナ船<4000TEU	21784 km
TC4	ブラジル製造・出荷	トラック10トン	1000 km
		コンテナ船>4000TEU	21784 km
		日本国内輸送	100 km

参考 (3) 原料化可能な資源の賦存量

- 賦存バイオマスは、汎用品の原料とするには規模が小さく偏在。⇒ 現状、熱回収などに活用
- 賦存バイオマス（廃棄物「畜産、活性汚泥、食品系」）や未活用バイオマス（林業資源、ブルーカーボンなど）の徹底活用と原料用バイオマスの生産がカギか。

(単位：トン/年, %)

	湿潤重量	炭素換算値	割合	利用量	利用率	備考
家畜排泄物	4,249,515	360,120	47	360,120	100	メタン発酵や廃棄物からの生分解性ポリマーの生産などの研究事例が多数報告
集落排水汚泥	1,485	143	0	127	89	メタン発酵事例あり
食品廃棄物	264,325	11,683	2	11,678	100	自治体等でのメタン発酵事例あり
製材工場等残林	439,763	113,899	15	102,930	90	前処理・糖化技術、収集コスト課題
建設発生木材	78,000	34,300	5	32,100	94	前処理・糖化技術、収集コスト課題
農作物非食用部	168,803	48,327	6	45,883	95	SIP 2などで検討中
林地残材	770,560	199,575	26	0	0	前処理・糖化技術、収集コスト課題
合計	5,972,451	768,047	100	552,838	72	
ブルーカーボン	4,400 (乾燥重量)	1,400	—			収集コスト、糖組成などの課題
廃プラスチック	9,400,000	8,100,000	—	6,600,000	82	化石燃料由来が主、熱回収利用57%。炭素換算はポリオレフィンがメインと想定
生活系ゴミ	92,894,000					

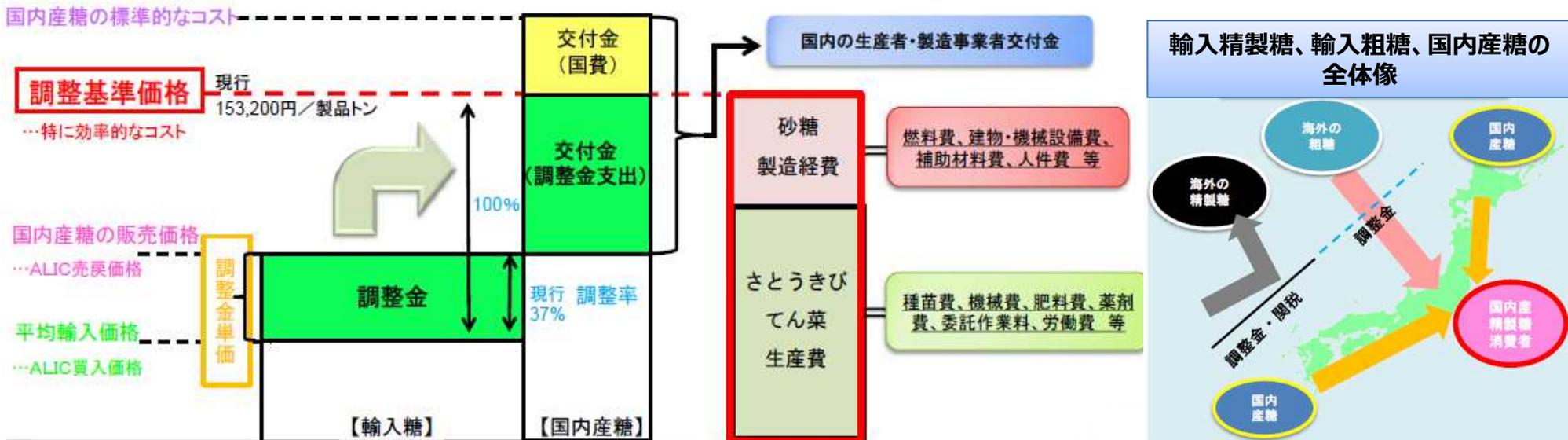
出所：「バイオマスの活用の推進（バイオマス賦存量と利用）」（農水省）、「マテリアルリサイクルによる天然資源消費量と環境負荷の削減に向けて」（環境省）などを基に
NEDO技術戦略研究センター作成（2020）

参考（４）糖価調整制度の例

- バイオ製品の原料となる砂糖やでん粉（ぶどう糖溶液含む）の国内価格には、国内の製糖、でん粉産業保護の観点から「糖価調整制度」が存在（下図参照）。
- 対象とならない国内の非可食原料は、安価・安定的な流通量が限られている状況。

糖価調整制度の概要

- ◆ 砂糖及びでん粉について、「砂糖及びでん粉の価格調整に関する法律」に基づき、諸外国との生産条件の格差から生ずる不利を補正するため、安価な輸入品から徴収した調整金を主たる財源として、国産品の生産者及び製造事業者に対し、国産品の生産・製造コストと販売額との差額相当の交付金を交付する価格調整制度。



出所：「令和2砂糖年度・令和2でん粉年度における価格調整制度の各種指標の決定等について（令和2年9月15日農林水産省プレスリリース）」及び「甘味資源部会 令和2年度第1回（令和2年9月11日）資料3：砂糖及びでん粉をめぐる現状と課題について（令和2年9月農林水産省）」

■ 生産技術の観点からの課題整理

- バイオ合成は一般に、反応速度や触媒回転数が低く、また、水溶液中での反応でありターゲットの溶解度や生体毒性の影響を受けやすい。^{参考(5)}
- また、水溶媒からの分離回収負荷が高く、さらに、生産工程から発生する多量の廃水処理が必要^{参考(6)}である。
- 反応プロセスは、一般に通気攪拌型の反応槽が用いられ、バッチ反応が多いため釜効率が低く、上記全てがコストアップの要因となる。

■ 課題解決の切り口

- バイオ合成触媒や生産菌のさらなる性能向上
(例:データ駆動型の合成生物・合成酵素開発、新規生産経路設計)
- “選択性が高い”という特徴を活かした適切なターゲットの選定^{参考(7)}
- 分離回収 (ダウンストリームとのマッチング) をあらかじめ考慮した上での生産技術開発 (例:誘導体化によるターゲット形態の選択^{参考(8)})
- 低コスト化のためのエンジニアリング技術開発 (例:連続反応化などによる釜効率の改善) や効率的な低コスト廃水処理技術開発
(バイオものづくりのLCA改善につながる)^{参考(9)}
- 成功事例に学ぶ^{参考(11)(12)(13)}

- バイオ合成は、一般に、高選択性のバイオ触媒を用いて、水溶液中で、常温常圧のマイルドな条件で反応を行う、という特徴に由来するメリットとデメリットがある。
⇒メリットを生かし、デメリットを補完する技術開発が重要。

メリット

- 水溶液中での反応、生体触媒利用、天然原料
→ 毒性物質や危険物を使用しない
- 常温常圧での反応
→ 環境調和型、大規模化を要しない（熱回収、高圧対応など）
- 選択性が高い
→ バイオならではの骨格、副生物が少ない

デメリット

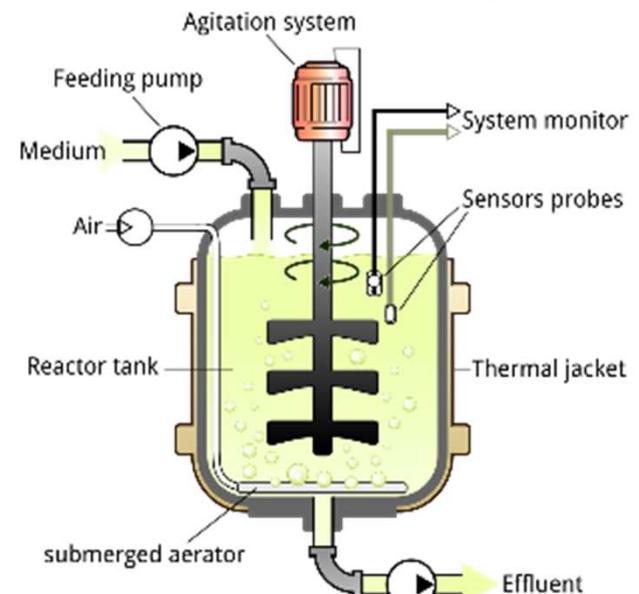
- 水溶液中での反応が一般的
→ 分離精製負荷が高い
- 反応速度が遅い（アレニウス原理）
→ 反応時間が長い（釜効率が悪い）
- 蓄積濃度が低い（生体毒性、溶解度、塩濃度などの影響）
→ 釜効率が悪い、分離精製負荷が高い

反応プロセスは、通気攪拌型リアクターが主流



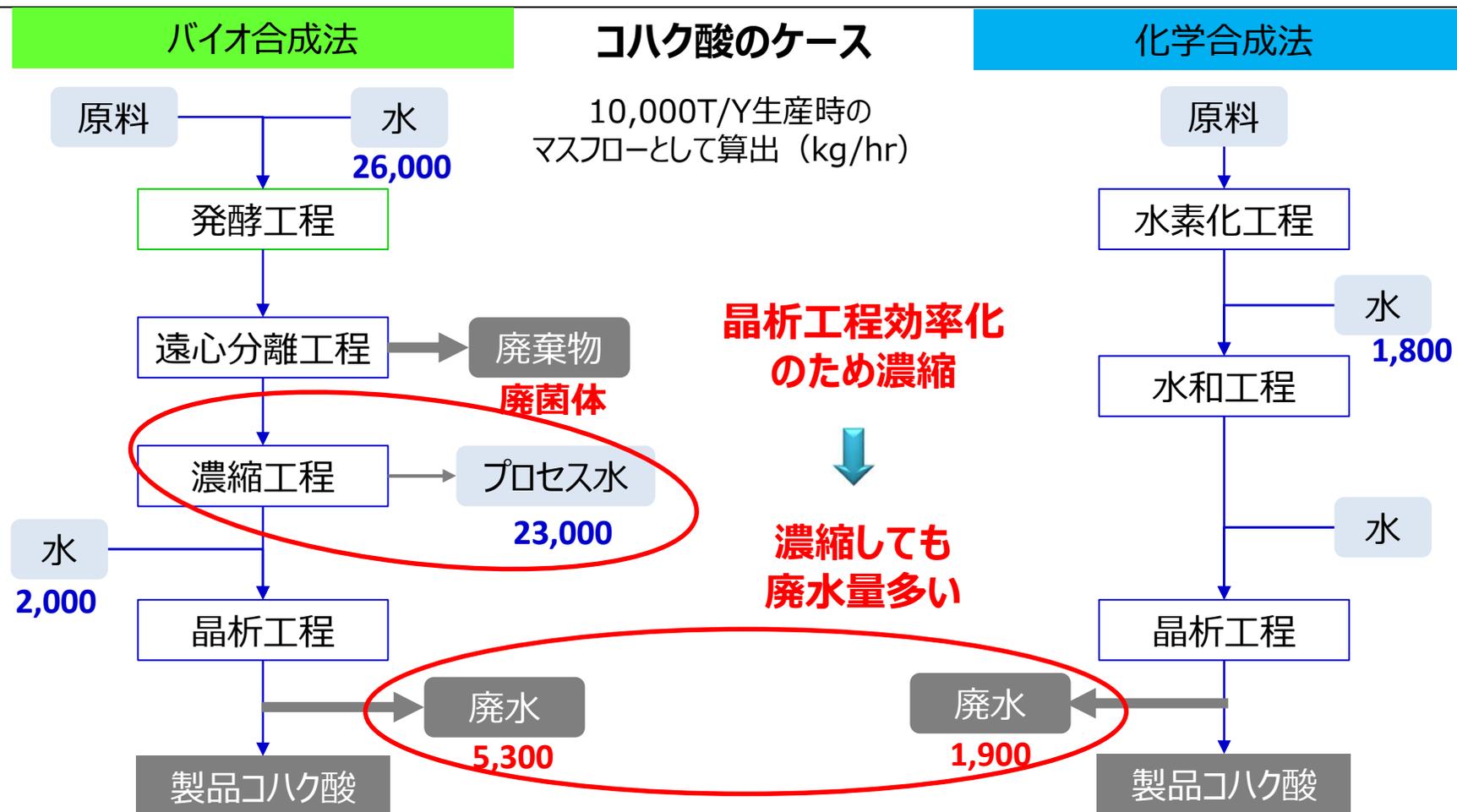
- 好気反応は、酸素を溶解させる攪拌機が必要
→ 攪拌機コスト（CAPEX）、動力コスト（OPEX）負担が高い
- 連続反応に適していない
→ 釜効率やダウンストリームとの適合性からは連続反応が適切

【一般的な発酵槽】



参考 (6) ダウンストリームプロセスでの現状と課題

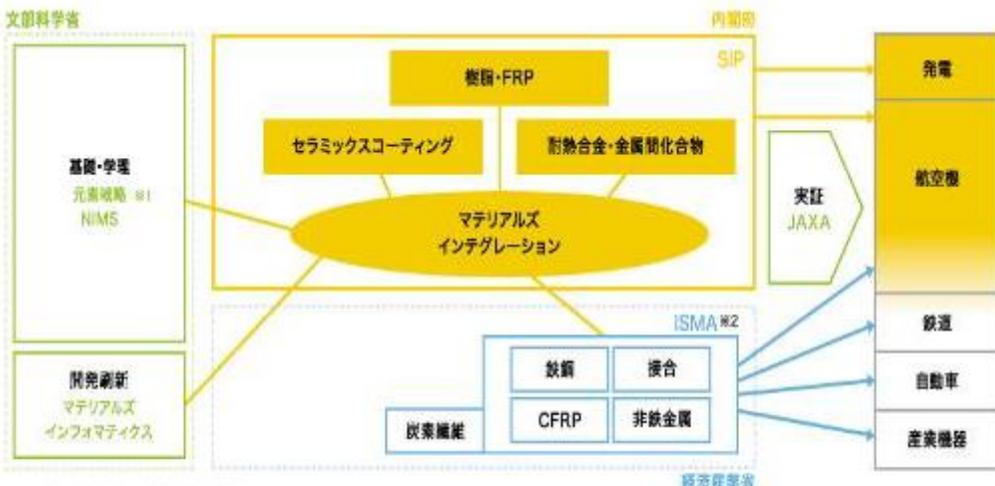
- バイオ合成は、通常、水溶媒で反応させることから分離精製負荷が高い（コストアップ要因）。
 - ◆ 濃縮／蒸留工程：水の比熱が高いため有機溶媒に比べてエネルギー消費大
 - ◆ 晶析工程：多くの廃水が発生、回収工程を加える必要も多い
 - ◆ 抽出工程：回収工程を加えると、多くの廃水が発生、エネルギー消費大
- 中程度のBOD含有の多量の廃水が発生（難分解性物質の含有は比較的少ない）。



参考 (7) データ駆動型のターゲット選定

- 酵素反応の選択性や代謝分子の特徴を活かしたターゲットの選定が重要。
 バイオならではの化合物骨格による差異化や、バイオマス原料に含まれる化合物中に存在する酸素や窒素を有効活用することにより、原料原単位を改善。
- バイオ合成反応の技術検証には比較的時間がかかるため、所望の物性を示す分子構造をあらかじめ設計するデータ駆動型技術（マテリアルインフォマティクス）は極めて有効。

SIP 革新的構造材料研究

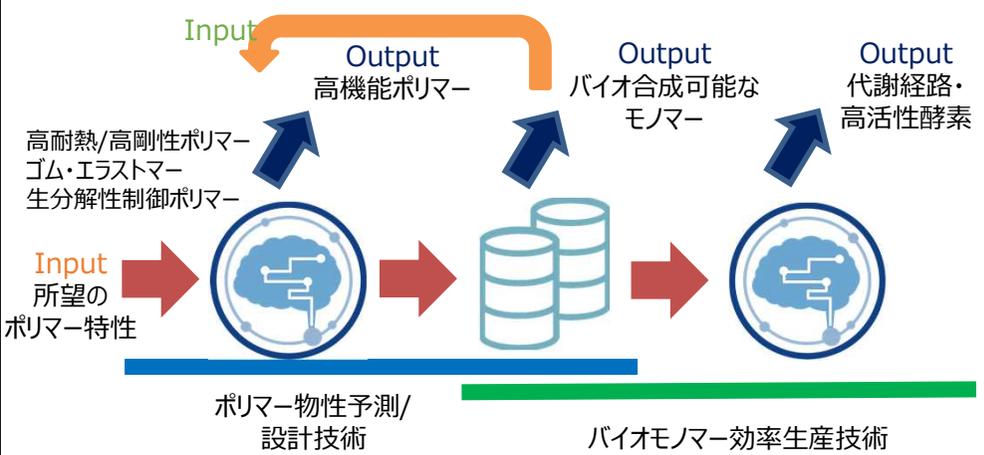


※1 元素増産プロジェクト(所管:文部科学省)
 ※2 新構造材料技術研究会 (Innovative Structural Materials Association)
 2014年度NEDO委託事業(未来創成研究プロジェクト、所管:経済産業省)

出所: 科学技術振興機構 戦略的イノベーションプログラム (SIP) 「革新的構造材料」

マテリアルデータ、バイオデータを駆使して所望のポリマーを設計

理化学研究所 中嶋氏をリーダーとした研究コンソーシアム



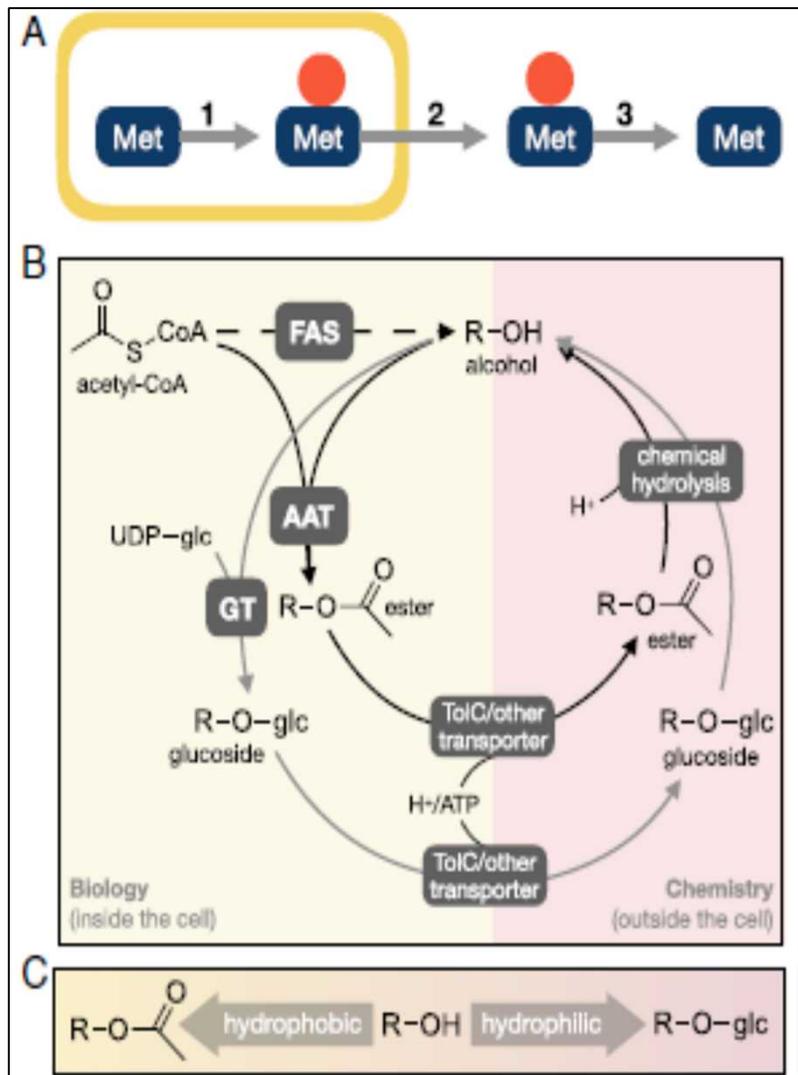
出所: 第二期SIP スマートバイオ産業・農業基盤技術

米国動向: マテリアル・ゲノム・イニシアチブ 材料科学にコンピュータを徹底的に活用して新しいマテリアルを2倍の速度で開発する目標で、2011年にホワイトハウスがプロジェクトを立ち上げ (>250M \$)
 (2016年以降目立った動きはない模様)

参考 (8) 反応効率向上や分離回収の容易化

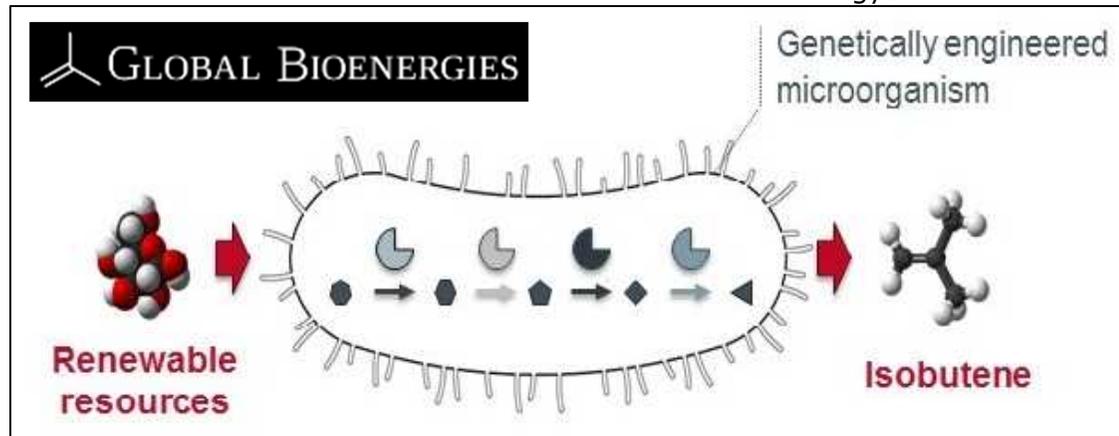
- ターゲットを誘導体化して生産することやガス状化合物として生産することによる反応効率の向上や分離回収の容易化などが有用（ダウンストリーム負荷低減）。

エステル化 配糖体化 の例

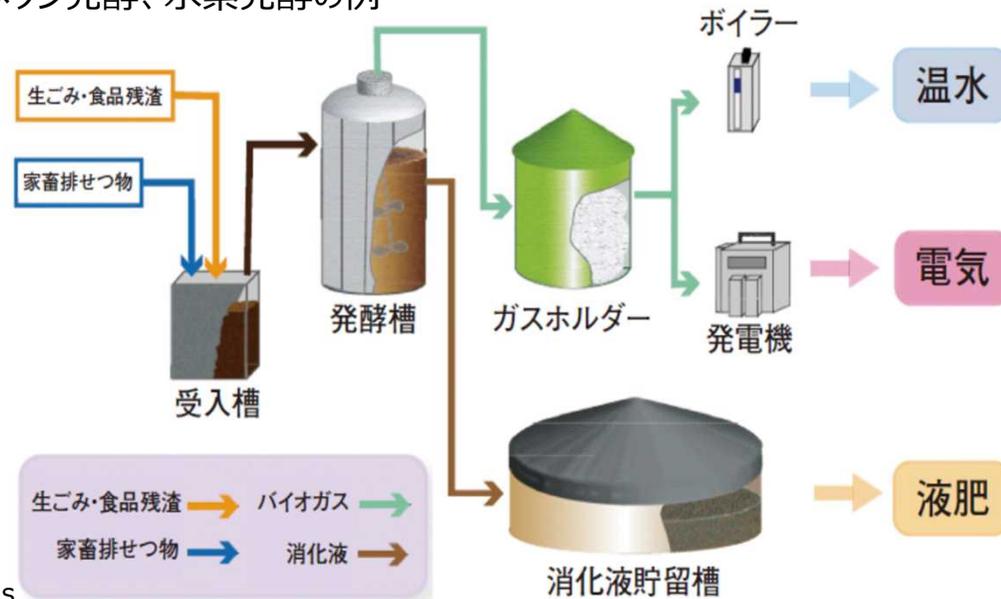


ガス状のイソブテンの生産例

出所：Global Bioenergy社ホームページ



メタン発酵、水素発酵の例



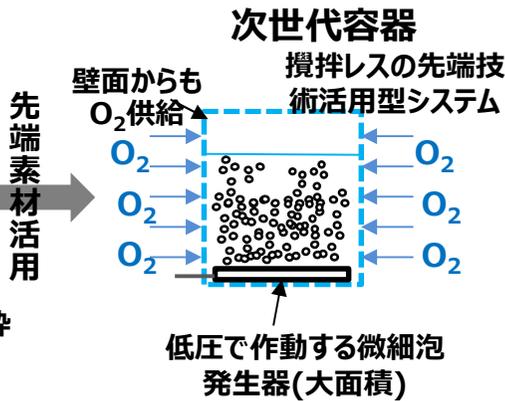
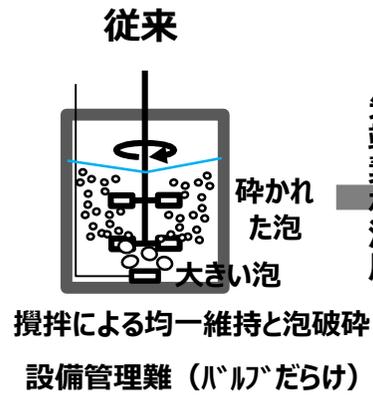
出所：Bioderivatization as a concept for renewable production of chemicals that are toxic or poorly soluble in the liquid phase. (PNAS. 2020)

出所：バイオガス事業推進協議会 バイオガス事業の礎

■ バイオ合成によるものづくりを効率化させる生産プロセス・エンジニアリング開発や分離精製、廃水処理技術の高度化によるトータルコスト低減が重要。

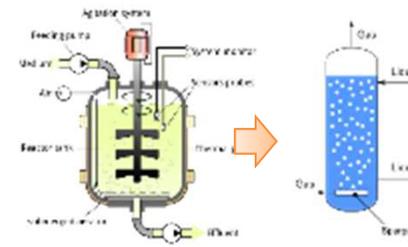
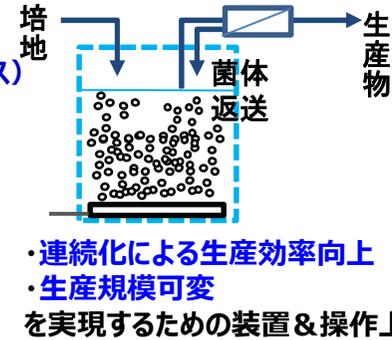
<培養装置の技術開発例>

ゼロベースで考える次世代型培養槽の実証 (省エネ、低コストで多品目・多様な量を、素早く、安全に)



各種プロセスを効率化可能な先端操作

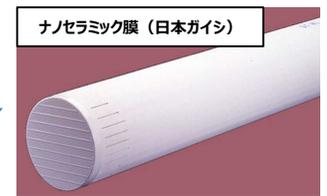
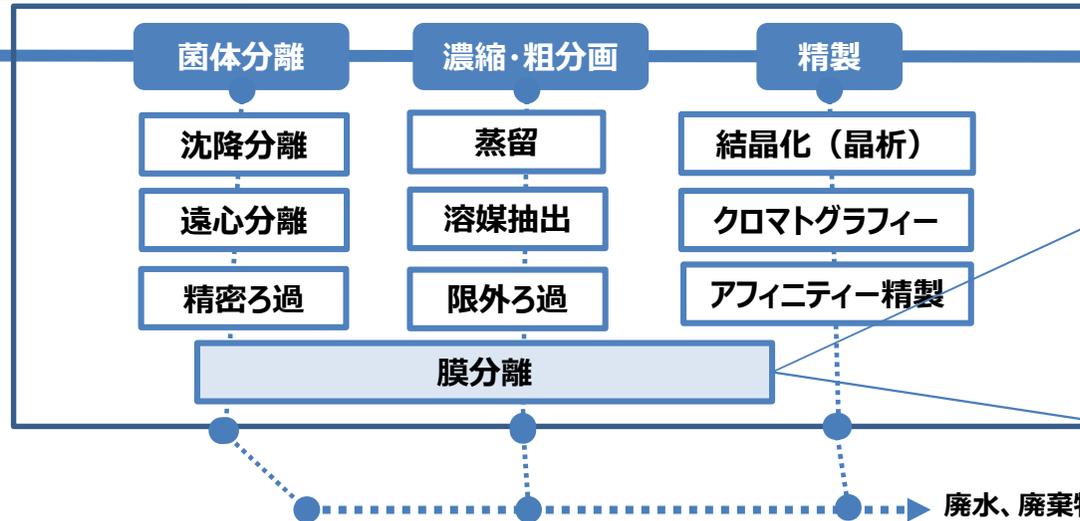
- ・省エネ (撈拌レス)
- ・十分な $k_L a$
- ・高 C*
- ・不均一レス
- ・放熱 O
- ・クリアランス容易
- ・管理作業容易



Bubble Column reactorの適用例報告も増加

<バイオプロダクツの分離精製の技術開発例>

出所：大阪工業大学/工学部 生命工学科 長森准教授



生産物の物性に最適化

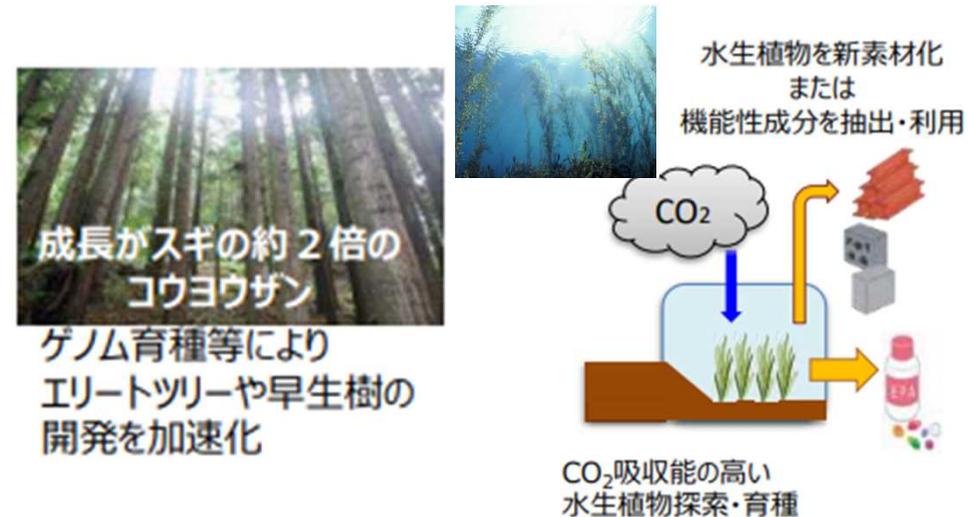
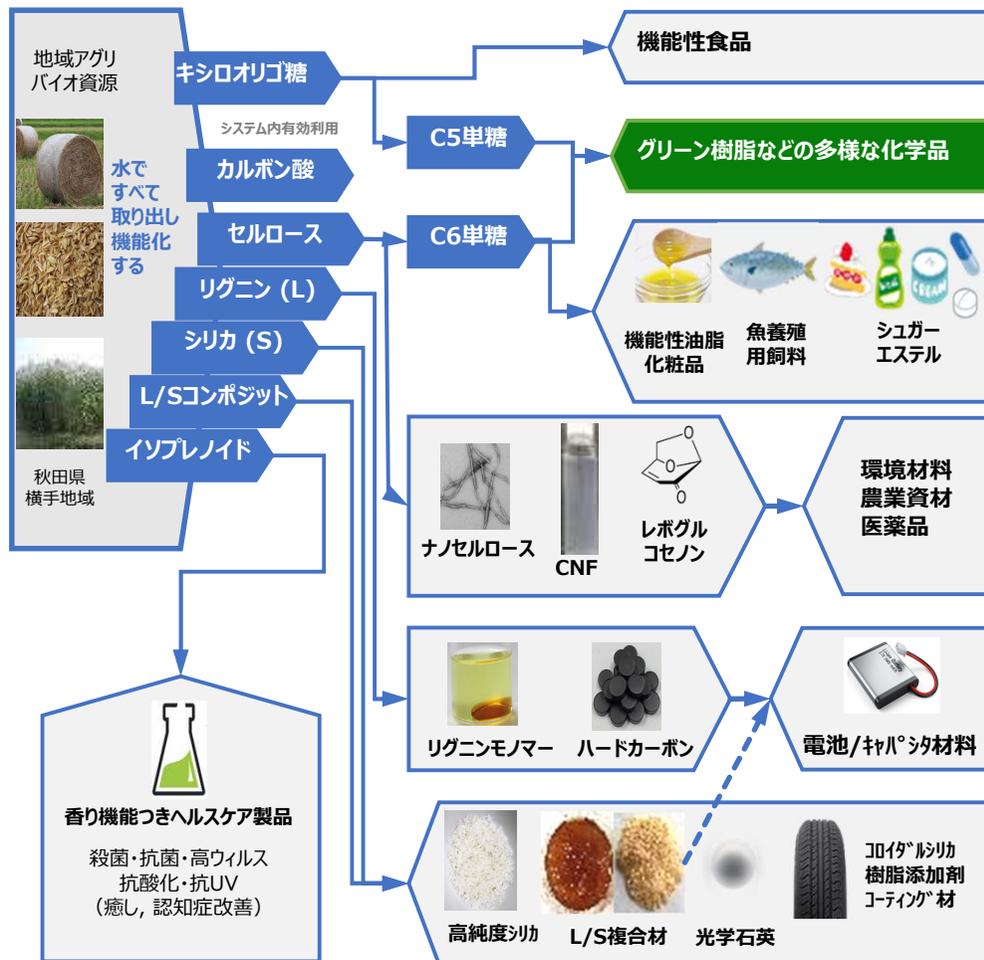


参考 (10) バイオマス・廃棄物資源の徹底的な活用

- 国内に賦存するバイオマス（、及び廃棄物）の徹底活用のための技術開発の事例
（非可食農業廃棄物のカスケード利用や廃棄物からのエタノール生産など）
- バイオ製品用バイオ原料の生産技術開発事例
（ゲノム編集などによる早生植物／燃料作物開発・ブルーカーボン活用など）

農林水産資源の非可食部を徹底的に活用するスケールアウト技術

出所：アグリバイオ・化学システム 研究代表 九州大学 林潤一郎教授

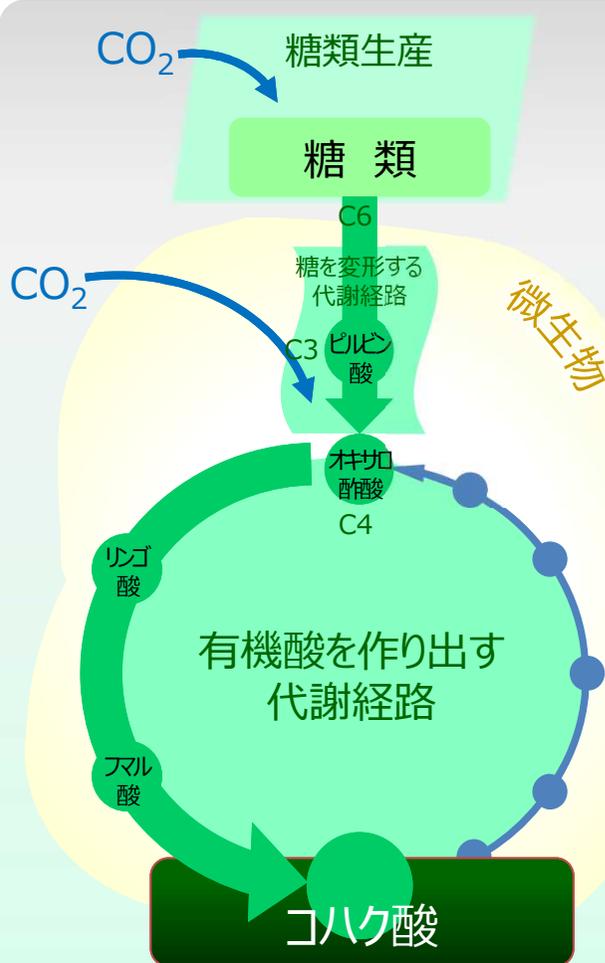


参考 (11) 成功事例に学ぶ：生産経路設計 (バイオコハク酸の例)

TSC Bioeconomy Unit

- 反応時にCO₂を取り込む生産経路を設計することにより原料理論収率が優位になることで設備コスト高が吸収され、トータルコストは化学法を凌駕。

バイオ合成法

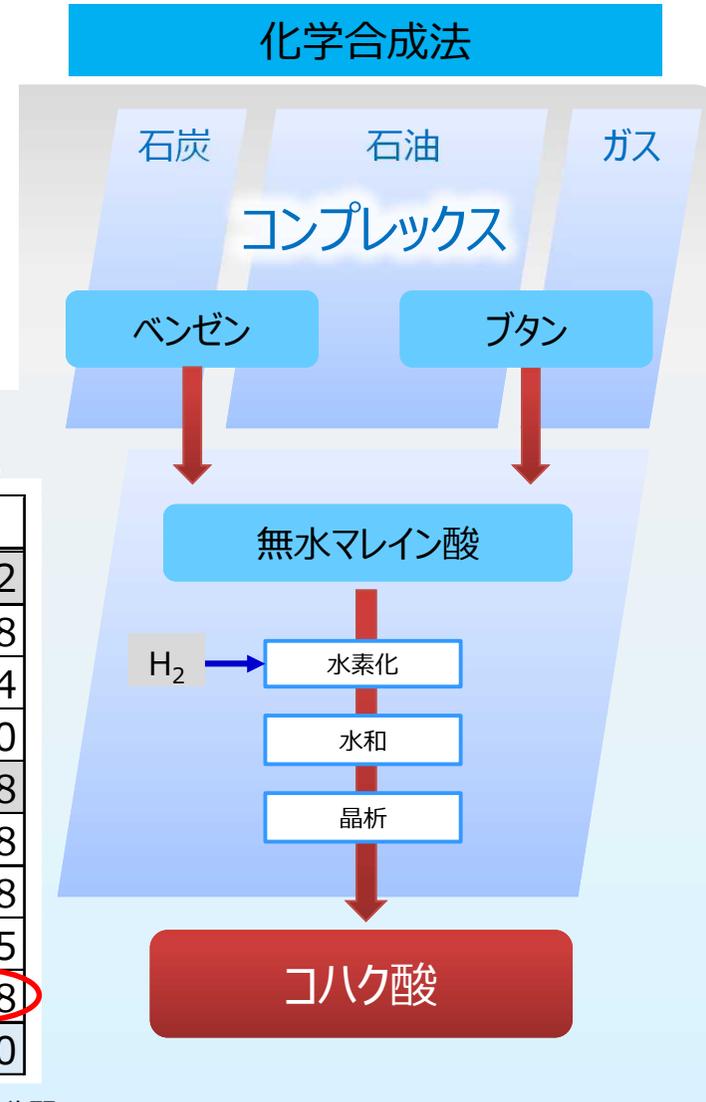


- ✓ 生体分子で比較的作りやすい
 - ✓ 途中でCを1つ取込むため糖の原料原単位が良い
 - ✓ 設備投資額は若干高い
 - ✓ 冷却のための用役費高い
- が、比例費優位のインパクトが高く、化学法（石化原料）に比べて安価

キャパシティ：10,000T/Y (¥/kg)

バイオ合成法		化学合成法
131.6	変動費	165.2
104.4	原料	158.8
27.3	用役	6.4
-0.1	副生物控除	0
148.3	固定費	134.8
59.8	通常運転	59.8
13.8	メンテナンス	13.8
49.2	一般管理費	48.5
25.5	減価償却	21.8
279.9	合計	309.0

化学合成法



出所：NEDO成果報告書：「スマートセルによる物質生産分野に係る環境・経済への波及効果分析及び関連技術動向調査」

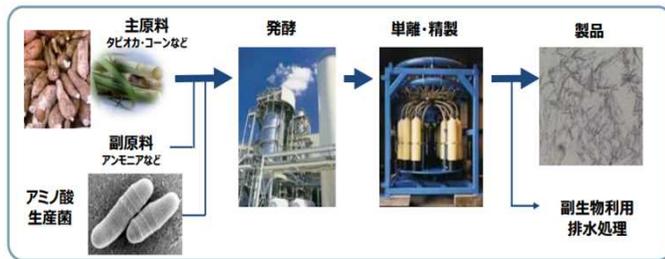
参考 (12) 成功事例に学ぶ：生産経路設計・ターゲット選定

TSC Bioeconomy Unit

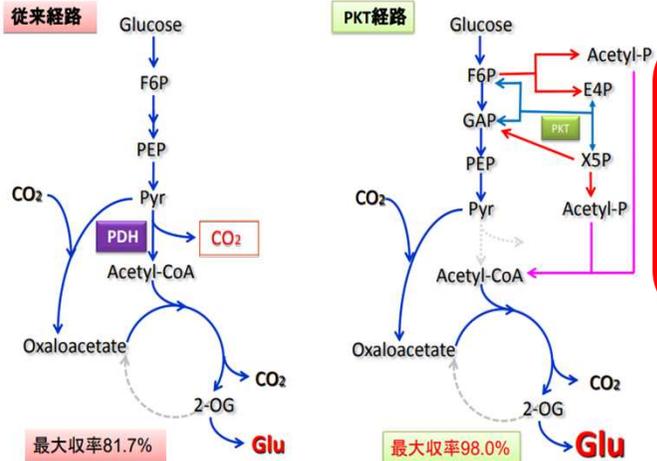
- 味の素やCargillは、代謝設計技術を活用して、新規ルートによる差異化で事業化を達成。
- スパイバーは、世界初のタンパク質ベースの素材をテキスタイルや自動車等の構造材へ展開。

事例①：味の素（日本）

アミノ酸発酵生産プロセス



新規代謝経路利用による収率向上



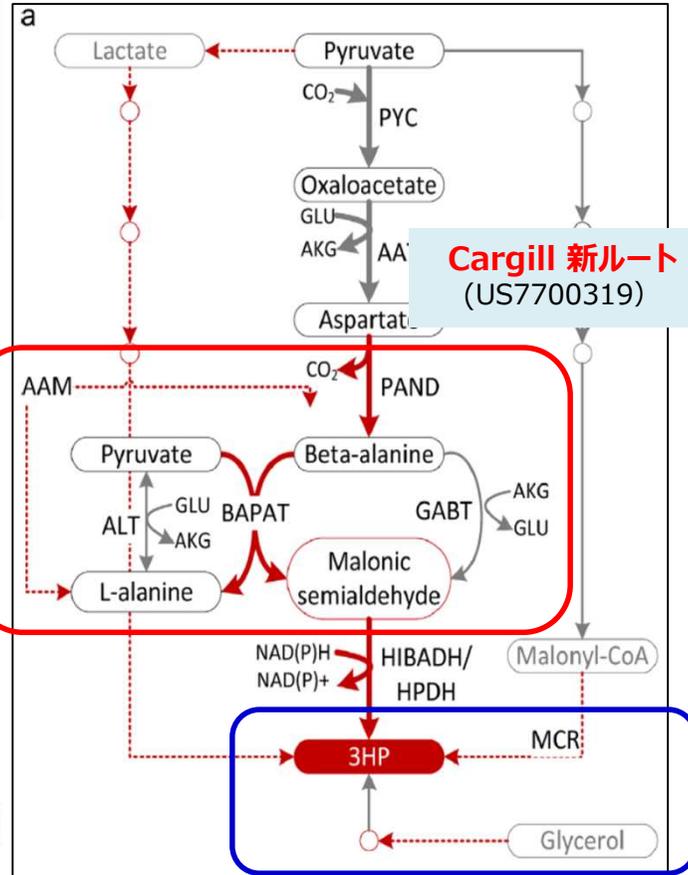
PKT (phosphoketolase) 導入によるグルタミン酸収率向上と排出CO₂削減

Innovative metabolic pathway design for efficient L-glutamate production by suppressing CO₂ emission. J. Biosci. Bioeng. (2007)

事例②：Cargill（米国）

バイオベースアクリル酸

BASF, Cargill, Novozymes 連携にて事業化



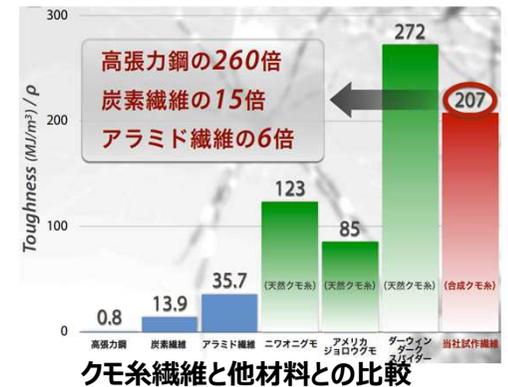
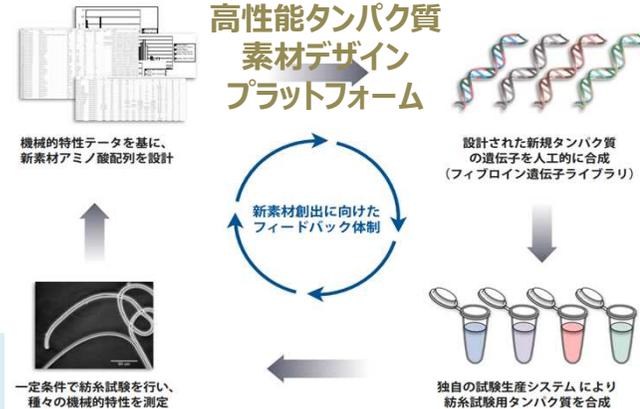
Cargill 新ルート (US7700319)

DuPont 旧ルート (US6,852,517)

出所：各種参考資料[基]にNEDO技術戦略研究センター作成 (2020)

事例③：スパイバー（日本）

高性能タンパク質素材デザインプラットフォーム



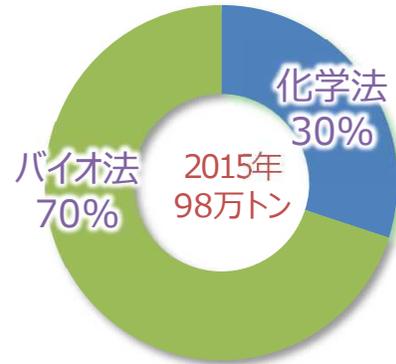
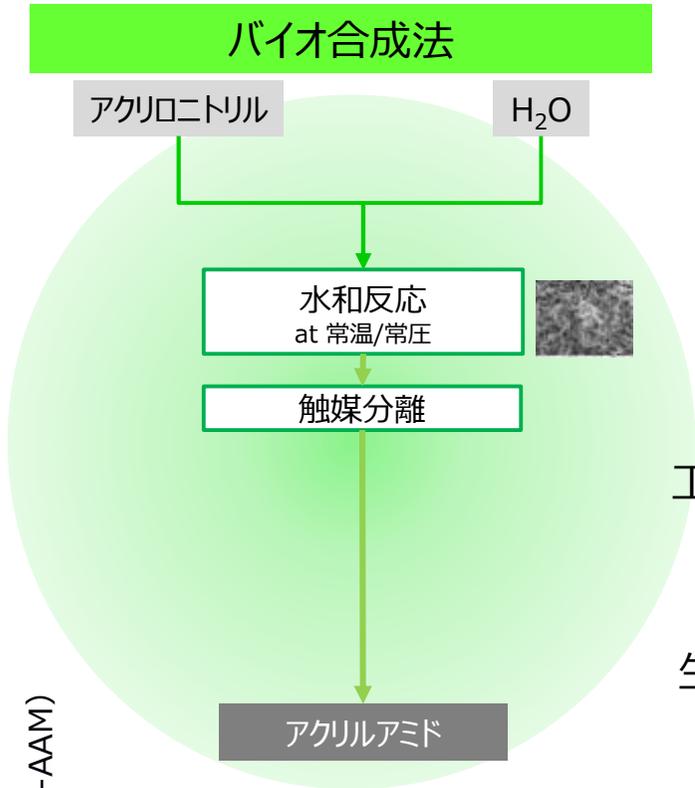
クモ糸繊維と他材料との比較



構造タンパク質素材を用いたアウトドアジャケット
発酵量産プラントをタイに建設 (米国でも現地ADM社との合併プラントを建設予定)

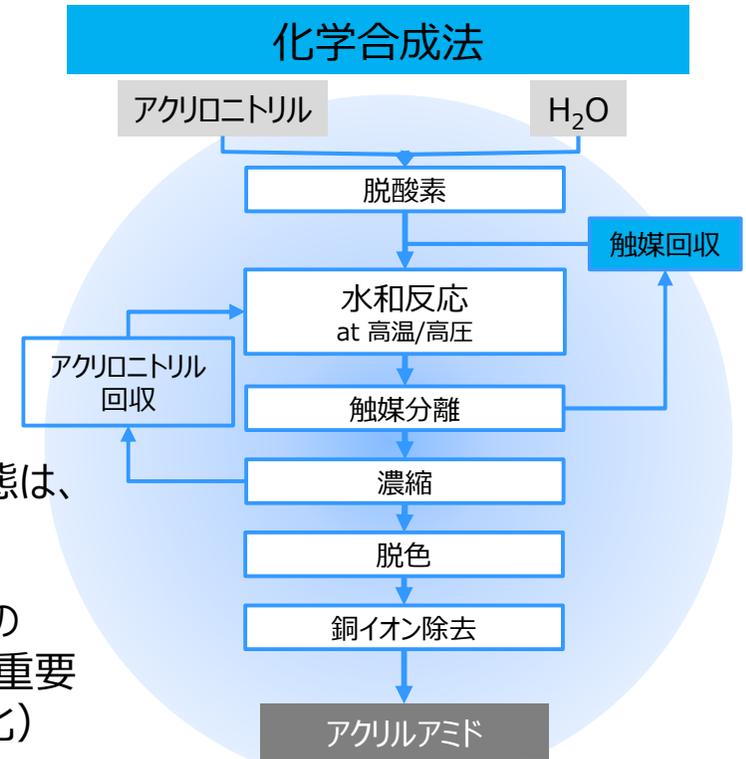
スパイバー社ホームページ

高性能触媒（選択性、添加率、生成物耐性）と生体触媒を有効に活用した製造プロセスエンジニアリングにより、化学法を凌駕するプロセスイノベーションを達成。

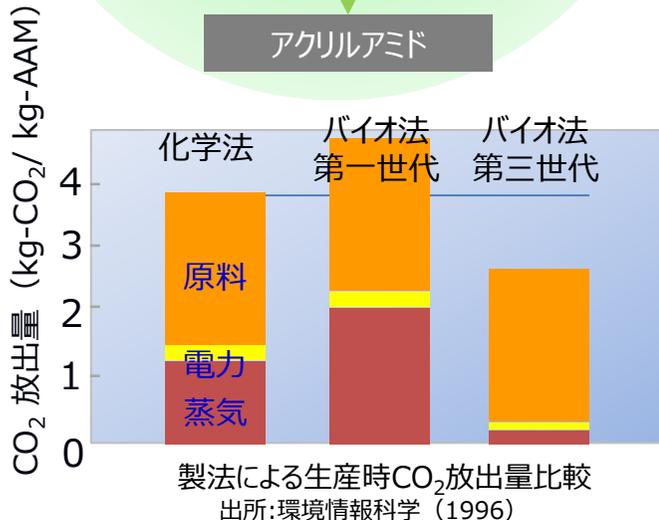


工業用アクリルアミドの流通形態は、**50%水溶液が主流**

バイオ合成法で50%以上の生成物濃度を達成できた点が重要
→濃縮不要（省エネルギー化）



* 化学法大規模プラントでは、廃熱利用など効率的に設計、低コスト化が可能だが、水溶液流通形態は、輸送コストが問題となり、オンサイト化ニーズが増加



- ターゲット市場領域の観点からの課題整理^{参考(14)}
 - 燃料やエネルギー分野での活用では圧倒的にバイオマス原料が不足。
 - 汎用化学品への活用も多くの品種を対象とするには現状の国内バイオマス原料では不足。
 - 高付加価値品への活用は、バイオマス原料からの制約は少なく、日本の強みを活かせる分野。しかし環境へのインパクト（貢献）を考慮するとミドルマス以上も対象とすべき。
- 課題解決の切り口
 - 産業・市場規模と環境へのインパクトを考慮すると、ポリマーやプラスチックなどの分野は適切なターゲット領域と考えられる。^{参考(15)}
 - 高付加価値品の事例としては、川下産業の強みから、自動車材料（ガラス代替光学樹脂、モーター・電池材料）などでのバイオベースポリマー活用が想定される。
 - 国主導で、インパクトを示すことができるようなフラッグシップターゲットを設定し、バイオマス原料からのチェーンを構築・量産化効果を得ることができるプラットフォーム形成の実証事例を示すことも重要ではないか。

化学品の価格と規模について

高機能化学品

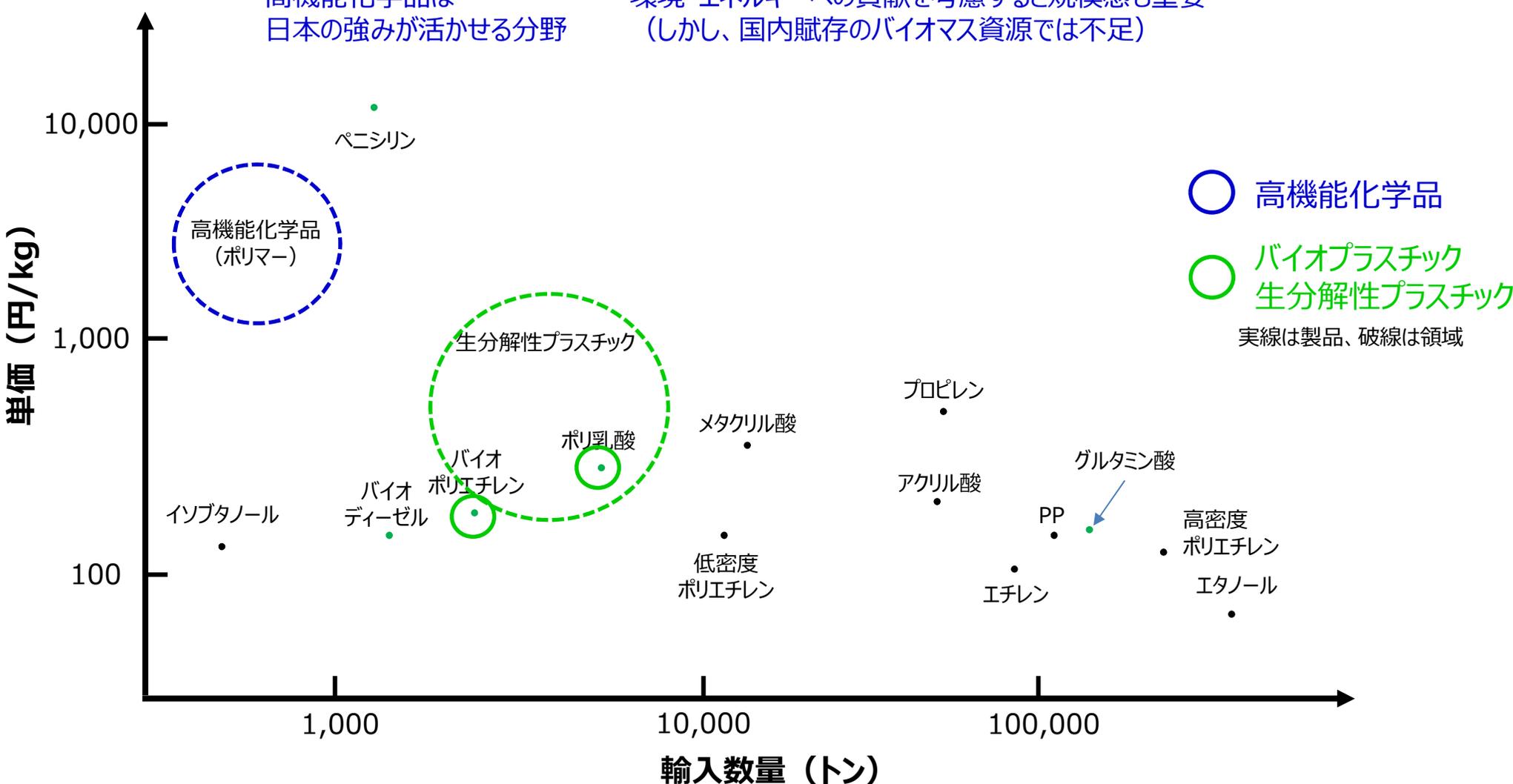
ミドルマス化学品

汎用化学品

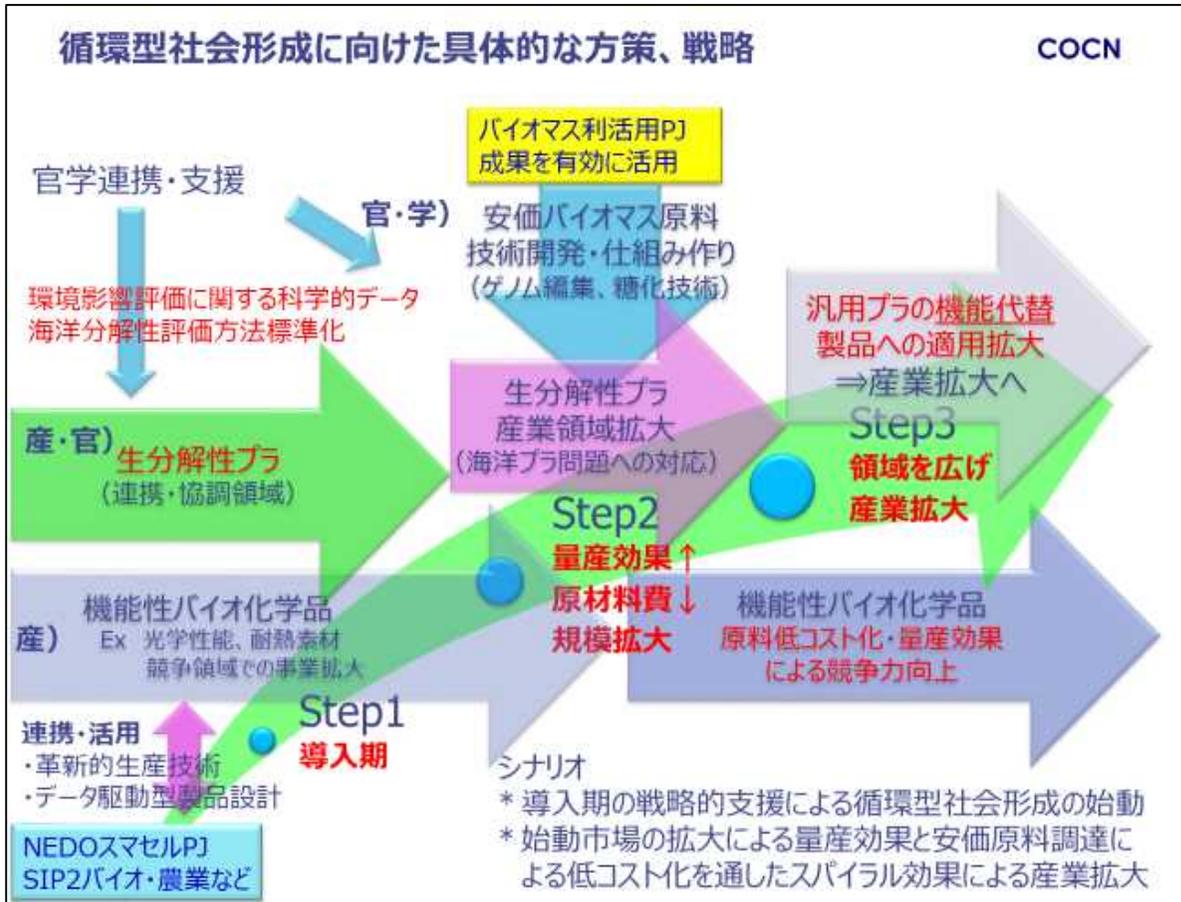


高機能化学品は日本の強みが活かせる分野

環境・エネルギーへの貢献を考慮すると規模感も重要 (しかし、国内賦存のバイオマス資源では不足)

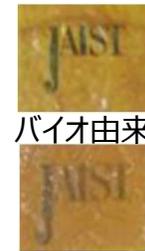
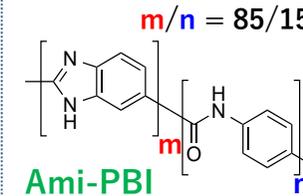


- 生分解性プラスチックや機能性バイオ化学品（例えば、電池材料やモーター部材など）への産業界の参入ニーズは高く、アカデミアでも基盤的技術開発が積極的に行われている。



モーター・電池材料の研究開発例示

内閣府第2期SIPスマートバイオ産業・農業基盤技術（微生物由来の芳香族バイオマスを用いた高機能性マテリアルの製造）
微生物生産した芳香族化合物を用いて、Liイオン伝導性PBI二次電池、超高耐熱性PBI電線被覆、高機能性複合材料等を開発
試薬（石化品）由来



出所：東京大学レスリース、農研機構 生物系特定産業技術研究支援センターHP

生分解性ポリマーの研究開発例示

分解開始スイッチ機能を有する酵素内包生分解性プラスチックの開発

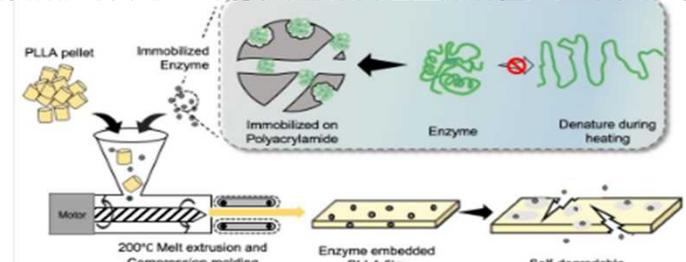


図1 高耐熱性固定化酵素内包ポリ乳酸の作製と分解模式図

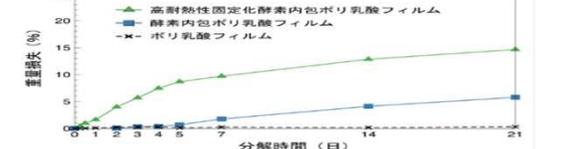


図2 酵素内包ポリ乳酸フィルムの水環境下での生分解試験

出所：東京大学大学院農学生命科学研究科 岩田研HP

出所：産業競争力懇談会 COCN 推進テーマ「デジタル・バイオエコノミーの実現に向けて」最終報告書

フラッグシップターゲット：バイオマス資源の有効活用の観点からは、酸素・窒素含有化合物が原料原単位において有利
ポリエステル、アクリル、ポリアミド、ウレタンなどの原料用モノマーなど
(競争領域の正当な競争を阻害しない配慮が必要)

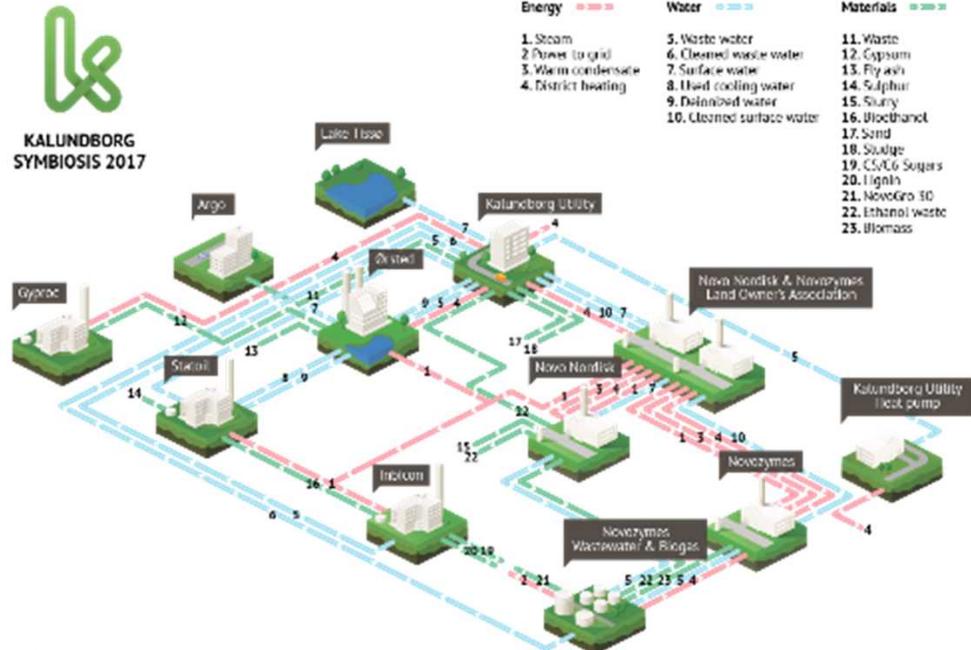
- 継続的なバイオ産業化の観点からの考察
 - バイオ製品の産業化を加速するためには、環境に加え、社会への貢献の観点から評価（社会的評価）し、共通理解の上で推進することが重要。
 - 輸送コストが課題のバイオマス資源を環境・エネルギーへ貢献する分野で活用するためには、できる限り輸送を避けた、地域共生型の産業都市（バイオマスタウン）の形成及びクラスター化／グリッド化が有効ではないか。
 - その際に技術の核となる研究開発拠点（連携ラボ・バイオファウンドリ）も競争力強化や人材育成に重要ではないか。
 - バイオ製品産業自体で経済合理性を確保することが前提ではあるが、地域の持続的な一次生産、再生エネルギー活用、資源循環、さらに雇用創出も併せて地域共生圏構築というランドデザインのもとでの取り組みという方策も有効ではないか。
- 継続的なバイオ産業化の観点での参考事例
 - 産業共生の事例（デンマーク、カルンボ-市）や、エネルギーや交通などを総合的に実施する地域公共サービス（ドイツ、シュタットベルケ）^{参考(16)}
 - 官民連携共同プロジェクトの事例
（米国：Farm to Fly, バイオジェット燃料実用化をめざすプログラム）^{参考(17)}

参考 (16) 制度設計 (地域共生圏) の事例

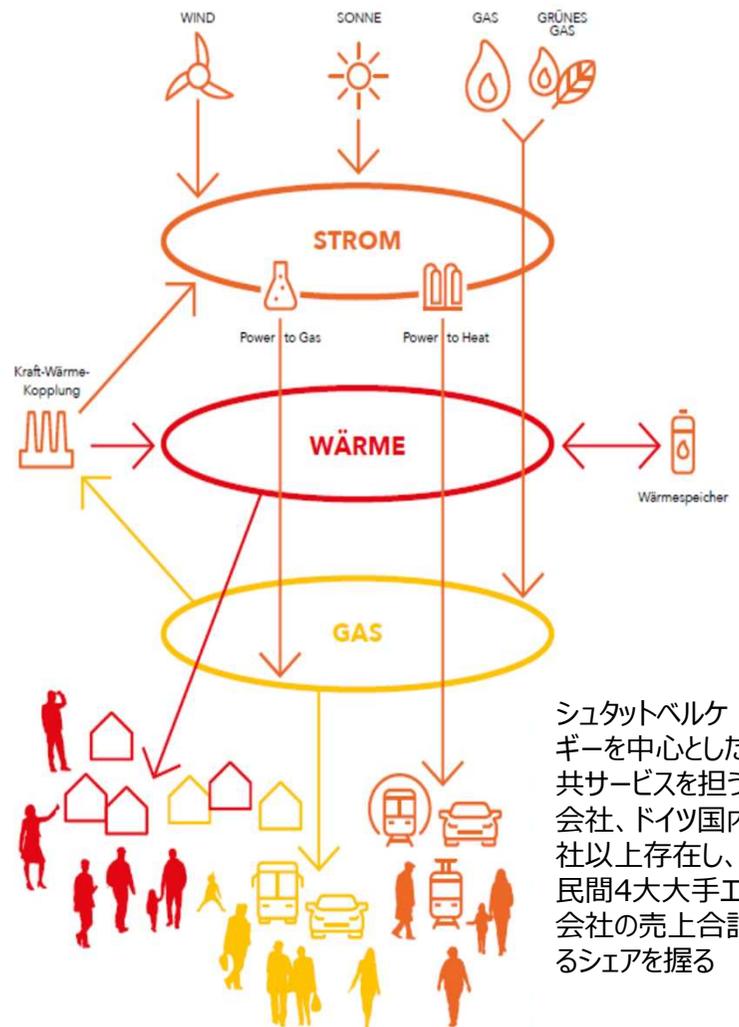
■ 企業や自治体、市民参加による産業共生都市（産業、エネルギー、交通等の社会インフラ連携）の事例は、日本での実施においても参考になる。

デンマーク カルンボー市のSymbiosiscenterの例

産業共生発祥の地（40年前から）、工場と都市が共存、火力発電所（バイオマス）を中心に広がり、パイプラインを通して、エネルギーや水を共有、廃水の共同処理などGHG削減に大きく寄与



ドイツ シュタットベルケの例

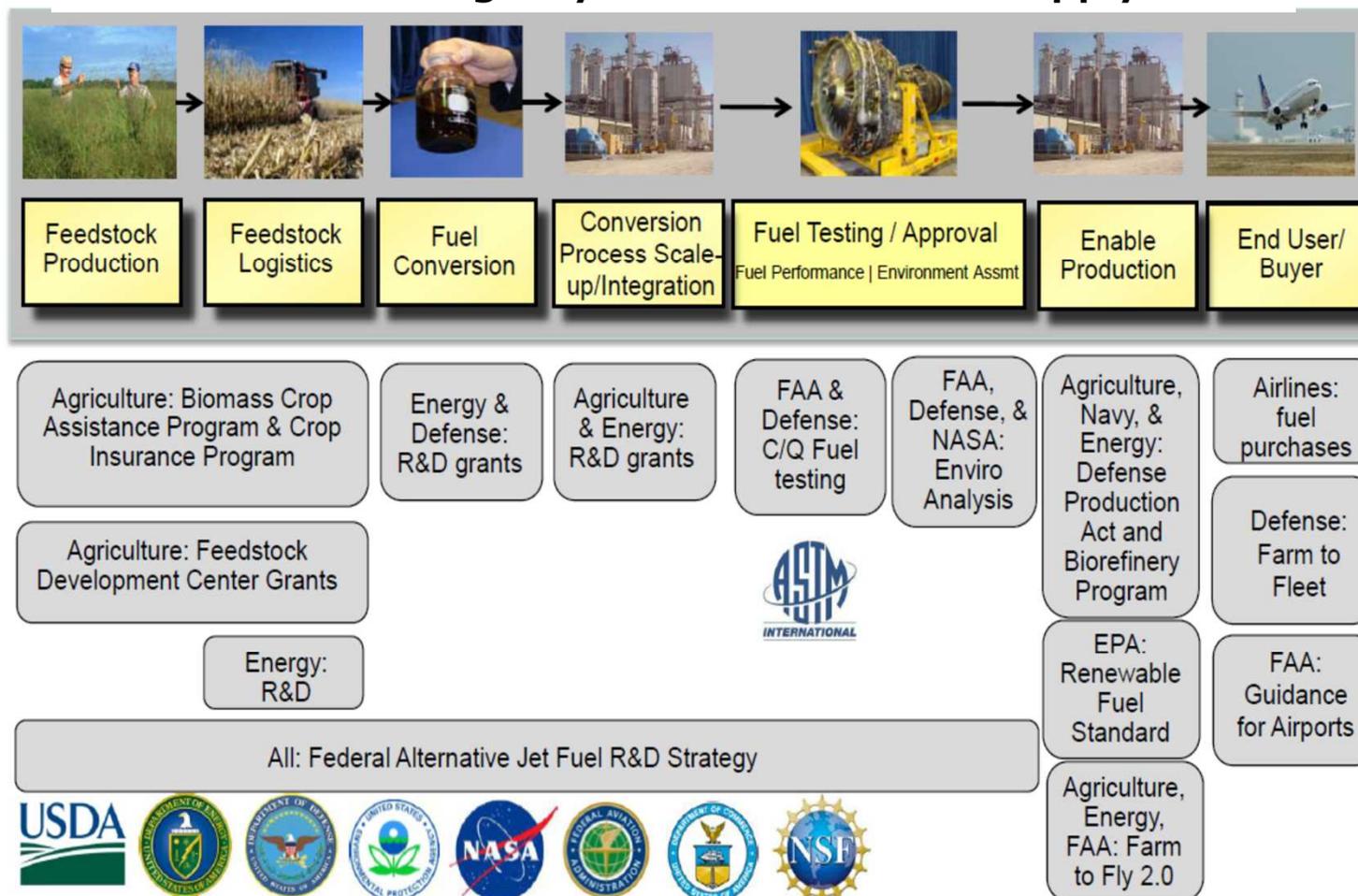


シュタットベルケ：エネルギーを中心とした地域公共サービスを担う公的な会社、ドイツ国内に900社以上存在し、ドイツの民間4大大手エネルギー会社の売上合計を上回るシェアを握る

参考 (17) 制度設計 (官民全体連携) の事例

■ CAAFI (Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative) :代替ジェット燃料実用化をめざす、官民連携プログラムで、バイオマス増産、ジェット燃料生産、安全性確認、規格化等のサプライチェーン全体を対象に、技術開発から社会実装まで、政府機関と民間が連携して取り組んでいる。

Coordinated U.S. Agency Efforts Across the Supply Chain

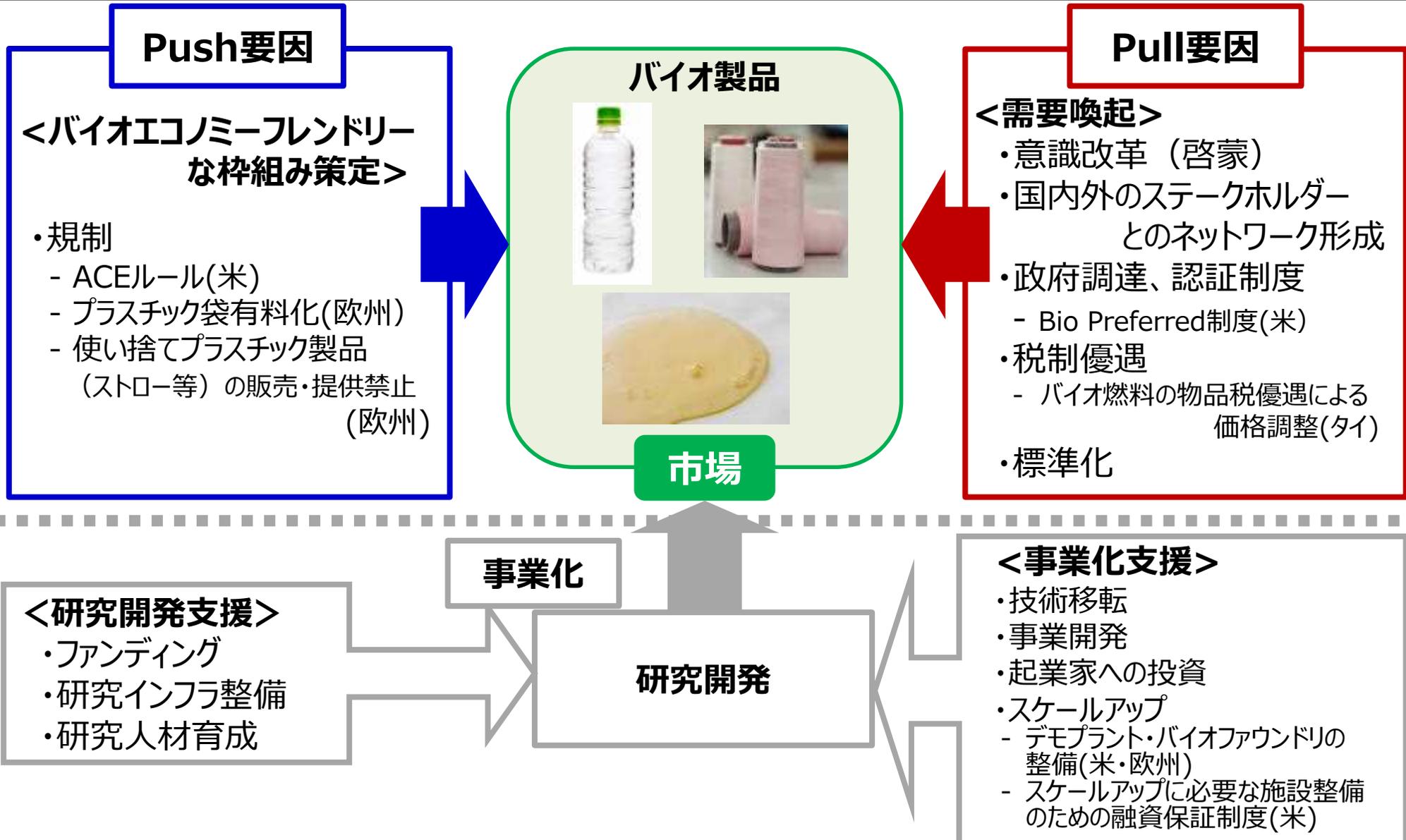


"Farm to Fly"

出所：
CAAFIホームページ

4. バイオ製品普及に対する各国の取り組み状況

- 研究開発から製品の市場での普及まで、バイオエコノミーを促進するために政策的に措置。^{参考(13)}
- Push型、Pull型の政策を組み合わせ^{参考(14) (15)}、産業競争力を上げ、産業の振興を図る。



参考 (13) 各国の本分野の取り組み状況

- 環境・エネルギー分野のバイオものづくりに関する政策的取り組みは、バイオエコノミー戦略のもと、個別の戦術として、まとめられる傾向がある。
- 欧米や一部のアジア諸国は、各国の特徴・強みを活かした「バイオエコノミー戦略」を策定し、具体的な施策（参考(14) (15)参照）に着手している。



The Bioeconomy Initiative : Implementation Framework (2019年) では、国内の豊富なバイオマス資源を持続的に最大限活用し、安全で信頼性が高く、コスト競争力のあるバイオ燃料とバイオ製品の供給を可能とするためのR&D優先領域を設定。



2017年に低炭素化を通じた経済成長を目指す「**グリーン成長戦略**」、2018年に初のバイオエコノミー国家戦略（**Growing the Bioeconomy**）を策定。世界トップクラスのバイオサイエンスを基盤に、食料、化学物質、素材、エネルギー生産、健康、環境の分野における主要課題に取り組み、2030年までに4,400億ポンドのバイオエコノミーによるインパクト創出を目指す。



化石原料への依存から脱却し、再生可能な原料の生産と活用を基盤とするバイオエコノミーを志向し、「**国家研究戦略バイオエコノミー2030**」（2010年）、「**国家政策戦略バイオエコノミー**」（2013年）、2020年には新たに**National Bioeconomy Strategy**を策定。生物学的資源・プロセス・システムをあらゆる経済領域に活用すべく、気候・環境・生態系の限界負荷を視野に入れたイノベーションを促進。

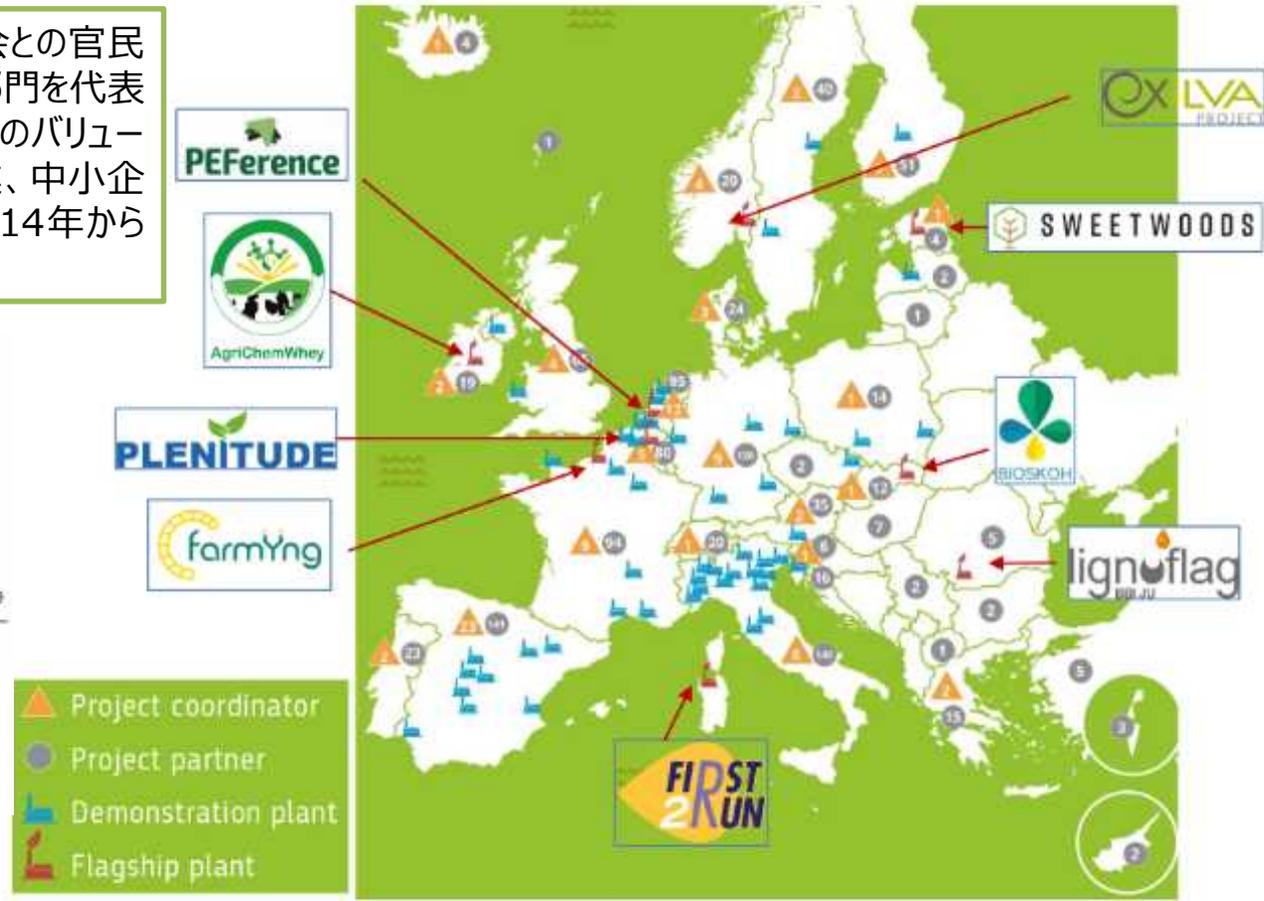


Thailand 4.0 (2015) で、将来に向けて競争力強化を図るべき新産業として、バイオ燃料・バイオ化学を提示し、先進的なバイオエコノミーの発展を掲げた。2017年には、**Bioeconomy Roadmap** を発表。サトウキビやキャッサバなど既存の経済作物を使用した高付加価値製品の開発により、産業構造の高度化を目指す。

参考 (14) 各国の本分野の取り組み例 (1)

- 研究開発と市場のギャップを埋める支援策として、スケールアップ検証のためのデモプラントの建設やバイオフィウンドリを有する研究開発施設の整備が進む。
- 欧州では、Bio-based Industries Joint Undertaking (BBI JU) から支援を受けている DEMO/FLAGSHIPプロジェクトが各地で進行中。
- 米国では、DOEがAgile Biofoundryを設置、バイオ製品が市場に出るまでに要する従来の期間を半減することを目標に掲げる。

Horizon2020の下、欧州委員会との官民パートナーシップ (PPP) で民間部門を代表する組織として設置。バイオベースのバリューチェーン全体をカバーする、大企業、中小企業等のメンバーで構成される。2014年から2020年の間に37億ユーロを投資。



■ バイオ製品市場の開発・拡大を促進するため、規制や政府調達の実施。

使い捨てプラスチック製品の規制等



使い捨てプラスチック製品の流通を2021年までに禁止する法案をEU理事会が採択(2019年5月)



【イギリス】
使い捨てプラスチック製ストロー、マドラー、綿棒の供給を禁止する規制を施行
(2020年10月～)



【ドイツ】
拡大生産者責任 (EPR) の観点から、道路や公園などの清掃費用について、使い捨てプラスチック製品のメーカーや流通事業者にも負担を義務付けた循環経済法改正案が閣議決定
(2020年2月)

Bio-Preferred制度



バイオ製品の購入及び使用の促進を目的とした、USDA主導のイニシアチブ

1) 政府調達

- 連邦政府機関とその請負業者の義務的なバイオ製品調達制度
- 2018年の農業法改正により、藻類由来の製品まで適用を拡大



2) ラベル認証制度

- 製品のバイオマス度を試験し、基準を満たしていれば、ラベルが使用可
- 消費者のバイオ製品の購入を促進

- 環境調和・融和型（Nature-based）の循環型社会形成に向けてバイオへの期待が高まっているなか、環境エネルギー分野へ貢献するバイオ産業の現状と課題についてまとめた。
- 環境影響を可視化する取り組み（LCA）は進んできており、関心の高まりを示すが、バイオ産業については、さらに社会的影響などについての指標を織り込んだ共通の物差し（Social-LCA）をつくることが重要と思われる。
- 米国や欧州は、バイオマス生産と活用を組み合わせたバイオエコノミー戦略を推進しており、バイオ燃料などの規模を伴った市場分野も狙っている。
- 日本は、バイオマス原料の量的な制約もあり、独自の戦略をもって推進する必要があり、バイオ製品の普及に向けて、トータルコストダウンや価値創出などの、さらなる技術開発や仕組み作りが重要と考えられる。
- バイオ産業自体の経済合理性を伴った自立が前提であるが、“環境・エネルギーに貢献するバイオ産業”、“持続的な農林水産業（バイオマス原料）”、“地産地消の再エネ・資源循環（地域共生）”などの、いわば、三本の矢の取り組みにより、レジリエントで自然共生型の産業振興へつながると思われる。
- 本レポートにより、脱炭素社会実現に向けて、バイオものづくりに関わる議論が広く喚起されていくことを期待する。

- [P3] Top photos from day one of Davos 2017 | World Economic Forum (weforum.org)
<https://www.weforum.org/agenda/2019/09/artificial-intelligence-meets-biotechnology/>（2021/1/11アクセス）
- [P3] ハリハリ氏公式ホームページ <https://www.ynharari.com/>（2021/1/16アクセス）
- [P4] PubMedによる検索結果（2020.10.20実施）を基にTSCにて作成：<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>
- [P5] “Thermochemical processing of woody biomass: A review focused on energy-driven applications and catalytic upgrading”,
Renewable and Sustainable Energy Reviews 136 (2021) 110376
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403212030664X>
- [P9] “2017年度～2018年度成果報告書 植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発/スマートセルによる物質生産分野に係る環境・経済への波及効果分析及び関連技術動向調査”、NEDO、2017年度～2018年度、報告書管理番号：20200000000297：
<https://seika.nedo.go.jp/pmg/PMG01B/PMG01BG02>
- [P10] “「バイオマスの活用の推進（バイオマス賦存量と利用）」 参考 p1
https://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/local/pdf/miyazaki_san.pdf
- [P10] 廃プラスチック：“マテリアルリサイクルによる天然資源消費量と環境負荷の削減に向けて”（平成28年5月環境省）
プラスチックを取り巻く国内外の状況 <第1回資料集>：<http://www.env.go.jp/council/03recycle/y0312-01/y031201-s1r2.pdf>
プラスチック資源循環戦略小委員会：<https://www.env.go.jp/council/03recycle/yoshi03-12.html>
- [P11] “令和2砂糖年度・令和2でん粉年度における価格調整制度の各種指標の決定等について”、農林水産省、令和2年9月15日プレスリリース資料：
https://www.maff.go.jp/j/press/seisaku_tokatu/chiiki/200915_18.html
- [P11] “砂糖及びでん粉をめぐる現状と課題について”、農林水産省、食料・農業・農村政策審議会甘味資源部会（令和2年度第1回）資料3：
<https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kanmi/200910.html>
- [P14] “2017年度～2018年度成果報告書 植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発/スマートセルによる物質生産分野に係る環境・経済への波及効果分析及び関連技術動向調査”、NEDO、2017年度～2018年度、報告書管理番号：20200000000297
<https://seika.nedo.go.jp/pmg/PMG01B/PMG01BG02>
- [P15] 科学技術振興機構ホームページ “戦略的イノベーションプログラム（SIP）「革新的構造材料」”（2021/1/11アクセス）
<https://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/outline/index.html>
- [P15] 生物系特定産業技術研究支援センターホームページ “第二期SIP スマートバイオ産業・農業基盤技術”（2021/1/11アクセス）
<https://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/brain/sip/sip2/index.html>
- [P16] “Bioderivatization as a concept for renewable production of chemicals that are toxic or poorly soluble in the liquid phase.” PNAS. 117, 1404–1413 (2020) <https://www.pnas.org/content/117/3/1404>
- [P16] “Isobutene process” Global Bioenergy ホームページ（2021/1/11アクセス）
<https://www.global-bioenergies.com/group/isobutene-process/?lang=en>
- [P16] “バイオガス事業の契”バイオガス事業推進協議会ホームページ（2021/1/11アクセス）
http://www.biogas.jp/pdf/pdf_siori2019.pdf

- [P17] “From Biofiltration to Promising Options in Gaseous Fluxes Biotreatment” Recent Developments, New Trends, Advances, and Opportunities 2020, Pages 5-27 等
- [P17] 菌体分離装置 日本ガイシホームページhttps://www.ngk.co.jp/product/industrial/membrane/cefilt_application_02/index.html、ナノセラミック膜 日本ガイシホームページ <https://www.ngk-global.com/100th/jp/history/product/03.html>、ナノ分離膜 ダイセル・エボニック株式会社ホームページ<https://www.daicel-evonik.com/product/detail/206> より転載
- [P18] “農林水産研究イノベーション戦略2020（資料編）”、農林水産省農林水産技術会議事務局、pp54（2021/1/11アクセス）：<https://www.affrc.maff.go.jp/docs/press/200527.html>
- [P18] “ごみをエタノールに変換する世界初の革新的生産技術を確立～化石資源に依らない究極の資源循環社会システムの創生に向けて～”、積水化学工業株式会社プレスリリース、2017：https://www.sekisui.co.jp/news/2017/1314802_29186.html
- [P19] “2017年度～2018年度成果報告書 植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発/スマートセルによる物質生産分野に係る環境・経済への波及効果分析及び関連技術動向調査”、NEDO、2017年度～2018年度、報告書管理番号：20200000000297：<https://seika.nedo.go.jp/pmg/PMG01B/PMG01BG02>
- [P20] “生物機能を活用したものづくりにおける味の素(株)の取組とプロジェクトへの期待”、味の素講演資料pp12,19、2016：<https://www.nedo.go.jp/content/100805429.pdf>
- [P20] “Innovative metabolic pathway design for efficient L-glutamate production by suppressing CO2 emission. J. Biosci. Bioeng. 2007. 103(3):262-269.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389172307700579?via%3Dihub>
- [P20] “Patent No.: US 7,700,319 B2, Patent No.: US 6,852,517 B1”
<https://patentimages.storage.googleapis.com/15/df/50/ac475f3989bef7/US7700319.pdf>
<https://patentimages.storage.googleapis.com/c2/f5/cc/d79a0443f695c0/US6852517.pdf>
- [P20] “究極の繊維「クモ糸」の人工合成”、スパイバー株式会社講演資料、pp13,15：
<https://www.nistep.go.jp/conference/nt110630/pdf/sekiyama.pdf>
- [P20] “微生物による発酵プロセスでつくられた構造タンパク質素材を使用した世界初のアウトドアジャケットを発売”、スパイバー株式会社ニュースリリース、2019：<https://www.spiber.jp/files/user/MP%20press%20release.pdf>
- [P20] “ブリュード・プロテイン™の量産拠点、タイの発酵生産プラント着工へ”、スパイバー株式会社ニュースリリース、2019：
<https://www.spiber.jp/news/detail/id=265>
- [P20] “SpiberとADM、植物資源をベースに作られる構造タンパク質素材「プロテイン・ブリュード™」の米国での量産で提携”、スパイバー株式会社ニュースリリース、2020：https://www.spiber.jp/files/user/Spiber_ADM%20press%20release_Final_1006_JP.pdf
- [P21] “省エネルギーおよびCO₂排出量削減の視点からみたアクリルアミドの製造法の評価-バイオ合成法および化学合成法の比較” 環境情報科学, 25(3), 61 (1996) <https://ci.nii.ac.jp/naid/10006110730>
- [P21] “第3回 産業構造審議会 商務流通情報分科会 バイオ小委員会
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shomu_ryutsu/bio/pdf/003_11_00.pdf
- [P23] “貿易統計統計品別表（輸入）”、財務省、2019：<https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm?M=29&P=0>

- [P24] “産業競争力懇談会 COCN 推進テーマ「デジタル・バイオエコノミーの実現に向けて」最終報告書” <http://www.cocn.jp/report/thema108-L.pdf> “COCNフォーラム” <http://www.cocn.jp/forum/2018/>
- [P24] “SIP第2期 スマートバイオ産業・農業基盤技術、5. バイオ資源活用技術・バイオ素材の開発”、生物系特定産業技術研究支援センターウェブページ、<https://www.naro.affrc.go.jp/laboratory/brain/sip/sip2/theme/theme05.html>
- [P24] “分解開始スイッチ機能を有する酵素内包生分解性プラスチックの開発ー使っているときは分解せず、環境に出ると分解する生分解性プラスチックー”、東京大学大学院農学生命科学研究科ウェブページ、2020 : https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics_20200730-1.html
- [P26] “Kalundborg Symbiosis” Kalundborg Symbiose Homepage (2021/1/11アクセス) <http://www.symbiosis.dk/en/>
- [P26] “Wiener Stadtwerke Sustainable report 2019” <https://www.wienerstadtwerke.at/berichtswelt/index-en.php>
- [P27] “Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative ” CAAFI Homepage (2021/1/11アクセス)
<http://www.caafi.org/default.aspx>
- [P28] “Update Report of National Strategies around the World”, Bioeconomy Council (独) , 2018 :
https://bioekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/berichte/GBS_2018_Bioeconomy-Strategies-around-the_World_Part-III.pdf
- [P29] “The Bioeconomy Initiative: Implementation Framework”, Biomass Research and Development (BR&D) Board (米) , 2019 : https://biomassboard.gov/pdfs/Bioeconomy_Initiative_Implementation_Framework_FINAL.pdf
- [P29] “Growing the Bioeconomy”, Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS) (英) , 2018 :
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/761856/181205_BEIS_Growing_the_Bioeconomy_Web_SP.pdf
- [P29] “National Bioeconomy Strategy”,
Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) (独) , 2020 :
https://biooekonomie.de/sites/default/files/publications/bmbf_national-bioeconomy-strategy_en.pdf
- [P29] “Thailand 4.0”, 在米タイ王国大使館ホームページ (2021/1/11アクセス) : <https://thaiembdc.org/thailand-4-0-2/>
- [P30] A.Ruiz Sierra, et al., “The bio-based industries joint undertaking: A high impact initiative that is transforming the bio-based industries in Europe”, New BIOTECHNOLOGY, 60 (2021) 105-112. (Available online 9 October 2020) :
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871678420301801>

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight 短信

環境・エネルギー分野へ貢献するバイオ産業

～バイオものづくりの課題と可能性～

2021年2月3日 発行

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター（TSC）

- センター長 岸本 喜久雄
- センター次長 西村 秀隆
- バイオエコノミーユニット
- ユニット長 水無 渉
- 研究員 今井 浩司
- 研究員 五十嵐 美香
- 研究員 南 誓子
- 研究員 加納 周雄
- 研究員 藤島 義之

- 本資料に掲載されている全てのドキュメント、画像等の著作権は、特に記載されているものを除き、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター（以下、NEDO TSCという。）に帰属します。
- 本資料の内容の全部又は一部について、私的使用又は引用等著作権法上認められた行為として、適宜の方法により出所を明示することにより、引用・転載複製を行うことができます。
ただし、NEDO TSC以外の出典元が明記されている場合は、それぞれの著作権者が定める条件に従ってご利用下さい。
- 本資料に掲載されている著作物を商業目的で複製する場合は、予め下記お問い合わせ宛にご連絡下さい。
商業目的で複製とは、直接収益を得ることを目的に著作物を複製して販売すること等を指します。
- 本資料の全部又は一部について、NEDO TSCに無断で改変を行うことはできません。
- 本資料に関する問い合わせ先：
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター
電話 044-520-5150 E-Mail: tsc-unit@ml.nedo.go.jp