



国立研究開発法人 理化学研究所 環境資源科学研究センター

資料2

今後の環境エネルギー分野の研究開発

2016年8月16日
センター長 篠崎 一雄

人類生存のためには、資源の循環的な創出と活用が不可欠

2013年
4月発足



センター長
篠崎 一雄

- 生物機能と化学機能の多様性の理解を礎とし**植物科学、ケミカルバイオロジー、触媒化学**の先導的研究を推進
- 有用資源の創成、効率的な資源生産システム**および**持続可能な農業等の実現**に資する技術革新に貢献

創資源

炭素の循環的利活用 研究プロジェクト

- 植物や触媒を活用した大気(CO₂やO₂等)の資源化
- 光合成機能向上、植物代謝機能、バイオマス生産性の向上

省資源

窒素等の循環的利活用 研究プロジェクト

- 生物生産、化学合成プロセスの効率化・短縮化
- 気候変動下での持続的な食料生産の実現(収量の向上、環境耐性、低肥料、病害虫耐性)

活資源

金属元素の循環的利活用 研究プロジェクト

- 植物を利用したレアメタルの回収、利用
- 様々な金属元素を用いた新規触媒の高機能化

研究基盤

循環資源探索・活用研究基盤

循環資源の探索と利用研究のための研究基盤を構築。特に、メタボローム解析、ケミカルスクリーニング基盤

バイオマス工学研究部門の概要

2015年
4月統合

組織沿革:

- ・平成22年4月1日
理研内の分野横断型、社会貢献型の組織である社会知創成事業下の「バイオマス工学研究プログラム」として発足
- ・平成27年4月1日
「バイオマス工学研究部門」として環境資源科学研究センターに完全統合

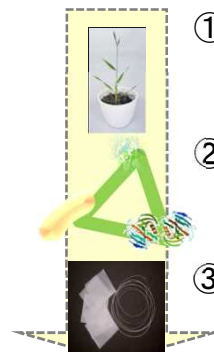
設置期間：10年間(平成32年3月末迄)

予算：平成28年度 4.8億円(平成27年度 4.9億円)

研究戦略

課題解決型基礎研究を推進し、応用展開につながる以下の研究目標を10年以内(平成22~31年度)に達成する

- ①植物の機能強化による「**高生産性・易分解性を備えたスーパー植物**」の開発
- ②バイオテクノロジーを活用した化学製品原料の効率的な「**一気通貫合成技術**」の確立
- ③ポリ乳酸に並び立つ「**新たなバイオプラスチック**」の探求、新規バイオ分子素材の開発



H28年4月1日現在

植物科学

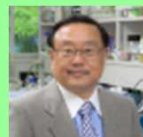


篠崎 一雄
センター長

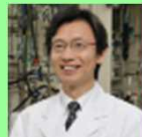
コアメンバー(グループディレクター)



斉藤 和季
副センター長



長田 裕之
副センター長



侯 召民
副センター長



袖岡 幹子



吉田 稔



白須 賢



榊原 均



松井 南

- 機能開発研究グループ 篠崎 一雄
- 生産機能研究グループ 榊原 均
- 植物免疫研究グループ 白須 賢
- 統合メタボロミクス研究グループ 斉藤 和季
- 代謝システム研究チーム 平井 優美
- メタボローム情報研究チーム 有田 正規
- 環境代謝分析研究チーム 菊地 淳
- 植物ゲノム発現研究チーム 関 原明
- 細胞機能研究チーム 杉本 慶子
- 植物共生研究チーム 林 誠
- 適応制御研究ユニット 瀬尾 光範
- 発現調節研究ユニット Lam-Son TRAN
- 機能調節研究ユニット Ryoung SHIN
- 植物プロテオミクス研究ユニット 中神 弘史
- 統合ゲノム情報研究ユニット 櫻井 哲也

創薬・医療技術基盤連携部門

- 創薬ケミカルリンク基盤ユニット 長田 裕之
- 創薬シード化合物探索基盤ユニット 吉田 稔

触媒化学

- 先進機能触媒研究グループ 侯 召民
- 触媒・融合研究グループ 袖岡 幹子
- 先進機能元素化学研究チーム 内山 真伸
- グリーンナノ触媒研究チーム 魚住 泰広
- 生体機能触媒研究チーム 中村 龍平
- ケミカルバイオロジー研究グループ 長田 裕之
- ケミカルゲノミクス研究グループ 吉田 稔
- 分子リガンド標的研究チーム C.M.BOONE
- 天然物生合成研究ユニット 高橋 俊二
- 化合物リソース開発研究ユニット 長田 裕之
- 生理活性物質探索研究ユニット 渡邊 信元

ケミカルバイオロジー

バイオマス工学研究部門

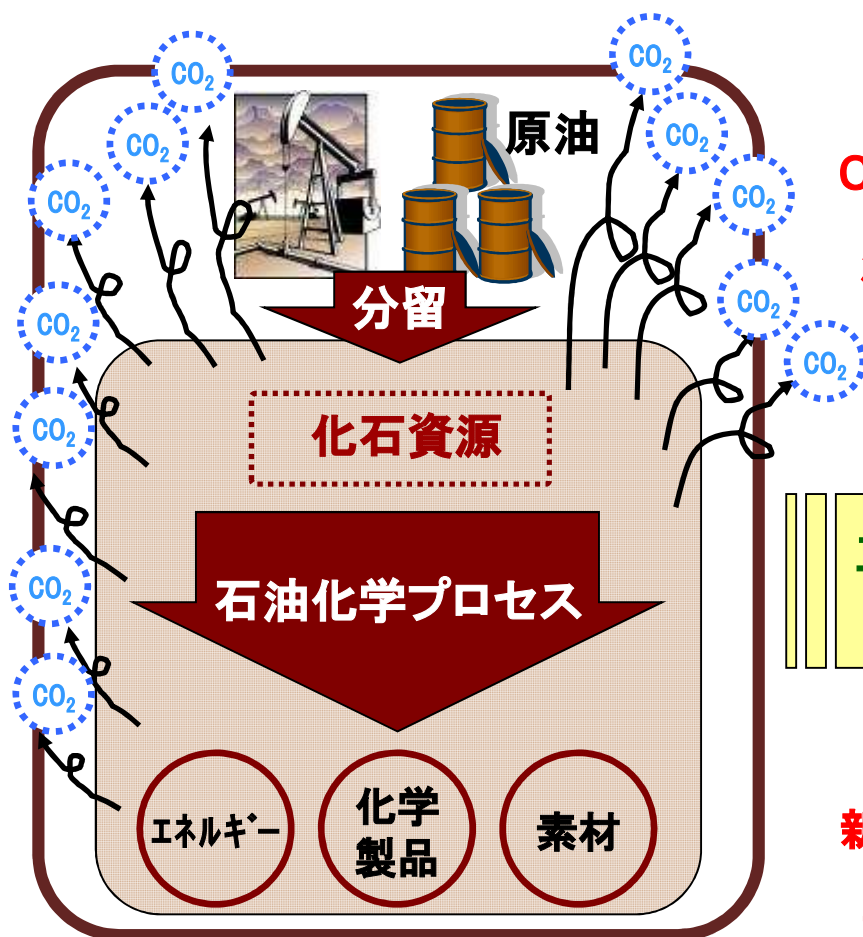
- 合成ゲノミクス研究グループ 松井 南
- セルロース生産研究チーム 持田 恵一
- 酵素研究チーム 沼田 圭司
- バイオプラスチック研究チーム 阿部 英喜
- 細胞生産研究チーム 近藤 昭彦
- バイオマス研究基盤チーム 篠崎 一雄

技術基盤部門

- 分子構造解析ユニット 越野 広雪
- 生命分子解析ユニット 堂前 直
- 質量分析・顕微鏡解析ユニット 斉藤 和季

化石資源

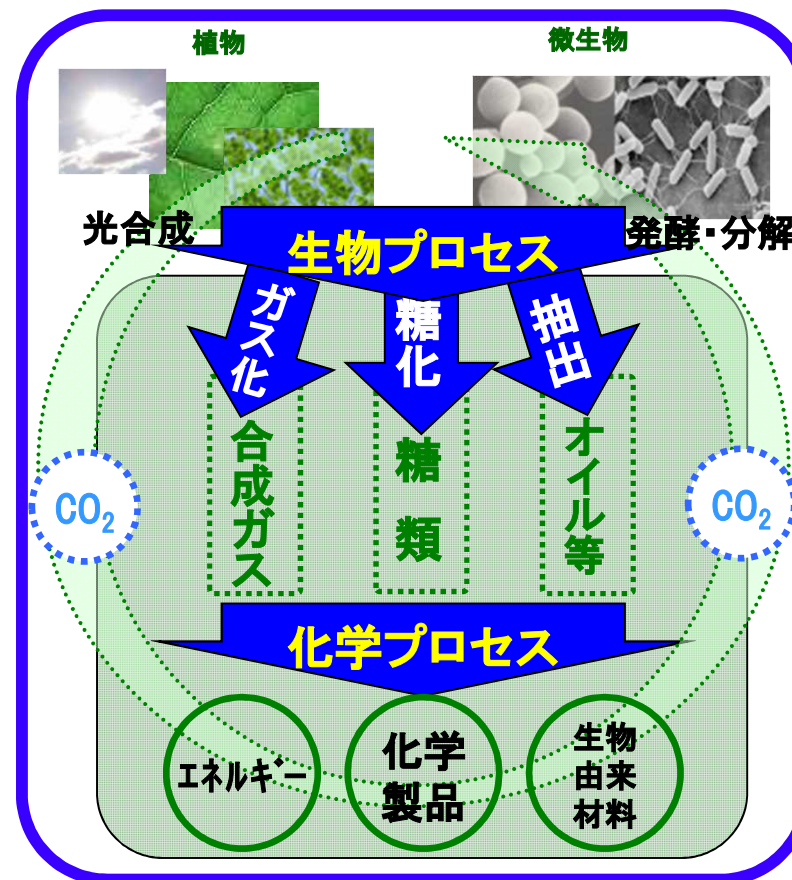
生物資源



CO₂の資源化
温暖化対応

革新技术
の開発

新産業の創出
再生可能な
生物資源の活用



橋渡し研究

産業連携とオープンイノベーション

国際連携とネットワーク

産業連携を推進

バイオマス工学研究部門、創薬・医療基盤連携部門

融合研究

炭素の課題

窒素等の課題

金属元素の課題

学際領域の開拓に挑戦

基盤構築

統合メタボロミクス・ケミカルバイオロジー基盤
技術基盤部門

コア研究

植物科学コア

化学生物学コア

触媒化学コア

世界最先端の研究を推進

- 環境資源科学研究事業においては平成25年度より、総合科学技術・イノベーション会議が策定する「科学技術重要施策アクションプラン」のうち、エネルギーキャリアに関連する課題を担っている。
- 平成27年度においては「**エネルギーキャリア製造次世代基盤技術の開発**」として登録されており、「**窒素等の循環的利用技術の研究開発**」として先進機能触媒研究グループの「**窒素活性化多金属化合物に関する研究**」、および「**『水素社会』を支える革新的エネルギー生産触媒の研究開発**」として生体機能触媒研究チームの「**普遍金属を用いた中性の水から水素を製造する技術開発に関する研究**」が採択されている。平成28年度も引き続きアクションプラン特定施策として推進している。

『水素社会』を支える革新的エネルギー生産触媒の研究開発

研究目標

中性の水から普遍金属を用いて電子やプロトンを取り出す水分解触媒の開発を行い、中性の水のみから低コストで水素を創出できる最適化された触媒の開発をめざし、持続可能な水素社会の実現を加速。

水素の製造

- 水分解による水素製造

水素等の利用

- 水素を燃料として利用
- 水分解産物の利活用

概要

- 普遍金属による水分解機構の解明
- 中性水分解の低コスト補助物質の同定
- 中性の水を分解する触媒の開発
- 水素製造システムの最適化

窒素等の循環的利活用技術の研究開発

研究目標

省エネルギーでのアンモニア合成に資する革新的触媒技術の開発を行い、省資源省エネ型のアンモニア合成触媒の開発を目指す。



概要

- 大気中の窒素と水素のみから、より温和な条件(常温・常圧に近い)でかつ特殊な試薬を用いずにアンモニアを合成可能な革新的な金属錯体触媒を開発し、その触媒を利用してアンモニアを従来のハーバーボッシュ法よりも省エネルギーかつクリーンな効率的かつ低環境負荷で製造する新たな手法を開発
- ✓ 窒素活性化機構の解明
- ✓ 活性化された窒素から温和な条件でアンモニアを合成し得る金属錯体触媒を開発
- ✓ 触媒の最適化によるアンモニア合成効率の向上

背景・課題

- 水素はクリーンであるとともに、化石燃料・再生可能エネルギーからの製造が可能で、エネルギー供給源の多様化にも寄与。
- 水分解による水素製造は、希少金属の使用や環境負荷といった課題があるとともに、エネルギーキャリアであるアンモニアへの変換には化石資源を大量に使用するという課題がある。
- 革新的触媒反応により、水素、アンモニア等を製造する基盤技術確立し、中長期的な観点から水素社会の実現に貢献。

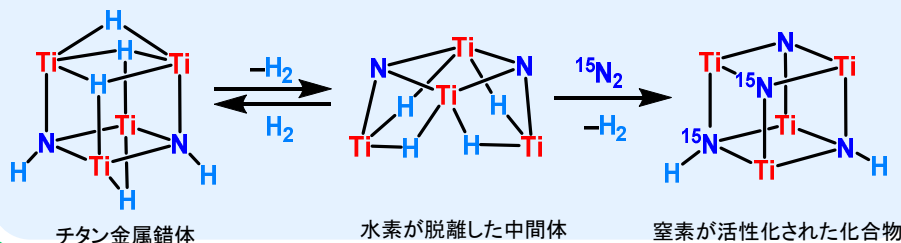
具体的な取組み

省エネルギーな革新的アンモニア合成法の開発

- 水素をアンモニアに変換する方法として、ハーバーボッシュ法が確立されているが、高温・高圧条件が必要で化石資源を大量に使用することが課題。
- 窒素から温和な条件で特殊な試薬を用いずにアンモニアを合成する金属錯体触媒を開発。
- ハーバーボッシュ法より省エネルギーかつ低環境負荷でアンモニアを製造する手法を構築。

【成果】

- チタン金属錯体を用いた窒素活性化の反応機構を解明する上で鍵となる中間体の構造解明に成功。
- さらに、計算化学を駆使して、実験結果と一致する反応機構の詳細解明に成功。上記の成果をもとに、実用化を念頭に、より反応効率の高い触媒の開発を目指す。

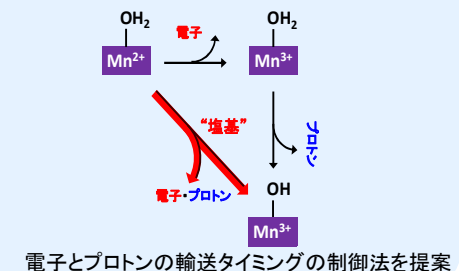
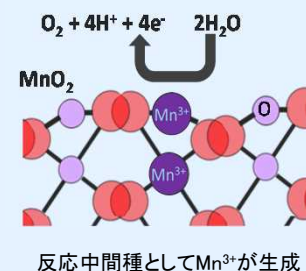


中性の水を用いた水分解による水素の創出

- 水分解による水素の製造において、希少金属の使用や環境負荷が課題となっている。そこで、雨水、海水、河川水等の中性の水を原料として、希少金属を用いない触媒を使った水分解により、水素等を創出する取組を実施。
- 再生可能エネルギーとの融合により、クリーンで安価な水資源化システムを構築。

【成果】

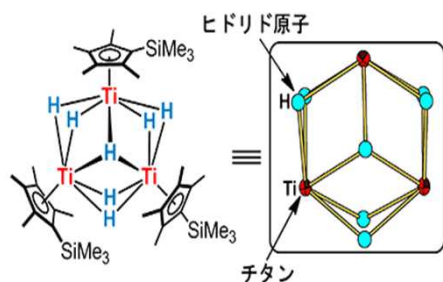
- 酸化マンガンを用いた中性水分解において、反応活性低下の原因を解明。
- プロトン移動を制御することで活性の向上が可能であるという新たな触媒設計指針を提唱。



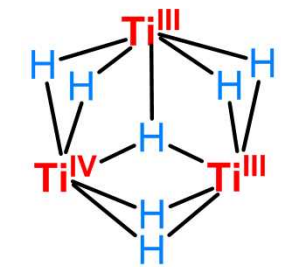
窒素分子の切断と水素化を常温・常圧で実現

– 産業に多く利用されるアンモニアの新しい合成法の開発に道を拓く –

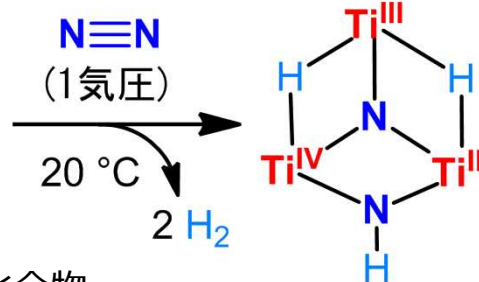
多金属チタンヒドライド化合物に常温・常圧で窒素分子を取り込ませ、**窒素-窒素結合の切断**および**窒素-水素結合の形成**を世界で初めて実現。特殊な還元剤や水素源を必要とせず、水素と窒素とチタンヒドライド化合物のみで反応。窒素と水素から省エネルギーでアンモニアを合成できる可能性を見出した。



多金属のチタンヒドライド化合物の構造

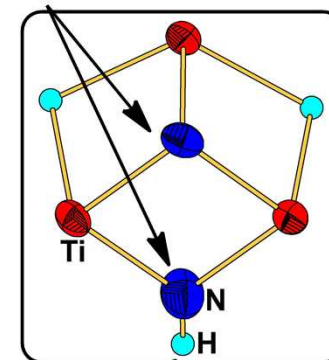


チタンヒドライド化合物



チタンヒドライド化合物による窒素分子の切断と水素化

窒素



水素

窒素から省資源・省エネでアンモニアや含窒素有機化合物の新しい合成法の開発に期待

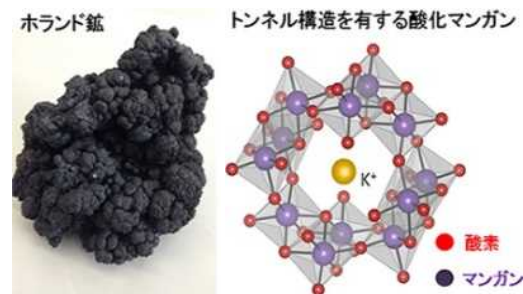
(『Science』オンライン版2013年6月)

理化学研究所 環境資源科学研究センター
先進機能触媒研究グループ 侯召民グループディレクターら

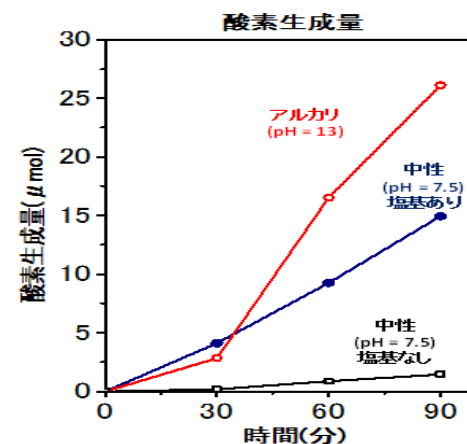
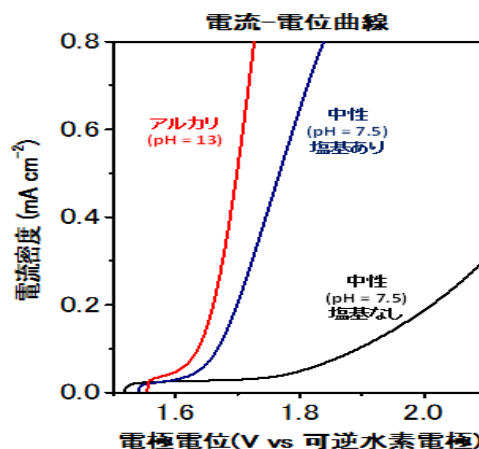
中性の水から電子を取り出す「人工マンガン触媒」を開発

－水を電子源とした燃料製造に前進－

中性環境における生体マンガン酵素と人工マンガン触媒の活性の違いとして電子/プロトン輸送の機構の違いに着目。生体マンガン酵素では電子とプロトンが同時に移動するのに対し、人工マンガン触媒では、電子とプロトンが個別のタイミングで移動することを発見。電子とプロトンの輸送タイミングを最適化することで、安価なマンガン酸化物を用いて中性の水を分解し、電子を獲得することに成功。



人工マンガン触媒として使用した酸化マンガン



人工マンガン触媒を用い、中性の水にてアルカリ性の水に近い活性を得ることに成功

クリーンで豊富な中性の水を電子源とした水素製造ならびに低環境負荷の有機燃料製造につながることを期待

(Nature Communications 2014年6月)

理化学研究所 環境資源科学研究センター
生体機能触媒研究チーム 中村龍平チームリーダーら

背景・課題

- 爆発的に増加している世界の人口を支えるためには、国連食糧農業機関によると2050年までに食糧・エネルギー共に90%以上の増産の必要があると試算されているものの、米国のトウモロコシの約40%、ブラジルのサトウキビの約55%がバイオエタノールの生産に回されているという現状では、その実現可能性は極めて低く、次世代バイオマスである微細藻類の活用が期待されている。
- 微細藻類等を原料としたバイオ燃料市場は、航空分野において2030年に12兆円近くの市場規模になるとの予測があるものの、油脂の分離精製過程では濃縮等に膨大なエネルギー投入(光合成で獲得できるエネルギーの2から10倍程度)を必要とする等、エネルギーバランスの改善と低価格化が課題。

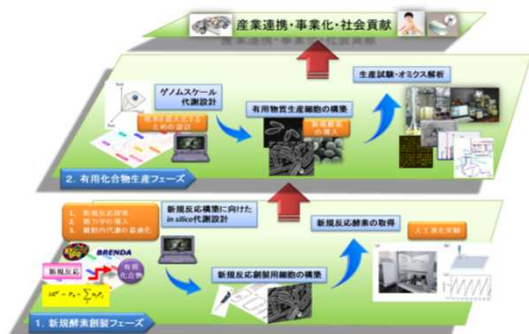
研究目標

- 微細藻類からのバイオ燃料・化成品等の創出に向け、要素技術や基盤技術において隘路となっている課題を解決するため、生物自体あるいは生態系や環境との相互作用の中で発揮している高次能力を解析・応用する事により、低コストの濃縮技術および効率的な油脂蓄積技術等を開発し実用化を促進。
- 微細藻類等により、直接二酸化炭素から非生体有用化合物生産(メタクリル酸等)実現のための代謝工学の高度化を実現。

具体的な取組み

有用代謝化合物生産に向けた新規代謝反応構築技術の開発

- シミュレーションによる新規代謝反応の探索技術および人工進化実験を導入した新規酵素の高速最適化技術を開発

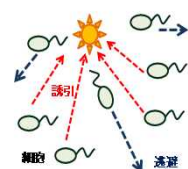


新規酵素の創製から物質生産までのスキーム

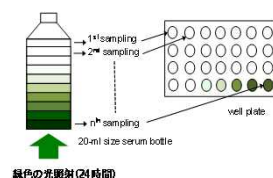
微細藻類を用いたバイオ燃料・化成品等の創出に向けた要素技術の開発

- 光エネルギーを利用した微細藻類濃縮技術の開発
- 効率よく脂質を蓄積させるための天然化合物および遺伝子の探索
- 分子育種の基盤となる有用微細藻類のゲノム情報の整備

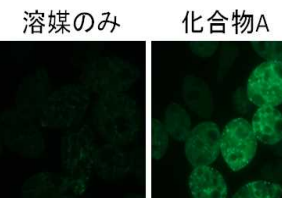
■ 藻類が持つ光運動性



■ 光運動性を利用した細胞濃縮



光で油を作り、光で濃縮



化合物による脂質蓄積の促進

概要

- バイオマスを化石資源の代替として活用するには、原材料・プロセスコストの削減が重要
- 従来の複雑で高コストなプロセスを一体化し、低コストで省エネルギー化された革新的な一貫バイオプロセスの開発を推進
- 計算科学の駆使による非天然の有用化合物を生合成できる微生物触媒の開発、酵素反応として理論的に考えられる代謝反応をデザインしてその反応を実現する人工酵素を創製する技術の開発を実施

具体的な取組

細胞内代謝設計技術の開発

- BioProV: 非天然化合物を生合成できる人工代謝経路設計ツールの開発
- HyMeP: 生体反応を網羅的に付加し、代謝設計を最適化するハイブリッド代謝予測モデルの開発

人工酵素触媒の創製

様々な芳香族化合物を生産できるプラットフォームの開発

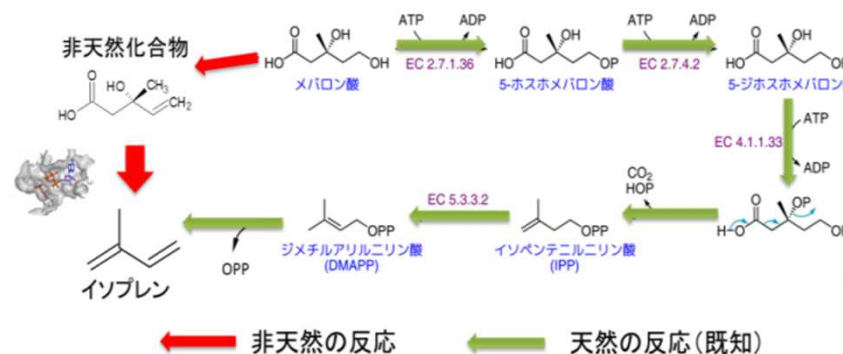
バイオマスを原料とした合成ゴム (ポリイソプレンゴム) の新技術開発

(ニュースリリース 2015年9月)
細胞生産研究チーム(近藤 T 他)

➢ 開発した人工代謝経路設計ツールを使い、横浜ゴム、日本ゼオンとの共同研究で人工代謝反応を創生することによりイソプレン（自動車タイヤなどの原料として使われる合成ゴムの原料）をバイオ合成することに成功。

➢ 現在、イソプレンはナフサ熱分解の副生成物として工業的に生産されているが、新技術の開発によって、化石燃料使用の削減だけでなく、気象条件によって生産高が変動する天然ゴムの補填原料としても期待される。

➢ 今後、2020年代前半を目標に実用化を目指す計画。



非天然化合物からイソプレンを生合成する酵素の創生に成功

代謝経路の設計と酵素デザインを駆使した微生物によるイソプレン合成

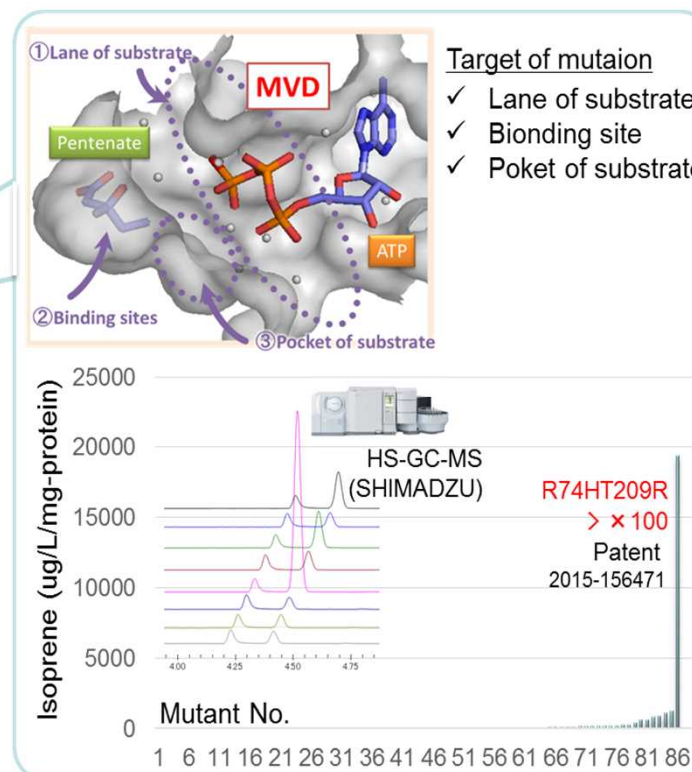
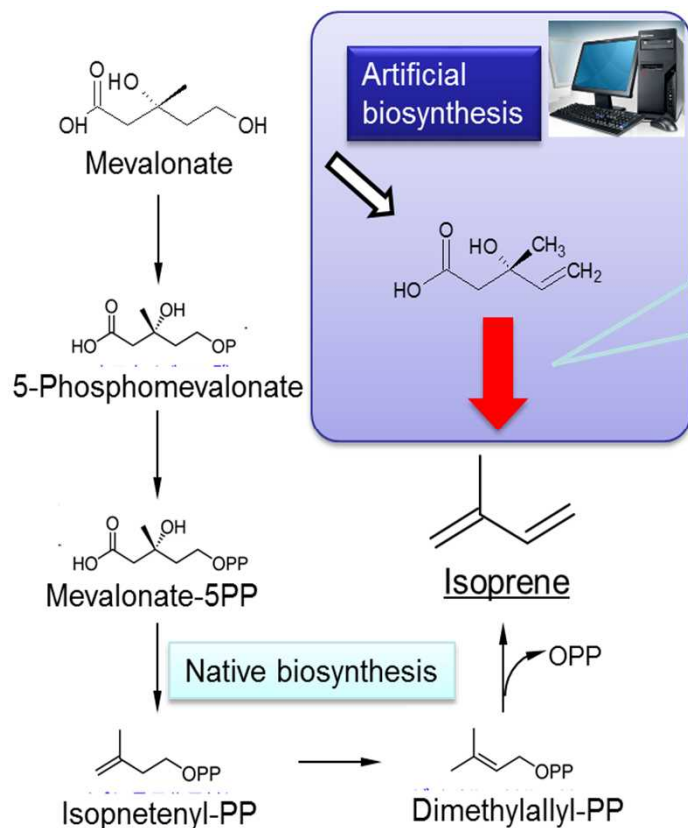
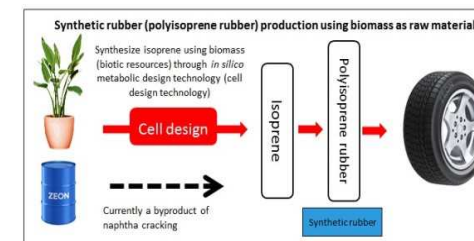
1. 情報科学の手法で代謝経路の設計の自動化(BioProV)を行い、イソプレン合成に関する最適の新規代謝経路の設計を行った。
2. イソプレン合成に関わる代謝酵素の変異体を作成して、野生型の酵素の100倍の活性をもつ酵素を作成することに成功した。(特許申請)
3. 企業(日本ゼオン、横浜ゴム)と開発の初期からの共同研究で応用展開を目指している。

NEWS
RELEASE

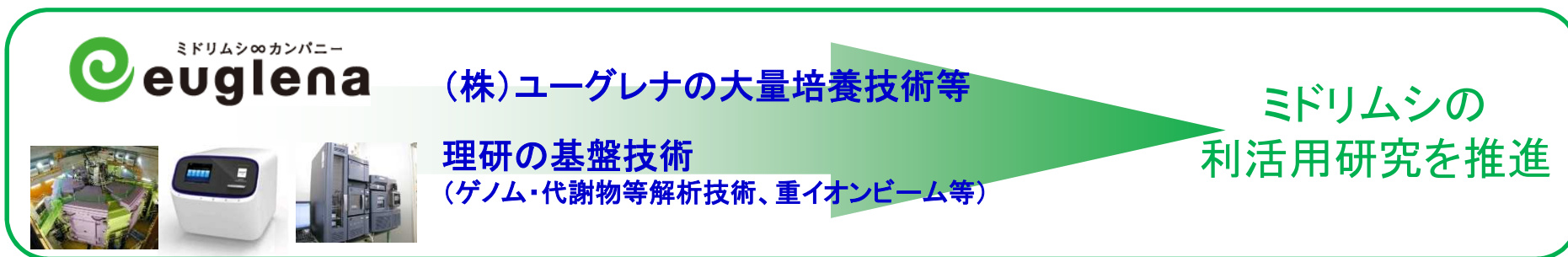
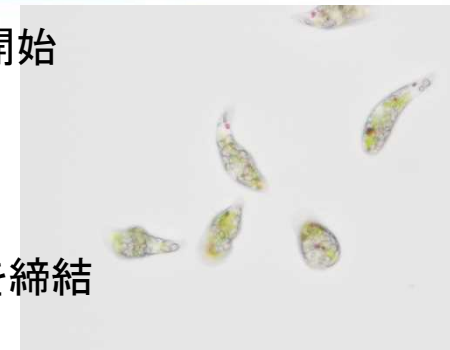
YOKOHAMA
ZEON

2015年9月3日

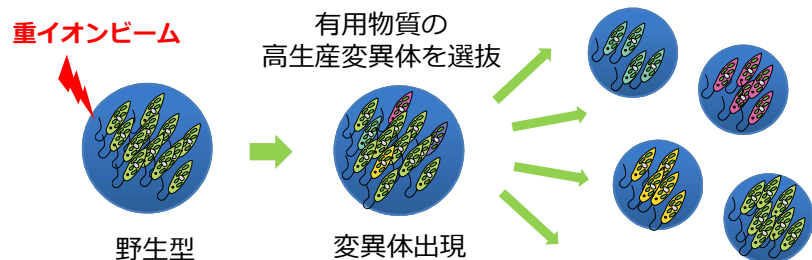
横浜ゴム、理化学研究所、日本ゼオン
バイオマスを原料とした合成ゴム(ポリイソプレンゴム)の新技術開発



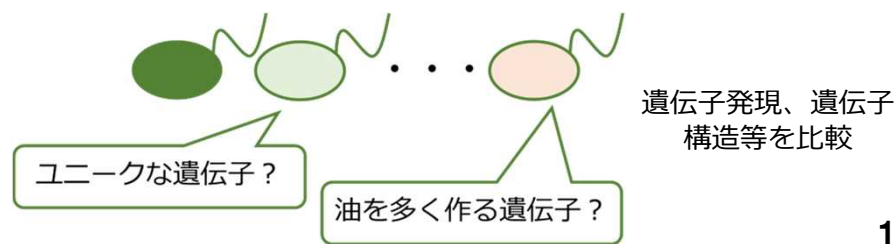
- 2013年 ユーグレナ(ミドリムシ)の育種・遺伝子探索に関する共同研究を開始
重イオンビームを用いた育種 (仁科加速器研究センター)
産業的に有用な遺伝子の効率的な探索、またその発現制御機構の解明 (環境資源科学研究センター)
- 2013年12月 環境資源科学研究センターと(株)ユーグレナ間で包括協定を締結 (以後、半年に1回連携運営会議を開催)
- 2015年12月 (株)ユーグレナがバイオジェット・ディーゼル燃料製造実証プラントを理研横浜事業所向かいの旭硝子敷地内への建設を表明
理研とはバイオマス資源としての利活用に関する連携をより深める予定



重イオンビームを用いた育種の共同研究



有用遺伝子探索に関する共同研究



バイオプラスチック高性能・高機能化の要素技術の技術移転

○カネカは、科学技術振興機構(JST)による委託開発により、理研の成果を元に、2011年5月より生産実証試験として、年間1,000トンの製造を開始している。今後、より高度な生産技術・プロセス革新技術の開発を進め、さらに生産能力の増強を図り、2020年に100億円以上の売り上高を目指している。

○理研は、**PHAの実用化に向け、その熱成型加工性を格段に向上する基盤技術として、2012年に結晶化を促す添加剤の探索に成功**。PHAの事業化展開に向けた取組を進めている(株)カネカにおいて、成果の一部が実用化の一過程において導入予定。



AONILEX®



カネカ高砂工業所にある*PHB Hの実証設備

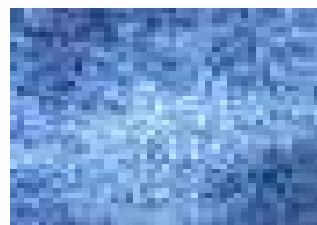
成形加工の高度化を可能にする核剤を発見

PHAの画期的な結晶核剤となる糖アルコールを発見し、企業との共同研究によりバイオプラスチック成形加工の高度化を実現。

Optical micrographs of
P(3HB-co-3HHx)
copolymer crystallized at 75°C



Without additives



With 2wt% of sugar alcohol

*PHAで工業生産で実際に流通しているのが、カネカのつくるP(3HB-co-3HH)



開発された農業用マルチフィルム

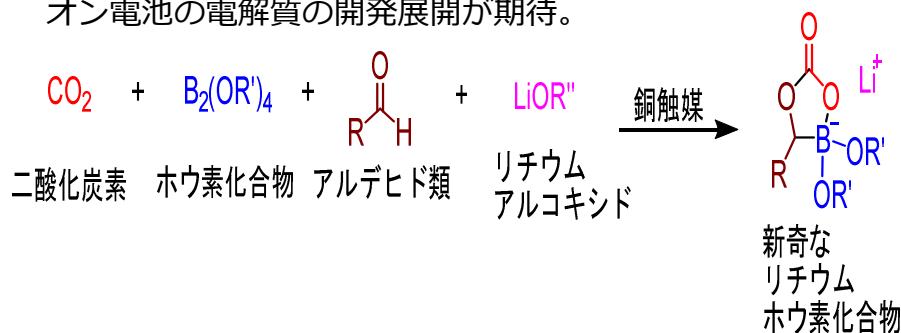


*PHBHを原料とする製品の数々

リチウムホウ素化合物の新しい合成法を開発 - 入手容易な原料から1段階で新規な構造の構築が可能に -

(Angew. Chem. Int. Ed. 2016年4月)
先進機能触媒研究グループ (侯GD他)

- CO2は入手が容易で再生可能な炭素資源であると同時に、温室効果ガスとして環境に悪影響を及ぼすことから、CO2削減につながる有効な利用法の開発が期待されている。
- これまでCO2を利用する有機合成反応について研究を進めてきており、“銅触媒”を用いることにより、CO2、ホウ素化合物、アルデヒド類、リチウムアルコキシドといった複数の入手容易な原料から、1段階で分子内に5員環構造を持つ新奇なリチウムホウ素化合物の選択的合成に成功。
- 新しいCO2の有効利用法の開発につながる可能性や従来のリチウムイオン電池のものとは異なる、新しいリチウムイオン電池の電解質の開発展開が期待。



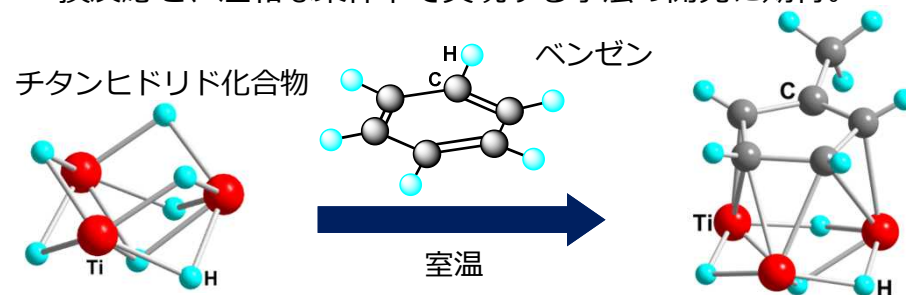
- ・ 入手容易な複数の原料から一段階で選択的に合成
- ・ 新しい二酸化炭素固定化反応
- ・ 多様なアルデヒド類が適用可能

銅触媒を用いた多成分カップリング反応による
リチウムホウ素化合物の合成

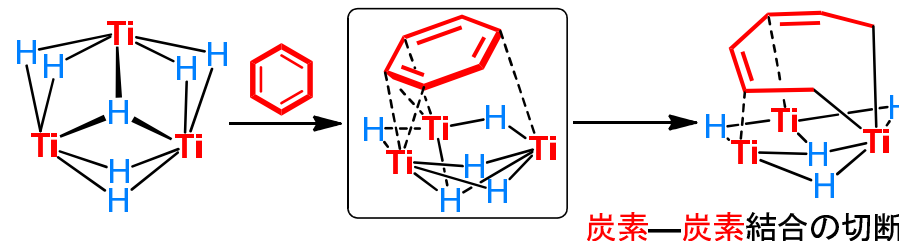
ベンゼンの「炭素-炭素結合」を室温で切断 - チタンヒドライド化合物で安定な芳香族化合物の炭素-炭素結合切断に成功 -

(Nature 2014年8月)
先進機能触媒研究グループ (侯GD他)

- ベンゼン環は非常に安定で、その炭素-炭素結合の切断には、固体酸触媒を用いて500°C程度に加熱する必要があり、多くのエネルギーを消費している。
- 窒素-窒素結合を切断できるチタンヒドライド化合物により、ベンゼン環の炭素-炭素結合を室温で切断、再配列できることを世界で初めて発見し、その様子を分子レベルで解明。
- 石油やバイオマスなどに豊富に存在する芳香族化合物から基礎化学品や医農薬中間体など、付加価値の高い化合物への変換反応を、温和な条件下で実現する手法の開発に期待。



チタンヒドライド化合物によるベンゼン環の切断



反応プロセス(3つのチタンがベンゼン環切断に働いている)

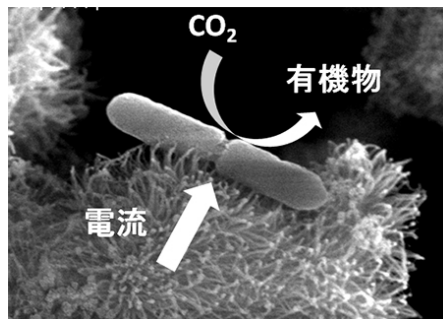
電気で生きる微生物を初めて特定

－微生物が持つ微小電力の利用戦略－

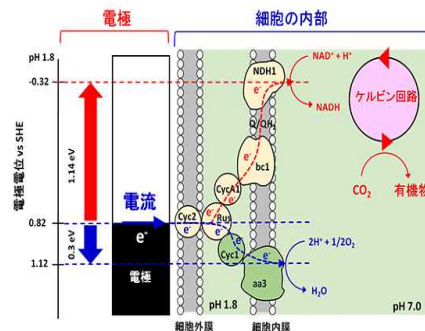
(Frontiers in Microbiology 2015年9月)

生体機能触媒研究チーム (中村 T L 他)

- ▶ 光合成と化学合成に代わる第3の有機物を合成する生物として、電気で生きる微生物の存在が注目されているが、電気を利用して細胞増殖可能な微生物や電気エネルギーを利用する上で必要となる代謝経路は解明されていなかった。
- ▶ 鉄イオンをエネルギーとして利用する鉄酸化細菌の一種を用い、電気のみがエネルギー源となる環境で細胞の培養を行い、細胞の増殖を確認。更にこの細菌は、微弱な電位を増幅し、電位差を生成することで、二酸化炭素から有機物を合成する代謝経路を駆動する事を明らかにした。
- ▶ 電気が光と化学物質に続く地球上の食物連鎖を支える第3のエネルギーであることを示すと同時に、二酸化炭素の固定反応に関わる微生物代謝の多様性を示した。また、極めて微小な電力で生きる電気合成微生物の存在は、微小電力の利用という観点からも新たな知見を提供した。



電機エネルギーを利用して栄養分を作り出す微生物



微小の電力を使って生きる生物の代謝経路

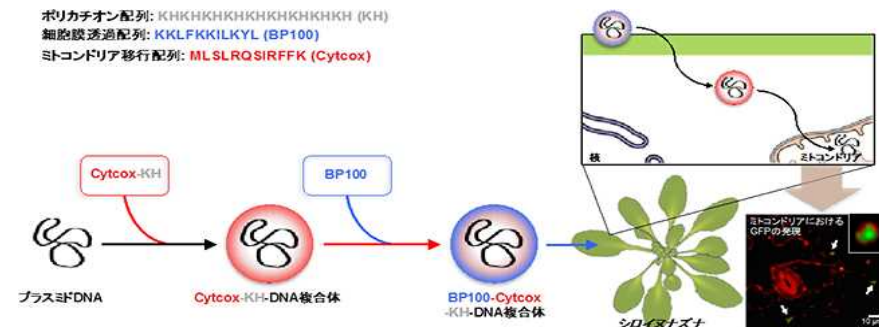
植物ミトコンドリアへ選択的に遺伝子導入する手法を開発

－複数機能を有するペプチドとDNAを組み合わせる新手法－

(Scientific Reports 2015年1月)

酵素研究チーム (沼田 T L 他)

- ▶ 化石燃料に依存した物質生産からの脱却と二酸化炭素の資源化を同時に実現するには、光合成を行う植物を利活用して、二酸化炭素から有用な物質を生産するシステムの構築が必要。
- ▶ 植物内でプラスチックなどの化成品や炭化水素などの化成品原料の生産を行うには、物質やエネルギーの生産を行う葉緑体やミトコンドリアの改変が必要なため、目的の遺伝子を選択的かつ高効率に導入することが望まれているが、有効な遺伝子導入法は存在していなかった。
- ▶ 植物細胞の葉緑体やミトコンドリアなどのオルガネラに遺伝子を効率的に導入する技術を開発。
- ▶ 植物オルガネラの改変による植物物質生産への道を拓き、低炭素社会の実現や、二酸化炭素の資源化への貢献も期待。



植物ミトコンドリアへの選択的な遺伝子導入の模式図

新規触媒の開発と高機能化

窒素からのアンモニア生産、二酸化炭素の利活用、酸素による安全な酸化、水からの水素生産、微小電気等のエネルギー利用

新規高分子素材の開発

バイオポリマー・タフポリマーの開発、植物由来ポリマーの利活用、機能性ポリペプチドの開発、高機能性構造タンパク質の開発

気候変動下での食料の安定確保とバイオマス生産向上

気候変動下での食料生産と作物育種、栽培技術の高度化・省力化、植物バイオマス・藻類バイオマスの利活用

有用植物・微生物の利用

植物や微生物のゲノム多様性の利活用による有用物質生産、植物の根圏微生物叢の解析、窒素固定、共生微生物の利用

強力な研究基盤の構築

ゲノム・メタボローム関連解析、ケミカルバンクとケミカルスクリーニング(創薬基盤も含む)合成化学