

「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発/  
資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発/  
微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発」

## 事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
-----	--------------------------------------

# —目次—

概 要.....	A-1
プロジェクト用語集.....	用語集-1
<b>I. 事業の位置付け・必要性について</b>	
1. 事業の背景・目的・位置づけ .....	I-1
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	
2.1 NEDO が関与することの意義 .....	I-7
2.2 実施の効果（費用対効果） .....	I-8
<b>II. 研究開発マネジメントについて</b>	
1. 事業の目標.....	II-1
2. 事業の計画内容	
2.1 研究開発の内容.....	II-1
2.2 研究開発の実施体制.....	II-3
2.3 研究開発の運営管理.....	II-5
2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性.....	II-7
3. 情勢変化への対応.....	II-7
4. 評価に関する事項	
4.1 事前評価.....	II-7
4.2 中間評価.....	II-8
4.3 事後評価.....	II-9
<b>III. 研究開発成果について</b>	
1. 事業全体の成果.....	III.1-1
2. 研究開発項目毎の成果	
2.1 触媒開発(東京大学・大阪大学)	
2.1.1 アノード微生物触媒.....	III.2-1
2.1.2 カソード酸素還元触媒.....	III.2-3
2.2 カソード開発 (パナソニック)	
2.2.1 Fe/N 共ドーブ炭素系触媒のベンチスケール量産化プロセスの開発.....	III.2-6
2.2.2 Fe/N-C 触媒のインク化技術、及びガス拡散層への塗布技術の開発.....	III.2-7
2.2.3 三相界面構造評価技術の開発.....	III.2-9
2.2.4 低コストカソードの開発.....	III.2-12
2.2.5 カソード電極構造検討によるリアクター出力、耐久性検証.....	III.2-15
2.3 アノード開発 (積水化学工業、東京大学、東京薬科大学)	
2.3.1 従来カーボン素材の性状・性能評価.....	III.2-18
2.3.2 低コストアノードの開発.....	III.2-20
2.3.3 バイオミネラリゼーション(東京大学).....	III.2-21
2.3.4 バイオフィルム微生物構造の解明 (東京薬科大学).....	III.2-22

2.4 微生物制御技術の開発(東京薬科大学)	
2.4.1 廃水処理 MFC 中のアノード微生物膜の解析.....	Ⅲ.2-24
2.4.2 微生物機能制御法の開発.....	Ⅲ.2-26
2.5 効率化システムの開発(東京薬科大学、積水化学工業)	
2.5.1 スラローム型リアクターの検討(東京薬科大学).....	Ⅲ.2-28
2.5.2 汚泥発生量の検討(東京薬科大学).....	Ⅲ.2-30
2.5.3 膜分離リアクターの検討(積水化学工業).....	Ⅲ.2-31
2.5.4 流路・電極配置の検討.....	Ⅲ.2-33
2.6 実証試験(積水化学工業, 東京大学, 東京薬科大学, パナソニック)	
2.6.1 スケールアップ(積水化学工業).....	Ⅲ.2-36
2.6.2 実証設備の設計(積水化学工業, 東京大学, 東京薬科大学, パナソニック).....	Ⅲ.2-40
2.6.3 実証試験(積水化学工業, 東京大学, 東京薬科大学, パナソニック).....	Ⅲ.2-41
<b>IV. 実用化に向けての見通し及び 取り組みについて.....</b>	<b>IV-1</b>

(添付資料)

- ・ 添付資料① イノベーションプログラム基本計画(ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画抜粋)
- ・ 添付資料② プロジェクト基本計画
- ・ 添付資料③ 技術戦略マップ(分野別技術ロードマップ)
- ・ 添付資料④ 事前評価関連資料(事前評価書、パブリックコメント)
- ・ 添付資料⑤ 特許論文等リスト

概要

最終更新日 2016年11月10日

プログラム(又は施策)名	ナノテク・部材イノベーションプログラム		
プロジェクト名	グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発/資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発/微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発	プロジェクト番号	P09010
担当推進部/ 担当者	<p>担当推進部 2014.04-現在 環境部 環境化学グループ</p> <p>担当者 主任研究員 岩田 寛治 2012.04-2013.01 主査 高木 雅敏 2012.04-2014.07 主任研究員 山野 慎司 2013.01-2016.04 主査 永淵 弘人 2014.07-2016.06 主任研究員 吉澤 由香 2016.05-現在 主査 渡部 雅智 2016.07-現在</p>		
0. 事業の概要	<p>化学品の製造プロセスにおけるクリーン化、省エネ化、原材料・資源の多様化・有効利用、廃棄物の減容化等を実現し、将来にわたっても持続的に化学品を製造するために必要な新規なグリーン・サステナブルケミカルプロセス(以下「GSC プロセス」という)の研究開発を行う。GSC プロセス研究開発課題としては、i)有害な化学物質を削減、ii)廃棄物、副生成物を削減、iii)資源生産性を向上、iv)化学品原料の転換・多様化等による独創的で革新的な化学プロセスを通じた開発であり、これら研究開発を通じてプロセスイノベーションやマテリアルイノベーションを早期に実現することを目的とする。これにより、わが国全体の産業競争力強化と環境負荷低減を飛躍的に促進することができ、新産業創造戦略及び世界全体をリードしたサステナブルな産業構造への貢献が期待できる。</p> <p>「微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発」(以降、本事業という)は、この中のiii)資源生産性を向上できる革新的化学プロセスの開発に位置する。本事業では、廃水中の有機物を分解して電気を発生し、電力消費の大きい活性汚泥法の曝気を不要とする微生物触媒を利用する微生物燃料電池による廃水処理に必要な技術の開発を目指す。これにより、化学工場等における廃水処理プロセスの大幅な省エネ・自立化を目指す。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>我が国の化学産業は、国際的に高い技術力と競争力を有し、社会の発展を支えているが、様々な課題も抱えている。製造プロセスでは、有害添加物(ハロゲン、重金属等)利用、高機能化に伴う多段化等によるエネルギー消費増、廃棄物大量排出等が問題となっている。我が国の化学産業のCO<sub>2</sub>排出量は業種別で鉄鋼業に次ぐ第2位であり、製造業の16%(日本全体の約5%)を占める。また、生産に必要な多くの原材料等は一部の産出国からの輸入に頼らざるを得ない状況にあり、将来にわたって安定的に化学品を製造可能なのかも危惧されている。これらの問題は、我が国のみならず、地球規模においても認識されており、科学の発展に伴い大量生産・大量消費文明を築き、資源枯渇、地球温暖化に代表されるような問題が顕在化してきている。これらの問題に対して、様々な環境対策が世界的に強化されていることに加え、これらの問題を克服し、持続的社會を実現するために、日米欧においてグリーン・サステナブル・ケミストリー(GSC)活動が進められてきている。我が国においては、GSCは枯渇性資源(原料、エネルギー)の消費を最小化し、かつ製造・加工プロセスで排出される廃棄物及び使用後に排出される廃棄物を最小化すると共に、使用時を含めた全ライフサイクルにわたって「人と環境の健康、安全」を実現する化学技術として位置付けられてきた。NEDOでは、これら資源、エネルギー、環境の制約問題を克服し、高機能な化学品の持続的製造を可能とする基盤技術の確立を目指し、前項i)~iv)による「GSCプロセス基盤技術開発」を実施している。</p> <p>本事業は、iii)資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発(石油化学品、機能性化学品合成、生成物分離、副生ガス分離等に対して大幅な消費エネルギー削減が可能となるクリーンプロセスを開発するために必要な触媒、膜材料、分離材料、吸着剤、選択加熱法による革新的な技術の開発)の内の開発項目の一つとして、微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発を行うものである。具体的には、廃水中の有機物を微生物が分解する際に生ずる電気エネルギーを効率よく取り出し、廃水処理システム自体の運転に活用し、併せて汚泥の大幅削減を図るための微生物燃料電池の実用化に必要な基盤技術を開発する。化学産業では製造プロセスの他産業廃水の処理に伴って多大なエネルギーが消費され、発生する汚泥処理も含め大量のCO<sub>2</sub>発生源となっている。本事業により、化学プラント等からの産業廃水の処理に伴うCO<sub>2</sub>排出量の削減・省エネ化に資する基盤技術を開発することにより、我が国の化学産業等のGSCプロセス化に寄与することができる。</p>		



II. 研究開発マネジメントについて

<p>事業の目標</p>	<p>本事業では、廃水中の有機物を微生物が分解する際に生ずる電気エネルギーを効率よく取り出し、廃水処理システム自体の運転に活用し、併せて汚泥の大幅削減を図るための微生物燃料電池の実用化に必要な基盤技術を開発する。</p> <p>具体的には下記の内容別に研究開発を実施し、最終的にベンチスケールの微生物燃料電池を開発して実証試験を行い、安定した廃水処理、省エネルギーのための運転技術を確立する。</p> <p>① 触媒の開発 ② カソードの開発 ③ アノードの開発 ④ 微生物制御技術の開発 ⑤ 効率化システムの開発 ⑥ 実証試験</p> <p>最終目標(平成 27 年度末) ・開発した小型実証装置(1立方メートル程度)により、廃水処理率が現行の活性汚泥処理と同等以上で、かつエネルギー消費が 20%以下となることを確認する。</p>														
<p>事業の計画内容</p>	<p>主な実施事項</p>	<p>2012fy</p>	<p>2013fy</p>	<p>2014fy</p>	<p>2015fy</p>	<p>2016fy</p>									
	<p>微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発</p>	<p>←</p>			<p>→</p>	<p>▼ 事後評価</p>									
<p>開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位:百万円)</p>	<p>会計・勘定</p>	<p>2012fy</p>	<p>2013fy</p>	<p>2014fy</p>	<p>2015fy</p>	<p>総額</p>									
	<p>一般会計</p>														
	<p>特別会計(需給)</p>	<p>200</p>	<p>200</p>	<p>200</p>	<p>200</p>	<p>800</p>									
	<p>加速予算 (成果普及費を含む)</p>		<p>60</p>			<p>60</p>									
	<p>総予算額</p>	<p>200</p>	<p>260</p>	<p>200</p>	<p>200</p>	<p>860</p>									
<p>開発体制</p>	<p>経産省担当原課</p>	<p>製造産業局化学課(現 製造産業局素材産業課)</p>													
<p>開発体制</p>	<p>プロジェクトリーダー</p>	<p>国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科 教授 橋本 和仁(2012.8-2016.3)</p>													
<p>開発体制</p>	<p>委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載)</p>	<p>(国)東京大学 (私)東京薬科大 積水化学工業(株) パナソニック(株)</p>													
<p>情勢変化への対応</p>	<p>2013 年 9 月:電極の低コスト化技術の加速実施」を目的に、表面観察装置、電気化学測定装置、微生物評価装置を導入</p>														
<p>評価に関する事項</p>	<p>事前評価 : 2011 年度実施 担当部 環境部</p>														
<p>III. 研究開発成果について</p>	<p>最終目標(2015 年度末)とそれに対する成果は以下の通り</p> <table border="1" data-bbox="464 1749 1225 1854"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>最終目標</th> <th>成果</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>廃水処理率</td> <td>90%以上</td> <td>90%以上</td> </tr> <tr> <td>エネルギー削減率</td> <td>80%以上</td> <td>最大 84%</td> </tr> </tbody> </table> <p>・最終目標はすべて達成 ・各企業の個別開発目標についても達成</p> <p>投稿論文 「査読付き」7 件、 特許 「出願済」43 件、(うち PCT 出願 10 件)</p>						項目	最終目標	成果	廃水処理率	90%以上	90%以上	エネルギー削減率	80%以上	最大 84%
項目	最終目標	成果													
廃水処理率	90%以上	90%以上													
エネルギー削減率	80%以上	最大 84%													

	その他の外部発表 (プレス発表等)	「研究発表・講演」46 件、「新聞・雑誌等への掲載」28 件、「展示会への出展」3 件
IV. 実用化の見通し について	<p>本事業の結果、電極製造と処理装置仕様に関する基盤技術を確立することができた。今後はこの基盤技術を基に、積水化学工業㈱が 2016 年度「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」新規技術開発テーマで助成事業の採択を受け、実用化に向け電極のスケールアップ、長期耐久性の立証を行う。その後更に製造ライン構築、製品実証を行い、5 年後の実用化を目指す。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	2009 年 3 月 作成
	変更履歴	<p>2009 年 12 月 改訂 (「明日の安心と成長のための緊急経済対策(平成 21 年度補正予算(第 2 号))」に係る研究開発項目④追加による改訂)</p> <p>2010 年 8 月 改訂 (加速に伴い(別紙)研究開発計画の研究開発項目③-2 の達成目標を修正)</p> <p>2011 年 1 月 改訂 (平成 22 年度補正予算第 1 号による研究開発項目④-4、④-5 追加による改訂)</p> <p>2011 年 7 月 改訂 (根拠法改正に伴う改訂)</p> <p>2011 年 10 月 改訂 (中間評価の結果に基づき(別紙)研究開発計画の研究開発項目③-1 の内容を修正)</p> <p>2012 年 3 月 改訂 (研究開発項目③-4 追加による改訂)</p> <p>2012 年 9 月 改訂 (研究開発項目②の一部追加実施に伴う改訂)</p> <p>2013 年 2 月 改訂 (研究開発項目③-1 の目標修正、研究開発項目④の期間修正、評価に関する事項修正、業務方法書の改正による改訂)</p> <p>2014 年 9 月 改訂 (「先導的調査研究」の追記に伴う改訂)</p>

## プロジェクト用語集

### 1. 触媒の開発 < 東京大学、大阪大学 >

専門用語	英語記載	専門用語の説明
アノード電位	Anode potential	電気化学系においてアノードが示す電位のこと
アノード微生物電流	Anodic microbial current	アノード上に生育する電流生成菌に媒介された有機物酸化反応に伴い流れる電流
グラフェン	Graphene	グラファイト 1 層に相当する炭素材料
広域 X 線微細構造 (EXAFS) 解析	Extended X-ray Absorption Fine Structure	X 線吸収スペクトルにおいて、吸収端から高エネルギー側に 1000eV 程度までの領域に見られる構造。その解析により分子の配位構造に関する情報が得られる
サイクリックボルタモグラム測定	Cyclic voltammogram	電気化学測定において作用極電位を周期的に操作し、酸化還元活性種の電気化学特性を評価する方法
酸素還元触媒	Oxygen reduction catalyst	酸素還元反応を促進する触媒
電流生成菌	Electricity generating microbe	アノードに電子を渡すことで生育する微生物種。適当なカソード反応と組み合わせることで電流を生ずることができる
軟 X 線吸収分光スペクトル	Soft X-ray absorption spectroscopy	物質の電子状態や局所構造を求めるために用いられる X 線分光法
微生物燃料電池	Microbial fuel cell	電流生成菌によるアノードでの有機物酸化分解反応と、適当なカソード反応との組み合わせからなる電池系
網羅的代謝解析	Metabolomic analysis	生細胞内の代謝物濃度を網羅的に解析すること
Geobacter		細胞膜外膜に電子伝達たんぱく質を有することを特徴とする電流生成菌の一種
PCR 法	PCR technique	ポリメラーゼ連鎖反応(PCR)により DNA を増幅する原理を用いた遺伝子解析手法
Shewanella		細胞膜外膜に電子伝達たんぱく質を有することを特徴とする電流生成菌の一種
3電極式リアクター	Three-electrode system reactor	参照電極を用いて、作用電極の電位を精密に制御する方式を備えた電気化学リアクター
$\pi$ 逆供与性	$\pi$ -electron back donation	金属錯体の中心金属から配位子へ電子が供与される性質

### 2. カソードの開発 < パナソニック(株) >

専門用語	英語記載	専門用語の説明
イオノマー	Ionomer	ポリマー構造の間にイオン結合を有する樹脂
拡散限界電流	Diffusion-limited current	電極反応によって電極表面の反応物が全て消費され、反応物濃度が0となり物質拡散のみが律速しているときの電流

ガス拡散電極	Gas diffusion electrode	酸素を含む気体の拡散特性を有する電極
グラファイト	Graphite	層状の結晶構造を有する炭素からなる物質
グラファイトホイル	Graphite foil	膨張黒鉛粒子を圧延して成形したシート
交換電流密度	Exchange current density	酸化反応と還元反応の電流密度が等しく、系が平衡状態であるときの電流密度
サイクリックボルタムトリー	Cyclic voltammetry	電気化学測定において作用極電位を操作し、酸化還元活性種の応答電流を評価する手法
三相界面	3-phase interface	気体、電解液、触媒の三相によって形成される界面
酸化グラフェン	Graphene oxide	酸素を含有する官能基が結合したグラフェン
酸素還元オンセット電位	Oxygen reduction onset potential	酸素還元反応に伴う電流が流れ始める電位
繊維処理剤	Textile treatments	繊維に対して撥水性、防水性、柔軟性などの付加機能を付与するための薬剤
電気化学的表面積	Electrochemical active surface area	サイクリックボルタムトリーなどの電気化学的な測定手段によって導出され、電気化学反応に対して有効に作用する表面積
半波電位	Half-wave potential	反応によって生じた電流変化の半分に相当する電流が流れるときの電位
溶存酸素	Dissolved Oxygen	水中に溶解している酸素
HRT	Hydraulic retention time	水理学的滞留時間
LSV 特性	LSV property	電極電位を連続的に変化させることで得られる、各電位において流れた電流値の特性
PTFE 分散液	PTFE dispersion	ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)の微粒子を溶媒中に分散させた液
vs. RHE		可逆水素電極に対する電位

### 3. アノードの開発<積水化学工業(株)>

専門用語	英語記載	専門用語の説明
バッチ式リアクター	batch reactor	回分式で有機物等の供給を行う方式の処理槽
パワーカーブ	power curve	電力と電流との関係をプロットして表される線図。分極曲線から求める
分極曲線	polarization curve	電池の性能を評価する手法で、電流と電位との関係をプロットして表される線図
メディエーター	mediator	電子伝達物質
pH 緩衝剤	buffer agent	pH の変動を抑制する薬剤

X線CT	X-ray computed tomography	X線を用いたコンピューター断層撮影もしくはその装置
------	---------------------------	---------------------------

### 3. アノードの開発<東京大学>

専門用語	英語記載	専門用語の説明
バイオミネラリゼーション	Bio mineralization	生化学プロセスをきっかけに固体状無機物が形成される現象

### 3. アノードの開発<東京薬科大学>

専門用語	英語記載	専門用語の説明
共焦点顕微鏡	Confocal microscopy	焦点距離がばらばらになるような厚い試料のイメージを微小なポイント毎に撮り、それをコンピューターで再構成して全体の画像を得ることができる顕微鏡
バイオフィルム	Biofilm	固体表面に微生物により形成される膜状構造体
Fluorescence in situ hybridization (FISH)		蛍光色素で標識したオリゴヌクレオチドプローブを目的の遺伝子と結合(ハイブリダイゼーション)させ、その遺伝子が存在する細胞を特異的に蛍光顕微鏡で検出する手法

### 4. 微生物制御技術の開発<東京薬科大学>

専門用語	英語記載	専門用語の説明
工場活性汚泥	Industrial activated sludge	工業的廃水を処理する活性汚泥
ショットガンメタゲノム解析	Shotgun metagenome analysis	採取したサンプル中に存在する様々な微生物の全遺伝子の包括的な標本抽出法で、これにより微生物の多様性や機能を評価することができる
代謝経路	Metabolic pathway	生物が化学物質を変換する経路
パイロシーケンス解析	Pyrosequencing	高速 DNA シークエンス法の一つで、ヌクレオチドが DNA に取り込まれるときに放出されるピロリン酸を ATP に変化させて発光反応に用いることで、ヌクレオチドがどれくらい DNA に取り込まれたかを定量できるという原理に基づいたもの
ポリ硫酸鉄	Poly ferroussulfate	廃水処理における凝集剤などに用いられる無機物ポリマー
Desulfovibrio 属細菌	Desulfovibrio bacteria	Proteobacteria 門に属す細菌で、硫酸還元菌に代表される
KEGG 等のデータベース	KEGG database	KEGG (Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes: 京都遺伝子ゲノム百科事典)はバイオインフォマティクス研究用のデータベースで、遺伝子、タンパク質、代謝、シグナル伝達などの分子間ネットワークに関する情報を統合したもの
Sporomusa 属細菌	Sporomusa bacteria	Firmicutes 門に属す細菌で、ホモ酢酸活性や嫌氣的メタノール資化能を有するものを含む

16S rRNA 遺伝子	16S rRNA gene	リボソームを構成する RNA の一つをコードする遺伝子で、分類マーカーとして広く使われるもの
--------------	---------------	--

#### 5. システム効率化の検討<東京薬科大学>

専門用語	英語記載	専門用語の説明
汚泥の発生	Sludge production	廃水処理は廃水中の有機物等汚濁物質を除去することによりなされるが、処理場において除去された汚濁物質の分だけ汚泥などが発生し、汚泥の廃棄の必要性が生じる
カセット電極型 MFC	Cassette-electrode microbial fuel cell	単位体積当たりの電極面積を大きくするために開発されたカセット電極を組み込んだ微生物燃料電池
COD	Chemical oxygen demand	化学的酸素要求量のことであり、水中の有機物濃度の指標となる

#### 6. システム効率化の検討<積水化学工業(株)>

専門用語	英語記載	専門用語の説明
固液分離工程	solid-liquid separation process	固体が液体に分散している状態の液を固体と液体とに分離する工程。
膜分離	membrane separation	分離膜に液体のみを透過させることで行われる固液分離。
膜面流速	surface velocity	分離膜表面近傍における膜面方向の液体の流速。
面積負荷	surface area loading rate	電極面積当たりの有機物負荷速度。
BOD	biochemical oxygen demand	生物学的酸素要求量。

#### 7. 実証試験<積水化学工業(株)、東京大学、東京薬科大学、パナソニック(株)>

専門用語	英語記載	専門用語の説明
古細菌	Archaea	生物の3つのドメインの一つであり、微生物により構成される。メタン菌等が含まれる。
植種	Seed	微生物プロセスを立ち上げる時に導入される微生物源のこと
定量 PCR	Quantitative polymerase chain reaction	ポリメラーゼ連鎖反応を利用して DNA 等の総量を間接的に測定する手法。
メタン転換率	Methane-conversion rate	バイオマスなどが嫌気分解によりメタンに変換される効率

# I. 事業の位置付け・必要性について

## I.1 事業の背景・目的・位置付け

### (1) 事業の背景

我が国の化学産業は、国際的に高い技術力と競争力を有し、経済社会の発展を支えている。国別の出荷額(図 I-1)では中国、アメリカに続く第 3~4 位をドイツと争い、国内製造業での比較(図 I-2)では出荷額、付加価値額とも 2 位を占める主要な産業である(工業統計における化学工業、プラスチック製品、ゴム製品の合計を化学産業と定義)。

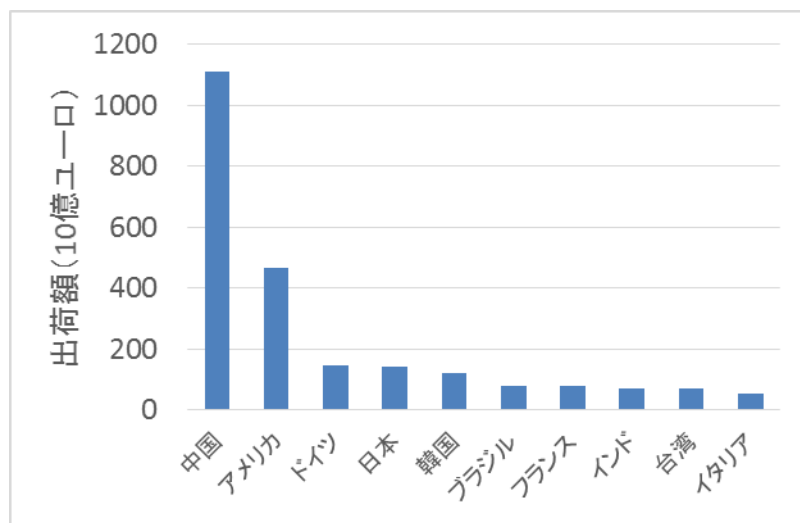


図 I-1. 上位 10ヶ国の化学製品出荷額(2014年、医薬品除く)  
(Cefic Chemdata International)

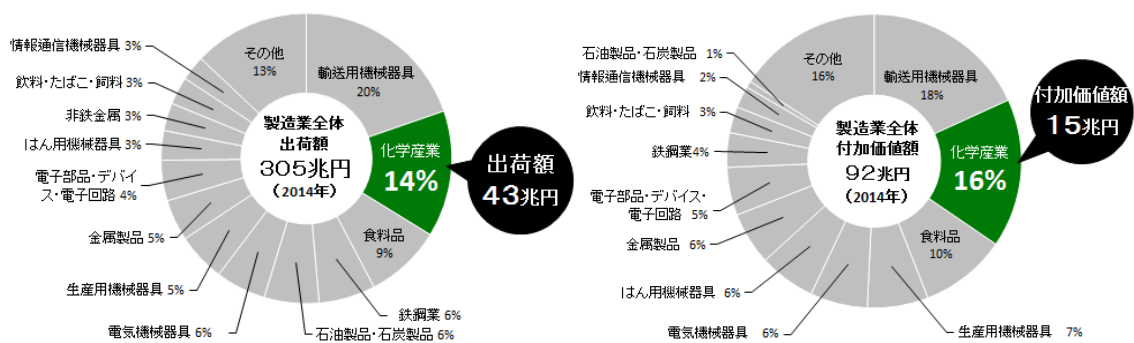


図 I-2. 製造業の国内出荷額(工業統計 2014年確報より作成)

一方、地球温暖化問題、資源枯渇問題が現実化しつつある中で様々な課題を抱えてもいる。製造プロセスでは、有害な添加物(ハロゲン、重金属等)の利用、高機能化追求にともなうプロセスの多段化等によるエネルギー消費の増大、廃棄物の大量排出(廃棄処分場の不足等)などが問題となっている。一方、生産に必要な多くの原材料等は限られた産出国からの輸入に頼らざるを得ない状況にあり、将来にわたって安定的に化学品が製造できるか危惧されている。国内製造業での比較(図 I-3)では化学産業は CO<sub>2</sub> 排出量の 23%、廃棄物排出量の 13%を占めており、これらの削減は化学産業にとって重要な課題である。

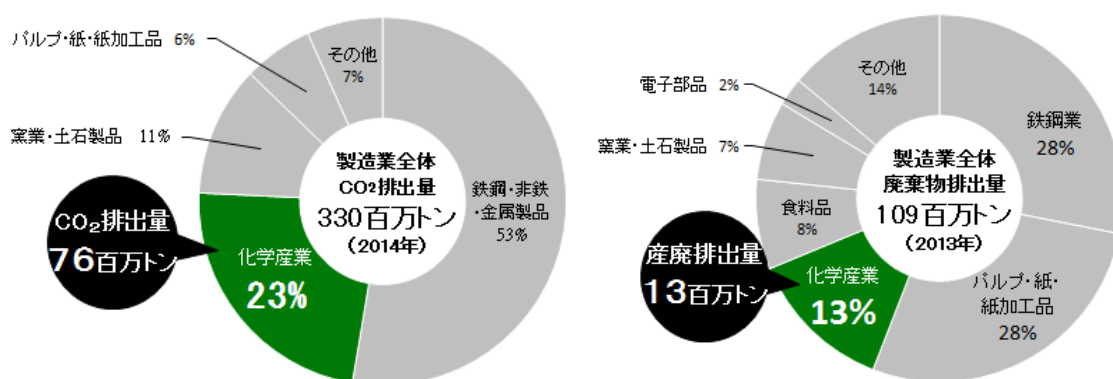


図 I-3. 製造業の CO<sub>2</sub> および廃棄物排出量  
(国立環境研究所「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」および環境省データより作成)

このような背景の下、例えば米国では「グリーンケミストリー(Green Chemistry)」、EU では「サステナブルケミストリー(Sustainable Chemistry)」と呼ばれる概念が提唱され、化学産業でのエネルギーや資源、環境負荷を削減し、持続可能な社会を構成する持続可能な化学産業の構築を目指す様々な取組が世界的に進められている。

我が国では、エネルギー、資源制約を克服して環境との共生を図り、安全・安心で競争力のある持続可能な社会を構築するための化学技術の体系として「グリーン・サステナブルケミストリー」(GSC)の概念を掲げ、化学産業の転換への取り組みを進めている(図 I-4)。1998年、通商産業省(当時)、工業技術院物質工学工業技術研究所(当時)、各種業界団体、学会によるグリーンケミストリー連絡会が発足、これを前身として2000年3月に化学系の学協会、独法研究機関など産学官25団体による「グリーン・サステナブルケミストリーネットワーク(GSCN)」が設立され、GSCの概念や技術の産業界への普及を図っている。GSCNには、オブザーバーとして経済産業省、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下 NEDO)も関与している。

経済産業省および NEDO は、これら資源、エネルギー、環境の制約問題を克服し、高機



能な化学品の持続的製造を可能とする基盤技術の確立を目指し、「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発」(以下 GSC プロセス基盤技術開発)を実施した。本事業「微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発」はその中の一つである。

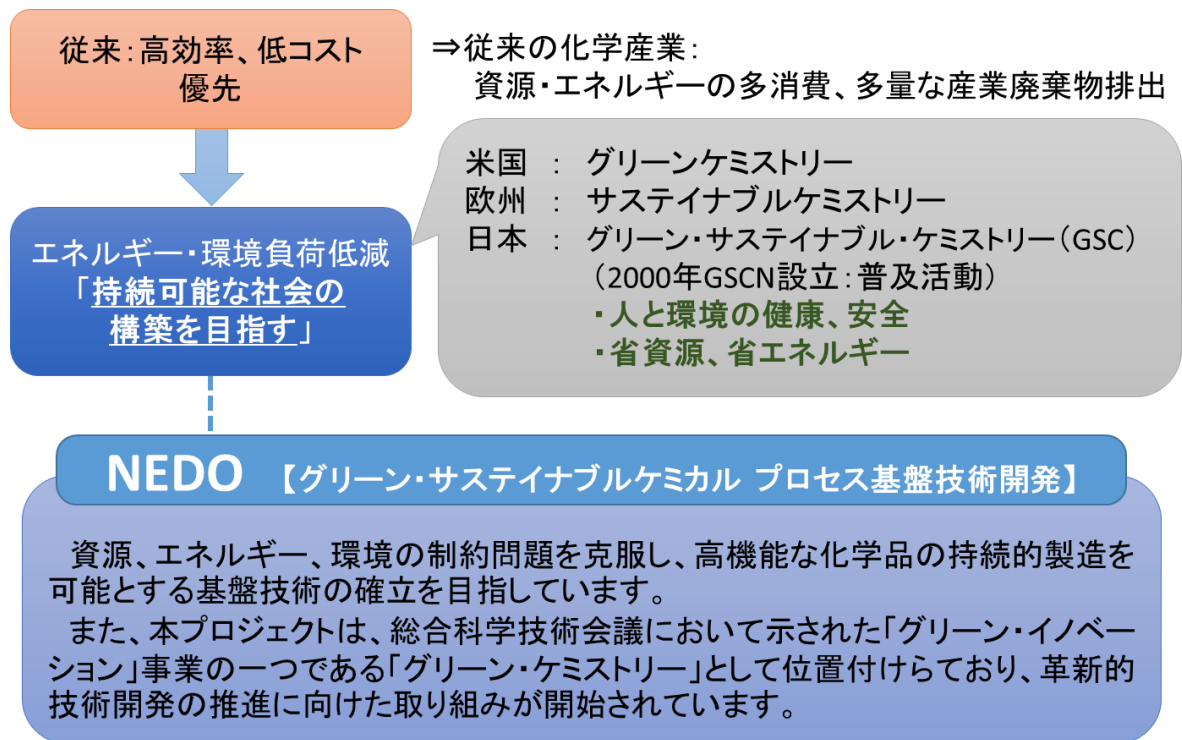


図 I -4. グリーン・サステイナブルケミストリー活動

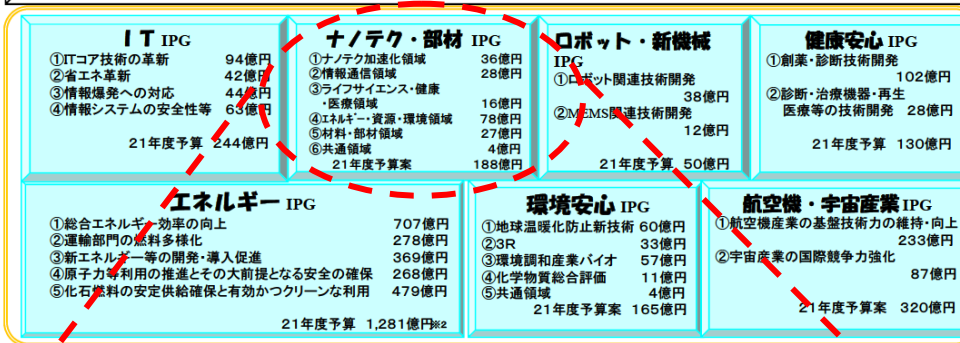
## (2) 本事業に関連する経済産業政策

経済産業省では、実施する研究開発プロジェクトを7つの政策目標のもとにまとめ、市場化に必要な関連施策(規制改革、標準化等)と一体となった施策パッケージである[イノベーションプログラム](2008年4月1日制定)として推進している。

同プログラムの[2. ナノテク・部材イノベーションプログラム]内の[IV. エネルギー・資源・環境領域]に GSC プロセス技術が盛り込まれており(図 I -5)、これに則り2008年度より GSC プロセス基盤技術開発が開始された(2008年度は経済産業省直轄事業、2009年度より NEDO 事業)。

1. 「イノベーションプログラム」の中での体系的推進 (Inside Management & Accountability)
- 経済産業省の全ての研究開発プロジェクトは、政策目標毎に7つの「イノベーションプログラム」の下で体系的に推進。
  - 各プログラムの中で、政策目標に向けたプロジェクトの位置付けと目標の明確化、市場化に必要な関連施策(規制改革、標準化等)との一体化を図り、イノベーション実現に向け各プロジェクトを効果的に推進。
2. 「技術戦略マップ」に基づく戦略的企画立案 (Outside Communication & Networking)
- 先端産業技術動向を把握し、国が取り組むべき技術課題とイノベーションの道筋を明確化するため、産学官で協働するロードマッピング手法を導入(『技術戦略マップ 2005/2006/2007/2008』)。
  - 研究開発プロジェクトの選定に当たっては、イノベーションプログラムにおける政策目標を基に技術戦略マップに位置付けられた重要技術課題を抽出し戦略的に企画立案。

イノベーションプログラム(IPG)の21年度予算額 (総額: 1,966億円※1)



※1 各イノベーションプログラムにおけるプロジェクトの重複を排除した額 ※2 各サブプログラムで重複があるため小計と一致しない

2. ナノテック・部材イノベーションプログラム 【平成21年度予算額: 188億円】

○あらゆる分野に対して高度化・不連続な革新をもたらすナノテクノロジー・革新的部材技術を確立する。 ○我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服を可能とする。



図 I-5. イノベーションプログラムにおける GSC の位置付け

### (3) 事業の目的

GSC プロセス基盤技術開発の研究開発目標は、次の4項目に分けられる。

- ① 有害な化学物質を削減できる、又は使わない革新的プロセス及び化学品の開発
- ② 廃棄物、副生成物を削減できる革新的プロセス及び化学品の開発
- ③ 資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発
- ④ 化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発

これらの課題に、独創的で革新的な化学プロセスの開発を通じて取り組み、プロセスイノベーションやマテリアルイノベーションを早期に実現することを目的とする。これにより、わが国全体の産業競争力強化と環境負荷低減を飛躍的に促進することができ、新産業創造戦略及び世界全体をリードした持続可能な産業構造への貢献が期待できる。

本事業「微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発」は、「③資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発」の内の開発項目の一つ(図 I-6)として、2012年度から開始された。また、本技術は経済産業省の技術戦略マップ 2010 において「低環境負荷型廃水処理の開発」に関連する技術として位置付けられる。技術戦略マップの該当部分については別添資料とする。

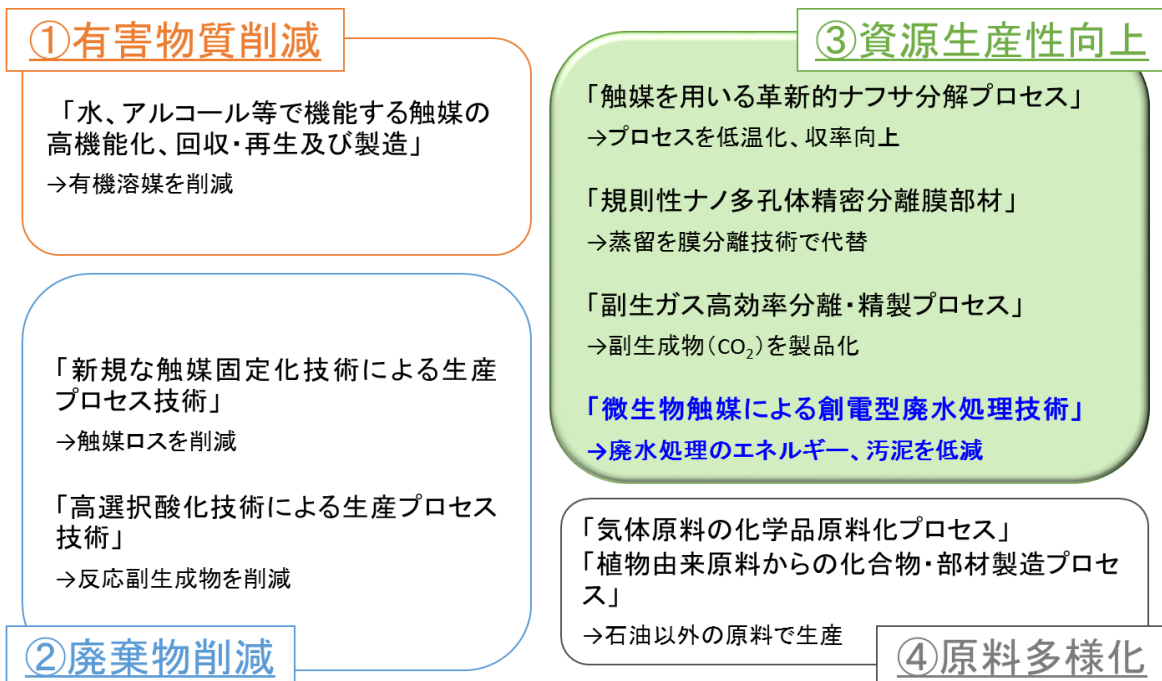


図 I-6. GSC プロセス基盤開発の開発項目

本事業では石油化学プラントからの産業廃水に対し、微生物燃料電池による廃水処理技術を開発する事を目的とする。

微生物燃料電池とは、有機物を分解する際に得られる化学エネルギーの一部を電子として放出する性質を持つ発電微生物を用いた燃料電池である(図 I - 7)。

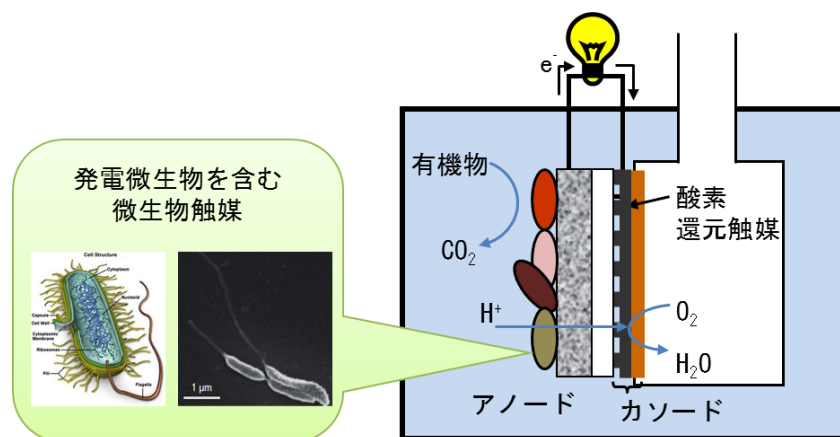


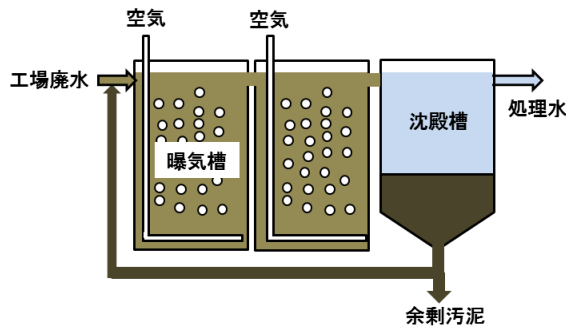
図 I - 7. 微生物燃料電池の概念図

現在の標準的な廃水処理技術である活性汚泥法では、曝気により廃水中に酸素を供給して微生物による有機物の分解を行い、有機物を取り込んで分裂・増殖した微生物である余剰汚泥を廃棄しているが、曝気および汚泥処理工程に多大な電力を消費している。

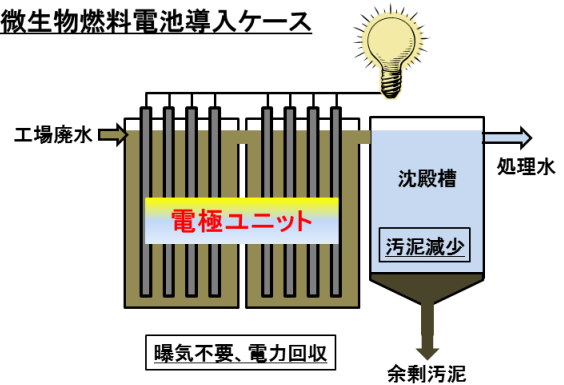
微生物燃料電池では、発電による電力回収効果に加え、必要な酸素はカソード反応を通じて供給されるため曝気処理が不要となる。また、電力を回収した分だけ、有機物分解により微生物群が得る化学エネルギーの総量が低減されるため、余剰汚泥の増加量が減少し、汚泥処理工程に要する電力も削減できる。以上の複数のエネルギー削減効果が合わさり、廃水処理にかかるエネルギーの大幅な削減が期待でき(図 I - 8)、我が国の化学産業等の GSC プロセス化に寄与することができる。

具体的には、①触媒、②カソード、③アノード、④微生物制御技術、⑤処理システム構成、といった微生物燃料電池による廃水処理技術の構築に必要な各種基盤技術を開発し、最終的に実際の工場廃水による実証運転を行い、エネルギー削減効果を検証した。

現状: 活性汚泥法



微生物燃料電池導入ケース



【エネルギー消費バランスイメージ】

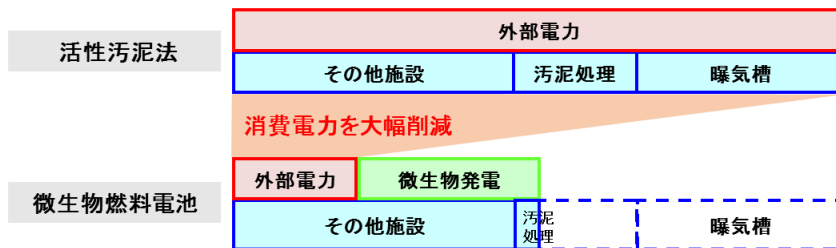


図 I - 8. 微生物燃料電池による水処理装置イメージ

I.2 NEDO の関与の必要性・制度への適合性

I.2.1 NEDO が関与することの意義

本技術は、経済産業省による技術戦略マップ 2010、グリーン・サステナブルケミストリー (GSC) 分野に掲載の「低環境負荷型廃水処理の開発」に関連する技術として位置付けられており、NEDO が推進すべき事業分野に合致している。化学産業における CO<sub>2</sub> 排出削減は喫緊の課題である。GSC プロセス基盤技術開発において製造プロセスに関する事業が多数実施されているが、廃水処理に適用する微生物触媒システムを開発する本事業は新規性を有し、波及効果も大きい。

微生物触媒システムは新規性を有する技術で難易度が高く、開発内容も多岐に渡るため、単独の研究機関や民間企業での開発は非常に困難である。実用化には複数の研究開発主体間での協力枠組みを維持することが不可欠であり、NEDO のマネジメント機能による産学の効果的な連携の下に推進することが非常に効果的と考えられる。

以上、事業の目的、技術の新規性と困難性、波及効果等を勘案し、本事業には NEDO の関与が妥当と考えられる。



## I.2.2 実施の効果

### (1) 事業費

事業費の推移を表 I-1 に示す。2013 年度には、加速予算で電極表面観察装置と電気化学測定装置、および実証試験サイズ(表面積 1m<sup>2</sup>/枚)の微生物燃料電池用電極の評価装置を導入し、電極材料(アノード材料、カソード材料)の低コスト化を加速した。

表 I-1. 事業費の推移(単位:百万円)

	2012 年度	2013 年度	2014 年度	2015 年度	総額
当初予算	200	200	200	200	800
加速予算		60			60
繰越	—	—	—	—	—
実績	200	260	200	200	860

### (2) 効果

2040 年の段階で微生物燃料電池による廃水処理の普及状況を 50 万 m<sup>3</sup>/日と想定(廃水量 300m<sup>3</sup>/日以上国内事業所への普及率 20%に相当)した場合、活性汚泥法による工場廃水処理の処理水当りの電力使用量を 2kWh/m<sup>3</sup>、微生物燃料電池による省エネ効果を 80%(削減幅 1.6kWh/m<sup>3</sup>)とすると、電力削減および CO<sub>2</sub> 削減として以下の効果が見込まれる。

《総省エネ効果》

$$50 \text{ 万 m}^3/\text{日} \times 365 \text{ 日/年} \times 1.6 \text{ kWh/m}^3 = 2.9 \text{ 億 kWh/年}$$

《総 CO<sub>2</sub> 削減》

$$2.9 \text{ 億 kWh/年} \times 0.579 \text{ kg-CO}_2/\text{kWh} = 17 \text{ 万 t-CO}_2/\text{年}$$

## II. 研究開発マネジメントについて

### II.1 事業の目標

GSC プロセスの研究開発目標は下記の 4 項目である。

- ①有害な化学物質を削減できる、又は使わない革新的プロセス及び化学品の開発：
  - ・ハザードの大きな溶媒、化合物等の使用に対して大幅な削減が見込めること。
  - ・ライフサイクルに亘り大幅な省エネ効果、安全性、軽量化、長寿命化等に大幅な改善が見込めること。
- ②廃棄物、副生成物を削減できる革新的プロセス及び化学品の開発：
  - ・e-ファクター(副生成物量(=産業廃棄物量)/目的生成物量)の大幅な低減、廃棄物、排水量等に対して大幅な削減が見込めること。
  - ・ライフサイクルに亘り大幅なリサイクル率(カスケードリサイクル含む)向上、軽量化、長寿命化等の大幅な改善が見込めること。
- ③資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発：
  - ・石油化学品、機能性化学品合成、生成物分離、副生ガス分離など、大量エネルギー消費に関わる単位操作のプロセスにおいて大幅な消費エネルギー削減が見込めること。
  - ・ライフサイクルに亘り大幅なリサイクル率(カスケードリサイクル含む)、安全性、軽量化、長寿命化等の大幅な改善が見込めること。
- ④化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発：
  - ・化学品に使用される石油由来原料について、気体原料や植物由来原料等への大幅な転換・多様化が見込めること。
  - ・ライフサイクルに亘り大幅な二酸化炭素の排出の抑制が見込めること。

上記項目のいずれかにおいて顕著な効果が期待できる水準を達成するとともに、他の要素(性能、コスト等)に対しても既存のプロセス、化学品の製造に対して同等レベル以上であることを目標とする。

本事業はこの中で「③資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発」に位置づけられ、大量エネルギー消費に関わる単位操作のプロセスにおいて大幅な消費エネルギー削減を図るために、化学プロセス等から排出される有機性廃水の処理プロセスにおいて微生物燃料電池による廃水処理プロセスを開発し、現行の廃水処理法と同等以上の処理性能かつエネルギー消費 20%以下を達成することを最終目標とする。

### II.2 事業の計画内容

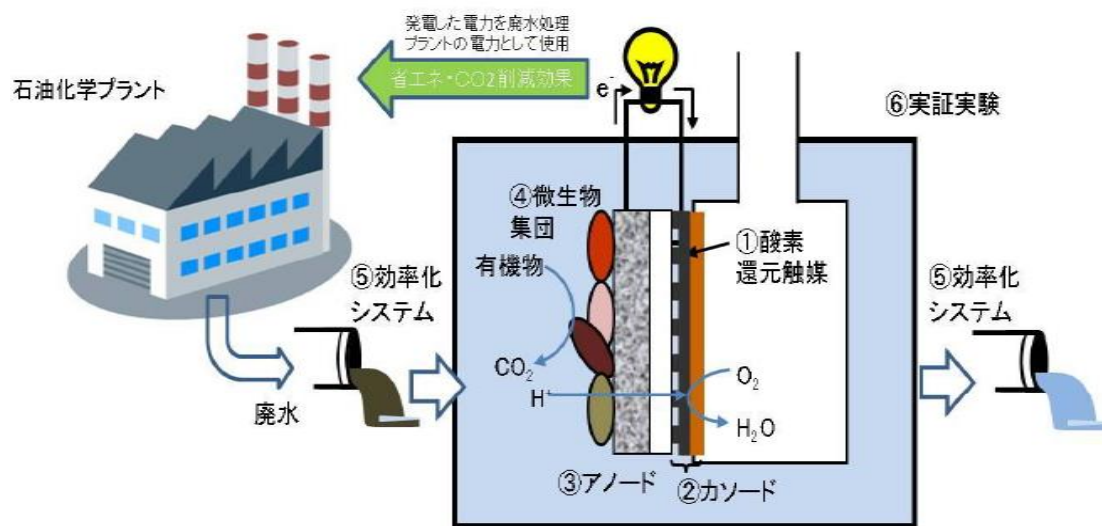
#### II.2.1 研究開発の内容

##### (1) 研究開発項目

本事業では、上記の目標を達成するため、ベンチスケールの微生物燃料電池型廃水処

理装置を開発し、実証試験を行って安定した廃水処理、省エネルギーのための運転技術を確認した。具体的には、下記の6つの研究開発項目を実施した(図Ⅱ-1)。

- ① 触媒の開発
  - ・微生物燃料電池のカソード(陽極)に適した安価な酸素還元触媒の開発、及び微生物アノード(陰極)の電気化学的解析を行う。
- ② カソードの開発
  - ・安価な電極基板材料を開発することにより、ベンチスケールの微生物燃料電池のカソード用空気拡散電極を開発する。
- ③ アノードの開発
  - ・微生物親和性が高く安価な電極基板材料を開発することにより、ベンチスケールの微生物燃料電池のアノードを開発する。
- ④ 微生物制御技術の開発
  - ・電流生成微生物の代謝経路の網羅的解析を行って、廃水に適合した発電微生物集団を迅速に形成させる技術、及び微生物集団を安定に機能させるための技術を開発する。
- ⑤ 効率化システムの開発
  - ・廃水処理前後工程を考慮した効率化システムの開発を行う。
- ⑥ 実証試験
  - ・①～⑤で開発した小型実証装置(1m<sup>3</sup>程度)を用い、安定した廃水処理、省エネルギーを実証し、安定した廃水処理、省エネルギーのための最適な運転技術を確認する。



図Ⅱ-1. 本事業の研究開発項目



## (2) 事業目標(値)

### 最終目標(2015年度末)

開発した小型実証装置(1 m<sup>3</sup>程度)により、廃水処理率が現行の活性汚泥処理と同等以上で、かつエネルギー消費が 20%以下(消費エネルギーの削減率 80%)となることを確認する。

なお、本研究開発終了後、実用化技術として、コスト低減、早期の市場導入に対して大きな寄与が期待できる技術レベルを確立すること。

## Ⅱ.2.2 研究開発の実施体制

### (1) 実施者の選定

GSC プロセス基盤技術開発に属する各事業については、2009 年度より NEDO が、単独ないし複数の原則、本邦の企業、大学等の研究機関(原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外の企業等(大学、研究機関を含む)の特別の研究開発能力、研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を、国外企業等との連携により実施することができる。)から公募によって研究開発実施者を選定後、共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託して実施した。

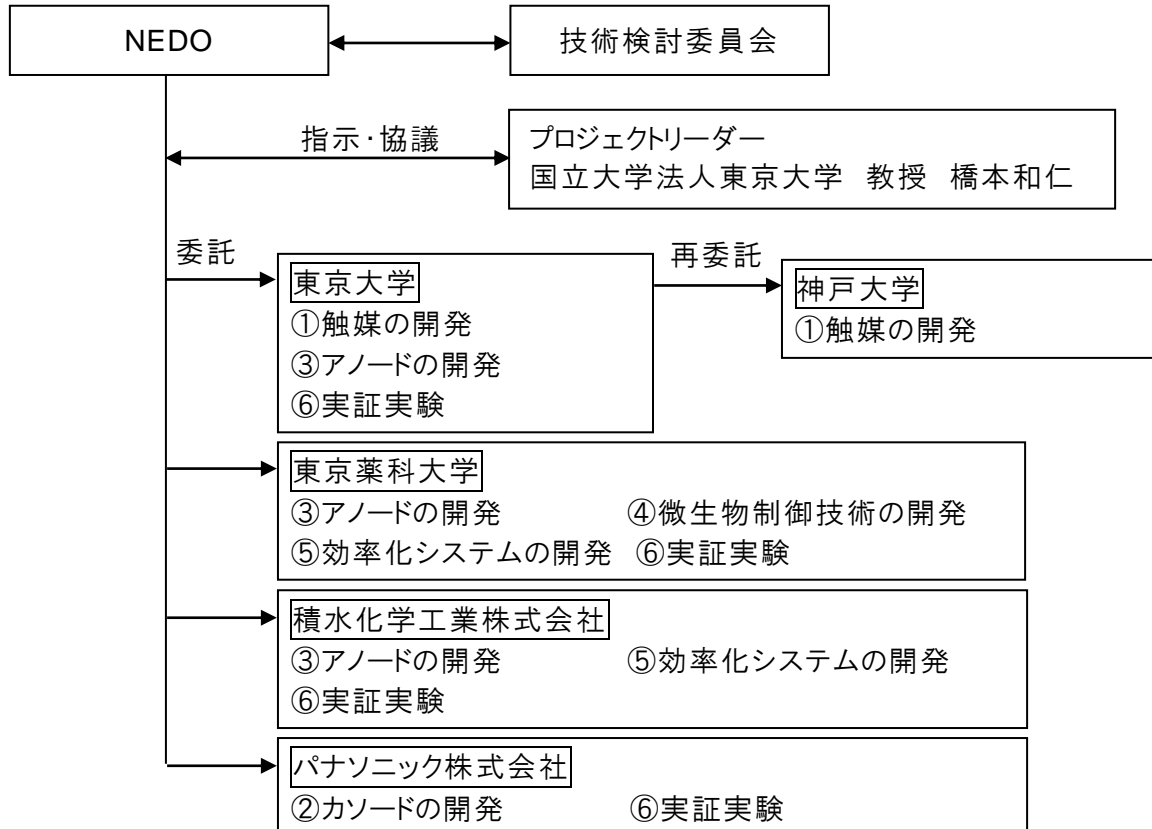
### (2) プロジェクトリーダー

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルを最大限に活用することにより効率的に研究開発推進を図る観点から、委託先決定後に NEDO が指名する研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を研究体に置き、その下に研究者を可能な限り結集して効率的な研究開発を実施した。本事業では、的確な計画立案・指示・判断・研究開発マネジメントが遂行されるよう、実施者の中から国立大学法人東京大学先端科学技術研究センター教授 橋本和仁にプロジェクトリーダーを委嘱した。

(3) 実施体制

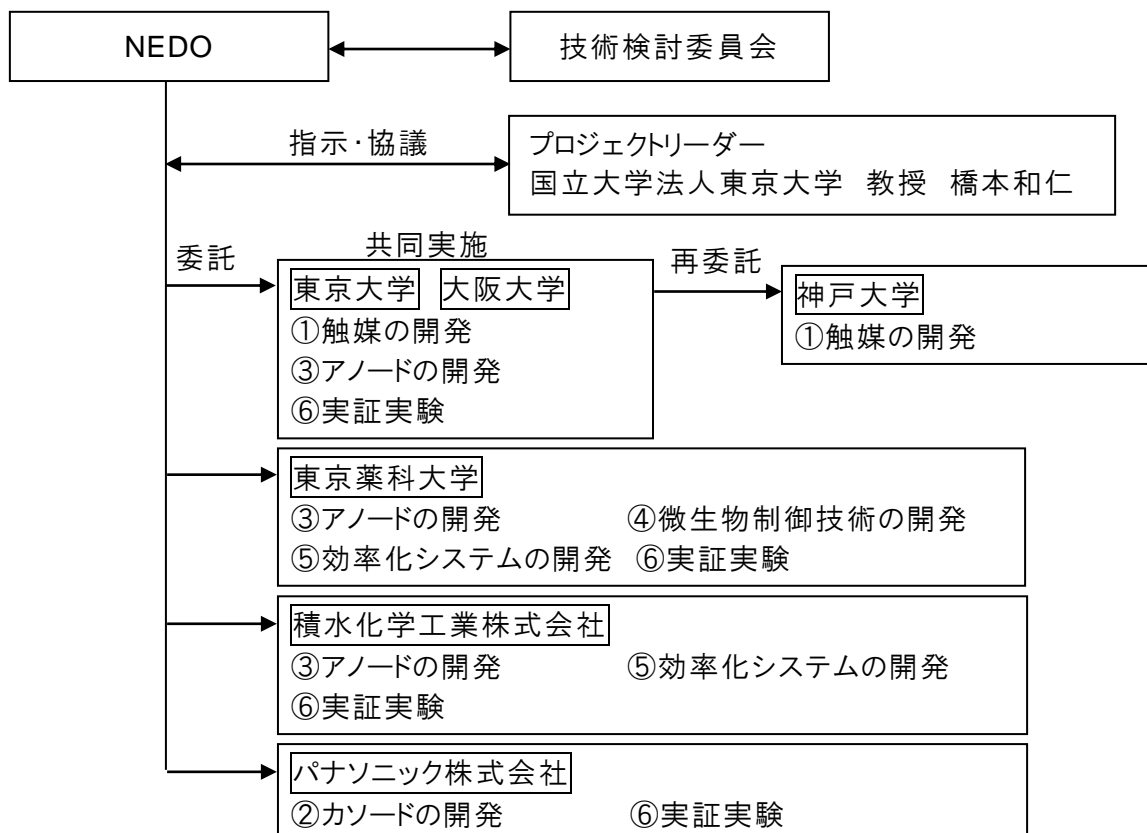
(3)-1 2012 年度～2014 年度

2012 年度から 2014 年度の実施体制を以下に示す。



(3)-2 2015 年度

2015 年度の実施体制を以下に示す。



(4) 知的財産権の帰属

産業技術力強化法第 19 条第 1 項に規定する 4 項目及び NEDO が実施する知的財産権の状況調査(バイドール調査)に対する回答を条件として、知的財産権は全て、その発明寄与に応じ、実施者である国立大学法人東京大学、学校法人東京薬科大学、积水化学工業株式会社、パナソニック株式会社、および国立大学法人大阪大学に帰属するものとした。

Ⅱ.2.3 研究開発の運営管理

(1) 技術検討委員会

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、研究体毎にプロジェクトリーダーを設置し、担当範囲を明確にした。また、NEDO は、経済産業省及びプロジェクトリーダー等と密接な関係を維持し、更には、国内外の類似する技術開発の把握に努め、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を行った。具体的には、プロジェクトリーダー、委託先機関等からのヒアリングにより、開発目標に対する成果状況などの報告を受けるほか、自ら当該分野の国内外における技術開発動向の調査や技術マップの調査・更新を行い、次年度の業務委託の可否や、実施内容、予算規模の見直しを図った。優れた研究成果を上げている研究体に対しては、研究加速についても弾力的に対処するなど予算の効果的配分に努

めた。

具体的には、本事業ではNEDOにより研究開発内容や開発計画の検討・修正・アドバイスを行うための有識者6名からなる技術検討委員会を設置した。技術検討委員のリストを表Ⅱ-1に示す。

表Ⅱ-1 技術検討委員

区分	氏名	所属	役職
委員長	末永 智一	国立大学法人 東北大学	教授
委員	安宅 龍明	産業技術総合研究所	招聘研究員
委員	早出 広司	早稲田大学	教授
委員	室井 高城	アイシーラボ	代表
委員	中原 啓介	株式会社 日本リサイクルマネジメント	代表取締役社長
委員	縣 邦雄	アクアス株式会社	取締役

(敬称略・順不同)

技術検討委員会は年2回の開催とし、このうち1回は集中研の設置されている国立大学法人東京大学や東京薬科大、参画企業で実施した。技術検討委員会において委員から頂いたご意見を本事業の運営管理に反映させた。表Ⅱ-2に技術検討委員会の開催履歴を示す。

表Ⅱ-2 技術検討委員会開催履歴

回数	開催年度	開催日	開催場所	参加法人
1	2012年度	2013.2.22	NEDO 川崎	NEDO、METI、東京大学、東京薬科大学、パナソニック株式会社、積水化学工業株式会社
2	2013年度	2013.10.09	東京薬科大 八王子	NEDO、METI、東京大学、東京薬科大学、パナソニック株式会社、積水化学工業株式会社
3	2013年度	2014.2.05	NEDO 川崎	NEDO、METI、東京大学、東京薬科大学、パナソニック株式会社、積水化学工業株式会社
4	2014年度	2014.11.12	パナソニック 大阪	NEDO、東京大学、東京薬科大学、パナソニック株式会社、積水化学工業株式会社
5	2014年度	2015.3.12	NEDO 川崎	NEDO、METI、東京大学、東京薬科大学、パナソニック株式会社、積水化学工業株式会社
6	2015年度	2015.10.13	積水化学 滋賀	NEDO、METI、東京大学、大阪大学、東京薬科大学、パナソニック株式会社、積水化学工業株式会社
7	2015年度	2016.2.12	NEDO 川崎	NEDO、METI、東京大学、大阪大学、東京薬科大学、パナソニック株式会社、積水化学工業株式会社

## Ⅱ.2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

本事業では、開発開始当初は基盤技術開発的要素が大きかったため、東京大学に設置した集中研を中心として、情報および成果の共有化を図り、プロジェクトリーダーを交えた討議を頻繁に実施することにより、短期間で成果を挙げた。また、年2回開催の進捗報告会(「全体会議」と称する)等には、NEDOも極力出席して状況の把握に努めた。

2年目に入り、基礎技術の研究開発が進展し、実用化に向けた検討の開始に至るまでになった。それに基づいて、技術検討委員会のアドバイスなども踏まえて、加速資金投入の判断を行った。

また、本事業では、事業実施前および実施中に、関連技術に関する特許、論文等の開発動向調査を実施し、これらの結果を実施者間で共有して知財創出に役立てた。また、全ての参画大学および参画企業の間で「知的財産権取扱に関する取り決め」を策定し、実施者間の合意に基づいて、研究開発結果に基づいた戦略的な特許出願、知財権の帰属・譲渡等の実務を行った。以上のように、本事業では知財マネジメントに関して体制が整えられており、知財創出・管理に関して効率的な運用が図られた。また、本研究開発における成果のアピールの一環として微生物燃料電池廃水処理装置のデモや参画企業に設置した実証装置に関し、TEPIA(一般財団法人高度技術社会推進協会)先端技術館への展示や水環境展、国際水ソリューション総合展(InterAqua)などの展示会への出展を積極的に行った。

## Ⅱ.3 情勢変化への対応

研究開発の進捗に伴い、電極の低コスト化の開発を加速するために加速財源の投入を行った。投入した加速財源とその目的及び成果を表Ⅱ-3に示す。

表Ⅱ-3 加速財源の目的・概要及び主要成果

時期	金額 (百万円)	目的及び概要	主な成果
2013年 9月	60	電極の低コスト化技術の加速のため、下記の評価装置等を購入。 ・高倍率光学顕微鏡 ・電気化学測定装置 ・共焦点蛍光顕微鏡 ・中型実験装置	電極材料の選定、微生物膜形成方法の評価、電極形状の評価、試作電極の性能検討を加速し、材料コストを大幅に低減させた実用化レベルの電極を開発した。

## Ⅱ.4 評価に関する事項

### Ⅱ.4.1 事前評価

#### (1) 事前評価書

本事業に関しては、GSC 基盤技術開発の③資源生産性を向上できる革新的プロセス及

び化学品の開発における追加事業として、2011年度に環境部、電子・材料・ナノテクノロジー部にて事前評価を実施し、NEDOの実施する事業として適切であると判断した。事前評価書を添付資料4-1に示す。

## (2) NEDOPOST3

本事業の基本計画に研究開発項目③-4「資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発」(微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発)を追加した基本計画(案)に関するパブリックコメントの募集を2012年2月10日～2月23日の間、実施したが、本事業に対する意見は無かった。パブリックコメントの内容とそれに対する考え方は添付資料4-2に示す。

## (3) 採択審査

2012年4月16日～5月15日の間、公募を行った結果、本事業において1件の応募があり、NEDO技術開発機構内に設置した5名の外部専門家からなる技術審査委員により、6月5日～6月13日の書面審査及び6月13日のヒアリング審査を実施した。審査結果として、本事業において1件を採択した。採択審査委員を表Ⅱ-4に示す。

表Ⅱ-4 採択審査委員

区分	氏名	所属	役職
委員長	五十嵐 泰夫	国立大学法人東京大学 大学院農学生命科学研究科	教授
委員	末永 智一	国立大学法人東北大学 原子分子材料科学高等研究機構	教授
委員	縣 邦雄	アクアス株式会社 つくば総合研究所	取締役 所長
委員	中原 啓介	JFE エンジニアリング株式会社 都市環境本部 アクア事業部	事業部長
委員	安宅 龍明	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会 企画運営推進会議	副議長

(敬称略・順不同)

## Ⅱ.4.2 中間評価

無し

### Ⅱ.4.3 事後評価

NEDOは、技術的及び政策的観点から、事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント、研究開発成果並びに実用化の見通しについて、外部有識者による研究開発の事後評価を2016年度に実施する。

- ・実施時期 : 分科会 2016年11月10日  
研究評価委員会 2017年2月(予定)
- ・評価手法 : 第三者評価
- ・評価事務局 : 評価部
- ・評価項目、基準 : 標準的評価項目・評価基準に基づく
- ・評価委員 : 表Ⅱ-5に示す。

表Ⅱ-5 2016年度 事後評価 分科会委員(敬称略、五十音順)

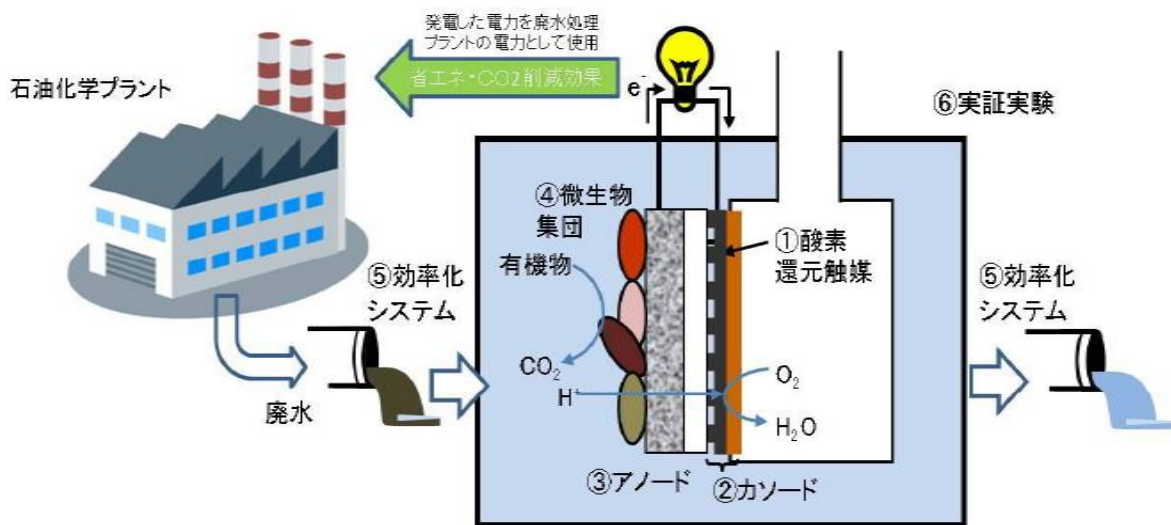
	氏名	所属、役職(仮)
分科 会長	ふじえ こういち 藤江 幸一	横浜国立大学先端科学高等研究院 教授
分科 会長 代理	かきぞの としひで 柿園 俊英	広島大学大学院先端物質科学研究科 准教授
委員	おおと ときお 大戸 時喜雄	メタウォーター株式会社 R&D センター 技師長
	ふたまた ひろゆき 二又 裕之	静岡大学グリーン科学技術研究所 教授
	やすい ひでなり 安井 英斉	北九州市立大学国際環境工学部エネルギー循環化学科 教授
	やまぐち たかし 山口 隆司	長岡技術科学大学 大学院工学研究科技術科学 イノベーション専攻 教授

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### Ⅲ.1 事業全体の成果

##### (1) 本プロジェクトの目的

本プロジェクトでは、その処理に多大なエネルギーが使用されている化学工場等の廃水処理の省エネ・自立化を目指し、廃水中の有機物に含まれる化学エネルギーを電気エネルギーへと変換する微生物触媒を備えたシステム(微生物燃料電池 MFC: 図Ⅲ.1.1)の実用化に必要な基盤技術を開発するとともに、ベンチスケールの実証試験を行って安定した廃水処理、省エネルギーのための運転技術を確認するために必要な開発を実施した。



図Ⅲ.1.1 微生物燃料電池(MFC)による廃水処理

現在、もっとも普及している廃水処理法である標準活性汚泥法においては、好気性菌を活性化するための曝気に多大な電力が使用され、またその活発な好気呼吸の結果として莫大な量の余剰汚泥(産業廃棄物)が発生する。MFC法は、標準活性汚泥法が抱えるこれらの問題を根本的に解決する潜在性を有することから、その実用化が従来から強く望まれていた。しかし一方で、数リットル容量の小型設備での実績は多く報告されているものの、実用化された事例は無く、また近々実用化されるという情報も国内外を見渡しても無い。その本質的原因は、既存の水処理・エネルギー回収技術に対して、MFC法にコストパフォーマンスでの優位性が見出されてこなかったことにある。こうした背景を元に、本プロジェクトにおいては、大型化と低コスト化の両立を図ることに重点を置いた実用化開発を進めた。

##### (2) 最終目標

2012年度～2015年度にわたるプロジェクトにおいて、以下に示す3点をプロジェクト終了時に達成していることを具体的目標として設定した。



① 開発した小型実証装置<sup>※1</sup>において、現行の活性汚泥処理と同等の廃水処理性能<sup>※2,3</sup>を発揮すること

※1 1 m<sup>3</sup>程度の廃水処理リアクター

※2 BOD 除去率:90 %以上

※3 目標のブレークダウン

$$\text{BOD 除去量} = 800 \text{ gBOD/m}^3/\text{day} \times 90 \% = \underline{720 \text{ gBOD/m}^3/\text{day}}$$

② 開発した小型実証装置(1m<sup>3</sup>程度)において、現行の活性汚泥処理と比較してエネルギー消費を80%削減すること<sup>※4,5</sup>

※4 図Ⅲ.1.2:エネルギー消費削減の目論見

※5 目標のブレークダウン

積水化学某工場での現行処理設備のエネルギー消費量より計算

$$\text{目標電力量} = (\text{曝気 } 1512 \text{ kWh/day} + \text{他 } 533 \text{ kWh/day}) \times 20 \% (\text{省エネ})$$

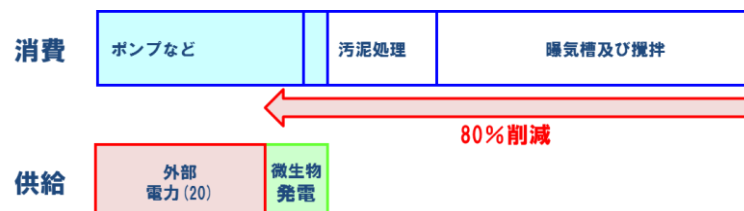
$$= 2045 \times 0.2 = 409 \text{ kWh/day}$$

微生物燃料電池の稼働には 502 kWh/day の電力量が必要

従って、

$$\text{目標発電量} = 502 - 409 = 93 \text{ kWh/day} (1000 \text{ m}^3) \rightarrow 98 \text{ kWh/day} (\text{AD 変換})$$

$$= 98 \text{ Wh/m}^3/\text{day} = \underline{4.1 \text{ W/m}^3}$$



図Ⅲ.1.2 微生物燃料電池システムによる消費エネルギー削減のイメージ

③ 実用化技術として、実コスト低減・早期の市場導入が期待できる技術レベル<sup>※6</sup>を確立すること

※6 目標のブレークダウン

1. 電極コストの低減
2. 微生物燃料電池リアクターの構成設計
3. 大型電極による処理率と発電量の確保
4. 長期安定性の確保
5. 低汚泥発生率の確認(標準活性汚泥の 1/3 以下)
6. 戦略的な特許出願による技術の権利化

### (3) 開発成果(全体)

1 m<sup>3</sup> サイズの実証試験用の廃水処理設備の詳細仕様の検討、システム全体の設計を行い、実証設備を製作・設置した。この装置を用いて試験を行った結果、現行の活性汚泥処理と同等の廃水処理率、およびエネルギー消費の 84 %削減を確認した。電極材料費は当初実施者内で独自に定めた目標コストの 50 倍程度であったが、プロジェクトの検討を通して、電極基材、触媒、バインダー等の低コスト材料の探索により 2 倍以下まで低減した。さらに、目標達成のための技術手段も見出せたので、今後の目標コスト達成が見込まれる。それらの材料を用いて、実証設備にて最終目標の廃水処理性能と省エネ性能を達成したことは大きな成果であり、今後の事業化の道筋が得られたと言える。最終目標および成果のまとめを表Ⅲ.1.1 に、消費エネルギー試算の内訳を表Ⅲ.1.2 に示す。

表Ⅲ.1.1 最終目標に対する成果

項目	目標	成果
処理性能	現行の活性汚泥法と同等 (BOD 除去率 90 %以上)	BOD 除去率 90%以上を達成
省エネ性能	廃水処理にかかるエネルギー消費を 80%削減	最大 84 %削減を達成
要素技術	コスト低減・早期の市場導入が期待できるレベル	各要素技術を実証装置に導入 戦略的出願を実施

表Ⅲ.1.2 消費エネルギー試算内訳

		目標設定時条件での試算		修正条件での試算 <sup>※7</sup>	
		活性汚泥法	MFC 法	活性汚泥法	MFC 法
曝気動力	kWh/m <sup>3</sup>	1.51		2.57	
汚泥処理動力	kWh/m <sup>3</sup>	0.15	0.12	0.17	0.12
その他動力	kWh/m <sup>3</sup>	0.38	0.38	0.59	0.59
必要動力小計	kWh/m <sup>3</sup>	2.04	0.50	3.33	0.71
発電量	W		8.00		8.00
発電による動力	kWh/m <sup>3</sup>		0.18		0.18
消費電力量	kWh/m <sup>3</sup>	2.04	0.32	3.33	0.53
電力消費削減率	%		84		84

※7 曝気、汚泥処理、その他動力量を最新の情報により見直し、精度を高め試算を行った。

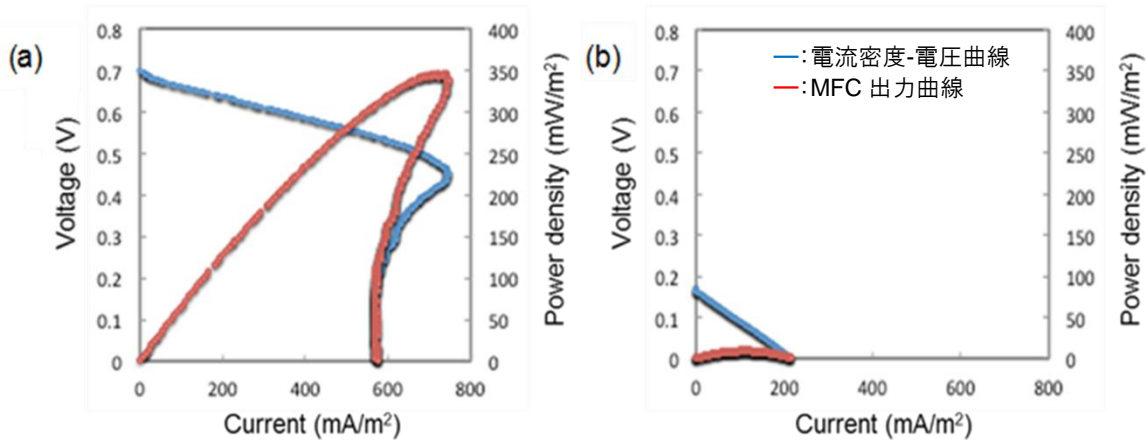
## Ⅲ.2 研究開発項目毎の成果

### Ⅲ.2.1 触媒開発(東京大学・大阪大学)

#### Ⅲ.2.1.1 アノード微生物触媒

アノード微生物電流は微生物燃料電池(MFC)系の出力を決定づける主要因の一つである。従来から、*Shewanella* や *Geobacter* などの電流生成モデル菌の生ずる微生物電流がアノード電位に依存することが知られていた。実廃水中でアノード上に集積する微生物群集の電流生成能が、モデル微生物と同様にアノード電位依存性を示すならば、MFC系におけるアノード電位の制御を介したアノード微生物触媒の活性化が期待される。そこで、まずはアノード電位が正確に制御可能な3電極式・電気化学リアクターを用い、実廃水から採取した汚泥を微生物源とした系でアノード上に集積する微生物群集のアノード電位依存性を調べた。

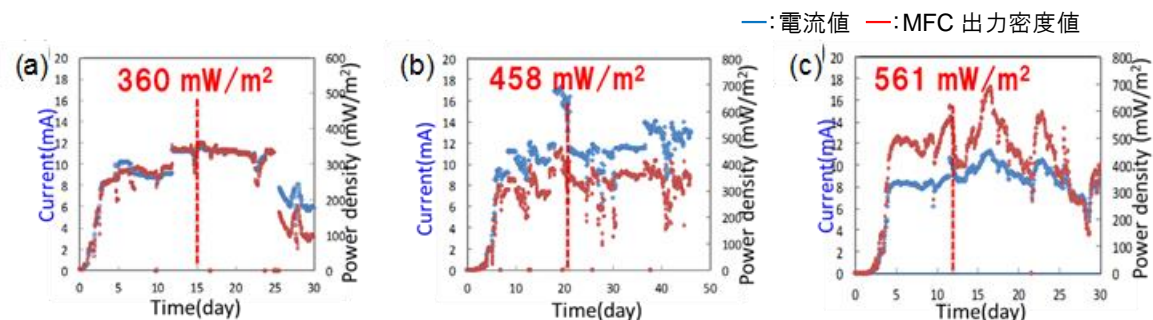
具体的には、 $-0.2\text{ V}$  および  $+0.2\text{ V}$  (vs. Ag/AgCl)の電位をそれぞれ印加した場合を比較した。その結果、 $-0.2\text{ V}$  の電位でアノード微生物層を形成させた場合(図Ⅲ.2.1.1(a))には、 $+0.2\text{ V}$  で形成させた場合(図Ⅲ.2.1.1(b))と比べて大きなMFC出力が得られた。アノード上の微生物種をPCR法で解析したところ、 $+0.2\text{ V}$  の場合に比べて大きな電流が得られた $-0.2\text{ V}$ において電流生成菌として知られる *Geobacter* 属が多く集積していることが分かった。この結果は、*Geobacter* 含量の大きなバイオフィーム形成が電流増加に有効であり、アノード電位制御がその方法の1つとなることを示す。



図Ⅲ.2.1.1 20 mM Acetate in HEPES buffer (BOD  $\approx$  800)で  
(a)-0.2 V および(b)+0.2 Vにアノードを20日間保持した後に得られたMFC出力曲線

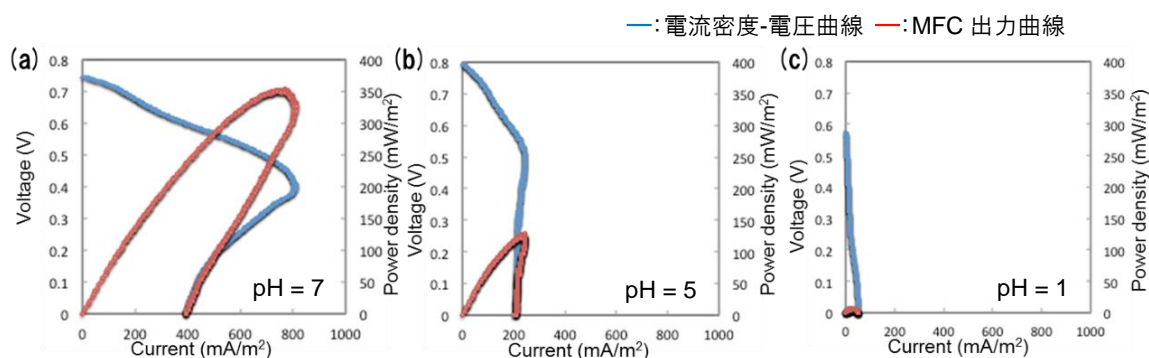
上記の結果は、アノード電位の正確な制御が可能な3電極式リアクターで得られたものであるため、2電極のMFC系ではアノード電位を適した値へとセットする工夫が別途必要となる。そこで、まずMFC運転時におけるアノード電位を把握するために、アノードおよびカソード電位を独立に測定する実験系を立ち上げた。MFCが定常運転状態になったとき、アノード電位、カソード電位はそれぞれ約 $-420\text{ mV}$  および  $10\text{ mV}$  (vs. Ag/AgCl)を示した。このアノード電位値は、3電極式電気化学リアクターを用いた実験で明らかとなった高出力を導く電位領域よりも負であったため、アノード電位を正側へとシフトさせる方策が必要であることが分かった。この結果を踏まえ、MFC系にお

けるアノード電位の正側シフトを目的に、アノードに対するカソードの面積比を増加させた。その結果、アノード電位の正側シフトが期待通りに確認され、同時に発電特性の向上も認められた(図Ⅲ.2.1.2)。



図Ⅲ.2.1.2 アノードに対するカソードの面積比を変化させた場合の MFC 出力  
アノード面積:カソード面積 = (a) 1 : 1, (b) 1 : 2, and (c) 1 : 3

一方、種々のアノード微生物代謝活性制御に関する試みを検証すること、および低出力時の要因探索の一つの方法論を提供することを目的に、リアクター内微生物群集の網羅的代謝解析を行った。まず、サンプルの抽出から解析までの一連のプロトコルを完成させるために、大きな MFC 出力が得られる条件、および代謝活性低下によりほぼ出力が得られない条件を、それぞれ培地の pH 制御により構築し(図Ⅲ.2.1.3)、コントラストの大きかった 2 サンプル(図Ⅲ.2.1.3の(a)および(c))で代謝解析を行った。その結果、出力が出ない場合には、中間代謝生成物の中央代謝物が多く蓄積することが明らかとなった。これは嫌気メタン発酵と同様の傾向であり、MFC 系においても中央代謝物の蓄積量がアノード代謝活性の一つの指標となることが示唆された。



図Ⅲ.2.1.3 種々の pH での MFC 出力

### III.2.1.2 カソード酸素還元触媒

低コスト・高活性なカソード酸素還元触媒の開発は MFC 技術の実用化を図る上で必須であった。従来、MFC のカソード触媒として白金が使用されていた。しかし、白金は有機物の被毒によって活性が大きく低下してしまう点、また高価である点が、MFC の実用化の観点から大きな問題となっていた。そこで、本プロジェクトにおいては、非白金のカソード触媒として、有機物被毒耐性に優れ、高い構造安定性かつ導電性を有する炭素材料であるグラフェンをベースとした新規酸素還元触媒の開発を進めた。

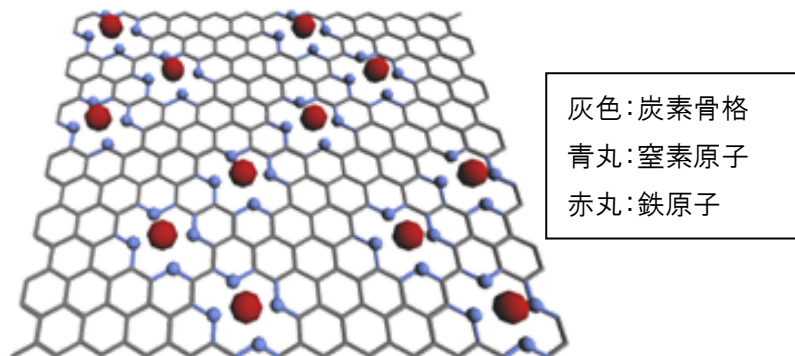


図 III.2.1.4 Fe/N-グラフェンの模式図

まず触媒設計指針を得ることを目的に、その触媒機構の解明を行った。図 III.2.1.4 に示すように、新規に開発した鉄(Fe)と窒素(N)が共ドーピングされたグラフェン材料(Fe/N-グラフェン)は、多電子酸素還元活性中心となることが期待される Fe-N サイトが高密度にドーピングされた構造となっている。グラフェンと鉄のみを加えて作製したグラフェン(Fe-グラフェン)とその軟 X 線吸収分光スペクトルを比較したところ、Fe-N グラフェンでは窒素から鉄への強い電子供与に基づき鉄の電子密度が向上していることが明らかとなった。この放射光を利用した解析結果から、グラフェン内にドーピングされた鉄は窒素からの強い電子供与によって電子密度が向上し、それに伴って鉄から酸素への  $\pi$  電子逆供与が促進され、結果として  $O=O$  結合の活性化、すなわち酸素還元活性の向上が実現されていることが示唆された(図 III.2.1.5)。

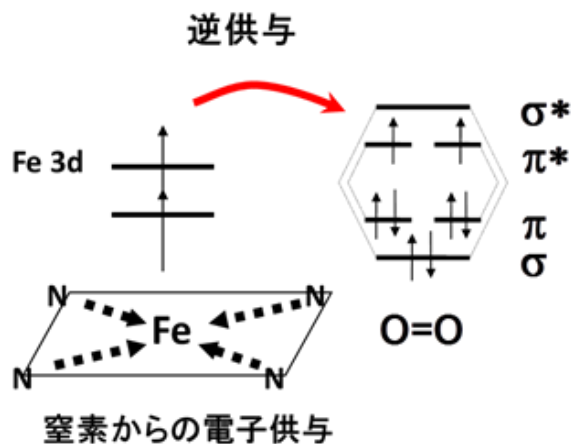
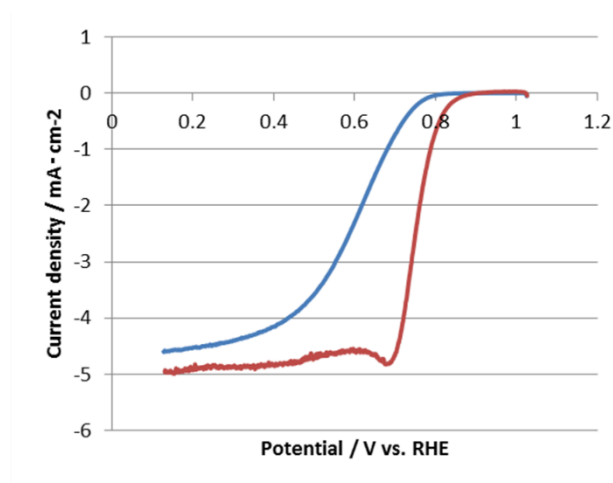


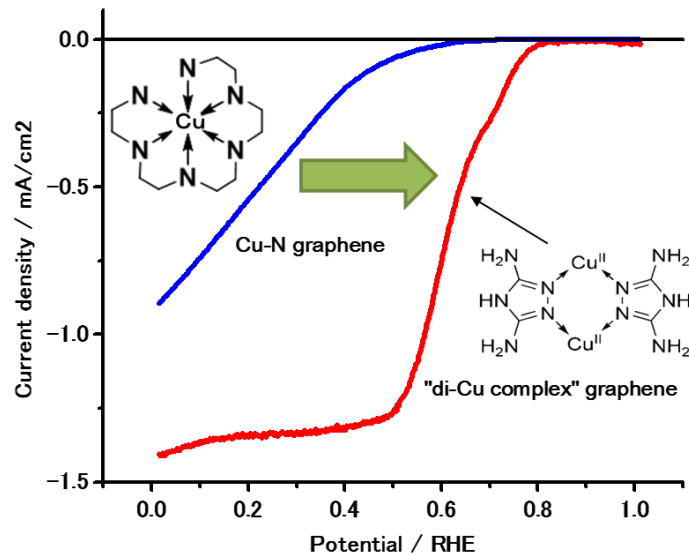
図 III.2.1.5 Fe/N-グラフェンにおける  $O=O$  結合活性化の説明模式図

この結果を踏まえ、前駆体の選定によってこの窒素から鉄への電子供与性をより大きくすることでさらなる高活性化を目指した。具体的には、Fe-N4 配位構造を有する環状生体分子であるヘミンを前駆体に用い、本手法の特徴である1分程度の極短時間の熱処理によって前駆体の鉄-窒素構造を維持したまま触媒を合成した。その結果、図Ⅲ.2.1.6の電流-電位曲線に示すように、以前の触媒と比較して過電圧が50 mVほど低下し、その酸素還元開始電位は0.9 Vに達した。さらに広域 X 線微細構造(EXAFS)解析において、従来開発品とヘミンを前駆体として使用した新開発品とを比較すると、新規開発触媒において Fe-N 配位結合距離が従来品に比べて約 0.2 nm ほど短くなっていることが明らかとなった。配位結合距離が短くなることによって窒素から鉄への電子供与が強くなり、鉄から O=O 結合への  $\pi$  逆供与性が増加して、酸素還元反応が高効率に進行し、過電圧が低下したと推察される。



図Ⅲ.2.1.6 (青)ペンタエチレンヘキサミン、および(赤)ヘミンを前駆体として合成した Fe/N-グラフェンの酸素還元活性評価

前駆体の選定とは別の触媒活性向上のためのアプローチとして、触媒活性中心の複核化を試みた。これは、生体における酸素還元酵素が複核銅を反応中心に持つことに着想を得て発案したものである。3,5-ジアミノ-1,2,4-トリアゾールを配位子に持つ二核銅錯体を合成し、これを前駆体として、銅 - 窒素ドーピンググラフェン(Cu/N-グラフェン)を得た。この Cu/N-グラフェンにおいては 780 mV (vs. RHE)付近から酸素還元電流の立ち上がりが確認された(図Ⅲ.2.1.7)。この酸素還元開始電位は銅ポルフィリンなどの単核銅錯体系での既報値(~ ca. 600 mV)と比べて 100~200 mV ほど正電位側に位置し、Cu 系触媒としては世界最高値である。次に 1000 サイクルのサイクリックボルタモグラム測定の前後の電流電位曲線を比較することで、熱処理前後で触媒の耐久性を評価した。600 mV (vs. RHE) における酸素還元電流値を比較したところ、熱処理を施した Cu/N-グラフェンでは、熱処理を施さない炭素担持二核銅錯体と比べて電流減少率が 1/3 以下に抑えられており、耐久性が大幅に向上していることが確認された。



図Ⅲ.2.1.7 (青)単核, および(赤)複核の銅錯体を前駆体として合成した Cu/N-グラフェンの酸素還元活性評価

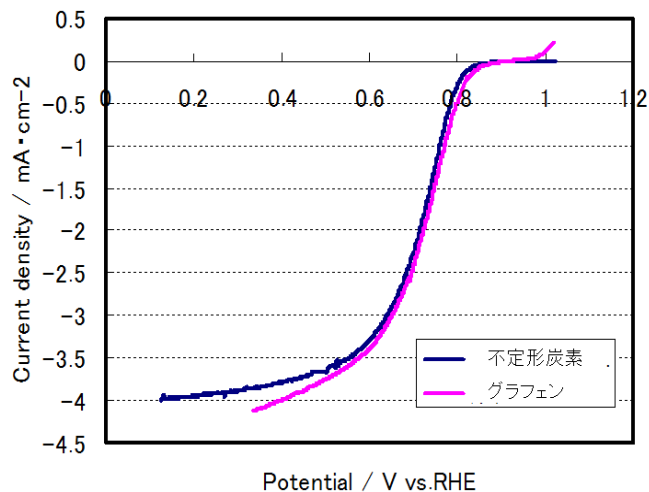


### Ⅲ.2.2 カソード開発 (パナソニック)

#### Ⅲ.2.2.1 Fe/N 共ドーピング炭素系触媒のベンチスケール量産化プロセスの開発

カソードに担持する酸素還元触媒は、微生物燃料電池の出力を決定付ける重要因子である。従来、微生物燃料電池の酸素還元触媒には、希少金属である白金が用いられてきたが、コスト面が大きな問題であった。そこで、東京大学において開発された数十秒のごく短時間焼成によるグラフェンへの Fe-N ドーピング法をベースとして、より生産容易な炭素ベースの触媒、および約 1kg/月以上のベンチスケール生産が可能な生産プロセスの開発を行った。

東京大学において開発された炭素系触媒の炭素基材として用いていたグラフェンおよびその元となる酸化グラフェンは、一般に Modified Hummer's 法などを用いて製造されるが、この方法は多量の過酸化物を用いることから危険性が高く、大きなスケールでの合成が難しいことから現時点で広く工業化されていない。そこで、既に広く流通している炭素材料である不定形炭素に着目した。不定形炭素は、1 次粒子径が 20~40 ナノメートル、2 次粒子径が数百ナノメートルの粒子である。1 次粒子は非常に細かい鱗片状のグラファイト構造とアモルファス炭素の混合物から形成されている多孔質体であり、比表面積は一般に 1,000 m<sup>2</sup>/g 以上と非常に大きい。また不定形炭素は、他の炭素材料より比較的多くの官能基をその表面に有しており、特に不定形炭素中のグラファイト構造部は酸化グラフェンと近い化学状態にあると推察された。そこで、グラフェンに代わる炭素材料として不定形炭素を基材に用いて、その表面に Fe と N を短時間の焼成を介して共ドーピングした。こうして得られた材料(Fe/N-C)は、Fe/N-グラフェンとほぼ同等の酸素還元オンセット電位、半波電位、拡散限界電流を示し、良好な触媒活性を有することが確認された(図Ⅲ.2.2.1)。この結果、広く工業化されている汎用的な材料のみを用いて炭素系触媒を合成することが可能となった。

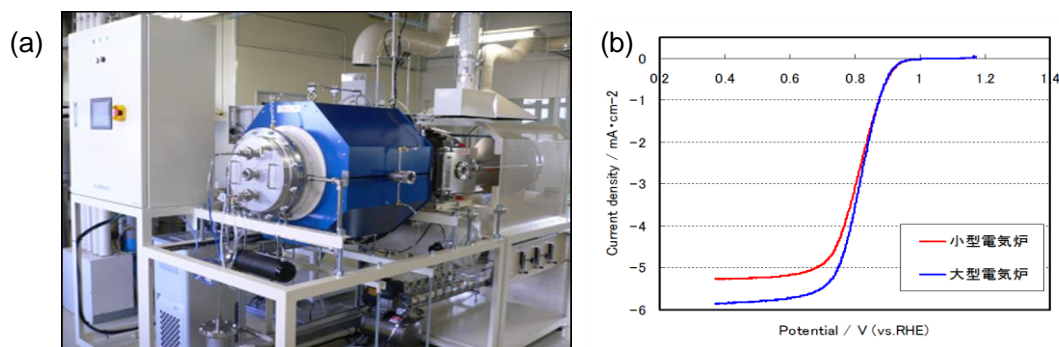


図Ⅲ.2.2.1 グラフェンおよび不定形炭素から成る触媒特性評価結果

次に触媒焼成設備の開発を実施した。本触媒材料を得るための短時間焼成法は、急速に試料部を昇温し、ごく短時間(数十秒)だけその材料を高温中に保持する特殊プロセスである。この試料の温度プロファイルを、合成スケールを 1 バッチ当たり 50 g 程度までスケールアップした際にも再現



可能な焼成設備を設計・開発した。焼成設備の設計にあたっては、常温から最高焼成温度まで急速に昇温可能なように、加熱部へ急速に移動可能な試料台を設け、また加熱部と試料交換部の間には断熱材からなるシャッターを設けた。試料台は、50 g 程度の触媒を一度に得られる大きさに設計した。焼成用の大型電気炉の外観を図Ⅲ.2.2.2(a)に示す。この設備によって得られた Fe/N-C 触媒の特性は、ラボスケールの小型電気炉で焼成した触媒と良い一致を示した(図Ⅲ.2.2.2(b))。本設備は、メンテナンスなしで最低でも20 バッチ程度の繰り返し使用が可能であることも確認され、こうして 1 kg/月以上の触媒のベンチスケール生産を可能とする体制を築いた。

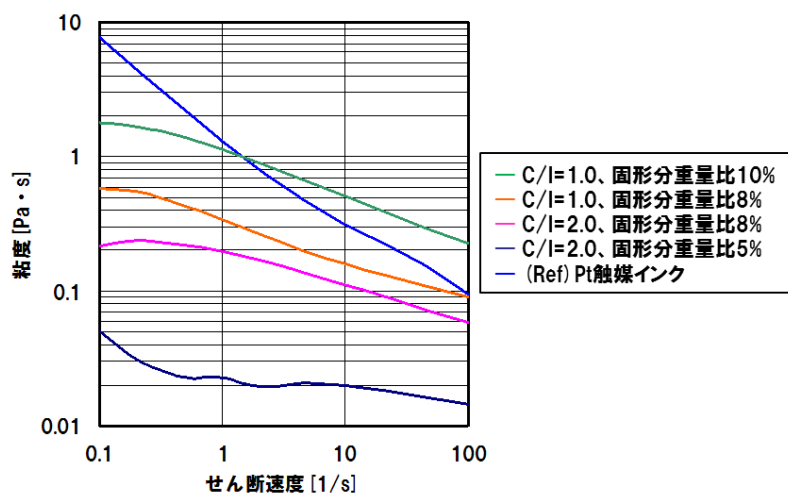


図Ⅲ.2.2.2 (a)大型電気炉の外観, (b)小型/大型の各電気炉で調整した触媒特性

### Ⅲ.2.2.2 Fe/N-C 触媒のインク化技術、及びガス拡散層への塗布技術の開発

開発した Fe/N-C 触媒をガス拡散電極へ実装するためには、Fe/N-C 触媒を溶媒中に混合・分散させたインクを作製し、これを電極へ塗布する必要がある。Fe/N-C 触媒は従来の白金触媒と比較し、その粒径・分散性・濡れ性等が異なるため、Fe/N-C 触媒に合わせたインク調整が必要となる。実際に作製した Fe/N-C 触媒インクを電極に塗布し、これを MFC 電極として作動させた際に十分な出力特性が発現するか確認を実施した。

従来の白金触媒インクの構成を参考に、Fe/N-C 触媒インク成分の検討を行った。白金触媒インクは、66.6%Pt/C 触媒 1 mg に対して、バインダーとしてイオノマーであるナフィオン(Nafion perfluorinated resin, 5% wt.% solnin lower aliphatic alcohols / H<sub>2</sub>O mix, Aldrich)を 45  $\mu$ l、純水を 3  $\mu$ l 添加し、攪拌することで触媒インクを作製していた。そこで Fe/N-C 触媒に対して、バインダーとしてナフィオンより安価なイオノマーであるアシプレックス(旭化成株式会社)を選定し、その分散性を向上するため溶媒に H<sub>2</sub>O/EtOH = 6/4 の混合溶媒を選定した。これら配合条件において Fe/N-C 触媒/イオノマー比(C/I)および固形分重量比を変化させて混合、攪拌することで得た Fe/N-C 触媒インクについて粘度特性評価を実施した(図Ⅲ.2.2.3)。その結果、固形分重量比 8~10%において従来の Pt 触媒インクに近い粘度であることがわかった。中でも最も類似の挙動を示した C/I = 1.0、固形分重量比 10%を Fe/N-C 触媒インクの条件として選定した。



図Ⅲ.2.2.3 各炭素系触媒インクの粘度特性評価結果

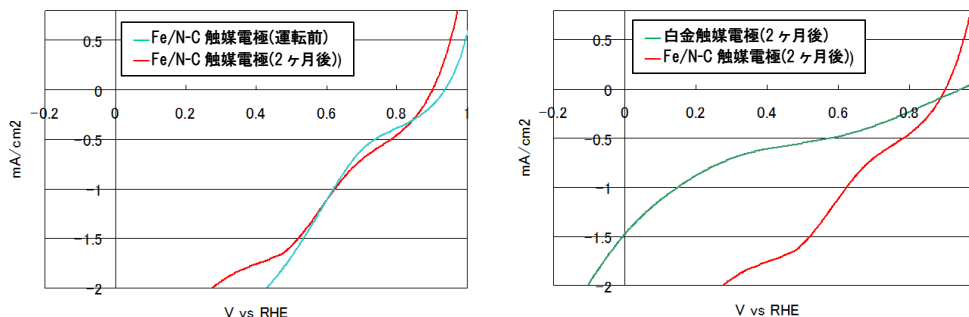
次に、Fe/N-C 触媒インクを塗布した電極を用いた MFC 出力特性の検討を実施した。まず、電極を以下の手順に従って作製した。カーボンペーパー(東レ, TGP-H-120)の片面をテープで保護し、他面を PTFE 分散液(Sigma-Aldrich, 60 wt% dispersion)に浸漬し、乾燥後、テープを剥がし 380 °C で 20 分焼結した。最初のテープ保護面の対面に再度 PTFE 分散液を塗布し、乾燥後 380 °C で 20 分焼結した。この操作をさらに 2 回繰り返し、撥水処理カーボンペーパーを作製した。この撥水処理カーボンペーパーの PTFE 塗工面ではない側に、Pt 触媒インクおよび Fe/N-C 触媒インクをそれぞれ塗工筆にて塗布し、乾燥させることでカソード電極を得た。Pt 触媒インクにはナフィオンと H<sub>2</sub>O を前述の 45 μl, 3 μl の配合で添加した。また、Fe/N-C 触媒インクにはアシプレックスと H<sub>2</sub>O と EtOH を C/I = 1.0、固形分重量比 10%の配合で添加した。

評価用 MFC 用リアクターには内容量 300 ml 程度のアクリル槽を用いた。廃液は槽下部から導入され、上部から排出される。MFC セルの内部には O<sub>2</sub>を導入するためのエアポケットが存在する。エアポケットから外部(廃液側)へ向かい、順にカソード、セパレータ、アノードの構成になっており、エアポケットを中心に両面に MFC が構成されている。電極サイズは 9 cm × 13 cm であり、触媒塗工面積は 7.5 cm × 8.3 cm である。

セパレータにはポリエチレン・ポリプロピレン混紡の不織布を使用し、アノードにはグラファイトフェルトを使用した。廃液はデンプンを主成分とした人工下水を使用した。微生物源として、田んぼ土壌中の微生物から立ち上げた人工下水適用の他 MFC リアクター排水を 20 mL 植種した。リアクターは 30 °C の水浴中に設置し、液流量は 300 ml/day、HRT = 24 で運転を行った。MFC のアノードおよびカソードには外部抵抗を接続し、10 kΩ から順に引き下げて MFC を立ち上げた。

これらの条件において、MFC 運転前および運転開始 2 ヶ月後のカソード電極の LSV 特性を評価した。図Ⅲ.2.2.4 に電極特性結果を示す。Fe/N-C 触媒を適用した MFC 用カソード電極では運転前後で大きな特性の差異は見られなかった。一方、白金触媒を適用したカソード電極では、運転前条件では白金触媒の濡れ性が低く正常に測定することが出来ないため、2 ヶ月後の特性を比較評価した。これらのカソード特性を比較した結果、Fe/N-C 触媒を担持したカソード電極の方が良好な

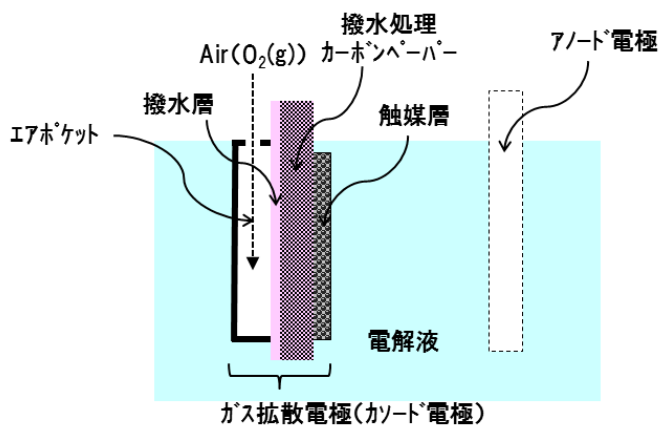
特性を示した。これは、2ヶ月間のMFC運転の間に、白金触媒が有機物で被毒されるのに対し、Fe/N-C触媒はそうした被毒に対する耐性が高いためであると考えられる。この結果を基に、現行のFe/N-C触媒インクにて十分な電極特性が発揮されていると判断し、開発完了とした。



図Ⅲ.2.2.4 各触媒インク適用時のカソード電極 LSV 特性評価結果

### Ⅲ.2.2.3 三相界面構造評価技術の開発

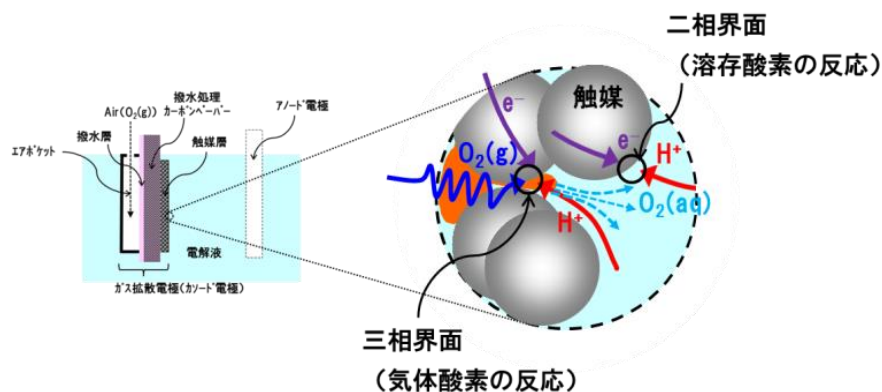
三相界面はガス拡散電極の性能を決定づける重要因子であり、三相界面を正しく評価することが求められる。PEFC や固体酸化燃料電池(SOFC)の分野において三相界面の評価法は存在するがMFCは電解液に浸漬した系であり、電解液浸漬系のガス拡散電極における三相界面の適切な評価法が存在しなかった。そこで、Fe/N-C触媒を用いた電解液浸漬系のガス拡散電極における三相界面を定量化するための評価手法を開発した。また、その評価手法に基づきFe/N-C触媒を担持したガス拡散電極を評価し、三相界面の触媒目付け量に対する傾向を評価した。



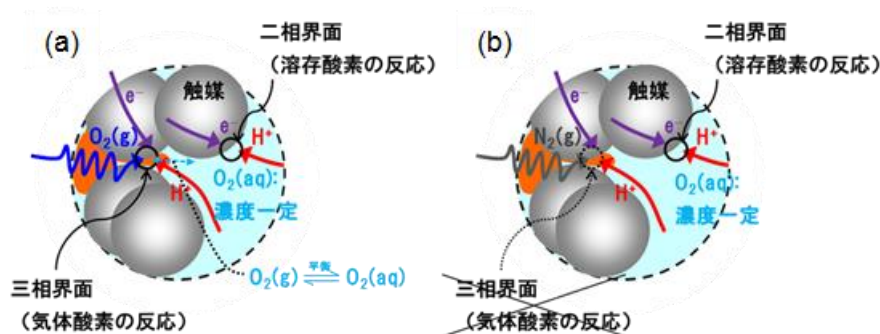
図Ⅲ.2.2.5 電解液浸漬系のガス拡散電極の断面模式図

はじめに、代表的な電解液浸漬系のガス拡散電極の断面模式図を図Ⅲ.2.2.5に示す。この電極構成は本質的に本プロジェクトで採用するMFCの構成と同じである。図Ⅲ.2.2.5に示したような系では、前述の通り、気体酸素が関与する三相界面における酸素還元反応と、溶存酸素が関与する二相界面における酸素還元反応の両方が同時に起こる(図Ⅲ.2.2.6)。電解液中には溶存酸素の濃度勾配が生じるため、触媒の位置によって近傍の溶存酸素濃度は異なる。このような状態では、全体の酸素還元活性に占める溶存酸素由来の電流の寄与を把握することは難しい。そこで溶

存酸素の寄与をより明確にするため、電解液中の溶存酸素の濃度を一定に近い条件にすべく、電解液を大気酸素分圧において酸素飽和条件とした。この状態でエアポケットに大気を送り込んだ場合(条件(1))、得られる酸素還元電流は、気体酸素による成分と、溶存酸素による成分の和となる。一方、エアポケットに窒素を送り込んだ場合(条件(2))、気体酸素が反応場に存在しないので、得られる酸素還元電流は溶存酸素による成分のみとなる。大気酸素分圧において酸素飽和条件の場合では、条件(1)と条件(2)で電解液に溶存している酸素濃度は等しくなるので、それぞれの酸素還元電流における溶存酸素による成分は等しくなる。したがって、条件(1)の酸素還元電流から条件(2)のそれを差し引くことで、気体酸素による寄与を大まかに掴むことができる。(図Ⅲ.2.2.7)



図Ⅲ.2.2.6 電解液浸漬系における電極反応の概念図



図Ⅲ.2.2.7 電解液浸漬系における気体酸素成分の切り分け

実際の評価に向け、まず電極を以下の手順に従って作製した。カーボンペーパー(東レ, TGP-H-120)の片面をテープで保護し、他面を PTFE 分散液(Sigma-Aldrich, 60 wt% dispersion)に浸漬し、乾燥後、テープを剥がし 380 °C で 20 分焼結した。最初のテープ保護面の対面に再度 PTFE 分散液を塗布し、乾燥後 380 °C で 20 分焼結した。この操作をさらに 2 回繰り返し、撥水処理カーボンペーパーを作製した。この撥水処理カーボンペーパーの PTFE 塗工面ではない側に、Fe/N-C 触媒インクを塗工筆にて塗布し、乾燥させることでカソード電極を得た。Fe/N-C 触媒インクにはアシプレックスと H<sub>2</sub>O と EtOH を C/I = 1.0、固形分重量比 10 % の配合で添加した。触媒インクはジェットミル(スギノマシン)を用い 150 MPa にて 1 回通過させることで分散し

た。触媒層のエッジ部による影響を除外するため、端面をエポキシ樹脂にて無効化した。さらに、触媒層の対面に厚さ 5 mm のエアポケットをポリオレフィン系ホットメルト接着剤にて取り付けることで、ガス拡散電極を作製した。上記方法により、Fe-N/C 触媒がそれぞれ 1.2 mg/cm<sup>2</sup>、2.3 mg/cm<sup>2</sup>、3.8 mg/cm<sup>2</sup> の担持量の 3 種類のガス拡散電極を作製した。

このガス拡散電極を作用極に用い、また対極にグラファイトフェルト、参照極に Ag/AgCl をそれぞれ用い、0.1 M HClO<sub>4</sub> 水溶液を電解液として三電極式の電気化学評価セットアップを組んだ。ガス拡散電極の有効面積は 30 mm × 30 mm とし、サイクリックボルタンメトリーを行った。サイクリックボルタンメトリーの結果から、気体酸素による酸素還元電流を求め、その絶対値の対数プロットにより得られた曲線における直線部の外挿切片から交換電流密度  $j_0$  を求めた。触媒層を形成する触媒が均質であるとの仮定においては、三相界面単位面積当たりの  $j_0$  は等しいと考えられ、得られた  $j_0$  は三相界面の面積を反映しているといえる。各電極の  $j_0$  を求め、触媒目付けに対してプロットした結果を図 III.2.2.8(b) に示す。なお、図 III.2.2.8(a) には各電極の電気二重層容量比、すなわち電気化学的に有効な表面積を触媒目付けに対してプロットした結果を示す。図 III.2.2.8(a) において、各点は 1 次関数に非常に良い一致を示した。したがって、触媒目付け 3.8 mg/cm<sup>2</sup> までの範囲では、担持した触媒は、その量に比例してほとんど全てが電気化学的に有効に機能していると考えられる。また、図 III.2.2.8(b) において、 $j_0$  は触媒目付けに対して正の相関が見られ、対数関数的な傾向を示した。これはすなわち、触媒目付けが多くなるにしたがって三相界面の量は増えることを意味し、一方で触媒目付けが多くなると三相界面を形成する比率は低下することを意味している。この結果は、触媒目付けを増やした場合に、よりカーボンペーパーから遠い側で触媒が水没する割合が増えることを示唆している。すなわち、触媒目付けを増やした場合、触媒利用効率が低下すると推測される。

以上より、電解液および気相側の雰囲気気を制御することにより、溶存酸素と気体酸素の成分を切り分け、 $j_0$  により三相界面を評価する手法を開発した。また触媒層の目付けを多くすることが三相界面の面積向上に有効であることを確認した。

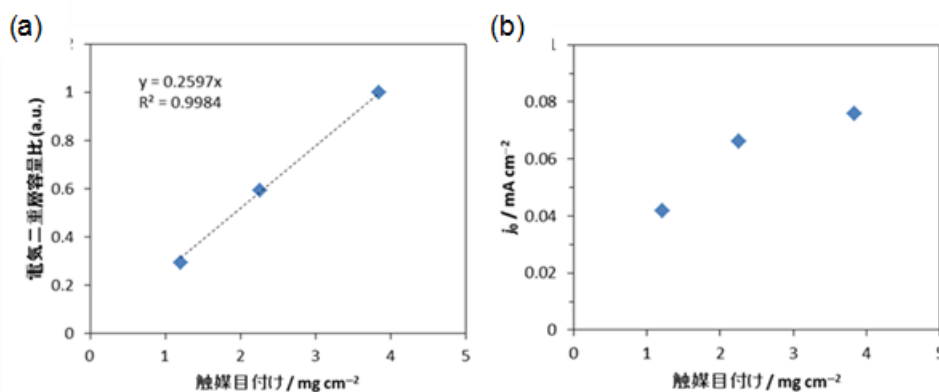


図 III.2.2.8 (a) 電気化学的に有効な表面積と触媒目付けの関係  
(b)  $j_0$  と触媒目付けの関係



#### Ⅲ.2.2.4 低コストカソードの開発

MFC に用いられてきたガス拡散電極は、その作製に高価な材料や煩雑なプロセスを適用する必要があり、高い材料コストおよびプロセスコストが大きな課題となってきた。白金触媒に対しては、Ⅲ.2.2.1 で既に述べたように Fe/N-C 触媒を適用することで低コスト化を図っているが、実用化に向けては更なる低コスト化が求められる。そこで、電極作製における簡易プロセスの導入および電極材料の低コスト化に関する開発を行った。

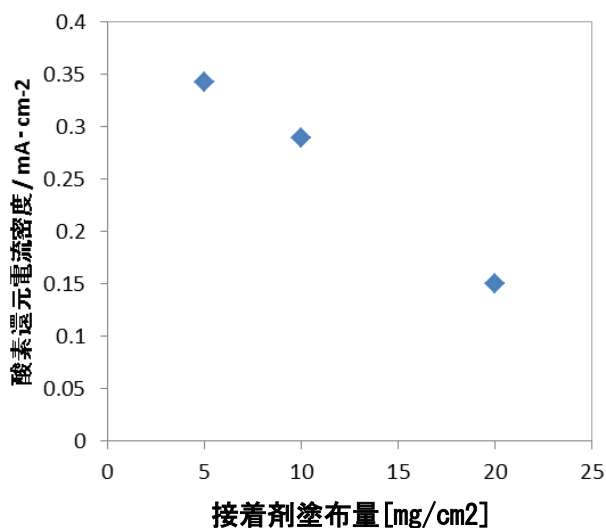
当初のガス拡散電極の作製プロセスが煩雑である理由の一つに、酸素(気相)、触媒(固相)、電解液(液相)が同時に会合する反応場となる三相ナノ界面の形成が挙げられる。三相ナノ界面は電極中で効果的に酸素還元反応を起こすことが可能であるが、その形成には PTFE に代表される高級な撥水材料と高度な形成技術が要求される。そこで三相界面を形成させずに、より安価な材料と簡易なプロセスで電極を作製することを目的とし、撥水シートを張り合わせた新規な構成のガス拡散電極について適用可能性を検証した。

まず、撥水シートを用いて、耐水度試験を行った。耐水度は静水圧法の水柱試験により評価した。φ50mmパイプの一端に撥水シートを固定して塞ぎ、水柱の上昇速度が 0.5 cm/s となるようにパイプに水を入れ、撥水シートの水に接していない面から水滴が 4 点確認されたときの水柱の高さを耐水度  $R_w$  (mmH<sub>2</sub>O)と定義した。MFC 用のガス拡散電極には高い耐水性が要求されることから、種々の撥水シートを評価して、最も高い耐水度を示したシートを電極用の撥水シートとして選定した。

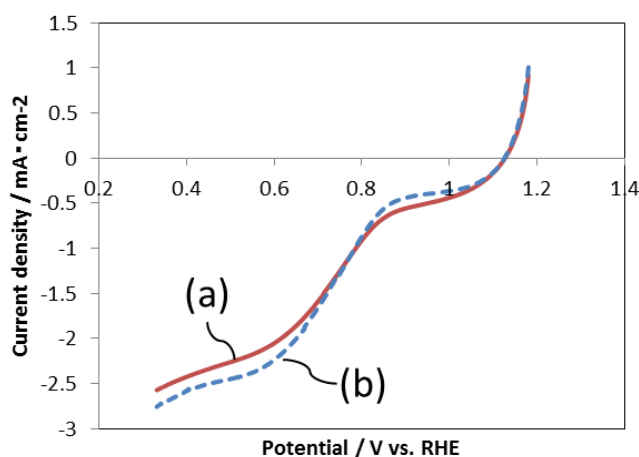
また、実際の MFC の運転において、ガス拡散電極から水漏れが起こった場合、エアポケット部に水が溜まることでガス拡散電極が空気と接触する面積が減り、その面積減少に比例して電極性能が低下してしまう。そのため、エアポケット部への浸水を長期にわたって防ぐことは、メンテナンス上、非常に重要である。そこで次に、実証装置サイズのエアポケットによる長期耐水試験を実施した。長期耐水試験は、撥水シートをホットシーラーを用いた融着により袋状に加工し、その中に 3次元立体構造体を入れて水に浸漬し、実証試験同等の水圧負荷環境における袋内部への浸水量を確認するという方法で行った。表Ⅲ.2.2.1 に試験 21 日後の撥水シートのポケット部への浸水量を示した。未処理のまま用いた場合、初期は水漏れが確認されなかったが、試験 21 日後には 200 mL の浸水が確認された。一方で、繊維処理剤を塗工した場合には、試験 21 日後においても 10 mL の浸水しか確認されず、長期の耐水確保において、繊維処理剤の塗工が有効であることが分かった。以後の検討では、いずれも繊維処理剤を塗工したものを撥水シートとして用いた。

表Ⅲ.2.2.1 試験 21 日間浸漬後の浸水量

繊維処理剤	あり	なし
浸水量	10ml	200ml



図Ⅲ.2.2.9 接着剤塗布量とガス拡散電極の酸素還元電流の関係



図Ⅲ.2.2.10 ガス拡散電極の LSV 測定結果  
(a) 撥水シート貼り合わせ型, (b) PTFE 塗布型

次に貼り合せ条件の検討を行い、酸素透過性を評価した。電極基材には空気極材料として一般的なカーボクロスを選定し、撥水シートとの接着には、酸素透過性が高い接着剤材料を用いた。この接着剤を用いて、撥水シートとカーボクロスを接着した際に必要となった、最小の乾燥後接着剤重量を  $n = 2$  で測定し、その塗布量とガス拡散電極にしたときの酸素還元電流の関係を調べた。その結果を図Ⅲ.2.2.9 に示した。図Ⅲ.2.2.9 における酸素還元電流は、作用極を  $-0.7 \text{ V vs. RHE}$  の一定電位に保った状態で  $600 \text{ sec}$  経過時点での電流とした。図Ⅲ.2.2.9 より、接着剤の塗布量と酸素還元電流には、 $5 \sim 20 \text{ mg/cm}^2$  の塗布量の範囲において負の相関関係があることが確認できた。したがって、この範囲においては接着剤における酸素透過が酸素還元反応の律速段階であることが分かった。

酸素透過が最適となるよう撥水シートとカーボクロスを貼り合わせた、貼り合わせ型ガス拡散電極について、従来の三相界面を形成した PTFE 塗布型のガス拡散電極と性能比較を行った。還元側に電位を掃引した LSV の結果を図Ⅲ.2.2.10 に示す。ここで、PTFE 塗布型のガス拡散電極は、

前述の方法にならって以下のように作製した。PTFE 未処理のカーボンペーパー(TGP-H-120、東レ製)の一面に養生テープを貼ってマスクし、他方の面を 60 wt% の PTFE 分散液 (SIGMA-Aldrich) にディップし、乾燥させた。乾燥後、養生テープを剥がし、大気中 350 °C で 20 分間焼結した。その後、PTFE が塗工された面に、刷毛で PTFE 分散液を塗布し、乾燥、さらに大気中 350 °C で 20 分間焼結という工程を 3 回繰り返して、PTFE 撥水層を形成した。その後、PTFE 撥水層と反対面に触媒インクを触媒担持量が 2.0 mg/cm<sup>2</sup> となるように塗布し、乾燥させることでガス拡散電極とした。

図 III.2.2.10 において、1.2~0.8 V vs. RHE の領域は、ガス拡散電極のチャージ成分に由来する電流である。また、0.8 V vs. RHE 付近が酸素還元反応の立ち上がりであり、0.6 V vs. RHE 付近で電流密度が一定に近づくのは電極への酸素の拡散律速によるためである(拡散限界電流)。図 III.2.2.10(a)、(b)を比較すると、図 III.2.2.10 (a)で酸素還元のカブの傾きがやや緩やかであるものの、酸素還元のオンセット電位および拡散限界電流はほとんど同様であることが分かる。このことから、撥水シート貼り合わせ型のガス拡散電極によって、PTFE 塗布型と同等程度の電極性能を発現できることを確認した。

カソード電極特性として十分な特性評価が確認されたため、貼り合せ型のガス拡散電極をカソード適用した MFC を作製し、その MFC 特性評価を実施した。貼り合せ型のカソード基材として、カーボクロスにて評価を実施した。結果を図 III.2.2.11 に示す。貼り合せ型のカソード電極を適用した MFC において、立上げから 5 日目程度で 100 mW/m<sup>2</sup> 以上の良好な出力特性を示し、この貼り合せ型カソード電極の実証試験適用が十分に可能であることが確認された。一方、立上げから 10 日目程度から貼り合せ型カソード電極の出力が経時的に緩やかに低下する傾向が見られた。貼り合せ型電極を適用した MFC の最大出力値は PTFE 塗布型電極を適用した MFC と比較して 2/3 程度となったが、前述の経時的な出力低下によって副次的に最大出力値も引き下げられている可能性が示唆される。

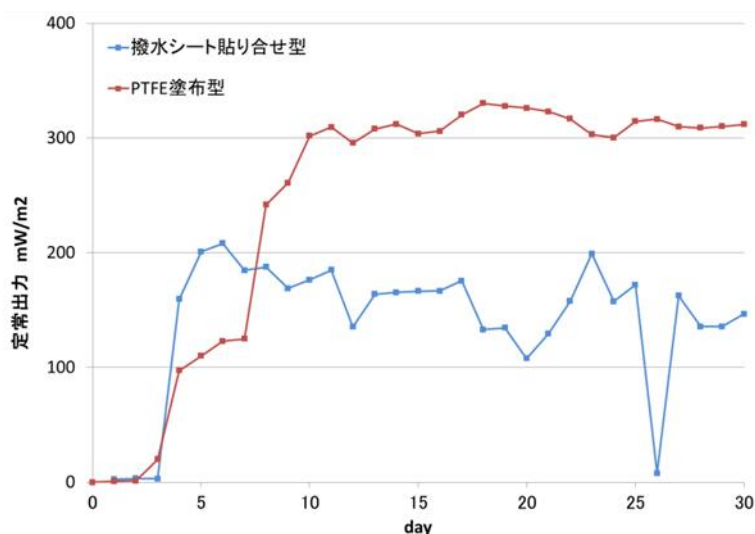


図 III.2.2.11 各構成のガス拡散電極の MFC 出力特性評価結果



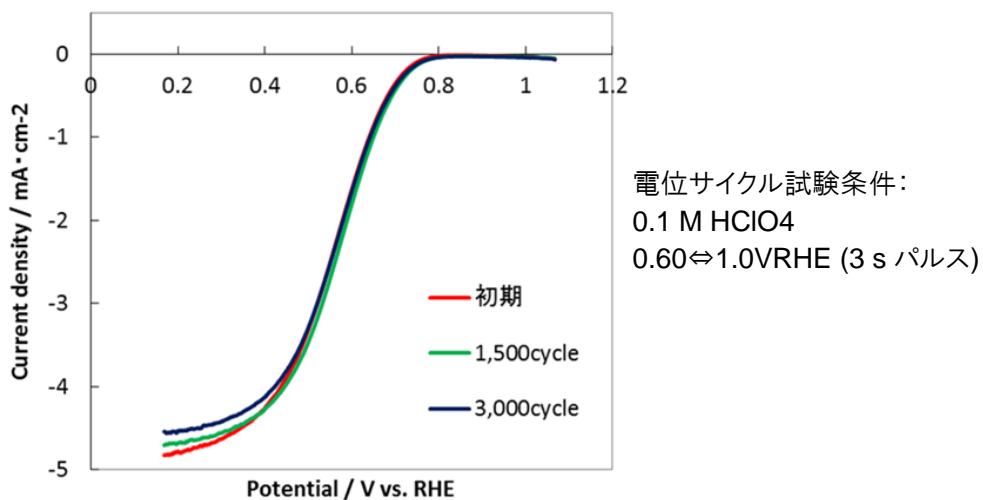
### Ⅲ.2.2.5 カソード電極構造検討によるリアクター出力、耐久性検証

Ⅲ.2.2.4 の評価において、カソード電極自体の電流密度特性および MFC 適用時の出力特性において、実証試験への適用が十分可能であることが確認された。一方で、MFC 出力特性の経時的な低下が観測されており、長期的な発電性能維持といった観点では課題が残されていた。そこで経時的な出力低下要因の解析とその抑制対策について検討を行った。

開発電極を MFC のカソードとして運転した際の経時的な性能低下要因は、以下のように切り分けることができる。

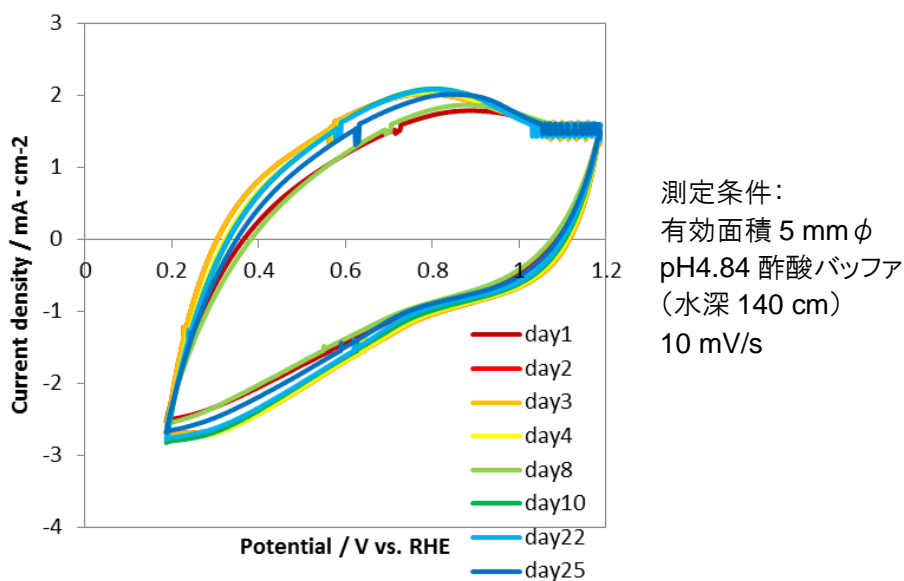
- ①触媒層の劣化
  - ①-1 触媒活性の低下
  - ①-2 電気化学表面積の低下
  - ①-3 触媒の剥離
- ②プロトン供給低下
  - ②-1 微生物によるプロトン消費
- ③酸素供給低下
  - ③-1 撥水シートの剥離
  - ③-2 微生物による酸素消費

以上の分類に従い、各項目について分析を行った。まず触媒層劣化による影響の検討を実施した。MFC の運転条件(カソード電位 $\sim 0.7$  V<sub>RHE</sub>)で触媒活性の低下が生じているのかを、負荷応答試験で調べた結果を図Ⅲ.2.2.12に示す。図Ⅲ.2.2.12において、0.8 V 付近からの電流の立ち上がりは酸素還元電流を示し、酸素還元電流が 20  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以上となる電位がオンセット電位、0.2 V における電流の半分の電流値が流れた電位が半波電位(Half wave potential: HWP)と定義される。図Ⅲ.2.2.12 より、触媒のオンセット電位および HWP は、耐久試験 3,000 サイクル後においても初期とほとんど変化がないことが分かる。このことから、触媒活性は、負荷応答試験後もほとんど変化していないといえる。したがって、MFC の運転条件では、触媒およびイオノマーは十分安定であると考えられる。



図Ⅲ.2.2.12 触媒の耐久試験前後の酸素還元活性

また図Ⅲ.2.2.13に、電気化学的表面积の変化について開発電極のCVの経時変化を調べた結果を示す。CVにおいて、0.8 V付近からの電流の立ち上がりは酸素還元電流を示し、負電位方向掃引側と正電位方向掃引側とのヒステリシスは、充電容量を、すなわち電気化学的表面积を示す。図Ⅲ.2.2.13より、電極のCVにおいても酸素還元電流のオンセット電位は25日までで経時的な変化は見られず、また電気化学的表面积に関してもほとんど変化は見られなかった。浸漬1日目と浸漬25日目の比較では、25日目の方が電気化学的表面积は10%程度向上していた。このことから、開発電極の電気化学的表面积の経時的な変化はMFCの出力低下に関与していないことが分かった。



図Ⅲ.2.2.13 開発電極のCVの経時変化

カーボクロスからの触媒の剥離を検証するため、MFC 運転後の電極をサンプリングして観察した。観察の結果、触媒の剥離は観察されなかった。また、リアクター内の触媒粉の浮遊等も特に観察されなかった。以上の結果から、触媒層の劣化は生じていないと考えられる。

次に微生物によるプロトン消費がカソード性能の低下に与える影響を検討するため、人工下水にバッファを加えて廃液中のプロトン濃度を一定に保った状態でMFC 運転を行った。もしアノード/カソード間に存在する微生物によってプロトンが消費され、これがカソード性能の低下の主要因であるとすれば、プロトン濃度に変化がなければカソード性能の低下は見られないはずである。しかしながら、バッファとして20 mMの炭酸水素ナトリウムを添加しても同じような時間間隔でMFCの経時的な出力低下が確認された。このことから、微生物によるプロトン消費もカソード性能の低下の主要因ではないと考えられる。以上の結果から、カソードの性能低下に対するプロトン供給低下の影響は小さいと考えられる。

最後に酸素供給低下による影響の検討を行った。MFC 適用後のカソード電極を採取し、撥水シートとの剥離について調査を実施した。基材にカーボクロスを用いた電極において、41 日間運転後

の電極では、撥水シートは容易に剥離でき、撥水シートとカーボクロス間にバイオフィルムが形成していることが確認できた。このような剥離現象およびバイオフィルム形成によって、酸素供給が低下している可能性が示唆される。今後はこのような現象を抑制する手法の確立を目指していく。

### Ⅲ.2.3 アノード開発（積水化学工業、東京大学、東京薬科大学）

#### Ⅲ.2.3.1 従来カーボン素材の性状・性能評価

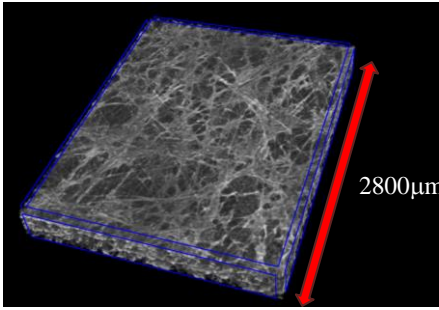
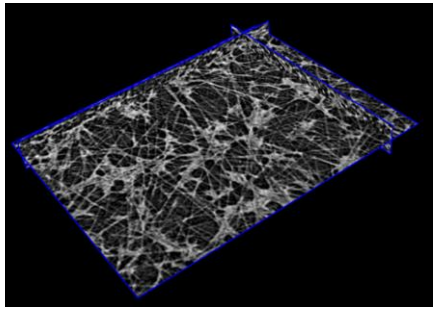
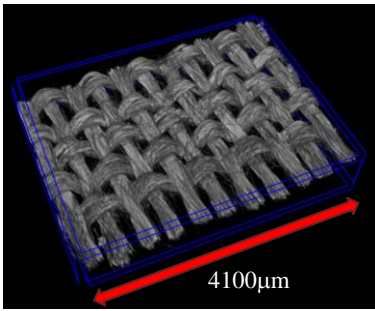
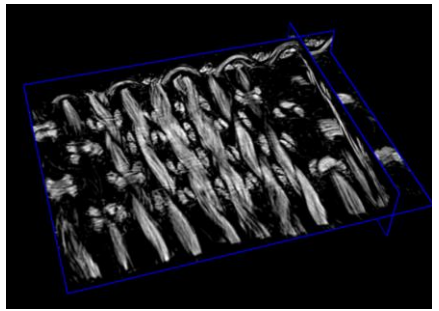
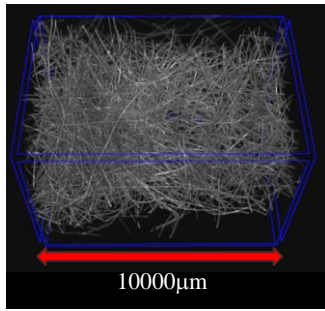
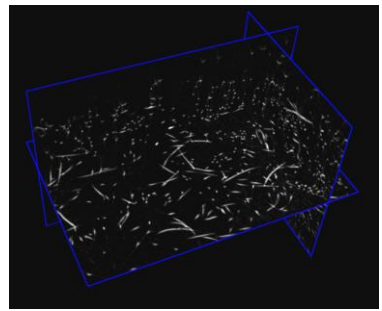
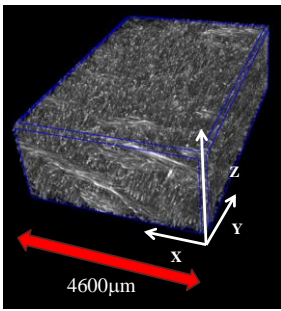
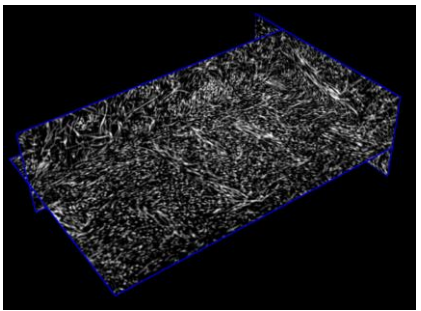
MFC において、発電能力の源である発電菌は、アノード電極表面に生育する。そのため、アノード電極は MFC の発電性能を左右する重要な要素である。一般的に、アノード電極素材の比表面積が大きいと発電菌が多く生育でき、発電性能が向上するとされているが、それ以外の、見掛け密度、気孔率や電気抵抗率などの素材性状と発電性能との関係は明確になっていない。また、既往の論文では、バッチ式リアクターでの報告が多く、本プロジェクトで用いるような連続流入系での知見は少ない。バッチ式リアクターでは、発電性能向上に寄与するメディアーターの蓄積が可能で、加えて、カソードへのプロトン輸送能力を増強する pH 緩衝剤が用いられるため、前提条件が根本的に異なる。連続流入系において、アノード電極素材と発電性能との関係を把握することで、本開発において配慮すべき素材のパラメーターを把握し、新規開発する低コストアノードの検討方向性を定めることができる。

本実施項目においては、様々な形状の市販のカーボン素材の性状と性能の評価を行った。発電性能評価は電極評価専用開発した小型リアクターを用いた。これは東京薬科大学が開発したカセット電極 1 枚が評価可能な構成であり、多くの電極材料の評価を同時に実施することが可能である。表Ⅲ.2.3.1 に示す 6 種類の市販のカーボン素材に関して評価を行った。本実験では、素材を重ねることで、厚みを 10mm に合わせた。各素材の X 線 CT による 3 次元形状とその特徴を表Ⅲ.2.3.2 に示す。なお、ポーラスカーボンは画像の取得ができなかった。

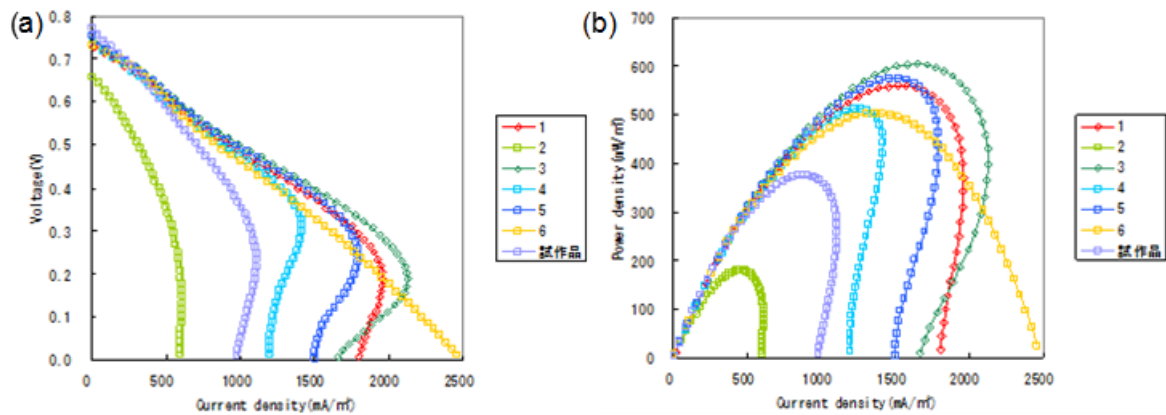
表Ⅲ.2.3.1 使用した市販のカーボン材料

No	名称	製法	厚み (mm)
1	カーボンペーパー	焼結	10
2	カーボンクロス	織物	10
3	カーボンフェルト A	ニードルパンチ	10
4	カーボンフェルト B	ニードルパンチ	10
5	グラファイトフェルト C	ニードルパンチ	10
6	ポーラスカーボン	焼結	10

表Ⅲ.2.3.2 実験に使用したカーボン材料の X 線 CT 画像とその特徴

No.	名称・特徴	画像	
1	<p>カーボンペーパー</p> <p>XY 平面上でネットワークを組んだ構造が観察された。</p>		
2	<p>カーボクロス</p> <p>平織構造が確認された。</p>		
3	<p>カーボンフェルト A</p> <p>繊維がランダムに配向している。</p>		
4	<p>カーボンフェルト B</p> <p>YZ 平面に繊維の束が観察された。それを取り巻くように他の繊維が配向している。</p>		

評価結果を図Ⅲ.2.3.1に示す。本実験で行ったような連続流入系に関しては、見掛け密度が小さい方が最大出力密度(図Ⅲ.2.3.1(b)のカーブの頂点)は大きく、高い発電性能を有する傾向が見られた。これらの結果から、比表面積は重要でないと考えられた。



図Ⅲ.2.3.1 市販カーボン材料の発電性能 (a)分極曲線, (b)パワーカーブ

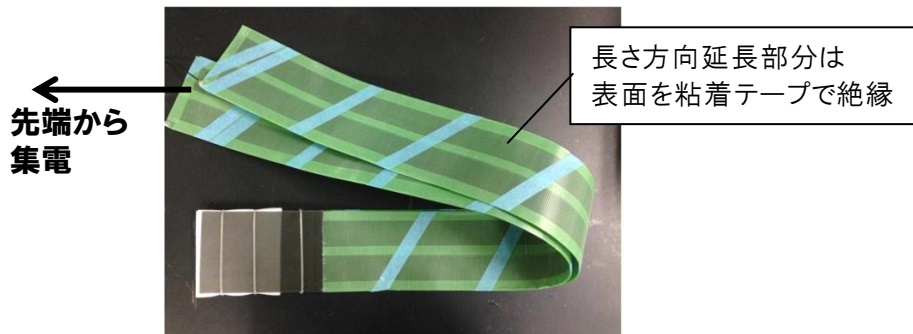
### Ⅲ.2.3.2 低コストアノードの開発

創電型廃水処理装置における普及への課題のひとつに、電極材料のコストが挙げられる。高い発電性能が得られたとしても、コストが見合わなければ普及が困難であることは自明である。これまでMFCの研究に多く用いられているカーボンフェルト等のカーボン材料は廃水処理に用いられるような本用途では高価であり、素材の根本的な見直しが必要であった。当然ながら、発電性能の維持も必要な要素であり、コストと発電性能を両立することが求められる。加えて本プロジェクトでは、ベンチスケールへの大型化を目標としている。サイズが大きくなれば構成する材料の電気抵抗の影響が大きくなり、カーボン材料では十分な導電性が得られず、大型化にしたがって発電性能が低下する懸念があった。

そこで本プロジェクトにおいては、新しい低コストアノード電極のサンプルを作成し、その発電性能の評価を実施した。評価はⅢ.2.3.1項と同様の試験装置、実験条件を用いて評価を行った。新アノードの候補としては、ステンレスメッシュを構成するステンレス線にカーบอนを主成分とする導電性コーティングを付加した電極を作成した。従来のカーボンフェルトから本構成に変更することで、アノード電極の材料コストは約 1/3 に低減できる。候補電極について小型リアクターの運転を行い、分極曲線とパワーカーブを得た。最良の仕様では、従来のカーボンフェルトと同等の発電性能が得られた。

次に、上記候補電極について、実証サイズでの使用を想定した発電性能評価を実施した。上記と同サイズの実験装置とカソードを用い、アノードのみを実証サイズ同等の長さとした電極(図Ⅲ.2.3.2)にて発電性能評価を行った。結果、長さを大きくすることによる発電性能の低下は見られなかった。この結果を元に、上記候補電極を実証試験に用いることとした。なお、本実験で用いたアノードは、コーターによる機械的塗装方式で製作しており、実証試験用アノードも同方式で製作した。

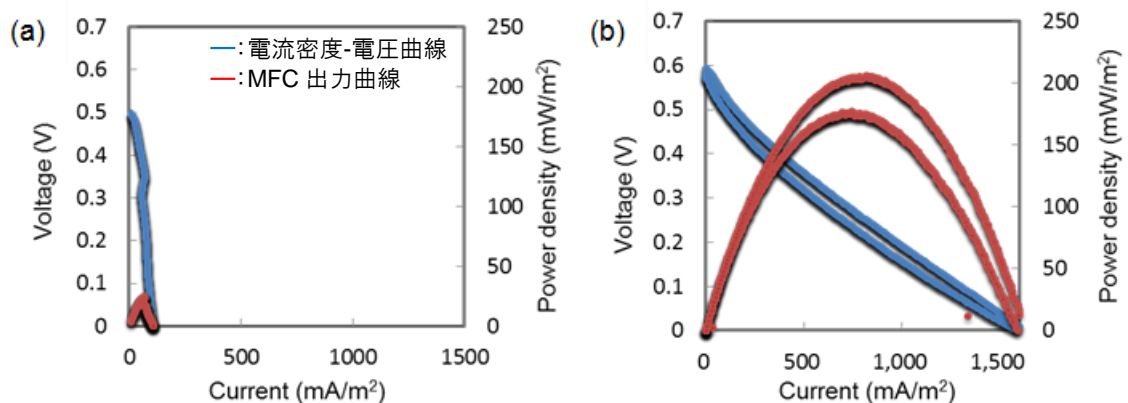




図Ⅲ.2.3.2 実証サイズアノードの代用評価に用いた電極の外観

### Ⅲ.2.3.3 バイオミネラリゼーション(東京大学)

アノード電極の導電性は、MFC の出力を決定付ける要因の一つであるが、高導電性カーボンフェルトは大きなコスト要因となっていた。Shewanella 菌のような電流生成菌の純粋培養系においては、バイオミネラリゼーションによる導電性 FeS が形成され、高い導電性を持つアノード微生物触媒(バイオフィルム)が電極上に形成される事が知られている。MFC のような混合培養系においても同様のことが期待されることから、本プロジェクトでは FeS 形成を促進することで、低導電性カーボンフェルトから高い出力を得る試みを進めた。その結果、従来の高導電性カーボンフェルトと比べ、市場価格で 10 分の 1 程度の安価な低導電性カーボンフェルト電極を用いた場合でも、バイオミネラリゼーションによって高導電性カーボンフェルトを用いた場合と同様の出力が得られる事を確認した(図Ⅲ.2.3.3)。また、このバイオミネラリゼーション法は MFC の立上げ期間の短縮にも効果が認められ、小型リアクターにおいて FeS 形成を伴わない場合に 2~3 週間必要であった立上げ期間を、FeS 形成を利用することでおよそ 1 週間に短縮できることが確認された。

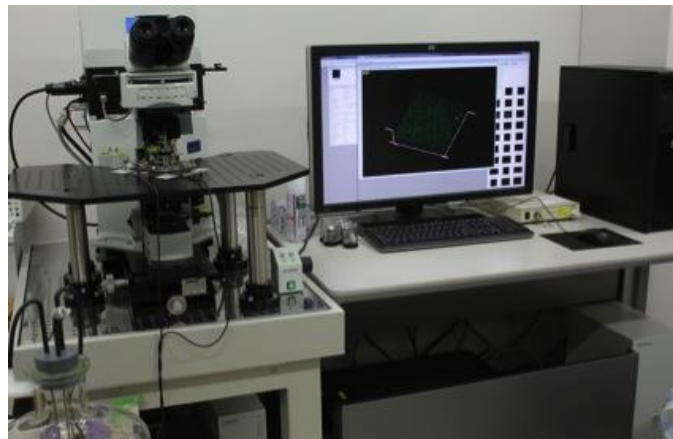


図Ⅲ.2.3.3 安価な低導電性カーボンフェルトをアノード基材としたときの MFC 出力  
(a) バイオミネラリゼーション前, (b) FeS バイオミネラリゼーション後

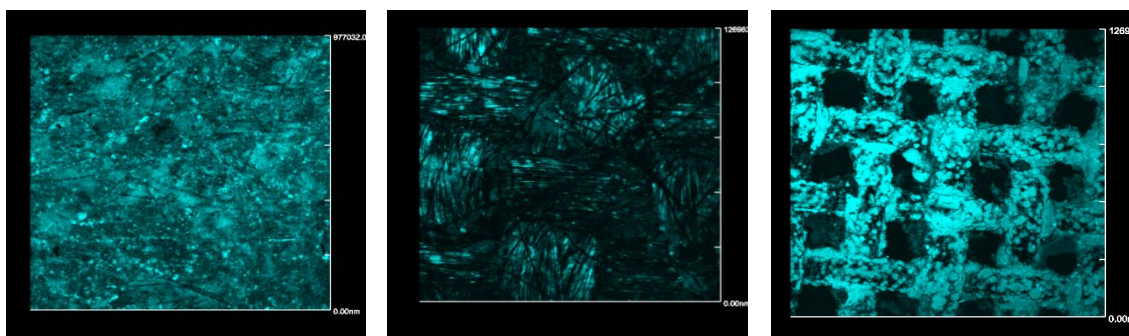
### Ⅲ.2.3.4 バイオフィーム微生物構造の解明 (東京薬科大学)

これまでの廃水処理用MFCの研究において、アノードの表面形状が出力に影響することが明らかになっている。また、アノード付着微生物の解析において、微生物組成と出力の相関があまり見られないケースがあることが示されている。これらの結果は、単なる微生物組成ではなく、バイオフィームの構造が発電に重要なことを示唆するものである。そこで、アノード反応の高効率化を目指すためには、本プロジェクトで使用または開発しているグラファイト系やステンレス系のアノード上に形成されるバイオフィームの構造を解析することが必要と考えられた。しかし、以前の研究においてはガラス平板上に形成されるバイオフィームの観察が主に行われており、光を通さず起伏の大きな電極上のバイオフィーム構造の解析はなされていなかった。そこで本項目では、電極上に形成される生きたままの発電バイオフィームの構造を解析する方法を確立し、バイオフィーム構造と発電量の相関を考察することにより、より高効率なアノード構造の提案を目指した。

本項目の研究のために導入した共焦点顕微鏡は、水浸レンズを搭載した正立式共焦点顕微鏡(オリンパス社製FLUOVIEW FV1200 BX61WI)である(図Ⅲ.2.3.4)。これを用いれば、蛍光色素で染色された電極バイオフィームを水中で観察できると考えられた。またFluorescence in situ hybridization (FISH)を用いて特定の微生物を染色すれば、バイオフィーム中の発電菌(例えば*Geobacter*)の分布も知ることができると期待された。



図Ⅲ.2.3.4 電極バイオフィームを解析するために導入した共焦点顕微鏡



カーボンペーパー

カーボンクロス

カーボンブラック塗布ステンレスメッシュ

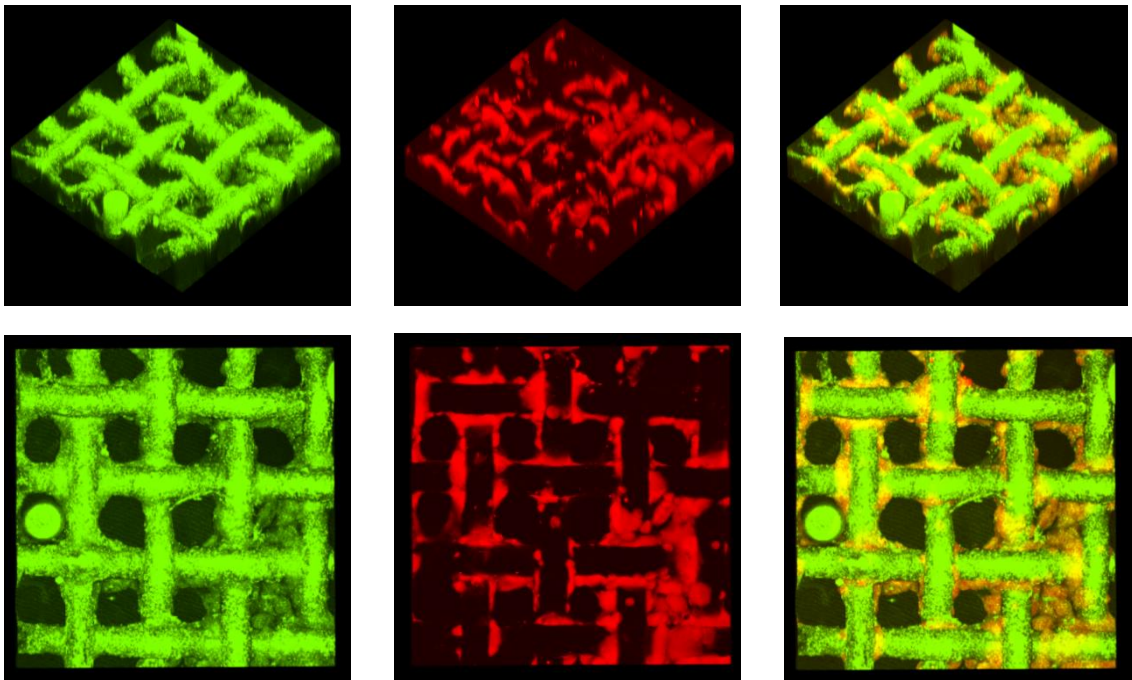
図Ⅲ.2.3.5 電極上に形成された発電バイオフィーム(付着微生物を蛍光色素で染色)



この装置の有用性を検証するため、各種電極(カーボンペーパー電極、カーボクロス電極、カーボンブラック塗布ステンレスメッシュ電極)に付着したバイオフィルムの観察を行った(図Ⅲ.2.3.5)。この写真が示すように、他の電極に比べ、カーボンブラック塗布ステンレスメッシュ電極において付着微生物量が多くなっていることが分かる。この電極を用いたMFCの発電量は他の電極に比べて高く、その結果発電菌が増殖し、付着バイオフィルム量が増えたものと考えられた。

そこで、FISH法を用いて発電菌がバイオフィルム中にどのように分布しているかを調査した。これには、発電菌*Geobacter*とその近縁種を検出する蛍光プローブを用い、バイオフィルム全体は反射光で観察した(図Ⅲ.2.3.6)。その結果、発電菌はメッシュのへりや交差点のくぼみの中に多く存在し、逆に廃水が直接当たる部分には存在していないことが示された。この結果を基にすると、発電菌を増やして発電量を上げていくためには、発電菌が存在しやすいくぼみを増やすこと、つまりメッシュの場合はメッシュのピッチ(1インチ当たりの繊維の本数)を増やす必要があると考えられた。

この考えを基に、ピッチの異なるメッシュをアノードに使った実験を行ったところ、100から150メッシュが最も発電に適することが明らかになった(実証実験で用いたものは80メッシュ)。この知見は、今後の実用化研究において発電量を上昇させる一つの有望な方法を提案する上で重要である。



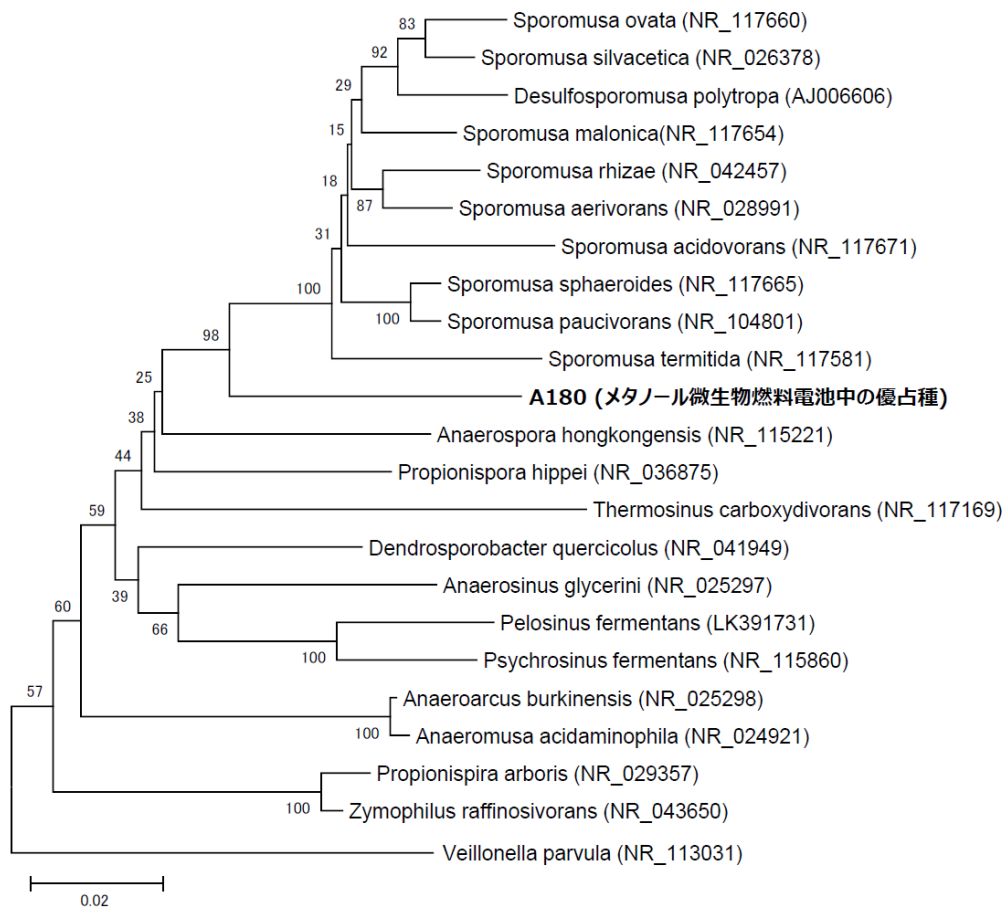
図Ⅲ.2.3.6 カarbonブラック塗布ステンレス電極上に形成されたバイオフィルム中の発電菌の FISH 解析 (左)反射光像, (中央)*Geobacter*をターゲットとした FISH 像, (右)両者重ね合せ

### Ⅲ.2.4 微生物制御技術の開発 (東京薬科大学)

#### Ⅲ.2.4.1 廃水処理MFC中のアノード微生物膜の解析

実証実験に用いる工場廃水中には、主要汚濁物質としてメタノールおよびアルデヒド類が含まれる。しかし、これらの有機物を用いた微生物発電の報告はなく、この種の系における発電可否判断が必要であった。また、発電可能であることが確認された後には、発電に関与する微生物および代謝経路を解明することが、微生物を制御し発電を安定化・高効率化するために重要となる。

そこで、メタノールまたはブチルアルデヒドの分解及び発電に関与する微生物種を同定することを目的に、実験用一槽型MFCに工場活性汚泥を植菌し、メタノールまたはブチルアルデヒドを唯一の有機物源として運転を行った。出力が安定した後に、アノード上のバイオフィーム、カソード上のバイオフィーム、電解液中の微生物を採取し、その中の微生物種を16S rRNA遺伝子のパイロシーケンス解析、その中に存在する代謝系遺伝子をショットガンメタゲノム解析により同定した。その結果、メタノールに関してはSporomusa属に近縁な細菌により酢酸に変換され、Geobacter属細菌がその酢酸を電気に変換することが明らかになった。Sporomusa属細菌は、ホモ酢酸菌(酢酸を水素と二酸化炭素に変換、またはその逆反応を行うことによりエネルギーを得て生育する細菌)として知られており、メタノールなどのC1化合物を利用して生育できるものも含まれる。今回検出された微生物種はSporomusa属に近縁な新属の細菌と考えられ(図Ⅲ.2.4.1)、その生理学

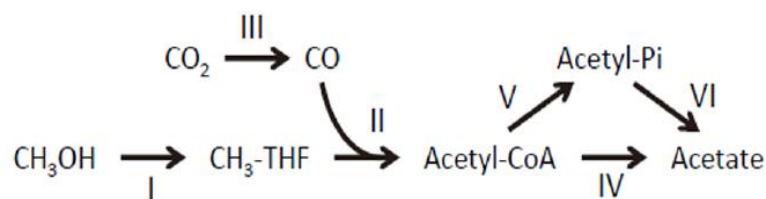


図Ⅲ.2.4.1 メタノール MFC のアノードバイオフィーム中の優占種(メタノールを分解すると考えられている細菌)の分子系統的位位置(16S rRNA 遺伝子解析による)

的性質や代謝に興味を持たれた。そこで、アノードバイオフィームから全ゲノムを抽出し、ショットガンメタゲノム解析を行った。その結果、この細菌はメタノールを酢酸に変換して生育すること、その代謝はKEGG(Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes)等のデータベースに記載されていない新しい経路(図Ⅲ.2.4.2)によるものであることが判明した。

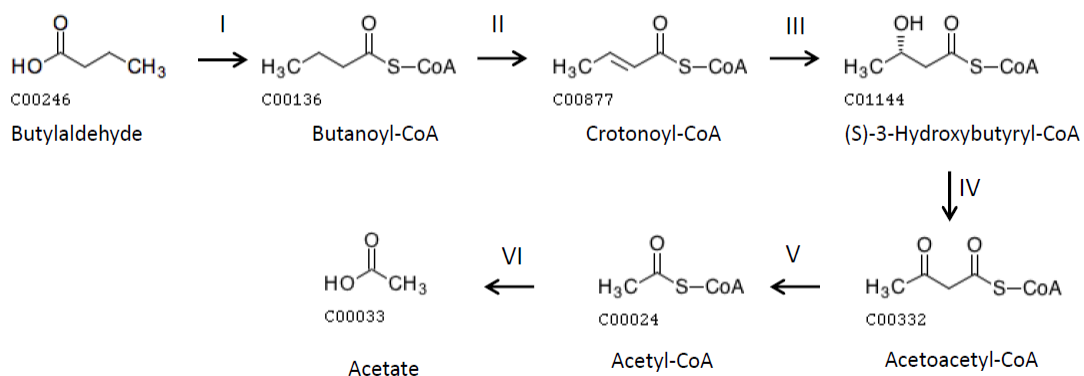
一方ブチルアルデヒドに関しては、Desulfovibrio属細菌が酢酸に変換し、Geobacter属細菌がその酢酸を電気に変換することが示された。また、Desulfovibrio属細菌は、butanoyl-CoAなどを經由してブチルアルデヒドを酢酸に変換する既知の代謝経路(図Ⅲ.2.4.3)を用いることがメタゲノム解析により示された。

いずれの化合物においても、発電に直接関与するのはGeobacter属細菌であることが示されたので、この細菌種をモニタリングするための定量的PCR法を確立し、実証実験などにおける微生物解析に利用した。



Step I, methanol:THF methyltransferase; II, acetyl-CoA synthase (EC.2.3.1.169); III, carbon monoxide dehydrogenase (EC.1.2.7.4); IV, acetyl-CoA hydrolase (EC.3.1.2.1); V, phosphate acetyltransferase (EC.2.3.1.8); VI, acetate kinase (EC.2.7.2.1)

図Ⅲ.2.4.2 MFCのアノードバイオフィーム中の優占種によるメタノールから酢酸への代謝経路

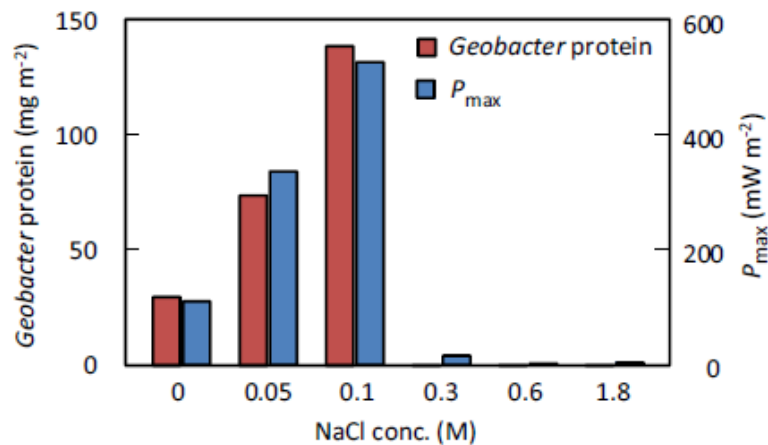


Step I, acyl-CoA synthase (EC.6.2.1.2); II, trans-2-enoyl-CoA reductase (EC.1.3.1.9); III, enoyl-CoA hydratase (EC.4.2.1.17); IV, 3-hydroxybutyryl-CoA dehydrogenase (EC.1.1.1.157); V, acetyl-CoA C-acetyltransferase (EC.2.3.1.9); VI, acetyl-CoA hydrolase (EC.3.1.2.1)。

図Ⅲ.2.4.3 MFCのアノードバイオフィーム中の優占種によるブチルアルデヒドから酢酸への代謝経路

### Ⅲ.2.4.2 微生物機能制御法の開発

上記の研究および廃水処理用カセット電極MFC中のアノードバイオフィルムの解析から、Geobacter属細菌の重要性が示唆された。従って、この発電菌がどのような条件で高い発電能を発揮できるかを知ることは、MFCの高出力化にとって重要と考えられた。本項目ではまず、廃水中の塩濃度(イオン強度)が微生物による発電に与える影響を調査した。この検討では、酢酸を主要有機物とする様々な塩濃度(0 Mから1.8 M)の廃水をカセット電極型MFCに連続的に流入させ、発電量とアノードバイオフィルム中のGeobacter量を調査した。その結果、最も高い出力を示す塩濃度は0.1 Mであり、その際にはGeobacterが最も多くなることが示された(図Ⅲ.2.4.4)。これは、液中の電解質濃度が高い方が発電には有利であるが、Geobacterは淡水性のため0.1 M NaCl程度までしか増殖できないことによるものと考えられた。この結果は、適度な塩濃度がMFCの出力を向上させるために必要なことを示している。

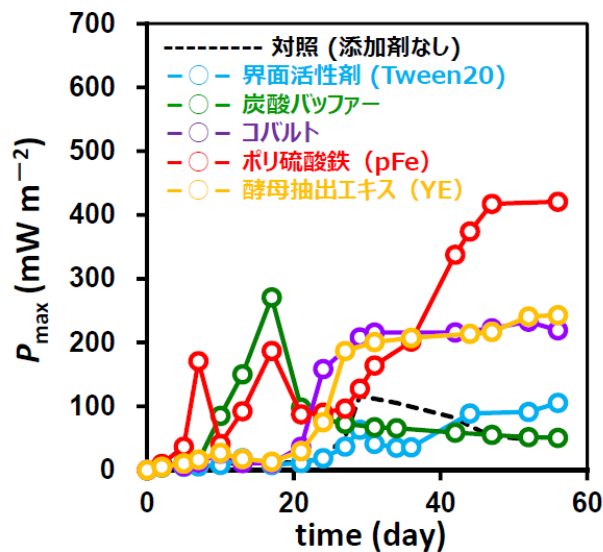


図Ⅲ.2.4.4 培地中の塩濃度が発電量(Pmax)およびアノードバイオフィルム中の Geobacter 量(Geobacter protein)に与える影響

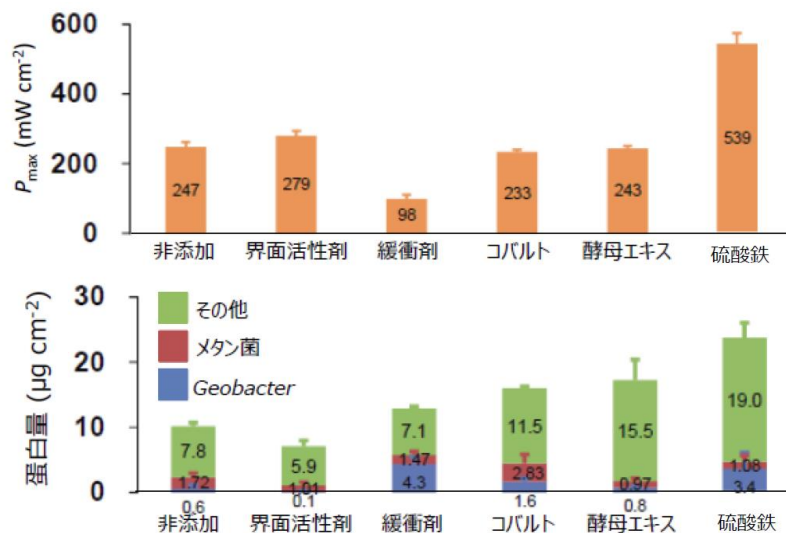
次に、微生物による発電を安定化および高効率化するために利用可能な添加剤(性能を改善するために廃水に添加する薬剤)の検討を行った。この際にもアノードバイオフィルム中の Geobacter量を調査し、添加剤のGeobacterへの影響を調査した。今回検討に用いた添加剤は、界面活性剤(作用機序は不明であるがMFCの出力を上昇させるという報告がある)、炭酸バッファ(プロトン移動効率を上昇させ、MFCの出力を上昇させると考えられている)、コバルト(メタノール代謝系の重要酵素の活性化に必要な金属である)、ポリ硫酸鉄(鉄や硫酸はMFCの出力を上昇させるという報告がある)、酵母抽出エキス(様々な補酵素やビタミンを含み、発電菌を活性化するという報告がある。)であった。これらのうちの一つの添加剤を加えた模擬工場廃水をカセット電極MFCに流入させて出力を比較したところ、非添加に比べて最も出力向上の効果が大きかったものはポリ硫酸鉄であった(図Ⅲ.2.4.5)。各種添加剤を加えた時のアノードバイオフィルム量を蛋白定量により求め、またその中のGeobacter及びメタン菌(発電を阻害する菌種として注目した)の量を定量PCRにより求め、発電量と比較した(図Ⅲ.2.4.6)。その結果、非添加系と比べると、硫酸鉄添加系では明らかにアノードバイオフィルム量が増えており、またGeobacter量も増加していた。これにより、ポリ硫酸鉄はGeobacterの増殖を促進する効果があり、その結果としてMFCが

らの出力を上昇させると考えられた。また、ポリ硫酸鉄添加濃度の検討を行い、出力上昇効果は鉄換算濃度で数十 $\mu\text{M}$ から百数十 $\mu\text{M}$ 程度で見られるが、それ以上添加しても出力は低下することが明らかになった。

ポリ硫酸鉄は廃水処理において凝集剤として利用されており、安価な薬剤である。また今回行ったカセット電極型MFCを用いた研究において流出廃水中の鉄濃度は非常に低く、鉄は槽内に蓄積する傾向が観察された。このことは、常にポリ硫酸鉄を添加しなくても効果が期待できることを示している。以上を総合し、ポリ硫酸鉄は廃水処理用MFCの出力改善を目的とした添加剤として有用な薬剤となり得ることが確認された。



図Ⅲ.2.4.5 各種薬剤添加時の発電量(Pmax)の推移



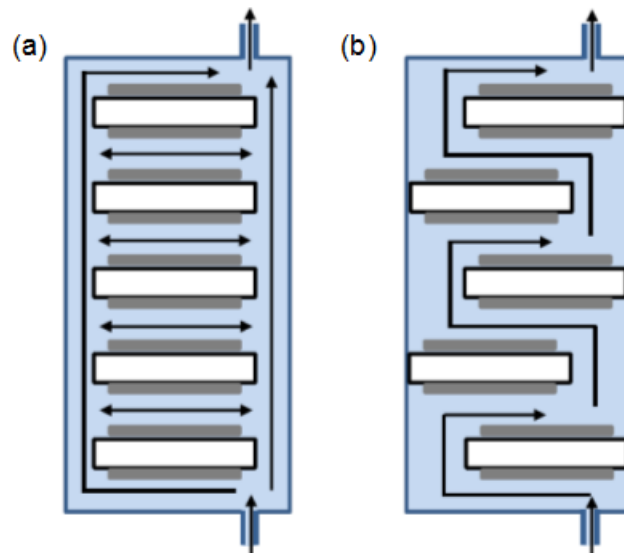
図Ⅲ.2.4.6 (上)添加剤別の発電量(Pmax)比較  
(下)添加剤別のアノードバイオフィルム量, Geobacter量, メタン菌量比較



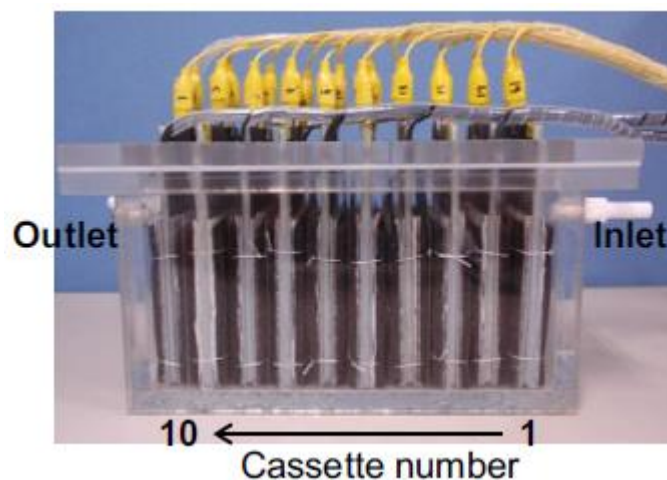
### Ⅲ.2.5 効率化システムの開発(東京薬科大学、積水化学工業)

#### Ⅲ.2.5.1 スラローム型リアクターの検討(東京薬科大学)

本項目では、廃棄物系バイオマスからの電力回収を目的に開発されたカセット電極型MFCを基に、廃水処理に適したMFCの開発を目指した。カセット電極型MFCとは、カソード、絶縁膜、アノードが一体になったカセット電極を微生物反応槽に挿入することによりできあがるMFCであり、複数のカセット電極を挿入することにより反応槽容積あたりの電極面積を極めて大きくできる点が特徴である。この方式のMFCは、過去のNEDO事業(平成18~21年度実施、新エネルギー技術研究開発/バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発(先導技術開発)/廃棄物系バイオマスを原料とする微生物燃料電池の研究開発)において開発され、有機物分解速度  $6 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{日}$ 、最大出力密度  $150 \text{ W/m}^3$ を達成している。しかし、このMFCシステムは、嫌気消化槽の代替を目指したもので、高濃度バイオマスを滞留時間10日~50日で処理しながら発電するには適しているが、水滞留時間の短い廃水処理は難しい。そこで本項目では、活性汚泥プロセスと同等の水滞留



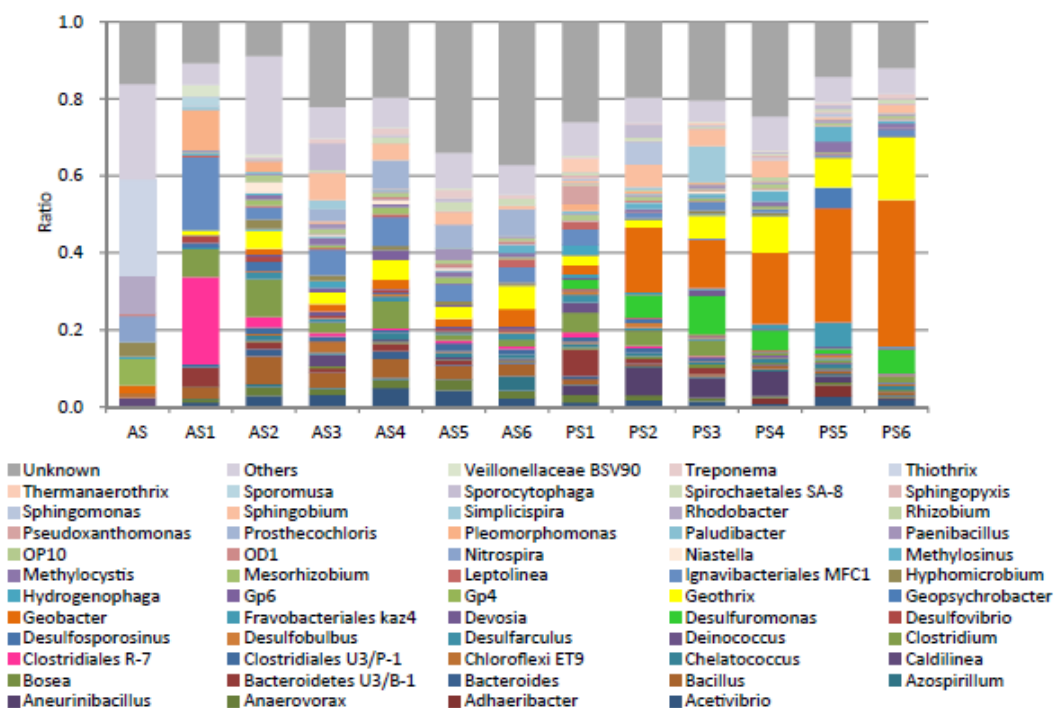
図Ⅲ.2.5.1 カセット電極型 MFC, (a)従来型, (b)スラローム型



図Ⅲ.2.5.2 本項目の実験に用いたスラローム流カセット電極型 MFC

時間で廃水中の有機物を分解除去しながら発電できるMFCとして、廃水を効率よくアノード電極に付着した微生物膜に接触させる構造のスラローム型リアクター(図Ⅲ.2.5.1)の検討を行った。

本実験においては、内容積約1Lのスラローム流カセット電極型MFCを用いた(図Ⅲ.2.5.2)。水田土壌を微生物源、複合高分子基質からなる模擬廃水を流入水として用い、水滞留時間を24時間から6時間まで段階的に変化させて、各々の水滞留時間における有機物除去率および電子回収率を求めた。その結果、水滞留時間9時間で有機物除去効率85%以上という活性汚泥と同等の処理性能が確認され、その時の電子回収率は20%から25%であった。しかし、水滞留時間を6時間にすると有機物除去効率は80%以下に低下した。以上の結果は、スラローム型リアクターにおいて廃水処理が十分にできることを示すものと考えられた。さらに、工場活性汚泥を微生物源とした実験も行い、上記の水田土壌を微生物源とした時と比較した。その結果、有機物除去と発電のどちらにおいても両ケースで大きな差はなかった。その際のアノード付着微生物群集の構成を比較するために16S rRNA遺伝子による分子系統解析を行ったところ、両者の微生物群集は大きく異なることが明らかになった(図Ⅲ.2.5.3)。どちらのケースにもGeobacterが存在することは確認できたが、他の構成種は大きく異なっており、複合基質を発酵分解する菌種が違うことが考えられた。

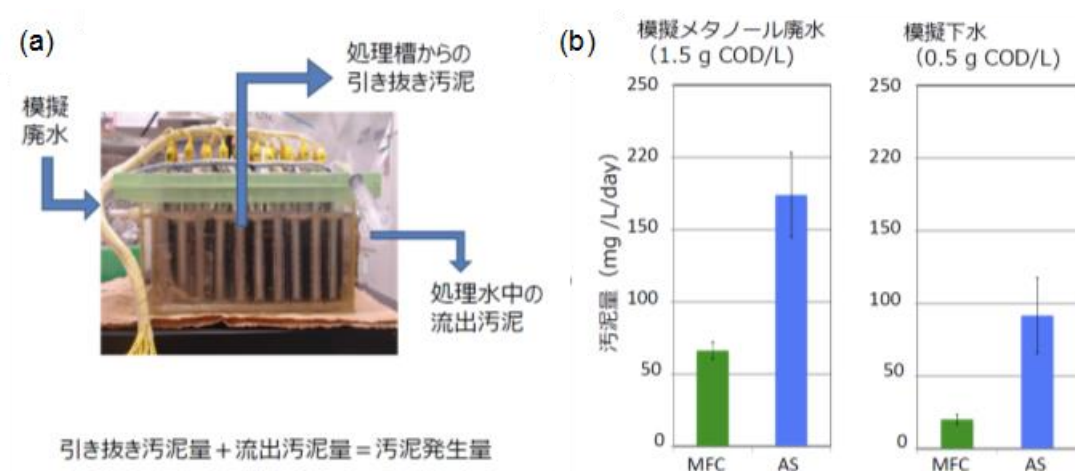


AS: 植種源の活性汚泥  
 AS1~AS6: 活性汚泥植種アノード(上流→下流方向に電極をナンバリング)  
 PS1~PS6: 水田土壌植種アノード(同上)

図Ⅲ.2.5.3 アノードバイオフィルムの細菌構成  
 (16S rRNA 遺伝子断片の Pyrosequencing 解析による結果)

### Ⅲ.2.5.2 汚泥発生量の検討(東京薬科大学)

MFC を廃水処理に用いることの利点として、廃棄物となる汚泥の発生量を低減できる可能性が考えられる。下水処理を考えると下水汚泥の廃棄費用は処理場における最大の経費であり、また国内の産業廃棄物の約 2 割を下水汚泥が占めると言われている。そこで、上記の研究においてスラローム型カセット電極 MFC が廃水を効率よく処理することが示されたので、MFC を用いて廃水処理をした場合に、活性汚泥法と比べてどの程度汚泥の発生が削減されるかに興味を持たれた。しかし、過去に MFC を用いた廃水処理において発生する汚泥の量に関する報告は存在していなかった。そこで、Ⅲ.2.5.1 項で開発した実験室スケールのスラローム型カセット電極 MFC を用いた廃水処理実験を行い、その際に発生する汚泥量を測定した。発生汚泥としては槽内に蓄積する汚泥と廃水とともに槽外に流出する汚泥の両者を考慮し、これらについて 1 日当たりの発生量を算出した(図Ⅲ.2.5.4)。また、並行して同じ廃水を処理する活性汚泥槽を運転し、そこで発生する汚泥量を算出した。その結果、MFC において発生する汚泥量は活性汚泥槽の汚泥と比べて約 1/3 程度であることが示され、MFC による汚泥削減効果が確認された。この際の MFC における電子回収率は 20%から 25%であったので、この低減効果が単に発電によるものとは考えにくい。ただし、曝気が制限された条件下で汚濁物質が分解され、その結果菌体収率が低くなったなどの複合的原因により、この程度の汚泥低減がなされたと考えられる。



図Ⅲ.2.5.4 (a)廃水処理用 MFC における汚泥発生量の考え方  
(b)MFC および活性汚泥法(AS)を用いた廃水処理における発生汚泥量



### Ⅲ.2.5.3 膜分離リアクターの検討 (積水化学工業)

これまでのMFCの検討は、主に電極およびリアクター部分に限定されているが、実際の施設に導入する場合には、前工程や後工程を含めた検討を行う必要がある。前工程については、対象排水の種類・性状により異なる可能性があるが、後工程については固液分離工程が標準的に付加されることが推測される。固液分離工程は、重力沈殿分離が一般的であるが、浮上分離や膜分離が使用される場合もある。近年分離膜の開発が進み、活性汚泥と組み合わせた膜分離活性汚泥法(MBR)を採用した実績も増加している。分離膜を使用することにより、固液分離性能(処理水質)や安定性が向上するメリットがある反面、膜に供給するポンプ等による電力費や、膜の洗浄等によるメンテナンスコストが上昇するというデメリットがある。MFCで発電する電力を、膜分離に必要な電力の一部に充当できれば、電力費の節減が可能になる。また、同時に発電菌が処理水と共に流出するのを防ぐことができるため、発電菌が高濃度に保持され、発電量やクーロン効率が向上することが期待できる。このため、MFCリアクターと膜分離システムの組み合わせの検討を実施した。

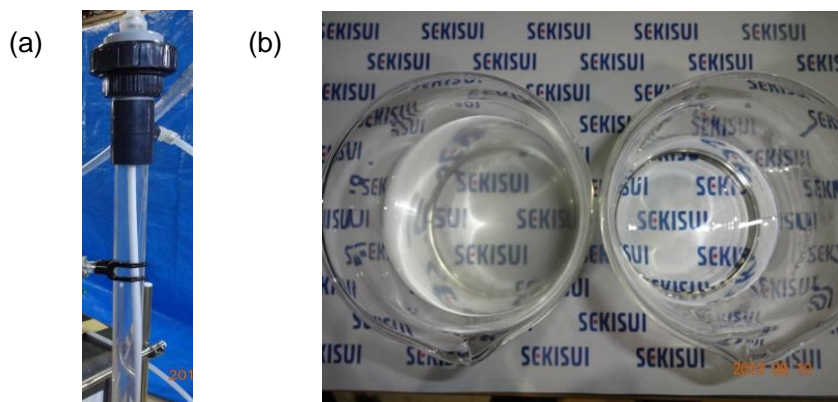
評価においては、模擬工場廃水(BOD 800 mg/L)を使用したMFC 1 Lリアクター(カセット 10枚)の7枚目近辺から予備検討用原水を採取し、バッチ試験による予備検討を実施した。使用した分離膜の仕様を表Ⅲ.2.5.1に、試験結果を表Ⅲ.2.5.2に示す。また、使用した膜分離試験装置、およびろ過前後排水の写真を図Ⅲ.2.5.5に示す。膜ろ過水の水質は良好であり、また1.0 m/dの透過流速が得られたため、膜分離に問題がないことがわかった。

表Ⅲ.2.5.1 分離膜の仕様

膜の区分	MF
膜材質	塩化ビニル系樹脂
膜の形状	中空糸膜
公称孔径	0.04 $\mu$ m
通水方向	内圧式

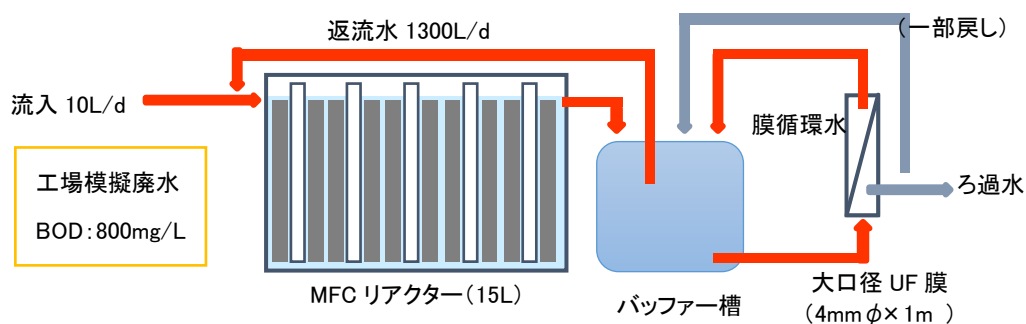
表Ⅲ.2.5.2 膜分離予備検討結果

	原水	膜ろ過水
BOD[mg/L]	5	<1
COD[mg/L]	33	<5
SS[mg/L]	17	<1



図Ⅲ.2.5.5 (a)膜分離試験装置, (b)MFC 処理水(左)と膜ろ過水(右)

次に、MFC 15 Lリアクターと膜分離試験装置を組み合わせるMFC 膜分離連続試験を実施した。原水は、模擬工場廃水(BOD 800 mg/L)を用いた。MFC 膜分離連続試験装置のフロー及び運転条件を図Ⅲ.2.5.6、MFC 膜分離連続試験装置の写真を図Ⅲ.2.5.7 に示す。運転条件は、MFC の BOD 面積負荷  $5.3 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ 、滞留時間 36 h、膜分離システムの透過流速  $0.2 \text{ m/d}$ 、膜面流速  $0.3 \text{ m/s}$ 、ろ過サイクルは  $0.3 \text{ m/d}$  で 10 min 運転後  $0.45 \text{ m/d}$  で 1 min 逆洗である。



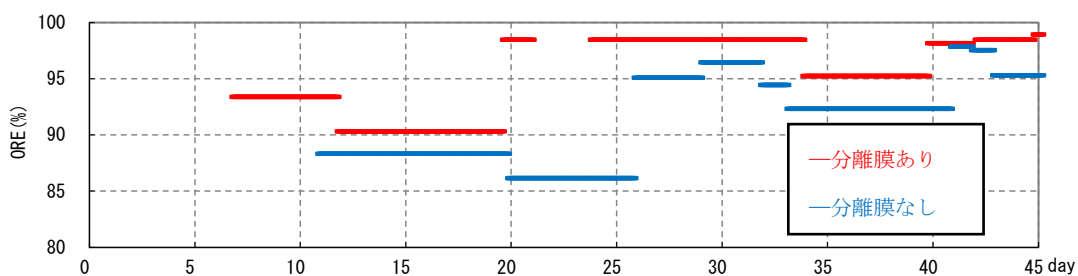
図Ⅲ.2.5.6 MFC 膜分離連続試験装置のフロー



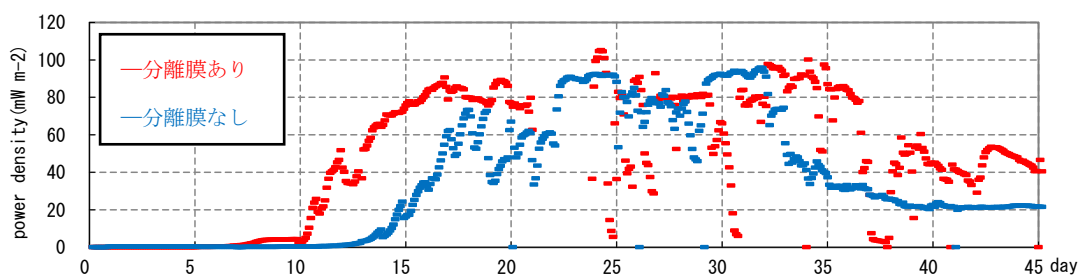
図Ⅲ.2.5.7 MFC 膜分離連続試験装置

MFC アノードの発電菌と原水中の有機物との接触効率を上げるため、返流水量を  $1300 \text{ L/d}$  に設定し膜面流速を上げて効果を確認した。運転条件は、MFC の面積負荷  $5.3 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ 、滞留時間は 36 h である。分離膜の有無による BOD 除去率の比較を図Ⅲ.2.5.8 に、発電性能の比較を図Ⅲ.2.5.9 に示す。

以上の結果より、MFC リアクターに膜分離システムを組み合わせると、BOD 除去率や発電性能の向上が確認されたが、その効果はそれほど大きくなく、膜分離装置の設置費用やランニングコストの上昇をカバーすることは難しいと考えられる。



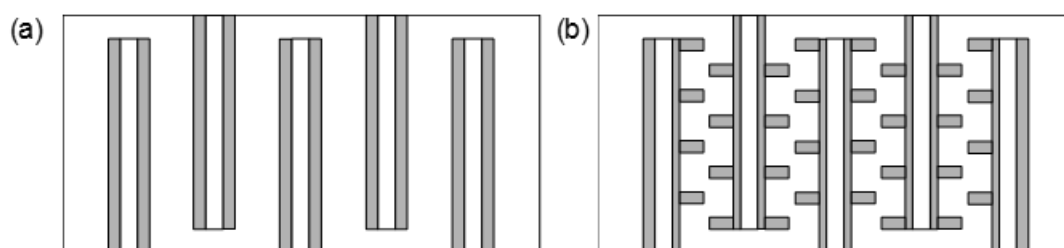
図Ⅲ.2.5.8 BOD 除去率の比較



図Ⅲ.2.5.9 出力密度の比較

### Ⅲ.2.5.4 流路・電極配置の検討

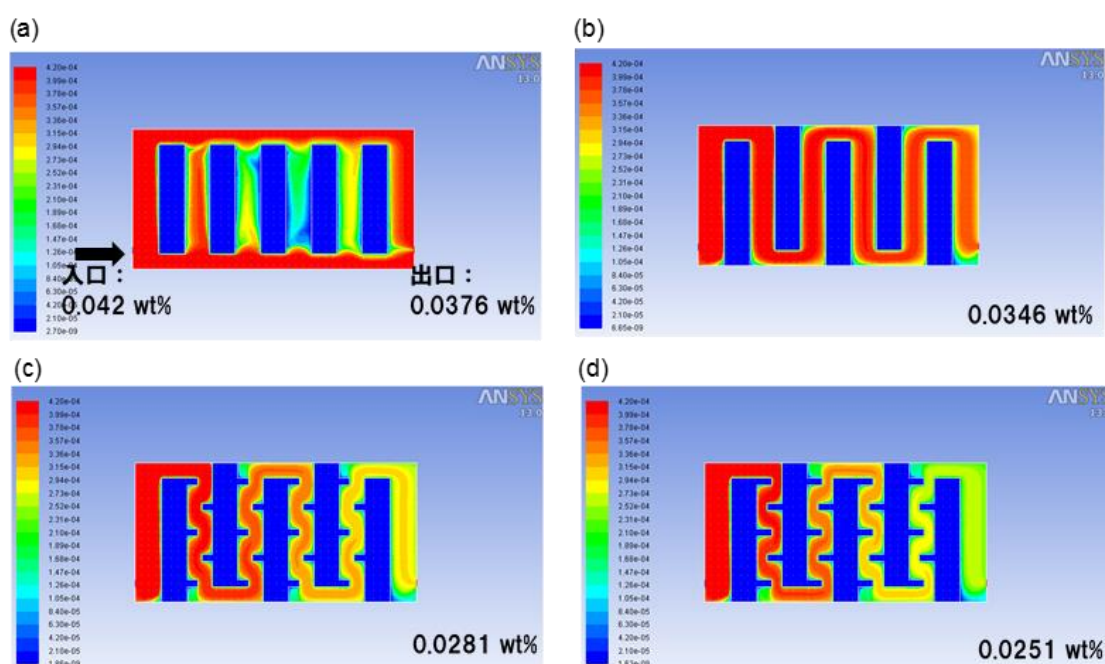
効率よく廃水と微生物膜を接触させた改良版スラローム型リアクターとして、流路を複雑化してアノード電極のマクロな比表面積を増加させたフィン付スラローム型リアクターを検討した。両方のイメージを図Ⅲ.2.5.10に示す。図Ⅲ.2.5.10(b)のフィン付スラローム型に関しても、様々なバリエーションが考えられるため、流体シミュレーションを実施した。解析条件を表Ⅲ.2.5.3に、解析結果を図Ⅲ.2.5.11に示す。



図Ⅲ.2.5.10 流路イメージ図  
(a)スラローム型, (b)フィン付スラローム型

表Ⅲ.2.5.3 解析条件

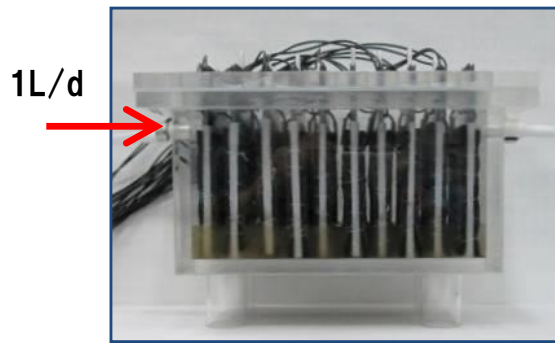
解析条件	拡散 : 質量拡散係数 $1e^{-9}[\text{m}^2/\text{s}]$
流体: 水+有機物	反応 : 電極表面において有機物が水に変化
流量: 1.3L/d	その他 : 槽流モデル、重力考慮
圧力: 出口: 0(Pa)	反応速度: 解析ソフトの初期値



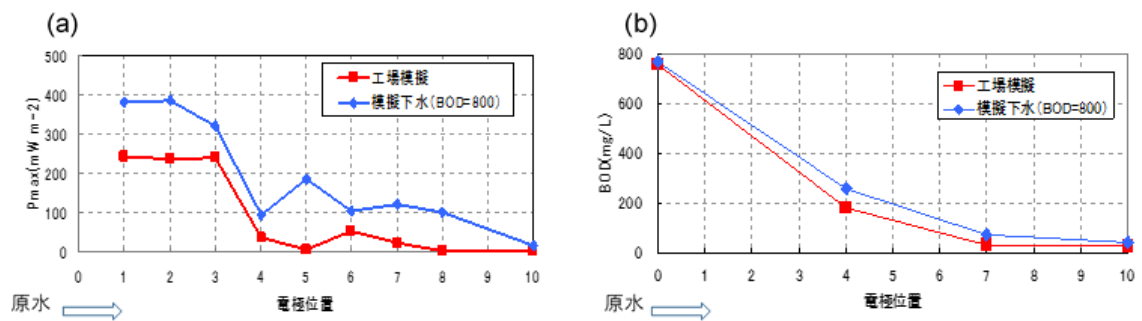
図Ⅲ.2.5.11 流体シミュレーション解析結果  
 (a)従来型, (b)スラローム型, (c)フィン付スラロームⅠ型, (d)フィン付スラロームⅡ型

これより、従来型(図Ⅲ.2.5.11(a))より、スラローム型(図Ⅲ.2.5.11(b))の方が、有機物濃度が低くなり、さらにフィン付スラロームⅠ型(図Ⅲ.2.5.11(c))、Ⅰ型よりフィンを伸ばしたⅡ型(図Ⅲ.2.5.11(d))になるに従い有機物の濃度が低下する、すなわち有機物と電極表面との接触効率が高くなっていく解析結果となっている。シミュレーションでもフィンの効果が確認できたため、実際に縦フィン型と横フィン型のリアクターを作成し、実験を実施した。

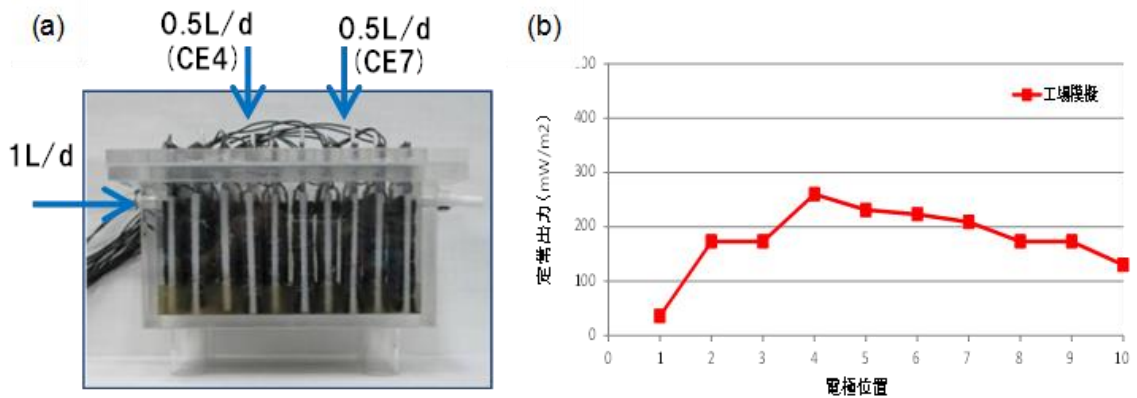
効率化のためには流路設計に加えて、排水の流入箇所工夫も別の方策として考えられる。現状のスラローム型リアクター(図Ⅲ.2.5.12)における、各電極位置での発電量( $P_{max}$ )、およびBOD値を図Ⅲ.2.5.13に示す。これより、発電量は原水流入側から数えて4番目の電極以降で低下しており、同様にBOD値も4番目の電極以降で低下している。これより、発電菌に必要な有機物が不足すると同時に発電量も低下することがわかる。このため、図Ⅲ.2.5.14(a)に示したように、同じリアクターで流入部から約1/3と2/3の距離にある電極4枚目と7枚目の位置に、各0.5 L/dの原水を流入させ負荷の均一化を図った。この結果、図Ⅲ.2.5.14(b)に示したとおり、後半部の電極においても出力を向上させることができた。



図Ⅲ.2.5.12 スラローム型リアクター



図Ⅲ.2.5.13 (a)発電量, および(b)BOD 値と電極位置との関係



図Ⅲ.2.5.14 (a) 原水流入位置の変更, (b)発電量と電極位置との関係

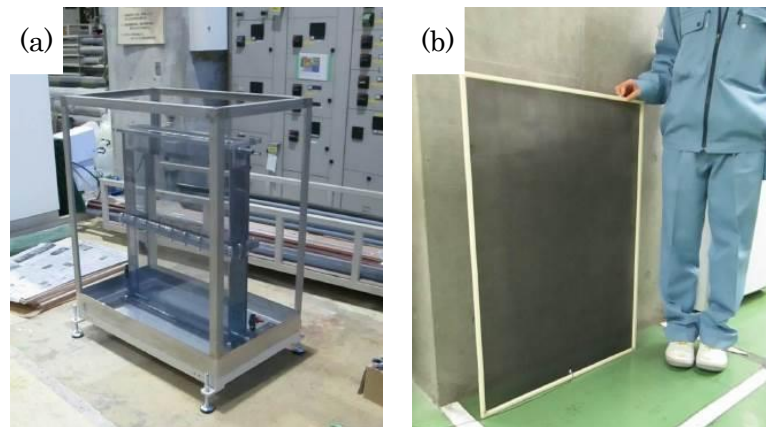
以上から得られた知見に基づき、実証試験装置に採用するリアクターの流路として平行流式を考案した。実験結果より、実証試験においては、平行流式を採用することにした。

### Ⅲ.2.6 実証試験 (積水化学工業, 東京大学, 東京薬科大学, パナソニック)

#### Ⅲ.2.6.1 スケールアップ (積水化学工業)

実証試験では、各実施項目で開発された要素技術を組み合わせ、装置の設計を行う。実証試験へのスケールアップの前段階として、実証サイズの電極 1 枚で性能評価が実施可能な中型リアクターを設計、製作、評価した。これは、本検討を通して、廃水流路の確認、及び、最適な電極設計、運転条件の検討を行い、実証装置の要求仕様を決定し、設計、製作、運転評価に展開するための基礎データを得ることが目的である。

中型リアクター、及び、使用したアノードの外観を図Ⅲ.2.6.1 に、またその仕様と運転条件を表Ⅲ.2.6.1 に示す。槽内の廃水の流れは、Ⅲ.2.5.4 項に記載した平行流方式とした。アノードは積水化学が開発した電極を用いた。一方、創電型廃水処理装置の実用化に向けて、組立容易な構成の提案は重要な課題である。左記の点をスケールアップの段階から考慮し、中型リアクター向けに電極モジュール構造を開発し導入した。



図Ⅲ.2.6.1 中型リアクターとアノードの外観  
(a)槽の外観, (b)アノード

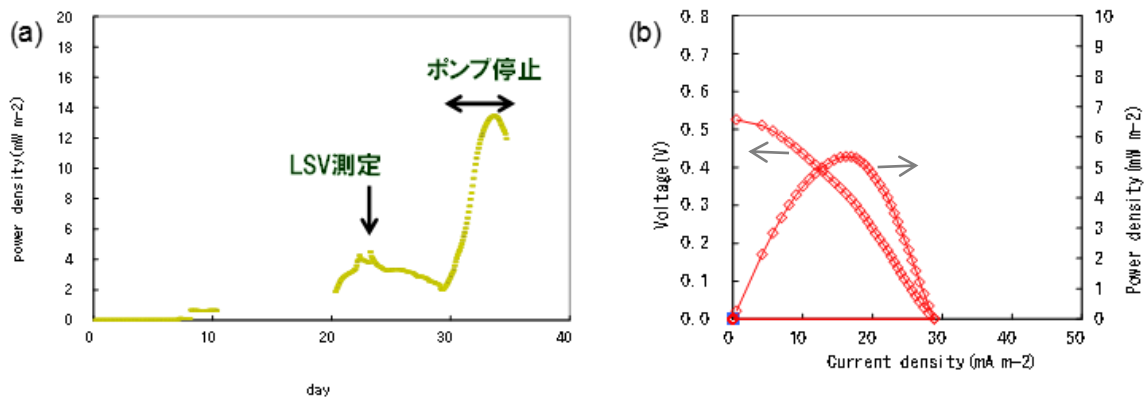
表Ⅲ.2.6.1 中型リアクターの仕様と運転条件

電極面積	約 1m <sup>2</sup>
槽容積	20L
水滞留時間	24 時間
原水の BOD	800mg/L(工場模擬廃水)
植種方法	工場の活性汚泥プロセスにおける返送汚泥を槽内に懸濁
温度制御	30℃(槽内水をヒーターで直接加温)
カソード電極	パナソニック開発品
アノード電極	積水化学開発品



(実験1)

まず、工場模擬廃水を用いた運転条件の検討を実施した。小型のリアクターと同様に、スタート時から設計負荷量(流量)を与え評価を行った際の発電性能の測定結果を図Ⅲ.2.6.2に示す。省エネルギー目標値を達成するための当面の発電性能の目標値は  $100 \text{ mW/m}^2$  であるのに対して  $14 \text{ mW/m}^2$  しか出力密度が得られなかった。この値は小型電極の  $1/20$  以下に相当する。小型と同等の発電性能が得られない原因を考察するため、槽内、及び、カソードカセット内の状態を測定した。リアクター状態の観察や、小型リアクターなどとの違いがある特徴的な現象とそこから考察できる原因の仮説を表Ⅲ.2.6.2にまとめる。



図Ⅲ.2.6.2 中型リアクターの発電性能(初期)

(a)定常出力, (b)LSV(Linear Sweep Voltammetry)測定から得られた分極曲線とパワーカーブ

表Ⅲ.2.6.2 現象と発電性能低下の仮説

現象	発電性能低下の仮説
pH が低い	pH 低いため、発電菌の活動が阻害されている
アノード・カソード間の距離が大きい (10mm 程度)	アノードからカソードへのプロトン輸送が律速になっている
ポンプ停止後に出力密度上昇	菌がアノードに付着せず、流出してしまっている
カセット内酸素濃度が低い	カソードへの酸素供給不足している
カソードの電気抵抗が大きい	カソードの内部抵抗が大きく、出力を損失している

(実験2)

実験1の結果を受け、対策検討を実施し中型リアクターにて同様に評価した。その対策と評価結果を表Ⅲ.2.6.3、図Ⅲ.2.6.3に示す。模擬廃水中に、バッファを添加し pH を調整すること、立ち上げ時に連続流にせず、高濃度の原水を槽内に添加し有機物を供給する方式を用いることで発電性能の向上が見られた。したがって、発電性能低下の原因は、pH が低く発電菌の活動が阻害されていた点、菌が流出してしまっていた点である可能性が高い。なお、処理性能には明確な差異は見られなかった。条件の改善により  $30 \text{ mW/m}^2$  まで出力密度は向上したが、目標である  $100 \text{ mW/m}^2$  には達しておらず、さらなる改善が必要であった。

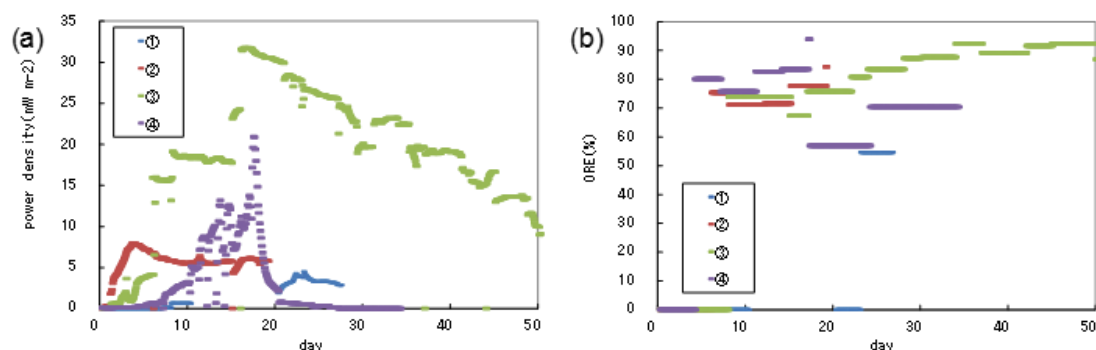


また、条件③で採用した立ち上げ方法は濃縮水を用いており、実際の立ち上げに適用することができない。

表Ⅲ.2.6.3 発電性能低下対策と評価結果(凡例:○実施、×不実施)

項目	対策	①	②	③	④
カソード電気抵抗低減	集電体設置	×	○	×	○
電極間距離低減	電極面を点接着	×	○	○	○
カソードへの酸素供給	カソード上部にブロー設置	×	×	○	○
pH 調整(バッファ添加)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 添加, 槽内 pH7-7.5	×	×	○	×
立ち上げ方法	(右記の通り)	20L/d 連続	20L/d 連続	濃縮液 添加 <sup>*1</sup>	10L 交換 <sup>*2</sup>
定常出力密度(mW/m <sup>2</sup> )		4	7	30	1

\*1: バッチ式の有機物供給方法。連続流にはせず、槽内の水を一部捨て高濃度の原水を槽内に供給した。\*2: バッチ式の有機物供給方法。槽容量の半量である 10 L を捨て、2 倍濃度の原水を 10 L 供給した。



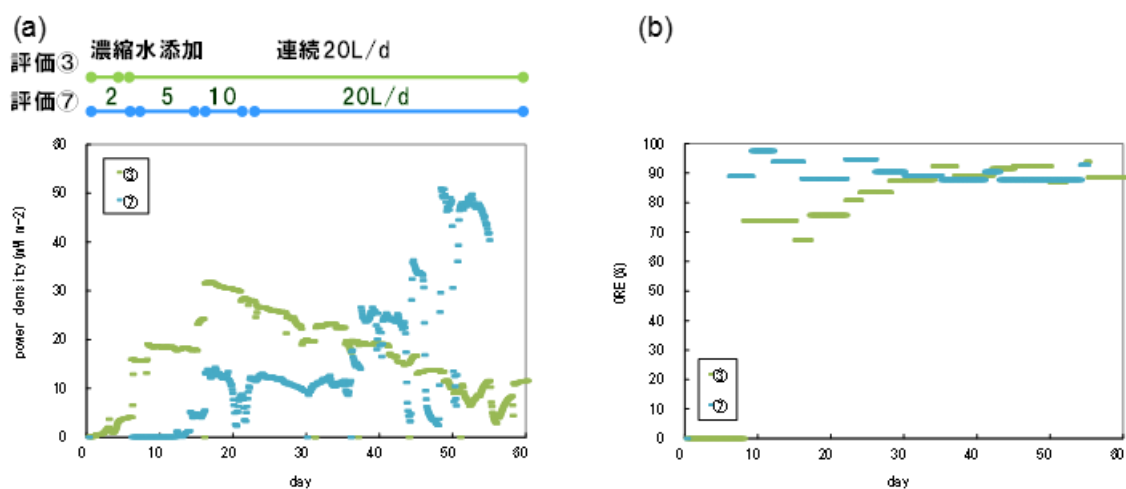
図Ⅲ.2.6.3 中型リアクターの運転経過  
(a)発電性能(定常の出力密度), (b)有機物除去率

### (実験3)

実験2で、流量が大きいことによる菌の流出が発電性能低下の原因である可能性が高いことが判明したので、次に別の方法での菌の流出防止を検討することとした。実際の廃水処理装置に適用可能な立ち上げ方法を検討した(表Ⅲ.2.6.4、図Ⅲ.2.6.4)。その結果、定常出力密度は同等以上であり、MFC 立ち上げが可能であることが分かった。

表Ⅲ.2.6.4 発電性能低下対策と評価結果(凡例:○実施、×不実施)

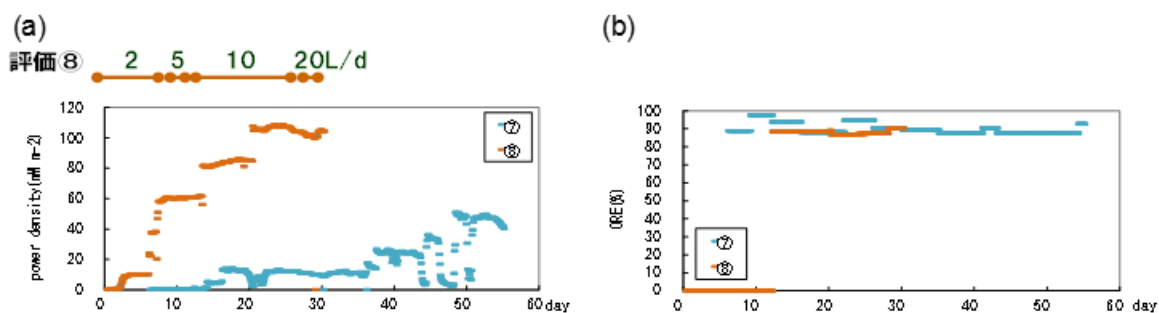
項目	対策	③	⑦
カソード電気抵抗低減	集電体設置	×	○
電極間距離低減	電極面を点接着	○	○
カソードへの酸素供給	カソード上部にブロー設置	○	○
pH調整(バッファ添加)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 添加, 槽内 pH7-7.5	○	○
立上げ方法	(右記の通り)	濃縮液添加	徐々に流量増加
定常出力密度(mW/m <sup>2</sup> )		30	50



図Ⅲ.2.6.4 中型リアクターの運転経過  
(a)発電性能(定常の出力密度), (b)有機物除去率

(実験4)

出力密度の目標値である 100 mW/m<sup>2</sup> 達成をめざし、槽内の状態から考察した(表Ⅲ.2.6.2 参照)以外の要因を検討した。対策を実施した電極を中型リアクターにて評価した(図Ⅲ.2.6.5、評価⑧)。結果、目標値を達成し、同時に、有機物除去率は活性汚泥法同等を確認した。評価⑧にて発電性能の 100 mW/m<sup>2</sup> 達成を目途付け、基本仕様を確立した。本電極、及び、運転条件を実証試験用の廃水処理設備に展開した。

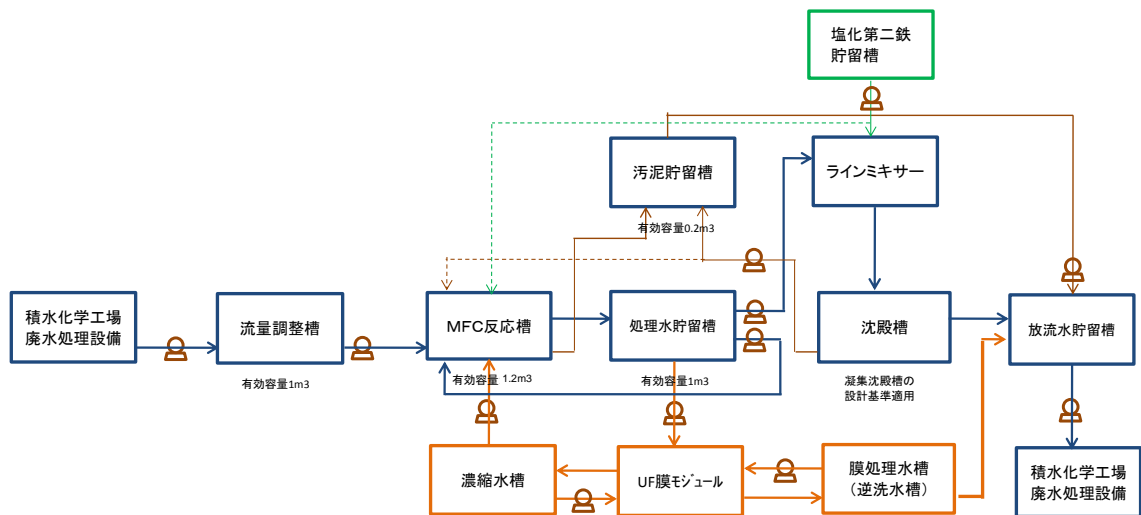


図Ⅲ.2.6.5 中型リアクターの運転経過・評価⑧  
(a)発電性能(定常の出力密度), (b)有機物除去率

### Ⅲ.2.6.2 実証設備の設計 (積水化学工業, 東京大学, 東京薬科大学, パナソニック)

本技術開発の目的は、開発した技術を集約して実証試験用の廃水処理設備を作製し、実工場廃水の処理実験をとおして技術の有効性を実証するとともに、運転技術を確認することである。中型リアクターの検討では各要素技術を盛り込み、スケールアップ可能な電極構成、運転方法の基礎技術を確認することができた。実証試験では、1m<sup>3</sup>規模の反応槽の設計、全体フローの構築を行い、実廃水を用いて性能を検証した。

実証設備は、積水化学工業株式会社の化学工場に設置した。フローチャートを図Ⅲ.2.6.6に示す。試験に使用する廃水は、工場の廃水処理設備流量調整槽から、ポンプで実証設備の流量調整槽に圧送される。流量調整槽から定量ポンプでMFC反応槽に送られ処理された後、通常は処理水貯留槽を経由して沈殿槽に送られ、溢流水は放流水貯留槽からポンプで工場の廃水処理設備に返送される。沈殿槽から引き抜かれた汚泥も同様に、放流水貯留槽からポンプで工場の廃水処理設備に返送できる。また、凝集沈殿や分離膜モジュールの運転は、バルブ操作により切り替えて実施できるようにしている。



図Ⅲ.2.6.6 実証試験設備フローチャート

先の流路検討結果から、平行流型が各電極の発電量の均一化という観点からは優れており、かつ水処理性能も許容範囲である。このため、実証装置の MFC 反応槽は、平行流方式を採用した。

MFC 反応槽は 3 分割されており、各槽には最大 20 枚のモジュールが収納できる。モジュールの間隔は一定であるため、各モジュール間を流れる流量はほぼ一定になる。また、反応槽を等容積に 3 分割し、原水供給ポンプも 3 台設置し、同時並行して原水供給量や異なった電極を試験できるように工夫した。MFC 反応槽の設計条件を表Ⅲ.2.6.5 に示す。

表Ⅲ.2.6.5 MFC 反応槽の設計条件

		設計基準	設計値
処理量(Q)	[m <sup>3</sup> /d]	-	1.5
原水BOD(C)	[mg/L]	-	800
MFC反応槽有効容積(V)	[m <sup>3</sup> ]	BOD容積負荷1.0kg/m <sup>3</sup> ・d	1.2
BOD容積負荷	[kg/m <sup>3</sup> ・d]	$Q \times C / V / 1000$	1.0
電極面積(S)	[m <sup>2</sup> ]	1m <sup>2</sup> ×60枚	60
BOD面積負荷	[kg/m <sup>2</sup> ・d]	$Q \times C / S / 1000$	20

### Ⅲ.2.6.3 実証試験 (積水化学工業, 東京大学, 東京薬科大学, パナソニック)

実証試験は 2 回に分けて実施し、それぞれにおいて異なる仕様の電極が搭載されている。以下、順次、その結果について述べる。

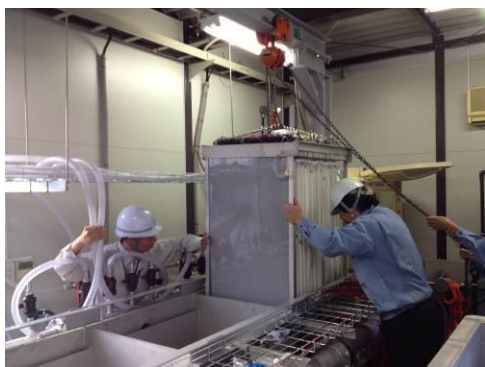
#### ■ 実証試験 1 回目

##### (電極構成)

電極モジュールの構成は、中型リアクターで用いたものと同じで、パナソニック製のカソード、積水化学製のアノードとした。

##### (ユニット構成、構造)

電極ユニットは、複数枚の電極モジュール組み付けたものとした(図Ⅲ.2.6.7)。



図Ⅲ.2.6.7 電極ユニットと設置状況

##### (立ち上げ)

最初に槽内に植種源を投入し、その後、槽を原水で満たした。立ち上げは中型リアクター

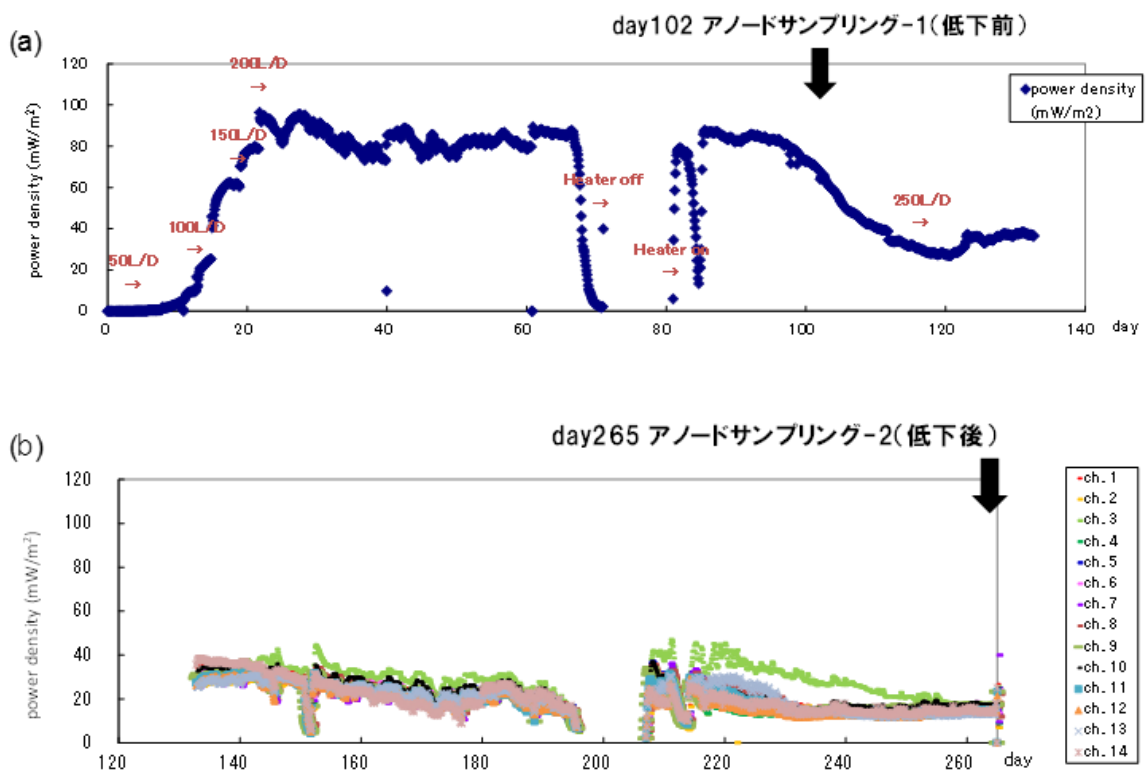
で得られた知見を活用した。

(発電性能:概要)

発電性能の測定結果を図Ⅲ.2.6.8に示す。当初は、全電極を並列に接続し測定を行った。20 日前後で出力が立ち上がり、目標である  $100\text{mW}/\text{m}^2$  近くまで発電し中型リアクターと同等の値が得られた。65 日目から 81 日目までは工場操業休止期間であり廃水の供給がなく発電は停止したが、原水が再び導入されると直ちに出力を回復した。その後、100 日目前後から 120 日目にかけて急激に出力が低下する現象が見られた。

(発電性能:低下原因の検討 1)

当初、電極を並列に接続していたため、出力低下の原因が電極毎の個別の要因によるものなのか、全電極で発生していることなのかを判別することができなかった。原因を絞り込むため、133 日目から電極1枚ずつ個別に出力を測定する方式に切り替えた。結果、電極毎の出力の差異はなく、原因は電極のばらつきによるものではなく槽全体に共通するものであることが示唆された。



図Ⅲ.2.6.8 実証試験(1回目)の発電性能

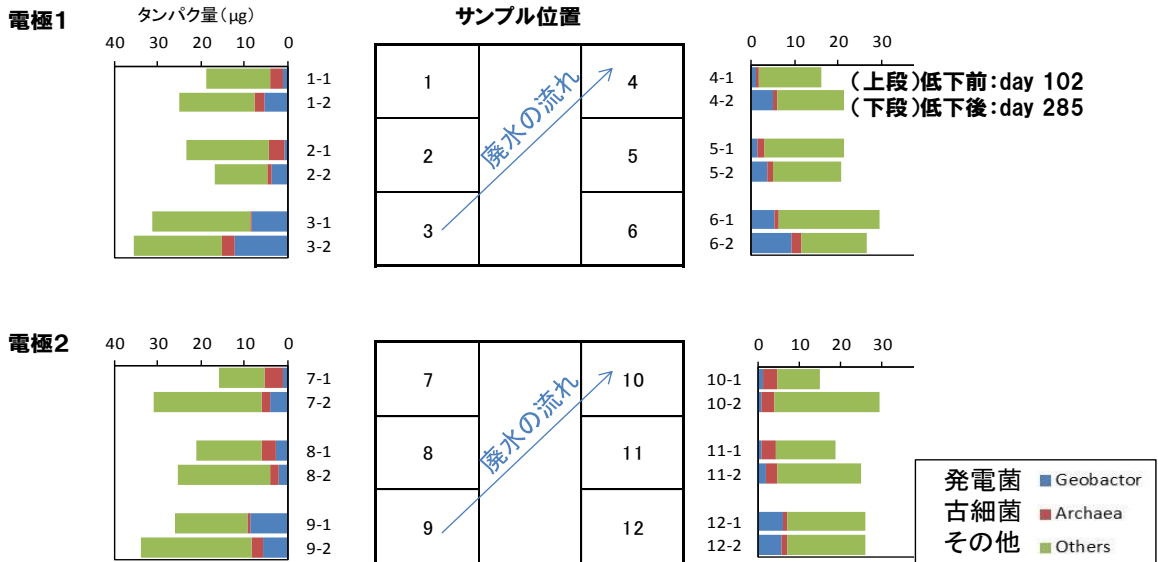
(a)全電極を並列に接続し測定した期間, (b)全電極の出力を個別に測定した期間

(発電性能:低下原因の検討 2)

さらに原因を考察するため、微生物解析の結果を検討した。評価の手法としてはアノード表面の微生物に起因するタンパク量測定と菌叢の定量 PCR を用い、微生物量とその比率を算出した(図Ⅲ.2.6.9)。結果、出力低下前後とも、発電菌は同程度存在しており発電菌の変

化は見られなかった。また、電極毎の差はなく、これは発電量の傾向と一致している。この結果から考察すると、出力低下原因の仮説として下記の2点が挙げられる。

- 1) 電極表面や槽内に存在する他の菌が電子を奪った。
- 2) デバイスの電気抵抗が上がり、電極に電子が流れにくくなった。



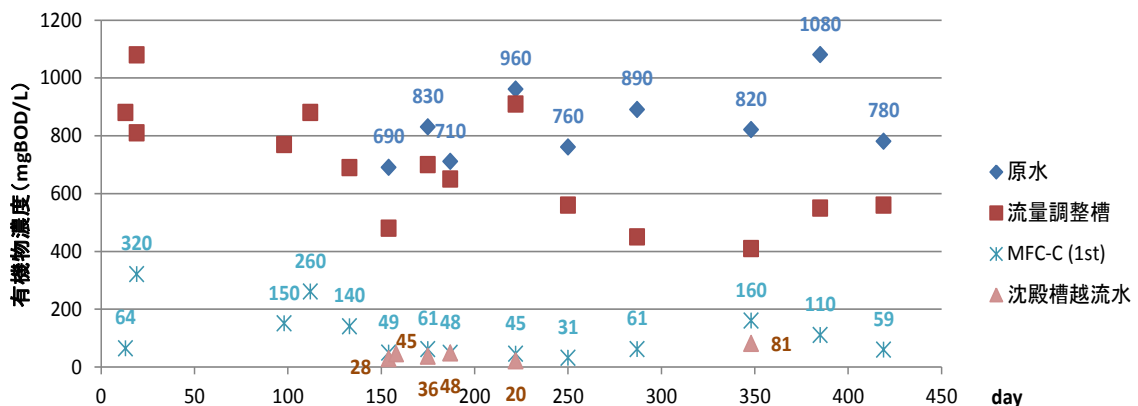
図Ⅲ.2.6.9 発電性能が低下する前後の微生物解析結果

(発電性能: 低下原因の検討 3)

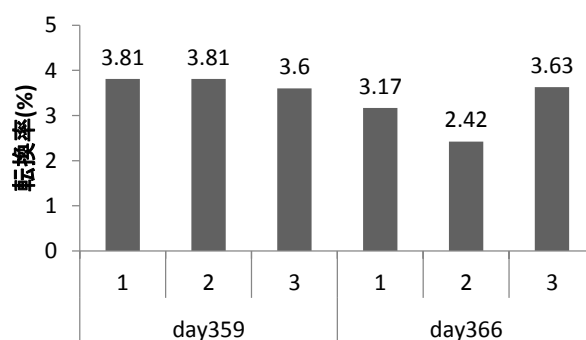
上記仮説の検証を実施した。結果、Ⅲ.2.2.5 項で検討したようなカソード内部の変化が出力低下の原因である可能性が高いと考えられる。

(処理性能)

処理性能の測定結果を図Ⅲ.2.6.10に示す。90～95%前後の処理率を長期間維持した。一方、微生物解析の結果、古細菌が検出されたことから、メタン発酵によって有機物が処理されている可能性が考えられた。メタンガス発生量を測定し、流入 COD のメタン転換率を算出したところ、4%以下であった(図Ⅲ.2.6.11)。したがって、有機物の大部分は発電菌などの電極上に存在する微生物で処理されていると考えられる。



図Ⅲ.2.6.10 有機物処理性能



図Ⅲ.2.6.11 流入 COD のメタンへの転換率

### 実証試験 2 回目

#### (電極構成)

電極は、パナソニックが開発した、Ⅲ.2.2.5 項で検討した出力低下要因を改善したカソード、積水化学が開発した 1 回目試験仕様のアノードを用いて製作した。

#### (発電性能)

実験では区画1を立ち上げたのち、他2区画は 64 日目に運転を開始した。立ち上げ方法は 1st 仕様電極の時と同じで、出力密度は問題なく立ち上った。

#### (処理性能)

活性汚泥法と性能を比較するため、沈殿後越流水における BOD 除去率を算出した。結果、119 日以降で除去率 90%以上を達成した。

#### (省エネルギー効果の検証)

省エネルギー効果を検証するため、処理水量と全体の発電量を算出した。今回の実証試験装置の実績と工場の実設備の実績とを踏まえ、消費エネルギーの削減率を算出した。電力消費削減率として、最大で 84 %の値が得られた。一時、出力が低下したが、その場合でも、電力消費削減率は 81 %であり 80 %以上を維持した。

#### (まとめ)

1 m<sup>3</sup> 規模の実証試験装置の設計、製作、運転を行い、開発した電極の性能を評価した。結果、処理性能は活性汚泥法同等を確認し、省エネルギー効果は最大で約 84 %に達し、どちらも当初の目標を達成した。成果を表Ⅲ.2.6.6 にまとめた。

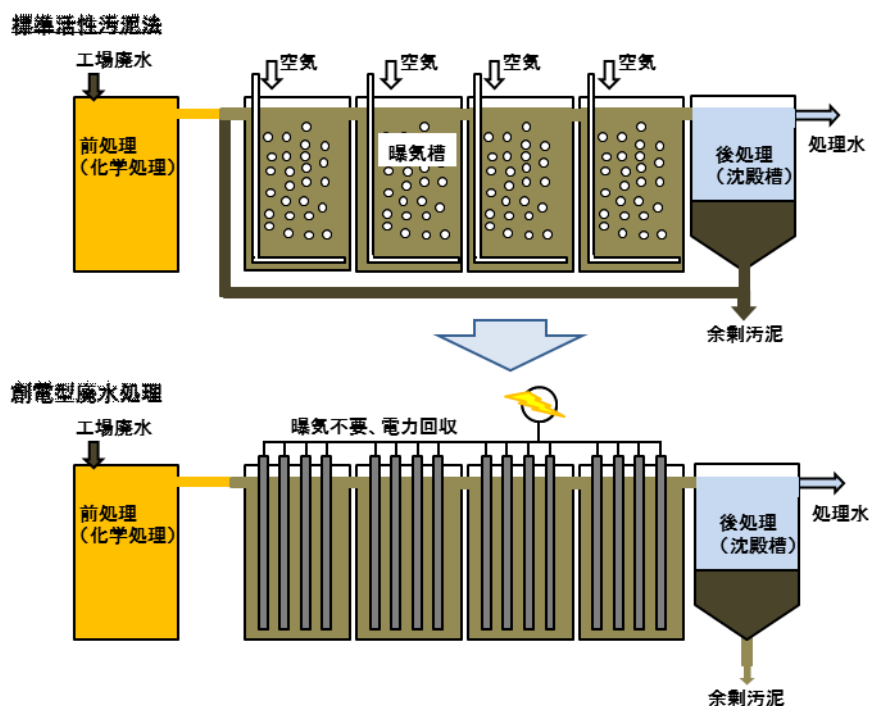
表Ⅲ.2.6.6 実証試験の成果まとめ

項目	目標値		結果
処理性能	現行の活性汚泥法と同等	BOD 除去率 90%以上	○BOD 除去率 90%以上を達成
省エネ性能	廃水処理にかかるエネルギー消費を 80%削減		○最大 84%削減を達成



#### IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

廃水処理において現在主流である標準活性汚泥法(以下、AS法)は、①前処理工程、②生物処理工程、③固液分離工程の3工程からなる。AS法では②生物処理工程に曝気槽を使用するが、本プロジェクトで開発に取り組んだ創電型廃水処理法(以下、創電法)では、生物処理槽に専用の電極を挿入することで、廃水を浄化しながら電力を得ることができる。



図IV-1. 創電型廃水処理法の製品イメージ

先進国の廃水処理で最も多く利用されているAS法は、生物処理槽における曝気にかかるエネルギー消費が大きいという課題がある。曝気に消費される電力量はAS法における電力消費の1/2以上を占め、また、国内総消費電力量に対する全国下水処理場の総電力量は約0.6%に及び、廃水処理において電力消費量を低減する技術が望まれている。また、AS法で発生する余剰汚泥は産業廃棄物として処理されるが、その量は国内で発生する全産業廃棄物の20%に相当し、同じく、低減が望まれている。

創電法では、AS法で問題となっている生物反応槽内への曝気が不要となり、さらに廃水のエネルギーから得られる電力を活用することで、80%の消費電力の低減が期待できるとともに、汚泥発生量が70%程度低減できる見込みである。これらの効果は、廃水処理を実施するユーザーにおける電力費と余剰汚泥処分費の低減に直結し、AS法に対して大幅なランニングコスト低減が見込まれる。

我々は、2020年の創電法の事業化を目指している。事業化までの開発、評価計画概要を図IV-2に示す。実用化に向けた主な課題は、耐水圧性の向上である。製品化するためには、本プロジェクトの実証試験に用いた90cmよりもより水深を大きくし、また、発電性能の維持を実現しなければ

ならない。そのためには、電極の耐圧力性能の確保とその長期耐久性の立証が必要である。電極の改良とスケールアップを行った後、電極の生産ラインの構築と想定顧客先での性能実証を実施し、実用化を目指す。

実施主体		FY16	FY17	FY18	FY19	FY20
製品サイズスケールアップ	積水化学 パナソニック 東京薬科大学 大阪大学 神戸大学	-----				
構成材料・システム最適化		-----				
長期性能確認		試験法確立 ----- 目途付け 確認 -----				
実廃水試験		製品サイズ -----				
電極の基本仕様確立			★			
品質安定性の確保	パナソニック 積水化学				-----	
生産プロセスの確立	パナソニック 積水化学			詳細仕様	生産ライン構築	
実証試験 (想定顧客ユーザーワーク)	積水化学			-----		
実用化	パナソニック 積水化学					★

図IV-2. 開発, 評価計画概要

本技術では、AS 法などの好気性生物処理に必要である曝気に動力を要しない。したがって、発展途上国等の電力が逼迫している地域において普及が見込まれる廃水処理技術と考えられる。また、省エネルギー化が可能な廃水処理技術として、先進国における既存の廃水処理システムからの置き換えについても期待できる。

# イノベーションプログラム 基本計画

平成21年4月

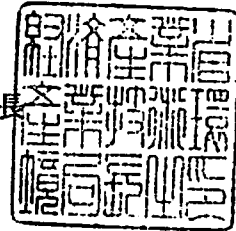
経済産業省

経済産業省

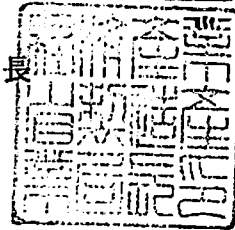
平成 21・03・25 産局第 1 号

平成 2 1 年 4 月 1 日

経済産業省産業技術環境局長



経済産業省製造産業局長



ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画の制定について

上記の件について、イノベーションプログラム実施要領（平成 1 6 ・ 0 7 ・ 2 7 産局第 1 号）第 4 条第 1 項の規定に基づき、別添のとおり制定する。

(別添)

## ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画

## 1. 目的

このプログラムは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすることを目的とする。

## 2. 政策的位置付け

第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）の一つに指定、優先的に資源配分することとされている。
- ・我が国の材料技術は、基礎研究から応用研究、素材、部材の実用化に至るまでの全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている。

「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、中長期的に取り組むべき課題として、「1.生涯健康な社会形成」、「2.安全・安心な社会形成」、「4.世界的課題解決に貢献する社会形成」、及び「5.世界に開かれた社会形成」の分野に位置付けられている。
- ・所要の措置を講じていくことが必要である事項として以下の点が指摘されている。
  - ・学際領域・融合領域における教育等人材育成、拠点形成
  - ・社会受容を促すための積極的な取り組み
  - ・知的財産確保のための戦略的な取り組み

「経済成長戦略大綱」（2006年7月財政・経済一体改革会議）

- ・「我が国の国際競争力の強化」の取り組みとして、高度な部品・材料産業やモノ作り中小企業の強化が掲げられている。
- ・「技術戦略マップ」の活用等により、ユーザー企業との垂直連携による研究開発を推進することを通して、我が国経済発展の基盤である高品質、高性能な部品・材料産業の強化を図ることが今後の取組として記載されている。

「新産業創造戦略2005」（2005年6月経済産業省）

- ・部材分野は、新産業群の創出を支える共通基盤技術として位置づけられている。
- ・「高度部材・基盤産業」の集積を形成していることが、「ものづくり」に不可欠な基盤技術のネットワーク化を通じた現場レベルでの迅速かつ高度な摺り合わせを可能としており、我が国「ものづくり」の強みの源泉となっていると記載されている。

## 3. 達成目標

- ・世界に先駆けて、ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を実現する。

- ・我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに部材産業の付加価値の増大を図る。
- ・ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る。
- ・希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す。

#### 4．研究開発内容

##### [プロジェクト]

##### ．ナノテクノロジーの加速化領域

ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を加速・促進する。

##### (1) 異分野異業種融合ナノテクチャレンジ(運営費交付金)

###### 概要

革新的なナノテクノロジーの研究開発を促進し、キーデバイスの早期実現を目指すため、大学や研究機関などの川上と企業などの川下の連携、異業種異分野の連携による提案公募によって、ナノテク実用化に向けたチャレンジを支援する。

###### 技術目標及び達成時期

マテリアル・プロセス研究、加工・計測技術研究、昨今の環境意識向上に対応した研究、社会課題を解決するための基盤技術研究に加え、異分野等の融合研究を推進することにより、2011年度までにナノテクノロジーの産業化のための基盤的技術を確立し、実用化を図る。

###### 研究開発期間

2005年度～2011年度

##### ．情報通信領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して既存技術の微細化の壁を突破し、電子デバイス・光デバイスで世界をリードするとともに、高度化された製造技術の開発を行う。

##### (1) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち新材料・新構造ナノ電子デバイス(運営費交付金)

###### 概要

従来の半導体は、性能の向上(高速化、低消費電力化、高集積化)を確保するために微細化が進められてきたが、絶縁性、誘電率等の物理的限界、微細化に伴う製造コストの増大など、集積度向上によるメリットが十分達成されなくなっている。

本研究開発では、シリコンで培った微細化技術やデバイス原理を活用しながら、シリコン材料の物理的限界を突破するための“新材料”および“新(デバイス)構造”の開発を行い、次世代の電子デバイス技術を確立する。

###### 技術目標及び達成時期

2011年度までに、産業界が10年後を見据えた将来の電子デバイスを開発する際に、産業技術として活用できるかどうかの実現可能性を見極め、また技術シーズを確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

## (2) スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト(運営費交付金)

概要

将来のエレクトロニクスにおいて中核的な基盤技術となり得るスピントロニクス技術(電子の電荷ではなく、電子の自転=「スピン」を利用する全く新しいエレクトロニクス技術)を確立するため、強磁性体ナノ構造体におけるスピンの制御・利用基盤技術を開発し、我が国が世界に誇るシーズ技術を核として、産学官の共同研究体制を構築し、将来の中核的エレクトロニクス技術における我が国の優位性の確保を図る。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピンメモリのための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

## (3) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発(運営費交付金)(再掲)

概要

窒化物系化合物半導体は、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、重要なデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減への貢献を期待されている。このため、従来の半導体材料では実現出来ない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電子素子、超高速電子素子等の作成に必要な窒化物系化合物半導体先進技術の国際競争力を強化すべく、高品質かつ大口径単結晶基板、高品質かつ大口径エピタキシャル成長技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

### 1) 基板技術(GaN、AlNバルク結晶作製技術)

- ・口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

### 2) エピ技術(エピタキシャル成膜及び計測評価技術)

- ・低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。
- ・高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現
- ・高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

研究開発期間

2007年度～2011年度



## (4) 三次元光デバイス高効率製造技術(運営費交付金)

## 概要

波面制御素子による空間光変調技術を確立し、ガラス中に三次元造形を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。この技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。

## 技術目標及び達成時期

2010年度までに波面制御素子による空間光変調技術を用いたフェムト秒レーザー照射技術等を確立し、高精度の光デバイスを高速に作製できるプロセス技術を開発する。

## 研究開発期間

2006年度～2010年度

## (5) 低損失オプティカル新機能部材技術開発\*(運営費交付金)(再掲)

## 概要

近接場光の原理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

## 技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

## 研究開発期間

2006年度～2010年度

## (6) 超フレキシブルディスプレイ部材技術開発\*(運営費交付金)(再掲)

## 概要

製造工程等の省エネルギー化を実現するために行う。従来、表示デバイスの製造には、真空蒸着と高温下での焼成と、それに伴う排ガス排水処理が必須であった。これを、ロールtoロール方式に代替することで常圧、常温下での製造を実現し、フレキシブルな薄型ディスプレイを製造する。そのために、有機TFT材料およびコンタクトプリント技術等を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

## 技術的目標及び達成時期

2009年度までに、実用化に向けた実証のための巻き取り方式ディスプレイのプロトタイプを試作する。またフレキシブルデバイス材料開発に貢献する部材ならびに薄膜複合化技術を開発し、これらをパネル化するための実用化技術を確立する。

## 研究開発期間

2006年度～2009年度

(7) 半導体機能性材料の高度評価基盤開発(運営費交付金)(再掲)

概要

情報通信機器の高機能化や低消費電力化等の要求を満たす半導体集積回路を実現するため、新たな機能性材料開発に貢献する評価基盤技術を開発し、さらに開発した機能性材料を半導体及び半導体集積回路に適用できる統合的なソリューション技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2011年度までに、半導体デバイス性能に直結する接合素子の性能性及び信頼性等、半導体製造プロセス全体を俯瞰しつつ、機能性材料開発が可能となる評価基盤技術を開発し、開発した機能性材料を用いた統合的なソリューションが提案できる材料評価基盤を構築する。

研究開発期間

2009年度～2011年度

・ライフサイエンス・健康・医療領域

ナノテクノロジーを駆使して初めて可能となる診断・治療により革新的な医療を実現する。

(1) 次世代DDS型悪性腫瘍治療システムの研究開発事業(運営費交付金)

概要

DDSのさらなる裾野の拡大、及び早期実用化を目指し、様々な外部エネルギー(機器技術)と薬剤技術を組み合わせることにより、比較的人体の深部にある臓器(肺、消化器)等のがんを対象としたDDS型治療システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

光線力学治療システムの前臨床試験の開始及び治療効果・安全性の検証と、超音波診断・治療システムの前臨床試験を可能とする薬剤及び装置の完成に関する開発を難治性がんの治療に向けて行う。

研究開発期間

2006年度～2009年度

(2) 個別化医療実現のための技術融合バイオ診断技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

我が国が有する微細加工技術・表面処理技術といったナノテク等の強みを活かし、染色体異常を高感度、高精度かつ迅速、安価で非コード領域までを検出するゲノムアレイや解析基盤技術開発を行うとともに、全自動解析システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、BAC(染色体の断片)を用いた非コード領域を含むゲノム全領域を検出できる高精度ゲノムアレイを開発する。さらに、臨床現場において、微量サンプル(数ナノグラム)から、12時間以内に染色体異常(増幅、欠失、コピー数多型等)を、低コストかつ定量性・再現性を確保して検出ができる自動染色体異常解析シス

テムのプロトタイプを開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) 分子イメージング機器研究開発プロジェクト(運営費交付金)

) 生活習慣病超早期診断眼底イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

細小血管の分子レベルでの代謝機能を非侵襲で可視化する細胞代謝イメージングを実現し、代謝異常を細胞レベルで観察することにより、生活習慣病に起因する血管病変等合併症の早期の診断・治療を図る。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、ナノテクノロジーを活用した光学基盤技術等を確立することにより、細胞やタンパク質レベルの組織診断を可能とする機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

) 悪性腫瘍等治療支援分子イメージング機器研究開発プロジェクト

概要

良性・悪性の区別も含めた腫瘍の超早期診断を実現するため、悪性腫瘍に特異的に反応する標的物質を利用することにより生体細胞の分子レベルの機能変化を抽出・検出できる機器の開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、全身で3mm、局所で1mmの分解能を有する分子イメージング機器を開発する。

研究開発期間

2005年度～2009年度

) 新規悪性腫瘍分子プローブの基盤技術開発

「概要

分子イメージングにおいて、病変を可視化する分子プローブの開発を一層強化・促進するため、分子プローブの基盤要素技術と評価システムの開発を行う。

技術目標及び達成時期

2009年度までに、新規の近赤外蛍光分子プローブ及び小動物用近赤外蛍光イメージングシステムを試作し、同システムを用いて分子プローブのがん特異性を定量的に評価するための条件等を明らかにする。

研究開発期間

2008年度～2009年度

・エネルギー・資源・環境領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して、エネルギー・資源・環境等の社会的制約を克服すると同時に我が国の強みであるナノテク関連産業・部材産業の競争力を強化する。

( ) エネルギー制約の克服

## ( 1 ) サステナブルハイパーコンポジット技術の開発 ( 運営費交付金 ) ( 再掲 )

## 概要

炭素繊維複合材料は、軽量、高強度等の優れた特性を有している。従来の熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維複合材料では成形性・加工性に乏しくリサイクルが困難であったため、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料 ( CFRTP ) の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

## 技術目標及び達成時期

2012年度までに、炭素繊維と熱可塑性樹脂との中間基材を開発し、高速成形技術、接合技術及びリサイクル技術を開発する。

## 研究開発期間

2008年度～2012年度

## ( 2 ) マルチセラミックス膜新断熱材料の開発 ( 運営費交付金 ) ( 再掲 )

## 概要

住宅やビルなどの冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を持つ壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造やポリマー複合化構造などからなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

## 技術目標及び達成時期

2011年度までに、熱貫流率 ( 熱の伝わりやすさ ) が  $0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$  以下、壁厚さ  $10 \text{ mm}$  程度の超断熱壁材料および熱貫流率が  $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$  以下、光 ( 可視光 ) 透過率が  $65\%$  以上 ( Low-E ガラス使用 )、ヘイズ率が  $1\%$  以下の超断熱窓材料を実現する。

## 研究開発期間

2007年度～2011年度

## ( 3 ) カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト ( 運営費交付金 ) ( 再掲 )

## 概要

高純度、高密度に配向した長尺の単層カーボンナノチューブの大量合成技術を開発するとともに、これを用いた従来よりも格段にパワー ( 電力 ) と蓄電量が大きなキャパシタを開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

## 技術目標及び達成時期

2010年度までに、単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術を確立するとともに、キャパシタ製造技術を確立することで、 $20 \text{ Wh/Kg}$  の高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタを開発する。

## 研究開発期間

2006年度～2010年度

## (4) 革新的省エネセラミクス製造技術開発(運営費交付金)(再掲)

## 概要

小型炉設備で生産可能な小型セラミック中空ユニットを複数組みあわせることで、これまでその製造が難しかった複雑形状かつ大型セラミクス部材を省エネで製作することができる革新的なセラミック部材製造技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

## 技術目標及び達成時期

2013年度までに、高機能化された小さな精密ブロックを立体的に組み上げ、高効率で接合、一体化をし、複雑形状や大型の部材を製造可能とする革新的なプロセス技術の基盤を確立し、高耐性部材、高温断熱部材及び高比剛性部材の試作を行う。

## 研究開発期間

2009年度～2013年度

## (5) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発(運営費交付金)(再掲)

## 概要

プラズマ等による高温を利用し瞬時にガラス原料をガラス化することにより、極めて効率的にガラスを気中で溶融(インフライトメルティング法)し省エネに資する革新的ガラス溶融プロセス技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

## 技術目標及び達成時期

2012年度までに、インフライトメルティング法により原料を溶解する技術、カレットをガラス原料として利用するため高効率で加熱する技術、カレット融液とインフライトメルティング法による原料融液とを高速で混合する技術を開発する。

## 研究開発期間

2008年度～2012年度

## (6) 高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト(運営費交付金)(再掲)

## 概要

革新的な高効率送電技術を確立して高温超電導ケーブルの実用化を促進するため、工業生産プロセスで実用化レベルに達している高温超電導線材(DI-BSCCO等)を活用し、首都圏の系統に接続する実証試験及び評価を行う。

なお、本事業は、発電用施設による電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

## 技術目標及び達成時期

2011年度までに、200MVA級の中間接続部を有した三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66KV実系統に接続して、12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

## 研究開発期間

2007年度～2012年度

## (7) 発電プラント用超高純度金属材料の開発(運営費交付金)(再掲)

### 概要

超高純度金属材料を発電設備の蒸気配管等に実用化することを目指し、高純度金属材料の高度化に向けた低コスト・量産化製造技術を開発し、実使用環境における超高純度金属材料の耐久性試験等を行う。

なお、本事業は、発電用施設における電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

### 技術目標及び達成時期

2009年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って発揮できることを確認する。

### 研究開発期間

2005年度～2009年度

## (8) セラミックリアクター開発(運営費交付金)(再掲)

### 概要

低温域かつ高効率なエネルギー変換を可能とする次世代型セラミックリアクターの実現のため、世界最高効率の燃料電池マイクロセルの集積構造技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

### 技術目標及び達成時期

2009年度までに、新電解質材料の適用や電極反応の高効率化等による、低温作動時(650以下)での出力性能を向上させる材料技術と共に、マイクロセルの集積構造化や精緻なインターフェース構築のための製造プロセス技術を開発。そして、これらの技術を統合することにより、次世代型セラミックリアクターとしてのプロトタイプモジュール実証(出力性能2kW/L等)を行う。

### 研究開発期間

2005年度～2009年度

## ( ) 資源制約の克服

### (1) 希少金属代替材料開発プロジェクト(運営費交付金)

#### 概要

ハイテク製品の製造に不可欠であり世界的な需給逼迫が懸念されるレアメタル(タングステン、インジウム、ディスプロシウム)について、ナノテクノロジー等の最先端技術を活用して、代替材料開発・使用量削減を行う。なお、平成21年度からは、これまでの対象3鉱種に加えて、白金、セリウム、テルビウム等も研究開発の対象とする。

#### 技術目標及び達成時期

タングステン、インジウム、ディスプロシウムについては2011年度までに、白金、セリウム、テルビウム等については2013年度までに、使用原単位について現状と比較して削減ができる製造技術を開発し、ユーザー企業、大学等の外部機関に対して機能

評価のためにラボレベルで提供（試料提供）できる水準に至るまでの技術を確立することを目標とする。また、製品の機能や製造コストは現状と同等であることを少なくとも維持することを前提とする。

〔対象元素〕

- ・超硬工具向けタンゲステン（W）
- ・透明電極向けインジウム（In）
- ・希土類磁石向けディスプロシウム（Dy）
- ・排ガス浄化向け白金族（Pt）
- ・精密研磨向けセリウム（Ce）
- ・蛍光体向けテルビウム、ユーロピウム（Tb、Eu）

研究開発期間

2007年度～2013年度

## （ ）環境制約の克服

### （1）グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発

概要

化学品等の製造プロセスにおけるシンプル化、クリーン化、原材料・資源の多様化・有効利用、更に、廃棄物の減容化、容易なりサイクル等を実現し、産業競争力強化、国際規制の先取りを図って、将来にわたっても持続的に化学品等を製造するための必要なGSC（グリーン・サステナブルケミストリー）プロセスを開発する。

技術的目標及び達成時期

2015年度までに、有害な化学物質を削減できる又は使わない革新的な製造プロセス及び化学品の開発、廃棄物、副生成物を削減できる革新的な製造プロセス及び化学品の開発、資源生産性を向上できる革新的な製造プロセス及び化学品の開発を行う。

研究開発期間

2008年度～2015年度

### （2）革新的マイクロ反応場利用部材技術開発\*（運営費交付金）（再掲）

概要

マイクロリアクター、ナノ空孔などの精密反応場を利用し、反応分子の自由な運動を活性種レベルで制御した革新的な化学反応プロセスと新機能材料創成技術の確立を目指す。さらに、マイクロリアクターとナノ空孔反応場の組み合わせ、各反応場とマイクロ波等のエネルギー供給手段との組み合わせにより協奏的反応場を構成し、さらなる高効率生産等を可能にする基盤技術を開発する。これらの技術の確立により、反応システムの小型化、多段プロセスの簡略化等を通じた化学産業の製造工程等の省エネルギー化を図る。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術的目標及び達成時期

2010年度までに、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体等のエネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場を構成



することにより、これまでにない革新的な化学反応プロセスを確立し、新機能材料創成技術を実現する。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬中間体などの部材を開発する。

研究開発期間

2006年度～2010年度

### (3) 循環社会構築型光触媒産業創成プロジェクト(運営費交付金)

概要

我が国で発見された光触媒技術の新産業分野開拓を目指し、サイエンスにさかのぼることにより、紫外光のみならず、可視光レベルでの性能・機能の飛躍的な向上のための技術基盤を構築する。これにより、従来では困難とされてきた医療関連分野や住宅建材分野、環境関連分野等に光触媒技術を導入し、光触媒の最大のメリットである自然エネルギーを利用した安心・安全な環境を提供できる技術を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、材料レベルで紫外光応答型2倍、可視光応答型10倍の感度向上を達成し、その高感度光触媒を適用した薄膜プロセス技術の基盤技術を確立する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

### (4) 高感度環境センサ部材開発\*

概要

ダイオキシンをはじめとする極微量有害有機物質を超高感度で安価かつ簡易に計測するために、高感度セラミックセンシング材料を用いた環境センサーを開発する。

技術目標及び達成時期

2010年度までに、ダイオキシン類、エストラジオール及びビスフェノールAについて、 $0.001 \text{ ng} \cdot \text{ml}$ の濃度において有意な電気信号として検出し得る小型・携帯型計測器に挿入可能な寸法のセンサ部材の開発を目標とする。

研究開発期間

2006年度～2010年度

### (5) 次世代高信頼性ガスセンサ技術開発(運営費交付金)(再掲)

概要

一酸化炭素中毒やガス漏れなどのガス事故を限りなくゼロに近づけるため、センサ素子のナノレベルでのメカニズム解析及び開発設計を行い、コードレスで高信頼性を有する次世代高信頼性ガスセンサ(COセンサ・メタンセンサ)を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、最先端のナノテクノロジー及びMEMS技術を導入し、電池駆動で5年以上の長寿命、高信頼性(数百ppm以下の故障率)、低コストなCOとメタンのセンサを開発する。

研究開発期間

2008年度～2011年度

### ・材料・部材領域

極めて広範囲な産業領域に波及する材料・部材領域について、ユーザー製造業等との連携（川上・川下連携）を促進し、高度な部材産業群の「すり合わせ力」を一層強化する。

#### （1）鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発（運営費交付金）（再掲）

概要

プラント、構造物や自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、最新の科学的知見を導入し、鉄鋼材料及び鋼構造体を超高機能化する基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる（1）高級鋼厚板（高強度鋼、極低温用鋼、耐熱鋼）溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術（高密度・清浄熱源溶接技術）、及び金属組織制御技術を基本とする材料技術（クリーブ破壊及び水素破壊の機構解明等を踏まえた）の開発、（2）部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適機能傾斜を付与する機械部品鍛造技術（駆動部材の信頼性確保のための耐疲労破壊特性の向上を踏まえた）の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、高級鋼厚板（高強度鋼・極低温用鋼・耐熱鋼）の溶接を予熱・後熱なしに可能とする溶接技術と材料技術を開発するとともに、傾斜機能部材の鍛造技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

#### （2）超ハイブリッド材料技術開発（運営費交付金）

概要

従来実現が不可能と考えられていた相反する複数機能（トレードオフ機能）を両立できる材料を、異種素材の組合せ（ハイブリッド化）により実現するための技術を開発する。要素技術として、異種材料間の界面挙動をシミュレーション技術等により解明し、ナノレベルよりもさらに微小な原子・分子レベルでのハイブリッド化構造・配列制御のための合成技術を開発する。従来の単一材料では実現困難であったトレードオフの性能を引き出すことで、自動車用構造材料、パワーデバイス用材料、光学材料等を出口イメージとした、高機能革新部材製造に必要な技術基盤を開発する。

技術目標及び達成時期

2011年度までに、電気・電子材料、光学材料、その他工業材料について従来材料では実現できなかった相反機能を解消するとともに、市場評価が可能な成果物を供試し、市場（ユーザー）から、客観的な実用化研究開発課題を抽出する。また、単なる相反機能の解消ではなく、相反機能を制御・実現する技術を開発する。

研究開発期間

2007年度～2011年度

## (3) 先端機能発現型新構造繊維部材基盤技術の開発\* (運営費交付金)

### 概要

電界紡糸や溶融紡糸等により創製される極微細な繊維状材料に対してナノオーダーの成形加工や微細な界面加工ならびに複合化することで材料を高機能化した革新的部材を創出する。高機能新材料を求めるユーザーの要望を満たす繊維の極微細加工と高次複合化を解決する基盤技術開発を行う。

### 技術的目標及び達成時期

2010年度までに、電界紡糸法による繊維高機能化、大型装置化技術およびナノ溶融分散紡糸法による超極細炭素繊維製造技術を開発し、これら基盤技術を活用して、高性能・高機能電池用部材、高性能・高機能フィルター用部材、高性能・高機能医療衛生用・産業用部材を開発する。

### 研究開発期間

2006年度～2010年度

## (4) 次世代光波制御材料・素子化技術\* (運営費交付金) (再掲)

### 概要

ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

### 技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

### 研究開発期間

2006年度～2010年度

## (5) 高機能複合化金属ガラスを用いた革新的部材技術開発 (運営費交付金)

### 概要

複合化金属ガラス(金属ガラスマトリックス中に第二相として微結晶や微粒子または微小空隙等を分散させたもの)を創製して、次世代高密度記録媒体、超微小モータ用部材および高強度・高導電性電気接点部材を開発する。

### 技術目標及び達成時期

2011年度までに、複合化金属ガラス合金を創製し、従来の金属ガラス単層合金の持つ優れた特徴に加えて、塑性加工性、硬磁気特性、高電気伝導性等を付与する。この複合化金属ガラスの新規特性を用いて、従来の金属ガラス単層合金では為しえなかった革新的部材の開発を行い、さらに多様な工業製品に応用することで、我が国産業の優位性を確保する。

### 研究開発期間

2007年度～2011年度

## (6) マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト\* (運営費交付金)

## 概要

マグネシウム合金部材について、製品歩留まりが高く、高耐疲労性を付与する鍛造技術の開発を行う。また、循環型素材としてのマグネシウム合金部材の特性を活かし、リサイクル材の鍛造用ビレット化に係る課題抽出を行う。当該技術開発により、マグネシウム鍛造部材製造技術の基盤を構築し、我が国の家電、自動車等の川下産業の競争力の強化に不可欠な高度部材を供給する。

## 技術目標及び達成時期

2010年度までに高強度・高耐疲労・加工性に優れたマグネシウム鍛造技術を確立する。

## 研究開発期間

2006年度～2010年度

・共通基盤領域

ナノテクノロジー、部材分野の研究開発に必要な加工・計測・解析技術等の共通基盤の確立とともに、リスク不安に対処したリスク管理手法を開発し、社会に貢献する産業化の支援を相互的に推進する。

## (1) ナノ粒子の特性評価手法開発 (運営費交付金)

## 概要

ナノ粒子のキャラクタリゼーション、計測技術の確立とともに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びナノテクノロジーによるリスク不安に対処したリスク管理手法を開発する。

## 技術目標及び達成時期

2010年度までに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びリスク評価手法を開発し、ナノ粒子のリスク評価及び管理の考え方の提言を行う。

## 研究開発期間

2006年度～2010年度

注：\*印のある研究開発プロジェクトは、2006年度より開始された新産業創造高度部材基盤技術開発の一環として実施しているもの。

## 5. 政策目標の実現に向けた環境整備（関連施策）

ナノテクノロジーは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献する重要な技術シーズである。そのため、ナノテクノロジーの研究開発と一体となった関連施策を実施することで、その成果を市場に出していくことが重要である。主な関連施策を、以下に示す。

## 〔技術戦略マップ〕

- ・NEDO及び経済産業省では、技術戦略マップを策定、毎年改訂し、ナノテクノロジー・部材分野の将来の方向性を見定めながら、合理的かつ効果的な研究開発プロジェクトを推進している。また、技術戦略マップを活用して、多様な連携（川上川下の垂直連携、異業種間の水平連携など）による研究開発を促進、支援し、当該分野の技術革新を促進している。

## 〔サンプル提供・実用化促進〕

- ・NEDOでは、実施するナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクト成果のサンプルを対象として、それらを活用した用途の開発、実用化ないし製品化提案を有する企業とのマッチングを図ることで、プロジェクトの事業化を促進する取組みを実施している。

## 〔標準化〕

- ・経済産業省では、ナノテクノロジー関連の研究開発成果を社会及び市場等に普及するための環境整備として、ナノテクノロジーの標準化活動（ISO/IEC、JIS）を推進している。

## 〔広報〕

- ・ナノテクノロジーに関する先端技術及び製品等の世界最大の展示会である「nano tech」が毎年日本で開催されている。

## 〔社会受容〕

- ・ナノテクノロジーの産業化の推進とともに、ナノ粒子のキャラクタリゼーション技術や人の健康や環境に及ぼす影響等の潜在的な課題に関する知見を蓄積する等のナノテクノロジーの社会受容に対する取組みを推進している。
- ・経済産業省では、2006年度から「ナノ粒子の特性評価手法開発」を開始し、工業ナノ粒子の有害性評価手法、また、そのリスク評価手法の確立を目標としたプロジェクトを開始しているところ。
- ・OECDでは、2006年9月、化学品委員会に工業ナノ材料作業部会（WPMN）が設置され、代表的な14種の工業ナノ材料について、試験計画の合意と試験実施を目的とする「スポンサーシッププログラム」が実施されている。スポンサーシッププログラム対象物質のうち、カーボンナノチューブ（単層、多層）、フラーレンの3物質については日本が中心となって担当し、「ナノ粒子の特性評価手法開発」等の成果で貢献している。

## 〔人材育成〕

- ・経済産業省では、「製造中核人材育成事業」を実施しており、産学連携による波及効果の高い人材育成プログラムを開発、実践している。ナノテクノロジー関連の人材育成プログラムも複数実施している。

（例）ナノテク製造中核人材の養成プログラム

概要：情報家電、燃料電池、ロボット、医療機器、バイオ等の応用分野において、その産業の基盤と創出を支える中堅企業を対象として、「基礎加工技能・技術、特殊な要素技能・技術に習熟し、製造技術の高度化を図る人材」及び「豊富なナノ加工プロセスの知識や先端機器を使いこなすノウハウ等を習熟し、製造現場の技能・技術を統括できず人材」を育成するもの。

- ・ N E D O では、我が国の産業技術の発展のため、先端分野や融合分野の技術を支える人材の育成と、人的交流の面から産学連携を促進するための「場」の形成を促進する取組みを実施している（N E D O 特別講座）。具体的には、優れた成果を生み出しつつあり、大学が技術の中核となっている研究開発プロジェクトをコアプロジェクトとし、そのプロジェクトリーダーの所属大学に拠点を設置し、関連技術の人材育成、人的交流の拡大、周辺研究の実施を行うもの。ナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクトも複数実施している。

### 〔関係機関との連携〕

- ・ ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発 - うち新材料・新構造ナノ電子デバイスプロジェクト、希少金属代替材料開発プロジェクトにおいては、文部科学省との合同会議を設置するなど、連携しつつプロジェクトを推進している。

### 〔他省庁との連携〕

- ・ 総合科学技術会議 / 連携施策群において、「ナノバイオテクノロジー」「ナノテク研究推進と社会受容」等が設置され、関係省庁と連携して実施している。

## 6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業に（運営費交付金）と記載したもの）は、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

## 7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け制定。
- (2) 平成14年2月28日付け制定。材料ナノテクノロジープログラム基本計画（平成12・12・27工総第16号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成14・02・25産局第8号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成15・03・07産局第1号）は、廃止。
- (5) 平成17年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成16・02・03産局第7号）は、廃止。
- (6) 平成18年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成17・03・25産局第4号）は、廃止。
- (7) 平成19年4月2日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成18・03・31産局第13号）は、廃止。
- (8) 平成14年2月28日付け制定。
- (9) 平成15年3月10日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成14・02・25産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成16年3月7日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成15・03・07産局第5号）は、廃止。
- (11) 平成17年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成16・03・07産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成18年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成17・03・25産局第3号）は、廃止。
- (13) 平成19年4月2日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成18・03・31産局第14号）は、廃止。
- (14) 平成20年4月1日付け、ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成19・03・20産局第1号）および革新的部材プログラム基本計画（平成19・03・19産局第4号）は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。
- (15) 平成21年4月1日付け制定。ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画（平成20・03・24産局第1号）は、廃止。



(ナノテク・部材イノベーションプログラム)

「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発」基本計画

環境部

電子・材料・ナノテクノロジー部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

### (1) 研究開発の目的

我が国の化学品製造産業は、国際的に高い技術力と競争力を有し、経済社会の発展を支えているが、地球温暖化問題、資源枯渇問題が現実化しつつある中で様々な課題を抱えてもいる。製造に際しては、有害な添加物(ハロゲン、重金属等)の利用、過度の高機能化追求にともなうプロセスの多段化等によるエネルギー消費の増大、中間工程における廃棄物の大量排出、リサイクルに不向きな製品の大量廃棄(廃棄処分場の不足等)などが問題となっている。一方、生産に必要な多くの原材料等は限られた産出国からの輸入に頼らざるを得ない状況にあり、今後、将来にわたって安定的に化学品が製造できるか危惧されている。さらに、欧州では RoHS 指令、REACH 規制の導入や中国などでの自主的な化学物質排出規制の制定など、化学品の製造に関連する環境対策が世界的に強化されている。

このような背景の下、我が国の全産業の基幹となる化学品を持続的に生産、供給していくためには、これまでの大量消費・廃棄型生産プロセスから脱却して、持続的な生産が可能なプロセスによる供給体制の構築が急がれる。そこで、これら資源、エネルギー、環境の制約問題を克服し、高機能な化学品の持続的製造を可能とする基盤技術の確立を目指し、『部材分野の技術戦略マップを活用し、将来の部材の基盤技術の方向性を見定め、材料関係者だけでなく多様な連携による基盤技術開発の支援で、部材分野の技術革新を促進すること』を目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」に位置付けて本事業を実施する。また、資源生産性向上を目指すことを提言した「新経済成長戦略のフォローアップと改訂」(平成 20 年 9 月 19 日閣議決定)においても「地球温暖化、世界的な資源の需給逼迫に対応して、抜本的な省エネ、省資源技術の確立を目指すべく、グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発を推進する。」こととされている。

本事業では、化学品の製造プロセスにおけるシンプル化、クリーン化、省エネ化、原材料・資源の多様化・有効利用、さらに、廃棄物の減容化、容易なりサイクル等を実現し、産業競争力強化、国際規制の先取りを図って、将来にわたっても持続的に化学製品を製造するために必要な新規なグリーン・サステイナブルケミカルプロセス(以下「GSC プロセス」という)の研究開発を行う。想定される研究開発課題としては、i)有害な化学物質を削減できる、又は使わない、ii)廃棄物、副生成物を削減できる、iii)資源生産性を向上できる、等による独創的で革新的な化学プロセスを通じた化学品の開発であり、これら研究開発を通じてプロセスイノベーションやマテリアルイノベーションを早期に実現することを目的とする。これにより、我が国全体の産業競争力強化と環境負荷低減を飛躍的に促進することができ、新産業創造戦略及び世界全体をリードしたサステイナブルな産業構造への貢献が期待できる。

### (2) 研究開発の目標

本研究開発では、既存の化学品等の製造において、これまでにないシンプル化(高い原子効率)、クリ

ーン化、原材料・資源の多様化・有効利用が実現できる新規プロセスや既存の化学品に比べて、使用から廃棄にわたるライフサイクルにおいて、大幅な省エネ効果、廃棄物の減容化、容易なりサイクル等が実現できる新規な化学品の製造等、今後、持続的に製造可能となるプロセスイノベーション、マテリアルイノベーションに資する革新的な研究開発を行う。研究開発目標は下記の通りである。

### 【研究開発目標】

#### ①有害な化学物質を削減できる、又は使わない革新的プロセス及び化学品の開発：

- ・ハザードの大きな溶媒、化合物等の使用に対して大幅な削減が見込めること。
- ・ライフサイクルに亘り大幅な省エネ効果、安全性、軽量化、長寿命化等に大幅な改善が見込めること。

#### ②廃棄物、副生成物を削減できる革新的プロセス及び化学品の開発：

- ・e-ファクター(副生成物量(=産業廃棄物量)/目的生成物量)の大幅な低減、廃棄物、排水量等に対して大幅な削減が見込めること。
- ・ライフサイクルに亘り大幅なりサイクル率(カスケードリサイクル含む)向上、軽量化、長寿命化等の大幅な改善が見込めること。

#### ③資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発：

- ・石油化学品、機能性化学品合成、生成物分離、副生ガス分離など、大量エネルギー消費に関わる単位操作のプロセスにおいて大幅な消費エネルギー削減が見込めること。
- ・ライフサイクルに亘り大幅なりサイクル率(カスケードリサイクル含む)、安全性、軽量化、長寿命化等の大幅な改善が見込めること。

#### ④化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発：

- ・化学品に使用される石油由来原料について、気体原料や植物由来原料等への大幅な転換・多様化が見込めること。
- ・ライフサイクルに亘り大幅な二酸化炭素の排出の抑制が見込めること。

上記項目において顕著な効果が期待できる目標を達成するとともに、他の項目(性能、コスト等)に対しても既存のプロセス、化学品の製造に対して同等レベル以上であること。なお、研究開発項目①～④に関する具体的な研究開発テーマの研究開発目標は、別紙の研究開発計画において設定するものとする。

### (3) 研究開発の内容

本研究開発は、社会状況、「グリーン・サステイナブルケミストリー技術戦略ロードマップ」を勘案して独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、「NEDO」という。)及び経済産業省が協議して政策的に重要と判断した研究開発テーマを優先的に実施する。具体的には、化学品等の製造プロセスの中でシンプル化、クリーン化、省エネ化、原材料・資源の多様化・有効利用、廃棄物の減容化、容易なりサイクル等の観点から、①有害な化学物質を削減できる、又は使わない革新的プロセス及び化学品の開発、②廃棄物、副生成物を削減できる革新的プロセス及び化学品の開発、③資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発、④化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発を委託により実施する。なお、研究開発項目①～④に関する具体的な研究開発テーマにつ

いては、別紙の研究開発計画に基づいて実施するものとする。

## 【研究開発項目】

### [委託事業]

#### ①有害な化学物質を削減できる、又は使わない革新的プロセス及び化学品の開発:

ハザードの大きな溶媒等を削減又は使わないクリーンプロセス及び有害物質を含まない化学品を開発するために必要な水溶性触媒、無溶媒、親水性溶媒、相間移動触媒、有機合成の触媒化等を利用した革新的な技術を開発する。

- ・「水、アルコール等で機能する触媒の高機能化、回収・再生及び製造に関する共通基盤技術」

#### ②廃棄物、副生成物を削減できる革新的プロセス及び化学品の開発:

副原材料、廃棄物を大幅に削減できるクリーンプロセス又はシンプルプロセスを利用した化学品を開発するために必要な酸化反応、エステル化等に利用できる新規触媒による革新的な技術を開発する。

- ・「新規な触媒固定化技術による生産プロセス技術に関する共通基盤技術」
- ・「高選択酸化技術による生産プロセス技術に関する共通基盤技術」

#### ③資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発:

石油化学品、機能性化学品合成、生成物分離、副生ガス分離等に対して大幅な消費エネルギー削減が可能となるクリーンプロセスを開発するために必要な触媒、膜材料、分離材料、吸着剤、選択加熱法による革新的な技術を開発する。

- ・「触媒を用いる革新的ナフサ分解プロセス基盤技術開発」
- ・「規則性ナノ多孔体精密分離膜部材基盤技術の開発」
- ・「副生ガス高効率分離・精製プロセス基盤技術開発」
- ・「微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発」

#### ④化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発

気体原料を高効率に有効利用する技術や植物由来原料から有用な化合物を合成するプロセス及びこれらのプロセスから得られる化合物や既存の非化石由来原料から得られる化合物から高機能化部材を製造するプロセスの開発を行い、全体システムとして高度化・多様化する革新的な技術を開発する。

- ・「気体原料の高効率利用技術の開発」
- ・「植物由来原料から化合物を合成するプロセスの開発」
- ・「高機能化部材製造プロセスの開発」

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

研究開発項目①及び②は、経済産業省により、企業、大学等(委託先から再委託された研究開発実

施者を含む。)から公募によって研究開発実施者が選定され、共同研究契約等を締結する研究体が構築され、平成20年度より委託により実施されている。平成21年度よりNEDOが本研究開発を運営・管理するに当たっては、平成20年度の進捗状況を踏まえた研究開発内容・計画及び実施体制の妥当性について、外部有識者による審議を含めた評価を行った上で最適な研究開発体制を構築し、委託して実施する。さらに、研究開発項目③及び④については、平成21年度よりNEDOが、単独ないし複数の原則、本邦の企業、大学等の研究機関(原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外の企業等(大学、研究機関を含む)の特別の研究開発能力、研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を、国外企業等との連携により実施することができる。)から公募によって研究開発実施者を選定後、共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託して実施する。

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルを最大限に活用することにより効率的に研究開発推進を図る観点から、委託先決定後にNEDOが指名する研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を研究体に置き、その下に研究者を可能な限り結集して効率的な研究開発を実施する。

## (2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、研究体毎にプロジェクトリーダーを設置し、担当範囲を明確にする。また、NEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダー等と密接な関係を維持し、更には、国内外の類似する技術開発の把握に努め、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を行う。具体的には、プロジェクトリーダー、委託先機関等からのヒアリングにより、開発目標に対する成果状況などの報告を受けるほか、自ら当該分野の国内外における技術開発動向の調査や技術マップの調査・更新を行い、次年度の業務委託の可否や、実施内容、予算規模の見直しを図る。優れた研究成果を上げている研究体に対しては、研究加速についても弾力的に対処するなど予算の効果的配分に努める。また、成果の早期達成が可能と認められた研究体については、期間内であっても研究を完了させ、実用化へ向けた実質的な研究成果の確保と普及に努める。

④「化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発」については、個別の研究体毎に、研究開発責任者を設置する。また、NEDOは、経済産業省及び研究開発責任者等と密接な関係を維持し、更には、国内外の類似する技術開発の把握に努め、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を行う。

## 3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成21年度から平成27年度までの7年間とする。なお、社会的な要請、緊急性を勘案して、新規テーマの追加、研究実施期間を延長する場合もある。

平成20年度から経済産業省により「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発」として実施された研究開発項目①、②については、平成21年度よりNEDOの事業として平成23年度まで実施する。

なお、研究開発項目②については平成23年度までに、従来のハロゲン等を含む酸化剤に対して、クリーンな酸化剤である過酸化水素の活用を実現するために三元系触媒反応プロセスを確立し、選択的な

酸化が容易な単純な構造の多官能オレフィンを高効率で酸化することで、電子部材等の商品化につながる化合物合成の実用化に目処をつけた。しかし、平成 23 年度までに実用化に目処をつけた過酸化水素酸化技術では、加水分解し易い構造の多官能オレフィンについては実用化に要する水準までは酸化できない。これら高難度基質を高反応率、高選択率で酸化する酸化触媒プロセスの開発と、これを用いた廃棄物、副生成物を抜本的に削減できる触媒反応プロセス及び化学品の開発を行うことで、ハロゲン化物等の有害な化学物質を用いないクリーンな酸化プロセスの適用範囲を一層拡大させるため、平成 24 年度に一部を追加的に実施する。

研究開発項目③-1～3については、平成 21 年度より NEDO の事業として平成 25 年度まで実施する。研究開発項目③-4については、平成 24 年度から平成 27 年度までの計画とする。「明日の安心と成長のための緊急経済対策(平成 21 年度補正予算(第 2 号))」により実施した研究開発項目④については、平成 22 年度補正予算(第 1 号)等による追加予算の充当にともない、研究内容の見直し及び期間延長を行ない平成 21 年度から平成 25 年度までの計画とする。平成 24 年度以降の目標・計画については、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、見直しを行う。

#### 4. 評価に関する事項

NEDO は、技術的及び産業技術政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、研究開発テーマ(研究開発項目①、②、③)毎に中間評価を事業開始 3 年目(5 年以上の研究期間を有する研究開発テーマ、③-4 は除く)に、事後評価を終了年度の次年度にそれぞれ外部有識者により実施する。④については、事後評価を終了年度の次年度に外部有識者により実施する。また、本研究開発全体の事後評価は全ての研究開発テーマが終了した次年度に実施する。なお、評価の時期については、当該研究開発に係わる技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

#### 5. その他の重要事項

##### (1) 研究成果の取扱い

NEDO は、研究開発実施者に対して、研究成果の広範な導入・普及に努めるものとする。

##### (2) 知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備又は標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、普及促進策としての国内外の強制規格の把握・対応、及び標準化戦略について、初期の段階からその必要性を十分に確認・検討した上で、必要な標準案の提案等を積極的に行う。

##### (3) 知的財産権の帰属

研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第 26 条の規定等に基づき、原則として、全て受託者に帰属させることとする。

なお、開発したシステムの事業化を見据えた知財戦略を構築し、適切な知財管理を実施する。

### (4) 基本計画の変更

NEDO は研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、研究開発動向、産業技術政策動向、第三者による評価結果、研究開発費の状況、当該研究開発の進捗等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うことができるものとする。

### (5) 根拠法

本プロジェクトは独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第1項第一号ニ及び第二号に基づき実施する。

### (6) その他

①～④以外の研究開発テーマで、社会状況等の緊急性を勘案して、産業競争力強化、大きな波及効果が期待できる革新的なプロセス及び化学品に関する研究開発についても実施する場合がある。なお、研究開発目標は共通基盤技術、実用化技術の確立の点から十分なものと想定されるが、本事業では数多くの独創的なGSCプロセスによる高機能な素材・部材製造に関する研究開発テーマの提案が期待されることから、適宜、最新の技術情報、有識者のヒアリング等を通じて柔軟に研究開発目標の変更を行う。また、①～④以外の研究開発を実施する場合には、①～④に対する研究開発目標と同等以上とし、顕著な効果(副生成物削減、未利用/低品位資源の活用、長寿命化、省エネ化、軽量化、リサイクル率向上等)が期待できる数値目標を立てることとする。

## 6. 基本計画の改訂履歴

平成 21 年 3 月、制定。

平成 21 年 12 月、「明日の安心と成長のための緊急経済対策(平成21年度補正予算(第2号))」に係る研究開発項目④追加による改訂。

平成 22 年 8 月、加速に伴い、(別紙)研究開発計画の研究開発項目③-2 の達成目標を修正。

平成 23 年 1 月、平成22年度補正予算第1号による研究開発項目④-4、④-5 追加による改訂。

平成 23 年 7 月、根拠法改正に伴う改訂。

平成 23 年 10 月、中間評価の結果に基づき、(別紙)研究開発計画の研究開発項目③-1 の内容を修正

平成 24 年 3 月、③-4追加による改訂。

平成 24 年 9 月、研究開発項目②の一部追加実施に伴う改訂。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①「有害な化学物質を削減できる、又は使わない革新的プロセス及び化学品の開発」

## 1. 研究開発の必要性

安全性が高い溶媒(水、アルコール等)で機能する触媒反応や無溶媒反応は、従来有機溶媒中で行われてきた化学品製造プロセスを代替することで、有害な有機溶媒の使用量を抜本的に改善することが期待できる技術である。しかしながら、これら新規反応の多くは、ラボスケールの研究開発段階にあり、工業プロセス化を進めるためには、水、アルコール等での触媒活性、選択性の更なる向上、触媒寿命・耐久性の向上、生成物と触媒との分離・精製技術及びスケールアップ等の生産システム化に向けた基盤技術の開発が必要である。

本研究開発では、水、アルコール等で機能する触媒を利用することでハザードの大きい有機溶媒等を使用しないクリーンな生産システムを実現するための共通基盤技術の確立を行う。

## 2. 研究開発の具体的内容

研究開発目標を達成するため、具体的に下記の内容の研究開発を実施する。

### (1) 水、アルコール等で機能する触媒の高機能化、回収・再生及び製造に関する共通基盤技術

現状の工業プロセスにおいては、有機合成反応は有機溶媒中で行われている。これを環境に優しい水、アルコール等の溶媒に置き換えることで環境負荷の大幅な削減が期待できる。これまでも水系で機能する新規な触媒が開発されてきているものの、その多くはラボスケールの実験結果であり、生産プロセスを指向した技術開発は十分に行われていない。本研究開発では、水、アルコール等で機能する触媒の活性、選択性及び耐久性の向上、分離回収・再生技術、触媒製造技術等の実用化生産システム化に向けた共通基盤技術を確立する。

## 3. 達成目標

### (1) 水、アルコール等で機能する触媒の高機能化、回収・再生及び製造に関する共通基盤技術

中間目標(平成 21 年度末)

#### ①水、アルコール等で機能する触媒の活性・耐久性向上

- ・水、アルコール等で機能し、反応率 70%以上、選択率 70%以上の触媒プロセスを開発する。

#### ②触媒反応プロセス、分離回収・再生技術に関する共通基盤技術

- ・反応物から触媒および生成物を効率的に回収する反応システムを設計し、ラボスケール装置により、生産量(処理量)0.1kg～10kg/日以上を達成する。

- ・水、アルコール等で機能する新規触媒反応プロセスに関する試設計、開発を行う。

最終目標(平成 23 年度末)

#### ①水、アルコール等で機能する触媒の活性・耐久性向上

- ・水、アルコール等で機能し、反応率 80%以上、選択率 90%以上の触媒プロセスを開発する。

#### ②触媒反応プロセス、分離回収・再生技術に関する実用化基盤技術



・生産量(処理量)10kg～数t/日以上を想定し、ベンチスケール装置により、実用化規模プロセスの概念設計を行う。

なお、本研究開発終了後、実用化技術として、コスト低減、早期の市場導入に対して大きな寄与が期待できる技術レベルを確立すること。

## 研究開発項目②「廃棄物、副生成物を削減できる革新的プロセス及び化学品の開発」

## 1. 研究開発の必要性

昨今、化学品を製造する有機合成反応では、e-ファクター(副生成物量(=産業廃棄物量)/目的生成物量)が10~100以上と、生産に伴う大量の廃棄物を排出しているため、無害化処理に多大なコストが掛かっている。数多くの有機合成反応を触媒反応に置き換えることが出来れば、これまでの大量の廃棄物を大幅に削減することが可能となる。しかしながら、有機合成反応を触媒反応に置き換える場合、金属活性種を担体に担持しても、十分な活性、選択性を保持できるか、担持触媒からの金属種の流出を十分抑えることができるか、といった問題の解決が重要となる。今後、ますます高まるであろう環境規制の強化に対応するためにも、より安定性、耐久性(長寿命)に優れ、かつ高活性、高選択性を有する触媒とその固定化技術及び新規な固定化触媒を用いて高付加価値生産に寄与できるプロセス技術の開発が必要である。一方、化学産業における酸化プロセスは全化学プロセスの30%を超える重要な基幹プロセスであるものの、ハロゲン等を含む有害な廃棄物を大量に排出するプロセスとなっている。したがって、これまでにないクリーンで難易度の高い高選択酸化触媒が開発されれば、精密化学品や電子材料等の普及に伴いますます需要が見込まれるオレフィン類やケトン類を含む化合物における特定の官能基を選択的に酸化することによる高付加価値な化学品が合成できるばかりでなく、大幅な廃棄物の削減を実現することができる。しかしながら、これらの高性能触媒による工業プロセス化に向けては、新規な高性能触媒の開発ばかりではなく、触媒回収・再生技術やスケールアップなど生産プロセスに関する基盤技術の確立も重要となる。

本研究開発では、(1)新規な触媒固定化技術 (2)高選択酸化触媒反応による廃棄物、副生成物を抜本的に削減できる革新的プロセス及び化学品の開発のための共通基盤技術の確立を行う。

## 2. 研究開発の具体的内容

## (1) 新規な触媒固定化技術による生産プロセス技術に関する共通基盤技術

触媒を利用した化学プロセスが抱える問題点として、触媒として利用している金属の反応場への流出、生成物への混入、また、反応で劣化した触媒(希少金属を含む)の大量廃棄が挙げられる。回収・再使用可能な新規な固定化技術により、これらの多くの問題が解決されることが期待できる。本研究開発では、高活性、高選択かつ再生可能な新規な固定化触媒の開発、さらに開発された新規な触媒を使った実用化プロセスに関する設計・開発等に関する共通基盤技術を確立する。

## (2) 高選択酸化技術による生産プロセス技術に関する共通基盤技術

オレフィン類やケトン類の選択酸化反応は化学品やポリマー材料の合成において極めて重要なプロセスであるが、選択酸化反応の制御は技術的に困難であり、多くの副生成物(廃棄物)が発生するプロセスとして知られている。ここでは、ハロゲン化物等の有害な化学物質を原料に用いない高活性、高選択性を有する酸化触媒の開発、触媒回収・再生技術やスケールアップ等の生産システム化に向けた共通基盤技術を確立する。

## 3. 達成目標

### (1) 新規な触媒固定化技術による生産プロセス技術に関する共通基盤技術

中間目標(平成 21 年度末)

#### ①高活性、高選択性かつ再生可能な新規な固定化触媒プロセスの開発

・反応率 70%、選択性 70%、溶出金属回収率 90%以上。

#### ②新規な固定化触媒によるラボスケールでの生産

・ラボスケール装置により、生産量 0.1kg～10kg/日以上を達成する。

最終目標(平成 23 年度末)

#### ①高活性、高選択性かつ再生可能な新規な固定化触媒プロセスの開発

・反応率 80%、選択性 90%、溶出金属回収率 98%以上。

#### ②新規な固定化触媒による実用化プロセスに関する設計・開発

・生産量 10kg～数t/日以上を想定し、ベンチスケール装置により、実用化規模プロセスの概念設計を行う。

### (2) 高選択酸化技術による生産プロセス技術に関する共通基盤技術

中間目標(平成 21 年度末)

#### ①高性能触媒による高活性、高選択性酸化触媒プロセスの開発

・オレフィン類やケトン類に対する選択酸化触媒プロセスを開発する。なお、オレフィン類の選択酸化反応では反応率 70%以上、選択率 70%以上、ケトン類の選択酸化反応では反応率 60%以上、選択率 70%以上とする。

#### ②高性能触媒によるラボスケールでの生産

・ラボスケール装置により、生産量 0.1kg～10kg/日以上を達成する。

最終目標(平成 23 年度末)

#### ①高性能触媒による高活性、高選択性酸化触媒プロセスの開発

・オレフィン類やケトン類に対して高活性、高選択性を有する酸化触媒プロセスを開発する。なお、オレフィン類の選択酸化反応では反応率 80%以上、選択率 90%以上、ケトン類の選択酸化反応では反応率 80%以上、選択率 80%以上とする。

#### ②高性能触媒による実用化プロセスに関する設計・開発

・生産量 10kg～数t/日以上を想定し、ベンチスケール装置により、実用化規模プロセスの概念設計を行う。

なお、本研究開発終了後、実用化技術として、コスト低減、早期の市場導入に対して大きな寄与が期待できる技術レベルを確立すること。

平成 24 年度追加実施目標(平成 24 年度末)

#### ①高性能触媒による高活性、高選択性酸化触媒プロセスの開発

・加水分解し易い構造の多官能オレフィンに対して高活性、高選択性を有する酸化触媒プロセスを開

発する。これら高難度基質の選択酸化反応では反応率 80%以上、選択率 80%以上とする。

### ②高性能触媒による実用化プロセスに関する設計・開発

- ・生産量 10kg～数t/日以上を想定し、ベンチスケール装置により、実用化規模プロセスの概念設計を行う。

なお、本研究開発終了後、実用化技術として、コスト低減、早期の市場導入に対して大きな寄与が期待できる技術レベルを確立すること。

## 研究開発項目③-1「資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発」 (触媒を用いる革新的ナフサ分解プロセス基盤技術開発)

### 1. 研究開発の必要性

国内の化学プラントにおける省エネ率は世界最高レベルであるものの、全産業に占めるエネルギー使用量は鉄鋼業に次ぐ27%と膨大であり、1980年代以降は横這い状況が続いている。将来、国内の化学産業が持続的に高付加価値な機能性化学品(セミバルク、ファイン)を安定的に供給するためには、クリーンかつ省エネで石油化学品を生産できる革新プロセスの開発が求められている。現在、ナフサ接触分解は、エチレン、プロピレン、ブテン、BTX等の石油化学品を生産するための基幹プロセスであるが、現行技術では原料ナフサを850℃程度の熱分解で生産しており、この工程での消費エネルギー量は、化学産業全体の16%(石油化学産業全体の30%強)を占めるに至っている。今後も長期間にわたりエチレンセンターが日本のみならず世界的に化学産業の中核的存在であると見込まれることから、ナフサ接触分解プロセスにおいて、革新的な高効率、省エネルギー化を図り、資源生産性の向上を図ることができるようになれば、2030年以降においても化学産業における産業競争力、国際競争力の強化に繋がることが期待できる。

本研究開発では、ナフサ分解プロセスにおいて、石油化学品の高収率、高選択、省エネルギー化が可能となる新規な触媒を用いた接触分解プロセスに関する基盤技術を確立する。

### 2. 研究開発の具体的内容

研究開発目標を達成するため、具体的に下記の内容の研究開発を実施する。

#### (1) 触媒を用いる革新的ナフサ接触分解プロセス基盤技術開発

現状のナフサ分解では、触媒は用いられておらず、熱分解でエチレン、プロピレン、ブテン、BTX等を生産している。このプロセスは、反応温度、反応時間、反応器の構造、フィード、経済性等により収率、選択性が制限され、大量のエネルギー投入を必要とするため、このプロセスを、触媒化プロセスに転換することができれば、収率や選択率の改善、プロセスの低温化(省エネルギー化)等が期待できる。これまでも、国内外で触媒の開発やナフサ接触分解の研究開発が行われてきたものの、実用化に至ったものはなく商用生産プロセスを指向した技術開発は十分に行われていないのが現状である。

本研究開発では、新規触媒によるナフサ接触分解を実用化するため、触媒の開発・評価を行い、触媒の性能向上、触媒劣化メカニズムの解析を行うことにより長寿命化を図る。ナフサ分解から得られる目的生成物に対する収率、選択性を高めるとともに、プロセス内のエネルギーバランス、分離工程におけるエネルギー消費の最適化を行い、既存熱分解プロセスを代替し得る、触媒を用いたナフサ分解プロセスに関する基盤技術を確立する。

### 3. 達成目標

#### (1) 触媒を用いる革新的ナフサ接触分解プロセス基盤技術開発

中間目標(平成23年度末)

##### ①高性能触媒による高収率、高選択プロセスの開発

・エチレン、プロピレン、ブテン、BTXの収率の向上及び低温化を図れる触媒プロセスを開発する。

上記 4 成分への収率 63%以上(対熱分解比 5%向上)又は、エチレン、プロピレンへの収率47%以上(対熱分解比 5%向上)とする。

- ・触媒寿命については、再生後の初期活性 90%以上を達成する。

### ②高性能触媒によるラボスケールでの生産

- ・ラボスケール装置により、ナフサ処理量 0.2kg/日以上を達成する。

これらにより平成 23 年度末までに、触媒の開発・評価を行い、ナフサ接触分解プロセスにおける最適な反応運転条件を決定する。

最終目標(平成 25 年度末)

### ①高性能触媒による高収率、高選択プロセスの開発

・エチレン、プロピレン、ブテン、BTX の収率の向上及び低温化を図れる触媒プロセスを開発する。上記 4 成分への生成物収率 66%以上(対熱分解比 10%向上)又は、エチレン、プロピレンの収率 50%以上(対熱分解比 10%向上)とする。

- ・触媒寿命については、再生 5 回後の初期活性 90%以上を達成する。

### ②高性能触媒による実証規模プロセスに関する設計・開発

- ・国内外で稼動している実プラントレベルの生産量を想定し、セミベンチスケール装置により、ナフサ処理量:1kg/日以上を達成し、実証規模プロセスの概念設計を行う。

なお、本研究開発終了後、実用化技術として、コスト低減、早期の市場導入に対して大きな寄与が期待できる技術レベルを確立すること。

## 研究開発項目③-2「資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発」 (規則性ナノ多孔体精密分離膜部材基盤技術の開発)

### 1. 研究開発の必要性

産業分野の約30%超のエネルギーを消費している化学・石油関連産業では、そのうち約40%のエネルギーが、分離精製を目的とする蒸留プロセスで消費されている。そのために両産業分野では長年に渡って効率改善に努力し、その技術は高度に洗練され、改善効果は頭打ちになっている。こうした背景にあって、更なる大規模な省エネルギー化を達成するためにはアプローチ手法の革新的転換が必要であり、それを可能にするための現在考え得る唯一の技術が膜分離技術である。

本研究開発では、

耐水性・耐熱性が必要なイソプロピルアルコール／水混合物分離

耐水性・耐酸性・耐熱性が必要な酢酸／水混合物分離

を対象とし、以下の基盤技術研究開発を行う。

#### ③-2-1 分離膜製造基盤技術及び分離膜評価技術の開発

#### ③-2-2 分離膜用セラミックス多孔質基材の開発

#### ③-2-3 モジュール化技術の開発

#### ③-2-4 試作材の実環境評価技術の開発

### 2. 研究開発の具体的内容

#### ③-2-1 分離膜製造基盤技術及び分離膜評価技術の開発

##### (1) 分離膜製造基盤技術

- ・ 産業界において実用化ニーズの高いイソプロピルアルコール脱水用分離膜を開発する。併せて、工業的ニーズの高い酢酸脱水用分離膜を開発する。
- ・ モルデナイト(MOR型)、ZSM-5(MFI型)、Y型(FAU型)などの各種規則性ナノ多孔体膜合成条件を把握する。
- ・ 水熱反応の条件(反応温度、圧力、原料組成、濃度等)と規則性ナノ多孔体膜の構造及び化学組成の関係を系統的に調べるとともに、膜の分離能を評価し、両者を比較検討して膜組織を制御するための要因を明らかにする。
- ・ 構造欠陥の無い分離膜の合成方法を確立する。
- ・ 工業需要を満たすため、製造設備の制御因子(反応器の形状、加熱・加圧方法、結晶母液供給方法等)について明らかにする。

##### (2) 分離膜評価技術

- ・ 分離特性を支配する構造要因を明らかにする手法を開発する。
- ・ 複雑な膜形状を有する分離膜の構造解析を支援するため、評価用モデル膜を用いて、分離膜の構造と分離特性の関係を明らかにする。
- ・ 分離膜の分離・吸着特性評価法を開発し、膜製造プロセスの開発を支援する。

#### ③-2-2 分離膜用セラミックス多孔質基材の開発



### (1)セラミックス多孔質基材の開発

研究開発項目③-2-1 の目標分離性能を達成するために必要なセラミックス多孔質基材特性(形状精度、表面平滑性、蒸気透過性、最適細孔径、機械的強度、耐化学特性等)を満足する基材を開発する。具体的には、原料の材質、粒子形状及びサイズ等の適正化と基材作製技術(成形、乾燥、焼成)等の改良により、高性能なセラミックス多孔質基材を開発する。

### (2)多チャンネル型セラミックス多孔質基材の開発

膜を集積化した構造を持つ多チャンネル型大面積基材を作製するための押出成形、乾燥、焼成技術を開発する。安定した基材品質を維持する作製プロセスと評価技術を開発する。多チャンネル型基材においては内管被覆となるので、内管被覆がしやすい(種結晶が付きやすい)内管表面の構造を具備する多チャンネル型基材を開発する。

## ③-2-3 モジュール化技術の開発

### (1)管状基材を用いたモジュール化技術

研究開発項目③-2-1、③-2-2 で開発された分離膜部材を用い、接合部の熱的・化学的・物理的安定性を保持しつつ管状基材を複数本束ねたマルチエレメントの格納形状を決定し、その有効利用率を最大にする格納容器設計をする。

### (2)多チャンネル型基材を用いたモジュール化技術

多チャンネル型基材を格納容器に接続できるよう、使用条件に耐えるシール材料の選定及びその塗布方法を開発する。

### (3)膜分離解析モデル・シミュレーターの開発

膜のモジュール化技術を支援するための膜分離解析シミュレーターの開発のため、規則性ナノ多孔体分離膜の分離膜特性(透過度、分離係数)を定量的に表現するための数学モデルの導出、分離膜特性の透過分離挙動の解析シミュレーターの開発、膜モジュールシミュレーターの開発、膜モジュール設計手法と設計ツール等の開発を行う。

## ③-2-4 試作材の実環境評価技術の開発

### (1)実環境評価検討

- ・ 分離膜モジュールを、実稼動しているイソプロピルアルコール製造プラントの蒸留塔に付設し、イソプロピルアルコールと水の混合実流体で分離試験をし、実用化技術の確立に向けての課題を抽出する。その際、分離流体の組成、単位面積あたりの処理量、モジュールの差圧等の実用化技術の開発に必要なデータを集積する。
- ・ 連続運転試験に必要な監視・データ記録システムを構築し、上述のデータを収集する。
- ・ 得られたデータを基に、プロセスシミュレーションを用いて分離プロセスを設計する。

### (2)プロセスシミュレーターの開発

- ・ 既存の蒸留システムに分離膜モジュールを組み合わせたHybridなプロセスシステムを対象とし、エネルギー効率や機器サイズを検討可能なプロセスシミュレーターを開発する。
- ・ 開発したプロセスシミュレーターを用いて、開発目標とする分離膜を想定した高効率・低コスト分離プロセスを設計する。

- ・ 既存の蒸留システムのプロセスフローに対して、分離膜モジュールを導入した場合のプロセスフローを想定し、ケーススタディーにより、分離膜モジュールを組み合わせた場合のプロセスシステムの最適化や、既存の蒸留プロセスと比較した場合の省エネ化、低コスト化を定量的に評価する。
- ・ 上記検討結果を適宜膜開発にフィードバックし、分離膜製造基盤技術の最適化を図る。

### 3. 達成目標

#### ③-2-1 分離膜製造基盤技術及び分離膜評価技術の開発

##### (1) 分離膜製造基盤技術

イソプロピルアルコール脱水用:

中間目標(平成 23 年度末)

現行の市販無機膜の水の透過度が $1\sim 8\times 10^{-9}$  mol/(m<sup>2</sup> s Pa)であるのに対し、同透過度が $8\times 10^{-8}$  mol/(m<sup>2</sup> s Pa)、分離係数 100 以上の分離膜を工業的に製造できる技術を開発する。

最終目標(平成 25 年度末)

水透過度が $2\times 10^{-7}$  mol/(m<sup>2</sup> s Pa)、分離係数 200 以上の分離膜を工業的に製造できる技術を開発する。

また併せて、研究開発項目③-2-2 で開発される多チャンネル型管内壁の内部表面上に規則性ナノ多孔体薄膜を製膜することにより分離膜を製造する技術を開発する。

酢酸脱水用:

中間目標(平成 23 年度末)

水透過度 $8\times 10^{-8}$  mol/(m<sup>2</sup> s Pa)、水と酢酸の分離係数が 100 以上であり、耐酸性を有する分離膜を工業的に製造できる技術を開発する。

最終目標(平成 25 年度末)

水透過度 $2\times 10^{-7}$  mol/(m<sup>2</sup> s Pa)、水と酢酸の分離係数が 200 以上であり、耐酸性を有する分離膜を工業的に製造できる技術を開発する。

##### (2) 分離膜評価技術

中間目標(平成 23 年度末)

- ・ 膜組織と分離特性の関係及び膜組織と合成条件の関係を明らかにする。
- ・ 開発材の支援を可能とする評価法を確立する。
- ・ 分離特性を支配する構造欠陥を評価するための評価法を確立する。

最終目標(平成 25 年度末)

- ・ 評価技術を高度化し、より微細な構造解析を可能とする技術を確立する。
- ・ 実環境評価によって試作材に関する技術課題を抽出し、それらを解決するための指針を示す。

#### ③-2-2 分離膜用セラミックス多孔質基材の開発

##### (1) セラミックス多孔質基材の開発

中間目標(平成 23 年度末)

- ・ 水熱法等のケミカルプロセスによる分離膜製膜技術及びイソプロピルアルコール及び酢酸の脱水プロセス条件下で大幅な強度劣化の生じない多孔質材料を開発する。

- ・ 目標分離性能を実現する分離膜を担持可能な細孔径、蒸気透過性、表面平滑性、耐化学特性を有する基材を開発する。

最終目標(平成 25 年度末)

- ・ イソプロピルアルコール及び酢酸の脱水分離膜として長期使用した際に、大幅な強度劣化が生じない多孔質材料を開発する。

### (2)多チャンネル型セラミックス多孔質基材の開発

中間目標(平成 23 年度末)

- ・ 内管表面構造を制御する製造技術を開発する。
- ・ 多チャンネル型基材 長さ1m(管状 外径 30mm)当たり 0.2 m<sup>2</sup>の膜面積を実現する。

最終目標(平成 25 年度末)

- ・ 種結晶が均一に付着しやすい内管表面構造を有する多チャンネル型基材の製造技術を開発する。
- ・ 多チャンネル型基材 長さ1m(管状 外径 30mm)当たり 0.3m<sup>2</sup>の膜面積を実現する。

## ③-2-3 モジュール化技術の開発

### (1)管状基材を用いたモジュール化技術

中間目標(平成 23 年度末)

マルチエレメントモジュールを想定し、モジュール化した際に、研究開発項目③-2-1、③-2-2 で開発する分離膜性能(透過度、分離係数)を最大限に引き出すためのマルチエレメント格納容器の設計をし、その構造実現に必要な要素技術を見極める。

最終目標(平成 25 年度末)

検討項目③-2-1 で開発する分離膜特性(透過度、分離係数)の 60%以上を有するモジュール製造のための基盤技術を確立する。

### (2)多チャンネル型基材を用いたモジュール化技術

中間目標(平成 23 年度末)

使用条件に耐えるシール材料を選定する。

最終目標(平成 25 年度末)

管状型分離膜と同等のシール性能を確認する。

### (3)膜分離解析モデル・シミュレーターの開発

中間目標(平成23年度末)

- ・ 分離膜の簡易的な1次元モデル・シミュレーターを開発する。
- ・ 膜モジュールシミュレーター開発のベースとなる3次元解析用モデルを開発する。

最終目標(平成25年度末)

- ・ 膜モジュールの設計手法を開発し、設計ツールを開発する。
- ・ 管状型膜モジュールシミュレーター及び多チャンネル型膜モジュールシミュレーターを開発する。

## ③-2-4 試作材の実環境評価技術の開発

### (1)実環境評価検討

中間目標(平成 23 年度末)

- ・ 開発する分離膜モジュールの性能を十分に引き出せるサイズを確定し、配置場所、流体の流路方向、気体状態を維持するための効率的な保温、液体発生時の対策等を考慮し、モジュールの製造とリンクさせた実環境試験フローを設計する。

最終目標(平成 25 年度末)

- ・ 200 時間連続運転によるモジュールの耐用性能評価を可能とするシステムを開発し、実用化のための技術課題を抽出する。
- ・ プロセスシミュレーションにより、膜分離システムを組み込んだ分離プロセスを提案する。

(2)プロセスシミュレーターの開発

中間目標(平成 23 年度末)

- ・ 既存の蒸留システムに分離膜モジュールを組み合わせたHybridなプロセスシステムを対象としたプロセスシミュレーターを開発する。

最終目標(平成25年度末)

- ・ 既存の蒸留システムとのエネルギー効率、コストの比較を容易に行えるようなシステムを開発する。
- ・ プロセスシミュレーターを用いて、イソプロピルアルコール系を対象として最適な高効率・低コスト分離プロセスを設計する。

なお、本研究開発終了後、実用化技術として、コスト低減、早期の市場導入に対して大きな寄与が期待できる技術レベルを確立すること。

研究開発項目③-3 「資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発」  
(副生ガス高効率分離・精製プロセス基盤技術開発)

### 1. 研究開発の必要性

現在、産業分野から排出される 3.2 億t-CO<sub>2</sub>/年のうち、約 20%が化学工業から排出されている。化学プロセスでは、加熱や蒸留に伴う燃料消費での CO<sub>2</sub> 発生がある一方で、化学反応に伴う低濃度の副生ガスとしての CO<sub>2</sub> 発生がある。いずれの場合においても、希薄、低温、低圧レベルで発生するため、CO<sub>2</sub> の分離は化学吸着、物理吸着、膜分離等により技術的に回収することが可能であっても、従来技術では経済性の観点から困難を極めている。同様に他の化学プロセスでも低濃度の副生ガスとして N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 等が発生している場合があり、これらの低濃度の副生ガスを取り除くために大量のエネルギーが消費されている。これらの低濃度の副生ガスは、分離、濃縮されれば、汎用の基礎化学品へ転換、CO<sub>2</sub> 削減と資源制約からの脱却という我が国の抱える 2 つの課題を同時に解決することが期待できる。

本研究開発では、多孔性金属錯体等のような革新的な材料を用いて、燃焼や化学反応に伴う低濃度の副生ガス(以下「副生ガス」という。)を、低温、低圧で効率よく吸着、脱離する技術を開発し、高濃度に濃縮された副生ガスにより有用な化学品をクリーンに生産するための基盤技術の確立を行う。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) 副生ガス高効率分離・精製プロセス基盤技術開発

研究開発目標を達成するため、具体的に下記の内容の研究開発を実施する。

副生ガスの回収は、化学吸着、物理吸着、膜分離等により技術的に可能であるものの、現在使用されている化学吸着材料では、脱離プロセスで高温エネルギーが必要であったり、物理吸着材料や膜分離材料では、吸着量が小さかったり、分子透過に伴う膜設計が困難であったりと、現状では、基礎基盤的な開発段階にある。

本研究開発では、化学プロセス、石油化学プロセス等の生産プロセスから発生する副生ガス(主として CO<sub>2</sub>)を、マイルドな条件で効率よく吸着、脱離することで、高濃度に濃縮された副生ガスを、①高純度、②低コスト、③低エネルギーで精製できる革新的な材料を開発し、濃縮された副生ガスを原料として有用な化学品をクリーンに生産できるプロセスに繋げる。

### 3. 達成目標

#### (1) 副生ガスの高効率分離・精製プロセス基盤技術開発

中間目標(平成 23 年度末)

##### ① 副生ガスの分離・精製材料開発

・副生ガスの分子サイズに合わせた多孔性金属錯体等の分子設計を行い、副生ガスとしての CO<sub>2</sub> 等を高濃度(95%以上)に濃縮でき、かつ高選択に分離する材料を開発する。具体的には、現在実用されているゼオライト、活性炭等の分離材料に比べて低い操作エネルギーで高選択的に副生ガス(CO<sub>2</sub> 等)を吸着・脱離できる新規材料(副生ガスの吸着エネルギーが 40kJ/mol 以下、分離度(吸着相と気相における目的成分のモル分率比)が 150 以上である材料)を開発する。

### ②副生ガスによるグリーンプロセス技術

- ・95%以上に濃縮された副生ガスを原料として、目的生成物の選択率が60%以上となる化学プロセスに関する試設計を行う。

最終目標(平成25年度末)

#### ①副生ガスの分離・精製材料開発

- ・副生ガスの分子サイズに合わせた多孔性金属錯体等の分子設計を行い、副生ガスとしてのCO<sub>2</sub>等を高濃度(99.9%以上)に濃縮でき、かつ高選択分離する材料を開発する。具体的には、現在実用されているゼオライト、活性炭等の分離材料に比べて低い操作エネルギーで高選択的に副生ガス(CO<sub>2</sub>等)を吸着・脱離できる新規材料(副生ガスの吸着エネルギーが30kJ/mol以下、分離度(吸着相と気相における目的成分のモル分率比)が300以上である材料)を開発する。

### ②副生ガスによるグリーンプロセス技術

- ・99.9%以上に濃縮された副生ガスを原料として、目的生成物の選択率が80%以上となる化学プロセスに関する試設計を行う。

なお、本研究開発終了後、実用化技術として、コスト低減、早期の市場導入に対して大きな寄与が期待できる技術レベルを確立すること。

### 研究開発項目③-4 「資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発」

#### (微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発)

#### 1. 研究開発の必要性

化学産業のCO<sub>2</sub>排出量は我が国産業中第2位(全排出量の約5%)であり、このうち約16%が石油化学プラントで排出されているが、製造プロセスの他産業廃水の処理に伴って多大なエネルギーが消費され、発生する大量の汚泥処理も含め大量のCO<sub>2</sub>発生源となっている。

このため、本研究開発では、廃水中の有機物を微生物が分解する際に生ずる電気エネルギーを効率よく取り出し、廃水処理システム自体の運転に活用し、併せて汚泥の大幅削減を図るための微生物燃料電池の実用化に必要な基盤技術を開発する。

#### 2. 研究開発の具体的内容

##### (1) 微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発

研究開発目標を達成するため、ベンチスケールの微生物燃料電池を開発し、実証試験を行って安定した廃水処理、省エネルギーのための運転技術を確立する。具体的には、下記の内容の研究開発を実施する。

##### ① 触媒の開発

微生物燃料電池のカソード(陽極)に適した安価な酸素還元触媒の開発、及び微生物アノード(陰極)の電気化学的解析を行う。

##### ② カソードの開発

安価な電極基板材料を開発することにより、ベンチスケールの微生物燃料電池のカソード用空気拡散電極を開発する。

##### ③ アノードの開発

微生物親和性が高く安価な電極基板材料を開発することにより、ベンチスケールの微生物燃料電池のアノードを開発する。

##### ④ 微生物制御技術の開発

電流生成微生物の代謝経路の網羅的解析を行って、廃水に適合した発電微生物集団を迅速に形成させる技術、及び微生物集団を安定に機能させるための技術を開発する。

##### ⑤ 効率化システムの開発

廃水処理前後工程を考慮した効率化システムの開発を行う。

##### ⑥ 実証試験

①～⑤で開発した小型実証装置(1立方メートル程度)を用い、安定した廃水処理、省エネルギー化を実証し、安定した廃水処理、省エネルギーのための最適な運転技術を確立する。

#### 3. 達成目標

##### (1) 微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発

最終目標(平成27年度末)

開発した小型実証装置(1立方メートル程度)により、廃水処理率が現行の活性汚泥処理と同等以上で、かつエネルギー消費が20%以下となることを確認する。

なお、本研究開発終了後、実用化技術として、コスト低減、早期の市場導入に対して大きな寄与が期待できる技術レベルを確立すること。



### 研究開発項目④ 「化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発」

#### 1. 研究開発の必要性

化学製品の大半は石油由来の原料から製造されており、これは現在の石油消費量の約 20% を占める。将来的に、石油資源自体の供給リスクを克服して、持続可能な低炭素社会を実現していくためには、化学製品の製造において使用される石油由来原料を石油以外の原料へ転換・多様化していくことが必要である。

そのためには、汎用的に入手可能な原料、例えば、気体原料（メタン、水素、二酸化炭素等）や非可食性植物由来原料（糖類、アルコール類、有機酸、セルロース、ヘミセルロース、リグニン、油脂等）から有用な化合物を省エネルギー・高効率に製造するプロセスの開発やそれらの化合物の利用を促進する技術の開発を行い、化学品原料の転換・多様化を可能とする全体システムとして製造プロセスの高度化・多様化を実現し、ライフサイクルに亘る二酸化炭素の排出の抑制及び化学産業・化学製品のグリーン化を図っていく必要がある。

#### 2. 研究開発の具体的内容

##### (1) 化学品原料の転換・多様化を可能とする革新グリーン技術の開発

研究開発目標を達成するため、具体的に下記の内容の研究開発を実施する。本研究開発では、将来的な実用化を念頭に置き、出発原料から化合物、さらには高機能化部材までの全体システムとして高機能化、低コスト化、省エネルギー化、高効率化の観点から、製造プロセスの高度化・多様化に資する技術開発を行う。そのために、個別の出発原料である気体原料（メタン、水素等）を選択的に分離・貯蔵等することにより、化合物の合成等への利用を促進する技術や植物由来原料（糖類、アルコール類、有機酸、セルロース、ヘミセルロース、リグニン、油脂等）から有用な化合物（中間体、モノマー、ポリマー等）を合成するプロセス及びこれらのプロセスから得られる化合物や既存の非化石由来原料から得られる化合物を用いた高機能化部材を製造するプロセスの開発を行う。

具体的には、以下の研究開発を行う。

##### ④-1 気体原料の高効率利用技術の開発【平成 21～22 年度】

・石油由来原料に代えて、気体原料（メタン、水素等）の選択的な分離・貯蔵等により、化合物の合成等への利用を促進する基盤技術の開発を行う。

##### ④-2 植物由来原料から化合物を合成するプロセスの開発【平成 21～22 年度】

・石油由来原料に代えて植物由来原料（糖類、アルコール類、有機酸、セルロース、ヘミセルロース、リグニン、油脂等）を使用することにより有用な化合物を省エネルギー・高効率に合成するプロセスの基盤技術の開発を行う。

##### ④-3 高機能化部材の製造プロセスの開発【平成 21～22 年度】

・④-1、④-2 で得られる化合物や既存の非石油原料由来の化合物を用いた新規ポリマー製造プロセスの開発やこれらの化合物を用いた材料化プロセスの開発を行い、化学品原料の転換・多様化を促進する高機能化部材の開発を行う。

平成 22 年度補正予算(第 1 号)等による追加予算の充当にともない、本プロジェクトの研究項目④-4、④-5 の追加及び期間延長を行う。

### ④-4 気体原料の化学品原料化プロセスの開発【平成 22～25 年度】

④-1 及び既存の転換・多様化プロセスを組み合わせ、石油由来原料からの転換・多様化を、より多角的に進めるため、豊富に存在する気体（メタン、水素、二酸化炭素等）の利用技術の開発を行う。具体的には、高効率な分離・精製技術等により、従来は原料としての利用が困難であった低品位の気体（バイオメタン等の混合ガス）を利用するための分離・精製プロセスや、既存のプロセスと比較して、低環境負荷で且つ総合的に二酸化炭素排出量の低減が可能となる気体原料を利用した新規製造プロセスの開発を行う。

本技術開発により、コスト或いはその他の要素（不純物低減、二酸化炭素低減等）が既存プロセスと比較して優位なものとなり、将来的な石油資源からの置き換えを可能とし、化学品原料の転換・多様化を実現する。

### ④-5 植物由来原料からの化合物・部材製造プロセスの開発【平成 22～25 年度】

④-2、④-3 及び既存の転換・多様化プロセスを組み合わせ、非可食性植物由来原料から化合物・部材までを省エネルギー・高効率に製造する一貫生産プロセスの開発を行なう。

開発する製品・部材はセルロース、ヘミセルロース、リグニン、油脂等の特徴を活かした製品・部材やポリエステル、ポリアミド等の含酸素系樹脂等の製造するプロセスであり、原料の構造的な特徴を活かすこと等により、分離・精製や成形・加工のプロセスを含めて、省エネルギー・高効率に製造できるプロセスを開発する。

開発するプロセスは既存の石油系から製造するプロセスよりも省エネルギーであり、石油由来のものを代替することによる二酸化炭素の削減効果を含めて、低炭素社会の実現に貢献する。また、開発する製品・部材については、既存の石油由来の製品と同等以上の性能・コストであり、将来的な普及により、大規模に化学品原料の転換・多様化を実現する。

本研究開発は、幅広いプロセスが対象となるため、テーマ選定にあたっては、開発の難易度、研究開発実施体制、実現可能性、2020 年及び 2030 年の市場創出効果、原料転換の効果及び二酸化炭素削減効果を総合的に判断する。

## 3. 達成目標

### (1) 化学品原料の転換・多様化プロセス技術開発

平成 22 年度補正予算(第 1 号)等による追加予算の充当にともない、本プロジェクトの研究内容の見直し及び期間延長を行う。それに伴い、従来の最終目標を平成 22 年度末目標とし、新たに平成 23 年度末目標及び 25 年度末目標を設定する。目標・計画については、平成 24 年度以降の研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、見直しを行う。

#### 平成 22 年度末目標

##### ④-1 気体原料の高効率利用技術の開発

- ・省エネルギー・高効率利用技術の可能性の実証

##### ④-2 植物由来原料から化合物を合成するプロセスの開発

- ・省エネルギー・高効率合成プロセスの可能性の実証

##### ④-3 高機能化部材製造プロセスの開発

- ・新規ポリマー製造プロセスの可能性の実証

- ・新規の材料化プロセスの可能性の実証

なお、本研究テーマは「明日の安心と成長のための緊急経済対策（平成 21 年度補正予算（第 2 号））の一環で短期間に実施するため、詳細な目標については採択者が決定した後、NEDO、研究開発責任者及び採択者との間で協議の上、実施期間において実現可能なものを定めるものとする。

平成 23 年度末目標

#### ④-4 気体原料の化学品原料化プロセスの開発

気体原料を用い、従来の石油由来原料から製造されるものに対して、市場での競争力のある基盤技術としての可能性を実証する。

具体的には、以下のいずれかのレベルを達成すること。

- ・低品位な気体原料（混合ガス）から高品位な基幹化学品を製造するための分離・精製等の基盤技術の開発を行い、併せて製造プロセスへの適用条件の検討により、得られる基幹化学品が現行品に対して、特性・コスト面等で同等以上となる可能性を示す。

- ・気体原料から基幹化学品等を合成する新規製造プロセスの基盤技術の開発を行い、併せて製造プロセスへの適用条件の検討により、得られる基幹化学品等が、既存製品、プロセスと比較して、環境負荷を低減し、二酸化炭素削減が可能となる見通しを示す。

#### ④-5 植物由来原料からの化合物・部材製造プロセスの開発

非可食性植物由来原料から化合物・部材までを従来の石油由来から製造されるものよりも省エネルギー・高効率であり、市場でのコスト競争力のある一貫生産プロセスの可能性を実証する。

具体的には、以下のいずれかのレベルを達成すること。

- ・植物由来原料からポリエステル、ポリアミド等のポリマーを合成するプロセスの開発を行ない、ポリマーの試作・評価を行なうとともに、スケールアップを行うための課題を抽出することにより、代替するポリマーと比較して、性能・コスト面で同等以上との見通しを得る。

- ・セルロース、リグニン、油脂等の植物由来原料の特徴を活かした材料化プロセスの開発を行い、自動車、家電等に材料の試作・評価を行なうことにより、要求される基礎特性を満たすことを確認するとともに、部材を製造するための課題を抽出することにより、代替する実部材と比較して、性能・コスト面で同等以上との見通しを得る。

平成 25 年度末目標

#### ④-4 気体原料の化学品原料化プロセスの開発

気体原料を用い、従来の石油由来原料から製造されるものに対して、市場での競争力が見込めるレベルの実証を行う。

具体的には、以下のいずれかのレベルを達成すること。

- ・低品位な気体原料から基幹化学品を製造する分離・精製プロセスの開発において、スケールアップ評価により量産時の課題を整理し、特性・コスト面等で市場での競争力が見込める生産プロセスの試設計を行う。

- ・気体原料を利用した基幹化学品等を合成する新規製造プロセスの開発において、スケールアップ評価により量産時の課題を整理し、既存プロセスと比較して、環境負荷を低減し、二酸化炭素削減が可能となる生産プロセスの試設計を行う。

#### ④-5 植物由来原料からの化合物・部材製造プロセスの開発

非可食性植物由来原料から化合物・部材までを省エネルギー・高効率に製造する一貫生産プロセスであり、市場でのコスト競争力のあるプロセスの確立が見通せるレベルを実証する。

具体的には、以下のいずれかのレベルを達成すること。

- ・植物由来原料からポリエステル、ポリアミド等のポリマーを合成する製造プロセスのスケールアップに必要な要素技術の開発を行い、代替するポリマーと比較して、性能・コスト面での優位性を確認する。

- ・セルロース、リグニン、油脂等の植物由来原料の特徴を活かした材料を用いた自動車、家電等へ適用する部材の製造・加工プロセスの開発を行い、代替する実部材と比較して、性能・コスト面での優位性を確認する。

本開発終了後、実用化技術として、コスト低減、早期の市場導入に対して大きな寄与が期待できる技術レベルを確立することとする。

なお、詳細な目標・計画については採択者が決定した後、NEDO、研究開発責任者及び採択者との間で協議の上、実施期間において実現可能なものを定めるものとする。

# グリーン・サステイナブル ケミストリー（GSC）分野

（持続的社會のための環境共生化学）

我が国の素材・部材製造産業は、国際的に高い技術力と競争力を有し、経済社会の発展を支えているが、地球温暖化問題、資源枯渇問題が現実化しつつある中で様々な課題を抱えてもいる。製造に際しては、有害な添加物（ハロゲン、重金属等）の利用、過度の高機能化追求に伴うプロセスの多段化等によるエネルギー消費の増大、中間工程における大量の廃棄物排出、リサイクルに不向きな製品の大量廃棄（廃棄処分場の不足等）などが問題となっている。一方、生産に必要な多くの原材料等は限られた産出国からの輸入に頼らざるを得ない状況にあり、将来にわたって安定に製造できるかどうか危惧されている。さらに、欧州での RoHS 指令、REACH 規制の導入や中国などでの自主的な化学物質排出規制の制定など、化学品等の製造に係わる環境対策が世界的に強化されている。

このような背景の下、我が国の全産業の基幹となる化学品等を持続的（サステイナブル）に生産、供給していくためには、これまでの大量消費・廃棄型生産プロセスから脱却して、持続的な生産が可能なプロセスによる供給体制の構築が急がれる。そこで本ロードマップは、エネルギー、資源制約問題を克服し、環境との共生を図ると同時に生活の質の向上をめざすことで安全・安心で競争力のある持続型社会を構築するための化学技術、すなわちグリーン・サステイナブルケミストリー（GSC）を実現するために必要な要素技術を抽出し、これらの制約条件や競争力や基盤性といった観点から重要技術を選定するとともに、今後の技術の発展を描いた。

## グリーン・サステイナブルケミストリー分野の技術戦略マップ

**I. 導入シナリオ****(1) GSC 分野の目標と将来実現する社会像**

化学産業は、社会のニーズに応じて有用な製品を製造し、資源の不足や枯渇と戦い、環境問題に直面しつつそれを克服してきた。

GSC とは、エネルギー、資源制約を克服して、環境との共生を図ると同時に、生活の質の向上を目指して、安全・安心で競争力のある持続可能な社会を構築するための化学技術の体系【参考資料 1：GSC 概念図】であり、今後の化学産業の発展に大きな役割が期待される。

今後の社会変化の様々な可能性【参考資料 2：GSC を推進させる 2050 年までの背景】に国家として対応できるよう、GSC を国家の将来の化学分野における戦略的テーマに据え、その競争力を担保するための目標と将来社会像について示す。

**< 将来の資源・エネルギー制約と GSC の目標 >**

世界的に地球温暖化防止への動きが加速している観点から、大幅な CO<sub>2</sub> 削減への対応が検討されている。産業界においても、より一層の省エネルギー、CO<sub>2</sub> 削減が求められている。この観点から化学産業としても、今まで以上に省エネルギー、CO<sub>2</sub> 削減への対応が求められる。一方、これまで依存してきた原油価格は確実に上昇していくことは避けられない。長期的には、現 OECD 諸国のエネルギー需要は、将来、人口の多いアジア・アフリカ地域に追い越されると予想される。このような状況により、今後日本は、これまでどおり高品質の原油を安定的に購入することが難しくなり、重質で硫黄や重金属等の多い低品位の原油を扱っていかなければならないと予想される。

また、原料としては、炭化水素以外の元素も重要であり、高機能部材を支えているものも多い。それらの中には、将来の枯渇が危ぶまれるものや、産出国が偏在しているものがある。これら資源の供給が政変等で止まる事態となれば、高機能部材を収益源とする日本の化学産業の競争力は、言うまでもなく、日本経済自体に打撃を与える恐れがある。希少資源の供給断絶事例は、実際に過去に起きている。

以上を鑑みると、日本としては、地球温暖化防止のために、より一層の省エネルギー技術、CO<sub>2</sub> 削減技術や資源安全保障の確保のための資源・エネルギーの効率的利用技術、リサイクル技術、代替技術が必須である。短期的には省エネルギー技術、資源リサイクル技術や、重質化・低品位化する原油をクリーンかつ効率的に利用していく技術が必要である。しかし、リサイクルにも限界があり、中期的には代替技術に移行していくこととなる。また、遠い将来には究極的な CO<sub>2</sub> 削減につながる技術や石油資源のピークが訪れることから、原料の革新的な変換技術が必要である。

**< 将来の環境との共生と GSC の目標 >**

持続可能な開発に関する世界首脳会議において合意されたヨハネスブルグ宣言の

2020年の目標実現に向け、引き続き、大気汚染防止、水質汚濁防止、産業廃棄物処理、土壌汚染防止を進めていくことが求められる。

一方で、欧州のRoHSやREACHに代表される化学物質規制の動きは、日本からの進出企業や輸入品への規制等を通じて我が国にも影響するものであるが、さらに中国等で類似の規制の導入を呼ぶこととなった。今後、この動きが世界に広がって「標準的」な規制になっていくのか、注視が必要である。

日本としても化審法、化管法が改正されたことを受けて、これらの規制に適切に対応するとともに、このような規制を先取りして対応しうる技術開発をしていくことが必要である。

#### <将来の生活の質の向上とGSCの目標>

将来の生活の質の向上について、短期・中期・長期に分けると次のようになる。

短期的にはまず、我々の生活環境のリスクのさらなる低減が望まれる。具体的には、衣食住におけるリスクの低減（例：シックハウス症候群への対応）、交通や通信などのもたらす環境負荷の低減、廃棄物削減（製品の再利用・長寿命化・軽量化等）等が挙げられる。

このような短期的なリスクの低減に加え、中期的にはアメニティを積極的に向上する方向に進んでいくことが望まれる。特に、今後、少子高齢化が進むことから、個人の行動を支援し、充実した暮らしができるようにしていくことが望まれる（バリアフリー化、福祉対応製品等）。

さらに、長期的には、アメニティの向上と言っても快適性や利便性の一方的な追求だけでは過去の大量生産・大量消費・大量廃棄と同じでサステナビリティを実現できないので、国のレベルでは社会経済システムの変革、個人のレベルではライフスタイルや価値観の転換が求められることとなる。

以上を鑑みると、GSCにおいても、社会ニーズに応じて快適性や利便性を実現していく際に、資源・エネルギーの浪費や環境負荷の増大を招かないような技術開発が不可欠である。

#### <将来の化学産業>

BRICs 台頭の中で国際競争は激化し、“今日のファインは明日のバルク”という状況となってくる。

日本には、ファインケミカルズを中心とする高機能部材の集積と川下産業との摺り合わせにより、強い競争力を有する分野がある。しかし、今後も継続的に、革新的なプロセス、材料を開発していく必要がある。また大規模の欧米企業と伍していくには、より広い視点を化学産業としてとらえ、産業間連携を拡大していく必要がある（これは省エネ・省資源や摺り合わせ強化にも資すると考えられる）。

いまや日本の化学企業の海外移転は不可避の流れであるが、国内はファインケミカルズの新しい技術・製品の発明のセンターとなっていく必要がある。一方で、バルク

ケミカルズは、そこからファインケミカルズが作られていく基礎原料であり、全てを海外移転していくと、生産国の事情で供給が不安定になった場合、日本の化学工業は打撃を受けることとなる。このような事態を防ぐため、バルクケミカルズも一定以上の生産を残し、その生産性を向上させていく必要がある。

#### <GSCの短期・中期・長期の目標>

以上を鑑み、エネルギー・資源・環境制約からの脱却と生活の質の向上とに向けて、GSCの短期・中期・長期の目標を置いた。

すなわち、短期的には、喫緊の問題として省エネルギー、CO<sub>2</sub>削減を考慮しながら、グリーンの方角性（廃棄物を減らす、今ある資源・エネルギーを効率的に利用）、中期的には、サステイナブルの方角性（有害物質、希少元素の代替）、さらに長期的には、グリーン・サステイナブルの方角性（快適でサステイナブルな生活を実現する新しい材料の開発、原料の革新的転換）とした。

なお、これらの目標を達成するために、プロセス(How to make)及びマテリアル(What to make)の両面でイノベーションが必要となる。特にマテリアルは、その機能によって社会の発展や生活の質の向上に直接的に貢献するものであるが、グリーン・サステイナビリティの観点からは、マテリアルを製造するときだけでなく、ユーザに使われるときの効果が重要となる。すなわち、マテリアルの場合、ライフサイクルでみたときの環境への優しさが重要となる。具体的に化学産業における、GSCの典型的な実績を例示した。【参考資料 3-1～3-3：GSCの実績例】

### (2) 研究開発の取組

研究開発の推進については、開発目標を戦略的に設定するとともに、効率的な研究開発体制の構築が重要である。特に、今後予想される様々な社会変化に対応するためには、持続的発展が可能となるプロセス及び製品のイノベーションに資する革新的な化学技術の開発を行うことが必要である。以上に鑑み、経済産業省・NEDOでは、GSCの名称を冠した我が国初の国家プロジェクト「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発」を2008年度より実施するに至った。同プロジェクトの目標として、①有害な化学物質を削減できる、又は使わない革新的プロセス及び化学品の開発、②廃棄物、副生成物を削減できる革新的プロセス及び化学品の開発、③資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発、を掲げている。これらの目標を達成することにより、我が国全体の産業競争力強化と環境負荷低減を飛躍的に促進することができ、新産業創造戦略及び世界全体をリードしたサステイナブルな産業構造構築への貢献も期待できる。

### (3) 関連施策の取組

グリーン・サステイナブルケミストリー分野の目標や将来像を実現するためには、研究開発と並行して技術を定量的に評価できる基準の開発、産学官連携、国際連携を推進する制度、体制の充実が必要である。



## 〔基準・標準化〕

GSC の普及を図るためには、感覚に訴える言葉を発するだけでなく、定量的に技術を評価する必要がある。環境負荷、有害性・安全性、経済性・社会性という評価尺度が異なるものを、評価の目的にあわせて正しく評価する必要がある。経済産業省では、GSC の効果を正しく把握するために、グリーン・サステイナブルケミストリーネットワーク (GSCN) を通じ、GSC 賞の評価手法に取り入れるなど、実務面の評価を加えつつ、GSC 評価手法 (例えば i-Messe) の開発と標準化を推進している。

## 〔産学官連携〕

日本における グリーン・サステイナブルケミストリーの活動を効果的かつ強力に推進するために、2000 年 3 月に化学系の学協会、独法研究機関など 25 団体によって「グリーン・サステイナブルケミストリーネットワーク (GSCN)」が設立された。ここでは、研究開発推進上の諸課題と提言、GSC 賞の贈呈、ワークショップ・シンポジウム開催、教材作成、教育支援、国際交流などを展開している。経済産業省は GSCN にオブザーバーとして参加し、GSC 賞における経済産業大臣賞の設置やシンポジウムの支援等を行っている。これら活動を通して、GSCN を産学官連携のコアのひとつとして、GSC の概念だけでなく、GSC 技術の産業界への普及を図っている。

**(4) 海外での取組**

1992 年のリオ宣言を契機として持続可能な発展 (Sustainable Development) のための取組が各国で開始される中、日米欧が中心となって化学分野でのその取組は活発に活動されている。

米国では、1995 年に EPA により Green Chemistry (GC) が提案され、GC12 カ条が打ち出されている。また、GC の大統領賞が創設されている。

欧州でも、米国とほぼ時を同じくして、産業界を中心として Sustainable Chemistry が推進されている。1994 年には、CEFIC (欧州化学工業連盟) により SUSTECH が設立されている。2004 年には、CEFIC や EuropaBio (欧州バイオ産業協会) 等により、技術開発のプラットフォームとして SusChem (The European Technology Platform for Sustainable Chemistry) が設立され、2007 年以降の EU の科学技術 5 ヵ年計画 (FP7) の重点技術分野を策定することとなった。SusChem では、「製品のライフサイクルはどんどん短くなっており、スペシャリティも急速にコモディティになってしまう」との意識や、このままでは日米アジアに押されてしまうことへの危機感の下、①マテリアルテクノロジー、②反応、プロセス設計、③バイオ工業テクノロジー、④革新のフレームワークと経済的成果、の 4 分野について、目指すべき方向性 (ビジョン) が示されている。また、「Strategic Research Agenda 2005」により、具体的に技術開発すべき項目が列挙されている。

1998 年には OECD で Sustainable Chemistry (SC) 活動が開始され、日米欧が中心となって、研究開発のガイダンス作成や教育支援等が行われてきている。欧州委員会

では、規制面において持続可能な生産と消費のための実行計画を検討中、現時点ではいくつかの規制ツールや、よりソフトなボランティアプログラムを考えている。また、環境技術実行計画のもと国家レベルの環境技術のためのロードマップを現在までに 22 カ国が策定している。

### (5) 改訂のポイント

- GSC 分野の目標と将来実現する社会像において、最近の情勢を踏まえた CO2 削減の必要性について言及した。

## II. 技術マップ

### (1) 技術マップ

わが国の素材・部材産業が、全産業の基幹となる化学品等を持続的(持続可能な)に生産、供給していくためには、これまでのエネルギー大量消費・大量廃棄型生産プロセスから脱却し、かつ、地球温暖化問題、資源枯渇問題等を解決した持続可能な生産が可能なプロセスによる供給体制の構築、および、持続可能な社会に対応したマテリアルの開発が急がれる。そのためには、プロセス及びマテリアルの両面でイノベーションが必須であることから、2050 年までの中長期における両分野のイノベーションの対象となる技術課題を、目標の実現のために設定したサステナビリティに関する 4 分野、すなわち、エネルギー制約からの脱却(エネルギーと略す)、資源制約からの脱却(資源と略す)、環境との共生(環境と略す)、さらに生活の質の向上(生活と略す)に分別して収録した。また、その抽出の過程で、4 分野が相互に重なり合う領域について 4 分野共通というカテゴリーを設け、さらに全ての分野に技術の基盤として関わりをもつものを、新たに共通基盤技術として加えた。共通基盤技術は、昨年度は技術俯瞰図には基盤技術として全分野に共通の枠組みとして取り上げていたが、技術マップには載せていなかったものである。また、本年度の調査として、将来にわたり GSC 技術の波及効果の大きいと思われる分野を抽出した中で、昨年度は重要とされていなかった IT に関する 2 件の技術項目「IT 向け化学品(電子材料)」、「微細構造・精密構造形成技術」について、重要技術項目に加えた。

### (2) 重要技術の考え方

「クリーン化、シンプル化、省エネルギーを実現するための新規プロセス、マテリアルの創生につながるような国内外の革新的な要素技術」および「廃棄物の減容化、容易なりサイクル、原材料多様化を実現するための新規プロセス、マテリアルの創生につながるような国内外の革新的な要素技術」の観点から広く調査、収集され、分類された2009年度の技術テーマを踏襲し、本年度ローリング作業のベースとした。

技術項目および技術テーマの評価にあたっては、①省エネ効果、②原料多様化、③有害物質削減量、④廃棄物排出減、⑤温室効果ガス削減効果、⑥生活向上度の6つの指標からなる「グリーン・サステナブルケミストリー(GSC)評価」および①市場規模、

②付加価値率、③コスト削減、④機能向上、⑤他分野への波及効果の5つの指標からなる「産業競争力・創設力評価」を活用した。また、選定された重要技術項目について俯瞰図を作成し、安全・安心で競争力のある持続型社会を構築するための化学技術の役割をわかりやすく表現した。以下は、各分野で抽出した各分野における26件の重要技術項目の一覧である

### ○ エネルギー

- ・ グリーン製造化学プロセス
- ・ 熱エネルギー高効率変換利用技術
- ・ 再生可能エネルギー
- ・ 高効率水素製造
- ・ IT向け化学品（電子材料）

### ○ 資源

- ・ 低品位資源利用技術
- ・ 次世代蓄電材料技術
- ・ 稀少金属の有効利用と代替材料技術
- ・ 非枯渇性資源の化学品・材料化
- ・ 易リサイクル加工用材料とプロセス
- ・ CO<sub>2</sub>分離・回収・利用技術
- ・ 微細構造・精密構造形成技術

### ○ 環境

- ・ ハザード管理されたハロゲン製品
- ・ 製造工程廃棄物・副生物の大幅削減
- ・ 環境負荷が小さい製品
- ・ 環境負荷が小さい加工プロセス
- ・ 革新的燃焼による大気環境の保全

### ○ 生活

- ・ 日用品の快適性向上と低消費化
- ・ 食の安全と量の確保
- ・ 快適な省資源型ロングライフ住宅
- ・ 容易で安全な医療・介護と身体機能補助

### ○ 4分野共通

- ・ 輸送システム（低環境負荷・高利便性交通輸送システム）
- ・ 水（良質な水資源確保システム）

### ○ 共通基盤技術

- ・ 分析化学
- ・ 計算科学

- ・ 環境評価

### (3) 改訂のポイント

- 昨年度の技術マップには載せていなかった技術項目の「共通基盤技術」とそれに関する技術テーマを加えた。
- 本年度の GSC 技術の展望として議論した 6 テーマの中で、IT 関連分野をその一つとし、これに該当する技術項目、技術テーマを新たに重要項目、重要技術テーマに加え、他と同様グレー、ローズ色で示した。
- その他には、研究課題について、適宜追加をおこなった。

## Ⅲ. 技術ロードマップ

### (1) 技術ロードマップ

技術マップに記載した技術テーマの中で各重要技術項目における重要技術テーマとして選定したのに関して「GSC 評価」、および「産業競争力・創設力評価」を実施した。評価方法は 2009 年度のデータを参考に 3 段階で再評価を実施した。その結果をレーダー図に示し、技術ロードマップとともに各頁ごとにまとめて掲載した。また「技術の概要」と「技術優位性」についても解説し、技術内容理解のための助けとした。

当該テーマが中期（2020 年以降）、長期（2030 年以降）のいずれの時間軸を前提にしたものであるかを考慮し、記述にもできうる限り反映させた。また、基礎研究から事業化・市場導入の間に必然的に経由する数段階の状況を、現時点で可能な範囲でイメージとして示せるよう心がけた。

### (2) 改訂のポイント

- 重要技術項目毎に対象となる重要技術テーマを 1 ページにまとめ、内容を理解しやすいものとするを狙った。配置としては 2050 年までの技術ロードマップを中心に置き、以下の 4 つの説明のための欄を更新した。
- 各欄の内容は次のとおりであり、評価項目の更新にあわせて、新たな評価を行い、レーダー図を更新した。
  - 「技術の概要」：重要技術テーマについて概要を説明
  - 「技術優位性」：重要技術テーマについての日本あるいは、日本企業の国際的な優位性についてコメント
  - 「GSC 評価」：各重要技術テーマについて 3 段階で各項目につき技術評価し、その結果をレーダー図に表すと同時にコメント
  - 「産業競争力・創設力評価」：産業競争力や創設力について 3 段階で各項目について評価し、その結果をレーダー図に表すと同時にコメント

## Ⅳ. その他の改訂のポイント

- GSC 技術の展望

GSC 技術によって持続可能な社会を実現していくために、「GSC 技術の展望」として、GSC に関する技術 6 件を以下に取り上げ例示し、わかり易いイメージ図で示した【参考資料 4：GSC 技術の展望】【参考資料 5：革新的重要技術テーマ】。

- ・ Green Agriculture（食糧資源に貢献する環境適応型肥料および農薬）
- ・ Green Biomass（バイオマスからの化学品製造）
- ・ Green Electronic Storage（電気エネルギーの貯蔵）
- ・ Green Information Electronics（半導体製造向け化学製品）
- ・ Green Process（環境負荷の小さい化学品製造プロセス）
- ・ Green Sustainable Housing（快適で長持ちする省エネ型住宅）



サステイナビリティ	技術項目 (グレーは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色:プロセスイノベーション 青色:マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小:数万吨未満 中:数十万吨以下 大:100万吨以上	実用時期 短期:2016年以降 中期:2020年以降 長期:2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野
エネルギー	グリーン製造化学プロセス	G001	革新的省エネ型化学分離プロセス	・高配向性(ゼオライト、酸化物等)による蒸留、抽出、吸着分離、濾過プロセスへの導入 ・新規炭素系ガス分離材、MOF等有機金属分離材 ・省エネ蒸留塔(HIDIC)適用系等の実用化プロセス技術開発	省エネ、省資源	大	中期	1,000	基礎化学(蒸留、PSA、脱水)プロセス、水処理等広範囲
		G002	グリーン酸化プロセスの開発	・過酸化水素、空気酸化用多成分系触媒 ・直接法フェノール、パラフィン酸化、活性酸素包接化合物利用等 ・直接法過酸化水素製造技術、活性酸素包接化合物利用等 ・ナノ、マイクロバブルを用いた酸化反応	省エネ資源多様化産業競争力	大	短期、中期	1,000	化粧品、医薬品、電子材料、接着剤、封止材、環境浄化触媒
		G003	電磁エネルギー利用高効率化学合成プロセス	・マイクロ波、高周波、プラズマ等の利用 ・誘電体触媒等による無溶媒プロセス	省エネ、省資源	中	短期、中期	500	医薬品原体、電子材料、香料、添加剤、プラスチック等
		G004	分離・反応一体型リアクタープロセス	・界面活性剤型触媒、相間移動触媒の開発 ・MOF等有機金属錯体の開発 ・非平衡反応分離型(気体分離、液体分離、イオン交換、電気透析、逆浸透等)プロセス ・分離性能と反応性能のマッチング最適設計	省エネ資源確保産業競争力	大	短期、中期	1,000	化学品製造、医薬品原体、電子材料、香料、添加剤、水処理等広範囲
		G005	マイクロリアクタープロセス	・ナノ空孔、協奏的反応場等反応制御技術 ・マイクロリアクターを利用したプラント技術 ・細薄化技術 ・キャピラリーを用いた無触媒精密重合プロセス	省エネ、省資源	中	中期	100	医薬品原体、電子材料、香料、添加剤等
		G006	精密制御高分子製造	・汎用モノマーの精密重合プロセス:メタロセン触媒、リビング重合などによる重合プロセス設計 ・高性能機能化学品の製造	省エネ、省資源	大	中期、長期	1,000	化粧品、電子材料、接着剤、封止材等高分子関連産業
		G007	低環境負荷型縮合系高分子製造技術	・新規触媒、選択加熱、新媒体利用等によるプロセス ・透明、長寿命、省資源材料プロセス ・新規原料モノマーの利用	資源確保産業競争力	中	中期、長期	500	樹脂成型物(電機電子、自動車等)
		G008	高純度金属ケイ素の省エネ製造プロセスの開発	・非ハロゲン法プロセス ・ノンハロゲン高純度金属ケイ素製造法	省エネ、省資源	大	中期	1,000	太陽電池、半導体、電子産業
		G009	有機分子触媒	・不斉合成、相間移動触媒、水系触媒、酸塩基触媒、酵素触媒等 ・有機合成の触媒反応プロセス(eファクター低減)	省エネ、省資源	大	中期、長期	500	化粧品、医薬品、電子材料、接着剤、封止材等高分子関連産業
		G010	金属錯体を用いた資源回収	・海水からのトリウム捕集材 ・固体分離回収、気体分離、触媒膜等による資源回収	資源確保産業競争力	小	中期、長期	100	化学分離、精製プロセス、金属・非鉄金属、電子材料等
熱エネルギー高効率変換利用技術	G011	低品位排熱の蓄熱・輸送、回収材料、及び熱変換プロセスの開発	・合成珪酸(エリスリトール等)、ゼオライト、粘土鉱物、クラスレート等蓄熱材 ・アンモニウム塩、代替溶媒、アンモニウム等による各種ヒートポンプ、カーナサイクル ・Ca、Mg塩等の水和・脱水によるオンサイト蓄熱システム	利用効率の向上	大	短期、中期	1,000	熱供給業、ガス業、集合住宅・公共施設、ゴミ処理場における給熱給湯、冷熱	
	G012	低温排熱エネルギー変換用熱電変換材料の開発	・ポストBi-Te系、Zn-Sb系、多成分、クラスター系新規材料 ・有機系熱電変換材料開発、無機材料:Mg2Si他 ・熱交換器塗布型高分子、易加工材(無機/有機系複合材料)	利用効率の向上	小	長期	500	製造業(化学、セメント、石油等)、電気業、ゴミ処理場における給熱給湯、冷熱	
	G013	化学エネルギー変換高密度蓄熱材料・触媒・プロセスの開発	・アルコール、芳香族、多環芳香族化合物の水素化、脱水素反応用触媒(卑金属系) ・アンモニウム塩、Br系水和反応系蓄熱プロセス ・可逆的分子骨格変換触媒(光または熱)	利用効率の向上	大	長期	500	製造業(化学、セメント、石油等)、オンサイト熱供給業、給熱給湯、冷熱関連	
	G014	低摩擦表面素材/潤滑物質の開発	・新規炭素材料(DLC等)、無機・有機ハイブリッド表面コーティング、ナノ潤滑剤等 ・潤滑油のトライボロジーによる省エネ、高寿命材料、 ・固体表面のナノレベル分子配向制御	利用効率の向上	中	短期、中期	1,000	機械、エネルギー、一般製造業等広範囲	
	G015	高性能デシカント空調用高湿潤吸着材料の開発	・既存除湿冷房とのハイブリッド用吸着材料 ・高性能ゼオライト、シリカゲル、高分子ポリマー、多孔性配位高分子等 ・高濃度水溶性塩系材料(アンモニウム塩系等) ・ヒートポンプへの組み込み	利用効率の向上	大	短期、中期	500	空調設備、熱供給業、集合住宅、ショッピングセンター、コンビニ等関連産業	
再生可能エネルギー	G016	風力発電用新規材料の開発	・ポリプロピレン系高強度、軽量材料 ・オンサイト小型発電システム ・メンテナンスや解体処理がしやすい環境適合型部材 ・低損失潤滑剤	新エネルギー	大	中期、長期	1,000	照明、機械、住宅、オンサイトエネルギー産業	
	G017	色素増感型太陽電池材料の開発	・チタニア色素増感型、プラスチック基板型等 ・建材一体型太陽光利用材料:屋根以外の曲面構造部分への装着 ・安価(非Ru)色素増感剤開発	新エネルギー	中	中期、長期	1,000	オフィス、住宅、オンサイト小型発電、街路灯等	
	G018	薄膜シリコン型太陽電池材料の開発	・高効率アモルファス、微結晶シリコン材料 ・オンサイト小型発電システム:系統連携とのマッチング	新エネルギー	中	中期	1,000	照明、電子材料、住宅、オンサイトエネルギー産業	

サステイナビリティ	技術項目 (グレーは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色:プロセスイノベーション 青色:マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小:数万吨未満 中:数十万吨以下 大:50万吨以上	実用時期 短期:2016年以降 中期:2020年以降 長期:2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野
再生可能エネルギー	G019	有機半導体型太陽電池材料の開発		・p型半導体ポリマー、n型フラーレン等 ・家電等補助電源用システム ・発電のカスケード利用等材料的開発 ・マルチスケールコーティング&パターニング技術を用いた周辺技術の開発	新エネルギー	中	中期	1,000	照明、電子材料、住宅、オンサイトエネルギー産業
	G020	燃料電池(PEFC・SOFC)用新規材料の開発		・低価格化、普及を目的にPt代替電極、Pt代替膜 ・CO選択酸化触媒、水素製造装置等 ・高信頼性:酸化還元によるダメージの改善	コスト低減	大	中期、長期	1,000	電気業、ガス業、住宅、移動体(自動車、バス等)
	G021	ハイブリッド太陽電池材料及び次世代ナノ材料太陽電池材料の開発		・有機系、無機・有機複合化合物、クラスター金属利用高効率半導体(GIGSなど) ・オンサイト小型発電システム ・量子ドット太陽電池システム ・マルチエキシトン太陽電池システム	新エネルギー	中	中期、長期	500	照明、電子材料、住宅、オンサイトエネルギー産業
高効率水素製造	G022	高効率水素製造技術の開発		・高温水蒸気電解等 ・改質炉伝熱性向上技術 ・太陽光利用光触媒、原子炉熱利用技術 ・MOF等有機金属錯体の開発 ・オンサイトとオフサイト双方での製造・輸送技術	エネルギー転換	大	短期、中期	1,000	石油化学産業、ガス業、移動体(自動車、バス等)
	G023	水素貯蔵・輸送技術の開発		・合金ナノ粒子、有機金属材料による高密度貯蔵材料 ・超高压ガス容器不要の貯蔵、輸送技術 ・水素利用社会インフラ整備のための安全性技術 ・水素/都市ガス共通パイプライン利用技術(膜) ・有機ハイドレート	インフラ整備	大	中期、長期	1000	石油化学産業、電気業、ガス業、住宅、移動体(自動車、バス等)
代替材料(軽量・高強度材料)	G024	新規コンポジット樹脂材料の開発		・CFRP、炭素、無機有機ハイブリッド材料 ・セルロースナノファイバの高次構造を活かしたコンポジット樹脂材料 ・軽量・高強度・難燃性かつ成形性・加工性・リサイクル性に優れたコンポジット樹脂材料	省エネ、長寿命	中	短期、中期	1,000	建材、電子材料、機械材料、医療、パソコン等
	G025	超耐熱性、強度等を有する新規材料(ポリオレフィン類等)の開発(再掲)		・ポストメタロセン触媒、コモノマー材料 ・金属・高分子ハイブリッド材料 ・高密度、易加工ポリオレフィン材料の開発	省エネ、長寿命	大	短期、中期	1,000	建材、電子材料、機械材料、医療、輸送材料等
	G026	金属代替超軽量材料の開発		・有機無機ハイブリッド材料 ・超高密度高分子材 ・超軽量、超高強度を有する航空宇宙材料 ・導電性高分子材料	代替材料	大	中期、長期	1,000	建材、電子材料、機械材料、航空機及び自動車等車体等
	G027	光機能を有するプラスチック材料の開発		・ポリカーボネート、ポリメタクリレート等の高機能光ファイバ材料等 ・複合材料による光透過性向上、低減衰、高速応答等	機能性向上	中	中期、長期	1,000	建材、電子材料、機械材料、窓ガラス、パソコン、照明材料等
	G028	省エネ成形、易リサイクル型硬化性樹脂の開発(再掲)		・コモノマー、ハイブリッドモノマー利用材料・樹脂 ・超臨界ガス利用による発泡・加工 ・熱可塑性設計によるリサイクル材料	利用効率の向上	大	中期	1,000	建材、電子材料、機械材料、医療、輸送材料等
	G029	機能性接合、接着剤の開発		・高性能金属-樹脂接合材料 ・表面修飾、界面改質による接着機能向上	機能性向上	小	中期	500	機械材料、金属-樹脂加工等広範囲
	G030	薄膜塗装技術による防食材料の開発		・マグネ表面処理用脂環族モノマー等共重合材料 ・連続加工、塗装プロセス	機能性向上	小	短期	500	電子部品、パソコン・家電筐体、携帯電話、自動車部品等
	G031	自己修復スマート材料の開発		・有機・無機ハイブリッド、複合化プラスチック ・酵素材料、バイオマス材料の高度利用 ・バイオミメティック材料	機能性向上	中	中期、長期	500	医療、電子材料、機械材料、医療、輸送材料等
	G032	ノンフロン断熱・保温・保冷物質の開発(再掲)		・ポスト代替フロン断熱材料 ・超臨界CO <sub>2</sub> 利用空調システム ・環境への負荷がない新規保冷物質 ・低温暖化係数、低オゾン層破壊、環境適合型新規フロン化合物	ヒートアイランド対策	大	短期、中期	1,000	空調、建材
	G033	多孔質断熱材料の開発(再掲)		・廃土木資材利用による断熱材料 ・廃プラスチック利用多孔質断熱材料 ・廃建材利用による断熱材料 ・多孔質樹脂、バイオマスアロイを利用した断熱材	省エネ、長寿命	大	短期、中期	1,000	空調、建材
省エネのための化学品(生活環境材料)	G034	易リサイクル性断熱部材の開発(再掲)		・高断熱性成形樹脂、無機断熱材料 ・バイオ樹脂、バイオマスアロイを用いた易リサイクル性断熱部材 ・材料カスケードプロセス	省エネ、廃棄物削減	中	短期、中期	1,000	製造業(化学、石油、セメント、機械加工等)、空調、建材、
	G035	省電力照明材料の開発(再掲)		・超微量レアメタルによる次世代LED、有機EL、無機EL等材料 ・低価格発光材料の開発による普及:ZnO薄膜、ナノ材料	省エネ	大	短期、中期	1,000	街灯、ビル照明、コンビナート、住宅等
	G036	低摩擦性材料の開発		・添加剤、界面修飾による低摩擦タイヤ ・低摩擦性による省エネ効果 ・低摩擦潤滑剤の長寿命化	長寿命、廃棄物削減	中	短期、中期	1,000	自動車、移動体



サステイナビリティ	技術項目 (グレーは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色: プロセスイノベーション 青色: マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小: 数万吨未満 中: 数十万吨以下 大: 50万吨以上	実用時期 短期: 2016年以降 中期: 2020年以降 長期: 2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野
		2010							
エネルギー	IT向け化学品 (電子材料)	G037	新型高温超伝導材料の開発	・有機金属化合物系、有機・無機ハイブリッド複合材料 ・革新的原理に基づく新規高温超伝導材料 ・超伝導材料の革新的インフラ技術	省エネ、産業競争力	中	中期、長期	1,000	半導体関連産業 (太陽電池等)、住宅・ビル照明、電卓等
		G038	光利用率向上有機半導体材料の開発	・フラーレン系等新規材料 ・機能性ポリマーによる新規液晶材料	利用効率の向上	大	短期、中期	1,000	半導体関連産業 (太陽電池等)、住宅・ビル照明
		G039	新規封止材、絶縁材料、パワー半導体等の開発	・無機有機複合材料、ハイブリッド、ナノコンポジット等による高性能IT材料 ・ノンハロゲン系絶縁有機材料 ・SiC、GaN等次世代パワー半導体材料	機能性向上、廃棄物削減	小	短期、中期	500	電気・電子・精密機器関連産業
		G040	超高密度超ナノ情報素子材料の開発	・量子ナノデバイス、統合量子シリコンチップ等 ・スピントロニクス素子材料	機能性向上	小	短期、中期	500	コンピュータ・情報電子関連産業
	原子力	G041	廃棄物の高効率減容化、リサイクル技術の開発	・化学処理、超臨界利用等による放射能被曝材料の減容化	廃棄物削減	大	短期、中期	1,000	電力供給産業
	耐熱・伝熱材料	G042	新規高伝熱材、熱損失抑制用材料の開発	・超合金による複合材の高密度発泡、超耐熱(1000℃超)材料 ・非金属、炭素材料による耐熱材料	省エネ	中	中期、長期	500	建材、プラント、エネルギー
	エネルギー変換・活用材料	G043	高分子アクチュエータの開発	・機能性たんぱく質、機能性ポリマーの開発 ・ナノセンサーとの組み合わせによりマイクロマシン	機能性向上	中	中期、長期	1,000	精密機器・ロボット・マイクロマシン関連産業
資源	低品位資源利用技術	G044	バイオマス、未利用有機資源からの合成ガス・化学品の製造	・環境負荷の小さい原材料前処理技術 ・安定原料確保のための原料供給・利活用モデル ・化学品原料向けGTL(低鎖長留分、オレフィンリッチ) ・DME直接合成/間接合成、エタノール及びエタノール經由エチレン製造等 ・バイオマスから基幹中間原料の一貫製造プロセス ・合成・バイオリアファイナリーの展開	資源確保 産業競争力	大	中期、長期	1,000	石化基礎品産業、 液体燃料関連産業
		G045	低品位ガス系化石資源、メタンハイドレート、コールベットメタン等からのオレフィン、芳香族化合物製造技術の開発	・脱硫、脱窒素系触媒 ・低温水素化分解触媒 ・各種化学品変換触媒 ・メタンホモゲネーション ・エタン酸化脱水素 ・高密度酸化によるエチレン製造 ・酸化脱水素触媒	資源確保 産業競争力	大	中期、長期	1,000	液体燃料関連産業、 基礎化学品産業、 電力供給関連産業
		G046	低品位固体系化石資源からのナフサ留分、オレフィン等の製造	・脱硫、脱窒素系触媒 ・低温水素化分解触媒 ・コンデンセート、重質油、石油コークス、オイルサンド等分解プロセス ・蒸留分離以外の分離プロセス(物理吸着・吸収、化学吸着・吸収、分離膜)、 マイクロチャネル伝熱利用分離	資源確保 産業競争力	大	短期、中期	1,000	石化基礎化学品産業
		G047	各種資源の接触法による芳香族、オレフィン等製造	・ナフサ接触分解技術 ・新規ゼオライト、複合貴金属触媒新による収率・選択性向上 ・新規流動相・固定床反応プロセス ・高寿命高性能新規触媒(固体酸・固体塩基)の開発 ・酸化脱水素法によるオレフィン製造用触媒 ・高効率膜分離プロセス	省エネ 資源確保 産業競争力	大	短期、中期	1,000	石化基礎製品
		G048	化学品、電力、熱のトリジェネレーション	・低温吸熱、発熱発熱用反応対応触媒、及びプロセス ・高度エクセルギー解析技術、製造工場間のエネルギー関連フローの統合化技術 ・コンビナート再生、生産効率向上のためのプロセス設計技術	省エネ、 産業競争力	大	中期、長期	1,000	化学産業、鉄鋼産業、 エネルギー、 コンビナート関連産業
		G049	石炭ガス化発電(IGCC)と化学品の併産	・石炭ガス化発電、化学品併産に使える機能性触媒 ・生産多様化、高効率CO2回収・利用プロセスの構築 ・安価酸素製造技術	省エネ、 産業競争力	大	中期、長期	500	火力発電と化学品製造
	次世代蓄電材料技術	G050	超高蓄電型二次電池材料の開発(再掲)	・安全性の高い、正負極活性物質、炭素電極、電解液、セパレーター(膜)等 ・高出力密度汎用型電気二重層キャパシタ ・ナノファイバー電極、セパレーター	省エネ、 産業競争力	中	短期、中期	1,000	商用施設、住宅、 オンサイト小型発電、 自動車等
G051		新しい電池材料の開発(再掲)	・次世代リチウムイオン電池向け材料:リチウム硫黄系新固体電解質、不燃性有機電解質、非Co系正極 ・新型ニッケル・水系電池、リチウムポリマー電池、リチウム硫黄系電解質等	省エネ、 産業競争力	中	短期、中期	1,000	商用施設、住宅、 オンサイト小型発電、 移動体、パソコン、 携帯電話等	
G052		有機ラジカル電池・レドックス高分子材料の開発(再掲)	・非リチウムイオン電解質 ・短時間充電、高容量、高出力で発火や爆発リスクの低い有機/ラジカルポリマー電池	省エネ、 産業競争力	小	短期、中期	100	商用施設、住宅、 オンサイト小型発電等	

サステイナビリティ	技術項目 (グリーンは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色:プロセスイノベーション 青色:マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小:数万吨未満 中:数十万吨以下 大:50万吨以上	実用時期 短期:2016年以降 中期:2020年以降 長期:2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野
		2010							
資源	次世代蓄電材料技術	G053	高蓄電池用電解液の開発(再掲)	・新規な高容量・安全なイオン液体:イミダゾリウムやピリジニウムのリチウムイオン液体	省エネ、産業競争力	小	中期、長期	100	商用施設、住宅、オンサイト小型発電、移動体、パソコン、携帯電話等
		G054	移動電源、及び固定電源用高蓄電エネルギー材料の開発(再掲)	・新型固体電解質、電解質膜、イオン液体等の開発:不燃性により安全性向上、移動体等への適用	省エネ、産業競争力	大	中期、長期	1,000	電子機器、バス、電車等用エネルギー供給・利用関連産業
		G055	個人用移動システム駆動源の開発(再掲)	・軽量小型電池等の開発:体積および重量あたりの蓄電容量および出力とも大きい高性能電池	省エネ、産業競争力	小	中期、長期	100	機械ロボット、車椅子
	稀少金属の有効利用と代替材料技術	G056	希少元素、貴金属代替新材料の開発	・ニッケル、コバルト、モリブデン、タングステン、リチウム、インジウム、希土類、タンタル、白金族、ホウ素等を代替する新材料 ・カーボンアロイ触媒	資源確保 産業競争力	中	短期、中期	1,000	電子部品、パソコン・家電筐体、携帯電話、自動車部品等
		G057	高耐熱材料の開発	・稀少金属やNi,Co,Wを使わない高耐熱性材料 ・タービン用耐久性新規高耐熱材料 ・熱分解反応器、水蒸気改質反応器、バーナーノズルに使用可能な稀少金属を使わない高耐熱性材料 ・原子炉、核融合炉用高耐熱性材料	資源確保 産業競争力	中	中期、長期	1,000	電子部品、パソコン・家電筐体、携帯電話、自動車部品等
		G058	希少金属、特定元素資源の抽出・リサイクル技術の開発及び代替材料の開発	・低品位鉱物原料・廃棄物(都市鉱山)からの稀少金属資源の分離・回収 ・触媒、製品等に使用される稀少金属資源の分離・回収、代替 ・環境リサイクル型設計	資源確保 産業競争力	中	中期、長期	1,000	電子部品、パソコン・家電筐体、携帯電話、自動車部品等
	非枯渇性資源の化学品・材料(化学品原料の転換・多様化)	G059	バイオマスからの化学品原料製造技術	・ウレタンポリオール、ファインケミカルズ、中間原料 ・ポリアミド4、リグニン誘導体(熱硬化性樹脂、接着剤、ピロジカルボン酸等)等化学品 ・高選択的プロセス、完全水添触媒プロセス ・マイクロ構造を活かした機能性樹脂、バイオマスアロイ	資源確保 産業競争力	中	中期	500	化粧品、食品、接着剤、洗剤、医薬品、合成繊維等高分子関連産業
		G060	構造保持セルロースによる機能化学品製造技術	・セルロース繊維のシングルナノファイバーへの転換 ・触媒酸化技術によるセルロース変換 ・軽量高強度材料 ・機能性バイオマス樹脂、バイオマスアロイ	資源確保 産業競争力	小	中期、長期	500	化粧品、医薬品、自動車、建材、合成繊維等高分子関連産業
		G061	新規酵素等を利用したバイオマスの利用技術	・酸化還元酵素による高分子モノマー、ファインケミカルズ製造 ・酵素モジュール触媒プロセス	資源確保 産業競争力	中	長期	500	化粧品、食品、洗剤、医薬品、合成繊維等高分子関連産業
		G062	油脂等からの化学品原料・液体燃料製造技術	・グリセリン副生抑制プロセス ・油脂系バイオマスからの有効成分の高効率抽出、分離プロセス	資源確保 産業競争力	中	中期、長期	500	化粧品、食品、接着剤、洗剤、医薬品、合成繊維等高分子関連産業
		G063	気体原料や非食糧資源からのプラスチック、モノマー等化学品製造技術の開発	・バイオガス、空気等気体原料を原料とする化学品原料製造技術 ・非食糧資源を原料とするポリ乳酸、PBS等、L-乳酸、D-乳酸、バイオエタノール/ブタノール、BTL等製造 ・セルロースの革新的糖化技術 ・セルロースナノコンポジットを用いた光通信関連部材、ディスプレイ部材等の開発	省エネ 資源確保 産業競争力	大	中期、長期	1,000	化学品原料、自動車、電機電子、日用品等広範囲
	易リサイクル加工用材料とプロセス	G064	積層フィルムの代替材料、及び易リサイクル材料(再掲)	・フィルムの単層化、相溶化等によるリサイクル性の向上:単相化フィルムでのパッケージ性能保持 ・易剥離性積層フィルムと易解体接着剤の開発 ・光配線フィルム材料 ・リサイクル可能な同時多層積層成膜製造技術 ・環境適合型重層製膜プロセス	資源確保、リサイクル	中	短期、中期	500	包材、建材、日用品
		G065	解体性接着材料と易リサイクル加工法	・機能性マイクロカプセル、エポキシ樹脂等材料の改良 ・多機能多成分性接着剥離用フィルム ・新たな剥離プロセス:熱、通電、発泡などによる接着材料の剥離プロセス構築	省エネ、省資源	小	短期、中期	500	包材、建材、文房具、等
		G066	易リサイクル、易分解性粘着剤及び自己剥離材料の開発(再掲)	・非エポキシ系樹脂等のリサイクル材料:リサイクルが困難な熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂を代替 ・熱可塑性樹脂の活用によるリサイクル性の向上	資源確保、リサイクル	小	中期	500	建築土木、自動車、電機電子等
	CO2分離・回収・利用技術	G067	GO2等の分離・回収	・分離方法の確立(化学吸収法、物理吸収/吸着法、膜分離法、未利用低品位熱利用による吸収液再生法) ・化学吸収(未利用廃熱利用、低再生エネルギー吸収液開発) ・膜分離(高選択性膜開発、分離膜の大型化、連続製造) ・MOF等有機金属錯体の開発	地球環境、リサイクル	大	長期	500	電力供給産業・鉄道
		G068	超臨界流体の加工プロセスへの利用(再掲)	・超臨界CO2による塗装、表面処理、重合、発泡、複合化、洗浄、めっき等、選択的分解、可溶化等 ・有機溶媒代替反応場	リスク削減	小	短期	500	機械、金属加工産業

サステイナビリティ	技術項目 (グレースは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色: プロセスイノベーション 青色: マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小: 数万吨未満 中: 数十万吨以下 大: 50万吨以上	実用時期 短期: 2016年以降 中期: 2020年以降 長期: 2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野
		2010							
資源	フッ素資源リサイクル(フッ素化学)	G069	CO <sub>2</sub> を原材料としたポリカーボネート樹脂等化学品製造技術の開発	・脂肪族、芳香族ポリカーボネート等化学品製造技術 ・低温、低濃度CO <sub>2</sub> 活性触媒	資源確保 リスク削減	中	中期、長期	500	電機電子、包材、窓、封止材等
		G070	フッ素系機能化学品代替材料の開発	・低温硬化係数、低オゾン層破壊、新規環境適合型含フッ素化合物 ・冷媒、発泡剤、噴射剤、絶縁材、半導体/液晶用代替材料 ・炭化水素系、ヘテロ化合物系代替物質	資源確保 産業競争力	中	中期、長期	500	機能性化学品・樹脂関連産業、電機電子等
		G071	廃蛍石、低品位鉱石等からのフッ化水素酸回収・製造技術の開発	・低濃度フッ素含有原料からの濃縮、分離技術: フロン類、フッ素樹脂からのフッ素の回収、再生利用のため高純度CaF <sub>2</sub> 回収技術	リサイクル、資源確保	中	短期、中期	500	電機電子、鉄鋼、化学品関連産業
		G072	フッ素樹脂リサイクル技術の開発	難リサイクル材からの再利用、リサイクルプロセス ・カスケード利用プロセス	リサイクル、資源確保	小	短期、中期	500	樹脂リサイクル関連産業
	微細構造・精密構造形成技術	G073	印刷法による革新的加工材料開発(プリンタブルエレクトロニクス)	・印刷技術による有機トランジスタ、電子回路製造を可能とする材料・プロセス ・硬化性、絶縁性、耐熱性等の機能を持たせたインク材料開発 ・大画面、高精細等の精密印刷技術、プロセスの低温化。	省エネ、省資源	大	短期	1,000	情報電子機器製造関連産業
		G074	分子自己組織化を利用した高性能ナノ・マイクロ材料の開発	・電子材料、記憶素子用熱硬化性、光硬化性樹脂 ・核酸やコラーゲン、抗体などの選択的結合を模した機能性高分子複合体)	省エネ、省資源	小	短期	500	情報電子機器製造関連産業
		G075	ナノ三次元構造制御による材料加工プロセスの開発	・熱溶解鋳型、溶媒溶解鋳型高分子材料 ・微小重力、光加工プロセス	省エネ、省資源	中	短期	1,000	情報電子機器・精密機器製造関連産業
		G076	新規リソグラフィ加工技術の開発	・ナノインクプリントを利用した電気化学法、表面処理等による加工技術: ナノレベルのインクによるリソグラフィ技術	省エネ、省資源	小	短期	500	情報電子機器・精密機器製造関連産業
	水処理プロセス	G077	工業用超高純度水(再掲)	・次世代NF、RO、耐酸化性非フッ素膜等による水循環 ・オンプレックス、MBR等による難分解物質分解プロセス ・酸化剤、酸化剤沈殿による汚泥削減プロセス ・汚染湖沼河川浄化用バイオマス由来大量安価な浄化膜	資源確保 産業競争力	大	短期、中期	1,000	めっき業、化学・石油、医薬品、コンピナート等広範囲の製造業
		G078	洗浄機能水の開発	・機能水の安定化(長寿命化) ・機能水、超純水の安価製造プロセス ・不純物回収分離膜プロセス	資源確保 産業競争力	中	短期	1,000	航空機、電気・電子・精密機器関連産業
	ナノ材料	G079	エレクトロニクス・マイクロマシン用ナノ実装材料の開発	・無機有機ハイブリッドナノ材料 ・電気化学プロセスによる新規ナノ材料製造技術: 新規磁性ナノ粒子などを組み込んだ高次機能性ハイブリッド材料・プロセス	省資源 産業競争力	小	短期	500	電気・電子・精密機器関連産業
		G080	新規低誘電率ナノ材料の開発	・新規メソポーラス体材料の開発(誘電率1.3以下) ・次世代半導体製造技術	省エネ、省資源	小	中期	100	電気・電子・精密機器関連産業
		G081	光学機能用材料の開発	・ケイ素系ナノコンポジット有機無機等透明材料 ・ナノ技術による高屈折率光学透明材料 ・熱線吸収透明材料 ・ナノファイバー材料	省エネ、省資源	小	中期	100	光学加工、レンズ、医療、分析機器等
	バイオポリマー	G082	易リサイクル、カスケードリサイクル材料の開発	・リサイクルし易いバイオ樹脂、コンポジット材料、バイオマスアロイ等の製造 ・モノマー段階からの分子設計と重合技術開発	資源確保 産業競争力	小	長期	100	コンシューマプロダクト
		G083	生分解性次世代ゴム材料の開発(再掲)	・エラストマー、コンポジットによる弾性材料 ・バイオマスからの多輪環誘導体等を原料とした弾性体 ・バイオマス、ゴムのハイブリッド型弾性材料	省エネ、省資源	中	中期	1,000	建設部材、家電、食器等
	海洋開発	G084	化学技術による海洋開発	・造水、メタンハイドレート、CO <sub>2</sub> 固定、ウラン・リチウム等希少元素の分離、回収技術 ・海洋バイオマス、有用有機・無機資源の効率的回収、利活用技術	資源確保 産業競争力	中	中期、長期	1,000	資源・エネルギー関連産業
	元素資源の確保	G085	めっきスラッジ等からの金属回収、減容化技術の開発	・新規凝集材、固化材による汚泥削減と有用資源(Ni, Zn, Cr他)の回収 ・油水分離プロセスによる金属イオン回収 ・微生物を利用した金属分離回収	省資源 産業競争力	大	短期、中期	1,000	金属資源リサイクル関連産業・金属加工業・電機電子産業
	複合材料処理	G086	化学処理による複合材料・混紡繊維等リサイクル技術の開発	・界面活性型抽出・分離プロセス ・繊維リサイクルのための炭化水素系溶媒分離プロセス	省エネ、省資源	小	短期、中期	100	高分子素材リサイクル関連産業
	環境	G087	クリーン再資源化可能な塩化ビニル樹脂	・有機溶剤の回収再利用 ・塩化ビニル樹脂および可塑剤の回収再使用率アップ ・有害安定剤を使用しない塩化ビニルの開発	リスク削減、資源多様化	大	中期、長期	1,000	資源リサイクル関連産業・化学・電機電子等の製造業

サステイナビリティ	技術項目 (グリーンは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色:プロセスイノベーション 青色:マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小:数万吨未満 中:数十万吨以下 大:100万吨以上	実用時期 短期:2016年〜 中期:2020年以降 長期:2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野
環境	ハザード管理されたハロゲン製品	G088	過酸化水素酸化を利用した高機能材料製造技術	・過酸化水素等による新酸化プロセス ・ハロゲンを含まない超高機能電子材料	リスク削減、資源多様化	大	中期、長期	1,000	封止材、プラスチック、医薬品、絶縁材料等
		G089	ジクロロメタン代替物質としての機能水	・有害なジクロロメタン代替溶剤としての機能水 ・物理的・化学的方法で機能付与	リスク削減、国際規制	中	短期、中期	500	脱脂洗浄(機械加工、電子材料)、有機合成溶媒
		G090	生活用浄水技術(再掲)	・非塩素系消毒、微量有機物/無機物対策、膜技術、光分解触媒等 ・オンサイト小型浄水処理プロセス	水資源、リサイクル	大	中期、長期	500	下水道、過疎地排水等
		G091	CO <sub>2</sub> 利用ノンハロゲンプロセスの開発	・CO <sub>2</sub> をつかったポリカーボネート、ウレタン、イソシアネート等化学品製造プロセス ・合成ガス原料の効率化製造プロセス	リスク削減、資源多様化	中	中期、長期	500	基礎化学品、ファインケミカル製造業
		G092	ノンフロン洗浄剤、溶剤、機能材料の開発	・新規酸化水素系脱フロン代替溶剤(配合技術、添加剤等) ・環境負荷が小さい新規フロン洗浄剤の開発	国際規制産業基盤	小	短期、中期	100	電気・電子機器・機能材料関連産業
		G032	ブロム及びリンフリー新規難燃材料の開発(再掲)	・表面修飾、クラスター加工によるハイブリッド化、微細構造化 ・シリコン系、複合金属系新規難燃剤:ポリカーボネート、発泡ウレタン	リスク削減、国際規制	大	短期、中期	1,000	電気・電子機器・機能材料関連産業
		G093	ノンフロン断熱・保温・保冷物質の開発(再掲)	・ポスト代替フロン断熱材料 ・超臨界CO <sub>2</sub> 利用空間システム ・環境への負荷がない新規保冷物質 ・低温硬化係数、低オゾン層破壊、環境適合型新規フロン化合物	リスク削減、国際規制	大	短期、中期	500	建材・食品保管・輸送関連産業
	製造工程廃棄物・副生物の大幅削減	G094	新規固体酸・塩基触媒による化学プロセスのグリーン化	・塩化アルミニウム、硫酸、硝酸等の代替触媒(ゼオライト、Ti系触媒、ヘテロポリ酸) ・カボラクタム、MMA、ニトロ化合物プロセスのグリーン化	廃棄物削減、資源多様化	大	中期、長期	1,000	医薬品、香料、石油製品、潤滑油、電子材料、農業、防食剤等
		G095	従来型有機合成のシンプル化	・合成ルートの転換、触媒反応化、溶媒転換、精製工程転換等を含む副原料削減 ・新触媒による大型生産プロセスへの転換(医薬原体、電子材料等) ・マイクロリアクター(流体特性)と触媒(分子特性)の最適化探索	廃棄物削減、資源多様化	大	中期、長期	1,000	医薬品、香料、石油製品、潤滑油、電子材料、農業、自動車部品、建材、液晶材料等
		G096	ナノ空間触媒による新合成プロセス	・石油化学プロセス用触媒、ナフサ接触分解等 ・新規触媒によるエステル化、骨格異性化反応の効率改善とグリーン化	省エネ、廃棄物削減、資源多様化	大	中期、長期	500	石油化学製品、光学材料、医薬・農業等製造業
		G097	低環境負荷型廃水処理の開発	・化学/物理ハイブリッド処理によるバイオプロセスの効率化 ・汚泥の減量、再利用等のための新規処理剤 ・(工場)排水の高清浄化・有害成分の高濃縮回収技術(高濃縮と高濃縮の両立)	省エネ、省資源	大	中期、長期	1,000	水処理業
	環境負荷が小さい製品	G025	超耐熱性、強度等を有する新規材料(ポリオレフィン類等)の開発(再掲)	・ポストメタロセン触媒、コモノマー材料 ・金属、高分子ハイブリッド材料 ・高密度、易加工ポリオレフィン材料の開発	省エネ、長寿命	中	短期、中期	1,000	建材、電子材料、機械材料、医療、輸送材料等
		G098	易リサイクル型高弾性ゴムの開発(再掲)	・高純度モノマー材料による易リサイクル ・配合技術を利用したカスケード利用	省エネ、省資源	中	省エネ、省資源	1,000	建設部材、家電、食器等
		G099	環境安全性が高い添加剤の開発	・ポリオレフィン等向け添加剤材料 ・天然由来添加剤	資源多様化、安全	小	中期	100	レザー製品、壁紙、電線等
		G100	植物由来原料からの高性能防錆剤の開発	・松脂等からの防錆剤 ・新規モノマー/樹脂開発 現行樹脂の改良	資源多様化、安全	小	中期	100	家具、建材、食料品防食等
		G101	アスベスト代替シール材の開発	・膨張黒鉛の改良 ・つなぎ目のない配管材料の開発 ・粘土鉱物等とのハイブリッドシール材	国際規制産業基盤	大	短期、中期	500	化学・石油プラント、製鉄、発電所等大型プラント、配管設備施工関連産業
	環境負荷が小さい加工プロセス	G102	亜臨界、超臨界流体を利用した表面処理技術	・超臨界CO <sub>2</sub> による塗装、表面処理、重合、発泡、複合化、洗浄、めっき等	リスク削減	中	短期	500	機械、金属加工産業
		G103	ジクロロメタン代替としての洗浄プロセス	・超臨界流体による半導体、機械等の精密洗浄 ・洗浄プロセスの開発	リスク削減、国際規制	中	短期、中期	500	脱脂洗浄(機械加工、電子材料)、有機合成溶媒
G104		脱VOCリソグラフィエターニング技術の開発	・非VOC型液状硬化性樹脂 ・液状効果性樹脂によるナノインプリントプロセス	リスク削減	中	短期	500	電気・電子・精密機器関連産業	
革新的燃焼による大気環境の保全	G105	クリーン燃料(水素以外)・清浄燃焼技術の開発	・リンバーン燃焼触媒の性能向上、耐熱性、長寿命化 ・高濃度酸素の製造技術による煤煙、NOx等抑制技術 ・重質残油クリーン燃料転換	地球環境、産業競争力	大	短期、中期	1,000	自動車、エネルギー、化学・石油・製鉄プロセス	
	G106	燃焼排ガス浄化技術の開発	・NOx直接分解触媒、DPF触媒等による排ガス浄化:EOP向け燃焼触媒	地球環境、産業競争力	大	短期、中期	1,000	セメント、廃棄物処理業、小型発電機等	



サステイナビリティ	技術項目 (グリーンは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色:プロセスイノベーション 青色:マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小:数万吨未満 中:数十万吨以下 大:100万吨以上	実用時期 短期:2016年以前 中期:2020年以降 長期:2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野
環境	水環境の保全	G107	非金属元素含有排水の高度処理技術の開発	・バイオマス、シリカ系吸着材によるBF回収 ・アナモックス菌による硝酸性窒素等分解プロセス	水資源、リサイクル	中	中期、長期	500	金属加工、化学プラント、医薬品、上下水処理
		G108	難分解性物質含有排水の高度処理技術の開発	・オゾン曝気、MBR等による高効率分解プロセス ・油水分離プロセスによる分離	水資源、リサイクル	中	中期、長期	500	金属加工、化学プラント、医薬品、上下水処理
		G109	植物・バイオマス起源生分解性溶剤の開発	・天然物起源生分解性溶剤:乳酸エステルなどの環境対応溶媒	資源多様化、リスク削減	小	中期、長期	100	洗剤、香料、プラスチック容器、化粧品等
		G110	環境調和型潤滑油添加剤、及び生分解性潤滑油の開発	・天然物由来原料(誘導體化)による生分解性潤滑油:アミノ酸系など生分解性潤滑油	資源多様化、リスク削減	小	中期、長期	100	洗剤、香料、食品加工、機械加工、化粧品等
		G111	易生分解性界面活性剤の開発(再掲)	・天然物由来原料(誘導體化)による生分解性界面活性剤:アミノ酸や脂肪酸系界面活性剤	資源多様化、リスク削減	小	中期、長期	500	洗剤、香料、食品加工、洗浄剤、化粧品等
		G112	リン資源の高効率回収、代替技術の開発	・排水や機能性製品等に含まれるリン回収 ・土壌からの残存P回収プロセス ・非リン系農薬、PFOS,PFOA対応	国際規制、資源確保	中	短期、中期	500	農薬、消化剤、プラスチック等
		G113	重金属含有排水、汚泥の新規高度処理技術の開発	・回収重金属のカスケード利用:精練、精製 ・回収汚泥のカスケード利用:スラッジからの重金属回収、精練、精製	省エネ、省資源	大	中期、長期	1,000	無機系資源リサイクル関連産業・化学・電機電子等の製造業
	リサイクル促進	G114	無機系副生物・廃棄物のリサイクル、及びカスケードリサイクル技術の開発	・金属イオン回収材、磁性プロセスの効率化 ・酸化物固化、廃棄材による汚泥減容等 ・廃酸・廃アルカリ含むリサイクル技術	省エネ、省資源	大	中期、長期	1,000	無機系資源リサイクル関連産業・化学・電機電子等の製造業
		G115	易リサイクル型コンポジット材料の開発	・GFRP、ナノファイバー等コンポジット材料 ・ナノテクの応用などでコンポジット率を低減化 ・バイオ樹脂、バイオアロイをベースとした易リサイクル型コンポジット材料	省エネ、省資源	中	中期、長期	1,000	自動車、電機電子、建材等
		G028	省エネ成形、易リサイクル型硬化性樹脂の開発(再掲)	・コモノマー、ハイブリッドモノマー利用材料・樹脂 ・超臨界ガス利用による発泡・加工 ・熱可塑性設計によるリサイクル材料	省エネ、省資源	中	中期、長期	500	電機電子等広範囲
		G064	積層フィルムの代替材料、及び易リサイクル材料(再掲)	・フィルムの単層化、相溶化等によるリサイクル性の向上:単相化フィルムでのバックージ性能保持 ・易剥離性積層フィルムと易解体粘着剤の開発 ・光配線フィルム材料 ・リサイクル可能な同時多層積層成膜製造技術 ・環境適合型重層製膜プロセス	資源確保、リサイクル	中	短期、中期	500	包材、建材、日用品
		G033	多孔質断熱材料の開発(再掲)	・廃土木資材利用による断熱材料 ・廃プラスチック利用多孔質断熱材料 ・廃塗材利用による断熱材料 ・多孔質樹脂、バイオマスアロイを利用した断熱材	省エネ、長寿命	大	短期、中期	1,000	空調、建材
		G034	易リサイクル性断熱部材の開発(再掲)	・高断熱性成形樹脂、無機断熱材料 ・バイオ樹脂、バイオマスアロイを用いた易リサイクル性断熱部材 ・材料カスケードプロセス	省エネ、廃棄物削減	中	短期、中期	1,000	製造業(化学、石油、セメント、機械加工等)、空調、建材、
		G116	高機能繊維材料の開発	・新ポリウレタン材料(体感向上素材、温湿度コントロール、撥水、耐熱・耐薬) ・天然由来原材料の高度化利用	資源多様化、生活向上	小	短期、中期	500	繊維、装飾品等
		G027	光機能を有するプラスチック材料の開発(再掲)	・ポリカーボネート、ポリメタクリレート等の高機能光ファイバ材料等 ・複合材料による光透過性向上、低減減、高速応答等	機能性向上	大	中期、長期	1,000	建材、電子材料、機械材料、窓ガラス、パソコン、照明材料等
生活	日用品の快適性向上と低消費化	G117	軽量化素材	・有機無機コンポジット、バイオマス原料による高度製造技術 ・金属代替材料(エンブラ等)の低価格化	省エネ、省資源	大	短期、中期	1,000	自動車、寝具、家具等
		G035	省電力照明材料の開発(再掲)	・超微量レアメタルによる次世代LED、有機EL、無機EL等材料 ・低価格発光材料の開発による普及:ZnO薄膜、ナノ材料	省エネ	大	短期、中期	1,000	街灯、ビル照明、コンビナート、住宅等
		G118	電気製品の汎用修理可能な機能材料	・製造容易でリサイクル可能な材料開発(例えばCPUボードの換装)	リサイクル、産業競争力	小	短期、中期	500	電気製品、電子材料、太陽光発電、液晶材料等
	G119	高機能性食品包材	・保冷・酸化防止・脱水・保湿・遮光材料 ・エチレン吸収材 ・空気透過性高分子材料	生活向上、安全	小	短期、中期	500	食品加工・包装・流通・輸送関連産業	
	食の安全と量の確保	G120	システム農業資材(肥料・農薬を含む)	・生分解性肥料、殺虫剤、農薬 ・水性培地材料の開発 ・生育工業光源材料 ・家庭菜園への提供	食糧確保、国際競争力	大	短期、中期	1,000	食料品、医薬品
G121		耐塩・耐寒性穀物	・ゲノム育種と開発の実証 ・ムギ・イネの有用遺伝子探索 ・遺伝子操作・解析技術開発	生活向上、安全	小	短期、中期	500	食品加工・包装・流通・輸送関連産業	

サステイナビリティ	技術項目 (グレーは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色:プロセスイノベーション 青色:マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小:数万吨未満 中:数十万吨以下 大:100万吨以上	実用時期 短期:2016年〜中期:2020年以降 長期:2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野		
										2010	
生活	快適な省資源ロングライフ住宅	G122	水分、養分保持材料の開発	・高性能吸水性材料(長期保存) ・エチレン吸収剤	生活向上、安全	中	短期、中期	500	食品加工・包装・流通・輸送関連産業		
		G123	200年住宅用外装・内装材料・断熱材	・高分子、金属ハイブリッド断熱材等 ・耐紫外線塗料、ペンキ材料 ・光触媒による防汚、浄化材料	生活向上、安全	大	短期、中期	1,000	建材・居住用素材関連産業		
		G124	高効率太陽電池材料	・負荷変動対応型高密度蓄電材料(家庭用) ・高効率かつ低価格な太陽光電池 ・家庭の形状に適応可能な柔軟性材料 ・有機太陽電池	新エネルギー	大	中期、長期	500	照明、電子材料、住宅、オンサイトエネルギー産業		
		G035	省電力照明材料の開発(再掲)	・超微量レアメタルによる次世代LED、有機EL、無機EL等材料 ・低価格発光材料の開発による普及:ZnO薄膜、ナノ材料	省エネ	大	短期、中期	1,000	街灯、ビル照明、コンビナート、住宅等		
		G032	フロム及びリンフリー新規難燃材料の開発(再掲)	・表面修飾、クラスター加工によるハイブリッド化、微細構造化 ・シリコン系、複合金属系新規難燃剤:ポリカーボネート、発泡ウレタン	リスク削減、国際規制	中	短期、中期	1,000	電気・電子機器・機能材料関連産業		
		G125	重塗装用完全水性塗料の開発(再掲)	・新規オリゴマー高分子材料による硬化剤、基剤塗料 ・ミニエマルション材料による新塗料	地球環境、産業競争力	大	短期、中期	1,000	建材、道路、大型構造物(ビル、橋)等		
		G126	ノンVOC含有建材用材料の開発	・水性、シリコン系接着剤及び接合材料 ・接着剤を使わない接合技術	リスク削減、生活向上	大	短期、中期	1,000	建材・居住用素材関連産業		
		G127	ノンVOC系塗料・インキの開発	・完全水性塗料、インキ材料 ・非溶剤型塗料、インキ	リスク削減、生活向上	中	短期、中期	500	文具、建材、組み立て加工関連産業		
		G128	安全性殺虫防虫剤・防かび剤・除菌剤の開発	・光触媒、ナノ触媒型抗菌剤(Ag/TiO <sub>2</sub> ) ・天然物由来触媒	リスク削減、生活向上	小	短期、中期	500	農業、食品加工、衛生関連素材・管理関連産業		
		G129	完全防臭・消臭材料の開発	・ナノ触媒型消臭剤として(ZnO/TiO <sub>2</sub> ) ・ナノ孔型消臭剤(ナノゼオライト他) ・高寿命消臭分解型材料	リスク削減、生活向上	中	短期、中期	500	農業、食品加工、衛生関連素材・管理関連産業		
		G130	遮音、遮熱、断熱、電磁波遮蔽材料の開発	・遮音、遮熱、断熱可能な新規ガラス、新規建材 ・断熱効果が高く安全な塗料等 ・電磁波を効率的に遮断する材料	リスク削減、生活向上	大	短期、中期	1000	建材、構造物、空調設備、ホール等		
		G032	ノンフロン断熱・保温・保冷物質の開発(再掲)	・ポスト代替フロン断熱材料 ・超臨界CO <sub>2</sub> 利用空調システム ・環境への負荷がない新規保冷物質 ・低温暖化係数、低オゾン層破壊、環境適合型新規フロン化合物	ヒートアイランド対策	大	短期、中期	1,000	空調、建材		
		G033	多孔質断熱材料の開発(再掲)	・塵土木質材利用による断熱材料 ・廃プラスチック利用多孔質断熱材料 ・廃建材利用による断熱材料 ・多孔質樹脂、バイオアロイによる断熱部材	省エネ、長寿命	大	短期、中期	1,000	空調、建材		
		G034	易リサイクル性断熱部材の開発(再掲)	・高断熱性成形樹脂、無機断熱材料 ・バイオ樹脂、バイオマスアロイを用いた易リサイクル性断熱部材 ・材料カスケードプロセス	省エネ、廃棄物削減	大	短期、中期	1,000	製造業(化学、石油、セメント、機械加工等)、空調、建材、		
		G131	耐震材料の開発	・軽量、超強度プラスチック材料 ・免震ゴム、 ・耐震工法適合材料	生活向上、安全	大	短期、中期	1,000	建材・居住用素材関連産業		
		生活	容易で安全な医療・介護と身体機能補助	G132	介護ロボット用構成材料の開発	・新規金属・高分子軽量材料 ・感情変化、触感、臭い検知センサー ・目的に適合した機能ソフト	生活向上、安全	小	短期、中期	1,000	医療・医用材料関連産業
				G133	身体補助材料の開発	・(人工筋肉など)高性能身体補助材料 ・人体に親和性の高い機能を実現する材料 ・拒絶反応のない長期安定材料	生活向上、安全	小	短期、中期	1,000	医療・医用材料関連産業
				G134	医薬・診断薬の開発	・独自性の高い医薬品 ・機能性タンパク質検出用簡易キット ・生活習慣病をモニタリングできるデバイス ・簡易で信頼性のある診断薬、キット、診断システムの開発	生活向上、安全	小	短期、中期	1,000	医療・医用材料関連産業
G135	長寿命ペースメーカー用電池の開発			・高密度小型電池材料(次世代リチウム電池等) ・軽量化、安全性向上	生活向上、安全	小	短期、中期	1,000	医療・医用材料関連産業		
G136	簡易人工透析システムの開発			・人工透析用新規分離材料:取り扱いやすく安価な透析膜 ・院外で安全に人工透析を行うシステム	生活向上、安全	小	短期、中期	1,000	医療・医用材料関連産業		
G137	細胞(骨髄等)代替担体材料の開発			・2次元/3次元の成形性・体内への親和同化性・目的細胞の培養プロセス ・高機能性ステント、人工骨等	生活向上、安全	小	短期、中期	100	医療・医用材料関連産業		
G138	体内埋め込み型の超小型システム			・埋め込み型の診断システムやインスリンなどの投与システム、人工臓器など	生活向上、安全	小	短期、中期	1,000	医療・医用材料関連産業		
G051	新しい電池材料の開発(再掲)			・次世代リチウムイオン電池向け材料:リチウム硫黄系新固体電解質、不燃性有機電解質、非Co系正極 ・新型ニッケル・水素電池、リチウムポリマー電池、リチウム硫黄系電解質等	省エネ、産業競争力	中	短期、中期	1,000	商用施設、住宅、オンサイト小型発電、移動体、パソコン、携帯電話等		






サステイナビリティ	技術項目 (グレーは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色:プロセスイノベーション 青色:マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小:数万吨未満 中:数十万吨以下 大:100万吨以上	実用時期 短期:2016年以前 中期:2020年以降 長期:2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野
生活	安全・クリーン・省エネで便利な交通機関	G052	有機ラジカル電池・レドックス高分子材料の開発(再掲)	・非リチウムイオン電解質 ・短時間充電・高容量・高出力で発火や爆発リスクの低い有機/ラジカルポリマー電池	省エネ、産業競争力	小	短期、中期	100	商用施設、住宅、オンサイト小型発電等
		G053	高蓄電池用電解液の開発(再掲)	・新規な高容量・安全なイオン液体:イミダゾリウムやピリジニウムのリチウムイオン液体	省エネ、産業競争力	小	中期、長期	100	商用施設、住宅、オンサイト小型発電、移動体、パソコン、携帯電話等
		G054	移動電源、及び固定電源用高蓄電エネルギー材料の開発(再掲)	・新型固体電解質、電解質膜、イオン液体等の開発:不燃性により安全性向上、移動体等への適用	省エネ、産業競争力	中	中期、長期	1,000	電子機器、バス、電車等用エネルギー供給・利用関連産業
		G055	個人用移動システム駆動源の開発(再掲)	・軽量小型電池等の開発:	省エネ、産業競争力	中	中期、長期	100	機械ロボット、車椅子
		G139	交通制御システム	・超高速通信移動体向け材料 ・暗視対応色素材料、液晶材料の開発	生活向上、安全	大	短期、中期	500	交通、電子材料、ソフト、液晶等
		G140	生体情報センサー・デバイス	・有機ハイブリッドセンサー材料 ・生体の温度、動作等の自動感知センサーシステム ・衝突防止システム用センサー材料	生活向上、安全	小	短期、中期	100	医療・医用材料関連産業
		G141	高機能化学センサー	・高感度反応化学物質 ・新機能デザイン	生活向上、安全	中	短期、中期	500	セキュリティ、環境
		G050	超高蓄電型二次電池材料の開発(再掲)	・安全性の高い、正負極活性物質、炭素電極、電解液、セパレーター(膜)等 ・高出力密度汎用型電気二重層キャパシタ	省エネ、産業競争力	大	短期、中期	1,000	商用施設、住宅、オンサイト小型発電、自動車等
	きれいな水・空気の確保	G142	無騒音道路舗装材	・微細構造制御、空隙確保等による無機材料 ・高分子軽量材料:高性能防音壁用材料	生活向上、安全	中	短期、中期	500	道路・都市交通・騒音街区建設・管理関連産業
		G090	生活用浄水技術(再掲)	・非塩素系消毒、微量有機物/無機物対策、膜技術、光分解触媒等 ・オンサイト小型浄水処理プロセス	水資源、リサイクル	大	中期、長期	500	下水道、過疎地排水等
		G111	易生分解性界面活性剤の開発(再掲)	・天然由来原料(誘導体化)による生分解性界面活性剤:アミノ酸や脂肪酸系界面活性剤	資源多様化、リスク削減	中	中期、長期	500	洗剤、香料、食品加工、洗浄剤、化粧品等
		G143	微粒子・アレルギーの除去	・有機系低抵抗、高効率フィルター ・抗原、抗体ウイルス対応型材料	生活向上、安全	小	短期、中期	100	医療・医用材料関連産業
		廃棄物の削減	G064	積層フィルムの代替材料、及び易リサイクル材料(再掲)	・フィルムの単層化、相溶化等によるリサイクル性の向上:単相化フィルムでのパッケージ性能保持 ・易剥離性積層フィルムと易解体粘着剤の開発 ・光記録フィルム材料 ・リサイクル可能な同時多層積層成膜製造技術 ・環境適合型重層製膜プロセス	資源確保、リサイクル	小	短期、中期	500
	G066		易リサイクル、易分解性粘着剤及び自己剥離材料の開発(再掲)	・非エポキシ樹脂等のリサイクル材料:リサイクルが困難な熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂を代替熱可塑性樹脂の活用によるリサイクル性の向上	資源確保、リサイクル	中	中期	500	建築土木、自動車、電機電子等
G098	易リサイクル型高弾性ゴムの開発(再掲)		・高純度モノマー材料による易リサイクル ・配合技術を利用したカスケード利用	省エネ、省資源	中	省エネ、省資源	1,000	建設部材、家電、食器等	
G083	生分解性次世代ゴム材料の開発(再掲)		・エラストマー、コンポジットによる弾性材料 ・バイオマスからの多糖類誘導体等を原料とした弾性体 ・バイオマス、ゴムのハイブリッド型弾性材料	省エネ、省資源	中	省エネ、省資源	1,000	建設部材、家電、食器等	
化粧品材料	G144	未来型化粧品材料の開発	・ナノ技術、界面技術によるアンチエージング機能、安全性等を有した材料開発 ・海洋、天然由来タンパク質材料の大量分離生産プロセス	生活向上、安全	小	短期、中期	500	化粧品・アンチエージング関連産業	
	共通	G145	電池式駆動	・次世代リチウムイオン電池、・新型固体電解質、電解質膜、イオン液体等の開発:不燃性により安全性向上、移動体等への適用	省エネ、産業競争力	大	中期、長期	1,000	電子機器、バス、電車等用エネルギー供給・利用関連産業
G146		車体軽量化、高機能内装	高強度・軽量・超耐熱性に加え、遮音、断熱、紫外線吸収、アレルギー削減、導電性等の機能を高めた構造材用新規コンポジット樹脂材料	省エネ、産業競争力	大	中期、長期	1,000	陸上車両・航空機等エネルギー利用産業	
G147		無騒音舗装、低摩擦材料	トライボロジーによる無騒音道路舗装材、低転がり摩擦タイヤ、機械摩擦低減による、駆動エネルギーロス削減	省エネ、産業競争力	大	中期、長期	1,000	自動車道路・タイヤ産業	
G148		高度交通制御・事故防止システム	・超高速移動体通信向け材料 ・暗視対応色素材料、液晶材料 ・センサー用高感度反応化学物質 ・生体情報センサーデバイス	省エネ、産業競争力	小	中期	500	都市空間制御	
水(良質な水資源確保システム)	G077	工業用超高純度水(再掲)	・次世代NF、RO、耐酸化性非フッ素膜等による水循環 ・オン曝気、MBR等による難分解物質分解プロセス ・酸化剤、硫化物沈殿による汚泥削減プロセス ・汚染湖沼河川浄化用バイオマス由来大量安価な浄化膜	資源確保 産業競争力	大	短期、中期	1,000	めっき業、化学・石油、医薬品、コンピュータ等広範囲の製造業	
	G090	生活用浄水技術(再掲)	・非塩素系消毒、微量有機物/無機物対策、膜技術、光分解触媒等 ・オンサイト小型浄水処理プロセス	水資源、リサイクル	大	中期、長期	500	下水道、過疎地排水等	

サステイナビリティ	技術項目 (グレーは重要技術項目)	(ローズ色は重要テーマ)	テーマ名 (茶色:プロセスイノベーション 青色:マテリアルイノベーション)	研究課題	キーワード	CO2削減効果 小:数万吨未満 中:数十万吨以下 大:50万吨以上	実用時期 短期:2016年ごろ 中期:2020年以降 長期:2030年以降	期待される市場規模 (億円/年)	関連市場分野
		2010							
共通		G149	排水の高度処理技術	・高濃縮と高濃縮の両立する排水のリサイクル技術	水資源、リサイクル	小	中期、長期	500	金属加工、化学プラント、医薬品、下水処理
	共通基盤技術	分析化学	G150	微細、微量、高速、迅速な化学分析(構造決定、成分分析など)	・様々な技術へ波及する各種分析技術の向上 原子・分子スペクトル分析、レーザー分光分析、X線分析、電気化学分析、質量分析、フローインジェクション分析、クロマトグラフィー・分離科学、電気泳動分析、マイクロ・ナノ分析、顕微鏡、界面分析、材料分析・材料解析等		—	—	—
計算科学		G151	技術の発展に寄与するための計算科学	・ナノテク分野など特に必要とされる分野へのより適用し易いソフトの開発		—	—	—	全分野
環境評価		G152	LCA評価	・信頼性の高いLCA(データ・境界条件の共通化による客観性の向上)		—	—	—	全分野
		G153	リスク評価	・リスク初期評価のための有害性評価、暴露評価精度向上		—	—	—	全分野



# ーグリーン・サステイナブルケミストリー(GSC)重要技術俯瞰図ー

統合化による化学技術システムの最適化  
(2030年を見据えて)

 : エネルギー重要技術項目  
 : 資源重要技術項目  
 : 環境重要技術項目  
 : 生活重要技術項目  
 : 共通重要技術項目  
 重要技術テーマ  
 ★マテリアルイノベーション  
 ☆プロセスイノベーション

## エネルギー

### 工 熱エネルギー変換利用技術

- ☆低品位排熱の蓄熱・輸送・回収材料およびプロセス
- ★低温排熱エネルギー変換用熱電変換材料
- ★低摩擦表面素材/潤滑物質
- ★高性能デシカント空調用高湿潤吸着材料
- ☆化学エネルギー変換高密度蓄熱材料・プロセス(触媒他)

### 工 再生可能エネルギー

- ★風力発電用新規材料
- ★太陽電池材料  
(色素増感型、薄膜シリコン系、有機半導体型、ナノ材料)

### 水素製造

- ☆高効率水素製造技術(水蒸気改質、及び水電気分解等)

### 資 微細構造・精密構造形成技術

- ★印刷法による革新的加工材料開発
- ★分子自己組織化を利用した高性能ナノ・マイクロ材料
- ★ナノ三次元構造制御による材料加工プロセス
- ★新規リソグラフィ加工技術の開発

### 資 低品位資源利用技術

- ☆バイオマス・混合有機資源からの合成ガス・化学品の製造
- ☆低品位ガス系化石資源(メタンハイドレート等)からの基礎化学品製造
- ☆低品位固液系化石資源(オイルサンド等)からのナフサ、オレフィン製造

### 資 次世代蓄電材料技術

- ★超高蓄電型二次電池材料
- ★新しい電池(リチウム代替等)材料
- ★有機ラジカル電池・レドックス高分子材料

### 資 稀少金属の有効利用と代替材料技術

- ★希少元素、貴金属代替新材料
- ★稀少金属やNi,Co,Wを使わない高耐熱材料

### 資 非枯渇性資源の化学品・材料化

- ☆バイオマスからの化学品原料製造技術
- ☆構造保持セルロースによる機能化学品
- ☆非食糧資源からのプラスチック、モノマー等化学品製造技術

### 資 易リサイクル加工用材料・プロセス

- ★解体性接着材料と易リサイクル加工法
- ★積層フィルムの代替材料・易リサイクル材料

### 資 CO2分離・回収・利用技術

- ☆CO2等の分離・回収技術
- ☆CO2を原材料としたポリカーボネート樹脂等化学品製造技術

## 資源

### 工 グリーン製造化学プロセス

- ☆化学分離プロセス
- ☆グリーン酸化プロセス(直接過酸化水素製造、過酸化水素酸化、空気酸化等)
- ☆電磁エネルギー利用合成プロセス
- ☆分離・反応一体型リアクタープロセス
- ☆マイクロリアクタープロセス
- ☆精密制御高分子製造
- ☆有機分子触媒

### 工 IT向け化学品(電子材料)

- ★光利用率向上有機半導体材料の開発
- ★新規封止材、絶縁材料、パワー半導体等の開発
- ★超高密度超ナノ情報素子材料

## 4分野共通

### 共 水

(化学技術利用による良質な水資源確保システム)

- ☆工業用超高純度水
- ☆生活用浄水技術
- ☆排水の高度処理技術

### 共 輸送システム

(低環境負荷・高利便性交通輸送システム)

- ★電池式駆動
- ★車体軽量化、高機能内装
- ★無騒音舗装、低摩擦材料
- ★高度交通制御・事故防止システム材料

## 環境

### 環 製造工程廃棄物・副生物の大幅削減

- ☆新規固体酸・塩基触媒による化学プロセスのクリーン化
- ☆従来型有機合成のシンプル化
- ☆ナノ空間触媒による新合成プロセス

### 環 環境負荷が小さい加工プロセス

- ☆亜臨界、超臨界流体を利用した表面処理技術
- ☆ジクロロメタン代替としての洗浄プロセス

### 環 革新的燃焼による大気環境の保全

- ☆クリーン燃料(水素以外)・清浄燃焼技術

### 環 ハザード管理されたハロゲン製品

- ☆クリーン再資源化可能な塩化ビニール樹脂
- ☆過酸化水素酸化を利用した高機能材料
- ☆CO2利用ノンハロゲンプロセスの開発
- ★ジクロロメタン代替物質としての機能水

### 環 環境負荷が小さい製品

- ★超耐熱性、強度等を有する新規ポリオレフィン類
- ★易リサイクル型高弾性ゴム

### 生 日用品の快適性向上と低消費化

- ★高機能繊維材料
- ★光機能(材料透明化、低減衰、高速応答等)プラスチック
- ★軽量化素材
- ★省電力照明

### 生 容易で安全な医療・介護と身体機能補助

- ★介護ロボット用構成材料(センサー等)
- ★身体補助材料(人工筋肉等)

## 生活

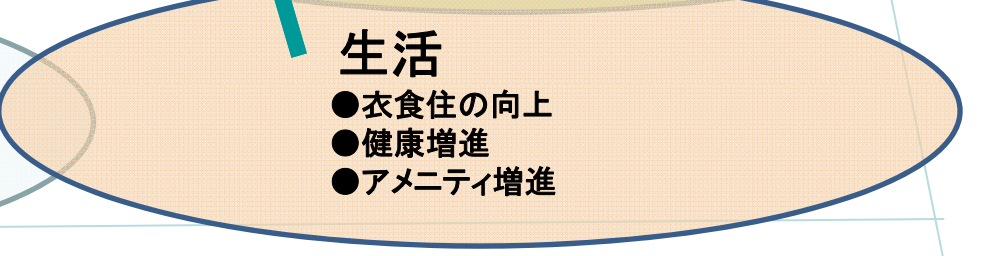
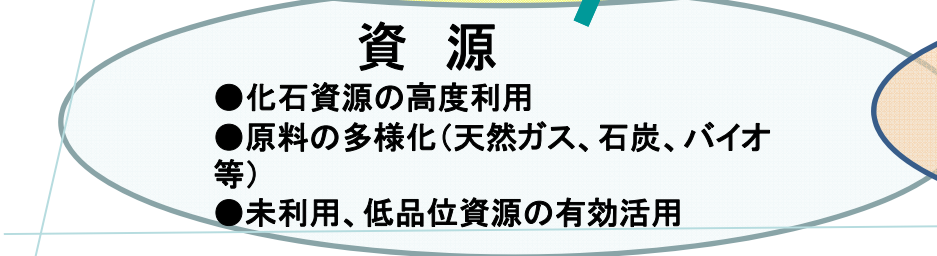
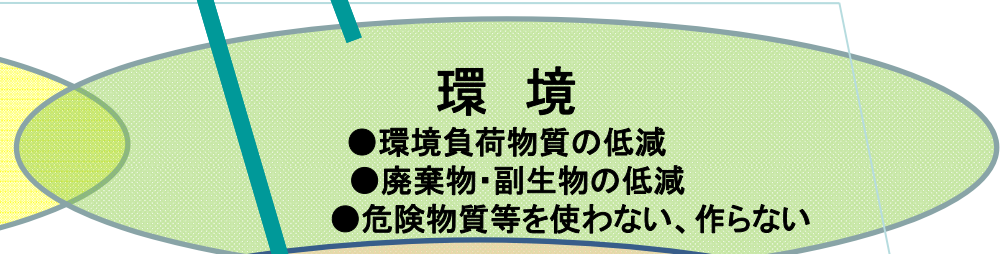
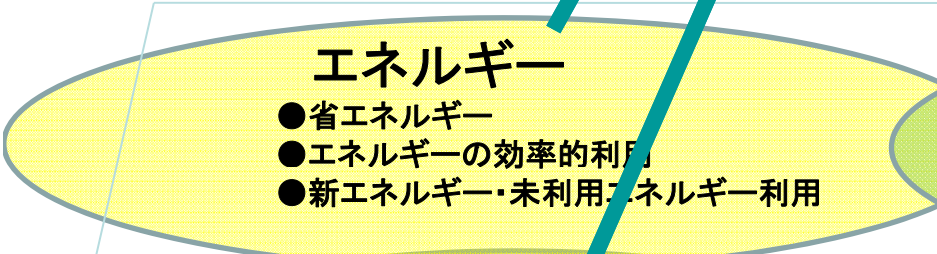
GSC概念図

安全・安心で競争力ある持続可能社会の創生



**プロセスイノベーション**  
(省エネ、廃棄物最小、資源有効利用製造技術)

**マテリアルイノベーション**  
(安全・安心で高機能製品)



大量生産・消費・廃棄社会 → **グリーン・サステイナブルケミストリー (GSC)** → サステイナブル社会

	2010年	2020年	2030年	2050年
<b>エネルギー</b>	<p>増え続ける世界のエネルギー需要 (日本のエネルギー自給率6%、石油の中東依存度86%) 非在来型化石資源、石炭、バイオマス等の利用拡大</p> <p>さらなる省エネルギー推進 自然エネルギー利用拡大(太陽光、風力等)</p> <p>大幅なCO2削減圧力 原子力発電の利用拡大(高レベル廃棄物処理処分) 水素エネルギー</p>			
<b>資源</b>	<p><b>原油価格・供給変動への対応</b></p> <p>原油重質化低品位化 資源の多様化(石油、天然ガス、バイオマス、石炭等) 石炭の環境適合型高効率利用技術</p> <p>石油資源の高度利用、省資源 世界的な水資源の不足</p> <p>希少元素の偏在・枯渇 水の高度利用、国際貢献</p> <p>資源リサイクル 省資源技術、代替物質の開発 希少元素代替・リサイクルの革新的技術</p>			
<b>環境</b>	<p><b>大気汚染防止、水質汚濁防止、産業廃棄物処理、土壌汚染防止等規制強化(化審法・化管法の改正)</b></p> <p>リスクの高い物質の回避 低環境負荷・低リスク・長寿命材料の開発</p> <p>環境負荷物質削減 廃棄物・副生物の削減</p> <p>欧州規制の強化(Rohs法、REACH法) 新興国への波及 環境調和型製品への転換</p> <p>国際規制を先取りした製品の開発</p>			
<b>生活関連</b>	<p><b>生活環境場のリスク最小化対応</b></p> <p>衣食住、交通・通信の環境負荷低減</p> <p>廃棄物縮減(再利用、長寿命化、軽量化)</p> <p>アメニティ増進</p> <p>低環境負荷ライフスタイル適合製品</p> <p>バリアフリー化・福祉対応製品</p> <p><b>ライフスタイルの転換</b></p> <p>価値観の転換</p> <p>快適でサステイナブルな社会の実現</p>			

参考資料3-1

## GSCの実績例

### 1) 自動車・航空機の軽量化を進めるプラスチック

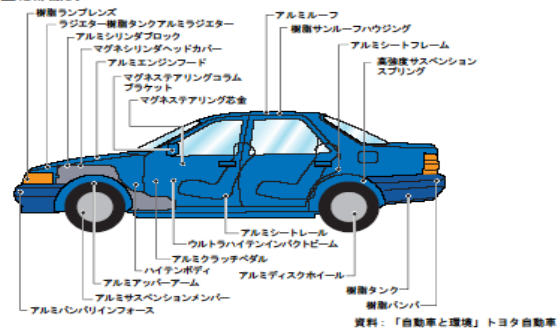
**自動車の軽量化**は、燃費向上の重要なポイントである。車体の約7割をしめる鉄の比重が7.8であるのに対して、プラスチックでは比重が1であることから軽量化に大きな寄与が期待できる。乗用車の場合、**プラスチックが占める重量構成比は1973年で2.9%**であったものが、**2007年には、8~10%**と向上しており、体積比ではほぼ1:1にまでなり大幅な省エネに貢献している。

航空機においても高靱性炭素繊維複合材料等が利用され始めている。

#### 自動車に使用されるプラスチック類

- PP (ポリプロピレン)
- PE (ポリエチレン)
- ABS 樹脂
- PVC (ポリ塩化ビニル)
- PA (ポリアミド、ナイロン)
- POM (ポリアセタール)
- PBT (ポリブチレンテレフタレート)
- PC (ポリカーボネート)
- PPS (ポリフェニレンサルファイド)
- CFRP (炭素繊維強化複合材料)

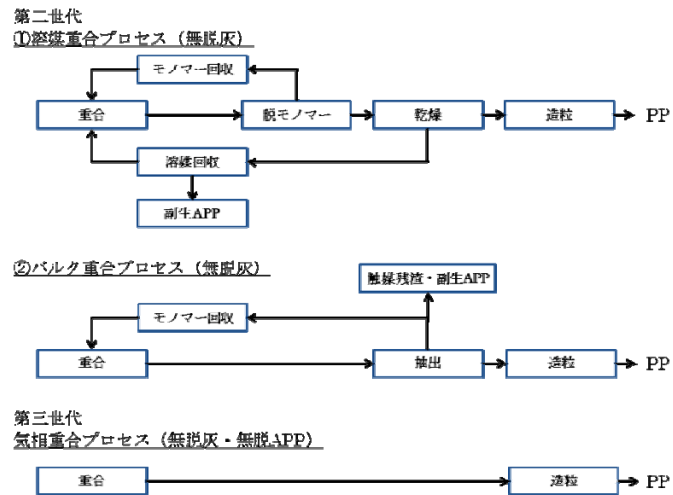
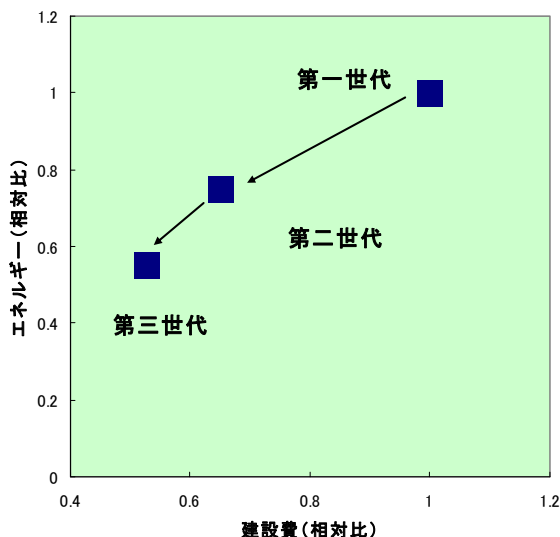
●自動車の軽量化部品例



樹脂系材料は、形状の出し易さやコストダウンにも繋がることから、内外装部品はもとより、エンジンルーム内の機能部品やエレクトロニクスシステム、燃料システム、エアバッグ、シートベルト等の安全システム、更に駆動・シャシ系にも採用されている。さらに強度、剛性、耐熱性などが改良されれば、さらにその比重を増す可能性が残されている。

#### ポリプロピレン(PP)の製造法でも、 大幅な省エネとプロセスの簡略化を達成している

自動車の軽量化に貢献する樹脂系材料の中でも、その比重が高いポリプロピレンの製造法においても、プロセスの簡略化や新規触媒の開発により、大幅な省エネとコスト削減を達成している。





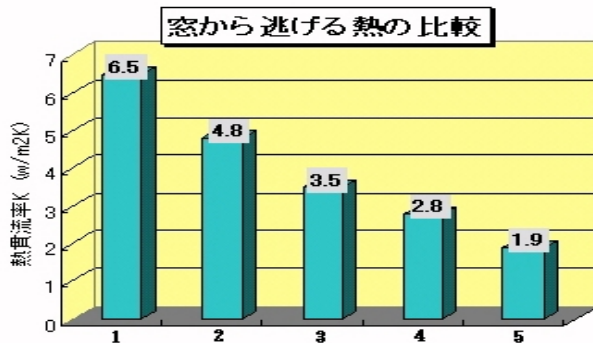
GSCの実績例

参考資料3-2

2) 冷暖房エネルギーの大幅削減を果たす高断熱建材  
GSCのマテリアルイノベーション (製品による大幅省エネへの貢献)

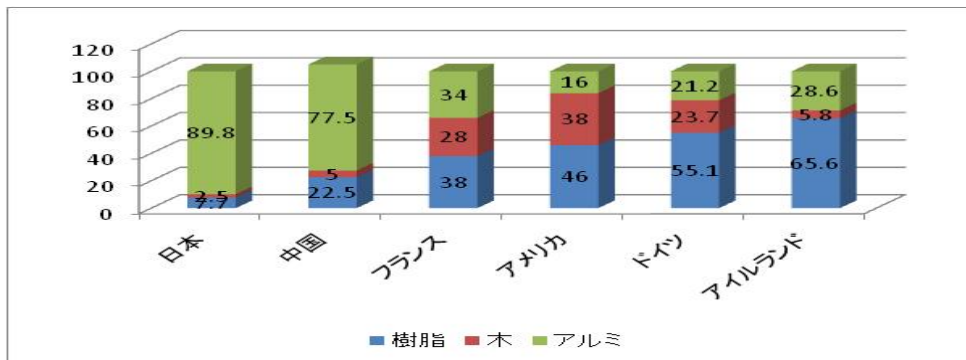
★窓枠部分に塩化ビニル樹脂(塩ビ)を使用し、間に空気層を備えた2層のガラスを用いる「複層ガラス塩ビサッシ」は、従来のアルミサッシ(単層ガラス)と比べると、**断熱性が非常に高い。**

★従来と比べ、**冷暖房費は3割～4割減少**



1. アルミサッシ1重ガラス(従来使われていたもの)
2. アルミサッシ2重ガラス(ガラスとガラスの間隔・空気層が6mm)
3. アルミ・樹脂の複合断熱サッシ2重ガラス(空気層12mm)
4. 樹脂(又は木製)サッシ2重ガラス(空気層12mm以上)
5. 樹脂(又は木製)サッシ2重ガラス(空気層12mm以上)  
Solar Shield(高性能Low-Eガラス入り樹脂サッシ)

★日本は、アルミサッシが90%近くで、諸外国に較べても、樹脂サッシの比率が低い。



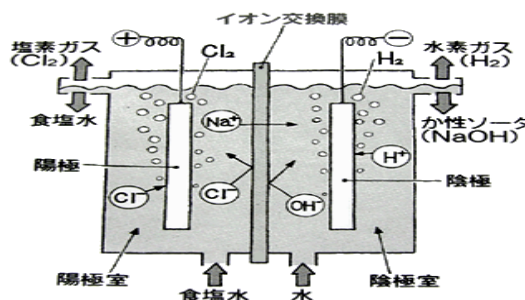
## GSCの実績例

参考資料3-3

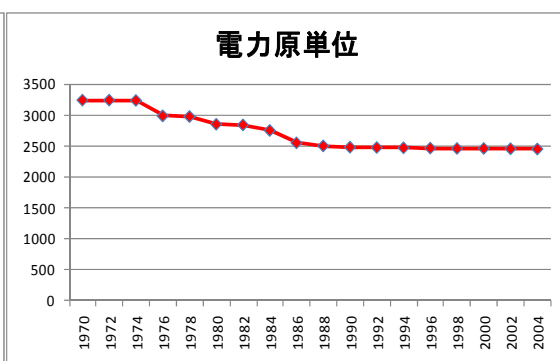
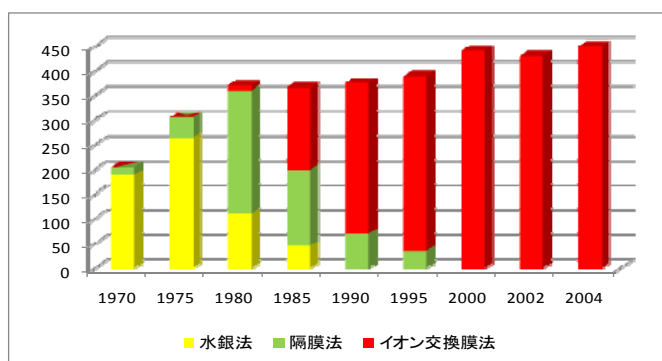
### 3) 省エネとリスク削減を同時に果たした食塩電解

#### GSCプロセスイノベーション（大幅な省エネと環境との調和プロセス）

食塩水を電気分解して、塩素と苛性ソーダを得るプロセスは、化学工業にとって重要なプロセスであるが、日本はリスクの大きな水銀を使う水銀法からリスクのないイオン交換法への転換を世界に先駆けて2000年に完了している。



さらにイオン交換法はそれまでの水銀法、隔膜法と較べて大幅な消費電力の削減を果たすことができた。水銀というリスクの高い物質を使わない方法への転換と大幅な省エネルギーにも貢献したイオン交換法は、GSCに理念にかなった製造方法の転換で、プロセスイノベーションの成果といえる。



日本の食塩電解プロセスの変遷（縦軸：生産量千トン）  
食塩電解の電力原単位の推移  
出典：日本ソーダ協会

#### 食塩電解における水銀使用廃止の動き

	2000	2010	2012	2020
日本	全廃	全廃	全廃	全廃
アメリカ	全廃	全廃	全廃	全廃
EU	全廃	全廃	全廃	全廃

我が国は、2000年に水銀法からイオン交換法への全面転換を果たしたが、諸外国の状況を見ても、アメリカではアスベストを利用する隔膜法が依然として主流となっており、水銀法については、オバマ政権になって転換の方針が変わり、2012年までに全廃となる予定である。これに対して、ヨーロッパでは、2008年でもイオン交換法は46%、水銀法が38%、それに隔膜法が14%となっており、EU全体としては2020年までに全廃とする目標を掲げている。

# GSC技術の展望

## ～GSCが拓く持続可能な社会～

添付資料③

参考資料4

### Green Agriculture

- ◎安全で高活性な農薬の創生
- ◎省エネ型肥料製造プロセス等



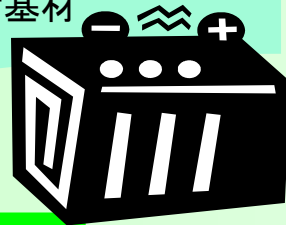
### Green Sustainable Housing

- ◎高性能断熱材
- ◎窓枠、遮蔽塗料等の省エネ化学品



### Green Electronic Storage

- ◎高性能蓄電池向け基材



### Green Information Electronics

- ◎半導体向け化学品
- ◎リソグラフィー技術への化学品部材



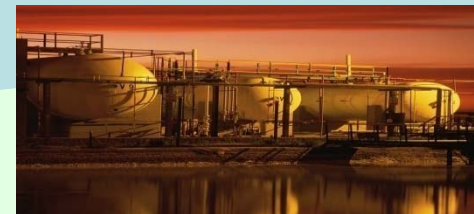
### Green Biomass

- ◎バイオマス原料の糖化技術
- ◎脱化石資源への挑戦



### Green Process

- ◎Eファクターに優れた省エネ型プロセス



# 革新的重要技術テーマ

GSC技術として特に重要と評価された  
6テーマを革新的技術テーマとした。評価はGSC委員会での審議によった

革新的技術テーマ	理由	研究課題(例)
<b>Green Agriculture</b> (食糧資源に貢献する環境適応型 肥料および農薬)	食料資源の確保のために化学製品である肥料や農薬の役割は大きい	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全性が高く高活性な農薬の創生</li> <li>・省エネ型肥料製造プロセスの開発</li> </ul>
<b>Green Biomass</b> (バイオマスからの化学品製造)	脱化石原料による化学品製造体系の構築は資源面で重要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バイオマス原料の糖化技術開発</li> <li>・バイオプロセスの開発</li> </ul>
<b>Green Electronic Storage</b> (電気エネルギーの貯蔵)	電気自動車や自然エネルギーの活用のために電気貯蔵技術は重要である	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高性能蓄電池向け機材の開発</li> </ul>
<b>Green Information Electronics</b> (半導体製造向け化学製品)	大きな省エネルギー効果があるGreen ITの推進のためには高性能な半導体が必須であり、製造には化学製品が重要である	<ul style="list-style-type: none"> <li>・半導体製造向け化学品の開発</li> <li>・リソグラフィ技術の要である化学品の開発</li> </ul>
<b>Green Process</b> (環境負荷の小さい化学品製造プロセス)	化学製品の製造プロセスにおいて、廃棄物が少なく省エネルギーなものとするために触媒・反応の開発は常に重要である	Eファクターに優れた省エネ型プロセスの開発
<b>Green Sustainable Housing</b> (快適で長持ちする省エネ型住宅)	高性能な断熱材などを使用した省エネルギー住宅は地球温暖化防止対策への貢献が大きい	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高性能断熱材</li> <li>・窓枠、遮熱塗料等の省エネ化学品の開発</li> </ul>



## 事前評価書（案）

		作成日	平成 24 年 2 月 1 日
1. プロジェクト名	グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発		
2. 推進部署名	環境部		
3. プロジェクト概要（予定）			
<p>※ 当該プロジェクトに、研究開発項目③-4「資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発」（微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発）を追加するものであり、変更点を中心に記載している。</p> <p>(1) 概要</p> <p>1) 背景</p> <p>化学産業は我が国最大のエネルギー消費産業。CO<sub>2</sub>排出量は業界 2 位（全排出量の約 5%）であり、このうち約 16%が石油化学プラントで排出している。</p> <p>本事業では、廃水中の有機物を分解して電気を発生し、電力消費の大きい活性汚泥法の曝気槽を不要とする微生物触媒を利用するために必要な技術の開発を目指す。これにより、化学工場等における廃水処理の省エネ・自立化を目指す。</p> <p>2) 目的</p> <p>石油化学プラントからの産業廃水について、微生物燃料電池による廃水処理技術を開発し、処理過程で微生物の働きにより系内に発生する電気エネルギーの回収や、それに伴う汚泥の削減により、CO<sub>2</sub>排出量の削減・省エネ化に資することを目的とする。</p> <p>3) 実施内容</p> <p>廃水中の有機物を微生物が分解する際に系内に生ずる電気エネルギーを効率よく取り出し、処理システム自体の運転に活用するための微生物燃料電池を開発し、実証運転を実施する。</p> <p>(2) 規模 総事業費（需給）24 年度：2 億円（委託） 25 年度～27 年度：2 億円～4 億円／年度（予定）</p> <p>(3) 期間 平成 24 年度～27 年度（4 年間）</p>			
4. 評価内容			
(1) プロジェクトの位置付け・必要性について			

## 1) NEDOプロジェクトとしての妥当性

微生物触媒システムの実用化を目指すものであり、技術の新規性や難易度から、NEDOの機能による産学の効果的な連携の下に推進することが不可欠である。

なお、本技術は、化学プロセス、素材・部材のプロセスイノベーション、マテリアルイノベーションを実現するための「グリーン・サステナブルケミストリー」技術戦略マップ(2010年版)に掲載の「低環境負荷型廃水処理の開発」に関連する技術として位置付けられている。

## 2) 目的の妥当性

化学産業におけるCO<sub>2</sub>排出削減は喫緊の課題であり、既に製造プロセスについてはいくつかの基盤技術の開発プロジェクトが進行中であるが、さらに廃水処理に適用する微生物触媒システムを開発しようとする本プロジェクトの目的は、技術の新規性、その波及効果の大きさ等からも妥当である。

## (1) プロジェクトの位置付け・必要性についての総合的評価

化学産業のCO<sub>2</sub>排出削減という喫緊の課題に取り組むため、微生物触媒システムという新規性や難易度の高い基盤技術を、産学の効果的な連携を通じて実用化しようというものであり、NEDOプロジェクトとして実施する必要性は高い。

## (2) プロジェクトの運営マネジメントについて

## 1) 成果目標の妥当性

「現行の活性汚泥法（好気性微生物を用いた水処理法）と同等の効率（例えば、水滞留時間6時間程度、COD除去率80%以上）で廃水処理を行い、かつそれにかかるエネルギー（CO<sub>2</sub>排出）を、システム全体で80%以上削減する」ことを目標に、必要となる要素技術を開発し、開発した要素技術を組み込んだベンチスケール装置で微生物燃料電池を利用した廃水処理プロセスの有用性を実証することを目標とする。これは現状の技術レベルを勘案し、プロジェクト終了後数年程度での上市を想定した妥当な目標である。

## 2) 実施計画の想定と妥当性

前半の2年間で各要素技術の開発を終了し、後半の2年間でベンチスケール装置の実証運転を通じた改良等を行うことを想定した妥当な計画である。

## 3) 評価実施の想定と妥当性

4年間の事業終了後、NEDOの外部評価委員による事後評価を行う。

#### 4) 実施体制の想定と妥当性

微生物触媒による創電型廃水処理の飛躍的な特性改善のためには、既存技術の改良に留まらず「学」によるサイエンスに遡った技術開発が必要不可欠である。そこで、本プロジェクトでは、微生物触媒に係る基礎研究の第一人者から構成される「学」の下に要素技術の開発を担う「産」が結集した集中研究室を中心とする体制を想定している。これは、基礎研究成果からのフィードバック及び各要素技術開発の緊密な連携を必要とする本プロジェクトに必要な体制である。

#### 5) 実用化・事業化戦略の想定と妥当性

プロジェクト終了後、システムを一体として製品化する主体としての民間企業によるパイロット試験を経て、5-6年後に上市が実現されると想定している。これは、成果の普及が早期に期待できる事業化の形態として妥当である。

#### 6) 知財戦略の想定と妥当性

開発したシステムの事業化の観点から、知財については知財戦略を踏まえた適切な出願を行うと共に、上述のとおりシステムを一体として製品化することが想定されることから、プロジェクト内に専門の委員会を設置し、個別案件毎に知的財産の取扱い（内容・比率等）について審議することを想定しており、成果普及の観点から妥当である。

#### 7) 標準化戦略の想定と妥当性

成果の普及に必須の強制規格への対応、あるいは普及促進策としての標準化戦略については、初期の段階からその必要性を十分に確認・検討し、必要な標準案の提案を積極的に行うことを指摘することを想定している。

### (2) プロジェクトの運営マネジメントについての総合的評価

NEDO事業としてその運営マネジメント機能を十分に発揮することが求められるプロジェクトであり、成果目標、実施体制等について、適切と考えられる。また、知財や標準化について、早期の段階から検討を図ることは、実用化の観点から重要と考える。

### (3) 成果の実用化・事業化の見通しについて

#### 1) プロジェクト終了後における成果の実用化・事業化可能性

中期的には、プロジェクト終了後、システムを一体として製品化する主体としての民間企業によるパイロット試験を経て、5-6年後に自立型廃水処理システムとして上市が実現されると想定している。

長期的には、引き続き改良研究を重ねることにより、産業廃棄物を利用したコジェネシステムへの応用、あるいはエコタウン構想等での自立型廃水処理システムとしての応用による更なる市場の拡大が期待される。

## 2) 成果の波及効果

技術的、経済的には、プロジェクト終了後の不断の技術開発による適用廃水の拡大による省エネ化への貢献拡大や海外展開等が期待される。また、本プロジェクトでは、微生物燃料電池研究開発の第一人者を結集した実施体制を構築した上で、大学教員、企業の研究者、若手博士研究員、大学の学生が共同で研究を行い、活発に研究に関する議論が行われることにより、本分野における人材育成の促進等の波及効果も期待される。

## (3) 成果の実用化・事業化の見通しについての総合的評価

成果の実用化・事業化については、妥当なスケジュールの見通しが建てられている。



### 研究テーマ名 グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発

※当該プロジェクトに、研究開発項目③-4「資源生産性を向上できる革新的プロセス及び化学品の開発」(微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発)を追加するものであり、変更点を中心に記載している。

#### 研究目的

##### ○背景、目的、必要性

背景: 化学産業は、我が国最大のエネルギー消費産業(CO<sub>2</sub>排出量は業界2位、全排出量の約5%)。また、化学工場廃水の処理に多大なエネルギーが使用されている。本事業では、化学工場等の廃水処理を省エネ・自立化するために、廃水中の有機物を分解して電気を発生する微生物触媒を利用するために必要な技術の開発を目指す。  
市場ニーズ(目的): 省エネ、省コスト型の工場廃水処理。  
技術ニーズ: 近年、有機物の化学エネルギーを電気エネルギーに変換する微生物触媒を用いる微生物燃料電池の研究が盛んに行われているが、実用化の用途はたっていない。本プロジェクトでは、廃水処理への応用が有望と考え、それに必要な技術開発を行う。

#### 研究内容概略

##### ○研究開発課題

- ①触媒の開発: 微生物燃料電池のカソードに適した安価な酸素還元触媒の開発。微生物アノード極の電気化学的解析。
- ②カソードの開発: カソード用空気拡散電極の開発。安価な電極基板材料の開発。
- ③アノードの開発: 微生物親和性の高いアノードの開発。安価な電極基板材料の開発。
- ④微生物制御技術の開発: 廃水にあった発電微生物集団を迅速に形成させる技術、微生物集団を安定に機能させるための技術の開発。
- ④'微生物代謝の解析: 電流生成微生物の代謝経路の網羅的解析。
- ⑤効率化システムの開発: 廃水処理前後工程を考慮した効率化システムの開発。
- ⑥実証試験: 安定した廃水処理、省エネ化を小型実証装置(1立方メートル程度)で実証。廃水処理にあったプロセス構成の確立。安定した廃水処理、省エネのための運転技術の確立。

##### ○キーテクノロジー、ブレークスルーのポイント、オリジナリティ

- ・微生物プロセスに適した電極の開発。安定で安価な酸素還元触媒の開発。カソード空気拡散電極の大型化技術の確立。安価な電極材料の開発。
- ・廃水にあった発電微生物集団を迅速に形成させる技術及び微生物集団を安定に機能させるための技術の確立。細胞外電子伝達系の制御法の開発。
- ・廃水処理等の目的にあったプロセス構成の開発。安定に有機物を処理して発電するための運転技術の確立。

#### プロジェクトの規模

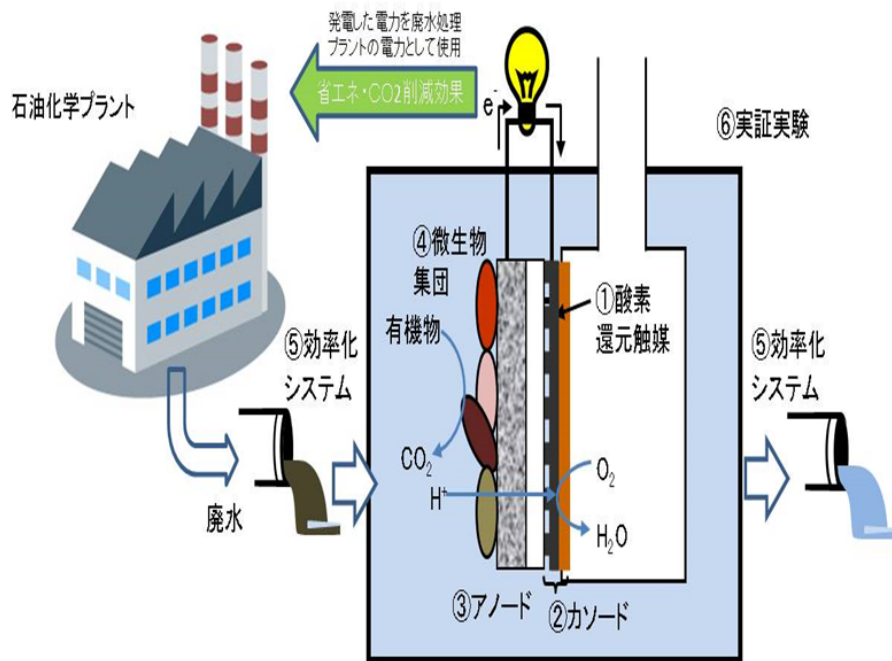
##### ○事業費と研究開発期間

研究開発期間 平成24年度～27年度(予定)  
平成24年度 2億円(予定)

#### 技術戦略マップ上の位置付け

化学プロセス、素材・部材のプロセスイノベーション、マテリアルイノベーションを実現するための「グリーン・サステナブルケミストリー」(2010年版)技術戦略マップに掲載の「低環境負荷型廃水処理の開発」に関連する技術として位置付けられている。

#### その他関連図表



## 添付資料④

「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成 24 年 2 月 24 日  
NEDO  
環境部

NEDO POST 3 において標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。  
みなさまからのご協力を頂き、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間

平成 24 年 2 月 10 日～平成 24 年 2 月 23 日

2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞

計 0 件

## 特許論文等リスト

## 1 論文

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2013/2	J. Biosci. Bioeng., 115, 176-181(2013)	Use of cassette-electrode microbial fuel cell for wastewater treatment	M. Miyahara, K. Hashimoto, K. Watanabe
2014/5	PLoS ONE 9:e98425.	Metagenomic analyses reveal the involvement of syntrophic consortia in methanol/electricity conversion in microbial fuel cells.	Yamamuro A, Kouzuma A, Abe T, Watanabe K.
2014/5/13	ChemElectroChem (2014) 1, 877-884.	Iron-Nitrogen Coordination in Modified Graphene Catalyzes a Four-Electron-Transfer Oxygen Reduction Reaction (inside cover picture)	Kazuhide Kamiya, Hiroyuki Koshikawa, Hisao Kiuchi, Yoshihisa Harada, Masaharu Oshima, Kazuhito Hashimoto, Shuji Nakanishi
2014/11	J. Biosci. Bioeng. 118:533-539.	Conversion of activated-sludge reactors to microbial fuel cells for wastewater treatment coupled to electricity generation.	Yoshizawa T, Miyahara M, Kouzuma A, Watanabe K.
2015/8/21	Electrochimica Acta (2015) 180, 173-177.	Heat-treated 3,5-diamino-1,2,4-triazole/graphene hybrid functions as an oxygen reduction electrocatalyst with high activity and stability	Hiroyuki Koshikawa, Shuji Nakanishi, Kazuhito Hashimoto, Kazuhide Kamiya
2015/6/10	J. Wat. Env. Technol. 13:221-230.	Floating boards improve electricity generation from wastewater in cassette-electrode microbial fuel cells.	Miyahara M, Yoshizawa T, Kouzuma A, Watanabe K.
2015/6/10	AMB Express 5:34	Effects of NaCl concentration on anode microbes in microbial fuel cells.	Miyahara M, Kouzuma A, Watanabe K.

## 2 総説

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2013/1	太陽エネルギー、39, 5-10(2013).	微生物燃料電池	高妻篤史、渡邊一哉
2013/4	BIOINDUSTRY 30:11-17.	電流生成菌の遺伝子改変による発電効率の向上	高妻篤史
2013/4	BIOINDUSTRY 30:18 - 23.	微生物燃料電池用電極や装置に関する研究開発の現状	石井良和、渡邊一哉
2013/4	BIOINDUSTRY 30:31 - 36.	微生物燃料電池の廃水処理への応用	宮原盛雄
2013/7	産業と環境 2013.6:73-74.	微生物燃料電池への期待	渡邊一哉
2013/10	微生物燃料電池による廃水処理システム最前線 3-6. NTS	微生物燃料電池開発の現状と今後の展望	渡邊一哉
2013/10	微生物燃料電池による廃	微生物の細胞外電子伝達の分子	高妻篤史

	水処理システム最前線. 47-65. NTS	メカニズム	
2013/10	微生物燃料電池による廃 水処理システム最前線. 114-125. NTS	微生物燃料電池用アノードの開発	石井良和
2013/10	微生物燃料電池による廃 水処理システム最前線. 143-162. NTS	微生物燃料電池用カソードの開発	宮原盛雄, 神谷信行
2013/10	微生物燃料電池による廃 水処理システム最前. 163-171. NTS	水処理用微生物燃料電池の開発	宮原盛雄
2014/12	化学工学 78:886-889.	微生物燃料電池による廃水処理.	宮原盛雄、渡邊一哉
2014/6	クリーンテクノロジー. 24:47-51.	微生物燃料電池による廃水処理シ ステムの開発と実用化への課題.	宮原盛雄、渡邊一哉、石井良 和
2015/2/10	クリーンエネルギー. 24:26-33.	微生物燃料電池による廃水処理シ ステム.	宮原盛雄、浅井佑介、中川大 輔、渡邊一哉.
2016/2/5	Electrochemistry (2016), 84, 93-98.	廃水処理実用技術としての微生物 燃料電池:サイエンスから実用化 へ	中西周次、岡本章玄、橋本和 仁
2015/10/23	エネルギーハーベスティン グの設計と応用展開. 110-119. CMC 出版	第9章微生物燃料電池	宮原盛雄、渡邊一哉
2015/10/30	会報光触媒 47:74-79.	微生物燃料電池・微生物太陽電 池の研究開発	滝沢宏次、廣瀬篤弥、渡邊一 哉
2015/11/1	バイオサイエンスとインダ ストリー 73:449-454	環境バイオテクノロジーの発展と普 及	渡邊一哉
2015/12/20	科学と工業 89:402-410	微生物燃料電池システムによる廃 水処理	宮原盛雄、坂本晃洋、渡邊一 哉

### 3 学会発表

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2013/1/20	2nd Water research conference, Singapore	Population dynamics in anode biofilm communities developed in a cassette -electrode microbial fuel cell for wastewater treatment	M. Miyahara, K. Hashimoto, K. Watanabe
2012/12/3	日本太陽エネルギー学 会、第4回研究講演会 「植物バイオマスのエネ ルギー変換」	微生物燃料電池	渡邊一哉
2012/12/3	日本太陽エネルギー学 会、第4回研究講演会 「植物バイオマスのエネ ルギー変換」	微生物型太陽電池	橋本和仁
2013/3/22	日本化学会第93春季年 会	酸素還元触媒としての鉄-窒素共 ドープグラフェンのワンポット合成	神谷和秀、中西周次、橋本和 仁
2013/3/11	第47回日本水環境学会 年会	カセット電極微生物燃料電池の水 処理への応用	宮原盛雄、橋本和仁、渡邊一 哉
2013/3/11	第47回日本水環境学会 年会	活性汚泥槽を転用した微生物燃 料電池式廃水処理	吉澤智也、宮原盛雄、高妻篤 史、渡邊一哉
2013/3/22	日本化学会第93春季年 会	微生物の細胞外電子移動と電力 生産	橋本和仁(基調講演)
2013/5/30	環境バイオテクノロジー学	メタノールを電気に変換する微生	山室彩香、高妻篤史、渡邊一



	会	物群集の集積および解析	哉
2013/9/1	第4回国際微生物燃料電池シンポジウム	Enrichment and metagenomic analyses of microbial communities generating electricity from methanol	Yamanuro, A., Kouzuma, A., Abe, T. and Watanabe, K
2013/9/1	第4回国際微生物燃料電池シンポジウム	Comparative metagenomic analyses of microbiomes in acetate-fed single-chamber MFCs	Tsukida, S., Kouzuma, A., Abe, T. and Watanabe, K
2013/9/14	The 19th China-Japan Bilateral Symposium on Intelligent Electrophotonic Materials and Molecular Electronics (SIEMME'19) 2013	One-Pot Synthesis of Fe-N-codoped Graphene as an Efficient Electrocatalyst for Oxygen Reduction Reaction	Hiroyuki Koshikawa, Kazuhide Kamiya, Kazuhito Hashimoto, Shuji Nakanishi
2013/9/18	2013 年日本生物工学会大会	微生物群集を対象とした代謝解析による嫌気消化の特徴付け	佐々木大介、佐々木建吾、中西周次、橋本和仁、近藤 昭彦
2013/9/28	2013 年電気化学秋季大会	鉄-窒素共ドーピンググラフェン触媒の構造解析と酸素還元特性	神谷和秀、越川裕幸、木内久雄、原田慈久、尾嶋正治、橋本和仁、中西周次
2013/9/28	2013 年電気化学秋季大会	微生物燃料電池の効率に与える培地pH・電極電位の影響の検討	砂田香矢乃、桐谷久恵、弥永都、加藤創一郎、橋本和仁
2013/11/10	第16回日本水環境学会シンポジウム	水処理型微生物燃料電池の低負荷処理条件における発電効率の改善	宮原盛雄、吉澤智也、高妻篤史、渡邊一哉
2013/11/10	第16回日本水環境学会シンポジウム	水中の界面活性剤や電解質が微生物燃料電池の発電性能に及ぼす影響	吉澤智也、宮原盛雄、高妻篤史、渡邊一哉
2013/11/18	第29回日本微生物生態学会大会	酸微生物燃料電池中の微生物群集のメタゲノム解析	月田匠二、高妻篤史、阿部貴志、渡邊一哉
2013/11/18	第29回日本微生物生態学会大会	メタノールを電気に変換する微生物群集のメタゲノム解析	山室彩香、高妻篤史、阿部貴志、渡邊一哉
2012/12/3	MRS Fall Meeting & Exhibit	One-Pot Synthesis of Fe-N-Modified Graphene as an Efficient Electrocatalyst for Oxygen Reduction Reaction in Acidic Solutions	Kazuhide Kamiya, Kazuhito Hashimoto, Shuji Nakanishi
2014/3/27	日本化学会第94春季年会	グラフェン欠陥上での電気化学硝酸還元反応とその理論的解析	神谷和秀、橋本和仁、中西周次
2014/3/29	電気化学会第81回大会	金属原子ドーピンググラフェンが示す多様な電極触媒能	中西周次、神谷和秀、橋本和仁
2014/3/31	電気化学会第81回大会	複核銅錯体を前駆体に用いた銅-窒素共ドーピンググラフェンの酸素還元触媒能	神谷和秀、越川裕幸、中西周次、橋本和仁
2014/7/20	The 2nd AP-ISMET Conference/Singapore	Cassette-electrode microbial fuel cells for wastewater treatment	Watanabe K
2014/8/31	International Society of Electrochemistry 65th Annual Meeting	Instantaneous one-pot synthesis of Fe-N-codoped graphene as an efficient electrocatalyst for oxygen reduction reaction in acidic solutions	Ryo Kamai, Kazuhide Kamiya, Kazuhito Hashimoto, Shuji Nakanishi

2014/9/3	微生物資源学会	発電微生物	渡邊一哉
2014/9/3	The 65 <sup>th</sup> Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry	Graphene Defects Serve as Active Catalytic Sites Superior to Platinum for the Electrochemical Nitrate Reduction	Kazuhide Kamiya, Kazuhito Hashimoto, Shuji Nakanishi
2014/9/21	The 20 <sup>th</sup> China-Japan Bilateral Symposium on Intelligent Electrophotonic Materials and Molecular Electronics (SIEMME'20) 2014	Performance comparison of microbial fuel cell under operating conditions of different electrode potentials	Kayano Sunada, Hisae Kiriya, Miyako Lyonaga, Kunio Yokoyama, Soichirou Kato, Shuji Nakanishi, Kazuhito Hashimoto,
2014/10/16-17	理研ー東大ー阪大ジョイントセミナー	複核銅錯体を前駆体に用いた銅ー窒素ドーピンググラフェンの酸素還元能	越川裕幸、神谷和秀、橋本和仁、中西周次
2014/10/30	日経エレクトロニクスセミナー	発電菌と微生物燃料電池	渡邊一哉
2014/11/7	有機デバイス研究会	微生物燃料電池と排水処理	渡邊一哉
2014/11/21	第 55 回電池討論会	鉄-窒素配位構造を導入したグラフェン電極における酸素還元特性	神谷和秀、越川裕幸、木内久雄、原田慈久、尾嶋正治、橋本和仁、中西周次
2014/11/21	第 55 回電池討論会	二核銅錯体を前駆体に用いたグラフェン電極の酸素還元能	越川裕幸、神谷和秀、橋本和仁、中西周次
2015/2/17	さかい IPC 環境ビジネス研究会セミナー	水処理の常識を変える微生物燃料電池	渡邊一哉
2015/3/13	読売テクノフォーラム研究会	発電菌がきりひらく未来のバイオ	渡邊一哉
2015/3/16	2015 年日本水環境学会	微生物燃料電池のアノードバイオフィルムへの NaCl 濃度の影響	宮原盛雄、高妻篤史、渡邊一哉
2015/3/16	2015 年日本水環境学会	微生物燃料電池における汚泥発生量の評価	浅井佑介、宮原盛雄、高妻篤史、渡邊一哉
2015/3/17	電気化学会第 82 回大会	微生物燃料電池における電極電位と出力との関係性について	砂田香矢乃、桐谷久恵、弥永都、加藤創一郎、中西周次、橋本和仁
2015/6/30	環境バイオテクノロジー学会	微生物燃料電池の最新動向と実用化への課題	渡邊一哉
2015/10/2	ISMET	Effects of NaCl concentration on anode microbes in microbial fuel cells	Morio Miyahara, Atsushi Kouzuma, Kazuya Watanabe
2015/10/14	Bio Japan	環境バイオテクノロジーの発展と普及	渡邊一哉
2015/10/16	酵素工学研究会	発電菌を用いた未来のバイオテクノロジー	渡邊一哉
2015/11/27	新化学技術推進協会環境技術部会講演会	発電菌が切り開く未来のバイオテクノロジー	渡邊一哉
2016/3/7	「電気と微生物」小集会	創電型廃水処理基盤技術開発	石井良和
2016/3/16	水環境学会	ポリ鉄 (Fe/S 系添加剤) による微生物燃料電池の出力改善	宮原盛雄、高妻篤史、渡邊一哉
2016/3/16	水環境学会	廃水処理燃料電池における炭素被覆メッシュアノードの評価	中川大輔、宮原盛雄、高妻篤史、渡邊一哉
2016/3/16	水環境学会	添加剤に着目した廃水処理系微生物燃料電池の高効率化法の開	坂本晃洋、宮原盛雄、高妻篤史、渡邊一哉

		発	
--	--	---	--

## 4 新聞・テレビ等

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2013/1/20	読売新聞 日曜暮らし教育面	バイオ電池	東京薬科大学
2013/2/17	朝日新聞 日曜版 Globe	菌のちから	東京薬科大学
2013/5/30	化学工業日報	微生物燃料電池を開発 排水処理性能、実用レベル	東京薬科大学
2013/5/31	日本経済産業新聞	酸素を使わず廃水浄化	東京薬科大学
2013/6/3	IT media、スマートジャパン	「生きた電池」を細菌で作る、電気を使わない廃水処理へ	東京薬科大学
2013/6/3	SankeiBiz	微生物燃料電池を開発	東京薬科大学
2013/6/5	電気新聞	微生物燃料電池 浄化性能実用レベル	東京薬科大学
2013/7/31	環境新聞	発電菌が変える排水処理の未来	東京薬科大学
2013/8/15	J-Net21(中小機構)	廃水処理しながら発電する微生物燃料電池	東京薬科大学
2013/8/17	東京新聞	微生物パワーで電気	東京薬科大学
2013/8/27	中日新聞	浄化と創電 菌が活躍	東京薬科大学
2013/9/8	BS フジ「ガリレオ X」	驚き！微生物パワー イノベーションを興す小さな主役たち	東京薬科大学
2013/10/6	BSTBS「週刊 BSTBS 報道部」	動き出した大学発のベンチャー企業	東京薬科大学
2013/10/13	TBS「未来の起源」	高妻助教	東京薬科大学
2013/10/26	BS TBS 「ニュースの焦点～次の世代へ～」	田んぼ発電	東京薬科大学
2013/10/26	Tokyo FM「鶴田真由のフロンティアーズ～明日への挑戦～」	21世紀の新しい技術	東京薬科大学
2014/4/1	Business i ENESCO「地球環境とエネルギー」	微生物燃料電池の廃水処理装置を実用レベルに	東京薬科大学
2014/4/22	日経エレクトロニクス	植物に近づく人工光合成、昆虫の体液や微生物で発電も	東京薬科大学
2014/7/29	日本経済新聞	微生物で発電 広がる	東京薬科大学
2014/10/20	at home TIME	発電する微生物で燃料電池をつくる	東京薬科大学
2015/1/1	下水道新聞 1/1 号	対談記事の一部に「微生物触媒による創電型廃水処理」が掲載	積水化学工業
2015/1	日本経済新聞 電子版	「環境アクション 2014」積水化学グループの環境貢献 の一部に掲載 <a href="http://ps.nikkei.co.jp/sekisui2014/">http://ps.nikkei.co.jp/sekisui2014/</a>	積水化学工業
2015/3/10	毎日新聞	生きた電池、研究すすめ	東京薬科大学
2015/4/2	FM Tokyo Honda Smile		東京薬科大学

	Mission		
2015/5/1	読売クオーターリー	発電菌が切り開く未来のバイオ	東京薬科大学
2015/5/2	月刊「潮」		東京薬科大学
2015/12/15	YAHOO ニュース	微生物が電気をつくる燃料電池・その実力と可能性は？	東京薬科大学
2016/1/25	別冊ニュートン		東京薬科大学

5 展示会

発表年月日	発表媒体	展示内容	発表者
2014/12/11	エコプロダクツ展 2014	微生物触媒による創電型廃水処理	積水化学工業
2015/12/10	エコプロダクツ展 2015	水処理用微生物燃料電池	東京薬科大学
2016/1/27	InterAqua 2016	水処理用微生物燃料電池	東京薬科大学

6 特許出願

出願年月日	発明名称	出願人
2013/6/14	燃料電池システムおよび燃料電池モジュール	パナソニック株式会社
2013/7/31	微生物燃料電池モジュール用負電極、膜・電極接合構造体及び微生物燃料電池モジュール	積水化学工業株式会社
2013/8/21	微生物燃料電池用電極、微生物燃料電池用電極の製造方法及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2013/8/21	微生物燃料電池用エアカソード及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2013/9/24	炭素系材料、電極触媒、電極、電気化学装置、燃料電池、及び炭素系材料の製造方法	パナソニック株式会社
2013/11/8	微生物燃料電池	積水化学工業株式会社 パナソニック株式会社
2014/2/13	燃料電池システムおよび燃料電池システム用モジュール	パナソニック株式会社
2014/4/28	微生物燃料システム、微生物燃料電池の蓄電方法および蓄電回路	積水化学工業株式会社
2014/6/2 (PCT 出願)	炭素系材料、電極触媒、電極、電気化学装置、燃料電池、及び炭素系材料の製造方法	パナソニック株式会社
2014/6/20	炭素系材料、電極触媒、電極、電気化学装置、燃料電池、及び、炭素系材料の製造方法	パナソニック株式会社
2014/6/24	ガス拡散電極、電気化学装置、及び、燃料電池	パナソニック株式会社
2014/7/16	微生物燃料電池用電極モジュール及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2014/8/21 (PCT 出願)	微生物燃料電池用電極、微生物燃料電池用電極の製造方法及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2014/9/11	電極ならびにそれをを用いた燃料電池及び水処理装置	パナソニック株式会社
2014/10/20	電極、燃料電池及び水処理装置	パナソニック株式会社

## 添付資料⑤

2014/10/29 (PCT 出願)	微生物燃料電池	パナソニック株式会社
2014/10/31	電極ならびにそれらを用いた燃料電池及び水処理装置	パナソニック株式会社
2014/11/11	微生物燃料電池用エアカソード、膜・電極接合構造体及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2015/1/15	微生物燃料電池システム	パナソニック株式会社
2015/1/22 (PCT 出願)	微生物燃料電池システム、微生物燃料電池、ガス拡散電極及び微生物燃料電池の使用方法	パナソニック株式会社
2015/1/30 (PCT 出願)	微生物燃料電池	パナソニック株式会社
2015/2/12	微生物燃料電池廃水処理システム	積水化学工業株式会社
2015/2/12	微生物燃料電池廃水処理システム	積水化学工業株式会社
2015/2/20	微生物燃料電池用アノード及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2015/2/20	微生物燃料電池用アノード及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2015/2/20	微生物燃料電池用電極、微生物燃料電池用電極積層体及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2015/2/23	微生物燃料電池用電極、微生物燃料電池用電極積層体及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2015/2/23	微生物燃料電池用電極積層体及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2015/3/11 (PCT 出願)	微生物燃料電池システム	パナソニック株式会社
2015/3/11	微生物燃料電池用電極、微生物燃料電池用電極の製造方法及び微生物燃料電池	積水化学工業株式会社
2015/4/7	電極、燃料電池及び水処理装置	パナソニック株式会社
2015/4/13	電極、燃料電池及び水処理装置	パナソニック株式会社
2015/6/5	電極複合体、並びにそれらを用いた微生物燃料電池及び水処理装置	パナソニック株式会社
2015/8/20	微生物燃料電池及び廃液処理装置	パナソニック株式会社
2015/9/4	炭素系材料、並びにそれを備える電極及び微生物燃料電池	パナソニック株式会社
2015/9/7 (PCT 出願)	電極ならびにそれらを用いた燃料電池及び水処理装置	パナソニック株式会社
2015/9/16 (PCT 出願)	電極、燃料電池及び水処理装置	パナソニック株式会社
2015/10/28 (PCT 出願)	電極ならびにそれらを用いた燃料電池及び水処理装置	パナソニック株式会社
2015/12/22	電極の製造方法、及び膜電極接合体の製造方法	パナソニック株式会社
2015/12/22	電極複合体の製造方法	パナソニック株式会社
2016/1/14	微生物燃料電池システム	パナソニック株式会社
2016/2/12 (PCT 出願)	積層体及び水処理システム	積水化学工業株式会社
2016/2/26	微生物燃料電池	パナソニック株式会社

7 受賞実績

2014/3 電気化学会学会賞(武井賞) 橋本 和仁

「電気化学を基盤とするエネルギー・環境技術の基礎および応用研究」

2015/10/14 バイオインダストリー協会賞 渡邊一哉

「環境バイオテクノロジーの発展と普及」