

「ナノテクノロジー・材料を中心とした融合新興分野研究開発」(産学官連携型)
事後評価報告書

1. 課題名

「革新的環境・エネルギー触媒の開発」

2. 代表者(機関名)

堂免 一成 (国立大学法人東京大学大学院工学系研究科)

3. 課題の概要

本研究開発の目的は、独創的・先端的触媒開発を行うことにより、現在人類の直面する環境問題・エネルギー問題に本質的に貢献できる触媒技術の確立を目指すことである。具体的には主に以下の3つの主要テーマのもとに研究を遂行した。(1) 太陽光と水から水素製造を目的としたエネルギー変換型光触媒の開発及び実用的プロセスの提案、(2) 酸素および過酸化水素を酸化剤とする高活性・高選択性酸化触媒の開発、(3) 硫酸代替可能な固体酸と新規なゼオライト触媒プロセスの開発および実用レベルの性能を達成することを目的とする。(1)の研究課題は国立大学法人東京大学、国立大学法人東京工業大学、三菱化学㈱との共同で開始したが、平成19年度から国立大学法人北海道大学、国立大学法人新潟大学、及び国立大学法人京都工芸繊維大学も参入した共同体制で実施した。(2)の研究課題は国立大学法人東京大学と日本触媒㈱との共同で実施した。(3)の研究課題は国立大学法人東京大学、国立大学法人東京工業大学及び三菱化学㈱と共同で実施した。東京大学堂免がチームリーダーとして全体を統括した。年に2度程の研究連絡会を開催し、グループ間の学術交流を深めた。各課題内の交流だけではなく課題間での連携も考慮に入れて研究を展開した。

4. 研究開発目標(中間評価時に改定)

(1) 水素製造光触媒に関する研究

1. 水分解光触媒活性

単一光触媒系: 410nm で量子収率 10%, 500nm で量子収率 2.5%

2段階水分解系: 600nm で水分解可

光電気化学系: 420nm で IPCE 30% (0.6 V vs. RHE)

2. 反応機構の詳細な解明

3. 長寿命化: 1か月程度安定

4. 反応装置の試作

5. 水素・酸素分離法の提案

(2) 選択酸化触媒に関する研究

1. 過酸化水素: オレフィンが 1:1 条件下で収率 90%以上

2. 触媒合成法: 原料ベースで収率 90%以上

大量合成・効率化による触媒価格低減

3. 固定化触媒の開発

ベンチスケールでの反応

(3) 固体酸触媒に関する研究

1. 硫酸代替可能な炭素系固体酸の開発

・バイオマス(特にセルロースの有効利用)に特化した固体酸触媒の開発

セルロースの加水分解を硫酸と同等の速度で行う固体酸触媒の構築

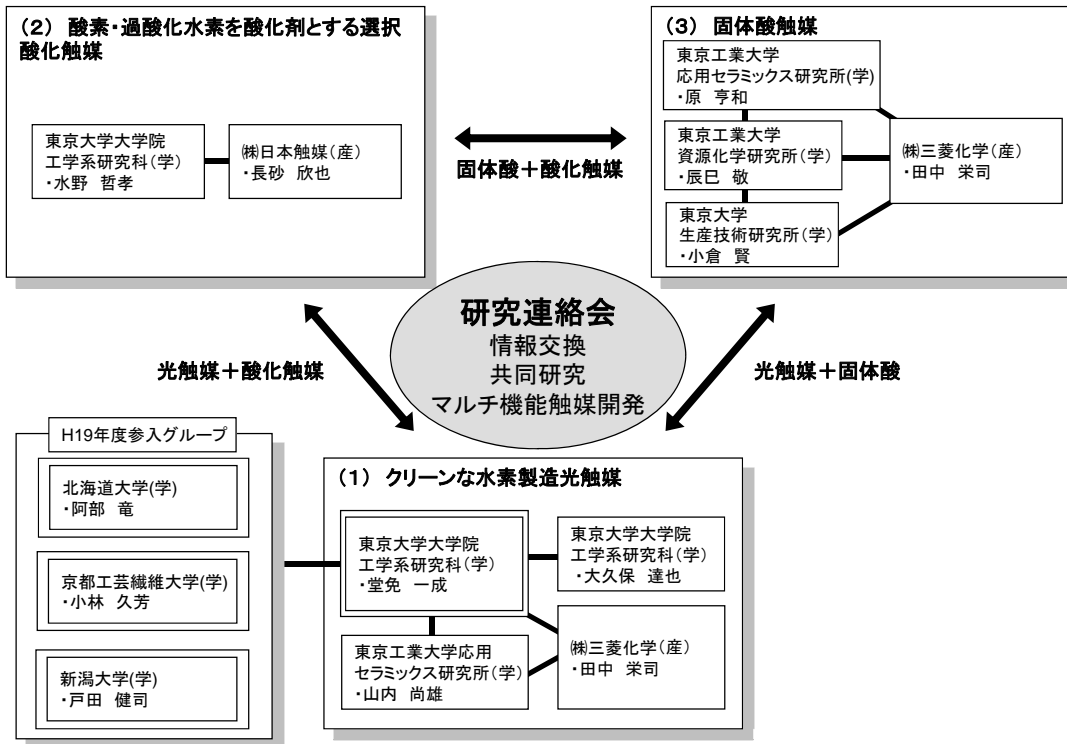
2. 実用レベルのゼオライト系固体酸の開発

・低級アルコールからプロピレンを 80%以上の選択率で与える長寿命触媒の開発

・実用的触媒プロセスの提案

5. 研究体制

(1)の研究課題は、平成19年度から国立大学法人北海道大学、国立大学法人新潟大学、及び国立大学法人京都工芸繊維大学も参入した共同体制で実施。山内グループは海外への異動のため、平成20年度末をもって離脱。



6. 課題の達成状況等

(1) 研究開発計画 (当初)

項目	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度
1. 水素製造触媒に関する研究 (1) 水分解光触媒活性					
(2) 反応機構の詳細な解明	水素製造用光触媒の合成法及び反応条件の検討	水素製造用光触媒の活性点制御・修飾法の検討	水素製造用光触媒の構造解析及び反応メカニズムの解明	水分解システムとカップリング可能な反応系の提案及び触媒開発	水素製造用光触媒の合成法の再検討及び触媒の耐久性に関する検討
(3) 長寿命化					
(4) 反応装置の試作	光触媒合成のスケールアップの為の予備検討及び光触媒の用途開発基礎検討	光触媒による水素製造システムの前備検討及び光触媒の用途開発検討	光触媒による水素製造システムの小規模実験及び光触媒の用途開発 Target 絞込み	光触媒による水素製造システムの実用的リアクターの設計・試作	光触媒による水素製造システムの実用的リアクターでの検討
(5) 水素・酸素分離法の提案	酸素貯蔵材料の開発	酸素貯蔵材料の特性の最大化	新型酸素貯蔵材料の開発	最高性能を示す酸素貯蔵材料の選択と改良	酸素貯蔵材料の応用と展開

2. 選択酸化触媒に関する研究 (1) 過酸化水素：オレフィンが 1:1 条件下で収率 90% 以上 (2) 原料ベースで収率 90%以上 (3) 固定化触媒の開発	活性点金属・構造の異なるポリオキソメタレート化合物の合成	ポリオキソメタレート化合物の三次元集積化・固定化の検討	過酸化水素を酸化剤とする反応系の開発	酸素を酸化剤とする反応系の開発	得られた知見をもとに更なる高活性な触媒の開発
	ポリオキソメタレート化合物合成の効率化	ポリオキソメタレート化合物合成のスケールアップの検討	実用化検討課題の抽出	実用化検討	実用プロセスの提案
3. 固体酸触媒に関する研究 (1) 炭素系固体酸：アルキレーション等 炭素系固体酸：フラインケミカル等 炭素系固体酸：セルロース加水分解 (2) ゼオライト系固体酸：プロピレン合成 ゼオライト系固体酸：実用的プロセス提案	固体酸・ハイブリッド型固体酸の合成と評価	種々の反応に対する触媒の最適化	実験室レベルでの実用化開発（触媒寿命の評価等）	固体酸触媒による実用化に関する問題抽出	実用プロセスの提案
	新規ゼオライトの合成と評価	種々の反応に対する触媒の最適化	実験室レベルでの実用化開発（触媒寿命の評価等）	固体酸触媒による実用化に関する問題抽出	実用プロセスの提案
	固体酸・ハイブリッド型固体酸及び新規ゼオライトの target 反応への適用	固体酸・ハイブリッド型固体酸及び新規ゼオライトの性能確認、製造法工業化基礎検討	触媒性能小スケール最終確認、製造法工業化基礎検討	実用プロセスの設計支援	実用プロセスの提案
所要経費	210	210	210	210	210

所要経費（百万円）

(2) 研究開発実績

項目	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度	平成 21 年度	平成 22 年度
1. 水素製造触媒に関する研究 (1) 水分解光触媒活性 (2) 反応機構の詳細な解明 (3) 長寿命化	水素製造用光触媒の合成法及び反応条件の検討	水素製造用光触媒の活性点制御・修飾法の検討および長波長化・結晶構造解析・電子状態の検討	水素製造用光触媒の合成法・修飾法の検討および新規ナノ粒子合成法の開発	水素製造用光触媒の合成法および修飾法の再検討および新規調製法の開発	水素製造用光触媒の合成法の再検討及び精密修飾法の開発
	水素製造用光触媒の活性点制御・修飾法の検討	コアシェル型助触媒の機能解明	水分解反応の速度論的検討 助触媒ポテンシャルの in-situ 観察	水分解反応の速度論的解析 助触媒ポテンシャルの in-situ 観察	粉末系光触媒を用いた助触媒ポテンシャルの in-situ 観察
			長時間耐久性評価	長期間耐久性評価	長期間耐久性評価および再生法検討

(4) 反応装置の試作	光触媒合成のスケールアップの為の予備検討及び光触媒の用途開発基礎検討	光触媒による水素製造システムの予備検討及び光触媒の用途開発検討	光触媒による水素製造システムの小規模実験及び光触媒の用途開発 Target 絞込み	光触媒による水素製造システムの実用的リアクターの設計・試作	光触媒による水素製造システムの実用的リアクターでの検討
(5) 水素・酸素分離法の提案	酸素貯蔵材料の開発	酸素貯蔵材料の特性の最大化 光電極型触媒の検討	酸素貯蔵メカニズムの解明と特性改善 光電極型触媒の検討	炭素系分離膜の検討 光電極型触媒系の拡張	光電極型触媒の性能向上
2. 選択酸化触媒に関する研究 (1) 過酸化水素：オレフィンが 1:1 条件下で収率 90% 以上	活性点金属・構造の異なるポリオキソメタレート化合物の合成	活性点金属・構造の異なるポリオキソメタレート化合物の合成と評価	過酸化水素を酸化剤とする反応系の開発	新規ポリオキソメタレート化合物の合成と過酸化水素を酸化剤とする反応の評価	得られた知見をもとに更なる高活性な触媒の開発
(2) 原料ベースで収率 90%以上	ポリオキソメタレート化合物合成の効率化	ポリオキソメタレート化合物合成のスケールアップの検討	スケールアップ実験と性能の検討	新規無均一系無機固体触媒のスケールアップ検討	スケールアップ実験と実用プロセスの提案
(3) 固定化触媒の開発		ポリオキソメタレート化合物の三次元集積化・固定化の検討	ポリオキソメタレート化合物の不均一触媒としての検討	ナノ構造体を利用および新規不均一系無機固体触媒開発	新規固定化触媒の開発
3. 固体酸触媒に関する研究 (1) 炭素系固体酸	固体酸・ハイブリッド型固体酸の合成と評価	炭素系固体酸によるセルロースの糖化と炭素系固体酸の構造解析	反応因子・最適条件の検討およびメカニズム解明	高表面積化および官能基制御	新規構造の炭素系固体酸の構築およびグルコース有効利用のための新規固体酸開発
(2) ゼオライト系固体酸：プロピレン合成	新規ゼオライトの合成	種々の反応に対する触媒の最適化	安価な合成法の検討および各種反応特性の検討	合成手法・構造と触媒反応特性との検討、反応機構解析	合成手法・構造と触媒反応活性との関連、触媒再生法の検討および反応機構解析
ゼオライト系固体酸：実用的プロセス提案	新規ゼオライトの target 反応への適用	新規ゼオライトの性能確認、製造法工業化基礎検討	触媒性能小スケール最終確認、製造法工業化基礎検討	触媒再生法の検討	実用プロセスの提案
所要経費	210	200	190	164	130

所要経費（百万円）

- 事業開始当初の研究開発目標
水素製造触媒に関する研究：研究開始時の量子収率の評価に誤りがあったため(2.5%と評価していたが、実際は0.8%であった)、当初目標（単一光触媒系：410nmで量子収率20%、500nmで量子収率5%）を中間評価時に“単一系光触媒 410nmで量子効率10%、500nmで量子収率2.5%”へと変更。
炭素系固体酸触媒に関する研究：よりインパクトの高いバイオマス有効利用（セルロースの有効利用）に特化。
- 事業開始当初の研究開発計画
水素製造触媒に関する研究：国立大学法人東京大学、国立大学法人東京工業大学、三菱化学㈱と

の共同で開始したが、平成 19 年度から国立大学法人北海道大学、国立大学法人新潟大学、及び国立大学法人京都工芸繊維大学も参入した共同体制で実施。山内グループは海外への異動のため、平成 20 年度末をもって離脱。

(3) 目標達成状況

研究開発項目	達成状況
1. 水素製造触媒に関する研究	<p>水分解光触媒活性 単一光触媒系：410nm で量子収率 10% [5.1%@420nm, 世界最高活性] 500nm で量子収率 2.5%[未達成] 2 段階水分解系：600nm で水分解可[達成] 材料系開発済 (BaTaO₂N, Ta₃N₅), TaON-WO₃ 系:6.3%@420nm 光電気化学系：420nm で IPCE 30% (0.6V_{RHE}) [ほぼ達成] 光アノード TaON 電極：25%@0.6V_{RHE} @420nm 光カソード CZTS 電極：45%@0.0V_{RHE} @600nm</p> <p>反応機構の詳細な解明[達成] 長寿命化 1 か月程度安定[達成] 約 3 カ月間安定 反応装置の試作[達成] 水素・酸素分離法の提案[達成]</p>
2. 選択酸化触媒に関する研究	<p>過酸化水素:オレフィンが 1:1 条件下で収率 90%以上 [達成] 触媒合成法：原料ベースで収率 90%以上[達成] : 大量合成・効率化による触媒価格低減[達成] 固定化触媒の開発[達成] ベンチスケールでの反応[達成]</p>
3. 固体酸触媒に関する研究	<p>炭素系固体酸 セルロースの加水分解を硫酸と同等の速度で行う固体酸触媒の構築 [達成] ゼオライト系固体酸の開発 ・低級アルコールからプロピレンを 80%以上の選択率で与える長寿命触媒の開発[達成] ・実用的触媒プロセスの提案[達成]</p>

(4) 中間評価指摘事項への対応

中間評価指摘事項	対応
3 つの研究課題が各々独立して実行されているように見える	<p>課題間での共同研究の例 ・ゼオライト+光触媒： カーボンレプリカを用いた光触媒ナノ粒子の調整 ゼオライトメソ孔内への光触媒合成 ・光触媒+炭素系固体酸：層状光触媒材料の固体酸への応用 ・光触媒+選択酸化：ポリオキシメタレートの光触媒反応場への応用</p>
実用化を念頭においたプロジェクト運営を一層推進する必要がある	<p>水分解光触媒：反応器の提案・試作による課題抽出の実施。 粉末系の大面積化を考慮したプレート型を検討。 選択酸化触媒：数年後の実用化検討段階へ到達。 固体酸触媒：炭素系・ゼオライト系ともにパイロットプラント建設へ。</p>

(5) 研究開発成果

ガリウムと亜鉛を含有した固溶体(Ga_{1-x}Zn_x)(N_{1-x}O_x)が可視光照射下で水を水素と酸素に分解できる光触媒であることを見出し、調整条件や表面修飾法等の検討によって、量子収率が 5.2% (410 nm) と、プロジェクト開始時と比較して約 6 倍の活性向上を達成した。さらに 6 カ月間にわたる耐久性評価から、約 3 カ月間は安定であり、6 カ月後でも初期の 50%程度の活性が維持されることを確認し、さらに触媒再生法の検討も行った。新規光触媒材料探索としては、金属を含まない材料である C₃N₄ による水分解の達成、また C₃N₄ を用いた新規ナノ粒子調製法の確立に成功した。また種々の低次元構造を有する材料群で新たな光触媒を見出した。二段階水分解では、酸素生成系で Ta₃N₅ の 600

nm、水素生成系で BaTaO₂N の 670 nm までと有効波長領域を拡大し、表面修飾によって TaON-WO₃ 系では量子収率 6.3%(420nm) と従来の約 6 倍の大幅な活性向上に成功した。光電極系では電極作製法・表面修飾法等の検討によって TaON 系で性能向上を達成し、またカルコパイライト系材料群への展開も行った。反応機構の検討では、理論計算と分光測定からのバンド構造の解明、Rh-Cr コアシェル助触媒の機能解明等を行い、さらに速度論的検討から開発指針を得た。水素と酸素の分離を行うために酸素吸蔵材料の検討を行ってきたが、ペロブスカイト系酸化物での酸素吸蔵では不適との結論に至った。分離にはゼオライト系膜の利用を提案する。実用化プロセスの検討では、反応器の試作・問題抽出等の工業化に向けた基礎検討を実施した。

ケイ素中心二原子欠損型ポリオキシメタレート (SiW10) が、過酸化水素：基質=1：1 の反応条件下でのアルケンのエポキシ化反応に高い触媒活性を示した。金属使用量の低減を目指し、SiW10 の活性点構造を抽出したセレン中心二核ペルオキシタングステート (SeW2) の合成に成功した。SeW2 のタングステン当たりの触媒活性は SiW10 の約 7 倍に向上し、ホモアリルアルコールの官能基選択的エポキシ化反応に高い触媒活性を示した。また、SiW10 とアルキルアンモニウムカチオンとの複合体 (TBA-SiW10) が、再利用可能な不均一系触媒として機能することを見出した。より高い熱安定性と基質適用性を示す亜鉛とタングステンを同時担持した無機触媒 (W-Zn/SnO₂) の開発にも成功した。さらに触媒の安価調製法も確立し、1L-10L といったスケールアップ実験にも成功した。

ナノサイズのグラフェンシートにスルホ基を高密度固定したカーボン固体酸を開発が水溶液中でセルロースをグルコースへと加水分解できることを見出した。ANN法と応答曲面法を組み合わることにより、セルロース糖化反応の最適条件の決定および反応支配因子を解明し、草本系および木質系バイオマスの糖化において、当該触媒が硫酸と同等以上の性能で反応を進めることを実証した。さらに、各種表面分析手法を用いた構造評価を進め、当該反応のメカニズムの解明に成功した。また、これまでの実用化検討の過程でより高活性な CSA の開発が必要となり、当該触媒の高表面積化やカーボンドメインが sp³ で架橋された全く新しいタイプのカーボン材料(sp³ 架橋型カーボン系固体酸)の開発に成功した。さらにプロジェクト後半では酸化チタン、酸化ニオブが水中で機能する固体のルイス酸触媒であり、グルコースを必須化学品原料への変換反応に有効であることを見出した。各種ゼオライトを固体酸触媒として使い、メタノールの転換反応による低級オレフィンの生成反応 (MTO 反応) において触媒性能を評価した。8 員環小細孔ゼオライトでは、エチレン、プロピレンが高選択的に生成することが分かり、特に CHA 型ゼオライトでは長い触媒寿命を示し、RTH 型、DDR 型ゼオライトではプロピレンを優先的に生成する特異的な性質を見出した。ゼオライト構造中の Al 含有率、粒子サイズを制御することで、長寿命かつ高選択的低級オレフィン生成能を有するゼオライトが合成可能であることを見出した。また、分光学的手法を駆使することで、反応中における触媒表面上での分子種の挙動を捉えることに成功した。

(6) 独創性・優位性について

粉末系半導体光触媒を用いた水分解の効率は本研究実績が明らかに世界をリードしている。さらに 10-15 年後の実用化を考慮すると、本課題で開発してきた (酸) 窒化物・酸硫化物系の可視光応答性材料群は 600nm 以上の光を利用した水分解が可能な材料であり、非常に有望なものである。実際、本課題で達成してきた単一光触媒系 (Ga₂N:ZnO, 量子収率 5.1%@410nm) および 2 段階系 (TaON-WO₃, 量子収率 6.3%@420nm)、光電極系 (TaON, IPCE 25%@0.6V_{RHE}) での可視光水分解活性は世界最高である。また、新規に開発した厳密なナノ構造制御法の確立や詳細な反応機構・機能解明も水分解光触媒系においては最初の例である。さらに粉末系においては水素と酸素が混合気体として生成するが、三菱化学で開発された新規なモレキュラーシーブ系分離膜を用いることにより、効率よく分離できる可能性が見出された。このことを前提にした安価かつ大規模に展開可能な反応器の検討・試作を行った。このような大規模展開可能な反応器は現在世界的にみても検討されておらず、独創的なものであり、将来的に安価な水素を大量に供給するシステム構築に向けて大きな優位性を有する。

従来の過酸化水素を酸化剤とする選択酸化触媒系では、過酸化水素：基質=1：1 の反応条件下での生成物収率、触媒回転数 (TON)、触媒回転頻度 (TOF) は低い。本研究開発では、ポリオキシメタレートを用いて、(i)適切な中心元素の選択によるタングステート触媒の Lewis 酸性制御、(ii)これらタングステート触媒の固体化あるいは担体への固定化による固体触媒開発、というオリジナルなコンセプトを基に「高活性タングステート触媒の開発」に成功し、過酸化水素：基質=1：1 の反応条件下においても様々の基質に対して収率 80% 以上を達成している。さらにポリオキシメタレート系を参考にして日本触媒で開発された固体触媒 W-Zn/SnO₂ はアルケンのエポキシ化反応に対して、実用レベルの活性・選択性・寿命を有する世界に例を見ない触媒系である。

現在有望なセルロース糖化プロセスとしてはセルラーゼを用いた酵素糖化法と硫酸を触媒とした硫酸法の 2 つが挙げられる。酵素法は大量のセルロースバイオマスを迅速に糖化することができず、戦前に端を発する硫酸法では硫酸と糖の分離に多くのエネルギーを必要とするため、未だこれらの手法は商用プロセスとして実用化していない。一方、本研究課題で開発したカーボン系固体酸を用

いる手法は硫酸法における分離回収などの問題が解消されるだけでなく、硫酸プロセスに匹敵する活性で糖化できるため、既存の手法に比べてエネルギー消費を含むすべての部分で優位性を発揮する。また、エタノールやエチレンからプロピレンへの転換反応において、本研究で開発したゼオライト系触媒は、高転化率で、選択性が高く、ほぼ熱力学的平衡状態まで反応を進めることができる従来例の無い固体酸触媒である。従って、短期間での実用化が充分に見込める触媒反応プロセスの構築が可能である。さらに、通常ゼオライト合成には、構造規定剤 (SDA) と呼ばれる有機化合物が使用されるが、本課題では有機 SDA 無使用での CHA 型、RTH 型ゼオライトの合成に成功し、安価な触媒調製を行うことが可能となった。

7. 研究成果の発表状況 (本課題で得られた成果と一部本課題を利用して得られた成果を分けて記載のこと)

<主として本課題で得られた成果>

(1) 研究発表件数

- ・ 査読付き論文 : 152 件
- ・ 査読無し論文等 : 12 件
- ・ 口頭発表 : 429 件 (国内 : 303 件、国際 : 126 件)
[うち招待講演 国内: 50 件、国際:64 件]

(2) 知的財産権等出願件数(出願中含む)

22 件 (国内 : 18 件、外国(基礎出願を 1 件とする。指定国明記) : 4 件)

(3) 受賞等

4 件 (国内 : 4 件、国際 : 0 件) [触媒討論会優秀ポスター発表賞等]

(4) その他

プロジェクト最終年度にあたる 2010 年 7 月 17 日に石原 PJ と合同で「ナノ環境機能触媒の開発」成果報告シンポジウムを一般公開のもと開催。参加者約 250 名。

<一部で本課題を利用して得られた成果 (本課題の資金、枠組みにおける成果を利用しているが、主として他の資金等により得られた成果) >

(1) 研究発表件数

- ・ 査読付き論文 : 65 件
- ・ 査読無し論文等 : 1 件
- ・ 口頭発表 : 50 件 (国内 : 41 件、国際 : 9 件)
[うち招待講演 国内: 1 件、国際:0 件]

(2) 知的財産権等出願件数(出願中含む)

6 件 (国内 : 5 件、外国(基礎出願を 1 件とする。指定国明記) : 1 件)

(3) 受賞等

13 件 (国内 : 12 件、国際 : 1 件)
[堂免一成(日本化学会賞)、辰巳敬(日本化学会賞)、水野哲孝(触媒学会学会賞(学術部門))、Michikazu Hara (Scientific American 50 (2006))、等]

8. 今後の展望と課題

水分解光触媒に関しては、太陽エネルギー変換効率約 5%の達成が実用化の目安となる。そのため、600nm まで有効に利用でき、量子収率 30%程度で水分解を行う必要がある。本研究課題で開発した触媒 (LaTiO₂N, Ta₃N₅, BaTaO₂N 等) は 600nm 以上に吸収端をもつ水分解可能な光触媒材料である。これらの材料をベースに本研究課題で明らかになった手法 (より欠陥の少ない新規調製法・非対称修飾法等) を用いて高活性の光触媒を開発することにより、今後 10 年程度で実用レベルの光触媒を開発し、パイロットスケールの反応系の検討を行うことは充分可能性があると考えられる。上記目標を達成できれば、現在のエネルギー問題・環境問題に大きなインパクトが期待され、経済的および社会的影響は大きい。

選択酸化触媒の開発においては、本研究課題で開発した固体触媒 (W-Zn/SnO₂) は従来になかった活性・選択性・寿命を有しており、極めて実用レベルに近い触媒である。今後は経済的に成立する製品を選択し、実用化を検討する段階にある。

炭素系固体酸触媒に関しては、現在、製材所から排出されるオガ粉等を原料とした量産化が成

功し、セルロースバイオマス糖化プロセス等のいくつかのプロセスで実用化検討が進められている。セルロース糖化に関しては、現在では民間企業で実用化する段階に達しており、今後は本プロジェクトで得られた成果を最大限に利用して実用化へのハードルを着実に超えていくところが重要である。具体例としては、インドにおいて実用化を目指したプラントが建設中である。

ゼオライト系固体酸触媒を用いるプロピレン合成反応では、ブテンを原料とするプロセスはパイロットスケールで既の実証中であり、エタノール/エチレンを原料とするプロセスはベンチスケールでの実証中である。従って両プロセスともほぼ実用化の段階に達しており、今後は原料価格・製品価格等を見極め、実プラントの検討段階に入ると考えられる。これらのプロセスが実用化されると、化学プラントからのCO₂排出量抑制にも効果があり、環境問題への貢献も期待される。

9. 特記事項

水分解光触媒の開発については当初設定目標に至らなかった部分はあるものの、単一系・2段階水分解系・光電極系の全てにおいて世界最高の水分解活性を達成している。理論計算および反応機構や機能の詳細な検討から得られた開発指針をフィードバックできた効果は大きい。今後のブレークスルーに大きな貢献が期待される。さらに固体酸グループの開発した手法を応用した光触媒ナノ粒子の新規合成法の確立は、グループ間連携の相乗効果の代表例といえる。

本研究課題推進時に当初予定されていなかった民間企業との共同研究がいくつかスタートした。具体的には水分解光触媒開発において三菱化学地球快適化インスティテュート(TKI)やトヨタ等であり、本研究課題の推進において側面からの大きなサポートになった。

本研究課題の成果は200報以上の原著論文として発表し、また海外での国際会議における基調講演・招待講演64件を含む、国際講演135件、国内講演344件を行っている。さらに20件以上の特許出願をしており、権利取得も積極的に行った。

また、成果報告シンポジウムを石原プロジェクトと合同で一般公開のもと開催し、約250名の参加者があった。