

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
「副生ガス高効率分離・精製プロセス
基盤技術開発」(事後評価)

(2009年度～2013年度 5年間)

プロジェクトの概要 (公開)

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
環境部

2014年10月30日

I. 事業の位置付け・必要性



II. 研究開発マネジメント



III. 研究開発成果



IV. 実用化に向けての見通し及び取組



- (1)NEDOの事業としての妥当性
- (2)事業目的の妥当性

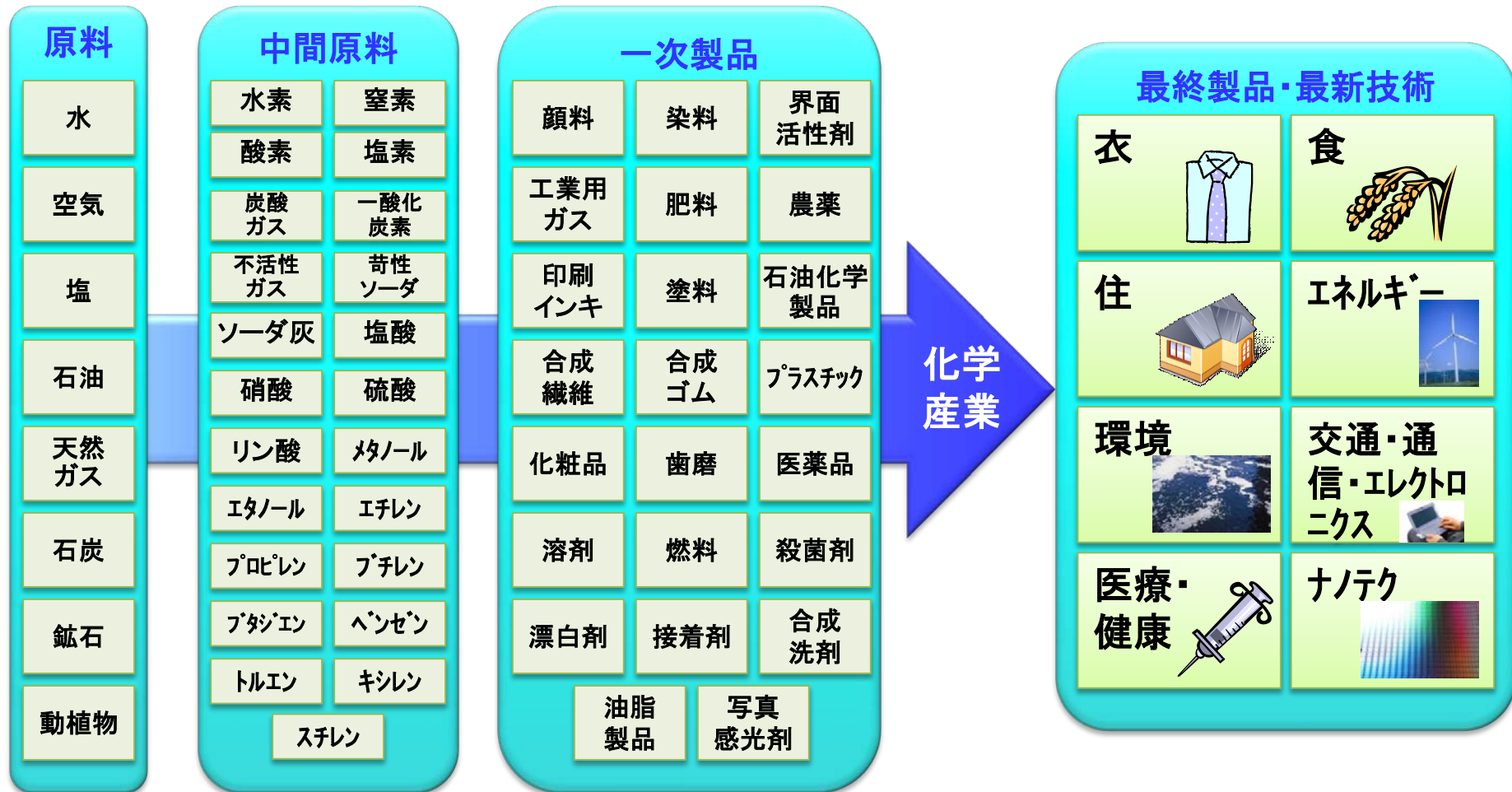
- (1)研究開発目標の妥当性
- (2)研究開発計画の妥当性
- (3)研究開発実施の事業体制の妥当性
- (4)研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性
- (5)情勢変化への対応等

- (1)目標の達成度と成果の意義
- (2)知的財産権等の取組
- (3)成果の普及

- (1)成果の実用化の見通し
- (2)実用化に向けた具体的取組

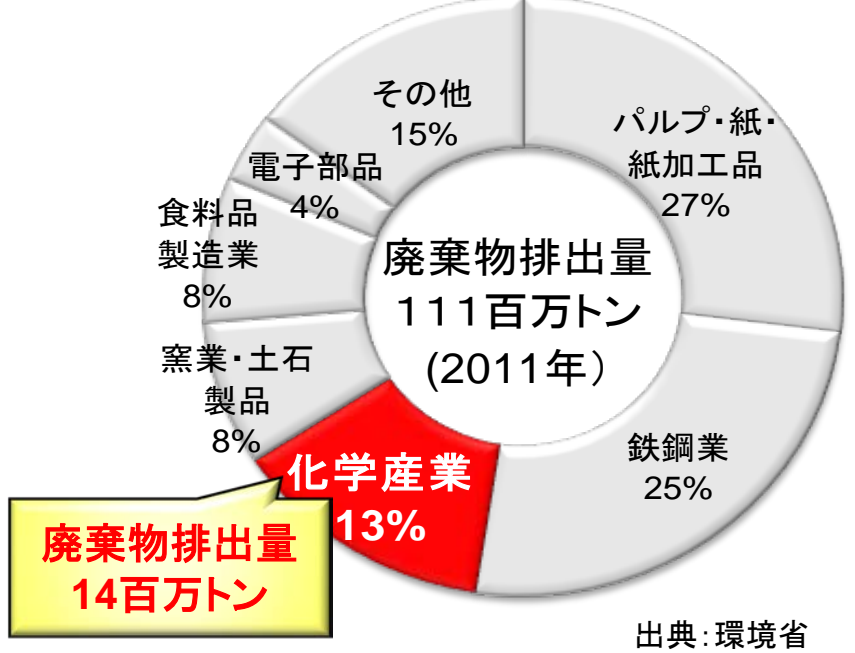
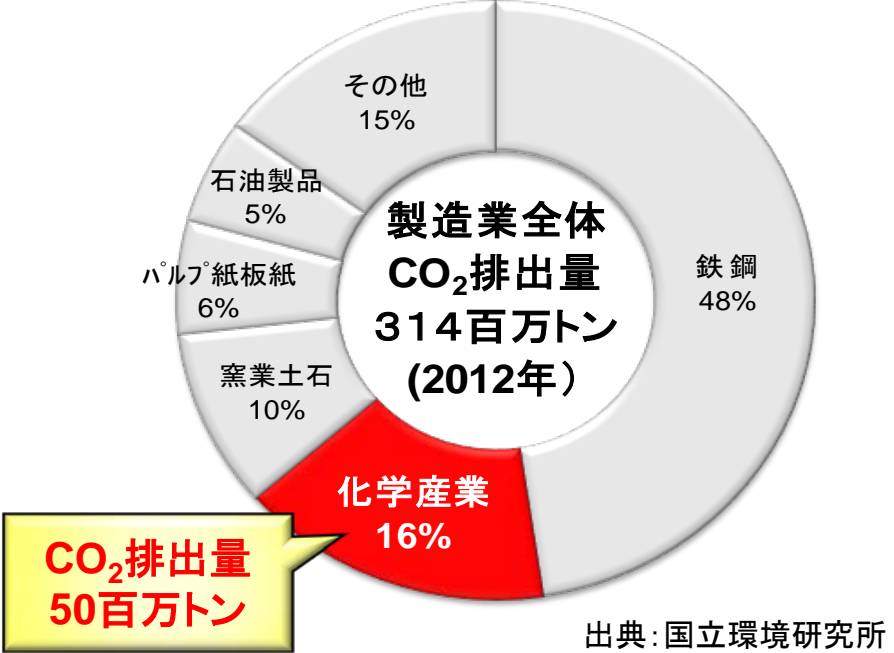
◆社会的背景(1) 化学産業の位置付け

化学産業：原料から中間原料を経て得られた一次製品を最終製品や最新技術に供給しており、様々な分野で不可欠な存在である。



◆社会的背景(2) 化学産業の課題

化学産業の課題：CO₂排出量の削減、廃棄物排出量の削減



GSC(グリーン・サステイナブル・ケミストリー)の実現

エネルギー、資源の制約を克服
 環境との共生
 安全・安心で持続可能な社会

大量消費、
 廃棄型生産プロセス

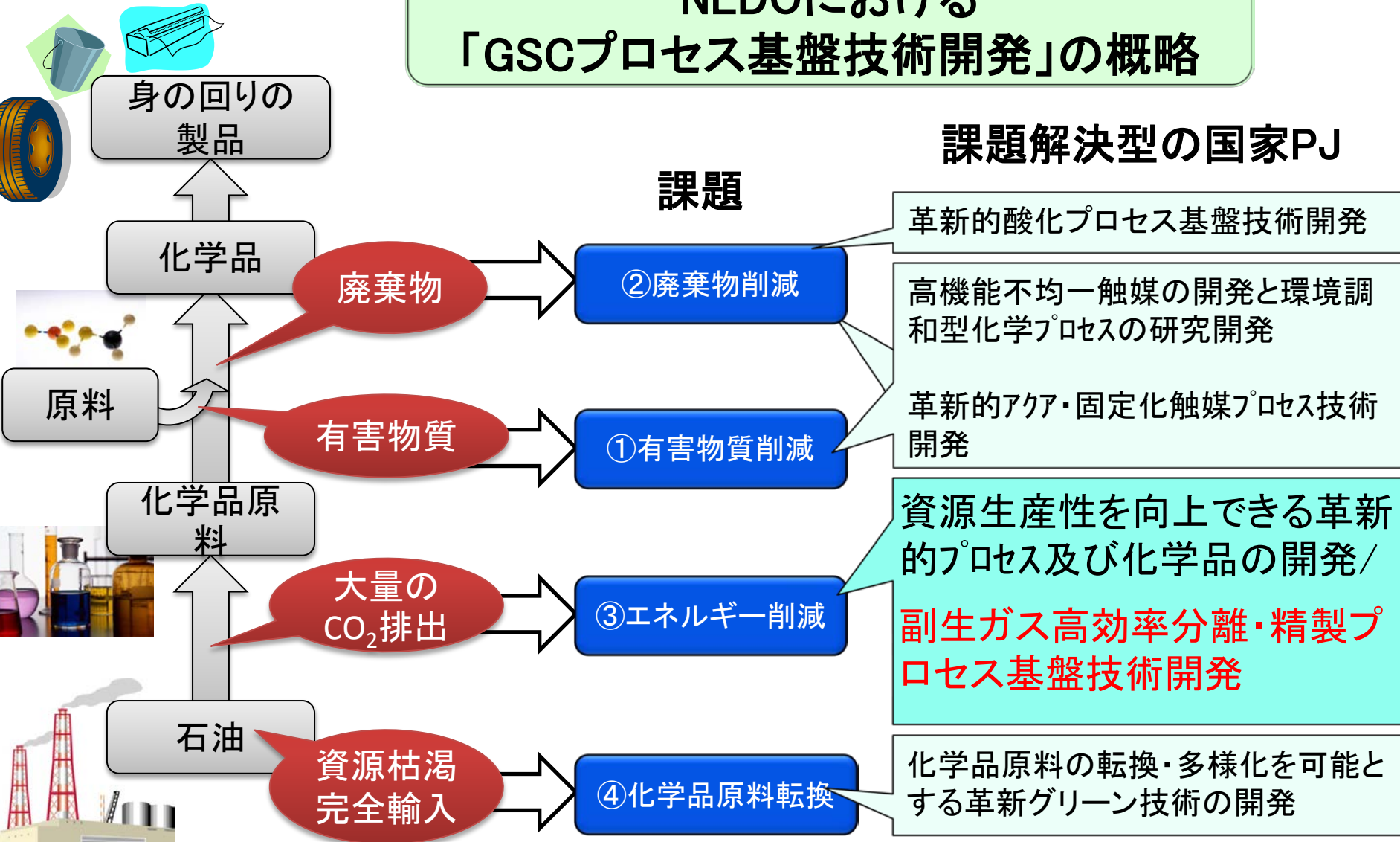


持続的な生産を可能
 とする製造プロセス

◆社会的背景(3) GSC分野におけるNEDO技術開発の取り組み

NEDOにおける「GSCプロセス基盤技術開発」の概略

課題解決型の国家PJ



◆事業の目的

化学プロセス等から発生するCO₂等の副生ガスをマイルドな条件で効率良く吸着、脱離することで、高純度、低コスト、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グリーンに生産できるプロセスの開発を目指す。

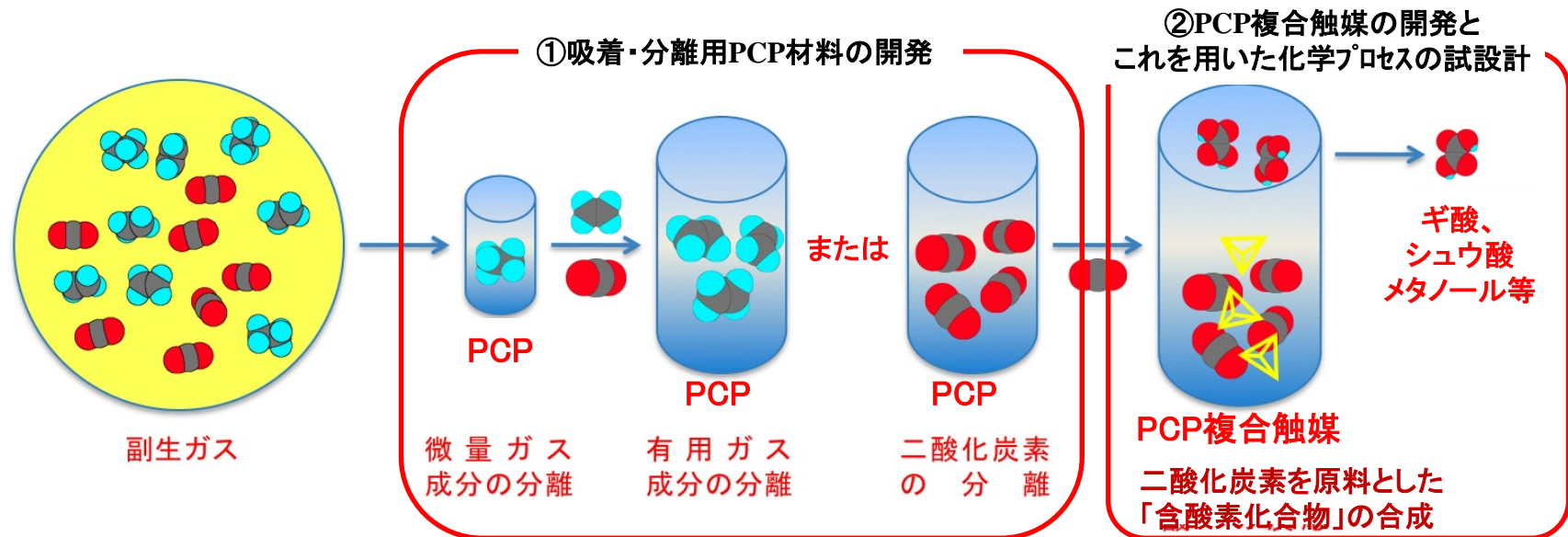
<事業の内容> 革新的な材料である多孔性金属錯体(PCP/MOF)を用いて以下の開発を行う。

①CO₂ガスの分離・精製材料基盤技術開発

CO₂等の副生ガスをマイルドな条件で効率良く吸着・脱離できる革新的な吸着材料の開発

②回収CO₂ガスによるグリーンプロセス基盤技術開発

高濃度に濃縮された副生ガスから有用な化学品をグリーンに生産する基盤技術の開発



PCP
MOF

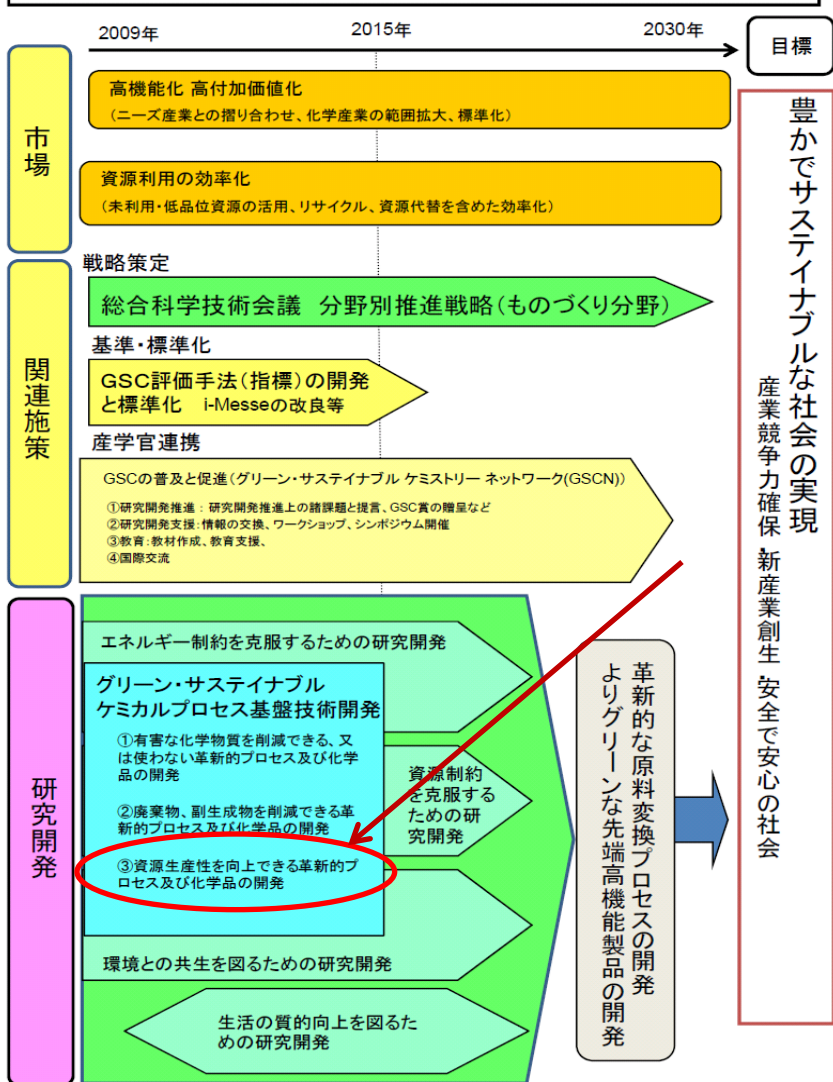
Porous Coordination Polymer (多孔性配位高分子)
Metal Organic Framework (多孔性金属錯体)

I. 事業の位置付け・必要性について (1)NEDOの事業としての妥当性

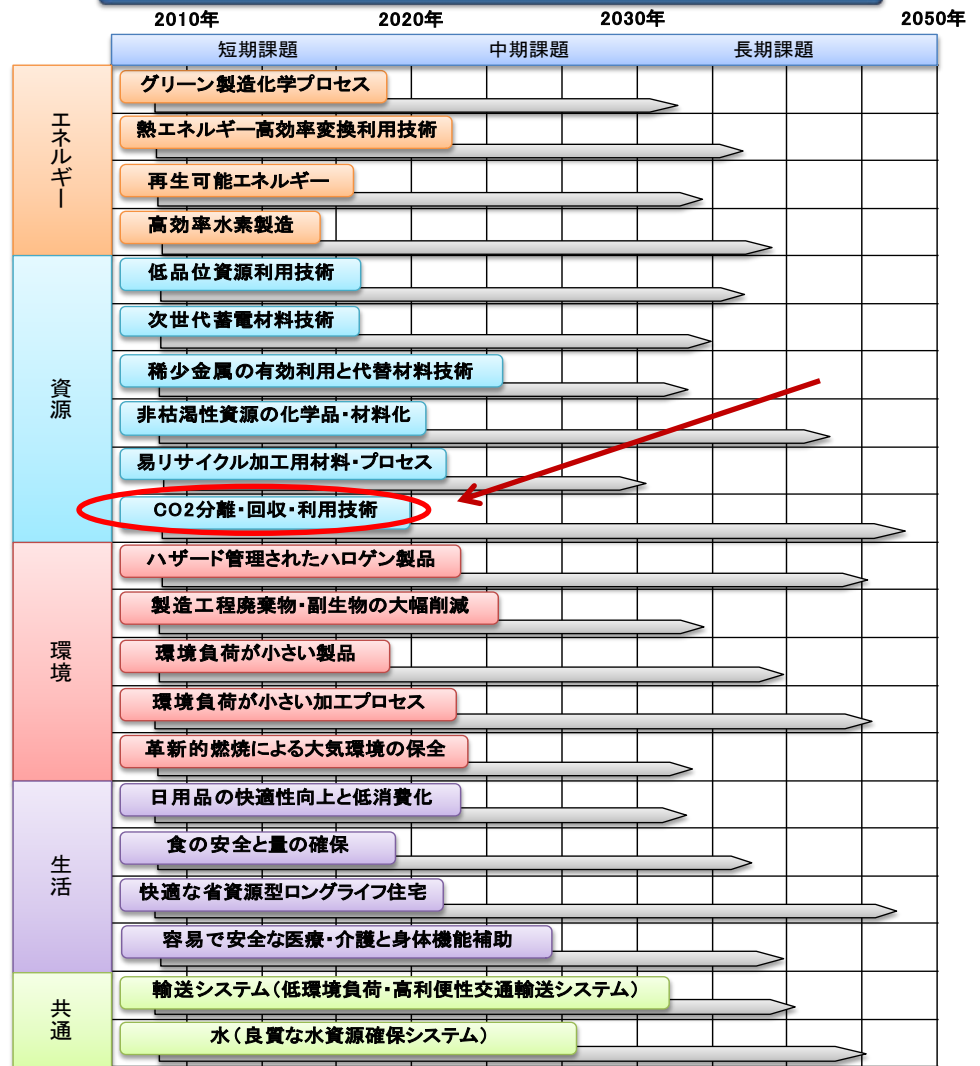
◆技術戦略マップ(ナノテク・部材分野)での位置付け

GSCの導入シナリオとロードマップ

グリーン・サステイナブルケミストリー分野の導入シナリオ



グリーン・サステイナブルケミストリー(GSC)ロードマップ概要

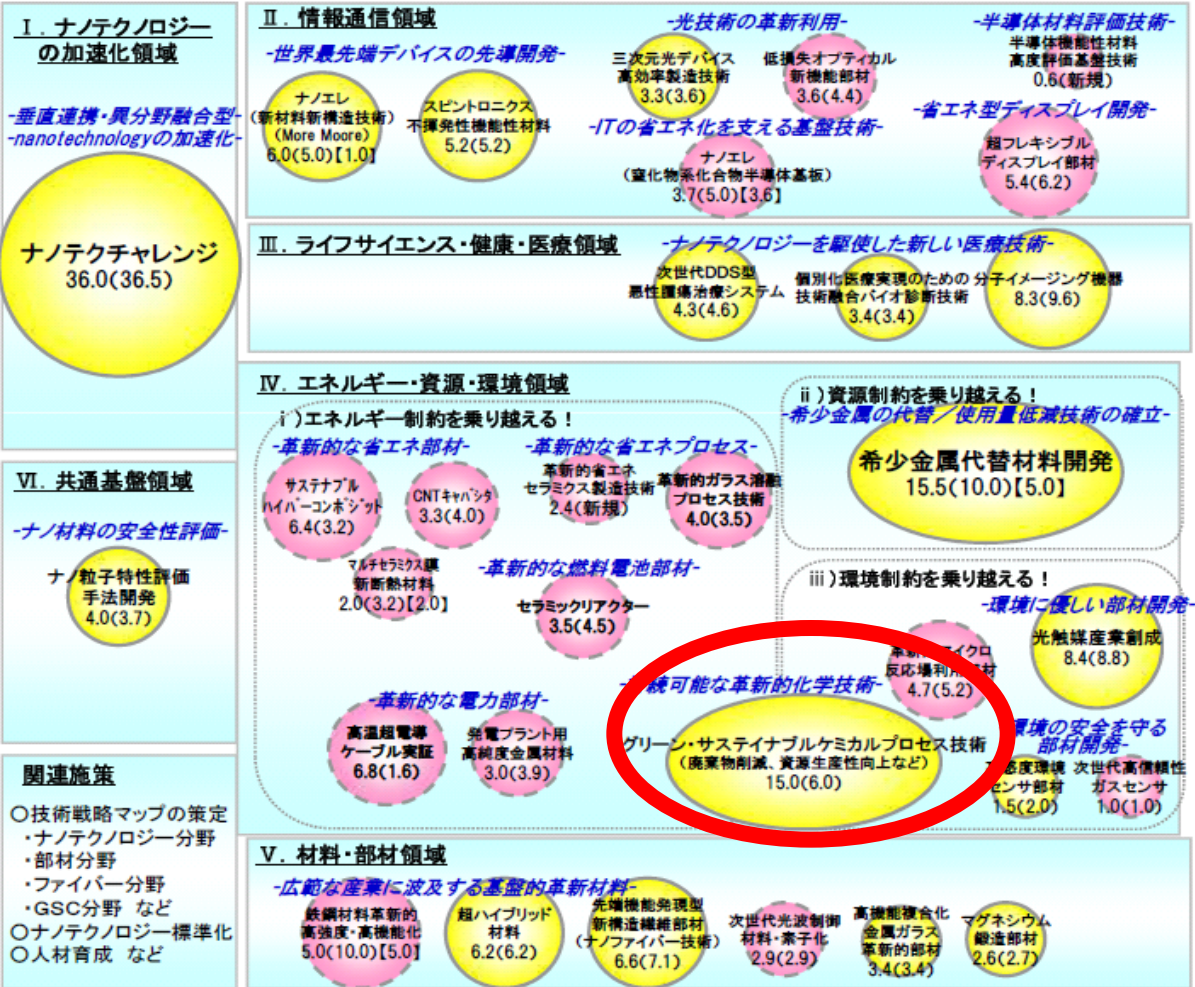


I. 事業の位置付け・必要性について (1)NEDOの事業としての妥当性

◆ナノテク・部材イノベーションプログラムでの位置付け

2. ナノテク・部材イノベーションプログラム

○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。



IPGの目標

-ナノテクによる非連続技術革新-
 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。

-世界最強部材産業による価値創出-
 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。

-広範な産業分野での付加価値増大-
 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。

-エネルギー制約・資源制約などの課題解決-
 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。

◆NEDOが関与する意義

「副生ガス高効率分離・精製プロセス基盤技術開発」

- ・ PCPを用いた**新規な副生ガス分離・精製技術**
 - ⇒ CO₂分離プロセスの更なる省エネ化、**社会的必要性大**
- ・ **PCPおよびPCP複合材料創成技術**
 - ⇒ 日本の化学産業の基盤強化、将来的な**競争力強化**
- ・ **研究開発の難易度高、開発リスク大** ⇒ **産官学の知見を結集**



NEDOが持つこれまでの知見、実績を活かして推進すべき事業

◆実施の効果(費用対効果)

費用の総額

13.8億円

H21～25年の
5年間の総額

省エネ効果

原油換算で
▲約2万kl/年※CO₂削減効果

▲5万トン/年※

※2030年時点で、化学プラント等にて発生する副生ガスからのCO₂100万トン分離に対し、本技術で開発した吸着材を用いたCO₂分離システムを導入したとして算出。

◆国内外の研究開発の動向及び本事業の位置付け

■欧米で、MOF/PCPの特徴(A.吸蔵、B.分離、C.触媒)を活かした研究開発を実施中

- ・(例)MACADEMIA (EU/FP7、2009～2013、総額約13億円(円換算))
PCPを用いた分離、触媒 等が開発テーマ
BASF社、TOTAL社も参画
- ・BASF社:企業ではトップランナー (A.気体貯蔵(メタン)、C.触媒)

■本事業は実用化志向の研究開発

- ・実用化ニーズのある企業と、基盤研究シーズを持つ大学との産学連携
- ・PCP分野の応用開発では日本初の国家プロジェクト

B.分離 ⇒ CO₂/メタン、CO₂/エチレン、微量成分ガス

C.触媒 ⇒ PCPと各種触媒材料との複合化方法、触媒能検証

◆事業の目標(2013年度 最終目標)

①CO₂ガスの分離・精製材料基盤技術開発

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CO₂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(CO₂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 回収CO₂ガスによるグリーンプロセス基盤技術開発

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。

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて (1) 研究開発目標の妥当性

◆ 研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	根拠
①CO ₂ ガスの分離・精製材料基盤技術開発	分離後のCO ₂ 濃度 99.9%以上	化学品原料として用いる際の純度を考慮
	CO ₂ 吸着エネルギー 30kJ/mol以下	実用的な材料として、既存材料を凌駕する世界最高のレベル
	CO ₂ 分離度 300以上	実用的な材料として、世界最高のレベル
②回収CO ₂ ガスによるグリーンプロセス基盤技術開発	選択率(電流効率) 80%以上	世界最高レベルの効率

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて (2) 研究開発計画の妥当性

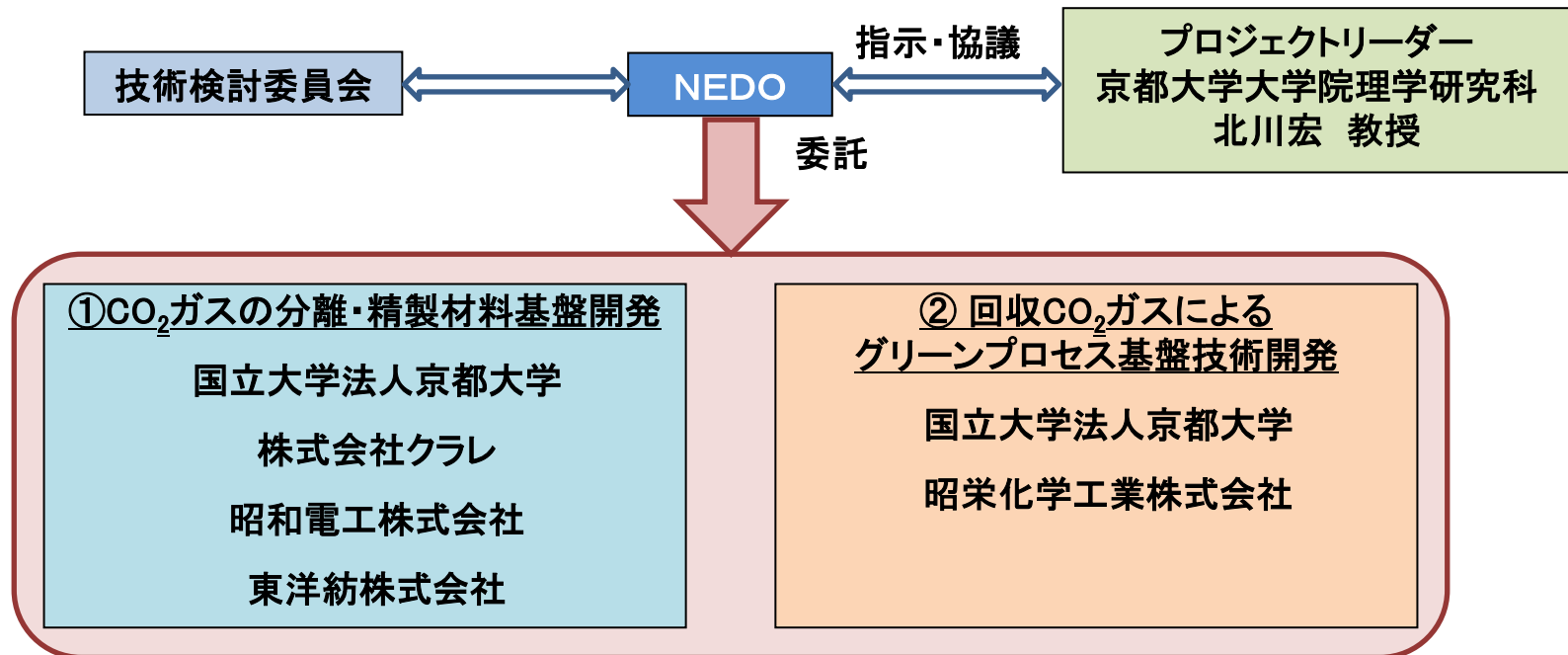
◆ 研究開発のスケジュールと開発予算

開発項目	2009	2010	2011	2012	2013	2014
① CO₂ガスの分離・精製材料基盤技術開発 中間評価 ▼ 事後評価 ▼						
CO ₂ /N ₂ 分離用PCPの開発	基本構造検討、メカニズム解明、測定方法確立		構造最適化、実ガス想定試験			
メタン精製用PCPの開発	基本骨格探索、PSA基盤技術開発		実用化の課題抽出	耐久性向上	スケールアップ合成、形態付与	
CO ₂ /エチレン分離用PCP、特定構造炭化水素分離用PCPの開発	基本骨格探索、形態付与		評価装置基本設計	構造最適化	プロセス検討	
PCPによる微量ガス分離材の開発	基本骨格探索、形態付与		安定性検討	構造最適化	形態付与、プロセス検討	
② 回収CO₂ガスによるグリーンプロセス基盤技術開発						
気相法によるPCP複合触媒の開発	複合化方法の検討、評価方法確立		複合触媒作成、化学プロセス試設計			
液相法によるPCP複合触媒の開発	複合化方法の検討、評価方法確立					
PCP複合触媒の開発						
事業費(百万円)	240	476	159	362	139	

事業費合計(百万円) 1,376

◆ 研究開発の実施体制

- ・PCPの基本構造探索、分離および反応メカニズム解明をアカデミアが実施し、それを応用して各企業がそれぞれの目的に合わせた実用化検討を実施した。
- ・PJ前半3年間は、京都大学内に設置した集中研において、成果・課題・解決策を迅速に共有することで、研究開発の円滑化を行った。



◆ 実用化に向けたマネジメント(1)

■ NEDOによるマネジメント

・NEDO主催の「技術検討委員会」を2回/年開催し、外部有識者の意見をPJ運営管理に反映。

- ＜反映内容＞
- ・実用化に向けた目標等の明確化、
 - ・課題解決の強化(PCPの形態付与、耐久性評価)
 - ・アカデミアと参画企業の連携強化

企業のニーズ ⇔ アカデミアでのメカニズム解明

区分	氏名	所属	役職
委員長	戸嶋 直樹	山口東京理科大学	教授
委員	指宿 堯嗣	産業環境管理協会	常務理事
	北島 昌夫	早稲田大学	招聘研究員
	染宮 昭義	神鋼リサーチ	主席研究員
	室井 高城	アイシーラボ	代表

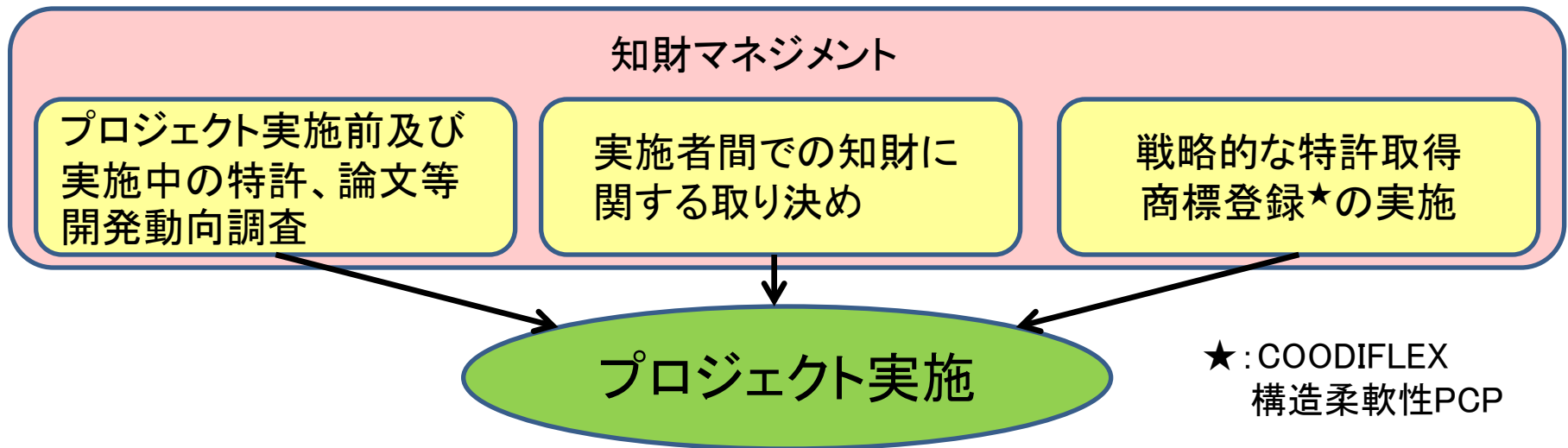
・実用化に向けた課題抽出の前倒しを目指して、効率的な資金投入(加速費)による開発加速を実施。

◆ 実用化に向けたマネジメント(2)

■ PLによるマネジメント

- ・PLを補佐して実用化の支援を図る**アドバイザーの設置**。
- ・全体会議(2回/年)等の主催による**実施者間の連携強化**。
- ・PLによる各実施者への**サイトビジット**(2回/年)を通じた進捗確認、研究開発の方向性検討、課題解決に向けた助言等の実施。
- ・全体会議、サイトビジットには**NEDOも極力参加**し、情報共有を図った。

◆ 知財マネジメント



◆加速財源投入実績

実用化に向けた課題抽出および評価試験を加速するため、加速財源の投入を実施した。

No	時期	金額 (百万円)	目的及び概要	成果
1	H22.2	61	開発サイクル高効率化のため、集中研に反応装置及び評価装置を導入。	世界で初めて気相法による多孔性金属錯体の合成に成功した。
2	H22.6	69	実用化時の課題検討着手のため、成形装置、評価装置等を導入。	成形体による実用性評価に前倒しで着手できた。
3	H22.11	255	早期実用化のため、中量合成装置及び実ガス想定の評価装置等を導入。	PCP合成量増加および評価効率向上により、実用化に向けた課題抽出の加速を図ることができた。
4	H24.8	58	実用化候補となるPCPの性能評価の迅速化のため、触媒活性評価装置の導入とキログラムスケールでのPCP外注合成を実施。	複合触媒の性能評価の効率化および、実用化に向けた分離用PCPの耐久試験の加速を図ることができた。
5	H24.11	109	PCP複合触媒の性能向上と耐久試験の効率化のため、複合触媒合成装置並びに分析装置の導入と、再度のPCP外注合成を実施。	高性能なPCP複合触媒の合成に成功した。候補PCPにおいて、実用化可能なレベルの耐久性を確認した。

合計

552

◆ 中間評価結果への対応

実用化に即した数値目標の設定や課題の明確化についてのご指摘をいただき、それらの対応を実施方針、実施計画書等に反映、実施した。

No.	指摘事項(概要)	指摘事項への対応
1	実用化の観点から目標設定にやや問題あり。分離後の濃度、分離度は、吸着材の性能が悪い場合も、操作条件や分離操作のカスケード化で達成できる。対象物質の吸着平衡や吸着速度などの材料そのものの優れた点をアピールできる数値目標に変更すべき。	より実用化に即した目標として、 動的な吸着挙動(破過試験等)を指標とした目標を設定した 。参画企業の想定する混合ガス系に対しても、同様な目標を定め、H24年度からの実施計画書に反映して研究開発を行った。その結果、目標を達成し、 実用化が可能なレベルの性能を持つ吸着材を開発 することができた。
2	材料コスト、分離プロセスを合わせたトータルコストとして既存技術と競合可能となる道筋が見えてこない。 競合技術と比較して現時点でどのレベルとか、部材がここまで安くなれば競争力を持つ等の評価が必要 。	実用化の判断は、最終的には性能とコストとのバランスとなる。現状の部材コストでは優位性を出すことは難しいため、PCPの製造コスト低減化の検討に加え、 既存技術とのプロセスコスト面等に関する比較を行い、実用化に必要な開発課題を明確化 することとし、H24年度以降の実施方針に反映して研究開発を行った。実験とシミュレーションを組み合わせ てPCPを用いた分離プロセスのコスト等を検討した結果、既存技術と競合可能なレベルのプロセスの構築可能性を明らかにした 。
3	CO ₂ を原料にしたシュウ酸等の新規合成プロセスはエネルギー的に合理的なものになりえるのか、皆が納得できるようなストーリーの確立が必要。 CO₂の再資源化触媒の研究は、基礎研究の領域 であり、実用化イメージ・出口イメージに基づき、 開発の各段階でマイルストーンには曖昧さがある 。	CO ₂ の原料化はハードルが高く、本事業では 試設計との位置付けではあるが、合理的なプロセスとして成立するための要件を明らかにすること とし、H24年度以降の実施方針に反映した。新規な合成対象として基幹化学品である メタノール を追加し、 気相中で合成したPCP複合触媒 を用いて、ラボレベルではあるが メタノール生成を確認し、PCP複合触媒の有用性を検証した 。

◆事業の内容

①CO₂ガスの分離・精製材料基盤技術開発 <吸着・分離用PCP材料の開発>

京都大学

①-a: CO₂/N₂分離用PCPの開発

共通基盤技術開発

- ・高性能PCPの開発
- ・基礎物性の評価
- ・メカニズムの解明



各企業の個別開発ターゲット

クラレ

①-b: メタン精製用PCPの開発

昭和電工

①-c: CO₂/エチレン分離用PCPおよび特定構造炭化水素分離精製用PCPの開発

東洋紡

①-d: PCPによる微量ガス(アルデヒド)分離材の開発

最終目標(公開): 高性能PCPの開発

達成

- ・CO₂濃度 ≥ 99.9%、
- ・吸着エネルギー ≤ 30 kJ/mol
- ・分離度 ≥ 300

②回収CO₂ガスによるグリーンプロセス基盤技術開発 <PCP複合触媒の開発とこれを用いた化学プロセスの試設計>

京都大学

②-c: PCP複合触媒の開発

共通基盤技術開発

- ・PCPと触媒の複合化技術
- ・複合体の構造解析
- ・触媒反応の解析

連携

複合触媒を用いた化学プロセス試設計 (キ酸合成、メタノール合成)

複合触媒の工業的製法の検討

昭栄化学工業

②-c: PCP複合触媒の開発

最終目標(公開)

達成

- ・目的生成物の選択率 ≥ 80% となる化学プロセスの試設計

◆プロジェクトとしての達成状況

いずれの研究開発項目においても最終目標を達成した。

* 公開されている目標のみ記載

研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	成果	達成度
①CO ₂ ガスの分離・精製材料基盤技術開発	分離後のCO ₂ 濃度 99.9%以上	99.9%	◎
	CO ₂ 吸着エネルギー 30kJ/mol以下	25kJ/mol	
	CO ₂ 分離度 300以上	655	
②回収CO ₂ ガスによるグリーンプロセス基盤技術開発	化学プロセスの試設計において 選択率(電流効率) 80%以上	ギ酸生成 95%以上	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達



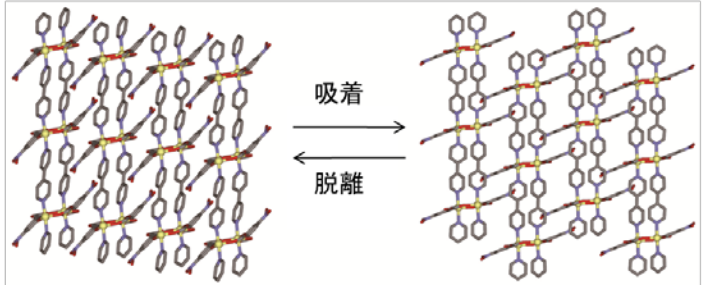
Ⅲ. 研究開発成果について (1) 目標の達成度と成果の意義

◆ 個別開発項目の成果

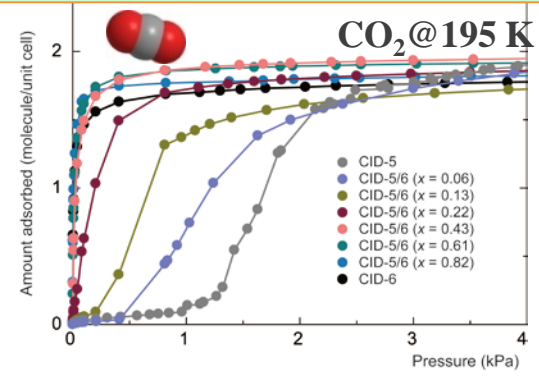
①-a CO₂/N₂分離用PCPの開発

■ 共通基盤技術としてのCO₂分離用PCPの開発

高いCO₂分離能を示す柔軟PCPの開発



PCP配位子固溶化によるCO₂吸着制御



■ 実際のニーズに近いガス分離向けPCPの開発

CO₂/エチレン分離向けPCPの開発

水蒸気耐性(繰り返し耐性)PCPの開発

■ ガス分離・吸着を定量的に評価するための各種装置の設計開発と評価・解析

CO₂分離破過曲線による混合ガス分離評価

CO₂ガス吸着のメカニズム解析

■ 目標達成状況

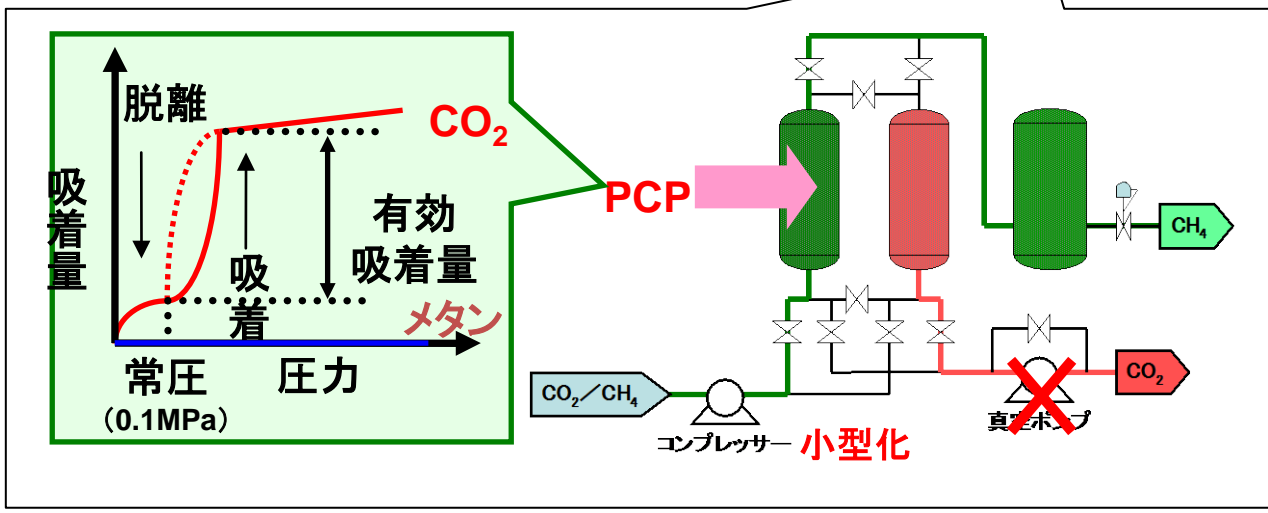
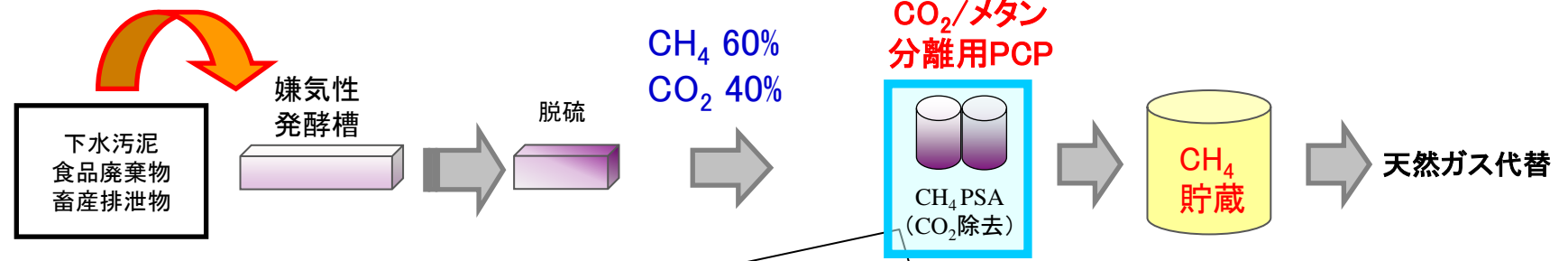
研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	成果	達成度
①CO ₂ ガスの分離・精製材料基盤技術開発	分離後のCO ₂ 濃度	99.9%以上	99.9%
	CO ₂ 吸着エネルギー	30kJ/mol以下	25kJ/mol
	CO ₂ 分離度	300以上	655
			◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達



①-b メタン精製用PCPの開発

■PSA用の新規な高性能吸着材として、CO₂/メタン分離用PCPを開発



- ①常圧での再生
→ 真空ポンプ不要
 - ②圧カスイング幅狭化
→ コンプレッサー小型化
- PSA運転に係る
ユーティリティ費大幅削減

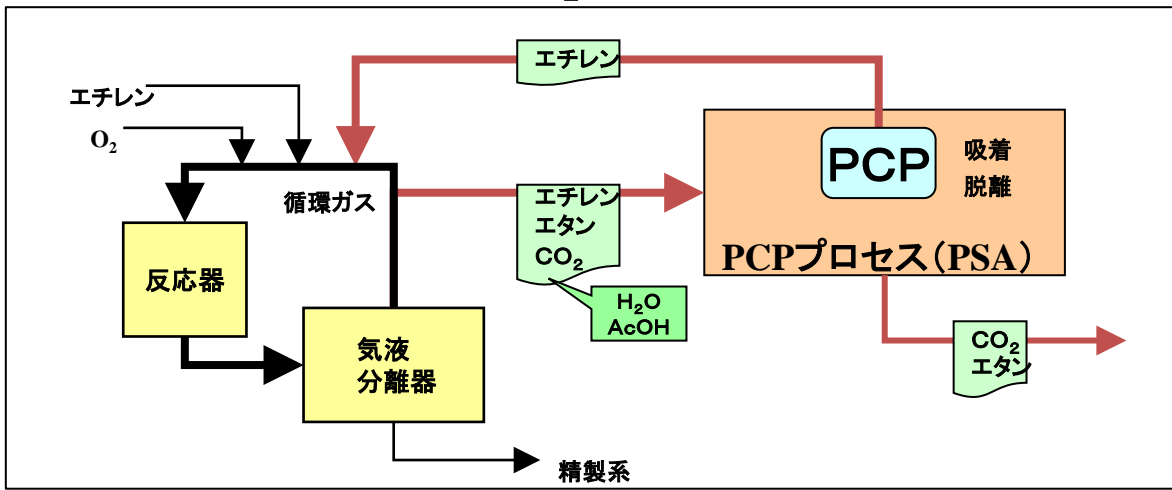
■ 目標達成状況と実用化の見通し

- ・最終目標性能を有するPCPを開発し、PCPの実用化に必要な基盤技術を確立
- ・平成29年度の実用化を目指し、今後はバイオガス精製以外の用途も念頭に技術開発・市場開発を行う。



①-c CO₂/エチレン分離用PCPの開発および 特定構造炭化水素分離精製用PCPの開発

■酸化反応プロセス中のCO₂/エチレン分離用PCPを開発



CO₂除去プロセス: 熱炭酸カリ法
⇒PCPを吸着材とした
PSA法で省エネ化

■構造異性体混合物から、特定の構造を持つ物質を分離するPCPを開発

沸点が近いので分離困難 従来の蒸留法 ⇒ PCPを用いた吸着・分離法による省エネ化

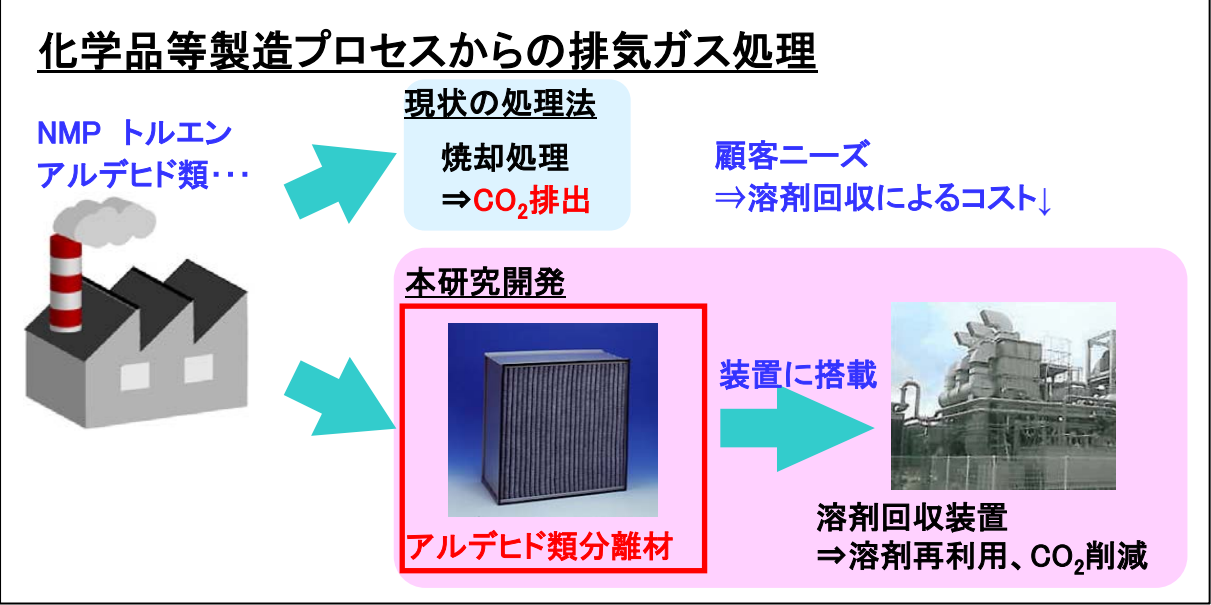
■目標達成状況と実用化の見通し

- ・エチレン分離: 最終目標性能を有するPCPを開発し、**実用化に必要な基盤技術を確立**
- ・特定構造物質の分離: 候補PCP抽出、形態付与技術を確立
- ・実用化の見通し: 分離・精製プロセス設計、コストダウン検討、量産検討
⇒量産試作、実証実験 ⇒ 実用化



①-d PCPによる微量ガス分離材の開発

■ 化学品等製造プロセスにおける排ガス中の微量成分(アルデヒド)分離用PCP開発



ホルムアルデヒド除去PCPの開発
⇒ 世界初

薬剤添着PCP
⇒ 世界最高レベルの吸着材

■ 目標達成状況と実用化の見通し

- ・最終目標性能を有するPCPを開発し、**実用化に必要な基盤技術を確立**。
- ・実用化: 東洋紡保有の微量ガス吸着分離技術を活用し、**アルデヒド類除去で実用化を狙う**。
- ・波及効果: **他のVOC除去用途**(工場空調、自動車、空気清浄機向け脱臭フィルタ)への適用により事業拡大が期待できる。

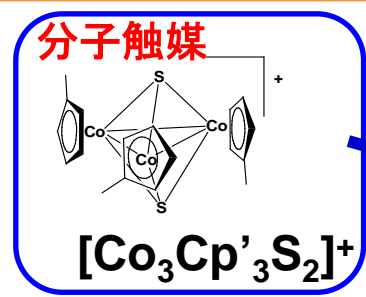


Ⅲ. 研究開発成果について (1) 目標の達成度と成果の意義

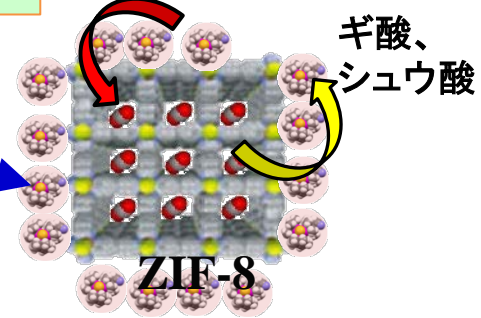
② 回収CO₂ガスによるグリーンプロセス基盤技術開発/PCP複合触媒の開発

■ PCP複合触媒の開発、これを用いた化学プロセス試設計 (CO₂ ⇒ ギ酸、メノール等の合成)

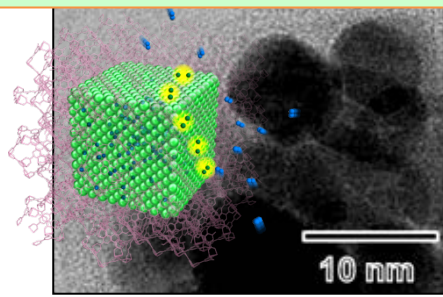
分子触媒とPCPの複合化



二酸化炭素濃縮



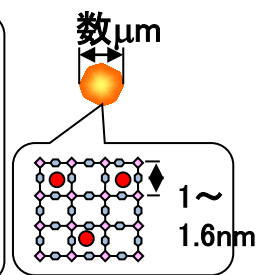
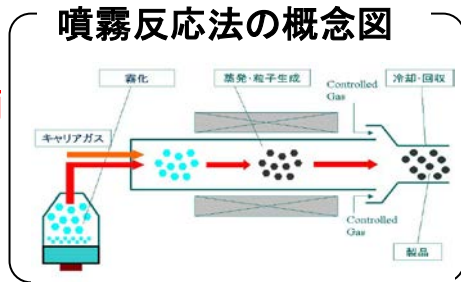
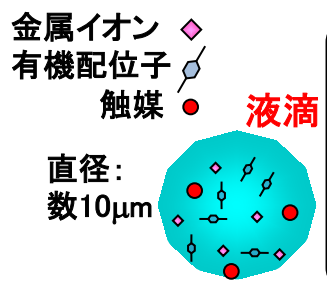
活性金属種とPCPの複合化手法の開発



メノール生成用
PCP複合触媒

PCP複合触媒の工業的製法の開発

気相反応による
PCP複合触媒の作製



■ 目標達成状況

研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	成果	達成度
② 回収CO ₂ ガスによるグリーンプロセス基盤技術開発	選択率(電流効率) 80%以上	ギ酸生成 95%以上	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

■ 実用化の見通し、波及効果(昭栄化学工業)

・気相中のPCP複合材料製造技術 ⇒ PCP複合触媒、高機能材料への展開

◆ 知的財産権、成果の普及

	2009	2010	2011	2012	2013	(2014)	計
特許出願	5	11	24	25	23	12	100件
(うち外国出願)		(1)		(7)	(6)	(3)	(17件)
商標登録		2					2件
論文	3	4	8	5	5	4	29件
(うち査読付き)	(3)	(3)	(6)	(3)	(3)	(3)	(21件)
研究発表・講演		3	2	5	2	4	16件
受賞実績							0件
新聞・雑誌等への掲載	0	2	2	2	2	1	9件
展示会への出展							0件

平成26年10月1日現在

◆ 成果の意義

PJ全体：PCP基盤技術の確立

- ・吸着分離に最適な柔軟構造的PCPの開発
- ・配位子固溶化手法等による吸着制御
- ・理論計算に裏付けられたPCP材料設計
- ・吸着・分離の定量的評価手法
- ・触媒とPCPの複合化技術

①CO₂ガスの分離・精製材料基盤技術開発

- ・実用化可能なレベルのPCPの開発
- ・分離プロセスのFS、コスト計算等による技術的優位性の検証

②回収CO₂ガスによるグリーンプロセス基盤技術開発

- ・PCP複合触媒の工業的製法の開発
- ・PCP複合触媒を用いた化学プロセス試設計
(例)CO₂原料からのメタノール合成

■ 本成果の効果

- ・PCPにより分離プロセスの高精度化、低コスト化、省エネ化が可能
- ・PCPと他材料の複合化技術は、様々な用途の高機能材料へ展開が可能

■ 本成果のレベル

- ・基盤技術として大きな成果 ⇒ 企業が自社内で実用化検討を深めるのに十分なレベル

◆本プロジェクトにおける「実用化」の考え方

当該研究開発で開発した「PCP/MOFを用いた分離技術」または「PCP/MOFと触媒の複合化技術」を利用した実証レベルの技術を確認することを言う。

基盤技術の
確立

実証レベルの
技術の確立

本事業

PJ成果

- ・PCPの製造技術
- ・形態付与技術
- ・PSA法による分離プロセス
- ・気相中でのPCP複合体製造技術

自社での継続開発

実用化に向けた
課題解決

- ・更なる性能向上
- ・低コスト化
- ・化審法・安衛法への対応
- ・量産化技術の確立
- ・市場調査、サンプル提供

実用化

PCPを使用した
分離プロセス

PCPを使用した
フィルタ、部材

PCP材料
PCP複合材料

各企業の実用化ターゲットにあわせて、自社内で課題解決を実施し、
PJ終了から3～5年後を目途に実用化を図る。