

「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発」

⑥カーボンリサイクル・次世代火力推進事業

共通基盤技術開発

・

⑨CO₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発」

事業原簿

【公開版】

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	概要 1～9
プロジェクト用語集	用語 1～2
1. 事業の位置づけ・必要性について	1 - 1
1. 1. 事業の背景・目的・位置づけ	1 - 1
(1) 政策的重要性	1 - 2
(2) 我が国の状況	1 - 4
(3) 世界の取り組み状況	1 - 6
1. 2. NEDO が関与する必要性・制度への適合性	1 - 7
(1) NEDO が関与することの意義	1 - 7
(2) 実施の効果（費用対効果）	1 - 8
2. 研究開発マネジメント	2 - 1
2. 1. 事業の目標	2 - 1
2. 2. 事業の計画内容	2 - 2
2. 2. 1. 研究開発の内容	2 - 2
2. 2. 2. 研究開発の実施体制	2 - 6
2. 2. 3. 研究開発の運営管理	2 - 21
2. 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	2 - 22
2. 3. 情勢変化への対応	2 - 26
3. 研究開発成果	3 - 1
3. 1. 研究開発全体の成果	3 - 1
3. 2. ⑥共通基盤技術開発の個別テーマ成果概要	3 - 1
3. 3. ⑨CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発の個別テーマ成果概要	3 - 2
4. 成果の実用化に向けた取組および見通し	4 - 1
4. 1. 本プロジェクトにおける「実用化」の考え方	4 - 1
4. 2. 実用化に向けた戦略	4 - 1
4. 3. 実用化に向けた具体的取組	4 - 1
4. 4. 実用化に対する課題	4 - 6
4. 5. 波及効果	4 - 6

(添付資料)

- ・添付資料 1 プロジェクト基本計画
- ・添付資料 2 特許論文等リスト

概要

	最終更新日	2022年6月30日							
プロジェクト名	カーボンサイクル・次世代火力発電等技術開発／ ⑥カーボンサイクル・次世代火力推進事業／共通基盤技術開発・ ⑨CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発	プロジェクト番号	P16002						
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 PM 谷村 寧昭 (2022年4月～2022年6月現在) 環境部 PM 荒川 純 (2020年7月～2022年3月)								
0. 事業の概要	<p>火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素 (CO₂) を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。これら技術開発の方針に対応するため、CO₂ 排出削減を目的として、分離・回収した CO₂ を多様な炭素化合物の製品として有効利用する技術 (カーボンサイクル) を多分野において幅広い段階で開発することにより、技術体系構築を促進する。特に、化学品、燃料、鉱物化等における製品化を行うため、以下の2つの研究開発項目において基礎研究及び実用化技術開発を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発項目⑥：共通基盤技術開発事業により、カーボンサイクルに必要な中長期的な研究開発を実施し、基礎技術を構築する。 研究開発項目⑨：CO₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発事業により、基礎研究から実証に向けた応用技術を構築する。 								
1. 事業の位置 付け・必要性について	我が国においてはカーボンサイクルに関して、経済産業省が策定した「カーボンサイクル技術ロードマップ」(2019年6月策定、2021年7月改訂)では、化学品や燃料(液体や気体燃料)、鉱物(コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など)などの分野を中心に、カーボンサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられている。								
2. 研究開発マネジメントについて									
事業の目標	本カーボンサイクル技術ロードマップに記載されている技術の中で、CO ₂ を原料とした化学品、燃料、鉱物化などに関する技術を対象とし、これらの原理解明等の結果が中長期的に幅広い技術開発に活用できるように先導研究の共通基盤技術開発を実施することで、カーボンサイクル技術を向上する。 また、CO ₂ の排出源や製品の用途等に応じた適用技術の成果の整理を行い、化学品、液体燃料、コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などに関するカーボンサイクル技術の実用化の見通しを得る。								
事業の計画内容	主な実施事項	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	2024fy	2025fy	2026fy	
	研究開発項目⑥カーボンサイクル・次世代火力推進事業／共通基盤技術開発								
	a.ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中のCO ₂ からの基幹物質製造開発事業			→					
b.カルシウム含有廃棄物からのC a抽出およびCO ₂ 鉱物固定化技術の研究開発			→						

c. CO ₂ 電解リバーシブル 固体酸化セルの開発	→						
d. 石炭灰およびバイオマ ス灰等による CO ₂ 固定・ 有効活用に関する要素 技術開発	→						
e. 高温溶融塩電解を利用 した CO ₂ 還元技術の 研究開発	→						
f. CO ₂ /H ₂ O の共電解 技術の研究開発	→						
g. 放電プラズマによる CO ₂ 還元・分解反応の 基盤研究開発	→						
h. 二酸化炭素資源化 のための中低温イオン液 体を用いた尿素電解合 成の可能性調査	→						
i. CO ₂ の気相電解還元 による炭化水素燃料の 直接合成可能な電極 触媒の研究開発				→			
j. 海水と生体アミンを用 いた CO ₂ 鉱物化法の研 究開発				→			
k. CO ₂ からのアンモニア メタネーションの技術開発				→			
l. CO ₂ を活用したマリンバ イオマス由来活性炭転 換技術の開発				→			
m. カーボンサイクル L P ガス合成技術の研究 開発				→			
n. 二元機能触媒を用い た高効率炭酸ガス回 収・メタン合成プロセスの 研究開発				→			
研究開発項目⑨CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発							
o. CO ₂ を原料としたパラ キシレン製造に関する技 術開発	→						
p. CO ₂ を用いたメタノー ル合成における最適シ ステム開発				→			
q. CO ₂ を原料とした直 接合成反応による低級				→			

	オレフィン製造技術の研究開発							
	r. 次世代 FT 反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発							
	s. 微細ミスト技術による CO ₂ 回収技術及び炭酸塩生成技術の研究開発							
	t. マイクロ波による CO ₂ 吸収焼結体の研究開発(CO ₂ -TriCOM)							
	u. 海水および廃かん水を用いた有価物併産 CO ₂ 固定化技術の研究開発							
	v. 産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発							
	w. セメント系廃材を活用した CO ₂ 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究							
	x. 製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO ₂ 固定化プロセスの技術開発							
	y. 二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発							
	z. 製鋼スラグの高速多量炭酸化による革新的 CO ₂ 固定技術の研究開発							
事業費推移	会計・勘定	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	2024fy	2025fy	総額
(会計・勘定別に NEDO が負担した実績額 (評価実施年度については 予算額) を記載) (単位:百万円)	一般会計							
	特別会計 (需給)	1,270	3,753	4,146	(4,091)	(3,150)	(910)	(17,320)
	開発成果促進財源							
	総 NEDO 負担額	1,270	3,753	4,146	(4,091)	(3,150)	(910)	(17,320)

(委託)・ (助成)・ (共同研究) のうち使用しない 行は削除	(委託) 研究開発項目⑥カーボンリサイクル・次世代火力推進事業／共通基盤技術開発							
	a.ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中のCO ₂ からの基幹物質製造開発事業	69	107	-	-	-	-	175
	b.カルシウム含有廃棄物からのC a抽出およびCO ₂ 鉱物固定化技術の研究開発	43	59	-	-	-	-	92
	c.CO ₂ 電解リバーシブル固体酸化セルの開発	175	78	46	-	-	-	300
	d.石炭灰およびバイオマス灰等によるCO ₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発	86	130	91	-	-	-	307
	e.高温溶融塩電解を利用したCO ₂ 還元技術の研究開発	38	102	65	-	-	-	205
	f.CO ₂ /H ₂ Oの共電解技術の研究開発	91	86	122	-	-	-	300
	g.放電プラズマによるCO ₂ 還元・分解反応の基盤研究開発	56	35	-	-	-	-	101
	h.二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査	17	33	-	-	-	-	51
	i.CO ₂ の気相電解還元による炭化水素燃料の直接合成可能な電極触媒の研究開発	-	-	119	79	-	-	197
	j.海水と生体アミンを用いたCO ₂ 鉱物化法の研究開発	-	-	43	88	(67)	-	(198)
	k.CO ₂ からのアンモニアメタネーションの技術開発	-	-	54	57	-	-	111
	l.CO ₂ を活用したマリンバイオマス由来活性炭転換技術の開発	-	-	82	44	-	-	126
m.カーボンリサイクルLPガス合成技術の研究開発	-	-	109	147	(44)	-	(300)	
n.二元機能触媒を用いた高効率炭酸ガス回収・メタン合成プロセスの研究開発	-	-	161	37	-	-	198	

研究開発項目⑨CO2 排出削減・有効利用実用化技術開発							
o.CO ₂ を原料としたパラキシレン製造に関する技術開発	137	1147	367	(337)	-	-	(1,988)
p.CO ₂ を用いたメタノール合成における最適システム開発	-	12	433	(178)	(202)	(238)	1064
q.CO ₂ を原料とした直接合成反応による低級オレフィン製造技術の研究開発	-	19	76	(932)	(530)	(428)	(1,984)
r. 次世代 FT 反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発	11	1,113	1,535	(1,064)	(752)	-	(4,479)
s. 微細ミスト技術によるCO ₂ 回収技術及び炭酸塩生成技術の研究開発	100	89	-	-	-	-	189
t. マイクロ波による CO ₂ 吸収焼結体の研究開発(CO ₂ -TriCOM)	30	89	160	(62)	(54)	-	(395)
u. 海水および廃かん水を用いた有価物併産CO ₂ 固定化技術の研究開発	153	170	-	-	-	-	323
v. 産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発	135	188	163	(420)	(161)	-	(1,067)
w. セメント系廃材を活用したCO ₂ 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究	115	179	-	-	-	-	294
x. 製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO ₂ 固定化プロセスの技術開発	-	61	110	(174)	(111)	-	(456)
y. 二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発	-	90	248	(444)	(232)	(194)	(1,209)
z. 製鋼スラグの高速多量炭酸化による革新的CO ₂ 固定技術の研究開発	-	9	121	(29)	(997)	(50)	(1,205)

	経産省担当原課	資源エネルギー庁資源・燃料部石炭課
	プロジェクトリーダー	設定なし
	プロジェクトマネージャー	NEDO 環境部 荒川純 (2020/7-2022/3) NEDO 環境部 谷村寧昭 (2022/4-)
	開発体制 委託先 (助成事業の場合「助成先」とするなど適宜変更) (組合が委託先に含まれる場合は、その参加企業数及び参加企業名も記載)	<p>●研究開発項目⑥カーボンリサイクル・次世代火力推進事業／共通基盤技術開発</p> <p>a.ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中のCO₂からの基幹物質製造開発事業 学校法人慶應義塾、学校法人東京理科大学、 一般財団法人石炭フロンティア機構</p> <p>b.カルシウム含有廃棄物からのC a抽出およびCO₂鉱物固定化技術の研究開発 住友大阪セメント株式会社、国立大学法人山口大学、国立大学法人九州大学</p> <p>c.CO₂電解リバーシブル固体酸化物セルの開発 一般財団法人電力中央研究所、国立大学法人東京工業大学</p> <p>d.石炭灰およびバイオマス灰等によるCO₂固定・有効活用に関する要素技術開発 一般財団法人電力中央研究所、三菱重工業株式会社、東洋建設株式会社、 一般財団法人石炭フロンティア機構 <再委託> 国立研究開発法人国立環境研究所、株式会社福岡建設合材</p> <p>e.高温熔融塩電解を利用したCO₂還元技術の研究開発 国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人同志社</p> <p>f.CO₂/H₂Oの共電解技術の研究開発 東芝エネルギーシステムズ株式会社、国立大学法人九州大学</p> <p>g.放電プラズマによるCO₂還元・分解反応の基盤研究開発 国立大学法人東海国立大学機構、澤藤電機株式会社、川田工業株式会社</p> <p>h.二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査 一般財団法人電力中央研究所、学校法人慶應義塾</p> <p>i.CO₂の気相電解還元による炭化水素燃料の直接合成可能な電極触媒の研究開発 国立大学法人東京工業大学、国立大学法人埼玉大学、 国立大学法人北海道大学</p> <p>j.海水と生体アミンを用いたCO₂鉱物化法の研究開発 学校法人北里研究所北里大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、 国立大学法人琉球大学、国立大学法人東京大学、株式会社日本海水、 出光興産株式会社</p>

		<p><再委託> 国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人琉球大学</p> <p>k.CO₂からのアンモニアメタネーションの技術開発 日揮ホールディングス株式会社、日揮グローバル株式会社、 国立大学法人広島大学</p> <p>l.CO₂を活用したマリンバイオマス由来活性炭転換技術の開発 国立大学法人九州大学、一般財団法人金属系材料研究開発センター</p> <p>m.カーボンサイクルLPガス合成技術の研究開発 一般社団法人日本グリーンLPガス推進協議会、 国立研究開発法人産業技術総合研究所、エヌ・イーケムキャット株式会社</p> <p>n.二元機能触媒を用いた高効率炭酸ガス回収・メタン合成プロセスの研究開発 国立研究開発法人産業技術総合研究所、日立造船株式会社</p> <p>●研究開発項目⑨CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発</p> <p>o.CO₂を原料としたパラキシレン製造に関する技術開発 国立大学法人富山大学、日本製鉄株式会社、日鉄エンジニアリング、 ハイケム株式会社、千代田化工建設株式会社、三菱商事株式会社</p> <p>p.CO₂を用いたメタノール合成における最適システム開発 JFEスチール株式会社、公益財団法人地球環境産業技術研究機構</p> <p>q.CO₂を原料とした直接合成反応による低級オレフィン製造技術の研究開発 株式会社IHI</p> <p>r.次世代FT反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発 成蹊大学、ENEOS株式会社、名古屋大学、横浜国立大学、 出光興産株式会社、産業技術総合研究所、石油エネルギー技術センター <再委託> 国立大学法人東京大学、国立大学法人広島大学、国立大学法人大阪大学、 学校法人日本大学、国立大学法人東北大学、国立大学法人北海道大学</p> <p>s.微細ミスト技術によるCO₂回収技術及び炭酸塩生成技術の研究開発 株式会社トクヤマ、双日株式会社、ナノミストテクノロジーズ株式会社 <再委託> 国立大学法人東京工業大学</p> <p>t.マイクロ波によるCO₂吸収焼結体の研究開発(CO₂-TriCOM) 中国電力株式会社、国立大学法人広島大学、 中国高圧コンクリート工業株式会社 <再委託> 学校法人中部大学</p>
--	--	--

		<p>u.海水および廃かん水を用いた有価物併産 CO₂ 固定化技術の研究開発 学校法人早稲田大学、株式会社サクラ、日揮グローバル株式会社</p> <p>v.産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発 出光興産株式会社、UBE 株式会社、日揮ホールディングス株式会社、 日揮株式会社、学校法人成蹊大学、国立大学法人東北大学</p> <p>w.セメント系廃材を活用した CO₂ 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術 の研究 株式会社竹中工務店</p> <p>x.製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO₂ 固定化プロセスの技術開発 株式会社神戸製鋼所、株式会社神鋼環境ソリューション <再委託> 学校法人早稲田大学、国立大学法人東北大学、学校法人日本大学、 学校法人東京農業大学</p> <p>y.二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発 三菱マテリアル株式会社 <再委託> 国立大学法人群馬大学、国立大学法人岡山大学、国立大学法人東京工業大学</p> <p>z.製鋼スラグの高速多量炭酸化による革新的 CO₂ 固定技術の研究開発 JFE スチール株式会社 <共同研究> 国立大学法人愛媛大学</p>
情勢変化への 対応	<p>2021 年 4 月に菅総理大臣は、2030 年に向けた温室効果ガスの削減目標について、2013 年度に比べて 46% 削減することを目指し、さらに 50%の高みに向けて挑戦を続けていくことを表明した。</p> <p>2021 年 7 月に経済産業省により「カーボンリサイクル技術ロードマップ」が改訂された。カーボンリサイクルに係る技術は、将来有望な選択肢の一つであり、そのイノベーションを加速化していくことが重要とされ、DAC や CO₂ 輸送等の取り組みも追加され、また、カーボンリサイクル製品（汎用品）の普及開始時期を 2040 年頃に前倒しすること等が示された。</p> <p>2021 年 11 月に「COP26」が開催され、低排出エネルギーシステムへの移行に向けての技術の開発・実装・普及及び政策の採用を加速させることとなった。また、パリ協定第 6 条に基づく市場メカニズムの実施指針が合意された。</p> <p>2021 年 12 月に経済産業省により、「グリーンイノベーション基金事業の基本方針」が策定され 2050 年カーボンニュートラルの実現に向け、NEDO に 2 兆円の基金を造成し、野心的な目標にコミットする企業等に対して、10 年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援することとなった。</p> <p>これらのことから、本事業の早期実用化の重要性がさらに高まるとともに、事業内容を上記政策と連携し、排出源、サプライチェーン、制度等の影響などの観点も追加した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・カーボンリサイクルの加速化も踏まえ、2030 年ごろに社会実装を目指すテーマについては、グリーンイノベーション基金事業で採択され実施中（2 件） ・各種勉強会や協議会における議論を注視し、標準化の議論や制度構築に資する基礎データの取得も行うこととした。 ・国内外の排出源やサプライチェーンについても、特に実証に近いテーマ等で、必要に応じ検討を行うこととしている。 	
中間評価結果 への対応		

評価に関する事項	事前評価											
	中間評価	2025年度（予定）										
	事後評価	2026年度（予定）										
3. 研究開発成果について	<p>●研究開発項目⑥：共通基盤技術開発事業</p> <p>2020年の8つの採択事業の半数以上は先導から実用化開発に向けた研究にシフト。更に6つの新たな先導研究を採択。カーボンリサイクルロードマップの先導基盤技術の可能性を明確化。</p> <p>●研究開発項目⑨CO2排出削減・有効利用実用化技術開発</p> <p>化学品分野において、各事業においてラボ～ベンチ試験装置が導入完了し、合成等の評価が進行中。カーボンリサイクルによる化学品合成手法の構築に寄与</p> <p>液体燃料分野では電解等設備を導入完了し、試験開始。合成触媒の試験で選択性を確認。合成燃料における技術深化により、低コストな技術の提供に寄与。</p> <p>炭酸塩・セメントコンクリート等の分野ではラボ～ベンチスケールでの要素技術開発及び全体システム検討を実施中。実証での要素技術開発につなげ全体システム構築化に寄与。</p>											
	投稿論文	「査読付き」27件、「その他」63件										
	特許	<p>「出願済」29件、「登録」3件、「実施」0件（うち国際出願4件）</p> <p>特記事項：</p> <ul style="list-style-type: none"> 本事業中で得られた技術成果のうち、ノウハウについては、公開につながる特許化は行わない。ただし、必要に応じて、新たな基本特許になりうる重要なものは特許化を推進する。 本事業によって得られた成果を活用し、標準化機関等との連携を図り、わが国の優れたカーボンリサイクル技術を普及させることを念頭に、積極的な提案活動を展開していく。 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>2020年度</th> <th>2021年度</th> <th>2022年度</th> <th>計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>特許出願（うち外国出願）</td> <td>2</td> <td>22 (4)</td> <td>8</td> <td>32 (4)</td> </tr> </tbody> </table>		2020年度	2021年度	2022年度	計	特許出願（うち外国出願）	2	22 (4)	8	32 (4)
		2020年度	2021年度	2022年度	計							
特許出願（うち外国出願）	2	22 (4)	8	32 (4)								
その他の外部発表（プレス発表等）	新聞・雑誌等への掲載：26件 展示会への出展：5件											
4. 成果の実用化・に向けた取組及び見通しについて	<p>実用化は、『CO₂排出削減・有効利用に適用可能な技術が確立されたこと』をいう。</p> <p>技術構築の観点では、2020年度から2025年度ごろを目標にラボレベルからベンチレベルにスケールアップを行い、基本技術を確立し、実証により製品製造技術を実用化させる。その後、製品製造2035年度ごろを目標に大型商用プラントを構築し、大規模商用化を図る。</p> <p>ビジネスモデルの構築の観点では、実証機を通じたカーボンリサイクル製品の製造技術構築により技術実用化を行い、事業化見通しを得る。さらに一次製品の市場導入を図り、高次加工された製品としてさらなる社会流通を狙う。また、製造設備や運用ライセンスなどとしての事業も同時に立ち上げ、総合的に事業拡充する。</p>											
5. 基本計画に関する事項	作成時期	2016年1月 制定										
	変更履歴	2016年4月、9月、2017年2月、5月、6月、2018年2月、7月、9月、2019年1月、7月、2020年2月、3月、7月、9月、10月、2021年1月、5月、6月、7月、2022年3月 改訂（研究開発の実施体制、具体的研究内容、達成目標、研究開発スケジュール表等の追加、修正）										

プロジェクト用語集

名称	略号	意味
Anion Exchange Membrane	AEM	陰イオン交換膜
Bipolar Membrane Electro-Dialysis	BMED	バイポーラ膜電気透析法：電気透析法によるイオンの分離と複合膜（バイポーラ膜）による水の乖離反応を組み合わせた方法
Bench Scale Unit	BSU	ベンチレベルの小規模試験設備
Benzene, Toluene, Xylene	BTX	ベンゼン・トルエン・キシレンの総称
Capital Expenditure	CAPEX	資本的支出：設備投資のための支出
Carbon Capture Utilization	CCU	二酸化炭素回収・利用
Carbon Capture Storage	CCS	二酸化炭素回収・貯留
Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage	CCUS	二酸化炭素回収・利用・貯留
Computational Fluid Dynamics	CFD	数値流体力学
Conference of the Parties	COP	「気候変動枠組条約」の加盟国による締約国会議
Carbon Recycle	CR	二酸化炭素を炭素資源としてとらえ、これを回収し、多様な化合物として再利用すること。
Chemical Vapor Deposition	CVD	化学的蒸着法：気相状態での化学反応により
Calcium-Silica-Hydrate	CSH	ケイ酸カルシウム水和物：コンクリート構成物質の一つ。
Direct Air Capture	DAC	大気中から二酸化炭素を回収する技術・プロセス
Dual Functional Material	DFM	二元機能触媒
Enhanced Oil Recovery	EOR	石油増産回収：地中の原油の回収率を向上する技術
Engineering, Procurement, Construction	EPC	設計・調達・建設
Feasibility Study	FS	ビジネス・プロジェクト等の実現可能性の事前調査
Fischer-Tropsch	FT	フィッシャートロプシュ（反応）：一酸化炭素と水素から触媒反応で炭化水素を合成する反応。
International Energy Agency	IEA	国際エネルギー機関
Integrated coal Gasification Combined cycle	IGCC	石炭ガス化複合発電
Integrated coal Gasification Fuel Cell Combined cycle	IGFC	石炭ガス化燃料電池複合発電
Life Cycle Assessment	LCA	ライフサイクルアセスメント：製品の製造、輸送、販売、使用、廃棄、再利用までの各段階の環境負荷を調査解析し、総合的な環境負荷を低減する検討
Methanol	MeOH	メタノール
Operation Expenditure	OPEX	運用費：設備の保守運用を含めた事業費
Polymer Electrolyte Fuel Cell	PEEC	固体高分子型電解セル

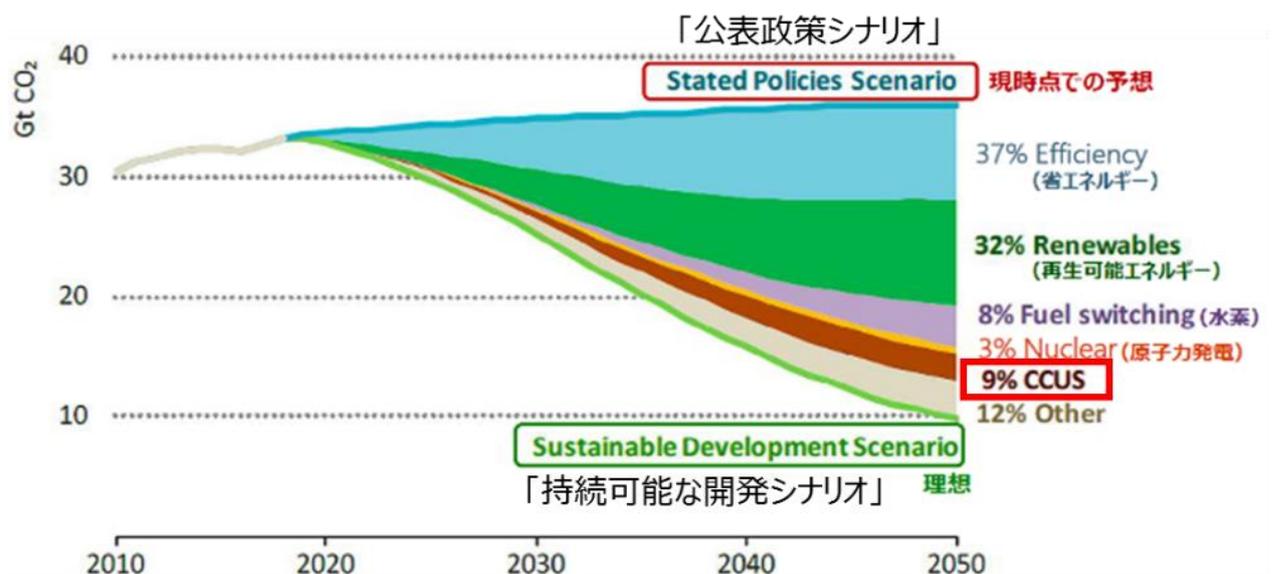
名称	略号	意味
Pressure Swing Adsorption	PSA	圧力変動吸着法
para-xylene	PX	芳香族化合物：パラキシレン
reversible Solid Oxide Cell	rSOC	リバーシブル 固体酸化物セル：電池／電解の両方に利用可能な固体酸化物セル
Semi-Autogenous Grinding	SAG	準自生粉碎：粉碎に鉱石と金属ボールの両方を用いて、ドラム中で破碎と摩擦により粉碎を行う
Tetraethyl orthosilicate	TEOS	オルトケイ酸テトラエチル： $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$

1. 事業の位置づけ・必要性について

1. 1. 事業の背景・目的・位置づけ

二酸化炭素回収・利用・貯留（CCUS: Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）は、工場や発電所等から排出される CO₂ を大気放散する前に回収し、化学品・燃料・鉱物化などの製品に再利用したり、地下へ圧入貯留する技術である。CCUS は、温室効果ガス削減効果が大きいこと等から地球温暖化対策の選択肢の一つとして世界的に期待されており、国際エネルギー機関（IEA ; International Energy Agency）が公表した Energy Technology Perspective 2017 では、2050 年までの累積 CO₂ 削減量の 9% を CCUS が担うとされている。この CCUS における「Utilization」にあたる技術として、分離・回収された CO₂ を多様な炭素化合物の製品として有効利用する技術（カーボンリサイクル）が提案されており、CO₂ 排出削減を達成していくためには、省エネや再エネの導入だけではなく、カーボンリサイクル技術を含む複数手段の組み合わせが重要とされている。

特に火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素（CO₂）を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンリサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。



出典：World Energy Outlook 2019 CO₂削減に関する取り組みとその貢献度

図1-1 CO₂削減に関する取り組みとその貢献度

本事業の目的

CO₂ 排出削減のため、分離・回収した CO₂ を多様な炭素化合物の製品として有効利用する技術（カーボンリサイクル）を多分野において幅広い段階で開発することにより、技術体系構築を促進する。化学品や燃料（液体燃料や気体燃料）、鉱物（コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など）などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める。

共通基盤技術開発事業により、カーボンリサイクルに必要な中長期的な研究開発を実施し、基礎技術を構築する。また、CO₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発事業により、基礎研究から実証に向けた応用技術を構築する。

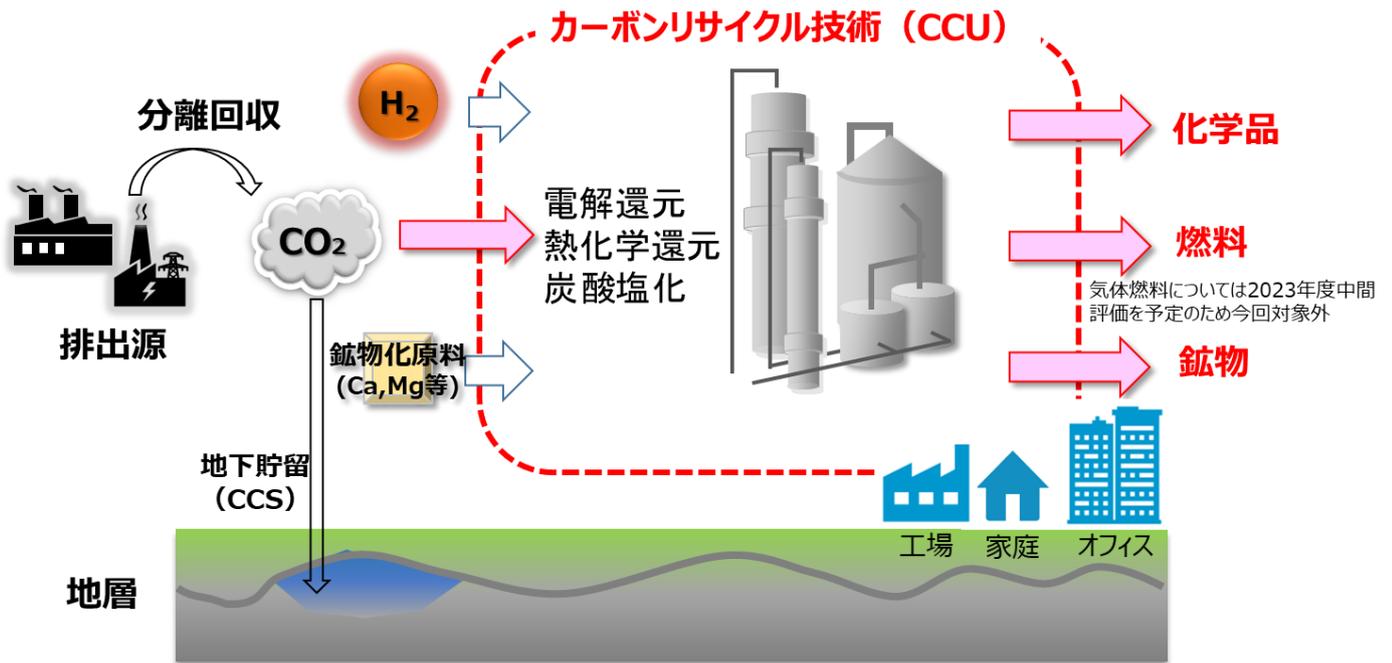


図1-2 カーボンリサイクル技術の概要図

(1) 政策的重要性

我が国においてはカーボンリサイクルに関して、経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」（2019年6月策定、2021年7月改訂）では、化学品や燃料（液体や気体燃料）、鉱物（コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など）などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられている。

■ 長期エネルギー需給見通し（2015年7月）

(3) 2030年度以降を見据えて進める取組

安全性、安定供給、経済効率性及び環境適合に関する政策目標の確実な実現と多層・多層化した柔軟なエネルギー需給構造の構築に向け、革新的な蓄電池、水素社会の実現に向けた技術、次世代型再生可能エネルギー、二酸化炭素の回収貯留 (CCS) 及び利用に関する技術を始めとする新たな技術の開発・利用の推進、メタンハイドレートなど我が国の排他的経済水域内に眠る資源の活用に向けた取組も推進する。

- カーボンリサイクル技術ロードマップ(2019年6月)
CO₂を資源として捉え、これを分離・回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルに係る技術は、将来有望な選択肢の一つであり、そのイノベーションを加速化していく。
- パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（2019年6月）
CO₂を資源として捉え、これを分離・回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルに係る技術は、将来有望な選択肢の一つであり、そのイノベーションを加速化していく。
- 革新的環境イノベーション戦略（2020年1月21日）
CO₂の大幅削減に不可欠なカーボンリサイクル、CCUS技術を重点領域の一つと位置づけ
て、脱炭素かつ安価なエネルギー供給技術の実現を進め、温室効果ガスの国内での大幅削減とともに、世界全体での排出削減に最大限貢献する。

事業開始後の政策等の動向変化

- 2021年4月に菅総理大臣は、2030年に向けた温室効果ガスの削減目標について、2013年度に比べて46%削減することを目指し、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けていくことを表明した。
- 2021年7月に経済産業省により「カーボンリサイクル技術ロードマップ」が改訂された。カーボンリサイクルに係る技術は、将来有望な選択肢の一つであり、そのイノベーションを加速化していくことが重要とされ、DACやCO₂輸送等の取り組みも追加され、また、カーボンリサイクル製品（汎用品）の普及開始時期を2040年頃に前倒しすること等が示された。
- 2021年11月に「COP26」が開催され、低排出エネルギーシステムへの移行に向けての技術の開発・実装・普及及び政策の採用を加速させることとなった。また、パリ協定第6条に基づく市場メカニズムの実施指針が合意された。
- 2021年12月に経済産業省により、「グリーンイノベーション基金事業の基本方針」が策定され2050年カーボンニュートラルの実現に向け、NEDOに2兆円の基金を造成し、野心的な目標にコミットする企業等に対して、10年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援することとなった。

(2) 我が国の状況

2016年6月に官民協議会で策定した「次世代火力発電に係るロードマップ」においてはCO₂排出量削減のため、2030年度以降を見据えた取組に係る技術に関する方針として、CO₂有効利用技術は火力発電からのCO₂排出を再利用することで、実質的なCO₂排出量をゼロに近づける切り札となり得るもののひとつとされており、長期的な視点で戦略的に技術開発を進めることが適当とされている。

また、2019年6月に経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」においては、CO₂排出量削減の鍵となる取り組みとして、省エネルギー、再生可能エネルギー、CCS、カーボンリサイクルが挙げられており。このうち、CO₂を資源として捉えて利用するカーボンリサイクルについては、そのイノベーションを加速化していくことが重要とされている。

我が国のCO₂大規模排出源としては、火力発電のほか、鉄鋼業における製鉄プロセス（高炉法）が挙げられ、これら大規模排出源からのCO₂を削減すべく、CCSとともにカーボンリサイクル技術の開発を実施している。

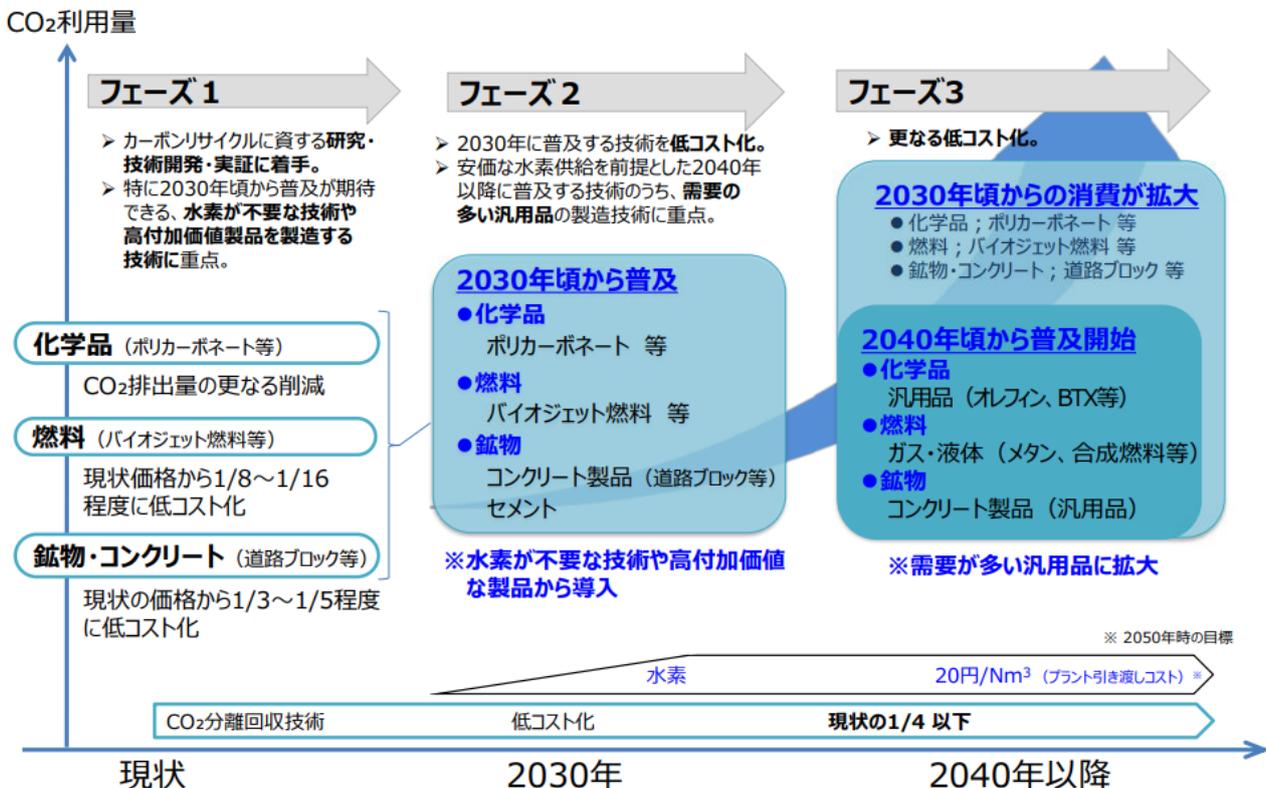


図1-3 次世代火力発電に係る技術ロードマップ（CO₂回収関連技術）

出典：経済産業省 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会 「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」

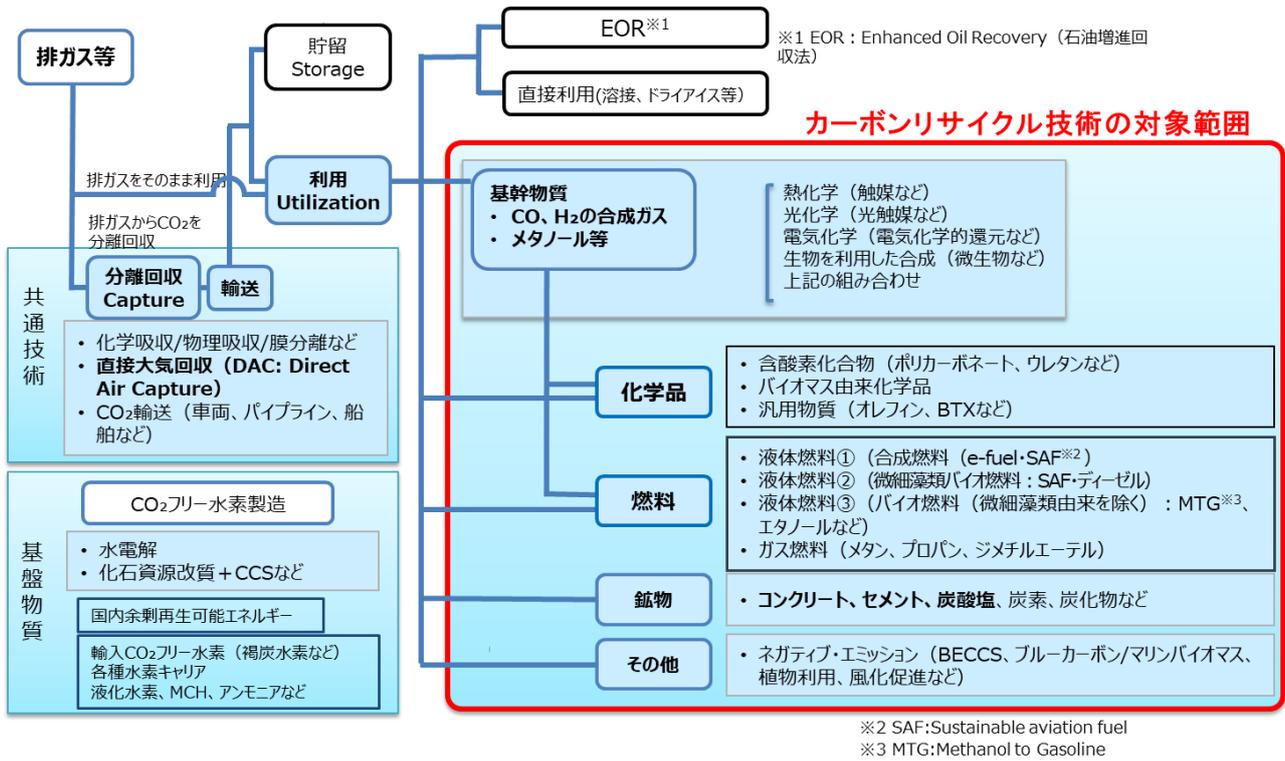


図1-4 カーボンリサイクル技術ロードマップ

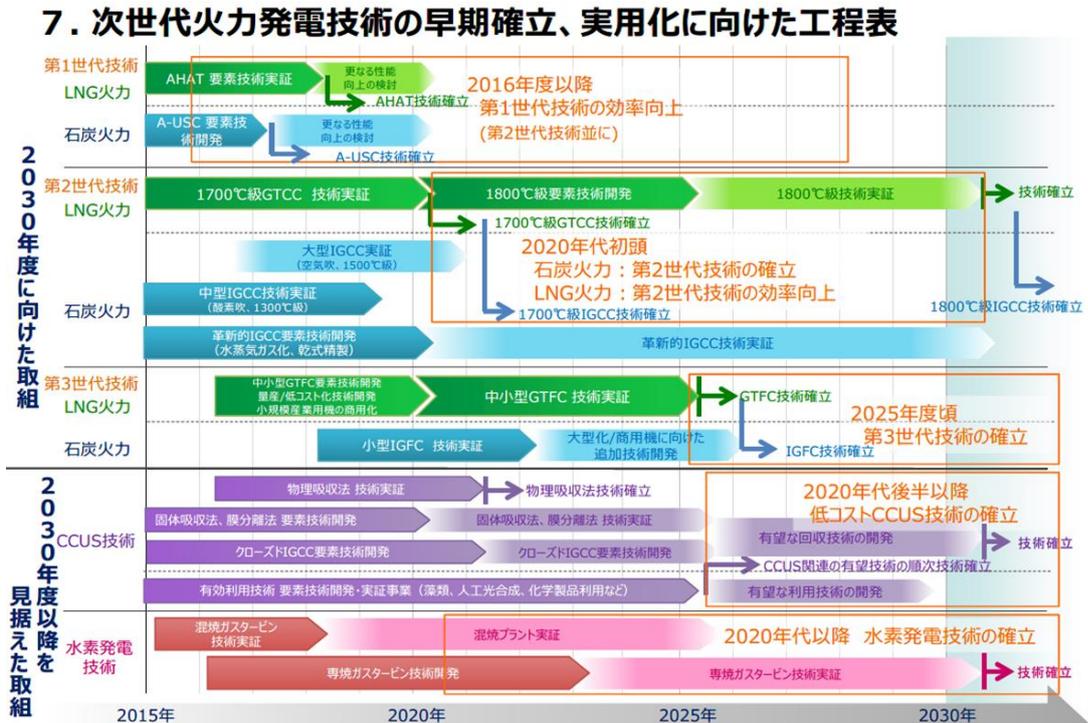


図1-5 カーボンリサイクル技術の実用化工程表

出典: 経済産業省 次世代火力発電の早期実現に向けた協議会 「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」

(3) 世界の取り組み状況

2015年にパリで開催された国連気候変動枠組条約第21回締約国会議（COP21）において採択された「パリ協定」が発効され、世界的に一層のCO₂の排出削減が必要とされている。このような流れの中、既に米国等ではCCS無しでは石炭火力発電所の新設が事実上不可能なレベルの規制を設けるなど、CO₂排出に対する規制強化の動きがある。また、引き続き開催されたCOP26においては我が国から提案している2国間取引制度に関する議論が進んでおり、制度整備が整いつつあるなど、本格的な導入に向けた準備が進んでいる。

これらに対し、化学品、燃料、鉱物（セメント・コンクリート）では一部で商用化が進みつつある。また、国内外では多様な製品・技術を対象とした開発・実証が活発化しており、早期の商品化と市場構築に向け競争状態となっている。ここではコスト低減と用途拡大が課題となっている。

国内では、化学、セメント、エネルギー、エンジニアリング等多様な分野の企業が参画しており、得意分野を補完した体制の構築が測られている。また欧州・米国でも、国家プロジェクトやスタートアップによる開発・実証が活発化している。

燃料				鉱物			
国	企業・組織名	製品・生成物	開発段階	国	企業・組織名	製品・生成物	開発段階
米	Lanzatech (スタートアップ)	エタノール	実証	日	中国電力、鹿島建設 等	CO ₂ 吸収コンクリート	商用化
米	Opus12 (スタートアップ)	メタン、エタン、エタノール	実証	英	O.C.O Technology (スタートアップ)	軽量骨材	商用化
日	INPEX 日立造船	メタン	実証 (NEDO)	米	Solidia Technology (スタートアップ)	CO ₂ 吸収コンクリート	商用化
日	ユーグレナ	ジェット燃料（微細燃料）	実証	米	Blue Planet (スタートアップ)	軽量骨材	商用化
独	Audi（自動車メーカー）	メタン、合成燃料（e-fuel）	実証	加	Carbon Cure (スタートアップ)	セメント原料	商用化
日	IHI	ジェット燃料(微細藻類)	基礎 (NEDO)	日	宇部興産、日揮、出光、 東北大学	セメント原料	実証 (NEDO)
日	JPEC、成蹊大他	合成燃料（e-fuel）	基礎 (NEDO)	日	太平洋セメント、東京大学、 早稲田大学	セメント原料	基礎～実証 (NEDO)
				仏	LafargeHolcim 等 (セメントメーカー)	セメント原料	基礎～実証 (FastCarb PJ)

図1-6 国内外の主なプロジェクト

1. 2. NEDO が関与する必要性・制度への適合性

(1) NEDO が関与することの意義

世界的に CO₂ 排出削減に関する取り組みが加速している状況において、第 5 次エネルギー基本計画（2018 年 7 月）、パリ協定に基づく長期戦略としての成長戦略（2019 年 7 月）でも温室効果ガス削減技術として、CCS・CCU／カーボンリサイクル技術は重要な技術として位置付けられている。CCU／カーボンリサイクル技術としての CO₂ 排出削減・有効利用の実用化、および共通基盤技術の開発は、下記の 3 点の観点から NEDO が関与し、NEDO がもつこれまでの知識、実績を活かして推進すべき事業としている。

- 社会的必要性：大、国家的課題（気候変動対策）に貢献する技術
- 研究開発の難易度：高、実用化に至るまでのリードタイムが長い
- 投資規模：大＝開発リスク：大

また CO₂ 排出源や製品の用途等が異なる様々なテーマについて、あるいは、様々な用途に適用される共通基盤技術開発について、NEDO は、産学官の技術力・研究力を最適に組み合わせることで研究開発を推進でき、他の調査事業とも連携させ、カーボンリサイクル技術の社会実装に至るまで、一貫した総合的なマネジメントを行うことが可能である。

これに関し、温室効果ガス排出量の大部分を占める CO₂ について、排出削減、貯蔵・固定化、再利用を全て考慮する炭素循環という観点から、社会システム全体で持続可能な社会を目指すことが重要である。

そこで、NEDO では、気候変動問題の解決に向けた技術開発の在り方や目指すべき方向性などをまとめた「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2020（NEDO 総合指針）」を策定した。

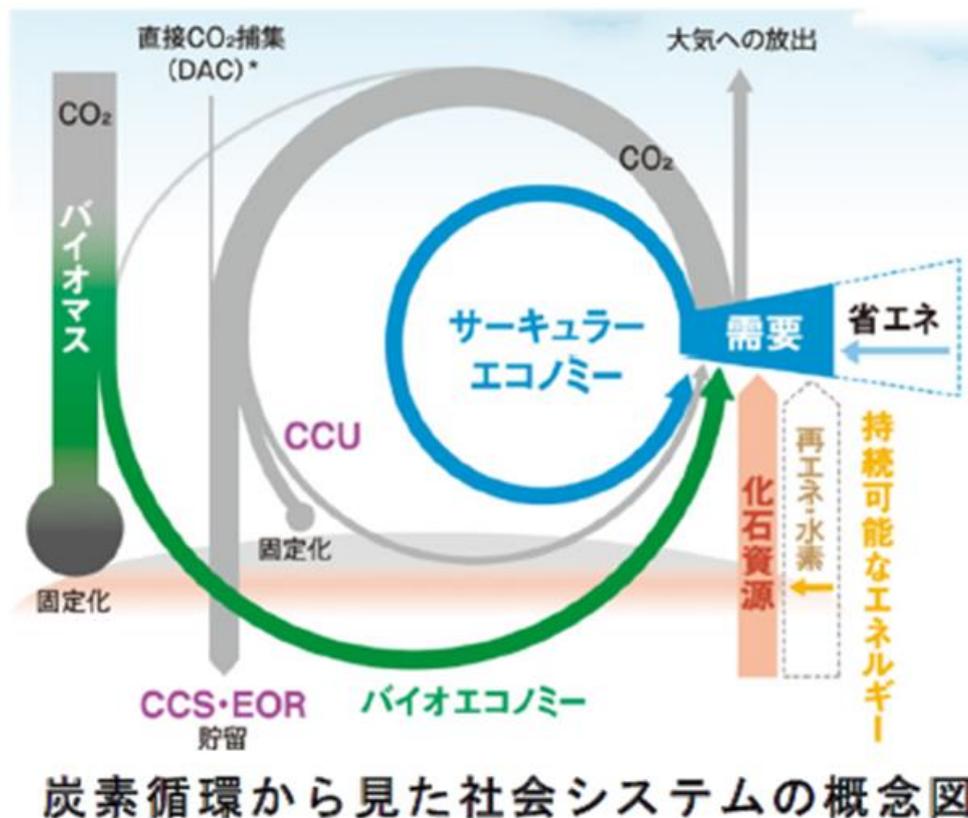


図 1 - 7 持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2020（2020 年 2 月）

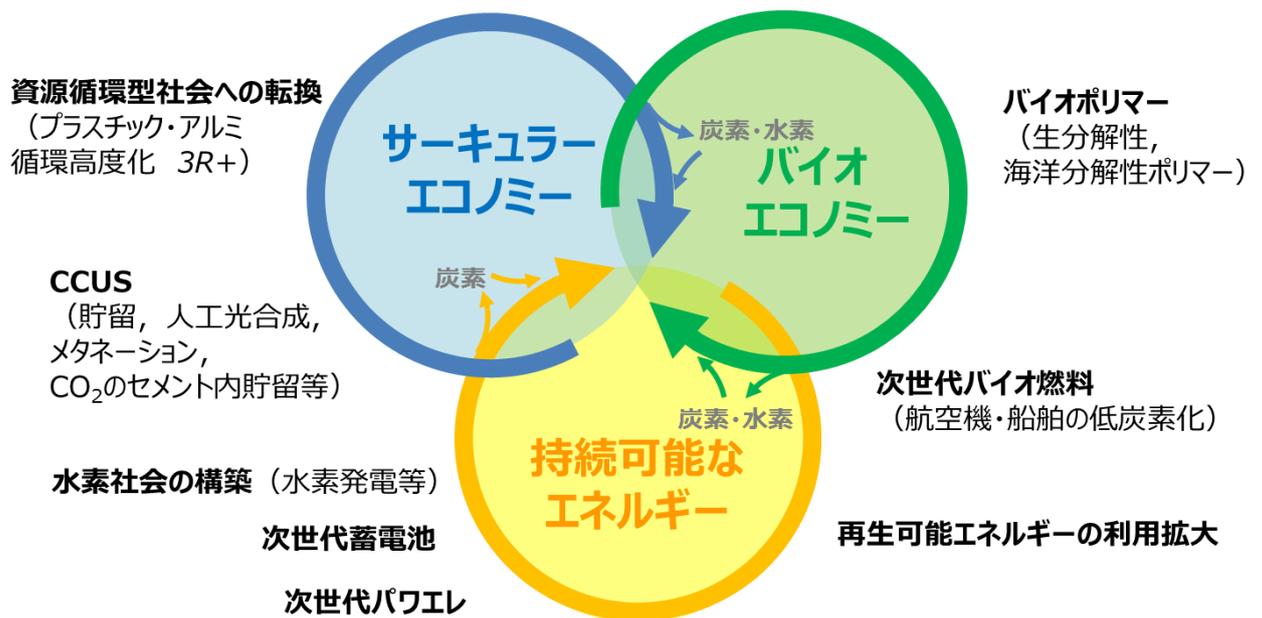


図1-8 持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針 2020 (2020年2月)

(2) 実施の効果 (費用対効果)

本事業で対象としているカーボンリサイクル技術を部分的に2030年ごろより適用開始し、2040年頃より本格適用を想定した場合、2050年度で約4兆円/年に達すると試算されている。

化学品、	300 億円/年 (2030 予測)	、0.4 兆円/年 (2050 予測)
液体燃料	150 億円/年 (2030 予測)	、3.1 兆円/年 (2050 予測)
鋳物化	400 億円/年 (2030 予測)	、0.3 兆円/年 (2050 予測)

また、本プロジェクトの実施によるCO₂削減への寄与は日本の2019年CO₂排出量：10.9億トン/年に対し、2050年では約1.5億トン-CO₂/年を予測しており、大きな削減効果が期待できる。

化学品	36 万トン/年 (2030 予測)	、0.06 億トン/年 (2050 予測)
液体燃料	10 万トン/年 (2030 予測)	、0.8 億トン/年 (2050 予測)
鋳物化	91 万トン/年 (2030 予測)	、0.7 億トン/年 (2050 予測)

2. 研究開発マネジメント

2. 1. 事業の目標

CO₂ 排出削減による気候変動対策は世界的課題であり、特に火力発電からの CO₂ 排出量が多く、CO₂ の地中貯留や、分離・回収した CO₂ を多様な炭素化合物の製品として有効利用する技術（カーボンリサイクル）による CO₂ 排出削減の必要性が高まっている。

CO₂ 排出削減に寄与する、用途に適した CO₂ 有効利用実用化技術と共通基盤技術の開発が必要であり、化学品や燃料（液体燃料や気体燃料）、鉱物（コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など）などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進めることが求められている。

このため、⑥共通基盤技術開発では CO₂ 分解メカニズムの解明、化学反応速度評価等の検討及び個々の技術の可能性を探索する先導研究により、カーボンリサイクル技術の構築に必要な技術の研究を行う。実現可能性のある研究については実用化を目指す事業への転換も探索する。

また、⑨CO₂ 排出削減・有効利用実用化事業ではカーボンリサイクル技術の中長期的な研究開発を促進し、CO₂ の排出削減や有効利用に貢献できるカーボンリサイクル技術を構築し実用化を推進する。実証・商用化等を経て将来のカーボンリサイクル技術の社会実装につなげる。

各研究開発項目毎の目標については、以下「2. 2 研究開発の内容」に記載する。

赤字・赤枠が今回評価対象事業・期間

事業項目		'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25	'26
先導 基礎	CO ₂ 排出削減のための要素研究調査/要素技術検討(終了)			■	■							
	⑥カーボンリサイクル技術の共通基盤技術開発											
CO ₂ 排出削減 有効利用	化学品 CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発：化学品											
	液体燃料 液体燃料製造技術に関する開発シーズ発掘調査(終了)											
	CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発：液体燃料											
	気体燃料 CO ₂ 有効利用可能性調査(終了)											
	CO ₂ 有効利用技術開発(終了)											
	CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発：気体燃料											
鉱物 炭酸塩	CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発：炭酸塩											

2. 2. 事業の計画内容

2. 2. 1. 研究開発の内容

化学品や燃料（液体燃料や気体燃料）、鉱物（コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など）などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める。

⑥共通基盤技術開発

CO₂分解メカニズムの解明、化学反応速度評価等の検討及び個々の技術の可能性を探索する先導研究により、カーボンリサイクル技術の構築に必要な技術の研究を行う。実現可能性のある研究については実用化を目指す事業への転換も探索する。

⑨CO₂排出削減・有効利用実用化

カーボンリサイクル技術の中長期的な研究開発を促進し、CO₂の排出削減や有効利用に貢献できるカーボンリサイクル技術を構築し実用化を推進する。実証・商用化等を経て将来のカーボンリサイクル技術の社会実装につなげる。



図2-2 研究開発フェーズと規模の関係

○化学品へのCO₂利用技術開発

化学品へのCO₂利用技術については、既存の化石燃料由来化学品に代替可能でありCO₂削減・CO₂固定化に繋がること、高付加価値品製造に利用可能であること、新規技術導入による効率向上やコスト低減の可能性があること等から、カーボンリサイクル技術として実現への期待は大きい。一方で、現状では基礎研究レベルに留まる研究も多く、今後重点的に技術開発に取り組むべき分野である。また、CCS実施に際しての法規制等の現状と課題を明らかにするとともに、CCSに対する国民の認知度を高め理解を深めるために種々の取り組みを行う。

本事業ではCO₂を原料とした化学品の合成において、CO₂と水素あるいは合成ガスから一段で直接オレフィンを合成する技術や、CO₂と水素あるいは合成ガスからB T X（ベンゼン・トルエン・キシレン）等を製造する技術の開発、CO₂分離回収技術とメタノール合成技術とを一体化させたシステムの技術の開発等が必要である。これらについて高効率な製造技術の開発や、全体システムの最適化を行い、適用条件の明確化や事業性の検討を行う。

o. CO₂を原料としたパラキシレン製造に関する技術開発

CO₂を原料としたパラキシレン製造の技術開発。パラキシレンは、その組成上、他の化学品に比べて製造時に必要な水素原料が少なく済むため、より低コストで多くのCO₂を固定できる。パラキシレンの世界需要は約4,900万トン/年あり、仮に全てをCO₂原料に切り替えた場合のCO₂の固定量は約1.6億トン/年に上る。

本事業では、CO₂からパラキシレンを製造するための画期的な触媒の改良や量産技術の開発、プロセス開発を実施するとともに、全体の経済性やCO₂削減効果を含めた事業性の検討を行う。CO₂を原料としてパラキシレンを工業的に製造する技術は確立されておらず、日本独自技術として、世界最先端の取り組みを通じて実用化を目指す。

p : CO₂を用いたメタノール合成における最適システム開発

製鉄所等の排ガスに含まれるCO₂から基礎化学品であるメタノールを合成するCO₂有効利用プロセスを開発する。製鉄所の高炉ガスはCO₂濃度が比較的高く、副次成分としてCOやH₂を含むという特徴があり、これらを最大限利用することで、メタノール合成の低コスト化・高効率化を図る。

q : CO₂を原料とした直接合成反応による低級オレフィン製造技術の研究開発

燃焼排気ガスから回収した二酸化炭素（CO₂）と水素を原料とした非化石資源による低級オレフィン製造プロセスの技術開発を行う。また、本プロセスとナフサを原料とする既存の低級オレフィン製造設備であるエチレンプラントの統合についても検討し、既設の蒸留・精製設備や後流のプラスチック製造・供給バリューチェーンの活用を視野に入れた開発を進める。

○液体燃料へのCO₂利用技術開発

CO₂由来の液体燃料については、既存の石油サプライチェーンを活用でき液体燃料の低炭素化を促進する技術であることから、カーボンリサイクル技術としての実現への期待は大きい。一方で、現状では生産効率やコストなどの面で課題が大きいことから、普及に向けて技術開発に取り組む必要がある。

本事業では、CO₂を原料とした既存の液体化石燃料（ガソリン、軽油等）の代替品となり得る液体燃料（微細藻類由来のバイオ燃料を除く）製造に関するF T合成やその他合成反応など製造プロセスの改善などを通じ、CO₂を有効利用しつつ、その排出削減を目指す技術開発を行う。

r : 次世代FT反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発

本研究では、CO₂を原料としたカーボンニュートラルな液体合成燃料を製造するための研究開発として、CO₂を原料とした炭化水素製造に最も親和性が高いと考えられるフィッシャー・トロプシュ（FT）反応の次世代技術開発と液体合成燃料一貫製造プロセスの構築と最適化、さらに将来のスケールアップに向けた研究開発を行う。

技術課題①としてFT反応におけるCO₂を原料とした直接反応、FT生成物の選択性制御を、技術課題②として再エネ由来電力を利用した合成ガス製造技術、これとFT反応を組合わせた一貫製造プロセスの確立、液体合成燃料の利用技術を研究開発する。

○コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへの CO₂ 利用技術開発

コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへの CO₂ 利用については、CO₂ 固定化ポテンシャルが高いこと、生成物が安定していること、土壌改質などへの適用も見込めることなどから、カーボンリサイクル技術としての実現への期待は大きく、早期の社会実装が望まれる分野である。

本事業では、鉄鋼スラグ、廃コンクリート、石炭灰等の産業副産物、廃鋳物、海水（かん水）等からの有効成分（CaやMgの化合物）の分離や微粉化等の前処理の省エネ化、湿式プロセスにおける省エネ化、安価な骨材や混和材等の開発および炭素・炭化物の生成技術などの要素技術を開発する。また、CO₂ 生源から製造・供給までの一貫システム構築・プロセスの最適化、用途拡大と経済性の検討を行い事業性について検討する。

s : 微細ミスト技術による CO₂回収技術及び炭酸塩生成技術の研究開発

特殊な技術で微細な霧とした CO₂吸収液（微細ミスト）を用いて、石炭火力発電所から排出される CO₂を吸収させ、高濃度の CO₂として回収する技術を開発する。

回収した CO₂は、炭酸塩（ソーダ灰）の原料として利用し、石灰石由来の CO₂と置き換えることで、工場全体の CO₂排出量削減を図る。

t : マイクロ波による CO₂吸収焼結体の研究開発（CO₂-TriCOM）

石炭火力発電に伴って発生する石炭灰、電柱廃材などの廃コンクリートの粉の混合物をマイクロ波で加熱して固めた材料（焼結体）を製造し、これに CO₂を吸収させることで、緑化基盤材や軽量盛土材として利用可能な材料を製造する技術を開発する。

u : 海水および廃かん水を用いた有価物併産 CO₂ 固定化技術の研究開発

海水および廃かん水※に含まれるマグネシウムを原料とし、CO₂を炭酸マグネシウムとして固定化し、コンクリート製品の骨材などとして利用するまでの一連の技術を開発する。カーボンリサイクルと同時に軟水、石膏、芒硝、食塩、塩酸、肥料といった工業製品の併産が可能である。

※廃かん水：海水淡水化プラントの廃水

v : 産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発

廃コンクリート等からカルシウムを抽出し、排ガス中の CO₂と反応させて固定化させる技術を開発する。カルシウム分の抽出と炭酸塩化の効率を高め、加速させるため、加速炭酸塩化技術について検討を行う。炭酸塩の高付加価値化を進めるとともに、炭酸塩とカルシウム抽出後の残渣を建築・土木材料、各種工業材料等の資源として大量に活用することを目指す。

w : セメント系廃材を活用した CO₂固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究

セメント系廃材を前処理することにより、火力発電所の排ガス中の CO₂を効率的にセメント系廃材に固定する技術を開発する。

CO₂を固定化した副産物に含まれる炭酸カルシウムおよび珪酸質の粒子の特性を活かして、コンクリートや地盤改良体といった建設資材として有効利用する技術を開発する。

CO₂の固定化を通してコンクリートおよび地盤改良体の高品質化を図る。

x : 製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO₂ 固定化プロセスの技術開発

製鋼スラグ中の Ca を他業種で副産物として発生する有機溶媒等で高効率に抽出することを特徴とする新規 CO₂ 固定化プロセスを開発し、CO₂ 削減・地球温暖化抑制に貢献する。また、生成物は品質を向上させ、資源として有効活用する。

y : 二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発

「活性化還元剤」を用いた CO₂ 利用技術開発を行う。活性化還元剤は、粉末状の金属酸化物を水素と反応させることによって、CO₂ を活性化還元剤と反応させることで CO₂ を化学的に分解し炭素ナノ材料を製造する。また、使用済みの還元剤の再生過程で水素の製造も可能とする、一連の技術開発に取り組み、得られた炭素ナノ材料はカーボンブラックや電池材料、構造材料などへの利用が期待される。本技術の実現により、火力発電所や産業プラント（鉄鋼、セメント）などから排出される CO₂ の削減を図る。

z : 製鋼スラグの高速多量炭酸化による革新的 CO₂ 固定技術の研究開発

鉄鋼生産の副産物として生成する高温状態の製鋼スラグに、石炭利用産業から排出される CO₂ を吹き込むことにより、製鋼スラグ中の酸化カルシウム成分に、短時間で多量に CO₂ を固定して炭酸塩化する革新的な技術を開発する。

同時に、CO₂ 固定化後のガスの熱を回収することでエネルギー効率を高め、プロセス全体での CO₂ 固定量および削減量の最大化を図る。また、炭酸塩化した製鋼スラグは、需要が大きな道路用鉄鋼スラグとしての利用を図る。

表 2 - 1 各事業の研究開発予算

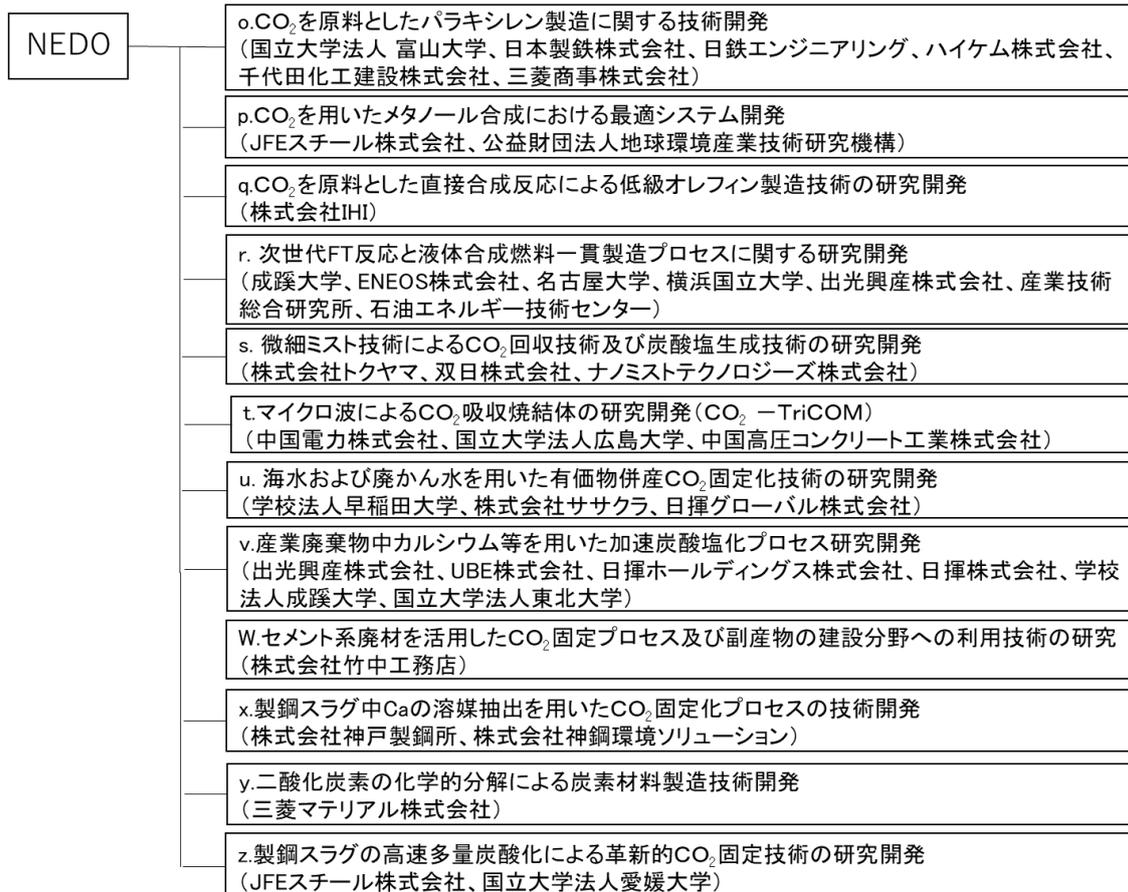
評価対象年度（単位：億円）

研究開発項目	分野	2020	2021	2022※	合計
カーボンリサイクル技術の共通基盤技術開発		5.8	6.1	9.0	20.9
CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発	化学品	1.4	11.5	9.0	21.9
	燃料(液体)	0.1	11.1	15.3	26.6
	炭酸塩、コンクリート、炭素等	5.3	8.8	8.1	22.2
合計		12.7	37.5	41.5	91.7

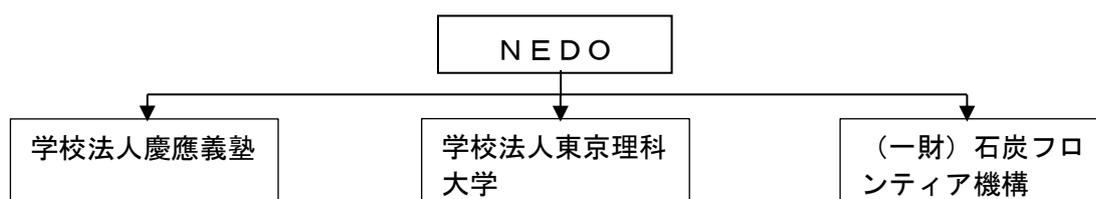
※2022年度は予算額

2. 2. 2. 研究開発の実施体制

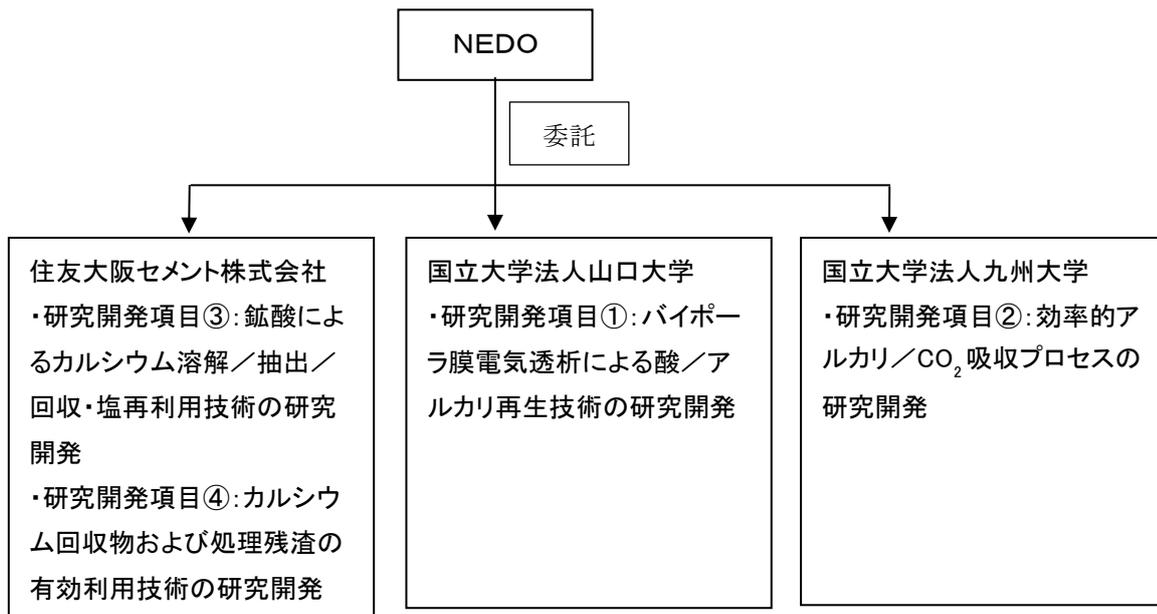
NEDO	a. ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中のCO ₂ からの基幹物質製造開発事業 (学校法人慶應義塾、学校法人東京理科大学、一般財団法人石炭フロンティア機構)
	b. カルシウム含有廃棄物からのCa抽出およびCO ₂ 鉱物固定化技術の研究開発事業 (住友大阪セメント株式会社、国立大学法人山口大学、国立大学法人九州大学)
	c. CO ₂ 電解リバーシブル固体酸化物セルの開発 (一般財団法人電力中央研究所、国立大学法人東京工業大学)
	d. 石炭灰およびバイオマス灰等によるCO ₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発 (一般財団法人電力中央研究所、三菱重工業株式会社、東洋建設株式会社、一般財団法人石炭フロンティア機構)
	e. 高温熔融塩電解を利用したCO ₂ 還元技術の研究開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人同志社)
	f. CO ₂ /H ₂ O共電解技術の研究開発 (東芝エネルギーシステムズ株式会社、国立大学法人九州大学)
	g. 放電プラズマによるCO ₂ 還元・分解反応の基盤研究開発 (国立大学法人東海国立大学機構、澤藤電機株式会社、川田工業株式会社)
	h. 二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査 (一般財団法人電力中央研究所、学校法人慶應義塾)
	i. CO ₂ の気相電解還元による炭化水素燃料の直接合成可能な電極触媒と実装化に向けた電極触媒開発指針の開発 (国立大学法人東京工業大学、国立大学法人埼玉大学、国立大学法人北海道大学)
	j. 海水と生体アミンを用いたCO ₂ 鉱物化法の研究開発 (学校法人北里研究所北里大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人琉球大学、国立大学法人東京大学、株式会社日本海水、出光興産株式会社)
	k. CO ₂ からのアンモニアメタネーションの技術開発 (日揮ホールディングス株式会社、日揮グローバル株式会社、国立大学法人広島大学)
	l. CO ₂ を活用したマリンバイオマス由来活性炭転換技術の開発 (国立大学法人九州大学、一般財団法人金属系材料研究開発センター)
	m. カーボンリサイクルLPガス合成技術の研究開発 (一般社団法人日本グリーンLPガス推進協議会、国立研究開発法人産業技術総合研究所、エヌ・イーケムキャット株式会社)
	n. 二元機能触媒を用いた高効率炭酸ガス回収・メタン合成プロセスの研究開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所、日立造船株式会社)



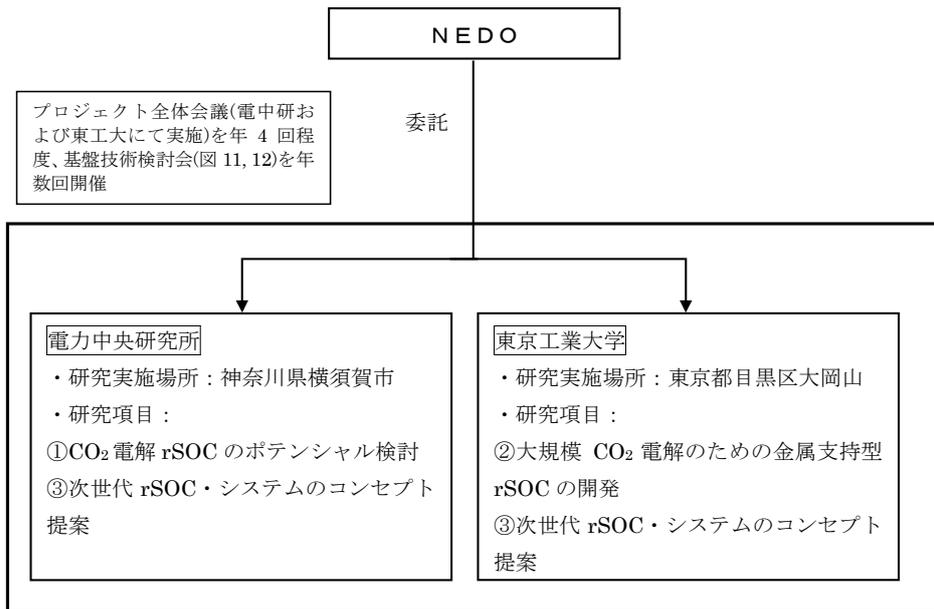
a. ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中の CO₂ からの基幹物質製造開発事業



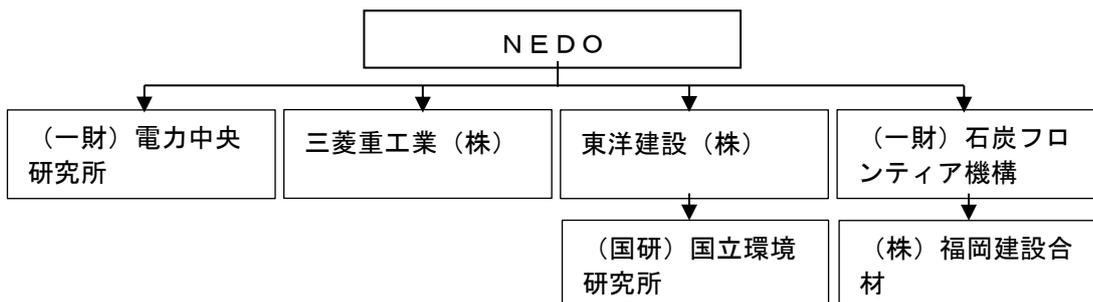
b. カルシウム含有廃棄物からの Ca 抽出および CO₂ 鉱物固定化技術の研究開発



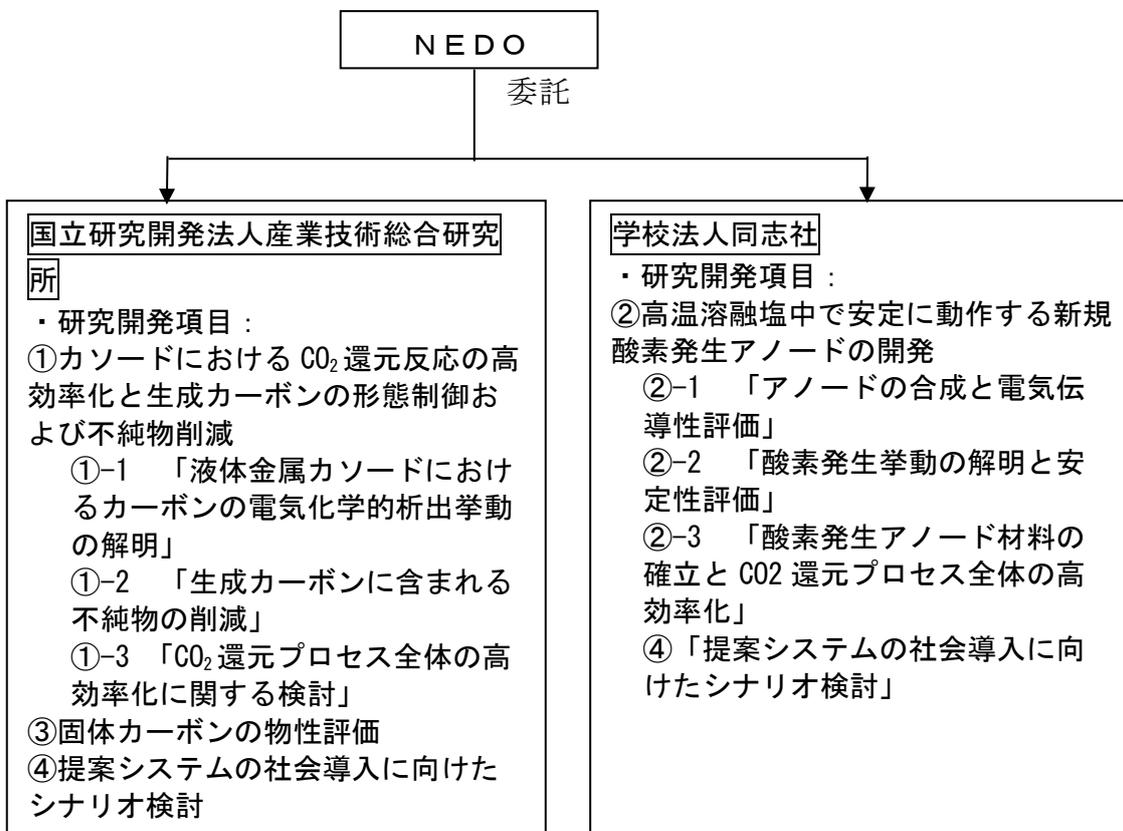
c. CO₂ 電解リバーシブル固体酸化物セルの開発



d. 石炭灰およびバイオマス灰等による CO₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発



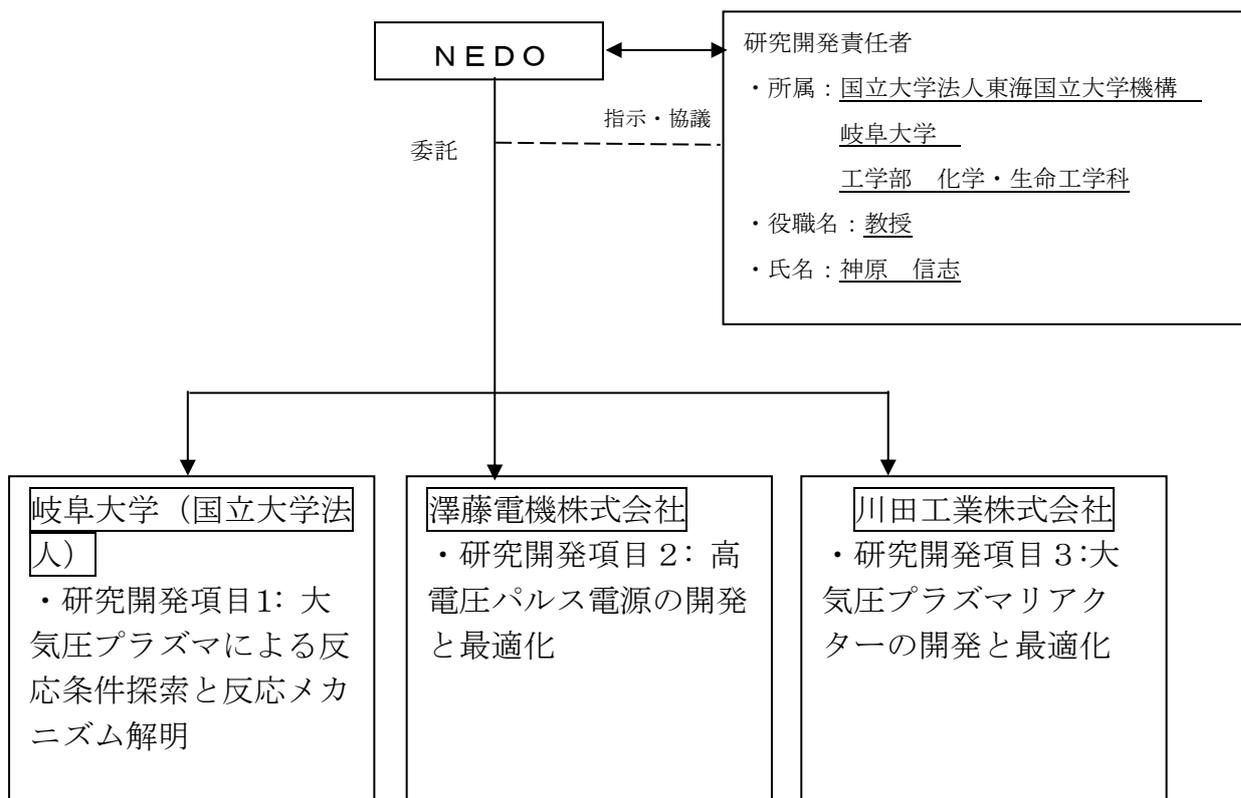
e. 高温熔融塩電解を利用した CO₂ 還元技術の研究開発



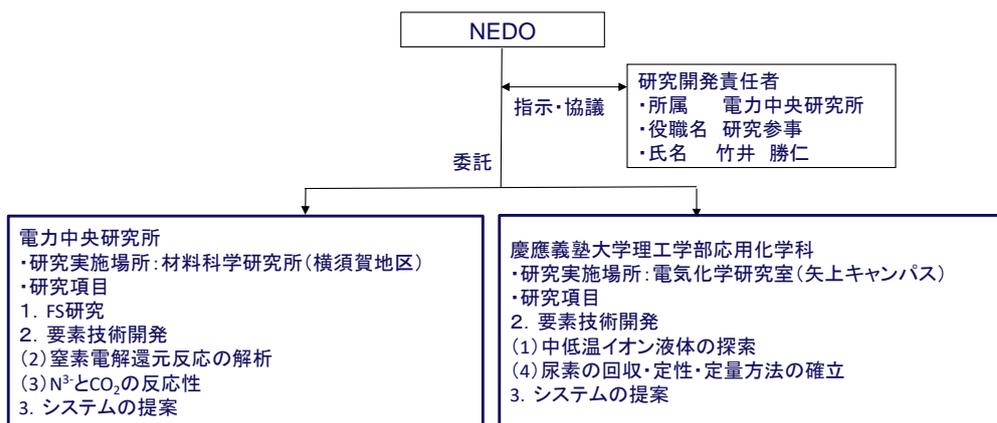
f. CO₂/H₂O の共電解技術の研究開発



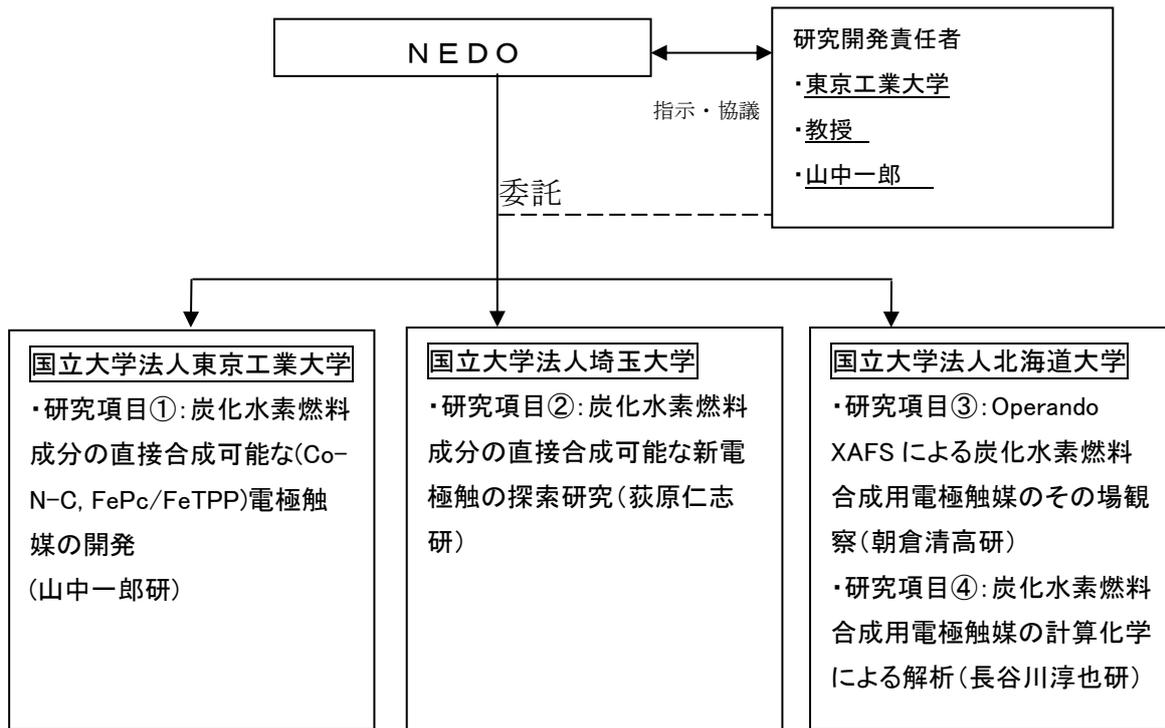
g. 放電プラズマによる CO₂ 還元・分解反応の基盤研究開発



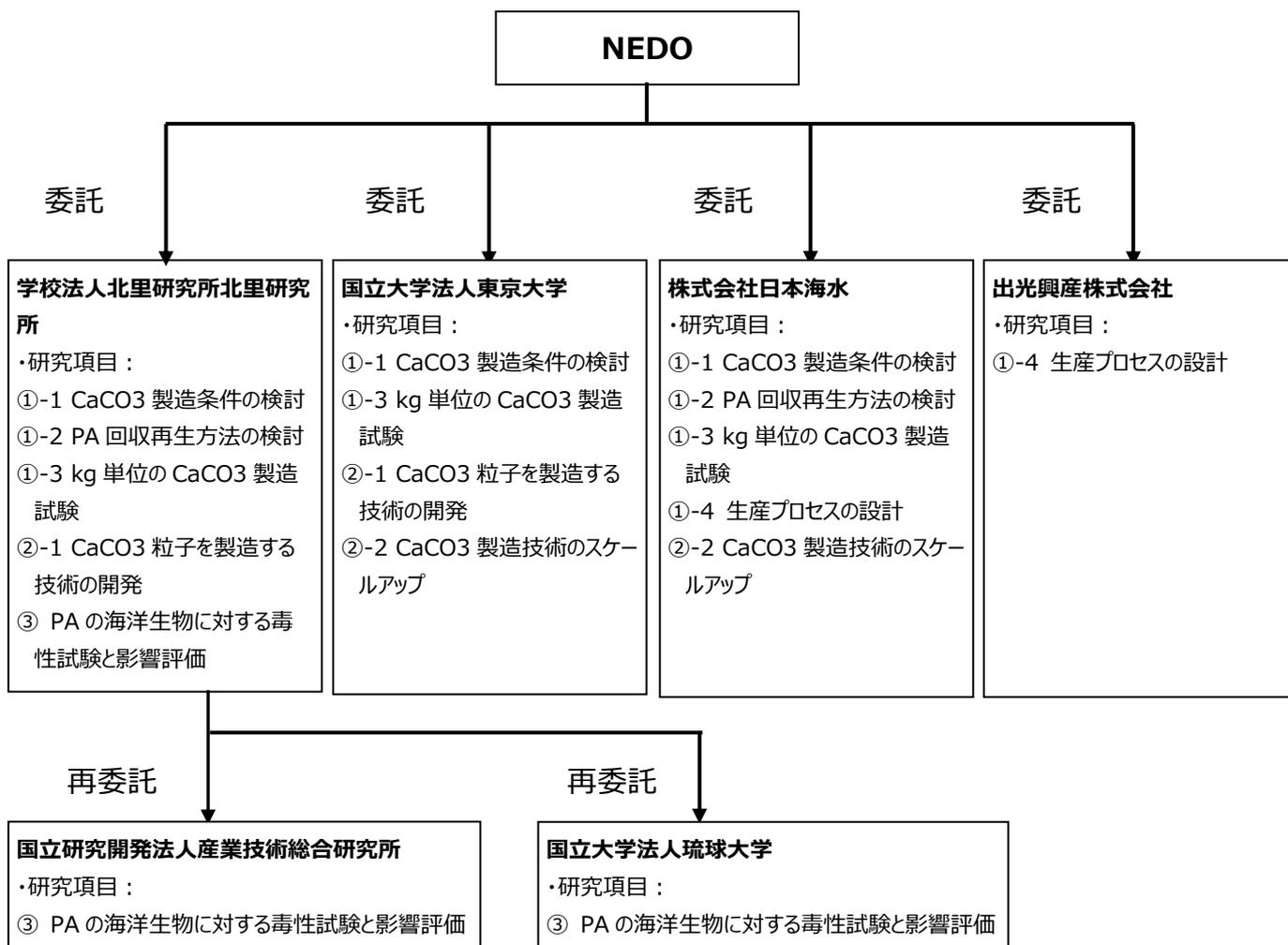
h. 二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査



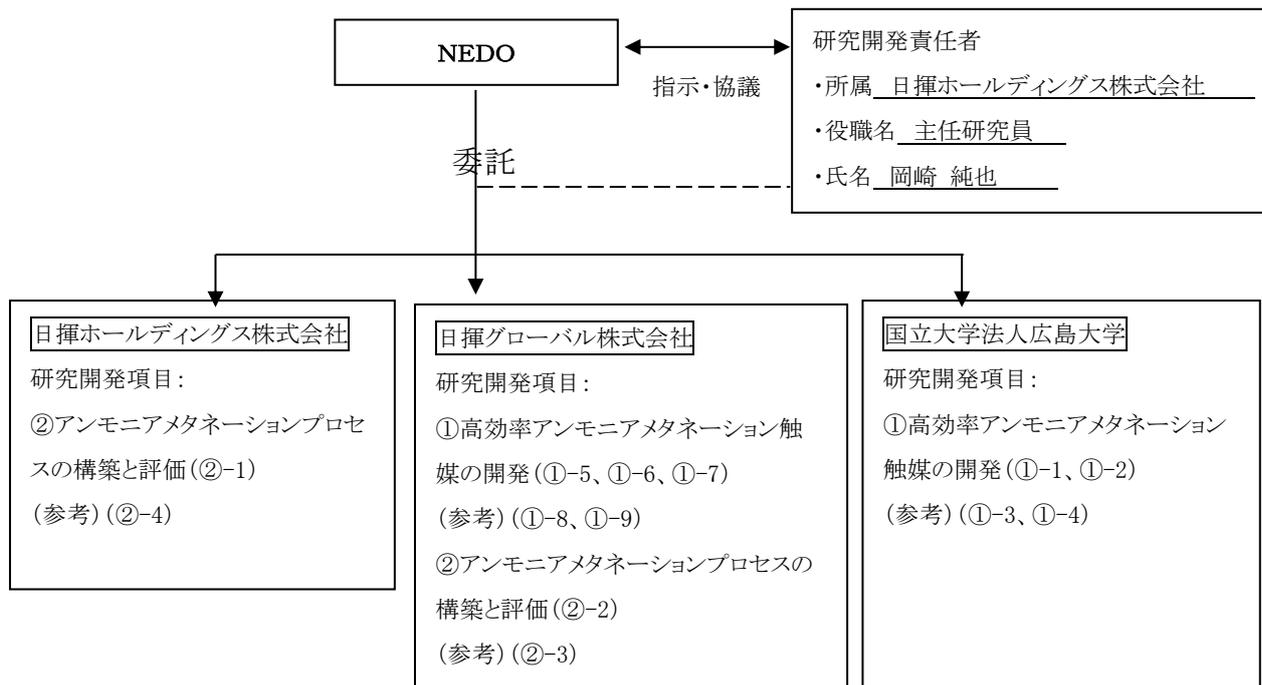
i.CO₂の気相電解還元による炭化水素燃料の直接合成可能な電極触媒の研究開発



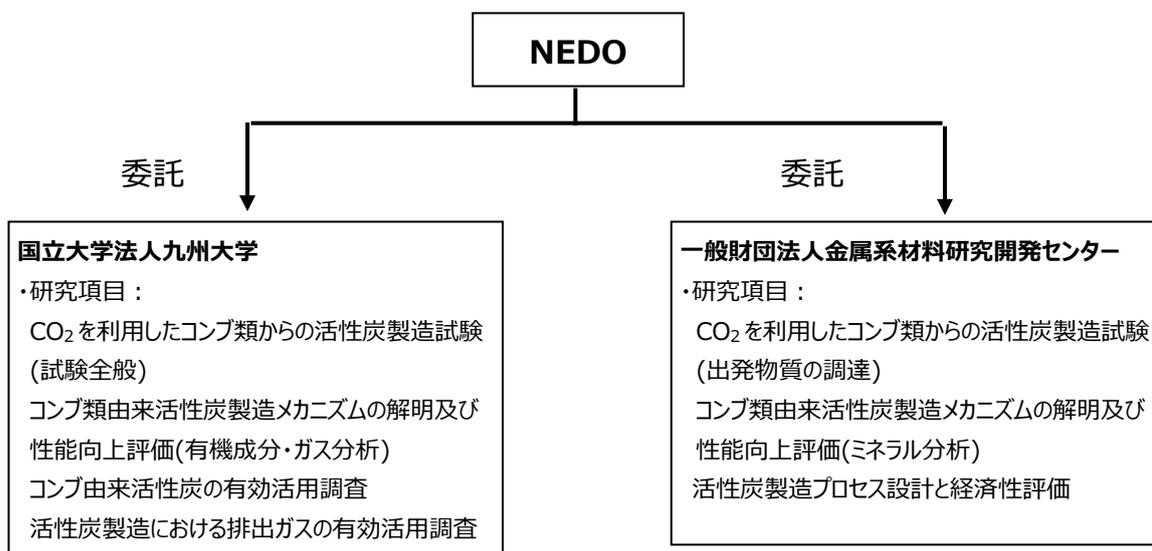
j. 海水と生体アミンを用いた CO₂ 鉱物化法の研究開発



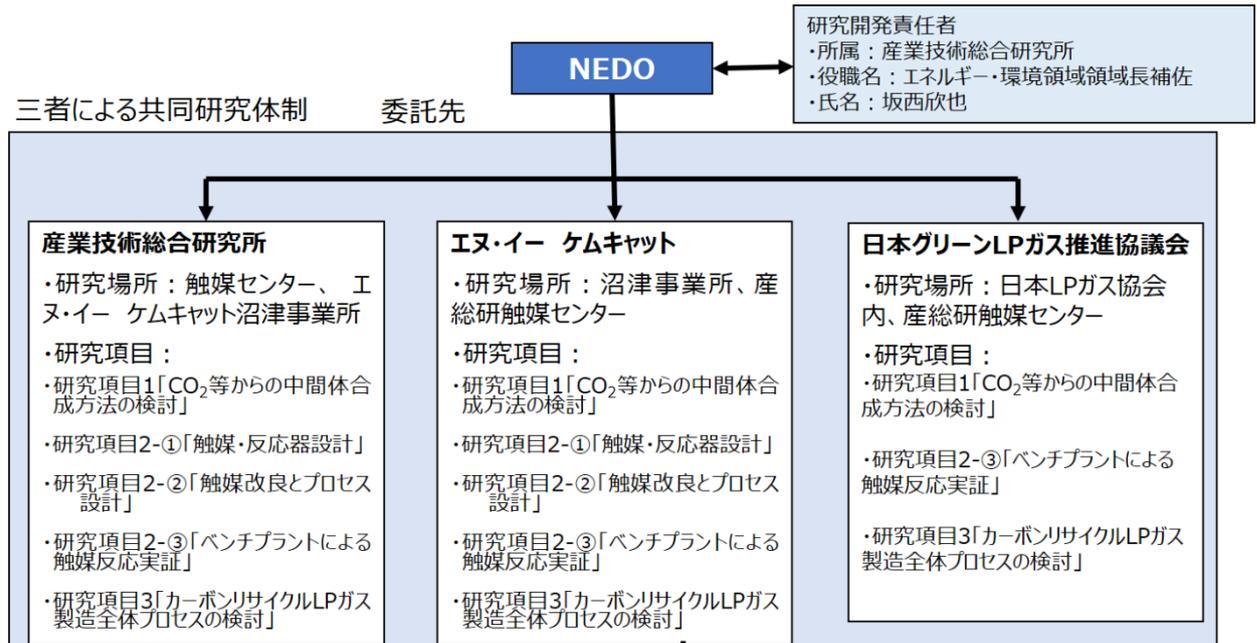
k.CO₂からのアンモニアメタネーションの技術開発



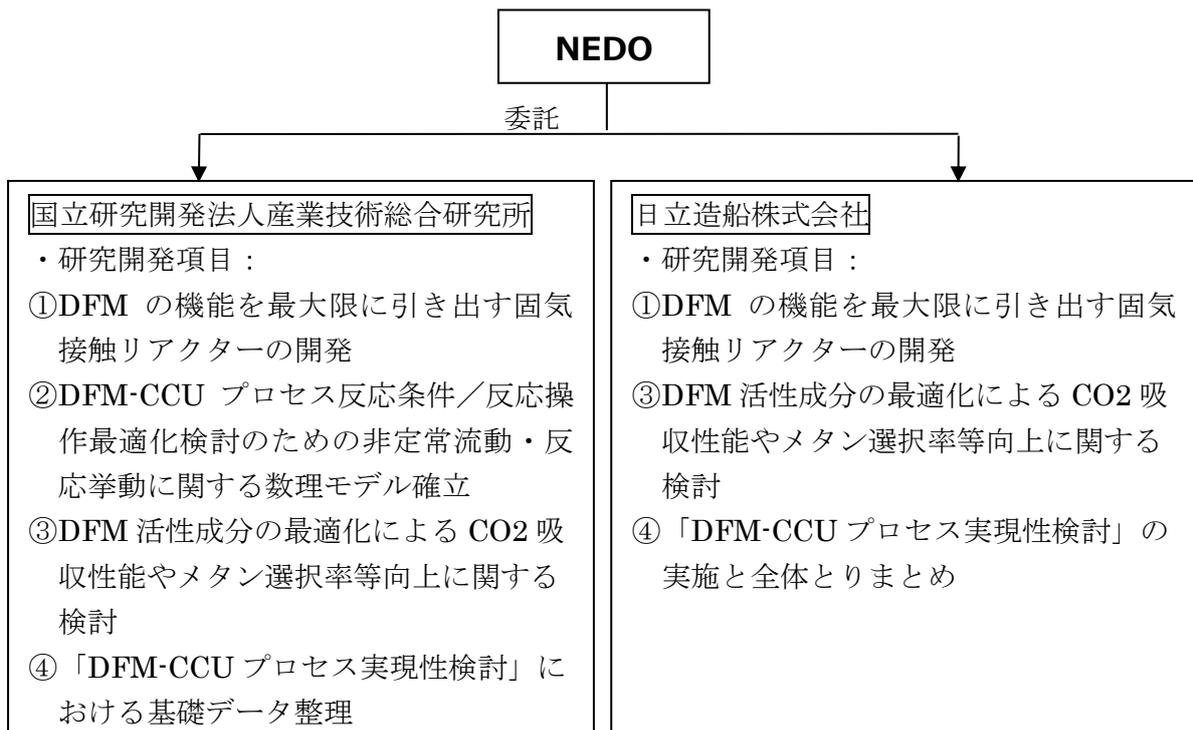
l.CO₂を活用したマリンバイオマス由来活性炭転換技術の開発



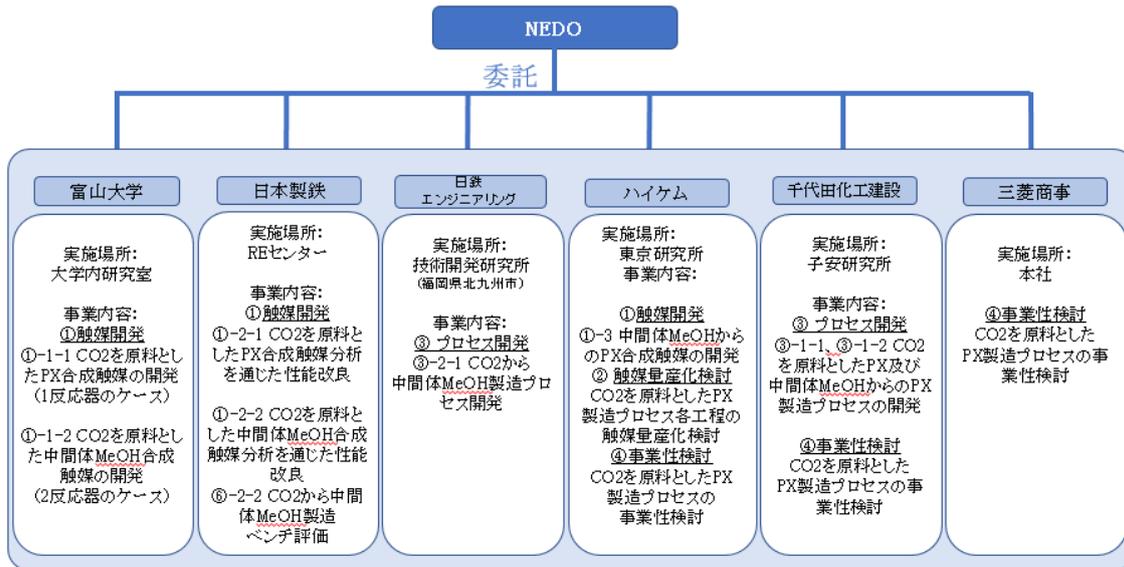
m. カーボンリサイクルLPガス合成技術の研究開発



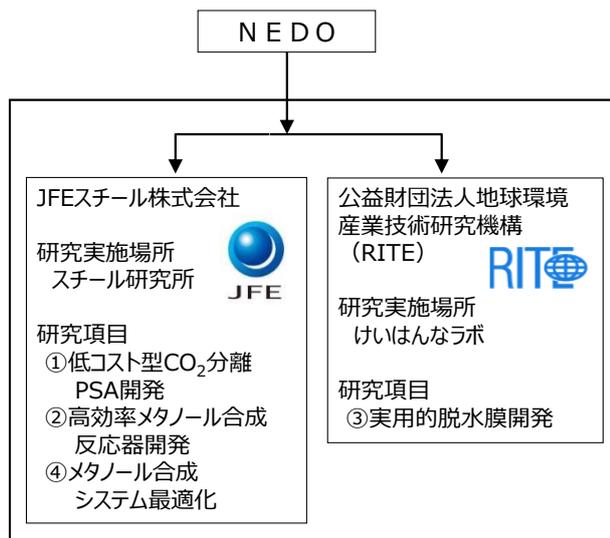
n. 二元機能触媒を用いた高効率炭酸ガス回収・メタン合成プロセスの研究開発



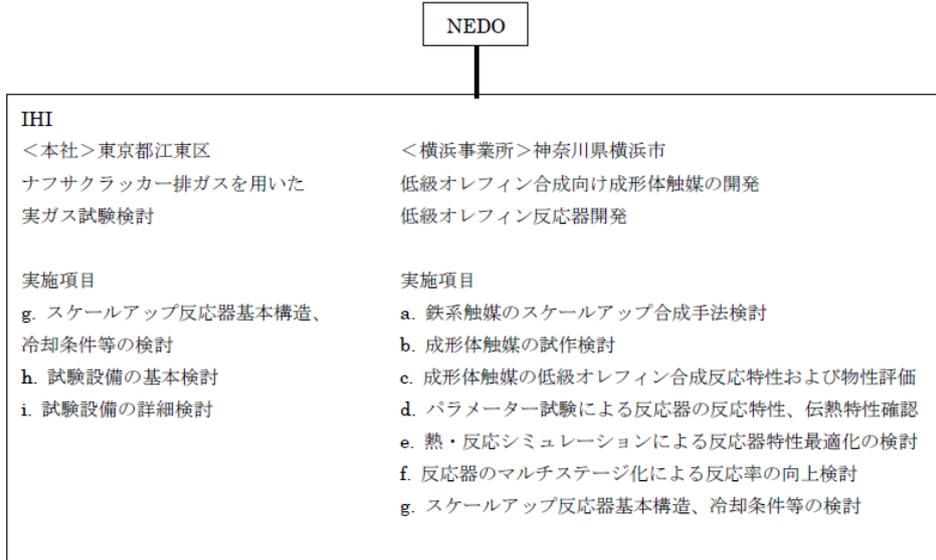
o. CO₂を原料としたパラキシレン製造に関する技術開発



p. CO₂を用いたメタノール合成における最適システム開発



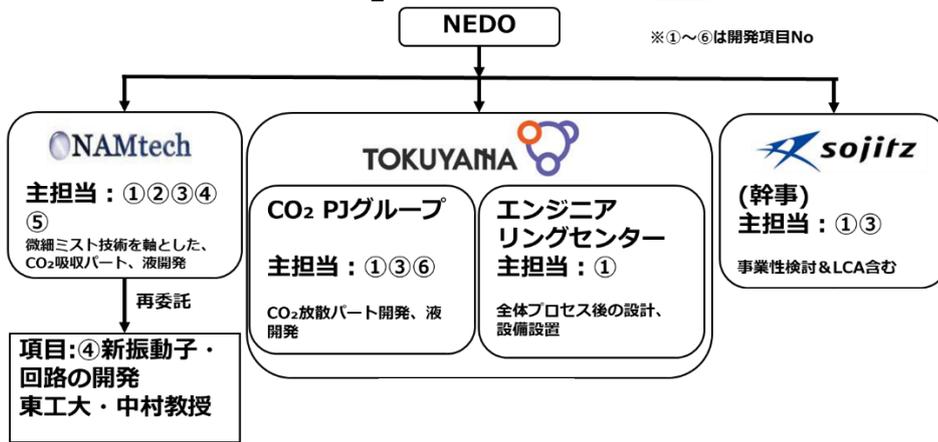
q. CO₂を原料とした直接合成反応による低級オレフィン製造技術の研究開発



r. 次世代 FT 反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発



s. 微細ミスト技術による CO₂ 回収技術及び炭酸塩生成技術の開発研究



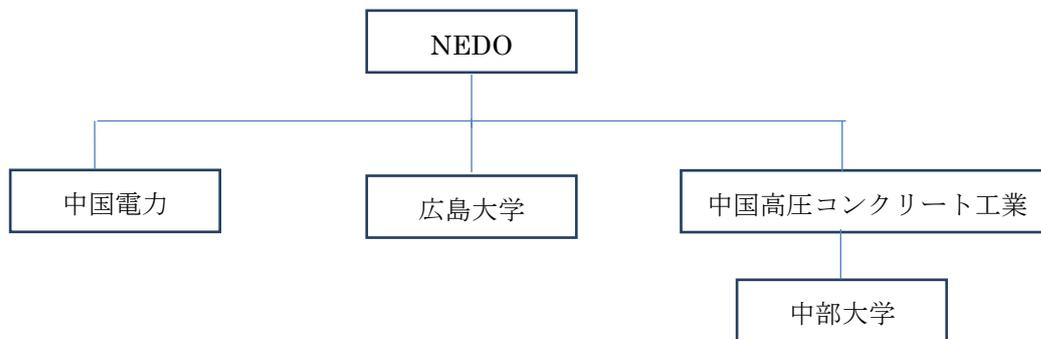
本事業において全3回の外部有識者委員会を実施、以下3名より助言頂く。

信州大学 繊維学部 教授 高橋 伸英 氏

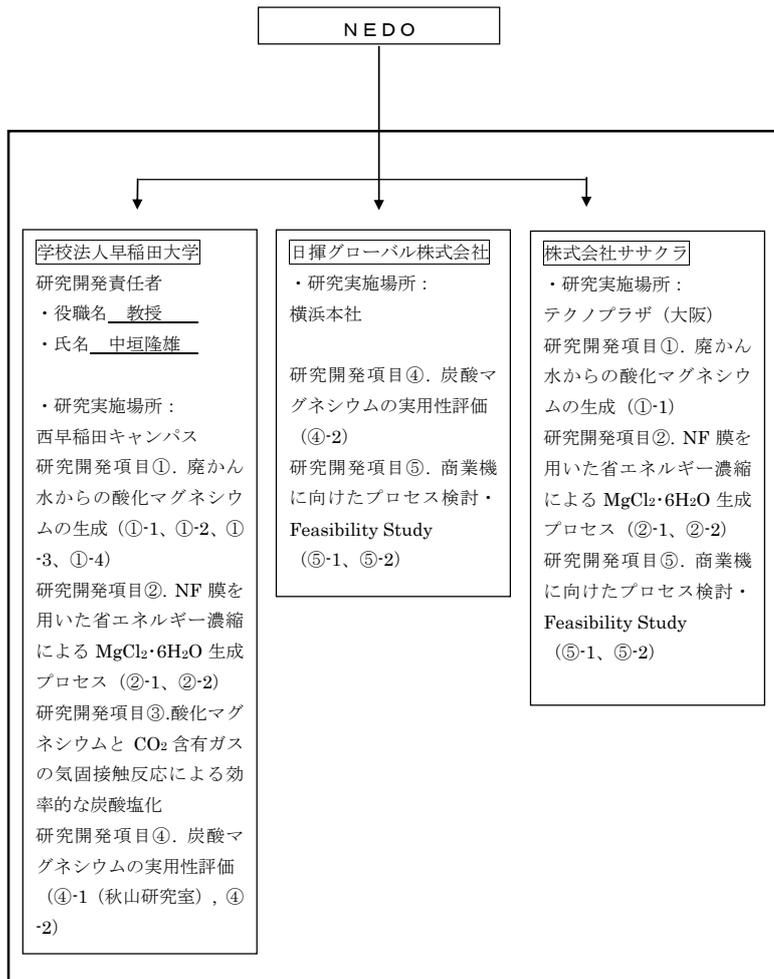
東京大学 未来ビジョン研究センター 准教授 菊池 康紀 氏

株式会社双日インベーションテクノロジー研究所 知財部部長 山崎 隆生氏

t. マイクロ波による CO₂ 吸収焼結体の研究開発 (CO₂-TriCOM)



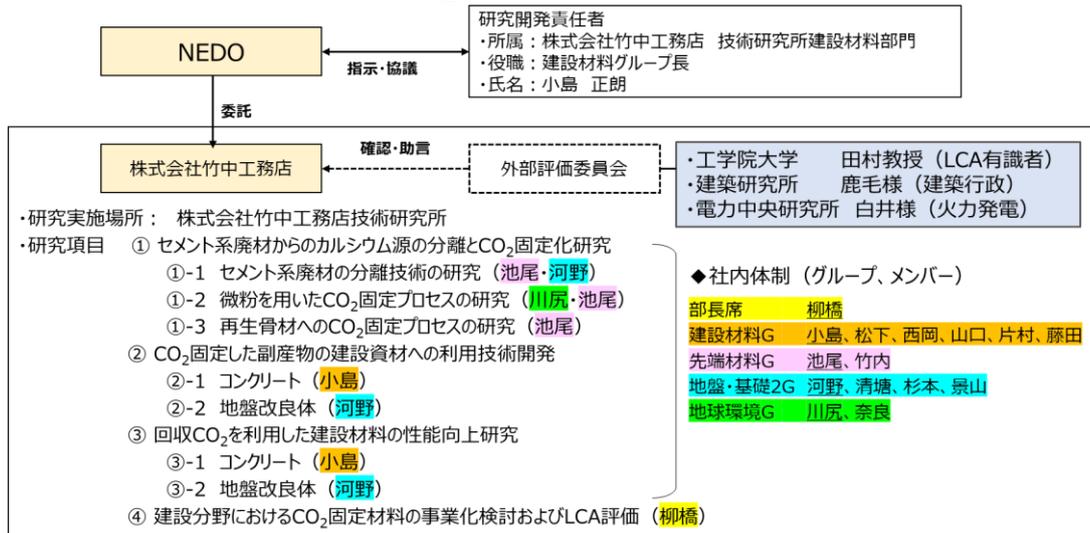
u. 海水および廃かん水を用いた有価物併産 CO₂ 固定化技術の研究開発



v. 産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発



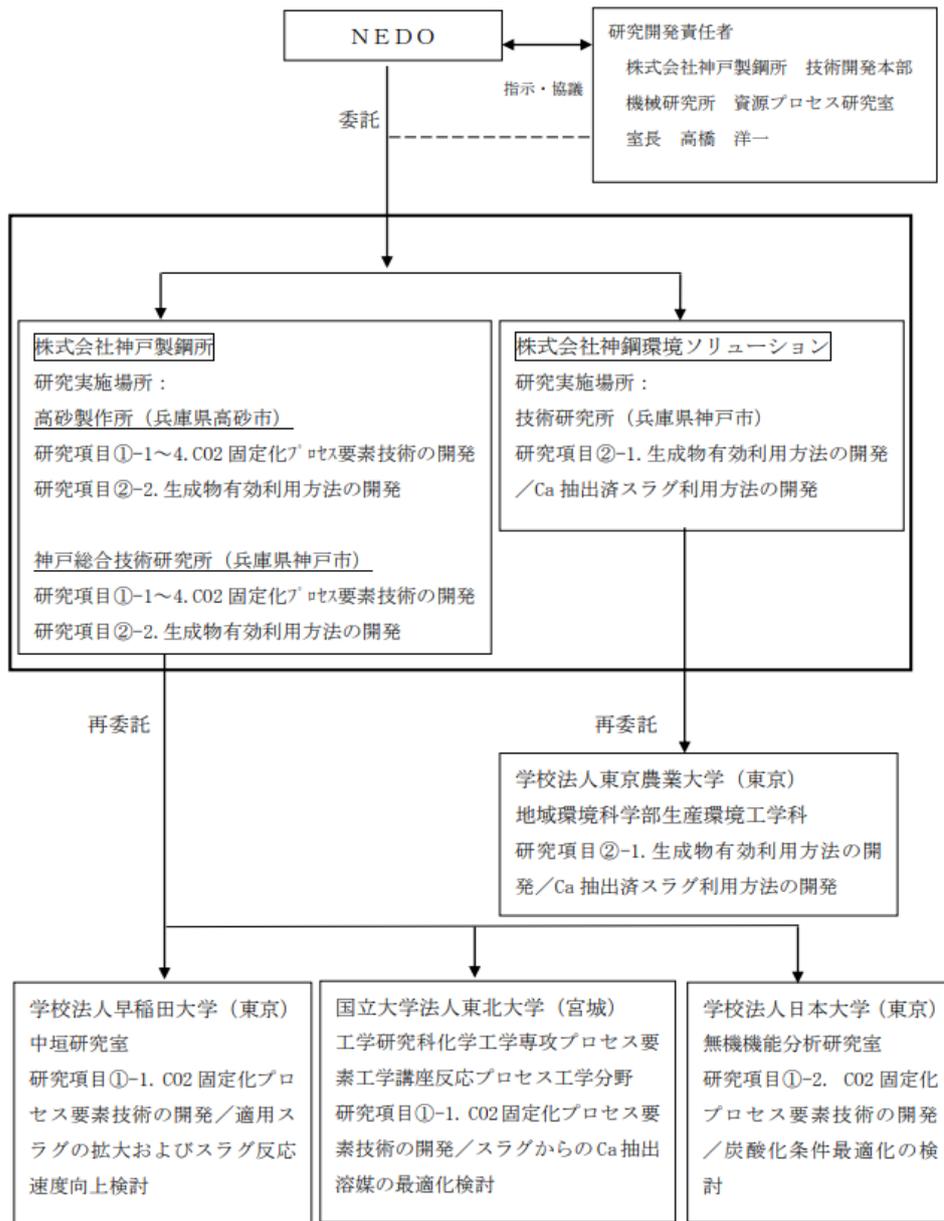
w.セメント系廃材を活用した CO₂ 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究



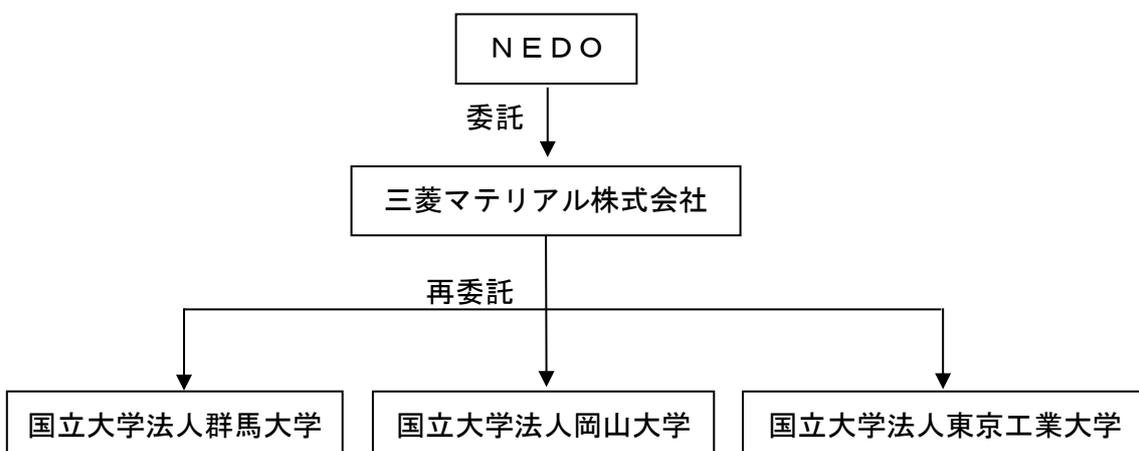
【外部評価委員会】

- ・工学院大学 建築学部 教授 田村雅紀 (LCA 有識者)
- ・建築研究所 材料研究グループ長 鹿毛忠継 (建築行政)
- ・電力中央研究所 エネルギー技術研究所 白井裕三 研究参事 (火力発電)

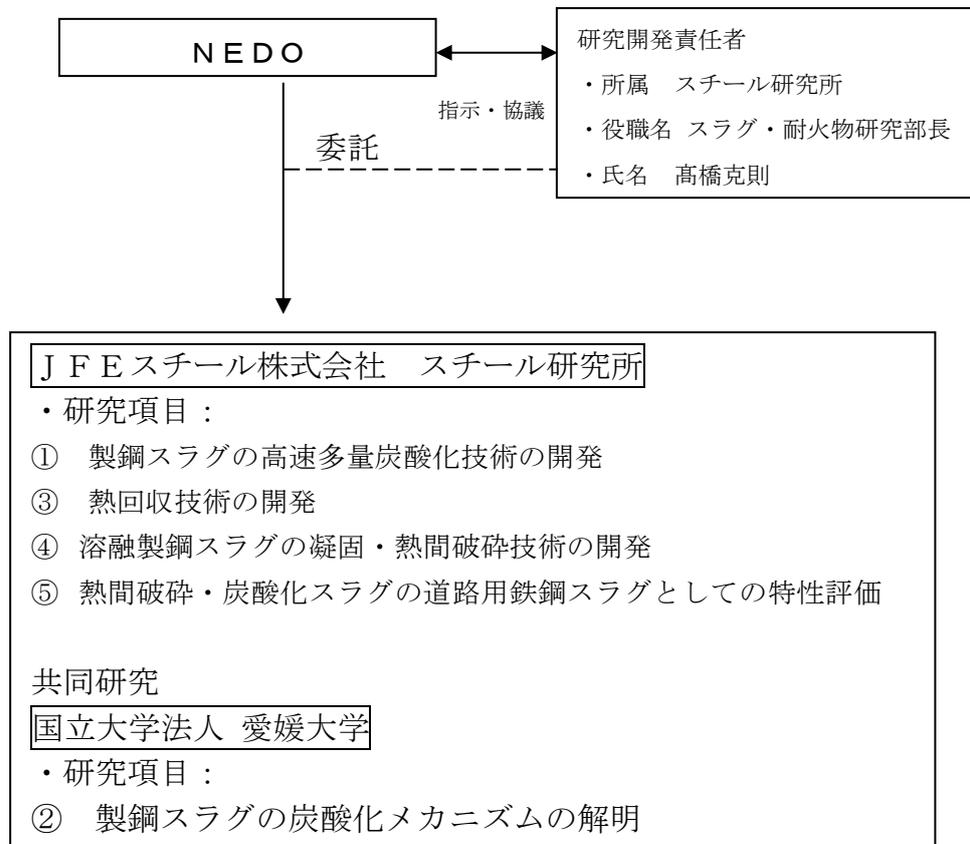
x. 製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO₂ 固定化プロセスの技術開発



y. 二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発



z. 製鋼スラグの高速多量炭酸化による革新的 CO₂ 固定技術の研究開発



2. 2. 3. 研究開発の運営管理

NEDO は研究開発全体の管理及び執行に責任を負い、研究開発の進捗の他、外部環境の変化等を適切に把握し、必要な処置を講じた。

PM は、研究開発責任者および研究開発実施者と連携し、ヒアリング等により実施状況を確認することで研究開発の進捗状況を把握（2020.7-2022.4 で 9 回開催）している。特に、研究開発責任者が主催する外部有識者からなる技術検討委員会における各研究開発項目の進捗状況報告を通じ、目標達成の見通しを常に把握することとしている。具体的な開催事例は以下の通り。

CR 化学品①	2021 年 3 月 24 日	
CR 化学品②	2022 年 4 月 11 日	
CR 炭酸塩①	2021 年 4 月 14 日	
CR 炭酸塩②	2021 年 12 月 20 日	（共通基盤 炭酸塩分野も共催）
CR 炭酸塩③	2022 年 2 月 9 日	
CR 炭酸塩④	2022 年 4 月 15 日	
CR 電解還元①	2021 年 4 月 21 日	
CR 電解還元②	2021 年 12 月 22 日	
CR 燃料①	2022 年 4 月 20 日	

また、事業者の研究開発責任者による進捗管理としては、共同実施者間や再委託先との打ち合わせを頻繁に行うとともに、全実施者が進捗報告を行うワーキング会議を定期的で開催し、各研究開発項目の進捗状況、成果および課題を把握し、プロジェクトの計画や工程に反映している。

また、ワーキング会議は各事業およそ 1 回/2 か月で開催し、NEDO の関係者も同席し状況の把握に努めるとともに、主担当はさらに密接に研究開発者と実務連絡を取り事業の推進を行っている。

2. 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

①成果の普及

得られた事業成果については、NEDO、実施者とも普及に努めた。NEDO 主催の環境部事業報告会や各種勉強会・セミナーや実施者による講演会、シンポジウム、学会発表、出展等での積極的な成果の発信を行った。

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	計
論文	7	19	1	27
研究発表・講演	1	48	14	63
受賞実績	0	3	0	3
新聞・雑誌等への掲載	2	22	2	26
展示会への出展	2	2	1	5

a. ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中の CO₂ からの基幹物質製造開発事業

論文投稿：7 件、学会発表 1 件

c. CO₂ 電解リバーシブル固体酸化物セルの開発

2021 年度 12 月 15 日 The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment (CUUTE-1), Poster award 受賞（東工大）

d. 石炭灰およびバイオマス灰等による CO₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発

石炭セミナー（2021 年 11 月）

石炭灰有効利用シンポジウム（2021 年 12 月）

JCOAL Journal（2021 年 6 月）

e. 高温熔融塩電解を利用した CO₂ 還元技術の研究開発

エネルギー技術シンポジウム 2021（オンライン）2021 年 11 月 29 日

h. 二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査

・熔融塩技術化研究会

・カーボンリサイクル産学官国際会議

q. CO₂を原料とした直接合成反応による低級オレフィン製造技術の研究開発

2022 年度 2 月 11 日 日経産業新聞 掲載「IHI,CO₂フリーのプラ原料」

2022 年度 1 月 31 日 日本経済新聞 掲載 プロジェクト最前線

r. 次世代 FT 反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発

事業紹介（講演等）：計 20 件（内訳：講演 15 件、新聞・雑誌掲載 5 件）@2021 年度

論文投稿：1 件、学会発表等 10 件

t. マイクロ波による CO₂ 吸収焼結体の研究開発（CO₂-T r i C O M）

論文 2 件、外部発表 5 件

u. 海水および廃かん水を用いた有価物併産 CO₂ 固定化技術の研究開発

学会発表等 4 件

v. 産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発

(1) プレスリリース 発表日：2020.7.15

題：「廃コンクリートなど産業廃棄物中のカルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセスの研究開発」が NEDO の研究開発委託事業として採択

(2) 外部発表 発表日：2021.9.1

発表会題名等：論文投稿（コンクリート工学, 59, 9, 830, 2021）

題：産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発

(3) 外部発表 発表日：2021.12.14

発表会題名等：学会発表（化学工学会関西大会 2021）

題：UBE グループにおける気候変動問題への取り組み

w. セメント系廃材を活用した CO₂ 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究

コンクリートテクノプラザ展示（2022.7 予定）

プレスリリース 2 件（脱炭素から「活性炭」へ 次世代コンクリート技術の共同研究を開始、

NEDO グリーンイノベーション基金事業「CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発プロジェクト」にコンソーシアムとして提案し採択）

x. 製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO₂ 固定化プロセスの技術開発

2021 年 10 月 25 日：本件採択に係るプレスリリース（株式会社神戸製鋼所、株式会社神鋼環境ソリューション）

2022 年 1 月 22 日 環境新聞 13 面（株式会社神鋼環境ソリューション）

y. 二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発

プレス発表（三菱マテリアル（株）、2021 年 10 月 15 日）

z. 製鋼スラグの高速多量炭酸化による革新的 CO₂ 固定技術の研究開発

石炭由来の CO₂ を利用して有価物を製造する新プロセスが NEDO 委託事業に採択（JFE のプレス発表、NEDO 委託事業が採択された 10/15 に実施）

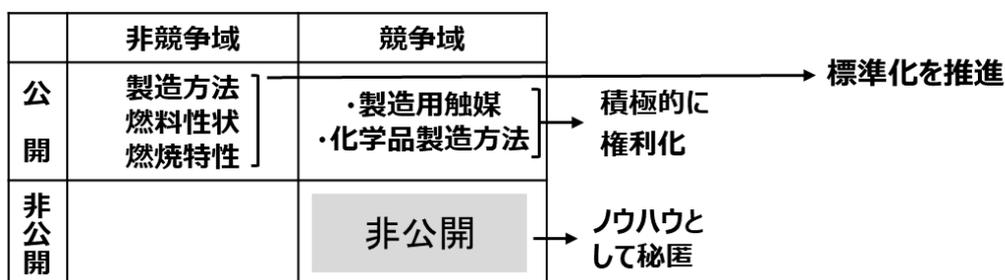
② 知的財産権の帰属

「国立研究開発法人新エネルギー・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 25 条（委託の成果に係る知的財産権の帰属）の規定に基づき、原則として、事業成果に関わる知的財産権は全て委託先に帰属させる。

一方、得られた事業成果については、標準化機関等との連携を図り、わが国の優れた CCUS 技術を普及させるために、標準化への提案等を積極的に行う。

【化学品・燃料事業の例】

➤ オープン／クローズ戦略の考え方



➤ 戦略的な特許取得、標準化

＜特許化戦略（化学品・燃料）＞

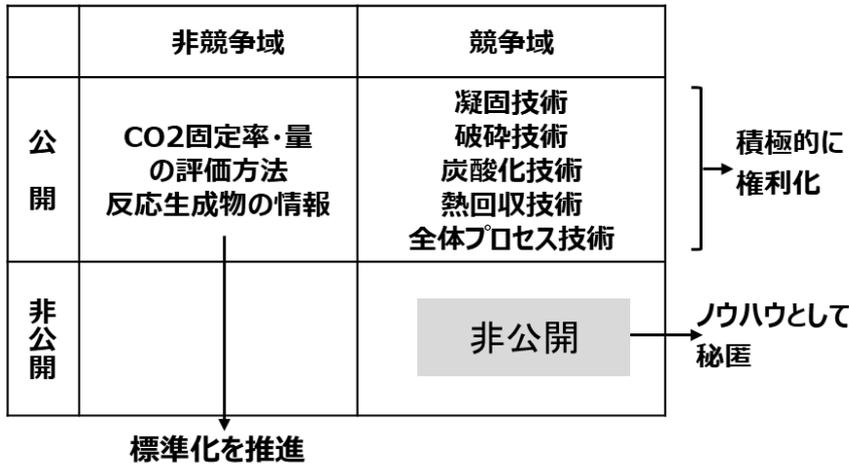
- ・ 開発した処方による化学品製造方法の基本特許を出願済み。
- ・ 基本特許記載の範囲(反応条件、使用触媒)を広げ、実行範囲の拡大を行う。
- ・ 化学品合成用触媒と触媒の製造方法は競争域。
改良触媒を用いたメタノール添加製造方法で積極的に権利化を狙う。（触媒量産の例）

＜標準化戦略（燃料）＞

- ・ 新しい燃料を市場投入する場合、燃料品質規格での検討が必要。
- ・ 新規製造法によるカーボンリサイクル液体合成燃料の性状や燃焼特性面よりの規格に関し検討を実施する。
- ・ カーボンリサイクル液体合成燃料における CO₂ 排出削減効果の LCA 評価としては、広義での評価手法が ISO に規定された段階。個別の製造法における規定は未だ決まっていない状況
- ・ 欧州を中心に様々な分野にて LCA に関する規格化に向けた動きがある。日本においても、本技術開発にて得られるデータを活用し、LCA 評価等の標準化活動に積極的に参画し、関係機関と連携して取り進める。

【炭酸塩化事業の例】

➤ オープン/クローズ戦略の考え方



➤ 戦略的な特許取得、標準化

＜特許化戦略（炭酸塩等）＞

- 製造方法の基本特許を出願済み。
- 凝固・破碎技術、熱回収技術、熱回収方法、炭酸化技術、全体プロセス技術で積極的に出願
- 製造方法、コンクリートや地盤改良等への利用方法も出願・権利化を狙う。
- CO₂ 固定率や評価方法については標準化を検討予定。

＜標準化戦略（炭酸塩等）＞

- CO₂ 固定量の評価方法、反応生成物の物性・品質について、基礎データを収集するとともに関係機関と連携して、標準化を検討する。

③知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

- NEDO では、『日本版バイ・ドール条項（産業技術力強化法第 19 条）』を適用し、当該研究開発に係る知的財産権は、NEDO に譲り渡すことなく、委託先に帰属する。
- 実施者の知的財産の取り扱いについては、約款にて規定し、知的財産権の出願、申請等の手続きを行った場合は、NEDO に報告すること。
- プロジェクト内での共同実施者には実施を許諾する。

また、発明委員会を開催し、下記の運用を実施する。

- 実施者より、発明等を創作した旨の報告がなされたときは、報告日の翌日から 30 日以内に発明委員会を開催
- 発明の技術的評価、本研究開発に関わることの認定、出願要否に関することについて審議・認定
- プロジェクト実施期間中、必要に応じ、任意に開催

2. 3. 情勢変化への対応

情勢変化	対応方針
<p>2021年4月に菅総理大臣は、2030年に向けた温室効果ガスの削減目標について、2013年度に比べて46%削減することを目指し、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けていくことを表明した。</p>	<p>⇒本事業の早期実用化の重要性がさらに高まるとともに、事業内容を上記政策と連携し、排出源、サプライチェーン、制度等の影響などの観点も追加した。</p>
<p>2021年7月に経済産業省により「カーボンリサイクル技術ロードマップ」が改訂された。カーボンリサイクルに係る技術は、将来有望な選択肢の一つであり、そのイノベーションを加速化していくことが重要とされ、DACやCO₂輸送等の取り組みも追加され、また、カーボンリサイクル製品（汎用品）の普及開始時期を2040年頃に前倒しすること等が示された。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● カーボンリサイクルの加速化も踏まえ、2030年ごろに社会実装を目指すテーマについては、グリーンイノベーション基金事業での実施とした（2件） ● 各種勉強会や協議会における議論を注視し、標準化の議論や制度構築に資する基礎データの取得も行うこととした。
<p>2021年11月に「COP26」が開催され、低排出エネルギーシステムへの移行に向けての技術の開発・実装・普及及び政策の採用を加速させることとなった。また、パリ協定第6条に基づく市場メカニズムの実施指針が合意された。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 国内外の排出源やサプライチェーンについても、特に実証に近いテーマ等で、必要に応じ検討を行うこととしている。
<p>2021年12月に経済産業省により、「グリーンイノベーション基金事業の基本方針」が策定され2050年カーボンニュートラルの実現に向け、NEDOに2兆円の基金を造成し、野心的な目標にコミットする企業等に対して、10年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援することとなった</p>	

3. 研究開発成果について

3. 1. 研究開発全体の成果

CO₂を原料とした化学品合成、液体燃料合成の各技術およびコンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへの各CO₂利用技術について、要素技術開発および全体システムの構築を行う。

(21年度末での進捗状況はどれも達成○)

事業	分野	達成状況（中間目標）		成果の意義
⑥カーボンリサイクル・次世代火力推進事業／共通基盤技術開発		2020年の8つの採択事業の半数以上は先導から実用化開発に向けた研究にシフト。更に6つの新たな先導研究を採択。	△	カーボンリサイクルロードマップの先導基盤技術の可能性を明確化
⑨CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発	化学品	各事業においてラボ～ベンチ試験装置が導入完了し、合成等の評価が進行中。	△	カーボンリサイクルによる化学品合成手法の構築に寄与
	燃料(液体)	電解等設備を導入完了し、試験開始。合成触媒の試験で選択性を確認。	△	合成燃料における技術深化により、低コストな技術の提供に寄与。
	炭酸塩・セメントコンクリート等	ラボ～ベンチスケールでの要素技術開発及び全体システム検討を実施中。	△	実証での要素技術開発につなげ全体システム構築化に寄与。

3. 2. ⑥共通基盤技術開発の個別テーマ成果概要

研究開発テーマ	成果	達成度	今後の課題と解決方針
a. ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中のCO ₂ からの基幹物質製造開発事業	電極面積1m ² 換算で目標値200g/(m ² ・h)を超える367g/(m ² ・h)のギ酸生成達成	○	電解セル・分離回収システムを統合しラボレベルからベンチスケールアップ技術を開発(今年度、研究拠点におけるCO ₂ 有効利用要素技術)
b. カルシウム含有廃棄物からのCa抽出およびCO ₂ 鉱物固定化技術の研究開発	各個別の開発項目別の年度目標は達成	○	2022年2月終了。それぞれを連動させた全体プロセスの実証検証にチャレンジする。(21年度より、GI基金で実施中)
c. CO ₂ 電解リバーシブル固体炭酸塩セルの開発	・CO ₂ 電解時の性能面・材料面の技術課題を抽出。 ・ポタンセル規模でMS-rSOCの目標CO ₂ 電解速度を達成。また、大面積セルの製造に成功した。	△	250kW程度の中核デバイスとしての実用化を想定し、要素機器の諸特性を検証
d. 石炭灰およびバイオマス灰等によるCO ₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発	・計15種類の灰を対象に、CO ₂ 固定能および重金属等の溶出量の変動を把握 ・市場規模および要求品質を把握。製品を試作してCO ₂ 固定-製品製造に関わるLCCO ₂ を試算	△	CO ₂ 吸収装置では灰1トン当たり24kg以上、処分場では10kg以上のCO ₂ を固定可能な技術、ならびに炭酸塩化灰の資材化に向けた基礎製造技術を開発
e. 高温溶融塩電解を利用したCO ₂ 還元技術の研究開発	500℃以上の溶融塩において、アノード腐食率2.0 cm y ⁻¹ 以下の材料の合成に成功。	△	電極作成条件と電解条件の最適化、ならびに生成カーボンの洗浄によりアノード腐食率を1.2 cm y ⁻¹ 以下達成見込み
f. CO ₂ /H ₂ O共電解技術の研究開発	・LaFeO ₃ 系とNi系の吸着特性、反応特性等CO ₂ 分解・電極反応メカニズムを解明できた ・SrFe(Mo)O ₃ およびNi-Co修飾が、700℃でも生成物分離が可能な、高性能電極材料の見通しを得た	△	実用化を見据え、高性能電極の開発及び共電解セル・スタックの劣化機構の解明よりセルおよびスタックの長寿命化、共電解システムコンセプトの確立を行う。
g. 放電プラズマによるCO ₂ 還元・分解反応の基盤研究開発	世界最高レベルのCO ₂ 転換率とエネルギー効率を達成し、その反応メカニズムを解明した。	○	基礎研究からベンチスケールレベルに向けた研究開発を継続する(今年度、研究拠点におけるCO ₂ 有効利用要素技術に移行)
h. 二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査	FS調査、プロセス検討の一部は達成、尿素合成検討はPJ後も継続	△	イオン液体中における反応性について基礎検討を自主研究で継続する。

3. 3. ⑨CO₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発の個別テーマ成果概要

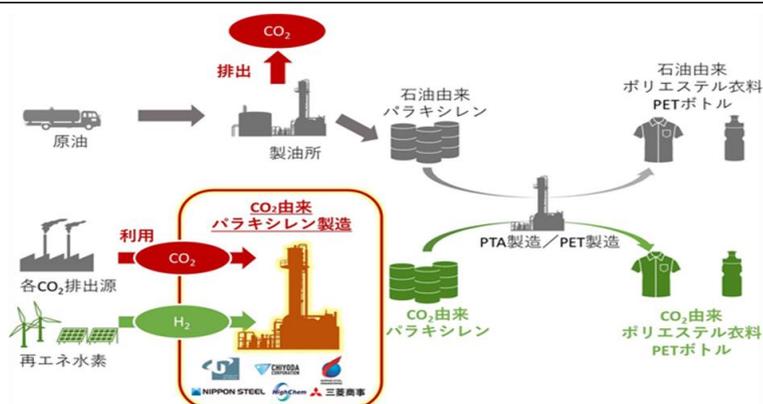
研究開発テーマ	成果	達成度	今後の課題と解決方針
o. CO ₂ を原料としたパラキシレン製造に関する技術開発	触媒開発、プロセス開発、事業性検討は達成済、触媒量産化において、優先順位の高い目標は達成済/一部遅れて達成見込み。最も難関のカプセル触媒の量産化技術を見出した。	△ (23年3月達成見込み)	触媒開発/量産化等引き続き研究開発が必要であるいずれも達成は可能
p. CO ₂ を用いたメタノール合成における最適システム開発	設備仕様決定し、ラボ試験での脱水膜およびメタノール合成基礎データ採取済み、反応器CFDの基本モデルも作成完了	△ (23年3月達成見込み)	試験設備の運用 (安全、効率化) 全体システムモデル構築 (ラボ知見活用)
q. CO ₂ を原料とした直接合成反応による低級オレフィン製造技術の研究開発	実ガス試験で使用する触媒の合成方法、成形方法の検討が完了 基本設計が完了	△ (23年3月達成見込み)	実ガス試験機向けの触媒・反応器を含む装置の詳細設計、製作・据え付けを行い、実ガスより回収したCO ₂ ガスを原料とした性能確認の実施
r. 次世代FT反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発	C5+炭化水素選択率60%達成を見込める触媒系を見出した。またPEEC, SOECそれぞれの効率や耐久性の向上検討を実施した。	△ (23年3月達成見込み)	触媒開発では計算科学の展開を含め研究加速し、電解セル開発成果との早期の連携を図る。
s. 微細ミスト技術によるCO ₂ 回収技術及び炭酸塩生成技術の研究開発	高濃度CO ₂ に対し大量のアルカリ微細ミストが必要との技術課題が判明し、結果的にコスト高との見通し。	×	2021年度で終了し、その後は低濃度CO ₂ での高吸収速度を活用できる用途を事業者で探索する。
t. マイクロ波によるCO ₂ 吸収焼結体の研究開発(CO ₂ -TriCOM)	マイクロ波の投入エネルギーで焼結エネルギーの10%以上の削減を確認。小型プラントの設計も完了。	△ (23年3月達成見込み)	添加材等処方確定およびさらに具体的な設備化検討
u. 海水および廃かん水を用いた有価物併産CO ₂ 固定化技術の研究開発	かん水中のMgの回収率85%、中間物質の塩化マグネシウム純度98%以上達成、炭酸マグネシウム固定後の利用法に目途、実証試験設備の基本設計完了	◎	目標達成、完了
v. 産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発	カルシウム現性状把握し、炭酸塩の基本品質を満足することを確認し、LCAも算定済み	△ (23年3月達成見込み)	1-サー情報収集と評価、副産物評価により適合性を確認する。
w. セメント系廃材を活用したCO ₂ 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究	セメント系廃材を活用したCO ₂ 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術にかかる各要素技術をラボレベルで構築した。	○	完了、2022年2月よりGI基金にて実施中。
x. 製鋼スラグ中Caの溶媒抽出を用いたCO ₂ 固定化プロセスの技術開発	プロセス要素技術試験結果に基づき、小型試験装置の仕様を決定。スラグの性状を確認し、資材化の見込みを得た。炭酸塩については市場調査を行い、品質目標を設定	△ (23年3月達成見込み)	<課題> BSUを早期導入し連続化を想定したデータを採用する必要がある。 <解決方針> 導入時期短縮化とコスト削減を図る。

個別テーマの成果

o. CO₂を原料としたパラキシレン製造に関する技術開発

➤ 個別事業概要

- CO₂を原料としたパラキシレン製造の技術開発。パラキシレンは、その組成上、他の化学品に比べて製造時に必要な水素原料が少なく済むため、より低コストで多くのCO₂を固定できる。パラキシレンの世界需要は約4,900万トン／年あり、仮に全てをCO₂原料に切り替えた場合のCO₂の固定量は約1.6億トン／年に上る。
- 本事業では、CO₂からパラキシレンを製造するための画期的な触媒の改良や量産技術の開発、プロセス開発を実施するとともに、全体の経済性やCO₂削減効果を含めた事業性の検討を行う。CO₂を原料としてパラキシレンを工業的に製造する技術は確立されておらず、日本独自技術として、世界最先端の取り組みを通じて実用化を目指す。



CO₂を原料としたパラキシレン製造に関する触媒の開発、及びその量産化を行う。1 反応器、2 反応器のプロセス設計を行い、ベンチ試験を据え付けて必要なデータ取得を行い、大型実証、商業化への道筋をつける。経済性評価を行い、又市場調査を含む事業性検討を行う。

CO₂を原料としたパラキシレンの合成では、CO₂→メタノール（以下 MeOH）→PX が選択率の観点で有望であり、これらの反応を直接一段で合成する方法と、二段で合成する方法、または（2 反応器ケースの後段）、および（2 反応器ケース）が考えられる。前者については、多段反応をワンパスで起こすカプセル触媒が織り込まれたハイブリッド触媒が用いられ、後者については、前段は低温 MeOH 合成触媒が、後段はカプセル触媒が用いられる。現状としては、富山大学中心に優れた触媒技術が既に開発されているが、事業化に向けては、改良、量産技術、プロセス開発、上記最適ルートの特等開発課題が残されている。本事業では、これらの触媒の更なる改良、量産化、プロセス開発、経済性評価や CO₂ 排出量評価を含む事業性検討を行うものである。

➤ 実施の効果（費用対効果）

将来フルコマmercialサイズ(年産パラキシレン生産量 10 万トン)で社会実装するとした場合、1 プラントからの年間売上は 300 億円規模と見込まれる。事業者として参画する場合でも、ライセンス

サーとして参画する場合でも NEDO 事業予算（4 年合計約 20 億円）との比較において十分大きく、費用対効果は高いと言える。

2030 年/2040 年/2050 年の年間売上額として夫々 300 億円/1,800 億円/3,300 億円、CO₂ 削減効果(単年)として 夫々 33 万トン/199 万トン/365 万トンを見込む。

➤ 個別事業成果

① CO₂ を原料としたパラキシレン(PX)製造に関する触媒開発【富山大学、日本製鉄、ハイケム】

①-1 CO₂ を原料とした PX 及び中間体メタノール(MeOH)合成触媒の開発【富山大学】

①-1-1 CO/CO₂ を原料とした PX 合成触媒の開発（1 反応器ケース）

CO 原料、CO₂ 夫々のケースにおける触媒設計、触媒のスクリーニング、触媒メカニズムの解析等が課題である。また反応条件、反応器システム、触媒再生方法、触媒大量製造方法の最適化を検討する。2020 年度と 2021 年度は、触媒調整方法の確立、触媒反応機構の解明、触媒反応条件の最適化を行った。触媒反応条件の最適化を行った結果として、2021 年度目標であった、両ケースにおける PX 生成空時収率について、目標を達成した。触媒寿命については、途中から多少の触媒失活があったが、再生後は触媒活性が戻ったことを確認した。2022 年度の目標は、引き続き触媒活性選択性寿命の更なる向上予定である。

①-1-2 CO₂ を原料とした中間体 MeOH 合成触媒の開発（2 反応器ケースの前段）

①-1-1 同様の課題、開発内容に対して、2020 年度と 2021 年度は触媒調整方法の確立、触媒反応条件の最適化を行った結果として、高い選択性、転化率を示し、触媒寿命についても目標時間を達成した。2022 年度の目標は、引き続き触媒活性選択性寿命の更なる向上予定である。

①-2 CO₂ を原料とした PX 及び中間体 MeOH 合成触媒分析を通じた性能改良【日本製鉄】

①-2-1 CO₂ を原料とした PX 合成触媒分析を通じた性能改良（1 反応器ケース）

富山大開発触媒に関して、透過型電子顕微鏡（TEM）による観察を行い、触媒の結晶状態や存在状態を解析し、富山大学へのフィードバックの上、改良検討に繋げた。

①-2-2 CO₂ を原料とした中間体 MeOH 合成触媒分析を通じた性能改良（2 反応器ケース前段）

低温メタノール合成触媒及びプロセスに関する技術調査から、触媒開発における指針を整理し、富山大開発触媒と同じ調製方法によるラボ製造方法を確立した。また、日本製鉄ラボ評価設備を立ち上げ、富山大調製品と日本製鉄調製品とで反応活性を比較、再現性を確認した。更にラボ評価装置にて、触媒組成最適化、反応条件最低帰化を進めた。

① -3 中間体 MeOH からの PX 合成触媒の開発 (2 反応器ケースの後段)【ハイケム】

本研究はカプセル触媒性能の影響因子の特定、性能良否の分析方法、量産化手法の検討を目的として、高性能の触媒を安定的に、量産化することを目指す。

【2020 年度 達成基準 a : コア ZSM-5 特性最適化／目標達成度 100%】

【2020 年度 達成基準 b : 被覆シリカライト-1 装置・条件検討／目標達成度 100%】

【2020 年度 達成基準 c : 分析・評価 カプセル化確認／目標達成度 100%】

2020 年度において、コア ZSM-5 として、シリカ/アルミナ比の最適化およびカチオン種の選定により、触媒反応に有利なカプセル触媒の物性の傾向を確認できた。また、コア ZSM-5 のカプセル化方法とカプセル化条件の検討を行い、ゼオライト表面被覆に適した方法や適したカプセル化合成条件を確認した。分析・評価方法について、カプセル化の良否は性能評価の PX 選択性で判断し、カプセル化で選択性向上を確認した。機器分析として、最表面の分析手法が、カプセル化の良否判定に適用できる可能性を示した。

【2021 年度 達成基準 a : カプセル化確認方法の確定／目標達成度 100%】

【2021 年度 達成基準 b : 少量(数百 g)ゼオライトカプセル触媒の供給／目標達成度 100%】

【2021 年度 達成基準 c : 中量(数 kg)の製造装置確定／目標達成度 100%】

2021 年度では、ハイケムは独自のカプセル化手法を開発できた。従来のカプセル化手法として水熱合成法、CVD 法等の研究は行われているが、工業化は難しいため、ハイケムでは富山大学の TEOS 製造方法を参考にして、工業化に適した独自の製造方法を見出した。この手法を用い、高性能の触媒を安全・安定に工業生産できる可能性を示した。

本製造方法に基づき、数 kg 触媒の製造装置を確定し、数百 g のゼオライトカプセル触媒の供給は準備済み。カプセル化確認方法につき、種々分析・解析を行ってきた結果、性能と相関性がある SiO₂ 担持量を簡易手法として、SEM、XPS、TOF-SIMS、TEM 等の方法を補助手段にし、性能評価を最終判定というような確認方法に至った。

【2022 年度 達成基準 : 中量 (数 kg) ゼオライトカプセル触媒の供給】

2022 年度の目標は達成見込み。

②CO₂ を原料としたパラキシレン製造に関する触媒量産化検討【ハイケム】

本検討は高性能のハイブリッド触媒の量産化を目的として、金属/金属酸化物触媒のレシピ及び量産、カプセルゼオライト触媒のレシピ及び量産、ハイブリッド化装置及び条件、成形条件、分析方法を検討している。

【2020 年度 達成基準 a : ハイブリッド化方法及び装置の確定 / 目標達成度 100%】

【2020 年度 達成基準 b : ハイブリッド化分析方法及び装置の確定 / 目標達成度 100%】

【2020 年度 達成基準 c : 成形触媒の形状、サイズの確定 / 目標達成度 100%】

【2020 年度 達成基準 d : 富山大で実現された性能のある触媒の製造 / 目標達成度 100%】

2020 年度では、金属/金属酸化物の量産化用のレシピを検討し、条件変更による物性変化を一部確認した。物性と性能結果との相関性を検討している。kg スケールでの量産化は外部試作中。カプセルゼオライト触媒につき、ラボで富山大学と同じ性能を再現できた。数十 g のレシピを確立し、外部試作を行っている。ハイブリッド化については、市販の金属酸化物とゼオライトでラボにて混合試験を実施した。混合状態は SEM にて確認し、性能との相関性を検討する予定。低温メタノール触媒は 5mm 打錠品、カプセル及びハイブリッド触媒は 1.5mm 押出品で成形可能であることを確認した。今後、成形品を評価する予定。

【2021 年度 達成基準 a : 少量（数百 g）成形触媒の供給 / 目標達成度 100%】

【2021 年度 達成基準 b : 富山大で実現された性能の 8 割程度を有する量産化成形触媒の製造 / 目標達成度 80%】

2021 年度では、CO₂→PX の成型触媒（約 12kg）を千代田化工建設へ供給済み。他の触媒については、供給準備済み。性能面においては、CO₂→PX 触媒の初期性能は目標値達成したが、劣化対策が必要。今後は評価条件・再生条件の最適化および成型条件、成型サイズ・形状の改良を行う。

一方、CO→PX 触媒は、富山大学の第一世代の触媒処方にて量産化検討を行ってきたが、高 STY の性能を実現できていない。今後は、富山大学で高 STY が実現された第二世代の触媒処方にて、性能改善を目指す。低温メタノール触媒は富山大学と同等性能を実現できた。

【2022 年度 達成基準 a : 中量（数 kg）成形触媒の供給】

【2022 年度 達成基準 b : 富山大で実現された性能の 8 割程度を有する量産化成形触媒の製造】

2022 年度では、中量（kg）成形触媒の供給は達成見込み。性能については、各々触媒のレシピ、量産化方法の最適化、成形方法の改善等を通じて、達成可能と考えている。

③ CO₂を原料としたパラキシレン製造に関するプロセス開発【千代田化工建設、日鉄エンジニアリング、日本製鉄】

本研究開発項目は、CO₂から中間体 MeOH を合成する反応と MeOH から PX を合成する反応を一つの反応器で行うケース（1 反応器ケース）と別々の反応器で行うケース（2 反応器ケース）のそれぞれのプロセスを分担して開発し、最終的に最適なプロセスの提案を目指している。

③-1 CO₂を原料とした PX 及び中間体 MeOH からの PX 製造プロセスの開発【千代田化工建設】

③-1-1 CO₂を原料とした 1 反応器での PX 製造プロセスの開発

本研究では、（1 反応器ケース）として、水素・CO₂・CO(CO₂からの逆シフト反応で生成)の混合ガスから、一段で PX を合成する反応について、最適反応条件・プロセスを確立し PX 収率向上を目指す。

（1）ベンチ装置の EPC（設計・調達・建設工事）完了

上記目的のため、まずは本プロセスの触媒を、より商業機（PX 生産量：数万トン/年～数十万トン/年）に近い状態（反応器内で使用する触媒を商業機と同一形状のものにする、反応器内のガス線速を商業機と近くする、等）で評価するためのベンチ装置の設計・製作を行う必要がある。

2020 年度は、ベンチ装置の基本設計を実施した。商業機で想定されるサイズの工業触媒が入り、反応器内の運転条件を商業機と近い状態にできる反応器とした。また、原料流体である水素、CO₂、CO、MeOH を任意の比で供給でき、触媒再生も反応器内で実施できる装置とした。

2021 年度に、ベンチ装置 EPC を完了し、100%目標を達成している。2022 年 3 月より水素/CO₂の反応試験を開始済みである。

2022 年度からは、ベンチ装置で CO₂ Feed 実験をまず行い、その後 MeOH Feed 実験を行う。

2022 年度は反応⇔再生を繰り返した連続運転を 100 時間以上、2023 年度は同連続運転を 1000 時間以上達成するとともに、運転条件の最適化を行う。

（2）商業機の簡易プロセス設計・プレ経済性検討の実施

商業機の簡易プロセス設計（PFD、機器リストの作成等）・プレ経済性評価を行い、実機化の観点からベンチ試験計画や触媒開発へフィードバックするとともに、ベンチ装置運転により得られたデータでプレ経済性評価もアップデートしていく。

2020 年度は、これまでの富山大学による触媒試験データをもとにして反応モデルを作成し、簡易プロセス設計（PFD、機器リストの作成等）を行い、それに準じて概略機器コスト、生産コストを算出した。PX の生産コストには再エネ水素価格の占める割合が大きいが、再エネ水素価格の低減が実現すれば、石化由来の PX に価格が近づいてゆくことが分かった。

③-1-2 中間体 MeOH からの PX 製造プロセスの開発（2 反応器ケースの後段）

本研究では、水素と CO₂ から MeOH を合成する反応と MeOH から PX を合成する反応をそれぞれの至適な反応条件で進めることによって PX 収率向上を目指す。MeOH から PX を合成する反

応について、最適反応条件・プロセスを確立し、PX 収率向上を目指す。最終的にはそれぞれの成果を組み合わせ（1 反応器ケース）のプロセスとの比較を行い、CO₂ を原料とした PX 製造における最適な反応パスを提案する。

（1）ベンチ装置の EPC（設計・調達・建設工事）完了

ベンチ装置の進捗、今後の予定は③-1-1 と同じである（同じ装置を使用する）。

（2）商業機の簡易プロセス設計・プレ経済性検討の実施

2021 年度に 2 反応器ケースのプレ経済性検討を完了し、100%目標を達成している。これまでのハイケムによる触媒試験データをもとにして、MeOH⇒PX の反応モデルを作成し、簡易プロセス設計（PFD、機器リストの作成等）を行い、③-2-1 の CO₂⇒MeOH の設計資料とあわせて概略機器コスト、生産コストを算出した。2 反応器ケースでは 1 反応器ケースよりも CAPEX が大きくなるが、今後の開発で必要触媒量の低減、PX 選択率の向上をすれば CAPEX が大きく低減できることを見出し、今後の触媒開発に有用な情報をフィードバックすることができた。

③-2 CO₂ を原料とした PX 中間体 MeOH 製造プロセスの開発【日鉄エンジニアリング、日本製鉄】

本研究項目は、2 反応器ケースの前段側プロセス開発を実施するものである。技術課題は、実機相当サイズの反応器であってもラボ試験と同等の性能を発揮できることであり、ベンチ試験を通して実機化に向けたエンジニアリングデータ採取を目指す。尚、実機においては MeOH 合成後に蒸留分離工程が必要になるが、蒸留分離工程は広く確立されているプロセスであるため本研究対象からは除外した。

③-2-1 CO₂ から中間体 MeOH 製造プロセス開発【日鉄エンジニアリング】

③-2-1 CO₂ から中間体 MeOH 製造プロセス開発（日鉄エンジニアリング）

ベンチ試験計画・ベンチ試験装置基本仕様策定（2020 年度）

【達成基準：ベンチ試験使用触媒量・触媒形状の決定／目標達成度 100%】

【達成基準：ベンチ試験装置基本仕様決定／目標達成度 100%】

①-1 の富山大学で実施しているラボでの触媒改良評価試験結果を解析し、反応圧力・反応温度・触媒と原料ガスの比率をパラメータとしてベンチ試験での条件の幅を設定した。この結果を基にベンチ試験装置反応器のサイズを仮設定し、②のハイケムや①の富山大学、③-2-2 の日本製鉄と協議をしながら、実機で使用すべく量産化される触媒の形状とサイズを決定した。②のハイケムから得られた触媒嵩比重の情報を基にベンチ試験装置反応器サイズやベンチ試験での条件の幅を見直し・確定した。

次に、上記で設定したベンチ試験条件幅を基にマテリアルバランスを検討し、③-2-2 の日本製鉄が検討する分析装置仕様へのインプット条件として液とガスの発生量と濃度幅を整理した。さらに、ベン

チ試験の反応圧力条件とポンペに充填可能な圧力を考慮し、原料となる CO₂ が液化せずに最大量使用できるように原料ガス組成 (CO₂+H₂+Ar) と濃度調整方法を設定した。さらに、③-2-2 の日本製鉄と連携し、設置場所制約条件と存在するインフラの情報を調査・整理し、試験装置への原料ガス供給設備の構成と仕様を設定した。

また、高圧ガスや消防法などの法令を遵守する上で必要な設備の検討、設置場所に存在するインフラ情報の整理を③-2-2 の日本製鉄とともにを行い、最適なインフラ工事基本仕様を決定した。最後に、これらの情報を踏まえて、設置場所における各設備の配置を確定した。

ベンチ試験導入・立上げ支援 (2021 年度)

【達成基準：ベンチ試験装置完成検査・試運転完了／目標達成度 100%】

本目標に向けて、研究開発項目 (③-2-2) の日本製鉄と一体となって取り組んだ。

2020 年度に設定した仕様に従い、研究開発項目 (③-2-2) の日本製鉄によるベンチ試験装置導入に向けた仕様書作成、ベンダー見積評価を助勢した。

また、ベンチ試験装置設置場所の監督官庁 (千葉県) と高圧ガス関連法令条文に対する解釈について幾度となく協議を重ね、特に、装置内の主たる部分や長納期対応になりそうな部分に関して早期に高圧ガス関連法令に対応した仕様 (設計条件) を過剰スペックにならないように確定した。さらに、高圧ガス関連法令対応仕様をベースにベンダー図書に対するチェック&レビューを通して進捗を管理しながら時には研究開発項目 (③-2-2) の日本製鉄のベンチ試験装置運転員 (予定) のオペレーション上の要望を取り入れながら構成設備間の取合調整や運転思想の全体整合性確保の調整を行うことで、研究開発項目 (③-2-2) の日本製鉄のベンチ試験装置導入を助勢した。これらの行動により、年度末までのベンチ試験装置試運転に間に合うタイミングでの日本製鉄の高圧ガス本申請と着工に貢献した。年度末までに構成設備の試運転を完了し、4 月より実ガスを用いたベンチ試験評価を開始する。

経済性評価支援 (2021 年度)

【達成基準：商業機コスト構成、CO₂ 排出量の算出の支援／目標達成度 100%】

2 年目時点での研究開発項目 (①-1) 富山大学によるラボ評価データを解析し試験条件毎のマテリアルバランスを検討した。また、1 パスで操作されるラボ試験に対し実機と同様に未反応ガスをメタノール合成反応器入口に戻すことを想定した概算のメイクアップ CO₂ と H₂ 量を計算し原料コストを計算した。

2020 年度に研究開発項目 (④) で実施された 1 反応器での経済性評価結果を踏まえて、原料コストが最も安価となった操作条件のデータを今回の経済性評価のベース条件として商業プラントを想定したマテリアルバランスを検討した。

2 反応器後段プロセス開発を担当する研究開発項目（③-1-2）千代田化工建設と密に連携をしながら、CAPEXとOPEX積算用にプロセスフローシート作成、構成機器のサイジングとUtility使用量（エネルギー消費量にも使用）、PLOT PLAN等作成した。

2022年度の目標は引き続き経済性評価支援としており、研究開発項目（③-2-2）で日本製鉄が実施する、研究開発項目（①-1）及び研究開発項目（②）の触媒を適用したベンチ試験の結果を解析し、反応条件の最適化を行うとともに実機化に向けたエンジニアリングデータ（実証及び商業機の反応器及びプロセス設計用パラメータ）の一次構築を行う。

特に、反応条件の最適化には2021年度に完成したベンチ試験装置と経済性評価結果をブラッシュアップしながら進めることができるため、2022年度も目標達成は可能と考えている。

③-2-2 CO₂から中間体 MeOH 製造ベンチ評価【日本製鉄】

ベンチ試験装置検討・導入（2020年度）

【達成基準：インフラ情報・設置場所制約条件の整理、分析装置仕様の決定／目標達成度100%】

【達成基準：ベンチ試験設置場所整備、設置場所特有の諸申請・官庁対応のリストアップと計画／目標達成度100%】

③-2-1の日鉄エンジニアリングと連携し、ベンチ試験設備導入に向け、必要インフラ情報及び設置場所制約条件を整理した。さらに、ベンチ試験の効率化を念頭においた運用方法を検討し、ベンチ試験装置の系列を決定した。これらの情報を基に、③-2-1の日鉄エンジニアリングと協議して、ベンチ試験装置への原料ガス供給設備の構成と仕様を設定した。

③-2-2の日鉄エンジニアリングからの入力情報を基に分析装置の運用方針（サンプル時間、切替周期など）と分析装置仕様を決定した。また、ベンチ試験装置設置場所特有の諸申請・官庁申請対応の内容を整理し、周辺インフラ工事基本仕様を設定した。

ベンチ試験装置検討・導入（2021年度）

【達成基準：ベンチ試験装置完成検査・試運転完了／目標達成度100%】

本目標に向けて、研究開発項目（③-2-1）の日鉄エンジニアリングと一体となって取り組んだ。2020年度に設定した仕様に従い、ベンチ試験装置導入に向けた仕様書を作成しベンダーの見積評価を行なった。

また、ベンチ試験装置設置場所の監督官庁（千葉県）と高圧ガス関連法令条文に対する解釈について協議を重ね、ベンチ試験装置設置場所が属する事業所全体の当該法令関連の対応状況と整合性を図りながら、特に、装置内の主たる部分や長納期対応になりそうな部分に関して早期に高圧ガス関連法令に対応した仕様（設計条件）を確定した。

さらに、高圧ガス関連法令対応仕様をベースにベンダー図書に対するチェック&レビューを通して進捗を管理しながら、時には設計変更にならない範囲でベンチ試験装置運転員（予定）のオペレーション上の要望を取り入れながら構成設備間の取合調整や運転思想の全体整合性確保の調整を行いベンチ試験装置製作の円滑化に努めた。

これらの行動により、年度末までのベンチ試験装置試運転に間に合うタイミングでの高圧ガス本申請と着工した。年度末までに構成設備の試運転を完了し、4月より実ガスを用いたベンチ試験評価を開始する。

2022年度の目標はベンチ試験実施・データ取得であり、研究開発項目（①-1）で開発した触媒を用いてベンチ試験装置で評価し、一連の基礎データに加えて、各種エンジニアリングデータに結び付くデータを取得し、研究開発項目（③-2-1）日鉄エンジニアリングにインプットする。2021年度末のうちから試験条件について日鉄エンジニアリングと議論を始めており、2022年4月上旬にはベンチ試験評価を開始できる見込みであるため、2022年度も目標達成可能と考えている。

④ CO₂を原料としたパラキシレン製造に関する事業性検討【三菱商事、千代田化工建設、ハイケム】

事業性検討で特に重要な課題は、生産コスト、販売価格への転化の2点である。これら課題に対して、経済性評価、CO₂削減効果の評価、市場調査の3点に大別して検討を行う。これらの内、2020年度に行った1反応器ケースの経済性の仮評価を元に2021年度には1反応器の経済性評価、又2反応器の経済性の仮評価を行った。いずれも結果としては、コストの内、原料としての水素調達コストの割合が最も大きいことが分かった。特に設備投資コストはスケールメリットが働くが、水素調達量がプラントサイズの律速となることが判明した。これらを踏まえ、スケールメリット追求によるコスト削減と水素調達可能性の観点から、商業段階における最適な生産数量を特定した。その商業段階におけるコストを見積もった結果として、原油由来PXよりもコストは増大するが、現状のリサイクルPETの取引価格、又市場関係者のヒアリングの結果として、コスト増は、販売価格に転化可能な範囲内に収束し得ることを示した。

また2021年度は、1反応器ケースのCO₂削減効果の試算を行った。プロセス排出を加味してもCO₂を原料として使用することによる削減効果が大きく、つまりプロセス全体ではネットネガティブの排出量となることが分かった。2022年度は2反応器ケースの経済性評価、CO₂削減効果の試算を行う。

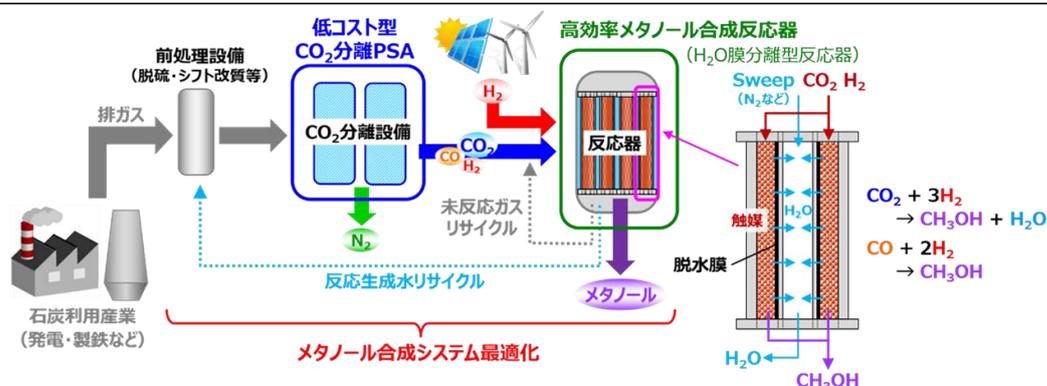
また2021年度は、市場調査も行った。主に、パラキシレンの需給環境を調査した。パラキシレンは引き続き需要が堅調に伸びる見込み。特に中国における需要増が続く。但し中国国内の供給量が追い付かず、日韓の輸出は継続し、中東の輸出も大きく伸びる見通し。パラキシレンの次の工程であるテレフタル酸の市場動向も調査しながら、上記水素等による生産コスト、2022年度に行う認証制度等の調査も踏まえて、総合的に商業立地の候補を検討していく。

p.CO₂を用いたメタノール合成における最適システム開発

➤ 個別事業概要

石炭利用産業から排出されるCO₂を用いて基幹化学物質であるメタノールを生産することでCO₂排出量の大幅削減が可能。カーボンリサイクル（以下C R）メタノールの社会実装に向けた課題は製造コストであり、低コスト製造プロセス開発により価格競争力を向上させる。

- 製鉄所等の排ガスに含まれるCO₂から基礎化学品であるメタノールを合成するCO₂有効利用プロセスを開発する。製鉄所の高炉ガスはCO₂濃度が比較的高く、副次成分としてCOやH₂を含むという特徴があり、これらを最大限利用することで、メタノール合成の低コスト化・高効率化を図る。
- 本開発では、圧カスイング吸着法(PSA)による低コスト型CO₂分離・回収、およびCO₂から高効率なメタノール合成が可能なH₂O膜分離型反応器の技術開発を進めるとともに、前処理設備やメタノール合成時の反応生成水のリサイクルも含めた最適な全体システムの構築を目指す。



➤ 実施の効果（費用対効果）

メタノールの国内市場は、現状 170 万 t / 年で約 700 億円 / 年くらいの規模である。我が国の石炭利用産業の排出CO₂量は約 5 億 t と非常に大きいため、当該事業の成果により、プロセス改良効果のみでも当該事業の予算（約 11 億円）を大きく上回る効果が期待される。

我が国の石炭利用産業から排出されるCO₂を用いたC Rメタノール合成に最適な低コスト型CO₂分離および高効率メタノール合成反応器から成るC Rメタノール合成システムを構築し、C Rメタノールの社会実装を目指す。

➤ 個別事業の成果

本事業（C Rメタノール）では、2022年度に、低コスト型CO₂分離PSAと高効率メタノール合成反応器の大型試験設備の建設を計画しており、2021年は、試験設備の設計および運用に関わるラボ実験データの取得およびシミュレーションを実施した。ラボPSA実験では、運転条件や吸着剤の種類による影響を評価中であり、今後ベンチCO₂分離PSAの設計仕様に反映する。高効率メタノール合成反応器（H₂O膜透過型反応器）については、3次元CFDシミュレーションによる反応器基本モデルの作成を行った。反応器に用いる脱水膜については膜の高性能化および均一性向上に向けた合成条件の検討を行った。前処理プロセスについては、原料ガスの脱硫およびシフト改質についての簡易ラボ評価を行った。

➤ 研究開発項目毎の成果

本事業における研究開発項目ごとの目標と達成状況を以下表に示す。

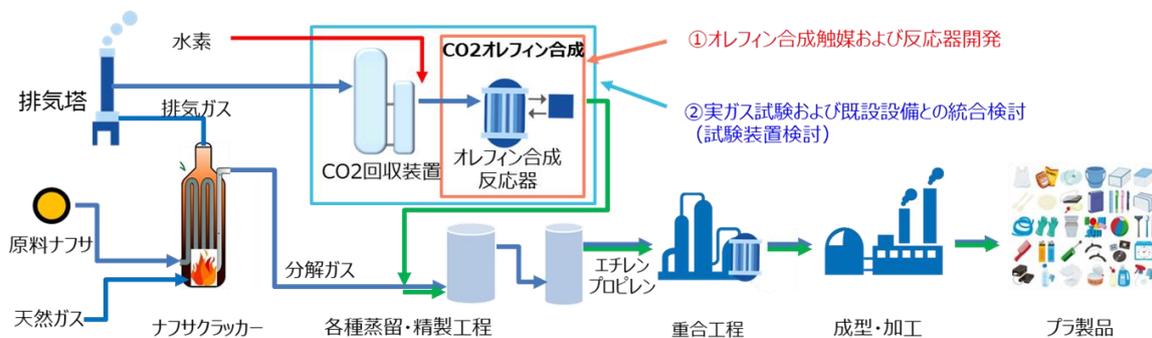
研究項目	21年度目標 (最終目標)	進捗 評価	課題と対応策	資料 掲載 ページ
研究開発項目① 低コスト型CO ₂ 分離PSA 開発	<ul style="list-style-type: none"> ラボPSA運転条件変更によるCO₂分離効率への影響評価 低コスト型CO₂分離PSA運転に適した吸着剤選定 	○	<ul style="list-style-type: none"> PSA運転温度および原料ガス供給量とCO₂回収率の関係を明確化 CO₂, N₂吸着特性の異なる複数の吸着剤でCO₂分離性能比較 	
研究開発項目② 高効率メタノール合成反応器 開発	<ul style="list-style-type: none"> H₂O膜分離型反応器に適した運転条件を1次元モデルで検討 H₂O膜分離型反応器の3次元CFD基本モデル作成 	○	<ul style="list-style-type: none"> 高炉ガス組成でのシフト改質実験によるCO転化率評価 3次元CFDモデル作成 	
研究開発項目③ 実用的脱水膜開発	<ul style="list-style-type: none"> 膜の高性能化に向けて合成条件の検討 長尺膜の均一性向上に向けて合成条件の検討 	○	<ul style="list-style-type: none"> 新規に合成した種結晶を用いた脱水膜の性能向上の有無を確認 長尺化に向けて、性能以外にも結晶の性状を評価 	
研究開発項目④ メタノール合成システム最適化	<ul style="list-style-type: none"> 前処理 (シフト改質, 脱硫) ラボ実験によるプロセスシミュレーター向け基礎データ取得 	○	<ul style="list-style-type: none"> 高炉ガス組成でのシフト改質実験によるCO転化率評価 メタノール合成触媒S影響評価 脱硫目標濃度見極め 	

q.CO₂を原料とした直接合成反応による低級オレフィン製造技術の研究開発

➤ 個別事業概要

本事業ではCO₂とH₂から一段で直接低級オレフィンを合成する技術開発を実施する。低級オレフィンの収率目標である"実ガス試験において20%以上"を見通せることを確認する。またナフサクラッカーから排出されるCO₂を原料としH₂と合成するため、オレフィン合成する触媒及び反応器の開発、実ガス試験及び既設ナフサクラッカーに設置するオレフィン合成設備の検討を行う。

- 燃焼排気ガスから回収した二酸化炭素 (CO₂) と水素を原料とした非化石資源による低級オレフィン製造プロセスの技術開発を行う。また、本プロセスとナフサを原料とする既存の低級オレフィン製造設備であるエチレンプラントの統合についても検討し、既設の蒸留・精製設備や後流のプラスチック製造・供給バリューチェーンの活用を視野に入れた開発を進める。



➤ 実施の効果 (費用対効果)

カーボンニュートラル実現のための技術開発であり、本研究で得られる触媒製造・成形技術や実ガス試験によって得られる知見により、商用化時にナフサクラッカー1プラント当たり年間数十万トンのCO₂削減が期待できる。

➤ 個別事業成果

本研究は前述の状況を踏まえ、以下の2つの研究開発に取り組む。

① 低級オレフィン合成触媒および反応器開発

触媒大量合成方法の確立と、オレフィン反応に適した反応器開発を行う。

② ナフサクラッカー排ガスを用いた実ガス試験検討

実ガス試験のために設置する設備の検討（基本設計，詳細設計）に取り組み、試験の実施計画を策定する。

① 低級オレフィン合成触媒および反応器開発（2021年度達成度 100%）

2021年度に、触媒大量合成方法および成形方法の検討が完了し、試作を実施した。

図 3.2-1 に 1kg スケールの触媒試作工程を示す。本試作により、スケールアップ時の課題（沈殿工程が不均一になる）が明確になったため、2022年度に沈殿工程を改良して課題解決を目指す。

2022年度に 1 kg の触媒と成形体の試作・評価を完了予定、かつ、シミュレーションと試験による反応管の最適化の検討が完了する見込みである。

② ナフサクラッカー排ガスを用いた実ガス試験検討(2021年度達成度 100%)

2021年度に、低級オレフィン収率 20% を達成見込みの実ガス試験装置の基本設計が完了した。成果の一例として図 3.2-1 にオレフィンシステムのフロー抜粋を示す。

2022年度に詳細設計が完了する予定である。



図 3.2-1 1kg スケールの触媒試作工程

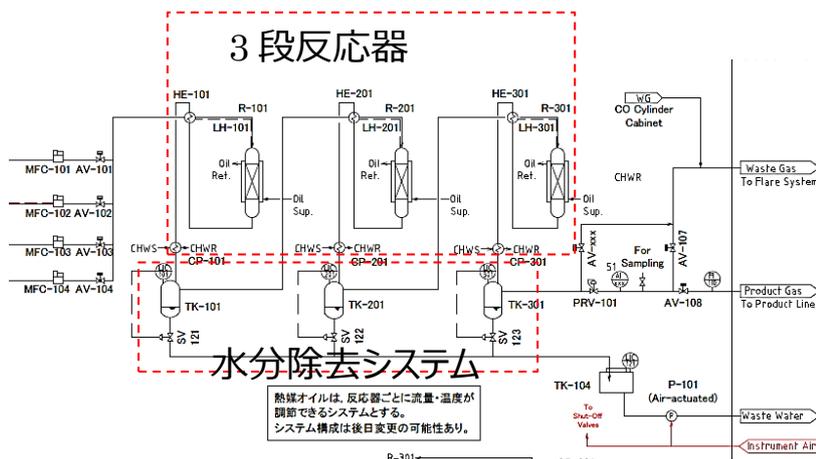
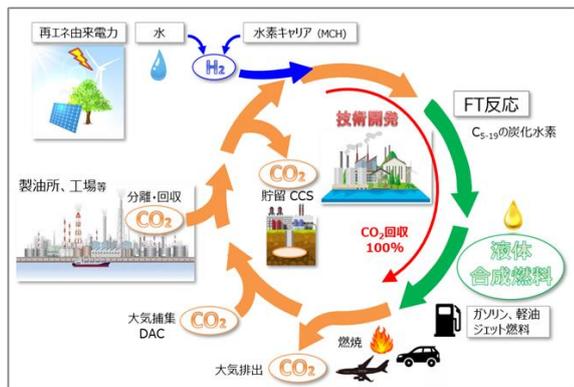


図 3.2-2 オレフィンシステムフロー図の抜粋

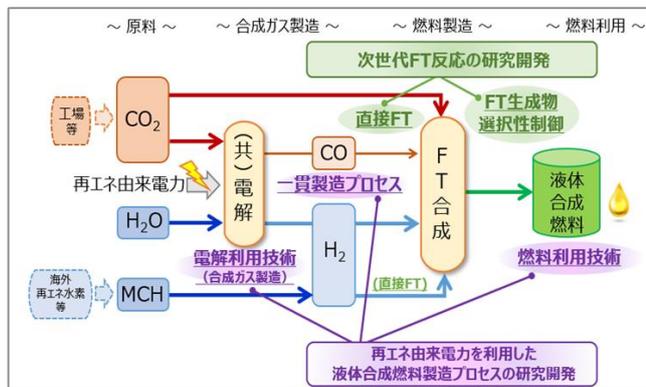
r. 次世代 FT 反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発

➤ 個別事業概要

- 本研究では、CO₂を原料としたカーボンニュートラルな液体合成燃料を製造するための研究開発として、CO₂を原料とした炭化水素製造に最も親和性が高いと考えられるフィッシャー・トロプシュ (FT) 反応の次世代技術開発と液体合成燃料一貫製造プロセスの構築と最適化、さらに将来のスケールアップに向けた研究開発を行う。
- 技術課題①としてFT反応におけるCO₂を原料とした直接反応、FT生成物の選択性制御を、技術課題②として再エネ由来電力を利用した合成ガス製造技術、これとFT反応を組合わせた一貫製造プロセスの確立、液体合成燃料の利用技術を研究開発する。



CO₂からの液体合成燃料製造の将来像イメージ



研究開発の概要

➤ 実施の効果（費用対効果）

本研究開発の成果により、2050年に実質カーボンニュートラルに必要な液体燃料全量を供給した場合、CO₂排出削減効果は、約 8,000 万トン-CO₂、国内市場規模（燃料）として、約 3.1 兆円と試算される。

➤ 個別事業成果

CO₂を原料とした化学品製造の実現や炭化水素製造に最も親和性が高いと考えられるフィッシャー・トロプシュ反応の次世代技術と液体合成燃料一貫製造プロセスの構築と最適化、さらに将来のスケールアップに向けた研究開発

研究開発項目①「次世代 FT 反応の研究開発」

①-1「直接 FT 反応」

<研究開発成果>

2種の活性金属を中心に担持方法、担体種、第3成分添加効果、反応条件の影響等の検討をMI技術等も活用しながら系統的に行い、中間目標：C5+炭化水素選択率60%達成を見込める触媒系を見出した。

<目標達成度>

2021年度は計画通りに進捗しており、中間目標は2022年度末までに達成見込みである。

①-2「選択性制御」

<研究開発成果>

合成ガスよりのFT反応として2種の活性金属を中心に担持方法、担体種等の検討、および生成ワックス成分の分解・異性化に適した酸触媒の検討を計算科学等も活用しながら系統的に行い、中間目標：液体炭化水素（C5-19）選択率60%以上達成を見込める触媒系の方向性を見出した。

<目標達成度>

2021年度は計画通りに進捗しており、中間目標は2022年度末までに達成見込みである。

①-3「次世代 FT 触媒の実用化検討」

<研究開発成果>

量産製造での課題を抽出した。また、触媒メーカー調製品の性能評価を行い、開発試製品と同等性能を確認した。

<目標達成度>

2021年度は計画通りに進捗しており、中間目標は2022年度末までに達成見込みである。

研究開発項目②「再生エネルギー由来電力を利用した液体合成燃料製造プロセス技術の研究開発」

②-1「再生エネルギー由来電力を利用した合成ガス製造技術」

<研究開発成果>

PEECによるCO₂電解によるFT用合成ガス製造として、100cm²MEAでの検討を行い、CO生成ファラデー効率 $\geq 90\%$ 、劣化率 $\leq 3\%/1,000\text{h}$ となる単セル材料を見出した。

<目標達成度>

2021年度は計画通りに進捗しており、中間目標は2022年度末までに達成見込みである。

②-2「再生エネルギー利用合成ガス製造とFT反応を組合わせた液体合成燃料製造プロセス技術」

<研究開発成果>

合成ガス製造に利用する SOEC 共電解セルについて、基本特性を把握するとともに、CO₂ 共電解での SOEC 材料の劣化に関する基礎データを取得した。また、中間目標となる SOEC と FT を組み合わせた 10kW 級一貫製造ベンチ試験機の製作に向けた 10kW 級電解モジュールの基本設計を作製した。

<目標達成度>

2021 年度は計画通りに進捗しており、中間目標は 2022 年度末までに達成見込みである。

②-3「燃料利用技術」

<研究開発成果>

国内外より 10 種類の合成燃料を調達・分析し、中間目標となる既存燃料との相違点等を把握した。また、ガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンの合成燃料使用時の燃焼特性把握のための基礎データを取得した。

<目標達成度>

2021 年度は計画通りに進捗しており、中間目標は 2022 年度末までに達成見込みである。

参画機関の相乗効果が発揮、研究開発を強力に推進出来るように、下記のマネジメント体制を構築し、運営している。

○液体合成燃料研究開発委員会の設置による進捗管理および研究開発事業の推進

○液体合成燃料研究開発委員会の構成

本委員会の下に分野毎の研究 WG*を設置。

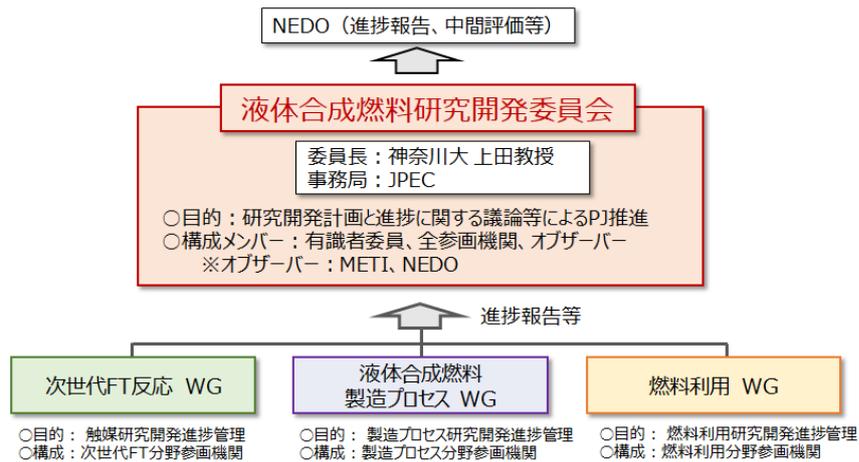
本委員会には、外部有識者委員にも参加頂いている。

*研究 WG：次世代 FT 反応、液体合成燃料製造プロセス、燃料利用の計 3 つ

○開催頻度

・液体合成燃料研究開発委員会：年 3 回（期初、期中、期末）

・研究 WG：月 1 程度



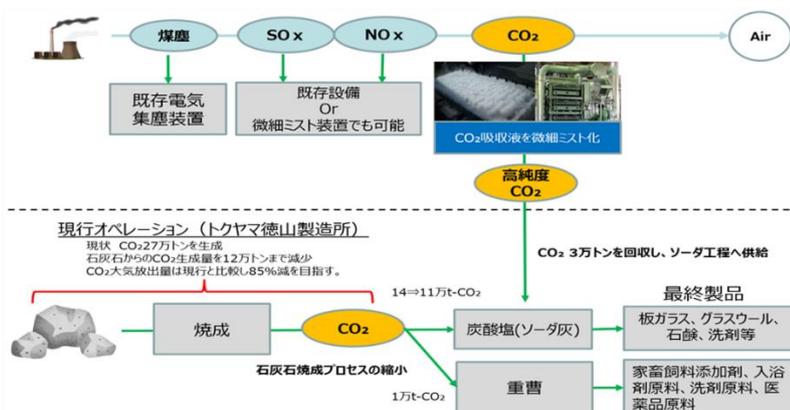
液体合成燃料研究開発委員会における登録委員

氏名	所属・役職
上田 渉	学校法人神奈川大学 工学部 物質生命化学科 教授
江口 浩一	国立大学法人京都大学 大学院工学研究科 物質エネルギー化学専攻 教授
工藤 昭彦	学校法人東京理科大学 理学部 応用化学科 教授
古谷 博秀	国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター 研究センター長
寺井 聡	東洋エンジニアリング株式会社 エンジニアリング技術統括本部 次世代技術開拓部 シニアリサーチエンジニア

s. 微細ミスト技術による CO₂ 回収技術及び炭酸塩生成技術の開発研究

➤ 個別事業概要

- 特殊な技術で微細な霧としたCO₂吸収液(微細ミスト)を用いて、石炭火力発電所から排出されるCO₂を吸収させ、高濃度のCO₂として回収する技術を開発する。
- 回収したCO₂は、炭酸塩(ソーダ灰)の原料として利用し、石灰石由来のCO₂と置き換えることで、工場全体のCO₂排出量削減を図る。

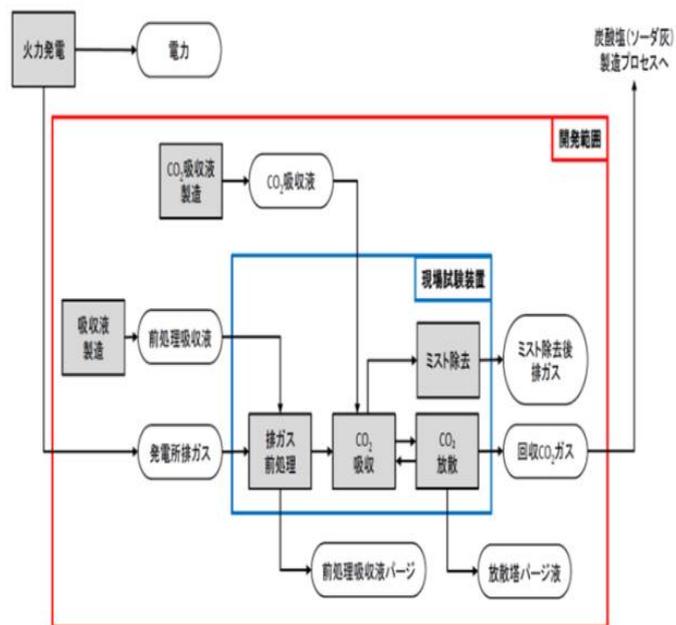


➤ 個別事業成果

CO₂分離回収技術で代表的なアミンによる化学吸収法では、火力発電所の燃焼排ガスなどの大気圧かつ低CO₂濃度のガスから純度の高いCO₂を回収する一方、高価格なアミン溶液やCO₂放散時の消費エネルギーが高いことが、技術普及の課題とされている。本研究開発において、微細ミスト技術によるCO₂吸収面積の拡大効果を活用し、炭酸ナトリウムや炭酸カリウムなどの比較的安価なアルカリや、株式会社トクヤマの徳山製造所やその周辺にある廃アルカリをCO₂吸収液候補として検討し、アミン法よりも省エネルギーとなるCO₂回収および利用技術の開発を行う。また、徳山製造所では、ソーダ灰製造工程において石灰石を焼成し、CO₂を年間27万トンを生成している。その内、原料として利用されるのは10万トンで残り、17万トンを大気放出している現状である。その為、石灰炉での焼成プロセスを縮小、石炭火力発電所からCO₂を3万トン回収し、ソーダ灰製造に利用することで、ソーダ灰製造におけるCO₂の大気放出量を年間2万トンに減らす。年間CO₂削減量18万トンの地球温暖化対策の取り組みを図る。本研究開発は、株式会社トクヤマの徳山製造所における石炭火力発電所から排出されるCO₂を、ナノミストテクノロジー株式会社がある微細ミスト技術にて回収・放散後、トクヤマのソーダ灰(炭酸ナトリウム)製造プロセスへ供給することで、カーボンサイクルビジネスの早期社会実装を図る。

本研究開発では、従来の化学吸収法よりコスト優位性を見出すべく、微細ミスト技術による化石燃料排ガスのCO₂を回収する技術開発、炭酸塩製造の既存プロセスへの適用検討、及び経済性・事業性の評価を行う。

	当初目論見(採択時)
対象排ガス	徳山製造所 石炭火力発電所
ガス中CO ₂ 濃度	12%
CO ₂ 回収量	3万トン/年
CO ₂ 回収率	90%
回収プロセス	CO ₂ 吸収：微細ミスト装置 CO ₂ 放散：充填塔/リボイラー
目標コスト	4,000円/t-CO ₂
実装時期	2025年度中



➤ 実施の効果（費用対効果）

投入予算に対して、従来の化学吸収法と比較し、低コストな回収技術が立証できた場合は効果的と判断される。一方、21年度の開発進捗においては、まだ低コストを立証できていないため、費用対効果の判断については、現時点では難しい状況。

➤ 個別事業成果

下記開発項目に分け、基礎技術の開発を実施。

①-1 モデル構築

開発項目②～⑥の技術開発、ラボスケールでの試験結果を反映し、マスバランスシートを作成し、課題を分析する

①-2 CO₂処理コストの低減

開発項目②～⑥のコスト情報を纏め、全体でのCO₂処理コストを設定する。

①-3 CO₂回収率の向上

開発項目②～⑥のCO₂吸収率に関する情報を纏め、全体でのCO₂回収率を設定する。

①-4 事業性評価

ラボスケールでの試験の内容を踏まえ、試算された開発コストを用いて、経済性検討を行う

①-5 LCA評価・検証

評価単位、評価範囲、評価対象とした環境影響範囲、評価条件の設定をラボスケールでの試験の内容を踏まえ、推計作業を行う。

②CO₂吸収前処理の検討

CO₂吸収処理を施す前に、煤塵処理後、脱硫処理後から、CO₂以外のNO_x、SO_x、水分、灰分など不純物を、更にCO₂吸収前処理として一定量除去する必要がある、処理方法を検討する。

③-1 CO₂吸収液・添加剤の開発

微細ミスト発生装置やCO₂吸収装置を用いてCO₂を吸収させるのに適した溶液を探索する。

③-2 廃アルカリ溶液の活用

廃アルカリより逆有償もしくは無償調達できるアルカリ溶液など、微細ミスト吸収法に適した吸収液の開発を行う。

④ 微細ミスト化装置の検討

ガス吸収の促進を目的として1振動子あたりの霧化速度を向上させるために、霧化槽の構造や周囲の構造の改良を行う(強制排気機構や流下式霧化槽構造等)。

⑤ CO₂吸収装置の開発

CO₂と微細ミストの反応効率を向上する装置を検討する。

⑥ CO₂放散条件の検討

複数の吸収液で放散条件を検討し、回収コストの低減を図る。

開発項目	21 年度目標 (最終目標)	成果状況
①-1 モデル構築	課題設定した液ガス比の向上が見られ、且つ低コストな回収プロセスの概念設計と基本設計を実施する。	各開発項目の開発が完了せず、全体プロセスの構築に至っていない。 対策として、微細ミスト吸収法に適したモデルの見直しが必要となる。一方で、液滴発生量を増加させるべく、液滴発生手法と装置構造の基礎技術開発が引き続き必要。
①-2 CO ₂ 処理コストの低減	ラボスケールの試験結果を踏まえたコストの再積算を行う。21 年度における微細ミスト発生部でのコスト目標は \$48/CO ₂ -ton。	液滴発生量が少ないことから、吸収放散をあわせた OPEX のみで、\$ 353~643/CO ₂ -ton。前処理コストや CAPEX がさらに加算される見込み。吸収のみの場合、\$ 257~546/CO ₂ -ton となる見込み。 対策として、安価かつ目標とする液滴発生量を達成すべく手法や装置構造の改善、吸収液再選定が必要。
①-3 CO ₂ 回収率の向上	ラボスケールでの試験結果を踏まえ、CO ₂ 処理効率の見直しを図る。22 年度以降の実証実験時点で CO ₂ 回収率 80%、商業化時点で 90% を目標。	①-2 コストの条件において CO ₂ 回収率(吸収—放散)は 25%~30% 台。液滴吸収のみに限定すると上記数値より低下し約 2.6%。 対策は①-2 と同じ。加えて、ガス側の前提条件(濃度等)の変更も考えられる。
①-4 事業性評価	収益性のある事業モデルの構築	複数収益シナリオ作成も、コストが共通課題。
①-5 LCA 評価・検証	2020 年度業務で作成した評価の枠組みを適宜修正し、CO ₂ 削減効果の推計。脱炭素に資する削減効果を目指す。	①-2 コストの条件において、CO ₂ 1 t 回収につき、CO ₂ 1.9t を要する。 対策は①-2 と同じ。吸収放散装置でのエネルギー低減策実施後、再試算。
②CO ₂ 吸収前処理の検討	酸露点を回避する熱交換器の選定、ガス相対湿度を 30%以下とする条件選定、NO _x ・SO _x を 70%以上除去する条件の特定を行う。	材料選定ならびに熱バランス検討に至らず。 今後は、各種条件を定めた上での実施が必要。
③-1 CO ₂ 吸収液・添加剤の開発	選定された吸収剤・吸収液を用いて試験を実行し、吸収剤と添加剤の候補選定を行う。	微細ミスト法に適する吸収液が未決定。 対策として、吸収速度が遅く吸収容量が大きい液を見つけるための調査、ラボ試験、検証の PDCA を継続実施。
③-2 廃アルカリ溶液の活用	廃アルカリ溶液による CO ₂ 吸収後の液について処理プロセスの検討と、技術的に実用可能の検討を実施する。	廃アルカリ溶液の活用手法が未決定。 今後は、鶏糞灰に特化し、廃アルカリ活用法を検討。液滴発生課題改善後に、検討を再開する。
④微細ミスト化装置の検討	微細ミスト装置(霧化装置)の性能向上を引き続き実施する。霧化効	霧化効率が良い条件は霧化速度が低い。反応槽の構造改良を行なった上で本事業のガス吸収試験(実機条

	率目標を 15g/Wh とする。	件に近い)では、21g/h、0.57g/Wh と低調。 今後は、大量・安価に液滴発生できる手法に移行する。
⑤ CO ₂ 吸収装置の開発	滞留槽内部の流体解析を実施するとともに、装置内サンプリング分析で気液の混合率を検証。	データ解析は実施、実機検証が未達。 今後は、滞留槽の体積を低減した装置小型化の設計を行う。
⑥ CO ₂ 放散条件の検討	放散の最適条件の検討、吸収液分析方法の確立。次年度実ガス試験の装置設計。材質選定のための腐食試験を実施。回収 CO ₂ 濃度 90%以上、放散率 70%以上	放散工程のみで放散エネルギー低減検討実施。回収 CO ₂ 濃度 90%以上、放散率 80%以上を達成見込みだが、吸収側プロセス未確定により全体プロセス最適検討、腐食試験未着手。

t. マイクロ波による CO₂ 吸収焼結体の研究開発 (CO₂-TriCOM)

➤ 個別事業概要

1. 事業の背景・目的・位置づけ

石炭火力発電所から排出される CO₂ を資源として捉えた炭酸塩等への CO₂ 利用技術の社会実装が望まれている。電気事業に伴い発生する副産物（石炭灰、廃コンクリート粉）を用い、炭酸塩化により CO₂ を固定化し、CO₂ 収支の面で優れる、土木材料の開発を実施する。

➤ 実施の効果（費用対効果）

本事業の研究予算は全体で約 3.8 億円となっている。2030 年度からの実用化後は、焼結体の製造販売で年間 1.25 億円、更に開発した焼結プラント設備を 1 基/年を目標に 2 億円程度で販売することで、年間 3.25 億円の経済効果が得られる見込みである。

➤ 事業の目標

本研究では、電気事業に伴い発生する産業副産物（石炭灰、廃コンクリート粉 等）のリサイクルにより CO₂ 吸収量 60kg-CO₂/t と収支面に優れる土木材料の開発を目的としている。電気事業に伴い発生する産業副産物（石炭灰、廃コンクリート粉等）のリサイクルにより CO₂ 収支面に優れる土木材料の開発を目的に、CO₂ 吸収焼結体による CO₂ 吸収量の最適化及び CO₂ 吸収焼結体の製造過程で発生する CO₂ 量の低減等の課題を解決し、商用化への見通しを立てる。

➤ 個別事業成果

1.

研究項目	21年度目標	進捗評価	課題と対応策
① -(a)石炭灰及び廃コンクリート粉の混合割合とCO ₂ 吸収量の関係性把握	先導研究レベルで、炭酸塩化によるCO ₂ 吸収量60 kg-CO ₂ /t以上を達成	△	【課題】 FAの混合割合を高めた状態でCO ₂ 吸収量が60 kg-CO ₂ /tを達成する 【対応策】 ・降温時のCO ₂ 吸収、焼結後のCO ₂ 吸収によるCO ₂ 吸収量の増（焼結体の促進炭酸化の実施）。 ※以上により、FAの混合割合を高めた吸収量60 kg-CO ₂ /tを達成する。
① -(b)CO ₂ 焼結体の物理・化学特性の把握（強度面、安全面（重金属の溶出）面等	先導研究レベルで、CO ₂ 吸収焼結体の品質確認（クリンカアッシュ相当）	○	重金属の溶出試験を実施し、土壤環境基準と海洋汚染防止の基準をクリアした。
②-(a)発電所排ガス等の熱利用等による使用エネルギー量削減の検討	先導研究（ベンチスケール）レベルで、②-(a), (b), (c)で合わせて、製造過程での使用エネルギー量削減によるCO ₂ 排出削減量226 kg-CO ₂ /t以上（消費エネルギーを50%削減）を達成	○	100万kWの石炭火力発電所の脱硝出口の排ガス（350℃程度）でFA等を予熱することで、消費エネルギーは約30%削減可能。
②-(b)鉄化合物等の添加によるマイクロ波の吸収効率向上に伴う使用エネルギー量削減の検討		○	鉄化合物添加の有無によるマイクロ波による加熱エネルギーを比較。添加量0.42%において、焼結エネルギーの10%以上の削減。
②-(c)Ca等の添加による融点低下に伴う使用エネルギー量の削減の検討		○	NaOH添加によって融点が低下する。焼結温度を低下させることで、消費エネルギー10%削減可能。
③-パイロットスケールレベル（小型プラント）での焼結体試作・評価	機械装置の製作、設置（実用化研究（パイロットスケール（小型プラント）レベルで、CO ₂ 収支167 kg-CO ₂ /t以下を達成）	△	【課題】 マイクロ波加熱炉の検討に時間を要したため、機械装置の据付が2022年6月に後ろ倒し。 【対応策】 据付完了後の試験計画を見直すことにより、2022年度目標に影響なし。
④-実用化に向けた課題の整理・検討	機械装置の基本諸元の提示（実用化（デモンストレーションスケール）のプラント設計に向けた課題整理と対応策を提示し、実用化の可能性について、見通しを立てる。）	○	300kW級のマイクロ波加熱装置が36台必要となる。計画通り検討中。

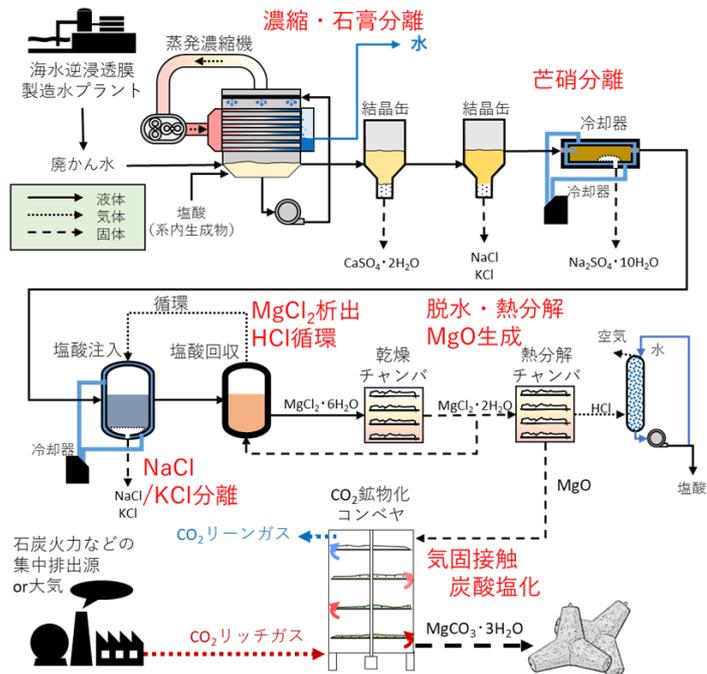
※2022年2月末での進捗

u. 海水および廃かん水を用いた有価物併産 CO₂ 固定化技術の研究開発

➤ 個別事業概要

- 海水および廃かん水※に含まれるマグネシウムを原料とし、CO₂ を炭酸マグネシウムとして固定化し、コンクリート製品の骨材などとして利用するまでの一連の技術を開発する。カーボンリサイクルと同時に軟水、石膏、芒硝、食塩、塩酸、肥料といった工業製品の併産が可能である。

※廃かん水：海水淡水化プラントの廃水



カーボンリサイクル技術のうち、Ca/Mg を利用した無機固定は長期の大気放散隔離が可能な CCS 代替となりうる技術であり、人口増と気候変動に伴う淡水需要増加にも対応すべく、海水および廃かん水からのマグネシウムによる炭酸塩とその利用技術へのニーズは高まる一方である。

➤ 実施の効果（費用対効果）

総額 3.2 億円で、わずか 2 年間で全ての目標を達成した。しかも、当該事業で導入した機材の大部分は今後予定する 20TPD の試験にも用いられるため、費用対効果は高い。

➤ 個別事業目標

廃かん水あるいは海水からの酸化マグネシウムの生成として、濃縮過程で蒸発濃縮、ナノろ過膜利用のいずれか、塩化マグネシウム生成で塩酸法、共飽和法、共飽和・溶融塩分離法のいずれかを選定し、酸化マグネシウムと CO₂ 含有ガスの気固接触反応による効率的な炭酸塩生成法を確立する。海水および廃かん水を用い、さらなる造水とともに、石膏、芒硝、食塩、肥料など有価物を併産しながら、塩化マグネシウム 6 水和物を経て CO₂ を含む排気ガスと気固接触にて炭酸マグネシウム 3 水和物を生成し、化学品やコンクリート等に利用するプロセスの確立する。

➤ 個別事業成果

① 廃かん水からの酸化マグネシウムの生成

①-1 蒸発濃縮プロセスの確立

<達成目標>

MgCl₂·6H₂O 主成分の溶液生成の最適条件の把握、濃縮晶析装置のパイロットテスト機を製作して、有価物と溶液の成分分析と純度を評価する。

「実績」

上記目標を達成済。

①-2 塩酸法

<達成目標>

製作した装置で塩化水素ガスを連続的に回収しながら、95%以上の MgCl₂·6H₂O スラリーを連続的に得て、それを脱水・熱分解して純度 98%程度の MgO を 3kg 程度製造する。

「実績」

連続的に純度 99.6%程度の MgCl₂·6H₂O スラリーを連続的に得た。さらに MgCl₂·6H₂O をスクリー熱分解炉にて純度 97%±1%の MgO を 3.4kg 製造した。

①-3 共飽和法

<達成目標>

実かん水で連続プロセスの成立性を確認し、97%以上の高純度 MgCl₂·6H₂O スラリーを得る。

「実績」

上記目標を達成済。実かん水を用いた 100 L 連続試験を実施し、分離後の溶液分析結果から評価した。分析の結果、スラリーの Mg 純度は 98%以上確保。

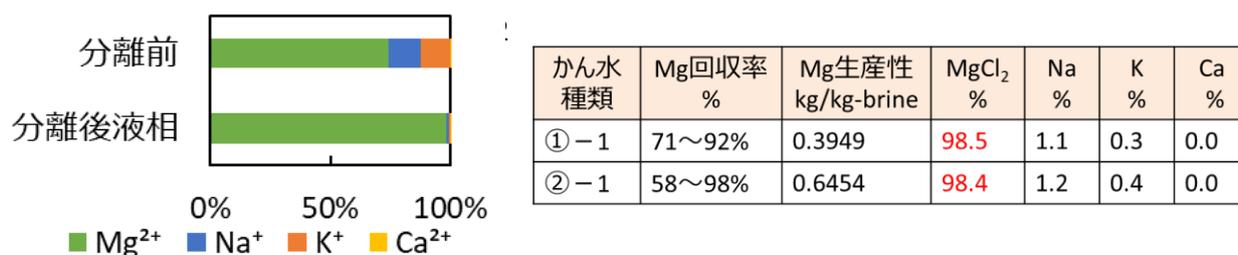


図 ①-3 共飽和法の連続試験結果

①-4 共飽和・溶融塩分離法

<達成目標>

実かん水のプロセスの成立性を確認し、加熱操作のみで 97%以上の高純度 MgCl₂·6H₂O スラリーを得られる。

「実績」

上記目標を達成済。実かん水を用いて蒸発および密閉加熱の二段階加熱操作のみで分離試験し、分離後の溶液を分析した。分析の結果、97%以上の Mg 純度を確保。

②ナノろ過膜（以下、NF膜）を用いた省エネルギー濃縮による MgCl₂・6H₂O 生成プロセス

②-1 ナノろ過膜濃縮水からの MgCl₂・6H₂O 生成

<達成目標>

石膏、NaCl、KCl、芒硝等の有価物と MgCl₂・6H₂O 主成分の溶液を回収し、その成分分析と純度を評価する。

「実績」

上記目標を達成済。高純度の MgCl₂ を含んだ最終溶液を回収可能であることを見出した(図)。

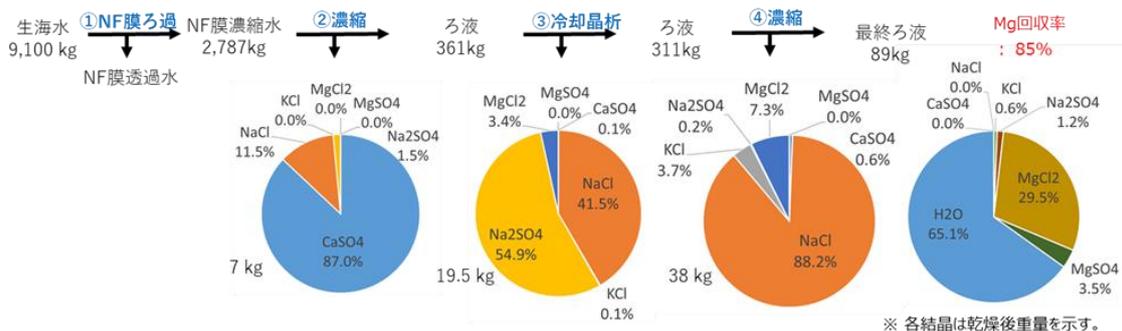


図 ②-1 パイロット試験による回収物組成

②-2 廃液ゼロ排出のナノろ過膜濃縮水からの MgCl₂・6H₂O 生成

<達成目標>

想定したプロセスにおける物質収支、熱収支および必要なユーティリティを算出する。

「実績」

上記目標を達成済。当初計画どおり、実証試験を想定したプロセスにおける各種試算を行った。

③酸化マグネシウムと CO₂ 含有ガスの気固接触反応による効率的な炭酸塩化

<達成目標>

概念設計を基に詳細に設計・製作した連続試験装置でほぼ 100%の鉱物化率の炭酸マグネシウムを得る。

「実績」

上記目標を達成済。反応済み層の研削と加湿で反応加速のための連続鉱物化装置を設計・製作し、100%鉱物化率の炭酸マグネシウム 7 kg を連続的に得た。

④炭酸マグネシウムの実用性評価

④-1 コンクリート骨材としての実用性評価

<達成目標>

所要の目標強度が与えられた場合の炭酸マグネシウムコンクリートの配合設計法を確立し、当該材料を用いる場合の留意点を整理する。

「実績」

スランプ試験を通したワーカビリティ評価、圧縮強度発現の変化を実験的に観察した。セメント質量で炭酸マグネシウム置換 1%であれば通常コンクリートと同等の圧縮強度を発現。炭酸マグネシウムを含むソレルセメントを細骨材とした鉄筋コンクリート（RC）梁の構造実験では破壊モードや破壊荷重に有意な差は生じないことを確認し、本材料を RC 構造体へ適用できる可能性を確認した。

④-2 その他炭酸マグネシウムの直接利用の用途調査と実用性評価

<達成目標>

・炭酸マグネシウムの用途別の要求仕様の概略を把握。

「実績」

技術的にも、市場規模的にも石膏ボード代替が有望であり、炭酸マグネシウムを用いた石膏ボード代替品の試験片の試作および強度評価を実施、⑤の FS には価格も反映させた。

⑤商業機に向けたプロセス検討・Feasibility Study

⑤-1 商業機の Feasibility Study の実施

<達成目標>

スケールアップが必要な要素技術について、商業化への課題を把握する。ラボ試験結果に基づいて物質収支・熱収支、ユーティリティ使用量から実質の CO₂ 固定量を算出するとともに、技術的および経済的な実現可能性の見通しを得る。

「実績」

課題としては、MgO 生成キルンにおける材料および炭酸マグネシウム生成用粉砕機における付着防止である。LCA 検討による副生物として塩酸を考慮する場合の CO₂ 削減効果は約 20 万 ton-CO₂/(年・プラント)、CO₂ 削減ポテンシャルは約 1.2 億 ton/年となった。実質 CO₂ 固定化量が 0 以上となるためのエネルギー由来の許容 CO₂ 排出係数は 1,540 g-CO₂/kWh(塩酸販売有り)で、系統電力を用いても十分 CO₂ 削減効果があると考えられる。製品・副生物の販売益 > 運転費 が見込まれ、現段階では実現可能性があることが確認できた。

⑤-2 大崎上島におけるパイロット試験など、実証試験を想定したプロセスおよび設備の基本設計

<達成目標>

実証試験を想定したプロセスおよび設備の PFD、物質収支・熱収支、ユーティリティ使用量を作成する。

「実績」

実証試験を想定したプロセスおよび設備のPFD、物質収支・熱収支、ユーティリティ使用量を作成した。主要機器については、仕様についての取りまとめを行った。

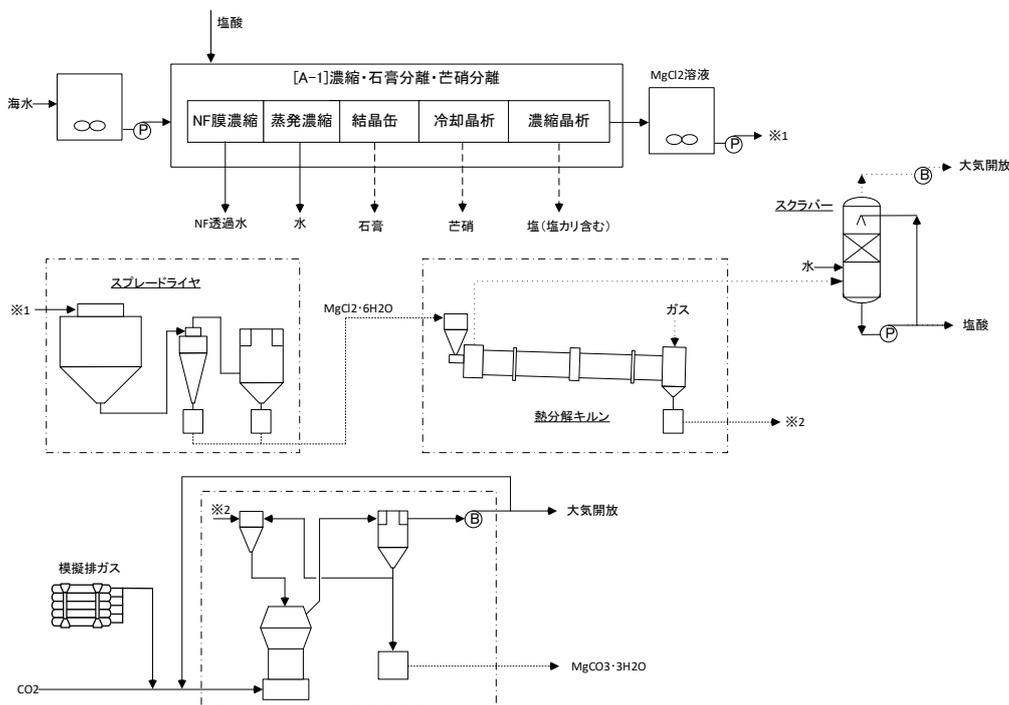
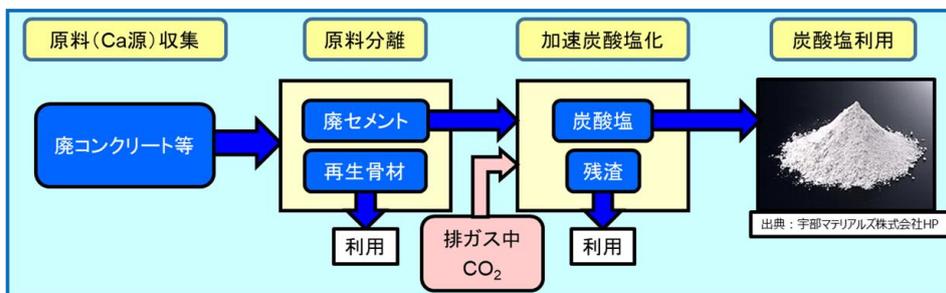


図 ⑤-2 実証試験を想定したプロセスフロー

v. 産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発

➤ 個別事業概要

- 廃コンクリート等からカルシウムを抽出し、排ガス中のCO₂と反応させて固定化させる技術を開発する。カルシウム分の抽出と炭酸塩化の効率を高め、加速させるため、加速炭酸塩化技術について検討を行う。炭酸塩の高付加価値化を進めるとともに、炭酸塩とカルシウム抽出後の残渣を建築・土木材料、各種工業材料等の資源として大量に活用することを目指す。



発電所等から排出されるCO₂と産業廃棄物から抽出したカルシウムイオンとを反応させる炭酸塩化技術を開発・実用化することで、CO₂排出量削減に貢献することを目的とする。このプロセスはCO₂フリー水素の利用を前提としないため、本プロセスのみでCO₂の固定化が可能であり、かつ比較的早期の実用化が期待できる。

➤ 実施の効果（費用対効果）

本プロジェクト費用の総額は11.4億円である。CO₂フリーの炭酸塩の市場が拡大し、かつ対象とする廃棄物(原料)の年間排出量の10%を炭酸塩製造に使えるとすると、市場は年間400億円のポテンシャルがあると算出され、費用対効果は非常に高いと言える。

➤ 個別事業目標

原料（廃棄物）から生産物（炭酸塩および副産物）までの流通経路も加味した炭酸塩化プロセスを構築し、ベンチスケール試験による正味のCO₂固定量（CO₂固定化量-CO₂排出量）および経済性を評価し、採算性を確保できるビジネスモデルの構築を目指す。

発電所等から排出される排ガス中CO₂を産業廃棄物から抽出したカルシウムイオンにより炭酸塩として固定する技術を開発する。また、廃棄物の性状および収集に関する調査、生産される炭酸塩等の利用技術も検討する。

➤ 個別事業成果

1. 廃棄物からのカルシウム源の確保に関する検討（計画通り進捗）

産業廃棄物の処理手法、性状、関連業者の立地の情報を集め、サプライチェーン構築のために、廃棄物処理業者と協議する上での必要情報を把握した。

2.1. CO₂炭酸塩化技術（手法1）の開発

2.1.1. CO₂炭酸塩化の要素技術開発（計画通り進捗）

ラボ試験により、エンジニアリングデータを取得し、ベンチプラント設計に反映させた。また、原料中の不純物元素（21元素）の挙動を測定・把握した。

2.1.2. エンジニアリングデータ取得（計画通り進捗）

各種CO₂排出源の排ガス性状を把握した上で、プロセス全体のシミュレーションに必要である、想定不純物(S分)の系への影響を、平衡計算により把握した。

2.1.3. ベンチ試験装置概念設計（計画通り進捗）

ラボ試験で得られたデータを基に、スケールアップ手法を確立し、ベンチ装置の概念設計を行った

2.2. CO₂炭酸塩化技術（手法2）の開発

2.2.1. 要素技術開発（計画通り進捗）

各ステップの効率アップの方策について検討し、プロセスシミュレータの概念設計を行った。

2.2.2. エンジニアリングデータ取得（計画通り進捗）

ラボ試験により、ベンチプラント設計のためのエンジニアリングデータを取得した。加えて、排ガス吸収液、廃棄物からのカルシウム抽出液の不純物同定と影響の評価を行い、改良プロセスを提案した。商業化に向けては、CO₂固定化量と経済性面改善が課題であり、2022年度は実験検討を中心に、改良プロセスの確立と技術実証を実施する。

2.2.3. ベンチ試験装置概念設計（計画通り進捗）

ラボ試験で得られたデータを基に、スケールアップ手法を確立し、ベンチ装置の概念設計を行った

3. 炭酸塩および副産物の用途開発

3.1. 既存市場への適合性検討（計画通り進捗）

炭酸塩については、品質を把握し、各種フィラーへの適用可能性を評価し、基本品質を満足することを確認した。また、副産物については、適用可能性の調査として、コンクリート用骨材の規格調査を行った。引き続き、想定する用途先ユーザーからの情報収集を行う。

3.2. 事業性評価（計画通り進捗）

サプライチェーンに係る企業にヒアリングを行い、炭酸塩および副生物の販売・普及等における課題を把握した。

4.1. プロセス構築のための条件設定、LCA 評価（計画通り進捗）

- ・ ラボ試験結果に基いたプロセス全体の経済性評価のアップデートおよび LCA 評価
- ・ ベンチ試験装置について、物質収支・熱収支、Process Flow Diagram、P&ID、機器リスト、用役リストの作成
- ・ ラボ試験結果に基いての、商業プラントの物質収支・熱収支、Process Flow Diagram、機器リスト、用役リストのアップデート

を行った。

4.2. プロセス構築・コスト評価（計画通り進捗）

- ・ 商業プラントの Plot Plan の作成
- ・ 商業プラントの設備費の概算

- ・ ベンチ試験装置のプロセス構築に必要なベンダー調査
- ・ ベンチ試験装置についての Plot Plan の作成
- ・ ラボ試験結果に基づいての、商業プラントの Plot Plan、設備費のアップデートを行った。

5. 海外調査

本事業の手法 2 と類似した米国の技術（酸によって廃棄物中カルシウムを抽出し CO_2 と反応させることにより炭酸カルシウムを製造）について調査を行うため、本事業で使用したものと同一廃コンクリートを用い固定化実験を実施した。

2.3 研究開発の運営管理

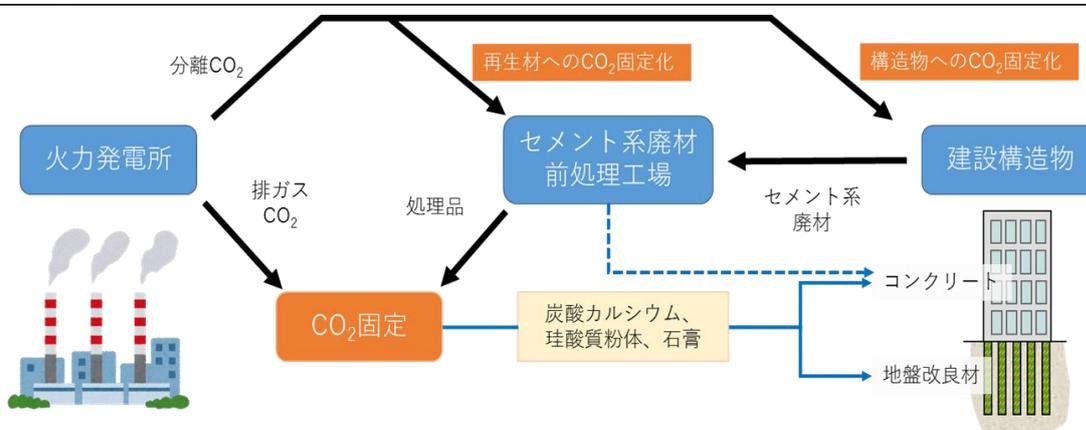
廃棄物からのカルシウム源の確保に関する検討は出光興産(株)が担当する。加速炭酸塩化技術の開発は、手法 1 については宇部興産(株)及び、東北大学が、手法 2 については出光興産(株)及び成蹊大学がそれぞれ担当し、日揮ホールディングス(株)及び日揮(株)は、炭酸塩化プロセスの構築、概念設計、コスト評価、LCA 評価を実施する体制を取った。定期的な進捗報告会等を全体及び技術ごとに行い、目標に向けた情報共有化を行った。

外部有識者による委員会は設置していない。

w.セメント系廃材を活用した CO_2 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究

➤ 個別事業概要

- セメント系廃材を前処理することにより、火力発電所の排ガス中の CO_2 を効率的にセメント系廃材に固定する技術を開発する。
- CO_2 を固定化した副産物に含まれる炭酸カルシウムおよび珪酸質の粒子の特性を活かして、コンクリートや地盤改良体といった建設資材として有効利用する技術を開発する。
- CO_2 の固定化を通してコンクリートおよび地盤改良体の高品質化を図る。



本事業では、石炭火力発電所から大量に排出され課題となっている CO₂と、建設分野でリサイクルが進んでいないセメント系廃材中に含まれるセメント由来のカルシウム成分を反応させ、炭酸塩として CO₂を固定化する。これにより、CO₂の排出削減と同時に、建設分野でのセメント系廃材のリサイクル促進、CO₂を固定化した副産物の建設分野での有効利用を実現することで、両分野の課題解決を図ることを目的とする。セメント系廃材としてはコンクリート廃材が主であり、コンクリートへのリサイクルを考えていたが、本事業では地盤改良系の廃材、地盤改良へのリサイクルについても検討する。

石炭火力発電所からの CO₂を多く含む排ガスが大量に放出されており、排出削減が課題となっている。一方で、建設分野では、セメント系廃材（コンクリートや地盤改良体）が年間 3700 万トン発生しており、99%がリサイクルされているというものの、用途は路盤材でありダウンサイクル利用の状態である。年間 4200 万トンの新たに製造されたセメントが、新たにストックとなっている。セメント系廃材から骨材を取り出し、再生骨材としてリサイクルする技術は実用化されているものの、再生骨材を製造する際に 3~4 割程度発生する微粉の用途が無く処分に困ることや、3~4 割程度得られる再生細骨材の品質を構造物に利用できるレベルまで高めるためには多量のエネルギーを要することから、普及していない。

➤ 実施の効果（費用対効果）

年間 3,700 万トン発生するコンクリート廃材の CO₂ 固定ポテンシャルは最大 270 万トン-CO₂ 程度、同様に年間 4200 万トン生産されるセメント（コンクリートおよび地盤改良用）は、2,000 万トン-CO₂ 程度の CO₂ 固定ポテンシャルを有している。また、これまでに構造物としてストックされたコンクリートや地盤改良を含めるとこの何十倍という莫大な CO₂ 固定ポテンシャルを有している。一方で、120 万 kW 級の火力発電所から年間 320 万トン-CO₂ が発生する。全国の火力発電所での CO₂ 発生量を考えると、建設分野での有効利用する観点でいえば十分な CO₂ 供給量といえる。

コンクリート廃材が多く発生する場所近傍での火力発電所を選定する等、適した立地条件で事業化を計画することで経済性が確保できると想定される。

ラボレベルの検討段階であり、実用化開発、実証フェーズまで進展していないことから、現時点での費用耐効果の評価は困難であるが、2050 年にカーボンネガティブコンクリートを実現するためには必須の技術であり、技術の普及が期待される。本開発材料を用いたコンクリートの適用量を 2030 年 5000m³、2040 年 5 万 m³、2050 年 50 万 m³と仮定すると、コンクリート価格に占める本開発製品の売上高は 0.1 億円、1.1 億円、10.5 億円（2050 年累積 60 億円超）、CO₂ 削減量は 250、2500、25000t-CO₂/年となり、実施の効果は期待できる。

➤ 個別事業目標

石炭火力発電所からの排ガスに含まれ現状はそのまま放出されている CO₂を、セメント系廃材（コンクリートや地盤改良体）を分離処理することで効率的に CO₂を固定処理する技術を開発し、CO₂ 固を

定処理で得られた副産物を再びコンクリートや地盤改良材の原料として循環利用を実現する。排ガス中の CO₂ とセメント系廃材を資源と捉え、建設資材としての循環型利用を実現する。また、火力発電所等から分離回収された高濃度 CO₂ をコンクリートや地盤改良体に作用させ、CO₂ を固定すると同時にコンクリートや地盤改良体を高性能化・高品質化を実現する。

➤ 個別事業成果

CO₂ の建設分野での有効利用を目的として、以下の 4 つの研究開発を行う。

- ① コンクリートや地盤改良体といったセメント系廃材中に含まれるカルシウム源に、CO₂ を固定することで得られた副産物を、コンクリートや地盤改良の品質や性能向上に資する材料として循環利用する研究
- ② CO₂ 固定した副産物の建設資材への利用技術開発
- ③ 回収 CO₂ を利用した建設材料の性能向上研究
- ④ 建設分野における CO₂ 固定材料の事業化検討および LCA 評価

①セメント系廃材からのカルシウム源分離と CO₂ 固定化研究

①-1 セメント系廃材の分離技術の研究

①-1-1 コンクリート廃材起源の細粒の分離技術

コンクリート塊（解体コンクリート）から CO₂ 固定能力を有するセメント成分を回収するためにセメント硬化体を多く含む微粉と再生骨材への分離試験を行った。原料となるコンクリート塊を粉砕原理が異なる 3 種類の装置で粉砕処理して再生細骨材および微粉を回収した。その際、粉砕処理条件を変化させた。粉砕処理条件と再生細骨材および微粉の品質には関係があり、処理時の装置の電力量が再生細骨材の品質に影響すること、コンクリート塊種類により同様の処理条件でも得られる再生骨材および微粉の品質は異なることが確認できた。処理時間が長いほど再生細骨材の品質が向上するが、再生細骨材の回収率は低下して微粉の回収率が増加することが認められた。微粉については、CO₂ 固定に有用なセメント成分と CO₂ 固定に不要な骨材成分が混在しており、分級により粒径が小さい微粉を回収するほどセメント成分が多くなるが回収率は低下するため、コンクリート塊全体から回収できるセメント成分は分級しない方が多くなった。また、セメント成分の一部は既に炭酸化していること、微粉の成分と再生細骨材の品質の関係を把握した。

①-1-2 地盤改良体起源の細粒の分離技術

セメント系地盤改良中の CO₂ 固定能力を把握するため、XRD 試験による水和物の種類に基づき CO₂ 固定能力を推定した。また、TG-DTA 試験により、地盤改良体を炭酸化させることにより、CO₂ 固定能力量を測定した。地盤改良体の CO₂ 固定能力は、地盤改良体構築時のセメント使用量に依存し、50～90kg-CO₂/m³ の固定が可能であることを把握した。また、CO₂ 固定能力は地盤改良体

の解体粒径に依存し、粒径を 20mm 以下とすると、CO₂ 固定能力に及ぼす影響が小さいことが判った。

① -2 微粉を用いた CO₂ 固定プロセスの研究

試作したセメントペースト微粉およびコンクリート塊からの回収微粉を対象に、湿式での CO₂ 固定化を検討した。スラリー溶液に CO₂ ガスを吹き込むことで CO₂ 固定する試験を、ビーカーレベルの検証から、20L 規模のラボレベル試験装置で実施した。セメントペースト微粉およびコンクリート塊からの回収微粉とも、CO₂ を固定し、一定時間反応させることで、セメント水和物中の水酸化カルシウムは完全に炭酸化する、ケイ酸カルシウム水和物（CSH）の一部も炭酸化する、CO₂ 固定後は微粉の密度が高くなることが認められた。同一条件で CO₂ 固定した場合でもコンクリート塊の種類により CO₂ 固定量が異なること、今回の CO₂ 固定試験条件では未反応分が残ることが確認された。供用～回収過程での CO₂ 固定量も含めると、セメント成分が約 50%の微粉 1ton で、100kg-CO₂ 程度の CO₂ 固定が可能であることが確認できた。

ビーカーレベル、20L 規模ラボレベル試験での反応条件を整理し、2021 年度に 2m³ の反応槽 2 基からなるベンチスケールの装置を製作した。

①-3 再生骨材への CO₂ 固定プロセスの研究

再生細骨材の骨材表面に付着したセメント硬化体を、乾式条件および湿式条件で炭酸化する（CO₂ 固定）して性質を向上させる（改質再生細骨材）検討を行った。いずれの方式でも CO₂ 固定により骨材の品質が改善できることが確認された。乾式条件では、CO₂ 固定期間や CO₂ 濃度の影響があること、CO₂ 固定前の再生細骨材の品質が低い場合に CO₂ 固定による品質改善の程度が大きくなることが確認できた。また、CO₂ 固定により明確に炭酸カルシウム量が増加し、CO₂ 固定期間が長いほど炭酸カルシウム量が増加する傾向が認められた。湿式条件は、微粉の CO₂ 固定化試験で用いた各規模の試験装置を用い、CO₂ 固定による改質の程度が乾式条件よりも小さく、乾式条件と湿式条件で炭酸カルシウムの結晶種類の割合に違いがあることが認められた。供用～回収過程での CO₂ 固定量も含めると、再生細骨材 1ton で、40～70kg-CO₂ 程度の CO₂ 固定が可能であることが確認できた。

② CO₂ 固定した副産物の建設資材への利用技術開発

②-1 副産物のコンクリート材料への利用技術の研究

②-1-1 CO₂ 固定微粉を用いた高流動マスコンクリートの研究開発

試作した CO₂ 固定微粉を用い、モルタルおよびコンクリートで、フレッシュ性状および硬化性状を評価した。その結果、いずれの CO₂ 固定微粉を用いても、分散剤を用いることで流動性の制御が可能であること、高流動コンクリートに必要な分離抵抗性を確保できること、強度増進が期待できること、同じ圧縮強度では低発熱性が期待できること、ヤング係数は圧縮強度が同じなら同等であること、成分調整

により収縮が低減できることなどが確認できた。ラボレベルで、CO₂ 固定微粉の高流動マスコンクリートへの活用の有効性が確認できた。

②-1-2 改質再生細骨材を用いた構造体コンクリートの研究開発

CO₂を固定処理した改質再生細骨材の試作品を用い、モルタルおよびコンクリートの試験を行い、フレッシュおよび硬化性状を評価した。その結果、中品質再生骨材を原料として試作した改質再生細骨材を用いたモルタルおよびコンクリートは、原料の中品質再生細骨材 M を使用した場合と同程度の圧縮強度発現性とヤング係数が得られること、収縮も概ね同程度であることが確認できた。ラボレベルで、適用部位を限定すれば、改質再生細骨材のコンクリート構造体への利用できる可能性が確認できた。

②-2 副産物の地盤改良体への利用技術の研究

②-2-1 CO₂ 固定微粉を用いたセメント系地盤改良材に関する研究

CO₂ 固定再生微粉の添加が、セメント系地盤改良体の初期・長期強度に及ぼす影響を試験室において調査した。CO₂ 固定再生微粉の添加量、地盤種類、セメント使用量などを変化させ、強度試験を実施した。CO₂ 固定再生微粉の添加により、地盤改良体の初期および長期（材令 28 日）強度が増加することを確認した。また、CO₂ 固定再生微粉の添加量を増加させるほど強度増進効果が高いことが判った。CO₂ 固定再生微粉を添加した地盤改良体に対して、XRD 試験および細孔分析試験により、微粉の添加により水和物量が増加していること、また高炉 B 種セメントでは見られない水和物であるエトリンガイトが生成していることを確認し、強度増進の要因を把握した。

CO₂ 固定再生微粉の添加により、セメントスラリーの流動性等の施工性に及ぼす影響を調査した。CO₂ 固定再生微粉をセメントに対して 60%～70%程度用いる範囲においては、施工性に及ぼす影響が小さいことが判った。70%以上添加する場合、流動化剤を用いることにより施工性が向上する可能性を把握した

②-2-2 改質再生細骨材を用いたサンドコンパクション材に関する研究

CO₂ 固定再生細骨材の材料特性（密度、粒度分布、含水比）および締固め特性、強度を試験室において調査した。また、サンドコンパクションパイルは地盤の地下水以下の環境におかれるため、CO₂ 固定再生細骨材からの重金属の溶出特性の調査も実施した。材料特性、締固め特性および強度特性の調査結果より、CO₂ 固定再生細骨材はサンドコンパクションパイルへの適用が可能であることを把握した。また、重金属の溶出試験より、六価クロムおよびフッ素の溶出が確認された。重金属の溶出防止のための固化方法および固化させたサンドコンパクションパイルの適用先の検討を行った。なお、重金属の溶出試験および溶出防止のための検討は継続する事業において実施予定である。

③回収 CO₂ を利用した建設材料の性能向上研究

③-1 コンクリート硬化体への固定化の研究

分離回収した CO₂ をコンクリート構造物に固定化することによる強度増進、効率的な CO₂ 固定化工法および CO₂ 固定化した硬化体からのアルカリ溶出の抑制効果について、ラボレベルで検討した。その検討の結果、CO₂ ガスを作用させる条件によっては最大で圧縮強度が 1.6 倍になること、合成繊維をコンクリート中に混入することで CO₂ ガスの浸透経路ができ、内部まで CO₂ を浸透できること、CO₂ 固定化した硬化体からのアルカリ溶出による pH 変化は小さいことが確認された。

③-2 地盤改良体への CO₂ 固定による性能向上に関する研究

地盤改良体を試験室において作成し、CO₂ ガスをバブリングした水槽に浸漬し、炭酸カルシウム析出量を調査した。試験においては、セメント使用量、セメントの種類、地盤種別および CO₂ 濃度を変化させ、炭酸カルシウム析出量や圧縮強度に及ぼす影響を調査した。地盤改良体表面から CO₂ を吸収し、地盤改良体中に炭酸カルシウムを生成することが判った。また、CO₂ 吸収の速度は、セメント種類にもよるが表面から 5mm~12mm/1 カ月程度であり、CO₂ 吸収速度の促進が課題あることが判った。

④建設分野における CO₂ 固定材料の事業化検討および LCA 評価

④-1 事業化に関する調査検討

④-1-1 国内火力発電所に関する調査

国内石炭火力発電所の MAP 化、排ガスの処理設備や排ガス成分等の文献調査および電源開発株式会社へのヒアリング、最新の排ガス処理技術に関する文献調査を実施した。細粒（セメント系廃材）の大量発生地である都市部からは石炭火力発電所の立地は少し離れているといった状況や、排出ガス中の CO₂、SO_x、NO_x、ばいじんの含有量の情報収集、大崎プロジェクトで取り組まれている IGCC やアンモニア混焼の情報収集を把握した。

④-1-2 CO₂ 固定プロセスに活用するセメント系廃材に関する調査

コンクリート構造物解体時のコンクリート塊や地盤改良体の解体・排出状況のヒアリングを行い、セメント系廃材の発生状況と将来予測を行った。具体的には国内のセメント生産量の経年値や、生コンクリート生産量の経年値、地盤改良施工量の経年値、コンクリート塊搬出量の経年値、建設残土排出量の経年値を調査し、直接調査対象とする文献や資料がないものについては、建設投資額の経年値等から推計を行った。

④-1-3 CO₂ 固定プラントの設置場所候補リストの作成

後述の項目④-2 の検討を通じて、具体的な事業地を 3 か所想定した。

④-2 CO₂ 削減効果の評価と事業化の概要検討

想定した事業地における LCA の検討および事業採算性の検討に必要な情報を収集し、現時点で想定可能な項目と今後の実証的な実験を通じて把握すべき項目を整理した。

④-3 LCA の評価

④-3-1 事業化時の LCA 評価における境界の設定

基本的な LCA 評価の境界（バウンダリ）を検討するため、火力発電所構内又は隣接地で微粉製造と CO₂ 吸収の事業を行うケース、セメント系廃材の処理場隣接地で微粉製造と CO₂ 吸収の事業を行うケース、セメント系廃材の処理場隣接地で微粉製造を行いつつ火力発電所構内又は隣接地で CO₂ 吸収の事業を行うケース、火力発電所以外の CO₂ 排出事業者の排出ガスを利用するケースについてバウンダリ（LCA 評価の境界）を設定した。

④-3-2 事業化時のインベントリ分析

④-2 および④-3-1 で検討・整理した情報に沿って LCA のインベントリ分析を実施した。2021 年度の時点では実証実験フェーズのデータは入手できないので基礎研究のデータから推定可能な情報を収集し、インベントリ分析の状況として整理した。

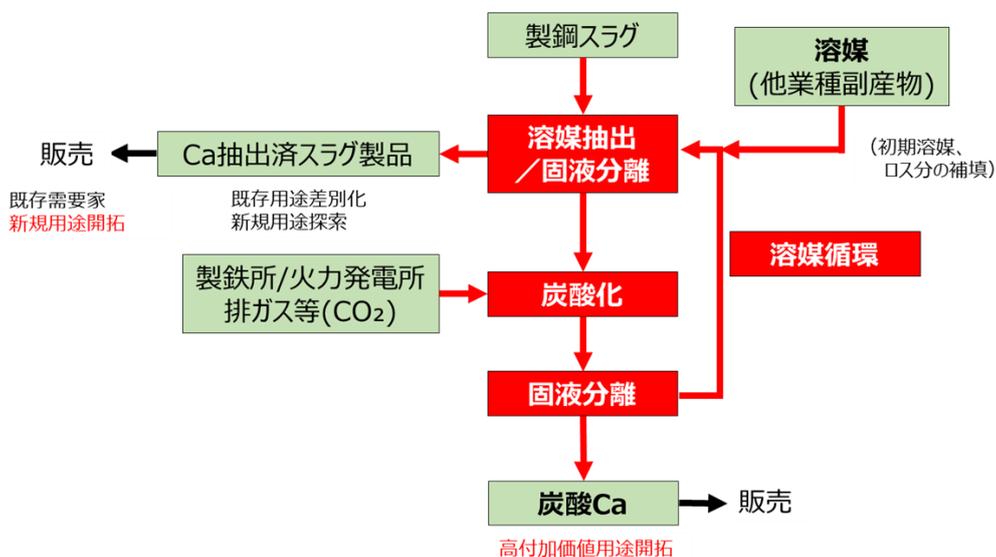
④-4 まとめ

④-1～④-3 に関して 2021 年度までに得られた調査結果および検討結果を事業収支および LCA 検討に関する情報として整理した。

x. 製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO₂ 固定化プロセスの技術開発

➤ 個別事業概要

- 製鋼スラグ中のCaを他業種で副産物として発生する有機溶媒等で高効率に抽出することを特徴とする新規CO₂固定化プロセスを開発し、CO₂削減・地球温暖化抑制に貢献する。また、生成物は品質を向上させ、資源として有効活用する。



本事業では、製鋼スラグ中の Ca を溶媒中で抽出し CO₂ を固定化する新規プロセスの要素技術を開発するとともに、生成物の高付加価値化を図ることで、競争力のあるプロセス及びサプライチェーンの構築を図る。

➤ 実施の効果（費用対効果）

本取り組みにより、製鋼スラグや副生グリセリンなどの産業界の副生物に CO₂ を固定化する技術が開発されることで、競争力のあるプロセス及びサプライチェーンが構築され、カーボンリサイクル製品の普及に貢献できる。

➤ 個別事業目標

<最終目標（予定）>

- ・ BSU 試験装置での模擬連続プロセス試験により、連続プロセス要素技術を確立する。（f-CaO 抽出率 75%以上、溶媒回収率:95%以上）
- ・ 要素技術組み合わせによる全体プロセスフローの構築とプロセス生成物用途の見極めにより、想定されるビジネスモデルを構築する

<設定の根拠>

本目標の達成により、連続プロセスを想定したビジネスモデルを検討し、経済性を試算することで、次フェーズである PP フェーズへの移行可否が判断できる。

➤ 個別事業成果

本事業は、製鉄スラグ中の Ca 成分を溶媒中で高効率に抽出し、得られた Ca 抽出液に CO₂ を固定化し炭酸 Ca として抽出分離する技術について、プロセス要素技術を開発しかつ生成物の高付加価値化を検討することで、実用化を図るものである。

テーマ名：製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO₂ 固定化プロセスの技術開発

2021 年 10 月より本格的な研究に着手し、中間目標に対し以下の結果を得た。

中間目標	成果
<ul style="list-style-type: none"> ・ ラボスケールおよび小型装置での試験により得られたスケールアップデータと生成物（Ca 抽出済スラグ、炭酸 Ca）の品質評価結果に基づき、BSU 試験装置の仕様を決定する。 ・ プロセスにより得られる Ca 抽出済スラグおよび炭酸 Ca の有効利用用途への適用可能性を調査する。炭酸 Ca については、当面の品質目標を樹脂用重質炭酸 Ca 並みと設定し、ビジネスモデルを検討する。なお、炭酸 Ca の品質目標値は進捗に応じて見直しを行い、BSU 試験装置の仕様に反映する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ラボスケールでの試験結果を基に、BSU 装置のベースとなる小型試験装置の仕様を決定した。 ・ Ca 抽出済スラグおよび炭酸 Ca の市場調査を行い、目標性状を決定した。

研究開発項目①-1「スラグからの Ca 抽出技術の開発」

2021 年度の目標は、ラボスケール試験にてスラグ性状、抽出条件・方法と Ca 抽出効率の関係とスラグ微粉、抽出される微量不純物が炭酸 Ca に与える影響が把握され、微粉抑制、微量元素除去などの検討が可能なスラグ量十 kg 規模の小型試験機の仕様決定、基本設計が終了していることであった。これに対し、ラボスケール試験にて、溶媒濃度、固液比と Ca 抽出効率の関係を調査し、その結果に基づき小型試験装置の仕様を決定した。また、スラグから抽出される微量不純物がプロセスに与える影響を調査した。更に、溶媒調達先に係る調査を実施し、候補溶媒の調査・選定を実施した。2022 年度は小型試験機での試験結果を基に、BSU 試験装置の仕様を決定する。

(現在の達成度 60% : 中間目標達成見込み)

研究開発項目①-2「炭酸化技術の開発」

2021 年度の目標は、ラボスケール試験にて炭酸化条件、CO₂ 含有排ガスなどに含まれる不純物ガスが CO₂ 吸収、炭酸化反応、炭酸 Ca 性状に与える影響を把握し、ガス吸収塔の調査結果も反映させて数十 L 規模の小型炭酸化試験装置の仕様、基本設計が終了することであった。これに対し、ラボスケール試験にて、炭酸化条件が CO₂ 吸収、炭酸化反応、炭酸 Ca 性状に与える影響を調査し、その結果に基づき小型試験装置の仕様を決定した。また、CO₂ 含有排ガス中に含まれる不純物を把握した。2022 年度は小型試験機での試験結果を基に、BSU 試験装置の仕様を決定するとともに、ガス中不純物の影響について調査する。

(現在の達成度 60% : 中間目標達成見込み)

研究開発項目①-3「溶媒循環技術の開発」

2021 年度の目標は、ラボスケール試験にてスラグ、炭酸 Ca および溶媒の物質収支データを取得し、小型抽出試験装置、小型炭酸化試験装置での溶媒循環に関する試験計画を決定することであった。これに対し、ラボ試験にて、Ca 抽出後スラグからの溶媒回収方法を検討し、小型試験装置を用いて実施する溶媒循環に係る試験計画を策定した。2022 年度は小型試験機をベースとした溶媒循環試験を行い、BSU 試験装置での検証方法を決定する。

(現在の達成度 50% : 中間目標達成見込み)

研究開発項目①-4「全体プロセスの検討」

2021 年度の目標は、ラボスケール試験に基づいた主工程に関する全体プロセスフローの第一案を決定するとともに、事業性に影響する各種調査に着手し、炭酸塩の市場動向については調査結果が得られていることであった。これに対し、①-1、①-2 の検討結果を基に、転炉／脱りんスラグを対象としたプロセスフロー検討及び物質収支の計算を行った。また、ビジネスモデル検討のため、副生グリセリン供給先の調査および炭酸塩市場の調査を行った（副生グリセリンについては①-1、炭酸塩市場について

は②-2で報告)。2022年度は、全体プロセスフロー2次案での設備コスト、操業コストおよび生成物品質、調査結果に基づく経済性評価の提示、事業成立性を判断するとともに事業成立のための改良案を提示する。

(現在の達成度 50% : 中間目標達成見込み)

研究開発項目②-1「Ca 抽出済スラグ有効利用方法の開発」

2021年度の目標は、Ca 抽出スラグの農業用資材としての適用候補となる用途抽出、および第1候補となる農業用資材に使用する造粒バインダーを選定するとともに Ca 固定化量向上方法を見出す、また Ca 抽出済みスラグの路盤材用途への適用可能性を確認する、ことであった。これに対し、各原料の肥料成分を確認するとともに基礎的な化学特性・物理特性を調査し、用途抽出の見込みを得た。また、農業用資材の生育試験の実施・評価についても達成見込みである。更に、路盤材としての試験分析に着手した。2022年度は、候補用途を抽出し農業用資材としての適用可能性の見極め、第1候補となる植物の生育に適した農業用資材サンプル作製条件の確認と生育試験の実施、路盤材としての品質確認等を行う。

(現在の達成度 50% : 中間達成見込み)

研究開発項目②-2「炭酸塩委利用方法の開発」

2021年度の目標は、炭酸塩の用途と想定用途での要求品質、市場取引価格が判明しており、ラボスケール試験での炭酸 Ca の品質レベルが明確になっている、ことであった。これに対し、炭酸塩市場の調査を行うとともに、メーカーへのヒアリング等を実施し、本プロセスで生成する炭酸塩の性状から、セメント・コンクリート用途のほかに、樹脂用重質炭酸カルシウムをターゲットにすることとした。重質炭酸カルシウムの国内使用量は2028年で約3百万トン、価格は平均で凡そ30円/kgと見込まれた。2022年度は、市販の重質炭酸 Ca 並みの品質の炭酸 Ca を得るための検討結果がBSU試験設備仕様に反映され、炭酸 Ca 品質について顧客による評価結果が得られており、更に目標品質レベル到達が難しい場合は代替となる用途とそのためのプロセス改良案を提示する(①-4にフィードバック)。

(現在の達成度 : 50% : 中間目標達成見込み)

y.二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発

➤ 個別事業概要

- 「活性化還元剤」を用いたCO₂利用技術開発を行う。活性化還元剤は、粉末状の金属酸化物を水素と反応させることによって、CO₂を活性化還元剤と反応させることでCO₂を化学的に分解し炭素ナノ材料を製造する。また、使用済みの還元剤の再生過程で水素の製造も可能とする、一連の技術開発に取り組み、得られた炭素ナノ材料はカーボンブラックや電池材料、構造材料などへの利用が期待される。本技術の実現により、火力発電所や産業プラント(鉄鋼、セメント)などから排出されるCO₂の削減を図る。



② -1 水素製造サイクルの検討

<目標>

試験装置（塩酸溶解、炭素分離、塩化鉄回収、水素製造）の構成検討 & 製作を実施し、パラメータ試験により適正反応条件を把握する。

<進捗>

塩酸溶解試験を実施し、不活性ガス掃気により溶液中の鉄イオンの酸化を抑制できることを確認

塩化鉄塩酸溶液濃縮/乾固試験体系の試運転を実施

水素製造関連試験（乾式塩化、熱還元、加水分解）を実施。反応条件範囲を確認

塩酸溶解試験装置



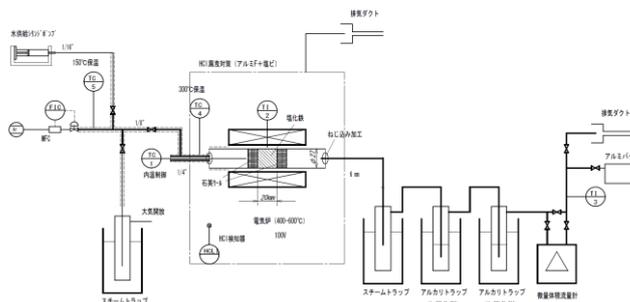
濃縮試験装置



乾固試験装置



水素製造試験装置フロー図



③ 生成ナノ炭素の高付加価値用途開拓

③-1 二酸化炭素分解によるナノ炭素サンプルの製造

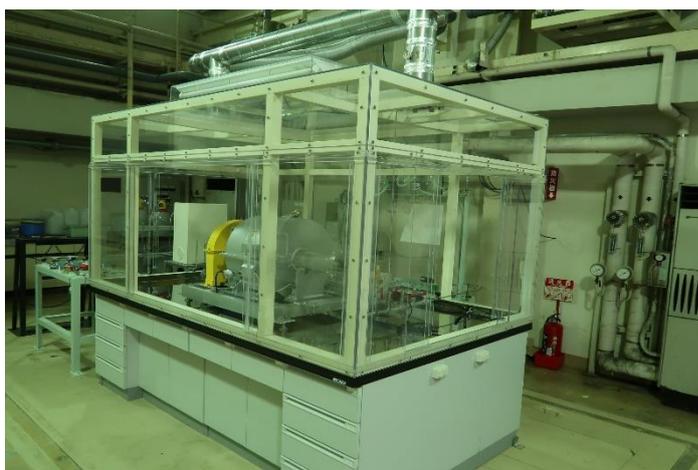
<21年度目標>

ラボスケール試験装置を用いて、各種条件（反応温度、付着炭素濃度等）での試験を実施し、項目②、③-2、③-3、③-4に必要となるナノ炭素サンプルの製造をスケジュール通りに完成。

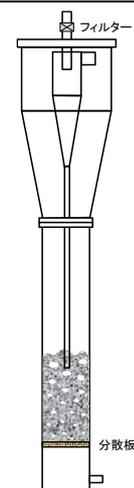
<進捗>：21年度目標達成

1. 各項目に必要なナノ炭素サンプルを製造し、各試験に提供
2. 還元剤の繰り返し使用性能確認試験を実施。
3. 製造時のガスサンプルを項目③-2提供
4. 可視化流動層試験装置により、粉体の流動状態の確認、基礎データ取得試験を実施

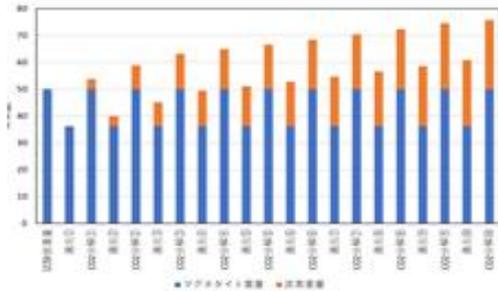
ラボスケール試験装置



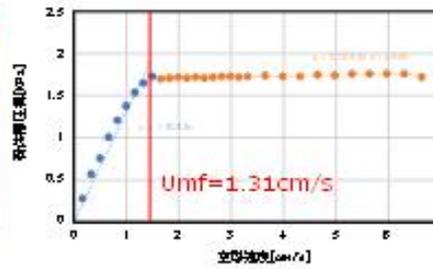
流動層装置図



ラボスケール試験装置による 10回繰り返し試験結果



流動層試験結果



③ 生成ナノ炭素の高付加価値用途開拓

③-2 二酸化炭素分解過程の解明

<21年度目標>

試料観察機構付き示差熱天秤と赤外線ガス分析装置の導入と、項目③-1で得られた排出ガスを用いた分析条件を策定する。

項目③-1で得られた炭素付着還元剤サンプルのキャラクタリゼーションと、製造条件による炭素構造および還元剤化学組成の相違を明らかにする。

<進捗>：21年度目標ほぼ達成

装置導入時期が遅れたため、装置メーカーの協力による類似条件での検討を実施した。

項目③-1で得られた炭素付着還元剤サンプルについて XRD、TEM、Raman、XPS によるキャラクタリゼーションを実施した。

<課題>

熱天秤装置の新型コロナウイルス感染症に起因する納期遅延のため、実機での分析条件策定が未実施。

<課題対応策>

装置導入後すぐに対応可能であり、今後の進捗に影響はない。

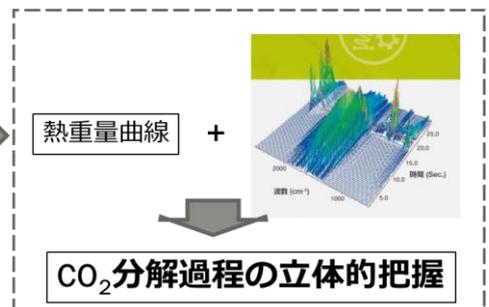


CO2対応熱天秤

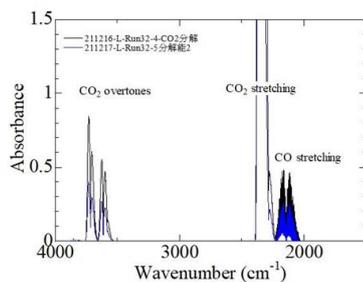
*納品遅れのため CO₂ 分解・分析に関する準備検査を



ガスサンプリング装置の導入

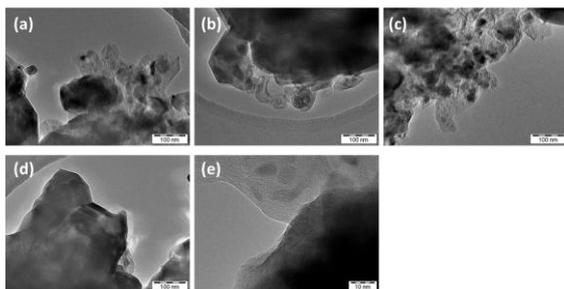


熱天秤ーガスオンライン分析システムの構築



- ▶ 分解生成物 CO と未反応原料 CO₂ の分離・定量性確認

生成カーボンのモルフォロジー (TEM) 観察



(a)-(d) 粒子状のカーボン
(d) カーボンのない部分
(e) カーボンと鉄化合物粒子の共存の様子

▶ 数 nm の Fe 化合物粒子が分解促進
Fe に近いカーボンは高い結晶性を持つ

③生成ナノ炭素の高付加価値用途開拓

③-3 生成ナノ炭素粒子の物理的分離法の開発と生成ナノ炭素の構造解析

<21 年度目標>

遊星ボールミルを基本とした湿式粉碎により、ナノ炭素と還元剤残渣を分離する条件を策定する。また、有機物添加がナノ炭素の分離に及ぼす影響を明らかにする。

分離したナノ炭素の純度評価と炭素構造の評価を行う。

<進捗> : 21 年度目標達成

予備検討より選択した試料について、ボールミル処理とデカンテーションおよび磁気的方法を用いた分離操作を実施した。また、粉碎時および分離時に添加する有機物として、メタノール、界面活性剤を選択し実施した。

得られた炭素試料について、XRD、TEM 観察を実施し、炭素構造の評価を行った。

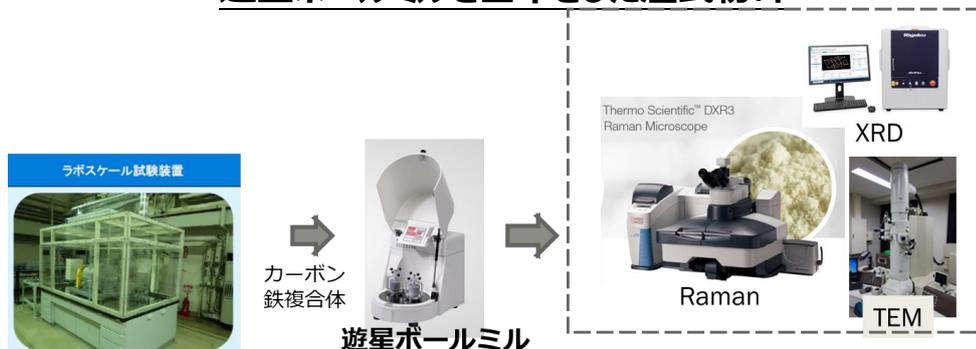
<課題>

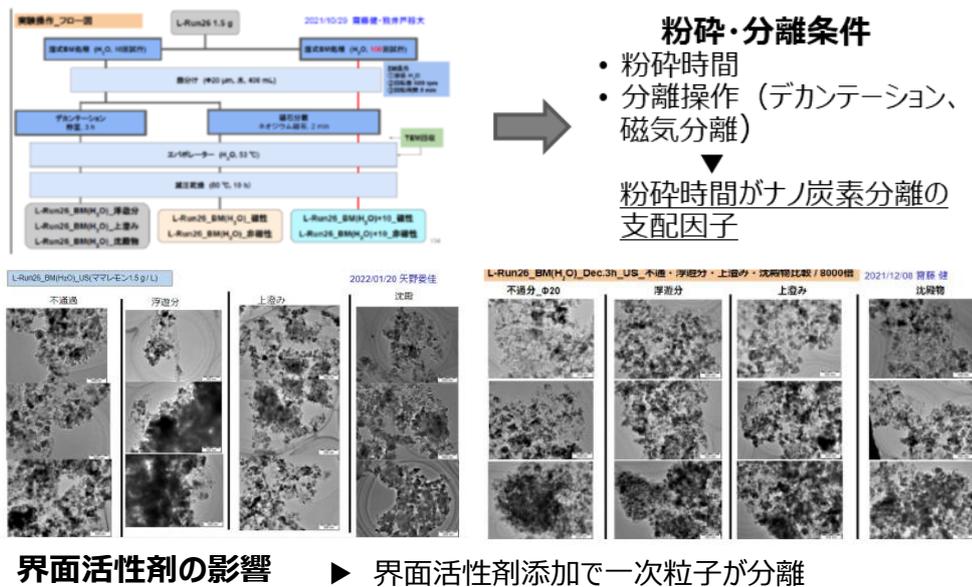
内包 Fe およびナノオーダー分散 Fe の存在によるカーボンの純度低下とその機能性発現への影響が懸念されること。

<課題対応策>

塩酸処理によるカーボンの高純度化、または、Fe 共存の特徴を生かした機能性材料への適用可能性を議論する。

遊星ボールミルを基本とした湿式粉碎





- ③ 生成ナノ炭素の高付加価値用途開拓
- ③-4 生成ナノ炭素の用途開拓のための分散・化学修飾

<21 年度目標>

生成ナノ炭素の分散手法、溶媒の選定をし、提供試料の結晶性・官能基評価と結晶性向上する

<進捗> : 21 年度目標達成

生成ナノ炭素を超音波もしくは圧力式ホモジナイザーにより、水に分散させることができた。

Raman 分光・X 線光電子分光法、表面積測定による解析、高温処理による結晶性の向上の試みを実施した。

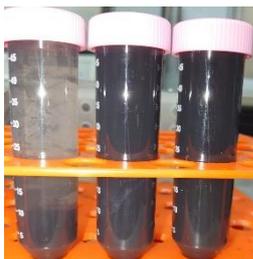
<課題>

塗布や成膜して応用する場合、有機溶媒に分散させることがある。今後、有機溶媒への分散を検討。

<課題対応策>

- ・ 界面活性剤など分散剤の使用
- ・ 化学修飾による有機溶媒との親和性向上
- ・ UV オゾン処理など表面状態のコントロール

分散手法の検討



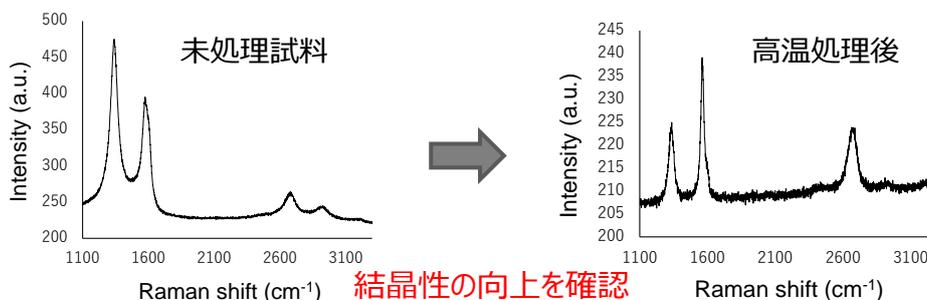
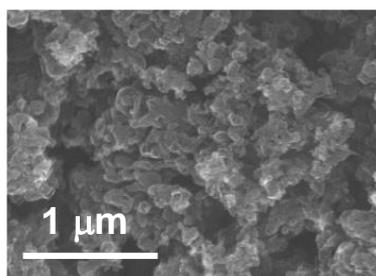
- ① 超音波分散機 65W、1h
- ② 圧力ホモジナイザー 150MPa、1h
- ③ 剪断ホモジナイザー 6000rpm、1h

溶媒の検討

溶媒	結果
水	○
NMP	×
DMF	×
DMSO	×
2-propanol	×
Hexane	×
Toluene	×

分散方法による粒径の違い

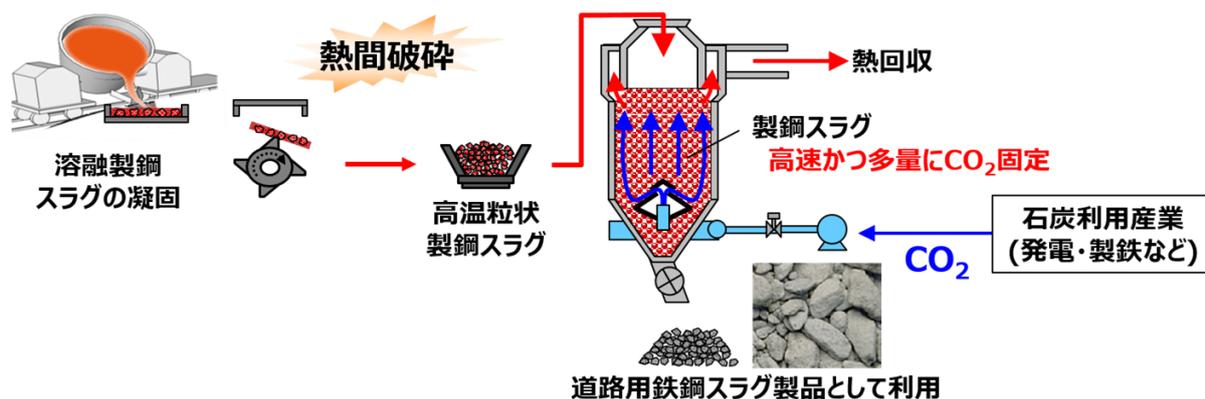
処理方法	平均粒径 /nm
超音波分散	329.2
圧力	255.3
剪断	540.4



z. 製鋼スラグの高速多量炭酸化による革新的 CO₂ 固定技術の研究開発

➤ 個別事業概要

- 鉄鋼生産の副産物として生成する高温状態の製鋼スラグに、石炭利用産業から排出されるCO₂を吹き込むことにより、製鋼スラグ中の酸化カルシウム成分に、短時間で多量にCO₂を固定して炭酸塩化する革新的な技術を開発する。
- 同時に、CO₂固定化後のガスの熱を回収することでエネルギー効率を高め、プロセス全体でのCO₂固定量および削減量の最大化を図る。また、炭酸塩化した製鋼スラグは、需要が大きな道路用鉄鋼スラグとしての利用を図る。



➤ 個別事業成果

3.1.1 研究開発項目①:「製鋼スラグの高速多量炭酸化技術の開発」

・研究開発成果

簡易試験用製鋼スラグを道路用鉄鋼スラグの粒度(JIS A 5013 CS-40)に調整して、電気炉内に金属製の反応容器にセットし、温度を制御して、CO₂ および H₂O ガスを金属製の反応容器に吹き

込み、数 kg/バッチの簡易炭酸化試験装置を使った簡易ラボ試験を行った。その結果、水蒸気のない条件では、雰囲気温度を上げるとともに CO₂ 固定量が増加した。また、1000℃において、水蒸気を 20%導入することで、3 時間で 1kg あたりの CO₂ 固定量が 30g 以上となった。

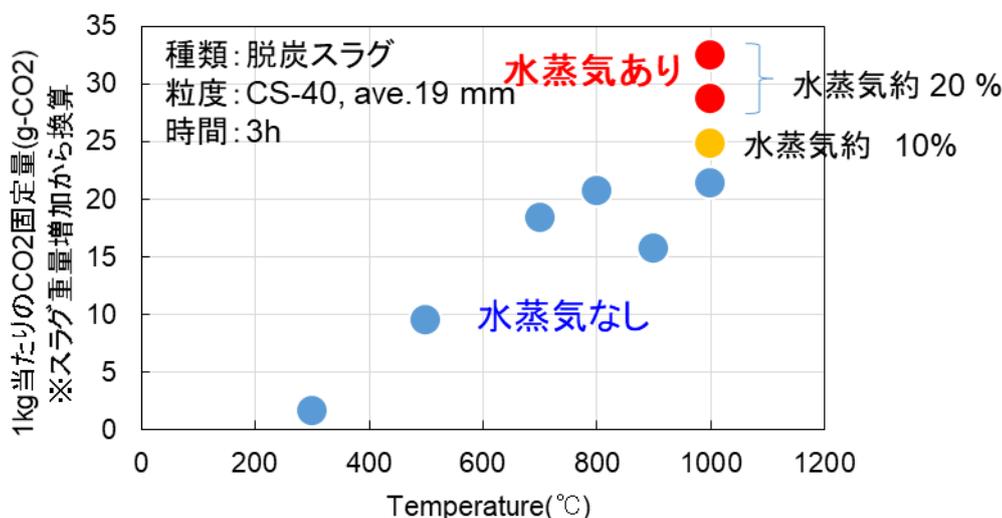


図 3.1.1-1 製鋼スラグの炭酸化

・目標達成度：

2021 年度の目標は製鋼スラグの 1kg あたりの CO₂ 固定量 30g 以上であり、達成することができた。

・2022 年度の達成見込み：

ベンチ試験装置設計に向けた数 10kg/バッチの小型炭酸化・熱回収試験装置を使用した実験において、JIS A 5015 道路用鉄鋼スラグに規定される粒度分布で、製鋼スラグ 1kg あたりの CO₂ 固定量 30g 以上とするための高速多量炭酸化条件を明らかにする。

3.1.2 研究開発項目②:「製鋼スラグ炭酸化メカニズムの解明」

板状に成形した製鋼スラグを試料として、CO₂と水蒸気の混合ガスを流した電気炉内で 500 °C 以上で加熱することによりスラグ表面で進行する炭酸化反応を観察した。反応後の試料を走査型電子顕微鏡で観察し、スラグを構成する鉱物相のうち 2CaO・SiO₂ 上において CaCO₃ が粒子状に析出することが確認された。一例として 500 °C で 1 時間反応させた場合には、粒径 3mm 程度の CaCO₃ が析出した。板状スラグ試料の表面を X 線回折(XRD)で調べることにより、析出した CaCO₃ 粒子の結晶構造を同定するとともにスラグ構成鉱物相の変化を考察した。さらに、鉱物相の炭酸化反応を高温 XRD によりリアルタイムで観察するための準備として、測定装置（試料ホルダ部やガス導入部）の検討・部品作製を行うとともに、炭酸化反応の逆反応である CaCO₃ 試薬の熱分解を観察した。CaCO₃ から CaO への分解が高温 XRD により検出できたことから、本装置に CO₂ を導入することにより炭酸化反応を評価可能と期待できる。また、今後の方針として 2CaO・SiO₂ をはじめとするスラグ構成鉱物

相をそれぞれ単独で炭酸化試験を行う予定にあるため、単一相を目指して作製された試料（JFE スチールからの提供）の均一性確認および結晶構造の同定を行った。

3.1.3 研究開発項目③:「熱回収技術の開発」

・研究開発成果

1)ラボ試験：

製鋼スラグを容器に投入してスラグ充填層を形成し、スラグ充填層へのガス流通を行うラボ試験を実施した。また、スラグ充填層上方に風速計を設置し、ガスの風速分布を測定した。試験よりスラグ投入時の偏析によるガス偏流することを確認し、スラグ投入方法改善が必要であることがわかった。今後、投入方法を検討する。

2)ガス流通シミュレーション：

製鋼スラグを容器に投入してスラグ充填層を形成し、スラグ充填層へのガス流通を模擬するガス流通シミュレーションモデルの基礎を構築した。熱伝導率や比熱などのスラグ物性調査を実施し、シミュレーションモデルに反映させた。ラボ試験で得られたデータも反映させて、数 10kg/バッチの小型炭酸化・熱回収試験装置（図 3.2.2）に関する充填層容器サイズ、ガス流通条件などの基本仕様を決定した。

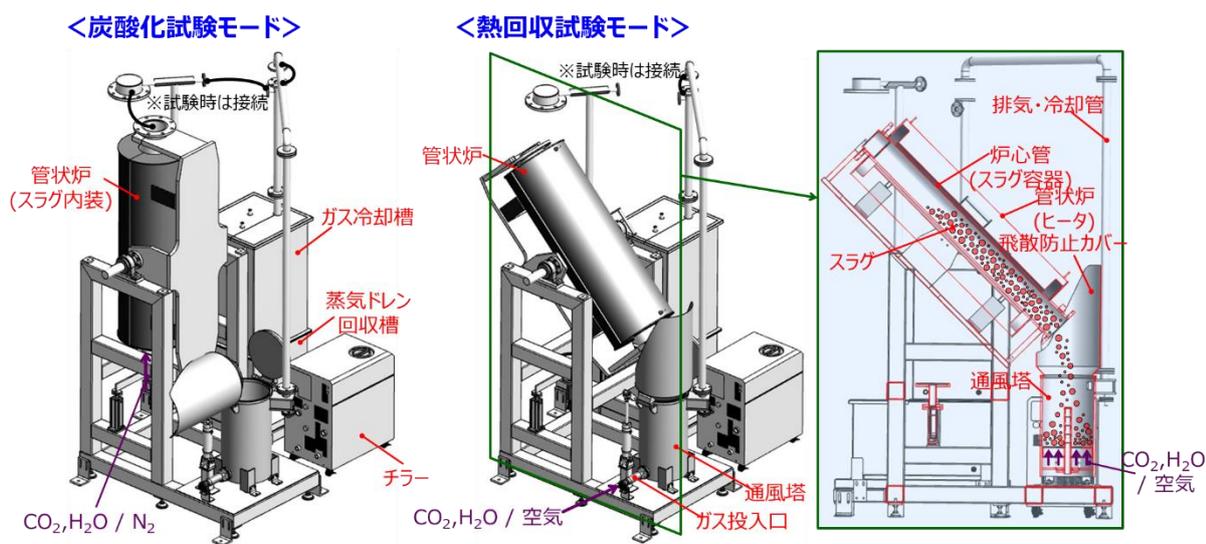


図 3.2.2 数 10kg/バッチの小型炭酸化・熱回収試験装置

・目標達成度：

2022 年度に実験を行う、数 10kg/バッチの充填層に、CO₂ や空気などのガスを流通させる数 10kg/バッチの小型炭酸化・熱回収試験装置に関する、充填層容器サイズ、ガス流通条件などの仕様を決定でき、目標を達成した。

・2022 年度の達成見込み：

プロセスイメージの構築および数 t/バッチ規模の炭酸化・熱回収試験ベンチ試験装置に関して、充填層容器のサイズ、各ガス種の流量といったガス流通条件を決定する。また、熱回収容器へのスラグ投入温度が 900℃前提での熱回収効率 50%以上と高速多量炭酸化の同時複合処理が可能な基本仕様を決定する。

3.1.4 研究開発項目④:「製鋼スラグの凝固・熱間破碎技術の開発」

・研究開発成果

1) 簡易凝固試験

熔融スラグを鉄球とともに凝固させる試験を行い、鋼球がスラグの熱を短時間に吸収できる抜熱媒体として機能することを確認した。(図 3.2.3) また、簡易凝固試験を基に抜熱媒体量及び製鋼スラグ量としてスラグ:鋼球の比率 1.5:1 での伝熱解析を行い、冷却時間は 10min で十分であることを確認した。

試験および解析結果から、抜熱媒体サイズはスラグの最大粒度である 53mm が適当であると推察された。この理由は、スラグの熱を短時間に吸収させるためにスラグと接触する表面積が大きく、また、スラグ製品と容易に分離しやすくさせるためである。

2) 簡易破碎試験

重錘を指定の高さから落下させて製鋼スラグを破碎する試験を実施した。(図 3.2.4) 破碎後の製鋼スラグの粒度分布を測定することで、位置エネルギーに対する破碎量を評価し、粉碎に必要なエネルギー量を求めた。スラグの破碎方式として、回転型(例えば、ロータリーキルン)の方式を検討している。本方式は単純な機構であり、耐熱設計も比較的可能である。装置の材質は耐熱汎用鋼板である SUS310S を選定した。また、回転型装置にスラグと鋼球を掻き揚げるミルライナーを内蔵させる。ミルライナー数は、鋼球が落下した際にミルライナーと接触しにくい、3~4 枚が妥当であると推定した。さらに、小型破碎装置製作候補先の試験装置を用いた実験により、ミル回転速度は 1-10rpm、破碎時間は 10min 以内、抜熱媒体鋼球量としてスラグ鋼球比 1:6 または 1:7、抜熱媒体鋼球サイズは 50~100mm で路盤材粒度に破碎できることが推測された。

3) 破碎解析

2)で得られた結果を基に、破碎解析を実施した。2022 年度に導入予定の数 10kg/バッチの小型破碎試験装置の設計に必要な小型破碎試験装置の想定電力量を得た。また、文献調査により、小型破碎試験装置に用いる材の高温強度データ等を収集した。試験及び解析結果から、小型破碎試験装置の基本仕様を決定した。装置サイズは設置場所と装置設計の制約から決定した。(図 3.2.5)

4) 伝熱解析

数 kg/バッチの簡易凝固試験装置に対する熱負荷を伝熱解析で検証した。製鋼スラグを床敷きとして撒くことで、鑄型への抜熱は大幅に減少できることを確認した。

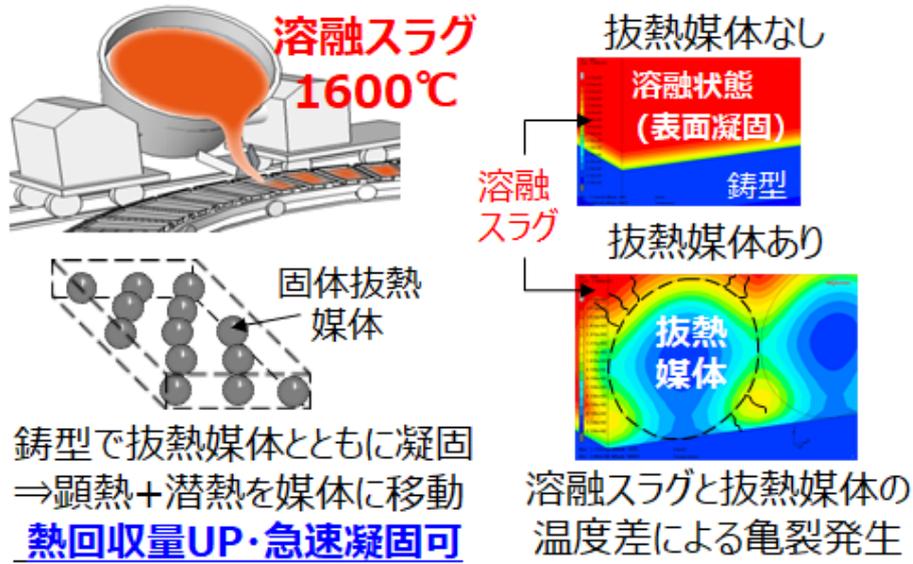


図 3.2.3 抜熱媒体による効果

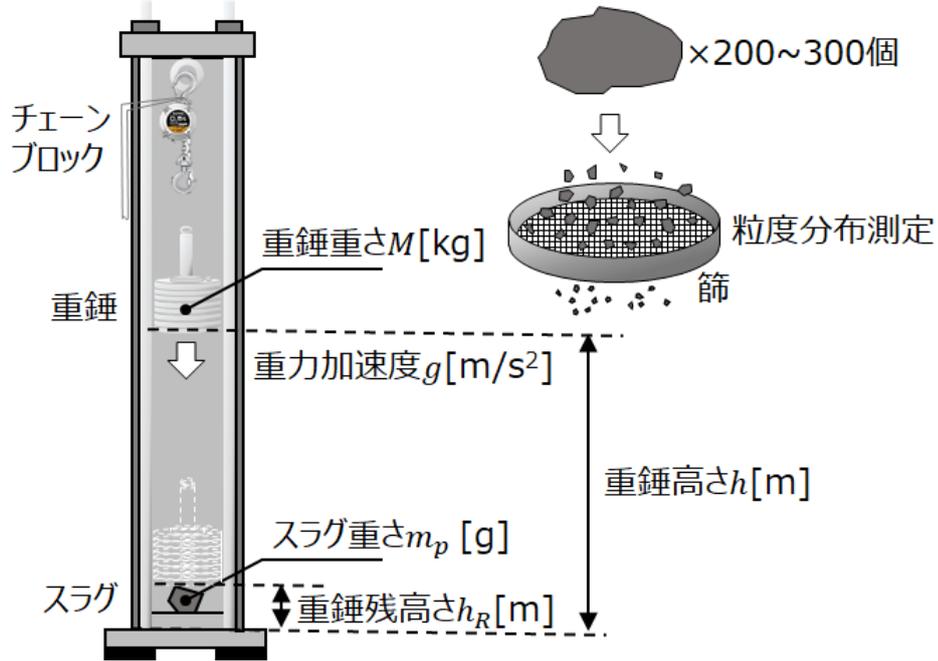


図 3.2.4 簡易破碎試験

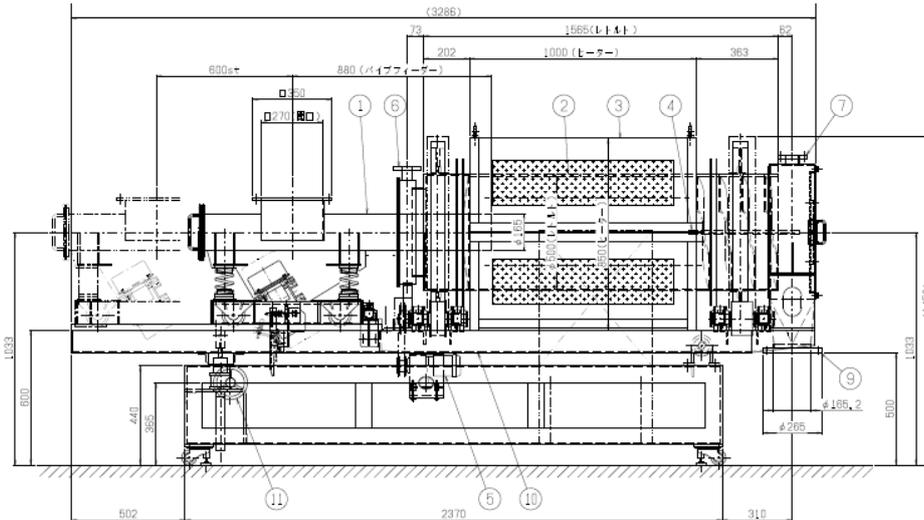


図 3.2.5 小型破碎試験装置の基本仕様

・目標達成度：

2022 年度に導入予定の数 10kg/バッチの小型破碎試験装置の基本仕様（破碎方式：ロータリーキルン+SAG ミル方式、ミル材質：SUS310S、装置サイズ：W1300×L3200）を決定でき、目標を達成した。

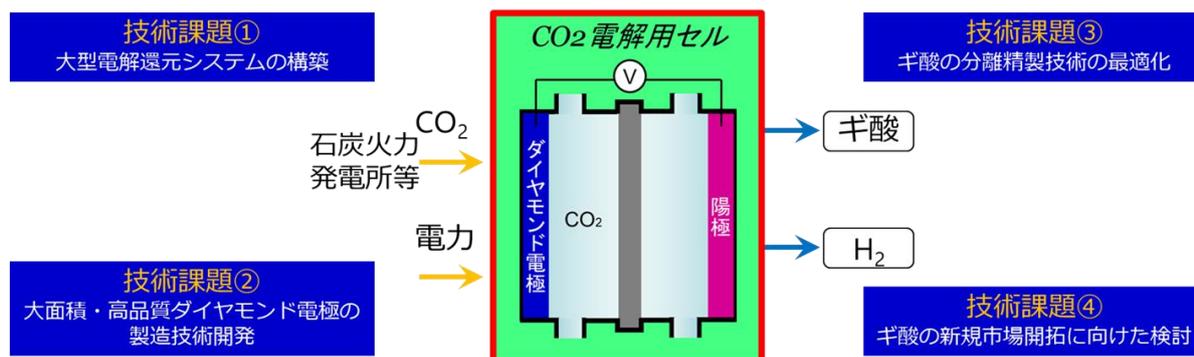
・2022 年度の達成見込み：

将来の実機設備を考慮した数 t/バッチのベンチ試験装置の概算能力等の基本仕様（ミル材質、装置サイズ、熱対策）を決定する。

a. ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中の CO₂ からの基幹物質製造開発事業

➤ 個別事業概要

- ダイヤモンド電極を用いて、石炭火力等の排ガス中CO₂を電解還元し、基幹物質としてのギ酸を製造するシステム構築を行い、長時間連続駆動によるCO₂還元を実現し、量産化施策の構想設計を可能とする。また、大型電解還元システムに適用可能な大面積・高品質なダイヤモンド電極製造技術を確認する。さらに、CO₂還元により製造したギ酸の分離精製技術の最適化検討を行い、水素エネルギー源と化学原料の両面からの新規市場開拓に向けた可能性を検討する。



我が国喫緊の課題である再エネ大量導入による新たな需給調整技術や電力変換による調整力の確保および CO₂ を炭素資源（カーボン）と捉える「カーボンリサイクル」技術による CO₂ 削減に貢献できる技術を開発する。

CO₂ を直接 CO に電解すると同時に電力の需給調整が可能なリバーシブル固体酸化物セルの基盤技術開発を行う。このために、SOFC セルをリバーシブルに用いて技術的課題を抽出すると共に低コスト・大面積化が可能なプロセッシング技術により次世代セルを開発する。

➤ 個別事業成果

CO₂ 直接電解と同時に電力の需給調整が可能なリバーシブル固体酸化物セルについて、固体酸化物燃料電池メーカーセルをリバーシブルセルとして評価し、技術的課題を明らかとする。合わせて、低コスト・大面積化が可能な金属支持 rSOC を次世代セルとして開発する。

①大型電解還元システムの構築

「熱フィラメント CVD 法」によるダイヤモンド電極の大面積化を試み、CO₂ 還元にあふさわしい高品質化を目指し、定電流電解において、ファラデー効率 80%以上でのギ酸生成を達成した電極を作製することができ、従来法での「プラズマ CVD 法」と同等の性能を引き出すことに成功した。また、電解還元システムの大型化をめざし、溶液フローに関して「間欠流動」の有用性を示し、このシステムを最適化することにより、従来の小型セルの 3 倍の電極面積をもつ中型セルにて、時間あたり 600mg を超えるギ酸生成、すなわち電極面積 1m² 換算にて目標値 200 g/(m²・h) を超える 367 g/(m²・h) を達成した。さらに、100mm×200mm の大面積をもつダイヤモンド電極の創製に成功し、これを搭載した CO₂ 還元の実施が可能な電解槽の作製を実現した。

➤ 個別事業成果

①バイポーラ膜電気透析による酸／アルカリ再生（BMED-AB）技術の研究開発（山口大学）

・BMED-AB プロセスのシミュレーション結果より電流効率の低下は主に陰イオン交換膜（AEM）からのプロトンの拡散であることを解析し、難プロトン透過性 AEM と添加塩に NaCl を使用した BMED 実験を行った結果、Na₂SO₄ の場合と比較して劇的に酸電流効率が増加し、アルカリ電流効率も増加した。さらにアルカリ側に添加する NaCl 濃度を 0.001 M から 0.1 M に増やすと酸とアルカリの電流効率は増加し、酸とアルカリの電流効率は共に 90%以上を実現した。

・ED 用長時間運転評価装置においてサンプル液に NaCl が存在しない（0.0 M）場合は、電位と時間の関係から推算した電位が 1 V 上昇する時間は 32.2 時間となったが、NaCl が存在する場合（1.0 M）場合は 478 時間となり、1 価の塩を共存させることで電位上昇が約 1/15 に低減することが判明した

②効率的アルカリ／CO₂ 吸収プロセスの研究開発（九州大学）

・アルカリ水溶液を用いて CO₂ を含む混合ガス中から CO₂ を回収する際、その回収効率は CO₂ の濃度、混合ガスの供給流量、アルカリの種類や濃度、温度、共存塩に依存する。これらのパラメーターの CO₂ 回収効率依存性を検討した。吸収塔の設計において、アルカリ水溶液を循環させるスプレー塔と、より構造が簡便な吸収塔下部から分離対象ガスを供給する気泡塔を比較し、気泡塔がより効率的であることを明らかにした。その結果、1 L スケールの気泡塔式吸収塔において、CO₂ 回収率が 90 % 以上となる操作条件を決定した。そして、0.5 N KOH を用いた場合に、CO₂ 回収効率は 1.0 mol-CO₂/h/L となることがわかった。

③鉬酸によるカルシウム溶解／抽出／回収・塩再利用技術の研究開発（住友大阪セメント）

・6 種 12 銘柄のカルシウム含有廃棄物を評価し、1 銘柄のみ Ca 抽出率 80%に未達であったが、高い pH 条件でも効率的に抽出できる可能性を見出した。

・アルカリ溶液による pH 調整によって、効率的に Ca 以外の成分を除去できることを確認した。

・炭酸カルシウム中に目標値 0.1%以上の Na₂O が混入が確認されたが、炭酸ナトリウムの添加速度を制御することで目標値以下に制御できることを確認した

④カルシウム回収物および処理残渣の有効利用技術の研究開発（住友大阪セメント）

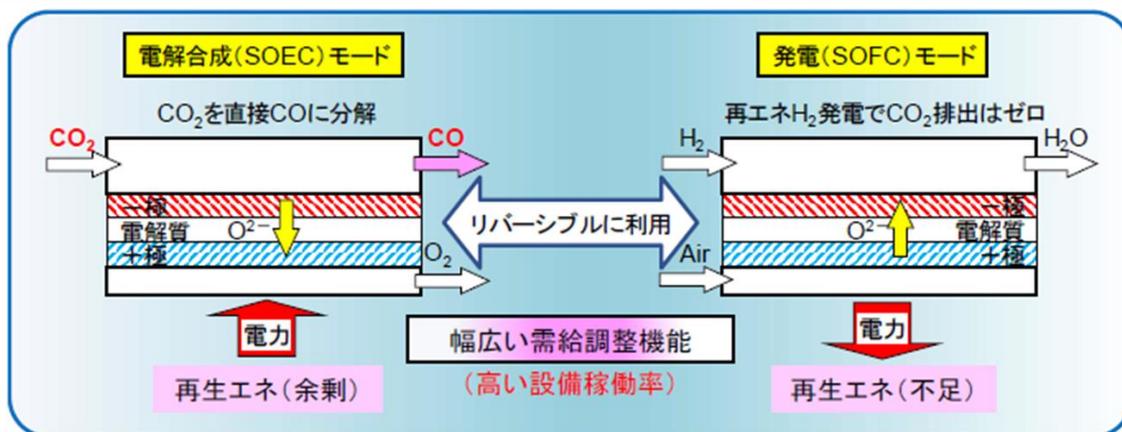
・炭酸カルシウムの粒径が細かいと、短期材齢での強度が増加し、長期材齢での強度低下は見られるものの、置換率 10%まで利用可能であることを確認した。微粉末効果による初期水和の促進及び、充填率増加による置換率が多い（セメント量減）配合においても強度低下が抑えられたものと考えられる。

・廃棄物をそのままセメント原料として利用すると、クリンカ 1000g あたり 97.2g 利用可能であった。一方、抽出残渣は 56.7g 配合でき、これより抽出残渣を得るための元試料量は 157.5 g であり、Ca を抽出してから残渣をセメント原料として利用すれば、より多くの廃棄物を処理できる可能性が示された。

c. CO₂ 電解リバーシブル固体酸化物セルの開発

➤ 個別事業概要

- 本研究開発では、CO₂を直接電気分解することにより有価なCOまたは合成ガスに変換すると同時に電力の需給調整が可能なシステムの根幹技術となるリバーシブル固体酸化物セル（rSOC）について、現行トップレベルのSOFCメーカーセルをリバーシブルセルとして評価し、技術的課題を明らかとする。あわせて、低コスト・大面積化が可能な金属支持rSOCを次世代セルとして開発する。最終的に、rSOCのためのシステムコンセプトを提案する。



➤ 個別事業成果

①CO₂ 電解リバーシブル固体酸化物セル(rSOC)のポテンシャル検討

・国内メーカー製の固体酸化物形燃料電池(SOFC)の単セルを SOEC として用いて、CO₂ の電解性能を評価し、電解電流とセル電圧の関係(電流-電圧特性)、交流インピーダンス法により内部抵抗を測定することでセル性能を把握した。CO₂ の直接電解および CO₂ と水蒸気との共電解試験を行い、燃料側の出口ガス組成を詳細に分析することで、合成ガスに含まれる CO の生成量や組成比 (H₂/CO/CO₂) 等々を評価した。更に、SOFC の性能表示式を SOEC の性能評価に適用するために、電解時の電極過電圧のガス分圧依存性等の測定結果を基に SOEC 性能表示式を構成する電極反応抵抗式を導出した。これにより、SOEC および SOFC を切り替えて運転する rSOC の性能評価が可能になった。

・CO₂ の電解メカニズム解明について、電解時に CO の生成率が電解電流に比例して変化し、概ね理論生成率に一致することから、CO₂ が直接 CO に電解されることがわかった。試験後のセルについては、性能評価において反応抵抗の増大が認められたカソードを中心に解体分析したところ、FIB-SEM により電解質/カソード界面の微構造の有意な変化を観察すると共に、顕微ラマン分光分析により炭素の析出を確認した。これらの事象については、これまでの SOFC では数万時間の運転でも観察されない事象が数百時間で生じており、SOEC 特有の性能面・材料面の技術課題が明らかとなった。

・CO₂ から水素、水素から CO₂ へのガス切替方法の試験手順を検討した結果、CO₂ への切替時にはカソードが酸化され性能劣化することが判明し、この劣化を避けるために、切替と同時に電解を開始する必要があることなど、リバーシブル試験に向けて重要な知見を得た。。

②大規模 CO₂ 電解のための金属支持型 rSOC の開発

・独自開発の MS-rSOC についてセル構成層の検討を行い、CO₂ 電解性能を評価した結果、YSZ を高純度化した電解質を用いた MS-rSOC において電解効率の向上が確認され、目標としていた CO₂ 電解速度を上回る 0.6 μmol s⁻¹ cm⁻² を達成した。

・変形が少なく各溶射層の皮膜割れが生じていない大面積 MS-rSOC の製造に成功した。

大面積セルの製造に成功した。本大面積セルは基板サイズ 100 mm x 100 mm、電極サイズ 84 mm x 84 mm を有しており、本プロジェクトの大面積セルのサイズ目標を達成している。

③次世代 rSOC・システムのコンセプト提案

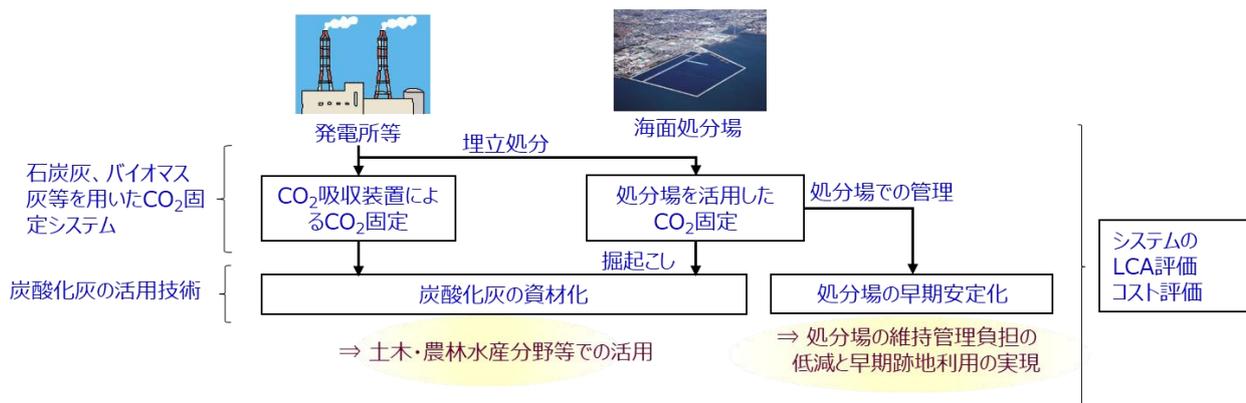
・ボタンセル規模での CO₂ 電解試験の結果から、CO₂ 電解速度 0.710 μmol s⁻¹ cm⁻² における単位電極面積あたりの必要な電解電力は 0.120 W cm⁻² (@1.0V) となった。高炉 1 基（銑鉄生産量：10,000ton/day, 銑鉄 1ton 当たりの高炉ガス生成量：1,533Nm³/ton）からの CO₂ 排出量を 39.0Nm³ s⁻¹ とし、その内 30%を MS-rSOC で CO に還元し循環利用を想定する。この時、上記の実測されたセル性能から、必要な電極面積は 7.4 万 m²、電解電力は 88.4 MW、供給熱量は 48.9 MW と試算された。

・国内の高炉をすべてシャフト炉と rSOC 連携システムに置き換えたと仮定すると、CO₂ 排出削減は約 1,890 万 ton-CO₂/年になり、2019 年における鉄鋼業全体の年間排出量 (1.70 億 ton-CO₂/年)に対して 11%の排出削減が見込まれた。

d. 石炭灰およびバイオマス灰等による CO₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発

➤ 個別事業概要

- 国内で発生する廃棄物のうち、石炭灰およびバイオマス灰等は、CaやMg等といった安定的な炭酸塩を形成するアルカリ成分を含む。これらの灰等を用いたCO₂固定システムの構築、および炭酸化した灰を有効活用する技術の確立（図）を最終目標に、最適なCO₂固定方法の調査・選定を行うとともに、炭酸化に伴う重金属等の動態評価・安定化处理、および炭酸化灰の資材化に向けた基礎製造技術の開発を行う。



➤ 費用対効果

石炭灰・バイオマス灰等を対象に、①CO₂との反応量、反応速度および炭酸塩化に伴う重金属等の動態評価を把握し、プラントに併設した CO₂ 吸収装置もしくは処分場を活用した CO₂ 固定システムにより、CO₂ 吸収装置で石炭灰・バイオマス灰 1 トン当たり 24 kg 以上、処分場で 10 kg 以上の CO₂

を固定可能な技術開発を行う。また、②炭酸塩化に伴う重金属等の動態評価を行い、排水基準への適合を目標とした安定化処理法を探索するとともに、③炭酸塩化灰の利用用途の調査と資材化に向けた基礎製造技術を開発することを目標とする。

➤ 個別事業成果

2.1.1 CO₂ 吸収装置による石炭灰・バイオマス灰等の CO₂ 固定システムの構築に向けた研究開発

燃料種毎に異なる灰の性状に応じた CO₂ 吸収装置の設計仕様の作成に向けた研究開発を実施する。具体的には、灰組成・CO₂ 分圧等をパラメータとした CO₂ 固定能、反応速度の評価及び CO₂ 固定に伴う重金属及び主要化学物質等の動態評価を行うとともに、化学組成の異なる灰に対する最適な炭酸塩化プロセスを検討し、CO₂ 吸収装置の設計仕様に資する技術を開発する。

2.1.2 処分場を活用した石炭灰・バイオマス灰等の CO₂ 固定システムの構築に向けた研究開発

処分場を CO₂ 固定リアクターとして扱い、最適な CO₂ 吹き込み方法、及びこれに伴う処分場浸出水の水質予測・処理方法に関わる研究開発を実施する。具体的には、処分場に埋立処分される状態の灰（湿灰）の CO₂ 固定能、反応速度の評価及び CO₂ 固定に伴う重金属及び主要化学物質等の動態評価を行う。また、CO₂ を用いて高 pH の保有水を中和するための技術開発を行う。

2.1.3 炭酸塩化灰の資材化に関わる調査及び検討

2.1.1 および 2.1.2 で得られた炭酸塩化灰を対象に、土木・農林水産分野等への適用用途調査を行うとともに、抽出された利用用途に応じた炭酸塩化灰の固化方法と安定性の検討を行うことで、炭酸塩化灰を用いた資材の製造に関わる基礎技術を開発する。

2.1.4 石炭灰およびバイオマス灰等による CO₂ 固定・有効活用に関わる総合評価

2.1.1～2.1.3 で得られた結果に基づき、石炭灰・バイオマス灰排出事業所の状況（CO₂ 吸収装置の設置の可否、処分場の有無等）に応じた複数のモデルケースに対し、石炭灰・バイオマス灰等による CO₂ 削減可能量の概算を示すとともに、コスト評価を行う。

①CO₂ 吸収装置による石炭灰・バイオマス灰等の CO₂ 固定システムの構築に向けた研究開発

・化学組成の異なる 15 種類の石炭灰・バイオマス灰・焼却残渣を用いて、室内試験により各種運転条件（ガス量、石炭灰性状等）が CO₂ 固定量に及ぼす影響を評価した。Ca 含有量が多い試料ほど CO₂ 固定量が多くなることを明らかにした。CO₂ の吸収・炭酸塩化に関わる反応速度係数等の各種係数を導出した。

・ベンチスケールの連続試験装置を用いて、ガス量、液量、灰濃度、運転 pH 及び灰種が CO₂ 吸収・炭酸塩化に及ぼす影響を評価した。灰重量当たりの CO₂ 固定量（kg/t-灰）は、運転 pH を下げる（灰の供給量を減らす）ことで多くできるが、排ガス中 CO₂ 低減量（%）は低下することが分かった。また、システム最適化条件の検討を行い、CO₂ 固定化率向上に向けた検討を実施した。

・灰 15 種類を対象に、炭酸塩化処理に伴う重金属等の溶出量を測定し、既存の排水処理設備に大きな負担をかける成分はないことを確認した。

②処分場を活用した石炭灰・バイオマス灰等の CO₂ 固定システムの構築に向けた研究開発

・化学組成の異なる 7 種類の石炭灰・バイオマス灰・焼却残渣を対象に、灰を湿らせた条件で 0.04～20%の CO₂ に暴露し、CO₂ 固定量を測定した。その結果、処分場内の状態に近い含水比 20%で CO₂ 固定量が最も高くなり、5～20%の CO₂ 暴露では、濃度変化による炭酸塩化速度に大きな差異は認められなかった。

・カラム試験を行って長期の溶出挙動を評価し、炭酸塩化により重金属等の溶出速度は増加するが、原灰よりも速く溶出が完了することを確認した。炭酸塩化灰に一定の水を接触させることで原灰より速やかに重金属等が除去され、本技術を処分場の早期安定化や灰の掘起こし利用に応用できる可能性が示された。

・処分場内保有水を対象とした、ウルトラファインバブルによる CO₂ 固定を検討するため、大型鉛直カラム（直径 50cm×高さ 3m）および断面水槽（長さ 5m×幅 1m×高さ 2m 等）を用いた室内実験を実施した。その結果、注入水の中和拡散方向は、水温差および密度差の影響を受けることが確認され、今後、効果的な注入水深の設定に活用する。また、pH の低減量から CO₂ の固定量を推定するとともに、保有水の中和反応モデルを構築した。

③炭酸塩化灰の資材化に関わる調査及び検討

・炭酸塩化灰を用いた製品の市場導入可能性と課題の把握のため、排出元、中間処理業者、および炭酸塩化灰を用いた開発資材の適用先となりうる土木・海洋・農業関連業界等にヒアリングを行い、具体的な市場規模、各市場で求められる品質・コスト等に関わる情報を得た。

・炭酸塩化させた 15 種類の石炭灰およびバイオマス灰を用いて配合試験を行い、人工石を試作した。その結果、炭酸塩化灰人工石は、原灰人工石と比較して、一部の重金属の溶出・含有量が低下し、固化材の添加量を削減できる可能性が示唆された。加えて、土木資材、海洋資材、農業資材の要求仕様を満たす炭酸塩化灰人工石の配合条件の見通しが得られた。

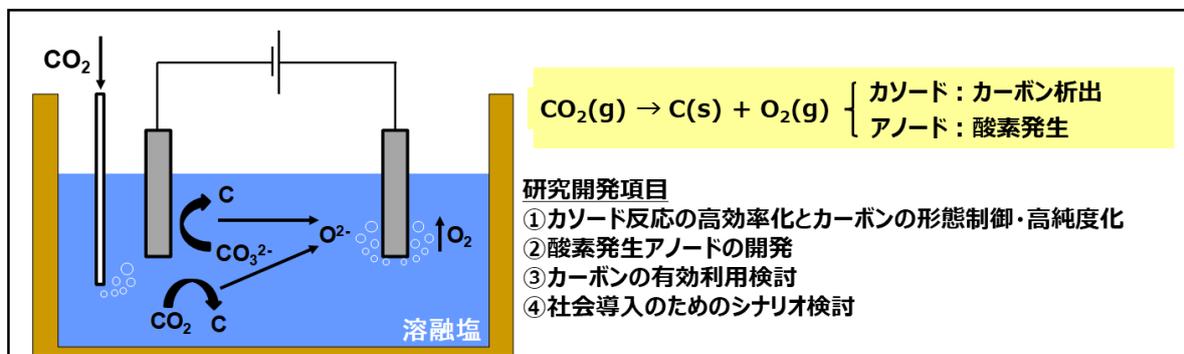
④LCCCO₂ の試算

・①～③で得られた成果に基づき、LCCCO₂ を試算した。CO₂ 吸収装置による灰の炭酸塩化－盛土材製造（対象：石炭灰、バイオマス灰）のプロセスでは、主原料に炭酸塩化灰を用いることで、原灰よりも固化材（セメント）の使用量が減少するため、最大 40%の CO₂ 量を削減できる結果となった。一方、処分場を活用した灰の炭塩化（対象：石炭灰、焼却残渣）では、CO₂ 固定量と炭酸塩化処理に伴う CO₂ 排出量が相殺されるため、CO₂ 削減量はほぼ 0 となり、エネルギー投入量の小さい CO₂ 固定方法を検討する必要があると考えられた。

e. 高温熔融塩電解を利用した CO₂ 還元技術の研究開発

➤ 個別事業概要

- 熔融塩電解を利用して、CO₂を固体カーボンと酸素ガスに分解し、固体カーボンを回収・再利用するプロセスの確立を目指し、高効率なCO₂還元反応と酸素発生プロセスの基本設計に資する先導的かつ基盤的研究を行う。具体的には、カソードにおけるCO₂還元反応の高効率化、固体カーボンの形態制御と不純物の削減、ならびに長期間安定に動作する酸素発生アノードの開発を行う。



1. 事業の背景・目的・位置づけ

大規模な CO₂ 排出量削減に向けたキーテクノロジーとして、高温熔融塩電解を利用して CO₂ を固体炭素と酸素ガスに分離する技術の開発を目指す。この固体炭素を、貯留あるいは炭素製品等に利用するカーボンリサイクルシステムを提案する。

➤ 実施の効果（費用対効果）

本プロジェクトで開発した CO₂ 分解システムにより生成された固体カーボンが、カーボンブラック相当品として販売できれば、2050 年には、年間数十万トンの CO₂ 削減が見込まれ、年間数百億円規模の市場規模が期待される。

➤ 個別テーマの目標

CO₂ を有効利用した新しいカーボンリサイクルシステムの提案に向けたキーテクノロジーとして、高温熔融塩電解を利用して CO₂ を固体カーボンと酸素ガスに分離する技術を開発するべく、先導的かつ基盤的な研究開発を実施する。CO₂ を固体カーボンと酸素ガスに分解し、固体カーボンを回収・再利用するプロセスの確立を目指し、高効率な CO₂ 還元反応と酸素発生プロセスの基本設計に資する研究開発を行う。

➤ 個別事業成果

①カソードにおける CO₂ 還元反応の高効率化と生成カーボンの形態制御および不純物削減

①-1 液体金属カソードにおけるカーボンの電気化学的析出挙動の解明

主に 500～600℃の熔融 LiCl-KCl-Li₂O-Li₂CO₃ において、液体金属カソード上でのカーボンの電気化学的析出について検討を行った。サイクリックボルタンメトリーの結果から、定電位電解後に得られた

カーボンの重量からカーボン析出反応の電流効率は 80%以上と高い値が得られ目標を達成した。さらに、CO₂ ガスの吹き込みと液体金属カソードを組み合わせた、まったく新しい CO₂ 分解手法を開発し、1 件の特許出願を行った。

①-2 生成カーボンに含まれる不純物の削減

主要な不純物である溶融塩と液体金属の洗浄方法に関する検討を実施したところ、蒸留水および塩酸で洗浄することで純度 90%以上を達成した。一方で、溶融塩や電極構成材料が一部残存することが判明した。

② 高温溶融塩中で安定に動作する新規酸素発生アノードの開発

②-1 アノードの合成と電気伝導性評価

金属酸化物の微粉末を原料とし、混合、成形、焼結等のプロセスを経て数 cm 四方の緻密な酸化物体の合成に成功した。本研究では構成元素の汎用性の拡張を狙い、異なる組成をもつ 2 種の酸化物体アノード(La_{1-x}Ca_xFeO_{3-δ}・La_{1-x}Sr_xCoO_{3-δ})を合成した。合成した酸化物体は単相かつ 98% 以上の高い相対密度をもつ構造であることが明らかとなり、600℃における電気抵抗率は最大で 1.2×10⁵ Ωm まで到達した。

②-2 酸素発生挙動の解明と安定性評価

600℃の溶融 CaCl₂-LiCl-CaO 中における電気化学測定より、酸素発生電位が 2.9-3.6 V であることを特定した。60 mA cm⁻² で 5 時間の定電流電解試験より、アノード電位は酸素発生電位域である 3.1 V 付近を安定して推移し、ガス分析より発生ガスが酸素であることが判明した。誘導結合プラズマ (ICP) 発光分光分析から、電流効率が 99.5%であることが明らかとなった。さらに電解前後における形状および結晶構造の変化はなく、重量変化より算出された腐食率は 0.1 A cm⁻² においては 1.35 cm y⁻¹ 相当となった。以上の研究結果は、新規酸化物体アノードの高温溶融塩中における高い酸素発生性能を明らかにした画期的な成果であり、1 件の特許出願を行った。

③ 固体カーボンの物性評価

カーボンの物性評価結果として、カーボンの純度は 90%以上であることが確認できたが、主な不純物として、溶融塩の残存物と微量の電極材料構成元素が含まれることを明らかにした。これらの結果を①にフィードバックさせることで、生成カーボン中の不純物を最小限にするための、電解条件およびカーボンの洗浄方法等に関する指針を得た。

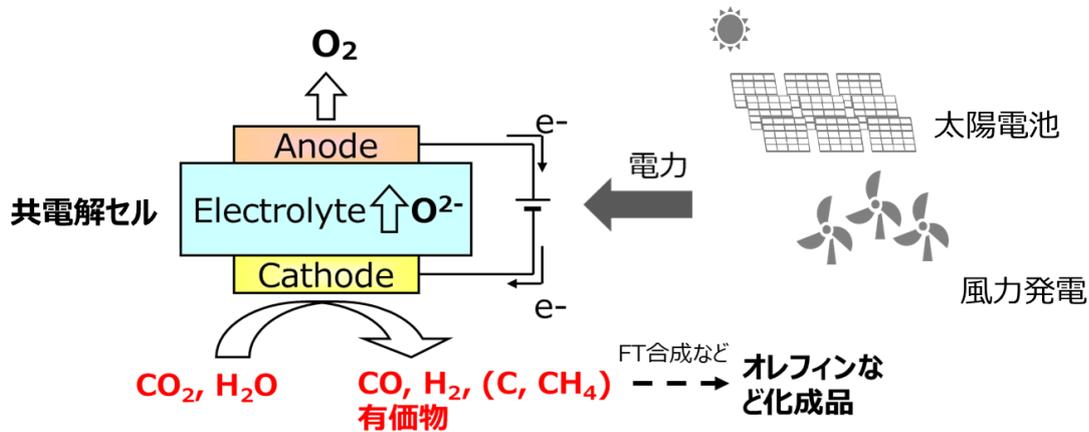
④ 提案システムの社会導入に向けたシナリオ検討

生成カーボンの分析結果を検証し溶融塩電解で生成したカーボンを、熱処理等の後処理を介さずにカーボンブラック製品等へ適用することは非常に難しいことを明らかにした。一定量の CO₂ を処理するために必要な電解条件の試算によって、多くの CO₂ を効率的に処理するためには電流密度を向上させることが一つ課題であることを明らかにした。

f. CO₂/H₂O の共電解技術の研究開発 要見直し

➤ 個別事業概要

- CO₂とH₂Oを同時に還元し有価物であるCOと水素を生成するための高温共電解システムの研究開発を進めるにあたり、共電解反応メカニズム解明を行い、高性能電極触媒材料の開発を行う。



➤ 個別事業成果

①CO₂分解・電極反応メカニズム解明

・Ni-YSZ および Ni-GDC サーメット電極の共電解特性を把握し、Ni-GDC 電極の方が共電解電極として高活性であることが判明した。共電解電極上で起こっている電極／副反応のモデル解析を実施し、反応モデルを策定した。

②高性能電極材料開発

・オールセラミック電極である La(Sr)Fe(Mn)O₃ が優れた共電解性能を発現するのは、非解離状のCO₂の吸着量が多く、CO₂がH₂Oとの相互作用しないためであることが示された。

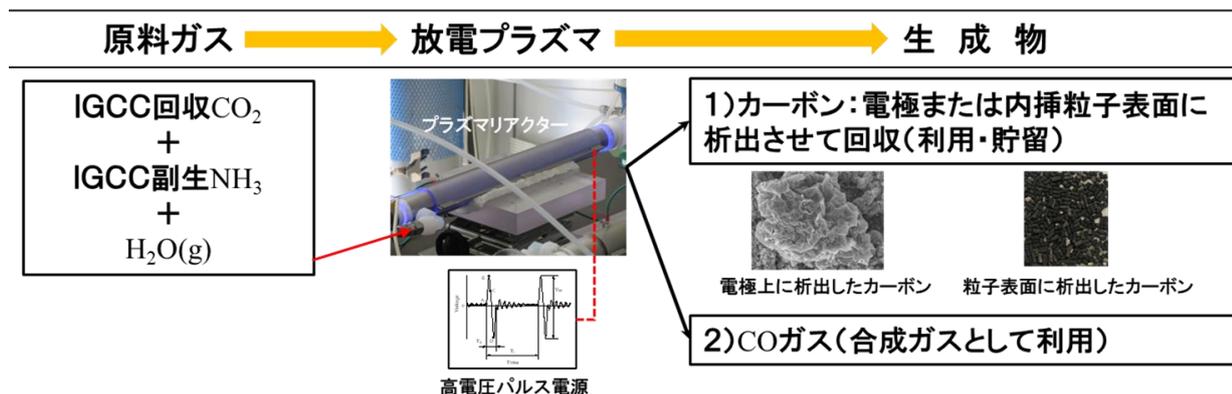
③共電解反応プロセス解明および要素技術検討

・温度低下とともに水性シフト反応を生じやすいので、逆シフト反応の触媒成分の添加が有効であることを見出した。とくに今年度見出した SrFe(Mo)O₃系を中心に、CeO₂やCaOなどのナノ粒子の修飾が電流密度の増加に有効であり、Co, Niのインフィルトレーションにより、700℃でもある程度の生成物制御可能であることが分かった。

g. 放電プラズマによる CO₂ 還元・分解反応の基盤研究開発 要見直し

➤ 個別事業概要

- 放電プラズマでのCO₂還元・分解反応速度を測定し、カーボン効率良く析出させる触媒や電極材質について探索を行ない、CO₂、H₂O、NH₃等共存下での反応メカニズムを解明する。また、CO₂を効率よく還元・分解する最適なプラズマ状態を得るために、高電圧パルス電源の開発と最適化およびプラズマリアクターの開発と最適化を行なう。



➤ 個別事業成果

研究開発目標である世界最高レベルのCO₂転換率とエネルギー効率を達成し、プラズマでのCO₂分解・還元反応メカニズムを解明した。さらに、スケールアップリアクターの設計・製作を行い、スケールアップリアクター開発の課題を抽出し、研究計画以上の成果を得た。

プラズマリアクター・既設電源によるCO₂還元・分解反応速度の測定試験について円筒二重管型既設プラズマリアクターと既設電源（ハイデン社製）を用いて、大気圧プラズマによるCO₂分解率、分解速度を測定し、分解反応のエネルギー効率を明らかにした。また、アンモニアおよび水蒸気を用いてCO₂還元率、還元反応速度を得た。アンモニアでの還元反応では、直接尿素に転換できる可能性を得た。また、新型プラズマリアクターと新型電源（澤藤電機製）を用いてCO₂分解反応実験を行い、世界最高レベルの分解率（50.2%）とエネルギー効率（10.8%）を達成した。また、アンモニアでのCO₂還元反応実験を行い、尿素転換の最適条件を明らかにした。

CO₂還元・分解反応メカニズムの解明研究について、CO₂分解反応およびCO₂/NH₃還元反応の素反応モデルを構築した。まずCO₂分解反応モデルについてシミュレーションと実験結果の比較を行い、良く一致することを確認した。

大気圧プラズマ用高電圧電源の開発について、低消費電力型の大気圧プラズマ用高圧電源を試作し、岐阜大学に設置し、プラズマへの入力電力、電源消費電力、CO₂分解率を測定し、岐阜大学所有の既設プラズマ電源の値と比較した。新開発の電源は格段に優れていることが明らかとなった。

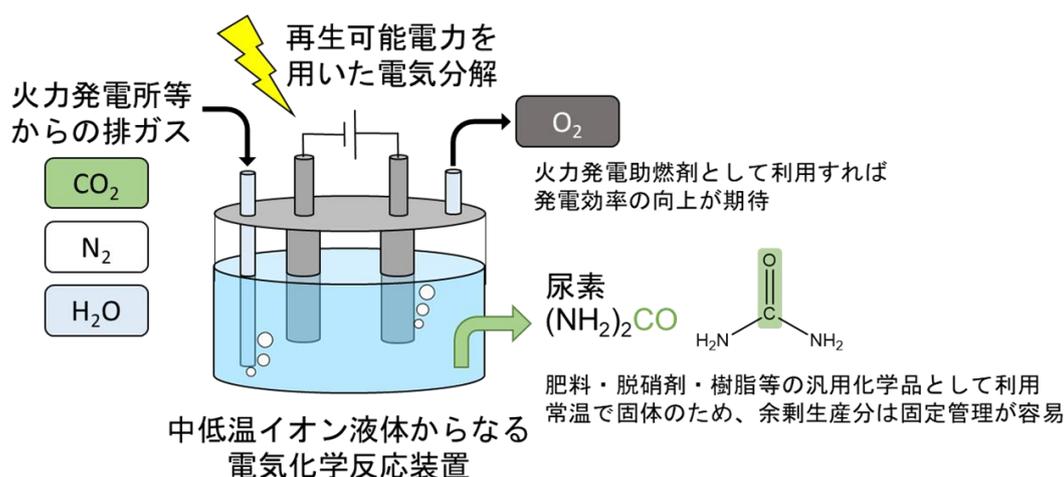
プラズマリアクターの最適化について、最適プラズマリアクター#2を製作し、円筒型プラズマリアクターと性能比較した。CO₂分解率は両者同等であるが、エネルギー効率は最適プラズマリアクター#2の方が

高く、目標を達成した。カーボン析出用円筒型プラズマリアクター（銅電極）を試作し、岐阜大学でカーボン析出実験を行った。カーボン析出が確認された。

h. 二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査

➤ 個別事業概要

- 火力発電所等からの燃焼後排ガスに含まれるCO₂を固定化するため、排ガスに含まれる窒素および水(水蒸気)を原料として再生可能電力を用いた、中低温イオン液体中における尿素電解合成反応によるCO₂固定化・資源化システムの実現可能性を調査する。



火力発電所等からの燃焼後排ガスに含まれる CO₂ を固定化するため、排ガスに含まれる窒素および水(水蒸気)を原料として、再生可能電力を用いた中低温イオン液体中における尿素電解合成反応による CO₂ 固定化・資源化システムの実現可能性を調査する。

➤ 実施の効果（費用対効果）

本提案は新奇な CO₂ 固定化・炭素循環型再資源化システムであり、開発に成功すれば、火力発電所排ガスからの CO₂ 固定とともに、有用化学品の製造につながる。

➤ 個別事業成果

最終目標は中低温イオン液体中における尿素電解合成システムの実用化であるが、第一段階として、実現可能性を検討した。イオン液体の選択により、キーテクノロジーである N₂ 還元の必要条件・課題を明示できた。

火力発電所等からの燃焼後排ガスに含まれる CO₂ を固定化するため、排ガスに含まれる窒素および水（水蒸気）を原料として、再生可能エネルギーなどから電気化学的に、有用な汎用化学品である尿素を合成する可能性調査を実施する。

①FS 研究

・既存の商用尿素製造プロセス（化石原燃料使用）および CO₂ フリー水素からのアンモニアを用いた尿素製造プロセスの CO₂ 排出量、投入エネルギー量を調査するとともに、本事業の新規電気化学プロセスが優位となる目標値を見積もった。

・既存の商用尿素製造プロセス（化石原燃料使用）を調査した結果、CO₂ 排出量は 0.72 t-CO₂ /t-尿素（国内）、0.42～1.85 t-CO₂ /t-尿素（海外）、投入エネルギー量は 22.2 GJ/t-尿素（国内）、20.1～31.9 GJ/t-尿素（海外）を得た。

・CO₂ フリーとなる（再エネによる水電解 + Haber-Bosch 法）から尿素製造するプロセスを目標対象とすると、その投入エネルギー量は約 28 GJ/t-尿素と推定された。これより、本提案方式の優位性は、電解電圧を 2 V とすると約 69%以上の電流効率で得られると試算した。

②要素技術開発研究

②-1 尿素合成反応場条件を満たす中低温イオン液体の探索

尿素-リチウムビス（トリフルオロメチルスルフォニル）アミド（LiTFSA）電解液（以降 A 系）、有機カチオンからなるアミド系イオン液体（リチウムビス（フルオロスルフォニル）アミド-カリウムビス（フルオロスルフォニル）アミド：以降 B 系）、有機カチオンからなるアミド系イオン液体（ブチルメチルピロリジニウム（トリフルオロメチルスルフォニル）アミド：以降 C 系）に加えて新規イオン液体として溶媒和イオン液体であるグライム系（以降 G3 または G4）について、窒素含有化学種の溶解性調査および電解窒素還元反応の解析を行った。A 系は電気化学測定から窒素還元反応に必要な耐還元性がないこと、B 系は 60 °C 以上で加水分解し HF を発生するため、候補から除外した。

C 系では、電解液採取、HCl 水溶液抽出により、N₃⁻を NH₄⁺としてイオンクロマトグラフ分析により定量化する手法を確立したが、窒素電解還元で明確な N₃⁻生成は確認されていない。G3 および G4 では、G3 の電気化学試験時に採取した電解液から有意な NH₄⁺濃度を初めて検出したが、投入電気量との相関が乏しく、再現性を得る必要がある。

② -2 尿素合成反応プロセスの最適化

Li₃N 分散 C 系を用いて、プロセスの低投入エネルギー化が期待できる N₃⁻と CO₂ より尿素前駆体である C-N 結合性化合物の合成に取り組んだ。添加した Li₃N は、CO₂ バブリングとともに減少することを反応液の分析により明らかにしたが、得られた沈殿物は Li₂CO₃ と同定され、尿素または尿素前駆体は得られていない。高速液体クロマトグラフを用い、適切な分離カラム・検出器を選定し、サンプル量・オープン温度等を適正化することにより、水溶液中の尿素を 1 から 2000ppm の濃度範囲で定量する方法を確立した。この際、試料中に B 系イオン液体の反応場を想定した 500ppm のイオン液体成分が共存しても、尿素の定量に影響しないことを確認した。また、尿素を溶解した水溶液の全反射赤外吸収スペクトルには、尿素中の N-H、C=O および C-N 結合に帰属できる吸収ピークが観測され、50 mM 程度以上の濃度では定量分析が可能であることを明らかにした。基準物質としてエタノールを添加した尿素水溶液のラマンスペクトルから、C-N 結合に帰属される散乱強度が尿素濃度に対して線形に変化することがわかり、ラマン分光分析による定量分析手法を確立した。

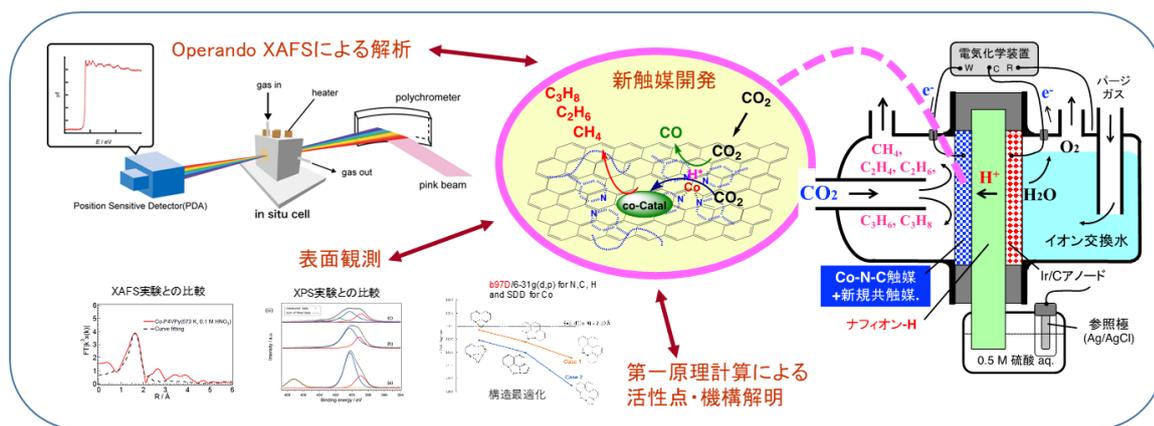
③システムの提案

尿素が分散した C 系を水と接触させ振動することでイオン液体は無色透明に変化し、水相の赤外分光およびラマン分光測定により水相中への尿素の抽出を確認した。赤外吸収スペクトルの吸光度から水相中の尿素濃度を定量分析した結果、イオン液体に加えた尿素のほぼ全量を分離回収することに成功した。電解セルの概念設計として、多孔質 Ni 電極を用いた電気化学的窒素還元反応は、小孔径で通電電流が増加すること、その電流値は液浸漬部体積（浸漬深さ）に依存すること、 N_2 を電極下部から導入することで電極浸漬部がより有効に機能することを実験的に明らかにした。現時点では、提案システムを実験的に模擬した条件において、尿素合成まで至っていない。

i.CO₂ の気相電解還元による炭化水素燃料の直接合成可能な電極触媒の研究開発

➤ 個別事業概要（2022 年 4 月事業開始）

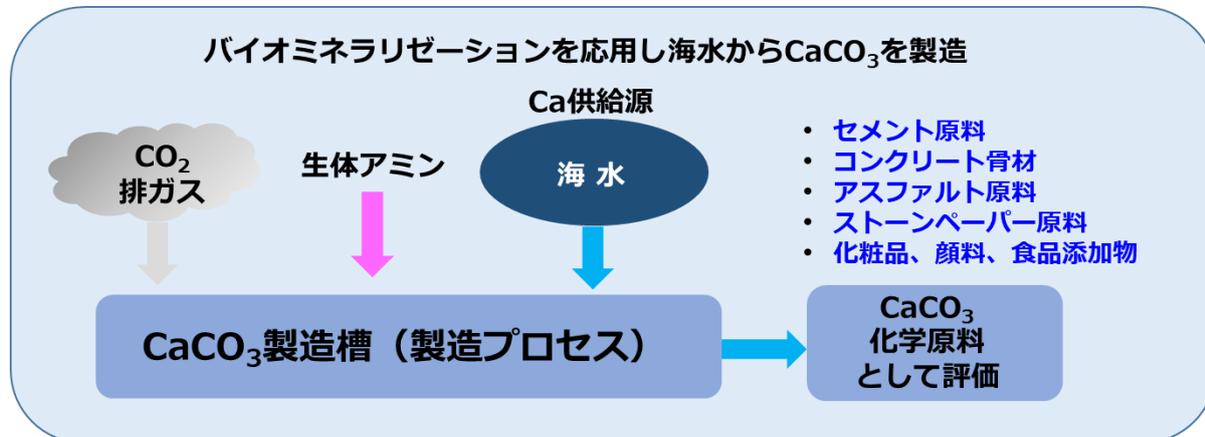
- CO₂ の気相電解還元による炭化水素生成に活性な新規電極触媒を研究開発し、炭化水素生成と反応条件因子との法則性を明らかにして反応機構および電極触媒作用を解明し、炭化水素生成の選択合成可能な電極触媒を開発する。



j. 海水と生体アミンを用いた CO₂ 鉱物化法の研究開発

➤ 個別事業概要（2022年4月事業開始）

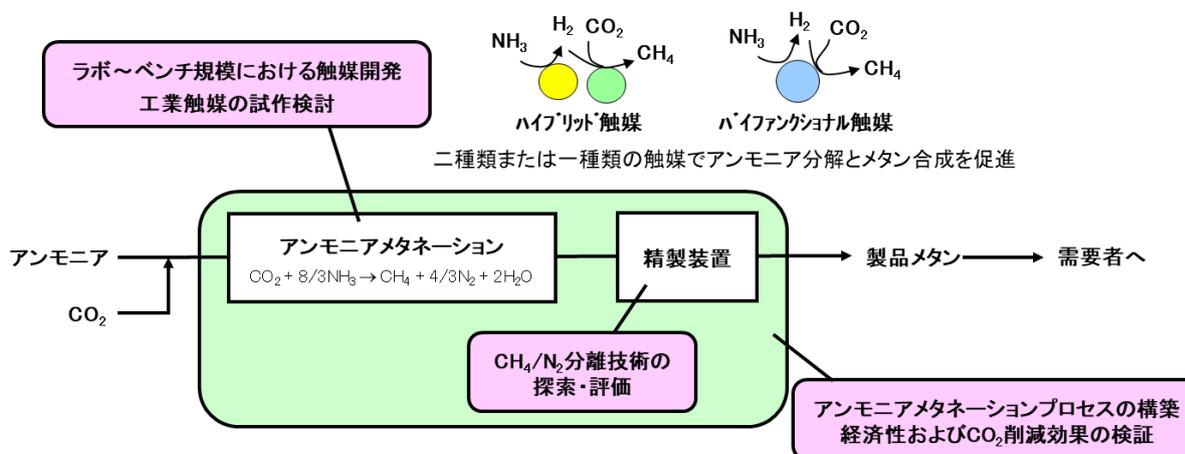
- 本研究では、海水と生体アミンを用いてバイオメテックなCO₂鉱物化法(CaCO₃)を開発すること目的とし、トンスケールのスケールアップ実証実験を行う。



k. CO₂ からのアンモニアメタネーションの技術開発

➤ 個別事業概要（2022年4月事業開始）

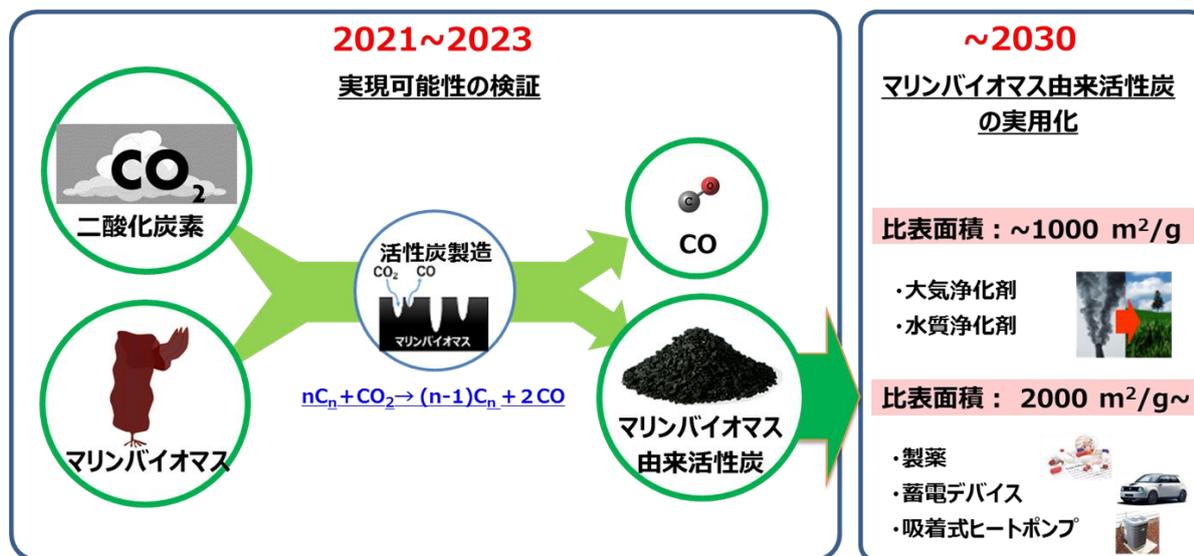
- 本研究では、アンモニア由来の水素によりCO₂を還元して合成メタンを得るアンモニアメタネーションの触媒開発およびプロセス検討を行い、技術的、経済的な実現可能性を明らかにする。



l : CO₂を活用したマリンバイオマス由来活性炭転換技術の開発

➤ 個別事業概要 (2022年4月事業開始)

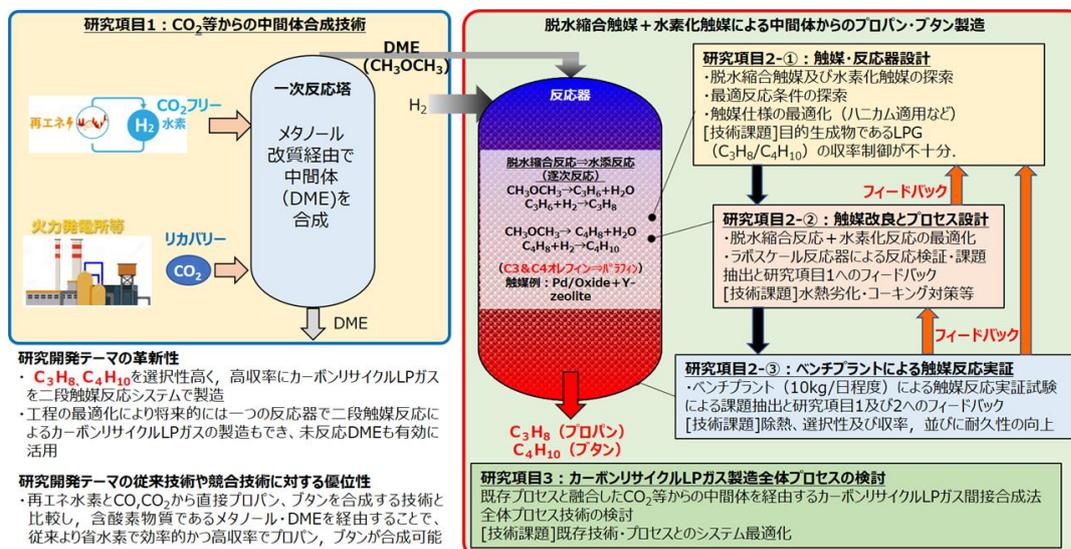
- 本研究では、CO₂を固定化するマリンバイオマスを原料とし、更にそのものを原料としてCO₂を利用して活性炭へ転換するという新たな試みであり、CO₂を利活用することを目的とし、マリンバイオマス由来活性炭の製造を行う。



m : カーボンリサイクル LP ガス合成技術の研究開発

➤ 個別事業概要 (2022年4月事業開始)

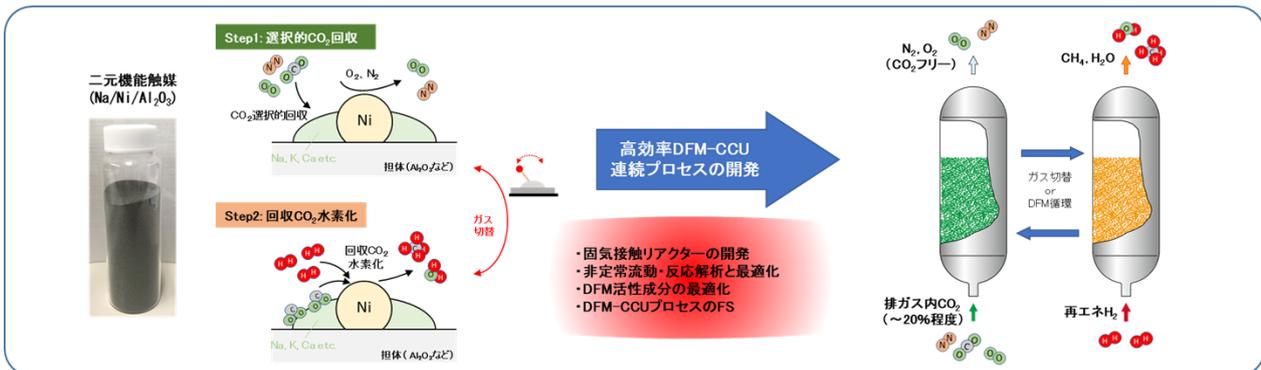
- 本研究では、CO₂とH₂を原料とし、ジメチルエーテル(DME)を経由して各種触媒反応と合成プロセスによってプロパン、ブタンを製造し消費者に提供することを目指す。



n : 二元機能触媒を用いた高効率炭酸ガス回収・メタン合成プロセスの研究開発

➤ 個別事業概要（2022年4月事業開始）

- CO₂回収とCO₂水素化の二つの機能を有する二元機能触媒（DFM）を用いた、新たなCO₂回収・メタネーションプロセス（DFM-CCUプロセス）の開発を行う。効率的な連続操作を実現するリアクターの開発、DFM性能の向上、DFM-CCUプロセス実現性評価を展開する。



4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

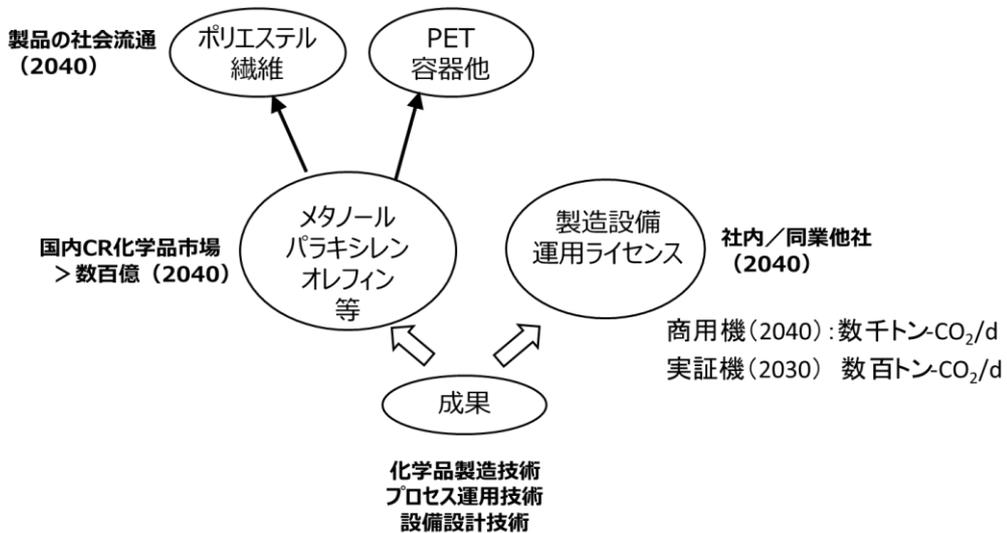
4. 1. 本プロジェクトにおける「実用化」の考え方

実用化は、『CO₂ 排出削減・有効利用に適用可能な技術が確立されたこと』をいう。

4. 2. 実用化に向けた戦略

実証機を通じたカーボンリサイクル製品の製造技術構築により実用化を図る。さらに一次製品の市場導入を図り、高次加工された製品としてさらなる社会流通を狙う。また、製造設備や運用ライセンスなどとしての事業も同時に立ち上げ、事業化を行う。

※化学品事業における例示



4. 3. 実用化に向けた具体的取組

2020 年度から 2025 年度ごろを目標にラボレベルからベンチレベルにスケールアップを行い、基本技術を確認し、実証により製品製造技術を実用化させる。その後、製品製造 2035 年度ごろを目標に大型商用プラントを構築し、大規模商用化を図る。

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度	2027年度～2030年度～2035年度
規模 検討内容	ラボ試験 材料性能向上 基本原理確認		中間目標	ベンチ試験 連続運転 性能評価		最終目標 実証プラント 設計・建設 実証試験 製品製造実用化 商用プラント 設計・建設 大型商用プラント実用化
全体システム 最適化	基本原理確認		基本技術確立		長期運転性能実証 事業化検討	量産化

a. ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中の CO₂ からの基幹物質製造開発事業

2022 年度以降、研究開発成果を基にした小型～中型の電解装置を開発する他、製造ギ酸の市場受入可能性を“CO₂ 有効利用拠点における技術開発”の中で検証する。2027 年度以降、電解装置を工場内 CO₂ 排出源に併設し、CO₂ 処理性能等の検証、および LCA 評価とコスト競争力分析によるビジネスモデルの検討を進めていく。

b. カルシウム含有廃棄物からの Ca 抽出および CO₂ 鉱物固定化技術の研究開発

全体システムとしての連動実証の実施が大切であり、また CO₂ を固定化し炭酸塩を得るためのコストを明確にする必要もある。今後は、GI 基金事業にて、社会実装に向けた検討を加速して実施する。

c. CO₂ 電解リバーシブル固体酸化物セルの開発

今後研究体制にメーカーを加え、～2025 年では大容量化技術開発、～2028 年では 50kW 級大容量スタック実証試験ならびに 5kW 級次世代スタック(大面積)技術検証、～2031 年では 250kW 級システムおよび 50kW 級次世代スタックの実証を行い 2030 年超での rSOC の商用化を目指す。

d. 石炭灰およびバイオマス灰等による CO₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発

2028 年度を目途に電気事業者等供給側、資材販売メーカー等需要側の参画可否等について確認すべく提案する予定である。

e. 高温溶融塩電解を利用した CO₂ 還元技術の研究開発

基盤研究を実施しながら、導入シナリオの検討を行っている。また、関連企業との連携関係を構築しつつあり、事業終了後には、大型化に向けたプロセス設計、パイロットプラント試験実施等に取り組むことで実用化につなげていく。

f. CO₂/H₂O の共電解技術の研究開発

本研究開発で得られた電極反応機構および高性能電極材料開発をベースとした高性能セルの製造技術開発および、スタック化技術についての研究開発を実施する。また、共電解システムの実用化に向け、ベンチシステムでの検証を計画する。

g. 放電プラズマによる CO₂ 還元・分解反応の基盤研究開発

今後、CO₂ 還元分解スケールアップリアクターの開発を行うとともに、生成物 CO を尿素に転換するリアクター開発も行い、“CO₂ 有効利用拠点における技術開発”の中で CO₂ 還元分解プロセスとして実用化に取り組む。

h. 二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査

尿素合成法の確立を目指し基礎研究を継続し、システム成立に目途が付けば、エンジニアリング会社を取り込み、実用化研究の開発に移行する。

o. CO₂を原料としたパラキシレン製造に関する技術開発

本事業期間（2020年度～2023年度）の内、触媒開発、量産化は継続しつつ、2022年度にはベンチプラントを稼働させ、実証プラントの試設計も行う。

事業期間後は、実証プロジェクトに移行する。立地、予算含め現状では未定。

実証プロジェクトで技術面、商業面を確認し、2030年迄には商業化プラントを稼働させる予定。

p.CO₂を用いたメタノール合成における最適システム開発

鉄鋼業は、CO₂集中排出源であると同時に、COやH₂などのCRメタノール合成に利用可能な副生ガスを多量に排出するガス供給源でもある。また、近隣の化学プラントと連携してコンビナートを形成しており、低コストCRメタノールの供給ポテンシャルが大きい。

q.CO₂を原料とした直接合成反応による低級オレフィン製造技術の研究開発

本研究期間終了後、社会実装を目指したスケールアップのための実証プロジェクト化を目指す。

本研究では、小規模100kg-CO₂/Dでの試験であるが、製造ガス組成が事業者側の受入条件を満たす場合、本提案の中で商流プロセスへの導入実績を得ることができる。その成果をもとに化学メーカーに対して、スケールアップ機の実証プロジェクトへの参画を提案しやすくなると考えられる。スケールアップ機での実ガス導入試験を完了することができれば、ユーザー側事業者の技術導入ハードルが下がり、実用化を加速することができる。

r. 次世代 FT 反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発

2030年代よりの準プラント規模での実証事業を目指し、2020年代後半の事業においては、100kW級へのスケールアップを検討する。そのため、本事業では、100kW級パイロット試験機の概念設計を実施すべく、そのための基礎データを取得中である。

s.微細ミスト技術によるCO₂回収技術及び炭酸塩生成技術の開発研究

2020年度～22年度を基礎技術、徳山製造所での現場試験を実施後、23年度と24年度は同地での、装置サイズをスケールアップした実証を想定、25年に商業運転を行う見通しで計画。

t.マイクロ波によるCO₂吸収焼結体の研究開発（CO₂-TriCOM）

需要が供給を上回るクリンカアッシュの代替材として、道路材や屋外緑化材など幅広い分野に向けて焼結体を販売する。また、2025年～2029年度で商用化を考慮した大型化等を実施し、2030年度以降は、開発した商用プラントを石炭灰排出事業者向けに販売を行う。

u. 海水および廃かん水を用いた有価物併産 CO₂ 固定化技術の研究開発

本事業の終了後、ベンチ規模の実証、その後パイロット実証を行い、その結果を踏まえて商業機の Feasibility Study をアップデートする。さらに、関連企業とコンソーシアムを形成しサプライチェーンを構築し、2030年に商業1号案件開始を目指す。

v. 産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発

参加した企業・大学を中心として本技術の事業化を目的とした「技術研究組合」を設立し、その後事業主体となる「特定目的会社」を関係企業等の出資を募って立ち上げ、プラント販売あるいはライセンス販売を展開することを検討する。

w. セメント系廃材を活用した CO₂ 固定プロセス及び副産物の建設分野への利用技術の研究

CO₂固定化とCCU材料製造事業は2025年に自社事業化計画であったが、グリーンイノベーション基金事業への継承に伴い、同事業のコンソーシアム構成会社とともに事業家を進める。2025年に試適用を行い、その後、需要を見ながら2030年には本格適用し、社会実装を図る。回収されたCO₂をコンクリートおよび地盤改良に固定処理事業もグリーンイノベーション基金事業に継承し、2026年から試適用を進め、2030年から本格的にCO₂固定処理事業として行う。CO₂を有償で引き取り、その代わりにクレジットを発行などによりコストアップを抑え、普及拡大を狙う。

x. 製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO₂ 固定化プロセスの技術開発

本取組は、産業界で生成する副生物に CO₂ を固定化しつつ、高付加価値の製品を得るプロセスを指向するものであり、高効率プロセス開発及びサプライチェーンの確立により、経済面で競争力のあるカーボンリサイクル技術の確立が期待できる。

y. 二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発

計画としては、2025年度までにベンチスケール試験、2028年度までにパイロットスケール試験、2032年度までにデモンストレーション実証試験を完了し、その後、火力発電所、セメント工場や鉄鋼プラント等の CO₂ 排出源に隣接した場所でモデル工場を作り、カーボンリサイクル事業を展開しながら、装置の大型化検討や低コスト検討を実施し、更なる事業拡大を図っていく。

z. 製鋼スラグの高速多量炭酸化による革新的 CO₂ 固定技術の研究開発

高速多量炭酸化および熱回収については、小型炭酸化・熱回収試験装置を製作中である。炭酸化メカニズムについては反応生成物の観察を開始している。凝固・熱間破碎については、小型破碎試験装置を発注済である。何れも計画通り進捗中である。

4. 4. 実用化に対する課題

○技術面

- 化学品・燃料においては合成触媒における収率・耐久性・選択性を向上する開発が課題。
- 鋳物化においては用途開拓とともに、CO₂ 固定による材料強度の確保等既存規格との整合確認が課題。
- 原料 CO₂ 等の確保から製品完成まで、低コストで実現可能な一貫プロセスの構築が必要。

○事業面

- 原料となる CO₂、H₂ の調達コストを含めた総合的な経済性検討が必要
- 特に燃料分野においては国際標準等に基づいた CO₂ カウントの仕組み、インセンティブの在り方など制度形成による経済性評価を行う必要。

4. 5. 波及効果

○技術・社会的効果

- 2050 年のカーボンニュートラル化で数億トン/年規模の CO₂ 削減量を見込み、温暖化対策への大きな波及効果が見込める。
- 技術的な網羅を行い、実例を収集し、発信を行うことで新規の参入を活発化することを期待できる。これにより 2050 年カーボンニュートラル化を目指して、社会的な開発を活性化させる。

○経済的効果

- 経済性評価等を実施することにより、社会的な経済性見通し、特に地域経済に適合した運用の最適化が見込まれる。

○人材育成効果

- 共通基盤事業等により大学・企業内でのカーボンリサイクル技術者が育成され、知識の伝搬による業界への人材展開が期待できる。

P16002

P16003

P10016

P92003

「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発」基本計画

環境部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

2015年7月に決定された長期エネルギー需給見通しにおいては、3E+S（安全性、安定供給、経済効率性、環境適合）を同時達成しつつ、バランスの取れた電源構成を実現していくこととしており、火力発電分野においては、石炭火力発電及びLNG火力発電の高効率化を図り、環境負荷の低減と両立しながら、有効活用を推進することとしている。火力発電の高効率化は、再生可能エネルギーの最大限の導入促進、安全性の確認された原子力発電の活用と合わせ、温室効果ガス削減目標積み上げの基礎となった対策・施策として位置づけられている。これを踏まえ、2016年6月に官民協議会で策定した「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」においては、火力発電の高効率化、CO₂削減を実現するため、次世代の火力発電技術の早期確立を目指すこととしている。また、2021年10月に策定された「第6次エネルギー基本計画」においては、火力発電は再生可能エネルギーの変動性を補う調整力・供給力として柔軟な運転（幅広い負荷変動への対応）が求められることから、負荷変動対応や機動性に優れた火力技術開発等の取組を推進することとしている。

2050年に向けて化石燃料の利用に伴うCO₂の排出を大幅に削減していくためには、あらゆる技術的な選択肢を追求していく必要があることから、CO₂を炭素資源（カーボン）と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルを推進することとしており、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では、カーボンニュートラル社会を実現するための重要分野の1つにカーボンリサイクル技術が位置づけられた。また、「カーボンリサイクル技術ロードマップ」（2019年6月策定、2021年7月改訂）において、カーボンリサイクル技術の確立、普及を目指していくこととしている。

2020年3月に策定された「新国際資源戦略」では、CO₂排出削減に向け、液体アンモニアの混焼を含めて着実に技術開発等を進めることが必要とされている。

石炭利用に伴って発生するCO₂、SO_x、NO_x、ばいじん等への対応や、石炭灰及びスラグの有効利用方策を確立することが大きな課題である。そのため、今後とも石炭を活用し、エネルギー需給安定化に貢献していくためにも、より高度なクリーンコールテクノロジーの開発が必要である。

②我が国の状況

我が国の火力発電の熱効率の世界最高水準を保っている。世界で初めて超々臨界圧火力発電（USC）を商用化し、さらには高効率な空気吹石炭ガス化複合発電（IGCC）が既

に実用化段階であり、酸素吹IGCCにおいても実証フェーズにある。また、効率向上に大きく寄与するガスタービンにおいて、1600℃級という高温化を世界に先駆けて実現する等、熾烈な国際競争の中においても、我が国の高効率火力発電システムは、トップレベルを維持しており、世界をリードしている。しかしながら、燃料資源を他国に大きく依存する我が国にとっては、限られた資源の有効利用を図ることは至上命題であり、今後とも、更なる効率化を図っていく必要がある。また、中長期的な視点では、大幅なCO₂削減を実現しうるCO₂の回収・貯留・利用（CCUS）やCO₂フリー燃料の利用技術の開発・推進も重要なテーマであり、国内でのCCS（二酸化炭素の回収・貯留）大規模実証事業や貯留ポテンシャル調査等に加え、CO₂を炭素資源と捉え、これを回収し、多様な炭素化合物として再利用するカーボンリサイクルを推進する取組や石炭火力発電におけるアンモニア混焼試験が進められている。

また、我が国においては、石炭の排ガスに関して、世界的に見ても非常に厳しい環境基準（環境保全協定値）が定められ、その基準が遵守されている。そのような背景から、脱硫、脱硝、ばいじん処理技術等、高度な環境保全技術が過去から培われており、日本の強みが発揮できる分野のひとつである。一方、石炭利用に伴い排出する石炭灰については、主にセメントの原料として、これまでは有効利用されてきたが、近年セメント生産量は減少傾向にあり、セメント原料に代わる石炭灰の利用方法の確立が喫緊の課題である。

③世界の取組状況

気候変動対策のため、2021年11月時点では世界の150ヶ国以上で年限付きのカーボンニュートラル目標が掲げられており、各国でCO₂排出量を大幅に削減するための基礎研究から技術開発、実証研究等の様々な取組が行われている。

火力発電のCO₂排出の削減に向けた高効率化、ゼロエミッション火力発電、再エネ導入時の負荷変動対応に向けた開発等が海外でも進められている。また、火力発電とCCUSの組み合わせによるカーボンニュートラルにも注力する方向であり、火力発電や各種産業等の排ガスからのCO₂を分離・回収する技術として、高性能の材料等を用いて省エネルギー・低コストを目指す化学吸収法や物理吸着法、膜分離法等の研究開発と実証等が世界各地で進められている。さらに、回収したCO₂を様々な物質に変換させて有効利用する技術についても、先進的な取組が行われており、CO₂と水素から基礎化学品や機能性化学品、液体燃料や気体燃料を合成する技術、コンクリート等にCO₂を効率的に固定化させる技術の開発や実証等が進められている。

④本事業のねらい

長期エネルギー需給見通しの実現に向けて、火力発電の高効率化に関しては、石炭火力の発電効率を大幅に引き上げる石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）の実証事業をはじめ、石炭火力、LNG火力の双方につき、新たな火力発電技術の開発等を実施する。また、火力発電から発生するCO₂排出量をゼロに近づける切り札となる技術として、CO₂フリー燃料の利用及び火力発電所等から発生する大量のCO₂を効率的に分離・回収・有効利用するための技術開発等を実施する。これまでの火力発電に係る技術開発は、個別の技術ごとに進められていたが、石炭火力、LNG火力は共通する要素技術が多く、火力発電全体の技術開発を加速するためには、個別技術開発を統合し、包括的かつ一体的に推進することが有効である。そこで、次世代火力発電技術に係る事業を本事業において統合し、関連

事業を一元管理し、一体的に進めることで、開発成果を共有しつつ、技術開発に係るリソースを最適化する。これにより、次世代火力発電技術の開発を加速し、早期の技術確立及び実用化を狙う。また、LCA的な観点も含めたCO₂の利用に係るカーボンリサイクル技術開発を一元的に進めることで、火力発電プロセスの更なる効率化を図るとともに、CO₂排出削減に向けた取り組みの効率化を図る。

石炭の効率的利用、環境対応等を目的として、石炭利用の環境対策に関する調査・技術開発を実施する。これらの取組により、石炭の安定調達性が増し、石炭を安価で安定的に使用することが可能となり、我が国におけるエネルギーセキュリティの向上に資する。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標

本事業を通じて、発電効率の大幅な向上技術、調整力確保に寄与する負荷変動対応発電技術、CO₂分離・回収後においても高効率を維持する技術、CO₂フリー燃料の利用技術、低コストなCO₂分離・回収技術及びCO₂有効利用技術(カーボンリサイクル等)により、CO₂排出の削減に寄与する革新的なカーボンリサイクル技術及び次世代火力発電技術の見通しを得る。また、石炭灰の有効利用率を100%まで向上させるなど、石炭の有効利用技術を確立する。

研究開発項目ごとの目標については、別紙にて定める。

②アウトカム目標

本事業の開発成果により、2030年頃にLNG火力においては、将来のガスタービン燃料電池複合発電(GTFC)商用機として送電端効率63%(高位発熱量基準)を達成し、さらには、IGFC商用機へと繋げることで、石炭火力として送電端効率55%(高位発熱量基準)を達成する。また、世界の火力発電市場は、今後、2040年にかけて石炭火力では約520兆円、LNG火力では約270兆円で、累計790兆円の規模が見込まれる。年平均では約30兆円であり、このうちのシェア1割、約3兆円の次世代火力技術の市場を獲得する。また、2040年頃に燃料としての年間アンモニア利用量1,000万トンを実現し、アンモニア35,000円/tを想定した場合において、3,500億円相当の燃料アンモニア市場を創出する。CCUSの実現に向け、CO₂分離・回収コスト1,000円台/t-CO₂という大幅な低減を達成する。また、CO₂有効利用の一例として、CO₂由来のメタンで天然ガスパイプラインの許容圧力変動幅の1割を活用して負荷変動対応に供する場合として、1,300億円相当の天然ガス代替を獲得する。また、負荷変動対応技術を確立することで、電力市場整備の一つとして進められてきた調整力公募市場(短期間での電力需給調整能力(ΔkW 価値)を取引する市場公募)での電力供給機会の更なる創出に寄与し、電力市場の活発化に貢献する。

また、カーボンリサイクルの観点からは、2030年頃に短期的に実現可能な技術(ポリカーボネートなどの化学品、バイオジェットなどの液体燃料、道路ブロックなどのコンクリート製品など)を既存のエネルギー・製品と同等のコスト実現を目指すとともに、2040年以降に実現をめざした需要の多い汎用品(オレフィンやBTXなどの化学品、ガス、液体などの燃料、汎用コンクリート製品など)へ拡大する。

③アウトカム目標達成に向けての取組

市場ニーズを見極めつつ、各技術開発プロセスの進捗管理を行い、開発優先度の調整、開発スケジュールの最適化、技術開発の相互連携を図り、中長期の火力発電技術開発の全体プロセスの最適化・効率化を図る。そして、技術開発のプロセスにおけるコスト低減の取組と信頼性の確保により、商用機導入を早期に拡大する。

(3) 研究開発の内容

火力発電の効率化及びCO₂フリー燃料の利用、CO₂分離・回収・有効利用等に関する調査、開発及び実証、石炭灰や溶融スラグの有効利用及び削減に関する調査及び技術開発並びに排煙処理技術等の環境対策に関する調査等を実施する。実施に当たっては、各事業の性質に合わせ、委託事業又は助成事業（NEDO負担1/3、2/3、1/2）により実施するとともに、必要に応じてステージゲート審査を用いる。

なお、個別研究開発項目の研究開発内容の詳細については、別紙にて記載する。

研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業 [助成事業]

- 1) 酸素吹IGCC実証 (1/3助成)
- 2) CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証 (1/3, 2/3助成)
- 3) CO₂分離・回収型IGFC実証 (1/2助成)
- 4) 信頼性向上、低コスト化 (1/3助成)
- 5) CO₂分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発 (1/2助成)

研究開発項目② 高効率ガスタービン技術実証事業 [助成事業]

- 1) 1700℃級ガスタービン
(2016～2018年度: 2/3助成、2019～2020年度: 1/2助成)
- 2) 高湿分空気利用ガスタービン (AHAT) (2/3助成)

研究開発項目③ 先進超々臨界圧火力発電技術開発 [助成事業 (2/3助成)]

研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発 [委託事業]

- 1) 次世代ガス化システム技術開発
- 2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究
- 3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発
- 4) 燃料電池石炭ガス適用性研究
- 5) CO₂分離型化学燃焼石炭利用技術開発
- 6) 石炭火力の負荷変動対応技術開発
- 7) CO₂有効利用技術開発
- 8) CO₂分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発
- 9) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究

研究開発項目⑤ CO₂回収型次世代IGCC技術開発 [委託事業]

研究開発項目⑥ カーボンリサイクル・次世代火力推進事業 [委託事業]

研究開発項目⑦ 次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発 [助成事業 (1/2助成)]

研究開発項目⑧ CO₂有効利用拠点における技術開発 [委託・助成事業]

- 1) CO₂有効利用拠点化推進事業 [委託・助成事業]
- 2) 研究拠点におけるCO₂有効利用技術開発・実証事業 [委託・助成事業]

研究開発項目⑨ CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発 [委託・助成事業]

- 1) 化学品へのCO₂利用技術開発 [委託・助成事業]
- 2) 液体燃料へのCO₂利用技術開発 [委託・助成事業]
- 3) コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO₂利用技術開発 [委託・助成事業]
- 4) 気体燃料へのCO₂利用技術開発 [委託・助成事業]

研究開発項目⑩ 石炭利用環境対策事業 [委託・助成事業]

- 1) 石炭利用環境対策推進事業 [委託事業]
- 2) 石炭利用技術開発 [助成事業 (2/3助成)]

研究開発項目⑪ アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業 [委託・助成事業]

- 1) 要素研究 [委託事業]
- 2) 実証研究 [助成事業 (1/2助成)]

※1)の実施者を公募した後の、1)から2)への移行の可否は、外部有識者で構成される委員会の審査(ステージゲート審査)を経て決定する。

研究開発項目⑫ CO₂分離・回収技術の研究開発 [委託事業]

(2021年度までは「CCUS研究開発・実証関連事業」において実施)

- 1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発
- 2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究
- 3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発
- 4) 二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発

研究開発項目⑬ 火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業 [委託・助成事業]

- 1) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の技術開発・実証研究 [委託・助成事業]
- 2) 石炭火力の負荷変動対応技術開発・実証研究 [委託・助成事業]

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本事業は、NEDOが単独又は複数の企業、大学等の研究機関(原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別の研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業との連携が必要な部分はこの限りではない。)から、原則公募によって実施者を選定し実施する。ただし、移管事業に関してはこの限りではない。

NEDOは、プロジェクトの進行全体の企画・管理やプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させるため、必要に応じてプロジェクトマネージャー(以下「PM」という。)を任命する。また、各実施者の研究開発ポテンシャルを最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、必要に応じて研究開発責任者(プロジェクトリーダー、以下「PL」という。)を指名する。

なお、研究開発項目ごとのPM、PLは以下のとおり。また、研究開発項目④2)、3)、4)は、推進にあたって、燃料電池に関する情報共有と開発戦略の整合性を図るため、プロジェクトチーム(PT)にNEDO新エネルギー部を加える。

研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業

PM:NEDO 戸島正剛、PL:大崎クールジェン株式会社 木田一哉

研究開発項目② 高効率ガスタービン技術実証事業

1) 1700℃級ガスタービン

PM: NEDO 園山希、PL: 三菱重工業株式会社 石坂浩一

2) 高温分空気利用ガスタービン (AHAT)

PM: NEDO 山中康朗、PL: 三菱日立パワーシステムズ株式会社 吉田正平

研究開発項目③ 先進超々臨界圧実用化要素火力発電技術開発

PM: NEDO 足立啓、PL: 一般社団法人高効率発電システム研究所 福田雅文

研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発

1) 次世代ガス化システム技術開発

PM: NEDO 中田博之、PL: 一般財団法人電力中央研究所 牧野尚夫

2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ要素研究

PM: NEDO 春山博司、PL: 電源開発株式会社 早川宏

3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

PM: NEDO 福原敦、PL: 三菱日立パワーシステムズ株式会社 北川雄一郎

4) 燃料電池石炭ガス適用性研究

PM: NEDO 福原敦、PL: 電源開発株式会社 大畑博資

5) CO₂分離型化学燃焼石炭利用技術開発

PM: NEDO 中田博之、PL: 一般財団法人石炭エネルギーセンター 原田道昭

6) 石炭火力の負荷変動対応技術開発

PM: NEDO 野原正寛、PL: 契約毎に設置

7) CO₂有効利用技術開発

PM: NEDO 天野五輪磨、PL: 国立研究開発法人産業技術総合研究所 坂西欣也

8) CO₂分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発

PM: NEDO 森匠磨

9) 機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究

PM: NEDO 新郷正志、PL: 一般財団法人電力中央研究所 渡辺 和徳

研究開発項目⑤ CO₂回収型次世代IGCC技術開発

PM: NEDO 青戸冬樹、PL: 一般財団法人電力中央研究所 牧野尚夫

研究開発項目⑦ 次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発

PM: NEDO 西里友志、PL: 一般社団法人高効率発電システム研究所 福田雅文

研究開発項目⑧ CO₂有効利用拠点における技術開発

PM: NEDO 戸島正剛

研究開発項目⑨ CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発

PM: NEDO 荒川純

研究開発項目⑩ 石炭利用環境対策事業

PM: NEDO 菅本比呂志

研究開発項目⑪ アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業

PM: NEDO 園山希

研究開発項目⑫ CO₂分離・回収技術の研究開発

PM: 選定中

研究開発項目⑬ 火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業

PM: 選定中

(2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理及び執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適切に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

①進捗把握・管理

PMは、PLや研究開発実施者と密接に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

②技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策の分析及び検討を行う。

3. 研究開発の実施期間

本事業の実施期間は、2016年度から2026年度までの11年間とする。なお、研究開発項目①及び②は2012年度から2015年度、研究開発項目③は2008年度から2015年度まで経済産業省により実施したが、2016年度からNEDOが実施している。研究開発項目⑫は2018年度から2021年度まで「CCUS研究開発・実証関連事業」により実施したが、2022年度より本事業で実施する。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、事業の意義及び目標達成度や成果に係る技術的意義及び将来の産業への波及効果等について、評価を実施する。研究開発項目①～⑤、⑦～⑨、⑪については、技術評価実施規程に基づき、プロジェクト評価を行い、⑩については事業評価を行う。

評価の時期については、研究開発項目①は、中間評価を2017年度、2020年度及び2023年度に、前倒し事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目②は、中間評価を2018年度、事後評価を2021年度に実施する。研究開発項目④1)は、研究開発項目⑤と統合の上、評価を行う。研究開発項目④2)は、事後評価を2019年度に実施する。研究開発項目④3)、4)は、中間評価を2019年度に、事後評価を2022年度に実施する。研究開発項目④5)は中間評価を2017年度に実施し、研究開発項目④6)は、中間評価を2020年度に、事後評価を2023年度に実施し、研究開発項目④7)は前倒し事後評価を2021年度に実施し、研究開発項目④8)は中間評価を2022年度に、事後評価を2025年度に実施し、研究開発項目④9)は前倒し事後評価を2021年度に実施する。研究開発項目⑤は、中間評価を2017年度、前倒し事後評価を2020年度に実施する。研究開発項目⑥は、調査事業については内容に応じて研究開発項目①から⑤、⑦～⑪の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施し、共通基盤技術開発については研究開発項目⑨の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施、先導研究については内容に応じて研究開発項目⑨、⑪の中間評価、事後評価の際に合わせて評価を実施する。研究開発項目⑦は、中間評価を2019年度、事後評価を2022年度に実施する。研究開発項目⑧および研究開発項目⑨1)、2)、3)は、中間評価を2022年度及び2025年度、事後評価を2027年度に実施する。研究開発項目⑨4)は中間評価を2023年度、前倒し事後評価を2026年度

に実施する。研究開発項目⑩は、中間評価を2019年度、2022年度、前倒し事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目⑪は、事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目⑫は、中間評価を2022年度、事後評価を2025年度に実施する。研究開発項目⑬は、中間評価を2024年度、前倒し事後評価を2026年度に実施する。

5. その他の重要事項

(1) 委託事業成果の取扱い

①成果の普及

得られた事業成果については、NEDO、実施者とも普及に努める。

②標準化等との連携

得られた事業成果については、標準化等との連携を図り、我が国の優れたカーボンリサイクル・次世代火力発電等技術を普及させるために、標準化への提案等を積極的に行う。

③知的財産権の帰属

事業成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・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25条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。

なお、海外動向や国際展開を見据えた知財管理を行うとともに、海外における知財の確保を積極的に推進する。

④知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトのうち、研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発及び研究開発項目⑥カーボンリサイクル・次世代火力推進事業、研究開発項目⑧CO₂有効利用拠点における技術開発、研究開発項目⑨CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発、研究開発項目⑩石炭利用環境対策事業及び研究開発項目⑪アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業、研究開発項目⑫CO₂分離・回収技術の研究開発、研究開発項目⑬火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業は、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

⑤データマネジメントに係る運用

本プロジェクトのうち、研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発8)、研究開発項目⑥カーボンリサイクル・次世代火力推進事業、研究開発項目⑧CO₂有効利用拠点における技術開発、研究開発項目⑨CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発、研究開発項目⑩石炭利用環境対策事業及び研究開発項目⑪アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業、研究開発項目⑫CO₂分離・回収技術の研究開発、研究開発項目⑬火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業のうち2018年度以降に公募を行う事業は、「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針」を適用する。

(2) 基本計画の変更

PMは、当該事業の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、事業内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、基本計画を見直す等の対応を行う。

(3) 根拠法

本事業は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第一号ハ、第三号及び第六号イに基づき実施する。

(4) 委託先等以外の第三者の土地に設置した資産の処分方法

研究開発項目⑧においては委託先等以外の第三者の土地に拠点整備インフラを設置する予定である。第三者の土地に設置した資産であっても、委託先は、委託事業終了後、有償により、NEDOに帰属する資産をNEDOから譲り受けることとなっている（約款第20条の2①）。ただし、以下の要件を満たすものに限り、委託事業内における当該資産の解体撤去を実施できる。

・事業目的達成後に、取得資産を設置した第三者の敷地等の速やかな原状回復を必要とし、かつ、その時点で利活用できない資産（機能が著しく低下している、移設するとその機能を失う等、物理的に使用できない資産）である場合

(5) その他

最新の技術動向や政策上の必要性に鑑み、必要に応じた研究開発項目の追加や見直しを行うことがある。本事業の実施を通じて、イノベーションの担い手として重要な若手研究員及び女性研究員の育成や中堅・中小・ベンチャー企業等を支援することとする。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2016年1月、基本計画制定。

(2) 2016年4月、3. 研究開発の実施方式（1）研究開発実施体制 研究開発項目③、④ 1）と2）、⑤のPMの変更。

5. 評価に関する事項、研究開発項目④ 5）中間評価、事後評価の年度を1年後ろ倒し。別紙 研究開発項目④ 5）の3. 達成目標、中間目標年度と最終目標年度を1年後ろ倒し。研究開発スケジュールは研究期間を1年延長し、中間評価と事後評価を1年後ろ倒し。

(3) 2016年9月、5. 評価に関する事項、研究開発項目④ 5）中間評価、事後評価の年度を1年後ろ倒ししたが、当初計画通りに戻す。

別紙 研究開発項目④ 5）の3. 達成目標、中間目標年度と最終目標年度を1年後ろ倒ししたが、当初計画通りに戻す。

研究開発スケジュールは研究期間を1年延長し、中間評価と事後評価を1年後ろ倒ししたが、当初計画通りに戻す。

(4) 2017年2月

1. 研究開発の目的・目標・内容の（2）研究開発の目標並びに（3）研究開発の内容に、研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発6）石炭火力の競争力強化技術開発、7）C

O₂有効利用技術開発及び研究開発項目⑦次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発の内容を追加した。

3. 研究開発の実施方式のPM及びPLを追記・修正した。

5. 評価に関する事項の④及び⑥の実施時期を修正し、並びに④1)、5)の前倒しの区分を明確化し、④6)、7)、⑦を追加した。

6. その他の重要事項の(1)委託事業成果の取扱い③知的財産権の帰属に知財マネジメント適用プロジェクト名を追記した。

(5) 2017年5月

3. 研究開発の実施体制(1)研究開発実施体制 研究開発項目②の1)と2)及び④の6)のPMの変更。

(6) 2017年6月

研究開発項目④の1) 3. 達成目標に中間目標を設定し、2017年度に中間評価を実施する。

(7) 2018年2月

1. 研究開発の目的・目標・内容の(3)研究開発の内容のうち、研究開発項目①の2)、3)の助成率を変更した。また、研究開発項目④次世代火力発電基盤技術開発8)流動床ガス化燃焼を応用した石炭利用技術開発、9)機動性に優れる広付加帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究の内容を追加した。また、研究開発項目④次世代火力基盤技術開発1)次世代ガス化システム技術開発を、研究開発項目⑤に統合し、研究開発項目⑤の名称を変更した。

3. 研究開発の実施方式のPM及びPLを追記・修正した。

5. 評価に関する事項の④1)、6)、8)、9)の評価時期を追記・修正した。

6. その他の重要事項の(1)委託事業成果の取扱い③知的財産権の帰属に注釈を追記した。

(8) 2018年7月

3. 研究開発の実施方式(1)研究開発実施体制 研究開発項目④2)、8)のPMの変更、及び、研究開発項目④5)のPLの変更、研究開発項目④6)のPLの記載変更。別紙 研究開発項目⑥ 1. 研究開発の必要性、2. 具体的研究内容にかかる記載を一部変更した(バイオマスに係る記載の追記)。

(9) 2018年9月

3. 研究開発の実施方式において、研究開発項目①及び研究開発項目④7)、9)のPLの変更、4. 研究開発の実施期間の変更、5. 評価に関する事項の研究開発項目①の中間評価時期及び事後評価時期の変更、研究開発項目④2)の評価時期変更、研究開発項目④5)の事後評価を削除。6. その他の重要事項のデータマネジメントに係る運用に研究開発項目①3)を追記。また、別紙 研究開発項目①について、期間の延長および、2)CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証の最終目標を詳細な記載に変更。別紙 研究開発項目④9)について、目標値を補足。研究開発スケジュール表の修正。

(10) 2019年1月

1. 研究開発の目的・目標・内容の(3)研究開発の内容において、研究開発項目②1)の助成率の変更。5. 評価に係る事項において、研究開発項目⑦の中間評価の追加及び事後評価時期の変更、研究開発項目④8)の前倒し事後評価時期の変更。別紙 研究開発項目④8)の実施期間の変更。別紙 研究開発項目④9)の最終目標を詳細な記載に変更。別紙 研究開発項目⑥の2. 具体的研究内容に燃料多様化に係る記載を追記。別紙 研究開発項目⑦

の実施期間の変更及び中間目標の策定、最終目標年度の変更。研究開発スケジュール表の修正。

(11) 2019年7月

和暦から西暦へ表記修正。3. 研究開発の実施方式において、研究開発項目④6)、7)、9)、⑤及び⑦のPMの変更。5. 評価に関する事項において、研究開発項目④3)、4)の中間評価の追加及び研究開発項目④2)、3)、4)の事後評価時期の変更。別紙 研究開発項目④3)、4)について、実施期間の延長、中間目標の策定及び最終目標の修正。研究開発項目⑥の文言修正。研究開発スケジュール表の修正。その他誤記修正。

(12) 2020年2月

改訂： 基本計画の名称変更、基本計画「クリーンコール技術開発」の統合による記載内容の移管、1. 研究開発の目的・目標・内容(1)(2)において内容の追加、1. 研究開発の目的・目標・内容(3)研究開発の内容及び2. 研究開発の実施方式(1)研究開発の実施体制において名称変更と項目の追加、3. 研究開発の実施期間において期間変更及び追加、4. 評価に関する事項において評価時期の変更及び追加、5(1)④知財マネジメントに係る運用⑤データマネジメントに係る運用において対象研究開発項目の追加、研究開発項目④3)4)において中間評価結果反映のため最終目標を追記。研究開発項目⑧⑨の追加、研究開発項目⑩の移管。

(13) 2020年3月

5. その他重要事項(4)委託先等以外の第三者の土地に設置した資産の処分方法、(5)その他において追記。

(14) 2020年7月

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②2) ④3)、4)、8) ⑧、⑨のPMと研究開発項目④8)の名称を変更。別紙 研究開発項目④8) 1. 研究開発の必要性、2. 具体的研究内容、3. 達成目標の記載から噴流床ガス化技術に係る記載を追加 別紙 研究開発項目⑤ 2. 具体的研究内容の記載から噴流床ガス化技術(ポリジェネレーション)に係る記載を削除。研究開発スケジュール表の修正。その他誤記修正。

(15) 2020年9月

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、④6)、⑧のPMを変更、④4)のPLを変更、⑧と⑨のPLに関する記載を削除。

(16) 2020年10月

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、⑧のPMを変更。

(17) 2021年1月

1. 研究開発の目的・目標・内容(1)(2)において内容の追加、1. 研究開発の目的・目標・内容(3)研究開発の内容及び2. 研究開発の実施方式(1)研究開発の実施体制において項目の追加、3. 研究開発の実施期間において期間変更、4. 評価に関する事項において評価時期の変更及び追加、5(1)④知財マネジメントに係る運用⑤データマネジメントに係る運用において対象研究開発項目の追加、研究開発項目①2)の内容拡充、研究開発項目①4)5)、⑨4)の追加。研究開発項目⑩の追加。

(18) 2021年5月、2. 研究開発の実施方式(1)研究開発実施体制 研究開発項目④3)、4)、6)、7)及び8)、研究開発項目⑦、研究開発項目⑩のPMの変更。

(19) 2021年6月

1. 研究開発の目的・目標・内容（3）研究開発項目⑨3）における項目名の変更。別紙研究開発項目⑨3）の項目名の変更および内容の拡充。

（20）2021年7月

5. その他の重要事項（1）委託事業成果の取扱い④知財マネジメントに係る運用及び⑤データマネジメントに係る運用における対象研究開発項目の変更。

（21）2022年3月

1. 研究開発の目的・目標・内容（1）（2）において内容の追加、1. 研究開発の目的・目標・内容（3）研究開発の内容及び2. 研究開発の実施方式（1）研究開発の実施体制において項目の追加、3. 研究開発の実施期間において期間変更及び記載の追加、4. 評価に関する事項において評価時期の変更及び追加、5（1）④知財マネジメントに係る運用、⑤データマネジメントに係る運用において対象研究開発項目の追加。別紙において、研究開発項目⑦、研究開発項目⑧、研究開発項目⑨、研究開発項目⑪において期間変更及び研究開発項目⑫、研究開発項目⑬の追加。

研究開発項目① 「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」

1. 研究開発の必要性

石炭は、他の化石燃料と比べ、可採年数が約110年と長く、かつ世界各国に幅広く分布する等、供給安定性が高く、経済性に優れることから、エネルギー自給率が極めて低い我が国にとって重要な一次エネルギー源であり、発電の分野においても石炭火力発電は発電電力量の約3割を占める重要な電源の一つである。

一方で、石炭は他の化石燃料と比べ、燃焼時の単位発電量当たりのCO₂排出量が多く、地球環境面での制約要因が多いという課題を抱えており、石炭火力発電についてもさらなるCO₂排出量の抑制が求められている。

したがって、石炭火力発電の高効率化及びCO₂排出量削減の観点から本事業を実施する必要性がある。

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画においても、石炭火力発電は、「安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源」と評価されている一方、「温室効果ガスの排出量が多いという課題がある」と指摘され、その課題を解決すべく、次世代高効率石炭火力発電技術として、石炭ガス化複合発電（IGCC）の開発・実用化を進めるとともに、2020年頃の二酸化炭素回収貯留（CCS）の実用化を目指した研究開発を行うことが盛り込まれている。

その後、エネルギー基本計画を踏まえ、2014年12月にまとめられた「エネルギー関係技術開発ロードマップ」において、「高効率石炭火力発電」、「二酸化炭素回収・貯留技術」が国際展開も見据えた形で整理されている。

2021年10月「第6次エネルギー基本計画」において、石炭火力は、再生可能エネルギーを最大限導入する中で、調整電源としての役割が期待されるが、電源構成における比率は、安定供給の確保を大前提に低減させる一方で、脱炭素化を見据えつつ、次世代の高効率石炭火力発電技術であるIGCCや石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）などの技術開発等を推進することが盛り込まれている。

以上のとおり、石炭火力発電におけるCO₂排出量の課題を克服していくことが一層重要となっており、石炭火力発電の高効率化及びCO₂排出量削減を目指す本事業の必要性は大きい。

2. 具体的研究内容

本事業では、石炭火力発電から排出されるCO₂を大幅に削減させるべく、究極の高効率石炭火力発電技術であるIGFCとCO₂分離・回収を組み合わせた実証試験を行い、革新的低炭素石炭火力発電の実現を目指す。

1) 酸素吹IGCC実証（1/3助成）

IGFCの基幹技術である酸素吹IGCCの実証試験設備により、性能（発電効率、環境性能）、運用性（起動停止時間、負荷変化率等）、経済性及び信頼性に係る実証を行う。

2) CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証（1/3、2/3助成）

酸素吹IGCC実証試験設備とCO₂分離・回収設備を組み合わせ、CO₂分離・回収型石炭火力システムとしての性能、運用性、信頼性及び経済性に係る実証を行う。また、CO₂分離・回収装置を追設した場合のIGCC運用性について実証を行う。更に、CO₂分離・回収と組み

合わせたCO₂液化プロセスを構築する。加えて、IGCCの負荷変動に対応したCO₂分離・回収装置とIGCC設備の運用性について実証を行う。

3) CO₂分離・回収型IGFC実証(1/2助成)

CO₂分離・回収型酸素吹IGCCシステムと燃料電池を組み合わせ、石炭ガス化ガスの燃料電池への利用可能性を確認し、最適なCO₂分離・回収型IGFCシステムの実証を行う。

4) 信頼性向上、低コスト化(1/3助成)

酸素吹IGCCシステムの早期商用化を実現すべく、設備信頼性の向上及び経済性の改善に係る実証を行う。

5) CO₂分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発(1/2助成)

CO₂分離・回収型IGCCシステム及びIGFCシステムのCO₂分離・回収設備の負荷変動に対応すべく、CO₂分離・回収負荷変動対応ガスタービンの環境性能、安定性、信頼性に係る要素技術開発を実施する。

3. 達成目標

[実施期間]

- 1) 酸素吹IGCC実証：2012年度～2018年度（うち2012年度～2015年度は経済産業省において実施）
- 2) CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証：2016年度～2022年度
- 3) CO₂分離・回収型IGFC実証：2018年度～2022年度
- 4) 信頼性向上、低コスト化：2021年度～2022年度
- 5) CO₂分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発：2021年度～2025年度

[中間目標(2017年度)]

1) 酸素吹IGCC実証

(a) 発電効率：40.5%程度(送電端効率、高位発熱量基準)を達成する。

商用機の1/2～1/3倍の規模で、1300℃級ガスタービンを採用する実証試験設備により送電端効率(高位発熱量基準)40.5%を達成すれば、1500℃級ガスタービンを採用する商用機(石炭処理量2,000～3,000t/d)で送電端効率約46%を達成する見通しが得られる。

(b) 環境性能：「SO_x<8ppm」、「NO_x<5ppm」、「ばいじん<3mg/Nm³」を達成する(O₂=16%)。

我が国における最新の微粉炭火力は世界的に見ても最高水準の環境諸元を達成しており、酸素吹IGCCを導入する場合には同等の環境諸元を達成することが求められる。

2) CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証

CO₂分離・回収設備の詳細設計を完了する。

[中間目標(2020年度)]

1) 酸素吹 I G C C 実証

- (a) プラント制御性運用性：事業用火力発電設備として必要な運転特性及び制御性を確認する。

我が国における微粉炭火力はベースからミドル電源として運用されており、酸素吹 I G C C 商用機を導入する場合にも同等の制御性、運用性を確保する。

- (b) 設備信頼性：商用機において年間利用率 70% 以上の見通しを得る。

我が国における微粉炭火力は年間利用率 70% 以上で運用されており、酸素吹 I G C C 商用機を導入する場合にも同等の設備信頼性を確保する。

- (c) 多炭種適用性：灰融点の異なる数種類の炭種で適合性を確認する。

酸素吹 I G C C 商用機には、微粉炭火力に適合し難い灰融点の低い亜瀝青炭から、微粉炭火力に適合する比較的灰融点の高い瀝青炭までの適用炭種の広さが求められる。商用化に向け、実用化時期や日本への供給可能性も考慮に入れつつ、性能と経済性を評価する。

- (d) 経済性：商用機において発電原価が微粉炭火力と同等以下となる見通しを得る。

国内外において酸素吹 I G C C 商用機の普及を促進するためには、発電原価を微粉炭火力と同等以下とすることが求められる。また、海外普及を目的としたマイルストーンを検討する。

2) CO₂分離・回収型酸素吹 I G C C 実証

- (a) 基本性能（発電効率）：新設商用機において、CO₂を 90% 回収しつつ、発電効率 40%（送電端効率、高位発熱量基準）程度の見通しを得る。

CO₂回収時のエネルギーロスによる発電効率の低下という課題に対し、CO₂を 90% 回収（全量ガス処理）しながらも、現状の微粉炭火力と同等レベルの発電効率 40% 程度の見通しを得る。これを実現するために、実証機プラントにおいて、CO₂分離回収にかかるエネルギー原単位「0.90 GJ/t-CO₂（電気エネルギー換算）」を発電効率に係る性能として確認する。

- (b) 基本性能（回収効率・純度）：CO₂分離・回収装置における「CO₂回収効率 > 90%」、
「回収 CO₂ 純度 > 99%」を達成する。

革新的低炭素型石炭火力の実現のために CO₂分離・回収装置単体における回収効率は 90% 以上を目標とする。CO₂地中貯留から求められる可能性がある CO₂純度について、湿式物理吸収法を使って定常運転時、体積百分率 99% 以上を目標とする。

- (c) プラント運用性・信頼性：CO₂分離・回収型 I G C C システムの運用手法を確立し、信頼性を検証する。

商用機において、CO₂分離・回収型酸素吹 I G C C システムを構築するには、プラントの起動停止や、発電所特有の負荷変動等に対し、I G C C 本体に追従した CO₂分離・回収装置の運用手法を確立し、信頼性を検証する。また、生成ガスの全量を CO₂分離した場合の I G C C 運転との相互影響やガスタービン性能についても検証する。

- (d) 経済性：商用機における CO₂分離・回収の費用原単位を評価する。

CO₂分離・回収型酸素吹IGCCを普及させるに当たっては、費用原単位評価が必要であり、CO₂分離・回収装置建設時期や発電所敷地等の制約に応じた評価を実施する。また、実用化・事業化に向けたマイルストーンを検討する。

(e) IGCCプラント運用性：

CO₂分離・回収装置を追設した場合のIGCC運転への影響を確認し、運用性を検証する。

3) CO₂分離・回収型IGFC実証

CO₂分離・回収型IGFC実証設備の詳細設計を完了する。また、機器製作に着手する。

[最終目標（2022年度）]

2) CO₂分離・回収型酸素吹IGCC実証

CO₂液化プロセス開発：CO₂分離・回収型IGCCとCO₂液化を組み合わせた場合の最適プロセスを構築する。

CO₂分離・回収負荷変動対応IGCC運用性向上：IGCCの負荷変動に伴うCO₂分離・回収設備の追従性を確認し、運用性を検証する。

3) CO₂分離・回収型IGFC実証

500MW級の商業機に適用した場合に、CO₂回収率90%の条件で、47%程度の発電効率（送電端効率、高位発熱量基準）達成の見通しを得る。

4) 信頼性向上、低コスト化

信頼性向上により5,000時間以上の長期運転の達成、また経済性向上により早期商用化の見通しを得る。

[中間目標（2023年度）]

5) CO₂分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発

水素濃度の変動に対応した燃焼試験を開始する。

[最終目標（2025年度）]

5) CO₂分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発

CO₂分離・回収の負荷変動に伴う、経時的な水素濃度変化に対応したガスタービン燃焼技術を確立する。

研究開発項目② 「高効率ガスタービン技術実証事業」

[実施期間]

1700℃級ガスタービン：2012年度～2020年度（うち2012年度～2015年度は経済産業省において実施）

高温分空気利用ガスタービン（AHAT）：2012年度～2017年度（うち2012年度～2015年度は経済産業省において実施）

1. 研究開発の必要性

2008年3月に閣議決定された「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」において、天然ガスタービンの高効率化が環境負荷低減の実現のための重要な技術開発であると位置づけられている。また、2011年8月に制定された「第4期科学技術基本計画」においては、安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現のため火力発電の高効率化に資する技術開発は重点的な取組として位置づけられている。

欧米は巨額の研究開発費を投じており、厳しい国際競争の中で我が国の優位性を維持するため、また電力産業の保守高度化とリプレース需要にあった大容量機の高効率化を目指し、コンバインド効率向上、CO₂排出量削減を達成するため、1700℃級に必要な革新的技術開発に取り組み、早期に実用化する事が必要である。

また、高温分空気利用ガスタービン（AHAT）は、ガスタービンサイクルを改良したシステムであり、比較的早期に実用化が期待できる高効率発電システムで、電力産業の短中期的ニーズに対応する中小容量機（10万kW程度）の高効率化（45%（高位発熱量基準）→51%（高位発熱量基準）以上）を目的とした日本オリジナルの技術であり、世界初となるAHATの実用化は急務である。

これらの政策を実現するために、発電規模に応じた発電熱効率の一層の向上が必要であり、ガスタービン高温部品の技術向上と発電サイクルの工夫が必要不可欠である。また、環境負荷の少ない発電システムを開発することは、電力の安定的かつ低廉な供給を確保する上で極めて重要な対策である。

さらに、石炭ガス化複合発電（IGCC）や石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）における更なる効率向上には、将来的に1700℃級ガスタービンやAHATシステムの導入が不可欠である。

2. 具体的研究内容

1) 1700℃級ガスタービン

1700℃級ガスタービンにおける性能向上、信頼性向上に関する要素技術開発を実施する。例として、製造技術・検査技術の開発、超高温高負荷タービンの信頼性向上、過酷環境下でのデータ取得のための特殊計測技術開発等を実施する。また、1700℃級での実証運転時における特殊計測の実施、試運転データの評価・分析を行い、商用化の検討を実施する。

2) AHAT

AHATシステムについては、ユーザーニーズとしてミドル運用以上（年間50回以上の起動・停止）における長期信頼性が求められていることから、既存40MW級総合試験装置の改造による実証機製作、実証試験による長期信頼性評価を実施する。また、実証機試験結果を用いて商用機化の検討を実施する。

3. 達成目標

1) 1700℃級ガスタービン

[中間目標(2018年度)]

1700℃級ガスタービンの性能向上、信頼性向上に関する要素技術開発により、商用機に適用できる見通しを得た上で、設計・製作の仕様を決定する。

[最終目標(2020年度)]

1700℃級ガスタービンの実証試験データの取得、及び評価を実施し、送電端効率57%達成(高位発熱量基準)の見通しを得る。

2) AHAT

[最終目標(2017年度)]

実証機を用いた試験により、長期信頼性の実証として以下を達成する。

- ・ミドル運用(年間50回以上の起動・停止)の2倍である年間100回以上の起動・停止での実証試験を実施し、等価運転時間 10,000時間以上を確保する。
(等価運転時間とは、起動・停止等の機械装置の寿命を考慮し、同等の連続運転時間とみなせる運転時間)

研究開発項目③ 「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」

[実施期間] 2008年度～2016年度（うち2008年度～2015年度は経済産業省において実施）

1. 研究開発の必要性

従来型石炭火力発電の中で最高効率である超々臨界圧火力発電（USC）は蒸気温度の最高温度は630℃程度が限界と言われてきた。しかしながら、近年の材料技術の進歩により700℃以上の蒸気温度を達成できる先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発（A-USC）の実現可能性が見えてきた。

本事業では2020年以降に増大する経年石炭火力のリプレース及び熱効率向上需要に対応するため、高い発電効率を実現できるA-USCの開発を行う。

2. 研究開発の具体的内容

（1）システム設計、設計技術

基本設計、配置最適化、経済性の試算

（2）ボイラ要素技術

700℃級候補材料について、耐久試験により、10万時間の長期信頼性を確保する

（3）タービン要素技術

大型鋼塊の製造性を確認するとともに10万時間の長期信頼性を確保する

（4）高温弁要素技術

実缶試験・回転試験に組み込み、信頼性を確認する

（5）実缶試験・回転試験

実缶試験、回転試験により、ボイラ要素及びタービン要素の信頼性の実証を行う。

3. 達成目標

[最終目標（2016年度）]

蒸気温度を700℃へ高めるための要素技術開発を実施し、2020年以降において商用プラントでの送電端熱効率46%（高位発熱量基準）達成の技術的見通しを得る。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

1) 次世代ガス化システム技術開発

[実施期間] 2015年度～2018年度（うち2015年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画（2014年4月閣議決定）においては、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置づけられているが、温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、石炭ガス化複合発電（IGCC）等の次世代高効率石炭火力発電技術等の開発及び実用化を推進することとされている。中長期的には、さらなる高効率化に向けて、現在開発中のIGCCを効率でしのぐ次世代高効率石炭火力発電技術等の開発を実施する必要がある。

2. 具体的研究内容

次世代高効率石炭ガス化発電システムについて、冷ガス効率及び送電端効率の向上並びに実用化に向けた技術開発を実施する。

酸素吹石炭ガス化においては、ガス化炉にガス化剤として酸素を供給して石炭を部分燃焼させ、石炭を熱分解しているが、投入された石炭が一部燃焼して消費されること、酸素製造装置等の所内動力の増加により送電端効率が低下することが効率向上のための課題となっている。

そこで、熱分解の一部を、ガスタービン排熱を利用して作る水蒸気を用いた石炭ガス化反応に置き換えることにより、冷ガス効率の向上を図るとともに、酸素供給量の低減を図り、送電端効率の向上を目指す。

これまでのシミュレーションによる検討結果では、①噴流床型IGCCガス化炉への高温の水蒸気の注入による冷ガス効率及び送電端効率の向上、②エネルギー効率の高い酸素製造技術を組み込んだIGCCシステムの構築による更なる送電端効率の向上、の可能性があると分かった。そこで、これらの可能性を検証及び評価するため、以下の項目を実施する。

(1) 水蒸気添加による冷ガス効率向上効果の検証

噴流床型ガス化炉への高温の水蒸気の注入による冷ガス効率の向上について、小型ガス化炉での検証を行う。

(2) エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性評価

エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性を評価する。

(3) IGCCシステム検討

エネルギー効率の高い酸素製造装置を組み込んだIGCCの最適化システム試設計及び経済性検討を行う。

冷ガス効率の向上及び試設計を踏まえて、送電端効率を精査する。

3. 達成目標

[中間目標（2017年度）]

既存のIGCC（1500℃級GTで送電端効率46～48%）を凌ぐ高効率石炭ガス化発電システムの見通しを得るため、小型ガス化炉による水蒸気添加ガス化試験方法を確立する。

[最終目標（2018年度）]

既存のIGCC（1500℃級GTで送電端効率46～48%）を凌駕する高効率石炭ガス化発電システムの見通しを得る。

2018年度以降については研究開発項目⑤CO₂回収型クローズドIGCC技術開発と統合して、新名称 研究開発項目⑤CO₂回収型次世代IGCC技術開発とする。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

2) 燃料電池向け石炭ガスクリーンナップ技術要素研究

[実施期間] 2015年度～2017年度（うち2015年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

1. 研究開発の必要性

石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）は石炭をガス化させ、燃料電池、ガスタービン、蒸気タービンの3種の発電形態を組み合わせ、トリプル複合発電を行うもので、究極の高効率発電技術として、実現が望まれている。

クールアースエネルギー革新技术開発ロードマップにおいても2025年頃の高効率石炭火力発電技術として55%の送電端効率を目指すIGFCが位置づけられている。

IGFCにおいては、燃料である石炭ガス化ガスに多種類の微量成分が含まれており、この微量成分の一部が燃料電池の劣化を招き、長期信頼性を損なう可能性があることが懸念されている。

そのため、IGFCの実現に向けては、石炭ガス化ガス中の微量成分の燃料電池への影響を把握するとともに、燃料電池の被毒成分に対するガス精製技術を確立することが必要である。

2. 具体的研究内容

燃料電池用ガス精製技術と燃料電池を組み合わせ、石炭ガス化ガスの模擬ガス試験により燃料電池の被毒耐性を確認する。また、特定された被毒成分に対して、成分を許容レベルまで除去するガス精製技術を検討し、模擬ガスによる性能評価を行う。

3. 達成目標

[最終目標（2017年度）]

- ・模擬ガス試験により燃料電池の被毒耐性を評価する。
- ・模擬ガス試験により燃料電池用ガス精製技術性能を評価し、ガス精製技術を確立する。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発

[実施期間] 2016年度～2021年度

1. 研究開発の必要性

2015年7月に経済産業省における「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」により策定された「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」において、ガスタービン燃料電池複合発電(GTFC)については、小型GTFC(1,000kW級)の商用化、量産化を進め、SOFCのコスト低減を図り、中小型GTFC(10万kW級)の実証事業を経て、発電効率63%程度、CO₂排出原単位:280g-CO₂/kWh程度を達成し、2025年頃に技術を確立することが示されている。また、量産後は従来機並の発電単価を実現することとされている。

さらには、同ロードマップにおいて、IGFCの技術を確立するためには、GTFCの開発成果を活用していくことが示されており、次世代火力発電技術の早期確立に向けて、本事業の必要性は高い。

2. 具体的研究内容

小型GTFC(1,000kW級)の商用化及び量産化を進め、SOFCのコスト低減を図る。さらに、中小型GTFC(10万kW)の要素技術を開発し、中小型GTFCの技術実証に活用する。

3. 達成目標

[中間目標(2019年度)]

中小型GTFC(10万kW)の要素技術を開発する。

- ・高圧SOFCモジュールを開発する。
- ・ガスタービンとの関係技術を確立する(燃焼器、燃料/空気差圧制御系、排燃料・排空気・空気抽気)。

[最終目標(2021年度)]

中小型GTFC(10万kW)の要素技術を確立する。

- ・燃料電池の高性能化による中小型GTFCシステムの最適化を行う。
- ・小型GTFC(出力1,000kW級)において、57%LHV(低位発熱量基準)の発電効率(送電端)の見通しを得る。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

4) 燃料電池石炭ガス適用性研究

[実施期間] 2016年度～2021年度

1. 研究開発の必要性

石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）は、石炭をガス化し、燃料電池、ガスタービン、蒸気タービンの3種類の発電形態を組み合わせてトリプル複合発電を行うもので、究極の高効率石炭火力発電技術として、その実現が望まれている。

「次世代火力発電に係る技術ロードマップ」において、IGFCの開発方針として、2025年度頃技術確立、発電効率55%及び量産後従来機並の発電単価の実現を目指すことが示された。

IGFCを構成する高温型燃料電池については、現在、天然ガスを燃料とした燃料電池の開発が進んでいるが、石炭ガスを燃料とした場合の適用性についての検証及びシステムの検討を行う必要がある。

燃料を石炭ガスとした場合に、燃料電池の劣化を引き起こすガス中被毒成分濃度の確認と被毒成分の除去技術についての研究は、すでに着手されている。

IGFCを構成する燃料電池モジュールについて、石炭ガスを燃料とした場合の運用性や性能を把握する必要があることから、実燃料電池モジュールを用いた石炭ガス燃料の適用性試験を行い、その結果を踏まえて、IGFCの技術確立に必要な実証機に係るシステム検討を行う必要がある。

2. 具体的研究内容

(1) IGFCシステムの検討

国内外における高温型燃料電池及びIGFCの技術開発動向をレビューすることにより、最新情報を入手し、IGFCの実用化に向けた課題の整理を行う。商用機システムとして、CO₂分離・回収を行わないIGFCとCO₂分離・回収型IGFCについて、ケーススタディを行い、送電端効率とコストの試算を行う。IGFCの実用化に向けた課題、商用化システムの検討結果及び(2)の成果を踏まえて、IGFC実証システムについて検討を行い、実証機の容量を決定のうえ、試設計を行う。

(2) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

石炭ガス燃料の適用性試験に供する高温型燃料電池モジュールについては、天然ガス燃料で既に実用化されている燃料電池モジュールとする。本試験に係る設計、製作、据付け等を行い、まず、天然ガスを燃料とした試運転を行う。次いで、天然ガスをH₂リッチガスに改質した燃料を用い、燃料電池モジュールの運用性、性能等を把握するとともに、天然ガス燃料の場合との比較から課題を抽出する。さらに、石炭ガス化の実ガスを燃料として、燃料電池の被毒成分をガス精製によりクリーンアップしたうえで燃料電池モジュールに供給し、その運用性、性能等を把握するとともに、石炭ガス適用時の課題を抽出する。さらに、これまで実績のない石炭ガスによる運転を行うことから、燃料電池セル及びモジュール内部構造への影響を把握するため、装置の解体調査を行い、石炭ガス適用時の課題を抽出する。

3. 達成目標

(1) I G F Cシステムの検討

[最終目標 (2019年度)]

I G F C実証機の容量を決定し、実証機の試設計を完了する。

(2) 燃料電池モジュールの石炭ガス適用性研究

[中間目標 (2019年度)]

H₂リッチガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの基本性能を確認するとともに、発電性能を最適化するための運用性を確立する。また、石炭ガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの基本性能を確認する。

[最終目標 (2021年度)]

石炭ガスを燃料とした場合の燃料電池モジュールの運用性と性能を把握し、課題を抽出する。また、石炭ガス適用時の燃料電池出力変化率を天然ガスと同等の1%/min程度とする石炭ガス化炉連係システムを構築する。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

5) CO₂分離型化学燃焼石炭利用技術開発

[実施期間] 2015年度～2017年度（うち2015年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画（2014年4月閣議決定）においては、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置づけられているが、温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、環境負荷の一層の低減に配慮した石炭火力発電の導入を進めることとされている。

現在、石炭の燃焼排ガス又は石炭ガス化プラントの石炭ガス化ガスからのCO₂の分離・回収技術の開発が進められているが、CO₂分離・回収工程において多くのエネルギー損失が発生することが課題となっている。これを解決するため、エネルギー損失のない高効率でありながら、CO₂の分離・回収が可能な化学燃焼石炭利用技術について、実用化に向けた開発を実施する。

2. 具体的研究内容

従来、石炭の燃焼時の排気ガス又は石炭ガス化プラントの石炭ガス化ガスからのCO₂分離・回収に当たっては、この過程における多くのエネルギー損失が課題となっているが、CO₂分離型化学燃焼石炭利用技術においては、酸素キャリアとなる金属を媒体とする石炭の燃焼反応と金属の酸化反応を二つの反応器で別個に発生させることにより、CO₂の分離・回収装置及び空気分離装置が不要となり、エネルギー損失のないCO₂の分離・回収が可能である。

さらに、CO₂分離型化学燃焼石炭火力発電は、流動床燃焼技術を用いることから多様な燃料（低品位炭、バイオマス等）が活用でき、IGCCやA-USCが大規模プラントであるのに対して、中小規模プラント（10～50万kW）におけるCO₂の分離・回収に適しているといった特長がある。

しかしながら、実用化に向けては、酸素キャリアのコスト抑制及び反応塔の小型化に向けた酸素キャリアの反応性の向上という課題がある。

そこで、有望な酸素キャリアの評価と選定並びにプラント構築を目的として、以下の項目を実施する。

(1) 酸素キャリアの評価と選定

酸素キャリアの反応性、耐久性及び流動性等について要素試験にて評価を行い、コストを踏まえて選定する。

(2) プラント試設計及び経済性検討

酸素キャリアの反応性からプロセス解析を行うとともに酸素キャリアの流動や循環を検討し、プラント試設計を行う。この結果をもとに経済性検討を行う。

(3) ベンチ試験装置によるプロセス検証

酸素キャリアの反応性、耐久性及び流動性等並びに流動や循環を含むプラントの成立性を検証するため、ベンチ試験装置を製作し、試験・評価を行う。

3. 達成目標

[中間目標（2017年度）]

分離・回収コスト1,000円台/t-CO₂を見通せるキャリアを選定する。

[最終目標（2020年度）]

分離・回収コスト1,000円台/t-CO₂を見通せるCO₂分離型化学燃焼石炭火力発電システムを提示する。

2017年度の間評価で、中間目標は達成したものの「データ解釈の精密化と実用的な設計提案の立案についてより深く検討する」ことが求められたことから、研究開発体制を見直す必要があると考えた。従って2017年度で本研究を中止し、研究開発の内容を見直し、ラボ試験を行いデータを蓄積し精度向上を図ると共に、実用的な設計立案に向け、実機設計技術の確立を目指した要素研究を「研究開発項目④8）流動床ガス化燃焼技術を応用した石炭利用技術開発」で実施する。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

6) 石炭火力の負荷変動対応技術開発

[実施期間] 2017年度～2022年度

1. 研究開発の必要性

日本の石炭火力発電所は、長年の技術開発の成果により、高い発電効率や排出ガス対策で、世界的に最高レベルの技術を有している。しかしながら、日本の技術を採用したプラント価格は、他の国のプラントに比べて高価であるため、国際市場に於いて必ずしも高い競争力を有しておらず、海外での導入事例も限られているのが現状である。日本の石炭火力発電所が受注に至った地域では、厳しい技術要件が定められており、日本の高効率発電技術が入札時に評価されている一方、他国性の石炭火力発電所を導入した諸外国のユーザーの多くが、稼働率の低下をはじめとしたオペレーション上の様々な課題を抱えている。

また、2019年7月に閣議決定された「第5次エネルギー基本計画」において、石炭は「現状において安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源の燃料として評価されているが、再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、適切に出力調整を行う必要性が高まると見込まれる」とされている。さらに、2021年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」において、今後、石炭火力は、電源構成における比率は、安定供給の確保を大前提に低減とされている一方で、「再生可能エネルギーを最大限導入する中で、調整電源としての役割が期待される」とされている。

今後とりわけ自然変動電源（太陽光・風力）の導入が拡大する中で、電力の需給バランスを維持し周波数を安定化するために、火力発電等による調整力の一層の確保と信頼性・運用性の向上が求められている。

そこで本事業では、石炭火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるための先進的な技術開発を実施する。そのことにより、日本の石炭火力発電プラントの競争力向上にも寄与する。

2. 具体的研究内容

負荷変動対応に伴う事故リスクと保守コスト低減に必要な故障予知・寿命予測等の保守技術および石炭火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるための先進的な技術開発を実施する。

3. 達成目標

[中間目標（2020年度）]

長期保守契約（L T S A）等に寄与できる各種モニタリング・センシング・解析等の要素技術を確立する。

[最終目標（2022年度）]

負荷変動対応に伴う事故リスクと保守コスト低減に必要な故障予知・寿命予測等の保守技術および石炭火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるための先進的な技術の見通しを得る。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

7) CO₂有効利用技術開発

[実施期間] 2017年度～2021年度

1. 研究開発の必要性

供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の26%を担う重要な電源である。

しかし、これら石炭火力発電ではCO₂排出量が比較的多く、将来的にCO₂分離回収有効利用: Carbon Capture and Utilization (CCU) が検討されている。現時点ではCO₂の大規模処理が困難であるものの、有価物の製造等により利益を創出する可能性がある。

2030年度以降を見据え、将来の有望なCCU技術の確立を目指して、我が国の優れたCCT (Clean Coal Technology) 等に、更なる産業競争力を賦与する事が可能なCCU技術について、実用化に向けた開発を実施する。

2. 具体的研究内容

短～中期において大規模且つ高濃度のCO₂ (99%以上)を、エネルギーとして工業的に活用可能な技術開発を実施する。一例として、メタネーション技術については石炭火力発電所等から回収した高濃度CO₂の適用性を評価する。

3. 達成目標

[最終目標 (2021年度)]

事業終了時に本事業として実施するCO₂有効利用技術の適用性を確認する。一例としては、将来的に天然ガス代替では0.9円～1.4円/MJ (LHV)を見通す経済性を評価する。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

8) CO₂分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発

[実施期間] 2020年度～2024年度

1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画において、石炭火力は、安定供給性と経済性に優れたエネルギー源として評価されているものの、温室効果ガスの排出量が多いという問題があるため、脱炭素化を見据えた高効率化が望まれている。

石炭火力からのCO₂排出抑制技術としては、CO₂の分離・回収技術があるが、エネルギー損失が大きいことから、発電システムとしてCO₂を分離・回収できるガス化技術を適用した技術が有望視されている。また、この技術は、バイオマスや炭素系廃棄物等を燃料として発電することによるCO₂排出削減や有価な生産物（水素や化学品等）の製造に応用できる技術として期待されている。

本事業ではガス化技術を適用して、燃料を多様化するとともに、有価な生産物を併産することで、CO₂分離・回収コストの低減を目指したCO₂分離・回収型ポリジェネレーションシステムを構築する火力発電設備設計技術の確立に向けた技術開発を実施する。

2. 具体的研究内容

CO₂分離・回収型ポリジェネレーションシステムを構築可能な技術として、流動床ガス化燃焼技術と噴流床ガス化技術がある。

(1) 流動床ガス化燃焼技術の適用

流動床ガス化燃焼技術は、流動床技術をベースとして、空気燃焼塔、揮発分（可燃性ガス）反応塔、石炭反応塔（ガス化）で構成され、流動材（酸素キャリア）を媒介として空気燃焼塔で流動材を酸化し、酸化された流動材を揮発分反応塔、石炭反応塔に供給し、酸化された流動材の酸素を用いて石炭をガス化し、発生した可燃性ガスを燃焼させるシステムで、窒素が揮発分反応塔や石炭反応塔に同伴されないことから、石炭は燃焼後、CO₂、水蒸気、ばいじんとなる。煤塵を集塵機で捕集し、ガス温度を下げることで水蒸気を凝縮するとCO₂ガスのみが分離回収できる。

本技術は中小規模（100MW級）の発電プラントにも適用でき、多様な燃料（低品位炭、バイオマス等）に活用できる。また、水素反応器を追加することにより、水素併産が期待できる。また、別置きCO₂分離・回収装置や空気分離装置が不要であることから、エネルギー損失がないCO₂分離・回収および水素製造が可能となる。

具体的研究内容としては、水素併産に最適な流動材の選定およびシステム開発、プラント構成の最適化を実施し、流動床ガス化燃焼を適用した火力発電設備設計技術確立のための研究開発を実施する。例えば、流動材を利用した水素製造技術の最適化、バイオマス燃焼の適用性、長期運転における課題検討などを実施する。

(2) 噴流床ガス化技術の適用

酸素吹き石炭ガス化においては、ガス化炉にガス化剤として酸素を供給して石炭を部分燃焼させ、石炭を熱分解しているが、投入された石炭が一部燃焼して消費されること、酸素製造装置等の所内動力の増加により送電端効率が低下することから、熱分解の一部をガスタービン排熱

等を利用して作る水蒸気を用いた石炭ガス化反応に置き換えることにより、冷ガス効率の向上を図るとともに酸素供給量の低減を図り、送電端効率の向上が可能となる。このような O_2/C
 O_2/H_2O 吹き噴流床ガス化技術をベースとし、燃料として石炭だけでなく炭素系廃棄物等を利用することで CO_2 排出量を削減し、化学品を併産することで CO_2 分離・回収コストの低減が期待できる。

具体的研究内容としては、炭素系廃棄物燃焼の適用性検証、ガス化ガスからの化学合成技術の選定、システム構成の最適化を実施し、噴流床ガス化技術を適用した火力発電設備設計技術確立のための研究開発を実施する。

3. 達成目標

[中間目標（2022年度）]

CO_2 分離・回収型ポリジェネレーションシステムの実証設備設計に必要な要素技術の確立に目途をつける。

[最終目標（2024年度）]

CO_2 分離・回収型ポリジェネレーションシステムにより分離・回収コスト1,000円台/t- CO_2 を見通せる火力発電設備の設計技術確立および経済性を評価する。

研究開発項目④ 「次世代火力発電基盤技術開発」

9) 機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究

[実施期間] 2018年度～2021年度

1. 研究開発の必要性

我が国では、2050年に温室効果ガス80%削減の目標が掲げられており、その達成に向けた手段の一つとして、再生可能エネルギー電源（以下、再エネ電源）の増加が見込まれている。2015年7月に公表された、長期エネルギー需給見通しにおいて示された2030年度の電源構成比では、太陽光発電が7%の発電電力量を占めることになる。太陽光発電の利用率を平均の13%とすると、約6400万kWの設備容量を必要とし、これは国内事業用の全発電設備容量の1/4程度に相当する。一方で、普及の拡大が予測される太陽光発電や風力発電の出力は天候に大きく影響を受けるため、電力の安定供給を考えた場合、系統安定化が必要不可欠である。

火力機は、大量に導入される再エネ電源に対応して、需給調整や周波数調整など重要な役割を果たしている。例えば、太陽光発電の日中に生じる急激な天候変動等による大幅な出力変動に対応するには、ガスタービン複合発電（以下、GTCC）を用いることが有望な手段の一つであるが、現状の性能では起動時間が長い、出力変化速度が遅い、最低出力が高い等の課題がある。

そこで本研究開発では、再生可能エネルギー電源の大量導入時の電力安定供給とCO₂排出量削減の両立を狙い、既存の火力発電設備へのレトロフィットやリプレース向けに定格時の効率を維持したうえで、機動力と再エネ出力不調時のバックアップ電源の両機能を具備した、機動性に優れた広負荷帯高効率GTCCを開発するため、中核機器であるガスタービン（以下、GT）の負荷変動対応に係る要素技術を開発し、実機に組み込める目処を得ることを目的にする。

2. 具体的研究内容

急速起動・出力変動時のGTCCの安定運転の実現に向け、GTの数値解析技術、材料技術、燃焼技術、制御技術、冷却・シール技術などの要素技術開発を行う。具体的には、試験設備を用いて、燃焼器の急速起動・燃焼負荷変動・ターンダウン等の試験、軽量化したタービンロータの設計と翼の試作、クリアランスや冷却・シール空気の能動制御機構の設計等を行い、実証に進める目処を得る。

並行して、発電事業者にとって重要となる設備信頼性の確保に向けて、合理的な設備保守技術の開発研究に取り組むとともに、実機レトロフィットによる機器実証の準備を行う。

表 先行研究で設定されたGTCCとしての目標性能

	起動時間 (ホットスタート)	出力変化速度	1/2負荷における定格からの 効率低下 (相対値)	最低出力 (一軸 式)
開発目標	10分	20 %/分	10 %	10 %
(参考) 現状性能	60分	5 %/分	15 %	45% 程度

3. 達成目標

[最終目標（2021年度）]

- ・先行研究で設定した目標性能（上表）を実現する目処を得るために、実規模の燃焼器を設計・試作し、単缶実圧燃焼試験により、無負荷から定格まで5分で到達すること、最低負荷条件においても安定燃焼が可能であることを確認する。
- ・急速起動、出力変化速度向上、最低負荷引き下げ、部分負荷時の効率低下抑制を含む、GTCCシステムとしての運転制御技術とGT後流（HRSG－蒸気タービン側）の成立性・性能評価、急速起動に寄与する動翼・ロータの軽量化については、実プラントの設計に反映できる目処を得る。
- ・合理的な設備運用保守を行うために、従来の考え方からの違いを整理する。
- ・対象GTCCと他の調整力電源（揚水発電、蓄電池など）の経済性を比較評価し、事業として成立するための課題を整理する。
- ・既存設備のレトロフィットによる実証研究計画を立案し、実証試験の仕様を明らかにする。

研究開発項目⑤ 「CO₂回収型次世代IGCC技術開発」

[実施期間] 2015年度～2020年度（うち2015年度はNEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施）

1. 研究開発の必要性

エネルギー基本計画（2014年4月閣議決定）においては、石炭火力発電は重要なベースロード電源として位置づけられているが、温室効果ガスの大気中への排出をさらに抑えるため、石炭ガス化複合発電（IGCC）等の次世代高効率石炭火力発電技術等の開発及び実用化を推進することとされている。石炭は他の化石燃料と比べ利用時の二酸化炭素排出量が大きく、地球環境問題での制約要因が多いという課題を抱えており、石炭火力発電についても更なる二酸化炭素排出量の抑制が求められている。今後CO₂排出量抑制のためには、さらなる高効率化に向けて、現在開発中のIGCCを効率でしのぐ次世代高効率石炭火力発電技術等の開発に加え、CCSによる低炭素化を図っていく必要がある。

しかしながら、CCSは多大な付加的なエネルギーが必要であり、効率の低下や発電コストの上昇を招く。そのためエネルギー資源を海外に依存する我が国では、資源の有効利用と発電コストの抑制のため、このエネルギーロスを可能な限り低減する必要がある。

2. 具体的研究内容

本技術開発においてはCO₂回収型クローズドIGCCの開発、水蒸気を添加した次世代ガス化システム及び両技術の相乗効果確認を実施する。とりわけ相乗効果については、既存のIGCCへ両要素技術の適用性についても効果を検証する。クローズドIGCCシステムは、排ガスCO₂を一部系統内にリサイクルすることにより、CO₂回収型石炭ガス化発電システムの効率を大幅に向上することのできる、世界でも例のない次世代IGCCシステムである。本システムは高効率に加え、CO₂の100%回収が可能であるため、CO₂を排出しないゼロエミッション石炭火力の実現が期待できる。また、次世代ガス化システムは、冷ガス効率及び送電端効率の向上並びに実用化に向けた技術開発に向けて、酸素吹石炭ガス化においては、ガス化炉にガス化剤として酸素を供給して石炭を部分燃焼させ、石炭を熱分解しているが、投入された石炭が一部燃焼して消費されること、酸素製造装置等の所内動力の増加により送電端効率が低下することが効率向上のための課題となっていることから、熱分解の一部を、ガスタービン排熱を利用して作る水蒸気を用いた石炭ガス化反応に置き換えることにより、冷ガス効率の向上を図るとともに、酸素供給量の低減を図り、送電端効率の向上を目指す。CO₂回収型クローズドIGCCの実現に向けては、2008年度から2014年度まで実施した「CO₂回収型次世代IGCC技術開発」において、石炭投入量3t/dの小型ガス化炉を活用し、送電端効率42%（高位発熱量基準）以上を達成可能とする基盤技術を開発してきた。

本事業では、この基盤技術開発の成果を活用し、実機により近い大型のサイズのガス化炉において検証を行い、システム実現に向け、基盤技術をより確実な技術として発展させるとともに、他のCO₂分離・回収技術と比較した本システムの経済的優位性を確認することを狙いとする。

具体的には、石炭投入量50t/d規模のガス化炉を用いた、O₂/CO₂ガス化技術の実証や乾式ガス精製システムの実証といった高効率発電を可能とする各要素技術を開発する。また、セミクローズドGTについては、燃焼試験とCFD解析を通し、実スケールの燃焼器の特性評価を行う。

次世代ガス化システムのこれまでのシミュレーションによる検討結果では、①噴流床型 I G C C ガス化炉への高温の水蒸気の注入による冷ガス効率及び送電端効率の向上、②エネルギー効率の高い酸素製造技術を組み込んだ I G C C システムの構築による更なる送電端効率の向上、の可能性があると分かった。そこで、これらの可能性を検証及び評価するため、以下の項目を実施する。

(1) 水蒸気添加による冷ガス効率向上効果の検証

噴流床型ガス化炉への高温の水蒸気の注入による冷ガス効率の向上について、小型ガス化炉での検証を行う。

(2) エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性評価

エネルギー効率の高い酸素製造装置の適用性を評価する。

(3) I G C C システム検討

エネルギー効率の高い酸素製造装置を組み込んだ I G C C の最適化システム試設計及び経済性検討を行う。

冷ガス効率の向上及び試設計を踏まえて、送電端効率を精査する。

また、両技術の相乗効果確認及び既存の I G C C へ適用した場合の効果を検証する。

3. 達成目標

[中間目標 (2017年度)]

CO₂回収型クローズド I G C C については、送電端効率42% (高位発熱量基準) を見通すための要素技術確立の目途を得る。

次世代ガス化システムについては、既存の I G C C (1500℃級GTで送電端効率46~48%) を凌ぐ高効率石炭ガス化発電システムの見通しを得るため、小型ガス化炉による水蒸気添加ガス化試験方法を確立する。

[最終目標 (2020年度)]

CO₂回収型クローズド I G C C については、2019年度までに送電端効率42% (高位発熱量基準) を見通すための要素技術を確立する。

次世代ガス化システムについては、2018年度までに既存の I G C C (1500℃級GTで送電端効率46~48%) を凌駕する高効率石炭ガス化発電システムの見通しを得る。

両技術の相乗効果として、2020年度までにCO₂回収型クローズド I G C C の目標効率から更に0.5ポイント程度の向上の見通しを得る。

研究開発項目⑥ 「カーボンリサイクル・次世代火力推進事業」

[実施期間] 2016年度～2024年度

1. 研究開発の必要性

長期エネルギー需給見通しにおける基本方針は、3E+S（安全性、安定供給、経済効率性、環境適合）を同時達成しつつ、バランスの取れた電源構成を実現することである。2030年以降、中長期的に火力発電から排出されるCO₂を一層削減するには、次世代技術の普及による更なる高効率化や再生可能エネルギーの利用拡大、並びにカーボンリサイクルの推進が重要である。これらの推進を実現するには中長期的な研究開発も重要であるため、革新的技術の先導研究や調査が必要となる。

2. 具体的研究内容

最新の技術動向や社会情勢、社会ニーズに合わせ、国内外の火力発電技術分野およびカーボンリサイクルにおける最新技術の普及可能性、技術開発動向、産業間連携等の調査や、新規技術開発シーズ発掘のための調査を実施する。また、IEA/CCC (Clean Coal Centre)、IEA/FBC (Fluidized Bed Combustion)、等に参画し、技術情報交換・各種技術情報収集を行うとともに、国内関係者への情報提供を行う。また、今後の国際市場における日本の火力発電所受注に向けて、高い競争力を発揮できる戦略及びビジネスモデルを構築する。さらに、低コスト高効率次世代火力発電システム実現に向けた検討や次世代火力発電における燃料多様化（バイオマス、アンモニア等）のための調査および先導研究を進める。また、カーボンリサイクルにおいては、要素技術検討のための共通基盤技術開発（CO₂還元、炭酸塩化等）を進める。

3. 達成目標

[最終目標（2024年度）]

火力発電技術分野において、CO₂排出量低減、環境負荷低減及び国際競争力の強化を図るために必要となる基礎的情報や、最新情報の収集・解析及び将来における次世代火力の技術開発や導入可能性について、関連技術の適応性、課題等の調査を行う。また、海外との協力を通して、我が国の優れたCCTの導入に向けた取組を行う。カーボンリサイクル分野において、先導研究や調査の成果を俯瞰して、関連技術の経済性や導入可能性、CO₂削減効果に関する基礎的情報や課題を整理する。

研究開発項目⑦ 「次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発」

[実施期間] 2017年度～2022年度

1. 研究開発の必要性

従来型石炭火力発電の中で最高効率である超々臨界圧火力発電（USC）は蒸気温度の最高温度は630℃程度が限界と言われてきた。700℃以上の高温蒸気へ適用されるボイラ・タービン適用材料開発については、長期高温環境下での使用を想定したクリープ試験を実施する等、更なる信頼性の向上が必要である。本事業では2020年以降に増大する経年石炭火力のリプレース及び熱効率向上需要に対応するため、高温材料信頼性向上及び保守技術開発を行う。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 高温材料信頼性向上試験

信頼性向上のため、クリープ疲労試験、異種材料溶接部健全性評価、材料データベースの拡充、表面処理技術開発等を実施する。

(2) 保守技術開発

タービンロータ超音波探傷試験（UT検査）等の精度向上、高効率化、適用箇所の拡大を目的とした非破壊検査技術開発を実施する。

3. 達成目標

[中間目標（2019年度）]

長時間クリープ疲労試験、材料データベースの拡充については、各種データの取得を行い、2021年度末までの試験計画を策定する。

表面処理技術開発等の高温材料信頼性向上及びタービンロータ超音波探傷試験（UT検査）精度向上等の保守技術については、技術確立の見通しを得る。

[最終目標（2022年度）]

事業終了時において送電端熱効率46%（高位発熱量基準）達成可能な商用プラントへ適用する長時間クリープ疲労試験、材料データベースの拡充、表面処理技術開発等の高温材料信頼性向上及びタービンロータ超音波探傷試験（UT検査）精度向上等の保守技術を確立する。

4. その他重要事項

本事業については、他の事業との連携を図りながら、ユーザー及び外部有識者等の意見を適切に反映し、着実な運営を図る。情報発信及び知財化についても、技術の流出防止と適宜知財化を適切に助成先へ指導する。

研究開発項目⑧「CO₂有効利用拠点における技術開発」 [委託・助成事業]

[実施期間] 2020年度～2026年度

1. 研究開発の必要性

供給安定性及び経済性に優れた天然資源である石炭を利用した火力発電は、将来的にも、国内の発電供給量の26%を担う重要な電源であるが、これら石炭火力発電ではCO₂排出量が比較的多い課題がある。このような石炭火力を中心とした産業部門から生成するCO₂を削減するため、経済産業省において策定された「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2019年6月策定、2021年7月改訂)において、CO₂を資源として捉え、これを分離・回収し、鉱物化や人工光合成、メタネーションによる素材や燃料への利用等とともに、大気中へのCO₂排出を抑制していく方針が示された。

2019年9月に開催されたカーボンリサイクル産学官国際会議において、経済産業省より、カーボンリサイクル3Cイニシアティブ、すなわち、3つのCのアクションとして、①相互交流の推進(“C”aravan)、②実証研究拠点の整備(“C”enter of Research)、③国際共同研究の推進(“C”ollaboration)に取り組むことが示された。

カーボンリサイクル技術の開発を効率的に進めるためには、CO₂の分離・回収が行われている場所において、カーボンリサイクル技術開発を重点的に進める必要がある。

2. 具体的研究内容

1) CO₂有効利用拠点化推進事業

CO₂が得られる広島県大崎上島を研究拠点に、複数の企業や大学等が要素技術開発および実証試験等を行うための拠点化に向けた検討および整備を行い、拠点の運営業務、要素技術開発および実証試験の総括的な評価等を行う。

2) 研究拠点におけるCO₂有効利用技術開発・実証事業

2030年の実用化に向け広島県大崎上島の研究拠点において、CO₂有効利用に係る要素技術開発および実証試験を実施する。

3. 達成目標

[中間目標(2022年)]

複数の企業や大学等が要素技術開発および実証試験等を行うための拠点化に向けた検討および整備を行う。また、CO₂有効利用に係る要素技術開発を行い、実現可能性を検討し、拠点候補地で行うべき事業を選定する。

[中間目標(2025年)]

当該拠点化に向けた追加整備を必要に応じて行う。また、CO₂有効利用に係る要素技術開発や実証試験を行い、実施済の要素技術開発等についてCO₂有効利用技術の経済性、CO₂削減効果等を評価する。

[最終目標(2026年度)]

CO₂有効利用に係る要素技術開発や実証試験を行い、2026年度まで実施した要素技術開発等についてCO₂有効利用技術の経済性、CO₂削減効果等を評価する。

研究開発項目⑨ 「CO₂排出削減・有効利用実用化技術開発」 [委託・助成事業]

1) 化学品へのCO₂利用技術開発

[実施期間] 2020年度～2026年度

1. 研究開発の必要性

火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素（CO₂）を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンリサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」（2019年6月策定、2021年7月改訂）では、化学品や燃料（液体や気体燃料）、鉱物（コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など）などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられた。

化学品へのCO₂利用技術については、既存の化石燃料由来化学品に代替可能でありCO₂削減・CO₂固定化に繋がること、高付加価値品製造に利用可能であること、新規技術導入による効率向上やコスト低減の可能性があること等から、カーボンリサイクル技術として実現への期待は大きい。一方で、現状では基礎研究レベルに留まる研究も多く、今後重点的に技術開発に取り組むべき分野である。

2. 具体的研究内容

CO₂を原料とした化学品の合成において、CO₂と水素あるいは合成ガスから一段で直接オレフィン合成する技術や、CO₂と水素あるいは合成ガスからBTX（ベンゼン・トルエン・キシレン）等を製造する技術の開発、CO₂分離回収技術とメタノール合成技術とを一体化させたシステムの技術の開発等が必要である。これらについて高効率な製造技術の開発や、全体システムの最適化を行い、適用条件の明確化や事業性の検討を行う。

3. 達成目標

[中間目標（2022年）]

CO₂を原料とした化学品合成の各技術について、要素技術開発および全体システムの構築を行う。

[中間目標（2025年度）]

CO₂を原料とした化学品合成の各技術について技術開発もしくは実証研究を実施し、全体システムを最適化するとともに、プロセス全体のCO₂削減効果および経済性評価を実施する。

[最終目標（2026年度）]

CO₂の排出源や製品の用途等に応じた適用技術の成果の整理を行い、化学品に関するカーボンリサイクル技術の実用化の見通しを得る。

2) 液体燃料へのCO₂利用技術開発

[実施期間] 2020年度～2026年度

1. 研究開発の必要性

火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素（CO₂）を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンリサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」（2019年6月策定、2021年7月改訂）では、化学品や燃料（液体や気体燃料）、鉱物（コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など）などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられた。

CO₂由来の液体燃料については、既存の石油サプライチェーンを活用でき液体燃料の低炭素化を促進する技術であることから、カーボンリサイクル技術としての実現への期待は大きい。一方で、現状では生産効率やコストなどの面で課題が大きいことから、普及に向けて技術開発に取り組む必要がある。

2. 具体的研究内容

CO₂を原料とした既存の液体化石燃料（ガソリン、軽油等）の代替品となり得る液体燃料（微細藻類由来のバイオ燃料を除く）製造に関するFT合成やその他合成反応など製造プロセスの改善などを通じ、CO₂を有効利用しつつ、その排出削減を目指す技術開発を行う。

3. 達成目標

[中間目標（2022年）]

CO₂を原料とした液体燃料合成の各技術について、要素技術開発および全体システムの構築を行う。

[中間目標（2025年度）]

CO₂を原料とした液体燃料合成の各技術について技術開発もしくは実証研究を実施し、全体システムを最適化するとともに、プロセス全体のCO₂削減効果および経済性評価を実施する。

[最終目標（2026年度）]

CO₂の排出源や製品の用途等に応じた適用技術の成果の整理を行い、液体燃料に関するカーボンリサイクル技術の実用化の見通しを得る。

3) コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO₂利用技術開発

[実施期間] 2020年度～2026年度

1. 研究開発の必要性

火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素(CO₂)を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンリサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2019年6月策定、2021年7月改訂)では、化学品や燃料(液体や気体燃料)、鉱物(コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など)などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられた。

コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへのCO₂利用については、CO₂固定化ポテンシャルが高いこと、生成物が安定していること、土壌改質などへの適用も見込めることなどから、カーボンリサイクル技術としての実現への期待は大きく、早期の社会実装が望まれる分野である。

2. 具体的研究内容

鉄鋼スラグ、廃コンクリート、石炭灰等の産業副産物、廃鉱物、海水(かん水)等からの有効成分(CaやMgの化合物)の分離や微粉化等の前処理の省エネ化、湿式プロセスにおける省エネ化、安価な骨材や混和材等の開発および炭素・炭化物の生成技術などの要素技術を開発する。また、CO₂発生源から製造・供給までの一貫システム構築・プロセスの最適化、用途拡大と経済性の検討を行い事業性について検討する。

3. 達成目標

[中間目標(2022年)]

コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへの各CO₂利用技術について、要素技術開発および全体システムの構築を行う。

[中間目標(2025年度)]

コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などへの各CO₂利用技術について技術開発もしくは実証研究を実施し、全体システムを最適化するとともに、プロセス全体のCO₂削減効果および経済性評価を実施する。

[最終目標(2026年度)]

CO₂の排出源や製品の用途等に応じた適用技術の成果の整理を行い、コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物などに関するカーボンリサイクル技術の実用化の見通しを得る。

4) 気体燃料へのCO₂利用技術開発

[実施期間] 2021年度～2026年度

1. 研究開発の必要性

火力発電や各種工場で排出される二酸化炭素(CO₂)を資源として捉え、回収し、有効利用するカーボンリサイクル技術の開発は、気候変動対策の一つとして重要なものと考えられている。経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」(2019年6月策定、2021年7月改訂)では、化学品や燃料(液体や気体燃料)、鉱物(コンクリート、セメント、炭酸塩、炭素、炭化物など)などの分野を中心に、カーボンリサイクル技術を活用した製品の、コスト低減や用途拡大に向けた技術開発を進める方向性が示された。また、2021年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においてカーボンリサイクル技術は、カーボンニュートラル社会を実現するためのキーテクノロジーに位置づけられた。

気体燃料へのCO₂利用技術については、既存の化石燃料を代替可能であり既存燃料市場へ適応した場合、大規模なCO₂削減を実現する可能性を持つことや、既存のインフラを活用可能な点から技術確立後のCO₂削減効果の波及のしやすさが大きく期待される等、カーボンリサイクル技術として実現への期待は大きい。一方で、現状では基礎研究レベルに留まる研究も多く、今後重点的に技術開発に取り組むべき分野である。

2. 具体的研究内容

CO₂を原料とした気体燃料製造技術においては、触媒長寿命化や活性マネジメント、熱マネジメント、スケールアップ検討、電解技術等を活用した基盤技術等の開発が必要である。これらについて高効率な製造技術の開発や全体システムの最適化、またそれらを通じた低コスト化検討等を行う。

3. 達成目標

[中間目標(2023年)]

CO₂を原料とした気体燃料製造の各技術について、要素技術開発および全体システムの構築を行う。

[最終目標(2026年度)]

CO₂の排出源や製品の用途等に応じた適用技術の成果の整理を行い、気体燃料に関するカーボンリサイクル技術の実用化の見通しを得る。

研究開発項目⑩ 「石炭利用環境対策事業」

[実施期間] 2016年度～2025年度

1. 研究開発の必要性

石炭は、経済性、供給安定性に優れた重要なエネルギー資源であり、「第6次エネルギー基本計画」においては、再生可能エネルギーを最大限導入する中で、調整電源としての役割が期待されている。一方、石炭利用に伴い発生するCO₂、SO_x、NO_x、ばいじん等への対策や、石炭灰やスラグの有効利用方策を確立することが喫緊の課題である。

2. 具体的研究内容

石炭利用に伴い発生する環境影響の低減等に貢献する技術の開発を行う。

1) 石炭利用環境対策推進事業

石炭利用時に必要な環境対策に関わる調査を実施する。また、今後のCCT開発を効率的に支援するコールバンクの拡充及び石炭等の発熱性に係る調査・技術開発を行う。

石炭灰の発生量や有効利用に関する実態調査等を行う。具体的には、国内石炭灰排出量・利用量を把握するとともに、海外の石炭灰利用技術及び利用状況等を調査する。また、石炭等の燃焼灰利用及び削減に係る技術開発を行う。

さらに、石炭ガス化溶融スラグ有効利用技術を開発し、工業製品として規格化することにより、スラグ製品として新しい販路を開拓し、石炭等の燃焼灰有効利用の用途を広げる。

2) 石炭利用技術開発

石炭等の燃焼灰の利用用途拡大に関する技術開発を行う。

セメントを使用しないフライアッシュコンクリート製造技術の開発を実施する。加えて、低品位フライアッシュの硬化体原材料としての適用範囲を把握し、有望視される用途（土木分野、建築分野、環境分野等）に適した硬化体製造技術を確立する。

石炭ガス化溶融スラグを利用したコンクリート構造物を製造し、強度、組成、耐久性などに関する評価試験を実施し、信頼性・性能の確認を行う。また、コンクリートを使用する際のガイドラインとなる設計・施行指針を作成する。

3. 達成目標

[中間目標（2019年度）]

1) 石炭利用環境対策推進事業

石炭利用環境対策に関わる調査、コールバンクの拡充及び石炭等の発熱性を把握することにより、石炭の有効利用技術の確立に向けた知見を得る。

石炭等の燃焼灰の有効利用、及び削減に寄与する技術の確立に向けた知見を得る。

また、新たな石炭ガス化溶融スラグ有効利用技術を開発し、工業製品としての規格化の見通しを得る。

石炭の有効利用に資する国内石炭灰排出量・利用量等の共通基盤データをとりまとめる。

2) 石炭利用技術開発

石炭等の燃焼灰の利用拡大技術として、セメントを使用しないフライアッシュコンクリート製造技術を確立し、製品化に向けた用途を提案する。

[中間目標（2022年度）]

1) 石炭利用環境対策推進事業

石炭等の発熱性を把握すると共に、石炭管理の指針に資する知見を得る。石炭等の燃焼灰の有効利用、削減及び用途拡大に寄与する技術の確立に向けた知見を得る。

2) 石炭利用技術開発

石炭等の燃焼灰の利用拡大技術として、セメントを使用しないコンクリート製造技術を確認、製品性能の見通しを得る。また、石炭ガス化溶融スラグを使用したコンクリートの信頼性・性能を示し、また設計・施工指針を作成するための知見を得る。

[最終目標（2025年度）]

1) 石炭利用環境対策推進事業

石炭利用環境対策に関わる調査、コールバンクの拡充及び石炭等の発熱性を把握することにより、石炭の有効利用技術確立の見通しを得る。

石炭等の燃焼灰の有効利用、及び削減及び用途拡大に寄与する技術確立の見通しを得る。

また、新たな石炭ガス化溶融スラグ有効利用技術を開発し、工業製品としての規格化の見通しを得る。

石炭の有効利用に資する国内石炭灰排出量・利用量等の共通基盤データを取りまとめる。

2) 石炭利用技術開発

石炭等の燃焼灰の利用拡大技術として、セメントを使用しないフライアッシュコンクリート製造技術を確認し、製品化に向けた用途を提案する。加えて、石炭ガス化溶融スラグを使用したコンクリートの信頼性・性能を示し、設計・施行指針を作成する見通しを得る。

研究開発項目⑪「アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業」〔委託・助成事業〕

[実施期間] 2021年度～2024年度

1. 研究開発の必要性

2018年7月「第5次エネルギー基本計画」では、石炭は、経済性、供給安定性に優れた重要なエネルギー資源であり、重要なベースロード電源と位置付けられている。また、既存のインフラを有効利用した脱炭素化のための技術開発として、アンモニアを燃料として直接利用する技術開発が挙げられている。また、2021年10月「第6次エネルギー基本計画」では、アンモニアを燃料とした発電は燃焼時にCO₂を排出せず、カーボンニュートラル実現に向けた電源の脱炭素化を進める上で有力な選択肢の一つと位置付けられている。

2020年3月に策定された「新国際資源戦略」では、CO₂排出削減に向け、液体アンモニアの混焼を含めて着実に技術開発等を進めることが必要とされている。

CO₂フリーアンモニアは、水素を輸送・貯蔵できるエネルギーキャリアとして、火力発電の燃料として直接利用が可能であり、燃焼時にはCO₂を排出しない燃料として、温室効果ガスの排出量削減に大きな利点がある。

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用は、2030年以降、中長期的に火力発電から排出されるCO₂を一層削減し、アンモニアをはじめとする水素エネルギーの社会実装に繋がる技術開発である。

2. 具体的研究内容

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用技術を実証すべく、設備費、運転費並びにアンモニアの製造・輸送コストを考慮した経済性検討、実証試験に必要な技術検討などを実施する。

1) 要素研究〔委託事業〕

2) 実証研究〔助成事業（1／2助成）〕

※1)の実施者を公募した後の、1)から2)への移行の可否は、外部有識者で構成される委員会の審査（ステージゲート審査）を経て決定する。

3. 達成目標

[中間目標（2023年）]

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用技術の見通しを得る。

[最終目標（2024年度）]

火力発電等におけるアンモニアの燃料としての利用技術を確立する。

研究開発項目⑫ CO₂分離・回収技術の研究開発 [委託事業]

[実施期間] 2018年度～2024年度

(2021年度までは「CCUS研究開発・実証関連事業」において実施)

1. 研究開発の必要性

2020年1月に策定された「革新的環境イノベーション戦略」においては、CO₂分離・回収コストの低減が技術課題として記載されており、新たな研究開発・実証として、固体吸収材や分離膜を用いた分離回収技術が挙げられている。

また、2021年7月に経済産業省が改定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」では、CO₂の分離・回収は共通技術として重要な位置づけとされている。

本事業では、石炭火力発電所等で発生するガスからCO₂を分離・回収するのに有効な技術として、固体吸収法および膜分離法について研究開発を行う。

2. 具体的研究内容

(1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発【2019年度終了】

CO₂の分離・回収技術の一つである化学吸収法のうち、高効率な回収が可能な「アミンを固体に担持した固体吸収材」について、燃焼排ガスを対象としたプラン1ト試験設備を用いた実用化研究を行う。

(2) 先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

石炭火力発電所の燃焼排ガスに最適化された、固体吸収材移動層システムの研究開発を行う。

固体吸収材移動層システムのCO₂分離・回収試験を実施するために、移動層パイロットスケール試験設備(40t-CO₂/d規模)について、設計・建設・運転等を行う。また、固体吸収材の性能向上を図るとともに、固体吸収材の大量製造技術、移動層システムにおけるCO₂分離・回収等の各工程にかかるプロセスシミュレーション技術等、CO₂固体吸収法に関わる基盤技術開発を行い、石炭火力発電所からの実燃焼排ガスを用いて、固体吸収法による石炭燃焼排ガスへの適用性を研究する。

(3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発

石炭ガス化複合発電等で発生する比較的高い圧力を有するガスからCO₂を分離・回収するのに有効な分離膜技術について、実ガスを用いた実用化研究を行う。

(4) 二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発

火力発電所等で発生するガスからCO₂を分離・回収するのに有効な膜分離技術について、実ガスに適用可能な分離膜モジュールおよび分離膜システムの実用化研究を行う。

また、CO₂分離・回収プロセスとCO₂利用プロセスの統合を考慮した膜分離技術の研究開発を行う。

3. 達成目標

(1) 先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発

[最終目標] 2019年度

CO₂分離・回収エネルギーを1.5GJ/t-CO₂を達成する固体吸収材・システムを開発する。

(2) 先進的二氧化碳素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究

[中間目標] 2022年度

移動層パイロットスケール試験設備すべての機器の据付、受電を完了し、石炭火力発電所煙道から移動層パイロットスケール試験設備へ実燃焼排ガスを導入し、CO₂を分離し回収出来ることを確認する。

固体吸収材のスケールアップ製造技術開発を行い、パイロット試験開始に必要な固体吸収材の供給を完了する。また、移動層シミュレーションによる実ガス試験での最適運転条件を提示する。

[最終目標] 2024年度

火力発電所などの燃焼排ガスなどからCO₂を分離・回収する固体吸収法について、実燃焼排ガスからのCO₂分離・回収連続運転を実施し、パイロットスケール設備においてCO₂分離・回収エネルギー1.5GJ/t-CO₂の目途を得る。

(3) 二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発【2021年度終了】

[最終目標] 2021年度

石炭ガス化複合発電等で発生する比較的高い圧力を有するガスからのCO₂分離・回収エネルギーについて、実用化段階(数百万t-CO₂/年規模を想定)で回収エネルギー0.5GJ/t-CO₂以下を達成する分離膜技術を開発する。

(4) 二酸化炭素分離膜システム実用化研究開発

[中間目標] 2022年度

実用化段階で想定される条件下でCO₂分離・回収に用いることができる分離膜材料の設計方針の見通しを得て、評価設備による性能検証を開始する。

[最終目標] 2023年度

火力発電等で発生するガスからのCO₂の分離・回収において、CO₂の利用プロセスに適する分離膜材料を適用した分離膜システムを開発し、比較的高い圧力を有するガスからのCO₂の分離・回収においては実用化段階でCO₂分離・回収エネルギーが0.5GJ/t-CO₂以下を達成できる技術を開発する。

研究開発項目⑬「火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業」〔委託・助成事業〕

1) 機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の技術開発・実証研究〔委託・助成事業〕

[実施期間] 2022年度～2026年度

1. 研究開発の必要性

2021年10月に策定された「第6次エネルギー基本計画」では、再生可能エネルギーを大量導入するには、調整力の確保等の電力システムの柔軟性の向上が必要であるとされており、火力発電の今後の在り方についても、安定供給を大前提に設備容量の確保が挙げられている。

火力発電の運用性向上を目指すため、調整力電源の安定性維持に貢献する機動性に優れたガスタービン複合発電（GTCC）に適用する技術について、既存設備への適用を対象とした社会実装に取り組むことが重要である。

2. 具体的研究内容

急速起動・出力変動時のGTCCの安定運転の実現に向け、発電事業者が抱える現状ガスタービンの課題に対し、本事業の要素研究にて確立した燃焼技術、制御技術、数値解析技術等を中心とした要素研究の成果を、発電事業者の設備投資コストをできるだけ抑えた形で実用化する検討を実施し、最低負荷の引き下げや出力変化速度改善の検証等を行う。

1) 要素研究〔委託事業〕

2) 実証研究〔助成事業（1／2助成）〕

※1)の実施者を公募した後の、1)から2)への移行の可否は、外部有識者で構成される委員会の審査（ステージゲート審査）を経て決定する。

3. 達成目標

[中間目標（2024年度）]

機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電について、電力事業者の方針や対象機器の要求仕様等に応じた設備仕様等をまとめる。

[最終目標（2026年度）]

機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電について、実証設備での目標性能達成の目途を得る。

研究開発項目⑬「火力発電負荷変動対応技術開発・実証事業」〔委託・助成事業〕

2) 石炭火力の負荷変動対応技術開発・実証研究〔委託・助成事業〕

[実施期間] 2023年度～2026年度

1. 研究開発の必要性

2021年10月に策定された「第6次エネルギー基本計画」において、火力発電は、再生可能エネルギーの瞬時的・継続的な発電電力量の低下にも対応可能な供給力を持つ形で設備容量を確保することを求められており、とりわけ自然変動電源（太陽光・風力等）の導入が今後拡大する中で、電力の需給バランスを維持し周波数を安定化するために、火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性の向上が必要となる。

2. 具体的研究内容

火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるために、機動性に優れた広負荷帯高効率発電用ボイラに関する技術開発・実証研究を実施する。

1) 要素研究〔委託事業〕

2) 実証研究〔助成事業（1／2助成）〕

※1)の実施者を公募した後の、1)から2)への移行の可否は、外部有識者で構成される委員会の審査（ステージゲート審査）を経て決定する。

3. 達成目標

[最終目標（2026年度）]

負荷変動対応に伴う事故リスクと保守コスト低減に必要な故障予知・寿命予測等の保守技術および火力発電による調整力の一層の確保と信頼性・運用性を向上させるための先進的な技術の社会実装に向けた見通しを得る。

研究開発スケジュール

年度(西暦)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
研究開発項目① 石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業 1) 酸素吹IGCC実証(1/3助成) 2) CO ₂ 分離・回収型酸素吹IGCC実証(2/3、1/3助成) 3) CO ₂ 分離・回収型IGFC実証(1/2助成) 4) 信頼性向上、低コスト化(1/3助成) 5) CO ₂ 分離・回収負荷変動対応ガスタービン要素技術開発(1/2助成)																				
研究開発項目② 高効率ガスタービン技術実証事業 1) 1700℃級ガスタービン(1/2助成) 2) 高温分空利用ガスタービン(AHAT)(2/3助成)																				
研究開発項目③ 先進超々臨界圧実用化要素火力発電技術開発(2/3助成)																				
研究開発項目④ 次世代火力発電基盤技術開発																				
1) 次世代ガス化システム技術開発(委託)																				
2) 燃料電池向け石炭ガスクリーナップ技術要素研究(委託)																				
3) ガスタービン燃料電池複合発電技術開発(委託)																				
4) 燃料電池石炭ガス適用性研究(委託)																				
5) CO ₂ 分離型化学燃焼石炭利用技術開発(委託)																				
6) 石炭火力の負荷変動対応技術開発(委託)																				
7) CO ₂ -有効利用技術開発(委託)																				
8) CO ₂ 分離・回収型ポリジェネレーションシステム技術開発(委託)																				
9) 機動性に優れた広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の要素研究(委託)																				
研究開発項目⑤ CO ₂ 回収型次世代IGCC技術開発(委託)																				
研究開発項目⑥ カーボンサイクル・次世代火力推進事業(委託)																				
研究開発項目⑦ 次世代技術の早期実用化に向けた信頼性向上技術開発(1/2助成)																				

年度(西暦)	1982	~	14	15	16	17	18	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
研究開発項目⑧ CO ₂ 有効利用拠点における技術開発(委託・助成)											◇			◇	
	CO ₂ 有効利用拠点化推進事業														
	研究拠点におけるCO ₂ 有効利用技術開発・実証事業														
研究開発項目⑨ CO ₂ 排出削減・有効利用実用化技術開発(委託・助成)											◇			◇	
1) 化学品へのCO ₂ 利用技術開発(委託・助成)											◇			◇	
	化学品へのCO ₂ 利用技術開発														
2) 液体燃料へのCO ₂ 利用技術開発(委託・助成)											◇			◇	
	液体燃料へのCO ₂ 利用技術開発														
3) 炭酸塩、コンクリート製品・コンクリート構造物へのCO ₂ 利用技術開発(委託・助成)											◇			◇	
	炭酸塩、コンクリート製品・コンクリート構造物へのCO ₂ 利用技術開発														
4) 気体燃料へのCO ₂ 利用技術開発(委託・助成)												◇			◇
	気体燃料へのCO ₂ 利用技術開発														
研究開発項目⑩ 石炭利用環境対策事業(委託・助成)								◇			◇			◇	
1) 石炭利用環境対策推進事業(委託)				※ 2	石炭発熱性調査・先導研究、スラグの規格化、石炭灰発生量及び有効利用実態調査、石炭灰利用・削減技術開発等										
2) 石炭利用技術開発(2/3補助)			※ 1	セメント不使用フライアッシュ製造技術開発											
	石炭ガス化溶融スラグのコンクリート実規模性能試験														
研究開発項目⑪ アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業(委託・補助)															◇
	アンモニア混焼火力発電技術研究開発・実証事業														
研究開発項目⑫ CO ₂ 分離・回収技術の研究開発(※3)									◇		◇				◇
1) 先進的二氧化碳固体吸収材実用化研究開発				※ 1	先進的二氧化碳固体吸収材実用化研究開発										
2) 先進的二氧化碳固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究															
	先進的二氧化碳固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究														
3) 二氧化碳分離膜モジュール実用化研究開発				※ 1	二氧化碳分離膜モジュール実用化研究開発										
4) 二氧化碳分離膜システム実用化研究開発															
	二氧化碳分離膜システム実用化研究開発														

※1 経済産業省にて実施

※2 NEDOゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクトにて実施

※3 2021年度までは「CCUS 研究開発・実証関連事業」において実施

年度(西暦)	1982	~	14	15	16	17	18	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
研究開発項目⑬ 火力発電負荷変動対応技術開発・ 実証事業													◇		◆
1) 機動性に優れる広負荷帯 高効率ガスタービン複合発電 の技術開発・実証研究											機動性に優れる広負荷帯高効率ガスタービン複合発電の 技術開発・実証研究				
2) 石炭火力の負荷変動対応 技術開発・実証研究											石炭火力の負荷変動対応技術開発・実証研究				

● 研究発表・講演（口頭発表も含む）

発表者	所属	タイトル	学会名・イベント名等	発表年月
一般財団法人電力中央研究所	—	h. CRIRPI Activities on Carbon Recycling 電力中央研究所におけるカーボンリサイクルに関する研究開発のご紹介	International Conference on Carbon Recycling 2020	2020年10月
竹井 勝仁	一般財団法人電力中央研究所	h. CO2排出削減・固定化に向けたアンモニアおよびその誘導体合成法の開発	溶融塩技術事業化研究会 2020年度第7回研究会 (アイエムセップ(株) 主宰)	2020年11月
一般財団法人電力中央研究所	—	h. CRIRPI Activities on Carbon Recycling 電力中央研究所におけるカーボンリサイクルに関する研究開発のご紹介	International Conference on Carbon Recycling 2021	2021年10月
長尾有記	株式会社UBE	v. UBEグループにおける気候変動問題への取組み	化学工学会関西大会2021	2021年12月14日
栄長泰明	慶應義塾大学	a.ダイヤモンド電極の応用展開	第 59 回センサ&アクチュエータ技術シンポジウム（招待講演）	2021年7月
栄長泰明	慶應義塾大学	a. Electrochemical Application on Boron-doped Diamond Electrodes	International Symposium on Electroanalytical Chemistry (ISEAC)（招待講演）	2021年8月
栄長泰明	慶應義塾大学	a. Electrochemical CO ₂ reduction using boron-doped diamond electrodes	2d Workshop Nanotechnologies for 21st Century（招待講演）	2021年10月
栄長泰明	慶應義塾大学	a. Electrochemical Application on Boron-doped Diamond Electrodes	Asianalysis XV（招待講演）	2021年10月
栄長泰明	慶應義塾大学	a. Development of electrochemical application on boron-	2021 MRS Fall Meeting（招待講演）	2020年12月

		doped diamond electrodes		
富永悠介、上塚洋、石田直哉、近藤剛史、湯浅真、藤嶋昭、寺島千晶	東京理科大学	a.マイクロ波液中プラズマCVDを用いたボロンドープダイヤモンドの高速合成	第2回ダイヤモンド・DLC関連若手研究会（口頭発表(一般)）【プレゼンテーション賞ゴールド受賞】	2021年11月
富永悠介、上塚洋、石田直哉、近藤剛史、湯浅真、藤嶋昭、寺島千晶	東京理科大学	a.マイクロ波液中プラズマCVDにおけるボロンドープダイヤモンドの合成条件の最適化)	第35回ダイヤモンドシンポジウム（ポスター発表(一般)）	2021年11月
Y. Tominaga, A. Uchida, H. Uetsuka, N. Suzuki, N. Ishida, T. Kondo, M. Yuasa, A. Fujishima, C. Terashima	Tokyo University of Science	a.Expansion of diamond film formation area by using in-liquid microwave plasma CVD	MRM2021（ポスター発表(一般)）	2021年12月
Y. Tominaga, A. Uchida, H. Uetsuka, N. Ishida, T. Kondo, M. Yuasa, S. Sato A. Fujishima, C. Terashima	Tokyo University of Science	a.Synthesis and Crystalline Evaluation of Boron-Doped Diamond by Using In-liquid Microwave Plasma CVD	第31回MRS（ポスター発表(一般)）	2021年12月
Y. Tominaga, A. Uchida, H. Uetsuka, N. Suzuki, N. Ishida, T. Kondo, M. Yuasa, S. Sato, A. Fujishima, C. Terashima	Tokyo University of Science	a.Synthesis of large-area diamond film by in-liquid microwave plasma CVD	Pacificchem2021（ポスター発表(一般)）	2021年12月

富永悠介、上塚洋、石田直哉、近藤剛史、湯浅真、佐藤進、藤嶋昭、寺島千晶	東京理科大学	a.マイクロ波液中プラズマCVDによるポロンドープダイヤモンド膜成長の高速化	第26回シンポジウム「光触媒の最近の展開」(ポスター発表(一般))	2022年3月
久保田侃昌、富永悠介、上塚洋、石田直哉、藤嶋昭、寺島千晶	東京理科大学	a.マイクロ波液中プラズマ法による厚膜ダイヤモンドの高速合成	第26回シンポジウム「光触媒の最近の展開」(ポスター発表(一般))	2022年3月
辻井翔矢斗、富永悠介、上塚洋、石田直哉、藤嶋昭、寺島千晶	東京理科大学	a.有限要素解析を用いたマイクロ波液中プラズマの電磁界シミュレーション	第26回シンポジウム「光触媒の最近の展開」(ポスター発表(一般))	2022年3月
加賀谷つぐみ、石田直哉、勝川るみ、鈴木孝宗、藤嶋昭、手嶋勝弥、寺島千晶	東京理科大学	a.アルコールを用いたゼオライト分離膜によるギ酸水溶液の高純度化・高濃度化	第26回シンポジウム「光触媒の最近の展開」(ポスター発表(一般))	2022年3月
富永悠介、上塚洋、石田直哉、近藤剛史、湯浅真、佐藤進、藤嶋昭、寺島千晶	東京理科大学	a.マイクロ波液中プラズマCVDを用いたポロンドープダイヤモンドの超高速成長	日本化学会第102春季年会(口頭発表(一般))	2022年3月
久保田侃昌、富永悠介、寺島千晶、上塚洋、石田直哉、藤嶋昭	東京理科大学	a.マイクロ波液中プラズマ法による厚膜ダイヤモンドの合成	日本化学会第102春季年会(口頭発表(一般))	2022年3月
今林 拓海、浅野浩一、麦倉良啓	電力中央研究所	SOEC性能評価技術の開発／セル性能に基づくSOEC性能表示式の導出	第29回燃料電池シンポジウム	2022年5月

●新聞・雑誌リスト（一部抜粋）

掲載日	新聞	記事タイトル
2022年度2月11日	日経産業新聞	q.「IHI, CO ₂ フリーのプラ原料」
2022年度1月31日	日本経済新聞	q.プロジェクト最前線
2021年4月~2022年3月	講演 15件	r. 次世代 FT 反応と液体合成燃料一貫製造プロセスに関する研究開発の事業紹介
	新聞・雑誌 5件	
2020.7.15	プレスリリース	v.「廃コンクリートなど産業廃棄物中のカルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセスの研究開発」が NEDO の研究開発委託事業として採択 発表日： 発表会題名等： 題：
2021.9.1	論文投稿（コンクリート工学, 59, 9, 830, 2021）	v. 産業廃棄物中カルシウム等を用いた加速炭酸塩化プロセス研究開発
2021.12.14	学会発表（化学工学会 関西大会 2021）	v. UBE グループにおける気候変動問題への取組み
2021年4月~2022年3月	プレスリリース 2件	w.（脱炭素から「活性炭」へ 次世代コンクリート技術の共同研究を開始、NEDO グリーンイノベーション基金事業「CO ₂ を用いたコンクリート等製造技術開発プロジェクト」にコンソーシアムとして提案し採択）
2021年10月25日	プレスリリース	x. 製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO ₂ 固定化プロセスの技術開発の採択（株式会社神戸製鋼所、株式会社神鋼環境ソリューション）
2022年1月22日	環境新聞 13面	x. 製鋼スラグ中 Ca の溶媒抽出を用いた CO ₂ 固定化プロセスの技術開発の採択（株式会社神鋼環境ソリューション）
2021年10月15日	プレスリリース	y. 二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発（三菱マテリアル（株））
2021年10月15日	プレスリリース	z. 石炭由来の CO ₂ を利用して有価物を製造する新プロセスが NEDO 委託事業に採択
2021年6月	JCOAL Journal	a. ダイヤモンド電極を用いた石炭火力排ガス中の CO ₂ からの基幹物質製造開発事業（河口真紀、田中恒祐）
2021年11月	石炭セミナー	d. 石炭灰およびバイオマス灰等による CO ₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発
2021年12月	石炭灰有効利用シンポジウム	d. 石炭灰およびバイオマス灰等による CO ₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発
2021年6月	JCOAL Journal	d. 石炭灰およびバイオマス灰等による CO ₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発
2021年11月29日	エネルギー技術シンポジウム 2021	e. 「溶融塩電解による固体炭素・酸素ガス製造技術」 加登裕也
2021年11月18日	・溶融塩技術化研究会	h. 二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査
2021年10月	・カーボンサイクル産学官国際会議	h. 二酸化炭素資源化のための中低温イオン液体を用いた尿素電解合成の可能性調査

●学会誌等への寄稿（国内）

発表者	所属	タイトル	発表誌名	ページ番号	発表年月
Irkham, S. Nagashima, M. Tomisaki, Y. Einaga	Keio University	a.Enhancing the electrochemical reduction of CO ₂ by control-ling the flow conditions: Intermittent flow reduction system with a boron-doped diamond electrode.	ACS Sustainable Chem. Eng.	5298-5303	2021年3月
J. Du, A. Fiorani, Y. Einaga	Keio University	a.An efficient, formic acid selective CO ₂ electrolyzer with a boron-doped diamond cathode	Sustainable Energy Fuels	2590-2594	2021年5月
M. Tomisaki, K. Natsui, S. Fujioka, K. Terasaka, Y. Einaga	Keio University	a.Unique Properties of Fine Bubbles in the Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide Using Boron-Doped Diamond Electrodes	Electrochim. Acta	138769	2021年6月
P. K. Jiwanti, S. Sultana, W. P. Wicaksono, Y. Einaga	Keio University	a.Metal Nanoparticles modified Carbon-based Electrode for CO ₂ Electrochemical Reduction	J. Electroanal. Chem.	115634	2021年8月
Z. Peng, J. Xu, K. Kurihara, M. Tomisaki, Y. Einaga	Keio University	a.Electrochemical CO ₂ Reduction on Sub-microcrystalline Boron-doped Diamond Electrodes	Diamond Relat. Mater.	108608	2021年9月
富永悠介、内田晃弘、近藤剛史、四反田功、湯浅真、板垣昌幸、藤嶋昭、上塚洋、寺島千晶	東京理科大学	a.マイクロ液中プラズマ法によるダイヤモンド合成	日本材料科学会誌「材料の科学と工学」	58号 5巻 172ページ	2021年10月

●特許等

出願者	出願番号	国内・外国・PCT	出願日	名称	発明者
慶應義塾大学	特願2020-115713 特開2022-1327	国内	2020年7月3日	a.導電性ダイヤモンド電極を用いたギ酸製造方法及び装置	栄長泰明 他
慶應義塾大学	特願 2 件	国内	2022年1月	a.導電性ダイヤモンド電極を用いたギ酸製造方法及び装置	栄長泰明 他
三菱重工株式会社	特願 3 件	国内	2021年3月 ~2022年3月	d.石炭灰およびバイオマス灰等によるCO ₂ 固定・有効活用に関する要素技術開発	今田他
三菱マテリアル株式会社	特願3件	国内	2022年1月	y.二酸化炭素の化学的分解による炭素材料製造技術開発	—

●受賞実績

発表者	所属	タイトル	雑誌名・学会名・イベント名等	発表年月
栄長泰明	慶應義塾大学	学術賞	電気化学会・「ダイヤモンド電極の創製と機能開拓」	2022年3月
富永悠介、上塚洋、石田直哉、近藤剛史、湯浅真、藤嶋昭、寺島千晶	東京理科大	プレゼンテーション賞ゴールド受賞	第2回ダイヤモンド・DLC関連若手研究会	
Sho Kuzukami, Yuko Maruyama, Shuzo Tominaga, Hiroki Takasu, Yukitaka Kato	東工大	Poster award受賞	The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment (CUUTE-1),	2021年度12月 15日