

事業原簿

作成：2022年9月

上位施策等の名称	なし	
事業名称	カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発 /⑩ 石炭利用環境対策事業	PJコード：P16002 P10016 P92003
推進部	環境部	
事業概要	<p>本事業は石炭の環境対策等を目的として、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、石炭需要の拡大により増大する石炭灰やスラグの有効利用のための技術的課題を明らかにした上で、その課題の解決を目指し、必要に応じ技術開発や技術実証を行う。</p> <p>実施に当たっては、各研究開発の性質に合わせ、委託事業又は助成事業（2/3助成）により実施する。</p> <p>(1) 石炭利用環境対策推進事業【委託事業】</p> <p>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の発熱性に係る調査・技術開発を行う。</p> <p>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、石炭灰利用及び削減に係る技術開発を行う。</p> <p>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、スラグ製品としての新しい販路を開拓し、石炭灰有効利用の用途を広げる。</p> <p>(2) 石炭利用技術開発【助成事業（2/3）】</p> <p>石炭灰の利用用途拡大に関する技術開発を行う。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	
事業期間・予算	<p>(1) 石炭利用環境対策推進事業</p> <p>事業期間：2016年度～2025年度</p> <p>契約等種別：委託</p> <p>勘定区分：一般勘定、電源勘定、エネルギー需給勘定</p> <p style="text-align: right;">[単位：百万円]</p>	

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
予算額	80	60	75	115	75	130	383	918
執行額	93	173	52	101	121	431	(415)	1386
(2) 石炭利用技術開発								
事業期間：2016年度～2025年度								
契約等種別：助成								
勘定区分：一般勘定、電源勘定、エネルギー需給勘定								
[単位：百万円]								
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	合計
予算額	20	20	0	15	35	91	69	250
執行額	20	20	0	1	45	95	(89)	270
事業の 位置付 け・必要 性	(1) 政策的な重要性							
	石炭は、現時点において安定供給性や経済性に優れた重要なエネルギー源。今後、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（「第6次エネルギー基本計画」（令和3年10月閣議決定）より抜粋）。ということで、将来的に石炭の利用は減少が見込まれるが、当面の間は石炭利用が見込まれる中であって、その利用に伴いCO ₂ 、SO _x 、NO _x 、ばいじんや石炭灰やスラグは継続的に発生する。石炭利用の環境負荷低減のためには、環境対策や石炭灰・スラグの削減・有効利用方策は、依然としてその確立が必要である。							
	(2) 世界の取組状況							
	火力発電は世界的にもアジアを中心に必要最小限使わざるを得ず、石炭利用に伴い発生するCO ₂ 、SO _x 、NO _x 、ばいじん、石炭灰やスラグといった物質の環境への影響を低減する方策や石炭利用時に必要な環境対策の確立が重要。							
	(3) 我が国の状況							
	日本は、2050年カーボンニュートラルを目指すことを宣言し、CO ₂ を直接削減するため、石炭の利用は低減されてきているものの、石炭事業全般については、バイオマス混焼やCCUSによってCO ₂ 削減に資する利用も計画されている。また、CO ₂ を積極的に有効活用していくカーボンサイクルの新技术開発も計画されており、石炭の利用は今後も継続して行われることから、石炭利用の規模感を見据えて技術開発事業を進めるとともに、開発した技術の早期の実用化を図る必要がある。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。							

	<p>(4) NEDO が関与することの意義</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ NEDO は、これまでも石炭利活用の環境対策にかかる技術開発を実施してきた経験と知識を有する。 ➤ NEDO は、産学官の技術力・研究力を最適に組み合わせ研究を推進できる。 ➤ NEDO は、難易度が高く、投資規模が大きく、実用化までのリードタイムが長い、いわゆる開発リスクが高い研究開発を支援できる。 <p>以上より、NEDO が本技術開発事業に関与することにより、効果的・効率的に成果を得られると考えられる。</p>
<p>事業の目的・目標</p>	<p>事業の目的</p> <p>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、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。そこで石炭灰の有効利用率の向上など、石炭の有効利用技術の確立の見通しを得る。</p> <p>事業の目標</p> <p>研究開発項目ごとの目標を以下の通り設定した。</p> <p>(1) 石炭利用環境対策推進事業</p> <p>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。</p> <p>(2) 石炭利用技術開発</p> <p>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立、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。</p>
<p>事業の成果</p>	<p>別紙参照</p>
<p>情勢変化への対応</p>	<p>石炭火力の新技术開発として、アンモニア混焼石炭火力など計画されており、石炭の利用並びに石炭灰の量は減少する見込み。一方、この転換は徐々に進むことが想定され、引き続き一定量の石炭の利用、石炭灰の排出が続くことから、石炭利用の規模感を見据えながら、技術開発事業を進めるとともに、開発した技術の早期の実用化を図る。</p>
<p>評価の実績・予定</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 毎年度評価：内部評価 ・ 中間評価：2019 年度、外部評価 ・ 中間評価：2022 年度、外部評価 ・ 事後評価：2026 年度、外部評価

グリーンコール技術開発／石炭利用環境対策事業
事業の成果

1. 石炭利用環境対策事業 研究開発項目一覧

研究開発項目	件名	実施期間	実施者
石炭利用環境対策推進事業 [技術開発：委託]	石炭の低温反応機構解明とそれに基づく自然発熱抑制技術開発	2021 ～2022年度	電中研、日本製鉄
	石炭灰の削減と用途拡大のための石炭高品位化技術開発	2019 ～2021年度	群馬大、電中研、日鉄エンジ、産総研
	浅海域における石炭灰の利活用促進に向けた環境配慮型技術の開発	2021 ～2022年度	JCOAL、電中研、東洋建設、東京パワーテクノロジー
	石炭灰を主原料とした新規なりサイクル連続長繊維の応用研究	2021 ～2022年度	東京大、新日本繊維、電中研
石炭利用技術開発 [技術開発：助成]	石炭ガス化溶融スラグの信頼性確認	2019 ～2022年度	JCOAL、清水建設、勿来IGCCパワー
	石炭灰によるセメントレスコンクリート技術の実用化開発	2021 ～2022年度	大林組、フジミコーポレートテッド、日本シーカ

2. 石炭利用環境対策事業 研究開発成果

2.1 石炭利用環境対策推進事業

(1) 石炭の低温反応機構解明とそれに基づく自然発熱抑制技術開発

① 事業の位置づけ・必要性について

①-1 事業の背景・位置づけ

2050年のカーボンニュートラルを目指す中、CO₂回収型のIGCCでは低品位炭が使用され、アンモニア混焼や再生可能エネルギーの利用の増加に伴い、石炭の消費速度が低下することで、石炭の保管期間が長期化し、より一層石炭の自然発熱抑制技術が求められる。また、鉄鋼業界においても低品位炭の使用比率が上昇していることから、発熱機構に裏付けされた貯炭技術と発熱リスクの評価手法が必要となる。

①-2 実施の効果

自然発熱から発火に至った場合、現場での運転・操業が停止する等甚大なる被害が生じる可能性があり、これによってエネルギーや鋼材供給等にも支障をきたし、産業活動や国民生活に大きな損失が生じることが予想される。自然発熱課題が解決できることで、上記の被害を回避できるだけでなく、低品位炭の活用が進み、電力業界および鉄鋼業界において大幅なコスト低減が可能となることが見込まれる。それに対して、本PJ予算は約10億円であり、費用対効果は高いと考える。

②研究開発マネジメントについて

②-1 事業の目標と目的

当事業の目的は、石炭ユーザが活用可能な、発熱のメカニズムに裏付けされた自然発熱抑制技術および発熱リスク評価法の開発である。従って、自然発熱を引き起こす低温酸化機構解明と、それに基づいた自然発熱抑制技術を実証すると共に、自然発熱リスク分析・評価法を確立することを目標としている。

②-2 研究開発の概要

ラボスケールにて昇温挙動解析および化学構造解析（官能基、ラジカル）などのアプローチにより自然発熱機構の解明を進めると共に、発熱機構から導き出された発熱抑制指針を大型試験装置により検証することで発熱抑制技術の確立を目指す。更に、現場管理に資する石炭の自然発熱リスクの分析・評価法の確立を目指す。

②-3 研究開発の運営管理

研究開発全体の進捗と自然発熱抑制指針の妥当性の確認のため、石炭の自然発熱の第一人者である京都大学三浦名誉教授を主査に、石炭ユーザ、石炭に対する知見が深い外部有識者、総計 5 名による委員会を組織し、定期的に委員会を開催して助言・指導を受けている。

③情勢変化への対応について

特筆すべき点はなし。

④研究成果について

1. 石炭等の自然発熱時の昇温およびガス発生特性と水分挙動解明：2021 年度は目標通り達成、2022 年度は目標通り達成見込み。

1.1 石炭等の自然発熱時の昇温特性とガス発生特性の把握

瀝青炭の中で比較的発熱性が高い石炭（Y 炭）を用いて、加水等による石炭中水分濃度変化、ならびに供給する湿潤ガスの水分濃度変化による昇温特性への影響を、自然発熱性評価試験（R70 試験）で把握した。その結果、高水分炭の昇温特性は貯炭場でみられるような等温工程を経てから昇温工程となる状況を R70 試験で再現できることを確認し、それらの試験結果から Y 炭における等温工程から昇温工程へ移行する際の条件等を明らかにした。

1.2 石炭に対する水分の吸脱着現象および石炭と水との反応現象解明

石炭の自然発熱には、水分の吸脱着による熱や石炭と酸素との反応熱等が関与しているため、水分吸脱着現象および水との反応現象の解明に向けて、以下の項目を実施した。

・湿潤ガス下における発熱量測定の前段階として、乾燥雰囲気下における発熱量を精密 TG-DSC（熱重量-示差走査熱量同時測定装置）を用いて測定した。その結果、極微少な酸化発熱量及び酸素吸着熱量を測定することができ、湿潤ガス下における発熱量も測定できる見通しを得たことから、乾燥、湿潤雰囲気下の違いから水分による発熱量を把握することが可能となる。

・石炭を大気雰囲気下で加熱した際に生じる微量ガスを GC-MS（ガスクロマトグラフ質量分析計）を用いて測定し、発生ガス濃度の温度依存性及び石炭中水分の依存性を定性的に把握した。今後、湿潤雰囲気下において水分の存在により生じる微量ガスの把握が可能になる。

・前述の TG-DSC を用いて、常温下での水分形態を分析し、自由水、結合水、不凍水量を定量した。今後、石炭中水分の蒸発挙動を把握するために、石炭が有する形態毎の水分量に関する情報を活用する。

2023 年度は、湿潤状態の石炭に湿ガスを供給した際の自然発熱性評価試験を、炭種を増やして実施し、その昇温特性とガス発生特性を把握するとともに、TG-DSC を用いた熱分析により、水との反応、水の吸着、酸化反応時に生じる発生熱量を把握する。

2. 化学構造解析による低温酸化機構解明と、それに基づく自然発熱抑制指針提示およびその実証：2021 年度は目標通り達成、2022 年度は目標通り達成見込み。

2.1 ラジカル生成挙動解析

ESR(電子スピン共鳴)装置を導入し、ラジカル(活性種)を定性・定量するための ESR スペクトルの解析方法等、基礎検討を実施した。更に、Y 炭を用いて、酸素導入前後の ESR スペクトルを測定した結果、酸素導入によりラジカルの変化が示唆され、低温酸化反応に関与するラジカルを特定できる見通しを得た。

2.2 酸素官能基解析および発生ガス解析

天然存在度の低い同位体酸素 (^{17}O , ^{18}O) を濃縮したガスや同位体水を用いて、Y 炭を低温酸化させ、生成した酸化炭を ^{17}O NMR(核磁気共鳴)法で解析した。その結果、複数の酸素官能基を観測・定量することに世界で初めて成功し、更に、試験時に発生するガスの総量やその同位体組成も把握することで、低温酸化反応機構の解明に向けて重要な知見を得ることが出来た。

2.3 酸素消費速度解析

Y 炭を対象とする小型流通式試験により、水分が酸素消費量、発生ガス量に与える影響を調査した。その結果、酸素消費速度に対する水分の影響は、明瞭では無かった。一方で、ガス発生量は、水分の有無により差異が観測され、これは同位体酸素を用いた試験の発生ガス量(2.2)と定性的に一致する結果であった

2.4 自然発熱リスク分析・評価法の開発

自然発熱リスク分析・評価法には、NMR を用いた化学構造分析が必要である。2021 年度は、NMR 分析のための望ましい石炭の前処理方法に関し、標準化案を纏めた。

2022 年度は、更に 1 炭種の解析を進め、目標通り低温酸化機構解明の見通しを得ると共に、発熱リスク分析・評価法については、NMR 分析法の標準化案を纏める予定である。更に、2023 年度は、低温酸化機構解明し抑制指針を提案すると共に、自然発熱リスク分析・評価法に関わる全ての標準化案を完成させる予定である。

3. 自然発熱時の熱流体・反応数値解析(自然発熱時に生じる水分挙動および反応を考慮した数値解析)

本研究では、総括反応モデルをベースとする固気混相流数値解析ツールを用い、R70 試験に用いる小型反応器内の乾燥炭充填層を対象に解析を行い、第一段階として、総括反応モデルによって、自然発熱を捉えられること、また、モデルパラメータの調整により、解析精度の向上が見込まれることを確認した。

2023年度は、小型装置内の乾燥炭充填層を対象に、総括反応モデルをベースとする固気混相流数値解析ツールを用いた熱流体・反応数値解析を実施し、ラジカル反応モデルを組み込みに向けて、総括反応モデルの妥当性を把握する。

4. 委員会等の開催

研究開発全体の進捗と石炭の自然発熱抑制指針の妥当性を確認するため、石炭ユーザを含めた外部有識者で構成される委員会を設置した。2021年度には委員会を開催し、各研究開発項目で目標とする成果を踏まえて作成した石炭の自然発熱抑制指針(案)の内容について協議した。

⑤ 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

本事業では、基礎研究に基づいた抑制指針について、スケールアップ効果の把握も含めてより実機に近い大型試験装置で実証する等、実用化に向けた取り組みを2025年度までに実施予定である。また、石炭ユーザが利用可能な、発熱リスク事前評価のための自然発熱リスク分析・評価法の確立にも取り組んでいる。

本事業が終了した2026年度以降に自然発熱リスク分析・評価の実用化、および貯炭場管理技術の実用化と普及を目指す。

(2) 石炭灰の削減と用途拡大のための石炭高品位化技術開発

① 事業の位置づけ・必要性について

①-1 事業の背景・位置づけ

2030年までは国内電力需要の上昇が見込まれており、安価な電力の確保に石炭火力発電の活躍が想定される。一方、発電用途として使用される灰分の少ない高品位な瀝青炭の価格が増大している。よって、低廉な高灰分炭の安定的な入手ならびにその高品位化技術の開発が強く望まれている。

①-2 実施の効果

本事業に投じられた全体予算（1.75億円）に対し、本事業により開発した石炭高品位化システムの導入により33.1億円/年/設備の石炭灰処理コストの削減が見込まれており、費用対効果は十分である。

② 研究開発マネジメントについて

②-1 事業の目標と目的

国内での利用を想定した高灰分炭を調査・選定し、高灰分炭に対する粉碎・分級処理技術、すなわち石炭高品位化技術の研究開発、ならびに最も合理的な石炭一貫利用システムの提案を行うことを目標とする。

②-2 研究開発の概要

高灰分炭から灰分を選択的に除去可能な石炭高品位化技術を開発した。さらに、産炭地で適用可能な粉碎・分級プロセスを選定し、経済的に成り立つ高灰分石炭利用システムを提案した。

③ 情勢変化への対応について

新型コロナウイルスの流行により、計画していた産炭地の現地調査は中止とし、オンライン学会参加等の別手段での情報収集を行った。

④ 研究成果について

我が国で発生する石炭灰発生量を効率的に低減するために、我が国での利用可能性が高い高灰分炭として選定されたロシア産の Nekkoy 炭（NKV 炭）、ならびに一般炭であるオーストラリア産の Moolarben 炭（MLB 炭）を対象として、産炭地において高灰分炭から灰分を選択的に除去し高品位化する乾式脱灰技術に適用可能な要素技術の開発と性能評価を行い、経済的に成立しうる脱灰技術の選定を行うと同時に、脱灰炭の燃焼性評価も併せて実施した。

図 1 に本事業で実施した石炭高品位化技術開発項目を示す。高灰分炭の粉碎処理として、従来型の機械的粉碎処理方法の比較検討に加えて、新規粉碎方法として電気パルス粉碎および超音波粉碎処理の可能性を検討した。灰分の選択的除去の前処理粉碎プロセスとして、従来型の機械的粉碎処理は適用可能であると判断され、また、灰分の存在状態により適切な粉碎方法があることを明らかにした。超音波粉碎においては、高灰分含有粒子を 100 μm 以下の微粒子として選択的に粉碎できることができた。いずれの新規粉碎方法も、従来型の機械式粉碎に比べて高い分離効率を持つことが示された。現時点では、実用化のためにはまだ数段階のスケールアップが必要ではあるが、乾式脱灰プロセスの性能向上に寄与できるポテンシャルがあることが確認できた。

NKV 脱灰炭の燃焼特性は、脱灰前の NKV 原炭ならびに一般炭である MLB 炭と比較して大きな性状低下は認められず、問題なく利用可能と判断された。脱灰炭の灰分の付着・溶融挙動についても、灰分の性状は原炭の組成によってほぼ決まっており、脱灰操作そのものによって問題が引き起こされる可能性は少ないものと考えられた。

分級処理については、100 μm 以上の粒子に流動層偏析分級が適用可能であることを確認した。特に、機械粉碎した粉碎炭について灰分を 70 %まで濃縮できる条件を見出した。総合分離効率も、目標値である 20 %に近い性能が得られることを確認した。100 μm 以下の微粒子への適用を目指して、流動層気流分級プロセスを検討した。粉碎物の流動化操作のみでは高灰分粉碎炭の分離は困難だったが、流動層内に電極を設置し、高電圧を印可することで 55%まで灰分が濃縮された粒子を選択的に分離することに成功した。一方で、分離した粒子の回収方法やシステム全体の分離効率を高めるための運転条件の最適化、実規模へのスケールアップが今後の課題として明確化された。

以上の成果を踏まえて、産炭地で適用可能な脱灰プロセスを選定し、高灰分石炭利用システムを提案した。

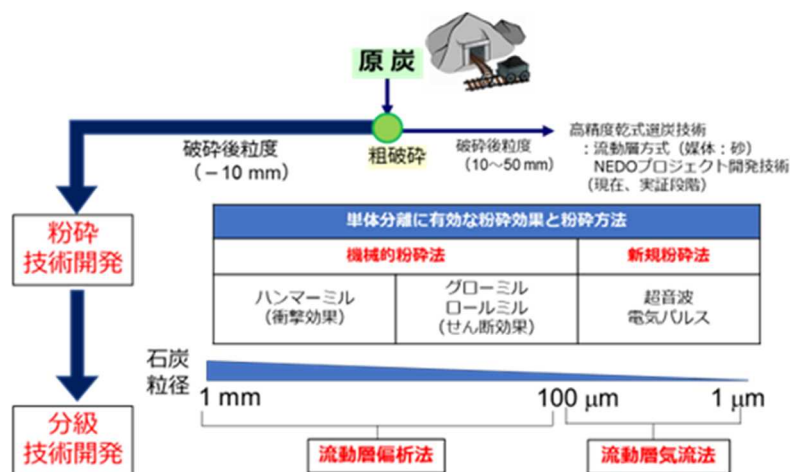


図 1 石炭高品位技術開発の概要

⑤ 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

パイロット規模での技術検証・事業性評価により、スケールアップ時のデータ収集・課題抽出を行い、実規模プロセスの確立に向けた取り組みを行う。実用化により安価・安定的な電源の確保に加え、産炭国に技術的・経済的な貢献が可能である。

(3) 浅海域における石炭灰の利活用促進に向けた環境配慮型技術の開発

① 事業の位置づけ・必要性について

①-1 事業の背景・位置づけ

わが国は、領海（日本の海）及び排他的経済水域（水産資源や鉱物資源等日本の支配下に置くことができる海域）の面積が約 447 万 km² であり、国土の約 12 倍の広さの海域かつ世界第 6 位の海域を保有する海洋国家である。この点を踏まえ、陸地で創出される再生資源である石炭灰を活用して、海域の生産力を向上させることで水産資源の回復と海域環境の改善を図り、かつ天然資源の消費抑制と環境影響の低減を目指した環境配慮型技術を開発することは、低炭素社会と持続発展可能な循環型社会を実現する。

①-2 実施の効果

本事業の成果から、年間の石炭灰の発生量が現状と同程度の 12,000 千 t であると仮定すると、2030 年度時点では、全体の発生量の約 3%を浅海域で利用することができ、2050 年度時点では、全体の発生量の約 20%を浅海域で利用することが可能となる。また、これら石炭灰利用により、衰退した藻場や干潟等の約 10%を石炭灰混合材で置き換えることが期待できる。

② 研究開発マネジメントについて

②-1 事業の目標と目的

本事業では、石炭灰の有効利用率の向上の石炭の有効利用技術の確立の見通しを得るため、石炭利用に伴い発生する環境影響の低減に貢献する技術として、今後のニーズ拡大が見込まれる浅海域を対象に、石炭灰の有効活用策の拡大と環境影響の低減を実現できる石炭灰混合材の研究開発を行う。

②-2 研究開発の概要

1. 藻場再生・造成用石炭灰混合ブロック開発

秋田県能代・山本地域及び北海道渡島地域で、基本材料の石炭灰と他の地元産業副産物である貝殻、バイオマス灰及びスラグ等を活用し、環境安全性と生物親和性及び耐久性に優れた藻場再生・造成用石炭灰混合ブロックの開発を行う。

2. アサリ漁場改善用石炭灰混合基質開発

熊本県緑川河口域で、基本材料の石炭灰と他の地元産業副産物であるバイオマス灰及び各種スラグ等を活用し、環境安全性と生物親和性に優れたアサリ漁場改善用石炭灰混合基質の開発を行う。

3. 洗掘防止用石炭灰混合人工石材開発

洋上風力発電設備等の洗掘防止工への適用を想定し、秋田県沖、千葉県銚子市沖を対象海域とし、基本材料の石炭灰と他の地元産業副産物である石炭ガス化スラグ、熔融スラグ等を活用し、副産

物の有効利用率が高く、かつ環境安全性や耐久性に優れた洗掘防止用石炭灰混合人工石材の開発を行う。

②-3 研究開発の運営管理

知財運営委員会を設置し、知財マネジメント基本方針およびデータマネジメント基本方針に従い、知財および研究開発データに関わるマネジメントを適切に実施している。

③ 情勢変化への対応について

特筆すべき点はなし。

④ 研究成果について

1. 藻場再生・造成用石炭灰混合ブロック開発

秋田県と北海道の2海域において適地を選定し、決定した資材の要求仕様に適した配合設計や基本構造設計を行うとともに、地産地消が可能な原料配合及び目的藻類の繁茂に効果的な資材配置法を検討した。更に、試験板等による室内試験や海域試験を通じ、環境安全性と機能性についての評価を行った。

2023年度には、2海域において設置した大型藻礁ブロックに対するモニタリングを通じて、環境安全性と機能性に関する評価を行い、必要に応じて、配合設計、構造設計及び製造方法の改良案を作成する。

2. アサリ漁場改善用石炭灰混合基質開発

熊本県緑川河口域における候補地を選定し、基礎データ取得のため、材料配合、粒径、形状、硬さ・強度等の異なる試験基質を3~4種類試作し、室内試験や水槽内・試験海域試験を通じ、環境安全性及び機能性評価を行った。また、浸食・埋没を防ぐことができる基質の收容方法、設置方法案を決定した。

2023年度には、干潟で沈下・埋没しない基質を製造、海域に設置し、モニタリングを通じて、環境安全性と機能性に関する評価を行い、必要に応じて、配合設計及び製造方法の改良案を作成する。

3. 洗掘防止用石炭灰混合人工石材開発

文献調査、聞き取り調査及び基礎環境調査により、適地選定や要求仕様選定に必要な情報を把握するとともに、地域性に配慮した材料仕様を選定した。

2023年度には、高比重、高耐久な推奨配合を選定し、候補海域において、実海域への設置に関する関係機関の合意と必要な許可申請等承諾を得る。

⑤ 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

本研究開発終了後、本研究開発成果を生かした実証試験を進めるとともに、研究開発成果を体系化すべく、全国の普及拡大に必要なマニュアル化を推し進める。また、NETIS、都道府県が保有するリサイクル製品認定制度等技術認定に係る準備・登録も行き、その後、啓発活動、企業誘致等事業拡大に向けた準備を進める。

(4) 石炭灰を主原料とした新規なりサイクル連続長繊維の応用研究

① 事業の位置づけ・必要性について

①-1 事業の背景・位置づけ

グリーン成長戦略において、電源の相当数を占める石炭火力は、その利用の際に発生する CO₂、ばいじん、石炭灰といった物質の環境への影響を低減する環境対策は急務である。この課題解決に寄与するコンクリート部材適用技術の確立に向けた知見を得る。

①-2 実施の効果

補強コンクリート市場は 2026 年には 5,000 億円に到達すると予測(グローバルマーケットリサーチ調べ)されており、石炭灰コンクリート強化部材が計画通り 3.6%のシェアを獲得できれば 180 億円の新たな市場を生み出す事ができ、優れた費用対効果が予想される。

② 研究開発マネジメントについて

②-1 事業の目標と目的

本事業は、石炭灰の有効利用・用途拡大を目標とし、コンクリート構造物の長寿命化への寄与を念頭に、石炭灰連続長繊維を短繊維(CS)やロッドとしてコンクリート部材へ適用する技術を確立することを目的とする。

②-2 研究開発の概要

本研究では、石炭灰連続長繊維を開発し、その有効利用として、CS やロッドを用いたコンクリート部材のひび割れ抵抗性や耐荷性の実験的検証し、一般市販品の繊維材を用いたコンクリート部材と比較し、高付加価値工業製品の実現を目指す。

②-3 研究開発の運営管理

毎週、金曜日午後に定例の連絡会議を行い、目的達成のため新着状況等の情報共有および意見交換を行っている。外部有識者による委員会等は設置していない。

③ 情勢変化への対応について

近年、社会インフラや建築物に用いられるコンクリート構造物の長寿命化や、特に 2050 年カーボンニュートラルを目指した CO₂ 大量固定コンクリートの開発・普及が社会的要請として強まり、鉄筋の代替となる非腐食性のコンクリート補強材への期待が高まっている。本事業は、この課題解決に貢献できる可能性があり、周辺状況を注視しつつ研究開発を引き続き進めていきたい。

④ 研究成果について

1. 石炭灰連続長繊維の生成、加工及び物性研究

1.1 コンクリート用 CS、ロッドの製作

石炭灰連続長繊維 (CALCLF) について、石炭灰、およびその他成分の組成比率を確認しつつ予備試験用の試作を行い、図 2 に示すような連続長繊維が得られた。また、アルカリ耐性のある CALCLF-CS およびロッドの製作に向け、最適な収束剤の情報収集を行うと共にさらに試作を行い、東京大学物性研究所(ISSP)、電力中央研究所(CRIEPI)に提供した。



図 2 CALCLF 予備試験用試作品

コンクリート補強用 CS については、その仕様を 0.8mmφ前後 x 30mm 程度と確定した。比較対象市販品、ポリプロピレン CS、アラミド CS、カーボン CS およびガラス CS を購入し、ISSP、CRIEPI に提供した。

コンクリート補強用ロッドについては、その仕様を径 8mmφ前後 x 長さ 3m 程度と確定した。比較対象市販品、アラミドロッド、ガラスロッドを購入し、ISSP、CRIEPI に提供した。

コンクリート補強用 CACLF-CS、ロッドを製作するにあたりこれらの情報を参考に評価・分析し、製作する方針である。

1.2 石炭灰連続長繊維の物性研究

CACLF および各種 CLF-CS およびロッドの物性（物理特性・形状表面観察・成分評価・耐アルカリ性評価など）を実施するための各種装置を整備・設置した。手試作された CACLF-CS（図 3）に対する耐アルカリ性のテストを行い、実施計画通りの良好な結果が得られた。また、引張強度評価ではガラス CS と同程度の値が得られている。



図 3 CACLF 試作品

コンクリート補強用 CACLF-CS、ロッドを製作するにあたりこれらの情報をフィードバックし、CACLF の改良に役立てる。

2. 加工製品の利用研究

2.1 CACLF-CS 補強コンクリートのひび割れ抵抗性

（靱性）の検証

提供された、各種 CS のコンクリート試験体の作製と材齢 28 日の物性試験を目的とした、配合選定試験を繰り返し行い（図 4 参照）、コンクリート試験体の仕様を決定した。ポリプロピレン CS については、コンクリート試験体の作製と材齢 28 日の物性試験を実施した。



図 4 コンクリート配合選定試験の様子

2.2 CACLF-ロッド補強コンクリート部材の耐荷性(剛性)の検証

各種ロッド補強コンクリート部材の耐荷性を評価するための数値解析を行い図 5 に示される様な結果を基に梁断面の設計を行った。また、各種ロッドとコンクリートの付着性能を評価するため、実験の仕様を決定した。

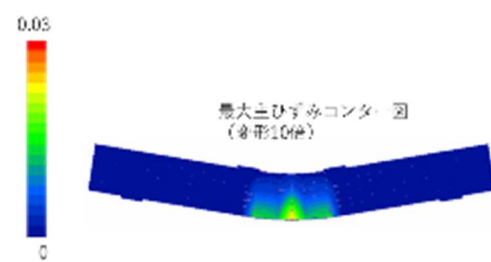


図 5 数値解析によるはりの計算例

⑤ 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

新日本繊維は、CACLF の発注メーカー以外の紡糸メーカーとも量産化紡糸検証を実施している。また、石炭灰供給についても、CACLF 用石炭灰提供企業以外の電力会社とも将来事業提携を予定しており、各メーカーでの事業化が可能となる予定である。

2.2 石炭利用技術開発

(1) 石炭ガス化溶融スラグの信頼性確認

① 事業の位置づけ・必要性について

①-1 事業の背景・位置づけ

石炭ガス化複合発電（IGCC）の普及に伴い、石炭ガス化スラグ発生量の増大が見込まれる。そのため、石炭ガス化スラグの有効利用方策の確立は、IGCC の環境適用性の観点から重要なプロセスであり、その主たる方策として、他業種のスラグと同様に規格や指針など利用環境を整備することは必要不可欠である。

石炭フロンティア機構では、実運用磨砕特性を把握すると共に、石炭性状、ガス化炉及びコンクリート配合等による磨砕特性、骨材性状等への影響を把握し、スラグ品質に影響を及ぼす因子を整理することで規格適合材製造プロセスを構築する。

清水建設では、石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートの実機製造過程の実証、ポンプ圧送試験による実施工特性の確認、実構造物等供試体を実供用環境暴露試験による長期安定性・耐久性の評価を行う。

勿来 IGCC パワーでは、石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートの実環境における利用技術確立に資する長さ変化・拘束収縮試験及び材齢経過による耐久性、コンクリート実構造物の耐荷性能及び鉄筋の付着特性、及び曲げ・せん断等構造特性を評価する。

本事業により、石炭ガス化スラグのコンクリート細骨材としての資源化を実現し、官民工事全般への利用拡大・定着が図られれば、天然骨材資源の削減による環境破壊の抑制や高効率 IGCC 発電技術の海外技術移転にも貢献できる。

①-2 実施の効果

本事業での取り組みにより、これまで廃棄物として処分していた石炭ガス化スラグをコンクリート細骨材（JIS 規格品）として再資源化できる。また、天然骨材資源の枯渇に伴う価格高騰に対する代替骨材として安定供給を可能とし、土木建築工事やコンクリート二次製品等の費用を削減できる。

② 研究開発マネジメントについて

②-1 事業の目標と目的

石炭ガス化複合発電（IGCC）から排出される石炭ガス化スラグについて、有効利用の拡大・定着に不可欠な土木学会及び日本建築学会の設計・施工指針の策定、並びに JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）の使用材料への採用に向けて、石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートの実規模性能をはじめ、組成、強度、耐久性などの試験を行い、コンクリート骨材として信頼に足る評価を得ることを目的とする。

②-2 研究開発の概要

実規模における石炭ガス化スラグ細骨材の品質・製造技術の信頼性確保、石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針の確立に向けた試験・評価を実施する。

②-3 研究開発の運営管理

本事業で得られた結果について、学識経験者、使用者、生産者で構成する技術評価委員会によって、材料品質・製造技術の信頼性並びに社会一般への健全な普及に寄与する設計、施工指針の確立に資するデータとして技術評価を行う。

③情勢変化への対応について

当初 2 カ年の事業検討の結果より、石炭ガス化スラグが他業種スラグと異なる特徴を有することが判明したため施工指針策定における適用範囲の拡大を目的に、事業期間の延伸により追加試験を実施して、基礎情報の取得に努める。

④研究成果について

目標：

石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリートの実規模・実環境での性能・信頼性を評価し、初期の目標を達成すると共に、評価結果に基づき、設計・施工指針を制定した（2023 年予定）

1. スラグ細骨材の実規模製造技術の確立

国内全ての IGCC の石炭ガス化スラグ（CGS）を対象に大量・連続磨砕試験により JIS 規格適合品製造技術を実証した(図 6)。

CGS の組成、骨材性状は、石炭種及びガス化条件により影響を受けるものの、JIS 規格に適合できることを確認した。また、従来の天然骨材使用コンクリートに比較して、凝結遅延、初期強度低下が観察されたことから、2022 年度まで事業延長し、要因を明らかにして、CGS として十分な適用範囲を確保する予定。

CGS 規格適合品を製造する品質・製造管理プロセスを構築した。

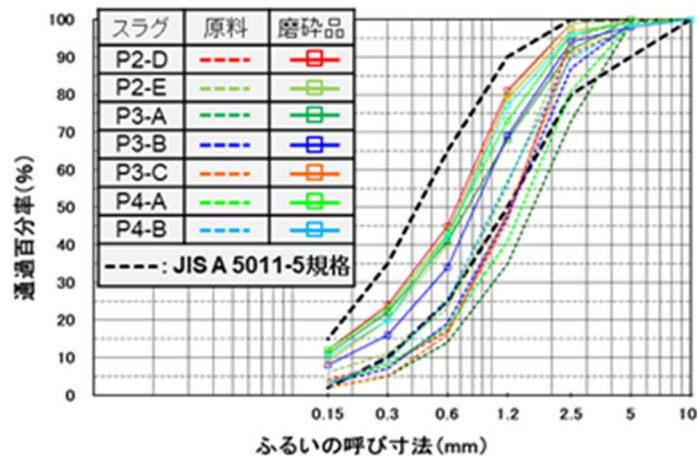


図 6 粒径加積曲線（磨砕前後）

2. 実規模施工・暴露試験による信頼性確保

石炭ガス化スラグ細骨材を使ったコンクリートの製造性・施工性・諸性能の確認を行った。

製造性については、従来のコンクリートと同様に、練混ぜができることを確認した。

施工性については、従来のコンクリートと同様に、ポンプ圧送での打込み・締固めができることを確認した（図 7）。

諸性能（フレッシュ性状・力学性状※・耐久性能※）は、従来のコンクリートと同様の傾向を示した。
 （※材齢 1 年までの結果による評価）



図 7 石炭ガス化スラグ細骨材を使ったコンクリートの壁を模擬した試験体の施工状況

3. 実環境における優位性評価試験

CGS は、乾燥収縮、湿潤膨張の低減、拘束収縮ひび割れの抑制（図 8）に対して、有効に作用することを確認した。一方で、乾燥による収縮量は小さいものの、小さいひずみ量でひび割れが発生しやすいことも確認した。

CGS の利用による物質浸透抵抗性の向上に伴い、中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性の向上が期待できることを確認した。

CGS の利用により、やや凍結融解抵抗性を低下させる 傾向にあることが確認されたが、その影響は限定的であり、適切な空気量の連行によって十分な凍結融解性を確保できることを確認した。

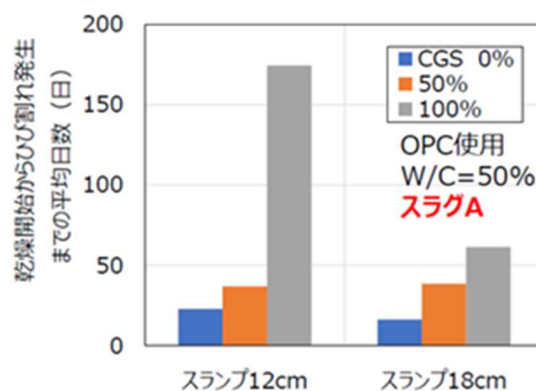


図 8 拘束収縮試験結果

4. 構造試験による鉄筋コンクリート構造性能把握

鉄筋コンクリート部材による載荷試験では、いずれも一般のコンクリートと同等の破壊形態（図 9）で耐荷性能、変形性能にも有意な差はなく、構造部材を構成する材料として有用であることを確認した。

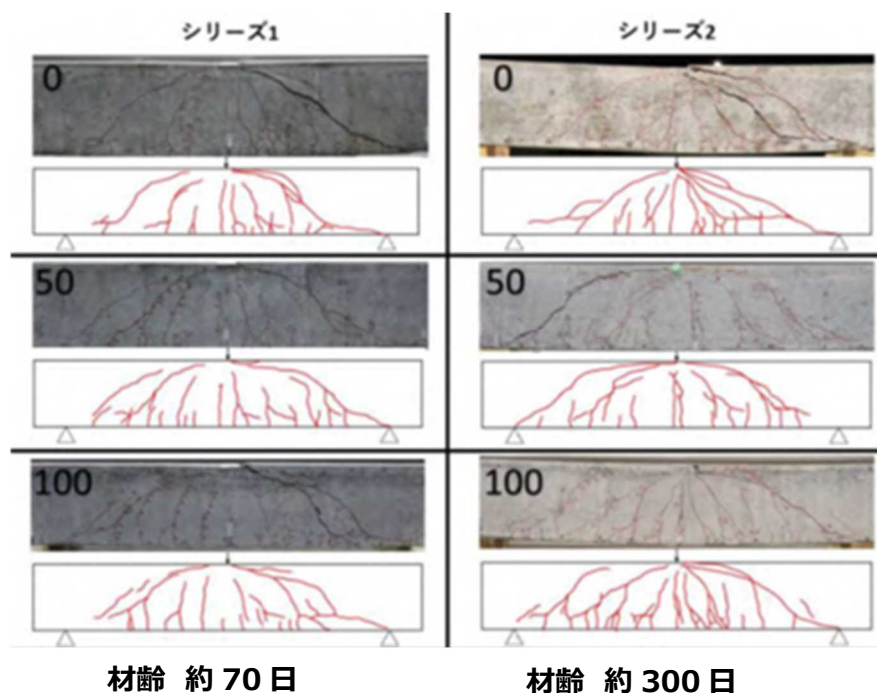


図 9 曲げ試験結果

一軸部材の両引張試験においても、ひび割れ発生荷重や鉄筋降伏荷重の低下などは認められないことから、ブリーディングによる影響はほとんどなく、コンクリートとの十分な付着が得られていることを確認した。

⑤ 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

石炭フロンティア機構は、石炭ガス化スラグ骨材の JIS 化、土木学会及び日本建築学会での設計施工指針の作成を主導的に進めるとともに保有データよりスラグ性状の推定、評価を行い、品質の安定性を確保する。

清水建設は、石炭ガス化スラグ細骨材を用いたコンクリート性質や配合特性を明らかにし、同スラグ細骨材の有用性を示すとともに、環境に配慮した積極的利用に努める。

勿来 IGCC パワーは、製造技術の構築・実証、製造・販売計画及び市場について推進し、発電事業の収益改善に努める。また石炭調達及びガス化条件、スラグ回収等プラント運転の最適化に努める。

(2) 石炭灰によるセメントレスコンクリート技術の実用化開発

① 事業の位置づけ・必要性について

①-1 事業の背景・位置づけ

石炭火力発電では運転に伴い石炭灰が発生するが、品質変動が大きく再利用の用途は限られていた。石炭火力発電は、重要なベースロード電源である。石炭灰の資源としての有効活用法の開発は喫緊の課題であり、使用量の大きいコンクリート用代替え材としての開発を目的とする。

①-2 実施の効果

本事業は、石炭火力発電所より発生する年間 900 万トン(2015 年)にも及ぶ石炭灰を原状で用いられている普通ポルトランドセメントの代替え材とする技術である。このため市場規模も大きいと考えられる。ただし、建設業界は非常に保守的な面があり、現状の普通ポルトランドセメントの市場に、本技術

のような新技術の実用化を図ることは容易ではない。そこで、普通ポルトランドセメントベースのコンクリートが適用困難であった、化学的作用の大きい例えば、下水道・温泉などの市場への適用を、まずは進める。このため、実施効果としては、石炭灰によるセメントレスコンクリートの単価を 2030 年度 4 万円/m³として、石炭灰の 0.1%を利活用すると想定で約 12 億円/年の市場創成を目指す。

② 研究開発マネジメントについて

②-1 事業の目標と目的

大林組は、石炭火力発電所から発生する石炭灰を結合材化してセメントの代替材とする新たなセメント不使用コンクリート（セメントレスコンクリート）について 10m³/日規模のコンクリート施工能力を最終目標とする。

フジインコーポレーテッドは、上記の規模に対応すべく、日産量 1500kg の助材の製造技術を確立する。

日本シーカは、従来のコンクリート並みの練上がり後、3 時間程度の自由成形時間を確保できる混和剤および特級コンクリート並み(収縮量 300μm/m)の収縮抑制剤を開発する。

②-2 研究開発の概要

本事業では、石炭火力発電所から発生する石炭灰を結合材化してセメントの代替材とする新たなセメント不使用コンクリート（セメントレスコンクリート）について 10m³/日規模のコンクリート施工能力を最終目標として、石炭灰処理装置や混練用助材や初期成形性確保用の混和剤の開発、これらを纏めたコンクリート技術を開発する。

②-3 研究開発の運営管理

外部有識者による委員会について、今後、設置を計画中。

③ 情勢変化への対応について

特筆すべき点はなし。

④ 研究成果について

施工技術は、後述する個別課題の成果を構成要素として、これらを集約したものとなる。その具体的な成果として、コンクリート供試体を製作した（図 10）。

石炭灰の加工装置については装置の探索と評価を実施した。石炭灰が結合材として機能する特性の獲得には、独自の処理を加えることが必要である。再委託先である A 社の機種である A1 による処理後に別の装置である A2 による処理を加える方法が適すと判断した。この条件による処理石炭灰を用い、砂と粗骨材を含まないペーストによる供試体を作製し、40 N/mm²の圧縮強度となった。

処理装置 A2 の適用性に関し、A 社との協議の上で処理条件の最適化を検討した。処理条件と石炭灰の表面状態の変化度合いや硬化体中イオンの化学結合状態についての検討により、処理条件と助材の反応性や硬化時間には相関性のあることが確認された。ただし供試体作製時の低粘性と混練



図 10 コンクリート供試体

後から硬化までの時間は 10 分程度に留まり、減水剤と遅延剤の併用が望ましいと判断された。処理装置は大型のものもあり、目標である日産量も十分達成可能であることが確認された。

助材の製造は、これまで 1 バッチ 2～3kg の小スケールで製造していた。2021 年度は、1 バッチを 25kg にスケールアップし、助材中の構成材の成分評価や製造した助材を用いた硬化体の製作および図 11 に示すような硬化体の圧縮強度の関係などの検討より、小スケールの結果と同等であることが確認され、2021 年度目標である助剤製造量 25kg/日を達成できた。当初の計画通り、2022 年度に 50kg/日、2023 年度に 250kg/日の製造量を達成させる。

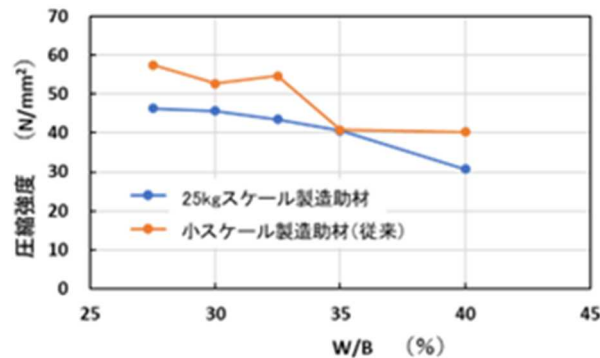


図 11 助材の変更に伴う硬化体の圧縮強度の関係

助材の原材料について 2021 年度は安価原料候補の探索を行った。セメントレスコンクリート製造のコストに占める割合の大きい原材料安価品を見出し、品質やコンクリートに与える影響も従来と同等であることが確認された。当初の計画通り、2022 年度、2023 年度は他の原材料候補の探索と分析、原料を変える事による硬化等への影響把握を進め、その後の用途毎の適用原料検討や最適な助材の設計につなげる。

コンクリートとして使用するためには、材料を混練後に型枠に打込むなど自由成形が可能である状態（フレッシュ状態）の確保が欠かせない。減水剤について探索の結果、減水剤 D1 を用いた場合、処理灰を良好に分散させることができた。このメカニズムとして、減水剤 D1 の親水基と処理を加えた石炭灰の電気的反発力が起因していると考えられた。遅延剤に関しては既存材料を中心に探索を実施し、D2 が良好な結果を示した。特に減水剤 D1 の併用で効果を発揮することがわかった。

セメントレスコンクリートの課題である硬化に伴う体積収縮の抑制剤として、減水剤 D1 と収縮低減剤 D2 と併用して効果のある D3 を選定した。これにより、供試体作製後、ひび割れの発生を抑制が可能になった。収縮低減剤の作用機構については検討中である。

コンクリート構成材の周辺環境への微量有害元素の溶出の抑制のため、対象となる重金属等を不溶化するための薬剤を試験で調べ、E1 と E2 の 2 種類の混和材が、重金属等の溶出抑制の効果が認められた。使用法の検討により E1 と E2 を複合添加の検討を行い、4 種の重金属等に有効なそれぞれの添加量を見出した（表 1 参照）。

対象物質	不溶化材	
	E1	E2
ヒ素	○	◎
セレン	◎	×
六価クロム	—	—
ふっ素	○	○
ほう素	×	◎

【不溶化効果】◎高い、○あり、×なし

表 1 不溶化材の評価結果

⑤ 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

パイロット規模での技術検証・事業性評価により、スケールアップ時のデータ収集・課題抽出を行い、実規模プロセスの確立に向けた取り組みを行う。実用化により安価・安定的な電源の確保に加え、産炭国に技術的・経済的な貢献が可能である。

以 上