

革新的セメント製造プロセス基盤技術開発

評価用資料

平成27年10月15日

経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課

宇部興産株式会社

住友大阪セメント株式会社

太平洋セメント株式会社

三菱マテリアル株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	1
1－1 事業の目的.....	1
1－2 政策的位置付け.....	1
1－3 国の関与の必要性.....	3
2. 研究開発目標.....	5
2－1 研究開発目標.....	5
2－1－1 全体の目標設定.....	5
2－1－2 個別要素技術の目標設定.....	6
3. 成果、目標の達成度	9
3－1 成果	9
3－1－1 全体成果	9
3－1－2 個別要素技術成果.....	10
3－1－3 特許出願状況等.....	36
3－2 目標の達成度.....	39
4. 事業化、波及効果.....	42
4－1 事業化の見通し.....	42
4－2 波及効果.....	43
5. 研究開発マネジメント・体制等.....	44
5－1 研究開発計画.....	44
5－2 研究開発実施者の実施体制・運営.....	45
5－3 資金配分.....	47
5－4 変化への対応.....	47
6. 費用対効果	
6－1 費用対効果	48
(参考) 用語解説.....	49

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

セメント産業はエネルギー多消費産業の一つであることから、我が国の温室効果ガス削減に向け、更なる省エネ・低炭素化に向けた取り組みが求められている。しかしながら、我が国セメント産業の省エネ技術は既に世界最高水準にあり、既存技術による省エネはほぼ限界に達していることから、本事業では、更なる省エネ・低炭素化を可能とする革新的な製造プロセスを開発することを目的とする。

具体的には、セメント製造において、鉱化剤あるいは鉱物組成の変更による焼成温度低下技術に加え、焼成プロセスを解析するシミュレーション技術やキルン内計測技術を用いて焼成プロセスの高度化等、種々の省エネ技術を融合化することにより、セメント製造エネルギーの8~9割を占めるクリンカ焼成工程における革新的なセメント製造プロセスの基盤技術開発を実施し、国内セメント製造業全体の競争力強化に繋がる革新的省エネルギー技術の確立を目的とするものである。

1-2 政策的位置付け

(1) 省エネルギー技術戦略2011（平成23年3月資源エネルギー庁策定）

省エネルギー技術の研究開発と普及を効果的に推進するため、経済産業省とNEDOにより策定された「省エネルギー技術戦略2011」において、製造プロセスで省エネを推進する「エクセルギー損失最小化技術」が重要かつ基軸となる技術として選定された。

この「エクセルギー損失最小化技術」においてセメント製造プロセスが具体例として示され、本事業の内容が引用されている。

(2) 環境エネルギー技術革新計画（平成25年9月総合科学技術会議決定）

「技術で世界に貢献していく、攻めの地球温暖化外交戦略を組み立てること。」との安倍総理大臣からの指示を受け、総合科学技術会議により計画を改訂。環境エネルギー技術革新計画2013において、地球全体の環境・エネルギー制約の解決と、各国の経済成長に必要と考えられる「革新的技術」の1つとして、セメント製造プロセスが具体例として示され、本事業の内容が引用されている。

(3) エネルギー基本計画（平成26年4月閣議決定）

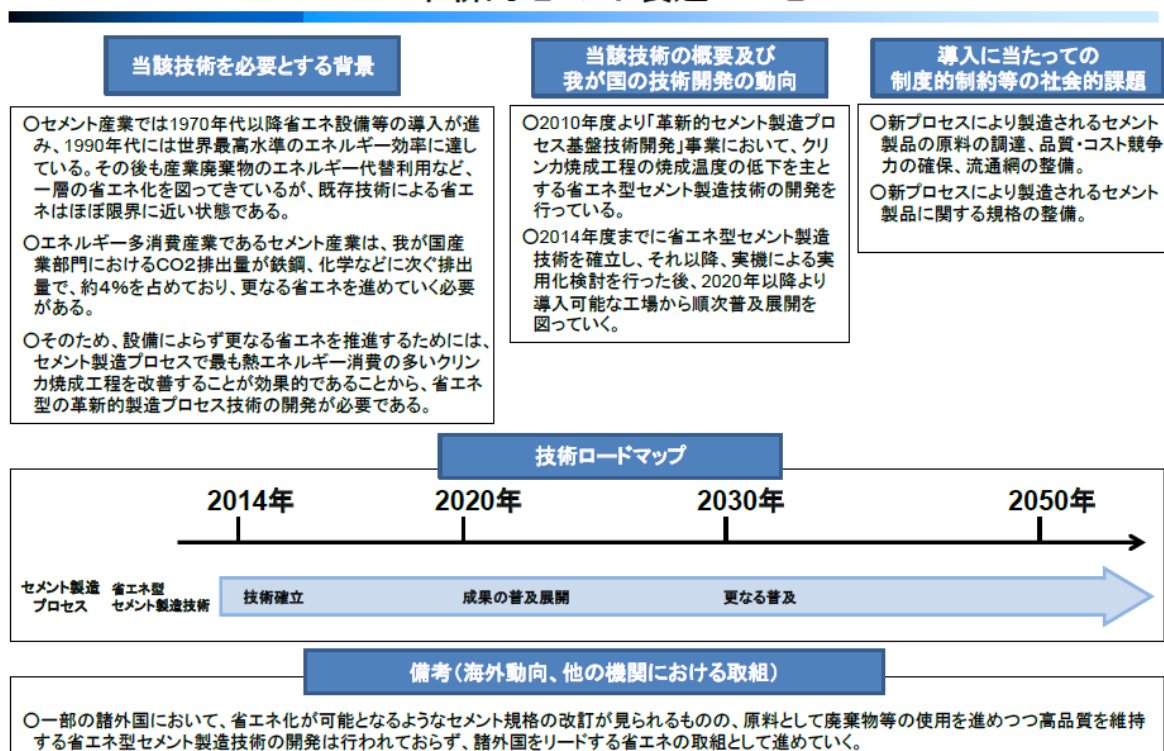
第4章 戦略的な技術開発の推進において、取り組むべき技術課題の1つとして、エネルギー利用に関するプロセスを効率化するための「製造プロセスの

革新」を支える技術開発に取り組むと明記されている。

(4) エネルギー関係技術開発ロードマップ（平成26年11月資源エネルギー庁策定）

エネルギー基本計画の方針に基づき、我が国のエネルギー関係の技術開発戦略を改めて俯瞰し整理することを目的として、「エネルギー関係技術開発ロードマップ」が経済産業省により策定された。ここにおいても、本事業の「革新的セメント製造プロセス」が取り上げられており、その重要性和普及展開のためのロードマップが示されている。

25. 革新的セメント製造プロセス



(出典) エネルギー関係技術開発ロードマップ H26.12 経済産業省 より抜粋

(5) 長期エネルギー需給見通し（平成27年7月資源エネルギー庁）

エネルギー基本計画の方針に基づき、将来のエネルギー需給構造の見通しを示すためにとりまとめられた「長期エネルギー需給見通し」において、見通し策定の前提となる省エネ施策の1つとして、本事業の「革新的セメント製造プロセス」が取り上げられており、2030年の本技術の貢献による省

エネルギーの見通しが示されている。

産業・転換部門						
産業・転換部門	省エネルギー対策名	導入実績		省エネルギー 万kWh	内訳	
		2012FY	2030FY		うち電力	うち燃料
産業・転換部門	従来型省エネルギー技術の導入 （熱効率向上、スラグ粉砕 エアーム式クーラー、セパレータ改善 型型石炭炉）	—	—	2.1	0.8	1.3
	熱エネルギー代替廃棄物（廃プラ等）利用 技術の導入	—	—	1.3	-0.1	1.4
	革新的セメント製造プロセスの導入	0%	50.0%	15.1	—	15.1
	ガラス溶融プロセスの導入	0%	0%	-0.0	-0.6	0.6
	産業・土石製品製造業 計	—	—	23.5	0.1	23.4
パルプ・紙・紙加工品製造業	高効率古紙パルプ製造技術の導入	11%	40%	3.6	3.6	—
	高圧高圧型黒液回収システムの導入	※	69%	3.9	—	—
	パルプ・紙加工品製造業 計	—	—	9.5	3.6	0.0
石油製品・石炭製品製造業	熱の有効利用の推進 （高効率熱交換器の導入、 動力系の効率改善、 プロセスの大規模な改善・高度化）	23% （2030年度の目標 に対する達成率）	100% （2030年度の目標 に対する達成率）	77.0 （2010年度比 100.0）	—	—
	石油製品・石炭製品製造業 計	—	—	77.0	—	—
産業・土石製品製造業、パルプ・紙・紙加工品製造業、石油製品・石炭製品製造業における 〇〇〇〇の対策は、各業界における2020年度以降の低炭素社会実行計画において位置付けられているもの。						
※印を付した対策は、統計の整理上、最終エネルギー消費の削減量としては計上しないが、相当分が転換部門において一次エネルギー消費の削減に寄与するものとなる。						

（出典） 長期エネルギー需給見通し関連資料 H27.7 資源エネルギー庁 より抜粋

1-3 国の関与の必要性

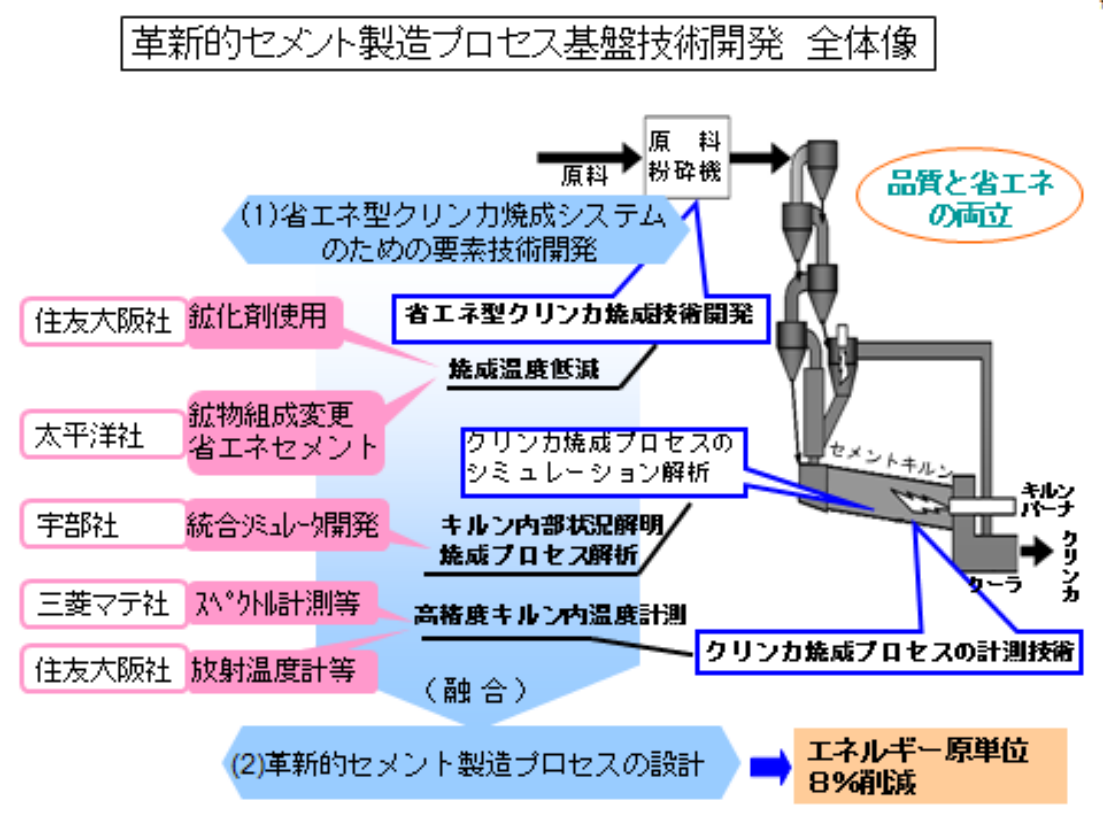
セメント産業はエネルギー多消費産業の一つであり、CO2 排出量は我が国産業部門の約4%を占めており、更なる省エネ・低炭素化に向けた取組が求められているが、我が国セメント産業のエネルギー効率は世界最高水準であり、既存の対策技術については、工場に設置スペースがない等の特段の制約が無い限り、2020 年までにほぼ 100%の導入を計画している。

このため、既存技術の導入により更なる CO2 削減を達成することは困難であり、これを打開するためには、製造プロセスで最もエネルギーを消費するクリンカ（セメントの中間製品）の焼成プロセスにおいて、焼成温度低下等、非従来型の革新的製造プロセスを確立する必要がある。

また、世界のセメント需要はアジア等の新興国を中心に 2050 年に向けて大きく拡大することが見込まれており、セメント産業の CO2 排出抑制は国際的にも極めて重要な課題となっている。

したがって、セメント分野の省エネルギーディングカントリーとして地球規模での温暖化対策に貢献するとともに、我が国セメント産業の国際競争力を強化する観点からも本技術開発は必要不可欠である。

本事業は、地球温暖化対策及び省エネルギーという国家的要請に的確に対応し、産業部門、特にエネルギー多消費業種の省エネルギー対策に資する基盤技術の開発であり、革新的な省エネ技術の普及に向けたリスクの高い技術の開発に対して国が補助するものであることから、有効性は高いと判断する。



2. 研究開発目標

2-1 研究開発目標

2-1-1 全体の目標設定

革新的セメント製造プロセス基盤技術開発は、「エネルギー原単位を 8%削減するセメント製造プロセス全体の設計提案を行い、実用化への技術課題を明確にする。」ことを最終目標とする。

本研究開発事業の全体の目標は表 1 のとおり。

表 1. 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
[中間目標:平成24年度] 焼成温度低下等を実現する省エネ型クリンカ焼成システムの要素技術を開発し、単位セメント製造重量当たりのエネルギー消費量(以下、「エネルギー原単位」という。)8%削減を目標とする革新的プロセスの設計提案を行い評価する。	平成 21 年度 NEDO 事前研究によると、鉱化剤使用においては、100～150℃の焼成温度低減によるエネルギー原単位削減割合は 2～3%にとどまる。また、セメント強度向上効果によりクリンカの一部を石灰石等の混和材に置き換えるには、普通ポルトランドセメントの JIS 規格により混和材添加率に制限があり、クリンカ使用量削減によるエネルギー原単位削減割合は 5%以下となる。そのため、現段階で想定できるエネルギー原単位削減量は、7～8%程度となる。
[最終目標:平成26年度] エネルギー原単位を 8%削減するセメント製造プロセス全体の設計提案を行い、実験的検証によって実用化への技術課題を明確にする。	一方、平成 21 年度 NEDO 先導調査によれば、理論的には、ビーライト割合約 20%の普通ポルトランドセメントに比べ、例えばビーライト割合約 60%の低熱ポルトランドセメントは、約 6%のエネルギー原単位削減が、また、ビーライトーアウイン系クリンカは鉱物組成の変化に応じ、6～20%のエネルギー原単位削減が期待できる。

2-1-2 個別要素技術の目標設定

表 2. 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
(1) 省エネ型クリンカ焼成技術開発			
(a) 鉱化剤使用によるセメントクリンカ低温焼成技術開発	実機適用への課題抽出	実験室規模の電気炉で選定された鉱化剤種類、量、割合及び、鉱物組成のクリンカについてテストキルンを用いた製造試験を行い、実機焼成での焼成温度低減（100℃）を図るための焼成条件を明確化。	セメント焼成エネルギー低減技術の一つとして鉱化剤を用いた焼成温度低下技術があるが、国内においては鉱化剤の実機製造による適用は十分に行われておらず、その技術を確立することは重要。
(b) 鉱物組成変更による省エネ型クリンカ焼成技術開発	鉱物組成変更による省エネ型クリンカ焼成における諸条件の最適化および実機焼成における課題抽出	<u>7) ビーライト活性化によるクリンカ開発</u> テストキルンによる焼成試験等に基づき、実機焼成により普通ポルトランドセメント同等品質を達成するための製造条件を明確化。 <u>1) ビーライトーアウイン系クリンカ開発</u> テストキルンによる試験焼成の結果等に基づき、実機焼成試験を行い、実機製造における運転管理や設備面での課題等を明確化。	セメント焼成エネルギー低減のための技術の一つとして石灰石の割合を減じる方法があるが、セメントの強度が低くなるという問題があった。 これに対して、 7) ビーライトそのものの水和活性を高める方法（ビーライト活性化による低カルシウム型クリンカの開発）及び 1) ビーライトに水和活性の高いアウインを共存させる方法（ビーライトーアウイン系クリンカの開発）が効果的。

(c)省エネセメントの開発	製造プロセス実用化に向けた技術的課題を抽出し、エネルギー原単位8%削減を可能とする製造プロセスをの検討	省エネ型クリンカ等の性能を把握の上クリンカ性能の効果的利用方法を検討し、クリンカ性能向上のための方策の提案を行う。	エネルギー原単位削減手法として、クリンカの一部を混和材で置換する方法があり、上記省エネ型クリンカ等を基材とした場合、それらの性能を最大限に引出しつつ、更なる省エネ性能向上が可能
(2) クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析	革新的セメント製造プロセスの課題抽出	①セメントプロセス全体シミュレータの開発及び ②焼成システムを考慮できる統合シミュレータの開発を行い、それらからエネルギー原単位低減に向けた影響因子を定量化することにより、革新的セメント製造プロセス設計の課題抽出を行う。	セメントプラントのロータリーキルン内では、複雑な化学反応を行いながらクリンカを生成しているが、この化学反応は各温度で連続的に行われ、また内部循環している物質等もあり、現在もこの化学反応の詳細が追及できていない。 このキルン内部等のプラント運転の状況を解明することができれば、 ・ 運転操作条件の最適化 ・ 省エネ運転化 ・ 運転トラブルのメカニズム把握及び対策 ・ 新プロセス開発 の大きな指針となり、セメント製造プロセスを考える上でも非常に重要であるが、実際のクリンカ生成モデル化技術は未だ発展途上であるため、実プラントと同様の燃焼システムを考慮できる統合シミュレータを開発するもの。
(3) クリンカ焼成プロセスの計測技術開発			
(a)スペクトル計測等によるキルン内温度計測技術開発	スペクトル計測等による実機キルンへ適用ができるキルン内温度計測技術の確立	スペクトル計測等による技術選定を行い、炉内環境模擬試験装置による原理確認と温度計測手法の確立と実機キルンにおける実証試験により、実機キルンへ適用ができるキルン内温度計測技術の確立を目指す。	低温焼成を行う場合、通常の焼成に比べ焼成温度が目標値を下回ると一気に温度が低下し品質低下を招くおそれがあることに加え、セメントキルンは「原料や燃料の品質変動」、「コーティングの落下による原料移動速度変化」等の様々な外乱があるため、セメントキルン低温焼成の安定運転を行うためには、キルン温度の計測精度の向上が必須。 また、本事業で開発する省エネセメントは従来のセメントと較べ

		①実機キルン内スペクトル計測等による温度計測技術の選定 ②炉内環境模擬試験装置による原理確認と温度計測手法の確立 ③実機キルンにおける実証試験	低温域での焼成を行うが、こういった低温焼成ではクリンカ粒径が小さくなり相対的にクリンカクーラからの粉塵の影響が大きくなるため、現在使用している放射温度計計測では精度の低下が懸念された。 このため、キルン内から放出されるスペクトル等を利用し、粉塵による影響を受けにくい温度計測方法の開発が必要。
(b)放射温度計等によるキルン内温度計測技術開発	窯前（キルン出口部）からキルン内部を分光測定することにより、キルン内部のガス温度等の温度計測を可能とする技術の確立	①キルン内部の温度計測を行うため、窯前（キルン出口部）よりキルン内部の分光測定の実施、及びキルン二次空気含塵濃度測定装置の開発を実施し、単色放射温度計、二色放射温度計での含塵濃度の影響を評価する。 ②キルン内部の温度計測を直接行うため、キルンセルに熱電対を直接挿入し信号を無線等にて伝送するシステムの開発を実施し、高温セル上での装着・耐久性等を評価し、6ヶ月以上の耐用を目指す。 ③キルン操業状態と①②で得られる温度分布との関連を評価する。	セメントキルンでの温度測定は従来、キルン入口及びキルン出口でのガス温度測定のみであり、キルン内部のガス温度等の温度計測は十分に行われておらず、キルンの内部状況を知る上で直接的かつ連続的な温度測定は重要

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体成果

中間評価時点においては、各要素技術（①省エネ型クリンカ焼成技術、②クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析技術、③クリンカ焼成プロセスの温度計測技術）を確立するとともに、これらの要素技術を融合し、クリンカ焼成工程の焼成温度低下等を可能とするセメント製造プロセスを設計した。

- ・ 鉱化剤使用クリンカ少量成分の最適化を実施：F=0.14～0.2%，SO₃=1～4%
- ・ 省エネセメントの設計を実施：高 C3A(+4%)+混合材 10%（LSP 必須）
- ・ セメント全体シミュレータを開発：キルンシミュレータ+熱流体解析

事後評価時点においては、確立したそれぞれの要素技術について実機適用に向けた検討を行うとともに、これらを融合したセメント製造プロセス全体の設計を行った。これにより本基板技術の実用化への技術課題を明確にした。

- ・ 鉱化剤使用および省エネセメントの OPC 同等品質を確認
- ・ 全体シミュレータの高度化を実施
- ・ 新規温度計測方法を確立

中間評価時点の成果および事業後半の成果の概略を下表に示す。

材料技術						シミュレーション 技術	計測技術
↓項目/材料→		鉱化剤使用	ヒート活性化	アインヒート系	高 C3A 系		
省エネ型クリンカ焼成技術開発	材料設計	F=0.6% SO ₃ =4.5%	C2S 単相 (Ba 添加)+OPC	アイン 40%	C3A=13~16%	・ 原料予熱工程を含めたプロセス全体を考慮できる全体シミュレータを開発 ・ 熱流体解析ソフトと双方向連成する統合シミュレータを開発 ・ このシミュレータを用いて、製造プロセス設計の課題抽出	・ 放射温度計測定精度比較(単色 Si 優位) ・ 熱電対によるキルン内部クリンカ温度の連続測定・有効性検証 ・ ガスの影響を除いた新規計測方法の理論の確立
	品質	OPC 同等	初期強度やや低	OPC 同等 強度の伸び少	OPC 同等		
	省エネ率	7%	2~3%	30%	0%		
	規格	現行 N (場合により溶出)	現行 N	非 N→新規規格 非 ISO	非 N→N 拡張 ISO 内		
省エネ 8%達成		要混合材添加	未達成	達成	要混合材添加		
実用化への課題		・ F 原料調達 ・ キルン内物質循環把握 ・ 品質設計	—	・ コスト、実績等 ・ キルン内物質循環把握 ・ 品質設計	・ 規格 ・ 品質設計	・ 低温焼成型クリンカーの実機焼成での検証	・ 新規計測方法の精度向上と実機での検証 ・ キルン内部クリンカ温度測定データの活用
		限定的可能 (第Ⅰ期)	—	将来 (次世代)	近い将来 (第Ⅱ期)		

3-1-2 個別要素技術成果

(1) 省エネ型クリンカ焼成技術開発

(a) 鉱化剤使用によるセメントクリンカ低温焼成技術開発

i. 実施内容の概略

前半3年では、基礎実験として実験室規模の電気炉焼成試験、スケールアップ試験としてテストキルンによる製造試験を行い、実機焼成での焼成温度低減を図るための鉱化剤添加量や焼成条件の検討を行った。また、鉱化剤の安定供給の可能性を確認するため、想定した廃棄物（F系、石膏系）について賦存量を調査した。後半2年では、前半3年で得られた結果を元に、仮焼炉の改造を行ったテストキルン（以下ミニプラント）での製造試験を実施し、焼成温度低減効果の確認と製造したクリンカの物性評価を行った。さらにスケールアップ試験として大型テストキルンを用いた2～3tレベルでのクリンカの試製造を実施し、製造したクリンカについて各種物性試験や耐久性試験、コンクリート製品製造に用いて、より実機に近い規模での製造によるクリンカの評価を行った。

ii. 開発スケジュール

	H25				H26			
【1】ミニプラント焼成試験								
①適用条件確認	焼成試験、物性確認							
②耐久性確認試験								
③実機課題抽出					課題抽出			
【2】大型テストキルン焼成試験								
①クリンカ試製造					焼成試験、物性確認			
②耐久性確認試験								
③試験施工実施					コンクリート製品製造			

iii. ミニプラント焼成試験

ミニプラントを用いた焼成試験では、鉍化剤の添加量を、これまでの試験結果から最適と判断された $F=0.20\%$ 、 $SO_3=2.0\%$ を中心に検討を行った。得られたクリンカを用いてモルタル物性試験（強度、凝結）を実施した。物性に関しては、強度は増加、凝結は若干の短縮傾向であった。凝結に関しては、焼成を安定させるためにクリンカ中の $f. CaO$ を高めに設定したことが影響していると考えられる。

ミニプラント焼成試験結果

組成範囲	普通ポルトランドセメント (OPC) 組成
焼成条件	$f. CaO$ 0.8%以下 硫黄成分の揮発抑制のため窯尻 O_2 分圧 $\approx 5\%$ 焼成温度は OPC クリンカ焼成時と比較し $90^\circ C$ 程度低い
鉍化剤添加量	F（フッ素）：0.15% SO_3 ：1.5～2.0% JIS R 5201 に従って作成したモルタル供試体からの F 溶出量を環境庁告知第 46 号に従って測定した。F の溶出はクリンカ中の F 含有量が 0.2%を超えると、環境基準を満たさない。
物理性状	ブレン比表面積 $3300 cm^2/g$ に粉碎しモルタルおよびコンクリート性状評価 いずれも鉍化剤添加により強度は増進傾向を示し、凝結に関しては遅延傾向を示した。 コンクリート耐久性は、乾燥収縮、促進中性化に関しては若干の減少傾向を示し、凍結融解性では変化はなかった。断熱温度上昇、水和熱は若干の増大が認められたが、同一強度レベルで比較すると変化はなかった。

iv. 大型テストキルンによるクリンカの試験製造

ミニプラント焼成試験の結果を踏まえて、更なるスケールアップ試験として大型テストキルンを用いたクリンカの大量焼成試験を実施した。原料投入量としてはこれまでの $30 kg/h$ から $1000 kg/h$ と大幅に増加させ、2～3t の製造を行った。製造したクリンカを用いてモルタル・コンクリート物性試験（強度、凝結、耐久性試験）を実施したところ、鉍化剤添加による強度への影響は小さく、凝結に関しては遅延傾向であった。耐久性に関しても影響は小さい結果となった。

大型テストキルンによるクリンカ試製造結果

組成範囲	普通ポルトランドセメント (OPC) 組成
焼成条件	f . CaO 0.8%以下 硫黄成分の揮発抑制のため窯尻 O_2 分圧 $\approx$ 5% 焼成温度は OPC クリンカ焼成時と比較し 90℃程度低い
鉍化剤添加量	F (フッ素) : 0.15% SO_3 : 1.5%
物理性状	ブレン比表面積 $3300\text{cm}^2/\text{g}$ と粉砕しモルタルおよびコンクリート性状評価 いずれも鉍化剤添加により強度は増進傾向を示し、凝結に関しては遅延傾向を示した。 コンクリート耐久性は、乾燥収縮、促進中性化に関しては若干の減少傾向を示し、凍結融解性、断熱温度上昇、水和熱についても変化はなかった。

v. コンクリート打設試験

コンクリート打設試験は、コンクリート製品のロングベンチフリーム (LBF) を製造し、圧縮強度、載荷試験、外観への鉍化剤添加による影響の確認を行った。LBF は規格品 (溝幅 650mm 外幅:770mm 長さ 3995mm 高さ:480mm) を製造した。また、現行品の製造も併せて行い打設状況の比較を行った。製品打設、均し等作業性等において現行品との差異はなかった。材齢 21 日品についてひび割れ荷重、及び破壊荷重までの載荷を行ったが、鉍化剤添加による影響を認められない。また、脱型時のひび割れや色むらなどについても現行品と差異が無かった。



ロングベンチフリーム打設状況

vi. 実機適用時の課題

●正確な焼成温度計測、管理が必要

鉍化剤含有量の変動によって焼成温度を変化させる必要がある為、正確な焼成温度の計測と焼成温度管理が必要になってくると考えられる。

●工場での安定操業行う上での懸念事項

液相成分の増加によるキルン内奥リング生成による操業トラブルや、揮発成分の循環濃縮によるサイクロンの閉塞トラブルが懸念される。また、脱塩設備において揮発成分である F が回収される懸念がある。

●AQC の最適化が必要

鉍化剤の添加により、焼成クリンカは細粒化すると想定される。クリンカが細粒化すると AQC を通過するクリンカの層が密になり、エアーが通過出来ず、AQC の熱交換効率が低下すると考えられる。よって、装置の最適化、もしくはオペレーションの最適化が必要になると考えられる。

vii. まとめ

●鉍化剤添加により焼点温度の低下効果を確認した。クリンカ中の F 含有量が 0.20%を超えると、溶出量が環境基準値を満足できないことから F=0.15%で検討を行ったところ、焼点温度低下効果はおよそ 100℃の低下を確認した。この時の SO_3 含有量は 1.0%であったことから、焼点温度を 100℃程度低減するための鉍化剤添加量は F=0.15%、 SO_3 =1.0%であることが明確となった。

●モルタル物性への影響は、強度に関しては増加傾向を示し、凝結に関しては若干の遅延傾向を示したが、通常変動範囲内と考えられる。コンクリートに関しても同様であり、耐久性に関しても乾燥収縮、促進中性化、凍結融解抵抗性において大きな影響は無かった。断熱温度上昇量に関しても OPC 相当であったが、データ数は少なく、試験は続けていく必要がある。

●コンクリート製品の製造試験では、鉍化剤添加による影響は認められなかった。また、長期安定性に関しては今後観察を行っていく予定である。

●今後の課題としては、焼成温度の正確な測定・管理の方法や、AQC の最適化が必要である。また、キルン内コーティングへの影響や、PH の閉塞、脱塩設備での F 回収などについて留意し、今後、実機適用時に確認していく必要がある。

(b) 鉱物組成変更による省エネ型クリンカ焼成技術開発

ア) ビーライト活性化による低カルシウム型クリンカの開発

中間評価時点での成果として下表の実機製造に向けた課題を明らかにした。OPC 同等の品質を有する低カルシウム型クリンカの製造には、バリウムを 10mol%程度含有するビーライトの単相合成が必要となることが明らかとなった。またその際の製造エネルギー削減量は 0～4%程度と見積もられた。一方、実機製造への課題は原料調達や設備面等が挙げられた。これらの結果より、原材料の調達の難しさおよび経済性の面から実用化は困難と判断し、中間評価後は、より実用性の高い技術の研究開発に研究資源を集中投入することとした。

実機製造に向けた課題

項目	課題
原料面	Ba 調達
焼成面	OPC、ビーライト各基材の別焼成
粉碎面	ビーライト超微粉碎
設備面	原料サイロ等整備
エネルギー削減効果	0～4%(粉碎エネルギー未考慮)

イ) ビーライトーアウイン系クリンカの開発

i. 実施内容の概略

OPC と同等の強度を得るためには、鉱物量としてアウイン量 40%以上の確保と併せ、焼成条件（焼点温度、窯尻酸素濃度、f. CaO)の最適化が必要であった。またセメント仕上げ条件（ブレン比表面積、石膏添加量）は、焼成条件以上に強度に影響することを確認した。一方、実機製造に関しては、原料中に多く含まれる硫黄成分がキルン内で循環濃縮することによりコーティングが生成し、安定製造が困難となることが予想された。そこで後半 2 年では、実機製造を前提に低アウイン量で OPC 同等の性能を得るための方策を検討した。その結果を以下に述べる。

ii. 開発スケジュール

	H25				H26			
原料組成および焼成条件が鉱物組成に及ぼす影響調査								
ラボ試験	■	■						
スケールアップ試験		■	■					
大型テストキルンによる焼成試験								
焼成試験			■	■				
仕上げ条件の最適化				■				
コンクリート評価等					■	■	■	■

iii. 低アウイン量（アウイン量 40%未満）での検討

これまでの検討により、アウイン量 40%以下でも、焼成エネルギー8%低減を確実に達成可能であることが明らかである。一方、アウイン量が多くなるとキルン内で循環・濃縮する SO_3 分が増加するため、キルン内にコーティングが生成し、実製造において運転トラブルが発生することが懸念される。シミュレーションによる SO_3 分の揮発状況から、この減少はアウイン量 40%以下でも発生することが予想された。したがって、実製造を前提とし、OPC 同等の性能を維持しつつアウイン量を 40%未満にするための諸条件の最適化が必要である。

そこで、アウイン量 30%、 C_4AF 20%のビーライト-アウインクリンカ中にドーパントを添加して、ビーライトを活性化させることで強さ改善を試みた。

● ラボスケールでの検討

電気炉により各種少量成分を添加したアウイン量 30%、 C_4AF 量 20%のクリンカを焼成温度 1350℃で焼成し、少量成分が鉱物組成に与える影響を検討した。その結果、ホウ素、リンを添加することでこれまでに確認された $\beta\text{-C}_2\text{S}$ では無く、 $\alpha'\text{-C}_2\text{S}$ が確認された。

電気炉で検討した組成範囲と鉱物組成に与える影響

鉱物組成目標	アウイン量30% C_4AF 量20% C_2S 量50%
添加成分	ホウ素, リン, バリウム
少量成分の影響	ホウ素, リンを添加 $\Rightarrow \alpha'\text{-C}_2\text{S}$ が生成（通常 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ のみ）

少量成分を添加し、焼成したクリンカをブレン 4000±200cm²/g に粉砕し、ブレン 6000±200cm²/g 無水石膏を後混合することで、無水石膏添加量とクリンカ中に添加した少量成分がモルタル強さに与える影響を 1/10 スケールモルタル試験※で評価し、最適な石膏添加量や、少量成分を明確化した。

※ 1/10 スケールモルタル

JIS R 5201:1997 に規定されるセメント強さ試験用モルタルの 1/10 スケールのもの。試製したクリンカ試料量が少量である場合の評価に用いる。

電気炉焼成品の強度評価結果

石膏添加量	無水石膏を11mass%添加（セメント中SO ₃ /Al ₂ O ₃ 比 0.7%）時、モルタル強さは最大となった。
少量成分	ホウ素を添加した水準でOPC並みの強さとなった。

● 少量成分検討結果

アウイン量 30%、C₄AF20%のアウイン-ビーライトクリンカを用いて、OPC と同等のモルタル強さを得るための条件をスクリーニングした結果、ホウ素を 0.9%添加し、石膏添加量は 11mass%（セメント中 SO₃/Al₂O₃ 比 0.7）とした。

iv. スケールアップ実験

● テストキルンでの焼成評価

前項の結果を踏まえてテストキルンでは低アウイン量のクリンカ焼成条件を明確にし、実機製造における課題を抽出した。1380℃まで焼成温度を上げた場合、クリンカが大塊化したためテストキルンでは 1360℃が上限と考えられる。

テストキルン焼成条件の評価結果

検討組成と添加剤	アウイン量40% C ₄ AF量10%	アウイン量30% C ₄ AF量20%	アウイン量30% C ₄ AF量20% ホウ素 0.9%
焼成条件	窯尻O ₂ 濃度 4.0%以上 焼成温度 1350±10℃	窯尻O ₂ 濃度 4.0%以上 焼成温度 1350±10℃	窯尻O ₂ 濃度 4.0%以上 焼成温度 1350±10℃
運転課題	焼成温度上昇に伴いクリンカが大塊化		

v. 物性評価

● テストキルン焼成クリンカのもルタル評価

ラボスケールでの検討を元に、得られたアウイン量 30%のクリンカのもルタル評価を行い、もルタル強さが最も高くなる焼成条件を明確化した。その結果、ホウ素を添加することにより明らかにもルタル強さが改善され、さらに高温焼成することでよりもルタル強さが大きくなった。また、一方で焼成温度低下すると強さが低下するため、厳密な焼成温度管理が必要であることが分かった。

もルタルフローと強度が良好なセメント仕上げ条件

クリンカ 鋳物量	焼成温度 (°C)	クリンカ粉 末度 (cm ² /g)	無水石膏 粉末度 (cm ² /g)	SO ₃ /Al ₂ O ₃ モル比	強さ評価
アウイン量 30% B 無し	1,300	4000	6000	0.7	初期×、長期×
	1,350				初期×、長期△
アウイン量 30% B 有り	1,300				初期×、長期○
	1,350				初期○、長期○

● コンクリート評価

仕上げ条件を最適化したセメントについて、コンクリート耐久性を OPC と比較して評価し、添加したホウ素がコンクリート耐久性に良い影響を与えることを確認した。しかしながら、OPC のコンクリート耐久性には劣るため、さらなる検討が必要である。

コンクリートの耐久性評価

セメント	断熱温度上昇	促進中性化	凍結融解	長さ変化
アウイン 30%	×	△	△	×
アウイン 30% ホウ素有り	△	△	○	○

○ : OPC 並み △ : OPC よりやや劣る × : OPC より劣る

vi. 実機製造に向けた課題

●品質に関する課題

- ・ OPC に比べ、コンクリート耐久性に劣る。
（促進中性化、断熱温度上昇、凍結融解）
- ・ 焼成温度が強さに大きく影響する。

●安定製造に関する課題

- ・ コーティングによるトラブルの懸念
- ・ 焼成温度上昇に伴うクリンカ大塊化によるトラブルの懸念。

●規格に関する課題

- ・ 現在の OPC 規格の範囲外のため新規格の制定が必要

●原材料に関する課題

- ・ アルミニウム源の確保が必要。

vii. まとめ

- 電気炉焼成試験により、アウイン量 30%、 C_4A_3F 20%のビーライト-アウインクリンカを用いて、OPC 相当のモルタル強さとなる添加剤の種類と最適添加量 (B_2O_3 : 0.9%) と、最適な石膏添加量を把握した (11mass% = SO_3/Al_2O_3 : 0.7)。
- テストキルン等焼成試験の結果から、アウイン量 30%でも焼成温度が高くなるとクリンカが大塊化する傾向があり、安定焼成には焼成温度管理が重要であることが明らかとなった
- テストキルン焼成試験により、焼成条件を明確にする（焼成温度：1350 ±10℃、窯尻酸素濃度 4.0%以上）と同時に、OPC クリンカ焼成と比べて大幅にエネルギー効率を削減できることを確認した（約 20%）。さらに、物性評価により、ホウ素を添加することでコンクリート耐久性が改善することを確認したが、OPC と比べるとやや劣る結果であった。
- 本基盤研究の結果から焼成エネルギー削減効果は大きく、次世代省エネセメントとして期待される材料であるが、品質および安定製造面の課題が多く、今後さらなる検討の必要がある。

(c) 省エネセメントの開発

i. 実施内容の概略

省エネ型クリンカの性能を把握し、それを基にクリンカ性能の効果的利用方法ならびにクリンカ性能向上のための方策を検討した。それらの結果は各クリンカの項において述べる。

高アルミネート相クリンカ（高 C_3A クリンカ）の試験焼成、物性確認および省エネ効果の評価を行った。その結果、OPC クリンカに比して C_3A を 4% 増加することで、焼成エネルギーを 3~4% 低減し、また、混合材として石灰石を 5~10% 程度増加することにより、エネルギー原単位を 8~14% 程度低減する可能が示唆された。一方、この省エネセメントが JIS 規格外であり、規格の整備が必要となることが課題とされた。

ii. 開発スケジュール

本項の開発スケジュールは以下のとおりである。

	H25				H26			
ミニプラント焼成試験								
クリンカの試製造								
省エネ効果の確認								
耐久性確認								
大型テストキルンによるクリンカ試製造								
クリンカの試製造								
物理特性の明確化								
省エネセメントの設計								
普及に向けた検討								

iii. ミニプラント焼成試験

● クリンカの試製造、省エネ効果の確認

テストキルン等の試験により最適化された鉱物組成のクリンカを試製造し、省エネ効果の確認および焼成状況の把握を行った。その結果、OPC クリンカに比べ、焼成温度が約 3°C 、燃料供給量が約 2.2% 低下したことが確認された。焼成状況については、クリンカ中の液相が増加したことによりコーティングが付着しやすくなっており、実機製造における安定運転への影響が懸念された。

クリンカ組成と省エネ効果

試料名	鉱物割合(wt%)				焼点温度 (°C)	焼点温度 低減(°C)	燃料供給 割合(%)
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			
OPC	50.3	28.0	9.7	9.5	1452	0	100
高 C ₃ A	49.2	25.7	12.6	10.3	1449	-3	97.8

● 試製セメントの耐久性試験

試製造クリンカを使用したセメントによる耐久性等の評価を行った。その結果、圧縮強さは OPC と同等で、耐久性は OPC に比べやや劣る部分もあるが概して同等以上であった。

物理特特性評価結果

試料		JIS 規格	OPC	高 C ₃ A
混合材割合(wt%)		under 5	LSP 3.5	LSP 10.0
ブレン(cm ² /g)		over 2500	3400	3400
凝結 時間	始発(分)	over 60	60	85
	終結(時)	under 10	2.2	2.0
安定性(mm)		under 10	1.0	0.5
圧縮強さ (N/mm ²)	3d	over 12.5	22.9	20.3
	7d	over 22.5	33.8	32.2
	28d	over 42.5	52.9	49.9
MgO(%)		under 5.0	1.6	1.8
SO ₃ (%)		under 3.5	2.2	2.1
LOI(%)		under 5.0	2.4	5.2
Total alkali(%)		under 0.75	0.22	0.21
Cl(%)		under 0.035	0.000	0.000

耐久性評価結果

試料名	混合材	促進 中性化	乾燥収縮	断熱温度 上昇	硫酸塩劣化	
					5°C	23°C
OPC	LSP 3.5% (基準)	—	—	—	—	—
	LSP 10%	◎	○		○	○
	LSP 5% + FA5%	○	○		○	○
高 C ₃ A	LSP 3.5%	○	○		△	△
	LSP 10%	◎	○	○	△	△
	LSP 5% + FA5%	○	○		△	△

iv. 大型テストキルンによるクリンカ試製造

- クリンカの試製造、物理特性の明確化

ミニプラント焼成により最適化が確認された鉱物組成のクリンカを大型テストキルンにより試製造し、得られた試製セメントの物性を評価した。その結果、LSP 混合量の増加により、強熱減量が規格値 5.0% となったが、その他の品質は概ね OPC と同等であった。

物理特性評価試料

試料名	鉱物割合(wt%)				f-CaO (%)	混合材 LSP
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF		
OPC	64.1	13.2	3.7	10.5	0.00	3.5
高 C ₃ A	57.3	9.3	10.7	5.8	0.27	10.0

物理特特性評価結果

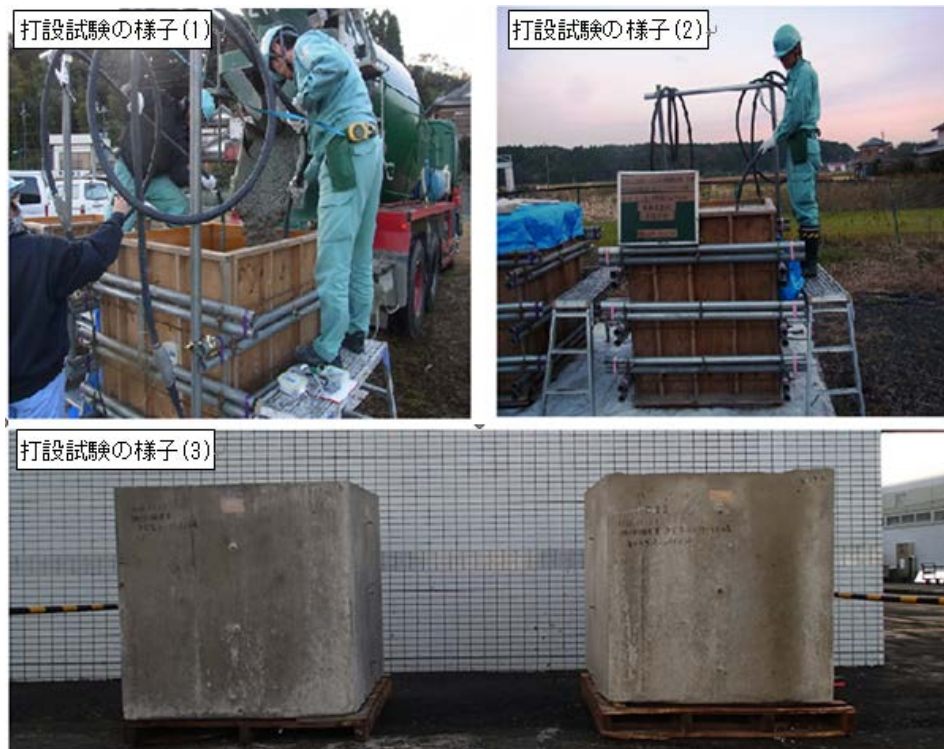
試料		JIS 規格	OPC	高 C ₃ A
混合材割合(wt%)		under 5	LSP 3.5	LSP 10.0
ブレン(cm ² /g)		over 2500	3250	3360
凝結時間	始発(分)	over 60	120	125
	終結(時)	under 10	3.6	2.9
安定性(mm)		under 10	0.5	28.2
圧縮強さ (N/mm ²)	3d	over 12.5	26.3	28.2
	7d	over 22.5	43.8	44.2
	28d	over 42.5	61.8	54.8
MgO(%)		under 5.0	1.5	1.5
SO ₃ (%)		under 3.5	1.9	1.7
LOI(%)		under 5.0	2.6	5.0
Total alkali(%)		under 0.75	0.20	0.32
Cl(%)		under 0.035	0.000	0.000

v. コンクリート打設試験

- 試験施工、コンクリート評価

大型テストキルンによる試製造クリンカを使用し、生コン工場において一般的な土木構造物を想定したフレッシュコンクリートを作製した。

これを使用して 1m×1m×1m の打設構造体を試作し、コンクリート評価を行った。その結果、フレッシュコンクリートの性状は OPC コンクリートと同等であり、圧縮強度は OPC コンクリートよりやや劣ったがミニプラントでの試製造をはじめこれまでの試験での評価結果より同等の性能を有すると考えられた。



コンクリート評価結果(1)

試料名		スランプ(cm)			空気量(%)			コンクリート温度(℃)		
		0	30	60	0	30	60	0	30	60
経過時間(分)										
OPC		15.5	14.0	13.0	6.2	6.1	5.5	16	17	17
高 C ₃ A		18.0	14.0	13.5	6.2	6.2	6.1	16	16	17

コンクリート評価結果(2)

硬化時間 (day)	圧縮強度(N/mm ²)		静弾性係数(kN/mm ²)	
	OPC	高 C ₃ A	OPC	高 C ₃ A
7	18.6	18.6	—	—
28	27.7	24.6	24.9	24.8
56	31.5	25.8	26.8	26.9
91	31.6	27.2	28.3	27.0

- 省エネセメントの設計

これまでの諸試験の結果より、混合材割合と L0I が JIS 規格を超えるがその他の品質は OPC 同等であり、本技術開発における省エネセメントの設計を、高 C_3A (+4%) + 混合材 10% (ただし、LSP5%が必須) とした。

vi. 実機適用時の課題

テストキルンおよびミニプラント等での試製造等の結果から、クリンカ中の液相量増加に伴うキルン内壁へのコーティング付着による安定運転への影響が懸念事項として挙げられる。

vii. 海外規格・市場調査

本セメントの設計が JIS 規格外であり、実用に際しては規格の整備が必要となる。そこで海外における関連規格の調査を行った。

- 韓国

2011 年に韓国政府が、「2020 年、低炭素緑色社会具現化のためのロードマップ」を発表した。これに対して、セメント部門は温室効果ガス排出量 8.5%削減を目標と、そのための方策として、少量混合成分の含有量を 10%に規格変更した。この規格変更後の混合材使用割合はメーカーによっては+1~2%の増加傾向であった。

- アメリカ

2002 年にアメリカ・ポルトランドセメント協会 (PCA) が、2020 年までに 1990 年比で CO_2 排出量 10%削減を任意目標とした。これを受け、ASTM に Portland-limestone cement が追加されたが、その製造量はごく僅かと見られる。

viii. まとめ

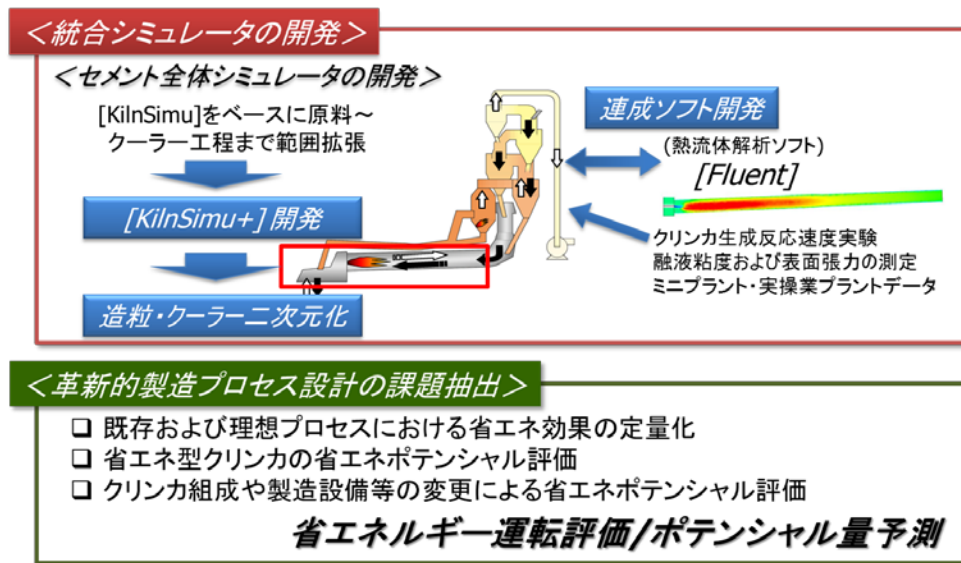
- 省エネセメントの設計を以下のとおりに決定した。

高 C_3A (+4%) + 混合材 10% (ただし混合材に LSP5%が必須)

- 高 C_3A クリンカは OPC クリンカよりも焼成エネルギーが 2.2 ~4.0%低減し、セメント製造全体でのエネルギー低減は 8.5~10.1%と試算された。

- 省エネセメントはモルタルおよびコンクリート評価試験の結果、OPC と同等の品質であることが確認された。ただし、強熱減量、水和熱および耐硫酸塩性は OPC より劣る結果となった。今後、より詳細な検討が必要であると考えられた。
- 省エネセメントを用いたコンクリート構造体の打設実験により、OPC を用いた場合と同等の施工性であることが確認された。
- 省エネセメントの実用に向けた課題として、混合材割合等の規格整備が挙げられる。また、製造時のクリンカ中の液相量増加に伴うキルン内壁へのコーティング付着による安定運転への影響に留意する必要がある。

(2) クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析



i. 統合シミュレータの高度化（ツール開発）

①微粉炭燃焼試験を通じた計算精度向上

- ・ (財)電力中央研究所の石炭燃焼試験炉にて粉碎条件の異なる 2 水準のオイルコークスを調整し、粒子径差異による燃焼影響を評価した。
- ・ 燃焼挙動を数値的に再現することで計算精度の向上を図ることができた。

②クリンカクーラーモデルの二次元化

- ・ クリンカクーラー内の熱交換シミュレーションに造粒（クリンカ粒度）の影響を考慮できるよう以下の改良を行った。
 - 焼成プロセスの省エネポテンシャルでは、クリンカクーラーの熱回収効率が大きく影響を及ぼす。そこで、統合シミュレータの一部としてキルン内でのクリンカ造粒および転動による粒子偏析を予想するためのモデルを作成した。
 - クリンカクーラーの幅方向に粒度が異なった状態としてクリンカが投入されるクーラーの二次元モデルを開発し、クリンカ組成変更等によるクリンカ粒度及びクーラー効率への影響まで想定できる様にした。
- ・ シミュレータで考慮すべき因子を検討するため、以下のラボ実験（電気炉、テストキルン）および実機キルンデータ収集を行った。
 - 電気炉実験によるクリンカ生成反応速度の測定を行い、鉱化剤添加や高 C₃A 化の影響を確認した。その効果をシミュレーションのパラメー

- タに反映させることで省エネ効果を試算できるようにした。
- クリンカ造粒検討のための融液粘度および表面張力の測定を行った。
- ミニプラントでの省エネ型クリンカ焼成試験により造粒メカニズムを推定し、省エネクリンカの造粒には大きな影響はないことを確認した。
- 実機キルンのクーラー内温度分布および粒子偏析状態を観察した。

ii. 革新的製造プロセス設計の課題抽出（ツール利用）

開発したシミュレータを用いて、省エネ型クリンカのポテンシャル評価、クリンカ組成や製造設備、運転パラメータの変更による影響を確認し、省エネ製造に向けた指針・課題抽出を行った。

①省エネ型クリンカの省エネポテンシャル評価

● 省エネ型クリンカ焼成の省エネ効果を定量評価した。

① 鉱化剤使用によるクリンカ焼成〔住友大阪社〕

- 高 F、高 SO₃ クリンカ (F/SO₃ = 0.1/2.0%、0.2/2.0%、0.2/4.0%)

② 鉱物組成変更によるクリンカ焼成〔太平洋社〕

- 高 C₃A クリンカ (C₃A:12%)
- ビーライト-アウイン 40%

なお、テストキルンでの焼成実験により、省エネ型クリンカの粒度は OPC クリンカと大きな違いは無いと考えられたため、本シミュレーションでのクリンカ粒度分布は OPC クリンカと同等で計算した。

	最高ベッド温度 (°C)	最高ガス温度 (°C)	原単位削減量 [MJ/t]
OPC クリンカ（比較ベース）	1,409	1,768	3,824
鉱化剤 (F:0.1%, SO ₃ :2.0%)	△34	△9	△3.3%
鉱化剤 (F:0.2%, SO ₃ :2.0%)	△64	△46	△4.0%
鉱化剤 (F:0.2%, SO ₃ :4.0%)	△60	△35	△6.3%
高間隙相化	△32	△8	△0.5%
ビーライト-アウイン 40%	△61	△124	△21.1%

- ・ 鉱化剤添加による反応速度増加を考慮して省エネ効果をシミュレーションした結果、最大 6.3%の熱量原単位削減が期待される。

- ・ 高間隙相化（高 C_3A 化）による省エネ効果は小さい。
- ・ ビーライト-アウイン系では省エネ効果が大きいが、硫黄のキルン内部循環量が多く、現状プラントでの運転トラブルの懸念がある。

②焼成プロセスの省エネポテンシャル評価

- ・ クリンカ諸率（HM, SM、IM）変化による省エネ効果を定量評価した。

	原単位削減量 [MJ/t]
OPC クリンカ（比較ベース）	3,824
① HM（2.10→1.95）低減	△119（△3.1%）
② SM（2.49→1.70）低減	△22（△0.6%）
③ IM（1.79→0.80）低減	△9（△0.2%）
④（①+②+③）	△49（△1.3%）

- ・ HM 低減の熱量原単位の削減効果が最も高い。但し、クリンカの鉱物組成として C_3S の割合がやや少なくなる。SM および IM 低減も効果はあるが、HM に比べると影響は小さい。
 - ・ なお、2次元モデルでの熱量原単位の低減効果およびクリンカ組成の計算結果は、いずれも1次元モデル検討時と同傾向であった。
- 既存設備の省エネポテンシャルを定量評価した。改善項目はSPリークガスの低減、余剰空気の削減およびクーラー効率改善とした。

OPC クリンカとの比較	熱量原単位 [MJ/t]	原単位削減量 [MJ/t]
① SP 部リークガスの低減		
リーク 25kNm ³ /h 削減	3,767	△58（△1.5%）
② 余剰空気の削減		
燃焼空気比 1.2→1.05	3,740	△84（△2.2%）
酸素富化（1次空気）	3,772	△52（△1.4%）
③ クーラー2次空気・抽気温度変更		
クーラー効率 63%	3,716	△109（△2.8%）
クーラー効率 70%	3,608	△217（△5.7%）

- ・ クーラー二次元化モデルにより既存設備の省エネポテンシャルを精査したところ、今回試算した3つの項目の中ではクーラー効率改善に

よる熱量原単位の削減効果が大きいことが分かった。

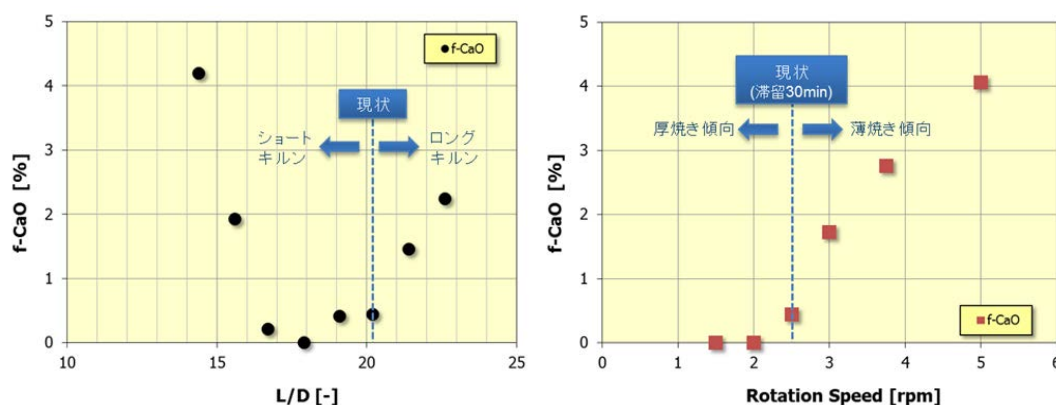
- 各種プラント運転条件変更による燃費影響を定量評価した。

① 仮焼炉焚比変更による影響

	生産量 [t/h]	原単位削減量 [MJ/t]	f. CaO [%]
OPC クリンカ（比較ベース） 〈仮焼炉 54：キルン 46〉	194	3,824	0.41
① 仮焼炉 0：キルン 100	128	▲192（▲5%）	0.77
② 仮焼炉 70：キルン 30	185	▲154（▲4%）	0.34

- ・ NSP プラントから SP 運転を想定すると、キルン窯尻ガス温度や f. CaO の上昇により運転困難となり、運転調整すると生産量▲34%、熱量原単位▲5%となる。
- ・ 仮焼炉側の比率を上げると、キルン側の熱量不足が顕著となり、f. CaO が上昇する。これに対応するために焚量変化・送分量減のアクションが必要となり、熱量原単位が▲4%となる。
- ・ 現状クリンカ焼成における仮焼炉焚比の変更は、熱量原単位の悪化となる。

② キルン長 (L/D)、回転数による影響



- ・ キルンを長くするとキルンからの放熱が大きく、クリンカ焼成熱量不足となり、f. CaO の残存が高い。一方、キルンを短くしすぎても焼成熱量不足となる。
- ・ キルン内ベッド高さが高い焼成（厚焼き）の方が、クリンカ f. CaO の残存が低い。
- ・ 本結果より、現状キルン長さを 15%短くし、キルン回転数を遅くした

運転の方が高効率となる。この際の熱量原単位は 1%改善される。

③ 石炭種、微粉炭粒子径による影響

	熱量原単位 [MJ/t]	原単位削減量 [MJ/t]
OPC クリンカ（比較ベース）	3,824	---
① 微粉炭粒子径変更		
平均粒子径 44→66 μm	4,140	▲316（▲6.8%）
平均粒子径 44→99 μm	4,384	▲560（▲12.1%）
② 石炭種変更		
瀝青炭→半無煙炭	3,905	▲81（▲2.1%）
瀝青炭→無煙炭	3,906	▲82（▲2.1%）

- ・（財）電力中央研究所での微粉炭燃焼試験などを踏まえた計算のチューニングおよびクーラー2次元モデル化により、再検討を実施した。
- ・微粉炭粒子径を大きくすると、燃焼が悪化するためにガス温度が低くなり、f. CaO が増加した。これに対応するための焚量・送入力減により、熱量原単位は悪化した。
- ・石炭種を半無煙炭あるいは無煙炭に変更すると、燃焼が悪化するために熱量原単位はやや悪化する傾向となった。

iii. まとめ

(i) 統合シミュレーターの高度化

① 微粉炭燃焼試験を通じた計算精度向上

- （財）電力中央研究所の石炭燃焼試験炉にて粉碎条件の異なる 2 水準のオイルコックスを調整し、粒子径差異による燃焼影響を評価した。
- 燃焼挙動を数値的に再現することで計算精度の向上を図ることができた。

② クリンカクーラーモデルの二次元化

- 原料・焼成工程全般を検討できる KilnSimu+と燃焼解析ソフトの双方向連成で解析可能な統合シミュレータにクリンカ粒度及びクーラー効率への影響までを想定可能なクーラー二次元モデルを加え高度化したものを開発した。また、以下の実験及び測定を行い計算精度を向上させた。
- 電気炉実験により、省エネクリンカにおける生成鉱物の反応速度の違いを把握した。

- 省エネクリンカ（鉍化剤，高 C_3A ，7μm等）の造粒特性に関して、融液特性（粘度，表面張力）の測定を行い、ミニプラントでの焼成試験により融液特性と粒度との関係を確認した。
- 実機キルンのクーラー内温度分布および粒子偏析状態を観察した。

(ii) 焼成プロセスの省エネポテンシャル評価

(i) の高度化キルンシミュレータを用いて、省エネ型クリンカの省エネポテンシャルおよびクリンカ組成や焼成プロセス・運転条件の変更による省エネポテンシャルを再評価したところ、以下の結果が得られた。

①省エネ型クリンカの省エネポテンシャル評価

- 省エネ型クリンカの中では鉍化剤使用が最も省エネポテンシャルが高く、 $F : 0.2\% + SO_3 : 4.0\%$ の条件で最大 $\Delta 6.3\%$ の省エネ効果が得られることが推測された。
- 高 C_3A 化による省エネ効果は $\Delta 0.5\%$ と小さかった。
- ビーライトーアウイン系は省エネ効果 $\Delta 21.1\%$ と大きいですが、硫黄のキルン内循環量が増加し、コーティングによる運転トラブルが懸念される。

②焼成プロセスの省エネポテンシャル評価

- クリンカの諸率変更の中で HM 低減による省エネ効果が最も大きい（HM - 0.15 低減で 3.1% の省エネ効果）。
- 既存設備の改善（SP 部リークガス低減、余剰空気削減、クーラー効率改善）による省エネポテンシャルを評価した結果、クーラー効率の改善の省エネ効果が大きいことが確認できた。
- プラント運転条件として仮焼炉焚比、キルン長および回転数、石炭種変更および粒子径変更の影響を評価した結果、仮焼炉焚比や石炭種・粒度は現状条件を変更すると熱量原単位が悪化することが分かった。また、シミュレーションに用いたキルン設備では、現状よりもキルン長を長くし、回転数を遅くすることで熱量原単位が良化することが推測された。

(3) クリンカ焼成プロセスの計測技術開発

(a) スペクトル計測等によるキルン内温度計測技術開発

i. 予備試験

<ダストキャンセル法（DC法）>

- 炉内環境模擬試験装置を用いた検証試験で、DC法を適用して粉塵の影響を除くことで計測精度が向上することが確認でき、DC法の理論が成り立つと判断した。（図1、図2）

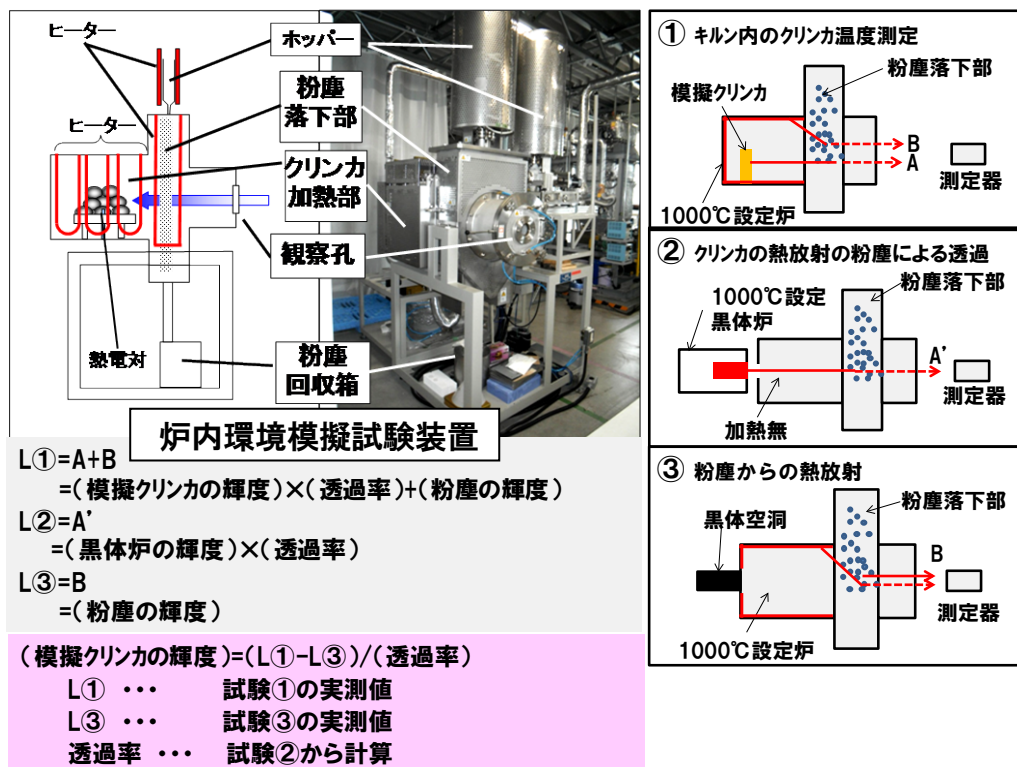


図1. DC法の理論確認試験の方法

	粉塵加熱	粉塵落下前 (真値)	粉塵落下中	
			DC法適用無	DC法適用有
模擬クリンカ 単色(1.35)温度(℃)	あり(800℃)	1063	1033(-30)	1053(-10)

【仮定】
 粉塵による散乱は等方散乱
 クリンカの放射率は1
 炉壁放射率1

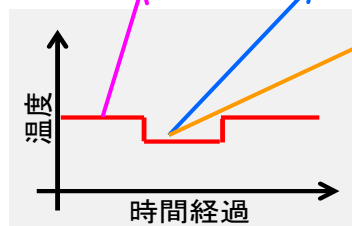


図2. DC法の理論確認試験の結果

＜光ファイバー法＞

「放射温度計の導光部に FIMT（金属被覆管光ファイバー）を使用しその先端を直接溶融金属に浸漬させて測温する温度計。直に溶融金属に浸漬して測温するため外乱、放射率の影響を受けず、FIMT が消耗しても、新しい FIMT を繰出すだけで繰返し測温が可能」として市販されている JFE メカニカル株式会社製の光ファイバー温度計（図 3）を、同温度計の本来の測定対象とは異なるクリンカの温度測定に適用する方法について検討し、以下の結論を得た。

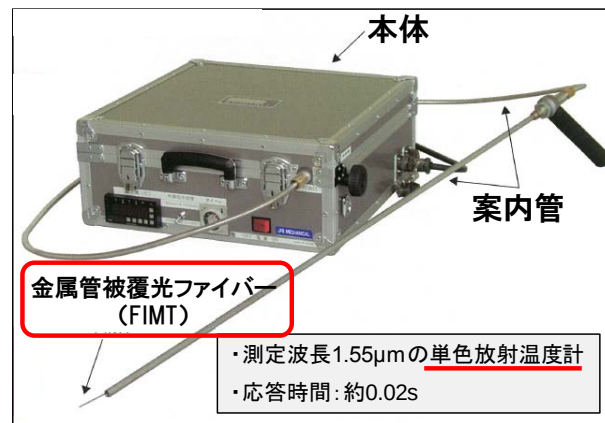


図 3. 光ファイバー温度計

- クリンカ焼成温度である 1450℃の炉内では、クリンカに接触しなくても、FIMT は熱によるダメージを受ける。そこで、「FIMT を水冷管で保護してキルン内部へ導入し、クリンカへ挿入する短時間だけ水冷管からの出し入れを間欠的に行う」方法（図 4）で、クリンカ温度の自動測定ができるか検討を行うことにした。

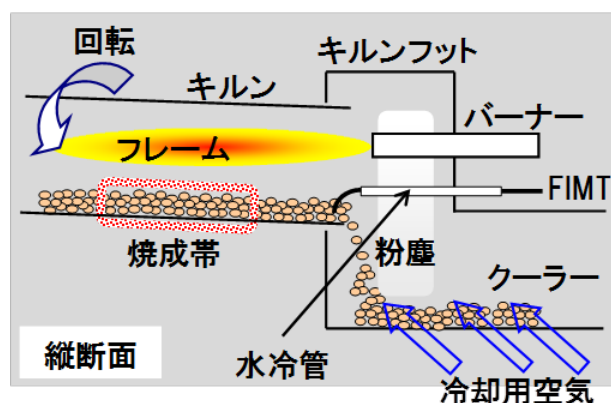


図 4. キルンへの FIMT 導入方法の概念図

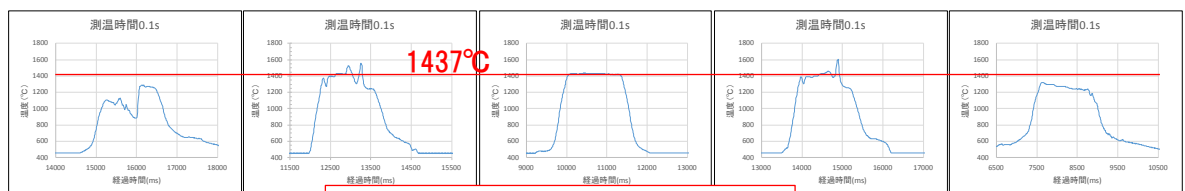
- 前記の検討を行うため、FIMT をクリンカ焼成温度である 1450℃に設定した炉内に設置したクリンカと炉外の間を往復させることで、光ファイバーを水冷管に退避し、測定時のみにクリンカに接触させる状況を再現する試験装置を製作して温度測定試験を実施した。光ファイバー温度計の測定結果はクリンカに挿入した熱電対による測定結果との差が大きく、その差も一定ではなかったため（図 5）、光ファイバー温度計をクリンカ温度測定に適用することは、何らかの工夫がない限り難しい、と判断した。

クリンカ内挿入熱電対: 1437℃ → 光ファイバー温度計の表示もこの値に近くなるはず

【測定条件】

- ・FIMTの挿入深さ: 10mm
- ・測温時間: 0.1s/1回測定
- ・FIMTの移動速度: 400mm/s(炉内に居る時間: 2.3s/1回測定)

【1回測定】



各測定値の差が大きい

【50回繰返し測定】

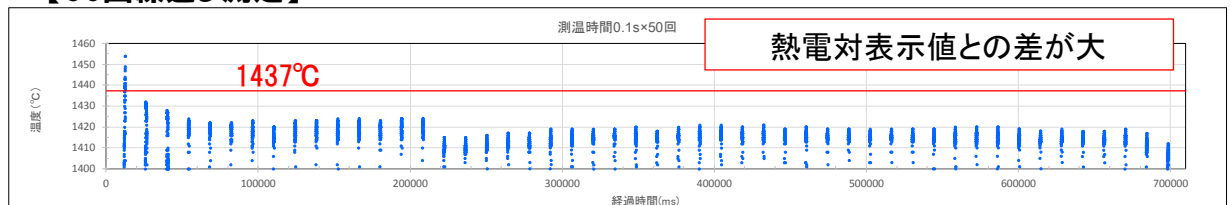


図 5. FIMT による温度測定結果

ii. 実機試験

＜ダストキャンセル法（DC法）＞

- DC法を実機キルンに適用し、粉塵温度、粉塵濃度、クリンカ温度を求めた。粉塵の温度は刻々と変化していること（グラフ上）、測定器①方向の透過率は0～1の間を大きく変化していること（グラフ中）、粉塵の影響により測定器②のクリンカ温度は低く表示されていること（グラフ下）、測定器①の透過率が低い「グラフ中」の赤枠の時刻のクリンカ温度の測定精度は悪化しておりデータがばらついていること（グラフ下）、が読み取れた。（図 6）

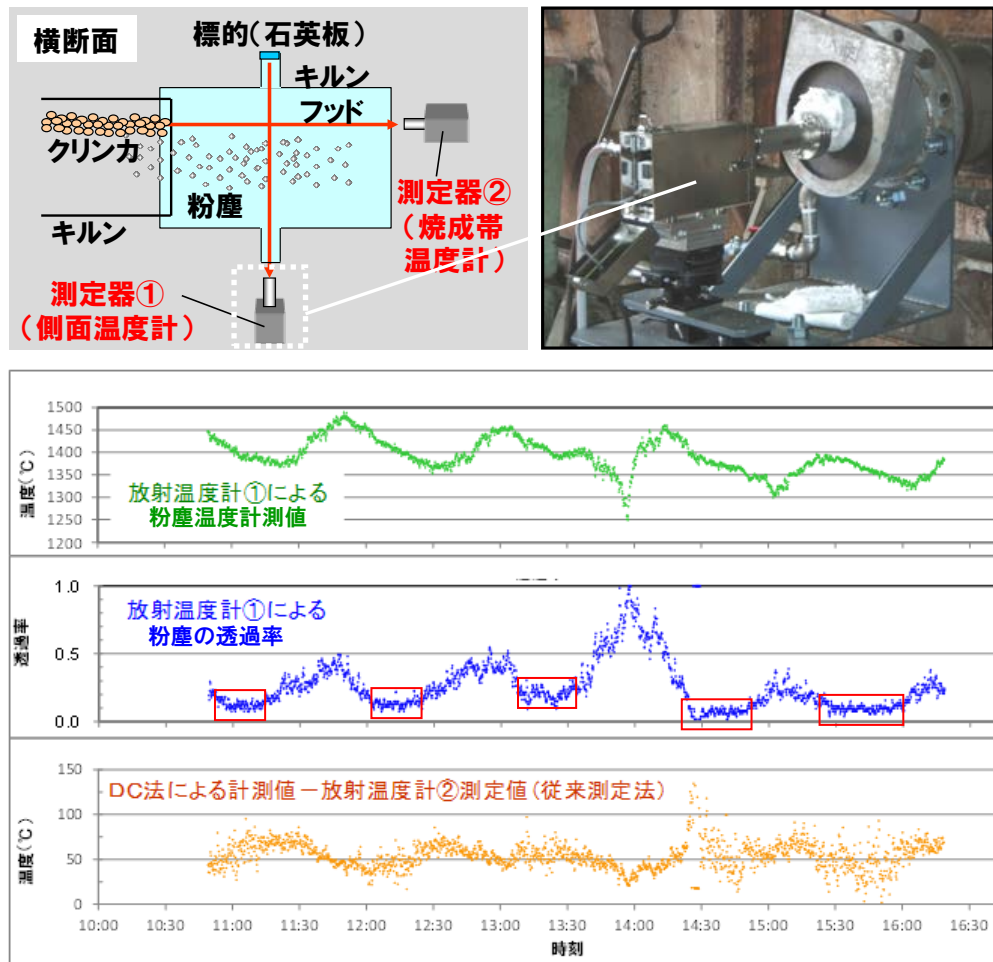


図6. DC法による計測結果

iii. まとめ

ダストキャンセル法と光ファイバー法の2つの方法に対して実機キルンでの検証を行い、工場への適用の可否を判断した結果、以下の結論を得た。

<ダストキャンセル法>

- 炉内環境模擬試験装置を使った検証試験で、ダストキャンセル法の理論が成り立つと判断した。
- 実機キルンに適用することで、大きく変化する粉塵温度や透過率による影響をキャンセルしたクリンカ温度を求めた。

- 以上より、ダストキャンセル法の工場への適用は可能であると判断した。

＜光ファイバー法＞

- 光ファイバーを水冷管に退避し、測定時のみにクリンカに接触させる試験装置を製作し温度測定試験を実施した結果、クリンカ温度の測定結果は熱電対との差が大きく、その差も一定ではなかった。光ファイバー温度計は、何らかの工夫がない限り、クリンカ温度を間欠的に測定することも難しいと判断した。

3-1-3 特許出願状況等

表 3. 特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の 被引用 度数	特許等件 数(出願を 含む)	特許権の 実施件数	ライセン ス供与数	取得ライ センス料	国際標準 への寄与
(1) 省エネ型クリンカ焼成技術開発							
(a) 鉱化剤使用によるセメントクリンカ低温焼成技術開発	0	0	1	0	0	0	0
(b) 鉱物組成変更による省エネ型クリンカ焼成技術開発	0	0	1	0	0	0	0
(c) 省エネセメントの開発	2	0	1	0	0	0	0
(2) クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析	0	0	0	0	0	0	0
(3) クリンカ焼成プロセスの計測技術開発							
(a) スペクトル計測等によるキルン内温度計測技術開発	0	0	3	0	0	0	0
(b) 放射温度計等によるキルン内温度計測技術開発	0	0	0	0	0	0	0
計	2	0	6	0	0	0	0

表 4 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	セメント・コンクリート論文集 「製造条件が C_2S 固溶体の水和活性に与える影響」	H27. 3
	セメント・コンクリート論文集 「省エネルギー型汎用セメントの開発」	H27. 3
投稿	セメント新聞 「太平洋、住友大阪、三菱マテ、宇部 共同で革新的技術開発 セメント製造省エネ NEDO が助成先に決定」	H22. 10
	セメント新聞 「4 社で革新的製造技術開発 廃棄物活用でエネルギー効率悪化 焼成システム改革図る」	H22. 12
	セメント新聞 「革新的セメント製造技術開発 成果、海外へ技術移転も 3 要素技術開発へ 4 社が役割分担」	H22. 12
	セメント新聞 「着実に進展する革新的セメント製造プロセス基盤技術	H24. 1

	開発」	
	セメント新聞 「革新的製造技術開発・キルン内温度計測に“期待”」	H25. 2
発表	第 67 回セメント技術大会 「クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析」	H25. 5
	2nd International Symposium on Inorganic and Environmental Materials 「Development of New Advanced Simulation Technology for Cement Making Process」	H25. 10
	日本セラミックス協会 2014 年年会 「省エネルギー型汎用セメントの研究」	H26. 3
	第 68 回セメント技術大会 「ビーライト - アウインクリンカのテストキルン焼成と品質評価」	H26. 5
	第 68 回セメント技術大会 「電気炉試験によるビーライト - アウインセメントの鉱物組成と焼成条件に関する検討」	H26. 5
	第 68 回セメント技術大会 「各種石膏を添加したビーライト-アウインセメントの物理性状に関する研究」	H26. 5
	第 68 回セメント技術大会 「石膏を添加したビーライト - アウインセメントの水和反応についての考察」	H26. 5
	第 68 回セメント技術大会 「ビーライト - アウイン系クリンカを単味粉碎したセメントの水和反応についての考察」	H26. 5
	第 68 回セメント技術大会 「ビーライト - アウインセメントのコンクリート評価」	H26. 5
	第 68 回セメント技術大会 「省エネルギー型汎用セメントの開発」	H26. 5
	第 68 回セメント技術大会 「ビーライト-アウインクリンカのテストキルン焼成と品質評価」	H26. 5
	第 68 回セメント技術大会 「製造条件が高ビーライトセメントの水和活性に与える影響」	H26. 5
	第 68 回セメント技術大会	H26. 5

	「鉬化剤使用によるセメントクリンカーの低温焼成」	
	GTT Workshop 「Simulation Technology for Clinker Burning Process」	H26. 7
	化学工学会第 46 回秋季大会 「クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析」	H26. 9
	第 14 回 FactSage ユーザー会 「クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析」	H26. 10
	AIChE(米国化学工学会) Annual Meeting 2014 「The Estimation Method Using the Advanced Simulation Technology for Cement Manufacturing Process」	H26. 11
	第 69 回セメント技術大会 「クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析(第 2 報)」	H27. 5
	第 69 回セメント技術大会 「焼成温度を低減した省エネクリンカーの造粒に及ぼす融液特性の影響」	H27. 5
	第 69 回セメント技術大会 「ドーパントとリサイクル原料がビーライト - アウインセメントの強さ発現性に及ぼす影響」	H27. 5
特許	出願 No. 2012-080012「炉内における被加熱物、粉塵及び炉内ガスの温度とそれらの放射率の計測方法」	H24. 3 出願済
	出願 No. 2014-053172「粉塵が存在する雰囲気中の物体の温度を計測する方法」	H26. 3 出願済
	出願 No. 2015-182656「被加熱物の温度、粉塵の温度及び粉塵の濃度を計測する方法」	H27. 9 出願済
	出願 2013-59802「セメント組成物」	H25. 3 出願済
	出願 2013-59302「セメント組成物」	H25. 3 出願済
	出願 2015-73688「セメントクリンカーの製造方法」	H27. 3 出願済

3-2 目標の達成度

表 5. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
1. 省エネ型クリンカ焼成技術開発			
(a) 鉱化剤使用によるセメントクリンカ低温焼成技術開発	実機適用への課題抽出。 ・予熱設備を追加したテストキルン（ミニプラント）や大型テストキルンを用いて、鉱化剤添加効果の確認とプロセス評価や物性評価の実施。試験施工や耐久性といった物理特性の明確化。	・ミニプラント焼成試験では焼成温度低減（100℃）を図る為の焼成条件を明確化した。 ・大型テストキルンを用いたクリンカ試製造では、原料投入量をミニプラント焼成に比べて大幅に増加させてクリンカを製造し、モルタルおよびコンクリート性状に鉱化剤添加の影響がないことを明確化した。 ・さらにコンクリート製品であるロングベンチフリューム（LBF）の製造試験を行い、製品打設時、均し等作業性および耐久性を含めた諸物性において鉱化剤添加の影響がないことを確認した。 （課題） ・鉱化剤含有量の変動によって焼成温度を変化させる必要がある為、正確な焼成温度の計測と焼成温度管理が必要。 ・鉱化剤の添加により、焼成クリンカは細粒化すると想定、AQC の熱交換効率の低下が予想されることから、装置およびオペレーションの最適化必要になる。	達成
(b) 鉱物組成変更による省エネ型クリンカ焼成技術開発	1) ビーライトーアウイン系クリンカ開発 鉱物組成変更による省エネ型クリンカ焼成における諸条件の最適化および実機焼成における課題抽出。 ・テストキルン等での試験焼成による鉱物組成およびドーパントの最適化、実機焼成時の課題抽出。 ・試製セメントの物性明確化、仕上げ条件の最適化。 ・試製コンクリートのフレッシュ性状、強度発現性、	・テストキルン等を使用し、アウイン量最適化およびホウ素ドーブにより OPC 同等の試製クリンカを得た。 ・テストキルンにより得たビーライトーアウインクリンカは、仕上げ石膏添加の種類、量、粉末度などの最適化が必要であることを明らかにし、その最適条件を明確化した。最適化したセメントを用いて、コンクリートのフレッシュ性状、強度発現、耐久性を評価し OPC 代替としての特徴を明らかにした。 ・実機製造ではコーティングおよび	達成

	耐久性および品質課題の確認。	焼成温度制御、品質面では耐久性および規格等が課題である。	
(c) 省エネセメントの開発	製造プロセス実用化に向けた技術的課題を抽出し、エネルギー原単位 8%削減を可能とする製造プロセスの検討。 ・品質、耐久性及び省エネ効果等を総合的に踏まえた省エネセメントの設計。 ・省エネ効果を最適化した条件でのクリンカ試製造および物性明確化。 ・実用化に向けた課題抽出。	・省エネセメントの設計を以下に決定した。高 C3A(+4%)+混合材 10%（ただし、混合材に LSP5 % が必須） ・高 C3A クリンカでは焼成エネルギーが 2.2~4.0%低減し、セメント製造全体でのエネルギー低減は 8.5~10.1%と試算された。 ・省エネセメントの品質は OPC と概ね同等、強熱減量は一部規格外、水和熱は高め、耐硫酸塩性は低めであった。 ・実機製造ではコーティング、品質面では規格変更または新設が課題である。	達成
2. クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析			
	革新的セメント製造プロセスの課題抽出。 (i) 統合シミュレータの高度化 ①微粉炭燃焼試験を通じた計算精度向上 ②クリンカクーラーモデルの二次元化 (ii) 焼成プロセスの省エネポテンシャル評価 ①省エネ型クリンカの省エネポテンシャル評価 ②焼成プロセスの省エネポテンシャル評価	・(財)電力中央研究所の石炭燃焼試験炉にて粉碎条件の異なる 2 水準のオイルコークスを調整し、粒子径差異による燃焼影響を評価した。 ・燃焼挙動を数値的に再現することで計算精度の向上を図ることができた。 ・原料・焼成工程全般を検討できる KilnSimu+と燃焼解析ソフトの双方向連成で解析可能な統合シミュレータにクリンカ粒度及びクーラー効率への影響までを想定可能なクーラー二次元モデルを加え高度化したものを開発した。また、以下の実験及び測定を行い計算精度を向上させた。 ・電気炉実験により、省エネクリンカにおける生成鉱物の反応速度の違いを把握した。 ・省エネクリンカ（鉱化剤、高 C3A, アイン等）の造粒特性に関して、融液特性（粘度、表面張力）の測定を行い、ミニプラントでの焼成試験により融液特性と粒度との関係を確認した。 ・実機キルンのクーラー内温度分布および粒子偏析状態を観察した。 ・高度化したシミュレータにより	達成

		省エネ型クリンカの省エネポテンシャルを再評価した。 ・クリンカ組成や製造設備等の変更による省エネポテンシャルを再評価した。	
3. クリンカ焼成プロセスの計測技術開発			
(a) スペクトル計測等によるキルン内温度計測技術開発	スペクトル計測等による実機キルンへ適用ができるキルン内温度計測技術の確立（下記方法の工場適用可否判断）。 ① ダストキャンセル法 ② 光ファイバー法	①ダストキャンセル法の工場への適用は、可能性ありと判断した。 ・炉内環境模擬試験装置を使った検証試験で、ダストキャンセル法の理論が成り立つことを確認した。 ・実機キルンに適用し、大きく変化する粉塵温度や透過率による影響をキャンセルしたクリンカ温度を求めた。 ②光ファイバー温度計はクリンカ温度の測定に適していないと判断した。 ・光ファイバーを水冷管に退避し、測定時のみにクリンカに接触させる試験装置を製作し、温度測定試験を実施した。 ・クリンカ温度の測定結果は熱電対との差が大きく、その差も一定ではなかった。	達成

4. 事業化、波及効果について

4-1 事業化の見通し

セメント製造業はエネルギー多消費産業の一つであり、CO₂ 排出量は我が国産業部門の約 4%を占める。国内のセメント製造各社は、1970 年ごろから積極的に省エネルギー技術の開発や導入を行い、そのエネルギー効率は世界最高水準となっている。我が国セメント製造業は、既存技術による省エネはほぼ限界に達しているが、CO₂ 排出量削減の社会的な要請の高まりもあり更なる省エネ・低炭素化が求められており、これを実現する新しい省エネ技術の開発が必要とされている。

今般、経済産業省では、エネルギー基本計画の方針に基づき、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会長期エネルギー需給見通し小委員会における取りまとめを踏まえ、「長期エネルギー需給見通し」を決定した。また、本年 12 月にフランス・パリで開かれる国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)に向け、日本政府としての約束草案が決定され、国連気候変動枠組条約事務局に提出されたところである。こうした状況下において、CO₂ 削減に関する社会的要請はますます強まっており、企業の社会的責任の面からも CO₂ 削減のための省エネ技術開発は重要な研究課題と位置づけられる。特に、本事業は、「長期エネルギー需給見通し関連資料」中に、産業・転換部門における省エネルギー対策の 1 つとして挙げられており、2030 年における省エネ量が 15 万 kL と見込まれている。

本基盤研究においては全セメント生産量の約 80%を占める普通ポルトランドセメントと同等の品質確保を目標としているため、開発した技術が実用化すれば、現行製品を置き換えることになる。したがって、現行の販売ルートや販売先等をそのまま利用することが可能であり、開発した技術の普及が進みやすく、かつ省エネ効果が産業全体に波及しやすい、という利点を有している。

一方で、事業化に向けた社会的課題として、

- ・新プロセスにより製造されるセメント製品に要する新たな原料の調達
- ・品質・コスト競争力の確保
- ・流通網の整備

加えて、本事業を通して明らかになった技術的課題として、

- ・セメントキルン内壁に付着し安定運転を妨げるコーティング対策
- ・長期的品質確認のためのコンクリート耐久性試験の継続実施

- ・必要に応じた設備の改造や導入等の最適化実施

などが想定される。

これら課題を本事業実施者である4社が中心となって業界全体で解決をはかり、2020年以降*より実機による実用化検討を行った後、導入可能な工場から順次普及展開を図っていきたい。

*セメント業界においては、復興需要、全国的な減災・防災需要、オリンピック・パラリンピック関連需要などの要因により2020年頃までは実機稼働率が100%に近い状況であり、本事業終了後直ちに実機による実用化検討を始めることは難しいため。

4-2 波及効果

国内のセメント生産量がここ数年減少傾向である一方で、世界におけるセメント需要は、BRICsに代表される新興国の経済発展に伴い年々増加の一途を辿っていることから、当該産業におけるCO₂排出抑制を目的とした省エネ技術開発は、国際的にも極めて重要な課題である。

したがって、我が国が省エネリーディングカントリーとしてセメント製造に関する革新的な省エネ技術を確立し世界に発信していくことは、グローバルな省エネ・低炭素化に貢献するとともに、この結果として、国内セメント産業の国際競争力強化にも繋がることになる。

5. 研究開発マネジメント・体制等

5-1 研究開発計画

表6. 研究開発計画

実施項目／年度(平成)	22	23	24	25	26
Ⅰ. 省エネ型クリンカ焼成システムのための要素技術開発					
1. 省エネ型クリンカ焼成技術開発					
(a) 鉱化剤使用によるセメントクリンカ低温焼成技術開発	鉱化剤最適化	テストキルン焼成		コンクリートによる耐久性評価試験	
(b) 鉱物組成変更による省エネ型クリンカ焼成技術開発	ピーライト活性化影響調査	ピーライト活性化テストキルン焼成		ミグラー等によるクリンカ製造試験およびセメントとしての品質評価	
	アウイン系影響調査	アウイン系テスト/実機キルン焼成		ミグラー改良	
(c) 省エネセメントの開発		クリンカ性能利用	省エネセメントの創出	ミグラー等によるクリンカ製造試験およびセメントとしての品質評価	
				市場調査	
2. クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析					
		全体シュミレータ開発		統合シュミレータ開発	
		統合シュミレータ開発			
			ミグラー省エネ評価	プロセス設計課題抽出	省エネ関連焼成プロセス評価
3. クリンカ焼成プロセスの計測技術開発					
(a) スペクトル計測等によるキルン内温度計測技術開発	実機キルン内外計測技術	炉内環境模擬試験装置	実機実証	実機キルン実証試験	
				精度向上検討	
(b) 放射温度計等によるキルン内温度計測技術開発	焼点温度測定技術開発	キルンセル熱電対埋込み	操作評価		
Ⅱ. 革新的セメント製造プロセスの設計					
			要素技術開発融合	要素技術開発の融合	
			クリンカ性能利用	革新的セメント製造プロセス設計	

5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、宇部興産株式会社、住友大阪セメント株式会社、太平洋セメント株式会社及び三菱マテリアル株式会社の4社が共同で、平成22年度にNEDOからの助成を受けて実施し、平成23年度からは経済産業省の直執行として補助を受けて実施したもの。

また、研究開発の実施に当たっては、本研究を円滑にすすめ目標達成に向けた各研究分担の成果の融合を図るために以下を役割とする全体会議を設置した。

- ・ 本研究の進捗確認
- ・ 研究成果等の情報共有
- ・ 本研究目標達成のための相互協力

全体会議は各社の主任研究者を中心に構成され、研究開発を統括するためのリーダーを太平洋セメント株式会社 中央研究所 市川牧彦（期途中で人事異動により平尾宙に交替）とするとともに、委員の指導および助言により本研究の方向性等について適正化を図るため、本研究内容に関する専門知識を有する学識経験者からなる技術委員会を設置した。全体会議では、特許の共有や利用許諾などの成果の活用方法についても議論し、事業参加者内での利用と、外部への利用許諾についての方針を合意している。

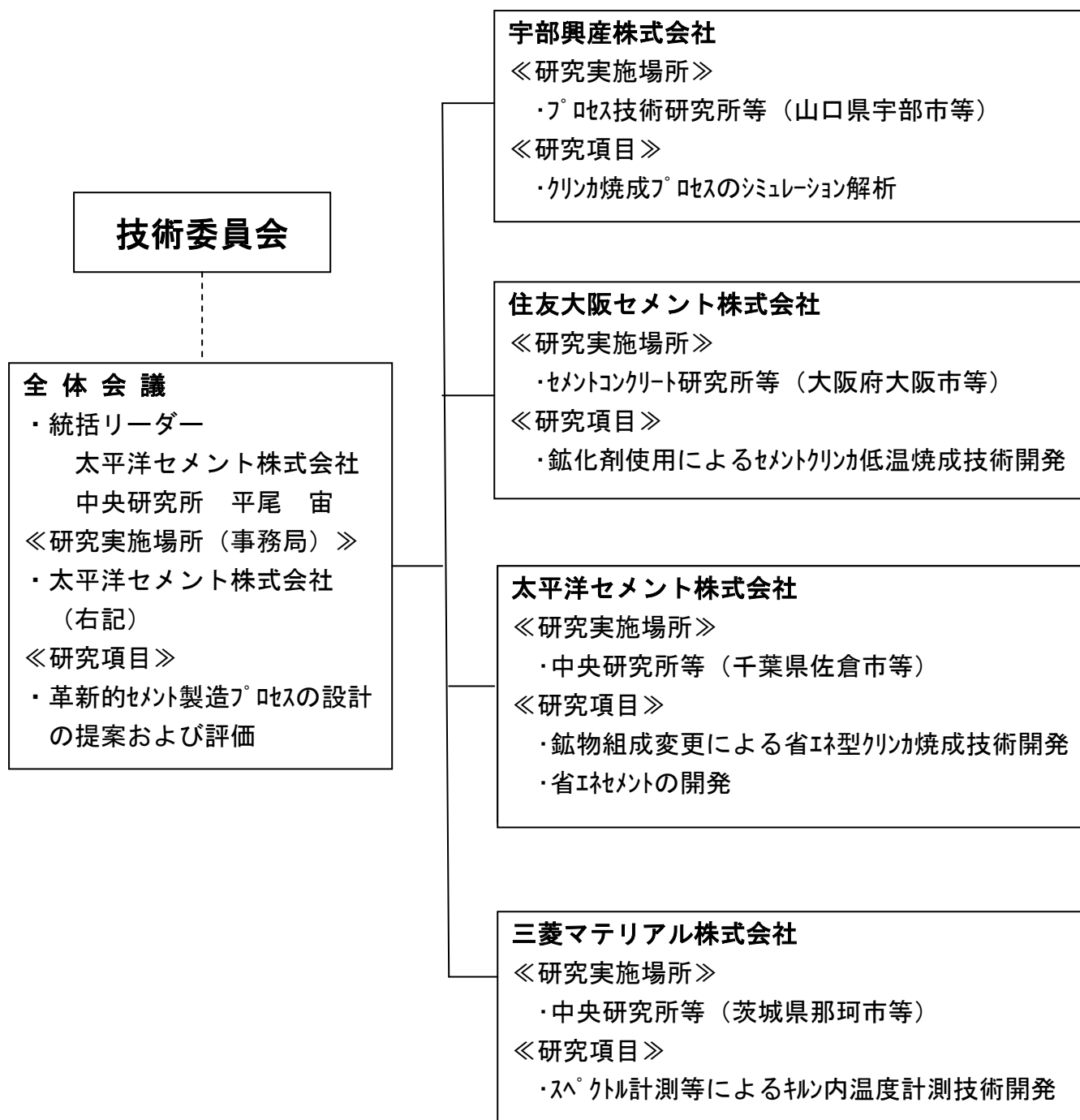


図 5 - 1. 研究開発実施体制

5-3 資金配分

本事業は公募による選定審査手続きを経て、宇部興産株式会社、住友大阪セメント株式会社、太平洋セメント株式会社及び三菱マテリアル株式会社の4社の共同申請に基づき採択した。各要素技術における事業費（補助金を含む全額）を以下に示す。

事業資金の配分については、事業選定時に審査しており、また、実施事業者それぞれにおいておおむね良好な成果が得られたことから、資金の配分は妥当であったと考えられる。

表7. 資金配分（研究開発費として）

（単位：百万）

実施項目／年度	22	23	24	25	26	合計
革新的セメント製造プロセス基盤技術開発						
(1) 省エネ型クリンカ焼成技術開発	90	96	81	75	68	409
(a) 鉱化剤使用によるセメントクリンカ低温焼成技術開発	22	29	25	25	24	125
(b) 鉱物組成変更による省エネ型クリンカ焼成技術開発	67	58	27	25	12	190
(c) 省エネセメントの開発	0	9	29	26	31	95
(2) クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析	61	62	33	46	35	237
(3) クリンカ焼成プロセスの計測技術開発	41	42	32	30	41	186
(a) スペクトル計測等による窑内温度計測技術開発	31	31	31	30	41	163
(b) 放射温度計等による窑内温度計測技術開発	11	11	1	0	0	22
合計	191	200	145	151	144	832

* 四捨五入の関係で、合計の合わないところがある

5-4 変化への対応

特になし

6. 費用対効果

6-1 費用対効果

本研究開発は低炭素社会に向けた次世代型セメント製造プロセスの開発であり、将来的には実用化し国内セメント製造全般に普及することを目指す。独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が制定した「革新的セメント製造プロセス基盤技術開発」基本計画によれば、本基盤技術が実用化しエネルギー原単位 8%削減が実現した場合、我が国のセメント業界全体に普及すれば、製造プロセスへの投入エネルギーを原油換算で年間約 38 万 kL（暫定値）低減させることが期待でき、本プロジェクトの予算規模（H22～H26）約 7.2 億円に比べて十分な効果が得られるものと考えられる。

	2020 年	2030 年	2050 年
セメント生産量※ ¹	5,621 万 t※ ³	5,521 万 t※ ⁴	5,521 万 t※ ⁴
消費エネルギー※ ²	486 万 kL	477 万 kL	477 万 kL
省エネ効果 = 477 × 8%			約 38 万 kL

※1：H21 年 8 月 平成 21 年 8 月 26 日公表（長期エネルギー需給見通し(再計算)について）より

※2：H21 年 2 月 地球温暖化問題に関する懇談会 中期目標検討委員会(第 4 回)より

※3：H25 年 1 月 セメント協会の低炭素社会実行計画より

※4：※1 における 2020 年数値(6,699 万 t)を※3 における 2020 年数値(5,621 万 t)に置換え、その減少率を※1 における 2030 年数値および 2050 年数値に適用して表記した。

(参考) 用語解説

■ セメント

用語	定義
セメント	水と反応して、硬化する鉱物質の微粉末。
セメントクリンカー (又はクリンカ)	セメントの原料をキルンで焼成した塊状のもの。
ポルトランドセメント	水硬性のカルシウムシリケートを主成分とするクリンカに適量のセッコウを加え、微粉碎して製造されるセメント。
普通ポルトランドセメント	一般用途に用いる汎用性のあるポルトランドセメント。
早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメントの3日強さを1日で発現するセメント。緊急工事や寒冷地での冬場の工事などに使用される
混合セメント	ポルトランドセメントに、高炉スラグ微粉末、シリカ質混合材、フライアッシュなどの混合材をあらかじめ混合したセメント。

■ コンクリート

用語	定義
モルタル	セメント、水、細骨材及び必要に応じて加える混和材料を構成材料とし、これらを練り混ぜその他の方法によって混合したもの、又は硬化させたもの。
コンクリート	セメント、水、細骨材、粗骨材及び必要に応じて加える混和材料を構成材料とし、これらを練り混ぜその他の方法によって混合したもの、又は硬化させたもの。
フレッシュコンクリート	まだ固まらない状態にあるコンクリート。
LBF	Long Bench Flume (ロングベンチフリューム)、主に圃場整備事業の農地造成における小用水路に使用される。また、法尻等に設ける側溝、法面の集排水等にも使用される。コンクリートベンチフリュームは JIS A 53723 に規定されている。ロングベンチフリュームは据付手間や漏水の軽減のために、通常のベンチフリュームよりも製品延長が長く (4 m) になっている。

■ クリンカ鉱物および水和生成物等

用語	定義
エーライト	セメントクリンカーを構成する主要な化合物の一種で、理想組成は $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_3\text{S})$ で表される。短期・長期に渡る強度発現を担っている。
ビーライト	セメントクリンカーを構成する主要な化合物の一種で、理想組成は $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_2\text{S})$ で表される。エーライトに比べて反応速度が遅く、長期に渡る強度発現を担っている。水和熱が小さい特徴を持つ。
アルミネート相	セメントクリンカーを構成する化合物の一種で、間隙相物質の一つ。理想組成は $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_3\text{A})$ で表される。水和直後から反応し、モルタル・コンクリートのフレッシュ性状や凝結などに影響を及ぼす
フェライト相	セメントクリンカーを構成する化合物の一種で、間隙相物質の一つ。理想組成は $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{C}_4\text{AF})$ で表される。
$\text{C}_{11}\text{A}_7 \cdot \text{CaF}_2$	化学式で $11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$ と表される水硬鉱物で、急硬性を示す。
アウイン	通常のセメントクリンカーには含まれないが、原料中に多量の CaSO_4 を添加するなどの条件によってセメントクリンカー中に生成させることができる。化学式では、 $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$ で表され、海外ではカルシウムサルホアルミネートと表記されることが多い。またイーリマイトとも表記される。
Na_2Oeq	全アルカリ量 (%) = Na_2O (%) + $0.658\text{K}_2\text{O}$ (%) で表される。コンクリートのアル

または R_2O 、全アルカリ量、アルカリ総量	カリ骨材反応と関連が高いため、ポルトランドセメントは JIS で 0.75%以下に定められている。
ig.loss または強熱減量、LOI(Loss On Ignition)	一般に 1000℃前後の規定温度で試料を加熱し、結晶水や揮発成分の離脱による質量の減少分を百分率で示した値。セメントでは風化の程度を表しており、ポルトランドセメントは JIS で 5.0%以下に定められている。
insol または不溶残分、インソール	試料 1g を塩酸 (1+1) 10ml で溶かし、未溶解部分をさらに炭酸ナトリウム溶液 (5%) 50ml で溶解したときに残ったものを百分率で示した値。セメントにおいては、不溶残分は添加されているセッコウや混和材などに含まれる。
f.CaO またはフリーライム、遊離石灰	未反応の CaO のこと。クリンカ焼成管理において、焼成反応の完結の程度を見る指標として重要であり、適正値は 0.2～1.0%の幅を持つ。焼成が不十分な際に多くなり、コンクリートに膨張性亀裂を生じさせる原因となる。
脱炭酸	セメントの主原料である石灰石に熱を加え CO_2 を揮発させること。
固溶	固体結晶中に他のイオンが溶解すること。格子点にある原子の一部を異種原子で置換する置換固溶と、格子の空隙に異種原子が不規則に介在する侵入固溶がある
水和物	水と反応したもの。例えば、珪酸カルシウム水和物 (C-S-H ゲル)、エトリンガイト、モノサルフェートなど。
エトリンガイト	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31 \sim 33H_2O$ で表される化合物で、セメント中のセッコウとアルミネート相が反応してできる。
モノサルフェート	セメントの水和物の名称。エトリンガイトとアルミネート相が反応してできる化合物
ストラトリンガイト	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$ で表される化合物で、通常のセメントには生成せず、 Al_2O_3 を多く含有する特殊なセメントで生成する。アウインセメント中では、 C_2S と水酸化アルミが反応してできる。

■ 混和材料

用語	定義
混和材料	セメント、水、骨材以外の材料で、コンクリートなどに特別な性質を与えるために、打込みを行う前までに必要に応じて加える材料。
混和材 または、混合材	混和材料の中で、使用量が比較的多く、それ自体の容積がコンクリートなどの練上がり容積に算入されるもの。
フライアッシュ	微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから集塵器で捕集されるアッシュ。それ自体は、水硬性をもたないが、水の存在のもとで水酸化カルシウムと常温で反応して不溶性の化合物を作って硬化する鉱物質の微粉末の材料。
高炉スラグ微粉末	溶鉱炉で銑鉄と同時に生成する熔融状態の高炉スラグを水によって急冷し、これを乾燥・粉砕したもの、又はこれにセッコウを添加したもの。
LSP	Lime Stone Powder、石灰石微粉末

■ 混和剤

用語	定義
化学混和剤	コンクリートに混和することで、流動性の改善、凝結・硬化時間の調整などコンクリートの諸物性を改善するために用いる薬剤の総称。比較的少量の添加で効果を発揮するため、完成したコンクリートの容積として算入する必要がない。
減水剤	セメント粒子表面に負の電荷を与え、粒子を分散させることにより流動性を高める作用をもち、単位水量を低減させることができる。ポリカルボン酸系、ナフタリン系、アミノスルホン酸系などが使用される。
高性能減水剤	通常の減水剤よりも高い減水効果をもち、単位水量をさらに低減することができる。ナフタレンスルホン酸系、ポリカルボン酸系などが使用される。

AE 助剤	コンクリートに混和させることで、多数の微細な独立した空気泡を一様に分布させることができる。コンクリートの打設作業の能率や凍結に対する抵抗性を向上させる作用をもつ。樹脂系、アルキルベンゼンスルホン酸系などが使用される。
遅延剤	コンクリートの凝結を 2 時間程度遅らせるもので、暑中コンクリートの施工やコールドジョイントの防止に使用される。フッ化物、リン酸塩、ホウ酸塩などの無機物や、糖類、リグニンスルホン酸、クエン酸、グルコン酸など各種の有機酸またはその塩が使用される。

■ 骨材

用語	定義
骨材	モルタル又はコンクリートつくるために、セメント及び水と練り混ぜる砂、砂利、砕砂、砕石、スラグ骨材、その他これらに類似の材料。
細骨材	10mm 網ふるいを全部通り、5mm 網ふるいを質量で 85%以上通る骨材。
粗骨材	5mm 網ふるいに質量で 85%以上とどまる骨材。
砂	自然作用によって岩石からできた細骨材。

■ コンクリート配合及び物性に関する用語

用語	定義
強さまたは強度	圧縮や曲げなどの外力に抵抗できる程度。JIS 規格ではコンクリートの場合には強度、モルタルやペーストの場合には強さと表される。
密度	セメント、混和材などの粉体の質量をその絶対容積で除した値。
粉末度	セメント、混和材などの粉体の細かさ。
凝結	セメントに水を加えて練り混ぜてから、ある時間を経た後、水和反応によって流動性を失い、次第に硬くなる現象。
単位水量	フレッシュコンクリート 1m ³ 中に含まれる水量。
水セメント比	フレッシュコンクリート又はフレッシュモルタルに含まれるセメントペースト中の水とセメントとの質量比。
スランプ	フレッシュコンクリートの軟らかさの程度を示す指標の一つ。スランプコーンを引き上げた直後に測った頂部からの下がりで表す。
ブリーディング	フレッシュコンクリート及びフレッシュモルタルにおいて、固體材料の沈降又は分離によって、練混ぜ水の一部分が遊離して上昇する現象。
空気量	コンクリート中のセメントペースト又はモルタル部分に含まれる空気泡の容積の、コンクリートの全容積に対する百分率。
断熱温度上昇	断熱状態におけるコンクリート内部の温度上昇のこと。ダムなどの大型の構造物では、内部で発生したセメントの水和熱の放熱ができず、温度応力によりひび割れが発生する可能性がある。
乾燥収縮長さ変化	硬化したコンクリート又はモルタルが乾燥によって収縮する現象。
凍結融解(凍害)	コンクリートが受ける劣化現象の一つ。寒冷地のコンクリートは、コンクリート中の水分が凍結し、その氷圧のため組織に微細なひび割れが生じる。長期にわたる凍結と融解の繰り返しによってコンクリートが徐々に劣化する。
中性化	硬化したコンクリートが空気中の炭酸ガスの作用を受けて次第にアルカリ性を失っていく現象。
促進中性化試験	硬化したコンクリートの中性化に対する抵抗性を相対的に評価する試験。通常よりも高い CO ₂ 濃度の環境下に試験体を置き、試験体の中性化速度から抵抗性を評価する。

■ セメントの製造に関する用語

用語	定義
セッコウ	クリンカを粉砕してセメントを製造する際にクリンカに対し数%添加される。急結を防止し、凝結を適切に制御する役割を果たす。

キルン	セメントの原料を焼成する回転窯。
ミル	セメントの原料などを粉状に粉碎する機械。
仕上げ粉碎	セメント製造の最終工程。クリンカと石膏とを混合粉碎し、目標の SO_3 量や比表面積に調整する。
プレヒーター または、予熱器	セメントの原料をキルンに入れて焼成する前に、あらかじめキルン排熱や仮焼炉によって熱を上げておく装置。
SP キルン	予熱器であるいくつかの熱交換器（サイクロン）を備えたキルン。
NSP キルン	SP キルンの予熱器に加えて、クーラ排熱を利用した仮焼炉（Calciner）を設けてさらに予熱機能を強化したキルン。キルン方式の中では最も熱効率が高い。
クリンカクーラ または、クーラ	キルンから排出された高熱のクリンカを冷却する装置。
AQC	Air Quenching Cooler（エアクエンチングクーラー）。空気との熱交換によりクリンカーを冷却する装置。高温の焼成物に冷風を送り、急冷してクリンカーを冷却する空冷式冷却機。焼成物がクーラグレー特上を移動しており、この下部に設置された複数の空気室から冷却空気がグレー特の孔を通して供給されることにより焼成物を冷却する。
コーチング	キルン内の高温焼成部でセメント原料から揮散した成分（塩素、アルカリ、硫黄など）が、低温部に付着析出した化学物。
アルカリ	主にナトリウム、カリウムをいう。
モジュラス	化学成分係数値。
（焼成）熱量原単位	セメント（またはクリンカ）1 トンを製造するのに要する原燃料由来の熱量。
理論（焼成）熱量原単位	クリンカ焼成反応を完結させるために理論的に必要な熱量。実際の焼成熱量はさらに放散熱、排ガス・クリンカ持去り熱などが加わる。
電力原単位	セメント 1 トンを製造するのに要する電力。
HM(水硬率)	$\frac{\text{CaO} - 0.7 \times \text{SO}_3}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$
SM(珪酸率)	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$
IM(鉄率)	$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$
LSF(石灰飽和度)	クリンカ中の酸性成分 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 と結合できる最大必要な CaO 量(MgO 量) $\frac{\text{CaO} (+ 0.75 \text{ MgO})}{0.028 \text{ SiO}_2 + 0.018 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.0065 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$
ノルム計算 （ボーグ式）	対象とするものの化学組成から、一般的に生成する鉱物の構成量を計算により求める方法。セメントでは一般的にボーグ式が用いられることが多い。
リートベルト解析	セメントクリンカーを粉末 X 線回折により分析し、測定された X 線回折強度が対象鉱物の体積に比例することを利用したリートベルト法により、クリンカ中の構成化合物の定量を行うこと
窯前	キルン出口部
焼点温度	キルン内クリンカ温度（最高温度部）
キルンフッドスロート部	クリンカクーラからキルンまでの連結部分
クリンカ焼成度 (f-CaO)	クリンカ鉱物生成後の残存 CaO （酸化カルシウム）
窯尻	キルン入口部

原料 HM(水硬率)	送入原料の成分比 (=CaO/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃))
キルンセル	キルンの外殻 (厚さ 50mm 程度の管状鉄板)

■ 計測

用語	定義
スペクトル	スペクトルという言葉にはいろいろな意味が含まれるが、本文においてはキルンから放出される光のうち波長に従って連続的に変化する連続スペクトルである熱放射スペクトル、原子に特有の不連続な線スペクトルである原子スペクトル、分子に特有の不連続な帯スペクトルである分子スペクトルを意味する。
輝度、または、放射輝度	ある面積から放出される光線の強度。単位は、単位立体角あたり、単位投影面積あたり、単位時間あたりのエネルギー。SI 単位では $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ 。特定の波長における輝度は、分光放射輝度といい、単位は、 $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$ 。
放射率	加熱された物体の輝度 L と、同温度の黒体の輝度 L_B との比 L/L_B 。
単色放射温度計	物体の熱放射の輝度を計測して温度を算出する放射温度計の一種で、特定の波長の分光放射輝度を利用して温度を算出する温度計測装置。分光放射輝度から温度を算出するのにプランクの放射則*を使うため、物体の放射率が定まらなと温度を算出することができない。 * $L(\lambda, T) = \varepsilon \times (2C_1 / \lambda^5) \times [1 / \{\exp(C_2 / \lambda T) - 1\}]$ $L(\lambda, T)$: 分光放射輝度、 ε : 放射率、 C_1 : 放射の第1定数、 C_2 : 放射の第2定数、 λ : 波長、 T : 加熱された物体の温度
二色放射温度計	物体の熱放射の輝度を計測して温度を算出する放射温度計の一種で、波長 λ_1 における分光放射輝度 L_1 と波長 λ_2 における分光放射輝度 L_2 の比 L_1/L_2 を利用して温度を算出する温度計測装置。分光放射輝度比から温度への変換に、2つの波長における放射率が等しいと置いてプランクの放射則から導いた $T = \{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1) / \{\ln(L_1/L_2) + 5\ln(\lambda_1/\lambda_2)\}\}$ を使うため、2つの波長における放射率が同じであれば放射率が不明でも温度を算出することができる。

■ シミュレーション

用語	定義
シミュレータ	現実的に実験することが困難な場合に、その仮想的なモデルを作成して模擬的に実験するソフトウェア
パラメータ	ソフトウェアの動作条件を与えるための情報
燃焼空気比	微粉炭等が燃焼する際、実際に使用される空気量と理論空気量との比。
リーク	SP 内部が負圧であるため、設備の隙間から漏れ入る空気
酸素富化	燃焼用供給空気の酸素濃度を高めることで、排ガス量の低減を図る技術
クーラー効率	クーラーに投入される熱エネルギーの内、熱エネルギー回収ができる割合
アスペクト比 L/D	ロータリーキルンの [(長さ L) / (直径 D)] で表され、キルンのサイズを表す指標。現在運転されているセメント用ロータリーキルンで (14~20) 程度
仮焼炉焚比	NSP キルンで使用される熱エネルギーに対して、仮焼炉側で使用される熱エネルギー比
流動層	上向きにガスを噴出させることによって、固体粒子をガス中に浮遊させる層
移動層	固体粒子とガスの接触によって熱移動や化学反応などを行わせる充填層