

革新的セメント製造プロセス基盤技術開発 の概要

平成27年10月15日

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. プロジェクトの概要
2. 目的・政策的位置付け
3. 目標
4. 成果、目標の達成度
5. 事業化、波及効果
6. 研究開発マネジメント・体制等
7. 費用対効果
8. 中間評価の対応状況

1. プロジェクトの概要

概 要	○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%を占めている。 ○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が、更なる省エネ・低炭素化に向けた取組が求められている。 ○このため、本プロジェクトでは、セメント製造プロセスで最もエネルギーを消費するクリンカの焼成工程において、焼成温度低下等を可能とする革新的な製造プロセスの基盤技術の開発を行い、我が国セメント産業の一層の省エネ・低炭素化を図るもの。
実施期間	平成22年度～平成26年度(5年間) *ただし、平成22年度はNEDO事業として実施。
予算総額	総額7.2億円(補助(補助率:2/3)) (平成22年度:1.4億円 平成23年度:1.6億円 平成24年度:1.6億円 平成25年度:1.4億円 平成26年度:1.2億円)
実 施 者	宇部興産(株)、住友大阪セメント(株)、太平洋セメント(株)、三菱マテリアル(株)
統括リーダー	平尾 宙 太平洋セメント(株) 中央研究所

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

● エネルギー関係技術開発ロードマップ

25. 革新的セメント製造プロセス

当該技術を必要とする背景

○セメント産業では1970年代以降省エネ設備等の導入が進み、1990年代には世界最高水準のエネルギー効率に達している。その後も産業廃棄物のエネルギー代替利用など、一層の省エネ化を図ってきているが、既存技術による省エネはほぼ限界に近い状態である。

○エネルギー多消費産業であるセメント産業は、我が国産業部門におけるCO2排出量が鉄鋼、化学などに次ぐ排出量で、約4%を占めており、更なる省エネを進めていく必要がある。

○そのため、設備によらず更なる省エネを推進するためには、セメント製造プロセスで最も熱エネルギー消費の多いクリンカ焼成工程を改善することが効果的であることから、省エネ型の革新的製造プロセス技術の開発が必要である。

当該技術の概要及び我が国の技術開発の動向

○2010年度より「革新的セメント製造プロセス基盤技術開発」事業において、クリンカ焼成工程の焼成温度の低下を主とする省エネ型セメント製造技術の開発を行っている。

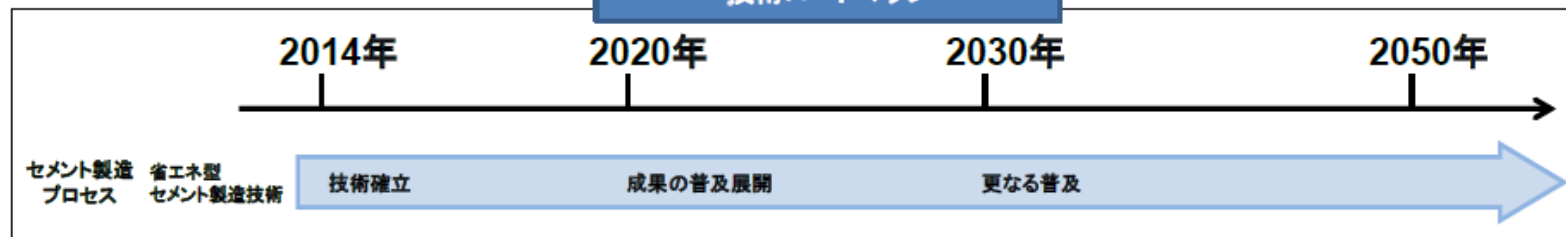
○2014年度までに省エネ型セメント製造技術を確立し、それ以降、実機による実用化検討を行った後、2020年以降より導入可能な工場から順次普及展開を図っていく。

導入に当たっての制度的制約等の社会的課題

○新プロセスにより製造されるセメント製品の原料の調達、品質・コスト競争力の確保、流通網の整備。

○新プロセスにより製造されるセメント製品に関する規格の整備。

技術ロードマップ



備考(海外動向、他の機関における取組)

○一部の諸外国において、省エネ化が可能となるようなセメント規格の改訂が見られるものの、原料として廃棄物等の使用を進めつつ高品質を維持する省エネ型セメント製造技術の開発は行われておらず、諸外国をリードする省エネの取組として進めていく。

● 長期エネルギー需給見通し(関連資料)
省エネルギー施策の1つとして、本技術開発が上げられている

産業・転換部門

業種	省エネルギー対策名	導入実績	導入・普及見通し	省エネルギー	内訳		概要
		2012FY	2030FY	2030FY	うち電力	うち燃料	
窯業・土石製品製造業	従来型省エネルギー技術の導入 排熱発電 スラッグ粉砕 エアーム式クーラ セパレータ改善 堅型石炭炉	—	—	2.1	0.8	1.3	粉砕効率を向上させる設備、エアーム式クーラ、排熱発電の導入等のベストプラクティス技術の最大導入に努める。
	熱エネルギー代替廃棄物(廃プラ等)利用技術の導入	熱エネルギー代替 廃棄物使用量 166万t	熱エネルギー代替 廃棄物使用量 168万t	1.3	-0.1	1.4	従来の設備を用いて熱エネルギー代替として廃棄物を利用する技術。
	革新的セメント製造プロセスの導入	0%	30.0%	15.1	—	15.1	セメント製造プロセスで最もエネルギーを消費するクリンクの焼成工程において、焼成温度低下等を可能とする革新的な製造プロセス技術。
	ガラス熔融プロセスの導入	0%	5.4%	5.0	-0.6	5.6	プラズマ等による高温を利用し、融解にガラス原料をガラス化することで効率的にガラスを気中で熔融し、省エネを図るプロセス技術
	窯業・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	—	古紙パルプ工程において、古紙と水の攪拌・古紙の溶解を従来型よりも効率的に進めるバルバーを導入し、稼働エネルギー使用量を削減する。
	高温高圧型黒液回収ボイラの導入 ※	49%	69%	5.9	—	—	濃縮した黒液(パルプ黒液)を噴射燃焼して蒸気を発生させる黒液回収ボイラで、従来型よりも高温高圧型で効率が低いものを更新時に導入する。
	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 高度制御・高効率機器の導入 動力系の効率改善 プロセスの大規模な改良・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)	—	—	高効率熱交換器の導入、コンピュータによる高度制御の推進、ポンプ等動力源の高効率モーターへ置き換え、装置間の配管新增設による原料油ダイレクトチャージ等によりエネルギー消費量を削減する。
	石油製品・石炭製品製造業 計			77.0	—	—	

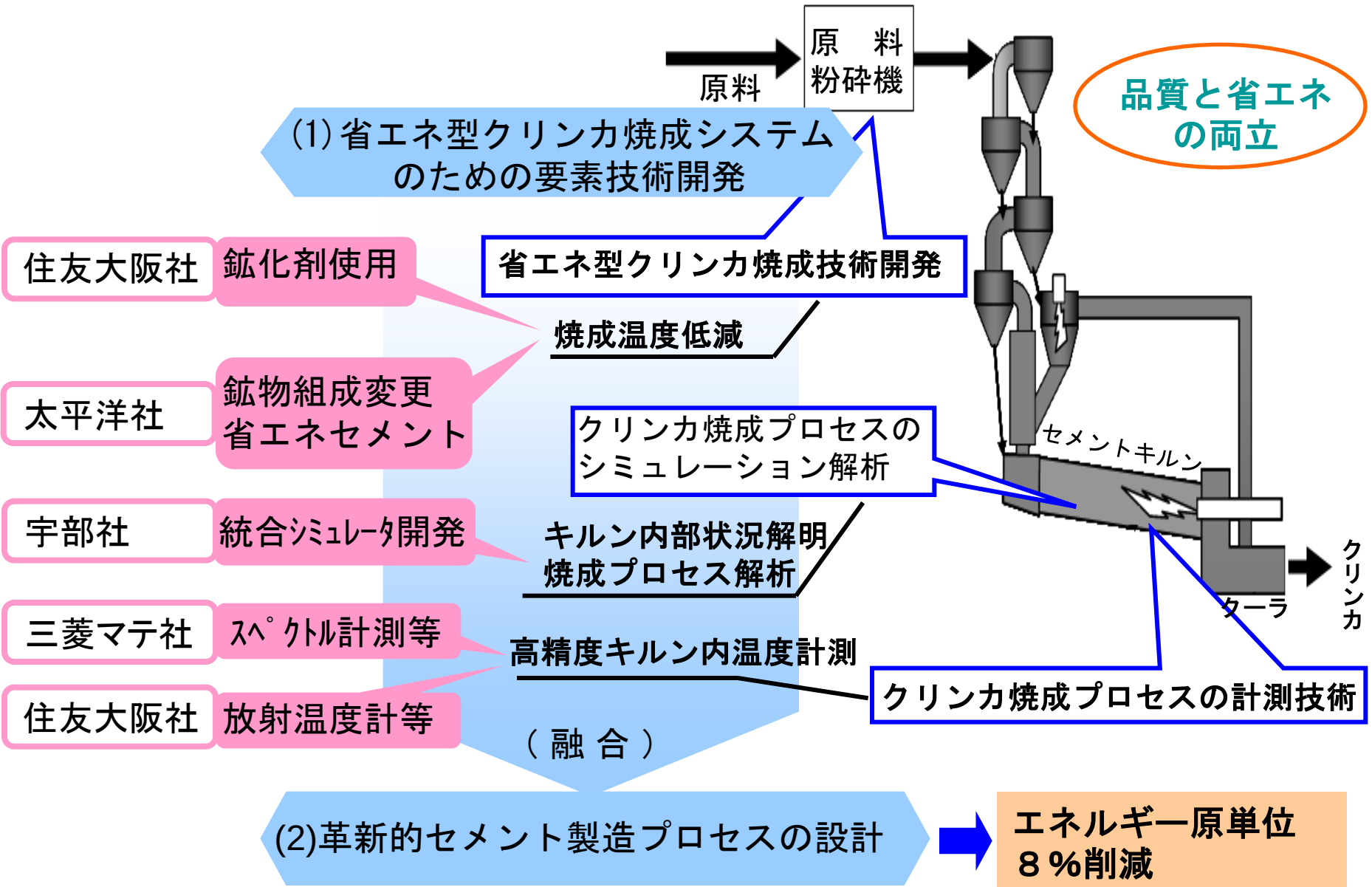
窯業・土石製品製造業、パルプ・紙・紙加工品製造業、石油製品・石炭製品製造業における [] の対策は、各業界における2020年度以降の低炭素社会実行計画において位置付けられているもの。

※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。

3. 目標（全体）

全体目標	妥当性・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。 [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。	平成21年度NEDO事前研究によると、鉍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。 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鉍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。

(参考) 全体目標達成に向けた要素技術開発



3. 目標（要素技術）

（鉍化剤／放射温度計等：住友大阪セメント(株)）

要素技術	中間評価時点の目標・指標	事後評価時点の目標・指標
(1) 省エネ型クリンカ焼成技術開発 (a) 鉍化剤使用によるセメントクリンカ低温焼成技術開発	実験室規模の電気炉で選定された鉍化剤種類、量、割合及び、鉍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する。	実機適用への課題を抽出する。
(3) クリンカ焼成プロセスの計測技術開発 (b) 放射温度計等によるキルン内温度計測技術開発	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。	（中間評価時点で終了）

3. 目標（要素技術）

（鉱物組成変更／省エネセメント：太平洋セメント(株)）

要素技術	中間評価時点の目標・指標	事後評価時点の目標・指標
(1) 省エネ型クリンカ焼成技術開発 (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クリンカ開発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する。 イ) ビーライトーアウイン系クリンカ開発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する。	（中間評価時点で終了） 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を抽出する。
(1) 省エネ型クリンカ焼成技術開発 (c) 省エネセメントの開発	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。	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検討する。

3. 目標（要素技術）

（統合シミュレータの開発：宇部興産(株)）

要素技術	中間評価時点の目標・指標	事後評価時点の目標・指標
(2) クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析	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。	①統合シミュレータの高度化として、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する。 ②焼成プロセスの省エネポテンシャル評価

3. 目標（要素技術）

（スペクトル計測：三菱マテリアル(株)）

要素技術	中間評価時点の目標・指標	事後評価時点の目標・指標
(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。 ①実機キルン内スペクトル計測等による温度計測技術を選定する。 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を確立する。 ③実機キルンにおける実証試験を行う。	次の2つの方法に対して実機での検証を行い、工場への適用の可否を判断する。 ①測定器1により「クリンカと、クリンカの放射輝度を測定する測定器2の間に存在するダストの放射輝度」を測定した結果を用い、測定器2の測定値からダストの影響を除いて、高精度クリンカ温度計測を行う方法。（ダストキャンセル法） ②放射温度計の導光部である光ファイバーを高温融体に挿入することで、放射率の測定が不要かつ、極めて容易に繰返し測定ができる温度測定手法。（光ファイバー法）

4. 成果、目標の達成度(全体成果)

材料技術					
↓項目/材料→		鉍化剤使用	ヒート活性化	70℃ヒート系	高 C3A 系
省エネ型クリンカー焼成技術開発	材料設計	F=～0.6% SO ₃ =～4.5%	C ₂ S 単相 (Ba 添加)+OPC	70℃ 40%	C ₃ A=13～16%
	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 ・クリン内物質循環把握 ・品質設計	—	・コスト、実績等 ・クリン内物質循環把握 ・品質設計	・規格 ・品質設計
		<u>限定的可能</u> <u>(第Ⅰ期)</u>	—	<u>将来</u> <u>(次世代)</u>	<u>近い将来</u> <u>(第Ⅱ期)</u>

シミュレーション 技術
・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
・低温焼成型クリンカーの実機焼成での検証

計測技術
・放射温度計測定精度比較(単色 Si 優位) ・熱電対によるクリン内部クリンカ温度の連続測定・有効性検証 ・ダストの影響を除いた新規計測方法の理論の確立
・新規計測方法の精度向上と実機での検証 ・クリン内部クリンカ温度測定データの活用

4. 成果、目標の達成度（鉍化剤：住友大阪セメント(株)）

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
中間評価時点			
(1) 省エネ型クリンカ 焼成技術開発 (a) 鉍化剤使用による セメントクリンカ低温 焼成技術開発	ラボ試験で選定された鉍化剤添加条件でテストキルンを用いて製造試験を行い、焼成温度低減(100℃)を図るための焼成条件を明確化。	・ラボ試験では焼成温度低減(100～150℃)効果のある鉍化剤種類、量、割合、鉍物組成を把握した。 ・テストキルンを用いた製造試験では、焼成温度低減(100℃)を図るための焼成条件を明確化した。	達成
事後評価時点			
(Ⅰ)(i)(b)(ア) 鉍化剤 添加クリンカ (Ⅱ)(i)(a)(ア) 第Ⅰ 期省エネセメント(鉍 化剤添加クリンカ使 用)の品質設計	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、鉍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コンクリート耐久性や試験施工の実施により物理特性を明確化した。	達成

鉍化剤使用による低温焼成技術開発 (実施内容の概略)

実験室規模電気炉



- ・実験室規模の電気炉を用いて焼成温度低減効果のある鉍化剤(F, SO_3)について、添加量、配合割合および焼成条件を検討

H22～24

テストキルン



- ・実験室規模電気炉で選定された鉍化剤、量、割合を用いてテストキルンを用いた製造試験実施

ミニプラント



- ・2次燃焼炉(仮焼成)を追加したテストキルンを用いた製造試験実施

H25～26

大型テストキルン

- ・原料投入量を大幅に増加させてクリンカ試製造、コンクリート物性確認、コンクリート製品(LBF)製造

実験室規模の電気炉およびテストキルンで選定された鉍化剤種類、量、割合を用いてミニプラントで焼成試験実施

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≒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 :1.5~2.0% 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	ブレーン比表面積3300cm ² /gと粉砕しモルタルおよびコンクリート性状評価、鉍化剤添加により強度は増進傾向、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、大きな変化は認められない。

鉍化剤使用による低温焼成技術開発

i. ミニプラント焼成試験

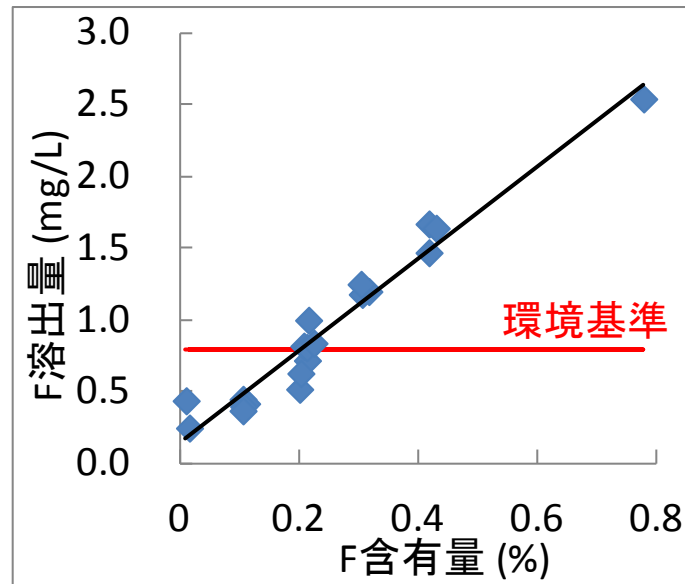


図1. F含有量とF溶出量の関係 (モルタル28日、環告46号準拠)

⇒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

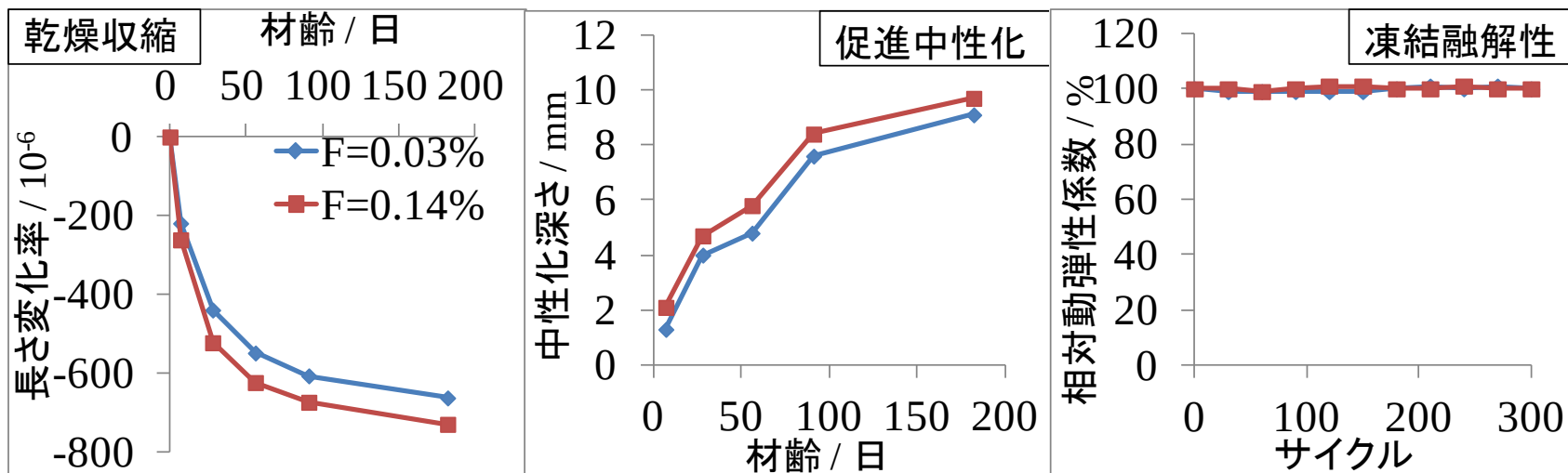
原料投入量を大幅に増加させてクリンカ試製造、モルタル・コンクリート物性確認

組成範囲	普通ポルトランドセメント組成
焼成条件	f.CaO 0.8%以下
鉍化剤添加量	F(フッ素):0.15% SO ₃ :1.5%
物理性状	ブレーン比表面積3300cm²/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。

鉍化剤使用による低温焼成技術開発

ii. 大型テストキルンによるクリンカ試製造

●大型テストキルンクリンカの物性(乾燥収縮、中性化、凍結融解)



⇒乾燥収縮への影響小

⇒中性化への影響小

⇒凍結融解への影響無し

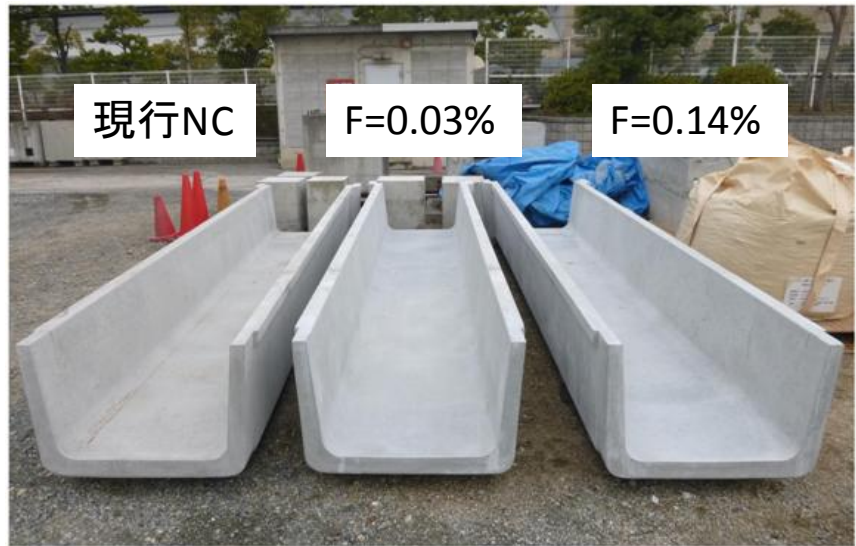
鋅化剤使用による低温焼成技術開発 iii. コンクリート打設試験

iii. コンクリート打設試験(コンクリート製品製造)

大型テストキルン試製クリンカを用いロングベンチフリューム(LBF)を製造

●製品の曲げ試験結果

	ひび荷重	破壊荷重	圧縮強度
	kN	kN	N/mm ²
現行品	59.5	114.6	51.6
NK	57.2	113.7	46.8
鋅化剤	58.3	113.3	54.8



●コンクリート製品外観 (LBF)

- ⇒曲げ試験：鋅化剤添加による影響は無い
- ⇒圧縮強度：F添加により強度増進傾向
- ⇒製品外観：鋅化剤添加による影響は無い

鉍化剤使用による低温焼成技術開発

iii. コンクリート打設試験



コンクリート製品打設状況

⇒製品打設、均し等作業性等において現行品と差異は無い

鉍化剤使用による低温焼成技術開発

iv. まとめ

●鉍化剤添加により焼点温度の低下効果を確認。クリンカ中のF含有量0.2%以上となると、溶出量が環境基準を満たさないことが判明したため、0.15%で焼成試験を実施したところ、焼点温度低下効果はおよそ100℃となり、その時のSO₃含有量は1.0%であった。

●鉍化剤添加クリンカの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であり、大きな影響は考えられない。

●コンクリート耐久性に関しては、乾燥収縮、促進中性化、凍結融解抵抗性に関しては大きな影響は見られず、断熱温度上昇量に関しても普通セメント相当であったが、データ数は少なく、試験は続けていく必要がある。

●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。

4. 成果、目標の達成度 (ビーライトーアウイン：太平洋セメント(株))

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 (b) 鉱物組成 変更による省 エネ型クリン カ焼成技術 開発	《中間評価時点》 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 課題等を明確化する。	・電気炉により、普通ポルトランドセメント 同等品質を目標とする鉱物組成および 焼成条件を明確化した。 ・ミニプラントのテストにより、クリンカの 焼成製造条件を明確化した。 ・L/Dが実機同等のテストキルンにより、 実機製造における焼成面での運転管理 や設備面での課題等を明らかにした。	一部 達成
イ) ビーライト ーアウイン系 クリンカ開発	《事後評価時点》 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 る課題を抽出する。	・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普通セメ ント同等の試製クリンカを得た。 ・試製クリンカは、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、耐久性を評価し普通セメント代替 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焼成温 度制御が、品質面では耐久性および規 格等が課題である。	達成

ビーライトーアウイン系クリンカ開発 (実施内容の概略)

鉱物組成変更の効果および影響

原料 = 石灰石 + 粘土 + 珪石 + 鉄原料

CaCO_3	⇒	CaO	+	CO_2	クリンカ鉱物	初期強度
使用割合		焼成エネルギー		焼成温度		
多い ↓ 少ない		多い ↓ 少ない		高い ↓ 低い	エーライト $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ビーライト $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	高い ↓ 低い

方 策

初期強度向上のためにクリンカ鉱物にアウインを組み合わせる

開発対象

ビーライト(C_2S)およびアウインを主とし、
フェライト(C_4AF)等の少量鉱物を含むクリンカ

ビーライトーアウイン系クリンカ開発 (実施内容の概略)

方策	電気炉		テストキルン／ミニプラント		
目的	<u>鉱物組成および焼成条件が物性に及ぼす影響把握</u>	<u>OPC同等品質達成</u> ・鉱物組成および焼成条件の影響の明確化	<u>実機焼成時の製造条件の明確化</u> ・省エネ効果の確認 ・運転面および設備面での課題抽出	<u>最適アウイン組成でのOPC同等品質達成</u> ・焼成条件の明確化 ・添加剤の検討および最適化	<u>コンクリート評価および諸物性評価</u> ・OPC代替としての実用性確認 ・品質課題の明確化

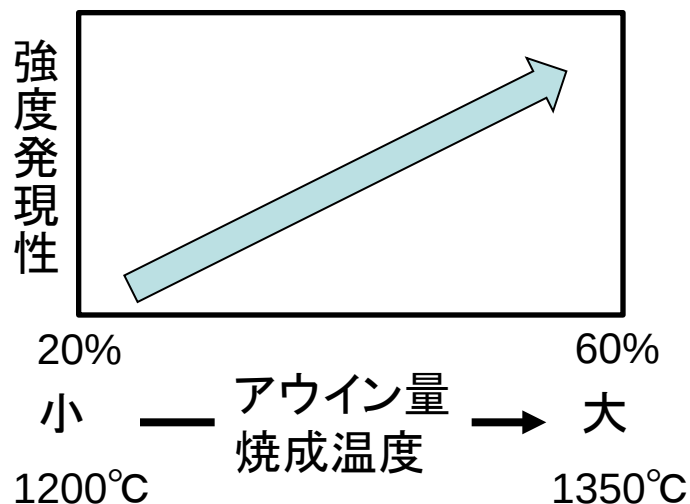


後半2年で実施

- ・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する。
- ・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を抽出する。

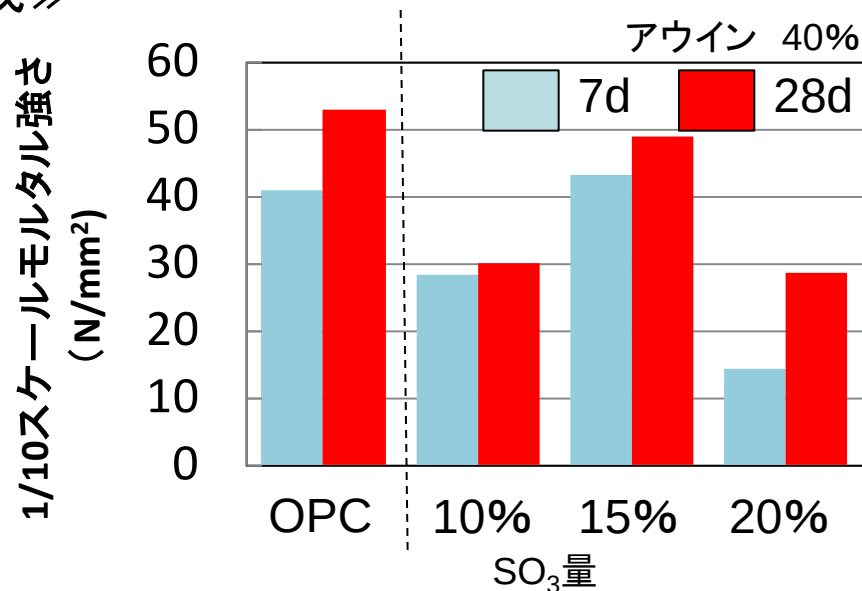
ビーライトーアウイン系クリンカ開発 (実施内容の概略)

《電気炉試験・OPC同等品質の達成》



アウイン量、焼成温度が強度発現性に及ぼす影響

- ・アウイン量アップ
⇒ 強度発現性改善(特に初期)
- ・焼成温度アップ
(アウインが分解する1350°C程度まで)
⇒ ビーライトの反応性改善
→ 強度発現性改善



アウイン40%における強度発現性とセメントSO₃量の関係

- ・石膏添加量(SO₃/Al₂O₃比)を調整
⇒ 強度発現性を調整できる。
- ・アウイン量40%以上でOPC並みの強さを発現。

ビーライトーアウイン系クリンカ開発 (実施内容の概略)

《実機焼成時の製造条件の明確化》

- ミニプラント焼成データを用いてシミュレーションを実施し、その結果からSO₃揮発量から、アウイン量ごとのコーティング付着傾向および焼成エネルギー低減割合を予測した。
- 電気炉およびテストキルン焼成試験結果から得られたアウイン量と強度の関係を整理した。

	コーティング付着	OPCクリンカ比 焼成熱量削減率 (シミュレーション結果より)	強度
アウイン60%	多い  少ない	- 24.8%	高い  低い
アウイン40%		- 21.1%	
普通クリンカ		—	

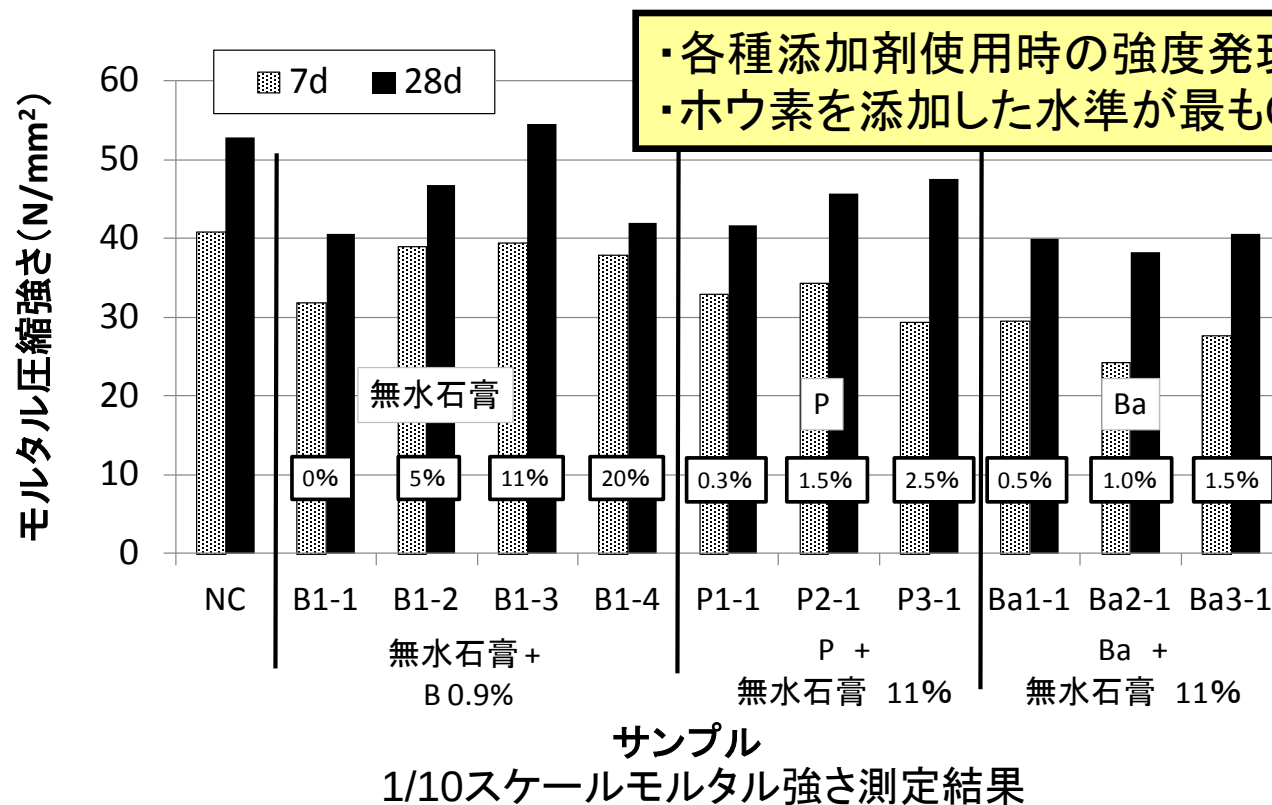
※強度は焼成温度が高いほど高くなる傾向にある。

- 実機での安定製造のためにコーティングを避け、アウイン量を40%以下とし、添加剤(ドーパント)添加による強度向上を図る。
 - ・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。
 - ・アウイン量40%以下でも、キルン内SO₃の循環濃縮によるコーティング生成が予想されるためアウイン量および諸条件の最適化が必要である。

ビーライトーアウイン系クリンカ開発

iii. 低アウイン量（アウイン量40%未満）での検討

《ドーパント石膏添加量の検討》



- ・各種添加剤使用時の強度発現性差異あり。
- ・ホウ素を添加した水準が最もOPCに近い強さを示した。

・ホウ素添加により、 α' -C₂Sが生成



・モルタル強さ向上

・C₂S中へのホウ素の固溶を確認

ホウ素添加前後の鉱物組成（アウイン30% フェライト20%設計時）

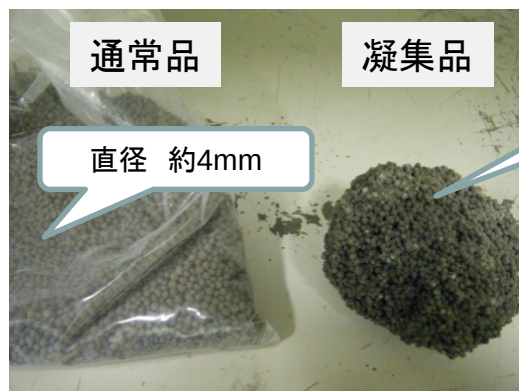
	単位	アウイン	α -C ₂ S	α' -C ₂ S	β -C ₂ S	C ₄ AF	C ₃ A
添加剤有り	mass%	32.8	1.5	37.3	6.4	16.1	2.1
添加剤無し		29.7	0.3	2.0	44.7	17.1	1.7

ビーライトーアウイン系クリンカ開発

iv. スケールアップ実験

《テストキルンでの焼成評価》

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 4.5±0.5% 焼成温度 1350℃	窯尻O ₂ 濃度 4.5±0.5% 焼成温度 1350℃	窯尻O ₂ 濃度 4.5±0.5% 焼成温度 1350℃
運転課題	焼成温度上昇に伴いクリンカが大塊化		

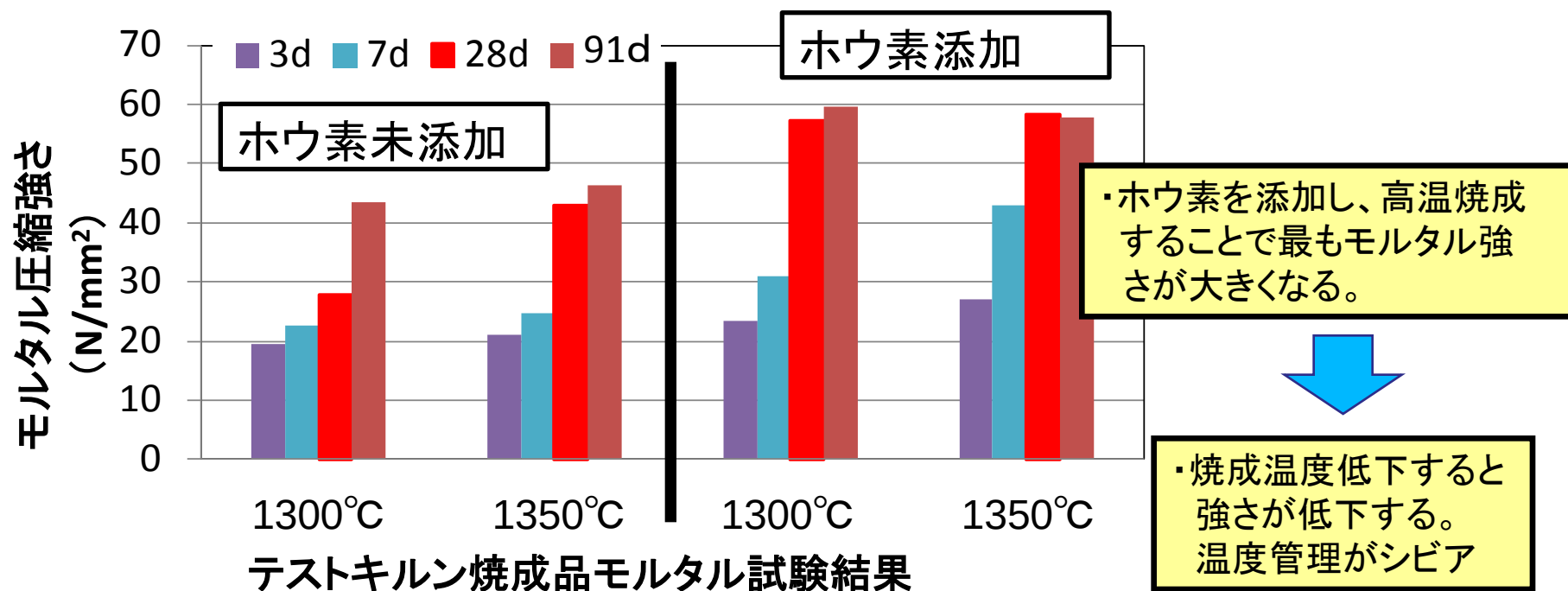


- ・1380℃では写真のように大塊化。
- ・キルン運転中、大塊による輸送システムのトラブルが懸念される。

ビーライトーアウイン系クリンカ開発

v. 物性評価

《テストキルン焼成品のモルタル強さ》



クリンカ 鋳物量	焼成温度 ℃	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○

ビーライトーアウイン系クリンカ開発

V. 物性評価

《テストキルン焼成品のコンクリート耐久性評価》

コンクリート試験結果概略

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% ホウ素有リ	△	△	○	○

○: OPC並み △: OPCよりやや劣る ×: OPCより劣る

- ・ホウ素添加することで、コンクリート耐久性が改善
- ・コンクリート耐久性はOPCより劣るため、耐久性向上の検討を行う必要がある。

ビーライトーアウイン系クリンカ開発

vi. 実機製造に向けた課題

ビーライトーアウイン系 クリンカ利用のメリット	ビーライトーアウイン系クリンカ実用化に向けた課題
・アウイン量30%、C₄AF20% でOPCと比べ約20%削減 (焼成エネルギー削減効果が非常に大きい。)	●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 ・コーチングによるトラブルの懸念 ・焼成温度上昇によるクリンカ大塊化に伴うトラブルの懸念。
	●規格に関する課題 ・現在のOPC規格の範囲外。 ⇒ 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。

焼成エネルギー削減効果は大きく期待される材料であるが、品質および安定製造面での課題が多く、今後さらなる検討の必要がある。

ビーライト-アウイン系クリンカ開発

vii. まとめ

- 電気炉焼成試験により、アウイン量30%、 C_4AF 20%のビーライト-アウインクリンカーを用いて、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: $1350 \pm 10^\circ C$ 、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製造エネルギー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での課題が多く、今後さらなる検討の必要がある。

4. 成果、目標の達成度 (省エネセメントの開発：太平洋セメント(株))

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 (c)省エネセメントの開発	《中間評価時点》 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。	・省エネセメントの設計を高C₃A(+4 %)+混合材10 % (ただし、混合材にLSP5 %が必須)と決定した。	達成
	《事後評価時点》 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検討する。	・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普通ポルトランドセメントと概ね同等、強熱減量の一部規格外、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等が課題である。	達成

省エネセメントの開発 (実施内容の概略)

●省エネセメントの開発

- ・焼成エネルギーの低減および少量混合材の増量により、製造エネルギーを低減させる。
- ・課題：
 - ✓混合材が増えることにより、品質低下が懸念される。
 - ✓クリンカー生産量の減少に伴い、リサイクル使用量が減る。

《開発コンセプト》

- ・クリンカ鉱物中の液相(間隙質)成分の増加により焼成温度低減可能。
 - ・液相成分であるアルミネート相(C_3A)は石灰石微粉末(LSP)との反応性良好。
- ※リサイクル原燃料使用量を増加させるためにも C_3A の増加が好ましい。



高 C_3A クリンカ(低温焼成) + 少量混合材添加 ⇒ 省エネセメント

《開発フロー》

進め方	電気炉	テストキルン	ミニプラント	大型テストキルン
目的	・クリンカ設計	・省エネ効果確認 ・セメント設計(物性確認) ※クリンカ性能向上のための方策の提案	・省エネ効果確認 ・セメント設計(耐久性確認)	・セメント設計 ・コンクリート品質・施工性確認 ※実用化に向けた技術的課題を抽出

省エネセメントの開発 (実施内容の概略)

●使用クリンカー組成(電気炉焼成品)

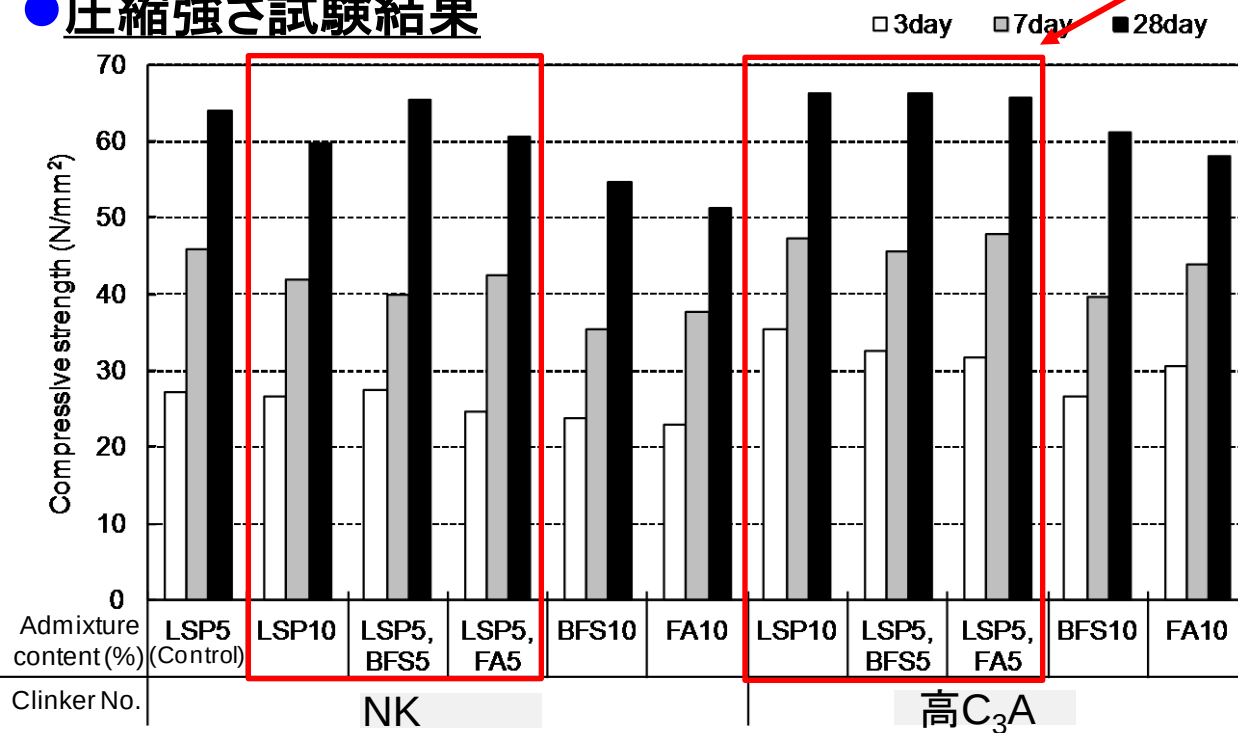
水準	鉱物組成 (Bogue)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
NK	58.3	21.5	9.1	8.7
高C ₃ S	68.7	10.9	9.8	7.9
高C ₃ A	63.1	14.9	11.6	8.7

※略称の説明

・C ₃ S : エーライト クリンカ	・NK : 普通セメント
・C ₂ S : ビーライト ランドセメント	・OPC : 普通ポルト ランドセメント
・C ₃ A : アルミネート 粉末	・LSP : 石灰石微 粉末
・C ₄ AF : フェライト	

全材齢でOPC同等以上

●圧縮強さ試験結果



・高C₃A + LSP (5-10%) で強さは現行OPC同等以上 (高C₃S系よりも強度発現良好)。

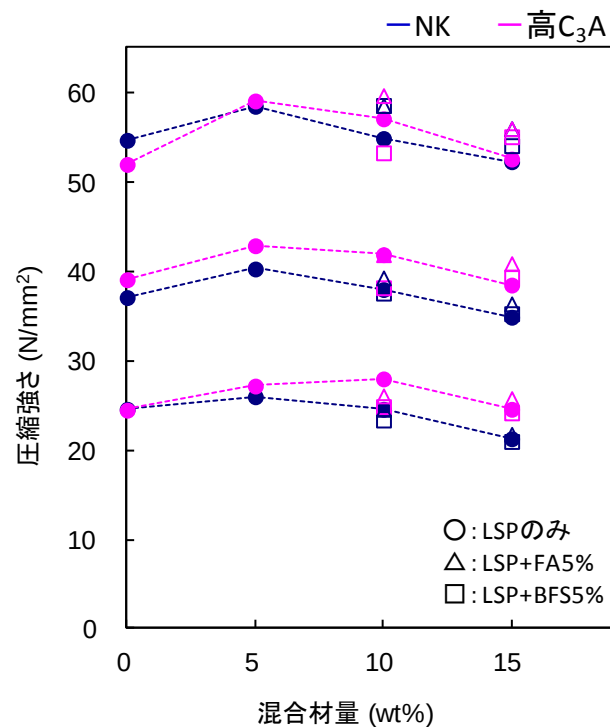
⇒ 高C₃A (+4%) +
LSP (5-10%) を
基本設計に決定

省エネセメントの開発 (実施内容の概略)

● クリンカーの組成および省エネ効果(テストキルン焼成)

水準	Bogue(wt%)				焼点温度 (°C)	焼点低減温度 対blank (°C)	燃料供給量対 blank(%)
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			
NK	61.7	16.5	8.9	9.02	1447	0	100
高C ₃ A	61.5	13.0	12.9	9.2	1432	-15	96.0

● 試製セメントの強さ



テストキルン焼成試験では高C₃A水準はOPCに対し、

- ・焼点温度15°C程度低下
- ・燃料供給量4.0%程度低下

- ・混合材添加はLSPを必須とし、計5-10%程度でOPCと同等品質が得られた。
(強熱減量は一部、規格外。水和熱も若干高め。)

省エネセメントの開発

iii. ミニプラント焼成試験

●クリンカーの組成および省エネ効果(ミニプラント焼成)

水準	モジュラス			Bogue (wt%)			
	HM	SM	IM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
NK	2.07	2.61	1.83	50.3	28.0	9.7	9.5
高C ₃ A	2.04	2.13	2.06	49.2	25.7	12.6	10.3

水準	f.CaO (%)	焼点温度 (°C)	窯尻温度 (°C)	反応塔下温度 (°C)	燃料供給量(L/h)		燃料供給量 対ブランク比(%)
					キルン	2次燃焼炉	
NK	0.46	1452	1000	907	15.35	8.10	100
高C ₃ A	0.54	1449	1033	906	15.38	7.55	97.8

- ミニプラント焼成試験では高C₃A水準はOPCクリンカに対し、
 - ・焼点温度3°C程度低下・燃料供給量2.2%程度低下(テストキルンでは4.0%低下)
 - ・省エネセメントの品質はH24年度の結果と同様にOPC同等であった。
- 焼成時、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が認められた。

省エネセメントの開発

iii. ミニプラント焼成試験

●省エネセメントの耐久性

・使用クリンカー：ミニプラント焼成品 ・混合材：10%以内で適宜混合

水準		中性化抑制	凍結融解	長さ変化 (乾燥収縮)	断熱温度上昇	硫酸塩劣化	
						低温	常温
1	NC(ブランク) (NK+LSP3.5%)	－	－	－	－	－	－
2	NK+LSP10%	◎	○	○	－	○	○
3	NK+LSP5%+FA5%	○	△	○	－	○	○
4	高C ₃ A+LSP3.5%	○	○	○	－	△	△
5	高C ₃ A+LSP10%	◎	◎	○	○	△	△
6	高C ₃ A+LSP5%+FA5%	○	△	○	－	△	△
7	高C ₃ A+LSP5%+GBFS5%	○	◎	○	－	△	△
8	高C ₃ A+FA10%	△	△	◎	－	△	△
9	高C ₃ A+GBFS10%	◎	◎	○	－	△	△
10	高C ₃ A+FA5%+GBFS5%	○	△	○	－	△	△

少量混合材として、LSPをメインとし一部スラグで置換した水準は、いずれの品質項目もOPCと同等以上の結果となった。

※耐硫酸塩性は、OPCよりも劣る結果を確認。

省エネセメントの開発

Ⅳ. 大型テストキルンによるクリンカ試製造

●省エネセメントの物理性状評価

- 使用クリンカー :
 - ・大型テストキルン焼成品
- 使用セメント :
 - ・OPC (LSP:3.5%)
 - ・省エネセメント (高C3A: +4%、LSP:10%)

- ・焼成時にキルン内壁へのコーティングが認められた。
- ・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普通セメントと同等であった。

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

省エネセメントの開発

v. コンクリート打設試験

- ・使用クリンカー : 大型テストキルン焼成品
- ・使用セメント : OPC(LSP:3.5%)、省エネセメント(高 C_3A :+4%、LSP:10%)

試験施工の概要

- ・打設構造体: 1 m^3 ($1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$)
- ・呼び強度 : 27 N/mm^2
- ・スランプ : 18 cm
- ・水セメント比 : 53.5%
- ・試験項目 : フレッシュ性状, コア強度, 温度変化, 目視
- ・試製造 : 生コン工場にて試製造



打設作業の様子

- ・OPCと同等のフレッシュ性状であり、OPCと同等の打込み、充てんが可能であった。
- ・圧縮強度は普通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。



打設構造体の外観

省エネセメントの開発

vi. 実機適用時の課題 / vii. 海外規格・市場調査

【vi. 実機適用時の課題】

クリンカ中の液相量増加 ⇒ キルン内壁へのコーティング付着
(安定運転への懸念)

【vii. 海外規格・市場調査】

●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CO2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。

省エネセメントの開発

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C₃A(+4%) + 混合材10%(ただし混合材にLSP5%が必須)
- 高C₃A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。

4. 成果、目標の達成度 (シミュレーション：宇部興産(株))

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
(2)クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析	《 中間評価時点 》 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。	●セメントプロセス全体シミュレータの開発では、原料余熱工程を含むプロセス全体に拡張したセメント全体シミュレータを製作し、さらに、理想的なプラント検討のための[KilnSimu+(流動層版)]を製作した。 ●このセメント全体シミュレータを使用し、電気炉・実機キルン及びテストキルン実験より得られたクリンカ生成反応パラメータ等のチューニングを行い、特定の実機プラントデータと合致できるようにした。 ●焼成システムを考慮できる統合シミュレータの開発では、[Fluent]を用いた微粉炭燃焼解析を実施し、バーナ燃焼フラム形状およびキルン内温度分布等を予測し、[微粉炭燃焼によるキルン内雰囲気温度分布推算]と[キルン内クリンカ温度分布推算]との連成解析を行い、特定の実機キルン運転実績と合致できるようにした。 ●革新的セメント製造プロセス設計の課題抽出では、上記のシミュレータを用い、既存プラントの省エネルギーに係わる重要因子を抽出し、設備・運転変更への評価を実施した。さらに、クリンカ焼成から見た理想的なプラント設計への指針抽出し、省エネルギーポテンシャル値の予測を行った。	達成

4. 成果、目標の達成度 (シミュレーション：宇部興産(株))

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
(2)クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析	《事後評価時点》 ①統合シミュレータの高度化として、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する。 ②焼成プロセスの省エネポテンシャル評価	●セメントプロセス全体シミュレータの開発および高度化 - 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(鉱化剤、高C₃A、アウイン等)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。 ●焼成プロセスの省エネポテンシャル評価 - 高度化したシミュレータにより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。 ●革新的セメント製造プロセス設計の課題抽出 - 既存および理想プロセスにおける省エネ効果の定量化を行った。	達成

シミュレーション (クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析)

【目標および実施内容】

＜統合シミュレータの開発＞

＜セメント全体シミュレータの開発＞

[KilnSimu]をベースに原料～
クーラー工程まで範囲拡張

[KilnSimu+] 開発

造粒・クーラー二次元化

連成ソフト開発

(熱流体解析ソフト)

[Fluent]

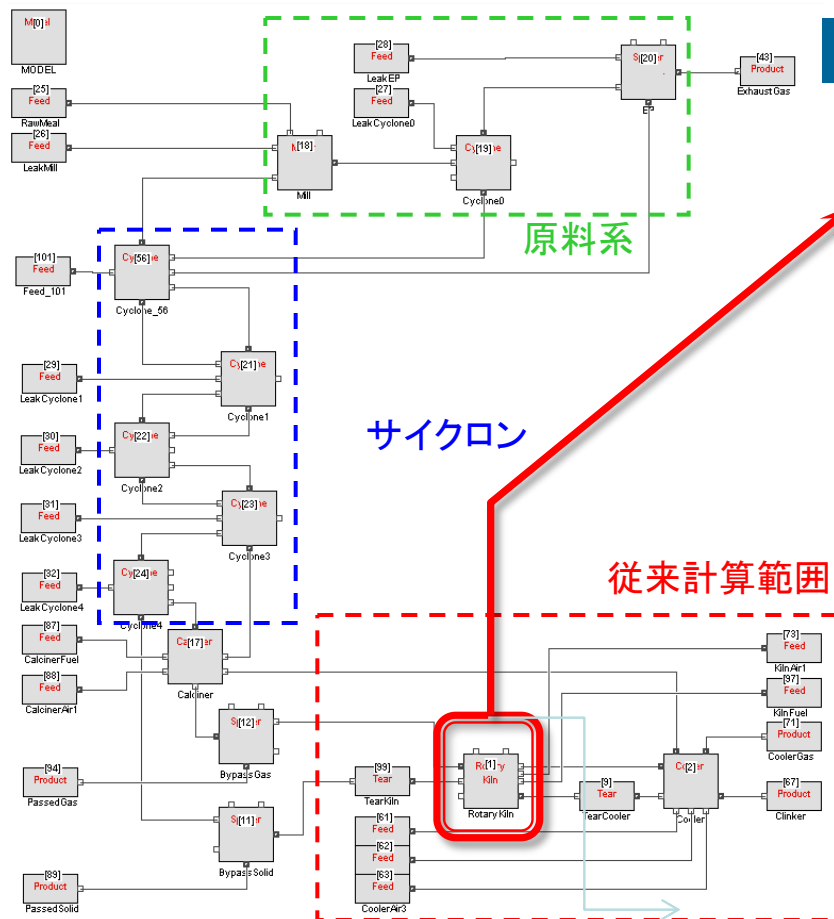
クリンカ生成反応速度実験
融液粘度および表面張力の測定
ミニプラント・実操業プラントデータ

＜革新的製造プロセス設計の課題抽出＞

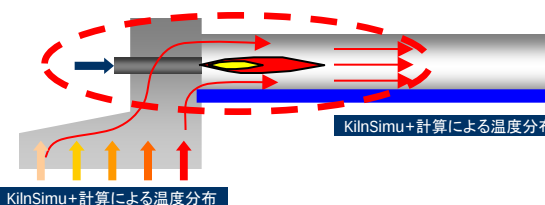
- 既存および理想プロセスにおける省エネ効果の定量化
- 省エネ型クリンカの省エネポテンシャル評価
- クリンカ組成や製造設備等の変更による省エネポテンシャル評価

省エネルギー運転評価/ポテンシャル量予測

シミュレーション 統合シミュレータ開発 (KilnSimu+拡張とFLUENTの連成)



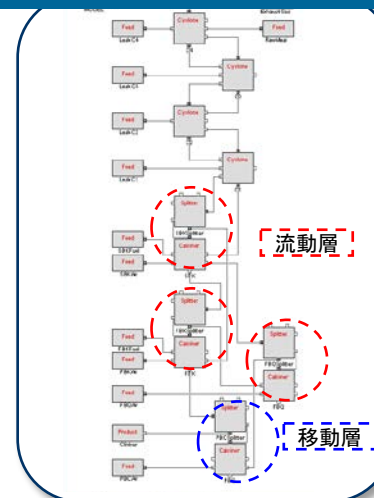
KilnSimu+とFLUENTの連成



KilnSimu+
固相反応を考慮した
原料温度・生成物予測

FLUENT
ガス側
詳細燃焼計算

KilnSimu+による流動層モデル

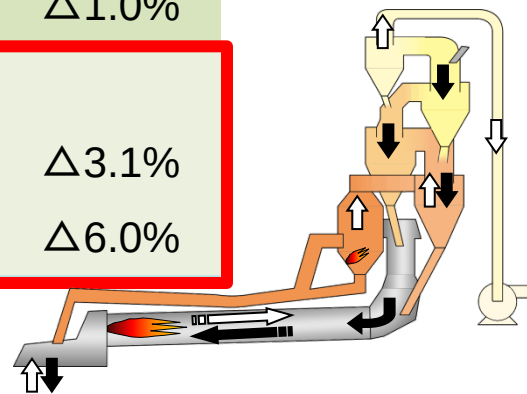


- ❑ 原料予熱工程まで拡張したセメント全体プロセスシミュレータ [KilnSimu+] を開発し、熱流体解析ソフト [FLUENT] との連成を行うことで、詳細な燃焼計算まで考慮できる統合シミュレータを完成させた。
- ❑ 流動層プロセスを考慮できるよう [KilnSimu+] を拡張し、[KilnSimu+ (流動層版)] を開発した。

シミュレーション

[前半3年] 省エネポテンシャル評価

	熱量原単位 (MJ/t)	低減効果 (MJ/t)	低減効果 (%)
SP部リークガスの低減			
現状⇒ゼロへ (25kNm ³ /h削減)	3,756	△67	△1.8%
余剰空気の削減			
燃焼空気比 (空気比1.2⇒1.05)	3,759	△65	△1.7%
酸素富化燃焼(1次空気O ₂ : 21→25%)	3,786	△38	△1.0%
クーラー2次空気・抽気温度変更			
クーラー熱回収効率(57→63%)	3,704	△120	△3.1%
クーラー熱回収効率(57→70%)	3,593	△230	△6.0%



- ❑ クーラー設備改善による熱量原単位の低減は約6%に達するが、その他の項目で大きな改善の期待ができない。
- ❑ 鉱物組成変化による省エネ効果を検討する場合は、クリンカ粒径の小径化等でクーラー効率の悪化も懸念されるため、その影響把握が必要である。

シミュレーション 前半3年まとめ

<成果、目標の達成度>

- 統合シミュレータの開発（全体シミュレータ含）
 - ・ 原料～クーラー工程まで検討できる[KilnSimu+]を開発した
 - ・ [KilnSimu+]と燃焼解析の双方向連成を開発した。
- 革新的セメント製造プロセス設計の課題抽出
 - ・ 省エネ型クリンカの省エネ効果を定量推定した。
 - ・ 既存及び理想プロセスの省エネに関するポテンシャル量を定量化し、プロセス設計の課題の抽出を行った。

ほぼ達成
(双方向連成は変更追加必要)

ほぼ達成

<残された課題>

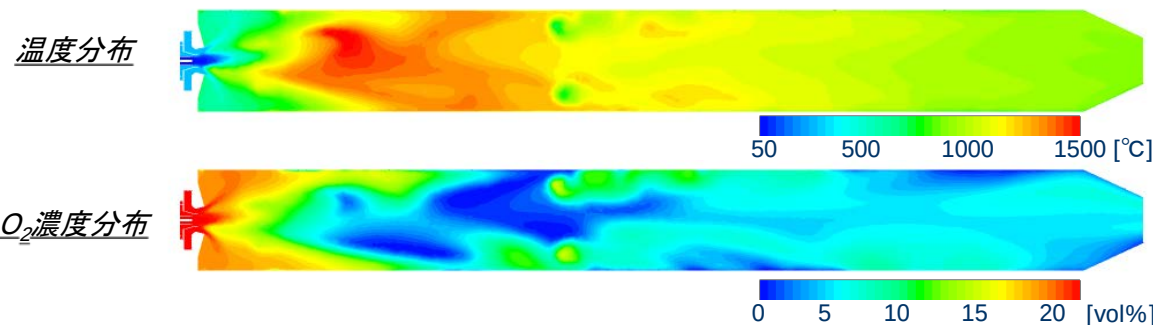
- 本ツールを利用した省エネ検討の更なる深掘り
 - ・ ロータリーキルンでの省エネ評価の精度アップ
 - 設定パラメータのチューニング見直し
 - クリンカ造粒メカニズムの推定とクリンカクーラーモデルの二次元化
＜鉱物組成変更によるクリンカ粒径影響＞
 - 燃焼解析との双方向連成のブラッシュアップ

PJ後半検討予定

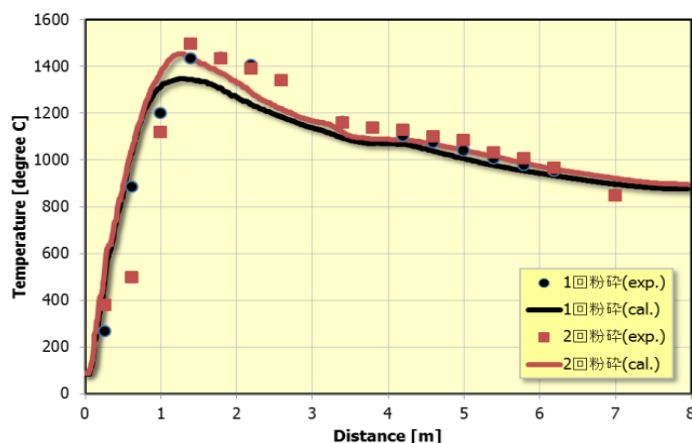
シミュレーション

微粉炭燃焼：実験炉試験

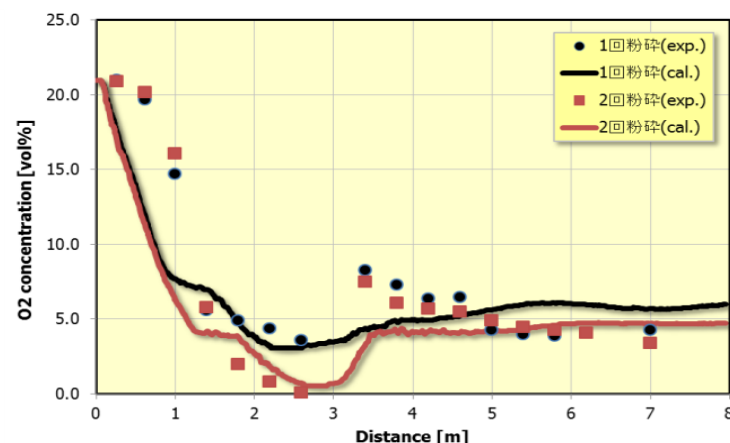
- 微粉炭燃焼計算の精度向上を目的として、一般財団法人 電力中央研究所所有の単一バーナーを有する石炭燃焼試験炉($\phi 0.8 \times 8\text{m}$)にて燃焼試験を実施。
- 粒子径の異なる2水準のオイルコークスを対象として、燃焼影響を評価する。



火炉中心軸上温度分布



火炉中心軸上 O_2 濃度分布



- 石炭種及び粒子径の違いによる温度、ガス濃度分布の結果を得た
- 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。

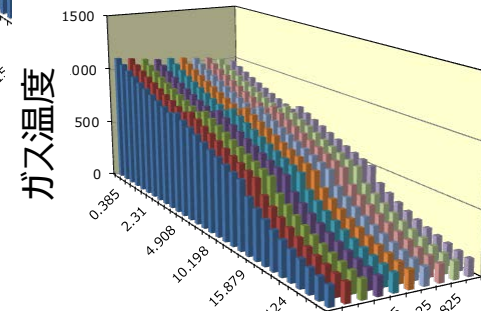
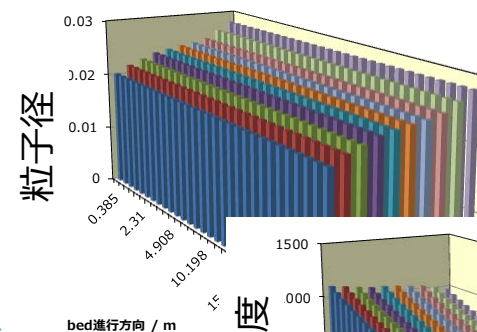
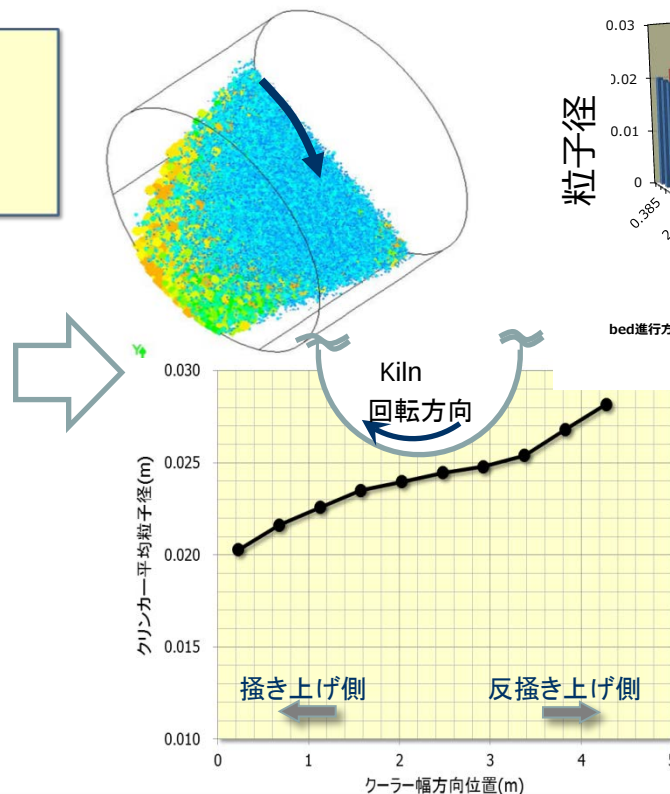
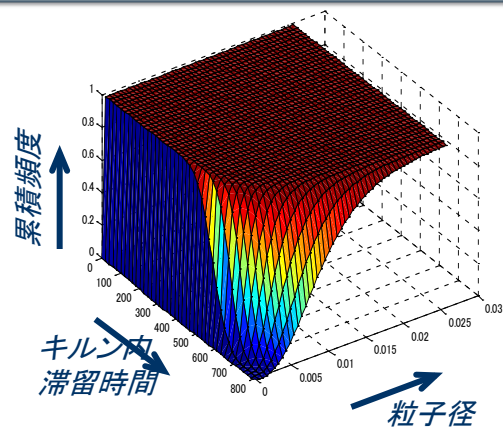
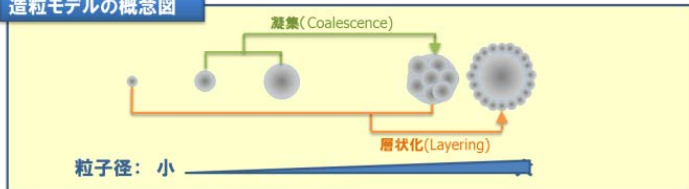
シミュレーション 統合シミュレータ開発（造粒ソフト開発・クーラー二次元化）

造粒モデル

粒子挙動モデル

クーラー二次元化

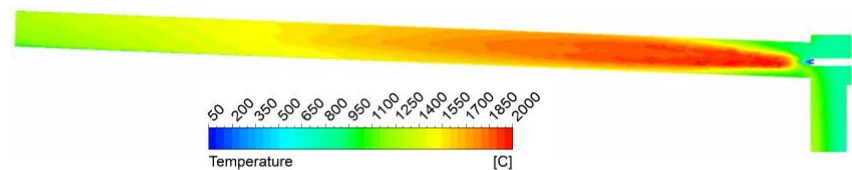
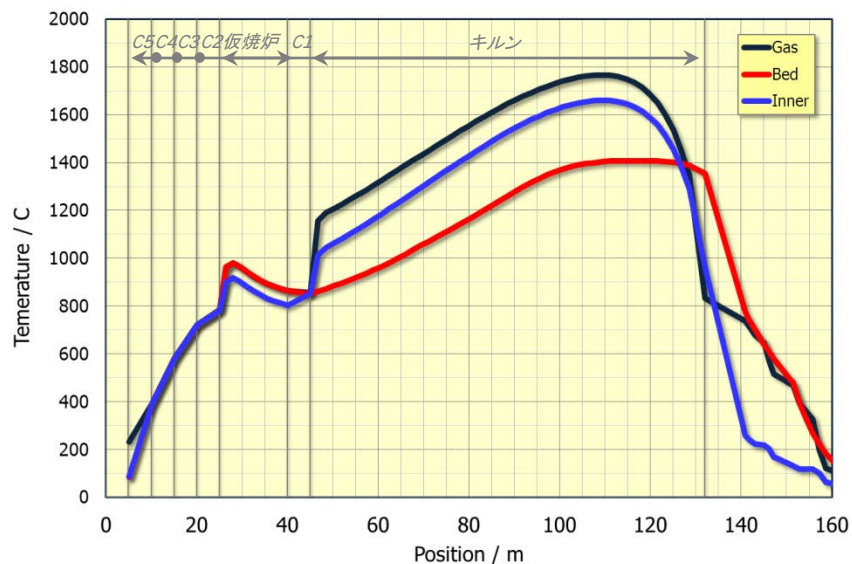
造粒モデルの概念図



温度[°C]	二次空気	抽気
実測値	705	894
1Dモデル	865	1052
2Dモデル	778	897

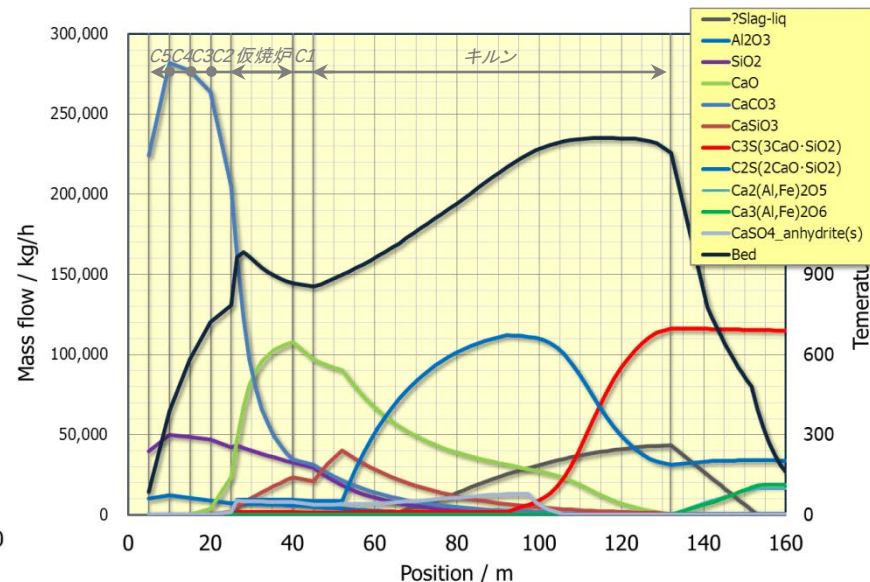
- 焼成プロセスの省エネポテンシャルでは、クリンカクーラーの熱回収効率が大きく影響を及ぼす。そこで、統合シミュレータの一部としてキルン内でのクリンカ造粒および転動による粒子偏析を予想するためのモデルを作成した。
- 粒子の凝集、層状化による造粒をモデル化・チューニングし、クーラー落口の粒子偏析およびクーラー内ガス温度分布を考慮することで二次空気温度等を実測値に近づけることが可能となった。

シミュレーション 実操業キルンモデルの構築



キルン中心断面における温度分布図

- ❑ ガス温度は約1760℃に達し、ベッド温度は最高1400℃強。
- ❑ ベッド温度はキルン口元から約30mの間で保持され、その中でエーライト(C_3S)の生成が行われる。
- ❑ 原料系を含めて、ロータリーキルンによるセメント製造プロセス全体の挙動評価が可能。



		計算値	実機データ
最高ガス温度	℃	1,768	1,395(焼点)
最高ベッド温度	℃	1,409	-
C_3S	%	58.7	53.7
C_2S	%	17.3	23.3
C_3A	%	10.1	9.6
C_4AF	%	8.7	10.5
f.CaO	%	0.4	0.4
熱量原単位	kcal/kg	913	899
	MJ/t	3,824	3,761
C1サイクロン SO_3 濃度 (プラント管理値:<4.5%)	%	2.1	2.6

シミュレーション 革新的製造プロセス設計の課題抽出

$$\begin{aligned}
 \text{[キルン熱量原単位]} &= \text{[クリンカ理論焼成熱等]} + \text{[排ガス顕熱/熱放散等]} \\
 \text{ベースモデル(※) } 3,824\text{MJ/t} &= 1,394\text{MJ/t} + 2,430\text{MJ/t}
 \end{aligned}$$

クリンカ品質変化による燃費影響

- 省エネ型クリンカ焼成
- クリンカ諸率 (HM, SM, IM) 変化

既存プラントの省エネルギーに係わる重要因子の抽出/評価

プラント運転変化による燃費影響

- 既存設備の省エネ ポテンシャル
- 各種プラント条件変更
- 理想プラントの検討と既存プラント比較

クリンカ焼成から見た理想的なプラント設計への指針抽出/評価

(※) 熱量原単位は、低位発熱量を使用し、全ての投入エネルギーを計算

シミュレーション

クリンカ品質変化による燃費影響—省エネ型クリンカ焼成

	最高ベッド温度 (℃)	最高ガス温度 (℃)	熱量原単位 (MJ/t)
普通クリンカ (比較ベース)	1,409	1,768	3,824
鉍化剤 (F:0.1%, SO ₃ =2.0%)	△34	△9	△3.3%
鉍化剤 (F:0.2%, SO ₃ =2.0%)	△64	△46	△4.0%
鉍化剤 (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-アウィン40%	△61	△124	△21.1%

- 鉍化剤添加により、最大6.3%の熱量原単位削減が期待される。
- 高間隙相化による省エネ効果は小さい。
- ビーライト-アウィン系では省エネ効果が大いだが、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。

シミュレーション

クリンカ品質変化による燃費影響－クリンカ諸率変化

クリンカ諸率変化ケースと熱量原単位比較

	諸率			化合物組成				低減効果	
	HM	SM	IM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	[MJ/t]	%
普通クリンカ	2.10	2.49	1.79	53.6	22.8	9.7	9.6	-	-
HM減	1.95	2.50	1.80	37.1	38.8	10.2	10.1	△119	△3.1
SM減	2.10	1.70	1.80	61.2	9.9	12.6	12.5	△22	△0.6
IM減	2.10	2.50	0.80	63.2	15.9	2.1	15.0	△9	△0.2
組合せ	1.95	1.70	0.80	57.0	15.9	2.9	20.4	△49	△1.3

- HMの低下が、最も熱量原単位の低減効果があるが、クリンカ組成を見るとC₂Sの割合がやや大きくなっている。
- 低減効果、クリンカ組成ともに、1次元モデル検討時と同傾向。

シミュレーション 既存設備の省エネポテンシャル

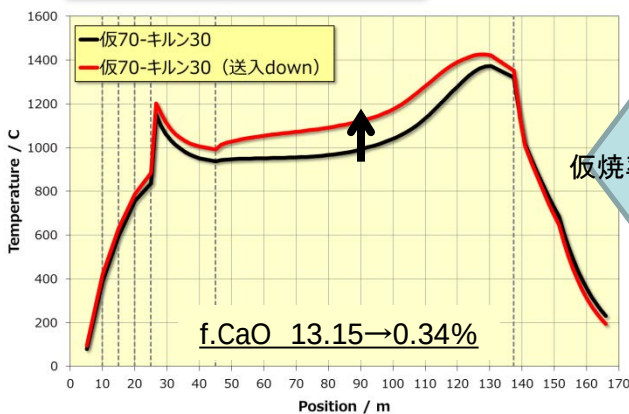
	熱量原単位	低減効果	
	MJ/t	MJ/t	%
◆ SP部リークガスの低減			
現状 ⇒ ゼロへ (25kNm ³ /h削減)	3,767	△58	△1.5
◆ 余剰空気の削減			
燃焼空気比 (1.2 ⇒ 1.05)	3,740	△84	△2.2
酸素富化燃焼 (一次空気O ₂ :21⇒25%)	3,772	△52	△1.4
◆ クーラー二次空気・抽気温度変更			
クーラー熱回収効率 (57⇒63%)	3,716	△109	△2.8
(57⇒70%)	3,608	△217	△5.7

- クーラー2次元モデル化により既存設備の省エネポテンシャルを精査した。
- 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明らかとなった。

シミュレーション 各種プラント条件変更 (1)

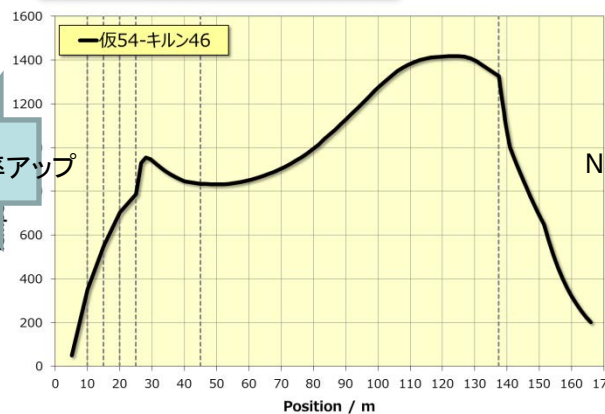
仮焼炉焚比による影響

仮焼炉70:キルン30



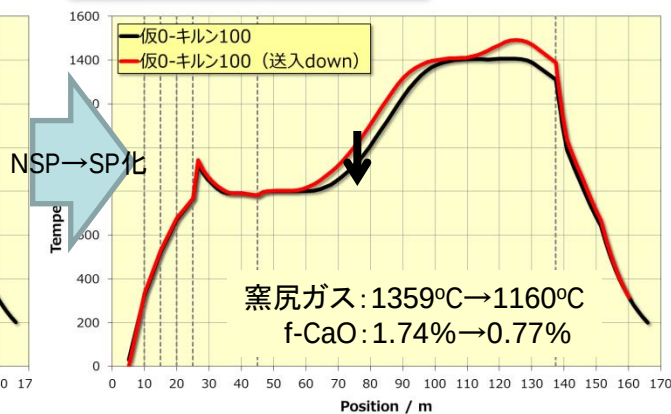
生産量 : 185t/h
熱量原単位 : 3,978MJ/t (▲4%)
f.CaO : 0.34%

仮焼炉54:キルン46



生産量 : 194t/h
熱量原単位 : 3,824MJ/t
f.CaO : 0.41%

仮焼炉0:キルン100

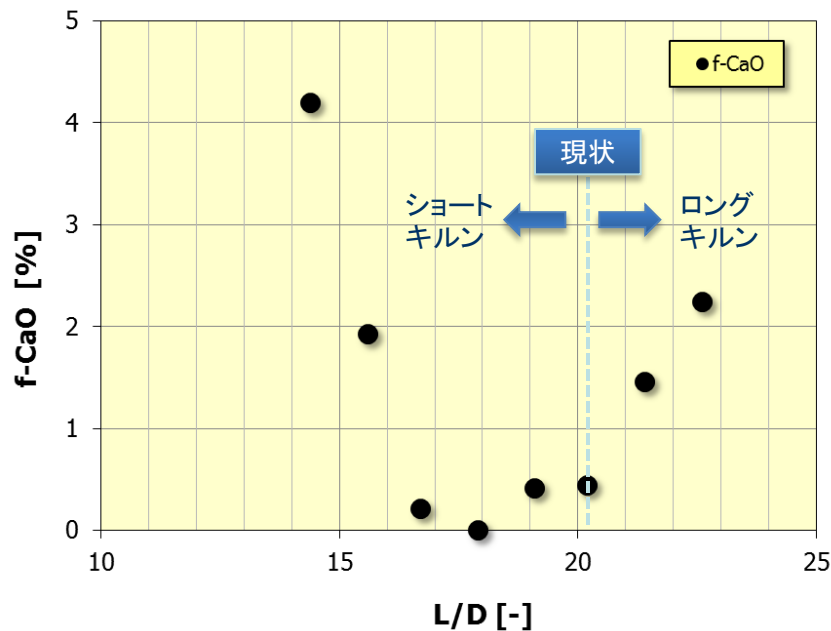


生産量 : 128t/h (▲34%)
熱量原単位 : 4,016MJ/t (▲5%)
f.CaO : 0.77%

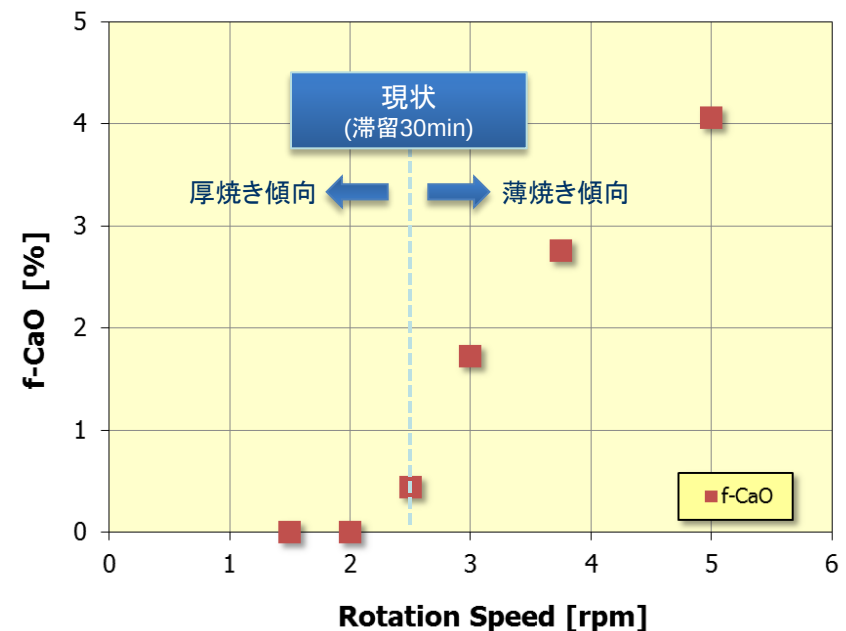
- ❑ NSPプラントからSP運転を想定すると、キルン窯尻ガス温度やf.CaOの上昇により運転困難となり、運転調整すると生産量▲34%、熱量原単位▲5%となる。
- ❑ 仮焼炉側の比率を上げると、キルン側の熱量不足が顕著となり、f.CaOが上昇する。これに対応するために焚量変化・送込減のアクションが必要となり、熱量原単位が▲4%となる。
- ❑ 現状クリンカ焼成における仮焼炉焚比の変更は、熱量原単位の悪化となる。

シミュレーション 各種プラント条件変更 (2)

キルン長(L/D)による影響



キルン回転数による影響



- ❑ キルンを長くすると放熱が大きく、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、キルン回転数を下げ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。

シミュレーション 各種プラント条件変更(3)

石炭種、微粉炭粒子径による影響

	熱量原単位	低減効果	
	MJ/t	MJ/t	%
◆ 微粉炭粒子径変更(瀝青炭)			
$D_{p_{av}}=44\mu\text{m} \Rightarrow 66\mu\text{m}$	4,140	▲316	▲6.8
$\Rightarrow 99\mu\text{m}$	4,384	▲560	▲12.1
◆ 石炭種変更(44 μm)			
瀝青炭 $\Rightarrow$ 半無煙炭	3,905	▲81	▲2.1
$\Rightarrow$ 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・送油量減により、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。

シミュレーション 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

- 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。

(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

- 高度化したシミュレータにより省エネ型クリンカの省エネポテンシャルを再評価した。

②焼成プロセスの省エネポテンシャル評価

- 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。

以上、当初計画の目標は、全て達成した。

4. 成果、目標の達成度（スペクトル計測：三菱マテリアル(株)）

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
(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	《中間評価時点》 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。 ①実機キルン内スペクトル計測等による温度計測技術を選定する。 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を確立する。 ③実機キルンにおける実証試験を行う。	①計測対象である放射源(クリンカ)の温度のみを計測可能とするための装置を製作した。 ②実機キルン内の環境を構成する要因のうち、ガスおよび粉塵の温度と粉塵の濃度の状態を模擬できる炉内環境模擬試験装置の設計製作を行なった。同装置を使い、ガス温度、粉塵温度、粉塵濃度、カリウム添加量、等を変量した実験を行い、熱電対等による実測値との比較から、新しく提案した温度計測方法の妥当性や精度の確認を実行している。 ③温度計測装置は、空冷による冷却で実機キルン周辺の高温環境下で正常に機能することを確認した。温度計測技術については、新しく開発した温度計測技術の妥当性の確認や問題点を抽出するために計測装置の改造を実施している。	一部達成

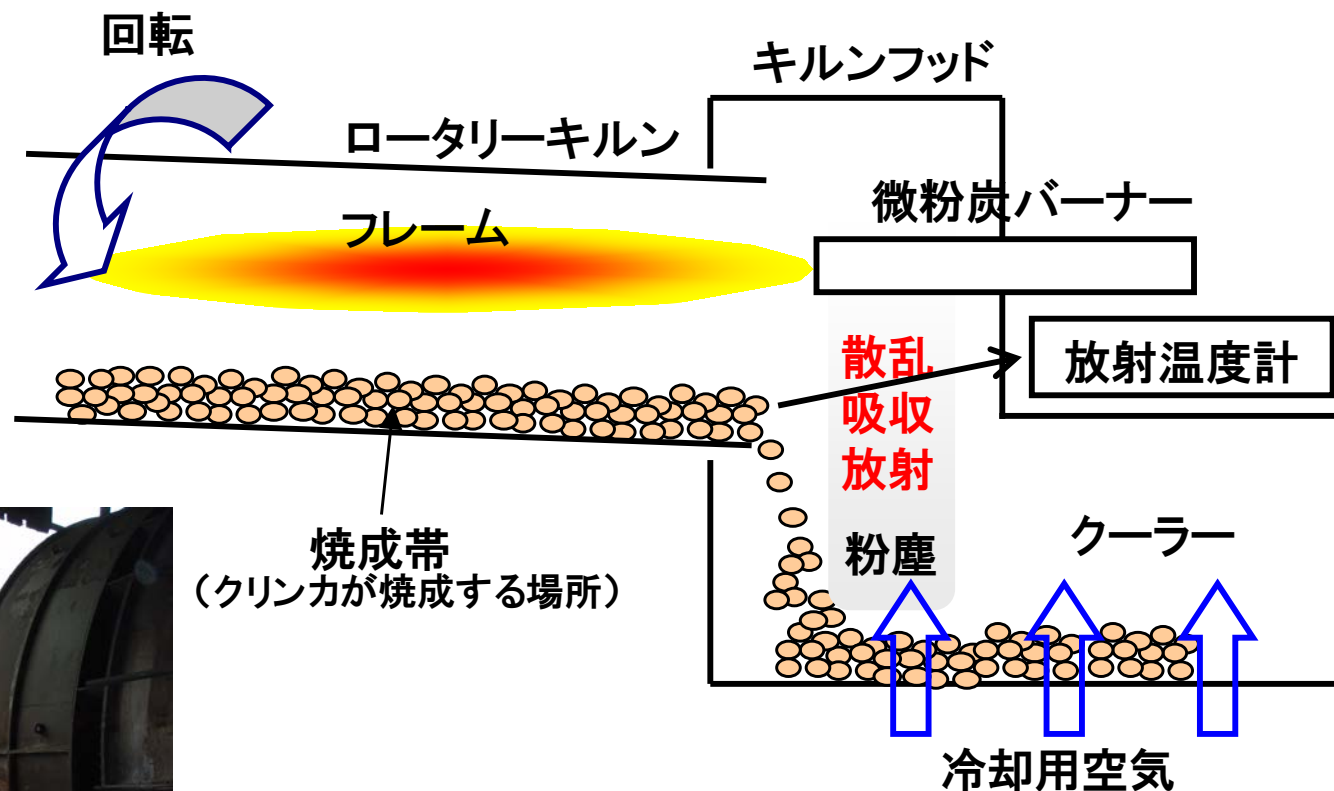
4. 成果、目標の達成度（スペクトル計測：三菱マテリアル(株)）

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
(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	《事後評価時点》 次の2つの方法に対して実機での検証を行い、工場への適用の可否を判断する。 ①測定器1により「クリンカと、クリンカの放射輝度を測定する測定器2の間に存在するダストの放射輝度」を測定した結果を用い、測定器2の測定値からダストの影響を除いて、高精度クリンカ温度計測を行う方法。 (ダストキャンセル法) ②放射温度計の導光部である光ファイバーを高温融体に挿入することで、放射率の測定が不要かつ、極めて容易に繰返し測定ができる温度測定手法。 (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 達成

スペクトル計測による温度計測技術開発 (低温焼成でキルン内の温度が正確に測定できない理由)

焼成温度の低下でクリンカが小径化し、粉塵が増加。

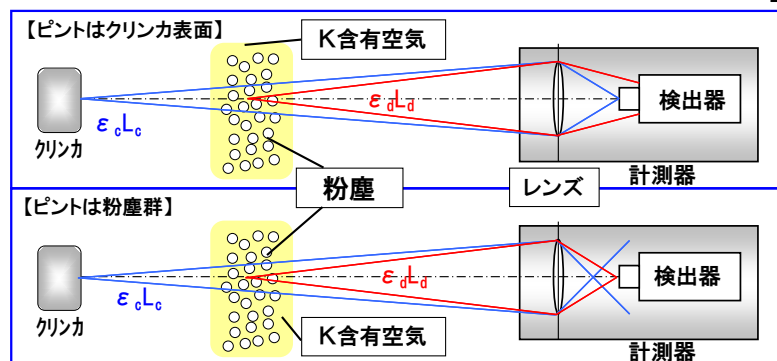
粉塵による散乱・吸収・放射のため、現行の放射温度計による測定精度低下。



スペクトル計測による温度計測技術開発 (前半3年間で検討した温度計測方法)

【開発の方針】放射輝度測定器に入射する、クリンカからの放射輝度と粉塵からの放射輝度を、分離して測定する方法を開発する。

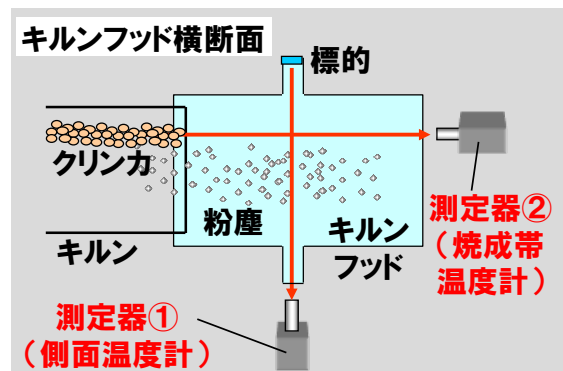
- ①測定器のピント位置で変わる放射輝度測定値の変化量から、クリンカの放射輝度と粉塵の放射輝度を分離する方法。(H22年度～H24年度 中間評価時点で検討していた方法)



検討の結果、
「クリンカと検出器を結ぶ光軸上のみに
粉塵が存在」する場合だけ有効だった
ため、検討を中止した。

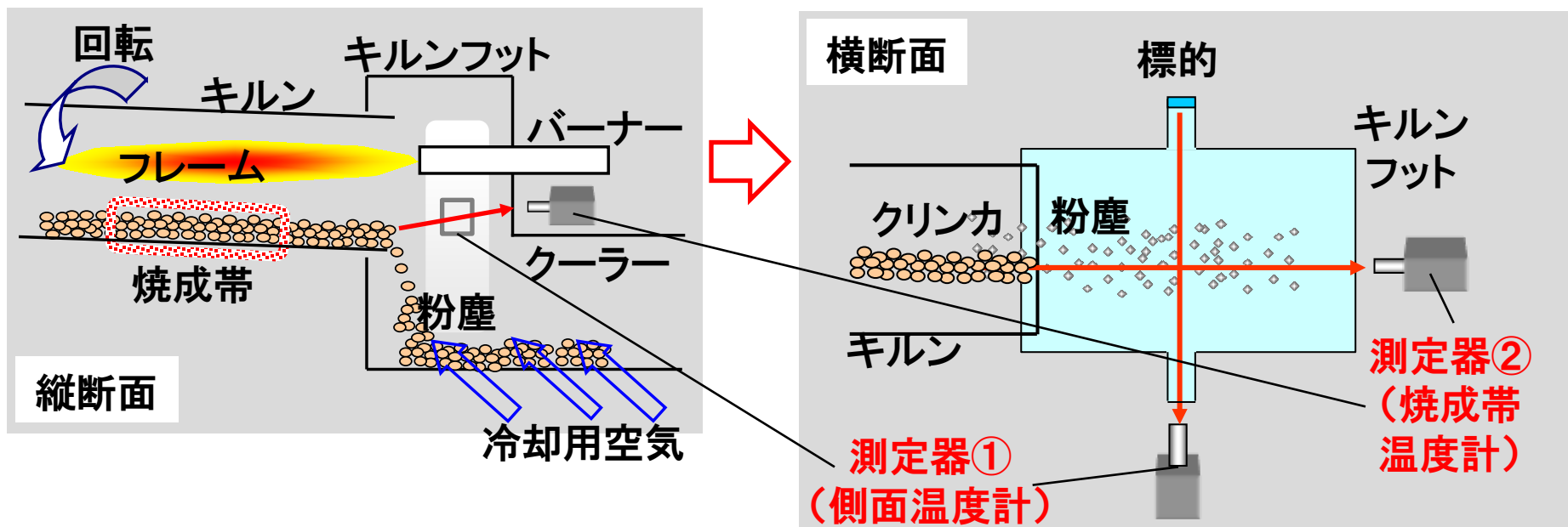
L_c : クリンカの放射輝度 L_d : 粉塵の放射輝度

- ②測定器①により「クリンカと、クリンカの放射輝度を測定する測定器②の間に存在する粉塵の放射輝度」を測定した結果を用い、測定器②の測定値から粉塵の影響を除いて、高精度クリンカ温度計測を行う方法(ダストキャンセル法)。(H24年度 中間評価後に検討した方法)



有効と判断し、
後半2年間での実施項目とした。

スペクトル計測による温度計測技術開発 (ダストキャンセル法 (DC法) の理論)



- 測定器① = (粉塵からの熱放射) + (背景光 ≈ 0)※

$$\text{測定器①} = \text{粉塵濃度} \times \text{粉塵温度} + \text{背景光} \approx 0$$
 - 測定器② = (クリンカからの熱放射) × (粉塵の透過率) + (粉塵からの熱放射)

$$\text{測定器②} = \text{クリンカ温度} \times \text{粉塵の透過率} + \text{粉塵濃度} \times \text{粉塵温度}$$
- 粉塵の影響を除いたクリンカ温度

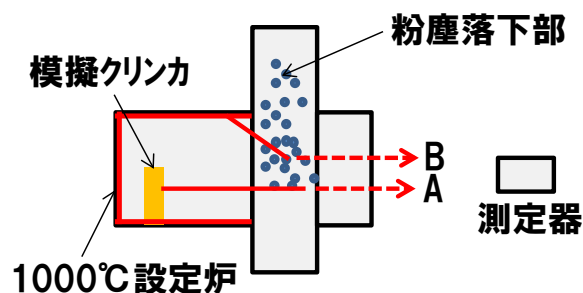
※ (1)標的の熱放射・反射 (2)標的以外から測定器に入る熱放射

DC法では背景光の影響が小さい標的、測定器を使い、計測精度の向上を目指す。

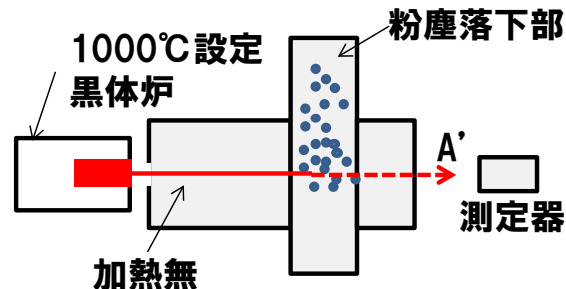
スペクトル計測による温度計測技術開発 (ダストキャンセル法 (DC法) の理論検証 試験方法)

炉内環境模擬試験装置による3つの試験で確認

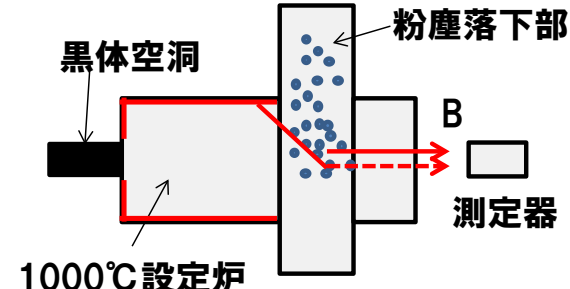
① キルン内のクリンカ温度測定



② クリンカの熱放射の粉塵による透過



③ 粉塵からの熱放射



$$L① = A + B$$

$$= (\text{模擬クリンカの輝度}) \times (\text{透過率}) + (\text{粉塵の輝度})$$

$$L② = A'$$

$$= (\text{黒体炉の輝度}) \times (\text{透過率})$$

$$L③ = B$$

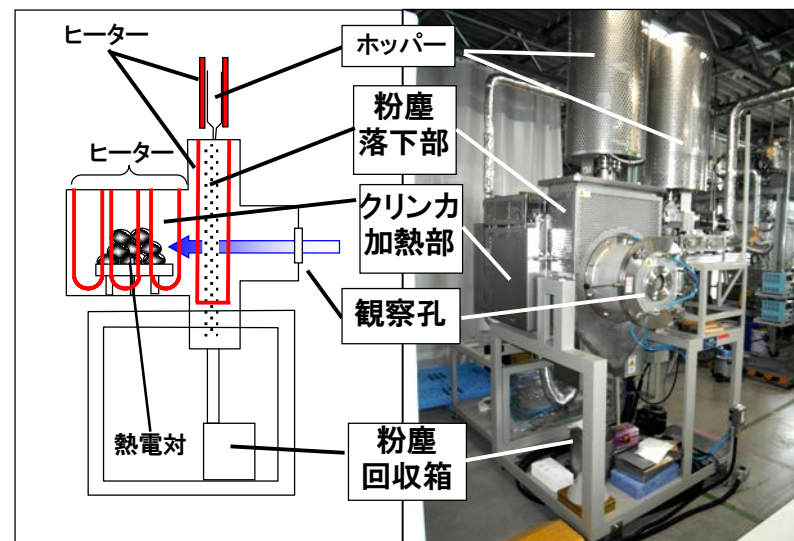
$$= (\text{粉塵の輝度})$$

$$(\text{模擬クリンカの輝度}) = (L① - L③) / (\text{透過率})$$

L① ... 試験①の実測値

L③ ... 試験③の実測値

透過率 ... 試験②から計算



炉内環境模擬試験装置

スペクトル計測による温度計測技術開発 (ダストキャンセル法 (DC法) の理論検証 試験結果)

DC法により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法の理論が成立することが分かった。

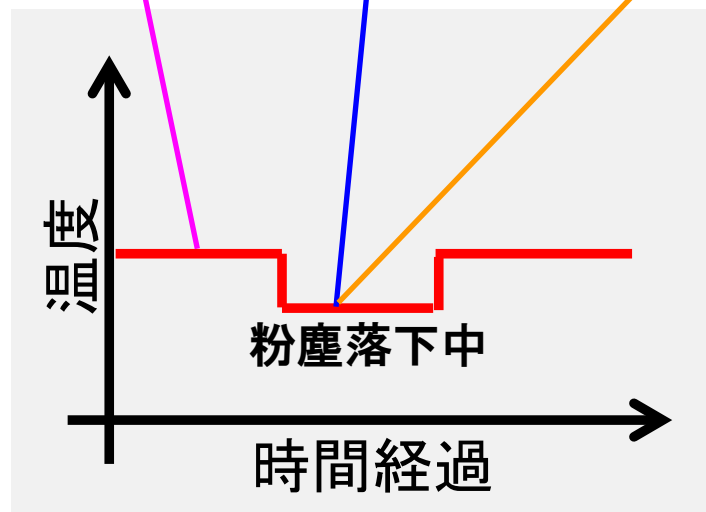
	粉塵加熱	粉塵落下前 (真値)	粉塵落下中	
			DC法適用無	DC法適用有
模擬クリンカ 単色(1.35)温度(°C)	あり(800°C)	1063	1033(-30)	1053(-10)

【仮定】

粉塵による散乱は等方散乱

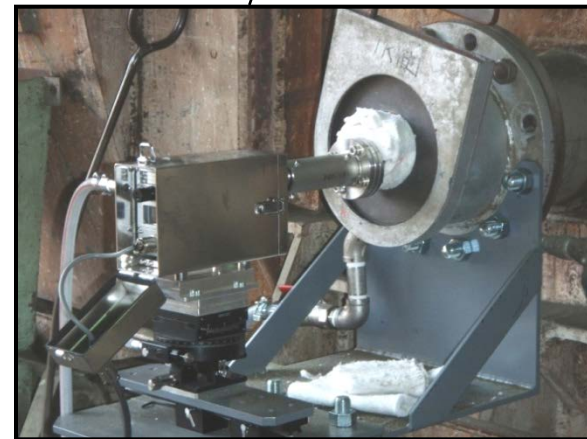
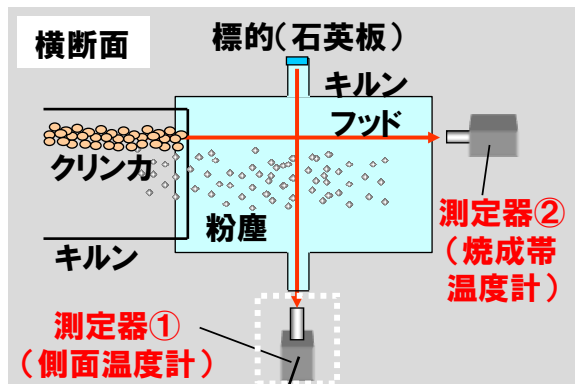
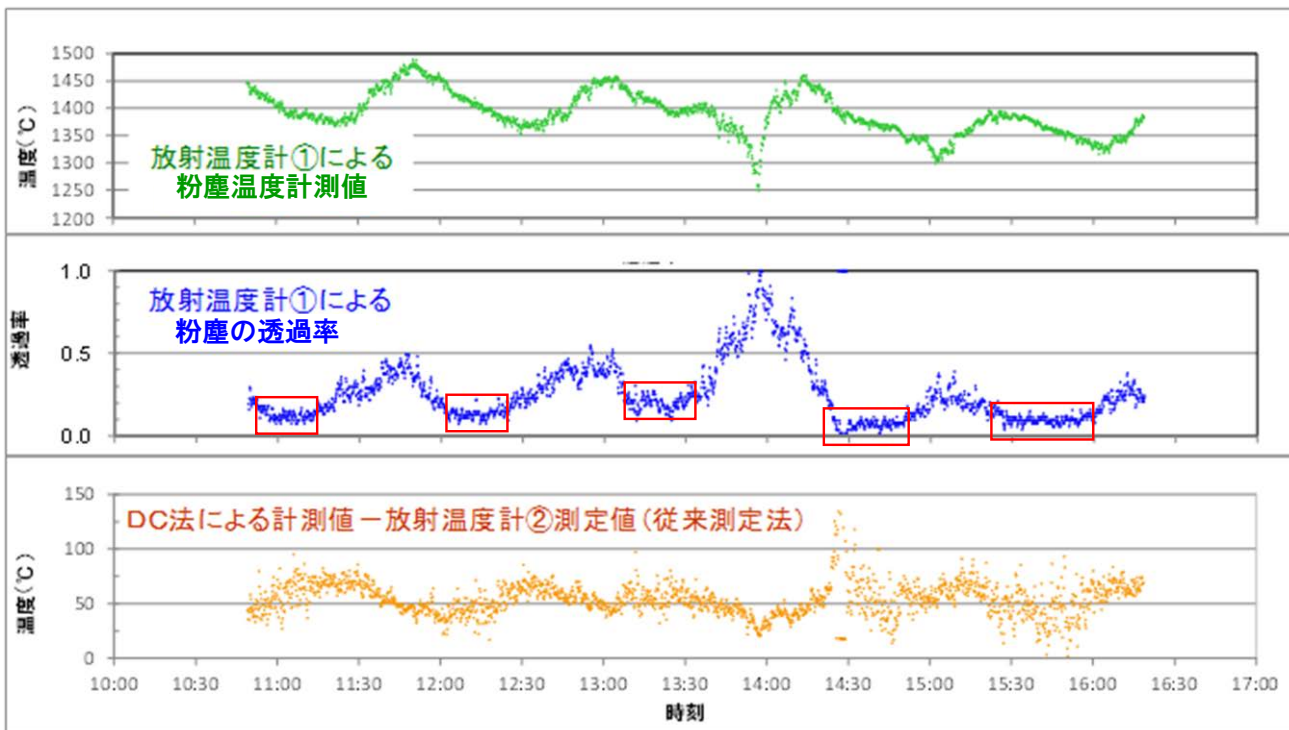
クリンカ放射率1

炉壁放射率1



スペクトル計測による温度計測技術開発 (ダストキャンセル法 (DC法) の実機キルンへの適用)

DC法により粉塵温度、粉塵濃度、クリンカ温度を求めた。



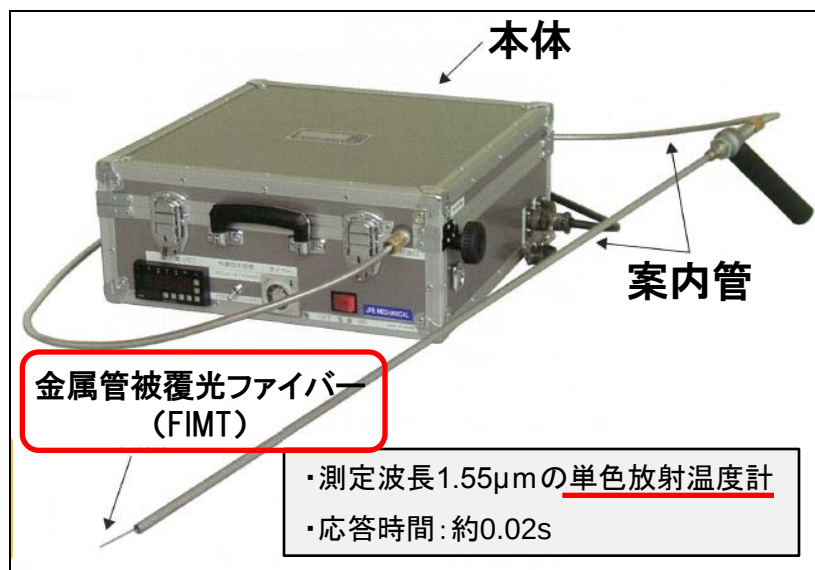
【グラフ上】粉塵の温度は刻々と変化している。

【グラフ中】粉塵の透過率は0～1と大きく変化している。

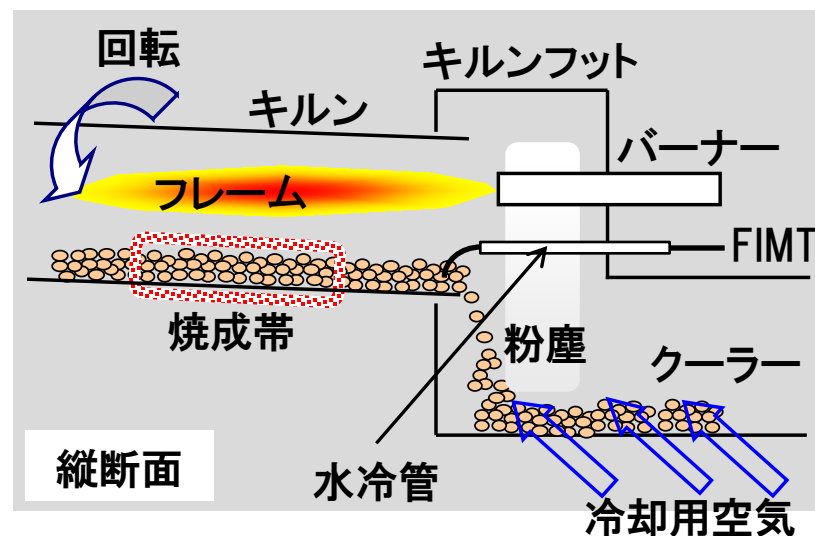
⇒ 従来温度計では粉塵の影響が大

【グラフ下】ダストキャンセル法により補正したクリンカ温度は、従来の温度測定結果より0～100℃高い。

スペクトル計測による温度計測技術開発 (光ファイバー法 光ファイバー温度計の特徴)



光ファイバー温度計(JFEメカニカル(株))



キルン内部における間欠的測定法

【試験前に期待していたこと】

熱電対と異なり光ファイバーが溶けても測定継続可能なため、連続測定ができる。

【予備試験の結論】

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。

⇒ 連続測定は無理。キルン内のクリンカに対して使用するために、間欠的測定法(通常は水冷管(図参照)に退避、測定時のみ水冷管から出してクリンカに挿入する)でクリンカ温度の自動測定ができるか、検証することにした。

スペクトル計測による温度計測技術開発 (光ファイバー法による温度測定結果)

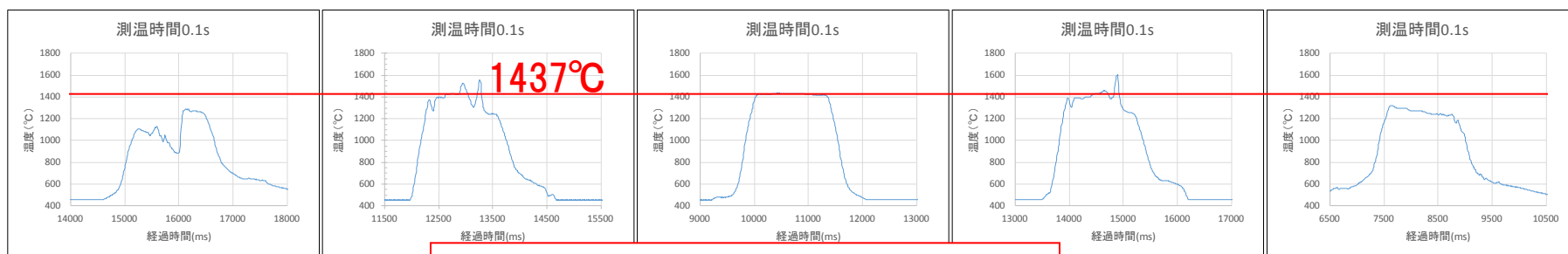
測定値の再現性は低く、熱電対との差も大きく、クリンカ温度の測定には適さない

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】

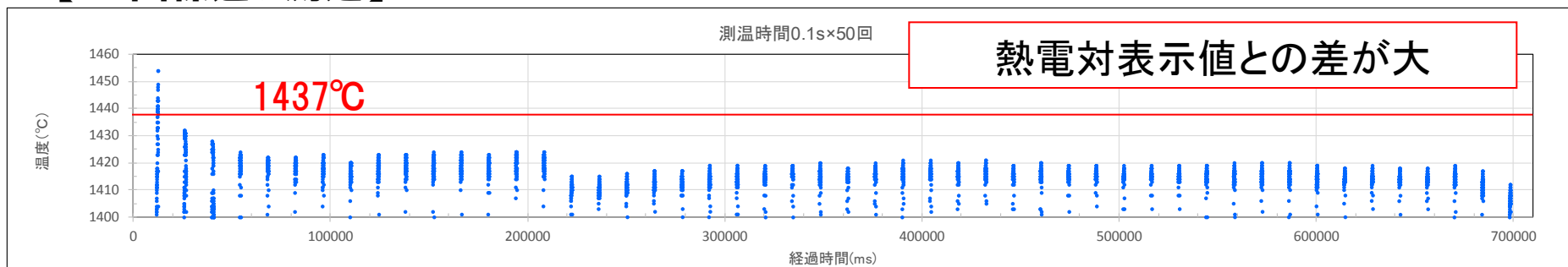
- ・FIMTのクリンカへの挿入深さ: 10mm
- ・FIMTの炉内移動速度: 400mm/s(炉内に居る時間: 2.3s/1回測定)

【1回測定】



各測定値の差が大きい

【50回繰返し測定】



スペクトル計測による温度計測技術開発 (まとめ)

ダストキャンセル法(DC法)と光ファイバー法の2つの方法に対して実機キルンへの適用の可能性の検討を行い、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による検証試験で、DC法が成立することを確認した。
- DC法を実機キルンへ適用し、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。
- 以上より、DC法の実機キルンへの適用は可能と判断した。

＜光ファイバー法＞

光ファイバー温度計による測定結果は、熱電対との差が大きく、その差も一定ではなかった。実機キルンへの適用は難しいと判断した。

4. 成果、目標の達成度 (研究開発の成果 - 総括 -)

エネルギー原単位 8%削減／OPC同等品質

プロセス設計提案

実用化に向けた課題

普及に向けた課題

省エネセメント 品質設計

鉱化剤
(第Ⅰ期)

$F=0.14\sim0.2\%$,
 $SO_3=1\sim4\%$
⇒約100℃低下

省エネ
約8%

高 C_3A
(第Ⅱ期)

高 $C_3A(+4\%)$
+混合材10%
(LSP必須)

省エネ
約8%

ビーライト
-アウイン
(次世代)

アウイン30%
+ ホウ素

省エネ
約20%

- ・温度管理
- ・コーティング、閉塞
- ・細粒化対策

- ・水和熱
- ・耐硫酸塩性

- ・温度管理
- ・コーティング、閉塞
- ・凝結
- ・耐久性確認

- ・フッ素源確保
- ・ユーザー認知
- ・(規格)

- ・規格
- ・ユーザー認知

- ・規格
- ・アルミ源確保
- ・品質確認
- ・ユーザー認知

省エネポテンシャル評価 (統合シミュレータ開発・高度化)

計測技術

(ダストキャンセル法) ・原理確認 ・実機適用

4. 成果、目標の達成度 (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 リンカー低温焼成技術開発 [△]	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 [△]

●その他の外部発表

- ・新聞発表(5件)
- ・国内学会等での口頭発表(17件)

- ・国際会議での口頭発表(3件)

5. 事業化、波及効果

●事業化の見通し

本基盤研究においては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、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、技術が普及しやすく、かつ省エネ効果が産業全体に波及しやすい。

一方で、事業化に向けた課題として、

- ・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

といったものが想定される。

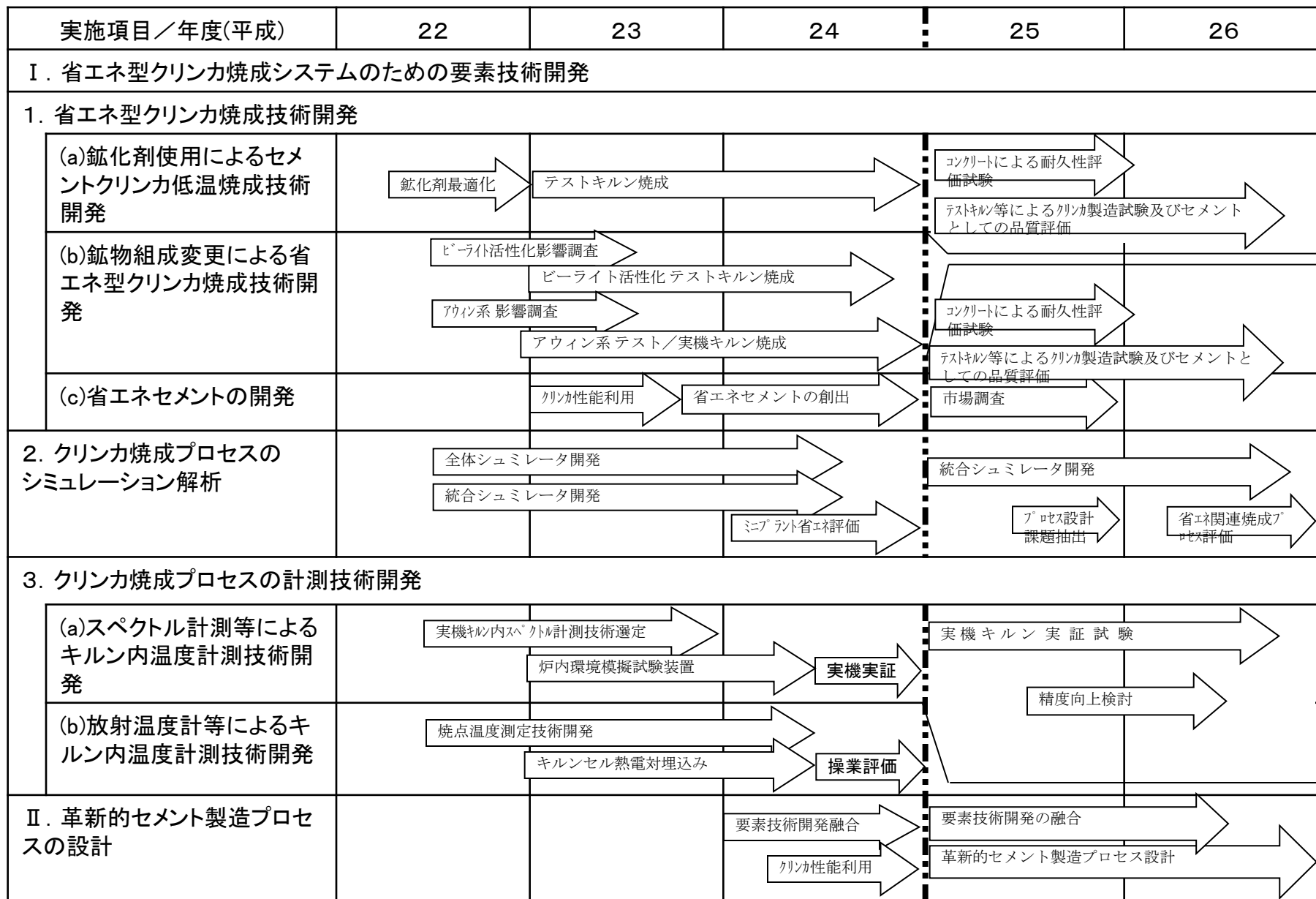
これら課題を業界全体で解決をはかり、2020年以降より実機による実用化検討を行った後、導入可能な工場から順次普及展開を図る予定。

●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、我が国が省エネルギ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。

6. 研究開発マネジメント・体制等 (開発計画)



6. 研究開発マネジメント・体制等 (研究開発実施体制)

技術委員会

全体会議

統括リーダー

太平洋セメント株式会社

中央研究所 セメント・コンクリート研究部

セメント技術チームリーダー 平尾 宙

《研究実施場所(事務局)》

・太平洋セメント株式会社(右記)

《研究項目》

・革新的セメント製造プロセスの設計の提

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
- ・本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

宇部興産株式会社

《研究実施場所》

・プロセス技術研究所等(山口県宇部市等)

《研究項目》

・クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析

住友大阪セメント株式会社

《研究実施場所》

・セメントコンクリート研究所等(大阪府大阪市等)

《研究項目》

・放射温度計等によるキルン内温度計測技術開発

・鉍化剤使用によるセメントクリンカ低温焼成技術開発

太平洋セメント株式会社

《研究実施場所》

・中央研究所等(千葉県佐倉市等)

《研究項目》

・鉍物組成変更による省エネ型クリンカ焼成技術開発

・省エネセメントの開発

三菱マテリアル株式会社

《研究実施場所》

・中央研究所等(茨城県那珂市等)

《研究項目》

・スペクトル計測等によるキルン内温度計測技術開発

6. 研究開発マネジメント・体制等 (資金配分)

(単位: 百万円)

実施内容	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	計
宇部興産株式会社	61	62	33	46	35	237
統合シミュレーター						
住友大阪セメント株式会社	33	40	26	25	24	147
鉱化剤使用／放射温度計						
太平洋セメント株式会社	67	67	56	50	44	284
鉱物組成変更／省エネセメント						
三菱マテリアル株式会社	31	31	31	30	41	163
スペクトル計測						
計	191	200	145	151	144	832

* 研究開発事業(補助金を含む全額)としての執行額

7. 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。

8. 中間評価の対応状況

評価コメント	コメントに対する対処方針	対応状況
○限られた期間内で事業化を目指すためには、各研究テーマについて、優先順位を決め、それにマンパワーを集中することも必要ではないか。 ○我が国のセメント会社が世界の市場で存在感を示すためには、国内のセメント会社が一致し、普通ポルトランドセメントを革新セメントに置き換えた製造・販売できるシステムの確立が重要であり、そのためには、要素技術の「省エネ型クリンカ焼成技術」を1種類に絞り込むことが必要ではないか。 ○また、本プロジェクトで開発したセメントキルン内での温度の計測技術とクリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析技術を向上させ、世界のセメント会社をリードできるのではないか。	○プロジェクト後半の事業実施にあたっては、これまで要素技術開発で得られた成果を踏まえ、実用化に向けた技術の絞り込みを行う予定です。 ○「省エネ型クリンカ焼成技術」においては、鉍化剤の使用や鉍物組成変更などによるクリンカの低温焼成技術開発を進めており、実用化に向けキルンへの影響やコンクリート製品としての基本性能を評価してきました。プロジェクト後半では、これらの成果を踏まえ、革新的セメント実現のための技術を絞り込んだ上でプロジェクトを進める予定です。 ○キルン内温度の計測事例は海外でもあまり無く、また本プロジェクトで開発したシミュレーション解析では夢のセメントキルンとも言える流動層キルンも想定したものであることから、世界をリードできるポテンシャルを有すると思われますが、未だ改善すべき点も多く、まずは国内での実用化を目指してまいります。	○「省エネ型クリンカ焼成技術」および「計測技術」の絞り込みを行いました。 ○技術の絞り込みと合わせ、実用化の優先順位を決め、各技術の実用化に向けた課題を明確にしました。 ○国内実用化を目指した検討を実施しつつ、その成果を国際会議で報告したり、海外特許出願を行いました。

評価コメント	コメントに対する対処方針	対応状況
○シミュレーション解析の精度を上げるには、実プラントのキルン内温度等のデータが不可欠であり、逆に、シミュレーションで最適化された条件でどの程度の省エネルギーが達成できるか実プラントでの検証も不可欠である点を考慮すれば、究極の省エネプラント開発には、4社における情報伝達を密に協力していくことが重要であり、共有すべき情報を明確化し相互協力を実質化していただきたい。 ○基本計画の最終目標は「実用化への技術課題を明確にする」ということであるが、解決できない技術課題を明確にしても意味がない。今後の研究開発での最終目標は、より具体的に実用化への道筋がわかる目標を設定していただきたい。	○本プロジェクトにおいては、これまでも定期的に4社の連絡会や技術委員会を開催するなど協力体制をとってきましたが、ご指摘のように情報伝達をさらに密にすべく、プロジェクト後半では、例えば、要素技術開発で得られたデータについて今後活用されることを想定し整理するなど、4社間の密接な情報共有化を図ってまいります。 ○プロジェクト後半においては、実用化への具体的な道筋を明らかにするため、例えば、本プロジェクトで開発してきた各要素技術について、エネルギー原単位削減への貢献度を各々に評価し、それらを積み上げることで最終目標の具体化への道筋を明確化するなどの検討を行う予定です。	○焼成試験を共同で実施し、そのデータをシミュレーションに活用するなど、積極的かつ密な情報交換により、実用化に向けた様々な情報や課題を確実に共有して参りました。 ○各要素技術をもとに、プロセス全体を考慮したシミュレーションにより、具体的な方策を示しました。

評価コメント	コメントに対する対処方針	対応状況
○実用化に向けた経済性に関する検討がなされていないが、たとえ良い技術であっても経済的に成り立つ可能性がない技術は開発しても仕方がなく、目標値達成のみに注力して実用性に乏しい研究にならないよう注意していただきたい。 ○近年、セメント産業には、省エネ化の推進、温室効果ガスの削減に加え、産業副産物・産業廃棄物受入量の拡大に向けた検討が求められているが、それらの課題を個々に検討し研究開発に取り組むことは非効率的であり、また、お互いの効果が相殺してしまう可能性もあることから、セメント製造全体における大きな課題は何か、その解決にあたり検討すべき項目は何か、更に、それらの項目全ての最適化はどこに求められるのかを考えた研究開発を是非進めて欲しい。	○ご指摘のとおり、実用化に向けては技術的課題の解決のみならず、経済的な観点からの検討が必要と考えており、プロジェクト後半では、例えば、市場性調査を実施する予定です。 ○また、実用化に向けては、温暖ガス効果、廃棄物対策といった環境影響と経済性を考慮した統合的な視点からみた課題の解決が重要と考えており、プロジェクト後半においては、例えば、実用化に際し必須条件である従来製品の普通ポルトランドセメント同等の品質確保を前提として、“省エネ(エネルギー原単位削減)”、“環境貢献(廃棄物使用量増大)”、“経済性(原料価格・工程価格)”などを技術の評価指標と位置付けることにより、プロジェクト前半で開発した要素技術等の絞り込みを行うなどの総合的な検討を行う予定です。	○米国および韓国における規格変更後の市場動向を調査し、本技術実用化時の市場対応を予測しました。 ○左記3つの評価指標を念頭に、技術の優先順位を決め、各技術での品質設計を行い、実用性の確認および実用化への具体的な課題抽出を行いました。