

# 革新的セメント製造プロセス基盤技術開発 事後評価の概要

平成27年12月18日

製造産業局

住宅産業窯業建材課

# 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. 中間評価結果
9. 評価
10. 提言及び提言に対する対処方針

# 1. プロジェクトの概要

|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>概 要</p>             | <p>○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。</p> <p>○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。</p> <p>○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。</p> |
| <p>実施期間</p>            | <p>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。</p>                                                                                                                                                                                                                         |
| <p>予算総額</p>            | <p>総額7.2億円(補助(補助率:2/3))</p> <p>(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)</p>                                                                                                                                                                      |
| <p>実 施 者</p>           | <p>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)</p>                                                                                                                                                                                                                           |
| <p>プロジェクト<br/>リーダー</p> | <p>平尾 宙 太平洋セメント(株) 中央研究所</p>                                                                                                                                                                                                                                               |

## 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。

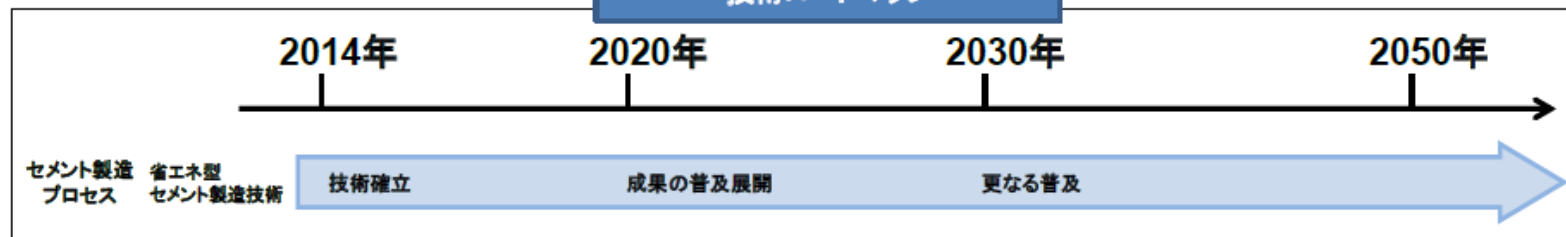
○2014年度までに省エネ型セメント製造技術を確立し、それ以降、実機による実用化検討を行った後、2020年以降より導入可能な工場から順次普及展開を図っていく。

##### 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   |      |
|               |                                                             | 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<br>排熱発電 スラッグ粉砕<br>エアーム式クーラ セパレータ改善<br>堅型石炭炉  | —                             | —                              | 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                                    | 熱エネルギー代替<br>廃棄物使用量<br>166万t   | 熱エネルギー代替<br>廃棄物使用量<br>168万t    | 1.3                        | -0.1 | 1.4  |
|               | 革新的セメント製造プロセスの導入                                            | 0%                            | 30.0%                          | 15.1                       | —    | 15.1 |
|               | ガラス熔融プロセスの導入                                                | 0%                            | 5.4%                           | 5.0                        | -0.6 | 5.6  |
|               | 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  | —    |
|               | 高温高圧型黒液回収ボイラの導入 ※                                           | 49%                           | 69%                            | 5.9                        | —    | —    |
|               | 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<br>高度制御・高効率機器の導入<br>動力系の効率改善<br>プロセスの大規模な改良・高度化 ※ | 23%<br>(2030年度の目標<br>に対する達成率) | 100%<br>(2030年度の目標<br>に対する達成率) | 77.0<br>(2010年度比<br>100.0) | —    | —    |
|               | 石油製品・石炭製品製造業 計                                              |                               |                                | 77.0                       | —    | —    |

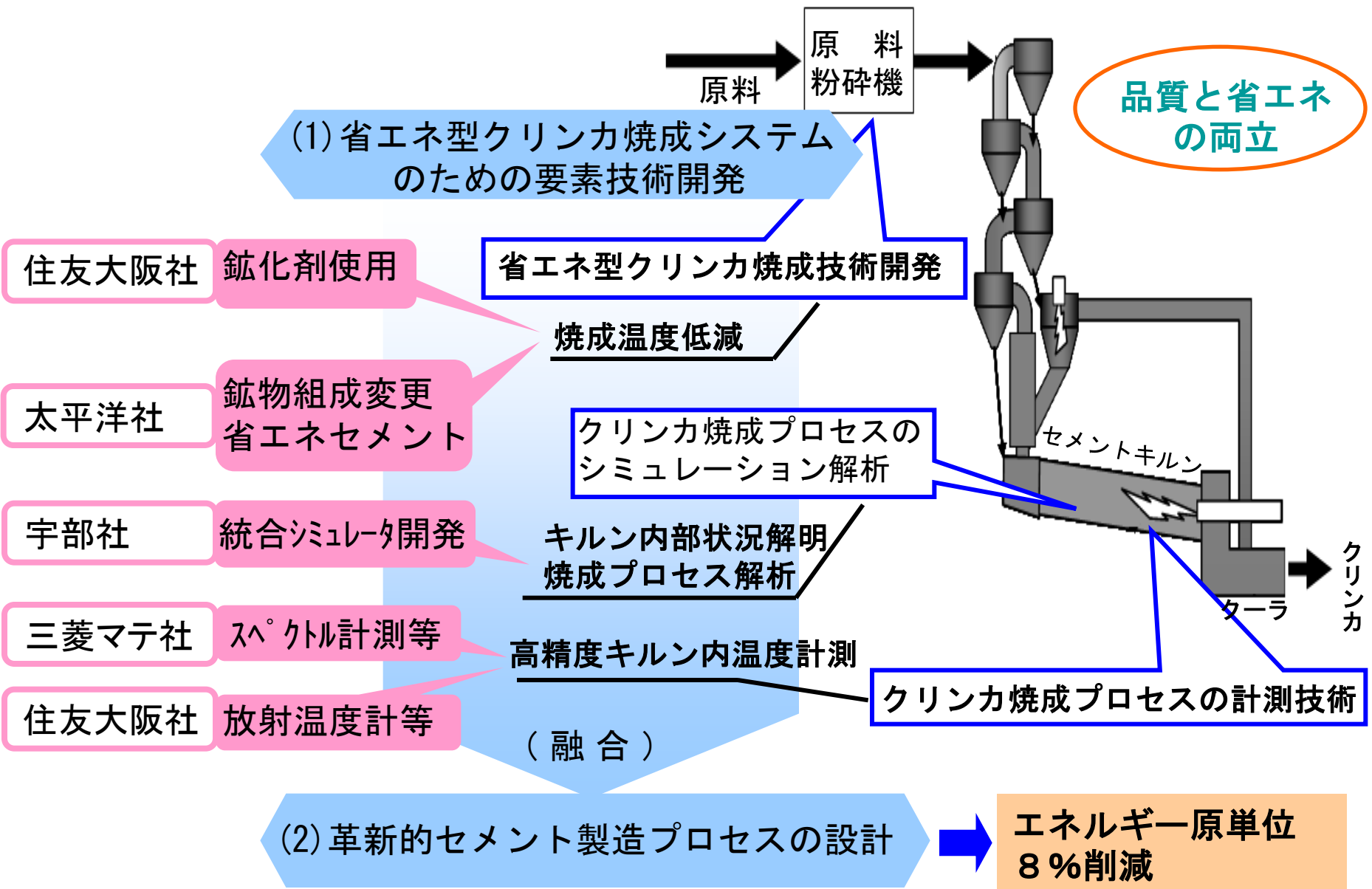
窯業・土石製品製造業、パルプ・紙・紙加工品製造業、石油製品・石炭製品製造業における   の対策は、各業界における2020年度以降の低炭素社会実行計画において位置付けられているもの。

※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                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>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。</p> | <p>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。</p> <p>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。</p> |

# (参考) 全体目標達成に向けた要素技術開発



## 4. 成果、目標の達成度 (鉱化剤：住友大阪セメント(株))

| 要素技術                                               | 目標・指標                                                                                |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) 省エネ型クリンカ焼成技術開発<br>(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 | 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。 |

### (実施内容の概要)

#### 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鉱化剤( $F, SO_3$ )について、添加量、配合割合および焼成条件を検討

#### テストキルン

↓ ・実験室で選定された鉱化剤、量、割合を用いての製造試験

#### 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での製造試験

#### 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

H22～24

H25～26

## 成果および課題（鉱化剤：住友大阪セメント(株)）

| 成 果                                                                                                                                                                                                                                                      | 達成度 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <ul style="list-style-type: none"><li>・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。</li><li>・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。</li><li>・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。</li></ul> | 達成  |



### （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。
- ・鉱化剤添加により、焼成クリンカは細粒化する可能性が考えられることから検証が必要。
- ・細粒化が発生した場合は、AQC(エアークエンチングクーラー)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が必要。

## 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                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (b) 鉱物組成変更による省エネ型クリンカ焼成技術開発<br>(ビーライトーアウイン系クリンカ開発) | <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・試製セメントの物性明確化、仕上げ条件の最適化。</li> <li>・試製コンクリートのフレッシュ性状、強度発現性、耐久性および品質課題の確認。</li> </ul> |

| 《 開 発 フ ロ ー 》 |                               |                                                                                        |                                                                                                             |                                                                                                               |                                                                                                              |
|---------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 進め方           | 電気炉                           |                                                                                        | テストキルン／ミニプラント                                                                                               |                                                                                                               |                                                                                                              |
| 目 的           | <p>鉱物組成および焼成条件が物性に及ぼす影響把握</p> | <p>OPC同等品質達成</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・鉱物組成および焼成条件の影響の明確化</li> </ul> | <p>実機焼成時の製造条件の明確化</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・省エネ効果の確認</li> <li>・運転面および設備面での課題抽出</li> </ul> | <p>最適アウイン組成でのOPC同等品質達成</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・焼成条件の明確化</li> <li>・添加剤の検討および最適化</li> </ul> | <p>コンクリート評価および諸物性評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・OPC代替としての実用性確認</li> <li>・品質課題の明確化</li> </ul> |

## 成果および課題 (ビーライトアウイン:太平洋セメント(株))

| 成 果                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 達成度 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>●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添加によりOPC同等の試製クリンカを得た。               <ul style="list-style-type: none"> <li>・アウイン量:30%、<math>C_4AF</math>:20%、<math>B_2O_3</math>:0.9%</li> <li>・焼成温度:1350±10℃ ⇒ 焼成エネルギーを約20%削減</li> </ul> </li> <li>●テストキルンにより得たビーライト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。               <ul style="list-style-type: none"> <li>・最適石膏添加量:11mass% (<math>SO_3/Al_2O_3</math>:0.7)</li> <li>・最適クリンカ粉末度:4000cm<sup>2</sup>/g、無水石膏粉末度:6000cm<sup>2</sup>/g</li> </ul> </li> <li>●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。               <ul style="list-style-type: none"> <li>・強度はホウ素添加により改善し、OPC同等となった。</li> <li>・OPCに比べ、耐久性(促進中性化、断熱温度上昇、凍結融解)が劣る。</li> </ul> </li> </ul> | 達成  |



### (課 題)

- ・実機製造ではコーティングが安定運転に影響を及ぼす懸念があり、温度管理が重要。
- ・品質面ではOPCに比べ耐久性が劣る。
- ・OPC規格外のため新規格が必要である。
- ・アルミニウム原料を確保する必要がある。

## 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                                                                                                                                                                                                             |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (c)省エネセメントの開発 | <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・実用化に向けた課題抽出。</li> </ul> |

| 《 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<br>・セメント設計(物性確認)<br>※クリンカ性能向上のための方策の提案 |   | ・省エネ効果確認<br>・セメント設計(耐久性確認) |   | ・セメント設計<br>・コンクリート品質・施工性確認<br>※実用化に向けた技術的課題を抽出 |

## 成果および課題（省エネセメントの開発：太平洋セメント(株)）

| 成 果                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 達成度 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>●省エネセメントの設計 = 高C<sub>3</sub>A(+4%) + 混合材10%(混合材にLSP必須) <ul style="list-style-type: none"> <li>・混合材割合等がOPC規格外。</li> </ul> </li> <li>●高C<sub>3</sub>A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。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・キルン内壁へのコーティングあり。</li> </ul> </li> <li>●上記の省エネセメントの品質はOPCと概ね同等。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> </ul> </li> <li>●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。</li> </ul> | 達成  |



### （課 題）

- ・実機製造ではコーティングによる安定運転への影響懸念あり、温度管理が重要。
- ・品質面では、強熱減量が一部規格外、水和熱は高め、耐硫酸塩性は低めであり、今後より詳細な検討が必要である。
- ・省エネ目標達成のために、混合材割合等の規格整備が必要である。

## 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

(2) クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析

### 目標・指標

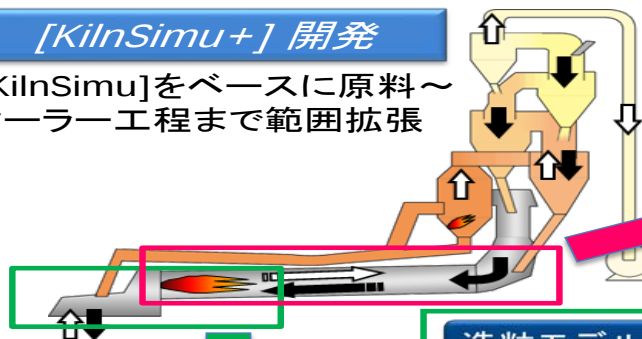
- ① 統合シミュレータの高度化として、クーラーの二次元モデルを開発し、クリンカ組成変更等によるクリンカ粒度及びクーラー効率への影響まで想定できる様にする。
- ② 焼成プロセスの省エネポテンシャル評価

### <統合シミュレータの開発・高度化>

### <セメント全体シミュレータの開発>

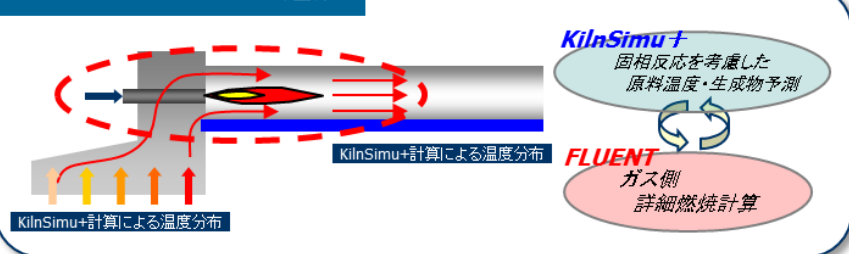
#### [KilnSimu+] 開発

[KilnSimu]をベースに原料～クーラー工程まで範囲拡張



### 連成ソフト開発

#### KilnSimu+とFLUENTの連成

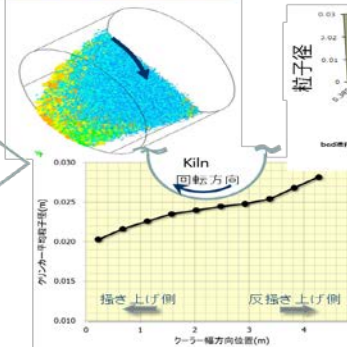


### 造粒・クーラー二次元化

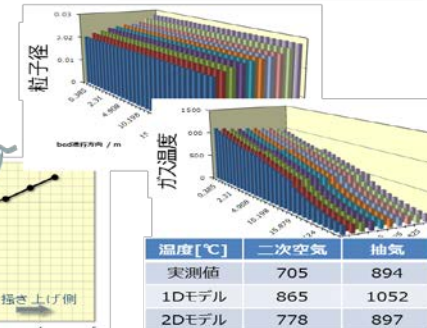
#### 造粒モデル



#### 粒子挙動モデル



#### クーラー二次元化



## 成果および課題（シミュレーション：宇部興産(株)）

| 成 果                                                                                                                                                                                                                                                      | 達成度 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <p>① 統合シミュレータの開発および高度化</p> <p>–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。実験及び測定を行い計算精度を向上させた。</p> <p>② 焼成プロセスの省エネポテンシャル評価</p> <p>–革新的セメント製造プロセス設計の課題抽出で、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。</p> | 達成  |



### （課 題）

・本要素技術開発に直接関わる課題は、特に残されていないが、現在のシミュレータは、種々の運転データからモデル（パラメータ）の同定を行う静的なシステムである。ソフトの特性から動的な変動に対応できないが、オフライン的な利用方法で最適運転ポイントの探索等に利用可能と考える。運転面での活用についてシミュレータを使い込む中で検討をして行きたい。

## 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                                                                          |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| (3)クリンカ焼成プロセスの計測技術開発<br>(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)。<br>①ダストキャンセル法<br>②光ファイバー法 |

(実施内容の概要)

### ①ダストキャンセル法(DC法)

- ・ DC法の理論の実験的検討  
炉内環境模擬試験装置を製作し、DC法の理論の実験的確認を実施。
- ・ DC法の計測精度の理論的検討  
上記試験において、現行の測定器(放射温度計)に迷光の影響があることが判明。  
迷光の低減によるDC法の計測精度の検討を実施。
- ・ DC法の実機キルンへの適用検討。

### ②光ファイバー法

- ・ 予察試験の実施  
金属管被覆光ファイバー(FIMT)の耐熱性が十分でない可能性が示唆された。
- ・ 耐熱性評価試験装置製作と同試験装置による試験の実施  
耐熱性評価試験のために、FIMT自動供給装置を製作し試験を実施。

## 成果および課題（スペクトル計測：三菱マテリアル(株)）

| 成 果                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 達成度 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <p>①ダストキャンセル法の工場への適用は、可能と判断した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・クリンカ温度、粉塵温度、粉塵濃度、炉内壁温度を仮定して行ったモデル計算により、理論的には、放射輝度測定器の指向性向上により、計測精度の向上が期待できることを示した。</li> <li>・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。</li> </ul> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> </ul> | 達成  |



### （課 題）

- ・ダストキャンセル法で使用する測定器の指向性向上により、計測精度の向上が期待できることが分かった。測定器の改良は今後の課題。

## 4. 成果、目標の達成度（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
- ・コーキング、閉塞
- ・細粒化対策

- ・水和熱
- ・耐硫酸塩性

- ・温度管理
- ・コーキング、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

## < 共通指標 > (特許・論文等件数)

| 要素技術 <sup>④</sup>                              | 論文数 <sup>④</sup> | 論文の<br>被引用<br>度数 <sup>④</sup> | 特許等件<br>数(出願を<br>含む) <sup>④</sup> | 特許権の<br>実施件数 <sup>④</sup> | ライセン<br>ス供与数 <sup>④</sup> | 取得ライ<br>センス料 <sup>④</sup> | 国際標準<br>への寄与 <sup>④</sup> |
|------------------------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| (1)省エネ型クリンカ焼成技術開発 <sup>④</sup>                 |                  |                               |                                   |                           |                           |                           |                           |
| (a) 鉱化剤使用によるセメントク<br>リンカー低温焼成技術開発 <sup>④</sup> | 0 <sup>④</sup>   | 0 <sup>④</sup>                | 1 <sup>④</sup>                    | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            |
| (b) 鉱物組成変更による省エネ型<br>クリンカ焼成技術開発 <sup>④</sup>   | 0 <sup>④</sup>   | 0 <sup>④</sup>                | 1 <sup>④</sup>                    | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            |
| (c) 省エネセメントの開発 <sup>④</sup>                    | 2 <sup>④</sup>   | 0 <sup>④</sup>                | 1 <sup>④</sup>                    | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            |
| (2) クリンカ焼成プロセスのシミ<br>ュレーション解析 <sup>④</sup>     | 0 <sup>④</sup>   | 0 <sup>④</sup>                | 0 <sup>④</sup>                    | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            |
| (3) クリンカ焼成プロセスの計測技術開発 <sup>④</sup>             |                  |                               |                                   |                           |                           |                           |                           |
| (a) スペクトル計測等によるキル<br>ン内温度計測技術開発 <sup>④</sup>   | 0 <sup>④</sup>   | 0 <sup>④</sup>                | 3 <sup>④</sup>                    | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            |
| (b) 放射温度計等によるキルン内<br>温度計測技術開発 <sup>④</sup>     | 0 <sup>④</sup>   | 0 <sup>④</sup>                | 0 <sup>④</sup>                    | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            |
| 計 <sup>④</sup>                                 | 2 <sup>④</sup>   | 0 <sup>④</sup>                | 6 <sup>④</sup>                    | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            | 0 <sup>④</sup>            |

### ●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CO<sub>2</sub> 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。

# プロジェクトのアウトカム(プロジェクトの成果が及ぼす効果等) (参考)

## 革新的セメント製造プロセス基盤技術開発

### プロジェクトの成果目標

- 鉱化剤使用によるセメントクリンカ低温焼成技術開発  
鉱化剤および焼成条件の検討により、現行品同等品質を維持しつつ焼成温度低減(100℃)を達成する諸条件を明確化し、さらに実機製造時の課題を明確化する。
- ビーライト・アウイン系クリンカの開発  
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製造時の課題抽出を行う。
- 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検討する。

省エネ型クリンカ焼成技術開発

クリンカ焼成プロセスのシミュレーション解析

クリンカ焼成プロセスの計測技術開発

セメントプロセス全体シミュレータの開発及び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。

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、温度計測手法の確立及び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。

### 目的達成までのシナリオ

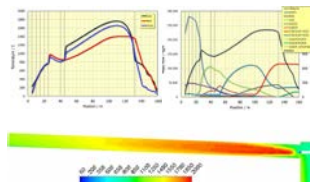
#### 直接アウトカム (直接カスタマー)

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。しかしながら、その一方で事業化に向けた以下の課題が想定される。

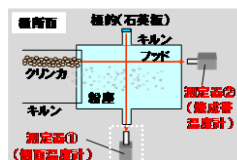
- 社会的課題として、
    - ・新プロセスにより製造されるセメント製品に要する新たな原料の調達
    - ・ユーザー認知
    - ・規格改定検討等
  - 技術的課題として、
    - ・セメントキルン内壁に付着し安定運転を妨げるコーティング対策
    - ・長期的品質確認のためのコンクリート耐久性試験の継続実施
    - ・必要に応じた設備の改造や導入等の最適化実施
- 上記課題を本事業実施者である4社が中心となり業界全体で解決をはかり、実機による実用化検討を行った後、導入可能な工場から順次普及展開を図る。

#### 間接アウトカム

- 非従来型セメントの検討
  - ・普通ポルトランドセメント以外の製品への本成果の展開
  - ・海外への本成果の展開
- セメントプロセス全体シミュレータの更なる高度化
  - ・各生産設備ごとのプロセスの最適化
  - ・新規生産設備の検討
  - ・生産性の更なる向上



- 非従来型の高度な温度計測技術の確立
  - ・様々な環境下でも正確な温度を把握
  - ・運転管理技術の高度化
  - ・生産性の更なる向上
  - ・他の業種における温度計測への展開



### プロジェクトの目的

現行品同等の品質を維持しつつ、製造エネルギー原単位を8%削減する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。

### 将来像

本技術開発により明確化された諸課題が解決された後、全国に本技術が展開され、製品が流通することにより、大幅なエネルギー削減が達成される。

### [上位施策の目的]

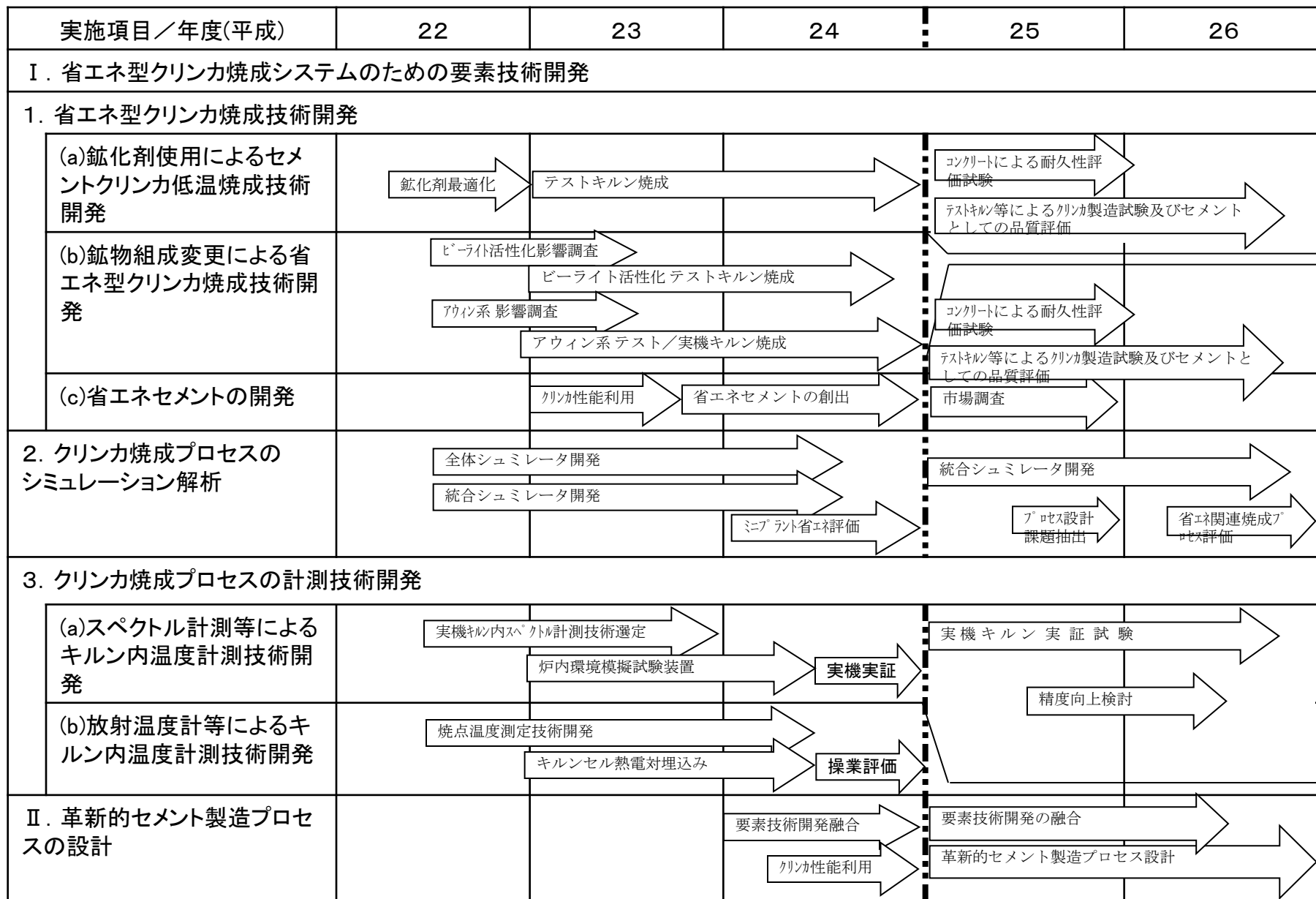
エネルギー基本計画(平成26年4月閣議決定)において、我が国が抱えるエネルギー需給構造上の脆弱性に対して、エネルギー需給を安定させ、安全性や効率性を改善していくことが求められており、そのための戦略的な技術開発課題の1つとされている。

### 波及効果

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CO<sub>2</sub>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. 中間評価の結果

| 中間評価コメント                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 提言に対する対処方針                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 対応状況                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>○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。</p> <p>○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。</p> <p>○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。</p> | <p>○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。</p> <p>○「省エネ型クリンカ焼成技術」においては、鉬化剤の使用や鉬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。</p> <p>○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。</p> | <p>○「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。</p> <p>○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。</p> <p>○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。</p> |

## 8. 中間評価の結果

| 評価コメント                                                                                                                                                                                       | コメントに対する対処方針                                                                                                                                                    | 対応状況                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>○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。</p> | <p>○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。</p> | <p>○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。</p> |
| <p>○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。</p>                                                                           | <p>○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。</p>                       | <p>○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。</p>                                 |

## 8. 中間評価の結果

| 評価コメント                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | コメントに対する対処方針                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 対応状況                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>○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。</p> <p>○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。</p> | <p>○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。</p> <p>○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。</p> | <p>○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。</p> <p>○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。</p> |

## 9. 評価

### 9-1. 評価検討会

| 評価検討会名称 | 革新的セメント製造プロセス基盤技術開発事後評価検討会 |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 評価検討会委員 | 座長                         | <p>片山 恵一<br/>東海大学工学部応用化学科 教授</p>                                                                                                                                                                                                                         |
|         | 委員                         | <p>梅本 宗宏<br/>日本建設業連合会コンクリート品質専門部会副部長(戸田建設株式会社<br/>技術開発センター社会基盤 ユニット構造材料チーム 主管)</p> <p>小嶋 芳行<br/>日本大学理工学部物質応用化学科 教授</p> <p>宝田 恭之<br/>群馬大学大学院理工学府 教授</p> <p>松尾 誠治<br/>東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 助教</p> <p>宗像 鉄雄<br/>国立研究開発法人産業技術総合研究所省エネルギー研究部門<br/>研究部門長</p> |

## 9-2. 総合評価(コメント)

○本事業は、全体としても各要素技術においても、当面の目標が計画通りに達成され、確実な成果を上げたことは評価に値する。我が国のセメント製造技術はエネルギー効率においても最高水準に達している中で、これを更に、省エネ・低炭素化を可能とする革新的製造プロセスを開発しようとする難易度の高い事業であるが、低温焼成材料の開発により、エネルギー原単位8%の削減の可能性を見出し、実証した点は評価できる。また、セメントシミュレーターや高精度温度測定法は他でも活用可能であり、高く評価できる。

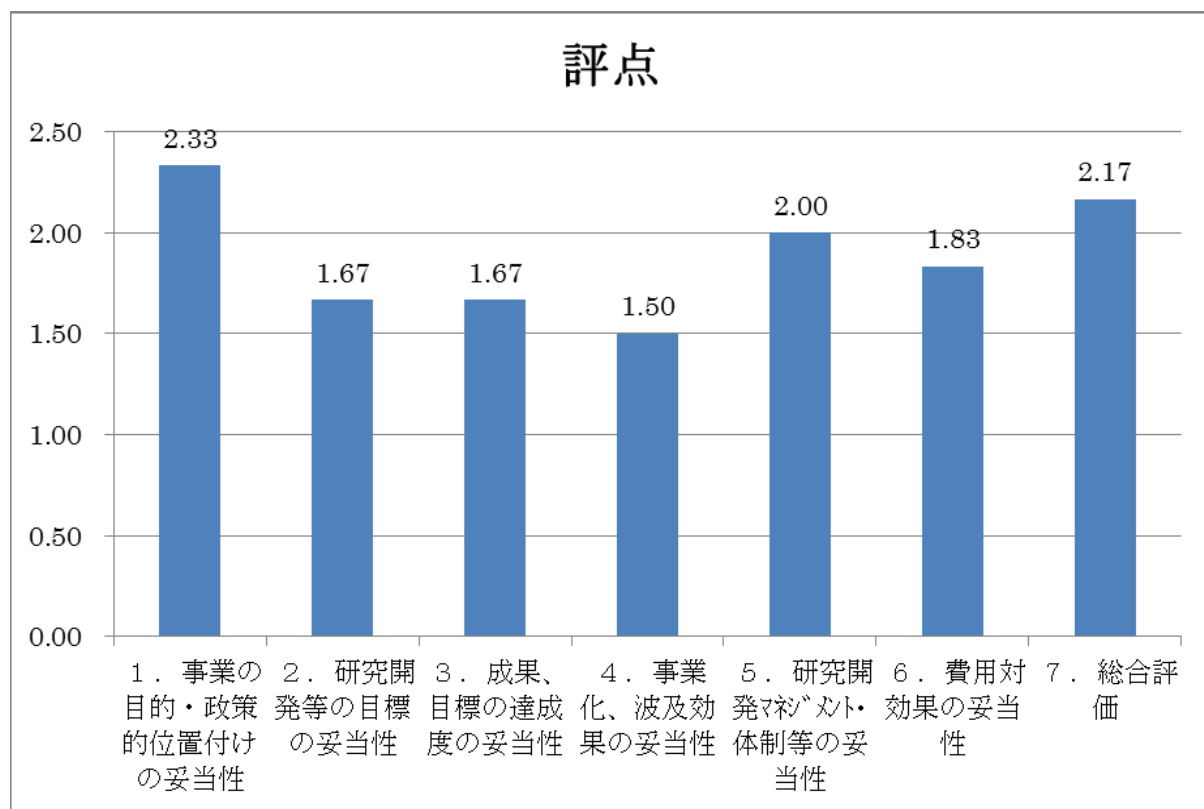
○セメント産業は我が国の基幹産業の一つであると共に、エネルギー多消費産業の一つでもある。国の関与の下で業界が一丸となってCO2削減に向かって本研究開発・事業化を進めることは、業界全体の活性化・成長に貢献できると同時に、社会的に大きな意義がある。

○なお、今後の事業化に向けては、ユーザーを巻き込んだ体制で経済性、新技術の実装、どのような製品を供給するのか等について更なる検討が必要と思われる。

## 9-3. 評点結果

○「経済産業省技術評価指針」に基づき、プロジェクト事後評価において、評点法による評価を実施した。

○本事業の政策的位置付けとしては高い評価をいただいているが、今後の実用化に向けて、特にコスト面の更なる検討が必要となることが評点に反映されている。



### 【評価項目の判定基準】

評価項目 1.～5.

3点: 非常に重要又は非常によい

2点: 重要又はよい

1点: 概ね妥当

0点: 妥当でない

### 6. 総合評価

(事後評価の場合)

3点: 実施された事業は、優れていた。

2点: 実施された事業は、良かった。

1点: 実施された事業は、成果等が今一步のところがあつた。

0点: 実施された事業は、成果等が極めて不十分であつた。

## 10. 提言及び提言に対する対処方針

### 今後の研究開発の方向等に関する提言

○今後の実施課題と位置付けられた、鉱化剤使用および省エネセメントのOPC同等品質の確認、全体統合シミュレータの高度化、新規温度計測方法を確立、の速やかな解決がまたれる。

一省エネ型クリンカ焼成技術において、温度管理、コーティング、閉塞、細粒化、耐硫酸塩性、耐久性などの個々問題への具体的対策を期待する。

一温度計測技術は、今後の海外展開などにおける日本のスキル・知財となりえる要素が多く実用が待たれる。

一全体統合シミュレータについては、解析の高度化のみならず、クリンカーのサイズ変動など複雑現象に対する実装に向けた最適運転計画などの制御アルゴリズムの提案にむけた検討も同時に期待したい。

### 提言に対する対処方針

○今後の実施課題について、

一省エネ型クリンカ焼成技術におけるコーティング等の運転面の課題に関しては、実機実証等を通じ最適な運転条件の確認を目指す。また、耐硫酸塩性等の品質面の課題に関しては、実使用環境条件に適した混合材設計等の最適化を目指す。

一温度計測技術については、実用化と普及のために装置化を目的とした開発を進め、2020年の装置完成を目指す。

一現在のシミュレータは、種々の運転データからモデル（パラメータ）の同定を行う静的なシステムである。ソフトの特性から動的な変動に対応できないが、オフライン的な利用方法で最適運転ポイントの探索等に利用可能と考える。運転面の活用については、シミュレータを使い込む中で検討して行きたい。

## 10. 提言及び提言に対する対処方針

### 今後の研究開発の方向等に関する提言

○今後、実際のセメント製造にこの事業の結果を当てはめて、長期の運転が可能であるか等の実証が必要と考える。また、事業化においてはコスト試算、マイルストーンの設定は必要と考える。各社で事業化に向けた方針は異なるものと考えられるが、多くの困難が予想される問題解決のためには、全社が一丸となって取り組む必要があると考える。

### 提言に対する対処方針

○実証については、2020年以降順次着手する予定。この際、ご提言いただいた点（長期運転による課題、コスト試算、マイルストーン設定等）についても検討していきたい。また、「セメント業界における2020年度以降の低炭素社会実行計画」において「革新的技術の開発・導入」の1つとして本技術を位置付け、オールジャパンでの取り組みを目指している。