

プロセスシミュレーターを用いたセメントプロセス モデルの開発

矢野信
持永忠
田代克
山下午 曉 正

Cement Process Modeling using Process Simulator

Makoto YANO
Tadashi MOCHINAGA
Katsushi TASHIRO
Akimasa YAMASHITA

Since the cement sintering process involves gas-solid phase reaction, each component in cement kiln shows too complicated behavior to allow a satisfactory quantitative analysis. We have developed a cement process model using Process Simulator which can reveal the behavior of each component in suspension preheater, kiln, and clinker cooler. Using this model, the following items have been studied :

- 1) Material/heat balance in suspension preheater, kiln, and clinker cooler.
- 2) Behavior of each component in suspension preheater, kiln, and clinker cooler.
- 3) Analysis of the anticipated effect that would influence the cement calcination process when the operation mode is changed.

In an effort of waste recycling and reduction of energy cost at cement plants, we are now trying to use plastic wastes, used tires, and RDF for partial replacement of coal. The present model has proved to be highly promising for the analysis of our ongoing program.

1. はじめに

セメント製造プロセスは、原料工程、焼成工程及び仕上工程の3つに大別される。中でも焼成工程はセメントの品質、エネルギー管理上最も重要なプロセスである。

最近では、キルンでの高温焼成を生かした廃棄物の燃焼処理が着目され、廃タイヤやRDFの利用に加え、廃プラ等の有効利用の検討が行われている。このように多様化する原燃料ソースに対応しながら、一方ではセメント品質の維持管理、省エネルギーの推進が要求されており、これらを満足するためには

焼成工程の定量的解析が必要である。

しかしながら、焼成工程におけるサスペンション・プレヒーター（SP）やキルン内の物性の挙動は、気-固相反応を含む極めて複雑な反応を有しており、それらを定量的に把握することは非常に困難とされてきた。

そこで、汎用プロセスシミュレーターを用いたセメント焼成工程のモデル化を試みた。このモデル化により以下の項目の検討が可能になる。

- ① 厳密なマテリアル/ヒートバランスの計算
- ② キルン内の主要成分の挙動解析
- ③ 運転条件変更時のプラント挙動の検討

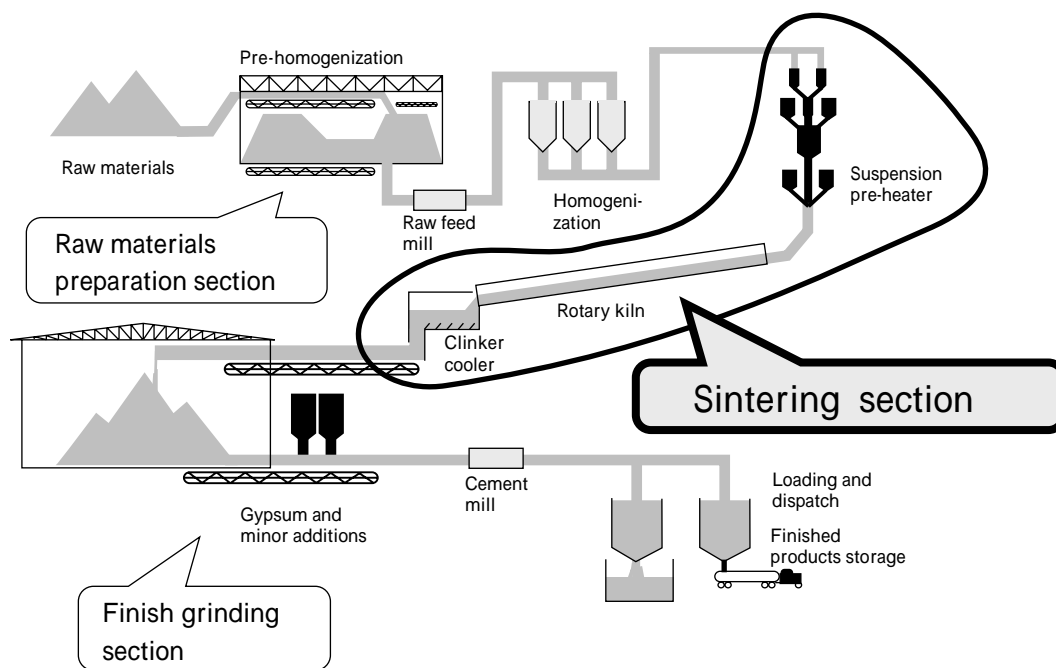


Fig. 1 Cement process.

2. セメントプロセスの概要

当社セメントプラントでは、2系列（6S、7S）のキルンで普通ポルトランドセメントの製造を行っている。

Fig. 1 に示すようにセメントの製造工程は原料工程、焼成工程及び仕上工程で構成されている。

・原料工程

セメントの原料は主成分として以下のものがあげられる。

- ・石灰石
- ・粘土
- ・珪石
- ・酸化鉄原料

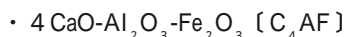
原料工程では原料の調合が行われる。また、ここでは発電所で排出される石炭灰を粘土代替原料として使用している。調合された原料は堅型ミルにて細かく粉砕され粉体原料となる。

・焼成工程

焼成工程では粉体原料をSP及びキルンで焼成し、セメントの中間製品であるクリンカーを生成する。

クリンカーの主要化合物を以下に示す。

- ・ $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ [略号 C_3S]
- ・ $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ [C_2S]
- ・ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ [C_3A]



これらの化合物はセメント原料の鉱物が分解・反応して生成される。

焼成に必要な熱エネルギーは主にキルンでの微粉炭の燃焼により供給されるが、最近ではゴミを固形燃料化したRDFも燃料として使用されている。また、SP側では廃タイヤ投入による代替エネルギーの使用も進められている。

キルンで焼成されたクリンカーはクーラーで冷却され、仕上工程へ送られる。

・仕上工程

仕上工程では、クリンカーにセメント硬化速度調節のために必要な石膏や混合材としてのスラグ等を加え、仕上ミルで粉砕後、製品としてのセメントを得る。

3. 焼成工程の設備概要と焼成反応

今回のモデル化は当社セメントプラントの7S焼成系を対象として行った。

Fig. 2 に焼成工程の主な設備を以下に示す。

【1】各機器概要

・サスペンション・プレヒーター（SP）

SPはサイクロンを4段、縦方向に連結した構造となっている。最上段から投入された原料は、落下しながらキルンから出る高温の排ガスによって

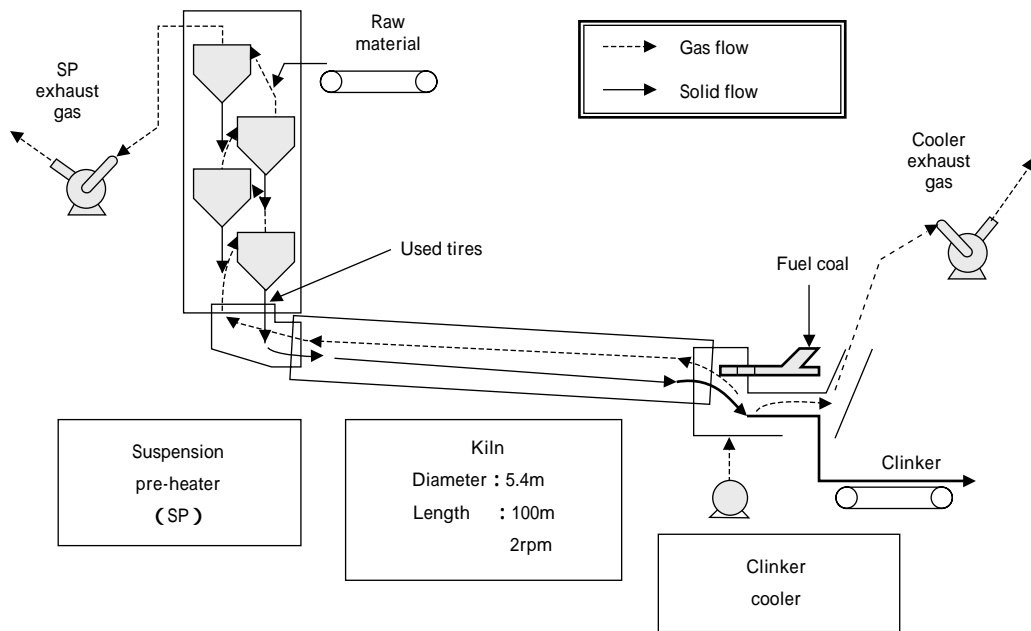


Fig. 2 Cement sintering section.

予熱されキルンへ入る。最下段では原料温度が800～900 に達しているため、一部炭酸カルシウムの分解（脱炭酸反応）が始まる。

・キルン（回転窯）

7Sキルンは直径5.4m、長さ100mの円筒形の窯で、内部を耐火レンガで内張りした構造となっている。キルンは3°の傾斜をつけてあり約2回/分で回転しながら原料をキルン出口へと導く。出口付近では微粉炭の燃焼により約1,450 の温度で焼成されクリンカーとなる。

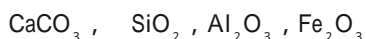
・クリンカークーラー

キルンで生成されたクリンカーはクーラーの可動式プレート上へ落下し、クーラー出口へ運ばれながらプレートの間隙から吹き込まれた空気によって冷却される。冷却に使われた空気はクリンカーの熱を奪い高温となるため、一部がキルンへ吹き込まれ微粉炭燃焼用の空気として利用される。クーラーから出たクリンカーは約80℃まで冷却される。

〔2〕焼成反応

焼成工程における反応を以下に示す。

原料の主要成分としては以下の物質が挙げられる。



原料はSP及びキルンにおいて昇温されるにした

がって反応が進む。温度による主反応をTable 1 に示す¹⁾。

キルン出口は約1,450℃で固相にC₃SとC₂S、液相にCaO、Al₂O₃、Fe₂O₃などが溶け込んでおり、クーラーで急冷されると液相からC₃AとC₄AFが晶出されクリンカーとなる。

クリンカーの概略組成を以下に示す。

C ₃ S	60wt%
C ₂ S	20wt%
C ₃ A	10wt%
C ₄ AF	10wt%

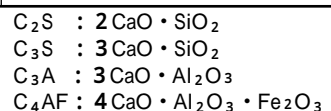
4. モデリング

〔1〕プロセスシミュレーター

今回のモデリングには、アメリカ Aspen Tech.社が

Table 1 Main reactions in cement sintering process

Temperature	Main reaction
~ 700	vaporization
700 ~ 900	CaCO ₃ → CaO + CO ₂
900 ~ 1200	2 CaO + SiO ₂ → C ₂ S
1200 ~ 1300	3CaO + Al ₂ O ₃ → C ₃ A
	4CaO + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ → C ₄ AF
1300 ~ 1450	C ₂ S + CaO → C ₃ S



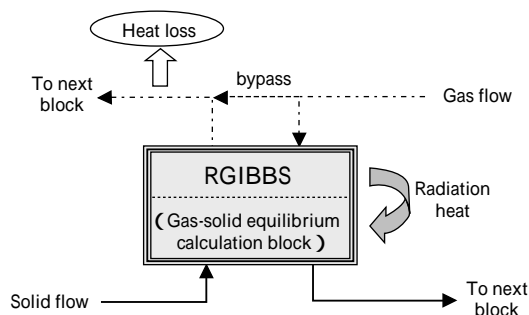


Fig. 3 Gas-solid equilibrium calculation unit.

開発したプロセスシミュレーター“ Aspen Plus ”を用いた。Aspen Plusは世界的に使用されている汎用プロセスシミュレーターのひとつであり、シミュレーターの中では唯一固体反応を取り扱う事が可能である。

今回のモデリング作業では、セメントの固相物性、キルンのモデリング技術に関してAspen Tech.社の技術協力を得た。

【2】反応モデル

セメントプロセスで行われている気 - 固相反応をモデル化するに当たり、Aspen Plusに内蔵される化学平衡反応計算ユニット (RGIBBS BLOCK) を用いた。この計算ユニットでは供給される気相、固相が全て化学平衡状態になる様に計算が行われる。

しかし実機の反応では完全に化学平衡状態になる事はない。そこで、気相の一部のみを固相と反応させ、未反応の気相をバイパスさせた。このようなユニ

ットを組む事で全量が平衡状態になる事を防ぎ、より実機に沿うモデルを構築した。Fig. 3に反応モデルの計算ユニットについての概略図を示す。

【3】物性モデル

物性推算には、1994年、A.D.Peltonにより発表された“ Phase Diagrams of Ceramists ”の気 - 固相平衡データより導き出されたパラメータを用いた。

【4】主要機器のモデル化

汎用シミュレーターでは、石化プラントで使用される蒸留塔、熱交換器、反応器等の一般的な機器は標準でユニット化されているが、セメントプロセスの様な粉体焼成機器の専用ユニットは装備されていない。そこで、前述した反応計算ユニットを組み合わせSP及びキルンのモデル化を行った。Fig. 4、Fig. 5にSPおよびキルンのモデル化の概念図を示す。

計算ユニットを直列に繋げる事で、実機と同様に燃焼ガスと原料を向流に接触させ反応が行われるモデルを構築した。

当初はキルンにのみ反応計算ユニットを組み合わせたモデルを採用し、SP部については原料の脱炭酸反応だけを計算する簡易モデルとしていた。しかし気相挙動が実機に沿わなかったため、SP部にも反応計算ユニットによる組み合わせモデルを採用した。その結果、SPで起こる CaCO_3 の脱炭酸反応率が、原料及び燃焼ガスの条件により自動的に算出される様になった。

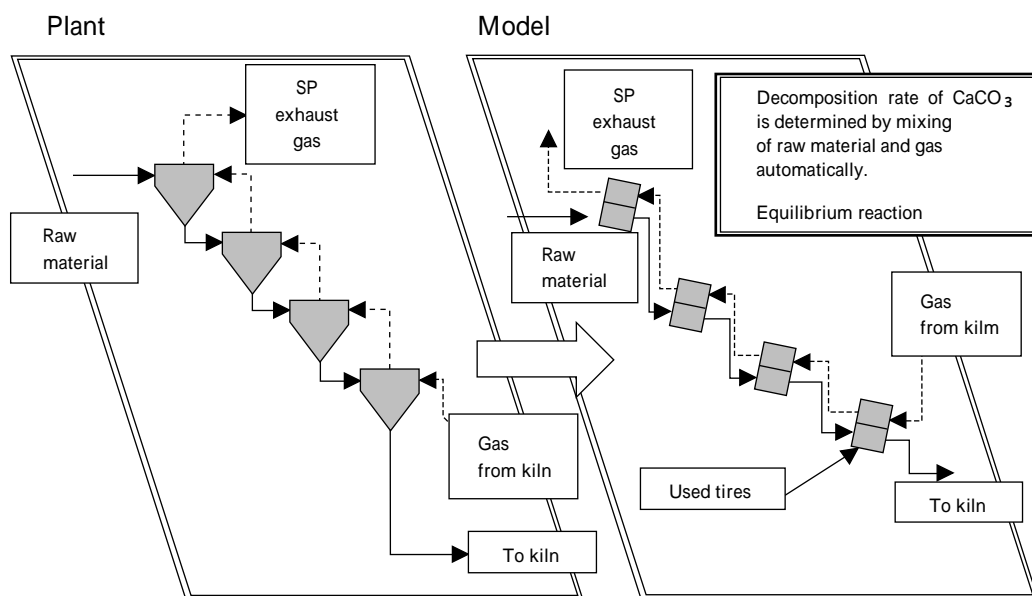


Fig. 4 SP model.

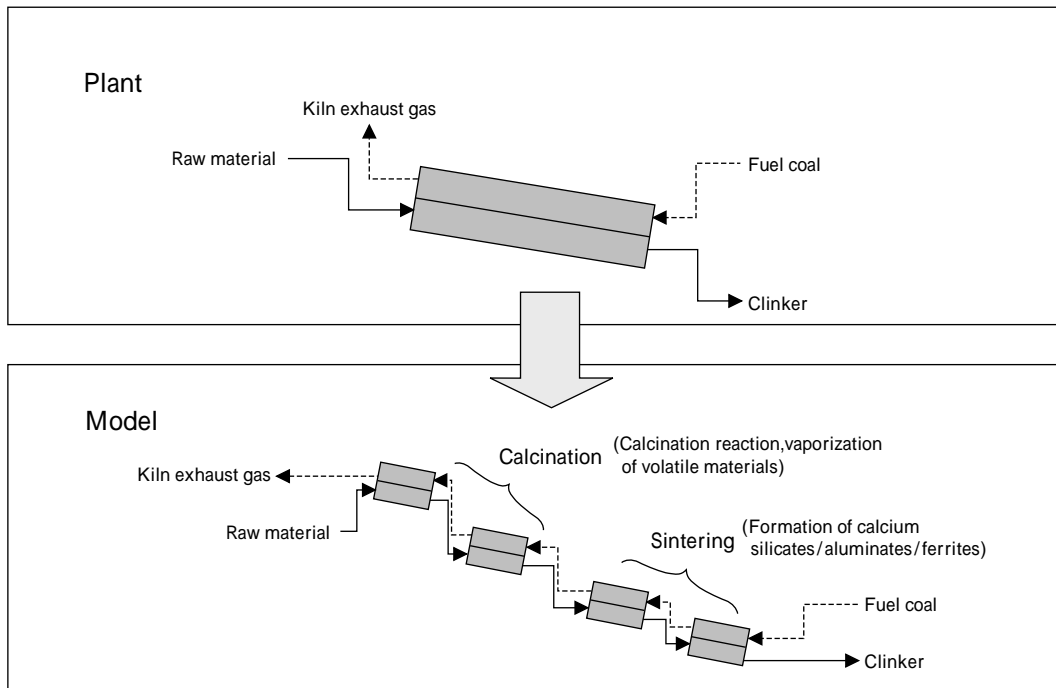


Fig. 5 Kiln model.

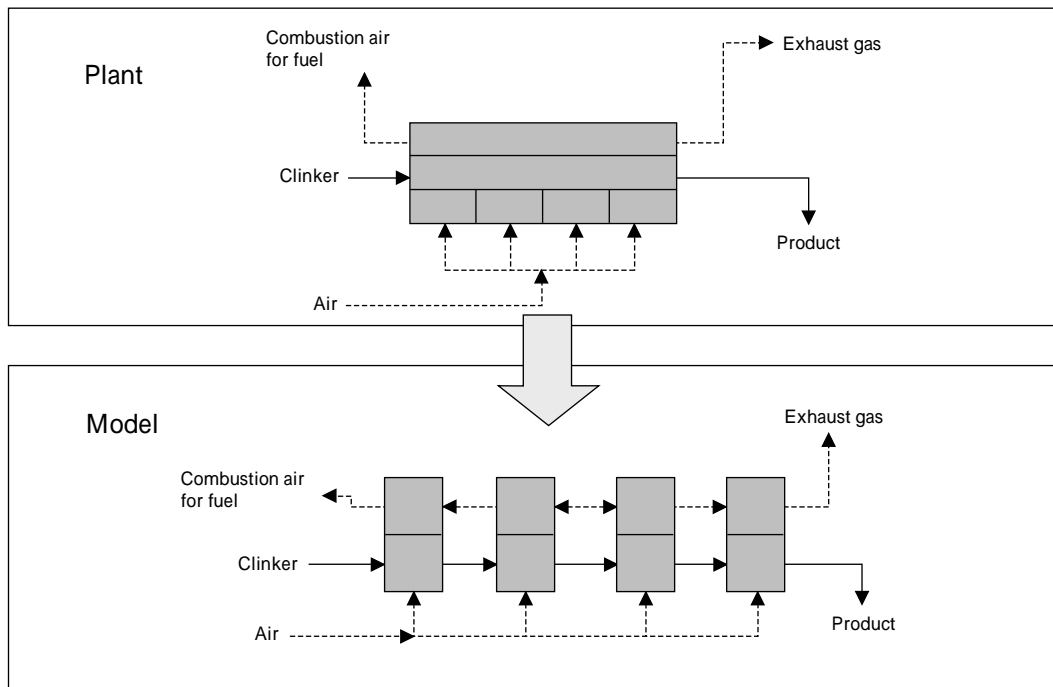


Fig. 6 Cooler model.

クリンカークーラーについては熱交換器の計算ユニットを組み合わせたモデルとした。 Fig. 6 にクリンカークーラーのモデル概略図を示す。

〔5〕入出力データ

以下の項目の流量及び成分データをモデルに入力

する。

- ・原料
- ・燃料（微粉炭及び用済みタイヤ）
- ・空気（燃料及び冷却用）

計算結果として以下のデータを得る事が出来る。

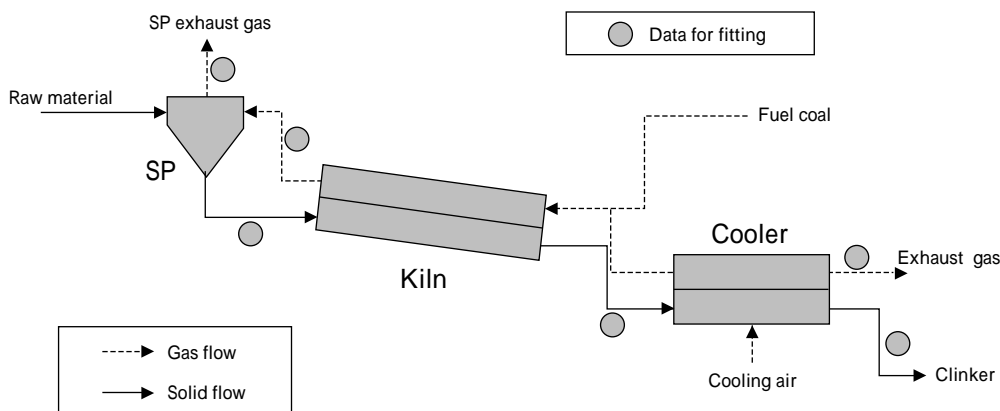


Fig. 7 Fitting points.

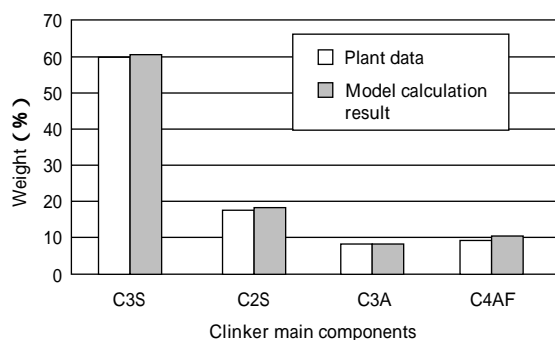


Fig. 8 Clinker main components.

- ・ 固相、及び気相の流量、組成、温度、エンタルピー
- ・ SP及びキルン内の各成分挙動及び温度分布

〔6〕モデルチューニング

モデルによる計算結果と実機運転データとの整合性を取るために、Fig. 7に示してある6ヶ所の温度について、以下のパラメーターでチューニングを行った。

- ・ SP部での対流伝熱量（ガスバイパス量）
- ・ SP部から大気中への放熱によるloss量
- ・ キルン部での対流伝熱量（ガスバイパス量）
- ・ キルン部から大気中への放熱によるloss量
- ・ キルン部でのGas Solidへの放射伝熱量
- ・ クーラー部の熱交換量

5. 計算結果

今回作成したモデルの検証を行うために実機運転データとシミュレーション結果の比較を以下の項目について行った。この計算に用いた入力データを以下に示す。

- ・ 原料投入量 6,600T/D
- ・ 微粉炭量 430T/D
- ・ 用済みタイヤ量 25T/D

〔1〕マテリアル/ヒートバランス

Fig. 8にクリンカーの組成について、プラントデータと本モデルによる計算結果との比較を示す。

各成分ともプラントデータとモデルによる計算結果がほぼ一致し、本モデルの妥当性が確認できた。

次にFig. 9にプロセス主要部分の温度、流量についてプラントデータとモデルとの比較を示す。

固相については、キルン落口のクリンカーについて流量と温度を比較した。それぞれ良い一致を見せている。

気相についてもSP排ガス、キルン排ガス、クーラー排ガスの温度について比較を行った。これらの値もプラントデータとモデルが良い一致を見せている。

〔2〕プロセス内気相挙動

本モデルの成果として、今まで困難とされてきたSP及びキルン内部での物質挙動を把握することが可能となったことが上げられる。Fig.10は気相成分のうちCO₂とSO₂について、SP、キルン内の挙動を示している。また、SP部の厳密なモデル化による気相挙動の影響についても比較を行った。

セメントの反応ではSP部およびキルンのSP側でCaCO₃の分解によるCO₂の発生（脱炭酸）が生じる。モデルでもキルンのSP側からCO₂が増加していることが確認された。

実機ではほとんどのsulfurが固相中に固定され、SP排ガスにSO₂は含まれていない。しかし簡易モデルでは排ガス中にSO₂が含まれている。これは簡易モデル

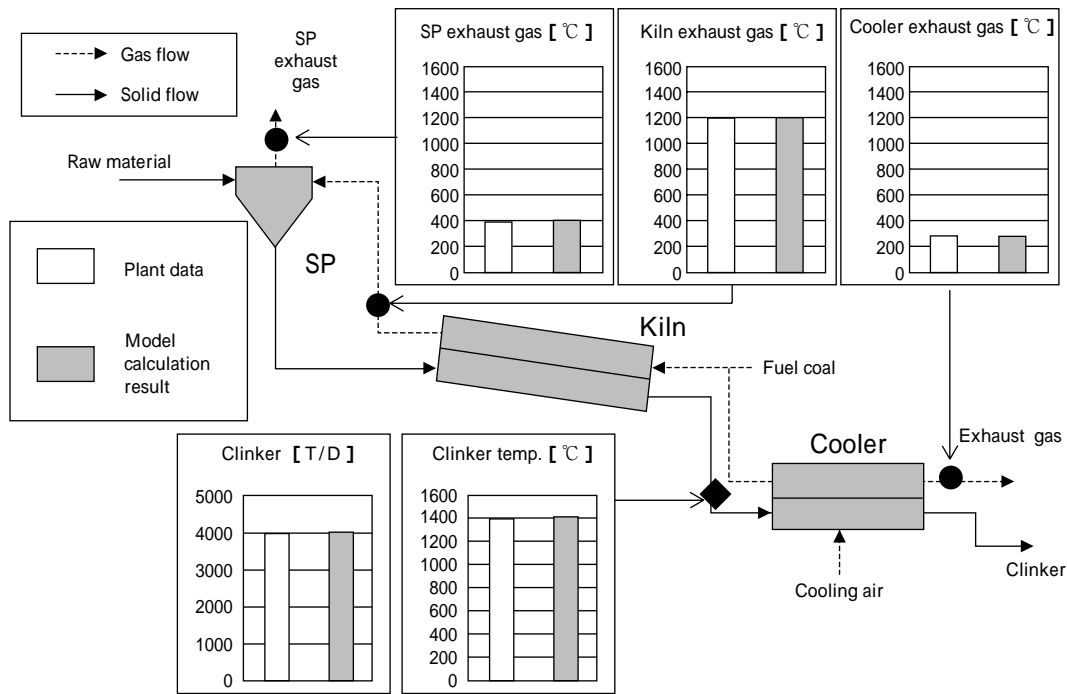


Fig. 9 Material and heat balance.

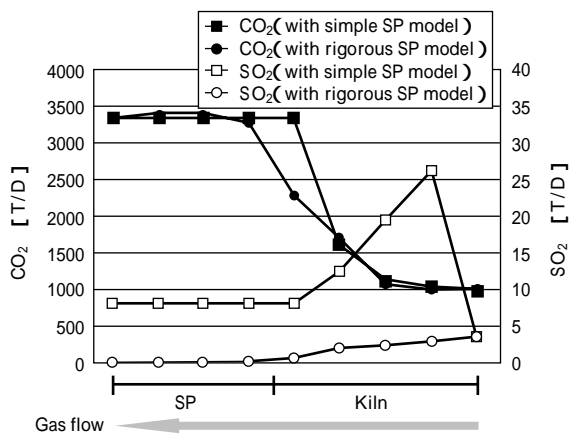


Fig.10 The behavior of gas components in SP and kiln.

では原料と燃焼ガスの反応が行われていない事が原因と考察される。そこで厳密なSPモデルに改良する事で原料と燃焼ガスを反応させ、sulfur成分の挙動を実機に近づける様にした。

厳密なSPモデルでは、気相中のSO₂がSP出口に向かって減少し、ほとんどのSO₂が固相に固定され、実機の状況がシミュレートされている事が確認された。

〔3〕プロセス内固相挙動

プロセス内の固相の挙動についても、セメントの

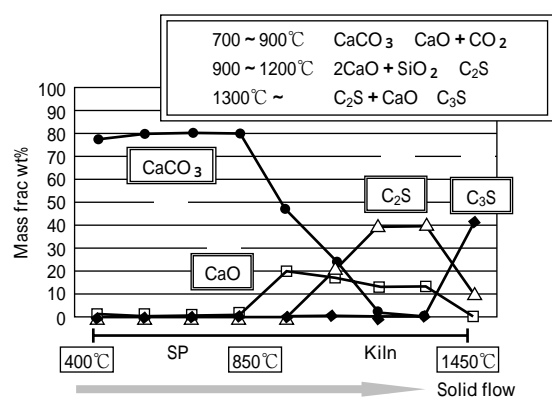


Fig.11 The behavior of solid components in SP and kiln.

主成分であるCaCO₃、CaO、C₂S、C₃Sについて着目し、Table 1に上げた反応と比較した。Fig.11にSP、キルン内での4成分の挙動について示した。

まず、SPからキルンにかけて脱炭酸反応によりCaCO₃が減少し、CaOが増加していることから①式の反応が確認出来た。

次に生成したCaOとSiO₂が反応しC₂Sがキルンの前半部で増加し②式の反応が確認出来た。

さらにキルン出口ではC₂SとCaOが反応しC₃Sが生成、増加しているのに対してC₂Sが減少しており③式の反応が確認出来た。

以上の検証から、セメント気 - 固相反応のシミュ

レーションが出来る事が確認された。また、代表的な運転データと本モデルのシミュレーション結果との比較においても、セメントプロセスの運転状況を良好にシミュレーション出来ると考えられる。

6.まとめ

汎用プロセスシミュレーターを用いて、気 - 固相反応を含むセメントプロセスのシミュレーションモデルが構築出来た。

その結果、実機の状態をよく表すことが可能となり、さらにプロセス内部の物質挙動についても把握することが可能になった。

今後このモデルを利用することで、原燃料の成分、投入量の変化に対するプロセスの挙動解析や、セメントプロセスでの廃棄物の有効利用、及びエネルギーコストの削減などが期待される。

文 献

著 者	著 者	著 者	著 者
氏名 矢野 信	氏名 持永 忠	氏名 田代 克志	氏名 山下 暁正
Makoto YANO	Tadashi MOCHINAGA	Katsushi TASHIRO	Akimasa YAMASHITA
入社 平成8年4月1日	入社 昭和62年4月1日	入社 昭和56年4月1日	入社 昭和61年4月1日
所属 南陽技術センター プロセス技術室	所属 セメントエネルギー製造部 部長付	所属 南陽技術センター プロセス技術室 室長	所属 セメントエネルギー製造部 セメント課 課長