石炭配合計画における混合整数計画法(MIP)の適用について

宮成 勇誠・似田代 勲・山下 哲雄・木原 研司・渡辺 生司

1. はじめに

一貫製鉄プロセスにおいて，高炉を安定して操業するためには，燃料としてのコークスの品質がおよぼす影響を無視することができない．コークス炉で石炭を乾留して良質なコークスを得るには，装入する石炭の品質変動を極力おさえるよう，石炭の銘柄毎の日々の最適な配合使用計画をたてる必要がある．

しかし，人手による計画作成方法では，多大の労力と時間を要するので，必ずしも満足できる結果が得られない．そこで，過去にそのシステム化が図られたが，ハードならびにソフトの不備から実現に至らなかった．

今回・オンライン対話方式と混合整数計画法（ＭＩＰ）の導入他によって，石炭配合計画システムを実用化したので，その概要を以下に紹介する．（ＭＩＰ：Mixed Integer Programming）

2. 石炭配合作業の概要

石炭を荷揚げしてからコークスに乾留して高炉へ装入するまでの作業の概要を図１に示す．この図で石炭ヤードからコークス炉へ装入するまでが石炭配合作業にあたる．船から荷揚げされた石炭は石炭ヤードへ銘柄別に貯炭され，必要に応じて配合槽へ送られる．入槽された石炭は石炭配合計画にしたがって定められた配合で切り出されると同時に配合される．さらに，粉砕，混炭の処理がほどこされ，コークス炉へ装入される．装入された石炭は，コークス炉で乾留(蒸焼き)されコークスとなる．

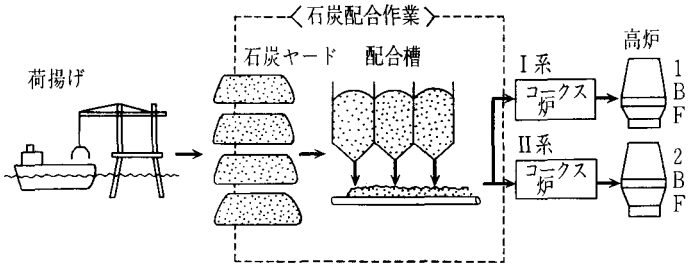


図１　コークス工程の物流のイメージ

石炭配合計画では，個々の石炭の成分からコークス品質を推定し，高炉の要求水準を満たすコークス品質を得るように銘柄別の配合割合を定めている．個々の石炭の成分とコークス品質の関係を図２に示す．計画の作成に当っては，下記の条件を考慮する．

a．使用槽数の制限（ＭＡＸ　18槽）
b．槽の切出し能力の上下限
c．使用銘柄数の制限（使用槽数以下）
d．グループ・銘柄別の石炭の使用制限
e．装入炭の品質制約

なお，入荷の遅れとか高炉の状態変化にともないコークス品質の目標値が変化するので，そのつ

みやなり　ゆうせい　〒870 大分市大字西ノ州１
にたしろ　いさお，やました　てつお　新日本製鐵　大分製鐵所　システム部　製銑オンラインシステム
きはら　けんじ，わたなべ　せいじ　新日本製鐵　大分製鐵所　製銑部　製銑技術室

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

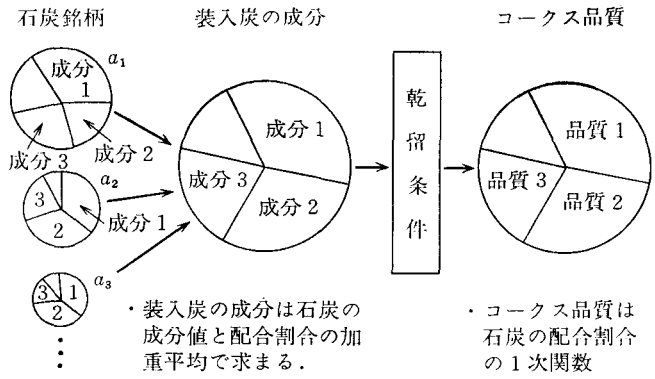


図 2　石炭の成分値とコークス品質

ど，計画の修正を行なうことになる．

3.　石炭配合計画システム

石炭配合計画システムは，半期，四半期および月次の計画作成を対象とし，その特徴は

①混合整数計画法（ＭＩＰ）をオンラインリアルタイム処理

②月次の計画作成においては，２カ月分の需給を考慮した日単位の配合使用計画を作成

③需給，品質制約等の諸条件の変化に迅速に対応できる使いやすいマン・マシン対話方式の採用等，機能面・運用面の工夫にある．図３に石炭配合計画システムの処理フローを月次計画の例で記す．

以下，各処理内容を順に説明する．

(1) 諸条件の設定

石炭配合計画の作成に必要な，計画スタート時の在庫計算および四半期の配合割合を目標に，実行中の配合から配合期間の配合変動を加味した初期の配合指針を設定する．

(2) 需給（在庫）のローリング

石炭配合モデルの前提となる個別の銘柄の在庫量を保証するため，前日の在庫量と配合割合をもとに当日の使用量から在庫量を計算し，在庫切れの有無をチェックする．在庫切れの場合は，代替の銘柄選択ルーチンへ進む．

(3) 銘柄選択

在庫切れ発生の場合，その代替銘柄として当日

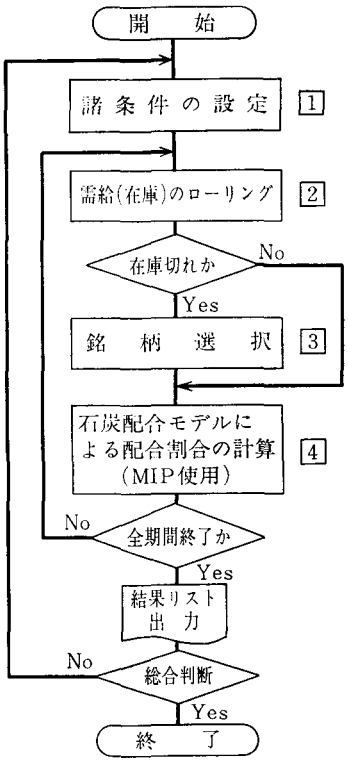


図 3　月次計画での石炭配合計画システムフロー

のヤードにある全銘柄（入荷予定も含む）を対象に，銘柄選択基準にしたがって在庫切れ銘柄と最も性状の近い銘柄を選択する．

主な選択基準に次のものがある．

a．同じ銘柄

b．同じ炭種

c．類似の成分

d．入荷の古さ

(4) 石炭配合モデルによる配合割合の計算

ＭＩＰを使用した石炭配合モデルによって，銘柄別の配合割合と個々の銘柄の分析値から装入炭成分の計算とコークス品質の推定を行ない，コークス品質を満足し，変更すべき銘柄の種類を少なくするような最適な配合割合を計算する．図４で具体的な銘柄別の配合割合をもとに石炭配合計画の作成手順の例を示す．

この作成例では，諸条件である前日の配合使用銘柄と配合割合および配合指針を図のように設定

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

銘柄名	諸条件		1日目			2日目			3日目		
	前日配合割合	配合指針	当日財源 下限	当日財源 上限	配合計算割合	当日財源 下限	当日財源 上限	配合計算割合	当日財源 下限	当日財源 上限	配合計算割合
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
a_1	10	10	8	16	11	8	15	11	8	14	11
a_2	20	21	15	23	20	15	22	20	0	0	0
a_3	15	15	12	18	15	12	17	15	12	16	15
a_4	25	24	20	26	24	20	25	24	20	25	25
a_5	15	15	10	17	15	10	16	15	10	15	15
a_6	15	15	10	15	15	10	15	15	10	15	15
a_7									17	25	19
2 需給(在庫)のローリング			在庫切れなし			在庫切れなし			a_2銘柄の在庫切れ		
3 銘柄選択			———			———			a_7銘柄選択		
4 石炭配合モデルによる配合割合の計算			a_1銘柄 10%→11% a_4銘柄 25%→24%			前日の配合割合と同じ			a_2銘柄 20%→0% a_4銘柄 24%→25% a_7銘柄 0%→19%		

図 4 石炭配合計画の作成手順の例

し，石炭配合計画をスタートさせた．第1日目は，配合指針（10，21，15，24，15，15%）をもとに石炭配合モデルで最適な配合割合（11，20，15，24，15，15%）を計算したケース．第2日目は，石炭配合モデルの結果が前日の配合計算割合と同じケース．第3日目は，a_2銘柄の在庫切れにともない代替銘柄（a_7銘柄，17～25%制約）を選択し石炭配合モデルで最適な配合割合（11，15，25，15，15，19%）を計算したケースである．

4. 石炭配合モデル（MIP使用）

石炭配合モデルは，同一の配合パターンが長期間継続するように，できるだけ少ない銘柄の操作でコークス品質を満足し，かつ，前回品質との品質差を抑制するモデルである．

目的関数を

$$F=\sum_k w_k\cdot|Q_k-Q_{kb}|+W\cdot\sum_i Z_i \qquad (4.1)$$

と表現し，Fが最小となるような銘柄別の配合割合X_i(%)と配合変更有無の変数Z_iを求める．

F：目的関数

i：添字（石炭の銘柄番号　$i=1\sim m$）

j：添字（石炭の品質番号　$j=1\sim n$）

k：添字（コークスの品質番号　$k=1\sim o$）

p_{ij}：第i番目の銘柄の第j番目の成分値（%）

X_i：第i番目の銘柄の今回の配合割合（%）

Q_k：第k番目のコークス品質の今回の値（%）でX_iの1次関数

Q_{kb}：第k番目のコークス品質の前回の値（%）

w_k：第k番目のコークス品質の重み係数

W：配合変更銘柄数の重み係数

Z_i：第i番目の銘柄の配合変更の有無

$Z_i=1$：前回から配合を変更する

$Z_i=0$：前回から配合を変更しない

制約条件としては，配合変更銘柄数の制約，配合割合の制約，品質範囲の制約，品質ギャップの制約等がある．

(1) 配合変更銘柄数の制約

配合変更銘柄数の制約は，MIPを適用し次のようにした．（図5）

$$X_i=(1-Z_i)\cdot X_{ib}+Xi_1 \qquad (4.2)$$

$$X_{iL}\cdot Z_i\leqq X_{i1}\leqq X_{iU}\cdot Z_i \qquad (4.3)$$

$$\sum_i Z_i\leqq N \qquad (4.4)$$

X_{i1}：第i番目の銘柄の仮の配合割合（%）

X_{ib}：第i番目の銘柄の前回の配合割合（%）

N：配合変更銘柄数の上限値

(4.2)(4.3)式は配合割合の決定式と制約式で

$Z_i=1$の時　$X_i=X_{i1}$（新配合割合の決定）

$Z_i=0$の時　$X_i=X_{ib}$（今回配合＝前回配合）

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

となる．(4.4) 式は配合変更銘柄数の制約式である．

(2) 配合割合の制約

$$X_{iL} \leqq X_i \leqq X_{iU} \qquad (4.5)$$

X_{iL}：第 i 番目の銘柄の配合割合の下限値（%）

X_{iU}：第 i 番目の銘柄の配合割合の上限値（%）

(3) 品質範囲の制約

$$P_j = \sum_i p_{ij} \cdot X_i \qquad (4.6)$$

$$P_{jL} \leqq P_j \leqq P_{jU} \qquad (4.7)$$

P_j：第 j 番目の装入炭成分の成分値（%）

P_{jL}：第 j 番目の装入炭成分の下限値（%）

P_{jU}：第 j 番目の装入炭成分の上限値（%）

$$Q_{kL} \leqq Q_k \leqq Q_{kU} \qquad (4.8)$$

Q_{kL}：第 k 番目のコークス品質の下限値（%）

Q_{kU}：第 k 番目のコークス品質の上限値（%）

(4.6)(4.7)式は装入炭成分の算出式と制約式であり，(4.8)式はコークス品質の制約式である．

(4) 品質ギャップの制約

$$\Delta P_j = \sum_i p_{ij} \cdot X_i - \sum_i p_{ij} \cdot X_{ib} \qquad (4.9)$$

$$\Delta P_{jL} \leqq \Delta P_j \leqq \Delta P_{jU} \qquad (4.10)$$

ΔP_j：第 j 番目の装入炭成分のギャップの値（%）

ΔP_{jL}：第 j 番目の装入炭成分のギャップの下限値（%）

ΔP_{jU}：第 j 番目の装入炭成分のギャップの上限値（%）

$$\Delta Q_k = Q_k - Q_{kb} \qquad (4.11)$$

$$\Delta Q_{kL} \leqq \Delta Q_k \leqq \Delta Q_{kU} \qquad (4.12)$$

ΔQ_k：第 k 番目のコークス品質のギャップ値（%）

ΔQ_{kL}：第 k 番目のコークス品質のギャップの下限値（%）

ΔQ_{kU}：第 k 番目のコークス品質のギャップの上限値（%）

(4.9)(4.10)式は装入炭成分ギャップの算出式と制約式であり，(4.11)(4.12)式はコークス品質ギャップの算出式と制約式である．

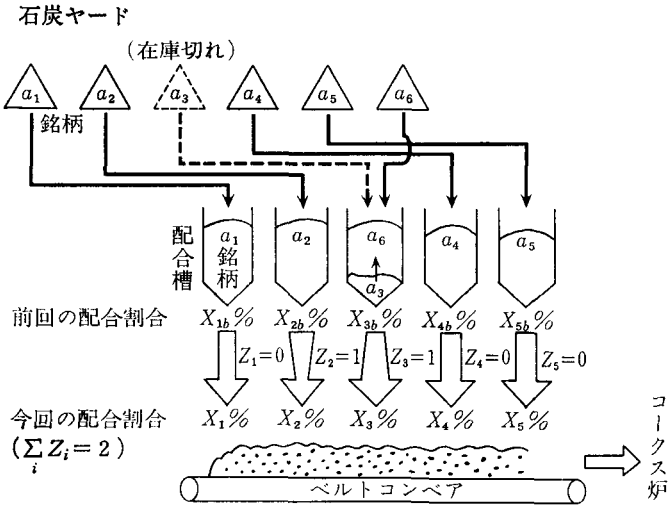


図 5 配合変更有無の変数 Z_i（0−1 整数変数）の導入例

5. 操業への適用と今後の課題

石炭配合計画システムは，コークス生産計画管理システムの主要な機能として，大分製鐵所の生産管理用大型ビジコンに組み込まれており，現在順調に稼動している．特にＭＩＰのオンライン化にさいしては，データの授受の工夫およびＣＰＵ処理の待時間の短縮を図った．図６に石炭配合計画のシステム構成を示す．

このシステムでは，グラフィックＣＲＴによってコークス品質ギャップの推移図（図７）やＭＩＰで解がない時のアクションガイド等の表示機能をサポートしている．

モデルのチューニングでは，シミュレーションにより配合変更時のコークス品質のギャップと変更銘柄数が実操業に適するような重み係数Wの値を求めた．

本石炭配合計画システムの実用化によって

ａ．コークス品質の変動の減少

ｂ．石炭配合担当者の業務負荷の軽減

ｃ．石炭配合管理業務の標準化

ｄ．迅速なアクションによる機会損失の減少等

が達成された．

今後の課題としては次の点がある．

①石炭配合モデルのレベルアップ

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

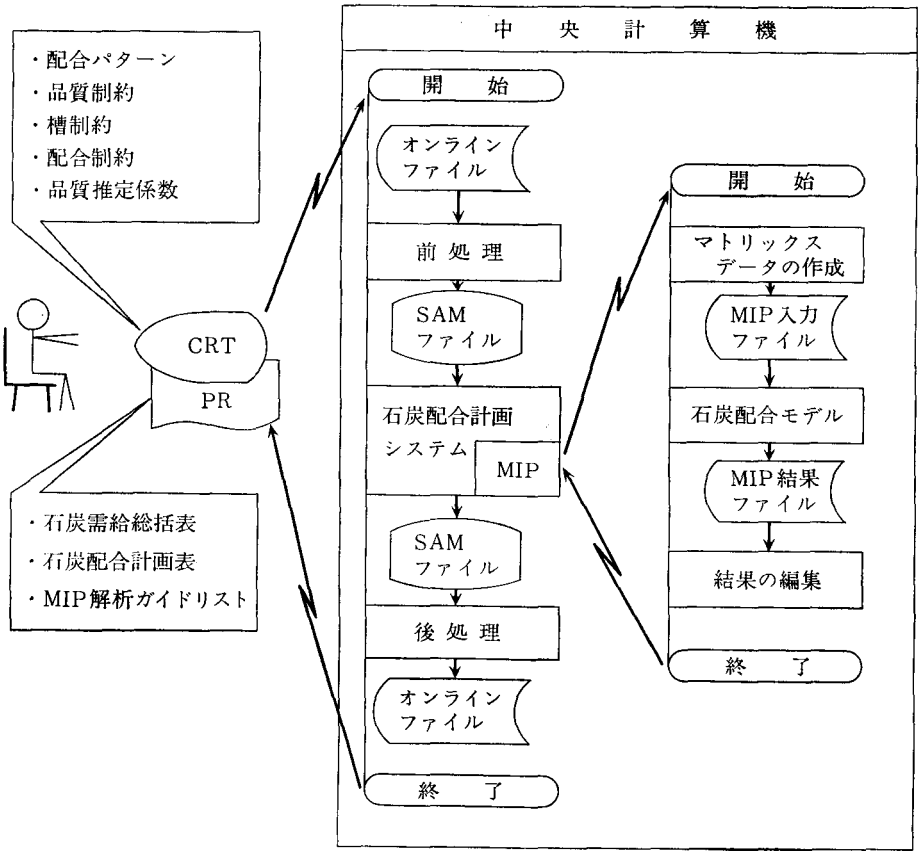
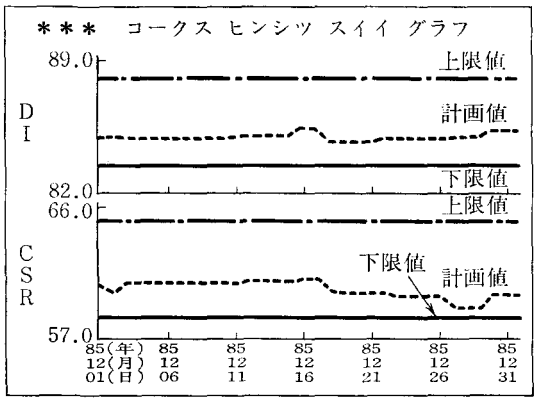


図 6 石炭配合計画のシステム構成

計画作成期間（たとえば2カ月間）全体にわたっての品質差のミニマム化を狙い，かつ，個々の配合変更時の品質差を極力ミニマム化することを考える．（図8）



DI ：コークス品質（冷間強度）
CSR：コークス品質（反応後強度）

図 7 石炭配合計画結果の出力例

②ＭＩＰ用パラメータ作成の自動化

ＭＩＰ用パラメータを作成するさい，モデル式をマトリックス形式に変換するのに要する作業負荷が非常に大きい．そこで，数式のイメージで直接入力されたデータから自動的にモデル用パラメータを作成するソフトを導入したい．

6. おわりに

以上，石炭配合計画システムの概要と混合整数計画法について簡単に述べた．線形計画法，あるいは混合整数計画法の原料計画分野への適用は，以前から行なわれているが，今回，石炭配合計画の分野に導入を図り，オンラインリアルタイムシステムとして実用化した．

また，混合整数計画法は，各種の制約条件下で操業の最適解を求める手法の１つとして有力であり，製鉄プロセスにおいて今後，さらに適用範囲

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

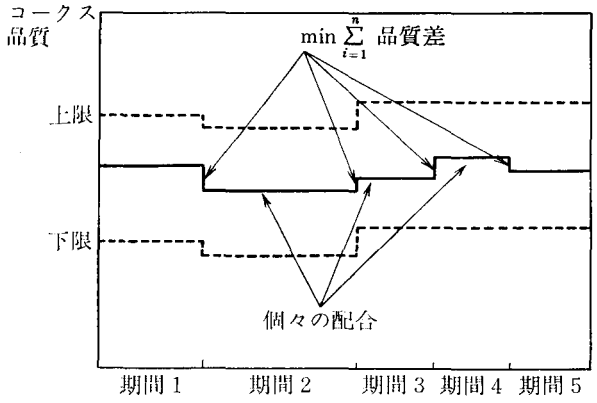


図 8 期間の品質差のミニマム化の考え方

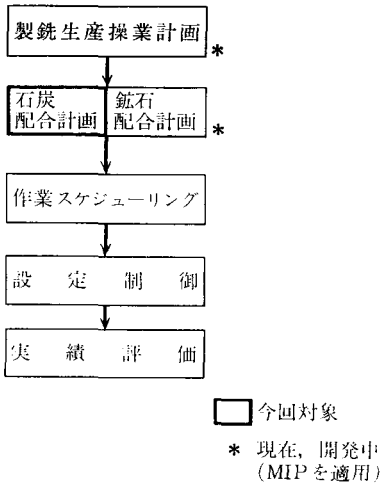


図 9 最適生産操業計画システム

が拡がるものと思われる．当システム部門においてもこの手法を発展させ，原料工場，コークス炉から高炉までトータルした最適生産操業計画システムの開発にもっかとりくんでいる．（図9）

●ミニミニ●OR●

暇つぶし

子供の頃には，ほとんどの汽車には蒸気機関車がついていて，汽車ごっこといえば腕を平行にかまえてシュッシュッといいながら一緒にまわしたものだ．ピストンとクランクのつもりだ．しかしよく考えてみるとおかしい．これだとピストンが死点にきたときに止まった機関車は動き出せないことになる．本物では何度かずらしてあるはずだ．

小学校に入ったとき，お祝いに船の模型をもらった．大航海時代の帆船で，マストのてっぺんに旗がひるがえり，進行方向にたなびいている．子供心にはこれが腑に落ちない．当時見たどの軍艦の写真でも軍艦旗のうしろに向いてはためいている．模型のほうが間違っているのだと早合点して直してしまった．でもこのことは何となく心にかかっており，その後数年して，帆がふくらんでいる方向に旗がたなびくのだということに気づいた．しかし，そのときには模型のほうはもうとっくにこわれていた．

ある午後のこと，中央線の駅のプラットフォームに立って電車を待っていた．日本一長い直線部分といわれる東西にのびた線路の，その東のはてに電車が動いているのが見える．しかし，去って行くのか近づいてくるのか？　遠くのことでさだかではない．よく見ると電柱の蔭が左下から右上に向って次々と横切っている．——まもなく下り電車が到着した．

暇なとき，雑誌にのっている風景の写真を見る．雪景色である．海が見える．1両だけのディーゼルカーが走っている——さて，この写真の撮影は何月頃か？　何時頃か？　方角は？　風向きは？　ディーゼルカーの進行方向は？　それ相応の理屈をつけて説明してみる．うまくいったときには，1人でホクソえんで言うのだ．「どうだねワトソン君？　納得したかね？」

（からくり堂主人）

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．