

Development of Storage Yard Operation Planning System



国分 春生

Haruo Kokubu

千葉製鉄所 製鉄部製
鉄技術室 主査(課長)



安田 素郎

Motoo Yasuda

千葉製鉄所 製鉄部製
鉄技術室長(部長補)



入月 克巳

Katsumi Iritsuki

情報システム部システ
ム技術室 主査(掛長)

要旨

千葉製鉄所製鉄原料ヤードの合理化の一環として P/C 更新に合わせてヤードの日間作業計画システムと置き場計画システムを開発し、運用を開始した。日間作業計画システムは毎日の原料処理、コンベアー輸送作業のスケジュールを自動的に立案するシステムである。制約指向プログラミングを適用して操業変化時のリアルタイムな対応を可能とし、計画作成時間の短縮を図った。置き場管理システムはヤード在庫や置き場スペースの推移を予測するシステムである。システム化により置き場検討作業の迅速化と予測精度の向上が図られ、置き場効率の向上も達成した。

Synopsis:

As a part of rationalization of raw material storage yard operation, along with upgrading of P/C, daily yard operation planning system and yard stock planning system were developed in Chiba Works, and went into operation. The former system automatically makes plans of daily material handling and conveyor operation schedules. Constraint logic programming was used to promptly cope with the change of operation conditions. Yard stock planning system predicts the transition of yard stock and available spaces. By use of the system, planning time was shortened, accuracy of estimation was improved and yard stock efficiency was improved.

1 緒 言

千葉製鉄所では原料ヤード作業の省力、設備操業コストの削減を目的として Fig. 1 に示すように 1993 年に東工場ヤードの西工場ヤードへの統合を行い、東工場のアンローダー、リクレーマーなどの軌条機械を停止した。その後 1994 年から 1995 年にかけて原料ヤード統合に伴う設備・作業の負荷軽減のため (1) コンベアー制御装置の更新、(2) ヤードプロコンの更新、(3) ヤード作業の日間作業計画システム・ヤード置き場管理システムの開発を行った。

日間作業計画システムとは毎日の整粒、スタッキングなどの原料処理作業、コンベアー輸送作業のスケジュールを自動的に立案するシステムである。軌条機械やコンベアーの運転計画では操業変化時のリアルタイムな対応性とプログラム変更の容易さが重要視されるため、開発に当たっては制約指向プログラミング (constraint logic programming: CLP)¹²⁾ を適用し、経験の少ないオペレーターでも短時間で計画の立案を可能とすることを旨とした。

ヤード置き場管理システムはヤードの在庫状況、原料使用計画などをベースにヤード在庫や置き場スペースの推移を予測するシステムであり、置き場検討作業の迅速化と置き場効率の向上を目的として開発した。

本報告では今回開発した両システムの概要と適用効果を述べる。

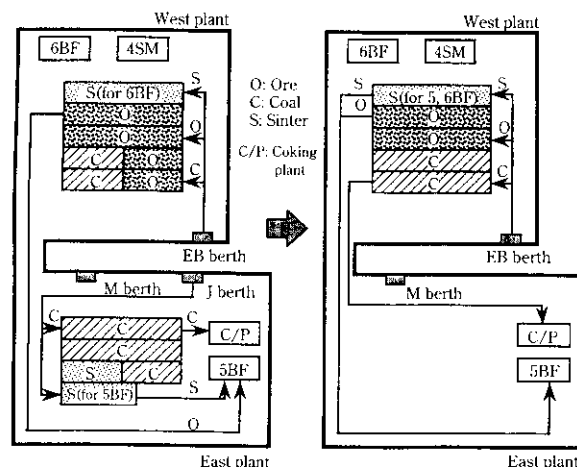


Fig. 1 Change of yard stock by yard operation rationalization

2 日間作業計画システムの開発

2.1 システム構成

日間作業計画システムでは中長期的なヤード運用、原料配合計画、週間および日々の設備保守計画、本船荷揚情報、銘柄ごとのヤード内積み山位置、プラントの槽レベルを主たる入力項目として、これら

* 平成9年3月3日原稿受付

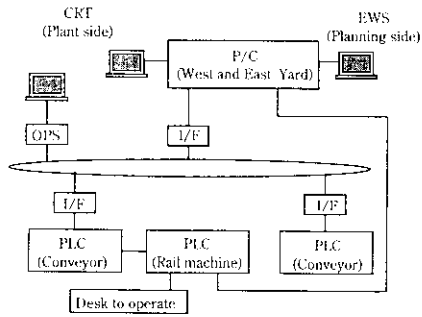


Fig. 2 Computer network

を基に原料輸送、処理作業ごとの開始、終了時刻、使用するコンベアー系統、スタッカー、リクレーマー（軌条機械）を決定する。

Fig. 2 に原料ヤードのシステム構成を示す。本システムはヤード操業プロセスコンピューター (P/C) のサブシステムとしてワークステーション (EWS) で稼働しており、P/C からの操業状況、操業条件の伝送に加えて若干の操業条件の補足入力が行われる。CLP による計画立案後、計画担当者は対話型計画指示画面 (GUI) を通して操業条件の緩和、変更の指示、一部計画の固定指示、再計画立案指示をすることができる。直接的な作業計画変更も可能である。なお、P/C ダウン時は OPS (operator station system) 操作により個別のコンベアー系統運転を可能としている。

2.2 CLP によるシステム化の狙い

システム化に当たって CLP を採用した理由は下記2点である。

- (1) コンベアーや軌条機械が錯綜し互いに干渉するため固定的な計画立案ロジックの規定が困難である。これに対し CLP では計画対象や操業条件を変数と制約条件として記述できるためプログラミングの特性が合っている。
- (2) 原料処理作業の種類や銘柄間の優先順位の変更、特定作業の固定、追加といったその時々状況変化に応じた計画策定が必要となるが、CLP では部分的に条件を変更したり、幾つかの変数を固定してその他の変数について求解するような処理が可能であり、効果的な対話型システムを構築できる。

2.3 CLP による問題解決方法

2.3.1 日間作業計画の問題解決方法

日間作業計画では、作業ごとに (a) 作業内容（輸送原料の銘柄、輸送量、輸送元、輸送先）、(b) 開始時刻、(c) 終了時刻、(d) 使用するコンベアー系統、(e) 使用する軌条機械の各項目を決定する必要がある。主な操業制約条件と問題の規模を以下に示す。

(1) 主な操業制約条件

- ・プラント貯鉄槽の在庫レベルを管理範囲内に保つ。
- ・一部のコンベアーを共用する系統の同時運転はできない。
- ・軌条機械同士の近接作業は禁止する。

(2) 問題の規模

- ・コンベアー系統数：約 200
- ・軌条機械数：約 10
- ・プラントの槽数：約 90

一日当りの作業計画において決定すべき変数は約 1000 である。

(3) 制約の記述

CLP では領域変数間の関係を等式と不等式で記述する。例として、槽番号 p 、装入 n 回目の装入開始時刻、 $ST[p, n]$ およ

び装入終了時刻、 $SE[p, n]$ に関する制約式を示す。

(a) 装入開始時刻に関する制約

$$SL[p, n] = EL[p, n-1] - SpB(ST[p, n] - ET[p, n-1]) \dots (1)$$

$$Inf < SL[p, n] < Sup \dots (2)$$

$$ET[p, n-1] < ST[p, n] \dots (3)$$

(b) 装入終了時刻に関する制約

$$EL[p, n] = SL[p, n] + (SpA - SpB) \times (ET[p, n] - ST[p, n]) \dots (4)$$

$$Sup < EL[p, n] < Max \dots (5)$$

$$ST[p, n] < ET[p, n] \dots (6)$$

ここで Max は槽の満量値で、これ以上のレベルでの装入は装入装置の自動運転の確保が不可能となるレベルを意味する。Sup は槽の上限管理値で、装入開始時はこのレベル以下とすることにより短時間の装入を防止することができる。Inf は槽の下限管理値で、槽レベル低下時の原料装入時の粉化を抑制するために設定した装入時の槽の下限レベルを意味する。SL[p, n] は装入開始時刻の槽レベル、EL[p, n-1] は前回装入終了時のレベル、SpA, SpB はそれぞれ原料装入速度、原料切出し速度、ET[p, n-1] は前回装入終了時刻を意味する。

このように、CLP では制約を満たす解を導く手順を一切記述する必要がなく、等式と不等式で制約式を記述するのみで解を求めることが可能である。

CLP では $ST[p, n]$ などの領域変数の値は制約伝播による解空間の縮小後、生成検査によって決定される。制約解消処理は処理系任せにしても良いが、解の質の向上と処理時間の短縮を図るため以下に示すように生成検査過程に制御構造を取り入れた。

- (1) 計画対象期間において、新たな作業が付加される際の既割り付け作業の変更を防止するために、実時間に沿って解を決定するように制御構造を記述した。順不同に作業が割り付けられると新たな作業が付加されるたびに既割り付け作業の変更が発生する。
- (2) プラント槽への原料装入作業において、一回当りの作業量（原料送り量）を多くするためには槽レベルの管理範囲をフルに活用して作業開始、作業終了時刻を可能な限り遅めに設定する必要がある。そのために作業開始、終了時刻の生成検査を大きい値から行うように設定した。

2.3.3 日間作業計画システム化の効果

計画作成のシステムフローを Fig. 3 に、アウトプット例を Fig. 4 に示す。本システム化により計画作成時間は2時間から約30分に短縮され、経験豊富なオペレータでなくても確度の高い計画を作成できるようになった。操業面での効果としてはプラント槽レベル管理精度の向上、および作業切り替え回数の削減がある。槽レベルの管理精度については自動操業管理による向上が期待できる。また作業切り替え回数の削減については、従来、操業中の現場では長期的な視野に立って計画を立案することが困難であったため槽在庫確保のためにオペレーターが早めの装入で対応したのに対し、本システムでは全銘柄の槽在庫レベル推移の予測のもとに管理レベルの範囲を広く使う方向で作業計画を立てるため作業切り替え回数の削減が可能となる。シミュレーションによれば今後25%程度までの作業切り替え回数の削減が期待されている。

本船荷役作業については、ヤードへの積み付けが他作業のヤード払出し作業と軌条機械で干渉する。入港後の荷揚げを早く終了させ

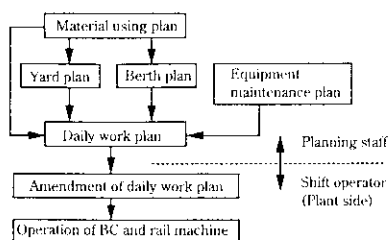


Fig. 3 System flow of daily work plan

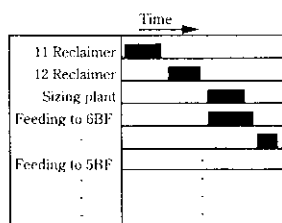


Fig. 4 Output image of conveyor operating schedule

るために焼結用粉鉱石のベッド積み付け作業と塊鉱石の整粒作業は他作業の合間に割り付けられる。これらの作業については従来の操業と同等の処理量を確保することができた。

2.3.4 システム処理速度の向上

計算処理速度の向上を図るため、以下の対応を行った。

- (1) CLPでは制約の記述順序は解の質に影響を及ぼさないが、厳しい制約から順に評価すれば制約伝搬による解領域の縮小が早くなりバックトラップの回数が減少する。このため条件の厳しい制約が先に評価されるような順序で制約条件を記述した。
- (2) 同様に、解領域の縮小を早め、バックトラップを抑えるために、制約条件の性格が異なり、相互の影響の少ない作業種類ごとにモジュール化し、部分ごとの制約評価と変数への付値を行う処理とした。
- (3) 軌条機械同士の作業位置による干渉のチェックのような定型的処理はC言語によって記述し、探索速度の向上を図った。これらの対策によりシステム処理速度を3倍に向上できた。

3 置き場計画システムの開発

3.1 置き場計画システムの機能

置き場計画では1km×0.4kmの原料ヤードにある約50の原料積み山の状況を把握し、本船荷揚時の卸し場の決定、および操業計画にしたがった物流を決定する。

本システムではP/CおよびB/Cから伝送入力される高炉、焼結、原料炭の配合計画とヤード在庫状況、および入船計画をもとに各銘柄の日毎原料使用量、および最長6ヶ月のヤード在庫マップの予測を行う。この際、ヤードの在庫状況（置き場スペースの状況）から入船時の置き場を検討できるシステムとした。システム出力例をFig. 5に示す。Ore-A, C, Dが配合銘柄であり約20日後に入船予定のOre-Eの置き場をOre-CとOre-Dの間に確保可能であることを示している。

3.2 ヤード在庫状況の把握精度向上

ヤード在庫状況の把握精度向上を目的として、リクレーマーの3

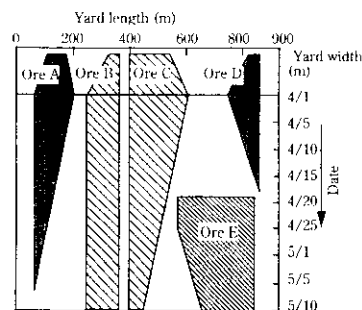


Fig. 5 Output example of yard stock planning

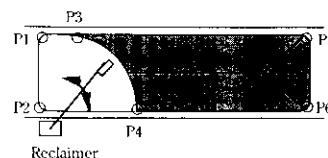


Fig. 6 Estimation of yard stock during reclaiming

次元情報（軌条での位置、ブームの旋回角度、およびブームの俯仰角度）から得られる積み山の切り欠き量も考慮した在庫量の把握を可能とした。リクレーマーによる払出過程の積み山のイメージをFig. 6に示す。初期形状はP1, P2, P5, P6の位置情報で代表されるが、リクレーマーの3次元情報から払出過程の位置情報P3, P4が計算され、現在の在庫量としてP3, P4, P5, P6の4点で代表される形状の在庫となっていることをリアルタイムに把握することができる。

3.3 置き場計画システム化の効果

従来、1～2回/週の実測に基づくヤードマップの作成とこれをもとにした置き場の検討作業が行われていたが、本システム化により置き場の検討作業時間が従来の3～4時間から約30分に短縮された。また前述したように、リクレーマーの3次元情報によるリアルタイムの在庫量の把握と精度向上が図られ、置き場計画の検討精度が向上した。その結果、置き場効率の向上を達成した。

4 結 言

千葉製鉄所ではヤード作業の効率化を図るため、コンベアー制御装置とヤードプロコンの更新に合わせてヤードの日間作業計画システムと置き場計画システムを開発し、運用を開始した。日間作業計画システムの開発により計画作成時間は2時間から約30分に短縮され、経験豊富なオペレータでなくても確度の高い計画を作成できるようになった。また、置き場計画システムの開発により置き場の検討作業時間が従来の3～4時間から約30分に短縮され、かつ検討精度の向上が図られた結果、置き場効率の向上を達成した。

参 考 文 献

- 1) 溝口文雄, 古川康一, J. L. Lassez:「制約指向プログラミング」; 知能情報処理シリーズ別巻2, (1989), [共立出版]
- 2) 相場一亮, 古川康一:「制約指向プログラミングについて」; 人工知能学会誌, 6(1991), 47-59