

(論文)

神戸発電所における燃料需給計画シミュレータの開発

梅田豊裕*¹(博士(工学))・藤井優貴*²・瀧澤勇介*²・瀧 秀行*²・濱野貴央*²・平出洋太郎*³

Development of Fuel Supply and Demand Planning Simulator at Kobe Power Plant

Dr. Toyohiro UMEDA・Yuki FUJII・Yusuke TAKIZAWA・Hideyuki TAKI・Takahisa HAMANO・Yotaro HIRAIDE

要旨

火力発電用燃料の荷揚げからボイラまでの物流計画を対象に、物流モデルと人間判断を双方向で利用して動作する新コンセプトのシミュレーションシステムを実用化した。本システムは配船、サイロ在庫、発電量、燃料成分、プロセスデータなど多様な実績・計画情報をもとに、船からサイロへの貯蔵、サイロからボイラへの搬送、およびサイロ間での循環の物流を時系列で計算するシミュレータをコアとし、シミュレーション中の物流切り替えに人の判断を反映できる機能を持つ。また、実行後に任意の時刻に遡り、切り替えの判断を変更または追加して再シミュレーションできる。これらにより、データとモデルに基づく標準条件での物流計画をベースとしながら、モデル化困難なイレギュラーな操業をシームレスに織り込むことを可能とした。

Abstract

This study focuses on the logistics planning of fuel for thermal-power generation from its unloading to being supplied for boilers. A new concept simulation system has been developed and implemented, which utilizes both logistics models and human judgment bidirectionally. This system utilizes diverse historical and planned information such as ship allocation, silo inventory, power generation, fuel composition, and process data. Its core is a simulator that calculates the logistics of storage from ships to silos, transportation from silos to boilers, and circulation among silos in a time series manner. Additionally, this system can incorporate human judgment in switching logistics during simulation. Furthermore, it is possible to backtrack to any chosen point in time after execution and modify or add judgments for switching, enabling re-simulation. These capabilities allow for the seamless incorporation of irregular operations that are difficult to model, while basing logistics planning on standard conditions derived from data and models.

検索用キーワード

シミュレーション, 計画, スケジュール, 発電, 石炭, 物流, 在庫, 需給, 滞船

まえがき = 1995年の電気事業法改正を受け、当社では既存インフラや製鉄事業での自家発電ノウハウなどを最大限に活用した新規事業として、石炭火力発電所を建設し70万kW×2基(1, 2号機)体制で、1号機は2002年4月、2号機は2004年4月より電力供給事業を開始した。さらに、2017年の神戸製鉄所の上工程休止に伴い、高炉跡地に発電規模65万kW×2基(3, 4号機)の発電所を建設し、3号機は2022年2月、4号機は2023年2月よりそれぞれ営業運転を開始した。3, 4号機建設前の投資判断の段階では、3, 4号機の稼働により、発電用燃料である石炭の入荷量が2倍近くになるため、製鉄所を中心とする物流能力検証の知見を活かし¹⁾、発電所の石炭物流専用に設計したシミュレータ²⁾を構築して石炭輸送用の船舶の構成や貯炭用サイロの増設数の検討を実施した。いっぽう、業務面においては、積み地からの輸送や発電所内でのバス～サイロ～ボイラ間の石炭需給物流が複雑化することから、従来の熟練者に依存した人手作業による需給計画業務を継続することは困難と予想された。そこで、これまでに社内の製造拠点において生産計画の立案や製造方針の決定などの計画系業務にシ

ミュレータを活用^{3), 4)}した経験をもとに、3, 4号機建設前の投資判断に用いたシミュレータをベースに、発電所内の直近数日から数箇月先までの石炭需給計画の支援システムを新たに構築した。本システムは3, 4号機稼働後の物量増加や、より複雑化する石炭物流に対応できる需給計画業務の実現を目指すもので、その計算結果は非定常操業を含む現実の操業指示に直接利用される。そのため、シミュレータのロジカルな計算精度だけでなく、人間独自の判断とのシームレスな連携方法とその効率化をとくに技術課題として着目した。本稿ではこれら課題に対して開発したシミュレーションシステムの構成および特徴について述べる。

1. 対象プロセスと業務の概要

1.1 発電所の石炭物流

図1に神戸発電所の物流の概要を示す。発電燃料である石炭は豪州やインドネシアなど海外から数万トンクラスの船舶で輸送され、発電所の専用岸壁からアンローダで荷揚げされ約3万トンの容量を持つ15基のサイロに貯炭される。入荷する石炭には産地により種々の銘柄

*¹ 技術開発本部 デジタルイノベーション技術センター *² 電力事業部門 神戸発電所第一発電部 *³ 電力事業部門 技術部

があり組成が異なるため、入荷するロットごとに貯炭サイロが割り当てられる。発電機に直結する蒸気タービンは4基あり、それぞれに蒸気を供給するボイラが設置される。貯炭された石炭はスクリーンとクラッシャで粒状を整えた上でこれら4基のボイラ前のバンカに受け入れられたのち、ボイラに供給される。また、アンローダ以降の搬送は全てコンベアで行われ、環境対策としてアンローダ、コンベアのいずれも密閉式となっている。

以上が基本的流れであるが、発電用燃料としての石炭の物流上の特徴を以下に示す。

- (1) ボイラでの燃焼性や燃焼後のばい煙抑制、副産物である灰や石こうの品質確保（セメント原料などに再利用するため）など、各種制約条件を満足するため、組成の異なる複数の銘柄を混合して燃焼させることが通常行われる。これを「混炭」と呼び、銘柄の組み合わせや操業状況により比率を変える。
- (2) 貯炭中の石炭の一部は空気に触れることで活性化し発熱する特徴がある。貯炭期間が長期化すると最悪発火する恐れもあるため、サイロ内のガス濃度、貯炭温度、貯炭期間により石炭を別の空サイロに移動させる操作を行う。これを「リサイクル」と呼び、銘柄により発熱特性が異なる。また、リサイクル中はコンベアを利用するため、通常の送炭との物流干渉が生じる。
- (3) 上記のように長期間の貯炭は防災上好ましくないことに加え、都市型発電所で敷地の制約もあるため、貯炭能力を十分に大きく取ることが難しい。そのため、荷揚げに必要な空きサイロが無い状況も起きやすく、その場合は石炭輸送船の待ち（滞船）が発生する。

1.2 需給計画業務

発電所での石炭需給計画は、前節で説明した荷揚げ～貯炭～ボイラまでの石炭の移動経路と流量を決める業務であるが、移動経路には自由度があり、サイロ在庫や石炭輸送船の状況に応じて適切な経路を選択する必要がある。いっぽう、流量は移動経路終端のボイラでの石炭消費量および経路上の設備やコンベアの能力などから従属的に決まる。そのため、石炭需給計画のポイントは石炭の移動経路を時間軸上で設定することであり、物流の切り替え方とそのタイミングを決定する業務であるとも言える。ここで物流の切り替えは下記の3種類である。

- ①荷揚げ：石炭輸送船の航海情報、アンローダやコンベアの保全計画をもとに荷揚げを開始する時期、荷揚げ先のサイロを決める。
- ②混炭：ボイラごとの発電計画をもとに、供給する銘柄（1～3種類）とサイロ、銘柄ごとの使用比率（混炭比）を決める。通常はサイロが空になった時点で混炭を切り替える。
- ③リサイクル：貯炭日数、貯炭温度、サイロの空き状況予測をもとに、送炭の開始時期、送炭元の貯炭中サイロ、送炭先の空きサイロを決める。また、サイロの補修がある場合はその前に石炭を別のサイロに移動させるが、これもリサイクルと同様に扱う。

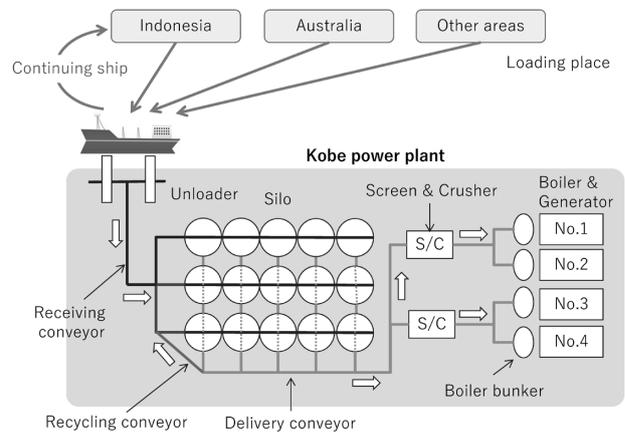


図1 神戸発電所の物流概念図
Fig.1 Outline of Kobe power plant logistics

現実の石炭物流のコントロールにおいては、これらの物流切り替えを決定する上で考慮する条件は多岐に渡り、以下のような難しさがある。

- 1) リサイクルはサイロの受入側と払出側両方のコンベアを使用するため、荷揚げやボイラ送炭との物流干渉を考慮する必要がある。例えば、防災上リサイクルを優先することにより、荷揚げの延期や中断、あるいはボイラ送炭の経路に制約が発生する可能性がある。
- 2) 石炭物流の切り替え方は自由度が大きく、切り替えの影響は時間的空間的に伝播（でんぱ）するため、切り替え時にその影響を正確に予測することが非常に難しい。つまり、試行錯誤的に物流計画を立案することが必要な構造となっている。
- 3) 石炭輸送船の到着時期、貯炭温度、設備のトラブルなど計画する上での不確実要素が存在するため、需給計画は最新の情報をもとに日々修正する必要があるが、2)に示した物流伝播により前日の計画を一部修正するに留まらず全体を見直す必要がある。
- 4) 標準的な物流の切り替えルールや制約は存在するが、状況により標準的な切り替えルールに沿わないイレギュラーな操業も行われる。例えば、新規銘柄の試験的操業ではサイロが空になる前に混炭を何度も切り替える場合がある。また、特定の炭種を優先して使用する必要が生じた場合は、先に到着した石炭輸送船を待たせて後に到着する石炭輸送船から先に荷揚げする場合がある。

これらのうち、1)～3)は標準的な条件の範囲での物流コントロール（定常操業）であり、事前に設定したパラメータ、ルール、ロジックに基づくシミュレーションモデルの適用が有効であると考えられる。いっぽう、4)は標準範囲外の物流コントロール（非定常操業）であり、論理的なモデル化は困難である。そのため、人の判断を積極的に活用することが有効な部分と考えられる。これら定常操業と非定常操業は時間的につながり互いに影響し合うため、シミュレーションモデルと人の判断を双方向に連動させることが需給計画をシステム化する上での課題となる。

2. 石炭物流シミュレーションモデル

2.1 構成要素

今回構築した需給計画用シミュレーションシステムの構成を図2に示す。本システムはシミュレータに実績、計画、制約パラメータなど種々のデータを連携させることで、発電所内の石炭の動きを状況や前提が異なる条件下で計算することができる。以下に構成要素の概要を示す。

○物流要素モデル (Logistics elements model) :

物流のベースとなる設備や施設に対応し、バッファ、機械、搬送の3種類の要素から構成される。バッファは容量、機械と搬送は単位時間当たりの処理重量を能力として持ち、搬送にはバッファまたは機械を端点とする経路が設定される。

○実績情報 (Actual data) :

計画は実績と接続するため、サイロ在庫や配船の実績を入力する。また、混炭計算に利用する石炭ロットごとの成分検査情報、リサイクル時期の決定に利用する貯炭温度やガスクロデータも実績として取得する。

○事前計画情報 (Preliminary planning data) :

需給計画の前提となる事前に作成された計画として、配船、発電量、設備保守などの情報を入力する。

○マスタ (Masters) :

物流要素の能力、銘柄の組み合わせと混炭比、銘柄ごとの最大貯炭日数などの標準的な制約条件のパラメータを設定する。

○シミュレーションエンジン (Simulation engine) :

本シミュレータは一定時間間隔で物流状態の変化を計算する動作方式である。そのため、時刻を更新するごとに物流の切り替えが必要かどうかを判断する部分、およびその間の物量の変化を計算する部分から構成される。さらに、物流切り替えはユーザインタフェースを介して人の判断を反映できる。

○シミュレーションログ (Simulation log) :

シミュレーション過程の情報として、物流の切り替

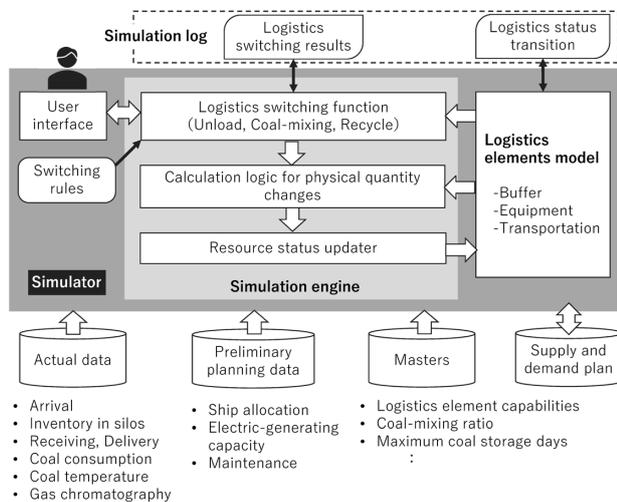


図2 システム構成
Fig.2 System configuration

えの結果と各物流要素の状態の時間推移を保存する。前者は切り替えのタイミングで後者は一定時間ごとに出力する。これらは後述する本システムの特徴である後戻り再実行時に利用される。

2.2 シミュレータの動作

本節では図3に示すシミュレータ本体の動作フローをもとに、シミュレータの動作上の特徴を説明する。

- 時刻を更新しながら動作するため一定時間間隔 (ΔT : 可変) で時刻を更新し、その間の物量変化を計算することで、離散的に物量状態を更新する。 ΔT は小さく設定するほど時間軸上の変化を詳細に計算できるが、計算時間が長くなるため、予備実験により1時間に設定した。
- 物流の切り替え判断を各時刻で行い、その結果に応じて物量変化を計算する。物流の切り替え判断はシミュレータの持つ標準ルールに基づくモードとユーザの判断を反映できるモードの2種類がある。なお、ユーザ判断の反映方法は次章で説明する。
- 翌日にシミュレーションする場合や、次章で紹介する後戻り再実行時にユーザ判断の結果を再利用できるように、各時刻において前回の物流切り替え判断を検索し実行可能であれば採用する。

2.3 精度検証

本シミュレータはシミュレーション過程でユーザの判断を反映できる点が特徴ではあるが、需給計画業務に適用するには、前提として標準的なシミュレーションロジックにより現実的な物流を精度よく再現できることが求められる。そこで、過去の物流実績とシミュレータによる物流計算の比較をおこなった。ここで、シミュレータに設定した条件は以下の通りである。

- 配船情報: 石炭輸送船の積載銘柄, 重量, 港への到着時刻

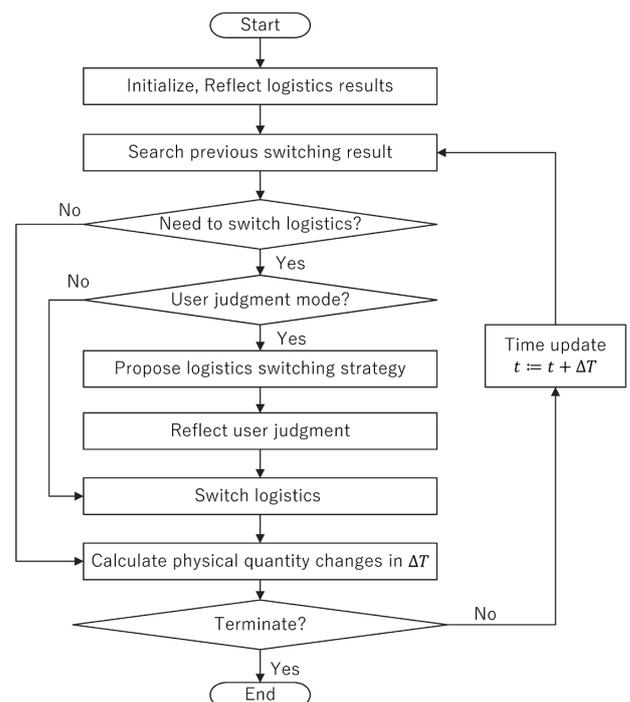


図3 シミュレーションの流れ
Fig.3 Simulation flow

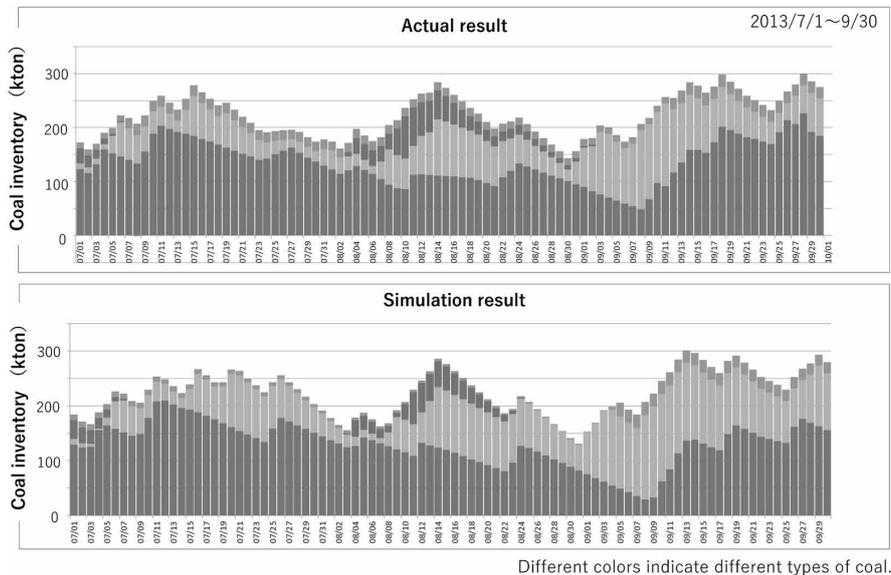


図4 シミュレーション結果と実績との比較 (石炭在庫量の推移)
 Fig.4 Comparison between simulation results and actual results(changes in coal inventory)

- 在庫情報：各サイロの初日での銘柄と在庫量
 - 石炭需要：日ごとの各ボイラでの石炭消費量
 - 貯炭日数：各サイロ在庫の初日時点での貯炭日数
- また、混炭やりサイクルのルールについては、操業上の標準的な条件を設定した。

上記設定のもとで、3箇月間のシミュレーションを実行した結果と実績との比較例として、サイロ在庫全体の推移を図4に示す。図4は銘柄を特性により4種類の炭種に分類した時の在庫の構成である。物流の切り替えはシミュレータ独自に決定しているが、在庫構成の時間的な変化が実績を良く再現していることが分かる。なお、1箇月目あたりで在庫の総量に差が見られるが、これはアンローダのトラブルが発生したためである。

その他、リサイクルした石炭量、平均の滞船時間についても実績と比較し数%の差であることが確認できたため、本シミュレータを需給計画作成のベースとして利用することとした。

3. 人の判断との連携

3.1 対話形式による実行モード

上述のように、本シミュレーションシステムはユーザーによる物流切り替えの判断をシミュレーション過程で反映できる点が特徴である。そのため、標準ルールに基づくシミュレータの判断を人の判断に変更する、新たな判断を追加する、あるいは、判断のタイミングを変更することが可能な実行モードを備えている。以下にその特徴を示す。

- シミュレータが物流切り替え必要と判断した時点でいったん停止し判断結果を提示する。ユーザーはその内容を確認し変更することができる。例えば、混炭に使用するサイロや混炭比、リサイクルや荷揚げ先のサイロを変更する。
- シミュレータの提示した物流切り替えのタイミングをユーザーが延期することができる。例えば、石炭輸送船の荷揚げ順を入れ替えるための荷揚げの延期

や、払出中のサイロではリサイクルの延期も可能である。

- 次節の後戻り再実行機能と組み合わせることで、一度シミュレーションを実行した後に、新たな物流切り替えを実行期間内の任意の時刻に設定できる。例えば、サイロが空になる前に混炭を切り替える、早めにリサイクルを開始するなど標準ルールでは物流切り替えが発生しないタイミングでの切り替え設定が可能となる。

物流切り替えの判断結果は全て判断ログとして時刻や内容が保存され、次回実行時に読み込んで再利用できる。これにより、ユーザーが同じ設定を繰り返し入力する必要がなくなる。さらに、前回の入力を変更して異なる物流切り替えを設定することもできる。図5に時間をおいて再度シミュレーションするケースを例に、前回の物流切り替え判断結果を利用するイメージを示す。ここでは、1回目のシミュレーションを4/1の0時から開始し、①から⑤の5回の物流切り替えを行っている。このうち、②、③、および⑤の3回がユーザー判断による切り替えである。また、5回の物流切り替え判断結果はその

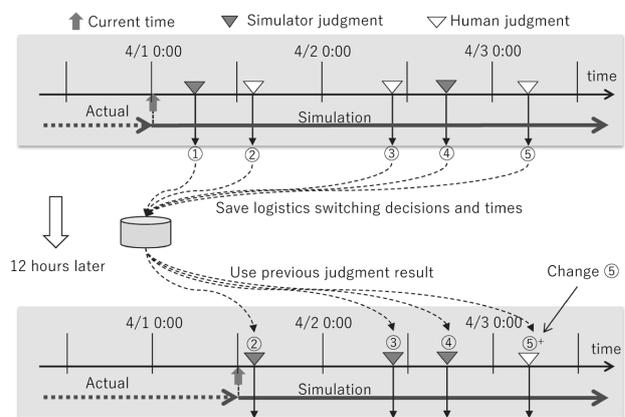


図5 前回の物流判断結果を利用したシミュレーション
 Fig.5 Simulation using results of previous logistics switching decision

時刻とともにログとして保存される。次に12時間後の4/1 12:00に再度シミュレーションを開始する際、保存されたログのうち開始時刻以降の②から⑤の物流切り替え判断を読み込むことで前回のユーザ判断結果が反映される。この例では、⑤の物流切り替えを前回判断結果から修正することで、4/3以降の物流計画が修正される。

3.2 後戻り再実行機能

需給計画の作成においては、シミュレーション実行と修正（物流切り替えの変更）を何度か繰り返しながら、より望ましい計画に仕上げて行くことになる。このプロセスにおいては前節でも述べたように任意の時刻にシミュレーション状態を戻した上で、物流切り替え判断を追加・変更できる必要がある。ここで、任意時刻に戻す方法としては、物流を逆向きに再生して所定時刻で停止する方法⁵⁾と各時刻での物流状態、すなわちサイロやバンクの在庫、石炭の向け先、延期中の判断などを保存しておき所定時刻の物流状態にシミュレータ内を置き換える方法が考えられる。前者は逆向き再生に順方向シミュレーションと同じだけ時間が必要となる点で、後者は時間刻みの数（需給計画の場合数千〜数万）だけ状態を保存する必要がある点でいずれも現実的では無い。

そこで、本システムでは、物流状態の保存は日単位のような粗いメッシュで行い、保存時刻から後戻り先の所定時刻までは事前シミュレーション（Pre-simulation）を行うことで、任意の時刻まで短時間で戻れる機能を新規に開発した。図6に後戻り先時刻への復帰を実現する方法の例を示す。この例では2日ごとに物流状態を保存しており、戻り先である4/6 15:00の直近保存時刻である4/5 0:00の物流状態にリセットした後、39時間の事前シミュレーションを実行している。この間4/5 12:00には前回実行時の物流切り替え判断を読み込むことで、ユーザ判断があった場合でも正確に物流状態を再現できる。

所定時刻に戻った時点でシミュレータは一時停止し、新たな物流切り替え判断を設定する、あるいは前回の判断を変更することで、何度でも途中から異なる条件でのシミュレーションが可能となる。

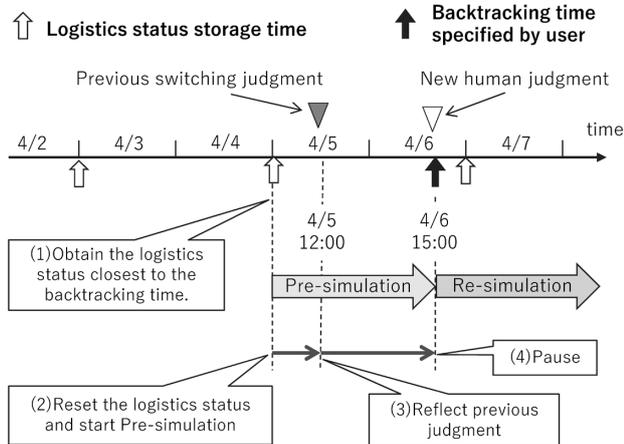


図6 後戻り先時刻への復帰と物流状態の再現

Fig.6 Return to backtracking time and reproduction of logistics status

3.3 実行例

現実を模擬したデータを用意し、シミュレータ上で上記の後戻り再実行機能を利用して再計画した際の需給計画画面例を図7および図8に示す。ここで、これらの画面例はサイロ（縦軸）ごとの日別の在庫量（横軸）を示しており、最上段の行は石炭輸送船の航海番号が荷揚げ開始日に設定されている。また、図の中のA~Lは石炭の銘柄を、その下の数値はサイロの在庫量 [kton] をそれぞれ示している。

図7は混炭設定のみ著者の判断で設定し、荷揚げとリサイクルはマスタに設定したルールに基づいてシミュレーションした日ごとの需給計画画面である。このシミュレーションでは、11/1 16:00にNo.2サイロの在庫が貯炭期限に達したために空き状態のNo.12サイロへのリサイクルを開始している。リサイクルの間11/2に石炭輸送船（★印）が到着したが、リサイクル優先と夜間入

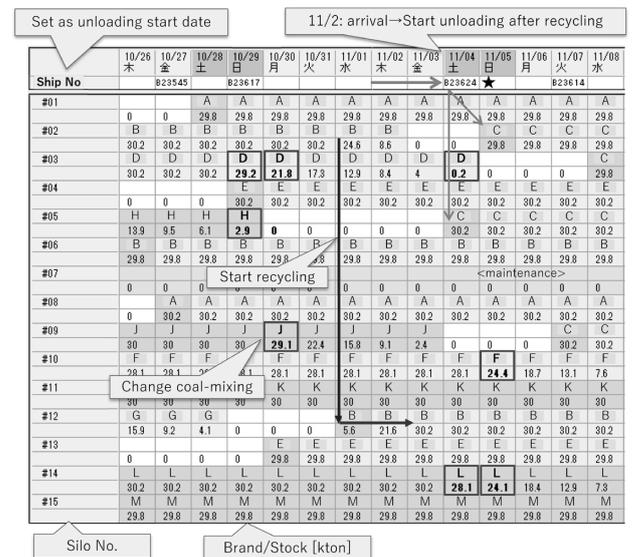


図7 需給計画画面の例（荷揚げとサイロ在庫計画）

Fig.7 Example of supply and demand planning screen (unloading and silo inventory)

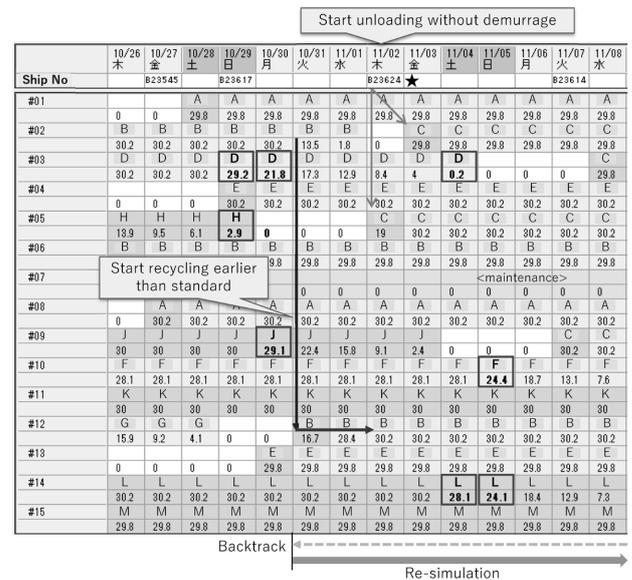


図8 後戻り再実行の例（リサイクル開始を40時間早めた場合）

Fig.8 Backward re-simulation example (Case of starting recycling 40 hours earlier)

港不可の制約のためリサイクル終了後に入港できる11/4 8:00に荷揚げを開始している。

図8は再シミュレーション後の需給計画画面である。ここでは、リサイクルの開始を早めるため、10/31 0:00に後戻りしNo.2サイロのリサイクルを人が設定し、その後はシミュレータのみで実行している。その結果、11/2に到着した石炭輸送船(★印)は図7では発生していたリサイクル待ちによる滞船を発生させることなく11/2から荷揚げを開始できている。また、11/4と11/5の混炭切り替えは図7と図8で一致しており、前回の物流切り替え判断が再利用されていることも分かる。このように物流の切り替えタイミングを基準よりも早めるようなシミュレータ単独で実現するには難しい計画が、人の判断と後戻り再実行機能を利用することで実現することができる。

4. 業務での活用

本シミュレーションシステムは発電所のプロセスデータや業務系の情報とリンクさせ、需給計画業務と並行した試行を通して機能面や操作性の改善を進めた結果、実操業に適用可能な計画を立案できることが確認できた。具体的な本システムの使い方を以下に示す。

- 配船がほぼ確定している直近約1箇月間は人の判断と連携させ、イレギュラーな操業を含めて精密に計画を作成する。その結果は石炭物流の操業指示に展開され、操業や石炭輸送船動静の変動を反映させるため日々計画を修正する。
- 1箇月目以降半年程度先までは、配船や計画修理の予定をもとにシミュレータの自動判断モードで計画を作成する。シミュレーション自体は直近の計画と接続しているため、直近計画の修正影響が反映される。その結果は配船(調達)の調整に活用する。
- 需給計画の結果得られるボイラごとの混炭計画をもとに燃焼後の灰や石こうの発生量を予測し、これらを再利用するための在庫管理や出荷計画に活用する。

今後、本システムを継続的に運用することで以下の効果が期待される。

- 当初の目的として、ボイラが2基から4基に増設されたことによる物量の増加と物流の複雑化に対応できる需給計画業務が可能となる。
- 計画に要する時間が短縮することで、混炭の組合せ、荷揚げやリサイクルのタイミングなどを変えた複数ケースの比較が可能となり、滞船の抑制と安定操業が可能となる。
- 配船を変更した場合のシミュレーションも可能であるため、発電所側で配船の調整案を作成した上で石炭調達部門に早期にリクエストすることができ、在

庫の安定化による操業リスクの低減が可能となる。

- これまで特定の担当者に埋もれていた種々の計画ノウハウが可視化・共有化されるため、需給計画業務を立案できる人材の拡張につながる。

むすび = 当社が保有するシミュレーション技術は、これまでに鉄鋼、非鉄など素材系を中心に多品種化が進展する種々の社内製造工程や物流プロセスへの適用を通して機能の強化・拡張とモデルの表現力向上を図って来た。これらの適用対象はオフライン、すなわち設備や物流要素の投資判断に資する能力検討や複数の製造パターンの比較検討といったリアルな現場とはいったん切れた形で動作させ、その結果はリアルな現場に直接反映されるものでは無かった。そのため、精度面での一定の粗さが許容される部分がある。いっぽう、本シミュレータはリアルな世界の操業現場と直接つながるオンライン系であり、現実の操業をそのまま再現できるレベルの精度が要求される点で明確な違いがある。ただし、現実の操業現場ではシミュレータでは認知できない情報に基づいたイレギュラーなオペレーションが常に行われる。そのため、データとロジックで駆動されるシミュレーション技術をベースに物流切り替えポイントでの人の判断を連携させる新たな駆動モデルに発展させることで、実操業につながられるレベルの精度を実現できた。

今後日々の業務で安定的に使い続けるためには、調達する石炭や操業方法の変化にマスタ設定を常時整合させる仕組みが必要である。これには、実績データとマスタ設定の不整合を検出しアラームを発信する方法が考えられる。また、操作性を高めるためのより使いやすいユーザインタフェースも課題となる。さらに、石炭物流全体を考えた場合には、発電所での需給計画と石炭調達部門での配船計画をシステム連携させ、積み地から発電ボイラまでの一貫需給計画の実現を目指したい。

なお、ユーザとの対話形式によるシミュレータの実行や後戻り再実行など本シミュレータに搭載した特徴的な技術は、発電所の物流に限らず生産工程や工場内外の搬送工程のシミュレーションにも広く適用可能であるため、今後グループ内の物流管理の課題に対して広く横展開してゆく所存である。

参考文献

- 1) 岩谷敏治. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.68, No.2, p.29-35.
- 2) 神戸製鋼所. 梅田豊裕. 石炭物流状況管理装置及び方法. 特許第7011570号. 2022-1-18.
- 3) 松田浩一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2001, Vol.51, No.3, p.28-35.
- 4) 掘尾明久ほか. システム制御情報学会論文誌. 2018, Vol.31, No.10, p.347-355.
- 5) 日立製作所. 前田和彦ほか. シミュレーション方法. 特開平1-270164. 1989-10-27.