

鉄作りを支える最新の設備技術

New Technologies for Steel Manufacturing Based upon Plant Engineering

植村 章 鉄鋼技術センター 設備技術部 部長
白井 正明 基盤技術研究所 副所長

Akira Uemura
Masaaki Shirai

当社の設備部門は、(1) 設備診断、(2) 自動化、(3) 延命化、(4) 計測制御技術の開発に多くの成果を上げて、品質の向上、品質保証、操業の合理化および設備の長寿命化に大きく貢献している。本稿では、最新の設備技術とその展望について開発事例とともに紹介する。

NKK has successfully developed various new technologies in the field of plant engineering. These have greatly improved the quality of the Company's products and production yield, and extended the life of equipment in the steelworks. This paper introduces typical examples of recent technological accomplishments in the field of plant engineering.

1. はじめに

鉄鋼業は巨大な装置産業であり、設備技術は鉄鋼製造設備の建設から保全、さらに寿命延長と鉄作りの基礎を支えてきた。

今日、設備技術には従来の分野にとどまらず、歩留り、品質の向上、商品の幅広い品質保証と多岐にわたる分野での貢献が要求されてきている。

当社では設備部門が研究所と密接に連携し、設備の診断、自動化技術、設備の長寿命化、延命技術、さらに品質保証を含む計測制御技術という最新の分野で多くの成果を上げている。

本稿では、最近の開発事例を示すとともに、今後の設備技術の方向も展望する。

2. 設備の診断、自動化技術

2.1 設備診断技術

2.1.1 設備診断技術の展望

鉄鋼製造設備の保全方式の中で、状態基準保全（CBM：Condition Based Maintenance）は、設備診断技術を用いて設備の劣化状態を定量的に把握し最適な時期に必要な最小限の修理を行うものであり、最も合理的な保全方式である。

当社では、設備診断技術をCBM方式の設備管理に不可欠な技術と位置付け、技術開発と実用化を進めている。

以下に当社の設備診断技術の特長を示す。

(1) 高炉・製鋼・熱間圧延・冷間圧延などの多種多様な設備を対象としているため、振動診断・潤滑診断・構造系診断・電機制御系診断などの各種診断技術を保有し、複合的に活用している。

(2) 設備の良否を判定する日常点検から余寿命予測、設備異常時の原因究明・損傷程度・損傷範囲の推定などの診断目的

に応じた診断手法を確立している。

(3) 設備特性や業務フローなどの業務実態にマッチし、低コストで作業効率の高い設備診断技術とするために、汎用振動診断計、油性状自動分析計、絶縁診断計などの主要な技術の多くを自社開発している。

このような特長を持つ各種診断技術を合理的に組み合わせることで、的確で効率的な設備状態把握を実現している。

2.1.2 オンラインモニタリングシステム

当社では、設備状態把握の効率化と高精度化を目的として、製鉄所内全域をカバーするネットワークシステムを自社開発しており、福山製鉄所の場合、主要な18工場（約4800点）でオンライン監視体制を構築している。Fig.1 にシステム構成を示す。本システムの特長は、以下のとおりである。

(1) 設備異常時には自動的に精密診断を実行するとともに、監視端末から任意に精密診断が可能なシステムを開発し、さらに、システムの信頼性向上のため、センサー異常やケーブル断線、監視機器の異常などを自動的に認識する自己診断機能も開発および実用化している。

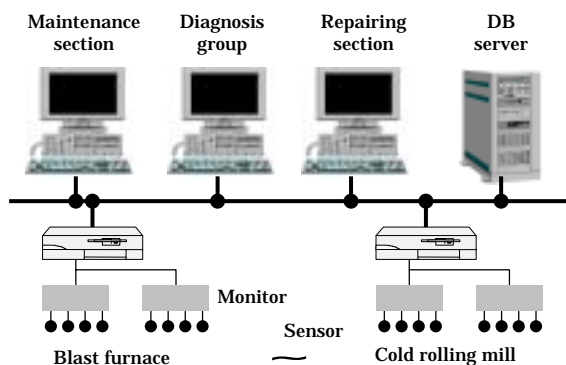


Fig.1 Configuration of on-line monitoring and diagnosis system

(2) 安価で耐久性の高いセンサーやマイコン監視機器および監視ソフトを自社開発しており、設置コストは当社従来品の1/2以下と大幅な低廉化を実現した。

本システムの活用により、高精度の保全計画立案や設備異常時の迅速な対応が可能となり、最小限の保全要員で設備の安定稼働と保全費用低減を実現している。また本システムは、自社内活用だけでなく、電力・自動車・化学などのさまざまな産業分野でも広く活用いただいている。

2.2 歩留り・稼働率向上、自動化技術

2.2.1 歩留り・稼働率向上、自動化技術の展望

製鉄所における合理化・省力化実現への設備技術が果たす役割は大きく、設備の高度化に伴い、今後更にその比重が高まるものとする。当社は、これまでも種々の上記技術の開発を積極的に推進してきた。本稿では、転炉の稼働率向上技術、クレーン自動化技術の開発事例について紹介する。

2.2.2 転炉二次燃焼ランス

転炉に入れられた溶銑は転炉上部より挿入された水冷ランスにより、酸素を吹き付けられ銑鉄中の炭素を燃焼させ鋼となる。このとき急激な溶銑の攪拌が起こり溶けた鉄が吹き上げられ転炉上部に地金として付着する。特に転炉型脱燐炉では、温度も低い地金が付きやすく、これの堆積は大きな問題であった。

この問題に対し、転炉上部にあたる部分にランス側面より酸素を噴射し、二次燃焼を行わせる技術を開発し、炉口部の温度を上昇させることで、地金フリーの操業を実現した。

Fig.2 に開発した二次燃焼ランスを示す。

本ランスでは、(1) 多重管内外筒の熱変形を防止する構造や、(2) 炉壁までの距離に応じて最適二次燃焼する多段サイドノズルの技術を確立した。

これにより転炉型脱燐炉において、ほぼ地金付着フリーの操業が可能となり、転炉稼働率約1%の向上のほか、転炉補修費の低減、炉修期間の短縮などが実現でき、安定稼働に大きく寄与している。

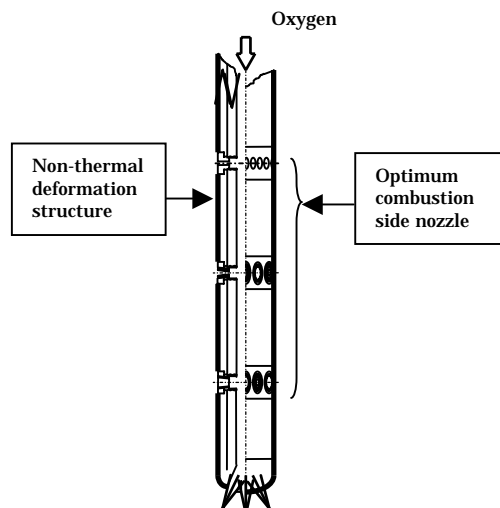


Fig.2 Configuration of side combustion lance

2.2.3 クレーン自動化技術と高精度振れ止め制御

圧延工場のコイル搬送作業に占める天井クレーンの使用比率は高く、自動化による省力化ニーズは大きいですが、それには投資対効果が見合う低コストな無人化クレーンの開発が必要であった。そこで、当社では、既設改造の最小化、汎用シーケンサの積極利用、システムの共通化・標準化を基本方針とし、低コスト型のクレーン自動化技術の開発に取り組んだ。

主な開発項目は、NKK 式ショックレスパターン振れ止めの開発、コイル画像処理位置認識による台車入出庫作業の全自動化、先入れコイル検出器による対先行コイル衝突防止、レーザ距離計による高精度クレーン位置検出、自由マップ方式による置き場高効率化などである。今回開発したクレーン自動化システムの概要を Fig.3 に示す。

本技術を適用した結果、従来メーカーに比べて、約40%以上の設備費低廉化を図ることができた。1994年から2000年までに14台の天井クレーンを自動化し、54人の省力化を達成した。

現在は、更に自動化上の課題が多いコイルヤードへの適用に向け、横走行・巻き3軸同時振れ止め制御、2台クレーン同調制御などのレベルアップを推進中である。

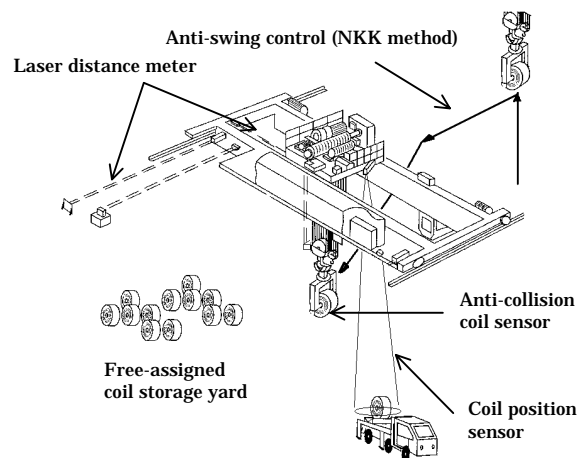


Fig.3 Automatic crane control system

3. 設備の長寿命化、老朽更新低廉技術

3.1 長寿命化技術

3.1.1 長寿命化技術の展望

設備寿命の延長は、設備部門にとり重要な課題の一つであり、さまざまな取り組みを行っている。

当社では各設備の長寿命化技術の開発を積極的に推進してきた。本稿では、最重要設備の一つである高炉炉体の冷却装置とその補修技術の開発事例について紹介する。

3.1.2 高炉炉体冷却装置のクーリングステーブの長寿命化

高炉炉体冷却装置のクーリングステーブ(以下、CS と略記する; Fig.4 参照)として、Fig.5 (a)に示す鋳鉄と冷却配管が融着していない非融着式 CS を使用していたが、近年の微

粉炭多量吹き込みなどの操業変化で、炉体熱負荷が増加した影響により、CS 本体変形が顕在化し、高炉の安定操業を阻害していた。

非融着式 CS には、CS 本体き裂の冷却配管への伝播防止のために、鑄鉄と冷却配管の間に空気層が存在するため、その断熱作用で冷却性能が低く、冷却管高密度化、背面冷却化などの CS 変形防止対策では、効果が不十分であった。そこで、冷却強化型の新型 CS として、Fig.5 (b)に示す密着式 CS を当社独自技術として開発、実用化した。

密着式 CS は、合金層を介して鑄鉄と冷却配管が一体化され、空気層が存在しないため、非融着式 CS より冷却性能が大幅に向上する。また、CS 本体き裂は、合金層に到達した際に、もろい素材の合金層が剥離することで停止し、冷却配管には伝播しない構造になっている。

FEM 解析による非融着式 CS と密着式 CS の温度、応力、変形解析結果を Fig.6 に示す。密着式 CS は、非融着式 CS より冷却性能が向上し、その結果大幅な変形低減効果を確認したことで従来の 2 倍の 10 年以上の寿命が期待できる。

密着式 CS の開発により CS の長寿命化技術が確立され、現在、高炉安定操業を志向して密着式 CS を適用拡大中である。

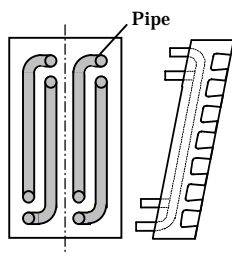


Fig.4 Schematic of the cooling staves

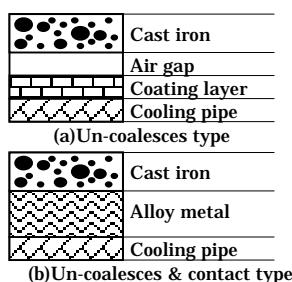


Fig.5 Comparison of cast-in pipe border

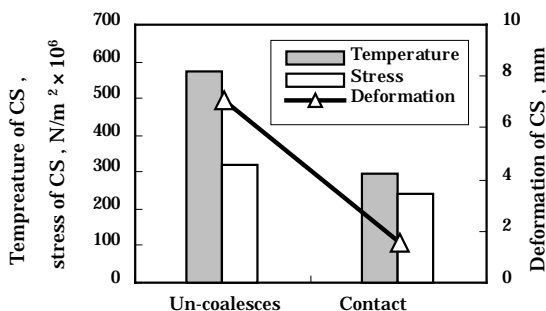


Fig.6 Result of the FEM analysis

3.1.3 高炉大減尺による炉体補修技術

近年の微粉炭多量吹き込みなどの操業変化により、炉体の熱負荷が増加し、CS の損傷が大きくなっている。特に、朝顔部の CS については、本体の損耗による内部冷却配管の破損が顕著になっている。この CS 破損の進行は、朝顔鉄皮の冷却能力低下につながり、炉体寿命に大きな影響を与えるため、一定以上損耗した CS は一式取り替える必要性が出てくる。

従来朝顔部の CS 一式取り替えは、その工事の困難さから炉外より円筒型冷却金物の取り付けおよび耐火物注入の補修を行ってきたが、十分な効果が得られなかった。

当社では、恒久補修として CS の全面一周取り替えを短期間で実施できる施工技術を開発した。Fig.7 に CS 取り替え概要図および Table 1 に朝顔 CS 取り替え実績を示す。大減尺休風により、装入原料を羽口レベルまで下げて実施される朝顔 CS 取り替え施工に際しては、(1) CS の回収と取り付けを複数箇所で同時施工する工法、(2) 新規 CS 吊り込み専用台車、(3) 取り付けた新規 CS 間の目地部隙間への圧入不定形耐火物のシール構造などを開発することで、短期間で大量の CS 取り替えが可能となった。

また、朝顔 CS 取り替え技術は、シャフト部の既存 CS の取り替えおよび新規 CS の取り付け工事にも適用されている。

この大減尺による CS 取り替えにより、炉体の延命補修技術が確立され、炉体に関しては 20 年以上の長寿命化が期待できる。高炉の寿命を律速する部位は、炉底の損傷のみとなり、今後、炉底の延命技術の開発が課題である。

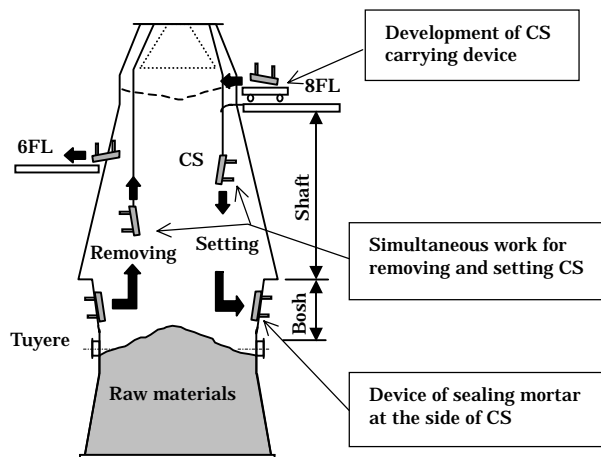


Fig.7 Explax of bosh staves

Table 1 Results of explaxing bosh staves

Blast furnace	Numbers	Shut down	Execution
Fukuyama No.4	56	86hrs.	Mar. 1999
Fukuyama No.5	64	90hrs.	Mar. 2000

3.2 老朽更新低廉技術

3.2.1 老朽更新低廉技術の展望

稼働以来約 30 年経過した製鉄所の各設備は、老朽化進行に伴いその更新時期を迎えており、この更新費用抑制は、製鉄所の大きな課題となっている。

当社では、設備の安定稼働を堅持しつつ、老朽更新の低廉化技術の開発を積極的に推進してきた。本稿では、計算機と鋼構造物の低廉技術の開発事例について紹介する。

3.2.2 プロコン老朽更新の低廉化

製鉄所では、全体で 200 台と数多くのプロセス制御用計算機（以下、プロコンと略記する）が稼働しており、稼働以来 15～20 年経過したシステムも多く、毎年数システムの老朽更新が見込まれている。そのため、その更新費用の低廉化が重要な課題である。従来の限られたメーカーによる高価なプロコン専用機あるいはダウンサイジングでは、大幅な更新コストの削減が難しいため、最近の情報化技術の進歩で飛躍的に性能の高くなった汎用パソコンとネットワークを活用した安価なオープン系プロコンシステムを開発した。

このシステムを実現するにあたり、すべての機能がオープンな Linux を基本ソフトウェアに採用し、市販されていないプロセス制御用に必要なソフトウェアは独自に開発した。オープン系プロコンシステムの構成を Fig.8 に、従来のプロコン専用機との比較を Table 2 に示す。

このシステムは、2001 年 1 月に京浜製鉄所内にあるエヌケーケー鋼板線の No.3 溶融亜鉛めっきラインで初めて実機適用し、その後京浜および福山製鉄所のプロコン老朽更新に順次適用している。この結果、従来のプロコン専用機に比べて約 40%以上の更新費用の削減が達成できた。

また、将来の再リプレース時期においても、パソコン本体のみの単純更新が可能であり、従来のようにハードとソフトが一体となった更新が不要となるため、非常に安価で短期間かつ容易にリプレースが可能となる。

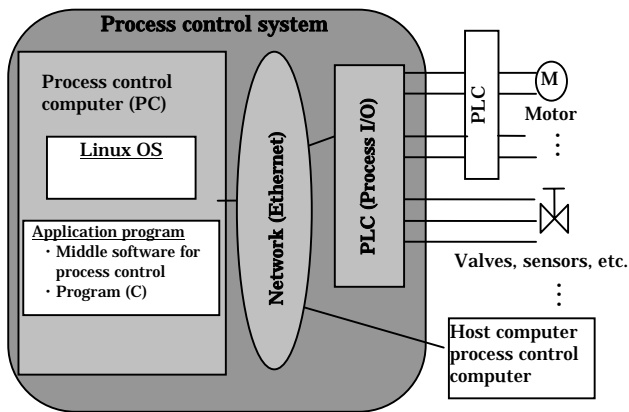


Fig.8 Configuration of new open-type process control system

Table 2 Comparison between conventional and new system

Items	Specialized computer for process control (Conventional)	Open-type computer for process control (Newly developed)
OS	Developed by manufacturer Functions are not open	Linux All functions are open
Application program	Developed by special language code (upper compatible is not assured)	Middle software for process control is newly developed (upper compatible is assured by adopting C language)
Process I/O connection	· Network (Host Computer, etc.) · Process I/O are connected directly to computer	· Network (Host computer, etc.) · Process I/O are connected to PLC(separated from computer)
Main use	Real-time treatment for process control	Ditto
Endurance	24hr continuous run without stop	Ditto
Renewal method	Renewal of both hardware and software high cost	Renewal of only hardware low cost

3.2.3 コンベアフレーム劣化診断技術

製鉄所では鋼構造物の老朽劣化進行により、更新費用が増大傾向にある。中でも総機長 100km 以上に達する原料地区のベルトコンベア設備には毎年多大な費用を要している。コンベア設備の中には高炉装入コンベアなどのように、その故障が生産に重大な影響を及ぼす重要設備も多いため、安定操業の継続には安易な補修更新費用削減は許されない。

一般的なベルトコンベアは、溝形鋼や山形鋼で構成されるトラスフレームの上に、ローラーやベルトで構成される搬送部を搭載する構造を有しているが、設備によってはフレーム部の腐食減肉に伴う強度低下が限界に達しつつあり、補修や更新に至っている。

しかし、従来はその判断を保全員の目視（一部残厚測定）による主観的な劣化度判定に依存していたため、客観的かつ定量的評価が可能な診断技術の開発が望まれていた。

このニーズに応えるため、実機計測やモデル実験、数値解析などを繰り返し、その結果、コンベア設備のある特定の振動モードの固有振動数から、コンベアフレームの腐食減肉による老朽劣化度を客観的かつ定量的に評価する技術を開発した（Fig.9 のフロー参照）。さらに、その固有振動数を現場で簡便に測定する技術も開発した。本劣化診断技術は既に実用に供しており、(1) 安全確保と安定操業保証、(2) 突発的重大故障による機会損失の防止、(3) 更新範囲の厳選および補強延命の拡大による更新費用の抑制に大きく貢献している。

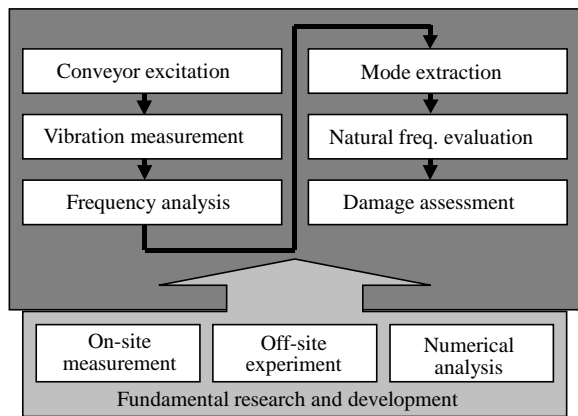


Fig.9 Flow of the damage assessment of conveyor frame

4. 計測制御技術

4.1 材質・品質保証技術

4.1.1 材質・品質保証技術の展望

品質の高い鉄鋼製品を安定的に顧客に提供するため、当社では、そのベースとなるセンサーおよび計測技術の開発を積極的に推進してきた。

近年、顧客からの品質要求はますます厳しくなり、自動車外板用鋼板では、従来の凹凸性の表面欠陥から、より軽度で検出が困難な「模様状欠陥」へと厳格化してきており、また飲料缶用鋼板では、薄肉化に伴い、素材内部の微小介在物の検出が厳しく要求されている。

このような品質ニーズに対応するため、当社では新しい計測技術を開発し、製造ラインにて実稼働させている。

4.1.2 薄板模様状欠陥検査装置「デルタアイ」

自動車外板製造ラインにおける模様状欠陥検査の完全自動化を目的として、高感度・高信頼性のオンライン表面検査装置「デルタアイ」を開発・実用化した。

模様状欠陥はコントラストが低いため、一般に検出能力を上げようとするとうる鋼板表面の無害模様（油・処理液など）の過剰検出が増えて歩留りの低下につながる。そこで、本装置では欠陥検出方式に「偏光原理」を採用し、有害欠陥と無害模様とを「物理現象」として識別し、有害欠陥のみを確実に検出することを可能にした。

Fig.10 に本装置のシステム構成図を示す。本装置の特長は以下のとおりである。

(1) 鋼板全面 3 偏光観察方式：検光角の異なる偏光フィルタを装着した 3 台 1 組のラインスキャンカメラを 4 組配置し、信号処理装置内で、隣接視野間と偏光 3ch 視野間の視野ズレ補正と視野合成処理を実施し、3 偏光リアルタイム全面検査を実現した。

(2) 高信頼性システムの構築：汎用画像処理装置をベースに、測定環境および鋼板表面性状変化（ex. ライン速度変化、蛇行、反射率ムラ、反射率変動）の影響を補償する前処理装置と光量制御装置をカスタマイズして組み合わせることにより、安定性と柔軟性を両立したシステムを構築した。

本装置は、1999 年 4 月に福山 No.2 溶融亜鉛めっきラインにおいて本格稼働した。ライン内の検出ヘッドの外観を Photo 1 に示す。

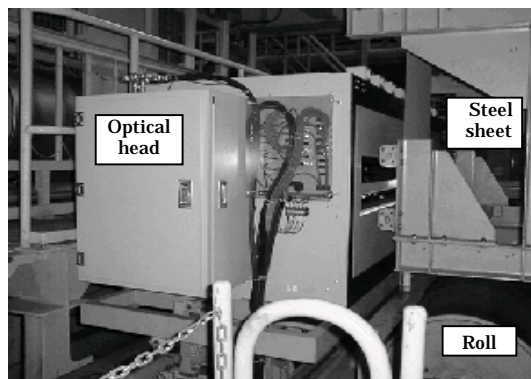


Photo 1 Optical head (Rear surface)

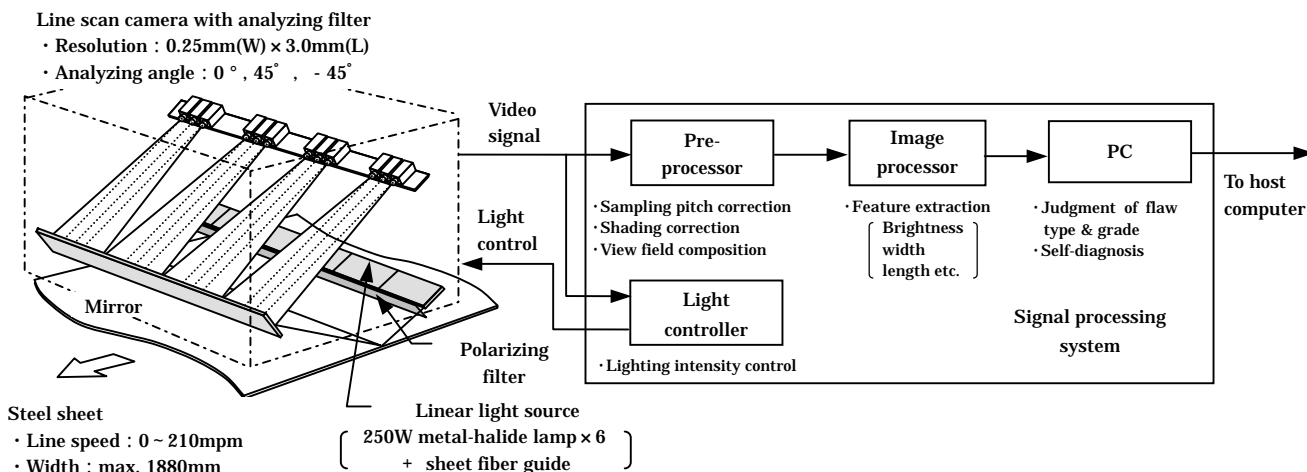


Fig.10 Schematic diagram of the surface flaw inspection system

本装置の検出能力をオンラインで評価した結果、模様状欠陥約 800 体につき検出率 100%かつ過検出率 1%未満を確認した。

本装置の導入の結果、欠陥発生状況の定量的・客観的な連続モニタリングが初めて可能となった。そのため、上工程での欠陥低減アクションの評価にも利用されており、鋼板の高品質作り込み技術の確立に大きく寄与している。

4.1.3 微小介在物計

飲料缶素材の内部品質向上のため、厚さ 8 μ m 以上の微小介在物がオンラインで検出可能な検査装置を開発した。

微小欠陥を検出するためには、高感度な検出に加えて材料に起因する磁気的なノイズと欠陥漏洩磁束とを区別する必要がある。材料に起因するノイズは、欠陥漏洩磁束に比べて磁束が空間的に広がっている傾向がある。その性質を利用して検出能を向上させるため、Fig.11 に示すような E 型コア磁気センサーを開発した。このセンサーは、3 本の極を持つ強磁性体コアおよびその中央の極に巻かれた検出コイルから構成されている。ノイズ磁束は、欠陥からの磁束よりも外側の極へ分散する傾向があるため、電気信号に変換されにくく相対的にノイズを低減することが可能となる。

Fig.12 に微小内部介在物（厚さ 10 μ m 幅 80 μ m 長さ 0.8mm）検出結果例を示す。ノイズ影響が低減され、S/N 比良く検出されていることがわかる。

本装置は、現在福山製鉄所コイル準備ラインで実機稼働している。本装置の導入により、上工程である製鋼工程までさかのぼった操業改善が可能となり、缶用素材の品質向上に大きく寄与している。

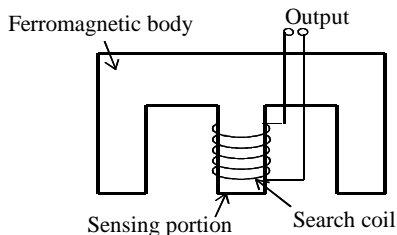


Fig.11 Outline of E-shaped core sensor

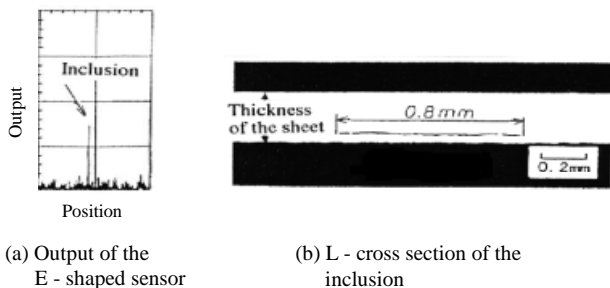


Fig.12 Off-line detection result of a minute inclusion

4.2 制御技術

4.2.1 制御技術の展望

鉄鋼製品の高級化・多品種化に伴い、製鉄所の製造工程はますます複雑化し、その生産計画の最適化や自動化が重要な課題である。

一方では、操業合理化の早期達成と品質対応のため、高精度の制御モデル開発・改善と開発のスピードアップが従来にまして望まれており、制御技術に期待される役割は大きい。

そこで、当社では、最近進歩が著しい IT（情報技術）を駆使し、制御技術全般のレベルアップを図ってきた。

ここでは、スケジューリング技術と制御モデルの開発効率化について最近の開発事例を紹介する。

4.2.2 次世代スケジューリング技術

昨今の計算機能力の著しい進歩により、オペレーションズ・リサーチの手法が鉄鋼生産計画の実問題に適用可能となり始めた。特にメタ戦略と呼ばれる探索型手法は有効であり、この手法を基本として問題の特性に合わせて探索順や探索空間をうまく選定すれば、人手よりも短時間で良い計画を策定することが可能である。

Fig.13 は、メタ戦略の一つである GA（遺伝的アルゴリズム）を改良して、京浜製鉄所の転炉～二次精錬～連続鑄造の日程計画を編成したものである（実操業用画面では鋼種名、鑄造セット名などが付記される）。従来オペレータは、1 日分の計画を約 3 時間かけて作成したが、本システムでは 1 週間分の計画を約 20 分で作成することができる。1 週間分の計画が可視化できるため、下工程への需給精度が向上した。また、生産量を確保した上で、二次精錬の待ち時間の最小化、標準の通過工程以外の代替処理工程の発生頻度を最小化するなどの最適化を図り、操業コスト合理化も併せて実現した。Fig.14 に一般的な GA と制約を利用し探索空間を狭めた改良 GA の解分布を示す。問題の特性に合わせた探索により、オペレータより精度の高い計画が編成できることがわかる。

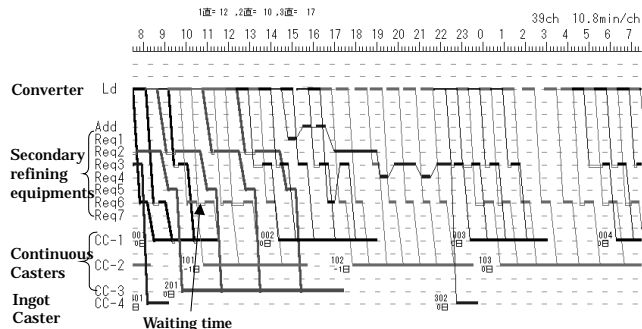


Fig.13 LD-CC diagram scheduled by advanced GA

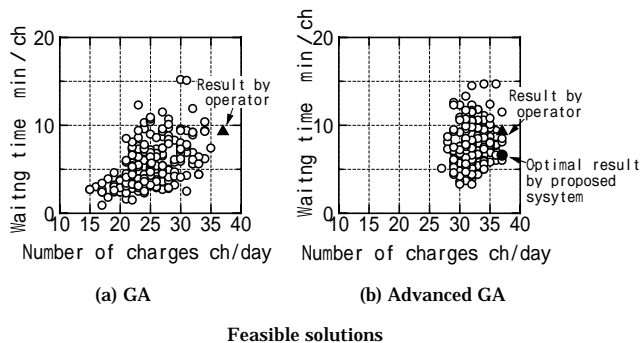


Fig.14 Comparison with GA and proposed algorithm

Table 3 Contents of DB

Process	BOF	HSM	Plate mill
Number of data (Storage period)	10000 heats (6 months)	6 months each coil	1 month each path
Data collection mesh	2 sec.	Top and bottom; 2m Middle; 5m	Top and bottom; 0.2m +10ms AI
Data items	3500 items	160 items	100 items
Examples of data items	Oxygen flow rate Waste gas flow rate Sub material addition Bottom gas flow rate ...etc	Sheet width Sheet thickness AWC data Temperature ...etc	Plate width AWC data Temperature Roll gaps ...etc

4.2.3 IT (情報技術)を活用した制御モデルの共同構築

製鉄所のホワイトスリム化とともに、制御モデルの開発・改善にかけられる技術者のマンパワーは限られており、効率的な開発のやり方が及第的な課題であった。このような背景のもとに、当社では、IT (情報技術) を活用し、社内の各部署がネットワークを介して連携して制御モデルの共同開発・調整作業の容易化を図り、開発効率を大幅に向上させることができた。

制御モデル共同構築のためのネットワークシステムを Fig.15 に示す。プロコンで収集される操業実績データは、パソコンサーバ DB (データベース) に格納され、その内容は社内ネットワークを介して研究所および製鉄所において随時参照することができる。代表的なプロセスの DB 内容を Table 3 に示す。開発スタッフは、自分のデスク上のパソコンで、操業実績データ、制御モデルパラメータ、プログラムなどをリアルタイムに参照し、解析・シミュレーションツールをうまく活用しながら、各部署が自立しつつも共同で連携した開発を行う環境を構築した。

従来の開発業務では、解析用の操業データ収集、解析、シミュレーションの多くの時間と労力を要したが、本システムの導入により、Fig.16 に示すとおり開発所要時間は当初に比べて約 1/3 程度に低減された。この結果、開発効率が大幅に向上し、操業合理化の早期達成に大きく貢献している。また、品質異常・操業トラブル発生時の解析も容易となり、その対応と対策の迅速化が図られた。

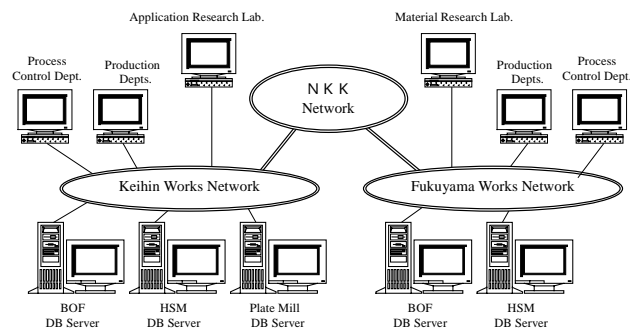


Fig.15 Configuration of collaboration network system

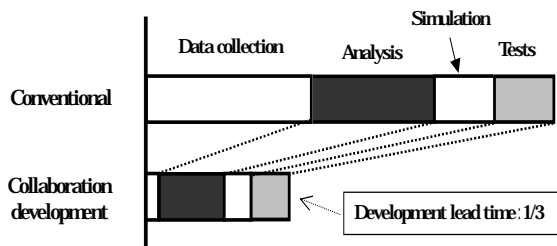


Fig.16 Comparison of lead time

5. おわりに

当社における、最近の開発技術を紹介した。本稿で述べた開発技術は学協会始め社外からも高く評価され、大河内賞技術賞、情報システム大賞など各種受賞にもつながっている。

当社の設備部門は、今後も機械、電気制御という設備固有技術にとどまらず、商品製造プロセス自身の改善改良を幅広く目指す視点で技術開発に取り組んでいきたい。

今後も設備が鉄作りの基礎を支えるという気概を持ち、研究所および設備メーカーとも連携協力して、日進月歩の技術と設備技術を融合発展させ、鉄鋼事業の基盤強化に貢献していきたい。