

技術論文

製鉄インフラストラクチャの保全マネジメントの高度化

Advancement in Maintenance Management of Infrastructure in Steel Plants

寄 光 伸 治*
Shinji YORIMITSU岩 本 豊
Yutaka IWAMOTO稲 葉 一 樹
Kazuki INABA杉 山 卓
Takashi SUGIYAMA吉 田 幸 祐
Kousuke YOSHIDA津 末 佳 朋
Yoshitomo TSUSUE男 帛 憲 一
Kenichi ONOTORA楠 大 介
Daisuke KUSUNOKI

抄 録

製鉄所構内には規模、数量とも膨大な設備が存在し、一般環境に比べて大荷重、高熱、水蒸気、ガス、海塩等の厳しい環境条件下にあることから劣化進行が早く、その形態も多岐にわたる。そのため、これらの設備の維持管理、更新投資の平準化およびライフサイクルコストミニマムを図るためのマネジメントは重要な課題である。製鉄工場建屋の屋根とクレーンランウェイガーダーを具体例として、設備の計画保全の概要と高度化の取り組みについて紹介した。

Abstract

Steel plants consist of many infrastructures of a large scale. These facilities exist under a harsh environment such as large loads, high temperatures, steam and gas exposure and seawater damage, causing accelerated deterioration in many forms. Management of these facilities is crucial to level equipment renewal / maintenance investment and minimize life-cycle costs. This paper will introduce the general outline of scheduled maintenance of infrastructure and discuss the advancement in maintenance management by introducing examples for roof and crane runway girders in factory buildings of steel plants.

1. 緒 言

製鉄所構内には、図1に示すように、鉄鋼生産を行う製鉄設備を支える、工場建屋、設備基礎、道路、線路、港湾施設など、いわゆるインフラストラクチャ（以下、製鉄インフラ設備と称す）が存在する。これら製鉄インフラ設備は、他業界のインフラストラクチャと比較すると、次の特徴があげられる。

まず、それぞれの規模、量が膨大であるという点である。全製鉄所で敷地面積の合計は約100km²あり、山手線内の面積を上回る広さである。このため点検、補修といった維持管理にかかる労力とコストも相当な金額となる。次に、広大な敷地の中でエリア毎に環境が異なり、劣化速度のばらつきが大きく、さらに大荷重、高熱、水蒸気、ガス、海塩等の厳しい環境条件下にあり、劣化の要因は疲労、熱劣化、腐食、摩耗等、多様であるという点である。

これらの特徴を有する製鉄インフラ設備は、保有量が膨大であるため、維持管理の効率化が重要な課題となる。新



図1 製鉄所構内の土木建築設備
Civil facilities in steel plant

日鐵住金(株)では、約50年前から状態基準保全(CBM: Condition Based Maintenance)の概念を取り入れた保全マネジメントの構築に取り組んでいる。状態基準保全は、1990年代から航空機産業の整備費削減を目指して本格化した保全手法の概念で、近年では他業界でも普及し始めている。

* 設備・保全技術センター 土木建築技術部 建築技術室 主幹 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

この保全マネジメントは、IT環境が整備されていない時代からスタートし、初期はアナログカメラと手書きでの点検データで、1990年代に入り、PCやCADといったツールを導入し、維持管理の効率化を追求している。

本論文では、工場建屋の屋根とクレーンランウェイガーダーを対象に、製鉄インフラ設備の保全マネジメントの構築について述べる。

2. 製鉄インフラ設備の保全マネジメントの概要

製鉄インフラ設備は、約100km²という敷地内に、それぞれが膨大な量があり、例えば工場建屋の屋根でいうと、その面積は、東京国際空港（羽田空港）の敷地面積よりもさらに広い。製鉄インフラ設備は、製鉄プロセスの進化にあわせて、増築や改造を行うことから、同じ製鉄所の同じ工場であっても施工年や仕様、構造が異なる。また、高炉や転炉、圧延機といった多様な製造設備が点在しているため、使用環境がばらばらで劣化の原因や進行速度もばらばらである。

このように製鉄インフラ設備は膨大であり、なおかつ、劣化速度や原因のばらつきが多いことから、損傷した箇所を都度補修する維持管理手法では、予期しない損傷が発生して工場ラインが緊急停止を余儀なくされたり、大量の設備が同時に耐用年数限を迎え一次的な投資負担が増大してしまったり等、経営的にも大きな影響を与えることとなる。一方、一定の周期毎に補修、更新を行う維持管理手法では、劣化速度にばらつきがあるため、多くの健全なエリアを同時に更新したり、一部だけが寿命を迎えてトラブルを起こしたりすることとなる。そして、対象量が膨大であるため投資額も大きく、相当な損失となってしまう。

このような問題を有する製鉄インフラ設備を効率的に維持管理していくには、保全計画の策定と点検補修の実施に加えて、実施した点検補修が適切であったかどうかについての分析と評価を行い、必要に応じて点検補修方法を改善改良していくこと、いわば保全マネジメントの構築が肝要となる。保全マネジメントの概要を以下に示す。

①点検補修計画

- ・点検を行う部位、手法の決定
- ・補修を行う部位、手法の決定

②点検補修作業の実行

- ・点検補修計画に基づき点検作業、補修作業を実行

③点検補修計画、点検補修作業のフィードバック

- ・点検補修計画の分析、評価

④点検補修計画、点検補修作業の改善改良

- ・評価結果を基に、点検補修計画、点検補修作業の改善改良をする

上記の流れで保全を進めていくが、効率的かつ確実に点検補修作業を進めていくには、ばらつきをなくするための維持管理標準と膨大なデータを目的に応じて適切に処理で

きる支援システムが必要である。維持管理標準は、点検の対象、方法、補修方法など、保全マネジメントの根幹となるものであり、点検補修作業において守るべき事項を規定する。支援システムは、維持管理基準で制定した評価指標に基づき、エリア毎の仕様、構造、使用環境の違いを区分して評価できるマッピング機能と、寿命、劣化速度や設備重要度等を素早く評価できる分析機能から構成される。保全マネジメントの要となる維持管理標準と支援システムは、数十年前からスタートし、これまで改善改良を重ねて現在にいたっている。

次章では、製鉄インフラ設備の代表であるクレーンランウェイガーダーと工場建屋の屋根で構築してきた維持管理標準および支援システムの概要を紹介する。

3. 製鉄インフラ設備の保全マネジメントの構築

3.1 クレーンランウェイガーダー

図2に、クレーンランウェイガーダー（以下、CRGと略す）の概要を示す。CRGの重要な機能は重量物の支持であり、抑えるべきリスクは折損である。折損が発生すると、天井クレーンの走行不能化による操業影響だけでなく、溶鉄、溶鋼の入った鍋を運搬する天井クレーンでは重大なトラブルに繋がるおそれもある。折損に至るまでの起点は、ほとんどの場合が疲労亀裂であることから、亀裂を早期に発見し適切に補修作業を実施することが重要となる。

3.1.1 維持管理標準

CRGの維持管理標準は、“劣化状態を評価するためのランク分類”と“ランクに応じた点検、補修方法”で構成される。

劣化ランクの定義と劣化ランクに応じた点検要否と対応方法を図3に示す。ランクは天井クレーンの走行頻度・荷重から累積疲労損傷度（以下、D値と称す）を算出し、D値が1以下の場合、劣化ランク4としている。D値が1を超える場合には点検を行い、亀裂がなければ劣化ランク3、亀裂が発見された場合には劣化ランク2とし、折損または繰り返し亀裂が発生している場合は劣化ランク1としている。

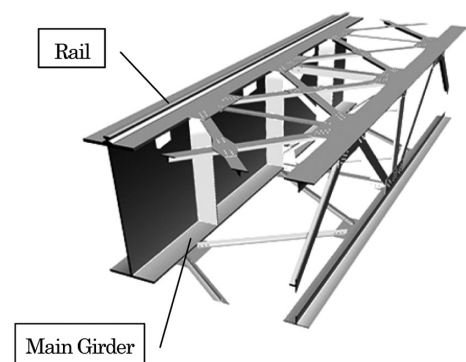


図2 CRGの概要図
Illustration of CRG

る。

劣化ランク毎の対応方法について、劣化ランク1のCRGは架け替えを計画的に行っているが、劣化ランク2のCRGでは、亀裂の補修に加え、図4に示す超音波衝撃処理(Ultrasonic Impact Treatment: UIT)¹⁾の実施を推奨している。UITは、圧縮残留応力の付与、溶接止端部の形状改善、表層部の硬度向上により、疲労強度等級アップおよび疲労回復効果による疲労延命を図る方法である。劣化ランク3のCRGは将来的に亀裂の発生する可能性が高いことから予防保全としてUITの実施を規定している。

次に疲労亀裂を発見するための点検について述べる。疲労亀裂は溶接接合の形状や方法によって発生のしやすさが異なる。図5に、CRGの疲労亀裂の代表的な例を示す。“下フランジ端面の溶接部”、“三角リブ下端”、“上フランジとウェブの溶接部”等は亀裂の発生が多い箇所である。また、下フランジの下面にブレースや歩廊、配線、配管等の支持材用のガセットプレートを溶接したり、カバープレートにて溶接補強したタイプもその溶接部が疲労亀裂の起点とな

ることが多い。このことから、点検部位は、これらの溶接箇所を設定した。

点検周期や点検方法については、高温溶融物の運搬の有無、バイパスルートの有無等により設備重要度を規定し、劣化ランクと設備重要度に応じて規定している。例えば、設備重要度の高いCRGについては寄り付き用の足場を設置して近接目視点検や定期的な非破壊検査を行っているが、比較的重要度が低いCRGは、床面からの遠方目視点検としている。

図6に、以上述べてきた維持管理基準に基づく調査結果の例を示す。下フランジ端面の溶接部16か所の亀裂の有無の調査結果を過去3回分記録したものであるが、亀裂無しのため、劣化ランクは3となる。これは全製鉄所で約10000本あるCRGの1本分の事例であり、電子データや紙面での資料となる。これらは現在のCRGの健全性状態を把握はできるが、今後の予測や傾向などをつかむことはできない。そこで、保全マネジメントのもう一つの要となる支援システムが必要となる。

Deterioration Rank	Inspection	Action Taken
Rank 1 Serviceability Limit (Repetitive Cracking)	Required	Needs Fundamental Measures (Replacement or Reinforcement)
Rank 2 Crack Initiation	Required	Welding Repair +UIT
Rank 3 Unsound State [Target:D>1]	Required	UIT
Rank 4 Sound State [Target:D1≤1]	Not Required	-

Standardizes Inspection and Repair According to its
Deterioration Rank

図3 CRG 維持管理基準の概要
Outline of CRG maintenance management criteria

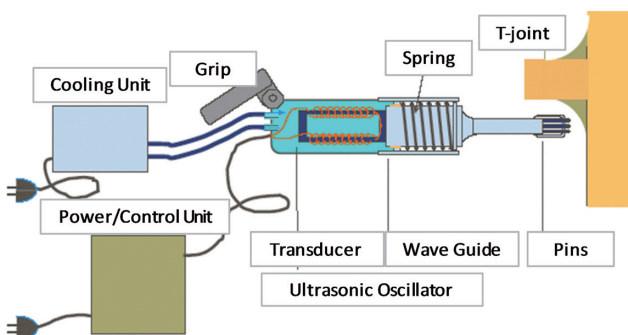


図4 UIT (Ultrasonic Impact Treatment) の概要
Illustration of UIT

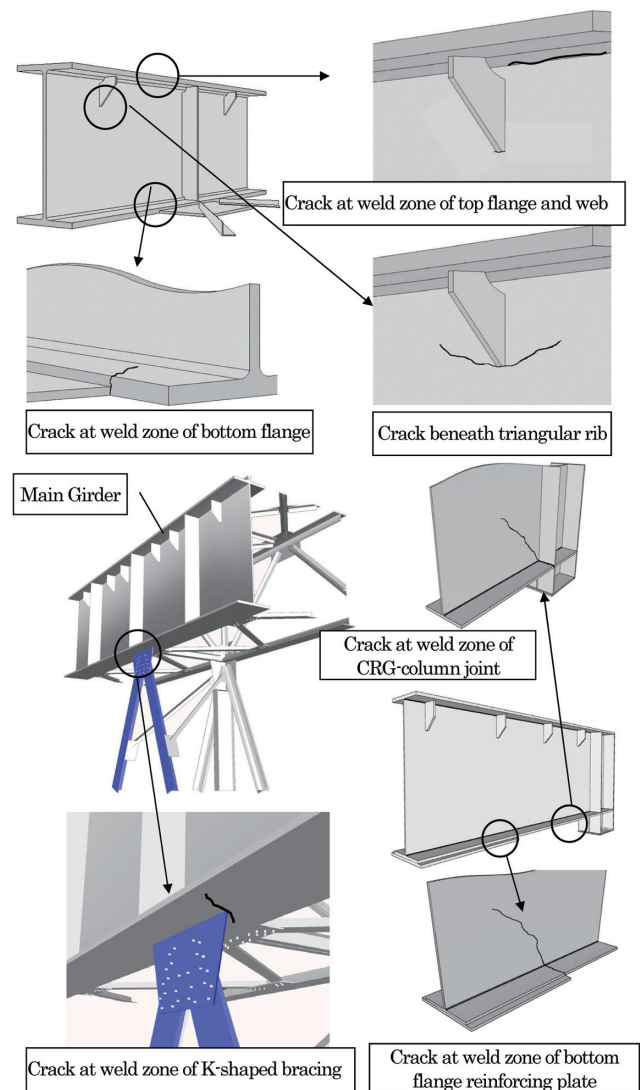


図5 CRG の主な亀裂発生箇所
Primary area of crack development in CRGs

CRG整備履歴管理表									
工場	E-400								
ポイント番号	E-400								
点検箇所	E-400								
点検部位	CRG下部/中央部								
No.	a(west) a(east) b(west) b(east) c(west) c(east) d(west) d(east)								
2013FY									
2014FY									
2015FY									
No.	e(west) e(east) f(west) f(east) g(west) g(east) h(west) h(east)								
2013FY									
2014FY									
2015FY									

図6 CRGの点検記録の例
Example of CRG inspection results

3.1.2 支援システム

CRGは建設年やスパン、構造が異なるだけでなく、操業条件により天井クレーンの走行頻度、吊荷重、吊位置等の条件が異なる。これらを管理するためにCRG 1台毎に番地付けを行い、図7に示す設備管理台帳を作成している。台帳にはCRG毎の建設年、天井クレーンの1日あたりの走行回数、天井クレーンの走行によりCRGに発生する応力等を入力することで、当該のCRGに作用したこれまでの繰り返し回数、D値を自動的に計算し、点検により亀裂の有無を入力することで劣化ランクを判定している。

図8に、劣化ランクに基づいて管理単位毎に色分けした例を示す。劣化ランクと設備重要度に基づき、次回の点検期限を自動計算し、過ぎている場合はアラーム表示を行う機能も有しており、抜けのない点検計画と実行に役立てている。また、全体が一目で分かるので、劣化ランク等の分布や全体感を把握しながら、修理時期・範囲を決定している。

以上、述べてきたCRGの維持管理標準と支援システムによる維持管理を実施し、大きなトラブルを未然に防いでいる。

Linked with MAP						
Input Data						
Code (Address)	Name of Yard	Equipment Importance Factor	Construction Year	Length (m)	Traveling number of times (/day)	Generated stress (MPa)
A1	X Yard	SA	1969	20	100	180
...	...	...	...	...	...	...
B1	X Yard	A	1975	20	50	170

Calculation in EXCEL®		Inspection Result		Judged in EXCEL®	Calculation in EXCEL®	Judged in EXCEL®
Number of repetitions (*1)	D Value (*2)	Inspection Date	Crack existence	Deteration Rank (*3)	Next inspection date (*4)	Alarm
1,715,500	6.0	2015/11/15	exist	2	2016/5/15	!Passed
...	...	...	...	...	...	...
748,250	2.5	2015/11/15	none	3	2016/11/15	

*1 Calculated from Construction Year and Traveling number of times
 *2 Calculated from Generated stress and Number of repetitions
 D Value : Cumulative fatigue damage
 *3 Judged from D Value and Crack existence
 *4 Calculated from Deteration Rank and Equipment Importance Factor

図7 EXCEL®によるCRGのデータ管理
Management of CRG data in EXCEL®

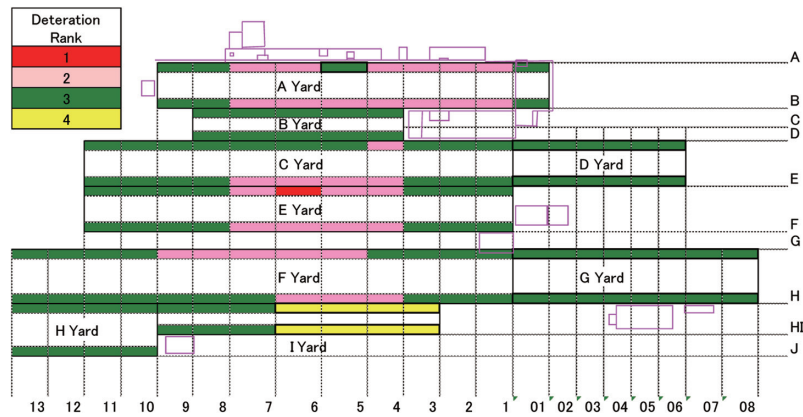


図8 マッピングシステムによる CRG の管理単位毎の自動色分け例
Example of color-coded plan for one management block of CRG in the mapping system

3.2 工場建屋の屋根

3.2.1 維持管理標準

屋根の維持管理標準は、“劣化度判定基準”と“仕様選定基準”で構成される。

劣化判定基準は、健全な状態から塗膜劣化 → 原板腐食 → 孔明きといった金属屋根の劣化プロセスに応じて劣化の程度を判定するものである。これを制定することにより評価のばらつきをなくすることができる。例えば、海岸に近いエリアでは海塩の影響を受け、圧延製造ラインでは、熱片スラブを大量の水で冷却する際に発生する多量の水蒸気の影響を受ける。これらの影響を受ける場所では、劣化のスピードが速くなるが、劣化判定により劣化の進展を把握

することが可能となる。

仕様選定基準は、使用環境毎の寿命を推定し、ライフサイクルコストを考慮した上で、水蒸気、ガス等の周辺環境に応じて葺き替える屋根材や塗装材を規定している。屋根材や塗装材の性能を評価するために必要に応じて試験等を行い評価する。図9に、室内での促進耐候性試験の一例を示す。写真の上段は新品、中段は既設屋根材、下段は既設屋根材に塗装を行ったものであり、それぞれがどの程度の耐久性能を具備しているかを明らかにしている。維持管理標準には、劣化度判定基準と仕様選定基準をベースに、点検する部位、周期、方法、および補修する方法を規定している。

【New Specimen】

Initial State	Equivalent to 10 years Exposure	Equivalent to 20 years Exposure	Equivalent to 30 years Exposure

【Specimen from Existing Roof】

Initial State	Equivalent to 10 years Exposure	Equivalent to 20 years Exposure	Equivalent to 30 years Exposure

【Specimen from Existing Roof】

Initial State	Equivalent to 10 years Exposure	Equivalent to 20 years Exposure	Equivalent to 30 years Exposure

図9 塗装延命工法の最適化に向けた環境サイクル試験
Environmental cycle test for optimization of life-extension paint

3.2.2 支援システム

膨大な量の屋根について全体的な劣化の傾向や相対感を掴むためには、全体を所定のメッシュで区分し、そのメッシュ毎に情報を管理するマッピング機能が必要である。

図10に、マッピング機能の一例を示す。工場建屋の柱通り毎に管理単位を区分し、それぞれに番地を付けた上で、番地毎に点検によって得られた劣化状態をシステム上で記録している。具体的なツールとしては、1980年代前半までは紙面に手書きで行っていたが、現在は、EXCEL®のマクロ機能等を活用したり、市販のマッピングシステムをカスタマイズすることで、固有のマッピングシステムを開発している。

3.2.3 保全マネジメントの実例

図11に、将来の劣化ランクを予測した事例を示す。

工場建屋の屋根は、使用環境やライフサイクルコスト等を考慮し、その時点で最適なものを採用しており、カラー鉄板やふっ素樹脂銅板、ステンレス銅板等、原板（亜鉛めっき銅板、ガルバリウム銅板等）や表面処理技術の進歩に伴

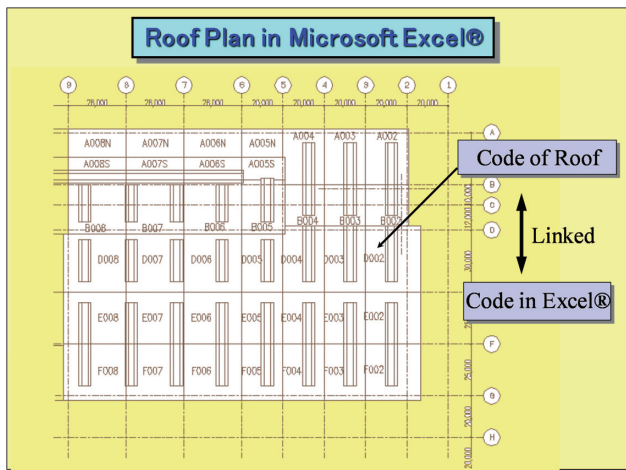


図10 マッピングシステムによる屋根の番地化
Coding of roof by the mapping system

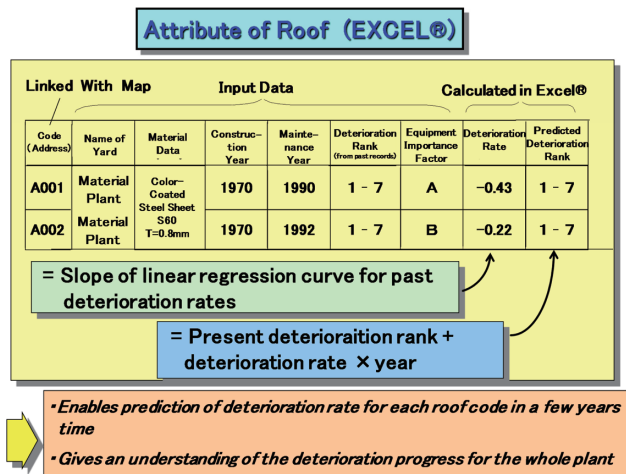


図11 屋根の劣化速度計算の計算例
Deterioration rate prognosis of roof

い様々な屋根材が使用されているが、施工時の仕様や現場塗装の有無、仕様等および使用環境により劣化速度が異なる。これらの情報を分析して、過去の点検結果から劣化速度を計算し、各メッシュ毎に寿命を予測する。

図12に、投資シミュレーションの例を示す。左が葺き替えに100%投資した場合、右が葺き替えに70%、延命塗装に30%投資した場合である。図の縦軸を屋根面積、横軸を暦年とし、劣化ランク別の屋根面積の推移を示している。図からわかるように、葺き替えに屋根の維持管理費用の100%を投資するよりも、葺き替えに70%、延命塗装に30%を投資した方が劣化の進行している屋根材（劣化ランク1, 2）の面積を減らすことができる。

図13に、マッピング事例を示す。劣化ランクに基づいて管理単位毎の色分け表示を自動的に行うことで、現在および将来の劣化ランクの分布を把握しながら、修理時期・範囲を決定している。また、寿命が短い屋根については葺き替え時に部分的に仕様を変更する等の判断にも役立てて

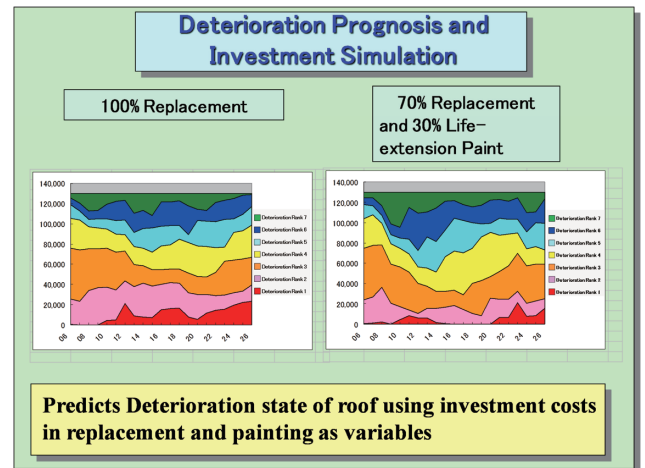


図12 屋根の劣化予測／投資シミュレーション
Deterioration prognosis and investment simulation of roofing in the mapping system

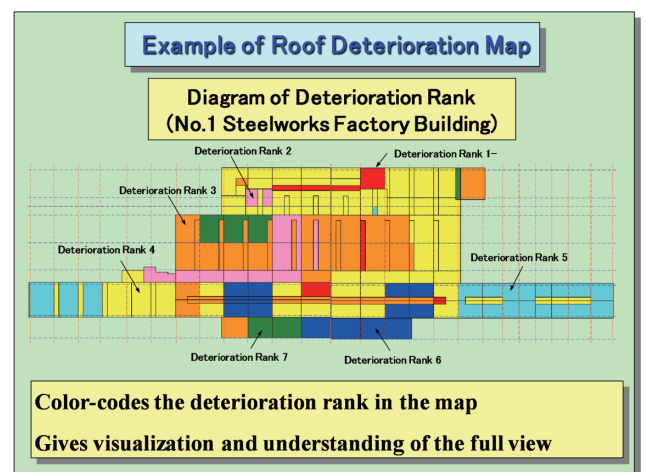


図13 マッピングシステムによる屋根の管理単位毎の自動色分け例
Example of color-coded plan for one management block of roof in the mapping system

いる。なお、作成するマップは劣化ランク別だけでなく、建設年代別、仕様別、設備重要度別、修理優先順位別等、必要に応じて追加することで膨大なデータをビジュアルにわかりやすく表現し、効率的かつ抜けのない計画保全を支援している。

4. 保全マネジメント高度化の取り組み

4.1 点検作業効率化

前述したCRGの点検データは、台帳等に記録して事務所に持ち帰り、別途データ入力を行うとともに、撮影箇所を確認しながら点検記録書内の所定の位置に写真を貼り付ける等の作業を行っていたが、データ量が膨大なため、非常に煩雑で手間がかかっていた。そこで、点検データの記録および整理作業を改善できる方法を開発した。

図14に、タブレット端末を現場に持参し、点検結果を現場で入力する様子を、図15に、デジタルカメラで撮影した写真をタブレット端末へ無線で転送し、予め設定した枠内に取り込む様子を示している。この方法によれば、事務所でのデータ入力、点検記録書作成作業の負荷を低減することができ、抜け漏れ防止にも効果がある。今後、CRG以外の設備にも順次適用範囲を拡大していく予定である。

4.2 支援システムの高度化

前述したCRGおよび屋根の支援システムは、EXCEL®をベースに、工場単位毎でデータを作成し利用してきたが、



図14 タブレット端末による点検結果の現場入力化写真
Input of inspection results using a tablet computer



図15 デジタルカメラからタブレット端末への写真転送
Data transfer from digital camera to tablet computer

直近では、製鉄所全体を一括するとともに、各点検データとの連動性を高めるため市販の設備管理ソフトウェアであるナビポータル®をベースにカスタマイズに取り組んでいる。

図16に、ナビポータル®の画面を示す。図面は、①設備管理図を表示するエリア、②EXCEL®で作成した設備管理台帳の情報をリンクして表示するエリア、③マップ作成時の条件や配色を設定するエリア、④番地に紐付けて登録したドキュメントを表示するエリア、⑤検索条件に基づいて全文検索を行い該当するファイルを表示するエリアで構成される。これにより、一目で各情報と連動することができ、効率的である。

図17に、設備管理図の作成状況を示す。Sketchup Pro®等の3次元モデル作成ソフトウェアを用いて建屋全体の3次元モデルを作成し、屋根、CRG、外壁、クレーンレール、雨樋、建具等、設備毎に規定した管理単位で区分し、番地付けをした設備管理図を作成している。これにより、従来、別々のファイルとなっていた設備を一元的に管理できる。

さらに、EXCEL®で作成した設備管理台帳の情報はナビポータル®に取り込むことができ、番地をもとに設備管理

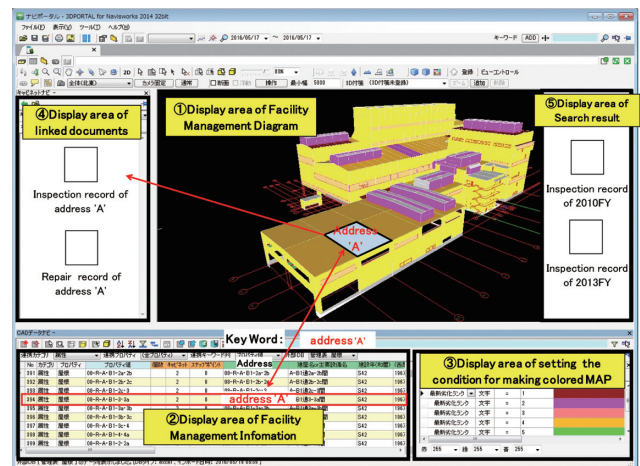


図16 ナビポータル®の画面構成
Screen configuration of NaviPortal®

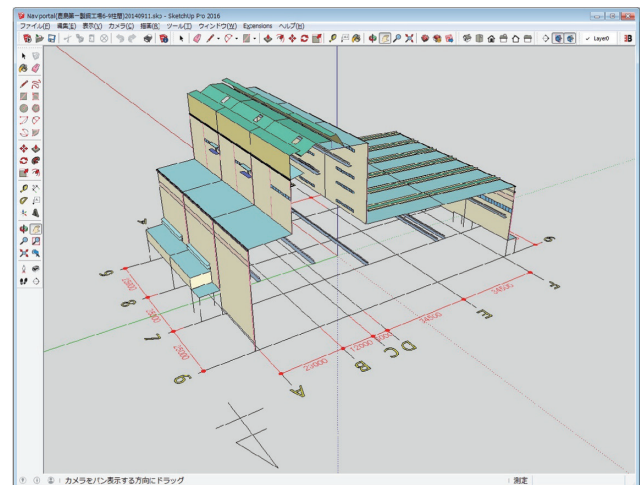


図17 Sketchup Pro®による設備管理図の作成
Creating a facility management diagram in Sketchup Pro®

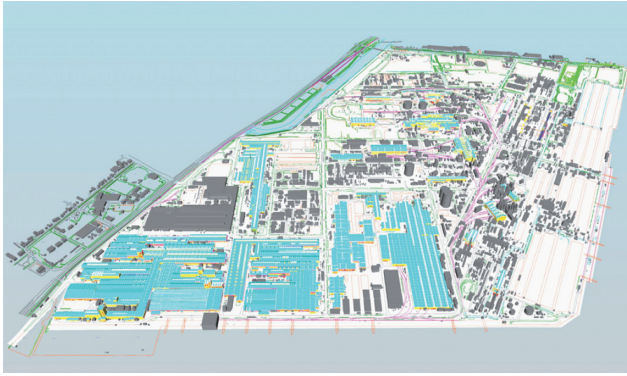


図 18 ナビポータル®による製鉄所設備の維持管理
Maintenance management of steel plant infrastructures
using NaviPortal®

図と紐付けることで劣化ランク別の色分けを自動に行うことができる。マップ作成時の条件設定は画面から追加・修正可能であり、任意のマップを容易に作成することができる。

また、設備管理図表示エリアの設備管理図の番地を選択することで設備管理台帳表示エリアに該当番地の情報が表示されるとともに、当該番地の点検結果等の各種ドキュメントを容易に登録、表示することができる。さらに選択した番地が検索のキーワードとして設定され、指定したフォルダ内にあるファイルを全文検索して当該番地を含むドキュメントが検索結果表示エリアに表示されるため、点検結果や修理履歴等の関連資料を容易に検索することができ

る。図 18 は、製鉄所構内のイメージ図であるが、将来的にはインフラストラクチャ全般への活用を検討している。

5. 結 言

製鉄工場建屋の屋根とクレーンランウェイガーダーを例に、製鉄インフラ設備の保全マネジメントと高度化の取り組みについて述べた。本論で述べたように、IT 環境の進歩に合わせてさらなる効率化を推進していくことは、設備土木建築技術者の使命である。昨今、建設業界では BIM、CIM や AR、ロボット、ドローン等、情報技術の進歩は目覚ましく、今後もこれらを有効活用していきながら、効率的な維持管理を追求していく。

謝 辞

計画保全に向けた取り組みは新日鐵住金および関係協力会社による長年にわたる取り組みの上に成り立っているものであり、これまで基準・指針類の策定に尽力された方々、日頃、点検、修理を実行していただいている関係協力会社の方々、点検、修理の改善、改良に尽力された関係者の方々にこの場を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 富永知徳、松岡和巳、佐藤嘉昭：日本鋼構造協会、鋼構造論文集、14 (55)、47-58 (2007)



寄光伸治 Shinji YORIMITSU
設備・保全技術センター
土木建築技術部 建築技術室 主幹
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



岩本 豊 Yutaka IWAMOTO
鹿島製鉄所 設備部 土建技術室 主幹



稲葉一樹 Kazuki INABA
名古屋製鉄所 設備部 土建技術室 主幹



杉山 卓 Takashi SUGIYAMA
鹿島製鉄所 設備部 土建技術室 主査



吉田幸祐 Kousuke YOSHIDA
日鉄住金テックスエンジニア(株)
名古屋建設センター



津末佳朋 Yoshitomo TSUSUE
日鉄住金テックスエンジニア(株)
建設事業部 技術部
名古屋設計技術グループ



男席憲一 Kenichi ONOTORA
日鉄住金テックスエンジニア(株)
名古屋建設センター



楠 大介 Daisuke KUSUNOKI
日鉄住金テックスエンジニア(株)
名古屋建設センター