

ステンレス鋼の構造部材利用による 新たなプラント建設技術コークス湿式消火設備

New Plant Construction Technology Using Stainless Steel Structural Members: Coke Wet Quenching Facilities

コークス炉に併設された湿式消火設備(蒸気放散設備)は従来鉄筋コンクリート造(以後、RC造)のものが主流である。本稿は老朽更新に伴い、操業用消火電車が走行するエリア内の狭隘スペースでの施工、工期短縮、高腐食環境下での主要構造部の長期メンテナンスフリー化を目指して、従来のRC造を鉄骨SUSとして更新した案件である。ステンレス鋼採用に際し、建築用材料であるSUS304AやSUS316Aの他、リーン二相鋼ステンレス材にも目を向けた。そしてコークスガスや高温水蒸気環境下による腐食影響を考慮して、現場暴露試験や高温水蒸気酸化促進試験などの評価を行った結果、高強度・高防食でSUS316Aより安価な二相鋼:SUS323L(2015年9月JIS化)を主要構造部に、内筒部にはYUS-220Mを採用した。蒸気放散を行う筒身を主要構造体の中に入れるアウトフレーム工法や、異種金属接触腐食対策工法、圧延材のないビルドアップ材を採用し、湿式消火設備特有の温冷を繰り返す環境下に耐えられるよう、熱応力影響や、熱による伸縮影響を考慮し取り組んだ事案である。

Wet quenching facilities (steam dissipation facilities) attached to coke ovens have traditionally been constructed primarily with reinforced concrete (hereafter referred to as RC). This paper discusses a project in which the conventional RC structure was replaced with a stainless steel frame to address issues during the renewal of aging facilities, such as construction in a confined space within the area where the quenching electric car operates, shortening the construction time, and achieving long-term maintenance-free main structural parts in a highly corrosive environment. In selecting stainless steel, we gave attention to lean duplex stainless steel materials in addition to the architectural materials SUS304A and SUS316A. Considering the corrosive effects of coke gas and high-temperature steam environments, we conducted on-site exposure and high-temperature steam oxidation acceleration tests. After evaluating the results, we selected US323L (JIS standardized in September 2015), a duplex stainless steel that is high-strength, highly corrosion-resistant, and cheaper than SUS316A, for the main structural parts, and YUS-220M for the inner cylinder. This project involved the use of an out-frame construction method in which the steam dissipation cylinder is placed inside the main structural body, measures to prevent galvanic corrosion, the use of built-up materials instead of rolled materials, and considerations for thermal stress and thermal expansion effects to withstand the unique environment of wet quenching facilities, which are subject to repeated heating and cooling.



辻本 恭平
TSUJIMOTO Kyohei
日本製鉄㈱名古屋製鉄所
設備部
土建技術室



関 一優
SEKI Kazumasa
日本製鉄㈱名古屋製鉄所
設備部
土建技術室



石上 一翔
ISHIGAMI Kazusa
日本製鉄㈱名古屋製鉄所
設備部
土建技術室



吉田幸祐
YOSHIDA Kosuke
日鉄テックスエンジニア㈱
建設事業部 設計技術部
名古屋設計技術グループ

1 緒言

当プロジェクトは、老朽化したコークス湿式消火設備を更新するものである。従来、鉄筋コンクリート造が採用されてきた背景があったが、操業電車が走行するエリアでの施工、かつ、工期短縮を目指し、鉄骨造(ステンレス構造)での設計・工事管理、技術改善に取り組んだ記録である。

2 プロジェクト概要と課題

2.1 工事概要

発注者	日本製鉄(株)名古屋製鉄所	
設計	日本製鉄(株)名古屋製鉄所 設備部 土建技術室 日鉄テックスエンジニア(株) 建設事業部 設計技術部 名古屋設計技術グループ	
監理	日本製鉄(株)名古屋製鉄所 設備部 土建技術室	
施工	日鉄テックスエンジニア(株) 建設事業部 名古屋建設センター	
工期	基礎_日修・操業並進	2021.8.1~2022.3.31
	架構1節_日修	2022.3.1~2022.5.31
	架構2節_日修	2022.3.31~4.15
	架構2節_操業並進	2022.6.1~6.30
	架構3節_日修	2022.4.15~5.26
	架構3節_操業並進	2022.6.16~6.30
	その他付帯_日修	2022.7.1~2023.9.30
主要構造	鉄骨造(SUS323L)、アウトフレーム工法 内筒(YUS-220M 0.8mm厚)	
基礎構造	杭基礎	
高さ	31.09m	



写真1



写真2

2.2 課題

- 1) 赤熱コークス(約700°C)の熱影響
※従来のRC造では、脱水・中性化、経年的な強度低下
- 2) 散水消火時に発生する水蒸気影響
- 3) コークスガス(SoxやNox排気ガス、亜硫酸ガス)による酸性環境影響
- 4) 電車が走行する中での操業並進施工
- 5) 既設設備と電車軌道設備間での狭隘スペース施工
- 6) 短工期施工
- 7) 従来のRC造程度の期待耐用年数(50年)
- 8) 安価化

3 プロジェクトの計画

本プロジェクトは、2.2に示す幾つもの課題があり解決に向けた取り組みを報告する。

3.1 鉄骨造の採用

操業用消火電車が走行するエリアを含む施工箇所では、短工期での施工、狭隘エリアでの施工に配慮し、上部構造物をRC造よりも軽量で施工性の良い鉄骨造の採用を図った。軌道内でのRC梁型柱支保工等の仮設が不要となり、図.1のような操業用消火電車が通行する上空での工事が可能になり、操業影響を最小限に留めた。

※腐食、熱に対する配慮が必要。

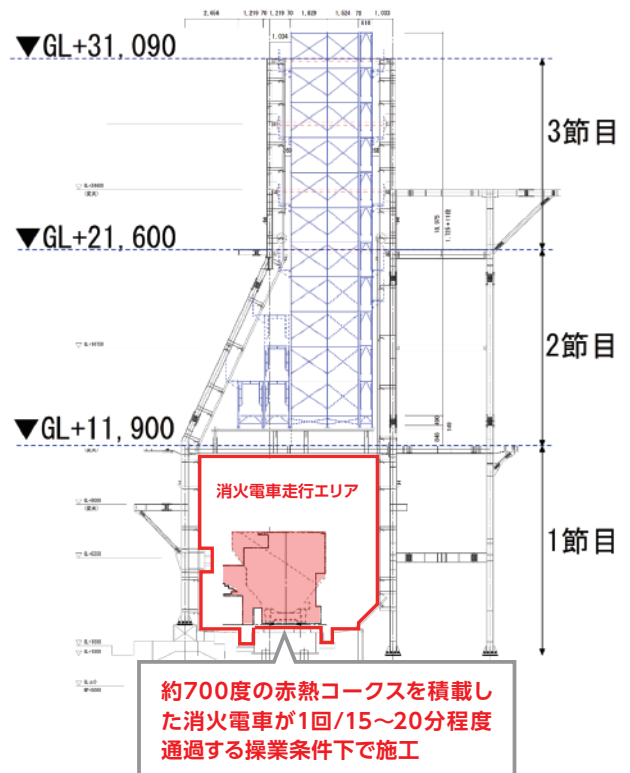


図1: 施工中の操業用消火電車通過イメージ

3.2 杭基礎の施工

鉄骨造を採用することで、上部架構重量が大幅に減り、小口径の杭の採用、杭本数の低減と、狭隘部での施工が可能となった。

3.3 熱影響対策

従来の鉄骨造で採用されているSS材、SN材などは200～300℃で普通鋼特有のひずみ時効※1効果による最大値に達した後、急激に引張強さが低下する。これに対し、SUS304では200～450℃で約500N/mm²と一定値を示すなど、ステンレス材は普通鋼に比較して極めて優れた高温強度を有している。特に塑性化開始後の応力-ひずみ曲線の硬化勾配が大きいことが特徴で、塑性化後も部材は高い耐力を保持できる。一方、高温熱定数、熱膨張率が普通鋼に比べて大きいことから、火災時や受熱影響化において、架構の熱変形が増大することが考えられ、配慮する必要がある。

今回、ステンレス鋼の中でも線膨張係数の小さいリーン二相鋼ステンレスを採用することで、熱影響を押さえた。

- SUS304 17.3 (*1×10⁻⁶/℃)
- SUS323L 13.0 (*1×10⁻⁶/℃) ← 採用
- SS400 12.0 (*1×10⁻⁶/℃)

この他、熱による伸縮や熱応力による影響に対し、注意・配慮して設計・施工管理する。

3.4 腐食対策

鉄骨造採用にあたり、従来のRC造に比較して、設置環境・操業環境条件を調査・ヒアリングし、腐食に対する評価・検証をしっかりと行う必要がある。今回、以下の3点に留意し、ステンレス材の仕様検討、採用判断を実施する。

1) 雰囲気環境

コークスガス腐食、沿岸部塩害、湿式消火時：操業時の高温水蒸気、他に対し、評価が必要であり、現場暴露試験、高温水蒸気酸化試験(室内試験)を実施する。

2) 従来のSS材+重防食塗装や亜鉛メッキ塗装との比較

過去の事例より、ガス腐食影響で、重防食塗装も10年以内での再塗装が維持管理上必須である事が分かっている。現場暴露試験の結果、重防食塗装は、1回の湿式消火で塗装焼失のケースも確認したため断念した。コークス粉は導電性があり、亜鉛メッキを激しく腐食させてしまうので、亜鉛メッキは採用できない。

3) 操業用消火電車が通過する湿式消火設備は、維持メンテナンスが容易ではないため、50年程度の主要構造部のメンテナンスフリー化を目指し、ステンレス構造を採用した。

<試験・考察>

今回上記3つの腐食対策評価として、サンプルを製作し、現場暴露試験、高温水蒸気酸化試験(室内試験)を行うことで、50年という耐用年数に対し、適切な材料選定を行う評価試験を実施した。

その結果、ステンレス鋼の中でも、SUS304よりも高耐食であるSUS316相当の二相鋼ステンレス(省合金※2のSUS323L_23Cr-4Ni-0.15N)を主要構造部に採用した。

また、内筒部の壁材には、SUS304とSUS316の中間価格帯で、SUS316よりも高耐久性・高耐錆性フェライト系ステンレスのYUS-220M(22Cr-1.6Mo-Nb-Ti-LC,N)を採用した。

※SUSは高耐食オーステナイト系や汎用二相系、スーパー二相系と呼ばれる高耐食性の材料もあるので、ケースに併せて最適な選択を行う必要がある。

3.5 安価化対策

1) 二相鋼ステンレスの採用

上部架構をRC造→鉄骨SUS造に変更したことで、固定荷重を低減し、基礎工事ボリュームを大幅に削減でき、工期短縮、コスト削減を実現した。さらに、SUS304とSUS316の中間価格帯で、高強度・高耐食な二相鋼ステンレスを採用することで、SUS316と同等の強度を確保しながら、部材断面サイズをダウンさせることが可能であり、鉄骨総重量減による主要構造部の材料コスト削減に繋がった。

2) 加工費削減

SUS304やSUS316に比較して、圧延材の種類が少ない二相鋼は、サイズによっては、折り曲げ材や、溶接ビルドアップ材を使う事になる為、加工費用が増大する。そこで、溶接ビルドアップよりも安価な折り曲げ加工可能なサイズを抽出し、加工費削減を実現した。

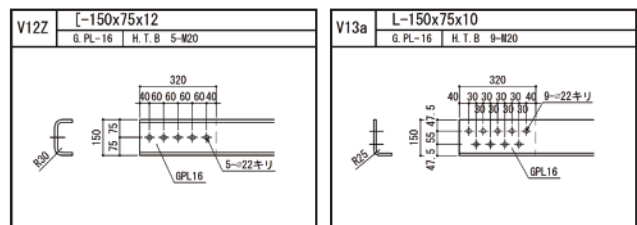


図2: 溶接ビルドアップ→折り曲げ加工例

曲げ加工可能サイズ

厚み	最小立上り寸法	最大長さ
8t	75mm	6000mm
9t	75mm	5500mm
10t	75mm	4000mm
12t	75mm	3000mm

図3: 二相鋼SUS曲げ加工可能サイズ

3) ICTの活用・取り組み

3Dプリンター模型での合意形成、複雑な形状をした部材のMR^{※3}による検査業務省力化への取り組みを実施した。

さらに、iPhone・iPadを活用し、遠方で製作したステンレス製品を完全リモートによる対話方式で検査を実施した。これにより、出張費削減などの他、有識者の多数参加やコロナ感染予防など付帯効果も得られた。

4) 高耐久性構造物の実現＝トータルコスト削減

SUS造によるイニシャルコストは、従来の鉄骨造よりはるかに高いが、RC造並みの耐用年数が期待できることから、供用期間中のメンテナンス頻度減によるランニングコストの削減、操業生産影響のミニマム化の効果が期待でき、トータルコストの削減になると考える事が出来る。

4 ステンレス構造物の設計・加工製作

4.1 継手

主要構造部の高力ボルト摩擦接合設計においては、ステンレス特有の高い耐食性により、赤錆発生しての摩擦接合は期待できない。日鉄ステンレス(株)・(株)アロイの技術的支援をいただき、今回採用する二相鋼ステンレスに適した処理方法を検討した。その結果、母材中板側はサンダー掛けによる面荒らし、スプライスプレート側はブラスト処理とした。

品質管理基準としては、中板側摩擦面：表面粗度40 μ mRy以上、スプライスプレート側摩擦面：表面粗度35 μ mRy以上として管理する。

4.2 ステンレス鋼の加工製作⇔設計変更例

3.5-2)の加工費削減の他、ステンレス鋼採用にあたり以下の点に注意して、設計・製作監理を実施した。

1) 材料費・加工費低減

圧延材の種類が少ないことから、折り曲げ・溶接ビルドアップ材の使い分けの他、溶接ビルドアップ材は一般的な圧延材サイズに拘らず、主柱：BH-400x400x30x30や、主梁：BH-500x300x25x30など、必要最適な断面サイズで設計し、鋼材量を押さえ、材料費削減を図った。主柱もSUS角形鋼管→BHに設計変更することで加工費削減を実施した。

2) 溶接焼け取り

一般的にはステンレス鋼の酸洗洗いは2回程度を標準としているが、加工コスト削減の点から、酸洗洗いは1回での品質確保を試みた。しかし、二相鋼SUSの溶接焼け取りにおいては、溶接サイズや板厚などにより、酸洗1回では品質確保が難しいことが判明した。酸洗以外の焼け取りの

方法として、ワイヤーブラシ、ワイヤーホイール、ショットブラスト、電解法などがある。大気中においては酸素とクロムが反応し、ごく短時間(150秒)で不動態皮膜が再生され耐食性が回復する知見(図.6)を得られたため、酸洗1回では難しい製品については、ステンレス専用ワイヤーブラシ・ワイヤーホイール → 必要に応じ再酸洗という管理で必要品質確保を図り、安価化を実施した。

ステンレス鋼の再不動態化

ステンレス鋼の不動態皮膜は破壊されても周辺の酸素と反応し、再生される。
→ 自己修復機能

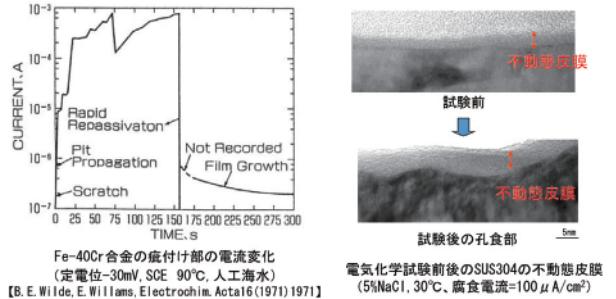


図4：ステンレス鋼の再不動態化

5 ステンレスファブリーケーターとの連携の重要性

本プロジェクト遂行にあたり、ステンレスメーカーの知見を得る事もさることながら、ファブリーケーターとの設計製作図調整・製作納期管理に対し、従来の鉄骨造とは比較にならない程のマンパワーを要した。

ステンレス構造体の製作手戻りは、全体工程の遅延だけでなく、コストデメリット影響も大きいので、計画段階からのファブリーケーターとの密な設計打合せと、余裕を持った材料手配、適正な加工製作期間の確保が重要である。

6 SDGsへの取組

ライフサイクル二酸化炭素排出量の点で、ステンレス鋼の採用は、他建材に比較して、生産過程～輸送過程～建設現場施工過程～運用過程～保守過程～大規模更新過程～解体除却過程までの耐用年数が長いこと(長寿命であること)と、資源循環性のある材料であることから、削減効果が高く、持続可能(SDGs)な材料として、カーボンニュートラル実現に向けた取り組みの一つとなった。

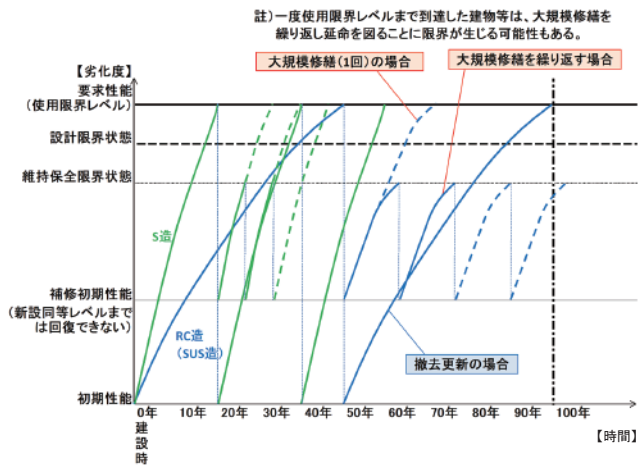


図5.建物劣化度概念図

7 今後の課題と展開

今回のプロジェクトを通じ、鋼構造物の耐熱・耐火・耐食設計、RC造並みの高耐用年数設計、ステンレス鋼構造の保有耐力設計や、ボルト接合部の設計ノウハウなど、多くの知見が得られた。

今後は、厳しい環境下で使用されている海洋工作物や海岸沿いの建築物、工場建築物などでのステンレス採用提案や、長期優良住宅・超長期耐用年数のSDGsな建築物提案など、更なるステンレス建築物の可能性の創出に取り組む所存である。

設計初期からBIMモデルなどの活用によるファブリケーターとの連携強化と、設計～製作～施工までのスケジュール管理などの更なる改善・効率化、従来鉄骨造やRC造とのトータルコスト比較評価も今後の課題である。

8 結言

本案件について、様々な設計・施工の課題・問題を解決することで、技術力を発揮することができ、設備安定稼働に貢献できたことを誇りに思います。

既設改修計画検討はじめ、各種試験、老朽更新プロジェクト始動～竣工までの長年に渡り、多大なるご支援、ご協力をいただきました日鉄ステンレス(株)関係者様、NSステンレス(株)関係者様、(株)アロイ関係者様、並びに、多数の日本製鉄・当社関係者の皆様方に深く感謝申し上げます。

*1ひずみ時効：冷間加工を施された金属、合金がその後の時効によって硬化する現象のこと。

*2省合金：ニッケルやモリブデンなど価格変動が大きいレアメタルの含有量が比較的小さい合金。

*3MR：複合現実。「Mixed Reality(ミックスド・リアリティ)」の略称で、現実空間の形状をMRゴーグルが認識(空間マッピング)し、仮想オブジェクトであるホログラムをディスプレイに投影して、現実空間上に可視化する技術。

参考文献

- 1) 日鉄ステンレス：ステンレス鋼 鋼種カタログ Cat.No.SJ001 2015.10版① 2015.10②
- 2) 日鉄ステンレス：ステンレス鋼の耐食性
- 3) ステンレス協会：ステンレス鋼を構造部材に使用した建築物の耐火設計指針 平成5年3月
- 4) 日鉄ステンレス：NSSC二相鋼シリーズ
- 5) 日鉄ステンレス：二相ステンレス鋼のご紹介
- 6) 日鉄ステンレス：高耐錆性フェライト系ステンレス鋼 NSSC220M(YUS220M)
- 7) 社団法人ステンレス構造建築協会：ステンレス鋼高力ボルト施工の手引き 2004.11 (FKP)
- 8) 青木博文：ステンレス高力ボルトの摩擦接合性能
- 9) 青木唯、松本由香、柳橋卓也、田川泰久、小田達彦：ステンレス鋼高力ボルト摩擦接合部における摩擦面処理とすべり係数に関する実験的研究 その1 試験概要
- 10) 青木唯、松本由香、柳橋卓也、田川泰久、小田達彦：ステンレス鋼高力ボルト摩擦接合部における摩擦面処理とすべり係数に関する実験的研究 その2 試験概要
- 11) 作本好文：ステンレス建築構造物の耐火設計について
- 12) ステンレス構造建築協会：Q&A
- 13) 日鉄ステンレス：ステンレス鋼の不動態皮膜

お問い合わせ先

建設事業部

TEL. 03-6860-6600(本社代表)

[メールの場合]:

more_information-kensetsu@tex.nipponsteel.com