

技術解説

超々臨界圧火力発電プラント用材料とその課題

Materials for Ultra Super Critical Thermal Power Plants and the Problem

難波 一夫

Namba Kazuo

火力発電プラントの高効率化は、材料技術の進歩により支えられてきた。蒸気条件を高め発電効率を著しく改善した超々臨界圧（USC：Ultra super critical）火力発電プラントの実用化には、数十年もの長期間にわたり高温・高圧の過酷な環境下で使用される材料の開発・実用化が大きく寄与している。一方で、これら材料の長時間使用による課題も見出され、その解決に加えさらなる次世代プラントの開発・実用化においても材料技術に対する期待はますます高まっている。

Ultra super critical (USC) thermal power plants has been supported by advances in materials technology. The development and practical use of the material under the environment in high temperature and high pressure over the long term contributed to the practical application of high efficiency USC thermal power plant. On the other hand, problems with long-term use of these materials is also found, expectations for material technology is increasing more and more in the development and commercialization of the next-generation plant and further resolution.

キーワード：火力発電，USC，高クロム鋼，クリープ，強度低下

1 はじめに

わが国の石炭火力発電所の総出力は、約 3 500 万 kW であり、電源構成において重要な役割を担っている。石炭は、世界各国に分布し、他の化石燃料と比較して、埋蔵量が豊富なことから、エネルギー資源を輸入に頼るわが国においては、重要なエネルギーと位置付けられる。しかしながら、他の化石燃料に比べ、単位電力量当たりの二酸化炭素（CO₂）の排出量が多いため、プラントの効率向上が求められてきた。この要請に応え、わが国では石炭火力発電において蒸気条件（ボイラから蒸気タービンに流入する蒸気の温度・圧力）を高温・高圧化した USC 火力発電プラント（以下、『USC プラント』という）を実用化し、1990 年代初頭に商用プラントの運転開始を実現した。

本稿では、USC プラントの主要耐圧材料である高強度フェライト系耐熱鋼に着目し、その実用化の経緯と課題について述べる。

2 USC プラントの実用化

図 1 に国内火力発電プラントの蒸気条件の推移を示す。蒸気条件の向上は、プラントの効率向上を意味する。効率化は 1950 年から 1959 年にかけて、蒸気条件の高温高圧化により急速に進んだものの、その後の約 30 年間は進展がなかった。この間、1980 年から国家プロジェクトにより蒸気タービン入口温度を 593℃以上の超々臨界圧まで高めた USC プラントの早期実用化を目指した材料開発・実用化の取り組みが結実し、

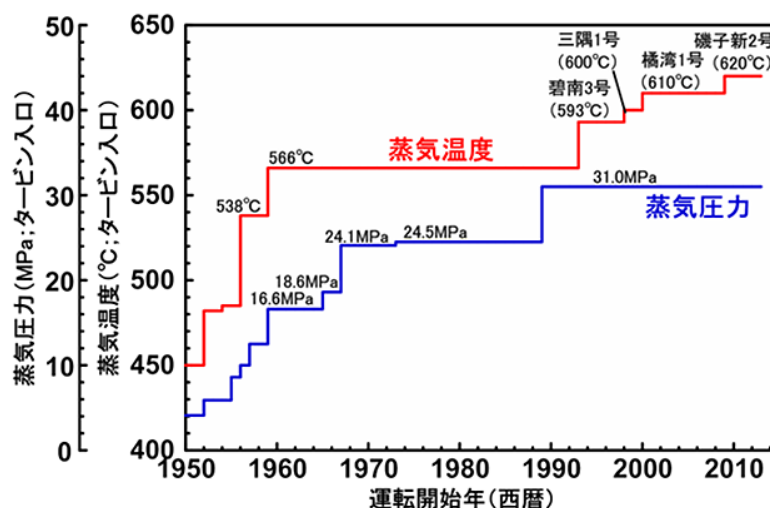


図 1 火力発電プラントの蒸気条件の変遷

1993年に蒸気温度 593℃の商用 USC プラント(中部電力 碧南 3 号)が運転開始するに至った。その後、蒸気条件は着々と向上し、2009年には世界最高水準の蒸気温度(620℃)である電源開発 磯子新 2 号(写真 1)が運転を開始した。

25 MPa/600℃/610℃(順に主蒸気圧力/主蒸気温度/再熱蒸気温度:『主蒸気圧力・温度』は、高圧蒸気タービンに流入する蒸気の圧力・温度、『再熱蒸気温度』は、中・低圧蒸気タービンに流入する蒸気の温度)の USC プラントは、24 MPa/538℃/566℃の在来プラントと比較し、相対値で約 3%の高効率化が図れ、CO₂ 排出量および発電コストの低減化に大きく寄与している。



写真 1 新鋭 USC プラントの外観
(電源開発 磯子火力発電所: 左が新 2 号)

3 USC プラントの主要耐圧材料

3.1 開発・実用化の背景

USC プラントの使用温度域(593℃以上)においては、在来プラントで使用されてきた低合金鋼(2.25Cr-1Mo 鋼)では、強度が不十分のため配管肉厚が極厚になる。また、耐食性に寄与するクロム(Cr)量が低く、管内面に生成する水蒸気酸化スケール剥離による蒸気タービン損傷を回避する観点からも採用が困難である。

一方、より高強度である既存のオーステナイト系ステンレス鋼(以下『 γ 系ステンレス鋼』という)の採用も考えられる。しかしながら、わが国の火力発電プラントは、電力需要の変動に対応すべく頻繁な起動・停止および中間負荷運用を前提として設計するため、配管や管寄せなどの厚肉耐圧部に線膨張係数の高い γ 系ステンレス鋼を採用

した場合、配管拘束点や接合点での熱応力が過大となり当該部での損傷が懸念される。さらに、ステンレス鋼は比較的高価な材料であるため、経済的に設備費の高騰を招来し、熱効率の向上による発電コスト低減効果を相殺する。

このような背景から、USC プラントの主蒸気管等の主要耐圧部に適用するにあたり、 γ 系ステンレス鋼と比較して、熱膨張係数、熱伝導率および経済性の面で有利な高強度のフェライト系耐熱鋼(以下、9~12Cr のフェライト系耐熱鋼を『高クロム鋼』という)の実用化が強く望まれていた。

3.2 高クロム鋼の実用化

国内ボイラメーカーは、米国オークリッジ国立研究所が 1974 年から高速増殖炉の蒸気発生器用材料として研究開発した高強度フェライト系耐熱鋼である改良 9Cr-1Mo 鋼(後に経済産業省発電用火設備の技術基準材 火 STBA28/ 火 STPA28, ASME SA213-T91/P91 として規格化)に着目し、USC プラントへの適用化検討を開始した¹⁾。この改良 9Cr-1Mo 鋼は、従来のボイラ用 9Cr 系鋼と異なり、高温強度向上に寄与する微量のニオブ(Nb)、バナジウム(V)、窒素(N)を添加していることが特徴である。転位密度を高めた焼戻しマルテンサイト素地中に窒化ニオブ(NbN)、窒化バナジウム(VN)を微細析出させるとともに、M₂₃C₆型炭化物に含有された V がその粗大化を抑制することが高温強度を長時間維持するものと考えられている。

図 2 に火力発電プラントに使用される鋼種の許容引張応力²⁾を示す。改良 9Cr-1Mo 鋼の許容引張応力は、600℃で従来の 2.25Cr-1Mo 鋼(STBA24)の 2 倍以上で、 γ 系ステンレス鋼の SUS304HTB と同等以上である。

改良 9Cr-1Mo 鋼は、厚肉部材として中部電力 碧南 3 号の再熱器出口管寄せ、高温再熱蒸気管に採用³⁾されて以降、現在においても USC プラントの管寄せ、主蒸気管、高温再熱蒸気管の大径配管(パイプ材)だけでなく、過熱器管、再熱器管などの小径管(チューブ材)として標準的に採用されている。写真 2 に 600℃超級 USC プ

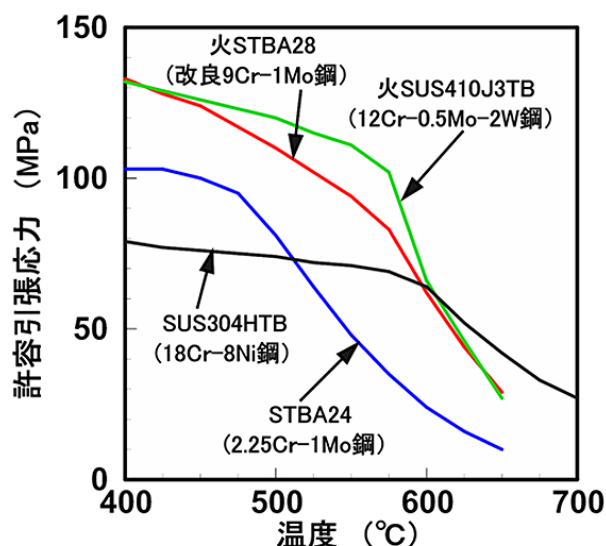


図2 ボイラ用材料の許容引張応力



写真2 改良9Cr-1Mo鋼製主蒸気管の一部

ラントの改良9Cr-1Mo鋼製主蒸気管の一部を示す。

改良9Cr-1Mo鋼の実用化検討中、国内において新たな高クロム鋼の研究開発が精力的に進められ、V、Nbを適正化したうえでタングステン(W)添加による強化を図る強化機構が新たなトレンドとなった。600℃を超える蒸気条件下での適用を目的に、三菱重工業と住友金属工業（現 新日鉄住金）が共同開発した12Cr鋼系の高クロム鋼がHCM12A（火SUS410J3TB/火SUS410J3TP, ASME SA213-T122/P122: 11/12Cr-0.4Mo-2W-0.8Cu-0.3Ni-Nb-V-N）⁴⁾である。耐水蒸気酸化性を考慮しCrを11~12%まで高め、クリープ強化元素としてWを多量添加した0.4Mo-2Wを基本成分とし、Nb、V、Nの適正化を図っている。また、靱性を低下させる δ フェライトを抑制するため、Cr当量の低減に効果がある銅(Cu)、ニッケル(Ni)を適量添加している。当初、650℃以下で改良9Cr-1Mo鋼と比較して許容

引張応力を1.3倍とし、高強度 γ 系ステンレス鋼であるSUS347HTBをも上回る強度設定がなされ、600℃超級USCプラント用材料として管寄せ、配管等の大径管や過熱器管等の小径管として実機プラントに採用された。

その他、東京大学と新日本製鐵（現 新日鉄住金）が共同開発した9Cr鋼系の高クロム鋼であるNF616（火STBA29/火STPA29: 9Cr-0.5Mo-1.8W-Nb-V-N）⁵⁾等の新鋼種も開発された。

これらの高クロム鋼は、母材の開発だけでなく、並行して溶接材料の開発や最適な熱処理条件等を検証し、溶接継手について高温強度、衝撃特性などの所定の機械的特性を確保したうえで実機USCプラントに採用された。

4 高クロム鋼の課題

4.1 長時間使用によるクリープ強度低下

高クロム鋼の実用化により、USCプラントが営業運転に至ったものの、2004年6月にUSCプラントの火SUS410J3（12Cr鋼）製の高温再熱蒸気管溶接部において蒸気漏えい事故が発生⁶⁾した。図3に600℃における火SUS410J3系鋼（12Cr鋼）のクリープ破断強度を示す。調査の結果、実機での高温長時間使用により、溶接継手のクリープ破断強度が急激に折れ曲がり、当初の予想（破線）よりも短時間で破断し、早期蒸気漏えい事故に至ったと考えられた⁶⁾。また、母材のクリープ破断強度に関しても同様な折れ曲がり傾向が認められた。

この事故を発端として許容引張応力設定に用いた10万時間におけるクリープ破断強度が非安全

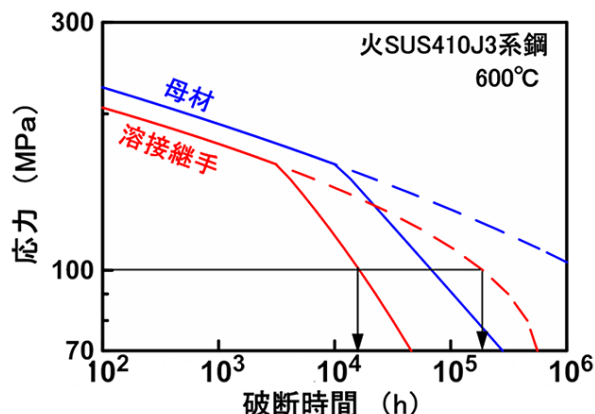


図3 火SUS410J3系鋼のクリープ破断強度

側であったことが判明し、火 SUS410J3 系鋼について 575℃ 超から当該鋼種の最高使用温度である 650℃ 以下の許容引張応力が大きく下方修正されることになった⁷⁾。

4.2 高クロム鋼配管溶接部のクリープ損傷

図 3 に示すように、母材よりも溶接継手の強度が低いため、実機での損傷は溶接継手で発生する。溶接継手の模式図を図 4 に示す。高クロム鋼の損傷では、溶接熱影響部 (HAZ: Heat Affected Zone) の母材近傍側である細粒域で発生し、損傷形態の分類から Type IV 損傷と呼ばれる。実機プラントで長時間使用すると、配管内圧の作用によりクリープ変形が生じ、HAZ 細粒域でクリープ・ボイドと呼ばれるミクロンサイズの空隙が発生し、これらが連結することによりき裂に成長する。き裂は HAZ 細粒域に沿って進展して、最終的に配管を貫通し、蒸気漏えい事故に至るのである。

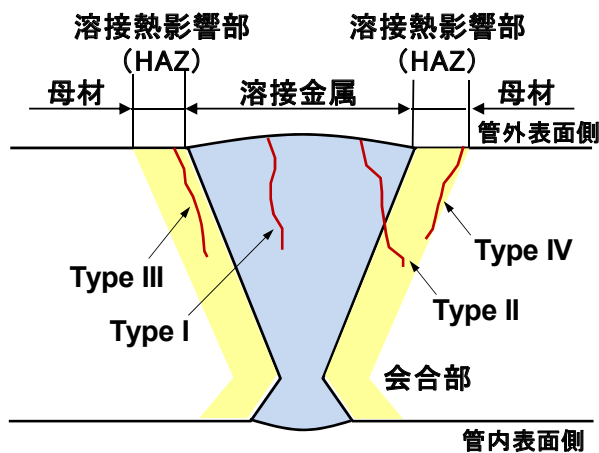


図 4 溶接継手部の損傷形態

開先形状にも依存するがクリープ・ボイドは管外表面よりも肉厚内部の会合部とよばれる肉厚内部の溶接幅の狭まった部分で先行して発生する傾向がある。そのため、管外表面側から実施する従来の非破壊検査では、損傷の状況を捉えにくく、高クロム鋼特有のクリープ損傷評価技術が求められている。

前述の蒸気漏えい事故を受け、USC プラントのユーザーは高クロム鋼製配管溶接部について、超音波フェーズドアレイ探傷検査 (UPA: Ultrasonic

Phased Array testing) やレプリカによるクリープ・ボイドの観察など各種の精密検査を定期的かつ継続的に実施し、プラントの安定運転確保に尽力している。

5 おわりに

材料技術は USC プラントの実用化において多大な貢献を果たした。一方、主蒸気管などの主要耐圧部材に新規採用した高クロム鋼については、長時間使用によりクリープ強度低下による損傷も懸念される。火力発電プラントの数十年間にわたる長期運転中に遭遇する不測のトラブル対策において材料技術の果たす役割は極めて大きい。また、600~620℃ 級 USC プラントの材料問題の解決は次世代の 700℃ 級先進超々臨界圧火力発電プラント (A-USC) の開発・実用化や先進ガスタービン・コンバインドサイクル発電プラントの廃熱回収ボイラの高効率化にも寄与する。各種技術の集大成である火力発電分野においても、ますます材料技術に対する期待は高まっている。

<参考文献>

- 1) 石本、梶谷ら：火力原子力発電 Vol.36, No.9, pp.931-942, 1985
- 2) 発電用火力設備の技術基準の解釈, 平成 19・08・10 原院第 3 号, 2007
- 3) 桑原ら：火力原子力発電 Vol.42, No.7, pp.862-869, 1991
- 4) 榎木ら：住友金属 Vol.47, No.4, pp.29-38, 1995
- 5) 榎原ら：火力原子力発電 Vol.39, No.8, pp.841-849, 1987
- 6) 橋本ら：火力原子力発電 Vol.63, No.12, pp.1027-1031, 2012
- 7) 木村：日本金属学会誌 Vol.73, No.5, pp.323-333, 2009

難波 一夫 (なんば かずお)
技術士 (金属部門)

電源開発 (株)
磯子火力発電所 技術グループ
中小企業診断士
e-mail : kazuo_nanba@jpower.co.jp

