

新しいエネルギー社会に貢献する鉄鋼材料

新日鐵住金株式会社
技術開発本部フェロー

五十嵐 正 晃

1. はじめに

東日本大震災からの復興に向けて、新しいエネルギー社会の構築が模索されている。しかしながら、経済を持続的に発展させるためには、安価な電力を継続して安定供給することが不可欠であり、既存エネルギーを有効活用した電力ベストミックスを実現していく必要がある。中でも石炭火力発電はCO₂排出量が多いため新增設が中断されていたが、燃料費が石油の4分の1、LNGの半分以下と安価であることから、先に政府が纏めたエネルギー・環境戦略でも「石炭火力は基礎電源としてより一層重要な役割を果たす」とされており、今後はLNG複合発電と共に高効率化した新型火力の普及・拡大が急務となっている。

本稿では直面するエネルギー問題に鉄鋼材料がどのように貢献できるかについて、石炭火力発電の飛躍的な高効率化によるCO₂排出削減の視点から概説する。

2. 世界のエネルギー需要動向

図1に世界の一次エネルギー需要の推移と今後の予測を示す¹⁾。エネルギー需要動向は、人口増加率やGDPの伸び率に大きく左右されるが、何れの予測においてもNIES諸国を中心にエネルギー需要は着実に増大すると見込まれており、そのなかで石油、石炭、天然ガスの化石燃料の比率はほぼ8割程度と大部分を占めることとなる。一方、地球温暖化防止には、これ

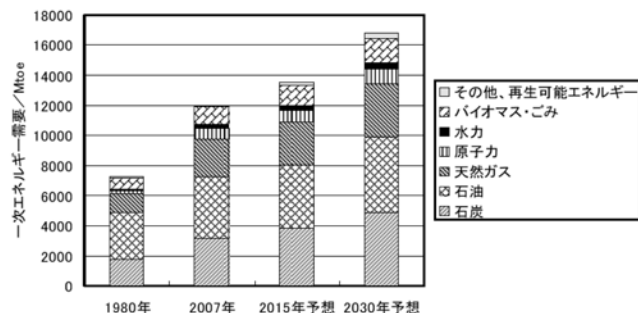


図1 世界の一次エネルギー需要動向 (OECD/IEA, World energy outlook 2009 データより作成)¹⁾

ら化石燃料の消費量を出来るだけ抑制する必要がある。再生可能エネルギーの普及・拡大に加えて、総合的な省エネ、革新技術開発の重要性が益々高まっている。例えば、省エネルギーの実現には、需要家サイドでは、産業・運輸・民生のそれぞれにおいて、最高効率水準の産業プロセス技術（鉄鋼・セメント・紙パルプ・石油精製）を世界に普及させることや、クリーンエネルギー自動車（HV・電気自動車・FCV）の普及拡大、省エネ家電、高効率給湯器（ヒートポンプ等）、高効率空調機器・照明の普及拡大、住宅の断熱強化などが不可欠である。また供給サイドでは、再生可能エネルギー（風力・太陽光・太陽熱・バイオマス発電・バイオ燃料）の普及拡大、安全を前提とした原子力の利用や高効率火力発電（超々臨界圧石炭火力・石炭ガス化複合発電）の普及拡大が必須である。さらには、CO₂回収・貯留（CCS）を発電部門（石炭火力・ガス火力の新設・既設設備）のみならず、産業部門（鉄鋼・セメント等大規模排出源）においても導入拡大することが求められる。

3. 火力発電プラントとその高効率化

火力発電によるCO₂排出抑制の鍵を握るのは、石炭火力発電プラントの更なる高効率化技術の開発である。図2は石炭火力発電の各種燃料・システム別にライフサイクルCO₂排出量を比較したものである²⁾。従来の微粉炭（石炭）焼き火力発電プラントでは超臨界条件（SC; Super Critical、主蒸気温度538℃、圧力24.1MPa）が主流であったが、その場合、石油焼き火力やLNG複合発電に比べて、CO₂排出量が多い。この微粉炭焼き火力の蒸気条件を超々臨界圧にまで高温高圧化することで発電効率の向上が可能となりCO₂排出量を低減できるが、例えば、既設の石炭焼き火力発電で最も効率の良い微粉炭焼き超々臨界圧発電³⁾（USC; Ultra Super Critical、蒸気条件が600℃、25MPa）

よりもさらに蒸気条件を一気に 100℃ 以上高めて、700℃ 級 A-USC 発電（例えば、主蒸気 700℃、35MPa、二段再熱 720～750℃）が実現すれば、発電効率（HHV、送電端効率）は既存 SC プラントの 39% 程度から、46～48% にまで向上可能と試算されている⁴⁾。これは、石炭ガス化複合発電（IGCC）⁵⁾ や石油火力に匹敵する⁶⁾。

しかしながら、この様な高温高压化の実現には、これまでプラント用構造材料として用いられてきた種々の鉄鋼材料の使用限界温度を、未知の領域にまで飛躍的に向上させるブレイクスルーが不可欠となる。

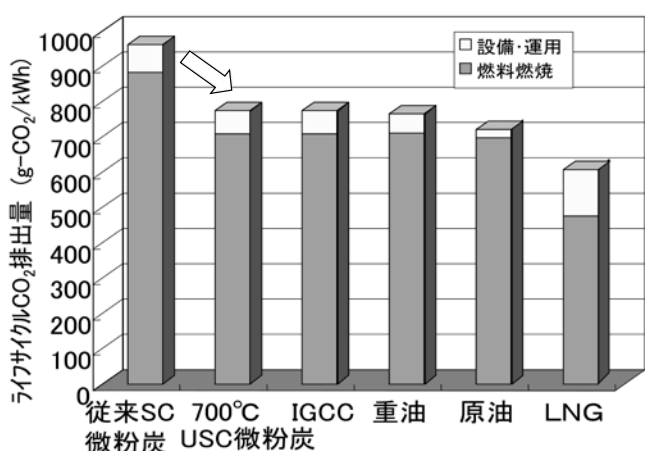


図2 火力発電のライフサイクル CO₂ 排出量の比較²⁾

4. 火力発電ボイラ用鉄鋼材料

図3に微粉炭火力発電所の構成模式図を示す²⁾。火力発電プラントはその機能から大きく分けて、石炭等の燃料を燃焼させて、高温高压の蒸気を発生させるボイラと、得られた高温高压の蒸気を機械エネルギーに変換して電気を得るタービンから成る。ボイラでは、

火炉において石炭の燃焼によって水を蒸気へ転換するが、鋼管の到達温度は現状の 600℃ 級 USC プラントでは 450℃～550℃ 程度であるため、炭素鋼から 2% Cr 鋼までが使用される^{7),8)}。蒸気はさらに過熱器で高温・高压化され、プラントの発電効率を決定する最高蒸気条件（例えば 600℃、25MPa）に到達する。その後、蒸気は管寄せに集められ、主蒸気管で高压タービンへ送られて発電する。ここから蒸気は再び再熱蒸気管を通して再熱器へ戻され、再度高温に加熱されて、その後主蒸気同様に次段のタービンへ送られて発電する。従って、過熱器管・再熱器管は、高温において強度（クリープ強度）が高く、同時に内部は水蒸気酸化、外部は石炭等燃料による高温腐食に耐える必要があり、そのため高強度・高耐食の高 Cr ステンレス鋼が使用される。管寄せ・主蒸気管、再熱蒸気管は大量の高温・高压水蒸気をタービンへ供給するため、大径鋼管が使用される。従って高強度材が必要であるが、同時に火力発電プラントが日常的に起動・停止を繰り返す負荷変動運転に対応するため、靱性や耐熱疲労特性も要求される。そのため熱膨張・熱伝導特性に優れたフェライト系の高強度 9～12% Cr 鋼が種々開発・実用化されている。

ボイラ用鉄鋼材料は、フェライト系耐熱鋼とオーステナイト系耐熱鋼に大別されるが、両者はそれぞれ独自の開発の歴史を辿ってきた。図4はボイラ用フェライト系耐熱鋼の開発系統図の一例である⁷⁾。フェライト系耐熱鋼の高温強度の向上は、(1) 転位強化 (C, N などによるマルテンサイト・ベイナイト変態)、(2) 固溶強化 (Mo, W など)、(3) 析出強化 (Cr, V, Nb 炭窒化物、Cu など) によって実現されている。一方、耐食性の向上は Cr, Si による安定な酸化皮膜形成が鍵

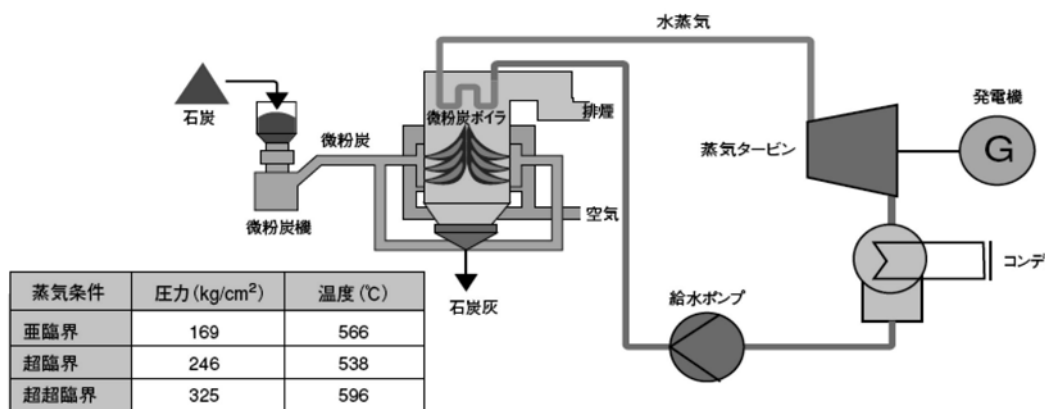


図3 微粉炭火力発電所の構成模式図²⁾

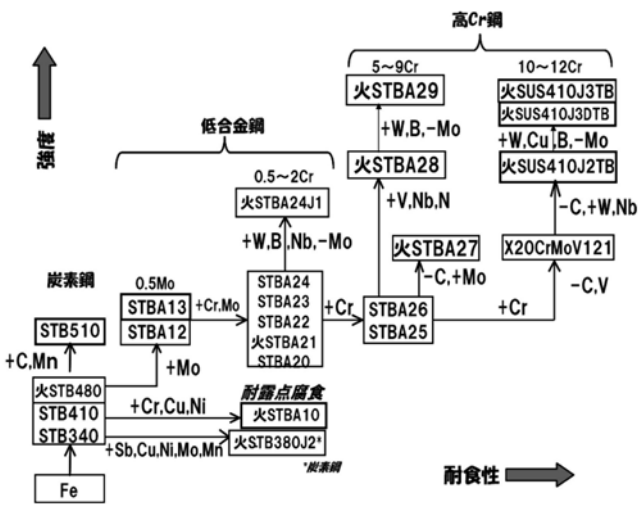


図4 フェライト系耐熱鋼の開発系統図⁷⁾

を握る。図5はオーステナイト系耐熱鋼の開発系統図の一例を示す⁷⁾。オーステナイト鋼はフェライト鋼に比べて、種々の合金元素を多量に固溶できることと、高温での元素拡散が遅いという決定的な利点を有することから、より高強度で、かつ高耐食性を有する。高温強度の向上には(1)固溶強化(Mo, Wなど)、(2)析出強化(Cr, Ti, Nb炭窒化物、Cu、金属間化合物など)が主に用いられてきた。また、高Cr化によって優れた耐食性が得られる反面、 σ 相等の粒界析出による脆化懸念があるため、Ni, N等の添加で相安定化が図られている。

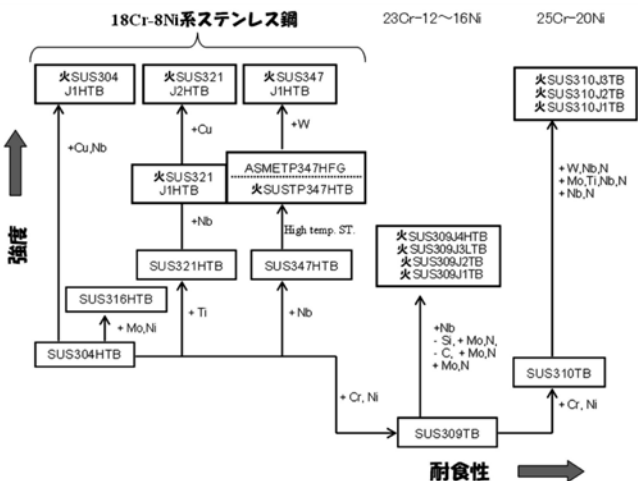


図5 オーステナイト系耐熱合金の開発系統図の一例⁷⁾

5. さらなる高効率石炭火力発電の実現に向けて

図6は平成20年度から開始され国家プロジェクト先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発が目指す700℃超級A-USCプラント二段再熱システムの構成

例で、主蒸気700℃、35MPa、再熱蒸気720℃/720℃で熱効率は46% (HHV, 送電端効率)以上が可能である^{4), 6)}。このプラントでは、ボイラ、タービンそれぞれについて、想定される材料候補を掲げているが、前節で紹介した従来の鉄鋼材料に加えて、より高温まで強度、耐食性に優れた新材料の開発が待望されている。

表1はA-USCボイラ用新材料に必要とされる特性の概要である⁷⁾。まず高温強度特性では、蒸気温度を700℃とした場合、大径管(主蒸気管、再熱蒸気管)では700℃程度、炉内の過熱器管ではさらに高い750℃程度までのメタル温度になることが想定され、それらの温度域で蒸気圧力(例えば35MPa)に耐える十分なクリープ強度(10万h破断強度で100MPa程度)が要求される。また、再熱蒸気温度は720~750℃が想定されていることから、再熱器管では圧力は低くても、より高温に曝される可能性がある。またボイラの日々の起動-停止や、負荷変動に対応するためには耐熱疲労、耐クリープ疲労特性が要求され、

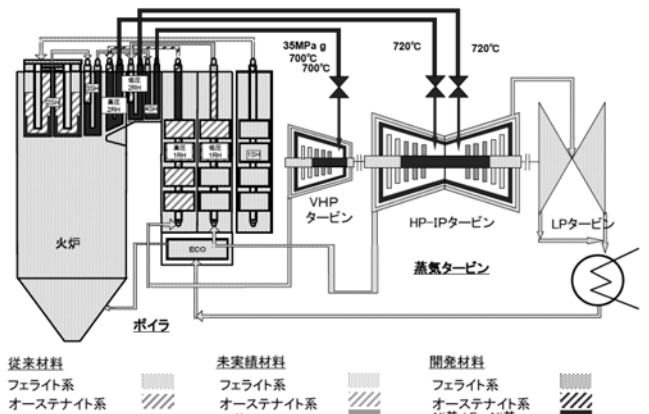


図6 700℃級A-USCプラント二段再熱システムの構成例と材料適用区分⁶⁾

表1 A-USCボイラ材料の特性評価項目¹⁰⁾

材料特性	評価内容	
高温強度特性	クリープ	母材および溶接継手の長時間強度
	熱疲労	大径管の起動・停止に伴う非定常熱応力対象
	クリープ疲労	配管系の起動・定常運転・停止に伴う熱膨張応力対象、クリープ疲労重畳効果と寿命評価法(設計法)
耐食性	高温腐食	過熱器管材料としての石炭灰腐食特性
	水蒸気酸化	腐食量、スケール剥離などの水蒸気酸化特性
溶接性	高温割れ性(凝固割れ、液化割れ、延性低下割れ)	
加工性	熱間曲げ性	
補修性	経年劣化材の溶接性	
欠陥検出性	UT等非破壊検査法の適用性	
経済性	素材価格、加工費	

これには熱膨張が小さく、かつ、延性・靱性に優れた材料が望ましい。次に耐食性については、過熱器管としては耐石炭灰腐食特性、配管材料でも耐水蒸気酸化特性が要求される。溶接性についても、溶接継ぎ手の健全性、長時間クリープ強度の安定性に加えて、溶接時の割れも回避されなければならない。また、プラントは長期間供用されることから補修の容易さ、例えば経年劣化材の溶接性についても考慮される必要がある。新材料の量産化技術の開発としては、大径管や小径管の製造に必要な加工性も十分考慮しなければならないが、施工段階においても、熱間曲げや溶接後に長時間熱処理が必要になるような材料は、実機適用が難しくなる。その他、欠陥の検出性や最終的には素材価格、加工費も考慮した材料の選定が必要である。

これらの特性の中で最大の難関が高温におけるクリープ強度の確保と他の特性を両立させることである。図7は候補材料のクリープ強度を比較したものである⁹⁾。主蒸気管大径厚肉管は700℃ x10万hクリープ破断強度が100MPa必要であるが、現在600℃級 USC 発電プラントで使用されている9/12Cr系フェライト鋼では全く強度不足であり、候補材の中では、Ni-Co基 γ/γ' 超合金のみが目標強度を満足していることになる。しかし、これらの超合金はボイラ用大径厚肉管としての使用実績が全くないばかりか、靱性、疲労特性、加工性等が十分でないため、A-USCプラントへの適用には慎重な評価が必要である¹⁰⁾。一方、前節のオーステナイト系耐熱鋼(図中ではSUPER304Hの表記;火SUS304J1HTB)はこれまで600℃級 USC プラントで過熱器管等として世界で広く使用されているが、強度が不十分であり、また、熱膨張が大であるため、大径厚肉管への適用は難しい。これに対して、その中間的存在であるFe-Ni基合金(図中ではHR6Wの表記;23Cr-45Ni-7W)は強度的にはやや劣るが、Ni-Co基超合金に比較して、靱性、疲労特性、加工性に優れ、また、オーステナイト鋼に比較した場合には、熱膨張が小さい等の利点を有する。これらの候補材の特徴を理解した上で、700℃超級A-USCプラントの実現には、総合的な特性を満足できる新しい鉄鋼材料の実用化が不可欠であり、現在オールジャパンで進められている開発をより加速していく必要がある。

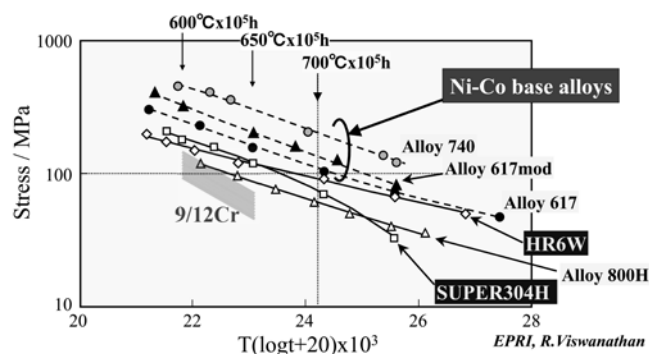


図7 A-USC 発電プラント候補材のクリープ強度の比較⁹⁾

6. おわりに

経済を持続的に発展させながら、新しいエネルギー社会を構築していくには、再生可能エネルギーの普及拡大に加えて、既存エネルギーのベストミックスによる安価電力の継続的な安定供給が必須であり、その実現には火力発電の高効率化技術開発が急務である。高効率化にはこれまでプラント用構造材料として用いられてきた種々の鉄鋼材料の使用限界温度を未知の領域にまで飛躍的に向上させるブレークスルーが不可欠であり、産学官がしっかりと連携して不断の技術開発が継続されることが重要である。

<参考文献>

- 1) World Energy Outlook 2011, OECD/IEA, (2011), 75.
- 2) 渡辺和徳: 第22回環境工学連合講演会「地球温暖化対策—省エネルギー技術による貢献」、平成20年4月15日、日本学会会議講堂。
- 3) K. Muramatsu: Proc. Advanced Heat Resistant Steels For Power Generation, edited by R. Viswanathan and J. Nutting, The University Press, Cambridge, (1998), 543.
- 4) 先進超々臨界圧プラント技術開発調査委員会、「先進超々臨界圧プラント(A-USC)技術開発」に関する技術評価報告書、(2007.5)
- 5) <http://www.ccpower.co.jp/igcctooha/tokucho.html>
- 6) M. Fukuda, H. Sone, E. Saito, Y. Tanaka, T. Takahashi, A. Shiibashi, J. Iwasaki, S. Takano and S. Izumi: Paper No. 1-05, presented at the 5th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, Marco Island, USA, EPRI, (2007).
- 7) 伊勢田敦朗: 配管技術, 48 (2006), 26.
- 8) 五十嵐正晃: 第194回・195回西山記念技術講座, (2008), 77.
- 9) R. Viswanathan and R. Purgert: Proceedings of 8th International Conference on Creep and Fatigue at Elevated Temperatures, July 22-26, 2007, CREEP2007-26826.20)
- 10) 岩崎淳, 椎橋啓, 高野伸一, 佐藤恭, 岡田浩一, 阿部富士雄: 火力原子力発電, 58 (2007), 649.

(原子力 昭和54年卒 56年修士)