

# 大容量石炭焚き火力発電設備の高効率化に向けた技術開発

Development of Technologies for Highly-efficient Coal-fired Thermal Power Plants

木村 肇 Kimura Hajime  
佐藤 恭 Sato Takashi  
今野 晋也 Imano Shinya

Christian Bergins  
齊藤 英治 Saito Eiji

地球温暖化対策において、石炭火力の高効率化技術開発は、大変重要な役割にある。日立グループはこれまで世界最高レベルの高効率石炭火力プラントを数多く提供してきた。近年ではさらなる高効率化をめざした700℃級先進超々臨界圧発電技術開発にも着手している。これらの開発は日本だけではなく、欧州でも積極的に行われており、グローバルな研究開発体制の下、開発を加速している。

## 1. はじめに

石炭は世界に広く分散しており、埋蔵量も豊富なことから他のエネルギー資源に比べて比較的安価に入手できる。石炭を利用した火力発電は大容量化や安定した電力供給ができる。そのため、石炭火力発電は世界の発電量の40%以上を占めており、中国やインドなどの経済新興国をはじめとして、各国での電力需要は確実に伸びてきている。また、国内では震災後の原子力代替発電設備として、単機で1,000 MW以上の発電出力の実績を持つ石炭火力のニーズは高まってきている。しかしながら、石炭火力発電による温室効果ガスの排出量は少なくない。電力の中で最もCO<sub>2</sub>排出量が多い石炭火力発電の効率を改善することができれば、直接CO<sub>2</sub>排出量の削減に貢献できる。環境に配慮した石炭火力発電の高効率化技術開発に対する期待は大きい。

ここでは、日立グループにおける高効率化をめざした石炭火力発電の技術開発の変遷と、新技術開発について述べる。

## 2. 石炭火力発電の開発背景

石炭火力発電の高効率化設計では、いかに大きな熱エネルギーを利用できるかが重要であり、熱サイクルの最高圧力や温度が高いほど高効率になる。石炭火力の蒸気条件を大別すると、亜臨界圧発電（主蒸気圧力が臨界圧22 MPaより低い蒸気条件）、超臨界圧発電（臨界圧22 MPaより高

い蒸気条件）、超々臨界圧発電（USC：Ultra-supercritical、超臨界圧発電で、かつ蒸気温度が593℃以上の蒸気条件）に区分されている。各蒸気条件に伴う発電端熱効率〔LHV（Lower Heating Value：低位発熱量）基準〕の推移を図1に示す。1970年代に主流であった亜臨界圧発電での熱効率は35%ほどであったが、現在では熱効率で45%以上に向上している。

日立グループにおけるUSCプラントの受注累積容量を図2に示す。USCの実用化技術開発は、1980年代に世界に先駆けて日本で行われ、1990年代にはUSCプラントは日本で商用化された。2000年代には、日立グループにおける電力関連技術のグローバル化の強化を図るため、日立パワーヨーロッパ（Hitachi Power Europe GmbH：以下、HPEと記す。）や日立パワーシステムズアメリカ（Hitachi Power Systems America, Ltd.：以下、HPSAと記す。）を設立し、現在、広く海外でのUSCプラントの提供に貢献し

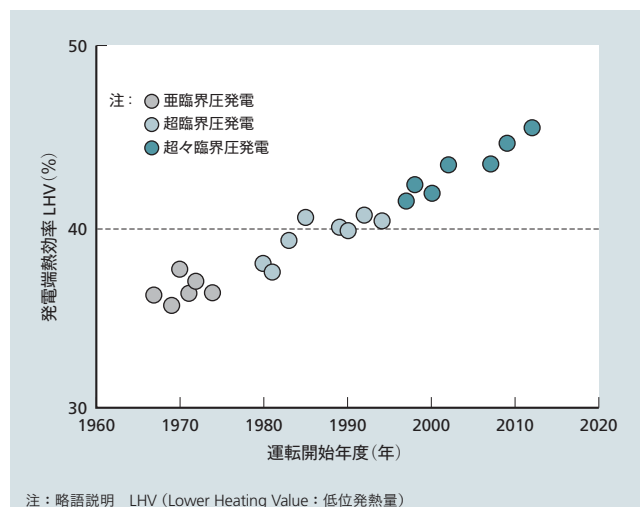


図1 | 石炭火力プラントの効率変遷

各年代で採用された最高蒸気条件に伴う石炭火力プラントの発電端熱効率は、1970年代の35%程度から現在は45%以上に向上している。

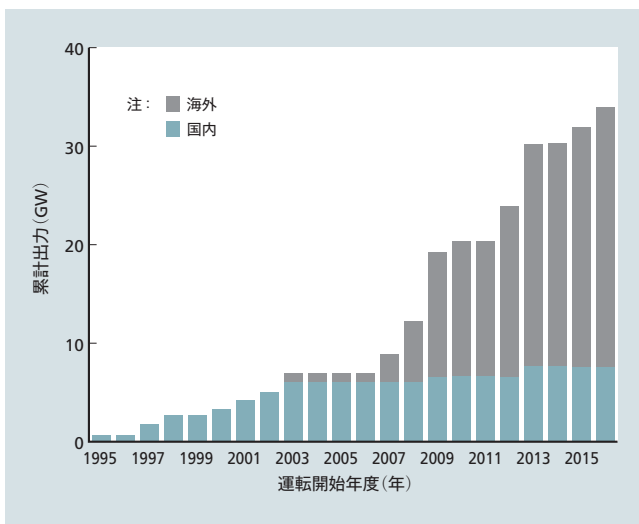


図2 | USC石炭火力プラントの受注累積容量

日立グループにおけるUSC (Ultra-supercritical: 超々臨界圧発電) 石炭火力プラントの受注は、現在38基、約34 GWの出力に達成しており、各プラントの効率向上に寄与している。

ている。

## 2.1 USC(超々臨界圧発電)タービンの現状

最新のUSCタービン実用化の例として、図3に電源開発株式会社磯子火力発電所新2号機のタービン外観を示す。このタービンは、主蒸気圧力25 MPa、主蒸気温度600℃、再熱蒸気温度620℃の世界最高レベルの蒸気条件を持つ。製造にあたっては、600℃級USCプラントですでに多くの実績を重ねてきた自社開発の高Cr鋼ロータ材「HR1100」の採用など、高中圧タービンや主蒸気弁、組み合わせ再熱弁に高温材料を採用した。また、再熱蒸気温度が従来以上に高くなる課題には、中圧タービンに最適な冷却技術を採用することで対処した。さらに、蒸気条件の

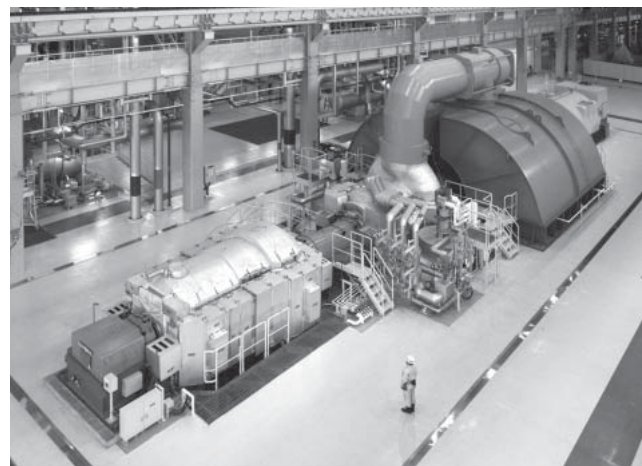


図3 | 電源開発株式会社磯子火力発電所新2号機タービンの外観

世界最高レベルの主蒸気圧力25 MPa、主蒸気温度600℃、再熱蒸気温度620℃の蒸気条件で現在稼働されている。

高温・高圧化による高効率化のみならず、最適な反動度設計を採用してタービン翼そのものの効率向上を行った。また、世界最長クラスの48インチ翼を低圧最終段に採用し、タービン構造全体のコンパクト化を達成した。

## 2.2 USCボイラの現状

1990年代以降、日本国内では超臨界圧火力発電所が継続的に建設されており、高温化技術の開発・蓄積およびその継承が行われてきている。石炭火力発電の効率向上は、蒸気温度と蒸気圧力の上昇によって達成され、現在は蒸気温度600℃、蒸気圧力25 MPa、発電出力1,000 MW級のプラントが建設されている。

バブcock日立株式会社 (以下、BHKと記す。) が納入した事業用石炭(だ)きボイラの蒸気条件変遷を図4に示す。高蒸気条件は、CO<sub>2</sub>排出量の低減を目的としたプ

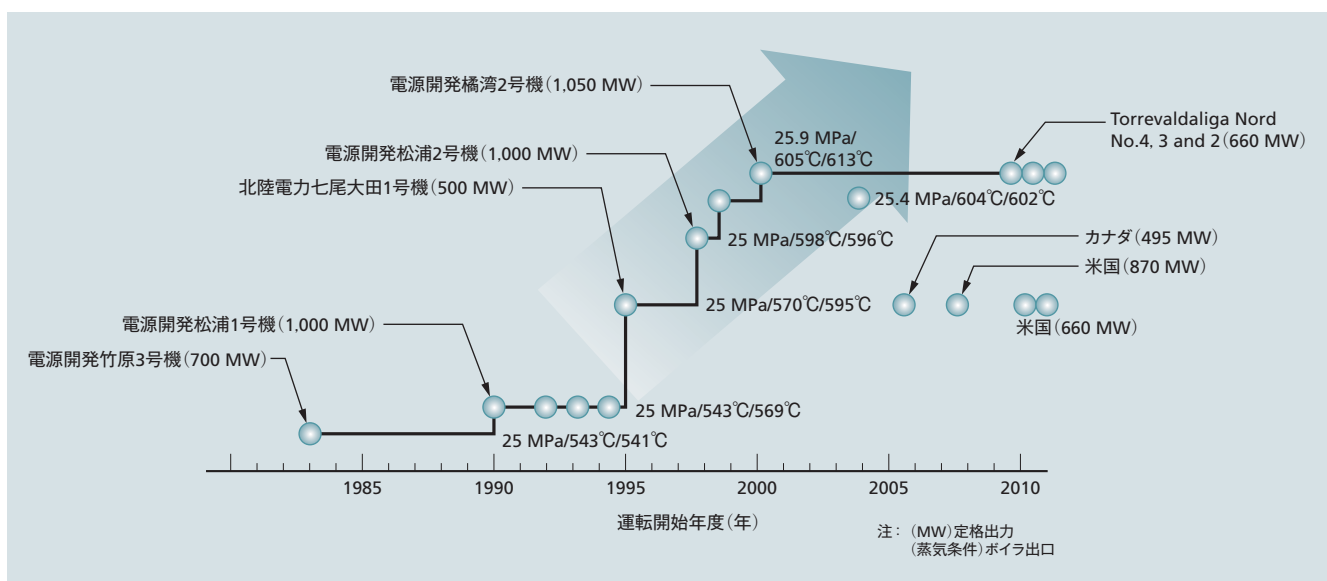


図4 | バブcock日立株式会社が納めたプラントの蒸気条件の変遷  
超臨界圧発電、USCの大容量プラントの最新実績を積み重ねてきた。



図5 | Torrevaldaliga Nord火力発電所

欧州初のUSC商用機をHitachi Power Europe GmbH (HPE) の協力の下、パブコック日立が納入した。

ラント効率の高効率化のために開発され、1983年に国内初の石炭焚き超臨界圧ボイラ (25 MPa/543°C/541°C, 700 MW) を電源開発竹原火力発電所3号機に納入した。それ以降、2000年には25.9 MPa/605°C/613°Cの当時国内最高蒸気条件のUSC石炭焚きボイラ (1,050 MW) を電源開発橘湾火力発電所2号機に納入した。

この技術と経験は海外でも高く評価され、2010年にはヨーロッパで最初の600°C級USC石炭焚きボイラ (25.3 MPa/604°C /612°C, 660 MW) をイタリアのTorrevaldaliga Nord火力発電所へ納入するに至った (図5参照)。

Torrevaldaliga Nord火力発電所はローマの約70 km北西に位置しており、既設の4ユニットの重油焚き定圧ボイラを高効率の石炭焚きUSC変圧ボイラに更新した設備であ

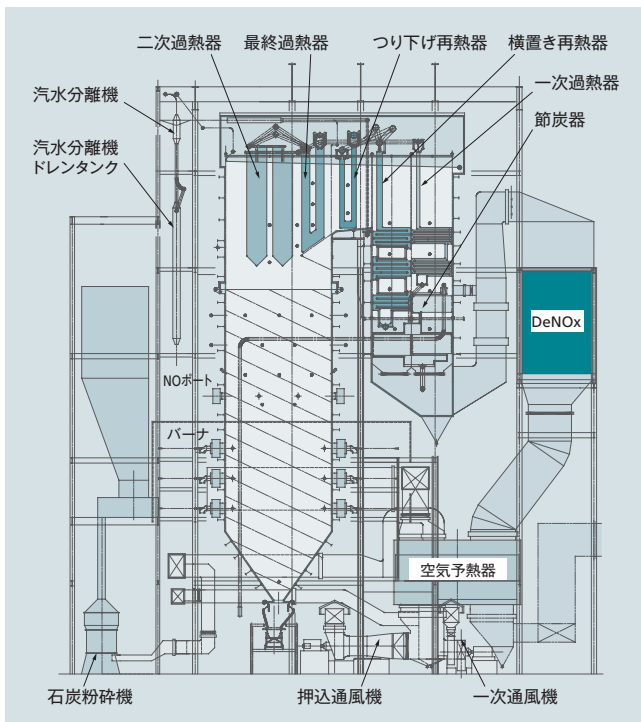


図6 | Torrevaldaliga Nordボイラの側面

欧州のボイラ材料規格への適合を図るため、Hitachi Power Europe GmbHによる耐圧主要部の設計機能評価を採用した。

る。このプロジェクトは、BHKを技術リーダーとし、イタリアのボイラメーカーであるAnsaldo Caldaie社と建設メーカーであるDemont社とのコンソーシアムによって2004年に開始された。

ボイラ耐圧部品すべての概念と基本設計を担当したBHKは、高蒸気条件に関連した過熱器や再熱器の詳細設計および製作も担当した。なお、ヨーロッパ規格に適合するため、HPEによる耐圧主要部の設計評価の機能を設けた。ボイラの側面図を図6に示す。

Torrevaldaliga Nordプロジェクトの成功は後述するA-USC (Advanced Ultra-supercritical:先進超々臨界圧発電) ボイラを開発するうえで重要なステップとなっている。このボイラで採用されたスパイラル水壁構造、ヘッダーや配管材の「P92」(9%Cr鋼)、伝熱管材の「SUPER304H」(18%Cr鋼)などの設計や製造技術に加え、より高温領域で十分な強度を持つ新しい材料の開発は、今後のA-USCボイラへの採用に向けて貴重な技術および経験となった。

### 3. A-USC(先進超々臨界圧発電)の開発

近年、石炭火力のCO<sub>2</sub>削減に向けたさらなる高効率化のため、蒸気温度を700°Cまで向上させたA-USCの開発が進められている。USC用に開発された高Cr鋼の耐用温度は600°Cレベルであり、さらに高温化を図るにはオーステナイト鋼やNi基合金を適用しなければならない。しかしながら、オーステナイト鋼は線膨張係数が高いために高温下での変形が大きく、製造性や熱ひずみの問題がある。Ni基合金は素材製造過程で温度変化に対する組織変化の感度が高いため、大型素材の製造中に材料組織が変わる偏析を生じる問題がある。そのため、試験片レベルでいかに高い強度特性が得られても、大型素材全体にわたり目標を満足する強度を確保することが難しい。また、オーステナイト鋼やNi基合金は高Cr鋼に比べて素材価格が高く、経済性の問題もある。

これらの課題を克服するため、欧州では1990年代からA-USCの開発が始まり、複数の材料開発や製造試験プロジェクトが行われてきた。現在も出力550 MWの実証プラント (35 MPa/700°C/720°C) 建設に向けて開発が進行中である。

日本においても、資源エネルギー庁の計画の中で、2050年までの温室効果ガス排出量大幅削減に寄与する21のエネルギー革新技術にA-USC開発が採用され、2008年から国内メーカーを主体にした開発が行われている<sup>1)</sup>。

#### 3.1 A-USCタービンの開発

700°C級のタービンを実用化するには、700°Cの高温に

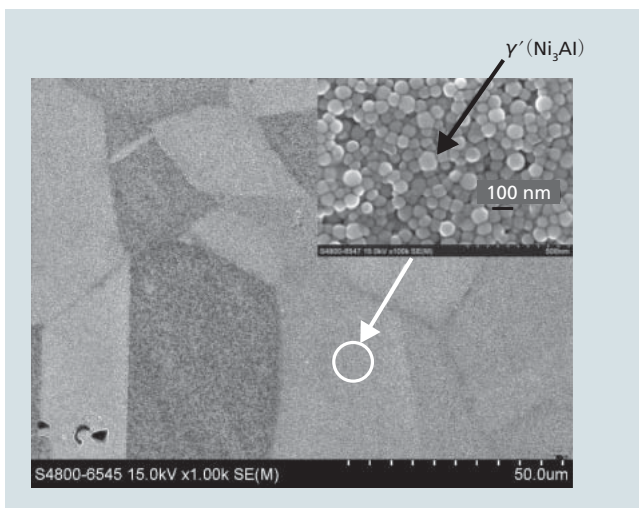


図7 | FENIX700のミクロ組織

走査型電子顕微鏡写真により、FENIX700の析出強化相 $\text{Ni}_3\text{Al}$ の存在が確認された。

さらされるロータや翼、ボルトなどに適用する新しいNi基合金の開発が必要である。特にロータは10～30 tほどの大きさが必要であり、単純にガスタービンに適用されてきた材料を蒸気タービンに流用することはできない。また、蒸気タービンでは蒸気環境下という独特の条件を持つので、Ni基合金の耐食性や溶接性も重要である。

これらの課題を克服するため、ベース合金Alloy706の材料組成からNbを取り除きAlを添加するなどの組成改良によるロータ向け鉄-Ni基合金、FENIX700を開発している。Alloy706は、鉄分を多く含み、Mo、W、Coなどの高価な元素を含まない。そのため、一般的な高強度Ni基合金の中で素材価格が安い利点を持つ。また、Alloy706に含まれるNbは、析出強化相である $\gamma''$ 相( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ )を生成するためにきわめて重要であるが、偏析しやすい元素でもある。そのため、Nbは大型インゴット製造には好ましく

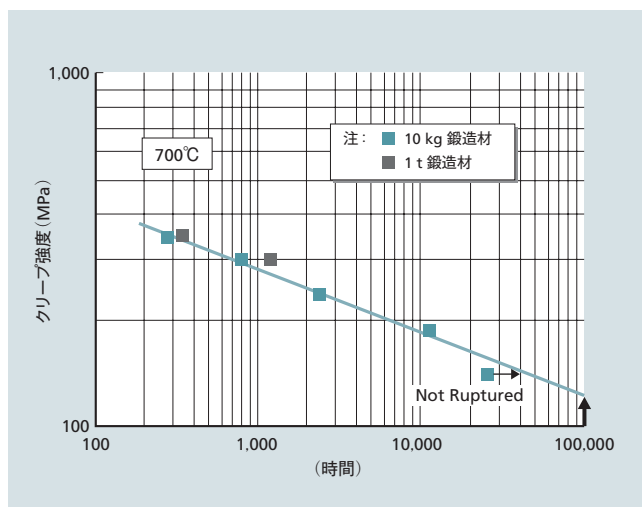


図8 | FENIX700の長時間クリープ試験結果

700°Cでの10 kg鍛造材のクリープ試験は4万5,000時間を経過しており、目標である10万時間100 MPaのクリープ強度を十分達成する見込みである。

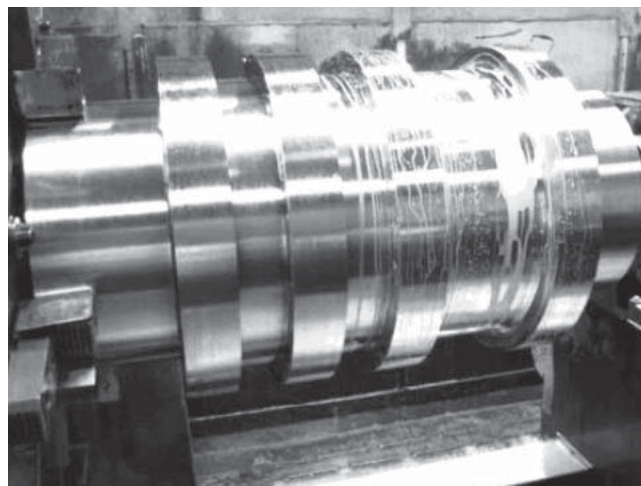


図9 | A-USC用ロータ製作の検討

A-USC (Advanced Ultra-supercritical : 先進超々臨界圧発電) に適用するNi基合金は従来の鋼に比べて高強度なので、切削製造性における研究開発も重要である。

ない。FENIX700の組成は、Nbを取り除きAlを添加する改良を考えた。FENIX700のミクロ組織を図7に示す。FENIX700の析出強化相はAlloy706で観察される $\gamma''$ ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ )に代わり、700°Cの高温化でも安定した析出強化相である $\gamma'$ ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ )のみ表れることが確認された。

FENIX700の長時間クリープ強度の計測例を図8に示す。現在、FENIX700のクリープ強度試験は4万5,000時間を超えており、開発目標である700°Cで10万時間のクリープ強度が100 MPaを超える設計強度を達成する見込みである<sup>2)</sup>。

さらに、FENIX700の大型製造性を検証するため、現在、10 tを超えた鍛造素材の試作を行っている。また、図9に示すように実機ロータ製作を考慮した製品開発にも着手している。このFENIX700のほかに、翼・ボルト材やボイラ伝熱管用に、700°Cを超える耐熱Ni基合金USC141も開発している。これら新材料は、2013年から2016年にかけて、700°C下の高圧場回転試験でタービン材料としての実証を行う予定である。

### 3.2 BHKでのA-USCボイラ開発

700°C級のA-USCボイラでは、高温部にクリープ破断強度に優れたNi基合金の管材の採用が必要不可欠であり、欧米ではAlloy617、Alloy263あるいはAlloy740をベースとして開発を進めている。日本のA-USC開発プロジェクトでは、これらに加えて経済性も考慮した日本独自の材料として、HR6W、HR35、USC141を取り上げて実用化開発を進めている(表1参照)。

A-USCボイラ開発材料の使用範囲を図10に示す。HR6WのようなNi基合金の新材料は高温部の三次過熱器、最終過熱器、二次再熱器や主蒸気管、高温再熱蒸気管

表1 | A-USCボイラ用Ni基系合金の候補材料

700℃級ボイラの候補材として、欧米、日本のA-USCプロジェクトでは数種のNi基合金候補材料の開発、評価が進められている。

|          | 伝熱管候補材 | 大径管候補材 |
|----------|--------|--------|
| HR6W*    | ○      | ○      |
| HR35*    | ○      | ○      |
| Alloy617 | ○      | ○      |
| Alloy263 | ○      | —      |
| Alloy740 | ○      | —      |
| USC141*  | ○      | —      |

※は国内開発材

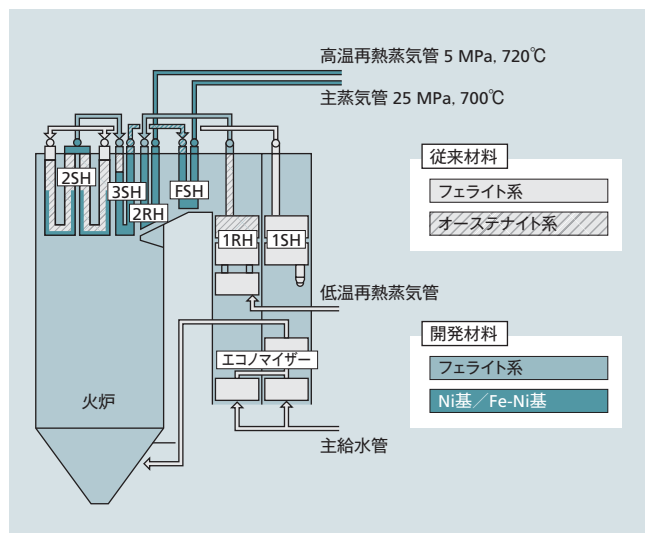


図10 | A-USC用ボイラ材の適用範囲

Ni基合金の使用範囲は、高温部に限定されたものである。

などに採用される。

Ni基合金はボイラ火炉内の伝熱管だけでなく、従来はフェライト鋼を使用してきた配管材でも採用が必要となるため、厚肉大径管の溶接技術が最も重要な課題となる。BHKでは長年600℃級ボイラの製作に適用してきた独自開発の狭開先HST（Hotwire Switching Tig）溶接法がNi基合金の溶接に好適であることから、有望な材料については国のプロジェクトに先行して溶接試験を行い、高効率で高品質の溶接が達成できることを確認している。現在4万時間を超える溶接継手のクリープ破断試験を継続している<sup>3)</sup>。

日本のA-USC開発プロジェクトの中でBHKが施工したNi基合金HR6Wの大径管の狭開先HST溶接試験結果を図11に示す。幅約10 mmの狭開先で欠陥のない健全な溶接部が得られている。

### 3.3 HPEでのA-USCボイラ開発

1990年代半ばからの欧州における主要な研究開発プログラムを図12に示す<sup>4)</sup>。欧州では、公的資金および民間資金の導入による多くのプログラムによって、ボイラすべての重要構成部材が系統立てて評価された。例えば、異なるボイラの型式とさまざまな圧力範囲に基づく700℃級発

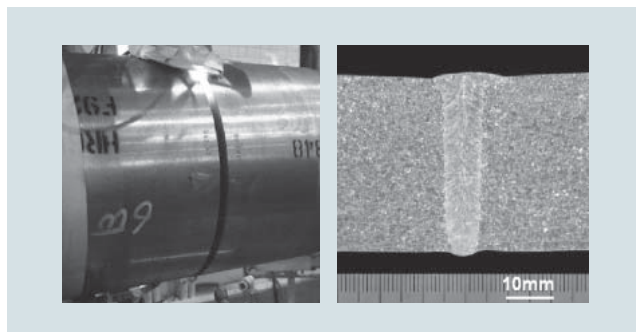


図11 | ボイラ溶接施工の例

Ni基合金HR6Wの大径管の狭開先HST（Hotwire Switching Tig）溶接試験結果にて溶接部の健全性を確認している。

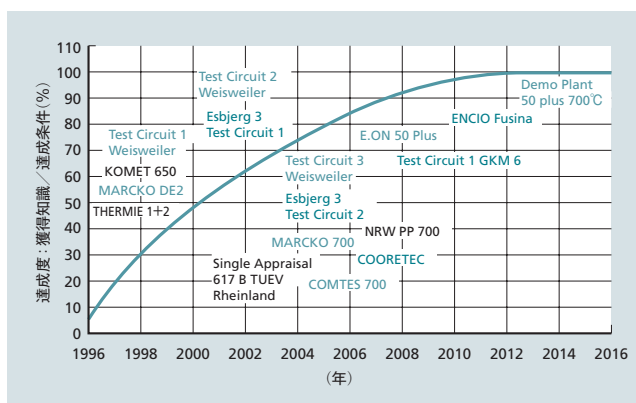


図12 | 欧州における700℃級技術の研究開発プログラム

近い将来に実証プラントを製造することが可能な知見が得られている。

電プラントの事前調査と基本設計に関わる研究が数多く実施された。HPEは同図に示された主要な研究開発プロジェクトのほとんどに参画し、Ni基合金材料の製造開発において主導的な役割を果たしている。

その一例として、図13にNi基合金を使用してHPEで製造した過熱器パネルを示す。これらは700℃級の実蒸気温度下での試験を行ったCOMTES700試験プラントにて30,000時間の試験に成功している。現在、COMTES700要素試験で明らかになった課題について、解決策を検証するため新たな700℃試験ループを設置するENCIOプロジェクトが準備されており、HPEは主要な役割を担う。これまでの実証試験結果や今後の検証試験により、生産プ

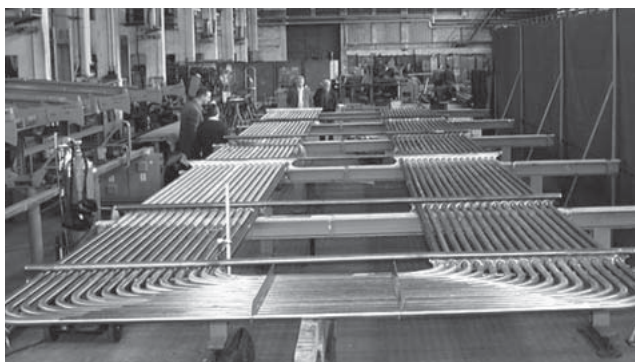


図13 | Ni基合金を用いた過熱器の管群

HPEは700℃級ボイラの製造に必要な技術開発を積み重ねている。

ロセスに対応する知識と材料特性の十分な研究結果が得られることが期待され、近い将来、実証プラントを製造することが可能と考えている。また、将来の実機製作に向け、溶接技術などに関してBHKとも技術交流を進めている。

#### 4. おわりに

ここでは、日立グループの石炭火力発電の高効率化技術の経緯と、新技術開発の動向について述べた。

石炭火力発電プラントのトータルシステムを提供できるメーカーは、世界的に数少なく、今後トータルシステムでの高効率石炭火力発電プラントを提供できるようにしなければならない。一方、石炭火力の高効率化に平行して、CO<sub>2</sub>回収技術の実用化も重要である。現在、日立グループではグローバルな研究体制の下、石炭火力効率向上およびCO<sub>2</sub>回収技術に関する研究開発プログラムを推進している。

今後もこの分野の技術開発を積み重ね、A-USCプラントの実用化を2020年までに達成することにより、環境・エネルギー問題の解決に貢献していく所存である。

#### 参考文献

- 1) M.Fukuda : Advanced USC Technology Development in Japan, Materials for Advanced Power Engineering 2010 (2010.9)
- 2) S.Imano : Development Status of Ni-Fe Base Superalloy for 700°C Class A-USC Steam Turbine Rotor Application, Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2010.8)
- 3) G.Bao, et al. : Long-term Creep Rupture Strength of Weldment of Candidate Ni and Fe-Ni Based Materials for Tube and Pipe of A-USC Boilers, Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2010.8)
- 4) C.Bergins, 外 : CO<sub>2</sub>回収装置を有する高効率石炭火力発電所, 日立評論, 92, 4, 300~304 (2010.4)

#### 執筆者紹介



**木村 肇**

1989年バブコック日立株式会社入社、火力技術本部 ボイラ設計部 所属  
現在、火力発電ボイラ技術の開発・設計に従事



**佐藤 恭**

1980年バブコック日立株式会社入社、呉研究所 所属  
現在、高温耐熱材料の実用化研究に従事  
日本機械学会会員、日本鉄鋼協会会員、日本材料学会会員



**Christian Bergins**

2006年Hitachi Power Europe GmbH入社、Research & Development 所属  
現在、酸素燃焼、CO<sub>2</sub>回収、700°C級A-USC、および褐炭ボイラの研究開発に従事  
工学博士



**今野 晋也**

1993年日立製作所入社、日立研究所 材料研究センタ 所属  
現在、高温耐熱材料の研究開発に従事  
工学博士  
日本鉄鋼協会会員



**齊藤 英治**

1987年日立製作所入社、電力システム社 火力事業部 火力開発本部 所属  
現在、火力発電新技術の開発推進に従事  
工学博士  
日本機械学会会員、ターボ機械協会会員