

# 700℃級先進超々臨界圧 ( A-USC ) ボイラ技術の開発

## Development of 700 Degree Celsius Class Advanced Ultra-Supercritical Boiler

高野 伸 一 エネルギー事業本部電力事業部基本設計部 主査  
 青木 裕 エネルギー事業本部電力事業部 技師長  
 久布白 圭 司 技術開発本部基盤技術研究所材料研究部  
 富山 信 勝 エネルギー事業本部電力事業部ボイラシステム設計部 主査  
 中川 博 勝 エネルギー事業本部電力事業部保守技術部 部長

石炭焚き発電システムのさらなる高効率化、CO<sub>2</sub> 排出量の削減に向けて、当社は豊富な納入実績をもつ USC 技術をベースに蒸気温度を従来の USC の 600℃級から 700℃級に引き上げた A-USC ボイラの開発を推進している。これまでに、開発材料である Ni 基 / Fe-Ni 基材料、改良型 9Cr 鋼材料を対象に溶接試験とクリープ試験を含む溶接継手の性能評価を実施し、板材の継手の良好な結果を得ている。また、開発材料の母材に関するクリープ疲労について基本データを取得し、完了した。

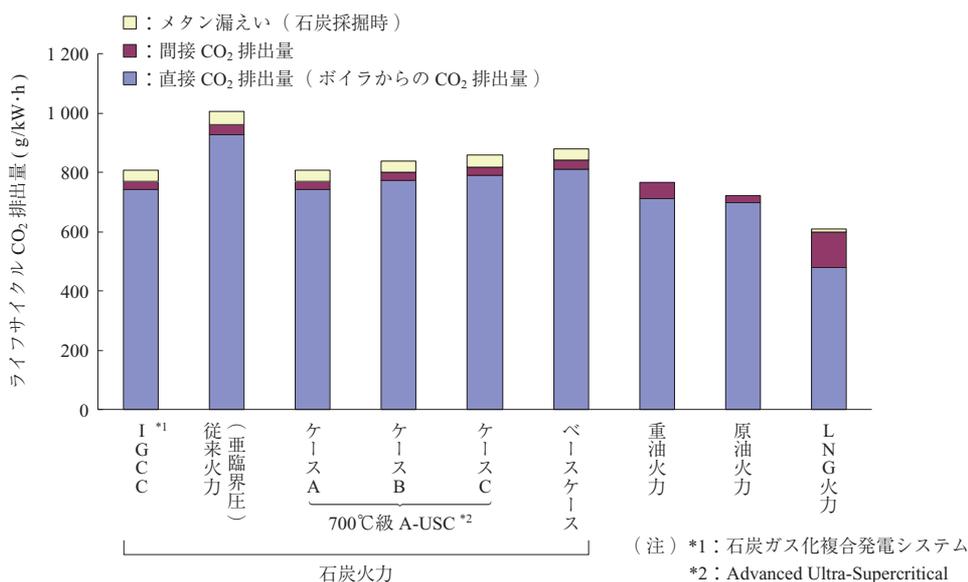
For further improvement of the thermal efficiency and reduction of CO<sub>2</sub> emission in coal-fired power systems, IHI has been developing A-USC boiler technology, steam conditions of which has been raised from 600°C to 700°C in the conventional USC technology based on the IHI's rich experience in USC boiler projects worldwide. IHI has previously conducted welding and creep tests on candidate materials of Ni-base alloy, Fe-Ni base alloy and 9% Cr. ferritic materials, and healthy weldment has been obtained from the tests. Moreover, basic properties of mother materials of developing materials have been acquired.

### 1. 緒 言

2009 年、日本政府の発表した「2020 年までに二酸化炭素 ( CO<sub>2</sub> ) などの温室効果ガスの排出量を 1990 年比で 25%削減する」という厳しい数値目標に対し、産業界では数値についての賛否の相違はあるものの、CO<sub>2</sub> 削減を強く進める必要があるという点については意見が一致する

ところと考える。

このような状況のなかで CO<sub>2</sub> の主要な排出源の一つである火力発電所においても、CO<sub>2</sub> 削減が強く求められている。特に、石炭は火力発電用の一次エネルギー源として、エネルギーの安定性、経済性の観点から今後も重要な役割を担っていくものであるが、CO<sub>2</sub> 排出原単位の観点からは、**第 1 図**<sup>(1)</sup> に示すように発電量当たりの CO<sub>2</sub> 排



第 1 図 化石燃料種・発電システムによる CO<sub>2</sub> 排出量<sup>(1)</sup>  
 Fig. 1 CO<sub>2</sub> emission by the types of fossil fuel and electric power generating systems<sup>(1)</sup>

出量が化石燃料のなかでもっとも大きく、その高効率化が喫緊の課題である。

第2図に、世界の一次エネルギー構成予想を示す<sup>(2)</sup>。アメリカ、中国、インドなど世界の主要CO<sub>2</sub>排出国の一次エネルギー源として石炭は重要な地位を占めており、供給の安定性、賦存量、経済性の優位性から、今後もその地位は変わらないと予想される。このため、石炭焼き発電の高効率化技術は地球規模でのCO<sub>2</sub>削減に対して、有効かつ不可欠な技術である。

石炭焼き発電の高効率化技術としては、石炭ガス化複合発電システム（IGCC）およびすでに国内の石炭焼き発電所に広く適用されている超々臨界圧発電システム（USC：蒸気温度593℃以上をもつ発電システム）が主な選択肢として位置づけられており、両技術ともに、そのさらなる高効率化を目指す開発が進められている。

当社では、国内外に豊富な納入実績をもつ、USC技術をベースとして、蒸気条件を700℃級まで高温化し、高効率化を目指す700℃級先進超々臨界圧（Advanced-USC：以下、A-USCと呼ぶ）発電用ボイラ技術の開発に取り組んでいる。本稿では、開発に向けての課題とその開発状況を紹介する。

## 2. 700℃級発電システム開発計画

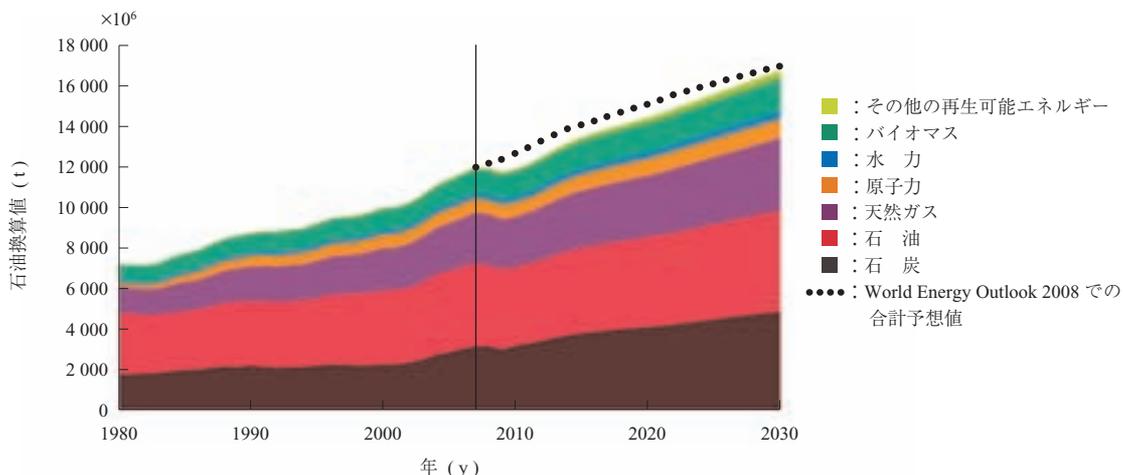
700℃級A-USCボイラの実用化に向けて、当社では、第3図に示す、二つのステップに分けて開発を行っている。ステップ1は運転圧力が低い再熱蒸気のみを700℃級に高温化し、高効率化を目指す、再熱蒸気700℃級発電

システムである。このシステムは既存の材料を適用し、構造面でも既存のUSCボイラとの相違点が限定されることから700℃級の早期実用化をねらえるものである。

ボイラ各部の材料としては既存の規格材ではあるが700℃級での使用実績がないため、700℃条件下における、耐食性、長時間クリープ強度およびぜい化などについて評価を実施している。

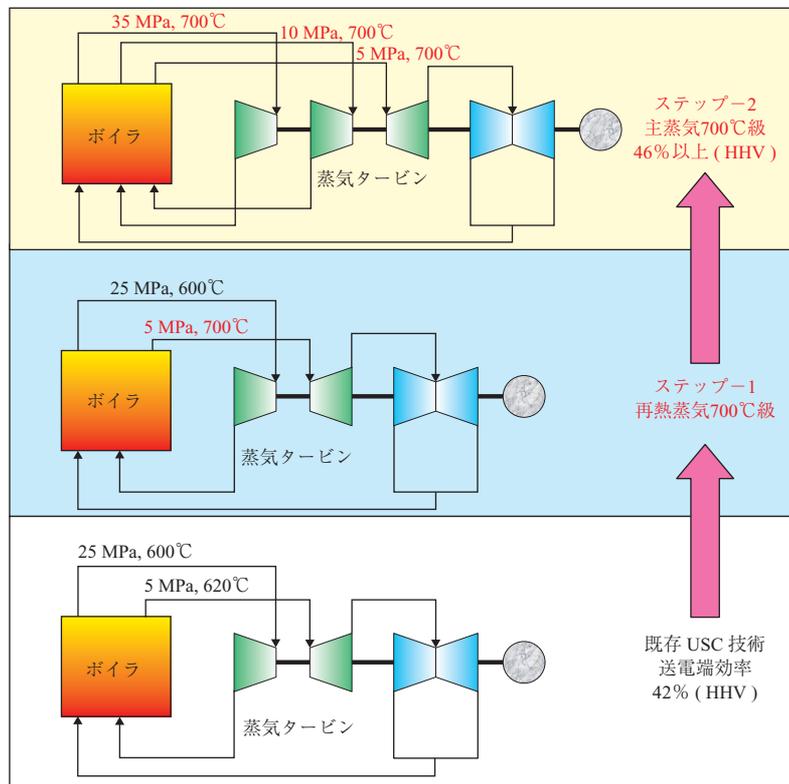
ステップ2は、高圧の主蒸気も含めて蒸気温度を700℃級に高温化するもので、2段再熱システムの適用と合わせてプラント効率46%（HHV：Higher Heating Value（高位発熱量）、送電端）以上の効率をターゲットとしたシステムである。この主蒸気700℃級発電システムの実現のためには、これまでのボイラ材料であるフェライト系Cr-Mo（クロム-モリブデン）鋼、オーステナイト系ステンレス鋼に加えて、より高温強度に優れたNi（ニッケル）基合金の適用が必要となる。Ni基合金はこれまで化学プラントやガスタービン高温部などに適用されてきた材料である。しかし、ボイラへの適用事例はなく、ボイラ材料としてNi基合金の母材の特性評価、溶接性、曲げ加工性などの製造性、継手部を含めた長時間信頼性評価など多岐にわたる材料試験、検証が必要である。

この主蒸気700℃級発電システムの実現を目指し、2008年度から、経済産業省資源エネルギー庁の補助事業として「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」が開始され、主要金属材料メーカ、タービンメーカ、弁メーカおよびボイラメーカが参加するオールジャパン体制が敷かれており、当社もボイラメーカとしてこの開発に参画している。



(注) World Energy Outlook 2009 から引用<sup>(2)</sup>

第2図 世界の一次エネルギー構成予測<sup>(2)</sup>  
Fig. 2 Primary energy consumption forecast of the world



第3図 IHIの700℃級発電システムの開発ステップ  
 Fig. 3 R&D process of IHI 700°C class power generation system

USC 技術の実用化・定着について我が国は世界的にみて高い水準にあるが、700℃級 A-USC 技術の開発については欧米が先行している。この国家プロジェクトでは、国際競争力を確保するため、欧米に早期に追いつけるよう、各メーカーが協調している。この開発は Phase-I：要素開発 5 年間（2008 ～ 2012 年）、Phase-II：実缶での検証試験 4 年間（2013 ～ 2016 年）の合計 9 年間の長期間にわたるものである。第 4 図に A-USC 国家プロジェクトスケジュールを示す。

### 3. 材料検証と開発

#### 3.1 再熱蒸気 700℃級材料の検証と課題

2 章で述べたように再熱器の蒸気温度だけを 700℃級とすることは、既存材料で実現可能である。大径管の候補材料にはオーステナイト系ステンレス鋼の SUS316HTP が挙げられる。SUS316 系の材料は、主蒸気圧力 34.5 MPa・温度 649℃を採用し、1960 年に運転開始し今日の A-USC 技術の先駆けとなったアメリカフィラデルフィア電力社のエディストン 1 号ボイラで実機適用された。このボイラでは、130 520 時間経過後、主蒸気管の 1 本でリークが発生

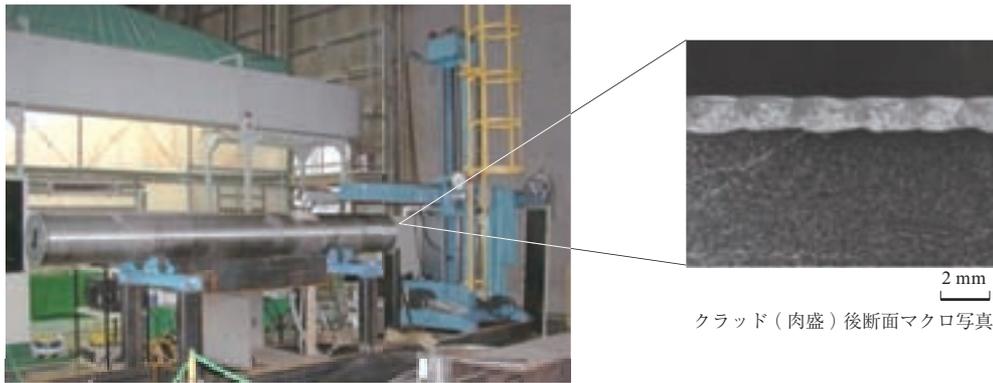
したが、多数の研究機関の調査からその要因は次に示す項目の重畳効果によることが明らかになっている<sup>(3)</sup>。

損傷が発生した管では、① 粒界上に  $\sigma$  相と呼ばれる析出物が多数析出（析出のない管もあり、当時の製品成分のばらつきによる）② 高い熱応力（国内では採用例に乏しい起動系統・要領による）が存在した領域で発生、していた。

これらの調査結果から、ニッケル (Ni) バランス、クロム (Cr) 当量を管理することで、 $\sigma$  相の析出を抑制できる SUS316HTP 材が製作されるようになり、エディストン 1 号ボイラに適用され、主蒸気温度はやや下げているものの健全に運用されている<sup>(4)</sup>。また SUS316 に限らず、700℃級環境下では、オーステナイト系ステンレス鋼の水蒸気酸化などの課題も挙げられる。そのため、SUS316HTP のボイラ高温再熱蒸気管への適用実用化には、水蒸気酸化減肉およびスケールはく離の対策として、配管内面への表面処理の検討も行っている。これは配管内表面に耐水蒸気酸化特性に優れた材料をクラッド化（肉盛）するもので、これまでに第 5 図に示すモックアップ用の配管への施工試験を行い、曲部、溶接部を含め問題のないことを確認している。

項目		年		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017以降
システム設計	システム設計, 設計技術開発	基本設計, 配置最適化, 経済性試算											
要素開発	ボイラ	材料開発	大径管, 伝熱管用新材料開発, 材料改良										
			高温長期材料試験 (3~7万時間)										
		材料製造性検証	溶接技術開発・試験, 曲げ試験										
	タービン	材料開発	材料改良仕様策定など 実サイズ部材試作										
			ロータ, ケーシングなどの大型溶接技術, 試作										
			高温長期材料試験 (3~7万時間)										
高温弁	構造・要素・材料開発	試設計		試作									
実証試験・回転試験 (高温弁含む)		設備計画 設備設計 設備製造, 据付け 試験, 評価										実証機	

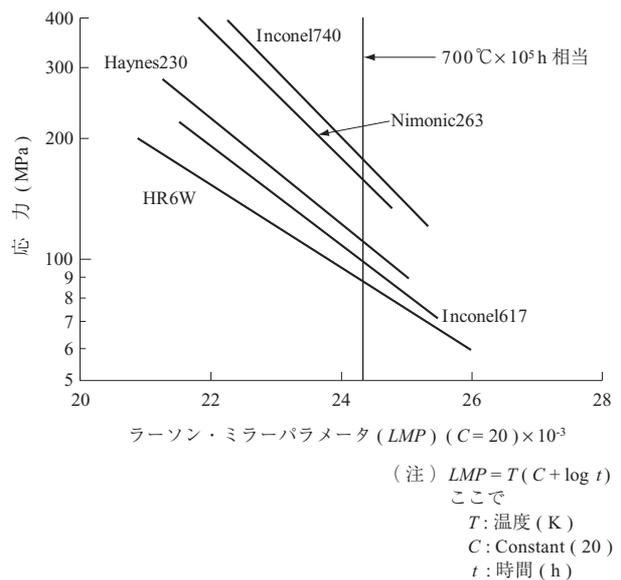
第4図 A-USC 国家プロジェクトスケジュール<sup>(1)</sup>  
Fig. 4 Roadmap of METI A-USC Project<sup>(1)</sup>



第5図 SUS316HTP 配管内面へのクラッド (肉盛) 処理施工  
Fig. 5 Clad treatment for internal surface of SUS316HTP pipe

### 3.2 主蒸気 700℃級材料の開発目標と課題

主蒸気 700℃級では, 既存のボイラ材料よりもさらに高温強度に優れた Ni 基合金が必要となる。材料強度としては, 700℃での 100 000 h クリープ破断強度が 100 MPa 程度必要となる。欧米や国内で有望視されている材料のクリープ強度を比較したグラフを第6図に示す<sup>(5)</sup>。条件を満たす候補材料は多数存在するが, クリープ強度だけでなく, 製造性, 加工性および溶接性に優れた材料を選定しなければならない。一方, Ni 基合金は非常に高価であり, 材料コストを下げるために極力, その適用範囲を限定することが必要となる。そのため, 既存の USC ボイラに適用されている現用のフェライト鋼の使用温度領域を拡大させる必要があり, フェライト鋼のさらなる高強度化が求められている。これらの課題に取り組むため, 2008 年度から



第6図 主蒸気 700℃級ボイラの候補材料のクリープ強度<sup>(5)</sup>  
Fig. 6 Creep strength of candidate material for SH 700℃ class boiler<sup>(5)</sup>

開始した「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発 (Phase-I)」では、材料選定に必要なデータを取得する。

本技術開発では、ボイラ要素技術開発として Ni 基合金および新フェライト鋼の材料特性評価、製造技術確立を中心に取り組んでいる。

#### 4. 製造技術

700℃級ボイラを実用化するためには、材料開発だけでなくボイラ製造技術の確立が必要不可欠である。ボイラ製造技術のなかで、特に溶接技術はボイラ構造物の信頼性とコストを左右する重要な技術である。

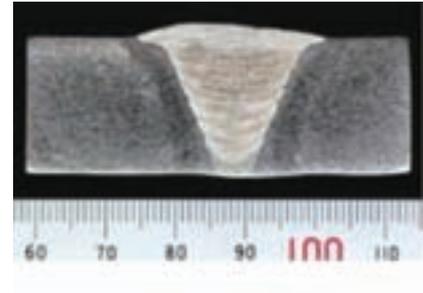
主蒸気 700℃級ボイラで新たに適用を目指している Ni 基合金は、これまでのフェライト鋼やステンレス鋼とは異なり、高温割れや再熱割れ発生の懸念がもたれている材料である。このため、長時間信頼性に配慮した溶接技術の確立を目標として、開発材料の溶接試験とクリープ試験を含む溶接継手の性能評価を実施している。現在までに試作された Ni 基合金を用いての溶接試験が終了し、溶接継手のクリープ試験を実施中である。

溶接試験では Ni 基合金の試作板材に第 7 図に示すように TIG (タングステンイナートガス) 溶接を施工した。この製作された溶接継手は PT (浸透探傷試験) および RT (放射線透過試験) によって健全性を確認し、併せて第 8 図に示すように継手の断面観察においても健全性を確認した。また、継手の性能評価試験として引張試験および衝撃試験を実施し、良好な溶接継手特性を確認している。加えて、700～800℃において、Phase-I で最長 1 万時間、Phase-II 以降を含めると 10 万時間までのクリープ

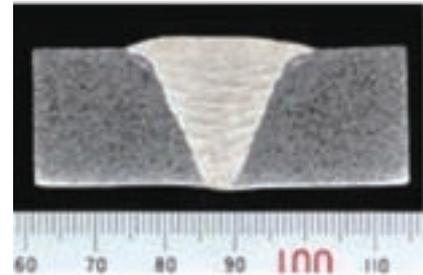


第 7 図 Ni 基合金試作板の溶接状況  
Fig. 7 Welding of Ni base alloy

(a) Ni 基合金 HR35



(b) Fe-Ni 基合金 HR6W



第 8 図 Ni 基合金の溶接継手の断面マクロ (単位: mm)  
Fig. 8 Cross-section macro photograph of welded joint (unit: mm)

試験に取り組んでおり継手の長時間クリープ強度を評価する計画である。

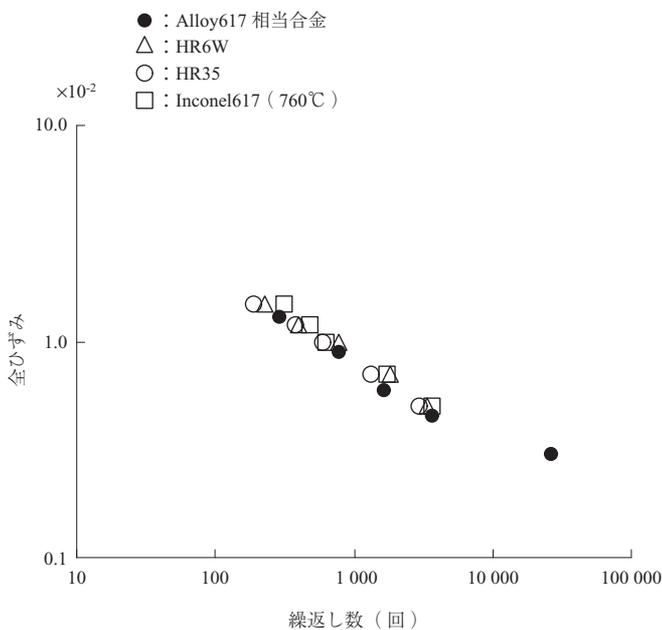
今後は、溶接基礎試験で得られた溶接施工条件をベースに工場でモックアップ用の配管と伝熱管を用いて溶接試験および継手性能評価試験を行う。また、配管の曲げ加工試験や検査技術評価などを実施する計画である。

一方、ボイラ構造の設計に必要な高温腐食や水蒸気酸化特性などの各種材料データの取得も各ボイラメーカーで分担して行われている。当社はそのなかで、開発材料の疲労データの取得を担当しており、現在までに基本的なデータを取得している。取得した高温疲労データを第 9 図に示す。今後は、よりきめ細かい条件でのデータ取得を行う予定である。

以上の試験結果を反映させ、長時間信頼性と経済的な製造コストが両立したボイラ製造技術を確立していく。

#### 5. A-USC ボイラの設計

700℃級ボイラにおいては、蒸気温度が従来の USC ボイラに対し、約 100℃上昇し、伝熱管の温度は非加熱部で 700℃以上、加熱部では 750℃以上となるため、これを設計温度に設定しても十分な許容応力をもつ Ni 基および鉄-Ni 基 (Fe-Ni 基) 材料の適用が必要となる。また A-USC 国家プロジェクトで目標とするプラント効率を達



第9図 候補材料の高低温サイクル疲労試験結果  
 Fig. 9 Results of fatigue tests on candidate material under high-temperature condition

成する最適タービンサイクルは、2 段再熱サイクルを採用し、各流量・圧力・温度は従来と様相が異なっている。

700℃級ボイラの設計に関する検討項目としては以下が挙げられる。

- ① 基本設計（ボイラ形式選定、収熱特性最適化、伝熱面配置）
- ② 高温部配管、管寄構造設計
- ③ 高温バルブ（タービンバイパス弁、安全弁、一般弁）開発

各項目に対しては以下のような課題がある。

### 5.1 基本設計

700℃級ボイラでは蒸気温度が従来の USC に対し 100℃以上上昇することによって、ガス温度と蒸気温度の差が縮小し熱伝達効率が低下する。さらに加熱部での蒸気温度上昇幅が増加するために、USC と比べて必要な伝熱面積が大幅に増加する。これら増加した伝熱面をボイラ内にどのように配置していくか、経済性を加味した最適設計が求められる。

この際、既設火力の改造を前提とした蒸気条件の向上では改造範囲を最小とする伝熱面配置が要求される。

また、タービンサイクル側の最適化の視点からボイラ給水温度が上昇することから、ECO（節炭器）スチーミング防止、火炉パス通過流体温度の上昇を考慮したシステム設計が必要となる。

経済性の観点からは高価な Ni 基や Fe-Ni 基合金で構

成される高温配管の長さは極力短いことが望ましい。主配管ルート長さの短縮の観点では、当社は USC ボイラで国内実績をもつタワー型ボイラが、主配管取出し位置が低く、従来の 2 パス型ボイラと比べて主配管を短くすることが可能であることから 700℃級への適用を計画している。

### 5.2 高温部配管・高温部管寄構造設計

700℃級ボイラの主蒸気管、再熱蒸気管・高温部管寄には線膨張係数の大きな Ni 基や Fe-Ni 基合金が適用される。これらの候補材は従来の USC ボイラで使用されてきたフェライト鋼に対し、第 10 図に示すとおり線膨張係数が大きく、また、設計温度自体も高いことから従来型の USC ボイラと比較して、より大きなシステム応力の発生を考慮した構造設計が必要となる。

これら主蒸気管高温部管寄等の厚肉部に対しては、起動停止・負荷変化に伴う非定常熱膨張応力を加味したシステム応力評価による適正な配管ルートの選定、サポート方法の検討が課題となる。また、主配管、高温管寄は最大配管径が従来配管以下に制限される可能性が高く、経済性や配管応力を考慮した配管、管寄系統数に関しても検討課題となる。

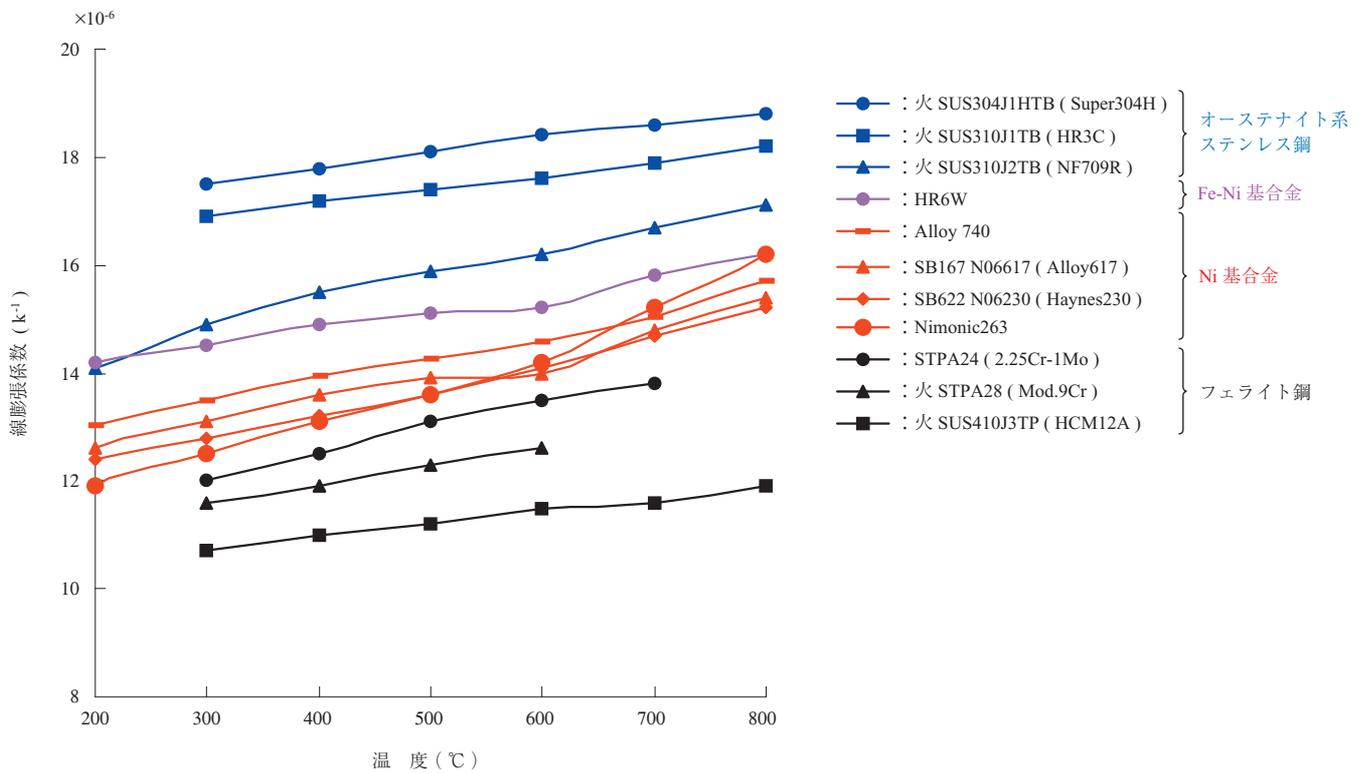
### 5.3 高温バルブ

700℃超の高温下で動作することから、バルブボディにはボイラ耐圧部同様に Ni 基合金の適用が必要となる。このため、① 構造材の線膨張係数の大きさを考慮した弁構造の確立 ② 熱応力による寿命評価 ③ 熱ひずみによる作動性 ④ 閉切性の検証、が課題となる。

一方、700℃の流体に耐えうるパッキン冷却構造、内弁部品の材質、肉盛溶接材の選定・検証が必要である。このように多岐にわたる課題があり、メンテナンスを含め信頼性を確保するために、国内のバルブメーカーとプラントメーカーが協調し、今後とも開発を鋭意推進していく。

## 6. 結 言

蒸気条件の高温化に向けた技術開発は、信頼性の確保が最も重要である。700℃級 A-USC における Ni 基合金の採用に当たっても 9 年もの開発期間をかけて長時間クリープ強度の検証を行うなど、決して省略できないステップがあり、一つ一つの課題を着実に検証して進めていくことが大切である。長期的な石炭の高効率利用と地球温暖化防止を目指し、着実に開発を進めていく所存である。今後の進捗状況を適宜報告していきたい。



第10図 ボイラ材料の線膨張係数の比較<sup>(6)</sup>  
 Fig. 10 Comparison of linear expansion coefficient of boiler materials<sup>(6)</sup>

### 参考文献

- (1) 福田雅文：A-USC の概要 先端技術フォーラム 日本機械学会 2007年9月
- (2) IEA：World Energy Outlook 2009 2009年11月 p.75
- (3) 大友暁ほか：プラント機器の損傷評価と全寿命予測技術例 応用技術 4版 1987年3月 p.101
- (4) John F. Delong, 石本礼二, 梶ヶ谷一郎：超高温プラントにおけるタービン止め弁／制御弁の損傷解析および材料評価 火力原子力発電技術 Vol.35 No.11 1984年11月 pp.31-35
- (5) R. Blam and RW. Vanstone：Proceeding of the 8th Ultra-steel work shop 2004 p.158
- (6) 岩崎 淳, 椎橋 啓, 高野伸一：A-USC ボイラの開発 火力原子力発電技術 第33回新技術発表会 2006年12月