

ボイラ「技術トピックス編」 — 一次世代超々臨界圧火力発電(A-USC)材料、 溶接技術開発 —*

福田 雅文**



Boiler(Technical Topics)

—Material and Welding Technology Development for Advanced USC Power System—*

by FUKUDA Masafumi**

キーワード 蒸気タービン, ボイラ, 超臨界圧, 耐熱合金, 発電システム, 効率向上, 地球温暖化

1. はじめに

日本国内においては1973年の「オイルショック」以後、一次エネルギーのベストミックスを指向するなかで石炭火力発電所の建設が進み、設備容量は現在 35 GW 程度、発電電力量では 25% まで拡大してきた。一方、東日本大震災により原子力発電への懸念が生じ、発電用一次エネルギーにおける天然ガス、石炭等の化石燃料の位置づけが高まる方向にある。電気事業連合会の資料によれば、2012年度火力発電は国内の全発電電力量の約 90% を供給した¹⁾。特に、天然ガス、石油火力の伸びは著しく、燃料価格の上昇と相まって、日本の貿易収支が赤字になるほどのインパクトを与えている。そのような状況下比較的価格が低く、かつ供給が安定している石炭火力に注目が集まっている。しかしながら、石炭火力発電は他の発電方法に比べて単位電力量あたりの二酸化炭素排出量が多く、地球温暖化問題への対応が強く迫られている。

先進超々臨界圧発電技術 (A-USC, Advanced Ultra Super Critical Steam Condition) は石炭火力発電の熱効率を向上し、二酸化炭素排出の削減を目指した技術である。現在の石炭火力発電所はほとんど全てがボイラと蒸気タービンを組み合わせた汽力発電技術を採用しており、A-USC もその一種である。A-USC は熱効率を大幅に向上するために蒸気タービン入口における蒸気温度を従来よりも 100℃ 程度高い 700℃ まで高めようとしている。そのためには高温で使用できる材料の開発、さらに材料に適した溶接や加工等の製造技術開発が必要である²⁾。

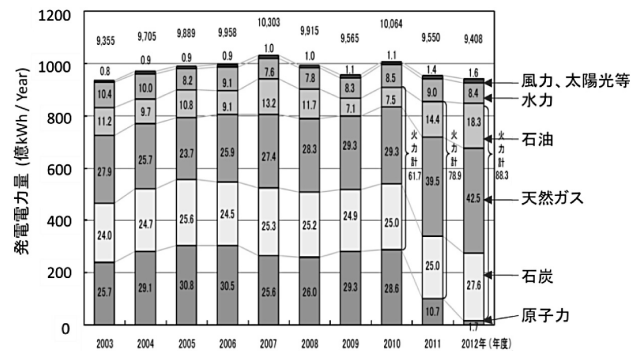


図1 国内の発電電力量¹⁾

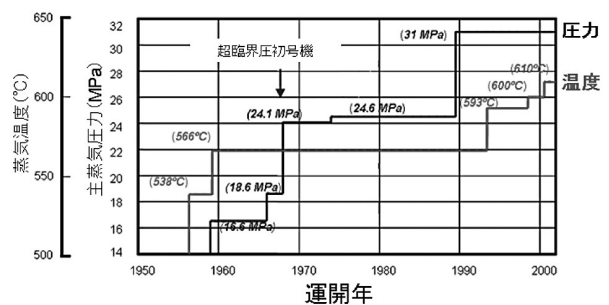


図2 国内火力発電所の蒸気条件の変遷

経済産業省からの補助を受け、2008年夏から9年間にわたる本格的な A-USC 要素技術開発プロジェクトが進められている。

2. 蒸気条件の向上

図2に国内火力発電所の蒸気条件の変遷を示す。主蒸気

*原稿受付 平成25年5月31日

** 一般社団法人 高効率発電システム研究所 Research Institute for Advanced Thermal Power Systems

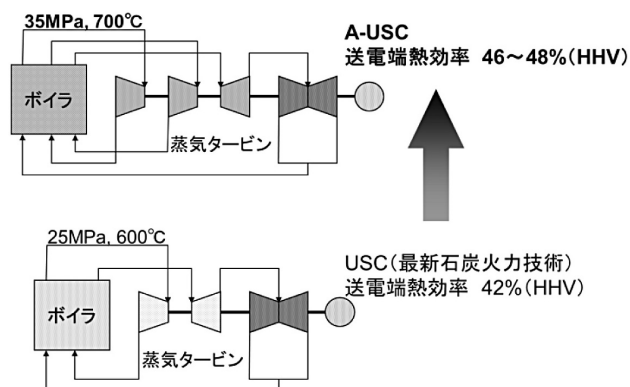


図3 A-USC 技術開発目標

温度は1950年代に538℃から566℃に向上したが、その後長期間同じ温度が維持された。そして、1993年に中部電力の碧南3号機で再熱蒸気温度593℃が、1997年に電源開発の松浦2号機で主蒸気温度593℃が達成された。さらに1998年には中国電力の三隅1号機で600℃に上昇した。2000年になると電源開発の橘湾1号機で再熱蒸気温度610℃が達成された。一方、主蒸気圧力は1967年に東京電力の姉ヶ崎1号機で初めて超臨界圧の24.1MPaが達成された。そして、1989年に中部電力の川越1号機で二段再熱方式が採用され、主蒸気圧力も31MPaまで上げられた。

超臨界圧で温度が593℃以上の蒸気条件の技術が一般に超々臨界圧発電技術(USC, Ultra Super Critical Steam Condition)と称されている。USCは比較的燃料コストが高い日本で開発された技術で、蒸気条件の向上による高効率化により燃料使用量を減らし、発電コストの低減を狙ったものである。USCの実現には耐熱材料の開発が不可欠だった。電源開発(株)は国からの補助を受け、1981年から2000年にわたる長期の開発を主導した。その結果、593℃、600℃級USCに適用可能な9~12%Cr鋼が開発され、順次実プラントに適用されてきた。現在、わが国の石炭火力発電所発電容量のほぼ半分をUSCが占めている。開発された技術や製品は欧米諸国や中国、インドにも波及、輸出され二酸化炭素削減に寄与している。

A-USCは600℃級USCに対してさらに100℃以上の蒸気温度向上を狙っている。その結果、高位発熱量基準(HHV)の送電端熱効率は42%から46~48%へ向上し、二酸化炭素排出量は約10%以上低減できる(図3)。

3. A-USC 技術開発

図4にA-USCの代表的なシステムと適用材料を示す。A-USCは汽力発電システムの一種であり、主たる構成要素としてはボイラと蒸気タービンがある。ボイラでは火炉で石炭等の燃料が燃焼し、その熱で水を蒸発させる。発生した蒸気は小径の伝熱管群から構成される過熱器で700℃の温度まで過熱された後、大径の主蒸気管と主蒸気弁を通して超高压タービンに導かれ仕事をする。超高压タービンから出た蒸気はボイラに戻され、小径の伝熱管群から構成される再熱器で720℃まで再熱される。再熱された蒸気は

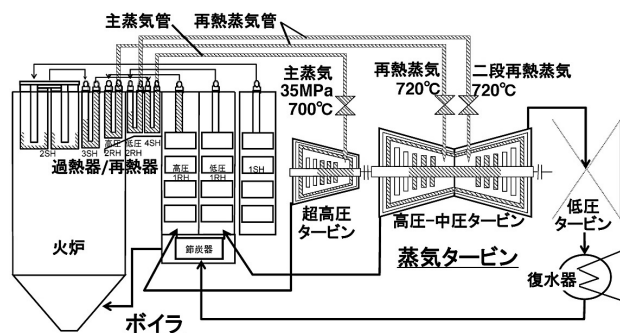


図4 A-USC のシステム構成

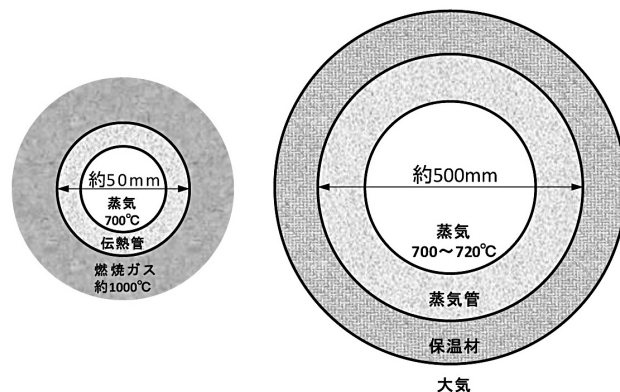


図5 伝熱管と蒸気管の使用環境

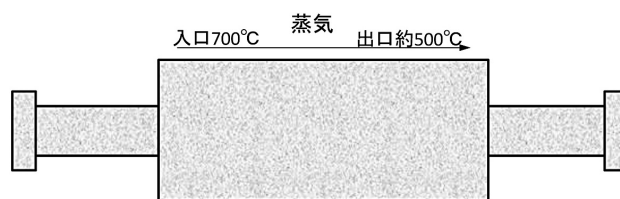


図6 蒸気タービンロータの使用環境

大径の再熱蒸気管と再熱弁を通り、高压タービンに送られ仕事をする。高压タービンから出た蒸気はもう一度ボイラに戻され二回目の再熱をされた後中圧タービンにもどり再び仕事をする。中圧タービンを出た蒸気は低压タービンでも仕事をし、復水器で冷却され水に戻る。

このようなシステムにおいて700℃の蒸気温度を実現するには耐熱材料や構造に開発課題がある。600℃級USCの実現には9~12%Cr鋼の高温強度向上が主役を演じたがA-USCではさらに高温に耐えうる材料としてNi基合金に期待がかかっている。図中ハッチング部分がNi基合金の適用部材である。

ボイラでは小径の伝熱管と大径の蒸気管が該当する。図5に伝熱管と蒸気管の使用環境を示す。伝熱管は約50mmの外径であり、外部から1000℃程度の燃焼ガスで加熱され、内部の蒸気に熱を伝える役割を有している。そのため、管材の温度は蒸気温度よりも高い750℃程度まで上昇する。一方、蒸気管は500mm程度の大径であるが、熱を大気に逃がさないように保温材が巻かれているので、管材の温度は内部の蒸気と同じで700~720℃程度になる。

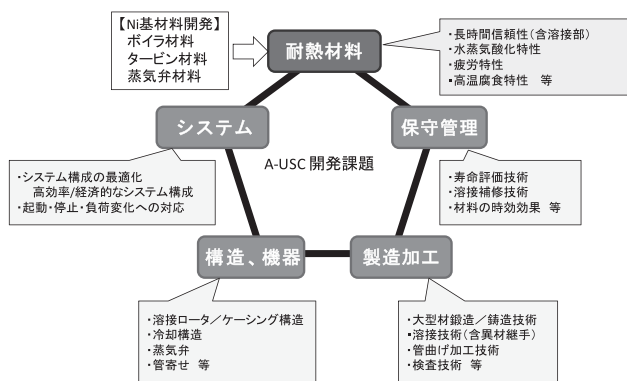


図7 A-USC 開発課題

図6に超高压タービンのロータ模式図を示す。タービン入口蒸気温度は700℃で、出口蒸気温度は500℃程度なので、ロータ表面には入口側で700℃、出口側で500℃の蒸気が流れることになる。そのため、ロータ材の一部は700℃程度の温度に上昇し、Ni 基合金を適用する。冷却することによりロータ材の温度を下げるという選択もあるが、熱効率の低下を伴うので慎重な判断が必要である。

Ni 基合金はこれまでガスタービンの高温部材や石油、化学工業の耐食性部材として使われてきたが、重量はガスタービンディスク材の2～3トン程度が最大だった。蒸気タービンではロータ、ケーシングに数十トンの部材が、ボイラでは過熱器、再熱器、主蒸気管、再熱蒸気管が百トンを超え、Ni 基合金の従来実績をはるかに上回る大きさとなる。そのようなサイズでも欠陥や強度の低下等の問題が生じない Ni 基合金を開発する必要がある。また、高価な Ni 基合金の適用部位を極力抑制した設計にする必要がある。

Ni 基合金を実際のプラントに適用するには単に材料の開発にとどまらず、システム全般にわたり多様な技術開発が必要になる。図7に示すように保守管理技術の開発、製造加工技術の開発、構造・機器の開発、システムの最適化等が必須である。特に、発電システムでは部材を交換せずに数十年間使用するので、高温環境下での材料の長期信頼性検証は最重要項目である。

表1にボイラに適用する新規材料の候補を示す。700℃の温度領域で用いる Ni 基合金6種類が挙げられている。HR6W, HR35, Alloy617は比較的加工が容易で主蒸気管や再熱蒸気管といった厚肉大径管と過熱器や再熱器の小径伝熱管に適用可能である。Alloy263, 740, 141は前者よりも耐熱性が高く過熱器や再熱器の最高温部に適用可能である。HR6W, HR35, Alloy141はA-USC 向けの国内開発材であり、期待が寄せられている。さらに、従来の9%Cr 鋼は630℃が使用の限界だったが、少しでも Ni 基合金の適用範囲を狭めるために、650℃まで耐熱性を向上した高 B-9Cr 鋼、低 C-9Cr 鋼、SAVE12AD といった先進 9Cr 鋼が候補に挙げられている。

蒸気タービンロータの候補材料としては FENIX-700, LTES700R, TOS1X の3種類が挙げられている(表2)。全て国内開発材でありそれぞれ特徴をもった材料である。FENIX700は IN706 からの改良材であり、10トン超の大型ロータ部材を製作目標としている。LTES700Rは 12%Cr 鋼

表1 ボイラ候補材料

材料呼称	組成	厚肉大径管	小径管	
HR6W	Ni 基	45Ni-23Cr-7W	高温部管寄せ 高温部連絡管 主蒸気管 高温再熱蒸気管	
HR35	Ni 基	50Ni-30Cr-4W-Ti		
617相当合金	Ni 基	Ni-22Cr-12Co-9Mo-Ti-Al		
263相当合金	Ni 基	Ni-20Cr-20Co-6Mo-Ti-Al		
740相当合金	Ni 基	Ni-25Cr-20Co-2Nb-Ti-Al		
141相当合金	Ni 基	Ni-20Cr-10Mo-Ti-Al	—	
高B-9Cr鋼	Fe70Ni30	9Cr-3W-3Co-Nb-V-B	管寄せ及び連絡管 (約650℃まで)	伝熱管 (従来高Cr鋼と同程度の温度領域)
低C-9Cr鋼	Fe70Ni30	0.035C-9Cr-2.4W-1.8Co-Nb-V		
SAVE12AD	Fe70Ni30	9Cr-3W-2.6Co-Nb-V-B		

表2 蒸気タービンロータ候補材料

候補材料	開発のポイント											
	重量	耐用温度	特徴									
FENIX-700	10ton超	700℃	10ton超クラス大型鍛造品 IN706からの改良 鉄-Ni基合金									
LTES700R	30～40ton	700℃以上	10tonクラス大型鍛造品 低線膨張係数 溶接継ぎ手強度・信頼性確保が重要									
TOS1X	超合金部分10ton	720℃以上	10tonクラス大型鍛造品 IN617からの改良 720℃クラスの温度 溶接継ぎ手強度・信頼性確保が重要									
組成(質量%)	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Al	Ti	Fe	C	B
FENIX-700	42	16					2	1.24	1.7	Bal.		
LTES700R	Bal.	12		6.2	7			1.5	0.9		0.031	
TOS1X	Bal.	18-28	10-15	5-12		0.1-0.7	0.1-0.4	0.8-1.5	0.6-1.5		0.01-0.15	0.001-0.006

表3 タービンケーシング候補材料

候補材料	試験分担	開発のポイント											
		重量	耐用温度	特徴									
IN617	三菱重工業	5～10ton	700℃	ヨーロッパのプロジェクト(AD700)で弁ケーシング試作実績有り									
IN625	日立製作所			ヨーロッパのプロジェクト(AD700)等で弁ケーシング試作実績有り									
IN740	東芝			ヨーロッパのプロジェクト(AD700)で小径管試作実績有り 高強度だが、大型実績無し									
組成 質量%	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	Cu
IN617	44.5min	20-24	10-15	8-10		2	0.8-1.5	0.6max	3max	1max	1max	0.05-0.15	0.5max
IN625	58min	20-23	1max	8-10	7	3.15-4.15	0.4max	0.4max	5max	0.5max	0.5max	0.1max	
IN740	Bal.	25	20	0.5		2	0.9	1.8	0.7	0.3	0.5	0.03	

との溶接を前提としており、線膨張係数が Ni 基合金としては低めになるように材料設計されている。TOS1Xは IN617 からの改良材であり、720℃以上の温度領域での使用が目標である。

ケーシングの候補材料としては IN617, IN625, IN740 の3種類があり、タービンメーカー各社で分担し材料の評価を進めている(表3)。

上記以外に、蒸気タービンについては翼、ボルト等、高温弁については弁棒、プッシュ材料等についても候補材を選定している。

4. 要素技術開発プロジェクト

経済産業省の補助を受けて、2008年から2016年までの9年間におよぶ「先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発」プロジェクトが進められている。

		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017以降
		H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	
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、経済性試験									
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								10万時間
			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	材料改良仕様実証等		実サイズ部材製作						10万時間	
		ロータ、ケーシング等の大型溶接技術、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						実証機	
実缶試験・回転試験(高温弁含む)		設備計画		設備設計		設備製造、運行		試験、評価			

図8 マスタースケジュール

図8にマスタースケジュールを示す。主として前半の5年間で材料試作，開発を行い，後半の4年間で実プラントのボイラを用いた「実缶試験・回転試験」を実施する予定である。

ボイラについては2008年度から2012年度にかけて表1に掲げた材料の開発，評価を行う。また，「溶接技術開発・試験」，「曲げ試験」等を行い，ボイラ製造技術を開発する。A-USCでは材料の長期信頼性が最も重要であることから，9年間にわたって「高温長期材料試験」を行い，母材，溶接継手の3～7万時間のクリープ強度を検証する。伝熱管は高温の石炭燃焼ガスに曝されるので，高温腐食についての検証を行う。また，伝熱管内面の高温蒸気による水蒸気酸化に関しても検証を行う。

蒸気タービンについては2008年度から2012年度にかけて表2に掲げたロータ材およびケーシング材等の主要部品を試作，評価する。また，「ロータ，ケーシング等の大型溶接技術，試作」を行い，実機大型部品を製造するために必要な技術を開発する。ボイラと同様に9年間にわたって「高温長期材料試験」を行う。

高温弁としてはタービン蒸気弁，ボイラ起動弁（タービンバイパス弁），ボイラ安全弁等がある。これらはタービンの蒸気流量の制御，ボイラ起動時の蒸気流量制御，緊急時に蒸気を逃がす等の機能を有し，システムを安全に運用する上でたいへん重要な機器である。700℃の蒸気環境下での高い信頼性を確保するために，弁の摺動部の耐久性や，弁棒周りからの蒸気リークを防止するパッキン材の耐久性に関する開発，検証を行う。

開発はIHI，ABB日本ベレー，岡野バルブ製造，新日鐵住金，東亜バルブエンジニアリング，東芝，パブコック日立，日立製作所，富士電機，三菱重工業，電力中央研究所，物質・材料研究機構から構成される「A-USC 開発推進委員会」により推進されている。

5. 開発状況と今後の予定

要素開発プロジェクトが開始され，5年が過ぎ，ほぼ予定に沿って試作，検証試験が進められている。図9は試作されたボイラ用の大径管であり，高温長期材料試験，溶接試験，曲げ加工試験に供された。

図10には高温長期材料試験の一例としてHR6Wの母材と溶接継手のクリープ試験状況を示す。大径管材料の開発目標は10万時間，700℃で90MPa以上のクリープ強度で

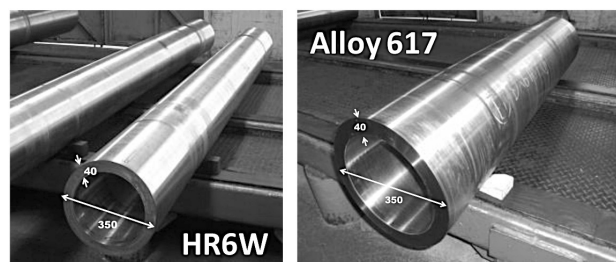


図9 試作されたボイラ大径管（新日鐵住金提供）

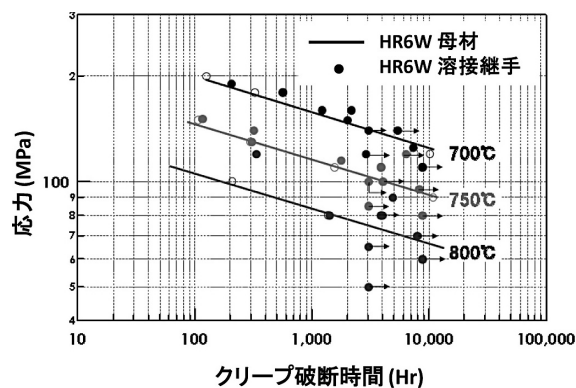


図10 HR6W母材と溶接継手のクリープ強度（新日鐵住金他提供）

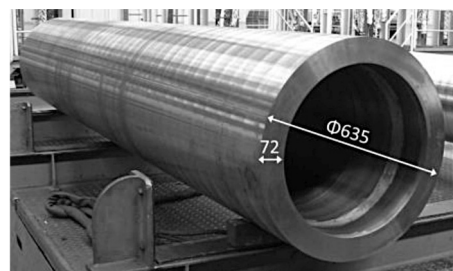


図11 再熱器モックアップ製作用の大径管（新日鐵住金提供）

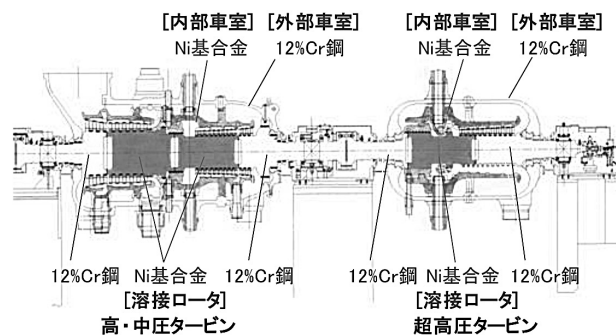


図12 蒸気タービン溶接構造（三菱重工業提供）

あるが，今のところ1万時間程度まで順調に試験が進んでいる。

再熱蒸気管や再熱器の蒸気を集めるヘッダ部分には図11に示すような大口径管が必要となる。この写真に示した管は再熱器ヘッダのモックアップを試作するために製作されたものである。

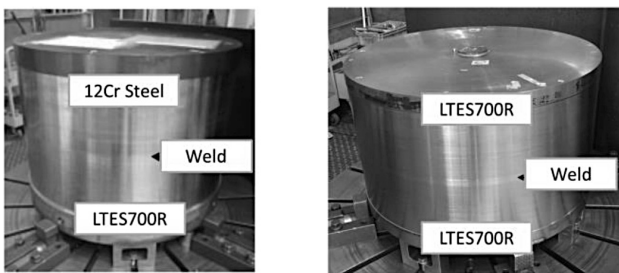


図13 ロータ溶接試験（三菱重工業提供）

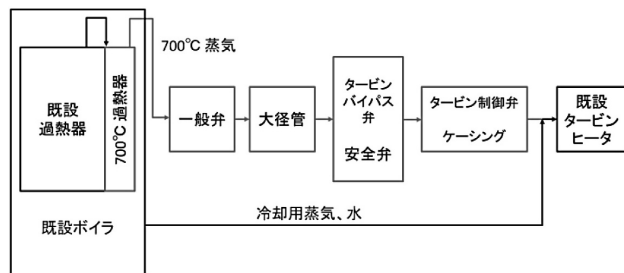


図15 実缶試験装置

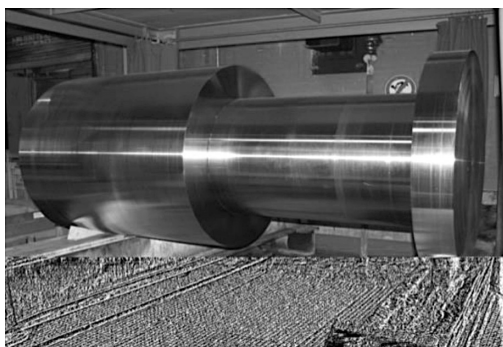


図14 Ni 基合金製ロータ（東芝提供）

蒸気タービンについては図12に示すような溶接ロータ、溶接ケーシング構造が提案されている。ロータやケーシングの中でも高温部のみにNi基合金を使い、それに従来の鉄鋼材料を溶接し、大型の部材を構成しようというものである。図13はNi基合金であるLTES700Rと従来の12Cr鋼を溶接したものであり、溶接部から切り出した試験片による材料試験を行っている。

図14は試作された13トンのTOSIX製大型ロータである。ケーシング、高温弁等についても同様に試作、材料試験を行っている。本プロジェクト後半には前半5年間の集大成として実缶試験、回転試験を行う。実缶試験は2015～2016年度に実ボイラに700℃の蒸気を発生する伝熱管等の部材を組み込みこんだ耐久試験を行う予定である（図15）。回転試験は2014～2016年度に実機と同じ外径で製作した3種類のロータを電気ヒータで加熱し実温度、実速度で検証試験する予定である。現在、試験を行うための準備を鋭意進めている（図16）。

6. まとめ

石炭火力発電からの二酸化炭素排出削減を狙い、700℃級の蒸気条件を有するA-USCの要素技術の開発が推進されている。開発には国内の主なボイラメーカー、タービンメ

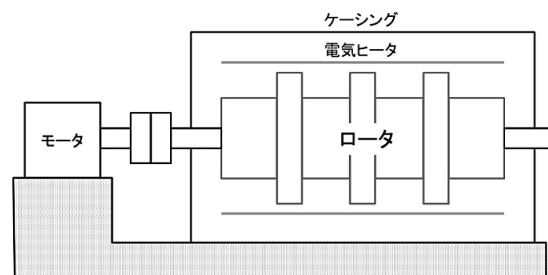


図16 回転試験装置

ーカ、弁メーカー、研究所などが参加し、2008年度から2016年度の9年間で、ボイラ、タービン、高温弁などの材料開発／検証、要素技術検証等を行っている。

要素開発プロジェクトが開始されてから約5年が経過したが、ほぼ予定に沿って試作、検証試験が進められている。

これまでに、ボイラでは候補材料による大径管等の部材試作が実施され、それらから切り出された試験片等によりクリープ試験、溶接試験、曲げ試験等が行われている。タービンでは候補材料によるロータ、ケーシング等の部材試作が実施され、クリープ試験、溶接試験等が行われている。

2014～2016年度にかけて、実ボイラに伝熱管等の部材を組み込んだボイラ「実缶試験」、タービンロータを試験チャンバー内で700℃まで加熱し、実回転数で試験する「回転試験」を予定しており、現在その準備をしている段階である。

参考文献

- 1) 2012年度の電源別発電電力量構成比, http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/sonota/_icsFiles/afieldfile/2013/05/17/kouseihi_2012.pdf, 電機事業連合会, 2013.
- 2) 次世代超々臨界圧プラント(A-USC)技術開発 経年石炭火力発電所の高効率化とそれに伴うCO2排出削減研究 報告書, エネルギー総合工学研究所, IAE-052010, 2006.

本文中には各社で用いられている商標が使われている場合があります。