

## C. 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発

### 1 事業の目的・政策的位置付け

#### 1-1 事業目的

我が国のエネルギーセキュリティ確保のためには、長期的な視点に立った化石燃料資源の有効利用が重要課題の一つである。特に近年アジア地域で急速に経済発展が進み、その影響によりエネルギー源の多様化は必須の状況である。その埋蔵量や他の化石燃料（天然ガス等）への価格牽制等を勘案すれば、石炭はエネルギー源のベストミックスを追求する上で、重要な位置付けにあると考えられる。国内の電源構成では図 1-1 に示すように東日本大震災以後、原子力が減少し、石油、天然ガス、石炭のシェアが増大した。石油、天然ガスは比較的高価な燃料であり、現在の我が国の貿易収支を悪化させる要因となっている。石炭の価格は安価で安定している。しかしながら、石炭は二酸化炭素 排出量が多いため、可能な限り効率良く、クリーンに利用できる技術の開発が強く求められている。

また、1970 年代のオイルショック以降に大型石炭火力が建設されてきたが、初期のものは更新や大幅な改修の時期に迫りつつある。そのような需要に対して、有効な技術の開発が必要である。

本事業で研究開発する先進超々臨界圧火力発電（以下「A-USC」）はこのような必要性に応える石炭火力発電技術であり、現在最新の石炭火力よりも二酸化排出量の 10~15%削減が期待できる。また、A-USC は従来石炭火力と同じシステム構成を有しているので、A-USC の技術を用いれば、既存石炭火力発電所を経済的に更新または大幅な改修を行うことが可能になる。

本事業では従来 630℃程度が限界といわれていた蒸気温度を 700℃まで向上し、**2020 年代に商用プラントでの高位発熱量基準送電端効率 46%達成の見通しを得ることを目的として本技術開発を行うものである。**



Source: [http://www.fepec.or.jp/about\\_us/pr/sonota/\\_icsFiles/afieldfile/2013/05/17/kouseihi\\_2012.pdf](http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/sonota/_icsFiles/afieldfile/2013/05/17/kouseihi_2012.pdf)

図 1-1 一次エネルギー源毎の国内発電量

## 1-2 政策的位置付け

・「京都議定書目標達成計画」（平成 17 年 4 月閣議決定）において、エネルギー転換部門の取組において、「電力分野の二酸化炭素排出原単位の低減」として、発電部門における二酸化炭素排出量原単位を低減させることが重要であることから、火力発電の熱効率の更なる向上の対策を講ずるとされている。

・「第 3 期科学技術基本計画」（平成 18 年 3 月閣議決定）の分野別推進戦略において、化石燃料の開発・利用の促進における重要な研究開発課題、「クリーン石炭利用技術」に位置づけられている。また、「平成 22 年度の科学技術に関する予算等の資源配分の方針」（平成 21 年 6 月）において、低炭素社会実現に必要な「最重要政策課題」に位置づけられている。

・「新・国家エネルギー戦略」（平成 18 年 5 月）において、総合資源戦略確保の具体的取組として、「化石エネルギーのクリーンな利用の開拓」が位置づけられている。

・「低炭素社会づくり行動計画」（平成 20 年 7 月閣議決定）において、ロードマップの着実な実行が掲げられている「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」及び「環境エネルギー技術革新計画」の双方に位置づけられている、高効率石炭火力発電の技術開発。（図 1-2）

・「エネルギー基本計画」（平成 22 年 6 月改定）において、我が国が有する世界最高水準の石炭火力発電技術をさらに革新していくことが重要であり、IGCC・A-USC（先進的超々臨界圧発電）等について、更なる高効率化や早期の実用化を目指して、官民協力して開発・実証を推進するとされている。さらに、高効率の石炭火力技術については、我が国を環境に優しい石炭火力の最新鋭技術の実証の場として位置づけ国内での運転実績の蓄積を図るとしている。

・「日本再興戦略」（平成 25 年 6 月）において「二．戦略市場創造プラン」「テーマ 2：クリーン・経済的なエネルギー需給の実現」「〇火力発電の技術開発支援」の中で、「先進超々臨界圧火力発電（A-USC）について 2020 年代の実用化を目指す（発電効率：現状 39%程度→改善後 46%程度）。」と位置付けられている。

・総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画」（平成 25 年 9 月）において、生産・供給分野の主要技術として高効率石炭火力発電のさらなる高度化が掲げられている。



図 1-2 Cool Earth-エネルギー革新技術計画

出典：「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」（概要） 平成 20 年 3 月 5 日 経済産業省

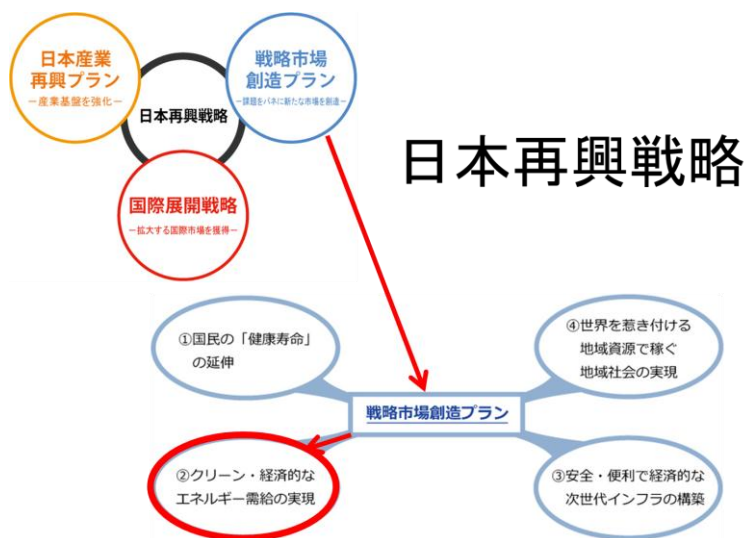


図 1-3 日本再興戦略における位置づけ

出典：首相官邸ウェブサイト [http://www.kantei.go.jp/jp/headline/seicho\\_senryaku2013.html](http://www.kantei.go.jp/jp/headline/seicho_senryaku2013.html)

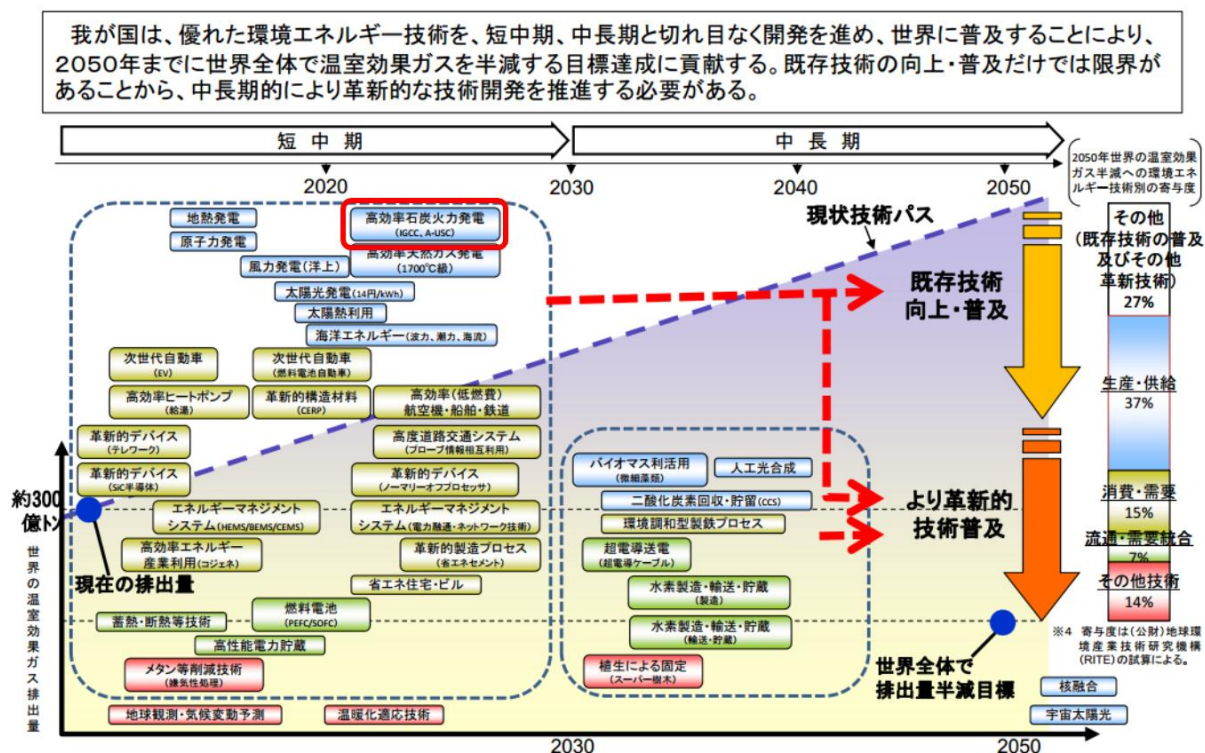


図 1-4 環境エネルギー技術革新計画における位置づけ

出典：総合科学技術会議 環境エネルギー技術革新計画（改訂案）【概要】 平成25年9月13日

### 1-3 国の関与の必要性

本研究開発は、我が国の長期のエネルギーセキュリティ確保と環境保全問題という命題を解決する技術開発であり、その成果は国民全体に裨益する。特に現有石炭火力の二酸化炭素排出削減に効果的である本技術は、国民生活への寄与が高い。

しかし、効率的な事業経営によるコスト低減という社会的要請のなか、開発リードタイムと技術開発負荷を鑑みると、民間のみの開発では継続的な投資は困難である。国の後押しとしての資金負担がなければ実施され得ないと考えられる。このため、一定程度の国庫補助は不可欠といえる。

一方、欧米においては EU や国家の支援の下、既に国際、国家レベルでのプロジェクトによる開発が進行中であり、中国、インドにおいても国家資金による開発が進められている。放置すると世界をリードして来た我が国の USC 技術が陵駕されるのも時間の問題である。我が国の産業競争力の維持、強化、ものづくり力の強化の観点からも最先端の A-USC 技術の発展を図ることが重要である。さらに、A-USC 技術が確立されれば東南アジアを始めとする石炭依存度の高い地域への展開等我国のエネルギー戦略上有効な国際協力活動の手段としての位置づけも可能と考えられる。以上のことから、我が国の国益のため国として一定の支援を行うことが適当と考えられる。

A-USC のシステムを完成するにはボイラメーカー、タービンメーカー、弁メーカー、材料メーカー等関与する企業が多岐に及ぶ。どの企業にとってもリソース（人的、資金的）を 10 年以上に及ぶ長期的な開発にあてるには、たいへん大きな決断を伴う。また、長期的な開発故に、その間の社会状況の変化等による技術開発の意義づけが変化するといったリスクも伴う。本事業は単なる事業促進補助ではなく、上述のような大きなリスクを伴う技術開発への補助であることを鑑みると補助率は 2/3 が妥当であると考えられる。

さらに、国際的に見ると中国、インドは丸々国からの資金で技術開発を行っている。そのような面からみても補助率は 2/3 が妥当であると考えられる。

## 2 研究開発目標

### 2-1 研究開発目標

従来の石炭火力発電では蒸気タービン入口の蒸気温度が 600℃程度で、高位発熱量基準送電端熱効率 は 42%だった。A-USC では蒸気温度を 700℃まで高めることにより、2020 年以降において商用プラントでの高位発熱量基準送電端熱効率 46%達成の見通しを得ることを本研究開発の最終的な目標とする。(図 2-1)

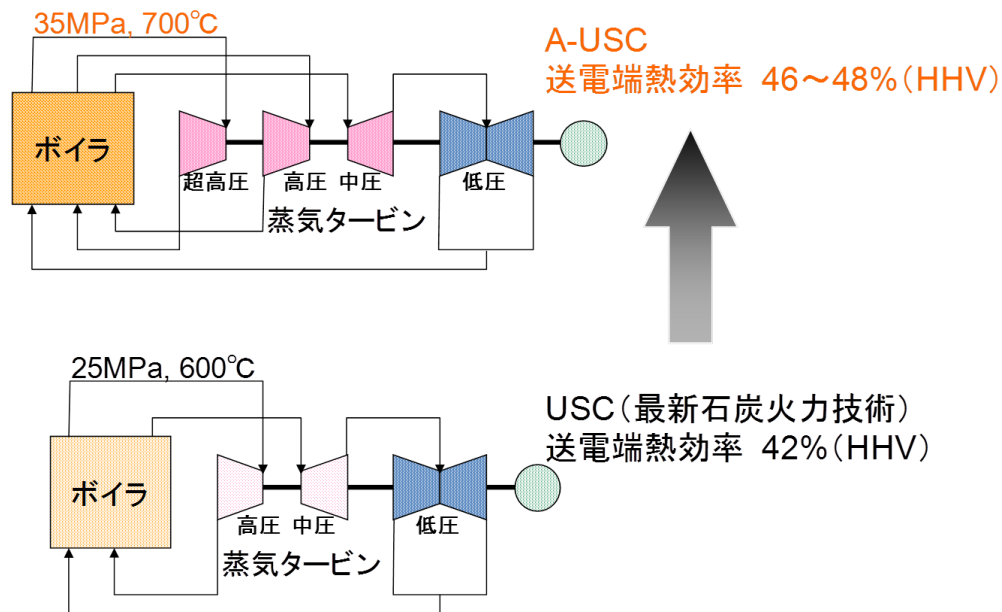


図 2-1 A-USC 開発目標

目標を達成するためにはボイラ、蒸気タービンに開発課題がある。

図 2-2 に A-USC システムと各部の候補材料を示す。ボイラでは石炭を火炉で燃焼し、その熱を使って 700℃の主蒸気、720℃の再熱蒸気を発生する。蒸気は蒸気タービンへ導かれそこで膨張し、仕事をする。図中、ピンクの塗りつぶしで示した部材は 700℃以上の温度になる。このような高温では従来の鉄鋼材料では強度が不足するため、Ni 基合金の適用が考えられている。Ni 基合金はこれまでガスタービンの高温部材として使われてきたが、重量はディスク材の 2～3 トン程度が最大だった。ボイラや蒸気タービンでは数十トンから数百トンクラスの部材があり、Ni 基の従来実績をはるかに上回る大きさとなる。さらに、石炭火力発電の大型部材は数十年の寿命が要求され、700℃以上の温度で連続的に長期間使用しても強度の低下や酸化、腐食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、Ni 基合金は従来の鉄鋼よりも高価であることから、従来よりも耐熱温度が高い鉄鋼材料を開発し、Ni 合金の適用部位を極力抑制する必要がある。なお、本図において、「未実績材料」とはすでに他の機械システム、

例えばガスタービン等に用いられている材料であり、まだ USC、A-USC では使用実績の無い材料のことである。「開発材料」とは A-USC に適用するために新たに開発、検証する材料のことである。

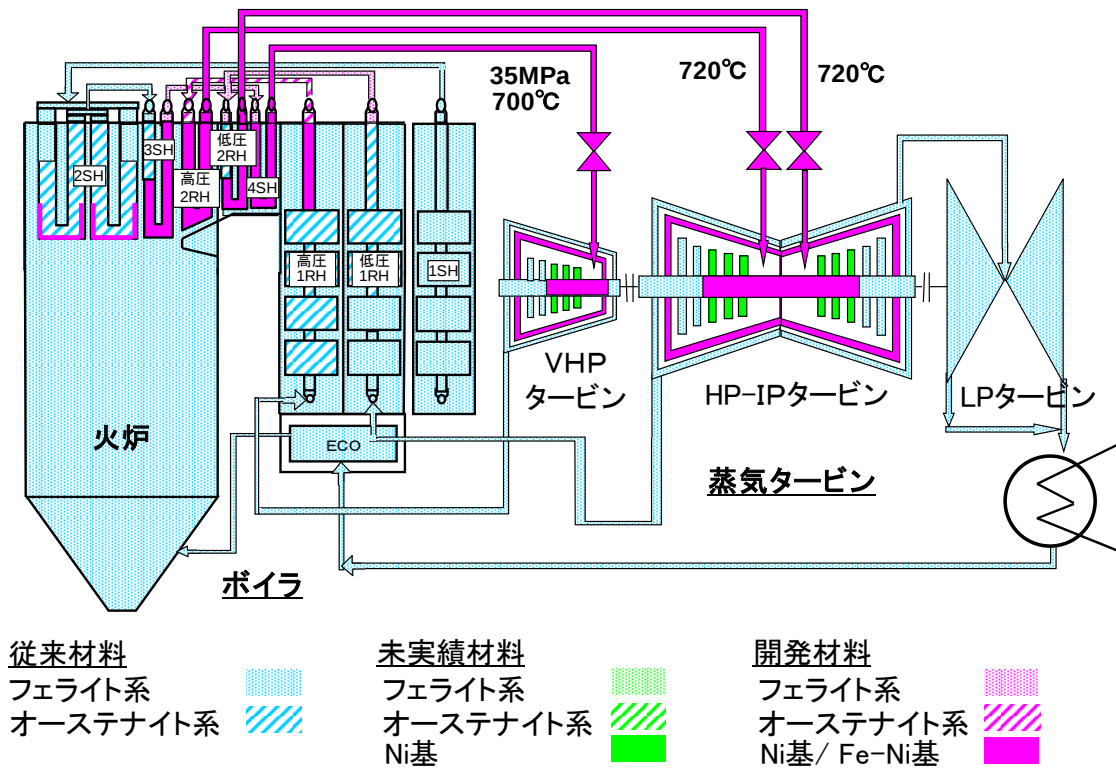


図 2-2 A-USC システムと候補材料

## 2-1-1 全体の目標設定

A-USC の実用化への道筋を図 2-3 に示す。この中で本研究開発は要素技術開発として位置づけられ、実証機検証に向けた要素技術の確立を目指す。

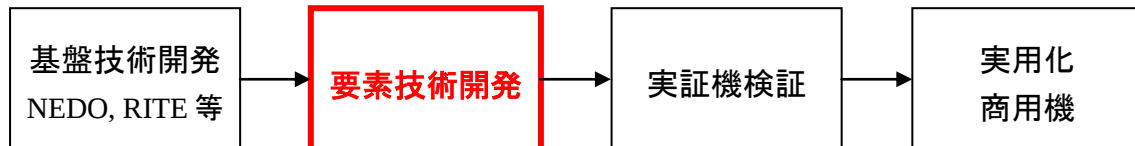


図 2-3 A-USC 実用化への道筋

本研究開発のマスタースケジュールを図 2-4 に示す。技術開発項目としては(1)システム設計、設計技術開発、(2)ボイラ要素技術開発、(3)タービン要素技術開発、(4)高温弁要素技術開発、(5)実缶試験・回転試験（高温弁を含む）からなる。9 年間の事業期間中、主として前半の 5 年間で第(1)～(4)項の開発を行い、主として後半の 4 年間で第(5)項の開発を行う。高温長期材料試験は 9 年間を通して実施する。

|                  |               |            | 2008<br>H20          | 2009<br>H21 | 2010<br>H22 | 2011<br>H23 | 2012<br>H24 | 2013<br>H25 | 2014<br>H26 | 2015<br>H27 | 2016<br>H28 | 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       | 材料改良仕様策定等            |             | 実サイズ部材試作    |             |             |             |             |             |             |        |
|                  |               |            | 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               |               |            |                      |             |             |             |             |             |             |             |             |        |
| 実缶試験・回転試験(高温弁含む) |               |            | 設備計画                 |             |             |             |             |             |             |             |             |        |
|                  |               |            | 設備設計                 |             | 設備製造、据付     |             |             |             | 試験、評価       |             |             |        |

図 2-4 マスタースケジュール

中間評価時点では 3 万時間程度の材料試験結果が得られているので、この結果を外挿し長時間信頼性を推定する。さらに、システム設計により熱効率 46%を確認することを中間評価時点での目標としている。

表 2-1-1 に実証機検証に至るまでの目標を示す。

表 2-1-1 全体の目標

| 目標・指標<br>(事後評価時点)                                             | 目標・指標<br>(中間評価時点)                                                                                                                                                                              | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>高位発熱量基準送電端<br/>熱効率 46%以上を達成<br/>できる A-USC の要素技<br/>術確立</p> | <p>①熱効率 46%達成可能性確認を含め、システム設計を完了する。</p> <p>②ボイラ、タービン高温弁の材料開発、製造性検証を完了する。</p> <p>③中間評価時点では一部の材料では 3 万時間を超える高温長期材料試験結果が得られているので、これらの結果を 10 万時間まで外挿し長期信頼性を推定する。</p> <p>④実缶試験・回転試験設備の基本設計を完了する。</p> | <p>①早期にシステム設計を実施し商用プラントの成立性を確認する。</p> <p>②プロジェクト後半に実施する実缶試験・回転試験による要素技術の総合的な検証に向け、材料開発、製造性検証を完了しておく必要がある。</p> <p>③10 万時間の材料強度を推定するには 3 万時間程度の長時間材料試験等による検証が欠かせない。</p> <p>④2015~2016 年度に実施する実缶試験・回転試験に向けこの時点で基本設計を完了する必要がある。</p> |

## 2-1-2 個別要素技術の目標設定

システム設計については熱効率 46%以上を確認し、経済性を含めた商用プラントの成立性を確認することが最終目標である。

ボイラ要素技術については図 2-5 に示すように、材料、保守管理、製造加工、構成機器、構造配置のそれぞれに開発、検証すべき課題がある。特に、700℃級材料の長期信頼性の検証が重要である。中間評価時点では大径管、伝熱管、電熱器モックアップ等を試作するとともに、3 万時間程度の材料試験を行い、その結果を外挿し十萬時間の長期信頼性を見通している。

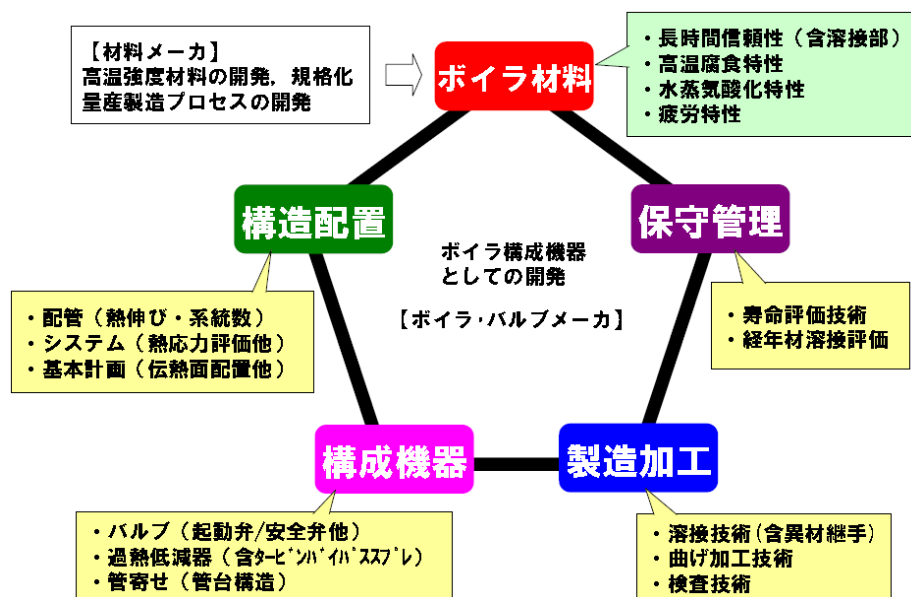


図 2-5 ボイラの開発課題

タービン要素技術については図 2-6 に示すように、材料、保守管理、製造、構造、システムのそれぞれに開発、検証すべき課題がある。特に、大型鋼塊の製造性、クリープ強度 (長期信頼性) の検証が重要である。中間評価時点では中型、大型ロータ材料、中型、大型ケーシング材料等を試作するとともに、3 万時間程度の材料試験を行い、その結果を外挿し十萬時間の長期信頼性を見通している。

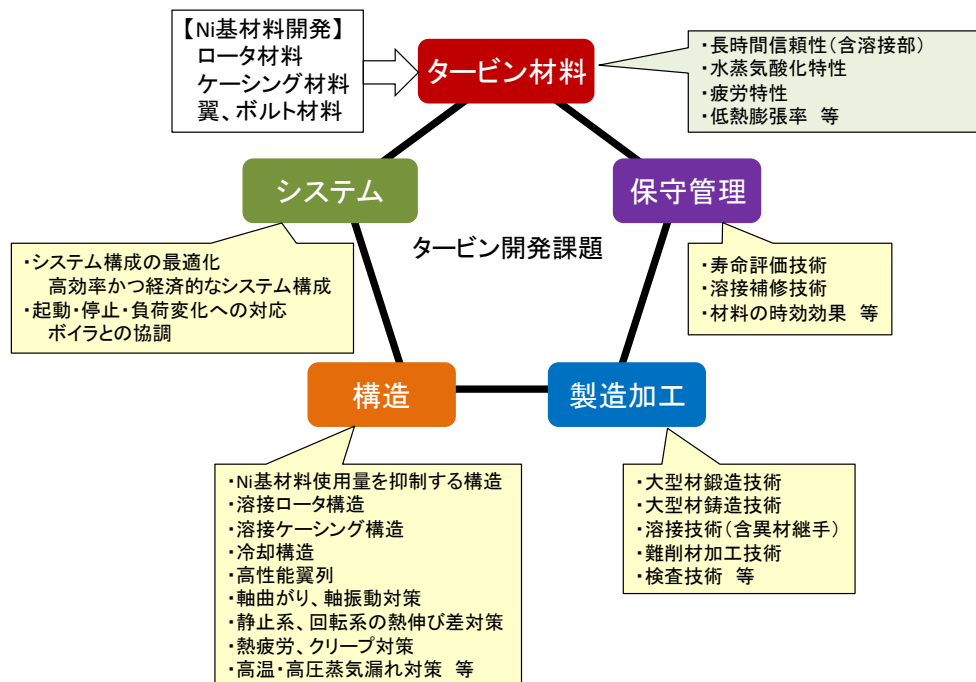


図 2-6 タービンの開発課題

高温弁要素技術については材料、保守管理、製造、構造に開発、検証すべき課題がある。弁材料としては弁棒とそれを支えるブッシュとの摺動性が課題であり、最適な組み合わせを見出すとともに、耐酸化特性検証、ケーシング試作等を中間評価時点での目標としている。

表 2-1-2 個別要素技術の目標

| 要素技術          | 目標・指標<br>(事後評価時点)                                                                                                                  | 目標・指標<br>(中間評価時点)                           | 設定理由・根拠等                               |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| システム設計、設計技術開発 | ・基本設計、配置最適化、経済性検討完了。                                                                                                               | 同左                                          | 商用プラントの成立性の確認                          |
| ボイラ要素技術開発     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・10万時間、750℃で90MPa以上のクリープ強度を持つ過熱器管材料開発</li> <li>・10万時間、750℃で60MPa以上のクリープ強度を持つ加工性・</li> </ul> | 選定された候補材料で3万時間程度の試験からの外挿により以下目標の達成可能性を検討する。 | 目標達成を確認するには3万時間以上の長時間材料試験等による検証が欠かせない。 |

|            |                                                                                                                                                                                             |                                                  |                                                                   |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|            | <p>経済性に優れる再熱器管材料開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・10万時間、700℃で90MPa以上のクリープ強度を持つ厚肉大径管材料開発</li> <li>・10万時間、650℃で80MPa以上のクリープ強度と継ぎ手強度低減係数0.7以上を持つ経済性に優れたフェライト系厚肉大径管材料開発</li> </ul> |                                                  |                                                                   |
| タービン要素技術開発 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・10万時間、700℃で100MPa以上のクリープ強度を持つ鍛造大型ロータ材料開発</li> <li>・10万時間、700℃で80MPa以上のクリープ強度を持つ鋳造大型ケーシング材料開発</li> </ul>                                             | 選定された候補材料で3万時間程度の試験からの外挿により以下目標の達成可能性を検討する。      | 目標達成を確認するには3万時間以上の長時間材料試験等による検証が欠かせない。                            |
| 高温弁要素技術開発  | 実缶試験・回転試験による弁信頼性の確認                                                                                                                                                                         | 摺動試験、水蒸気酸化試験、熱衝撃試験等の要素試験により材料選定作業を行い、最適な弁材料を見出す。 | 弁は弁棒とブッシュが700℃環境下で摺動するので、弁動作を保証するためには摺動試験による検証が欠かせない。<br>同様に各種弁部品 |

|           |                                                                                                                                                                                   |                 |                                                                                     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|           |                                                                                                                                                                                   |                 | の 700℃での水蒸気酸化特性や熱衝撃特性を確認する必要がある。                                                    |
| 実缶試験・回転試験 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1 万時間程度のボイラ実缶試験を実施し、700℃級ボイラ要素の信頼性を確認</li> <li>・ 5000 時間程度のタービン回転試験を実施し、700℃級タービン要素の信頼性を確認</li> <li>・ 実缶試験装置に高温弁を組み込みその信頼性を確認</li> </ul> | 試験設備の基本設計を完了する。 | 平成 27、28 年度に実施する実缶試験・回転試験に向け、平成 25、26 年度には設備の製作設計、製作、据付を行う。それに先立ち設備の基本設計を完了する必要がある。 |

### 3 成果、目標の達成度

#### 3-1 成果

##### 3-1-1 全体成果

- ①システム設計を完了し高位発熱量基準送電端熱効率 46%を達成可能であること、発電コストが従来の USC 並み以下であることを確認した。
- ②ボイラ、タービン高温弁の材料開発、製造性検証を完了した。
- ③3 万時間程度の材料試験により期待した材料特性が得られる見通しを得た。
- ④実缶試験・回転試験設備の基本設計を完了した。

##### 3-1-2 個別要素技術成果

###### (1) システム設計、設計技術開発

500MW、700MW、1000MW のシステム設計を実施し、高位発熱量基準送電端熱効率 46%が得られることを確認した。

500MW システムの経済性を検討し、二酸化炭素を 10%低減しているにもかかわらず、従来の USC 並み以下の発電コストであることを確認した。

図 3-1 に 1000MW のタービン断面図を示す。

図 3-2（非公開）に USC と A-USC の累積発電コスト比較を示す。

図 3-3（非公開）に USC と A-USC の機械装置建設費比較を示す。

表 3-1-1（非公開）に累積発電コストを算出した際（2011 年 10 月）の設定値を示す。

図 3-4 に算出のベースとなった石炭 CIF 価格の推移を示す。

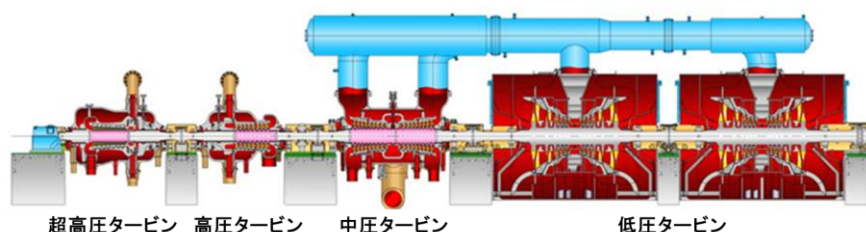


図 3-1 1000MW のタービン断面図



図 3-4 石炭 CIF 価格の推移（出典：財務省貿易統計）

<http://toukei-is.com/h/?p=30101&f=00>

## (2) ボイラ要素技術開発

6種類のNi基合金と3種類の9Cr鋼を試作し、3万時間程度の短時間材料試験を実施した。この試験結果を10万時間まで外挿することにより、目標を達成できる見通しが得られた。今後、実際に10万時間まで試験を継続し、確認をする。

図3-5に試作した候補材料を示す。

HR6W、HR35、Alloy617、Alloy263、Alloy740、Alloy141はNi基合金である。

B-9Cr、SAVE12AD、LC-9Crは耐熱温度を向上した鉄鋼材料である。

図3-6には試作したNi基大径管と小径管を示す。材料加工特性試験を実施した結果、大径管の製造に適した材料としてはHR6W、HR35、Alloy617を選んだ。試作した大径管は曲げ試験、溶接試験等に供された。

図3-7には高周波加熱曲げ加工後のNi基大径管(Alloy617、HR6W)の例を示す。加熱温度を調整した結果、どちらも曲げ加工可能だった。

図3-8にはNi基大径管と小径管(異材溶接)の溶接継手の例を示す。一部に高い溶接割れ感受性を示す材料があったが、概ね良好な溶接施工を行うことができた<sup>注1</sup>。

図3-9にはこれまで開発してきた大径管、小径管、溶接技術、管曲げ技術を総合的に検証するために製作した伝熱器ヘッダーのモックアップを示す。



図3-5 ボイラ候補材料



図 3-6 試作した Ni 基合金製大径管と小径管

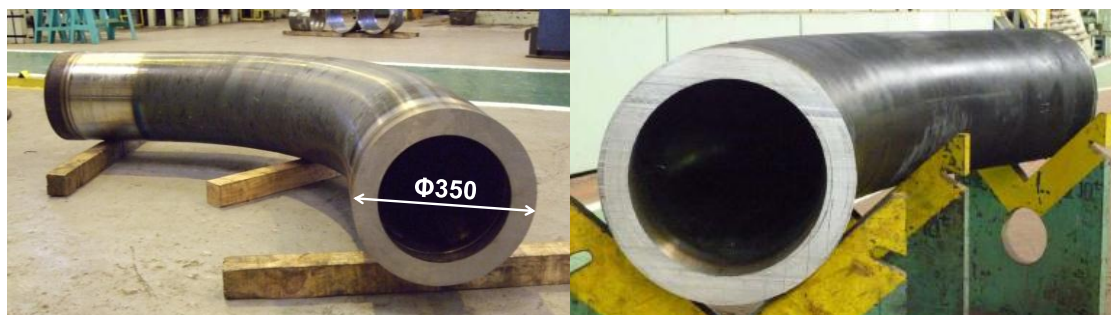


図 3-7 Alloy617 と HR6W の曲げ試験

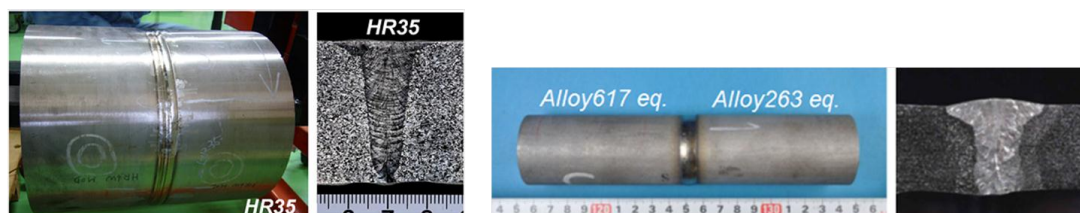


図 3-8 大径管と小径管(異材溶接)の溶接継手



図 3-9 再熱器、過熱器ヘッダーモックアップ

### (3) タービン要素技術開発

3 種類の Ni 基中型、大型ロータ材料 (FENIX700、LTES700R、TOS1X) と 3 種類の Ni 基中型、大型ケーシング材料 (Alloy617、Alloy625、Alloy740) を試作し、3 万時間程度の材料試験を実施した。この試験結果を 10 万時間ま

で外挿することにより、目標を達成できる見通しを得た。今後、実際に 10 万時間まで試験を継続し、確認をする。

図 3-10 にはロータ試作の代表例として TOS1X の状況を示す。前回中間評価時点では 7 トンの素材の試作が可能だったが、現在では 13 トンまで製作可能である。TOS1X は Alloy617 をベースとして開発され、高い強度を得ている。

もうひとつのロータ材料の例として、LTES700R の線膨張係数を図 3-11 に示す。一般の Ni 基合金よりも低い線膨張係数になるように設計された材料であり、鉄鋼材料（2.25Cr Steel, Conventional 12Cr Steel）と同じレベルの値を有している。そのため、鉄鋼材料と溶接などにより組み合わせたときに発生する熱応力を抑えることができる。LTES700R はもともと小型のボルト用材料として開発された LTES700 を大型ロータ材料向けに改良した材料である。LTES700R の線膨張係数は LTES700 より高くなっているものの従来の Ni 基合金や 2.25Cr 鋼より低いレベルになっている。

タービンロータは一般に 30~40 トンの重量であり、一体の Ni 基合金で製作することは難しい。そのため、Ni 基合金の共材溶接、Ni 基合金と鉄鋼材料の異材溶接技術を開発した。図 3-12 にタービンロータの溶接（異材、共材）試作例を示す。

ケーシング材料については、新たな開発は行わず、既存材料の中で蒸気タービンのケーシング材に最も適した材料の選定を行うこととした。候補としては Alloy617、Alloy625、Alloy740 があり、参加各社で分担し大型鋳物を試作した（図 3-13）。当初は図左側のステップブロックを試作し、これらの材料から切り出した試験片により材料特性評価を行なった。その結果選定された材料で大型の内部ケーシング、ノズルボックスを試作した。

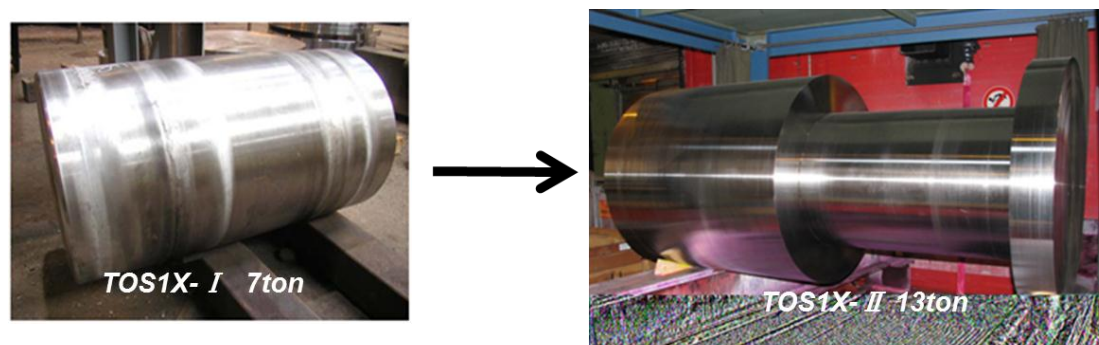


図 3-10 タービンロータ材料の大型化（TOS1X）

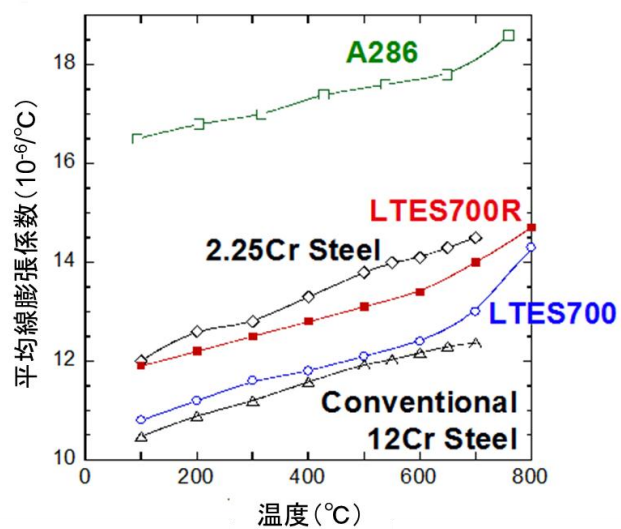


図 3-11 タービンロータ用低熱膨張合金 LTES700R

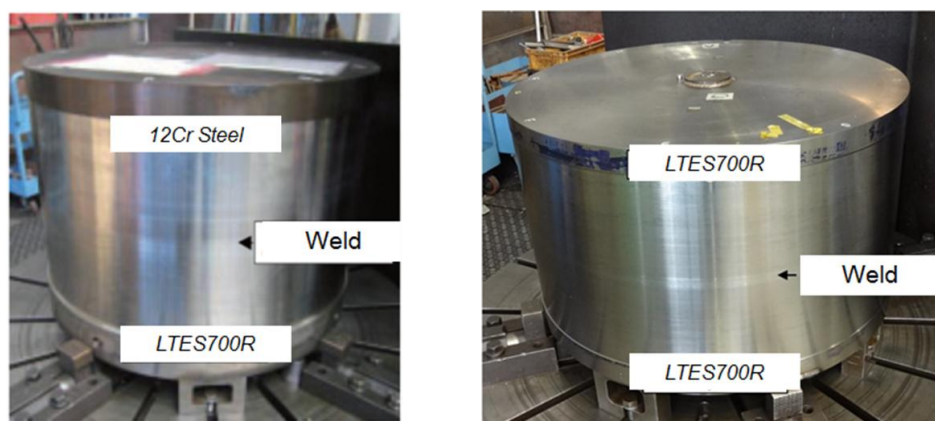


図 3-12 タービンロータの溶接（異材、共材）

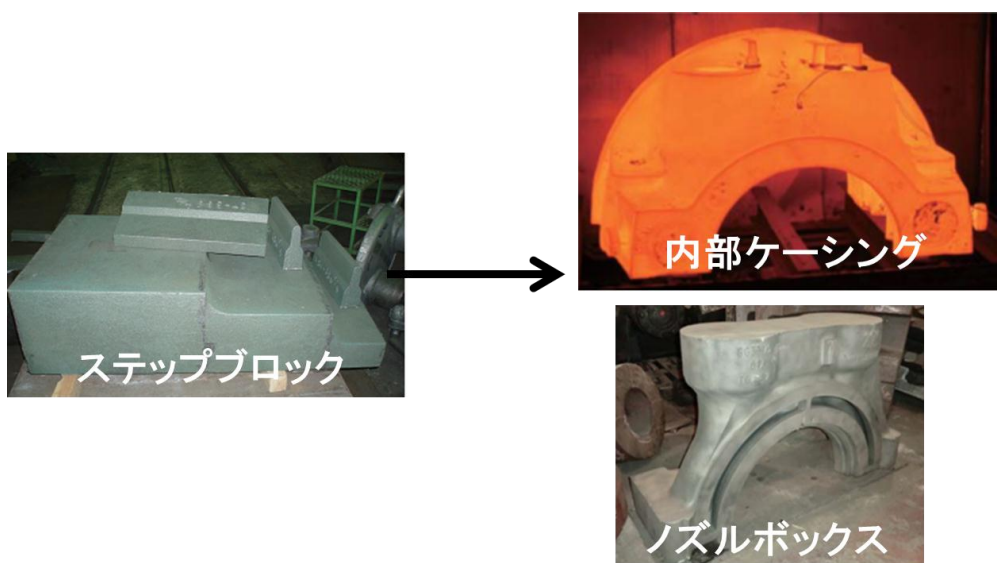


図 3-13 タービンケーシング用 Ni 基鋳物試作

#### (4) 高温弁要素技術開発

弁材料の摺動試験、水蒸気酸化試験等を実施し、700℃条件下で使用できる材料の組合せがあることを見出した。

実機高温弁の設計を実施し、鋳造による大型弁ケーシングの製造性を確認した。図 3-14 に各種高温弁、図 3-15 に試作された 9 トンの弁ケーシングを示す。

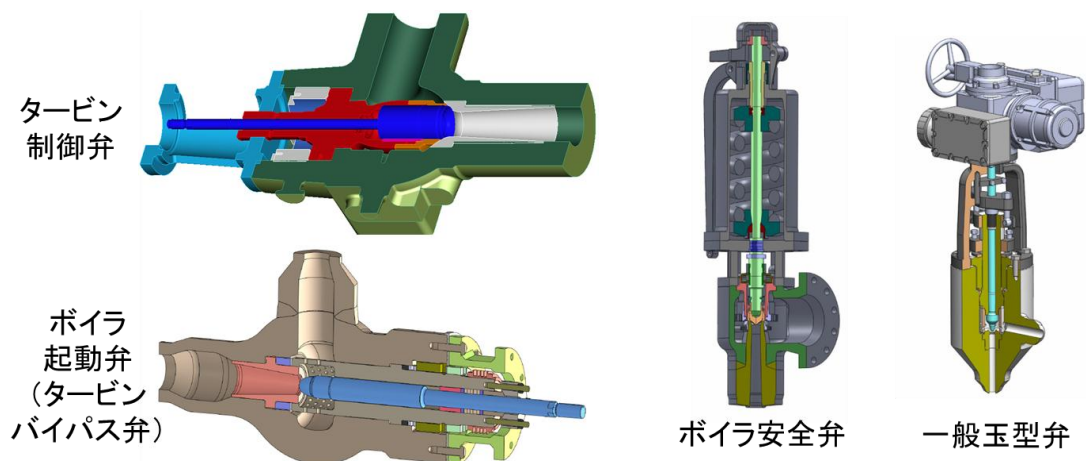


図 3-14 高温弁

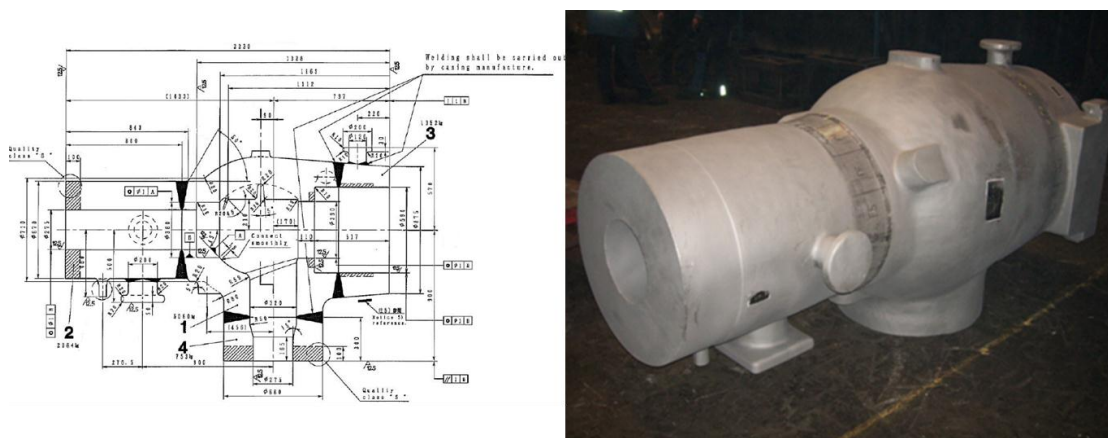


図 3-15 高温弁ケーシング(Alloy625,約 9ton)

#### (4) 実缶試験・回転試験

実缶試験・回転試験ともに基本設計を実施、完了した。

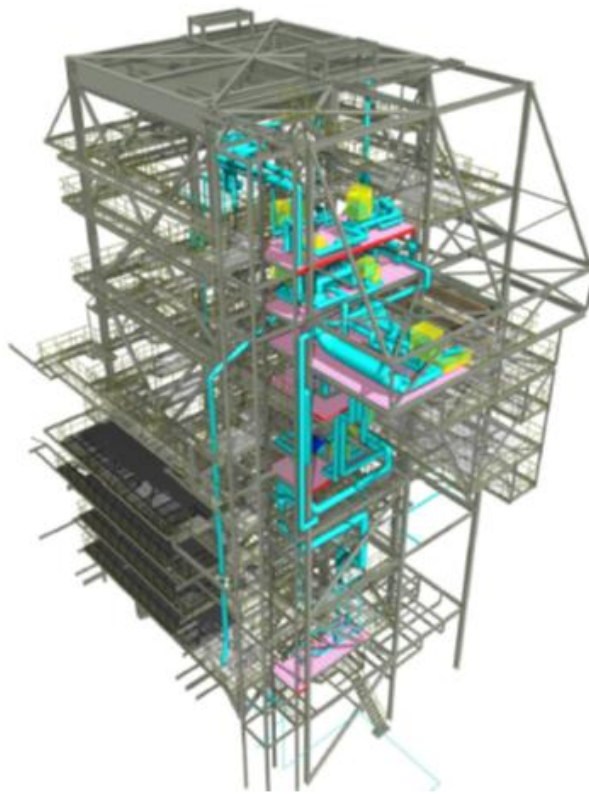


図 3-16 実缶試験装置計画図

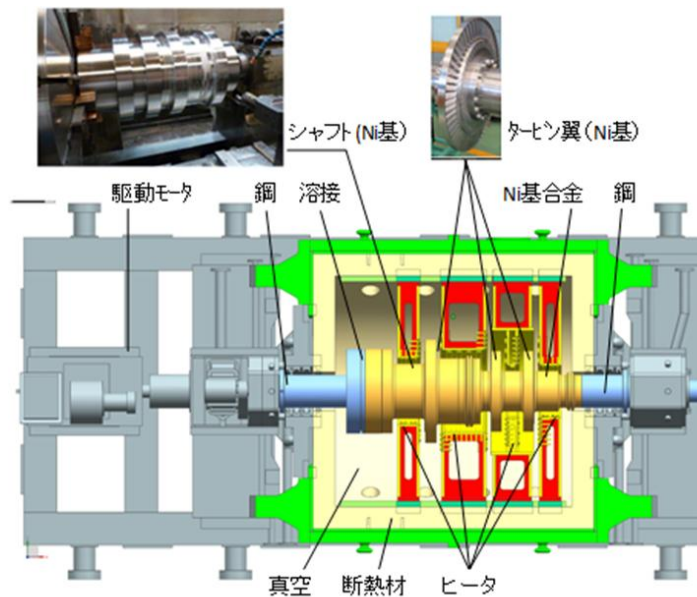


図 3-17 回転試験装置計画図

注 1 : 「一部に高い溶接割れ感受性を示す材料があった」

当初ボイラ候補材料である。Alloy617（大径管）を溶接したところ、下図に示すように溶接部の曲げテストにおいて溶接部に割れが生じた。この材料はクリープ強度を上げるために特別に成分調製されたものだった。溶接割れの結果を受けて、再度成分を調整し溶接試験を重ねた結果、割れを生じない材料成分を

見出すことができた。



図 注 1-1 曲げ試験で見出された溶接割れ

### 3-1-3 論文状況等

表 3-1-2 論文、投稿、発表リスト

|    | 題目・メディア等                                                                                                 | 時期     |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 論文 | 東芝レビュー「700℃級先進超高温蒸気タービン」                                                                                 | H20.9  |
|    | 日本機械学会会誌「次世代超々臨界圧蒸気タービンシステム」                                                                             | H20.10 |
|    | 石炭利用の最新技術と展望（書籍）「クリーンコールテクノロジーの現状と将来」、シーエムシー出版                                                           | H20.12 |
|    | 機械の研究「次世代超々臨界圧発電技術」、養賢堂                                                                                  | H20.10 |
|    | エネルギー・資源学会誌「先進超々臨界圧発電(A-USC)の開発」                                                                         | H22.3  |
|    | 富士時報「700℃級高温弁の要素技術開発」、富士電機                                                                               | H22.5  |
|    | 東芝レビュー「火力発電用蒸気タービンの高効率化技術」                                                                               | H22.8  |
|    | 三菱重工技報 Vol.48 No.3 (2011)「A-USC(700℃級先進超々臨界圧発電)の技術開発と展望」                                                 | H23.7  |
|    | 日立評論「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」                                                                         | H23.8  |
|    | 機械の研究「先進超々臨界圧発電技術の開発」、養賢堂                                                                                | H24.1  |
| 投稿 | エネルギーと動力「700℃級超々臨界圧蒸気プラント(A-USC) 技術開発状況」、日本動力協会                                                          | H21 春  |
|    | 日本機械学会誌「A-USC 先進超々臨界圧火力発電」                                                                               | H23.4  |
|    | 特殊鋼「A-USC 先進超々臨界圧火力発電技術」                                                                                 | H23.11 |
|    | 火力原子力発電技術協会協会誌「微粉炭焚き A-USC、および CCS」                                                                      | H24.10 |
|    | ターボ機械協会協会誌「A-USC の全体構想」                                                                                  | H25.1  |
|    | 溶接学会誌第 82 巻 6 号「次世代超々臨界圧火力発電(A-USC) 材料、溶接技術開発」                                                           | H25.9  |
|    | トライボロジスト (59 巻 3 号)「次世代超々臨界圧火力発電用金属材料の動向」                                                                | H26.3  |
| 発表 | 日本鉄鋼協会秋季講演大会「A-USC 技術開発」                                                                                 | H20.9  |
|    | Cleaner Coal Workshop 2009「A-USC Technology Development in Japan」、US Agency of International Development | H20.8  |
|    | 7th COALTECH 2008「Ultra-Supercritical Coal Power                                                         | H20.11 |

|                                                                                                                                                        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Generation」、APEC EXPERT GROUP ON CLEAN FOSSIL                                                                                                          |        |
| 第二回電力エネルギー技術シンポジウム「700℃級超々臨界圧（A-USC）発電技術について」、東北大学大学院工学研究科附属エネルギー安全科学国際研究センター電力エネルギー未来技術（東北電力）寄付研究部門                                                   | H20.11 |
| 高温強度部門委員会「A-USC 開発概要と蒸気タービン用材料の開発 -A-USC 開発概要-」、日本材料学会                                                                                                 | H21.2  |
| 3rd Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys for High Efficiency USC Power Plants 2009「Advanced USC Technology Development in Japan」、物質・材料研究機構    | H21.6  |
| 10th International Conference on Energy for Clean Environment「IHI's activities for CO2 reduction in Boilers」                                           | H21.7  |
| 日本鉄鋼協会秋季講演大会<br>「Ni-23Cr-13Co-9Mo-1.6Al-0.1Ta-0.3Nb 合金の機械的性質に及ぼす熱処理条件の影響」                                                                              | H21.9  |
| International Symposium on Low Carbon Technology<br>「ADVANCED USC TECHNOLOGY DEVELOPMENT IN JAPAN」、Chinese Society of Engineering Thermophysics (CSET) | H21.9  |
| Clean Coal Technology ワークショップ 2009「A-USC 技術の開発及び CCS 技術への取組み」、JCOAL                                                                                    | H21.8  |
| 火原協中部支部講演会「700℃級超々臨界圧（A-USC）プラントの開発動向について」                                                                                                             | H21.10 |
| International Conference on Power Engineering (ICOPE-09)「The Status of Advanced USC Technology Development in Japan」、日本機械学会                            | H21.11 |
| 日本機械学会講習会 No09-135「次世代超々臨界圧発電技術（A-USC）の開発状況」                                                                                                           | H21.12 |
| 第 6 回 CEE シンポジウム「A-USC の開発状況」、東京大学エネルギー工学連携研究センター                                                                                                      | H22.1  |
| 国際革新的ゼロエミッション石炭火力 CCS METI 欧州調査「A-USC の状況および豪州酸素燃焼プロジェクトの紹介」                                                                                           | H22.2  |
| 火原協関西支部講演会「低炭素化社会に向けた高効率蒸気タービンの開発動向について」                                                                                                               | H22.3  |

|  |                                                                                                                                                                                                        |        |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  | Sixth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants 「 Coal ash corrosion properties of Ni-base alloy for Advanced-USC boiler」、EPRI                              | H22.8  |
|  | Sixth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants 「 Advanced USC Technology Development in Japan」                                                             | H22.8  |
|  | 第 57 回材料と環境討論会「700℃級 A-USC ボイラ用 Ni 基系合金の高温水蒸気酸化特性」                                                                                                                                                     | H22.10 |
|  | 日本計画研究所「エネルギーの安定供給と地球温暖化防止の両立を実現する東芝の火力発電の高効率化と CO2 分離回収技術開発への取組み」                                                                                                                                     | H22.9  |
|  | 日本鉄鋼協会 ISHOC-10(Int. Sympo. on High Temperature Oxidation and Corrosion 2010<br>「 Development of Advanced Ultra Supercritical Plants in Japan - Materials and High Temperature Corrosion Properties -」 | H22.11 |
|  | 学振耐熱 123 委 耐熱金属材料の高温腐食と防食 国際シンポジウム「 Development of Advanced Ultra Supercritical Plants in Japan - Materials and High Temperature Corrosion Properties -                                                | H22.11 |
|  | 日本機械学会 第 11 回秋季技術交流フォーラム「 A-USC の取組内容と現状について」                                                                                                                                                          | H22.10 |
|  | 日本機械学会 動力エネルギーシステム部門設立 20 周年記念国際シンポジウム「 Satisfaction of Low Carbon Society - Latest Technical Approach on Coal-fired Power Plant -                                                                     | H22.11 |
|  | 日本鉄鋼協会春季講演大会<br>「Ni-19Cr-12Co-6Mo-2Al-3Ti-1W-0.05C-0.005B 合金の組織に及ぼす熱処理の影響」                                                                                                                             | H23.3  |
|  | 日本鉄鋼協会春季講演大会「A-USC ボイラ用非 $\gamma$ 強化型 Fe-30Cr-50Ni-W 合金の開発」                                                                                                                                            | H23.3  |
|  | 腐食防食協会 2011 年材料と環境研究発表会「700℃級ボイラ用 Ni 基系合金候補材の高温水蒸気酸化特性」                                                                                                                                                | H23.3  |
|  | ASME Turbo Expo 2011「Development and Strategy for A-USC Steam Turbine Cycle」                                                                                                                           | H23.6  |
|  | The 4th Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys Used for High Efficiency USC Power Plants 2011                                                                                                   | H23.4  |

|  |                                                                                                                                                      |        |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  | 「Narrow gap HST welding process and its application to candidate Fe-Ni based alloy for 700°C A-USC boiler components」                                |        |
|  | The 4th Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys Used for High Efficiency USC Power Plants 2011 「A-USC technology development project in Japan」 | H23.4  |
|  | 日本機械学会 動力エネルギーシンポジウム「700°C級蒸気タービン用材料の開発と機械的特性」                                                                                                       | H23.6  |
|  | 日本鉄鋼協会 第162回秋季講演大会<br>「Ni-0.04C-26Cr-21Co-1Al-1.9Ti-1.8Nb 合金の機械特性に及ぼす Nb、Ti の影響」                                                                     | H23.9  |
|  | 日本鉄鋼協会 第162回秋季講演大会「 $\gamma'$ 析出強化型 Ni 基超合金における $\sigma$ 相の析出とクリープ強度への影響」                                                                            | H23.9  |
|  | International Forgemasters Meeting in autumn 2011<br>「LARGEST STEAM TURBINE ROTOR EVER MANUFACTURED FROM A NICKEL BASE ALLOY」                        | H23.9  |
|  | 日本機械学会関西支部第12回秋季技術交流フォーラム「先進超々臨界圧火力発電の研究動向」                                                                                                          | H23.10 |
|  | 日本学術振興会 耐熱金属材料第123委員会回秋季講演大会「A-USC ロータ用 Ni 基超合金 TOS1X-II の開発」                                                                                        | H23.11 |
|  | NEDO 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト「A-USC プロジェクトの概要と今後の展開」                                                                                             | H24.1  |
|  | NEDO 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト「A-USC ボイラ用材料と製作技術の開発」                                                                                              | H24.1  |
|  | 2nd EPRI-NPL Workshop on Scale Exfoliation From Steam-Touched Surfaces 「Steam oxidation properties of candidate materials for 700C A-USC boilers」    | H24.1  |
|  | 九州経済産業局 第8回 九州低炭素システム研究会<br>「A-USC ボイラ候補材料とボイラ製作技術の開発」                                                                                               | H24.1  |
|  | 日本鉄鋼協会 第163回春期講演大会「タービンロータ用 Ni 基超合金の機械的性質に及ぼす熱処理条件の影響」                                                                                               | H24.3  |
|  | 日本鉄鋼協会 第163回春期講演大会「Ni 基超合金の機械的性質に及ぼす $\sigma$ 金属間化合物の影響」                                                                                             | H24.3  |
|  | 化学工学会第77年会「グリーンイノベーションに向けた次世代 A-USC ボイラの開発への取り組み」                                                                                                    | H24.3  |
|  | 石炭・炭素資源利用技術第148委員会 第132回研究会「石炭火力発電の高効率技術開発」                                                                                                          | H24.2  |

|  |                                                                                                                                                                                                                   |        |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  | 12th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures 「 Development of a Ni-based Superalloy for the Rotor Material of A-USC Turbine Power Generation」                      | H24.5  |
|  | 日本金属学会九州支部 合同学術講演会「700℃級ボイラ伝熱管向け Ni 基合金の高温腐食特性評価」                                                                                                                                                                 | H24.6  |
|  | 日本鉄鋼協会第 1 6 4 回秋季講演大会<br>「Ni-0.04C-26Cr-21Co-1Al-1.9Ti-1.8Nb 鑄造合金のクリープ強度に及ぼす偏析の影響」                                                                                                                                | H24.9  |
|  | 日本鉄鋼協会第 1 6 4 回秋季講演大会「A-USC 用 Ni 基超合金大型鍛造素材の機械的性質」                                                                                                                                                                | H24.9  |
|  | 日本鉄鋼協会第 1 6 4 回秋季講演大会「Fe/Ni 異材溶接界面の組織変化に及ぼす熱時効の影響」                                                                                                                                                                | H24.9  |
|  | IEA Clean Coal Center Workshop ‘Advanced ultrasupercritical coal-fired power plants’ 「 Advanced USC Technology Development in Japan」                                                                              | H24.10 |
|  | 第 5 6 回日本学術会議材料工学連合講演会「A-USC ボイラ材料の異材溶接部のクリープ強度」                                                                                                                                                                  | H24.10 |
|  | 日本鉄鋼協会第 1 6 5 回春季講演大会「Fe/Ni 異材溶接界面における C 拡散に及ぼす溶質元素の影響」                                                                                                                                                           | H25.3  |
|  | 日本金属学会 2013 年春季大会「700℃級 A-USC プロジェクトの現状と課題」                                                                                                                                                                       | H25.3  |
|  | 日本鉄鋼協会 2013 年秋季大会「Alloy625 大型鑄造材の析出挙動」                                                                                                                                                                            | H25.9  |
|  | 39th MPA-Seminar「 The on-going and planned activities of the A-USC project in Japan」                                                                                                                              | H25.10 |
|  | EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants 「Verification of Long-Term Creep Rupture Strength and Component, Fabricability of Candidate Ni based materials for A-USC Boilers」 | H25.10 |
|  | EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants 「Evaluation of creep rupture strength in Ni-based alloy weldments for an advanced USC Boiler」                                     | H25.10 |
|  | EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants 「Hot corrosion                                                                                                                    | H25.10 |

|  |                                                                                                                                                             |        |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  | properties of Ni-based alloys used in an advanced-USC boiler」                                                                                               |        |
|  | EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants 「Fabrication trials of Ni-based alloys for advanced USC boiler application」 | H25.10 |
|  | EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants 「ADVANCED USC TECHNOLOGY DEVELOPMENT IN JAPAN」                              | H25.10 |

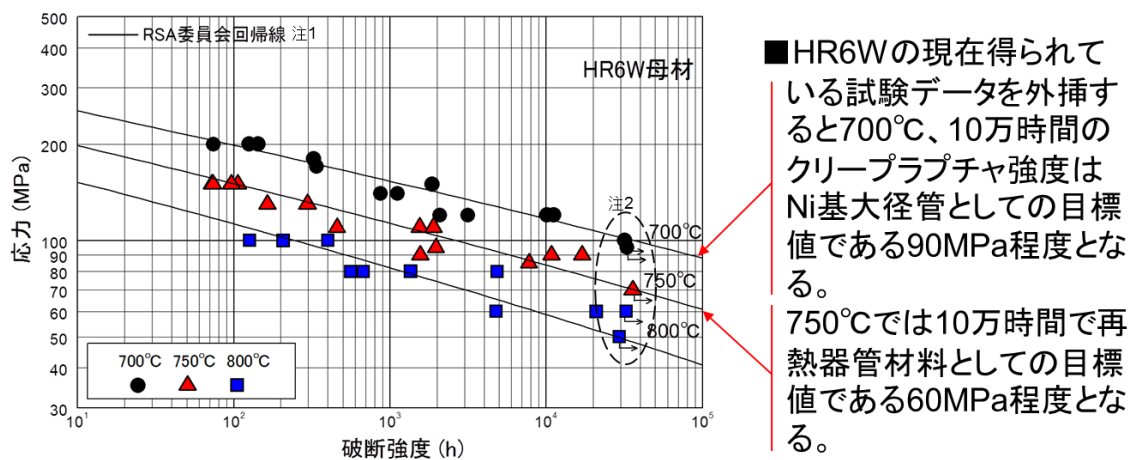
表 3-1-3 特許・論文等件数

|         | 件数 |
|---------|----|
| 論文数     | 10 |
| 学会誌等投稿数 | 7  |
| 発表数     | 59 |
| 特許件数    | 1  |

### 3-2 目標の達成度

ボイラ候補材料の HR6W に関するクリープ破断寿命を図 3-18 に示す。図中で矢印付きのデータはまだ破断せずに試験進行中であることを示している。HR6W は Ni 基合金で現在得られている試験データを外挿すると 700℃、10 万時間のクリープラプチャ強度は Ni 基大径管としての目標値である 90MPa 程度となる。さらに、750℃では 10 万時間で再熱器管材料としての目標値である 60MPa 程度となる。

図 3-19 に示す HR6W の溶接継手の寿命も母材と同等以上であり、期待通りの性能を示している。



注 1: RSA 委員会とは火力関係設備効率化技術調査委員会(発電設備技術検査協会主催)の略称であり、新材料の特性や、新技術に関する必要かつ十分な調査を実施した。回帰線は当該委員会で得られた材料クリープ破断データから得られた回帰曲線である。

注 2: 矢印は長時間クリープ破断試験を遂行中(まだ破断していない)ことを意味する。

図 3-18 HR6W 母材のクリープ寿命 (板材, ラボ FB 厚肉管, 大径管, 小径管)

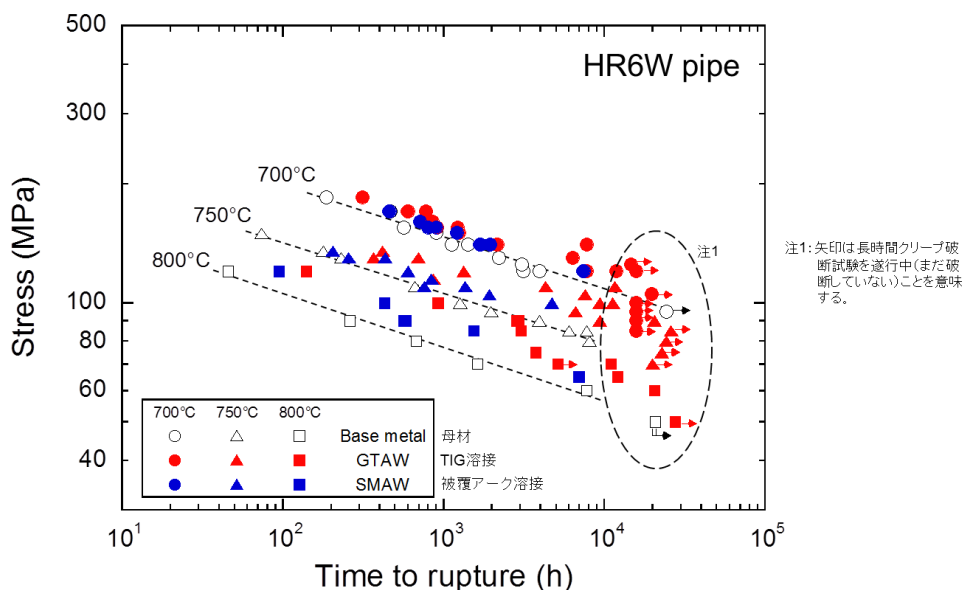


図 3-19 HR6W 溶接継手のクリープ寿命

大径管候補材料である HR35 のクリープ破断寿命を図 3-20 に示す。HR35 は Ni 基合金であり、現在得られている試験データを外挿すると 700℃、10 万時間のクリープ破断強度は Ni 基大径管としての目標値である 90MPa を優に超える。溶接継手の寿命も母材を上回っており、期待通りの性能を示している。

図 3-21 に示す HR35 の溶接継手の寿命も母材と同等以上であり、期待通りの性能を示している。

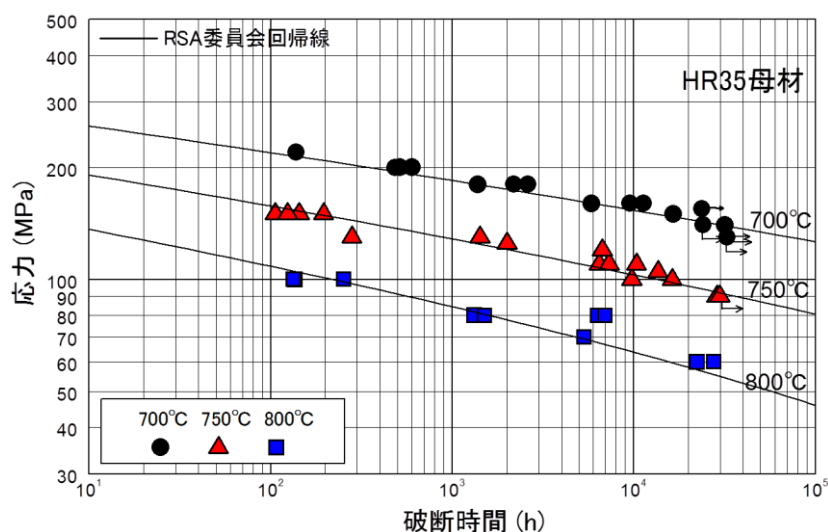


図 3-20 HR35 母材のクリープ寿命

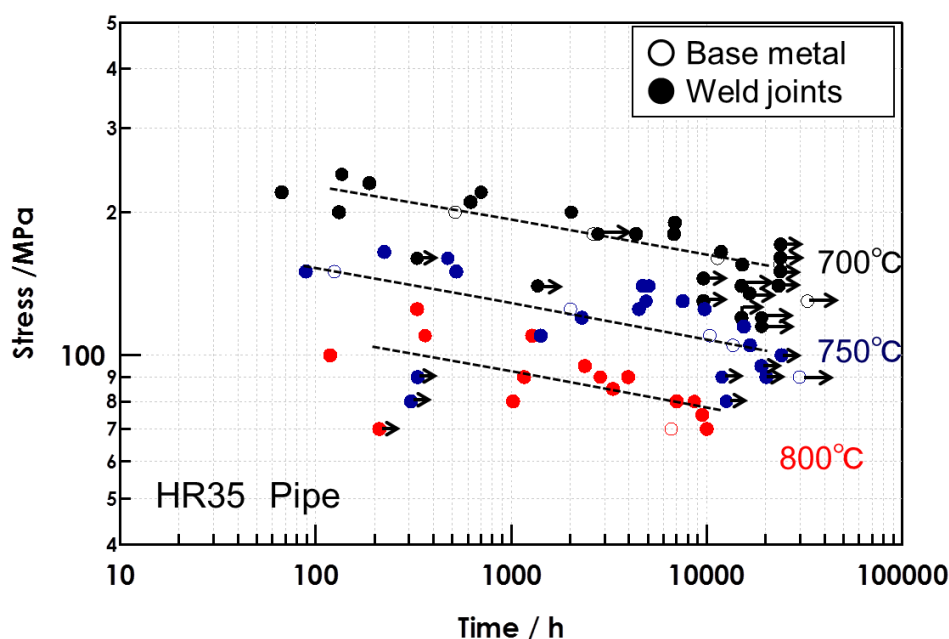


図 3-21 HR35 溶接継手のクリープ寿命

伝熱管候補材料である Alloy263 のクリープ破断寿命を図 3-22 に示す。

Alloy263はNi基合金であり、現在得られている試験データを外挿すると750℃、10万時間のクリープラプチャ強度はNi基伝熱管としての目標値である90MPaを優に超える。

図 3-23 に示す Alloy263 の溶接継手の寿命も母材と同等以上であり、期待通りの性能を示している。

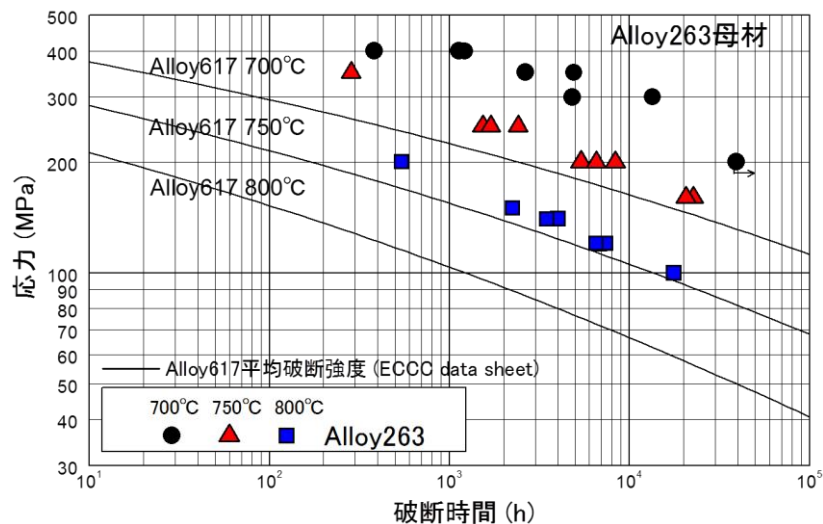


図 3-22 Alloy263 母材のクリープ寿命（板材,ラボ FB 厚肉管, 小径管）

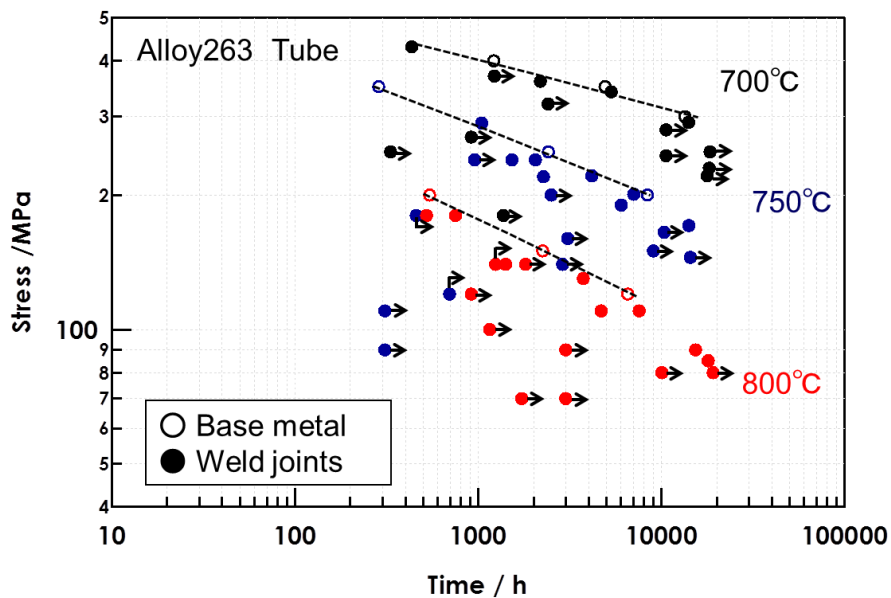


図 3-23 Alloy263 溶接継手のクリープ寿命

図 3-24 にボイラ材料の高温腐食試験結果を示す。この試験ではボイラ燃焼ガスに曝される伝熱管外表面の高温腐食を想定し、700℃の腐食環境下での材料の減量を測定している。材料のクロム含有量に対して減量をプロットしている。

候補 Ni 基系材料はどれもクロム含有量が多いので、耐腐食性が良好であることが確認された。

図 3-25 にボイラ材料の水蒸気酸化試験結果を示す。この試験では高温の水蒸気に曝される伝熱管、大径管内表面の水蒸気酸化によるスケール発生と減肉を想定し、750℃の水蒸気環境下での材料表面でのスケールを観察している。これまで 10,000 時間の試験を行ったが、候補 Ni 基系材料のスケール厚さ（各写真の中央部にある灰色の層）は全て 5  $\mu\text{m}$  程度で、現用オーステナイト鋼に比べ、スケール厚さは薄く、良好な耐水蒸気酸化性を示している。

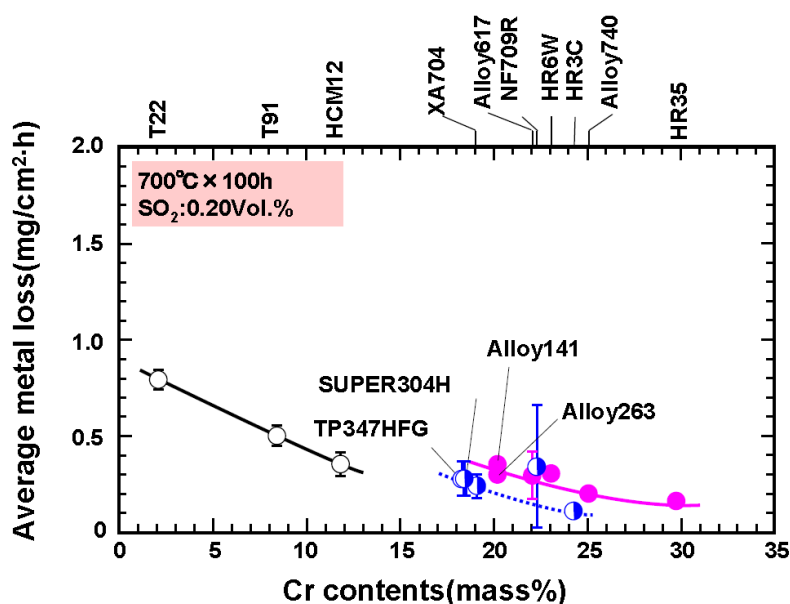


図 3-24 ボイラ材料の高温腐食

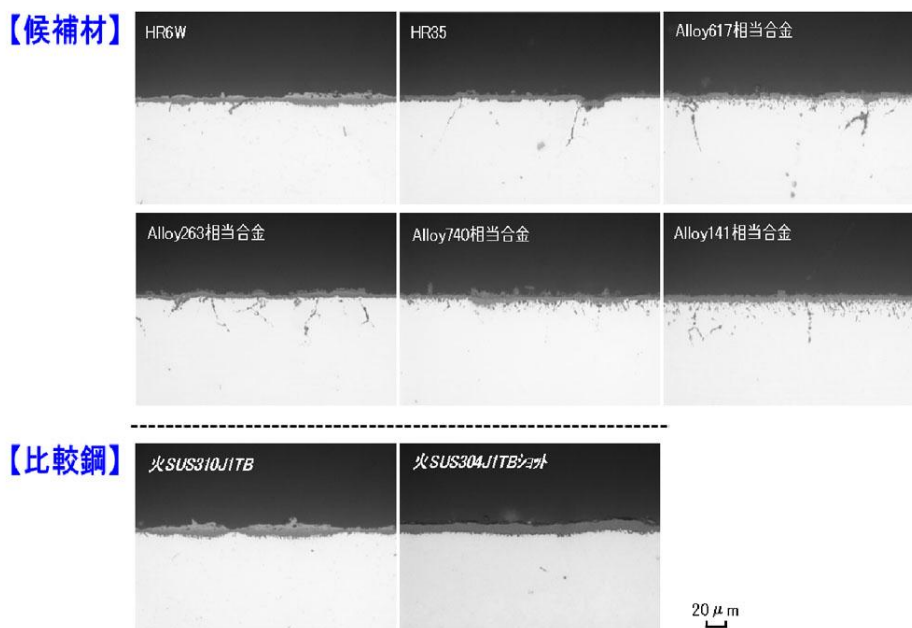


図 3-25 ボイラ候補材料の水蒸気酸化試験（750℃、10,000 時間）

タービンロータ材である FENIX700、LTES700R、TOS1X のクリープ破断寿命を図 3-26～図 3-28 に示す。TOS1X-II の開発が進められており、200MPa 程度の値を目指している。FENIX700 のクリープ破断試験は 7 万時間まで進んでおり強度は目標値（700℃×10 万時間クリープ強度 100MPa）を満足する見通しである。LTES700R、TOS1X-II のクリープ破断強度も目標値を十分満足する見通しである。

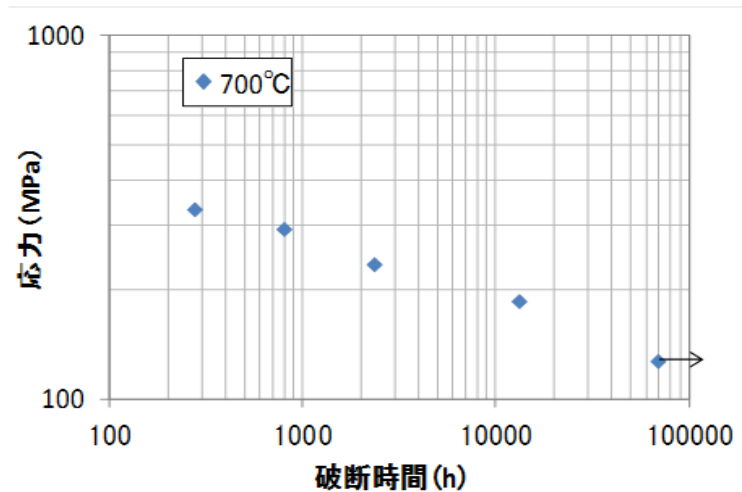


図 3-26 タービンロータ材料（FENIX700）のクリープ破断強度

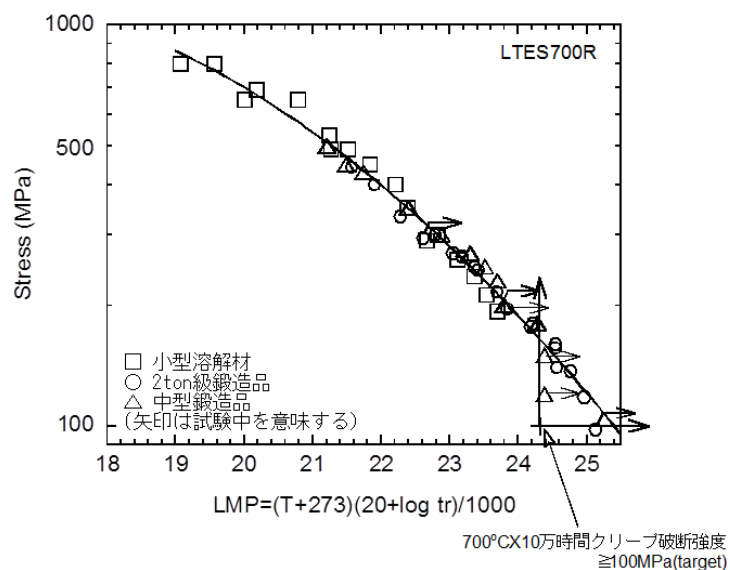


図 3-27 タービンロータ材料（LTES700R）のクリープ破断強度

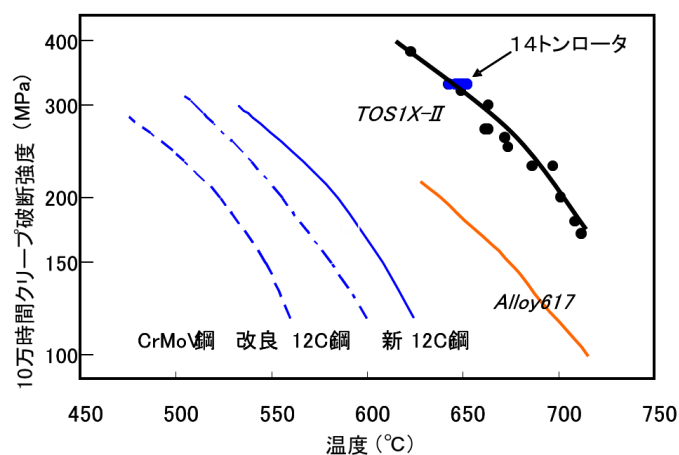


図 3-28 タービンロータ材料（TOS1X-II）のクリープ破断強度

タービンケーシング材は当初 Alloy625、Alloy617、Alloy740 を候補材として選択し、それぞれの材料で中型鋳物であるステップブロックを製作した。その結果、Alloy740 では 300mm の肉厚部にクラックが発生し、タービン内部ケーシングや弁ケーシング等さらに大型の部材を製作することが難しいと判断された。故に、以下には Alloy625、Alloy617 のクリープ破断試験状況を図 3-29 と図 3-30 に示す。Alloy625、Alloy617 のクリープ破断試験は 3 万時間程度まで進んでおり強度は目標値（700°C×10 万時間クリープ強度 80MPa）を満足する見通しである。

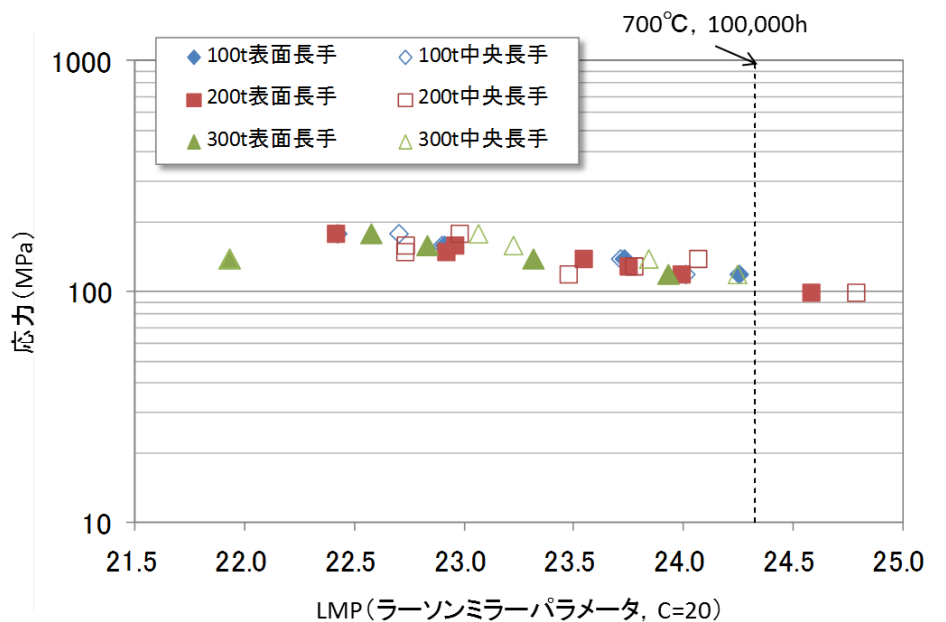


図 3-29 タービンケーシング材料（Alloy625）のクリープ破断強度

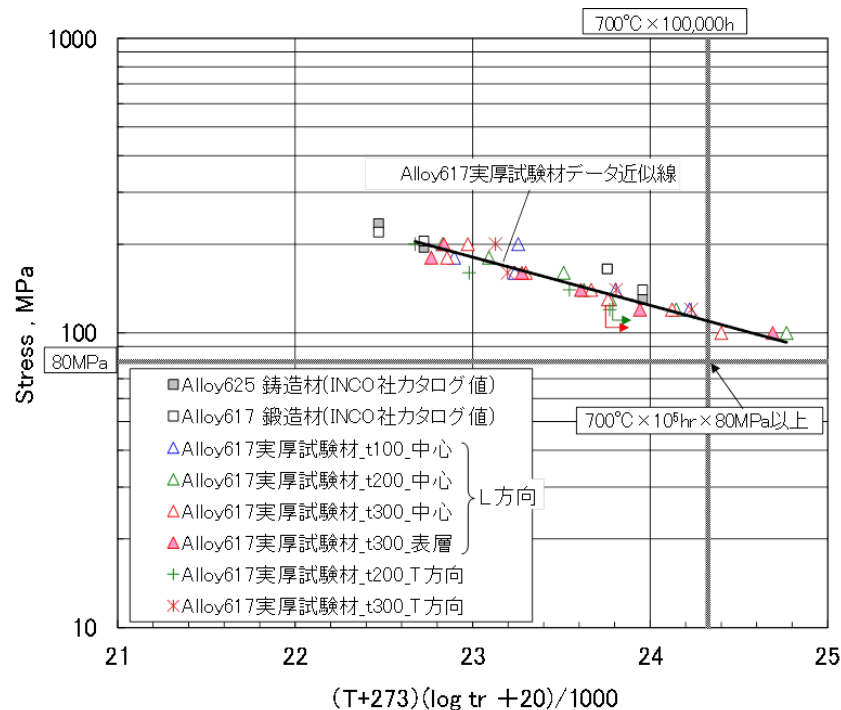


図 3-30 タービンケーシング材料 (Alloy617) のクリープ破断強度

高温弁については Ni 基合金、Co 基合金、耐摩耗コーティング材等の組合せで  $700^{\circ}\text{C}$  の環境下で摺動摩耗試験を実施した。その結果、従来材料を  $600^{\circ}\text{C}$  の環境下で摺動させた場合よりも摩耗量が少ない組合せを見出した。図 3-31 にはその結果を示す。中央の破線が従来材料を  $600^{\circ}\text{C}$  の環境下で摺動させた場合の摩耗量である。ケーシング材料である Alloy625 鑄造材のクリープ破断特性を図 3-32 に示す。強度は目標値 ( $700^{\circ}\text{C} \times 10$  万時間クリープ強度 80MPa) を満足する見通しである。

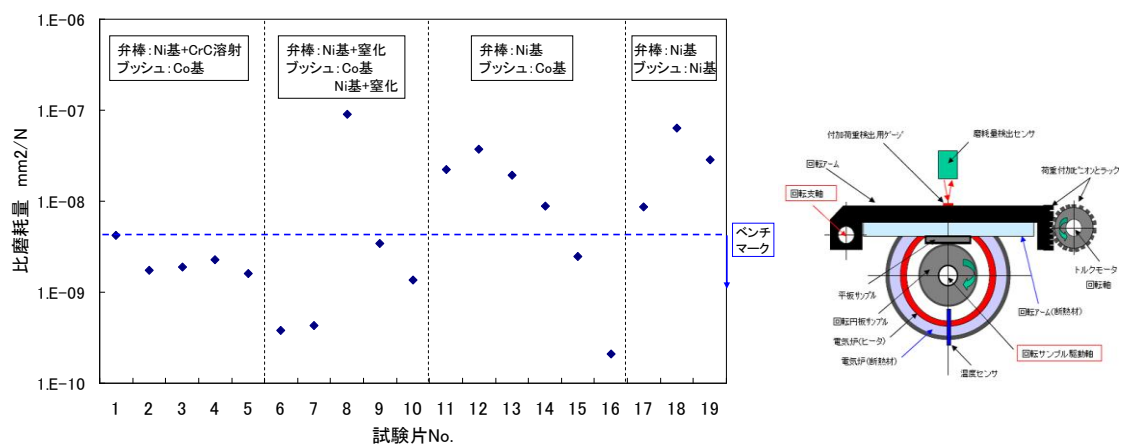


図 3-31 高温弁材料の高温摺動磨耗試験

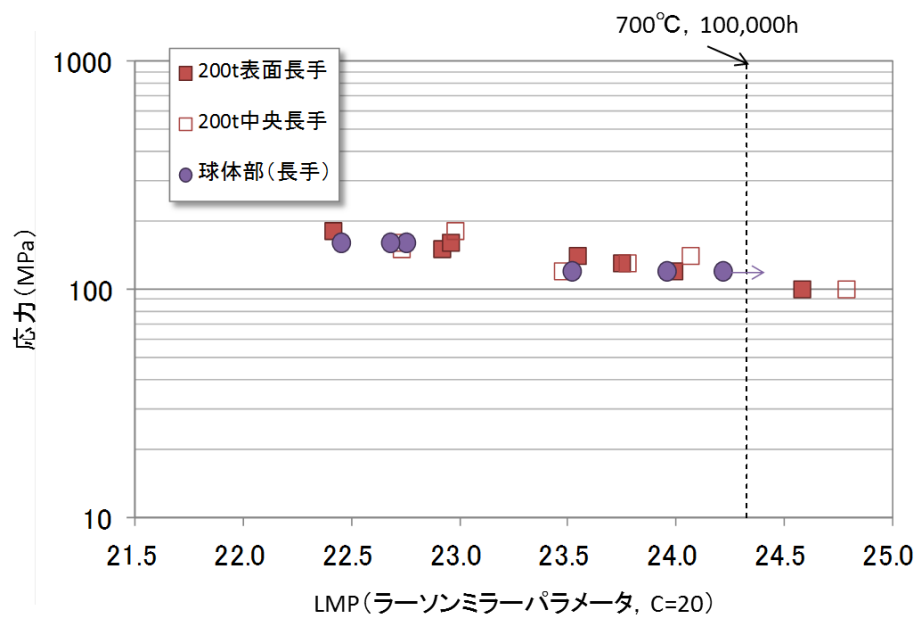


図 3-32 Alloy625 ステップブロックと試作高温弁（球体部）とのクリープ破断特性比較

これまで得られた結果を総括すると表 3-2 のようになる。

表 3-2 目標に対する成果・達成度の一覧表

| 要素技術          | 目標・指標                                            | 成果                                                                                                                         | 達成度 |
|---------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| システム設計、設計技術開発 | 基本設計、配置最適化<br>経済性検討完了                            | システム設計により熱効率 46%を確認した。<br>二酸化炭素を 10%低減しているにもかかわらず、従来の USC 並み以下の発電コストであることを確認した。                                            | 達成  |
| ボイラ要素技術開発     | 選定された候補材料で 3 万時間程度の試験からの外挿により以下目標の達成可能性を検討する。    | 6 種類の Ni 基合金と 3 種類の 9Cr 鋼を試作し、3 万時間程度の短時間材料試験を実施した。この試験結果を 10 万時間まで外挿することにより、目標を達成できる見通しが得られた。今後、実際に 10 万時間まで試験を継続し、確認をする。 | 達成  |
| タービン要素技術開発    | 候補材料を選定し、数千から一万時間程度の短時間試験からの外挿により達成の可能性を検討する。    | 6 種類の Ni 基合金と 3 種類の 9Cr 鋼を試作し、3 万時間程度の短時間材料試験を実施した。この試験結果を 10 万時間まで外挿することにより、目標を達成できる見通しが得られた。今後、実際に 10 万時間まで試験を継続し、確認をする。 | 達成  |
| 高温弁要素技術開発     | 摺動試験、水蒸気酸化試験、熱衝撃試験等の要素試験により材料選定作業を行い、最適な弁材料を見出す。 | 弁材料の摺動試験、水蒸気酸化試験等を実施し、700℃条件下で使用できる材料の組合せがあることを見出した。                                                                       | 達成  |

|           |                 |                                      |    |
|-----------|-----------------|--------------------------------------|----|
|           |                 | 実機高温弁の設計を実施し、鑄造による大型弁ケーシングの製造性を確認した。 |    |
| 実缶試験・回転試験 | 試験設備の基本設計を完了する。 | 試験設備の基本設計を完了した。                      | 達成 |

## 4 事業化、波及効果について

### 4-1 事業化の見通し

経年化していく既設の石炭火力発電所の更新には地球温暖化の観点から A-USC 技術は欠かせないものになると考えられ、二酸化炭素削減圧力が強まる中、今後本技術実用化への期待はさらに高まると推測される。また、東日本大震災の結果、石炭火力への期待は高まっていると考えられ、実用化へさらに短時間で至る道筋を探ることが必要である。

事業化に向け本研究開発に引き続き実証機の建設及び運転試験を行うことにより、システム全体の信頼性、運用性、性能、材料の健全性、環境性等を総合的に評価、検証するべきである。特に、ボイラ、タービンを接続する大径管や大型高温弁の挙動、健全性、またタービンシステムや環境性といったシステム上の問題や耐久性の確認が主たる検証項目となる。

### 4-2 波及効果

- ① 近年二酸化炭素排出量削減の観点からバイオマス燃料が脚光を浴びている。A-USC 技術による石炭とバイオマス燃料の混焼は、バイオマス燃料を効率良く利用できる一つの方法であり効果的な二酸化炭素削減に寄与する。
- ② 近年一次エネルギー確保のために調達手段の拡大の観点から重油燃料が見直されている。A-USC 技術はこのようなニーズに対しても、効果的な二酸化炭素削減技術として応えることができる。
- ③ A-USC 技術は天然ガス焚きコンバインドサイクルのボトミング条件の向上にも対応できる技術である。現在 1600℃級のコンバインドサイクルが実用化段階にあるが、排ガス温度の高温化に伴いボトミングサイクルの蒸気温度は 600℃まで高められている。将来 1650℃級、さらには 1700℃級とガスタービン温度が上昇することに伴い、ボトミングサイクルの蒸気温度も 650℃以上になることが予想され、A-USC 技術が必要となる。

## 5 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

### 5-1 研究開発計画

本研究開発においては、実証機を実現するための要素技術開発を実施する。

要素技術には「システム設計」、「ボイラ要素技術開発」、「タービン要素技術開発」、「高温弁要素技術開発」、「実缶・回転試験」がある。

前半の5年間では材料開発、評価を主体とした研究開発を行い、後半の4年間でその成果を反映した「実缶・回転試験」を実施する。

材料の長期耐久性が重要であり、9年間の事業期間を通じて「高温長期材料試験」を継続する。材料の開発目標は10万時間のクリープラプチャ強度を基準としているが、本事業期間では最大7万時間まで試験を行う。一般に10万時間のクリープラプチャ強度を予想するには3万時間のデータからの外挿が可能とされており、この手法により10万時間のクリープラプチャ強度を予測する。本事業以降も、「高温長期材料試験」を延長し10万時間試験を実施する予定である。

後半4年間の「実缶・回転試験」ではボイラで1万時間以上の耐久試験を行うことになっており、純粋な試験時間だけでも1年半を要する。その前後に試験装置製作・設置、試験結果の評価を行う。

|                  |                      |            | 2008<br>H20        | 2009<br>H21 | 2010<br>H22 | 2011<br>H23 | 2012<br>H24 | 2013<br>H25 | 2014<br>H26 | 2015<br>H27 | 2016<br>H28 | 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        | 材料改良仕様策定等   |             | 実サイズ部材試作    |             |             |             |             |        |      |         |       |     |
|                  | 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          |             |             |             |             |             |             |        |      |         |       |     |
| 実缶試験・回転試験(高温弁含む) |                      |            | 設備計画               |             |             |             |             |             |             |             |             |        | 設備設計 | 設備製造、据付 | 試験、評価 | 実証機 |

## 5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

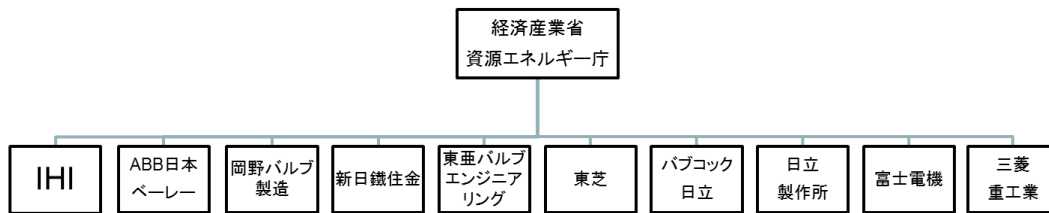


図 5-2-1 事業体制

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、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、バブコック日立、日立製作所、富士電機、三菱重工業が経済産業省からの補助を受けて共同で実施している（図 5-2-1）。また、補助事業者以外の中部電力、電源開発、電力中央研究所、物質・材料研究機構、高効率発電システム研究所も開発に貢献している（図 5-2-2）。

また、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するために「A-USC 開発推進委員会」を設置し、その下にタービン要素技術の統括するための「タービン分科会」、ボイラ要素技術の「ボイラ分科会」、高温弁技術の「バルブ分科会」、実缶試験の「実缶試験分科会」を置いた。プロジェクトリーダーは「A-USC 開発推進委員会」の議長を務める高効率発電システム研究所代表理事の福田雅文である。

電力会社、学会等からの参加を得て、毎年 1 回成果報告会を火力原子力発電技術協会主催で開催している。毎年、本成果発表会には 130 名程度の参加者を得ている。



図 5-2-2 研究開発実施体制

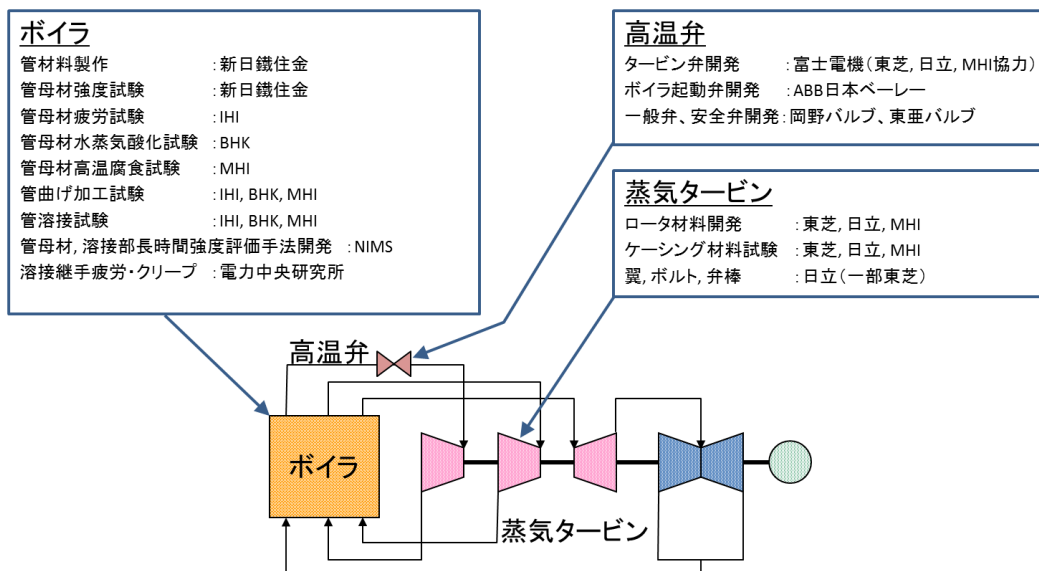


図 5-2-3 研究開発分担

### 5-3 資金配分

これまでは各社特に過不足なく推移している。  
ただし、為替が急速に円高に推移した局面において、海外に発注する物件で予算を達成できなかったケースがある。

表 5-3 資金年度配分 (単位: 百万円)

|               | 合計     | 平成20年度 | 平成21年度 | 平成22年度 | 平成23年度 | 平成24年度 | 平成25年度 | 平成26年度 | 平成27年度 | 平成28年度 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               |        | 2008年度 | 2009年度 | 2010年度 | 2011年度 | 2012年度 | 2013年度 | 2014年度 | 2015年度 | 2016年度 |
| IHI           | 1,249  | 22     | 69     | 56     | 85     | 98     | 127    | 317    | 244    | 233    |
| ABB日本ベレー      | 131    | ---    | 16     | 22     | 21     | 25     | 20     | 9      | 8      | 9      |
| 岡野バルブ製造       | 153    | ---    | ---    | ---    | ---    | 60     | 25     | 45     | 12     | 11     |
| 新日鐵住金         | 1,215  | 103    | 184    | 174    | 187    | 174    | 120    | 113    | 90     | 71     |
| 東亜バルブエンジニアリング | 233    | ---    | ---    | ---    | ---    | 60     | 26     | 123    | 13     | 10     |
| 東芝            | 2,462  | 29     | 192    | 280    | 372    | 360    | 550    | 291    | 219    | 170    |
| パプコック日立       | 1,372  | 21     | 80     | 51     | 91     | 93     | 199    | 334    | 260    | 243    |
| 日立製作所         | 2,726  | 36     | 266    | 230    | 408    | 391    | 651    | 398    | 170    | 176    |
| 富士電機          | 370    | 30     | 30     | 23     | 72     | 41     | 53     | 75     | 21     | 25     |
| 三菱重工業         | 3,552  | 53     | 228    | 279    | 415    | 352    | 516    | 695    | 563    | 453    |
| 物質・材料研究機構     | 6      | 6      | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    | ---    |
| 合計            | 13,469 | 300    | 1,064  | 1,114  | 1,650  | 1,654  | 2,287  | 2,400  | 1,600  | 1,400  |

#### 5－4 費用対効果

全世界の将来市場規模を考えると 2006 年時点の全石炭火力約 1300GW が 50 年間（プラント寿命）かけてすべて IGCC と A-USC に 50%づつ置き換わったと仮定すると、年間の A-USC 建設需要は  $1300 / 50 \times 0.5 = 13\text{GW}$  になる。

国内メーカーの市場シェアを 20%と仮定すると年間 2.6GW。

プラント建設単価を 300 千円/kW とすると年間の建設費用は 7800 億円/年。経常利益率を 5%、法人税率を 40%とすると、プラント建設会社の法人税は 156 億円/年となる。

本事業に要する費用は 9 年間で 130 億円であり、国が投入する補助金はその 2/3 の 87 億円である。将来の法人税収入はこの投入額に見合っていると考えられる。

#### 5－5 変化への対応

事業開始時点から見ると、二酸化炭素排出削減の必要性はさらに高まっている。再生可能エネルギーや原子力による削減努力がさらに必要であるが、当初述べたように、エネルギーセキュリティを確保する上で石炭の利用は引き続き必要である。このような状況下で A-USC の開発による石炭火力発電の熱効率向上は最も確実な対応策であり、その重要性は高まっている。また、排出された二酸化炭素を地中に貯留する CCS（Carbon Capture and Storage）が世界的に開発されつつあるが、CCS を石炭火力に適用すると熱効率が低下し、石炭の消費量が大幅に増す。そのため、A-USC を適用し、CCS による熱効率低下の影響を軽減することが重要であり、A-USC 技術の必要性がさらに高まっている。

