

第1回次世代電力供給システム分野に  
係る技術に関する施策・事業評価検討会  
**資料6-2-2**

**高効率ガスタービン実用化技術開発  
(AHAT)  
評価用資料**

平成25年11月13日

資源エネルギー庁電力・ガス事業部電力基盤整備課  
株式会社日立製作所

## 目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	1
1－1 事業の目的.....	1
1－2 政策的位置付け.....	1
1－3 国の関与の必要性.....	3
2. 研究開発目標.....	3
2－1 研究開発目標.....	3
2－1－1 全体の目標設定.....	3
2－1－2 個別要素技術の目標設定.....	6
3. 成果、目標の達成度.....	9
3－1 成果.....	9
3－1－1 全体成果.....	9
3－1－2 個別要素技術成果.....	10
3－1－3 特許出願状況等.....	29
3－2 目標の達成度.....	29
4. 事業化、波及効果.....	32
4－1 事業化の見通し.....	32
4－2 波及効果.....	38
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	39
5－1 研究開発計画.....	39
5－2 研究開発実施者の実施体制・運営.....	40
5－3 資金配分.....	41
5－4 費用対効果.....	42
5－5 変化への対応.....	42

## 1. 事業の目的・政策的位置付け

### 1－1 事業目的

平成23年3月の東日本大震災の後、原子力発電所の多くが停止されており、我が国の発電電力量の約9割が火力発電によるものとなっている。その発電効率は40.9%（平成17年度一般電気事業者の平均発電端熱効率）と既に世界最高レベルに達している。しかし、資源の乏しい我が国のエネルギーセキュリティの確保に関する問題及び近年の地球環境問題双方への対応から火力発電所は、環境に配慮した更なる発電効率向上への取組が求められている。

エネルギー資源の中で天然ガスは、東南アジアを中心に世界各国に幅広く分布しており、我が国のエネルギーセキュリティを確保する上で極めて重要な燃料である。また、他の化石燃料に比べ、燃焼時における二酸化炭素排出量が少ないため、環境負荷の少ないクリーンなエネルギーと言える。そのため、火力発電所における天然ガスの利用拡大を図るため、既設火力発電所に比べて二酸化炭素排出量の削減が多く見込まれる高効率ガスタービンの技術開発を推進していくことが強く求められている。

本事業で研究開発する高湿分空気利用ガスタービンAHAT<sup>\*1</sup>（以下、「本技術」）はこのような必要性に応える高効率ガスタービン技術であり、中小容量機（10万kW程度）の高効率化（45%（HHV）既設複圧CC<sup>\*2</sup>→51%（HHV）以上）を目標としている。AHATは1980年に日本で考案されたHAT<sup>\*3</sup>システムが基礎になっており、電力事業用に改良を加えた日本オリジナルの技術である。

世界初となるAHATの実用化に必要な技術開発を行い、世界をリードしていくことが本事業の目的である。

\*1 アドバンスト高湿分空気利用ガスタービン：Advanced Humid Air Gas Turbine

\*2 コンバインドサイクル：Combined Cycle

\*3 高湿分空気利用ガスタービン：Humid Air Gas Turbine

### 1－2 政策的位置付け

平成20年3月に閣議決定された「Cool Earth－エネルギー革新技術計画」（経済産業省）において、高効率ガスタービンは、二酸化炭素排出量を抑制できる高効率天然ガス発電であり、「重点的に取り組むべきエネルギー革新技術」の一つとして位置付けられている。また、同計画で示されたロードマップにおいて、AHAT（高湿分空気利用ガスタービン）は、2020年代に実用化を目指す技術として位置付けられている。

「技術戦略マップ」（平成22年6月14日、経済産業省）において、AHATは中小容量機の新設およびリプレースによるエネルギー効率向上できることから「総合エネルギー効率の向上」、天然ガスの有効利用の観点から「化石燃料の安定供給とクリーン・有効利用」に寄与する技術の一つとして位置付けられ

ている。

さらに、エネルギー基本計画(平成 22 年 6 月 18 日、経済産業省)において、「その他の火力発電については、新增設・更新の際には、原則としてその時点における最先端の効率を有する設備の導入を目指す。」と謳われており、AHAT はリプレースにおける中小容量機のエネルギー効率向上に努めることができる技術である。

AHAT と他の発電システムの関連づけとしては、平成 16 年 6 月にとりまとめられた、(財) エネ総工研の「電力分野産業技術戦略」に関する動向調査報告書において(図 1-2)、AHAT はガスタービンサイクルを改良したシステムであり、比較的早期に実用化が期待できる高効率発電システムである。また、次世代高効率発電システムである石炭ガス化と組み合わせた IGHA T へ展開できる技術であると位置づけられている。

## ① 高効率天然ガス火力発電

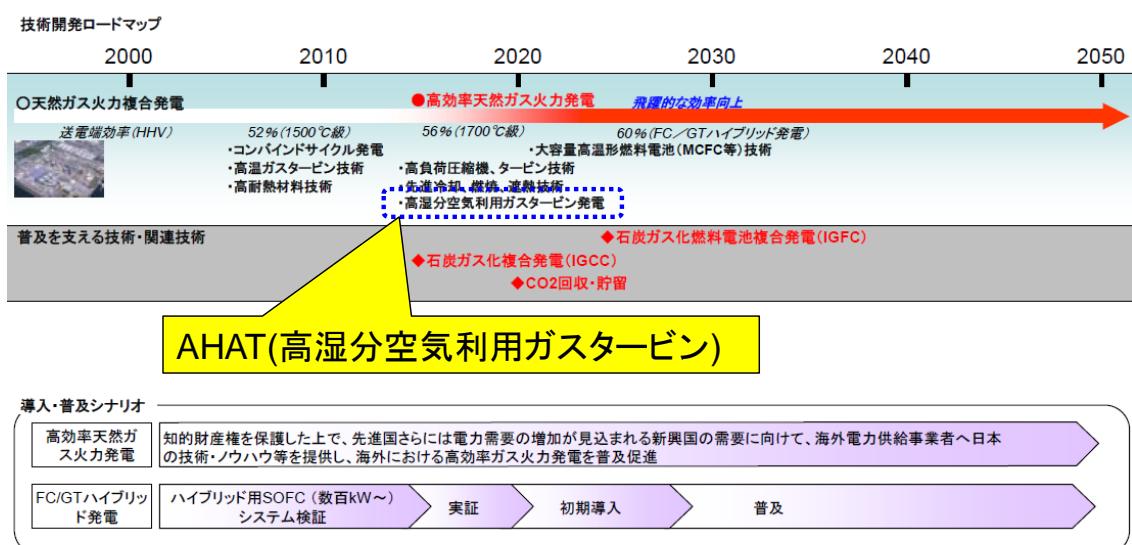
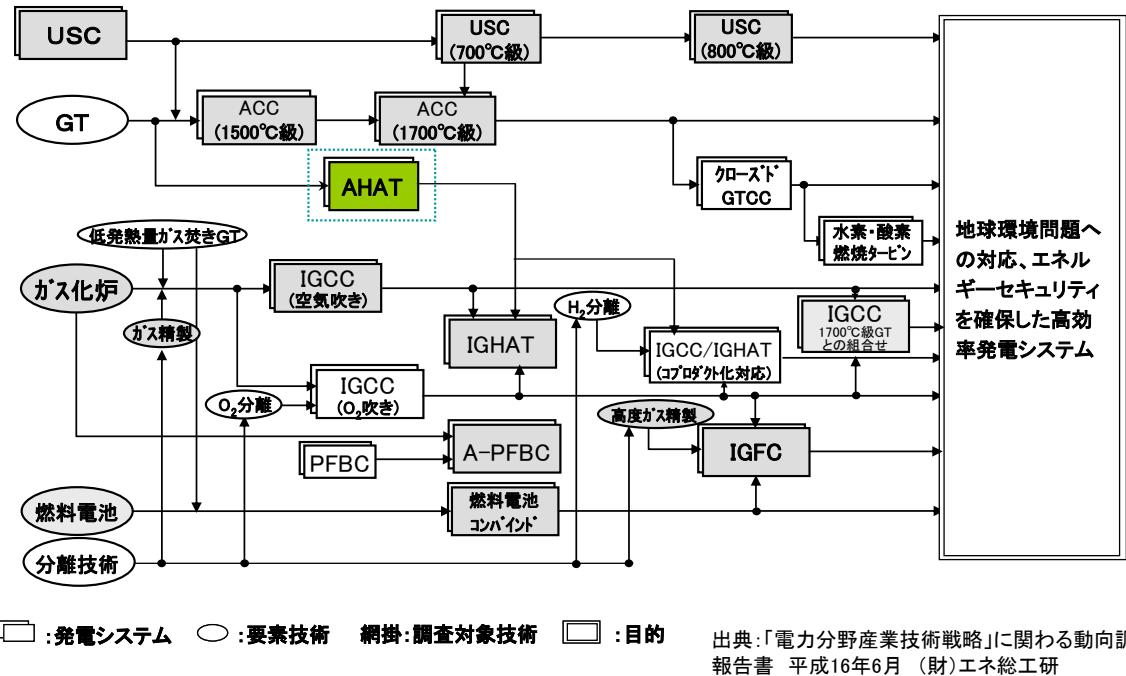


図 1-1 「Cool Earth - エネルギー革新技術計画」(平成 20 年 3 月、経済産業省)におけるロードマップ



出典:「電力分野産業技術戦略」に関する動向調査  
報告書 平成16年6月 (財)エネ総工研

図 1－2 各種発電システムにおけるAHATの位置づけ

### 1－3 国の関与の必要性

AHATは、世界初、新型ガスタービン発電システムである。増湿装置、再生熱交換器など新たな機器を統合した全体システム特性や、高湿分圧縮機、高湿分燃焼器、高湿分冷却翼などで構成されるAHATに適合したガスタービンは、未知なところが多く世界初の難度が高い技術である。民間企業だけでは開発リスクを伴うため、国の関与のもとで実用化技術開発を推進することで民間企業だけでは達成し得ない世界をリードする技術を確立することができる。

本技術を実用化することで、天然ガス利用促進によるエネルギーセキュリティ確保と高効率化によるCO<sub>2</sub>削減を実現できるため社会的意義が高い。一方で、開発リスクの大きい技術であることから、国の主導・支援による事業とし、民間はそれぞれ優位技術をもつ複数社で構成している。

## 2 研究開発目標

### 2－1 全体の目標設定

#### (1) AHATの概要

AHATは、ガスタービン本体の圧力比、燃焼温度の上昇により効率上昇を狙うのではなく、システムの熱回収の工夫により高効率を達成する新型ガスタービン発電システムであり、その概略系統を図2-1左に示す。ガスタービン圧縮機に吸気噴霧システムを採用している。吸気噴霧冷却による吸込み空気量の増加、圧縮機内部で液滴蒸発させることにより圧縮機動力低減の効果を狙っており、夏場の出力低下も抑制できる。圧縮機で加圧された空気は、増湿塔にて

温水と直接接触することにより蒸気タービン蒸気量に匹敵する量を加湿する。再生熱交換器で熱回収した高湿分空気は燃焼器に供給される。加湿により出力増加し、再生サイクルにより排ガスの熱を回収し熱効率が向上する。高湿分空気はNO<sub>x</sub>低減に大きな効果が期待できる。また、排ガス中の湿分と凝縮潜熱の一部を回収して再利用する水回収装置を有しており、水の消費量を抑制している。回収した水は、増湿塔に供給するとともにその一部を冷却して水回収器に再循環させている。

図2-1右に、コンバインドサイクルの概略系統を示す。コンバインドサイクルでは、ガスタービンと蒸気タービンの2台で動力を発生し高効率化している。AHATでは①噴霧器、②増湿塔、③再生熱交換器を設置し、ガスタービン1台で動力を発生し高効率化を図っている。

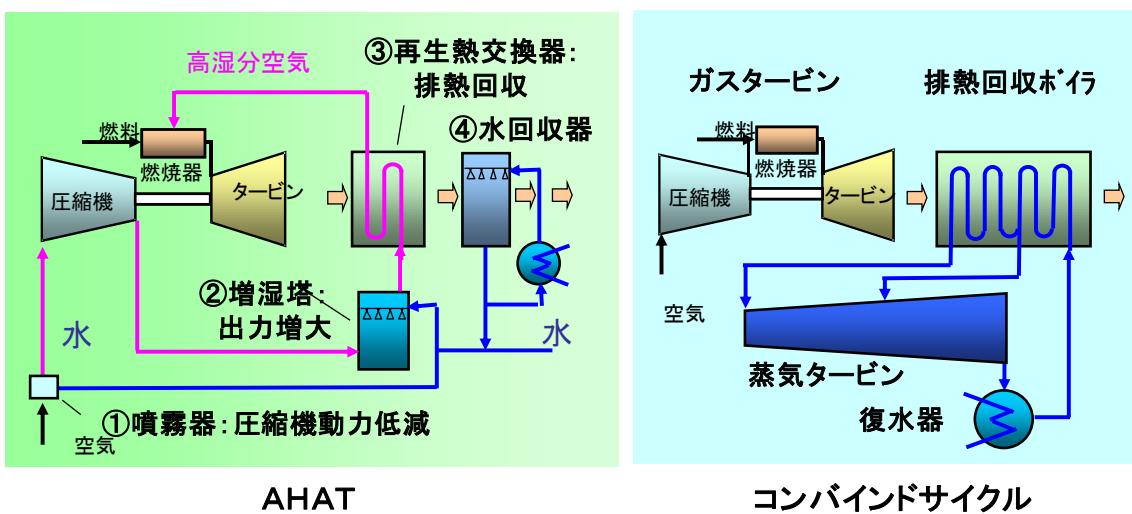


図2-1 AHATおよびコンバインドサイクルの概略系統

図2-2に各種発電システムの出力一効率特性を示す。AHATは、コンバインドサイクルの蒸気ボイラの構成が複圧程度である~200MW以下の中小容量クラスで他発電システムよりも高い効率を得ることができる。

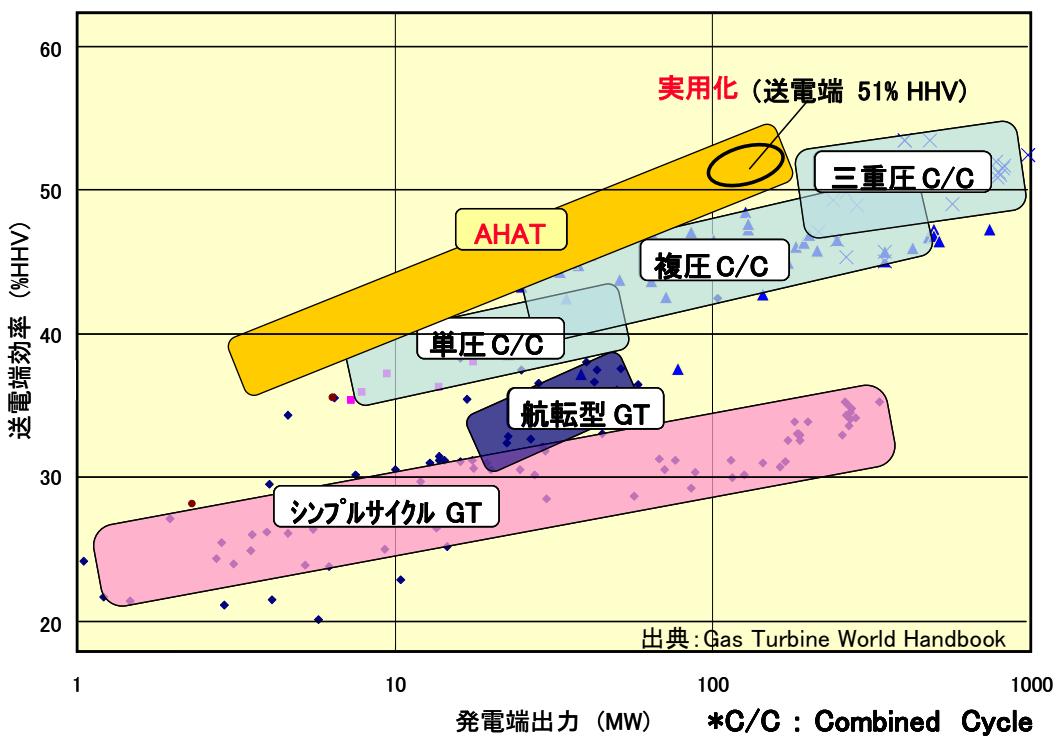


図 2-2 各種発電システムの出力—効率特性

表 2-1 にコンバインドサイクルとの特徴比較を示す。

まず、運用性に関して、蒸気タービンや排熱回収ボイラの暖機運転が不要のため起動時間が短くできる。高湿分燃焼により NO<sub>x</sub> 低減できるため、低負荷で加湿開始することで運用負荷帯を広くすることができる。吸気噴霧冷却により高気温時の出力低下を抑制し大気温度特性が改善し、制御もガスタービン制御が主でシンプルである。

環境性については、高湿分燃焼により低 NO<sub>x</sub> を図り、脱硝のためのアンモニア消費をなくす、もしくは消費を抑制できる。また、AHAT は 60°C 程度の比較的高い温度の回収水を 30°C 程度に冷却するので、冷却方式に空冷のクーリングタワーを使用することができる。コンバインドサイクルでは蒸気タービン出口で 30°C 程度と低温であり空冷では設備が大規模になるため、海水を用いた復水器を使用している。AHAT では復水器がないので沿岸でなければならないなどの設置場所の制約がなく、内陸部にも設置可能である。

経済性については、蒸気タービン系統が無いので構成がシンプルで工期も短く、メンテナンス費用も少なくできる。配管、水質管理、ユーティリティ消費がコンバインドサイクルと同等とみなしたとしても、AHAT は運用性、環境性、経済性に優れたシステムであるといえる。

表2－1 AHATとコンバインドサイクルとの特徴比較

◎:特に優位 ○:優位 -:同等

項目	AHAT	コンバインドサイクル
運用性	起動時間 ◎ ST系なく、起動時間短い	ST HRSG暖機要
	負荷即応性 ◎ GT単独運転並み	ベース
	最低負荷 ◎ 高湿分燃焼により低負荷で運転可能	低 NOx 安定燃焼の制限
	大気温度特性 ○ 吸気噴霧冷却:高気温時の出力低下小	GTおよびST出力低下
	制御 ○ GT制御が主でシンプル	GT、ST制御あり
環境性	NOx対策 ○ GT:高湿分空気燃焼、GT排気:必要に応じ脱硝装置	GT:低NOx燃焼器、又は、水噴射、又は蒸気噴射、GT排気:脱硝装置
	立地制約 ◎ 水回収水温60°C程度:冷却塔冷却 内陸部にも設置可能	ST出口温30°C程度:復水器冷却 沿岸(海水への温排水)
経済性	機器構成、工期 ◎ ST系なく、構成シンプルで工期も短い	ベース
	配管 - GT圧縮機吐出圧力低く、薄肉 ただし、再生サイクル配管径大	HRSG 高圧系圧力高く、肉厚 ただし、主蒸気配管径小
	水質管理 - 水処理装置(イオン交換樹脂等)設置	薬注による pH調整
	ユーティリティ消費 - 純水(圧縮機吸気噴霧冷却用)、アンモニア(脱消用)、冷却水(冷却塔補給用)	純水(HRSGプロー補給用)、 アンモニア(脱消用)、冷却水(補給用)
	メンテナンス費用 ○ 構成機器少ない(排熱回収系、水回収系)	排熱回収系、ST系、復水器系

GT:ガスタービン、ST:蒸気タービン、HRSG:排熱回収ボイラ

## (2) 開発目標の設定

AHATの最終目標は、天然ガスを燃料とした10万kW級中容量高湿分空気利用ガスタービンシステムにおいて、送電端効率 51%、NOx排出濃度 10ppm以下(16%O2)を達成することにある。

これを達成するための本事業におけるAHATの研究課題を図2-3に示す。①～④は高湿分空気に関係した実用化技術課題であり、⑤は3MW級検証機を活用して検討を進める課題である。また、⑥にて実用化技術(①～④)を組合せた総合試験装置による機器の相互作用確認し、⑦にてユーザー視点に立ったシステム評価を実施する。

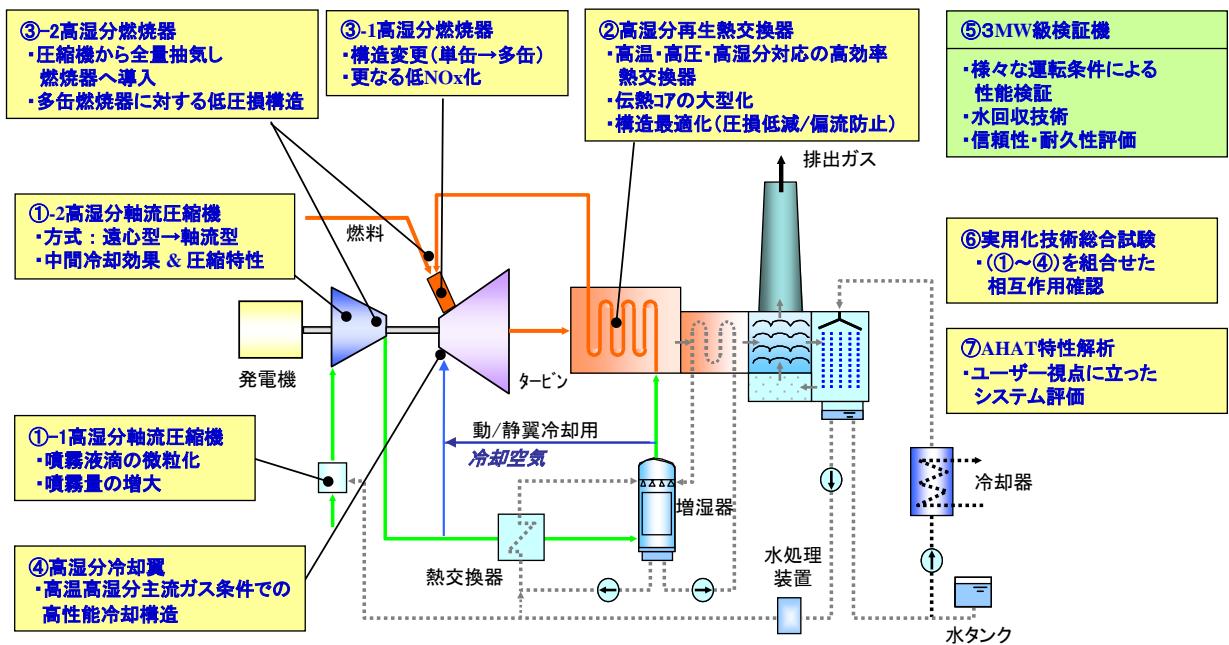


図 2-3 AHAT の研究課題

最終目標を達成するために開発すべき革新的技術の内容とその具体的な数値目標を以下に示す。

### ①高湿分軸流圧縮機

○目標値：噴霧量 3.5wt% 以上

圧縮機に 2% 以上の噴霧をした例は無く、それ以上の量の噴霧では、圧縮機内部での蒸発により中間冷却の効果がえられるが、従来には無い、圧縮機のサーボング、圧縮器の翼段毎の負荷分布の変化を考慮した設計が必要となる。また、圧縮器内部で液滴を蒸発促進させるため、液滴微粒化技術も開発する必要がある。

### ②高湿分再生熱交換器

○目標値：温度効率 90% 以上、伝熱面密度 1000m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> 以上

再生熱交換器には、高温、高圧かつ高湿度の環境で、ガスタービンの起動停止、負荷変動に伴う温度・応力が変動する条件で充分な耐久性と高い温度効率が必要。小型ガスタービンでは実用化されているが、それ以上のサイズでは実用化の例は僅かで(軍事用 WR-21(約 20MW)が最大)、更なる大容量にむけては伝熱面密度を上げ、コンパクトにする必要がある。高温、高圧かつ高湿度条件下で、充分な耐久性を持つ再生熱交換器を開発する必要がある。

### ③高湿分多缶燃焼器

○目標値： NOx 10ppm 以下

再生熱交換器の作用により、燃焼用空気が高温となる条件下では、燃焼器内の空間的温度分布が高温となり、低 NO<sub>x</sub> 化が難しくなる。さらに、高湿分空気の燃焼では、湿分の影響により、着火性、燃焼安定性の確保が難しくなる。高温、高湿分条件下で、燃焼安定性と低 NO<sub>x</sub> 化を両立する高湿分多缶燃焼器を開発する必要がある。

#### ④高湿分冷却翼の開発

○目標値：冷却効率静翼：70%以上、動翼：60%以上

AHAT では、タービンの作動流体である主流ガスが約 20~25vol% の湿分を含んでおり、タービン翼との熱伝達率が大きいことと、比熱比  $\gamma$  が小さいことからタービン排ガス温度が従来ガスタービンよりも高温となる傾向がある。そのようにタービン翼の熱負荷が大きい状況で、冷却空気の使用量を低減するために増湿塔出口の低温の高湿分空気を用い、必要な温度まで翼材料を冷却する高湿分冷却翼の開発する必要がある。

#### ⑤3 MW 級検証機

○目標：プラント側の特性把握

3 MW 機試験を実施し、AHAT システム特性、機器の性能向上、主要機器の経年変化を確認する。

#### ⑥実用化技術総合試験装置

○目標：発電用ベビーデューティーガスタービンに AHAT を適用

開発した要素技術を組合せ、高圧、高湿分環境における高湿分軸流圧縮機、高湿分再生熱交換器、高湿分多缶燃焼器、高湿分冷却翼の相互作用を確認する。

#### ⑦AHAT 特性解析

○目標：ユーザ視点からのシステム評価

開発側のみならず、ユーザの視点に立って客観的に特性を評価する。

これらをまとめたものを表 2-2 に示す。

表2－2 AHATの研究目標・指標

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
①高湿分軸流圧縮機	・吸気噴霧量:3.5%以上	圧縮機内部での水滴蒸発効果を積極的に活用できる噴霧量を設定した。
②高湿分再生熱交換器	・温度効率:90%以上 ・伝熱面密度:1000m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 以上	熱交換器のコアの大型化(コスト)と性能を勘案して設定した。温度効率90%は高温で作動する再生器にとって極めて高い値に相当する。
③高湿分多缶燃焼器	・NOx:10ppm以下	高湿分空気による燃焼では燃焼の不安定化が懸念される、低NOxと燃焼安定性の両立を勘案し設定した。
④高湿分冷却翼	・冷却効率 静翼:70%以上 動翼:60%以上	高湿分により主流ガス側の熱伝達率が大きくなり熱負荷が増大することを勘案し設定した。
⑤3MW級検証機	・AHATプラント側の特性把握	3MW機試験を実施し、AHATシステム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化を確認する。
⑥実用化技術総合試験	・発電用ヘビーデューティーガスターインにAHATを適用	開発した要素技術を組合せ、高圧、高湿分環境における高湿分軸流圧縮機、高湿分再生熱交換器、高湿分多缶燃焼器、高湿分冷却翼の相互作用を確認する。
⑦AHAT特性解析	・ユーザ視点からのシステム評価	技術開発においては、開発側のみならず、ユーザの視点に立って客観的に特性を評価することが重要。

### 3 成果、目標の達成度

#### 3－1 成果

##### 3－1－1 全体成果

3MW級検証試験および3MW級検証機評価は、平成21年度で完了している。3MW級検証機では大気温度特性、起動、部分負荷性能、水回収性能などの運転特性を取得し性能評価した。また耐久性、信頼性にかかる機器の経時変化を取得し、試験期間中、正常な状態を維持できていることを確認した。

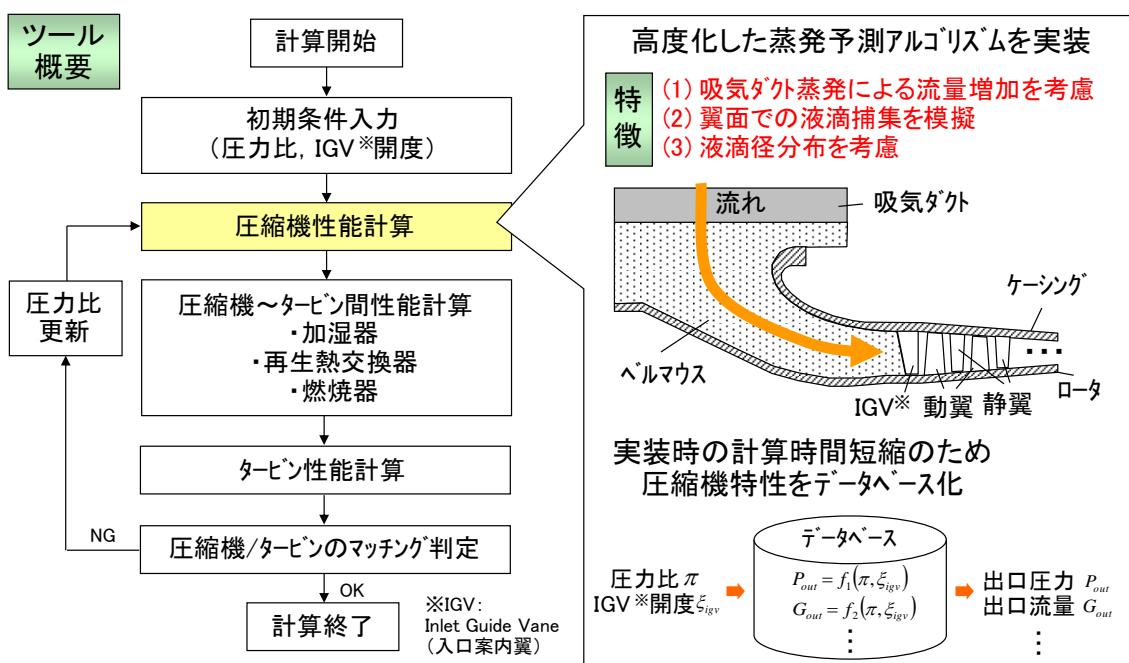
技術開発要素である高湿分圧縮機、高湿分再生熱交換器、高湿分多缶燃焼器、高湿分翼冷却についてはそれぞれの目標を達成し、平成22年度に完了した。

実用化技術総合試験は、平成24年1月から運転開始し、平成24年2月に50%負荷まで到達した。吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼など要素機器の相互作用と性能を確認するとともに、定格出力に到達するための課題を摘出した。

### 3-1-2 個別要素技術成果

#### (1) 高湿分圧縮機（図3-1-A参照）

軸流圧縮機噴霧冷却性能予測アルゴリズムとタービン性能予測アルゴリズムを連携させたガスタービンヒートバランス予測ツールを開発し、実用化技術総合試験装置設計に適用した。吸気部の蒸発や圧縮機内での液滴の捕集、および液滴径分布（多分散性）を考慮したモデルをアルゴリズムに組み込むことで高度化し、より詳細な圧縮機内部蒸発特性の予測を可能にした。



開発した性能予測手法は、40MW級総合試験装置の高湿分軸流圧縮機を設計に用いられた。性能予測結果から、吸気噴霧時には液滴蒸発によって圧縮機内部の負荷分布が変化し、圧縮機後段負荷が増加する傾向にあることが明らかになった。このため通常の圧縮機に比べて、蒸発完了段より後段側の静翼の取付角（スタッガ角）を1degから4deg増加させて後段の翼負荷を減少させることで、信頼性を確保することとした。

平成23年度には、40MW級総合試験装置を用いた吸気噴霧試験を合計4回実施した。試験では最大1.7%（吸込空気質量比）の噴霧を実施し、冬季の特性データを取得した。試験結果（表3-1-B、図3-1-C、図3-1-D）から、噴霧時は液滴蒸発によって圧縮機入口および出口温度が低下し、圧力比や流量の増加、および圧縮動力低減といった性能向上効果が得られることを確認した。さらに、開発した性能予測手法の妥当性も確認された。

さらに性能予測手法を用いて計画噴霧量（3.5%（吸込空気質量比））の性能予測を実施した。性能予測結果（図3-1-E）から、3.5%噴霧時でも噴霧液滴は

全量蒸発し、翼負荷等の信頼性に問題がないことを確認した。

表 3－1－B PHASE II 試験結果

項目	単位	内容
噴霧量	wt%	1.7
吸気温度低下量	°C	1.6
出口温度低下量	°C	36.7
吸込流量(DRY比)	-	1.018
圧力比(DRY比)	-	1.011
単位流量当たりの 圧縮動力(DRY比)	-	0.970

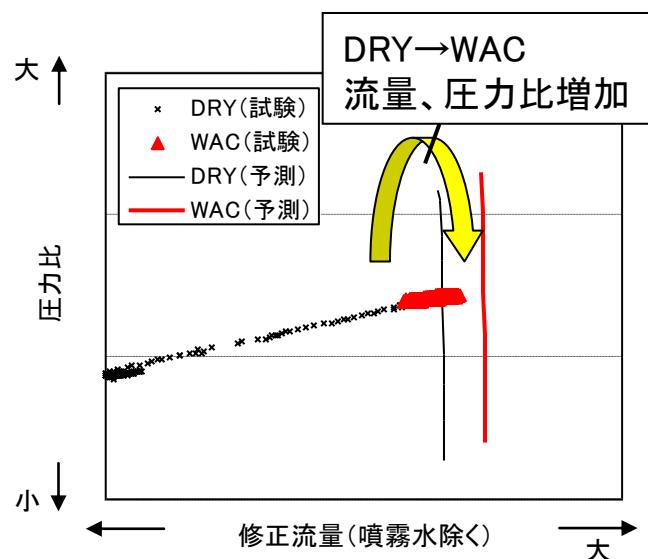


図 3－1－C 圧縮機特性

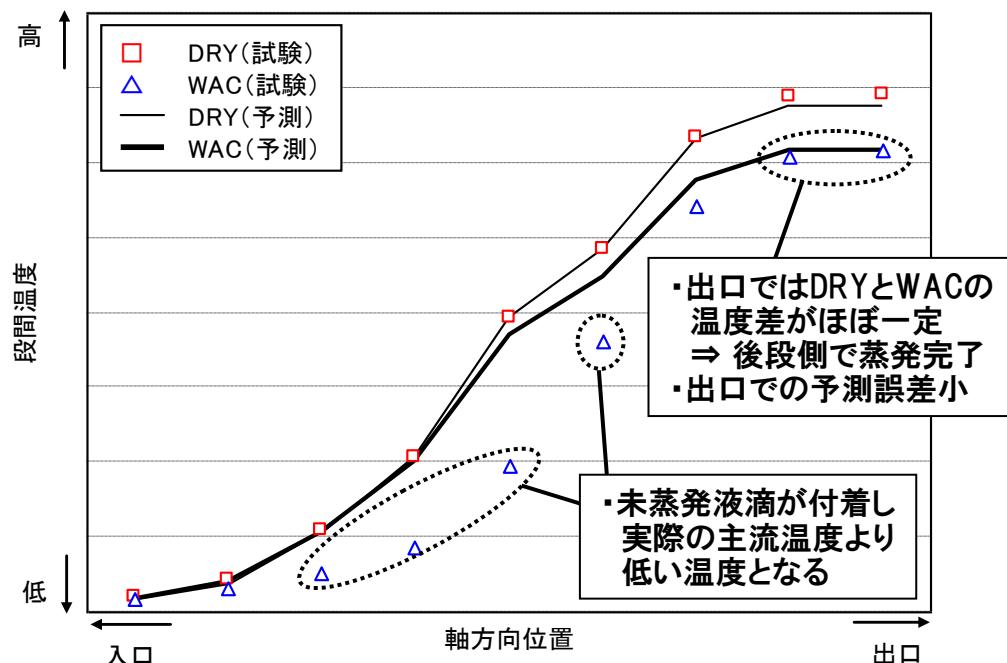


図 3－1－D 段間温度分布

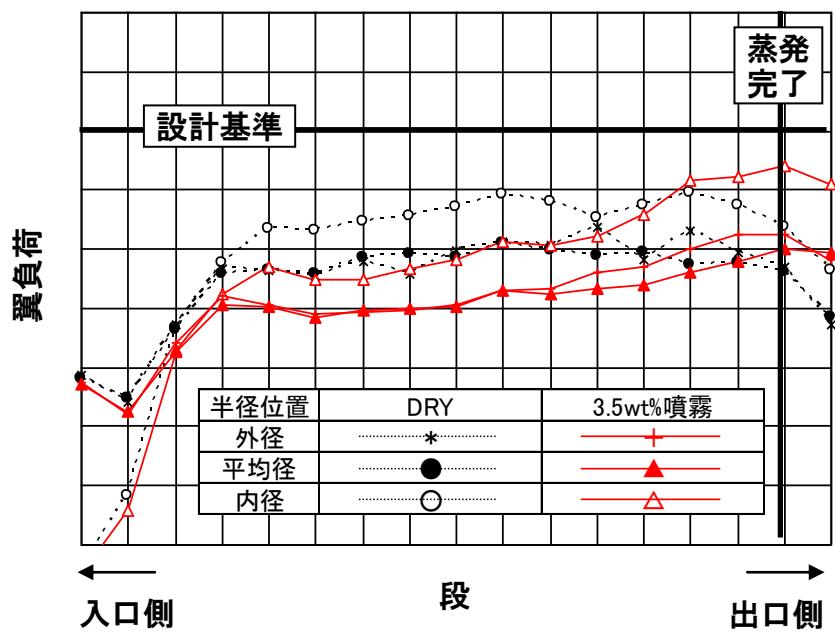


図3－1－E 3.5%噴霧時の圧縮機動翼負荷分布

## (2) 高湿分再生熱交換器

熱交換器本体のヘッダータンク形状の改良、流路構成の見直しにより、タービンの起動停止時に発生する熱応力を低減して3MW級AHATシステム用に開発した熱交換器本体から耐久性を約20倍高くなることをFEMによる構造解析により確認した。しかし、商用機の仕様には3MW級AHATシステムで使用した高性能フィンでは耐圧強度が不足するため、耐圧強度が高く、かつ伝熱面密度の減少も約10%と最小限とした肉厚高密度な新型高性能フィンを新たに開発した。

設計した熱交換器本体は、伝熱部フィンに燃焼排ガス側はパーフォレート型、圧縮空気側には新規開発したマルチエントリー（セレート）型を選定して高効率かつコンパクトな構成とした。その結果、伝熱面密度は約 $1160\text{m}^2/\text{m}^3$ となり、開発目標値である $1000\text{m}^2/\text{m}^3$ 以上の伝熱面密度を達成した。更に熱交換器本体を約70%大型化して熱交換器本体の数を最小とした。

再生熱交換器は、熱交換器本体部分を10基のブロックに分割して、ブロック2基を1つのモジュールとする、モジュール構造を採用した。合計5基のモジュールには、燃焼排ガス側はダクト、圧縮空気側は配管により分流される。

材料は高性能かつ低成本、耐水蒸気酸化性を考慮してステンレスを選定して、薄肉であるフィンおよびセパレートプレートには、NAR-AH-7と同等の高温強度ながらコスト的に優れたUNS S31060を選定した。

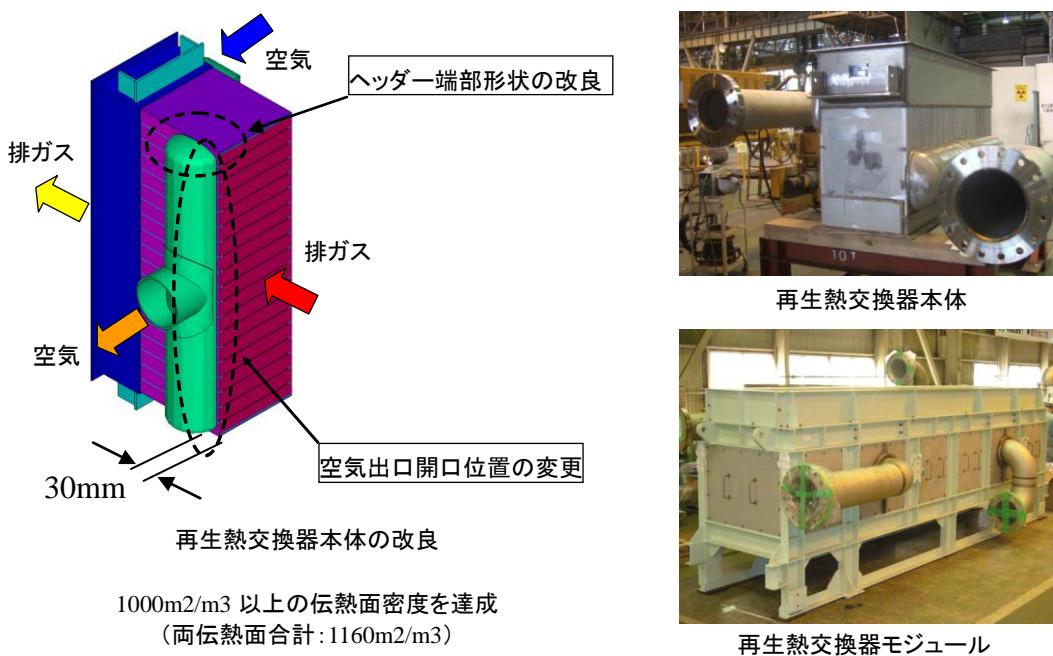


図3-2-A 再生熱交換器本体、モジュール

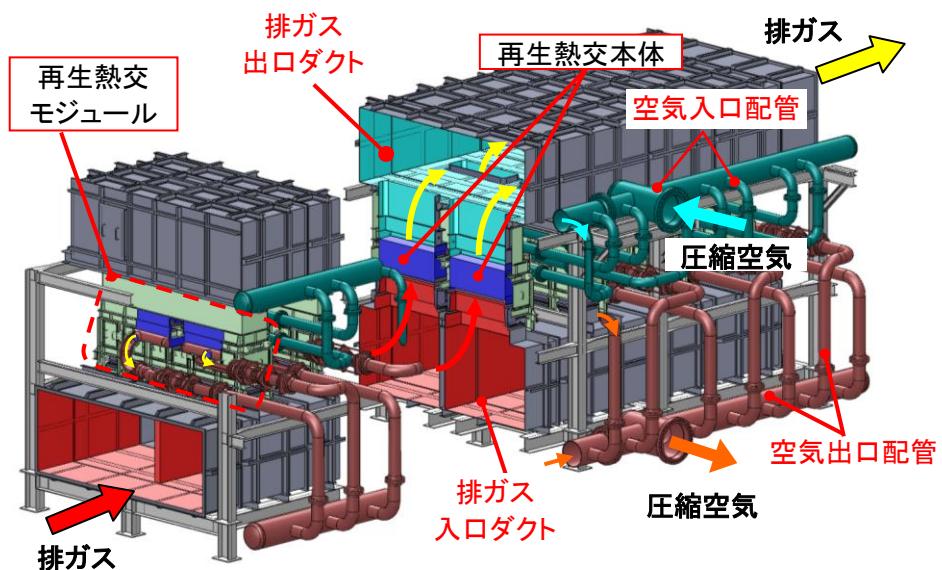


図 3－2－B 再生熱交換器ユニットの空気およびガスフロー



図 3－2－C 再生熱交換器ユニット外観写真

総合試験装置による運転試験評価は、2012年3月8日にガスタービン負荷20MWでの運転試験において、静定状態となった計測値で性能評価を行った。

空気通路側の温度効率は91.3%、圧力損失はいずれも仕様値以下の性能を達成することを確認した。また、その際の各ブロック間の温度分布は、燃焼排ガス側入口約2°C/出口11°C、圧縮空気入口約2°C/出口5°Cであった。ブロック間での温度の偏差が小さいことから、偏流などの事象は発生していないと考えられる。特に空気出口温度の偏差が小さく、圧縮空気側の温度効率向上に寄与している。

表 3－1 総合試験計測結果

項目		仕様値	測定値
燃焼排ガス温度	°C	入口 : 539.4 出口 : 301.8	入口 : 443.16 出口 : 292.01
圧縮空気温度	°C	入口 : 148.9 出口 : 471.3	入口 : 160.76 出口 : 418.58
温度効率 $\eta_c$	%	82.5	91.3
燃焼排ガス圧力損失	kPa	9.8	5.0
圧縮空気圧力損失	kPa	45.0	16.1

計測日時 : 2012.3.08 15:45

$$\eta_c = (T_{co} - T_{ci}) / (T_{hi} - T_{ci})$$

T<sub>ci</sub> : 圧縮空気入口温度、T<sub>co</sub> : 圧縮空気出口温度

T<sub>hi</sub> : 燃焼排ガス入口温度、 $\eta_c$  : 温度効率（圧縮空気側）

### (3) 高湿分多缶燃焼器

#### (3-1) 負荷運転特性（湿分による NOx 低減効果）

図 3-3-A に総合試験の加湿時における NOx 排出量の推移を示す。11 時からの加湿管や WAC での加湿により、NOx 排出量が減少していることが分かる。その後、16 時まで約 3 時間のヒートランを実施したのち、17 時前に加湿水の噴霧圧力を増加させることで加湿量をさらに増加させたところ、NOx 排出量は最小 10.3ppm まで低減でき、AHAT システムの加湿による NOx 低減効果を確認できた。

次に、NOx に対する湿分の影響を図 3-3-B に示す。ここで湿分は、総合試験機の加湿器における飽和条件に相当する湿分で規格化している。▲は 22 年度の単缶要素燃焼試験の結果を、また今回の総合試験機の NOx 特性を○で示す。いずれも負荷 20MW 一定条件のデータである。総合試験機においても要素燃焼試験の場合と同様、NOx 値は湿分によって影響を受けるが、今回の最大加湿条件で 10.3ppm となり、湿分が飽和条件となるフル AHAT システムの増湿塔方式では、目標としている 10ppm 以下を達成できる見通しを確認した。

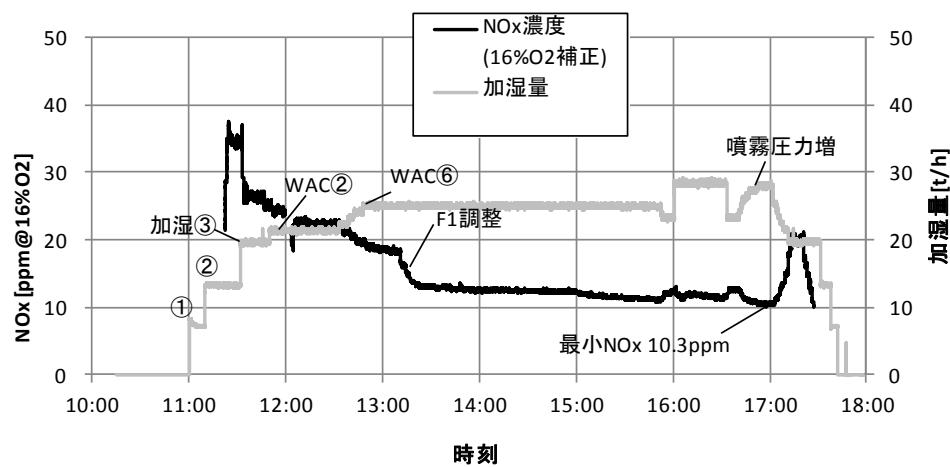


図 3-3-A 加湿量と NOx 排出量

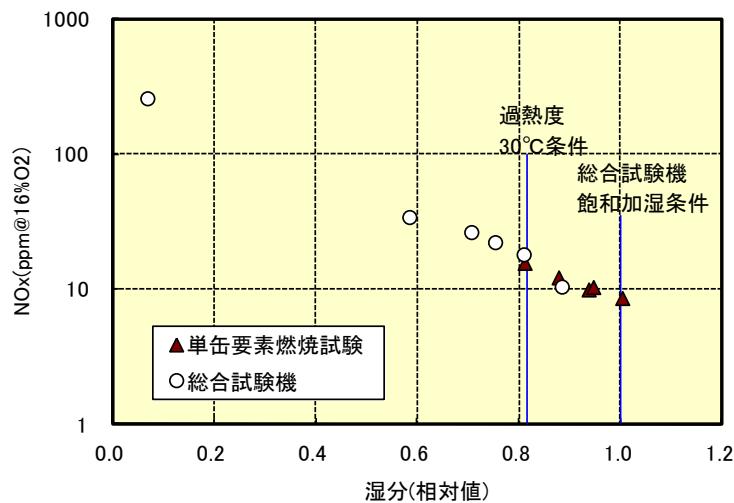


図 3-3-B NOx に対する湿分の影響

### (3-2) 湿分を考慮した安定燃焼制御

図3-3-Cの左の図は加湿管での加湿を開始した直後の燃料比率の変化を示す。加湿操作と同じタイミングで安定燃焼維持に重要なF1燃料の比率がステップに上昇している。また同じ図に燃焼制御指令の変化も合わせて示す。燃焼制御指令は、燃料系統の切替えを判断するための物理量であり、燃焼空気湿度の影響も考慮している。すなわち、同じ燃料流量、燃焼空気流量において燃焼空気湿度が高くなると、燃焼制御指令は低下する仕組みである。加湿操作後に燃焼制御指令が2段階で低下している。まず、燃焼空気湿度の上昇によって、演算に組み込まれたロジックに沿って燃焼制御指令が低下する。その後、燃焼空気湿度の上昇によって作動流体の密度が大きくなつて出力が増加するため、実際の燃料流量が減少して燃焼制御指令が低下する。このように、加湿による出力増加は遅れ時間を持つ。図3-3-Cの右の図はWAC時の燃料比率の変化を示す。加湿管での加湿量変化と同じく、WAC噴霧量の増加に対してF1比率が増加する。また、燃焼制御指令は、WACによって燃焼空気湿度が高くなるため、低下する。そして、圧縮機吸気量が増加するため、出力が増加して燃料流量が減少して燃焼制御指令はさらに低下する。

今回の総合試験機では、加湿による燃焼安定性の変化を考慮して、常に安定な火炎を維持するために、湿分を考慮した燃焼制御指令を考案して制御装置に組み込んだ。上記の検討結果から、制御装置での加湿量の推算が計画通りできていることが確認できた。また、湿分の変化に追従して燃料配分を制御した結果、加湿時、燃料切替え時にも燃焼安定性が確保できることを確認し、湿分を考慮した燃焼制御指令を用いたAHAT高湿分燃焼器制御の有効性が実証できた。

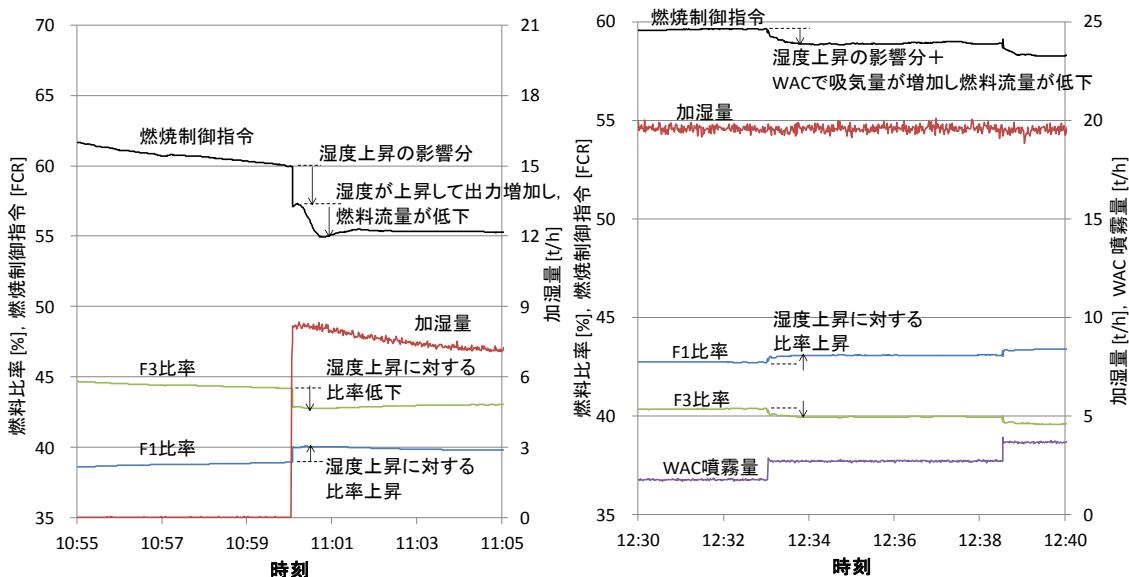


図3-3-C 加湿管加湿時（左）とWAC時（右）における  
加湿量、燃焼制御指令、燃料比率のトレンド

### (3-3) 多缶燃焼器の均一性

AHAT 多缶燃焼器構造の成立性を確認するため、負荷試験において、F3 バーナの点消火の遅れ時間を検討した。図 3-3-D は 6 缶の燃焼器それぞれに設置した空気孔プレートメタル温度計測値のトレンドを示す。F3 バーナに点火すると、空気孔プレートメタル温度が上昇するため、各缶の温度変化のタイミングから F3 点消火遅れが判断できる。図から、11:20:20 頃において全缶のメタル温度が同時に上昇、また 17:26:30 頃において全缶同時に低下しており、缶毎の切替え遅れは小さいことを確認した。また、メタル温度のバラつきは、点火前で約 15°C、点火後で約 50°C であり、実用上は問題ないバラつきと考える。

以上から、F3 バーナ点火時、消火時ともに缶毎の遅れ時間は十分小さく、AHAT の圧縮空気の抽気構造、加湿・再生後の圧縮空気の注入構造に起因する多缶燃焼器各缶の空気流量偏差が十分小さいことが確認できた。

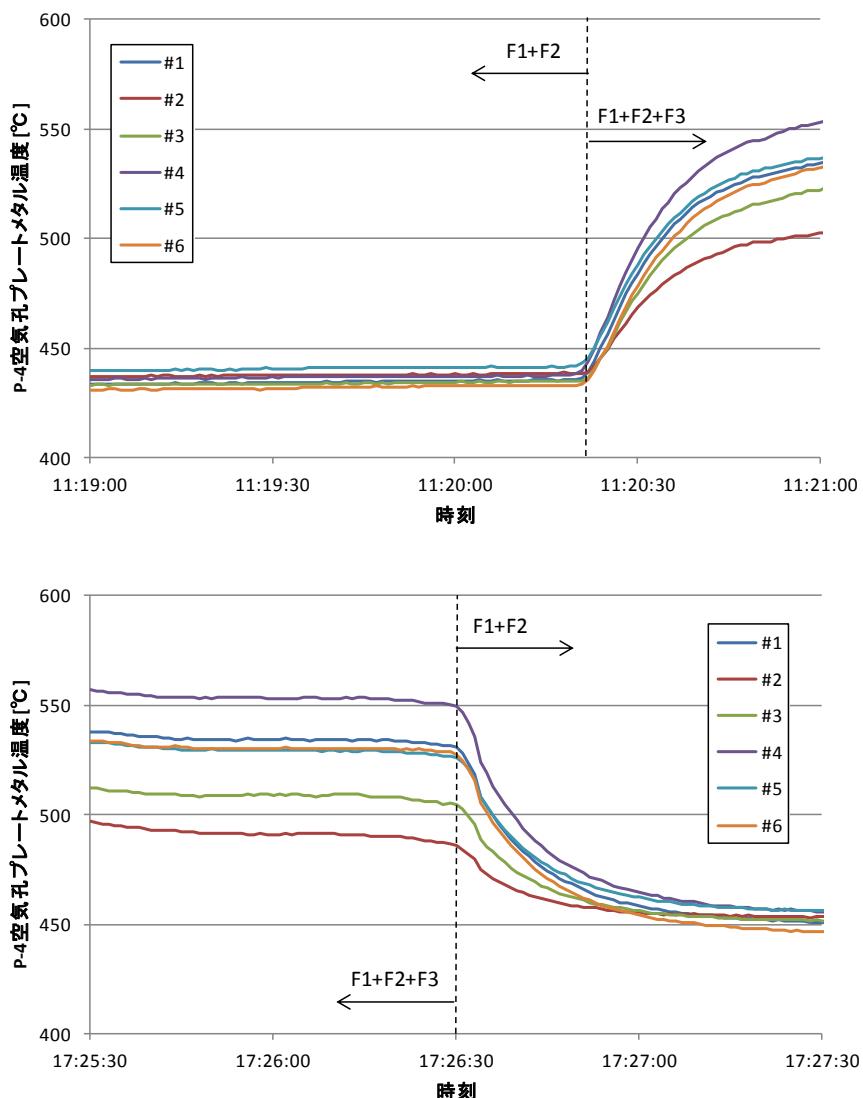


図 3-3-D F3 点火(上図)消火時(下図)の空気孔プレートメタル温度の変化

#### (4) 高湿分冷却翼

AHAT システムでは、乾燥空気を使用した燃焼ガスと比べて水蒸気濃度が高いので、タービン翼の主流側の熱伝達率が増加し、翼の受ける熱負荷が高くなる。冷却空気量の増加を抑制するために、サイクルの利点を生かして増湿系統から抽気した低温の高湿分空気を併用して冷却するハイブリッド冷却翼を設計・製作し、冷媒供給系統とともに総合試験装置に組み込んで冷却効率を確認した。

図 3-4-A にハイブリッド冷却翼の組込状況と断面図を示す。ハイブリッド冷却方式の効果を通常冷却翼と比較するため、ハイブリッド冷却翼は第 1 段静翼の 2 セグメント（1 セグメントは翼 2 枚）を製作した。ハイブリッド冷却翼のみに高湿分空気を選択的に供給するため、ハイブリッドカバーを設置した。またハイブリッド冷却翼の第 2、第 3 冷却流路に高湿分空気を使用する構造を採用し、熱応力を緩和している。

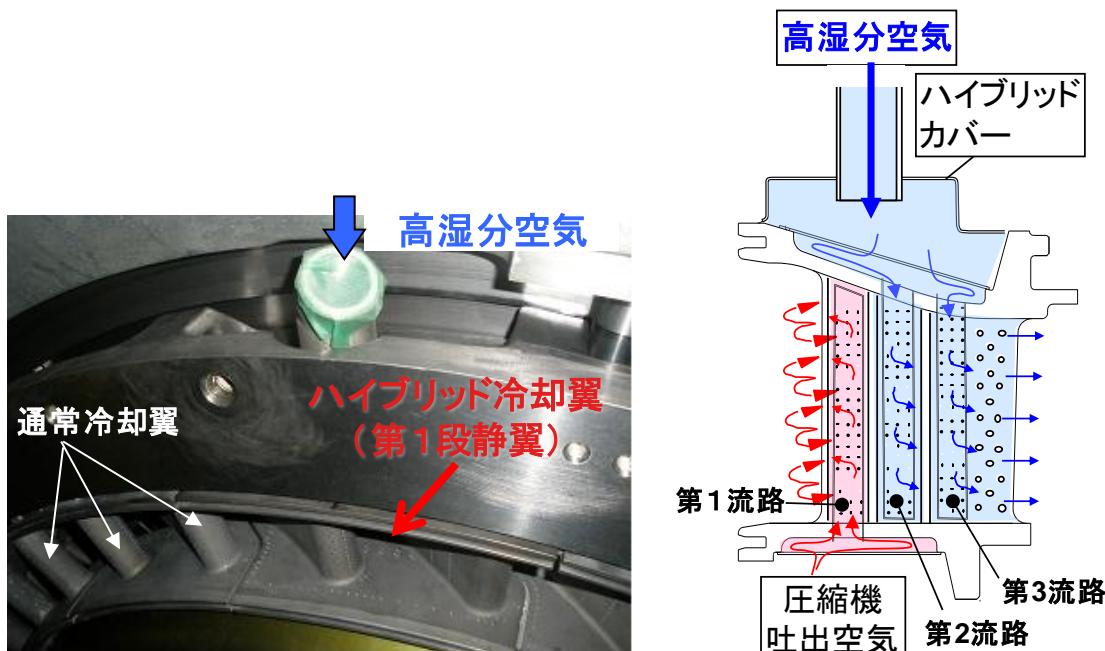


図 3-4-A ハイブリッド冷却翼組込状況と断面図

図 3-4-B に、加湿・WAC 有り試験におけるハイブリッド冷却翼のメタル温度実測値と、冷却性能評価ツールによる予測値を示す。メタル温度実測値は、腹側ではおおむね予測値に一致し、背側では予測値を下回った。以上の結果より、ハイブリッド冷却翼は高湿分運転時において計画通りの冷却性能を達成していることを確認した。

図 3-4-C に、加湿・WAC 有り試験におけるハイブリッド冷却翼の冷却効率を示す。横軸の冷却空気量は、通常冷却翼の冷却空気流量に対するハイブリッド冷却翼の冷却空気流量の相対値である。この結果より、通常冷却翼よりも少ない冷却空気量で、目標としていた冷却効率 70% 以上達成できることを確認した。

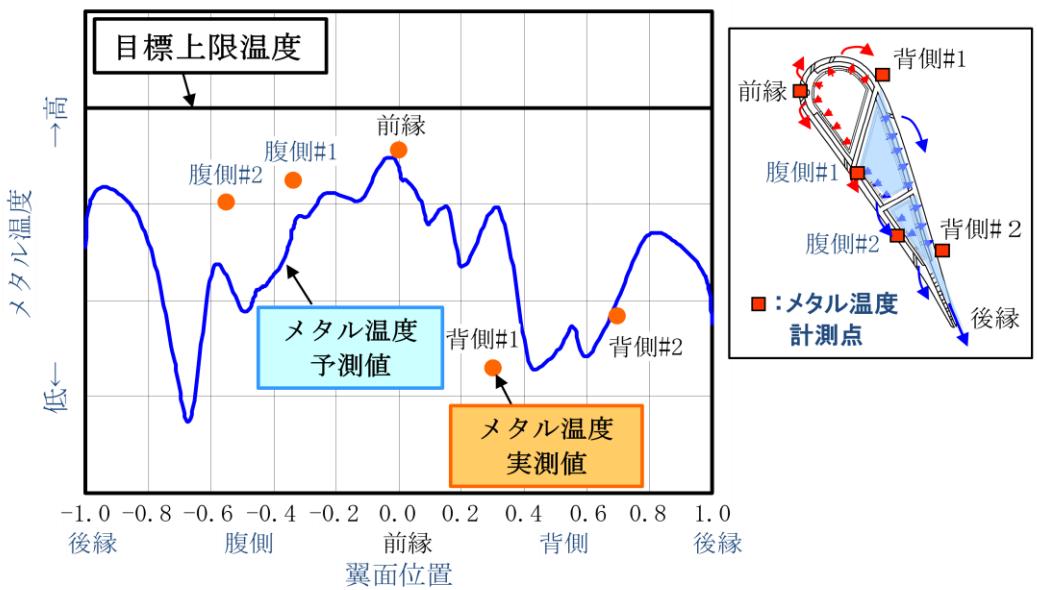


図3－4－B ハイブリッド冷却翼のメタル温度実測値と予測値の比較

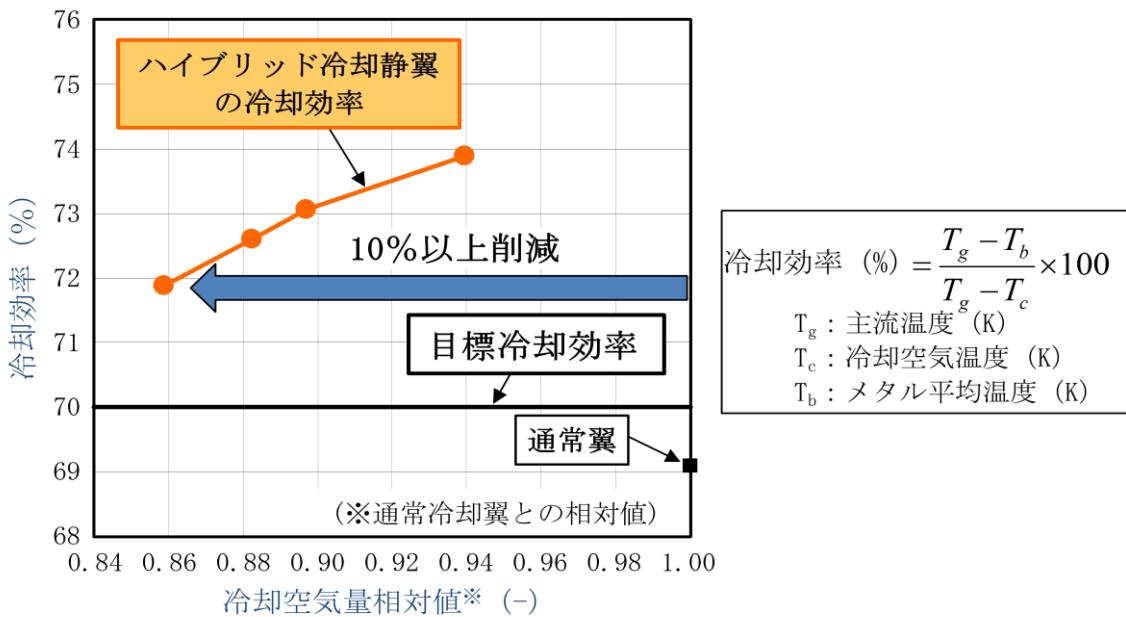


図3－4－C ハイブリッド冷却翼の冷却効率

## (5) 3 MW検証機試験、A H A T 特性解析

2004 年度から 2006 年度にかけて実施した要素技術開発では、図 3-5-A に示す 3MW 級検証機にて定格出力 3600 kW 以上の 3990 kW を達成し、A H A T システムの成立性を確認した。本事業では、3MW 級検証機を活用してシステム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化を確認した。

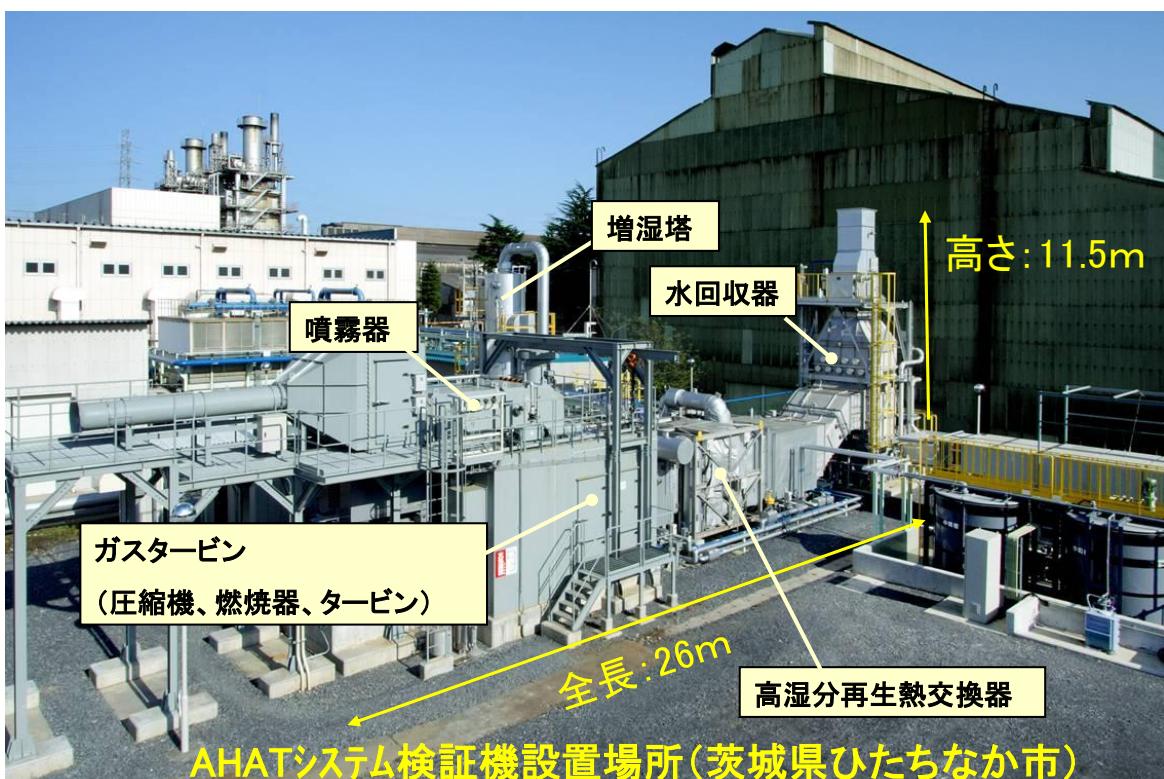


図 3-5-A 3 MW 級システム検証機

### (5-1) 大気温度特性

大気温度特性を図3-5-Bに示す。システムヒートバランス計算で求めた大気温度特性(実線:予測値)を併記している。出力、効率ともに、ヒートバランス計算による結果と同様な傾向を示し、気温が低いほど高出力、高効率になっている。

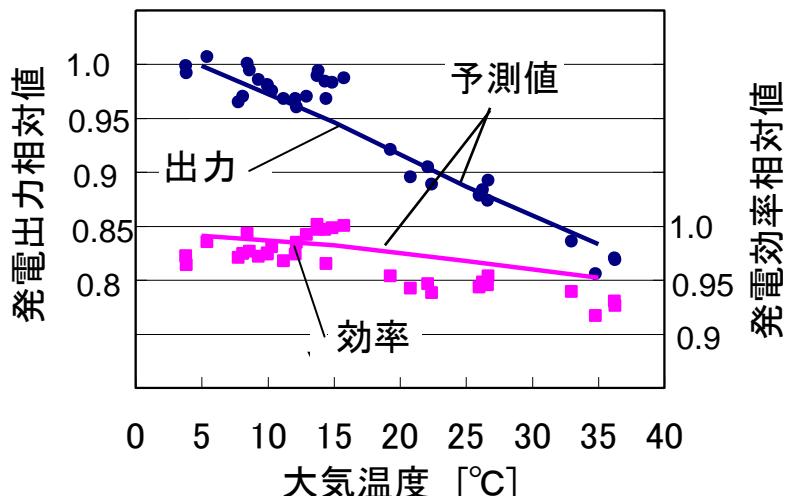


図3-5-B 大気温度特性

### (5-2) 起動時間

図3-5-Cに、完全停止状態からコールド起動したときのタービン入口温度、発電端出力、加湿量、給水加熱器入口ガス温度変化を示す。約60分で定格出力に達している。再生熱交換器や給水加熱器などの各機器熱容量により給水温度上昇、加湿量に遅れが生じることが負荷上昇の制約になることがわかった。

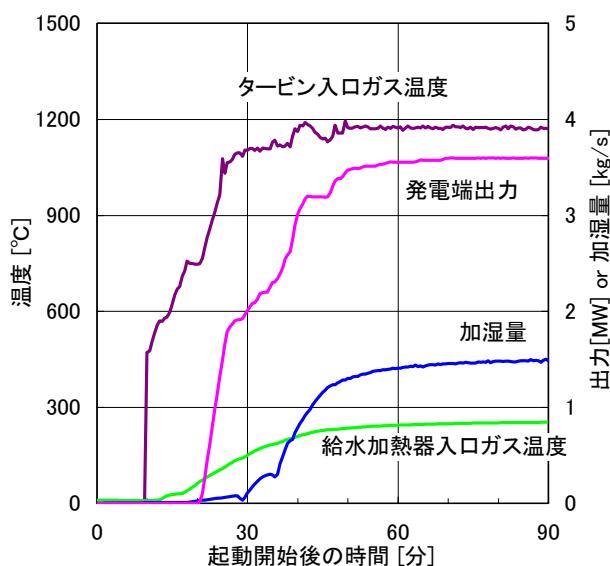


図3-5-C コールド起動特性

### (5-3) 水回収器での水回収性能

図3-5-Dに水回収器断面を示す。スプレイ液滴による気液直接接触で排ガス中の湿分を凝縮させ水分を回収している。図3-5-Eに水回収量を示す。液滴空間分布の均一化を目的に、スプレイノズル配置を工夫することにより回収率が改善されている(WR9、WR10)。これにより、増湿塔での加湿量はほぼ全量回収可能となった。

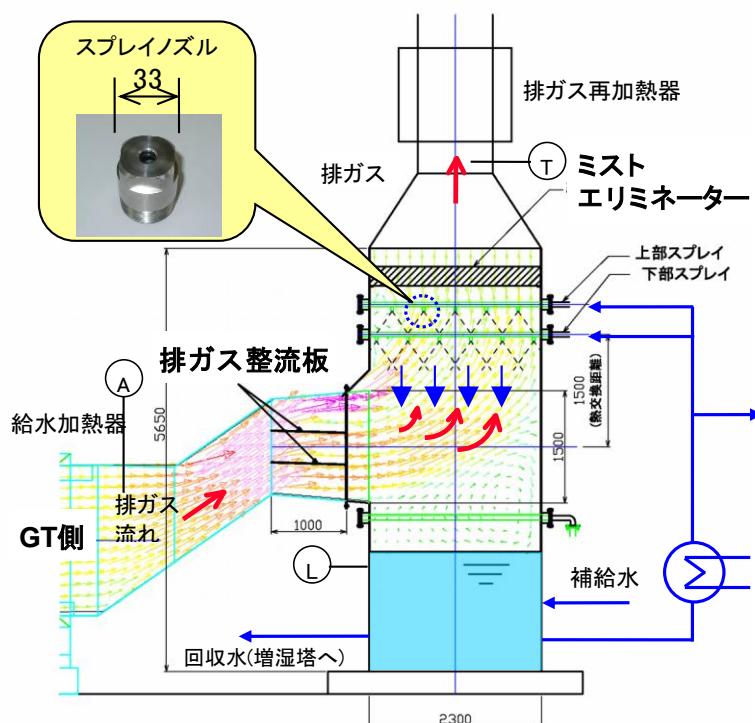


図3-5-D 水回収器

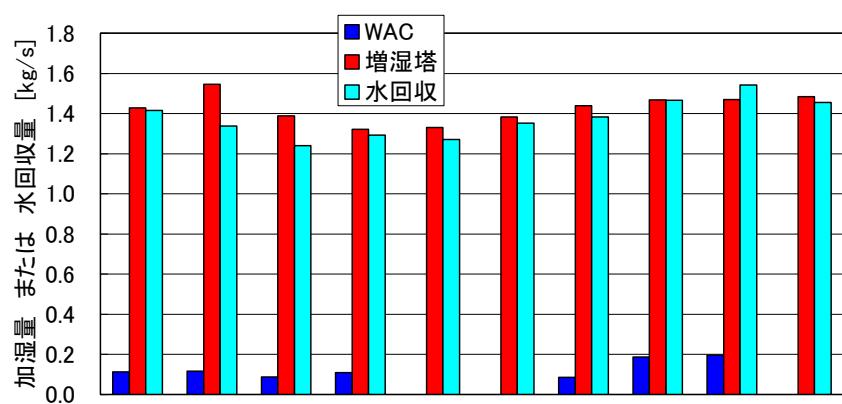


図3-5-E 水回収器での回収量

### (5-5) 機器の経時変化 (図3-5-F)

A H A T サイクルの主要機器で、起動停止時に発生する熱応力に対する信頼性確保が要求される再生熱交換器について、各試験の温度効率、圧力損失をプロットした。運転試験の間、熱交換性能および圧力損失の経年劣化は特になく、温度効率 90% 以上、許容圧損以下で、維持正常な状態を維持できていることを確認した。

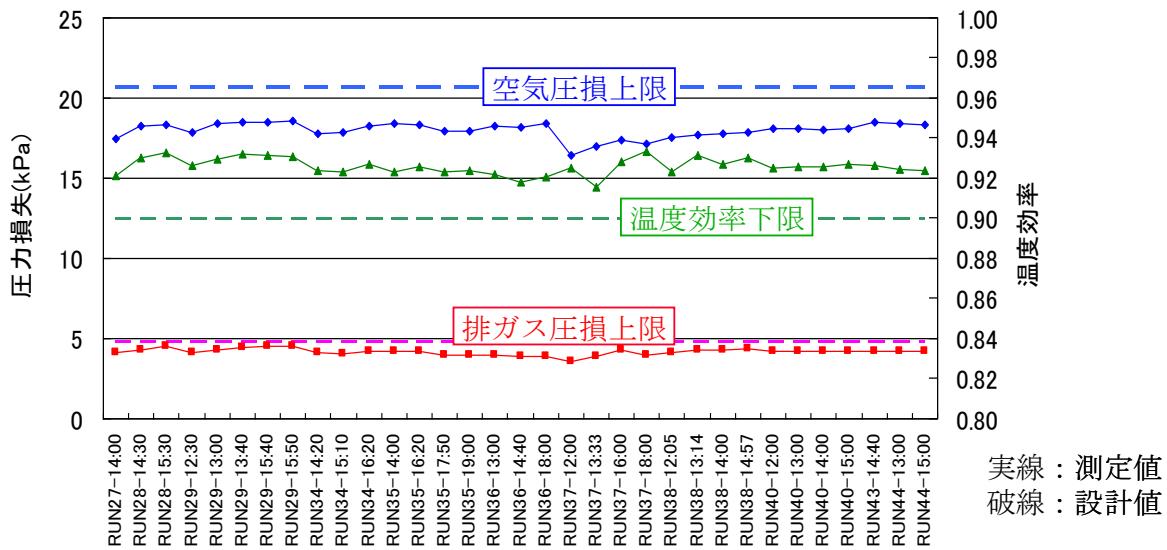


図3-5-F 再生熱交換器の温度効率、圧力損失変化

### (6) 実用化技術総合試験

高圧・高湿分環境における、高湿分軸流圧縮機、高湿分再生熱交換器、高湿分多缶燃焼器、高湿分冷却翼の相互作用を確認するために 40MW 級総合試験装置を設計、製作した。系統構成と検証項目を図3-6-A に示す。この試験装置は A H A T をヘビーデューティー型ガスタービンに適用するための技術開発であり、増湿装置は部分加湿の加湿管、水回収器は非設置とするなど、プラント機器構成を簡略化している。本装置は試験装置であるため、ガスタービンで得られる動力は発電して系統につなげることはせず、動力を負荷圧縮機で吸収することにしている。

本試験は、2012/1 に運転開始し、2012/2 に、50% 負荷である 20MW まで到達した。2012/3 まで、29 回の起動、累計 65 時間運転し、吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼など、運転動作確認した。図3-6-B に、運転曲線の例を示す。負荷を一定に保持し、燃焼器の調整により NOx 濃度 10ppm 以下を確認した。

定格負荷での運転に先立ち、加湿管の液滴蒸発率改善、ガスタービンから圧縮空気の抽気割合の改善など課題を抽出した。

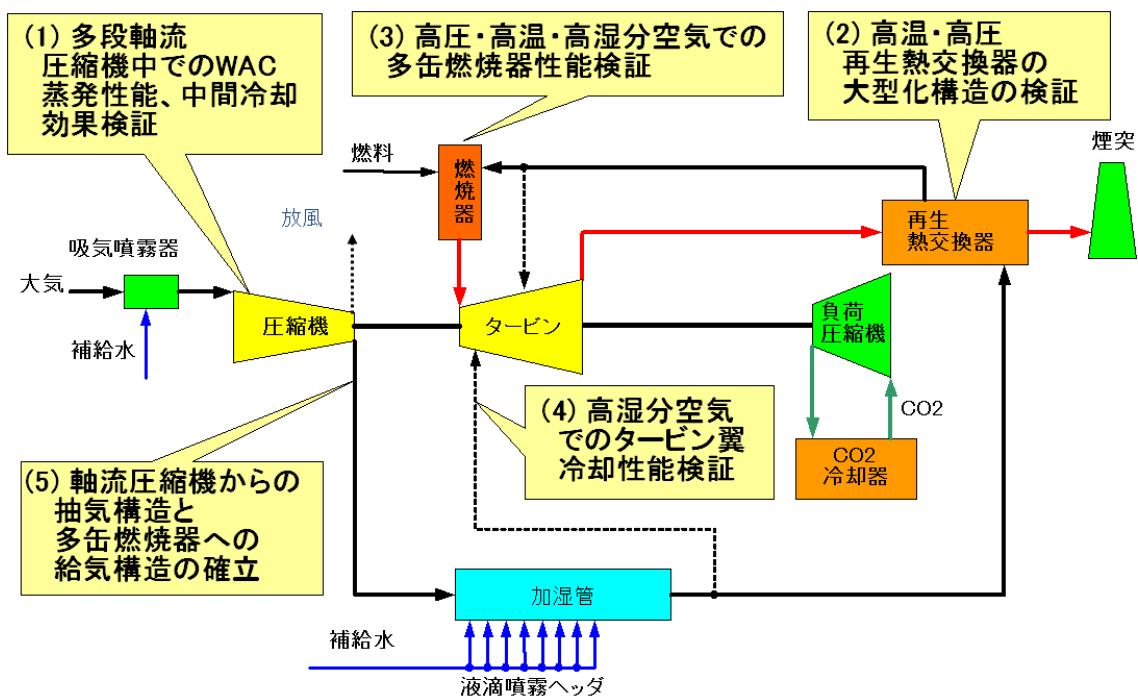


図 3－6－A 40MW 級総合試験装置の系統構成と検証項目

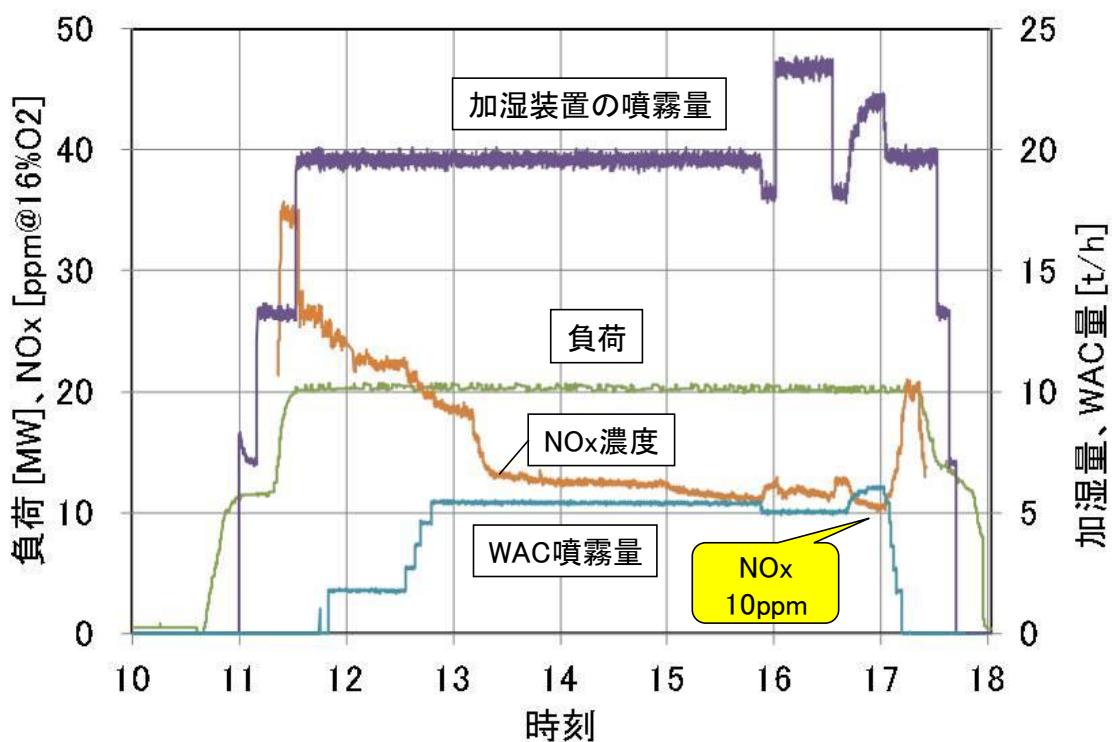


図 3－6－B 40MW 級総合試験装置の運転曲線 (2012 年 3 月 8 日)

## (7) AHAT 特性解析

3MW 級検証機の実際の運転試験データから、大気温度変化による特性、部分負荷や起動特性などを解析・評価した。

図 3-7-A に吸気水噴霧冷却 (WAC) による発電端効率の大気温度および吸気湿分率に対する変化を示す。図が示すように吸気湿分率の増加に伴い発電端効率が上昇しており、吸気水噴霧冷却の効果を実際の運転データから確認できた。

一般にガスタービンの特性上、大気温度の上昇に伴い圧縮動力が増加するため発電出力が低下する。図 3-7-A が示すように AHAT においてもその傾向が見られるが、水噴霧が無い場合（図中③）での発電端効率の低下割合（傾き）に比べて、水噴霧を行った場合（図中①、②）にはその低下割合は小さくなっている。これは、大気温度が上昇した際、水噴霧による吸気冷却効果によって圧縮機入口温度の上昇が抑制され、大気温度変化による発電端効率への影響が低減できるためと考える。

図 3-7-B は大気温度変化に対する AHAT と既存複圧 GTCC の発電出力の変化であるが、図が示すように、AHAT システムは GTCC よりも大気温度上昇による出力の低下が少ないことが分かる。今回の検証機では WAC 蒸発量が 1.8wt%までであったため、3.5wt%を想定した中容量 AHAT の熱効率解析結果には及ばないものの、AHAT システムは GTCC よりも大気温度変化による影響を受けにくいことが実際の運転試験結果から得ることができた。発電端効率にも同じ結果が得られている。

水回収装置における水回収率の大気温度変化に対する変化を図 3-7-C に示す。ここでの水回収率は、増湿塔での加湿量と吸気水噴霧の蒸発量の合計に対する水回収装置での水回収量の比率として定義した。大気温度が低い場合にはほぼ 100%水回収が出来ているが、大気温度上昇に伴い水回収率が低下している。これは、同図に示すように、大気温度の上昇により冷却水温度が上昇し、水回収装置出口のガス温度が上昇したため、増湿塔と同様、ガス中の飽和蒸気量が増加し、凝縮する水分量が低下したためと考えられる。年間を通じて高い水回収率を得るためにには、各季節に応じた適切な冷却水流量、冷却水温度の管理が必要であり、そのためには適切な水回収装置ならびに冷却設備の設置、運用が重要である。

図 3-7-D は AHAT および既存複圧 GTCC の部分負荷特性を示す。商用機 AHAT のシミュレーションでは GTCC よりも高い部分負荷特性が示されているが、検証機の低負荷における発電端効率低下は GTCC のそれより大きいものであった。この理由として、IGV なしのため吸込空気流量による負荷制御ができず、燃焼温度による負荷制御であるため効率に与える影響が大きかったことと、約 60%以下の低負荷においては部分加湿モードで運転していることなどが挙げられる。今後、さらなるスケールアップ機により、部分負荷で効率を高める方法の検討、実運転試験による効率向上と制御の安定性の確認が必要であると考える。

表3-7に、第2フェーズの試験で得られた起動時間および負荷変化率等の結果と、第1フェーズの結果およびGTCCとの比較を示す。負荷変化率について、これまで3.3%/分で行ってきたが、燃料供給速度の向上、静定時間の排除などにより安定性を確認しながら向上させ、GTのみ（加湿なし）でのハーフロードまで負荷変化率は最大15%/分を達成できた。その後の加湿による負荷変化は、本検証機においては手動により行っているため、2.3%/分から3.3%/分の向上に留まったが、自動化によりさらに向上来見込めるものと考える。起動時間について、この負荷変化率の向上のほか、途中での静定を無くしても問題なく負荷上昇でき、その結果、GT起動から最大出力まで約60分で起動できることが確認され、GTCCが180分（真空保持）であるのに比べ1/3に短縮できた。

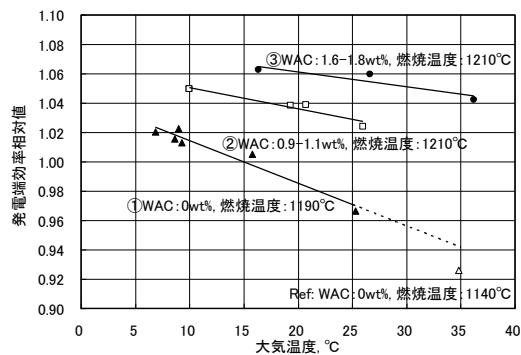


図3-7-A 吸気湿分率および大気温度変化に対する発電端効率の変化

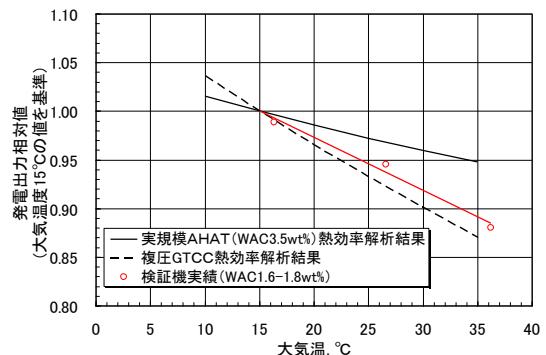


図3-7-B AHATとGTCCの大気温度変化に対する出力への影響の比較

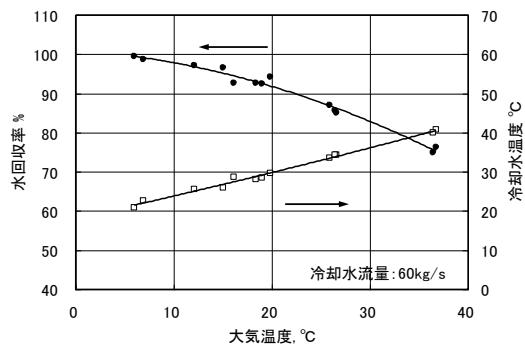


図3-7-C 大気温度変化に対する水回収率および冷却水温度の変化

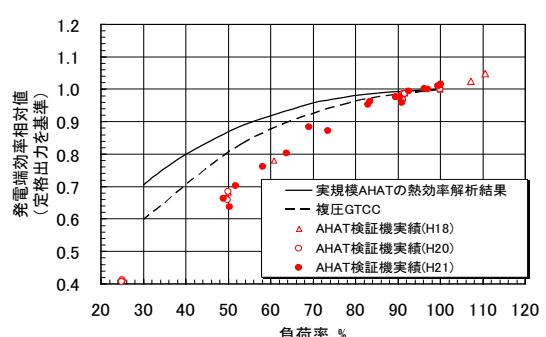


図3-7-D AHATとGTCCの部分負荷効率の比較

表 3－7. 各種運用性の比較

項目	検証機実績(第1フェーズ)	検証機実績(第2フェーズ)	既存一軸型 GTCC 発電	課題
起動時間 ホットスタート	-	-	約 60 分	
" コールドスタート	約 2 時間 40 分 (静定、データ採取時間 含む)	<b>約 60 分</b> (水系統起動時の場合)	約 180 分 (復水器真空保持の場合)	水系統の自動化
負荷変化率	燃焼による負荷変化 3.3%/分 加湿による負荷変化 2.3%/分	<b>燃焼による負荷変化 15%/分</b> (自動化) <b>加湿による負荷変化 3.3%/分</b> (手動操作)	5.0%/分	加湿による負荷 変化率向上
負荷制御	燃焼温度制御 増湿塔加湿量あり、なし WAC あり、なし	<b>燃焼温度制御</b> <b>増湿塔加湿量</b> <b>WAC 流量</b>	IGV 開度制御 燃焼温度制御	IGV の設置 低負荷での水噴霧

※WAC:  
Water Atomization Cooling  
(吸気噴霧冷却)

※IGV:  
Inlet Guide Vane  
(入口案内翼)

### 3－1－3 特許出願状況等

要素技術開発（2004年から2006年）から通算した件数を表3-8に示す。A H A Tは、国内外の学会等で高い評価を得ており、海外発表で4回、国内発表で2回表彰されている。その中で、2010年6月にはアメリカ機械学会(ASME)から年間最優秀論文としてJ.P. Davis賞を与えられた。また、3MW級検証機、40MW級総合試験装置は、国内外の多数の顧客に視察頂き、ユーザーに关心を持たれている。

表3-8 特許・論文等件数

年度 項目	要素技術開発				実用化技術開発				合計
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
論文・解説	0	2	1	2	3	3	4	8	23
特許(公開)	3	10	12	7	8	11	6	6	63
国際会議 発表	1	2	1	2	4	1	1	6	18
国内会議 発表	2	0	5	7	5	1	3	1	24

### 3－2 目標の達成度

各項目の成果を示す。

#### ①高湿分軸流圧縮機

開発した吸気噴霧冷却時の圧縮機性能予測アルゴリズムを用いて40MW級総合試験装置の圧縮機を設計し、最大で1.7%の噴霧試験を実施した。試験により、アルゴリズムの妥当性が確認された。また、このアルゴリズムによる計画噴霧量(3.5%)の予測結果から、3.5%噴霧時でも噴霧液滴は全量蒸発し、翼負荷等の信頼性に問題がないことを確認した。

#### ②高湿分再生熱交換器

従来フィンより耐圧強度が高く、かつ伝熱面密度も極力大きくした新型高性能フィンを新たに開発することで、温度効率90%以上、伝熱面密度1000m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>以上を達成した。総合試験条件で温度効率91.3%、圧力損失は設計仕様値以下を達成した。

#### ③高湿分多缶燃焼器

総合試験機の起動から最大負荷まで、開発した多缶高湿分燃焼器構造が安定に燃焼でき、最大負荷条件でNO<sub>x</sub>排出量10.3ppm、湿分が飽和条件となるフル

AHAT システムの増湿塔方式では、目標としている 10ppm 以下を達成できる見通しを得た。

#### ④高湿分冷却翼の開発

ハイブリッド冷却翼を開発し、通常冷却翼よりも少ない冷却空気量で、目標としていた冷却効率 70% 以上を達成できることを確認した。

#### ⑤3 MW 級検証機

5~35°C の範囲で大気温度特性を取得した。増湿量のほぼ 100% を水回収できた。再生熱交換器の温度効率 90% 以上を維持できていることを確認した。

#### ⑥実用化技術総合試験装置

40MW 級総合試験装置を設計、製作し、50% 負荷である 20MW まで到達した。29 回の起動、累計 65 時間運転し、吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼など、運転動作確認した。定格負荷での運転に先立ち、加湿管の液滴蒸発率改善、ガスタービンから圧縮空気の抽気割合の改善など課題を摘出した。

#### ⑦AHAT 特性解析

3 MW 試験でコールド起動時間 60 分を達成し、コンバントサイクルと比較し起動特性で優位であることを確認した。また、吸気水噴霧により効率向上が確認でき、大気温度上昇による効率低下が複圧 GTCC より小さいことが確認できた。一方、水回収効率が大気温度上昇により低下したため改善が必要であり、部分負荷特性もスケールアップ機での検証が必要であることを示した。

以上の成果により、本事業の目標を全て達成することができたと考えている。目標の達成度一覧を、表 3-9 に示す。

表3－9 目標の達成度一覧

要素技術	目標・指標	成果	達成度
①高湿分 軸流圧縮機	・吸気噴霧量: 3.5%以上	最大1.7%の噴霧試験によりアルゴリズムの妥当性を確認した。そのアルゴリズムを用いて3.5%噴霧時の信頼性を確認した。	達成
②高湿分 再生熱交換器	・温度効率: 90%以上 ・伝熱面密度: 1000m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> 以上	高性能フィンの開発により伝熱面密度1160m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> を実現した。総合試験で温度効率91.3%、圧力損失は仕様値以内を達成した。	達成
③高湿分 多缶燃焼器	・NOx: 10ppm以下	点火、昇速、加湿、吸気噴霧時の安定燃焼を確認した。湿分が飽和条件となるフルAHATシステムの条件で、NOx濃度10ppm以下の見通しを得た。	達成
④高湿分冷却翼	・冷却効率 静翼: 70%以上 動翼: 60%以上	高湿分低温空気を利用したハイブリッド冷却静翼を作成し、冷却効率70%以上を確認した。	達成
⑤3MW級検証機	・AHATプラント側の特性把握	システム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化ないことを確認した。	達成
⑥実用化技術 総合試験	・発電用ヘビーデューティーガスターインにAHATを適用	累計65時間運転し、吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼などの相互作用(性能)を確認、課題摘出した。	達成
⑦AHAT特性解析	・ユーザ視点からの システム評価	定格出力時の性能だけでなく、大気温度変化特性、部分負荷・起動特性を明らかにした。	達成

## 4 事業化、波及効果について

### 4-1 事業化の見通し

高湿分空気利用ガスタービンの実用化に当たっては、世界で初めて実用化されるシステムであり、開発リスクが大きいことから、表4-1の商用機までのロードマップに示すように、段階を踏んで開発を進めることによりリスク低減を図り、確実に技術開発を進めることが必要である。

表4-1 ロードマップ

項目	年度	2000	2005	2010	2020 ~
技術開発		<b>要素技術開発</b> ('04~'06年) <b>1/30規模</b> の装置でAHATシステムの原理的な成立性確認。	<b>実用化技術開発</b> ('08~'11年) <b>1/3規模</b> の装置で中容量AHATシステムを実現するためのガスタービンに関わる要素技術を開発。	<b>技術実証事業</b> ('12年~) 高信頼性化技術の開発とAHATシステムの長期信頼性実証。	<b>商用機</b> ('20年~)
		(3MW級検証機)	(40MW級総合試験設備) (実証機)		
技術開発の成果、波及			<ul style="list-style-type: none"> <li>・高湿分翼冷却翼技術</li> <li>・高湿分燃焼器技術</li> <li>→日立ガスタービンに適用</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・リプレース</li> <li>・系統調整電源</li> <li>・海外分散電源</li> </ul>
次世代発電技術への展開				CO <sub>2</sub> 回収型クローズドサイクルAHAT CO <sub>2</sub> 回収型IGHAT 	

#### (1) 技術開発について

2004年度から2006年度まで3年間の要素技術開発を予定通り実施し目標を達成できた。3MW級の検証機を建設し、ガスタービンと吸気噴霧冷却、増湿塔、再生熱交換器、水回収装置等を組み合わせたAHATシステムが原理的に成立することを確認した。効率は小容量クラスのガスタービンシステムで最高レベルの36.4%(HHV)(40%(LHV))以上を達成した。また、シミュレーションにより中容量AHATシステムで従来の同出力機より高い発電効率が得られることを確認した。3MW級検証機は高湿分空気を利用した再生型ガスタービンとして世界初のシステムであるため、要素技術開発ではシステムの成立性確認を最優先項目とし、ガスタービンはシステムを原理的に検証するために必要最小規模の小容量クラスで実施した。

実用化技術開発については、2008年度から2011年度までの4年間に、予定通りに完了した。商用機のAHATシステムは出力100MW級の中容量のヘビーデューティー型ガスタービンであり、ガスタービンは小容量に比べて圧力が高く、多段軸流圧縮機、多缶燃焼器、冷却タービンの構成となるため、小容量クラス

のガスタービンとは異なる。よって、中容量ガスタービンでA H A Tシステムを実現するため、各ガスタービン要素の実用化技術開発とそれらの技術を組合せた商用機の1/3スケールの総合試験装置によりガスタービンにかかる技術を開発した。

2012年度からの技術実証事業では、商用機と同程度規模で実際に発電することにより、表4-2に示した運用性、環境性、経済性の観点からA H A Tを評価するとともに長期信頼性を確認する。長期信頼性を確認するには電力系統に接続する必要があり、ユーザーの参画が求められる。

なお、高湿分空気を利用したガスタービンシステムは、システム改良に主眼をおいた高効率化技術であり、1980年に日本で考案された航空機転用型ガスタービンを利用する日本生まれの技術であるH A Tシステムが基礎になっている。その後、米国でシステム研究が行われ多くの派生システムが提案された後、1990年代から電力事業用に使用されているヘビーデューティガスタービンに適用するように日本で再検討され、3MW級のA H A Tシステム検証機によりシステム成立を世界に先駆け確認したことで日本が再び世界をリードしている。

A H A Tシステムは、夏季の出力低下が少ない（吸気噴霧冷却の効果）、部分負荷効率が高い（再生システムの効果）、起動時間が短い（蒸気タービン系が不要）、水回収により補給水が不要、設備費が低い、等の環境や電力需要への即応性が高いという点で好ましい特性を有しているが、日本独自の技術であるため前例がなく、商用機にいたるまでの技術課題が多い。産業界のみで本技術開発を進めていくにはリスクが高く、引き続き国の関与と支援が必要である。

## （2）技術開発の成果、波及について

要素技術開発で開発した高湿分翼冷却技術については、対流冷却での伝熱促進技術を日立ガスタービンの冷却翼に適用しており、冷却空気量削減による高効率化、CO<sub>2</sub>削減に寄与している。また、要素技術開発で開発した高湿分燃焼技術についても、多孔同軸噴流技術を日立ガスタービンの燃焼器に適用しており、低NO<sub>x</sub>化による環境負荷低減に寄与している。

IEAによる世界エネルギー需要予測を図4-2に示す。天然ガスは、シェールガスなど非在来型ガスの掘削技術が開発され、世界的な需要拡大が見込まれる。また、電力中央研究所による、わが国の電源構成推移を想定した図を図4-3に示す。電力需要の増加に伴うLNGおよび石炭火力の新設、増設に加え、2010年頃からは40年を寿命と考えた場合、寿命を迎えるプラントが急増しリプレース市場が活発化すると考えられる。ピーク・ミドル運用に適した中容量A H A Tシステムは、新增設需要に加え、次のようなリプレース市場への導入も見込まれる。

- ・LNG火力リプレース市場
- ・石油火力リプレース市場（燃料転換にも対応、ガス焚き、油焚き）

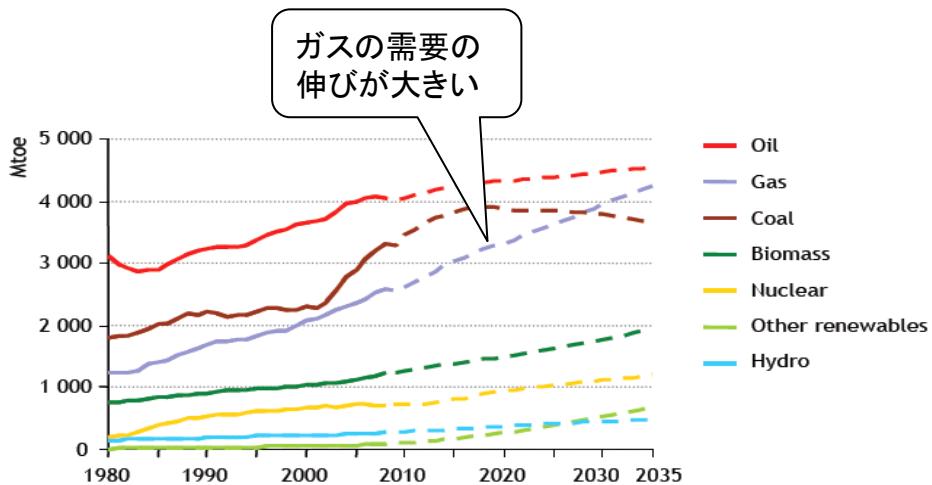


図 4－2 世界エネルギー需要予測（出典：IEA World Energy Outlook (2011)）

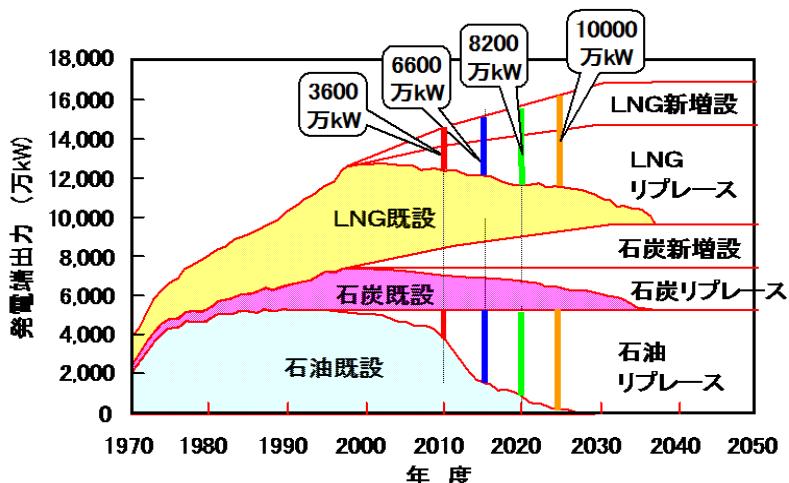


図 4－3 日本における電源構成の推移推定例(寿命 40 年)  
(出典：電力中央研究所「第 18 回エネルギー未来フォーラム」(1999))

また、世界全体のガスタービン発電市場は国内発電市場の 10 倍以上の規模があり、世界に先駆け、中容量の高効率発電システムが日本で実用化できれば海外展開として市場が開ける。100MW 級以下の高効率中小容量発電システムは送電網系統のインフラ整備が不充分な地域、特にエネルギー需要が急増している中国等アジア地域において、分散電源として地域の電源供給に貢献できる。また、分散電源としての海外への市場展開を図ることにより、外貨獲得および国内産業への波及効果が期待できる。

表4-2に、AHATのセールスポイントとユーザーのメリットを示す。

効率は中小容量クラスでは GTCC と同等以上であるが、このクラスのガスタービンは、欧米メーカーが技術的に先行し、販売シェアを占めている。そこで、独自の高湿分空気利用によるセールスポイントを付加して、事業化する戦略とする。

#### (運用性)

蒸気タービンがなくコンバインドサイクルに比べて高いフレキシビリティ(起動速度、負荷変化速度)が期待できる。特にコールド起動時間(ガスタービンや蒸気タービン、プラント機器が常温状態からの起動時間)は、排熱回収ボイラと蒸気タービンの暖機が不要のため、GTCC よりも高速な 60 分を目指している。

#### (環境性)

高湿分燃焼によって燃焼温度分布の均一化が可能であり、低 NO<sub>x</sub> 化が可能である。プラントの排熱において高温側と低温側の温度差を約 2 倍取れるため、空冷式とした場合でもコンバインドサイクルの場合の約半分の伝熱面積とすることを目標としている。空冷式の採用により、冷却水が利用できない内陸部への立地が容易となり、温排水の制約も緩和できる。

#### (経済性)

蒸気タービンがないことから機器構成がシンプルで設置工事の工期が短くて済み、建設費を低減できる。水回収により、補給水ゼロも可能となり、水資源が希少な地域で経済性メリット大きい。

表4－2 AHATのセールスポイントとユーザーのメリット

比較項目		AHAT(目標)		GTCC(ガスタービンコンバインドサイクル)	顧客ターゲットと メリット
効率	発電効率	○	200MW以下の同出力レベルでGTCCと同等以上	ベース	・日本、欧米:CO2削減による環境保全 ・アジア、欧州:ランニングコスト低減による経済性向上
運用性	起動時間	◎	ホット起動:30分 コールド起動:60分 (蒸気タービン無)	ホット起動:60分 コールド起動:180分 (蒸気タービンの暖機必要)	全地域:再生可能エネルギーとの連携(負荷変動への対応)
	負荷変化率 (時間あたりの出力の変化率)	◎	ガスタービン単独の場合と同等 (10%/min程度)	蒸気タービンの負荷変化率に依存 (5%/min程度)	
環境性	NOx (窒素酸化物) 排出濃度	○	脱硝装置無しで 10ppm以下 (高湿分燃焼)	脱硝装置必須	日本、欧米:低NOx排出による環境保全
	立地の自由度	◎	水回収装置の空冷化が比較的容易、内陸部にも設置可能 伝熱面積:50%	蒸気タービンの復水器の空冷化は伝熱面積大きく、臨海立地向き 伝熱面積:100%	・日本:自治体、事業者向けリスク回避型分散電源(内陸立地) ・中東、アフリカ、欧米:内陸部、グリッド未整備地域へ中小容量分散電源
経済性	機器コスト	◎	蒸気タービン系無しのため、GTCC以下	ベース	全地域:イニシャルおよびランニングコスト抑制による経済性(ライフサイクルコスト)最小化
	建設期間	○	蒸気タービン系無しのため GTCCより短工期	ベース	
	水消費	○	水回収により、補給水ゼロも可能	排熱回収ボイラのブローウォータの補給	渴水地域:高効率発電プラントを導入により、環境保全、経済性向上

次に、2010年に運開した出力50MW～200MWの中小容量ガスタービンの立地点に関し、地域別に臨海部か内陸部か分類した結果を図4-4に示す。同図によると、海に囲まれている我が国と異なり、世界全体でも内陸立地の割合は大きく、特に中東、アフリカの内陸立地の割合は大きい。発電効率がコンバインドサイクルと同等以上に高く、内陸立地も容易なAHATシステムが実用化されれば、これらの地域に導入できると考える。

ターゲット市場と戦略を、地域別に整理して表4-5に示す。同表に記載した主な戦略をまとめると、以下となる。

- 国内は、従来からターゲットとしてきたLNG火力リプレース、石油火力の燃料転換にも対応したリプレース市場だけでなく、エネルギーセキュリティ確保を目的とした自治体、発電事業者を新たなターゲットとする。
- 海外では、欧米など再生可能エネルギーの導入が多い地域の他、立地の自由度のメリットを生かし、中東、西アジア、アフリカ等の内陸部、グリッド未整備地域を中心にシェア拡大化を狙う。これらの国に導入することで、我が国には資源権益確保が可能となり、双方にメリットが生じる。

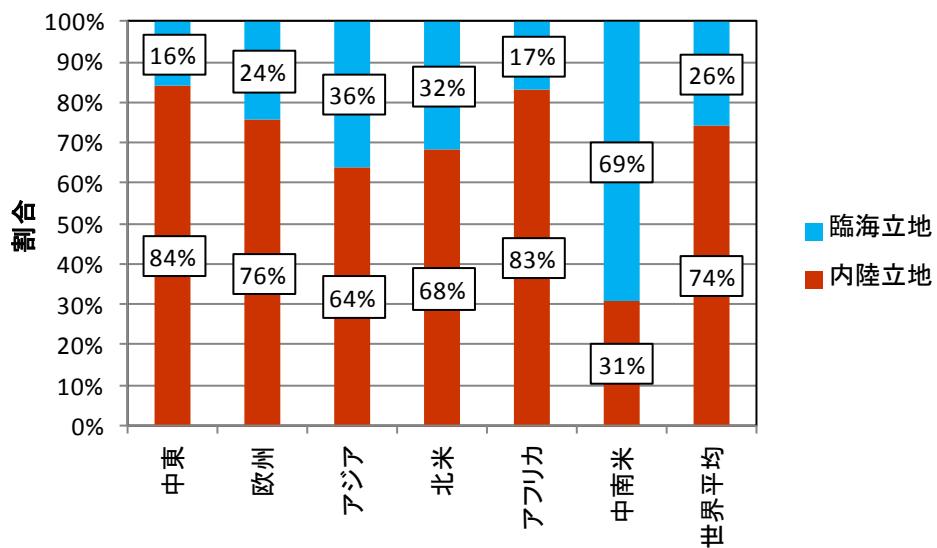


図4-4 地域別立地点の割合(2010年運開分)(出典:日立調査結果)

表4-5 ターゲット市場と戦略

No.	市場	特徴	戦略
1	国内	<ul style="list-style-type: none"> <li>・再生可能エネルギーとの連携ニーズ大</li> <li>・震災以降、エネルギーセキュリティ確保を目的とした分散電源のニーズ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・LNG火力リプレース、石油火力の燃料転換などのリプレース市場のユーザーに提案する</li> <li>・内陸立地の分散電源の案件を狙う</li> </ul>
2	欧米	再生可能エネルギーとの連携ニーズ大	起動時間、負荷変化率のメリット生かし再生可能エネルギーとの連携向けを狙う
3	中国、東南アジア	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中国の内陸部の発展</li> <li>・高気温</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・内陸立地の分散電源の案件を狙う</li> <li>・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする</li> </ul>
4	中東、西アジア、アフリカ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高気温</li> <li>・水が乏しい</li> <li>・グリッド未整備地域多い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする</li> <li>・水が乏しい地域に、補給水が少ないと必要な点をアピールする</li> <li>・グリッド未整備の内陸立地の分散電源の案件を狙う</li> </ul>

## 4－2 波及効果

高湿分空気利用ガスタービン技術は下記次世代システムの基盤技術になり、開発を推進していくことは重要である。

- ・ I G C C と高湿分空気利用ガスタービン技術の融合

石炭ガス化複合発電 I G C C と高湿分空気利用ガスタービン技術を組み合わせた I G H A T が提案されている。 I G H A T は石炭ガス製造時の排熱を水蒸気としてガスタービンに取り込むことができるため I G C C よりも効率が高く、単位出力あたりの設備コストも安くなると評価されている。

CO<sub>2</sub>をガス化剤とする酸素吹きガス化炉とクローズドサイクルA H A T を組合せることでA H A T の作動流体はCO<sub>2</sub>と水蒸気が主成分となり、水回収装置で水を除去すれば、CO<sub>2</sub>分離動力を必要とすることなく低温度のCO<sub>2</sub>を回収することができ、高効率CO<sub>2</sub>回収システムが実現できる。また、ガス化ガスの代わりに天然ガスとすることでCO<sub>2</sub>回収型クローズドA H A T を実現できる。

- ・ 水素燃焼ガスタービン

水素は高い燃焼温度が得られ、燃焼生成物は水蒸気である。水素燃焼ガスタービンの実現には超高温ガスタービンの技術とともに、高湿分空気利用ガスタービン技術も有効な基盤技術となることが期待される。

以上示したように、A H A T システムは極めて重要な技術開発といえる。

## 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

表5-1に、各実施項目の工程に関し、計画と実績を示す。平成23年3月の震災により、総合試験設備の建設が遅延したが、平成24年1月に運転開始することができ、各項目とも当初の目的を完遂した。

表5-1 A H A Tの研究開発計画

Legend: 計画 (Black arrow) / 実績 (Red arrow)

	項目（主担当）	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度
技術開発要素	①高湿分圧縮機 (日立)	評価モデル高度化、微粒化技術			総合試験評価
	②高湿分再生熱交換器 (住友精密)	材料試験・小型試験、コアの大型化			総合試験評価
	③高湿分多缶燃焼器 (日立)	バーナー要素試験・単缶燃焼試験			総合試験評価
	④高湿分翼冷却 (日立)	ハイブリッド冷却翼、高性能冷却試験			総合試験評価
試験	⑤3 MW級検証機 (日立、住友精密、電中研)	試験			中間評価
	⑥実用化技術総合試験 (日立、住友精密、電中研)	設計		製作	総合試験
解析	⑦A T A H特性解析 (電中研)	3 MW級検証機評価		他システム評価	総合試験評価
予算 (補助金ベース、百万円)		216	1085	2465	1032

## 5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

円滑な推進と最大限の成果を達成するため、図5-1に示す3事業者で分担し開発を推進した。ガスタービンシステム及び全体取りまとめを日立製作所が担当し、高温熱交換器の専門メーカーである住友精密工業がガスタービン用再生熱交換器を担当した。また新型システムの実用化にあたって重要な、電力等のユーザーの視点に基づくシステム評価を電力中央研究所が実施した。3MW級検証機による試験は3事業者が協力して実施した。40MW級総合試験装置による実用化技術総合試験についても3事業者が協力して実施し、研究の加速と事業の適正な推進を図った。

○ プロジェクトリーダー：（株）日立製作所 圓島 信也

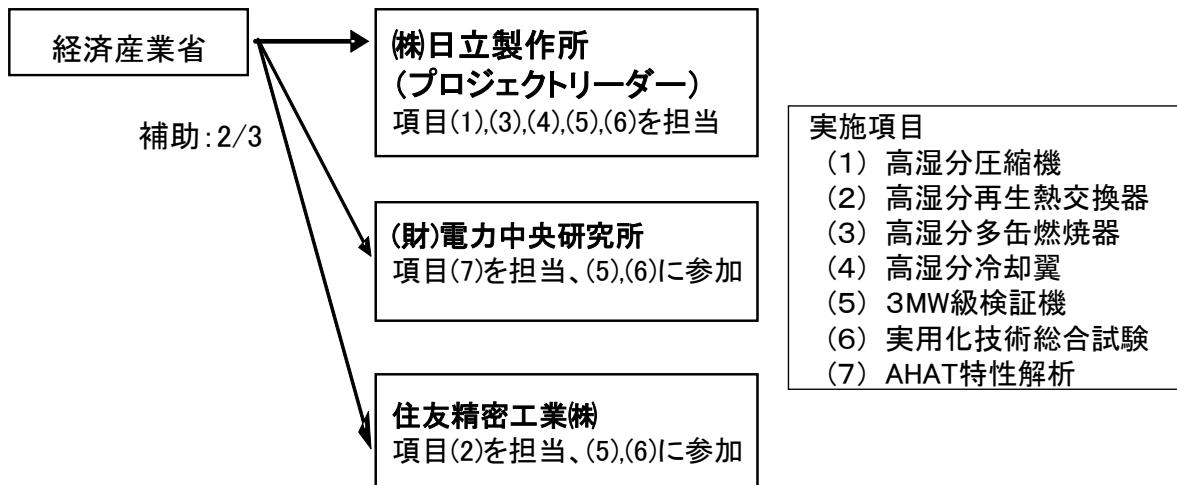


図5-1 AHAT研究開発体制

### 5－3 資金配分

技術開発要素、総合試験装置、特性解析の各段階において適切に資金を配分し、事業の円滑な推進に努めた。各機器の総合作用を確認する総合試験装置に全体の89%を使用した。

表5－2 資金配分（事業費ベース）

(単位：百万円)

年度 平成	20	21	22	23	合計
高湿分圧縮機	12.0	37.1	17.0	20.9	87.0
高湿分再生熱交換器	78.5	56.1	32.8	33.0	200.4
高湿分多缶燃焼器	32.0	103.0	27.4	25.0	187.4
高湿分翼冷却	15.0	55.0	36.5	14.0	120.5
3MW級検証機	90.0	114.0	0.0	0.0	204.0
実用化技術総合試験	92.6	1259.0	3582.0	1452.0	6385.6
A T A H特性解析	3.9	3.8	2.3	3.1	13.1
合計	324.0	1628.0	3698.0	1548.0	7198.0

#### 5－4 費用対効果

本事業には、4年間で48億円の補助金が投じられ、A H A Tシステムの有効性を確認しシステムの成立性の目処をつけるなどの成果をあげた。

A H A Tシステムは世界初の高湿分再生型ガスタービンシステムとして国内外の学会では高い関心を寄せられており、2008年日本ガスタービン学会から技術賞を受賞した。2009年米国機械学会ASME Turbo EXPOのCycle Innovations部門からBest Paper Awardを受賞し、さらに2010年米国機械学会ASME Turbo EXPOでは、全部門の中から唯一与えられるJ. P. Davis賞を受賞した。これらを含め、海外4回、国内2回の表彰を受けている。

#### (CO<sub>2</sub>削減効果)

中容量A H A TのCO<sub>2</sub>排出原単位は 0.35kg-CO<sub>2</sub>/kWhとなり、この値はリプレース対象と想定される既存の中容量コンバインドサイクル(CC)、油焚き汽力に対し大きなCO<sub>2</sub>削減率が期待できる。

	燃料	送電端効率 (%HHV)	CO <sub>2</sub> 排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /kWh)	AHAT導入時のCO <sub>2</sub> 削減率
中容量 AHAT	LNG	51	0.35	-
既存中容量 CC	LNG	44	0.405	15%
油焚き汽力	油	39	0.70	50%

また、年間CO<sub>2</sub>削減量として、2020年までのA H A T導入量を820万kWとし、年間稼働時間を3000時間/年・台とした場合 年間CO<sub>2</sub>削減量は530万ton/年となる。これは我が国の電気事業全体が年間に発生するCO<sub>2</sub>量の1.4%に相当する。

#### 5－5 変化への対応

燃料価格の高騰、電力の安定供給を背景に燃料多様化へのニーズが拡大しており、ピーク運用に関し、燃料をLNGだけでなく油まで対象を拡大し、油焚きA H A Tシステムを開発しておくことが有効である。

太陽光発電の大量導入計画により、火力発電には運用性の見直しがもとめられており、運用性に優れたA H A Tは調整用電源として有効である。

さらに火力発電にはCO<sub>2</sub>排出抑制が強く求められており、CCS Readyの要求が将来的には広がってくると予想される。A H A Tはクローズドサイクルにすることで CO<sub>2</sub> 分離動力なしに高効率に CO<sub>2</sub> を回収できる特長を備えている。