

# 高湿分空気を利用したガスタービンシステム (AHAT)

2009年11月13日

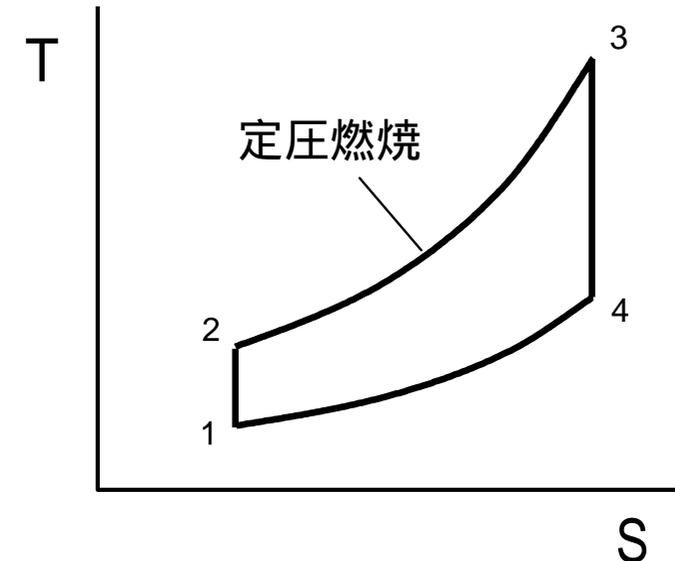
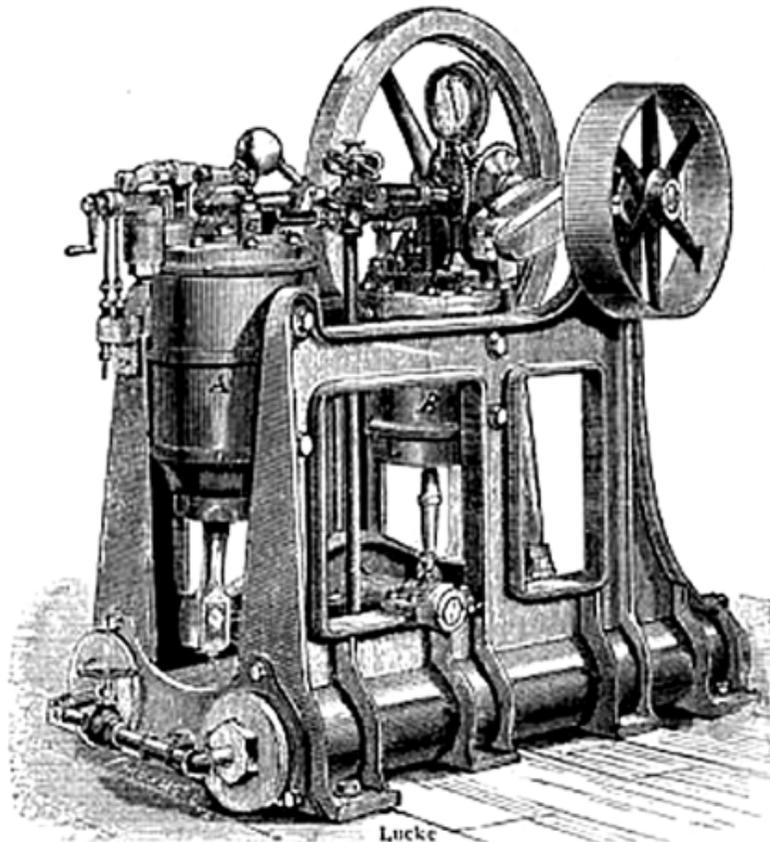
(株) 日立製作所 エネルギー・環境システム研究所

幡宮 重雄

- 1 . ガスタービンと熱サイクル
- 2 . 高温分空気を利用したガスタービンシステム
- 3 . A H A Tシステム
- 4 . システム検証試験
- 5 . 結言

## ブレイトンサイクル(1872)

断熱変化と定圧変化を組み合わせた  
ガスタービンのサイクルとして有名だが、最初は  
ピストンを有する定圧燃焼の内燃機関として考案



半世紀の歳月を経て  
ガスタービンサイクルに進化

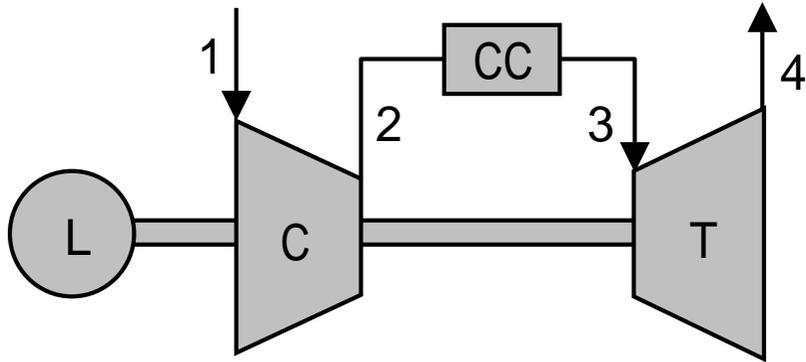
ガスタービンの実用化(1930年代)

- ・ 航空用ガスタービンエンジン(英、独)
- ・ 発電用ガスタービン (スイス)

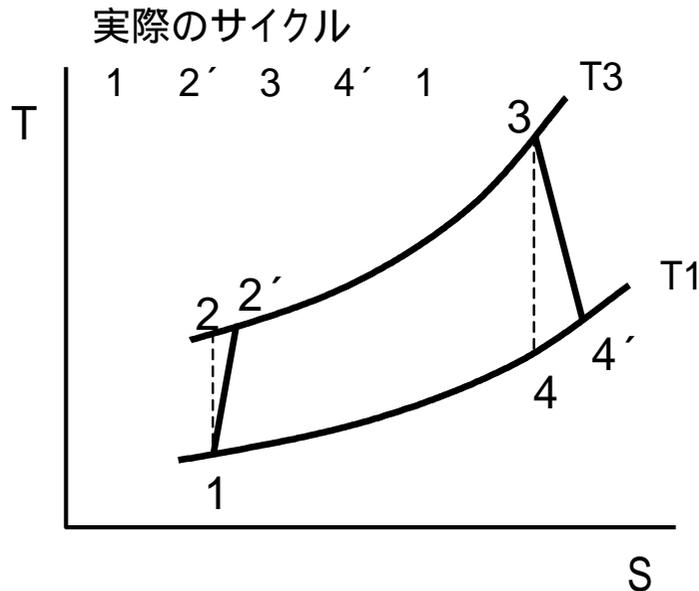
[http://www.todayinsci.com/B/Brayton\\_George/BraytonGeorgeEngine.htm](http://www.todayinsci.com/B/Brayton_George/BraytonGeorgeEngine.htm)

特集:ガスタービンサイクル - 源流からフロンティアへ -  
日本ガスタービン学会誌 vol.37 No.3 (2009年3月号)

ガスタービンの正味仕事 : (タービン仕事) - (圧縮機仕事)

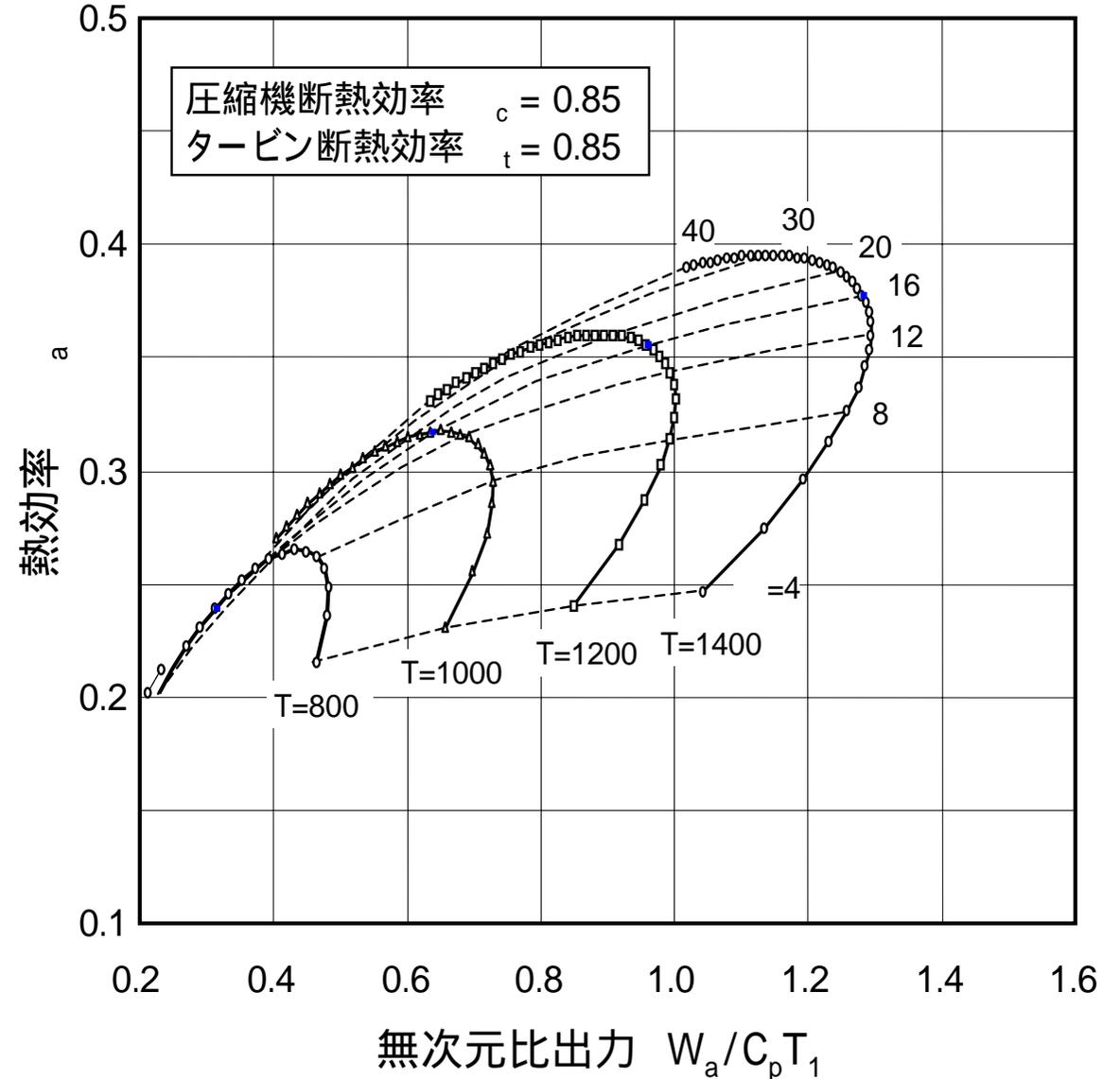


C: 圧縮機、CC: 燃焼器、T: タービン、L: 負荷  
ガスタービン基本構成



ガスタービンのTS線図

効率、比出力をそれぞれ最大にする圧力比が存在



ガスタービンの比出力 - 効率特性例

## ガスタービンシステムの効率向上

- ・空力性能の向上 (圧縮機、タービン)
- ・タービン入口温度の上昇      翼冷却技術、耐熱材料、
- ・蒸気タービンとの組み合わせ (コンバインドサイクル)

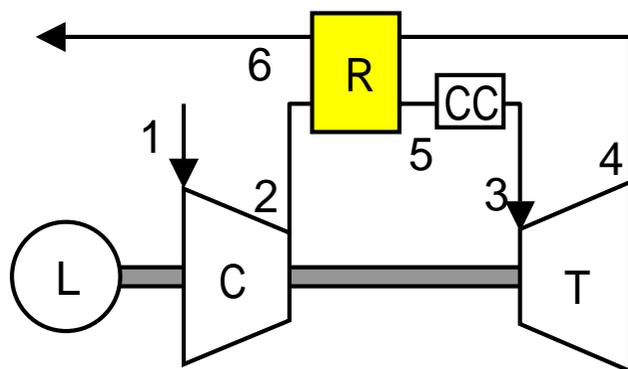
## 環境対応

- ・Low Emission      特に 低NOx

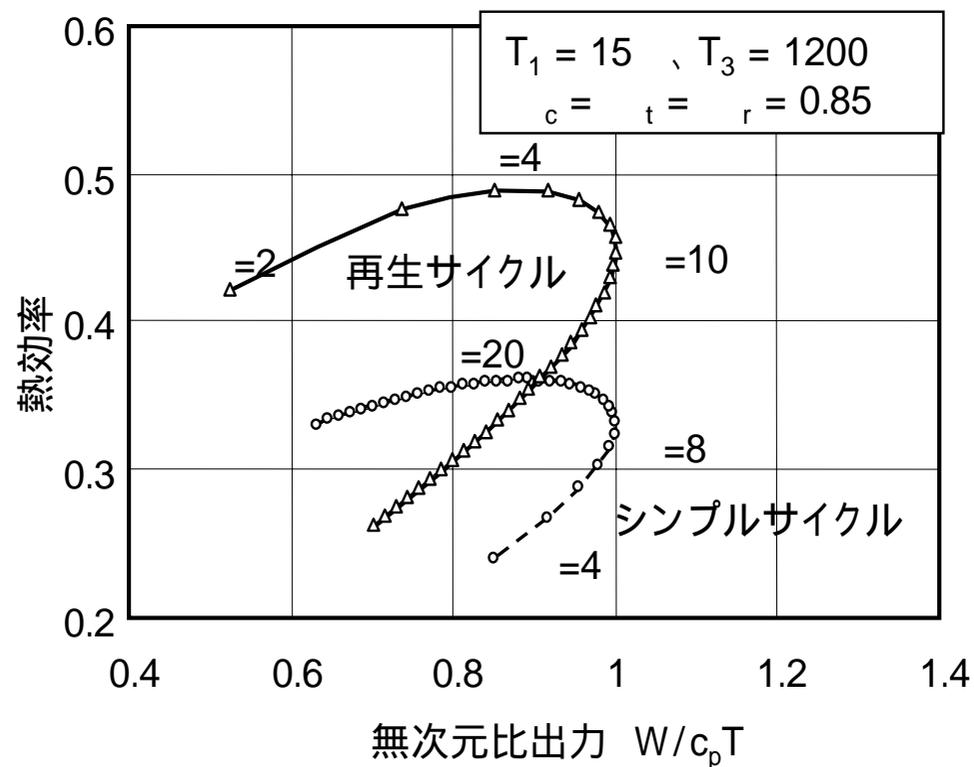
タービン入口温度 大型ガスタービンで 1500 級実現  
発電端効率 ( ~ 60%LHV)

- ・更なる高温化への挑戦
- ・熱サイクルの見直し

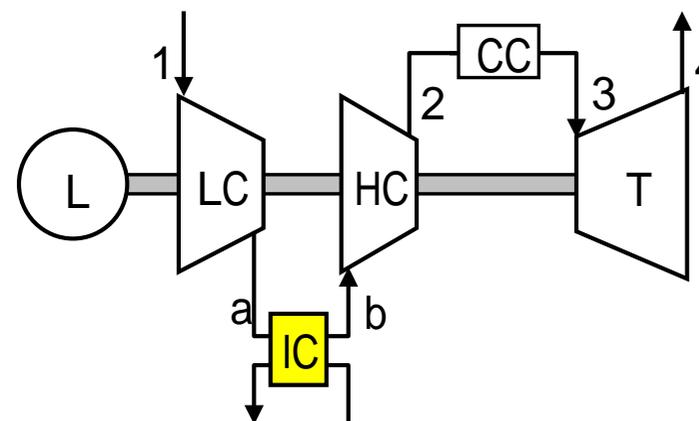
## 再生サイクル



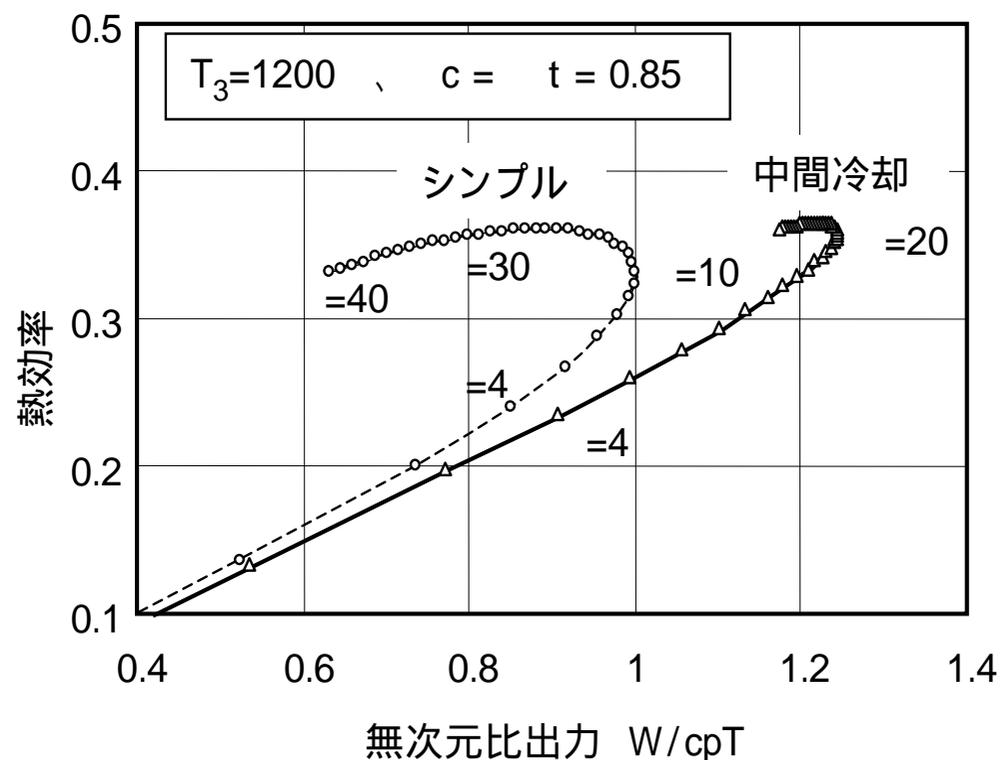
燃料削減により効率向上  
圧力比 の小さい(小型)ガスタービンに有効



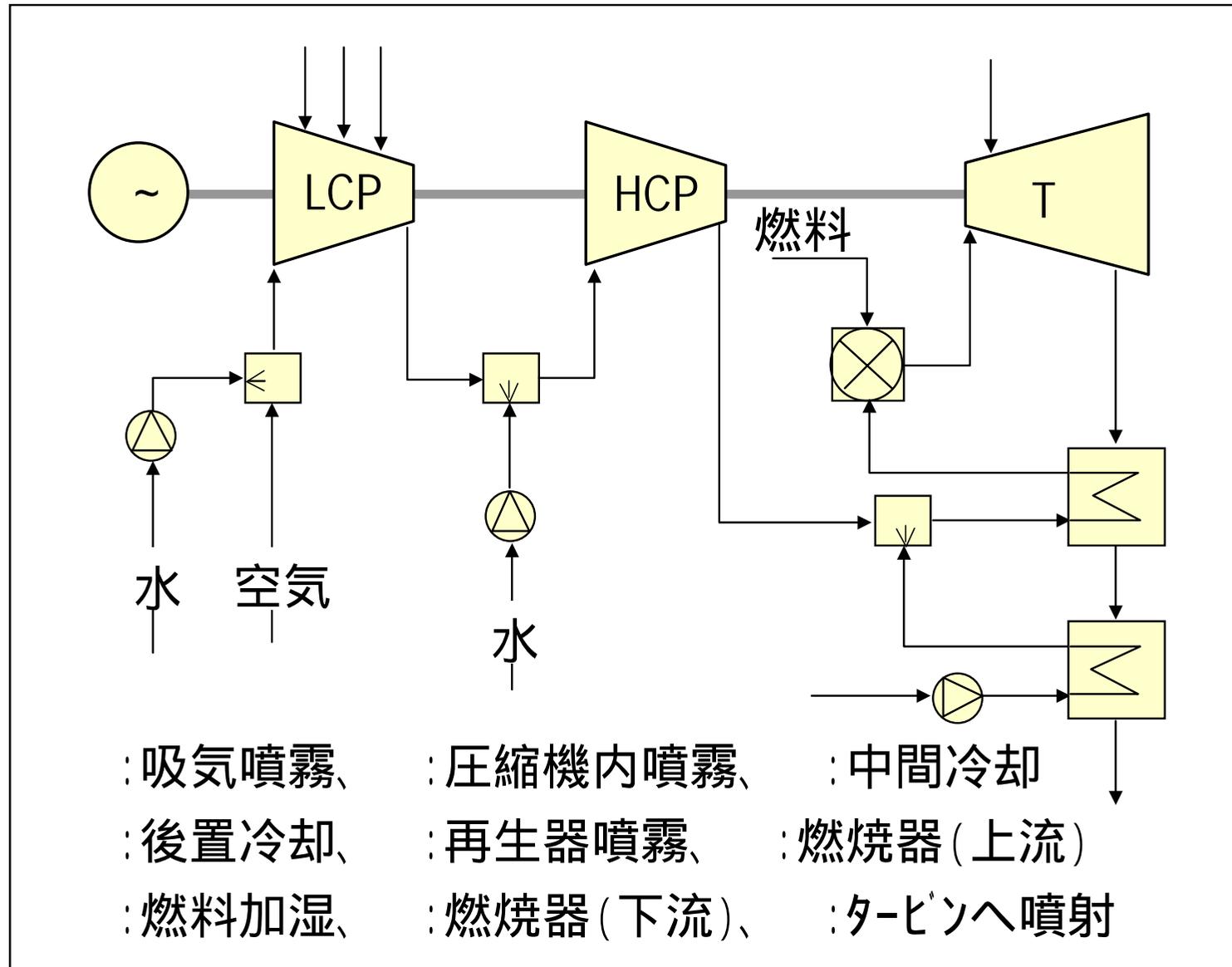
## 中間冷却サイクル



圧縮動力低減により出力増加  
圧力比 が大きなガスタービンに有効

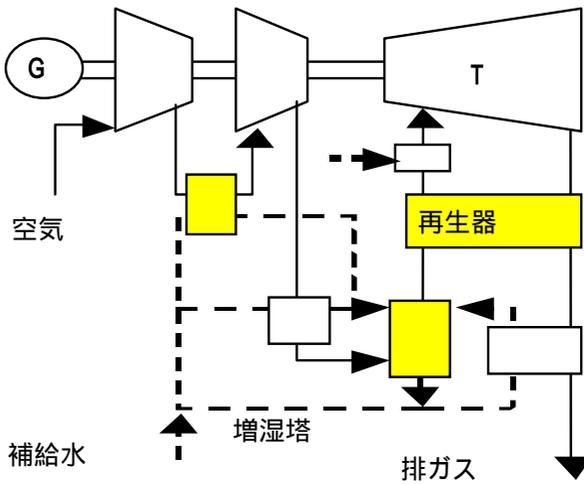
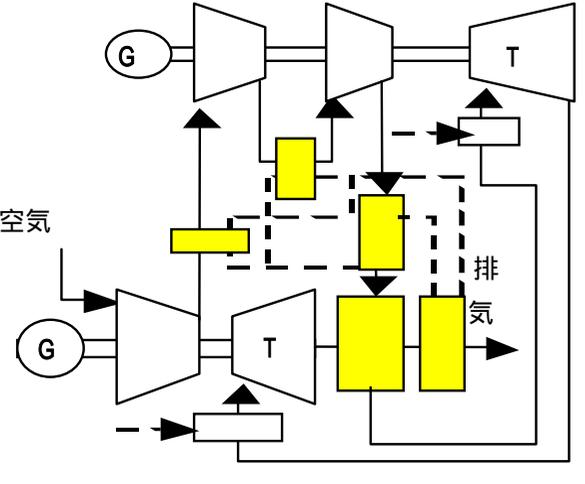
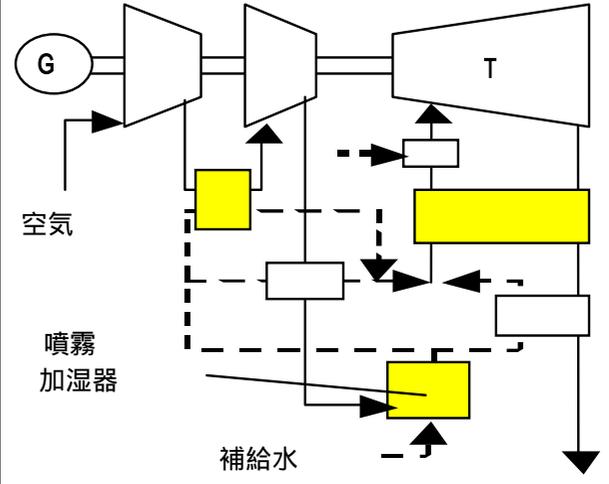


- ・従来から水(蒸気)注入は実施 目的:出力増加、NOx低減
- ・高湿分空気利用による特性改善  
水の蒸発潜熱や比熱が大きなことを利用





# 高湿分空気を利用したガスタービン2

主用途	高効率発電		
システム	HAT(1981年)	CHAT(1995年)	REVAP(1996年)
加湿方法	増湿塔で温水蒸発	同左	圧縮空気に液滴噴霧し熱交内で蒸発
構成			
特徴	コンバインドを凌ぐ高効率 部分負荷特性良好 高湿分燃焼で低NOx	HATサイクルの変形 既存GTと高圧 小型HATシステムの組み合わせ	HATサイクルの変形 設備の簡素化(増湿塔不要)
性能 GT仕様	202MW, 53.4% 圧力比 24	292MW, 52% 圧力比 53	40MW, 54% 圧力比 20
開発状況	FS、燃焼試験実施	FS実施	論文のみ
発明・開発者	三菱瓦斯化学、EPRI、DOE	EPRI、ESPC、TVA	ブリュッセル大学

# 高湿分空気を利用したガスタービン3

主用途	高効率発電		
システム	HAT(1981年)	TOPHAT(1997年)	AHAT(1998年)
加湿方法	増湿塔で温水蒸発	圧縮機内部と圧縮機吐出空気に液滴噴霧	圧縮機吸気に噴霧 + 増湿塔で温水蒸発
構成			
特徴	コンバインドを凌ぐ高効率 部分負荷特性良好 高湿分燃焼で低NOx	圧縮機内部での液滴蒸発による動力低減	圧縮機分割不要。水回収による補給水確保
性能 GT仕様	202MW, 53.4% 圧力比 24	104MW, 57% 圧力比 50	100MW級, 57% 圧力比 20
開発状況	FS、燃焼試験実施	論文のみ	FS実施、パイロットプラント建設
発明・開発者	三菱瓦斯化学、EPRI、DOE	KEMA(オランダ)	日立、電中研、住友精密

1. 熱サイクルの相違
2. 境界条件の相違 (圧力比、タービン入口温度)
3. ガスタービン性能の相違 (機器効率、耐熱材料、リーク量)

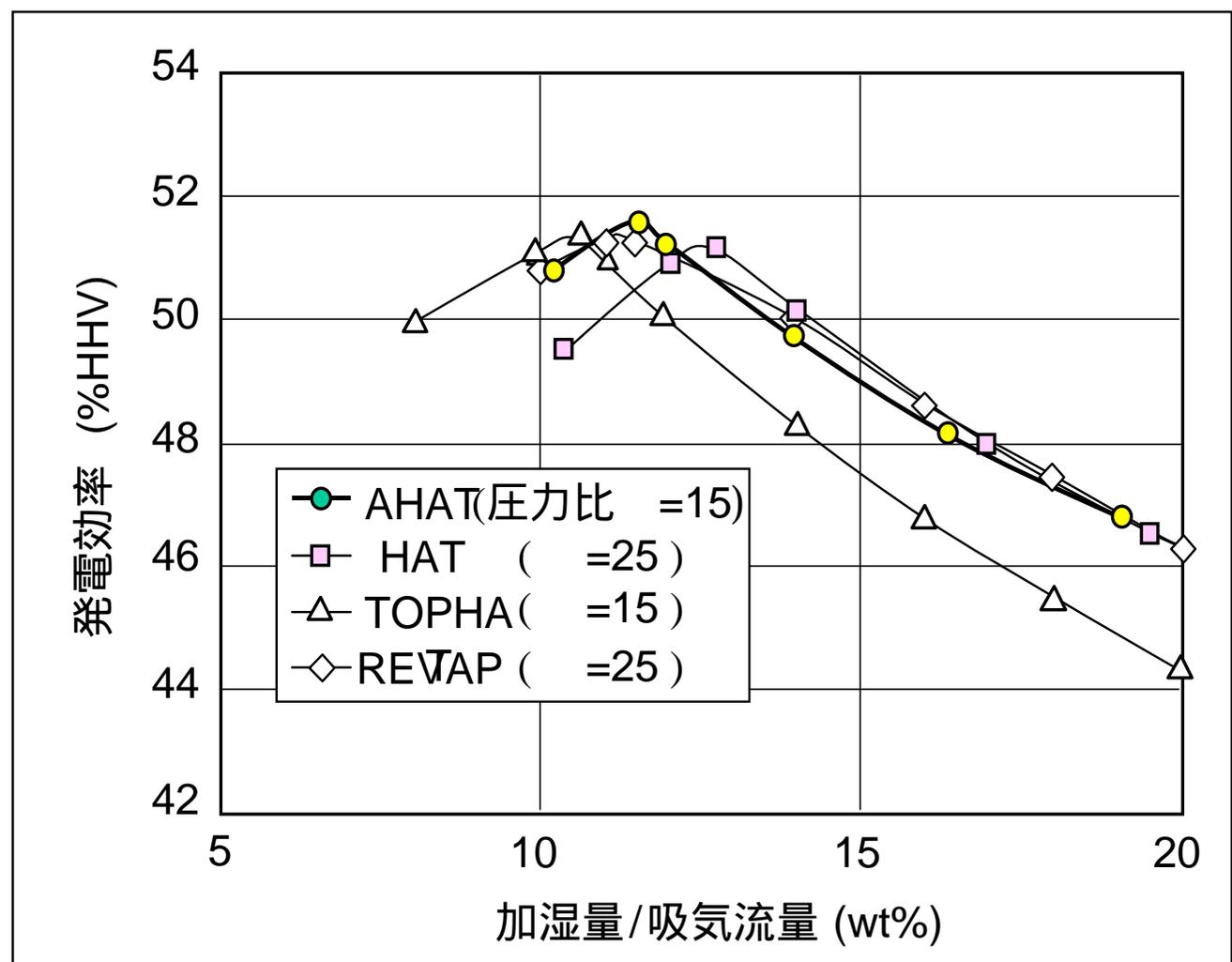
極力評価条件を同一  
とした相互比較を実施



評価結果: いずれも同程度  
の高効率を達成可能

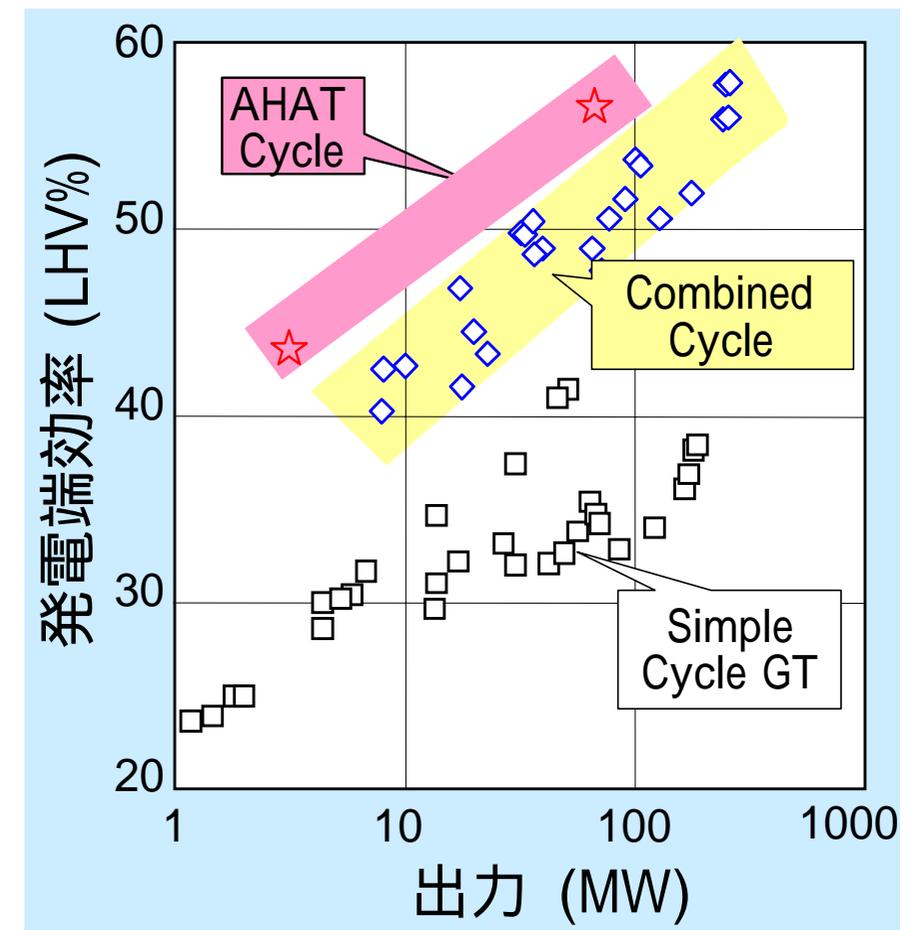
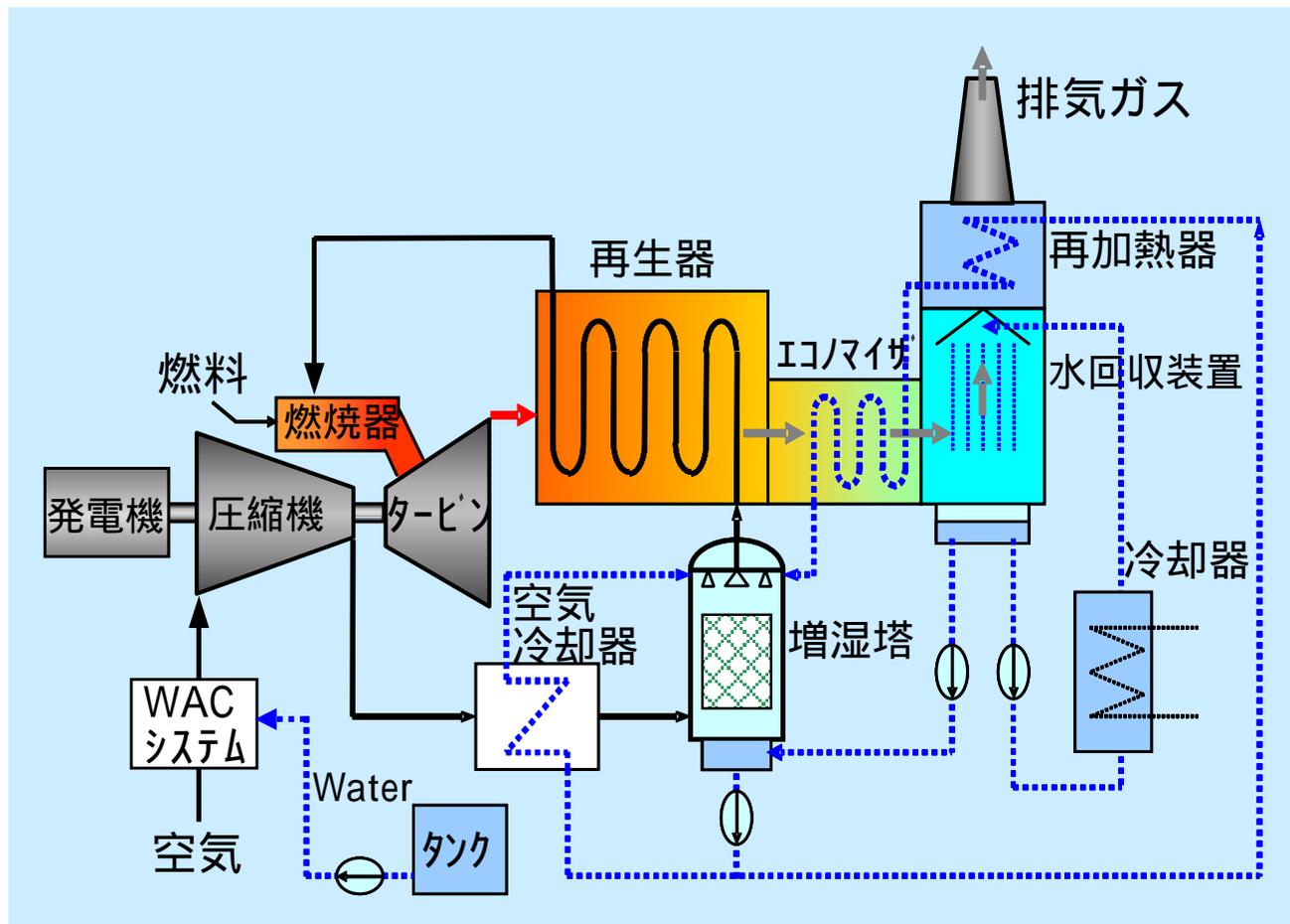


技術課題が少なく実現  
可能性の高いシステム  
選定が重要



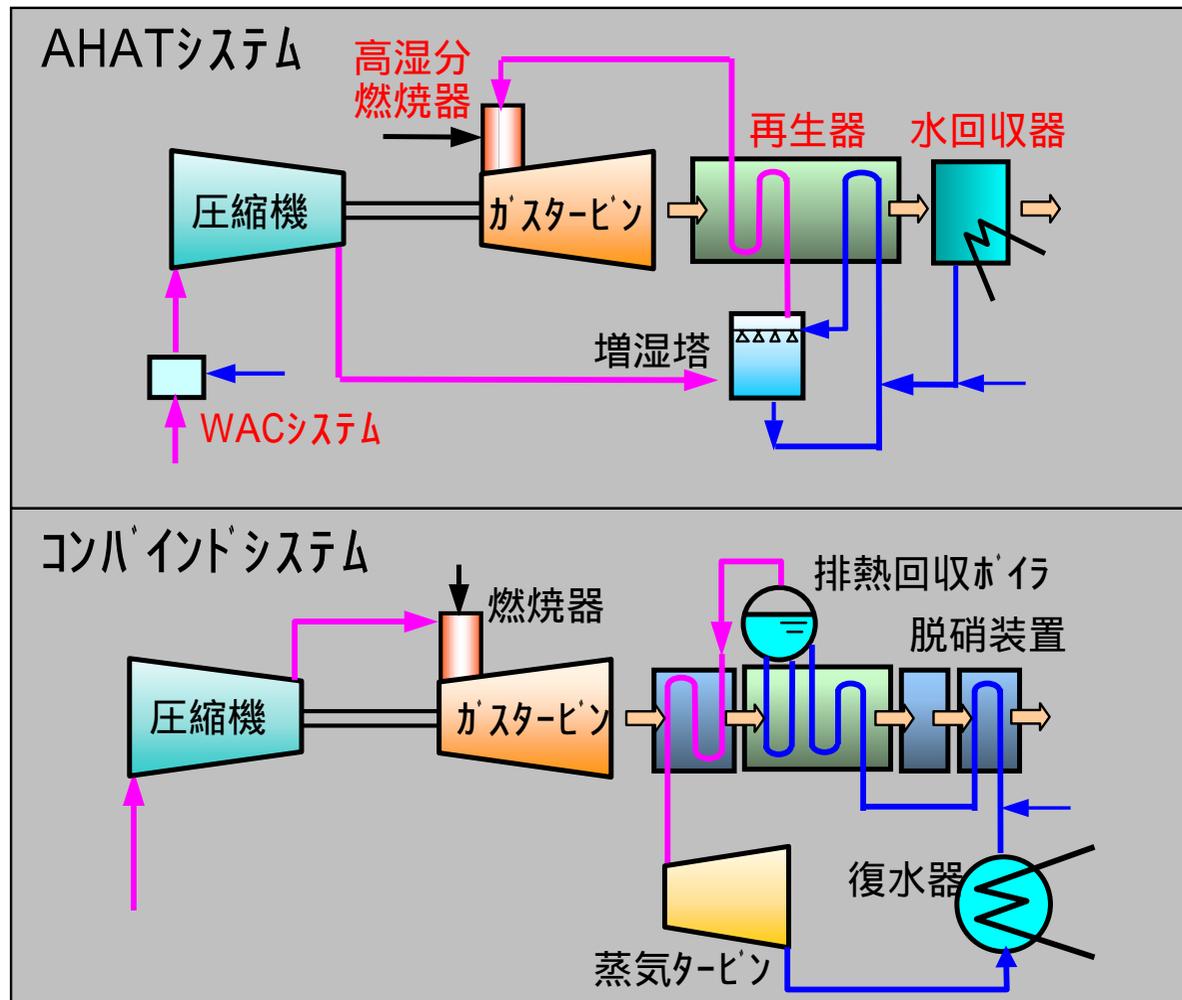
## AHAT (Advanced Humid Air Turbine)

- ・ガスタービンのみでコンバインドサイクルと同等以上の出力と効率達成を目指す  
新型ガスタービン発電システム
- ・経済産業省の支援('04～)をうけ要素技術開発・パイロットプラント建設を推進
- ・パイロットプラント総合試験で、AHATシステムの原理的成立性を検証



WAC: Water Atomization Cooling

- ・高出力・高効率なガスタービン発電システム
- ・蒸気タービン系統が不要
- ・起動時間が短く、部分負荷効率が低い
- ・環境に優しいシステム(低NOx、CO2削減、白煙なし)



## 高湿分に関する技術

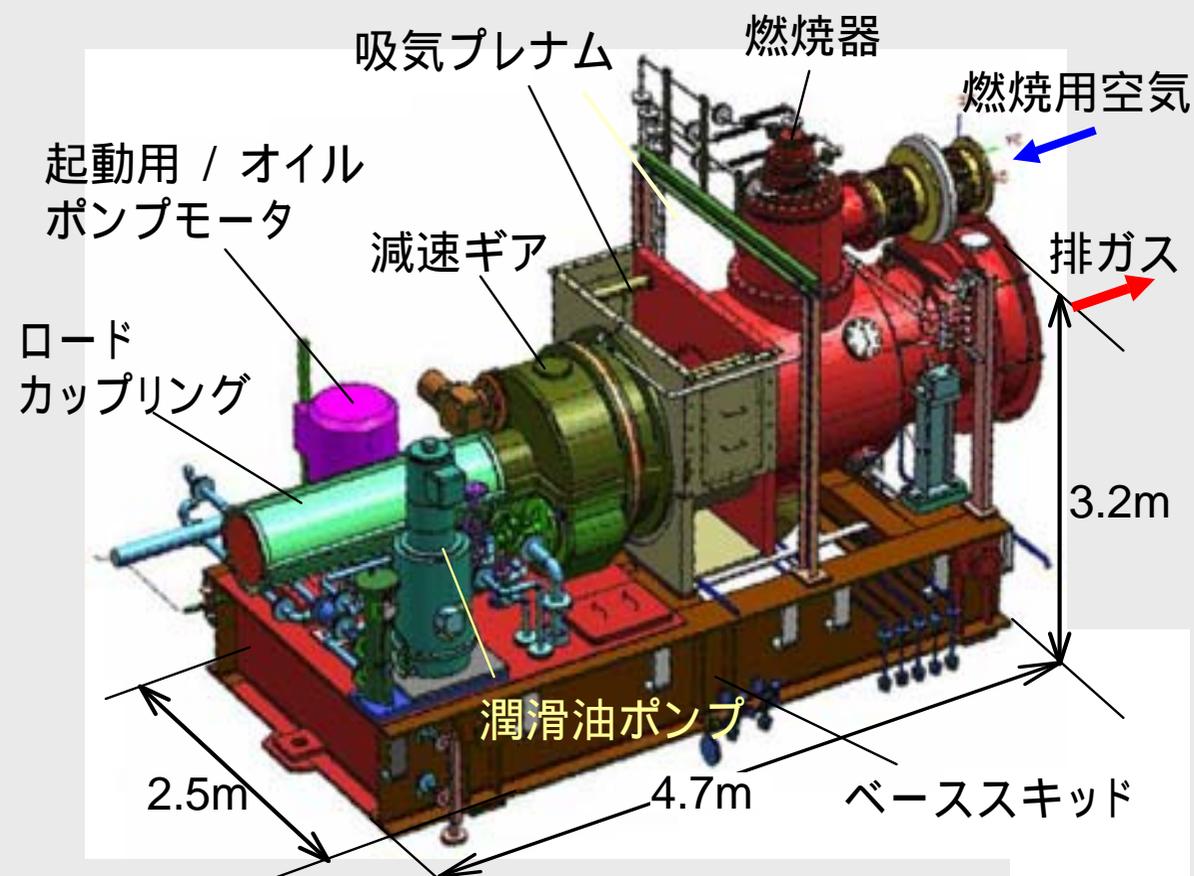
- ・吸気噴霧(WAC)システム
  - 圧縮動力の低減
  - 1軸型GTで中間冷却効果
- ・高湿分再生サイクル
  - 圧縮空気への加湿
  - 高効率再生熱交換器
- ・高湿分空気燃焼
  - 大幅なNOx低減(10ppm以下)
  - 新型クラスターバーナの採用
- ・排ガスからの水回収システム
  - 水資源の有効活用
  - 凝縮潜熱一部回収

## 基本仕様

- ・出力: 3.6MW
- ・効率: 42.5% LHV
- ・圧力比: 8
- ・燃焼温度: 1180
- ・空気流量: 10kg/s
- ・タービン回転数: 17800rpm



ガスタービンセット

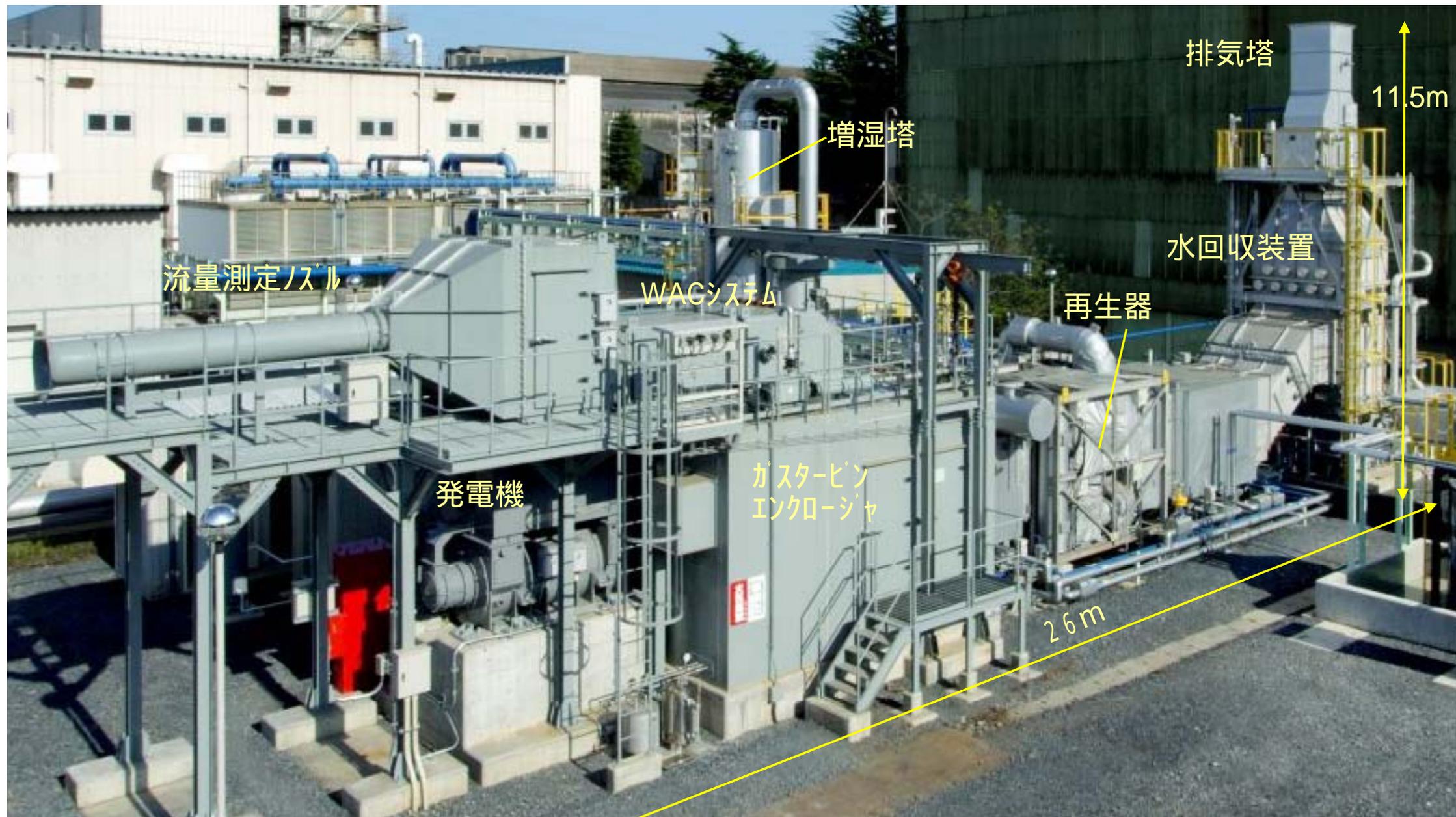


ガスタービン概要



圧縮機: 遠心2段、タービン: 軸流2段  
タービン ロータ

完成:2006/09、試験運転:2006/10~

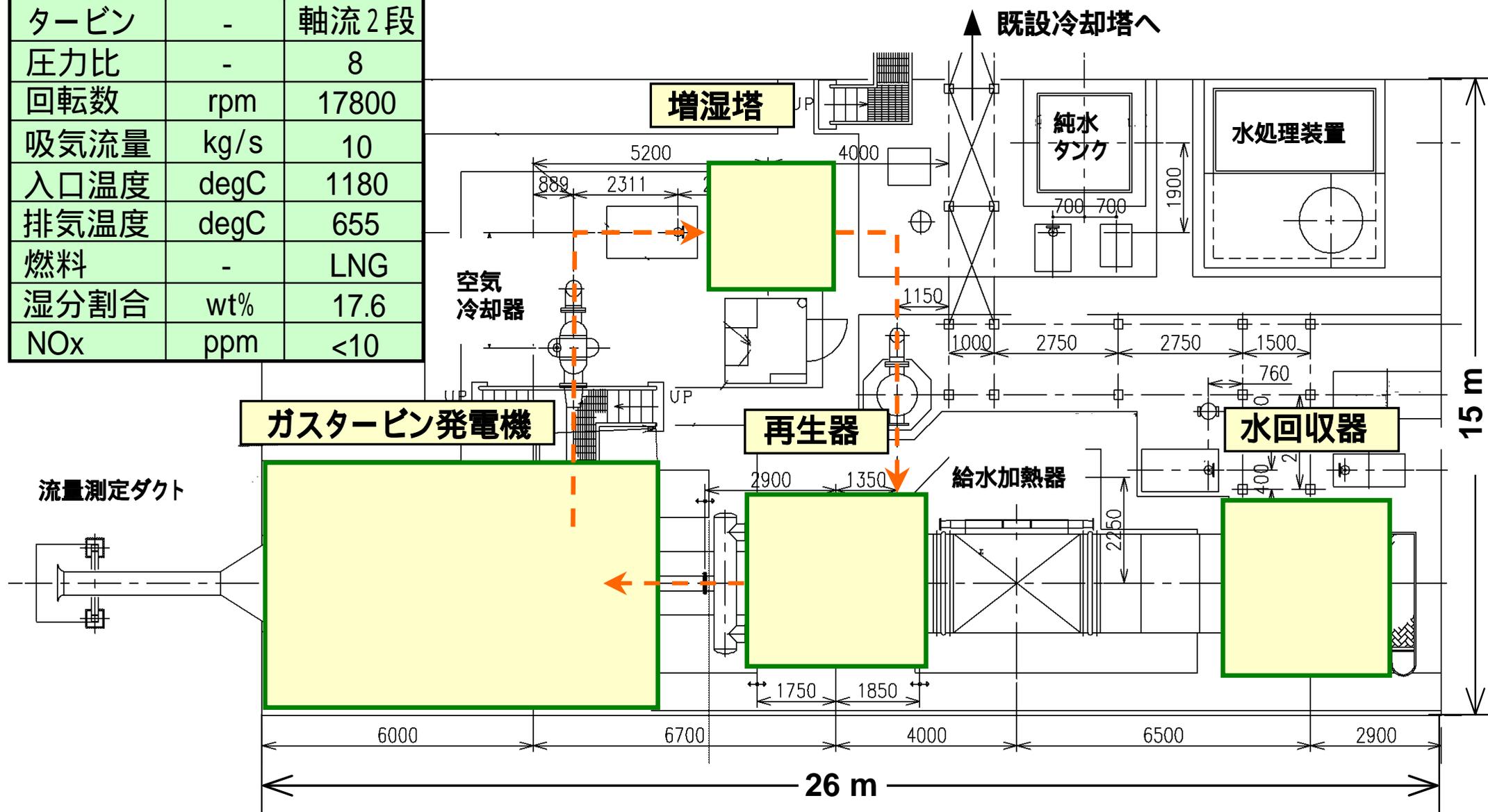


4MW級 AHATプラント(茨城県ひたちなか市)

# AHATパイロットプラント仕様および配置

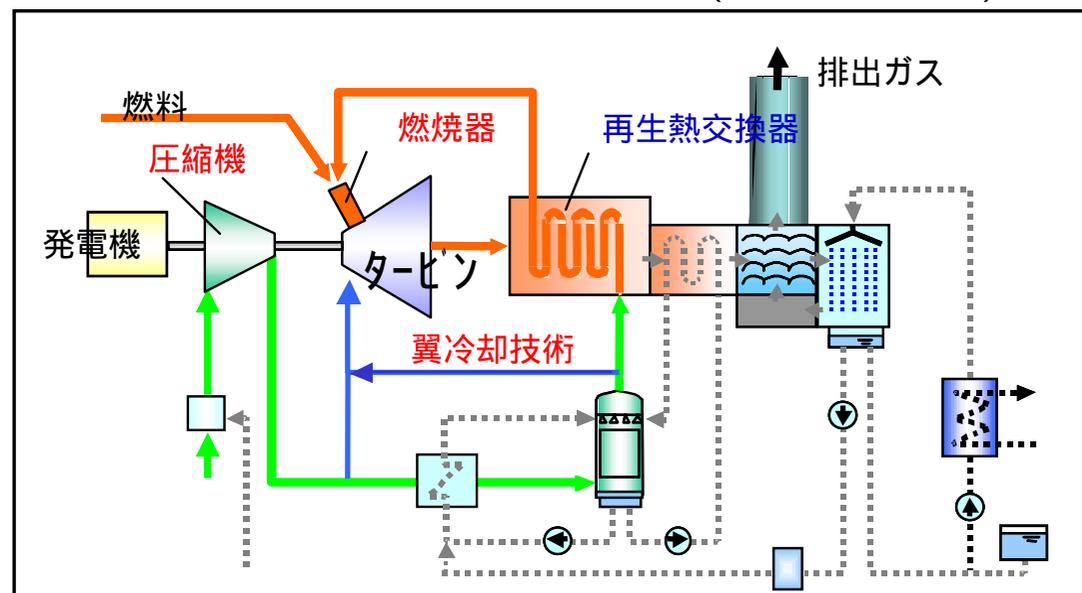
項目	単位	計画値
定格出力	MW	3.6
発電効率	%LHV	42.5
圧縮機	-	遠心2段
タービン	-	軸流2段
圧力比	-	8
回転数	rpm	17800
吸気流量	kg/s	10
入口温度	degC	1180
排気温度	degC	655
燃料	-	LNG
湿分割合	wt%	17.6
NOx	ppm	<10

- ・ 2006年10月より試験運転開始
- ・ システム成立性の確認、性能、運用性の評価



中容量AHAT機への適用をターゲットに、下記要素技術を開発（フェーズ1）

- 高湿分圧縮機
- 高湿分再生熱交換器
- 高湿分燃焼器
- 高湿分翼冷却技術



## 総合試験

3MW級総合試験設備による  
システム成立性の検証

他システムとの客観的相互比較

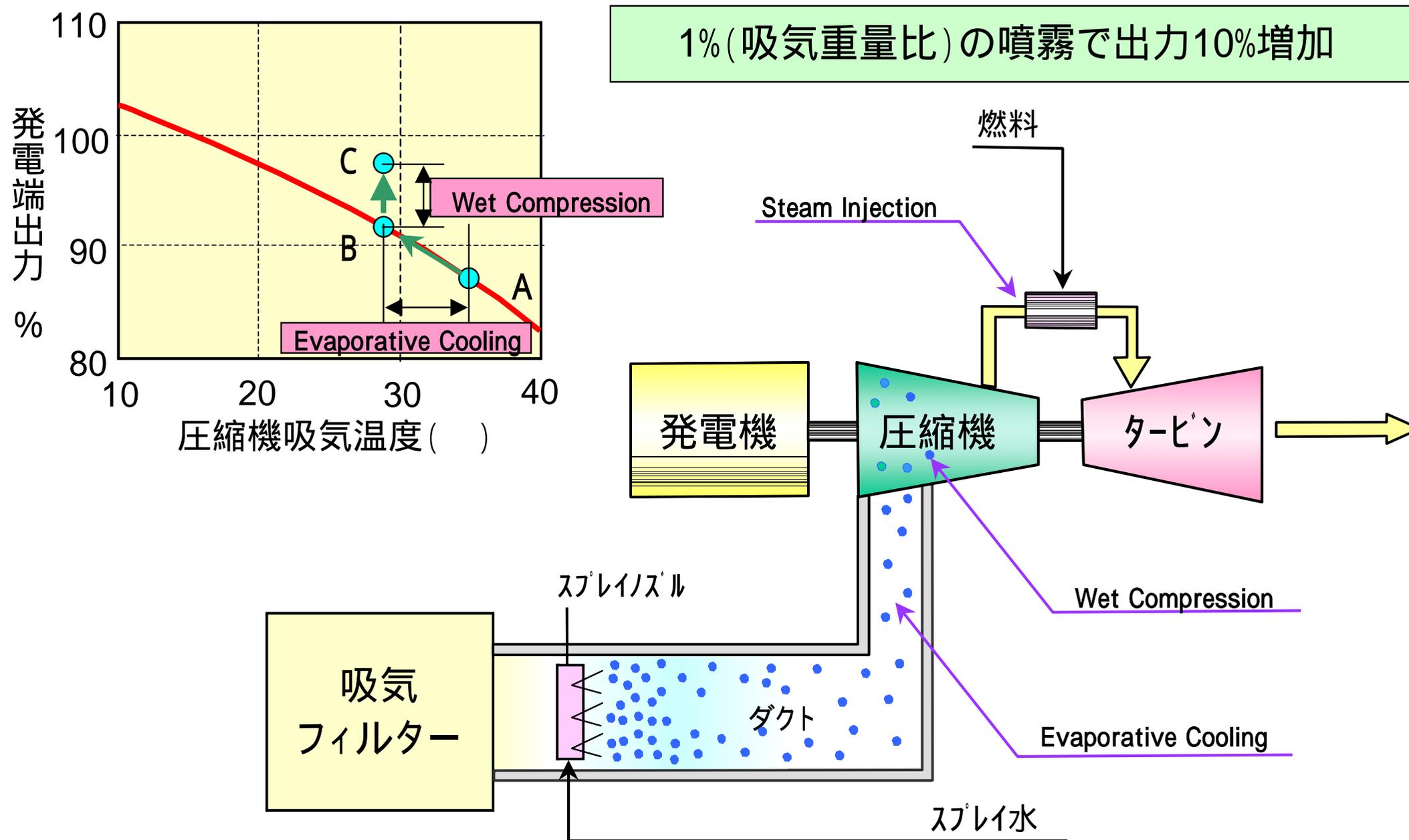
ユーザーの視点に立ったシステム評価

分担	開発項目
日立製作所	、 、 、
住友精密工業	、
電力中央研究所	、

研究開発項目 \ 年度	2004	2005	2006
高湿分空気に関する要素技術	解析・個別試験		→
総合試験装置の製作、試験	設計・製作		据付 → 総合試験
ユーザー視点のシステム評価	調査分析・システム評価		→

2008年から（フェーズ2）を開始

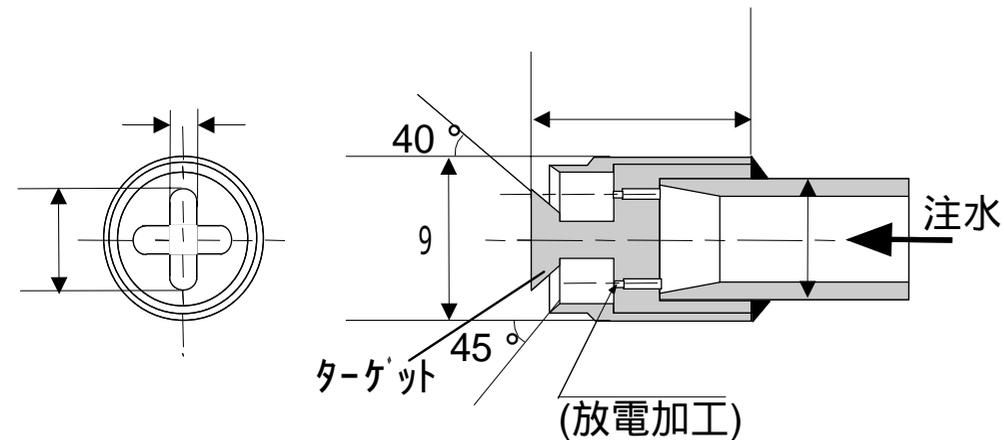
## 吸気噴霧冷却技術 WAC : Water Atomization Cooling



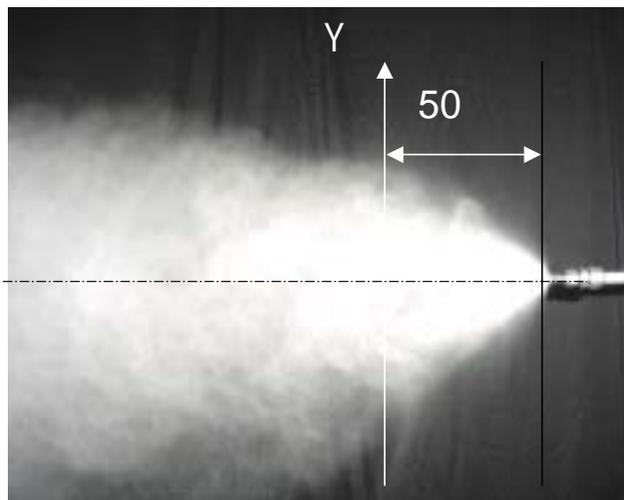
## ノズル径が小さく、アシストエアー不要の小型1流体ノズルを開発



ノズル外観

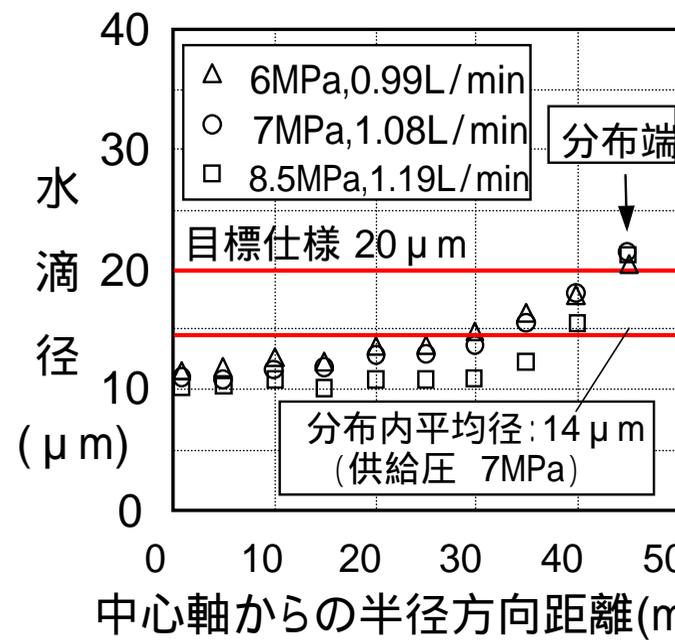


小型1流体ノズル(4ターゲット)の形状



噴霧状況

液滴径測定位置：ノズル先端から50mm



開発ノズルの液滴径分布

### 従来品との性能比較

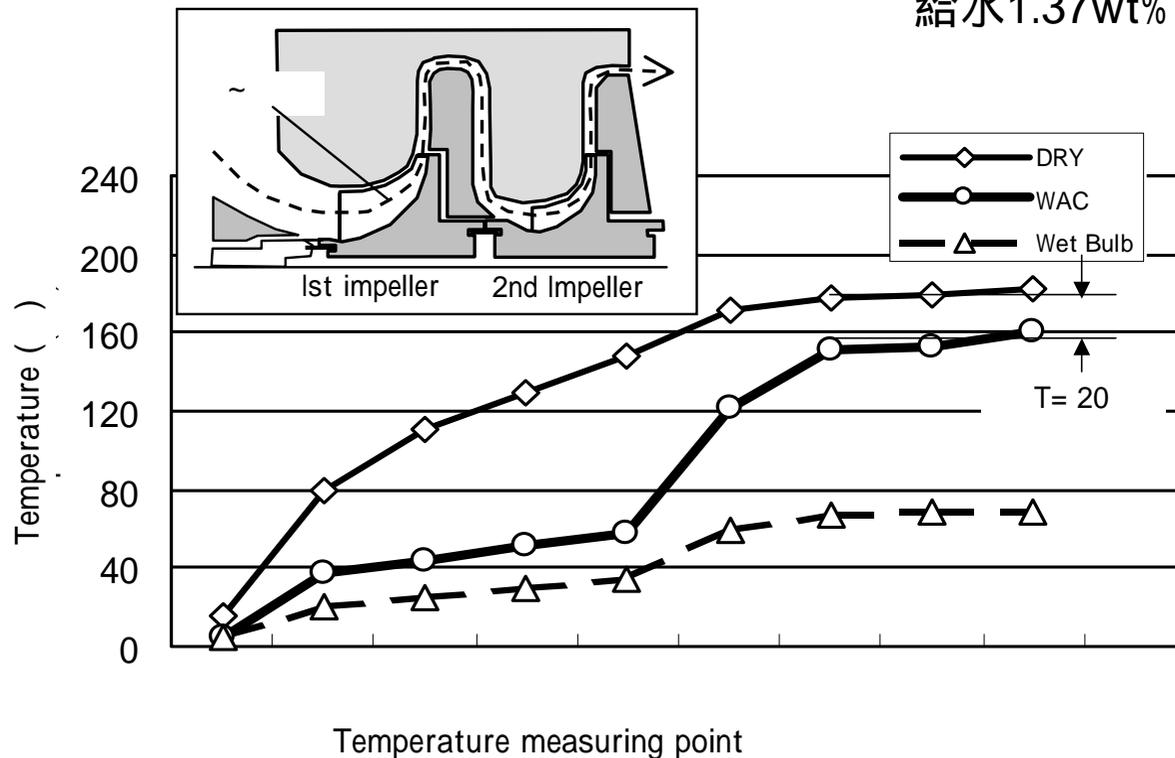
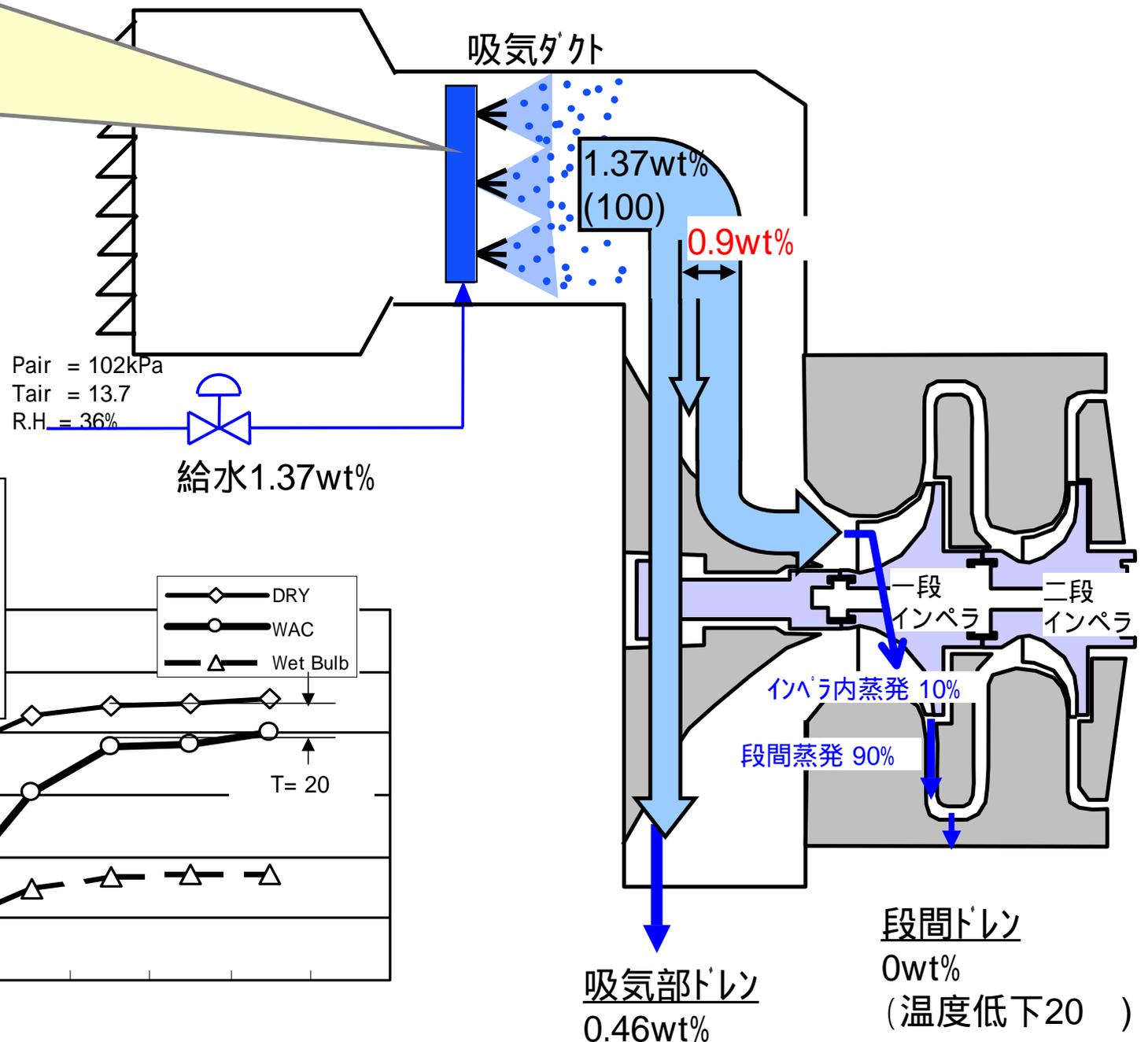
	開発品	A社*
供給圧力 MPa	7	13.8
平均液滴径 μm	14	16
噴霧流量 L/min	1.08	0.17
微粒化方法	多ターゲット 集合衝突型	1ターゲット 衝突型

従来品に比べ同程度の液滴径で6倍の流量を噴霧可能

## 初段静翼部にて噴霧液滴の完全蒸発を確認



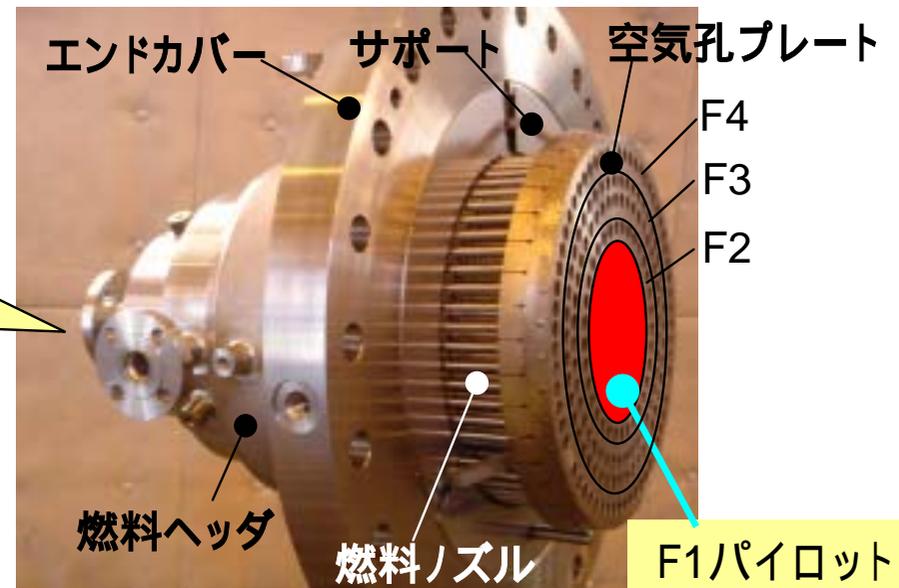
Water Atomization Cooling



## 高湿分燃焼技術

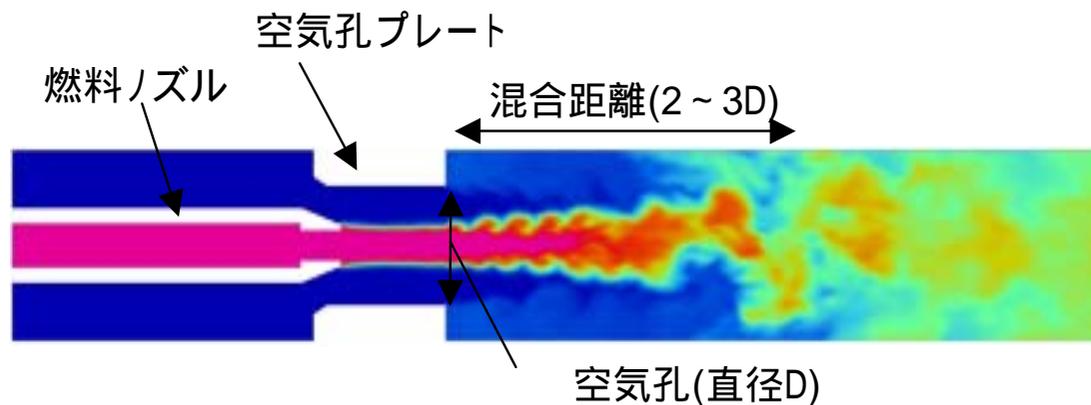
開発目標：高温・高湿分空気条件下で  
低NOxと安定燃焼の両立

- ・多数の燃料 - 空気同軸噴流による混合促進低NOx構造
- ・径方向4群で燃料制御し、負荷運用対応
- ・中央のF1パイロット炎強化(旋回, 燃料UP)



F1パイロット  
旋回保炎

### 多孔同軸噴流クラスターノズル

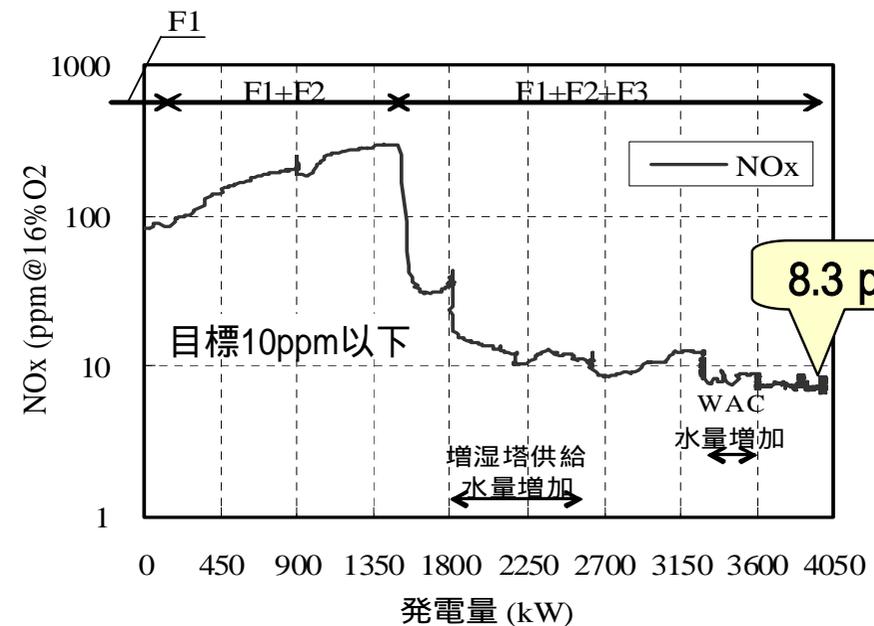


燃料 - 空気同軸噴流の燃焼シミュレーション

- ・出口直径の2-3倍の距離で急速混合
- ・逆火ポテンシャルなし

多孔同軸噴流クラスターバーナを開発し  
定格負荷時のNOx値8.3ppmを確認

### 多孔同軸噴流クラスターバーナ



8.3 ppm

目標10ppm以下

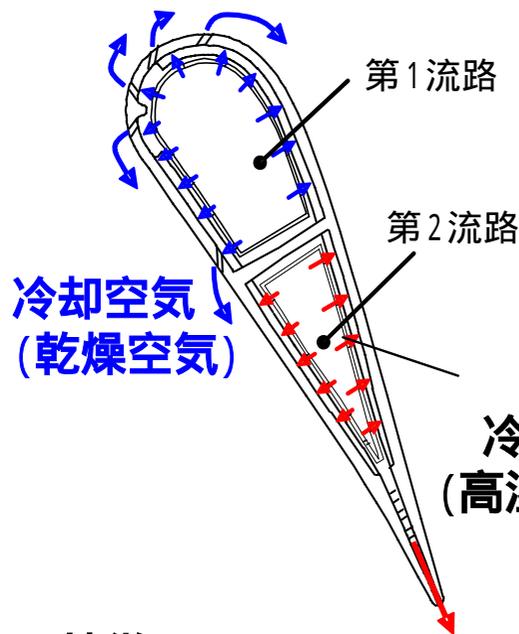
増湿塔供給  
水量増加

WAC  
水量増加

圧縮機吐出空気より冷却能力の高い、低温高湿分空気を利用した冷却強化  
ハイブリット冷却翼 により冷却効率70%以上達成の見通し

## ハイブリット冷却翼

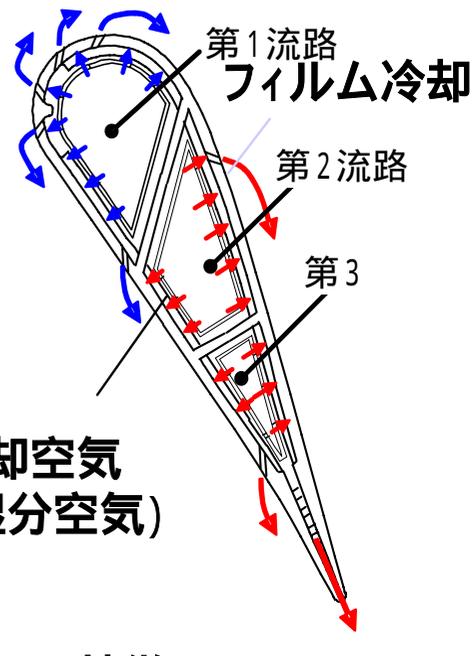
ハイブリット冷却翼



<特徴>

- ・第2流路を高湿分冷却
- ・第2流路は内部冷却のみ

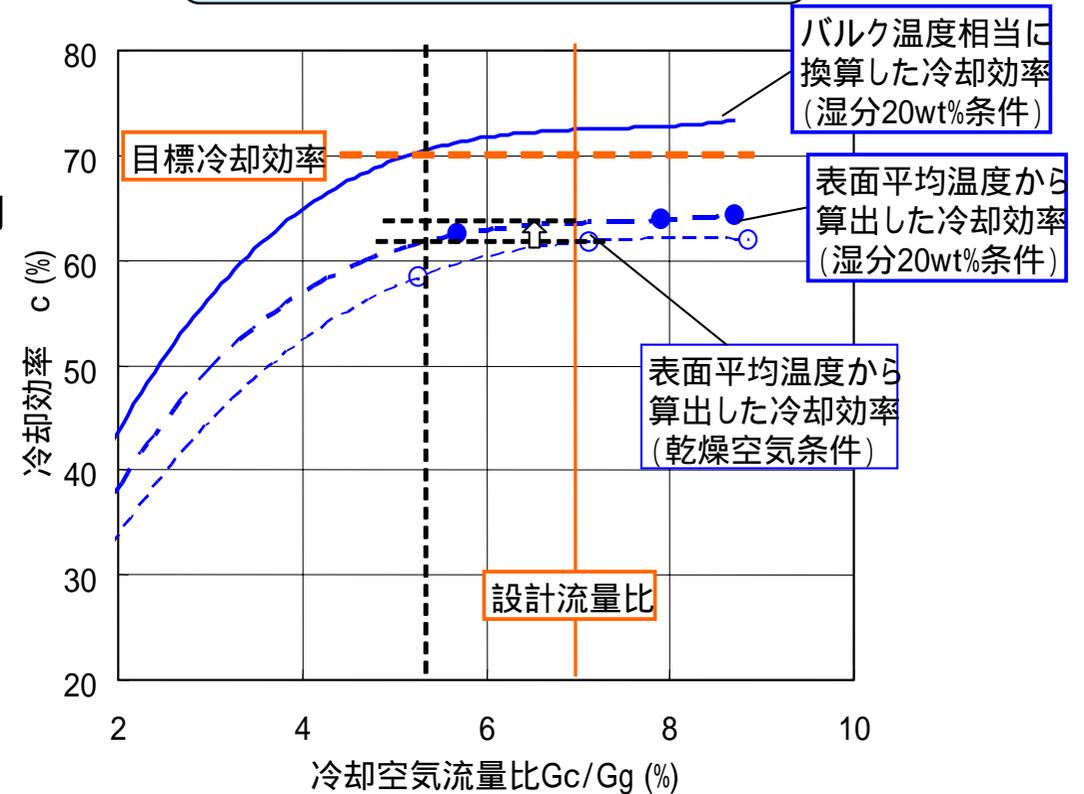
ハイブリット冷却翼



<特徴>

- ・第2,3流路を高湿分冷却
- ・第2流路にフィルム冷却採用

## 試験結果：冷却効率



### 冷却翼 の冷却効率

#### 冷却効率算出式

冷却効率:  $c = \frac{T_g - T_m}{T_g - T_c}$

Tg: 主流ガス温度(Mean断面)  
Tm: メタル温度  
Tc: 冷却空気供給温度

目的 ガスタービン排ガスにより燃焼用空気を予熱し、熱効率を向上

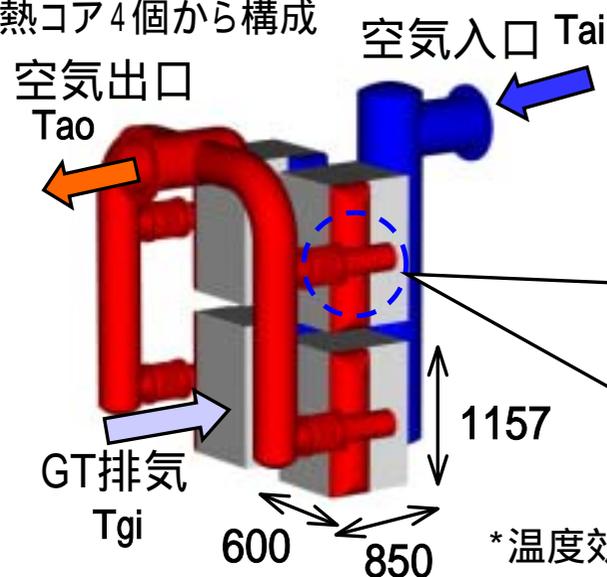
## 小型ガスタービン用再生熱交換器仕様比較

機種 (熱効率LHV%)	加湿 有無	温度 効率 %	GT 出力 MW	排気 温度	圧力比 -
SMGT* (37)	無	83.2	2.6	673	8
Mercury 50 (38.5)	無	90.0	4.2	630	9
AHAT (43)	有	<b>93.0</b>	3.7	670	8

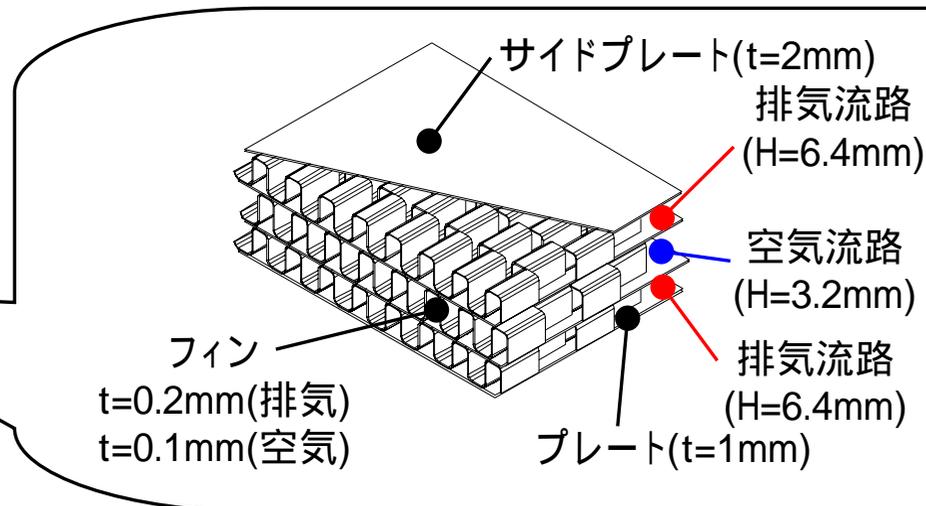


\*SMGT: Super Marine Gas Turbine

伝熱コア4個から構成



\*温度効率 =  $(T_{ao} - T_{ai}) / (T_{gi} - T_{ai})$

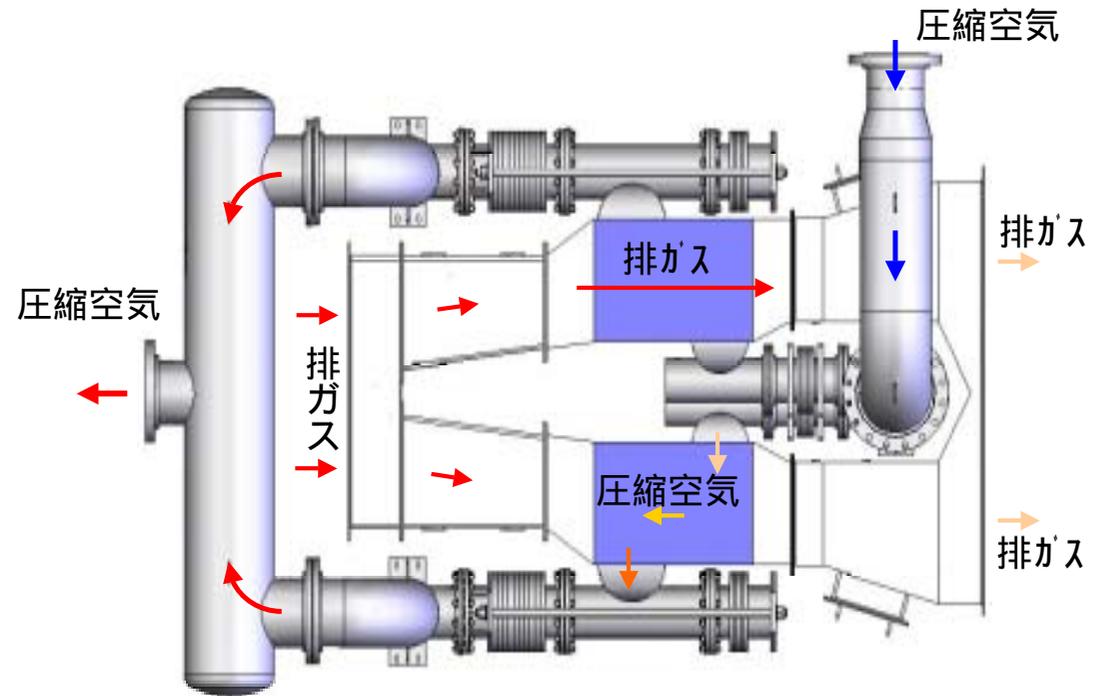


・コンパクトで高効率なプレートフィン式を開発

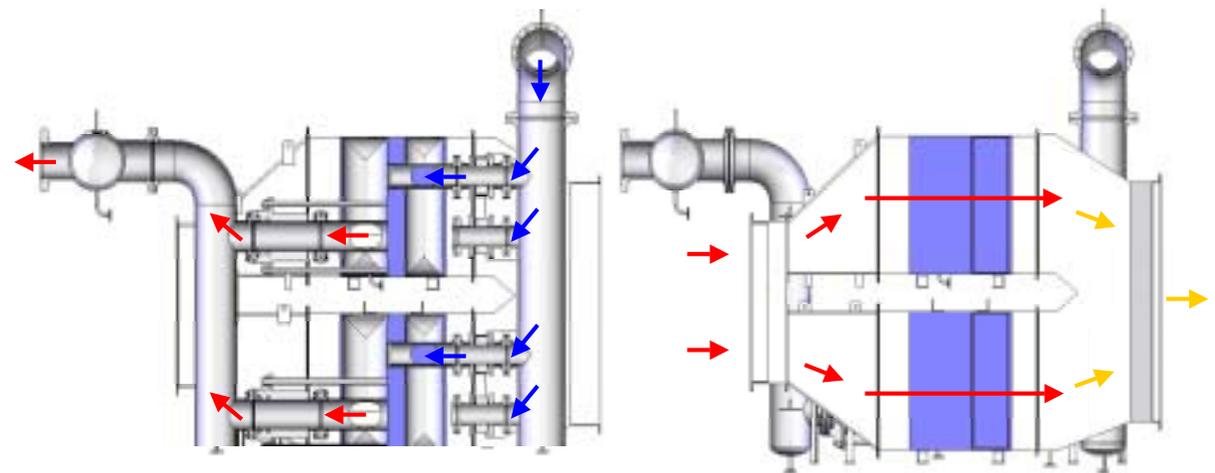
・排気/空気流路を交互に積層

設計・製作：住友精密工業

## 再生器全体アセンブリ



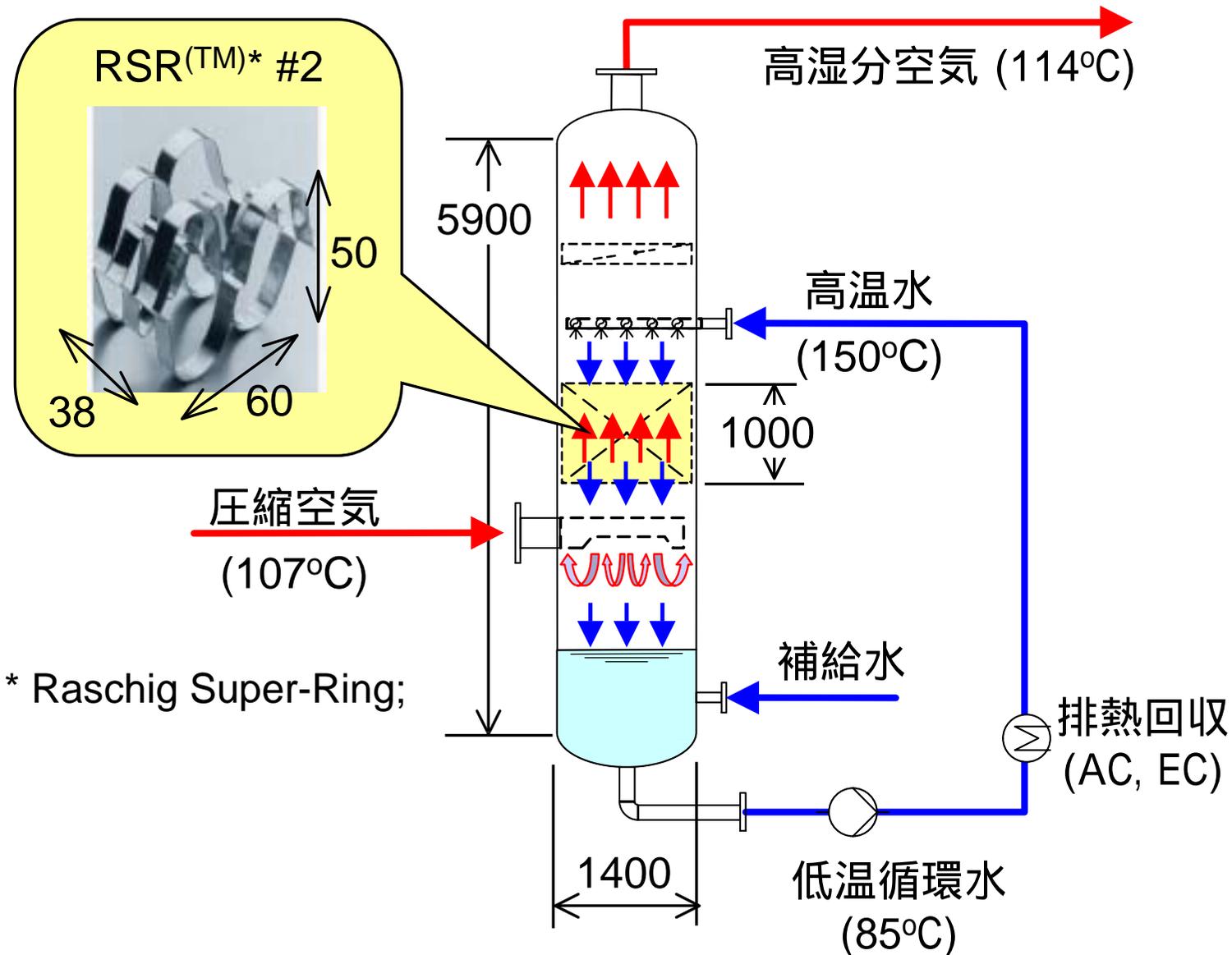
AHAT再生器  
本体 (1ブロック)



圧縮空気流路断面

排ガス流路断面

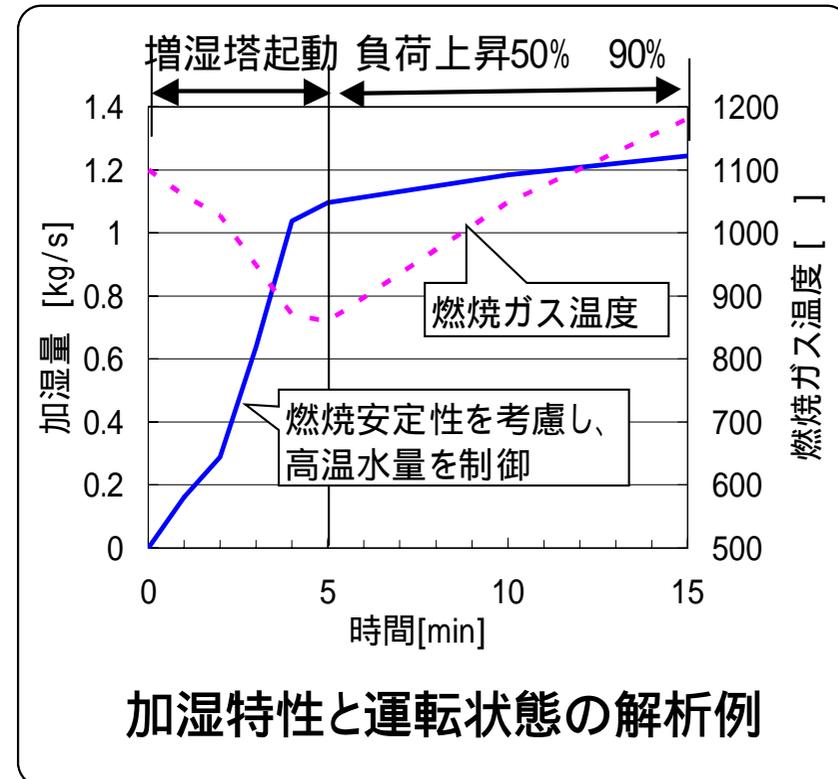
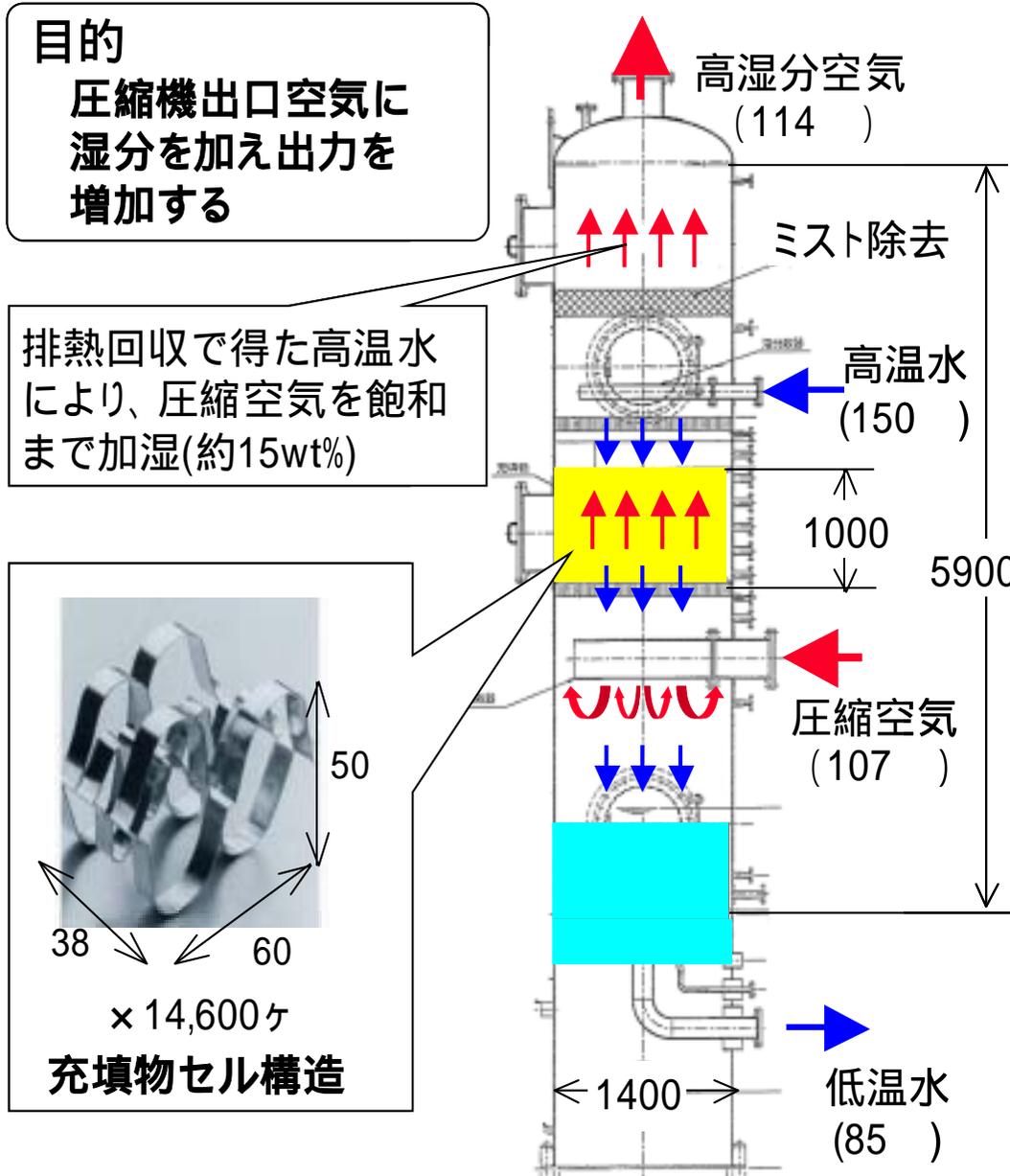
- 排熱回収で得た高温水により圧縮空気を飽和まで加湿 (約 15wt%)
- 低圧損充填物の選定により塔径をコンパクト化



\* Raschig Super-Ring;



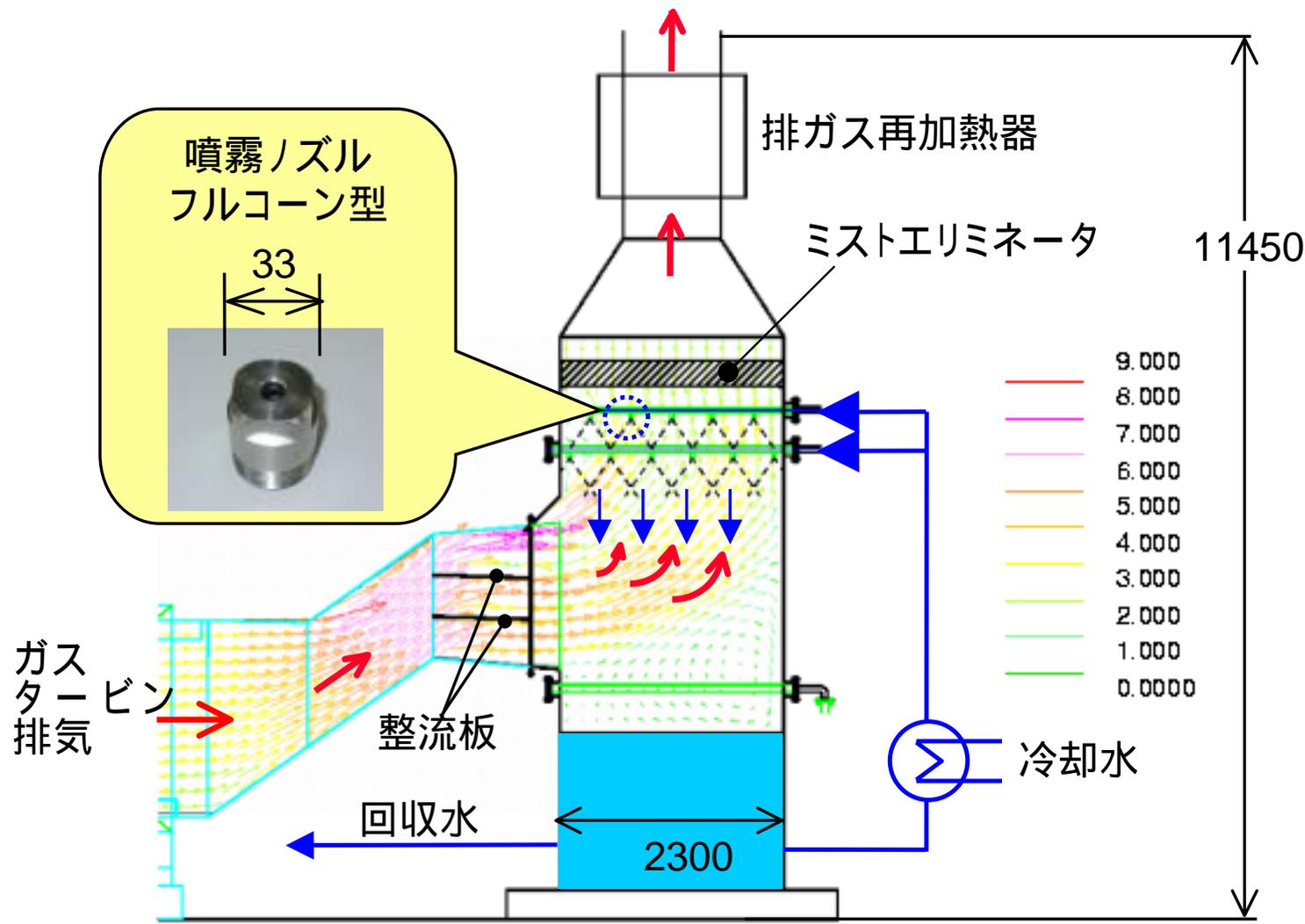
加湿量の計算予測値と実測値がほぼ一致し、加湿装置の特性を確認



## 検証機試験結果

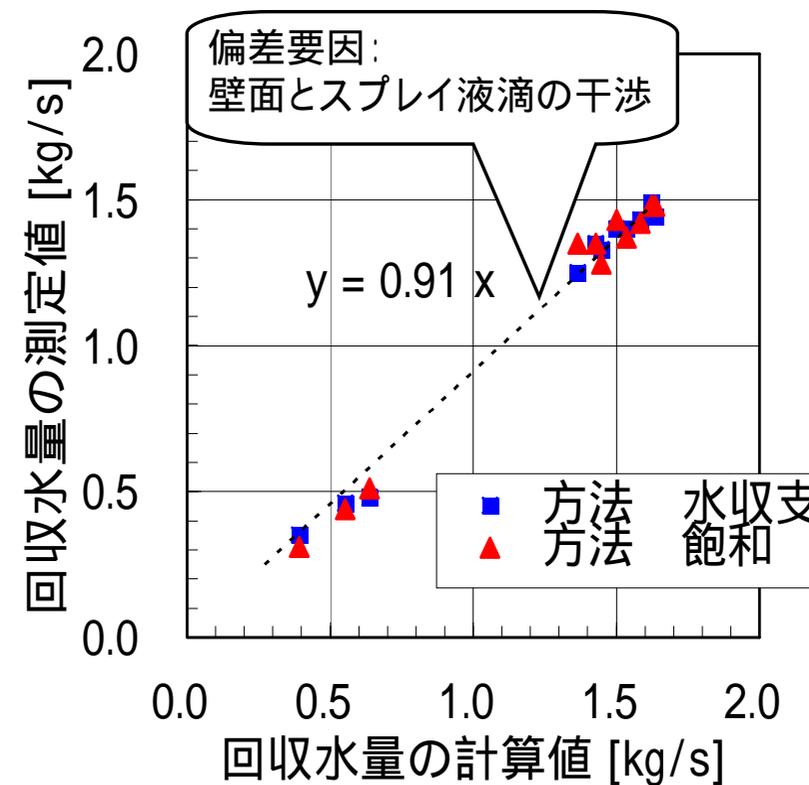
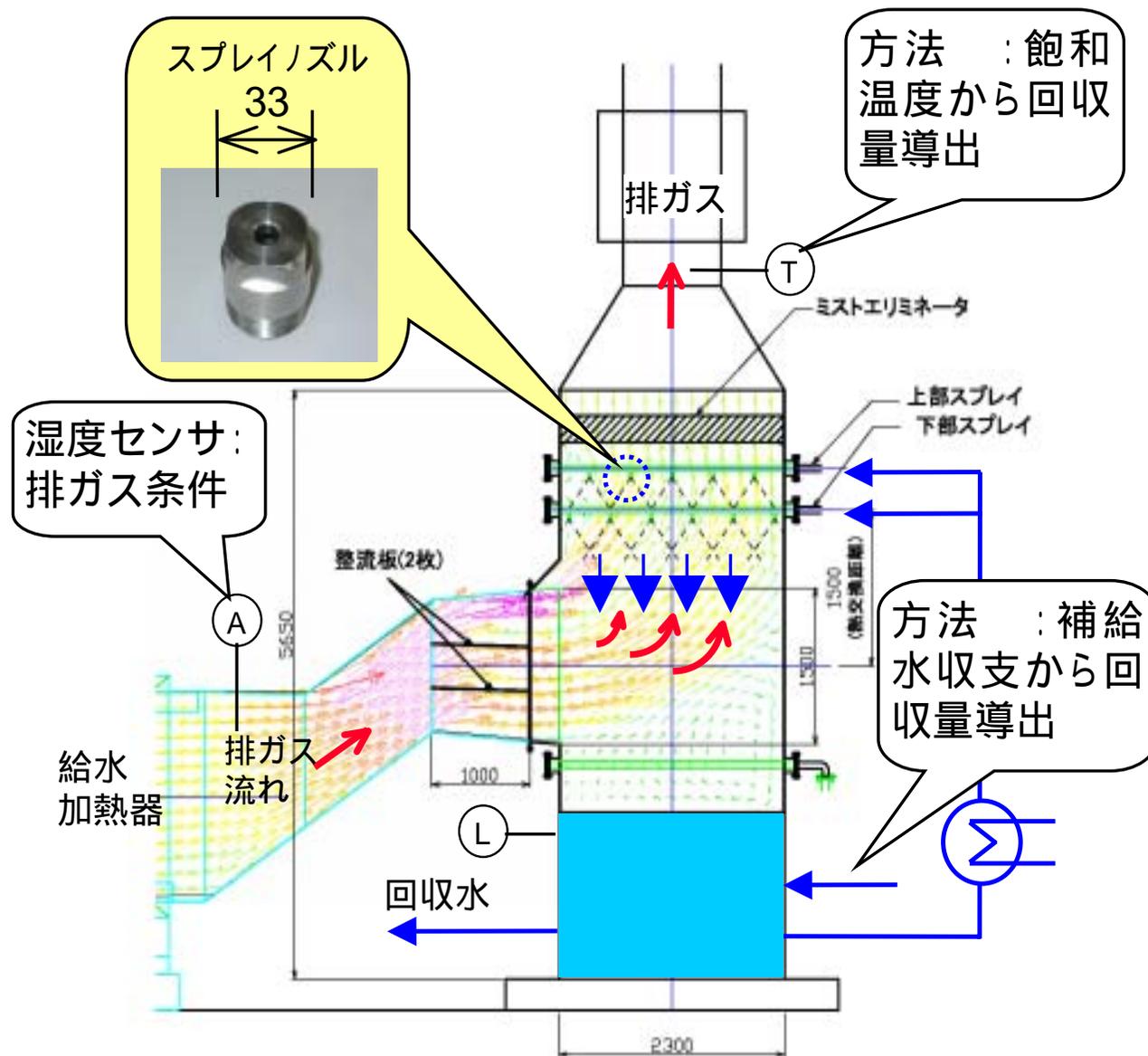
	排熱回収 [kW]	加湿量 [kg/s]
計画値	3,222	1.25
実測値	3,852	1.54
実測/計画	1.20倍	1.23倍

- 増湿塔における加湿量相当を回収
- 低圧損の水スプレイ方式を採用



水回収装置構造と外観

予測計算及び実規模試験により、装置の特性を確認

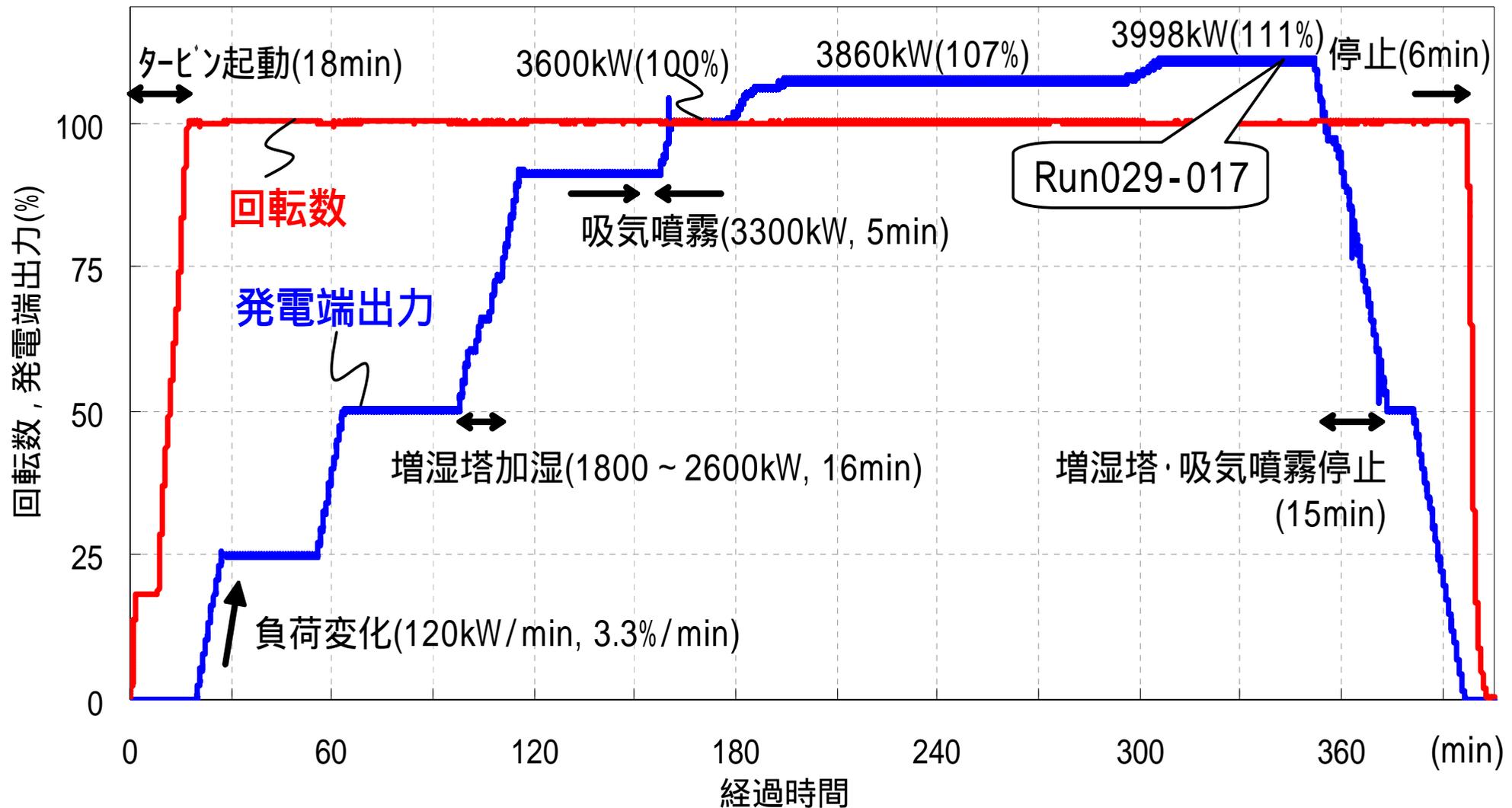


水回収量の測定結果例

出力 [kW]	加湿量 [kg/s]	回収量 [kg/s]	回収/加湿
3,600	1.38	1.40	101.4%
3,990	1.56	1.49	95.5%

- ・2006年10月から総合試験を実施
- ・システム各機器が計画どおり作動し定格負荷達成

AHATシステムが原理的に成立することを確認



## 2007年3月までに実施された試験結果の例

Output (kW)	3600	<b>3990</b>	+11%
-------------	------	-------------	------

Efficiency (LHV%)	42.5	40.0 <b>(43.3)</b>	OK (補正)
-------------------	------	-----------------------	------------

Flow rate(kg/s) at DRY condition	9.75	<b>10.7</b>	+9.7%
----------------------------------	------	-------------	-------

Pres. Ratio at DRY condition	7.58	<b>8.25</b>	+8.8%
------------------------------	------	-------------	-------

Compressor poly. effi.(%)	87.0	<b>88.5</b>	OK
---------------------------	------	-------------	----

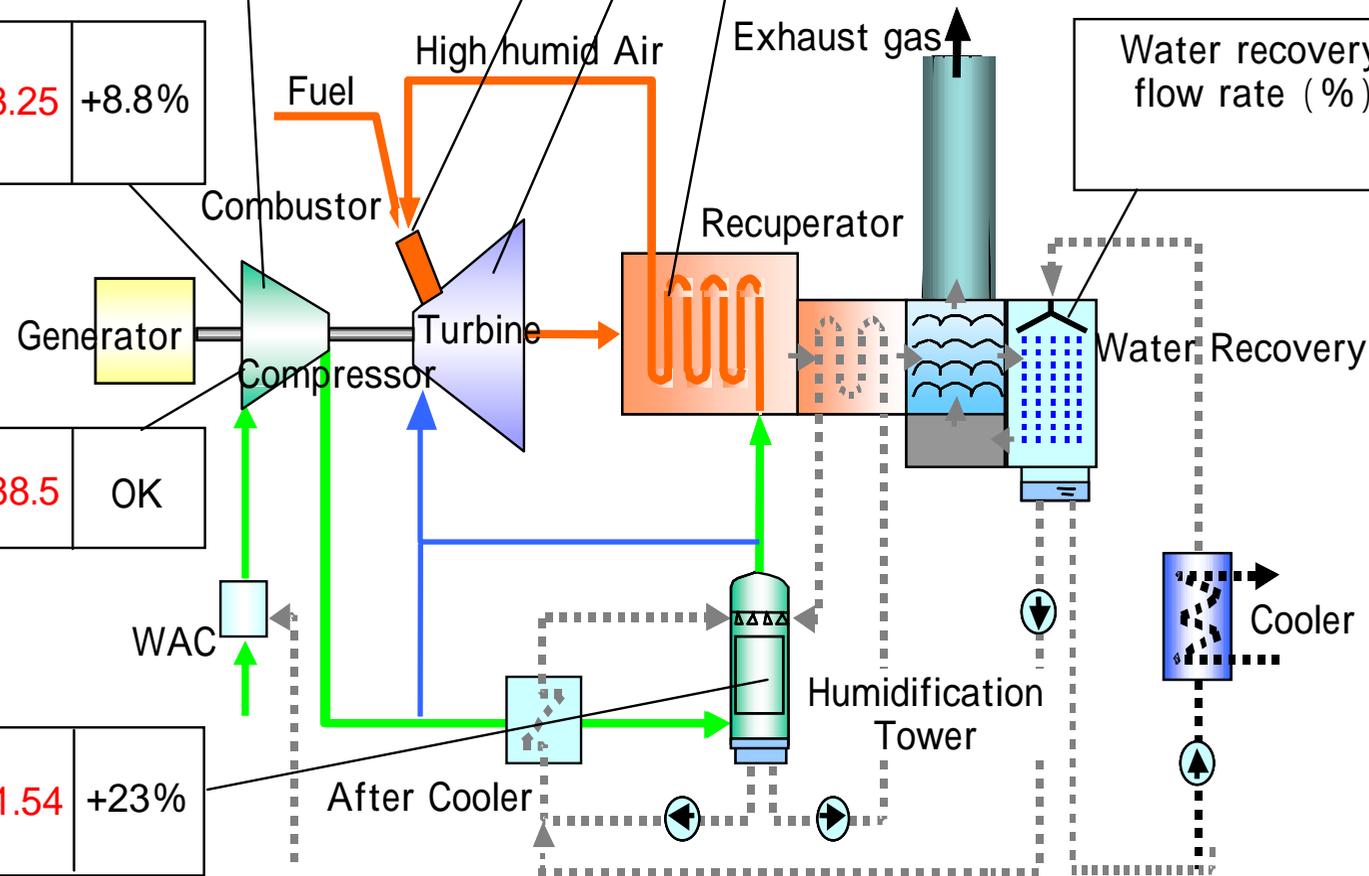
Humidification flow rate (kg/s)	1.25	<b>1.54</b>	+23%
---------------------------------	------	-------------	------

NO <sub>x</sub> Emission (ppm@16%O <sub>2</sub> )	10	<b>8.3</b>	OK (Single NO <sub>x</sub> )
---	----	------------	------------------------------

Blade surface Temp. (measure - design)	1N	-	OK
	1B	-	

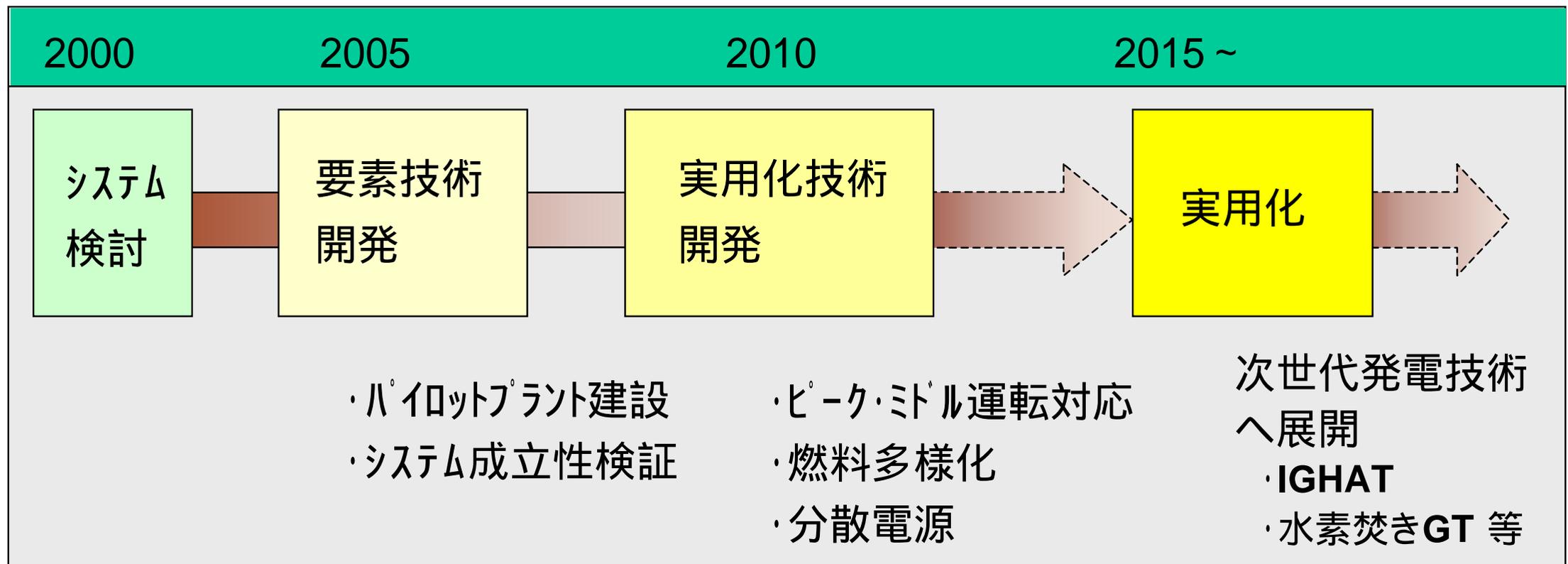
Recuperator efficiency (%)	93	<b>93.2</b>	OK
----------------------------	----	-------------	----

Water recovery flow rate (%)	100	<b>95.0</b> <b>(100)</b>	-5%
------------------------------	-----	-----------------------------	-----



## 実用化を目指して

- ・AHATシステムは成立性検証から、実用化技術開発段階へ。
- ・世界初の高温分再生型ガスタービン。性能・信頼性・運用性・経済性など多方面から検討を加え、段階を踏んで確実に技術開発を推進。
- ・環境性に優れ、使い勝手の良い新型高効率発電システムの実用化。



1. ガスタービンを利用した熱機関は火力発電を担う重要な機械として活躍しており、低炭素化社会に向け更なる高効率化が求められている。
2. ガスタービンの高効率化には高温化と共に、システム改良という方法があり、今回は高湿分空気を利用したA H A Tシステムを紹介した。
3. A H A Tは日本発祥の新型ガスタービンであり、パイロットプラント建設によるシステム成立性検証まで進み実用化に近づいている。
4. この開発を推進していくことで、二酸化炭素の排出量削減や地球環境の改善に少しでも貢献していきたい。

## 謝辞

A H A T開発は資源エネルギー庁からエネルギー使用合理化技術開発費補助金の支援を受けて実施したものです。