

圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン (CAES-G/T) の開発

Development of Compressed Air Energy Storage-Gas Turbine (CAES-G/T)

中 北 智 文	航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部 課長 理学博士
小 林 英 夫	航空宇宙事業本部ガスタービンプラント事業部システム技術部 課長
奥 原 巖	航空宇宙事業本部ガスタービンプラント事業部システム技術部 部長
高 橋 克 行	航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部
安 田 友 芝	航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部 部長代理

圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン (CAES-G/T) 発電システムは有望な電力負荷平準化技術として期待されている。オフピーク時の電力で生成した圧縮空気を大深度地下の空気貯槽に貯蔵しておき、電力負荷ピーク時にこの圧縮空気を空気貯槽からガスタービンに送風し発電する。平成 12 年度にアジア初の CAES-G/T パイロットプラントが北海道に建設され、平成 13 年度にその実証運転が行われた。本稿では、ガスタービンに焦点を絞り、CAES-G/T パイロットプラントの実証運転結果について述べる。

The compressed air energy storage-gas turbine (CAES-G/T) system is expected to provide an efficient and powerful electrical load management method. During periods of low power demand, off-peak electric energy is used to compress air, which is stored in an underground cavern. During periods of peak power demand, the compressed air is withdrawn from the cavern to the expander train to generate electricity. In 2000, the first CAES-G/T pilot plant in Asia was constructed in Hokkaido, Japan. In 2001, a practical test of facility was carried out. The test results of the CAES-G/T pilot plant are described here focusing on the gas turbine.

1. 緒 言

圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン (Compressed Air Energy Storage-Gas Turbine : 以下、CAES-G/T と呼ぶ) 発電システムは、オフピーク時の電力を使用し生成した圧縮空気を大深度地下の岩盤内に設けた空気貯槽 (圧縮空気地下貯蔵施設) に貯蔵しておき、電力負荷のピーク時にこの圧縮空気をガスタービンに送風し発電する。電力負荷平準化技術の一つの方法であり、技術的に早期導入可能と評価され、またほかの電力貯蔵技術である揚水発電に比べ立地制約が小さく需要地近接の電力貯蔵技術として期待されている。

CAES-G/T 発電システムは、1978 年にドイツのフントルフ発電所 (Nordwestdeutsche Kraftwerke, AG) で出力 29 万 kW のプラントが商用化して以来、1991 年にはアメリカのマッキントッシュ発電所 (Alabama Electric Cooperative, Inc.) で 11 万 kW の商用プラントが運転を開始している⁽¹⁾。

我が国では、平成 2 年度から平成 13 年度にわたって通商産業省 (現、経済産業省) 資源エネルギー庁が「新型負荷平準化電源技術開発調査」として CAES プロジェクトを

財団法人新エネルギー財団 (以下、新エネルギー財団と呼ぶ) に委託して実施した。平成 10 年 1 月から平成 12 年度にかけて国内初の CAES-G/T パイロットプラントを北海道空知郡上砂川町に建設し、平成 13 年度にはシステム実証運転を通じて本発電システムの実用性および安全性を確認した。新エネルギー財団からの委託で、北海道電力株式会社 (以下、北海道電力と呼ぶ) が地上発電施設を、電源開発株式会社が圧縮空気地下貯蔵施設を担当した。当社は平成 8 年 12 月から平成 13 年度まで北海道電力のもとで、圧縮機とガスタービンから構成される地上発電設備の設計・製作・試運転を担当した。なお、実証運転終了に伴い、CAES-G/T パイロットプラントは撤去され、現地は更地に戻っている。

本稿では、ガスタービンに焦点を絞り、CAES-G/T パイロットプラントの紹介およびその運転結果について報告する。

2. パイロットプラントの概要

我が国初の CAES-G/T パイロットプラントの計画諸元を次に示す。

発電出力	2 000 kW
------	----------

G/T 運転時間	4.0 h
定格出力	3.5 //
起動・停止	0.5 //
圧縮空気充填時間	10 //
圧縮空気貯蔵方式	変圧方式
気密方式	ゴムライニング方式
圧縮空気貯蔵圧力	
G/T 運転開始時	8 MPa abs
G/T 運転終了時	4 MPa abs
貯蔵空気温度	50℃以下
貯蔵空気容量	約 1 600 m ³
貯蔵空気質量	約 63 000 kg

第1図に基本構成を示す。また、着工から実証運転終了までの工程を**第1表**に示す。本パイロットプラントは、北海道空知郡上砂川町に建設された。地下無重力実験センターの隣である。圧縮空気地下貯蔵施設は旧三井砂川炭鉱をアクセストンネルとして利用し、地表から約 450 m の深度（海拔 -250 m）に構築した⁽²⁾。圧縮空気地下貯蔵施設をこのような大深度地下に建設するのは、本パイロットプラントの場合 8 MPa abs という貯蔵空気の圧力を岩盤にもたせるためである。

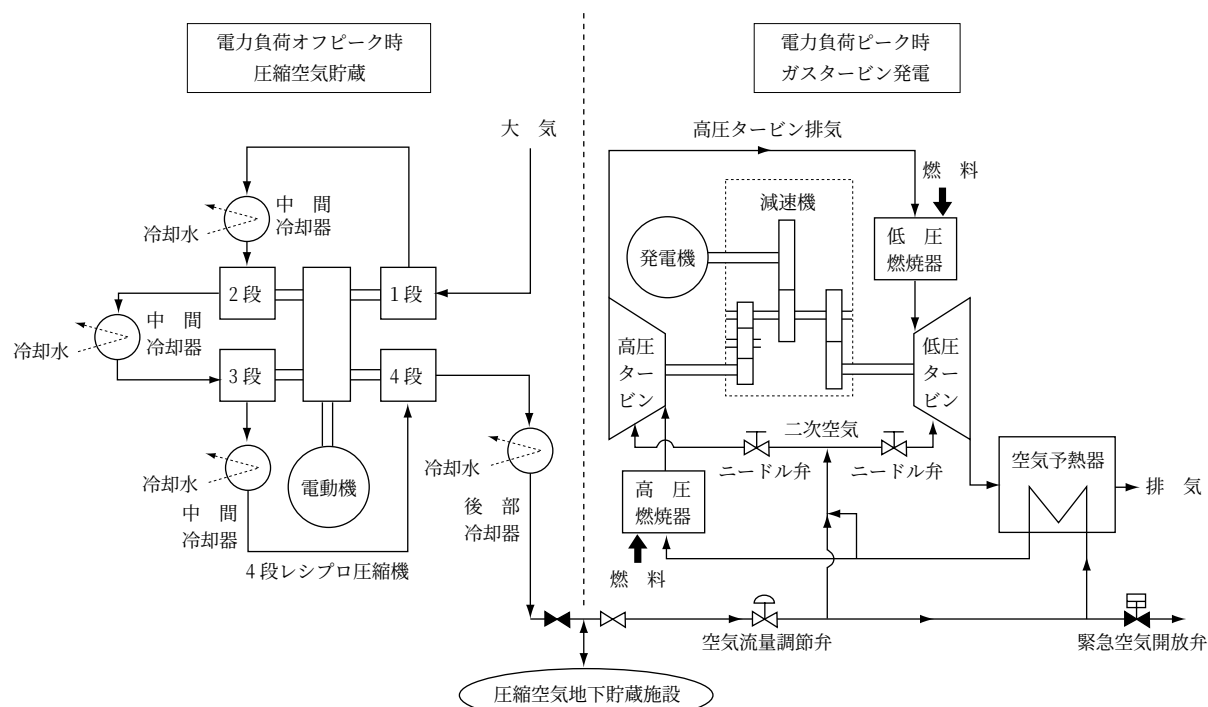
圧縮機は、夜間などの電力負荷オフピーク時の電力を使用し、昼間の発電に必要な圧縮空気容量約 63 000 kg を約

第1表 パイロットプラント全工程
Table 1 Times and stages of completion

項 目	平 成（年度）				
	9	10	11	12	13
建設工事		圧縮空気地下貯蔵施設			
			ガスタービン発電施設		
圧縮空気地下貯蔵施設気密試験				使用前自主検査	
ガスタービン発電施設試運転			工場試験	使用前自主検査	
				現地試運転	
プラント実証運転					

10 時間掛けて生成する。実績の多い当社製電動機駆動 4 段レシプロ圧縮機を採用した。

ガスタービンは、昼間の電力負荷ピーク時の 4 時間にわたって発電する。本ガスタービンは圧縮機をもたず、燃焼器とタービンから構成される。自ら吸気圧縮しながら発電する通常のガスタービンとは異なり、夜間に圧縮空気地下貯蔵施設に蓄えた高压空気の供給を受け、燃焼器で過熱した後、タービンを駆動して発電する。CAES-G/T は圧縮過程（貯気）と膨張過程（発電）を別の時間帯に行う。通常

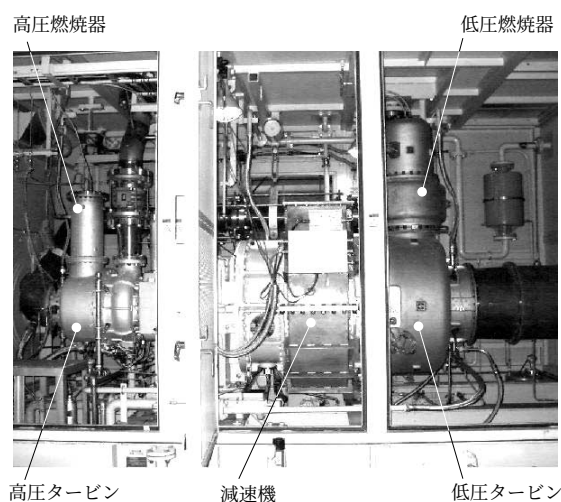


第1図 パイロットプラント基本構成
Fig. 1 Schematic diagram of pilot plant

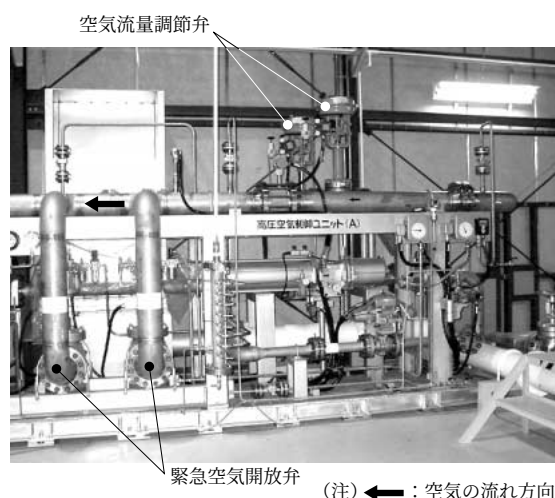
のガスタービンではタービン出力の約 2/3 が圧縮機駆動力に消費されるが、CAES-G/T ではタービン出力のすべてが発電機出力になる。すなわち、同量の燃料で発電出力は通常のガスタービンの約 3 倍となる。原子力などへの依存性の高い夜間電力で圧縮空気を生成貯蔵しておき、昼間は通常の火力発電よりも高い効率で発電するので、CO₂ 削減にも寄与する。

本パイロットプラントの CAES-G/T は、高圧タービンと低圧タービンを組み合わせている（第 1 図、第 2 図）。高圧タービンには当社製 200 kW 非常発電用ガスタービン IM27 を、低圧タービンには当社製 2 000 kW 常用発電用ガスタービン IM270 をそれぞれ改造して用いた。

CAES-G/T では、圧縮空気地下貯蔵施設からガスタービンへの供給空気の流量を出力に応じて調節しなければならない。このための高圧空気制御装置を第 3 図に示す。また



第 2 図 CAES-G/T パッケージ
Fig. 2 CAES-G/T package



第 3 図 高圧空気制御装置
Fig. 3 Control unit of high pressure air

圧縮空気地下貯蔵施設に貯蔵した空気は常温であるため、排熱を利用して空気予熱器（第 4 図）で予熱した後にガスタービンに供給する。

圧縮空気地下貯蔵施設の運転圧力は 4 ～ 8 MPa abs である。夜間に 8 MPa abs で貯気するが、発電中は貯蔵された空気を単に放出するだけなので、圧縮空気地下貯蔵施設の圧力は低下していく。本パイロットプラントの発電終了時の圧力は 4 MPa abs と設定した。

3. CAES-G/T 固有の技術課題と対策

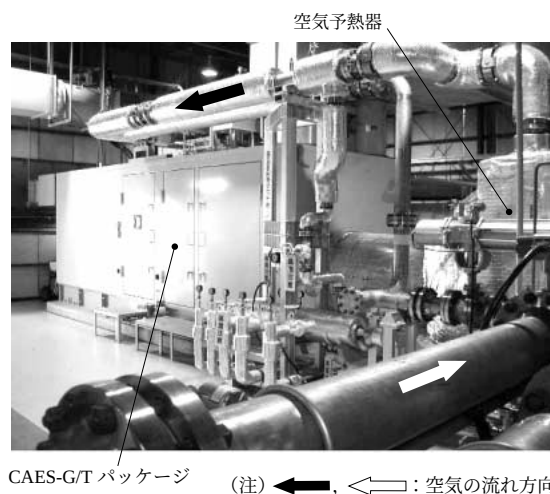
CAES-G/T の技術課題と対策については既報^{(3), (4)}で報告してあるので、ここでは簡単に述べる。CAES-G/T は、圧縮機をもたない再生再熱式のガスタービンということもできる。このため CAES-G/T の制御には、主として以下に述べる三つのシステム特有の技術課題が生じる。

(1) 制御ロジックと制御変数

一般的なガスタービン制御は燃料流量制御のみによって行われる。一方、CAES-G/T の場合は、これに空気流量制御も加わる。また、二つのガスタービンの燃料制御も同時並行して行うため、結局制御変数は空気流量、高圧燃焼器燃料流量、低圧燃焼器燃料流量の三つとなる。本パイロットプラントでは、空気流量と低圧燃焼器燃料流量を目標出力に対してあらかじめスケジュールしておき、残る高圧燃焼器燃料流量で制御した。この 3 変数統合制御を電子式制御装置によって行う。

(2) システム連系

電力系統への発電機の同期調速に関しては、大きな



第 4 図 CAES-G/T システム全景
Fig. 4 Panorama of CAES-G/T system

問題はない。定格回転無負荷運転時には、慣性モーメントで燃料増減に対する回転数応答性がゆっくりとしているためである。ただし、初期負荷投入に際して燃料急増のみで対応すると低圧タービン出口温度制限値超過を起こす危険があったため、燃料流量だけでなく空気流量をも増加するよう対策を採った。

(3) 負荷遮断時の過回転抑制

CAES-G/T の場合、この過回転抑制が最も困難な技術課題である。通常の高スタービンでは、たとえ全負荷遮断を行っても圧縮機がブレーキとなるため、燃料を急減するだけで回転数上昇は抑制される。一方、CAES-G/T は圧縮機駆動負荷が掛かっておらず、負荷は発電出力と微少な機械損失のみである。したがって、負荷遮断を行えば全くブレーキのない状態となり回転数は急上昇してしまう。燃料遮断だけでは十分な過回転抑制はできない。空気予熱器があるため、ここで加熱された空気がガスタービンに流入し回転数の上昇が続く。そのため、本パイロットプラントでは、空気予熱器上流の常温部分に緊急空気開放弁を設置し（**第1図**参照）、負荷遮断時にはここから放風しガスタービンへの空気の流入を断った。

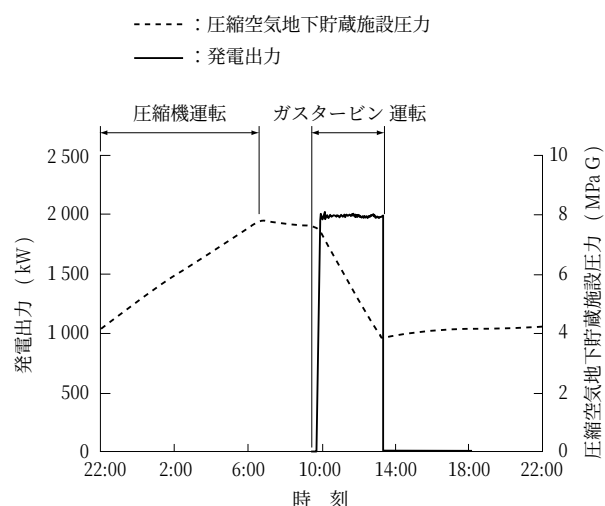
CAES-G/T では、タービン部でタービン出口側に向かって発生する軸スラストを、圧縮機の代わりに設置したスラストバランスディスクに二次空気圧力を掛けて発生させた逆方向のスラストでバランスさせている⁽⁴⁾。負荷遮断時には主流空気の大気開放とタイミングを合わせスラストバランス用二次空気も開放し、スラストバランスの崩れをベアリング許容値内に抑えた。

4. 運転結果

1999 年 11 月から 12 月にかけて当社瑞穂工場でガスタービン工場試験を実施した。詳細は既報⁽⁴⁾で報告してあるので割愛するが、負荷数百 kW までの試験ではあったが工場試験でガスタービン本体ならびに制御ロジックの機能を確認した。2001 年 3 月から現地でのガスタービン試運転調整を開始し、2001 年 6 月 13 日から 6 月 15 日に電気事業法に基づいて使用前自主検査を実施した。その後、2001 年 6 月 18 日から 2001 年 10 月 28 日まで実証運転を実施した。この間、106 サイクルの運転を実施した⁽⁵⁾。

4.1 連続サイクル運転結果

基本的な運転パターンを**第5図**に示す。空気を貯蔵するための夜間の圧縮機運転は 8 時間から 8 時間半と計画の 10



第5図 運転パターン

Fig. 5 Typical pattern of operation

時間よりも短くて済み、昼間のガスタービンによる発電は系統閉入から解列まで約 4 時間、定格出力での発電が 3 時間 20 ～ 25 分とほぼ計画どおりの運転を行うことができた。圧縮機起動指令・ガスタービン起動指令・系統への同期投入指令以外は全自動運転で行った。

高・低圧タービン燃料配分変更などによって発電効率が計画の 59%より 1 ポイントほど低かったものの、サイクル運転終了まで重大な不具合もなく、ガスタービン軸振動・減速機外殻振動・発電機各部温度・潤滑油温度なども安定しており、ガスタービン発電設備の健全性は維持された。実証運転期間中のガスタービン発電設備の運転実績を**第2表**に示す。

4.2 負荷遮断試験

負荷遮断試験は、試運転および使用前自主検査で実施した。3 章(3)で述べたように、負荷遮断時の過回転抑制が CAES-G/T の最大の技術課題である。設計段階で、ガスタービン動的シミュレーションを実施し、緊急開放弁として CV 値 360、応答遅れ 0.2 秒以下、動作時間 0.7 秒以下という高速作動の空気作動式シリンダ弁を 2 個設置することで、全負荷遮断時に達する最大回転数を非常调速装置の働

第2表 ガスタービン発電設備運転実績
Table 2 Operation record of gas turbine power generation facility

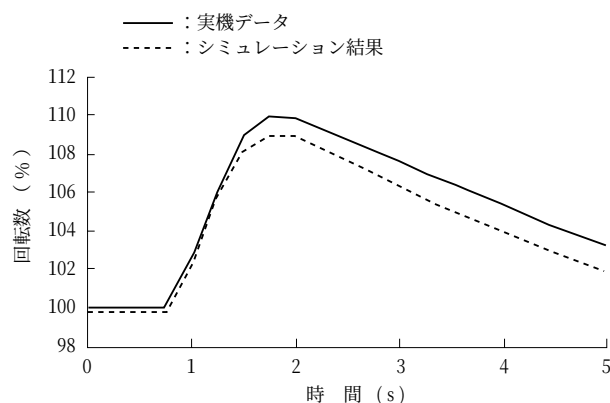
項目	単位	実績値
発電時間	h	393.75
発電回数	回	113
電力量	発電 kW-h	781 100
	送電 "	750 030
	受電 "	1 772 510

く 114%（定格回転数を 100%とする）以下に抑えることができる見通しを得た⁽⁶⁾。

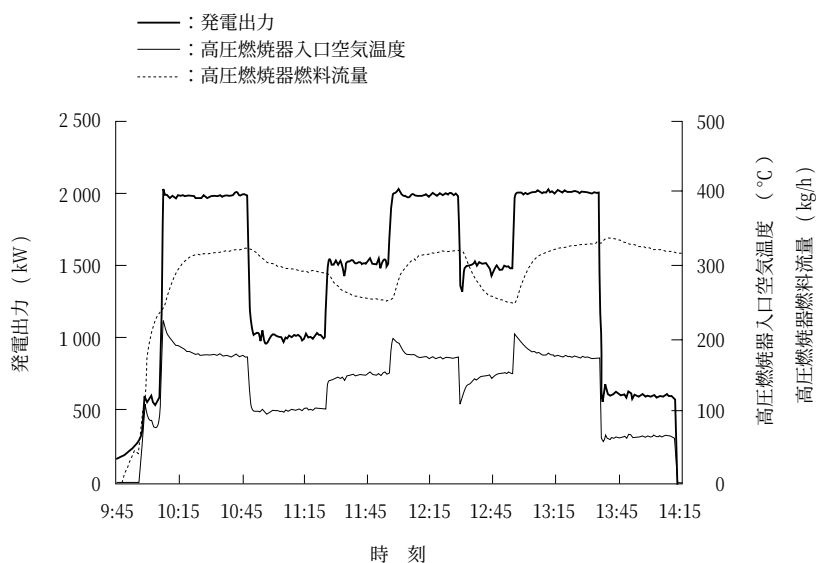
第 6 図に全負荷遮断試験結果を示す。実際に実機試験において、定格出力 2 000 kW からの全負荷遮断時に到達する最大回転数は 110%以内であることを確認した。非常调速装置の働く速度を 114%に設定してあり、「火力用発電設備の技術基準」に規定される保安水準の確保を確認した。

4.3 急負荷変動試験

2001 年 10 月 27 日に急負荷変動試験を実施した。**第 7 図**にその結果を示す。負荷増減指令は 1 000 kW/7 s というレートでだしている。このような負荷増減指令に対し、実際の発電出力は 5 秒程度の遅れで追従した。**第 7 図**に示されるように、空気予熱器の応答遅れで負荷変動に対する高圧燃焼器入口空気温度の応答は極めてゆっくりとしている。



第 6 図 全負荷遮断試験結果
Fig. 6 Full load rejection test result



第 7 図 急負荷変動試験結果
Fig. 7 Quick load variation test result

一定出力を維持するに当たっても、高圧燃焼器入口空気温度の応答遅れ分を高圧燃焼器燃料流量によって補償し、高圧タービン入口ガス温度を一定に保つことが要求される。空気予熱器応答遅れに対する燃料補償制御も良好に機能し、失火やタービン出口温度超過を起こすことなく負荷変動追従ができた。

5. 結 言

国内初の CAES-G/T パイロットプラントであったが、使用前自主検査後サイクル運転終了まで重大な不具合もなく、ガスタービン発電設備の健全性は維持された。また、最大の技術課題であった全負荷遮断時の過回転抑制対策も良好に機能し、速度上昇率 10%以内に抑制できた。さらに急負荷変動に対する追従性も良いことが確認された。空気流量の制御精度など改良すべき点もあるが、基本的な機能要求は満足したと評価できる。商用規模としては数百 MW 級が想定されるが、本パイロットプラントで得た技術と知見が活用できると期待される。

CAES-G/T 発電システムの開発では、制御設計が主たる技術課題であった。この制御設計に当たっては、当社の航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部において広範にガスタービン動特性シミュレーションを活用した。動特性シミュレーションが、制御システムの開発期間短縮、開発費削減、そして技術的リスク低減に大きく寄与することも確認できた⁽⁶⁾。

— 謝 辞 —

本 CAES プロジェクトの主幹であり、多大なるご協力をいただきました財団法人新エネルギー財団、北海道電力株式会社に深く感謝いたします。

また、この紙面を借りて、当社の、高圧タービンおよび圧縮機を担当した機械事業本部回転機械事業部、高圧燃焼器を担当した技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部に深謝します。

参 考 文 献

- (1) G. W. Gaul, T. M. Cornell, M. Nakhhamkin and H. Paprotna : Compressed Air Energy Storage Thermal Performance Improvements

- (2) 篠原俊彦, 合田佳弘, 川上博史, 福田和寛: 地下 450 m の岩盤中に高圧圧縮空気を貯蔵 北海道上砂川パイロットプラント工事 トンネルと地下 Vol.32 No.6 2001 年 6 月 pp.27-35
- (3) 中北智文, 小林英夫, 杉本尚旺: 圧縮空気貯蔵エネルギー利用ガスタービン (CAES-G/T) 発電の開発 石川島播磨技報 第 38 巻第 6 号 1998 年 11 月 pp.404-407
- (4) 中北智文: 圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン発電システム (その 3) ガスタービン技術課題と工場試験結果 クリーンエネルギー Vol.10 No.2 2001 年 2 月 pp.42-47
- (5) 山崎裕史: 圧縮空気貯蔵ガスタービン発電パイロットプラントの実証運転について 平成 14 年度火力原子力発電大会研究発表要旨集 2002 年 9 月 pp.36-37
- (6) K. Takahashi, T. Yasuda, M. Endoh and M. Kurosaki: Application of Dynamic Simulation to CAES G/T Control System Development ASME Paper GT-2002-30036