

# 負荷調整用地上型圧縮空気エネルギー貯蔵(CAES)を備えたガスタービンシステムの基礎検討

## A Fundamental Study on a Gas Turbine System with Overground Compressed Air Energy Storage (CAES) for Load Regulation

野々村 弘樹<sup>\*1</sup>  
NONOMURA Hiroki

中野 晋<sup>\*2</sup>  
NAKANO Susumu

竹田 陽一<sup>\*2</sup>  
TAKEDA Yoichi

### ABSTRACT

In order to stabilize the power system when increasing the output power of renewable energy, we proposed overground compressed air energy storage (CAES) as a facility equipped with the power absorption function in the existing gas turbine system. The overground CAES system consists of a reserve tank for storing compressor discharge air, an intermediate compressor for boosting the reserved air to a higher pressure, and a discharge tank for storing the boosted air. The operation methods of the CAES system are shown, and the operation was confirmed by our dynamic simulator for medium capacity gas turbines. By providing a reserve tank and discharge tank with a diameter of 18 meter and extracting or discharging 10% of the compressor's rated intake air flow, about 3.3 MWh of power absorption and about 3.7 MWh of power discharge can be performed, and we confirmed it had the function of load regulation.

キーワード：ガスタービン，CAES，負荷調整，圧縮機，貯留

Key words : Gas turbine, CAES, Load-regulation, Compressor, Reservoir

### 1. 緒言

近年、CO<sub>2</sub>を排出しない、燃料を消費しないなどの点から、再生可能エネルギーの導入が進められている。再生可能エネルギーとは、太陽光、風力、地熱など化石資源によらず自然界に常に存在するエネルギーを指し、日本においても導入は増加傾向にある。しかしながら太陽光や風力等の変動電源は、出力が天候に依存するため電力需要に合わせた調整が困難である。また大量導入時には、電力供給の安定化のため、電力系統から余剰電力を吸収しなければならないという課題がある。電力供給と余剰電力吸収を行える負荷調整用電源として揚水発電がある。これは、余剰電力を利用して水を汲み上げ、電力需要の大きい時間帯に、汲みあげた水を放水し発電するシステムであり、電気エネルギーを位置エネルギーに変換して貯留することが可能である。しかし、現在の日本では揚水発電施設の増設は困難である。一方、揚水発電と同様の概念で、余剰電力を利用して圧縮空気の形でエネルギーを保存し、電力需要時に貯留した圧縮空気を

放出してガスタービンで発電するシステムとしてCAES(Compressed Air Energy Storage)<sup>(1)</sup>がある。

CAESは、圧縮機とタービンが個別の回転軸を有するガスタービンシステムを用いて、地下の岩塩層巨大空間に、余剰電力を利用して生成した圧縮空気を貯蓄し、電力需要の大きくなる時間帯に圧縮空気をガスタービンに放出することで発電するシステムである。揚水発電と同様、余剰電力の有効活用が可能である。また急速な電力要求時には、貯留圧縮空気を急速供給し発電量を増加させることで、負荷追従運転を容易に実現できる。しかし、日本には大容量の空間を形成できる厚い岩塩層はほとんど分布していないため、パイロットプラントでの実証<sup>(2)</sup>を除き、実用化は困難な状況である。また、ガスタービンによる発電ではないが、CAESと同じ概念で、断熱圧縮した空気を貯蔵し、電力が必要な時に貯蔵した圧縮空気を膨張させ発電するシステムの開発も行われている<sup>(3)</sup>。

ここでは、既存のガスタービン設備に地上設置の空気貯留タンクを設けてCAESの機能を持たせる地上型CAESを追設したガスタービンシステムを検討する。このシステムは実用化例が少なく、基本構成や基本仕様など、システムの基礎検討が十分に行われていない。

本研究では、既存のガスタービン設備を活用し地上型CAESを付加することで電力吸収を含む電力調整可能なガスタービンシステムの基礎検討として、その基本構成、

原稿受付 2019年11月15日

査読完了 2020年9月17日

\* 1 東北大学大学院 工学研究科ファインメカニクス専攻

〒980-0845 仙台市青葉区荒巻青葉6-6

E-mail: Hiroki.nonomura@rift.mech.tohoku.ac.jp

\* 2 東北大学大学院 工学研究科

〒980-0845 仙台市青葉区荒巻青葉6-6

運転方法を提案し、動作解析によってその基本動作の確認を行うと共に、地上CAESシステムの運用による電力調整効果を定量的に検討することを目的とする。

## 2. 変動電源導入増加に伴う課題

変動電源の大量導入に伴い、電力の需要と供給のバランスが崩れすることが想定される。Fig. 1は東北6県と新潟エリアの2019年夏季と冬季の電力需要<sup>(4)</sup>を示した図である。国内の電力需要は昼食時間帯に需要が低下する傾向がある。またこの時間帯は雨天時を除き太陽光による発電量が増加する時間帯と重なる。このためこの時間帯は、再生可能エネルギー以外の発電設備、特に出力調整が他の発電設備に比べて比較的容易なガス火力発電設備の出力を低減させて対応する。しかし、太陽光発電が電力需要を大幅に上回る場合には余剰電力の吸収が必要になる。揚水発電を除く従来の発電設備では、電力吸収機能は無いため、余剰電力の吸収には蓄電池システムの設置が必要に成っている。東北電力管内には大型の蓄電池システムが2か所設置されており、そのうちの一つは、昼食時の余剰電力の吸収と、その後の電力需要増加時の放電により電力調整する目的で使用されている<sup>(5)</sup>。ここでは、既存ガスタービン発電設備を活用することで、しかも余剰電力の吸収が可能な上記蓄電池システムと同等な電力調整機能を有するシステムとし、既存ガスタービン発電設備への地上型CAESシステムの適用を考える。

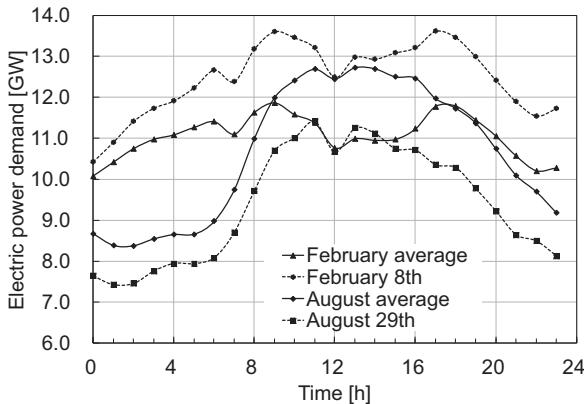


Fig. 1 Electric power demand curves<sup>(4)</sup>

## 3. 地上CAESシステム

### 3.1 基本構成

従来のCAESシステムでは、圧縮機とタービンの回転軸が分離、または切り離しが可能な構造で、圧縮機とタービンは独立に運転できる。一方、既存発電用ガスタービンは圧縮機とタービンが同一の回転軸を有する場合が多いため、圧縮機とタービンをそれぞれ独立に運転することはできない。このため、既存発電用ガスタービンに地上CAESを適用するためには、圧縮機とタービンを分離運転しないことが制約になる。

Fig. 2に地上CAESの概略図を示す。地上CAESは貯

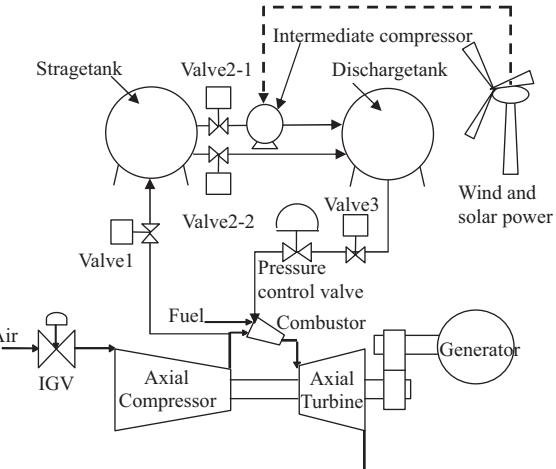


Fig. 2 Schematic of the overground CAES system

留タンクと放出タンクの2タンクシステムにより構成される。2タンク間に中間圧縮機を設置して、圧縮機より抽気した空気をさらに昇圧させたうえで貯留することができる。

### 3.2 地上CAESシステムの運転方法

圧縮機の吐出空気を貯留するのは、系統への電力需要が少ないときで、例えば待機運転中や部分負荷運転時が考えられる。ここでは、部分負荷運転時の圧縮機吐出空気の一部を貯留する場合を考える。一方、発電量の増加が要求されるときは、部分負荷運転のような低出力状態からの発電出力の増加を行うため、例えば、部分負荷運転状態での圧縮機吐出空気に放出タンクからの圧縮空気を追加して、短時間に発電出力を増加させる。ある程度の供給時間を確保するためには圧縮機吐出圧の空気を更に昇圧して貯めておく必要がある。この動作を、圧縮機特性曲線を用いて説明する。Fig. 3に既存発電用ガスタービンシステムに用いられる圧縮機の圧力-流量特性曲線を示す<sup>(6)</sup>。圧縮機吐出圧はタービン負荷によって決まり、タービン修正流量は、今回の作動範囲内では、ほぼ一定になるため、その関係を用いてタービン入口圧を算出した。今、50%負荷運転状態で圧縮空気を抽気することを考える。定格負荷運転状態から燃料流量を絞り50%負荷状態にしてCAESを作動させる。ここで、以後、CAES作動とは、Fig. 2に示すCAESシステムのバルブまたは中間圧縮機の動作を開始することを意味し、圧縮空気貯留時は、バルブ1,2-1,2-2を開け、中間圧縮機を起動させることを、また圧縮空気放出時はバルブ3および圧力調整弁を開けることを意味するものとする。Fig. 3中①点の50%負荷運転点での圧縮機吐出空気のうち10%を抽気してCAESに貯留すると仮定する。この抽気量10%は後述のCAESからの空気供給時に圧縮機吐出圧がサージ回避できる条件から決めた。圧縮機吐出空気の10%を抽気する時、タービンへの空気流量は圧縮機吐出空気の90%になるため、燃焼温度を一定にした場合のタービンの作動点は、タービン特性線に沿って②に移る。

一方、CAESからの空気供給を行うのはタービンシステムの発電量が少ないとおり、予めIGV開度を絞り、圧縮機吸気流量を低減して発電出力を低下させた状態で行う。回転数一定(100%回転数)でIGV開度を変えた時の圧縮機の性能曲線は図の一点鎖線に移動する<sup>(7)</sup>。IGV開度の減少によりサージ圧も図中破線に示すように低圧側に移動する。タービン運転点を部分負荷運転点である②から100%負荷点④に移行させるため圧縮機吐出圧も④と同じ③まで昇圧する必要がある。前述の抽気流量は、IGV開度を絞った時の圧縮機のサージ圧が圧縮機定格運転点の圧力を下回らないように決める。本解析ではサージに対する裕度を持たせるため抽気量を10%にした。タービン流量に関しては圧縮機吐出空気流量90%とCAESからの供給空気量10%で、定格空気量を確保する。②と④では圧力が異なり、貯留タンクの空気を直接燃焼器に供給できないため、中間圧縮機によって昇圧しておく必要がある。この中間圧縮機の動力には変動電源による余剰電力を使用する。

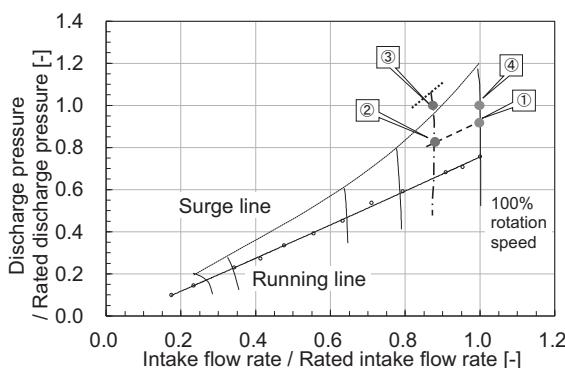


Fig. 3 Compressor characteristic curve and CAES operating point

#### 4. 設置対象ガスタービンと計算条件

##### 4.1 設置対象ガスタービンシステム

地上型CAES動作の計算は、中容量ガスタービンシステムを解析対象とし、既開発のガスタービンシステムダイナミックシミュレータ<sup>(8),(9)</sup>にCAES動作計算プログラム<sup>(10)</sup>を組み込み行った。解析はTable 1に概略仕様を示すコンバインド発電に用いられるガスタービンを対象とした。Table 1に示す発電システムはガスタービンと蒸気タービンからなるコンバインドサイクル2系列のシステムである。ガスタービンシステムのシミュレータは、入力データとして、圧縮機入口案内弁(IGV)の開度、ロータ回転数、および燃料流量を与え、圧縮機の吐出状態、燃焼温度、タービン出入口の状態、圧縮機動力、タービン出力を計算するシミュレータである。Fig. 4にコンバインドサイクルの計測出力と、ダイナミックシミュレータの計算結果であるガスタービン出力の計算結果、および供給蒸気と排気蒸気の温度圧力から推定した蒸気タービン出力分をダイナミックシミュレータ計算結果に加えた結果を示した。計測は連続運転中に行われ

たが、シミュレーションでは起動プロセスが必要なため、計算開始の0~0.08時間までを仮想的な起動時間とした。ガスタービンは全ての時間帯、定格回転数で運転されており、IGV開度と燃料流量のみ変更している。IGV開度は経過時間1.23時間以降の開度を100%としたときに、1.15時間までは68%になる。また、燃料流量は、1.23時間以降を100%にしたとき、1.15時間以前は78%になる。Fig. 4において、出力値は、1.23時間以降のガスタービン出力で無次元化した。Fig. 4から、CAES計算プログラムを組み込むガスタービンシステムのダイナミックシミュレータとして妥当な計算が行えるシミュレータになっていることが分かる。

Table 1 Specifications of calculation target gas turbine system

Rated output power	109MW ((GT+ST) × 2)
Rated rotational speed	7280rpm
Compressor	17 stages axial flow
Turbine	3 stages axial flow
Combustor	Low Nox Combustor (10 cans)

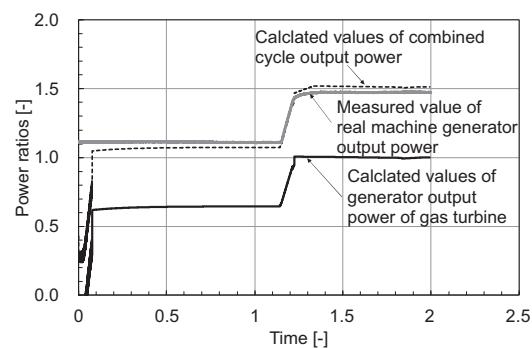


Fig. 4 Comparison of output powers for medium capacity gas turbine

##### 4.2 地上CAESの仕様と計算方法

今回の計算では、CAES設備の基本能力の把握のため圧縮機吐出空気の貯留とタンク空気の放出とも持続時間を1時間とした。これは昼食時の電力需要が低下する時間を考慮して設定した。計算に用いたCAESの仕様をTable 2に示す。

Table 2 Specifications of overground CAES

Storage tank	Spherical shape (18m in diameter) Minimum pressure 75% of rated discharge pressure of compressor
Discharge tank	Spherical shape (18m in diameter) Maximum pressure 300% of rated discharge pressure of compressor
Compression ratio of intermediate compressor	4
Rated flow of intermediate compressor	10% of rated intake flow rate of compressor
Diameter of piping	0.14 m

中間圧縮機の性能曲線は、既存圧縮機の性能曲線<sup>(11)</sup>をベースとして、タービンシステムの圧縮機の定格流量の1/10に修正したものを用いる。性能曲線をFig. 5に示す。

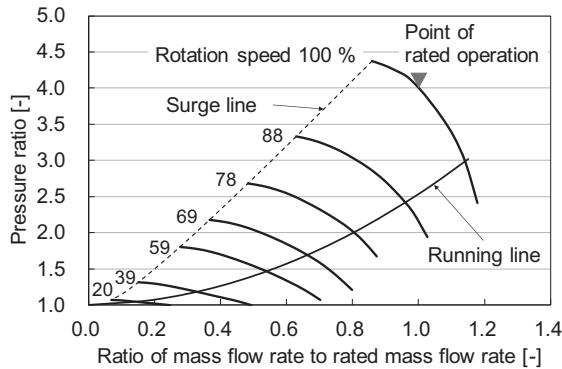


Fig. 5 Characteristics curves of intermediate compressor

中間圧縮機は、起動後300秒間は起動運転線に沿って昇圧し、定格回転数到達後は、吐出側の負荷に伴い100%回転数の性能曲線上を移動すると仮定した。タンク直徑は、中間圧縮機の昇圧によって放出タンクに蓄えられる空気量が、空気放出時のCAES作動時に圧縮機定格吸気流量の1/10を1時間以上タービンシステムに供給可能となるように設定した。

次にタンク内状態量変化の計算方法を示す。タンク内の状態量変化は、質量保存式、エネルギー保存式、および状態式を用いて算出した。また、エネルギー式ではタンク表面からの放熱を、対流熱伝達率7(W/(m<sup>2</sup>K)), 放射率0.5と仮定して計算した。

$$\frac{dM_{rt}}{dt} = m_1 - m_2 \quad (1)$$

$$\frac{dM_{dst}}{dt} = m_2 - m_3 \quad (2)$$

$$\frac{d(C_p M_{rt} T_{rt})}{dt} = m_1 C_p T_{co} - m_2 C_p T_{rt} \quad (3)$$

$$-A_{rt}[\alpha(T_{rt,out} - T_a) + \beta\sigma(T_{rt,out}^4 - T_a^4)] \quad (3)$$

$$\frac{d(C_p M_{dst} T_{dst})}{dt} = W_{comp} + m_2 C_p T_{rt} - m_3 C_p T_{dst} \quad (4)$$

$$-A_{dst}[\alpha(T_{dst,out} - T_a) + \beta\sigma(T_{dst,out}^4 - T_a^4)] \quad (4)$$

$$P_{rt} = \frac{M_{rt}}{V_{rt}} RT_{rt} \quad (5)$$

$$P_{dst} = \frac{M_{dst}}{V_{dst}} RT_{dst} \quad (6)$$

ここで、**A**:タンク表面積[m<sup>2</sup>], **Cp**:定圧比熱[J/(kg K)], **dt**:時間刻み[s], **M**:質量[kg], **m**:質量流量[kg/s], **P**:圧力[Pa], **R**:ガス定数[J/(kg K)], **T**:温度[K], **V**:体積[m<sup>3</sup>],  $\alpha$ :対流熱伝達率[W/(m<sup>2</sup>K)],  $\beta$ :放射率[-],  $\sigma$ :Stefan-Boltzmann定数[W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]。

添え字は、**1**:貯留タンク流入, **2**:貯留タンクから放出タンク, **3**:放出タンク流出, **a**:大気 **co**:圧縮機吐出側, **dst**:放出タンク, **out**:タンク外壁, **rt**:貯留タンクを表す。

#### 4.3 CAES作動時のタービン運転条件

**4.3.1 圧縮機吐出空気を抽気する場合** CAESシステムへの圧縮空気の貯留は、ガスタービンシステムが50%負荷運転状態で行う。計算では、開始から0.5時間経過まではFig. 4に示した運転と同じ運転、つまりFig. 6に

示すように、回転数は起動時を除き全て定格回転数一定に維持し、IGV開度比を初期値68%として、その後開度比を100%に保つ。これは、Fig. 4に示した部分負荷から定格負荷運転を再現したものである。Fig. 6にタービンシステムの計算条件として回転数、燃料流量、およびIGV開度を示す。0.5時間経過後、燃料流量を絞り発電出力を50%負荷まで低下させる。この時の燃料流量は、定格吸気流量での無負荷運転時の燃空比と100%出力時の燃空比から推定した燃空比によって与えた。その後、燃料流量は50%負荷時の燃空比を保つため、CAES作動による燃焼空気流量の低減に伴い燃料流量も減少する。CAES作動後、約0.5時間（経過時間1.29時間）経過後に燃料流量を増加した。つまり、50%負荷状態から、CAES作動により10%の空気を抽気すると、燃空比一定の運転条件では空気流量の低下に伴い発電出力が低下する。このため、発電出力が50%になるように燃料流量を増加させたものである。なお、IGV開度の時間変化率はFig. 4に示した実機タービンシステムの運転と同一にした。

Fig. 7にCAESシステムの計算条件として、バルブ1, 2-1, 2-2, および中間圧縮機のON・OFF (ONが1, OFFが0) を示す。CAESシステムは経過時間0.79時間からバルブ1, 2-1, および2-2を開いて中間圧縮機を作動させて、貯留タンクおよび放出タンクに空

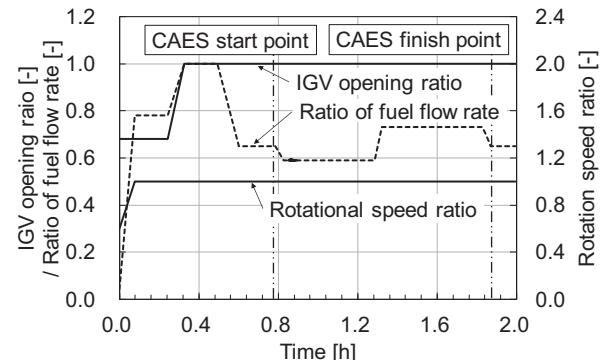


Fig. 6 Input data of turbine system for the operation of extracting compressed air

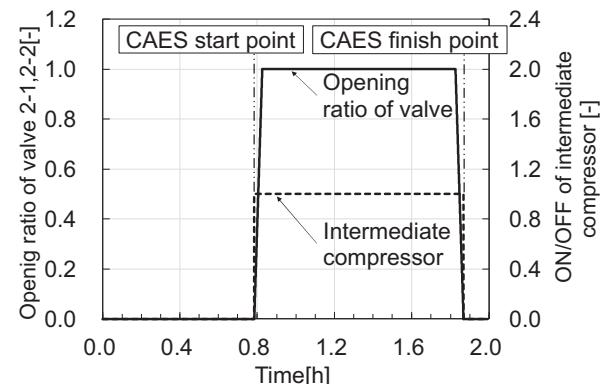


Fig. 7 Input data of CAES system for the operation of extracting compressed air

気を貯留する。なお、貯留タンクと放出タンクの初期値は、50%負荷運転時の圧縮機吐出圧、吐出温度とした。

**4.3.2 放出タンクの空気を供給する場合** Fig. 8にタービンシステムの計算条件を示す。計算は前節と同様に、0.5時間まではFig. 4に示した部分負荷と定格負荷運転を再現し、0.5時間以降に負荷変更を開始する。CAESからの空気供給によるガスタービンシステムの出力増加は、タービンシステムが部分負荷運転状態にある場合に実施される。計算では、初めにこの部分負荷の運転状態を用意する。0.5時間経過後、IGV開度は変更せず、燃料流量を絞り発電出力を50%負荷まで低減しFig. 3①の運転状態にする。その後IGV開度比を83%まで下げてFig. 3②の運転状態にしてCAES作動前のガスタービン運転状態を用意する。CAES開始後は、放出タンクからの空気供給に伴い燃料流量を増加させる。CAES作動1時間後にIGV開度を戻す。前節と同様に、IGV開度の時間変化率はFig. 4に示した実機タービンシステムの運転と同一にした。

Fig. 9にCAESシステムの計算条件としてバルブ3の開度を示す。経過時間0.79時間からバルブ3と圧力調整弁を開いて放出タンクからガスタービン燃焼器に空気を供給する。

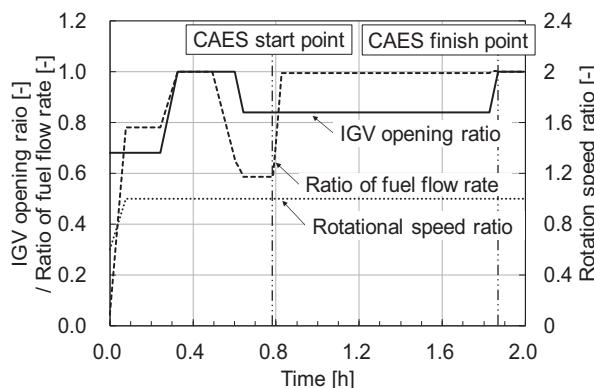


Fig. 8 Input data of turbine system for the operation of discharging compressed air

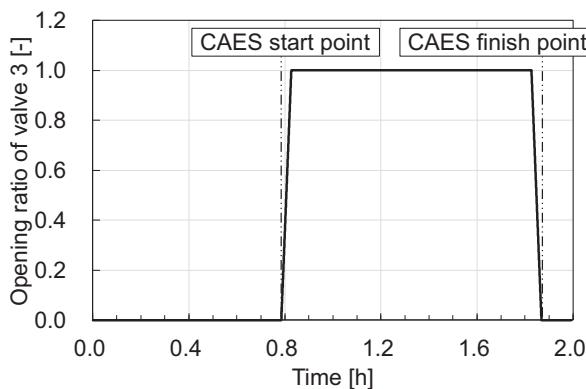


Fig. 9 Input data of CAES system for the operation of discharging compressed air

## 5. 解析結果と考察

### 5.1 圧縮機吐出空気を抽氣する場合

**5.1.1 CAESシステムの変化** 貯留タンクおよび放出タンクの圧力変化、流入空気流量、中間圧縮機動力をFig. 10からFig. 12に示す。以後の節、章を含め解析結果はCAES開始前の定格運転状態終了直前の0.4 hから表示する。Fig. 10は貯留タンク、放出タンク内の圧力を、圧縮機の定格吐出圧で除したグラフである。Fig. 10で中間圧縮機起動前の両タンク圧と中間圧縮機起動後の貯留タンク圧が減少しているのは、タンク放熱に伴う圧力低下とCAES動作後は貯留タンクへの流入空気量と中間圧縮機の吸気流量の差による圧力低下が表れたものである。Fig. 11で中間圧縮機の空気流量が貯留タンク注入流量よりも多いのは、CAES作動中の1時間内では、放出タンク圧と貯留タンク圧の比が中間圧縮機の定格圧力比以下の状態で運転されているため中間圧縮機の吸気流量が定格流量以上になるためである。Fig. 12から1時間の抽氣で、最大3.5 MWの動力を吸収することが分かる。

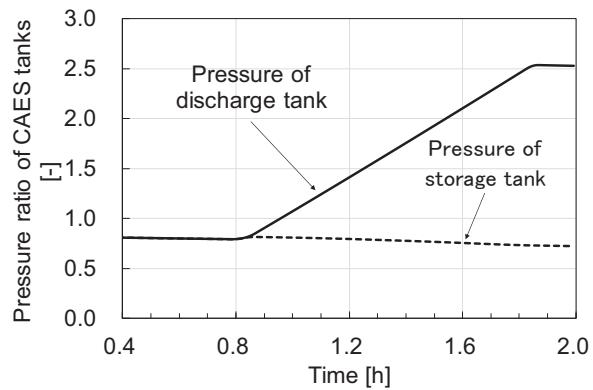


Fig. 10 Pressure change in tanks

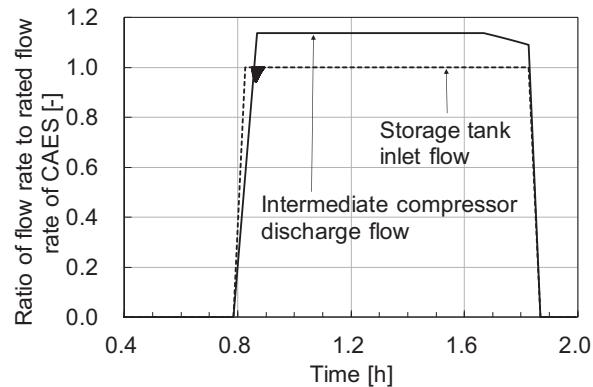


Fig. 11 Mass flow rate of storage tank and intermediate compressor

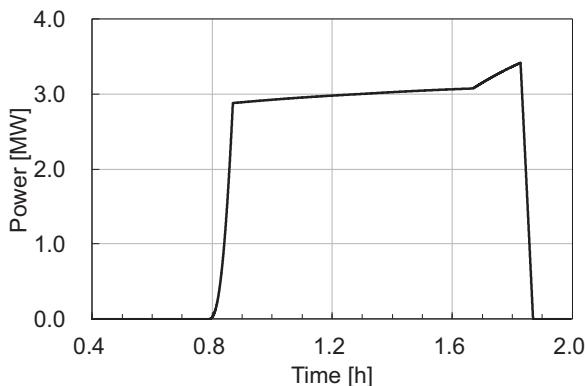


Fig. 12 Intermediate compressor driving power

**5.1.2 ガスタービンシステムの変化** CAES作動時におけるガスタービンシステムの空気流量、圧縮機吐出圧、各種出力をFig. 13からFig. 15に示す。Fig. 13で、CAES作動後、圧縮機吸気流量は変化ないものの、タービンに送られる空気流量は約10%低減し、この低減分の空気流量がCAESに貯留される。

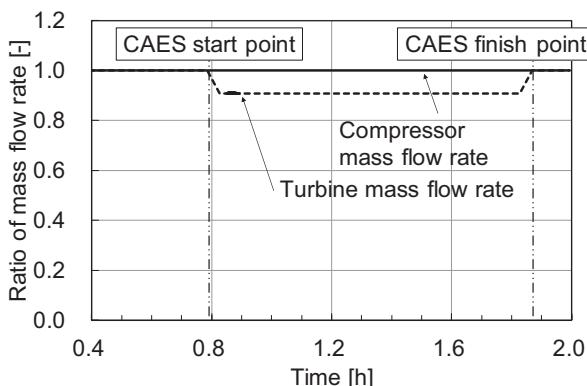


Fig. 13 Mass flow rate of gas turbine system

Fig. 14にタービンシステムの圧縮機吐出圧力を示す。①はFig. 3に示した50%負荷状態での圧力である。CAES作動後、燃焼温度を一定に保つ状態で空気流量を低減すると、タービン修正流量は一定のため、圧縮機吐出圧力は空気流量の低減に伴い低下し②の状態になる。この状態では発電機出力は50%よりも低下する。1.29時間以降は発電機出力を50%に戻すため燃料流量を増加させタービン入口温度を上昇させている。この負荷増加に伴い圧縮機吐出圧力は若干増加する。

Fig. 15はタービン出力、圧縮機動力、発電機出力を示したものである。CAES作動時の前半はCAES作動前の燃空比を保っているため、CAESへの抽気による空気流量の低下に伴う燃料流量の低下で発電機出力の低下が見られる。

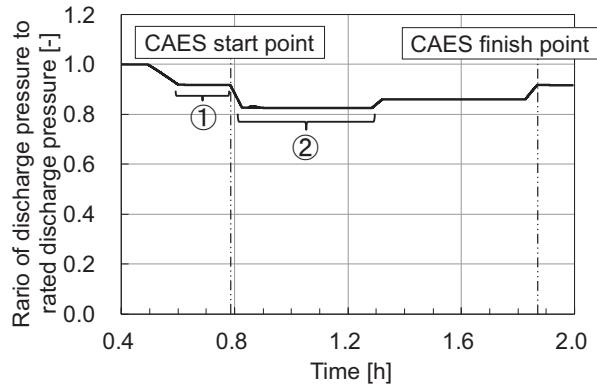


Fig. 14 Pressure change of gas turbine compressor

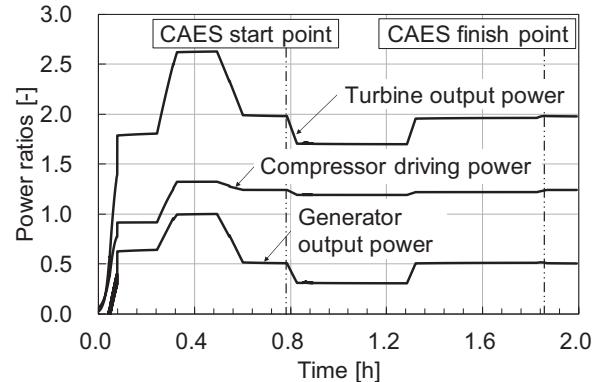


Fig. 15 Comparison of output power

## 5.2 放出タンクの空気を供給する場合

放出タンクの初期値は、5.1に示した中間圧縮機による1時間の充填後の状態にし、燃焼器に対して1時間の空気供給を行うものとする。

**5.2.1 CAESシステムの変化** 貯留タンクおよび放出タンクの圧力変化、ガスタービンへの供給流量をFig. 16, Fig. 17に示す。放出タンクの圧力は空気流量をガスタービンに供給するため低減する。しかし、空気供給1時間後においても圧縮機定格吐出圧以上の圧力を保持しており、放出タンクからガスタービンへの空気流量は供給できている。放出タンク18mで1時間の空気供給には十分な空気量を保有できている。

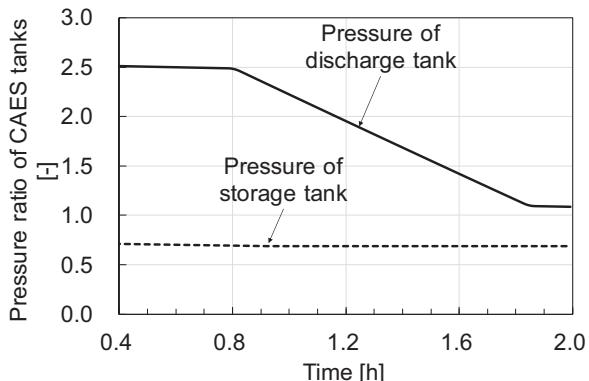


Fig. 16 Pressure change in tanks

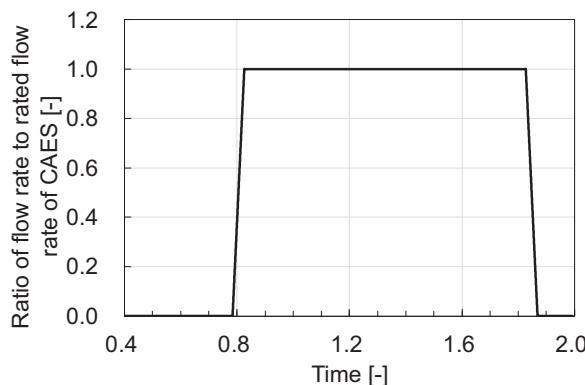


Fig. 17 Discharge mass flow rate of discharge tank

**5.2.2 ガスタービンシステムの変化** CAES放出時のガスタービンへの供給空気流量、燃料流量、圧縮機吐出圧、各種出力を、Fig. 18からFig. 20に示す。Fig. 18から、CAES作動に移行した時の圧縮機吸気流量はCAES作動前とかわらず90%程度の吸気量であるが、CAES作動により、タービンに供給される空気流量は通常の定格運転時と同等の空気が供給される。Fig. 8に示した燃料流量は定格運転時の燃焼温度と同等になるよう燃空比を合わせてあるので、空気流量の増加に伴い増加し、CAES作動前の定格運転時と同等の燃料流量になっている。

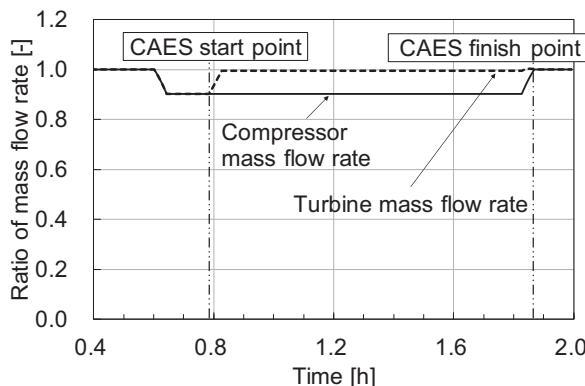


Fig. 18 Mass flow rate of gas turbine system

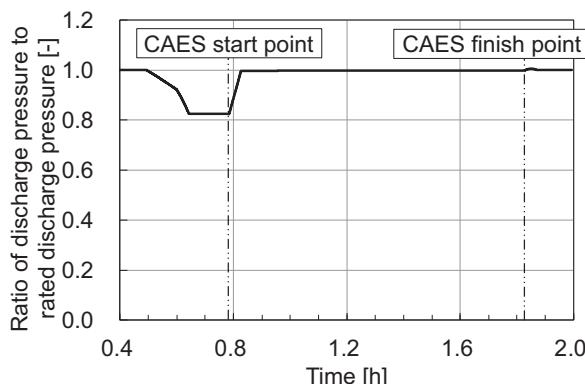


Fig. 19 Pressure change of gas turbine compressor

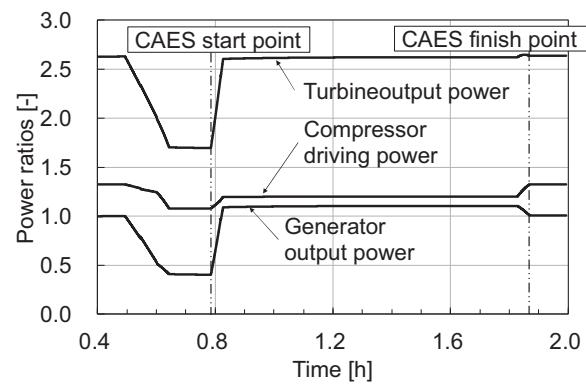


Fig. 20 Comparison of output power

Fig. 19の圧縮機吐出圧力はCAES作動直前の状態では、Fig. 3②の状態にある。CAESを作動させ、空気流量の増加に伴い、燃料流量を増加させ、発電出力を増加させるため、圧縮機の作動点も高圧力側に移動し、結果的には100%吸気の定格出力運転点と同等の圧力になる。Fig. 20の出力結果から、CAES作動時の発電量は通常の定格出力運転時における発電出力よりも約10%増加している。CAESを作動して空気を供給する場合、タービン出力は通常の定格出力運転とCAES作動時では差異はないが、CAES作動時では圧縮機の吸気量低減により圧縮機動力は低減し、この動力低減量が発電出力の増加に寄与している。

### 5.3 CAES作動時の発電効率、吸収電力量と放出電力量

CAES動作によるガスタービンシステムの発電効率を考察する。Fig. 21は発電機出力を投入燃料の熱量で除した発電効率を、CAES無しの通常の100%発電出力時を1として表した発電効率比である。圧縮機吐出空気を貯留する場合、同じ50%負荷運転で比較すると、CAESを作動した場合は、約0.09の効率低下をもたらしている。一方、CAESからの空気供給で発電出力を増加する場合の効率は、通常の100%出力時に比べて発電効率が約0.11增加することが分かる。貯留と供給をトータルとして考える場合には、タービンシステムとして約0.02の効率向上が図られることになる。

次にCAES動作時の電力吸収量と供給発電量を考察する。電力吸収量は、貯留タンクから放出タンクに加圧し

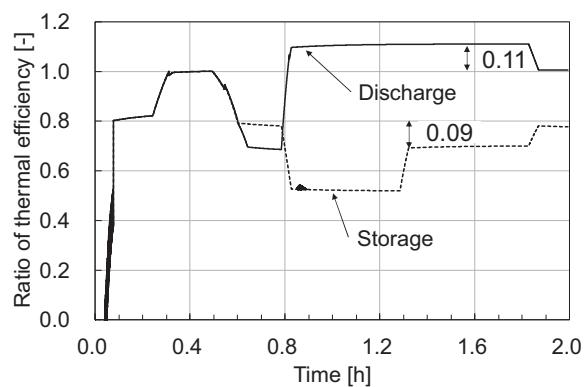


Fig. 21 Thermal efficiency during CAES operation

て空気を貯留するときに外部電力が必要となるため、この中間圧縮機の消費電力として算出する。また、放出電力量の算出は、ガスタービンの定格出力と空気放出CAES作動時の発電量の差で評価する。結果をFig. 22に示す。1時間での吸収量として3.3MWhを、放出量として3.7MWhが算出される。これらの発電量は地上CAESを設置したガスタービンの定格発電量の約1割に相当する。Fig. 23に、Fig. 15およびFig. 20に示した発電機出力を示す。抽気時は中間圧縮機の動力を消費するため、CAESを含めた本タービンシステムが外部に供給できる出力はFig. 15に示した発電機出力からFig. 12に示した中間圧縮機動力を差し引いた値になる。Fig. 23には抽気時のGTシステム出力としてこの値を示す。図に示すようにCAES作動時に本タービンシステムが外部に供給できる電力範囲はガスタービンシステムの定格出力の約41～110%になる。仮に発電負荷50%がタービンシステム運転上の最低負荷であった場合、Fig. 23のCAES終了点以降のガスタービンシステムの出力範囲である50～100%が通常のガスタービン設備の電力供給範囲になる。地上CAESの追設によりタービンシステムの出力調整範囲を約1.4倍拡張することができる。一方、容量に関しては、現在稼働するリチウムイオン電池の蓄電池システムの容量<sup>(5)</sup>に比べると約1/10以下であるが、地上CAESの場合、その動作は圧縮機のサージを回避しなければならないことと、空気の貯留量および放出量とも圧縮機の定格吸気流量に依存する。より多くの電力吸収や電力供給を期待する場合には、より大容量のタービンシステムにCAESを適用する必要がある。

最後に地上CAESによる充放電効率を示す。充電量に対する放電量として充放電効率を定義すると、地上CAESでの放電量は空気放出時のCAES作動によって得られる発電利得量とする。充電に必要な動力は空気貯留時に要する動力と中間圧縮機の動力になる。空気貯留時に要する動力の考え方としては、空気貯留時のCAES作動によって低下した発電量分として捉えることにする。Fig. 24に空気貯留時のCAES作動時もCAES作動前と同じ燃料流量を保ったときの発電出力を示す。Fig. 24には参考のためFig. 15に示した発電出力も示す。空気貯留時のCAES作動により発電出力比で約0.1の低下を示す。これは電力量として約3.6MWhに相当する。充電に要する電力量は、この電力量と中間圧縮機動力量の3.3MWhを合わせて6.9MWhになり、放出電力量3.7MWhをこの量で割り充放電効率は約54%になる。地上CAESでは、CAESからの空気供給によって得られる発電利得とCAESに空気抽気することで生じる発電損失はほぼ同等になるため、充放電効率は中間圧縮機動力に大きく依存することになる。中間圧縮機動力は、中間圧縮機の圧力比とタンク直径の選定に依存する。つまり、放出タンク径が増加すると一定放出空気量を保持するタンク圧力が低下するため、中間圧縮機圧力比の低減により中間圧

縮機動力が低減し充放電効率は増加する。逆にタンク径が減少すると中間圧縮機動力の増加により充放電効率は低下する。Fig. 25に放出タンク直径をパラメータとした場合の、放出電力量に対する吸収電力量を横軸に取った場合の充放電効率を示し、蓄電池システムを含む他システムとの比較<sup>(2)</sup>を示す。本地上CAESシステムの場合、放出タンク径を増加することで充放電効率は揚水発電や蓄電池システムと同等にまで上げることはできるが、電力吸収量は低減する。

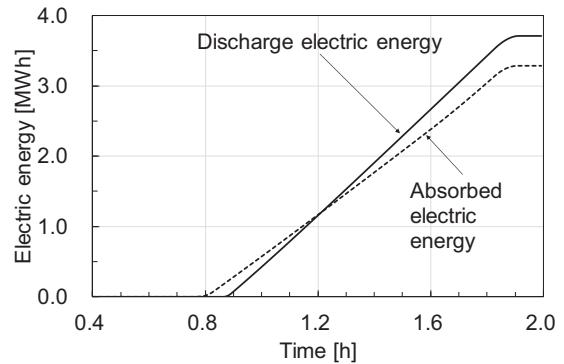


Fig. 22 Absorbed and discharged electric energy

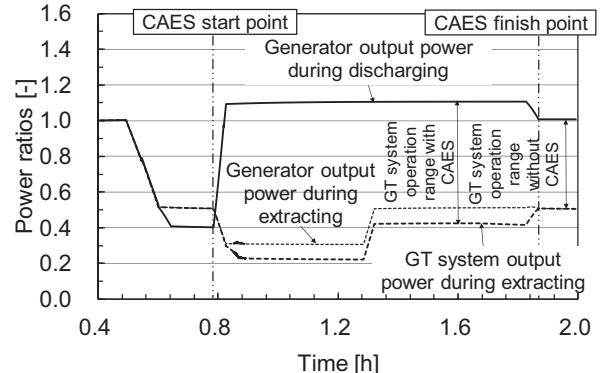


Fig. 23 Gas turbine system operation range with and without CAES

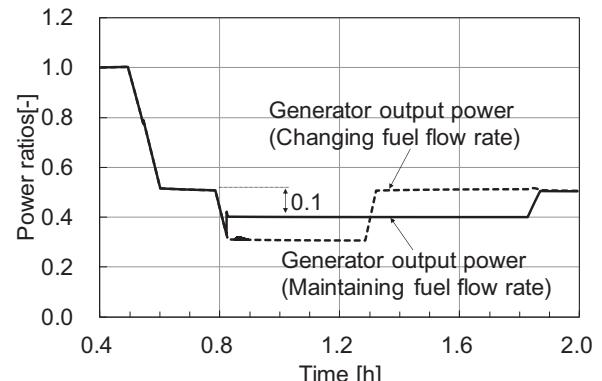


Fig. 24 Comparison of generation output power during extracting by the difference of fuel flow rate

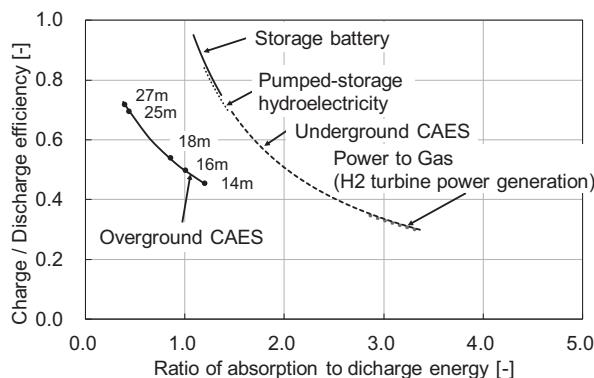


Fig. 25 Charging/discharging efficiency

## 6. 結論

変動電源導入増加時の電力系統安定化のため、既存ガスタービンシステムに電力吸収機能を備えた設備として地上型CAESを提案した。本地上型CAESシステムは、圧縮機吐出空気を貯留するタンク（貯留タンク）と、その貯留空気をさらに高圧に昇圧する中間圧縮機、およびその昇圧空気を貯留するタンク（放出タンク）等から成る。また、CAESシステムに空気を貯留する場合と、CAESシステムから空気を放出する場合の運転方法を示し、中容量ガスタービンを対象としたダイナミックシミュレータでその動作を確認した。直径18 mの貯留タンクおよび放出タンクを設け、圧縮機の定格吸気流量の10 %の空気を抽気または放出することで、ガスタービン発電機定格発電量の約1割に相当する3.3 MWhの電力吸収と3.7 MWhの電力放出が行え、既存ガスタービンシステムの出力調整範囲の拡張が可能になり、負荷調整用としての機能を向上できることを確認した。

## 謝辞

本研究は東北電力株式会社と東北大の共同研究部門である電力エネルギー未来技術共同研究部門で実施されたもので、東北電力株式会社からは研究遂行に対して多くの支援を頂きました。深く感謝の意を示します。

## 参考文献

- (1) Jidai Wang, Kunpeng Lu, Lan Ma, Jihong Wang, Mark Dooner, Shihong Miao, Jian Li, and Dan Wang, Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development, Energies 10, 991 (2017).
- (2) 中北智文, 小林英夫, 奥原巖, 高橋克行, 安田友芝, 圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン(CAES-G/T)の開発, 石川島播磨技法, Vol. 43 No. 3 (2003).
- (3) 戸島正剛, 松隈正樹, 新たな断熱圧縮空気蓄電システム「空圧電池」の開発, 日本AEM学会誌, Vol. 24, No. 4 (2016).
- (4) 東北電力ネットワーク株, 過去実績データのダウンロード, 東北電力(株)公式ウェブサイト <https://setsuden.nw.tohoku-epco.co.jp/download.html>, (2019).
- (5) 東北電力ネットワーク株, 南相馬変電所需給バランス改善蓄電池システム実証事業成果概要, 東北電力(株)公式ウェブサイト [http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/170331/170331\\_1.pdf](http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/170331/170331_1.pdf), (2016).
- (6) Y. Kashiwabara, Y. Katoh, H. Ishii, T. Hattori, Y. Matsuura, and T. Sasada, Developments leading to an axial flow compressor for a 25 MW class high efficiency gas turbine, 90-GT-238, (1990).
- (7) 生井武文, 井上雅弘共著, ターボ送風機と圧縮機, コロナ社, (1988).
- (8) 関慧一, 中野晋, 竹田陽一, マイクロガスタービンの動作解析, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43 No. 3 (2015), pp. 68-74.
- (9) 鈴木晃純, 中野晋, 田中翔悟, 竹田陽一, 菅原由貴, 中容量ガスタービン用動作解析シミュレータの開発, 第45回日本ガスタービン学会定期講演会 講演論文集, (2017)
- (10) 野々村弘樹, 中野晋, 竹田陽一, 地上型圧縮空気貯蔵(CAES)を備えたガスタービンシステムの基礎検討, 日本機械学会東北学生会, 第49回卒業研究発表講演会, (2019-3)
- (11) S. Nakano, T. Kishibe, H. Araki, M. Yagi, K. Tsubouchi, M. Ichinose, Y. Hayasaka, M. Sasaki, T. Inoue, K. Yamaguchi, H. Shiraiwa, Development of a 150 kW microturbine system which applies the Humid Air Turbine Cycle, ASME Turbo Expo, GT-2007-28192, (2007).
- (12) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), 電力貯蔵分野の技術戦略策定へ向けて, 技術戦略研究センター(TSC) レポート TSC Foresight, (2017).