

# LNG 冷熱を利用するガスタービン吸気冷却システムの開発

Development of Gas Turbine Suction-Air Cooling System Using LNG Cold Heat

機械事業本部 吉田 圭 二 郎\*<sup>1</sup>  
 技 術 本 部 松 原 亘\*<sup>2</sup>  
 高砂製作所 矢 嶋 春 喜\*<sup>3</sup>  
 菱明技研株式会社 牧 原 洋\*<sup>4</sup> 徳 田 雅 寛\*<sup>5</sup>  
 中部電力株式会社 小 野 田 聡\*<sup>6</sup>

未利用エネルギーである LNG の冷熱を利用して、夏場の高温時に低下するガスタービン発電設備の出力を回復させる LNG 冷熱利用ガスタービン吸気冷却システムの開発に取り組んでいる。これまでに LNG 気化設備の動特性シミュレーション及び実証機の約 1/100 規模の装置を用いた要素試験によって、発電設備としての機能及び信頼性を検証した。定格出力が 243 MW のガスタービン 7 軸で構成したコンバインドサイクル発電設備の場合、夏場のピーク時に発電出力が 7.1 % (15.2 MW/軸) 向上し、夏場の出力増加分の設備単価はコンバインドサイクル発電設備の発電単価並みとなる。また、年間を通じて海水を使用しない LNG 気化システムを構築したことにより、海水の取水と排水による環境への影響がなくなり、発電所のポンプ動力の低減等の効果もあることが分かった。

Gas turbine power generation has the fault that its output is lowered by high temperatures during summer, but our new system utilized LNG cold heat to cool the gas turbine suction-air and prevent the lowering of output. We successfully demonstrated the function and reliability of the equipment in the power generation system. With a combined power generation system having an output of 243 MW×7 units, a power increase of about 7.1% (15.2 MW/unit) is possible. Seawater has been used for LNG vaporization until now, but the new system uses a coolant, so the influence on the environment by intaking and discharging seawater will decrease.

## 1. ま え が き

世界的に環境保全への気運が高まる中、我が国の電力会社においては、クリーン化や高効率化の観点から、LNG (液化天然ガス) だきガスタービンコンバインドサイクル発電設備が導入されてきた。コンバインドサイクル発電の主体となるガスタービン発電設備では、外気温度が上昇すると、空気密度が小さくなりガスタービンに吸引される空気、すなわちガスタービン吸気の質量流量が減少する。そのため、燃焼器に導入する天然ガスの流量を減らさなければならない、気温の高い夏場は冬場に比べて発電設備の出力

が約 15 % 低下する例が報告されている<sup>(1)</sup>。

一方、電力の需要は夏場の昼間にピークを迎えるため、夜間の余剰電力を利用して冷熱を製造し、蓄積した冷熱で昼間のガスタービン吸気温度を下げて発電出力を回復させる、ガスタービン吸気冷却システムの開発が国内外で進められている。

これに対して、当社は中部電力(株)と共同で、有効利用されことなく海水中に放出されている LNG の冷熱に着目して、LNG 冷熱を利用したガスタービン吸気冷却システムを開発した<sup>(2)</sup>。本システムと主な他方式の吸気冷却システムとの比較を表 1 に示す<sup>(3)(4)</sup>。

表 1 主なガスタービン吸気冷却システムの比較  
 Comparison of gas turbine suction-air cooling system

|         | LNG 冷熱利用 (本方式)                                     | 氷蓄熱                                      | 液体空気噴霧                                | 同時吸気冷却                              |
|---------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| システム    | LNG の冷熱から冷水を作り、熱交換器でガスタービン吸気を冷却する。                 | 夜間電力で作った氷を昼間解氷して冷水とし、熱交換器でガスタービン吸気を冷却する。 | 夜間電力で液体空気を作り、昼間にガスタービン吸気へ直接噴霧する。      | ターボ冷凍機を用いて冷水を作り、熱交換器でガスタービン吸気を冷却する。 |
| 特 徴     | ①未利用エネルギーの有効利用<br>②海水を使用しない LNG 気化設備<br>③冷却用の動力が不要 | ①電力負荷の平準化<br>②システムが簡単                    | ①電力負荷の平準化<br>②液体空気の吹込み量により、出力増加の調節が可能 | ①電力のピーク対応<br>②システムが簡単               |
| 瞬間出力増加  | 中                                                  | 中                                        | 大                                     | 中                                   |
| エネルギー効率 | 大                                                  | 中                                        | 小                                     | 中                                   |
| 発電単価    | ピークロード用<br>(年間稼働時間 1 000 時間)                       | 揚水発電より安い                                 | 揚水発電より安い                              | 揚水発電より安い                            |
|         | ベースロード用<br>(年間稼働時間 3 000 時間)                       | 一般発電所より安い                                | 不明                                    | 不明                                  |
| 備 考     | LNG 基地へ隣接したプラントに限定される                              |                                          |                                       |                                     |

\*1 化学プラント技術センタープロジェクト部基本計画グループ主査

\*2 広島研究所化学プラント研究推進室

\*3 プラント技術部火力・原子力プラント設計課主務

\*4 技師長 工博

\*5 技師長

\*6 企画部設備総合計画グループ課長

平成4年度から開発に着手し、まず吸気冷却システム全体の構成及び各構成機器の型式を選定した。次に、急速な起動停止や負荷変化での運用が予想される、ガスタービン発電設備の燃料ガス発生設備を兼ねる LNG 気化設備の動特性をシミュレーションし、発電設備としての機能及び信頼性を確認した。その後、LNG 気化・水冷却設備の要素試験装置を製作して、先に実施したシミュレーション結果の妥当性を検証した。

本報では、LNG 冷熱利用ガスタービン吸気冷却システムの概要と LNG 気化・水冷却設備の要素試験の結果及び実用機で予想される経済性について報告する。

## 2. システムの概要

### 2.1 システム構成

図1に LNG 冷熱利用ガスタービン吸気冷却システムの構成を示す。

このシステムは、LNG の冷熱を中間冷媒 (HFC-134a) で回収し、この中間冷媒を用いて冷水を製造し、得られた冷水でガスタービンの吸気を冷却するシステムであり、逆にいえば、ガスタービンの吸気を冷却して得られた熱で LNG を気化するシステムである。

発電設備の燃料ガスを発生させるとともに、LNG の冷熱を回収するための LNG 気化・水冷却設備は、シェルアンドチューブ式の間接熱交換器3基で構成している。

LNG 気化器内に導入された約 $-160^{\circ}\text{C}$ の LNG は、水冷却器から供給される  $0^{\circ}\text{C}$  付近の中間冷媒蒸気によって加熱気化された後、NG 過熱器で  $5^{\circ}\text{C}$  以上に加熱される。

LNG の気化熱源となる吸気冷却器出口の水は、吸気冷却水循環ポンプを用いて、NG 過熱器を経て水冷却器に供給される。次に冷媒の蒸発熱で冷却されて吸気冷却用の冷水となり、吸気冷却器に供給される。ガスタービンの吸気ダクトに装着されたフィンチューブ式の吸気冷却器に供給された冷水はガスタービンの吸気を冷却した後、発電設備の機器冷却水系統から供給される温水と混合して、LNG 気化熱源として必要な温度に保たれる。

大気温度が低く、吸気を冷却する必要がない冬場には、LNG 気化熱源として発電所の機器冷却水を使用するため、水冷却器出口の冷水は、全量機器冷却水系統に循環される。

### 2.2 システムの特徴

LNG 冷熱利用吸気冷却システムはガスタービン発電設備の燃料ガス発生設備を兼ねており、定格出力が 243 MW のガスタービン

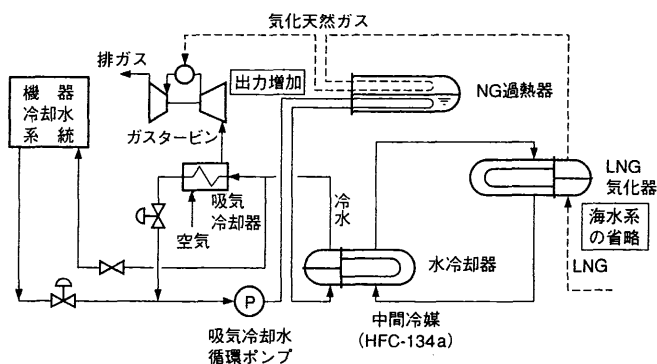


図1 LNG 冷熱利用ガスタービン吸気冷却システムの構成 LNG 気化器、水冷却器、NG 過熱器から成る LNG 気化・水冷却設備及び吸気冷却器から構成される。  
Gas turbine suction-air cooling system using LNG cold heat

7軸で構成した $1300^{\circ}\text{C}$ 級コンバインドサイクル発電設備を対象として、実際の立地条件に合せた吸気冷却システムのフィージビリティスタディを行った結果、次の特徴を有することが明らかとなった。

- (1) LNG の気化熱は年間を通じてガスタービン吸気と発電所の機器冷却水から供給できる。また、気化ガスの温度は  $5^{\circ}\text{C}$  以上を確保できる。
- (2) ガスタービン発電設備の急速な起動停止や負荷変化を想定しても、本システムの材料母材及び溶接部、構造全体、構成部材は 30 年以上の耐用年数を有する。
- (3) 発電設備の燃料負荷指令のみで、システムが最適運用できる。
- (4) LNG 気化設備で海水を全く使用しないため、従来のオープンラック式 LNG 気化器で煩雑であった海生物の除去作業が不要となる。また、海水取排水による環境への影響がなくなる。
- (5) 水冷却用の動力が不要であり、エネルギー効率が高い。さらに、発電所の海水ポンプの動力も低減できる。

このような特徴を有する LNG 冷熱利用吸気冷却システムは、システムの機能と信頼性を実証することで実用化できる見通しである。

## 3. LNG 気化・水冷却設備要素試験

LNG 冷熱利用吸気冷却システムの技術的ポイントは、約 $-160^{\circ}\text{C}$ の LNG の冷熱を水が氷結することなく回収し、なるべく低温の冷水をガスタービン吸気冷却器に送ることである。そこで、ポイントとなる LNG 気化・水冷却設備の機能及び信頼性を検証するため、要素試験を実施した。気化原料は、入手の容易さ、安全面から、LNG の模擬流体として液体窒素を使用した。

### 3.1 要素試験装置の概要

要素試験装置は、LNG 気化・水冷却設備の主要機器である水冷却器と気化器から構成される。LNG 気化熱量換算で実証試験機の約 1/100 (実機の約 1/340、液体窒素の流量：定格 700 kg/h) 規模の装置とした。要素試験装置の全景とプロセスフローを、それぞれ図2と3に示す。

要素試験装置では、吸気冷却器に相当する機器を熱源水槽とスチームの吹込みで模擬し、吸気冷却水の温度を調整した後水冷却器に戻すフローとしている。吸気冷却器には既に実績のあるフィ

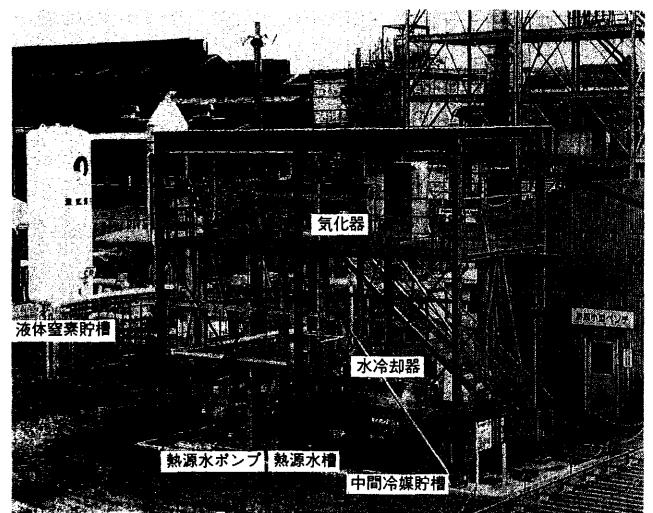


図2 LNG 気化・水冷却設備要素試験装置  
View of pilot plant of LNG vaporization system

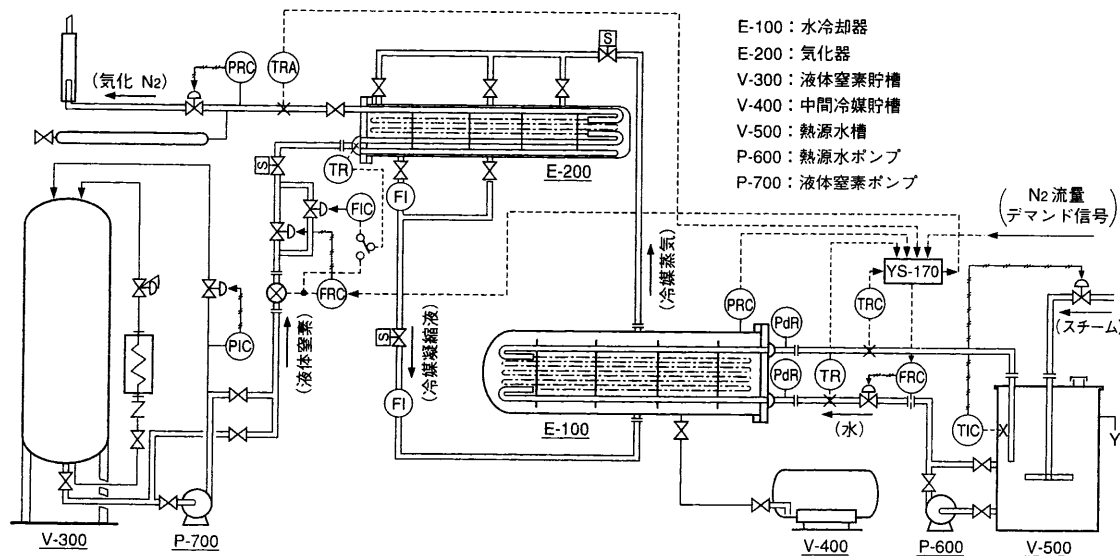


図3 LNG気化・水冷却設備要素試験装置のプロセスフロー  
Process flow of pilot plant of LNG vaporization system

ンチューブ式熱交換器を採用することから、この試験装置では吸気冷却器を省略した。

### 3.2 試験結果

試験は、(1) 負荷変化の追従性、(2) 外乱への応答性、(3) 中間吸気冷媒の伝熱特性、に着目して表2に示すように、液体窒素流量、冷却水流量などを変化させた条件で実施した。LNG気化・水冷却設備に要求される事業用発電設備としての、機能と信頼性を評価する基準として、ガスタービン発電設備の特性を参考に、①気化ガス温度 $0^{\circ}\text{C}$ 以上、②水冷却器冷媒圧力 $1.95\text{ kg/cm}^2\text{G}$ 以上( $0^{\circ}\text{C}$ での中間冷媒の飽和蒸気圧)、③気化ガス主管圧力変動幅 $\pm 0.8\text{ kg/cm}^2$ 以内に設定した。

#### (1) 負荷変化への追従性

図4に、急速起動させた場合の各状態量の経時変化の一例を示す。このように $600\text{ \%}/\text{min}$ という急速な負荷変化に対しても、追従性は良好で、気化ガス( $\text{N}_2$ )出口温度、中間冷媒温度は共に $0^{\circ}\text{C}$ 以上で保持可能であり、気化ガス( $\text{N}_2$ )圧力も許容変動幅内に入っていることが分かった。

以上のほか、通常運転時の負荷変化、急速負荷変化を想定した試験のいずれにおいても、負荷追従性は良好で、冷媒固化・水の凍結等は発生せず、システムとして定常的にも、過渡応答的にも問題ないことが分かった。

#### (2) 外乱への応答性

定常運転時に吸気冷却水量の変動や吸気冷却器からの入熱量

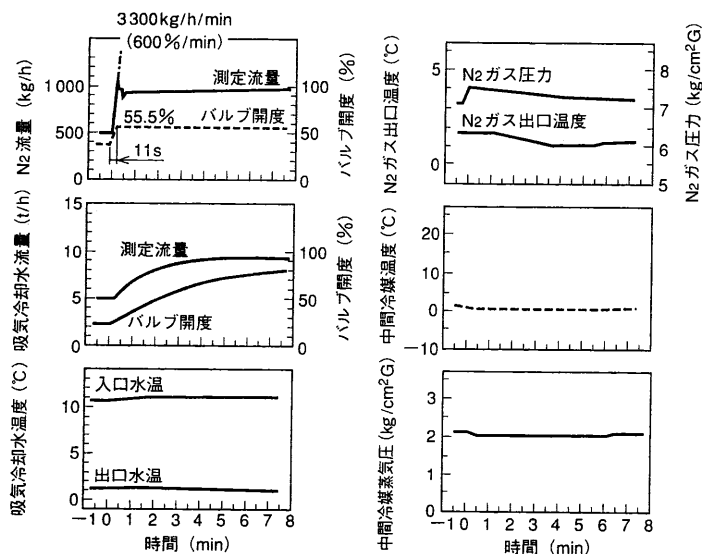


図4 LNG気化・水冷却設備の急速負荷変化試験の一例 急速な負荷変化に対しても良く追従している。  
Results of LNG vaporization test

変化に伴う吸気冷却水温の変動を想定した外乱を投入しても、各状態量の変動幅は小さく、定常運転を保持できることが分かった。また、LNG気化器や吸気冷却水循環ポンプのトリップなど異常時を想定した試験の結果、ウォータハンマ現象などに起因する配管の振動や、ポンプ停止後1min程度は水冷却器の水管内での氷結等は見られず、システム信頼性上の問題は発生しないことが分かった。

#### (3) 中間冷媒の伝熱特性

本システムでは中間冷媒としてHFC-134aを採用しており、試験期間中、安定して運転することができた。

水冷却器の水平管外表面では、この中間冷媒が核沸騰状態にあり、沸騰に伴う飛まつ同伴は伝熱性能に影響するほど発生しないことが分かった。LNG気化器の水平管外表面の凝縮熱伝達は、体積力凝縮支配の領域にあり、また、冷媒凝固の進展による伝熱性能への影響も見られないことが分かった。

#### (4) LNG気化器のサーマルショック対策

LNG気化器は、約 $-160^{\circ}\text{C}$ のLNGと $0^{\circ}\text{C}$ 付近の中間冷媒蒸

表2 要素試験の条件

Conditions of LNG vaporization test

| 試験の種類     | 変化させる条件        | 変化量                                          |
|-----------|----------------|----------------------------------------------|
| 負荷変化への追従性 | 通常負荷変化         | 液体窒素流量 $\pm 25\text{ \%}/\text{min}$ 以上      |
|           | 急速負荷変化         | 液体窒素流量 $\pm 300\text{ \%}/\text{min}$ 以上     |
|           | 急速起動           | 液体窒素流量 $600\text{ \%}/\text{min}$ 以上         |
| 外乱への応答性   | 吸気冷却水流量の変動     | 吸気冷却水流量 $3\sim 6\text{ t/h}$                 |
|           | 吸気冷却水温度の変動     | 吸気冷却水入口温度 $12\sim 20^{\circ}\text{C}$        |
|           | LNG気化器緊急停止     | 液体窒素流量 $1060\rightarrow 0\text{ kg/h}$       |
|           | 吸気冷却水循環ポンプトリップ | 吸気冷却水流量 $6\rightarrow 0\text{ t/h}$ (1min保持) |
| 中間冷媒の伝熱特性 | 液体窒素流量         | $300\sim 1200\text{ kg/h}$                   |
|           | 吸気冷却水入口温度      | $11\sim 40^{\circ}\text{C}$                  |

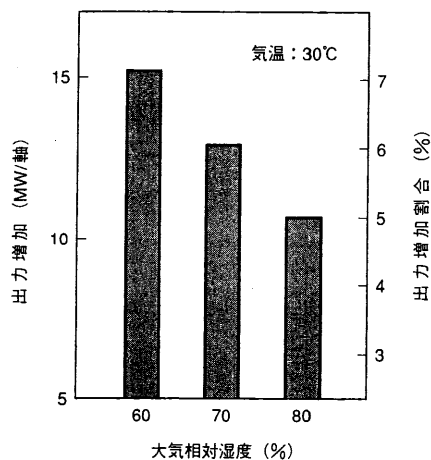


図5 夏場ピーク時の出力増加 気温30°Cでの大気相対湿度に対する出力増加の推算値を示す。  
Power increase of power generation system in summer

気との熱交換器であり、構成部材中に大きな温度分布が発生し、かつ、急速な起動停止や負荷変化で運用される。そのため、強度的にかなり厳しいことが予想され、実機の構造及び構成材料の強度信頼性を三次元有限要素法を用いて解析した。その結果、通常の起動停止時、急速起動時、通常時及び緊急時の負荷変動の各ケースについて、構造、構成材料の母材及び溶接部材は十分実用に耐えることが分かった。これらの強度信頼性は、さらに実証機で検証する予定である。

#### 4. 実用機の性能予測及び経済性検討

定格出力243 MWのガスタービン7軸で構成した1300°C級コンバインドサイクル発電設備用のLNG冷熱利用ガスタービン吸気冷却システムを試設計し、その性能と経済性について検討を行った。

##### (1) 夏場ピーク時の出力増加

夏場ピーク時の大気温度を30°Cとおいた場合、出力は213 MWに低下する。この出力を基準として吸気冷却によるコンバインドサイクル発電設備1軸当りの出力増加を推算した結果を図5に示す。

大気中の相対湿度が低いほど出力の増加が大きく、213 MWに低下した出力が60%では、出力が7.1% (15.2 MW/軸) 増加する。

##### (2) 月別の出力増加

吸気冷却器を5月～10月の6箇月間稼働した場合のコンバインドサイクル発電設備1軸当たりの出力増加の推算値を図6に示す。なお、気象条件はY地区の月別平均気温及び月別平均相対湿度を使用した。

平均気温26.7°C、平均相対湿度79%となる8月は、217 MWに低下した出力が吸気冷却により5.0% (10.9 MW/軸) 増加する。

##### (3) ポンプ動力低減

LNG冷熱利用ガスタービン吸気冷却システムの特徴は、冬場のLNG気化熱源として発電設備の機器類を冷却して得られる熱を利用していることであり、吸気冷却を行わない冬場は、LNGの冷熱を発電設備の機器類の冷却に利用したことになり、海水ポンプ動力の低減、海水を使用する機器冷却水冷却器の運用機

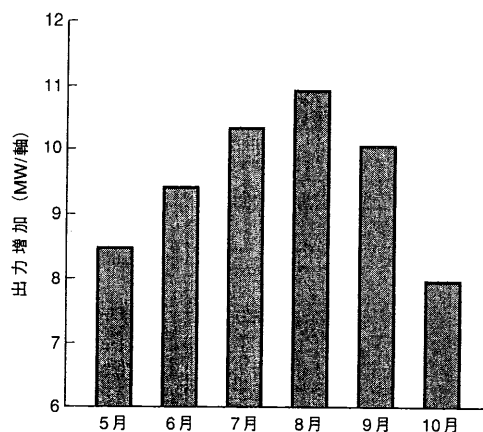


図6 各月別の出力増加 5月から10月までの出力増加の推算値を示す。  
Power increase of power generation system from May through October

器数の削減といった効果が生まれる。

##### (4) 吸気冷却による発電増加量

吸気冷却期間を5月～10月の6箇月間、吸気冷却システムの利用率を70%とし、図6を用いて吸気冷却による出力増加量及びポンプ動力低減量を求めた結果、出力増加量は $29.50 \times 10^6$  kWh/軸、ポンプ動力低減量は $0.32 \times 10^6$  kWh/軸となり、発電増加量は $29.83 \times 10^6$  kWh/軸となる。

##### (5) 経済性

吸気冷却期間におけるガスタービン発電設備の利用率を70%とおいた場合の発電単価を試算した結果、5月～10月の6箇月間稼働した場合、コンバインドサイクル発電設備の発電単価より安くなることが分かった。また、7月～9月の3箇月間稼働した場合、電力ピーク時対策用の揚水発電の単価より安くなることが分かった。

#### 5. む す び

LNGだきガスタービンコンバインドサイクル発電設備において、これまで未利用であったLNG冷熱を有効利用して、夏場のガスタービン発電出力を回復させ、同時に海水を使用しないLNG気化システムの構築を可能とするガスタービン吸気冷却システムを開発した。

このシステムは、実証機の約1/100規模の装置を用いたLNG気化、水冷却要素試験の結果から、ガスタービンの負荷変化への追従性も良好であり、事業用発電設備としての機能及び信頼性を備えていることが分かった。

今後は本システムを公益事業用技術として活用できるよう、経済性の一層の改善、実用機での実証試験を経て実用化していく計画である。

#### 参 考 文 献

- (1) 渡辺 裕, 地球環境問題, 火力原子力発電 Vol.48 No.10 (1997) p.1172~1178
- (2) 小野田ほか, LNG冷熱利用ガスタービン吸気冷却システムに関する研究, 中部電力株式会社研究資料 No.95 (1995) p.159~168
- (3) 岸本ほか, 液体空気利用ガスタービン吸気冷却システムによる出力向上, 三菱重工技報 Vol.34 No.1 (1997) p.22~25
- (4) 複合発電プラントの概要 (その1), 火力原子力発電 Vol.48 No.5 (1997) p.555~567