

液体水素の活用

Utilization of Liquid Hydrogen

久 角 喜 徳*

Yoshinori Hisazumi

1. はじめに

本年2月にはじまったロシアによるウクライナ侵攻に伴い、LNGおよび原油の価格が大幅に上昇し、ガス代、電気代、ガソリン代などエネルギーコストが上昇している。

一方、国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の地球温暖化の緩和策を盛り込んだ第3作業部会の第6次評価報告書によれば、産業革命前からの気温上昇を1.5度以下に抑えるパリ協定の努力目標を達成するには、二酸化炭素（CO₂）などの温室効果ガス排出量を3年後の2025年までに減少に転じさせ、貯蔵や吸収なども進める必要があるという¹⁾。

脱CO₂の流れのなかで2017年に水素協議会（Hydrogen Council）が結成され、現在世界の130社が参加して水素社会実現に向けた研究が進められている²⁾。

我が国では、2021年3月に経済産業省資源エネルギー庁新エネルギーシステム課/水素・燃料電池戦略室により、今後の水素政策の課題と対応の方向性の中間整理（案）がまとめられている³⁾。

液体水素は、風力や太陽光エネルギーからの変換（Power to Gas）によるグリーン水素や化石燃料+CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）により得られたブルー水素⁴⁾を冷却液化することで、大量輸送、大量貯蔵に有利であり、またその冷熱を活用することでシステムのエネルギー効率を高めることができる。

そこで本稿では、水素の用途、水素の液化方式とその所要動力、液体水素の冷熱エクセルギー価値の他に筆者が長年取り組んできたLNG冷熱利用の経験を生かして、液体水素冷熱の活用の考え方を紹介したい。

2. 水素の用途

図1に水素の用途を示す。国内では副生水素等が石油製油所、製鉄所、アンモニアプラント、石油化学プラント、ソー

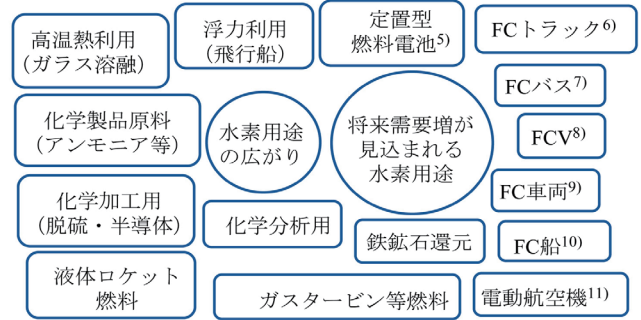


図1 水素の用途

ダプラントで年間約193万トン製造されており、その大部分が同一サイトで原油の脱硫やアンモニア合成、熱源等として供給・活用されている。また都市ガスやLPGを原料として水蒸気改質・精製により高純度のグレー水素をオンサイトで水素ステーションや水素ユーザーに供給する装置メーカーがある^{12~15)}。最近では太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーによる電力を用いてアルカリ性の水を電気分解する装置メーカー^{16~18)}があり、国の支援を受けて大規模な実証試験が実施され、生産された水素は圧縮されトレーラによりユーザーに供給されている¹⁹⁾。

前述の中間整理（案）では、2050年カーボンニュートラル（CN）に向けた目標水素供給量は2030年に最大300万トン/年、2050年に約2,000万トン程度と設定され、目標達成に向けた具体的な取組が示されている。

表1に将来需要増が見込まれる水素量とパリティークストを示す。パリティークストとは、現行燃料の発熱量と水素の発熱量の違いを考慮に入れた現行燃料コストと等価となる水素コストである。現行燃料コスト（2022年6月末現在）は、FCVのガソリン（リッター171円）、FCトラックの軽油（リッター154円）、水素燃料船のA重油（リッター100円）、水素燃料発電のLNG（トン94,000円）としてパリティークストを見直した。

表1 将来需要増が見込まれる水素量とパリティークスト

用途	条件	年間必要水素量	パリティークスト
FCV	2030年80万台	約25万トン	約100円/Nm ³
FCトラック	すべてFC化	約600万トン	約63円/Nm ³
水素燃料船	内航船A重油燃料国内総消費分	約111万トン	約21円/Nm ³
水素燃料発電	総発電量の10%	約600万トン	約21円/Nm ³

*前大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻
大阪ガス・エクセルギーデザイン共同研究講座/
本会元編集実行委員会副委員長

著者は令和4年8月28日にご逝去されました。
心よりご冥福をお祈り申し上げます。

3. 大量輸送に適した液体水素

我が国で初めて液体水素が生産されたのは、1978年岩谷産業株式会社の尼崎工場であり、その生産能力は毎時760リッター（月36トン）であり、1986年には初めての液体水素ロケット（H-Iロケット）の打ち上げに燃料として用いられた¹³⁾。

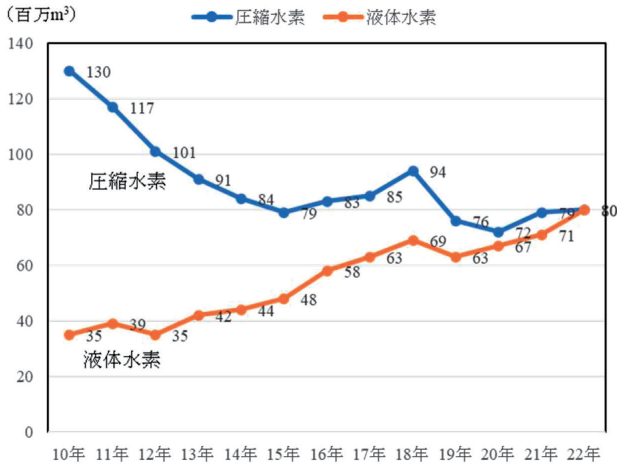


図2 国内市場での圧縮水素と液体水素の販売実績

図2に示すように、ガスジオラマによれば2022年の圧縮水素と液体水素の販売量は、ともに7,214トンであり、年々液体水素の販売量が増加している²¹⁾。水素は、 -253°C （大気圧沸点）に液化することで、密度が $70.8\text{kg}/\text{m}^3$ となり、大気圧 0°C の密度 $0.0899\text{kg}/\text{m}^3$ に比べて体積が788分の1になる。そのため、液体水素は大量輸送・大量貯蔵ができ、省スペースと高純度な点がメリットであり、各種産業で水素ガスから液化水素への切り替えが進んでいる。

表2に圧縮水素と液体水素の搬送仕様を示す^{20, 22)}。

最大の45MPa圧縮水素ガストレーラーの水素積載量は360kgに対して、最大の40フィート液体水素トレーラーの水素積載量は2,830kgとガストレーラー8台分を液水トレーラーなら1台で運搬することができる。

表2 圧縮水素と液体水素の搬送仕様

	圧縮水素	液体水素
貯蔵圧力	15~20MPa、45MPa	ほぼ大気圧
搬送方法	トレーラー	ローリー 40フィートトレーラー
積載量	1,100~3,100m ³ 360kg	約23,000L 約40,000L以上

表3に液体水素の製造拠点を示す²⁰⁾。いずれの製造能力も1系列3,000L/h（日量5.1トン）である。現在関東地区で天然ガス改質による製造能力3,000L/h×2系列以上の計画が進められている²³⁾。天然ガス改質による方式ではCO₂を回収していないので、グレー水素である。電解ソーダによる方式では、CO₂は発生しないが、苛性ソーダと塩

表3 液体水素の製造拠点

	(株)ハイドロエッジ	岩谷瓦斯(株)千葉工場	山口リキッドハイドロジェン(株)
拠点	大阪府堺市	千葉県市原市	山口県周南市
製造方法	天然ガス改質	電解ソーダ	電解ソーダ
製造能力	3,000L/h×3系列	3,000L/h	3,000L/h×2系列
運用開始	2006年4月	2009年7月	2013年6月

素生産の副産物であるため、ホワイト水素である⁴⁾。

4. 液体水素の液化方式とその所要動力

液体水素の製造は、ハンドリングや極低温技術に関する知見やノウハウが要求されるため、これまで欧米の大手産業ガス会社による提供となっており、表3の設備も欧米の大手産業ガス会社によるものである。

川崎重工業株式会社は、水素社会の実現に向けて、サプライチェーンの上流から下流まで一貫した技術開発および商用化を進めている。水素液化システムはその実現において重要な要素であるため、自社技術による初の国産化を目指している。2019年12月から2020年4月にかけて3,000時間の連続運転を実施した実証技術をベースに液化量が日量5~25トンまでの水素液化システムのラインアップを図っている²⁴⁾。

図3に水素液化システムの概略処理フローを示す。

このフローをもとにプロセスシミュレータを用いて主たる運転条件や液化に必要な動力などを評価した。

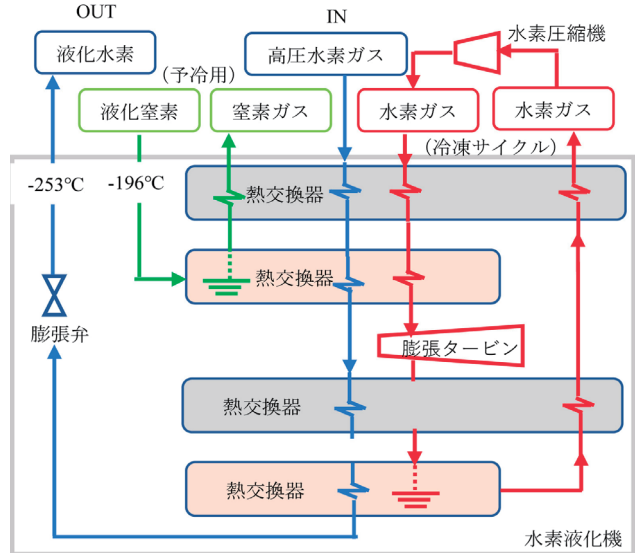


図3 水素液化システムの概略処理フロー

原料の水素ガスは、水素圧縮機にて約3.5MPaに昇圧され、予冷用の液化窒素で -195°C まで冷却された後、水素クローズド冷凍サイクルの冷熱で -250°C に冷却され、膨張弁にて大気圧まで断熱膨張で温度を下げ、大半が液化されて貯蔵タンクに貯められる。ボイルオフまたはフラッ

シュガスは、再圧縮もしくは所内発電の燃料として利用される。

シミュレーションによれば、1トンの水素液化に必要な液体窒素は10.6トンとなり、水素1Nm³あたり、窒素0.76Nm³が必要とされる。液体窒素の液化動力は0.85kWh/Nm³である²⁵⁾。この計算では、圧縮機や膨張タービンの断熱効率を85%、熱交換器のピンチポイントを約1℃とした。また原料水素は大気・常温で供給されるとした。

その結果、水素1Nm³を液化するのに必要な動力は1.1kWhとなり、その内訳は、液体窒素の供給に59%、原料水素の圧縮に17%、冷凍サイクルに24%となった。

液体窒素の沸騰域を利用する熱交換器において伝熱に伴う大きなエクセルギー損失が生じるので、高性能な熱交換システムの導入により液体窒素の代わりに低温窒素ガスを用いて、原料水素ガスと冷凍サイクルの水素ガスを予冷すれば、液化動力の低減が見込まれる。

ちなみに天然ガス1Nm³を液化するのに必要な動力は0.25kWhとわずかである。理由は液化温度が-160℃と冷却負荷が少なく、予冷にC₃、冷凍サイクルにC₁、C₂、C₃、C₄、N₂からなる混合冷媒が用いられ、伝熱に伴うエクセルギー損失を抑えていることと、原料天然ガスの井戸元圧力がたとえば4MPa前後と高いためである²⁶⁾。

国際水素サプライチェーン構築への取組みによれば、図4のCO₂フリー水素のコスト構造に示すように、日本到着のCIF (Cost Insurance and Freight: 運賃・保険料込み渡し) は約30円/Nm³ (334円/kg) と試算されており、水素液化のための設備費および運転費が最も大きい²⁷⁾。コスト評価のための水素製造量は年間225,500トン (1系列日量50トン×たとえば15系列) とされており、将来水素製造液化装置の大型化によるコストダウンが期待されている。

この水素供給規模は、燃料電池自動車300万台あるいは水素ガスタービンコンバインドサイクル発電所100kW 1基 (稼働率50%) が消費する量に相当する³⁾。

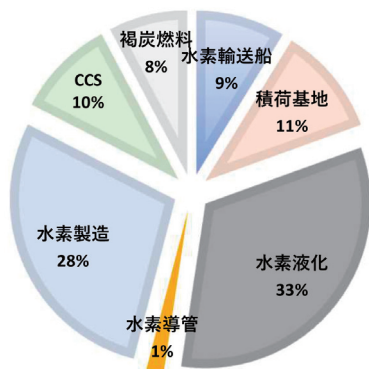


図4 CO₂フリー水素のコスト構造

IAEの予想によれば、2050年に再エネ電源のコストが下がれば、化石燃料+CCUSで製造されるブルー水素に対

して、グリーン水素の方がコスト競争力を有すると見込まれている³⁾。

5. 液体水素の冷熱エクセルギー価値

表4に水素の主な物性を示す²⁸⁾。液体水素冷熱の物理エクセルギーは、大気圧における温度-気化熱特性をもとにカルノー効率による積分で求めることができる²⁹⁾。

温度-気化熱特性は、冷熱利用検討では重要な設計ファクターであり、プロセスシミュレータで用いる状態方程式により異なり、炭化水素系物質によく使われる Advanced Peng-Robinsonでは、比熱の違いで気化熱が大きめに評価されるため、ここではRefProp (NIST) を用いた。

表4 水素の主な物性

物性	値	単位
分子量	2.02	
大気圧沸点温度	-252.8	℃
大気圧沸点蒸発潜熱	446	kJ/kg
大気圧飽和液体密度	70.8	kg/m ³
高位発熱量 (0℃、1atm)	12,790	kJ/m ³
低位発熱量 (0℃、1atm)	10,780	kJ/m ³
低位発熱量 (0℃、1atm)	33,369	kWh/ton
化学エクセルギー(評価15℃)	32,553	kWh/ton
冷熱エクセルギー (大気圧)	3,400	kWh/ton

図5に気化圧力による液体水素とLNGの温度-気化熱特性を示す。昇圧のためのポンプの効率は50%で計算した。

LNG (C₁:88.9, C₂:6.8, C₃:3.1, iC₄:1.2モル%) では、臨界圧の6.82MPaGまで過冷却域、沸騰域、ミスト域、過熱域が見られるが、液体水素では、臨界圧が1.21MPaGであるため、昇圧に伴い明確な沸騰域が見られず、また気化熱の減少もLNGに比べ少ない。

注目すべきは、たとえば気化圧力0.6MPaGの液体水素とLNG各1トンの気化熱 (15℃昇温までの値) は、液体水素では、1,048kWhに対し、LNGでは235kWhと約4.5倍大きい点である。

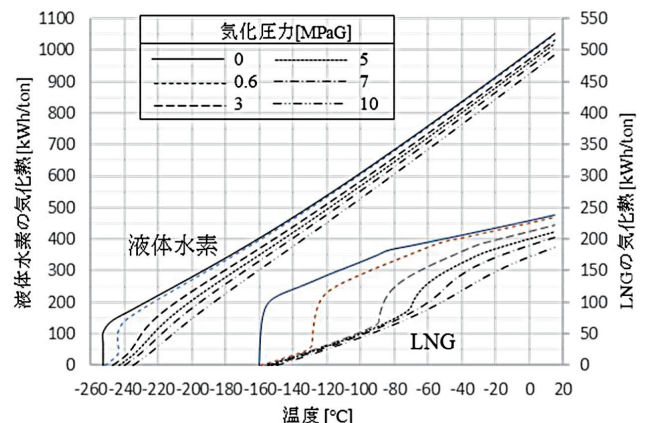


図5 気化圧力による液体水素とLNGの温度-気化熱特性

図6に気化圧力に対する液体水素の冷熱と圧力エクセルギーとポンプ動力の変化を示す。ポンプはボンベによる搬送を考慮して容積式とし、その効率を30%とした³⁰⁾。

表4に示すように大気圧飽和液の液体水素の冷熱エクセルギーは、3,400kWh/tonであるのに対して、LNGは約240kWh/tonに過ぎない²⁹⁾。LNGの化学エクセルギー13,977kWh/tonに対して、冷熱エクセルギーは1.7%に過ぎないが、水素の化学エクセルギー32,553kWh/tonに対して冷熱エクセルギーは10.4%も有する。

なお、LNGの低位発熱量は、13,675kWh/tonであり、発熱量に関しては、水素1トンはLNG2.44トンに相当する。

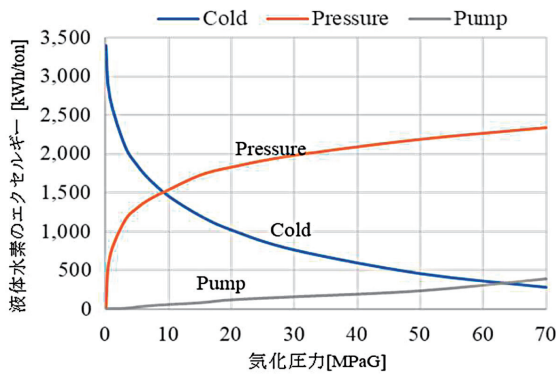


図6 液体水素の冷熱と圧力エクセルギーとポンプ動力

6. 液体水素コージェネレーションの導入

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) 助成事業「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」において、川崎重工業は神戸市のポートアイランドに設置した水素コージェネレーションにおいて水素専焼/混焼ガスタービンの開発を実施している。

2021年から2022年では図7に示す液体水素冷熱も活用したエネルギー供給システムの検討を進めている³¹⁾。

定格発電出力1MW級の「PUC17型常用発電装置」を用いて、(株)ハイドロエッジよりタンクローリで輸送された液体水素を用いて100%専焼試験が実施された。

現在の設備では液体水素は、圧力0.6MPaGのCEタンクに貯蔵され、既存のスターフィン型空温式気化器で気化され、ガス圧縮機でガスタービンに供給されている。

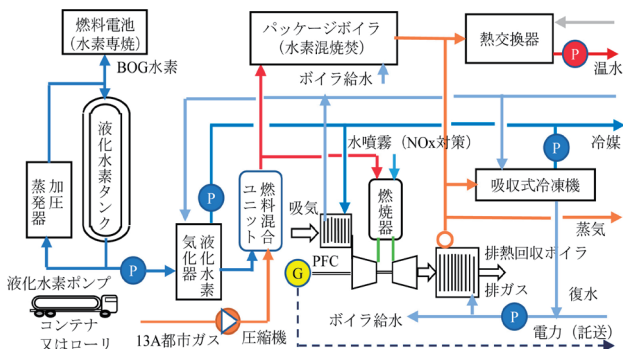


図7 液体水素冷熱も活用したエネルギー供給システム

100%水素専焼時の燃料流量は最大200kg/hであり、スターフィン型空温式気化器を用いていたため、着霜着氷問題から、連続運転が制限される懸念がある。

そこで、空温式気化器の代わりに、たとえば管内に液体水素が流れる多管式熱交換器³²⁾に変更し、冷水を7℃程度に冷却し、プレートフィンクーラ(PFC)により、ガスタービンの吸気を冷却する方式を検討している。また水素ガス圧縮機に代え、液体水素ポンプを用いることで、約100kWの自家使用電力の低減とシステムの簡素化ができる。

都市ガスとのパリティコスト差および外気の低い期間での吸気冷却なし運転を考慮し、都市ガスによる燃料供給を可能とすることでCO₂低減と経済性向上を目指している。

また近隣の病院などに蒸気を供給しているが、熱需要の変動に対応できるように蒸気による温水供給および冷水供給の機能を付加させている。

メーカーカタログ³³⁾に吸気温度によるガスタービンの発電出力、発電効率、蒸気発生量、タービン出口温度、排ガス量や圧縮比などのデータがある。そこで燃料を都市ガス13Aから水素100%に変え、外気の相対湿度を考慮して、吸気が何度下がるか、プロセスシミュレータで評価した。

図8に吸気温度に対する発電出力と発電効率を示す。

計算値は、定格運転に対する特性であり、外気の相対湿度により多少変化するが、水素専焼時には吸気温度は外気より最大15℃低い値となる。吸気の低下でガスタービン吸気の質量流量が増加し、ガスタービン出口温度制御に応じた投入燃料の増加により、発電出力と蒸気発生量も増加する。

また外気が20℃～35℃において吸気冷却を行うと発電効率が1ポイント以上向上するため、ガスタービンCGSの経済性が向上する。

仮に本システムを水素100%専焼で年間8,000時間運転した場合、年間の水素使用量は、1,600トンとなり、現在の液水販売量の約22%に相当する。また都市ガスを燃料とした場合、換算係数2.44を用いると都市ガスの年間使用量は、3,904トンとなり、13A都市ガスのCO₂排出量2.79を用いると年間10,892トンのCO₂排出削減となる。

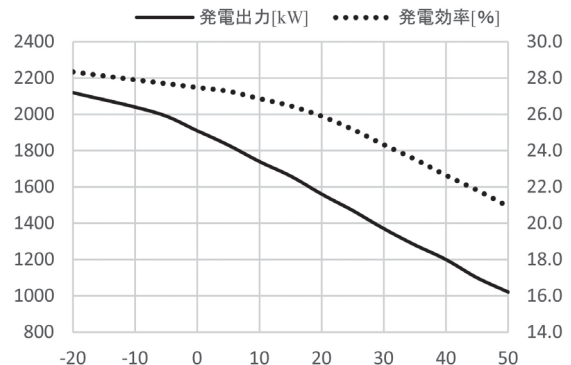


図8 吸気温度に対する発電出力と発電効率

新聞報道によれば、川崎重工業(株)は、水素混焼技術を搭載した「カワサキグリーンガスエンジン」の開発を進めており、市場投入時期は、2025年を予定されている³⁴⁾。

水素を体積比30%の割合で天然ガスと混焼した場合、天然ガス専焼と比べて年間1,000トンのCO₂を削減(発電出力6,000kW、年間4,000時間運転の場合)できるという。

そこでシミュレータを用いて、水素使用量等を評価した。

水素の使用量が420Nm³/h 約38kg/hとPUC17の100%専焼時の約1/5の流量でCO₂削減効果は減るが、PUC17の最高発電効率が27%に対して本ガスエンジンは49%と高く、蒸気を含めたエネルギーシステムのエクセルギー効率の面でもこのガスエンジンが有利になる。水素混焼割合の増加を期待したい。

7. 液体水素冷熱発電

2024年中にドイツにおいて川崎重工業の30MW級ガスタービン(L30A)を用いた水素100%専焼実証が計画されている³⁵⁾。このガスタービンは、このクラスで世界最高の発電効률을誇る。そこで液体水素冷熱を活用した吸気冷却による発電効률, 発電出力の向上と窒素ブレイトンサイクルによる冷熱発電の出力をプロセスシミュレータにより評価した。

ガスタービンは空気を作動媒体とするオープンブレイトンサイクルである。一方窒素クロードブレイトンサイクルは、窒素を作動媒体として加熱された高压窒素をタービンで膨張させ、低温流体で冷却させた後、圧縮循環するサイクルである。低温で圧縮することで動力削減が図れる。

図9に示すL30Aガスタービンを熱源とする水素冷熱発電を検討した。窒素の大気圧における沸点は、-195.8℃であるため、図5に示す10MPaGの液体水素気化特性で窒素を冷却する場合、窒素の一部が液化する。

液化した窒素をポンプで昇圧すれば、ガスを圧縮する場合に比べ昇圧動力を削減できる。さらに液化された窒素の冷熱をプレートフィン熱交で再生利用すれば、窒素の循環量を増やすことができ、発電量を高めることができる。

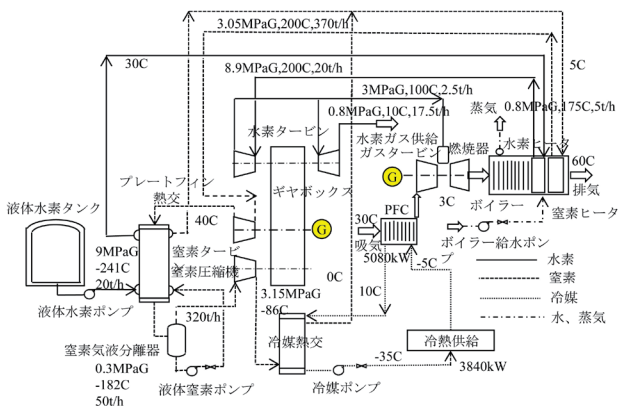


図9 L30Aガスタービンを熱源とする水素冷熱発電

メーカーカタログに吸気温度によるL30Aガスタービンの発電出力, 発電効률, 蒸気発生量, タービン出口温度, 排ガス量や圧縮比などのデータがある³³⁾。図10に吸気温度に対する発電出力と発電効률並びに蒸気発生量を示す。

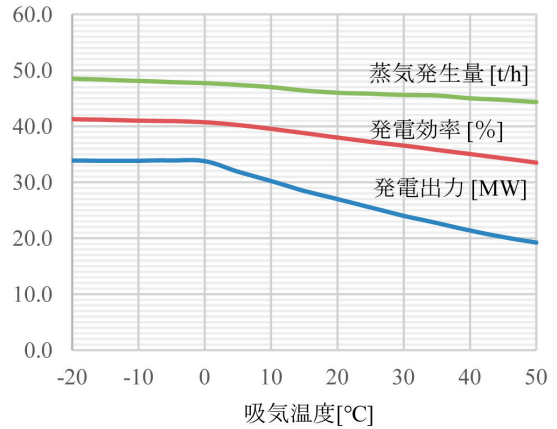


図10 吸気温度に対する発電出力と発電効률並びに蒸気発生量

NEDO助成事業において、液化水素の冷熱をガスタービンの吸気冷却に活用するシステム研究が大林組、大阪大学、関西大学にて2019年から2021年に実施された³⁶⁾。試験用プレートフィンクーラと冷凍機を用い、低温ブライン温度によるフィン表面着霜の可視化や外気露点に応じて安定冷却できる吸気温度を実験した。

その結果、ブライン温度が-5℃以下では、外気露点によるフィン表面に着霜することから、液体水素流量が十分あっても、露点が0℃以上の場合、着霜・着氷を回避して安定冷却できる吸気温度は3℃であることがわかった。

図10の発電出力の特性から、外気が3℃に冷却されると、夏日(25℃以上)、真夏日(30℃以上)、猛暑日(35℃以上)に応じて発電出力のアップは、それぞれ7,300kW以上、8,800kW以上、10,300kW以上が見込め、発電効률이36%から40%に向上する。

発電効률이1ポイント向上して、1年間運転すると、このクラスのガスタービンでは燃料費が約1億円削減できると言われている³⁰⁾。

表5にL30Aガスタービンを熱源とする水素冷熱発電の特性評価結果を示す。液体水素気化量は20t/hであるが、蒸気を発生させない場合は、25t/hまで最大気化できる。

窒素クロードブレイトンサイクルの正味軸出力は、圧縮機動力を差し引いて9,553kWとなった。9MPaGの冷熱エクセルギーをトン1,500kWhとすれば、冷熱の正味軸出力への変換効率は、31.8%である。

ガスタービンへの燃料は、高压水素膨張タービン出口の一部2.5t/hを供給し、残り17.5t/hは、低压水素ガスタービンを介して中圧A(压力0.8MPaG)に供給するとした。

これらの回転機は、減速機を介して同期発電機を駆動するが、回転機類の断熱熱効率は80%、減速機を合わせた発

電機の効率を95%として評価した。

冷熱発電の発電出力は、22,848kW、ポンプ動力による自家使用電力は1,519kWとなり、液体水素1トン当たりの正味回収電力は1,066kWhとなった。

一方、L30A ガスタービンCGSは、外気30℃では本来24,000kWの発電出力となるが、ブラインクーラにて得られた冷熱の約55%を用いて、吸気を3℃に冷却して発電出力33,512kWと9,512kW(39.6%)も増加させることができる。

残りの冷熱は、-35℃のブラインとしてコンビナート内の冷熱需要のあるプラントあるいは冷凍倉庫に供給することができる。庫内温度-20℃の2段フロン冷凍機のCOPを1.8とすると³⁸⁾、2,283kWの電力削減が見込める。

蒸気の発生量は、9t/hと図10に示す48t/hより減るが、代わりに水素と窒素を200℃に加熱することで、ボイラー出口排ガス温度を60℃まで冷却し、ガスタービンCGSの総合熱効率を90.1%に高めることができる。なお排ガスの露点は、53.1℃である。

表5 水素冷熱発電の特性評価

クローズド窒素ブレイトンサイクル		
圧縮機動力 (吸込圧力0.3MPaG・圧縮比8.1)	7641	kW
タービン出力 (入口窒素ガス温度200℃)	17194	kW
水素膨張タービン		
高圧 (入口ガス温度200℃、膨張比2.9)	8180	kW
低圧 (膨張比3.44 送出圧力0.8MPaG)	6317	kW
発電出力 (発電機・減速機効率95%)	22848	kW
液体水素窒素ポンプ動力	1519	kW
ガスタービンCGS		
燃料Input (LHV 燃料2.5t/h)	83112	kW
発電出力 (発電機等効率98%)	33512	kW
発電効率	40.3	%
蒸気出力 (0.8MPaG 9t/h飽和)	6336	kW
ボイラー熱出力	41403	kW
総合熱効率	90.1	%

図11に液体水素冷熱発電とL30A ガスタービンのエクセルギー解析を示す。評価条件は大気圧30℃とした。

ガスタービン燃料の化学エクセルギーは81.4MWであり、この値を100とした。液体水素流量20t/hのL30A ガスタービン排熱を利用する冷熱発電では、燃料の化学エクセルギーに対して約85%の冷熱エクセルギーを有する。

ガスタービンから窒素と水素の加熱で合計7.8の熱エクセルギーを得て、液体水素の冷熱エクセルギーを活用することで30.3の動力回収をしている。

水素の圧力エクセルギーは、ガスタービンへの燃料供給圧力にも利用され、中圧Aに利用された値は16.4である。

中圧A導管で供給された純水素は、定置型燃料電池^{39, 40)}

に供給される。現在未不臭供給に対する安全対策としての水素センサーの開発がなされている⁴¹⁾。

ガスタービンの吸気冷却に利用されたブライン冷熱のエクセルギーはわずか0.6であるが、外気30℃を3℃に冷却する効果で9.5MWの発電出力増加をもたらしている。

ガスタービンの有効エクセルギーは、発電に42.7、蒸気発生に2.3、冷熱発電への熱供給に7.8の合計52.8である。

中圧Aの圧力エクセルギーを含めたシステム全体のエクセルギー効率は、50.5%となる。

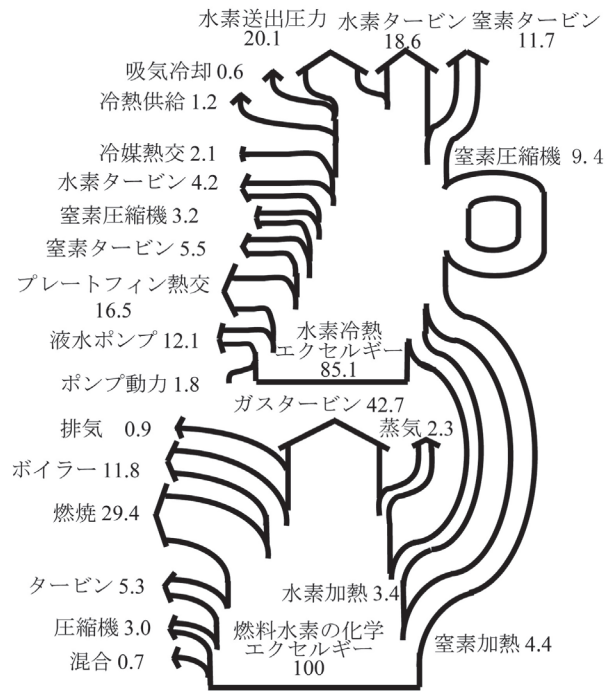


図11 エクセルギー解析

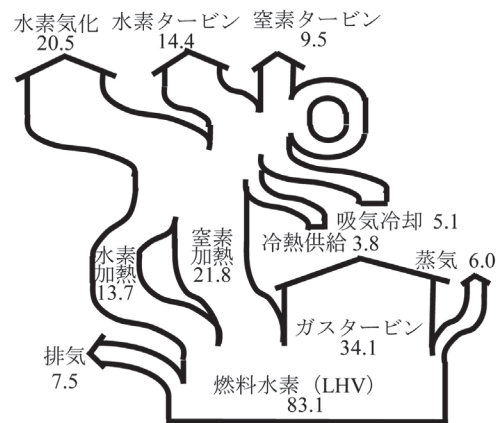


図12 熱バランス解析

プレートフィン熱交のエクセルギー損失は、液体水素冷熱エクセルギーの19.4%であり、LNG冷熱発電のLNG/プロパン熱交換器の損失24.3%に比べその割合は小さい²⁹⁾。

ガスタービンCGSの最大のエクセルギー損失は、燃焼に伴う損失とボイラーの伝熱に伴う損失である。燃焼に伴う損失は、燃焼器出口の燃焼ガス的高温化で物理エクセルギーが増加するが、増加分は燃料の化学エクセルギー分より少な

いため、その差が燃焼に伴うエクセルギー損失となる。

純酸素燃焼や空気予熱あるいは理論空燃比での燃焼を行うと損失は減らせる。ちなみに水素燃焼L30Aのタービン入口温度は1170℃と予想され、燃焼損失は29.4%であるが、1600℃級大型ガスタービンの燃焼損失は26.8%に下がる。

グラーツサイクルは、酸素水素当量燃焼のガスタービンシステムであり、1200℃級での燃焼損失は21.4%とされており、NO_xを排出しないことから早期の実現が期待されている⁴²⁾。

ボイラーの伝熱に伴うエクセルギー損失を減らすには、蒸気圧力を0.8MPaGより高め、また窒素の加熱を200℃から300℃に高めることで損失の低減が計れ、窒素タービンの出力が増加する。

冬季は、吸気冷却による熱供給をほとんど受けられないので、ボイラー排気の潜熱回収が必要となる。

図12に熱バランス解析を示す。表示の数値の単位はMWである。熱バランス解析では、以下の課題がある。

- ・電力と等価の蒸気の質が表せない。
- ・液体水素冷熱および送出ガスのエネルギーを表せない。
- ・エントロピー増加による損失を表せない。
- ・エネルギー効率改善のためのヒントを見いだせない。

8. まとめ

液体水素は、大気圧飽和液の状態では3,400kWh/tonの冷熱エクセルギーを有し、水素の化学エクセルギーの10.4%に相当する。しかし液化するには1.1kWh/Nm³を要するため、水素の低位発熱量2.99kWh/Nm³の約37%にも相当する。

今回、ガスタービンCGSの熱源を利用した発電並びに冷熱利用事業への活用例を示したが、液体水素の本格導入時には、是非これらのシステムの導入を検討してほしい。

我が国でもエクセルギー解析が新規プロセス導入において実施されてきているが、さらなる省エネルギー、創エネルギーにはエクセルギーデザイン学を適用してほしい。

世界に先駆けて液体水素の海外からの導入を計画しているが、今回検討のシステムを実現させ、液体水素導入の経済性向上を期待する。

参考文献

- 1) <https://www.yomiuri.co.jp/science/20220404-OYT1T50208/>
- 2) <https://hydrogencouncil.com/en/>
- 3) https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/025_01_00.pdf
- 4) <https://j-valve.or.jp/env-info/9040/>
- 5) <https://www.kankyo-business.jp/news/027469.php>
- 6) https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/024_05_00.pdf
- 7) <https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/21862392.html>

- 8) <https://toyota.jp/mirai/>
- 9) <https://travel.watch.impress.co.jp/docs/news/1389495.html>
- 10) https://www.eneos.co.jp/newsrelease/20210226_01_01_1090046.pdf
- 11) <https://www.aero.jaxa.jp/spsite/eclair-sp/index.html>
- 12) <https://products.awi.co.jp/ja/industrial/business/gas-generators>
- 13) <https://www.sumitomoseika.co.jp/product/gas/engineering/>
- 14) <https://www.liquidgas.co.jp/product/hydrogen.html>
- 15) <https://www.kakoki.co.jp/products/p-001/index.html>
- 16) <http://www.e-plan-net.com/service01.php>
- 17) <https://www.global.toshiba.jp/products-solutions/hydrogen/products-technical-services/supply-chain.html>
- 18) <https://www.enapter.com/ja>
- 19) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101293.html
- 20) <https://www.iwatani.co.jp/jpn/images/bookdata/h2/book.pdf>
- 21) https://www.gasreview.co.jp/shop/index.php?main_page=product_info&cPath=13&products_id=241
- 22) <https://www.khi.co.jp/corp/ke/product/hydrogen.html>
- 23) <https://newswitch.jp/p/26418>
- 24) <https://www.khi.co.jp/rd/magazine/pdf/182/n18205.pdf>
- 25) https://www.tn-sanso.co.jp/jp/rd/giho/pdf/29/tnscgiho29_12.pdf
- 26) 久角喜徳他；次世代LNG気化発電システムの研究，エネルギー・資源，35-3（2014），pp.46.
- 27) <https://www.khi.co.jp/rd/magazine/pdf/182/n18203.pdf>
- 28) <https://www.hess.jp/Search/data/27-01-048.pdf>
- 29) 久角喜徳他；エクセルギーデザイン学の理解と応用，大阪大学出版会（2012.12）。
- 30) <https://www.a-teckk.co.jp/product/tank.php>
- 31) <https://www.nedo.go.jp/content/100935314.pdf>
- 32) https://www.kobelco.co.jp/products/ecmachinery/lng/selection/cold_water.html
- 33) https://kga.com.my/wp-content/uploads/2020/10/Green_Brochure-for-whole-range-of-Gas-Turbine-model.pdf
- 34) https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20220316_1.html
- 35) https://www.khi.co.jp/pressrelease/news_211209-2j.pdf
- 36) https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101337.html
- 37) <https://www.youtube.com/watch?v=zil0GsiFENG&t=7s>
- 38) <https://j-net21.smrj.go.jp/development/energyeff/Q1206.html>
- 39) <https://panasonic.biz/appliance/FC/hydrogen/index.html>
- 40) <https://www.global.toshiba.jp/products-solutions/hydrogen/products-technical-services/fuel-cell.html>
- 41) <https://www.city.kitakyushu.lg.jp/files/000809058.pdf>
- 42) <https://www.gtsj.or.jp/technical/contents/vol45no3-02.pdf> (全てのアクセス日2022.7.1)

<著者紹介>



久角 喜徳（ひさずみ よしのり）

元大阪ガス(株)シニアエンジニア。前大阪大学大学院工学研究科 特任教授。大阪大学博士(工学)。日本伝熱学会名誉会員。日本機械学会永年会員(フェロー2005年) 専門:熱工学。プロジェクトマネジメント。LNG冷熱活用。エクセルギーデザイン学。

ご業績: 隣組コジェネレーションシステムなど、技術の社会実装を目指す多数のプロジェクトを主導。