

# 液化水素発電システムの開発

磯部佳成\*・村川収\*・山田誠治\*\*

## Development of Liquefied Hydrogen Power Generation System Yoshinari Isobe\*, Osamu Murakawa\* and Seiji Yamada\*\*

液化水素エネルギー分科会において、液化水素を気化し、水素ロータリーエンジンで発電する液化水素発電システムについて仕様検討を重ねた後に、プロポーザル公募方式を経て、各機器、システム構成など県内企業からの特徴的な提案を採用したシステムを試作開発した。

### 1. 緒言

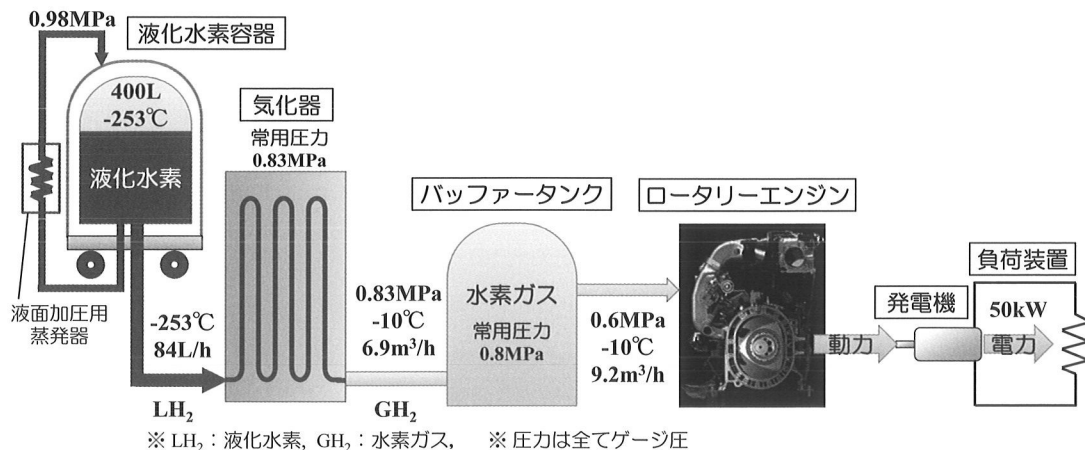
エネルギーの大半を輸入に依存している我が国におけるエネルギーセキュリティと先進国としての使命である地球温暖化対策の観点から新エネルギー利活用は大変重要な課題である。また、東日本大震災以降、特に地域のエネルギーセキュリティにおいて、その地域に存在する様々なエネルギー資源（以下、地産エネルギーという）の有効活用が益々重要となってきた。本県は全国有数の水素生産県であり、2013年6月には周南地区コンビナートに液化水素を製造するプラントが稼働した。現在、液化水素は高純度、高エネルギー密度の特徴を活かして宇宙開発や工業用原料として需要が伸びているが、民生用利用に向けて2015年の燃料電池自動車の市場投入と、それに併せた水素ステーションの先行整備が進められ、2015年8月には本県周南市にも中国・四国地方初の液化水素ステーションが開所された。このように水素社会実現に向けて次代のエネルギーとしての期待も高まっている。山口県では、本県の特性を活かして、環境・エネルギー関連産業クラスターの形成や水素利活用による産業振興と地域づくりに向けた取組を推進している<sup>1)</sup>。山口県産業技術センター（以下産技センター）では、エネルギー関連技術を最重要技術の一つに位置づける<sup>2)</sup>とともに、この分野において県内ものづくり企業と一体となって取り組む「新エネルギー研究会」を設置し、その活動により、県内企業の新たな技術の獲得を支援している。

この研究会の中に、液化水素に着目した「液化水素エネルギー分科会」（以下分科会）が平成25年4月に設置された<sup>3)</sup>。この分科会では、コンビナート企業群を支えるプラント関連メーカーをはじめとした多くのものづくり企業のポテンシャルを活用した液化水素関連製品等の開発を推進するために、液化水素の高エネルギー密度、極低温（-253℃）および高純度（99.9999%）の特徴を積極的に利用する製品の試作開発や実証実験に取り組むこととしている。その具体的事例として、液化水素のエネルギー利用を想定し、液化水素を気化し、ロータリーエンジンで発電するシステムの開発に取り組むこととした。この取組に際しては、液化水素を取り扱うために、低温・水素脆性、材料選定、関連法令などに関するセミナーによる知識習得を行い、試作開発に向けてシステムの仕様検討を重ねた。実際の試作開発は、分科会会員によるプロポーザル公募方式を採用し、その結果、計3企業を委託先として試作開発することとなった。

### 2. システム機器構成および諸条件

#### 2・1 システム機器構成

試作開発する液化水素発電システムの機器構成の概略を図1に示す。液化水素発電システムは、燃料である液化水素を貯蔵するための液化水素容器、液化水素を気化するための気化器、気化された水素ガスをエンジンに安定供給するためのバッファータンク、この水素ガスを燃料として、



\* 企業支援部加工技術グループ

\*2 企業支援部設計制御グループ

動力を取り出すためのエンジン、その動力を電気エネルギーに変換する発電機および発電された電力を消費するための負荷装置から構成される。

本システム構築においては、次の点を考慮することとした。

- ① 液化水素の極低温の特徴を活かすため、冷熱回収が可能なシステムとし、さらにエネルギーを有効利用するため、エンジンからの廃熱も回収可能なシステムとする。
- ② 水素を燃料とするエンジンとして技術確立され、かつ運転実績のあるロータリーエンジン（以下、RE）を採用する。
- ③ 安全性向上および機器構成の単純化によるコスト低減、保守・運転管理の容易化を目指して可能な限り高压ガス保安法の適用範囲を制限する。

2.2 システム最大能力および諸条件

動力発生装置に水素 RE を用いた液化水素発電システムを試作開発するために、水素 RE への水素ガス供給条件およびその出力特性に基づき各機器の条件・能力・容量等を決定した。水素 RE への水素ガス供給圧力は 0.6MPa 一定、また、水素 RE の出力特性から定格出力 20kW、最大出力 50kW とし、この最大出力時の水素ガス供給量を最大供給量 66Nm<sup>3</sup>/h とした。また、上述したように可能な限り高压ガス保安法の適用範囲を限定するため、その範囲を液化水素容器から気化器までとした。なお、安全性確保の観点から高压ガス保安法適用範囲以外の機器・計測器・配管等についても高压ガス保安法関連法規の技術基準に準拠することとした。これらを考慮して算出した諸条件が図 1 中に示されている。図中の温度は目標とする最低温度、圧力は全てゲージ圧であり、流量は各位置での温度および圧力条件時のものである。なお、本試作開発の液化水素発電システムでは、液化水素容器において高压ガスの製造行為があるため、その処理量から当産技センターは第二種製造事業所として届出の必要がある<sup>4)</sup>。

3. 構成機器の詳細

本開発システム全体は、水素供給システム、発電システム、計測・監視システムおよび安全対策システムから構成される。図 2 に本システム全体の概要を示す。

3.1 水素供給システム

水素供給システムは、液化水素容器から水素 RE までの水素を供給するための機器および配管等から構成される。以下にそれらの詳細について述べる。

3.1.1 液化水素容器

液化水素容器は、液化水素を貯蔵するための機器であるが、加えて、圧縮機等の機器を付加することなく水素ガスを供給するため、蒸発器を有し、自圧により液面を加圧して液化水素を圧送する方式（以下、液面加圧方式）を採用することとした。この液面加圧は高压ガスの製造行為に当たる。なお、分科会において、液面加圧方式の液化水素容器を開発するには、更なる技術的検討の必要性があるとの検討結果から、次回以降の取組課題とし、今回は既存品（岩谷産業(株)製）を用いることとした。採用した既存の液化水素容器を図 3 に、また、その概略仕様を表 1 に示す。貯蔵量の仕様欄の（ ）内の 360L は、液化水素の充てん可能最大容量（容器内容積の 90%）である。容器内の液化水素量が最大容量 360L の時、定格出力 20kW で約 10.7 時間連続運転可能と試算される。

表 1 液化水素容器概略仕様

項目	仕様
貯蔵量	400L (360L)
常用圧力	0.98MPa
最低温度	-253℃
液供給方式	液面加圧方式

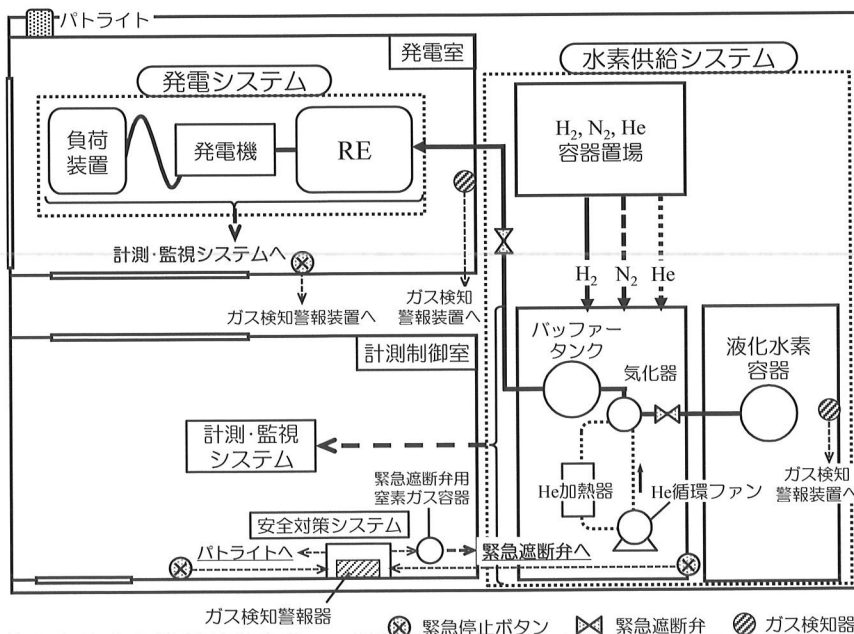


図 2 システム全体の概要図

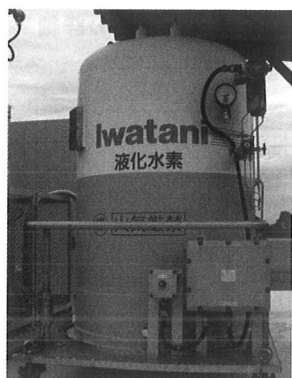


図3 液化水素容器

### 3・1・2 気化器

気化器は、液化水素容器から供給された液化水素を水素ガスに気化するとともに、液化水素の極低温の特徴を活かすため、その冷熱回収が可能な多管円筒式熱交換器（シェルアンドチューブ式熱交換器）を試作開発した。図4に試作開発した気化器の概略図を示す。シェル側をヘリウムガスが、チューブ側を水素が流れる。また、ヘリウムガスにより回収された冷熱は、一般的な空温式加熱器により大気と熱交換される。本気化器の特徴は、①液化水素の加熱媒体としてヘリウムガスを使用していること、②ヘリウム強制循環方式を採用していること、③向流式の多管円筒式熱交換器を採用し、堅型構造としていることである。①の特徴においては、沸点が水素（-253℃）より低いヘリウム（-268.9℃）を加熱媒体に使用することにより、それが液化あるいは氷結することによる不具合発生を防ぐことができる。②の特徴においては、バイパスラインの流量制御弁によりヘリウムガスの循環量を調整することにより、気化器出側の水素ガス温度の制御が可能となっている。また、ヘリウムガスで回収した冷熱を再利用するシステムへの移行が容易である。③の特徴については、比較的容易でかつ安価に製作できる多管円筒式熱交換器において、向流式とすることにより高効率化できる。また、堅型構造とすることにより、極低温下で生じる熱応力を抑制できる。この気化器の液化水素の設計気化能力は、7.2kg/hであり、2・2節で示した水素の最大供給量に対して約1.2倍となっている。表2に液化水素気化器の伝熱計算ソフトウェア（HTRI社製）による計算条件および計算結果を示す。また、材質はシェル側およびチューブ側共に低温脆性および水素脆性を考慮したSUS316Lである。更に、バッファータンク以降を高圧ガス保安法の適用範囲外とするため、気化器出側の圧力の最大値を0.83MPaに設定した。この設定値は、気化器出口で-10℃の水素ガスが35℃で1MPa未満となるための圧力とし、以下の通り算出される。なお、気化器には内圧が常用圧力を超えないように安全弁1が設置されている。

$$P_{Vout(-10)} = P_{Vout(35)} \times \frac{T_{Vout(-10)}}{T_{Vout(35)}} = 1101325 \times \frac{263.15}{308.15} = 9.40 \times 10^5 \text{ [Pa]}$$

$$= 0.940 \text{ [MPa]} \text{ (絶対圧)} = 0.839 > 0.83 \text{ [MPa]} \text{ (ゲージ圧)}$$

ここで、 $P_{Vout}$  は気化器出口圧力、 $T_{Vout}$  は気化器出口温度で添字( )内の数字は温度[℃]を表す。

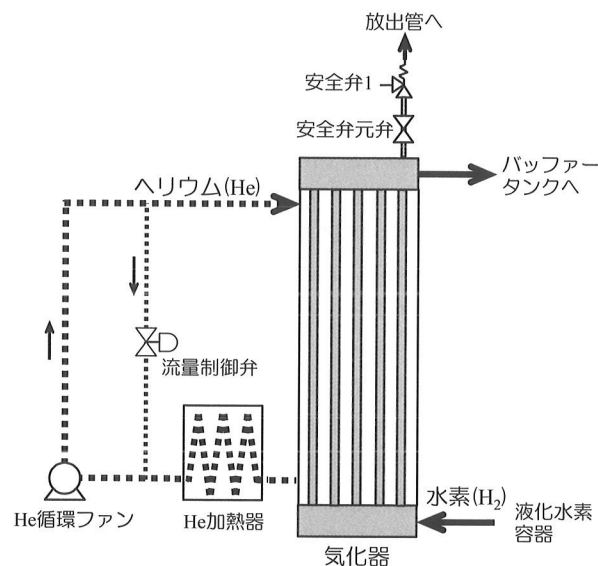


図4 気化器概略図

表2 液化水素気化器の計算条件・計算結果

項目	シェル側	チューブ側
流体名	ヘリウム	液化水素
流量	26.4kg/h	7.2kg/h
入口温度	0℃	-253℃
出口温度	-150℃	-10℃
入口圧力	101.3kPa(abs)	901.3kPa(abs)
熱交換量	27270.7kJ/h	27270.7kJ/h

### 3・1・3 バッファータンク

バッファータンクは、水素 RE へ圧力および温度変動を抑制して水素ガスを安定供給するために設置される。図5に試作開発したバッファータンクの概略図を示す。バッファータンク以降は、高圧ガス設備とならないように、常用圧力を0.8MPa、使用温度範囲を-10℃～40℃とした。仕様材質は、低温脆性および水素脆性を考慮してSUS316Lを選定した。また、バッファータンクの容量は、0.44[m<sup>3</sup>]である。この容量は、水素 RE 運転時に、バッファータンクより上流側の気化器からのガス供給が一定時間停止した場合においても、安定して RE に水素ガスが供給できることを考慮して、以下に示すように算出した。バッファータンクには、圧力計1およびタンク内圧が常用圧力を超えないように安全弁2が設置されている。また、水素濃度を確認するために水素濃度計 CI（新コスモス電機（株）製 KD-12C）が取り付けられており、0～100vol%の水素濃度の測定が可能である。

#### 【バッファータンク容量の算出】

バッファータンク初期圧力  $P_b$  [MPa]、バッファータンク温度  $T_b$  [K]、RE への供給流量  $q_r$ 、RE への供給圧力  $P_r$  [MPa]、RE への供給温度  $T_r$  [K]、バッファータンクから RE への供給時間  $t$ 、この供給時間の合計ガス量を  $V_r$  [m<sup>3</sup>]として、バッファータンク容量  $V_b$  [m<sup>3</sup>]を算出する。

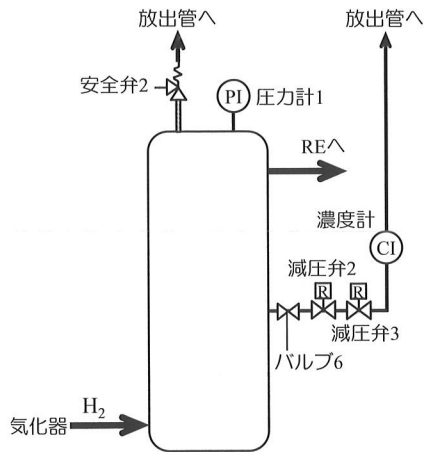


図5 バッファータンク概略図

バッファータンクから流出する水素ガス質量とREに供給される水素ガス質量は等しいので、気体の状態方程式より、

$$\frac{P_B V_B}{RT_B} - \frac{P_R V_B}{RT_B} = \frac{P_R V_R}{RT_R} \quad (1)$$

ここで、 $R$ はガス定数である。バッファータンク温度 $T_B$ とRE供給温度 $T_R$ が等しい( $T_B = T_R$ )と仮定すると、

$$V_B = \frac{P_R}{P_B - P_R} V_R = \frac{P_R}{P_B - P_R} q_R \cdot t \quad (2)$$

ここで、 $V_R = q_R \cdot t$ である。

$P_B = 0.901352[\text{MPa}]$  (0.8[MPa] (ゲージ圧)),  
 $P_R = 0.701352[\text{MPa}]$  (0.6[MPa] (ゲージ圧)),  
 $T_B = T_R = 263.15[\text{K}]$  (-10°C),  $q_R = 2.55 \times 10^{-3}[\text{m}^3/\text{s}]$  (at 0.6[MPa] (ゲージ圧)),  $T_R = 263.15[\text{K}]$  (-10°C) (=66Nm<sup>3</sup>/h),  $t = 30[\text{s}]$

とすると、 $V_B = 0.27[\text{m}^3]$ となる。1.5倍の余裕を見込むと、 $V_B = 0.27 \times 1.5 = 0.4[\text{m}^3]$ となる。実際に試作したバッファータンク容量は0.44[m<sup>3</sup>]である。

### 3・1・4 配管系

図6に水素供給システムのフロー図を示す。液化水素容器からREまでの間の配管は、図示するように機器等との接続、機能、常用圧力・温度等を考慮して配管a～eまでの五つに区分した。

#### a. 配管 a

配管aは液化水素容器から気化器入口までである。この配管は、両端に岩谷産業(株)製のバイオネットジョイントを有するトランスファーチューブと固定配管から構成されており、液化水素容器とはバイオネットジョイントで接続される。固定配管には、窒素パージ用の配管に接続する枝管があり、水素漏洩検知器と連動する緊急遮断弁1と温度計TI1が設置されている。

#### b. 配管 b

配管bは気化器出口からバッファータンク入口までである。バッファータンク入口との接続部にバルブ2を設置し、このバルブ2とこれより上流側が高圧ガス保安法の適用範囲である。配管の途中には、温度計TI2と圧力計PI2が設置されている。

#### c. 配管 c

配管cはバッファータンク出口から減圧弁1までである。この減圧弁1により、RE供給圧力に調整される。この配管には、高圧水素ガス容器からREに水素を供給するための枝管とガスの放出管に接続する枝管があり、水素漏洩検知器と連動する緊急遮断弁2が設置されている。

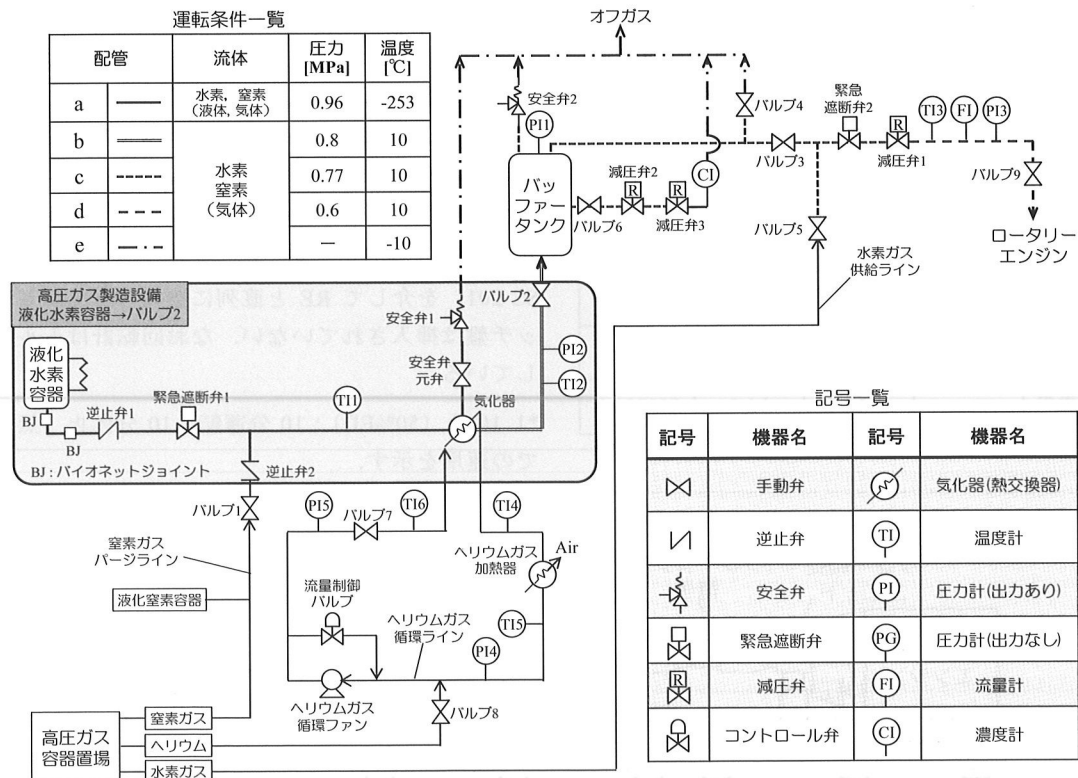


図6 水素供給システムフロー図

#### d. 配管 d

配管 d は減圧弁出口から RE 入口までである。この配管には温度計 TI3, 流量計 FI, 圧力計 PI3 が設置されている。

#### e. 配管 e

配管 e は気化器およびバッファータンクに設置されている安全弁, 配管 c のガス放出管およびバッファータンクに設置してある水素濃度計に接続されており, 水素供給システム内のガスを大気中に放出する放出管となっている。

#### f. 配管系全体

配管系全体について, 配管の肉厚は一般高圧ガス本規則関係例示基準<sup>9)</sup>「8.高圧ガス設備及び導管の強度」に準拠して算出している。配管 e (SUS304) 以外の配管の材質は, 気化器, バッファータンクと同様に SUS316L である。また, バルブ等は全て高圧ガス保安協会 (KHK) 認定品を採用している。各配管の内径については, プラントにおける流体の一般的な流速<sup>9)</sup>に基づき, その最大流速を超えないように最小径を算出し, これを目安に各配管径を設計することとした。各配管の仕様の一覧を表 3 に示す。

#### 【配管径の算出】

配管径  $d$  は次式により求めることができる。

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} \quad (3)$$

ここで,  $Q$  は体積流量[m<sup>3</sup>/s],  $v$  は流速[m/s]である。

一般ガスラインを想定し, 最大流量時の常用圧力が最も低い配管 d の条件を元に, 配管径を算出する。常用圧力 0.6[MPa] (ゲージ圧), 常用温度 -10[°C] のとき, 最大流量は  $2.55 \times 10^{-3}$  [m<sup>3</sup>/s] (=66Nm<sup>3</sup>/h) である。また, 配管内の流速は文献<sup>9)</sup>より  $v=15$  [m/s] とする。これらの条件から式(3)より,

$$d = 14.7 [\text{mm}]$$

となる。

表 3 各配管の仕様の一覧

配管区分	流体	常用圧力 [MPa]	常用温度 [°C]	配管内径 [mm]	材質
a	水素, 窒素 (液体, 気体)	0.96	-253	14.3, 16.1	SUS316L
b	水素, 窒素 (気体)	0.8	-10	14.3	SUS316L
c	水素, 窒素 (気体)	0.77	-10	14.3	SUS316L
d	水素, 窒素 (気体)	0.6	-10	14.3	SUS316L
e	水素, 窒素 (気体)	-	-10	14.3	SUS304

### 3・1・5 窒素ガス, 水素ガスおよびヘリウムガス供給設備

水素供給システムには, 各機器および配管内を窒素ガスでパージ・充てんするための窒素ガス供給設備, 補助的に燃料の水素ガスを供給する水素ガス供給設備および気化器におけるヘリウムガス循環系のヘリウムガス濃度低下時にヘリウムガスを補充するためのヘリウムガス供給設備が付帯している。これらのガス供給は, ガス種毎に高圧ガス容器から供給される。

### 3・2 発電システム

発電システムは, 水素 RE, 発電機および負荷装置から構成される。発電性能を評価するためにトルク計, 回転計, 電圧計および電流計が取り付けられている。図 7 に発電システムの概略図を示す。

#### 3・2・1 水素ロータリーエンジン

本開発で用いた水素 RE は, マツダ(株)独自の RE をベースに, 燃料に水素を使えるように開発されたエンジン<sup>7, 8)</sup>であり, マツダ(株)様の協力により当産技センターに無償で貸与されている。本システムの開発に際しては, このエンジンを定格出力 20kW (最大出力 50kW) で運転することを想定した。エンジンの制御は既に搭載されている ECU (Engine Control Unit) により行われる。エンジンの冷却水およびオイルの冷却装置には, 付属の自動車用ラジエータとオイルクーラを用いた。実際の自動車は自走により, 冷却装置に空気が流入してくるが, 本発電システムは定置式であるため, 送風機を用い, さらに冷却能力を向上させるために水噴霧も併せて行うことによりそれらを冷却することとした。

#### 3・2・2 発電機

発電機は, 多極かつ永久磁石方式を採用することにより, 大幅な小型化を実現し, かつ発電効率を向上させた永久磁石式三相同期発電機 (シンフォニアテクノロジー(株)製) を採用した。出力は定格 20kW (2000rpm 時) (連続), 最大 50kW (5000rpm 時) (10 分 (50%ED) \*) である。また, 発電機はフレキシブル継手 (三木プーリー(株)製 センタフレックスカップリング) およびトルク計 ((株)小野測器製 SS-201) を介して RE と直列に接続されており, 間にクラッチ盤は挿入されていない。なお回転計はトルク計に付属している。

\*1 10 分 (50%ED) : 10 分運転, 10 分休止 (無負荷運転) での運用を示す。

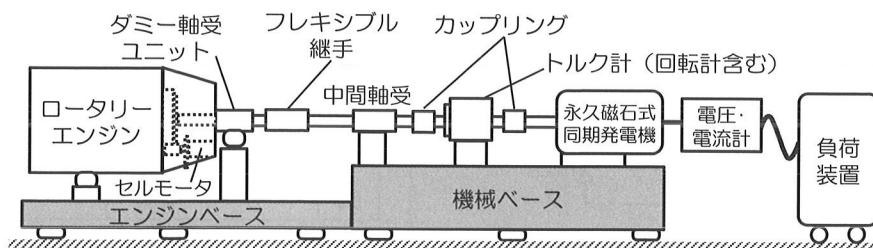


図 7 発電システム概略図

### 3・2・3 負荷装置

負荷装置は、可搬型の乾式負荷装置（(株)辰巳菱機製 MODEL : L-5）で、発電した電力を消費するための装置である。1kW～12kW 用の複数のトグルスイッチの組み合わせにより、1kW～51kW の範囲で容量が可変である。

### 3・3 計測・監視システム

計測・監視システムは、システムの状態監視と性能評価を行うために、本試作開発システムに取り付けられている上記に示した各種計測機器の計測信号を取り込むシステムで、データロガー（オムロン(株)製 ZR-RX45V）とパーソナルコンピュータで構成される。水素供給システムからは、温度計、圧力計、流量計および水素濃度計（図 6 中の計測器記号において、アルファベットの後に”I”（\*I）がついているもの）からの信号が取得される。また、発電システムからは、冷却水温度（ラジエータ入側）、潤滑油温度（オイルクーラー出側）、トルク、回転速度、発電機電圧（実効値）、発電機電流（実効値）および発電機温度のデータが取得される。

### 3・4 安全対策システム

図 2 を参考に安全対策システムの概要を説明する。水素漏えい検知警報設備が、一般高圧ガス保安規則関係例示基準<sup>5)</sup>「23.ガス漏えい検知警報設備とその設置場所」に準拠して設置されている。水素漏えい検知器（ガス検知器）（新コスモス電機(株)製 拡散式ガス検知器 KD-5B-N-C2）は、液化水素容器置場の屋根裏および RE を設置する発電室の屋根裏に設置され、水素漏えい検知器と連動した検知警報器（新コスモス(株)製 ガス検知警報器 NV-600HS2-2（保安電源装置内蔵））が計測制御室に設置されており、また、水素の漏えいを検知した場合、検知警報器と連動して、RE への水素ガスの供給を停止するために配管 a と配管 c に設置してある緊急遮断弁を作動させるとともに発電室外側に設置したパトライトが点灯する。なお、これらの緊急遮断弁は、水素供給システム機側、発電室および計測制御室に設置してある緊急停止ボタンによっても作動させることができる。緊急遮断弁への作動用のガスは、窒素パーラインとは別に独立して計測制御室に設置してある窒素ガス容器から供給され、その制御は電磁弁によりなされる。なお、その電磁弁は、安全性確保のため、通電時に「開」、停電時に「閉」となる。また、水素供給システム内は第二種危険場所として設置する電気設備はそれに応じて適切なものを設置しており、一般高圧ガス保安規則関係例示基準<sup>5)</sup>「30.静電気の除去」に準拠して接地がなされている。バルブ等についても一般高圧ガス保安規則関係例示基準<sup>5)</sup>「33.バルブ等の操作に係る適切な措置」に準拠して対応がなされている。

## 4. 結 言

液化水素エネルギー分科会において、液化水素を気化し、ロータリーエンジンで発電する液化水素発電システムについて、

①液化水素の極低温の特徴を活かすため、冷熱回収が可

能なシステムし、さらにエネルギーを有効利用するため、エンジンから廃熱回収可能なシステムとする。

②水素を燃料とするエンジンとして技術確立され、かつ運転実績のある水素ロータリーエンジンを採用する。

③安全性向上、機器構成の単純化によるコスト低減、保守・運転管理の容易化を目指して、可能な限り高圧ガス保安法の適用範囲を制限する。

を考慮して、仕様検討を重ねた後に、プロポーザル公募方式を経て、各機器、システム構成など県内企業からの特徴的な提案を採用したシステムを試作開発した。

今後は、実際に液化水素を用いて、本システムの性能検証を行うと共に、冷熱利用や温熱利用ができるコージェネレーションシステムの開発に取り組む予定である。

本システムの開発の取組に際しては、プロポーザル公募に参加し、試作開発から産技センターへの設置および動作確認において、多大なる協力を頂いた帝人エンジニアリング(株)様、新光産業(株)様および豊国電設(株)（現、徳機電設(株)）様に深く感謝します。試作開発委託先以外の(株)特殊ガス商会様およびシンフォニアテクノロジー(株)様におかれましても試作開発・設置・調整に多くの協力を頂きました。また、マツダ(株)様におかれましては、水素ロータリーエンジンを無償で貸与して頂くと共に、水素ロータリーエンジンの設置および運転等に関して大変に丁寧な技術指導を頂きました。ここに併せて深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 山口県商工労働部：やまぐち商工業推進計画 第 1 次改訂版，pp. 20-21 (2015)。
- 2) 山口県産業技術センター：技術戦略<第 2 期> [ロードマップ] (2015)。
- 3) 磯部佳成，藤本正克，山田誠治，：山口県産業技術センターの新エネルギー利活用プロジェクト，日本風力エネルギー学会誌，**37**(3)，pp. 413-416 (2013)。
- 4) 高圧ガス保安協会：高圧ガス保安法規集 第 12 次改訂版，p. 5 (2013)。
- 5) 高圧ガス保安協会：高圧ガス保安法令関係例示基準資料集 第 6 次改訂版，p. 14，pp. 67-69，p. 84，pp. 89-90 (2013)。
- 6) 化学工学会編：化学工学便覧 改訂六版，pp. 330-331 (1999)。
- 7) <http://www2.mazda.com/ja/technology/env/hre/>。
- 8) 機械振興協会：第 5 回新機械振興賞受賞者業績概要，pp. 29-32 (2007)。