

水素を用いた燃料電池に関する初歩的な教育システムの構築

田中 武*・岡光 序治**

(令和元年10月31日受付)

Construction of a preliminary educational system for fuel cells using hydrogen

Takeshi TANAKA and Nobuharu OKAMITSU

(Received October 31, 2019)

Abstract

Global warming problems, local energy problems, etc. are expected to become serious problems as the aging society in Japan progresses. In addition, the introduction of renewable energy is important not only for measures against global warming, but also from the viewpoints of securing energy security, building independent and distributed energy systems, creating new industries and jobs. In this research, we constructed a preliminary educational system that can confirm the operation of hydrogen sensor, water electrolysis, LED lighting using fuel cell and so on. In addition, examples of fuel cells, microgrids, and Rankine cycles provided by Mathworks were introduced, and future hydrogen-related facilities were introduced.

Key Words: autonomous energy, regenerative energy, hydrogen, fuel cell, electrolysis of water

1. はじめに

地球温暖化問題や、地域のエネルギー問題等は、日本の高齢化社会の進展とともに大きな問題になっていくことが予想される。

また、再生可能エネルギーの導入は、地球温暖化対策のみならず、エネルギーセキュリティの確保、自立・分散型エネルギーシステムの構築、新規産業・雇用創出等の観点からも重要です¹⁾。

自立型水素エネルギー供給システムの例として、ハウステンボス株式会社(以下、ハウステンボス)の「変なホテル」第2期棟(ウエストアーム)があります。そのシステムは、太陽光発電、蓄電池、水素製造装置、水素吸蔵合金タンク、純水素燃料電池により構成されています。日照時間が長い

夏季に太陽光で発電した電気の余剰電力を利用して、水素製造装置で水を電気分解し、製造した水素をタンクに貯蔵します。冬季には、その貯蔵した水素を利用し、純水素燃料電池で発電することにより、水と太陽光発電のみで年間を通じてホテル1棟12室分の電力を供給することができます。水素を高密度で貯蔵できる水素吸蔵合金を用いたタンクを採用しており、従来のタンクサイズと比較して10分の1まで小型化した貯蔵タンクによりシステムの省スペース化を実現しています²⁾。

また、自動車のガソリン・軽油の供給するための、ガソリンスタンドは減少の一途をたどっている。全国のサービスステーション(SS)数は、ガソリン需要の減少、後継者難等により減少し続けています。これに伴い市町村内のSS数が3カ所以下の地域も増加しており、平成27年3月

* 広島工業大学工学部電子情報工学科

** 広島工業大学大学院工学系研究科知的機能科学専攻

末時点で283カ所となっています³⁾。

過疎地では、都市部に比較して、この問題に早く直面することが予想される。中山間地、島しょ部のエネルギー問題は重要である。寒冷地における灯油等の供給もあげられる。自動車や運送事業者へのエネルギー供給に灯油では、用いることができない。最初に島しょ部へのガソリンスタンドの維持も困難になってきている。これらの地域のうち、近隣にSSがない住民にとっては、自家用車や農業機械への給油や移動手段を持たない高齢者への冬場の灯油配送などに支障を来している。

平時は太陽光発電による電力だけで作ったCO₂フリー水素を燃料電池車に供給し、非常時には貯蔵した水素を使って発電した電力を供給するシステムが報告されています⁴⁾。

本学では、太陽電池、リチウム電池、水の電気分解装置、水素タンク、燃料電池等からなる初歩的な自立式再生エネルギーシステムの構築を試みた⁵⁾。

本研究では、水素センサー、水の電気分解、燃料電池を利用したLED点灯等の初歩的な教育システムの構築を行った。さらに、Mathworks社から提供されている、燃料電池、マイクログリッド、およびランキンサイクルの例題を紹介し、今後の水素関連施設等について紹介する。

2. 水素センサーの作製・設置・運用



Fig. 1 水素センサー MQ-8の写真⁶⁾

Table 1 MQ-8の技術的仕様⁶⁾

Model		MQ-8	
Sensor Type		Semiconductor	
Standard Encapsulation		Bakelite, Metal cap	
Target Gas		Hydrogen	
Detection range		100~1000ppm(H ₂ gas)	
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V _ε	≤24V DC
	Heater Voltage	V _H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R _L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R _H	290±30(room tem.)
	Heater consumption	P _H	≤900mW
	Sensitivity	S	Rs(in air)/Rs(in 1000ppm H ₂)≥5
	Output Voltage	V _s	2.5V~4.0V (In 1000ppm H ₂)
	Concentration Slope	α	≤0.6(R _{1000ppm} /R _{400ppm} H ₂)
Standard test conditions	Tem. Humidity	20°C±2°C; 55%±5%RH	
	Standard test circuit	V _c :5.0V±0.1V; V _H :5.0V±0.1V	
	Preheat time	Over 48 hours	

NOTE: Output voltage (V_s) is V_{RL} in test environment.

Basic Circuit

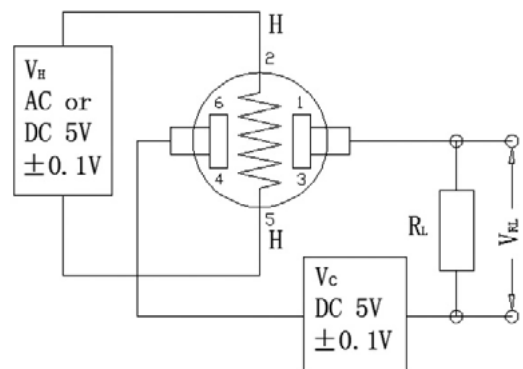


Fig. 2 MQ-8のテスト回路⁶⁾

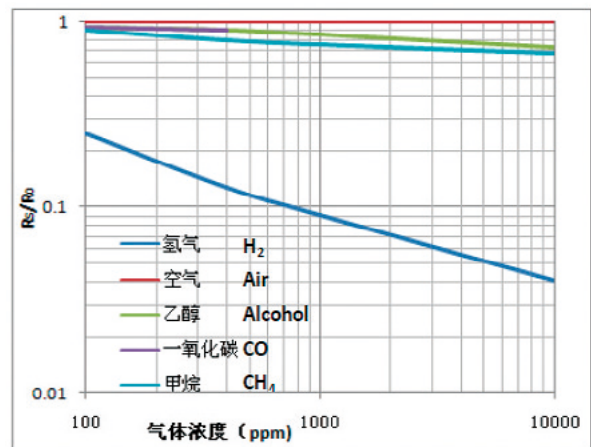


Fig. 3 MQ-8の典型的な感度曲線⁶⁾

水素の感度曲線を、下記の式に近似して用いた。

$$\text{Log}(R_s/R_0) = -0.39795 \cdot \text{log}(\text{気体濃度 ppm}) + 0.44634$$

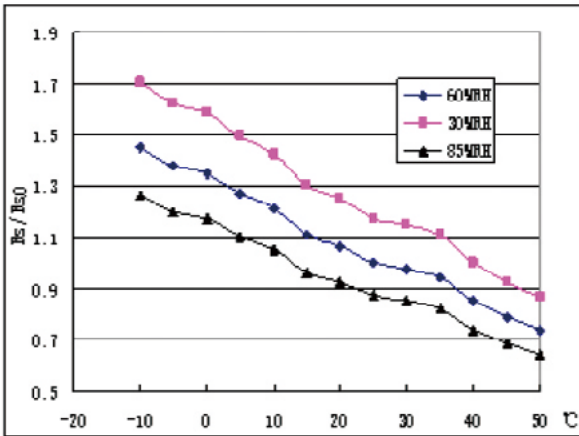


Fig. 4 MQ-8の典型的な温度/湿度曲線⁶⁾

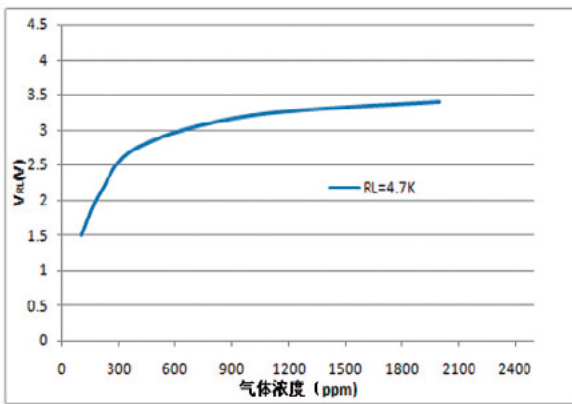


Fig. 5 MQ-8の典型的な感度曲線⁶⁾

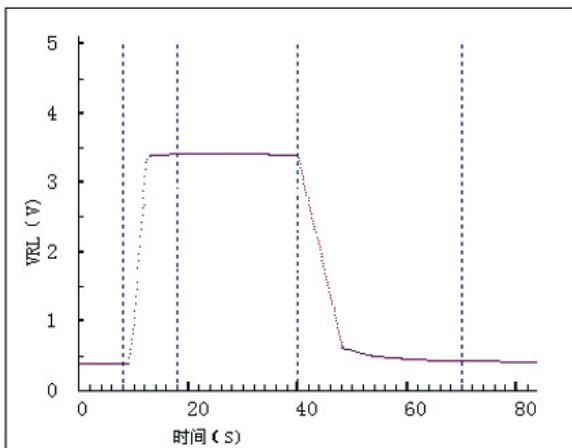


Fig. 6 MQ-8の立ち上がり、および立ち下り時間⁶⁾

水素センサー (MQ-8) の写真や、仕様等を、Fig. 1から Fig. 6に示した。そのセンサーと、本研究の水素ボンベ、レギュレータ、流量計、燃料電池、およびLEDを Fig. 7に示す。

H₂の流量が30cc/minで、LEDが点灯し、徐々にH₂の流量を下げると、15cc/min付近で、LEDが消灯した。今後詳細に実験を行う必要があると考えられる。

次に、水素の初歩的な教育システムを設置する部屋の安

全を確保するために、水素センサーによる、部屋中の水素濃度 (ppm)、温度、湿度、気圧等を15分ごとにモニターしており、ここでは、30cc/minで水素を流した場合の水素濃度を Fig. 8に示す。水素の初歩的な教育システムに流したH₂は、徐々に室内の水素濃度をあげていく。点間隔は15分なので、60分で20ppmになっている。

実験室は、横3.17m、縦7.45m、高さ2.6mで体積が61.4m³である。部屋に流れ込んだ水素量は、30cc/min、60分で1800ccです。均一にH₂が分布すると約30ppmと爆発限界(下限界)濃度の4%(40000ppm)の約1/1300と安全である。実測値は20ppmと、試作した水素センサーは、H₂濃度の目安を与える可能性が示唆された。



Fig. 7 新1号館408号室への水素センサー (MQ-8) および水素の初歩的な教育システムの写真

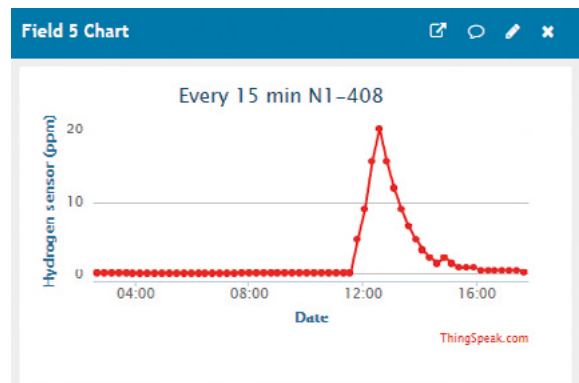


Fig. 8 広島工業大学の実験中の別の部屋の水素濃度 (ppm)

さらに、水素濃度が10ppm以上になると、Twitterで知らせるシステムを構築し、知らせた内容を Fig. 9に示す。

以上のことから、部屋内の水素濃度をモニターしておくことにより、安全に教育研究を実施できることが明らかになった。

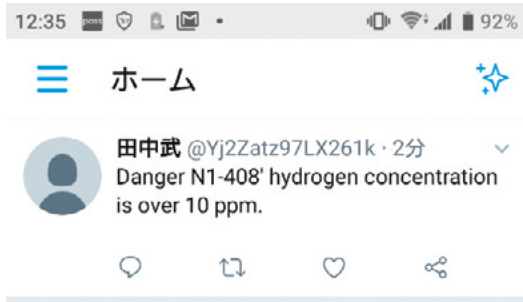


Fig. 9 Twitterでお知らせしたスマートフォンの画面

3. 水の電気分解装置、および燃料電池を用いた赤色 LED の点灯実験

水電解スタックの写真を Fig. 10に示す。また、その仕様を Table 2に示す。燃料電池の写真を Fig. 11に示す。

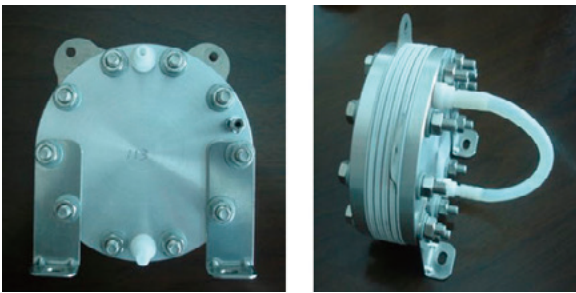


Fig. 10 水電解スタック (SPE) の写真⁷⁾

Table 2 水電解スタック (SPE) の仕様⁷⁾

型番	EHC-300	EHC-500	EHC-1000
水素発生量 (ml/min)	300	500	1000
使用圧力 (Mpa)	<0.7		
電源電圧DC (V)	2.5	5	10
最大電流 (A)	36		
発生ガス流量 (ml/min)	H ₂ : 300 O ₂ : 150	H ₂ : 500 O ₂ : 250	H ₂ : 1000 O ₂ : 500
環境温度 (°C)	1~50		
接続口	水IN: M10×1.5 酸素・水OUT: M10×1.5 水蒸気OUT: G1/8		

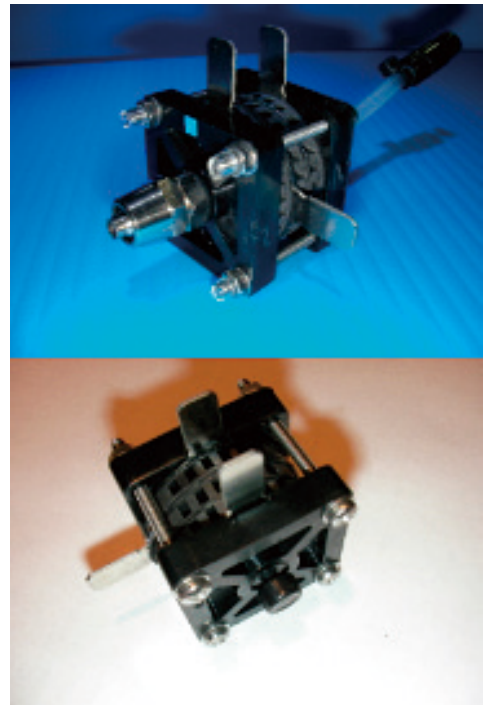


Fig. 11 燃料電池 (HCS-008)⁸⁾
 公称出力: 0.6W
 定格出力: 1.8V@280mA
 直流出力: 1.2V-2.5V
 重量56.9g (チューブ、コネクタ、バルブを含む)

水の電気分解、および燃料電池による発電の実験を Fig. 12、および13に示す。

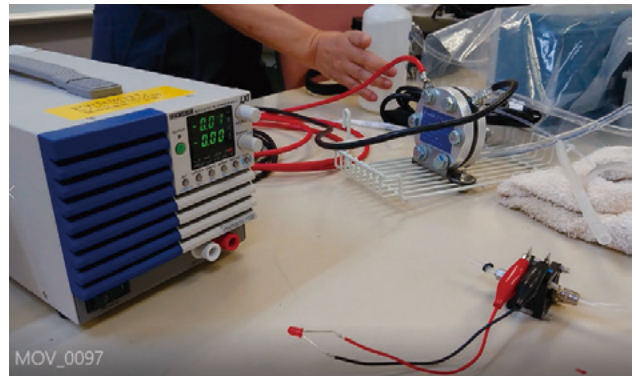


Fig. 12 水の電気分解、および燃料電池による発電の実験装置を組み上げた状態

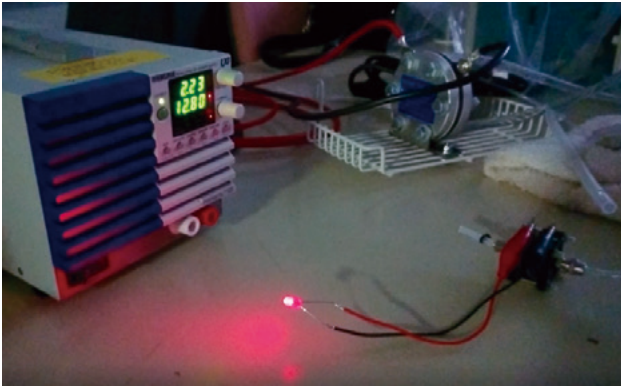


Fig. 13 水の電気分解、および燃料電池による発電の実験装置を組み上げ、水の電気分解、発電、およびその電気でLEDが点灯した状態

Fig. 13より、水の電気分解、燃料電池による発電、その電気によるLEDの点灯が観察された。

水の電気分解量を制御することにより、水素を用いた燃料電池の制御に関する初歩的な教育システムの構築が可能であることが示された。

4. MATLAB/simulink シミュレーション

4-1 6kW45Vdc 燃料電池スタック⁹⁾

この例では、平均値100VdcのDC/DCコンバーターに電力を供給するプロトン交換膜（PEM）燃料電池スタックモデル（Fig. 14）を示します。

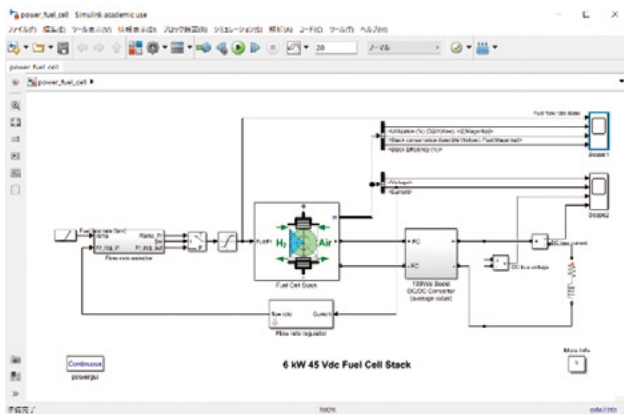


Fig. 14 Simulink モデル図

燃料電池スタックの定格電圧は45Vdc、定格電力は6kWです。コンバーターは、時定数が1秒である6kWのRL素子を負荷としてもちます。最初の10秒間、燃料流量制御器を使用して、水素の利用は一定のノミナル値（ $U_{f_H2} = 99.56\%$ ）に保たれます。10秒目以降は流量制御器がバイパスされ、スタック電圧の変動を観察するために、燃料の流量は最大値の85lpmに増加します。これによって、スタックの効率、燃料消費量および空気消費量が影響を受けます。燃料電池の電圧、電流、DC/DCコンバーター電圧およ

びDC/DCコンバーター電流の信号は、Scope2で確認できます。燃料の流量、水素と酸素の利用、燃料と空気の消費量および効率は、Scope1で確認できます。

$t = 0$ 秒で、DC/DCコンバーターは100VdcをRL負荷に加えます（負荷の初期電流は0A）。燃料の利用は99.56%のノミナル値に設定されます。電流は133Aの値まで増加します。流量は、燃料利用のノミナル値が維持されるよう自動的に設定されます。DC母線電圧（Fig. 16 Scope2）がコンバーターによってよく制御されていることを観察してください。シミュレーション開始時における122Vdcのピーク電圧は、電圧制御器の過渡特性状態が原因となっています。

$t = 10$ 秒のとき、燃料流量は3.5秒間で50リットル毎分（lpm）から85lpmに増加し、これによって水素の利用量が減ります。これはネルンスト電圧の増加につながり、燃料電池の電流は減少します。したがって、スタックの消費量と効率は減少します（Fig. 15 Scope1）。

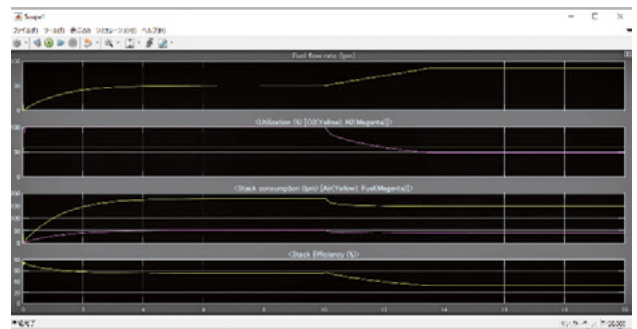


Fig. 15 Scope1

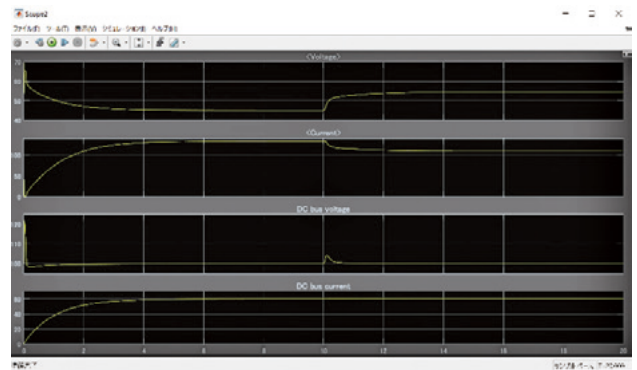


Fig. 16 Scope2

4-2 小規模マイクログリッドの簡略化モデル¹⁰⁾

この例では、典型的な1日における小規模マイクログリッドの簡略化モデルの挙動を説明します。このモデルでは、シミュレーション速度を上げるために、Specialized Power Systemsで提供されるフェーズ法を使用します。

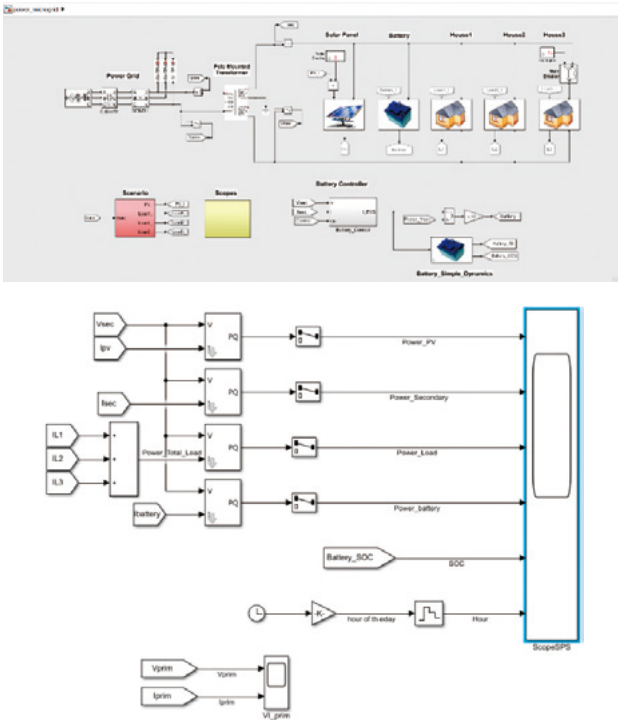


Fig. 17 1日における小規模マイクログリッドの簡略化モデル

マイクログリッドは、単相 AC 回路網です。エネルギー源は、電気回路網、太陽光発電システム、および蓄電池です。

蓄電池はバッテリーコントローラーで制御されます。これは、マイクロ回路網に余分なエネルギーがあれば余剰電力を吸収し、マイクロ回路網に電力不足があれば追加の電力を供給します。3軒の一般的な家で、エネルギー（最大値2.5kW）が電気量として消費されます。

マイクロアレイは、電柱に取り付けられた変圧器を経由して電力回路網に接続されています。この変圧器は6.6kVの電圧を200Vに降下させます。

太陽光発電および蓄電池は、単相 AC に変換される DC 電力源です。制御戦略では、マイクロアレイは電力網によって供給される電力に完全には依存せず、太陽光発電および蓄電池によって供給される電力は常に十分であると仮定されます。

20時から4時までの太陽光発電は0Wです。太陽光発電は、14時から15時の間にピーク量に達します（5kW）。

一般的家庭での典型的な負荷の変化として、電力負荷の量は9時（6,500W）、19時、22時（7,500W）にピーク消費に達します。

0時から12時および18時から24時の間、バッテリーコントローラーがバッテリーを制御します。バッテリー制御により、柱上変圧器の二次側からシステムに流入する有効電力が0になるように、電流のトラッキング制御が行われます。そうすることで、柱上変圧器の二次側の有効電力は常に0付近に保たれます。

蓄電池は、マイクログリッドの電力が不十分な場合には足りない電流を供給し、電力が電気負荷を超えると余剰電流をマイクログリッドから吸収します。

12時から18時の間は、バッテリー制御は行われません。蓄電池のSOC(充電状態)は定数に固定され、変化しません。

これは、蓄電池の充電または放電が、バッテリーコントローラーによって行われなためです。マイクログリッドで電力不足が発生すると、システム電源から足りない電力が供給されます。マイクログリッドに余剰電力があると、余剰電力はシステム電源に戻されます。

8時には、一般的な家の電気負荷 No.3が、ブレーカーによって10秒間オフに設定されます。柱上変圧器の二次側と蓄電池の電力で、有効電力にスパイクが観察されます。

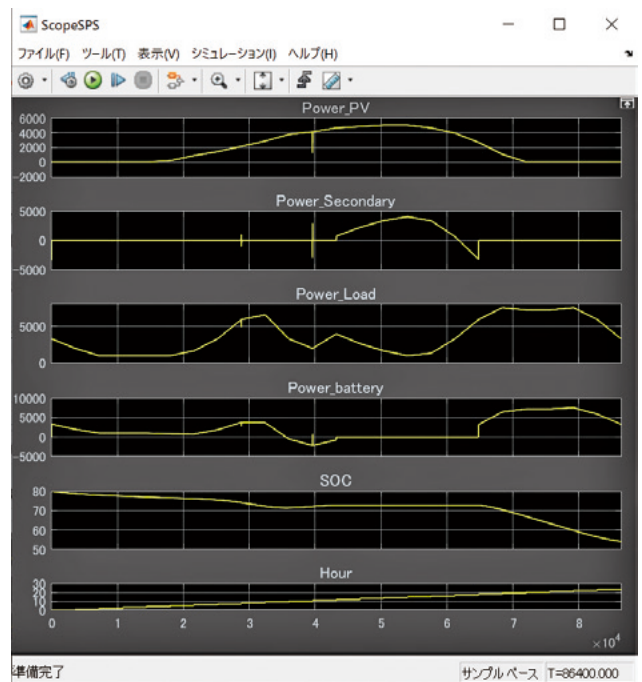


Fig. 18 SPS内のデータ

4-3 ランキンサイクル（蒸気タービン）

この例では、ランキンサイクルに基づく蒸気タービンシステムをモデル化します。サイクルには過熱および再加熱が含まれており、それぞれが高压タービンと低压タービンでの凝縮を防ぎます。サイクルには再生もあり、抽気蒸気を密閉型給水加熱器に通すことによって水を温め、サイクル効率を向上させます。

Saturated Fluid Chamber ブロックと Turbine ブロックは、Simscape™ Foundation Two-Phase Fluid ライブラリに基づいたカスタムコンポーネントです。Saturated Fluid Chamber ブロックは、飽和液の体積と飽和蒸気の体積を別にモデル化しており、ボイラーと復水器を作成するために使用されています。

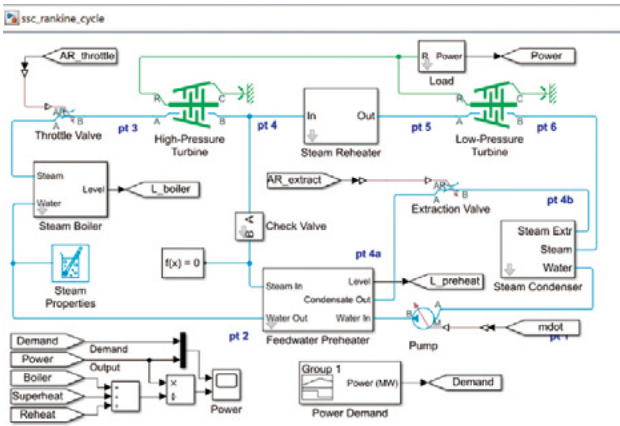


Fig. 19 ランキンサイクルのモデル図

蒸気から給水にも熱が伝達されます。

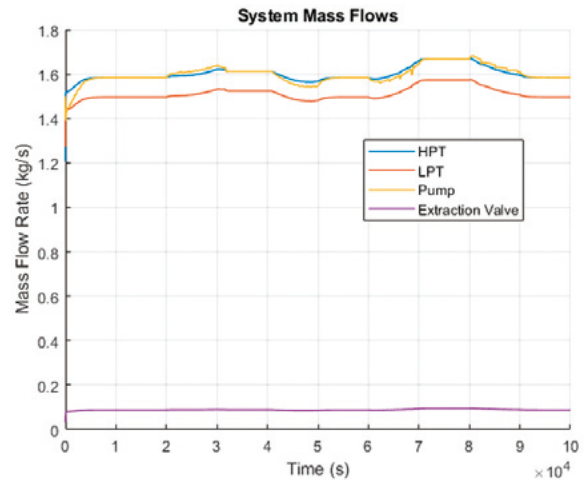


Fig. 22 システム質量流量

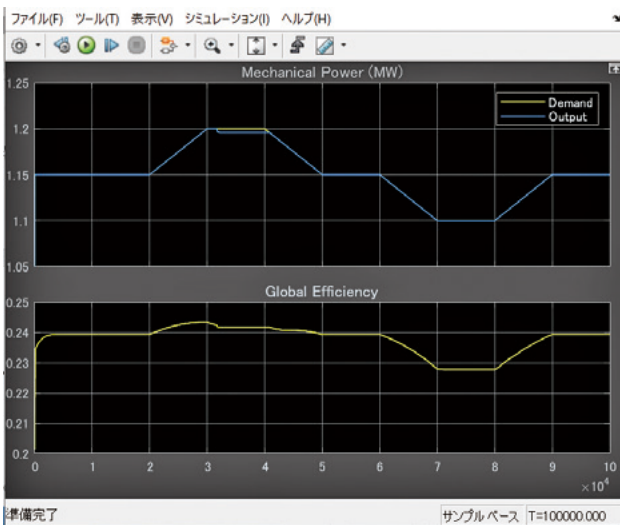


Fig. 20 Scope からのシミュレーション結果

Fig. 22は、システムを通る質量流量を示しています。蒸気の一部は高圧タービン (HPT) と低圧タービン (LPT) の間で抽気されます。抽気蒸気は、復水器で主流と再合流する前に、給水を温めるために使用されます。主流と抽気蒸気の流量は、それぞれボイラーと予熱器の凝縮器の水位を維持するためにコントローラーで制御されます。

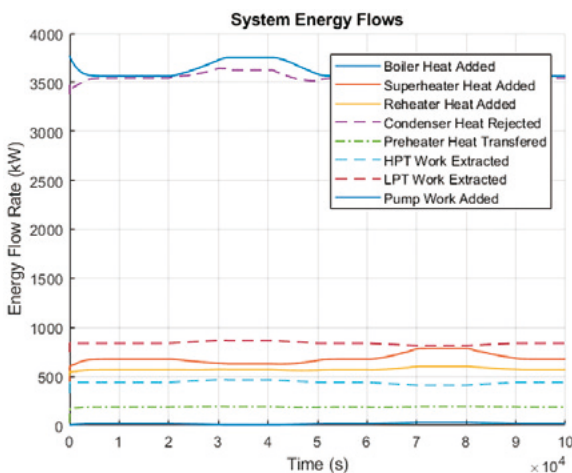


Fig. 21 システムエネルギーフロー

システム内のエネルギー交換を示しています。ボイラー、過熱器および再熱器によって炉の熱が追加されます。高圧タービン (HPT) および低圧タービン (LPT) によって有効仕事が蒸気から抽気されます。廃熱は、復水器内の冷却材に廃棄されます。熱効率を向上させるために、抽気

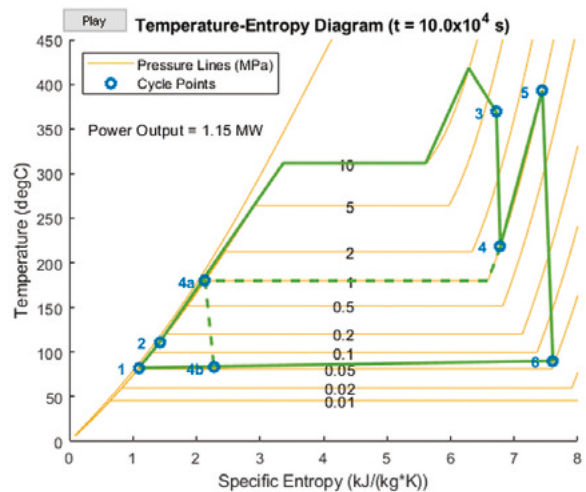


Fig. 23 温度-エントロピー図

ランキンサイクルのアニメーションを温度-エントロピー図で経時的に示したものです。主蒸気流は、サイクルポイント1～6のループに対応します。抽気蒸気流は、サイクルポイント4～4bの破線に対応します。このモデルでは、サイクルポイント3の前のスロットルバルブが動力出力をわずかに制御します。

5. 大型施設の紹介

水素エネルギー関連の船や液化水素荷役基地等の施設の概略図の一例は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技

術総合開発機構から紹介されている。¹¹⁾

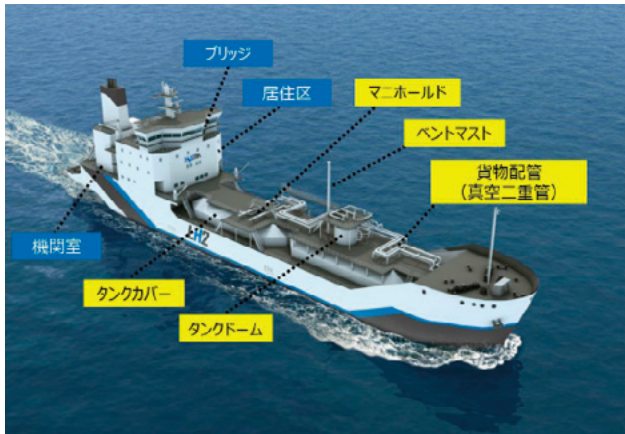


Fig. 24 水素運搬船

【主要目(計画値)】

輸送タンクシステム (助成対象)	
貨物	液化水素 (-253℃)
容積	1,250m ³ ×1基
積載量	75トン-H ₂
構造	横置き円筒 (2重殻)、蓄圧式
材料	SUS304L
防熱仕様	真空防熱
設計圧力	500 k Pa
支持構造物	内槽: GFRP (ガラス繊維強化プラスチック)
	外槽: 積層樹脂+鋼製サドル

船体部 (民間負担)			
全長	116m	航海能力	13ノット*1
全幅	19m	航続距離	11,300海里*2
定員	25名	推進方式	電気推進
船級/船籍	NK/日本	プロペラ	CPP*3×1

*1: 1ノット = 1,852km
 *2: 1海里 = 1,852m
 *3: CPP = Controllable Pitch Propeller (可変ピッチプロペラ)

Fig. 25 水素運搬船の仕様

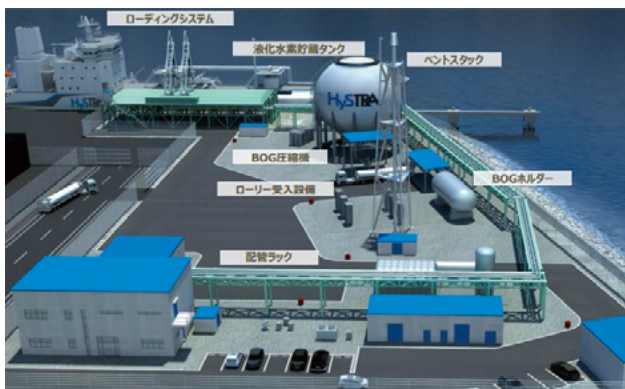


Fig. 26 神戸空港島液化水素荷役基地 概略図

6. まとめ

本研究では、水素センサー、水の電気分解、燃料電池を利用したLED点灯等の初歩的な教育システムの構築を行い、これらのシステムを用いた教育を、研究室の院生・学生から、学科の学生に実施していきたいと思ひます。さらに、Mathworks社から提供されている、燃料電池、マイクログリッド、およびランキンサイクルの例題を用いた学習や、将来の水素関連施設等の理解を深めるとともに、大型の水素関連設備を用いて教育研究していきたいと思ひます。

文 献

- (1) <http://www.env.go.jp/earth/zoning/index.html>
- (2) https://www.toshiba.co.jp/about/press/2016_03/pr_j1402.htm
- (3) http://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/distribution/sskasochi/
- (4) <http://www.cic-solar.jp/info/2017/0403095327.html>
- (5) 田中武他、“初歩的な自立式再生エネルギーシステムの構築”、広島工業大学紀要研究編、第52巻 (2018) 77-85
- (6) Flammable Gas Sensor (Model: MQ-8) Manual Version: 1. 4, Valid from:20150310, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd.
- (7) <https://www.enoah.co.jp/%E6%B0%B4%E9%9B%BB%E8%A7%A3%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%83%83%E3%82%AF-%E6%B0%B4%E7%B4%A0%E7%99%BA%E7%94%9F%E5%99%A8/>
- (8) <http://www.space-device.com/HCS008.html>
- (9) <https://jp.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/6-kw-45-vdc-fuel-cell-stack.html>
- (10) <https://jp.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html>
- (11) <https://www.nedo.go.jp/content/100895060.pdf>