

## EDLC を用いた水素製造システムの最適化に関する検討

井野畑 和企<sup>1)</sup>・田島 大輔<sup>2)</sup>・黒瀬 充晴<sup>1)</sup>・山本 拓也<sup>3)</sup>・三宅 琢磨<sup>4)</sup>・大坪 昌久<sup>5)</sup>

### *Examination about optimization of the Hydrogen Production System Using EDLC*

Kazuki INOHATA, Daisuke TASHIMA, Mitsuharu KUROSE, Takuya YAMAMOTO, Takuma MIYAKE, Masahisa OTSUBO

#### Abstract

*The objective of the present study is to develop hydrogen production system for fuel cell generation which combined electrolysis cell and EDLC (Electric Double-Layer Capacitor) with a wind power generator. The electric charge and electric discharge control unit used two kinds of devices. The one is ECaSS (Energy Capacitor System) and the other is a direct parallel changeover circuit by a shift type bank change method. An electric discharge to an electrolysis cell was performed and compared electric charge and electric discharge characteristic. As the result, it was understood that the hydrogen production system was effective to use a direct parallel changeover circuit. In addition, an experiment was performed with a direct parallel changeover circuit by a purpose of the most suitable constitution of a hydrogen production system. The experiment was changed a changeover point when direct parallel connection was changed. As the result, it was understood that this system was managed the most suitably changing a changeover point depended on the use situation.*

Key words :

Hydrogen production, EDLC, ECaSS, Direct parallel changeover circuit

#### 1. はじめに

風力発電は、大気汚染物質を排出しないクリーンなエネルギーであり、また新エネルギーの中では経済的にも有望であることから、その導入促進が期待されている。しかし、風の間欠性から安定した出力を得ることが困難である。この解決策の一つに、発電された電

力を水素エネルギーに変換させることが考えられており、効率良く水素製造を行うために、電力緩衝媒体に電気二重層キャパシタ(EDLC: Electric Double-Layer Capacitor)を搭載したシステムの利用が注目されている。本研究は、電気分解セルと EDLC、風力発電機を組み合わせ燃料電池発電用水素製造システムの開発を目的としている。本論文では、EDLC を用いることによって水素製造の効率を上げるために、EDLC の充放電制御装置と電気分解セルを用いて水素製造システムを構築し、その特性について解析した。実験には、充放電制御装置に ECaSS(Energy Capacitor System)と直並列

1) 電気電子工学専攻大学院生

2) 電気電子工学科研究員

3) 電気電子工学科学生

4) 工学部技術職員

5) 電気電子工学科教授

切替回路の2種類を使用した。

## 2. ECaSS について

### 2.1 ECaSS の原理

図1に ECaSS の基本構成<sup>(1)</sup>を示す。ECaSS とは、電子回路とキャパシタを組み合わせた蓄電装置で、電子回路により利用効率・充放電効率を上げキャパシタの性能を最大限に利用する蓄電システムである。キャパシタを複数個直列に接続し蓄電するが、それぞれのキャパシタには並列モニタ(電圧配分調整用の回路)を設ける。キャパシタの充放電はすべて電流ポンプ(電流源型のスイッチングコンバータ)を用いる。

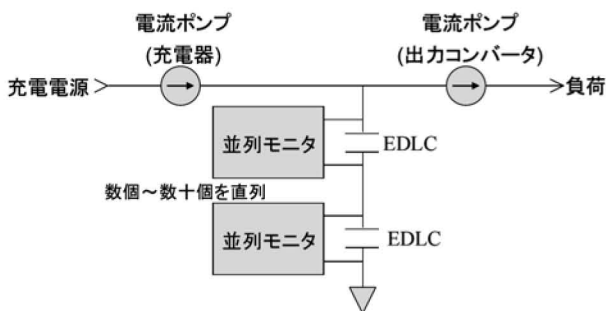


図1 ECaSS の基本構成.

### 2.2 ECaSS の特徴

各セルの電圧配分のばらつきを、各キャパシタに並列モニタを接続する事によって防ぐ事ができる。並列モニタは、小電力の電圧配分調整用の電子回路であり、電気二重層キャパシタを管理しつつ充電能力を最大限に活かす事ができる。また、スイッチングコンバータを用いているため、時間をかけて小電流で充放電が行え、効率の向上が可能である。更に、出力コンバータによって、放電に伴って低下していくキャパシタの電圧を一定に保つ事ができる。

## 3. 直並列切替回路について

### 3.1 直並列切替回路の原理<sup>(1)</sup>

著者らは、シフト型バンク切替え法を利用した直並列切替回路を用いている。シフト型バンク切替えとは、複数の電気二重層キャパシタを切替えて、出力の変動

幅を一定の範囲内に収める方法である。

シフト型バンク切替え法による直並列切替回路構成を図2の(a)に、切替え状態を(b)~(d)に示す。同図(a)における満充電からの放電は、S1aとS1bを同時にONにした(b)の状態を開始する。電圧が設定値を割ったらS1aとS1bをOFFにしてS2aとS2bを同時にONにして図(c)の状態にする。更に放電が進むとS2aとS2bをOFFにしてS3をONにして図(d)のように全て直列接続にする。

シフト型の特徴は、動作中いかなる状態でも切り離されるキャパシタバンクが存在しないことである。したがって、途中の充電状態に固定した状態で使い続けても、使っていないバンクがゼロに放電してしまう恐れはなく、切替えたときに期待した電圧が出ないなどという現象が起こらない。そのため、緩和充電装置は省くことができる。また、もう一つの長所として、キャパシタバンクに同一の耐電圧、静電容量のモノが使用できる点がある。

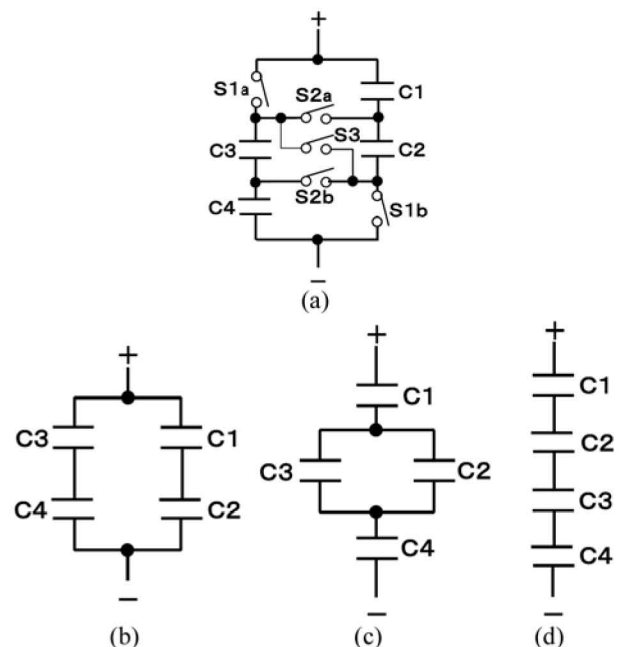


図2 直並列切替回路の構成.

### 3.2 直並列切替回路の特徴

直並列切替の長所は簡潔さと高効率である。大きなチョークコイルが不要で、希に動かすスイッチ数個で済むため、99%程度の効率が可能である。更に軽負荷での効率も高い。

## 4. ECaSS と直並列切替回路の放電特性の比較

### 4.1 実験内容と方法

通常、EDLC の充放電制御には ECaSS(Energy capacitor systems)が使用される。また、著者らの研究グループでは、これまで EDLC の直並列接続切替により、蓄積電気エネルギーを有効に利用できることを明らかにしている<sup>(2)</sup>。そこで、本論文では、ECaSS と直並列切替回路を電気分解セルに接続させた時の放電特性を比較し、直並列切替による水素製造システムの有効性を検討した。

図 3、図 4 に ECaSS、直並列切替回路使用時の実験回路をそれぞれ示す。また、図 5 に著者らが使用した直並列切替回路、図 6 に切替えの状態を示す。実験には、Power System 社製の EDLC(2.5V, 470F)を 4 個使用し、直流安定化電源を用いて充電を行った。充電後は電源を切り離し、電気分解セルを接続して放電を行い、その時の水素発生量、放電電圧、電流を測定した。直並列切替回路を介して放電するときは、放電開始電圧を水素製造開始電圧の 3V 以上とするために、図 6 の(b)の状態から放電を開始し、放電電圧が電気分解セルの定格電圧を下回るとき EDLC の接続切替(図(c), (d))を行い、放電電圧が常に水素発生電圧を上回るように調整した。

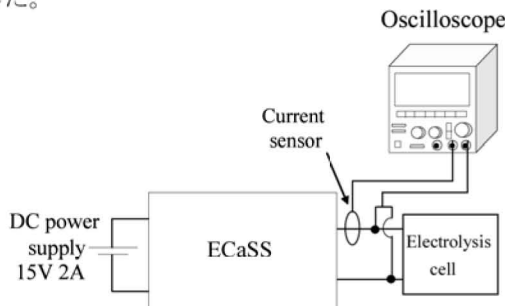


図 3 ECaSS 使用時の実験回路。

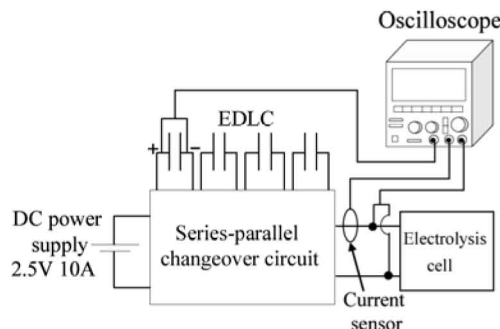


図 4 直並列切替回路使用時の実験回路。

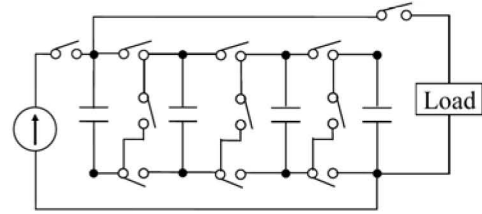


図 5 直並列切替回路。

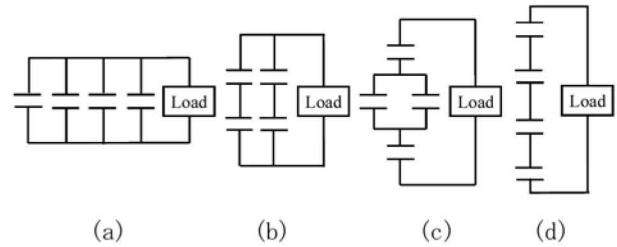


図 6 切替えの状態。

### 4.2 実験結果

ECaSS 使用時の放電特性、直並列切替回路使用時の放電特性を図 7、8 にそれぞれ示す。図 8 より、回路の切替を行い、EDLC の直列数が増えることによって、減少していた放電電圧、電流が増加することが確認できた。また、EDLC は蓄電量に比例して放電電圧が変化するため DC/DC コンバータを用いていない直並列切替回路を使用することにより、電圧変化が 33%程度生じることが分かった。

表 1 に、ECaSS 使用時と直並列切替回路使用時の放電特性の比較結果を示す。それぞれの放電エネルギーを計算した結果、ECaSS 使用時は 3.55[kJ]、直並列切替回路使用時は 3.62[kJ]と直並列回路使用時の方が高い放電エネルギー値を示し、充放電効率において、直並列切替回路使用時の方が 18%程度高い値を示した。また、ECaSS、直並列切替回路使用時の放電特性を比較した結果、水素発生量の差に 20[mL]程度の差があることが分かった。ECaSS に比べ直並列切替回路の方が EDLC の蓄積電気エネルギーをより多く利用できたこと、ECaSS の充電システムが電圧源であること、直並列切替回路はチョッパ回路のように高速なスイッチングを行わないため、回路の損失が低減できることなどが考えられる。そのため、電気分解による水素製造に直並列切替回路を応用することは十分に有効であると言える。更に、直並列切替回路は ECaSS のような電子

回路を使用しないため構造が簡単で済み、コスト面においても有用であると考えられる。

ECaSS は放電電圧が一定であるのに対し、直並列切替回路は 33% 程度の電圧変化が生じてしまうが電気分解による水素製造は供給電流が一定でなくても電流に比例して水素が生成されるため、33% 程度の電圧変化は水素生成に対して問題ないものと考えられる。

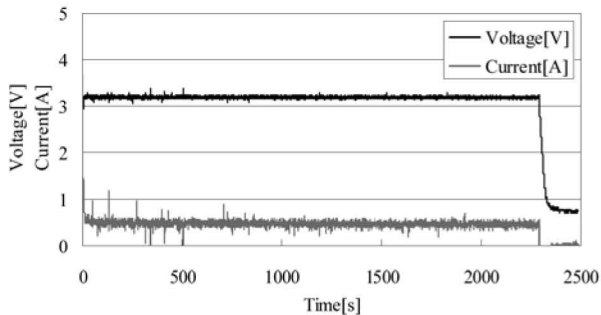


図7 ECaSS 使用時の放電特性.

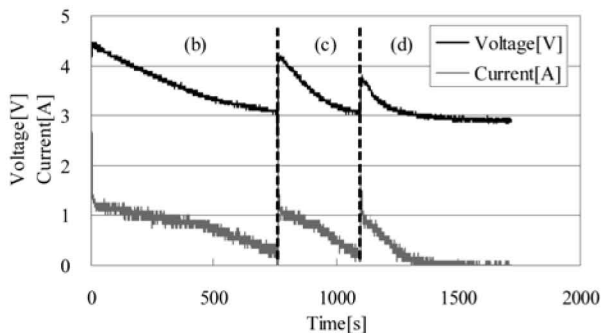


図8 直並列切替回路使用時の放電特性.

表1 放電特性の比較.

	ECaSS	直並列切替回路
放電エネルギー[kJ]	3.55	3.62
水素発生量[ml]	280	300
充放電効率[%]	53.4	71.7

## 5. 直並列切替回路の最適運用の検討

### 5.1 実験内容と方法

前節の結果より、直並列切替を用いた水素製造システムは有効であることが分かった。本節では、直並列切替回路を用いた水素製造システムの最適構成を目的

とし、直並列接続の切替を行う時、切替のタイミングを変化させて実験を行った。図9に電気分解セルへの放電電圧、電流を示す。図9に示す切替点を変化させることによって、水素発生量、充放電効率にどのような変化を及ぼすか調べた。

実験回路、実験方法は前節の直並列切替回路使用時と同じである。しかし、この実験において、切替電圧の違いによる放電特性の変化を分かりやすくするために、EDLC を 6 個に増やし、静電容量を増加させて実験を行った。図10にEDLCを6個使用した時の直並列切替回路、図11にEDLCを6個使用した時の切替の状態を示す。図11の(a)の状態から放電を開始し、同図(e)まで電気分解セルへの放電電圧をテストを用いてモニタリングし、放電電圧に合わせて直並列接続の切替を行った。切替のタイミングを放電電圧 3.10V から 3.25V まで 0.05V 毎に変化させて実験を行い、切替時の放電電圧の違いによる放電特性を比較した。

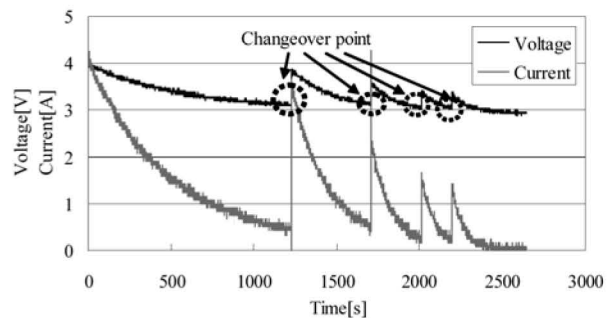


図9 電気分解セルへの放電電圧、電流.

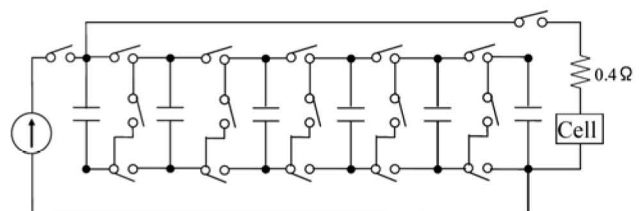


図10 EDLC を 6 個使用した時の直並列切替回路.

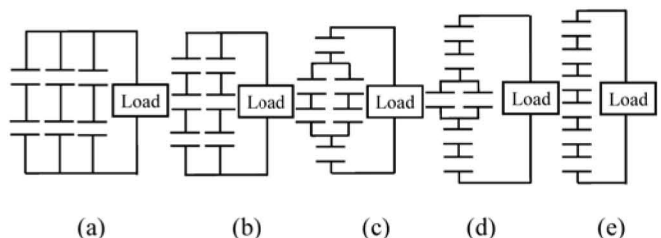


図11 EDLC を 6 個使用した時の切替の状態.

## 5.2 実験結果

図 12 の(a)に 3.10V 切替時, (b)に 3.15V 切替時, (c)に 3.20V 切替時, (d)に 3.25V 切替時の電気分解セルへの放電電圧, 電流, 表 2, 3 に切替点に対する水素発生量, 放電エネルギーと充放電効率を示す。図 12 より, 切替時の放電電圧が高くなるほど, 放電時間が短くなることが分かる。これは, 切替を行う際, EDLC の残圧が高く放電電流が大きくなるために, 放電時間が短くなったものと考えられる。表 2 より, 切替を放電電圧が低いときに行うほど, 水素発生量が増加し, 時間当たりの水素発生量は低下することが分かった。また, 電気分解セルでの消費エネルギーと抵抗での消費エネルギーを合わせて算出した充放電効率を表 3 に示す。表 3 より, 切替時の放電電圧が低い方が電気分解セルでの消費エネルギーが高く, 抵抗での消費エネルギーが低いことが分かる。これは, 放電電圧が低い時に切替を行うほど放電電流が低くなり, 抵抗での消費エネルギーが抑えられ, 電気分解セルへの供給量が多くなったものと考えられる。放電電圧が低い時に切替を行うほど充放電効率が良いことが分かる。これは, 直並列切替回路の内部抵抗やスイッチ切替時に生じる過渡現象などが原因であると考えられる。電流が低い方が直並列切替回路での損失が低いため, 回路の内部抵抗がある限りは切替点が高い方が充放電効率が高くなる。また, 放電電圧が低い時に切替を行うことで過渡現象を抑制でき, 損失が減少したものと考えられる。

以上の結果より, 使用状況に応じて切替点を変えることで本システムを最適に運用できると考えられる。風力発電機の発電量が少なく発電電力を効率良く使用したい時は切替点を低くすることで EDLC の電力から効率良く水素製造できる。また, 風力発電機の発電量が多く EDLC の充電が短時間でできる時は, 切替点を高くすることで短時間に多くの水素が製造でき, より多くの発電電力が利用可能であると考えられる。

図 13 に EDLC1 個の放電特性を示す。図 13 より, 放電が終了しても EDLC 内のエネルギー全てを使用できていないことが分かる。EDLC 内の残圧を計算した結果, EDLC6 個の合計の残圧が 2.76V, エネルギー換算すると, 473.5[J]残っていた。満充電時のエネルギーが

約 13125[J]であるため, 本システムでは, 使用できないエネルギーが 3.6%程度生じることが分かった。

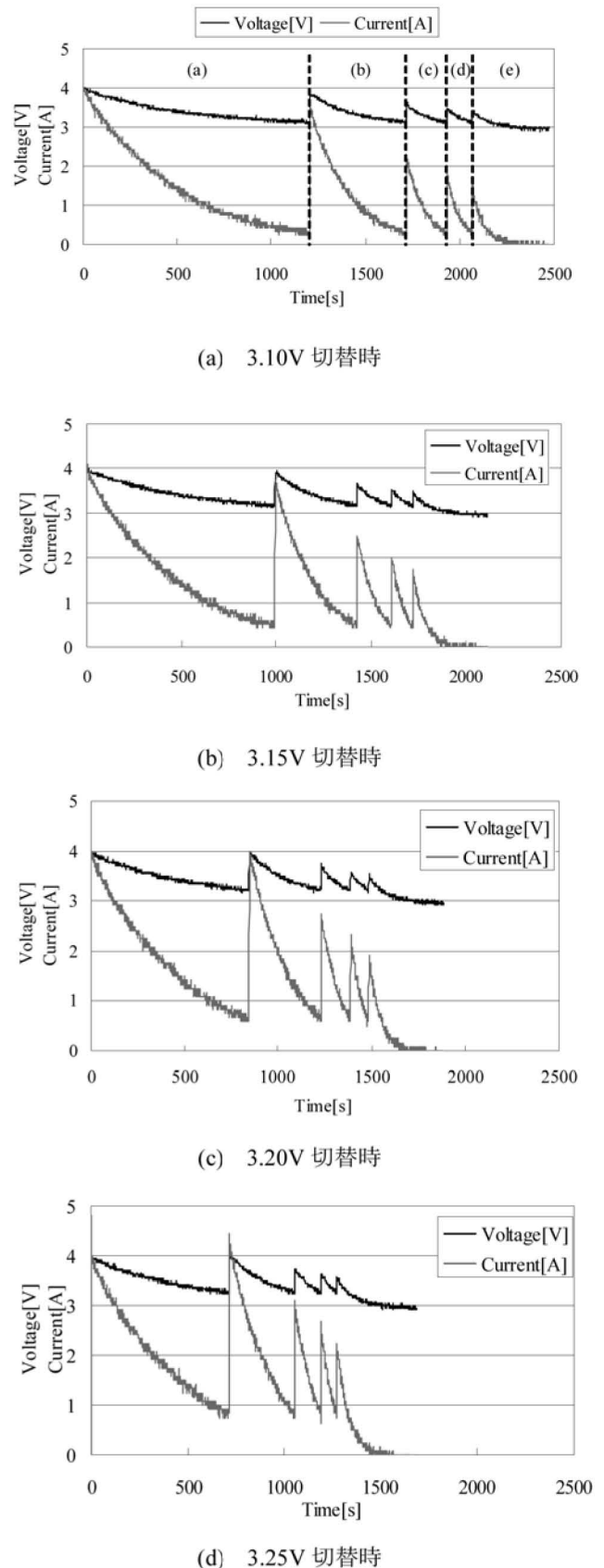


図 12 切替点の違いによる放電電圧, 電流。

表2 切替点に対する水素発生量.

切替電圧[V]	水素発生量 [mL]	時間当たりの水素 発生量[mL/s]
3.10	745	0.30
3.15	730	0.35
3.20	715	0.38
3.25	695	0.41

表3 放電エネルギーと充放電効率.

切替電圧 [V]	消費エネルギー		充放電効率 [%]
	電気分解 セル[kJ]	抵抗[kJ]	
3.10	9.89	0.81	81.1
3.15	9.80	0.83	80.6
3.20	9.69	0.87	80.0
3.25	9.56	0.91	79.3

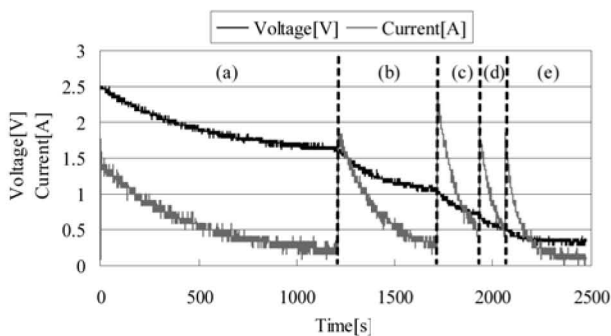


図13 EDLC1 個の放電特性.

## 6. まとめ

本実験では、EDLC の充放電制御装置を用いた水素製造システムの特長解析について実験を行った。その結果は以下の通りである。

(1) 電気分解セルへの放電に ECaSS と直並列切替回路を使用し、放電特性を比較した結果、直並列切替回路を使用した方が、放電エネルギーが大きくなり水素発生量が多くなることが分かった。また、充放電効率も 18%程度高くなった。そのため、EDLC の直

並列切替は電気分解セルを用いた水素製造システムに有効であると考えられる。更に、直並列切替回路は ECaSS のような電子回路を使用しないため構造が簡単で済み、並列モニタやコンバータを必要としないためコスト面においても有用であることが分かった。

(2) 直並列接続切替を行うタイミングを変化させた結果、使用状況に応じて切替点を変えることで本システムを最適に運用できることが分かった。風力発電機の発電量が少なく発電電力を効率良く使用したい時は切替点を低くすることで EDLC の電力から効率良く水素製造できる。また、風力発電機の発電量が多く EDLC の充電が短時間でできる時は、切替点を高くすることで短時間に多くの水素が製造でき、より多くの発電電力が利用可能であることが分かった。

## 参考文献

- 岡村 勉夫：「電気二重層キャパシタと蓄電システム 第二版」, 日刊工業新聞社, pp.6-23, pp.129-144, 2001 年 2 月
- 田島大輔, 平田優心, 大坪昌久, 成烈文, 本田親久, 房野俊夫：「電気二重層キャパシタの直並列切替使用による有効利用」, 第 56 回電気関係学会九州支部連合大会, No.04-2A-04, 2003 年 9 月