

# 再生可能エネルギーを導入促進するレドックスフロー電池システムの開発

## Development of redox flow battery system to introduce and promote renewable energy

|                   |                  |                   |
|-------------------|------------------|-------------------|
| 永山 智之*            | 鶴田 大毅*           | 小栗 利夫**           |
| Tomoyuki Nagayama | Tomotaka Tsuruta | Toshio Oguri      |
| 伊坂 久***           | 杉田 武***          | 福島 淳一***          |
| Hisashi Isaka     | Takeshi Sugita   | Junichi Fukushima |

### 要 約

COP21によるCO<sub>2</sub>削減を目的とした再生可能エネルギー（以下再生エネと略す）発電システムの導入促進には、蓄電池導入が必須となるが、国内の数十万箇所以上のFIT契約している50kW未満の太陽光発電所には殆どが蓄電池が付いていない。今後、再生エネ発電を導入するには既設の太陽光発電所も含め蓄電池付きとする市場が考えられる。この様な中で、太陽光発電所に設置する蓄電池には耐環境性及び長寿命が求められるが、これに対応できる蓄電池としてレドックスフロー（以下RFと略す）電池を採用し、他の蓄電池に無い、RF電池の特長を生かした基本制御システムを開発した。今後は基本制御技術を発展させた太陽光専用RF電池システムを開発し、次世代のスマートグリッドやバーチャルパワープラント（VPP）に応用できるRF電池システムの実用化を目指す。

### 目 次

- § 1. 開発の背景
- § 2. RF電池試験システムの概要及び特長
- § 3. 性能評価結果
- § 4. 次期開発機及び今後の展望

### § 1. 開発の背景

COP21によるCO<sub>2</sub>削減目標より世界は従来の化石燃料中心の発電から、再生エネ発電の積極導入と促進を加速させてきている。しかしながら自然に左右される再生エネ発電量が増加すると、電力系統に与える出力変動が大きくなり、電力貯蔵や再生エネ発電電力の変動吸収対策としての蓄電池導入は必須となっている。

一方、太陽光等の再生エネ発電が増加し続けると、アメリカのカリフォルニア州で発生したダックカーブ現象が世界でも問題になると考えられる。これは電力会社側にとって昼間に発生した大きな太陽光電力が系統に印加されると負荷に応じて発電所の出力を下げる制御を実施し、夕方に向け太陽光発電が減少するに従い出力を徐々に増

やす制御をしながら、夜間に太陽光発電が完全停止すると需要に見合った発電所内発電機を稼働させている。これは電力会社から見た1日の時間毎の電力供給量の曲線が図-1のようにアヒルの体に似ているためダックカーブ現象と呼ばれている。

発電所にとって、ダックカーブの曲線が顕著なほど需要に見合った発電機出力制御を短時間で実施する必要性

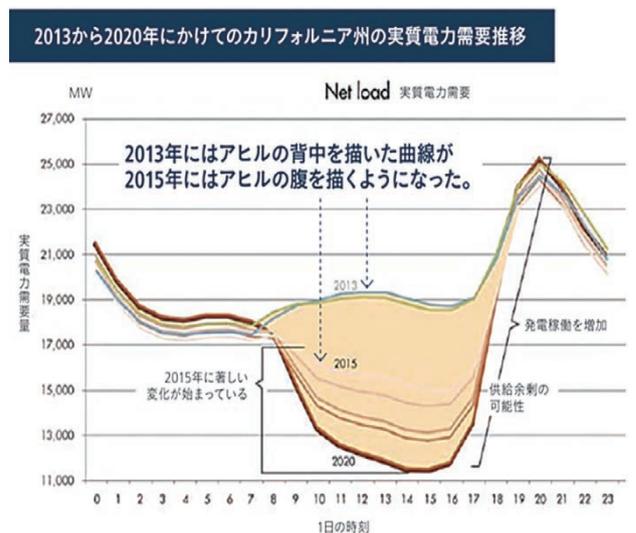


図-1 ダックカーブ現象  
 < 出展：California Independent System Operator >

\* 事業創生部事業創生一課  
 \*\* 技術研究所先端技術グループ  
 \*\*\* LEシステム株式会社つくば事業所

から、発電電力の調整が容易な火力発電機を稼働させざるを得ない。これはクリーンエネルギーである太陽光等の再エネ導入が増加するほど、CO<sub>2</sub>が多く発生する火力発電機を稼働させるという矛盾が生じる。従って、カリフォルニア州では再生エネの導入には電力貯蔵電池の設置が法令で義務づけられている。

国内（九州電力）でも2018年の夏に太陽光発電量が多い時間帯に受け入れを停止する要求を小型太陽光発電業者に通達をした。これはベース電力である大容量の原子力発電が稼働開始した為、火力発電機の稼働台数を少なくした。その結果、系統に大容量の太陽光等の再エネ電力が印加されると、火力発電機で負荷調整するが、火力発電量以上の太陽光電力が印加されると変動調整が出来ないため、太陽光発電所の一時停止を要求したものである。これはクリーンなCO<sub>2</sub>発生が無い再エネ発電を廃棄することとなる。

この対策として電池を備え余剰電力を電池に充電し、例えば太陽光発電が停止した夜間に電池に充電された電力を利用することにより、図-2のように無駄なく100%の太陽光発電電力を有効利用できるシステムとなる。

## §2. RF 電池試験システムの概要及び特長

### 2-1 RF 電池試験システムの概要

RF 電池システムはRF 電池の特長を生かすための基本制御技術の取得を目的として図-3のような試験システム系統図で開発した。

50kW 未満の既設太陽光発電システム（電池不付き）にFIT 契約（固定買取り制度）以上の太陽光余剰電力をRF 電池に貯蔵し、夜間に売電することで太陽光発電電力を100%使用可能なRF 電池システムを開発する。

この目的のため、今回はRF 電池の特長を生かす基本制御技術を開発する。

#### ① RF 電池スタックの各種性能評価試験

- ・RF 電池スタックの平均 Cell 抵抗、各種効率試験
- ・寿命試験（サイクルテストによる）

#### ② 基本制御ソフトの開発

RF 電池の充電状態をリアルタイムに計測できる開路電圧（OCV 値）を常時把握し、利用することにより各種制御ソフトを開発する。

- ・RF 電池の充放電制御
- ・電解液のポンプ流速・流量制御
- ・OCV 値による各種運転指令制御
- ・外部からの無線指令による装置の監視及び運転制御

#### ③ 各種運転モード制御ソフトの開発

次世代のスマートグリッドやバーチャルパワープラント（以下VPPと略す）に対応可能なRF 電池システムに要求される各種運転モード制御ソフトを開発する。

- ・ピークカット・ピークシフトモード

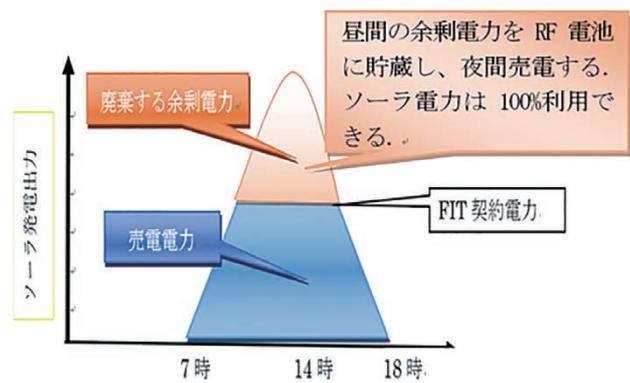


図-2 1日の太陽光発電出力推移

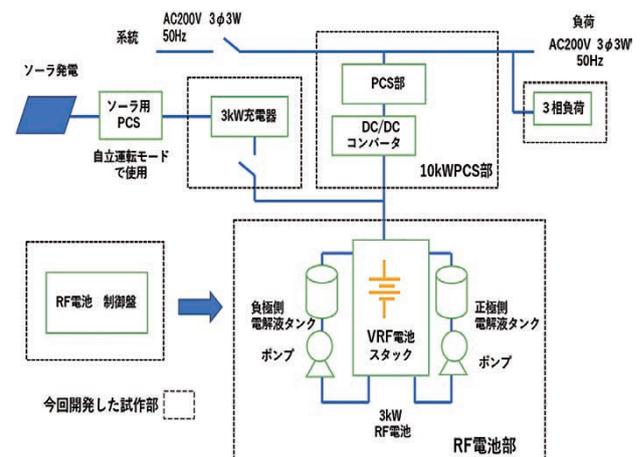


図-3 開発した試験システム系統図

- ・系統ダウン時の自立運転継続モード
- ・太陽光とRF 電池との組合せによる経済優先運転モード
- ・過電流耐量を向上させる電解液流速・流量制御モード

### 2-2 RF 電池の特長

再生エネ発電用の蓄電池に要求される主な機能は以下が考えられる。

- ・充電状態がリアルタイムに計測できること
- ・高速応答で電池の充放電制御が可能なこと
- ・短時間の過負荷耐量大きいこと
- ・蓄電容量を簡単に増加可能なこと

RF 電池はこれらの要件を全て満足しており、今回の制御技術開発はこれらの技術確立にある。

#### ① 充電状態をリアルタイムに計測

RF 電池はモニターセルに流す電解液の開路電圧（OCV 値）を計測することにより、リアルタイムで充電量が把握できるという特長がある。一方、他の蓄電池（例；リチウム、鉛等）は充電量を把握するには電池を満杯にし、その後は充放電量を計算により把握するため長時間運転すると計算値に誤差が生じ、正確な充電量を把握することは難しい。一方、OCV と充電深度は理論的な計算式（ネルンスト式）より、図-4 の関係となり OCV を計測すれば RF 電池の充電深度（蓄電量）が把握でき

ることがわかる。

しかしながら充電深度が10%~90%の範囲でOCV値の差は約0.25VしかないためOCV値の計測バラツキで蓄電量を間違える可能性がある。

実際のOCV値は電解液の気泡等の影響でバラツキが発生する。本試験システムの開発に当たり、このOCV値のバラツキを補正する補正OCV値計測手法を開発した。

② 高速応答で電池の充放電制御

再生エネの変動吸収にはRF電池の充電量をリアルタイムに把握し、RF電池の過充電や過放電を防ぎながら高速でRF電池を充放電制御する必要がある。

これには充電量を示すOCV値が正確に計測できる前提であるが、OCV値を把握しながら充放電指令後に短時間で動作することを確認する。この機能を応用することにより、再生エネ発電の変動吸収や将来のVPPにおける電力の売電ビジネスが可能となる。

③ 短時間の過負荷耐量が大きいこと

風力発電は風の影響で出力変動が大きく、電池の定格容量に対し短時間では定格値以上の過電力が発生する。過負荷耐量の大きい電池を採用すれば定格容量が小さい電池が採用できる。

今回の試験機でRF電池スタックの過負荷耐量を試験し、次回の再生エネの変動吸収制御システム開発に繋げる。

④ 蓄電時間が簡単に増加できる

RF電池は出力部(セル, スタック)と容量部(電解液タンク)が独立しているため、出力(kW)と容量(h)が個別に設計できる特長がある。従って、電池システムの追加、改造等により電池出力(kW)同じで、蓄電時間(h)を増やすには電解液タンク容量(電解液量)を増やすことで容易に実現できる。これは他の蓄電池(リチウム, 鉛等)には無いRF電池特有の機能である。

§ 3. 性能評価結果

今回、RF電池の特長を生かした基本制御システムを開発したが、主な性能評価結果を以下に報告する。

3-1 補正OCV値計測手法の開発

電解液の電荷価数のバラツキまたは、電解液中に含まれる気泡等により、図-5のOCVのように計測値が変動したり異常値を示すことが有る。

この対策として、モニターセルのOCV計測値と充電深度の相関関係に着目し、新しくOCV計測値の補正処理法を考案した。この補正処理の考え方は、充電量は瞬時値と時間の面積で表示できること、また、OCV値は充電深度(充電量)を示していることに着目した。OCV値に瞬時変動があっても時間的要素を加味し、OCV値を補正処理すれば標準化し図-4のように真の充電深度を表示することが判る。

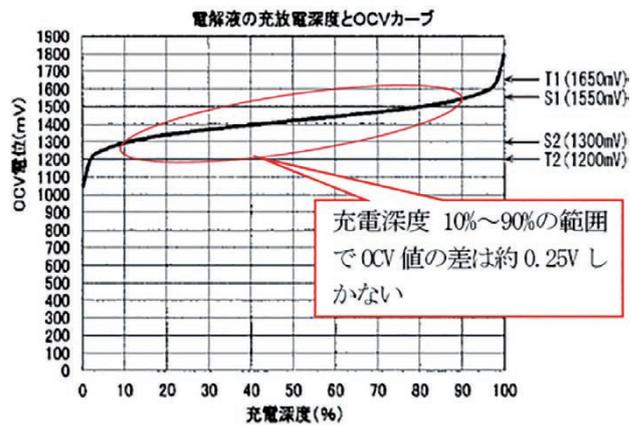


図-4 OCV電位と充電深度の関係

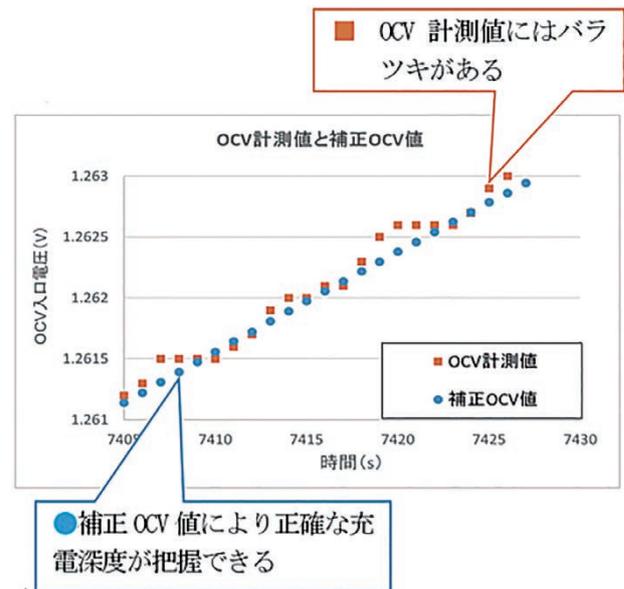


図-5 OCV電位と補正OCV値の比較データ

OCV値をリアルタイムに計測し、移動平均の時間(例;60秒,90秒等)を変えながらOCV値を求め、移動積分で補正してOCV値を求めた。この補正処理法で求めたOCV値(以下補正OCV値という)は、図-5に示す通りOCV計測値のバラツキ等が補正された真のOCV値(補正OCV値)を示すことが確認できた。

今後は、開発した補正OCV値を採用して各種RF電池制御に応用する。

3-2 RF電池スタックの各種性能試験

RF電池スタックの各種効率(電流効率, 電力効率, 電圧効率, 平均Cell抵抗)の評価試験結果を図-6に示す。また、耐久性試験として500サイクルの充放電試験結果を図-7に示す。

(1) RF電池スタックの各種効率試験

① 試験条件

- 電流;48A 電圧範囲;1.0~1.55V/セル
- 電解液流量;15L/min 電解液量;90L

## ② 試験結果からの考察

電流効率が安定して推移しており、イオン交換膜の劣化は無い。平均セル抵抗もほぼ横這いで電極の劣化も無いことより RF 電池スタックの開発目標は達成している。

## (2) 耐久試験

## ① 試験条件

- ・電流；48 A 電圧範囲；1.0～1.55 V/セル  
電解液流量；15 L/min 電解液量；90 L

## ② 試験結果からの考察

500 サイクルの試験結果では放電時間は 2500 秒から 3000 秒で安定している。また、RF 電池スタックの液漏れもなく問題無しと判断できる。

## 3-3 過負荷耐量試験

FR 電池の特長である過負荷耐量試験を実施した。図-8 は RF 電池の定格出力以上の負荷を印加した場合（約 10 秒程度）の RF 電池システムの出力量データである。

RF 電池スタック電極部の電流密度を変更した場合の、放電出力推移データを図-9 にまた、電力効率の推移データを図-10 示す。

## ① 試験条件

- ・電流；48 A 電圧範囲；1.0～1.55 V/セル  
電解液流速；15 L/min 電解液量；90 L  
定格出力；3 kW 定格電流密度；80 mA/cm<sup>2</sup>

## ② 試験結果からの考察

図-8 の RF 電池の過負荷特性より、RF 電池は短時間であれば定格の 1.3 倍～2.3 倍の負荷を接続しても正常運転を継続している。

今回開発した RF 電池システム試験機の PCS 容量は 10 kW であったため、これ以上の過負荷耐量試験は実施できなかったが、RF 電池の特性として更に短時間（例；数秒以下）であれば RF 電池出力の 5 倍以上は期待できる。

何れにしても、出力変動の大きい再エネ発電システムの変動吸収には RF 電池は最適な蓄電池であることが解る。

図-9 は RF 電池の電極の電流密度を上げると当然電池出力が増加することを示しているが、一方、図-10 より RF 電池の電力効率は低下している。通常、RF 電池の電力効率は 80% 以上を目標として電池スタックを設計するが、本データより電流密度は 60 mA/cm<sup>2</sup> が最大の電力効率（約 82%）となっている。

例えば 100 kW の RF 電池スタックを設計する場合、最大電力効率である電流密度を 60 mA/cm<sup>2</sup> で設計する場合と 80 mA/cm<sup>2</sup> で設計する場合を比較すると、60 mA/cm<sup>2</sup> は 80 mA/cm<sup>2</sup> の RF 電池スタックより寸法及び重量とも約 30% 増加する。これでは RF 電池スタックを小型軽量化に製造するには不利となる。

RF 電池スタック開発の観点から、低価格で且つ小型軽量化が求められるため、電流密度を 150 mA～200 mA/

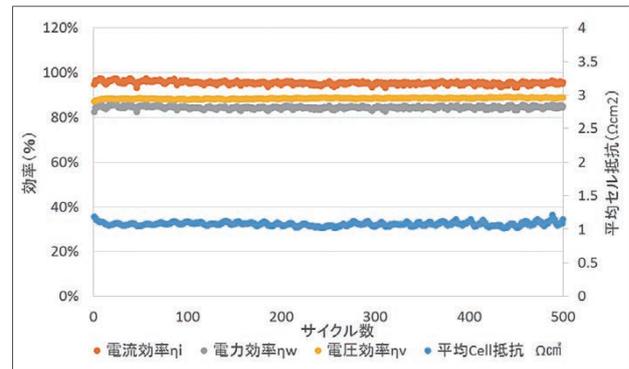


図-6 RF 電池スタックの各種効率試験結果

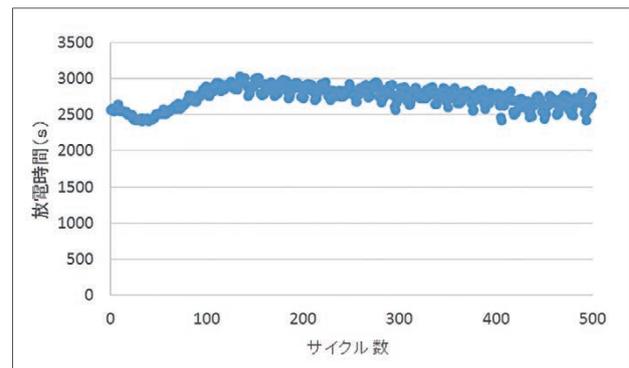


図-7 サイクル試験結果

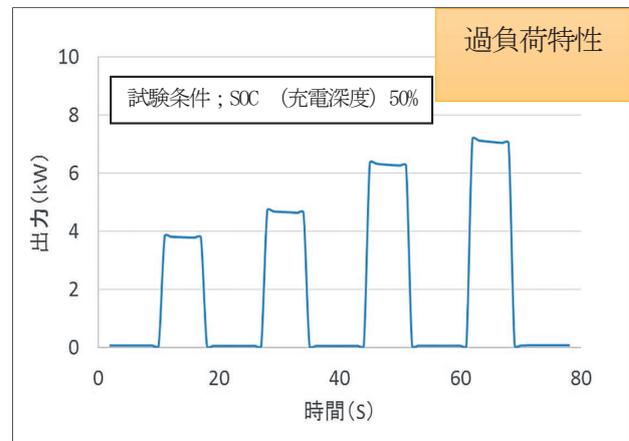


図-8 定格以上の過負荷耐量試験結果

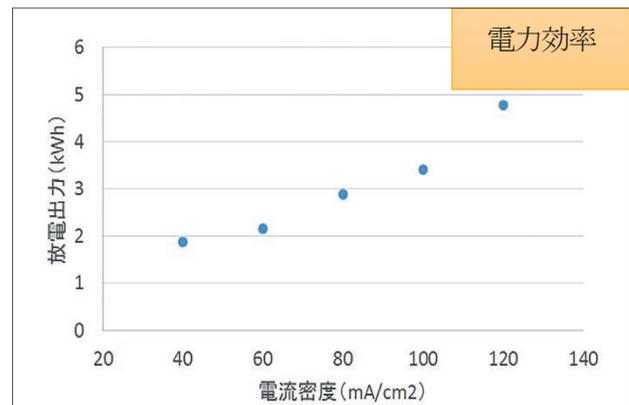


図-9 電流密度の推移による放電出力特性

cm<sup>2</sup>程度とし、電力効率は80%以上を目標に電池部材等の開発が世界のRF電池メーカー各社で進められている。一方、制御システム面からも電解液流速を負荷に応じて制御することにより電力効率も向上できる。

3-4 RF電池システムの高速度試験結果

RF電池スタック、PCS等を含めたシステム全体の応答速度を確認した。図-11より、RF電池制御盤からの放電指令後に、RF電池経由PCSから出力する迄の応答時間は約80msと高速で動作している。

再エネ発電出力の変動吸収にはこの応答速度で十分であり、ポイントは如何に再エネ発電の瞬時電力を検知しRF電池の充電量を正確に且つリアルタイムで把握しながら変動吸収の充放電制御を実施することにある。これには今回開発した補正OCV値計測手法が有効であると考えている。

3-5 性能評価結果の纏め

今回開発したRF電池システムの開発目標値と達成率を記載した性能評価結果を表-1に示す。

表-1の性能評価結果の纏めより、RF電池を稼働させるための基本制御技術は取得できた。次年度は開発した基本制御技術をベースに、再エネ発電出力の変動吸収や将来のVPPに応用できる制御システムを開発する予定である。

§4. 次期開発機及び今後の展望

長寿命が期待できるRF電池を採用した50kW未満の小型太陽光専用RF電池システムを開発する。RF電池は他の電池(リチウム電池、鉛電池等)に無い特長を生かしたシステムとする。コンテナ収納外観図を図-12に示す。また、太陽光パネル架台下収納の構想図を図-13に次年度開発予定の小型太陽光専用RF電池システムの系統図を図-14に示す。

太陽光専用RF電池システムは、電池が付いていない既設太陽光システムの配線変更のみで改造可能とし、RF電池の充電量をリアルタイムに計測(電解液のOCV値を計測)できる特徴を生かした各種制御システムを開発する。

- ① VPPに対応可能な上位CPUからの指令に対応するインターフェースを開発し動作を確認する
- ② 新開発した補正OCV値計測方式を採用し、風力及び太陽光等の発電出力変動が大きい短周期変動、長周期変動に対応可能な制御システムを開発する
- ③ 太陽光側の発電電力が契約電力以上の発電量となった場合のRF電池へ充電制御法を確立する
- ④ RF電池のOCV値を計測しながら太陽光からの発電電力を昼間充電、夜間放電のサイクル制御機能を確認する

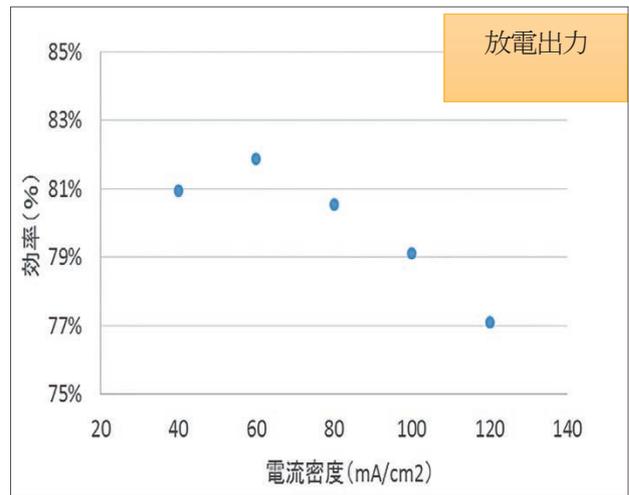


図-10 電流密度の推移による電力効率特性

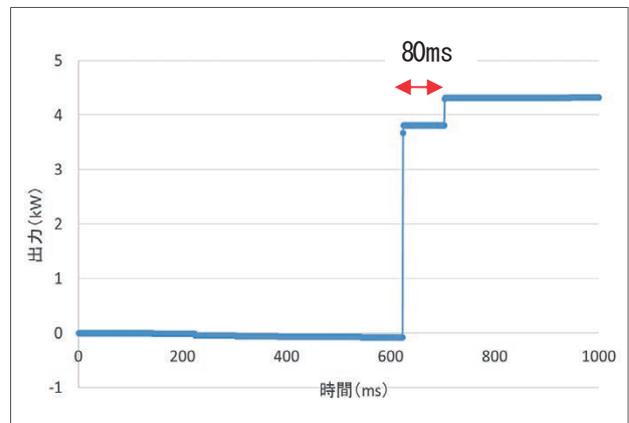


図-11 応答速度試験結果

表-1 RF電池システム性能評価結果

| 開発項目                                       | 目標値      | 結果       | 達成率  |
|--|----------|----------|------|
| 1. 3kW RF電池スタック<br>・各種効率(電力効率, 電流効率, 電圧効率) | 80%      | 81%以上    | 100% |
| ・過電流耐量                                     | 定格の2倍    | 定格の2.3倍  | 100% |
| ・サイクル試験                                    | 500 サイクル | 500 サイクル | 100% |
| 2. RF電池制御ソフト<br>・補正OCV値計測手法                | 計測法の開発   | 確認済      | 100% |
| ・各種電池制御ソフト(電解液流速制御, 充放電制御, 各運転モード, 無線通信他)  | 正常稼働     | 確認済      | 100% |
| 3. RF電池システム全体の制御                           | 正常稼働     | 確認済      | 100% |

次期開発機は実際の太陽光発電所に設置し、ロングランを含む実証試験を実施する。実証試験後は地方自治体向けの非常電源や小規模太陽光発電事業者向けに小型太陽光専用 RF 電池システムの市場投入を図る。

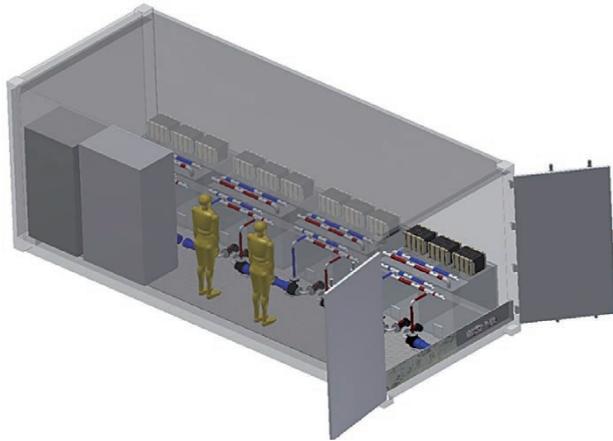


図-12 コンテナ収納外観図  
(20 f コンテナ収納例)

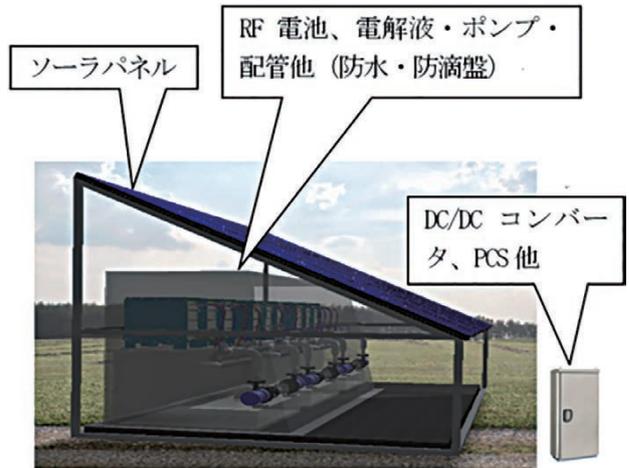


図-13 RF 電池システムソーラ架台下収納の構想図

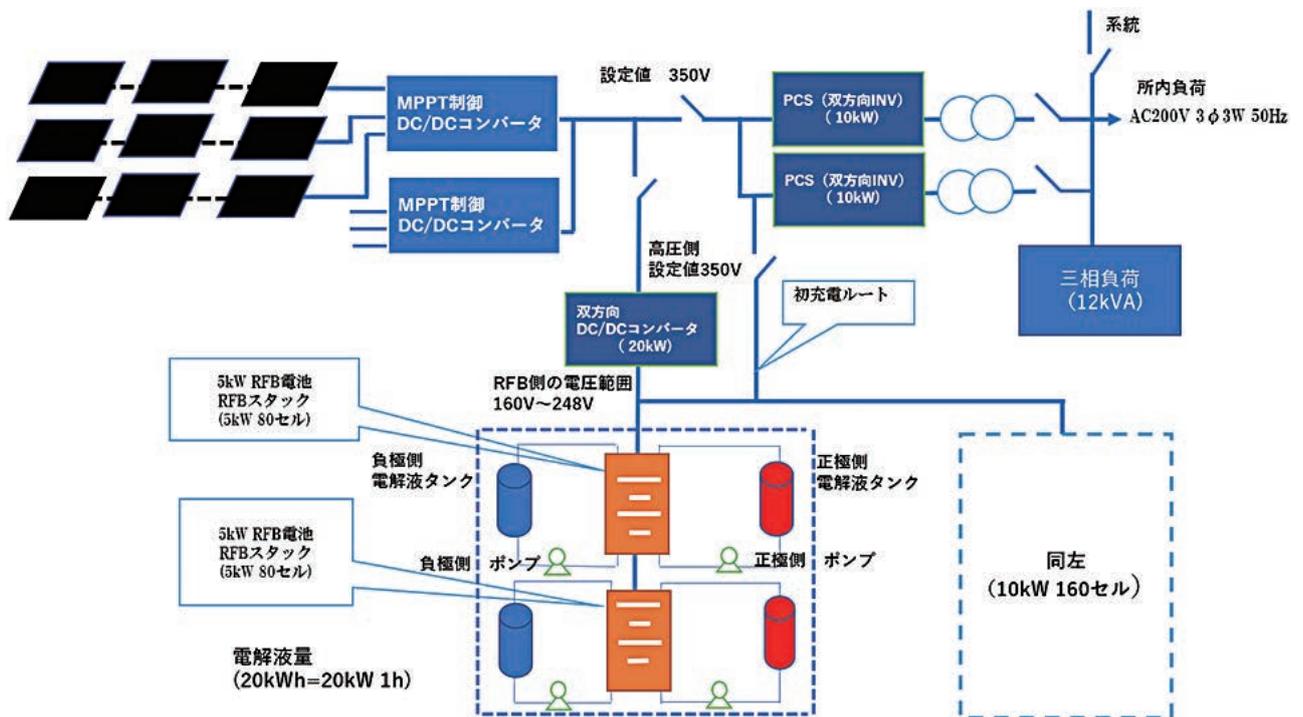


図-14 小型ソーラ専用 RF 電池システム系統図