

# 風力発電の出力変動緩和用 制御弁式据置鉛蓄電池 “LL1500-W形”

## VRLA Battery "LL1500-W Type" for Output Stabilization of Wind Power Generation Systems

佐野伸一\* *Shinichi Sano*    三谷 桂\* *Katsura Mitani*    広瀬義和\* *Yoshikazu Hirose*  
若田部浩之\* *Hiroyuki Wakatabe*    高林久顕\* *Hisaaki Takabayashi*    下浦一朗\*\* *Ichiro Shimoura*

風力発電や太陽光発電などの導入量増加に伴い、新エネルギー発電システムの出力変動緩和が重要となっている。これに対応するため、風力発電の出力変動緩和用制御弁式据置鉛蓄電池“LL1500-W形”を開発した。フィールド調査及びベンチテストの途中経過から、蓄電池における最終の劣化モードは、正極格子の腐食と判断した。その腐食形態は粒界腐食とは異なり、格子表面から均一に腐食が進むいわゆる全面腐食であることを見出した。従来品の正極格子を改善することで、全面腐食に対する耐久性の向上を実現し、期待寿命17年を満足する見込みを得た。本開発品であるLL1500-W形電池は、2009年10月に青森県の市浦風力発電所に納入され、2010年2月から出力変動緩和の実証試験を開始し、現在も順調に運用されている（2011年2月時点）。

The mitigation of power output fluctuations of new energy generation systems is a serious issue to expand the introduction of wind power and solar power generation to the power grid. The valve regulated lead-acid battery "LL1500-W type" has been developed to stabilize these fluctuations. The degradation mode of the battery for these use was elucidated to be the corrosion of the positive grid, by the results of bench tests and field tests. The corrosion of the positive grid was so-called general corrosion which grew uniformly from the surface was quite different from the grain boundary corrosion usually observed in positive grids. The life of the LL1500-W type battery was improved by controlling the corrosion, which extended the expected life up to 17 years. The battery modules were installed in the Shiura wind farm in Aomori Prefecture in October, 2009, and the wind farm started its operation in February, 2010. As of February, 2011, the output of the Shiura wind farm has been stabilized well by the modules of the LL1500-W type battery.

### 〔1〕 緒 言

我が国の温室効果ガス排出量を低減する方策の一つとして、風力発電の導入が進められている。風力発電においては天候などによって出力が変動するため、連系する系統電力に悪影響を及ぼすことが懸念されている。この対策の一つとして、蓄電池併設による出力変動緩和が挙げられ、風力発電の出力が下がる場合は蓄電池を放電し、逆に上がる場合は蓄電池を充電することで出力変動を緩和している。独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO技術開発機構）が実施した『蓄電池併設風力発電導入可能性調査』において、制御弁式鉛蓄電池（当社製LL形電池）、ナトリウム-硫黄電池、レドックスフロー電池を使用して検討され、いずれの蓄電池

も十分使用可能であると評価された<sup>1)</sup>。ただし、実使用における蓄電池の耐久性は明らかにならなかった。

2006年から東北電力(株)殿が、蓄電池併設の変動緩和型風力発電の公募を開始した。電力の需給期間は17年で、初期及びランニングにかかる費用を最小限に抑えることが求められ、それには期待寿命17年の蓄電池が必要であった。そこで当社は2006年に、出力変動緩和用途で期待寿命17年を有する蓄電池の開発に着手した。従来のサイクル長寿命型蓄電池であるLL形電池やLL-S形電池<sup>2)~5)</sup>をもとに、実機のフィールド調査や部分充電状態（PSOC：Partial State of Charge）で評価するPSOCベンチテストの途中経過から、蓄電池における最終の劣化モードを把握し、劣化部の改善による耐久性向上を実現した。そして2009年6月に、期待寿命17年（当社推奨の使用条

\*名張事業所 \*\*技術開発本部 電池研究開発センタ

件下)を見込める風力発電の出力変動緩和用制御弁式据置鉛蓄電池LL1500-W形電池(以下、LL-W形)を開発した。このLL-W形電池は2009年10月に青森県の市浦風力発電所、2010年9月に山形県の遊佐風力発電所に納入され、2011年2月現在、順調に運用されている<sup>6)~9)</sup>。

本報告では風力発電の出力変動緩和用途における制御弁式鉛蓄電池(以下、VRLA電池)の長寿命化技術について報告する。

## 〔2〕LL-W形電池の開発目標と開発方法

### 2.1 サイクル用制御弁式鉛蓄電池の長寿命化技術の開発経緯

当社における従来のサイクル用制御弁式鉛蓄電池(以下、サイクル用VRLA電池)は期待寿命が500サイクル程度であったが、電力貯蔵用のサイクル長寿命蓄電池として、2001年に期待寿命3000サイクルのLL形電池を開発し<sup>2)</sup>、さらに2005年には期待寿命4500サイクルのLL-S形電池を開発した<sup>5)</sup>(期待寿命は当社推奨の使用条件下による)。これらの蓄電池は、いずれも高強度の正極活物質と高耐食性合金を使用した正極格子を採用することによって、充放電の繰り返しに対する正極板の耐久性を向上した。また負極活物質の添加剤仕様を改良することで充電受け入れ性能を向上して、低充電電流量で使用した場合のサルフェーション現象(非還元性硫酸鉛の蓄積)の発生を抑制している。さらに蓄電池の極板水平方向設置やリテーナ仕様の最適化等により電解液の成層化を抑制し、充放電時の充電パターンや充電電流量も制御することで、充放電を繰り返すサイクル用途での長寿命化を達成した。このLL形電池やLL-S形電池をもとに、期待寿命17年(当社推奨の使用条件下)を見込んだLL-W形電池を開発した。

### 2.2 LL-W形電池の開発目標

表1はLL-W形電池の開発目標を示す。従来のサイクル用VRLA電池と最も異なる点は、期待寿命の目標を風力発電所の電力需給期間と同等の17年としている点である。

### 2.3 使用条件

一般にVRLA電池は、その使用方法により蓄電池の劣化モードや期待寿命が異なる。図1はVRLA電池による風力発電の出力変動緩和の効果の一例を示す。風力発電の出力変動緩和用途では、風力発電の出力が下がる場合は蓄電池を放電し、逆に上がる場合は蓄電池を充電するという使用方法となる。従って蓄電池は、常に充放電をおこなえる状態で維持する必要があるため、満充電状態に対し、SOC(State of Charge:充電状態)を下げたPSOCで充放電される使用方法となる。また、出力変動の周期は、秒~分単位と予想されるため、PSOCで秒~分単位の充放電を繰り返す使用条件が想定される。これは従来のサイクル用VRLA電池の使用条件とは全く異なっており、長寿命化のためには蓄電池における最終の劣化モードの把握と劣化部の耐久性向上が必要となる。

## 2.4 開発方法

充放電の電流が連続的に変化し、制御が困難である風力発電の出力変動緩和用途では、浅い充放電の繰り返しによるPCL現象(Premature Capacity Loss:早期容量低下)、PSOCなど充電不足で使用され続けたときに生じる負極活物質のサルフェーション、充放電を繰り返すことで発生する正極格子の腐食による劣化変形、そして正極活物質の軟化が問題となると考えられる。また、風力発電の出力変動緩和用途では、変動緩和システムの蓄電池に対する運用条件の違いや、使用される地域により風況に違いがあるため、各風力サイトによっても劣化モードが異なる可能性があると考えられる。このような条件で使用され、長寿命が必要となるLL-W形電池を短期間で開発するために、本開発では次の(1)(2)を検討した。

(1) 風力発電所の出力変動緩和用既納品蓄電池の調査(LL形電池)

(2) 風力発電の出力変動緩和用途を想定したPSOCベンチテスト(寿命評価試験:小容量のLL形電池で約80種類を試験)

(1)(2)の結果から、使用条件毎の蓄電池における最終の劣化モードの把握によって開発ポイントを絞り込み、劣化部の耐久性の向上と評価を実施することで、風力発電の出力変動緩和用途における長寿命化技術の確立を図った。

表1 LL-W形電池の開発目標

Table 1 Target of LL1500-W type battery.

項目		内容
名称		LL1500-W
定格容量		1500 Ah (10HR)
公称電圧		2 V
外形寸法	高さ	507 mm
	幅	172 mm
	長さ	437 mm
質量		約109 kg
リセット充電		定期的に当社推奨の条件によるリセット充電が必要
期待寿命		17年の見込(当社推奨の使用条件下)

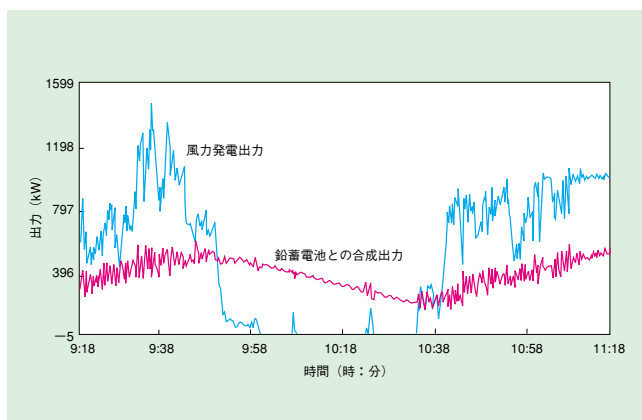


図1 VRLA電池による風力発電の出力変動緩和の効果の一例

Fig.1 Example of output stabilization of wind power generation by VRLA battery.

### [3] 結果

#### 3.1 既納品蓄電池の調査

図2は実際の風力発電システムで使用されている既納品蓄電池の調査(LL形電池)の放電容量の推移を示す。年数の経過とともに放電容量のバラツキが広がっているが、実機使用7年目における放電容量は、定格容量の85%以上を維持していることが確認できた。表2に風力発電システムで使用された蓄電池の解体調査結果を示す。解体調査は蓄電池の各部材に対して計15種類(寸法, 化学分析, 他)の調査を実施した。実使用年数7年目までの解体調査から判断すると、正極格子の腐食進行度が判

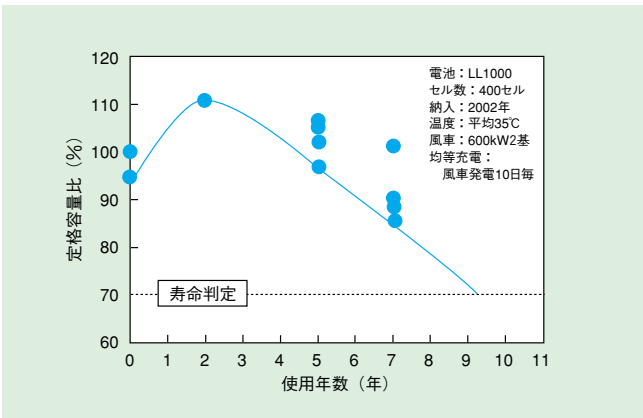


図2 風力発電システムで使用した電池の放電容量推移  
Fig.2 Change in rated capacity of batteries used in wind power generation systems.

表2 風力発電システムで使用された電池の解体調査結果

Table 2 Summary of disassembly analyses on batteries used in wind power generation systems.

予想される劣化モード		2年目	5年目	7年目	寿命判定基準(推定)	判定(7年目)
PCL		異常なし	異常なし	異常なし	界面に異常がないこと	問題なし
サルフェーション進行度	正極	10%	17%	27%	寿命時の硫酸鉛量を100%とする	問題なし
	負極	10%	20%	30%		
正極格子腐食進行度		30%	60%	80%	寿命時の腐食量を100%とする	最も劣化が進行

用途	出力変動抑制用途	サイクル用途	スタンバイ用途
使用条件	PSOCで秒~分単位の連続充電	放電使用後毎回満充電	常時浮動充電状態
断面写真			
腐食形態	全面腐食	粒界腐食	

表3 正極格子の腐食形態の確認  
Table 3 Comparison of used positive grids.

表4 PSOCベンチテスト結果

Table 4 Bench tests results based on operation conditions for LL1500-W type battery.

試験条件(充放電電流値)	当社推奨の使用条件の範囲内	当社推奨の使用条件の3倍	当社推奨の使用条件の5倍
正極格子腐食量比(対寿命期%)	90	75	85
腐食形態	全面腐食	全面腐食	全面腐食
総放電量からの換算年数(年)	18.5	11.4	11.1
判定(耐用17年)	○	×	×

定基準の80%に達しており、予想される劣化モードのうち正極格子の腐食が最も進行していることがわかった<sup>10)</sup>。

これらの結果より、風力発電所の使用条件において、LL形電池は約9年間の使用で寿命に至ると推定された。

#### 3.2 正極格子の腐食形態の確認

風力発電の出力変動緩和用途を想定したPSOCベンチテストの途中抜き取り解体調査において、正極格子の腐食形態を確認した結果を表3に示す。比較として、従来用途(サイクル用, スタンバイ用)におけるVRLA電池の代表的な正極格子の腐食形態を示す。従来用途では正極格子の腐食形態が粒界腐食(蓄電池を過充電領域で維持して使用する場合におこる, 粒界部分が選択的に腐食される現象)であったのに対し、PSOCベンチテストでは正極格子の腐食形態が全面腐食(表面からはほぼ均一に腐食が進行している形態)になっていることがわかった。表4にベンチテスト結果の一部を示す。今回実施した80種類の試験で、充放電電流値やSOCが当社推奨の使用条件の範囲内の場合、正極格子の腐食形態は全面腐食となることが分かった。これらの腐食は、使用する格子合金組成が均一に腐食する特性があること<sup>11)</sup>、使用時に過充電や過放電しないよう管理されているため<sup>12)</sup>全面腐食になると考える。

以上の結果より、全面腐食に対する耐久性を向上させることで、風力発電の出力変動緩和用途における蓄電池の長寿命化が可能であることを見出した。

また表4に示されているが、当社推奨の使用条件に対し、充放電電流を大きくして使用すると正極格子の腐食

量が増え、蓄電池寿命が短くなるということがわかった。これは電流が高くなると正極電位が貴となり、腐食が進みやすくなるためと考える。これより風力発電変動緩和用途で使用する場合は、充放電電流の制限を設ける必要がある。

### 3.3 正極格子の耐久性向上の検討

正極格子の耐久性向上を目的として正極格子設計を検討した。図3に正極格子耐久性（格子の耐久性比が高いと電池寿命期間が長くなる）の関係を示す。

従来の格子形状と同じ設計では、格子の耐久性は格子占有率とほぼ比例関係にあった。しかし、格子設計を検討した結果、正極板中に占める格子占有率を従来の格子の1.6倍にするだけで格子の耐久性を従来格子の約3.4倍にすることができ、正極格子の耐久性向上に格子設計が大きく影響することを見出した。この格子設計をもとにして、LL-W形電池の正極格子を設計した。今回、設計にあたり評価試験としたPSOCベンチテストは温度条件等理想的な条件で評価するため、実使用においては寿命が短くなる可能性もあるので、実使用に対する安全率を2倍として設計した。

新しく設計したLL-W形電池の正極格子を使用し、PSOCベンチテストをした際の正極格子の腐食量の変化を図4に示す。図4の横軸の使用年数は、蓄電池の定格容量の70%放電を4500サイクルしたときの総放電量を、使用年数17年として換算したものであり、縦軸の腐食量比は、正極格子の寿命時の腐食量を100とした場合の割合で示した。図のように、新しく設計した正極格子は、PSOC

ベンチテストにおいて、17年相当時点で、正極格子の腐食量が寿命レベルの約50%であり、目的の耐久性を有していることが確認できた。

### 3.4 LL-W形電池の正極格子の腐食変形シミュレーション

表5は正極格子を腐食変形シミュレーションで解析した結果である。LL-W形電池とLL形電池の正極格子の腐食変形シミュレーション<sup>1)</sup>を実施したところ、LL-W形電池の正極格子の方が変形量は小さく、17年使用後の変形量は、LL形電池の10年使用後の変形量の60%まで低減することが分かった。

### 3.5 LL1500-W形電池の仕様

以上のように正極格子において全面腐食に対する耐久性を向上させることで、風力発電の出力変動緩和用制御弁式据置鉛蓄電池LL1500-W形電池を開発し、2009年6月に上市した。LL1500-W形電池の推奨の使用条件下における期待寿命は、表1の目標にある17年を満足する見込みである。

表6にモジュール電池（LL1500-W-8形）の仕様を、図5にその外観写真を示す。

## [4] 適用例

市浦風力発電所は、風力発電機（単機出力1.93MWのENERCON社製E-82）×8基と蓄電池システムなどで構成され、定格出力は15.44MWのウィンドファーム（大規模風力発電システム）である。

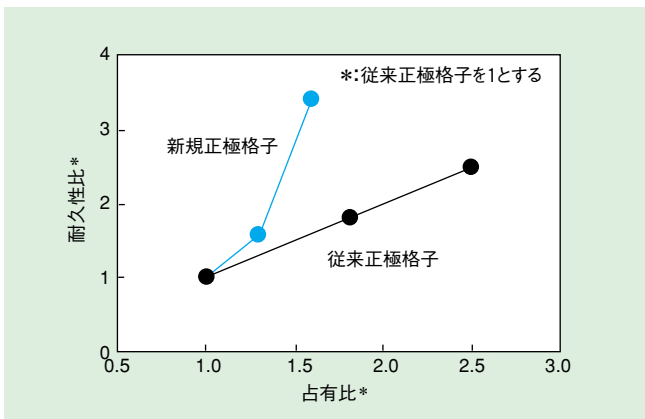


図3 正極板中に占める格子占有率と正極格子耐久性の関係  
Fig.3 Relationship between grid occupancy and grid durability in positive plates.

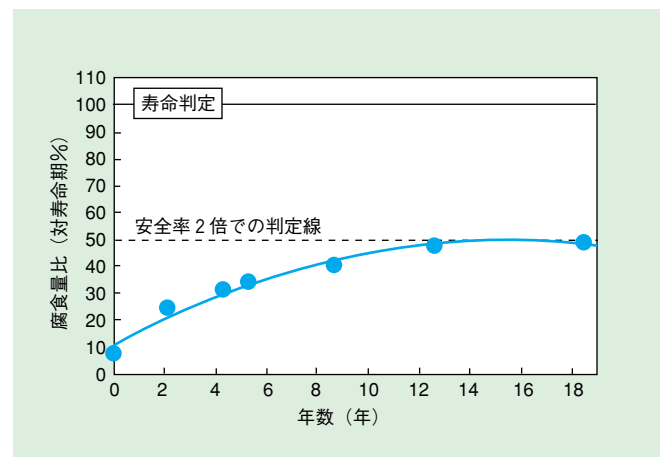


図4 PSOCベンチテストによる正極格子の腐食量変化  
Fig.4 Change of corrosion of positive grid newly designed for LL1500-W type against converted operation years.

表5 正極格子の腐食変形シミュレーションの解析結果  
Table 5 Simulation of corrosion deformation of positive grids.

項目	LL, LL-W形 (使用前)	LL形 (10年使用后)	LL-W形 (17年使用后)
解析結果			
変形量*	—	100%	60%

\*: LL形 (10年使用后) を100%とする。

表6 モジュール電池 (LL1500-W-8形) の仕様

Table 6 Specifications for LL1500-W-8 type battery module.

項目	内容	
名称	LL1500-W-8	
定格容量	1500 Ah (10HR)	
公称電圧	8 V	
公称容量	12 kWh	
設置方法	極板水平方向設置 (モジュール3段もしくは4段積み)	
外形寸法	高さ	473 mm
	幅	799 mm
	長さ	500 mm
質量	約485 kg	
期待寿命	17年 (当社推奨の使用条件下)	



図5 モジュール電池 (LL1500-W-8形)

Fig.5 LL1500-W-8 type battery module.

市浦風力発電所の基本仕様を表7に示す。本風力発電システムは、(株)日立エンジニアリング・アンド・サービス殿が開発されたものであり、750kVAのPCS (Power Control System: 系統連系制御・保護機能を持つ電力変換装置) とLL1500-W-8形電池 (72ユニット直列-2並列) で構成されたバンク (組電池の単位) 6組が風力発電機と並列で接続されている。風力発電の出力はAC22kVで、これを主変圧器により、AC33kVに変圧し、東北電力(株)殿の電力系統に連系している。蓄電池システムの最大出力は、風力発電所の定格容量の約24%で、VRLA電池、PCS盤は変電所の建屋内に設置されている。図6に市浦風力発電所の外観を、図7に風力発電所の建屋内に設置された蓄電池ユニット外観を示す。

本風力発電システムは2010年2月から実証試験を開始しており、東北電力(株)殿の出力変動緩和型の技術要件<sup>6) 7) 9)</sup>を満たすことが実証され、2011年1月時点も順調に運用中である。図8に市浦風力発電所における実際の出力変動緩和データを示す。蓄電池の入出力によって、風力発電の出力変動が緩和されたデータとなっている。

今後、蓄電池の耐久性などの検証をしていく予定である。

また、2010年9月にも市浦風力発電所と同規模である遊佐風力発電所にLL1500-W形電池を3456セル納入しており、2010年12月より実証試験を開始した。

表7 市浦風力発電所の基本仕様

Table 7 Outline of Shiura wind farm in Aomori Prefecture.

項目	仕様	
風力発電機の定格容量	15.44 MW (1.93 MW/風車 8基)	
電池	型式	LL1500-W-8
	公称電圧	8 V
	定格容量	1500 Ah (10HR)
	接続	72ユニット直列×2並列×6バンク (単電池3456セル, 10.4 MWh)
用途	風力発電所の出力変動緩和	
運用状況	2010年2月から実証試験開始	



図6 市浦風力発電所外観

Fig.6 Appearance of Shiura wind farm.



図7 市浦風力発電所の建屋内に設置された蓄電池ユニット外観

Fig.7 Appearance of battery units in Shiura wind farm.

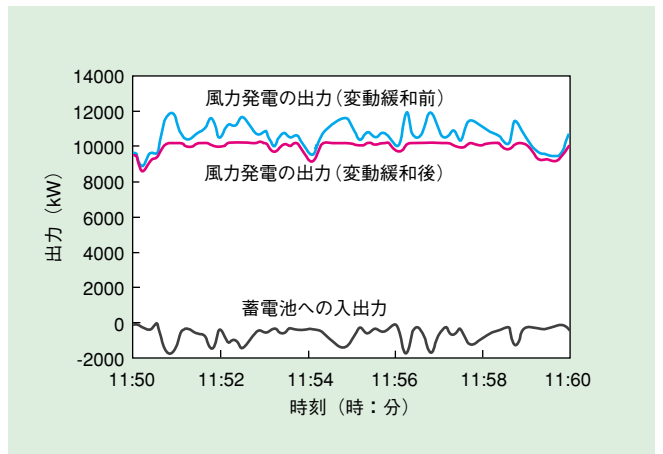


図8 市浦風力発電所における実際の出力変動緩和データ

Fig.8 Practical power output data of Shiura wind farm with and without battery for stabilization.

## 〔5〕 今後の用途展開

### 5.1 新エネルギー市場の動向

図9に新エネルギー発電電力の予想を示す。新エネルギー全体の発電電力は全世界で飛躍的に伸びると予想されており、系統電力の品質維持や新エネルギーの高効率化のため、蓄電池併設型システムの需要は国内外とも、今後大きく増加すると推測される。

### 5.2 用途展開

本開発電池は、風力発電用途だけではなく、電力系統全体を視野に入れた用途展開が必要である。今後、拡大が予想されるスマートグリッド等系統用分野への展開や、新エネルギーの導入量が多い欧州、米国等、海外へ展開を進めていく。

## 〔6〕 結 言

- (1) 風力発電の出力変動緩和用途において、長寿命化技術を確立し、期待寿命17年（当社推奨の使用条件下）を見込んだLL1500-W形電池を開発した。
- (2) 蓄電池における最終の劣化モードは正極格子の腐食であり、その腐食形態は、従来用途の粒界腐食とは異なり全面腐食であった。
- (3) 正極格子において全面腐食に対する耐久性を向上する等の改良を加え、風力発電の出力変動緩和用途における長寿命技術を確立した。
- (4) 2009年10月に市浦風力発電所にLL1500-W形電池を納入し、ウインドファーム規模の蓄電池併設型風力発電所へ制御弁式鉛蓄電池を導入した。

### 〔参考文献〕 .....

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：“平成12年度調査報告書 蓄電池併設風力発電導入可能性調査”（2002）。
- 2) 高林久顕 他：“電力貯蔵用制御弁式鉛蓄電池の開発”，新神戸テクニカルレポート，11，p35（2001）。
- 3) Hisaaki Takabayashi, et al：“Development of Value Regulated Lead Acid Batteries for Power Storage”，Proceedings of INTELEC'03, p383(2003).
- 4) 川越智夫 他：“小形サイクル長寿命制御弁式鉛蓄電池LL50-12形の開発”，新神戸テクニカルレポート，14，p19（2004）。
- 5) 高林久顕 他：“サイクル長寿命電力貯蔵制御弁式鉛蓄電池LL-S形の開発”新神戸テクニカルレポート，15，p31（2005）。
- 6) 鈴木和夫 他：“出力変動緩和型風力発電設備”第15回動力・エネルギーシンポジウム，A110（2010）。
- 7) 力武正樹 他：“出力変動緩和制御型風力発電システムと実証試験について”，日本機械学会，第20回環境工学シンポジウム論文集，412（2010）。
- 8) 五味敬芳 他：“新エネルギー導入をサポートする電力貯蔵を用いた系統安定化技術”，日立評論，92(3)，p234（2010）。
- 9) 鈴木和夫：“風力発電の蓄電池併設型出力変動緩和システム，”太陽エネルギー，36(4)，p41（2010）。
- 10) Hisaaki Takabayashi, et al：“The Application of Value-Regulated Lead Acid Batteries to wind Power Generation System”，Proceedings of INTELEC '09(2009).

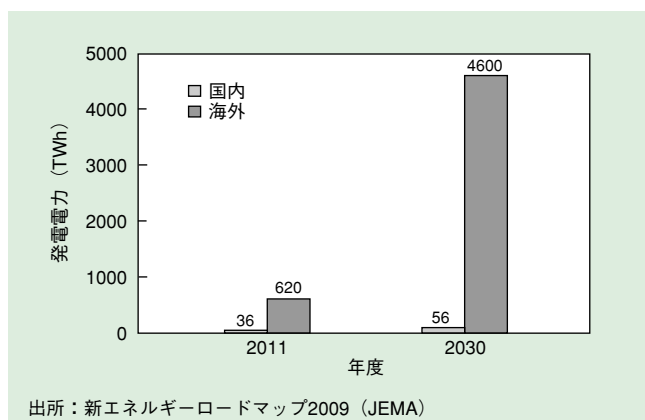


図9 新エネルギー発電電力の予想

Fig.9 Prediction of new energy generation capacity.

- 11) 向谷一郎 他：鉛蓄電池正極格子の腐食変形予測による長寿命化設計とMU，LL形電池への適用，“新神戸テクニカルレポート”，15，p23（2005）。
- 12) P.Ruetschi, et al：“Anodic Oxidation of Lead at Constant Potential”，J.E.C.S., 111(12), P1323-1330 (1964).