

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561053

研究課題名(和文) 震災対応蓄電池導入と環境負荷低減活用のコベネフィット分析

研究課題名(英文) Co-benefit analysis on battery storage system for a place of safety considering environmental load

研究代表者

岡島 敬一 (Okajima, Keiichi)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：60303533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災において非常用電源等のエネルギーシステムは十分に活かされず、被災地の避難所でのエネルギー確保に困難が生じた。震災対応に加えて平常時においても電力平準化、ピークカットへ活用することにより、環境負荷低減効果が期待でき震災対応および環境負荷低減のコベネフィットと見なすことができる。公共施設へ導入が進められている太陽光・蓄電複合システム等を対象に、非常時における停電対応能力について蓄電設備容量に基づく定量的な分析を行い、実データに基づく平常時における電力削減効果、ピークカット効果及びコスト削減効果の評価を通して、環境負荷低減コベネフィットを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：After The Great East Japan Earthquake, the introduction of a photovoltaic-battery storage system to public facilities has become active rapidly based on the contribution of the fund. In this study, we have evaluated a photovoltaic-battery system and electricity demand of a place of safety for preventing a blackout in a disaster. The probabilistic uncertainty for a place of safety with several electricity loads considering the occupancy and the equipment use has been calculated for the point of co-benefit, and the effect of the output power leveling depends on the battery capacity have also been evaluated considering the actual demand data.

研究分野：エネルギー学

キーワード：非常用電源 太陽光・蓄電池複合システム 燃料電池 CO2排出量 環境負荷低減

### 1. 研究開始当初の背景

2011年3月に発生した東日本大震災において、非常用電源等のエネルギーシステムは十分に活かされず、被災地では不自由な生活が続いた。避難所では夜間照明すら十分でなく、太陽光発電システムが活用できたという例は非常に少ない。また、被災地のみならず、首都圏でも計画停電が実施され、住宅用太陽光発電システムの多くや家庭用燃料電池システムが利用できないという、現状の分散型エネルギーシステムの弱点が露呈した。

これに対して蓄電池を備えたシステムがその対策として期待されるが、コスト面での増大だけがクローズアップされ、これまで環境負荷の面での議論は皆無といえる状況にある。蓄電池を震災対策用途に限定して導入した場合、蓄電池は非常用電源としてのシステム機能を高める一方で、製造・導入自体に環境負荷増大を伴う。加えて、長期間の未使用状態が続く状況においても自己放電による劣化のため定期的な入れ替えが必要となり、ライフサイクル面での環境負荷での不利が予想される。

蓄電池はその特性上平常時においても運用されることが望ましい。平常時に電力平準化、ピークカットに活用することで、震災時対応のベネフィットのみならず環境負荷面でのベネフィットが期待できる。これまで蓄電池導入効果の分析・評価は提案者を含め多くなされてきているが、震災対策を前提とした蓄電池導入における平常時活用のための技術特性評価ならびにライフサイクル評価からなる統合的総合評価はなされていない。

### 2. 研究の目的

東日本大震災において非常用電源等のエネルギーシステムは十分に活かされず、被災地の避難所でのエネルギー確保に困難が生じた。本提案は非常用としても活用できる分散型エネルギーシステムにおける蓄電池実装に主眼を置いた。震災対応という一点での導入を考えた場合、蓄電池製造・導入に伴う環境負荷増大が伴うため、ライフサイクル評価の面では望ましいとはいえない。震災対応に加えて平常時においても電力平準化、ピークカットへ活用することにより、環境負荷低減効果が期待でき震災対応および環境負荷低減のコベネフィットと見なすことができる。本提案はこれらの定量的分析を進め、求められる震災対策用分散型エネルギーシステムの明示化を目的としたものである。

### 3. 研究の方法

本研究提案は、震災対応に要求される蓄電池実装システム特性の分析・設計、気象データの収集補正と平常時エネルギー需要の分析、蓄電池、太陽光発電、燃料電池システムの過度特性評価、平常時における省エネルギー・省電力効果、電力ピーク負荷削減効果の定量的評価、震災対策設備投入に伴う環境負

荷増大および環境負荷低減効果の定量的評価からなる。災害時に必要とされる需要分析とシステム出力特性についての調査・設計、および気象データの収集と被災地の平常時のエネルギー需要分析を行い、平常時における省エネルギーと省電力の効果、ならびに電力のピーク負荷削減効果を定量的に分析した。

### 4. 研究成果

主要な成果として災害時を対象とした指定避難所電力需要・停電対応評価ならびに平常時を対象とした指定避難所対象施設における蓄電池導入効果、設備容量及びコスト評価研究成果を中心に示す。

#### (1) 災害時を対象とした指定避難所電力需要・停電対応評価

##### 前提条件および対象

収容人数の不確実性を検討すると共に、指定避難所における電力負荷をケース毎に設定することを目的とし、また様々な運転条件下で太陽光(PV)・蓄電池複合システムの運転シミュレーションを行い、設備容量からみた停電対応能力についての評価を目的とした。東日本大震災における事例を参考にし、主に茨城県における自治体の防災計画に基づいて検討を進めた。対象施設は、指定避難所として最も多く指定されている学校施設をシステムの導入対象として選択した。対象システムは、PV・蓄電池複合システムとした。本システムは、平常時には環境負荷低減のためピークカットに利用され、災害時には独立して避難所へ電源供給を行う。蓄電池の残存容量(SOC)管理は、平常時は100-40%とし、災害時に備えて容量に余裕を持たせる設定とした。一方で、災害時には100-20%として、自立型電源として機能するための電力を確保した状態で最大まで放電する設定とした。

非常用電源設備が電力を供給すべき日数を、東日本大震災の事例から設定した。東北電力及び東京電力管内において停電状態から復旧に要した日数は、長期間復旧しない県の場合、電力復旧率が9割近くまで達するのに1週間以上の日数を要したことが分かった。そこで本研究では、発災日から7日間(8日目)までの期間停電すると仮定して、その間にPV・蓄電池複合システムを稼働させる設定で運転シミュレーションを行った。

##### 災害時における必要負荷の検討

負荷ケースを決定するパラメータとして、使用機器の使用時間、数、種類の3つが挙げられる。使用時間に関しては、茨城県の防災計画より機器毎に使用する時間帯が決められていることから、各機器につきそれぞれ0-5(6h)、6-17(12h)、18-23(6h)とした。各時間帯における使用機器毎の電力負荷について表1に示す。使用する機器の数と種類については、使用機器数を決める収容人数のレベル(L)と、使用機器のグレード(G)を3ヶ

ースずつ設定し、全部で9通りの負荷ケースを設定した。

使用する機器の数は、1施設辺りの避難者の数に応じて変化するものとした。そこで、代表的な収容人数を100(L1)、300(L2)、500(L3)人の3通り設定し、それぞれの規模に適した使用機器数を算出した。収容人数Lの各ケースは、不確実性を持つ収容人数からみた電力負荷の指標となり、使用機器グレードGの各ケースは、運営者によって検討される防災計画からみた電力負荷の指標となる。

表1 使用機器と消費電力

グレード	使用機器	消費電力 (W)	個数	1台辺りの使用人数	電力量(kWh)			
					0-5 (6h)	6-17 (12h)	18-23 (6h)	1日 (24h)
G1	照明	25	10	200	1.5	0	1.5	3
	電話	5	1	80	0.00	0.06	0.03	0.09
	パソコン	150	1	80	0.00	1.80	0.90	2.7
	プリンター	10	1	—	0.00	0.12	0.06	0.18
	コピー機	10	1	—	0.00	0.12	0.06	0.18
	携帯電話充電	15	1	20	0.09	0.18	0.09	0.36
	携帯無線	10	4	—	0.24	0.48	0.24	0.96
G2	投光機	40	1	200	0.24	0.00	0.24	0.48
	テレビ	150	1	100	0.00	1.80	0.90	2.7
	放送設備	240	1	—	0.00	2.88	1.44	4.32
	扇風機	50	1	80	0.30	0.60	0.30	1.2
G3	空調設備	5,000	1	—	0.00	60.00	30.00	90
	その他	0	0	—	0.00	0.00	0.00	0.00
合計(kWh)					2.4	68.0	35.8	106.2

電力需要の算出に必要な収容人数の設定には不確実性があることから、本研究で最も堅く見積もったケース(L3:500人)を上回る可能性がある。そこで、収容人数の不確実性に注目して、収容人数によって決定される各負荷ケースの信頼度を評価した。モンテカルロ・シミュレーションを行った結果、収容人数で最も多いL3(500人)では、信頼度が94.6%となった(図1)。この結果は、約95%の確率で500人以下となり、想定内の負荷ケースで避難活動を行えることを意味している。その一方で、約5%の確率で500人以上の避難者が集まることで、災害時における電力需要を満たせなくなり、十分な避難活動が行えない事態に陥ることも示唆された。

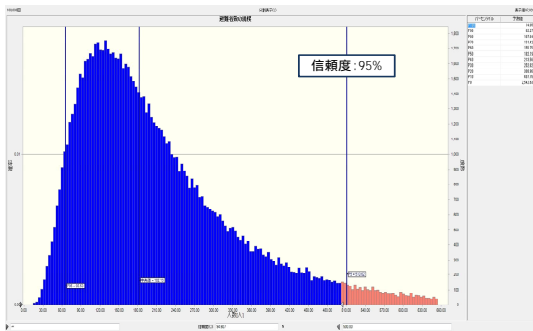


図1 モンテカルロ・シミュレーション試行結果

異なる運転条件における停電対応能力評価

PV・蓄電池複合システムを稼働させた場合の運転シミュレーション結果について図2を一例として示す。電力負荷の推移、PV出力、蓄電池の残存容量(SOC)、余剰電力、不足電力が示されている。平常時にピークカットを行い、初期状態のSOCは約0.6となっている。蓄電池は、PVの発電量が電力負荷を下回った

時に、供給を行う。仮に電力供給が負荷に対して十分で無かった場合には不足電力として示し、停電時間とした。本ケースでは、十分な蓄電池残量が無かった1日目と悪天候だった4日目で停電が起きている。その一方で、2,3日目等の他の日では、昼間・夜間双方において停電を回避している。

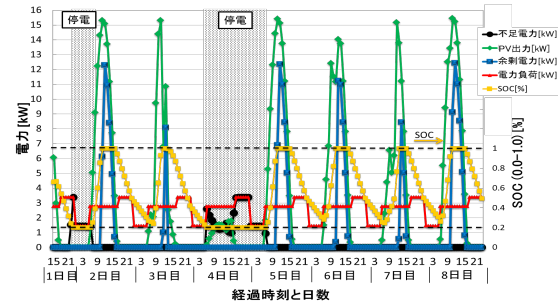


図2 PV・蓄電池複合システムの運転シミュレーション結果の一例

異なる負荷ケースの検討結果

9通りの負荷ケースに対して、異なる設備容量の組み合わせを検討した結果を見るために、図3にそれぞれの停電率を示す。図3は、それぞれの結果を使用機器のグレード(G1-3)に分割して表しており、運営者が避難活動の程度を選択する際の指標とした。縦軸の停電率は、15時発災における対象期間(176時間)に対して、停電に陥った割合を示す。同型のマーカーはPV設備容量からみた停電率の比較を示し、横軸が4通りの蓄電池容量を指していることから、それぞれ異なる設備容量の組み合わせにおける結果を示している。さらに、同色のマーカーは収容人数(L1-3)からみた停電率の比較を示し、異なる信頼度からみた結果を表している。これらより、設備容量の組み合わせごとに、9通りの負荷ケースに対してどの程度まで対応可能なかが明示された。使用機器のグレードからみると、G1では設備容量を増加させることで停電をほぼ回避できるが、空調設備ま

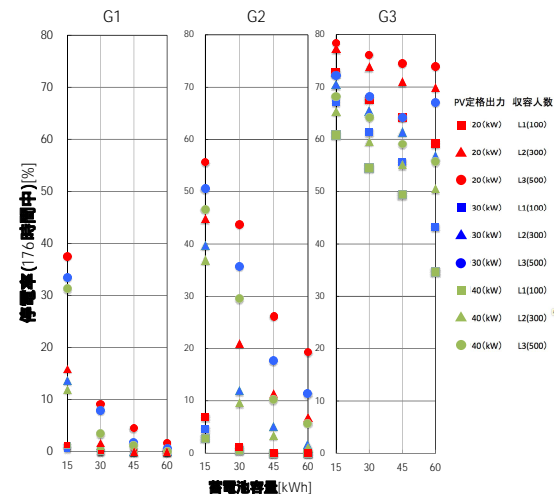


図3 異なる負荷ケースからみた停電対応能力

で使用する G3 では最も大きな設備容量を導入した場合でも 35%の期間で停電に陥る結果となった。このことから、PV・蓄電池複合システムによって災害時に空調設備を利用することは困難だと言える。

収容人数 (L1-3) の比較による不確実性を考慮した結果から、G1 の停電率について見る。最も少ない設備容量 (PV:20 kW, 蓄電池:15 kWh) の場合では、95%の信頼度で 62%の停電を回避することができる。一方で信頼度を 8 割 (L2:300 人) として見積もると、同様の設備容量の場合でも停電回避率は 84%に向上する。また、60 kWh の蓄電池を導入した場合には、導入する PV の容量に関わらず、95%の信頼度でほぼ全ての停電を回避できることが見込まれる。

## (2) 指定避難所対象施設における蓄電池導入効果、設備容量及びコスト評価

### 前提条件と対象

対象施設は災害時の指定避難所に指定されている学校施設である。対象施設のデマンドの特徴は季節によって若干異なるが、全体的に日中のデマンドが高く、夜間のデマンドが低い。また、平日と休日(冬季休業等も含む)でデマンドに大きな違いがあった。図 4 に対象施設におけるデマンド実データの一例を示す。

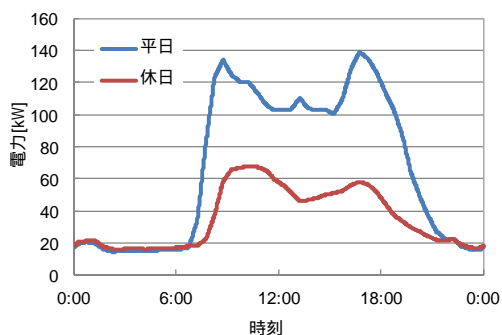


図 4 対象におけるデマンド実データの一例

### ピークカット効果および削減電力量評価結果

ベースケースにおいて天候別の比較を行った。平日、休日共に昼間削減電力量、正味削減電力量では天候により大きな差があり、晴れの場合と雨の場合では約 43 kWh の差があった。これは天候による PV 発電量の違いの影響が大きいためである。一方、平日におけるピークカット電力は天候による差はなく、晴れと雨の場合の差は 0.1 kW であった。これは 1 月平日におけるデマンドのピークは朝と夕方であり、ピーク時間帯において天候による PV 発電量の違いがほとんどないためである。休日では雨の場合のピークカット電力が他と比較して小さくなり、晴れの場合との差は 3.8 kW であった。

平日、休日ともに蓄電池容量別を増やすと昼間削減電力量は増加するが、正味削減電力

量は減少する。蓄電池容量を 45 kWh にした場合、最大で昼間ベースで 89.0 kWh、正味ベースで 59.9 kWh 削減可能であった。昼間削減電力量は蓄電池容量を 1 kWh 増やすと平均で 0.7 kWh 増加した。

一方、ピークカット電力は蓄電池容量に比例して大きくなり、蓄電池容量 45 kWh では最大で 18.5kW のピークカットが可能であった。ベースの 15 kWh の場合は最大で 12.5 kW のピークカットが可能でこれは最大デマンドの約 12%に相当した。

### コスト評価

蓄電池寿命と太陽電池システム単価を CaseA から CaseD までの 4 つのケースを想定した(表 2)。年間均等化設備費用が最大となるのは蓄電池容量 45 kWh、CaseA の時で 173.3 万円となった。昼間電力削減費用が最も高いのは CaseA で最も低いのは CaseD であり、その差は蓄電池容量を大きくすると大きくなり、最大で 21 円/kWh となった。CaseA の場合に対する各ケースの昼間電力削減費用の減少率と減少量を算出し、太陽電池単価や蓄電池寿命が昼間電力削減費用に与える影響を評価した。その結果を図 5 に示す。CaseB の減少量と減少率は蓄電池容量が増加すると小さくなった。つまり、太陽電池単価が昼間電力削減費用に与える影響は蓄電池容量が増加すると小さくなる。CaseC の減少率は蓄電池容量が増加すると大きくなった。つまり蓄電池寿命の影響は蓄電池容量が増加すると大きくなる。最も減少率が高くなった CaseD では、蓄電池容量を 45 kWh にした場合で CaseA に対して昼間電力削減費用を約 33% 減少させることが可能となった。

表 2 Case 設定

	太陽電池単価 [万円/kW]	蓄電池寿命 [年]	蓄電池単価 [万円/kWh]	5年後蓄電池単価 [万円/kWh]	太陽電池運転費 [万円/kWh/年]
CaseA	38.5	5	20	10.9	0.36
CaseB	27.5	5	20	10.9	0.36
CaseC	38.5	10	20	-	0.36
CaseD	27.5	10	20	-	0.36

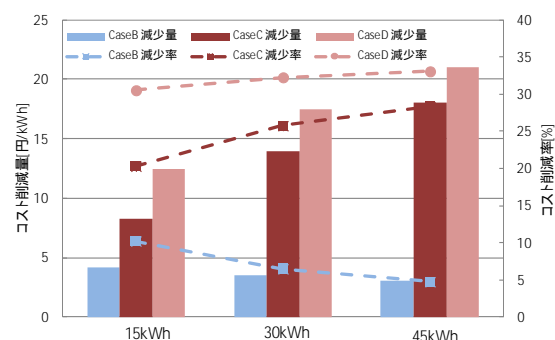


図 5 CaseA に対する減少量と減少率

各ケースのピークカット費用の比較結果については CaseA が一番高く、CaseD が一番低くなった。蓄電池容量別では 45 kWh の場合が高くなり、30 kWh と 15 kWh ではほとんど差がないか Case によっては 30 kWh の場合



がやや低くなった。追加昼間電力削減費用は CaseA, B の場合が CaseC, D と比べて約 1.4 倍となり、蓄電池寿命によって大きな差があった。追加ピークカット費用は蓄電池容量 45 kWh の場合は 30 kWh の場合の約 1.4 倍となり、ピークカットの観点からは大容量化は大きな導入コストがかかる。

#### 経済性評価

設備容量別のシステム導入後の年間総電力コストをケース別で算出した。システム導入前の年間電力コストは 868.5 万円、システム導入後は CaseA の場合で蓄電池容量 15 kWh の時が 908.3 万円、30 kWh の時が 926.4 万円、45 kWh が 954.8 万円となり、いずれの場合も年間の電力コストは上昇した。蓄電池容量 45 kWh の場合では 86.3 万円増加したことになる。電力コストの増減の各要素をグラフにしたのが図 6 である。電力コストの増加要素が正に、減少要素が負に示されている。電力コストの増加は年間資本コストによる影響が大きく、本システムを経済性のみの観点から導入するにはメリットはないが、非常用電源として導入した場合は、本システムを平常時に活用することで蓄電池容量 15 kWh の場合は年間 39.5 万円、30 kWh の場合で 58.3 万円、45 kWh の場合で 66.7 万円電力コストを削減可能となり、コベネフィット効果が明示された。

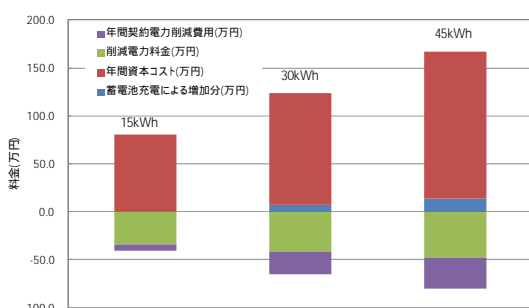


図 6 電力コストの増加要素と減少要素

### (3)まとめ

災害時運用を目的とした PV・蓄電池複合システムを対象に、複数の運転条件下で 9 つの負荷ケースに対する停電対応能力を評価した。また、平常時運用について実データを用いて蓄電池システムを導入した場合の電力削減効果、ピークカット効果及びコスト評価を行った。設定した負荷ケースは想定したい防災計画によって選択することができ、モンテカルロ・シミュレーションを行った結果より最大で 95% の信頼度がある。

本研究によって災害時対応蓄電池複合システムの導入者は、目的とする信頼度や避難活動の快適性に応じて負荷ケースを選択し、停電対応能力の評価結果を参考にすることで、適切な設備容量の検討に役立てることができる。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

Y.Akimoto, K.Okajima, Y.Uchiyama, Evaluation of current distribution in a PEMFC using a magnetic sensor probe, Energy Procedia, 2015, in press, 査読有

Y.Akimoto, K.Okajima, Experimental study of Non-destructive Approach on PEMFC Stack Using Tri-axis Magnetic Sensor Probe, Journal of Power and Energy Engineering, reviewed, Vol.3 No.3, 2015, pp.1-8, 査読有

DOI: 10.4236/jpee.2015.33001

鈴木 淳史, 岡島 敬一, 内山 洋司, 指定避難所における災害時電力需要と太陽光発電・蓄電池複合システムの停電対応評価、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、31、2015、pp.235-240、査読無

酒井 昂輝, 岡島 敬一, 内山 洋司, 学校施設における蓄電池導入効果と設備容量の評価、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、31、2015、pp.137-140、査読無

A.Nonaka, Y.Akimoto, K.Okajima, Y.Uchiyama, Evaluation of Daily Use of Batteries as Emergency Power Supply for Earthquake, Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering, 2014, pp.15-19, 査読有

Y.Akimoto, K.Okajima, Semi-empirical equation of PEMFC considering operation temperature, Energy Technology & Policy, Vol.1, No.1, 2014, pp.91-96, 査読有

DOI:10.1080/23317000.2014.972480

Y.Akimoto, K.Okajima, Modeling of PEMFC Based on a New Semi-empirical Equation Considering Operation Temperature, Proceedings of the World Renewable Energy Congress (WRECXIII), Vol.2014, No.15FC, 2014, pp.1-6, 査読有

野中 淳司, 秋元 祐太郎, 岡島 敬一, 内山 洋司, 震災対策を前提とした蓄電池導入における平常時活用のための特性評価、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、Vol.30、2014、pp.627-630、査読無

鈴木 淳史, 岡島 敬一, 内山 洋司, 避難施設における災害時電力需要と対応設備容量の検討、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、Vol.30、2014、pp.181-184、査読無

岡島 敬一, 秋元 祐太郎, 定置用固体高分子形燃料電池を用いた燃料電池自動車走行のシミュレーション評価、自動車技術、Vol.68, No.07, 2014, pp.93-97、査読無

岡島 敬一, 須川 陽平, 内山 洋司, 施設

への燃料電池導入における通常時・非常時活用の検討、第22回日本エネルギー学会大会講演論文集、Vol.22、2013、pp.330-331、査読無  
須川 陽平、岡島 敬一、内山 洋司、施設における燃料電池非常用電源導入と環境負荷低減活用の検討、エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、Vol.29、2013、pp.49-52、査読無

〔学会発表〕(計 9件)

Y.Akimoto, K.Okajima, Y.Uchiyama, Evaluation of current distribution in a PEMFC using a magnetic sensor probe、International Conference on Applied Energy (ICAEE2015), March 29, 2015, Abu Dhabi National Exhibition Center (Abu Dhabi, UAE)

酒井 昂輝、岡島 敬一、内山 洋司、学校施設における蓄電池導入効果と設備容量の評価、第31回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2015年1月27日、砂防会館(東京)

鈴木 淳史、岡島 敬一、内山 洋司、指定避難所における災害時電力需要と太陽光発電・蓄電池複合システムの停電対応評価、第31回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2015年1月27日、砂防会館(東京)

Y.Akimoto, K.Okajima, Modeling of PEMFC Based on a New Semi-empirical Equation Considering Operation Temperature、World Renewable Energy Congress (WRECXIII), August 6, 2014, University of Kingston (London, UK)

A.Nonaka, Y.Akimoto, K.Okajima, Y.Uchiyama, Evaluation of Daily Use of Batteries as Emergency Power Supply for Earthquake、International Conference on Electrical Engineering (ICEE2014), June 18, 2014, Ramada Plaza Jeju Hotel (Korea)

野中 淳司、秋元 祐太郎、岡島 敬一、内山 洋司、震災対策を前提とした蓄電池導入における平常時活用のための特性評価、第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2014年1月24日、砂防会館(東京)

鈴木 淳史、岡島 敬一、内山 洋司、避難施設における災害時電力需要と対応設備容量の検討、第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2014年1月24日、砂防会館(東京)

岡島 敬一、須川 陽平、内山 洋司、施設への燃料電池導入における通常時・非常時活用の検討、第22回日本エネルギー学

会大会、2013年8月5日、工学院大学(東京)

須川 陽平、岡島 敬一、内山 洋司、施設における燃料電池非常用電源導入と環境負荷低減活用の検討、第29回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2013年1月29日、砂防会館(東京)

〔図書〕(計 1件)

内山 洋司、岡島 敬一 他、コロナ社、「エネルギー学」への招待 - 持続可能な発展に向けて - 2014、176 (pp.126-138)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.risk.tsukuba.ac.jp/okajimablab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡島 敬一 (OKAJIMA KEIICHI)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号: 60303533

(2) 連携研究者

内山 洋司 (UCHIYAMA YOHJI)  
筑波大学・システム情報系・教授  
研究者番号: 50323275