

次世代省エネルギー光源・有機EL照明

OLED for Next-Generation Energy-Saving Lighting Applications

山江 和幸
Kazuyuki Yamae

辻 博也 キットェイションチットワルット
Hiroya Tsuji Varutt Kittichungchit

松 久裕子
Yuko Matsuhisa

井出 伸弘
Nobuhiro Ide

菰田 卓哉
Takuya Komoda

要 旨

有機EL (Electroluminescence) は、電極間に挟まれた薄膜の有機材料に電流を流すことによって発光が得られるデバイスである。照明用途では、既存の光源に対してより優れた設計自由度、薄型軽量、高応答性などが実現可能な次世代光源として期待されている。

筆者らは、独自の光学設計とデバイス化技術により、照明の重要な特性である効率・寿命の面で既存の蛍光灯型器具に迫り、演色性ではそれを上回る白色有機ELデバイスの開発に成功した。本稿では、その開発内容について述べる。

Abstract

An Organic Light-Emitting Diode (OLED) is a device composed of a thin organic film and electrodes, and emits light by current injection. OLED is expected to be the next-generation light source, because it is superior to the conventional light sources in illumination applications due to its high design flexibility, compactness, light weight, and high response.

In this paper, we report on the high-performance OLED which we have developed. This device has achieved a high Color Rendering Index (CRI), high efficiency, and long lifetime which are close to fluorescent lamp.

1. はじめに

近年の世界的な温室効果ガス削減の動向に東日本大震災と福島第一原発事故の影響も加わり、消費エネルギーの削減はますます重大な関心事になっている。中でも照明は全消費エネルギーの約20%を占める[1]ため、高効率化によるエネルギー削減の潜在的効果は非常に大きい。このような現状の中、高効率LED (Light Emitting Diode) を用いた照明器具が本格的な普及段階に入り、既存の白熱電球や蛍光灯器具と置き換わる次世代照明の柱として台頭しつつある。

有機ELはLEDと同じく次世代照明の光源として注目を集めている。有機ELとは、電極間に挟まれた薄膜の有機材料から成る発光デバイスである。LEDと同じく、陽極から注入された正孔と陰極から注入された電子が発光層で再結合することにより発光する。均一な面光源が得られるため照明器具の設計自由度が高く、薄型軽量や高応答性といった特徴も有する。有機EL照明の効率は実用化されたもので約10 lm/W ~ 50 lm/Wであるが、蛍光灯やLEDを用いた一般的な照明器具の効率 (60 lm/W ~ 80 lm/W) をキャッチアップして主照明市場へ参入するには、よりいっそうの効率改善が必要である。

有機ELの効率面の発展については近年目覚ましいものがある。一般的に、有機ELの高効率化には①材料の発

光効率向上、②有機薄膜のデバイス設計による電気-光変換効率向上、③発光層から大気中への光取り出し効率向上が必要である。このうち①と②に関してはイリジウム錯体 (さくたい) ($\text{Ir}(\text{ppy})_3$) に代表されるリン光材料系の開発、および正孔・電子注入性材料の改良などにより効率100%に近づきつつある[2][3]。一方、③の光取り出し効率については現在20% ~ 30%と低いため、改善によって大きな特性向上が期待される。

効率と並んで照明器具として重要な特性である寿命に関しても課題が克服されつつある。すでに輝度半減寿命が初期輝度1000 cd/m^2 において10万時間を超える材料が開発されており[4]、これらを用いて薄膜層構造や封止構造を適切に設計することで既存の照明器具を超える寿命を達成したデバイスがすでに報告されている[5][6][7]。

また、照明の分野では照射物体の色をどれだけ忠実に再現できるか (演色性) も重視される。その指標となるCRI (Color Rendering Index : 演色評価数)、特に平均演色評価数Raが重要な値として用いられている。CIE (Commission Internationale de L'Éclairage : 国際照明委員会) は住宅用照明としてRa>80、美術館や色検査用の照明としてRa>90を推奨している[8] (一般家庭で用いられる三波長形蛍光灯器具のRaは80前後)。有機EL材料は比較的ブロードな発光スペクトルを有するため、設計上はRaを高めやすい。

今回、筆者らは照明用途で重要な特性である効率・寿命・演色性の面で既存の照明用デバイスに匹敵、あるいは上回る性能を実現するため、光学設計とデバイス設計の両面から検討を行った。

2. 白色有機ELデバイスの開発

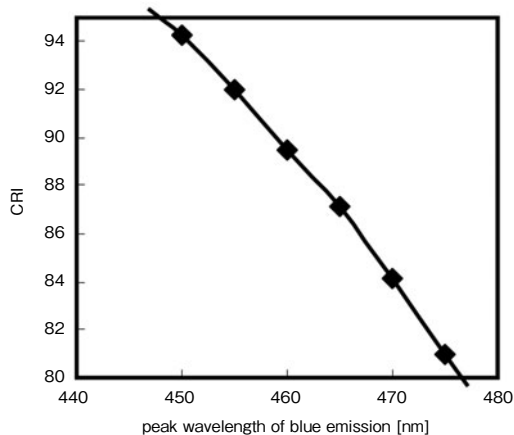
2.1 高演色性白色デバイス

[1] 材料の選定

一般に有機ELは複数の発光色を混ぜて白色光を生成する。Raの高い白色光を得るには、特定の色を発する発光材料の選定とその組合せが特に重要である。

筆者らは、赤、緑、青3色の発光材料を用いて高Raを達成し得る材料系の組合せを検討した。具体的には光学シミュレーションで白色の発光効率が最大になる場合のピーク波長とRaの関係について検討した。その結果、特に青色発光の短波長化がRa向上のために重要であることが確認された。第1図に、一例としてピーク波長615 nmの赤色材料とピーク波長525 nmの緑色材料の発光スペクトルを用いた場合の青色波長とRaの関係を示す。この結果、美術館などで求められるレベルの高演色性 (Ra>90) を達成するにはピーク波長455 nm以下の青色発光材料が必要であることを明らかにした。

青色発光材料は蛍光材料（効率25%～40%）とリン光材料（効率100%）に大別される。蛍光材料は寿命が長く、有機ELディスプレイなどの商品への採用実績もある。一方リン光材料は効率が高いが寿命が短く、特に455 nm以下の短波長領域では輝度半減寿命が数百～数千時間レベルである。以上を考慮し、有機EL照明の特徴である高演色性 (Ra>90) と長寿命を両立するために今回は蛍光材料を採用した。この結果を受けて、出光興産（株）と共同でピーク波長455 nm以下の蛍光青色発光



第1図 平均演色評価数と青色ピーク波長の相関
Fig. 1 Relation of CRI and blue emission peak wavelength

材料を開発した。

[2] マルチユニットデバイス構造

白色発光が得られるデバイス構造は (a) 単層型、(b) 色変換型、(c) 積層型の大きく次の3つの方式に分類される。

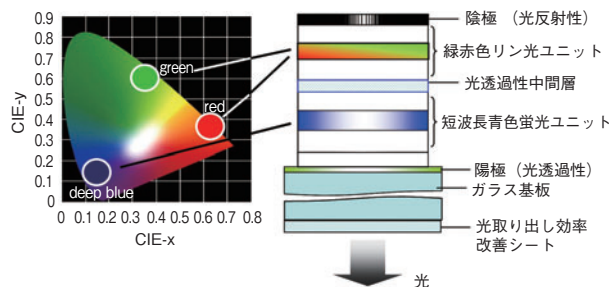
(a) 単層型は1層の発光層の中に複数色の発光材料を含む構成である。シンプルであるが、白色発光を得るために複数の材料の混合量を厳密に制御する必要があり、再現性に課題がある。(b) 色変換型は短波長（高エネルギー）の光を長波長（低エネルギー）に変換し、それらの色を混ぜて白色を発現する構成であり、LEDで一般的に用いられている方式である。しかし、エネルギー変換することにより生じるロス（ストークスロス）が大きく、特に広い波長範囲帯が求められる高演色性光源では効率面で不利である。

そこで筆者らは、(c) 積層型、すなわち異なる発光色を有する複数の発光層を含む構成を検討した。特に複数の発光層が光透過性の中間層で直列接続されたマルチユニット構造に着目した。マルチユニット構造を用いると、同一の輝度を得るのに必要な電流が少なくなるため（おおむねユニット数に反比例）、輝度寿命が改善される。そのため、高輝度化と長寿命化が同時に求められる照明用途では非常に有効である。

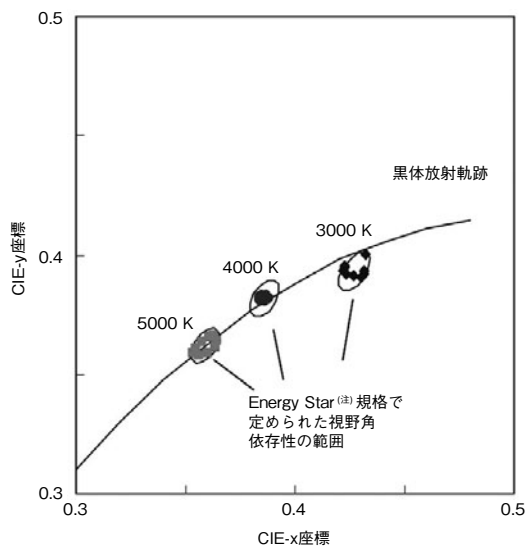
[3] デバイス設計

マルチユニット構造は照明用途に有効である反面、層数が増加するため再現性確保の懸念や干渉条件の不適合による色度の視野角依存性増大（見る角度によって色が異なる）などの問題が起きやすい。

そこで筆者らは、先述の短波長青色蛍光材料から成る発光ユニットと緑赤色リン光ユニットから成る省積層型2ユニットマルチ構造を採用した（第2図）。また、このマルチ構造について薄膜光学シミュレーションで各ユニットの発光層と反射電極との距離を適切に設計するこ



第2図 蛍光/リン光2ユニット型白色有機EL構造
Fig. 2 Typical structure of two-unit fluorescent/phosphorescent hybrid OLED



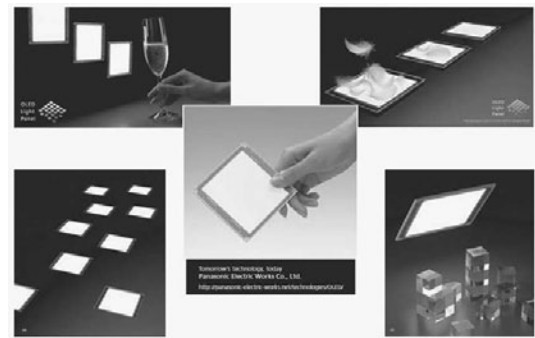
第3図 色温度の異なる各白色発光における視野角依存性

Fig. 3 Angular dependence of emission color of various white panels

とにより、視野角依存性を抑制した。

以上のコンセプトをもとに白色デバイス（発光面 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ）を試作した結果、輝度 1000 cd/m^2 における発光効率 42 lm/W 、輝度半減寿命 10 万時間、 $R_a\ 90$ 、色温度 3400 K を得た。ここで、さらに色温度の異なるデバイスの試作検討を行った。上記ですでに光学的・電気的に最適に近いデバイス設計がされているため、各層の材料など大きな変更はほとんど行わず、各ユニットの発光材料のドーピング濃度や膜厚制御により色調整を行った。その結果、種々の色温度（電球色 3000 K ～ 昼白色 5000 K ）において同等の効率かつ高演色性（ $R_a\ 90$ ）の白色が再現性よく得られることを確認した。また、各デバイスの視野角依存性（ 0 度から 80 度までの視野角に対する色座標変化）はいずれの色温度においても ENERGY STAR^(注) が規定している照明用白色光源に求められる規格[9]を満たすことを確認した（第3図）[10][11]。

以上で述べた白色デバイス構造を有する発光面 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 、厚さ約 2 mm の照明パネルを試作した（第4図）。パネルの性能は前述の小面積デバイスとほぼ同等であった。効率は既存の照明器具に及ばないものの、寿命と演色性は同等以上の性能を示し、薄型の点では優位性を得ている。また、現在市場に出ている有機EL照明に対しても輝度、効率、寿命、演色性、視野角依存性などのバランス面で総合的にトップレベルの性能を示している。以上の技術をベースにした照明用白色パネルはすでに量産技術を確認し、 2011 年9月1日に発売した。本パネルは、照明として市場に求められる輝度 3000 cd/m^2 で



第4図 白色有機ELパネルの照明応用時のイメージ

Fig. 4 Image of white OLED panels for lighting application

駆動した際に、電力効率約 30 lm/W 、寿命（輝度 70% ） 1 万時間以上、 $R_a > 90$ を達成している。

2.2 高効率・長寿命白色デバイス

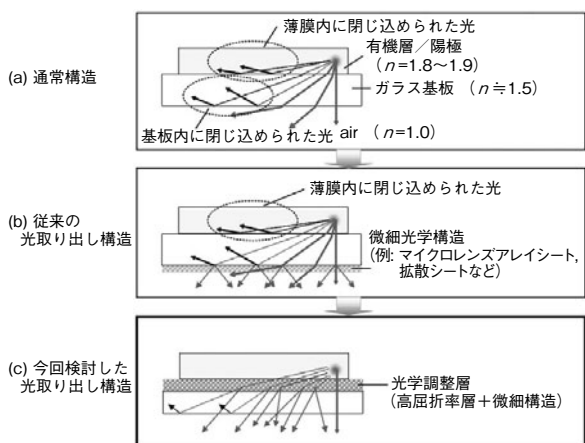
[1] 高光取り出し効率構造

光取り出し効率の向上は有機EL照明の大きな課題として残されている。有機ELは一般的に発光する部位およびその周辺部を構成する材料が高屈折率 ($n=1.8 \sim 1.9$) であるため、屈折率の異なる材料同士の界面（主に有機層とガラス基板、およびガラス基板と大気間）において特定角度以上で入射する光の全反射が生じる。全反射して内部に戻った光は薄膜内または基板内を導波して大気側に不出られず、最終的にはデバイスを構成する吸光性の材料（主に電極）に吸収される。そのため有機ELの光取り出し効率は一般的に 20% 程度に留まっている。以前はLEDも同じ課題を抱えていたが、基板微細加工と点光源の強みを生かしたマクロな光学構造を利用して全反射ロスを抑制し、光取り出し効率を 80% 程度まで高めることが可能になった[12]。

そこで、光取り出し効率の改善方法として微細な光学構造を基板表面に付与して基板と大気間の全反射ロスを低減する方法が提案されている。2.1節3項で試作したデバイスにおいてもこの方法を用いて約 $25\% \sim 30\%$ の光取り出し効率を得られることを実証している。ただし、この方法では有機層から基板への全反射ロスを低減できないため、さらなる光取り出し効率向上を期待することは難しい。

有機層と基板の界面における全反射ロスを低減するアプローチとして、基板と有機層の屈折率の差を低減する方法が考えられる。例えば基板を高屈折率化する方法、または発光層を低屈折率化する方法である。しかし、前者は有機層の屈折率 ($n=1.8 \sim 1.9$) に合うガラス基板のコストが非常に高いため実用化が難しく、後者は材料の発光効率や寿命の低下が著しい。

(注) 米国環境保護庁 (EPA) の登録商標



第5図 有機ELの光取り出し構造
Fig. 5 Light outcoupling structures of OLED

そこで筆者らは、界面における全反射ロスの低減に着目した別のアプローチを検討した。具体的には、陽極とガラス基板の界面に高屈折率材料と光角度を変換する微細構造から成る光学調整層を形成した。この光学調整層は、有機層や基板の屈折率、消衰係数などのパラメータを用いて適切な光取り出し効率が得られるように設計した。以上の光取り出し構造の概念図を、第5図に示す[10][11]。

光学調整層の挿入に伴い内部の薄膜干渉条件が変わるため、通常的设计では発光強度の低下や視野角依存性および色度の変化が生じる。そこで、この光学調整層を含む光学構造について薄膜シミュレーションを行い、各層の膜厚を調整した。具体的には、発光層から直接出る光と、電極で反射して取り出し側に向かう光の位相差をキャリア（電子および正孔）輸送層の膜厚により調整し、得られる発光強度と視野角依存性の最適なバランスがとれるように設計した。さらに輸送層膜厚の変更で生じる発光層へのキャリア注入性や色度変化の影響も考慮し、適切なドーブ濃度や発光層膜厚を決定した。

第1表 白色デバイスの特性比較

Table 1 Emission characteristics of white OLEDs

光取り出し構造	at 1000 cd/m ²	
	高取り出し光学構造 (高屈折率層+微細構造)	従来構造
電力効率	56 lm/W	42 lm/W
光取り出し効率 (推定*)	~ 40 %	25 % ~ 30 %
輝度半減寿命	>150 000 h	>100 000 h
電圧	6.1 V	6.0 V
Ra	91	90
色度座標	(0.42, 0.41)	(0.41, 0.39)
色温度	3200 K	3400 K

*光取り出し効率は直接計測が困難であるため、光取り出し構造のないデバイスをベースに算出

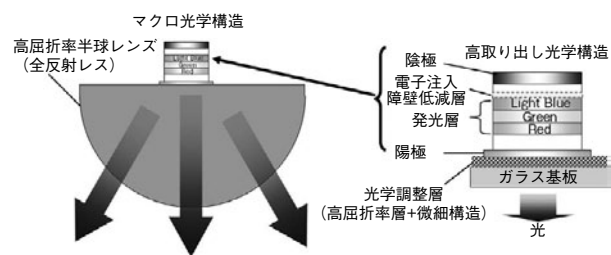
以上の取組みにより試作した高光取り出し効率の白色デバイス（発光面積25 cm²）の輝度1000 cd/m²におけるスペックを、第1表に示す。比較のため、2.1節3項で試作した白色パネルのデータも併記した。

試作したデバイスは光取り出し効率が大幅に改善されて約40%に達し、電力効率56 lm/Wを達成した。光取り出し効率が向上すれば、同じ輝度を得るために必要な電流が減少するため発光寿命も改善する。今回開発した構造は有機ELの長寿命化にもきわめて有効である。

[2] オールリン光白色デバイス構造

ここまで、青色蛍光発光層と緑赤色リン光発光層から成るマルチ構造の検討結果について記述した。ここで既述のとおり、青色もリン光材料に変更することによりさらなる高効率化が可能である。しかし455 nm以下のリン光材料は寿命が非常に短い。そこで今回は、現時点で実用化レベルの寿命が見込めるライトブルー（ピーク波長約475 nm）のリン光材料を用いた。まず基本特性を確認するために積層型シングルユニット構造を採用した。次に、電子輸送層から青色発光層への電子注入効率を改善するため電子注入障壁低減層を挿入して低電圧化を試みた。さらに、上記で内部発光効率を最大限に高めたデバイス構造に対し、2.2節1項で開発した高光取り出し構造、およびLEDと同じように点光源化で全反射ロスを完全に抑制したマクロ光学構造（第6図）を組み合わせた。

試作したデバイスを評価した結果を以下に述べる。電力効率はマクロ光学構造において128 lm/Wに達した。全反射ロス抑制と電子注入障壁の低減による電圧低下が効率向上に大きく寄与した。面光源のマクロ光学構造は大型化に伴って分厚くなり実用化が難しいが、開発した有機ELデバイスは非常に高い効率ポテンシャルを有することを示した。さらに、開発した実用化向け高光取り出し構造との組合せにおいても65 lm/W ~ 80 lm/Wの効率が得られた。これは既存の蛍光灯照明器具の効率（60 lm/W ~ 80 lm/W）に迫る性能である。今後さらに全反射ロスを低減する光取り出し技術を開発してマクロ光学構造の効率に近づければ、主照明分野へ参入するこ



第6図 オールリン光白色素子で検討した光学構造

Fig. 6 Evaluated optical structures of all phosphorescent white OLEDs

特
集

とも十分に期待できる。

寿命については、1000 cd/m²で1～3万時間程度であった。主照明分野へ参入するには既存の照明器具と同等以上、例えば、2.1節3項で示した白色デバイスの寿命スペック（3000 cd/m²で輝度70%における寿命1万時間）が求められる。試作したデバイスの寿命をこの条件に換算すると現状は約500時間～1500時間に過ぎない。今後寿命を改善するためには青色リン光材料の開発が必須である。また、マルチユニット構造との組合せなども有効と考えられる。

演色性については、用いた青色材料が長波長のため、先の蛍光／リン光マルチ構造より低下し、既存の三波長型蛍光灯と同等レベルの値（Ra>80）であった。今後Ra>90の演色性を達成するために、短波長リン光青色材料の寿命を改善することが重要課題である。

以上の結果をまとめたものを、第2表に示す。

第2表 オールリン光白色デバイスの特性比較

Table 2 Performance of all phosphorescent white OLEDs

デバイス構造	長寿命タイプ	低電圧タイプ (電子注入障壁低減型)	
		高取り出し光学構造 (高屈折率層+微細構造)	マクロ光学構造 (高屈折率半球レンズ)
電力効率	65 lm/W	80 lm/W	128 lm/W
光取り出し効率	～40%	～40%	～60%
輝度半減寿命	>30 000 h	～10 000 h	～20 000 h
Ra	85	83	82
色度座標	(0.44, 0.43)	(0.43, 0.44)	(0.41, 0.43)

3. まとめ

有機EL照明の高演色化を実現する短波長青色蛍光材料とそれをを用いた白色マルチユニット構造を開発した。これに独自の光学設計に基づいて開発した高光取り出し効率の構造を取り入れ、発光効率56 lm/W、寿命15万時間以上、Ra 91の白色デバイスを実現した。また、次世代の高効率材料である青色リン光材料を用いたオールリン光白色デバイスでは発光効率は80 lm/Wに到達した。これらの効率は既存の蛍光灯型器具効率（60～80 lm/W）に迫る値である。今後はオールリン光素子の長寿命化、およびさらなる光取り出し効率の向上によって主照明分野への展開をねらった開発を進める。

本開発の主たる部分は出光興産（株）、タツモ（株）、長州産業（株）、国立大学法人 山形大学、青山学院大学と共同で実施しているNEDO「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」プロジェクトにおける開発成果である。また、本開発に対する各種材料の御供給に関し、新

日鐵化学（株）、Universal Display Corp.、その他各種材料・装置などのご協力をいただいた各社様に謝意を表します。

参考文献

- [1] “Light’s labour’s lost -- policies for energy-efficient lighting,” International Energy Agency, 2006.
- [2] M. A. Baldo et al., “Very high-efficiency green organic light-emitting devices based on electrophosphorescence,” Appl. Phys. Lett. 75, pp.4-6, 1999.
- [3] C. Adachi et al., “High-efficiency organic electrophosphorescent devices with tris (2-phenylpyridine) iridium doped into electron-transporting materials,” Appl. Phys. Lett. 77, pp.904-906, 2000.
- [4] H. Yamamoto et al., “High efficiency and long-lived green phosphorescent OLEDs,” Proceedings of IDW’09, pp.435-438, 2009.
- [5] T. Nakayama et al., “Development of phosphorescent white OLED with extremely high power efficiency and long lifetime,” SID 2007 Int. Symp. Digest Tech. Papers 38, pp.1018-1021, 2007.
- [6] N. Ide et al., “White OLED devices and processes for lighting applications,” Proceedings of SPIE vol.7722, 2010.
- [7] T. Komoda et al., “High efficient OLEDs and their application to lighting,” Journal of Light and Visual Environment, vol.32, no.2, pp.75-77.
- [8] “Panasonic ランプ総合カタログ 2011年度版,” p.244.
- [9] “ENERGY STAR program requirements for solid state lighting luminaires,” Eligibility Criteria – ver.1.1, 2008.
- [10] T. Komoda et al., “White OLEDs for next generation solid state lightings,” Proceedings of IDMC’11, Session 23-02, 2011.
- [11] T. Komoda et al., “High performance white OLEDs for next generation solid state lightings,” SID 2011 Int. Symp. Digest Tech. Papers 42, pp.1056-1059, 2011.
- [12] オスラム社プレスリリース (Apr.22.2010), “Bringing LED efficiency to new heights – OSRAM’S UX:3 chip technology,” http://www.osram-os.com/osram_os/EN/News_Center/Spotlights/Technology/Bringing-LED-Efficiency-to-New-Heights-OSRAMS-UX3-Chip-Technology.html, 参照 Dec.05.2011.

執筆者紹介



山江和幸 Kazuyuki Yamae
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Panasonic Eco Solutions Co.,
Ltd.



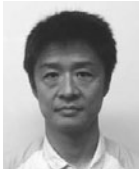
辻 博也 Hiroya Tsuji
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Panasonic Eco Solutions Co.,
Ltd.
博士（理学）



キットティシュンチットワルット Varutt Kittichungchit
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Panasonic Eco Solutions Co.,
Ltd.



松久裕子 Yuko Matsuhisa
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Panasonic Eco Solutions Co.,
Ltd.
博士（工学）



井出伸弘 Nobuhiro Ide
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Panasonic Eco Solutions Co.,
Ltd.
博士（工学）



菰田卓哉 Takuya Komoda
エコソリューションズ社 技術本部
Engineering Div., Panasonic Eco Solutions Co.,
Ltd.
博士（工学）