

# DC 給電のモジュール式 SSL がもたらす 効率と柔軟性

スコット・ツイーマン、ウィリアム・リヴシー、ウィリアム・エヴァンス

モジュール式のLED照明にDC配電を組み合わせることで、設置が容易になり、効率が高くなり、建造環境に独自の外観をもたせることができるといったメリットが得られる。

AC/DCドライバを使用する従来型のLED搭載製品が、照明市場で成功を収めているが、DCモジュール式照明を使用してより効率的に照明を設計すれば、多くの応用分野にそれ以上の効果を提供できる可能性がある。本稿では、DCモジュール式固体照明(SSL: Solid State Lighting)を実現する1つのアプローチを取り上げ、効率が高く、設置しやすく、建造環境に直接組み込めるといったそのメリットを紹介する。さらにその概念は、商用屋内照明の基本要素としての最終照明製品に対する認識を根本から覆し、かつてないほどのメリットを環境にもたらす可能性がある。

DCモジュール式照明は、複数の低電圧DCゾーンで構成される。各ゾーンには、単一の大きな専用照明器具に代わって、複数のモジュール式で可動式のSSL要素が含まれる。単目的の照明器具を取り除き、低電圧のDCモジュールを使用することで、エンドユーザーはもう照明に恐れを感じることなく、その設計、設置、適応にこれまでよりも気軽に参加できるようになる。専用照明器具と照明用の高電圧ACをなくすことにより、連鎖的に一連のメリットが得られる。

LEDの効率と技術の進歩に伴い、AC給電の大型照明器具は、もはや最良で最も効率的な照明ソリューションでは

なくなっている。本稿では、LED、インターコネクト(相互接続)、ディフューザ、発光面(LES: Light Emitting Surface)、ヒートシンクを1つのセラミック要素にまとめた、異なる種類のSSL光源を紹介する。LESがプライマリかつ唯一のヒートシンクであるこの光源は、照明器具なしで使用できる。米ゴールデンアイ社(Goldeneye)が提供するこの「Airelight」モジュール設計の詳細については、LightFair Internationalで発表され、LEDs Magazine ウェブサイトの最近の記事でも取り上げられている(<http://bit.ly/1U4Zrh1>)。

本稿では、上述のモジュールとDCモジュール式照明に基づくいくつかの事例を紹介する。このようなモジュールは、エネルギーと材料の両方の面で効率的である。例えば、Airelightモジュールは、60g未満の材料で1800ルーメン以上を達成する(30lm/g)。この光源は、厚さわずか1/4インチ(約6mm)、幅1インチ(約2.5cm)、標準的な長さは2フィート(約61cm)である。また、天井や木材といったあらゆる建築材料に安全に埋め込むことができる(図1)。

## モジュール式のメリット

モジュールをベースとする照明システムには多数のメリットがあるが、その筆頭が柔軟性である。この照明シ

ステムは、エンドユーザーのニーズの変化に応じて簡単に目的や配置を変えることができる。器具に依存しないこの照明によって、エンドユーザーは、専用の照明器具や一般的な建築材料の制約にとらわれることなく、独自のニーズに合わせて照明をカスタマイズして構築することができる。照明システムの初期設置時だけでなく、設置直後に変更が必要になった場合でも、この柔軟性が得られる。

このモジュールは、物流面でもメリットがある。1万2000ルーメンの照明システムで総重量は2ポンド(約900g)未満で、米国内のどの地域にも空輸で2日で配送でき、送料は14ドル未満である。顧客はモジュールを大量購入することで、標準化のメリットを享受しつつ、施設内のさまざまなスペースにクリエイティブな方法でモジュールを活用することができる。必要ならば、従来の照明器具を模倣する形で設置することもできる。DCモジュール式照明のコンポーネントは、究極的にはこれまでよりも低いコストで、製造、流通、購入、設置、リサイクルが可能で、あらゆる照明分野に適応させることができる。

## 電氣的メリットと機械的メリット

また、DCモジュール式照明には、電気設備、配電網、機械設備の面でもメリットがある。最終的には、作業員



図1 DCモジュール式照明は、ほとんどすべての一般的な建築材料に対して、表面に取り付けたり、埋め込んだりすることができる。

の安全性が高まる。クラス2、24VDCの配電は、120Vまたは277VACの配電よりも本質的に安全性が高いためである。さらに、7500平方フィート(約697平方メートル)の面積を照らすのに、総重量10ポンド(約4.5kg)未満のモジュールの方が、合計で500ポンド(約227kg)にもなるSSL照明器具よりも、はるかに扱いやすく、設置もしやすい。

DCモジュール式照明のメリットを、以下にまとめる。

- ・ クラス2のDC配線を利用できる柔軟性
- ・ 照明器具のパラダイムの範囲内でも範囲外でも動作可能
- ・ 標準的な高電圧のAC給電システムを設置するのは困難な場所でも設置可能
- ・ モジュール式コンポーネントにより、さまざまな応用分野の間の標準化の

レベルを引き上げられる可能性がある

- ・ 照明システムの設置を簡素化する可能性がある
  - ・ 照明システムを構成する各器具での変換に起因する、AC-DC変換による電力損失を低減する可能性がある
  - ・ 電源のDC側での調光を簡素化
  - ・ 市場に今日存在する大多数のLEDライトエンジンが本来はDC電源を使用するので、SSLに自然に適合する
- またDCモジュール式照明は、現時点で簡単に実装できる。さらにこの方式は、建物全体で完全にDC配電を利用するという多くの人々が望ましいと考える状態と、現状との間のギャップを埋める上で役立つ可能性がある。実際、集中変換による効率の向上、太陽光発電などの再生可能エネルギーとの互換性、コンピュータやサーバなどのデバイスとのDCの相乗効果が、建物

におけるDC配電網を支持する要因となっている。LEDs MagazineでもDC配電網に関するいくつかの記事を掲載してきた。例えば、2014年の特集記事では、太陽光発電とDCを利用してオフィスシステム全体に給電する銀行を紹介した(<http://bit.ly/1qYW9DC>)。

### 従来の照明器具との比較

この議論を検討する上で、LED搭載製品を含む従来の照明器具との違いを明らかにしておいた方が良いでしょう。照明器具は昔から、AC電圧からユーザーを保護すること、高温の光源や電源から建築材料を保護すること、特定の配光を実現することという3つの主要な機能を備える、大きく、重く、ルーメン出力の高い製品として設計されてきた。低電圧のDCモジュール式照明ならば、上述のとおり、最初の2

つの機能はもう必要なくなる。

配光については後ほど説明するが、ここではまず、大型の高出力照明器具が、照明システムとして広く普及している理由を明らかにしておこう。以前は、設置コストと市場への流通経路の観点から、照明を少数の大型器具に集約することが理にかなっていた。標準的な設置コストは、照明器具のコストの2～3倍だった。したがって照明器具が少ないほど、設置数が少なくなり、コストを抑えることができたのである。

残念ながら、大型照明器具は、部屋全体に均等に光を分配したいと考えた場合に、本質的に効率が低い。この照明の欠点は、部屋全体の照明レベルに大きなばらつきが生じてしまうことである。DCモジュール式照明ならば、照明デザイナーや仕様決定者が、光源をスペース内に均等に分散させることができ、本質的に均一性に優れた光レベルが得られる。

## 市場における障害

残念なことに、器具ベースの照明と同じだけ昔から存在する主要インフラを変更するのはかなり難しい。米エネルギー省(DOE: Department of Energy)とEnergy Starなどの市場変革プログラムは、このインフラを完全に変えるのは難しいことを認識し、従来の照明器具のルックアンドフィール(外観と操作性)を模倣するか、従来の照明とプラグアンドプレイ方式で互換性のあるSSLプログラムを推進してきた。この方針には、さらなる効率と柔軟性を生み出す可能性のある真に革新的なアプローチを抑制してしまうという問題点がある。

その典型的な例が、カリフォルニア州の奨励プログラムである。このプログラムでは、蛍光灯のトロファ照明を、

似た外観のSSLトロファ照明に取り替えた顧客または企業に対し、照明器具あたり100ドルが奨励金として支払われる。しかし、DCモジュール式照明は、蛍光灯のトロファ照明とは外観が似ていないので、100ドルの奨励金受給の対象にはならない。つまり、規制当局や役所が優れた手法を選定しようとする場合に、より革新的な手法は不利になってしまうのである。

政府による交換プログラムの根本的な欠陥は、既存の照明デザインが最適だという誤った前提に基づいている点にある。実際には、分散型のDCモジュール式照明を採用すれば、単にLEDに変換するだけよりも、さらにエネルギーを節減することができる。また、これらのプログラムは、大きく重い照明器具を製造するために必要となる余分な原材料に伴う隠れたコストや環境への影響と、その流通、出荷、パッケージ、安全性にかかるコストも見落としている。

## DCとLEDの融合

しかし、障害があるとしても、DCモジュール式照明の導入を諦めるのはあまりにも惜しい。この手法は、LEDに固有の性質に基づいて照明を設計することによって、サステナビリティ(持続可能性)の主要原則であるReduce(減らす)、Recycle(リサイクルする)、Reuse(再利用する)に対応している。LEDのいくつかの主要な特性と、従来の照明器具とは切り離されているという性質を考えてみよう。LEDの寿命は、モデルチェンジや目的変更が必要になる時期よりも長い。LED搭載照明器具は簡単には再利用できない。しかし、モジュールなら再利用可能だ。AC電源がなければ、LEDを製造するために、1ルーメンあたりに必要な材

料は非常に少ない。20lm/gを超える出力が達成できる。前述のとおり、LEDは、携帯電話やテレビ、家電製品など、今日のほとんどの電気機器と同様に、基本的には低電圧のDCデバイスである。

実際、われわれはACよりもDC電源を使用する方が適した機器に囲まれている。問題は、ほとんどすべてのビルや家屋などがAC用に配線されていることである。しかしここで、すべての照明がDC給電だったらどうだろうか。他の地域に適応させることはできるだろうか。照明は、屋根裏部屋を含めてすべての居室に必要である。照明をACからDCに移行させることは可能なのだろうか。これまで、各照明器具で100～1000Wの電力が消費されることから、照明にはAC電源が必要で、それに伴うコストや安全性の問題を考慮する必要があった。現在、ほとんどの照明器具の消費電力が10～50Wである。これは、これまでの技術と市場ドライバ(推進要因)がもはや有効ではないという、典型的な破壊的事象である。

## DCモジュール式照明の事例

次は、事例を紹介しよう。最もシンプルなDCモジュール式照明システムは、何年も前から既に台所に設置されている。キャビネットの下に取り付けられた低電圧のカウンター照明である。これらのシステムは、バックライトをベースとしたものが多く、設置場所に一連のホットスポットを生成していた。このような初期のDC光源は、効率、サイズ、ルーメン出力に問題があった。一方、前述の直線形のSSLモジュールは、単一要素で少なくとも500～1500ルーメンの均一性に優れた光を出力可能で、非常に薄型の設計

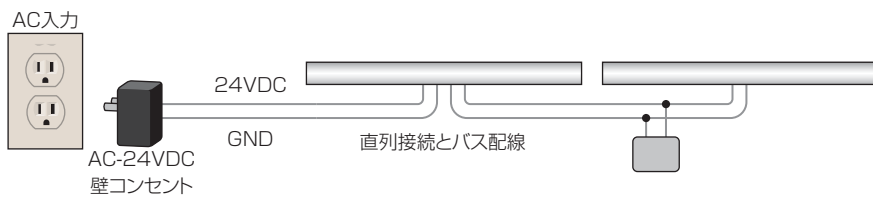


図2 棚やキャビネット下に設置された照明は、直列接続またはDCバスを介して接続可能なDC給電照明の1例である。

が可能である。

図2は、DC給電の直線形モジュールが、カウンターまたは棚の下に設置されている様子を示している。DC電源(壁コンセント)によって定電圧出力が供給される。この例には、電源に直列に接続された2本の直線形モジュールが示されているが、実際には、モジュールは並列接続で実装される場合が多く、DC入力までの部分が直列接続となる。

モジュールは、電源の24V出力が、モジュール内の直列に並んだLED列の順方向電圧に対してちょうど十分になるように設計されている。電圧を低くすることにより、LEDデバイスのIV(電流/電圧)曲線の非常に低い部分でLEDが動作し、最適な効率を得られるようにしている。図には、DCバスによって複数のモジュールセットが接続可能であることも示されている。電源とモジュールの間に配置されたパルス幅変調(PWM:Pulse Width

Modulation)の調光器によって調光機能が実装されている。

高いルーメン出力が得られる直線形モジュールは、従来のキャビネット下のタスク照明に変化をもたらす。例えば、Airelightの場合は、2本の24インチ(約61cm)のストリップ照明で750lm/ftが達成可能で、厚さは1/4インチなので表面に取り付けたり、木材に埋め込んだりすることができる。米プリンストン大(Princeton University)のウッドショップでは、このコンセプトを実証するために埋め込み実装を行った。またこの照明には、近所で調達した取り付け台が使用できるので、自由なカスタマイズが可能であると同時に、同梱されている以外のもので使用して自由に取り付けを行うことができる。

### マルチゾーンシステム

次は、さらに複雑なSSLシステムについて説明する。プリンストン大は、

モジュールを使用してオフィス用に独自の照明システムを構築した。天井に取り付けるウォールウォッシュ(壁面)照明、間接天井照明、棚に取り付ける埋め込み型タスク照明、ペンダント照明で構成されている。システム全体は、単一の24VDC電源または定電圧のLEDドライバによって給電される。

図3に、システム接続図を示す。LEDドライバによって基本的にすべての直線形モジュールが並列に接続される。しかし、このシステムでは、モジュールがゾーンに分割されており、各ゾーンにはそれぞれ専用の米イルムラ社(Illumra)製調光器がある。イルムラ社製の調光器スイッチには、バッテリーの代わりにエナジー・ハーベスティング(環境発電)技術が採用されており、スイッチを押したときに、スイッチから無線コマンドを調光器に送信するための十分なエネルギーが生成されるようになっている。この製品は、EnOceanアライアンスの無線規格に準拠している。図には2つのゾーンが示されているが、実際のプリンストン大の事例では、4つのゾーンが設けられている。

システムを新規に設置する場合は、DC電力を送電する低コストの配線を敷設することができる。プリンストン大の事例では、建物内の既存のAC配線をDC送電用に変換することにより、新たな配線を不要とし、銅線の再利用が行われた。

### 複雑な小売向けシステム

さらに複雑な例として、ニュージャージー州バーナーズビルにあるBravoという高級AV機器販売店では、モジュールを使用したDCベースのシステムが店舗全体に導入されている(図4)。8つのゾーンからなるこのシステムでも、すべてのモジュールに必要な電流

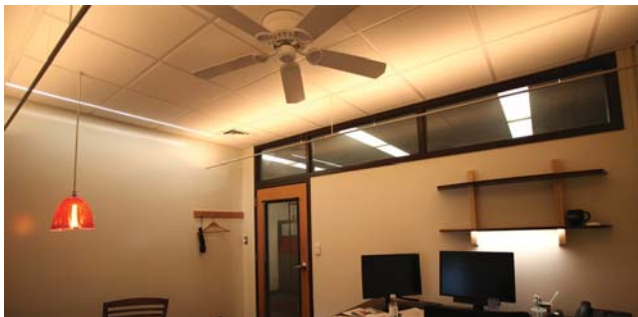
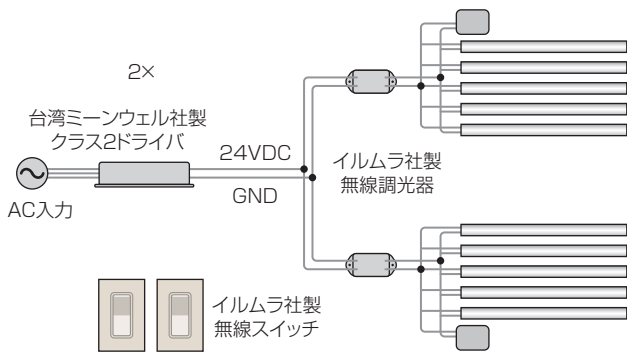


図3 単一電源で給電されるマルチゾーンシステムには、照明の個々のゾーンや異なるレイヤを制御する複数の調光器を装備することができる。

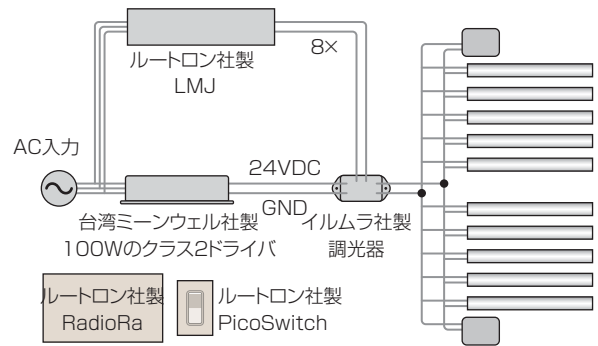


図4 このAV機器販売店のように、小売店舗に実装されるDCモジュール式照明は、さらに多くのゾーンに拡張可能で、複雑な環境で実証済みの無線ネットワークが利用できる。

を供給できるドライバを使用するならば、先ほどの事例と同様にドライバは1つでよい。8つのゾーンでは、カスタムメイドの直線形照明が天井、商品プラットフォーム、壁に埋め込まれており、照明としてだけでなく、音響用壁パネルに隠されたスピーカーにアクセントを添える役割も果たす。このシステムにはその他に、フロントウィンドウ照明とカウンター下照明、そして倉庫、トイレ、作業エリア用の吊り下げ式天井照明も含まれている。

8つのゾーンからなるこの実装を支えるのは、高密度な照明システム用に設計された、さらに堅牢な無線制御システムである。8つのゾーンのそれぞれに、米ルutron社(Lutron)製の無線ネットワーク「RadioRa」に対応する同社製のRF調光モジュール「LMJ」が装備されている。LMJモジュールから、0～10Vの調光信号がイルムラ社

製調光器に送信され、調光器において調光制御が各ゾーンのDC電力のPWMに変換される。ルutron社製RadioRaのさまざまな制御が、このシステムで利用できる。

システムのDC側で調光機能を実装することにより、このシステムでは、位相カット調光器やトライアック調光器などの従来のAC調光技術に伴う調光の問題は一切生じない。その上、1%までの調光が可能であるように実装されている。また、この店舗では、システムに変更を加えたり新しい照明モジュールを追加したりして、実装を進化させていくことができるので、このプロジェクトはDC方式の柔軟性を実証しているといえる。

### データセンター照明

DCモジュール式システムは、適切な電源を選択すれば、商用施設や工業

施設のさらに広いエリアを対象にその規模を拡大することができる。その1例が、プリンストン大の近くにあるITデータセンターである。主にサーバーラック間の通路として使われているデータセンターの3000平方フィート(約279平方メートル)のエリアを照らす照明として、直線形モジュールが使用されている。同じモジュールが、廊下とオフィスにも使用された。

図5に、システムの基本構成図を示す。ここでは、米ネクステック社(Nextek)製のマルチチャンネルの定電圧電源が使用されている。ネクステック社は、マルチチャンネル電源システムを専門としており、照明とITシステムの両方に対するDC電源を対象とするEMerge AllianceのDC配電システムを支持する中心的な企業である(<http://bit.ly/1lgXrSV>)。ネクステック社がこのシステムに提供した電源

は、Emergeシステム用に設計されているが、24V、100Wのチャンネルに対応する任意のシステムで簡単に使用することができる。

このデータセンターでは、サーバラックエリアの20フィート（約6m）の距離にわたって直線形モジュールが並べて設置された。この事例は、機械的な柔軟性を示すものである。モジュールはマグネットによって、天井から吊り下げられたそれぞれ1本の支柱でできた梁に取り付けられている。オフィスと廊下では、T-Gridの天井にモジュールがマグネットで取り付けられた。低コストの2線式配線がモジュールまで敷設されている。

## プロジェクトの費用

上述のすべての事例において、DC方式の照明によって、エネルギーと総所有コスト（TCO：Total Cost of Ownership）の両方の面でコストが削減された。TCOには、設置、流通、出荷、配線、リサイクル、使用原材料、安全性などのライフサイクルコストが含まれる。SSL業界ではこれまで、発光効率（ワット当たりのルーメン数）が重視されてきたが、現在ではより広い視野でこれを捉える必要がある。

ここまで説明してもまだ、なぜDCに移行するのかと疑問に思うかもしれない。コストを削減するため、というのが実際的な回答である。しかしDCの利用が今後増加するであろう理由は他にもあり、DCモジュール式照明は移行手段になる可能性がある。また、単なる省エネ効果にとどまらず、環境に対する影響という点で見ても、実質的な理由がある。

## SSLによる改修と環境

エネルギー効率は高いが、それでも

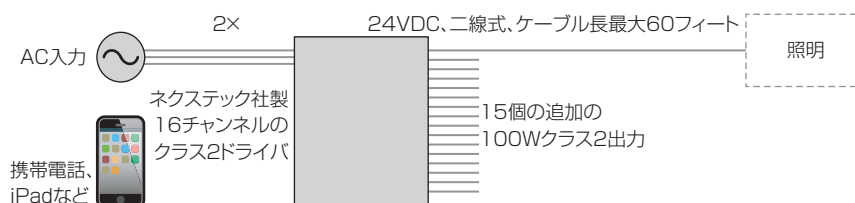


図5 データセンターにおいて、マルチチャンネルドライバによって給電され、天井梁にマグネットで取り付けられた直線形モジュール。

SSLに移行することによって環境への悪影響は生じる。北米で天井に取り付けられている500億ポンド（約2268万トン）もの照明器具が、その必要もないのに500億ポンドのSSL器具に置き換えられている。

一定の面積を照らす照明に必要な材料を比較してみよう。12個の直線形モジュールと1つのドライバ、そして基本的な配線によって、100Wで1万2000ルーメンが達成できる（図6）。ここで、蛍光灯システムと比較してみる。蛍光灯システムには、3つの照明器具に金属やプラスチック材料が必要で、それ以外にバラストと6つの蛍光管、そして複雑な配線も必要だが、それでも200Wで6000ルーメンしか出力できない。器具ベースのSSLならば、発光効率の不整合を調整することができるが、それでもモジュール式の場合よりもはるかに多くの材料が必要になる。

さらに、従来の照明器具ベースの方式には、深刻な火災の危険性が伴う。火災が発生すると、照明は直ちに天井にある唯一かつ最大の燃料源となる可能性がある。UL/NISTの燃焼試験によると、家庭や職場にプラスチック製のものが増えたことに主に起因して、この数十年間で火災発生時の避難可能時間は8分の1に短縮しているという。また、火災で生成される煙の毒性を定量化するための標準規格は存在しない。残念ながら、通信業界で経験上明らかになっている燃料負荷と毒性に関する知識が、照明業界ではほとんど考慮されていない。DCモジュール式照明ならば、本稿で説明したように、従来の器具ベースの照明の1/10の材料で照明システムを構築することができる。また、これらの照明は火災で燃焼せず、100%リサイクル可能で、危険物質を全く含まない。



図6 DCモジュール式照明は、従来の蛍光灯照明や、器具ベースのLED照明と比べても、必要な材料という点で格段に効率が高い。

## 立ちはだかる障害

さまざまなメリットを備えるモジュール式照明だが、障害が残っている。主にDesignLights Consortium (DLC) などの市場変革プログラムや、場合によっては政府の規制プログラムが、障害の根源となっている。

例えばDLCは、補助金給付対象の製品について、従来の照明器具を念頭に設けられた、特定のカテゴリと性能基準だけを義務付けており、それがイノベーションの妨げとなっている。より革新的な照明設計を採用すれば、エネルギーを節減できるだけでなく、北米だけでも400億ポンドを超える原材料を節約することができる。

## 結論

包括的なアプローチで照明を構築す

る場合は、エネルギー消費量だけでなく、サステナビリティのすべての原則 (Reduce, Recycle, Reuse) を検討するべきである。DCモジュール式照明は、原材料を減らし (Reduce)、完全にリサイクル可能で (Recycle)、設置場所におけるニーズの変更に応じて本質的に再利用 (Reuse) または「別の目的に再利用」 (Repurpose) 可能と、3つすべての原則に対応することができる。

DCモジュール式照明は、安全性、設置しやすさ、コスト削減といったメリットを備えるDC配電網に、照明器具に置き換わる持続可能な光要素を組

み合わせる。このようなシステムは本質的に、設置と使用が容易となる。

エジソンの時代にLEDがあったとしたら、彼は2つの基本特性を持つ光源を設計したにちがいない。つまり、DCを利用し、最小限の原材料を使用する光源である。今日でも、白熱電球は30lm/gの出力が可能であるのに対し、標準的な従来型のLED照明器具はわずか1lm/gである。本稿の事例で使用されたDCモジュール式照明は、最大で50lm/gを達成する。エジソンはきっと、DCモジュール式照明を気に入ってくれただろう。

## 著者紹介

スコット・ツィーママン (SCOTT ZIMMERMAN) とウィリアム・リヴシー (WILLIAM LIVESAY) はそれぞれ、米ゴールデンアイ社 (Goldeneye) のテクノロジー担当副社長と最高経営責任者 (CEO)。ウィリアム・エヴァンス (WILLIAM EVANS) は、米プリンストン大工学およびキャンパスエネルギー学部 (Engineering and Campus Energy department) に勤務する電気エンジニア。