

安定で持続可能なエネルギー未来のための新しい科学（米国）

DOE 基礎エネルギー科学諮問委員会(BESAC)からの報告書

（その3 省エネルギー未来技術）

NEDO 海外レポート 1039 号および 1040 号に引き続き、米国エネルギー省基礎エネルギー科学諮問委員会(BESAC : Basic Energy Sciences Advisory Committee)の報告書^{注1}の内容を紹介する。

内 容	
<u>はじめに</u>	
米国は3重のエネルギー問題に直面している エネルギー問題の大きさ	（以上 1039 号掲載）
<u>安定で持続可能なエネルギー未来を描く</u>	
1. エネルギー未来技術	
先例がない性能を持った材料 化学変化をより選択的にする 地球に炭素を返す 安全でより効率的な原子力発電	（以上 1040 号掲載）
2. 省エネルギー未来技術	（今号掲載）
そこにデジタル照明を 建物のためのソーラー経済 ハイブリッド電力グリッド 先進的な輸送 ソーラー燃料 電力による輸送	
<u>まとめ</u>	（次号へ）
これらの夢物語の実現 成功への道 提言	

2. 省エネルギー未来技術

そこにデジタル照明を

我々はどのようにより効率的に電力を使用することができるであろうか。現在、全電力の 22%が家庭、事務所および街路の照明で消費されているのを、2%未満にまで削減する

^{注1} “New Science for a Secure and Sustainable Energy Future”, A Report from the Basic Energy Sciences Advisory Committee,
http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/NSSSEF_rpt.pdf

のはどうであろうか。そして、その中で、あの裸の電球やコンパクトな蛍光灯以外の光について考えてみよう。その光は、はるかに洗練されており、我々が望むところへ向き、我々が望む時に、色を付けたり、組み込みの特殊な効果を示すことができる光である。答えは、我々のデジタル装置を飾っているあの小さな LED の後継である固体素子照明である。

あの裸の白熱電球は、ほとんどが熱を生成し、光源としてはわずか 5%の効率でしかない。もしナノスケール科学が欠陥の無い化合物半導体を生産することができれば、固体素子照明は、原理的に 70%の効率に達することができる。そして、固体素子照明はデジタル制御が使えるので、流れる文字の広告を綴る光の壁のように、望みうるなんでも表示することができるであろう。そして、ほとんどの固体素子照明は、これまでのところ、白熱灯や我々が使用しなければならないあの優雅さのない蛍光灯の両方よりも勝っている。固体素子照明の推進にはこの新しい素子の科学を加速することを必要とする。

固体素子照明

デジタル時代に、通常の白熱光は非常に原始的で非能率的である。しかしながら、21 世紀の照明の将来は、多くのデジタル装置の小さな固体素子の明かりや表示器の中などから、既に明らかである。

その潜在性は、照明の寿命が非常に長く、家屋よりも長持ちして、70%もの効率的である。そして、出力する光の色、品質、強度および指向性に対するより多くの制御性を提供し、白熱灯および蛍光灯の両方に対して、あらゆる点で改善をもたらす。

固体素子照明への切り替えは、米国の電力使用と温室効果ガス排出を、100 カ所の大型発電所相当分だけ、削減することができる。

固体素子照明をより良くするために、我々は、なぜ緑色を出力する材料が、それほど非能率的かを理解する必要がある。緑色エミッターは、既存の青色と赤色を放射する材料と組み合わせた時に、白色光の好ましい形式を含んだ完全なスペクトルを我々にもたらすからである。

固体素子照明で高効率を達成するために、我々は固体素子材料内の光の発生と素子から光を取り出す方法の両方を理解する必要がある。それは、原子レベルでの材料コントロール、電子および他の電荷担体が材料中をどのように移動するかについてのよりよい知識、さらに電荷担体が光を出力するためにどのように再結合するかについての新しい理解を意味する。

同様に、我々は、材料中へ、例えば「フォトニック結晶」として知られている、周期的なナノ構造の繰り返し原子格子パターンを導入するような手段によって効率をさらに向上させる必要がある。

基本的に、我々は、光がどのように固体素子装置と相互作用するかをよりよく理解し、向上した材料を見つけまたは作成し、そして、それらを生産し処理する新しい方法を開発する必要がある。

建物ためのソーラー経済

照明はよいスタートであるが、なぜそこで止まるのか？ 国内のほぼすべての新しい商業用および住宅用建物、また多くの懐古趣味が作りつけの既設建築物の屋根や窓に太陽電池を組入れて、電力を直接使用したり、電力グリッドに戻すことについて考えてみよう。今日の太陽電池ではなく、明日の太陽電池は、はるかに多くの太陽光エネルギーを捕えることができ、また現在よりはるかに効率的で、それほど高価でない先進材料で作られるであろう。

そのような太陽電池は、研究所で既に 41%の効率を達成しており、革新的で複雑な機能材料により先例がない性能を達成することができることを示している。しかしながら、これらの研究所の電池は、まだ本格的登場の準備はできていない。市場に参加するためには、これらの電池の材料と製作コストを劇的に削減するための研究が必要である。

安価な有機物基盤である他の種類の太陽電池も、また、低価格の太陽電力の見込みを提供する。しかし、太陽電池が生成した電子のすべてを役に立つ電力に実質的に変換するためには、材料をほとんど欠陥のないものにできなければならない。

太陽エネルギーは、既に幸運が続いており、さらに進展しそうである。しかし、石炭火力発電所と競合でき、置換することが可能なポイントへ達するには、基本的な新しい知識を必要とする。太陽エネルギー、風力エネルギー、そして恐らく他の再生可能資源のクリーン電力が、少なくとも我々の電力の 3 分の 1 を生成し、最終的により多くを発電することを期待しよう。

ハイブリッド電力グリッド

夜間になったら、あるいは風が止まったら、どうなるであろう。そうです、電力グリッドがその変化に対処することでしょう。我々の 21 世紀の電力グリッドは、容量を増加し、送電損失を低下させ、そして性能を安定化させるために、超伝導線を連結し、より高度に相互接続されたハイブリッド構成になるであろう。電力の僅かな供給停止さえ、デジタル装置に依存する社会においては、その損失は膨大である。

そしてさらに重要なことには、21 世紀の電力グリッドは、またグリッド接続された膨大な量の高速応答の電気エネルギー貯蔵装置を組込むであろう。これは、一つのタンクから別のタンクへ充放電スタックを介して、充電された電解質を流すことにより作動する新しい形式のバッテリーであろう。それは数 10 年間動作することができて、初期の試作バッテリーは既に商業運転している。しかし、それらはさらに改良して低価格で使用するために、新しい材料を必要とする。

バッテリーよりもさらに高速に動作できる電気エネルギー貯蔵装置は、斬新な人工ナノ

材料に直接電荷を蓄積する超キャパシタによって達成できるであろう。廉価な電気エネルギー貯蔵装置は、再生可能エネルギー資源を、我々のエネルギー経済において小さな役回りから主流の役割にまで変換し、その過程で、発電所からの温室効果ガス排出を、今日のレベルよりはるかに少なく押し下げるであろう。

電気エネルギー貯蔵

近いうちに、ハイブリッド自動車はより効率的になり、そのバッテリー生産は急上昇し、またプラグイン・ハイブリッド電気自動車の展開へ向けて、充電中の待ち時間を回避するためのサービスステーションでのバッテリー交換とか、また斬新な急速充電アプローチのような、多くのアプローチが研究されていることは明らかである。

これらの進歩は、リチウムイオン電池に関する科学技術の最近の発見によって可能になった。しかしながら、バッテリー科学の転換的進歩は重要な障壁に直面したままである。今日の最高の技術でさえ、全電気自動車に、再充電までに200マイル以上の運転距離の電力を供給することができるバッテリーは、単に大きすぎ、重すぎ、高価すぎるのが現状である。重要な研究の取り組みは、充電率を含む劇的な性能の向上とコストを低下させる、新しい電気化学エネルギー貯蔵材料を発見することである。

向上した電気エネルギー貯蔵が、全米電力グリッドに、現在のストレスを緩和し、また間欠性という属性を持つ再生可能エネルギー資源の成長に対処するために、必要とされる。揚水ダムや圧搾空気貯蔵のような、力学的エネルギー貯蔵技術は、現在の技術で実現可能である。しかし、これらはどこでも使用できるとは限らない。バッテリーを使用する電気化学エネルギー貯蔵は、体積あたりの高い蓄積エネルギーと展開の容易さを提示するが、現在は非常に高価である。それでも、バッテリーは短時間に多くの電力を提供することができるので、電力グリッドの周波数揺動の制御を支援するために既に大型バッテリーが展開されている。

それとは正反対で、太陽が沈んだ時の夜間や、あるいは風が吹かない時の数日間のような、長い時間にわたり大量のエネルギーを提供するために、他の貯蔵アプローチが必要である。科学者は、レドックスフロー電池を劇的に向上させる方法を研究している。それは、燃料電池とバッテリーのハイブリッドと見なすことができる。別のアプローチには、グリッドからの電力を使用して、水を分解して生じた水素を貯蔵する方法がある。

しかし、我々が、より大量の電力とデジタル経済のためのより信頼性ある電力の両方を全米電力グリッドに依存する時に、グリッドの特性が変化しなければならないことは明らかで、それ自体が様々な世代と貯蔵技術のハイブリッドになるであろう。そして、それは高度なエネルギー貯蔵や新しい素材と新しいアプローチ両方のブレークスルーを研究することが、不可欠であることを意味する。

問題をかかえる電力グリッド

電力グリッドは、都市や郊外における供給過剰の容量問題に、そして電力品質および信頼性のための基準向上の問題に直面している。さらに、太陽エネルギーや風力エネルギーの最も高い潜在的な資源は、最も需要の大きい場所の近くには存在していない。我々は、電力のより効率的な長距離送電を必要としている。

超伝導と 21 世紀の電力グリッド

電気が数分間でさえ停止したら、その結果、あなたはコンピューター上の仕事を失うことになる。さて、その時間に何 100 万もの人々と商業や産業活動の数 10 億ドルも仕事を掛け合わせてみよう。デジタル時代では、そのような瞬間停電でさえも、数年前に米国北東部の大部分で起きた不名誉なブラックアウトよりさらに損害が大きくなるであろう。

小規模な停電は、2006 年だけでも米国経済に 800 億ドルの打撃を与えている。スイッチを入れた時に電気を提供するだけでなく、我々の数多くのデジタル装置を壊したりまたは損害を与えないように、変動しない電力を十分に提供するために、我々は電力グリッドにますます依存している。

しかし、現在、米国の電力グリッドの信頼性は、例えばフランスや日本のグリッドよりも 5~10 倍も信頼性が低い。これは、超伝導が主要な役割を果たすことができる場所である。何人かのエンジニアは、主要都市の回りに超伝導「環状道路」を思い描いている。それは、電力を大量に必要とする都市へ 5 倍以上もの電力をもたらず既存の地下埋設管内への新しい大容量超伝導ケーブルであり、また、性能を安定させ送電損失を低下させるために、グリッド中の多くの場所に置かれる新しい超伝導リンクである。

しかしながら、我々は、まだ、なぜ多くの複合材料が高温で超伝導を示すのかを理解してしない。したがって、我々は、さらに良い性能の次世代超電導体を設計することができない。そこには、超電導線が運ぶことができる電流量を 10 倍も増加できる可能性がある。

そのためには、先端的な研究には多額の研究資金を払い、我々を小規模試験から 21 世紀の電力グリッドを支えるほど十分に強健で廉価な超電導体へと移動させることが必要であろう。新しい理論的な概念の開発、および、最近発見された鉄基盤超電導体ファミリーのような新しいクラスの材料の研究の両方が必要である。そして、この分野における進歩は加速している。

ナノスケールでの超伝導材料特性の制御が、現在、米国内の研究所で出現中の種々様々の研究や製作技術の開発により、操作温度と電流容量の両方を増加する鍵になるだろうという、幅広い期待がある。

先進的な輸送

我々の建物や電力部門を環境に優しくすることは、よいスタートである。しかし、我々は輸送のために、すべての輸入石油に相当する、さらに多くのエネルギーを使用している。そして、石油産出国への富の莫大な移動、石油への依存度の国家安全保障リスク、あるいは我々の低効率な内燃機関からの温室効果ガス排出など、その状況のどの面がより悪いかを知るのは困難である。

石油燃料をすべて撤退させるための有望なシナリオは何であろうか。まず第一はハイブリッド車だが、これはまだその幼年期にあり、さらに効率的にすることができるであろう。

一旦我々が本当に燃焼プロセスを理解できれば、ハイブリッド車または大型トラックのための内燃機関さえも、恐らく50%以上のエネルギー効率になりえるであろう。

その結果、先進的なバイオ燃料は、重要であるが、恐らく過渡的な役割を果たすであろう。これらは、今日のバイオディーゼル燃料ではなく、穀物基盤のエタノール、あるいは、ブラジルのより効率的なサトウキビに基いたエタノールでさえもない。第2世代のバイオ燃料は、植物のすべての部分や藻類を使用するであろうし、食糧供給に競合しない特別な高効率穀物から作られるであろう。しかし、バイオ燃料は恐らく全ての石油に置き換わることができるとは限らず、その役割が非常に重要であるのは、究極の解決策への架け橋としての立場であろう。

ソーラー燃料

究極的な輸送の解決策は、太陽光を使用して水を分解して水素を生産すること、あるいは、他のクリーンな太陽による燃料を生産するために、大気中の二酸化炭素を取り出し、水と組合せて作られたソーラー燃料であろう。その後、その燃料は、燃焼した時または燃料電池で電力に変換された時に、簡単に水と二酸化炭素に戻る。

植物や藻類は、既に光合成の中でこれを行っており、太陽による燃料の概念に原理証明を提供している。したがって、我々は、光合成を化学的に模倣することを学び、エタノールあるいは他の液体燃料を産出するためのプロセスを変更できるかもしれない。

あるいは、我々は、水中で光を捕えて、生成した電子およびホールを使用して化学反応を行い、水を分解して水素を生産する、新しい太陽電池のような材料を開発出来るかもしれない。恐らく、より徹底すれば、メタンを生産する合成物に、水分解化合物によって生産された水素イオンを送ることにより、自然の成功を模倣できるかもしれない。

それらを生産する生物模倣燃料、および革新的な道への機会は、実質的には無限である。そのようなバイオ化学システムは、我々の燃料を生産するために、太陽光、水および大気中の二酸化炭素を組合せる。これは、真の水素経済やソーラー経済であり、化石燃料から人類を永久に解放するであろう。

ソーラー燃料

太陽光、水、バイオマスおよび二酸化炭素から、燃料を作ることは、化石燃料の環境への因果関係から世界を解放する重要な方法である。

植物派生のエタノール、バイオディーゼル油および他の生物燃料の使用を拡大する取り組みが、既に進行中である。このアプローチは、適度な量において実現可能である。しかし、トウモロコシに基いた大量の生物燃料の生産は、食糧生産と競合するので、恐らく持続可能ではない。

したがって、ちょうど植物が光合成の過程で行うように、我々は、太陽光を使って水を分解し、あるいは二酸化炭素を水と光で還元して、水素あるいは他のソーラー燃料を作ることを学ばなければならない。

1つのアプローチは、非生物材料の光合成を模倣することである。それは、植物の化学反応についてのより深い理解を必要とする。植物の生化学を工業規模で再現することができれば、恐らく強力な新しい触媒の助けにより、我々は、石油ではなく、その原料が水と二酸化炭素の太陽エネルギー精油所を建造することができるかもしれない。

別のアプローチは、太陽電池モデルに基いており、水中に置かれた半導体材料の光子捕獲と、水を分解するために生じた電子の電荷を使用して、その結果、太陽電池は電気の代わりに水素を生産する。ここでの問題は、太陽光で水を分解させる、よりコスト効率が良く、効率的で、安定である、斬新な人工ナノ材料を設計し見つけ出すことである。

第三のそしてより野心的なアプローチは、人工の化学反応器中で水素あるいは恐らく別のクリーン燃料を生産するために、水、太陽光および二酸化炭素などを結合できる生化学システムを人工的に結びつけることである。ここでの鍵は、合成反応セル用の「ソフトウェア」を識別することで、これによって希望の製品を生産するプロセスを導くことができる。

これらの3つのアプローチのすべては、現在の科学的知識の視界を僅かに越えて存在している。しかし、これらを克服するための技術的問題および有望な研究方向は、明確ではっきりしている。

電力による輸送

ソーラー燃料は、輸送のための唯一の妥当性あるシナリオではない。他には、恐らく市街地使用のための純粋な電気自動車である「プラグイン」電気自動車、そして、より長期移動用の「プラグイン・ハイブリッド」電気自動車がある。その方向で、非常に効率的な化石燃料発電あるいは先進的原子力発電、風力や太陽光のような再生可能エネルギー資源、そして、将来のハイブリッド電力グリッドも、また輸送のための主要な解決策になる。

ここでの解決の鍵は、ラップトップ PC に電力を供給する今日のリチウム電池と比較して、与えられた重量に対して少なくとも5倍のエネルギー容量を持った、より強力でより軽量小型なバッテリーである。

理論的な可能性は、さらに高く、新しい材料により10倍の改善にもなりえて、長期の移動のためでさえも、ガソリンをバッテリーに置き替えるであろう。問題は、新しいバッテリー電極材にあり、その容量と寿命を向上させるための、組合せ構造、組成および表面形態がまだ研究されていない。あるいは、先端的な軽量燃料電池と結合した、液体水素より大きな密度で水素を格納することができる新しい材料が、実際において斬新な高エネルギー・バッテリーである。

このシナリオの下での展開は、同様にいくつかの興味ある工夫があるであろう。それは、ちょうど、現在人々が料理のためのプロパンボンベを交換しているように、地域のサービスステーションでバッテリーを交換することを意味するかもしれない。そして同じ理由からバッテリーを満タンにするための待ち時間を回避する意味もある。もう一つの方法としては、「高速充電」を可能にする新しい電気化学材料が現在研究されている。

夜間に我々がバッテリーを充電するか、サービスステーションで交換するか、あるいは必要に応じて高速充電するかは、輸送と電力グリッドを相互に連結させる電力のシナリオである。

(出典 : <http://www.sc.doe.gov/bes/reports/abstracts.html#NSSSEF>)