

データセンターにおける AC配電とDC配電の 効率に関する

ホワイトペーパー 127

改訂 2

ニール・ラスムセン

ジェームズ・スピタエルス

> 要約

ここでは、効率が最も高い DC 配電方法と、最も高い AC 配電方法の効率に関する詳細な定量的比較について、空調に必要な電力と総電力消費量への影響を含め、さまざまな分析を用いて説明します。最新の高効率 AC 配電システムや高効率 DC 配電システムは、実質的に同等の効率を備えていることが確認されているため、DC ベースのシステムに移行しても、効率の向上が保証されないことを示します。

コンテンツ

セクションをクリックして次に進む

はじめに	2
高効率配電の 2 つのオプション	3
配電経路全体の効率の比較	11
データセンター全体の電力消費量への影響	12
効率カルキュレータ（英語版でのご提供）	13
北米および日本に関する特殊注意事項	14
結論	19
リソース	21

はじめに

データセンタの効率向上を追求することにより、データセンタにおける電力および空調の技術革新への機運が高まりました。エネルギー効率改善の一案として広く議論されているのが、データセンタの配電システムを従来のACからDCに変換することです。新聞や技術雑誌の多くの記事でDC配電の利点が紹介され、Intel、APC、Sun Microsystemsなどの企業がその技術を実証するプロジェクトに参画しました。

データセンタで現実的に使用可能な配電方法には、基本的なAC配電2種類とDC配電3種類の合計5種類があります。この5種類については、APCのホワイトペーパー63『データセンタにおけるAC配電とDC配電の比較』に詳しい説明と分析内容を紹介しています。その記述の要旨としては、出版されている文献でも一般的に支持されているように、5種類のうち2種類の配電方法（1種類のACと1種類のDC）で優れた電力効率を得られるという点です。また、ホワイトペーパー#63では、これら2種類の高効率配電方法の比較にも焦点を当てています。データセンタの電力技術に大きな変革がない限り、この2種類のいずれか一方が、今後のデータセンタにおける配電方法の大勢を占める可能性が高いと予想されます。

このホワイトペーパーで説明しているAC配電システムの効率値は、現在購入できる実際の機器に基づいて簡単に入手できる数値です。現在入手できる商用DC配電システムは存在しないため、DC配電システムに関する効率の値は、入手可能な最新のサンプルデータ、予測値、および計算値に基づいています。このホワイトペーパーで使用する効率値については、引用文献や参考文献をすべて明示していますので、結果を独自にテストして検証することができます。

配電効率が増加すると、データセンタの総電力消費量に影響が及びます。ただし、この影響には以下の2要素が絡むため、数学的に複雑になります。

1. 配電効率の変化は熱負荷に影響を与え、その結果、空調の電力消費量も影響を受けます。
2. データセンタには、分析対象の配電システムから電力供給を受けていない電力負荷も、たくさんあります。

このホワイトペーパーではこれらの影響について詳しく説明し、配電効率の向上が総電力消費量の削減にどのように貢献できるかを定量化して示します。

背景

現在のデータセンタは、設計が不十分なうえに旧式の配電技術が使用され、極めて効率の低い状態で運用されているのが実情です。APCはデータセンタのオペレーションにおいて電力システムの効率が30%以下（空調システムを除く）という実態を見ました。このような非効率のほとんどは回避することができますが、実際には膨大な電力量を無駄にしていることとなります。確認された低効率は、主に以下の要素に起因します。

- IT機器の低効率の給電
- 変圧器を使用した低効率の分電盤（PDU: Power Distribution Unit）
- 低効率のUPSシステム
- 上記の損失のすべてを増大させる、システムの設計定格を大きく下回る負荷率での運用

過去3年間でIT機器電源とUPSシステムの効率は格段に向上しました。したがって、現在設置されているAC配電システムは、一般的に5年前の設備よりもはるかに高効率です。さらに、モジュール式で拡張可能なUPSシステムでは、負荷に対してUPSを適正規模にすることが容易になり、かつては頻繁に見られた負荷率の低さに起因する電力の低効率を防ぐことができます。北米の多くの施設では、変圧器を使用したPDUが現在も大きな損失の原因となっていますが、北米以外ではこのPDUは存在しません。



このホワイトペーパーに記載するACシステム分析は、欧州規格の400/230V配電を基準にしています。北米におけるAC400/230V配電の適用については、APCホワイトペーパー#128『高密度配電を適用したデータセンタの効率向上』に記載されています。

DC配電は、以下の3つの前提条件のもとで、より高い効率を実現する方法として提案されました。

1. AC UPSよりも効率の高いDC UPSを構築することが可能です。
2. 分電盤（PDU）の変圧器を排除することで電力損失を削減できます。
3. AC入力設計で可能な向上率以上に、IT機器電源そのものの効率を向上させることができます。

このホワイトペーパーでは、これらのコンセプトのすべてについて検討、定量化し、次のことを明らかにします。

- 最新世代のAC UPSシステムの損失は前世代のAC UPSの5分の1になり、それ以上に効率の高いDC UPSを構築できる保証はなくなりました。
- PDU内の変圧器は低効率になる大きな原因ですが、北米以外では使用されず、最新の高効率AC配電システムには組み込まれていません。
- DC入力への変換によってもたらされるIT機器電源の効率の向上は、当初の想定よりもはるかに実現性が低いことが明らかになっています。

新聞や雑誌の多くの記事では、DCはACよりも効率が10~30%向上すると予測されていました。しかし、新しいサーバ技術の性能を10年前に製造されたサーバの性能と比較しても意味がないと同様に、仮想のDC配電効率を旧来のAC配電システムの効率と比較することは適切ではありません。過去の方法と未来の方法を比較するのではなく、現在の方法と未来の方法を比較することが重要です。

このホワイトペーパーのデータによって、現在の最良のAC配電システムがすでに将来の仮想のDCシステムと同じ高効率を備え、新聞や雑誌記事による効率の増大に関する言及のほとんどは誤解をまねく不適切または間違った内容であることが明らかとなります。この主題に関して、このホワイトペーパーでは他の新聞雑誌記事とは異なり、あらゆる数量データの引用文献と参照資料を掲載しています。

高効率配電の 2つのオプション

「はじめに」で、将来的に効率の高いデータセンタを構築する際の採用候補として登場した2つの代替配電システムについて説明しました。その1つは、北米および日本以外のほとんどすべてのデータセンタで現在使用されている従来の一般的なAC400/230V配電システムをベースとするシステムです。もう1つは、DC電源を使用できるように改良されたIT機器に給電する、概念上のDC380V配電システムをベースとするシステムです。これらのシステムを、図1と図2に示します。

図1

高効率AC配電（北米および日本以外で一般的に使用）



図1は、最初のシステム候補を示しています。これは北米および日本以外で一般的に使用されているAC配電システムです。北米で現在使用されている標準的な配電システムであるUPSの電圧はAC480Vで、図にはAC480VからAC208/120Vに変換するPDU変圧器を表すブロックが

追加されます。IT負荷に 230Vで給電するためにUPSの出力電圧を下げる必要がないため、この図ではPDU変圧器とそれにもなう損失は示されていません。
 (訳注: 日本ではAC400VもしくはAC200VからAC200 - 100Vに変換するPDU変圧器が使用されています。)

図 2
 高効率 DC 配電 (仮想)



図 2 は、2 番目のシステム候補を示しています。DC380Vを配電する仮想のアプローチです。このシステムが機能するには、DC380V電源で稼動するように設計されたIT機器が存在することが必要です。このシステムは各文献で、300V、380V、400V、575VなどさまざまなDC電源電圧で提案されましたが、その中で望ましい標準は 380V程度との合意に達しているため、このホワイトペーパーの分析はDC380Vのシステムに基づいています。DC380VとDC400Vという呼び方は、基本的に同じシステムを指します。

分析の前提

このセクションでは、把握しておくとして理解に役立つ一般的なモデル構造とそのモデルをサポートするために定量化が必要なデータについて説明します。

給電経路の 3 つのセグメント

図 3 は、高効率の配電システムを使用する場合の一般的なデータセンターの基本的な給電経路を示します。考慮する 2 つの配電方法ではPDUは不要なため、図には示されていません。給電経路は次の 3 セグメントに分類されます。

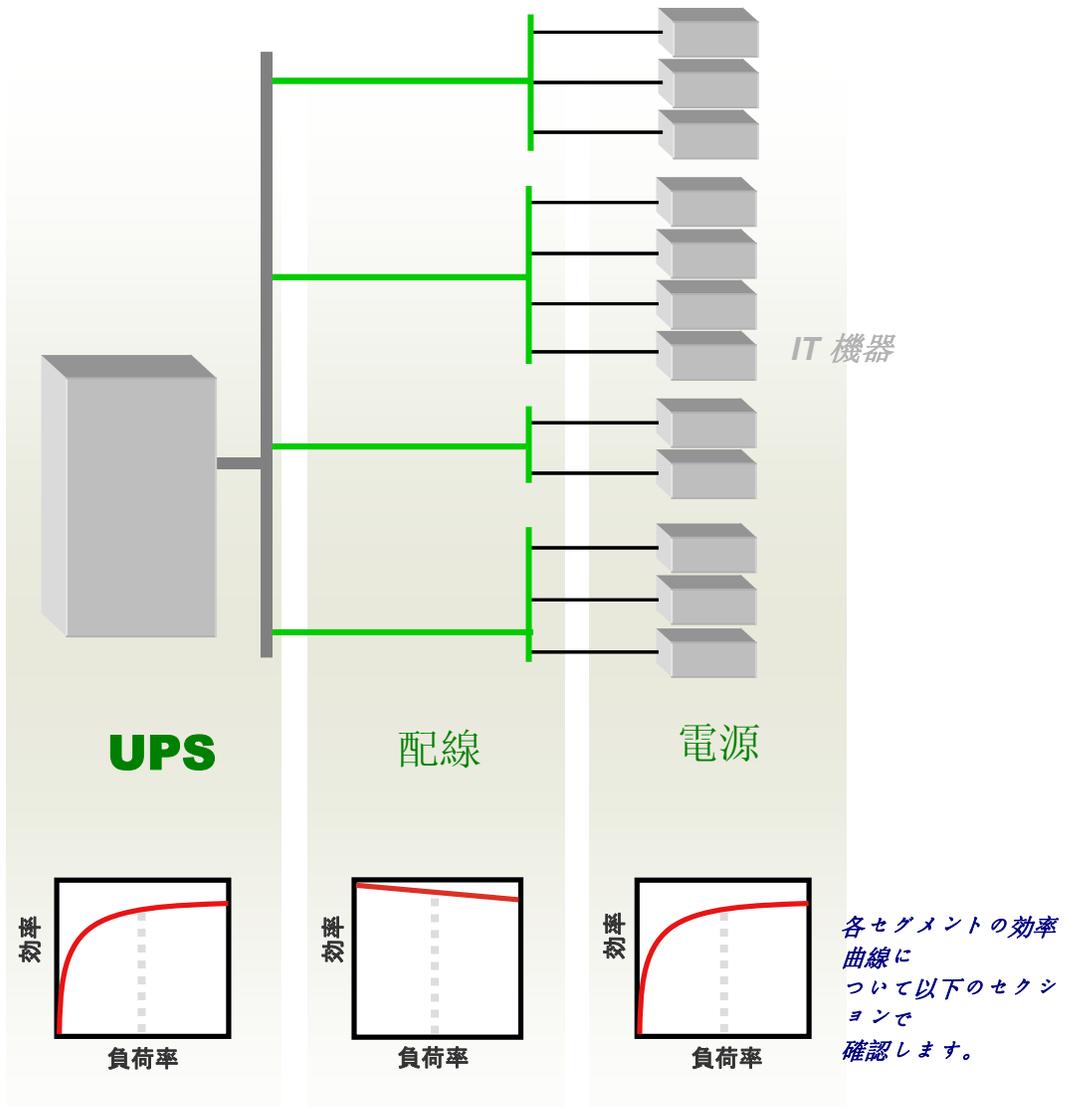
- UPS
- 配線
- IT機器電源 (PSU)

モデルに関する効率データ

以下のセクションでは、これらの給電経路の 3 セグメントそれぞれについて効率データを吟味し、定量化します。その目的は、負荷との相関関係として効率データを表すことにあります。その結果は、図 3 の下部に示すグラフと同じような各セグメントの効率曲線として示されます。次に、この効率データをモデルに組み込み、このモデルに基づいて従来の配電構造と仮想配電構造の効率を比較します。

モデルの基準となるケースでは 50%負荷時の効率の値を使用するため、効率曲線の 50%負荷ポイントにマークがつけられます。

図 3
データセンタの給電経路: 3
セグメント、3 つの効率曲線



モデルの基準運転負荷率（50%）

配電システムにおける機器の効率は一定の数値ではなく、適用される負荷率によって変動することは、このデータから明らかです。そのため、効率は単一の数値ではなく、「効率曲線」として正確に表されます。したがって、いかなる配電効率の計算も、給電経路の各セグメントに対する実際の運転負荷を考慮しない場合は不正確になります。

配電効率に関する以前の研究のほとんどでは、重要となる負荷の変動による影響についての情報が提供されていません。このホワイトペーパーでは、一般的な設備に代表的な基準負荷を使用して、負荷とともに効率がどのように変化するかを説明します。基準となる運転負荷を採用して AC と DC の比較の基準ポイントを設定することで、最初の説明が分かりやすくなります。ただし、これには効率は負荷率とともに変動する曲線であるという考えに基づく実際のモデルを制約するものではありません。実際の設備では、運転負荷（容量の一部）は給電経路の 3 セグメントで異なり、インタラクティブモデルでは動的に変動する可能性があります（図 9 を参照）。

以下の説明と、AC 配電と DC 配電との比較では、基準負荷率を 50% としています。これは、データセンタの 3 セグメントすべての運転範囲内です（上の図 3 を参照）。ここで、データセンタの各セグメントに 50% の負荷がどのように関連するかを説明します。

- **UPS**
冗長性を備えていない（1N）システムの場合、50%は通常の運転ポイントです。冗長（2N）システムの場合、50%は最大運転ポイントを示します（最大負荷を2台のUPSに分散）。
- **配線**
UPSに対する負荷と同様、冗長性を備えていない（1N）配線に対する現実的な運転負荷は50%です。冗長性を備えた二重経路（2N）配線システムの場合、一方の給電経路で50%が最大負荷になります（実際は、米国の電気規格により負荷が80%に制限されているため、給電経路当たりの負荷限度は40%になります）。いずれの場合も、配線効率は99~100%と非常に高く、向上可能な範囲が狭いため、配線の運転負荷は全体的な効率にほとんど影響がありません。
- **IT電源**
IT機器は1つまたは2つの内部電源を備えています。単一電源では、50%の運転負荷は中間を示し（サーバの大部分の時間が費やされる「アイドル」負荷に特有）、二重電源を備えたサーバでは、50%は最大運転ポイントです（最大負荷を2つの電源に分散）。

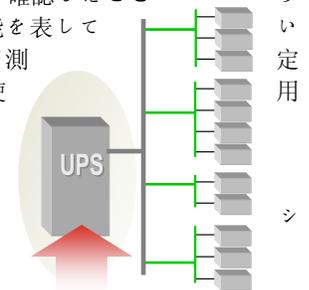
以下に示されるように、これら3セグメントの実際の効率曲線で50%前後の運転負荷の効率には大きな違いがないため、このポイントの値の正確さはそれほど重要ではありません。

UPSの効率

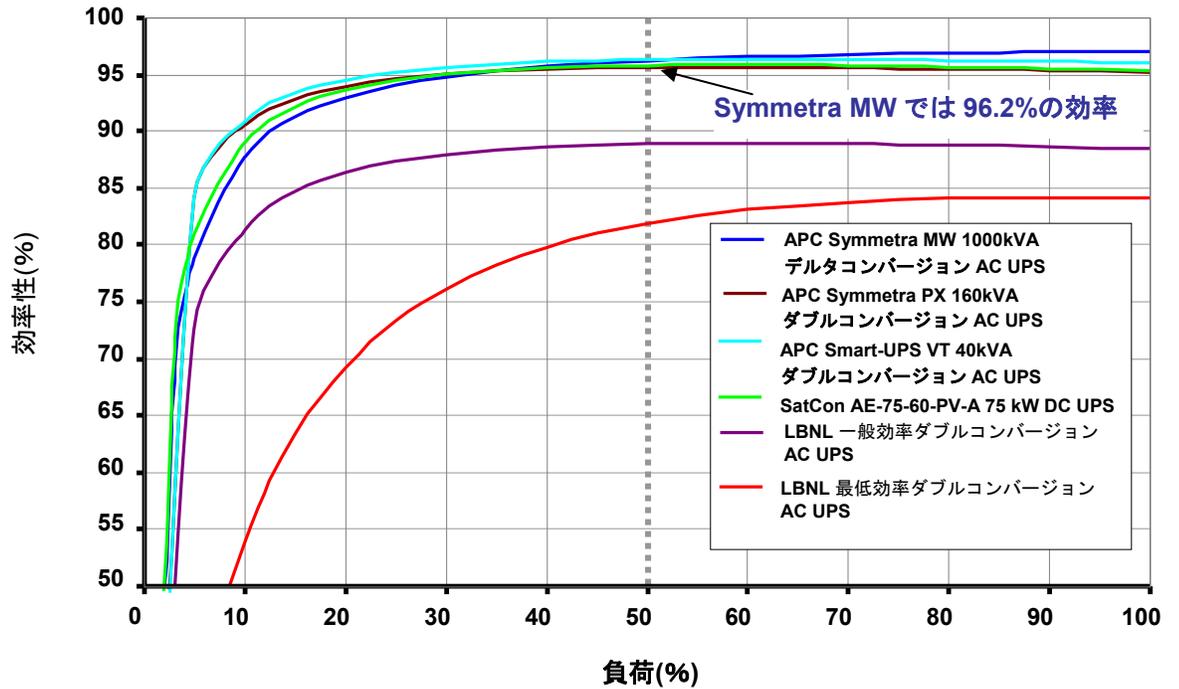
AC配線構造では、最初にUPSでAC母線を作成し、DC配線構造ではDC UPS（DC設備または整流器ともいいます）でDC母線を作成します。

AC UPSの場合、現在市販されている製品の性能は、公表されている効率に関する仕様を参照するか、性能を測定することにより検証できます。ただし、APCが確認したところによると、公表された仕様は多くの場合不正確であり、実際の性能を表していません。ここでの分析では、独立した研究機関により効率の定格が測定され、認定された確認済みのUPSから取得した効率データだけを使用しています。

図4は、市販されているさまざまなAC UPSシステムとDC UPSシステムの効率を示しています。



AC と DC の UPS 効率性比較



分かりやすくするために、上のグラフを表 1 にまとめます。

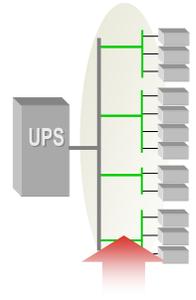
表 1

図 4 の UPS 効率データのまとめ

UPS	負荷			
	25%	50%	75%	100%
APC Symmetra MW (デルタコンバージョン AC)	94.1%	96.2%	96.9%	97.0%
APC Symmetra PX (ダブルコンバージョン AC)	94.7%	95.7%	95.6%	95.3%
APC Smart-UPS VT (ダブルコンバージョン AC)	95.3%	96.3%	96.3%	96.0%
SatCon AE-75-60-PV-A (DC)	94.5%	95.8%	95.6%	95.4%
LBNL 一般効率 (ダブルコンバージョン AC)	87.3%	88.8%	88.8%	88.4%
LBNL 最低効率 (ダブルコンバージョン AC)	73.3%	81.9%	84.0%	84.1%

モデルに使用する AC UPS 効率の値

1,000 kVA APC Symmetra MW デルタコンバージョン UPS は、50% 負荷時の効率評価が 96.2%、160 kVA Symmetra PX デブルコンバージョン UPS は、50% 負荷時の効率評価が 95.7%、40 kVA APC Smart-UPS VT デブルコンバージョン UPS は、50% 負荷時の効率評価が 96.3% です。これらはすべて TÜV.¹ の研究機関により認定されています。これらは、エコノミーモードまたはバイパスモードでの評価ではなく、インバータで出力電圧を生成し、入出力を完全に分離したオンライン運転条件での評価です。この分析では、50% 負荷時の AC 効率が 96.2% の Symmetra MW を使用します。



California Energy Commission² により認定された 75 kW SatCon インバータの効率評価は 95.8% です

(このインバータを含む多くのインバータは整流器としての機能も備え、いずれの運転モードでも同様の効率が得られるため、このインバータも DC UPS と考えることができます)。

その他の 2 つの効率曲線は、2005 年 LBLN 検査で測定されたデブルコンバージョン UPS の従来の効率を示します³。

モデルに使用する DC UPS 効率の値

DC UPS の場合、電源のバックアップを備えた DC380V 配電システムの要件を満たす市販の製品はありません。完全に解決されていない重要な技術上の課題の 1 つは、端子電圧が変動するバッテリーを安定化された 380V 母線に接続することです。ただし、Intel が複数の DC 電源事業者と協力して、効率が 97% と予測される設計案を発表しました⁴。サプライヤーの Netpower Labs は、350V の DC UPS を開発し、効率が 96% と公表しました⁵。LBNL は、効率 94% の DC UPS プロトタイプを公表しました⁶。

この分析では、報告された 3 つの効率、94%、96%、および 97% のうちの間接値を使用します。公表されたデータには負荷のパーセント値が指定されていないため、Netpower Labs による DC UPS の効率 96% は最大値と考えられます。50% 負荷時の効率は 96% を下回る可能性があります。

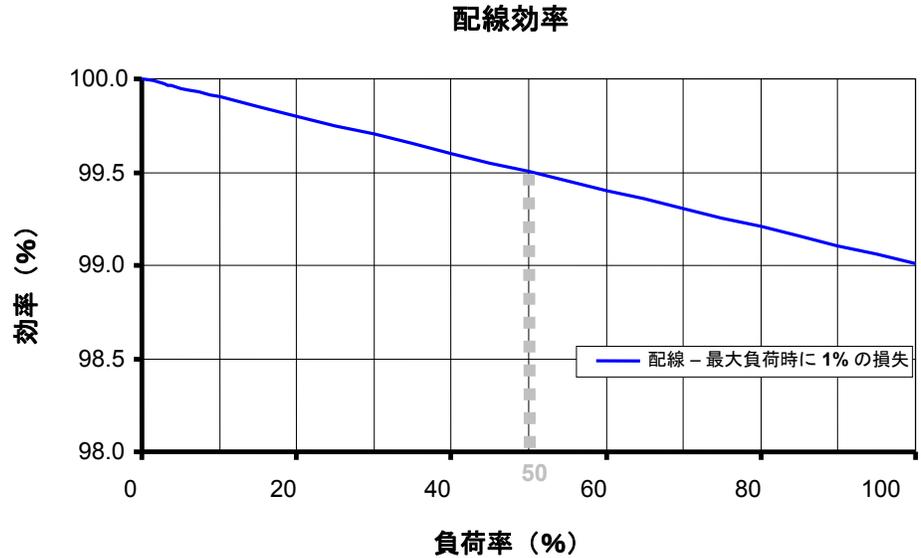
モデルの基準値
50% 負荷時の効率

AC UPS	96.2%
DC UPS	96.0%

配線の効率

AC UPS または DC UPS と IT 負荷との間の配線で電氣的ロスが生じます。このロスは、動作電流、電線の太さおよび長さによって異なります。データセンタには数百または数千もの異なる配線が存在するため、電線ごとのロスを加算してロスの合計を算出する必要があります。

図 5
配線の効率曲線



通常の設定では配線損失を推定することはできません。電線の太さは回路容量の定格で指定されており、電線の平均的長さは通常、規定があります。配線損失の一般的な設計値は、最大負荷時に負荷パワーの 1% です。配線に生じる損失は負荷の二乗値で変動します。負荷が半減するたびに、配線損失は四分の一に低下します。50% 負荷で稼動するデータセンタでは、配線効率は 99.5% になります。このため、ほとんどのデータセンタで配線損失はごくわずかです。

DC 設備と AC 設備で、配線損失は同じです。使用されている銅の量によって若干違いがある場合がありますが、効率は同じです。配線損失によって、DC 設備と AC 設備の効率に違いが生じることはありません。

モデルの基準値
50% 負荷時の効率

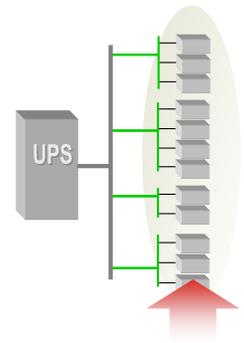
AC 配線	99.5%
DC 配線	99.5%

IT 電源の効率

現在の IT 機器は、入力 AC 電源を DC12V バスに変換してシャーシ内のカードやサブシステムに給電する内部電源 (PSU: Power Supply Unit) を (場合によっては複数) 備えています。¹ この PSU は、効率の向上をもたらす可能性があります。

旧世代のサーバでは、50% 負荷時の PSU の効率は約 75% でした (図 6 を参照)。

しかし、Sun Microsystems (図 7) と Hewlett-Packard (図 8) が発表した電源効率データによると、最新の設計ではさまざまな運転負荷時に於いて常に 90% 以上の効率が維持されます。



¹ 「分散方式の電源システム構造」では、個々のカードまたはサブシステムにより、内蔵された電源変換装置を使用して 12V バスから固有の低い電圧 (1.1V、3.3V、5V など) が生成されます。ほとんどの PSU は、ユーザが交換可能なシャーシに接続するモジュールです。

Figure 6

Lawrence Berkeley National Laboratory による旧世代サーバ PSU の効率

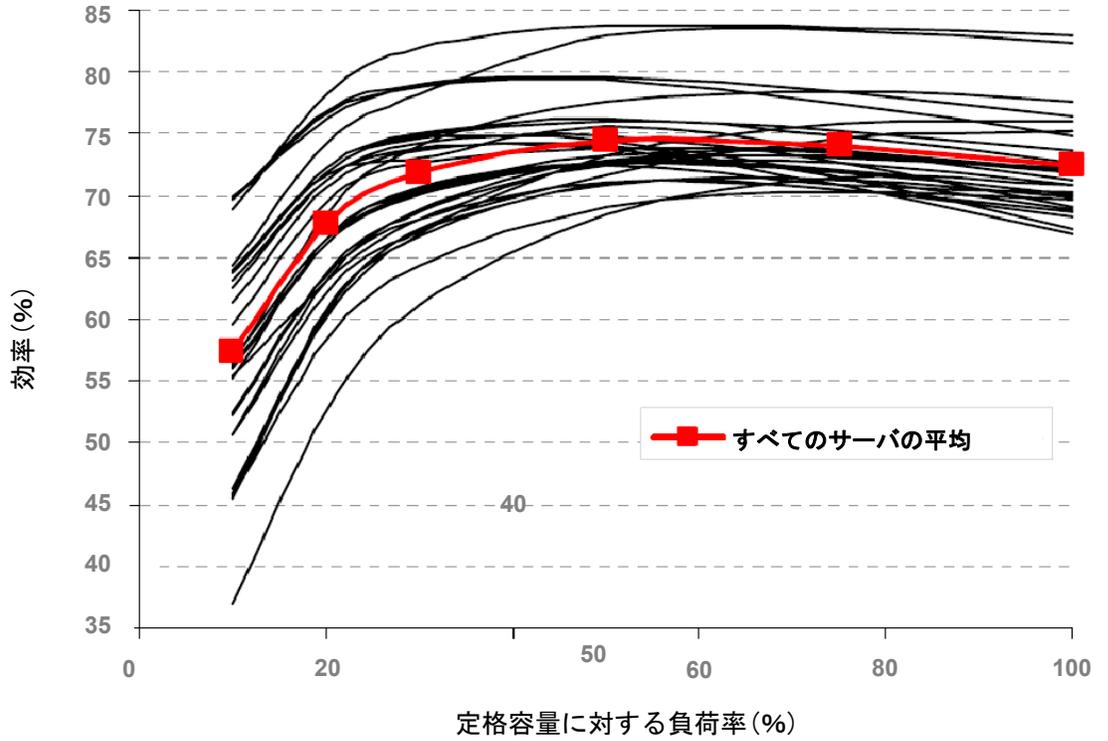


図 7

Sun Microsystems による負荷と相関関係にあるサーバ電源の効率。さまざまな入力電圧による効率への影響⁸

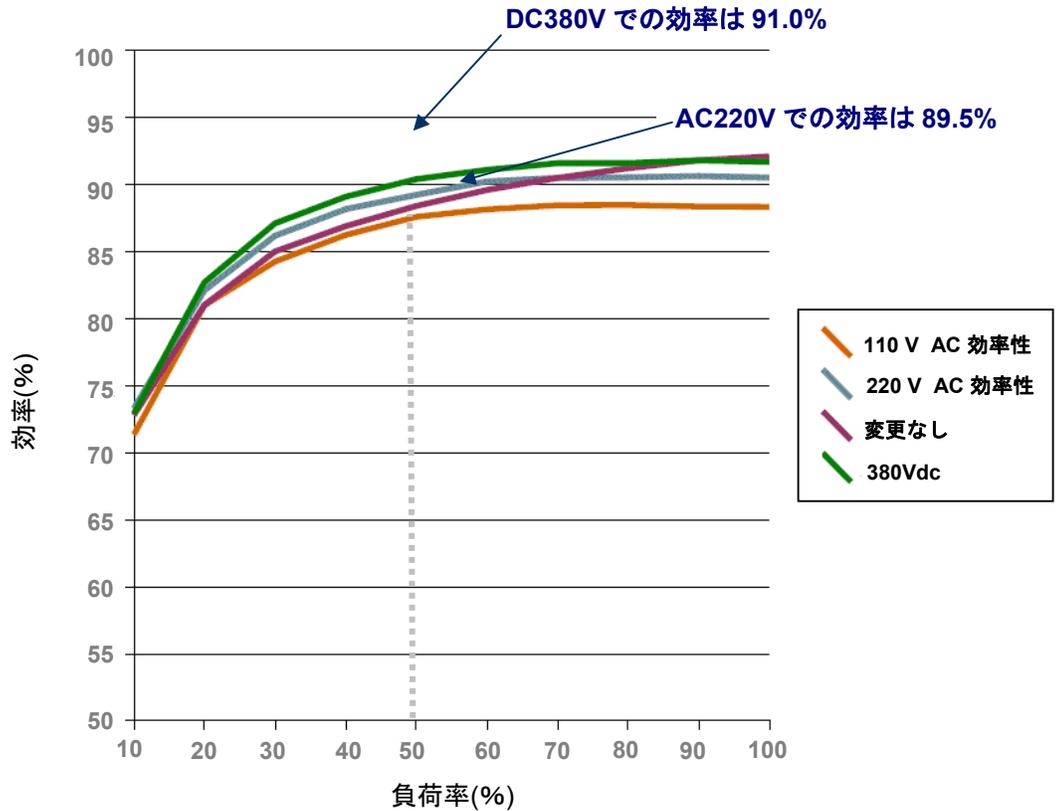
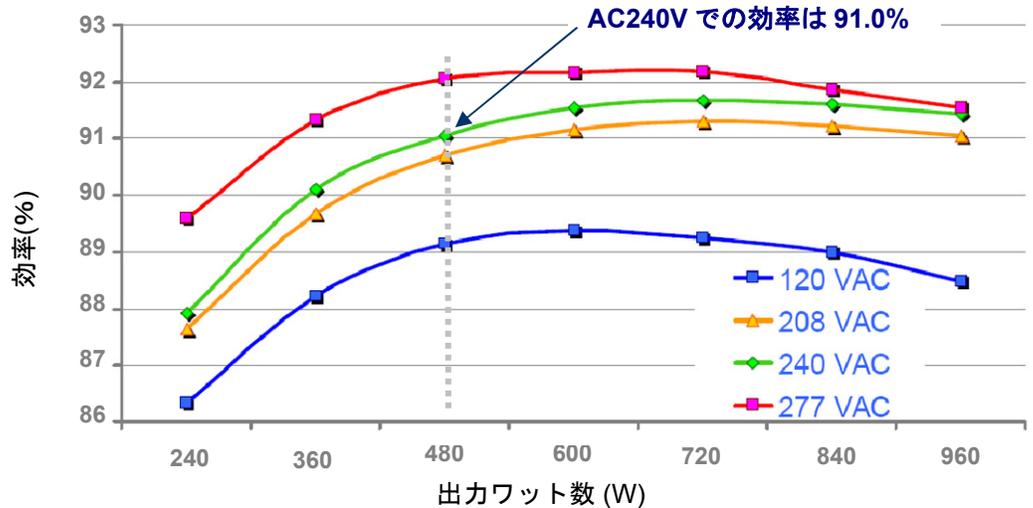


図 8

Hewlett-Packard による負荷と相関関係にあるサーバ電源の効率さまざまな入力電圧による効率への影響⁹



Sun Microsystems の例では、50% 負荷時の AC の効率は 89.5% で、Hewlett-Packard の例では 91% です。これらの電源を将来のサーバ (AC400/230V により 230V でサーバを稼動する) の代表的な電源として考慮する場合、2 つの例を平均した効率 90.25% を、このモデルの新しい電源の AC 効率の基準値として使用します。

図 7 の Sun Microsystems による電源効率の図には、DC380V に変換された電源の効率曲線も示されています。この曲線は、50% 負荷時の AC220V の効率より約 1.5% 効率が向上することを示しています。この効率の向上率 1.5% は多くの調査研究で使用されており、AC 基準値の 90.25% に加算すると、モデルの DC 効率は 91.75% になります。この向上率の大きさの可能性については、後で詳細に分析します。

さらに効率の高い (最大 94%) 電源装置が 2008 年初めに発売される予定です。これらの電源装置に関するデータはまだ一般に入手できないため、ここに記載することはできません。これらの電源装置を DC380V で使用した場合の効率の向上率は約 1% に低下することが予測されます。

モデルの基準値
50% 負荷時の効率

AC IT 電源	90.25%
DC IT 電源	91.75%

配電経路全体の効率の比較

表 2

50% 負荷時の全体的な配電効率計算高効率 AC 配電方法と DC380V 配電方法の比較

配電経路全体の効率は、上記の UPS、配線、IT 電源のそれぞれの効率の積です。これは表 2 に示すとおり、簡単な計算です。

	UPS		配線		IT 電源	全体の効率
DC	96.0%	X	99.5%	X	91.75%	= 87.64%
AC	96.2%	X	99.5%	X	90.25%	= 86.39%

↑ 1.25%

したがって、高効率 DC システムでは、高効率 AC システムよりも 1.25% 高い配電効率を得られます。この分析は、配電経路のすべてのセグメントで運転負荷を 50% としています。50% 負

荷時の効率が比較的フラットな曲線を描いていることから分かるように、50%周辺の負荷では効率に大きな変動はありません。

この効率の差異は配電システムのみに関するものであるため、データセンタ全体の電力消費量の影響を調べるには、次のセクションで説明するように、さらなる分析が必要です。

データセンタ全体の電力消費量への影響

配電システムで得られた効率の向上率がそのままデータセンタ全体の消費電力の削減率に同じパーセント値で反映されることはありません。配電損失の削減はデータセンタの熱を下げ、それによって冷却負荷を低下させます。したがって、配電で節約されたワット数によって、データセンタ全体の必要のワット数よりも実際には多く削減されます。ただし、配電効率が1%向上しても、データセンタ全体の効率が1%以上向上することにはなりません。実際には、配電効率の1%の向上によりもたらされる全体の効率の向上率は1%未満です。

配電効率の変化によりもたらされる実際の消費電力削減の計算は、次のようになります。

$$\Delta P = P - P'$$

$$\Delta P = 1 - [(1 - \Delta\eta PD) \times (ITP + PDP + ACPD) + LP + ACFD]$$

Pは1を基準とするACシステムの消費電力の基準値、P'は、配電効率が変わった後の電力消費量を表します。この計算式のその他の値については、その標準値とともに表3に示します。

変数	説明	標準値
ηPD	配電効率の変化	入力変数
ITP	IT負荷による電力消費量のデータセンタ全体に占める割合	45%
PDP	基準配電による電力消費量のデータセンタ全体に占める割合	5%
ACPD	負荷とともに変動する空調損失による電力消費量のデータセンタ全体に占める割合	25%
LP	照明負荷による電力消費量のデータセンタ全体に占める割合	2%
ACFD	一定の空調負荷による電力消費量のデータセンタ全体に占める割合	23%

表 3

電気負荷削減の計算に使用する変数

これらの値を上記のデータセンタ全体の電力消費削減量の計算式に当てはめると、配電効率の変化によりもたらされる全体の電力消費量の変化は0.75~1になります。つまり、配電効率が1%変化した場合、全体の電力消費削減率は0.75%になります。データセンタ全体の電力消費量の変化は、配電効率の変化よりも小さくなります。データセンタの電力消費の大部分（特に空調システム）が配電システムを介さないことと、配電損失の削減は空調損失の一定要素に影響を与えず、空調損失の比例要素（空調負荷とともに変動する損失）にのみ影響を与えることを考えると、この結果は納得できます。

この計算を、前のセクションのAC配電とDC配電の効率の結果に適用すると、ACからDCに変換することにより得られる1.25%の配電効率の向上は、全体の電力消費量の0.94%の削減をもたらすことが分かります。

これは、公表された他の研究による情報とまったく逆の結果です¹⁰。簡単な分析の多くは、DC380Vへの変換により節約された電力ワット数はデータセンタ全体の電力消費量に「2倍から4倍の影響」を与えると指摘しています。実際には、配電効率を超えて節約される電力は、負荷とともに変動する空調損失（比例損失）の一部だけです。適切に設計されている最新のデ

ータセンタでは¹¹、これらの変動損失はIT負荷のおよそ 20%であり、配電で節約された1ワットにより節約されるデータセンタ全体の電力はわずか 1.2 ワットです。

効率カルキュレータ (英語版でのご提供)

図9のAPC Interactive Toolでは、4種類の異なるシナリオでの給電経路効率と入力電力全体の削減率を算定します。配電経路のさまざまな要素の効率の変化が配電経路効率および入力電源損失全体の削減に与える影響を、このツールを使用して確認することができます。

基準となる従来ACのケースは、AC UPS、PDU、およびIT電源の効率が一般的な値の古いデータセンタを表し、IT電源がAC208Vで動作することを想定しています。最良ACのケースは、最新世代の高効率のAC UPS、PDU、およびIT電源を備えた新しいデータセンタを表します。DC400Vのケースは、最良ACと同じ最新のコンポーネントを備え、PDU（および関連する変圧器損失）を排除し、AC208Vよりも効率が0.5%高い（図8の緑の曲線と黄色の曲線の差異）AC230VでIT電源が動作することを想定しています。DC380Vのケースでは、理論上のDC UPSでPDUが存在せず、AC208Vよりも効率が1.5%高い（図7を参照）IT電源を使用します。すべてのケースで、配線効率は同じと仮定しています。

この効率カルキュレータでは、効率に影響を与えるすべての主要な変数を、スライダをドラッグして調整できます。このホワイトペーパーで説明するように、このツールはすべての変数について、50%負荷をベースとするデフォルト値を基準値として開始します。

カルキュレータツールで設定されている「Cooling Losses Per Unit Heat Load」のデフォルト値は、50%IT負荷時の一般的な値です。100%に近いIT負荷での運転負荷をモデル化する場合は、手動で「Cooling Losses Per Unit Heat Load」を低くし、冷却効率が最大負荷時の高さになるように調整してください。

このモデルでは、入力電源削減量の計算で照明負荷を2%と仮定しています。ネットワークオペレーションセンタなどの追加の一定負荷が存在する場合は、すべてのシナリオで入力電源損失の削減率を減算します。

> 効率カルキュレータの使用

この対話式カルキュレータはこのホワイトペーパーに組み込まれています。

Flash Player バージョン7以上が必要です。
ここをクリックしてご使用のバージョンを確認してください。

Flash Player をダウンロードするには、ここをクリックしてください。

カルキュレータのページをスクロールし、ダイアログボックスが表示されたら、[再生]をクリックしてください。

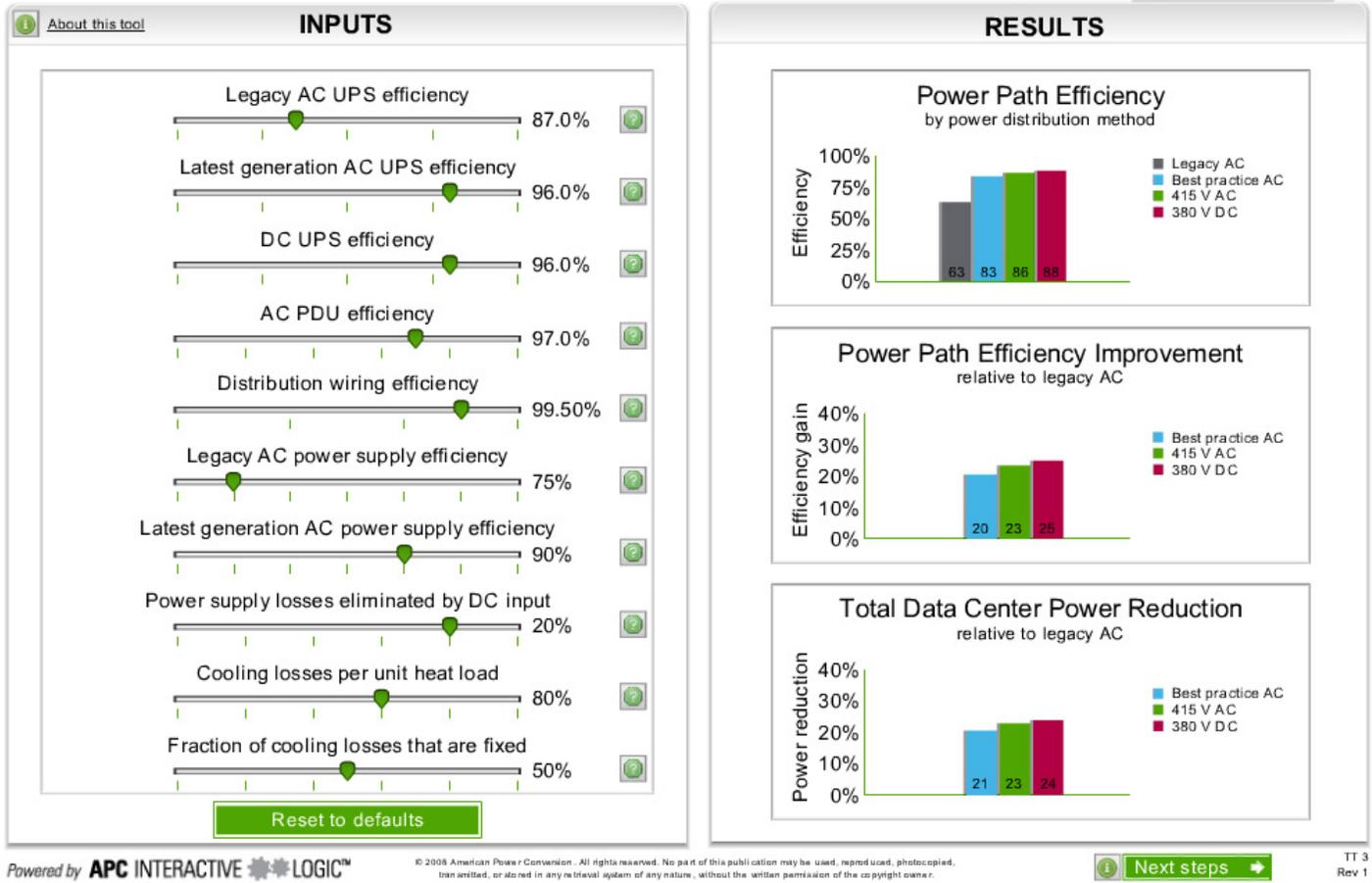
モデルの入力値を調整するには、ボタンをスライドします。

図 9

効率カルキュレータツール DC 配電システムと AC 配電システムの比較

Data Center AC vs. DC Calculator

Impact on data center efficiency of various AC and DC power distribution architectures



北米および日本に関する特殊注意事項

リソース
 APC ホワイトペーパー 128
 Increasing Data Center Efficiency by Using Improved High Density Power Distribution

北米および日本のデータセンタでは従来から変圧器を使用した分電盤 (PDU) を使用しているため、一般的に世界の他の地域よりもデータセンタの配電効率は低くなっています。北米では、通常 UPS 電源は 3 相 AC480/277V で動作し、IT 負荷への給電用には PDU 変圧器によって 3 相 AC208/120V の低電圧に変換されます。これに対し、北米以外のほとんどの地域では 3 相 400/230V の UPS 電源を使用しています。この電圧は低電圧に変換されることなく、負荷に直接給電されます。ほとんどの設計において変圧器は多大な損失を意味します。特に、設置された変圧器の定格の合計は一般的に UPS 定格をはるかに上回るため、変圧器の負荷率が低いことがその原因です。さらに、高密度のデータセンタでは、変圧器は広いフロアスペースを占有し、床荷重が非常に大きくなります。この問題に関する詳細と、北米で 400/230V 配電システムを使用する方法については、APC ホワイトペーパー 128『高密度配電を適用したデータセンタの効率向上』を参照してください。(訳注: 日本では通常 UPS 電源は 3 相 AC200V もしくは 400V で動作し、IT 負荷への給電用には PDU 変圧器によって単相 3 線 200V - 100V の低電圧に変換されています)

北米の一部の設備では、従来の 480/277V 電源を標準の 400/230V に調整する単巻変圧器の設置が必要となる場合があります。単巻変圧器を使用すると、変圧器の kVA 定格がシステム電力定格のわずか 17% になるため、変圧器を高効率で稼働させることができます。単巻変圧器を必

要とする北米のシステムでは、単巻変圧器損失によって配電システムの効率が低下します。これにより、北米の一部のAC配電システムの効率はおよそ1%低下します。しかし、OEMメーカーの間で、北米の480/277Vシステムですでに使用されているAC277Vに対応できるよう電源の入力範囲を拡大する提案がなされています。これが実現されれば、単巻変圧器を排除できるだけでなく、図8の電源効率曲線が示すように、電源の効率が大幅に向上し（赤の曲線と黄色の曲線の差異）、その結果、AC配電システムの全体的な効率はDC380Vと等しいか、それよりも若干高くなります。

IT負荷の変動が効率に与える影響

このホワイトペーパーでは、給電経路の効率比較を、IT負荷50%として計算しています。配電システムの効率、ひいてはデータセンタ全体の効率は、IT負荷との相関関係によって変動します。効率とIT負荷との関係は、APCホワイトペーパー113『データセンタの電力効率のモデル化』で説明されているように、正確にモデル化することができます。

このホワイトペーパーでの効率比較には、IT機器に内蔵されたPSU（電源ユニット）の効率も含まれます。実際にデータセンタで合計IT負荷合計値が変化する場合、その主な要因は既存のIT機器の「負荷の変動」ではなく、IT機器の「数量」の変化によるものです。したがって、データセンタのIT負荷合計値の変動は、UPSおよび配線システムの負荷に反映されますが、一般的に個々のPSUの運転負荷との相関関係はありません。電力はUPSから配線を通じて供給され、IT電源を介してIT負荷に給電されますが、すべての機器が同じ割合の定格容量で（つまり同じ運転負荷で）動作するわけではありません。合計電力は通常、多数の（場合によっては数千の）IT機器に供給されます。

データセンタが容量の5%で稼動すると仮定すると、UPSの運転負荷は5%（その容量の5%）と推定されますが、これは個々の下位ITのPSUの運転負荷を示しているわけではありません。UPSの5%の負荷は、以下のいずれかに起因します。

- 少数のIT機器が定格入力電圧の100%で動作している、もしくは
- 20倍の数のIT機器が定格入力電力の5%で動作している、もしくは
- 100倍の数のIT機器が定格入力電力の1%で動作している

UPSの5%の運転負荷は、そのUPSが電源を供給するすべてのIT機器の合計運転負荷と明らかに関連していますが、IT機器個々の運転負荷は相互に関連せず、それぞれが同じようにUPSの5%の運転負荷と関連することはありません。

このことは、データセンタの給電経路の3セグメントのうち（負荷の大きさに関係なく配線は効率にほとんど影響を与えないことから）IT負荷の変動に応じたデータセンタ全体の効率の変動にもっとも大きな影響を及ぼすのは、負荷（ACまたはDC）に応じた「UPS効率」の変動であることを意味します。

これらの理由から、IT負荷の変動が効率に与える影響は小さく、ACまたはDCのいずれもITの異なる運転負荷で効率上の利点が得られるとは考えられません。

したがって、このホワイトペーパーの分析と結論に関して、IT負荷の変動の影響は重要ではありません。

分析結果の信頼性

DC配電システムとAC配電システムの効率の確認に使用した数学的計算に、疑いの余地はありません。どの配電装置も100%以上の効率はないことについても、疑いの余地はありません。したがって、理論上可能なDCシステムの効率に関する利点の数値は、出版物で発表された利点の数値を明らかに下回ります。



Electrical Efficiency
Modeling for Data Centers

このホワイトペーパーでは、効率分析に大きな影響を与える主な値は、以下の3つのみであることを示します。

1. AC UPS システムの効率
2. DC UPS システムの効率
3. IT電源（PSU）をDC稼動に変換することにより実現可能な効率の向上

これら3つの値の不確実要素が効率比較の結論に影響を及ぼす可能性があるため、今後の研究や新技術によって、これらの値が著しく変化する可能性があるかどうかを検討することは重要です。

AC UPS の効率

このホワイトペーパーでAC UPSの効率に関して使用した値は、現在入手可能な実際の製品と、第三者機関により認定された性能の効率に基づいています。APCでは、まもなく市場に登場する新しい製品が同様の性能、または若干すぐれた性能を達成すると考えています。はるかに効率の低い旧来のAC UPS製品の多くが今後も市場で販売されることは確実です。したがって、効率の高いデータセンタを構築する場合は、高効率のUPSを使用する必要があります。現時点では、今後数年間で最高のAC UPS効率の大幅な向上は実現されないものと考えられます。

DC UPS の効率

このホワイトペーパーでDC UPSの効率に関して使用した値は、メーカーの公表データに基づいています。これよりも効率の高いデータセンタ配電のDC UPSは確認されていません。ただし、より効率の高いDC UPSシステムの可能性を検討することには意味があります。DC UPSでは、ACをDCに変換し、安定した出力を提供し、力率補正済みの入力を主要設備に提供する必要があります。これらの制約の範囲内で、96%を超える効率のDC UPSシステムが考えられますが、まだ実証されていません。現在、DC UPSに類似する商用機器で最良のものは太陽光発電性の商用電源連係用インバータです。これは効率が最適化され、技術的には逆給電で動作するDC UPSです。California Energy Commissionが発表したデータ分析によれば、その効率は50%負荷時で94%から最高96%の範囲であるとされています。これにより、DC UPSのモデルで推定される96%の効率の有効性について、有力な確証が得られました。

しかしながら、APCが行った研究では、DC UPSシステムの効率は最終的に96%を若干上回る可能性があるかと推定されます。したがって、最適化されたDC UPSでは、市販されているAC UPSとほとんど同程度の効率が得られる可能性があると考えられます。これが実現できれば、最良のDC配電システムとAC配電システムの効率は基本的に等しくなり、DC変換により得られるIT電源の効率の向上が唯一の差異になります。

IT電源をDCに変換することによる効率の向上

IT電源（PSU）をDC380Vに変換することで効率が向上することについては、一般的に合意されています。このホワイトペーパーでは、新しいAC電源は、幅広い負荷範囲において90%を超える効率が得られることを示しました。実際に、いくつかのモデルは2008年に発売が予定されており、すでにピーク効率94%を達成しています。このことは、DC電源の効率が100%であったとしても、DC電源効率の理論上の優位性は最大でも6%（100% - 94% = 6%）でしかないことを意味します。

このホワイトペーパーの分析では、Sun Microsystemsの調査データに基づいて向上率1.5%を使用しました。分析の結果、これらの向上率が得られたという事実は、1.5%の向上率が期待できるかどうか、どの程度の向上率が達成されるかといった質問に対する回答にはなりません。以下のセクションでは、DCによる稼動に変換することによりどれくらいの電源効率の向上が可能かを判断する理論上の根拠について見ていきます。

PSUの主な2つの機能は以下のとおりです。

- 計算処理回路と入力電源との間に安全のための絶縁を提供します。
- 入力AC電源を安定化されたDC12Vに変換します。

DC配電方法を使用した場合でも、安全のための絶縁の必要性和安定化されたDC12Vを提供する必要性は排除されません。ただし、DC配電方法を使用すると、ACからDCへの変換を行うPSU回路の一部を排除することができます。Sun Microsystemsは最近の発表で、PSUをACからDC入力動作に変換することで得られる潜在的な効率の向上に関する定量的な分析を提示しました。図10は、サーバPSU内の電力使用量の詳細な内訳を示しています。「DCにより排除」と記載された項目は、PSUがDCに変換された場合に確実に排除できるパーツによる損失を示します。「DCにより削減」と記載された項目は、逆充電保護の必要性により完全には排除できないが、PSUがDCに変換された場合に半減できる損失を示します。

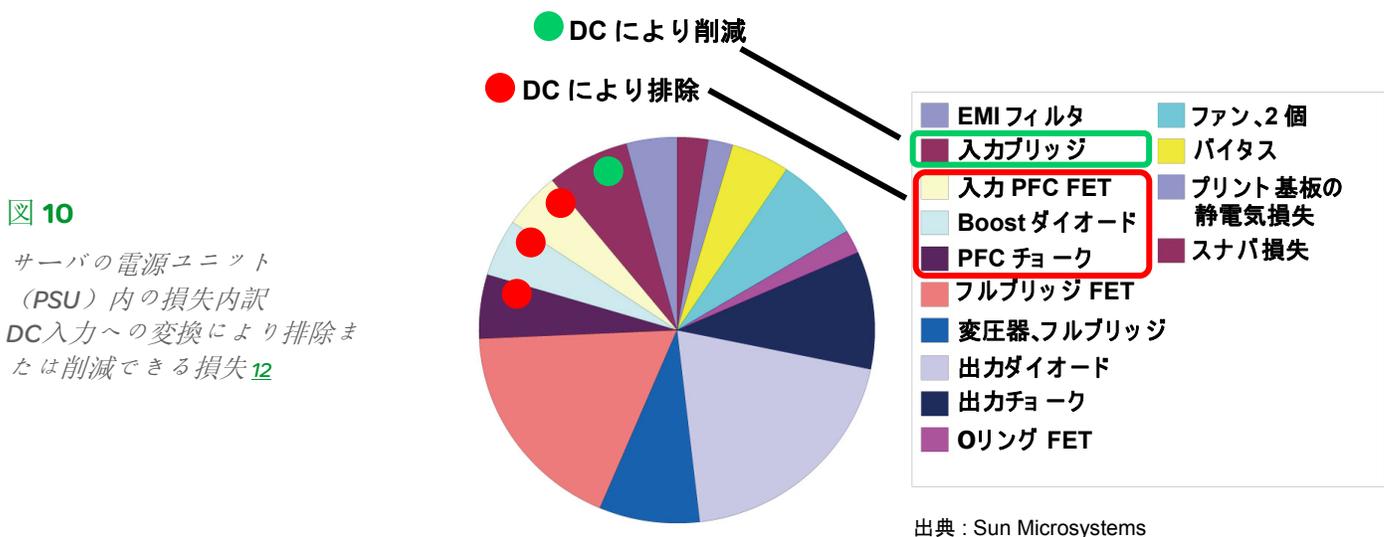


図10から、DCへの変換により、PSUの損失をおよそ20%排除できることが分かります。この損失の削減によって、電源効率がどのくらい向上するかを判断するには、次の計算を行います。

$$\begin{aligned}
 \Delta\eta &= \eta' - \eta \\
 &= (1 - \text{loss}') - \eta \\
 &= (1 - (1 - \eta) \times (1 - \text{PSLR})) - \eta \\
 &= (\eta + \text{PSLR} - \eta \times \text{PSLR}) - \eta \\
 &= \text{PSLR} \times (1 - \eta)
 \end{aligned}$$

η はAC電源効率、 η' はDC入力に変換後の効率、PSLRは、DC変換による電源損失の削減を示します。最良の電源効率が91.5%、DC変換による電源損失の削減率が20%とすると、効率の向上率は1.58%になります。

注意すべきことは、効率の向上率は電源の最初の効率によって大きく左右されるため、効率の低い電源ほどDCへの変換により得られる効率の向上率が高くなる点です。ただし、将来の効率の高いデータセンタでは必然的に電源効率も高くなることが予想され、実現可能な効率の向上率は1.5%程度にとどまります。

現在の世代のIT機器に対するPSU効率が90%以上とすると、計算により、IT機器の電源をDCに変換して得られる効率の向上率はおよそ1.6%と予想されます。この結果は、Sun Microsys-

temsが最近示した「DC/DC電源は通常、AC/DCよりも効率が1~3%高い」という結論と一致します。13また、Lawrence Berkeley National LaboratoryによるDC電源方式データセンタのデモンストレーションプロジェクトのおよそ2%の向上率という結果とも一致します¹⁴。

数値の信頼性について

AC配電システムとDC配電システムとの比較で使用された数値は信頼性の高いものです。DC UPSとAC UPSの効率値の変動は、使用された効率値の1%以内と予想されます。配線損失は非常に小さいため、重要ではありません。電源効率は4%以上の向上が予測されます。この利点はACおよびDCシステムの両方で得られます。ACからDCに変換することで得られる効率の向上は、90%の電源効率ではおよそ1.6%、94%の電源効率ではおよそ1%に制限されます。

この分析に基づいて、DCシステムではACシステムよりさらに1%効率が高くなると考えられます。

これが実現すると、この分析の基準となるケースに比べて、DC配電方法による向上率がおよそ1.5%に上昇し、これに応じてデータセンタ全体の電力消費量が1.1%削減されます。ただし、標準的なAC277V電源に変換した場合も、北米のAC設備の効率がおよそ1%向上します。これが実現できれば、AC配電方法とDC配電方法の効率は同等になります。

他の出版物の内容が誤りである理由

この分析の結果は、多数の出版物の記事に発表された内容と大きく異なります。効率向上の値を掲載した出版物の記事のほとんどは、Lawrence Berkeley National Laboratoryが発表した報告書の中の説明に引用しています¹⁵。Lawrence Berkeley National Laboratory報告書の記述を以下に紹介します。

「このケースでは、平均的なデータセンタで効率を28%以上向上させることが可能です。これは、示したように、DC配電システムが、現在データセンタで使用している一般的なACシステムより28%少ないエネルギーで動作できる可能性があることを意味します。データセンタのHVAC負荷は、通常、IT負荷とほぼ同じであるため、配電と変換で28%改善されるということは、全体的な施設レベルでの効率も28%向上することを意味します。」

引用したこの記述の問題点は、新しい施設ではDC配電方法を使用することによりACよりも施設全体の効率が28%高くなると読者を誤解させることにあります。この値はこのホワイトペーパーの分析報告が示す向上率の30倍にあたり、明らかに誤りです。LBNL報告書の表ES3に示されるように、28%という値は、DC設備においてIT機器の電源の効率が19%高いことを前提とした場合に得られる値であり、この前提は新しい電源には当てはまりません。Lawrence Berkeley National Laboratoryの詳細な報告書には、新しい電源の効率の向上率はせいぜい2%であることは記載されていません。また、28%という値は、AC UPSの効率が85%であることを想定していますが、これは市販のAC UPSシステムの効率よりも11.2%低い数値です。さらに、この記述では、全体的な施設レベルの向上率を下げる空調設備の負荷によらない一定の損失が考慮されていません。

> 矛盾する結果: ご確認ください

このホワイトペーパーと大幅に異なる結論については、間違った仮定、効果の重複、絶対測定値の誇張がないか確認してください。

確認が必要な事項:

- DC UPS の効率が 96%以上
- AC UPS の効率が 96%未満
- AC オペレーションと DC オペレーション電源効率の差異が 2%を超える
- 400/230V 未満の変圧器のない AC 配電システムとの比較
- 第三者によって認定されていない効率データ
- 給電経路の節減分を超えるデータセンタ全体の電力節減（パーセント）（いくつかの一定損失が存在するため、データセンタ全体の電力節減率は常に給電経路の節減率を下回る）
- AC と DC 間の配線損失の大きな差異（配線損失は基本的に同じ）
- AC シナリオと DC シナリオの各セグメントで確認されている最良の効率が総合されていない
- DC 配電と他の効率の向上または IT 負荷削減方法が混在する研究分析
- 非常に大規模な設備に関する絶対数量（ドル、ワットまたはサーバ台数）で表された節減数値

これらの不正確な仮定と混乱をまねく分析によって、結論が歪曲され、DC配電システムの利点が誇張される可能性があります。

これらの不適切な仮定にもとづいた分析では、LBNL報告のとおり28%という値が導き出されますが、このホワイトペーパーの分析結果では、データセンタの電力消費量においてDCがもたらす利益はわずか0.94%です。LBNL報告の計算でUPSと電源効率を適切な値に調整すれば、LBNL報告の結論はこのホワイトペーパーの結論と一致します。

結論

従来のデータセンタの配電システムには多大な損失が存在し、新しいデータセンタ、そして可能であれば

従来のデータセンタでこれらの損失を削減することは、すべてのデータセンタオペレータの利益につながります。

現時点では安全規則、配電装置、およびDC380V入力のIT製品が存在しないため、現在のデータセンタではAC配電システムを使用するしか選択の余地がありません。ほとんどの場合、新たなAC設計において高い効率を指定することができ、非常に高い配電効率を達成するためのソリューションを入手することができます。

将来に向けて、顧客とサプライヤの双方は、DCシステムがACに代わる現実的な方法であるかどうかを考慮する必要があります。

正しく設計された最新世代の高効率AC配電システムはすでに高い効率を備えているため、代替DCシステムが大幅な向上をもたらす余地はあまりありません。入手可能な最良のデータを使用して、仮想DC380Vシステムによりもたらされるデータセンタの電力消費量の削減率はわずか0.94%であることが分かりました（表2を参照）。

配電システム効率の約1%の向上を目標とする場合は、北米では標準の配電システムをDC380VではなくAC277Vに変更することが目標を達成する最短の方法です。AC277Vでの配電はDC380Vと同じ効率を備え、既存の機器と標準を使用し、異種混合環境での実装が簡単であり、すぐにも実装することができます。（訳注：日本ではヨーロッパ、アジアで一般的なAC400/230Vに変更することができます。）

効率の向上はいかなる規模であれ有意義です。ただし、IT、設計、設置、および電力の各業界における10年間の蓄積をわずか1%の向上を得るために大幅に変更することは妥当な方法とは思われません。

特に、データセンタの空調システム効率の向上に焦点を当てることで20倍近く（総電力消費量のおよそ20%）の向上の達成が実現可能となればなおさらです。実際に、空調システム設計または動作設定をわずかに調整するだけで、データセンタの電力消費量に変化をもたらすことを考えると、データセンタをACからDCに変換することで得られる利点は薄れます。

ほとんどすべての出版物の記事は、Lawrence Berkley National Labs報告書の不適切で誤解をまねく記述に頼ったため、DCシステムのケースについて大幅に誇張した内容を掲載しましたが、このホワイトペーパーで説明したように、これは誤った解釈です。

現在稼動しているデータセンタ、そして現在建設中のデータセンタの多くで、全体的な配電効率が最適化されず、データセンタの総電力使用量の10%が浪費されるということは事実です。DC配電方法がエネルギー節減方法として提案されてきましたが、その実現には何年も要する恐れがあります。しかし、ほぼ同じ効率の向上をもたらし、しかもすぐに導入できる新しいACアプローチが存在します。データの体系的な分析は、DC配電システムがこの問題に対する正しい解答ではないということを示しています。



著者について

ニール・ラスムセンは APC-MGE 社の CTO（最高技術責任者）です。ラスムセンは、世界最大規模の R&D 予算を注ぎ込んだ、クリティカルネットワーク向けの電力、冷却、ラックインフラのプロジェクトにおいて技術面での指揮をとっています。現在は、高可用性と拡張性を備えたモジュール式のデータセンターソリューションの開発を指揮し、**InfraStruXure** システムの主任設計者でもあります。

1981年に APC を設立するまでは、MIT（マサチューセッツ工科大学）で電子電気工学を専攻し、1979～1981年までは、MIT のリンカーン研究所でフライホイールエネルギー貯蔵システムと太陽光発電システムの研究に携わりました。

ジェームズ・スピタエルスは APC-MGE 社のコンサルティングエンジニアです。ウースター工芸大学で電気工学の学士号および修士号を取得しています。同社での 16年間の在職中に、UPS、通信製品、アーキテクチャおよびプロトコル、機器のエンクロージャ、配電製品を開発し、複数の製品開発チームを管理しました。UPS および電源システムに関する 4 件の米国特許を取得しています。



リソース



すべてのホワイト
ペーパーを閲
覧する
whitepapers.apc.com



AC vs. DC Power Distribution for Data Centers

APC ホワイトペーパー 63



Electrical Efficiency Modeling for Data Centers

APC ホワイトペーパー 113



Increasing Data Center Efficiency by Using Improved High Density Power Distribution

APC ホワイトペーパー 128



すべての APC
TradeOff Tools を
閲覧する
tools.apc.com



Data Center AC vs. DC Calculator

APC TradeOff Tool 3



お問い合わせ

このホワイトペーパーに関するご意見やお問い合わせに関して

Data Center Science Center, APC by Schneider Electric
DCSC@Schneider-Electric.com

計画中のデータセンタープロジェクトに関する具体的なお質問がありましたら

シユナイダーエレクトリックグループ APC までお問い合わせください

その他の参照資料

- ¹ Symmetra MW - TÜV Test Report Number 21113774_010、2005年9月26日 Symmetra PX - TÜV Test Report IS-EGN-MUC/ed、2007年6月12日 Smart-UPS VT - TÜV Test Report No. 21113774_008、2005年11月11日
- ² California Energy Commission 報告による SatCon データ
http://www.consumerenergycenter.org/erprebate/inverter_tests/summaries/Satcon-AE-75-60-PV-A.pdf
- ³ Lawrence Berkeley National Labs report: 『High Performance Buildings: Data Center - Uninterruptible Power Supplies (UPS)』2005年12月、図 17
http://hightech.lbl.gov/documents/UPS/Final_UPS_Report.pdf
- ⁴ 『Evaluation of Direct Current Distribution in Data Centers to Improve Energy Efficiency』著者：A. Pratt および P. Kumar、The Data Center Journal 2007年3月
- ⁵ Lawrence Berkeley National Labs 主催 2007年7月12日 DC データセンター関係者会議、Stefan Lidstrom による Netpower Labs プレゼンテーション、PDF 文書 P.31/67、スライド 8
<http://hightech.lbl.gov/presentations/dc-powering/dc-stakeholders/1-Voltage.pdf>
- ⁶ Lawrence Berkeley National Laboratory: 『DC Power for Improved Data Center Efficiency』2007年1月、要約 P.5 表 ES1
http://hightech.lbl.gov/documents/DATA_CENTERS/DCDemoExecutiveSummary.pdf
- ⁷ Lawrence Berkeley National Laboratory: 『High Performance Buildings: Data Centers - Server Power Supplies』2005年12月
http://hightech.lbl.gov/documents/UPS/Final_UPS_Report.pdf
- ⁸ Lawrence Berkeley National Labs 主催 2007年7月12日 DC データセンター関係者会議、Mike Bushuel による Sun Microsystems プレゼンテーション
<http://hightech.lbl.gov/presentations/dc-powering/dc-stakeholders/1-Voltage.pdf>
- ⁹ Uptime Institute Symposium 2007年3月5日、Paul Perez による Hewlett-Packard プレゼンテーション
http://www.uptimeinstitute.org/jsymp/index.php?option=com_content&task=view&id=45&Itemid=61
- ¹⁰ Guy AlLee、Milan Milenkovic、および James Song による Intel Day 2007 プレゼンテーション 『Data Center Energy Efficiency Research @ Intel Day』2007年6月
http://download.intel.com/pressroom/kits/research/poster_Data_Center_Energy_Efficiency.pdf
- ¹¹ Intel ホワイトペーパー 『Air-Cooled High-Performance Data Centers: Case Studies and Best Methods』著者：Doug Garday および Daniel Costello、2006年11月
<http://www.intel.com/it/pdf/air-cooled-data-centers.pdf>
- ¹² Lawrence Berkeley National Labs 主催 2007年7月12日 DC データセンター関係者会議、Mike Bushuel による Sun Microsystems プレゼンテーション、PDF 文書 P.19/67、スライド 9
<http://hightech.lbl.gov/presentations/dc-powering/dc-stakeholders/1-Voltage.pdf>

¹³ Lawrence Berkeley National Laboratory: 『DC Power for Improved Data Center Efficiency』 2007年1月、要約 P.6

http://hightech.lbl.gov/documents/DATA_CENTER/DCDemoExecutiveSummary.pdf

¹⁴ Lawrence Berkeley National Laboratory: 『DC Power for Improved Data Center Efficiency』 2007年1月、要約 P.6

http://hightech.lbl.gov/documents/DATA_CENTER/DCDemoExecutiveSummary.pdf

¹⁵ Lawrence Berkeley National Laboratory: 『DC Power for Improved Data Center Efficiency』 2007年1月、要約 P.6

http://hightech.lbl.gov/documents/DATA_CENTER/DCDemoExecutiveSummary.pdf