

# UPSシステム構成の 比較

ケビン マッカーシー

White Paper #75

**APC**<sup>®</sup>  
Legendary Reliability™

## 要約

商用電源入力からデータセンタの重要な負荷機器に電力を供給するには、主に5つのUPSシステム構成があります。用途ごとに最適な構成を選択するには、可用性の必要度、リスク許容度、データセンタの負荷機器の種類、予算、および既存のインフラを考慮します。

このホワイトペーパーでは、これらの構成について説明し、それぞれの利点と問題点について解説します。また、各構成が可用性に及ぼす影響についても示し、適切な設計を選択するためのガイドラインを提示します。

## はじめに

先進国の送配電システムの信頼度は比較的高いものですが、調査では、最高度の商用電源システムでさえ、重要かつノーストップのデータ処理の要求に十分に対応していないことが分かりました。商用電源障害によって生じるデータ処理エラーやダウンタイムが見込まれる場合、ほとんどの企業では送配電システムと重要な負荷機器の間にUPS（無停電電源装置）を設置することを選択します。用途に応じて選択されたUPSシステム設計の構成は、サポートされるIT機器の可用性に直接影響を及ぼします。人為的なエラー、コンポーネントの信頼性、保守スケジュール、回復時間など、システムの可用性に影響を及ぼす要因は多数あります。選択される構成によって、これらの要因がシステム全体の可用性に及ぼす影響について、詳しく検証してみましょう。

従来、多くの設計エンジニアが、重要な負荷機器をサポートする完成度の高いUPSの構築に取り組んできました。これらの設計には一般に名称が付与されていますが、それらの名称は、可用性のどの部分に当てはまるかを必ずしも表すわけではありません。UPSの設計エンジニアやUPS製造メーカーが、各種UPS構成に付与した名称の例として、並列冗長、待機冗長、共通予備、ホットタイ、ホットシンク、複数並列母線、システム+システム、キャッチャシステムなどが挙げられます。これらの名称に付随する問題は、人によって異なる概念を意味することがあったり、さまざまな解釈が可能になったりすることです。現在の市場にみられるUPSの構成は多種多様ですが、(1) 並列非冗長、(2) 待機冗長、(3) 並列冗長、(4) 共通予備、(5) システム+システムの5つの構成が最も広く採用されています。

このホワイトペーパーではこれらのUPSシステム構成について説明し、そのそれぞれの利点と問題点を解説します。システム構成は、負荷の重要性に応じて選ぶ必要があります。適切なシステム構成を選択するときには、ダウンタイムの影響や企業のリスク許容度を考慮ことが推奨されます。特定の用途に適した構成を選ぶ方法については、ガイドラインを提示します。

## 可用性とコストの尺度

### 可用性

データ処理マネージャが可用性の高さを求めるにつれ、UPS構成の可能性もますます広がっています。「可用性」とは、電源が通電されている時間と、電源が正常に提供されて重要な負荷機器をサポートすることが可能な時間の推定割合を指します。付録で解説する分析では、このホワイトペーパーで示す構成の可用性の違いを定量化します。どのモデルでも、分析は簡便化されていることを想定する必要があるため、ここでの可用性の値は実際の状況よりも高くなります。最も一般的な5つの設計の構成を比較するうえで、表1に示す簡単な尺度を使用します。これは、付録で示す分析結果の可用性の順位付けを示すものです。各種構成に関する説明を検証すると、この順序の理由が分かります。

## 層(レイヤ)

すべてのUPSシステム（および配電装置）は、定期的に保守を行う必要があります。システム構成の可用性は、その構成が有する機器の故障に対する耐性、通常保守を実施する能力、および重要な負荷機器を保守しながら日常的なテストを実施する能力に左右されます。詳細は、<sup>1</sup>Uptime Institute社が作成した「Industry Standard Tier Classifications Define Site Infrastructure Performance（業界標準の層分類によって決定されるサイト インフラのパフォーマンス）」で詳述しています。Uptime Institute社のドキュメントに記載されている層（レイヤ）は、このホワイトペーパーで言及する5つのUPSアーキテクチャに該当します（表1を参照してください）。

## コスト

構成の可用性の尺度が高くなるほど、コストも高くなります。各設計のおよそのコスト範囲を表1にまとめます。これらのコストは、新規データセンタの構築に要するものであり、UPSのアーキテクチャコストだけではなく、データセンタの完全な「NCPI（ネットワークに必須の物理インフラ：Network Critical Physical Infrastructure）」にかかるコストも含まれます。NCPIは発電機、スイッチギア、冷却システム、消化装置、フリーアクセスフロア、ラック、照明、物理的な空間、およびシステム全体の構築で構成されます。ここに含まれるのは初期コストのみであり、保守契約などの運用コストは含まれません。ラックあたり平均2.79平方メートルを想定しており、ラックあたり2.3 kWから3.8 kWの電力密度を基に算出しています。ラックあたりの単価は、建物の規模が大きくなるにつれて減少します。建物の規模が大きくなると、床面積も広くなるのでコストを分散でき、ベンダーの購買力を高められるためです。

表1 – UPS構成の可用性およびコストの尺度

構成	可用性の尺度	層のクラス <sup>1</sup>	データセンタのコストの尺度 (US\$)
容量(N)	1 = 最低	層I	\$13,500~\$18,000 / ラック (約¥1,485,000~¥1,980,000/ラック)
待機冗長	2	層II	\$18,000~\$24,000 / ラック (約¥1,980,000~¥2,640,000/ラック)
並列冗長(N+1)	3		
共通予備	4	層III	\$24,000~\$30,000 / ラック (約¥2,640,000~¥3,300,000/ラック)
システム+システム (2N、2N+1)	5 = 最高	層IV	\$ 36,000~\$42,000 / ラック (約¥3,960,000~¥4,620,000/ラック)

<sup>1</sup> [www.upsite.com](http://www.upsite.com)

## 「N」とは？

UPS設計の構成は、一般に「N」という用語を使用して記述されます。たとえば、並列冗長システムはN+1設計とも呼ばれ、システム+システム設計は2Nとも呼ばれます。「N」とは、重要な負荷機器が「必要とするもの」を表します。つまり、保護機器に電源を供給するために必要な電力のことです。RAID (Redundant Array of Independent Disks) システムなどのIT機器は、「N」によって表すことができます。たとえば、ストレージ機能に4つのディスクが必要で、RAIDシステムに4つのディスクがあるような場合は「N」設計です。また、5つのディスクがあり、ストレージ用として必要なディスク数は4つだけであれば、N+1設計になります。

従来、重要な負荷機器の電力要件とは、UPSシステムによって10年または15年後も負荷をサポートできるように、将来的な見通しが立つものでなければなりません。この負荷に関する計画は、当然、困難を伴う作業となってきました。1990年代に、この議論の枠組みとして、また新旧の設備を比較するために「ワット／面積」の概念が生まれました。しかし、面積が何であるかについて合意に至らないため、この方法で電力を測定しても解釈に違いが生じます。近年では、技術の高密化の流れを受け、システム容量を向上させるため「ワット／ラック」の概念が使用されています。スペース内のラック数はとても簡単に数えられるため、この方法によるものがより信頼性が高いことが分かりました。負荷機器 (N) は、デザインのプロセスを正しい場所から着手する方法で選択する必要があります。

現在は、拡張性の高いモジュール式のUPSシステム設計も配備可能であるため、ITの「必要性」の変化に応じてUPS容量も増加させることができます。詳細については、APCホワイトペーパー #37『データセンタ・インフラの過剰設備により発生する不要なコストを回避するために』を参照してください。

## 容量または「N」システム

Nシステムとは、簡単に言うと、UPSの単一モジュールまたは並列的なモジュールのセットで構成され、その容量が重要な負荷機器の予測と一致するシステムのことです。このタイプのシステムは、UPS業界では最も一般的な構成です。オフィスデスクの下に設置されている小型のUPSはN構成です。同様に、面積が465平方メートル、予測設計容量が 400 kWのコンピュータールームで、1台の 400 kW UPSを使用する場合や、2台の200 kW UPS を共通母線に並列に配置する場合もN構成になります。N構成とは、重要な負荷機器を保護するための最小要件として理解することができます。

上記のどちらの例もN構成ですが、UPSのモジュール設計は異なります。小型UPSとは異なり、単相電力（およそ 20 kW）を超えるシステムは内部の静止型バイパススイッチを備えており、UPSモジュールに内部障害が発生した場合に、負荷を安全に商用電源に切り換えられる設定となっています。UPSが静止型バイパスに切り換えられるタイミングは、重要な負荷機器を最大限に保護しながら、モジュール自体に障害が発生しないように保護するため、メーカーが慎重に設定します。以下の例では、このような保護策の1つを図で示します。三相UPSのモジュール

が過負荷定格となることは珍しくありません。この定格の1つに「モジュールは定格負荷の125% 10分間で切換え」と記されています。125%の過負荷が検出されると、内部クロックが10分のカウントダウンを開始し、モジュールはタイミングルーチンを実行します。タイマが終了しても負荷量が通常レベルに戻っていなければ、モジュールは負荷を静止型バイパスに安全に迂回させます。バイパスが起動されるシナリオは多数あり、UPSモジュールの仕様書に明記されます。

N構成の設計を拡張する方法として、システムに「保守」または「外部」バイパス機能を持たせることも可能です。外部バイパスを使用すると、障害が発生した場合でも、UPSシステム全体（モジュールおよび静止型バイパス）を安全にシャットダウンし、保守作業を実施できます。保守バイパスはUPSに給電する盤と同じ盤から発しており、UPSの出力パネルに直接接続されます。これは当然、通常は開いている回路ですが、UPSモジュールが静止型バイパスに切り換えられたときのみ閉じられます。UPSが静止型バイパスに切り換えられていないときに保守バイパス回路が閉じられないように、設計の段階で考慮する必要があります。保守バイパスは、システムに正しく実装されると、システムの重要なコンポーネントとなります。これは、負荷をシャットダウンしなくても、UPSモジュールを安全に動作させることができるためです。

「N」構成のほとんどは（特に100 kW以下のものは）、建物全体の電気システム構成を特に考慮せずに配置されています。通常、建物の電気システムは「N」構成で設計されているため、「N」UPS構成が給電するコンポーネント以外は何も必要ありません。図1に、一般的な単一モジュールUPSシステム構成を示します。

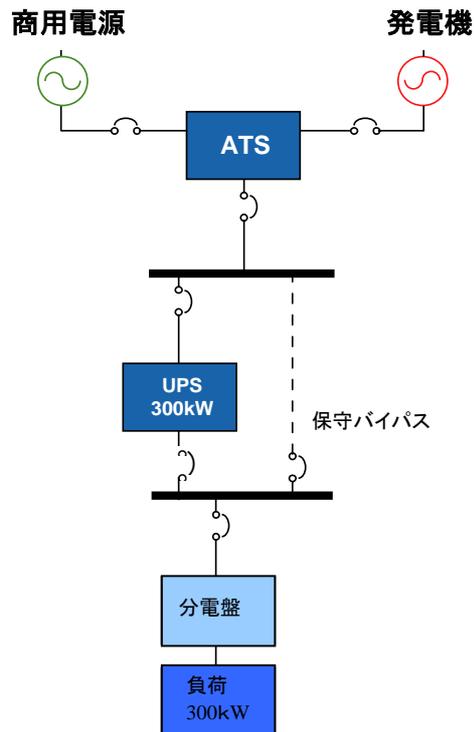


図1 - 単一モジュール「容量」UPS構成

#### 利点:

- 概念上、コスト効率の高い構成である。
- UPSの容量がフル活用されるため、UPSの効率性を最適化できる。
- 商用電源に比べ、高い可用性を提供できる。
- 電力要件が高まっても拡張可能（同じ設備内に複数のユニットを構成することもできる。ベンダーまたはメーカーによっては、同じ定格のUPSモジュールを最大8個まで並列で使用できる）。

#### 問題点:

- UPSモジュールに障害が起きたときに負荷がバイパスに切り換えられるため、負荷が保護されていない電源に接続されてしまい、可用性が制限される。
- UPS、バッテリー、または下位機器の保守作業中に、負荷が保護されていない電源にさらされてしまう（通常、少なくとも年に1度、2～4時間ほど）。
- 冗長性がないため、UPSが故障したときに、負荷が保護されなくなる。
- 単一障害点が多数ある。つまり、システムの信頼性は非常に低い。

## 待機冗長

待機冗長構成は「N+1」システムとも呼ばれますが、同じく「N+1」と呼ばれる並列冗長構成とは大きく異なります。待機冗長の設計概念には並列母線は不要で、かつモジュールの容量を同一にしたり、同一製造メーカーに統一したりする必要はありません。この構成では、負荷に給電するメインまたは「主」UPSモジュールがあります。「待機」または「二次」UPSは、主UPSモジュールの静止型バイパスに給電します。主UPSモジュールには、静止型バイパス回路用の入力コンバータと分離されている必要があります。このようにして、既存のUPSを完全に交換しなくても、前述の非冗長的な構成にある程度の冗長性を実現できます。図2は、待機冗長UPS構成を示したものです。

通常の動作環境では、主UPSモジュールは重要な負荷をすべて給電し、待機モジュールは完全に無負荷の状態です。主モジュールの負荷が静止型バイパスに切り換えられると、待機モジュールは直ちに主モジュールの負荷をすべて引き継ぎます。待機モジュールは、負荷を迅速に引き継ぐことができるかどうかを考慮し、慎重に選んでください。迅速に負荷を受け継ぐことができない場合は、それ自体が静止型バイパスに切り換えられ、この構成によってもたらされる保護が意味をなさなくなります。

いずれかのモジュールに負荷を切り換わるだけで、そのモジュールが給電を継続します。ここでも出力の単一障害点があるため、保守バイパスは重要な設計要素です。システムレベルの予防保守を実施するため、システム全体を年に2~4時間ほどシャットダウンしなければなりません。この構成によって信頼性は向上しますが、その利点も、遮断機やその他の関連制御機器の操作の複雑さによって弱められます。

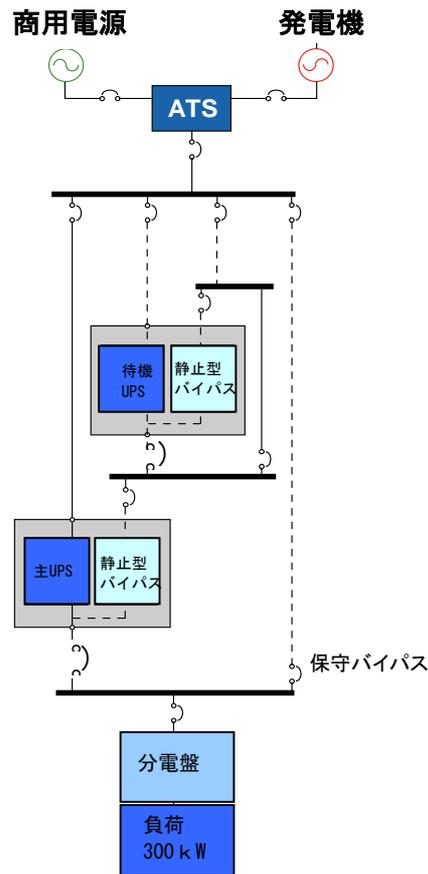


図2 - 待機冗長UPS構成

### 利点:

- 柔軟に製品を選択でき、他のメーカーの製品やモデルと組み合わせることができる。
- UPSに障害対策を提供できる。
- 同期は不要である。
- 2モジュールシステムにしては比較的成本効率が低い。

### 問題点:

- 待機モジュールから電力を受けるためには、主モジュールの静止型バイパスの正常動作に依存しなければならない。
- インバータ容量以上の電流を供給するには、両方のUPSモジュールの静止型バイパスが正常に動作していなければならない。

- 主モジュールがバイパスに切り換わったとき、待機UPSモジュールは負荷の急激な変動に対処しなければならない（このUPSは通常、長期間無負荷で動作している。すべてのUPSモジュールがこのタスクを実行し、バイパスモジュールを重要なモジュールに切り換えられるわけではない）。
- 遮断器と関連制御装置は、複雑であり、コストが高い。
- 待機UPSには負荷がまったくかかっていないが、動作を継続するために電力を要するため、運用コストが高くなる。
- 2モジュールシステム（主モジュールと待機モジュールを備えたシステム）では、バイパス電源として商用電源および他のUPSのいずれかを選べるように、少なくとももう1つ別の回路ブレーカを備えておく必要がある。そのため、共通の負荷母線を備えたシステムよりも複雑になる。
- 2つ以上の主モジュールがある場合は、バイパス電源として待機モジュールまたは商用電源のいずれかを選択するため、特別な回路が必要（静止型切換スイッチ）。
- システムあたり1つの負荷母線しかないため、そこが単一障害点となる。

## 並列冗長または「N+1」システム

並列冗長構成では、重要な負荷機器を商用電源に切り換えなくても、UPSの単一モジュールの故障に対処できます。UPSの目的は、商用電源の変動や停電から重要な負荷機器を保護することです。データの重要性が増し、リスク許容度が減少すると、静止型バイパスや保守バイパスに切り換えるという概念は、ますます最小限に抑えるべきだという見方が強くなってきます。それでも、N+1システム設計には静止型バイパス機能が必要であり、その多くは重要な機能を提供する保守バイパスを備えています。

並列冗長構成では、複数の同一サイズのUPSモジュールを、共通の出力母線に並列に配置します。このシステムは、「予備」電源が少なくとも1つのシステムモジュールの容量と一致する場合に冗長性があると考えられます。予備電源が2つのシステムモジュールと同じ容量を有する場合は、このシステムはN+2の冗長性を備えていることになります。並列冗長システムには、同じメーカーが製造する、同容量のUPSモジュールが必要になります。UPSモジュールのメーカーは、システム用の並列化ボードも提供しています。並列化ボードは、個々のUPSモジュールと通信するロジックを備えており、UPSモジュールは互いに通信し、完全に同期した出力電圧を発生します。並列母線は、システムの負荷量、システムの電圧、およびシステムレベルの電力特性を表示する監視機能も備えていることがあります。また、並列母線は、並列母線にあるモジュールの数、およびシステムの冗長性を保つために必要なモジュール数も表示しなければなりません。共通母線に並列化できるモジュール数には、論理的な最大数があり、この数はUPSメーカーによって異なります。並列冗長設計のUPSモジュールは、通常の動作環境では重要な負荷量を均等に共有します。いずれかのモジュールが、保守のために並列母線から取り外されると（または内部障害により取り外されると）、障害が起きたUPSモジュールの負荷は、残りのUPSモジュールが直ちに引き継ぐ必要があります。この機能により、どのモジュールが母線から取り外されても、重要な負荷機器を商用電源に接続しなくても修復することができます。

N構成の例で使用する465平方メートルのコンピュータールームでは、2つの400 kW UPSモジュール、または3つの200 kW UPSモジュールを共通の出力母線に並列化することで冗長性を実現します。並列母線は、冗長性を備えていないシステム容量と同じサイズになります。そのため、2つの400 kWモジュールで構成されるシステムは、定格容量が400 kWの並列母線を備えることになります。

N+1システム構成では、負荷の増加に伴い、UPS容量も増やすことができます。容量の割合が一定のレベルに達すると（UPSモジュールは、納品するまでに何週間、または何ヶ月も要することを考慮しつつ）新しい冗長モジュールを発注する必要があるため、容量判定基準を設定しなければなりません。UPS容量が大きくなればなるほど、この作業にはより大きな困難が伴います。大型UPSモジュールは何千kgもの重さになり、指定の場所に配置するには特別な装置が必要になります。通常、UPSルームには、このモジュールを設置するための場所が確保されています。大型UPSモジュールを設置するにはどのようなルームであってもリスクを伴うため、このような設備は入念に計画する必要があります。

冗長性を備えたUPSシステムを設計するには、システムの効率性が重要な考慮事項となります。負荷の低いUPSモジュールの効率性は、一般に、ほぼフル容量に負荷を有するモジュールよりも低くなります。各種サイズのUPSモジュールを使用するシステムでの、通常の動作負荷を表2に示します。このUPSモジュールは、すべて240 kWの負荷に給電しています。表が示すように、特定の用途向けに選択されたモジュールのサイズは、システムの効率性に大きな影響を及ぼすことがあります。負荷が低いときのUPSの効率はメーカーごとに異なるため、設計段階で調査する必要があります。

表2 – N+1構成

並列配置されたUPSモジュール	ミッションクリティカルな負荷機器	UPSシステムの総容量	UPSモジュールあたりの負荷率
2 x 240 kW	240 kW	480 kW	50%
3 x 120 kW	240 kW	360 kW	66%
4 x 80 kW	240 kW	320 kW	75%
5 x 60 kW	240 kW	300 kW	80%

図3は、2つのモジュールを使用した典型的な並列冗長構成を示したものです。この図では、これらのシステムでは単一UPSモジュールの故障に対処できるけれども、まだ並列母線に単一障害点が残っていることを示しています。容量設計の構成と同様、保守を実施するために並列母線を周期的にシャットダウンしなければならないため、この設計でも保守バイパス回路は重要な考慮事項となります。

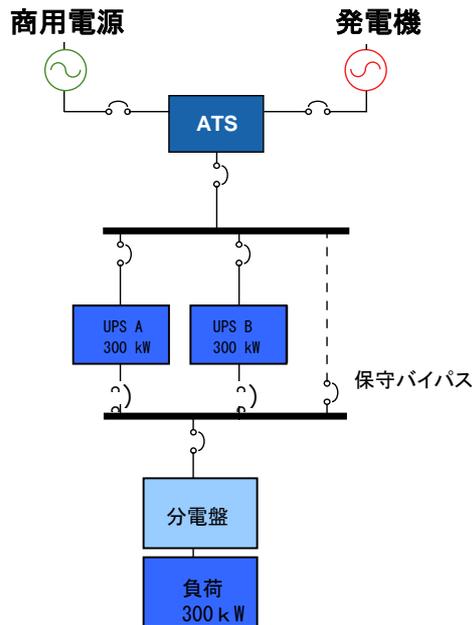


図3 - 並列冗長 (N+1) UPS構成

#### 利点:

- UPSモジュールのいずれかに障害が発生しても予備の容量を使用できるため、容量構成よりも高い可用性レベルを実現できる。
- 電力要件の増加に伴い、拡張が可能である。同じ設備に複数ユニットを構成できる。
- ハードウェアの配置が理論的にシンプルであり、コスト効率も高い。

#### 問題点:

- どちらのモジュールも同一設計、同一メーカー、同じ定格、同じ技術と構成でなければならない。
- UPSシステムの上位と下位に、まだ単一障害点が残る。
- UPS、バッテリー、または下位機器の保守中は、負荷は保護されていない電源にさらされる。保守は通常、年に1度、2~4時間ほど行われる。
- どのユニットも100%の割合で使用されていないため、稼働効率が低い。
- システムあたり1つの負荷母線しかないため、そこが単一障害点となる。
- 2つのUPSモジュール間で均等に負荷分散するには、ほとんどのメーカーでは外部静止型スイッチが必要である。外部静止型スイッチがなければ、15%の広い範囲内で負荷を共有しなければならない。これにより、機器にかかるコストが高くなり、複雑性も増す。
- メーカーのほとんどは、共通外部サービスバイパスパネルが必要である。これにより、機器にかかるコストが高くなり、複雑性も増す。

## 共通予備

現在の市場で最も広く使用されているのは、共通予備構成です。この設計は、あるエンジニアリング会社が、コストをかけずに完全な冗長性を実現しようと取り組んだ中で、1990年代後半に生まれました。この設計の基礎となるのは、それぞれが独立した入力給電部と出力給電部を備えた、3つ以上のUPSモジュールです。独立した出力母線は、複数のPDUおよびSTSを通じて重要な負荷機器に接続されています。商用電源の入口からUPSまでは、共通予備設計とシステム+システム設計（次のセクションで解説します）はよく似ています。どちらも並行保守が可能で、単一障害点を低減します。主な相違点は、重要な負荷機器への冗長電力経路を提供するために必要となるUPSモジュールの数と、UPSから重要な負荷機器までの配電構成です。負荷の要件「N」が増加すると、UPSモジュール数も節減できます。

図4と5は、2つの異なる共通予備設計概念に基づいた、300 kWの負荷を示すものです。図4では、共通予備設計で3つのUPSモジュールを使用します。これは別名「キャッチャシステム」とも呼ばれます。この構成では、モジュール3は各STSの二次入力に接続されており、いずれかの主UPSモジュールが故障すると、負荷を「キャッチ」します。このキャッチャシステムでは、モジュール3は通常は無負荷の状態です。

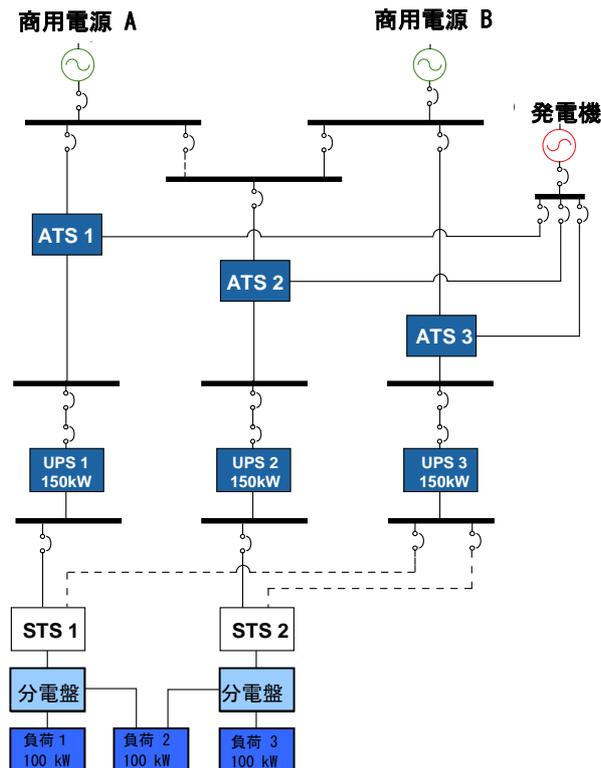


図4 - 共通予備の「キャッチャ」UPS構成



**並行保守** – 保守やルーチンテストを実行するために、電気コンポーネント、またはコンポーネントのサブセットを完全にシャットダウンすることです。その際、負荷を商用電源に切り換えなくてもかまいません。

**単一障害点** – 配電システムの要素のうち、システムにそれをバイパスする機能が備わっていなければ、ある時点でダウンタイムを生じさせるものです。N構成システムには、いくつかの単一障害点が含まれます。この単一障害点をいかに排除するかが、冗長性の主な鍵となります。

**静止型切換スイッチ (STS)** – STSには、2つの入力と1つの出力が備えられています。STSは通常、2つの異なるUPSシステムから電力を受け、そのいずれかから、安定化された電力を負荷に給電します。主UPSの給電部が故障すると、STSは4ミリ秒以内に二次UPSの給電部に負荷を切り替え、負荷を常に保護されている電源に保ちます。この技術は1990年代前半に開発され、共通予備構成では一般に使用されています。

この設計の最たる弱点は、静止型切換スイッチの使用です。静止型切換スイッチは非常に複雑で、予期しない故障モードがあります。その中でも最も悪いものは、2つの入力を互いに短絡させるような障害が発生するおそれがあることです。このような障害が発生すると、2つのUPSが同時に負荷をドロップするため、STSは単一障害点となります。STSの障害は上位にも波及し、システム動作全体にも影響を及ぼします。この点において、システム+システム設計（次のセクションを参照してください）がより優れた基礎的な可用性を備えています。特に、負荷を抱える機器がデュアルコード電力機能を提供できる場合に、優れた可用性を発揮します。

STS構成には多数のオプションがあり、市場でSTSの信頼性を表す評価もいくつか実施されています。この構成では、STSはPDUの前に配置されます（400ボルト側）。これが一般的な配置方法です。多くのエンジニアは、2つのPDUの200V/100Vボルト側にSTSを配置する方が、より信頼性が高いと主張しています。それは妥当な言い分ですが、400ボルトのSTSよりもコストのかかる配備方法です。詳細はAPCホワイトペーパー #48『ラック搭載機器への給電構成に基づく可用性の比較』を参照してください。

**シングルコード負荷** – シングルコード機器で構成される環境では、IT機器のそれぞれが単一のSTSかラックマウント切換スイッチからのみ給電されます。APCホワイトペーパー #48でも示すように、冗長アーキテクチャの可用性を高めるには、スイッチを負荷の近くに配置することが前提条件となります。何百台ものシングルコード機器を、大きい単一のSTSに配置すると、リスク要因が高くなります。複数の小さなスイッチを配備し、少ない割合の負荷に給電すると、この問題が軽減されます。さらに、分散型のラックマウント切換スイッチを使用すると、大きいSTSを配備した時のように、上位にある複数UPSシステムに障害が波及することはありません。このため、特に負荷の一部のみがシングルコードの場合は、ラックベースの切換スイッチを使用することがより一般的となっています。STS切換スイッチとラックマウント切換スイッチの相違点については、APC ホワイトペーパー #62『Powering Single-Corded Equipment in a Dual Path Environment』を参照してください。（URL: <http://www.apc.com>）

**デュアルコード負荷** – デュアルコード負荷が一般化しつつあるため、STSは不要になります。デュアルコード負荷の場合は、別々のUPSシステムから給電される2つのPDUに負荷を接続するだけです。

**複数電源の同期化** – データセンタでSTSユニットが使用されている場合、2つのUPSの給電が同期されている必要があります。同期制御がなければ、特にバッテリーで動作しているときに、UPSモジュールが同期しなくなることがあります。

非同期切換を回避する方法は、2つのUPSシステム間に同期化ユニットを配置し、AC電源と同期化させます。これは、UPSモジュールが入力電源を失い、バッテリーで動作している場合に特に重要になります。同期化ユニットは、すべてのUPSシステムを常に同期させるため、STSの伝送時にも電源は完全に同期されており、同期のとれていない伝送が発生して下位機器に損傷を与えることがなくなります。当然、独立したUPSシステムの間同期化ユニットを追加すると、一般的なモード障害や、すべてのUPSシステムを同時に切断してしまうような障害が発生する可能性があります。

### 利点:

- すべての負荷がデュアルコードであると、すべてのコンポーネントの並行保守が可能である。
- UPSモジュールの数が少なくなるため、2(N+1)設計よりもコストが低い。
- どのデュアルコード負荷から見ても2つの電力経路があるため、商用電源から冗長性が実現する。
- 安定化されていない電力に負荷をさらすバイパスモードに切り換えなくても、UPSモジュール、スイッチギア、およびその他の配電装置を保守できる。共通予備設計の多くは、保守バイパス回路がない。

### 問題点:

- 上記の構成よりも遮断器が頻繁に使用されるため、コストが比較的高い。
- この設計はSTS機器の正常動作に依存しているため、そこが単一障害点となったり、複数の障害モードが生じたりする可能性がある。
- 構成が複雑である。多くのUPSモジュール、および多数の静止型切換スイッチとPDUを備えた大規模な設備では、システムの負荷を均等に保ち、どのシステムがどの負荷に給電しているかを把握するには管理上困難が伴う。
- 予期しない動作モードが存在する。システムの動作モードが多数あり、動作モード間の移行も多数ある。予期される状況、および障害の状況下ですべてのモードをテストし、制御方式や障害分離機器の適切な動作を検証することは困難である。
- 完全に負荷がかかった状態における通常動作よりも負荷が低くなることもあるため、効率の低いUPSが存在する。

## システム+システム冗長

この構成は、システム+システム、複数並列母線、ダブルエンド、 $2(N+1)$ 、 $2N+2$ 、 $[(N+1) + (N+1)]$ 、および $2N$ と呼ばれています。この設計により、負荷を商用電源に切り換えなくても済むUPSシステムを構築できるようになりました。これらのシステムでは、ありとあらゆる単一障害点を解消する設計が可能です。ただし、単一障害点が除かれるほど、設計の実装にかかるコストも高くなります。最も大きなシステム+システム設備は、スタンドアロンの、特別に設計された建物に配置されています。インフラをサポートするスペース（UPS、バッテリー、冷却、発電機、商用電源、および電気室）のサイズが、データセンタの機器スペースと同じになることも決して珍しいことではありません。

これは、業界で最も信頼性が高く、最も高価な設計です。エンジニアの考えや所有者の要望に応じて、非常にシンプルになったり、または非常に複雑になったりします。この構成には名称が付与されていますが、設計の詳細はそれぞれによって大きく異なり、これもまた設計エンジニアの見解と知識に左右されます。この設計のうち、 $2(N+1)$ は図6に示すとおりですが、並列冗長UPSシステムの重複を中心に展開されます。理想を言うと、これらのUPSシステムは異なる受電盤だけではなく、別の商用電源から、さらに可能であれば別の発電システムから給電されます。このタイプの設備の構築にかかる莫大なコストは、データセンタの内部で起きていることの重要性、またダウンタイムが運用に及ぼすコストを考慮すると妥当なものです。多くの企業は、重要な負荷機器を守るために、この構成を選択しています。

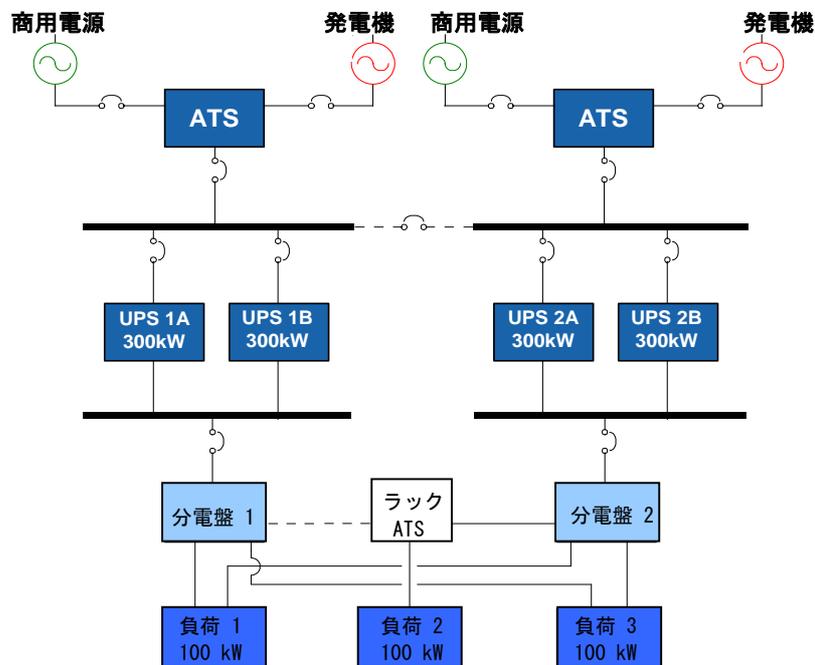


図6 -  $2(N+1)$  UPS構成

この構成のコストは、顧客のニーズに対応するためにシステムを複製することが、どれほど「広く深く」必要であるか、設計エンジニアが下す判断に応じて異なります。この構成の裏にある基礎的な概念としては、重要な負荷機器を商用電源に切り換えなくても、各電気機器に障害が生じたり、手動で電源を切ったりできなければなりません。2(N+1)設計で共通しているのは、システムの一部をシャットダウンし、代替電源にバイパスすることで設備の冗長性を保つバイパス回路です。図6は、この例を示したものです。UPSの入力盤間の接続回路により、UPSシステムのいずれかをシャットダウンしなくても、商用電源の入口のいずれかをシャットダウンできます。2(N+1)設計では、UPSの単一モジュールが故障すると、UPSモジュールが回路から取り外され、その並列モジュールは追加の負荷を引き継ぎます。

図6の例示では、重要な負荷機器が 300 kWのため、設計には4つの300 kW UPSモジュール（2つの並列母線上に、それぞれ2つのUPSモジュール）が必要となります。各母線は、2つの個別パスをデュアルコード負荷に直接給電するために必要なだけ給電します。図6は、シングルコード負荷において、切換スイッチが負荷の近くに冗長性をもたらし様子を示しています。ただし、層IV電源アーキテクチャでは、すべての負荷をデュアルコードにすることが求められます。

システム+システム構成を選択した企業は、通常、それを実現するコストよりも、高い可用性を実現することに重きを置いています。これらの企業には、多数のデュアルコード負荷があります。共通予備設計のセクションで論じた要因以外に、この設計の構成を促進する要因は以下のとおりです。

**強化**— 自然災害に耐性を有し、電気システムで発生しうる連鎖障害に耐性を有するシステム、および建物を設計することです。障害を切り分け、隔離する能力を指します。たとえば、2つのUPSシステムは同じ室内に配置せず、バッテリーはUPSモジュールと同じ室内には配置しません。この設計では、ブレーカの選定が重要な要素となります。ブレーカを適切に選定すると、短絡が発生しても選定遮断され建物の大部分に影響が及ばなくなります。

建物を強化することは、台風、竜巻、洪水などの災害への耐性を付与することでもあります。これは、建物の場所に応じて必要となります。たとえば、建物を洪水の恐れのある場所から100メートル離れた場所に建築し、上空の飛行路を回避し、厚い壁を立てて窓も作らなければ、この耐性を実現できます。

**静止型切換スイッチ (STS)** — デュアルコード対応のIT機器の出現を受け、この機器は、障害モードとともに排除できるようになりました。これにより、システム可用性が大幅に向上できます。

**シングルコード負荷** — システム+システム設計の冗長性が実現する利点をフル活用するには、シングルコードをラックレベルで切換スイッチに接続する必要があります。これによって実現する利点は、APCホワイトペーパー #48『ラック搭載機器への給電構成に基づく可用性の比較』で解説しています。

## 利点:

- 2つの個別電源パスがあるため、単一障害点がない。非常に耐障害性が高い。
- この構成は、商用電源の入口から重要な負荷機器にいたるまで、完全な冗長性を実現する。
- 2(N+1)設計では、並行保守の実行時にもUPSの冗長性を維持できる。
- UPSモジュール、スイッチギア、およびその他の配電装置は、負荷をバイパスモードに切り換えなくても保守できる。そのため、未調整電力に負荷をさらすことがない。
- システムの負荷を簡単に均等に保つことができ、どのシステムがどの負荷に給電しているかをより簡単に把握できる。

## 問題点:

- 冗長コンポーネントの数が増えるため、最もコストのかかるソリューションである。
- 完全に負荷がかかった状態における通常動作よりも負荷が低くなることもあるため、効率の低いUPSが存在する。
- 一般的な建物は、冗長コンポーネントのコンパートメント化を要する、高可用性のシステム+システム配備に適していない。

# 適切な構成の選定

企業は、それぞれに適した構成をどのように選択するのでしょうか。ここでも、適切な構成を選択するには、以下を考慮する必要があります。

- **コスト/ダウンタイムが及ぼす影響** – 毎分、企業で扱われる金額はいくらか、また、故障発生後にシステムの回復にどれだけの時間がかかるか。この質問に対する回答は、予算決定に役立ちます。その回答が\$10,000,000/分(約¥1,100,000,000/分)であるのと、\$1,000,000/時間(約¥110,000,000/時間)である場合とでは、決定が異なります。
- **リスク許容度** – 大規模な障害を経験していない企業は、通常、大規模な障害を経験したことのある企業よりもより高いリスク許容度を有します。賢明な企業は、同じ業界の他社の行動から学習するのです。これは「ベンチマーキング」と呼ばれ、さまざまな方法で実施できます。企業のリスク許容度が低くなればなるほど、より信頼性の高い運用と、より高い障害回復機能を求める声が内部から上がってきます。
- **可用性の要件** – 企業で許容するダウンタイムは、年間でどれくらいでしょうか。回答が「なし」であれば、高可用性設計を予算に組み込まなければなりません。しかし、毎日午後10時以降と、ほぼ毎週末は業務が行われない場合、UPS構成は並列冗長設計で十分でしょう。すべてのUPSは、どこかの時点で保守が必要となります。そして実際、UPSシステムには

定期的に、やや予期しない形で障害が発生します。年間スケジュールで確保できる保守の時間が少なければ少ないほど、システムには冗長設計の要素が必要となります。

- **負荷の種類（シングルコードとデュアルコード）** – デュアルコード負荷により、設計には冗長機能を活用する真の機会がもたらされますが、システム+システムの設計概念はデュアルコード機器が現れる以前に生まれたものです。コンピュータ製造業界は、デュアルコード負荷の製造を開始した当時、顧客の声に耳を傾けていました。データセンタ内の負荷の性質を考慮すると設計作業にも役立ちますが、上記の課題ほどには決定的な力を有しません。
- **予算** – 2(N+1)設計の実装にかかるコストは、あらゆる面において、並列非冗長システム、並列冗長システム、または共通予備システムよりもはるかに多くなります。大規模なデータセンタにおけるコスト差の一例として、2(N+1)設計には、30個の800 kWモジュールが必要となります（並列母線あたり5モジュール、並列母線は6つ必要です）。同じ施設で共通予備方式を適用した場合に必要なのは、18個の800 kWモジュールだけであり、コストを大幅に節減できます。

図7に示すフローチャートは、特定の用途に適したUPSシステム設計の構成を選択するときに参照できます。コンポーネントの冗長性がまったくない、または少ししかない設計には、ダウンタイム対策の保守時間も予期しなければなりません。ダウンタイムを許容できない場合は、並行保守を実行できる設計を考慮する必要があります。フローチャートの質問に回答するだけで、適切なシステムが分かります。

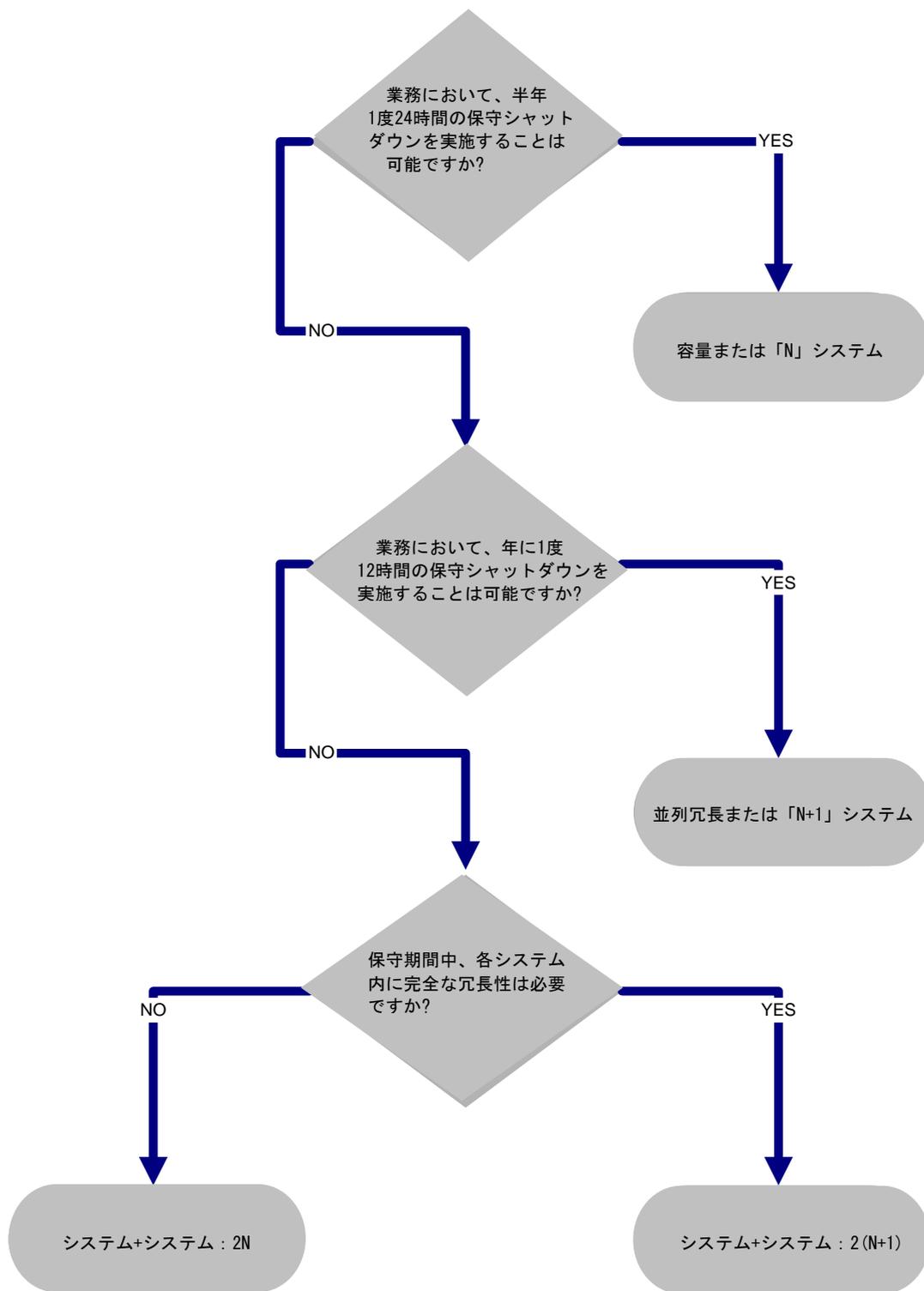


図7 - 設計構成の選択決定フローチャート

## 結論

データセンタ機器の正常稼動には、電源インフラを欠かすことができません。採用可能なUPS構成には多様な種類がありますが、それぞれに利点と問題点があります。ビジネスの可用性の必要度、リスク許容度、および予算を把握することで、適切な設計を選択できます。このホワイトペーパーの分析が示すように、デュアルコード負荷に直接給電する2(N+1)アーキテクチャは、完全な冗長性を提供し、単一障害点をなくすことで、最も高い可用性を実現します。

## 著者について

ケビン マッカーシーは、APCの上級技術コンサルタントで、フィールドベースのエンジニアリングチームの一員です。ケビンは、1984年にオハイオ州立大学から電気工学の学位を取得しました。副専攻はコンピュータサイエンスです。データセンタの設計を、17年間手がけてきました。先日まで、ケビンはEYP Mission Critical社ワシントンDC事務所の業務担当社員として勤務していました。ケビンは主な業界誌に記事を投稿し、7X24会議などの業界イベントにも多数参加しています。

## 付録 – 可用性の分析

このホワイトペーパーで解説した5つの構成の可用性の相違を定量化するため、可用性の分析を行いました。分析に関する詳細は以下のとおりです。

### 可用性の分析方法

APCのAvailability Science Centerは一貫した可用性分析アプローチを駆使して、可用性のレベルを計算しています。この方法では、信頼性ブロック図（RBD）と状態空間モデリングを組み合わせ、これら5つの構成の電源出力を示します。RBDはアーキテクチャのサブシステムを表し、状況空間図（Markov図とも呼ばれます）は電力系統のさまざまな状態を表します（例えば、停電の場合にはUPSがバッテリーを使用します）。分析のデータはすべて業界に広く受け入れられている第三者機関（IEEEやRACなど）の数値を採用しています。このようにして統計的に算出された可用性レベルは、第三者によって裏付けられています。

### バージニア大学Joanne Bechta Dugan教授

「分析は信頼できるものであり、方法は健全だ。信頼性ブロック図（RBD）とMarkov reward model（MRM）の組み合わせは適切な選択であり、MRMの柔軟性と精度をRBDの平明さと組み合わせることを可能にする」

### 分析に使用したデータ

コンポーネントのモデルに使用したデータは第三者から入手しました。この分析の主なコンポーネントは以下のとおりです。

1. 端子
2. 回路ブレーカ
3. UPSシステム
4. PDU
5. 静止型切換スイッチ (STS)
6. 発電機
7. ATS

PDUは3つの基本サブコンポーネント（回路ブレーカ、降圧変圧器、端子）に分割されます。分電盤は、1つのメインブレーカ、1つの分岐回路ブレーカ、複数の端子を直列に繋いでいます。

### 分析の前提条件

5つの構成の可用性が有する価値を正しく解釈することが重要です。複雑なシステムの可用性分析を実施するには、分析を簡便化するためにいくつかの前提条件を定める必要があります。従って、ここで示される可用性は実際の可用性よりも高くなります。表A1はこの分析で使用した基本的な前提条件を示します。

表 A1 - 分析の仮定

前提条件	説明
コンポーネントの故障率	分析されるコンポーネントは全て一定の故障率を示しているとします。機器が設計耐用期間だけ使用されていると仮定する場合に最も合理的な方法です。機器が設計耐用期間以上使用される場合には、故障率に非線形性を組み込む必要があります。
修復チーム	コンポーネントと同数の修理担当者が作業を行うと仮定します。
稼働可能なシステムコンポーネント	故障したコンポーネントの修理中、システムの他のコンポーネントはすべて稼働していると仮定します。
故障の独立性	これらのモデルは業界が推奨する最良の方法によって構築されていると仮定します。つまり、物理的な隔離と電気的な絶縁によって、障害が他に波及する可能性は非常に低くなっています。この前提条件は、共通予備アーキテクチャに必ず適用されるとは限りません。静的切換スイッチが2つまたは3つのUPSに障害を生じさせ、アーキテクチャ全体に障害を発生させることがあるためです。一般的原因において生じるこの障害については、2つの共通予備アーキテクチャでモデル化します。
配線の故障率	配線故障率は非常に低く、確実性と統計的な妥当性のある予測が難しいため、構造内の各コンポーネント間の配線は計算に含まれていません。以前の調査によれば、配線の故障は非常にまれであるため、全体の可用性にほとんど影響しません。主要な端子は計算に含まれています。
人的エラー	この分析では人為的ミスの原因とするダウンタイムは考慮されていません。人為的ミスはデータセンタのダウンタイムの原因としてかなりの比重を占めますが、この分析の目的は電源インフラの構造を比較し、各構造の物理的弱点を明らかにすることです。また、人為的ミスが可用性にどのように影響するかについてはデータがありません。
電力の可用性が分析の中心	この分析は電力の可用性に関する情報を提供します。電力が回復しても仕事がすぐに再開できるとは限らないため、一般に、業務上の可用性は電力の可用性よりも低くなります。ITシステムを再起動するには多少の時間がかかりますが、この遅延は分析に含まれていません。
IEEE Std 493-1997 (Gold Book)による故障の定義 「IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and commercial Power Systems」	電源システムコンポーネントにおける障害は、以下のいずれかを生じさせます。 — 設備の一部、または全体のシャットダウン。または標準以下の稼働 — ユーザ機器の性能の劣化 — 電力保護リレーの動作、または設備の電気システムの緊急稼働 — 電気回路または機器の切断

故障と回復率に関するデータ

表A2には、各サブコンポーネントについて故障率 $\left(\frac{1}{MTTF}\right)$ と回復率 $\left(\frac{1}{MTTR}\right)$ の値とソースが示されて

います。MTTFは平均故障時間 (Mean Time To Failure)、MTTRは平均回復時間 (Mean Time To Recover) をそれぞれ表します。

表A2 – コンポーネントと値

コンポーネント	故障率	回復率	データ元	備考
商用電力	3.887E-003	30.487	EPRI – 商用電源に関するデータを収集し、すべての配電の加重平均を計算した。	このデータは国や地域に大きく依存している。
ディーゼルエンジン発電機	1.0274E-04	0.25641	IEEE Gold Book Std 493-1997、406ページ	失敗率は稼働時間をベースとしている。同書の表3-4によれば始動時について0.01350の故障。
自動切換スイッチ	9.7949E-06	0.17422	Survey of Reliability / Availability - ASHRAE paper # 4489	商用電源から発電機、および発電機から商用電源に電源を切り換える。
端子、0-600V	1.4498E-08	0.26316	IEEE Gold Book Std 493-1997、41ページ	2つの三相接続を接続する。
6個の端子	8.6988E-08	0.26316	IEEE値の6倍 IEEE Gold Book Std 493-1997(ページ41)の値から計算。	変圧器の上位。3相接続ごとに3個の端子が存在する。コンポーネント間には2セットの端子が存在するため、合計で6個の端子が使用されています。
8個の端子	1.1598E-07	0.26316	IEEE値の8倍 IEEE Gold Book Std 493-1997(ページ41)の値から計算。	変圧器の下位。3相接続とニュートラルごとに4個の端子が存在する。コンポーネント間には2セットの端子が存在するため、合計で8個の端子が使用されています。
回路ブレーカ	3.9954E-07	0.45455	IEEE Gold Book Std 493-1997、40ページ	故障の局所化や点検のために電力を分離します。 一定(MCCBを含む)、0-600A
PDU変圧器(降圧) >100kVA	7.0776E-07	0.00641	MTBFはIEEE Gold Book Std 493-1997(ページ40)から、MTTRはMarcus Transformer DataとSquare Dによる平均。	480 VACのインプットを120 VACの負荷に必要な208 VACアウトプットに下げます。
サイリスタスタティック切換スイッチ	4.1600E-06	0.16667	ノースカロライナ州ローリーのGordon Associates	故障率にはコントロールを含む。このサイズのSTSの回復率はASHRAEによっては示されていないため、600-1000A STSの値を使用した。
UPS(バイパスなし) 150kW	3.64E-05	0.125	故障率はPower Quality Magazine(2001年2月号)から。回復率のデータは保守担当者の到着までに4時間、システムの修理に4時間を要するものとして計算されている。	バイパスなしのUPS。MGE "Power Systems Applications Guide"によれば、バイパスなしの場合のMTBFは27,440時間。

## 状態空間モデル

6つのアーキテクチャの各種の状態を表すために、6つの状態空間モデルを使用しました。信頼性データに加えて、これら6つの状態空間モデルの中で使用するその他の変数を定義しました（表A3）。

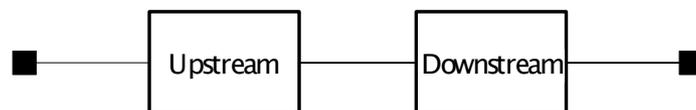
表A3 – ステートスペースモデルの変数

変数	価値	データ元	備考
PbypassFailSwitch	0.001	業界平均	UPS障害の際にバイパスが商用に切り換わるのに失敗する確率。
Pbatfailed	0.001	ノースカロライナ州ローリーのGordon Associates	バッテリーに切り替わったときにUPSの負荷がドロップする確率。コントロールを含む。
Tbat	7分		バッテリーのランタイムは、すべての構成において同一のまま。
Pgenfail_start	0.0135	IEEE Gold Book Std 493-1997、44ページ	発電機が始動時に失敗する確率。失敗率は稼働時間をベースとしている。同書の表3-4によれば0.01350の失敗率。この確率はATSも考慮している。
Tgen_start	0.05278	業界平均	停電時に発電機が始動するまでの遅延。190秒に等しい。

## 可用性モデルの解説

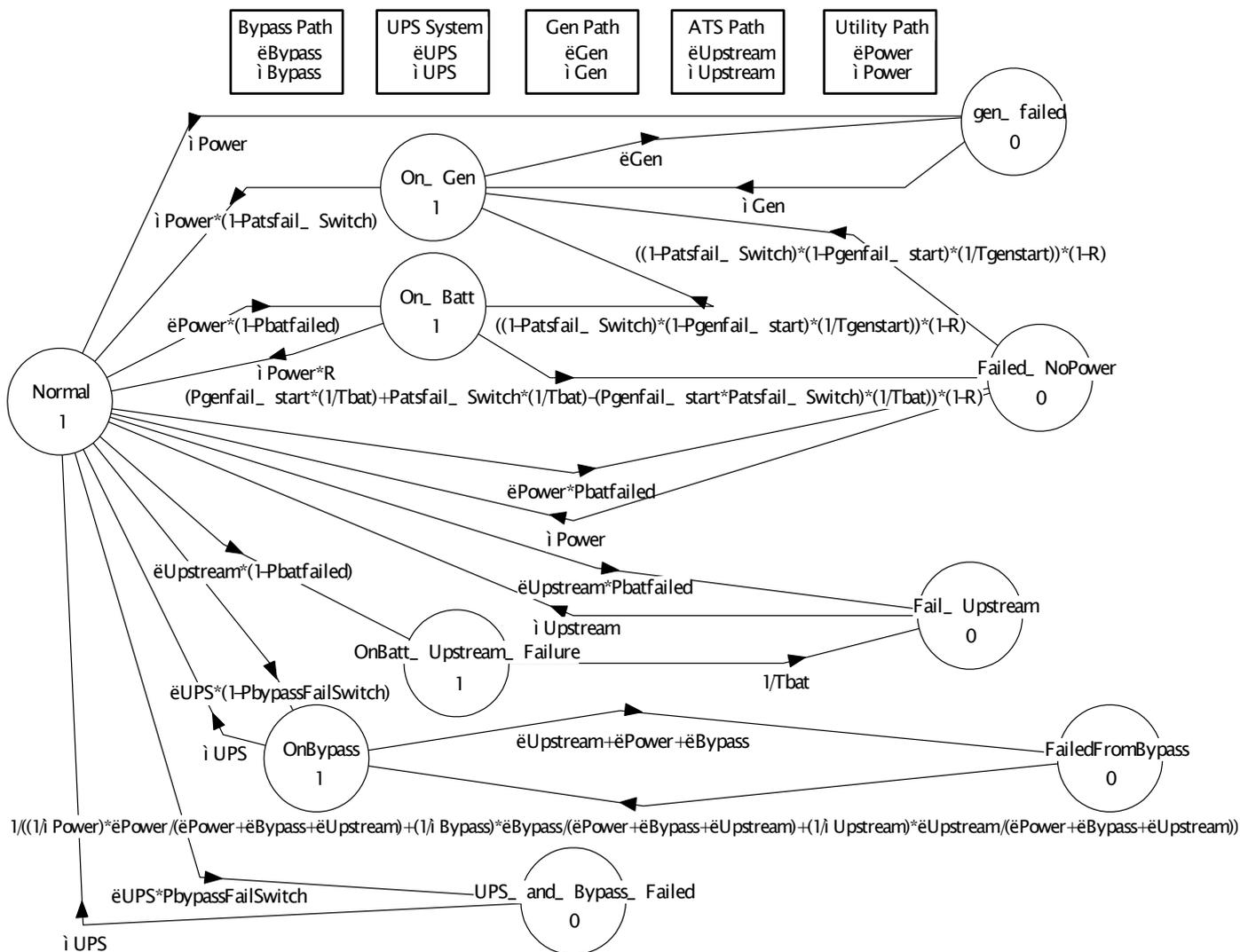
このセクションでは、「容量」構成の分析がどのように行われたかをまとめます。図A1からA3は、図1の「容量」構成の可用性モデルを示します。他のUPS構成のモデルも、同じ論理に基づいて作成されています。

図A1は、「容量構成」の上位部と下位部の関係を示すものです。「上位」ブロックは、商用電源とUPSを含む部分をすべて表します。「下位」ブロックは、全コンポーネントから変圧出力ブレーカを含む、UPS以降のすべてを表します。



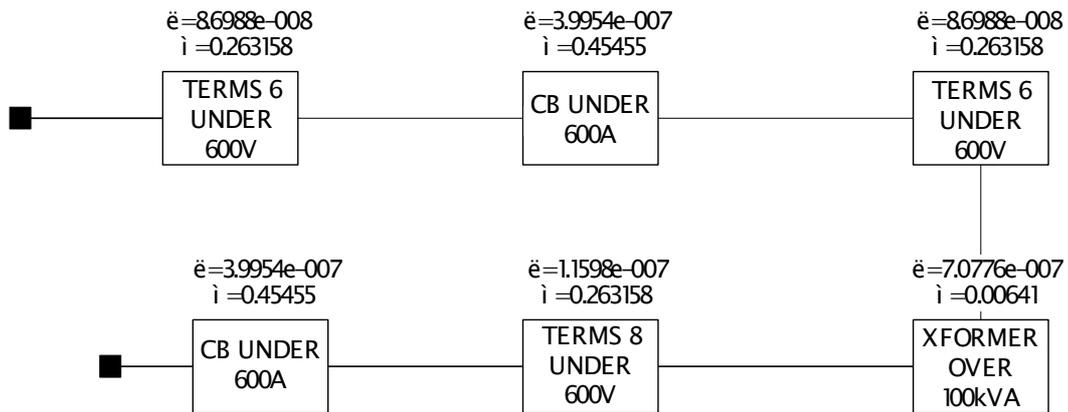
図A1 – 上位経路と下位経路を示す、トップレベルRBD

「電源入力」ブロックには、下位コンポーネントに給電する上位コンポーネントの可用性を算出するための、Markov図があります。図A2の上部にあるブロックは、バイパス、UPSシステム、発電機、自動切換スイッチ（ATS）、および商用電源をそれぞれ表します。これらのブロックの故障率と回復率はMarkov図に入力され、「上位」ブロック全体の総合的な可用性が導き出されます。



図A2—上位Markov図

図A3は、図A1の「下位」ブロックを構成するコンポーネントです。共通予備構成（図4と5）では、このコンポーネントストリングの頭にSTSが追加されます。



図A3 - 下位の図

## 結果

表A4に、5つのUPS構成すべての分析結果をまとめます。

表4 - 分析結果

UPSの設定	図の番号	可用性
単一モジュール「容量」UPS構成	1	99.92%
待機冗長UPS構成	2	99.93%
並列冗長(N+1)UPS構成	3	99.93%
共通予備の「キャッチャ」UPS構成	4	99.9989%
待機冗長UPS構成	5	99.9994%
2(N+1) UPS構成	6	99.99997%