

クラウド、データセンタ、および エンタープライズ・ストレージのための ストレージ・デバイス・レベルの 電力効率測定

2022年10月27日

要約： データ・ストレージ電力効率測定は、電力、性能、ストレージの運用経費を評価するために不可欠である。データセンタの運用経費には、計算、ネットワーク、ストレージ、および施設側のシステムやリソースが含まれる。ISO/IEC 24091:2019 IT Specification for Data Center Storage (ISO 24091) 標準は、エンタープライズ・ストレージ・システム・レベルの電力効率を測定するために SNIA グリーン・ストレージ技術作業部会（グリーン・ストレージ TWG）によって作成された SNIA Emerald™ 電力効率測定仕様 V3.0 に基づく。現在、グリーン・ストレージ TWG は、標準化され、使いやすく、コスト効率の良い電力効率測定法に関する補完的なストレージ・デバイス・レベルの仕様を策定中である。

本ホワイトペーパーでは、ストレージ・デバイス・レベル（個別のストレージ・ドライブ）の電力効率のテスト方法、デバイステスト装置、ワークロードの使用法、メトリクスの計算、およびデバイステスト結果の報告について説明する。グリーン・ストレージ TWG は、業界規制機関だけでなく、技術関係者やサプライ・チェーン関係者にも、技術リソースの提供、実稼働ストレージ・デバイスの短期貸与、および現実世界のエンタープライズ・アプリケーションワークロードの IO キャプチャを通じてデバイス・レベル仕様の今後の策定に参加することを促している。関心のある関係者は、emerald@snia.org でグリーン・ストレージ TWG に連絡することが求められている。

使用にあたって

SNIA では、本書の使用を個人に対しては個人的利用に限定して許可し、法人およびその他の事業主体に対しては社内利用（社内での複製、配布、および掲示を含む）に限定して許可する。ただし、次の要件が満たされていることを前提とする。

1. テキスト、図、チャート、表、または定義を複製する場合は、変更を加えずに全体を複製すること。
2. 本書からの資料（または本書の一部）を複製した印刷文書または電子文書は、その資料に対する SNIA の著作権を表示し、SNIA から再利用の許可を得ていることを明示すること。

上記で明示的に規定されている場合を除き、本書の商業的利用、本書の一部または全部の販売、または本書の第三者への配布を行ってはならない。明示的に付与されていないすべての権利は、明示的に SNIA に留保されている。

上記以外の目的での本書の使用の許可は、tcmd@snia.org に電子メールを送付して要請する。要請する個人および／または法人の識別情報と、要請する使用の目的、性質、および範囲の簡単な説明を含めること。

この SNIA 文書内のすべてのコード、スクリプト、データ・テーブル、およびサンプル・コードは、次のライセンスに基づいて利用できる。

三条項 BSD ソフトウェア・ライセンス

Copyright (c) 2022、ストレージネットワーキング・インダストリ・アソシエーション。

ソース形式かバイナリ形式か、変更するかしないかを問わず、以下の条件を満たす場合に限り、再頒布および使用が許可される。

- * ソース・コードを再頒布する場合、上記の著作権表示、本条件一覧、および下記免責条項を含めること。
- * バイナリ形式で再頒布する場合、頒布物に付属のドキュメント等の資料に、上記の著作権表示、本条件一覧、および下記免責条項を含めること。
- * 書面による特別な事前の許可なしに、本ソフトウェアから派生した製品の宣伝または販売促進に、ストレージネットワーキング・インダストリ・アソシエーション（SNIA）の名前またはコントリビューターの名前を使用してはならない。

本ソフトウェアは、著作権者およびコントリビューターによって「現状のまま」提供されており、明示黙示を問わず、商品性および特定の目的に対する適合性に関する暗黙の保証も含め、またそれに限定されない、いかなる保証も行われません。著作権者もコントリビューターも、事由のいかんを問わず、損害発生の原因いかんを問わず、かつ責任の根拠が契約であるか厳格責任であるか（過失その他の）不法行為であるかを問わず、仮にそのような損害が発生する可能性を知らされていたとしても、本ソフトウェアの使用によって発生した（代替品または代用サービスの調達、使用の喪失、データの喪失、利益の喪失、業務の中断も含め、またそれに限定されない）直接損害、間接損害、偶発的な損害、特別損害、懲罰的損害、または結果損害について、一切責任を負わないものとする。

免責事項

この公表文献に含まれる情報は事前の通知なく変更される場合がある。SNIA はこの仕様書に関していかなる種類の保証も行わない。これには商品性および特定の目的に対する適合性の暗黙的保証が含まれるが、これらに限定されない。SNIA は、本書に含まれる誤りあるいはこの仕様書の交付、履行、または使用に関連した偶発的または結果的損害に対して責任を負わない。

改訂に関する提案は、<http://www.snia.org/feedback/>で行う必要がある。

Copyright © 2022 SNIA. All rights reserved. その他の商標または登録商標は、すべて各々の所有者の財産である。

原文翻訳にあたって

本書の著作権は SNIA にあり、SNIA から翻訳許可を得ている。

SNIA 日本支部 グリーンストレージ委員会

目次

要旨	5
クラウド、データセンタ、およびエンタープライズ・ストレージのエネルギー消費	7
ストレージ・デバイス・レベル電力効率測定テスト	9
ISO 24091 および SNIA Emerald ストレージ・システム・レベルテスト仕様.....	10
SNIA Emerald ストレージ・デバイス・レベルテスト仕様案.....	11
予備的 SDLPEM 電力効率データおよびレポート.....	13
まとめ.....	15
追加情報	15

要旨

SNIA Emerald™電力効率測定仕様は、業界規制機関、国際標準、および IT ストレージ・プロフェッショナル向けに SNIA グリーン・ストレージ技術作業部会（グリーン・ストレージ TWG）によって作成されたビルディング・ブロック仕様である。SNIA Emerald V3.0 は、ISO/IEC 24091:2019 IT Power Efficiency Measurement Specification for Data Center Storage (ISO 24091) で具体化されている。ISO 24091 は、地域の規制機関やプログラム（EU Lot 9 プログラムや日本トップランナー・プログラム(省エネ法)など）によって参照されている。SNIA Emerald V4.0 は、米国環境保護庁の Energy Star データセンタ・ストレージ・プログラムによって参照されている。The SNIA Emerald™電力効率測定仕様では、エンタープライズ・ストレージ・システム・レベルテスト方法、ストレージ分類、テストと測定のための装置、システムワークロード、および電力効率メトリクスが規定されている。

SNIA Emerald 仕様では、**ストレージ・システム・レベル**の電力効率が規定されているが、個別のストレージ・デバイス（ドライブ）の直接測定は規定も定義もされていない。グリーン・ストレージ TWG は、現在、**ストレージ・デバイス**の電力効率を測定するための仕様を策定中である。本書で使用されるこの新しい仕様の作業名は、**ストレージ・デバイス・レベル電力効率測定（SDLPEM: Storage Device-Level Power Efficiency Measurement）**である。

ストレージ・デバイス・レベル電力効率テストを使用すれば、IT プロフェッショナルは、個別のストレージ・デバイスによって消費される電力量を算出することができる。SDLPEM では、個別のストレージ・デバイスの電力効率を測定するためのテスト、テストと測定のための装置、メトリクス、ワークロード、およびテスト方法が定義される。

ストレージ電力効率測定は次の 2 つの方法のどちらかで行うことができる。1. **デバイス・レベル**で - 外部パワー・ボード・サーバ（XPBS: external power board server）装置と個別のストレージ・デバイスの電源入力ポートを接続する。2. **システム・レベル**で - 外部電力計（XPM: external power meter）とストレージ・サーバの電源入力を接続する。XPBS と XPM は、ホスト・アイドル時とホスト IO コマンド処理中の電力測定値を収集し、ワットあたり I/O オペレーション数/秒（IOPS）とワットあたり MiB/s を単位とした電力効率の報告を可能にする。

SDLPEM は、使いやすく、低コストで、標準化されたテストを提供し、XPBS テスト装置を使用して個別のストレージ・デバイスの電力効率を測定する方法を規定している。これを使用すれば、IT プロフェッショナルは、システム・レベルの電力と数に限りがあるワークロードタイプに依存することなく、特定のユース・ケースとアーキテクチャにおけるストレージ・ドライブ・スケーリングの実際の電力効率への影響を把握することができる。SDLPEM 測定レポートは、デバイス・メーカーの大ざっぱなデバイス仕様シートを補完してきめ細かな電力予算計画に使用できるようにする。

SDLPEM 電力測定は、ストレージ・デバイス・レベルで合成ワークロード（ランダム 8 KiB 読み書きやシーケンシャル 128 KiB 読み書きなど）やリアルワールドワークロードを適用しながら行われる。リアルワールドワークロードは、実際のアプリケーションを使用しながら、用意されたストレージ・アーキテクチャ上でキャプチャされるワークロードである。リアルワールドワークロードは、ファイル・システム・レベルとブロック・レベルで観察された IO ストリームの 2 種がある。観察時に動作させたアプリケーションの種類によって、SPECstorage™ Solution 2020

ワークロードやリアルワールドワークロード（RWW）IO キャプチャと呼ばれる。SPECstorage™ Solution 2020 ワークロードと RWW IO キャプチャのそれぞれを使用して、観察された IO ストリームの順序と出現に基づいて移植可能なテストスクリプトを自動的に作成できる。移植可能なテストスクリプトは、ワークロードがキャプチャされたストレージ・システム以外のストレージ・システムで実行できる。

クラウド、データセンタ、およびエンタープライズ・ストレージのエネルギー消費

データセンタのエネルギー消費の増大は2000年代初頭から再三にわたって指摘されてきた。主な情報源は、米国エネルギー省が資金を提供しているローレンス・バークレー国立研究所による2016 US Data Center Energy Usage Report¹（以下「このレポート」）である。

このレポートには、データセンタのエネルギー消費の履歴と予測がサーバ、ストレージ、ネットワーク、およびインフラ設備別に記載されている。このレポートによれば、データセンタのエネルギーの増加率は減少傾向にあるが、データセンタは2014年の米国の総電気エネルギー消費の推定1.8%を占め、データセンタの電力消費は2010年から2014年までに約4%増加している。データセンタのエネルギー消費の増加率が減少することは引き続き予想されているが、これは主にデータセンタのエネルギー効率が継続的に改善することによるものである。このレポートから引用されたFigure 1に、これらの調査結果を示す。

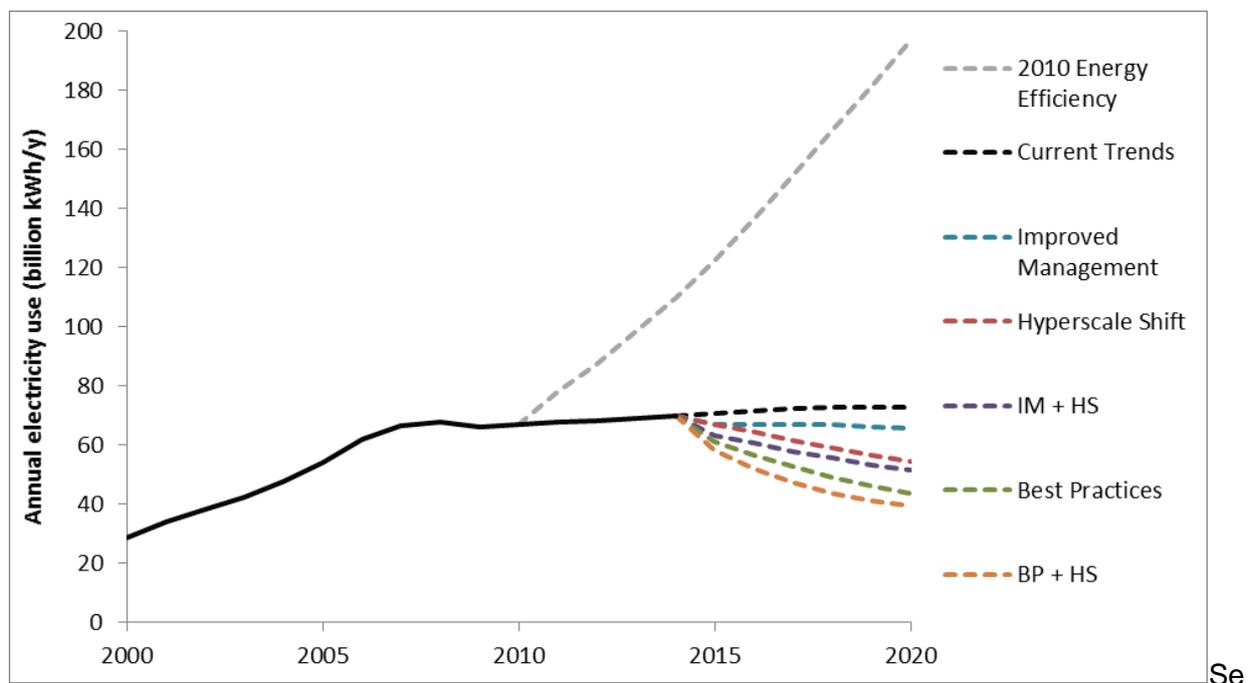


Figure 1 – Projected Data Center Total Electrical Use – US Data Center Energy Usage Report, June 2016

このレポートは、エネルギー効率の改善が、サーバ、ストレージ、ネットワーク、およびインフラ設備の改善からもたらされることを示している。

効率の改善によって電力消費がさらに最適化されることも予想され、例えば、このレポートによれば、「ストレージ・デバイスはドライブ単位の効率が上がっており、2020年までにドライブ・ストレージの容量の増加がデータ・ストレージ需要の増加を上回り、最終的に、データセンタ全体に必要な物理ドライブの数が減少することが予想される。」

¹ United States Data Center Energy Usage Report, June 2016 - Lawrence Berkeley National Laboratory LBNL-1005775、www.osti.gov/biblio/1372902

このレポートでのデータセンタ（DC）ストレージ・システムの電力消費の予想は、選択されたワークロードタイプ向けに見積もられた記憶容量を持つハード・ディスク・ドライブ（HDD）とソリッド・ステート・ドライブ（SSD）によって消費される平均電力の推定値を根拠としている。SSD は、2020 年のデータセンタ設置ストレージ・ドライブの総数の 47%を占めると推定されている。

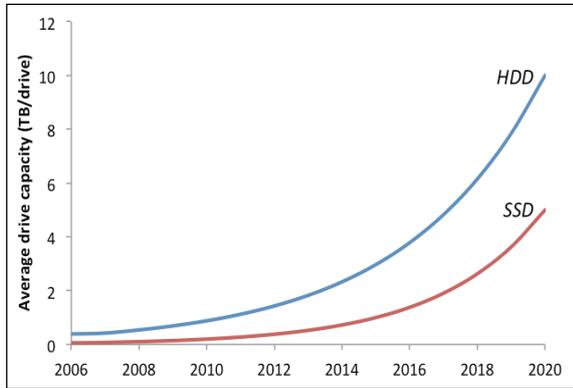


Figure 2 – Estimated Average Capacity DC Storage Drives

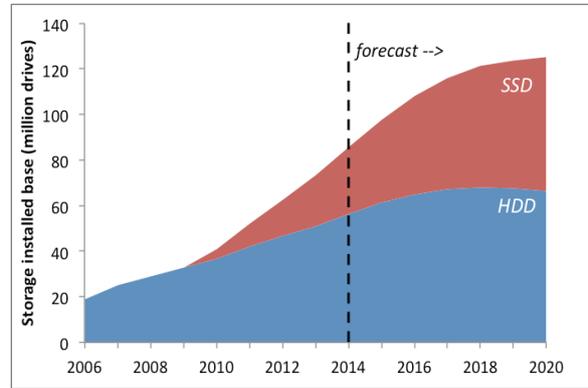


Figure 3 – Total US DC Installed Storage Drive Count

このレポートでは、Seagate HDD の電力消費が 2015 年には 8.6 ワット／ドライブで、2020 年には 6.5 ワット／ドライブであると推定されている。SSD の電力消費は 6 ワット／ドライブであると想定されている。

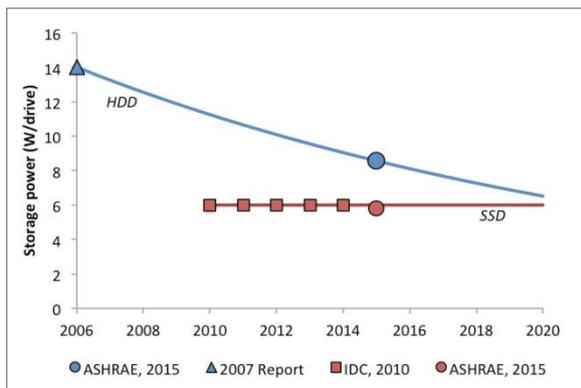


Figure 4 – Average Wattage US DC Storage Drives

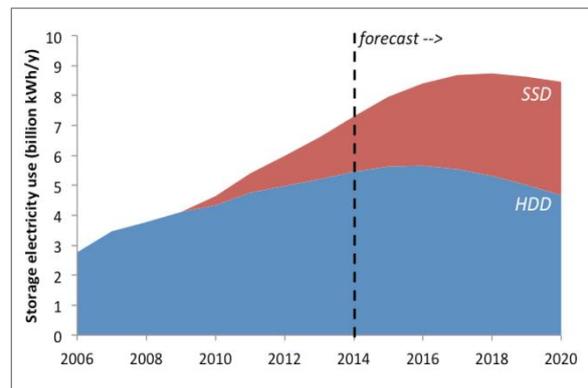


Figure 5 – Total US DC Storage Electricity Consumption

このレポートには、「すべてのデータセンタ・ストレージの電力消費は、ドライブの推定設置数とドライブあたり想定電力消費の積として求められる。その上で、外部ストレージ・システムを運用するために必要なコントローラや関連コンポーネントを考慮するためにその他の運用上の消費が加算される」と書かれている。

ストレージ・システムの電力消費の継続的な改善では、ストレージ機器ベンダー、IT プロフェッショナル、および規制機関にデータを提供できるように、電力消費の意味のある測定を行うことが必要である。実際のストレージ・デバイスの性能とエネルギー消費の挙動は、ワークロード、環境パラメーター、および使用パラメーターの細かい違いに大きく依存し、関連するユース・ケースワークロードに対してストレージ・デバイスを実際に測定することが必要である（予備的 SDLPEM 電力効率データおよびレポートの項を参照）。

ストレージ・デバイス・レベル電力効率測定テスト

ストレージ・デバイスの電力効率テストに関する SDLPEM 仕様案では、SNIA Emerald システム・レベル電力効率仕様で使用されている合成ワークロードと新しい実ワークロードテストの使用が構想されている。

SNIA Emerald 合成ワークロード

SNIA Emerald 合成ワークロードでは、複数の LBA ホット・バンドにわたってアクセス・パターンの組み合わせが適用されてから、ランダム 8 KiB ブロック・サイズ読み書き、続いてシーケンシャル 256 KiB ブロック・サイズ読み書きが適用される。

SNIA リアルワールドワークロード (RWW)

RWW は、実際のアプリケーション使用中（データベース問い合わせ、動画のキャプチャと再生、仮想店頭など）に発生するストレージ・デバイスの IO オペレーションのエミュレーションである。この IO オペレーションを記録するために IO キャプチャ・プロセスが使用される。RWW は、アプリケーション・レベル、ファイル・システム・レベル、ストレージ・システム・レベル、またはストレージ・デバイス・レベルでキャプチャできる。本ホワイトペーパーの目的では、ストレージ・デバイス・レベルがキャプチャ・ポイントである。記録されたビヘイビアは後で再現が可能のため、元の実行中のアプリケーションの動作との相関のあるスティミュラス(測定用入力信号)を得ることができる。この考え方により、信頼に足るスティミュラスの作成を効率的に行い、電力効率測定に使用されるワークロードの範囲を増やすことができる。実ワークロードの詳細については、SNIA CMSI ホワイトペーパー「Introduction to Real World Workloads - A Primer²」を参照されたい。

現在は、SNIA Compute, Memory, and Storage Initiative (CMSI) ウェブサイト³でいくつかの参照 RWW を入手できる。これは、将来の電力効率評価用ワークロードとして組み込まれる可能性のある RWW の収集の始まりである。SNIA 参照実ワークロード⁴は、表示、ダウンロード、および再現が可能である。

² SNIA CMSI、Introduction to Real Workloads – A Primer、www.snia.org/technology-focus-areas/physical-storage/nvme-ssd-classification/real-world-storage-workloads

³ SNIA CMSI ウェブサイト：www.snia.org/forums/cmsi

⁴ SNIA 参照実ワークロードウェブサイト：www.snia.org/technology-focus-areas/physical-storage/real-world-workloads/reference-real-world-workloads

ISO 24091 および SNIA Emerald ストレージ・システム・レベルテスト仕様

SNIA Emerald 電力効率測定仕様⁵では、アクティブ状態とアイドル状態の両方でのエンタープライズ・ストレージ・システムの電力効率を評価するための標準的な方法が規定されている。システムのプロファイルとサポートされている機能の観点でストレージ・システムの分類が定義されている。電力効率を測定するためのテストと実行ルールが定義されている。これには、テスト順序、テスト構成、器具類、ベンチマーク・ドライバー、IO プロファイル、測定間隔、およびメトリクス安定性評価が含まれる。複数の容量最適化手法の存在を確認するための定性ヒューリスティックテストが定義されている。結果の電力効率メトリクスは、選択された安定測定時間中の、記憶容量とアイドル時の平均測定電力の比率、または、アクティブ時における IO 性能と平均測定電力に対する比率として定義されている。

さらに詳細に、この仕様では、特定のアクティブ状態とアイドル状態におけるストレージ・システムの関連性能とエネルギー消費を評価するための方法とメトリクスが定義されている。ストレージ・システムとコンポーネントは、ホストとストレージ・システム間のデータ転送に関する外部的に開始されたアプリケーション・レベルの要求を処理しているときに「アクティブ」状態にあると見なされる。この仕様では、アイドルは、"ready idle"、すなわち、ストレージ・システムとコンポーネントが構成され、電源投入され、1 つ以上のホストに接続されており、通常の応答時間の制限内で外部的からのアプリケーション・レベルの IO 要求を処理できるが、このような IO 要求が送られてきていない状態として定義されている。

SNIA Emerald システム・レベルテスト方法では、ストレージ・システムへの AC 電力入力で電力が測定される。ストレージ・デバイス・レベルテスト方法案では、デバイスの電源コネクタで DC 電力が測定される。

⁵ SNIA Emerald™ Power Efficiency Measurement Specification, Version 4.0.0, July 3, 2020
www.snia.org/tech_activities/standards/curr_standards/emerald

SNIA Emerald ストレージ・デバイス・レベルテスト仕様案

グリーン・ストレージ TWG がストレージ・デバイス・レベル電力効率測定 (SDLPEM) 仕様を策定している。SDLPEM の目的は、SNIA Emerald システム・レベル仕様に厳密に従うことである。ただし、SDLPEM では、システム・レベル電力効率測定ではなく、合成ワークロードと実ワークロードの両方を使用した個別のストレージ・デバイスの測定に重点が置かれる。

SNIA Emerald システム・レベル仕様の下では、完全なストレージ・システム (ストレージが搭載されたストレージ・サーバとして定義) の電力効率が測定されるが、SDLPEM 案では、個別のデバイスの電源ポートで電力が測定される。

SNIA Emerald システム・レベル仕様ではシステム・レベル・パワー・アナライザーが必要だが、SDLPEM では外部パワー・ボード・サーバ (XPBS) が必要である。SNIA Emerald パワー・アナライザーは、コンセントとストレージ・サーバ電源プラグの間に設置される (下の Figure 6 を参照)。

SDLPEM XPBS は、個別の 12V/5V 電源システムをストレージ・デバイスの電源入力に供給する独立した電源を備えている (下の Figure 7 を参照)。

また、SDLPEM では、個別のストレージ・デバイスの電力の測定中に実行されるさまざまな合成ワークロードと実ワークロードも定義されている。各テストは、IOPS/W と MiB/s/W を単位として電力効率測定値を提供する。

合成ワークロードと実ワークロードのテスト手法、プラットフォームのセットアップ、テストフロー、テスト設定、テスト測定、および報告要件の詳細な議論については、本書の範囲を超えており、今後の SNIA ホワイトペーパーへの記載が予定されている。

システム・レベルテストとデバイス・レベルテストのテスト装置の比較

SNIA Emerald システム・レベル仕様とストレージ・デバイス・レベル仕様では、特定のテスト装置を使用する必要がある。

Figure 6 に、SNIA Emerald システム・レベル電力効率テストのテスト構成を示す。パワー・アナライザーを介して、ストレージ・システムの AC 電源入力と AC 電源が接続されている。

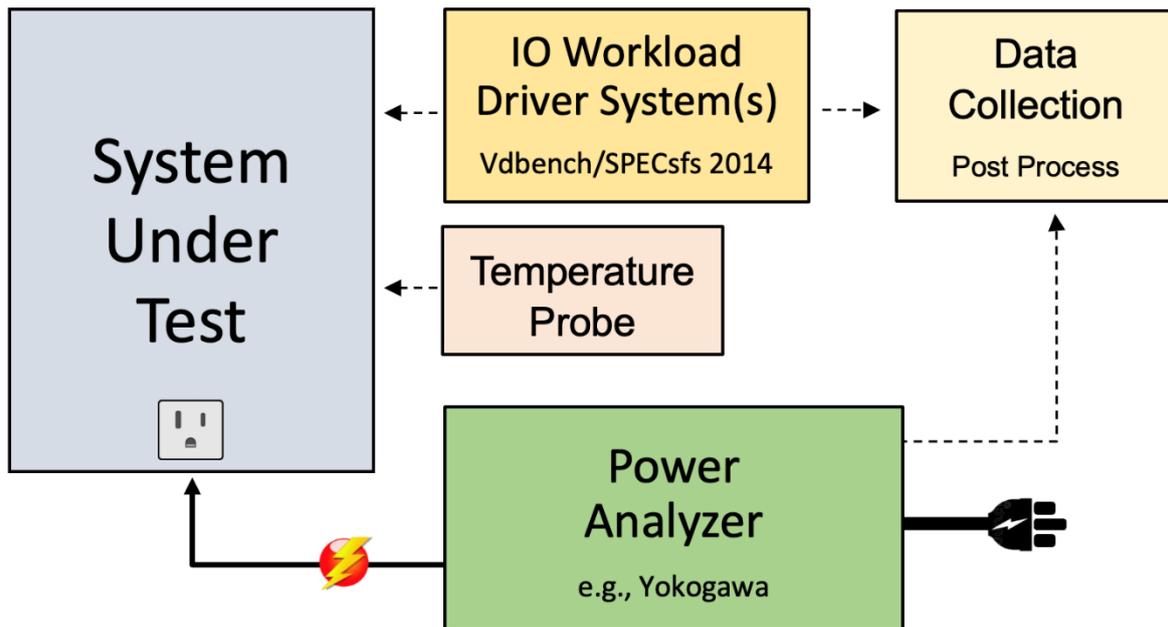


Figure 6 – System-Level Test Configuration

Figure 7 に、デバイス・レベル電力効率テストのテスト構成を示す。外部パワー・ボード・サーバ (XPBS) が個別のストレージ・デバイスの電源入力ポートに電力を供給している。これは、ストレージ・デバイス構成に合わせたさまざまなコネクタ・タイプ (SATA 電源ポートに直接、適切なマザーボード・バス・スロットに挿入されたストレージ・デバイス・インターポーザ・ボードに直接など) を使用して実現できる。

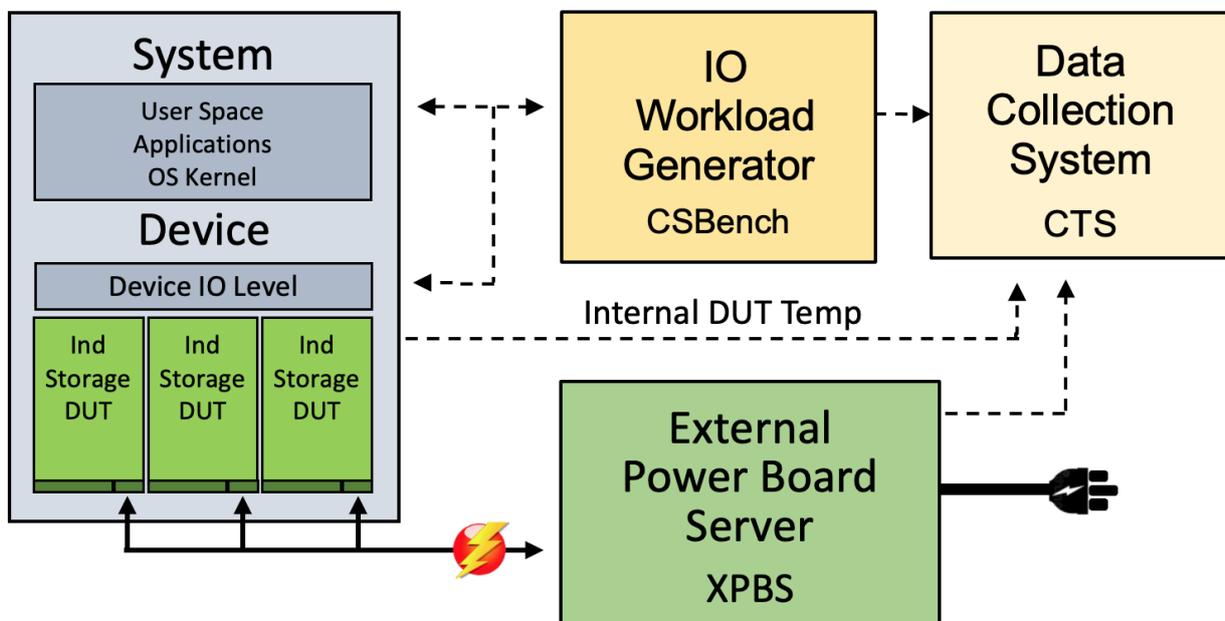


Figure 7 – Device-Level Test Configuration

予備的 SDLPEM 電力効率データおよびレポート

以下の電力効率データは、3 ドライブ RAID 0 構成の SAS HDD デバイスと NVMe SSD デバイスの両方についてのグリーン・ストレージ TWG と SNIA ソリッド・ステート・ストレージ TWG の予備テストに基づく。

ストレージ・サーバは SNIA 参照テストプラットフォーム 5.0⁶である。これは、PCIe Gen 3 マザーボード、デュアル 2.1 GHz 8 コア CPU、32 GB の 2400 MHz DDR4 ECC RAM、CentOS 7.0 OS を搭載し、Calypso Test Systems, Inc. の Calypso Test Suite (CTS) テストソフトウェアと CTS ワークロード発生器を使用する。

ターゲット・ストレージは、ソフトウェア RAID 0（ストライプ方式、N=3（ドライブ全体）、ブロック・サイズ = 64 KiB）を使用した 3 ドライブ RAID 0 LUNs としてセットアップされる。HDD RAID 0 LUN は、12 Gb/s HBA を介して接続された 3 つの SAS 600 GB HDD で構成される。SSD RAID 0 LUN は、マザーボード PCIe Gen 3 バス・スロットに挿入されたシングル・ドライブ・インターポーザ・カードを介した 3 つの NVMe 1920 GB SSD で構成される。

実行されるテストは、多様な読み書き構成に多様なランダム／シーケンシャル・ブロック・サイズを適用するグリーン・ストレージ TWG 電力効率テストである。結果は、個別 IO ストリーム IOPS、MiB/s、平均電力（W）、および電力効率（IOPS/W、MiB/s/W）に関して記録される。

以下の Figure 8 と Figure 9 に、SAS 15 K RPM HDD のデータを示す。3 ドライブ RAID 0 とシングル HDD ストレージの両方について、ランダム 8 KiB 読み書きとシーケンシャル 128 KiB 読み書きのプロットが示されている。

⁶ 参照テストプラットフォーム、www.snia.org/forums/sssi/rtp

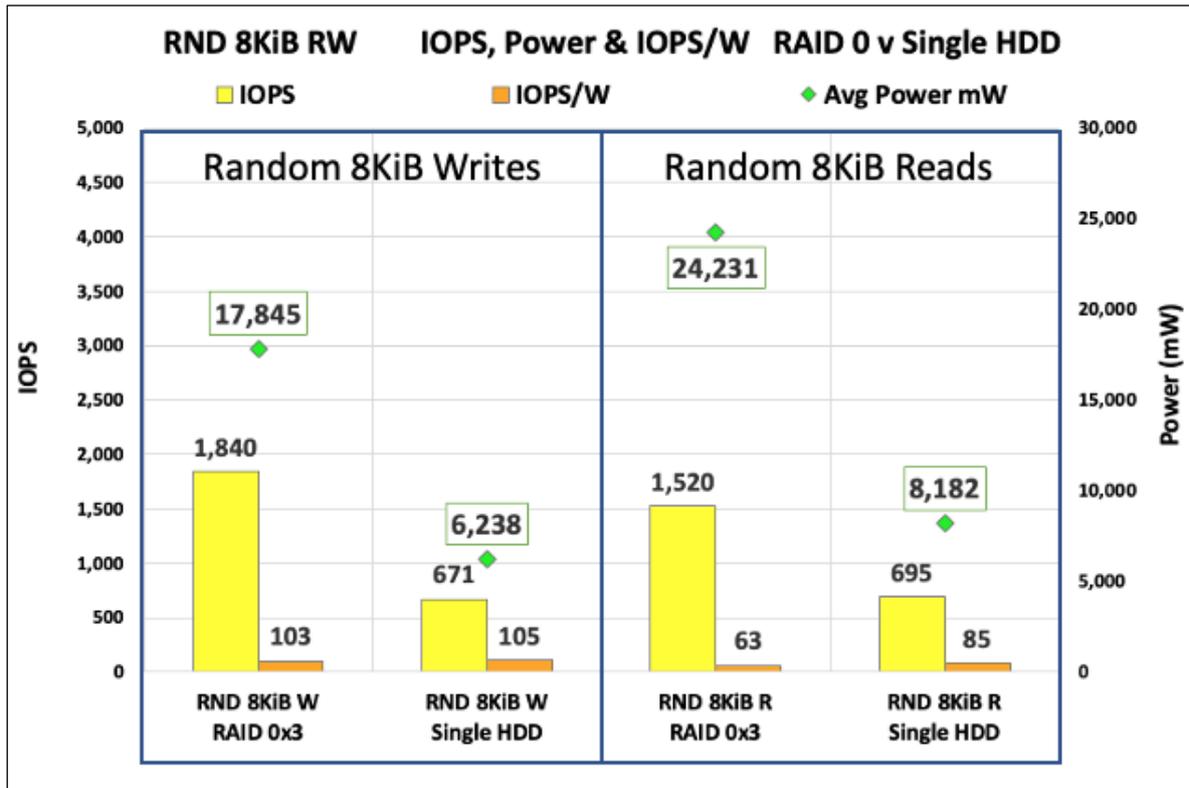


Figure 8 – Random 8 KiB Read/Write: IOPS, Power & IOPS/W

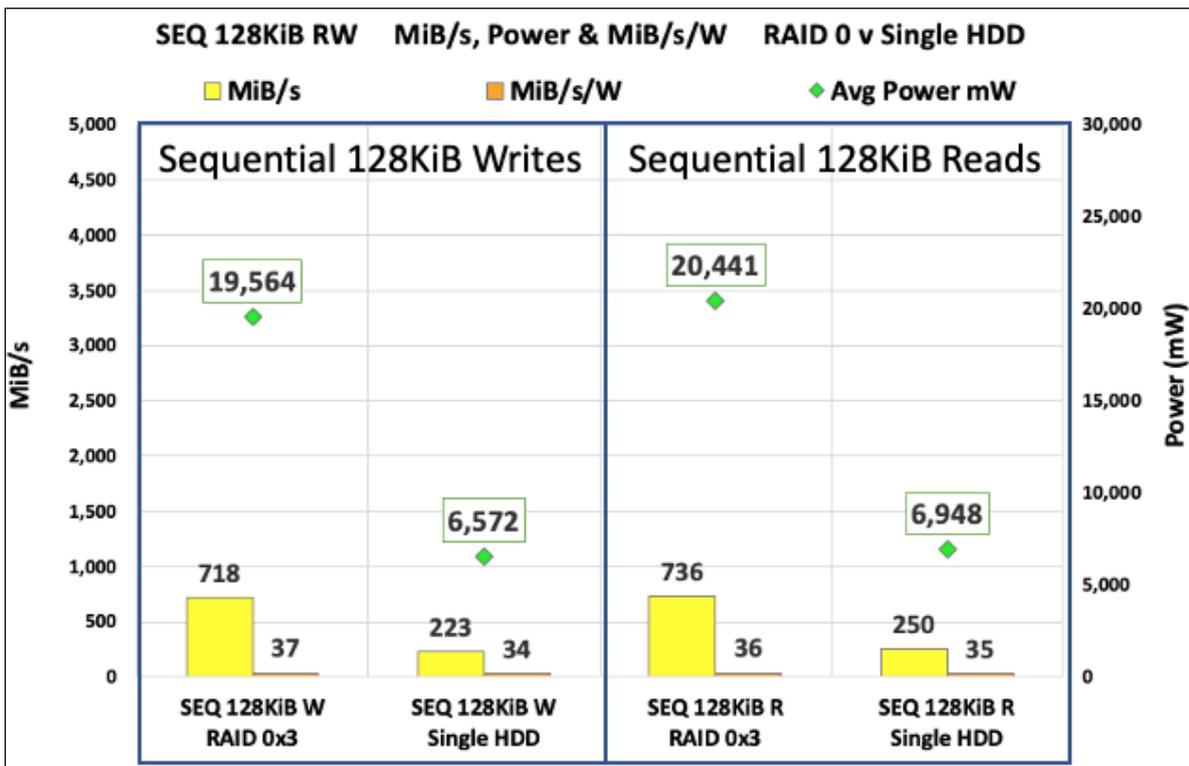


Figure 9 – Sequential 128 KiB Read/Write: MiB/s, Power & MiB/s/W

まとめ

SNIA Emerald™ 電力効率測定仕様は、業界規制機関、国際標準、および IT ストレージ・プロフェッショナル向けに SNIA グリーン・ストレージ技術作業部会（グリーン・ストレージ TWG）によって作成されたビルディング・ブロック仕様である。SNIA Emerald V3.0 は、ISO/IEC 24091:2019 IT Power Efficiency Measurement Specification for Data Center Storage (ISO 24091) で具体化されている。SNIA Emerald 仕様では、**ストレージ・システム・レベル**の電力効率が規定されているが、**個別のストレージ・デバイス（ドライブ）**の直接測定は規定も定義もされていない。

ストレージ・システムの電力効率を測定するための SNIA Emerald™ 電力効率測定仕様を策定した SNIA グリーン・ストレージ技術作業部会（グリーン・ストレージ TWG）は、**ストレージ・デバイスの電力効率を測定するための仕様**を策定中である。本書で使用されるこの新しい仕様の作業名は **SDLPEM** である。

ストレージ・デバイス・レベル電力効率テストを使用すれば、IT プロフェッショナルは、個別のストレージ・デバイスによって消費される電力量を算出することができる。SDLPEM では、個別のストレージ・デバイスの電力効率を測定するためのテスト、テスト装置、ワークロード、およびテスト方法が定義されている。そこに記載されているデバイスの特性に基づいて、ストレージ・システムの電力効率を最適化するための決定を情報に基づいて下すことができる。

システム・レベルとデバイス・レベルのテスト環境の主な違いは、電力消費メトリクスの取得に関係する測定境界と測定機器である。新しいワークロードとワークロード発生器を導入し、一貫したシステム・レベルテストの結果を提供しながら、ストレージ・システム・レベルテスト仕様の今後の改訂に役立てることが意図されている。

最後になるが、複数の IT レポートの結果が、本仕様の策定を追求する動機を提供している。これに、実際の環境からのメトリクスとレポートが続く。

追加情報

SNIA Emerald™ プログラムの詳細については、www.sniaemerald.com を参照のこと。

SNIA Emerald™ 電力効率測定仕様バージョン 4.0.0 は、www.sniaemerald.com/download から入手できる。

SNIA CMSI ホワイトペーパー「Real World Workloads – A Primer」は、www.snia.org/technology-focus-areas/physical-storage/nvme-ssd-classification/real-world-storage-workloads から入手できる。

SNIA グリーン・ストレージ・イニシアティブ（GSI）については、www.snia.org/forums/green を参照のこと。

SNIA Compute, Memory, and Storage Initiative (CMSI) については、www.snia.org/forums/cmsi を参照のこと。

SNIA（ストレージネットワーキング・インダストリ・アソシエーション）については、www.snia.orgを参照のこと。