

ネットブートとデスクトップ仮想化を採用した 京都大学の新教育用コンピュータシステム Network boot and Desktop Virtualization Solution for New Educational Computer Systems at Kyoto University

上田 浩¹, 喜多 一¹, 森 幹彦¹, 石井 良和²,
外村 孝一郎², 植木 徹², 上原 哲太郎³

¹ 京都大学 学術情報メディアセンター, ² 京都大学 情報部, ³ NPO 情報セキュリティ研究所
{uep, kita, miki, tonomura, ueki}@media.kyoto-u.ac.jp,
ishii.yoshikazu.3e@kyoto-u.ac.jp, uehara@tetsutaro.jp

概要: 平成 24 年 3 月に更新を行った京都大学の新教育用コンピュータシステムでは, ネットブートの採用に加え, ローカル HDD をキャッシュとして用いることにより, 管理コストの削減とパフォーマンスを追求した. 旧システムでは, 端末の更新のため数日を要していたのが, 新システムでは 15 分で完了するなど, 劇的な管理コストの削減を果たした. 加えて, サーバホスト型デスクトップ仮想化技術を採用した, 様々な端末から教育用端末と同様の環境を利用できるサービスを導入した. 本発表では, 新教育用コンピュータシステムの構築について, その背景, 設計および導入効果について報告するとともに, サーバホスト型デスクトップ仮想化端末のデモンストレーションを行う.

キーワード ネットブート, デスクトップ仮想化, 教育用端末, 省エネルギー

1 はじめに

大学の教育用コンピュータシステムは, 情報リテラシー, プログラミングなどの講義, 学生の自学自習を支える基幹設備である. このような教育用端末を含む情報システムには, 講義での一斉利用に伴うシステム負荷をはじめとする, 企業や SOHO の端末群とは全く異なる要件があることに加え, 多様な利用形態への柔軟な対応が求められるため, 運用を担当する各大学の情報系センターではこれまで様々な特色ある取り組みを行ってきた [1].

京都大学 (以下, 「本学」と記述する) では教育用コンピュータシステムを 5 年ごとに更新しており, 平成 14 年には仮想化技術の採用による Windows, UNIX の環境の同一端末での提供 [2, 3], 平成 19 年の LDAP による利用者管理の統合 [4, 5] など, 全学で 1,400 台以上の端末群を含む大規模システムの構築と運用を行ってきた. 本稿では, 平成 24 年 3 月に更新を行った教育用コンピュータシステムの構築について, その背景, 設計および導入効果について報告する.

以下, 2 節で導入の背景をまとめ, 3 節で新システムの概要と特徴を, ネットブートにローカル HDD キャッシュを組み合わせた教育用端末と仮想デスクトップサービスを中心に述べ, 第 4 節では新システム導入の TCO 削減効果について議論する.

2 導入の背景

2.1 システム利用者

教育用コンピュータシステムは, 主用途である教育に限っても, 全学共通教育として展開されている情報教育と学部, 大学院の専門教育との両方に利用されるため, 講義担当教員約 200 名と学部生約 12,000 人, 大学院生約 8,000 人が利用者となる. 本学では極めて多様な講義が行われているため, 本システムは講義で利用される様々なソフトウェアの動作を検証しつつ, 個人のファイル領域を提供する必要がある.

加えて, 本システムは今回の更新で本学統合認証システムとの連携を実現し, 本学全構成員が統合認証システムによる認証で本システムを利用できるようになった. これらの利用者が, 学術情報メディアセンターの講義用演習室や自習室のほか学内 20 箇所以上に配置されている約 1,400 台の教育用端末を利用することになる¹.

このような, 多様な利用者が全学的に利用できる端末群を中心としたサービス提供のためには, 利用者アカウントと端末管理業務の効率化が必要である.

¹このほか, 工学部情報学科計算機コースと大学院情報学研究所については別途, 教育用コンピュータの予算が措置されているが, 本システムとは別運用である.

2.2 教育用コンピュータシステムをとりまく環境の変化

近年、大学教育の質の保証の一環として、学習のアウトカム評価、教育情報の公開などが求められている。そのため、学生情報システムやコース管理システムの導入など教育の情報化が進んでいる。

また、アクティブラーニングなど学習活動をより活発化させる手法が提言され、これに伴って情報端末やそれを介して利用されるアプリケーション、Web サービスを様々な科目と目的で利用されるようになってきたため、教育用コンピュータシステムのこれまで以上の利用が予想される。

さらに近年では、PC 必携化や個人のスマートフォンやタブレット型の端末を大学として利用するといういわゆる BYOD (Bring Your Own Device) 的な試みも見られ、多様化が急速に進んでいる [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]。

また従来からの情報セキュリティ対策の必要性に加え、地球温暖化対策や福島原発事故以後の電力事情の逼迫も加わり、情報システムの省電力化も喫緊の課題となっている。

このように、教育用コンピュータシステムは講義のみならず大学の教育研究を支える基幹設備と位置付けられ、重要性がこれまで以上に増してきているため、更新にあたり、講義以外の教育研究活動への十分な配慮が必要である。

2.3 デスクトップ仮想化技術の進展

端末の多様化に対応可能なソリューションは、物理的な端末ではなく「環境」を提供するという考え方に基づく、デスクトップ仮想化技術である。デスクトップ仮想化には表 2.3 に示す通り、ターミナルサービス、サーバーホスト型、ブレード PC、アプリケーション仮想化、OS イメージ・ストリーミングなど様々な方式がある [14]。

本学では更新にあたり、教育用端末には OS イメージ・ストリーミングに分類されるネットブートを採用した。加えて、サーバホスト型デスクトップ仮想化技術を用い、様々な端末から教育用端末と同様の環境を利用できるサービスを導入した。

サーバーホスト型は、1 デスクトップに 1 つの仮想マシンを割り当てるもので、サーバベースによる運用管理の一元化とユーザごとに仮想マシンをカスタマイズ可能であるという柔軟性を併せ持っている。

OS イメージ・ストリーミングは、端末の一元管理とローカルリソースの利用による高いパフォーマンスの両立を目指したもので、クライアントは基本的には HDD を搭載しない PC である。クライアント起動時に OS イメージが最適化され (すな

わち良く使う領域を先に、使わない領域は後にロードする) 配信 (ストリーミング) されることにより OS のブートを行い、起動後はクライアントのハードウェアにより処理を行うため、一般の PC と同様に利用できる。

本学が採用したデスクトップ仮想化技術の詳細については 3.2, 3.5 節でさらに詳しく述べる。

2.4 旧システムの課題

旧システムでは、端末はローカル HDD から起動する方式を取っており、部局の要望や講義に利用する他種多様なソフトウェアの導入に対応するための HDD のイメージ管理とその配信が甚大な業務負担となってきた。旧システムでは HDD イメージを、Ghost AI Snapshot を用いて、ベースイメージと差分イメージによる管理手法を取るなどの工夫を行ってきた [5]。しかしながら、教育用コンピュータシステムは約 1,400 台の端末を全学 20 ヶ所に分散配置している大規模なシステムであることから、HDD イメージの更新のための配信を半年に一度しか行うことができず、ソフトウェアアップデートを迅速に行うことができないという問題を抱えていた。加えて、HDD イメージの破損時の再配信などの管理業務負荷が高く、セキュリティパッチの適用や耐震改修にともなう端末室の変更への対応が困難であることなど、サービスの品質においても課題を抱えていた。我々は新システムへの更新にあたり、ネットブートを採用することにより、これらの課題の解決を目指した。

3 新システムの概要と特徴

3.1 システム構成

新システムと旧システムの比較を表 2 に、新システムの概要図を図 1 に示す。新システムは平成 24 年 3 月～平成 29 年 2 月の 5 ヶ年間の賃貸借であり、主な構成は以下の通りである。

情報教育用端末 (図 2) NEC 製 Express5800/51Mb-S (CPU Celeron P4505 1.86GHz, 主記憶 4GB) 1234 台、うち、307 台は自習専用。OS は Windows 7, Citrix Provisioning Server によるネットブート。Windows 7 上の VirtualBox 上で Vine Linux を提供。

CALL 用端末 ハードウェアやソフトウェアの基本構成は情報教育用端末と同じである、教師用 3 台と、学生用 132 台を 3 演習室に展開。

CALL システム Calabo EX 2 式を CALL 用教室 3 教室のうち 2 室に導入。

管理システム等サーバ群 (図 3) NEC 製 ECO CENTER 20 ノード。

表 1: デスクトップ仮想化技術の比較 ([14] より抜粋したもの)

	ターミナル サービス	サーバー ホスト型	ブレード PC	OS イメージ・ ストリーミン グ	リモート OS ブート	OS	アプリケーシ ョン仮想化	仮想コンテナ
アプリケーションの 実行	サーバー	サーバー	サーバー	クライアント	クライアント	クライアント	クライアント	クライアント
ストレージ	サーバー	サーバー	サーバー	サーバー	サーバー	クライアント / サーバー	クライアント / サーバー	クライアント / サーバー
オフラインでの利用 ソリューション例	不可 Microsoft RDP	不可 VMWare PCoIP, Apache VCL	不可 ClearCube, HP Consoli- dated Client Infrastructure	不可 Citrix Pro- visioning Server, Dell OnDemand Desktop Streaming	不可 Lenovo Secure Man- aged Client	可 Citrix Xe- nApp, VMWare ThinApp	可 XenClient Type1, Microsoft MED-V およ び VPC7	

ファイルサーバ (図 4) NEC 製 iStorage NV7500/Ne3-20/M100 の 3 系統で構成, 総容量 92TB. このうちユーザ用領域は 1 ユーザ 300MB で運用している.

プリンタ 教室用に Xerox 製 DocuPrint3100 を 25 台, 自習室用に DocuPrint 5060 を 3 台導入し ApeosWare で管理している. 自習室用プリンタでは Felica FCF 方式の学生証で認証して印刷している (図 5).

ネットワーク サーバ室と学内 20 以上に分散する演習室を専用の光ファイバを介してスイッチ群で相互接続. ネットブートに対応できるよう, 主要部分は 10G の帯域を確保. 学内 LAN (KUINS²) とは 1 箇所でも常時接続するとともに, スイッチ等故障時の予備経路としても利用できる構成としている.

有償ソフトウェア 調達では Microsoft Office 2010 Professional Plus, ウイルスバスターコーポレートエディションを導入, 学術情報メディアセンターがライセンスを保有する Maple, Adobe Acrobat/Illustrator/Photoshop³, SPSS⁴, 部局購入ソフトウェアを併せて導入している.

3.2 ローカル HDD をキャッシュとして利用する ネットブートの採用

システム更新に先立って, 平成 21 年度に旧システムの増強を行った. この増強は新システムのパイロット版と位置付け, 新システムと同様の Citrix Provisioning Server を採用し, 160 台のネットブートのシンクライアントを導入するとともに, CO-CONV

²Kyoto University Integrated information Network System

³ライセンスサーバを用いたフローティング運用

⁴同上



図 2: 情報教育用端末 NEC Express5800/51Mb-s

社製の ReadCache を活用して端末側の HDD をキャッシュとして運用した. これにより, ネットブートの利点を活かしつつ, 起動の高速化とブート用サーバの台数の削減を目指した.

パイロット版システムの運用を通じ, 端末イメージの管理と切り替えに運用コストがかかることが判明した. これを踏まえ, ブートイメージの管理には CO-CONV 社製の CO-Store (図 7) を採用し, ブートイメージの管理コストを削減した.

HDD キャッシュ併用型のネットブートではディスクイメージが更新された際の一斉起動時の性能が懸念され, 実運用のシステムにおいても, 起動時間が安定せず, ボトルネックの原因を明らかにすることが困難な場合があることが報告されている [15]. 本学では, 5 分以内の起動を要求仕様として, サーバ台数やネットワーク構成を設計した. 本学の構成はブートサーバが Eco Center 物理 6 ノードで, 桂キャンパスを含め, 約 1,400 台のクライアントの一元管理を実現している.

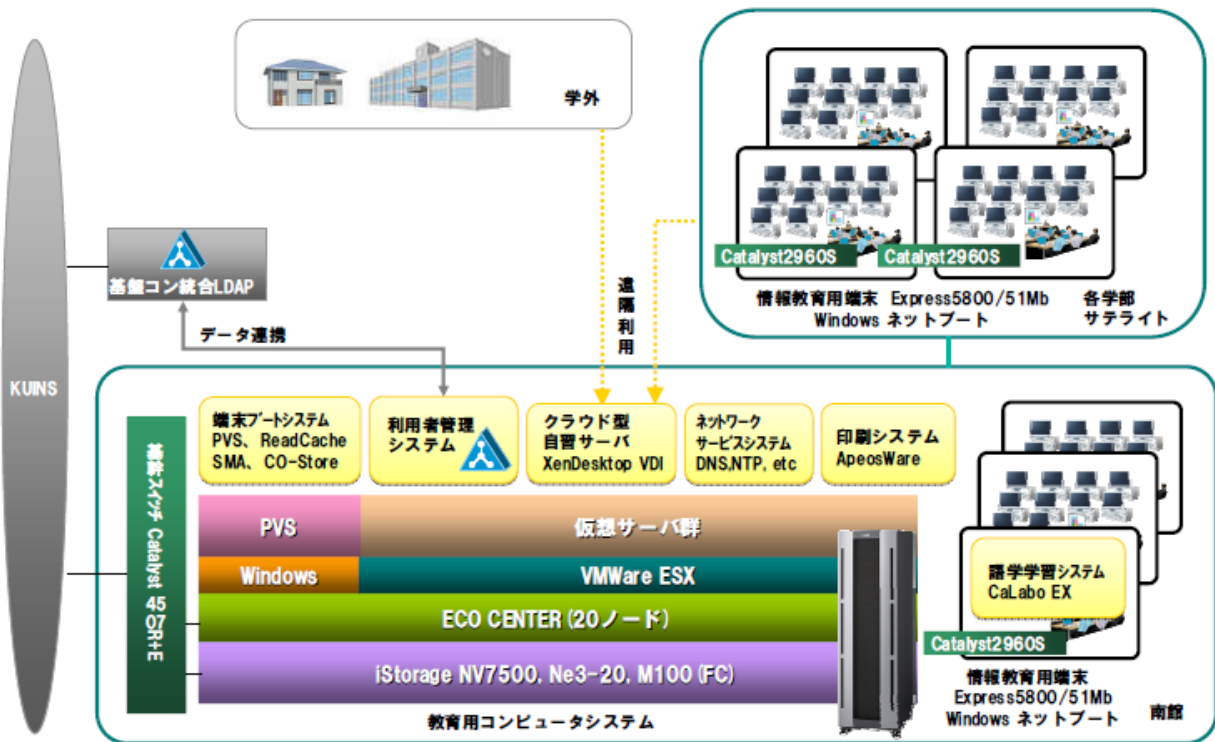


図 1: 新システムの概要. 情報教育用端末 1,369 台, ファイルサーバ容量 92TB の大規模分散システムである.

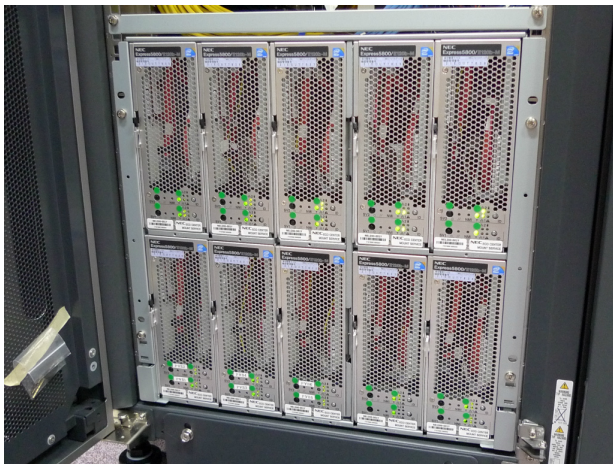


図 3: NEC Eco Center 20 ノード. 各区画に 2 ノード配置されており, 6 ノードはネットブートのための物理サーバ, 他は仮想サーバで利用している.



図 4: NEC iStorage NV7500 と管理コンソール. 水害などからユーザのホームディレクトリのデータ領域を守るために筐体をラック上部に配置している.

3.3 統合認証システムとの連携

旧システムでは, 教育用コンピュータシステムの利用アカウント ECS-ID を独自に発行, 管理してきた. 本学では 2010 年より統合認証システムが構築され, 教職員用アカウント SPS-ID が導入され, ECS-ID も全学アカウントの一部に位置付けられた. ID の統合に伴い, 本年度より ECS-ID が全学生に入学時に配布され, 利用開始時にアカウントの

アクティベーションを行うこととなった.

新システムでは引き続き ECS-ID の管理そのものは統合認証システムの一部として行うことに加え, SPS-ID, ECS-ID 両方での認証を可能とした. これにより, 教職員への ECS-ID の発行を原則として行わないこととした⁵.

⁵2012 年 8 月に教職員が保持している ECS-ID を原則停止した. また, 教育用コンピュータシステムを利用する教職員は限られているため, 運用管理コストを軽減する目的から, SPS-ID

表 2: 京都大学新旧教育用コンピュータシステムシステムの比較. メールシステムのアウトソーシング, 課金プリンタの廃止, ネットブート方式のシンクライアントの採用に加え, 学生アカウントを入学時に全員に配布するなどワークフローが大幅に変化した.

	旧システム	新システム
端末	Celeron 2.8GHz,1GB, 40GB, SXGA	Celeron P4505 1.86GHz, 4GB, 160GB, SXGA
OS	WindowsXP + 遠隔ログインによる Linux	Windows7 + VirtualBox による Linux
端末起動	ローカル HDD からのブート	Citrix Provisioning Server によるネットブート
端末更新	単一の HDD ファイル + 自動差分処理	CO-Store による端末イメージのリビジョン管理
印刷	無料 200 枚/年 + 課金	無料 200 枚, 課金プリンタ廃止
認証	LDAP で管理・認証, LDAP Manager で連携	統合認証システムによる管理, 連携
利用登録	申請の直後に利用可能	入学時に配布し個人でのアクティベーション
メール	DEEPMail パッケージ	アウトソーシング
メールアドレス	氏名@英数字から選択	lastname.firstname.12w@st.kyoto-u.ac.jp (学籍データから自動生成)



図 5: 自習室の IC カード認証式オンデマンド印刷用プリンタ.

加えて, 新システムでは, 教育用端末への Windows ログオンを行えば Shibboleth IdP への SSO が完了する環境を構築し, Web を越えた SSO を実現可能となった (図 6). 2012 年後期からサービス内容とそのリスクを含む利用者へのアナウンスを行った上で, 2012 年 11 月 19 日よりサービスを開始した.

教育用の情報環境の整備に当たっては留学生への配慮も重要である. 特に, 本学では日本語での教育を前提としない学位プログラムも開始されている. そこで, 個々のユーザーが OS の言語を日本語と英語のいずれかを選択できるように, また, 履修登録などで, 教育用システムへのログインなしに端末を利用したいという要望に応えるためログイン UI をカスタマイズした (図 8).

で認証する利用者のホームディレクトリはデフォルトでは作成せず, オンライン申請により作成するシステムを構築した.

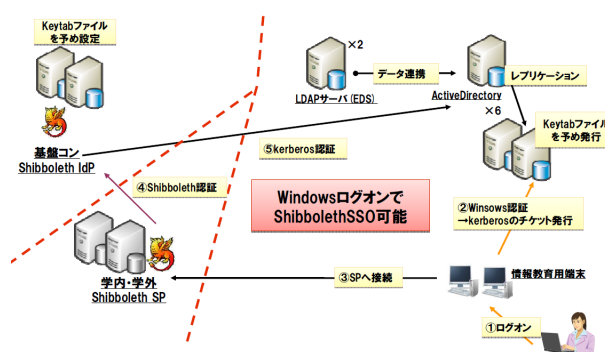


図 6: 端末ログインと Shibboleth 認証の連携の概念図. 本学では学生ポータルが Shibboleth SP となっているため, 端末へのログインが様々な情報システムへのログインを意味することとなる.

3.4 省電力化

新システムではサーバ, 端末とも省電力性に優れた機種を選定し, 旧システムに比べ約 40% の消費電力の削減を行った. また, 教育用の端末系は稼働時間がかなり短く, 主に学期期間中の週日, 朝～夕方が大半の端末の稼働時間帯である. このことを考慮して, 学休期間, 週末, 夜間などに待機電力を削減するために教室単位の電源管理を目的に遠隔制御できる電源制御ユニット AP7900 を各教室に導入した (図 9).

3.5 デスクトップ仮想化による新たなサービス

新システムではデスクトップ仮想化技術を基盤とする, リモートデスクトップ型のサービスを行えるようにした. 本サービスを利用することにより, これまで不可能であった端末室以外での, 場所を問わない情報教育用端末を利用する講義の実施, 端末室における講義に関連した自習をスムーズに行うことができる. 本サービスは, Citrix Xen Desktop と



図 7: ネットブートイメージ管理ツール CO-Store

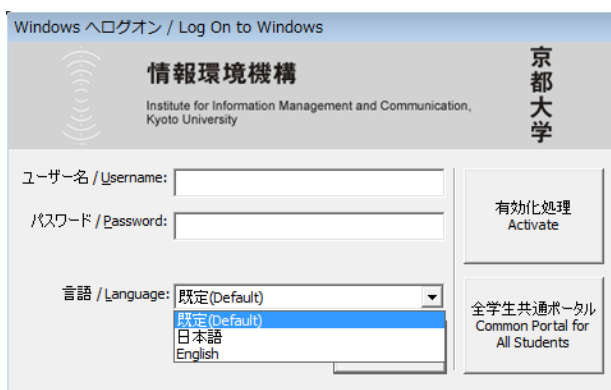


図 8: 日英選択対応のログイン UI. アカウント有効化処理, 教務情報システムなどへのログインのための全学生共通ポータル専用ボタンを備える。

VMware ESX Server を基盤とする仮想マシンによるもので, 同時利用最大 50 人となっている. ユーザは Web システムにログイン, クライアントソフトウェアのインストールの後, 教育用端末と同じ環境へログインできる (図 10, 11).

本サービス開始にあたり, 100 人分の Windows ライセンスを追加購入し, これらのライセンスを一定期間同一のユーザが使うということを条件にライセンス上の問題が発生しないよう Microsoft との交渉を行った⁶.

同様の, サーバホスト型に分類される, 画面転送型の技術を教育用端末に導入した教育機関の実例が多く報告されている. 画面転送型の端末は動画再生などリアルタイム性が要求されるアプリケーションには不向きであるという報告 [16] や, 動画再生のための支援機能を搭載した端末を採用した実例もある [17]. 本学では, 物理的な教育用端末はネットブートを採用したため, 本サービスは前述の通り, 教育用端末の補完という位置付けにとどまっている

⁶本来はユーザごとの Windows ライセンスが必要であり, 最もリーズナブルな購入方法は全学的な包括契約である.

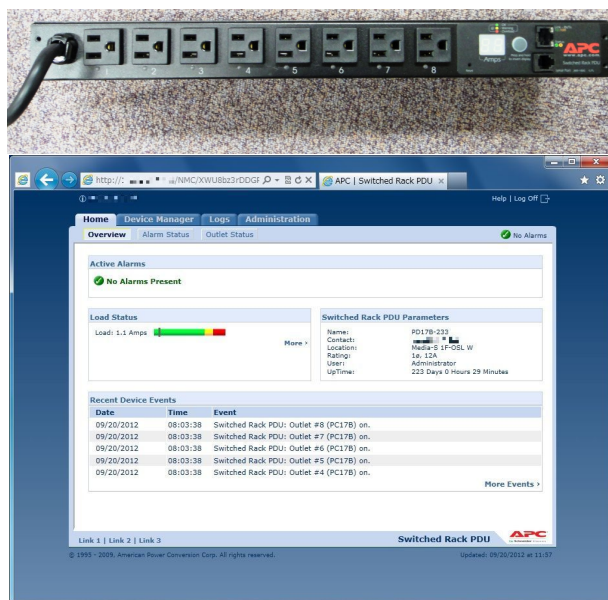


図 9: 電源制御ユニット AP7900 (上) と Web コンソール (下).

る. 現在, Citrix Xen Desktop の試用と評価を行っており, 今年度中を目処にユーザへの告知とサービスの開始を行う予定である.

4 新システムの運用と評価

4.1 HDD キャッシュとネットブート併用の効果

平成 24 年 1 月 27 日～2 月 25 日の期間中に, 全ての端末設置演習室で次の手順で起動時間の計測を行った.

1. 端末を一斉起動し, ネットブート開始時からログオンダイアログ表示までの時間を目視にて計測する. 計測対象は, サンプリング抽出した数台および, 最も遅くブート開始した端末とする.
2. ログオンダイアログに ID/Password (5 アカウントをランダムに使用) を入力しておき, 合図とともに数名で一斉に Enter キーを入力, ログインを行う. Enter キー押下後デスクトップ画面が表示するまでの時間を目視にて計測する. 計測対象は各自が最初に Enter キーを押下してから最遅端末のデスクトップ画面表示までの時間とする.
3. 3 回計測した平均値を算出する.

全ての演習室の計測値を平均すると, ログオンダイアログ表示まで 3 分 2 秒, デスクトップ表示まで合計 4 分 25 秒となった. 従って, 新システムの教育用端末は要求要件である「5 分以内での起動」を満足している,



図 10: Xen Desktop Manager のログイン画面。Windows, Mac, タブレット, スマートフォンからの利用が可能である。

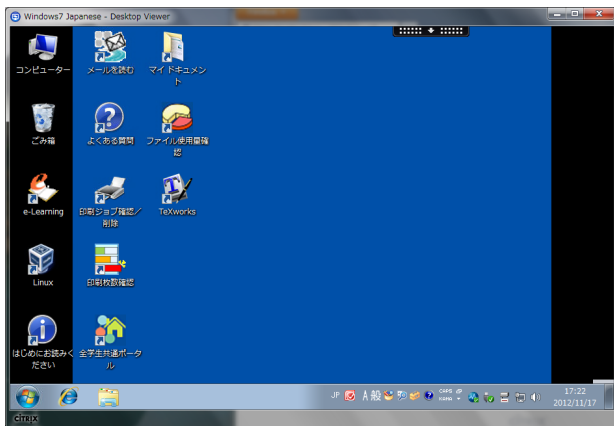


図 11: Xen Desktop 経由の教育用端末利用例。

4.2 CO-Store によるブートイメージ管理コスト削減効果

ネットブートの端末イメージの管理に採用した CO-Store (図 7) の効果を表 4.2 に示す。更新作業にかかる時間が 2 時間から 1 分となり、絶大な業務軽減となっていることが分かる。加えて、ネットブートの採用により、端末そのものの更新時間も大幅に削減されている。

4.3 省エネルギー効果

サーバ及び一部の端末群を対象に消費電力を計測したところ、同時期の旧システムと比較して概ね

表 3: 端末更新作業比較

	イメージ数	イメージ更新時間	端末更新時間
旧	1 イメージ + 差分	2 時間以上	28 時間以上
新	13	1 分以上	15 分

40% の消費電力減となっており当初期待された効果は得られている (図 12)。現在、電源制御ユニットの運用方針を検討中であり、端末系の待機電力の削減にも取り組む予定である。

4.4 IC カード認証方式プリンタ

印刷出力の取り忘れ、無駄な印刷などがほとんど発生しなくなったため、紙資源の節約とプリンタ管理コストが削減された。プリンタの利用実績においても前年度に比べ印刷枚数が 2012 年 4 ~ 6 月の平均で 68% となっている。

5 おわりに

本発表では、京都大学の教育用コンピュータシステムの更新について報告した。ローカル HDD をキャッシュとして利用するネットブート型の端末の採用により、管理コストの削減とパフォーマンスを追求した。旧システムでは端末の更新のため数日を要していたのが、新システムでは 15 分で完了するなど、劇的な管理コストの削減を実現した。加えて、サーバホスト仮想化技術を採用した、リモートデスクトップ型のサービスを構築した。これらの取り組みを含め、省電力化を進めた結果、旧システムと比べ 40% の電力を削減することができた。今後も運用レベルでの工夫を続け、教育研究の基盤として利用いただけるよう努めていきたい。

謝辞

本システムの設計と構築に多大なるご尽力を賜わった日本電気株式会社各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 梶田秀夫 編. 特集 大規模分散ネットワーク環境における教育用計算機システム. 情報処理, Vol. 45, No. 3, pp. 225-281, 2004.
- [2] 池田心, 森幹彦, 喜多一, 石橋由子, 竹尾賢一, 隈元榮子. 京都大学における大規模教育用情報基盤の運用. 平成 16 年度情報処理教育研究集会講演論文集, pp. 547-550, 2004.
- [3] 丸山伸, 最田健一, 小塚真啓, 石橋由子, 池田心, 森幹彦, 喜多一. Virtual Machine を活用した大規模教育用計算機システムの構築技術と考察. 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 4, pp. 949-964, 2005.
- [4] 喜多一, 上原哲太郎, 森幹彦, 池田心, 小澤義明, 竹尾賢一, 石橋由子, 坂井田紀恵. 京都大学教育用コンピュータシステムの構成—平成 19 年 2 月導入のシステムの構築について—. 大阪大学 Cybermedia Forum, No. 8, pp. 9-14, 2007.

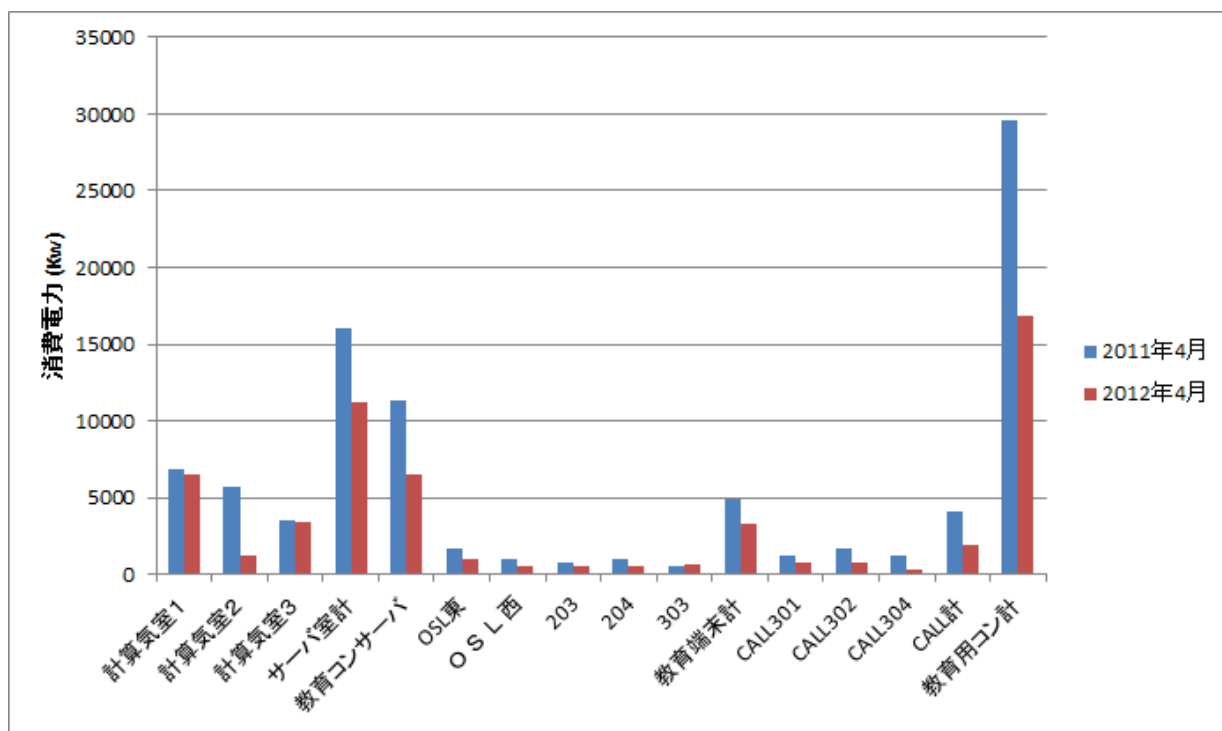


図 12: 新旧システム消費電力比較

- [5] 池田心, 森幹彦, 上原哲太郎, 喜多一, 石橋由子, 石井良和, 竹尾賢一, 小澤義明. 京都大学における情報教育基盤の整備と運用. 平成 19 年度情報教育研究集会講演論文集, 2007.
- [6] 金沢大学. 平成 18 年度入学者からの携帯型パソコンの必携について, <http://www.kanazawa-u.ac.jp/news/06/0104.html>, 2006.
- [7] 高知大学. ノート型パソコンの必携について, http://www.kochi-u.ac.jp/nyugaku_annnai/note_pc.html, 2012.
- [8] 埼玉大学. 埼玉大学学部新入学予定の皆様へ ノート型パソコン持参のお願いとお知らせ, <http://www.saitama-u.ac.jp/ceed/pchikkei.htm>, 2012.
- [9] 東京学芸大学. 平成 24 年度学生募集要項, <http://www.u-gakugei.ac.jp/~nyushika/univ/24youkouhen.pdf>, 2012.
- [10] 竹田尚彦. 情報教育入門の 8 年間と今後. 教養と教育, No. 8, pp. 6-13, 2008.
- [11] 伊藤一成. 大学におけるスマートフォンの活用事例. 情報処理, Vol. 52, No. 8, pp. 1026-1029, 2011.
- [12] 兼宗進, 阿部和広, 原田康徳. プログラミングが好きになる言語環境. 情報処理, Vol. 50, No. 10, pp. 986-995, 2009.
- [13] 大谷大学. 2011 年度 人文情報学科 正課授業における取り組み, http://web.otani.ac.jp/file/ipad2010/iPadxEducation_2011class.pdf, 2011.
- [14] インテル. ホワイトペーパー デスクトップ仮想化の理解, <download.intel.com/jp/business/japan/pdf/319175-005JA.pdf>, 2011.
- [15] 浜元信州, 三河賢治, 青山茂義. 教育用パソコンのネットワークブート起動時間に影響を与える要因の評価. 学術情報処理研究, No. 15, pp. 46-52, 2011.
- [16] 只木進一, 田中芳雄, 松原義継, 日永田泰啓, 江藤博文, 渡辺健次. 仮想デスクトップ・画面転送型シンクライアントによる演習室端末システム (佐賀大学の新しいシステム紹介). 情報処理学会研究報告, Vol. 2010-IOT-11, No. 3, pp. 1-5, 2010.
- [17] 瀬川大勝, 辻澤隆彦, 辰己丈夫. 仮想化技術を用いたサーバ集約と演習端末室の構築. 学術情報処理研究, No. 15, pp. 134-144, 2011.