国内最高水準の高効率ＤＣの省エネ手法の紹介と UPS 設備の活用によるDR/VPP への参画

高砂熱学工業株式会社　東京本店　藤崎　将彦

建築計画の概要

概要

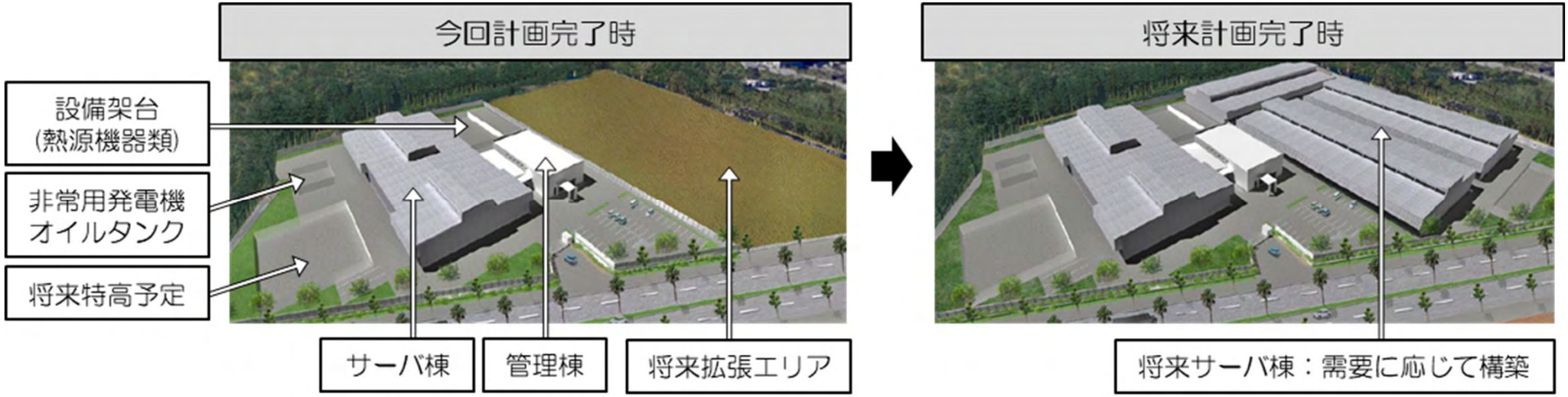
建物用途：データセンター、事務所
建物名称：白井データセンターキャンパス（白井DCC）
敷地面積：約40,000m2
工期
　Phase1-1,3：　2018年11月着工、2019年3月竣工
　Phase1-4　：　2020年4月着工、2021年5月竣工
　Phase1-5　：　2021年5月着工、2022年7月竣工
最終工事：2022年7月31日
（全サーバ室用の設備実装工事完了）
サーバ棟：延べ床面積　約4,600m2、地上1階、S造、耐震構造
　　（一部床免振）
管理棟：延べ床面積　約1,700m2、地上２階、S造、耐震構造
　　両棟ともシステム建築を採用

全体計画

敷地面積	約40,000m2
最大受電容量	50MW
最大ラック数	6,000ラック（6kVA／ラック）

本プロジェクト

サーバ棟　900ラック収容可能
管理棟

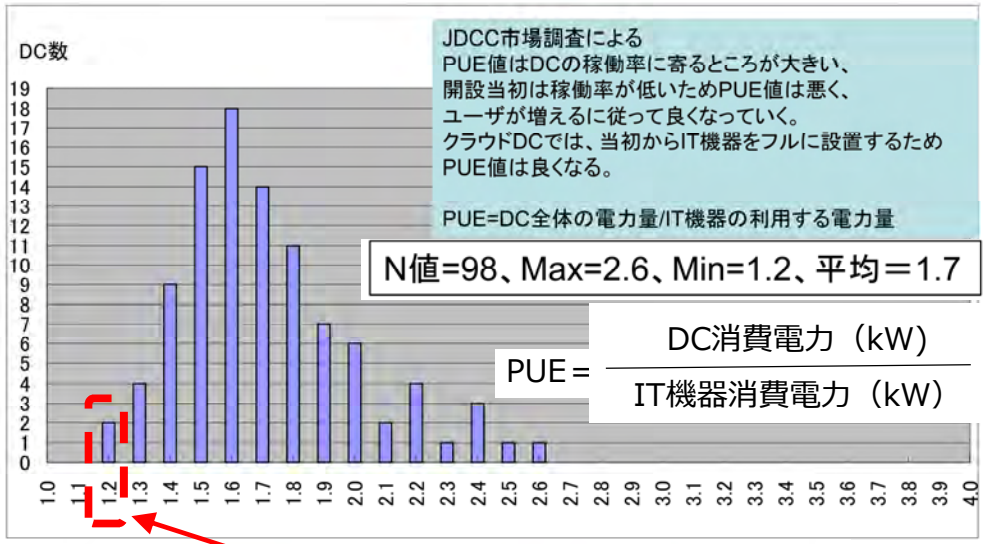


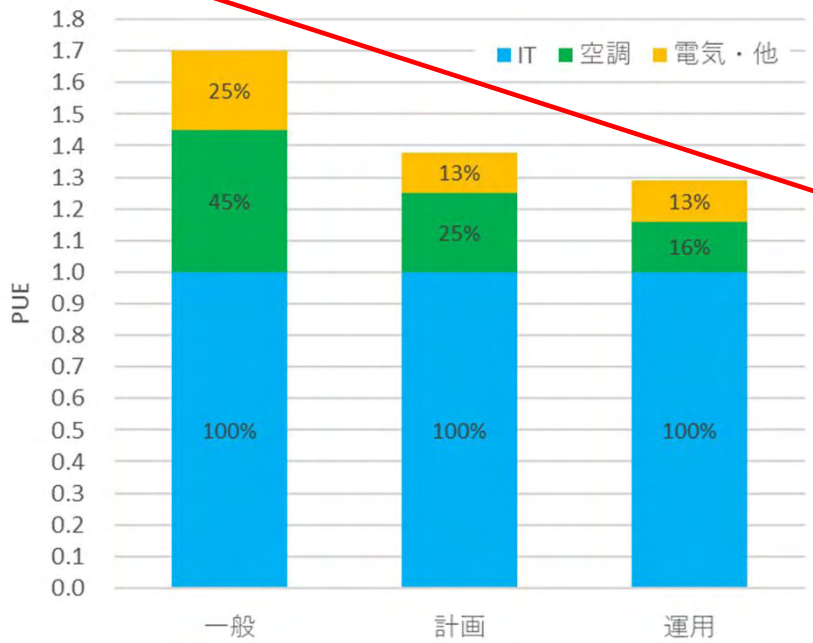
初期構築と将来拡張計画

目指したエネルギー効率

PUE　データセンターのエネルギー効率を表す指標

2021年4月8日　JDCC第32回「省エネルギー小委員会」資料より





一般的なDC　PUE＝1.7前後

電気設備　高効率UPS、バスダクト

空調設備

省エネ高効率を追求

外気冷房
⇒躯体空調機、頂部排気棟

空気搬送効率の高効率化
⇒躯体空調機、大型ECファン
空気循環経路の拡大

熱源設備の高効率化
⇒IDC-SFLOW（高い給気温度）
⇒冷水13℃

関連室空調の高効率化
⇒電気室SWIT、管理棟PMAC

白井DCC　計画PUE＝1.4以下

運用検証、チューニング

PUE＝1.2台
国内最高レベルを目指す

省エネ達成のための主眼点

主眼点01. 設備ファーストの建築形状

【計画】 サーバ室計画　躯体空調機と空気搬送経路最適化した空調空間
【計画】電気室,ＵＰＳ室計画ダクトレスと空気搬送経路を最適化した空調空間
【検証】設備ファーストで構築した建物計画の運用検証
【チューニング】空調設備のチューニング

主眼点02. 高効率な空調システム

（壁吹出し空調システム＋直接外気冷房）

【計画】直接外気冷房システム
【計画】壁吹き出し空調方式（IDC-SFLOW®）の採用
【計画】熱源システムとサーバ排熱回収システム
【検証】高効率な空調システム　直接外気冷房システムの運用検証
【チューニング】 空調設備のチューニング

主眼点03. AIを活用した運転制御システム

【計画】ＡＩを活用した運転制御システムの開発
【検証】ＡＩを活用した運転制御システムの運用検証
【チューニング】ＡＩを活用した運転制御システムのチューニング

主眼点04. IT機器の気流制御

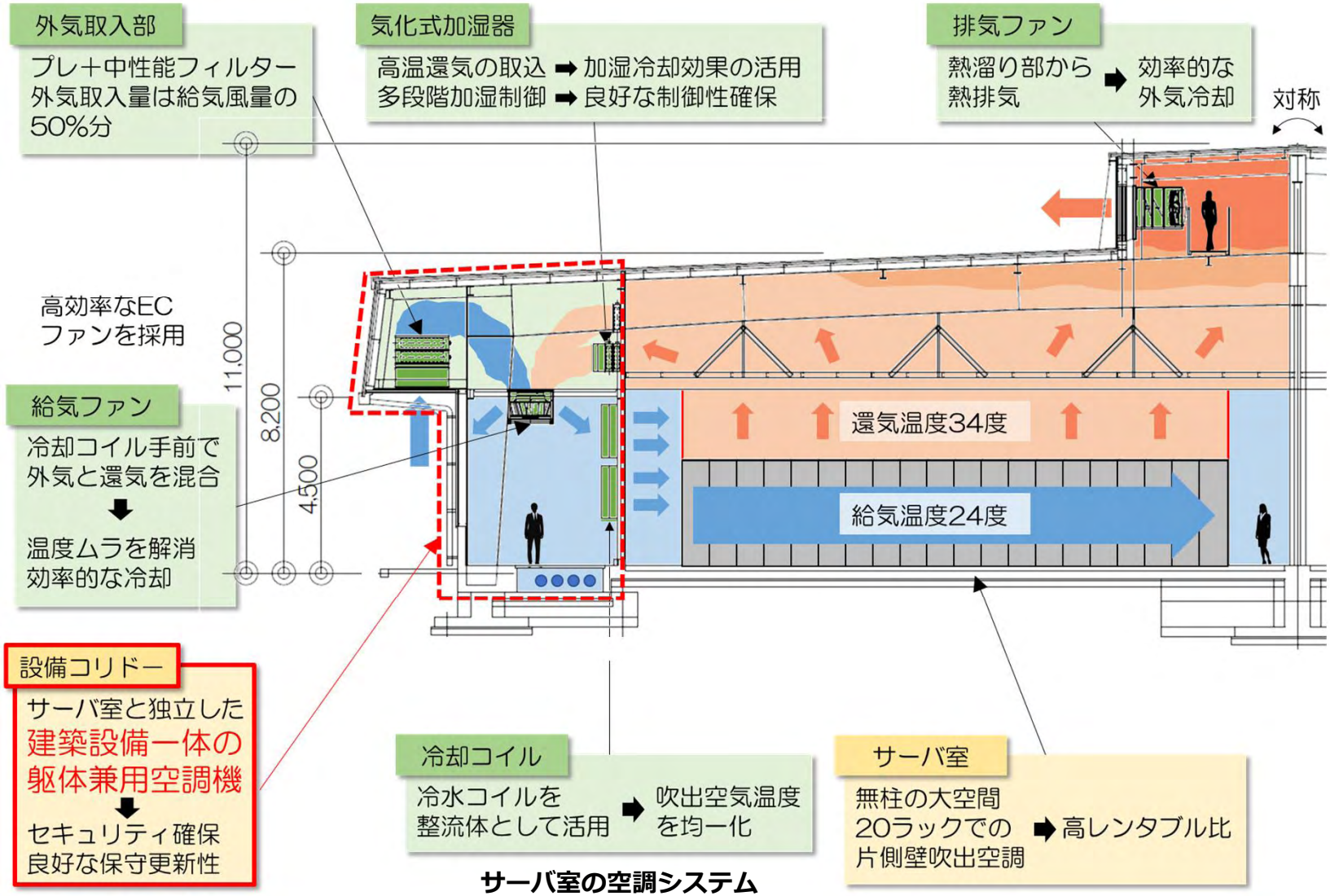
【チューニング】 IT機器のチューニング

主眼点01 サーバ室計画：躯体空調機と空気搬送経路最適化した空調空間

サーバ室計画

設備コリドー：建築躯体を空調機として利用
大空間：空気循環ルートを大きく確保
排気塔：建屋頂部に排熱が溜まる形状

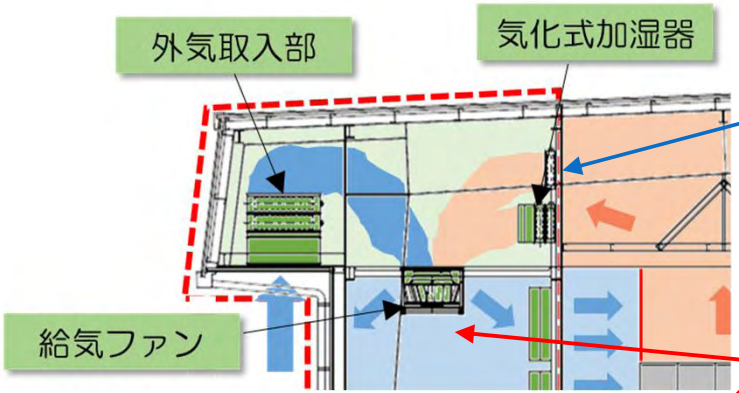
搬送効率と外気冷房効率の高い建築形状計画を実現



サーバ室の空調システム

主眼点01 サーバ室計画：躯体空調機と空気搬送経路最適化した空調空間

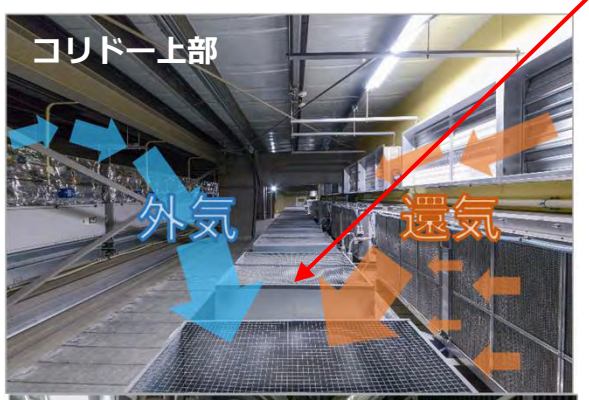
サーバ室計画

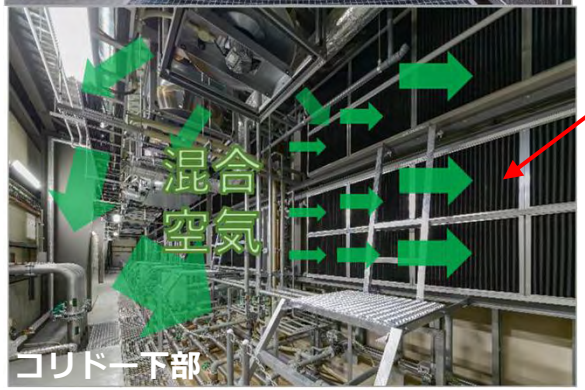


還気バイパス設置
搬送動力低減

給気ファン
外気と還気を混合
▼
温度ムラを解消
効率的な冷却

ECファン
最大風量より大型なファン設置
低回転⇒**省エネ運用**



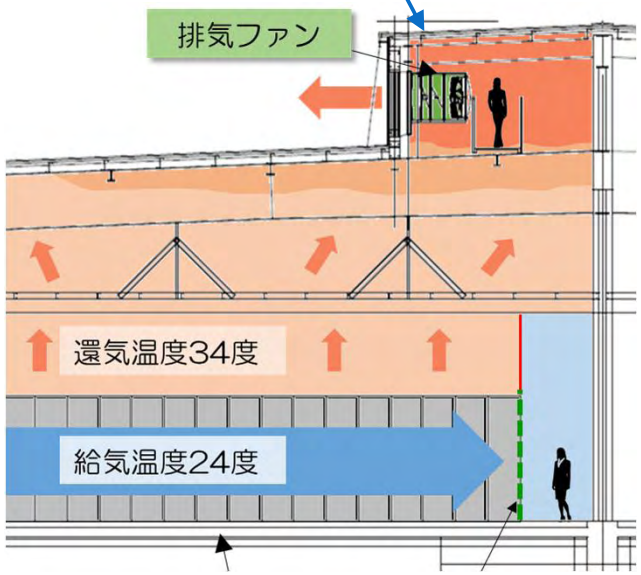


冷却コイル＋フィルター
吹出空気流速の均一化

外気混合計画

効率的な熱排気

建屋頂部に排気ファンを設置
熱溜まり部から熱排気



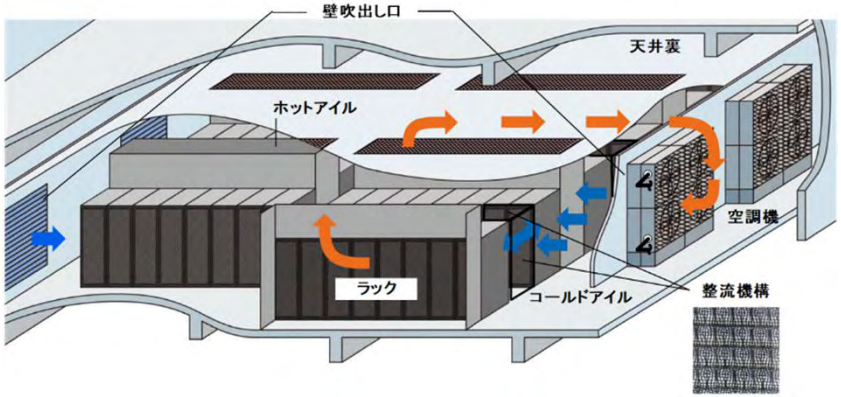
排気塔模式図

排気塔

主眼点02 壁吹き出し空調方式（IDC-SFLOW®）の採用

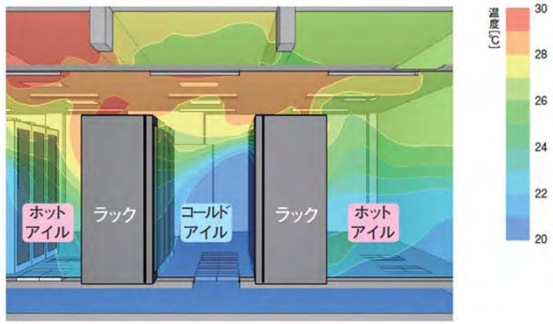
IDC向け壁吹出し方式空調システム「IDC-SFLOW ®」

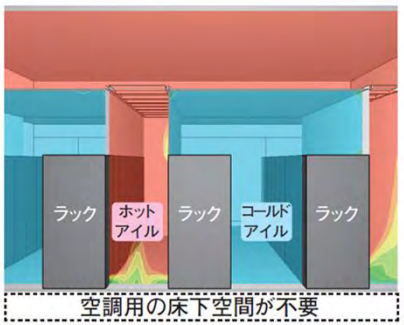
IDC-SFLOW ®
壁吹出し口、整流機構、ホットアイル区画により構成



IDC-SFLOW®の構成例

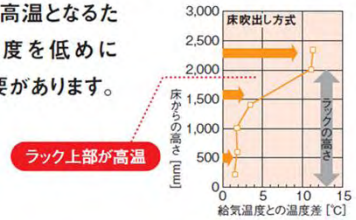
②ラック吸込み温度均一化による給気温度の高温化
整流機構の効果により、ラック吸込み温度を均一化





■熱気の回り込みによりラック上部が高温

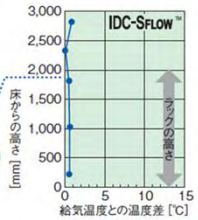
ラック上部が高温となるため、給気温度を低めに設定する必要があります。



IDC-SFLOW®の断面の熱画像

■給気温度に近い均一なラック吸込み温度

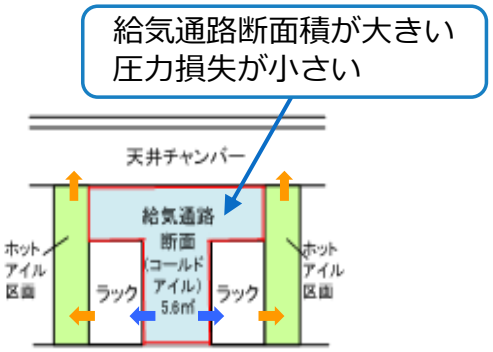
ラック吸込み面温度が均一なため、高めの給気温度でも十分な冷却効果が得られます。



床吹出し空調の断面熱画像

IDC-SFLOW ®を採用するメリット
床吹出し空調方式と比較した場合

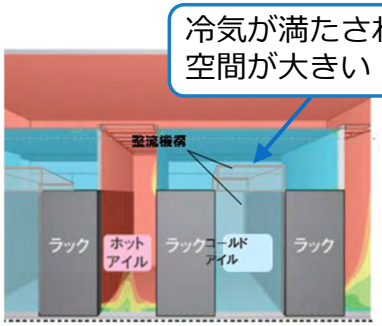
①空気搬送動力の低減
床吹出し空調方式と比較して空気搬送動力が約1/3



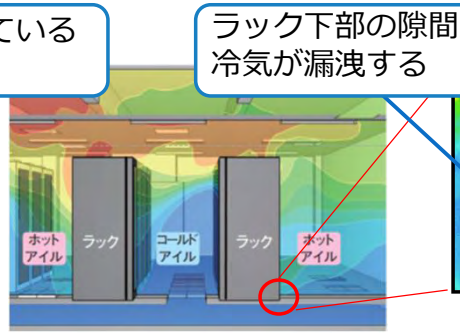
IDC-SFLOW®の断面例

③空調機停止時の温度上昇低減　空調停止時の温度上昇を低減

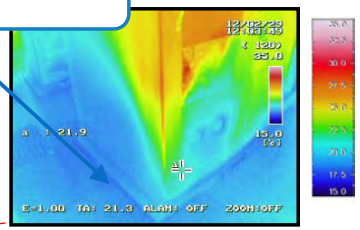
④ラック下部からの冷気漏洩によるロスが無くなる



IDC-SFLOW®の断面例



床吹出空調の断面例



冷気漏洩例（ラック下部）

主眼点02 4. 壁吹き出し空調方式（IDC-SFLOW®）の採用

IDC向け壁吹出し方式空調システム「IDC-SFLOW ®」

整流機構の効果

通過する風速が均一となる
誘引効果が少なくなる
サーバー吸い込み温度は均一になる

加圧給気風量が均等に各サーバーラックにかかる
給気風量が少なくてすむ

通常壁吹き出し空調
吹出口近傍のサーバラック
通過風速が早く、誘引効果により
サーバ排熱を誘引
温度が高い排気をサーバーが吸込む

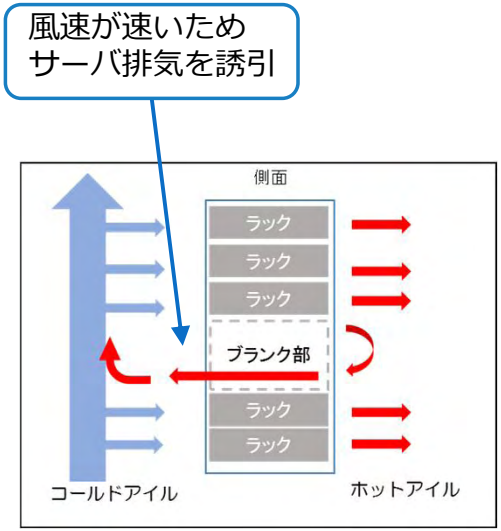
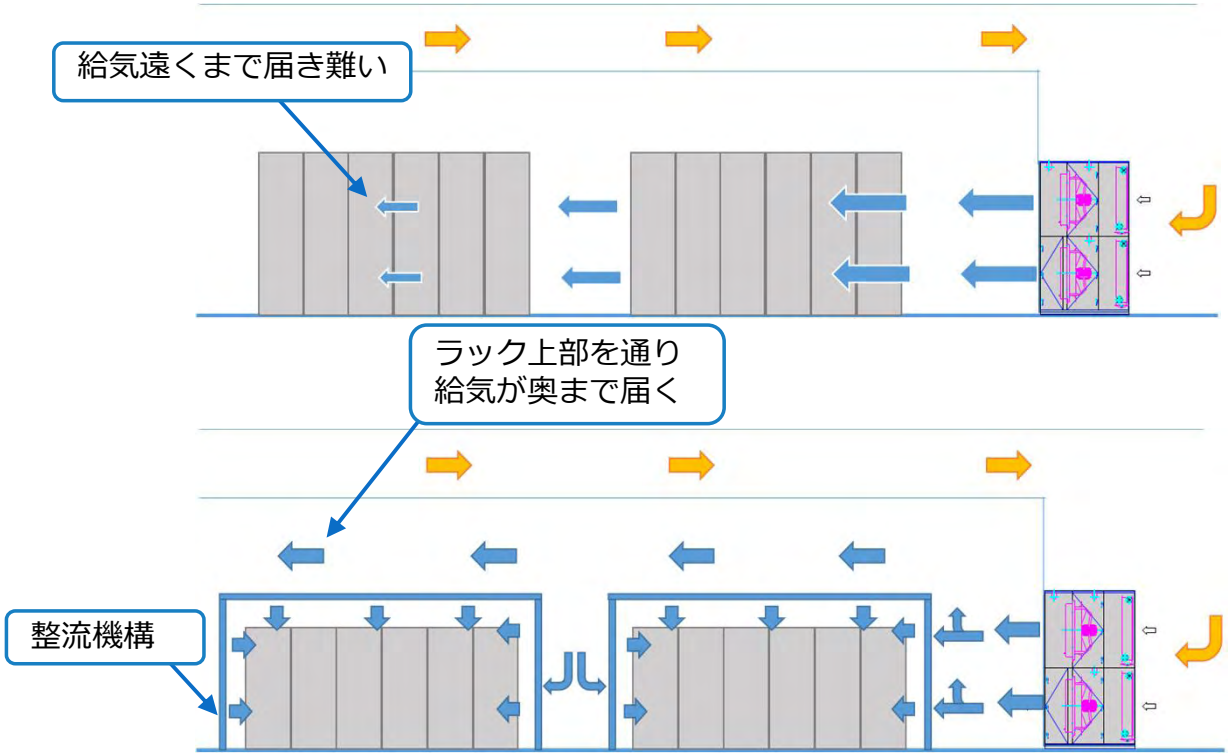


図2.2-8 サーバ排気の誘引



整流機構有と無の気流

4.3 給気温度の高温化による外気冷房効率化

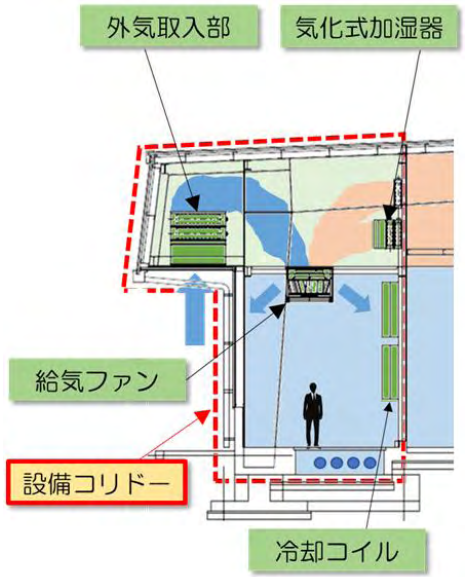
給気温度設定を24℃と高く設定
取り入れる外気との温度差大

外気冷房有効期間　約　9%UP
外気冷房処理能力　約11%UP

※給気温度18℃の場合と比較

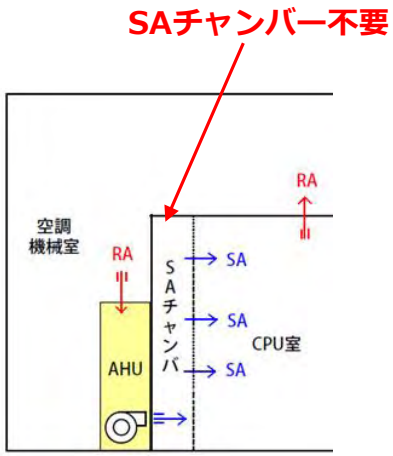
主眼点01 設備ファーストで構築した建物計画の運用検証

吹出空気流速の均一化



設備コリドー

一般的な壁吹出し空調システム
サプライチャンバーを設置
壁面の開口率やフィルタなどで調整



一般的な壁吹出空調例

設備コリドー下部を大型チャンバ
壁面に取り付けた冷水コイルとプレフィルタの圧力損失
コイル面から吹き出される空気流速は均一化

1.24m/s±0.14m/s（±11%）
良好な結果

サーバー室　コイル平均風速

[m/s]

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
風速	1.13	1.22	1.10	1.22	1.16	1.16	1.22	1.20	1.19	1.26
No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
風速	1.25	1.14	1.27	1.30	1.31	1.31	1.35	1.30	1.30	1.38

空気搬送効率

空気循環ルート圧力損失低減
高効率なECファン採用
大型なファンを選定し、低回転で運用

他の壁吹出空調IDCと比較して

ATF 3～4倍、APP 4～6倍

表空気搬送効率比較

	設計値（最大風量の場合）					想定（循環風量50%、冷却負荷25%）				
	風量 m3/h	消費電力 kW	冷却能力 kW	ATF	APP m3/h/W	風量 m3/h	消費電力 kW	冷却能力 kW	ATF	APP m3/h/W
白井DCC	568,100	33	1,891	57.2	17.2	284,050	5.0	473	95.3	57.3
壁吹_例1	912,000	194	3,792	19.5	4.7	456,000	29.2	948	32.5	15.6
壁吹_例2	360,000	123	1,620	13.2	2.9	180,000	18.4	405	22.0	9.8
床吹_例1	268,800	77	886	11.5	3.5	134,400	11.6	222	19.2	11.6

ATF：空気搬送効率

$$ATF = \frac{冷却能力（kW）}{搬送消費電力（kW）}$$

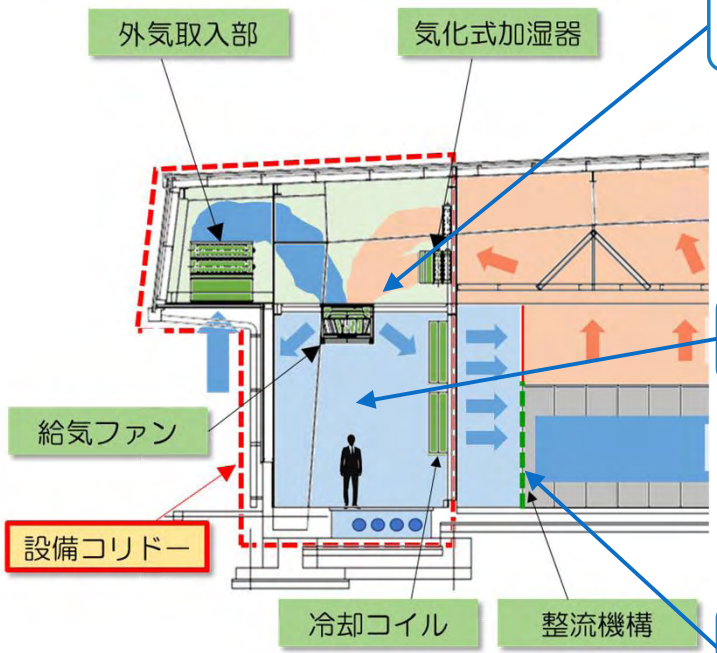
APP：消費電量当り風量

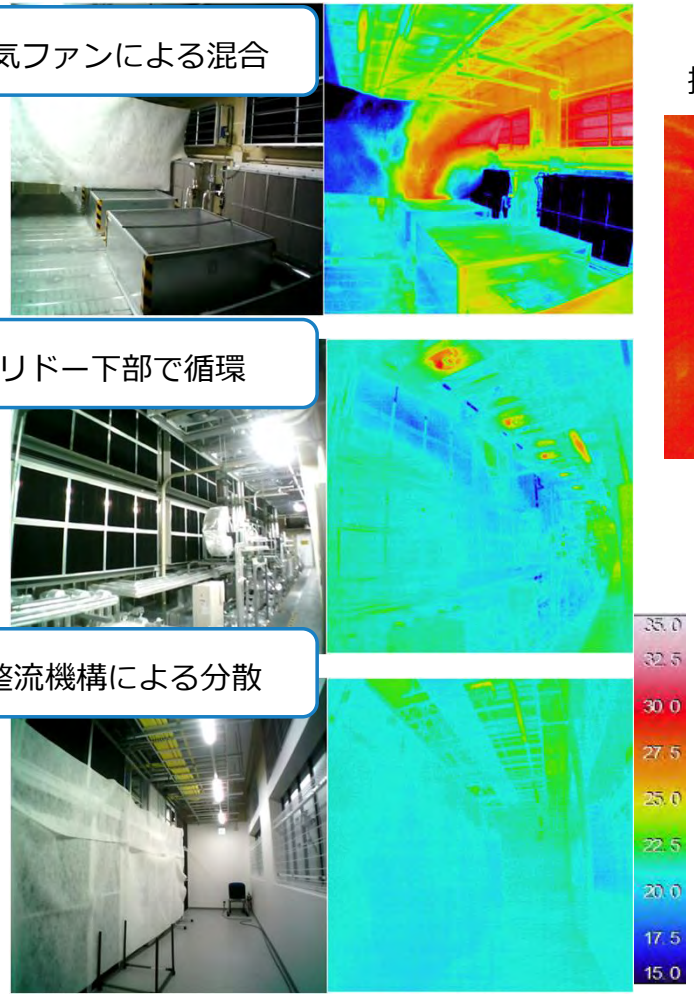
$$APP = \frac{風量（m3/h）}{搬送消費電力（W）}$$

主眼点02 高効率な空調システム　直接外気冷房システムの運用検証

外気冷房時の給気温度の均一化

外気冷房時にサーモカメラにて確認
低温の外気、加湿冷却後の冷気、高温の還気でも均一化





均一な給気温度を達成

▼

給気を高温化（24℃）

外気冷房時の各所熱画像状況

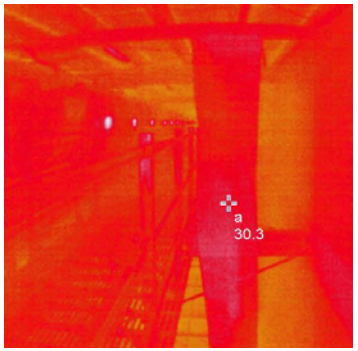
給気24℃＋2℃以内

高効率な排気

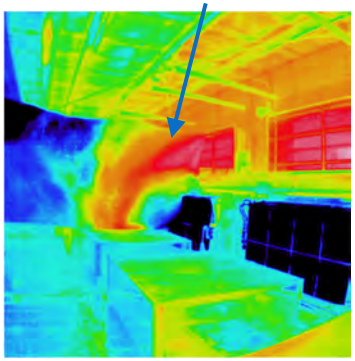
外気冷房時に排気塔の効果を確認

還気＋2℃を排気

排気棟上部平均30℃　　還気平均28℃



排気棟の温度



コリドー上部の温度

排気塔とコリドー上部の熱画像比較

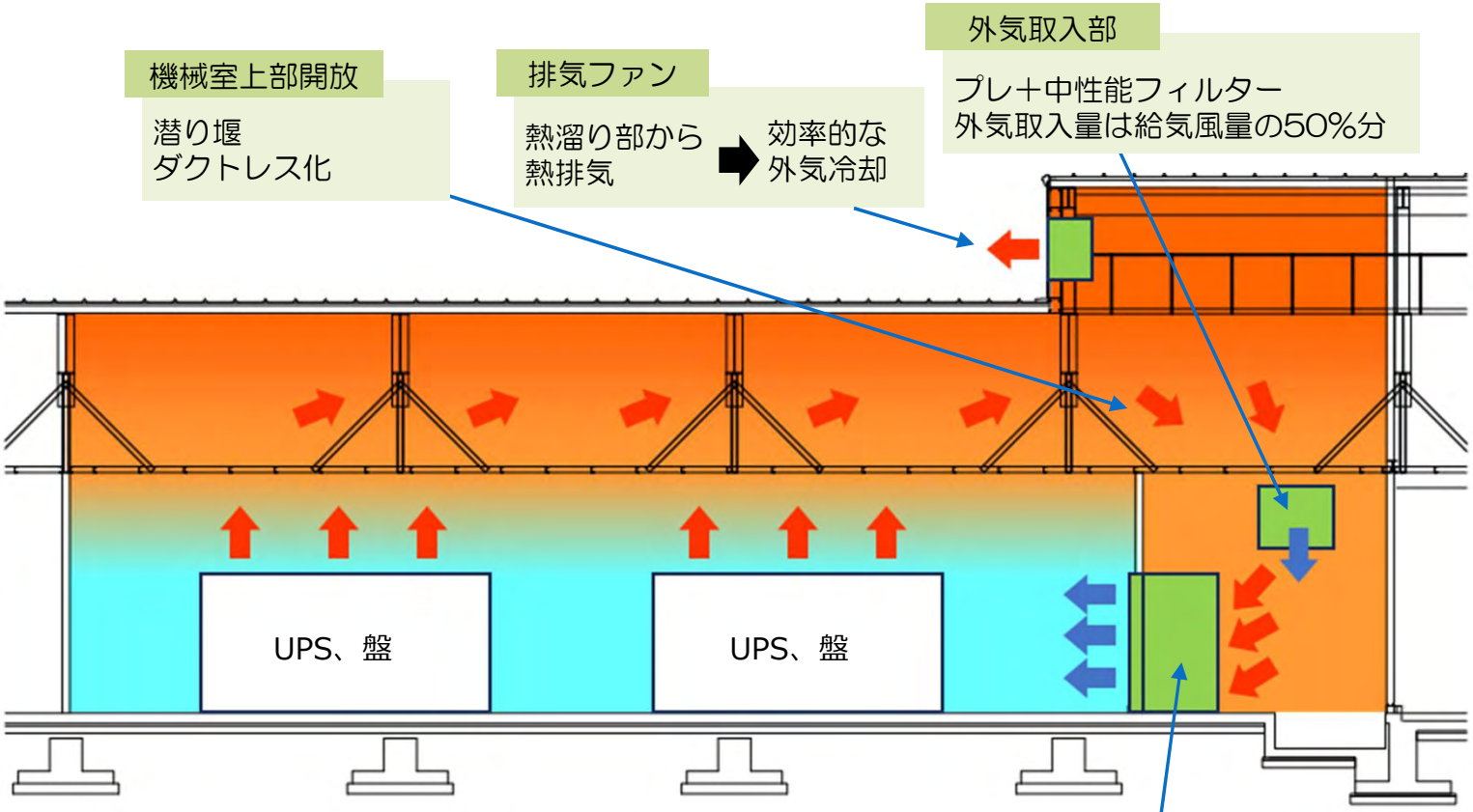
建屋頂部

主眼点01 電気室、ＵＰＳ室計画：ダクトレスと空気搬送経路を最適化した空調空間

電気室・UPS室計画

機械室：上部開放⇒ダクトレス化
大空間：空気循環ルートを大きく確保
排気塔：建屋頂部に排熱が溜まる形状

搬送効率と外気冷房効率の高い建築形状計画を実現



旋回流誘引型成層空調システム（SWIT®）
外気冷房を組み合わせた空調システム

UPS室、電気室の空調システム

SWIT吹出部

UPS

UPS室 サーモカメラ画像

主眼点02 電気室、ＵＰＳ室計画：ダクトレスと空気搬送経路を最適化した空調空間

旋回流誘引型置換換気空調システム（SWIT®）

データセンターの電気室、UPS室
　高発熱の盤、UPSが多数配置されるため、天井から吹き出す混合空調方式を採用する場合多い
　冷却対象の盤、UPSなどだけではなく空間全体を空調するために非効率

旋回流誘引型成層空調システム（SWIT®）
外気冷房を組み合わせた空調システム

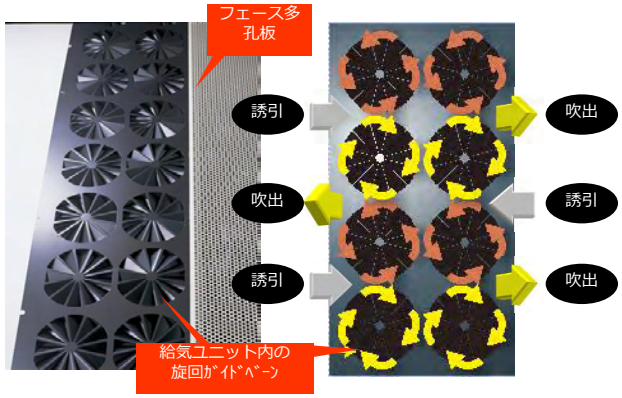
高い搬送効率と冷却効率

UPS室空調の効率化

UPS室の１年間の運用結果
　平均負荷は52kW
　搬送動力　平均1.43kW
　熱源消費電力　平均5.3kW

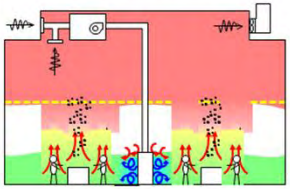
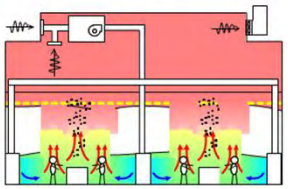
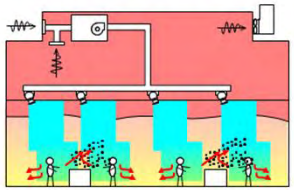
一般的な電気室空調より
空気搬送効率 1.7倍
消費電力 50%

※床置き空冷PAC
　給気ダクト有と比較



SWIT写真

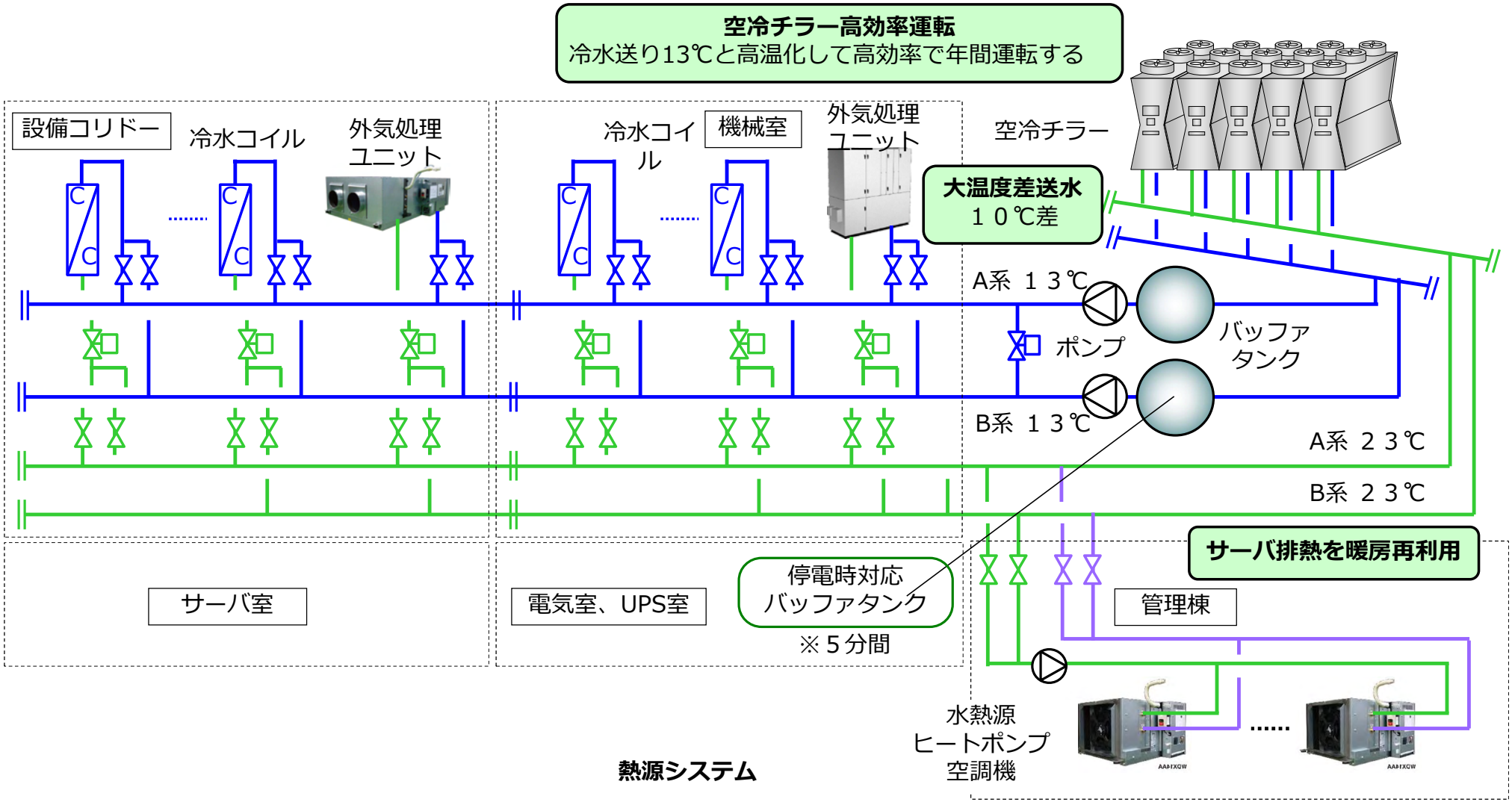
置換空調比較表

システム名称		SWIT		DV（従来型置換換気）		混合空調システム	
システム図							
快適性	温熱感	◎	遠方の温熱感をDVより向上できる（冷房時の体感温度向上／暖房時の足下温度上昇）	○	作業域全体で快適	△	気流暴露範囲のみ快適
快適性	空気清浄度	◎	旋回誘引流によって，作業域で発生する汚染物質をDV より効率よく希釈でき，清浄な作業環境を維持できる	○	浮力を伴う汚染物質に対しては換気効率が高く，清浄な作業環境を維持できる	△	空気汚染物質を作業域全体に攪拌
制約	設置スペース	○	吹出し面積がDV の1/3～1/5以下（給気ユニット壁面収納可）	△	給気口面積が大きい SWIT より大風量運転が必要	○	作業域外に吹出し口を設置できるが，クレーン作業の障害になりやすい
経済性	設備費	◎	71	○	85	○	100（気流範囲拡張には，要ダクト延長）
経済性	冷房期運転費	◎	58	○	62	△	100

主眼点02 熱源システム

熱源システム計画

空冷ヒートポンプモジュールチラーを採用
高温給気温度24℃⇒冷水温度13℃と高温化⇒高効率な運用
10℃差送水⇒搬送ポンプ動力低減
冷水送り温度13℃と高温⇒外気処理用の水熱源ヒートポンプ空調機の熱源水として利用⇒除湿用の熱源不要



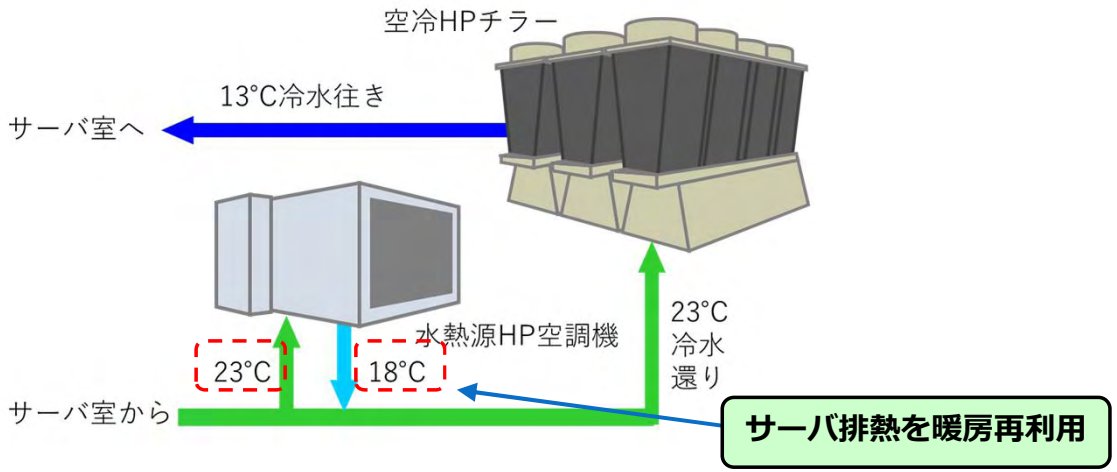
熱源システム

主眼点02 サーバ排熱回収システム

サーバ排熱の暖房利用

管理棟の空調
　サーバ棟の冷水還りを熱源水利用
　水熱源ヒートポンプパッケージエアコン

排熱回収
　暖房時にサーバ排熱を再利用



管理棟の空調システム

管理棟空調の効率化

冬期と中間期の一部でサーバ排熱の回収運転が出来ていることを確認
合計回収熱量は110GJ

管理棟熱源水の1日積算熱量

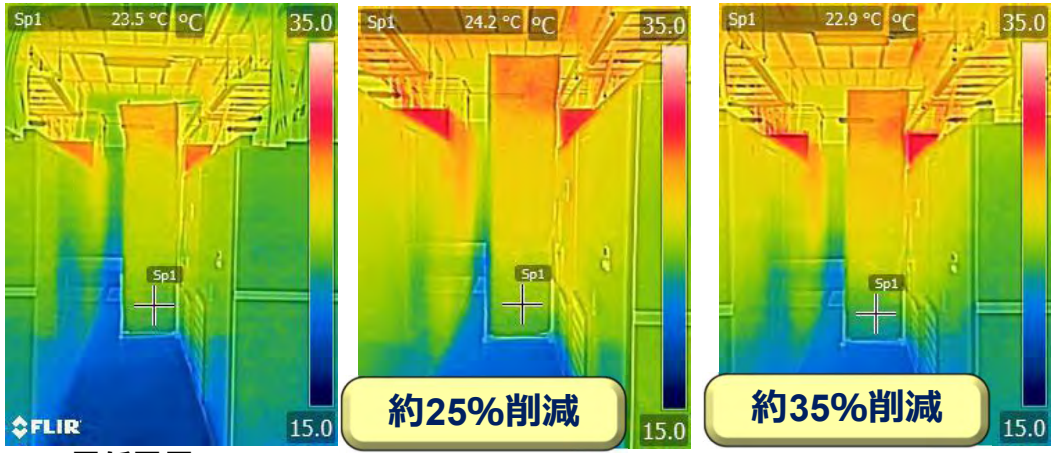
主眼点02 空調設備のチューニング

UPS室のチューニング

UPS室の空調機の風量を削減しても環境を保つことができるか試験検証

①竣工時設定の定格の30%から20%に変更
②空調機上部ファン停止

▶ **①継続運用**　②は仮設検証のみ



最低風量30%
現状最低風量で運転

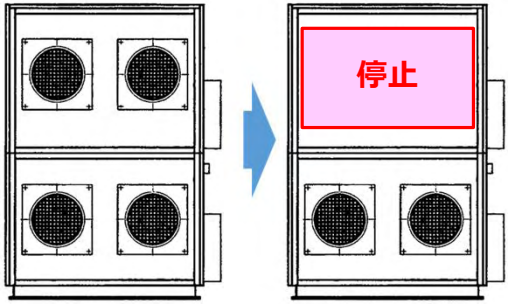
①最低風量20%

②上部塞ぎ

UPS室の試験時熱画像

②空調機上部ファン停止試験

UPS吸込み部温度問題なし



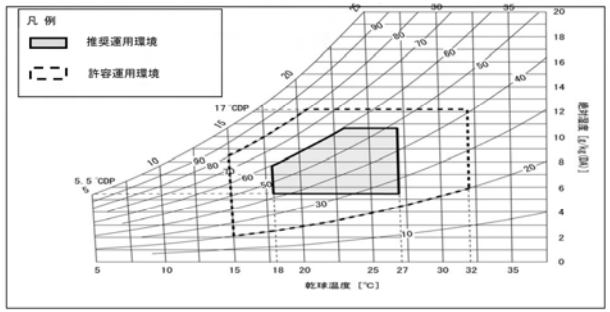
上部ファン停止時の空調機

外気冷房有効範囲チューニング

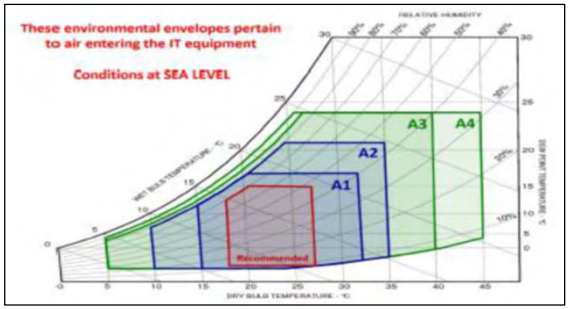
ＩＴ機器の劣化速度評価

▶

低湿度による静電気対策を
運用管理対策済



JDCC-FS Ver2.3
ASHRAE Datacom 2008



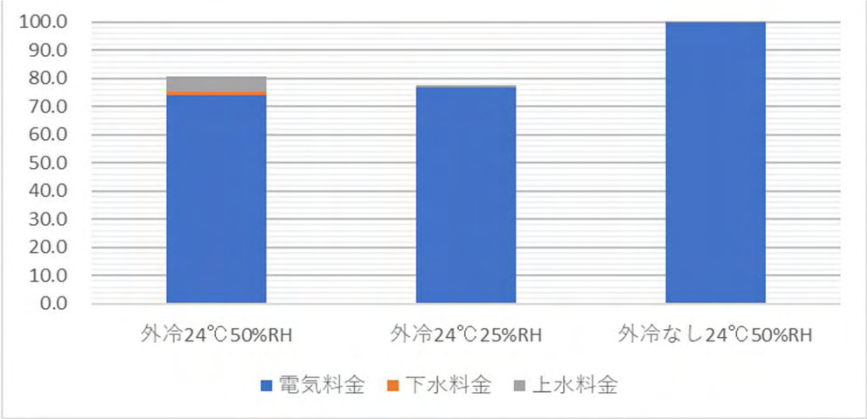
ASHRAE Datacom 2021

サーバ吸込み温湿度の推奨範囲の変化

**外気冷房効果により
約２０%削減**

▶

**設定変更で
更に約3.5%削減**



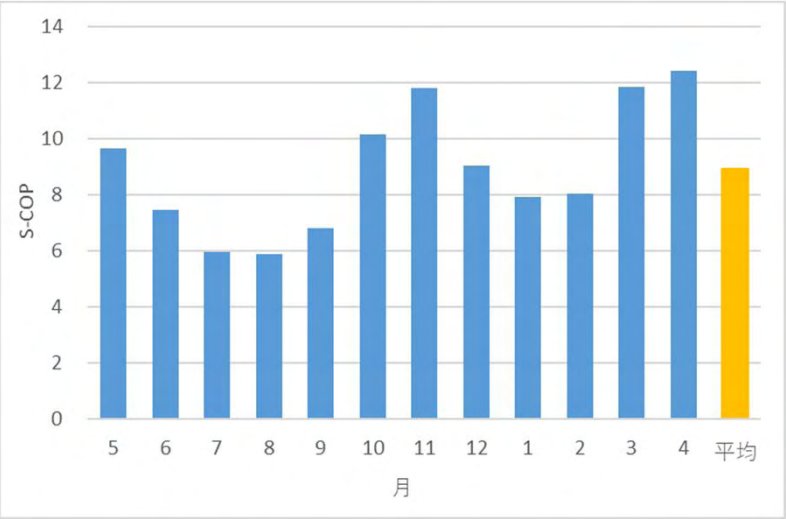
サーバ室条件によるランニングコスト比較

主眼点02 高効率な空調システム　運用結果

年間の熱源システムCOP

2022年5月から2023年4月の1年間

S-COP 8.9

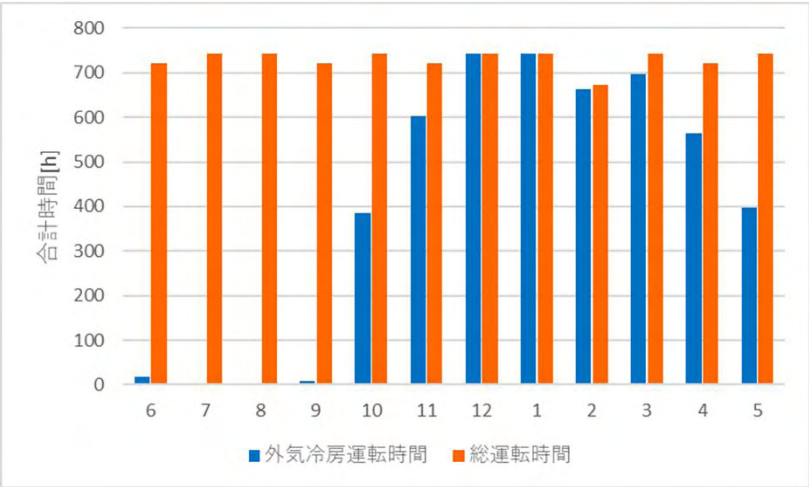


年間の熱源システムCOP

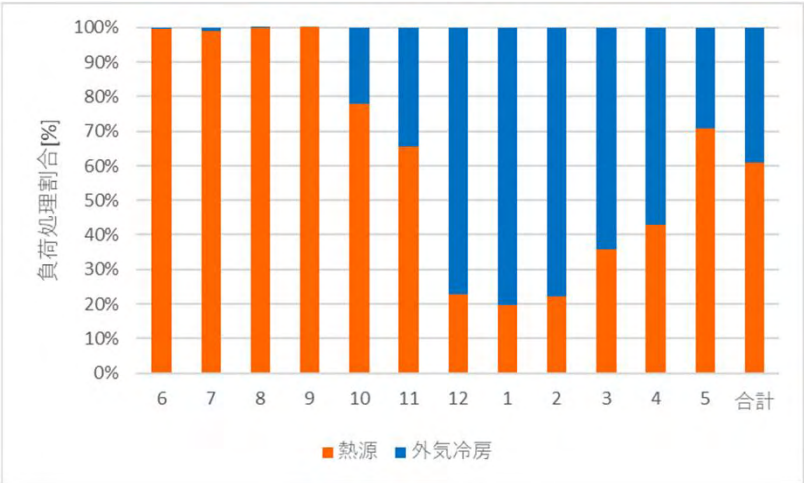
外気冷房の効果

2022年6月～2023年5月までの1年間の運用結果
　外気冷房期間：年間運用時間4,826時間
　外気冷房処理熱量：外気冷房処理熱量合計16,100GJ

外気冷房運転：年間55%
外気冷房処理熱量：年間負荷39%



外気冷房運転



外気冷房負荷処理割合

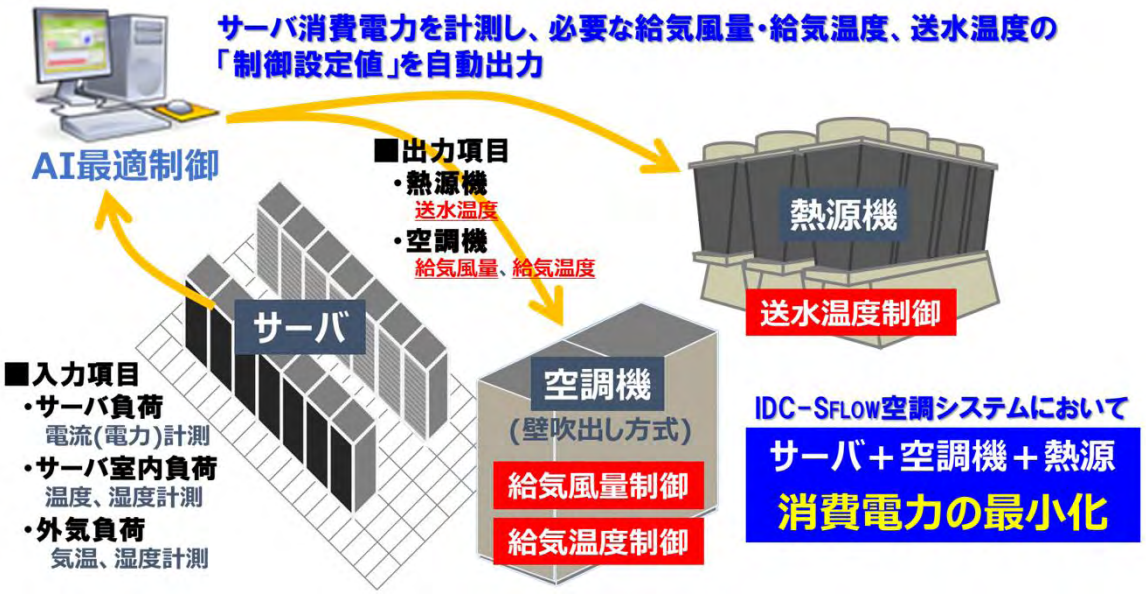
主眼点03　ＡＩを活用した運転制御システムの開発

開発のコンセプト

白井データセンターキャンパス（白井DCC）の空調制御システム
- ハードウェアの能力をソフトウェアによって向上
- ソフトウェアは常に進化し性能が向上する仕組みを作る

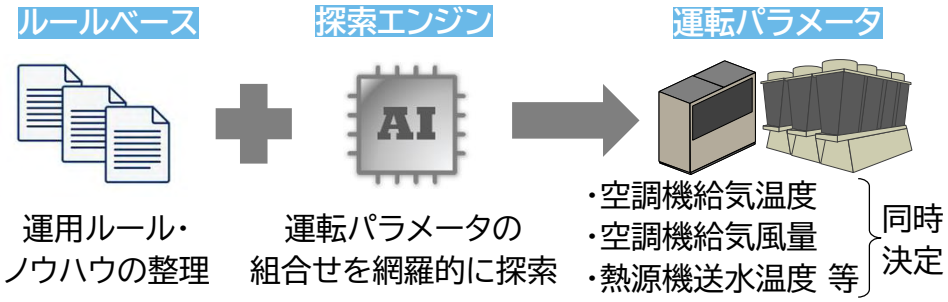
開発したAI活用空調制御システム

【概要】
- サーバ・空調機・熱源機の全体消費電力の最小化を実現するAI活用空調制御システム
- AI技術には『ルールエンジン』を採用
- 属人化し易い運用ルールをルールベースとして整理・体系化
- 探索エンジンによりルールベースを考慮した目的に即した最適な制御設定値の組み合わせを自動探索



AI活用空調制御システムの概要

■ルールエンジンとは？
- ルールベースと探索エンジンを組み合わせたＡＩ技術
- 特定の条件や事前に定義されたルールに基づいて自動的に判断やアクションを実行するソフトウェア
- 複雑な条件やロジックをプログラムする必要がないため、プロセスの自動化や意思決定システムなどで広く利用
- 本システムでは、サーバ室ごと、空調機ごとに給気温度や風量および熱源機の送水温度等の制御設定値の最適化に利用

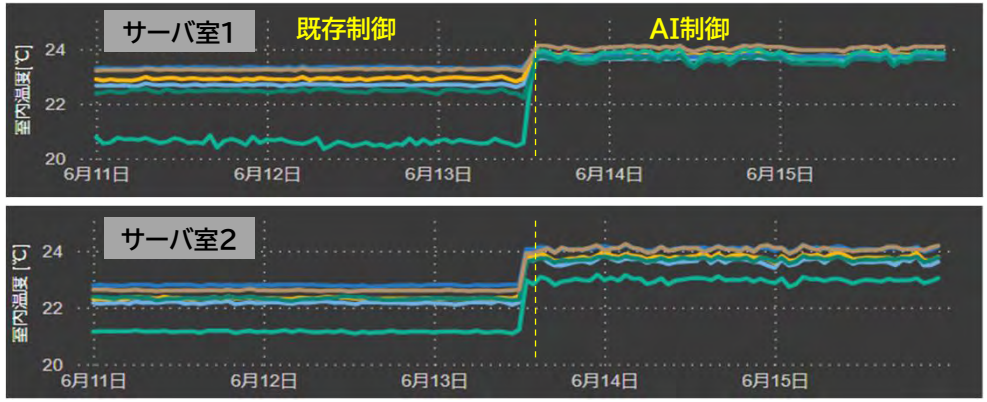


ルールエンジンによる運転設定値の決定方法

主眼点03　ＡＩを活用した運転制御システムの運用検証

■各サーバ室のコールドアイル内の温度分布（代表点）

サーバ消費電力を基にしたフィードフォワード制御の効果として、既存制御に比べてコールドアイル内の温度幅が小さくより均一性が増した。



各サーバ室のコールドアイルエリアの温度分布の経時変化

■熱源送水温度の制御出力値

空調機全台の要求条件を考慮した送水温度の制御設定値を出力

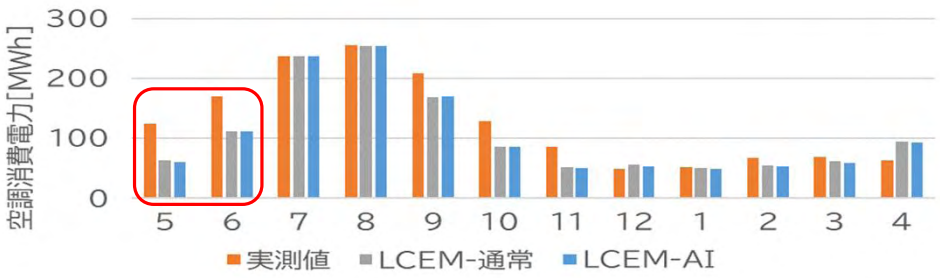
熱源送水温度の制御出力値の経時変化

主眼点03　ＡＩを活用した運転制御システムの運用検証

LCEMによるAI制御の導入シミュレーション検証

【妥当性】

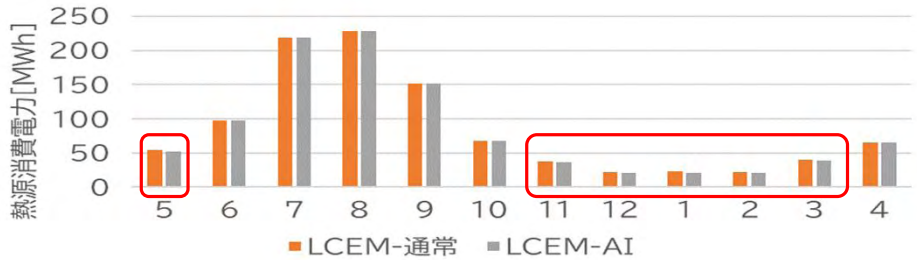
・LCEMにて空調熱源システムのモデルを構築して実績データと比較
・年間を通じて概ね再現できていることを確認
・4月、5月の実負荷データとの差異は、本来は外気冷房期間であるが、外気冷房制御の調整が不十分で外気冷房運転時間が短かったため。



シミュレーションによる妥当性検証

【AI制御による導入効果検証】

・LCEMにて1年間のAI制御の導入効果の検証を実施
・夏期は冷水温度を高く設定できないため、消費電力は変わらない結果
・中間期においては、5月に5.1%、11月に3.9%と通常制御に比べてAI制御での省エネ効果を確認
・中間期・冬期での平均省エネ効果は4.6%



AI制御による月別空調消費電力の削減効果

AI制御による運転員の省力化試算

AI制御による設定値変更を運転員が手動で対応した場合について試算を実施。

・制御周期は１０分
・設定値変更による制御性とサーバ積算電力値確認含む

No.	作業項目
1	･外気温度･相対湿度確認
2	･各サーバ室　コールドアイルの高温部の有無確認
3	･各サーバ室、各空調機の給気温度･給気風量の確認 ･給気温度、給気風量の設定値変更 ･制御性とサーバ積算電力値の確認
4	･空冷チラー送水温度の確認、設定値変更 ･制御性と空冷チラーの積算電力値の確認

10分周期で空調設定値の確認･設定変更をした場合の作業

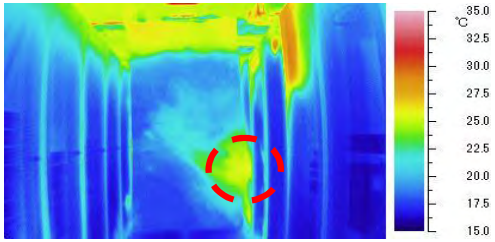
AI制御の導入により、年間800時間の省力化効果と推定

AI制御導入による省力化試算結果

主眼点04 IT機器のチューニング

サーバーラック廻りの課題

1．ＩＴ機器の排気効率を考慮したサーバーラックの選定
　コールドアイル側サーバーラック扉のあり/なし、扉開口率
　ホットアイル側サーバーラックの扉のあり/なし、扉開口率
　サーバーラックの上部天板のパンチング開口/閉止の選定
2．サーバーラック排気側のＩＴ機器排気とネットワーク配線の干渉
3．ブランクパネルの閉止率が悪い（サイド、最上部含む）
4．ＩＴ機器の冷却ファンの風量、静圧、可変風量の確認
5．ＩＴ機器のエアフローが空調エアフローと逆
　（コールドアイル側に熱排気）
6．ＩＴ機器の背面マウントによる区画位置の確認



コールドアイル側に排気するＩＴ機器の熱画像

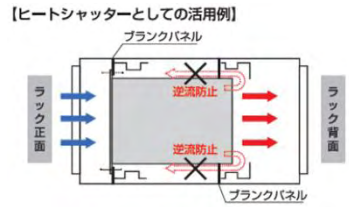
白井DCCでの課題に対する対策

1．サーバーラックは開口率の高い扉採用
　天板は閉止
2．ネットワーク配線施工要領により管理
3．ブランクパネルの徹底（サイド閉止、最上部の隙間も閉止）
4．対向するホットアイル側への気流なども、ルーバー等で変更
5．ネットワーク機器のファンエアフローと空調エアフローと
　整合をとる
　（機器発注時にエアフローを確認）
6．背面マウント機器のコールド、ホットのセパレートの徹底

チューニング後の維持管理として

ＩＴ技術者へ空調システムの社内教育
ＩＴ技術者とファシリティー技術者の連携
（自社サーバーラックでの対策検証）
省エネサーバーの採用
（冷却ファンの風量、静圧が適正な機種を考慮）

【3.対策例】



ブランクパネル設置状況

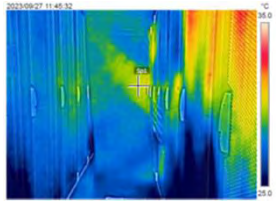
【4.対策例】

対策前　　**対策後**

サーバーラック
ホットアイル側
にルーバを取付
け
気流を変更

⇔ホットアイルで正面にフィルタを立て撮影した熱画像
右サーバラック内のＩＴ機器の熱排気が左側の サーバーラックに当たり一部はコールドアイルへの逆流が生じている。

ホットアイル不具合熱画像



ホットアイル改善熱画像

【5.対策例】

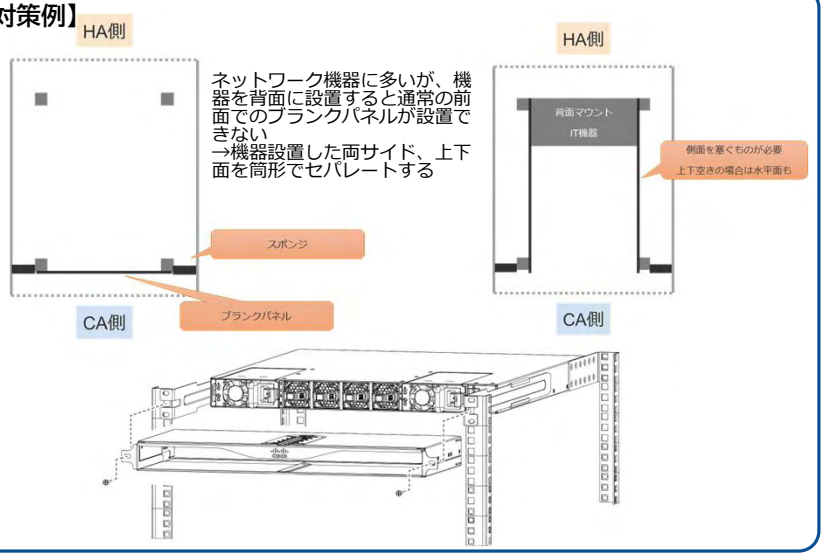
Arista 7170-32C: および7170-32CD
100GbE QSFP100 32ポート、SFP+ 2ポート

1RU筐体の7170の背面：背面吸気/前面排気と前面吸気/背面排気

ARISTA社カタログ
より抜粋

IT機器選定時、背面吸気か前面吸気か選択

【6.対策例】



ネットワーク機器に多いが、機器を背面に設置すると通常の前面でのブランクパネルが設置できない
→機器設置した両サイド、上下面を筒形でセパレートする

まとめ

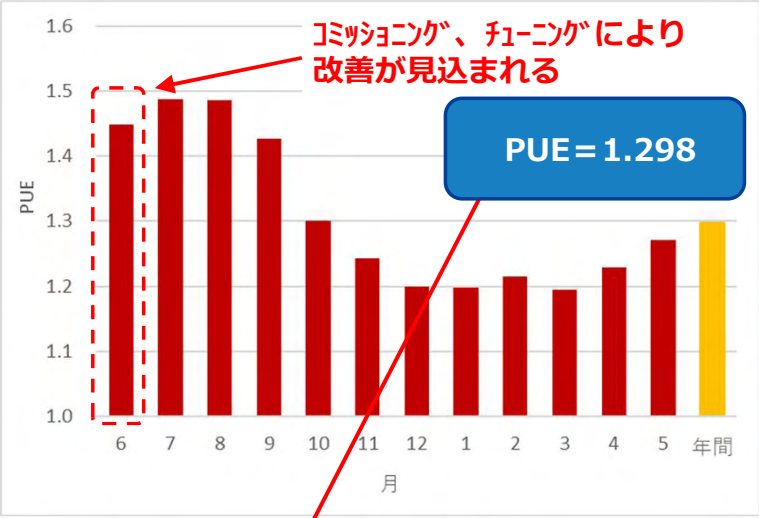
PUE結果　2022年6月から2023年5月までの1年間の実測結果

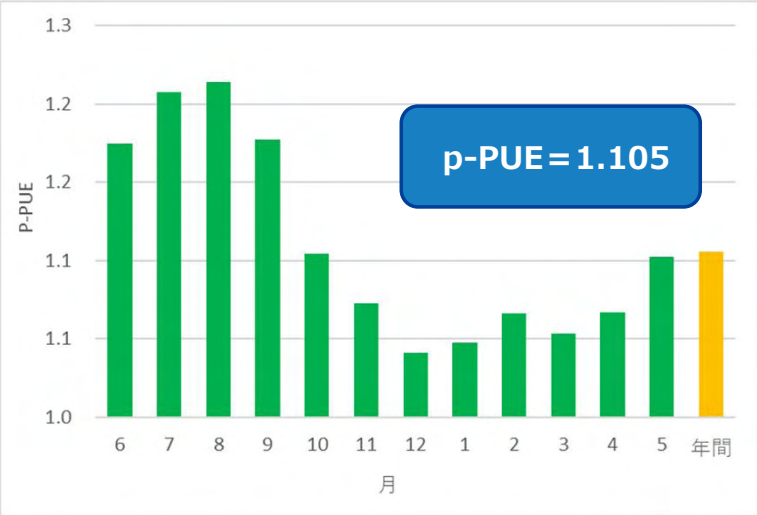
PUE：データセンターの電力使用効率

$$PUE = \frac{\text{DC全体の消費電力（kW）}}{\text{IT機器消費電力（kW）}}$$ ※管理棟含む

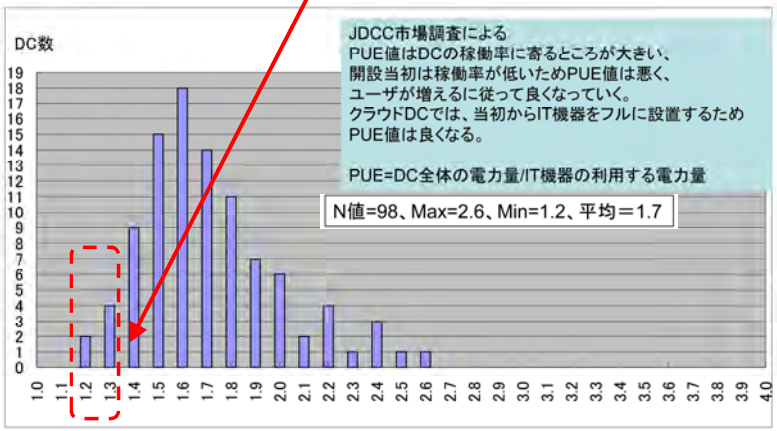
p-PUE：データセンターの空調電力使用効率

$$p\text{-}PUE = \frac{\text{DC全体の空調消費電力（kW）}}{\text{IT機器消費電力（kW）}}$$ ※管理棟含む





2021年4月8日　JDCC第32回「省エネルギー小委員会」資料より



IIJ Internet Initiative Japan 30th Anniversary

IIJ Engineering 25th Anniversary

東京大学 生産技術研究所 Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

おかげさまで100周年

環境クリエイター TakasaGo! 高砂熱学