富岳NEXTに向けたカーボンニュートラル化への取り組み

第24回PCクラスタシンポジウム - サステイナブルなHPCに向けて

2024.12.6

山本 啓二
理化学研究所 計算科学研究センター

カーボンニュートラル社会にむけて

- 2050年 カーボンニュートラルの実現

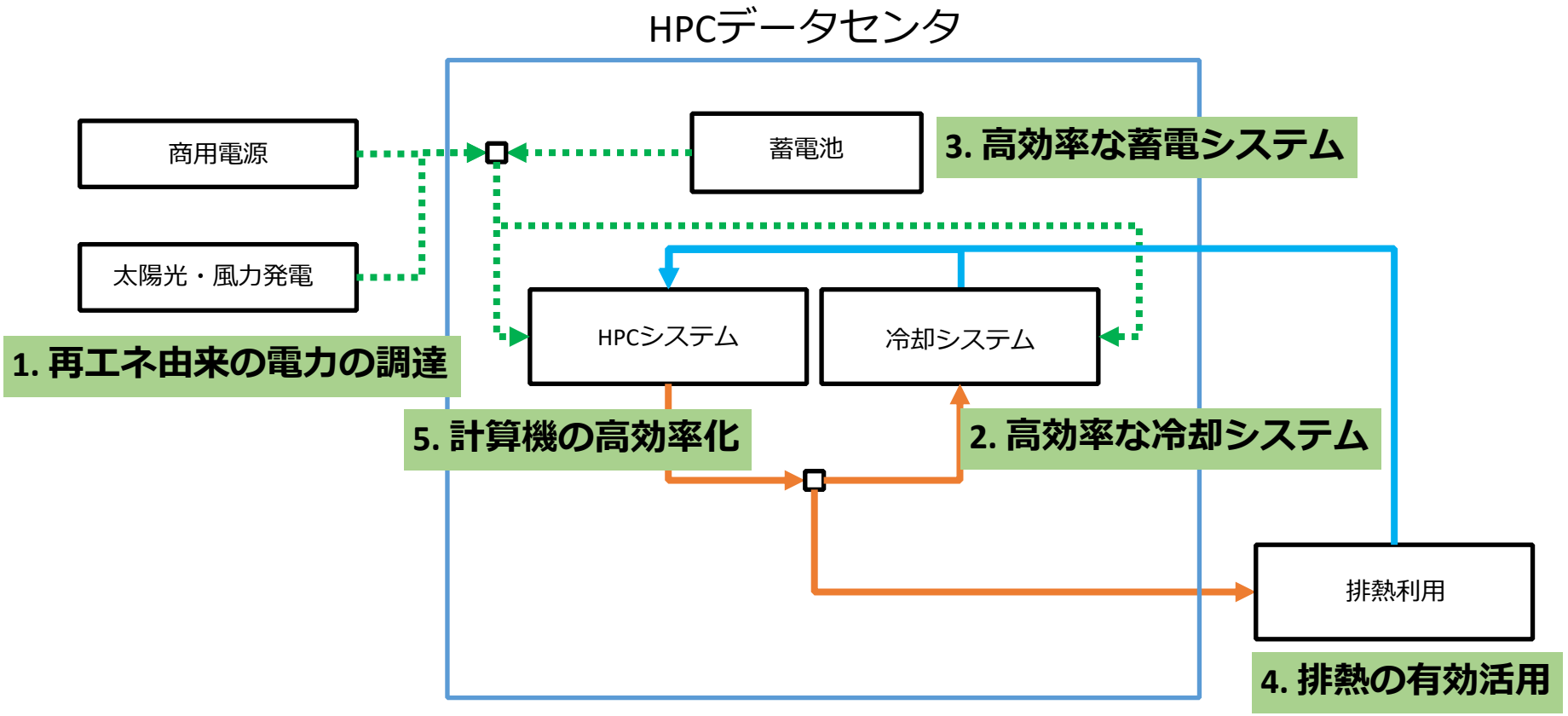
- 2030年には温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指し、さらに、50%の高みに向けて調整
  - 徹底した省エネに加えて、再エネ由来の電源の拡大が必要

- データセンタの消費電力は生成AIの台頭により従来予想を大幅に上回るペースで推移中

- データセンタのカーボンニュートラル化
  - IT機器の省エネ: (HPC用途であれば)高Flops/Watts
  - 冷却機器の省エネ: 低PUE化
  - 排熱利用による省エネ

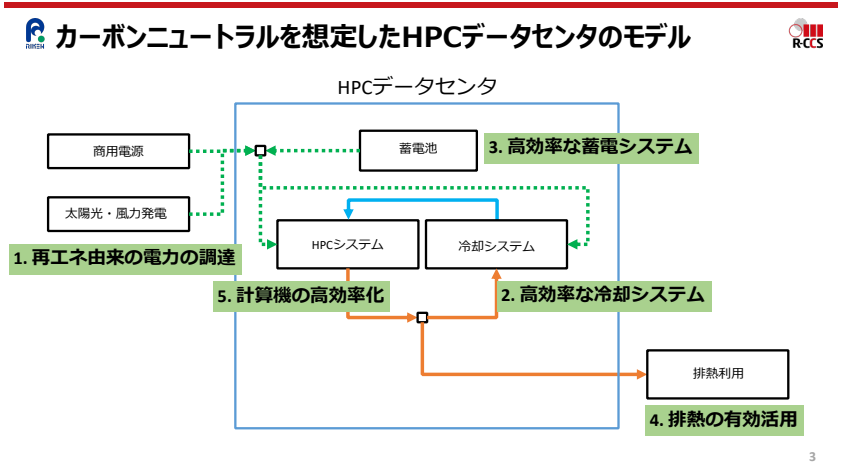
  - 残りの部分は再エネによるカーボンニュートラル化

カーボンニュートラルを想定したHPCデータセンタのモデル



再エネ由来の電力の調達

購入するか発電するか？
価格は？



再エネ電力の調達 – 購入

- 電力市場では、太陽光や風力由来のグリーンエネルギーの価値を証書として購入できる
  - 再エネ電力を電力価値と再エネ価値に分離して販売
  - 購入量に応じて、事業者が排出している二酸化炭素排出量と相殺される

- 電力価値(一般的な電気料金):　　1kWhあたり約20-30円
- 再エネ価値(グリーンエネルギー証書): 1kWhあたり約0.4-2円 (2024年時点)

- 2024年の段階では、約2-10%の電気料金上乗せでカーボンニュートラル化を達成できる
- 証書の価格は需給で変動し、現在は供給過多の状態
  - 2030年の目標を達成するには、今買う必要がなく2029年、2030年以降に買えば良い
  - グリーンエネルギーには限りがあるので、カーボンニュートラル化のために需要が多くなれば価格は上昇すると見込まれる

再エネ電力の調達 – 発電

- ハイパースケーラーは太陽光・風力発電など再生可能エネルギー発電所への投資
  - Apple: 2020年に350MW超の再生可能エネルギー発電設備を4か所で展開
  - Google: 2030年まで5GWのカーボンフリーエネルギー(風力、太陽光、地熱、バイオマス、原子力、水力、揚水発電、蓄電池)を供給予定
  - Amazon: 2020年中に再生可能エネルギーに投資し、その発電規模は4GW

- いちデータセンターができること
  - 小規模な太陽光パネルを利用した発電
    - 1MWのパネルあたり10,000m2の土地利用 -> 発電効率は20%程度
  - グリーン水素などのカーボンニュートラルな燃料を利用した発電
    - 「富岳」では都市ガスを燃焼させて5MW規模を常時発電
    - ガスの代わりに水素を燃焼させることで、その分のカーボン排出量を減らすことが可能
    - 発電機はUPSの代わりになるが、、、

水素発電 – コストの試算

- モデル発電機について
  - 非常用発電機は常用に比べてCO2削減効果は極めて低く、カーボンニュートラルへの貢献は限定的
  - 常用コジェネをモデル発電機とし、水素利用可能性におけるサプライチェーンを評価

項目/ユースケース	常用コジェネ
メーカ	川崎重工業
発電機	水素混焼ガスエンジン7,650kW機
最大混焼率(熱量ベース)	約10%
主な追加設備	燃焼混合システム、水素圧縮機
水素消費量	787Nm³/h
年間水素消費量	689万Nm³

	都市ガス専焼	水素10%(熱量)混焼	差額
①都市ガスコスト	1,959百万円	1,759百万円	−200百万円
②水素コスト(輸送含む)	0円	278百万円	+278百万円(都市ガスコストに対し約1.4倍)
③化石燃料賦課金	6.6百万円(3.7万t-CO2/年)	5.9百万円(3.3万t-CO2/年)	−0.7百万円
実質コスト(①+②+③)	1,965百万円(29.3円/kWh)	2,042百万円(30.5円/kWh)	+77百万円(+4%)

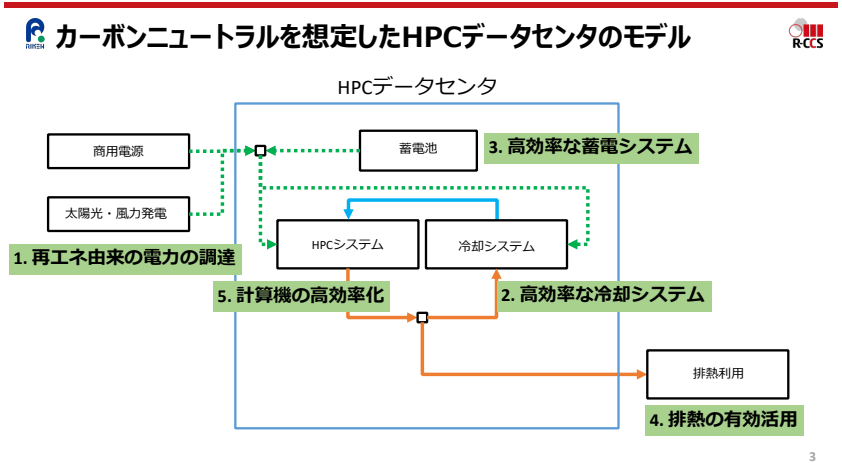
水素発電 – コストの試算

- 現状の水素インフラが整備されていない状況では、水素を使えば使うほどコスト面ではマイナス
- さらに、発電機のメンテナンス、運転員の人件費、薬剤が必要なことから小規模な需要側で発電機を設置するメリットは乏しい
  - UPS代わりになるが、UPSを導入する方が運用コストは低い

- 証書の購入コストが高くなれば発電の利点も生じる可能性がある

高効率な冷却システム

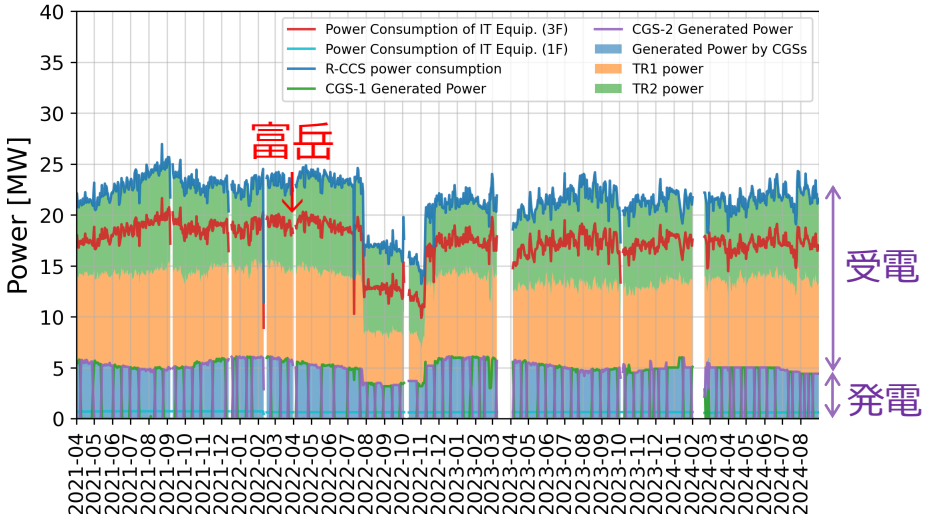
チラーやコンプレッサを使わない



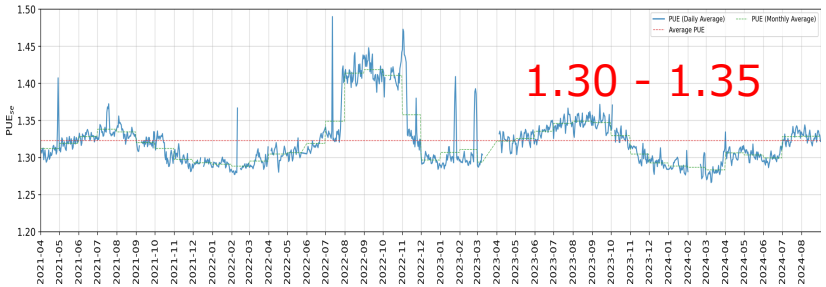
高効率な冷却システム

- PUEを限りなく1.0に近づけることが目標
- 一般的なデータセンタ PUE 1.3-1.4

消費電力（発熱）



PUE（データセンターのエネルギー使用効率の指標）



冷却システムの比較

	技術	設置条件	導入費用	管理費用	消費電力	実績	冷却水温度	その他
水冷	チラー	○	▲	×（保守）	×	◎	7度～25度？	水温変化の追従性が低い 冷却過多による故障防止に注意が必要
	チラー＋冷却塔	×（空間）	○	▲	○	○		制御が複雑化するため、大規模システムにおいては運転要員の待機が必要
	チルドタワー	▲（重量）	×	×（保守）	▲	×		チラー＋冷却塔の一体型 設備費用が高い
	冷却塔のみ	○	◎	○	◎ 但し水が必要	▲	夏季32度 他24度	TSUBAME3, ABCIで実証済み （夏場猛暑において無停止） 湿球温度に大きく影響 DC建屋のコストは低い（温湿度維持）
空冷	PAC	▲（空間）	○	○	×	○		既存技術
	水冷式	○	▲	○	▲	○		中規模消費電力に対応可能
	外気導入	×	○	×	○	×		温湿度の維持が難しい 塩害防止フィルターが高価
	間接外気冷房型PAC	○	▲	○	▲	▲		

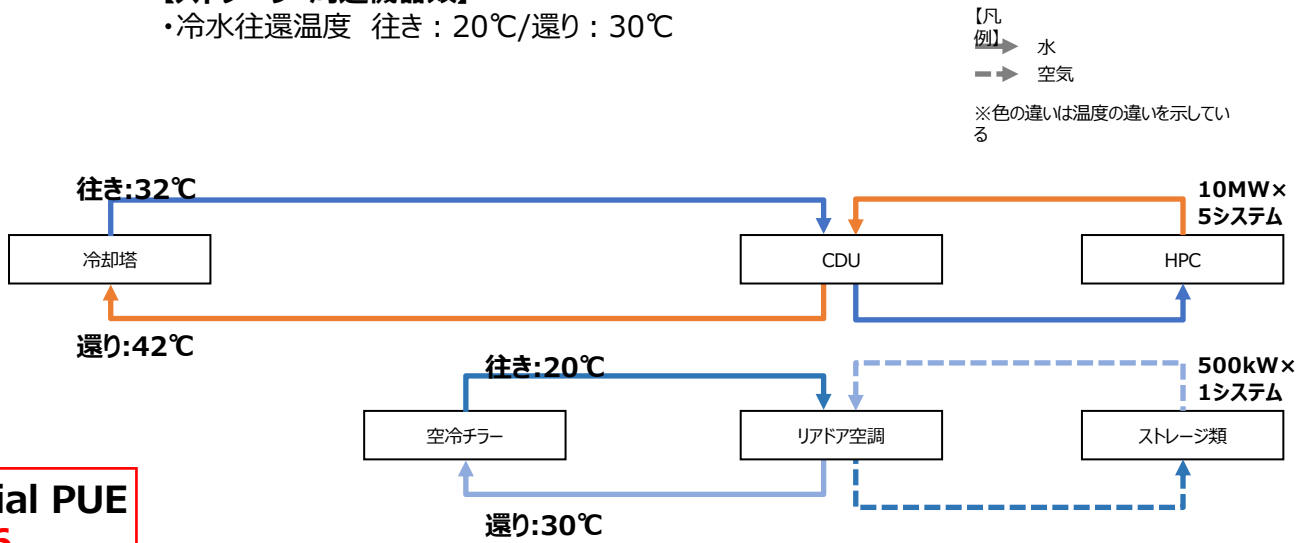
チラーレス・高温冷却水による計算機の冷却

- 冷却塔のみによるフリークーリングの実現
- 利点
  - 部品点数削減による導入コストの削減
  - 圧縮機の削減による冷却エネルギーの削減 (ポンプとファンのみ)
  - 運転の簡略化(冷却過多の心配なし、冷却可能温度域が広い)
- 欠点
  - リーク電力の増加
    → FinFETを用いることで少なくなってきている
  - 故障率の増加
    → 完全に空冷の場合よりは水冷の場合は熱容量に余裕
  - 異常気象による冷却能力不足
    チラーにおいても同様の問題が存在
- 世界的にみて多くの実績
  - TSUBAME3.0 (東京工業大学、現 東京科学大学)
  - ABCIシリーズ (産業技術総合研究所)
  - ASPIRE 2A (NSCC Singapore)
  - HPE-CRAY EXシリーズ
  - Lenovo Neptune シリーズ
  - Supermicro Rack-Scale Liquid Cooling Solutions

冷却システム ベースモデル案

【HPC 計算ノード】
・冷水往還温度　往き：32℃/還り：42℃

【ストレージ・周辺機器類】
・冷水往還温度　往き：20℃/還り：30℃



Peak partial PUE
1.06

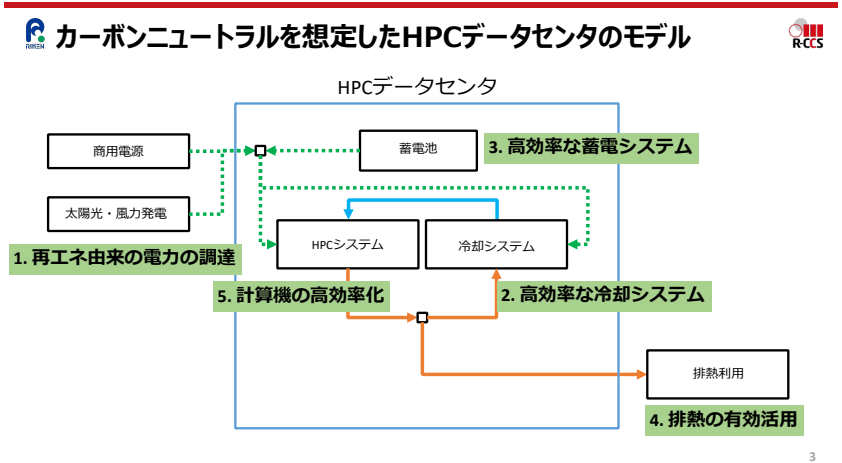
液浸冷却

- ファンを除去、空冷もほぼ不要
  - PUE 1.04 など
  - システム全体では、対応が難しい機器は残る
- TSUBAME-KFC（オイル）、PEZY-SC系（フロリナート）
  - 従来の冷媒ではビニール・ゴムなどの部品が劣化、高価、、
  - 新しい冷媒の開発が盛んに?
- 冷媒によって冷却方法はさまざま
  - 二相式 (液化から気化)
    - 冷媒の漏出・喪失防止のための機構が必要
  - 一相式 (液体のまま)
    - メンテナンス時・メンテナンス後部材の冷媒汚染

- 欠点
  - メンテナンス性
  - 実装密度

Intel液浸冷却リファレンスデザイン

高効率な蓄電システム

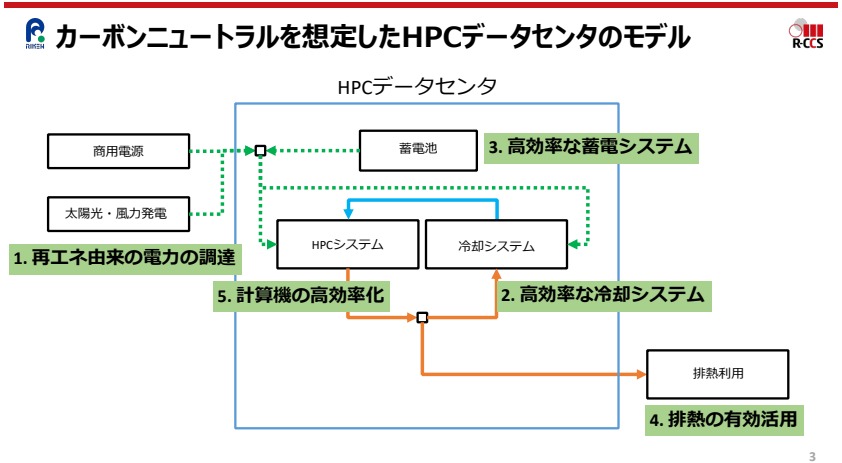

カーボンニュートラルを想定したHPCデータセンタのモデル
HPCデータセンタ
商用電源
太陽光・風力発電
蓄電池
3. 高効率な蓄電システム
HPCシステム
冷却システム
1. 再エネ由来の電力の調達
5. 計算機の高効率化
2. 高効率な冷却システム
排熱利用
4. 排熱の有効活用
3

大型蓄電システムの性能

- リチウムイオン電池は、高放電レート特性により出力容量当たりのスペース、設置コストが最小。放電レートより短周期変動抑制に有効
- ナトリウム・硫黄電池は、蓄電池容量当たりのスペース、設置コストが最小。サイクル寿命より、毎日5～6時間放電するシステムに最適
- レドックスフロー電池は、２つの電池の中間的な性能。高いサイクル寿命を活かすシステムへの適用が有効

	リチウムイオン電池	ナトリウム・硫黄電池	レドックスフロー電池
体積エネルギー密度 ※製品仕様値	**176 Wh/L**	83 Wh/L	15 Wh/L
充放電効率 （蓄電池単体） （システムでは概ね10%程度低下）	**95 %**	**90 %**	**85 %**
放電レート （出典元における調査時の国内事例の実績値）	**0.50～5.0 C**	0.17 C	0.25 C
サイクル寿命	**15,000 サイクル**	4,500 サイクル	100,000 サイクル
設置スペース	**0.21㎡/kW、0.21㎡/kWh**	**0.28㎡/kW、0.047㎡/kWh**	**0.33㎡/kW、0.083㎡/kWh**
設置コスト	**30.8万円/kW、30.8万円/kWh**	**43万円/kW、7万円/kWh**	**107万円/kW、27万円/kWh**
メンテナンスコスト （メンテナンス費/設置費）	**0.1 %**	**0.5 %**	**0.3 %**
メンテナンス	• 遠隔常時監視：対応可能 • 電池：巡視点検 • PCS：巡視点検、清掃、部品交換 • 空調：巡視点検、清掃、部品交換 • コンテナ：巡視点検、補修・部品交換 • 法定点検：電気設備、消火設備、保有空地	• 遠隔常時監視：対応可能 • 電池：巡視点検 • PCS：巡視点検、清掃、部品交換 • 空調：巡視点検、清掃、部品交換 • コンテナ：巡視点検、補修・部品交換 • 法定点検：電気設備、消火設備、保有空地	• 遠隔常時監視：対応可能 • 電池：巡視点検、部品交換 • 電解液タンク：巡視点検（漏洩） • PCS：巡視点検、清掃、部品交換 • 空調：巡視点検、清掃、部品交換 • コンテナ：巡視点検、補修・部品交換 • 法定点検：電気設備、消火設備

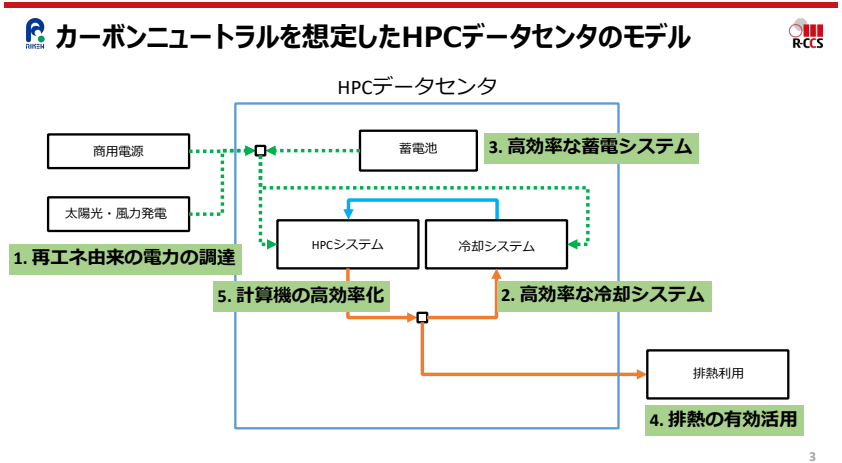
排熱の有効活用


カーボンニュートラルを想定したHPCデータセンタのモデル
HPCデータセンタ
商用電源
太陽光・風力発電
1. 再エネ由来の電力の調達
蓄電池
3. 高効率な蓄電システム
HPCシステム
冷却システム
5. 計算機の高効率化
2. 高効率な冷却システム
排熱利用
4. 排熱の有効活用
3

排熱の有効活用

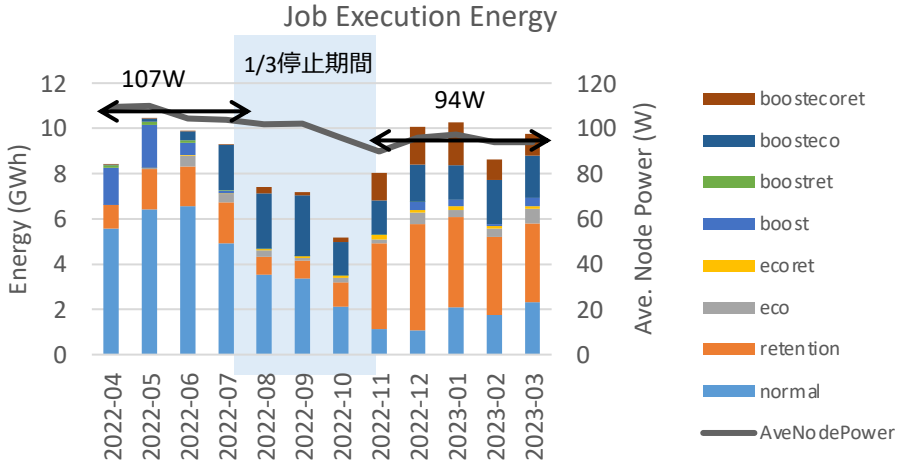
- 計算機からの排熱はせいぜい40度のため、そのままの温度では利用領域が限られる
  - 温水プール・温室栽培
- ヒートポンプを用いて昇温
- データセンタの近隣に温水需要が必要
  - 近隣までの配管
- 利点
  - 化石燃料を利用しない熱供給
  - データセンタ側から見るとカーボンネガティブ
- 欠点
  - 受益に対する制度の整理が必要
  - 近隣に十分な熱需要があることが前提
    - 自治体の協力も必要

計算機の高効率化


カーボンニュートラルを想定したHPCデータセンタのモデル
HPCデータセンタ
商用電源
太陽光・風力発電
1. 再エネ由来の電力の調達
蓄電池
3. 高効率な蓄電システム
HPCシステム
冷却システム
5. 計算機の高効率化
2. 高効率な冷却システム
排熱利用
4. 排熱の有効活用
3

「富岳」における省電力運用の取り組み

- **ジョブ実行電力の削減**
  - ✓ エネルギーコスト急騰のため、2022年7月後半から3.5か月間、1/3のノードを停止。
  - ✓ 電力モードの適切な設定をユーザに呼びかけ、ecoの指定も増加
  - ✓ 10月末から4608ノード以下のジョブにもretentionをデフォルトで適用
  - ✓ ノード平均電力は約12%削減
- **待機ノード電力の削減**
  - ✓ ノードリテンションの活用により待機時のノード電力を約6割削減可能。
  - ✓ 冷却設備による最低電力を守るために、ノードリテンションの適用を動的に制御
  - ✓ 現在約半分のノードに適用しており、充填率90%で約2.5%のエネルギー削減
    - ✓ 適用範囲を拡大中

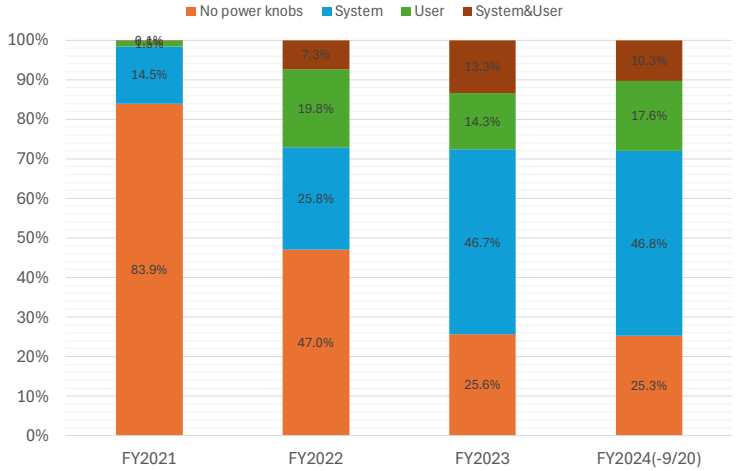


電力モード
- Boost: 2.2GHzで動作。normalは2.0GHz.
- Retention: アイドルコアを低電力状態に遷移するモード
- Eco: 浮動小数点演算パイプラインを1つのみ使用し、残りのパイプラインを低電力状態にするモード
- ノードリテンション: ジョブが割り当てられていないノードを、1つのアシスタントコアを除きコアリテンション状態とし、動作周波数を1.6GHzにしたモード

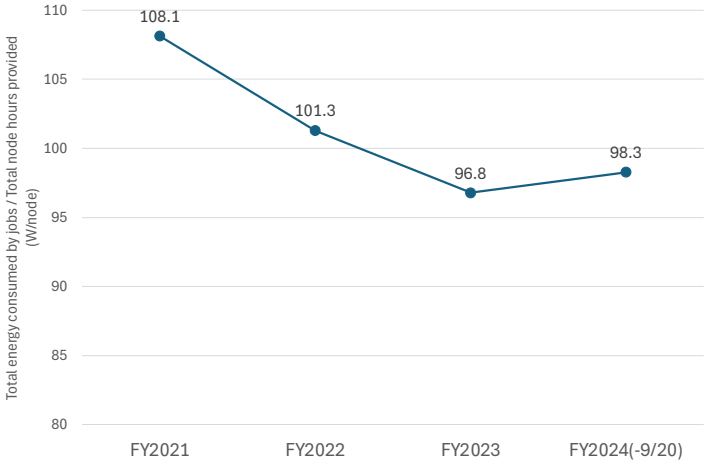
「富岳」ポイントによる省電力化の推進

- 2023年度から**富岳ポイント**プログラムを開始
  - 「富岳」にはパワーノブという様々な省電力機能があるが、利用者に機能を使って省電力化に貢献してもらうことが課題であった
  - 「富岳ポイント」は利用者の省電力化への貢献を数値化したもので、ジョブの電力が標準(平均)より省電力であればポイントが利用者に付与される
  - 利用者はポイントを利用してジョブをより高優先度のキューに投入できる

パワーノブの使用割合は増加

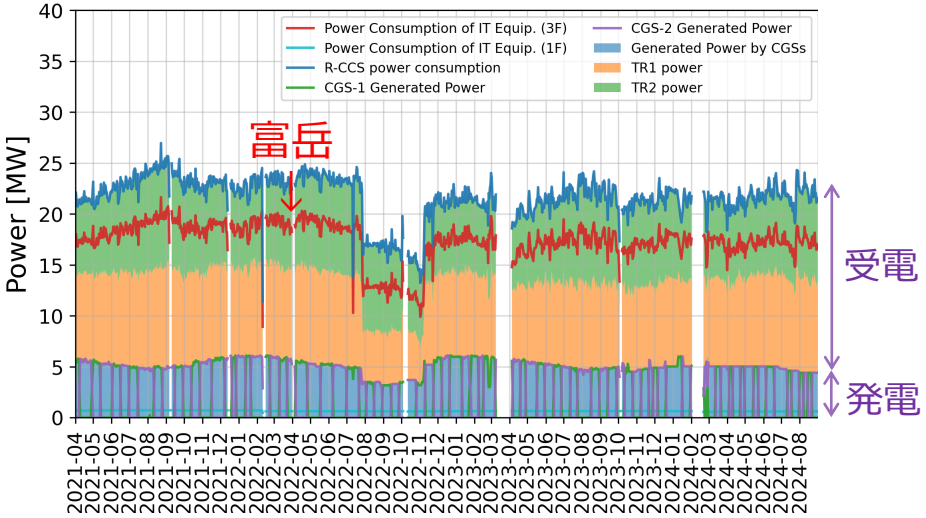


ノードあたりの電力(W)は徐々に減少

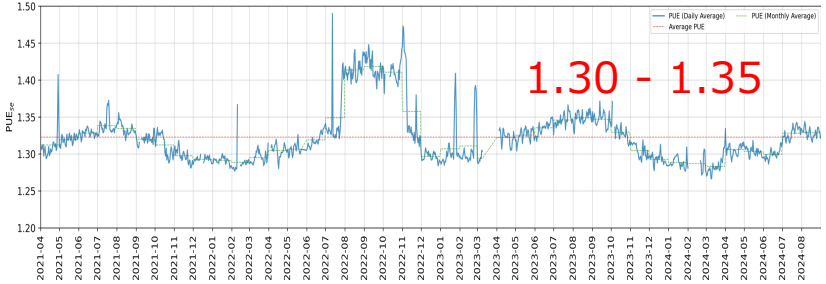


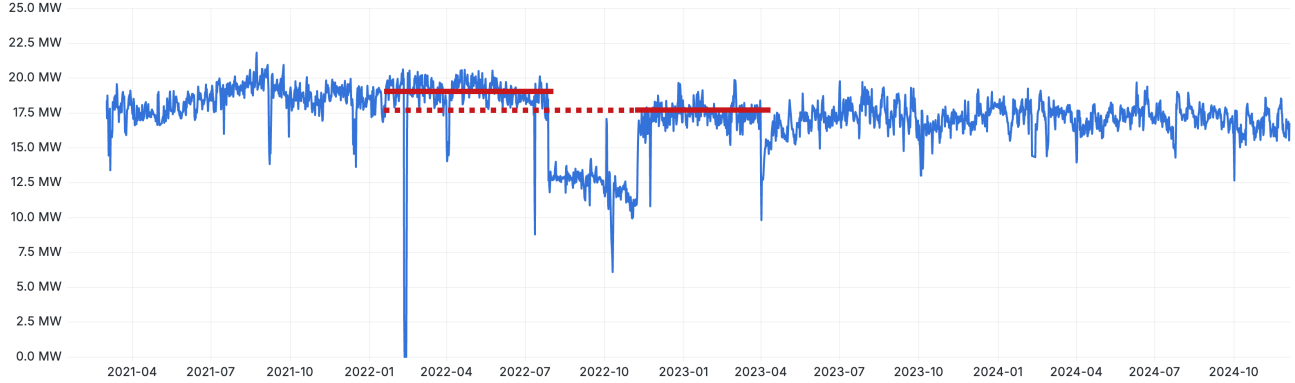
「富岳」の電力・PUE

消費電力（発熱）



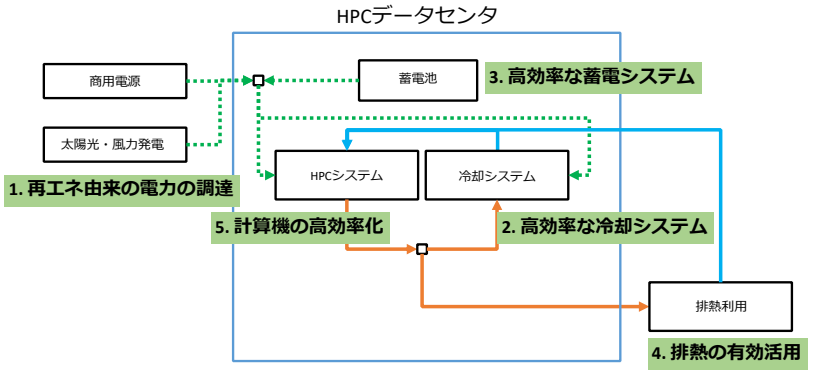
PUE（データセンターのエネルギー使用効率の指標）





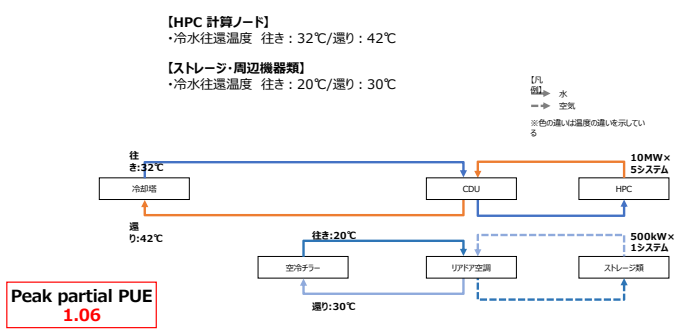
まとめ

カーボンニュートラルを想定したHPCデータセンタのモデル



3

冷却システム ベースモデル案



14