

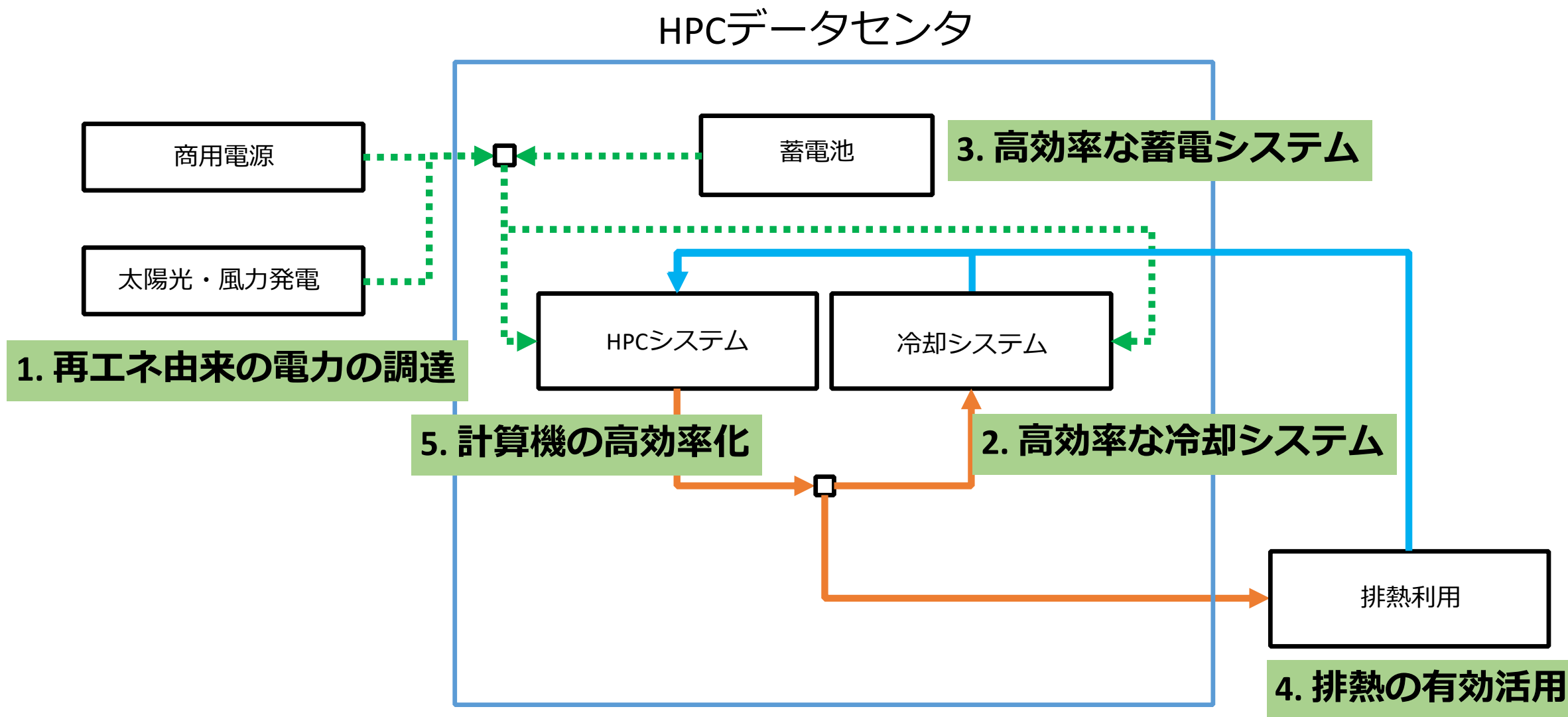
HPCデータセンターのカーボンニュートラル化 /次世代フラグシップシステムの施設・設備

「次世代計算基盤に係る調査研究」運用技術調査研究チーム最終報告会

2025年6月27日

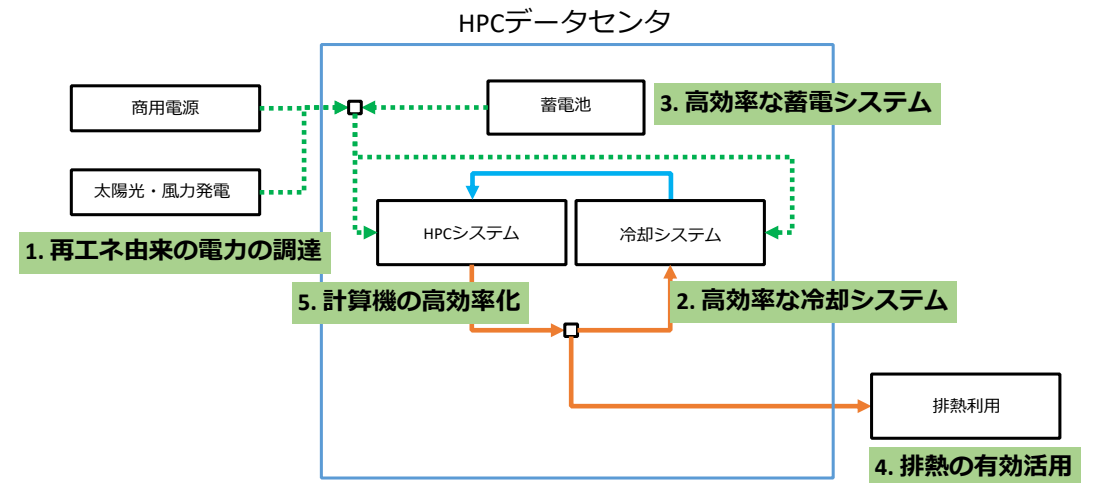
理化学研究所 計算科学研究センター
山本 啓二

- 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、再生可能エネルギー(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 -> 電力あたり性能を高める
 - 冷却機器の省エネ: 低PUE化 -> 発熱したIT機器の冷却に必要な電力を減らす
 - 排熱再利用による省エネ: 排熱を空調・給湯・地域暖房などに再利用 -> 使用エネルギーの総量を削減
- 残りの部分は再エネによるカーボンニュートラル化



再エネ由来の電力の調達

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



- 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
 - 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
 - 2030年をカーボンニュートラル化の目標としている企業が多い

- 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、、、

- 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
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	787Nm ³ /h
年間水素消費量	689万Nm ³

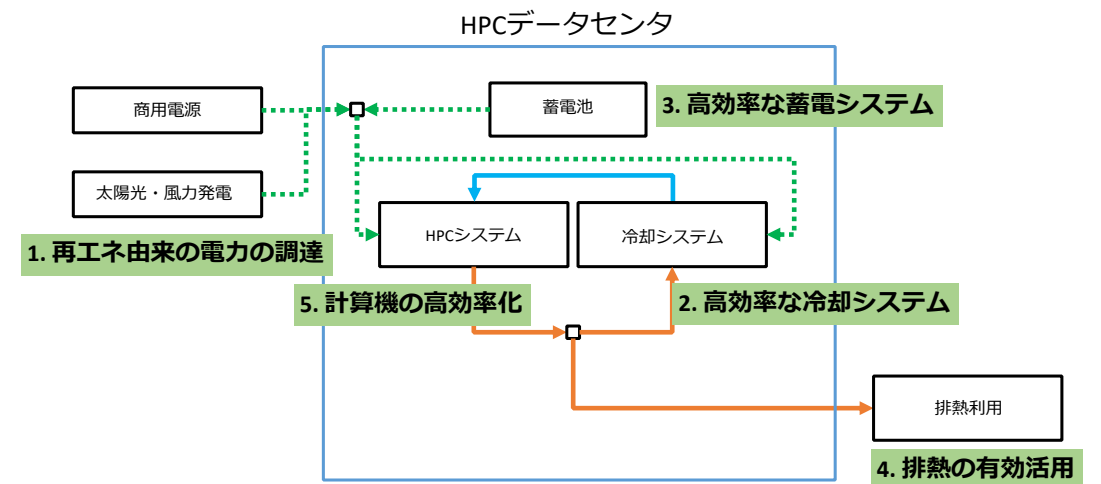
	都市ガス 専焼	水素10% (熱量)混焼	差額
①都市ガス コスト	1,959百万円	1,759百万円	-200百万円
②水素コスト (輸送含む)	0円	278百万円	+278百万円 (都市ガスコスト に対し約1.4倍)
③化石燃料 賦課金	6.6百万円 (3.7万t-CO2/年)	5.9百万円 (3.3万t-CO2/年)	-0.7百万円
実質コスト (①+②+③)	1,965百万円 (29.3円/kWh)	2,042百万円 (30.5円/kWh)	+77百万円 (+4%)

- 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（都市ガスコストの約1.4倍）
- 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常用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

温水冷却の導入

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



温水冷却によるPUEの試算（神戸）

- 想定エリア
 - 神戸（ここ20年の最高湿球温度：28.5℃）
- 計算機（FugakuNEXT: 40MW）
 - 水温 32℃/42℃（DLC）
- ストレージ（500kW）
 - 水温 20℃/30℃（RDHx）

ASHRAE CLIMATIC DESIGN CONDITIONS 2021, there is a 1 in 20 year probability of wet bulb temperature conditions of 28.5℃ occurring in Kobe.

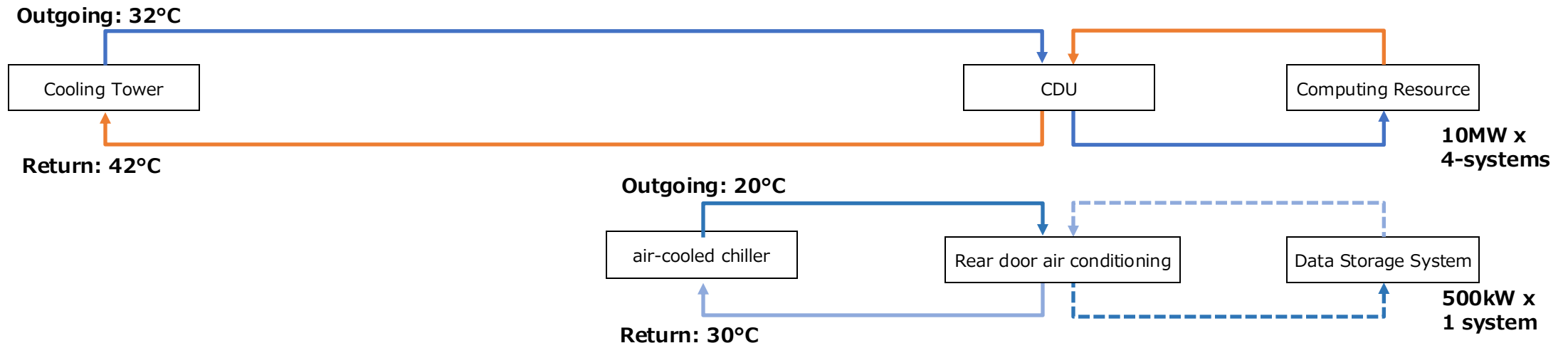
Extreme Annual Design Conditions															
Extreme Annual WS				Extreme Annual Temperature				n-Year Return Period Values of Extreme Temperature							
				Mean		Standard deviation		n=5 years		n=10 years		n=20 years		n=50 years	
												Min	Max		
1%	2.5%	5%		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
9.9	8.4	7.3	DB	-1.8	35.4	1.6	1.2	-3.0	36.2	-3.9	36.9	-4.8	37.6	-5.9	38.4
			WB	-3.8	27.2	1.5	0.7	-4.8	27.7	-5.7	28.1	-6.5	28.5	-7.6	29.0

Peak partial PUE
1.06

[legend].

→ water (esp. cool, fresh water, e.g. drinking water)
 - - - - - air

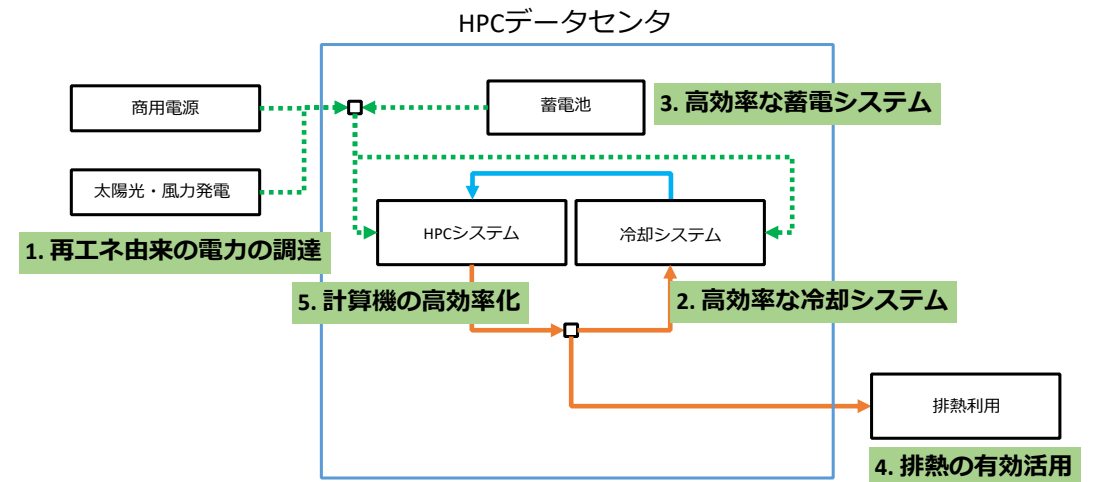
*Differences in color indicate differences in temperature.



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



- 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

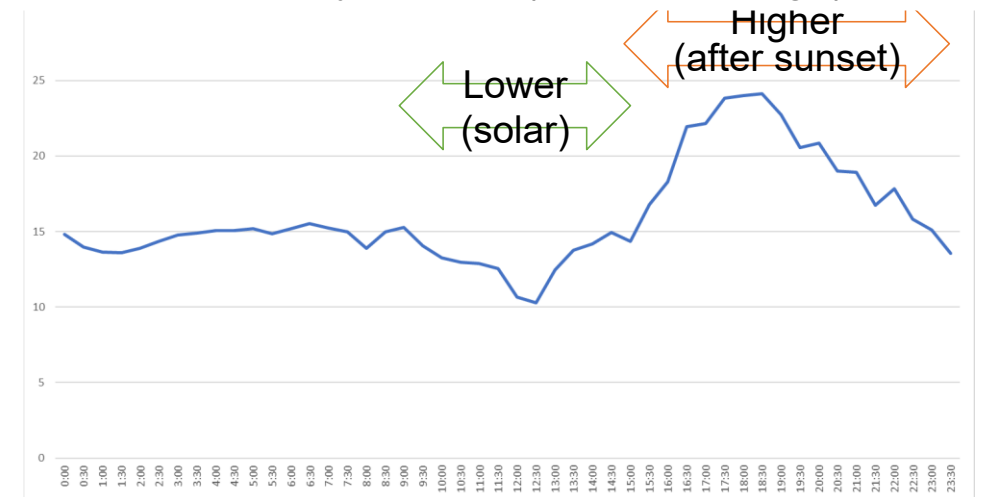
	リチウムイオン電池	ナトリウム・硫黄電池	レドックスフロー電池
体積エネルギー密度 ※製品仕様値	176 Wh/L	83 Wh/L	15 Wh/L
充放電効率 (蓄電池単体) (システムでは概ね10%程度低下)	95 %	90 %	85 %
放電レート (出典元における調査時の国内事例の実績値)	0.50～5.0 C	0.17 C	0.25 C
サイクル寿命	15,000 サイクル	4,500 サイクル	100,000 サイクル
設置スペース	0.21m ³ /kW、0.21m ³ /kWh	0.28m ³ /kW、0.047m ³ /kWh	0.33m ³ /kW、0.083m ³ /kWh
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

- **非常用電源用途**

- 「京」「富岳」では常用ガスタービン発電機がUPS代わり
 - UPSは設置していない
- 一方で、発電機の運用は非常に高コスト
 - 燃料費・保守・オーバーホール・人員体制
- 富岳NEXTでは常用発電機の代わりにリチウムイオン電池を設置したい
 - 設置スペースや実績の面でリチウムイオン電池が優位
 - 停電時にストレージ(1MW)を保護するため、10分程度の容量を検討

- 蓄電システムを利用した電力コストの最適化
 - 電気料金は昼間と深夜が安い傾向にある
 - 太陽光発電の供給が多い時間 / 電力需要の少ない時間
- 戦略
 - 電力料金が安い時間にバッテリーに蓄電
 - 電力料金が安い時間にバッテリーから放電
 - バッテリー容量にもよるが電力コストの最適化が可能
- 本手法を導入するには、より停電に対応するよりさらに大容量のバッテリーが必要

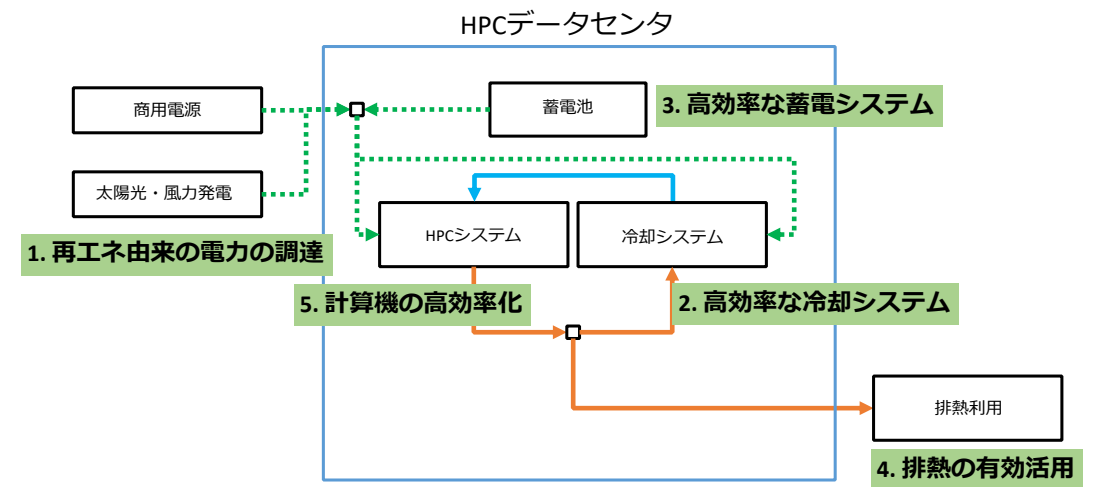
Daily unit price fluctuation in the Japanese Electricity Market (annual average)



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



- 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

- **Area**
 - Kobe area (ambient humidity: 28.5°C)
- **Main Computing Resource (FugakuNEXT)**
 - Water temperature 32°C/42°C (DLC)
- **Storage**
 - Water temperature 20°C/30°C (RDHx)
- **Waste heat utilization**

ASHRAE CLIMATIC DESIGN CONDITIONS 2021, there is a 1 in 20 year probability of wet bulb temperature conditions of 28.5°C occurring in Kobe.

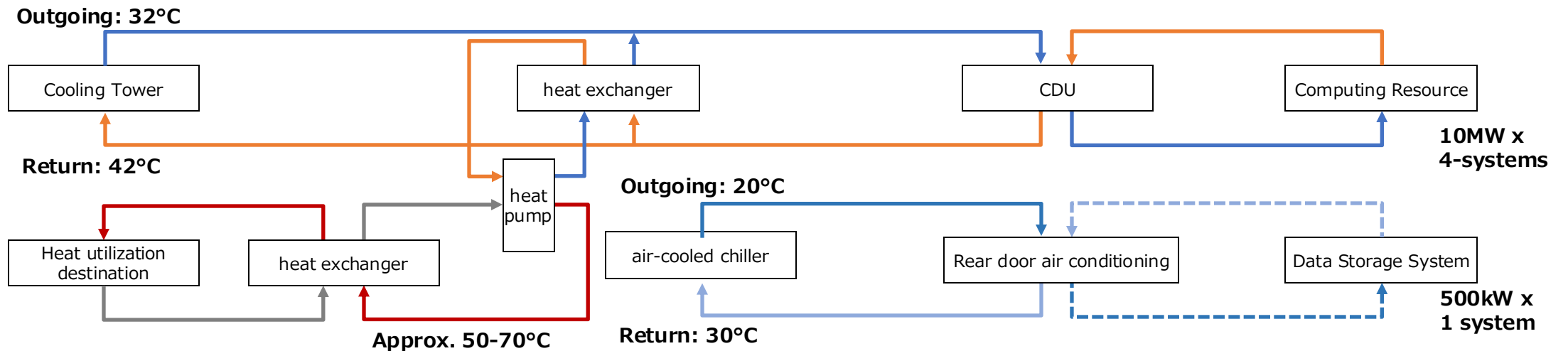
Extreme Annual Design Conditions															
Extreme Annual <u>WS</u>				Extreme Annual Temperature				n-Year Return Period Values of Extreme Temperature							
				Mean		Standard deviation		n=5 years		n=10 years		n=20 years		n=50 years	
												Min	Max		
1%	2.5%	5%		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
9.9	8.4	7.3	DB	-1.8	35.4	1.6	1.2	-3.0	36.2	-3.9	36.9	-4.8	37.6	-5.9	38.4
			WB	-3.8	27.2	1.5	0.7	-4.8	27.7	-5.7	28.1	-6.5	28.5	-7.6	29.0

- Assumed to be used by raising the temperature using a heat pump
- Needs large scale heat consumers near R-CCS

[legend].

→ water (esp. cool, fresh water, e.g. drinking water)
 - - - - - air

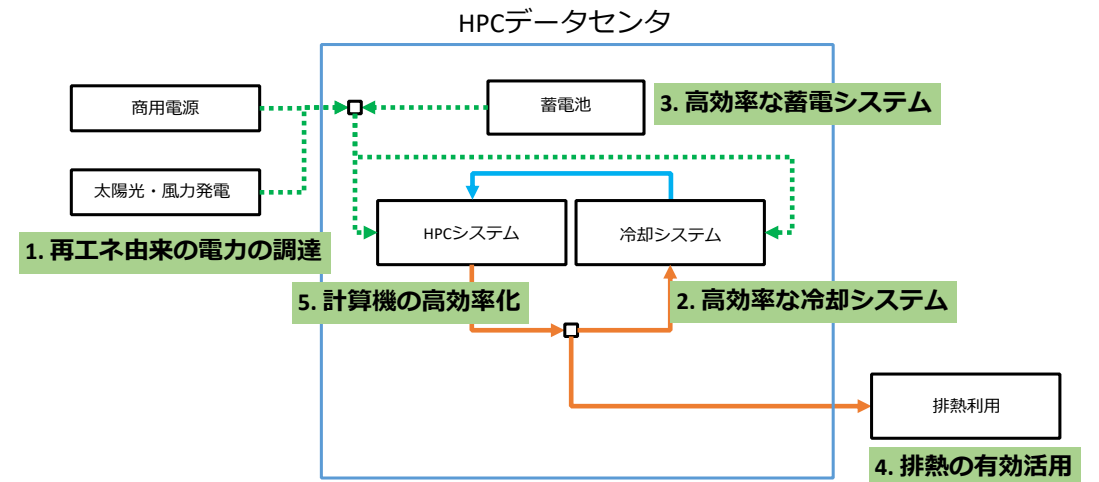
*Differences in color indicate differences in temperature.



計算機の高効率化

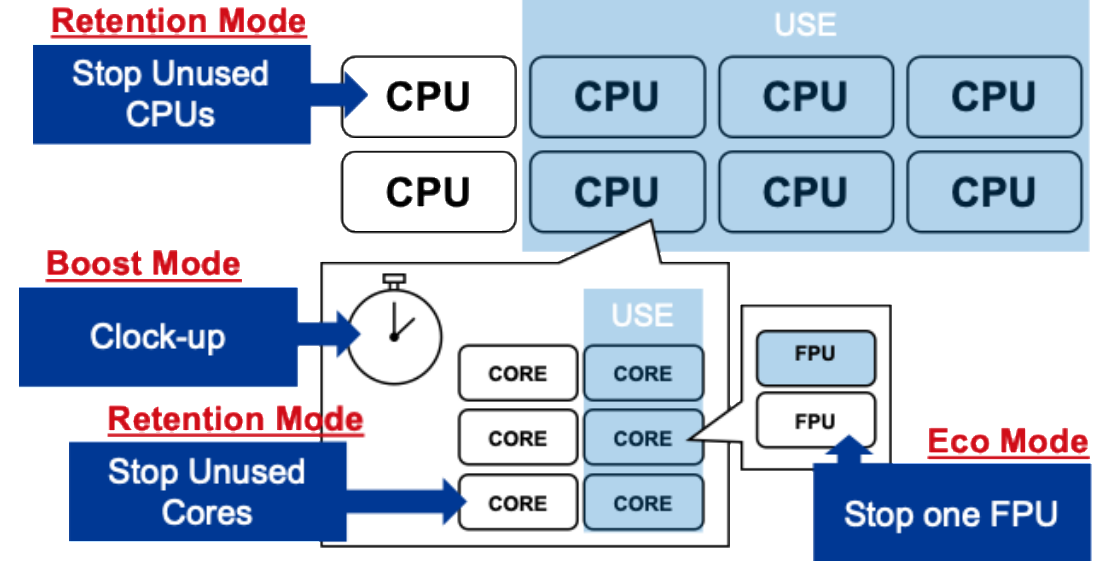


カーボンニュートラルを想定したHPCデータセンタのモデル

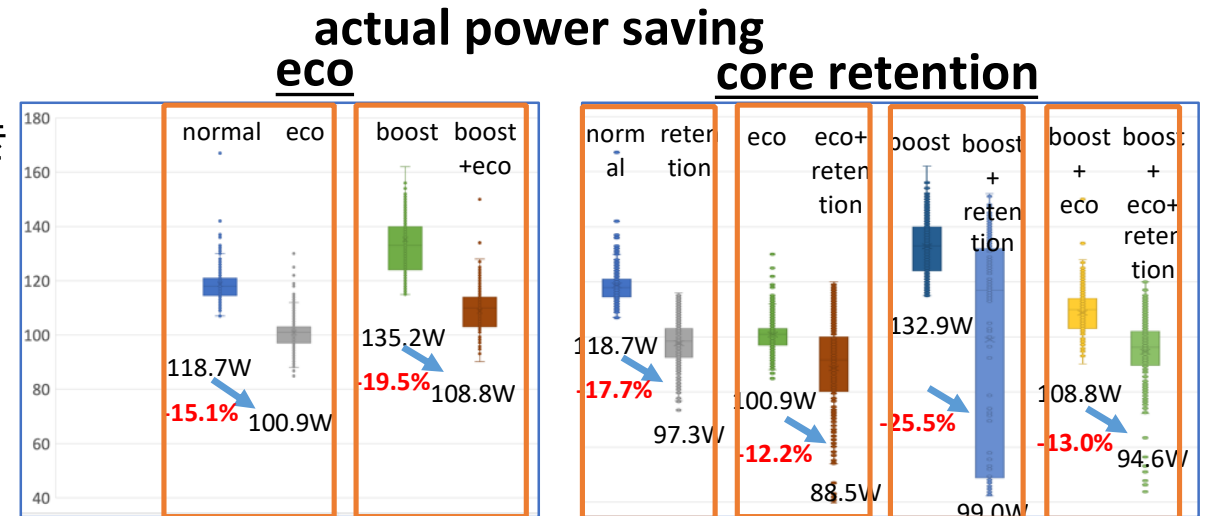


パワーノブ機能を利用した省電力ジョブ実行

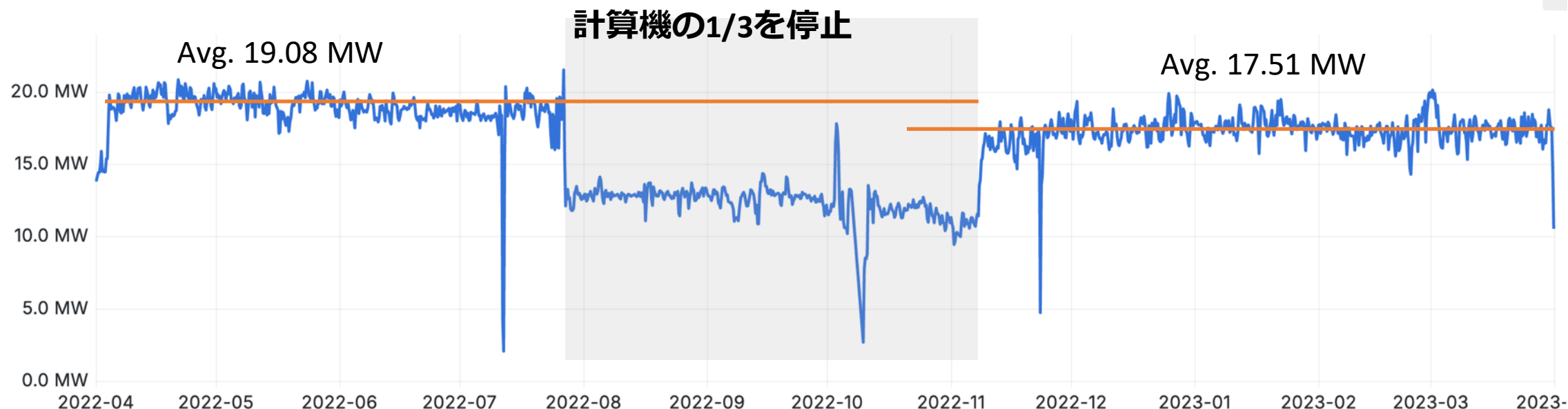
- 「富岳」のCPU(A64FX)は電力を制御するパワーノブ機能をもつ
- **Boost:** 2.2GHzで動かす。通常は2.0GHz
- **Retention:** アイドルコアを低電力モードに移行させる
- **Eco:** A浮動小数点演算パイプラインの2つのうち1つを止める
- **Node Retention:** OSの動作する1コアを除き他のコアすべてをretentionモードに移行させる



NOTE: The absence of power-saving features is referred to as **Normal Mode**



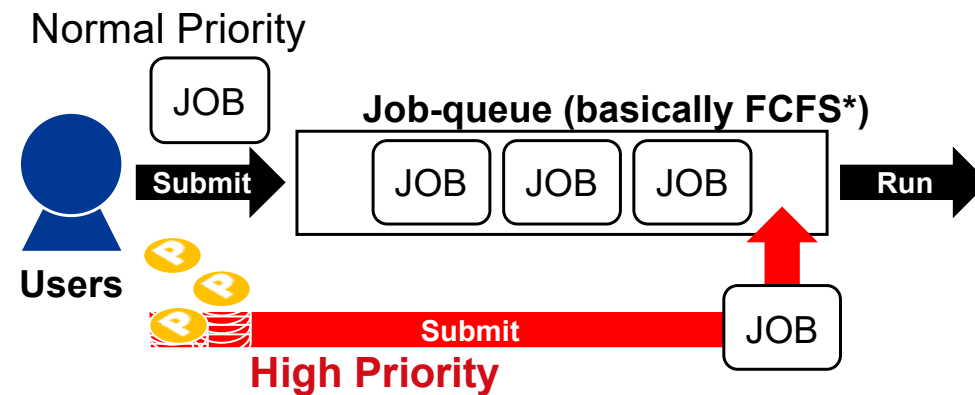
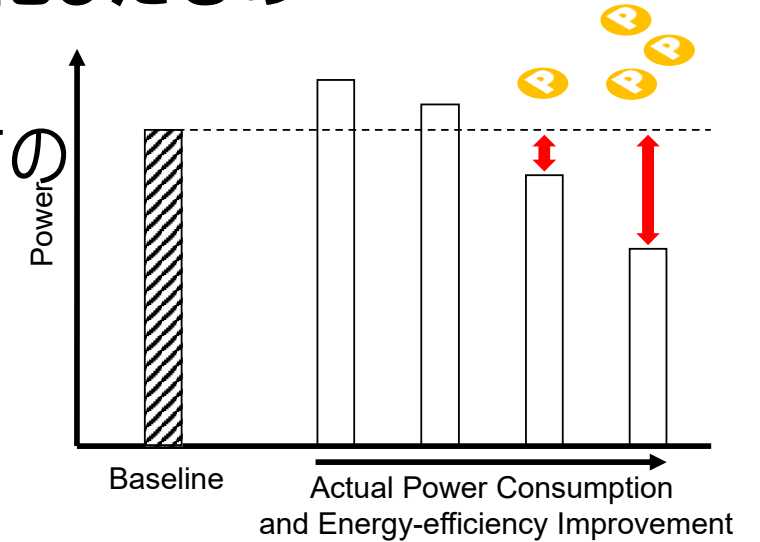
電力 / Electric Power ⓘ



- 2022年に電気代が約2倍に急上昇
- 予算制約のため約1/3の計算ノードを約3ヶ月間停止
- 停止期間中の対応
 - パワーノブ機能の評価
 - 利用者へパワーノブ機能を利用して省電力化に取り組んでもらうようにアナウンス
 - ジョブ実行時のデフォルトとなるパワーノブ設定の変更
- これらの施策により、19 MWから17.5 MWへと8%程度の削減を達成

- 「富岳ポイント」は利用者の節電への協力を数値化したもの

- 利用者は自分のジョブの電力が富岳のジョブ全ての平均の電力より小さい場合にポイントを得る
- 利用者はポイントを使って自分のジョブの優先度を上げることができる
 - ジョブの待ち時間を短くできる

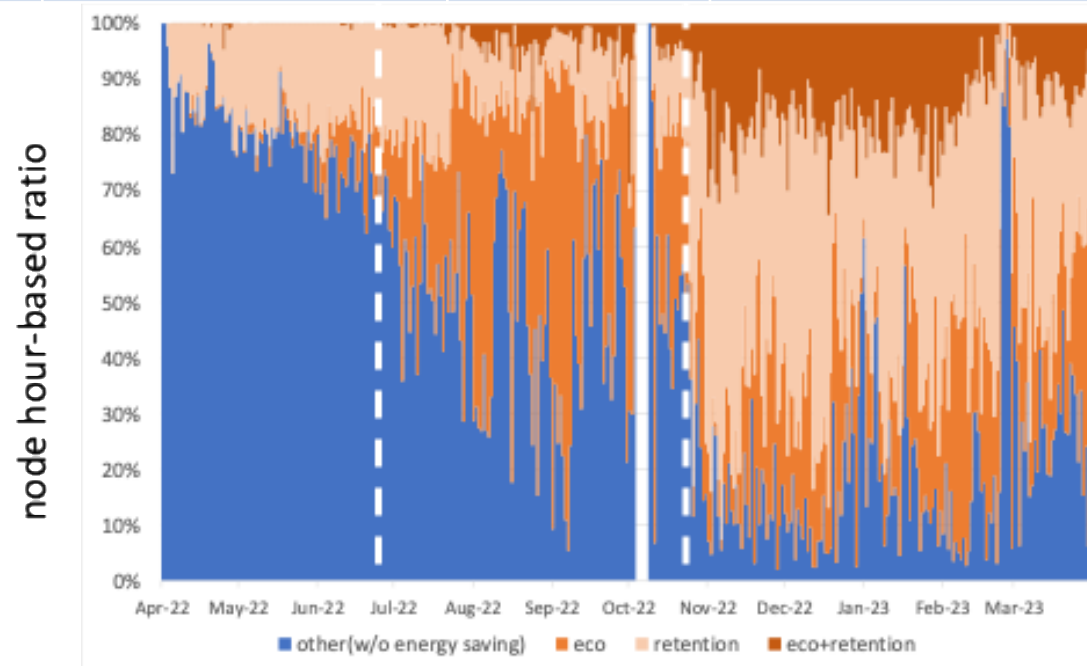
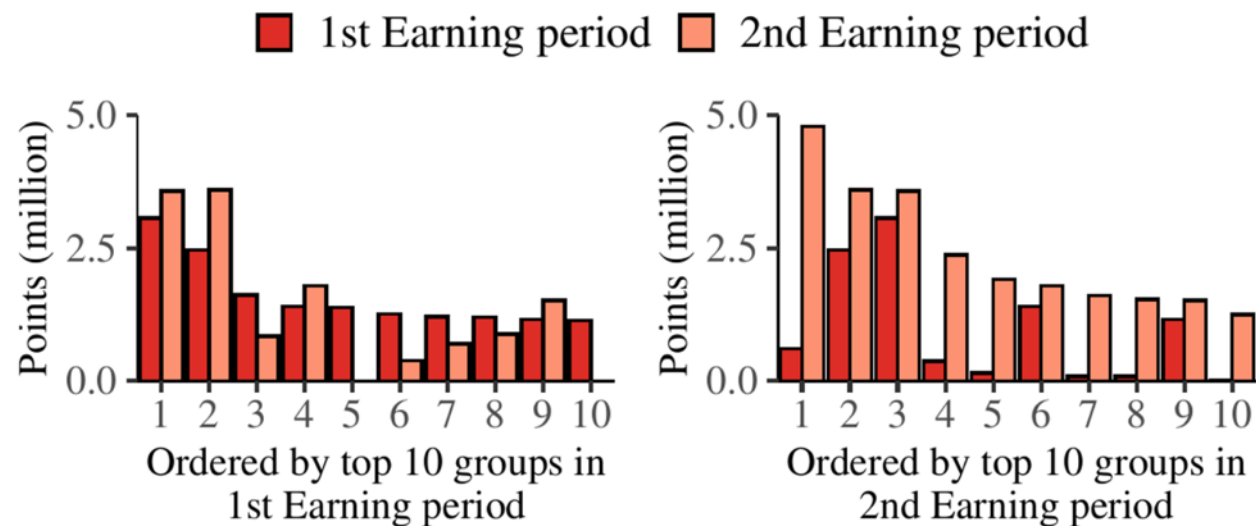


* First-Come, First-Served



ポイントプログラムの結果 (2023年度)

	FY2023 1H 4月-9月	FY2023 2H 10月-3月	+/-	
ポイントを得た課題数	161	170	+5.6%	
課題毎の平均ポイント数	248,303	320,692	+29.2%	
計算ノードの電力(平均)(W)	97.69	94.07	-3.7%	-6.86% for FY2022



<https://sc24.conference-program.com/presentation/?id=pap400&sess=sess389>

- ポイントプログラムによってより利用者の省電力への意識向上が図れた
- ノードあたりの平均消費電力が大幅に改善した

● 現状

- パワーノブの設定は利用者が手で(ジョブスクリプトに書く)指定する必要がある
- 利用者はどのパワーノブを使うかを決める必要がある

● 理想的な運用

- システムが自動的にジョブの特性をリアルタイムに判定
- 判定結果をもとに、システムが動的に最適なパワーノブを設定
- 利用者に負担をかけることなくより高い電力効率を達成

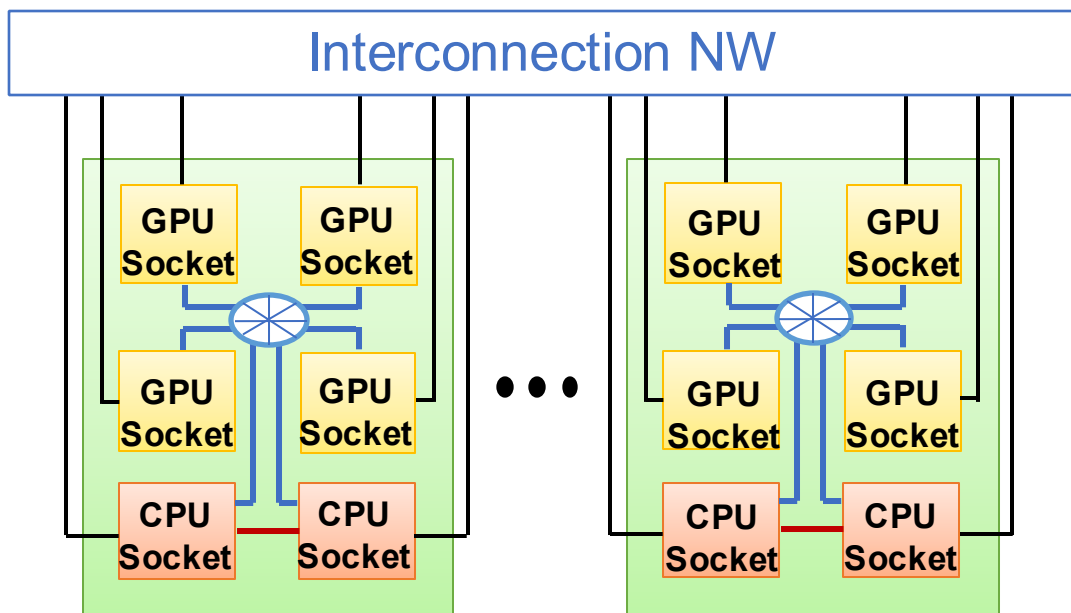
● 制限

- パワーノブ機能はA64FXに特有の機能
- 他のCPUやGPUへの適用は今後の課題

ポスト富岳/富岳NEXT

Architectural Outlook Proposed by Feasibility Study

High BW & heterogeneous node arch and whole system overview



Performance target of the entire system

	CPU	GPU
Total Num. of Nodes	>= 3400 Nodes	
FP64 Vector FLOPS	>= 48PFLOPS	>= 3.0EFLOPS
FP16/BF16 AI FLOPS	>= 1.5EFLOPS	>= 150EFLOPS
FP8 AI FLOPS	>= 3.0ELOP	>= 300EFLOP
FP8 AI FLOPS (w/ sparsity)	—	>= 600EFLOPS
Memory Size	>= 10PiB	>= 10PiB
Memory Bandwidth	>= 7PB/s	>= 800PB/s
Total power consumption	< 40MW	

**Goal: More than 5-10x effective performance gain in HPC apps,
more than 50EFLOPS effective AI performance (needs Zetta-scale low-precision perf.) ,
and 10-100x apps performance improvement by combining simulation and AI**

Comparison of power consumption

	K computer 	Fugaku 	FugakuNEXT
Release	Sep. 2012	Mar. 2021	2030
Peak power (Linpack)	12.7 MW	29.9 MW	<40MW
Average power	10 MW	17 MW	-
Water cooling ratio	70% (CPU/NIC)	90% (CPU/MEM/NIC)	95% (CPU/GPU/MEM/NIC/PSU)
PUE	1.3 – 1.4	1.3 – 1.35	< 1.1



- **カーボンニュートラル化**
 - 計算機やデータセンターの消費電力は今後も上昇傾向
 - まずは徹底した省電力化 -> その後に、グリーン電力の利用を検討
- **ポスト富岳/富岳NEXT**
 - データセンター建屋も含めたエネルギー最適化を図ったスーパーコンピュータを目指す
 - 徹底した省電力化
 - 施設レベルで温水冷却を採用することで、PUE 1.1未満が実現可能と試算済み
 - 省電力を考慮した計算機的设计
 - 排熱再利用は需要者不在
 - グリーン電力・再エネ由来電力の利用
 - 発電コスト・証書コストともに一般の電力と比較すると高コストが見込まれる
 - 京・富岳の経験から発電は発電事業者にした方がよい
 - 電力コストに応じた蓄電・放電システムであれば(初期費用を除けば)電気代の低減に効果が見込まれる
 - 定常運用時 / 京: 10MW -> 富岳: 17MW -> 富岳NEXT ?MW (最大40MW)