

# 運用技術調査研究チーム 報告

代表: 埴 敏博  
東京大学 情報基盤センター

# 「運用技術調査研究」目的

- 「富岳」ならびにHPCI第2階層システム群、mdxをはじめとする各種データプラットフォーム、GakuNin RDMなどの研究データ基盤、それらを統合する学術情報ネットワークといった多種多様なシステムの設計、運用の知見を集約し、これらがより有機的に結合した、持続可能な次世代計算基盤の実現に向けた検討を実施する。
- 様々な研究者のニーズに対し、求める適切な資源を提供し、平易で柔軟かつシームレスな利用の実現
  - システム調査研究チームと連携してそれを支えるツールの研究開発について検討する。
- Society5.0の推進, SDGsの達成に貢献するプラットフォームとして、ひいては国内研究者全般の研究DXに資する共通インフラとして提供することを目指す。

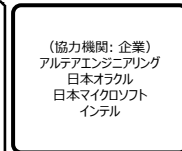
1. Society5.0運用
2. 資源管理
3. 施設・設備
4. カーボンニュートラル
5. データ利活用
6. HPCI運営



- 以下の3つの階層に分けて議論
- 設備・電力、カーボンニュートラル関連のインフラ的側面
- 資源管理やSociety5.0、データ利活用などのシステム設計
- HPCIなどの運用ポリシー、ユーザ視点
- 各メンバーは参加グループで主体的に活動するが、他のグループにも積極的に参加し連携して調査研究を行う。



国内有数の計算資源、学術情報ネットワークを運用する、基盤センター、国立研究所の研究者、技術スタッフが共同で実施



# 運用FSで目指したこと

- サステイナブルな計算資源の提供
- 研究データの提供・共有
- データセントリックで複雑なワークロードを実現
- 実験・観測設備等との連携
- 既存の環境から移行を容易に

→柔軟な利用形態の実現を目指す

運用FSの成果・提言 → 今後のHPCIの理想形

# 運用FSで目指したこと

- サステイナブルな計算資源の提供
- 研究データの提供・共有
- データセントリックで複雑なワークロードを実現
- 実験・観測設備等との連携
- 既存の環境から移行を容易に

# HPCIの概要

(2023年4月時点)

資料提供: RIST

High Performance Computing Infrastructure  
(革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ)の略

国内の大学や研究機関の最先端のスパコンやストレージを  
高速ネットワークSINET6で接続し、一体的な利用を可能し  
産業界や学术界の方に広く提供

## フラグシップシステム

理化学研究所  
「富岳」  
(CPU: Arm)



## 第2階層計算機システム

11機関+2機関(2023.10~)  
Arm(「富岳」と同じ)、x86、GPU、ベクトルで  
多様なニーズに応える

大阪大学  
OCTOPUS (CPU:x86/GPU)  
SQUID (CPU:x86/GPU/ベクトル)



理化学研究所  
共用ストレージ西拠点



九州大学  
ITO-A (CPU:x86)  
ITO-B (GPU)



京都大学  
Camphor3  
(CPU:x86)  
2023.10~



名古屋大学  
スーパーコンピュータ「不老」  
Type I (CPU:Arm)  
Type II (GPU)



東京工業大学  
TSUBAME3.0 (GPU)



東北大学  
AOBA-A (ベクトル)  
AOBA-B (CPU:x86)  
AOBA-S (ベクトル) 2023/8~



筑波大学  
Cygnus (GPU)  
Pegasus (GPU)



最先端共同HPC基盤施設  
(JCAHPC)・東京大学  
Wisteria/Odyssey (CPU:Arm)



東京大学  
Oakbridge-CX (CPU:x86) 統計数理研究所  
Wisteria/Aquarius (GPU) データ同化スーパーコンピュータ  
/ 共用ストレージ東拠点 (CPU:x86)  
2023.10~

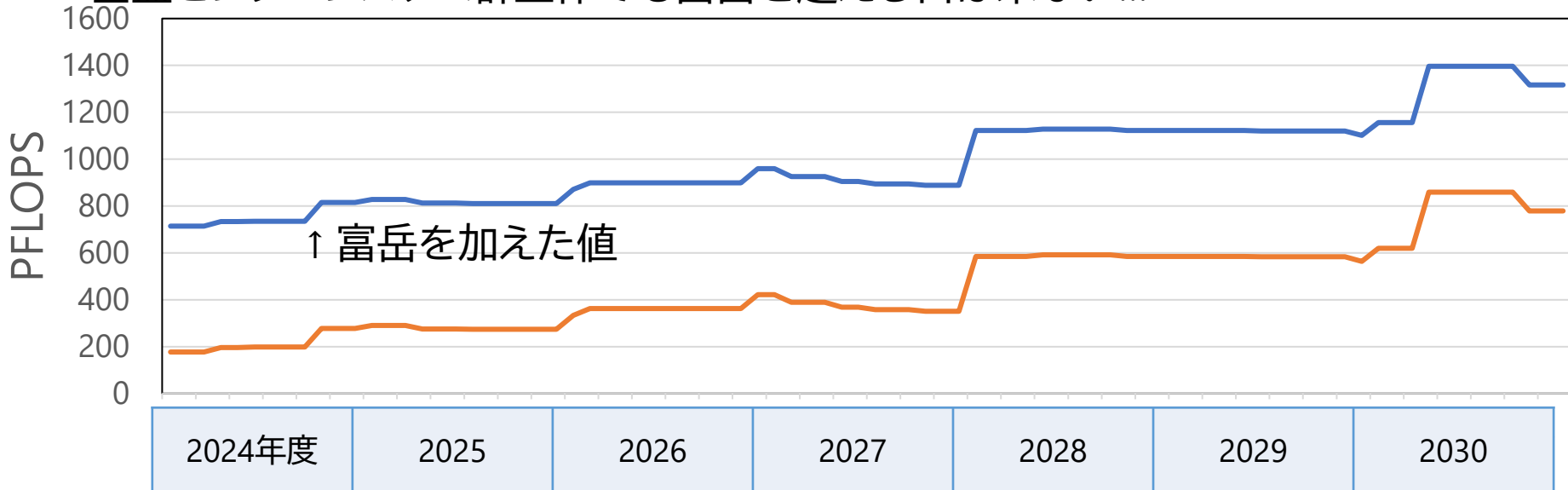


海洋研究開発機構  
地球シミュレータ (ES4)  
(ベクトル/CPU:x86)



# 計算基盤整備に向けた調査

- 2023年度時点で9大学基盤センターの導入計画について調査(合計値)
  - **HPCIにはこのうちの一部**を提供: 2024年度(平均): 55.3 PF / 186 PF → 約30%
  - 2028年度以降はあくまでも希望的観測
- 基盤センターシステム群全体でも富岳を超える日は来ない...



# 次期(+その先の)フラグシップシステム整備に向けて

- これまでのフラグシップシステム開発の問題
  - 計画立案からシステムの運用終了までのサイクルが10年程度(京の場合)
  - 継続的な計画がなかったため、次期システムが決まるまで運用期間の方針も立たない
    - 富岳もいつまで運用するか現時点での見通しが無い
  - システム移行のタイミング:いわゆる**端境期**→ ユーザの研究計画に多大な影響
- 理想的な形(**提案**)
  - 更新時期をずらし一体的な並行運用について検討
    - **研究開発の継続性も維持、技術動向の変化に即時対応できる**
  - 計算機システムの寿命は導入からせいぜい**6年**: コンポーネントの保証(End-Of-Life)の観点、これまでの運用経験から見て妥当な線
    - 製品のライフサイクルは、技術革新のサイクルの影響で延びてきているものの、6年目以降は厳しい
    - 7年目から保守費が急激に増加(IT機器は5年程度が多い)、機材によってはリプレースしないと継続運用できない
    - 利用者にとっては陳腐化し魅力が低下
  - 引き続き実現可能性を検討中

端境期をどう解消するのか?

富岳

導入・運用  
(案)

2025/3/6

導入

引退?

システム A1

第13回評価委員会

入れ替え

システム A2

導入


システムB1

入れ替え

システム  
B2

7

# 次世代計算基盤の整備に向けて:基盤センター群

- まず、**基盤センター群を「第2階層」と呼ぶのはやめよう!!**
    - 多様なアーキテクチャの選択、運用方針がセンター独自の特色、それらが尊重されてきた
  - システム導入予算の減少
    - 大学予算の一部、独法化後、運営費交付金の削減→センター予算にも波及
    - システム整備、保守等の出費増(WiFi設備、クラウド等のライセンス整備など)
    - 電気代高騰、物価上昇、円安など外的要因
  - システム価格の高騰
    - 物価上昇、製造コストの上昇、ムーアの法則の終焉
- 
- システム更新しても、性能が下がる可能性が高い  
近年の多くのシステムはCPU→GPUシフトで  
性能は向上したが、しかしその先は厳しい
- 基盤センター群に対しても**導入・運用のための予算配分**
    - **[導入]** システム**価格の上昇**、高効率な冷却設備のための初期導入コスト（運用コスト減少分は導入費用に組入れできない）
    - **[運用]** **電力料金の高騰**+今後求められる可能性が高い**再エネ利用のコスト増**
  - フラグシップだけでなく**基盤センター群+アカデミッククラウド+ストレージ**の充実・継続性も重要
    - 先進的・特色あるシステム、**量子との連携**など、**導入・運用を後押しする仕組みがあってもいい**
    - 基盤センターには、ユーザー層拡大、共同研究、手厚いユーザー支援、などの役割の充実が期待される
      - Cf. GPU移行に向けたセンター間の協力体制



# フラグシップシステムとストレージ・データ管理

- フラグシップ(に限らず)システム更新に伴うデータ移行は大問題だった

→ **ストレージのライフサイクルはシステム本体とは(当初から)独立に計画すべき**: システム本体より経年劣化は深刻

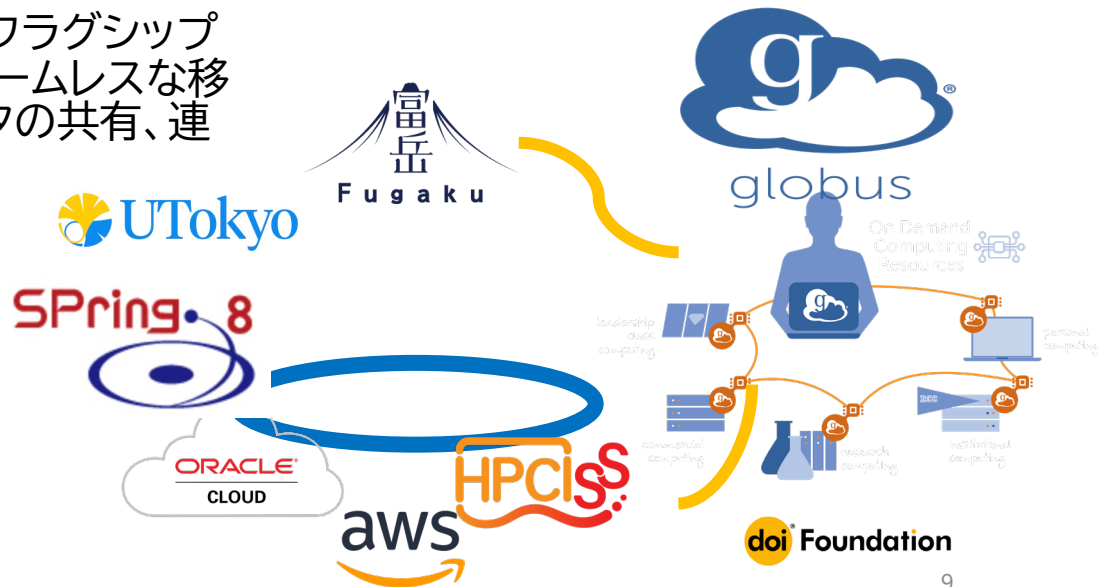
→ ユーザに意識させずにデータ移行を進める観点で、データ共有のフレームワーク導入を検討

- 海外/国内機関との連携には、研究データの共有および管理が必須、米国/欧州では、Globus を用いたデータ共有がデファクトスタンダードに

→ これらのツールを積極的にHPCI/次期フラグシップに取り込み、フラグシップシステムのシームレスな移行を可能にするだけでなく、研究データの共有、連携促進へ繋げる

## • 例: Globus

- FaaS (Function as a Service)に近いデータ管理/転送、認証などをサポートしたプラットフォーム
  - 昔のGridソフトウェアのGlobusとは別物
- DOIを付与することによって、研究データ、論文への到達性、一意性、永続性などを保証 (<https://www.doi.org>)



# カーボンニュートラルに向けて

## ● 政府目標

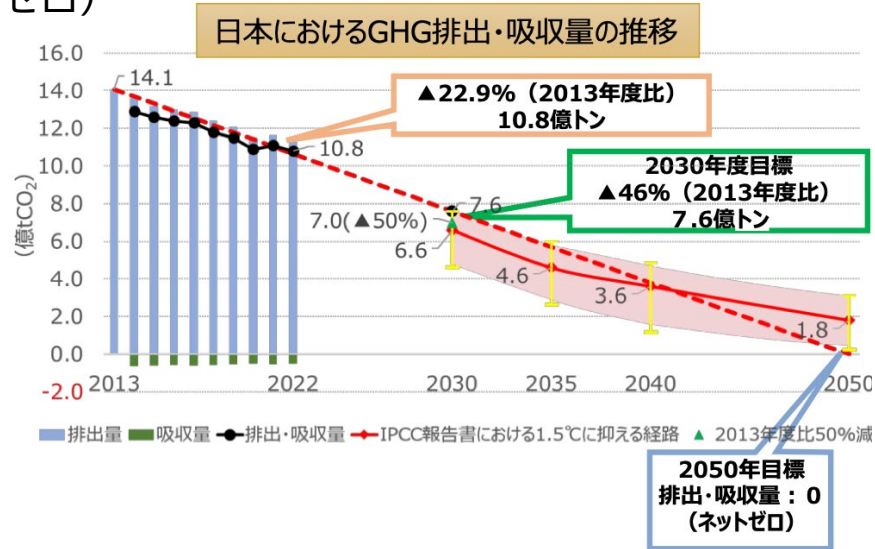
- 2050年度カーボンニュートラル(CN)化達成(ネットゼロ)
- 2030年度において、**温室効果ガス46%削減**(2013年度比) (50%とも)

## ● エネルギーミックス(再エネ比率)

- 2023年度 22.9% → 2030年度 **37.6%**  
→ 2040年度 40~55%

	2023年度		2030年度		2040年度	
	億kWh	構成	億kWh	構成	億kWh	構成
太陽光	965	9.8%	1,434	15.4%	2,933	22~29%程度
風力	105	1.1%	510	5.5%	690	4~8%程度
水力	748	7.6%	980	10.5%	1,035	8~10%程度
地熱	34	0.3%	110	1.2%	173	1~2%程度
バイオマス	401	4.1%	470	5.0%	633	5~6%程度
原子力	841	8.5%	1,996	21.4%	2,300	2割程度
石炭	2,804	28.5%	1,780	19.1%	4,025	3~4割程度
天然ガス	3,241	32.9%	1,870	20.0%		
石油等	716	7.3%	190	2.0%		
発電電力量	9,854	100%	9,340	100%	1.1~1.2兆kWh程度	100%

2025/3/6



[出典] IT mediaスマートジャパン  
[https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/2412/26/news084\\_3.html](https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/2412/26/news084_3.html)

「NDC実施と透明性向上に向けた共同行動」  
 の公表について  
[https://www.env.go.jp/press/press\\_04017.html](https://www.env.go.jp/press/press_04017.html)

# カーボンニュートラルなデータセンターに向けた検討

カーボンニュートラル化を進めることで、運用コストの低減を進める  
但し、スパコンだけの取り組みは限界であり、地域との連携が急務

**自然エネルギーの利用**

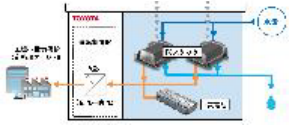


※ DCが独自運用することで、将来のエネルギー価格の高騰に対応可能

**効果:** 炭素排出の抑制  
石油価格によらない電力価格

**問題点:** 電力供給が不安定

**水素・バイオ燃料**



**効果:** 安定した電力エネルギーの再利用

**問題点:** ガスコスト・導入・運用コスト

**(4) 排熱の有効利用**



液化水素の焓化用熱  
プール  
温浴設備  
温室

<https://datacenterfrontier.com/waste-heat-utilization-data-center-industry/>

**効果:** 化石燃料を使用しない熱源の供給  
スパコンからみたカーボンネガティブの実現

**問題点:** 受益に対する法律・制度の整理が必要  
(受益者が安価でなければ利用しない)  
温暖な気候(=神戸)では有効利用が困難

**(1) カーボンニュートラルな電力の調達**

カーボンニュートラルな電力の自家発電

水素  
バイオマス


スパコンのシミュレーション  
成果の社会還元

↑ 廃熱

**自然エネルギー活用に伴う電力価格変動への対応**

**効果:** 電力調達価格の低減  
(副次効果: 電力網の負荷低減)

**問題点:** 導入のインシヤルコストが高い  
(但し、数年で損益分岐点を迎える)  
電力市場からの直接購入方法の制度  
(調達方法の制度整備)



電力市場価格


電力価格高騰の吸収

蓄電

放電

太陽光が使える時間

**(2) 大型蓄電池の導入**



→ 持続可能電力

**エネルギー効率の高いスパコン運用**

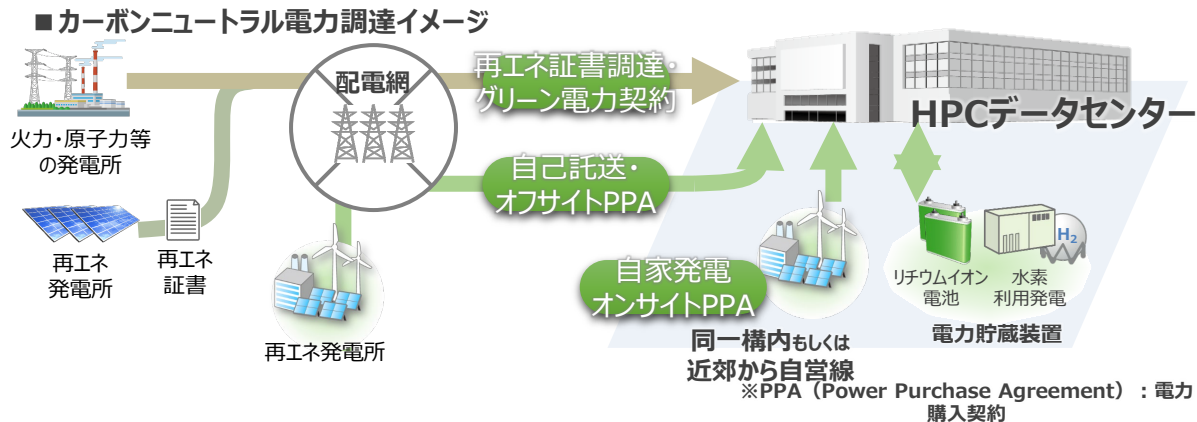
**効果:** 電力使用量の削減、人員コストの削減

**問題点:** 単独の取り組みはすでに限界

計算機本体の省電力化

- 電力効率のよいプログラミング
- 電力価格変動に応じた計算資源の割り当て
- 冷却設備の効率化
- 冷却水温度の高温化
- 高効率な冷却設備 (3)**
- 自動運転化

# (1)カーボンニュートラルな電力の調達



DC独自の再エネ自家発電はエネルギー価格に依らずに運用できるが、電力供給は不安定

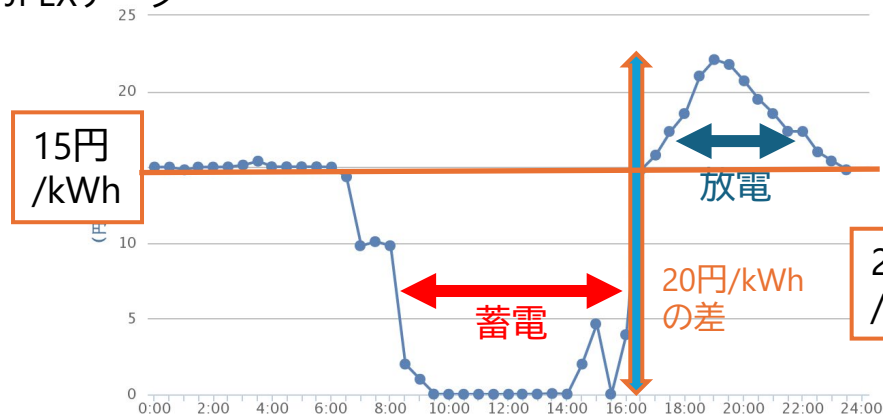
- 再エネ電力の購入：**現状は供給過多**なため、非化石証書による電力購入が最も安価
    - 電力会社や仲介事業者からの購入：新電力 0.77~1.43円/kWh, (旧)一般電気事業者 2円/kWh 前後
    - 市場に自ら参加し落札することも可能：0.40円/kWh+手数料
    - 再エネ電力料金 = 現在の電気料金 + 数%~10%程度の証書代
- ➔ 今後の動向は不透明、**2030年頃には需要増加により高騰する可能性**もあり得る

## (2) 電池技術を用いた自然エネルギーの有効活用とエネルギーコスト低減の両立

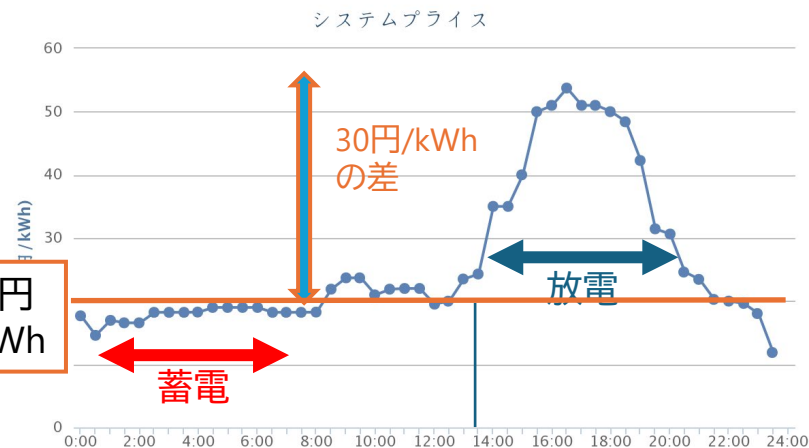
※ 電力価格が安い時間にジョブを集中して実行することも検討の価値あり

JPEXデータ

システムプライス



2022/6/12 (土曜日)



2022/8/30 (火曜日)

### 大型蓄電システムの実例調査（再エネ発電連携・系統）、性能比較

- 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。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。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

### (3) 高効率な冷却技術

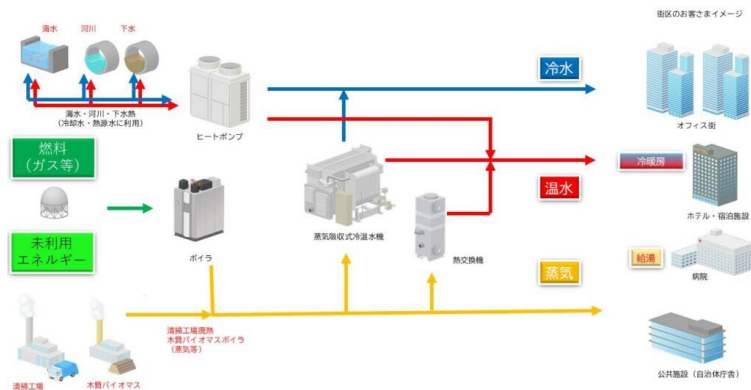
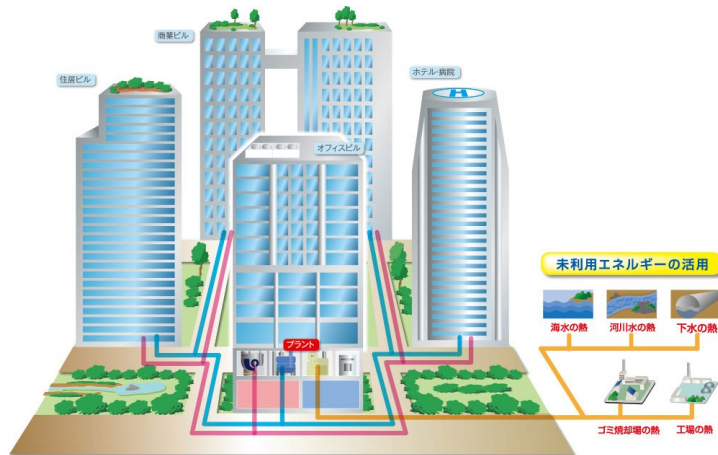
指標	チラーのみ	冷却塔+チラー/ チルドタワー	冷却塔	備考
達成可能PUE	× 1.3程度	△ 1.1強	○ 1.1以下	<ul style="list-style-type: none"> <li>電力料金に直結</li> <li>冷却塔はチラー比で全消費電力が2割減</li> </ul>
温度追従性	× 「富岳」以上の負荷変動には追従不可	△ チラーが2割までなら冷却塔で吸収可	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>追従できない分は冷却電力が増加</li> </ul>
生成可能な冷却水温度(夏季)	○ 20℃	△ 30℃	△ 32℃	<ul style="list-style-type: none"> <li>TSUBAME3やABCIIは32℃で運用実績あり</li> </ul>
保守コスト	× 費用大・人力監視	△ 人力監視/監視は不要	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>チラーはある程度人力の監視が必要(追従性の問題)</li> </ul>
導入コスト	×× 高価	×/×× 二重投資/高価	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>チラーの容量あたり導入費用は冷却塔の数倍</li> <li>冷却塔+チラーは設置面積の点で困難</li> </ul>

#### 液浸冷却: 効率は良いが、課題も多く、時期尚早

- ファンを除去、空冷もほぼ不要=PUE 1.04程度、但しシステム全体では、対応が難しい機器は残る
  - 冷媒の種類によって扱いやすさ・環境性能等異なり、現時点では良い解は
    - オイル: 一相式(液体のまま): ビニール・ゴム等の劣化を招く、粘性が高いため冷却効率が良くない・メンテナンス性が悪い
    - フッリナート: 二相式(液化⇄気化)、高価かつ揮発しやすい、PFAS, PFOA問題
  - 冷媒タンクの構造、高密度実装が困難、ラックマウントのためシャーシを囲うタイプも開発されているが、
- プロセッサ等は通常の水冷ブロック式冷却が現実的
- 少数の空冷機器(ストレージ等)ラックはリアドア水冷

# (4) 未利用熱(排熱)の活用

- 冷暖房・給湯に使用する温水（冷水）として
  - 温水としては、ヒートポンプを用いて50~70℃程度に昇温しないと実用的でない
    - そのために追加コストが必要、コストは誰が負担するのか？
  - 周辺地域に消費地が必要、周辺自治体の協力



地域熱供給(地域冷暖房)イメージ図 | 一般社団法人 日本熱供給事業協会 (jdhc.or.jp)



# カーボンニュートラルデータセンターのためのコスト検討結果

フラッグシップ対象

基盤センターにも適用可

初期コスト(0)  
運用コスト(+)

自然エネルギーの利用



※ DCが独自運用することで、  
将来のエネルギー価格の高騰に  
対応可能

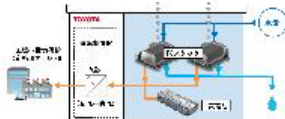
効果: 炭素排出の抑制  
石油価格によらない電力価格  
問題点: 電力供給が不安定

カーボンニュートラルな  
電力の調達



初期コスト(+++)  
運用コスト(++)

水素・バイオ燃料



効果: 安定した電力エネルギーの再利用  
問題点: ガスコスト・導入・運用コスト

カーボンニュートラルな  
電力の自家発電



水素  
バイオマス



スパコンのシミュレーション  
成果の社会還元

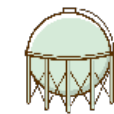


持続可能電力

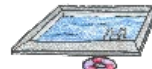
初期コスト(++ or +)  
運用コスト(-)

初期コスト(+)  
運用コスト(?) 自治体の協力が必須

排熱の有効利用



液化水素の焓化用熱



プール



温浴設備



<https://datacenterfrontier.com/waste-heat-utilization-data-center-industry/>

効果: 化石燃料を使用しない熱源の供給  
スパコンからみたカーボンネガティブの実現  
問題点: 受益に対する法律・制度の整理が必要  
(受益者が安価でなければ利用しない)  
温暖な気候(=神戸)では有効利用が困難



廃熱

自然エネルギーに活用よる電力価格変動への対応

効果: 電力調達価格の低減  
(副次効果: 電力網の負荷低減)

問題点: 導入のインシヤルコストが高い  
(但し、数年で損益分岐点を迎える)  
電力市場からの直接購入方法の制度  
(調達方法の制度整備)



大型蓄電池の導入



エネルギー効率の高いスパコン運用

初期コスト(+)  
運用コスト(-)

効果: 電力使用量の削減、人員コストの削減  
問題点: 単独の取組みはすでに限界

- 計算機本体の省電力化
- 電力効率のよいプログラミング
  - 電力価格変動に応じた計算資源の割り当て
  - 冷却設備の効率化
  - 冷却水温度の高温化
  - 高効率な冷却設備
  - 自動運転化





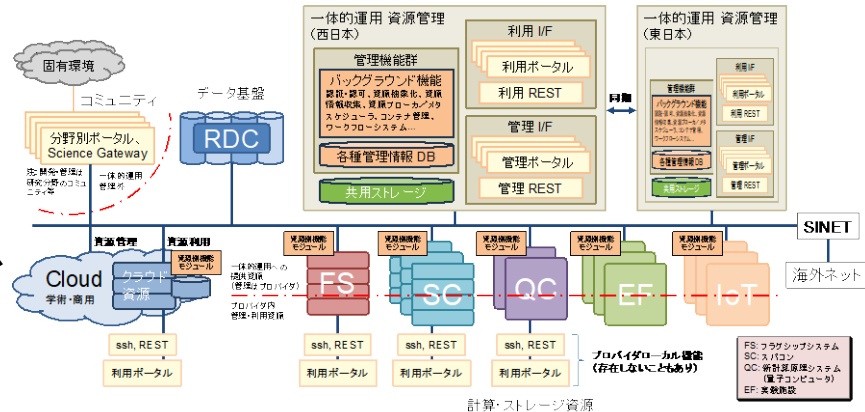
# 運用FSで目指したこと

- サステイナブルな計算資源の提供
- **研究データの提供・共有**
- **データセントリックで複雑なワークロードを実現**
- **実験・観測設備等との連携**
- 既存の環境から移行を容易に

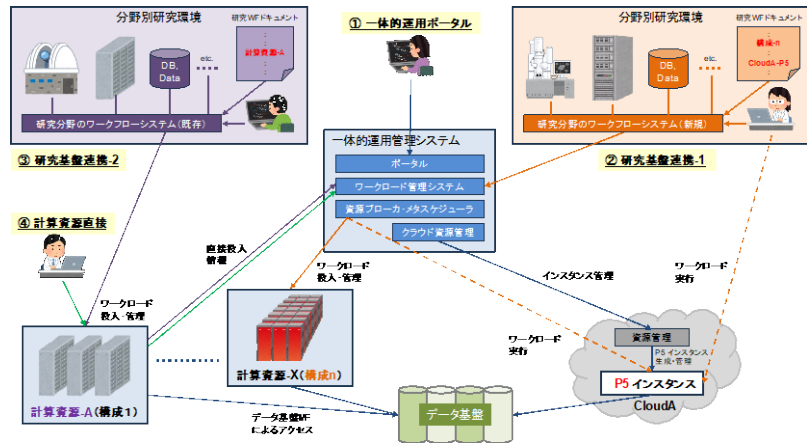
# 複数システム間・異種基盤間の連携

- 計算基盤の一体運用 & オンプレシステム、実験機器、研究分野DB等とのワークフロー連携など
  - 全ての資源やサービスで共通の認証・認可
  - メタスケジューラ、オーケストレータ
  - ワークフローとKubernetesによるコンテナ連携
  - ワークロードのマイグレーション
  - 電力需給バランス次第で実行するシステムを変更
- イベントが起こると短時間での起動・再開が求められるジョブ
  - 緊急ジョブ, 実験施設連携ジョブ, ストリーミングデータ, LLM推論など
  - Gang Scheduling+高速な同期切替機構など
- 欧米の計算基盤における異種基盤連携調査
  - 米国では Integrated Research Infrastructure (IRI)を推進: ANL Auroraと放射光施設 (APS)など

➔ 得られた知見を踏まえて連携のあり方を検討中、  
**推進・支援する人材も極めて重要**




一体的運用計算基盤の構成例



一体的運用計算基盤と研究基盤の連携例

# HPCシステムのセキュリティ

- 現状:「HPCI共通セキュリティ要件」を元に運用
    - 目的:不正アクセス・サービス妨害の防止や、インシデントへの緊急対応・事後調査・恒久対応
      - 認証局運用機関向けには別途「HPCI認証局運用規定」
    - 資源提供機関のポリシーに依存する部分: 共通化するためレベルの低いポリシーに合わせたものも
- 
- **セキュリティガイドラインの検討中**
    - NISTのCyber Security Frameworkを基にした HPC システム用セキュリティガイドラインの作成
      - NII を中心に策定中: ストラテジックサイバーレジリエンス研究開発センターの協力
      - 境界防御型から侵入やミスを前提とするゼロトラスト型のセキュリティ
    - CSFが組織間連携を考慮した2.0にアップデートされたため、ガイドラインドラフトも更新
      - 2022年度CSF 1.1 に基づくサイバーセキュリティアセスメントを「富岳」, 「Wisteria/BDEC-01」に対して実施
    - 10の学術機関からCSF2.0対応ガイドラインドラフトの内容等について意見を収集中、反映後、今年度末にガイドラインを完成予定
  - ソフトウェアの安全性も必要
    - 例: github、spackのようなautomatic check
    - SBOM : Software Bill of Materials, 使用したコンポーネント等のリストを一覧化
    - セキュリティ・プライバシーに配慮したストレージ、TEE (Trust Execution Environment)によるセキュアな計算環境も必要

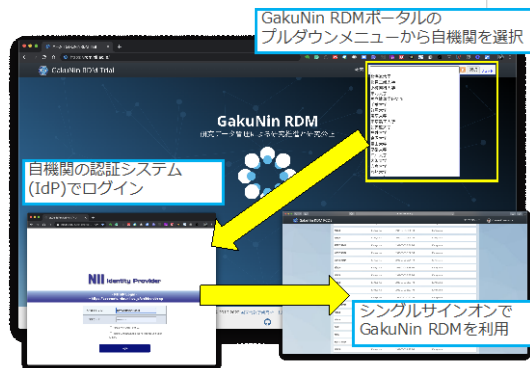
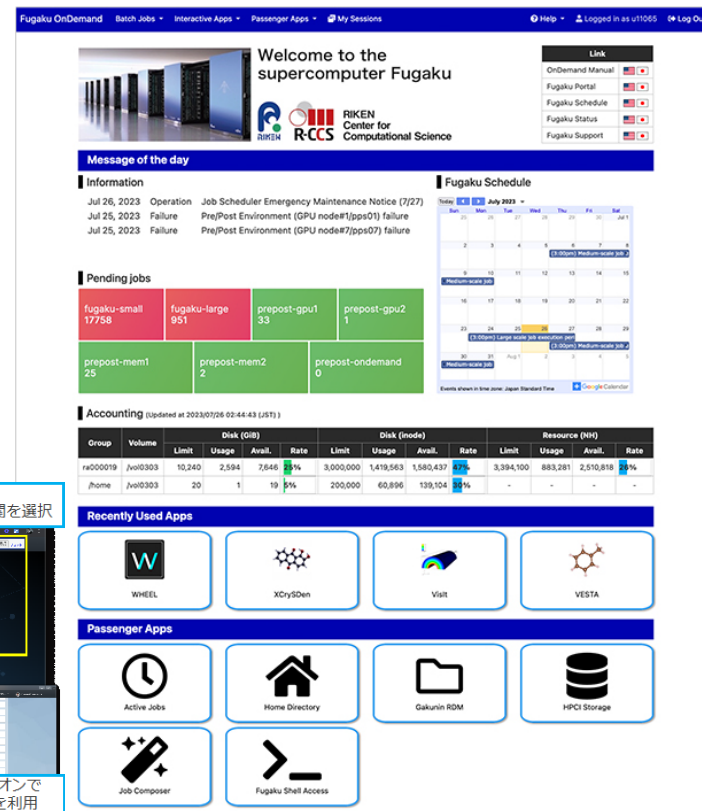
# 運用FSで目指したこと

- サステイナブルな計算資源の提供
- 研究データの提供・共有
- データセントリックで複雑なワークロードを実現
- 実験・観測設備等との連携
- **既存の環境から移行を容易に**

# ユーザビリティ向上

- Webベースのユーザインタフェース → 新規スパコンユーザの開拓
- システム間で統一されたユーザインタフェース → システムの相互利用を容易に
- ユーザポータル: Open OnDemand
  - オハイオ州立大学で開発、日本ではR-CCSでいち早く導入し「富岳」で利用可能に
  - TSUBAME4.0@東京科学大、玄界@九州大、AOBA@東北大、Miyabi@JCAHPC、ABCI@産総研など、ポトムアップ的に各所で利用可能に
- Jupyter Lab
  - データ解析、機械学習ではde facto
  - スパコンジョブスケジューラとの連携、プロトタイプ開発中 → 簡便なワークフローの実現
- Webベース研究データ管理基盤: GakuNin RDM
  - NIIで開発
  - 各計算資源やストレージを繋ぐためのプラグイン → データを中心とした計算資源との連携に向けて、ストレージ群と一体の検討が必要
- コンテナ技術を組み合わせ複数システムを連携させるワークフローについても検討
- 認証基盤も重要、すべての連携対象が対応する必要

• 中尾、山本@R-CCS:「HPCクラスタにおけるバッチジョブ投入のためのWebアプリケーションOpen Composerの開発」、HPC&CPSY研究会、情報処理学会研究報告、2024年12月、など



# まとめ

- 次世代計算基盤 → 次世代HPCIへの期待
  - **継続性**: 重要なインフラであり、様々なアーキテクチャの計算資源、ストレージの提供を将来にわたって担保することが求められる
    - 端境期をどのように乗り越えるかが課題
    - 運用コスト削減・カーボンニュートラルに向けて、電力、冷却設備の最適化
  - フラグシップシステムだけでなく**基盤センターシステム+アカデミッククラウド+ストレージ**の充実も、複数システム間・異種環境との接続とワークフロー
  - セキュリティ: ガイドラインの整備、セキュリティ・プライバシーに配慮した環境の提供
  - ユーザビリティの向上: 共通UI、認証基盤の整備