

スーパーコンピュータ「富岳」 性能ランキング1位までの道のり！

2021年9月2日
富士通株式会社
未来社会&テクノロジー本部
加瀬 将



スーパーコンピュータとは？

スーパーコンピュータとは？

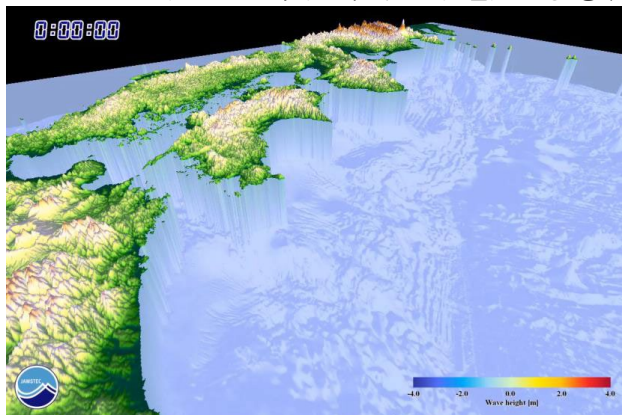
■ スーパーコンピュータ(スパコン)とは、膨大な計算を、短時間で処理できるコンピュータ

- 科学技術計算において、同時代で抜きに出て高速な計算機
- 大量の「プロセッサ」を「インターコネクト」で接続して、並列計算することで性能を出せるようにしている
 - ・ 一般的なコンピュータは1個か2個のプロセッサで構成

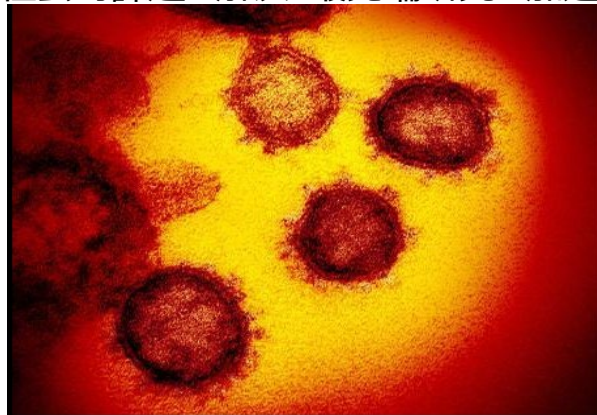
■ スパコンに期待されること

- コンピュータシミュレーションによる、社会的課題の解決・最先端研究の加速

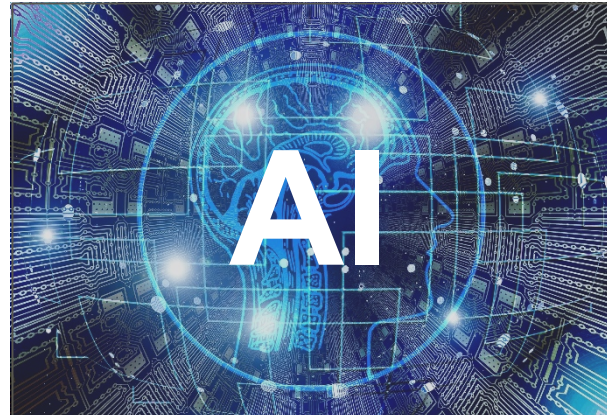
- 増大するデータの高速処理
〔 Ex. AI、機械学習/深層学習、
ビッグデータ解析 〕



南海トラフ沖巨大地震シミュレーション
(海洋研究開発機構馬場俊孝様)



新型コロナウイルスの電子顕微鏡写真
(米国立アレルギー感染症研究所)



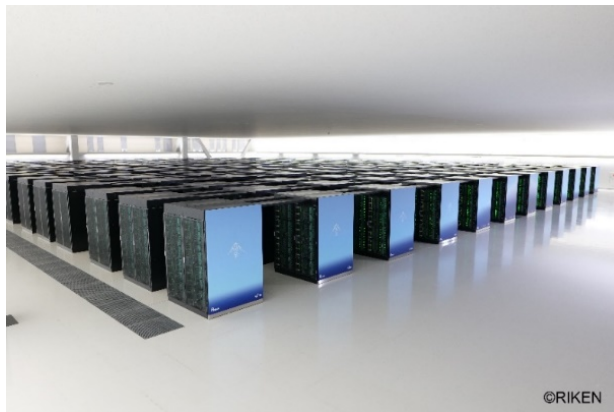
AI イメージ図



スーパーコンピュータ「富岳」

スーパーコンピュータ「富岳」

- 理化学研究所と富士通で共同開発を行ったスーパーコンピュータ
- 名前の由来
 - 富士山の高さ: 高い性能
 - 富士山の裾野の広がり: ユーザの広がり
- 2021年3月9日から共用開始



ターゲットアプリ

<https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/system/>

Area	Priority Issue	Performance Speedup over K	Application	Brief description
健康長寿社会の実現	1. Innovative computing infrastructure for drug discovery	131x	GENESIS	MD for proteins
	2. Personalized and preventive medicine using big data	23x	Genomon	Genome processing (Genome alignment)
防災・環境問題	3. Integrated simulation systems induced by earthquake and tsunami	63x	GAMERA	Earthquake simulator(FEM in unstructured & structured grid)
	4. Meteorological and global environmental prediction using big data	127x	NICAM+ LETKF	Weather prediction system using Big data(structured grid stencil & ensemble Kalman filter)
エネルギー問題	5. New technologies for energy creation, conversion / storage, and use	70x	NTChem	Molecular electronic simulation (structure calculation)
	6. Accelerated development of innovative clean energy systems	63x	Adventure	Computational Mechanics System for Large Scale Analysis and Design(unstructured grid)
産業競争力の強化	7. Creation of new functional devices and high-performance materials	38x	RSDFT	Ab-initio simulation (density functional theory)
	8. Development of innovative design and production processes	51x	FFB	Large Eddy Simulation (unstructured grid)
基礎科学の発展	9. Elucidation of the fundamental laws and evolution of the universe	38x	LQCD	Lattice QCD simulation (structured grid Monte Carlo)

「富岳」 ベンチマーク 4冠達成(2020/6月、11月、2021/6月)



- 4つのランキングで世界一位を獲得
- 4部門全てで1位の獲得は史上初
- 3期連続で4冠達成！

上段	ISC2020 (2020.6.22)
中段	SC20 (2020.11.16)
下段	ISC2021 (2021.6.28)

ベンチマークテスト	1位	スコア	単位	2位	スコア	単位*1	富岳の優位性
TOP500 (LINPACK)	富岳	415.5 442.0 442.0	PFLOPS	Summit (米国)	148.6 148.6 148.6	PFLOPS	2.80倍 2.97倍 2.97倍
HPCG	富岳	13.4 16.0 16.0	PFLOPS	Summit (米国)	2.93 2.93 2.93	PFLOPS	4.57倍 5.46倍 5.46倍
HPL-AI	富岳	1.42 2.00 2.00	EFLOPS	Summit (米国)	0.55 0.55 1.15	EFLOPS	2.58倍 3.64倍 1.73倍
Graph500	富岳	70,980 102,956 102,956	GTEPS	太湖之光 TaihuLight (中国)	23,756 23,756 23,756	GTEPS	2.99倍 4.33倍 4.33倍

*1:FLOPS: **F**loating point number **O**perations **P**er **S**econd
TEPS: **T**raversed **E**dges **P**er **S**econd

消費電力でも世界1位 2019.11 Green500

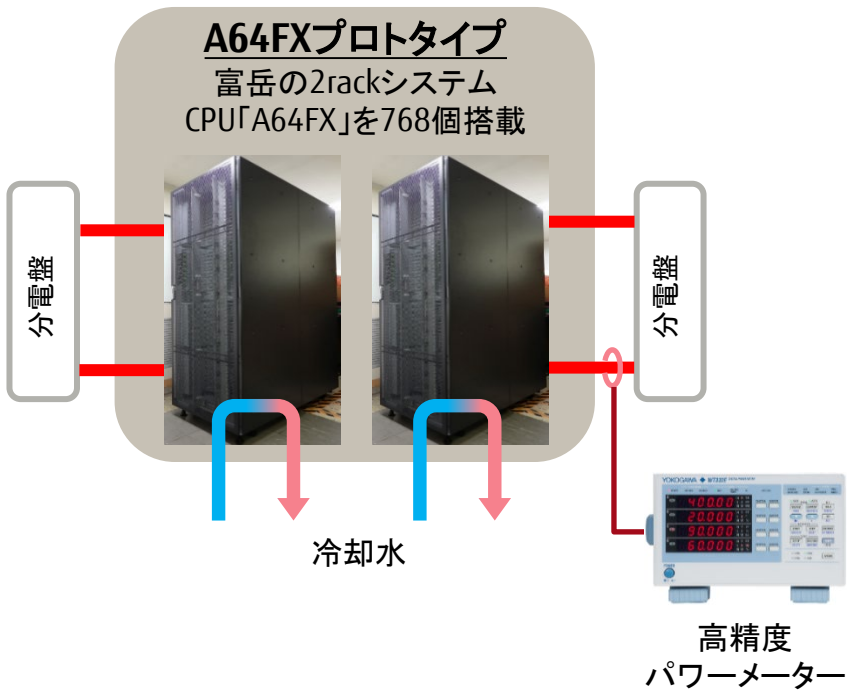
Green500 :

ベンチマークプログラム“HPL(High Performance Linpack)”の計算処理速度でTOP500にランクインしたスーパーコンピュータを、**消費電力あたりの計算処理速度**でランク付けしたものの

2019.11 Green500ランキングで

世界1位を獲得

- ✓ 1.9995 PFlops @HPL, 84.75%
- ✓ 16.876 GF/W
- ✓ Power quality level 2



■ 開発目標

- 高いアプリケーション性能・高い電力効率
- ユーザーに対する利便性の高さ
- 「京」で動作していたアプリケーションに対する互換性の維持

■ アプローチ

- 高い性能とスケーラビリティ、独自CPUコアの開発
 - 【性能】 幅広いSIMD、数学関数補助命令、高いメモリバンド幅
 - 【スケーラビリティ】 スケーラブルなTofuインターコネクトを強化
 - 【電力効率】 デバイステクノロジー、電力制御機能、最適なHWバランス
- Arm ISA採用によるArmバイナリ互換
- 性能バランスの維持と将来への拡張

「富岳」の技術的な新機軸と特長

使いやすさや広がり：業界標準の採用

- スマホやIoT機器で広く使われている**Armアーキテクチャを採用**したCPU「A64FX」を自社設計・開発
- OSはサーバ等で広く使われている**Red Hat Enterprise Linux (RHEL 8)を採用**

省電力性・高信頼性の実現：ハードウェア～ソフトウェアまで自社開発

- **CPU/システム/ソフトウェアの一体開発**による巨大システムの安定稼働、稼働率向上の実現
- **電力抑制機能**のハードウェア実装とソフトウェアによる効率的な制御
- 富士通の**CPU設計技術と7nm先端半導体技術を組合せ**、世界トップクラスの優れた電力性能を実現

アプリケーションの高速化：最先端技術の採用

- **Armのスパコン向け命令セットSVEを世界初実装**、リードパートナーとしてArm社のSVE開発にも協力
 - ・ 京の4倍の処理能力を持つ演算器(512-bit SIMD)、AIで活用されている半精度演算(FP16)を実装
- 大量・高速に演算器にデータ供給できる**積層メモリHBM2を汎用CPUでは世界で初めて採用**
- 大規模での同時並列処理を可能とする**TofuインタコネクTD開発**(「京」のTofuをエンハンス)

■ ArmアーキをHPC向けに拡張

- スパコン向け拡張命令(SVE^{*1})の策定に当社は“Lead partner”として貢献
- SVEをサポートする高性能コアを独自開発し、世界で初めて採用

■ 高いアプリ性能を実現するアーキテクチャ

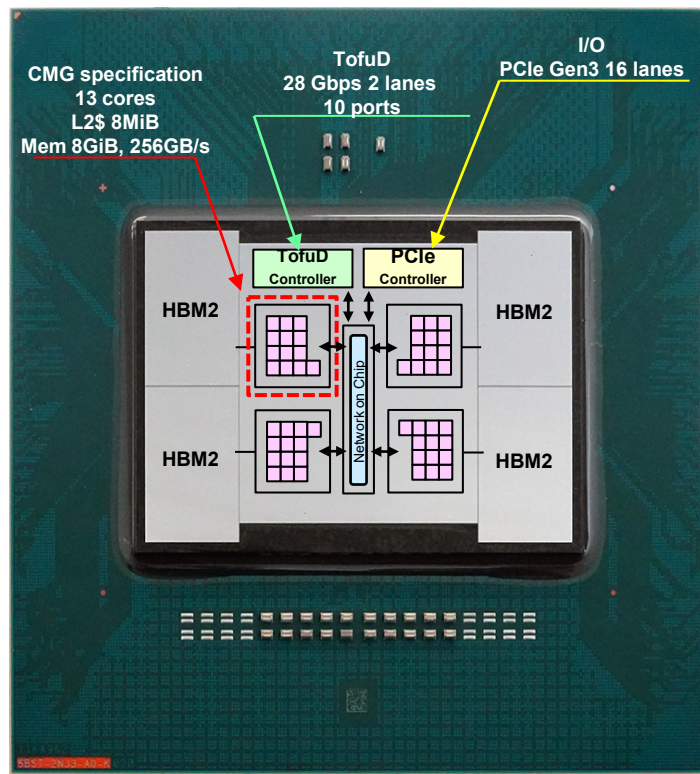
- 512bit SIMD (従来比4倍^{*2})
- HBM2の採用による高いメモリバンド幅

■ AI向け演算機能を強化

- FP16、INT16/8をサポート

*1)SVE: Scalable Vector Extension

*2)Arm NEON (128bit SIMD)との比較

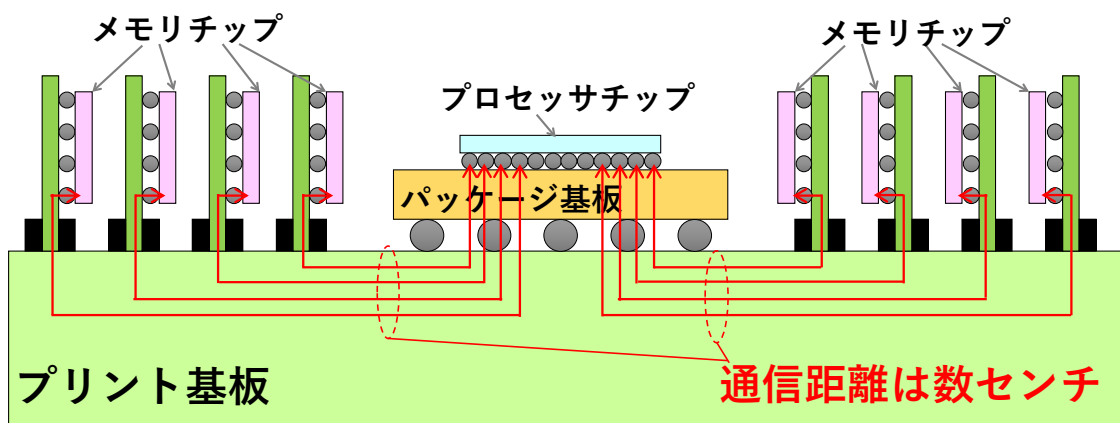


■ メモリチップをプロセッサパッケージ内蔵可能なHBM2を採用

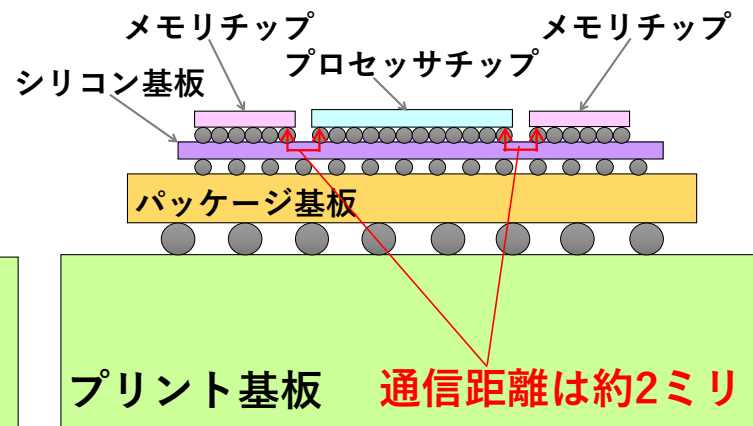
HBM2 : High Bandwidth Memory 2

- プロセッサ-メモリチップ間の伝送距離を数センチから約 2 ミリに短縮

⇒データ転送の高速化と省電力化、高密度実装化を実現



『京』のメモリ接続



『富岳』のメモリ接続

従来のTofuインターコネクトを強化

大規模システムの信頼性・運用性を大幅にアップ

■ アーキテクチャ

- 6次元メッシュトーラスのトポロジ
- リンク当たりのバンド幅: 6.8 GB/s x 双方向
- ノード同時データ転送性能: 40 GB/s x 双方向
- 集団通信 (Barrier, Reduction) をハードウェアサポート

■ 特長

- 高並列までスケールする直接結合網を採用、約39万ノード規模のスケラビリティを実現
- 通常の3次元トーラスインターコネクトの問題点を改善、高い耐故障性と運用性を実現

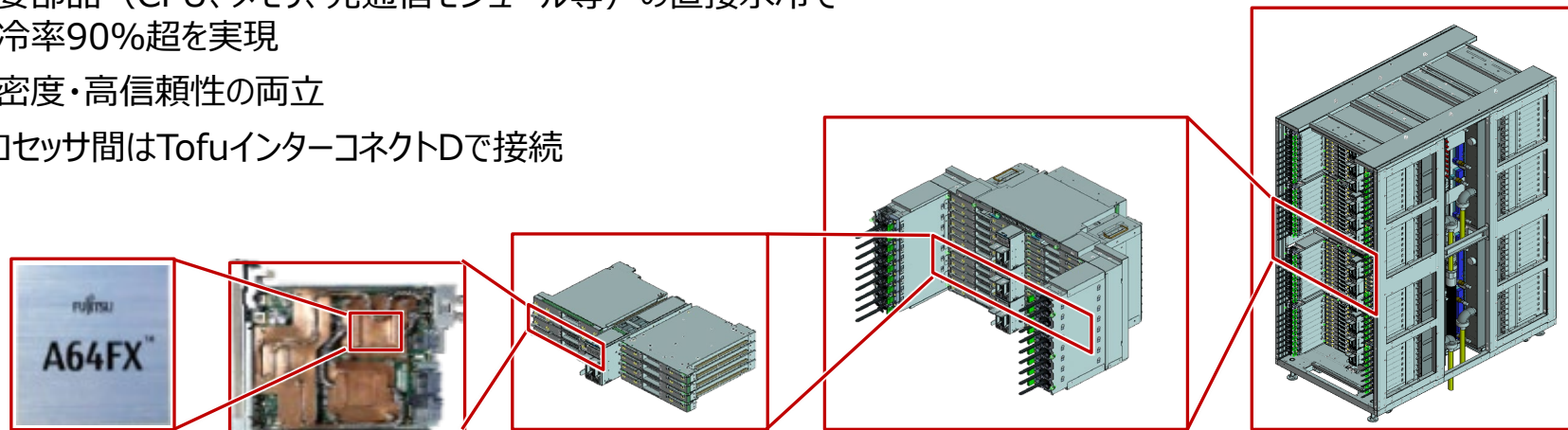


Tofuインターコネクト概念図

「富岳」のハードウェアデザイン

■ スケーラブルデザイン

- 主要部品（CPU、メモリ、光通信モジュール等）の直接水冷で水冷率90%超を実現
- 高密度・高信頼性の両立
- プロセッサ間はTofuインターコネクタDで接続



CPU

CMU

BoB

シェルフ

ラック

ノード

1

2

16

48

384

構成

CPU/主記憶

2ノード

8CMU

3BoB

8シェルフ

性能[FLOPS]

3.3792 T

6.7584T

54.067 T

162. 2T

1.2 P

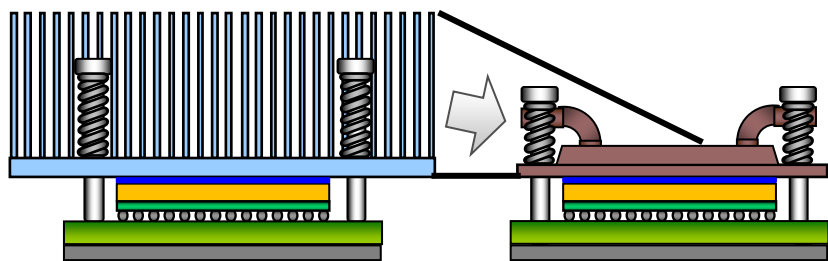
水冷のメリット（冷却部品小型化、信頼性向上）

水冷は 空冷に対し

冷却部品の**体積で10分の1以下**

冷却性能で4倍

⇒冷却部品の小型化で高密度実装に貢献



空冷ヒートシンク

体積：570cc

冷却性能：0.4℃/W以下

水冷クーリングプレート

体積：50cc

冷却性能：0.1℃/W以下

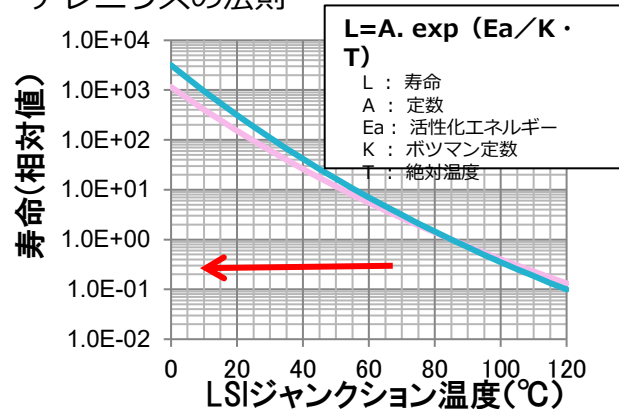
温度を**10℃下げると**

部品故障率は**約半分**に

(部品の寿命は**約2倍**に)

⇒長期間安定して使用できる

アレニウスの法則



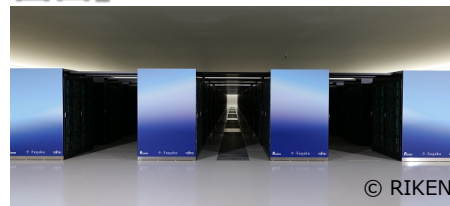
富岳を支える水冷技術、高密度実装技術

「京」



・通信距離短縮による高性能化
⇒高密度実装（とにかく詰め込む！）
京と同じスペースにCPU数は約2倍

「富岳」



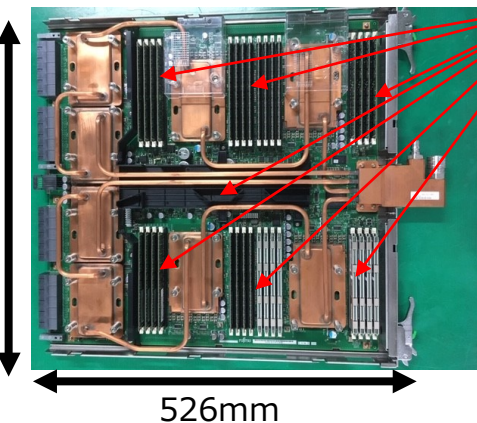
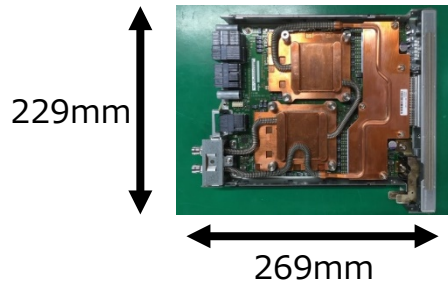
プロセッサ数: 102個/Rack x 864Rack ≒ 9万個

プロセッサ数: 384個/Rack x 432Rack ≒ 16万個

空気で冷やしている部分
(半分くらいのエリア占有)
・メモリ
・電源部品
・プリント基板（ボード自身）等

システムボードのサイズ: 約1/4
重量: 約1/4
⇒取り扱いやすさ（作業性）も向上！

富岳ではシステムボードの
完全水冷化を実現！
小型で高密度
(CPU x 4個当たりで半分のスペース)

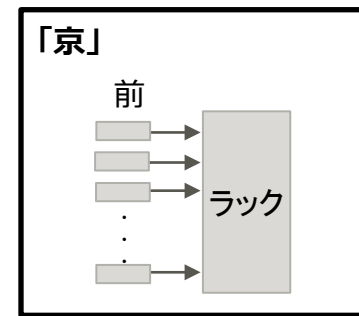
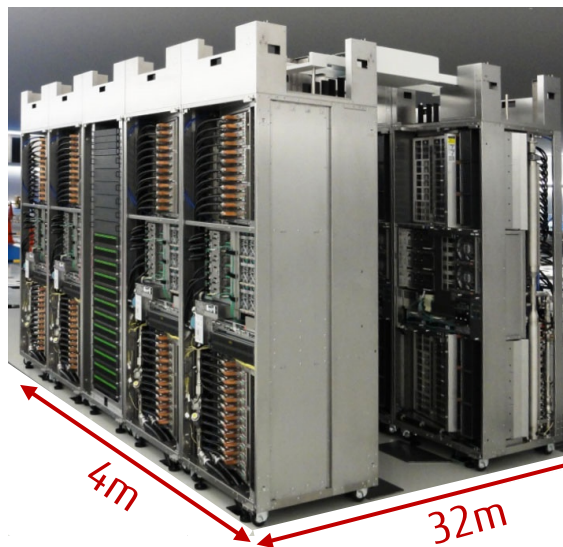
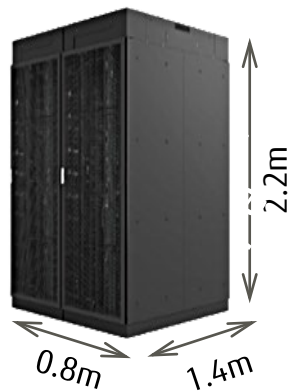
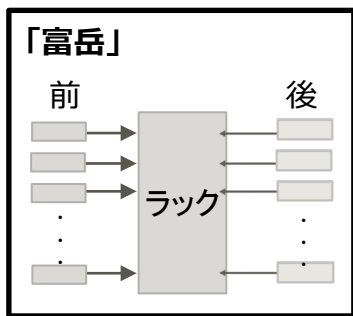


(「京」システムボード: 約14kg)

(「富岳」CMU: 約3.3kg)

高密度実装/設置面積

仕様・諸元	「富岳」	「京」
理論演算性能	537PF	10PF
ラック数	432	1,080
ラックサイズ	W800 × D1,448 × H2,200	W800 × D950 × 2,475
設置面積 (保守エリア除く)	約500㎡	約800㎡



■ A64FXの性能を引き出す開発環境を提供

「富岳」

開発環境

- コンパイラ
- 通信ライブラリ
- 数学ライブラリ
- プロファイラ 等

FUJITSU Software Compiler Package

- Fujitsu Compiler
- MPI
- Fujitsu SSL II, BLAS/LAPACK/ScaLAPACK
- Profilers 等

HPCミドルウェア

- ジョブスケジューラ
- ファイルシステム
- クラスタ管理 等

Technical Computing Suite

- システム運用管理
- ジョブ運用管理
- 電力管理

FUJITSU Software Technical Computing Suite

- FEFS(Fujitsu Exabyte File System)

OS

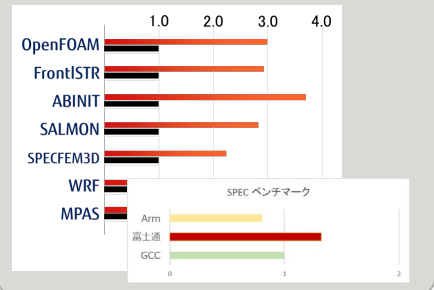
Red Hat Enterprise Linux 8

ソフトウェア - 「世界最高性能」への挑戦

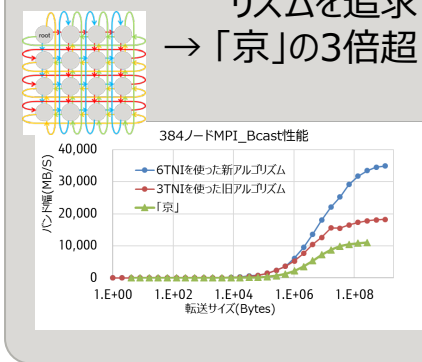
■ スパコン開発40年の技術を継承・発展



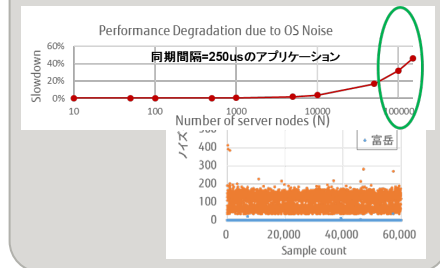
同じプログラムもダントツに高速実行
→ 最適化技術



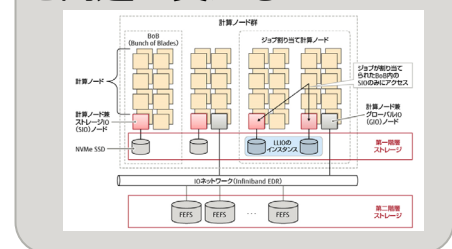
Tofu特性を活かすアルゴリズムを追求
→ 「京」の3倍超



数の暴力との闘い(1)
→ 16万CPUの歩調の乱れを100万分1秒単位で補正



数の暴力との闘い(2)
→ 1万台のSSDをキャッシュとし16万台からのI/Oを高速に支える



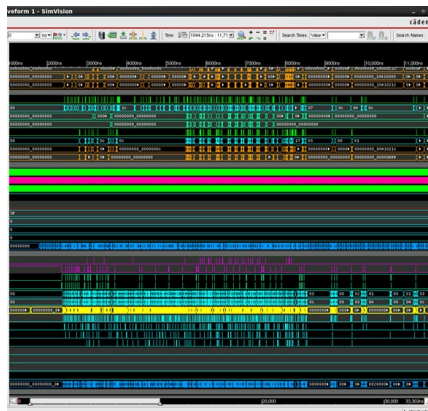
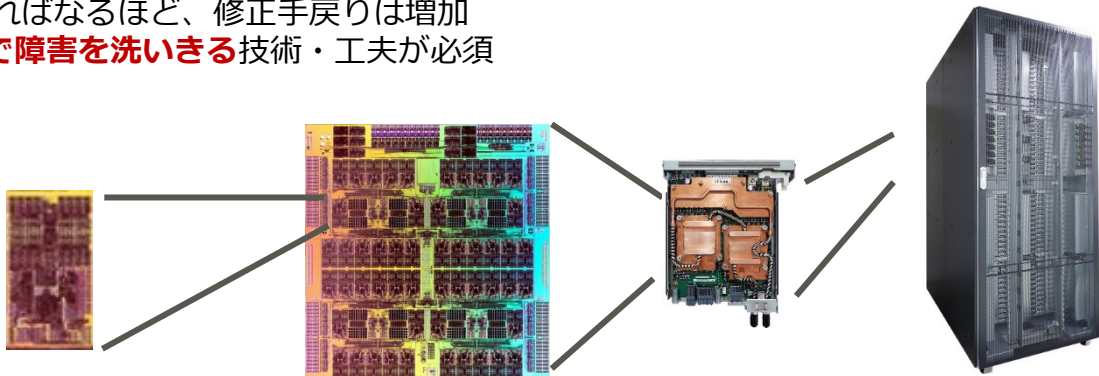
ハード・ソフト技術者が「連携」し前人未踏の「4冠」を達成



「富岳」開発から導入

CPU開発、検証、試験の流れ

- CPU設計データは論理ゲートやブロックの接続、あるいはRTL記述言語(ex. Verilog-HDL)で技術者が手入力
- 小さいところから徐々に組み上げて大規模、複雑な論理を検証
- 後工程になればなるほど、修正手戻りは増加
→ **上流工程で障害を洗いきる**技術・工夫が必須



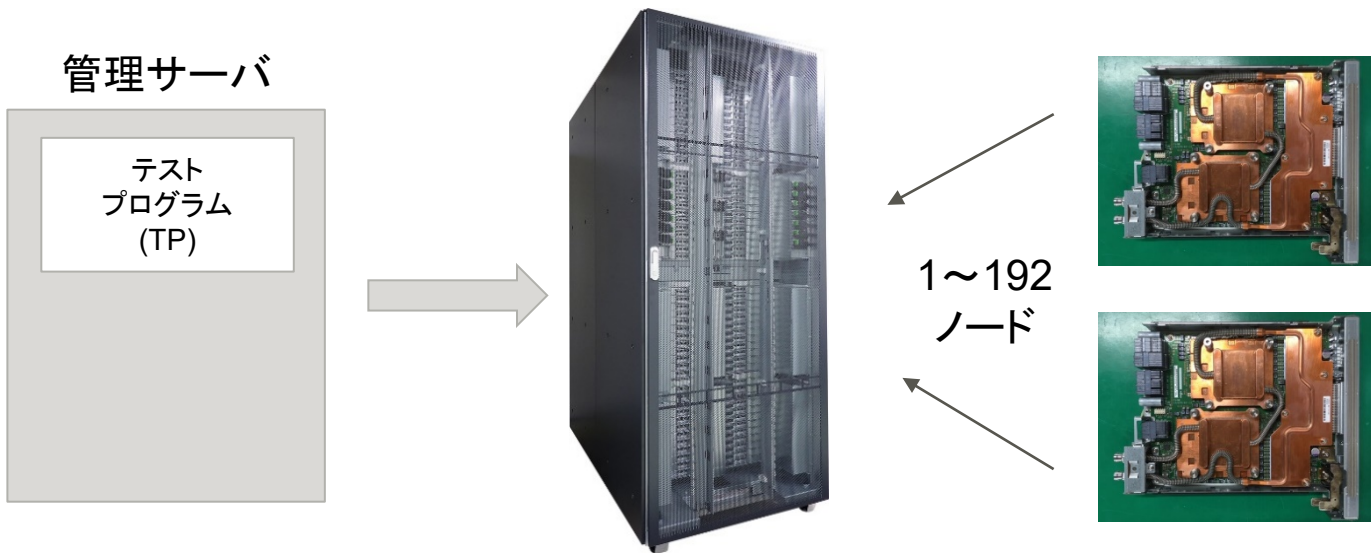
シミュレータ・エミュレータ動作
波形

	単体検証	結合検証	システム検証	試作機試験
検証対象	モジュール単体 ~100k Gates	モジュール間結合 1MG~100MG	1~3ノード 100MG~	3ノード以上
対象仕様	詳細仕様	詳細仕様+I/F仕様	システム仕様	システム仕様
検証基盤	シミュレータ フォーマル	シミュレータ エミュレータ	エミュレータ	試作機
手戻り	数時間	数日	一週間	数ヶ月

A64FX(実物)で初めてOS起動成功@川崎 2018.5~



- 目的に応じて1~192ノードの試験環境を構築
- システム検証と同様に、テストプログラムを走行させて結果を判定
 - CPUだけでなくメモリやIOも本物



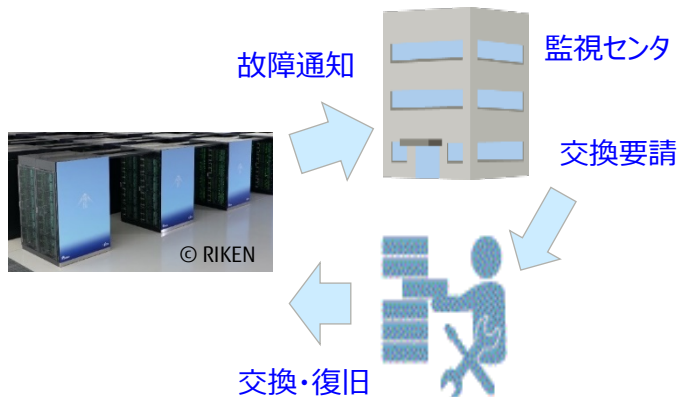
■ 最先端テクノロジー部品の品質確保と安定稼働

正常動作確認



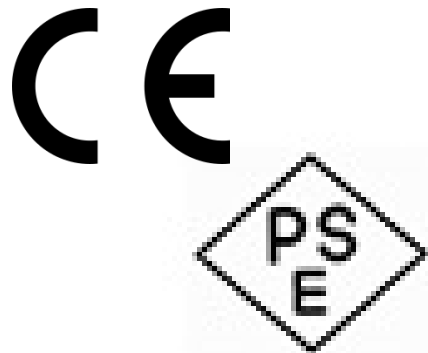
- 設置環境/装置高負荷テスト
(低温5℃/高温40℃で
高負荷テストプログラム走行)

故障時の通知・復旧確認



- 故障箇所指摘・通知
- 交換・復旧ができる

法規制・安全性確認

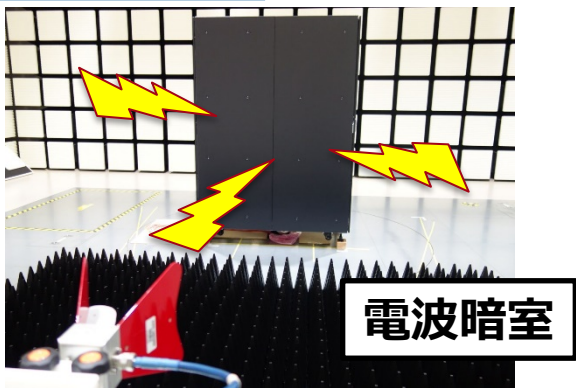


- 安全規格
発煙、発火、静電気、
放射妨害波など

■ 耐久性試験・環境評価

環境試験センターで電波/振動/騒音試験を実施。

電波試験 神奈川県新川崎

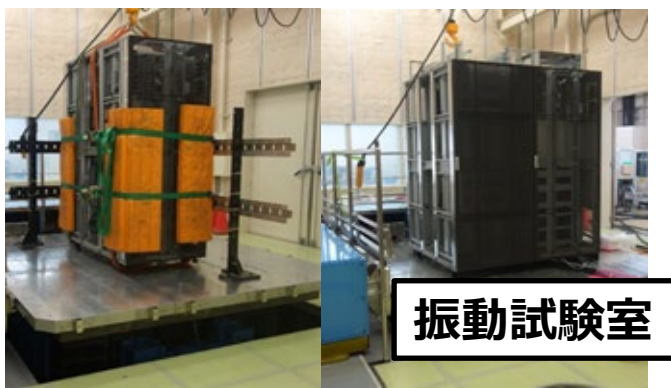


- 製品から発生するノイズの測定
- 外部からのノイズによる影響を確認

※：EMC試験

(Electro Magnetic Compatibility)

振動試験 静岡県沼津



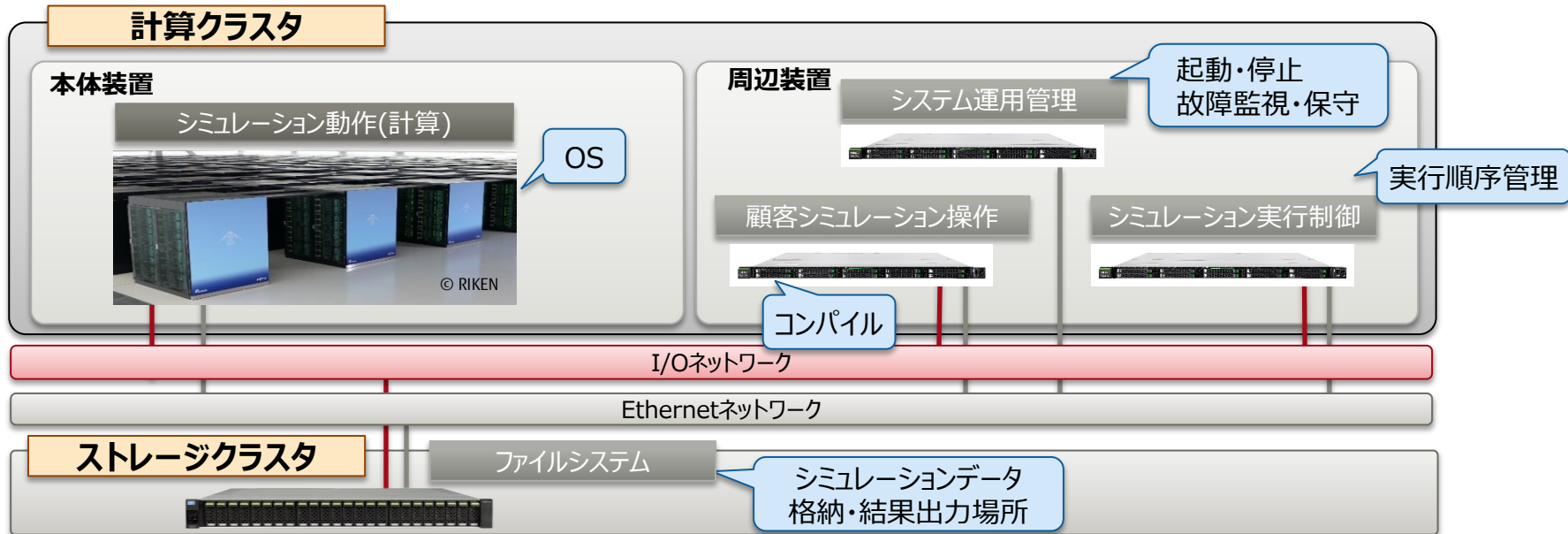
- 製品が地震や輸送の振動に耐えられるかを確認

騒音試験 静岡県沼津



- 製品からの騒音を測定

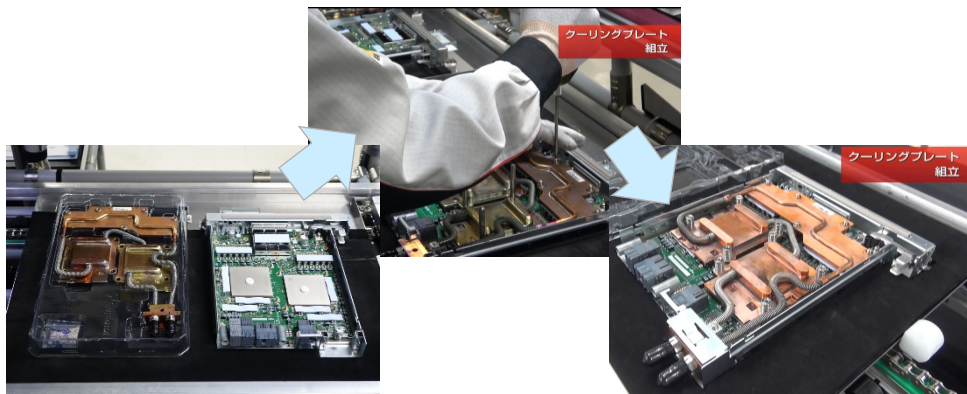
- システム運用を想定した環境で検証を実施
 - ・各種プロダクト製品（ハードウェア/ソフトウェア）の組み合わせテスト
 - ・顧客運用環境で想定される異常系を中心としたシステム信頼性検証
 - ・運用者/利用者の使いやすさ(システム導入/保守)



■ 短納期・大物量の量産を実現

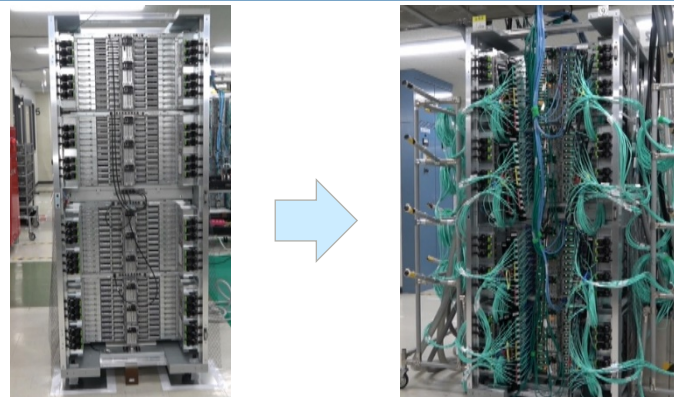
京を撤去した場所に富岳を設置するため、利用できない期間を短くしたい(研究がストップ)
プロセッサ数は京の2倍でも量産期間は11ヶ月→7ヶ月とこれまで経験のない製造能力が必須

プロセッサ搭載ユニットを3分/枚で組立



- ネジ締めなどの作業数を可能な限り削減
- 誰でも組立できる組立手順・構造

正常動作の確認



- 全コネクタ試験するケーブル接続方法確立
- 止まらない自動試験システム構築
- 作業員への障害有無の通知

「富岳」出荷開始

■ 2019.12.2 「富岳」の筐体出荷を開始

～ 世界各地でロックダウン～

- ◆ サプライチェーンの見直し(経路等)
- ◆ サプライヤとの作業分担見直しによる納期リカバリ
- ◆ 製造・組み立て順序を見直し欠品の影響を最小限に
- ◆ 代替品の国内製造なども検討



■ 2019.12.3 「富岳」搬入開始

- ◆ 理研の方々も「富岳」の搬入を建屋ら出て来てくださり、初号機の搬入をみんなで見守っている光景です。



「富岳」搬入開始から限定アプリの利用開始

■ 2020.4.7 COVID-19対策を目的とした「富岳」の優先的な試行的利用

- ◆ 導入中の一部の計算リソースをCOVID-19対策に利用
- ◆ 富士通試験の隙間(夜間)に実行することも検討

The screenshot shows the RIKEN website's news section. The main headline is "新型コロナウイルス対策を目的としたスーパーコンピュータ「富岳」の優先的な試行的利用について" (Regarding the preferential trial use of the supercomputer 'Fugaku' for COVID-19 response). The article text states that RIKEN is collaborating with the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to develop and optimize the supercomputer 'Fugaku' for COVID-19 research. It also mentions that RIKEN will provide technical support for the research.

スーパーコンピュータ「富岳」(開発・整備中)

https://www.riken.jp/pr/news/2020/20200407_1/index.html

■ 室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策

- <https://www.r-ccs.riken.jp/jp/fugaku/corona/projects/tsubokura.html>

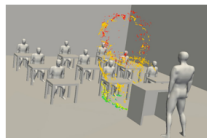
室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策（課題
代表者；理化学研究所/神戸大学 坪倉 誠）

この課題について

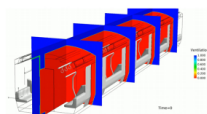
新型コロナウイルスは、せきやくしゃみ、声を出すことなどで発生する飛沫のほか、これらの飛沫のうち非常に小さいものであるエアロゾルによっても感染が広がる可能性が示されています。感染のリスクを評価し予防対策を行うためには、こうした飛沫やエアロゾルの飛散経路を正しく推定する必要があります。

飛沫やエアロゾルの飛散経路は空気の流れや湿度、温度などの複合的な影響を受けるため、その推定には膨大な計算が必要になります。そこで、理研が開発し、「富岳」に実装を進めている超大规模熱流体解析ソフト「CUBE」を使って、これまでの計算機では困難だった高精度で大規模な飛散シミュレーションを実施します。

通勤列車内、オフィス、教室、病室といった室内環境においてさまざまな条件下で感染リスクを評価し、空調や換気、パーティションなどを活用したリスク低減対策を提案するほか、シミュレーションの結果を動画化し、飛沫が具体的にどのように広がるのかを視覚的に理解できるようにすることで、感染防止に向けた認識や理解を広く普及させることが可能です。



教室における飛沫飛散シミュレーションの例（京都工芸繊維大学 山川提供）



通勤列車モデル

■ 「富岳」における新型コロナウイルスの治療薬候補同定

- <https://www.r-ccs.riken.jp/jp/fugaku/corona/projects/okuno.html>

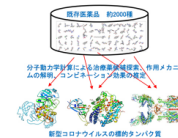
「富岳」による新型コロナウイルスの治療薬候補同定（課題
代表者；理化学研究所/京都大学 奥野 恭史）

この課題について

新型コロナウイルスには、増殖に欠かせない働きをするタンパク質がいくつかあります。それらに薬剤（化学物質）を結合させて働けないようにすることで、ウイルスの増殖を抑えることが可能です。

そこで、今ある治療薬の中から新型コロナウイルスに効果のある薬剤を探す研究が進められています。ここでは、どのような薬剤がウイルスの増殖に関係するタンパク質に結合しやすいか、物理や化学の法則に従って計算し、コンピュータの中でさまざまな組み合わせを試していきます。

「富岳」の計算能力を使えば、国内外で試験が行われている抗ウイルス薬に限らず、今あるさまざまな医薬品の中から広く治療薬の候補を探すことができます（2000種類を予定）。また、複数の候補を同時に計算できるため、2つ以上の薬を同時に使う場合の効果が変わる可能性があります。さらに、分子レベルでタンパク質と薬剤の結合の様子が明らかになることで、薬剤がどんなメカニズムによって効果をもたらすのかがわかってきます。それによって効果の高い新しい薬剤の開発を加速することができます。



「富岳」完成

■ 2020.5.13「富岳」の筐体搬入を完了

- ◆ COVID-19 感染なし、遅延無し、計画通りの製造・搬入完了
- ◆ COVID-19対策
 - ・保守要員以外は計算機棟への立入禁止
 - ・理研職員との接触回避(食堂利用禁止..)

■ 2020.5～ ISC2020 ベンチマーク開始

- ◆ ハードウェア保守を除き、リモートによる作業

2020年5月14日

理化学研究所

[← 前の記事](#) [↑ 一覧へ戻る](#) [→ 次の記事](#)

「富岳」の筐体搬入が完了しました

[英語ページ](#)

スーパーコンピュータ「富岳」は、2019年12月3日より計算科学研究センターへの設置が進められてきましたが、5月13日をもって、すべての筐体の搬入が完了しました。

新型コロナウイルス感染拡大による困難な状況の中、富士通株式会社をはじめとする関係者が工夫を重ね、予定どおり搬入を完了することができました。今後、2021年度の共用開始を目指し、各種の調整作業等を行っていきます。

なお、理化学研究所（理研）は、文部科学省と連携し、新型コロナウイルス感染症対策に貢献する研究開発に、調整作業中である「富岳」の計算資源を可能な限り供出し技術的サポートを行う取組を行っており、現在、5つの研究課題が実施されています。

理研としては、今後も、「富岳」が科学の発展のみならずSociety5.0の実現に貢献するイノベーションの面でも大きな成果が創出されるよう取り組んでまいります。



5月13日現在の「富岳」。今後パネルを装着予定。

https://www.riken.jp/pr/news/2020/20200514_1/index.html

COVID-19対策とベンチマークの成果へ

■COVID-19対策

予
防
対
策

- リモート作業を大前提に、現地作業は最低限に
- 通勤も3密を避け、徒歩移動も
- 居室やトイレを分離、動線も分けてリスクを低減
- 検温記録・手指消毒・マスク等、ルール徹底

感
染
影
響
最
小
化

- 2班以上に分け、バックアップ可能とする体制
- 消毒等の範囲・手順も事前にシミュレーション

感染なし、遅延無し、計画通りの製造・搬入完了

■ベンチマーク測定はリモート密連携で成功

理研/富士通のベンチマークプログラム最適化チーム

密な連携（リモート）

富士通の事業部、SE、CE部隊

理研施設オペレーションチーム

リモート会議でベンチマークをリアルタイムで見守る22名...5/29 21:50頃



役割	対応者	総人数
指揮官	2	6
システム構築・ソフトウェア保守	3	22
ハードウェア保守	4	21
ベンチマーク	1	3
合計	10	52

主要ベンチマークテストで4冠達成 (2020.6.22)



2位に対して
2.8倍の性能



2位に対して
4.6倍の性能



2位に対して
2.6倍の性能



2位に対して
3.0倍の性能



最後に


■ スーパーコンピュータ「富岳」

- CPU/システム/ソフトウェアの一体開発による巨大システムの構築・安定稼働
- 遅延無し、計画通りの製造・搬入完了

■ 「富岳」ベンチマーク4冠達成

- 世界最高速の計算性能は社会課題や科学技術分野の問題解決への貢献，ビッグデータやAIなどの幅広い分野での活用に貢献できると期待

富士通はスパコンの生み出す成果を通じて、豊かで夢のある未来を世界中の人々に提供することを目指します。デジタル時代を迎え、高いシミュレーション・AI処理能力を有するスパコンは、より一層、様々な分野での活用が広がると考えています。



FUJITSU

shaping tomorrow with you

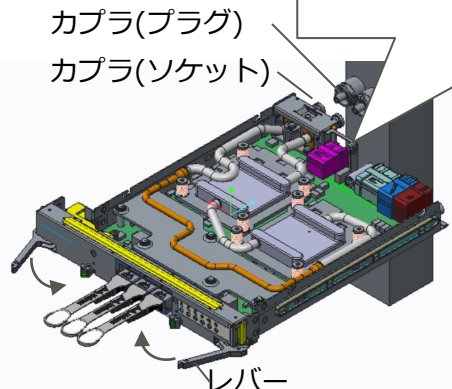
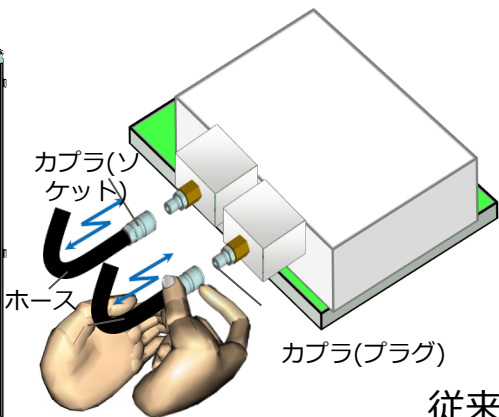
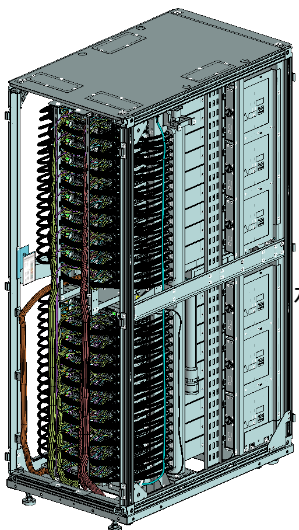
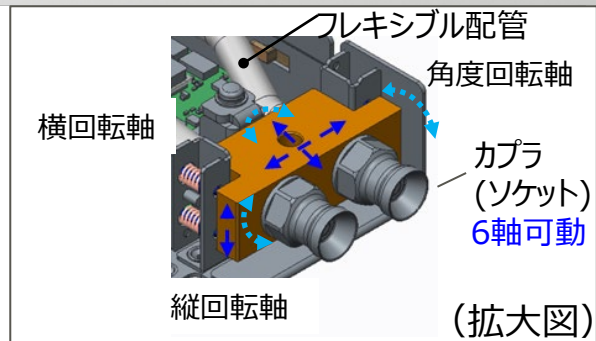
代表的なスパコンベンチマーク

- TOP500(LINPACKベンチマーク)
 - 理工学で一般的な連立一次方程式(密行列) $Ax=b$ を解く速度を測定。
 - 各国のスパコンサイトが測定結果をTOP500に登録。1993年より上位500のリストを6月、11月に公開。
- HPCG: High Performance Conjugate Gradient Benchmark
 - 反復法を使い、疎な係数行列の連立一次方程式を解く速度を評価。
 - 実アプリに現れる様々な種類の処理が含まれ、より実アプリに近い評価を目指している。
- HPL-AI
 - 半精度(16ビット浮動小数点)演算を活用して連立一次方程式を解く速度を評価(半精度演算はAI系で多用される演算)。2019年11月に制定された新しいベンチマーク。
- Graph500
 - 通信性能やメモリへのランダムアクセス性能を測るデータインテンシブなベンチマーク
 - 大規模グラフの幅優先探索、単一始点最短経路算出の性能を評価。
- Green500
 - TOP500に登録されたLINPACK性能測定時の消費電力によりスパコンの電力効率を評価。
 - 1Wあたりの実効演算性能でランク付けし、エネルギー効率を競う。

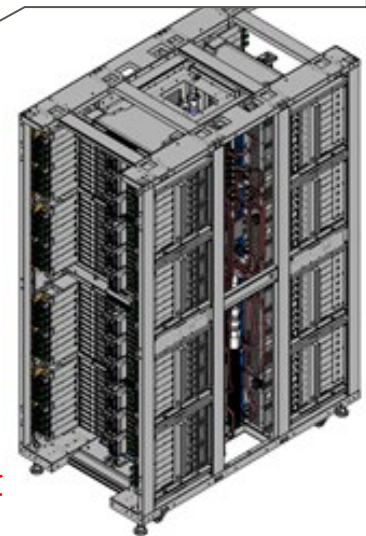
高密度実装を実現するためのホースレス構造

■ プロセッサ/通信素子実装スペースの拡大

- 従来、配管やホースで全体の1/4、スペース占有
⇒プロセッサ/通信素子に振り分けて高密度化



従来、人の手で位置合わせ (位置ずれ吸収)
⇒カプラ及びその支持機構を工夫して
電源・信号のコネクタと、冷却水のカプラを
まとめて同時接続



ソフトウェア – エコシステム構築し使いやすさを追求

■ Arm HPCエコシステムを構築→ハード・ソフト・様々な情報を世界中に流通

