スーパーコンピュータ「京」を支える建築・設備技術

Construction and Facilities Technologies for the K computer

● 関口芳弘

あらまし

「京」を収容し電力や冷熱を供給する設備は，ほかの施設にはない数々のユニークな特徴を持っている。例えば，柱のない広大な計算機室であり，無停電電源装置(UPS)を使わずコジェネレーション発電機と高速限流遮断器を組み合わせて同等な機能を持たせた電源システムであり，計算機室壁面に分電盤を並べずフリーアクセスの床下に設置した分電盤であり，高効率で非常に静かな空調機であり，正確に温調されたCPU冷却水設備などである。これらは全て「京」のインストールを迅速かつ容易にし，安定かつ安全に稼働させるために採用した方策である。これらの取組みは，ユニークではあるが新たな技術の開発や，最新の技術を採用したものではない。既存の技術，こなれた技術，枯れた技術，つまり安定的に使える技術を新たな発想でうまく組み合わせていくことにより実現したものである。限られた期間，限られた予算の中でのプロジェクトでは，あまりにチャレンジングな技術は採用できないのである。本稿では，「京」の建築・設備においてどのような建設技術を用いたのかについて述べる。

Abstract

The facilities for housing the K computer and for cooling and supplying power have many features not found in other supercomputer sites. These include an expansive, pillar-free computer room, a power supply system that combines the functions of a cogeneration system (CGS) and a high-speed current-limiting circuit breaker without using an uninterruptible power supply (UPS), distribution boards installed under a raised floor instead of on computer-room walls, extremely quiet, high-efficiency air conditioning equipment, and a cooling-water system for CPUs featuring precise temperature control. These features are part of a policy that was adopted to ensure quick and easy installation and stable and safe operation of the K computer. The application of these unique features did not require the development or adoption of new technologies. It was accomplished by cleverly combining existing, proven, and mature technologies having a stable reputation, since a development project limited in time and budget should not adopt novel and unproven technologies. This paper describes the construction and facilities technologies supporting the operation of the K computer.

ま　え　が　き

「京」を収容する建物は2010年5月末に完成，引渡しを受けた。また，「京」に電力と熱を供給するコジェネレーションシステム（CGS）は2011年1月末に完成，引渡しを受けた。「京」本体は2010年9月末より建物に設置が開始され，2011年8月末までで全ての筐体の設置が完了したが，この間設置状況に合わせて電力の供給を行い，熱源や冷却設備などを立ち上げてきた。また2011年4月からはCGSの24時間連続運転を開始した。

CPU冷却水フレキシブルパイプの折れ曲がり発生などいくつかの初期不良や，筐体増加に伴い徐々に出力を上げていく過渡的な運転のための難しさはあったが，「京」の設置および試運転調整には支障なく設備類の運転を継続している。

本稿では，「京」を安定かつ安全に稼働させるために本施設に採用した特徴的な建築・設備技術について説明する。

柱のない広大な計算機室

「京」本体が置かれる計算機室は3000 m^2（60 m×50 m）に及ぶ広大な空間を有している（**図-1**）。東側には600 m^2の準備室（倉庫）が設けられているが，壁は撤去可能であり，最大3600 m^2（60 m×60 m）までの拡張が可能である。これはおおむね公共の体育館の2倍の広さである。

この広大な計算機室を「柱なし」で構成した。これにより計算機の配置上の制限がなくなり，自由に計算機室をレイアウトすることができる。無柱とするために，二つの技術を用いた。

図-1　3階計算機室（「京」搬入前）

（1）免震構造

地震が来ると，一般の建物は地震によってひねられる。ひねられて建物が壊れることを防ぐために，柱や梁（はり）を太くしたり，柱の本数を多くしたり，筋交い（ブレース）をたくさん入れたりしなければならない。ところが免震構造にすると，ほぼ水平に揺れるだけになるため，ひねりに抗しなくてもよくなるのである。

計算機棟は，49台の積層ゴム免震装置で支えられている｛**図-2**（a）｝。この免震装置が中心から最大70 cm変位することによって，地震動を建物に伝えにくくする。免震装置により計算機棟内での最大加速度は200 Gal以下に抑えられ，計算機筐体の転倒を防ぐ。この耐震レベルは，防災拠点や拠点病院など地震後に機能維持が必要とされる建物と同等である。震度5程度の中規模地震では無被害，震度6強の大規模地震でも小破程度に抑えられ，建物の主要な機能は確保される。免震設計に当たっては，建築基準法で決められた地震波モデルはもちろん，観測波や東南海地震で想定される地震波においてもシミュレーションを行い，安全性を確保した。

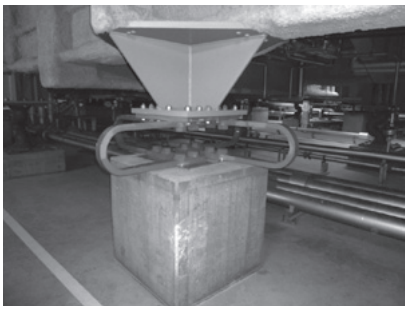
積層ゴム免震装置だけで構成すると，地震が収まったあとも建物はゆらゆらと揺れ続けてしまう。それを抑え，振動を早期に収束させるために，2種類のパッシブ型制振装置（ダンパ）も併せて設置してある｛図-2（b）鉛ダンパ，図-2（c）鋼製ダンパ，28台ずつ｝。二つのダンパを併用しているのは，それぞれの材料特性によって降伏点・初期剛性が異なるため，相補っていろいろな地震波に対して良好な特性を発揮させるためである。また，これら二つのダンパの向きは，設置場所によって様々な方向を向いている。それも地震波の向きによって特性が変わらないように考慮したものである。

（2）橋梁（きょうりょう）技術

「京」本体を収容する計算機室は3階となる。高い位置に作られる大きな計算機室を無柱化するために，橋梁に使われる技術を用いた。計算機棟の断面を**図-3**に示す。3階計算機室と2階空調機械室の部分に着目していただきたい。2階空調機械室に三角形のトラス構造を見ることができる。 計算機

（a）積層ゴム免震装置

（b）鉛ダンパ



（c）鋼製ダンパ

図-2　免震装置

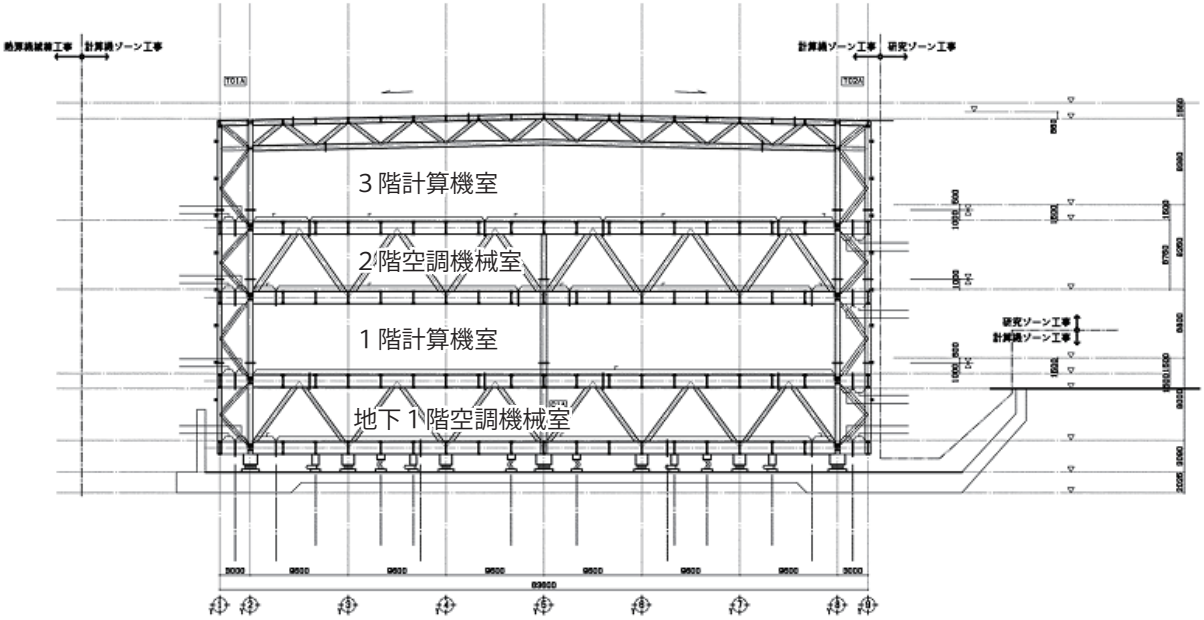


図-3　計算機棟断面図

室はこのトラスによって支えられている。つまり，計算機室は幅60 m長さ60 mの「トラス橋」でもある。

UPSなしでの停電・瞬低対策

● CGSと高速限流遮断器による停電対策

データセンターでは一般的にノンダウン化が求められ，無停電電源装置（UPS）の設置や電源などを冗長化構成とする場合が多いが，本施設は一部の重要負荷（外部からネットワークを通じて情報のやり取りを行うフロントエンド設備，データを保存するストレージ部分，研究の継続が必要な研究棟部分）のみを停電保護対象とする条件で

計画された。一部の重要負荷とはいえ，保護対象負荷の需要電力は設計時想定で5000 kW以上もあり，一般の蓄電池式UPS設備ではイニシャルコストの増大，設置場所の確保，数年ごとの蓄電池の交換などランニングコストの増大などから，採用は困難であった。また，大規模計算設備においては，停電後計算機のシャットダウンに要する時間は，UPSでの保護時間（5 ～ 10分間）では完了せず，蓄電容量が全く不足している問題もあった。

そこで重要負荷系統への電源供給としてCGSと高速限流遮断器を組み合わせ，これをUPSとして使い，停電および瞬時電圧低下（以下，瞬低）対策を行う。[1] **図-4**に示すように，CGSを常時運転し，施設全体に電力を供給する。不足の電力については商用電源から供給する。停電および瞬低時には，高速限流遮断器で商用系統とCGS系統を高速遮断し，重要負荷へ影響を抑制するとともに，CGSを保護する。以上のように冷却設備を含めた計算機の停電および瞬低保護を行うシステム構成とした。

● 遅延釈放型電磁開閉器による瞬低対策

「京」本体の消費電力は最大1万kW以上にもなるため，その冷却系の電力も含めるとCGSでの保護も現実的ではなく，商用電源で稼働せざるを得ない。それであっても極力停止しない方策が求められた。

立地点での瞬低の実績は年3，4回程度であり，その電圧降下は小さく継続時間も短い軽微な瞬低である場合が多い。一般的にスパコン自体の回路には多数のコンデンサが組み込まれているため，短時間での瞬低ではスパコンは停止しない（～ 0.1秒程度と想定）。軽微な瞬低においても影響を受けやすいのは，冷凍機や空調機を駆動する動力盤に組み込まれた電磁開閉器であることが分かった。すなわち，軽微な瞬低においてスパコン自体は生き残るが，電磁開閉器が解放されてしまうため冷却系が停止し，結果としてスパコンも停止してしまうのである。

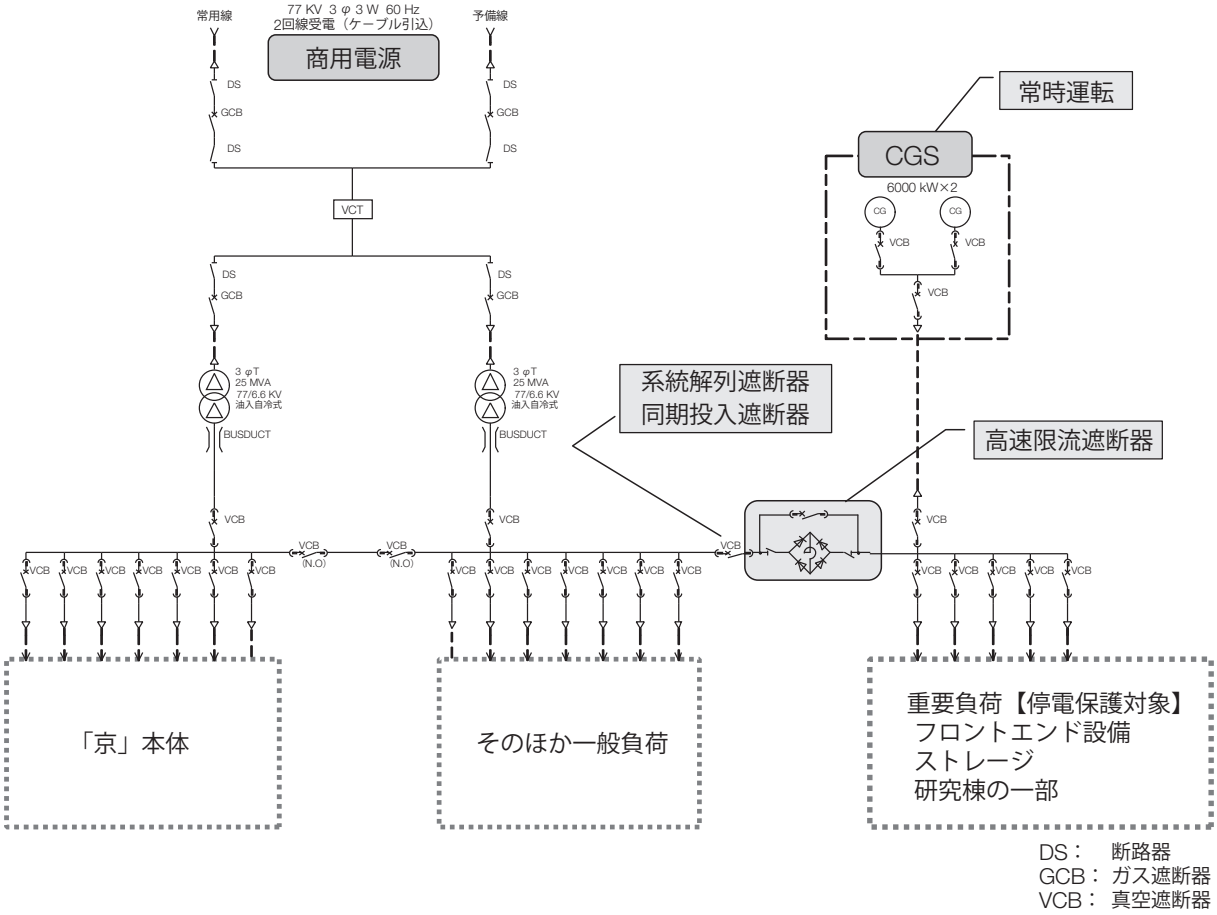


図-4　特高施設（単線結線図）

そこで，軽微な瞬低で「京」を停止させないために，動力盤に1秒間接点の閉路状態を保つことができる遅延釈放型電磁開閉器を採用した。これにより軽微な瞬低では冷凍機，空調機を停止させることがなくなり，「京」の稼働率を上げることに貢献できる。

筐体設置を容易にする床下分電盤

従来，計算機室の電源供給は壁面に分電盤を立て，そこから計算機へとケーブル配線を行うものであった。しかし，前述のように「京」本体を収容する計算機室は3000 m^2もの広大な空間であるため，必要な面数の分電盤を壁面に立てることができない。壁の長さは面積の平方根でしか長くならないからである。このため，従来の電源供給方式では壁面スペースが足りず，別途分電盤室の設置が必要となり，配線亘長（電線路の指定された区間の距離）も長くなるなど合理的な計画とならない。そこで計算機用配線スペースであるフリーアクセスフロア内（床下）を利用し，計算機1ユニットごとに分電盤（開閉器盤）を分散設置して，計算機に電源を供給する方式を採用した（**図-5**）。

世界と開発競争をしているスパコンであるので，筐体のインストールにかかる期間の短縮も必要となる。「京」の各ユニット設置位置の直下に分電盤があれば，筐体設置後すぐに電源を接続することができる。接続配線長も短くすることができ，電源の信頼性も増す。かつ，各ユニットと床下分電盤が直近にあるため，電源の投入，遮断に際しての誤操作も防ぐことができ，安全性も増す。

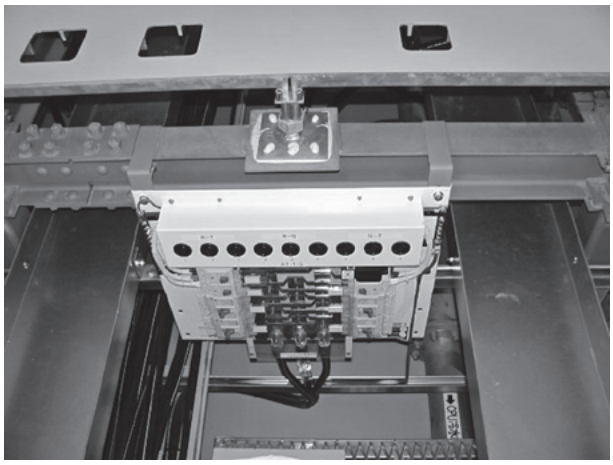


図-5　床下分電盤

床下分電盤方式を採用することにより，壁面に分電盤を並べる必要がなくなった。これにより計算機室のイメージが，従来の計算機室とは全く違った印象を持つこととなった。無機的で機械室のような印象は払拭（ふっしょく）され，整然とすっきりとした印象となり，「京」をより引き立たせる意匠とすることができたと考える。

高効率な空冷・水冷併用冷却システム

● 全圧の有効利用

計算機が設置されるフリーアクセスフロアの高さ（深さ）は1.5 mとってある。このフリーアクセス空間を配線スペースとしてだけでなく，CPU冷却水の配管スペースや冷却空気のサプライチャンバとしても使っている。一般的なデータセンターのように計算機室面積がさほどでもなければ，空調機は計算機室周りに同一平面的に設置可能であるが，3000 m^2もの大空間に均一的に冷風を送るためには，空調機を計算機室直下に配置せざるを得ない。上階に計算機室，下階に空調機械室という配置となるが，上下階には冷却空気が循環するため，建築基準法上1フロアとなっている（**図-6**）。

風速が速いほど，圧力損失が大きいほど空調動力は必要となる。本施設においては，空調機を計算機室の直下階に設置し，計算機直下のフリーアクセス内に直接吹き込む構造とした。フリーアクセスからコールドアイルまでは冷風を高速に吹き込み，計算機を冷却したあとホットアイルからはゆっくりと，リターンエアーチャンバー（RAチャンバー）経由で，下階の空調機室へと戻す。これによりダクトを最短とし，ダクト損など損失エネルギーを低減することができた。フリーアクセス内へ直接吹き出すため，静圧のみならず動圧も有効利用し，空調機の全圧効率全てを活用したシステムとなった。

● 高効率プラグファンの採用

通常の空調機に用いられるベルト式シロッコファンの効率は30％程度にとどまる。今回採用したダイレクトドライブプラグファンの全圧効率は70％にもなる。これによりファンモータの容量＝消費電力をシロッコファン方式に比べ半分以下にすることができた。

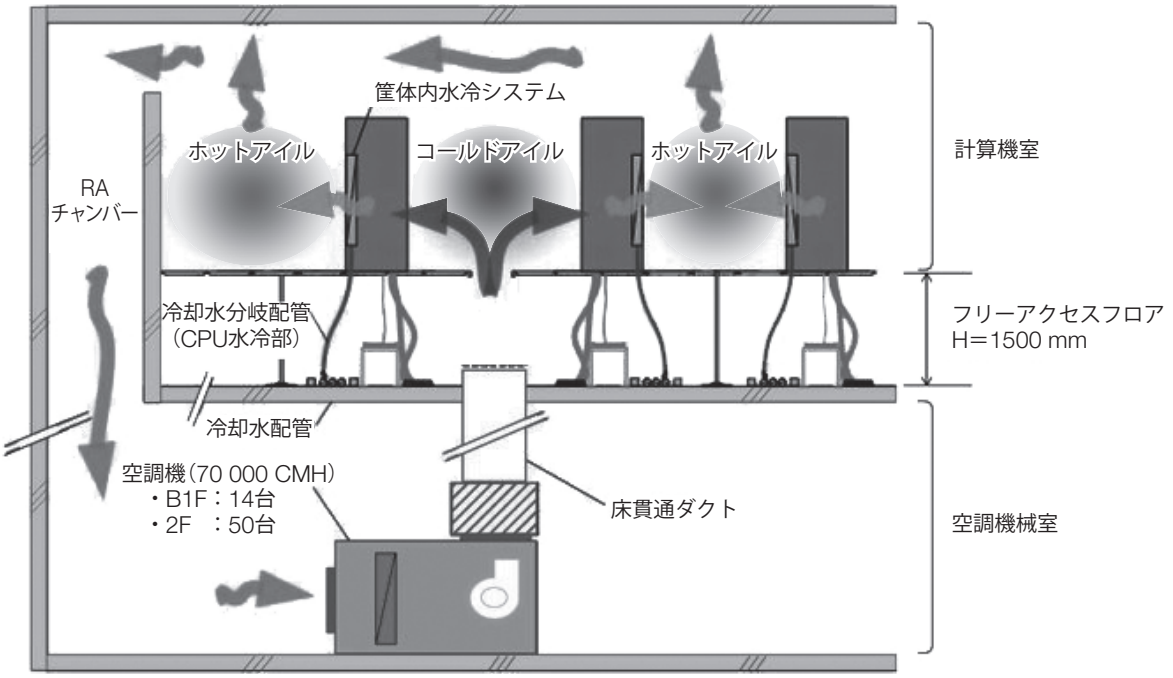


図-6　計算機室の空調システム

高効率ファンを採用したことにより，全ての機器を運転しても空調機械室内は75 dB程度の騒音値であり，会話も可能なレベルである。騒音値が高いということは，要するにエネルギー変換効率が悪く，本来空気の搬送動力になるべきエネルギーが騒音のエネルギーに変換されてしまっているということである。冷却空気で連続的につながっている計算機室の騒音環境の悪化を防ぐことにも貢献できた。

● CPU冷却水設備

「京」ではCPUとICC（インターコネクトコントローラ）を直接水で冷やす方式を採用している。水は空気の4倍の熱容量があり，非圧縮性流体でもあるので冷却媒体の搬送動力を空冷の1/4以下にすることができる。本施設では1次冷水は空調用冷水と共用化し，2階空調機室に設置した熱交換器を通し，各筐体へ送水している。送水温度は15℃±1℃に制御されている。理研では加速器施設でのマシン冷却水設備での実績があり，CPU冷却設備においてもその技術を転用することにより，安定的な設備とすることができた。

む　す　び

本施設は安定で安全な施設であるとともに，省エネルギー，環境にも配慮した建築・設備となっている。データセンターなどでは，施設全体の省エネルギー性能をPUE（Power Usage Effectiveness：電力使用効率）で評価することが一般的である。2011年10月に実施されたLINPACKベンチマーク試験において，PUE＝1.34（計算方法は日本データセンター協会の環境・基準WG「PUE/DCiE計測方法に関するガイドライン（Ver2.1）」による）を記録し，省エネ性，環境性を検証することができた。今後の「京」の実運用においてもPUE＝1.3を目標として，施設の運転をしていきたいと考えている。

最後に本施設の設計・監理および工事に当たって情熱的に取り組んで下さった日建設計，大林組，きんでん・九電工・三機工業JV，三機工業，川崎重工業，理研本所施設企画課のスタッフのみなさんに感謝いたします。

参考文献

(1) 河崎吉則ほか：高圧・大容量瞬低停電対策装置．日新電機技報，Vol.52，p.19-30（2007）．
http://nissin.jp/technical/technicalreport/pdf/200703/2007-129-04.pdf

Copyright© 2012 RIKEN. All Rights Reserved.

著者紹介

関口芳弘（せきぐち　よしひろ）
独立行政法人理化学研究所計算科学研究機構運用技術部 所属
現在，計算科学研究機構の電気設備，冷却設備などの運転・保守に従事。