



実装技術とシステム安定運用技術

応
専

—冷却, ケーブル接続技術と, HW/SW による
高故障耐性の実現—

宮崎博行 草野義博 新庄直樹 前田秀樹

富士通 (株)

実装・冷却技術

●ラック実装

「京」は高効率・高信頼を実現する水冷と低コストを実現する空冷を併用したハイブリッド冷却を採用した。CPU, ICC(InterConnect Controller) などの高発熱部品には水冷を採用したが, DIMM などには空冷を採用した。そのため, 冷却風を確保する吸排気口, ファンの場所を確保し, さらに水冷配管を配置する必要があった。今回, システムボード (SB) を斜めに実装する構造を開発し, 高密度実装を実現した (図-1)。

●水冷システム

本節では, ラック側と SB における水冷システムの構成について述べる。

ラックの水冷システム

ラック側の水冷システムの構造を図-2 に示す。前面右側に2本の配管(給水側, 排水側)を縦に実装しており, その配管から分岐した給排水用のホース(SB 給排水ホース各24本, IO用システムボード (IOSB) 給排水ホース各6本)が出ている。そのほか, この給排水管には, センサや給排水調整部品(空気抜き弁, 電動弁, 逆止弁, フィルタ)を保有している。これらをすべて2本の配管系に収め, 最終的には給水配管と排水配管の2つの配管系部品で構成される水冷システムとした。

給排水において, 給水側と排水側をバランスさせるため, 配管長さ方向に対し中央から給排水を行い, 流路系統内の配管径をコントロールし, さらに給排水のホースも損失をバランスする範囲内で均等長さに設計した。その結果, 給排水の損失差を±5%以内に抑えた。

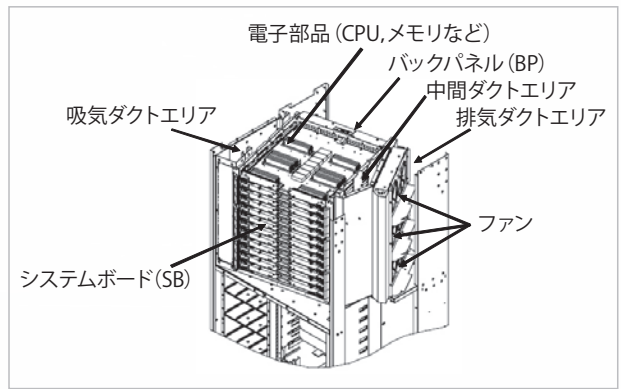


図-1 SB 斜め実装

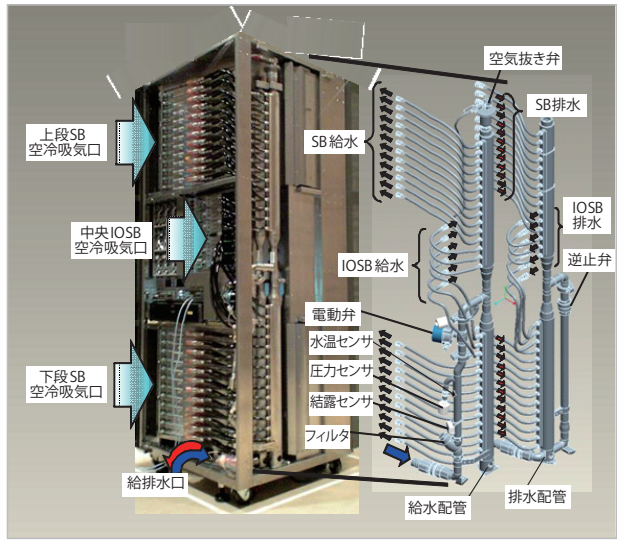


図-2 ラック水冷システムの構造

このように流量調整弁などの特別な部品を用いることなく流量をコントロールするシンプルな配管システムを設計したことにより, 配管単体での徹底した品質確保と高効率・高信頼なシステムを実現した。

SB の水冷システム

SB に実装された CPU と ICC のパッケージ, および一部の電源変換素子 (DC/DC コンバータ) は水冷ユニット (Liquid Cooling Unit : LCU) で冷却してい

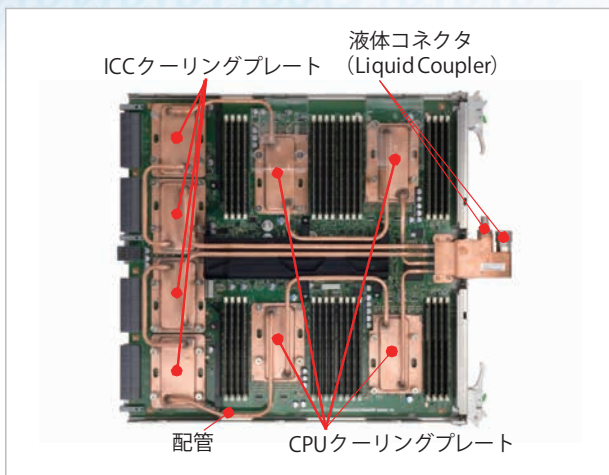


図-3 SB搭載水冷ユニット (LCU)

る。水冷ユニットは CPU および ICC 冷却用の複数のクーリングプレート (Cooling Plate : CP) により構成され、それぞれを並列 2 系統の配管経路で連結している (図-3)。水冷ユニットへの冷却水の給排水は、保守性を考慮し水冷ユニットの SB 前方に設置している液体コネクタ (Liquid Coupler) を介して行う。

「京」は 2 万枚以上の SB で構成されるシステムのため、循環水量を抑え効率良く冷却することが課題であった。このため、水冷ユニットは 8 つの CP のうち 4 つずつを並列 2 系統の配管経路で接続し、均等流量の冷却水を各 CP に流す設計とした。さらに CP 内部は冷却水循環流量を最小限に抑えるため微細チャンネル流路構造を採用した (図-4)。これらの工夫により冷却水の流動損失を抑えると同時に、CP 内部流路構造を調整することでラック内すべての CP において ±3% 以内に冷却水流量ばらつきを抑えることができた。また配管で連結、一体化した水冷ユニットを SB に取り付けるためには、それぞれの寸法ばらつきを吸収する構造が必要になる。CP を連結する銅配管の寸法や形状を工夫し、取り付け時の寸法誤差や応力を緩和する構造とした。この一体化構造により、コスト低減とともに水冷ユニットの強度、信頼性も大幅に強化された。さらに、薄型軽量化により、高密度実装も実現した。

●空冷システム

「京」の空冷システムは SB を斜め実装した特徴的なラック構造となっている。12 枚の SB を 6 台 (5+1冗長)

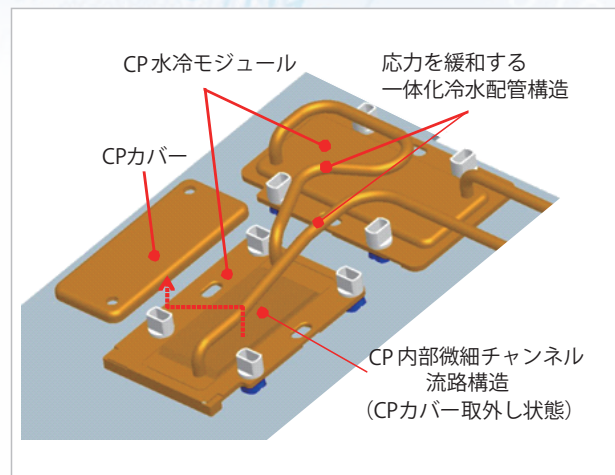


図-4 クーリングプレート (CP) の構造

のファンで冷却している。水冷配管や Tofu ケーブルのエリアを確保し、バックパネル (BP) やファンの保守性、SB への給排水のための液体コネクタの接続操作性を確保しつつ、SB 冷却風の損失を極力抑えるために採用した実装形態である。この斜め実装により、保守性を確保しつつ冷却風の損失を 90 度の実装に比較して 1/2 に削減している。また、ファン近傍に搭載した冷却風の逆流防止機構と合わせることで、ファン台数を 1/2 に削減できた。

図-5 に SB の空冷構造、図-6 に冷却風の流れを示す。SB には空冷対象部品として DIMM および電源部品の一部が搭載されている。これらの部品の冷却風は SB 斜め前方より入り、対象部品を冷却後、斜め後方へ排出される。このねじれた冷却風の流れを使用して、冷却風の流れを阻害する水冷ユニットを考慮し、最適な冷却風を供給する必要があった。冷却に必要な風量を確保・制御するために、冷却風供給側と排気側の板金の開口形状と位置の最適化や、SB 内ダクトの形状や配置を最適化し、対象部品にバランス良く冷却風を配分した。これらの工夫により DIMM などの温度ばらつきを極力抑え、効率的な冷却システムを実現した。

ケーブル実装技術

●Tofu インターコネクト実装

Tofu インターコネクトの 1 リンクは 6.25Gbps × 8 レーン × 2 (双方向) の速度を持つ高速伝送路である。

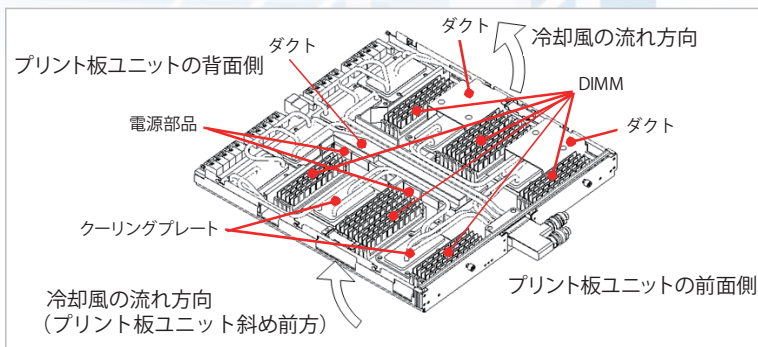


図-5 SBの空冷構造

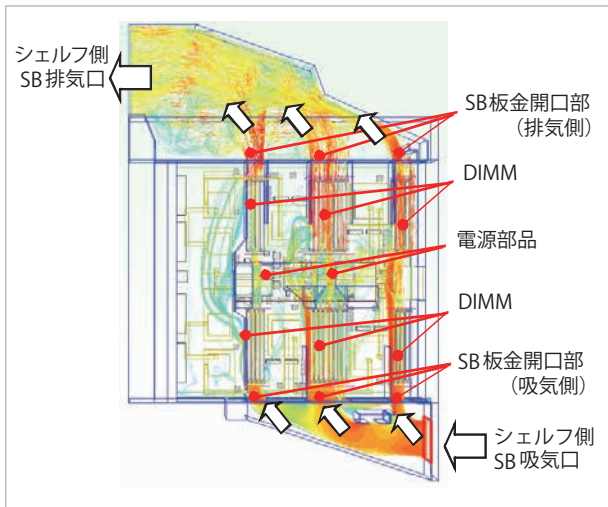


図-6 SB冷却風の流れ(上面視図)

1つのノードに10リンクを持たせることで、Tofuの特徴である6次元メッシュ/トーラスを実現している。X軸、Y軸のすべてとZ軸の一部はケーブルを用いて接続している。このケーブルをTofuケーブルと呼ぶ。残りのリンクはSB内やSBのBP内配線による接続となる。

Tofu インターコネクトは最大伝送ロス 26dB を目標として伝送路を設計した。目標を達成するため、①伝送路の長短に応じて最適な配線層を選択し反射の影響をコントロールする、②基板上の信号波長と基板配線パターン長の関係を意識してパターン長を調整し、コネクタやLSIと基板の接合部で発生する反射の受信端での影響をコントロールする、③ICCをSBの端に配置してSB上の伝送ロスを抑える、等の施策を行った。

Tofuケーブルの最長伝送路はX軸の接続であり、2台先のラックとのリンクとなる(図-7)。平面距離はおよそ3.2mだが、Tofuケーブルは計算ラック天井および床下に敷設しているためケーブル長は最大6.2mとなる。ほかに計9種類の長さのTofuケーブルを開発し、

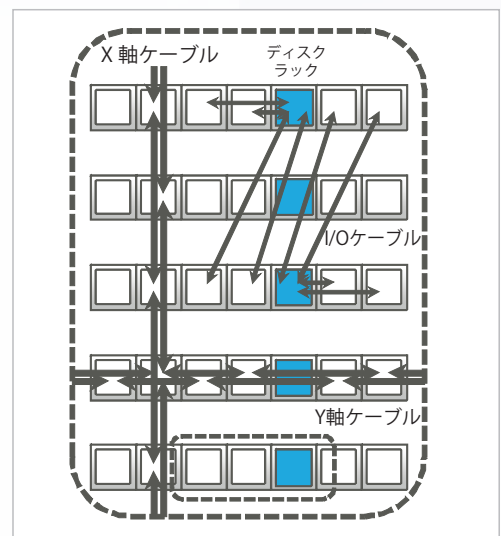


図-7 ラック間TofuケーブルおよびI/Oケーブル接続図

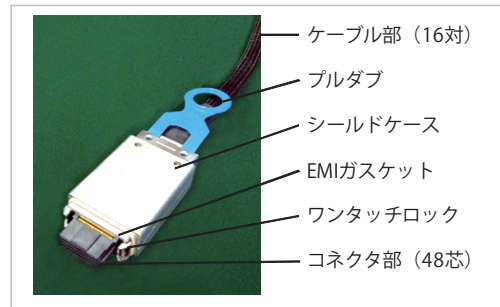


図-8 Tofuケーブル Assy

ラック内実装の最適化を行った。

● Tofuケーブル

Tofuケーブルは、敷設時の外力による特性変化を受けない堅ろう性と高速性の両立、さらにはケーブル量産製造時における長手方向での特性安定性を考慮して新規に開発を行った。

線材の被覆には低誘電率の絶縁体 ePTFE を採用し、ドレイン線を差動信号の横に配置しつつ、電気的な対称性を満足するよう特殊なシールド構造を採用した。ラック間を接続するインターコネクトケーブル(Tofuケーブル)として差動信号のポジネガ間スキューは30ps/10m以下と世界最高性能を誇り、「京」の高い伝送品質に貢献している。

Tofuケーブル Assyの外観を図-8に示す。

● ケーブル実装

CPU間の最短距離接続を実現するために、Tofuケ



図-9 BP でのコネクタ接続

ケーブルは SB を搭載した BP に直接実装する構造を採用した。BP では、正面の SB 接続に使用されるコネクタと、背面のケーブル用コネクタをスルーホールで共有する構造になっている (図-9)。この構造により、伝送ロスや信号反射が最小に抑えられている。

また、BP は電波シールドを兼ねたケーブル保持シェルフで覆われており、Tofu ケーブル装着時はワンタッチでロックされる方式で、静電対策と強度的な保持を両立させた構造を採用している (図-10)。

システム安定運用技術

この章では、「京」のハードウェアおよびソフトウェアで実現しているシステム安定運用技術について説明する。故障発生時のシステムの耐性について、信頼性、可用性、保守性の3つの独立した観点から記述する。

●信頼性

システムの信頼性を高めるためには、運用中の故障発生による実行中のジョブ停止やノード停止、ひいてはシステム停止を可能な限り防ぐことが必要である。

「京」の CPU には、メインフレームで培ってきた命令リトライ機能や、ECC や三重化等によるハード故障訂正機能により、運用中のエラー発生でもハードでリカバリしジョブを止めないための回路を実装している。

また、ノードを2個の大規模 LSI および8枚の DIMM のみで構成しており、少ない部品点数でノードを実現することで信頼性向上を狙った。ほかに、CPU および ICC、POL (Point of Load : LSI の近傍に専用電源回路として搭載される DC/DC コンバータ) 電源を水冷することで半導体の稼働温度を下げ故障発生率を低減させることや、Tofu インターコネクタに電気ケー

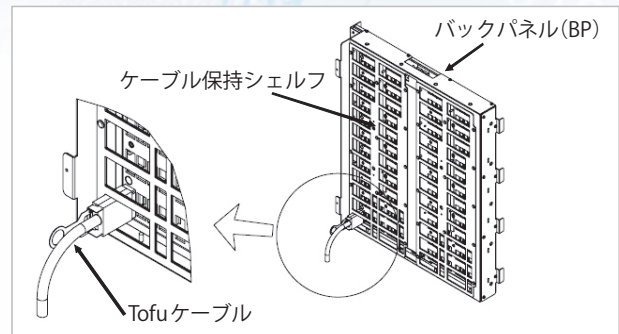


図-10 BP へのケーブル接続

ブルを採用して信頼性を向上している。

ソフトウェアも含めた信頼性向上のための施策としては、I/O 部のハードウェア冗長構成およびソフトウェアによる交替制御により、ジョブ実行中のファイルアクセスの信頼性を確保している。ローカルディスク接続では、RAID 構成をとる1台のディスク装置に対し必ずラックをまたぐ2つの IO ノードを接続する構成とし、各 IO ノードから2本ずつ、合計4本のファイバチャネルで接続している (図-11)。ローカルディスク装置内のコントロールモジュールの冗長運転機能、ノード上のソフトウェアによる故障回避機能と合わせて、IO ノード、FC (Fibre Channel) アドインカード、FC ケーブル、ローカルディスク装置内コントローラの故障が起きても、ジョブダウンを引き起こさず動的にファイルアクセスを切り替えることができる (図-12)。

また、グローバルファイルシステムにおいては、IO ノードはラックをまたいだ冗長構成とした上でファイルサーバを二重化している。これにより、ファイルシステムおよび運用ソフトによる二重化切り替えを動作中のジョブを止めることなく実行可能としている。

●可用性

「京」のような巨大システムにおいては、前述のように信頼性を高める施策が必須であるが、それでもジョブ影響を及ぼす故障が発生することを前提に、故障発生時のシステム全体運用への影響をなるべく小さくする必要がある。

Tofu インターコネクタの6次元メッシュ/トーラストポロジにより、システム内に故障ノードを抱えていても冗長軸によりユーザビューの3次元トーラスを維持する

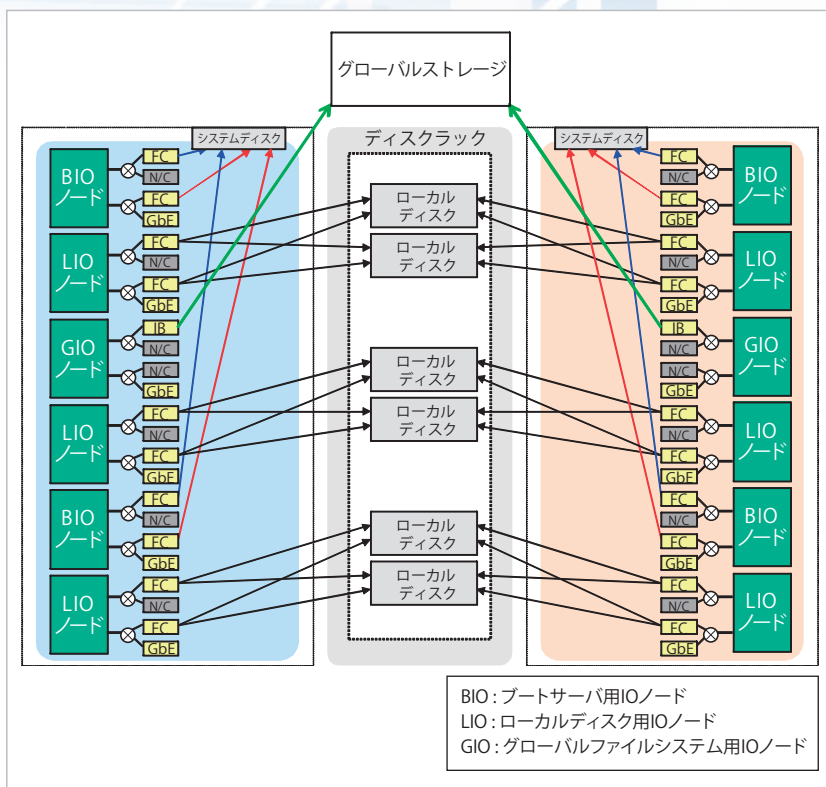


図-11 IOノード接続図

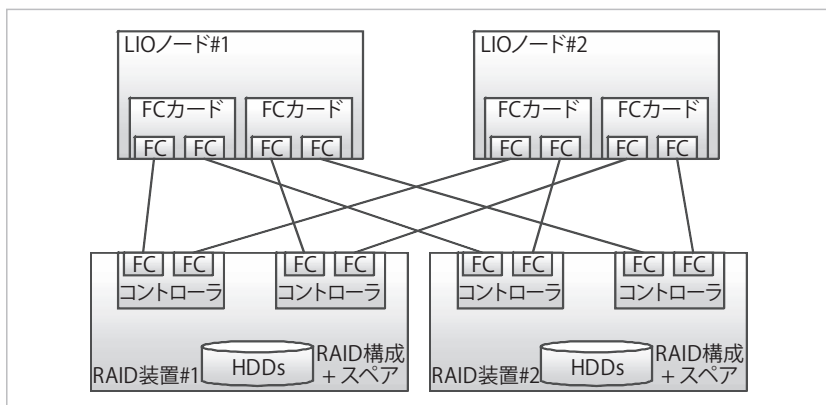


図-12 LIOにおける冗長接続構成

ことができる。これにより、故障ノードの交換を待たずにジョブの再割り当て、再起動が可能となり、可用性を高めている。

可用性を高めるための Tofu の機能としてはほかにもパケットフィルタによる異常パケット遮断機能や、故障によるリンクダウン発生時の連鎖的なダウンを防ぐ機能などを実装している。

Tofu インターコネクト以外にも可用性向上のための施策を入れている。CPU に実装されたメモリパトロール機能により、DIMM 内の間欠的な訂正可能エラーを訂正し複数ビットエラーに発展することを防ぐとともに、

パトロールで訂正不能エラーを検出した際実行中のジョブで当該領域を使用していなかった場合には、次のジョブを入れる前にノードを縮退させ、ジョブの異常終了発生を防いでいる。この仕組みは、サービスプロセッサによるハードウェア故障監視において、ノードを縮退予約状態として管理することにより実現している。検出した故障を、処理継続可能な故障とそうでない故障にカテゴリ化し、後者の場合は即ノード停止とするが、前者の場合には実行中のジョブ終了を待ってからノードを停止させることで、可用性を向上している。

また、ラック単位での可用性向上のために、ラック内のノードのブートサーバとなる IO ノードを運用系・待機系の二重化構成としている。運用系ブート IO ノードの故障時に待機系への切り替えを行うことで、故障したブートサーバ用 IO ノードの保守を待たずに、ラック内の 96 計算ノードと、ブートサーバ用 IO ノードを除く 4IO ノードを、切り替え先のブートサーバ用 IO ノードからブートし、運用を継続することができる。

「京」の計算ラックには、ハードウェア監視機構としてサービスプロセッサを 2 台搭載している。CPU を含むハードウェアにはエラーチェックを多数実装しており、チェック検出エラーをサービスプロセッサで監視することで故障を検出する仕組みとなっている。システム運用ソフトウェアとサービスプロセッサ間で連携することにより、ソフトウェアによる故障監視（ハング監視や Panic 発生監視など）よりもきめ細かく、かつ早急に故障発生を把握し、影響範囲を特定することで、ジョブの再割り当ておよび再実行までの時間を短縮し、システムとしての可用性を高めている。さらに、修正可能故障などジョブ運用は継続可能であるが長期

| 故障レベル | 故障状態 |
|---------------|---------------------|
| RouterFatal | ノード+Tofuルータ故障, 即時縮退 |
| Alarm | ノード故障, 即時縮退 |
| ReservedAlarm | ノード故障, 縮退予約 |
| Warning | ノード故障, 交換予約 |
| Normal | 通常状態 |

表-1
サービスプロ
セッサによる
故障管理のレ
ベル分類

的に見ると交換すべき故障発生について、交換予約として管理することで、保守のタイミングを調整しシステム運用への影響を最小限にしている。

サービスプロセッサでのエラーチェッカ監視による故障状態管理の詳細について、表-1に示す。

●保守性

ハードウェア故障発生時の影響範囲を局所化しても、フルシステムでの運用を再開するためにはハードウェア交換が必要である。交換の際に停止する必要がある範囲は、故障部を切り離してシステム運用を継続するために停止する必要がある範囲より大きくなる可能性がある。たとえば、故障がICPUに閉じていて、1ノードを縮退した状態で運用できる場合でも、複数ノードが物理的に同じボードに搭載されている場合は、そのノードを交換するには別のノードの停止を伴う必要がある。「京」では、CPUやチップセットの部品単位水冷実装を高密度実装で実現するために1枚のSBに4ノードを搭載する構成を採用した。その上で、インターコネクットのメッシュ/トーラス結合の特徴を活かし、システムとしての保守性を高めるために以下のような施策をとった。

まず、6次元メッシュ/トーラスタポロジにおいて、故障ノードおよびルータを縮退させ交換する際にも3次元トーラスを維持できるよう、ノードの交換単位をY-B平面で1つに閉じるよう実装した。具体的には、SB上のTofu接続をA-C軸とし、B軸方向は別のSBに実装した(図-13)。また、水冷カプラをSB単位に搭載し、ラック稼働状態でのSB保守を可能とすることで、SBを1枚抜きし保守している最中でもユーザーでの3次元トーラス維持を可能としている。

IOノード搭載のIOSBは1IOノードごとの実装とすることで、IOノード交換時には冗長側IOノードへ機能を切り替えて運用を継続できる。

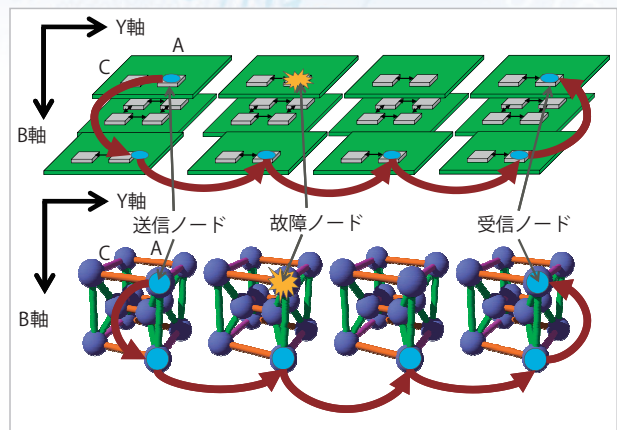


図-13 SB実装からみたTofu迂回ルーティング

また、「京」の計算ノードからのI/O接続はTofuのみであるため、Tofu故障時のPanic発生でダンプが取れない可能性があり、事象の切り分けが困難になることが予想された。そのため、サービスプロセッサから各CPUへ接続しているハード故障監視のパスを利用し、ダンプ情報のうち重要な一部分だけを採取する機能を実現した。

まとめ

本稿では、「京」の基盤技術として、ラックおよびSBの実装および特徴的な冷却方式について説明した。また、数万ノード規模のシステム運用を可能にするための安定運用技術について述べた。これらの技術により、超巨大HPCシステムを高信頼、安定的に実現することができた。

(2012年4月27日受付)

■宮崎博行 h.miyazaki@jp.fujitsu.com

次世代テクニカルコンピューティング開発本部所属。「京」のシステム仕様およびRAS仕様策定に携わる。現在、次世代HPCの仕様策定に従事。

■草野義博 (正会員) kusano-y@jp.fujitsu.com

次世代テクニカルコンピューティング開発本部所属。「京」のシステム開発を行う。現在、次世代HPCのシステム開発に従事。

■新庄直樹 shinjo@jp.fujitsu.com

次世代テクニカルコンピューティング開発本部所属。「京」のシステム開発を統括する。現在、次世代HPCの開発統括業務に従事。

■前田秀樹 maeda.hideki@jp.fujitsu.com

エンタプライズサーバ事業本部所属。「京」のシステム実装・冷却開発に携わる。現在、サーバ装置の実装構造技術開発に従事。