

## 3-4 制御

### 1. 加速器制御

#### 1-1 計算機制御系

加速器及びビームライン制御に使用される計算機群のうち上位にあたる計算機として、ファイルサーバー、データベースサーバー、開発用サーバー、Webサーバー等のサーバー類の他、オペレーター端末としてワークステーションや、シンクライアントがある。それらの機器の管理を行い、新規システム導入に伴う研究を行った。

##### 1-1-1 仮想化ソフトウェアの変更

計算機チームでは、以前からサーバー類を仮想化して物理サーバー数を減らし、省電力、省メンテナンスコスト、省スペースを実現してきた。2010年まで使用してきた仮想化ソフトウェアはVMware社製のVMServerであったが、これは仮想化支援機能付きCPUに対応できない他、I/O性能にも難があることがわかってきた。2009年度から新仮想化ソフトウェアを研究してきた結果、LinuxのKVM (Kernel based Virtual Machine) が仮想化ソフトウェアとして最適であるとの結論に至った。これは仮想化支援機能付きCPUに対応しI/O試験でも好成績を収めた。また他の機能においても優れていることが実証されたので、仮想化サーバーをKVMに移行した。現在、制御系、中立系合せて6台の物理サーバー上で23の仮想化された計算機が動作している。またリリース用のサーバーも2台待機しており物理サーバーのトラブルにも短時間で対応できる態勢となっている。また物理サーバーにおいても旧型機をリプレースして、さらなる信頼性向上に役立っている。

##### 1-1-2 データベース管理と開発

データベースは新規に施設監視、放射線監視のデータを追加した。これらを含め、3223信号の追加と29オンラインテーブルを追加した。放射線監視のデータは期間毎のデータをレポートすることが求められる。この際には古い時系列データを大量に取得する必要があり、データベースサーバーへの負荷の増大、取得時間の長期化が懸念されるようになった。これらを解決するため、データウェアハウスの導入の研究を行った。データウェアハウスとは見掛け上従来のリレーショナルデータベース管理システムと同等なインターフェースを持つが、データの変更に強いリレーショナルデータベース管理システムと異なり、データの読み込みに特化したデータベース管理システムである。データウェアハウスを使用すれば放射線監視のレポートのような大

量データの解析が素早くできることが期待される。2010年度はこの導入のための基礎的な研究を行った。

##### 1-1-3 中央制御室改装

2011年に供用運転開始が予定されているSACLAは、近い将来にSPring-8と一体的な運用がなされることが計画されている。このため運転制御は現在のSPring-8の中央制御室で行われる方針である。また将来のSPring-8 IIの運転も可能になるように中央制御室の改装を行った。

新中央制御室の設計は、SACLAの運転が可能であること、SPring-8 IIにも対応できる拡張性を備えること、各加速器運転を分割した構成にはしないこと、安全監視、施設監視との連携を重視すること、制御機器はなるべく置かないこと、画像データの表示機能を備えることなどを方針に据えて行われた。具体的な設計は2010年2月から、SPring-8加速器、光源光学、制御及びSACLAから招集されたメンバーから成るワーキンググループで行った。その結果、ワークステーションをビルトインし大型液晶ディスプレイを設置した制御卓、開発用スペース、プロジェクターが使用できる会議スペース、パーティションで区切られた水回りスペース、バックヤードの整備、中央楕円卓の機能強化、ディスプレイウォールの増設などが決定された。

ワーキンググループの設計をもとに制御・情報部門メンバーで構成される実務ワーキンググループが結成され、実務的な作業を行った。作業は制御卓などの什器の詳細な設計の他に、中央制御室の床下のケーブルの調査、撤去、新設工事、サーバー類移転、それに伴う空調施設の撤去、電源、ネットワークの整備、インターロック盤の移動などである。旧中央制御室の撤去は2011年2月24日から開始され、



図1 新中央制御室。

約1ヶ月の工期にて完成した。改装後の新中央制御室の写真を図1に示す。

#### 1-1-4 中央制御室改装に伴う整備

上記の改装に伴い、計算機制御系として以下の整備を行った。

1. ワークステーションの整備 2. ディスプレイウォールの整備 3. バックアップ計算機の移動 4. アナログビデオ信号廃止に伴う表示系の開発 である。以下に順に解説する。

##### 1. ワークステーションの整備

従来の制御端末はワークステーション本体を中央制御室バックヤードに置き、ディスプレイ、キーボード、マウスを制御卓まで延長ケーブルで接続していた。本体の騒音を遮断し中央制御室の静かな環境を実現するためである。しかし、メンテナンス性は良くなかった。そこで、本体を制御卓内にビルトインし、メンテナンス性の向上を図った。また水冷方式のワークステーションを採用し、騒音をほとんど気にならないレベルまで抑えることができた。

新ワークステーションを導入する際に、従来のSuSE Enterprise Linux のバージョンをV10からV11にアップグレードした。制御用ソフトウェアは全てV11上で試験し、一部発見された問題を修正した。

##### 2. ディスプレイウォールの整備

これまでのディスプレイウォールでは、SACLAの運転や将来のSpring-8 II に向けてさらなる表示情報の増加が予想されることから、これらに対応するためにディスプレイウォールを増強した。中央正面に46型の液晶ディスプレイを6×3面のもの(2号機)に増強し、従来の42型6×2面のディスプレイウォール(1号機)をサブ画面とすることにした。

1号機は7台のPCクラスター構成で駆動していたが、近年はディスプレイカード技術が向上した為、2号機は1台のPCに6画面同時出力できるカードを3枚使用してディスプレイと接続した。

##### 3. バックアップ用ファイルサーバーの移動

バックアップ用ファイルサーバーは従来、運転用サーバーと同じ場所に設置されていた。より安全性を求めるためには、運転用サーバーとバックアップ用サーバーは別の場所、別の電源系統に設置することが望ましい。このため、バックアップ用計算機を中央管理棟4階のネットワーク室に移動した。バックアップ用テープの所外保管は従来通りである。

##### 4. アナログビデオ信号廃止にともなう表示系の開発

中央制御室にはNewSUBARUを含む所内各所からの約20本のアナログNTSC規格の信号が集約され、アナログ信号のままディスプレイで表示していた。このNTSC

信号ケーブルを中央制御室から一掃し、画像是信号発生源でMotion jpeg形式にデジタル変換してHTTPプロトコルにて送るようにした。これを表示するための専用の表示アプリケーションを開発した。

#### 1-2 機器制御系

加速器の高度化への対応(加速器安全インターロック更新に伴う信号追加・機器変更への対応、線型加速器タイミングモニター系整備、蓄積リングBPM回路監視系整備、BBF制御系の高信頼化)に加え、以下に示すシステムの構築と高度化などを行った。

##### 1-2-1 中央設備監視系データ収集システムの構築

中央設備監視系の再構築を行った。中央設備監視系には加速器やビームラインの運転にとって有用なデータが含まれる。そこで、これらのデータを加速器データベースに収集するためのシステム構築した(図2)。中央設備監視系と加速器・ビームライン制御系とは運用形態が異なるため、お互いの制御系の境界に6ヶ所のゲートウェイを設けて、緩やかに結合する構成とした。2010年度末よりデータ収集を開始し、約1000点の信号を加速器データベースに取り込んだ。新中央設備監視系の基幹プロトコルであるBACnet (Building Automation and Control Networking protocol) と取り合う1ヶ所のゲートウェイについては、将来のオプションとして加速器制御系から中央設備監視機器に対する制御が直接行えるよう構築した。

##### 1-2-2 放射線監視設備データ収集システム更新

放射線監視設備で得られる放射線モニターのデータは、加速器データベースに蓄積されている。更新前の放射線監視設備ではデジタル指示モジュールと呼ばれる専用モジュールと産業用PCを使用しており、この間の通信にはGPIB規格が使われていた。しかしながら、(a) GPIBは必ずしも高信頼とは言えない、(b) GPIBによるデータ取得プログラムの正常動作を上位計算機から確認できない、(c) 産業用PCのプログラムがブラックボックスである、といった問題があった。これらの問題を解決するために、デジタル指示モジュールと産業用PC、GPIBの代わりにプログラマブルロジックコントローラー(PLC)とFL-netによるデータ収集システムを構築した(図3)。全てのPLCにはグラフィックパネルを取り付け、操作性の向上を図った。中央にはデータ収集用PLCを設置し、全放射線モニターの管理が中央からできるようになっている。インターロックモニターに対しては、新たに1時間積算、1週間積算の機能を設け、加速器安全インターロックに対してインターロック出力をするよう改修した。また、積算値を加速器データベースに取り込むようにした。この新しいデータ収集システムは、2010年度末より問題なく動作している。

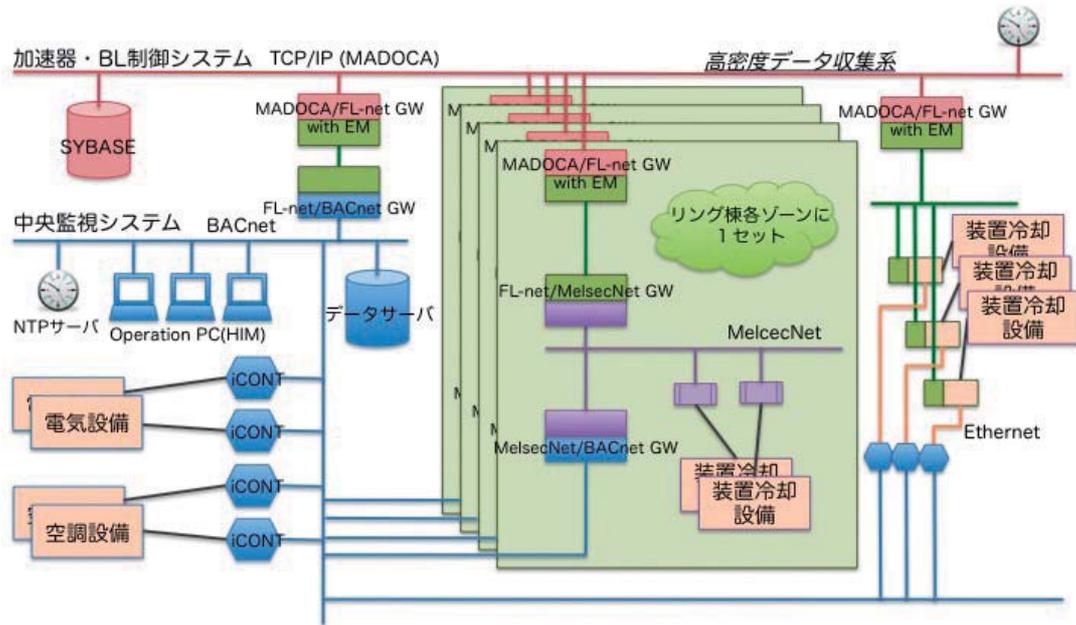


図2 中央監視設備系データ収集システムの概略図。

1-2-3 熱電対直入力VMEボード開発

主に熱電対による温度測定のために使用されている既存のVMEボードは、既に新規購入ができない状況にある。特にビームライン制御系においては依然としてVME計算機での温度測定の要求がまだ高くあること、故障時の準備品が必要であるという理由から、既存のボードと端子台レベルで互換性のある熱電対直入力ボードを開発した。チャンネル数を倍の16チャンネルに増やし、温度分解能を0.01℃と一桁向上させた。周囲温度25℃におけるボード単体での測定精度は±0.2℃以内（K型熱電対）、精度は±0.05℃以内を実現している。2011年度にボードを動かすためのデバイスドライバを作成し、夏期点検調整期間での実

機インストールに備える予定である。

1-2-4 COM Express VMEキャリアボード改造

2009年度までにCOM Express VMEキャリアボードの評価を行った。その結果、PCI空間にVMEバス空間をマッピングするための領域が1 MB程度しか確保できず、実用的ではないことが分かった。対策として、PCIコンフィギュレーションサイクル中に、Tsi148バスブリッジチップの直上流のPCI Expressスイッチデバイスに対して大きな空間を要求する疑似デバイスを実装するよう改版した。これにより、32 bit Solaris10において約1 GBのPCI連続領域を確保し、VME空間のマッピングに使用できるようにな

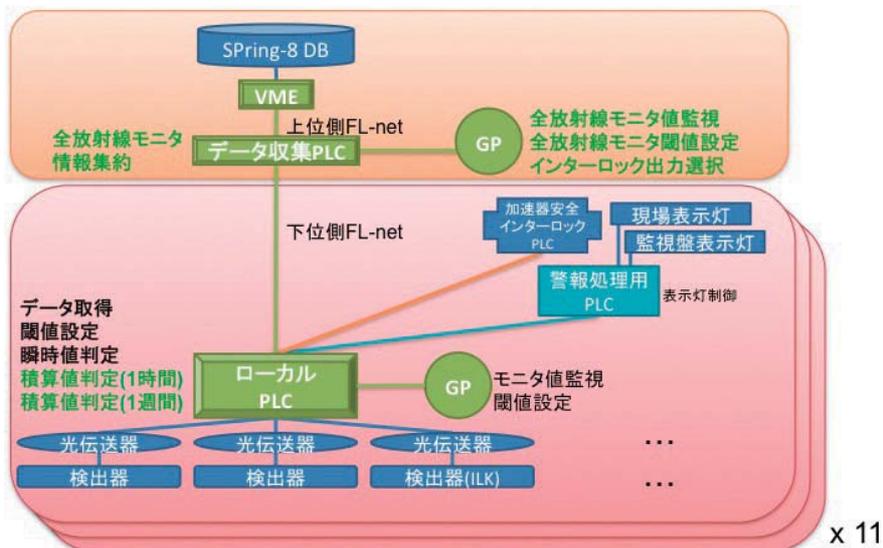


図3 新しい放射線監視設備データ収集システム。



図4 開発したFMC汎用ロジックボード。写真では3枚のFMCカード（CameraLinkカード2枚とSerDesカード1枚）を実装している。

った。2011年度は実装するCOM Expressモジュールの評価を行い、加速器制御系に投入する予定である。

#### 1-2-5 FMC対応汎用ロジックボード開発

SPring-8やXFELで導入されている汎用ロジックボードの改良版として、FPGAを乗せたキャリアボード上に実装するI/Oカードを、FMC（FPGA Mezzanine Card）と呼ばれる標準規格で構成するVMEキャリアボードの開発を行った（図4）。これにより、市販のFMC I/Oカードが利用可能となる。既存汎用ロジックボード同様、キャリアボード側にはVME インターフェース用のSystem FPGAと、ユーザーが自由にロジックを組込むことができるUser FPGA、DDR3 SDRAMが実装されている。最大で3枚のFMCカードが実装可能であり、そのうち1スロットはPMC/XMCスロットとしても使用できるよう設計した。また、キャリアボードと共に、FMCカメラリンクカードとFMC SerDes（Serialize/Deserialize）カードの開発も行った。SerDesカードは、FMCの基板サイズが小さいことを考慮して、実際のI/O部をSerDesモジュールで拡張した先に持たせるためのものである。2010年度は評価用としてSerDes FMC DIOキャリアボードの開発も併せて行った。これらFMC汎用ロジックボードの評価は2011年度より開始する予定である。

#### 1-2-6 利用実験用タイミング信号系の更新

利用実験では、放射光のパルス性を利用した時間分解測定が行われている。放射光パルス列からシングルパルス抜き出して利用することで、原理的に放射光パルス幅である数十ps までの時間分解能の実験を行うことができる。必要なパルスを切り出すX線チョッパーとして、既に動圧浮上式エアベアリングモーターによるチョッパーが実用化されている。このチョッパーシステムを効率的に使用するためには、蓄積リングの電子ビームの周回タイミングに同期した「ゼロ番パケット信号（ゼロ番信号）」が必要であ

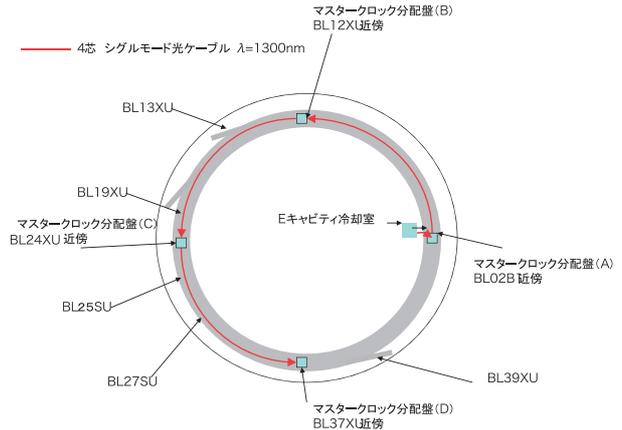


図5 光ケーブル敷設の経路概要（ただしビームラインまでの敷設経路を除く）。

る。そこで、ゼロ番信号をビームラインに分配するための蓄積リング周回タイミング制御システムを整備した（図5）。蓄積リングEステーションキャビティ冷却室に設置された光ファイバーモジュールから蓄積リングゼロ番信号を取り出す。これを光信号に変換した上で、BL02B1近傍の蓄積リング収納部に設置された508 MHzマスタークロック分配盤（A）に伝送した。この盤内において、伝送された信号を電気信号として取り出した。これを再び光信号に変換しBL12XU、BL24XU、BL37XU近傍の508 MHzマスタークロック分配盤（B、C、D）に分配した。BL13XU、BL19XU、BL25SU、BL27SU、BL39XUにこの光信号を分配した。

上記に加え、図5に示されたマスタークロック分配盤A、B、C、DにおけるRFクロックについて、多チャンネルRF分配器を各盤に増設し、ビームライン側へのファンアウトの方式を統一した。これによりクロックのSN比が向上し、更なるクロック供給への要求に対応できるようになった。

#### 1-2-7 XFEL光ビーム診断系の開発（PDアンプ系を中心として）

XFELにおいては $\sim 10^{11}$ 光子/パルスにおよぶ高輝度X線極短パルスの強度を計測診断する必要がある。従来、放射光の強度モニターとして電離箱やPINフォトダイオードが用いられてきた。後者は、大強度による非線形の問題が前者に比べて少なく、また逆バイアスを用いることにより端子間電気容量を減少させることで高速応答が実現できる。ただし $\sim 10^{11}$ 光子/パルスにおよぶ超高輝度X線パルス測定では、非線形の問題をクリアしなくてはならない。そこで、直接PINフォトダイオードでビームを検出する場合と、ダイヤモンド薄膜などを用いた散乱を検出する場合という2段階方式によりダイナミックレンジを拡張する。パルスレーザーを用いた予備実験をもとに、直接検出の領域を $10^9$ 光子/パルス以下とし、これ以上 $\sim 10^{11}$ 光子/パルスの領域では薄膜の散乱を用いることが妥当と考えた。

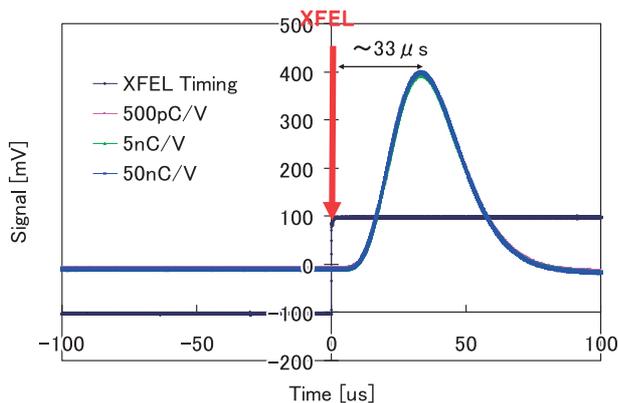


図6 模擬信号によるPDアンプ系のレスポンス。

また、XFELのコミッショニングプロセス初期において、自発光やアラインメントアンジュレータ光をPINフォトダイオードで直接検出する場合は、 $\sim 10^3$ 光子/パルスという微弱な光を扱うことが要求される。さらに施設が大きいため、信号を長距離伝送しなくてはならない。

上記測定を可能とするシステム構築のため (1) 6桁の広ダイナミックレンジ電荷有感型アンプと波形整形によるSN比の改善及び長距離伝送、(2) パルス形状から出力電荷量をリアルタイムに計算するADC変換系、の2つの開発項目を定めた。図6に示すように、開発したアンプ系はパルス入射から33  $\mu$ sにおいて、各ゲインで同様の整形波形を出力することが確認された。また計測波形からの電荷の算出は、このアンプ系の伝達関数を用いたフィッティングを行うアルゴリズムをADC上のFPGAに組み込むことで実現する予定である。

### 1-3 インターロック系

インターロックチームは2010年度夏に、加速器インターロックの高度化を行い、その構造を大きく改良した。ほかにも、入退管理システム、ビームラインインターロックシステムの管理と高度化を行った。

#### 1-3-1 加速器安全インターロック

加速器安全インターロックに対して、運転の安定化やメンテナンスの効率化などを行うために、2010年度夏に大幅な改良を行った。新しいインターロックは、「エリア管理」という考え方で動作する (図7)。今までは、各エリアへのビーム輸送運転と単独エリア蓄積運転の組み合わせ (運転モード) をインターロックで管理する方式、「運転モード管理」を行っており、運転モードに対応する運転のシーケンスがインターロックのロジックに組み込まれていた。しかし、加速器施設や運転方法が増えるにつれて、組み合わせの総数が急激に増えていくため、この方式では限界があった。新たに導入した「エリア管理」では、加速器運転の組み合わせではなく、加速器施設単位で独立してインター

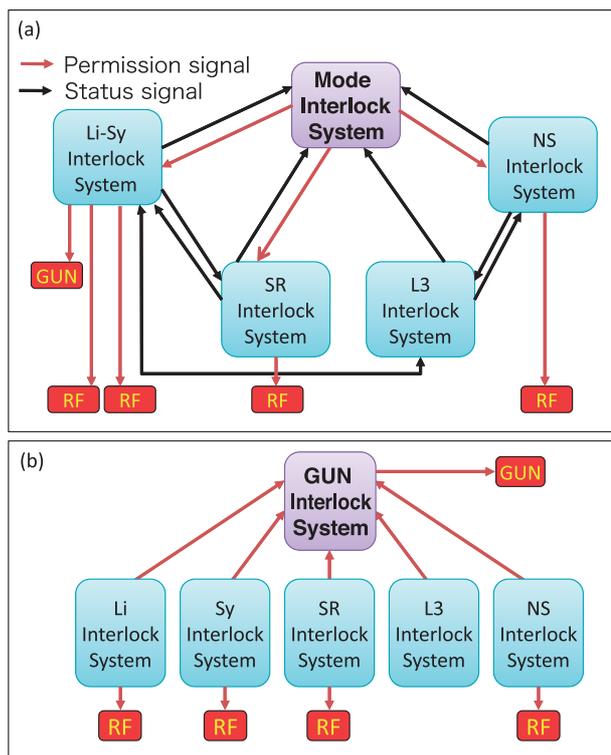


図7 (a) 旧加速器安全インターロックの概略図。電子銃 (GUN) とRF電源に許可を与えるインターロックシステムと、それを統括するモードインターロックから成る。インターロック間で複雑な接続となっている。(b) 更新後の加速器安全インターロックシステムの概略図。エリア単位のインターロック (Li, Sy, SR, L3, NS) と電子銃 (GUN) の許可を司るインターロックから成る。インターロック間の接続を大幅に単純化した。

ロックを動作させる方式とした。これにより、施設単位でのメンテナンス性が向上し、さらに、加速器施設の増設に柔軟に対応できるようになった。施工を、2010年度夏期点検調整期間に完了して、全て動作検査も完了した。秋以降に新システムで運用を始め、2010年度内は支障無く運転が継続できた。

#### 1-3-2 入退室管理システム

2010年度は大きなトラブルも無く順調に稼働した。また、安全管理室からの要望があり、管理区域内に滞在している人数をマップ上で一覧表示する機能を追加した。

#### 1-3-3 ビームラインインターロック

全てのビームラインインターロックシステムのハードウェアメンテナンスを行った。ユーザーが使用するシャッター操作キーを交換し、グラフィックパネルを約20式交換した。また、インターロックで使用していたケーブル (架橋ポリエチレン製) に、紫外線による劣化を発見した (特に白色のケーブル)。劣化部を切除して、対策を施したケーブルに交換するなどの対策を行った。ソフトウェアメンテ

ナンスを20本、劣化対策を5本のビームラインに対して実施した。また、新設ビームラインのBL28XU（京都大学）とBL43XU（理研）の建設支援を行った。加えて、BL43IRに対して、BL43XU建設に対応できるようにシステム変更を行った。他にもBL37XUとBL39XUのハッチ増設システムに伴い、インターロックシステムの改修を行った。

#### 1-3-4 ニュースバル 入退室管理システム・加速器安全インターロックシステム

ニュースバル入退室管理システムを2009年度に更新した後、2010年度は大きなトラブルも無く順調に稼働した。また、SPring-8加速器安全インターロック更新に合わせて、ニュースバル加速器安全インターロックシステムを更新し、エリア管理システムに対応した。更新後もSPring-8と同様に年度内は順調に稼働した。

## 2. ビームライン制御及び実験ステーション制御

### 2-1 全般

ビームライン制御グループではBL07LSU（東京大学アウトステーション）の第2期挿入光源増設への支援を行い、利用運転開始に対応した。また理研ビームラインBL43LXU、京都大学ビームラインBL28XU、電気通信大学ビームラインBL36XUの建設支援を行っている。BL43LXU及びBL28XUは2011年度、BL36XUは2012年度完成目標として建設が進められている。2009年度末現在120台のVMEと5台のビームライン制御計算機（1台の待機用計算機を含む）を運用し、夏冬の長期停止期間にはハードウェアの点検・保守を行っている。

また2009年度に行ったノイズ対策をほぼ全ての挿入光源ビームライン（20ビームライン）に対して行い、安定化の向上に貢献した（対策の詳細は2009年度年報参照）。その他、安定性向上、性能向上のために、ビームライン制御系の仮想化環境の更新、ユーザー操作端末の更新、Syslogサーバーの構築などを行った。遠隔実験システム（WRES）、実験制御装置、X線検出器の整備、開発、高度化を継続して行うなど、放射光実験の高度化を進めている。

この他、中央制御室で各ビームラインのインターロックシステムのアラーム表示を行っているソフトウェアが長年に渡るシステム更新に追従できておらず、一部不整合が発生していたため、現場の表示との突き合わせと修正を行った。フロントエンドデータ収集系に関しても一部実際の信号との不整合があったため、配線や設定を確認して不整合の解消を行った。

### 2-2 ビームライン制御

#### 2-2-1 次期VME CPUボードの評価試験とCFカードの選定

ビームラインにおける機器制御システムの中核として使用しているVME CPUボードは、初期の導入から10年とな

り、まもなく耐用期限を迎える。ビームライン実験の安定的且つ継続的な運用を実現するために、次期VME CPUボードの選定を進めてきた。同時に、CPUボードで動作するオペレーティングシステムの起動ディスクとして標準的に使用してきたコンパクトフラッシュメモリアの調達が困難になったことから、次期起動ディスク環境の選定も平行して進めてきた。幅広い評価の結果、GE社製及びConcurrent Technologies社製のCPU 2機種、エレコム社製及びTDK社製のコンパクトフラッシュ 2種を、次期システムの最終候補として選定を完了した。

#### 2-2-2 BL制御用仮想サーバー計算機更新

ビームライン制御用計算機は4台の計算機システムの上に53ビームライン分の仮想計算機を構築して制御を行っている。ビームラインの本数が増え、利用方法が高度化するなど、計算機資源に対する要求がますます増えていくため、オペレーティングシステム（OS）の変更及び計算機（4台＋予備1台）のリプレースを行った。OSは、従来Ubuntu 6.06 LTS（Xen 3.0.3）を用いていたが、保守期間の終了と蓄積リング制御系のOSと同一にすることで管理コストの低減を図るため、SLES SP3（Xen 3.2.3）へ変更した。計算機は、HP ProLiant BL465c G1（4コア、12 GByteメモリ）のものからHP ProLiant BL460c G1（8コア、16 GByteメモリ）に更新し、計算機資源の増強を行った。2009年度末現在、仮想サーバー計算機4台で、53台のワークステーション（仮想計算機）を管理している。

#### 2-2-3 ID07改造対応

夏期停止期間に永久磁石型位相器に加え電磁石型位相器が設置された。これに伴い制御プログラム（EM, MS, AS）やGUIの改造を行い、アンジュレータ動作試験、コミッションング対応を行った。ID07は30 m長直線部に8台のアンジュレータを並べ、さらに各アンジュレータ間に移相調整器が設置される大規模な構成であるため、2台のVMEと1台の温度計測用小形計算機を用いて制御することとした。2台のVMEは挿入光源の配置の都合上20 m離れた位置に設置されているが、お互いに情報交換しながら挿入光源全体の制御を行う必要がある。一方で上位制御系からは1台のVMEで制御されているように構成し制御性を確保するため、1つのマスターとなる制御プログラム（EM）で上位からのメッセージを受けた上で、各VME、小型計算機へコマンドを転送する仕組みを新たに構築した。

#### 2-2-4 BLユーザー用操作端末

HP社製シンクライアント t5545（一部 t5325）を夏期停止期間に全BLへ設置した（設置台数：68台）。この端末は、独自OS（HP ThinPro）を備えカスタマイズが容易でシステム性能も良く、コストパフォーマンスに優れた端末であ

る。一部の端末に関しては、後継機のt5325の試験を行い良好であったため、夏期停止期間後新たに設置した端末についてはt5325へ移行した。

### 2-2-5 Syslog Server

制御システムで障害が発生した際の解析情報を収集するシステムとしてsyslogサーバーを整備している。このsyslogサーバーに制御記録を集約し、障害事象の相関解析を可能としている。しかし、近年の制御システムの高速度化や信号点数の増加に伴い記録データが増大したことで、syslogサーバーの性能限界を超え、制御記録データの散発的なロスが発生していた。この問題に対応するため、syslogサーバーシステム全体の再設計を行い、従来のLinux仮想化環境をSolaris Container環境に入れ替え、ネットワーク負荷分散システムの効率化を図ることで、これまでの4.5倍以上の記録性能を実現した。これにより制御記録データの収集性能が大幅に向上し、効率的な障害解析が可能となった。

## 2-3 実験ステーション制御

### 2-3-1 遠隔実験システム整備

蛋白結晶構造解析を最初のターゲットとして進めてきた遠隔実験システム（Wide-area Remote Experiment System, WRES）はBL26B1にて実験用サーバー及び遠隔ユーザー用のGUIの構築が完了しシステムとして完成を迎えた。そこで2010年10月末に480 km離れた理研和光キャンパスからWRESに接続し、試験的にユーザーによる利用試験を行った。遠隔地からの利用実験の実施結果は良好であり、解析に耐えるデータを取得することができることが分かった。これをふまえて2011年度に共同利用ビームラインを含む蛋白結晶構造解析ビームラインで遠隔実験を一般ユーザーに公開するべく、課題の受付、ユーザー教育などのソフト面の整備を進めている。

### 2-3-2 小形汎用計測装置

実験ステーションで実験制御に用いるための汎用小形計測装置（Blanc4）について整備を進めている（2008年度年報参照）。2010年度はBlanc4のソフトウェア面ソフトウェア面での機能強化を行った。

一つは制御性能の向上のためLinuxカーネルをリアルタイムパッチ適用カーネルに変更し、性能測定を行い、時間揺らぎが0.3 ms以下であることが確認できた。多くの実験では1ミリ秒以下の時間精度があれば実用的な測定が行えるので、このシステムの利用価値は高い。蛋白質構造解析ビームラインで使われているX線シャッターと試料回転の同期システムに本システムを投入した結果、これまで用いていたVMEベースの制御システムに比べて時間精度が1桁程度向上し、短時間露光での実験データの質向上に貢献し

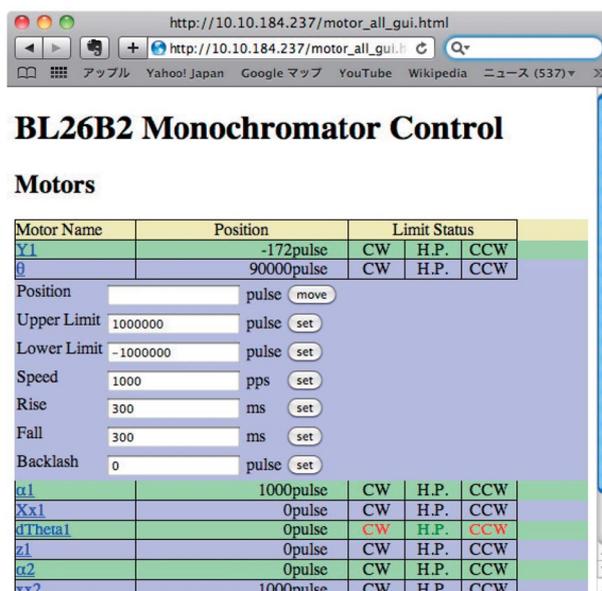


図1 モーター制御用Web アプリケーション。

ている。

これまでは、小形汎用計測装置はコスト等の関係でローカル制御機能を有していないため、PCを接続して利用しなければならなかった。そこで、この点を改良するために、Web ベースでユーザーインターフェースを作成する事ができないか検討を行い、HTML5の中で規格策定を進められているWebSocketを用いる事とした。WebSocketはWebアプリケーションで通常用いられるテキストベースの処理に適している。Webアプリケーションは、Windows、Mac等のPCだけでなく、タブレット等の携帯情報端末からも利用することができるため、現場端末として様々な選択肢がある。

MADDOCAもテキストベースのメッセージ交換を基本とする制御系であるため、WebSocketと親和性が非常に高い。WebSocketサーバーとしてメッセージをWebブラウザから受け取りMADDOCA制御系に渡すゲートウェイを作成する事で、Webアプリケーションとして制御ソフトウェアのユーザーインターフェースを作成する事ができた。図1に実際にステップモーターの動作を操作、監視するために作成したアプリケーションの例を示す。このインターフェースを用いてモーターを回転させたり、各種設定パラメータを変更したりする事が可能である。

## 2-4 検出器開発

高機能なアナログ・デジタル回路系が素子ごとに搭載させていることを特徴とする1次元型（ストリップ型）のMYTHEN検出器、2次元型（ピクセル型）のPILATUS検出器をユーザー実験に提供し、高速時分割X線回折や深さ分解XAFSなどの新しい分析手法を開拓するなどに貢献してきた。現状、MYTHENとPILATUSに用いられてい

るシリコンセンサーの標準的な厚さは320  $\mu\text{m}$ で、吸収によるX線検出効率は20 keVで27%、30 keVでは9%程度であり、更なる高度化として検出効率の向上が求められている。独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所の技術協力を受け、SPring-8が世界に先駆けて放射光実験での実用化を目指してCdTeピクセル検出器、CdTeストリップ検出器開発を行っている。共通方針として、高コントラストと高感度を兼ね備えた性能を達成すべく素子厚は500  $\mu\text{m}$ とした。これにより50 keVまではほぼ100%、100 keVでも約45%の検出効率が達成できる。

#### 2-4-1 CdTeピクセル検出器

ピクセル検出器開発の3要素には、基盤の目状に電極をアレイ化したピクセルセンサー開発、各画素の電荷信号を並列処理する集積回路開発、及び、センサーの各電極と読み出し回路のパッドを接合させるフリップチップ実装技術開発がある。特にセンサーの性能を劣化させずに実装するには電子部品を実装する民生技術をそのまま用いることはできず、独自のノウハウが必要であり、最もハードルの高い技術である。

SPring-8では、実装技術にCdTeセンサー用に開発された金スタットバンプボンディング法を用い、この実装法に適合したピクセルセンサー及び読み出し集積回路を独自に開発している。これまで2008年度にプロトタイプ検出器SP8-01 (ピクセルサイズ200 $\mu\text{m}$ ×200 $\mu\text{m}$ 、ピクセル数20×20)用の読み出し集積回路のシミュレーション及びレイアウト設計、2009年度には読み出し集積回路及びCdTeピクセルセンサーの実製作とセラミックパッケージへの実装を行った。

SP8-01とPILATUSの読み出し集積回路は、各ピクセルにプリアンプ、波形整形アンプ、コンパレータ、20ビットカウンタが搭載されているという基本設計は同じである。さらに、正負両極性の電荷の入力への対応、高エネルギー

X線が生成する大きな電荷量の測定のための利得切り替え機能、下限のみでなく上限のエネルギーを弁別できるという機能を新たに搭載した。2010年度はSP8-01テストボードを用いてこれらの性能に関する詳細な評価を行い、高利得モードでは15~40 keV、低利得モードでは30~100 keVに渡り高いエネルギー線形特性が得られていることを実証した (図2)。

SP8-01プロトタイプにより要求性能が満たされていることが確認できたのを受けて、2010年度は、ピクセル数を20×50に拡大するとともに、隙間なく並べてより広視野が得られるように設計したSP8-02集積回路の製作を行った。2011年度以降、SP8-02シングルチップ型からマルチチップ型へと拡張していき、最終的にはPILATUS検出器規模の大面积検出器の製作を目指している。

#### 2-4-2 CdTeストリップ検出器

MYTHENは1次元型ではあるがストリップピッチが50  $\mu\text{m}$ と高い位置分解能が得られる利点があり粉末X線回折などでの利用が広がってきているが、PILATUSと同様に現在のシリコンセンサーを用いたタイプの検出効率の向上が課題となっている。ストリップ検出器開発の3要素もピクセル検出器になぞって考えることができるが、センサーと読み出し集積回路の実装にはワイヤーボンディングが用いられる点で技術的に異なる。シリコンセンサーの場合は比較の実装が容易であるが、CdTeはもろく割れやすいためワイヤーボンディング法では製作が難しいという問題がある。

SPring-8では、CdTeピクセル検出器の実装方法を応用し、先ずインターポーザ (セラミック或いはガラス基板)にCdTeストリップセンサーを金スタットバンプボンディング法により接合し、次にインターポーザと読み出し集積回路をワイヤーボンディングで接合することで、この問題を克服している。図3は、MYTHENモジュールコントロ

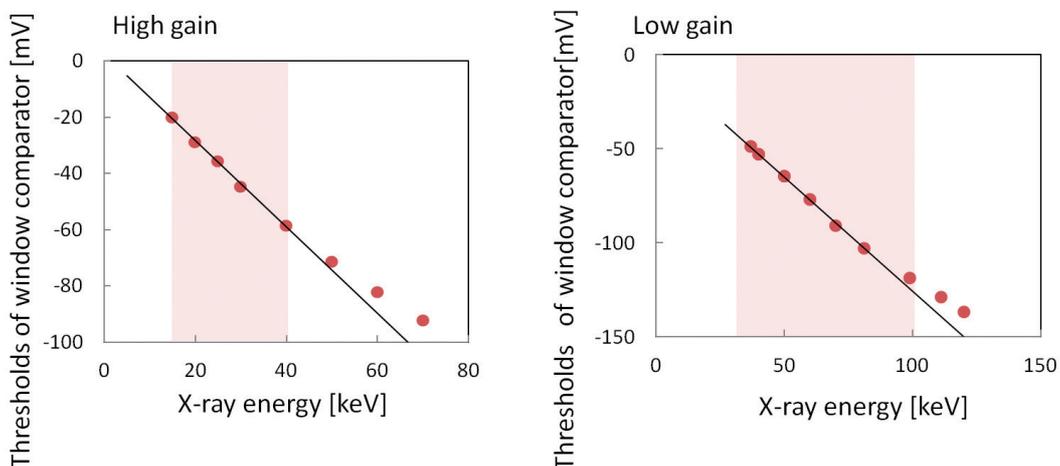


図2 入射X線のエネルギーとコンパレータの閾値をスキャンして求めた閾値電圧との関係。



図3 オーミック型CdTeセンサー、Inショットキー型CdTeセンサー及びリファレンスとしてシリコンセンサーを接合した試験用MYTHEN検出器。

ールボードにオーミック型CdTeセンサー、Inショットキー型CdTeセンサー及びリファレンスとしてシリコンセンサーを接合した試験用の検出器である。2011年度にオーミック型とショットキー型センサー、セラミックとガラスインターポーザの性能比較を行い、最終的にはMYTHENモジュール（6.4 mm長）を覆うCdTeストリップセンサーの製作を目指している。

制御・情報部門  
田中 良太郎