

## 3-2 ビームライン・共通技術開発

### 1. 挿入光源

#### 1-1 新規増設・改造等

##### (1) 偏光制御アンジュレータ

2004年8月にSPring-8の軟X線理研ビームラインBL17SUに設置されたアンジュレータはユーザーからの偏光に対する要求を満たすため電磁石と永久磁石から構成されており、電磁石の周期長及び極性を選択することにより、3つの運転モードを持っている。運転モードを切り替えることにより垂直・水平偏光（8の字アンジュレータモード）左右円偏光（ヘリカルアンジュレータモード）高速でヘリシティーが反転する左右円偏光（非対称8の字アンジュレータモード）を発生することが可能である。試験運転の結果、8の字アンジュレータモードは電子ビームの不安定性を引き起こすことが分かった。不安定性の原因を追求するため磁場の3次元測定を行い、SPring-8の加速器部門と協力して現在調査中である。一方、ヘリカルアンジュレータモードでは不安定性の問題は起こらなかったためユーザー運転に提供するべく閉軌道変位を補正するフィードフォワードテーブルを準備中である。

##### (2) 永久磁石の減磁対策試験

###### (a) 永久磁石の極低温における減磁

挿入光源に用いられている永久磁石（ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ）の電子線による被爆実験を韓国のPohang Light Source (PLS)と共同研究を行っている。本実験は、PLSの入射用ライナックの電子線（ $E=2.5\text{GeV}$ ）を永久磁石試料に照射し、その磁場分布を計測し、減磁の程度を試験するものである<sup>[1]</sup>。本年度は、クライオ型永久磁石アンジュレータに用いる予定の磁石に関して、液体窒素温度付近での放射線減磁を評価した<sup>[2]</sup>。低温においては耐放射線性が極めて向上することが分かった（図1）。

###### (b) 永久磁石減磁のビームエネルギー依存

SPring-8入射器（シンクロトロン）を利用して最高8GeVの高エネルギー電子ビームを永久磁石に照射し、その減磁特性を調べた。図2に示すようにビームエネルギーが高くなるにつれて著しく減磁することがわかる。したがって、SCSS計画等のX線自由電子レーザーにおいては完璧な減磁対策が必要となる。

#### 1-2 高度化

##### (1) 広帯域（クライオ型アンジュレータの開発）

クライオ型永久磁石アンジュレータは、アンジュレータの短周期化に不可欠な磁石の高性能化を、現在最も強力な

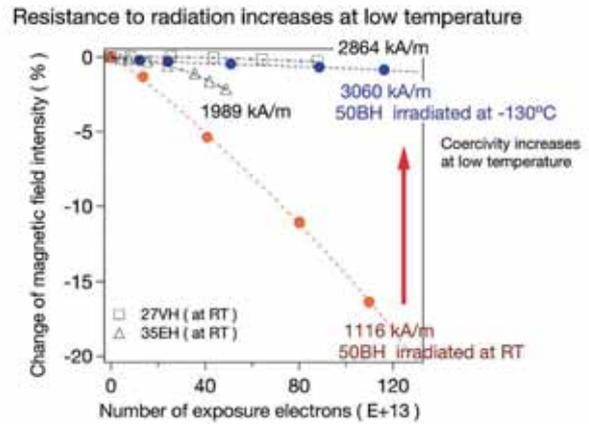


図1 低温域における永久磁石の電子線照射（2GeV）による減磁。NEOMAX50BHは室温において顕著な減磁を示すが、-130 の低温では、27VH材に匹敵する耐減磁特性を示す。

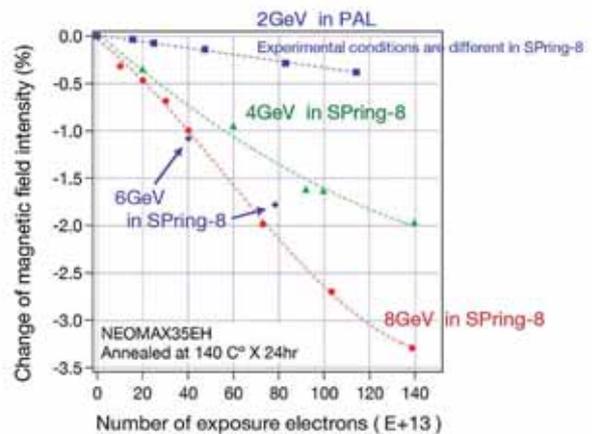


図2 異なるビームエネルギーにおける永久磁石の放射線減磁曲線。

永久磁石であるNdFeB磁石またはPrFeB磁石を77～150Kまで冷却することにより実現したものである。液体ヘリウム温度付近で動作する超伝導電磁石と比べ動作温度が高いため、冷凍機を用いて数百ワット程度の十分な冷却能力が得られ、クエンチがないため安定な運転が期待できる<sup>[3]</sup>。昨年度得られたNdFeB磁石の低温特性のデータをもとに、本年度はテスト機の開発を行った（図3）。テスト機の磁石列は、周期長15mm、全長60cmでNEOMAX社製高残留磁束密度NdFeB磁石50BHを使用して製作した。アンジュレ

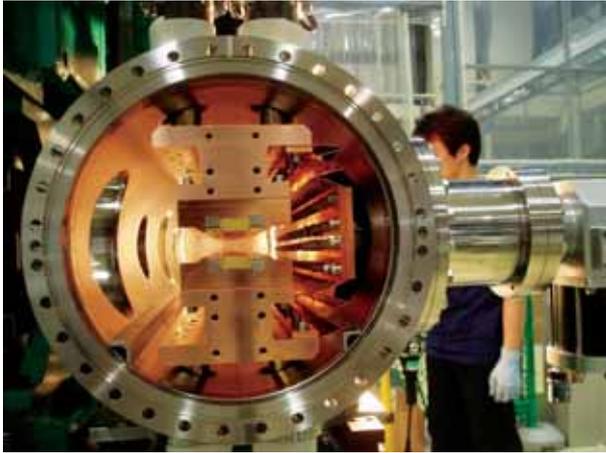


図3 クライオ型永久磁石アンジュレータのテスト機。

ータ架台は、SPRing-8で使用されている従来の1.5m長真空封止アンジュレータ架台を用い、ギャップ駆動に適応できるフレキシブルな銅板を介して冷凍機ヘッドを磁石列に熱接触させている。また真空中の磁石ビームと大気中架台を繋ぐシャフトは、断熱材を内部に入れ外部からの熱流入を抑えた構造を採用した。テスト機磁石温度は、磁石列ビームに取り付けたシースヒータにより制御している。

テスト機の磁場測定は、ベローズを介して真空中に設置したホールプローブをビーム軸方向にスキャンさせることにより行い、予想された低温における磁場強度の増大を確認した。低温での保磁力向上による耐放射線減磁特性の改善については、50BH磁石に対する電子ビーム照射実験を室温と150Kにおいて行い、低温で減磁が減少することを確認した。一方で、シャフトや磁石列ビーム等の熱収縮による磁石ギャップ変化や磁石列ビームの変形などの問題も判明し、今後、低温における磁石ギャップの直接測定による制御や、熱収縮を考慮した設計などを行い、実用機の開発を進めていく。

#### (2) 高温超伝導永久磁石アンジュレータの開発

高温超伝導体 (High Temperature Superconductor、以下HTSC) を用いた新しい原理に基づく短周期アンジュレータを考案し、開発を開始した。1つはクライオアンジュレータプラス (Cryoundulator *plus*以下CU+、図4参照) 他方はピュア型超伝導永久磁石アンジュレータ (Superconducting Permanent Magnet Undulator以下SCPMU) と呼ばれている。

CU+は、前年度に考案し、開発を開始したクライオアンジュレータ (Cryoundulator以下CU) の発展型であり、永久磁石の表面にリング上のHTSCを設置することによりCUの磁場を増強する目的で考案された<sup>[4]</sup>。磁石ギャップの開閉というアンジュレータ本来の機能を利用することにより、HTSCの着磁・利用が全く同一の装置内で行うことが可能であり、HTSC応用の新しい分野を開拓することが期待される。CU+の原理を実証するため、半周期モデル

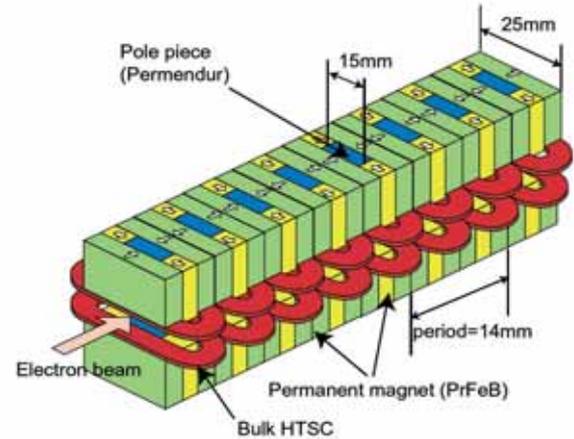


図4 高温超伝導永久磁石アンジュレータ (CU+) の原理図。

を製作し、液体窒素温度において増強される磁場を測定したところ、用いたHTSCサンプルの臨界電流密度から計算される磁場とよく一致することが確認された。

SCPMUは上記CU+よりもさらに積極的にHTSCを利用することにより、より強磁場・短周期のアンジュレータを開発するために考案されたものであり、HTSCの臨界電流密度が十分に高ければ、永久磁石型アンジュレータの到達磁場をはるかに上回る磁場を得ることが可能である<sup>[5]</sup>。原理は、直方体状のHTSCを並べ、これらを外部磁場により着磁することにより周期的磁場を発生するというものであるが、この際生ずるオフセット磁場を除去する方法により2つの種類に分類される。1つは、外部磁場の極性を反転して適正な値に調整する方法、他方は上下のHTSC列を逆極性の磁場により着磁する手法である。後者の場合、ギャップを閉じることによりHTSCの永久電流値が増加し、さらに着磁されるという利点がある。原理を検証するため3個のHTSCサンプルを電磁石により着磁し、磁場分布を測定したところ、予想通りの磁場分布が得られ、また電磁石の磁場を調整することにより磁場オフセットが除去できることを確認した。

今後は超伝導材料工学の専門家と協力し、HTSCの磁場特性、機械特性を改善する。

ビームライン・技術部門

光源・基幹チャンネルグループ 光源チーム  
北村 英男

#### 参考文献

- [1] T. Bizen, X. -M. Maréchal, T. Seike, H. Kitamura, T. Hara, T. Tanaka Y. Asano, D.E. Kim and H.S. Lee : "Radiation Damage in Permanent Magnets for ID", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Radiation Safety of Synchrotron Radiation Sources, SPring-8, Japan, November 17-19, 2004.

- [ 2 ] T. Bizen, X. -M. Maréchal, T. Seike, T. Hara, H. Kitamura, T. Tanaka Y. Asano, D.E. Kim and H.S. Lee : “Radiation damage in magnets for undulators at low temperature”, Proceeding of the 9th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2004).
- [ 3 ] H. Kitamura, T. Hara, X. -M. Maréchal, T. Tanaka, T. Bizen and T. Seike : “Design criteria and technology challenges for the undulators of the future”, Proceeding of the 9th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2004).
- [ 4 ] T. Tanaka, T. Hara, H. Kitamura, R. Tsuru, T. Bizen, X. -M. Maréchal and T. Seike : “Application of high-temperature superconducting permanent magnets to synchrotron radiation sources”, Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams, **7** (2004) 090704.
- [ 5 ] T. Tanaka, R. Tsuru and H. Kitamura : “Pure-type superconducting permanent-magnet undulator”, JOURNAL OF SYNCHROTRON RADIATION **12** (2005) 442-447.

## 2. 基幹チャンネル

### 2-1 新規増設、改造

#### (1) BL08B2用基幹チャンネルの新規建設

BL08B2にベンディングライン用の標準型基幹チャンネルを設置した。コミッショニングは、2005年度に実施の予定である。

#### (2) 鉛直専用型光位置モニターの設置

光軸の位置と角度を知るために、2台目の光位置モニターとして鉛直専用型光位置モニターをBL17SUとBL29XUの下流部の2箇所に設置した。すべての挿入光源ビームラインの最上流には既に各1台の光位置モニターが設置されているが、2台目のモニターは主マスク下流の設置となり開口が制限されていることや、上流側検出素子の影の影響を受けることなどにより、光位置モニターの形状を最適化することは困難であった。しかし、鉛直方向のビーム位置を精密に決定したいビームラインにおいては、鉛直方向の位置のみを測定することで、前述の問題を克服することが出来る。この鉛直専用型光位置モニターはブレード形状の2枚の検出素子を光軸中心の上下に配置させ、検出素子の間隔を可変とする機構をもつ。BL17SUには、検出原理として光伝導型を採用した。この検出素子は、挿入光源ギャップ依存性の抑制のために開発されたものであるが、検出素子の有感領域を点状に小さく出来るため、BL17SUの様々な挿入光源運転モードのビームプロファイルに対応できることを特徴としている。BL29XUには、従来から用いられている光電子放出型を採用した。この検出素子は、使用実績が豊富であるため信頼性が高いことが特徴である。これら2台の光位置モニターの位置分解能は当初の設計どおりの値が達成されているが、光伝導型検出素子は長期的

な安定性に劣るため留意して使用する必要がある。

#### (3) スクリーンモニター改造

BL29XUで発生した、スクリーンモニター (SCM) 2のOUTエラーによるビームアポートへの対策として、全ビームラインにおいて、SCMへのメカニカルストップの取り付けを行った。この不具合は、SCMの圧空配管部品が放射線損傷を受けたためエア漏れが生じ、モニターが真空チェンバ内に引き込まれたことにより発生したものである。SCMは、通常のユーザ運転中には使用されないにも関わらず、今後も同様の事象が発生する可能性があるため上記の対応をとった。蓄積リングやビームラインの改造を実施した後の光軸確認等でSCMが必要な場合には、事前にストップを外すことで対処する。

#### (4) 高速シャッターシステムの改造

供用開始以来いくつかのビームラインで発生した高速シャッター (FCS) の誤動作の原因が、FCSコントローラとPLCのラッチボックス間のケーブルにある可能性が高いことがわかった。これは、従来の配線 (シールドを接地せず、また途中で端子台を介した配線) を、ツイストペアのシールド線 (シールドをフレームグラウンドに接地) に替え、かつ端子台を介さずに直接つなぐ配線に変更したところ、信号ノイズが約1/5に減少したことを確認したためである。冬期運転停止期間において、本配線への変更を全ビームラインで実施した。

### 2-2 高度化

#### (1) 新型ベリリウム窓の弾塑性解析による寿命評価

特にイメージング、トポグラフィのユーザからビームの均一性の改善要求 (コヒーレンシーの低下抑制) があり、既存の一般的なX線窓用ベリリウム窓を高純度 (99.8%以上) ・高面粗度 (Ra 0.1  $\mu\text{m}$ ) 型のものに順次交換している。しかしこの新型の窓材は、引張試験の結果、試験片毎のばらつきがあるものの、従来品に比べて耐力、引張強さとも、常温時で約70%に、高温時 (200 ) では約50%に低下することが確認されている。従って、標準型アンジュレタからの熱負荷を考慮すると、最大相当応力を耐力以下に抑えるという従来の設計基準から逸脱することになり、三次元有限要素法「ANSYS」を用いた弾塑性解析による寿命評価を行った。繰り返し熱負荷が与えられた時の応力 歪み線図を計算したところ、塑性シェイクダウンは起こらずラチェット現象が発生し、全歪み範囲及びラチェット歪みは各々  $1.1 \times 10^{-3}$ 、 $-3.6 \times 10^{-6}$  と見積もられた。この結果をManson則に従い常温及び200 の両方のデータに対して評価したところ、いずれも  $10^6$  回程度の寿命を有することが確認できた。また、赤外線ランプによるオフラインでの10,000回の繰り返し照射 (ベリリウム窓での吸収熱量を放射光照射の場合と同等に設定) を行った本材に対してEBSP (Electron Backscatter Diffraction Pattern) 観

察を実施した。その結果、結晶粒内のミスオリエンテーション（方位差）は、未照射材と照射材で差異はなく、またこの値も小さいことから、照射材に損傷はほとんどないことが確認できた。この新材への移行によりユーザ側から改善の報告もなされているが、この材料でも母材内部にポイドが存在し、表面研磨だけでは透過強度の一様性が完全には改善されないこともわかってきている。今後も、光学系・輸送チャンネルグループと連携しながら、ユーザ実験の成果向上のための新たなベリリウム材の選定を行うとともに、新たな材料に対しても機械的特性の把握や解析による評価を継続して行っていく。

#### (2) 高耐熱フロントエンド機器の開発

電子ビーム照射装置を用いて、メタルフィルターの接触熱コンダクタンス（接触熱抵抗の逆数）の定量的評価を行った。メタルフィルターは、低エネルギー成分を除去するためのアルミニウム板を水冷銅ブロックにネジ止めした構造になっており、アルミニウムと銅との接触部における熱伝導特性が耐熱性を決定する。接触熱コンダクタンスは、接触面の表面粗さ、うねり、押し付け圧力、酸化状態や、接触固体の硬さ、熱伝導率、また接触面間に介在する物質の特性にも影響されるが、今回は、主に表面粗さ、うねり、押し付け圧力、中間材に的を絞って定量的評価を行った。評価方法は、入熱量を管理した電子ビーム照射を行い、アルミニウムフィルターと水冷銅ホルダに埋め込んだ熱電対の温度差を計測する一方、ANSYSで実機をできるだけ実際に即してモデル化し、接触要素の熱コンダクタンスをパラメータとして解析を行い、両者を比較するものである。その結果、接触面が通常の機械加工による面仕上げの状態、一般的なボルト締結用のトルク量で押し付けた場合、金箔や銀箔などの接触向上用の中間材の有無・種類に関わらず、接触熱コンダクタンスは少なくとも $10,000\text{W}/\text{m}^2$ 以上は得られることが確認できた。また、面仕上げが粗い場合には、中間材を入れる効果は無く、逆に接触箇所が増えることによるマイナスの影響がでる傾向にあること等もわかった。これにより、メタルフィルターへの限界入熱量の評価が可能となる。今後はグラファイトフィルターについても同様の実験を行っていく予定である。

#### (3) 高速型光位置モニターの開発

パンチ毎の計測を目指した高速型光位置モニターの開発を行っている。従来の光位置モニターは、耐熱性を高めるため検出素子は比較的大型のブレード形状とし、水冷ホルダーへの固定は薄膜セラミックを介して電氣的絶縁をとるとともに、熱的接触を図っていた。しかしながら、検出部の電気容量は大きくなり、信号検出の時定数は数100nsと長いものであった。電気容量を小さくするために検出素子を小型化するだけでは、耐熱性が犠牲になってしまう。そこで、高周波用同軸ケーブルにインピーダンスを整合させたストリップライン型光位置モニターを新しく考案した。

ストリップラインに直接光を照射する必要があるため、銅製のストリップラインを熱伝導率の高い窒化アルミの板を介して冷却ブロック上にロウ付けしていることが特徴である。電子回路用プリント基板でストリップラインを模擬的に製作しネットワークアナライザーで測定したところ、10GHz以上の帯域を実現できる可能性を示唆するものであった。このストリップライン型光位置モニターは、2nsのパンチ間隔の信号を個別に計測できることが期待できる。また、パンチ電流値モニターやパンチタイミングモニターとしての応用も検討している。

#### ビームライン・技術部門

光源・基幹チャンネルグループ 基幹チャンネルチーム  
高橋 直

### 3. 光学系・輸送チャンネル

#### 3-1 新規増設・改造

##### (1) BL08B2建設

兵庫県の2本目となる偏向電磁石ビームラインBL08B2では、遮蔽ハッチ、光学系・輸送チャンネルなどの設計及び建設が進められた。既設近隣ビームラインであるBL08W及びBL09XUとの干渉を考慮し、分離型タンデムハッチが採用された。また、コリメータミラー～二結晶分光器～集光ミラーの光学系構成のため大型の傾斜・昇降架台が設置された。建設はほぼ予定通り進み、2005年5月ごろ使用前検査、引き続いて試験調整運転へと進む予定である。

##### (2) BL17SU建設及び立ち上げ

2004年度は、新たなビームライン分光器の据付調整と、後置鏡の据付調整及びコミッションングを行った。2組の前置鏡調整機構によって分岐された放射光は、ブランチaとブランチbに分岐される。本年度は主として、ブランチbの分光器据付とブランチaの後置鏡の精密調整を行った。

ブランチbでは、発光点を光源として入射スリットを用いず、球面鏡と回折格子を経て出射スリットに分散光を与える光学系を採用した。全長79mの巨大な分光器であり、光学機器の安定保持のため、床面安定化のためのシールドを施した上で、熱膨張係数の小さなコーズライト架台を採用した。

後置光学系は、楕円筒面鏡によるタンジェンシャル横集光と、円筒面鏡によるサジタル集光を組み合わせている。真空中で独立に駆動される3軸の回転軸及び並進2軸の遠隔駆動の微調整機構を開発した。これら2枚1組の後置鏡の焦点条件を精密に求め、試料点において、当初の設計どおり、縦4ミクロン、横12ミクロンの集光を確認した。

ブランチaでは2箇所集光点においてユーザ実験装置が据付され、コミッションングが進められた。

##### (3) BL40B2改造

BL40B2はその後に建設されたBL38B1、BL26B1、

BL26B2、BL32B2などの偏向電磁石ビームラインの光学系・輸送チャンネルの原型となったビームラインである。二結晶分光器とその下流に下向き偏向のシリンダカル・ベントミラーを配置する構成は同様であるが、ミラーの角度が固定という制約があった。後続ビームラインと同様にミラー退避状態で実験ステーションまでストレート光が通せる状態からミラーを挿入し反射光を通す状態までミラー角度設定の自由度を確保すべく、ミラー周辺のレイアウト変更と、ミラー下流から実験ハッチまでの連結ダクト等の改造を行った。これにより利用の自由度がひろがった。

#### (4) その他の改造

BL29XUにおいて実験ホールの最下流付近に実験ハッチが追加建設され、長尺ビームラインに中距離の実験オプションが加わった。また、BL40XUにおいて、新規研究プロジェクトに対応すべく実験ハッチ2が追加建設された。BL41XUでは水平偏向のミラー調整機構及び本体ミラーのアップグレードが行われた。

### 3-2 高度化・要素技術開発

継続的にビームライン光学系・輸送チャンネルの要素技術開発を進め、性能向上と安定な稼働を目指している。

#### (1) 偏向電磁石ビームライン用分光結晶

昨年度までに冷却水路の基本的な設計を終了しており、今年度は、結晶表面から水路までの最短距離の最適化を行い5mmから2mmに変更した。これにより熱歪は、(111)結晶では実用的にほぼ満足のできる範囲におさまった。(311)結晶においても、局所的な歪は観測されるが、プラグ角3°から26°の範囲で結晶水平方向全体からの反射を得ることができ、実際に第二結晶ベンダーと組み合わせでサジタル集光を行う目処がついた。

結晶結合を行わず従来型のフィン式結晶のまま、ホルダーのOリング面の高平面度化、上下面の平行度向上、フィンインサータの高精度化などによる不要な応力を軽減するアプローチも並行して行い、結晶の歪を軽減することに成功している。

#### (2) アンジュレータビームライン用ピンポスト結晶

アンジュレータビームラインの一部のモノクロメータでは、水冷ピンポスト結晶が用いられている。この結晶は反射面の直下にピンを稠密に配置した水路を加工し、熱伝達係数を稼ぐように設計されている。2004年9月にBL39XUにてピンポスト結晶の性能を評価した結果、結晶の製作工程で導入される歪の影響は111反射では観測されず、製作工程は十分に最適化されていることが示された。しかし、フルパワーのアンジュレータ放射光を受けたときには、熱に起因する歪やドリフトが測定された。

2004年の後半は、冷却効率の向上を目的にピンポストデザインの再検討を行った。現状の結晶加工技術の範囲内で小さいピンをできるだけ多数配置することを目標に、テスト

ピースの加工テストを繰り返した。その結果、直径0.2mmのピンを縦ピッチ0.5mm、横ピッチ0.6mmの千鳥型に配置することに成功した。新しいピンポストデザインの結晶もビームラインで使用可能な形で納入されており、2005年度内に評価する予定である。

#### (3) アンジュレータビームライン用液体窒素冷却分光器

分光結晶はトップアップ運転の開始に伴い、従来と比較して実質的に熱負荷が増えた状態で使用しているが、循環装置、分光結晶ともに熱負荷に関する問題は発生していない。

冷却に循環流体を用いる分光器では振動の発生を避けることができないが、循環する液体窒素の圧力変動対策と流量の調整、及び分光器内のフレキシブル配管等の振動対策を行うことで、使用上での問題が無い程度まで抑制されている。また、新たに可変絞りに付きのダンパーを配管に取り付けることで、振動を抑制できることが確認された。これらの振動対策を行い、冷却流体が原因である振動は抑え込まれたが、その結果冷却流体以外の振動原因が見えてきた。その一つが分光器に取り付けられたターボポンプ冷却ファンである。分光器のより一層の振動抑制にはこれらの振動源の抑制対策も必要である。振動に敏感なビームラインでは、ターボポンプの冷却ファンをポンプ本体から取り外し、独立の架台に設置して振動の伝搬を防ぐ等の対策を行って、効果をあげている。

SPring-8に於ける分光結晶の液体窒素冷却では、循環液体窒素により冷却された銅ブロックにシリコンを接触させる間接冷却方法を採用している。この冷却方式の最も大きな熱抵抗はシリコン結晶と銅ブロック間の接触熱伝達部である。接触熱伝達を良くするために結晶と銅ブロックとの間にインジウムシートを挟み、一定の圧力で押し付ける方法を採用している。この押し付け圧力は大きいほど熱伝達は良くなるが、その一方では結晶の歪が大きくなるおそれがある。そこで、液体窒素冷却温度における接触熱伝達率を測定するための装置を製作して、接触圧力が小さくても熱伝達の良くなる条件の探索を目的として、熱伝達試験を開始した。

#### (4) アンジュレータビームライン用ダイヤモンド二結晶分光器

近年完全性の高い人工ダイヤモンド結晶が育成されるようになり、X線の分光結晶としても実用レベルになってきた。ダイヤモンド結晶は熱的な性質に優れるため、シリコンのピンポスト水冷結晶や液体窒素冷却シリコン結晶と並び、高熱負荷の分光結晶の有力な候補である。今年度は、標準アンジュレータビームラインBL09XUにおいて、ダイヤモンド結晶のSPring-8標準二結晶分光器(SSM)への導入と評価を行った。

分光結晶としては、間接水冷のダイヤモンド(111)結晶を用いた。ホルダーへの取り付けの際には、あらかじめ二結晶法で評価することで取り付け歪を抑制した。アライ

メントは、従来手順に加え幾つかのモニターを導入することで簡便に行える方法を確立した。オンラインでの評価結果は、フォトンフラックスとしてはほぼ計算通りであり、SSMにマウントされたシリコン(111)分光結晶と比べると $E < 38\text{keV}$ では半分程度、 $38 < E < 55\text{keV}$ では6倍以上の強度が得られる。最大入射パワー200Wまで顕著な熱歪みは観測されなかった。単色光のビームサイズはほぼ計算通りであったが、空間プロファイルには微細な構造がみられた。幾つかのエネルギーにおいて核共鳴散乱用の高分解能分光器を通したパフォーマンスを評価したが、フォトンフラックス、ビームサイズとも従来と同等か上回る結果が得られた。

今後の課題として、より簡便なホルダーへの取り付け方法の開発と、ドリフトの抑制があげられる。また、現行のSSMではダイヤモンド111反射で出せるエネルギー下限が6.6keVである。シリコン結晶と同様にさらに低エネルギー側を分光するためには駆動機構の大幅な改造が必要となる。

#### (5) 光学素子評価

ESRF-APS-SPring-8の光学系グループによる“Round Robin Project”が実施された。このプロジェクトでは、1組のミラー(平面鏡2枚と、トロイダル鏡1枚)をESRF、APS、SPring-8で持ち回り、各施設の表面形状計測装置で測定し、光学素子評価装置及び評価手法の比較検証を行うものである。1m級の長い放射光用ミラーから、超高精度に研磨された平面鏡などX線ビームラインにおいて用いられているミラーの曲率半径、形状誤差、表面粗さを評価した。

この結果は、ESRF-APS-SPring-8三極光学ワークショップにて発表され、情報交換が行われた。施設間で光学素子の評価尺度として意味のある数値を共有化すべく、今後もこのプロジェクトを続けていく予定である。

#### (6) 真空排気ユニット

標準排気ユニットの粗引きポンプの定期的保守を引き続き行っている。ポンプは一定期間で所定のベアリング等機構部品の交換を行うが、この交換回数に限度がある。そこで、交換頻度を低減できるように潤滑溜を増強した改造部品を試作し、長時間の試験運転を実施している。また、ポンプ電源ユニットの防塵対策を施し、ポンプ電源系障害対策を実施している。

#### (7) 高性能スリットの開発

輸送チャンネルにおいて用いられる標準的なスリットは、ベローズを介して大気側にある並進ステージの直線駆動を真空内に伝達しているが、真空チェンバを大気開放にしたときと真空排気した状態で、機構部の大気圧による変形によりブレード位置が変化するという問題がある。また、停電などでモータの励磁を切ると大気圧で真空側に引き込まれるなどの問題を抱えていた。今回、アンジュレータビームライン用の単色スリットについてこのような問題を解決すべく改良を行った。改良の要点は、真空中への直線導入の

ベローズを真空チェンバの両側に対向させ、貫通ロッドをチェンバ内で堅牢に結合させることにより大気圧の有無によるブレードの変位をキャンセルさせたことである。また、駆動用並進ステージについても市販品のなかでも最も位置決め精度、再現性に優れたものを採用し、全体をコンパクトなものにおさめた。

プロトタイプは長尺ビームラインの光学ハッチ内に設置され、利用者により実用的な性能が評価されているが、これまでのところ従来型に比べ性能向上が確認され、十分な性能が引き出されている。

今後、従来の標準型スリットと置き換えを進めるため真空チェンバなど外観寸法的に互換性のあるものの設計を進めていく。

#### (8) ベリリウム窓の品質向上に向けた評価

高い空間的可干渉性を必要とするビームラインを中心に、輸送チャンネル最終段にあるベリリウム窓による可干渉性の破壊がより深刻になり、より質の高いベリリウム窓の必要性が高まってきている。2001年度より継続的に、材料、研磨の両面からベリリウムの評価を継続している。

従来用いていた粉末冶金素材や融解素材には数ミクロン程度の空孔が多数存在し( $10^3 \sim 10^4$ 個/ $\text{mm}^3$ )このことは、X線透過イメージに見られる明るい点の密度のベリリウム厚さ依存性から推定されていたが、さらにX線CTによっても明らかになった。

今回、第三の製造方法である真空蒸着法に基づくベリリウム箔の評価を行った。

この素材は、真空蒸着による箔形成後、機械的強度を高めるために圧延しているが、圧延した素材そのもの場合は表面粗さが無視できず、表面粗さによる強度ムラが見られた。さらに鏡面研磨を加えた結果、真空蒸着素材については内部の空孔の存在を示すような強度ムラも現れず、窓材としては最良の結果が得られた。

今後、さらに詳しい評価を行い、実用化を進めていく。

#### (9) 冷却水増強

結晶分光器に液体窒素冷却を採用するアンジュレータビームラインの増加などにより、実験ホール内に供給される冷却水(L3系冷却水)の1ビームライン当たりの需要量は、施設建設当初の計画より増加しており、現状以上にビームラインが増えると、全体の需要量が供給量を上回ることが予想されていた。このため今年度は、施設管理部と協力し、L3系冷却水の水量及び冷却能力の増強を行った。

工事は主に機械室内のポンプ及び熱交換器の交換、増強と機械室周りの一部配管のサイズアップであり、実験ホール内工事は取り合い点のバルブの変更のみに留め、全体の配管変更などの大規模工事を行うことなく、共同利用を妨げることなく工事を完了した。

この増強により、蓄積リング全ての取り出し口にビームラインが建設されても、平均的に1ビームラインで結晶冷

却以外に使用される冷却水に変化が無ければ、全ての硬X線アンジュレータビームラインが液体窒素冷却を採用しても冷却水不足となることはなくなった。

ビームライン・技術部門  
 光学系・輸送チャンネルグループ  
 後藤 俊治、竹下 邦和、山崎 裕史  
 大橋 治彦、望月 哲朗  
 矢橋 牧名、仙波 泰徳

#### 4 制御

##### 4-1 全般

平成16年度には、新たにBL08B2（兵庫県ビームライン）の建設が開始された。これにあわせてビームライン制御系にも、ビームライン管理用ワークステーション（以下WS）、VME及びインターロックシステム各1式が導入された。現在、48台のワークステーション、101台のVME及び、48式のインターロックシステムが、ビームライン制御用として稼働している。後述するように、今年度はWS、VME関係の発熱対策が進み、ケーブルの取り回しなどの改善などを含め、より使いやすく、且つ廃熱効率の良いWS用ラックの設計を行い、BL08B2に導入した。また例年通り、夏期及び冬期停止期間には制御盤及びインターロックの定期点検を行った。また平成16年度には、台風による蓄積リング棟屋根被害があったが、制御系に関わる被害はなかった。

今年度は、制御系安定化、信頼性向上、実験ステーション制御系高度化などについて注力した。

##### 4-2 制御系安定化

###### (1) 制御用モジュールの高機能化

挿入光源制御系の安定化のために、昨年度に引き続きopt\_patternボードの導入をすすめ、ID25の制御系に導入した。opt\_patternボードは、キッカー電磁石電源とVME間を、光通信によって絶縁することができ、かつ、VMEが停止してしまった場合や、保守のためにVMEの電源を落とす場合にも、信号出力を保持できる。これにより、キッカー電磁石電源の制御系（光受信側）に、パターンメモリーを導入したことで、より安定に挿入光源の運転ができるようになった。

また、ID23の制御系では、運転開始以来使われてきたVMEボード類が、生産終了になるなど、今後の運転に支障をきたす状況となってきた。このため、制御系の見直しを行い、他の挿入光源やビームラインの制御系で用いられているボード類に交換する作業を行った。

2002年度より進めているVME CPUボードの高度化に伴って、ID制御系の全てのHP743rt（HP-RT）ボードについて、インテル系CPUのx86をベースとするボード（Solaris）への置き換えが完了した。これにより、ステアリング電磁

石の動的補正の高速化とともに、システムの安定化を実現した。

###### (2) VME熱対策とボード動作の安定化

また今年度は、VMEシステムの高度化に伴って発熱問題が重要になった。このため、各VME上のCPUの温度を、個別にモニタリングできるようにした。これを用いて、実稼働しているVMEの温度モニタリングを開始したほか、新たに納入されたVME CPUボードの固体検査を行った。この結果、特定のメーカー品の設計に問題があることが判明し、メーカー改修を行った。また、VMEシャーシの廃熱構造の検討を行い、熱的に安定なこと、冗長な電源設計等によって、システムを停止せずに保守できる機構を備えた、新しいVMEシャーシの設計製作を行った。このシャーシは、上述のBL08B2の制御系に導入されたほか、既存のVMEシャーシも順次置き換えを計画している。

1997年より導入している複数のVME I/Oボードに、VMEバスアクセスの不具合を発見した。この障害は、VME CPUボードの高度化により出現したもので、旧来のCPUボード環境では、発生頻度が極端に小さく、長い期間にわたって気がつくことのない不具合であった。対象となるボードは、現在300枚程度導入され、稼働しているが、2004年度中に、100枚程度の改修が終了した。2005年度以降も、引き続き改修を行う予定である。

###### (3) ノイズ対策

数年前からVMEパルスモータコントローラボードで異常な電圧が掛かり、ボードが誤動作したり故障したりするケースが数件発生しており、原因が掴めずにいた。今年度調査を続行したところ、この電圧は、分光器内で強いX線にさらされたチャンバーから発生する2次電子が、パルスモータコントローラのリミットスイッチに飛び込んで、チャージアップしていることが分った。そこで、このラインを接地することで、異常電圧発生に対処できることが分った。全ての分光器の制御系について接地処理を行い、問題は再発しなくなっている。

BL22XUで、フロントエンド機器と、インターロック機器の間のケーブルに、ノイズが乗って、インターロックが誤動作するという不具合見られたので、ケーブルの交換を行った。

###### (4) 瞬時電圧低下対策

落雷などのトラブルによって、年に十数件の頻度で、施設全体で瞬時電圧低下（以下、瞬低と記す）が発生する。こういった電源トラブルから、制御機器（WS、VME、インターロック、ネットワーク機器）を保護するため、これまで無停電電源装置（UPS）を用いてきた。ビームラインの数と共にUPSの数も増加し、平成16年までに約200台のUPSを制御系の保護のために用いていた。UPSのメンテナンスは、2.5年に一度のバッテリー交換作業、5年に一度のUPS本体の交換作業や、月1回の手動によるバッテリーチ

エック等が必要であった。それに加えて、高機能UPSは、バッテリー自己診断により無用の電源断を生じ、インターロック用PLCの動作不良を発生させ、年に数回の頻度でビームアポートを引き起こした。そこで、低コストでメンテナンスを必要としない、新たな電源装置の導入を検討した。

検討する際に、過去5年間にSPring-8で発生した電力トラブルの実態調査、UPSが保護していた機器の電力トラブル時の影響調査を行った。この結果、SPring-8では、0.5秒以上の電源トラブルは発生していないこと、ネットワーク機器とインターロック機器に対してのみ、電源保護が必要であること等が分った。このため、UPSよりも保護時間は短い、15年間メンテナンスを必要としない、コンデンサー式の瞬時電圧低下保護装置（MLP）が最適と判断した。MLPは、2005年3月に48本のビームラインにMLPを導入し安定に運用できている<sup>[1]</sup>。

#### (5) ハンディコントローラ開発

すでに報告しているとおり、GP-IBは制御系の中で不安定性の大きな要因となっており、順次、GP-IB制御機器を制御系から取りのぞき、より制御性の良い機器に交換してきた。大部分の制御機器は非GP-IB制御となったが、保守作業中にローカル操作が要求されるために、取りのぞけないGP-IB機器が残っていた。このため、VMEと手帳型個人情報端末（PDA）のみの組み合わせで、現場にて機器を動作させられるような、PDA制御システムの開発を行った。このための準備として、Linuxで動作するPDA上に、SPring-8の制御フレームワークMADDOCAを移植し、PDA上で機器操作を行えるソフトウェアを開発した<sup>[2]</sup>。来年度から、ローカル操作をVMEとPDAの組み合わせに切り替えることで、GP-IBの排除が完了する予定である。

#### (6) セキュリティの強化

実験ホールでユーザーが使用するネットワーク（BL-USER-LAN）上に、ウィルスに感染したPCが持ち込まれ、他のユーザーへ影響を及ぼす事象が散見された。このため、2004年夏期停止期間中に、BL-USER-LANに、コンピュータウイルスやワームの拡散を防御する、セキュリティゲートウェイ（CheckPoint製InterSpect410）を導入した。セキュリティゲートウェイは、例えば、ビームライン利用者が、BL-USER-LANにセキュリティ面が不十分なコンピュータを持ち込み、そのコンピュータからワーム拡散や攻撃が始まった場合、あるいは疑わしい通信状況が発生した場合、該当コンピュータの外部への通信を自動的に遮断する。この機能により、セキュリティゲートウェイは、ワーム拡散を防止するだけでなく、ワームによるBL-USER-LANの基幹ネットワーク機器への高負荷を防止し、ネットワークを利用した実験環境を維持し続けることに効果を発揮している。セキュリティゲートウェイ導入後、BL-USER-LANをより安全、安定に使用することが可能となり、ワームによるBL-USER-LANの停止は発生していない。

#### (7) 監視系強化

制御用計算機の安定運用のためには、各計算機のリソースの使用状況や、CPUの温度など、様々な情報を集める必要がある。そこで、制御用計算機安定運用のために、どのような情報を集めて記録を取るべきかの検討を行い、データベースに情報を登録できる計算機情報収集システムを開発した。このシステムは、ビームラインのVMEやワークステーションから、システム稼働時間、CPUの温度、ディスク使用率などのリソース情報をデータベースに収集することができる。これらのリソースの使用状況を、長期的にモニタリングすることにより、正常時の状態をあらかじめ把握する事ができる。

2005年2月より、システムの監視を始めた。これにより、不具合の予兆を察知し、不具合が発生する前に対処することが可能となり、制御システムの安定性向上が期待できる。

#### 4-3 データベース、計算機

実験ステーションから出てくるデータを、簡便にかつ使いやすく保存するためのデータベースシステム（MyDAQ）を開発し、2、3のビームラインの真空度の記録や、実験データの記録に導入した<sup>[3]</sup>。

現在、オペレータコンソールとして使われている端末は、HP社製のOS（HP-UX）を搭載したWSを使っているが、今後、機種選択の幅を広げるために、Solaris OSを使うための各種試験を行っている。これまでSolarisでは、データベース（Sybase）にアクセスするライブラリがなかったが、各種調査の結果、アクセス用ライブラリが整備されつつあるので、このライブラリを用いて、データベースアクセスが正しく行えるかどうかのテストを進めている。

加速器部門制御グループと共同して、情報共有用のWebサーバーの設計と立ち上げを行い、各種ドキュメント、ノウハウなどの情報共有を開始した。

#### 4-4 実験ステーション制御系高度化

##### (1) 高速化と自動化

蛋白結晶構造解析ユーザーは、多くの蛋白質結晶構造解析を迅速に行うため、多数のビームラインを用いている。これまでは、保守性やユーザーの利便性などを考慮して、立ち上げ時に、それぞれのビームラインで、独立にデータ収集系を導入してきた。そこで、これらのデータ収集系の見直しを進め、ハードウェア、ソフトウェアの共通化を図ってきた。出来るだけ汎用性のあるハード、ソフトを用いることで、高い移植性、保守性を確保する。このために、蛋白用回折計制御に、フロントエンド、輸送チャネル制御系と同様のVME制御系を用い、ソフトウェアも、SPring-8制御フレームワークMADDOCAを利用している。昨年度までに、偏向電磁石ビームラインでの整備をおおむね完了した。今年度は、挿入光源ビームラインBL41XUの実験ス

レーション高度化に伴い、回折制御系を既存のPCベースから、VME制御系へと更新した。

挿入光源ビームラインでは、X線の強度が偏向電磁石の10～100倍以上強いため、これまでよりも迅速にデータ収集が行える。このため、回折計の制御は、これまで10msecのタイミング精度で行えば十分であったが、BL41XUでは、1msec以下のタイミング精度が要求されることになった。ハードウェアの構成を同じに保ったまま、この条件を満たすために、VMEに2つのCPUを載せた。片方のCPUをタイミング制御専用、もう一方を、通常の作業（たとえば上位コンピュータからの問い合わせに対する応答など）に、役割分担をする仕組みを考え、VMEをDual Master Configurationで制御する構成を導入した。この仕組みはもともと、挿入光源の高速ステアリング制御への適用を想定して開発されたものであったが、BL41XUの蛋白用回折計制御にも適している。計測の結果、約100μ秒程度のタイミング制御を実現することができ、かつ、上位計算機（ワークステーション）のソフトウェアは、偏向電磁石ビームラインで開発した物を、そのまま使用することができた。平成16年度夏期停止期間中に、本システムの導入を行い、10月からのユーザー運転で実用に供されて、大きな問題なく稼働を続けている。

## (2) 分光器制御自動化

昨年度、蛍光板に映し出されたX線のスポット位置を、ビデオカメラで捕らえて、回折計上の試料の向きを決定するシステムを構築した。今年度は、その応用として、分光器から出てくるX線の位置をビデオカメラで捕らえ、自動的に分光器の調整を行うシステムの開発を行った。

## 参考文献

- [ 1 ] Y.Ishizawa et al.: "Installation of Instantaneous Voltage-drop Protector - Freedom from UPS Maintenance", Proc. of WAO' 05, Chicago, USA, 2005.
- [ 2 ] Y.Ishizawa et al.: "Development of a field controller with a PDA handheld computer", Proc. of PCaPAC' 05, Hayama, Japan, 2005.
- [ 3 ] A. Yamashita and T. Ohata : "MyDAQ, a Simple Data Logging and Display Server", Proc. of PCaPAC' 05, Hayama, Japan, 2005.

ビームライン・技術部門  
制御グループ

田中 良太郎

## 5. 検出器

### 5-1 全般

SPring-8は、赤外・軟X線領域分野から、生命科学分野で主に利用される12keV近傍の硬X線領域、更に材料科学

分野で利用される100keVを超える高エネルギーX線領域に至る非常に広範囲のエネルギー領域に渡って、高輝度、大強度の放射光を創出する事を特徴とする。この第三世代放射光源の恩恵を最大限に生かす為には、試料による透過、散乱、回折を高精度で計測する実験技術の開発が当然必要になる。SPring-8では、各ビームラインに於ける計測装置の高度化と並行して最先端のX線検出器開発を行っている。

検出器開発の指針として、検出効率の向上（特に高エネルギーX線）、許容計数率の向上、時間応答の高速化、多素子化（位置敏感型化）等があげられる。特に、多素子化、1次元化、2次元化（画像化）は、実験の効率を格段に向上させるだけでなく、短寿命状態のその場観察等、研究対象の拡大にもつながる。実際、1次元型検出器の典型であるPSPCや2次元型のイメージングプレートは、有効な計測装置として第二世代放射光実験・X線発生装置実験で既に普及している事は御承知の通りである。しかしながら、これらの既存の検出器をSPring-8で利用する場合、許容計数率（量）対高エネルギーX線感度、読み出し時間が問題となり、冒頭に示したSPring-8の特性を生かした応用には制限がある。

第三世代放射光源では、タンパク質結晶構造解析実験を典型として、PSPCやイメージングプレートからCCD型検出器に主役の座が交代した。CCD型検出器の登場なしには、SPring-8の多くの成果が語れない程、絶大な威力を発揮している。しかし、CCD型検出器は、積分型検出器の宿命として露光時間に比例してベースノイズが存在するので、長時間露光には適さない。即ち、短時間の露光で高統計が得られる第三世代放射光源だからこそCCD型検出器が威力を発揮できたと言える。逆に、SPring-8をもってしても微弱な反射しか得られない事象の研究では、依然として0次元検出器による走査法が主流になっている。単一X線光子を計測する、所謂、photon counting型の2次元検出器の開発が必要になる。

2004年度より利用実験時のトップアップ運転が始まり、検出器を含む計測技術の高度化の重要性が益々高まってきている。同年10月には、第8回SPring-8シンポジウムに併せて、「利用技術に関するワークショップ - 最新の検出器とその応用 - 」が開催され、2次元検出器の開発、応用、成果に関する議論がなされた。また、11月の第9回3極ワークショップの際には、検出器ワークショップが前日に開催され、SPring-8、ESRF、APSの検出器担当者による現状報告を行った。同時に、3施設の協力体制が討論され、アバランシェフォトダイオード（APD）検出器の大面积化（多素子化）及び高周波数に対応する周辺回路の開発に関する研究協力を実施する事を合意した。

本稿では、1次元ないし2次元型X線光子計数型検出器開発の以下の事例を報告する。高エネルギー領域では、マイクロストリップ・ゲルマニウム検出器、YAP画像検出器

が開発され実用に入っている。開発段階の詳細は前年度年報他に譲り、本稿では利用例として、2004A期に実施された課題実験の報告をする。また、SPring-8で最も標準的に利用されている10～30keV領域でのアプローチとしては、スイス・パウルシュラー研究所（PSI）との研究協力協定により開発中のマイクロストリップ（シリコン）検出器、ピクセル検出器について現状を報告する。

## 5-2 マイクロストリップ・ゲルマニウム検出器

マイクロストリップ・ゲルマニウム検出器は、高エネルギー非弾性散乱ビームライン（BL08W）B実験ステーションでの高分解能コンプトン散乱実験において、単素子ゲルマニウム検出器を用いる従来の計測方法から格段の効率向上を図る事を目的として開発された計測装置である<sup>[1]</sup>。本検出器は、70～90keVの領域で350 $\mu$ mの位置分解能の実現、かつバックグラウンドX線除去の為に3%以下のエネルギー分解能を有する事が条件とされ、これを達成する為に、面積50mm×55mm、厚さ6mmのゲルマニウム素子に300 $\mu$ m×40mmの電極が350mmピッチで128本配置されている。

2004A長期利用課題「高分解能（磁気）コンプトン散乱測定による巨大磁気抵抗物質の電子及び軌道状態の研究」（実験責任者：小泉昭久、兵庫県立大学）では、層状Mn酸化物 $\text{La}_{2-2x}\text{Sr}_{1+2x}\text{Mn}_2\text{O}_7$ （ $x=0.35$ ）の磁気コンプトンプロファイル測定を行った。低温での強磁性金属相、磁気転移温度直下の常磁性絶縁相及び7Tの外部磁場を印加した巨大磁気抵抗効果（CMR）条件下において、[100]軸から[110]軸の間の9方位で高分解能コンプトンプロファイルを得た。検出器の観点から得られた成果は、単素子ゲルマニウム検出器を用いる従来の計測方法に比べて約50倍の効率化が図られた事と磁場の影響に妨げられない点がある。

## 5-3 YAP画像検出器

YAP検出器は、高エネルギーX線領域で時分割X線画像を迅速に取得することを目的として開発した計測装置である<sup>[1, 2]</sup>。同検出器にはYAPシンチレーター素子（ $\text{YAlO}_3$ ：Ce、1mm×1mm×6mm）の2次元配列[128×128]が組み込まれている。高エネルギーX線光子が誘導するシンチレーションの位置を高速で決定するために、光学ファイバ群とマルチアノード光電子増倍管とから構成されるプロジェクト読み出し方式、及び高速位置座標変換装置とを採用している。

広Q領域の構造因子測定は、従来、回折計とシンチレーション検出器を用いた走査法の測定速度に支配されてきた。しかし、YAP検出器を利用することで広Q領域の構造因子測定の迅速化、さらに従来は不可能であった2次元回折像の時間変化追跡が可能となった。こうした観点から、

昨年度、高エネルギーX線回折ビームライン（BL04B2）に於いて亜鉛を加熱・冷却し、固相から液相、液相から固相への相転移時に於ける2次元X線回折像を取得した<sup>[2]</sup>。この手法を応用し、2004A利用課題では、2次元検出器を使った高エネルギーX線回折法による過冷却メルトからの凝固観察を学習院大学渡辺匡人グループと行った。本研究では、非平衡相である過冷却状態からの凝固、結晶成長を観察するためX線回折法を用いるが、過冷却状態が不安定であることと回折X線の時間変化を観測するために、迅速なX線回折の測定が必要である。このため、広い波数領域の回折X線を短時間で測定でき、さらに凝固・結晶成長過程の観察のため時分割の測定が可能なYAP画像検出器が応用され、その優位性が確認された。

## 5-4 ピクセル検出器

目下、ピクセル検出器技術は、医療から高エネルギー物理に至るまで、検出器技術に革命を起こしつつある。ここで言う「ピクセル」は、それ自身が既にX線検出器のシステムであり、単一X線光子が計測可能な機能を内部に有する微小機能体である。CCD型検出器のピクセルには可視光/X線が誘導した電子電流を蓄積、転送する機能はあっても、それ自身に光子を計測する機能はない。大面積CMOS集積システム（フラットパネル）も同様である。ここに本質的な差異があり、ピクセル検出器の絶大な優位性をもたらす。

第一の優位性は、ノイズが存在しない点である。ピクセル検出器はシリコン層をX線センサーとし、同層に吸収されたX線光子が発生する正孔を数10ナノ秒以下で直下のピクセルに検知して、デジタル情報（光子数）に変換する。検出からデジタル化までの時間的・空間的距離が最小化されたピクセル検出器では、実効上、読み出しノイズは存在しない。一方、CCDに発生した電荷は多数回転送され、最終段階で検知され、デジタル化される。転送中のアナログ情報の劣化は僅かであるが、最終段階での検知には読み出しノイズが重畳し、暗電流も問題となる。フラットパネルも同様の問題を有する。第二の優位性は、ピクセル検出器の高計数能力である。X線光子の検出情報のデジタル化は全てのピクセルに於いて並列的に進行する。その計数率は、10Mcps/ピクセルに達する。第三の優位性は、読み出し時間の高速化である。

ピクセル検出器は、APS、ESRFなど世界各国の放射光施設が注目し、国際的な開発競争が繰り広げられているが、スイス・パウルシュラー研究所（PSI）に建設された放射光施設Swiss Light Source（SLS）は傑出したピクセル検出器技術を誇り、PILATUS（Pixel Apparatus for the SLS）計画と呼んでいる<sup>[3, 4]</sup>。検出器チームは、JASRI-PSI研究協力協定（1999年5月～）に基づき、ピクセル検出器の共同開発研究を継続中である。2002年には、汎用単一モジュ

ール（ピクセルサイズ：217 $\mu$ m×217 $\mu$ m、ピクセル数：157×366、有感面積34.1mm×79.4mm）が完成し（図5）、同年9月にSPring-8にも実機1台が導入されている。また、2003年11月には検出器モジュールを3×6台組み合わせ、有感面積243mm×210mm、ピクセル数1,120×967（約1Mピクセル）の通称Pilatus-1Mが完成し（図6）、SLS-X06SAビームラインでの評価実験を開始した。

本年度は、SLSにおいてPilatus-1Mを用いたタンパク質結晶構造解析実験へ向けての試験が継続的に実施され、一般的な振動写真法、及び結晶を連続的に回転させて高速フレーム読み出しを行うfine-スライス法の標準データを取得した。特に、fine-スライス法は新しいX線構造解析手法として注目されているが、解析ソフトウェアが未開発で

ある事が課題となっていた。そこで、SLSではXDSプログラムを改良し、fine-スライス法の解析手法の開発も試みている。

一方、SPring-8においても、単一モジュール型検出器を空間的にスキャンさせる方法を用いてBL44B2ビームラインにおいて一連のタンパク質結晶構造解析実験を行い、標準的なタンパク結晶であるリゾチウムの電子密度分布をCCD検出器と遜色ない精度で決定できる事を示した。BL46XUビームラインでは超格子からの微弱反射計測等のR&D実験を行った。BL46XUでは、一般共同利用課題「X線回折による溶接金属急冷凝固組織のin-situ観察技術の開発、実験責任者：米村光治、住友金属工業」にも供され、有感面積が34.1mm×79.4mm程度ながら十分に実用可能である事が実証された。

同検出器の読み出しチップ（Pilatus-）は、放射線耐性DMILL CMOSプロセスにより製作したが、結果として約5%の欠陥ピクセルが生じる歩留まりが問題となっていた。本年度は上記の基礎実験と並行して、0.25 $\mu$ m CMOSプロセスによる新しい読み出しチップ（Pilatus-）が設計され、10月に製作工程に入り、12月に第1バッチが届き、欠損ピクセルが全くなく完璧な動作を確認している。その他、ピクセルサイズが217 $\mu$ mから172 $\mu$ mに小さくなっている等の仕様が改良されている。次年度は、Pilatus-による汎用単一モジュールをSPring-8へ導入する予定である。



図5 Pilatus 平面型モジュール検出器



図6 Pilatus-1M 検出器

新旧読み出しチップの性能比較

| 読み出しチップ | PILATUS                      | PILATUS                      |
|---------|------------------------------|------------------------------|
| CMOS技術  | DMILL                        | UMC 0.25                     |
| 面積      | 10.1×17.7mm <sup>2</sup>     | 10.5×17.5mm <sup>2</sup>     |
| ピクセル数   | 44×78 = 3432                 | 60×97 = 5820                 |
| ピクセルサイズ | 217×217 $\mu$ m <sup>2</sup> | 172×172 $\mu$ m <sup>2</sup> |
| カウンター   | 15bit                        | 20bit                        |
| 許容計数率   | 10kHz / pixel                | 1MHz / pixel                 |
| 読み出し時間  | 6.7ms@ 10MHz                 | 1.28ms@100MHz                |

新旧モジュール検出器のサイズの比較

| モジュール | PILATUS                      | PILATUS                     |
|-------|------------------------------|-----------------------------|
| チップ数  | 8×2 = 16                     | 8×2 = 16                    |
| ピクセル数 | 157×366 = 57462              | 195×487 = 94965             |
| 有感面積  | 34.069×79.422mm <sup>2</sup> | 33.54×83.764mm <sup>2</sup> |

#### 5-5 マイクロストリップ・シリコン検出器

SLSでは、1次元型マイクロストリップ検出器MYTHEN（Microstrip system for time-resolved experiments）が、SLS-X04SAビームラインで稼動している。同検出器は、上記のPILATUS検出器と同じ基盤技術を用いて製作されており、単位モジュールは、1280本のシリコンストリップ

が50 $\mu$ mピッチで形成されている(図7)。SLSでは、同モジュールを12台用いて、角度範囲60度、ストリップ数15,000本、角度分解能0.004度、読み出し時間250 $\mu$ sの時分割粉末結晶構造解析回折計を構築している。2003年度末に、試験用として同モジュール1台がSPring-8に導入され、2004A期BL46XUに於けるR&D課題としてCeO<sub>2</sub>による粉末回折評価実験を行った。この結果を受け、本年度末には、このマイクロストリップ検出器を7台追加導入した。今後、PILATUS検出器と同様に0.25mm CMOSプロセスにとる新しい読み出しチップに改良し、2005年度中の実用を目指している。

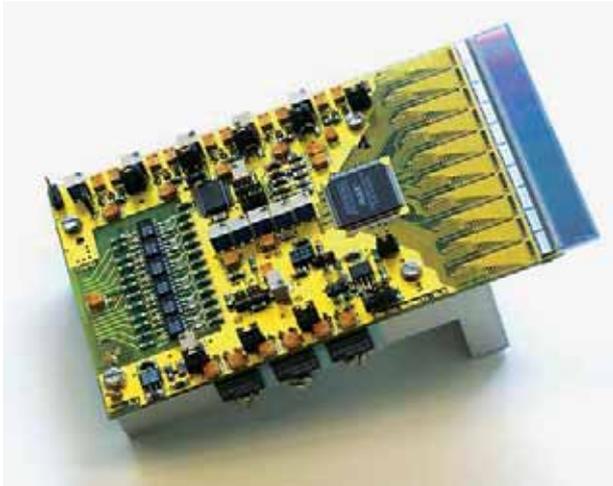


図7 マイクロストリップ検出器

#### 参考文献

- [ 1 ] M. Suzuki, H. Toyokawa and K. Hirota : in the proceedings of "Eight International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation," American Institute of Physics CP705 (2004) p.917.
- [ 2 ] H. Toyokawa, K. Hirota, M. Itou, S. Kohara, Y. Sakurai and M. Suzuki : Nucl. Instr. And Meth. A525 (2004) 85.
- [ 3 ] G. Huelsen, E. F. Eikenberry, R. Horisberger, B. Schmitt, C. Schulze-Briese, T. Tomizaki, H. Toyokawa, M. Stapanoni, G. L. Borchert, P. Willmott, B. Patterson and Ch. Broennimann : in the proceedings of "Eight International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation," American Institute of Physics CP705 (2004) p.1009.
- [ 4 ] Ch. Broennimann, Ch. Buehler, E. F. Eikenberry, R. Horisberger, G. Huelsen, B. Schmitt, C. Schulze-Briese, M. Suzuki, T. Tomizaki, H. Toyokawa and A. Wagner : Synchrotron Radiation News Vol. 17, No. 2 (2004) p.23.

ビームライン・技術部門

共通技術開発グループ 検出器チーム  
豊川 秀訓

## 6. 放射線評価

### 6-1 アンジュレータ放射光絶対強度測定法の開発

#### (1) 自由空気電離箱

エネルギー60keV以上のエネルギーの高いアンジュレータ放射光と、10<sup>14</sup>光子/秒と最も大強度な単色放射光の強度測定を行った。

前者には、開発した極板間隔85mmの自由空気電離箱を用い、BL20XUの60~100keV X線及びBL08Wの115keV X線に対して、十分な精度を有することを確認した。X線強度は、3.9 $\times$ 10<sup>11</sup> (60keV) 2.3 $\times$ 10<sup>11</sup> (80keV) 1.3 $\times$ 10<sup>11</sup> (100keV) 及び3.8 $\times$ 10<sup>12</sup>photons/s (BL08W)であった。ウイグラー放射光に対しては、-9.5kVまで印加して測定を行った。

BL19LXUの10<sup>14</sup>光子/秒の放射光強度についても、直接、高精度に測定した例はない。この放射光に対しては、極板間隔4.2mmの自由空気電離箱を用い、10keV X線に対して-3.8kVまで印加すれば、イオン再結合を無視できるレベルにできることを確認した。光子強度は1.10 $\times$ 10<sup>14</sup>photons/sであった。

#### (2) フラット空洞電離箱

フラット空洞電離箱は、アルミ蒸着膜電極を放射光ビームに対して垂直に配置した電離箱である<sup>[1]</sup>。エネルギーや強度に応じて、電極間隔を変えることができる。BL47XUの15~30keV X線に対して、十分な直線性を確認した。さらに、BL19LXUの10keV X線に対しても、極板間隔1mmのもと、-0.7kV印加すれば直線性を示すことを確認した。ただ、同BLでは長時間照射すると、電極の劣化と信号強度の低下が観察された。

#### (3) ガス蛍光

BL19LXUにおいてアルゴン蛍光の測定を行い、BL47XUの測定に比べてさらに直線からずれ、応答値が増大することがわかった。窒素を20~50%程度混合すれば、直線性が改善されることが示唆された。BL47XUの時は見えなかったが、窒素も強度が非常に大きくなると、非直線性が観察された。

### 6-2 大線量測定システムの運用<sup>[2,3]</sup>

蓄積リング内のクロッチ付近において引き続き利用されており、今年度は、さらに挿入光源及び基幹チャンネル(ID08)において、測定・読み取りを行った。後者の測定は、ケーブル損傷を防止するために設置された遮蔽性能の効果を確認するため、行われた。

年末にシステムのハードディスクにトラブルがあり、利用者の読み取りに支障をきたしたため、バックアップを常備した。

### 6-3 生体等価シート線量計の開発

放射光のような低エネルギー X線の被曝線量分布を詳細

に精度良く測定するためには、エネルギー応答に優れた2次元型線量計が有効である。引き続き、独立行政法人及び民間と共同で医学・産業応用を目指して研究を実施した。今年度は、ETFEベースに加え、PTFE（テフロン）ベースのシート線量計開発を試みた。さらに、読み取り装置も、従来の加熱プレート方式に加え、ガス加熱方式の適用について調べた。

#### 6-4 中性子遮蔽実験

SPring-8など高エネルギー加速器施設の放射線遮蔽設計に資するため、中性子遮蔽実験を実施した。まず、大阪大学核物理研究センターにおいて、原研、理研、大学及び民間と共同で350MeV準単色中性子の鉄及びコンクリート中における減弱とエネルギースペクトルの変化を測定した。あわせて、0度方向に生成する中性子エネルギースペクトルの測定も行った<sup>[4]</sup>。

欧州原子核研究機構（CERN）の高エネルギー基準場（CERF）施設においては、スタンフォード線型加速器センター、CERN及び東北大学と共同で実験を行った。120GeV/c（cは光速）の「混合」ハドロンビームを銅ターゲットに照射し、生成する中性子の鉄、コンクリート遮蔽透過後のエネルギースペクトルを測定した<sup>[5]</sup>。

これらは、高エネルギー加速器施設における放射線遮蔽設計のベンチマークデータとして有用である。

#### 参考文献

- [1] N. Nariyama : KEK Proceedings 2005-3 (2005) 123.
- [2] N. Nariyama : Appl. Radiat. Isot. **62** (2005) 693.
- [3] N. Nariyama, et al.: SPring-8 Document A 2005-002, (2005) 131.
- [4] Y. Iwamoto, S. Taniguchi, et al.: to be published in Nucl. Instru, Meth. A (2005).
- [5] N. Nakao, S. Taniguchi, et al.: to be published in Nucl. Instru, Meth. A (2005).

ビームライン・技術部門  
 共通技術開発グループ 放射線評価チーム  
 成山 展照、谷口 真吾

#### 7. 共通技術支援

周辺技術チームは、回路開発室、化学準備室、マシンショップ、ストックルーム、CAD室、共通測定器ストックの管理運営を行っている。

さらに、周辺技術チームでは、研究者等から直接依頼を受け各種作業を行っている。SPring-8に関わることであれば所属を問わず対応している。2004年度の作業依頼の件数は268件であった。その内訳はJASRI 59%、理研11%、原研10%、大学11%、企業5%、その他4%であった。

以下にそれぞれの管理運営状況を報告する。

#### (1) 回路開発室

回路開発室では、2004年度は、電気電子技術に関するコンサルティングなどの通常の技術支援業務に加え、A：蛍光X線検出型挿入光源用光ビーム位置モニター、信号処理回路系及び制御ソフトウェアの改良と普及作業、B：真空仕様の実験ハッチ用ビーム位置モニター開発についての技術支援、C：分光器フィードバックシステム（MOSTAB）によるビーム強度最大化制御の自動調整法の確立、D：ミラーによる高速ビーム位置制御のためのフィードバック制御回路の開発、E：高分解能ピエゾモーター駆動回路の開発などを行った。

#### (2) 化学試料準備室

化学試料準備室ではユーザーに対するビームライン測定試料の化学的処理のサポート、実験機器・器具の貸し出し、純水・超純水・各種ガス・その他の化学実験消耗品の供給、化学薬品の管理などを行っている。本年度は薬品管理システムの新システムへの移行に伴い、新システムの改良作業を行った。また、BL28B2のエネルギー分散型XFAS装置のガスパルス実験用in-situセルとガスパルス導入装置の開発及びそのユーザーサポートを行った。

#### (3) マシンショップ

マシンショップでは定期的に新規利用者に対して安全講習を行っている。各マシンショップにはカードリーダーを設置し安全講習修了者のみ入室できるようにしている。

2004年度は、第1と第2マシンショップ安全講習を15回、第3マシンショップ安全講習を7回行った。参加者は第1マシンショップが45名（ユーザー18名を含む）、第2が43名（ユーザー18名を含む）、第3が25名（ユーザー3名を含む）であった。

2004年度の1日の平均利用者数は、第1と第2マシンショップが13名で、第3マシンショップが10名であった。

ここで機器設計製作の作業依頼の1例を紹介する。図8に示す実験ステージは、宇留賀氏（利用研究促進部門 分光

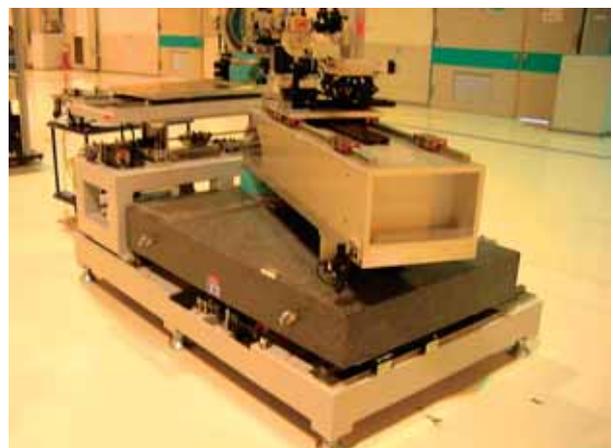


図8 実験ステージ

物性)からの依頼で、周辺技術チームの入江氏が設計したものである。溶接構造のベース部分等の大きな部材は外注し、各部品を周辺技術チームで組み立てたものである。石定盤(黒い部分)の上で、エアパッドで支えられたアームが、回転ステージによって、ビームに対する角度を変えることができる。石定盤はビームに対して左右に移動できる。外形寸法は長さ2.3m×幅1.3m×高さ1.3mで、重量は約2tである。

(4) ストックルーム

ストックルームの業務はユーザーの入/退室管理、備蓄品の入庫/出庫/在庫管理、工具類管理、液体窒素/液体ヘリウム管理などである。

2004年度のストックルーム、液体窒素、液体ヘリウムの利用割合及びストックコーナーの利用分布と月の利用推移を図9に示す。2004年度に利用者数は延べ14,064名、出庫件数は20,719件であった。

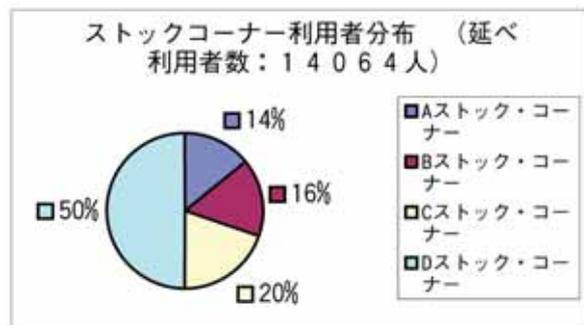
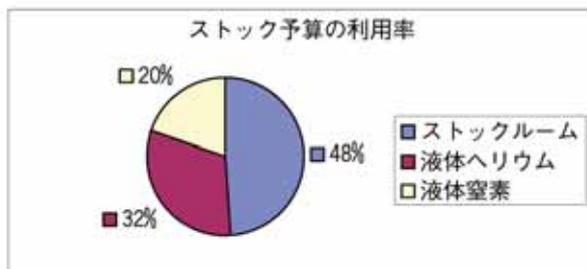


図9 ストックルーム、液体窒素、液体ヘリウムの利用割合(上段)ストックコーナーの利用分布(中段)月の利用推移(下段)。

2004年度、ストックルーム・ホームページにストック貯蔵品参照Webを作成、公開した。ストック情報、情報検索などを充実し、そのうち1700点あまりの部品情報、工作情報などを該ホームページに掲載した。

(5) CAD室

CAD室の業務はCAD機器管理、依頼によりCAD図面及びCADデータの保管、図面作成、データ変換、保管されている図面の打ち出しなどである。

2004年度CAD室が保有するCADシステムは次のようである。

- ・ IBM Helix CADAM(旧Micro CADAM)システム 6台
- ・ A&A Vector Works(旧Mini CAD)システム 2台
- ・ AutoCADシステム 2台
- ・ Fujitsu ICADシステム 1台
- ・ HP ME10システム 2台

上記の業務に加え、2004年度には次のような業務も行った。

- ・ SPring-8全体図のバージョンアップ
- ・ 第四世代放射光試験加速器施設の建て家図面、加速器機器図面の作図と図面管理
- ・ 「SPring-8 Research Frontiers」年鑑誌の挿絵作成
- ・ インターネットCAD部品参照ライブラリーの更新と補訂

ビームライン・技術部門

共通技術支援グループ 周辺技術チーム

工藤 統吾、呉 樹奎、横田 滋

安積 則義、佐藤 一道

8. ネットワークシステムの整備・維持・管理報告

SPring-8情報ネットチームとして以下のようなSPring-8内のJASRI、理研、原研を含むOA系ネットワークの整備・増強及び維持・管理・運用を行った。

8-1 ネットワーク機器整備・増強

(1) 外部接続の変更と高速化

SPring-8の実験研究者が大量データを全国、全世界の大学・研究所に転送しリアルタイムで解析等を行えるように外部接続をSINETに接続している。その回線は粒子線医療センターを経由して接続していたが、前年まで活用していたJGNプロジェクトが終了した事もあり、H16年5月26日西播磨県民局のアクセスポイントに直結接続に変更された。ここから兵庫情報ハイウェイ(500Mbps) 阪大Bio-Gridを経由してSINET大阪APの100Mbps-portに接続してきた。その後H16年8月26日にはこのBio-Gridプロジェクトが縮小されたこと及び神戸大学のSINETノードが1Gbpsになったことのため、神戸大学医学部を経由してSINET神戸大ノードに1GbpsのPortで接続した。また神戸大学にルータを設置させて頂いたためバックアップ回線も自動切り替えとなった(H16年12月)。(SINET接続/神戸大ルートの図10参照)

SINET 接続 神大ルート (2004.8~)

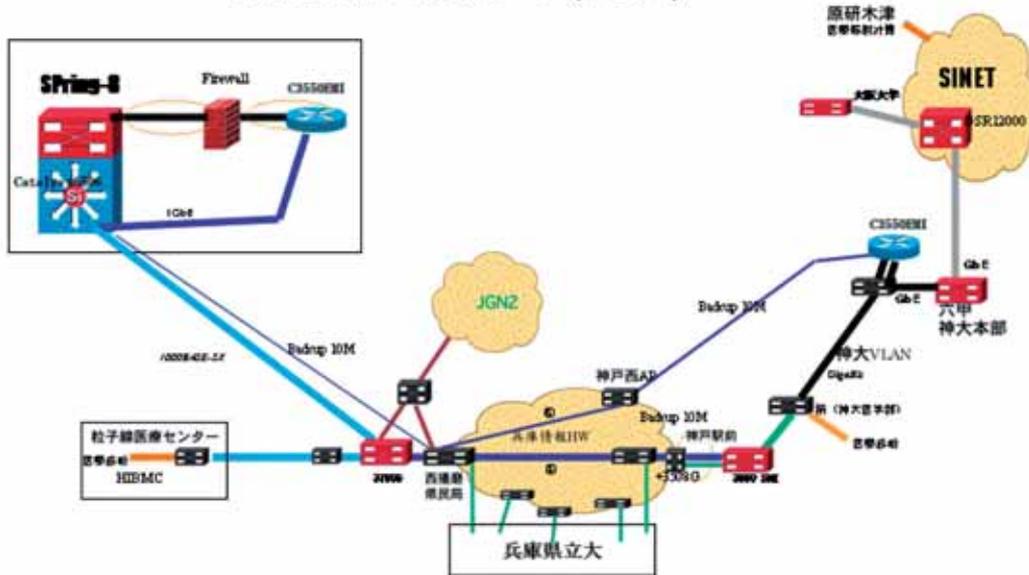


図10 SINET接続

(2) 所内の幹線の高速化

- ・各主要建物間の幹線を光ファイバーを利用して高速化 (1Gbps) を実現してきたが、これを更に推進するために基幹スイッチ ; Cat6500に1Gbps 12 portカードを増設した。
- ・中央管理棟におけるネットワークは高速化と二重化による信頼性の高い通信能力確保するため、中央管理棟4階にある基幹装置の更新を行った。
- ・蓄積リング棟CVCF室～医学利用施設間のネットワーク接続はリング棟Cゾーンの機器を経由していたが信頼性向上のため、一部光ケーブルを敷設し、直接接続とした。

(3) 各種サーバーの整備・増強

- ・メールサーバー  
SPring-8全体の代表メールサーバーの補助記憶装置の増強を行った。
- ・IMAPサーバー  
従来から電子メールについてはメールサーバ(sp8sun)を利用しているが、ユーザの利便性及びサイト外からのメールサーバアクセスに対するセキュリティ向上を目的としてIMAPサーバを構築した。現在、希望ユーザ向けに試験運用中であり将来はサービスを拡大する。
- ・サーバホスティングサービス  
仮想ホスト技術を利用したのホスティングサービスを運用開始した。利用研究促進部門、産業BL等のHTTPサーバサービスを運用開始した。近い将来に全ユーザ向けにサービスの拡大を行う予定である。

8-2 ネットワーク機器保守・管理

(1) ネットワーク機器の保守・管理

SPring-8全体のネットワーク接続機器 (OA系ネットワークスイッチ等) の保守・管理を行った。これらの設備は今や重要な通信基盤であることから、故障及び障害が発生した際の対応に緊急性を要求されるため緊急性の高い基幹部分に関しては24時間体制での保守契約の締結を行っている。また基幹との中継である各棟の集中ネットワークスイッチ (VLAN) 及び末端のハブ、スイッチに関しては代替装置・予備品を準備しておき当研究所のスタッフが交換するものとしている。

(2) 研究交流施設ネットワーク改修

研究交流施設は建設当時から使用しているネットワーク配線やハブに不具合が発生してきており、旧態化していたため、A棟のネットワーク機器を更新した。また、合わせて劣悪環境の収納室にあった機器をロビー側へ移設した。研究交流施設BCD棟のネットワーク機器不具合を調査して監視整備方法を検討する。

8-3 通信管理、サーバー類の運用保守管理

(1) IP addressの発行・運用管理

NSの管理とIP addressの発行に関する詳細情報データの運用管理を行った。

(2) SPring-8代表WWWサーバーを運用管理

(3) Mail、News、Proxyサーバーの運用・管理

SPring-8の代表メールサーバー及びウィルスメール監視装置の維持・管理を行った。メールアカウント新規発行・削除などの整理を行った。

SPring-8の各棟・各ブロックのネットワークを円滑に運営するために、それぞれのネットワークを管理するためのProxyワークステーションを運用管理した。

#### 8-4 インターネットセキュリティの維持・強化

- (1) 外部向けファイアウォール装置について、新たな手口によるネットワーク侵入に常に備えるために、保守契約に基づいたソフトウェアの更新を行った。
- (2) 外部発信の計算機約80台に関して、所外からの攻撃に対するPC、WSの脆弱性を検査した。セキュリティ検査を所内から行うためのソフトウェアと装置を試験導入して行い、結果を各管理者に報告し、セキュリティ向上を促した(9月)。

#### 8-5 ネットワーク認証システムの本格導入

- (1) 共用エリアで不特定者が利用する場合のネットワーク接続を認証する為のサーバーを導入し無線LAN利用者を含めた統括的管理を行うことによりセキュリティを向上させた。国際会議などのシンポジウムの来訪者等も安全に使いやすくなった。また利用実験施設では無線アクセスポイントを全棟で設置し統括的管理・運用が行える事を確認した。
- (2) 研究交流施設等のネットワーク接続認証開始；研究交流施設などの不特定多数が利用する有線LANについては無線LANと同様に接続時のユーザ認証を行うこととした。これにより利用者の特定、不適切なネットワークの利用などについて確認及び規制を行うことができるようになった。

#### 8-6 運転情報表示端末の保守・整備

2004年度に故障した運転情報表示端末数台の修理・交換等を行った。表示画面の劣化が目立ってきたためその9割を液晶ディスプレイに交換し保守整備した。また結果的に省電力にもなった。

#### 8-7 談話室・研究交流施設共用PCの管理

リング棟談話室、研究交流施設管理棟等の共用PCの管理を行った。

チームライン・技術部門

共通技術支援グループ 情報ネットワークチーム

武部 英樹、間山 皇、酒井 久伸

坂本 達亮、濱野 崇