

## BL20XU 医学イメージング

### 1. ビームライン建設の目的

BL20XU は中尺ビームラインとして2本目であり、共同利用ビームラインとしては唯一アンジュレータ光源のものである。中尺及び長尺ビームラインの特徴は、単純に言えば、その長さによって大面積ビームと高い空間コヒーレンスが得られることである。

リング棟実験ホール外に延長された一本目のビームラインは偏向電磁石光源のBL20B2である。このビームラインは各種イメージング実験（マイクロビーム、結像顕微鏡、トポグラフィー、トモグラフィー、屈折コントラストイメージング、マイクロアンジオグラフィー等）への利用を目的として設計されたが、以降の中尺及び長尺ビームライン建設の為にR & Dとしての役割も持たされていた。BL20B2は1998年2月のコミッショニング開始から、1999年10月には共同利用が開始され、各種イメージング実験等に利用されている。BL20B2での発光点サイズは水平300 $\mu\text{m}$ 、垂直50 $\mu\text{m}$ 程度である。分光結晶の振動による影響を考慮しても、発光点の見込み角は1 $\mu\text{rad}$ 程度であり、通常の結晶コリメータを用いた場合と同程度の空間コヒーレンスが得られている。しかしながら、フラックス密度に関してはエンドステーションでの実測値は $10\text{E}7\text{-}10\text{E}8$  photons/s/  $\text{mm}^2$ 程度であり、ビームラインの長さが異なるとは言え低エネルギー領域ではPFの偏向電磁石ビームラインより低い強度しか得られていない（原理的に当然の結果ではある）。したがって、高分解能で動的観測を行うような実験はこのビームラインでは不可能である。静的現象のみを対象としている場合はフラックス密度が観測限界を規定する場合は少ないと言えるが、現実的な実験条件（検出器のノイズや装置の安定性）を考慮するとより高輝度のアンジュレータ光源のビームラインが必要である。上記観点から、現在の偏向

電磁石光源のBL20B2と相補的な役割を担う目的で医学利用棟に引き込む2本目の中尺ビームラインとしてアンジュレータビームラインが提案された。

### 2. ビームライン設計建設

本ビームラインは医学応用のみならず種々イメージング技術の開発と応用を考えて企画された。その目的のひとつはそれまでR & Dビームラインである47XUで行われていたX線マイクロビーム/顕微鏡の研究を新しいビームラインに移行させることである。この目的でリング棟実験ホール内に第一実験ハッチを設置するものとした。また、生物試料等の実験の目的で医学利用棟内の実験エリアには各種の実験に対応可能なフレキシビリティの高いイメージング実験用ステーションをビームライン照射室(1)に設置している。BL20XUでは更に下流に臨床実験用エリアがあり、ビームラインの延長が可能である。しかしながら、現状では未だ臨床実験を行う予定が無いことから、この部分へのビームラインの延長は行わず、将来計画のために残してある。

光源には周期長26mm、173周期のハイブリッド型真空封止アンジュレータを採用している。最小ギャップ7mmで最大K値2.1が得られ、8 keV以上の全エネルギー領域を網羅出来るように設計されている。最大磁場強度は0.82テスラであり、標準型（周期長32mm）のアンジュレータに比較して高エネルギー領域を重視した設計である。

図1に示すようにビームラインの構成は光学ハッチと二つの実験ハッチからなり、実験ハッチ1(幅3m、長さ6m、高さ3.3m)は光学ハッチから分離して下流に30m離れた位置(光源からの距離は80m)に建設されている。ビームラインはさらにリング棟から外に延長され、約150m離れた

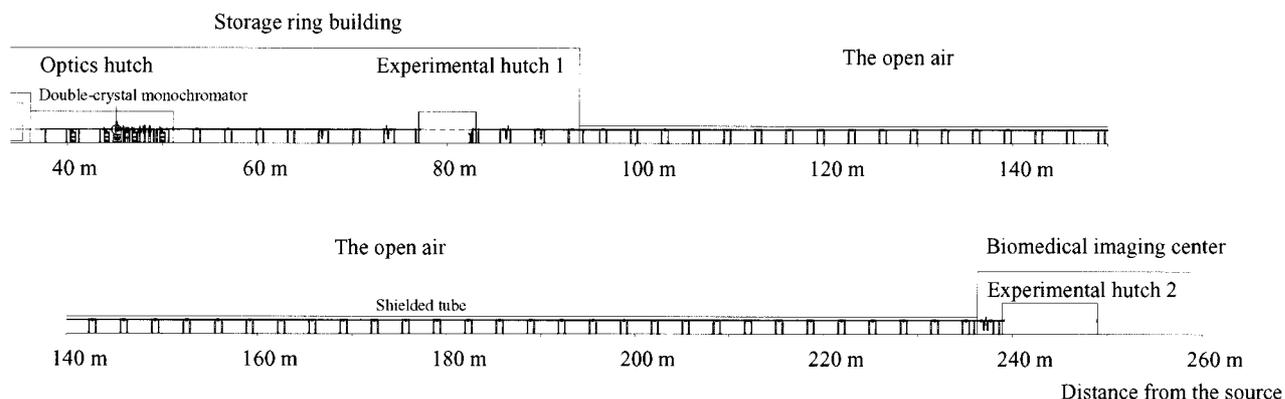


図1 BL20XU全体図



図2 BL20XU 建設後の全景



図3 実験ハッチ1内部の写真



図4 実験ハッチ2内部の写真

医学利用実験棟まで真空ダクトで輸送される。実験ハッチ2 (幅3 m, 長さ9 m, 高さ3.3m) は医学利用実験棟内のビームライン照射室(1)に設置されている。ビームライン光学系としては二結晶分光器だけであり、ミラー等の光学素子は無い。二結晶分光器はSPring-8のアンジュレータビームライン用標準分光器を用い、分光結晶は現在の所Si 111が使われている。冷却方式は閉鎖循環系の液体窒素冷却である。したがって回転傾斜配置ではなく通常の対称反射型で使われている。分光器の可動範囲からブラッグ角は3-27度になるので、Si 111 分光結晶では使用可能な最大エネルギーが37.7keVである。これだけでは高エネルギー領域の実験に適さないので、第一結晶を511反射結晶に交換して、第二結晶の333面と組み合わせた変則的な二結晶+-配置にして113keVまでの高エネルギー領域の実験を可能にしている。しかしながら、偏向電磁石光源のビームラインで使われている傾斜配置による反射面切り替えでなく、結晶を交換する方式であるために相当のシャットダウン期間が必要であり、改良の余地がある。

実験ハッチ1には図3に示すように、汎用の定盤とXYZステージ、ゴニオメータで構成されるX線イメージング用回折計が置かれている。本装置は、X線マイクロビームや顕微鏡実験を目的に設計されたものであり、BL47XUの実験ハッチ2から本ビームラインに移設された。下流側の実験ハッチ2での実験の際はこの部分を真空ダクトで置き換えことが出来る。また、実験ハッチ1,2を組み合わせての実験も可能である。実験ハッチ2には図4に示すように、精密X線光学実験やマイクロビーム実験が可能な汎用回折計と生物試料ステージ等から構成される実験装置が置かれている。

ビームラインの建設予算は1998年度からの3年計画として認可され、仕様策定後1998年末から順次発注建設作業が行われた。1998年の冬季停止期間のアンジュレータ設置に始まり、2000年5月からハッチ建設を開始した。医学利用棟の実験ホール(ビームライン照射室1)には大型設備に対応した搬入口が無かった。そのため、ハッチ建設に先立ち、2000年2月～3月に医学利用棟の搬入口建設工事を

行った。引き続き、夏期停止期間にフロントエンド、ビームライン輸送チャンネルの建設を行った。インターロック、ビームライン制御系の工事は10月～11月に行われた。ファーストビームは2001年1月に得られ、その後立ち上げ調整期間を経て、ユーザー実験は2001B (2001年9月) から開始された。

立ち上げと実験ステーションの整備が大体完了した状態である。図7にアンジュレータ放射のスペクトル測定の一例を示す。また、図8にテストとして測定した標準試料の吸収スペクトルを示す。第一結晶の交換によりCu K-吸収端 (8.9keV) から Au K-吸収端 (80.7keV) まで利用可能であることが確認された。

### 3. ビームラインと実験ステーションの現状

現在、いくつかの問題は残っているが、ビームラインの

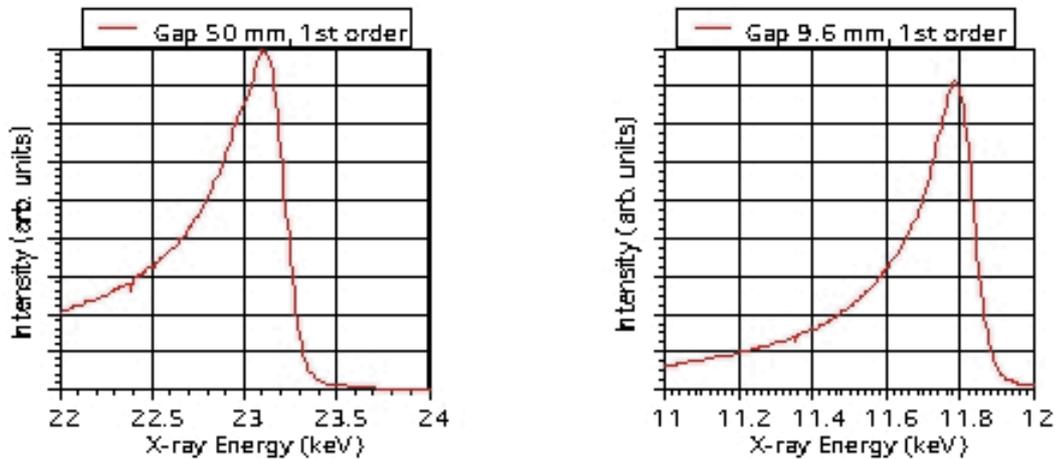


図7 アンジュレータ放射のスペクトル測定結果

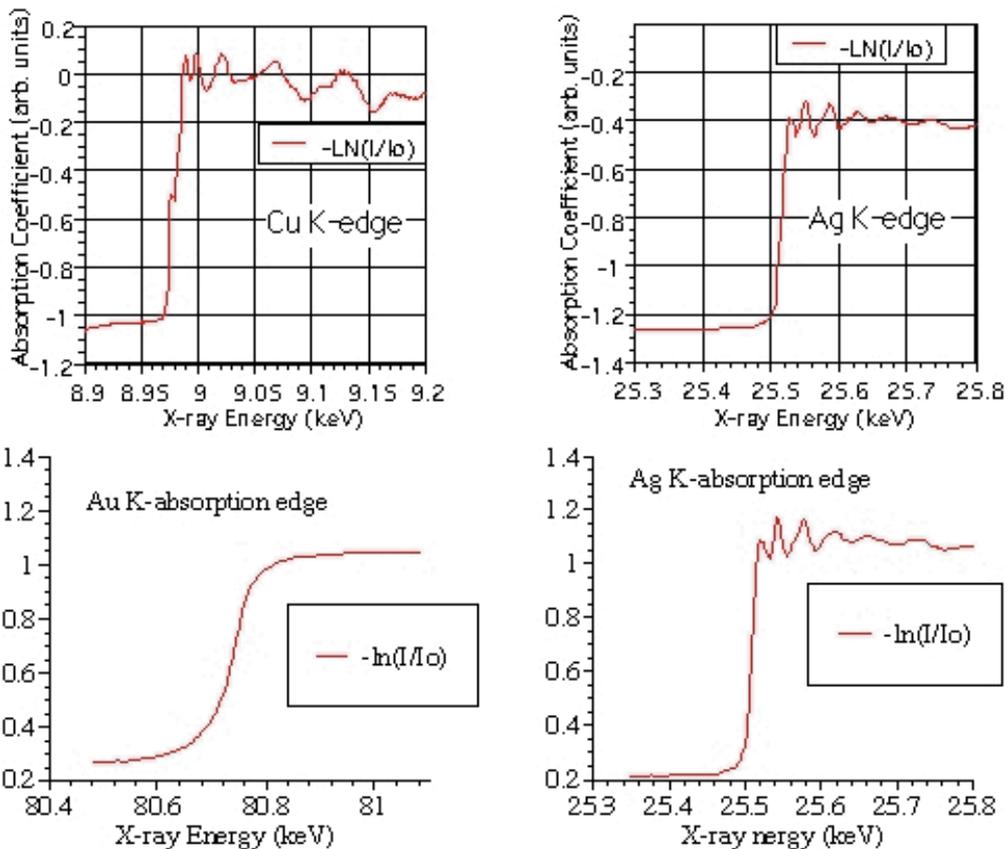


図8 銅、銀、金の金属箔の標準吸収スペクトル測定結果。上は Si111-111二結晶配置、下は Si511-333変則 + - 対称二結晶配置で測定したものである。

4. 今後の課題

現状である程度の実験は可能になっており、特に200mのビームラインの特徴である空間コヒーレンスを生かした実験に関しては、他のビームライン(1km長尺の理研ビームラインは別であるが)では困難な実験が可能になっている。しかしながら現状では未だ設計段階での予定性能に達していない部分もある。特に問題となっているのは、光源に関してはアンジュレータを最小ギャップまで閉じた場合の蓄積電子寿命に与える影響、ビームラインに関しては分光器の振動と冷却能力である。

本ビームラインのアンジュレータは真空封止型であり最小ギャップ7mmで設計されている。この光源の設計時点では20INはLow-セクションであり、リング全体も30m長直線部の改造前であった。その時点では、最小ギャップ7mmはリング蓄積電子寿命に影響がないと判断されていた。しかしながら、その後のリングラティスの改造の結果、現状では直線部での7mmの開口は十分とは言えず、明らかに電子ビームの寿命に影響が出ている。図11にアンジュレータマグネットギャップとビーム寿命の関係を測定した結果を示す。必ずしも一様に減少している訳ではないが、ギャップ値が8.5mm以下で急激に寿命が短くなっていることがわかる。この現象は必ずしも図に示したような単純なものではなく、たとえば、BL20XUのギャップを7mmに固定した状態で寿命が131時間であったものが、他の真空封止アンジュレータのギャップを9.6mmに閉めることによって142時間に向上することも実験的に確認されている。

分光器結晶の振動は現状で0.8秒(4 μrad)であり、これによって明らかに垂直方向の空間コヒーレンスは劣化している。通常の実験条件では分光器位置での縦方向ビームサイズは0.2mm程度であり、実際にはここが実効的な光源点

になっている為に、かなりの問題が回避されている。また、高いコヒーレンスを必要とする場合は分光器下流のスリット/ピンホールを仮想光源として用いている。しかしながら、この振動によって影響を受ける実験もおおく、またビーム強度の損失があることは明らかであり、改善を要すると考えている。例えば間接水冷の分光器では0.1秒程度の振動に押さえられているものもあり、液体窒素冷却を用いた分光器の場合でもBL47XUでは0.2秒程度の振動である。この程度の振動であればほとんどの実験で問題が無いと思われるので、今後改良を進めていく予定である。

このビームラインの分光結晶冷却は液体窒素間接冷却であり、閉鎖循環系の一次冷媒である液体窒素をヘリウム循環冷凍機で冷却する形式である。現状での熱負荷限界はこのヘリウム循環冷凍機の能力で制限されている。ヘリウム循環冷却器の最大負荷は450Wであり、アンジュレータ放射のピークをすべて受光した場合の熱負荷とほぼ等しい。しかしながら、放射光以外の回りからの入熱が200W程度あるために、現状では全放射パワーの50%程度しか受けられない。このためにフロントエンドのXYスリット開口を制限している。この問題を解消するためにはヘリウム冷凍機の冷却能力増強が必要である。なお、液体窒素間接冷却は、既に今までの実験結果から、400W以上の入熱に耐えられることが確かめられている。

利用研究促進部門  
顕微・分析グループ  
鈴木 芳生

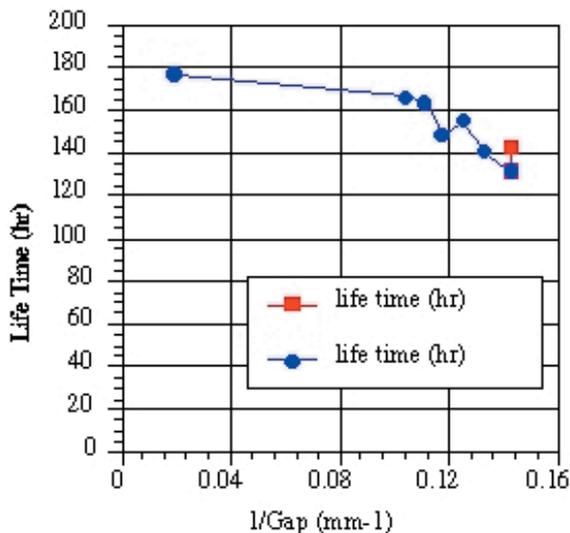


図11 アンジュレータのギャップ値と蓄積電子ビーム寿命  
蓄積電流100mA, Full Fill モード,  
BL20XU 以外の挿入光源は Full Open,  
縦軸は寿命(時), 横軸はアンジュレータギャップの逆数