

§4. ビームライン

4-1. ビームライン MR-BW-TL

杉山 弘*, 張 小威**

*高エネルギー物理学研究所・MR 超高輝度放射光計画推進室,

**高エネルギー物理学研究所・放射光実験施設

Beamline MR-BW-TL

Hiroshi SUGIYAMA* and Xiaowei ZHANG**

*Tristan Super Light Facility, Photon Factory, National Laboratory for High Energy Physics,

**Photon Factory, National Laboratory for High Energy Physics

The beamline MR-BW-TL was installed and operated for a feasibility study using super brilliant synchrotron radiation (SR) from the x-ray undulator XU#MR0 on the TRISTAN Main Ring in the autumn of 1995. The determinants of structure of the beamline were not only nature of the SR beam but also spatial restriction, period of beamline installation and period of SR experiment. The beamline was about 80 m long and its structure was as simplified as possible.

1. はじめに

ビームライン：MR-BW-TL の建設，運転に当たっては時間的，空間的に厳しい境界条件のもとではあったが，ほぼスケジュール通りに実行することができた．現場での建設期間（約3ヶ月）や実験期間（約3ヶ月）が短いことから建築工事も含めて，ビームラインの構造を可能な限り簡素化した．さらに建築物に関する制約から，SR 実験室は光源から約100 m 位置で光源より4.5 m 低い筑波実験室の側室を用いることを余儀なくされ，ビームラインは80 m 程度の長さになったが，光源の特性を十分引き出すことができた．

MR-BW-TL は，超高輝度 X 線アンジュレー

ター光を効率良く利用するために，極小ビームサイズ，高熱負荷であることを十分考慮に入れて設計，製作した．世界初の X 線アンジュレータービームラインである AR-NE3¹⁾での経験と開発技術が，ここでは非常に有用であった．特にモノクロメーターについては光ビームのコヒーレンスや輝度を保つために，AR-NE3 でのテストと同様の液体窒素冷却方式²⁾を採用した (§4-2)．そしてこのモノクロメーターを利用した最低限の光評価も行った (§5-1)．

2. ビームラインの設置

ビームラインはトリスタン筑波実験室北西側直線部のトンネル内に設置し，この直線部終端付近

* 高エネルギー物理学研究所・MR 超高輝度放射光計画推進室 〒305 つくば市大穂 1-1
TEL 0298-64-5699 FAX 0298-64-5707 e-mail hiroshis@mail.kek.jp

に設置した X 線アンジュレーター (XU#MR0) からの電子ビーム (右回り) による SR を利用した。ビームラインの名称は慣例に倣い、クロッチアプゾーバー取り付け位置の偏向電磁石の名称から “MR-BW-TL” とした。ここで BW-TL は筑波実験室に対して左周り側の弱偏向電磁石を意味する。図 1 にビームラインを下流側から見た写真 (1996年1月12日時点) を示す。一番手前があるのがモノクロメーター第 1 結晶部 (発光点から約 90 m)。この時点では既に解体が始まっておりモノクロメーターの鉛シールドが取り外してある。奥の方には小さくアンジュレーターが見える。左隣は MR 直線部の四極電磁石列である。

ビームライン構造を決定するうえでは、SR ビームの特質はもちろんのこと、利用実験をするための空間をどの様にして確保するかということにも大きく依存した。特に 80 m という長さで、§4-2で述べるモノクロメーターの特殊な構造を

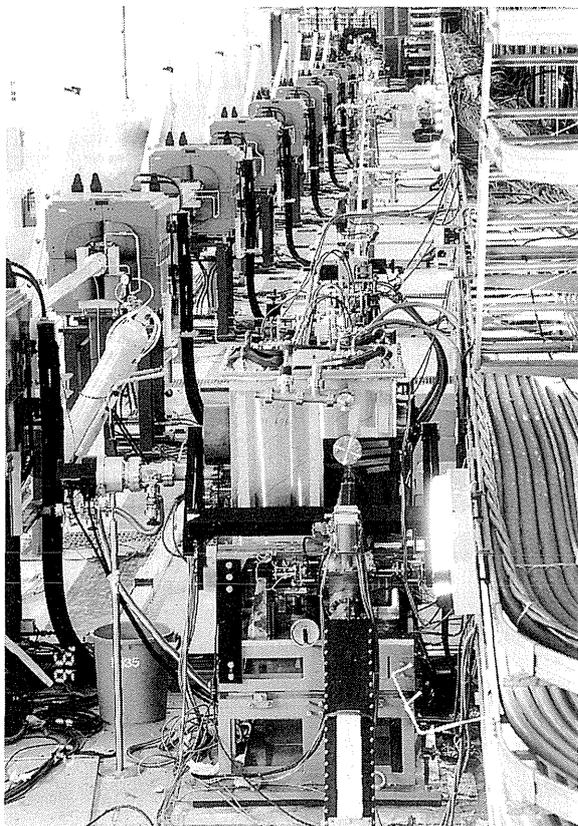


Figure 1. A picture of the beamline viewed from the lower reaches (as of 12 January 1996).

決定した最大の境界条件は SR 実験室の位置であった。

SR 実験室は発光点から約 90~100 m 位置にある筑波実験室地下 4 階側室を使用した。この部屋は光源より 4.5 m 低い位置にあり (図 2)、長さ 9.5 m、幅 4 m、高さ 2 m である。SR 実験室は加速器運転中に入退室可能な場所であればならない。また、建設期間が短いことなどから大規模な増改築は不可能であった。地下 4 階側室はこの条件を満たす唯一の場所であった。さらにこの実験室上に光軸が載るように最終的にアンジュレーターの位置が決定された。実際の建築工事は光源高さから実験室へ SR を導くための地下 3-4 階間の穴開けとケーブル類を通すための壁等への穴開けだけであった。また改造前の 30 GeV 運転の物理実験時でのこの実験室の温度変化は 1 日で $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下であった。

実験室は下流側に約 6.7 m 拡張された。実験期間が短いためにできるだけ各実験装置を光軸上にタンデムに並べて装置の出し入れ等の時間を節約するためである。拡張部分は鉛 5 mm を貼った鉄製ハッチ (鉄板 7.7 mm) で、側室と一体で 1 つの大きな SR 実験室とした。これによって十分な実験スペースを確保することができた。

SR 実験室は PF や AR 放射光の実験ハッチと

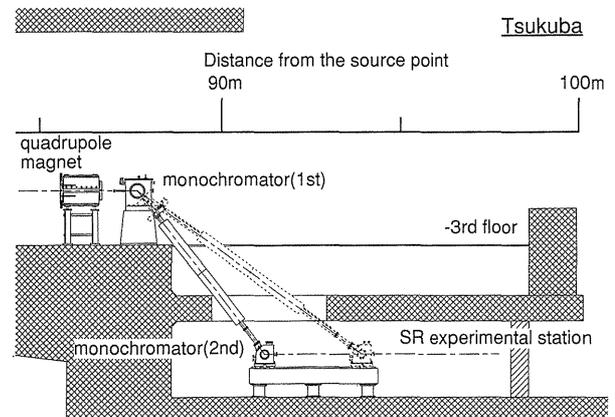


Figure 2. A cross-sectional view of the SR experimental room including the double crystal monochromator viewed from the center of the MR.

ほぼ同様に扱えるようにした。最上流の放射光シャッター (PF の MBS+BBS に相当) が “開” であってもモノクロメーター第1, 第2 結晶間の単色 X 線シャッター (PF の DSS に相当) さえ閉じていれば実験室にはいることができるようにした。筑波実験室から SR 実験室までの経路上には ID カードによる入室管理が無いいため, SR 実験室は常時 ID カードによる入室管理を行った。この点は PF 等の実験ハッチとは異なる。むしろ SR 実験室は PF の実験ハッチと実験ホールが一体となった取扱いに近いものであった。

ビームラインの設置は隣接する長直線部の四極電磁石を基準にして行った。アンジュレーター設置付近は SR 利用のために電磁石の再配列が必要であり, 改造によってアンジュレーター前後には基準となる四極電磁石が存在しない構造となる (§2)。また設置期間が3ヶ月しかないため, ビームラインの設置は加速器改造とほぼ並行して行う必要があった。そこで改造に伴う電磁石の再配列をしない長直線部の四極電磁石を基準とした。ビームラインのうち発光点から90 m 程度までの部分は加速器と同じトンネル内の2 m 以内の距離にある (図3)。あらかじめ長直線部の四極電磁石が水平面内で ± 0.8 mm 以下の精度で直線上に配置されていることを確認した。設計上での SR 軸と電子ビーム軌道の位置関係を基に設置基準線を引いた。その際ビームライン各位置で最寄りの四極電磁石を参照して行った。

ビームラインの各コンポーネント, ダクトは専用機具を用いてこの基準線上に並べた。高さは同じ専用機具とオートレベルを使用して四極電磁石の半割位置にあわせた。専用機具は下げ降りと水準器を取り付けられるようになっており, 機具の水平を出せば, 下げ降りがダクト断面の中心線を通るようにしてある。この機具を90度回転して使用すれば高さ方向にも使用できるようになっている。この機具をダクトまたは各要素のダクト部分に取り付け, 下げ降りと基準線が合うようにあ

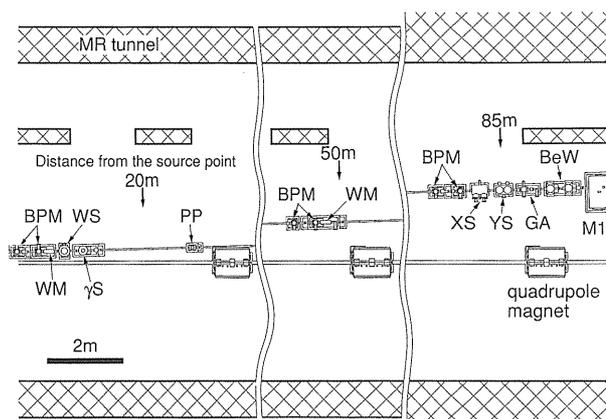


Figure 3. A plan view of beamline MR-BW-TL in MR tunnel. The meaning of the abbreviations in this figure are as follows; BPM: SR beam position monitor, WM: water-cooled mask, WS: water-cooled shutter, γ S: γ -ray shutter, PP: port for vacuum pump, XS: water-cooled horizontal slits, YS: water-cooled vertical slits, GA: graphite absorbers, BeW: beryllium windows, M1: first piece of the double crystal monochromator.

るいはオートレベルで観測しながら架台上の調節ネジで各要素の水平方向/高さ方向の微調節をした。最後に最上流の手動バルブの位置から下流を直視, 望遠鏡で覗いてモノクロメーター直前まで電灯光が通っていることを確認した。

最終的にはビームライン全体に渡って約 ± 2 mm の精度では設置できたと考えている。実際, 後述する上, 中, 下流部に設置した各水平/垂直方向放射光ビーム位置モニターの中の任意の2組から割り出した SR 軸と, 残りの1つから求めたビーム位置の差は1 mm 以内であった。

3. ビームラインの構造

図3はMRトンネル内のビームラインの要素を3分割して拡大した図である。主な構成要素はほぼ3ヶ所に分散しており, 1)放射光シャッター (水冷シャッター+ γ 線シャッター) 等を含む上流部 (発光点から17 m 付近), 2) 2番目の水冷マスクを含む中間部 (同じく50 m 付近), 3)水冷XYスリット, グラファイトアブソーバー, Be窓を含む下流部 (同じく85 m 付近) である。他の部分は単管, ポンプポートとモノクロメ

ーター第1結晶部下流の γ 線ストッパー（同じく100 m付近）などである。

ビームラインダクトはICF70フランジをベースにして内径35 mm ϕ 管で構成した。これはビームサイズ、パワー分布が発光点から85 mのビームラインの下流部においても十分に小さいためである（表1）。内径35 mm ϕ 管の使用によってコスト的なメリットだけでなく、ビームラインのコンダクタンスが小さくなることによる真空的な構造の簡略化も可能となった。中間部水冷マスクより上流側を加速器リング真空と同程度の 1×10^{-9} Torrに維持する場合でも、下流側部分はベッキング無しで、ポンプ数を上流部分の半数以下にすることができた。またこの実験では単一ビームラインのための加速器運転であり、期間も短いことから、高速遮断バルブ等の真空保護対策は施さずに、ビームライン構造の簡略化を図った。

水平/垂直方向用放射光ビーム位置モニター

Table 1. The characteristics of undulator radiation from the XU#MR0 which is at the maximum K value of 1.07, and when the MR is operated at 10 GeV with a ring current of 10 mA and an emittance coupling ratio of 1%

Total power	220 W
Peak power density	22.2 kW/mrad ²
Source size (horizontal/vertical)*,**	292/35 μ m
Beam divergence (horizontal/vertical)*,**	71/19 μ rad
Power divergence (horizontal/vertical)*	127/74 μ rad
Beam size at each position from the source point (horizontal/vertical)*,**	1.5/0.36 mm (@17 m) 3.8/1.0 mm (@50 m) 6.3/1.7 mm (@85 m)
Power size at each position from the source point (horizontal/vertical)*	2.5/1.3 mm (@17 m) 6.7/3.8 mm (@50 m) 11/6.4 mm (@85 m)
Power flux at each position from the source point	76.8 W/mm ² (@17 m) 8.9 W/mm ² (@50 m) 3.1 W/mm ² (@85 m)

*: These values are twice standard deviations.

** : These are values for the first harmonic (13.4 keV).

(BPM)を、上述の上流（発光点から約16/17 m）、中流（約48/49 m）、下流（約83/84 m）の各部分の最上流側にそれぞれ1組ずつ設置した。BPMにはグラファイト・ワイヤ・プローブ型 (§4-3)³⁾を採用した。3組のBPM設置によって2次元的なビーム位置だけでなく、ビーム角度の測定も可能であった。1995年9月29日には軌道補正なしの状態ですべて最初に最上流部のBPMによってアンジュレーター光を確認し、それが中流部まで到達していることを確認した。翌日にはビーム軸出しを行い、最初の電子軌道補正で発光点から約83 mの最下流BPMまでの軸出しが完了した。その後の定常運転における大幅なビーム位置変化に対しても、最下流で ± 0.5 mm以下の精度でビーム位置を再現させるのに、実際の軌道補正などの時間も含めて1時間程度で行うことができた。BPMはこの際のビーム位置の確認に極めて有効であった。

実際の加速器運転は8または10 GeV、最大15 mA程度で行われたが、構成要素の熱対策は当初の計画に沿って全て10 GeV、100 mA運転時を想定して行った。したがって実際の熱対策は表1に示すパワー、パワー密度の10倍を想定した。

具体的には水冷マスク、水冷シャッター、水冷X、Yスリット、グラファイトアブゾーバーとBe窓の水冷ホルダーの水冷無酸素銅部分の照射面上での実効的なピーク熱流束が40 W/mm²以下になるようにビーム軸に対して3~17度の傾斜を付けた。

Be窓については溶接ではなく、水冷ホルダーにBe板を機械的に固定する方法を採用した（図4）。金属O-ring（ヘリコフレックス）を用いて気密性を保ち、反対側から水冷銅ブロックを機械的に押しつけることで熱接触をとり、Be板の除熱を行った。このときBe板は表面粗さJIS規格3.2S相当のものを用いて金属O-ringとの接触を良くするようにした。さらにBe板-銅ブロック間に液体Gaを塗布して熱接触抵抗を低減した。

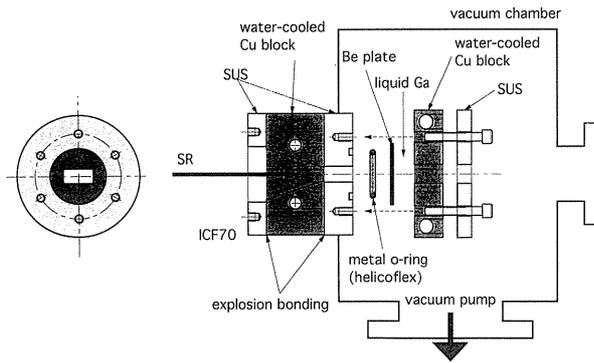


Figure 4. A schematic cross-sectional structure of a beryllium window.

また SUS 板を水冷銅ブロックの後ろに挿んで、金属 O-ring の押しつけの補強とした。金属 O-ring 接続部分を真空槽内に入れ込む構造にして、金属 O-ring 部分からのリークをできる限り少なくした。

この方法による Be 窓のリーク量は単体でおおよそ 1×10^{-5} Torr \cdot liter/sec であった。2 連にして

モノクロメーター直前に設置することにより、モノクロメーター第1結晶部が 10^{-3} Torr 以上になっても上流側は 10^{-9} Torr 台を維持することができた。このとき上流側の Be 窓ユニットの真空層には 110 liter/sec のノーブルポンプを、下流側ユニットの真空層には 300 liter/sec のターボ分子ポンプを直付けした。実験期間中の Be 窓に関するトラブルは全くなかった。

文献

- 1) X. Zhang, T. Mochizuki, H. Sugiyama, S. Yamamoto, H. Kitamura, T. Shioya, M. Ando, Y. Yoda, T. Ishikawa, C. K. Suzuki and S. Kikuta: *Rev. Sci. Instrum.*, **63**, 404 (1992).
- 2) T. Mochizuki, X. Zhang, H. Sugiyama, J. Zhao, M. Ando and Y. Yoda: *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 2167 (1995).
- 3) X. Zhang, H. Sugiyama, M. Ando, S. Xia and H. Shiwaku: *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 1990 (1995).