JAEA-Research
2022-015
DOI:10.11484/jaea-research-2022-015

SPring-8　JAEA専用ビームラインBL22XUの設計

Design of the SPring-8 JAEA Beamline BL22XU

塩飽 秀啓　丸下 元治

Hideaki SHIWAKU and Motoharu MARUSHITA

原子力科学研究部門
原子力科学研究所
物質科学研究センター
放射光エネルギー材料研究ディビジョン

Energy and Environment Materials Science Division
Materials Sciences Research Center
Nuclear Science Research Institute
Sector of Nuclear Science Research

May 2023

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　JAEA イノベーションハブ　研究成果利活用課
〒 319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

JAEA-Research 2022-015

SPring-8　JAEA 専用ビームライン BL22XU の設計

日本原子力研究開発機構
原子力科学研究部門　原子力科学研究所　物質科学研究センター
放射光エネルギー材料研究ディビジョン
塩飽　秀啓、丸下　元治*

（2022 年 12 月 8 日受理）

大型放射光施設 SPring-8 日本原子力研究所専用ビームライン（現在は、日本原子力研究開発機構（JAEA）専用ビームライン）である硬 X 線アンジュレータビームライン BL22XU の設計を行った。BL22XU は、主に放射性廃棄物処理に係る分離抽出材の設計及び化学的挙動解明を行うための XAFS（X-ray Absorption Fine Structure）解析実験、回折計を用いた磁性研究実験、高圧プレスやダイヤモンドアンビルセルを用いた極限環境下実験等を行うためのビームラインである。利用可能な X 線エネルギー範囲を 3～70keV に設定した。ビームラインの光学系を設計するために、ミラーの反射率、分光結晶の回折幅、Be 窓材の吸収率等を計算した。また、光線追跡を行い、各光学素子の材料、寸法、設置場所等を最適化した。さらに、放射性物質利用上の安全確保のため音響遅延管 ADL（Acoustic Delay Line）の遅延時間についても検討を行った。

BL22XU「重元素科学研究Ⅰ」は、2002 年にビームラインの建設を終え、立ち上げ調整期間を経て、既に運用している。軟 X 線アンジュレータを光源とするもう一つの JAEA 専用ビームライン BL23SU「重元素化科学究Ⅱ」と共に、2 つのビームラインを相補的に利用することによって、原子力科学が直面する多くの問題を解決する放射光ビームラインとして発展することが期待されている。2018 年から 2019 年に分光器の高度化を実施したため、ビームライン建設当時の設計、特徴と性能を改めてここに記録することとした。

播磨放射光 RI ラボラトリー：〒679−5148　兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
＊　株式会社 IHI

JAEA-Research 2022-015

Design of the SPring-8 JAEA Beamline BL22XU

Hideaki SHIWAKU and Motoharu MARUSHITA*

Energy and Environment Materials Science Division
Materials Sciences Research Center
Nuclear Science Research Institute
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo-ken

(Received December 8, 2022)

We designed the hard X-ray undulator beamline BL22XU, which is dedicated to Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) at SPring-8 (now Japan Atomic Energy Agency (JAEA)). BL22XU is used for XAFS (X-ray Absorption Fine Structure) analysis experiments to develop separation and extraction materials for radioactive waste treatment and to elucidate their chemical behavior, magnetic research experiments using a diffractometer, and experiments under extreme conditions using a high-pressure press and a diamond anvil cell. The available X-ray energy range was set from 3 to 70 keV. To design the optics of the beamline, the reflectivity of the mirrors, the diffraction width of the monochromatic crystal, and the absorptance of the Be window were calculated. In addition, ray tracing was performed to optimize the materials for optics, dimensions, and location. The delay time of the ADL (Acoustic Delay Line) was also examined to ensure the safety in the use of radioactive materials.

The operation of BL22XU "JAEA Actinide Science I" has already started. By collaborating BL22XU and BL23SU "JAEA Actinide Science II," which uses a soft X-ray undulator as a light source, we solve the problems to promote nuclear sciences. Since the monochromator was upgraded in 2018-2019, initial planning and measured data are documented here again.

Keywords: Actinide, Synchrotron Radiation, Beamline, Mirror, Monochromator, Acoustic Delay Line, SPring-8, JAEA

---

* IHI Corporation

目次

1. はじめに 1

2. 光源（アンジュレータ） 2

3. X 線ミラー 8

4. 低エネルギー分光器（カム式二結晶分光器） 20

5. 高エネルギー分光器（計算結合型二結晶分光器） 26

6. Be 窓 32

7. 音響遅延管 ADL 34

8. 全体配置 37

謝辞 39

参考文献 39

Index

1. Introduction 1

2. Light Source (Undulater) 2

3. X-ray Mirror 8

4. Low Energy Monochromator
(CAM Type Double Crystals Monochromator) 20

5. High Energy Monochromator
(Calculated Combine Type Double Crystals Monochromator) 26

6. Be Windows 32

7. Acoustic Delay Line, ADL 34

8. Layout of Beamline 37

Acknowledgement 39

References 39

1. はじめに

SPring-8 の RI 実験棟へ導かれた日本原子力開発機構（JAEA）専用ビームライン BL22XU では、主にウランをはじめアクチノイドを中心とする廃棄物処理に係る分離抽出材の設計及び化学的挙動解明を行うための XAFS 構造解析実験装置、磁性研究実験装置、マルチアンビルセルとダイヤモンドアンビルセルを用いた高温高圧実験装置が導入されている。磁性研究実験や共鳴散乱実験や MCD（磁気円二色性：Magnetic Circular Dichroism）では、Pd−L_{III} 吸収端 3.17keV や U−M_V 吸収端 3.55keV の比較的低エネルギーから約 30keV まで、マルチアンビルセルの高温高圧実験では 50～70keV の高エネルギーX 線が用いられる。また、ダイヤモンドアンビルセルを用いた高温高圧実験では、屈折レンズが用いられる。さらに XAFS 実験では、アクチノイドの L・M 吸収端を利用する構造解析を想定して、およそ 5～30keV の利用を予定している。非密封放射線試料の利用が可能な RI 実験棟では、XAFS 構造解析実験や磁性研究実験が行われ、通常の放射光実験ホールでは高温高圧実験等が行われる。我々はそれぞれの実験に最適な光源や光学系を設計し、ビームライン全体の配置を検討した。

本書では、BL22XU の重要な主要機器の初期基本設計について報告する。設計検討したビームライン機器は次の通りである。

(1) 光源（アンジュレーター）
(2) X 線ミラー
(3) 低エネルギー分光器（カム式二結晶分光器）
(4) 高エネルギー分光器（計算結合型二結晶分光器）
(5) Be 窓
(6) 音響遅延管 ADL
(7) 全体配置

2. 光源（アンジュレータ）

2.1. 概要

BL22XU のアンジュレータ光源について検討した。基本波から高次光までを組み合わせて用いることで、3keV～70keV の X 線が利用可能である。

2.2. 目的

BL22XU において、3keV～70keV までの放射光を発生できる光源の条件を決定する。

2.3. 条件

以下の条件にて検討する。

(1) 光源

SPring-8

(2) 利用エネルギー範囲

3～70keV

(3) 挿入光源

挿入光源として、標準アンジュレータである真空封止タイプとアウトバキュームタイプを検討する。また、磁石列は SPring-8 で実績のあるハルバックタイプとする。

① 周期 λ_u

SPring-8 でのハルバックタイプの最小周期実績（BL24ID）より 24mm 以上とする。

$$\lambda_u \geq 24 \text{ mm}$$

② 最小ギャップ G_{min}

SPring-8 の標準真空封止アンジュレータの最小磁石列間距離：Gap は 8mm であるが、フロントエンド要素機器が放射光照射による過熱損傷を防ぐために、実際には 9. 6mm に制限されている。このため、真空封止タイプの場合、最小 Gap を 9. 6mm とする。

アウトバキュームタイプの場合、SPring-8 での実績は位相駆動を行う BL23ID（JAEA ビームライン BL23SU に設置されている Apple-II タイプアンジュレータ挿入光源）の最小 Gap は 25mm（チェンバ厚さ 19mm）であり、BL08W（SPring-8 共同利用ビームライン BL08W に設置されているウィグラータイプ挿入光源）の最小 Gap は 20mm である（放射線申請上最小 Gap は 25. 5mm）。今回の挿入光源では位相駆動を行わないので、アウトバキュームタイプでは最小 Gap を 20mm と設定する。

G_{min} = 9. 6 mm（in VAC）

G_{min} = 20 mm（out VAC）

③　最大ギャップ G_{max}

SPring-8 の標準真空封止アンジュレータの最大 Gap は 50mm であるが、高次光とのオーバーラップを考慮する。標準タイプの実用最小 Gap が 9. 6mm での発生波長 5. 5keV の 3 次光が発生する Gap が 24mm であるので、実用最大 Gap を 25mm とする。

アウトバキュームタイプの最大ギャップは BL23ID で 300mm、BL08W で 160mm であるが、真空封止の最大 Gap に合わせ実用最大 Gap は 50mm とする。

G_{max} = 25mm（in VAC）

G_{max} = 50 mm（out VAC）

④　磁石厚さ t

真空封止タイプは標準タイプに合わせ 12mm とする。

アウトバキュームタイプの場合、BL08W で 40mm であるが、これは楕円ウイグラーであるため周期の 4 割程度を目安とし 20mm とする。

t = 12 mm（in VAC）

t = 20 mm（out VAC）

2.4.　検討

(1)　周期長

アンジュレータからの基本波 ε_1、高調波のエネルギー ε_n の関係は次式となる[1)]。

$$\varepsilon_n[keV] = 0.009496\frac{nE^2[GeV]}{\lambda_u[m](1+\frac{K^2}{2}+\gamma^2\theta^2[rad])},$$

$$K = 93.4B_0[T]\lambda_u[m]$$

ここで、E は蓄積リングのエネルギー、λ_u は周期長、γ はローレンツ因子、θ は光軸上からの角度、B_0 はアンジュレータのピーク磁場であり、次式の関係が成り立つ[2)]。

$$B_0 = 2B_r\frac{\sin(\pi/4)}{(\pi/4)}\exp(-\pi\frac{g}{\lambda_u})\{1-\exp(-2\pi\frac{h}{\lambda_u})\}$$

ここで、B_r は残留磁束密度、h は磁石高さ、g はギャップである。

B_r として、BL22XU 設計時に日本原子力研究所ビームラインだった BL11XU の実測値から算出した値 1. 18T を用いると周期長 λ_u は、

λ_u : 38mm（真空封止）

λ_u : 50mm（アウトバキューム）

となる。

(2)　エネルギー

上記周期数でのアンジュレータ軸上のエネルギー ε と K パラメータの関係を図

2-1 に示す。真空封止タイプでは、5 次光以上を用いれば 50～70keV まで利用可能であり、3～70keV までのエネルギーが途切れなく利用できる。アウトバキュームではエネルギーの途切れはないが、真空封止タイプで想定されるよりも高調波を用いなければ 70keV までの放射光は利用できない。

(3) パワー

アンジュレータのパワーは次式となる [1)]。

$$P_T = 0.31634554(2N-1)\lambda_u E^2[GeV]B_0^2[T]I_b[A] \quad \text{(kW)},$$

$$P_{D0} = P_T \frac{21\gamma^2}{16\pi K} G(K) \quad \text{(kW/mrad}^2\text{)},$$

$$G(K) = \frac{K^7 + \frac{24}{7}K^5 + 4K^3 + \frac{16}{7}K}{(1+K^2)^{7/2}}$$

ここで、P_T は全放射パワー、P_{D0} は軸上での放射パワー密度であり、I_b は蓄積電流である。これから、全放射パワーP_T と軸上での放射パワー密度 P_{D0} の関係は図 2-2 となる。真空封止タイプの場合最大全放射パワーは 16. 5kW、最大放射パワー密度は 498kW/mrad² となり、アウトバキュームの最大全放射パワーは 5. 6kW、最大放射パワー密度は 218kW/mrad² となり、アウトバキュームの方が熱負荷は小さい。真空封止アンジュレータを備えた BL11XU ではそれぞれ 13. 9kW、537kW/mrad² なので、真空封止タイプでは BL11XU より全放射パワーは大きいが、密度では小さくなる。フロントエンドスリットの開口を通常の 1×1mm²（光源より 29. 4m）と仮定すると、真空封止タイプの最大熱負荷は約 610W（図 2-3 参照）となる。BL11XU の約 670W と比較して、BL22XU の方がフロントエンドスリット通過後の通過全放射パワーは小さくなる。

(4) スペクトル

基本波を 3. 5keV に設定した場合のトータル FLUX を図 2-4 に示す。スペクトル計算には SPECTRA（Ver.1.1）を用いた [2-3)]。　実際には、フロントエンドスリット開口は 1×1mm² に制限されるため、計算値よりトータル FLUX は小さくなるが、真空封止タイプとアウトバキュームタイプを比べた場合、真空封止タイプの方が強度は大きい。また、高エネルギー側での強度減少は真空封止タイプの方が小さく、高次で高エネルギーを利用する場合でも真空封止タイプの方が有利である。

2.5. 結果

以上より本ビームラインでは真空封止タイプを採用する。以下に基本スペックを示す。

・周期長　　38mm

・周期数　　118（L=4. 484m：全長）

・残留磁束密度　　1. 18T
・磁石厚さ　　12mm
・最小 Gap　　9. 6mm
・最大 Gap　　50mm

2.6. 結論

BL22XU では光源として真空封止タイプ挿入光源を採用する。これにより、基本波から 5 次光までの光の利用で 3～70keV までの広範囲のエネルギーの光が利用できる。3. 5keV に基本波を合わせた場合、トータル FLUX で 10^{15} photons/sec/0. 1%b. w. オーダーの入射光を得ることが出来る。

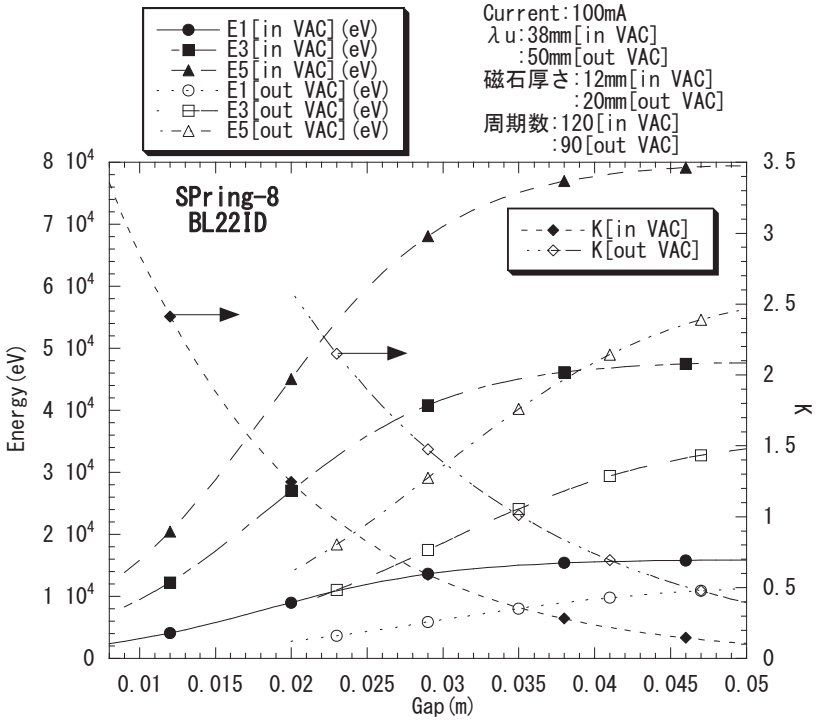

図 2-1. 真空封止タイプ（λ_u=38mm）とアウトバキュームタイプ（λ_u=50mm）のエネルギーと K パラメータの Gap 依存性

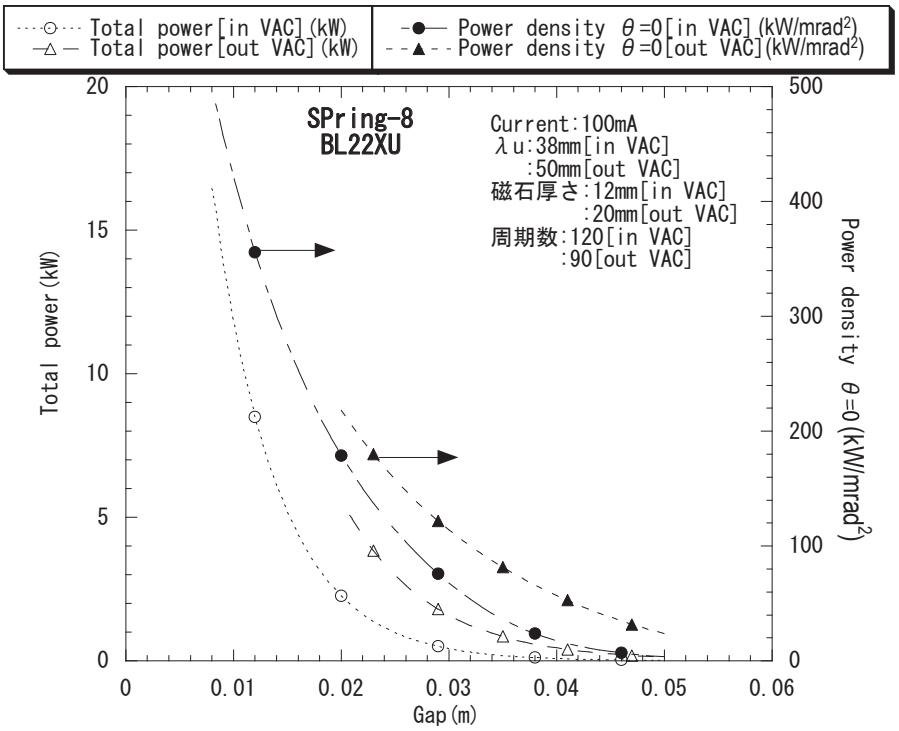

図 2-2. 真空封止タイプ（λ_u=38mm）とアウトバキュームタイプ（λ_u=50mm）の全パワーとパワー密度の Gap 依存性

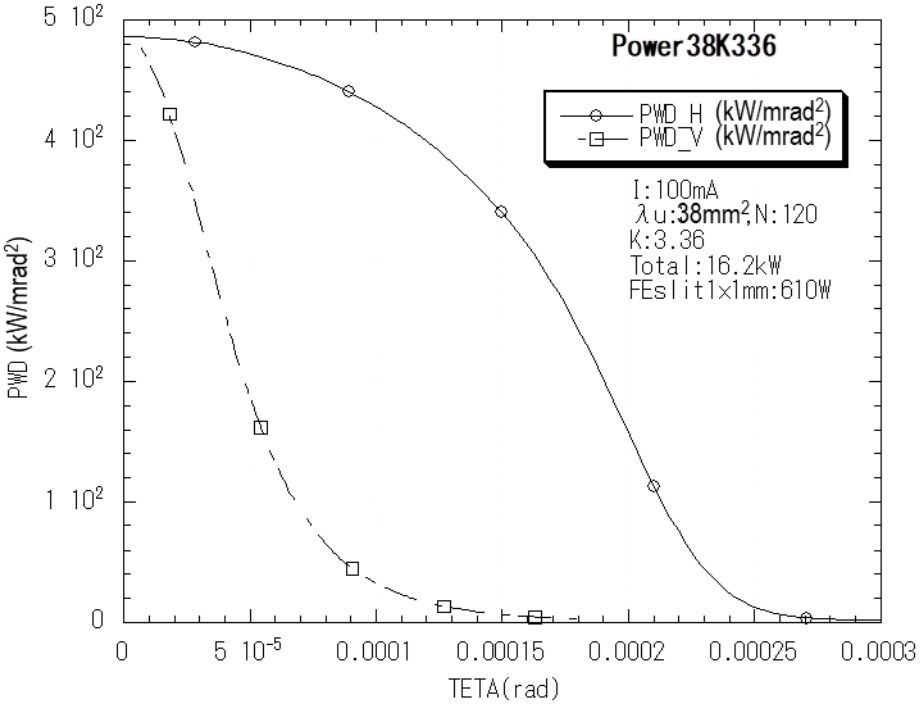

図 2-3.　真空封止アンジュレータのパワー密度

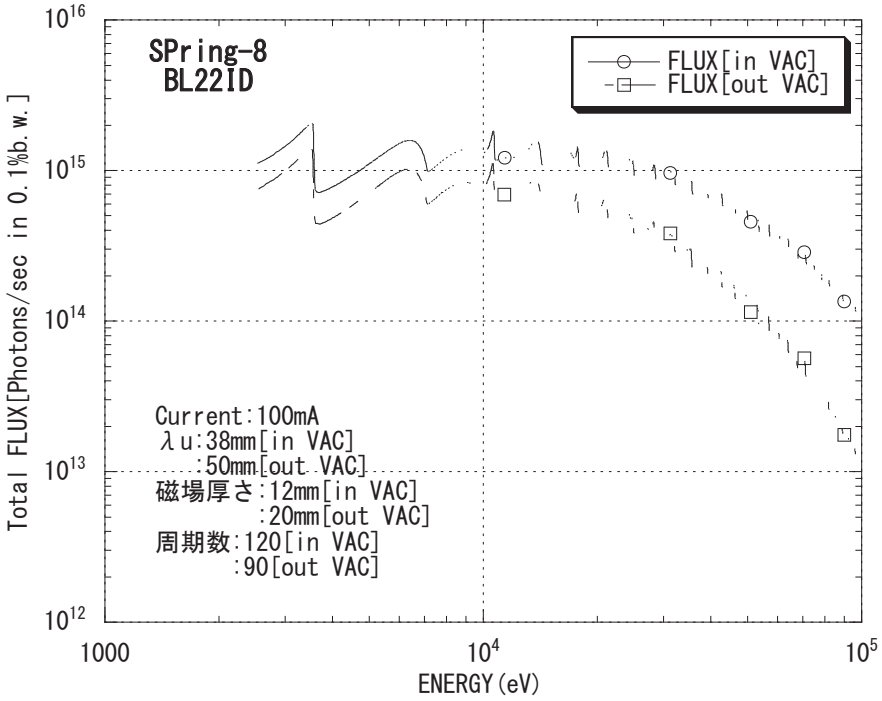

図 2-4. 全 FLUX スペクトル（λ1：3.5keV）

3. X 線ミラー

3.1. 概要

BL22XU のミラーについて検討した。RI 実験棟において、0. 1mm 程度の集光と入射エネルギー3～28keV の高調波除去が可能である。

3.2. 目的

BL22XU RI 実験棟に於いて、3～28keV の集光とその高調波除去が可能な X 線ミラーの条件を決定する。

3.3. 条件

以下の条件にて検討する。

(1) 光源

・ring

蓄積エネルギー：8GeV

ビームサイズ ：σx：0. 376mm、 σy：0. 0325mm

ビーム発散 ：σx’：0. 0157mrad、 σy’：0. 00362mrad

・真空封止アンジュレータ

周期長：3. 8cm、周期数：120

K 値：2. 94（1st：3 keV）、1. 6（1st：7 keV）、0. 534（1st：14 keV）

注）14keV はミラーのエネルギー分割より、16keV であることが望ましいが、当初 14keV で分割したのでこのままとした。広がりは 14keV の方が広いので安全側となっている。

(2) ビームライン

全長：117. 1059m

・フロントエンド

フロントエンドスリット：開口 1×1mm^2、29. 4m

・分光器

Si（111）二結晶分光器

位置：50m（第 2 結晶中心）

平板：L90mm×W50mm、 非対称度：0、熱隆起なし完全結晶

オフセット：30mm

・ミラー（初期条件）

配置は 2 枚の平行配置にて RI 実験棟に導く。

位置：58m（1:1）

表面粗さ：4Å

スロープエラー

平板：t0. 5″、s0. 25″、 サジタル：t1″、s5″

バルク密度：100%

3.4. 検討

(1) 設置位置 58m でのプロファイル

図 3-1、3-2 より、X 線ミラーは縦はねが有利である。ミラーを縦はねとし、X 線ミラー最大長を 1m とすると、入射角の最小値は 2mrad 程度となる。

(2) コート材

3～28keV の高調波をカットするため、X 線ミラーによるカットオフエネルギーを 3 つに分け、3～7keV、7～16keV、16～30keV とする。

図 3-3、3-4 の反射率より、3～7keV、16～30keV を Ni コート材、7～16keV を Rh コート材とした。理由は次の通りである。

- Pt は入射角が大きくとれるが 11～14keV に X 線吸収端がある。
- Rh、Pd、Ag は 3. 5keV 付近に X 線吸収端がある。
- Si、Quartz、SiC は入射角が小さくなる。

これより、M0 ミラーは長手方向に Ni:10mm、Si を基盤として 10mm、Rh:10mm に塗り分ける。M1、M3 ミラーは Ni コート、M2 ミラーは Rh コートとする。

コート材の基盤に対する傾斜は±0. 002° 以下とする。

図 3-5～3-8 にエネルギー3～7 keV、7～16keV での X 線ミラー反射率を示す。

このとき、コート材に対する入射角は、3～7keV では 8mrad、7～16keV では 4mrad、16～30keV では 1. 9mrad である。

(3) 基盤（母材）

基盤を選定するため、先に選定した Ni の入射角度での Si、Quartz、SiC の反射率を計算した。結果を図 3-9 に示す。これより、設置後のミラーコート材の不備がある場合の代替え反射材として Si が有望である。

(4) バルク密度

図 3-10 より、16～30keV の実際に利用する最大エネルギーは 28keV であるのでバルク密度は 80%まで許容される。

(5) コート厚さ

図 3-11 より、コート材の厚さは 200Å で十分であるが、余裕を見込み 500Å とする。

(6) 配置／オフセット

RI 実験棟に導くため、配置は図 3-12 とする。M0 と M1 との組み合わせで 3～7keV、M0 と M2 との組み合わせで 7～16keV、M0 と M3 との組み合わせで 16～30keV をカバーする。M0 は入射角可変で光軸方向ベンドにより縦集光、M1～M3 は入射角固定でサジタル集光により水平集光を行う。オフセットを大きくすると、M3 ミラーが M0 ミラーより遠のき M3 ミラーが大きなものになるので、M0 と M1 ミラーとの間隔を可能な限り近づける。これにより、オフセットは 15mm となる。

(7)　58m 集光（1：1 集光）

上記配置に従って、RI 実験棟位置で計算したビームプロファイルを図 3-13、3-14 に示す。図中に表記している「ダイレクト」とは FE スリットのみでミラーのない場合を示し、「M1」は M0 と M1 の組み合わせ時の 3keV、「M2」は M0 と M2 の組み合わせ時の 7keV、「M3」は M0 と M3 の組み合わせ時の 14keV のプロファイルを示す。計算結果より、縦方向は集光しない場合の方がビームサイズは小さくなった。

この理由は、X 線ミラーのスロープエラーに起因する。これを抑えるため、M0 ミラー位置を蓄積リング棟実験ホールの最下流に下げることが望ましい。その位置を発光点から 80m とする。

(8)　曲率

図 3-12 の M0 ミラーを 80m、集光点を 117.1059m とした場合に、M1、M2、M3 ミラーの位置はそれぞれ 80.93754m、81.87502m、83.9473779m となる。これより M0 ミラー曲率は、

- M1 との組み合わせの場合：6337m
- M2 との組み合わせの場合：12674m
- M3 との組み合わせの場合：26683m

となる。また、サジタル曲率は、

- M1 の場合：0.400m
- M2 の場合：0.1971m
- M3 の場合：0.0903m

となる。

(9)　たわみ

M0 ミラー曲率はベンドにより実施するため、自重による M0 ミラーのたわみを計算した。結果を図 3-15～3-18 に示す。発光点から 80m の場合 1：1 配置よりはずれるので、この位置で上下流の曲げモーメントを独立に加え楕円に近づける場合も計算した。結果を図 3-19～3-20 に示す。計算結果は自重も考慮している。

曲げモーメントは、円筒曲げの場合

- M1 との組み合わせの場合：19.152Nm
- M2 との組み合わせの場合：12.674Nm
- M3 との組み合わせの場合：8.9365Nm

となる。また、楕円の場合

- M1 との組み合わせの場合：19.1Nm、19.2Nm
- M2 との組み合わせの場合：12.64Nm、12.71Nm
- M3 との組み合わせの場合：8.923Nm、8.947Nm

となる。楕円では上流の曲げモーメントを先に記した。

このとき、最大曲げ応力は、M1 との組み合わせ時の 0.92MPa となり、Si の曲げ強さ 68.6−343MPa より十分小さい。

(10)　80m 集光

図 3-21～3-26 に、RI 実験棟での集光結果を示す。ここで、MR は円筒曲げ、ME は楕円曲げを示す。M0 ミラーを下流にすることによって縦方向のビームサイズはダイレクトビームと同程度に改善されている。これをさらに改善するため、サジタルミラーのサジタル方向スロープエラーを 5″から 1″に変更する事により、M0 と M1、M0 と M2 の場合、横集光と同程度まで改善された。M0 と M3 の場合を改善するため、M3 ミラー支持部のスパンを変更した。M2、M3 ともスパン 0.4m がよい結果を示した。計算結果を図 3-27、3-28 に示す。逆ベンドを M3 にかけても改善されるが、スパンの変更は簡易に改善されるため、本案ではスパン変更を採用した。（基盤を Si 以外の Quartz、ULE、Zerodur、SiC に変更すると、ヤング率が Si より小さいため、今回の結果より悪くなる。）

円筒曲げと楕円曲げでは、M0 と M1 の組み合わせでは優位に楕円曲げの方がよい。また、楕円曲げの上下流モーメントを同じにすれば円筒曲げとなるため、本機構は楕円曲げとする。

(11)　サジタル曲率

上記の最適な条件でサジタル曲率を変化させて、RI 実験棟でのビームプロファイルを計算した結果を図 3-29～3-34 に示す。次の値の時にサジタル曲率を最適化することができた。

- M1：0.400m −2%/+5%
- M2：0.1971m −2%/+5%
- M3：0.0903m ±2%

3.5.　結果

以上の検討結果より、X 線ミラーの仕様を以下に示す。

(1)　M0 ミラー

・員数：1

・サイズ: 1000 mm(l)×50 mm(w)× 50 mm(t)

・形状: 平面ミラー

タンジェンシャルベンド(タンジェンシャル曲率 6000～30000m 可変)

最大曲げモーメント：20N･m(Si ヤング率 163GPa として)

・コート材: Ni, Rh

長手方向に沿って側面より Ni20mm、Si 基盤 10mm、Rh20mm に塗り分ける。

バルク密度: 80%以上(目標 100%)、

コート厚さ: 50nm 以上

コート材傾斜角：基盤に対して±0.002°以下

・スロープエラー: 0.5″以下(l 方向)、0.25″以下(w 方向)

・裏面平行度：0. 02mm 以下、裏面平面度：0. 02mm 以下（鏡面仕上げ）
・表面粗さ：4Å以下
・有効面積：950mm（l）× 30 mm（w）
・基盤：Si

(2) M1 ミラー

・員数：1
・サイズ：400 mm（l）×50 mm（w）×50 mm（t）
・形状：サジタルミラー
　　サジタル曲率：0. 4m −2%/+5%
・コート材：Ni
　　バルク密度：80%以上（目標 100%）、
　　コート厚さ：50nm 以上
　　コート材傾斜角：基盤に対して±0. 002° 以下
・スロープエラー：1″以下（l 方向）、2″以下（目標 1″以下）（w 方向）
・表面粗さ：4Å以下
・有効面積：350mm（l）×30 mm（w）
・基盤：Si

(3) M2 ミラー

・員数：1
・サイズ：600 mm（l）×50 mm（w）× 50 mm（t）
・形状：サジタルミラー
　　サジタル曲率：0. 1971m −2%/+5%
・コート材：Rh
　　バルク密度：80%以上（目標 100%）、
　　コート厚さ：50nm 以上
　　コート材傾斜角：基盤に対して±0. 002° 以下
・スロープエラー：1″以下（l 方向）、2″以下（目標 1″以下）（w 方向）
・表面粗さ：4Å以下
・有効面積：550mm（l）×30 mm（w）
・基盤：Si

(4) M3 ミラー

・員数：1
・サイズ：900 mm（l）×50 mm（w）×50 mm（t）
・形状：サジタルミラー
　　サジタル曲率：0. 0903m±2%
・コート材：Ni
　　バルク密度：80%以上（目標 100%）、
　　コート厚さ：50nm 以上

コート材傾斜角：基盤に対して±0.002°以下

・スロープエラー：1″以下（l 方向）、2″以下（目標 1″以下）（w 方向）

・表面粗さ：4Å以下

・有効面積：800mm（l）×30 mm（w）

・基盤：Si

3.6. 結論

加工精度のよいX線ミラーを購入すれば、RI 実験棟での集光は十分可能である。

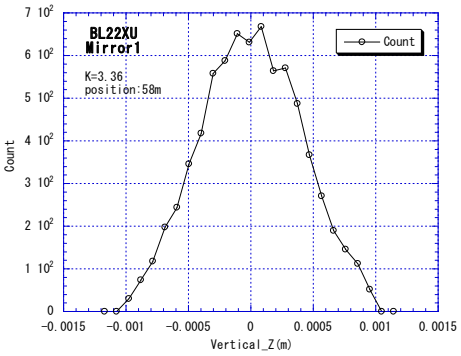

図 3-1. 58m 位置のビームプロファイル（縦）

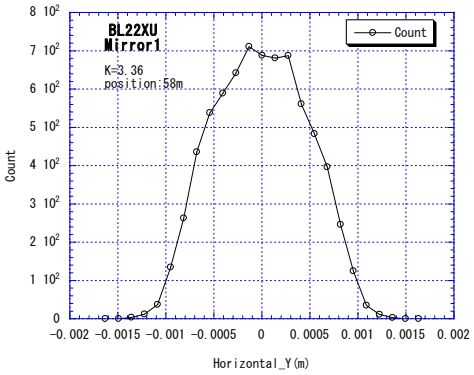

図 3-2. 58m 位置のビームプロファイル（横）

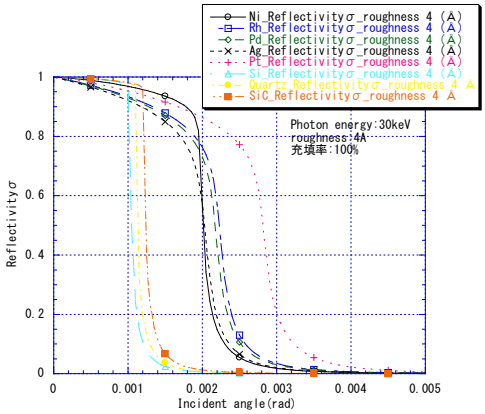

図 3-3. 30keV のミラー反射率の角度依存

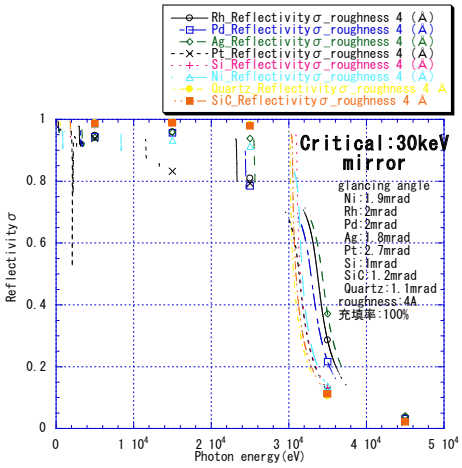

図 3-4. 臨界エネルギー30keV のミラー反射率のエネルギー依存

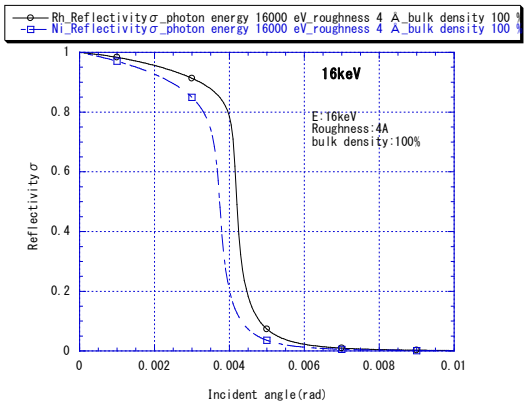

図 3-5. 16keV のミラー反射率の角度依存

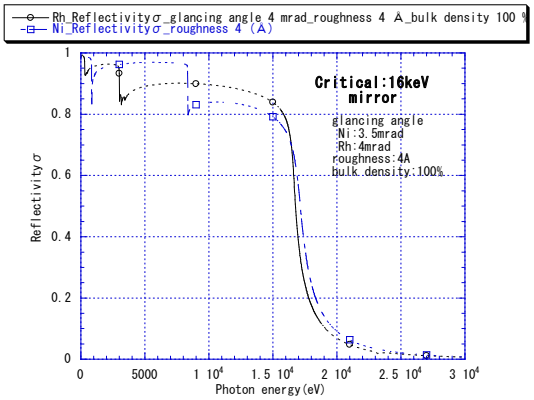

図 3-6. 臨界エネルギー16keV のミラー反射率のエネルギー依存

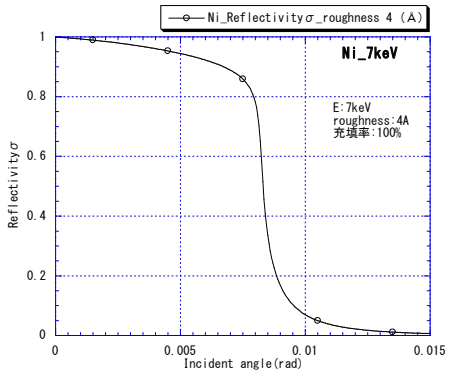

図 3-7. 7keV のミラー反射率の角度依存

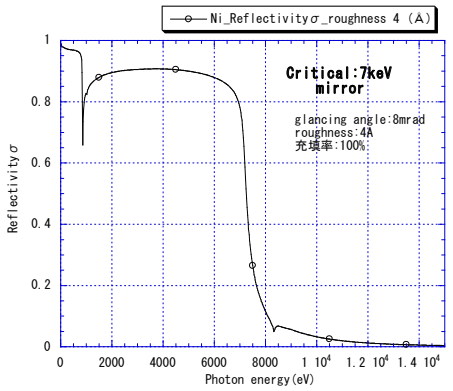

図 3-8. 臨界エネルギー7keV のミラー反射率のエネルギー依存

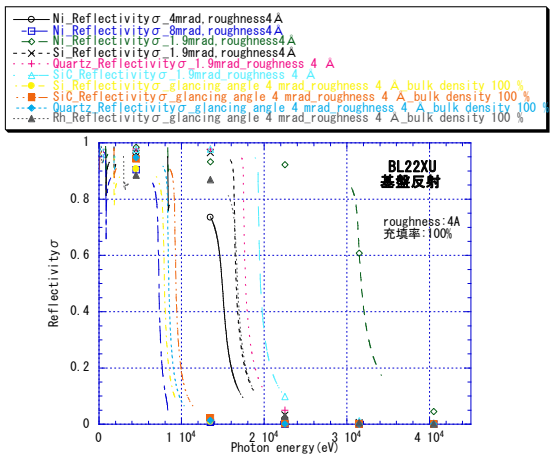

図 3-9. 基盤反射率のエネルギー依存

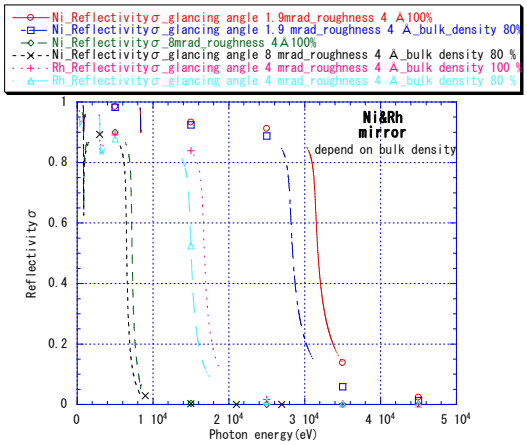

図 3-10. バルク密度 80%と 100%の反射率

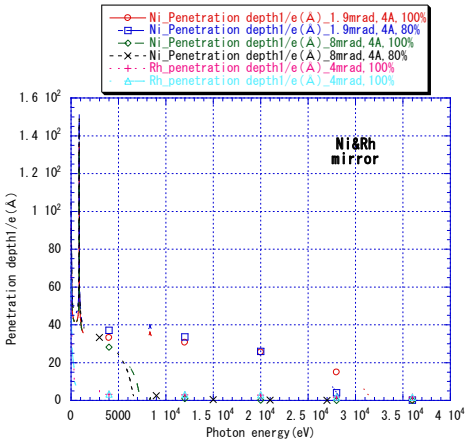

図 3-11. 各エネルギーの X 線侵入深さ

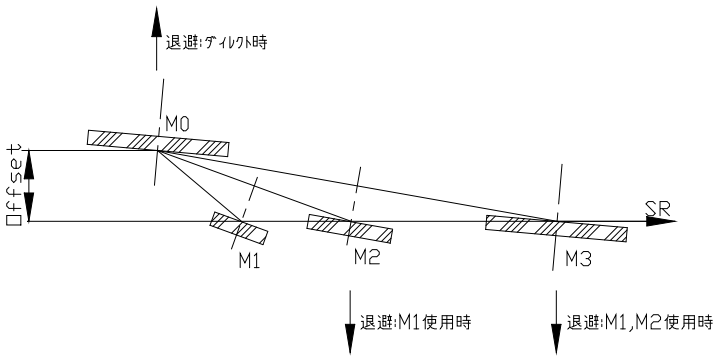

図 3-12. X 線ミラー配置

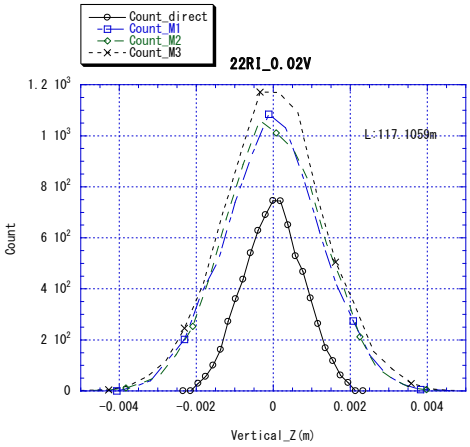

図 3-13. M0：58m の RI 実験棟のビームプロファイル(縦)

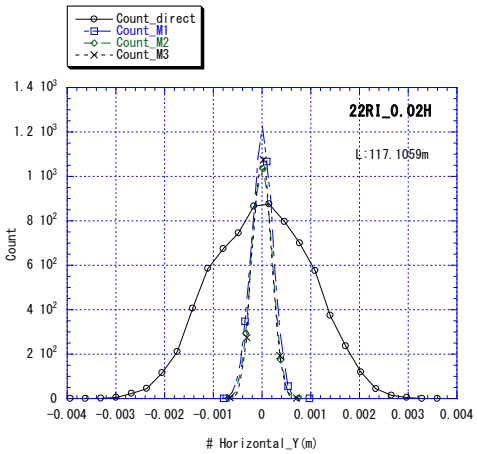

図 3-14. M0：58m の RI 実験棟のビームプロファイル(横)

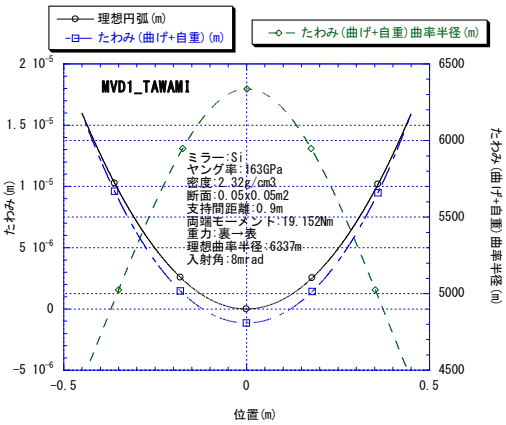

図 3-15. M1 との組み合わせ時の M0 たわみ(円弧)

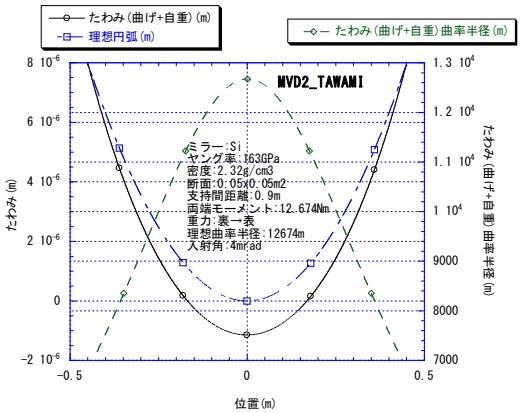

図 3-16. M2 との組み合わせ時の M0 たわみ(円弧)

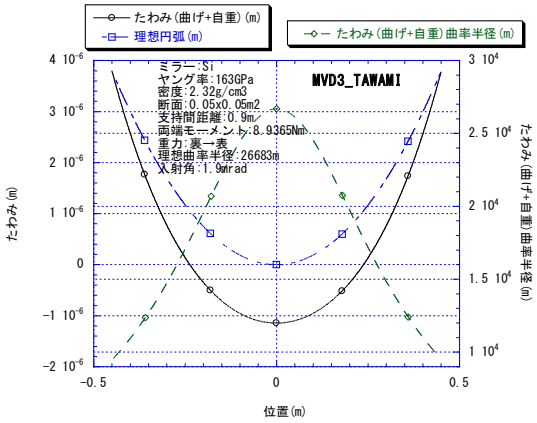

図 3-17. M3 との組み合わせ時の M0 たわみ（円弧）

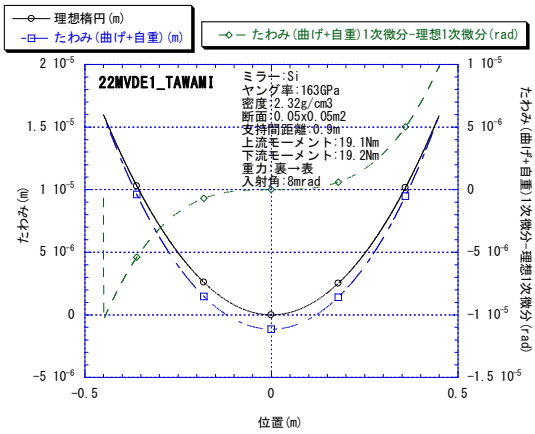

図 3-18. M1 との組み合わせ時の M0 たわみ（楕円）

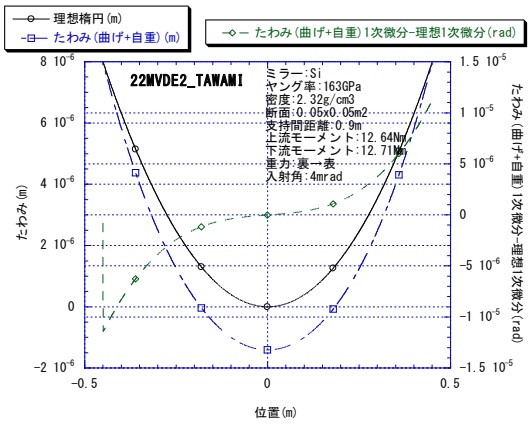

図 3-19. M2 との組み合わせ時の M0 たわみ（楕円）

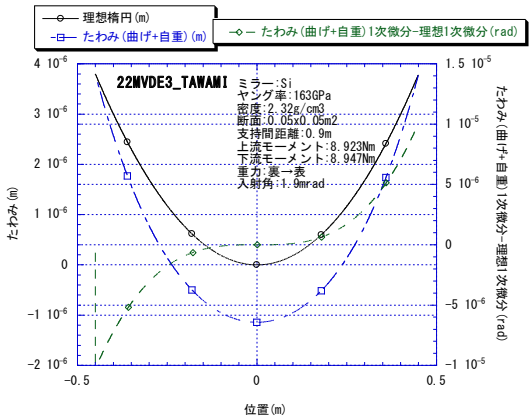

図 3-20. M3 との組み合わせ時の M0 たわみ（楕円）

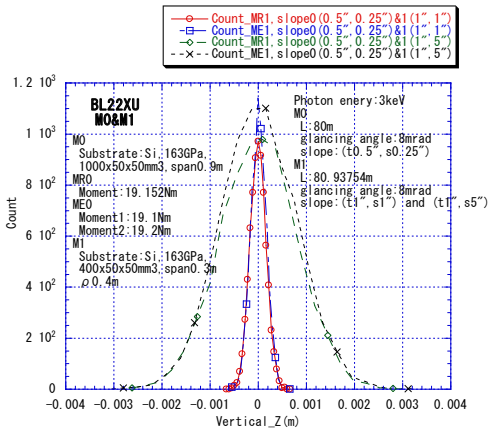

図 3-21. M0：80m の RI 実験棟のビームプロファイル（縦）、M0-M1 使用時

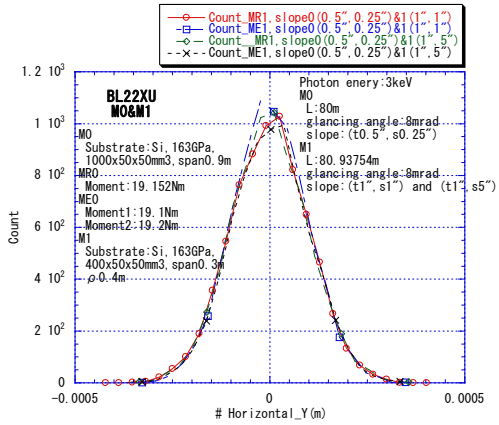

図 3-22. M0：80m の RI 実験棟のビームプロファイル（横）、M0-M1 使用時

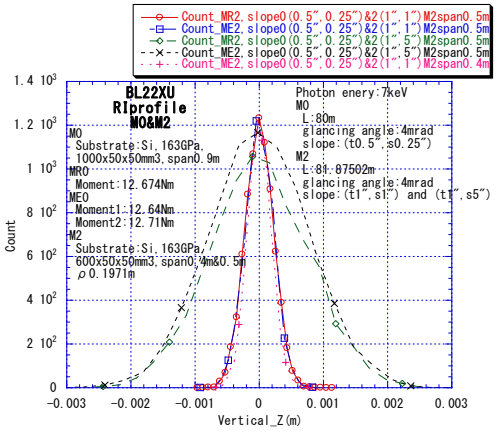

図 3-23. M0：80m の RI 実験棟のビームプロファイル(縦)、M0-M2 使用時

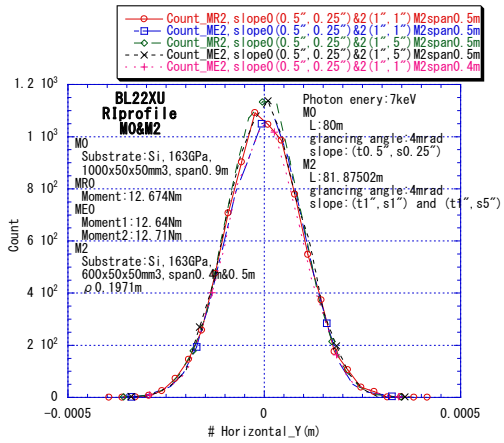

図 3-24. M0：80m の RI 実験棟のビームプロファイル(横)、M0-M2 使用時

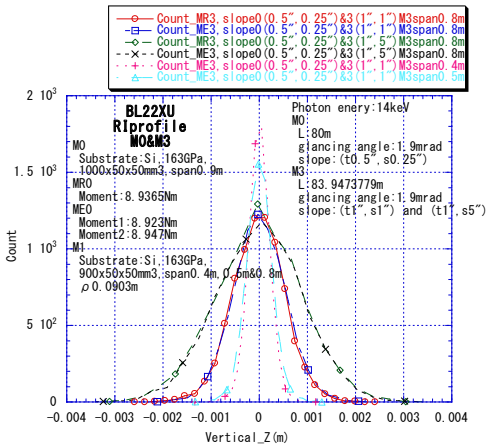

図 3-25. M0：80m の RI 実験棟のビームプロファイル(縦)、M0-M3 使用時

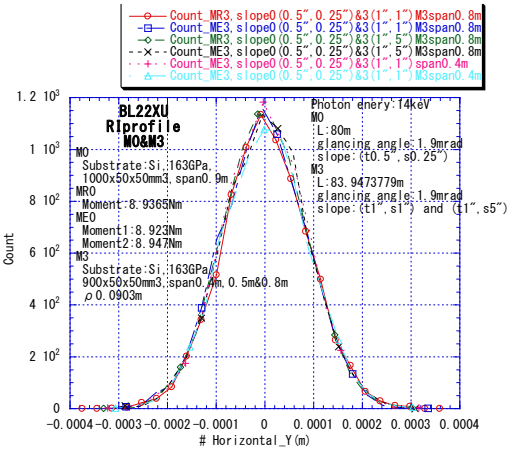

図 3-26. M0：80m の RI 実験棟のビームプロファイル(縦)、M0-M3 使用時

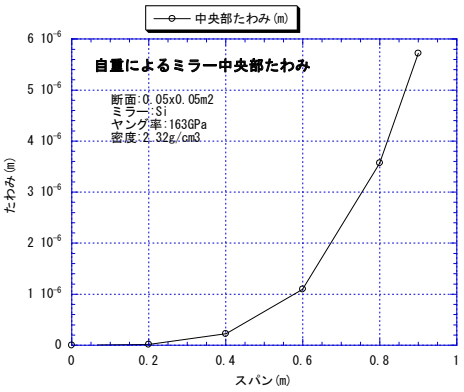

図 3-27. ミラー中央部の自重たわみ

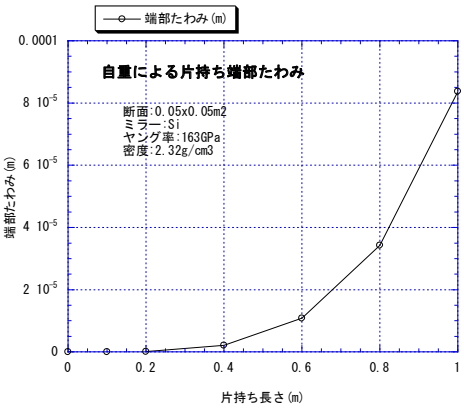

図 3-28. ミラー端部の片持ち自重たわみ

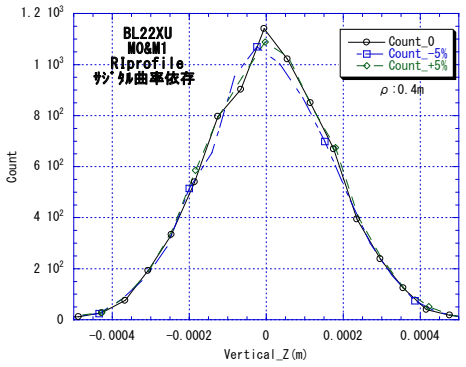

図 3-29. サジタル曲率を最適化したビームプロファイル(縦)、M0-M1 使用時

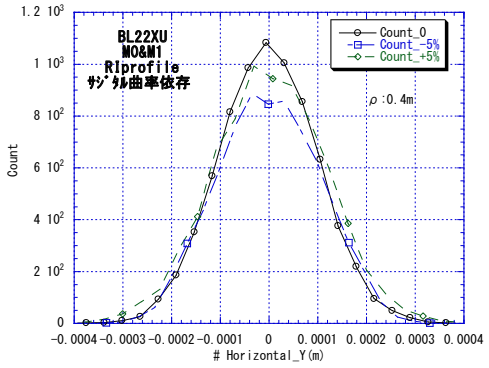

図 3-30. サジタル曲率を最適化したビームプロファイル(横)、M0-M1 使用時

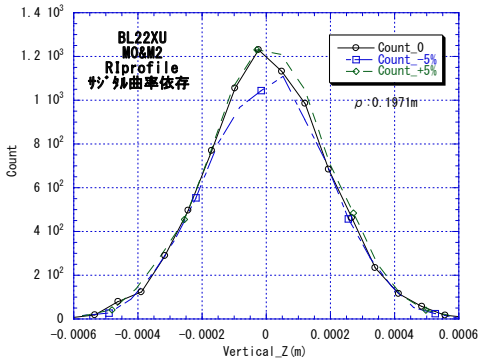

図 3-31. サジタル曲率を最適化したビームプロファイル(縦)、M0-M2 使用時

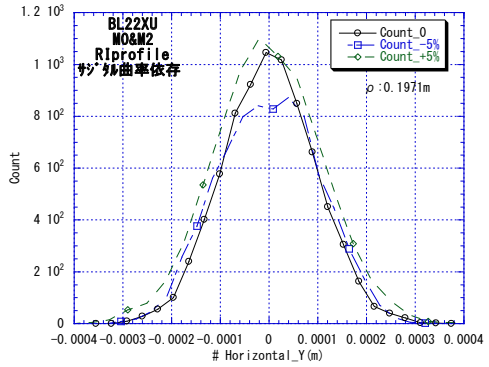

図 3-32. サジタル曲率を最適化したビームプロファイル(横)、M0-M2 使用時

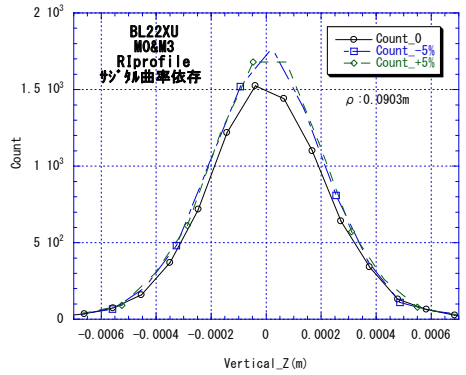

図 3-33. サジタル曲率を最適化したビームプロファイル(縦)、M0-M3 使用時

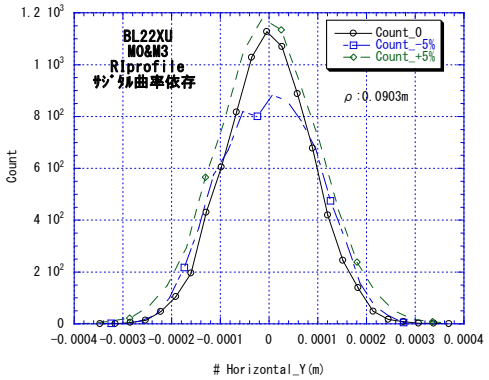

図 3-34. サジタル曲率を最適化したビームプロファイル(横)、M0-M3 使用時

4. 低エネルギー分光器（カム式二結晶分光器）

4.1. 概要

BL22XU の共鳴散乱実験や MCD では、Pd-L_{III} 吸収端 3.17keV、U-M_V 吸収端 3.55keV などの比較的低エネルギー領域から 30keV まで、マルチアンビルセルを使用する高温高圧実験では 50～70keV の高エネルギーX 線が用いられる。また XAFS 実験では、アクチノイドの L・M 吸収端を利用する構造解析を実施するため、5～30keV の利用を予定している。このため 3～30keV までを SPring-8 標準二結晶分光器（カム式二結晶分光器）の改良型を用い、50～70keV の高エネルギー領域では計算結合型二結晶分光器を使用する。SPring-8 標準二結晶分光器を高エネルギーX 線まで利用する場合、第 1 結晶が第 2 結晶（主軸）から大きく離れてしまう。そのため、SPring-8 標準二結晶分光器の主軸へのモーメント荷重が大きくなり、現実的ではない。

4.2. 目的

BL22XU の SPring-8 標準二結晶分光器の改良を検討する。

4.3. 条件

(1) 光源

・ring

蓄積エネルギー：8GeV

ビームサイズ：σx：0.376mm、 σy：0.0325mm

ビーム発散 ：σx’：0.0157mrad、σy’：0.00362mrad

・真空封止アンジュレータ

周期長：3.8cm、周期数：118

K 値：2.64（1st：3.5keV）

(2) ビームライン

全長：117.1059m

① 分光器

A) エネルギー範囲：3.5（3.1）～37keV

B) 冷却方式：間接冷却

エネルギーを 3keV とするため、フロントエンド(FE)は Be 窓無しとする。このため、フロントエンドとの取り合いの輸送部上流に差動排気部を設け、安全のために分光器の冷却は平板結晶間接冷却とする。

C) 出来るだけ SPring-8 標準二結晶分光器に合わせる。

4.4. 検討

(1) FE スリット開口

図 4-1、4-2 より FE スリットでの 3. 5keV の広がりは縦 1mm×横(半値)1mm となるので、現状のスリット開口 1mm×1mm と同じ開口サイズとする。

(2) 熱負荷

図 4-3 に 3.5keV の場合のパワー密度を示す。これより、FE スリットを通過するパワーは約 430W となる。光源から 50m 位置に分光器を設置すると、直入射時の光軸中心での最大密度は約 150W/mm² となる。

(3) 結晶

図 4-4～4-6 に Si (シリコン)、Dia(ダイヤモンド)、Ge (ゲルマニウム) の Bragg 角と回折角度幅Δθを示す。このとき、高エネルギー側の Bragg 角を SPring-8 標準二結晶分光器の最小角度である 3 度とし、エネルギー範囲で最もエネルギー分解能ΔE/E(=Δθ/tanθ)の悪いものを以下に選定した。

結晶と回折面	Photon Energy(keV)	Bragg 角
Si(111)	3. 1～37. 7	40～3
Si(400)	7. 1～87. 2	40～3
Dia(111)	3. 1～57. 5	80～3
Dia(220)	5～93. 9	80～3
Ge(111)	3～36. 2	40～3
Ge(400)	8. 4～83. 7	40～3

エネルギー範囲より結晶の組み合わせは 2 組となる。

Dia 結晶の場合 Bragg 角が大きくなるため、光を透過させる水冷間接冷却は結晶下部ステージと透過光とが干渉してしまい、使用するには困難となる。このため、冷却は液体窒素の間接冷却が有望である。

X 線の回折強度は Ge、Si、Dia の順となる。一方、母材となる単結晶の入手性、必要となる母材の大きさ、これまでの使用実績から Si が良い。Si の次に Dia か Ge となる。

以上から、BL22XU では Si(111)結晶を利用し、結晶の冷却方法は液体窒素間接冷却とする。

(4) 干渉

図 4-7 に現状の SPring-8 標準二結晶分光器 θ=42 deg での光路を示す。使用上は 40 deg で十分であるが、調整時の駆動範囲を考慮して、余裕をもたせ 42 deg にて計算をする。その結果、結晶の光路方向の長さは 80mm 以下となる。しかし、結晶の上流には、結晶エッジにダイレクト入射光を避ける銅ブロックがあるため、実際の長さは 80mm 以下となる。標準の液体窒素間接冷却銅ブロックの光路方向の幅が

10mm であるため、上流及び下流の銅ブロック幅を差し引くと結晶幅は 60mm 以下となる。これでは結晶両サイドの伝熱面が 6/9（標準の光路方向幅 90mm）になってしまうため、本ホルダでは上流及び下流の銅ブロックを、光路方向に光路を避けるように傾斜を設け、光路方向の結晶幅を 70mm、銅ブロック傾斜角 22°に改良する。（この時、SR との距離は 1. 9mm である。）パワー密度が最も大きくなる θ = 42deg では、第 2 結晶の上流でダイレクト光との干渉が生じやすくなるが、傾斜角をつけることによって受光面のパワー密度を小さくすることができる。

この時、カゴとダイレクト光を受ける銅ブロックも干渉の可能性があるが、カゴに切りかきを設けたり、チェンバを大きくしたりする等の改良を施すことによって、干渉を回避することができる。

(5)　駆動軸

Bragg 角が 40～3deg となるため、二結晶分光器のカム駆動範囲も変更しなければならない。図 4-8 に並進移動軸に対するカム形状と Bragg 角と示す。高角側でカム形状が大きく変化している。

分光結晶として平板結晶を使用するならば、SPring-8 標準二結晶分光器では不要となる軸が存在する。不要となる軸は SPring-8 標準二結晶分光器のカゴの中にあり、それは光軸の光路を変えるあおり軸 Tx 以外のカゴの中にある軸すべてである。水平軸 X はあおり軸の回転中心が結晶表面内にあれば不要であるが、SPring-8 標準二結晶分光器の Tx 軸のように回転中心が一致していない場合では必要となる。あおり軸の最小送りは、イメージー分光器間距離 67m と Be 窓開口をφ10mm とすると、140μrad/step 以下必要となるが、SPring-8 標準二結晶分光器に合わせ 0. 01”/step とする。また、面内回転軸φがあると分光器立ち上げ時に反射探しが容易となる。不必要な軸を残す場合には次の点が問題となる。

① Δθ軸から結晶表面までの距離、重量が大きくなると、Bragg 高角時の倒れが大きくなり、主軸の精度が悪化する。

② 液体窒素冷却時の振動の影響を受ける軸が増える。

そのため BL22XU の分光器では、カゴの中に結晶表面に回転中心を一致させるあおり軸、面内回転軸の 2 軸のみを残し、他の軸は除くこととする。また、上記②の理由から、液体窒素冷却配管は現状のフレキシブルチューブをブレード付きのフレキシブルチューブに変更し、これに伴いΔθ軸のトルクを現状の 2 倍以上へ増強させる。（参考として、BL11XU の SPring-8 標準二結晶分光器のフレキシブルチューブをブレード付きのフレキシブルチューブに変更した場合、配管の振動を抑えることは出来たが、Δθ軸のトルクが小さかったため、駆動に不具合を生じたこともあった。）　同様にカゴの上にあるあおり軸、面内回転軸のトルクもトルクを増やすことが望ましい。またあおり軸は、SPring-8 標準二結晶分光器のシーソー式では剛性が足りないので、採用しないこととする。

4.5. 結果

以上より、SPring-8 標準二結晶分光器（液体窒素間接冷却仕様）から以下の点を変更する。

- ・エネルギー　：3～37. 7keV
- ・タイプ　：SPring-8 標準二結晶分光器改良型
- ・結晶と結晶面　：Si（111）
- ・Bragg 角　：40～3 degree
- ・冷却方式　：間接液体窒素冷却（上流差動排気のため）
- ・結晶サイズ　：70mm×50mm×35mm
  （標準サイズ: 90mm×50mm×35mm）
- ・駆動軸　：カゴの中の軸は結晶表面に回転中心を一致させるあおり軸、面内回転軸の 2 軸のみ

4.6. 結論

BL22XU の低エネルギー分光器は、結晶サイズ、Bragg 角、カゴの中の駆動軸とΔθ軸のトルク、フレキシブルチューブを変更した SPring-8 標準二結晶分光器改良型で対応する。

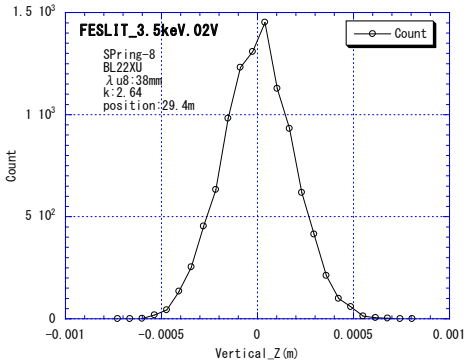

図 4-1. 3.5keV 使用時、FE スリット位置での入射光の広がり(縦)

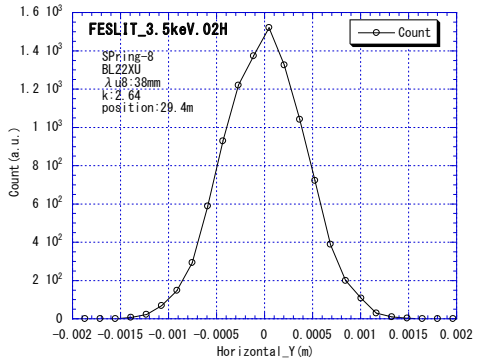

図 4-2. 3.5keV 使用時、FE スリット位置での入射光の広がり(横)

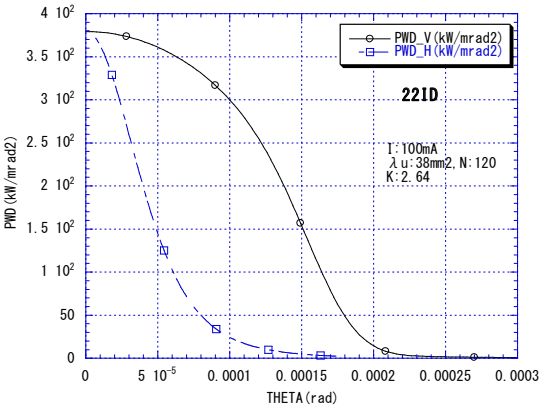

図 4-3. 3.5keV でのパワー密度

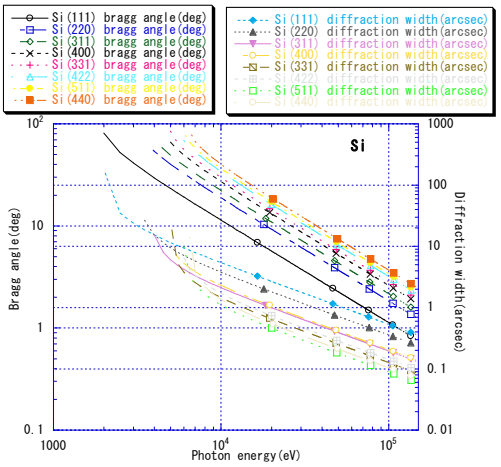

図 4-4. Si 単結晶の Bragg 角と回折幅の関係

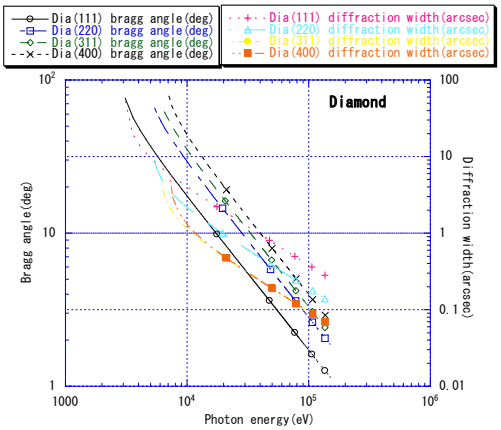

図 4-5. ダイヤモンド単結晶の Bragg 角と回折幅の関係

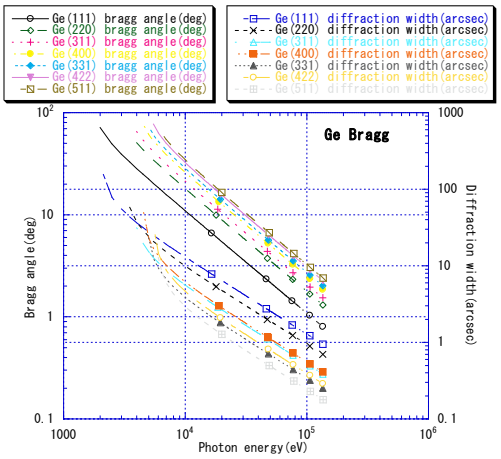

図 4-6. Ge 単結晶の Bragg 角と回折幅の関係

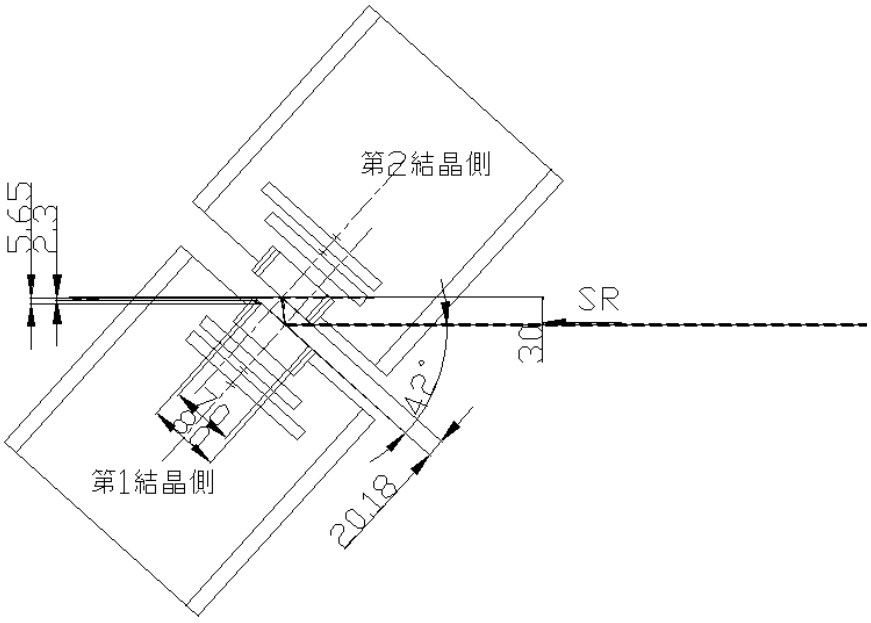

図 4-7.　θ =42 deg での光路

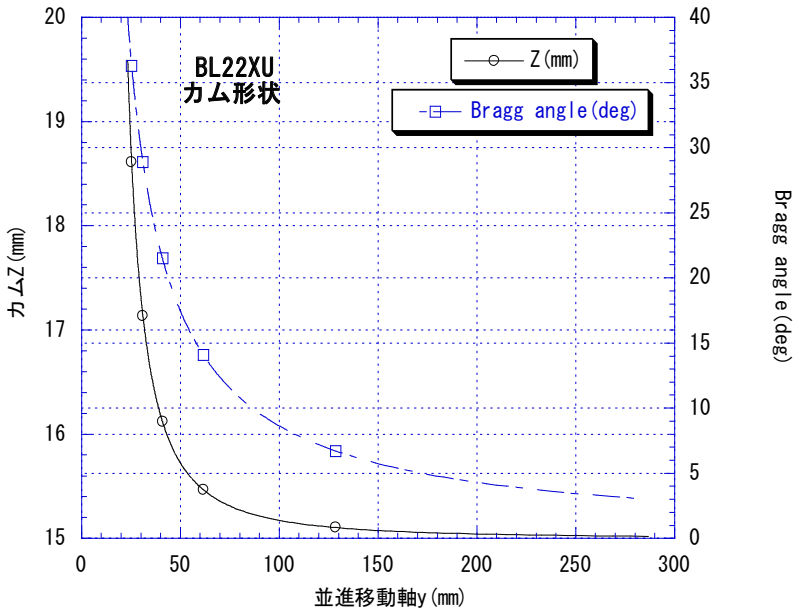

図 4-8.　カム形状

5. 高エネルギー分光器（計算結合型二結晶分光器）

5.1. 概要

低エネルギー分光器では対応できないエネルギー範囲のために、高エネルギー分光器を設置する。高エネルギー領域では、第 1 結晶と第 2 結晶（主軸）が大きく離れてしまうため、カム式分光器では対応が難しい。そこで、第 1 結晶と第 2 結晶を独立させ、計算された値によって角度を制御する計算結合型分光を採用する。

5.2. 目的

高エネルギー分光器として利用できる計算結合型分光器を検討する。

5.3. 条件

(1) 光源

・ring

蓄積エネルギー：8GeV

ビームサイズ：σx：0. 376mm、σy：0. 0325mm

ビーム発散　：σx’：0. 0157mrad、σy’：0. 00362mrad

・真空封止アンジュレータ

周期長：3. 8cm、周期数：118

K 値：1. 172（13th：80keV）

(2) ビームライン

全長：73m

① 分光器（計算結合型）

A) エネルギー域：50-70keV

B) 冷却方式：間接冷却

X 線エネルギー3keV を利用するため、フロントエンド（FE）は Be 窓無しとする。このため、フロントエンドとの取り合いの輸送部上流に差動排気部を設ける。安全のため、分光器の冷却は平板結晶間接冷却とする。

5.4. 検討

(1) 結晶配置

SPring-8 の他のビームラインでも採用されている結晶横はね 1 枚振りのヨハンタイプ分光器が、本ビームラインで利用できるかどうかをシミュレーションした。ヨハンタイプの分光器の場合、結晶を次式の 2R に曲げる。また、集光点距離が異なる場合、非対称角を持った結晶を曲げることになる[4)]。

$$l = 2Rcos\theta\left(\frac{\pi}{2} - \theta_B\right) \quad \text{（対称ヨハン）}$$

$$l_1 = 2Rsin(\theta_B - \alpha) \quad \text{（非対称ヨハン）}$$

$$l_2 = 2Rsin(\theta_B + \alpha) \quad \text{（非対称ヨハン）}$$

ここで、lは対称な場合の光源−結晶間、結晶−集光点距離、l_1は光源−結晶間距離、l_2は光源−結晶間距離、θ_BはBragg角、αは非対称角度である。フォトンエネルギー 80keVでは対称ヨハンの場合　l=52m、R2128m、非対称ヨハンの場合、l_1=52m、l_2=11m、α=0.595°、R=747mとなる。この時の集光点73m位置でのプロファイルは、図5-1となる。図5-1のHは水平、Vは垂直プロファイルである。比較のため、下流に設置される二結晶分光器の結晶をSi(400)に変えた場合も同様に示した。強度は非対称ヨハンの場合が一番強く、次にヨハンと二結晶が同程度である。しかし非対称ヨハンでは、θ_B=1.42°、α=0.595°の結晶を製作するのは容易ではなく、高温高圧実験にはそぐわない。Si(111)の対称ヨハンとSi(400)の二結晶分光器の強度が同程度であるため、本分光器は光軸（出射高さ）が変わらず、Si(400)の二結晶分光器より強度が大きくなるSi(111)の二結晶配置分光器を採用する。また、下流に設置される低エネルギー分光器と光軸を合わせるため、オフセットを30mmとする。

(2)　熱負荷

高エネルギー分光器では、50～70keVのX線を分光するため光源の高次光を用いる。そのため挿入光源のGapを小さく（狭く）して使用するため熱負荷は大きくなってしまう。しかし、高エネルギーX線を分光するため、分光器の上流に金属フィルターを挿入し熱負荷を緩和することが可能となる。

結晶の冷却方法として、水冷間接冷却の可能性を検討する。水冷間接冷却としてSPring-8で利用実績のある偏向電磁石ビームライン用分光器の水冷間接冷却方法を基準として検討する。図5-2、5-3に偏向電磁石ビームラインの例としてBL14B1の分光器第1結晶が受ける全パワースペクトルと軸上でのパワー密度スペクトルを示す。計算では第1結晶はダイレクト光が入射すると考えているため、パワー密度ではBragg角の補正をしなくてはならない。計算の結果、第1結晶の受ける全パワーは198W(水平1.5mrad)、パワー密度は0.5W/mm^{2}となった。同様に高エネルギー分光器の計算結果を図5-4に示す。計算では光源を最小Gapとし、フロントエンドにはパナソニックグラファイトフィルター300μm厚を挿入し、フロントエンドスリットの開口を1mm×1mm(29.4m)とした。熱負荷を緩和させるフィルターは、熱負荷の大きいBL08Wの実績からアルミニウム（Al）とし、位置は47m、Bragg角は50keVに合わせ2.27°とした。BL14B1程度の熱負荷とする場合には全パワー

から Al は 6mm 厚以上、パワー密度からは Al は 20mm 厚でも足りない計算結果となった。一方、光の減衰に着目すると、図 5-5 に示すとおり 3mm 厚でも 60keV でも約 20%となる。フォトン数の減少を 20%以下とすると、要求されるアルミニウムの厚さは 3mm 以下となる。計算の結果 BL22XU の高エネルギー分光器では、水冷間接冷却での結晶の冷却は困難である。よって高エネルギー分光器も、下流の設置される低エネルギー分光器同様に液体窒素冷却方式とする。

(3) Bragg 角

エネルギー範囲 50～70keV、オフセット 30mm、Si(111)結晶の採用により、Bragg 角、第 1 結晶並進移動量は以下となる。分光器のエネルギー決定のため、第 1 結晶が並進駆動するとした。

	Photon Energy(keV)	Bragg 角(deg.)	並進移動量(mm)
Si(111)	50～70	3.2～1.6	269～537

50keV の Bragg 角は 2.26°であるが、低エネルギー分光器の Bragg 角が 3°（41.2keV 相当）までなので、2 台の分光器を用いて出射 X 線エネルギーの途切れを無くすために、可動範囲を 3.2°（35.4keV 相当）とした。

(4) 結晶サイズ

フロントエンドスリット開口 1mm×1mm(29.4m)より、分光器を設置する 47m 地点での広がりは 1.6mm となる。これと最小 Bragg 角 1.6°より光軸方向サイズ 58mm となる。SPring-8 標準二結晶分光器の液体窒素冷却用の光軸方向結晶サイズが 90mm なので、本結晶サイズを液体窒素冷却用結晶サイズに合わせる。

(5) 駆動軸

Bragg 角が 3.2～1.6°、オフセット 30mm となるため、並進移動量は 269～537mm となり、標準二結晶分光器の並進移動量の約 2 倍となる。2 軸がリンクして駆動する場合、第 1 結晶が離れた時に第 1 結晶の自重によるモーメント荷重が問題となる。そのため、本分光器では計算結合型を採用し、並進軸は光軸に平行に移動する。結晶を平板とするため、必要とする軸は Bragg 角用回転軸 θ、Bragg 角微調用回転軸 $\Delta\theta$、第 1 結晶並進軸 Y、上下軸 Z、あおり軸 Tx、全体上下軸 ZZ となるが、調整時用に面内回転軸 ϕ を付加する。図 5-6 より 80keV での回折幅が 0.5″程度であるため、Bragg 角微調用回転軸 $\Delta\theta$ には 0.05″以下が確実に駆動するピエゾ軸を第 1 結晶に設ける。(SPring-8 標準二結晶分光器の $\Delta\theta$ 軸のパルスモータ(PM)駆動軸の最小送りは 0.01″であるが実際には 0.05″程度である。) Bragg 角用回転軸 θ の最小送りは、Bragg 角微調用回転軸 $\Delta\theta$ があるので、標準二結晶分光器に合わせ 0.1″/step とする。並進軸の最小送りは、最小回折幅の 1/10 の 0.05″、最小並進移動量 269mm から、1μm/step とする。あおり軸は、イメージー分光器間距離 26m と Be 窓開口を ϕ10mm とすると、380μrad/step 以下が必要となるが、

標準二結晶分光器に合わせ 0.01″/step とする。分光器全体の上下駆動軸は、下流の二結晶分光器へ入射光を導くために十分なストロークとして±20mm、最小送り 1μm/step とする。他の軸は基本的に SPring-8 標準型二結晶分光器に合わせる。各軸の駆動範囲、最小送りを以下に示す。

軸	員数	駆動	駆動範囲	最小送り	備考
θ	2	PM	3.2−1.6°	0.1″/step	0.5″ 読みエンコーダ付
Δθ	2	PM	±3°	0.01″/step	
	1	ピエゾ	±14″	0.001″/step	
Y	1	PM	250−550mm	1μm/step	
Z	2	PM	−10−5mm	0.1μm/step	
Tx	2	PM	±2°	0.01″/step	中心は結晶表面
ZZ	1	PM	±20mm	1μm/step	
φ	2	PM	±5°	0.5″/step	

5.5. 結果

以上より、高エネルギー分光器を以下とする。

- ・エネルギー　：37～70keV
- ・タイプ　：計算結合型二結晶平行配置
- ・結晶面　：Si(111)
- ・Bragg 角　：3.2～1.6 deg.
- ・冷却方式　：間接液体窒素冷却
- ・結晶サイズ　：90mm×50mm×35mm
- ・駆動軸　：Bragg 角用回転軸θx2、Bragg 角微調用回転軸Δθx2、第 1 結晶並進軸 Yx1、上下軸 Zx2、あおり軸 Tx x2、全体上下軸 ZZx1、調整時用に面内回転軸φx2 の 12 軸

5.6. 結論

本ビームラインの高エネルギー分光器は計算結合型二結晶平行配置の液体窒素間接冷却で対応する。

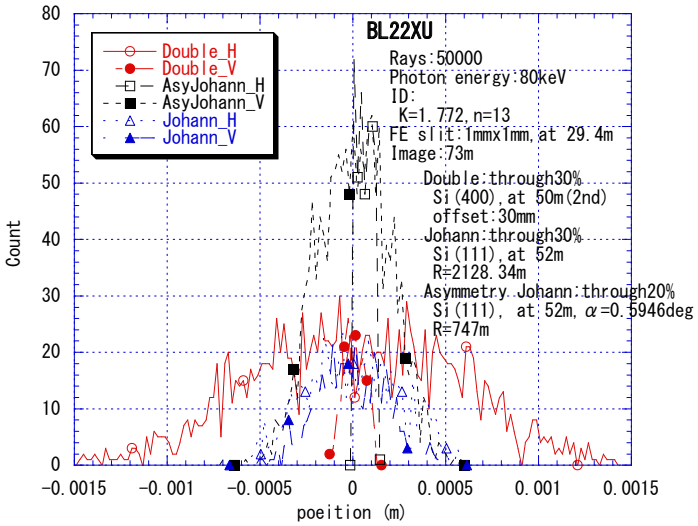

図 5-1. ヨハン、非対称ヨハン、2 結晶分光器のプロファイル

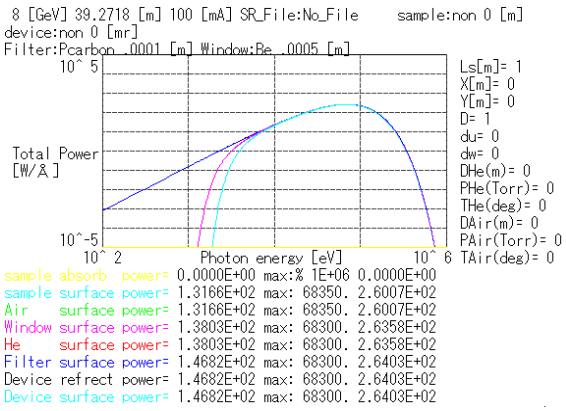

図 5-2. BL14B1 の全パワースペクトル

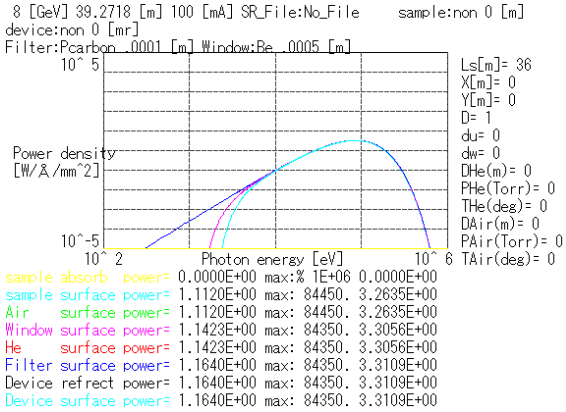

図 5-3. BL14B1 の軸上パワー密度スペクトル

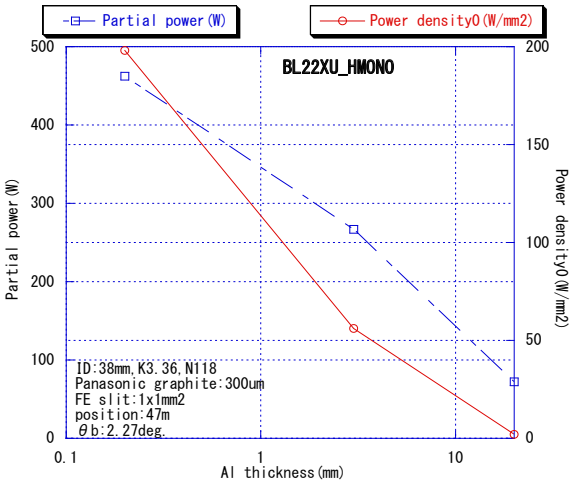

図 5-4. Al フィルターの第 1 結晶照射パワー（BL22XU）

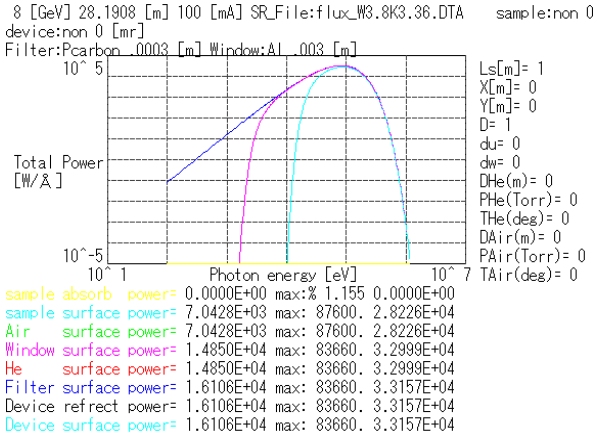

図 5-5. Al フィルター3mm 厚での全パワースペクトル（BL22XU）

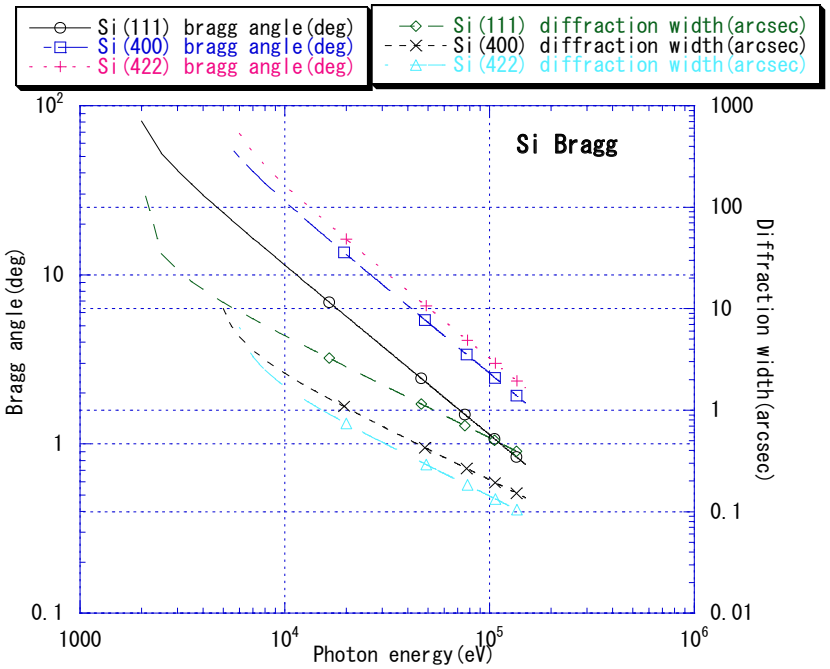

図 5-6. Si 結晶の各エネルギーでの Bragg 角と回折幅

6. Be 窓

6.1. 概要

BL22XU では 3keV の X 線を利用するため、他の硬 X 線ビームラインと比較して薄い Be 窓が利用される。可動式 Be 窓とする。

6.2. 目的

最下流で使用される Be 窓の仕様を決定する。

6.3. 計算条件

可動式 Be 窓を設置している BL15XU では、25μm 厚、直径φ11mm の Be 窓が使用されている。これより逆算して差圧 1.56atm とし、大たわみ理論(従来の Be は微少たわみ理論で計算)、最大せん断応力説を用い全応力は 0.47GPa 以下まで耐性を持つこととする。BL15XU ではこれに熱負荷が加わるため、熱負荷の小さい BL22XU ではより安全となる。

ポアソン比：0.07、ヤング率：314GPa、密度：1.848g/cm^3

6.4. 結果

図 6-1 に 3keV での Be 透過率、図 6-2 に差圧 1.56 atm、全応力は 0.47GPa での Be 厚さに対する Be 半径を示す。

3 keV で透過率 80%以上を得るためには、Be 窓 50μm 以下の厚さが必要である。また、50μm 以下の厚さでは窓径はφ22mm 以下となる。

BL22XU の場合、30keV 以上の光軸と 30keV 以下の光軸があり、軸のオフセットは 15mm であるので各軸用にゲートバルブに Be を貼り付けた可動 Be 窓を採用する。

6.5. 結論

BL22XU の場合、BL15XU より大きな窓径も可能であり、3keV 以上の低エネルギー用 Be 窓として厚さ 50μm、窓径φ20mm を採用する。

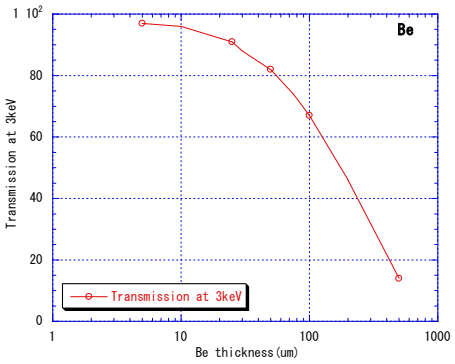

図 6-1　3keV での Be 透過率

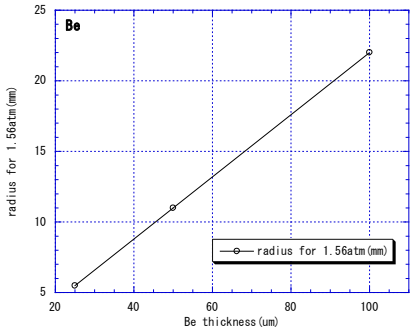

図 6-2　1.56atm、全応力 0.47GPa の Be 窓半径

7. 音響遅延管 ADL

7.1. 概要

BL22XU では速断バルブ FGV（Fast Gate Valve）が 3 カ所に設置される。なぜならば、RI 実験棟に於いて RI を取り扱うために、また 3keV の光を導くため通常より薄い Be 窓を使用するためである。下流の ADL は Be 窓破断時や RI 実験棟で使用される RI の飛散を防ぐため、中流の ADL は可動 Be 開閉の事故による大気流入を防ぐため、上流の ADL は上記下流事故を完全に防ぎ上流のリング、フロントエンドに被害を及ぼさないために設置する。

7.2. 目的

使用される ADL の仕様を決定する。

7.3. 計算条件

本ビームラインで流入する気体は空気とする（分光器は間接冷却）。

温度：20℃、分子量：28. 96、比熱比：1. 402、直径：4. 33E^{-10}m

7.4. 結果

(1) BL23SU（参考：JAEA 専用軟 X 線ビームライン）

RI 実験棟に導入されているビームライン BL23SU に設置されている ADL は、内全長 2. 4m、内径 145mm、部屋 12、オリフィス径はφ50mm である。ベース圧力を 1E^{-4}Pa とした時の計算結果を図 7-1 に示す。

トリガーレベルを 1E^{-1}Pa 程度と考えると遅延時間は 10msec 程度となる。

FGV の閉時間が数 msec 程度であるので、BL22XU の ADL ではこれより余裕を持たせなければならない。

(2) 下流および中流の ADL

下流の ADL は X 線ミラーの使用状況に応じて上下 15mm 離れた 2 本の光軸が存在する。ADL のセンターラインを一方に合わせ、10mm の余裕を持たせるとオリフィス径はφ50mm となる。一方、BL23SU より遅延時間を長くしたいので、ADL 内径をφ300m とし、内全長を 1. 8m、部屋 12 とした結果を図 7-2 に示す。ベース圧力はスクロールポンプを用いた真空環境なので 10Pa とした。トリガーレベルを 20Pa 以上とすると粘性流域なので 0. 1sec 以上遅延する。このとき、FGV の動作ゲージの最大トリガー圧力は 1E^{-2}mbar（1Pa）なので、1Pa 以下の真空でしか利用できない。この ADL は遅延時間としては十分であるが、FGV のセンサーもしくはベース真空度を改善する必要がある。

(3) 上流の ADL

中流および下流の ADL を上流で使用した結果を図 7-3 に示す。ベース真空は

BL11XU の光学ハッチ内の真空度が $1E^{-6}$ Pa 台であるので、$1E^{-5}$ Pa とした。オリフィス径 50mm の場合、トリガーレベル 0. 1Pa で遅延時間 30msec となる。これは、真空が分子流領域であるからである。オリフィス径 15, 20mm の場合も同時に図 7-3 に示した。上流の場合オリフィス径 10mm（Be 窓径）で十分通過できる。この場合、両ケースとも 0. 2sec 以上の遅延が期待出来る。入射光が分光前の光であるため、また ADL の製作精度が悪くとも十分光を通す必要があるので、オリフィス径 20mm を採用する。

7.5. 結論

以下の ADL を採用する。なお、下流は余裕を見込み下流 ADL が 2 本である。

上流　　：内全長 1. 8m×ADL 内径 300m、部屋 12、オリフィス径 20mm
中流　　：内全長 1. 8m×ADL 内径 300m、部屋 12、オリフィス径 50mm
下流　　：内全長 1. 8m×ADL 内径 300m、部屋 12、オリフィス径 50mm

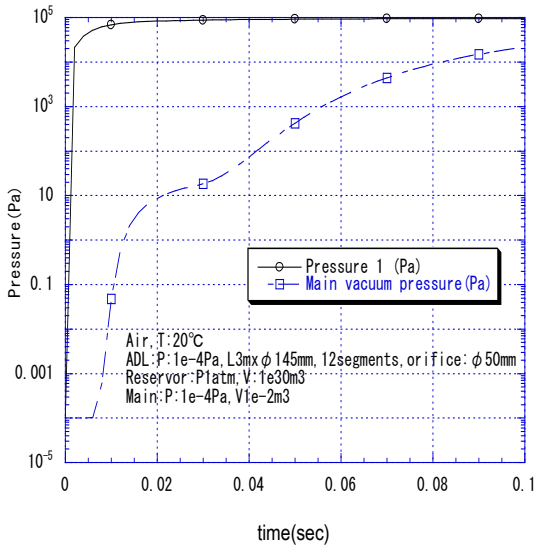

図 7-1　BL23SU の ADL 遅延時間

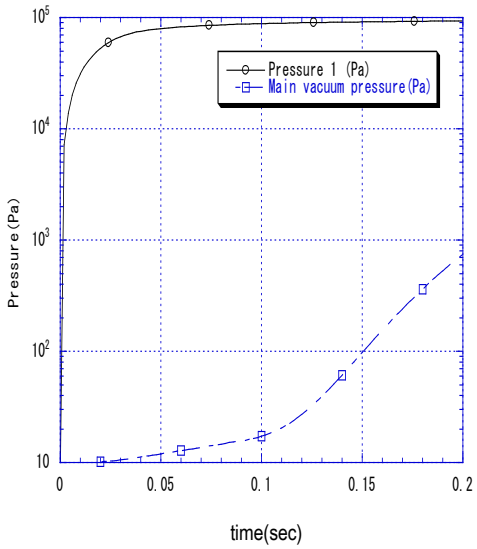

図 7-2　BL22XU 中下流 ADL 遅延時間

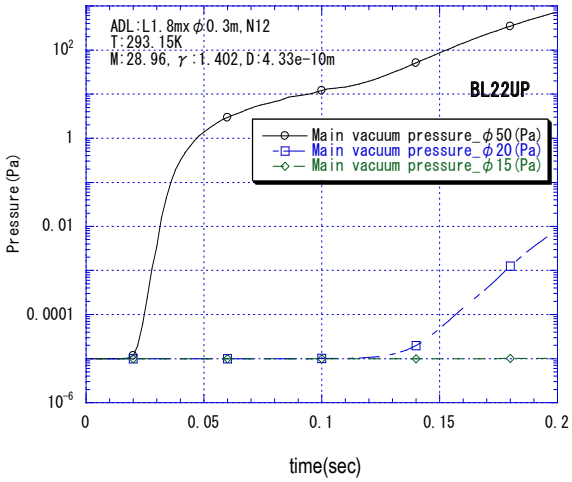

図 7-3　上流 ADL の遅延時間

8. 全体配置

8.1. 概要

以上の検討事項を踏まえて、BL22XU の配置を決定した。

8.2. 目的

BL22XU の配置を決定する。

8.3. 結果

以上の検討事項から、決定した配置図を図 8-1 に示す。全長約 124m、図中の FGV：高速ゲートバルブ、SM：スクリーンモニタ、DSS：下流シャッタ、GV：ゲートバルブを示す。

3keV の低エネルギーX 線を扱うため、フロントエンドは Be 窓無しとした。このため下流に差動排気部を設け、その下流には水冷可動式 Be 窓を設けた。下流の各実験ステーションには Be 窓付きゲートバルブを採用し、各利用エネルギーに応じて Be 窓有無を使い分けるようにした。また、放射性物質利用上の安全確保のため、3 カ所に FGV、ADL を設けている。

8.4. 結論

BL22XU は、挿入光源から RI 実験棟実験ステーションまで全長 124m であり、配置は図 8-1 のようになる。

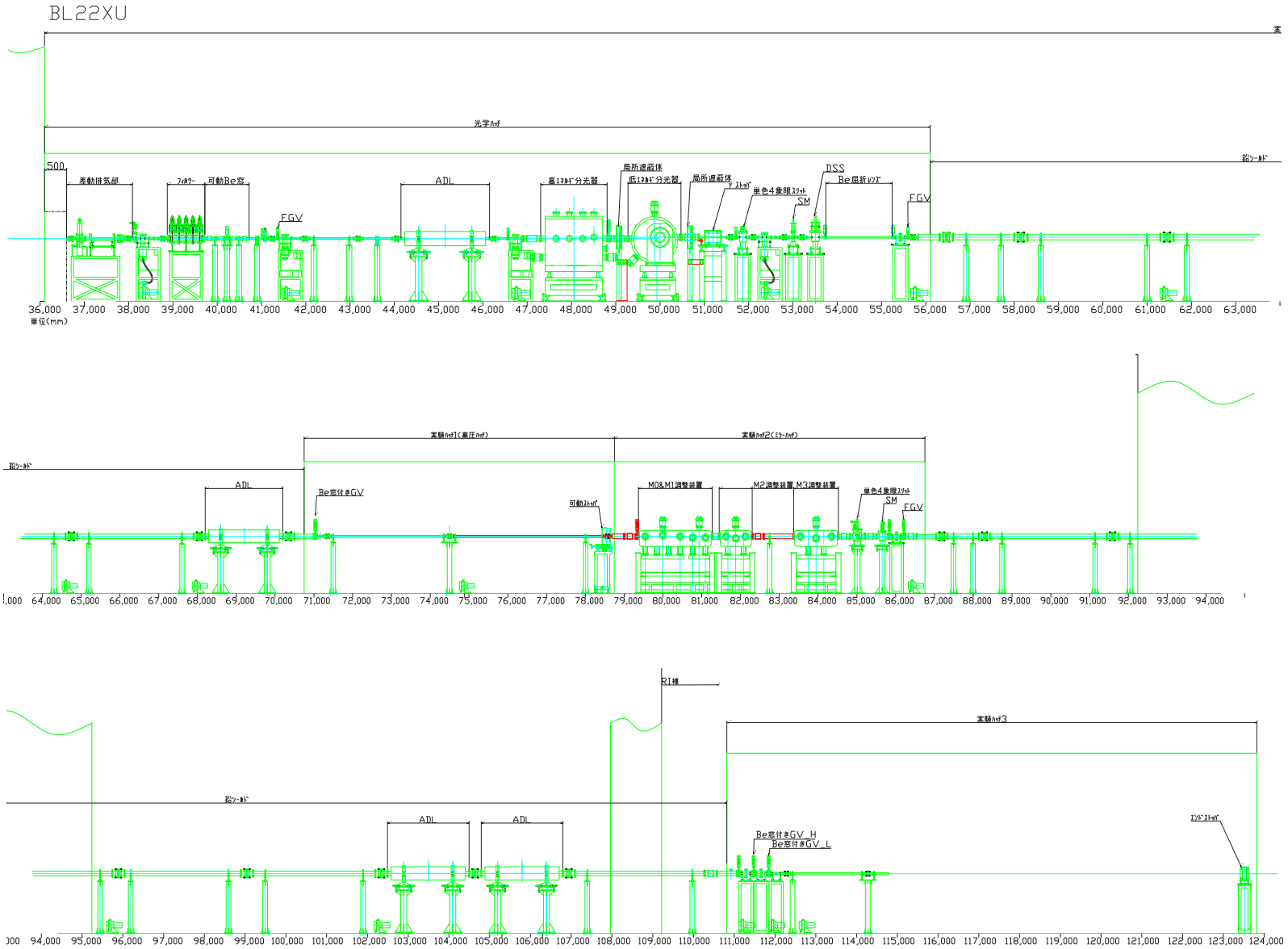

図 8-1.　BL22XU 配置図

謝辞

本設計で使用した計算コードは石川島播磨重工業株式会社（当時）にて開発した計算コードを、ご厚意により今回に限り使用させていただきました。石川島播磨重工業株式会社殿に感謝いたします。また、配置図は途中までスプリングエイトサービス株式会社の松本拓也氏に描いていただき、感謝いたします。その他、BL22XUの建設に関わった全ての方に感謝します。

参考文献

1) 高輝度光科学研究センター（JASRI），挿入光源ハンドブック'96，1996.
2) 佐々木 茂美，解説　挿入光源，放射光，Vol.6，No.3，1993，pp.13-20.
3) SPECTRA，https://spectrax.org/spectra/（参照 2023/02/28）.
4) 菊田 惺志，X線回折・散乱技術 上，　東京大学出版会，1992，256p.

This is a blank page.