JAEA-Technology 2009-035



精密 X 線光学系による放射光実験用単結晶材料の 結晶性評価

A Laboratory X-ray Measurement System of the Crystallinity of Single Crystal for the Synchrotron Radiation Optics

桐山 幸治 三井 隆也 福田 義博

Koji KIRIYAMA, Takaya MITSUI and Yoshihiro FUKUDA

量子ビーム応用研究部門 放射光科学研究ユニット

Synchrotron Radiation Research Unit Quantum Beam Science Directorate

D

July 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政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。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根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 Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, 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, 2009

精密X線光学系による放射光実験用単結晶材料の結晶性評価

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 放射光科学研究ユニット 桐山 幸治*、三井 隆也、福田 義博*

(2009年4月30日受理)

放射光実験で用いられる分光用単結晶には高い結晶性が要求される。そのため、実験で利用する単結晶の光学的性能を見極めて、その有効性を図るために、事前に簡便かつ迅速に結晶性を定量評価しておく必要がある。そこで我々は量子ビーム応用研究部門・放射光科学研究ユニット内においてX線発生装置を用いた精密X線光学系を組立て、上記の結晶を一例とする様々な結晶の結晶性を評価することができるシステムを立ち上げた。

このシステムにおいては、最小で数 0.01mm 程度の試料からの回折X線を 1″以下の角度精度で 測定することが可能である。また、試料の位置を走査することで、試料内の結晶性の分布を測定する ことも可能である。本手法を用いて評価された FeBO₃単結晶は、新たに開発された高分解能メスバウ アー分光実験法において利用されている。

原子力科学研究所(駐在):〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 ** 技術開発協力員(スプリングエイトサービス株式会社)

A Laboratory X-ray Measurement System of the Crystallinity of Single Crystal for the Synchrotron Radiation Optics

Koji KIRIYAMA*, Takaya MITSUI and Yoshihiro FUKUDA*

Synchrotron Radiation Research Unit Quantum Beam Science Directorate Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 30, 2009)

A single crystal used as an optical element in synchrotron radiation. X-ray experiment requires high quality and high performance. Therefore, the crystallinity of the single crystal should be estimated quantitatively before the experiment. For this purpose, a precise X-ray optics system has been developed at the laboratory of JAEA/Quantum Beam Science Directorate/Synchrotron Radiation Unit at SPring-8.

This system can measure a small sample less than $10 \,\mu$ m in size, and has angular resolution less than 0.01 degree regarding sample rotation. In addition, it is possible to measure the distribution of crystallinity at the single crystal surface. For example, a single crystal of FeBO₃ which was measured by this system has been installed in a monochromator for newly developed synchrotron radiation Mössbauer spectroscopy.

Keywords: Single Crystal, Crystallinity, Monochromator, X-ray, SPring-8

^{*:} Collaborating Engineer(SPring-8 service Co., Ltd)

目次

1.	はじめに	1
2.	精密 X 線光学系機器の仕様	2
	2.1 概要	2
	2.2 X線発生装置本体一式	2
	2.3 分光結晶	2
	2.4 精密 X 線光学系コンポーネントー式	3
	2.5 制御・測定コンポーネント	6
	2.6 制御ソフト	7
	2.6.1 モーターコントローラー制御用ソフト	7
	2. 6. 2 スキャン用ソフト	8
	2.6.3 X線検出器カウンター用ソフト	9
	2.7 X線検出器	10
3.	精密 X 線光学系を用いた単結晶評価手順	11
	3.1 概要	11
	3.2 X線発生装置、測定機器・制御装置の立上	11
	3.3 X線の光軸調整	14
	3.3.1 調整下準備	14
	3.3.2 スリット1の調整	15
	3.4 分光結晶調整	17
	3.5 試料測定	19
	3.5.1 試料位置合わせ	19
	3.5.2 回折強度曲線(ロッキングカーブ)の粗測定	21
	3.5.3 回折強度曲線(ロッキングカーブ)の精密測定	22
	3.6 単結晶の結晶性評価結果 一例	22
4.	まとめ	23
到十 ^二	较	<u>0</u> 9
· 财 [去 ·	rt * 立 酔	-20
<i>》</i>	~ ヘ m^	2ى مەرىيىيى
1.13		24

JAEA-Technology 2009-035

Contents

1.	Introduction	1
2.	Optics	2
	2.1 Outline	- 2
	2. 2 X-ray Generator Set	- 2
	2. 3 Monochromator Crystal	2
	2. 4 Components (Stages etc.)	- 3
	2. 5 Components (Control System etc.)	6
	2. 6 Control Software's	- 7
	2. 6. 1 Software for Motor Controller	· 7
	2. 6. 2 Software for Measurement	- 8
	2. 6. 3 Software for X-ray Detector	- 9
	2. 7 X-ray Detector Set	- 10
3.	Procedure of Evaluation of Single Crystal	11
	3. 1 Outline	- 11
	3. 2 Setup for Devices and Components	- 11
	3. 3 Alignment of X-ray Axis	- 14
	3. 3. 1 Setup	- 14
	3. 3. 2 Adjustment for Slit 1	- 15
	3. 4 Alignment of Monochromator Crystal	17
	3. 5 Measurements	- 19
	3. 5. 1 Adjustment of Sample Position	- 19
	3. 5. 2 Measurement of Rocking Curve 1	- 21
	3. 5. 3 Measurement of Rocking Curve 2	- 22
	3. 6 Example of Results of Measurements	- 22
4.	Summary	23
Ac	knowledgments	23
Ref	erences	23
Ap	pendix Trouble Shooting	24

1. はじめに

理想的な単結晶ではそれを構成している原子や分子がある決められた法則によって規則正しく配列し ている。しかし、天然に得られる単結晶は、一般にその法則を乱す不純物や欠陥を多く含んでいることが ほとんどである。そのため、工業あるいは学術研究用の実用材料として単結晶に純度や大きさ、光学的 特性を求める場合、不純物や欠陥の有無や濃度等を変化させて物理化学的性質をコントロールする。こ ういった単結晶の質は、X線などの回折実験によって得られる回折強度曲線(ロッキングカーブ)を動力 学的回折理論より算出したものと比較することにより求めることができる[1, 2]。例えば、この回折強度曲線 の最大強度値や面積、半価幅などが対象となる単結晶の結晶性の指標になる。すなわち、製作した単結 晶の回折強度曲線のデータと、理論的に求めたデータを比較することで、単結晶の性能を定量的に示す ことができる。

学術研究用に実験で用いられる単結晶の具体例の一つとして、放射光実験において利用される分光 結晶が挙げられる。分光結晶とは、白色あるいは準単色の放射光を分光して、ある特定のエネルギー幅 の単色光に変換する光学素子のひとつである。例えば、三井ら[3]によって近年に提案されている放射光 を用いた X線メスバウアー分光法で利用される FeBO₃ 単結晶がある。この単結晶は強い強度のメスバウ アービームを得るためにより良い結晶性でなければいけない。このような単結晶の光学的性能を正確に 見極めるために、簡便かつ迅速に結晶性を評価することが求められていた。そして、放射光実験での本 格利用の前には入念な予備実験を確実に行っておく必要があった。そこで我々は量子ビーム応用研究 部門・放射光科学研究ユニット内において X線発生装置を用いた精密 X線光学系を組立て、上記の結 晶を一例とする様々な結晶の結晶性を評価することができるシステムを立ち上げた。

2. 精密 X 線光学系機器の仕様

2.1 概要

結晶評価に必要な機材は、X線発生装置本体一式、分光結晶、精密X線光学系コンポーネントー式、 制御・測定コンポーネントー式、制御ソフトー式である。精密 X 線光学系コンポーネントは分光結晶およ び試料の位置調整のための複数のステージから構成され、X 線整形用のスリットも含まれる。制御・測定 コンポーネントは、X 線検出器やステージ制御用コントローラ等から構成される。

2.2 X線発生装置本体一式

X線発生装置本体は RIGAKU 製 Ultrax-18 である。定格出力は 18kW である。焦点サイズは 0.5 mm×1 mmである。測定においてターゲットは Mo を用いた (Mo の K_{$\alpha 1$}線の波長は 0.7093Å(E=17.48keV)である)。

2.3 分光結晶

分光結晶は Si 単結晶である。Si (111)面(対称反射)を利用する。形状を図1に示す。使用した分光結晶の形状は、インゴットからの切り出しの都合上、完全な直方体では無いが、利用に差し支えない。図1 の☆マークのある面が鏡面研磨されているX線受光面である。サイズは27mm×90mm×10mmである。また、Si(111)よりもさらに高いエネルギー分解能を必要とする場合、別に用意された Si (311)結晶を利用することもできる。



図1 結晶評価用 Si(111)分光結晶 図面

2.4 精密 X 線光学系コンポーネントー式

図2に精密 X線光学系コンポーネントを示す。図左側中央に X線入射口がある。上流側から、インタ ーロックを備えたシャッター、分光結晶前手動スリット、分光結晶、上流側自動ステージ(X・Z・θ・2θ)、こ れらに取り付けられる小型手動ステージ(Z・傾斜)、分光結晶後方手動スリット、それと、下流側自動ステ ージ(X・Z・corse-θ(粗動)・fine-θ(精動))、X線検出器前方(試料後方)手動スリット、X線検出器とな っている。通常利用する際の、それぞれの設定値等を表1に示す。測定光学系の概要を図3に示す。以 後は図3で定義した各部の名称を用いる。また、図2からわかるように、本光学系はX線が鉛直面内方 向に反射・回折される"縦振り"方式となっている。



図2 精密X線光学系外観

(a) 配置図



⑤ 試料、⑥ スリット3、⑦ X線検出器

(b) 軸定義



図 3 精密 X 線光学系概要

(a)配置図:③④は上流側ステージ上に設置、⑤⑥⑦は下流側ステージ上に設置、 (b)軸定義:矢印方向がプラスパルス方向

名称		仕様	備考	
	シャッター		インターロック機能付	
	手動ス	リット	20 mm × 20 mm	設定1mm×1mm、スリット1@図2
	分光結晶		Si(111) 対称反射	
		X1	± 50 mm、1 mm/500pls *2	プラスパルスで X 軸プラス方向
上法侧	白動フテニジ	Z1	± 50 mm、1 mm/500pls *2	プラスパルスで Z 軸プラス方向
工元側 フテージ		θ	360° 、1° $/5000$ pls *2	プラスパルスで X 軸に対して CW 回転
スノーン 粘 *1		2 0	360° $\tt 1^\circ$ /2500pls *2	プラスパルスで X 軸に対して CCW 回転
积	チ動っ二い	z	10 mm	
	于到入了一ク	α	±10°(傾斜)	
	手動スリット		20 mm × 20 mm	設定1mm×1mm、スリット2@図2
	試料ホルダー		小ゴニオ等を設置可能	
		х	±50 mm、1 mm/500pls*2	プラスパルスで X 軸プラス方向
下达侧	白動フニージ	Z	± 50 mm、1 mm/500pls*2	プラスパルスで Z 軸プラス方向
下加則	日刻へ)一ク	coarse− <i>θ</i>	360°、1°/250pls*2	プラスパルスで X 軸に対して CW 回転
スノーシ 新 *1		fine- $ heta$	$\pm 3^\circ$ 、1″/100pls*2	プラスパルスで X 軸に対して CW 回転
积	手動ステージ	2 θ	360	自動ステージ上に設置
	手動ス	リット	20 mm × 20 mm	設定 20 mm×20 mm、スリット 3@図 2
	X 線検出器		NaI	

表1 コンポーネント仕様一覧

*1 これらー式は、さらに X・Z 手動ステージに搭載

*2 モータードライバー設定が 1/1 の場合

2.5 制御・測定コンポーネント

制御・測定コンポーネントを図4に示す。モーターコントローラー(ラック上段)、モータードライバー(ラッ ク中段)、以下、ラック下段に①カウンター/タイマー(ORTEC 994)、②アンプ(ORTEC 570)、③シングル チャンネルアナライザー(ORTEC 550A)、④レイトメーター(ORTEC 449-2)、⑤NaI 用高圧電源(ORTEC 556)、⑥BIN 電源(ORTEC 4001A)である。NaI からの信号線(同軸ケーブル)が、アンプ→シングルチャ ンネルアナライザー→カウンター/タイマー→レイトメーターと接続されている。現在、モーターコントローラ ーとカウンターを GPIB 制御している。GPIB アドレスはそれぞれ「1」と「2」である。

モータードライバーは現状 CH0~3までの4チャンネルがある。CH3のみ STEP 設定を1/4としている。 制御したい軸に、それぞれのモータードライバーをその都度接続する。カウンター以下の機器設定に関 しては、2.7章に記述する。



図4 制御・測定用コンポーネント

2.6 制御ソフト

制御ソフトは3つあり、モーターコントローラー制御用、スキャン用(試料測定時等)、X線検出器カウン ター用である。それぞれのソフトはナショナルインスツルメンツ製プログラミングソフト「LabVIEW[4]」によっ て作成されている。使用方法を次に示す。

2.6.1 モーターコントローラー制御用ソフト

モーターコントローラー制御用のメイン画面を図5に示す。モーターコントローラー本体で行える基本的 な機能が、このソフトで利用できる。ソフトを実行した上で、予め"GPIB NAME"と"GPIB ADR"を決定し ておく。"CH 変更"で動かしたい軸のチャンネルを選択し、"PLS 変更"にて"絶対値移動"か"相対値移 動"かを指定した上で、"移動量"を決定して実行する。"現在の値"確認や"パルス値のプリセット"、"モー タ回転速度の変更"が必要となった場合はそれぞれのところで変更する。



図5 モーターコントローラー制御用ソフトのメイン画面

2.6.2 スキャン用ソフト

スキャン測定用のメイン画面を図 6 に示す。ソフトを実行した上で、スキャンしたい軸(モーターコントロ ーラーのチャンネル)を"SELECT AXIS"で指定し、スキャン範囲のパルスを"Start Position"、"End Position"に絶対値入力する。また一点ごとのステップを"Step"に、測定時間を"TIME"に入力する。スキ ャン中の現在パルスは"Current Position"に、カウント数は"カウント"に表示される。また、横軸をパルス、 縦軸をカウントにグラフが表示される。スキャンデータは自動で保存されるようになっているので、保存先 ホルダーを"Data Folder"に、ファイル名を"File Name Header"に入力しておく。ファイル名には4桁の 数字が自動的に付与される。スタートボタンでスキャンを実行すると、設定軸のバックラッシュ動作を行っ た後に、指定条件通りにスキャンを開始する。尚、スキャンデータはテキストファイルとして保存され、一般 的に利用される表計算ソフトで読み取りや追加計算処理が可能である。



図6 スキャン用ソフトのメイン画面

2.6.3 X線検出器カウンター用ソフト

現在のカウント数のみを知りたいときに用いるソフトである。メイン画面を図7に示す。"GPIB address"のコロンの左側は GPIB NAME を示している。コロンの右側は GPIB ADRESS を示している。"測定時間 /1 回"を設定して実行すると、測定時間(秒)当たりのカウントが表示される。前記のスキャンソフトを実行させる際には、干渉による誤作動を防ぐために、このソフトは必ず停止させておく。

GPIB address 0:2	
測定時間/1回 ↓1.0 CH1 100	
STOP	

図7 X線検出器カウンター用ソフトのメイン画面

2.7 X 線検出器

検出器は、NaIシンチレーションプローブ Type SP-10型(応用光研工業株式会社製)を用いる。検出器のセットアップは以下の通りである。

- 1) Nal とカウンターおよび高圧電源間にケーブルを接続する。この際、感電防止のために高 圧電源が 0V であることを確認しておくこと。
- 2) 高圧電源の電圧を段階的に 0.8kVに設定する。
- 3) シャッターを開き、X 線を出す。以下の設定時に強度が強すぎる場合(>数万 cps)は Nal が故障する可能性があるので、電圧・電流を下げるかアッテネータを入れて強度を下げること。
- シングルチャンネルアナライザーの設定モードを"Window"モードにして、"Upper Level" のつまみを0.1に設定し、"Lower Level"のつまみを最小から最大に変化させて、その時の カウント数を読み取る。
- 5) "Lower Level"の値を横軸、カウント数を縦軸にグラフを作成し、ピークの両端の値を記録 する。
- シングルチャンネルアナライザーの設定モードを"Normal"モードにして、先ほどのピークの 両端の値の低い方の値を"Lower Level"の、高い方の値を"Upper Level"の値として設定 する。
- 2009年1月30日現在の設定

AMP:GAIN=20-10, CORSE GAIN=200, SHAPING TIME=1 µ sec, BLR=AUTO SCA:Upper Level=7-0, Lower Level=3-0 HV:Voltage=0.8kV

3. 精密 X 線光学系を用いた単結晶評価手順

3.1 概要

精密 X 線光学系をセットアップするためには、X 線と測定系の位置関係をいかに正確に把握して調整 できるかがキーポイントとなる。そのために必要な調整手順を装置マニュアルも含めて解説する。

3.2 X線発生装置、測定機器・制御装置の立上

- 1) X線発生装置の立上(フロントパネル参照:図8)
 - (ア) 使用開始時間を記録する。
 - (イ) チラーの電源が ON になっていることを確認する。(通常 ON)
 - (ウ) 本体ラックの操作パネルにて"VACUUM"の電源が ON になっていることを確認する。(通常 ON)
 - (エ) "X-RAY"の POWER の ON を押す
 - (オ) "X-RAY"の X-RAY の ON を押す。 電圧、 電流値が 20KV、 10mAになる。
 - (カ) "X-RAY"のkV、mAのUP、DOWNで希望の出力にする。
 - (キ) "SHUTTER"の1番の列のMANUの緑ランプが点灯していることを確認する。していない場合は、 MENUボタンを押して、設定する。
 - (ク) "SHUTTER"の OPEN/CLOSE のボタンを押す。OPEN の赤ランプが点灯する。
- 2) 測定機器・制御装置の立上(制御装置参照:図9、図10)
 - (ア) モーターコントローラーの電源を入れる。
 - (イ) FUNCTION で LOC から REM に切り替える(GPIB 制御のためのリモートコントロール設定)。
 - (ウ) モータードライバーの電源を入れる(制御対象のステージを変更するためにケーブルを抜き差 しする際には必ず電源を切ること)。
- 3) X線の照射
 - (ア) X 線防護ケースの扉を閉める。ただし、閉める際はゆっくりと衝撃が無いように閉める。衝撃があると、X 線発生装置本体にある安全レバー(図 11)が下に動いて、本体のシャッターが開かなくなることがある(本体操作パネルの"SHUTTER"OPENの赤ランプが点灯しない)。また、X 線防護ケースの扉は閉まっている状態でなければ、通常インターロック機能によって、次述のシャッターは開操作できない。
 - (イ) シャッターのスイッチボックスのキーを回して(図 12)、シャッターを開く。シャッター本体の赤ランプが点灯する。X線防護ケース外に取り付けてある警告灯が点灯する。

補足:安全のために、インターロック機能の動作確認を本体 X-Ray を ON にする前(オフライン)に 行っておくことが望ましい。また、安全のためのインターロック機能を動作しないように設定してはい けない。



図8 X線発生装置 操作パネル



図9 モーターコントローラーとモータードライバー 操作パネル



図10 制御機器 操作パネル



図 11 X線発生装置にある安全レバー(黒丸部分)



図 12 シャッター用スイッチボックス

3.3 X線の光軸調整

3.3.1 調整下準備

1)水準器を用いて定盤を水平調整する。

(a)





図 13 定盤の水平調整 (b) 左右方向の水平調整、(b)前後方向の水平調整

2)次に、X 線防護ケース上に設置されたレーザーの位置あわせをする。このレーザーは見えない X 線を仮定し、コンポーネントの位置合わせのために利用する。

3)レーザーは定盤天面に対して平行になるように調整する。

1>同じ高さのロッド2本を定盤上の上下流2箇所に設置する。ロッドに目盛のような位置を確認できる指標があることが望ましい。

2>離して置いたそれら2本のロッドにそれぞれレーザーを当てて、その当たる高さを比較する。
 2本のロッドにレーザーが同じ高さで当たるようにレーザーを水平方向に調整する(図14)。
 3>横方向はX線を用いて最上流部スリット調整が終わった後に調整する。



図14 レーザーの調整

3.3.2 スリット1の調整

X線の光軸位置は X線防護ケース最上流に設置されたスリット1によって決められる。よって、X線源の"芯"を取り出し、かつ、正確な回折角度等を見積もるためには、出来る限り X線が定盤上に設置されたステージ類に対して平行・直角であることが必要である(図15)。ここでは図2に示す X方向および Z方向の光軸位置確認をして、スリット1の調整を行う手順を示す。その時の光学系を図16に示す。

- 1) スリット1を全開(20 mm×20 mm)にする。
- 2) 上流側ステージ類に設置されている分光結晶は手動ステージz(Z ではない)で回転中心から下 げておく。
- 3) スリット1もしくはスリット2にアッテネータの役割として厚さ5mm~10mmのアルミ板(X線の電圧・ 電流設定によって適宜変更;カウント数が10000cps以下であることが望ましい)を取り付ける。以 下の調整の際はダイレクトビームをNalに入れることになるので必ずアッテネータの取り付けを行 うこと。
- 4) スリット2に Nal を取り付ける。

(光軸位置確認:Z 方向)

- 5) スリット2をおよそ光軸上(0°の位置)にセットし、スリットを縦1mm、横20mmにする。ただし、スリット2のX1方向の位置は、設置する分光結晶と同じライン上に乗るようにしておくこと。
- 6) シャッターを開き、X線を照射する。Z1軸を上下方向にスキャンし、スリット2の位置関係とX線 光軸の"芯"の位置関係を調べる。スキャン後はシャッターを閉じる。
- 縦軸にカウント数、横軸に Z1 位置をとり、グラフから最も強度が強くなる点(ピークトップ)を求める。その時のカウント数は記録しておく。
- 8) 最も強度が強くなる Z1 の位置にする。
- 9) Nalを一時的に取り外し、スリット2に3.3.1で調整したレーザーが通るように、高さを調整する。

(光軸位置確認:X 方向)

- 10) スリット2をおよそ光軸上(0°の位置)にセットし、スリットを縦20mm、横1mmにする。ただし、スリット2のX1方向の位置は、設置する分光結晶と同じライン上に乗るようにしておくこと。
- 11) シャッターを開き、X線を照射する。X1軸を上下方向にスキャンし、スリット2の位置関係とX線 光軸の"芯"の位置関係を調べる。スキャン後はシャッターを閉じる。
- 12) 縦軸にカウント数、横軸に X1 位置をとり、グラフから最も強度が強くなる点(ピークトップ)を求める。その時のカウント数は記録しておく。Z 方向の時の値と比較する。
- 13) 最も強度が強くなる X1 の位置にする。
- 14) Nal を一時的に取り外し、そのスリット2に3.3.1 で調整したレーザーが通るように、高さを調整 する。

(スリット1 調整)

- 15) 上記の X 方向と Z 方向の光軸位置確認で得た X1、 Z1 の値にする。
- 16) スリット2を縦1mm、横1mmにする。
- 17) 取り付けていたアッテネータは取り外す。
- 18) レーザーがスリット2を通過することを確認する。
- 19) スリット2を通過したレーザーの位置に、スリット1を縦・横方向それぞれ調整する(縦1mm、横1 mm)。

20) アッテネータと Nal を再び取り付け、シャッターを開けて X 線を照射し、カウント数を確認する。 大きな減少が見られなければ良い。

21) 確認後、アッテネータと Nal を取り外す。

補足:スリット1調整は、ポラロイド写真を用いて光軸位置を調べて行う方法もあるが、利用していたポ ラロイドフィルムが生産中止になっていることや消耗品の使用量削減のためにも、上記方法で調整 することが望ましい。



床

図 15 光源とスリット位置による光軸の違い(Z 軸方向調整時)



図 16 スリット1 の調整時のセットアップ

- ① X線源、② スリット1、③ 分光結晶、④ スリット2、
- ⑤ 試料、⑥ スリット3、⑦ X線検出器(④に取り付け)

3.4 分光結晶調整

ここでは Si(111)対称反射の分光結晶を用いた場合の調整に関して述べる。また、手順として前章の 続きとする。この調整によって、スリット 2 も調整できる。また、ここまで終了すると、光学系のセットアップが 完了する。この際のセットアップを図 17 に示す。

- 1) 光軸に合わされたレーザーをスリット2から通過させる。
- 2) そのレーザーのおよそ半分を遮るように、分光結晶のzの高さをマイクロメータによって調整する。
- 3) 分光結晶の角度をMoK_{a1}に対する Si(111)のブラッグ角 6.49° に θ を動かして合わせる。
- 4) スリット2を縦1mm、横20mmにする。
- 5) スリット2に Nal を取り付ける。
- 6) シャッターを開いて X 線を照射し、2 0 スキャンを行う。スキャン後はシャッターを閉じる。
- 7) 縦軸にカウント数、横軸に20角度をとり、グラフから最も強度が強くなる20を求める。その時のカウント数を記録しておく。これまでの経験上、40kV、20mA(Moターゲット)の出力でカウント数はお よそ10000cpsである。また、曲線の形状が妥当であるかを確認する(図18参照)。
- 8) その20の値にスリット2を移動させる。
- 9) スリット2を縦20mm、横1mmにする。
- 10)シャッターを開いて X 線を照射し、その時のカウント数を記録する。7)で記録した値と比較し、異常が無いかを確認しておく。
- 11)分光結晶の下に取り付けられているαを目視で±0.5° ずつ移動させ、その都度シャッターを開い てX線を照射し、その時のカウント数を記録する。
- 12) 縦軸にカウント数、横軸にα角度をとり、グラフから最も強度が強くなるαを求める。
- 13) その *α* の値にする。
- 14) スリット2を縦1mm、横1mmにする。
- 15)この状態でのカウント数を記録する。
- 16) Nal を取り外す。



図 17 分光結晶調整時のセットアップ

② X線源、② スリット1、③ 分光結晶、④ スリット2、
⑤ 試料、⑥ スリット3、⑦ X線検出器(④に取り付け)



図 18 Si(111)分光結晶から得られるロッキングカーブ形状例 a) もっともらしい結果

b), c) おかしい結果(結晶の状態やスリットの位置・向き等に異常がある可能性)

3.5 試料測定

3.5.1 試料位置合わせ

ここではサイズ 1 mm²の試料が、ゴニオヘッドに取り付けられた針の先端に取り付けられているとする。 防護X線カバーと定盤および下流側自動ステージ類の位置関係の都合、下流側ステージ coarse- θ ステ ージと試料位置の距離は 150 mm以下にする必要がある。例えば、一般的に利用するゴニオヘッドをスペ ーサーと共に coarse- θ ステージに取り付けたとすると、それらの高さは約 88 mmであるので、ゴニオヘッド から 60 mm以内の高さに試料を設置していないと、ステージに設置した場合にX方向に動かせず、X 線が 試料に当てられない可能性がある。この時のセットアップを図 19 に示す。

- 上流側と下流側の自動ステージ類の位置関係(距離)を分光結晶と20の角度を元に算出しておく。
 必要な場合は、予め自動ステージにスペーサーを入れて上方向に高さをとる。その位置関係になるように、下流側自動ステージ類をセットする。
- 2) 下流ステージ側後方に支柱を立て、そこにスリット3とNalを取り付ける。Nalの取り付け角度、高さは、 分光結晶からスリット2を通過してきたX線を受けるようにセットする。
- 3) シャッターを開けて X 線を照射する。ここでのカウント数が、3.4 15)でのカウント数と同等であることを確認する。小さくなっている場合は、NaI の角度や高さがあっておらず、X 線が入ってきていないと考えて良い。確認後はシャッターを閉める。
- 4) 試料をステージに取り付ける。試料ホルダーに合わせて、適宜スペーサーを利用する。
- 5) 光軸に合わせたレーザーを用いて、X方向の試料位置合わせを行う。
- 6) シャッターを開けて X 線を照射する。Z2 スキャンを行う。始点は 3) で得たカウント数であるところを選ぶと良い。
- 7) 縦軸にカウント数、横軸に Z2 値とり、グラフからカウント数が減少する(無くなる)領域を求める。その 領域は X 線が試料によって遮られている領域なので、それより試料の中心位置もしくは測定希望領 域を求め、Z2 をその値にする。
- 8) X2 スキャンを行う。始点は3)で得たカウント数であるところを選ぶと良い。

- 9) 縦軸にカウント数、横軸に X2 値とり、グラフからカウント数が減少する(無くなる)領域を求める。その 領域は X 線が試料によって遮られている領域なので、それより試料の中心位置もしくは測定希望領 域を求め、X2 をその値にする。
- 10) 試料表面を分光結晶からでてきたX線に対して、測定希望回折面のブラッグ角θ分回転させる。 この時、角度の把握は厳密にできないので、およそで良い。
- 11) 別の支柱に取り付けていたスリット3+Nalを取り外し、下流側自動ステージ類の手動20アーム に取り付ける。NalのX方向位置はレーザーを元に中心に合わせる。
- 12) 手動20アームを動かして、試料の測定希望回折面の20の位置にあわせる。
- 13) Nal を取り付けている位置をスライドさせて、試料からの距離を調整する(遠くする or 近くする)。
- 14) スリット3を適宜絞る。特に支障が無ければ縦20mm、横20mmでも良い。



図 19 試料位置合わせ時 セットアップ

① X線源、② スリット1、③ 分光結晶、④ スリット2、⑤ 試料、

⑥ スリット3(⑤とは独立)、⑦ X線検出器(⑥に取り付け;⑤とは独立)

3.5.2 回折強度曲線(ロッキングカーブ)の粗測定

このときのセットアップを図 20 に示す。

1) coarse- θ スキャンを行う。設定は試料の予測される半価幅を元に決める。測定希望回折面からの回折X線強度が弱いと予測される場合は、X線の強度を高くしておくか、測定時間(溜め込み時間)を長くとる。半価幅が狭いと予測される場合は、1 ステップあたりのパルス数を小さくしておく。試料の見た目の角度が必ずしも X 線との角度と一致しないので、測定範囲はできるだけ広く取るほうが測定希望回折面を見つけやすい。

もし、一回のスキャンで測定希望回折面が見つけることが出来なかったときは、原因を探す。光学系のセットアップに何ら問題が無い場合は、スキャン範囲、1 ステップあたりのパルス数、測定時間を増やす。また、試料の位置関係を確認したりする。

2) 測定希望回折面が見つかった場合、coarse-θをその値にあわせる。可能であれば、現状データからの半価幅を見積もり、次に行う精密測定の測定範囲の参考情報を取っておく。



図 20 粗測定(および精密測定含)時 セットアップ

- ① X線源、② スリット1、③ 分光結晶、④ スリット2、
- ⑤ 試料、⑥ スリット3、⑦ X線検出器(⑥に取り付け)

3.5.3 回折強度曲線(ロッキングカーブ)の精密測定

この時のセットアップは図 20 と同じである。

1) fine- θ スキャンを行う。粗測定のデータを元に大まかな半価幅を求めておき、それに対応したスキャン 範囲を設定する。ここでは 1″以下の単位でスキャンが可能である(1″=100pls@モータードライバー 1/1 設定時)。

2) 測定終了後は fine-θの値を初期値 0 に戻しておく。

3) 表計算ソフト等を用いて得られたデータのフィッティングを行い、半価幅を定量的に求める。

補足:さらに厳密に測定する場合は、試料からの回折 X 線の発散角を抑える目的で、スリット3を絞ったり、 スリット3 および X 線検出器を試料からできるだけ遠い位置にセットしたりすることがある。

3.6 単結晶の結晶性評価結果 一例

本結晶評価システムで行った FeBO₃単結晶の結晶性評価の結果一例を図 21 と表 2 に示す。測定の 結果、2 つのピークがあることがわかった。ガウスフィッテングよりこれらのピークの半価幅を求めると、ピ ーク1の半価幅は 83″、ピーク2の半価幅は 63″であった。2 つのピークがあることは、試料が測定領 域において2 つのドメインに分かれていることを示している。また、他にもこれまでに、放射光 BL に用い る Si 分光結晶や数々の研究試料の結晶評価を行っており、それらの結果は成果公開[5, 6]のためのデ ータとして利用されている。



図 21 FeBO3 单結晶評価 結果例

\mathcal{X} \mathcal{I} \mathbf{FeDO}_3 中相时间 相不例					
	面積	中心	幅	高さ	
ピーク1	2.78E+06	166.44	83.058	26722	
ピーク2	7.48E+05	436.66	63.047	9462.3	

表 2 FeBO3 单結晶評価 結果例

4. まとめ

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・放射光科学研究ユニットでは、単結晶の結晶 性評価システムを立ち上げた。このシステムでは 1″以下での角度スキャンが可能である。また、試料の 種類にもよるが、数 10µm 程度のサイズの結晶性評価も行っている。試料の位置を走査すれば、試料内 での結晶性の分布を測定することも可能である。本システムを導入したことによって放射光実験の重要な 予備情報を迅速に得ることが可能となった。今後もさらに高精度の測定を行うためのシステム改良を継続 して行く予定である。

謝辞

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・放射光科学研究ユニット、稲見俊哉氏、高橋 正光氏には結晶評価装置の立上に関して多大な御助力をいただいた。また、同ユニット、菖蒲敬久氏、 石井賢司氏、大和田謙二氏には X 線発生装置の利用に関する御協力、御助言を多数いただいた。ここ に記して心からの感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 菊田 惺志(1992)「4. 動力学的回折理論」物理工学実験15 X線回折·散乱技術(上)、東京大学出版会、pp.237-266.
- [2] 石川哲也(1996)「4.1 X 線回折理論」シンクロトロン放射光の基礎(大柳宏之編)、丸善株式会社、 pp.288-295.
- [3] 三井隆也、瀬戸誠、増田亮、小林康浩、北尾真司(2008)、Conversion electron and X-ray Mössbauer spectroscopy using synchrotron radiation、Japanese Journal of Applied Physics 47(9), p.7136-7139
- [4] LabVIEW: http://www.ni.com/labview/ja/
- [5] 内海渉、齋藤寛之、金子洋、桐山幸治、青木敏勝(2004)、高圧下における窒化ガリウムの一致溶融:融液徐冷法による単結晶の合成、日本結晶学会誌、46、pp.297-303.
- [6] Y. Yoneda, J. Mizuki, H. Takeda, and T. Shiosaki (2008), X-ray Topography of Piezoelectric La₃Ta_{0.5}Ga_{5.5}O₁₄ Crystal Grown by Czochralski Method, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 55(5), pp.971–974.

付録 トラブルシューティング(一例)

付表1 項目

トラブル現象	確認事項	対策事項
	ケーブルが接続されているか	モータードライバーとモーター (ステージ)の組み合わせ確 認する。
	ケーブルの健全性は問題ない か	ケーブル断線を確認する。代 替機を利用する。
	各機器の電源が入っているか	電源を投入する。
パルスを送っても、ステージが動か ない	通信の健全性は問題ないか (LISTEN、TALK ランプが命令 時に点灯するか、制御ソフトがフ リーズしていないか)	制御ソフトの再立上、 LabVIEWの再立上、モーター コントローラーの再立上を行 う。 ケーブルの緩みを確認する。
	リミットスイッチを押しているか	ステージ駆動領域へ移動させ る。
	ステージの移動速度が適切か	ステージの移動速度を変更 (高速→低速)する。
	X線が照射されているか	シャッターの開閉確認、安全 レバーの確認を行う。
	スリットが閉まっていないか	スリットをあける。
	アッテネータを外し忘れていな いか	アッテネータを外す。
	20の値が間違っていないか	適切な値に設定する。
出るはずの試料の回折 X 線が測定	検出器の位置が合っているか	適切な位置に設定する。
できない	試料の位置が光軸上にあるか	適切な位置に設定する。
	試料がなくなっていないか	再度取り付ける。
	測定希望回折面からの回折 X 線強度が弱すぎないか	X 線強度をあげる
	<i>θ スキャン</i> の設定値に問題は無 いか	1 点あたりの測定時間を長くす る。 測定ステップを小さくする。

表 1. SI 基本单位			
甘大昌	SI 基本単位		
巫平里	名称	記号	
長さ	メートル	m	
質 量	キログラム	kg	
時 間	秒	s	
電 流	アンペア	А	
熱力学温度	ケルビン	Κ	
物質量	モル	mol	
光度	カンデラ	cd	

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例				
如女母 SI 表	基本単位			
和立重 名称	記号			
面 積 平方メートル	m ²			
体 積 立法メートル	m ³			
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s			
加速 度メートル毎秒毎	秒 m/s ²			
波 数 毎メートル	m ⁻¹			
密度,質量密度キログラム毎立方	メートル kg/m ³			
面 積 密 度キログラム毎平方	メートル kg/m ²			
比体積 立方メートル毎キ	ログラム m ³ /kg			
電 流 密 度 アンペア毎平方	メートル A/m^2			
磁界の強さアンペア毎メー	トル A/m			
量濃度(a),濃度モル毎立方メー	トル mol/m ³			
質量濃度 キログラム毎立法	メートル kg/m ³			
輝 度 カンデラ毎平方	メートル cd/m^2			
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1			
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1			

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立里位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 隹	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
· 体 催	ステラジア、(b)	er ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ¹
力 力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー、仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率,工率,放射束	ワット	w	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{-2} A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²
カーマ		, and	0.115	
線量当量,周辺線量当量,方向	SUNCE (g)	Sv	J/kg	m ² a ⁻²
性線量当量, 個人線量当量		50	orkg	III 8
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性抜種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を通の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘质	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放射 強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語					
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナーノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$			

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣される奴他が夫缺的に待られるもの			
名称	記号	SI 単位で表される数値	
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一原子質量単位	u	1u=1 Da	
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位				
名称			記号	SI 単位で表される数値
バ	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートルmmHg			mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	
ベ		N	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.
デ	ジベ	N	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位				
名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx		
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{\cdot 2} = 10^{\cdot 2} \text{ ms}^{\cdot 2}$		
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{2} = 10^{4} \text{T}$		
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹		

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	Ŧ		N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	- トル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク			ン	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています