

## 中性子反射体用ベリリウムの長寿命化に 関する予備検討（2） —高精度寸法測定法の開発—

Preliminary Study for Long Life as Beryllium Reflector (2)  
- Development of High Accuracy Size Measurement Device -

田口 剛俊 堀 善雄 綿引 俊介 土谷 邦彦

Taketoshi TAGUCHI, Yoshio HANAWA, Shunsuke WATAHIKI and Kunihiko TSUCHIYA

大洗研究開発センター  
照射試験炉センター  
原子炉施設管理部

Department of JMTR Operation  
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center  
Oarai Research and Development Center

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 (<http://www.jaea.go.jp>)  
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

## 中性子反射体用ベリリウムの長寿命化に関する予備検討（2） —高精度寸法測定法の開発—

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター

照射試験炉センター 原子炉施設管理部

田口 剛俊・塙 善雄・綿引 俊介<sup>+</sup>・土谷 邦彦<sup>+</sup>

(2008年3月31日受理)

ベリリウムは、中性子捕獲断面積が非常に小さく、散乱断面積が大きいため、試験研究炉の中性子反射体及び減速材として利用されている。材料試験炉の中性子反射体として使用されていたベリリウム枠やベリリウム反射体は、S-200F の金属ベリリウムであり、特に、ベリリウム枠に関しては、一定期間ごとに交換する必要がある。このため、ベリリウム反射体の長寿命化のための開発として、金属ベリリウムの予備照射試験を JMTR の運転が停止する前の 162～165 サイクルで照射した。照射試験の終了後、材質の違いによる照射効果を調べるため、2 種類の金属ベリリウム（S-200F 及び S-65C）の照射後試験を行った。この照射後試験として、高精度の曲がり測定試験片を用いて金属ベリリウム試料の寸法変化を測定した。

本報告書は、照射後試験の一環として開発した高精度寸法測定装置の開発とその性能試験結果についてまとめたものである。

---

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

<sup>+</sup>：照射試験炉センター

## Preliminary Study for Long Life as Beryllium Reflector (2) – Development of High Accuracy Size Measurement Device –

Taketoshi TAGUCHI, Yoshio HANAWA, Shunsuke WATAHIKI<sup>+</sup> and Kunihiko TSUCHIYA<sup>+</sup>

Department of JMTR Operation  
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center  
Oarai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 31, 2008)

Beryllium has been utilized as a moderator and/or reflector in a number of material testing reactors because of, low parasitic capture cross section for thermal neutrons and good neutron elastic scattering characteristics. Beryllium frames and beryllium reflectors, which have been utilized as neutron reflector in Japan Materials Testing Reactor, were fabricated with beryllium metals of S-200F grade. Especially, the beryllium frames is necessary to exchange every fixed period. Therefore, preliminary irradiation test of beryllium metals (S-200F and S-65C) was performed from 162nd to 165th cycles of JMTR operations as a part of development on life time extension of beryllium reflectors. The post irradiation examinations were carried out for these irradiated beryllium metals. In these PIEs, size change of the irradiated beryllium was measured by high accuracy size measurement device.

This report is described development of the high accuracy size measurement device and its performance.

Keywords : Beryllium, Reflector, High Accuracy Size Measurement Device , Neutron Irradiation, JMTR

---

<sup>+</sup> : Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

## 目 次

1.	はじめに .....	1
2.	高精度寸法測定装置の開発の背景 .....	1
3.	高精度寸法測定装置の検討 .....	2
	3.1 被測定物と測定方法の検討 .....	2
	3.2 測定装置の選定 .....	2
4.	測定試験 .....	3
5.	測定試験結果 .....	4
6.	まとめ .....	5
	謝辞 .....	5
	参考文献 .....	6
	付録 I 05M-22J キャップセルの照射試料配置図と中性子束との関係 .....	17
	付録 II ダイヤルゲージによる試料の測定 .....	18

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Background of development for high accuracy size measurement device .....	1
3.	Consideration of high accuracy size measurement device .....	2
	3.1 Samples and measurement method .....	2
	3.2 Selection of measurement device .....	2
4.	Experimental .....	3
5.	Results .....	4
6.	Conclusion .....	5
	Acknowledgement .....	5
	References .....	6
	Appendix I Arrangement and flux distribution of 05M-22J capsule .....	17
	Appendix II Measurement of samples by dial gauge .....	18

This is a blank page.

## 1. はじめに

ベリリウムは、中性子捕獲断面積が非常に小さく、散乱断面積が大きいため、試験研究炉の中性子反射体及び減速材として重要な役割を担っている<sup>(1-2)</sup>。このベリリウムは、

- 炉内での中性子との核反応によりヘリウムやトリチウムを生成すること、
- 核兵器の必須構成材料であるために国際規制物質であること、
- 特定化学物質に指定されていること、

などにより、世界中のほとんどの試験研究炉を有する国において廃棄処理が難しいために原子炉施設内で保管されている。

材料試験炉（JMTR）においても、中性子反射体としてベリリウムが使用されている。JMTRで使用されているベリリウムは、炉心内の燃料を取り囲むように配置されており、炉心内の固定された位置に配置されるH型のベリリウム枠と炉心内の格子位置に配置されるベリリウム反射体要素がある<sup>(3)</sup>。

本予備検討は、ベリリウム反射体の長寿命化のための開発として、金属ベリリウムの予備照射試験をJMTRの運転が停止する前の4サイクル（162～165サイクル）の照射期間で行った<sup>(4)</sup>。照射試験の終了後、材質の違いによる照射効果を調べるために2種類の金属ベリリウム（S-200F及びS-65C）の照射後試験を実施するため、曲がり測定や伸び測定方法の技術開発を行った。

本報告書は、予備照射試験における照射後試験の一環として開発した高精度寸法測定装置の開発とその性能試験結果についてまとめたものである。

## 2. 高精度寸法測定装置の開発の背景

照射試験用原子炉や加速器等を利用した材料の照射試験では、構成元素が放射化し、高レベルの放射能を有したものとなる。照射試験を行った後、高レベルの放射能を含む材料は、ホットセル内で遠隔操作により、各種照射後試験を行っている。このような放射能を帶びた照射試験片の形状変化測定は、写真による外観観察、ノギス、マイクロメータ等を用いて実施していた。しかし、写真による外観観察では、カメラのレンズによる歪みの影響で照射による曲がりを観察することが困難なこと、ノギスやマイクロメータを用いた寸法測定ではマニュピレータを用いた遠隔操作のため、寸法精度が0.5mm程度であるため形状変化を精度良く評価することが困難であった。また、大型の照射物や炉内構造物（反射体など）の寸法測定や曲がり測定には、スポット型のレーザ光を用いて行っていたが、形状が複雑であるため、変位測定が困難であった。このため、照射試験用原子炉や加速器等で照射された高レベル放射能を含む照射済試料の形状変化をレーザ光と高精度の自動ステージを用いて、遠隔操作で効率的に測定することができる装置の開発を行った。

### 3. 高精度寸法測定装置の検討

#### 3.1 被測定物と測定方法の検討

JMTR の照射キャプセルの制限から、曲がり測定に用いる試験片の形状は以下のように想定し、ホットセル内の測定条件を以下のように決定した。

- (1) 直径約 10mm、長さ約 150mm の棒状の試料。
- (2) 寸法精度は長さ方向で数  $\mu\text{m}$ 、精度は 1  $\mu\text{m}$  以下。
- (3) 試料は中性子照射されており、放射化されている。

この条件と遠隔での操作が簡単な方法として、レーザ光を用いる測定装置を考案し、以下の測定方法で寸法が測定できる装置の検討を行った。

- (1) 被測定物を載せる測定台とその測定台を精度良く直進させる移動テーブルを組み合わせ、その移動量をレーザにより検出する機構を備え、非接触で寸法を測定することが可能な装置。
- (2) 固定した被測定物に対して、精度良く直進させる移動テーブルにレーザ寸法測定器を取り付け、その移動量をレーザにより検出する機構を備えた非接触で寸法を非接触で測定することが可能な装置。
- (3) 上記の (1) もしくは (2) の装置に、レーザを被測定物に照射し、検出されるレーザ光を解析することにより、被測定物の寸法や表面粗さも同時に非接触で測定することが可能な装置。
- (4) 放射線等に晒されている環境下に使用されている機器の部品や中性子照射等により放射化されている材料の寸法を非接触で測定することが可能な装置。

#### 3.2 測定装置の選定

寸法測定装置として、コムス社製の高精度 X 軸自動ステージ PM80B-200X とキーエンス社製のレーザ寸法測定器 LS-3060 を選定し、これらの機器を組合せることにより測定を行えるようにした。

X ステージは、測定するベリリウム試料を精度良く直進させる必要があり、またその移動量を検出する機能を備えていなければならない。コムス社製の高精度 X 軸自動ステージ PM80B-200X はリニアボールガイド及び精密ボールねじを用いて、U 字型アウターレール構造と 4 条列の鋼球で構成された一体型ガイドシステムにより高精度の移動を実現している。使用する X 軸自動ステージの主な仕様<sup>(5)</sup>を Table 3-1 に示す。

測定器は、レーザ透過式で測定対象物の長さを測定できるもの、また高分解能なものを選定した。キーエンス社製のレーザ寸法測定器 LS-3060 はレーザ透過式で高分解能な性能であること、レーザ光源が 0.5mw (クラス 2) と低出力であることなどの特徴がある。使用するレーザ測定器の主な仕様<sup>(6)</sup>を Table 3-2 に示す。

## 4. 測定試験

Fig. 4-1 及び Photo. 4-1～2 に示すように、前項のレーザ寸法測定器及び高精度 X 軸自動ステージを用いて、寸法測定装置を組み立てた。

被測定物は、レーザ光に極力直角になるように V ブロックにのせてセットする。この自動ステージは、設定した距離だけステップ状に駆動し、レーザ寸法測定器に被測定物を送り出すものである。この操作により、被測定物によるレーザ光の信号強度を検出することにより、被測定物の寸法、曲がりなどの測定を行った。

被測定物の長さ方向の寸法は、エッジ部の送り速度に影響するため、予備試験により送り速度を決定し、以下の手順で測定を行った。

- (1) 予備試験で得られた送り速度 ( $1\mu\text{m}/\text{ステップ}$ ) でエッジ部の約  $2\text{mm}$  を測定。
- (2) 中間部の送り速度は  $100\mu\text{m}/\text{ステップ}$  で測定。なお、測定個所は、 $0^\circ$  及び  $90^\circ$  方向とする。
- (3) これを 2 回繰り返し、基準材の寸法を評価。
- (4) 基準材の変位の再現性を確認。

測定試料は、セラミックス製の標準ゲージ (Photo. 4-3)、マシナブルセラミックス (マコール) 及び純チタン製の基準材 (Photo. 4-4)、照射用金属ベリリウム (曲り測定用) [2 本] (Photo. 4-5) および未照射の金属ベリリウム (予備試料) [1 本] (Photo. 4-6) である。これらの測定試料を用い、予備試験データを取得した。なお、丸棒の基準材及び金属ベリリウムの測定個所は、 $0^\circ$  方向及び  $90^\circ$  方向とし、測定試料に測定個所の刻印をつけた。金属ベリリウム試料の寸法・変位測定箇所を (Fig. 4-2) に示す。また、本試験で用いる測定試料の概要を Table 4-1 に示す。

予備試験は、最初に被測定物のセット状態、ステージの送り速度などの測定条件を決定するため、標準ゲージを用いて測定を行った。続いて標準ゲージの測定で得られた測定条件により、マコール及び純チタン棒の測定を行った。

次に、照射用の金属ベリリウム試料を用いた。この金属ベリリウム試料は、原子力級ホットプレスで製作したものであり、その製法については文献(7)に示されている。本試験に用いた金属ベリリウム試料 (曲がり測定試験片) は、S-65C (Be 純度が 99%) であり、Table 4-2 にその化学組成を示す。その他、測定を行う 05M-22J キャプセルに装荷した照射試料には、JMTR の照射後試験の規格品である丸棒引張試験片及び切欠部のないシャルピー衝撃試験片も装荷されているため丸棒引張試験片及びシャルピー衝撃試験片も対象とした。なお、照射試料の詳細については、前報の報告書に試験検査成績書として添付している<sup>(4)</sup>。

## 5. 測定試験結果

Fig. 5-1 に被測定物とレーザ光の位置関係を示す横断面図を示す。また、Fig. 5-2 に測定結果の一例を示す。

まず、測定条件を決定するために、基準ゲージ（マコール）を用いて予備測定を行った。基準ゲージ（マコール）を高精度の自動ステージの上に V ブロック上に載せ、その V ブロックの上に固定した。この自動ステージを任意の送り速度で送ることにより、被測定物が平行光のレーザ光を通過するが、その被測定物のしや光によるレーザ光の強度変化を測定した。基準ゲージ（マコール）のエッジ部分の詳細な測定条件の決定のために、両エッジ部の約 1mm について、自動ステージの送り速度を 1 $\mu\text{m}$ 、10 $\mu\text{m}$  及び 100 $\mu\text{m}$  で行った。自動ステージの送り速度を変えたときの基準ゲージ（マコール）のエッジ部分 1mm の測定データを Fig. 5-3 に示す。この結果、送り速度を 100 $\mu\text{m}$  に設定した場合、寸法精度は 100 $\mu\text{m}$  と考えられたが、実際は約 50 $\mu\text{m}$  以下の精度で測定することが可能であることがわかった。また、自動ステージの送り速度を 1 $\mu\text{m}$  に設定した場合、寸法精度を 1 $\mu\text{m}$  にすることことができた。なお、この測定精度は、測定物の試験前に、予め校正された標準ゲージを用いて寸法を実測し、実測値と校正値とを比較することにより求めた。一方、被測定物の曲がり測定については、自動ステージを任意の送り速度で一定に送ることで、レーザ光の強度変化を連続的にモニタすることで測定できることがわかった。

Fig. 5-2 でも示したように、寸法及び曲がりを同時に測定する場合は、被測定物のエッジ部の約 2mm を送り速度 1 $\mu\text{m}$  に、他の部分の送り速度を例えば 100 $\mu\text{m}$  にすることにより、エッジ部直前及びエッジ部直後のレーザ強度変化をより精度良く測定することが可能であった。また、高精度の自動ステージを用い、エッジ部分のレーザ強度の変化を詳細に測定し、被測定物の形状変化の小さい部分の送り速度を速くすることにより、短い時間で測定できるとともに、その精度も 2 $\mu\text{m}$  以下にすることが可能であった。以上の結果により、標準ゲージ、基準材及び金属ベリリウムの評価結果を Table 5-1 に示す。表中のレーザ強度変化①～④の位置は、Fig 5-2 に示す。この結果は、照射後試験で実施する未照射の基本データとした。

実際に材料試験炉で照射した金属ベリリウムの照射済試料を測定するためには、寸法測定装置をホットセル内に設置する必要がある。このため、Fig. 5-4 に示すようなホットセル内での寸法測定装置の配置を検討した。照射済ベリリウム試料を精密に測定するため、X 軸自動ステージの水平調整も行った。実際測定した照射済の金属ベリリウム試料の寸法測定チャートを Fig. 5-5 に示す。この結果、炉外で実施した試験と同様な測定チャートを得ることができ、照射済の金属ベリリウム試料の寸法を精度良く測定できる見通しを得た。

## 6. まとめ

材質の異なる2種類の金属ベリリウムの曲りや寸法を測定するため、高精度寸法測定装置の開発を行い、以下のことが明らかとなった。

(1) 照射済試料の形状変化を利用してレーザ光の強度変化を測定・解析することで、精度良く、かつ迅速に寸法測定が可能となった。

(2) 高精度の自動ステージ及び平行光幅が数百 $\mu\text{m}$ 以下のレーザ光を組合せることにより、レーザ光の強度変化を測定する機能を持たせることで、所定の精度で寸法を測定できた。

今後、照射済ベリリウムの引張試験、衝撃試験及び金相観察等の照射後試験を実施する予定である。

## 謝　　辞

報告書をまとめるにあたり、河村弘照射試験炉センター長、新見素二原子炉施設管理部長及び宮澤正孝原子炉施設管理部次長、石塚悦男照射試験開発課長（照射試験炉センター）から有意義なご助言、ご指導を頂きました。また、高橋邦裕原子炉更新課長（原子炉施設管理部）にはベリリウム枠の製作に関する情報を、中川哲也ホットラボ管理課長（原子炉施設管理部）には照射後試験技術に関するご指導を頂きました。さらに、ホットラボ管理課 相沢静男係長（技術副主幹）には本装置の開発・製作にご協力を頂きました。以上、記して謝意を示します。

## 参考文献

- (1) Edited by C. R. Tipton, Reactor handbook – Second edition in four volumes – , Interscience Publishers, Inc., New York, (1960) p. 897.
- (2) J. M. Beeston, “Beryllium Metal as a neutron Moderator and Reflector Material”, Nucl. Eng. Des., 14 (1970) pp. 445–474.
- (3) 神永勝男、坪井一明、楠 秀彦、浅野典一、箭内智博、「JMTRベリリウム枠の一部更新」、JAERI-Tech 2003-051、(2003).
- (4) 塙 善雄、田口剛俊、坪井一明、斎藤 隆、石川和義、綿引俊介、土谷邦彦、「中性子反射体用ベリリウムの長寿命化に関する予備検討（1）—中性子照射キャップセル及びキャップセル開封装置の製作—」、JAEA-Technology 2008-039、(2008).
- (5) コムス社製カタログ.
- (6) キーエンス社製カタログ.
- (7) 河村 弘、石塚悦男、松本実喜夫、稻田征二、加藤岑生、瀬崎勝二、斎藤 実、「ベリリウム中のトリチウム挙動実験(1) —中性子照射キャップセルの製作—」、JAERI-M 89-073、(1989).

Table 3-1 X軸自動ステージの主な仕様<sup>(5)</sup>

移動方向	X軸
移動量	200mm
テーブルサイズ	80×80mm
ガイド方式	リニアポールガイド
送り方式	精密ボールねじ リード 2mm
軸換算イナーシャ	$1.17 \times 10^{-6} \text{kg}\cdot\text{m}^2$
モータ	0.35A/相 5相ステッピングモータ (オリエンタルモータ : PMM33B2 相当品) 5線ペンタゴン結線、ホールディングトルク : 0.033N/m ロータイナーシャ : 9g/cm <sup>2</sup>
分解能	4μm (フルステップ時)、2μm (ハーフステップ時)
最大速度	20mm/sec (ハーフステップ時 : 10000pps)
位置決め精度	18μm
繰返し位置決め精度	±2μm
バックラッシュ	2μm
ロストモーション	3μm
真直度	10μm
自重	2kg

Table 3-2 レーザ寸法測定装置の主な仕様<sup>(6)</sup>

種類及び測定部の分類	大径測定用 分離型
測定範囲	0.8～60mm
最小測定物体幅	0.8mm
投受光間距離	200±50mm
光源	赤色半導体レーザ (670nm) 最大 0.5mW JIS クラス 2 連続波
測定精度	±3μm 以下※
繰返し測定精度	±0.5μm 以下
最小表示単位	0.1μm
レーザ走査回数	400 回/秒
レーザ走査速度	126m/秒
測定平均回数	1～1024 回まで (11段階切換、単純または移動平均)
電源電圧/消費電力	AC85～264V 50/60Hz／40VA 以下

※ : 測定領域内で、Φ20mm の丸棒を移動させて測定した場合の誤差

Table 4-1 測定試料の概要

名 称	標準ゲージ		基準材			B e 試料
測定試料	50mm		100mm		純チタン棒	マコール
寸法 (mm)	50×35×9		100×35×9		φ8×100	φ10×100
					φ10×127	

Table 4-2 金属ベリリウム試料（曲がり測定試験片）の化学組成

		化学成分										
		Wt%							ppm			
		Be	BeO	Al	Fe	Mg	Si	C	F	Co	Sc	B
S-65C	曲り測定 試験片	99.5	0.5	0.02	0.06	<0.01	0.02	0.02	-	-	-	-

プロックゲージ 100mm	0° 方向	マコール 90° 方向	( mm )	純チタン 90° 方向	( mm )
エッジ部直前 レーザ強度変化①	0.944	0.882	0.869	0.751	1.081
エッジ部直前 レーザ強度変化②	1.244	1.187	1.176	1.061	1.388
エッジ部直後 レーザ強度変化③	101.027	100.957	100.960	100.867	101.194
エッジ部直後 レーザ強度変化④	101.425	101.265	101.264	101.175	101.500
評価寸法 ③-①	100.083	100.075	100.091	100.116	100.113
評価寸法 ④-①	100.481	100.383	100.395	100.424	100.419
評価寸法 ③-②	99.783	99.770	99.784	99.806	99.806
評価寸法 ④-②	100.181	100.078	100.088	100.114	100.112
マイクロメータ寸法	100.000	100.014	100.015	100.035	100.038
評価寸法 (③-①)との誤差	1.000830	1.000610	1.000760	1.000810	1.000750

ベリリウム-6 0° 方向	90° 方向	0° 方向	90° 方向	( mm )	ベリリウム-3 0° 方向	90° 方向	( mm )
エッジ部直前 レーザ強度変化①	0.967	0.996	0.795	0.951	0.926	0.926	0.907
エッジ部直前 レーザ強度変化②	1.271	1.301	1.105	1.263	1.232	1.232	1.212
エッジ部直後 レーザ強度変化③	128.279	128.293	128.242	128.370	128.250	128.250	128.248
エッジ部直後 レーザ強度変化④	128.584	128.601	128.550	128.683	128.562	128.562	128.555
評価寸法 ③-①	127.312	127.297	127.447	127.419	127.324	127.324	127.341
評価寸法 ④-①	127.617	127.605	127.755	127.732	127.636	127.636	127.648
評価寸法 ③-②	127.008	126.992	127.137	127.107	127.018	127.018	127.036
評価寸法 ④-②	127.313	127.300	127.445	127.420	127.330	127.330	127.343
マイクロメータ寸法	127.219	127.214	127.338	127.322	127.247	127.247	127.258
評価寸法 (③-①)との誤差	1.000731	1.000652	1.000856	1.000683	1.000605	1.000652	1.000652

Table 5-1 標準ゲージ、基準材及び金属ベリリウム（未照射材）の評価結果

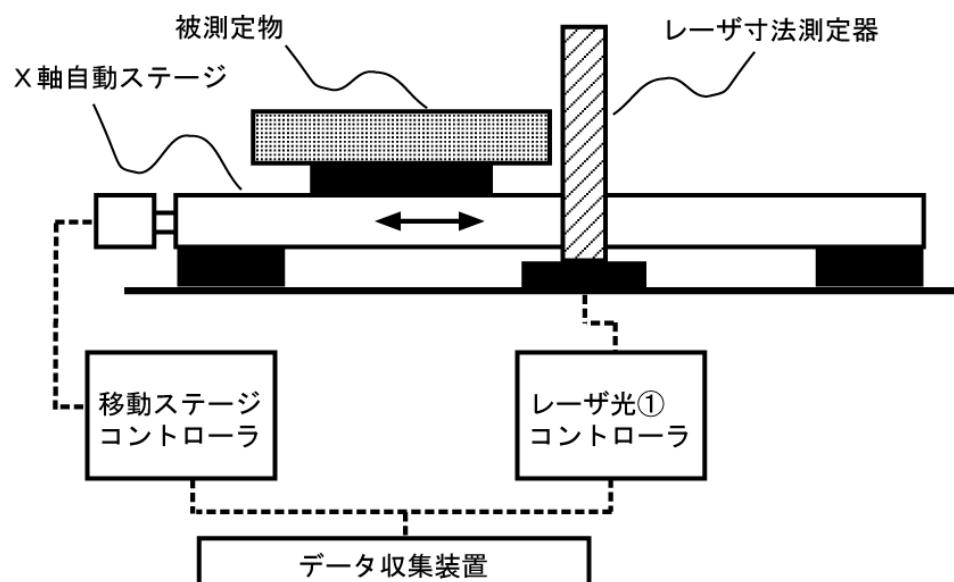


Fig. 4-1 測定装置の組立概念図

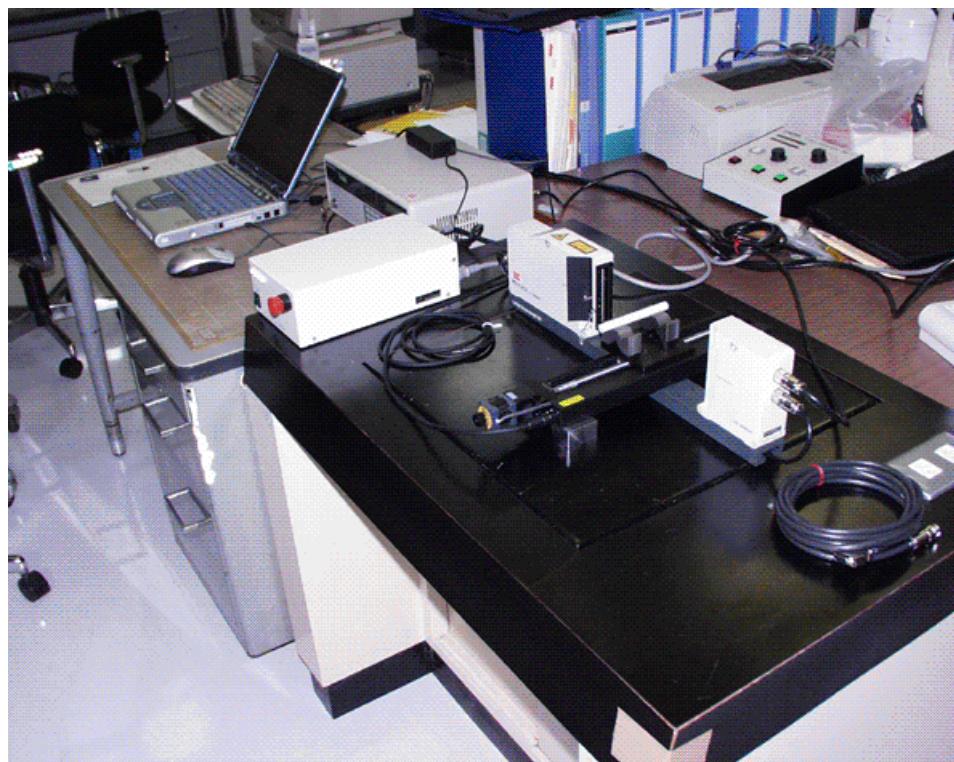


Photo 4-1 開発した寸法測定装置の外観写真（全体概要）

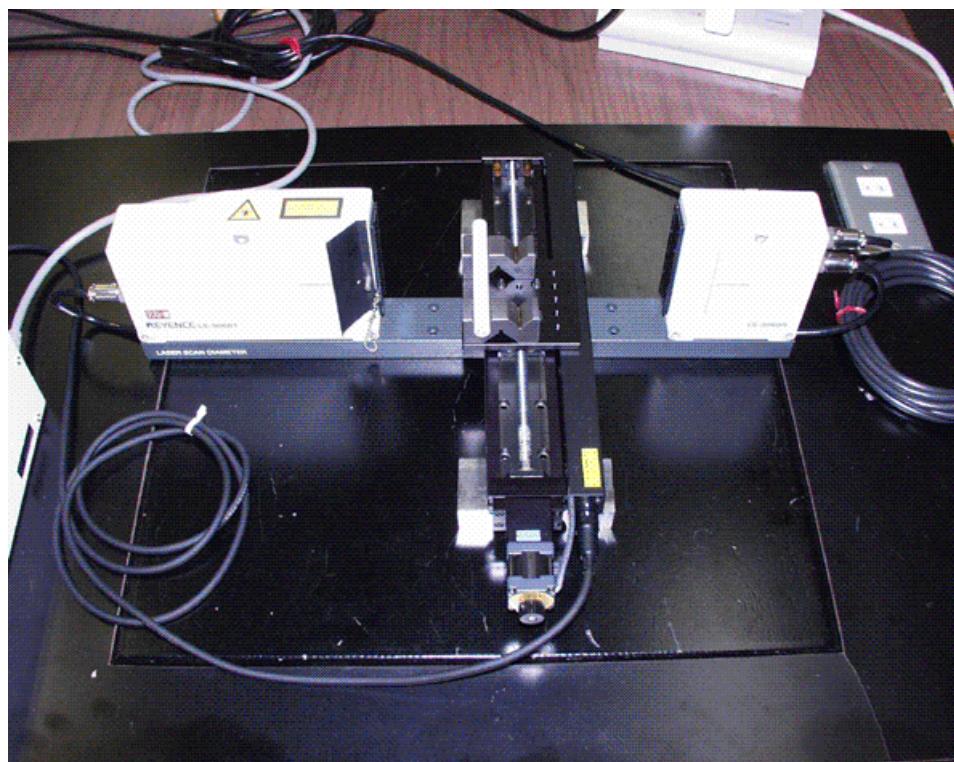


Photo 4-2 寸法測定装置の外観写真（試料セット部）

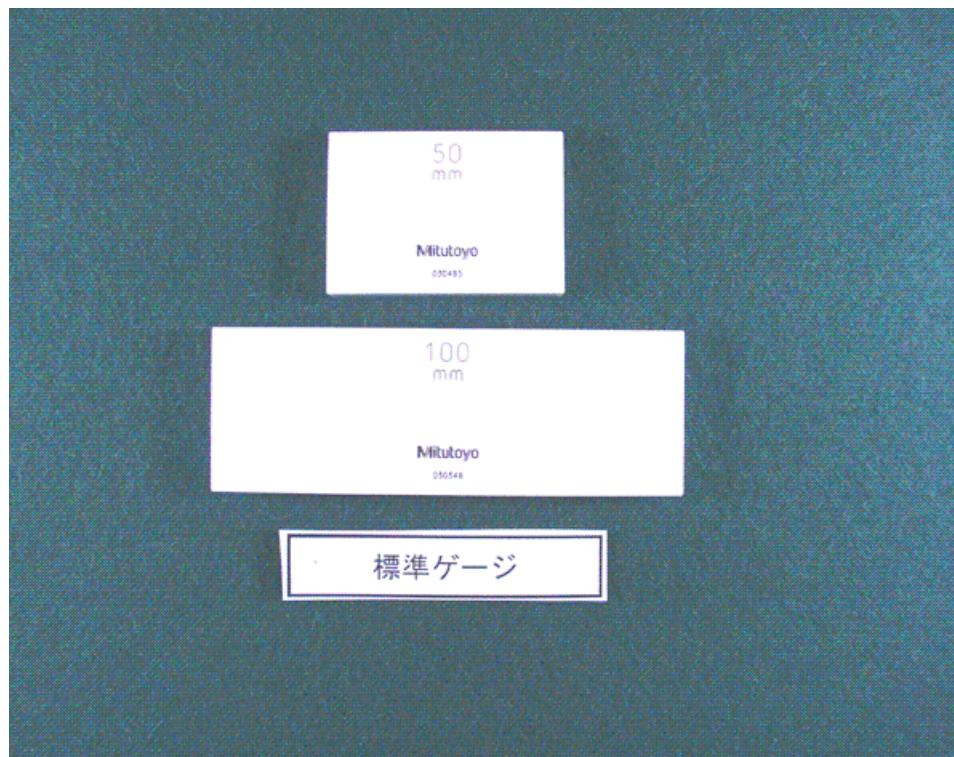


Photo 4-3 標準ゲージの外観写真

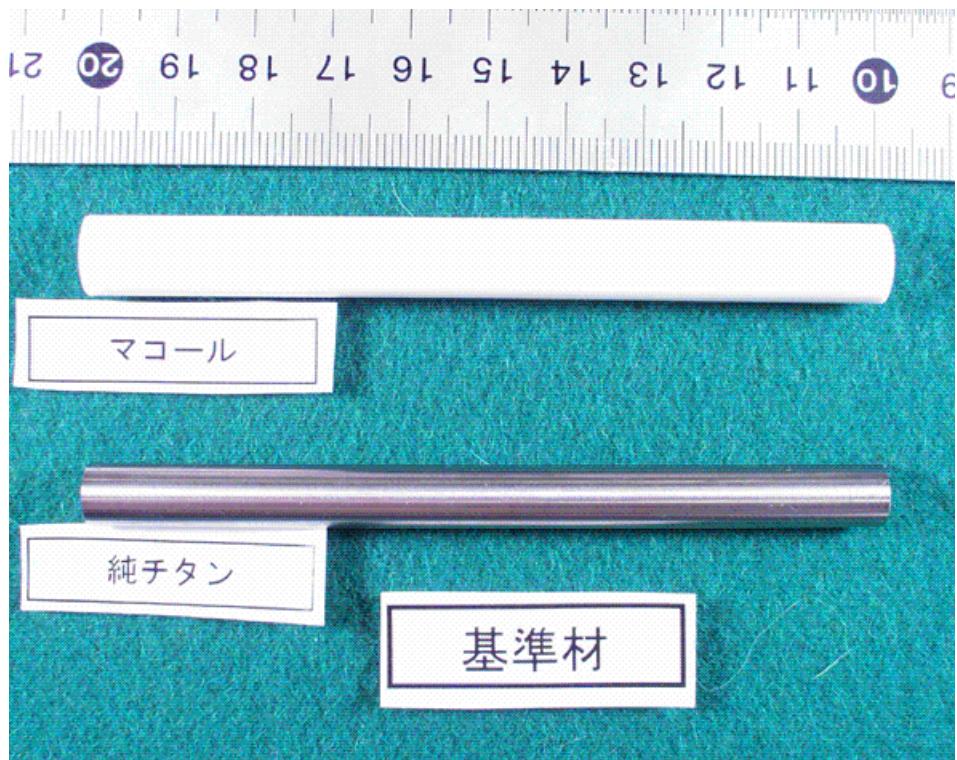


Photo 4-4 基準材（マコール及び純チタン）の外観写真



Photo 4-5 金属ベリリウム（照射試料）の外観写真



Photo 4-6 金属ベリリウム（未照射試料）の外観写真

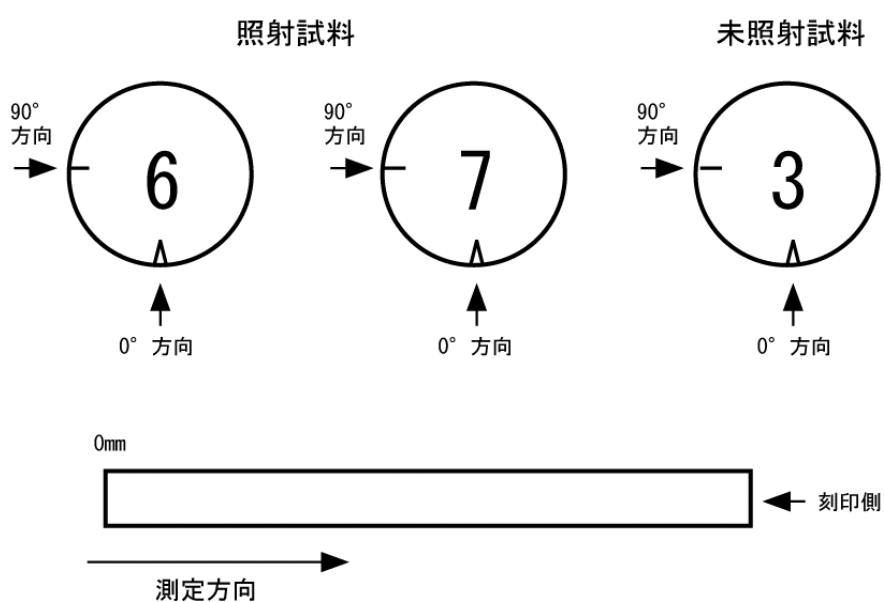


Fig. 4-2 金属ベリリウム試料の寸法・変位測定箇所

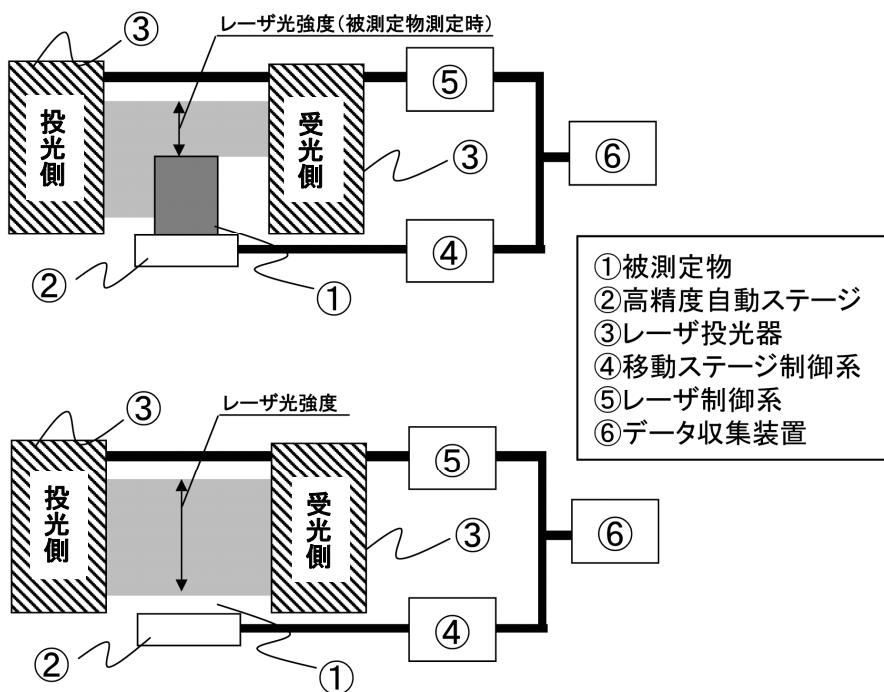


Fig. 5-1 被測定物とレーザ光の位置関係を示す横断面図

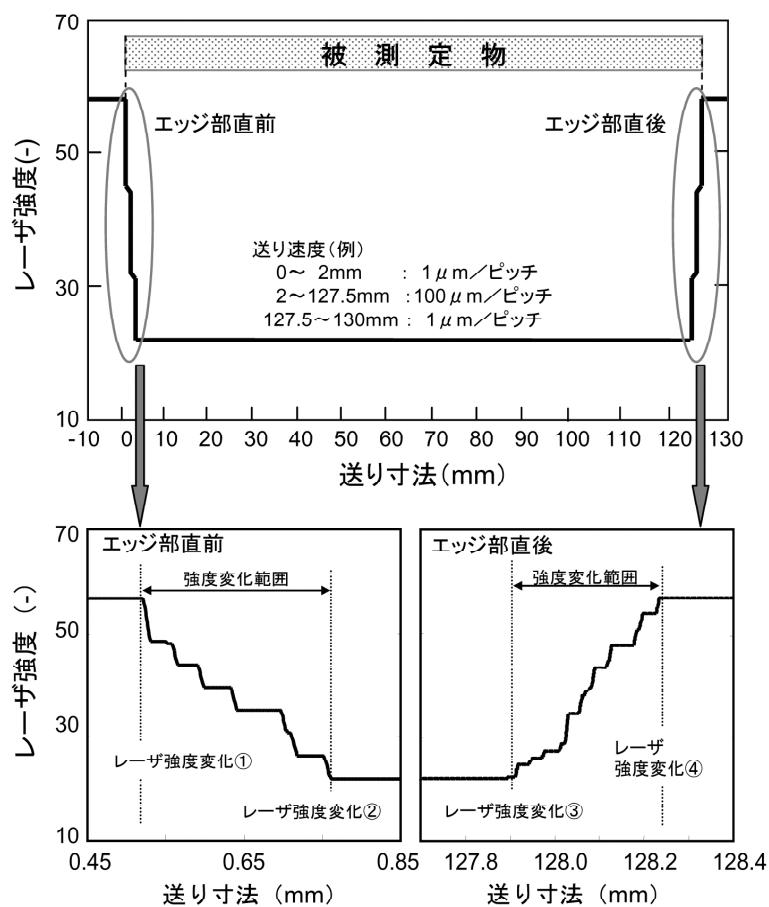


Fig. 5-2 開発した寸法測定装置を用いた測定結果例

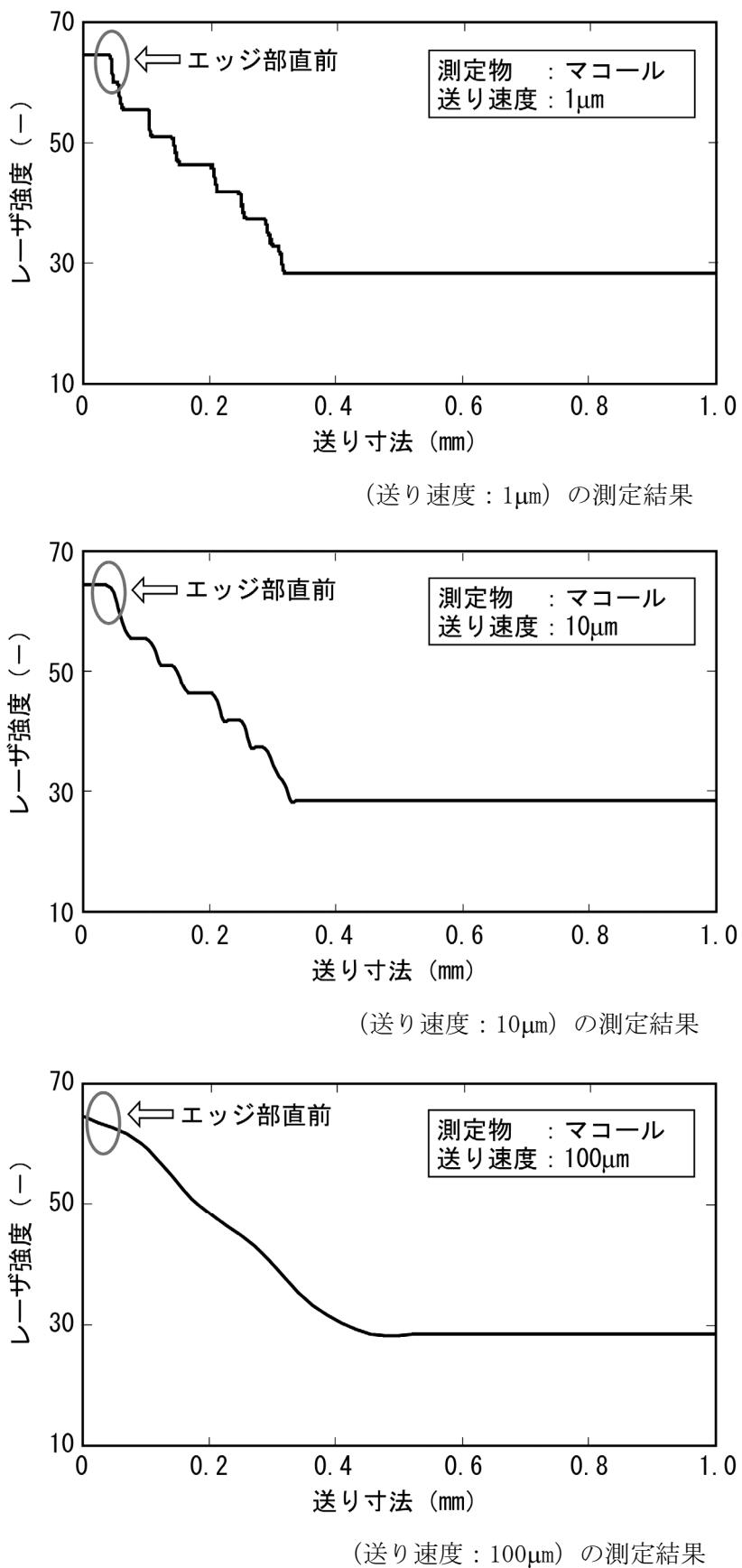
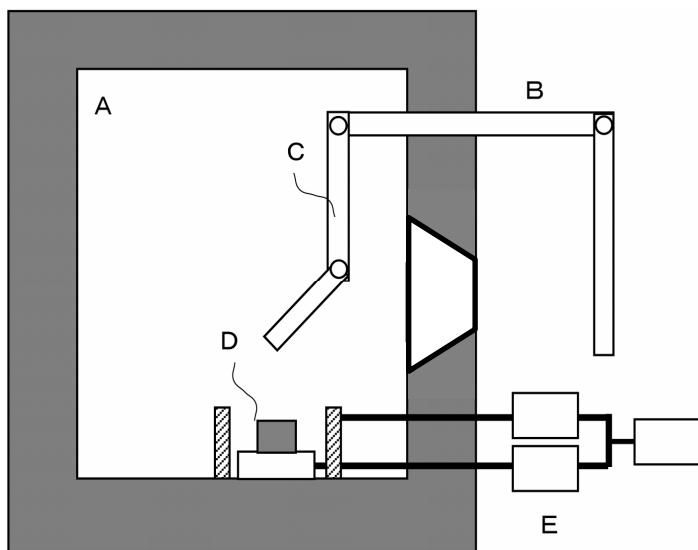


Fig. 5-3 基準ゲージ（マコール）のエッジ部分の測定データ



A : ホットセル、B : 操作室、C : マニュピレータ、D : 被測定物（照射済試料）、E : 精密寸法装置

Fig. 5-4 ホットセル内の寸法測定器の配置概念図

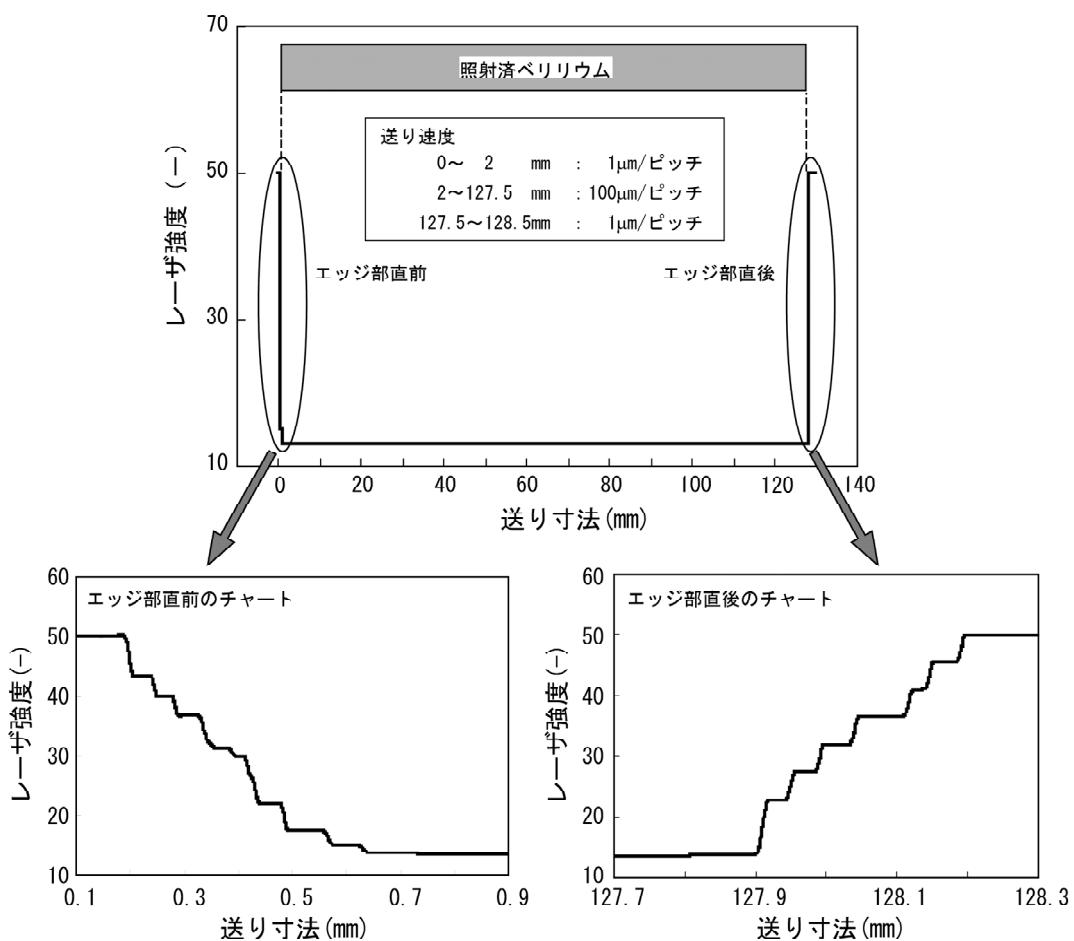


Fig. 5-5 セル内測定した照射済の金属ベリリウム試料の寸法測定チャート

## 付録 I 05M-22J キャプセルの照射試料配置図と中性子束との関係

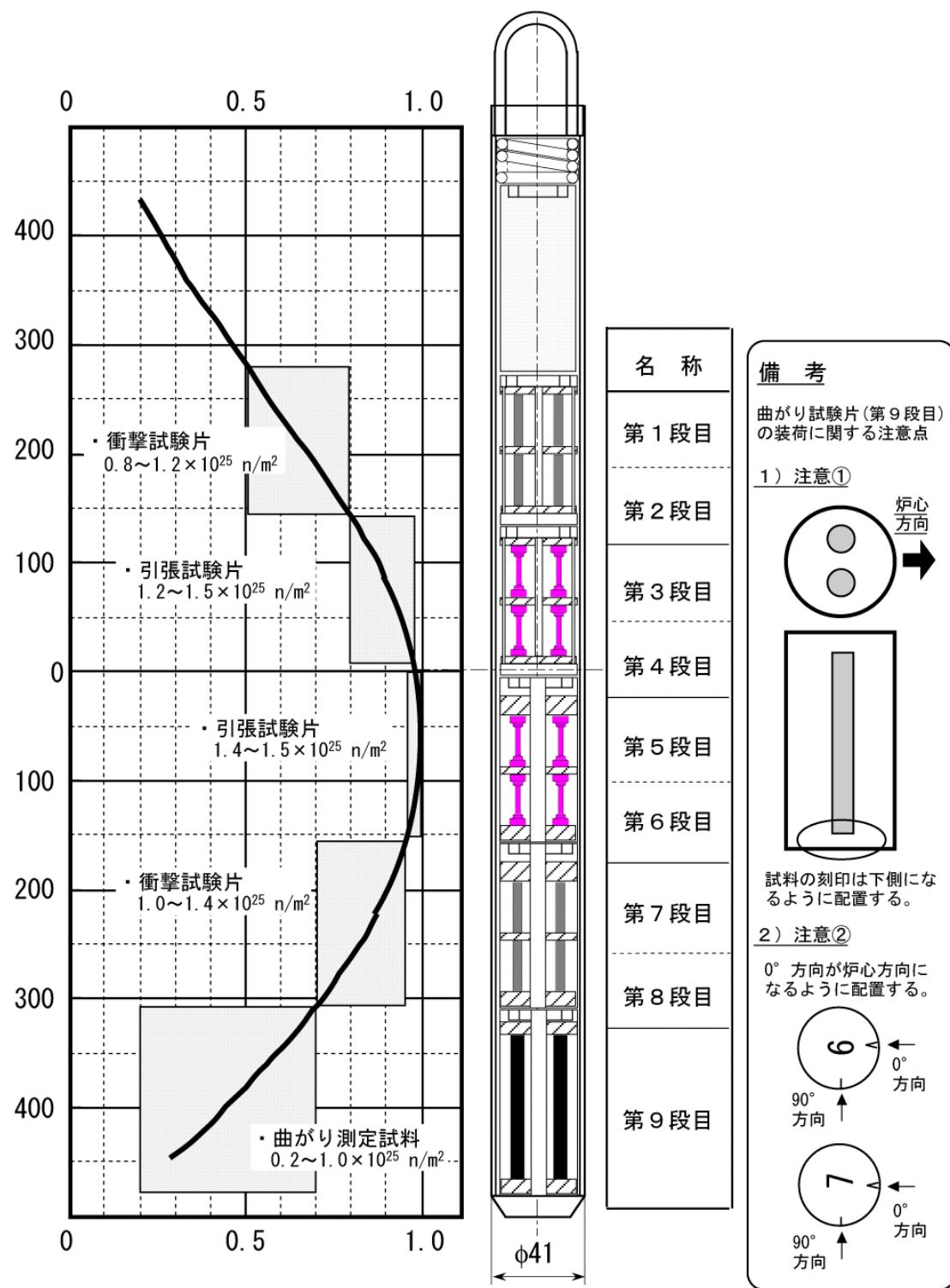


Fig. I-1 照射キャップセル内の配置図

## 付録II ダイヤルゲージによる試料の測定

今回測定に用いた測定器及びダイヤルゲージスタンドの概要を Table II-1 に示す。

測定に当たりデジマチックインジケータ [(株) ミツトヨ製] は、ダイヤルゲージスタンドのステム取付け穴に固定し、被測定物の長さに相当する標準ゲージを使用して標準ゲージの成績書値をプリセットする。その後、被測定物は、ダイヤルゲージスタンドのプレート上に測定箇所を決めて倒立させ、インジケータの測定子を当て、その時の表示値を記録する。

使用した被測定物の測定結果を Table II-2~4 に示す。また、測定の様子を Fig. II-1 に示す。

Table II-1 使用した測定器及び機器の概要

デジマチックインジケータ		型式 ID-112
製作会社	(株) ミツトヨ製	
仕様		
最小表示量	:	0.001mm
測定範囲	:	12.7mm
指示精度	:	0.003mm 以下
ダイヤルゲージスタンド		
製作会社	土井精密ラップ(株)	
仕様	MICRO-GRANITE MG-6	平面度(2μm 以下)

Table II-2 標準ゲージの寸法検査記録

寸 法 檢 査 記 錄	
件 名	ベリリウムサーベランス試験片の寸法測定評価
品 名	標準ゲージ (50mm 及び 100mm)
測定器	

**【試験検査】**

※：標準ゲージの試験検査成績書の値を記述。

**【自主測定】**

※：「非接触法によるベリリウム試料の寸法・変位測定」の結果参照  
(B1 : 0° 方向、B2 : 90° 方向の結果を示す。)

標準	寸 法 (mm)						重量 (g)
	L	D1	D2	D3	B1	B2	
	—	—	—	—	—	(自主測定)	
50mm	50	—	—	—	—	—	—
100mm	100	—	—	—	100.083	—	—

測定器 Mitutoyo Digimatic Indicator ID-C112

気温・湿度 25°C、72%

**【校正】**

標準ゲージ 100mm 及び 125mm (50mm と 75mm の組合せ) で校正を行い、  
Mitutoyo 社製の基準ゲージ (No. 167-104 (100mm) 及び No. 167-105 (125mm)) にて  
確認した。

100mm	100.001	—	—	—	—	—	—
125mm	125.000	—	—	—	—	—	—

Table II-3 基準材（マコール及び純チタン）の寸法検査記録

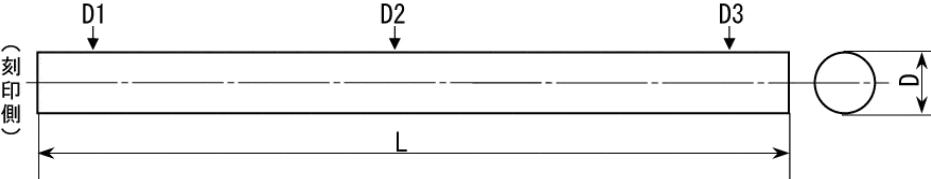
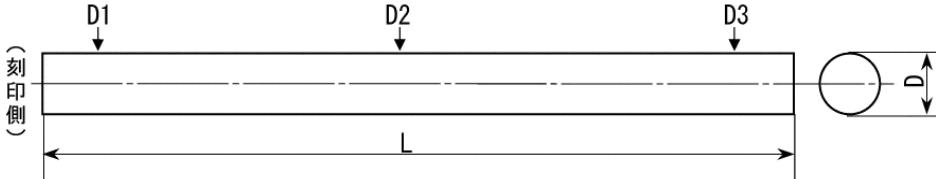
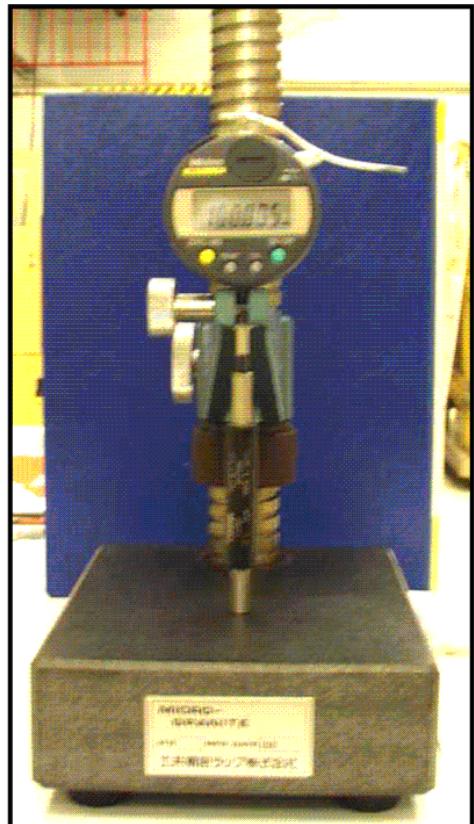
寸 法 檢 査 記 錄														
件 名	ベリリウムサーベランス試験片の寸法測定評価													
品 名	マコール、純チタン棒													
測定器														
【試験検査】														
														
【自主測定】														
※：「非接触法によるベリリウム試料の寸法・変位測定」の結果参照 (B1 : 0° 方向、 B2 : 90° 方向の結果を示す。) ※：寸法の補正については、100mm のブロックゲージとの比較法により算出した。														
刻印番号	寸 法 (mm)						重量(g)							
	L	D1	D2	D3	B1	B2								
100+0.5		-			(自主測定)									
マコール	100.02				99.992	100.008	-							
純チタン	100.04				100.033	100.030	-							
測定器		Mitutoyo Digimatic Indicator ID-C112												
気温・湿度		25°C、72%												
回 数	刻印-上/中心		刻印-上/0° 方向		刻印-上/90° 方向		刻印-下/中心							
	①測定	②測定	①測定	②測定	①測定	②測定	①測定	②測定						
マコール	100.010	100.008	100.011	100.013	100.013	100.014	100.016	100.016						
	100.010	100.009	100.014	100.014	100.017	100.015	100.017	100.016						
	100.009	100.010	100.015	100.014	100.015	100.014	100.009	100.018						
純チタン	100.031	100.031	100.036	100.035	100.040	100.035	100.031	100.033						
	100.028	100.029	100.035	100.035	100.036	100.038	100.033	100.032						
	100.029	100.029	100.035	100.036	100.039	100.037	100.030	100.033						

Table II-4 金属ベリリウムの寸法検査記録

寸 法 檢 査 記 錄								
件 名	ベリリウムサーベランス試験片							
品 名	曲がり測定試料 (S-65C)							
測定器								
【試験検査】								
								
【自主測定】								
刻印番号	寸 法 (mm)						重量 (g)	
	L	D1	D2	D3	B1	B2		
	127+0.5	10.1±0.15			(自主測定)			
3	127.30	10.183	10.223	10.224	127.218	127.235	19.27	
6	127.22	10.252	10.267	10.242	127.206	127.191	19.42	
7	127.33	10.248	10.235	10.176	127.341	127.313	19.31	
測定器		Mitutoyo Digimatic Indicator ID-C112						
気温・湿度								
回 数	刻印-上/中心		刻印-上/0° 方向		刻印-上/90° 方向		刻印-下/中心	
	①測定	②測定	①測定	②測定	①測定	②測定	①測定	②測定
6	127.225	127.221	127.220	127.218	127.216	127.216	127.224	127.224
	127.226	127.220	127.218	127.220	127.214	127.212	127.226	127.223
	127.224	127.220	127.219	127.218	127.213	127.212	127.224	127.226
7	127.334	127.335	127.339	127.338	127.333	127.332	127.337	127.336
	127.332	127.334	127.338	127.337	127.333	127.332	127.336	127.337
	127.335	127.334	127.337	127.338	127.330	127.333	127.335	127.337
3	127.249	127.250	127.247	127.247	127.257	127.258	127.254	127.253
	127.251	127.250	127.248	127.248	127.257	127.257	127.253	127.251
	127.250	127.250	127.247	127.247	127.258	127.259	127.253	127.254



標準ゲージ測定



標準ゲージ測定



純チタン測定

Photo. II-1(1) ダイヤルゲージによる寸法測定



標準ゲージ測定



標準ゲージ測定



照射試料（6）測定



照射試料（7）測定

Photo. II-1(2) ダイヤルゲージによる寸法測定

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
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

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル毎秒	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}$ <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}$ <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V
静電容量	フアード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	$lm/m^2$
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	J/kg
線量当量、周辺線量当量	カーマ		$m^2 \cdot s^{-2}$
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)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“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ニュートンメートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	ヨタ	Y	$10^{-1}$	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	c
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	P	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	T	$10^{-9}$	ナノ	n
$10^9$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	p
$10^6$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	キロ	k	$10^{-18}$	アト	a
$10^2$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼット	z
$10^1$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	°=(π/180) rad
分	'	'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dam^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ポアソン	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m/s$
ガウス	G	$1 G \triangleq 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx \triangleq 10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	X unit	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 γ=1 nT=10^{-9} T$
ジャニスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリヨン	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 μ = 1 μm = 10^{-6} m$

