JAEA-Technology 2008-004



レーストラックベローズの特性評価

Evaluation of Characteristics of Race-track Bellows

渡辺 真朗 荻原 徳男 澤 宗司* 田中 俊弘*

Masao WATANABE, Norio OGIWARA, Soji SAWA* and Toshihiro TANAKA*

J-PARCセンター 加速器ディビジョン

> Accelerator Division J-PARC Center

February 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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/index.shtml</u>) より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 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 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JAEA-Technology 2008-004

レーストラックベローズの特性評価

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター

加速器ディビジョン

渡辺 真朗、荻原 徳男、澤 宗司*、田中 俊弘*

(2008年1月8日受理)

J-PARC 3GeV シンクロトロンの出射部に設置されている出射セプタム電磁石1と出射セプ タム電磁石2に据え付ける真空ダクト間にベローズを設置するためには、円形のベローズを設 置するスペースがないため、レーストラック型ベローズを用いる必要がある。しかし、これま でにチタン製レーストラック形状の成形ベローズは製作されたことがない。そのため、実機サ イズより小型のレーストラックベローズを製作し、その基礎特性データを取得・評価した。軸 方向及び軸直角方向反力測定・伸縮耐久試験・真空加熱試験・ヘリウムリークテストを行った 結果、レーストラックベローズは十分使用可能であることがわかった。以上から判断して、 J-PARC 3GeV シンクロトロンの出射セプタム電磁石1と出射セプタム電磁石2間にレーストラ ックベローズを用いることが一つの解となる見通しを立てることができた。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

* 大阪ラセン管工業株式会社

JAEA-Technology 2008-004

Evaluation of Characteristics of Race-track Bellows

Masao WATANABE, Norio OGIWARA, Soji SAWA* and Toshihiro TANAKA*

Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 8, 2008)

At the extraction part of J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron, a race-track bellows is required between the vacuum chamber of extraction septum magnet 1 and 2, because there is no space to install a circular bellows. However, formed titanium bellows with race-track shape have never been fabricated. Small size formed titanium race-track bellows were fabricated. Characteristics of them were measured and evaluated. Spring force measurements, expansion/contraction repetition life test, vacuum heating test and He-gas leak test were performed. The characteristics of the race-track bellows are satisfied with our use conditions. We obtained a prospect that actual size race-track bellows could be used.

Keywords: Race-track, Formed Titanium Bellows, J-PARC, 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron, Extraction Septum Magnet

^{*} Osaka Rasenkan Kogyo Co.,Ltd.

目 次

2. レーストラックベローズの特性測定 1 2.1 レーストラックベローズ仕様 1 2.2 測定項目 2 2.3 測定結果 2 2.3.1 寸法測定 2 2.3.2 軸方向反力測定 2 2.3.3 軸直角方向反力測定 3 2.3.4 伸縮耐久試験 3 2.3.5 真空加熱試験 4 2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 5 付録 A. 反力計算式 13	1. 序論	 1
2.1 レーストラックベローズ仕様 1 2.2 測定項目 2 2.3 測定結果 2 2.3.1 寸法測定 2 2.3.2 軸方向反力測定 2 2.3.3 軸直角方向反力測定 3 2.3.4 伸縮耐久試験 3 2.3.5 真空加熱試験 4 2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 4 謝辞 5 参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	2. レーストラックベローズの特性測定	 1
2.2 測定項目 2 2.3 測定結果 2 2.3.1 寸法測定 2 2.3.2 軸方向反力測定 2 2.3.3 軸直角方向反力測定 3 2.3.4 伸縮耐久試験 3 2.3.5 真空加熱試験 4 2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 5 学校家文献 5 方録人、反力計算式 13	2.1 レーストラックベローズ仕様	 1
2.3 測定結果 2 2.3.1 寸法測定 2 2.3.2 軸方向反力測定 2 2.3.3 軸直角方向反力測定 3 2.3.4 伸縮耐久試験 3 2.3.5 真空加熱試験 4 2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 5 参考文献 5 参考文献 5 13 反力計算式	2.2 測定項目	 2
2.3.1 寸法測定 2 2.3.2 軸方向反力測定 2 2.3.3 軸直角方向反力測定 3 2.3.4 伸縮耐久試験 3 2.3.5 真空加熱試験 4 2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 5 樹辞 5 参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	2.3 測定結果	 2
2.3.2 軸方向反力測定 2 2.3.3 軸直角方向反力測定 3 2.3.4 伸縮耐久試験 3 2.3.5 真空加熱試験 4 2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 4 謝辞 5 参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	2.3.1 寸法測定	 2
2.3.3 軸直角方向反力測定 3 2.3.4 伸縮耐久試験 3 2.3.5 真空加熱試験 4 2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 4 謝辞 5 参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	2.3.2 軸方向反力測定	 2
2.3.4 伸縮耐久試験 3 2.3.5 真空加熱試験 4 2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 4 謝辞 5 参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	2.3.3 軸直角方向反力測定	 3
2.3.5 真空加熱試験 4 2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 4 謝辞 5 参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	2.3.4 伸縮耐久試験	 3
2.3.6 ヘリウムリーク試験 4 3. 結論 4 謝辞 5 参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	2.3.5 真空加熱試験	 4
3. 結論 4 謝辞 5 参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	2.3.6 ヘリウムリーク試験	 4
謝辞 5 参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	3. 結論	 4
参考文献 5 付録 A. 反力計算式 13	謝辞	 5
付録 A. 反力計算式13	参考文献	 5
	付録 A. 反力計算式	 13

Contents

1. Introduction	- 1					
2. Measurements of Characteristics of Race-track Bellows	- 1					
2.1 Specifications of Race-track Bellows	- 1					
2.2 Measurement Items 2						
2.3 Measurement Results	- 2					
2.3.1 Dimension Measurements	- 2					
2.3.2 Measurements of Spring Force in Axial Direction	2					
2.3.3 Measurements of Spring Force in Perpendicular Direction to an Axis	3					
2.3.4 Expansion/Contraction Repetition Life Test	3					
2.3.5 Vacuum Heating Test	4					
2.3.6 He gas Leak Test	- 4					
3. Concluding Remarks	- 4					
Acknowledgements	5					
References	- 5					
Appendix A. Calculation Expressions of Spring Force	13					

1. 序論

J-PARC 3GeV シンクロトロン (RCS) の出射部では 3GeV にまで加速された周回ビームを 8台のキッカー電磁石で蹴り出し、さらに3台の出射用セプタム電磁石1)2)でビームを偏向し、 Main Ring (MR) や中性子施設側ヘビームを送る必要がある。RCS 出射部(セプタム電磁石) を Fig.1 に示す。3 台の出射用セプタム電磁石とそれらに組み込む真空ダクトを据え付けるた めには各ダクトの設置誤差を吸収するためのベローズが必要である。しかし、周回ビームに対 して出射されるビームの偏向角が小さいため、出射セプタム電磁石1と出射セプタム電磁石2 の間に据え付ける真空ダクト間のベローズにおいて、ベローズの内部を通過する出射ビームの アパーチャを確保し、かつベローズが周回側ダクトと干渉しないためには円形のベローズでは 成立しない。設置誤差を極力小さくすることでベローズを用いないという解もあるが、空間的 制約を満たしながらベローズを用いる場合は、縦長形状のベローズ(レーストラック型ベロー ズ)が一つの解である。出射セプタム電磁石1と出射セプタム電磁石2間に必要なレーストラ ックベローズの断面形状を Fig.2 に示す。材料には SUS に比べ放射化後の残留放射能の少ない チタンを用い、超寿命のために成形ベローズとする 34%。レーストラックベローズの長軸はビー ムのアパーチャを十分確保するためビームより長い直線部(150mm)とし、420mmとした。短 軸は、ビームのアパーチャを確保しつつかつ周回側ダクトと干渉を避けるために 240mm とし ている。このような形状のレーストラックベローズが必要である。

ベローズはその必要とする機能・製作工程・構造等から断面は円形が一般的であるが、RCS では上記理由から空間的制約を満たすためにレーストラックベローズが必要である。しかし、 これまでにチタン製レーストラック形状の成形ベローズは製作されたことがないため、その特 性データがなにもない。そのため、いきなり実機サイズで実用化可能なレーストラックベロー ズを設計・製作することは困難であると考えられる。そこで本研究では、実機サイズより小型 のレーストラックベローズを製作し、その基礎特性データを取得・評価することを目的とし、 実機サイズ製作への見通しを展望する。

2. レーストラックベローズの特性測定

本章では始めに製作したレーストラックベローズの仕様について説明し、次に測定する項目 と特性測定結果について述べる。

2.1 レーストラックベローズ仕様

レーストラックベローズの仕様は以下のとおりである。製作したレーストラックベローズの 設計図を Fig.3 に示す。レーストラックベローズは2個製作している。

- 1. 材質:チタン1種。
- 2. 板厚 (t): 0.3mm。
- 3. 断面形状:ベローズ短軸内径 80mm・短軸外径 100mm、長軸内径 120mm・長軸外径

 $140\,m\,m_{\,\circ}$

- 4. ベローズ長 (L):~100mm。
- 5. 山数 (n):10。
- 6. ピッチ (Pi): ~2.5mm。
- 7. 成型方法:プレス成型。
- 2.2 測定項目

レーストラックベローズの測定項目を以下に記す。ベローズの一般的な測定項目に加え、レ ーストラック型である事から軸直角方向反力は短軸、長軸方向それぞれ試験をおこなった。

- 1. 寸法測定
- 2. 軸方向反力測定
- 3. 軸直角方向反力測定:軸直角方向(短軸、長軸)の反力の測定。
- 4. 伸縮耐久試験
- 5. 真空加熱試験:真空加熱後の変形確認。
- 6. ヘリウムリーク試験

2.3 測定結果

2.3.1 寸法測定

寸法測定を行った箇所を Fig.4 に示す。寸法測定結果を Table 1 、 Table 2 に示す。製作したレーストラックベローズを Photo.1 に示す。

2.3.2 軸方向反力測定

変位を以下のようにして軸方向反力測定を行った。実機においてユニバーサル型を想定して いるため、本試験もユニバーサル型で測定している。ユニバーサル型とはベローズ2個使用し て、軸直角変位をとりやすくした方式である。変位 0mm と変位 5mm 時の様子を Photo.2 に示す。

・変位:0.5 mm毎、0 mm→+5 mm→0 mm→-5 mm→0 mm。

測定結果を Fig.5 に示す。測定結果の平均反力を以下に示す。

・測定値反力平均:12.86N/mm。

比較として、レーストラックベローズの内径と外径の平均径を持つ円形ベローズを仮定した 計算値を以下に示す。

・計算値反力:18.72N/mm。(計算式等は付録参照。)

測定値と計算値を比較すると、測定値は計算値の約 0.7 倍である。したがってレーストラックベローズの測定値は円形ベローズを仮定した計算値より小さい反力が期待できるので、次の 設計では円形を仮定した軸方向反力の計算値をレーストラックベローズの最大軸方向反力と考 えて差し支えないものと判断できる。

2.3.3 軸直角方向反力測定

変位を以下のようにして軸直角方向反力測定を行った。短軸と長軸それぞれの変位 1mm 時の 様子を Photo.3 に示す。

・変位:1mm毎、0mm→+1mm→0mm。

測定結果を Fig.6 に示す。測定結果の短軸と長軸それぞれの平均反力を以下に示す。

・測定値軸直角方向反力平均(短軸方向):40.47N/mm。

・測定値軸直角方向反力平均(長軸方向):55.17N/mm。

比較として、短軸・長軸側のレーストラックベローズの内径・外径それぞれの径を持つ円形 ベローズの反力に補正項を加えた計算値を以下に示す。

・計算値軸直角方向反力平均(短軸方向): 40.15N/mm。(計算式等は付録参照。)

・計算値軸直角方向反力平均(長軸方向): 73.82N/mm。(計算式等は付録参照。)

測定値と計算値を比較すると、短軸方向の計算値は測定値とほぼ一致したのに対し、長軸方向の測定値は計算値の約0.75倍である。この原因のひとつにはベローズ山高さWの製作・測定 精度が上げられる。表1より短軸と長軸で山高さは約1.5mmの差があるが、バネ定数Kが W[^]-2.5に比例するため1.5mmの違いがあれば最大35%程度の誤差が生じることがわかる。

このように計算と測定に約25%のずれがあるので、ベローズ山高さWの製作・測定精度を上 げるとともに、今後他の形状のレーストラックベローズを製作し反力測定をすることで計算式 を見直し、精度の良い式を導く必要があると思われる。

しかし次の設計では、長軸方向の軸直角方向の計算値をレーストラックベローズの最大軸直 角方向反力と考えて差し支えないものと判断できる。

2.3.4 伸縮耐久試験

レーストラックベローズの伸縮耐久試験を行った。試験条件は以下の通りである。

- ・真空度:1.8kPa。
- 伸縮: +0.4 mm、-0.8 mm。
- 周期:2秒。

伸縮 1000 回、10000 回時の様子を Photo.4 に示す。No.1 のレーストラックベローズは伸縮 を最大15万回、No.2 のレーストラックベローズは伸縮を最大1万回繰り返したが、どちらも 圧力上昇などの異常はなかった。伸縮に関してレーストラック形状のベローズでも特に問題な いと判断できる。 2.3.5 真空加熱試験

真空加熱試験を行い目視にて変形を確認した。試験条件は以下の通り。

- ・真空度: 2.7 k Pa。
- ・ベローズ長さ:22mmで固定。
- ・設定温度:200℃、250℃。

試験開始時温度 15℃と設定温度 200℃・250℃のときの様子をそれぞれ Photo.5、Photo.6、 Photo.7に示す。設定温度到達後 30 分以上状態を維持していたが、変形等は確認できなかった。 真空加熱に対してレーストラック形状でも特に問題ないと判断できる。

2.3.6 ヘリウムリーク試験

ヘリウムを詰めたビニール袋で覆ったレーストラックベローズ内部を真空排気し、漏れ箇所 より入ったヘリウムを検出・測定(島津製作所製ヘリウムリークディテクターMSE-11AU(TP)) した。試験時の様子を Photo.8 に示す。

測定結果は No.1 のレーストラックベローズは 2.6×10⁻¹¹Pa・m³/sec、No.2 のレーストラッ クベローズは 6.26×10⁻¹¹Pa・m³/sec であった。どちらも実機で要求される仕様値 1.33×10⁻¹⁰Pa・m³/sec を満たしている。

3. 結論

レーストラックベローズの性能特性の測定をおこなった。軸方向反力の測定に関して、レー ストラックベローズと同じ平均径を持つ円形ベローズを仮定した計算値と比較して約 30%異 なる。また軸直角方向反力の測定に関して、短軸・長軸側のレーストラックベローズの内径・ 外径それぞれの径を持つ円形ベローズの反力に補正項を加えた計算値と比較して長軸方向の測 定値が約 25%異なる。世界で初めてレーストラックベローズを製作し、性能特性の測定をおこ なったため反力の計算式には改善の余地があるものの、軸方向・軸直角方向とも測定値に対し て計算値より小さい方向なので、次の設計では円形(+補正項)を仮定した反力の計算値をレー ストラックベローズの最大反力と考えて差し支えないものと判断できる。その他、伸縮耐久試 験・真空加熱試験・ヘリウムリークテストを行ったが、従来の円形ベローズと比較して、レー ストラックベローズに関して特記すべき問題点等はみられなかった。

以上から判断して実機サイズのレーストラックベローズに関しても実用は十分可能であると 思われる。したがって、J-PARC 3GeV シンクロトロン (RCS)の出射部において、出射セプタム 電磁石1と出射セプタム電磁石2間のダクト接続に対して、出射ビームのアパーチャを確保し、 かつ周回側ダクトと干渉しないためにレーストラックベローズを用いることが一つの解となる 見通しを立てることができた。

謝 辞

レーストラックベローズの製作及び試験に携わった大阪ラセン管工業株式会社袋井工場の 方々に深く感謝いたします。

参考文献

- M. Watanabe et al. : "Design of Thick Septa Magnets Based on 3D Field Calculation for the 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron of J-PARC", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, p1350-1353.
- 2) M. Yoshimoto et al. : "Designs of Septum Magnet at 3 GeV RCS in J-PARC", Proc. of EPAC2006 (2006), p1768.
- 3) M. Takasaki, et al. : "Guidelines in Safety Design of Accelerator Components and Facilities at High Radiation Fields", KEK-Internal 97-17, September 1997.
- 4) Y. Saito. : "General Guidelines of Vacuum System of Modern Accelerators", (2001), available from http://www-accps.kek.jp/~uota/works/.



Fig.1 RCS出射部(セプタム電磁石)







Fig.3 レーストラックベローズ設計図



Fig.4 寸法測定箇所

Table 1 寸法測定結果

		短載	铀					
ベローズ			山高さ			山高さ		
No.	内径	外径	(測定箇所	内径	外径	(測定箇所	ピッチ	
	А	В	No.12) ^{注)}	C	D	No.3) ^{注)}	Е	
1	77.0	104.5	13.45	116.5	141.5	12.2	2.2	
2	76.5	104.3	13.6	116.6	141.2	12	2.2	

注)山高さは、(外径-内径)/2-板厚で算出。 (単位mm)

Table 2 寸法測定結果(山高さ)

	測定												
ベローズ	箇所	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
No.	No.												
1	山高さ (mm)	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	13.9	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	13.9
2	山高さ (mm)	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	13.9	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	13.9



Photo.1 レーストラックベローズ外観



(a)変位 0mm

(b)変位+5mm

Photo.2 軸方向反力測定



Fig.5 軸方向反力測定結果





(b)長軸 : 変位 1mm

Photo.3 軸直角方向反力測定



Fig.6 軸直角方向反力測定結果



(a)伸縮回数 1000 回時





Photo.4 伸縮耐久試験



(a)外観
 (b)ベローズ内部
 Photo.5 真空過熱試験(試験開始温度15℃)





(a)外観
 (b)ベローズ内部
 Photo.6 真空過熱試験(設定温度 200℃)



(a)外観
 (b)ベローズ内部
 Photo.7 真空過熱試験(設定温度 250℃)



Photo.8 ヘリウムリーク試験

付 録 A. 反力計算式

2.3.2 及び 2.3.3 にて反力計算に使用した式を以下に記す。

伸縮量 1mm での軸方向反力: $F_x(N)$ 、

$$F_x = K\delta_x \quad , \tag{1}$$

変位量 1mm での短軸直角方向反力: $F_{vcom(sh)}$ (N)、

$$F_{ycom(sh)} = F_{y(sh)} + F_{y(sh)} \times \frac{2(D_{m(long)} - D_{m(sh)})}{\pi D_{m(sh)}}$$
(2)

右辺の第1項は短軸長さを持つ円形ベローズを仮定した直角方向反力、第2項が補正項である。 変位量 1mm での長軸直角方向反力: F_{vcom(lone)} (N)、

$$F_{ycom(long)} = F_{y(long)} + F_{y(long)} \times \frac{2\left(D_{m(long)} - D_{m(sh)}\right)}{\pi D_{m(long)}} \quad , \tag{3}$$

右辺の第1項は長軸長さを持つ円形ベローズを仮定した直角方向反力、第2項が補正項である。

ここで、Kは1山辺りのバネ定数、 δ_x は1山辺りの軸方向の伸縮量、 $F_{y(sh)}$ ・ $F_{y(long)}$ はそれ ぞれ短軸・長軸長さの円形ベローズを仮定した軸直角方向反力、 $D_{m(sh)}$ ・ $D_{m(long)}$ はそれぞれ短 軸・長軸の平均径である。計算結果の単位はNであるが、本文中では変位量1mmを仮定して、 N/mmとしている。

これらの定数等の計算式を以下に示す。

$$K = \frac{2ED_{m}t^{3}}{3\sqrt{\pi/2}W^{2.5}}$$
 (4)

$$F_{y} = \frac{KD_{m}\delta_{y}}{2L},$$
(5)

$$\delta_x = \frac{X}{2n} \,, \tag{6}$$

$$\delta_{y} = \frac{3D_{m}Y}{2n\{L+l(1/L+1)\}},$$
(7)

ここで、 δ_y (mm)は1山辺りの軸直角方向の変位量である。(1)~(7)に用いた定数・変数の値及び反力の計算結果をTable A-1に示す。また直感的に理解するためベローズ形状に依存する定

数を Fig. A-1 に示す。

			軸直角方向 (短軸)	軸直角方向 (長軸)	軸方向
軸方向伸縮量(想定値)	X	mm	0	0	1
軸直角変位量(想定値)	Y	mm	1	1	1
板厚	t	mm	0.3	0.3	0.3
山高さ	W	mm	13.53	12.10	12.62
平均径	Dm	mm	90.88 (D _{m(sh)})	$129.25 (D_{m(long)})$	115.31
各ベローズの山数	п	山	10	10	10
ベローズ長さ(No. 1, No. 2間の直線部 (中間パイプ)含む)	L	mm	64	64	64
No. 1, No. 2間の直線 部 (中間パイプ) 長さ	1	mm	20	20	20
1山辺りの バネ定数	K	N/mm	295.08	419.69	374.41
常温でのヤング率	E	N/mm ²	107000	107000	107000
1山辺りの軸 方向の伸縮量	δ_x	mm	0	0	0.05
1山辺りの軸直角 方向の変位量	${\delta}_y$	mm	0.15	0.21	0.19
軸方向反力	F_x	N	-	-	18.72
円形ベローズを仮定 した軸直角方向反力	F_y	Ν	$\overline{31.64} \\ (F_{y(sh)})$	$91.04 \\ (F_{y(long)})$	-
補正項を加えた 軸直角方向反力	F _{ycom}	N	$40.15 \\ (F_{ycom(sh)})$	$\overline{73.82} \\ (F_{ycom(long)})$	-

Table A-1 定数・変数の値及び反力計算結果



Fig. A-1 ベローズ形状に依存する定数

表1. SI 基本単位 SI 基本单位 基本量 名称 記号 長 さ ~ ートル m 質 量 キログラム kg 時 間 秒 \mathbf{S} 電 流 アンペア А 熱力学温度ケルビン K 量モ 物質 N mol

デラ

cd

度カ

光

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	値の例
SI 基本単位	
粗立重 名称	記号
面 積平方メート	νm^2
体積立法メート	ν 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)キログラム毎立法メート	ル kg/m ³
質量体積(比体積) 立法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	$\nu A/m^2$
磁界の強さアンペア毎メート	ル A/m
(物質量の)濃度 モル毎立方メート	$\nu mo1/m^3$
輝 度 カンデラ毎平方メート	$\nu cd/m^2$
屈折率(数の)1	1

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}	ナノ	n			
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	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3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

			51 租工申伍	
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 ^(a)	rad		m • m ⁻¹ =1 ^(b)
立 休 牟	フテラジアン ^(a)	(c)		$m^2 \cdot m^{-2} - 1$ (b)
	$\sim \nu \gamma$	51 H7		m m -1
		N		5 m lan
		Po	N /2	III • Kg • S ^{−1} . I ^{−2}
		га	N/ m	m • kg • s
		J	N•m	m • kg • s
	リット	W	J/s	m [*] •kg•s [°]
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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁東	ウェーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光東	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
照度	ルクス	lx	1m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	,	s ⁻¹
吸収線量, 質量エネル	14 1. 1	0	т /1	2 -2
ギー分与, カーマ	. / / 1	Gy	J/Kg	m · s ·
線量当量,周辺線量当				
量,方向性線量当量,個	シーベルト	Sv	J/kg	$m^{2} \cdot s^{-2}$
人線量当量,組織線量当				

(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った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℃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

和辛量	SI 組立単位			
和立里	名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘度	パスカル秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$	
力のモーメント	ニュートンメートル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
表 面 張 力	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	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$	
角 加 速 度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$	
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), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム 毎ケルビン	$J/(kg \cdot K)$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
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	ワット毎メートル毎ケ ルビン	W/(m•K)	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{K}^{-1}$	
体積エネルギー	ジュール毎立方メート ル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$	
体 積 電 荷	クーロン毎立方メート ル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$	
電 気 変 位	クーロン毎平方メート ル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mo1	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$	
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)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$	
照射線量(X線及びy線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$	

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	0	1° =(π/180) rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	1B=(1/2)1n10(Np)

表7.国際単位系と併用されこれに属さない単位で 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)×10 ⁻¹⁹ J				
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg				
天 文 単 位	ua	$1_{11a}=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$				

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	Ē	E	1 海里=1852m			
1	ッ		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s			
Р	— <i>j</i>	i∕a	$1 a=1 dam^2=10^2 m^2$			
\sim	クターノ	↓ ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$			
バ	-)	▶ bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa			
才:	ングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m			
バ	-)	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$			

主0 田方の夕かな合わのの知会尚は

及う. 回有の石标を含む603組立単位								
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値				
I	ル	グ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダ	イ	\sim	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポ	r	ズ	Р	1 P=1 dyn•s/cm²=0.1Pa•s				
ス	トーク	ス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s				
ガ	ウ	ス	G	1 G 10 ⁻⁴ T				
工	ルステッ	ド	0e	$1 \text{ Oe} (1000/4 \pi) \text{A/m}$				
$\overline{}$	クスウェ	N	Mx	1 Mx 10 ⁻⁸ Wb				
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$				
朩		ŀ	ph	1 ph=10 ⁴ 1x				
ガ		ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{m/s}^2$				

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	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq				
$\boldsymbol{\nu}$	ント	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$				
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy				
$\boldsymbol{\nu}$			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv				
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm				
ガ	ン		7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$				
ジ	ャンフ	くキ		Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W • m ⁻² · Hz ⁻¹				
フ	л.	ル	11		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m				
メートル系カラット					1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg				
ŀ			\mathcal{N}	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa				
標	準 大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa				
力		IJ	-	cal					
3	ク	n	~	11	1				

この印刷物は再生紙を使用しています