



JAEA-Data/Code

2008-028

緩衝材中ガス移行試験データベース

Database on Gas Migration Tests through Bentonite Buffer Material

棚井 憲治

Kenji TANAI

地層処分研究開発部門
ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

緩衝材中ガス移行試験データベース

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット
棚井 憲治

(2008年11月28日 受理)

炭素鋼オーバーパックスの腐食により発生する水素ガスは、緩衝材自体が低透気性であるため、緩衝材とオーバーパックスの界面に蓄積することが想定される。また、水素ガスが緩衝材中を移行する際、緩衝材中の間隙水を押し出すことが考えられる。これらの現象は、緩衝材の長期力学的安定性や核種移行抑制機能に影響を及ぼす可能性があることから、定量的に影響を評価することが重要となる。

そのため現象の理解、ガス移行評価モデルの開発の観点から、これまでに乾燥密度などをパラメータとしたガス移行試験を行い、緩衝材の基本的な透気特性データの取得を進めてきた。

本報告においては、実施主体が進める概要調査地区の選定や国の安全審査基本指針類の策定のための基盤情報の整備の一環として進めてきたデータベース整備の一つとして、日本原子力研究開発機構が2007年12月までに取得したガス移行試験データをデータ集として取りまとめた。

Database on Gas Migration Tests through Bentonite Buffer Material

Kenji TANAI

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 28, 2008)

Carbon steel is a candidate material for an overpack for geological disposal of high-level radioactive waste in Japan. The corrosion of the carbon steel overpack in aqueous solution under anoxic conditions will cause the generation of hydrogen gas, which may affect hydrological and mechanical properties of the bentonite buffer. To evaluate such an effect of gas generation, it is necessary to develop a model of gas migration through bentonite buffer material taking account of data obtained from experiments. The gas migration experiments under both unsaturated and saturated conditions have been carried out to clarify the fundamental characteristics of bentonite for gas migration.

This report compiles the experimental data obtained from gas migration tests for buffer material which has been conducted by JAEA until December, 2007.

Keywords: Gas Migration, Bentonite, Gas Permeability, Intrinsic Permeability

目 次

1. 序論	1
2. 実験装置及び用語の定義	1
2.1 実験装置の概要	1
2.2 用語の定義	3
3. 絶対浸透率の測定	4
3.1 試験手順	4
3.2 試験条件	4
3.3 留意事項	4
4. 有効浸透率の測定	10
4.1 試験手順	10
4.2 試験条件	11
4.3 留意事項	12
5. データベースの構成と内容	14
6. おわりに	14
参考文献	15
付録 データファイル CD	

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Apparatus and Definition of Term	1
2.1 Outline of Experimental Apparatus	1
2.2 Definition of Term	3
3. Measurement of Intrinsic Permeability	4
3.1 Experimental procedure	4
3.2 Experimental Conditions	4
3.3 Points of Concern	4
4. Measurement of Gas permeability	10
4.1 Experimental procedure	10
4.2 Experimental Conditions	11
4.3 Points of Concern	12
5. Database Configuration and Contents	14
6. Conclusion	14
References	15

Appendix Data File (CD)

表リスト

表 2-1	装置 A の主な仕様	2
表 2-2	装置 B の主な仕様	3
表 3-1	絶対浸透率試験条件	4
表 3-2	絶対浸透率測定結果	6
表 4-1	ガス有効浸透率試験条件	11

図リスト

図 2-1	装置 A の概要	2
図 2-2	装置 B の概要	3
図 3-1	水及び水素ガスの絶対浸透率測定結果	5

1. 序論

炭素鋼オーバーパックの腐食により発生する水素ガスは、緩衝材が低透気性であるため、緩衝材とオーバーパックの界面に蓄積されることが懸念される。また、水素ガスが緩衝材中を移行する際、緩衝材中の間隙水を押し出すことが考えられる。OECD/NEA の国際ワークショップ¹⁾では、ガスの発生・移行に関する安全評価上の問題として、①緩衝材あるいは母岩へのバリア性能に対して、恒久的なダメージを与える可能性と、②ガスの移行に伴う核種に汚染された間隙水の排水の二つをあげている。特に、前者は、ガス蓄積圧による緩衝材・岩盤への力学的影響や熱伝導率が小さいガス相の形成による温度変化などを意味している。これらについては、緩衝材の長期力学的安定性や核種移行に影響を及ぼすことが考えられることから、処分場の設計において設定される人工バリアシステムの長期健全性を示すためにも、その影響を定量的に評価することが重要となる。そこで、1995年頃から緩衝材を対象としたガス移行試験を行い^{2), 3), 4), 5), 6)}、基本的な透気特性データの取得、ならびに緩衝材中のガス移行挙動の把握を通じて評価モデルの開発を進めてきた。

ここでは、処分事業と国による安全規制を支える知識基盤の整備という観点から、緩衝材を対象としたガス移行試験の実験装置ならびに試験手順を明確にした上で、これらの実験で得られたデータを取りまとめガス移行試験データベースとして集約した。

2. 実験装置及び用語の定義

2.1 実験装置の概要

緩衝材を対象としたガス移行試験に使用した実験装置は、体積を一定に拘束した状態で背圧（水圧）を負荷できるタイプと負荷できないタイプに大きく分類される。背圧（水圧）負荷タイプの実験装置（以下、「装置 A」という。）の概要と主な仕様を図 2-1 および表 2-1 に、背圧を負荷できないタイプの実験装置（以下、「装置 B」という。）の概要と主な仕様を図 2-2 および表 2-2 にそれぞれ示す。

装置 A の試験容器は、岩石を用いた実験が行えるように容器内部にゴムスリーブがあり、拘束圧制御ポンプにて任意の拘束圧力が負荷できる構造となっている。ベントナイトを用いた実験を行う場合には、当該容器を使用せず装置 B の容器に類似したものを当該装置に接続して使用している。

計測項目としては、①水及びガス供給ポンプの押出量、押出流速及び圧力、②試験容器上流側圧力（供給側圧力）及び試験容器下流側圧力（排出側圧力）、③拘束圧制御ポンプの圧力、④背圧、⑤電子天秤の重量、⑥ガス透気流量、⑦室温であり、任意のインターバルにてこれらのデータをパソコン内に収集されるシステムとなっている。なお、ベントナイト供試体の膨潤応力を測定するためのロードセルは、装置 A には付随していないため測定は行っていない。

装置 B の試験容器は、圧縮ベントナイトのみを対象とした試験に使用している。計測項目としては、ガス供給圧力、ベントナイトの膨潤応力、ガス透気流量であり、このうちガス供給圧力と膨潤応力については、データロガーにて自動計測可能であるが、ガス透気流量については、

ビュレット内の石鹼膜の単位時間当たりの移動量を人為的に計測することが必要となる。

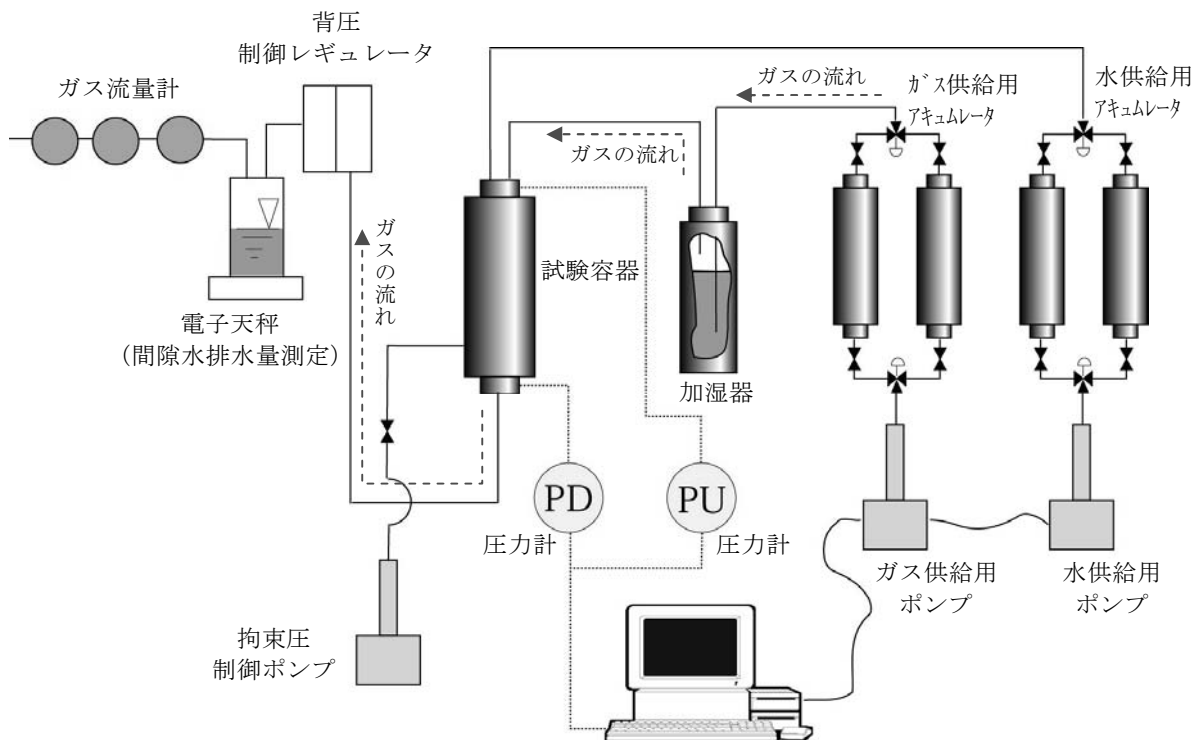


図 2-1 装置 A の概要

表 2-1 装置 A の主な仕様

装置類	主な仕様
試験容器	<ul style="list-style-type: none"> 対象試料寸法：直径 38mm, 高さ 100mm (最大) 注入圧/背圧：最大 34.3MPa 最高使用温度：121℃ 設計圧力：55.2MPa
ガス・水供給用ポンプ	<ul style="list-style-type: none"> 圧力及び流量制御可変 供給圧力：最大 34.3MPa 流量制御：0.005～35cc/min
拘束圧制御ポンプ	<ul style="list-style-type: none"> 容量：最大 35cc/min 供給圧力：最大 44.1MPa
加湿器	<ul style="list-style-type: none"> 容量：約 200cc 設計圧力：41.4MPa
ガス流量計	<ul style="list-style-type: none"> 型式：電気式 容量：0～15cc/min, 0～100cc/min, 0～1000cc/min 精度：1%F.S. 取扱流体：ヘリウムガス
背圧制御レギュレータ	<ul style="list-style-type: none"> 供給圧力：最大 34.3MPa
電子天秤	<ul style="list-style-type: none"> 容量：2100g 精度：0.005g

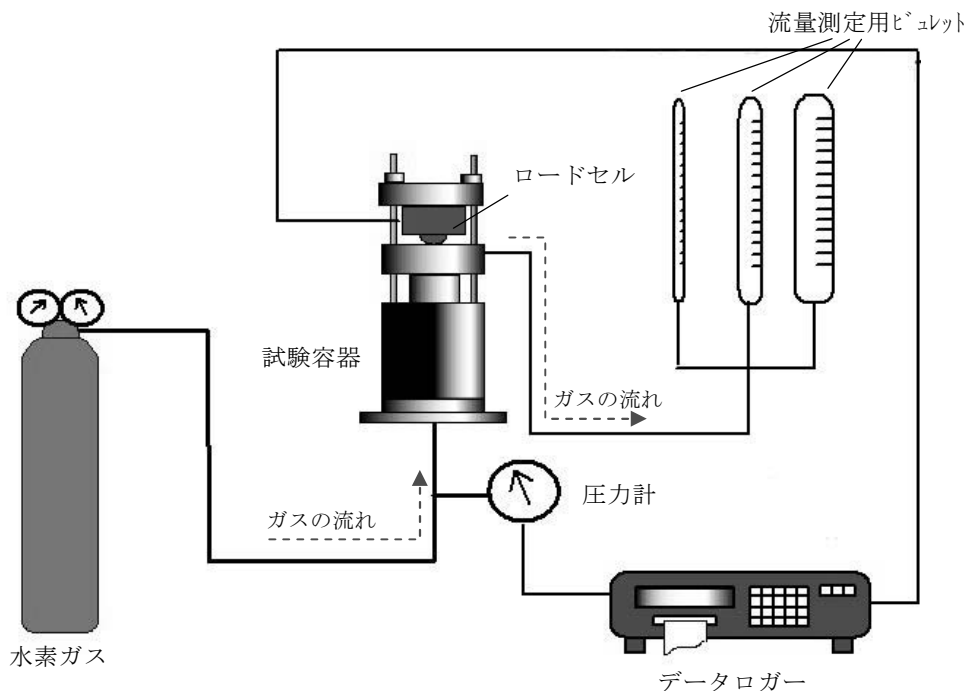


図 2-2 装置 B の概要

表 2-2 装置 B の主な仕様

装置類	主な仕様
試験容器	<ul style="list-style-type: none"> 対象試料寸法： 直径 50mm×高さ 10～50mm（可変型）：3 台 直径 50mm×高さ 300mm：1 台 注入圧：最大 15MPa 最高使用温度：室温
流量測定用ビュレット （石鹼膜流量計）	<ul style="list-style-type: none"> 容量：2cc, 5cc, 20cc 取扱流体：水素ガス
ロードセル	<ul style="list-style-type: none"> 仕様：最大 25MPa

2.2 用語の定義

本項では、ベントナイトの透気特性の一つの指標として、“浸透率”という用語をもちいることとする。浸透率とは、多孔質媒体が物理的に均質で変質しない場合の単一流体の透過能力として定義された。また、“浸透率”には、“有効浸透率”や“絶対浸透率”，さらには“相対浸透率”などが用いられ，これらの定義は以下に示すようなものである。

有効浸透率とは多孔質媒体内に 2 種類以上の流体が共存して流動している場合の，それぞれの流体の浸透率をいい，これに対して単一流体のみが流動している場合の浸透率を絶対浸透率ということとする。なお，相対浸透率は，有効浸透率の絶対浸透率に対する比である。

3. 絶対浸透率の測定

3.1 試験手順

ガスの絶対浸透率の測定は、前述した装置 B を使用し、以下に示す手順で行った。

- ①ベントナイトを 110℃ 炉乾燥させた後、試験装置 B の容器に試料を充填し所定の乾燥密度になるよう静的に圧縮成型した。ケイ砂混合体の場合は、3 号および 5 号ケイ砂を重量比 1:1 で混合したものを使用し、ケイ砂混合率は乾燥重量で 30wt% である。
- ②レギュレータにて任意のガス圧力 (0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2MPa) に調整し、試験装置 B の容器下部よりガスの供給を行う。
- ③ガスの供給と同時に流量測定用ビュレットにて単位時間当たりの透気流量を求め、(3.1)式から絶対浸透率を算出した。

$$Q = \frac{KA(P_1^2 - P_2^2)}{2\mu LP_b} \quad (3.1) \text{ 式}$$

ここで、 Q : 流量[m³ s⁻¹]、 K : 浸透率[m²]、 A : 断面積[m²]、 P_1 : 試料入口側圧力[Pa]、 P_2 : 試料出口側圧力[Pa]、 μ : ガスの粘性係数[Pa s]、 L : 試料長さ[m]、 P_b : ガス量測定時の圧力[Pa]である。

3.2 試験条件

試験条件を表 3-1 に示す。なお、供試体の直径は、50mm であるが、試料と試験容器境界部のガスの移行を抑制するため、本試験では直径 40mm の焼結金属フィルターを使用した。したがって、絶対浸透率の算出に用いた供試体の面積は、直径 40mm で求めた値を使用している。

絶対浸透率測定結果を表 3-2 に示す。

表 3-1 絶対浸透率試験条件

ベントナイト試料	クニゲル V1
使用ケイ砂	3 号+5 号
ケイ砂混合率 (%)	0, 30%
供試体サイズ (mm)	直径 50×高さ 50
乾燥密度 (Mg m ⁻³)	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8
飽和度 (%)	0% (乾燥状態)
試験ガス	水素
ガス圧力 (MPa)	0.03, 0.05, 0.1, 0.2

3.3 留意事項

絶対浸透率[m²]は透過媒体の構造特性に由来する透過抵抗係数であり媒体固有の値となる。したがって、水とガスの絶対浸透率は本来同じ値になると考えられるが、ベントナイトを用い

た試験におけるガスの絶対浸透率は、水のそれに比べて約5桁大きな値となる(図3-1参照)。このことは、ベントナイトが給水によって膨潤するという特性を有していることに起因していると考えられる。すなわち、ガスの絶対浸透率の測定は、ベントナイトが乾燥状態で行っているのに対して、水の場合は試料が飽和状態で行っていることから、給水によってベントナイトが膨潤し空隙構造が変化していることによるものと考えられる。

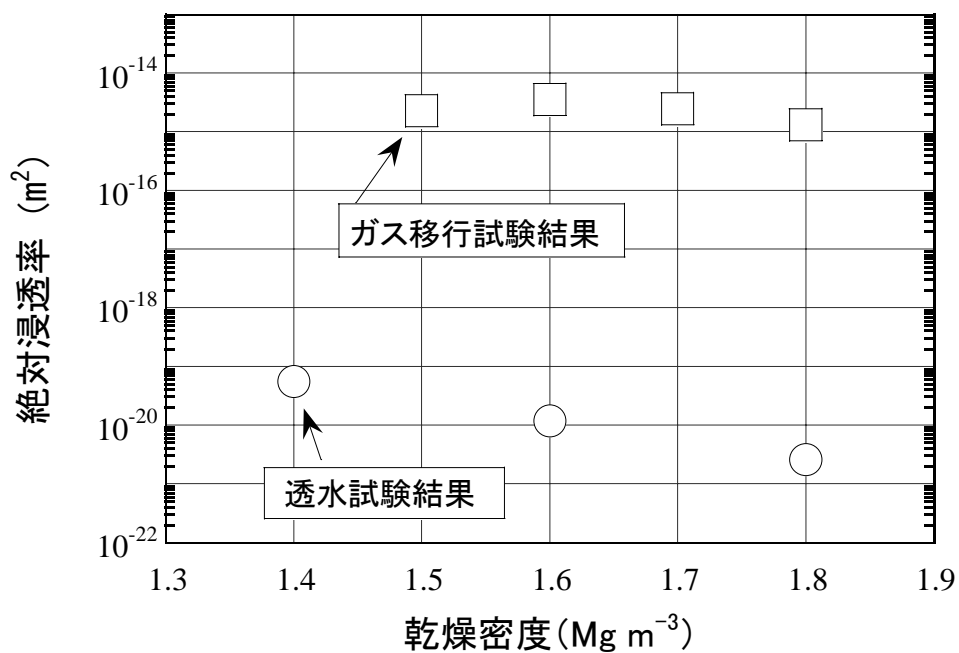


図 3-1 水及び水素ガスの絶対浸透率測定結果²⁾

表 3-2 絶対浸透率測定結果(1)

試料	乾燥密度 (Mg m ⁻³)	ケイ砂混合率 (%)	有効粘土密度 (Mg m ⁻³)	間隙率 (%)	試料直径 (cm)	試料高さ (cm)	含水比 (%)	ガス圧力 (MPa)	測定流量 (m ³ s ⁻¹)	絶対浸透率 (m ²)
クニケールV1	1.1	0.00	1.10	59.26	4.00	5.00	0.00	0.03	1.05E-05	1.09E-13
クニケールV1	1.1	0.00	1.10	59.26	4.00	5.00	0.00	0.03	1.06E-05	1.10E-13
クニケールV1	1.1	0.00	1.10	59.26	4.00	5.00	0.00	0.05	1.85E-05	1.06E-13
クニケールV1	1.1	0.00	1.10	59.26	4.00	5.00	0.00	0.03	1.06E-05	1.10E-13
クニケールV1	1.1	0.00	1.10	59.26	4.00	5.00	0.00	0.05	1.90E-05	1.09E-13
クニケールV1	1.1	0.00	1.10	59.26	4.00	5.00	0.00	0.03	1.05E-05	1.09E-13
クニケールV1	1.1	0.00	1.10	59.26	4.00	5.00	0.00	0.05	1.91E-05	1.10E-13
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.03	5.33E-06	5.54E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.05	8.16E-06	4.69E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.10	1.81E-05	4.36E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.10	1.78E-05	4.28E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.03	5.18E-06	5.38E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.05	8.55E-06	4.92E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.10	1.84E-05	4.43E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.10	1.82E-05	4.38E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.03	5.31E-06	5.52E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.05	8.73E-06	5.02E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.10	1.89E-05	4.55E-14
クニケールV1	1.3	0.00	1.30	51.85	4.00	5.00	0.00	0.10	1.87E-05	4.50E-14
クニケールV1	1.5	0.00	1.50	44.44	4.00	5.00	0.00	0.10	6.82E-06	1.64E-14
クニケールV1	1.5	0.00	1.50	44.44	4.00	5.00	0.00	0.20	1.66E-05	1.51E-14

表 3-2 絶対浸透率の測定結果(2)

試料	乾燥密度 (Mg m ⁻³)	ケイ砂混合率 (%)	有効粘土密度 (Mg m ⁻³)	間隙率 (%)	試料直径 (cm)	試料高さ (cm)	含水比 (%)	ガス圧力 (MPa)	測定流量 (m ³ s ⁻¹)	絶対浸透率 (m ²)
クニケールV1	1.5	0.00	1.50	44.44	4.00	5.00	0.00	0.03	1.95E-06	2.03E-14
クニケールV1	1.5	0.00	1.50	44.44	4.00	5.00	0.00	0.05	3.58E-06	2.06E-14
クニケールV1	1.5	0.00	1.50	44.44	4.00	5.00	0.00	0.10	6.94E-06	1.67E-14
クニケールV1	1.5	0.00	1.50	44.44	4.00	5.00	0.00	0.03	1.99E-06	2.07E-14
クニケールV1	1.5	0.00	1.50	44.44	4.00	5.00	0.00	0.05	3.43E-06	1.97E-14
クニケールV1	1.5	0.00	1.50	44.44	4.00	5.00	0.00	0.10	6.95E-06	1.67E-14
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.03	6.36E-07	6.61E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.05	1.10E-06	6.32E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.10	2.06E-06	4.96E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.03	6.73E-07	6.99E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.05	1.11E-06	6.38E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.10	2.09E-06	5.03E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.10	2.10E-06	5.05E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.03	6.81E-07	7.08E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.05	1.10E-06	6.32E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.10	2.13E-06	5.12E-15
クニケールV1	1.7	0.00	1.70	37.40	4.00	5.00	0.00	0.10	2.12E-06	5.10E-15
クニケールV1	1.2	30.00	0.97	55.22	4.00	5.00	0.00	0.03	1.41E-05	1.47E-13
クニケールV1	1.2	30.00	0.97	55.22	4.00	5.00	0.00	0.05	2.25E-05	1.29E-13
クニケールV1	1.2	30.00	0.97	55.22	4.00	5.00	0.00	0.05	2.25E-05	1.29E-13

表 3-2 絶対浸透率の測定結果(3)

試料	乾燥密度 (Mg m ⁻³)	ケイ砂混合率 (%)	有効粘土密度 (Mg m ⁻³)	間隙率 (%)	試料直径 (cm)	試料高さ (cm)	含水比 (%)	ガス圧力 (MPa)	測定流量 (m ³ s ⁻¹)	絶対浸透率 (m ²)
クニケールV1	1.2	30.00	0.97	55.22	4.00	5.00	0.00	0.03	1.33E-05	1.38E-13
クニケールV1	1.2	30.00	0.97	55.22	4.00	5.00	0.00	0.05	2.29E-05	1.32E-13
クニケールV1	1.2	30.00	0.97	55.22	4.00	5.00	0.00	0.03	1.23E-05	1.28E-13
クニケールV1	1.2	30.00	0.97	55.22	4.00	5.00	0.00	0.03	1.24E-05	1.29E-13
クニケールV1	1.2	30.00	0.97	55.22	4.00	5.00	0.00	0.05	2.18E-05	1.25E-13
クニケールV1	1.4	30.00	1.17	47.76	4.00	5.00	0.00	0.03	6.39E-06	6.64E-14
クニケールV1	1.4	30.00	1.17	47.76	4.00	5.00	0.00	0.05	1.11E-05	6.38E-14
クニケールV1	1.4	30.00	1.17	47.76	4.00	5.00	0.00	0.10	2.43E-05	5.85E-14
クニケールV1	1.4	30.00	1.17	47.76	4.00	5.00	0.00	0.03	7.18E-06	7.46E-14
クニケールV1	1.4	30.00	1.17	47.76	4.00	5.00	0.00	0.05	1.13E-05	6.50E-14
クニケールV1	1.4	30.00	1.17	47.76	4.00	5.00	0.00	0.10	2.47E-05	5.94E-14
クニケールV1	1.4	30.00	1.17	47.76	4.00	5.00	0.00	0.03	6.43E-06	6.68E-14
クニケールV1	1.4	30.00	1.17	47.76	4.00	5.00	0.00	0.05	1.13E-05	6.50E-14
クニケールV1	1.4	30.00	1.17	47.76	4.00	5.00	0.00	0.10	2.37E-05	5.70E-14
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.10	1.35E-06	4.60E-14
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.03	3.32E-06	3.45E-14
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.05	5.82E-06	3.35E-14
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.10	1.25E-05	3.01E-14
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.03	3.20E-06	3.33E-14
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.05	5.52E-06	3.17E-14
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.10	1.20E-05	2.89E-14

表 3-2 絶対浸透室の測定結果(4)

試料	乾燥密度 (Mg m ⁻³)	ケイ砂混合率 (%)	有効粘土密度 (Mg m ⁻³)	間隙率 (%)	試料直径 (cm)	試料高さ (cm)	含水比 (%)	ガス圧力 (MPa)	測定流量 (m ³ s ⁻¹)	絶対浸透率 (m ²)
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.03	3.36E-06	3.49E-14
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.05	5.70E-06	3.28E-14
クニケールV1	1.6	30.00	1.37	40.30	4.00	5.00	0.00	0.10	1.21E-05	2.91E-14
クニケールV1	1.8	30.00	1.58	32.84	4.00	5.00	0.00	0.03	1.07E-06	1.11E-14
クニケールV1	1.8	30.00	1.58	32.84	4.00	5.00	0.00	0.05	1.81E-06	1.04E-14
クニケールV1	1.8	30.00	1.58	32.84	4.00	5.00	0.00	0.10	3.61E-06	8.69E-15
クニケールV1	1.8	30.00	1.58	32.84	4.00	5.00	0.00	0.03	9.62E-07	1.00E-14
クニケールV1	1.8	30.00	1.58	32.84	4.00	5.00	0.00	0.05	1.71E-06	9.83E-15
クニケールV1	1.8	30.00	1.58	32.84	4.00	5.00	0.00	0.10	3.60E-06	8.66E-15
クニケールV1	1.8	30.00	1.58	32.84	4.00	5.00	0.00	0.03	1.07E-06	1.11E-14
クニケールV1	1.8	30.00	1.58	32.84	4.00	5.00	0.00	0.05	1.77E-06	1.02E-14
クニケールV1	1.8	30.00	1.58	32.84	4.00	5.00	0.00	0.10	3.47E-06	8.35E-15

4. 有効浸透率の測定

ガス有効浸透率の測定に関しては、装置 A と装置 B を用いた場合とでは試験手順が異なることから、以下には装置毎にそれぞれの試験手順を示す。

4.1 試験手順

4.1.1 装置 A を用いた場合の試験手順

装置 A によるガス有効浸透率の測定手順については、概略以下のようなものである。

- ① 試験容器中にベントナイト粉末を充填し、所定の乾燥密度となるよう静的に圧縮成型する。
- ② 水・ガス供給側バルブのうち、水供給ライン上のバルブを開け、試料上面より水供給用ポンプにて給水を行い 3 ヶ月程度保持する。この間、水の供給量と排水量を計測し、それらのデータから試料の飽和を判断する。
- ③ 試料の飽和後、一旦、水供給用ポンプを停止する。
- ④ 背圧レギュレータを所定の圧力に調整し、試料の両端面に所定の水圧（背圧）を負荷する。その状態で試料上面の水供給ライン上のバルブを閉じる。
- ⑤ ガスアキュムレータに背圧と同じ圧力でヘリウムガスを充填した後、試料上面のバルブのうち、ガス供給ライン上のバルブを開き、ガス圧力を試料に負荷する。その後、ガス供給用ポンプを圧力制御若しくはガスの供給量制御のいずれかを選択し、ガスの供給を開始する。
- ⑥ ガス供給圧力、ガス流量計、背圧、電子天秤への排水重量、室温などをコンピュータにて自動計測する。透気係数や破過圧力は、コンピュータに収録されたガス流量計の値から求める。

4.1.2 装置 B を用いた場合の試験手順

装置 B によるガス有効浸透率の測定手順については、概略以下のようなものである。

- ① 試験容器中に試料を充填し、所定の密度となるよう静的に圧縮成型する。
- ② 膨潤応力測定のためのロードセルなどの付属機器や配管を取付けたのち、水頭差あるいは給水ポンプにより試料下面より給水すると同時にロードセルにて膨潤応力を測定する。
- ③ 膨潤応力が収束した段階を飽和と判断し給水を終了させ、ガスの供給を開始する。ガスは、レギュレータによって任意の圧力に制御して供試体に供給する。ガスの初期圧力としては、膨潤応力のおよそ 50% から開始し、7 日から 10 日程度のスパンで透気するまでガス圧力を徐々に昇圧する。
- ④ 透気が発生した時点で流量測定用ビュレットにより透気流量を測定し、ガスの有効浸透率を算出する。透気流量の測定は、ビュレット内に石鹼膜を作り、単位時間内の石鹼膜の移動量から求める。

4.2 試験条件

これまでに行った試験の条件等（試験溶液、乾燥密度、ケイ砂混合率、試料の寸法、ガス供給の方法及び実験に用いた装置）を表 4-1 に示す。

表 4-1 ガス有効浸透率試験条件(1)

試験No.	1	2	3	4
ベントナイト系材料	Kunigel V1 (Na型)			
試験溶液	蒸留水	蒸留水	蒸留水	蒸留水
イオン強度 [mol dm ⁻³]	0.00	0.00	0.00	0.00
乾燥密度 [Mg m ⁻³]	1.60	1.70	1.80	1.90
ケイ砂混合率 [wt%]	0.0	0.0	0.0	0.0
有効粘度密度 [Mg m ⁻³]	1.60	1.70	1.80	1.90
試料の直径 [m]	0.05	0.05	0.05	0.05
試料の高さ [m]	0.01	0.01	0.01	0.01
ガス供給方法	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御
試験ガス	水素	水素	水素	水素
実験装置	装置B	装置B	装置B	装置B
試験No.	5	6	7	8
ベントナイト系材料	Kunigel V1 (Na型)			
試験溶液	蒸留水	蒸留水	蒸留水	蒸留水
イオン強度 [mol dm ⁻³]	0	0.00	0.00	0.00
乾燥密度 [Mg m ⁻³]	1.6	1.80	1.80	1.80
ケイ砂混合率 [wt%]	0	0	0	0
有効粘度密度 [Mg m ⁻³]	1.6	1.80	1.80	1.80
試料の直径 [m]	0.05	0.050	0.05	0.05
試料の高さ [m]	0.03	0.030	0.03	0.10
ガス供給方法	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御
試験ガス	水素	水素	水素	水素
実験装置	装置B	装置B	装置B	装置B
試験No.	9	10	11	12
ベントナイト系材料	Kunigel V1 (Na型)			
試験溶液	蒸留水	蒸留水	蒸留水	蒸留水
イオン強度 [mol/dm ³]	0.00	0.00	0.00	0.00
乾燥密度 [Mg/m ³]	1.40	1.60	1.80	1.60
ケイ砂混合率 [wt%]	30	30	0	30
有効粘度密度 [Mg/m ³]	1.17	1.36	1.80	1.37
試料の直径 [m]	0.05	0.05	0.05	0.036
試料の高さ [m]	0.05	0.05	0.05	0.050
ガス供給方法	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御 及びガス供給量制御 (0.1cc/min)
試験ガス	水素	水素	水素	ヘリウム
実験装置	装置B	装置B	装置B	装置A
試験No.	13	14	15	16
ベントナイト系材料	Kunigel V1 (Na型)			
試験溶液	蒸留水	蒸留水	蒸留水	蒸留水
イオン強度 [mol/dm ³]	0.00	0.00	0.00	0.00
乾燥密度 [Mg/m ³]	1.60	1.60	1.60	1.80
ケイ砂混合率 [wt%]	0	30	30	0
有効粘度密度 [Mg/m ³]	1.60	1.37	1.37	1.80
試料の直径 [m]	0.05	0.05	0.05	0.05
試料の高さ [m]	0.03	0.05	0.10	0.05
ガス供給方法	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御
試験ガス	水素	水素	水素	水素
実験装置	装置B	装置B	装置B	装置B

表 4-1 試験条件(2)

試験No.	17	18	19	20
ベントナイト系材料	Kunigel V1 (Na型)			
試験溶液	蒸留水	蒸留水	蒸留水	人工海水
イオン強度 [mol/dm ³]	0.00	0.00	0.00	0.64
乾燥密度 [Mg/m ³]	1.60	1.60	1.60	1.60
ケイ砂混合率 [wt%]	30	30	0	0
有効粘度密度 [Mg/m ³]	1.37	1.37	1.60	1.60
試料の直径 [m]	0.05	0.05	0.038	0.038
試料の高さ [m]	0.05	0.05	0.020	0.038
ガス供給方法	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給量制御 (0.05cc/min)	ガス供給量制御 (0.005cc/min)
試験ガス	水素	水素	ヘリウム	ヘリウム
実験装置	装置B	装置B	装置A	装置A

試験No.	21	22	23	24
ベントナイト系材料	Kunigel V1 (Na型)			
試験溶液	幌延地下水 (HDB-6)			蒸留水
イオン強度 [mol/dm ³]	0.21	0.21	0.21	0.000
乾燥密度 [Mg/m ³]	1.60	1.80	1.60	1.600
ケイ砂混合率 [wt%]	30	0.00	30	0.00
有効粘度密度 [Mg/m ³]	1.37	1.80	1.37	1.6
試料の直径 [m]	0.05	0.05	0.038	0.038
試料の高さ [m]	0.03	0.03	0.030	0.040
ガス供給方法	ガス供給圧力制御	ガス供給圧力制御	ガス供給量制御 (0.005cc/min)	ガス供給量制御 (0.003cc/min, 0.005cc/min)
試験ガス	水素	水素	ヘリウム	ヘリウム
実験装置	装置B	装置B	装置A	装置A

4.3 留意事項

添付された CD に収められているガス有効浸透率に関する実験データシートには備考欄を設け留意事項などを記載したが、シート内では記載しきれなかった事項等について以下に示す。

- ①実験装置の概要において述べたように、装置 B を用いた実験における透気流量の測定は、ビュレット内の気泡の単位時間当たりの移動量を実験者がストップウォッチを用いて計測している。したがって、ブレイクスルーが夜中に発生した場合や、実験者が実験現場に居なかった場合など、ブレイクスルーのタイミングによって計測できなかった場合があり、その部分については、計測データが欠落している。
- ②ブレイクスルー時点でダイナミックな流れが生じ計測不可能となったため、一旦、圧力を低下させた後、透気流量を測定したケースがある。
- ③排水側重量は、装置 A における容器から電子天秤までの配管内の水量を含めたガスの移動によって押し出された水の総量であって、供試体内の間隙水排水量のみを表すものではない。
- ④室温のデータが一部欠落している箇所は、熱電対の故障によるものである。
- ⑤“破過確認”と記載のある箇所は、以下のような状況から判断しており、この圧力を破過圧力（ブレイクスループレッシャー）としている。
 - ・ブレイクスルーをタイミングよく目視確認でき、透気流量測定を開始した時点

- ・ブレイクスルーが夜中に発生し目視確認できなかったものの、圧力の変動などから明らかにブレイクスルーと判断できる時点
- ⑥ “破過確認” と記載があり透気流量の計測値の記載がない場合は、ダイナミックな流れによって透気流量の計測ができなかったことによる。

5. データベースの構成と内容

添付のデータベースは、絶対浸透率とガス有効浸透率の2つのファイルがあり、それぞれの試験データが収納されている。

絶対浸透率については、ベントナイト系材料、試験ガス、乾燥密度、ケイ砂混合率、有効粘度密度、間隙率、供試体の直径、供試体の高さ、含水比、ガス供給圧力、ガス透気流量、絶対浸透率に関するデータ、ならびに実験に使用されたベントナイト及びケイ砂の化学特性、物理特性及び粒径に関する情報が閲覧できる。

ガス有効浸透率のファイルには、表 4-1 に示した試験 No.毎の Excel ファイルが収納されており試験条件とデータシートがある。試験条件では、ベントナイト系材料、試験溶液、イオン強度、乾燥密度、ケイ砂混合率、有効粘度密度、供試体の直径と高さ、ガスの供給方法、試験ガスに関する情報、ならびに実験に使用されたベントナイト及びケイ砂の化学特性、物理特性及び粒径、さらには試験に用いられた人工海水や幌延地下水に関する情報が閲覧できる。データシートでは、実験の開始から終了までのガス供給圧力、背圧、試験温度、ロードセルの値、透気流量及び有効浸透率の値などが閲覧できる。

6. おわりに

日本原子力研究開発機構では実施主体が進める概要調査地区の選定や国の安全審査基本指針類の策定のための基盤情報の整備の一環として、2005年度末に緩衝材基本特性データベースの日本語版を Web 公開するとともに、その翌年には同データベースの英語版、2007年度末には緩衝材の侵入特性に関わるデータを公開してきたところである。本報告書は、これらのデータベース整備の一つとして、2007年12月までに取得した緩衝材のガス移行特性データをデータ集として取りまとめたものである。

これら既公開データベースについては、実験の進捗にあわせてデータの更新を適宜進めていく一方、処分場の設計や安全評価の観点から必要であり、かつ未整理となっているデータについては、順次整理しつつ公開していく予定である。

参考文献

- 1) OECD/NEA : “Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal Safety-relevant Issues”, Workshop Proc. ISBN 92-64-18672-7 (2001).
- 2) K. Tanai, T. Kanno and C. Galle : “Experimental Study of Gas Permeabilities and Breakthrough Pressures in Clays”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 465, pp.995-1002 (1997).
- 3) 核燃料サイクル開発機構 : “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－ 分冊 2 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022 (1999).
- 4) 棚井憲治, 佐藤治夫, 村上文啓, 井上雅弘 : “地層処分場におけるガスの拡散・移行に関する検討”, JNC TN8400 99-045 (1999).
- 5) K. Tanai and M. Yamamoto : “Experimental and Modeling Studies on Gas Migration in Kunigel V1 Bentonite”, JNC TN8400 2003-024 (2003).
- 6) K. Tanai and M. Yui : “A Study on Gas Migration Behavior in Buffer Material using X-ray CT Method”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 932, pp.127-134 (2006).

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
物質の量	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 ²
体積	立方メートル	m ³
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	キログラム毎立方メートル	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
比誘電率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (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

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(b)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K
光強度	ルーメン	lm	cd sr ^(f)
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
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, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性化	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、ベクレルは放射性核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。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (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 (CF-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

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘り	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	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 ¹ s ⁻¹ s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	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 s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	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 s A
吸収線量	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 ³ 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	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼン	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	zepto	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	yocto	y

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	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バトン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	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	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
ステルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ₀ =(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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.185 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー)

