

ガラスの溶解に関するデータベースの改良

Improvement of Database on Glass Dissolution

林 真紀* 笹本 広 吉川 英樹

Maki HAYASHI*, Hiroshi SASAMOTO and Hideki YOSHIKAWA

地層処分研究開発部門

核種移行研究グループ

Radionuclide Migration Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

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

ガラスの溶解に関するデータベースの改良

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

林 真紀^{*1}, 笹本 広, 吉川 英樹

(2008年1月18日受理)

地層処分システムにおいて、ガラス固化体は放射性核種の放出を防ぐ第一障壁として長期にわたり核種を保持する性能が求められ、その性能評価技術の高度化は地層処分システム全体の安全評価の信頼性向上につながる。このためには、溶解/変質メカニズムの科学的理解をさらに深める現象論的研究、およびその成果に基づく堅固な溶解/変質モデルの構築が不可欠である。ガラスの溶解挙動に関する情報を集約したガラスの溶解に関するデータベース（以下、「ガラスデータベース」という）は、これらの研究を支援するためのツールの一つとして開発を進めている。

ここでは、以前作成したプロトタイプของガラスデータベースの改良点について報告する。また、ガラス浸出モデルの信頼性評価の観点からデータベース利用例の検討を行ったので、その結果についても報告する。

Improvement of Database on Glass Dissolution

Maki HAYASHI*1, Hiroshi SASAMOTO and Hideki YOSHIKAWA

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

(Received January 18, 2008)

In geological disposal system, high-level radioactive waste (HLW) glass is expected to retain radionuclide for the long term as the first barrier to prevent radionuclide release. The advancement of its performance assessment technology leads to the reliability improvement of the safety assessment of entire geological disposal system. For this purpose, phenomenological studies for improvement of scientific understanding of dissolution/alteration mechanisms, and development of robust dissolution/alteration model based on the study outcomes are indispensable. The database on glass dissolution has been developed for supporting these studies.

This report describes improvement of the prototype glass database. Also, this report gives an example of the application of the database for reliability assessment of glass dissolution model.

Keywords : Glass, Database, Dissolution Rate, High-level Radioactive Waste

*1: NESI

目 次

1. はじめに	1
2. ガラスデータベースの改良	1
2.1 ガラスデータベースの概要	1
2.2 データ検索機能の拡張.....	2
2.3 グラフ作成機能の拡張.....	3
3. ガラスデータベース利用例の検討	6
4. おわりに	7
謝辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction.....	1
2. Improvement of the Glass Database	1
2.1 Outline of the Glass Database	1
2.2 Extension of data search function.....	2
2.3 Extension of graph making function	3
3. Consideration of use of the Glass Database	6
4. Summary	7
Acknowledgment.....	8
References	8

図 目 次

Fig.1	データ検索機能の拡張（検索画面）	10
Fig.2	データ検索機能の拡張（成分選択画面）	10
Fig.3	データ検索機能の拡張（ガラス組成選択画面）	11
Fig.4	データ検索機能の拡張（ガラス選択画面）	11
Fig.5	データ検索機能の拡張（試験法選択画面）	12
Fig.6	データ検索機能の拡張（溶液選択画面）	12
Fig.7	グラフ作成機能の拡張（グラフ作成画面）	13
Fig.8	グラフ作成機能の拡張（NLR_Duration グラフ例）	14
Fig.9	グラフ作成機能の拡張（logNLR(cal)_pH グラフ例）	14
Fig.10	グラフ作成機能の拡張（NLR(cal)_C _{Si} グラフ例） （グラフ作成に必要なデータがない場合）	15
Fig.11	グラフ作成機能の拡張（logNLR(cal)_(1/T) グラフ例）	15
Fig.12	グラフ作成機能の拡張（NLR(cal)_Duration グラフ例）	16
Fig.13	グラフ作成機能の拡張（[Ci]_SA/V・Duration グラフ例）	16
Fig.14	ガラスデータベースを用いた水和変質モデルの信頼性評価例 （時間の平方根と NML _i -NML _{Si} の相関図（a）i=B,（b）i=Na の場合）	17

表 目 次

Table 1	グラフ作成時の Excel ファイル_Graph シートの表示項目	4
---------	---	---

Figure Contents

Fig.1	Extension of data search function (Search Form)	10
Fig.2	Extension of data search function (Element Selection Form)	10
Fig.3	Extension of data search function (Glass Composition Selection Form)	11
Fig.4	Extension of data search function (Glass Name Selection Form)	11
Fig.5	Extension of data search function (Experimental Type Selection Form)	12
Fig.6	Extension of data search function (Solution Selection Form)	12
Fig.7	Extension of graph making function (Graph Making Form)	13
Fig.8	Extension of graph making function (Example of NLR_Duration Graph)	14
Fig.9	Extension of graph making function (Example of logNLR(cal)_pH Graph)	14
Fig.10	Extension of graph making function (Example of NLR(cal)_C _{Si} Graph (in case of no data after searching))	15
Fig.11	Extension of graph making function (Example of logNLR(cal)_(1/T) Graph)	15
Fig.12	Extension of graph making function (Example of NLR(cal)_Duration Graph)	16
Fig.13	Extension of graph making function (Example of [Ci] _{SA/V} · Duration Graph)	16
Fig.14	Example of reliability assessment of the hydration alteration model on the Glass database (Differences between NML values for soluble elements (i) and those for Si as a function of the square root of time, (a) case of i=B, (b) case of i=Na)	17

Table Contents

Table 1	Fields of Graph sheet on Excel when making graph	4
---------	--	---

1. はじめに

地層処分システムにおいて、ガラス固化体は放射性核種の放出を防ぐ第一障壁として長期にわたり核種を保持する性能が求められ、その性能評価技術の高度化は地層処分システム全体の安全評価の信頼性向上につながる。このためには、溶解/変質メカニズムの科学的理解をさらに深める現象論的研究、およびその成果に基づく堅固な溶解/変質モデルの構築が不可欠である。ガラスの溶解挙動に関する情報を集約したガラスの溶解に関するデータベース（以下、「ガラスデータベース」という）^{*1}は、これらの研究を支援するためのツールの一つとして開発を進めている。これまでに、国内外の放射性廃棄物ガラス固化体を対象に浸出試験に関する文献を調査し、ガラスからの規格化浸出量（Normalized elemental mass loss : NML）の値を試験条件（溶液条件、試験期間等）に関わる情報とともに整理し、プロトタイプデータベース（Microsoft Access で作成）として整備した¹⁾。

ここでは、それ以降に行ったガラスデータベースの改良（データ検索機能およびグラフ作成機能の拡張）について報告する。また、ガラス浸出モデルの信頼性評価の観点からデータベース利用例の検討を行ったので、その結果についても報告する。

2. ガラスデータベースの改良

平成 17 年度までにガラスデータベースのプロトタイプを整備した¹⁾。それ以降のガラスデータベースの改良として、データベースの利用環境向上の観点から、データ検索機能およびグラフ作成機能の拡張を行った。以下にその内容について示す。

2.1 ガラスデータベースの概要

データベース整備にあたっては、放射性廃棄物ガラス固化体の溶解挙動に関するデータを多く含む、米国材料学会（Material Research Society : MRS）が主催する放射性廃棄物管理の科学的基礎に関するシンポジウムの proceedings を対象とした文献調査から 863 件のデータを抽出し、登録した。また、国際的な原子力文献情報システムである International Nuclear Information System (INIS) を用い、1976 年から 2003 年までに公表された文献の検索を行い、3,695 件のデータを登録し、データベースを更新した。（データチェックを行い、登録データ数の総計は 4,558 件）。登録データとしては、ガラスの種類、試験方法、溶液に関する情報、試験条件および試験結果に関する情報、リファレンス情報である。試験条件に関する情報は、溶液に共存する成分、温度、試験期間、試験前後の溶液の pH および Eh、ガラスの表面積、ガラス表面積と溶液の体積比（SA/V）、試験雰囲気、流速、流速とガラス表面積の比であり、試験結果に関する情報は、重量減少量、浸出溶液中のシリカ濃度（C_{Si}）、規格化浸出量（NML）、規格化浸出速度（NLR）、反応速度定数、溶解反応の活性化エネルギー

*1 ガラスデータベース名を「ガラスの溶解速度データベース」から「ガラスの溶解に関するデータベース」に変更した。

である。

ガラスデータベースの機能は、データ検索機能、リファレンス参照機能、グラフ作成機能の3つに大別できる。

2.2 データ検索機能の拡張

これまでのデータ検索機能において、①特定の成分に対するデータを抽出したい場合、検索結果から Excel データや元文献に遡る必要がある、②ガラス名が不明な場合や、ガラス組成[wt%]を指定したい場合は、ガラス選択画面では不足が生じる、③ガラス選択画面、試験法選択画面および溶液選択画面において複数選択ができない、等の課題が挙げられたので、以下に示すデータ検索機能の拡張を行った。

① 成分選択機能の追加

検索項目に Element を追加し、B, Si, Al, Ce, Cs および Na の 6 元素での検索を可能とした。これにより必要な成分データのみを抽出することができ、成分毎のデータ比較も容易にした。

検索画面 (Fig.1) 上の「成分選択」ボタンをクリックすると、成分選択画面 (Fig.2) が表示される。ここで検索したい成分を選択して「選択」ボタンをクリックすると、選択した成分が検索画面に表示される。成分は複数選択可である。成分を変更する場合は、同様の操作を行う。ただし、検索できる成分は、成分選択画面に表示される成分のみとなり、検索画面での直接入力を行えない。

② ガラス組成選択機能の追加

検索項目に Glass Composition を追加し、ガラス組成[wt%]の範囲を指定した検索を可能とした。検索範囲を指定できるガラス組成は、 B_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Ce_2O_3 , CeO_2 , Cs_2O , Na_2O および Na_2O_3 である。

検索画面 (Fig.1) 上の「ガラス組成選択」ボタンをクリックすると、ガラス組成選択画面 (Fig.3) が表示される。ここで検索したいガラス組成範囲を入力して「選択」ボタンをクリックすると、検索画面にガラス組成の範囲が表示される。ガラス組成は複数指定が可能である。入力内容を変更する場合は、同様の操作を行う。ガラス組成の指定はガラス組成選択画面でのみ行い、検索画面での直接入力を行えない。

③ ガラス、試験法および溶液選択機能の変更

既存のガラス選択画面、試験法選択画面および溶液選択画面 (Fig.4, Fig.5 および Fig.6) において、選択項目 (表示項目) を最大 40 個とし、複数選択を可能とした。また、ガラスの種類は多数あるため、ガラスデータベース管理側において、ガラス選択画面に表示する選択項目を任意に指定することも可能とした。

2.3 グラフ作成機能の拡張

グラフ作成機能として、以下に示す 6 種類のグラフ作成機能を追加し、合計 10 種類のグラフ作成を可能とした (Fig.7)。グラフのタイトルにおいて、NLR(cal)は規格化浸出速度 (NLR) の計算値^{*2}を示す。

- ① NLR_Duration (規格化浸出速度と試験期間の相関図),
- ② logNLR(cal)_pH (規格化浸出速度 (対数) と pH の相関図),
- ③ NLR(cal)_C_{Si} (規格化浸出速度と浸出液中の Si 濃度の相関図),
- ④ logNLR(cal)_(1/T) (規格化浸出速度 (対数) と絶対温度の相関図),
- ⑤ NLR(cal)_Duration (規格化浸出速度と試験期間の相関図),
- ⑥ [C_i]_{SA/V} · Duration (浸出液中の i 元素濃度 (i : B, Si, Al, Ce, Cs および Na) と SA/V を考慮した試験期間の相関図)

グラフ作成機能は、検索結果をもとに Excel ファイルにデータを出力し、Graph シート上にグラフ作成を行う。Fig.8～Fig.13 に 6 種類のグラフ作成例を示す。グラフとともに Graph シートに表示される項目を Table 1 に示す。なお、Excel 上でグラフの変更や図表化等も可能である。

^{*2} NLR(cal) = NML / Duration より算出する。

文献に記載されている NLR 値と区別するため、NLR(cal)と表示する。

Table 1 グラフ作成時の Excel ファイル_Graph シートの表示項目

No.	グラフ種類	表示項目				項目数
1	logNLR_pH	Experiment ID	pH_initial	pH_final	7	
		logNLR (g/m ² /day) NLR_グラフ Element	NLR Element	logNLR_グラフ (g/m ² /day)		
2	NLR_Csi	Experiment ID	Csi (g/m ³)	NLR (g/m ² /day)	6	
		NLR Element	NLR_グラフ (g/m ² /day)	NLR_グラフ Element		
3	logNLR_(1/T)	Experiment ID	1/T	NLR Element	6	
		logNLR (g/m ² /day)	NLR_グラフ Element	logNLR_グラフ (g/m ² /day)		
4	NLR_Duration	Experiment ID	Duration (day)	NLR (g/m ² /day)	6	
		NLR Element	NLR_グラフ (g/m ² /day)	NLR_グラフ Element		
5	NML_Duration	Experiment ID	Duration (day)	NML_B (g/m ²)	14	
		NML_B_グラフ (g/m ²)	NML_Si (g/m ²)	NML_Si_グラフ (g/m ²)		
		NML_Al (g/m ²)	NML_Al_グラフ (g/m ²)	NML_Ce (g/m ²)		
		NML_Ce_グラフ (g/m ²)	NML_Cs (g/m ²)	NML_Cs_グラフ (g/m ²)		
		NML_Na (g/m ²)	NML_Na_グラフ (g/m ²)			
6	logNLR(cal)_pH	Experiment ID	pH_initial	pH_final	15	
		logNLR(cal)_B (g/m ² /day)	logNLR(cal)_B_グラフ (g/m ² /day)	logNLR(cal)_Si (g/m ² /day)		
		logNLR(cal)_Si_グラフ (g/m ² /day)	logNLR(cal)_AI (g/m ² /day)	logNLR(cal)_Al_グラフ (g/m ² /day)		
		logNLR(cal)_Ce (g/m ² /day)	logNLR(cal)_Ce_グラフ (g/m ² /day)	logNLR(cal)_Cs (g/m ² /day)		
		logNLR(cal)_Cs_グラフ (g/m ² /day)	logNLR(cal)_Na (g/m ² /day)	logNLR(cal)_Na_グラフ (g/m ² /day)		
		Experiment ID	Csi (g/m ³)	NLR(cal)_B(g/m ² /day)		
7	NLR(cal)_Csi	NLR(cal)_B_グラフ (g/m ² /day)	NLR(cal)_Si(g/m ² /day)	NLR(cal)_Si_グラフ (g/m ² /day)	14	
		NLR(cal)_Al(g/m ² /day)	NLR(cal)_Al_グラフ (g/m ² /day)	NLR(cal)_Ce(g/m ² /day)		
		NLR(cal)_Ce_グラフ (g/m ² /day)	NLR(cal)_Cs(g/m ² /day)	NLR(cal)_Cs_グラフ (g/m ² /day)		
		NLR(cal)_Na(g/m ² /day)	NLR(cal)_Na_グラフ (g/m ² /day)			

8	logNLR(cal)_ (1/T)	Experiment ID logNLR(cal)_B_グラフ (g/m ² /day) logNLR(cal)_Al (g/m ² /day) logNLR(cal)_Ce_グラフ (g/m ² /day) logNLR(cal)_Na (g/m ² /day)	1/T logNLR(cal)_Si (g/m ² /day) logNLR(cal)_Al_グラフ (g/m ² /day) logNLR(cal)_Cs (g/m ² /day) logNLR(cal)_Na_グラフ (g/m ² /day)	logNLR(cal)_B (g/m ² /day) logNLR(cal)_Si_グラフ (g/m ² /day) logNLR(cal)_Ce (g/m ² /day) logNLR(cal)_Cs_グラフ (g/m ² /day)	14
9	NLR(cal)_Duration	Experiment ID NLR(cal)_B_グラフ (g/m ² /day) NLR(cal)_Al(g/m ² /day) NLR(cal)_Ce_グラフ (g/m ² /day) NLR(cal)_Na(g/m ² /day)	Duration (day) NLR(cal)_Si(g/m ² /day) NLR(cal)_Al_グラフ (g/m ² /day) NLR(cal)_Cs(g/m ² /day) NLR(cal)_Na_グラフ (g/m ² /day)	NLR(cal)_B(g/m ² /day) NLR(cal)_Si_グラフ (g/m ² /day) NLR(cal)_Ce(g/m ² /day) NLR(cal)_Cs_グラフ (g/m ² /day)	14
10	[Ci]_SAV • Duration	Experiment ID C _B (g/m ³) C _{Si} _グラフ (g/m ³) C _{Ce} (g/m ³) C _{Cs} _グラフ (g/m ³) SAV • Duration (m ⁻¹ • day)	Duration (day) C _B _グラフ (g/m ³) C _{Al} (g/m ³) C _{Ce} _グラフ (g/m ³) C _{Na} (g/m ³)	SAV (m ² /m ³) C _{Si} (g/m ³) C _{Al} _グラフ (g/m ³) C _{Cs} (g/m ³) C _{Na} _グラフ (g/m ³)	16

① NLR_Duration

検索結果より, NLR および Duration を使用して散布図を作成する。縦軸に $\text{NLR}[\text{g}/\text{m}^2/\text{day}]$, 横軸に $\text{Duration}[\text{day}]$ を表示する。グラフ作成に必要なデータがない場合は, Excel ファイルにデータ出力のみとなる。グラフ作成例を Fig.8 に示す。

② $\log\text{NLR}(\text{cal})_{\text{pH}}$

検索結果より, $\log\text{NLR}(\text{cal})$ および pH を使用して散布図を作成する。縦軸に $\log\text{NLR}(\text{cal})[\text{g}/\text{m}^2/\text{day}]$, 横軸に pH を表示する。グラフ作成に必要なデータがない場合は, Excel ファイルにデータ出力のみとなる。グラフ作成例を Fig.9 に示す。

③ $\text{NLR}(\text{cal})_{\text{C}_{\text{Si}}}$

検索結果より, $\text{NLR}(\text{cal})$ および C_{Si} を使用して散布図を作成する。縦軸に $\text{NLR}(\text{cal})[\text{g}/\text{m}^2/\text{day}]$, 横軸に $\text{C}_{\text{Si}}[\text{g}/\text{m}^3]$ を表示する。グラフ作成に必要なデータがない場合は, Excel ファイルにデータ出力のみとなる (Fig.10)。

④ $\log\text{NLR}(\text{cal})_{(1/T)}$

検索結果より, $\log\text{NLR}(\text{cal})$ および $1/T$ を使用して散布図を作成する。縦軸に $\log\text{NLR}(\text{cal})[\text{g}/\text{m}^2/\text{day}]$, 横軸に $1/T[1/\text{K}]$ を表示する。グラフ作成に必要なデータがない場合は, Excel ファイルにデータ出力のみとなる。グラフ作成例を Fig.11 に示す。

⑤ $\text{NLR}(\text{cal})_{\text{Duration}}$

検索結果より, $\text{NLR}(\text{cal})$ および Duration を使用して散布図を作成する。縦軸に $\text{NLR}(\text{cal})[\text{g}/\text{m}^2/\text{day}]$, 横軸に $\text{Duration}[\text{day}]$ を表示する。グラフ作成に必要なデータがない場合は, Excel ファイルにデータ出力のみとなる。グラフ作成例を Fig.12 に示す。

⑥ $[\text{C}_i]_{\text{SA}/V \cdot \text{Duration}}$

検索結果より, $[\text{C}_i]$ および $\text{SA}/V \cdot \text{Duration}$ を使用して散布図を作成する。縦軸に $[\text{C}_i][\text{g}/\text{m}^3]$, 横軸に $\text{SA}/V \cdot \text{Duration}[\text{m}^{-1} \cdot \text{day}]$ を表示する。グラフ作成に必要なデータがない場合は, Excel ファイルにデータ出力のみとなる。グラフ作成例を Fig.13 に示す。

3. ガラスデータベース利用例の検討

2.で述べたようにデータ検索やグラフ作成機能に改良を加えることで, これまでよりもガラスデータベース利用にあたっての利便性が向上した。一方, ガラスデータベースを用いて, 放射性廃棄物処分研究で必要となるガラスの溶解および浸出挙動評価の観点での利用については, これまで検討していなかった。そこで今回, 利用例の検討を試みた。

ガラスの溶解モデルとしては, Grambow モデル²⁾に代表されるような一次溶解反応式が挙

げられるが、長期の浸出挙動を評価するうえではガラス表面に生じる変質層の影響を考慮する必要がある。最近では表面変質層の役割を考慮した、ガラスの長期溶解、変質メカニズムに関するモデルとして、ガラスマトリクスの水和変質モデル³⁾、保護的なゲル層による溶解反応の抑制モデル⁴⁾、二次鉱物生成による溶存ケイ酸消費モデル⁵⁾等が提案されているが、長期浸出挙動の評価にあたり、研究者間で合意の得られたモデルが確立されていないのが現状である⁶⁾。

ここでは、上述のガラス浸出モデルから水和変質モデルを対象として、水和変質モデルの信頼性評価の観点からデータベースの利用例を検討した。

水和変質モデルは、ガラスの長期溶解速度を律速する過程としてガラスマトリクスへの水分子の拡散が考えられている。Inagaki ら⁷⁾によれば、可溶性元素の浸出量とシリカの浸出量の差を時間の平方根に対してプロットすると、浸出量の差は時間の平方根にほぼ比例していることから、可溶性元素の長期溶解速度は拡散過程により支配されると述べられている。そこで、本検討でも同様の観点から、ガラスデータベース中のデータが利用できるかを検討した。

まず、 $SA/V \geq 1000$ 、溶液：deionized water または distilled water、成分：B, Na, Si でデータを選定した。抽出データから、ホウ素およびナトリウムの規格化浸出量（NML_B および NML_Na）とシリカの規格化浸出量（NML_Si）の差を算出して、時間の平方根の関数としてガラス毎にプロットしたものを Fig.14 に示す。R7T7⁸⁾、SRP⁹⁾および P0798⁷⁾ガラスについて回帰式および R^2 乗値を算出すると $R^2=0.91 \sim 0.95$ となり、NML_B および NML_Na と NML_Si の差は時間の平方根にほぼ比例して増加していることが分かる。

以上のことから、 $SA/V \geq 1000$ 、溶液：deionized water または distilled water、成分：B, Na, Si の条件において、R7T7, SRP および P0798 ガラスの NML_B および NML_Na と NML_Si の差は時間の平方根に比例して増加する傾向が確認された。このように、ガラスデータベースはガラスの長期溶解挙動に関わるモデルの妥当性検討の観点で有効に利用できると思われる。

4. おわりに

ガラスデータベースの利用環境向上の観点から、データ検索やグラフ作成機能の改良を行い、これまでよりもガラスデータベース利用にあたっての利便性が向上した。また、ガラスの長期溶解挙動に関わるモデルの妥当性検討の観点でガラスデータベースを有効に活用できる可能性があることを例示した。

今後は、現状のガラスデータベースには含まれていないが、ガラスの溶解挙動評価において必要と考えられる情報として、表面変質層に関わる情報（変質生成物、厚さ等）、ランタニドおよびアクチニドといった難溶性元素に関する情報、ベントナイト共存系等の複合系での試験データの整備等を考慮してデータ拡充を進めていく予定である。また、引き続きガラスデータベースの利用環境向上についても検討していく予定である。

謝辞

ガラスデータベースの改良において、地層処分研究開発部門 油井三和博士、河村和廣氏には、データベースの改良や開発方針についての助言を頂きました。また、本報告書の作成において、核種移行研究グループの三ツ井誠一郎氏にご協力頂きました。これらの方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 林真紀, 佐竹憲治, 吉川英樹, 油井三和 : “ガラスの溶解速度データベースの構築”, JNC TN8400 2005-008 (2005).
- 2) B.Grambow : “Nuclear Waste Glass Dissolution : Mechanism, Model and Application.”, Technical Report-JSS Project Phase IV 87-02 (1987).
- 3) S.Mitsui, R.Aoki : “Effect of a siliceous additive on aqueous alteration of waste glass with engineered barrier materials”, Journal of Nuclear Materials, 298, p.184-191 (2001).
- 4) E.Vernaz, S.Gin, C.Jegou, I.Ribet : “Present understanding of R7T7 glass alteration kinetics and their impact on long-term behavior modeling”, Journal of Nuclear Materials, 298, p.27-36 (2001).
- 5) Denis M.Strachan : “Glass dissolution: testing and modeling for long-term behavior”, Journal of Nuclear Materials, 298, p.69-77 (2001).
- 6) 稲垣八穂広, 三ツ井誠一郎, 牧野仁史, 石黒勝彦, 亀井玄人, 河村和廣, 前田敏克, 上野健一, 馬場恒孝, 油井三和 : “高レベルガラス固化体の性能評価に関する研究－現状と信頼性向上にむけて－”, 原子力バックエンド研究, 10, 1-2, p.69-83 (2004).
- 7) Y.Inagaki, H.Furuya, K.Idemitsu, S.Yonezawa : “Corrosion behavior of a powdered simulated nuclear waste glass: A corrosion model including diffusion process”, Journal of Nuclear Materials, 208, p.27-34 (1994).
- 8) Y.Inagaki, A.Sakai, H.Furuya, K.Idemitsu, T.Arima : “EFFECTS OF REDOX CONDITIONS OF WATER ON Pu AND Cm LEACHING FROM WASTE GLASS”,
- 9) Gregory T.Chandler, George G.Wicks, Richard M.Wallace : “Effects of SA/V and Saturation on the Chemical Durability of SRP Waste Glass”, Advances in Ceramics, 20, p.455-463 (1986).
- 10) Inga-Kari Bjorner, H.Christensen, H.P Hermansson, M Tsukamoto, L Werme : “CORROSION OF RADIOACTIVE, CRUSHED WASTE GLASS”, Mat.Res.Soc.Symp.Proc., 127, p.113-120 (1989).
- 11) Shi-Ben Xing, Andrew C.Buechele, Ian L.Pegg : “EFFECT OF SURFACE LAYERS ON THE DISSOLUTION OF NUCLEAR WASTE GLASSES”, Mat.Res.Soc.Symp.Proc., 333, p.541-548 (1994).

- 12) P.Van Iseghem, W.Timmermans, R.De Batist : “CORROSION BEHAVIOUR OF TRUW
BASE AND REFERENCE GLASSES”, Mat.Res.Soc.Symp.Proc., 26, p.527-534 (1984).

ガラスの溶解に関するD.B.(検索画面)

Glass Name:

Glass Composition: wt%

Experimental Type:

Solution:

Element:

Temperature: ~ °C

pH: initial ~
 final ~

Eh: initial ~ mV
 final ~ mV

SA/V: m²/m³

Duration: ~ day

Reference: Author ,
 Journal

Fig.1 データ検索機能の拡張 (検索画面)

ガラスの溶解に関するD.B.(成分選択画面)

Element

B Si Al

Ce Cs Na

Fig.2 データ検索機能の拡張 (成分選択画面)

ガラスの溶解に関するD.B.(ガラス組成選択画面)

Glass Composition

B₂O₃: ~ wt%
 SiO₂: ~ wt%
 Al₂O₃: ~ wt%
 Ce₂O₃: ~ wt%
 CeO₂: ~ wt%
 Cs₂O: ~ wt%
 Na₂O: ~ wt%
 Na₂O₃: ~ wt%

Fig.3 データ検索機能の拡張 (ガラス組成選択画面)

ガラスの溶解に関するD.B.(ガラス選択画面)

Glass Name

<input type="checkbox"/> SRL165	<input type="checkbox"/> R7T7	<input type="checkbox"/> JSS-A
<input type="checkbox"/> ABS-39	<input type="checkbox"/> ABS-41	<input type="checkbox"/> 76-68 glass
<input type="checkbox"/> SRL131-3A	<input type="checkbox"/> SRL21	<input type="checkbox"/> SAN60
<input type="checkbox"/> SM58	<input type="checkbox"/> UK209	<input type="checkbox"/> C31-3EC
<input type="checkbox"/> SON58	<input type="checkbox"/> SON64	<input type="checkbox"/> P0545
<input type="checkbox"/> WG119	<input type="checkbox"/> WG123	<input type="checkbox"/> SON68 18 17 LIC2A2Z1
<input type="checkbox"/> P0500	<input type="checkbox"/> ATM-8	<input type="checkbox"/> DWPF
<input type="checkbox"/> SM513	<input type="checkbox"/> SM527	<input type="checkbox"/> borosilicate glass
<input type="checkbox"/> high-silica glass	<input type="checkbox"/> ABS-118	<input type="checkbox"/> fully radioactive waste glass 1
<input type="checkbox"/> fully radioactive waste glass 2	<input type="checkbox"/> SRL131	<input type="checkbox"/> HLLW glass
<input type="checkbox"/> SON68	<input type="checkbox"/> SG7-10 PHWR	<input type="checkbox"/> T7
<input type="checkbox"/> Magnox	<input type="checkbox"/> PWR	<input type="checkbox"/> ARM-1
<input type="checkbox"/> EA	<input type="checkbox"/> simplest glass	<input type="checkbox"/> KL 30
<input type="checkbox"/> KL 40		

Fig.4 データ検索機能の拡張 (ガラス選択画面)

ガラスの溶解に関するD.B.(試験法選択画面)

Experimental Type

circulation flow dynamic flow test

flow through high dilution test HP40 test

ISO MCC-1 MCC-2

MCC-3 MCC-4 multicomponent system test

PCT pulsed flow test single pass flow through test

soxhlet static TAV test

ALL CHECK ON ALL CHECK OFF

選択 戻る

Fig.5 データ検索機能の拡張（試験法選択画面）

ガラスの溶解に関するD.B.(溶液選択画面)

Solution

Allard water basalt water bentonite saturated water

bicarbonate groundwater brine solution brine water

buffer carbonate water cement water

chemical solution clay water clay/SIC solution

clay-water mixture deionized water demineralized water

diabase water dilute buffers distilled water

double distilled water EJ-13 water fresh water

granite water groundwater H2O

H2O2 H2SO4 HCl

HNO3 industrial water J-13 well-water

NaCl solution NaOH PBBI brine

pure water purity water Q-brine

Q-solution SCSSS sea water

shale water

ALL CHECK ON ALL CHECK OFF

選択 戻る

Fig.6 データ検索機能の拡張（溶液選択画面）



Fig.7 グラフ作成機能の拡張 (グラフ作成画面)

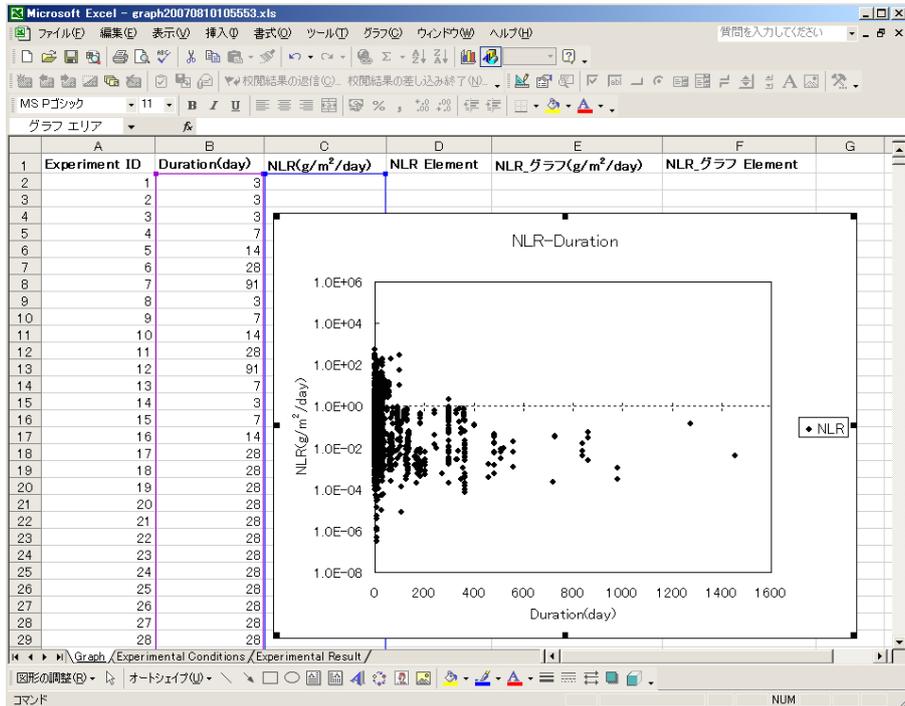


Fig.8 グラフ作成機能の拡張 (NLR_Duration グラフ例)

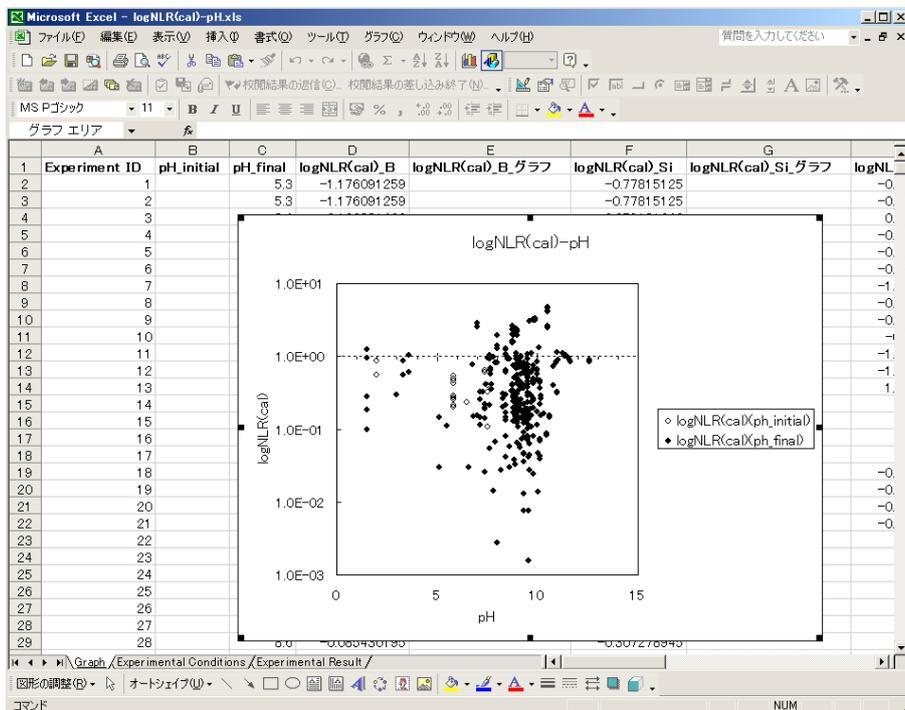


Fig.9 グラフ作成機能の拡張 (logNLR(cal)_pH グラフ例)

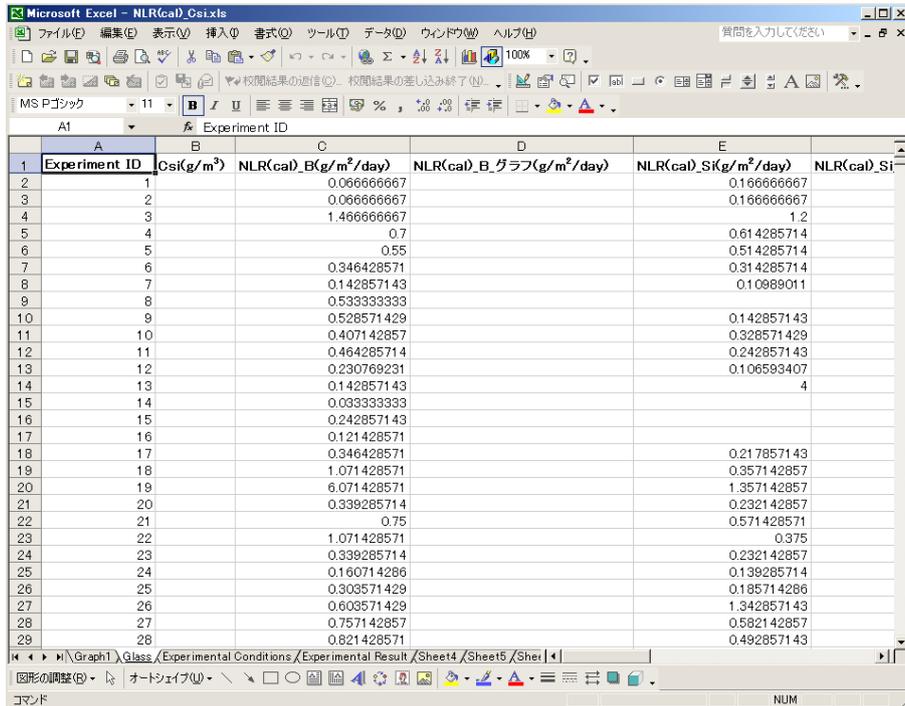


Fig.10 グラフ作成機能の拡張 (NLR(cal)_Cs₁₃₇ グラフ例)
(グラフ作成に必要なデータがない場合)

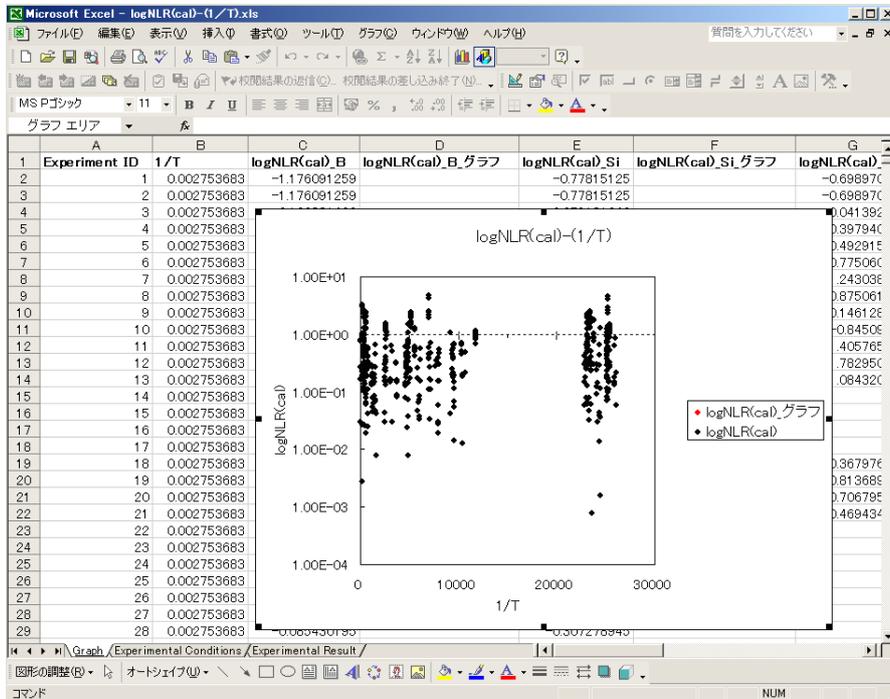


Fig.11 グラフ作成機能の拡張 (logNLR(cal)_(1/T) グラフ例)

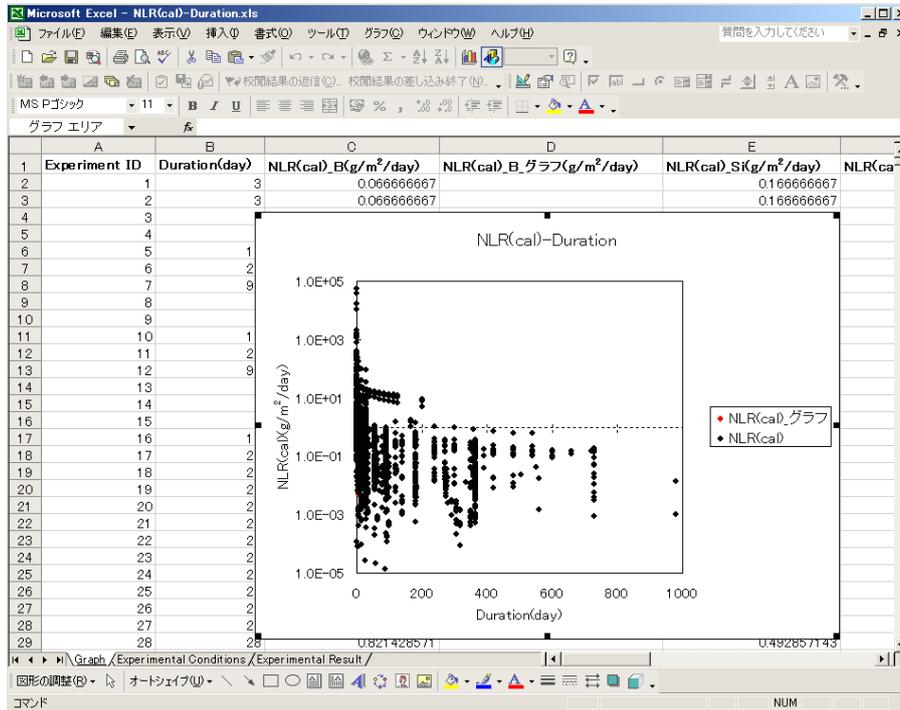


Fig.12 グラフ作成機能の拡張 (NLR(cal)_Duration グラフ例)

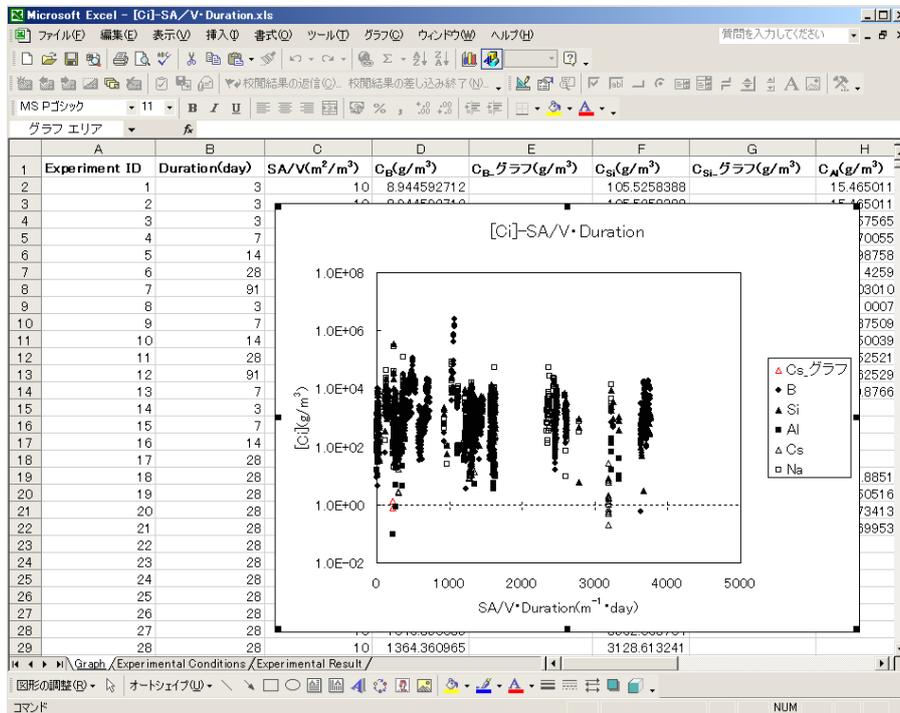
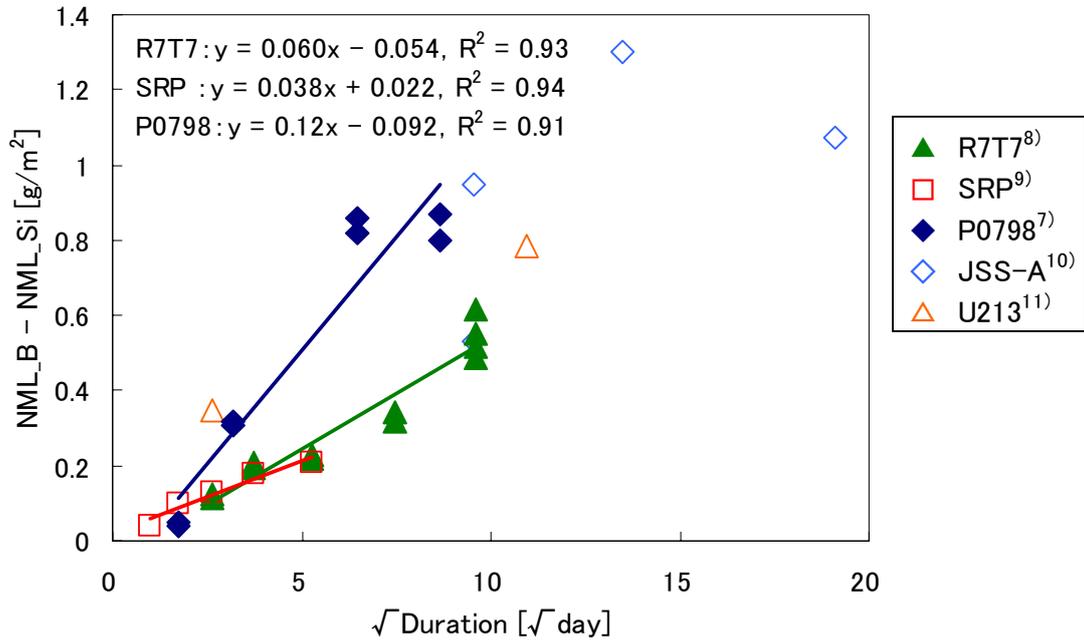
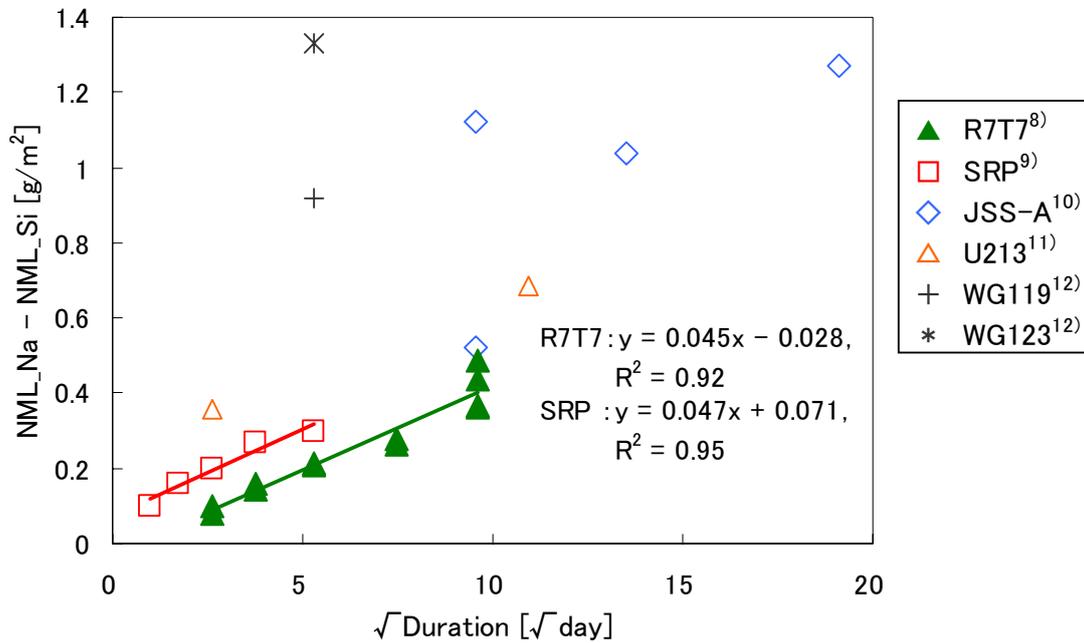


Fig.13 グラフ作成機能の拡張 ([Ci]_SA/V・Duration グラフ例)



(a)



(b)

Fig.14 ガラスデータベースを用いた水和変質モデルの信頼性評価例
 (時間の平方根と $NML_i - NML_{Si}$ の相関図 (a) $i=B$, (b) $i=Na$ の場合)

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
光の強度	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
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ル	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	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	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	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	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	1m/m ²	m ² ・m ⁻³ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (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に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
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m 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 ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻² ・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・K)	m ² ・s ⁻² ・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 ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・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 ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・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 ² ・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 ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・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	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ 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	1ua=1.49597870691(30)×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		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バイン	b	1b=100fm 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
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =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
エルステッド	Oe	1 Oe ≙(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位系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=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	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
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

