

中性子照射試験用セラミックスガスセンサーの 試作試験

Preliminary Fabrication Test of Ceramic Gas Sensor for
Neutron Irradiation Tests

北岸 茂 井上 修一 齋藤 隆 近江 正男
土谷 邦彦

Shigeru KITAGISHI, Shuichi INOUE, Takashi SAITO, Masao OHMI
and Kunihiko TSUCHIYA

大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

February 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Testing

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, 2010

中性子照射試験用セラミックsgasセンサーの試作試験

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

北岸 茂、井上 修一、齋藤 隆、近江 正男、土谷 邦彦

(2009 年 12 月 22 日 受理)

材料の中性子照射試験において、照射中の環境を把握することは必要不可欠である。特に、軽水炉の水環境等を模擬した中性子照射試験では、酸化性の化学種である酸素や過酸化水素が水の放射線分解により生成することから、材料の腐食に影響すると考えられている。このため、照射試料の腐食機構を把握する上では、酸素や過酸化水素の濃度をその場測定することが要求されている。一方、JMTR で用いる照射キャプセルの外径は最大でφ65mmと限られているため、小型でかつ高精度なセンサーを開発する必要がある。このため、酸素イオン導電体である安定化ジルコニア（YSZ）と白金を一体化させたセラミックsgasセンサーの開発を進めている。

本報は、放電プラズマ焼結（SPS）法によるガスセンサー素子の試作試験を行い、炉外における基本性能結果について記載している。

Preliminary Fabrication Test of Ceramic Gas Sensor
for Neutron Irradiation Tests

Shigeru KITAGISHI, Shuichi INOUE, Takashi SAITO,
Masao OHMI and Kunihiro TSUCHIYA

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

(Received December 22, 2009)

It is important for neutron irradiation tests of materials and fuels to clarify the irradiation environment. Especially, the oxygen and hydrogen peroxide concentrations are required to measure for the analysis of corrosion mechanism of the structure materials in the light-Water Reactor (LWR) conditions. On the other hand, it is necessary to develop the small and high-accuracy sensor because the outer diameter of the irradiation capsules used in JMTR is limited with $\phi 65\text{mm}$ at a maximum. Thus, the small ceramic gas sensor combined stabilized-zirconia (YSZ) as oxygen ion conductor and platinum as electrode has been developed.

In this report, the trial fabrication tests of the ceramic gas sensor carried out by the Spark Plasma Sintering (SPS) method and basic performance results of the sensor were described.

Keywords: Gas Sensor, Spark Plasma Sintering, Electromotive Force,
Neutron Irradiation, JMTR

目 次

1. はじめに	1
2. 製作性検討	1
2.1 ガスセンサー素子の構造	1
2.2 製作方法の選定	1
2.3 製作工程	2
2.4 焼結条件の選定	2
3. 基本性能試験	3
3.1 ガス中起電力測定試験	3
3.2 水中起電力測定試験	3
4. 結論	4
謝辞	4
参考文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Consideration of Fabrication	1
2.1 Construction of Gas Sensor Part.....	1
2.2 Selection of Fabrication Procedure	1
2.3 Fabrication Flow.....	2
2.4 Selection of Sintering Conditions.....	2
3. Basic Performance Experiments	3
3.1 Measurement of Electromotive Force in Gas Atmosphere	3
3.2 Measurement of Electromotive Force in Water	3
4. Conclusions	4
Acknowledgements	4
References	5

This is a blank page.

1. はじめに

材料の中性子照射試験において、照射中の環境を把握することは照射試料の材料特性を評価する上で必要不可欠である。特に、軽水炉の水環境等を模擬した中性子照射試験の実施にあたっては、水の放射線分解により酸素 (O_2) や過酸化水素 (H_2O_2) などの酸化性の化学物質が生成することから腐食環境に影響すると考えられている¹⁾。

腐食環境の指標として、pH、溶存酸素濃度、導電率及び腐食電位 (ECP: Electrochemical Corrosion Potential) があり、多くの計測機器は炉外に設置され、測定されている²⁾³⁾⁴⁾。特に、照射試料の腐食を把握するためには、照射試料の近傍に計測機器を設置し、腐食種濃度をその場測定する必要がある。しかしながら、高温高压水、高放射線場等の過酷な環境で測定できる計測機器はほとんどないのが現状である。

腐食電位センサー (ECP センサー) は、一部の BWR で採用されている。ECP センサーには、酸化物型 ECP センサーと Pt 型 ECP センサーの 2 種類がある。酸化物型 ECP センサーは酸素イオン導電性固体電解質を用いており、酸素濃度を測定するためのガスセンサーへの応用が期待される⁵⁾。しかしながら、これらの ECP センサーを JMTR の照射キャプセル (最大外径 ϕ 65mm) 内に設置する場合、専用の設置スペースが必要であることや近傍で測定可能な照射試料が限定される等の課題がある⁶⁾。

そこで、小型のセラミックスガスセンサー素子構造を検討し、ガスセンサー素子の製作性を調査するとともに、その試作試験を行った。本報告書は、ガスセンサー素子の試作試験及び性能確認試験結果についてまとめたものである。

2. 製作性検討

2.1 ガスセンサー素子の構造

ガスセンサー素子の概念図を図 1 に示す。ガスセンサー素子は、検出側電極、標準電極及び γ 線補償導線から構成された 3 芯型センサー素子構造を考案した。ガスセンサー素子の構成部材は、ペレット状の固体電解質 (以下「YSZ」という)、YSZ の検出側及び標準極側の表面に電極として白金 (Pt) メッシュ、リード線として白金 (Pt) ワイヤ、センサー内部に標準極として鉄-酸化鉄 ($Fe-Fe_2O_3$) 混合体及び標準極の閉込め、かつリード線の絶縁性を保つためのアルミナ絶縁体とした。

2.2 製作方法の選定

ガスセンサー素子の成形においては、「セラミックス-セラミックス」及び「セラミックス-金属」という組合せの接合もしくは焼結ができることが必要不可欠であることから、焼結方法を調査した。各種焼結方法の特徴を表 1 に示す。

焼結方法の選定においては、特性の異なったセラミックスを用いることから、熱衝撃等を小さくするために、低い焼結温度であること、かつ短い焼結時間であることが要求される。このため、表 1 より、放電プラズマ焼結（SPS：Spark Plasma Sintering）法が良好である。放電プラズマ焼結装置（以降、SPS 装置）の外観及び概念図を図 2 及び 3 に示す。この SPS 法の特徴は以下の通りである。

- ① 異種材料の接合もしくは焼結が可能。
- ② 操作が容易（温度、圧力などの条件が安定）。
- ③ 製作形状が限定。
- ④ 固定治具と試料が反応

2.3 製作工程

SPS 装置に設置するガスセンサー素子の組立概念図、構成部品及び SPS 加工フローを図 4、表 2 及び表 3 に示す。ガスセンサー素子の SPS 加工は、SPS 装置（シンテックス社製 SPS1050）を用いて行った。なお、今回の SPS 加工においては、粉末からの成形が困難であったため、YSZ、アルミナ絶縁体及び Fe-Fe₂O₃ 混合体は、予め焼結したものを使用した。

ガスセンサー素子の SPS 加工は、以下の 2 つのステップで行った。

- ① YSZ と Pt メッシュの焼結。
- ② ①の焼結体-アルミナ絶縁体の焼結。

また、各ステップにおいては、以下の手順で SPS 加工を行った。

- ① 構成部品をグラファイトダイに固定。
- ② SPS 装置に設置し、グラファイトパンチで焼結試料の上下を固定。
- ③ SPS 処理。
- ④ 試料取出し。

2.4 焼結条件の選定

（１） 試作試験

SPS 装置の制御装置の設定項目は、昇温速度、温度、荷重及び保持時間（設定した温度が到達後、それを保持する時間）である。まず、ガスセンサー素子を製作するために、予備試験により良好な焼結条件を求めた。良好な焼結条件の選定基準は、焼結体の外観状態及び金相観察から、焼結体の YSZ-Pt 接合状態を調べることにより決定した。

本試験は、昇温速度 100℃/min、保持時間 10 分及び真空雰囲気において、以下のパラメータで行った。

- ① 温度 : 900～1100℃
- ② 荷重 : 5～15kN

（２） 試験結果

試作試験の結果を図 5 に示す。代表的な焼結条件を以下に示す。

- ① 温度 : 1000℃
- ② 荷重 : 10kN

本条件における外観検査及び金相観察の結果を図 6、図 7 及び図 8 に示す。この結果、外観及び YSZ-Pt 接合部に異常が確認されず、良好な焼結体を製作することができた。以上より、性能確認試験においては、上記の焼結条件で試作したガスセンサー素子を使用した。

3. 基本性能試験

試作したガスセンサー素子の温度及び検出極側酸素濃度依存性がある電気的性能を確認する。性能確認試験においては、温度及び雰囲気が調整可能なガス中起電力測定試験を行った。また、本センサーが主に利用される予定である高温高圧水条件での水中起電力測定試験も行った。

3.1 ガス中起電力測定試験

(1) 試験方法

ガス中における起電力測定試験装置の概略図を図 9 に示す。試験装置は、ガスボンベ、真空ポンプ、真空容器（フランジ規格 ICF70 SUS304 製）、マントルヒーター及び起電力測定器（北斗電工製 HA151 ポテンショスタット）から構成されている。また、それらを接続ケーブル及び高圧配管（ステンレス製 1/4 インチ）で接続した。

本試験は、200℃～600℃において、100℃毎で昇温させたときの大気及び真空雰囲気におけるガスセンサー素子の起電力を測定した。

(2) 試験結果

ガス中における起電力測定結果を図 10 に示す。起電力は、昇温とともに増加する傾向であることが分かった。この結果から、ガスセンサー素子は、温度依存性がある起電力応答を示すことが確認された。また、大気から真空への雰囲気変化においては、起電力は減少していることが観測され、検出極側の雰囲気に依存した起電力応答を示すことが確認された。これにより、試作したガスセンサー素子が酸素ガス検出器としての性能を有することが確認された。

3.2 水中起電力測定試験

(1) 試験方法

水中における起電力測定試験装置の概略図を図 11 に示す。試験装置は、給水容器、高圧シリンジポンプ（ISCO 社製 500D）、耐圧容器（フランジ規格 ICF70 SUS304 製）、マントルヒーター及び起電力測定器（北斗電工製 HA151 ポテンショスタット）から構成されている。

水中における起電力測定の試験条件を表 4 に示す。まず、常温常圧水において、10、

100、500 及び 1000ppm の各過酸化水素水濃度について、ガスセンサー素子の起電力を測定した。次に、高温高压水中（200℃, 10MPa）において、10 及び 100ppm の各過酸化水素水濃度についてガスセンサー素子の起電力を測定した。

（２） 試験結果

常温常圧水中における起電力測定試験の結果を図 1 2 に示す。過酸化水素濃度を対数表示にした場合、起電力は、過酸化水素濃度に対して線形的に減少する傾向があることから、ネルンスト式に沿った起電力と過酸化水素濃度の関係が得られた。

高温高压水中（200℃, 10MPa）における起電力測定試験の結果を図 1 3 に示す。過酸化水素導入後、起電力が変化し、水に置換後、起電力は導入前の起電力に近い値まで戻った。この結果から、高温高压水中においても、過酸化水素濃度に対して応答することが確認された。さらに、過酸化水素濃度 100ppm においては、短時間で応答することが分かった。

4. 結 論

軽水炉の水環境等を模擬した条件で溶存酸素濃度及び過酸化水素濃度を高精度でかつ小型ガスセンサーの開発に着手した。3 芯型構造のセンサー素子を考案し、製作性の調査、試作試験及び炉外試験により、考案したガスセンサー素子は酸素ガス検出器としての性能を有する見通しを得た。

今後は、製作性の最適化、センサー本体構造の検討、高温高压水中における溶存酸素濃度に対する起電力校正試験及び耐久試験などを行い、JMTR の中性子照射試験で用いる計測機器として実証していく予定である。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、照射試験炉センター 河村 弘センター長及び石原正博副センター長、並びに原子炉施設管理部 技術管理課 那珂通裕課長代理から有意義なご助言を頂きました。以上、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山脇道夫, 他, 「BWR 炉心シュラウド等の応力腐食割れに係わる最近の研究動向」, 原子力学会誌, 47, (6), (2005), pp385-397
- 2) 特開平 7-280794 号公報.
- 3) 特開平 9-159795 号公報.
- 4) 特開平 8-240562 号公報.
- 5) 井手広史, 他, 「IASCC 照射試験に係るキャプセルの製作 (3) -腐食電位計測用キャプセル-」, JAEA-Technology2008-013, (2008).
- 6) 山村博, 岩原弘育, 「材料開発における結晶格子欠陥とその応用」, アイピーシー, (2002), pp307-349.

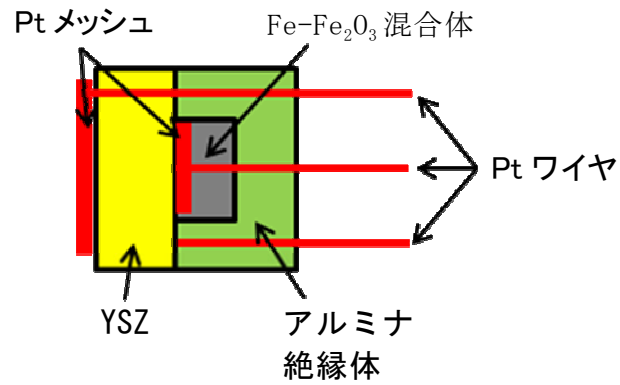


図 1 ガスセンサー素子の概念図

表 1 各種焼結方法の特徴

項目 \ 方法	放電プラズマ焼結 (SPS)	ホットプレス (HP)	熱間等方加圧 (HIP)
使用最高温度	1700°C	2000°C (炉の仕様による)	2000°C
荷重	負荷	負荷	負荷
焼結時間	短	長	長
消費電力	小	大	大



図 2 放電プラズマ焼結装置 (SPS装置) の外観写真

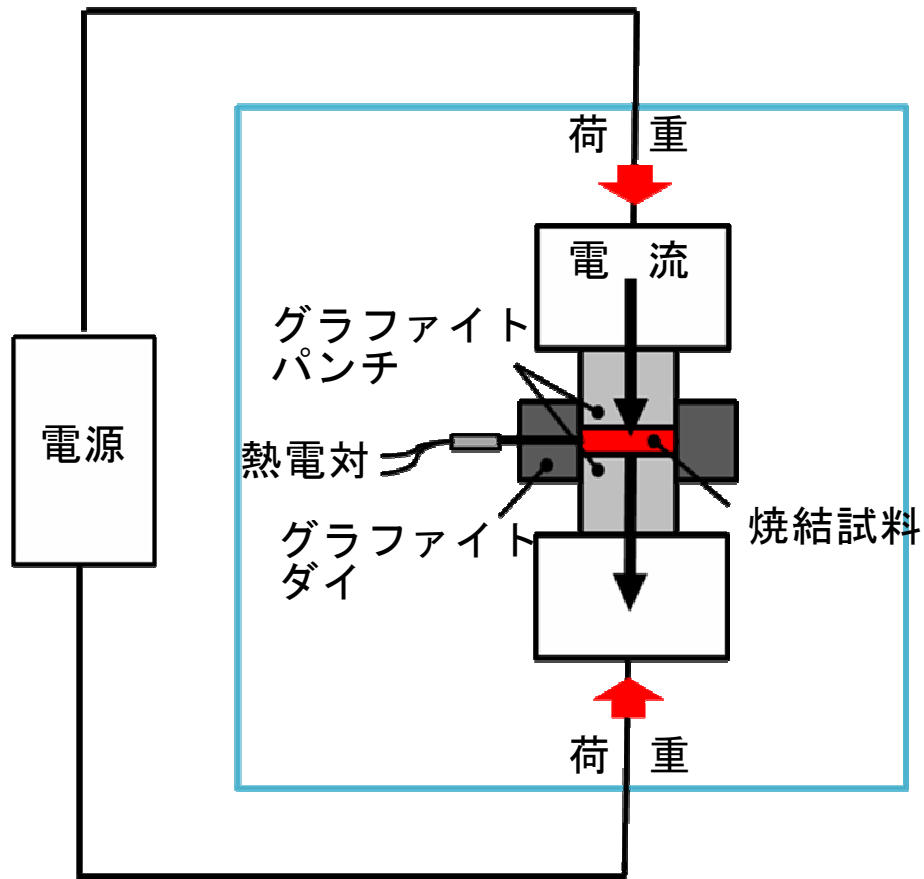
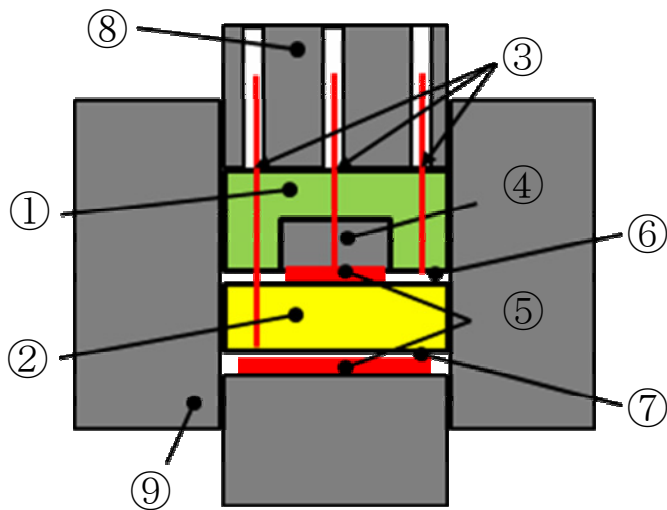


図3 SPS装置の概念図



番号	品名
①	アルミナ絶縁体
②	YSZ
③	Ptワイヤ
④	Fe-Fe ₂ O ₃ 混合体
⑤	Ptメッシュ
⑥	YSZ 粉末+アルミナ粉末
⑦	YSZ 粉末
⑧	グラファイトパンチ
⑨	グラファイトダイ

図4 SPS装置に設置する構成部品の組立概念図

表 2 ガスセンサー素子の構成部品

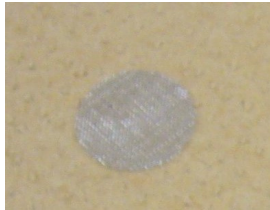
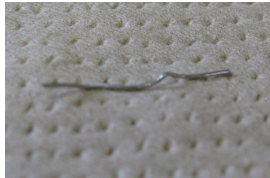
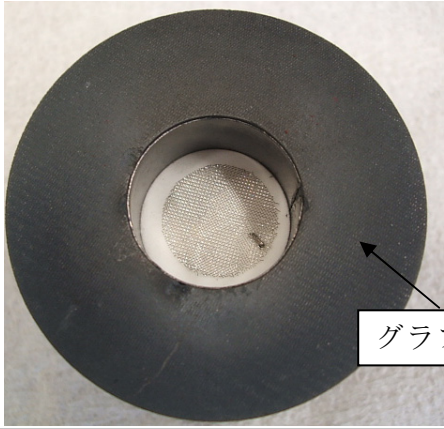
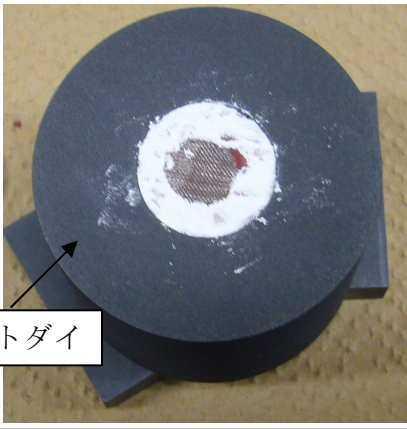
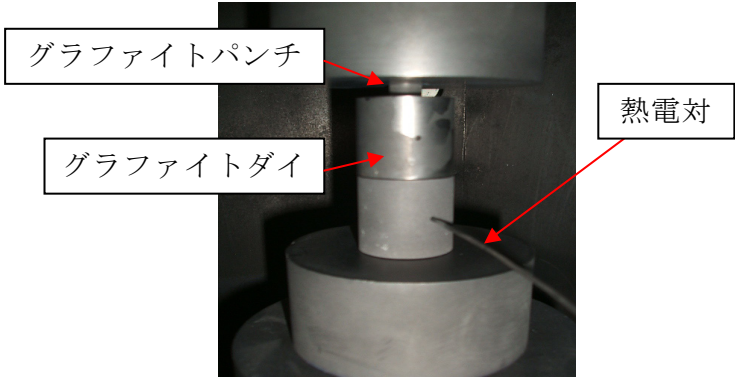
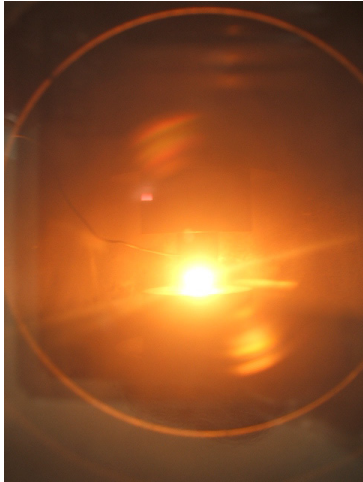
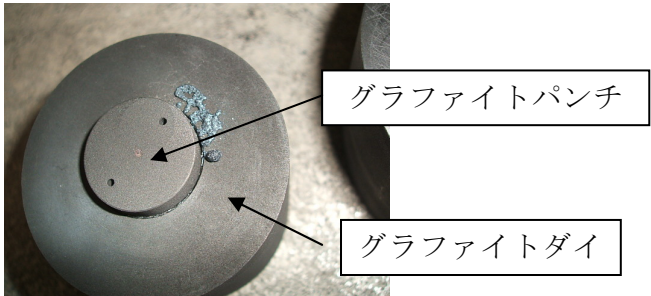
	品名	化学組成	外観写真
①	アルミナ絶縁体	$\text{Al}_2\text{O}_3 = 98.0\text{wt}\%$	
②	安定化ジルコニア (YSZ)	$\text{ZrO}_2 = 86.6\text{wt}\%$ $\text{Y}_2\text{O}_3 = 13.3\text{wt}\%$	
③	Pt メッシュ	Pt=99.95%	
④	Fe-Fe ₂ O ₃ 混合体	Fe:Fe ₂ O ₃ = 1:4(wt%)	
⑤	Pt ワイヤ	Pt=99.95%	

表 3 SPS加工フロー図

	①YSZとPtメッシュ焼結	②①成形体とアルミナ絶縁体焼結
部品の配置		
焼結試料 設置		
SPS処理		
焼結試料 取出し		

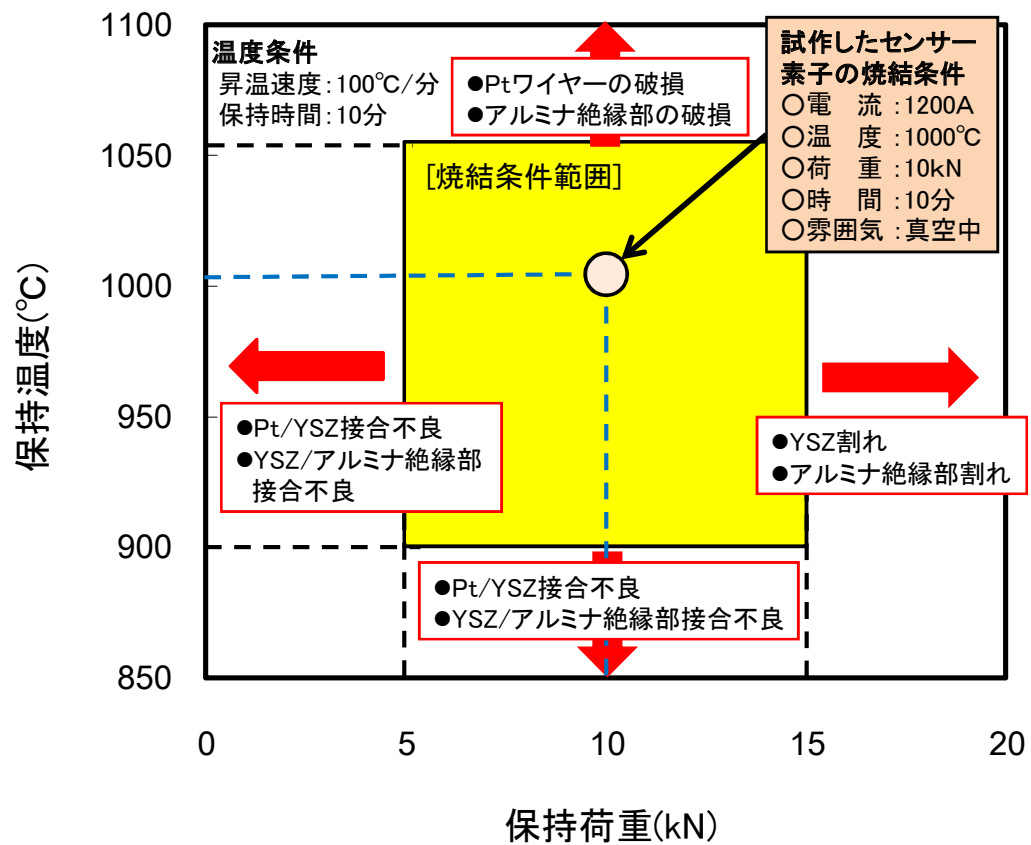


図5 SPS 焼結条件の選定における試作試験の結果



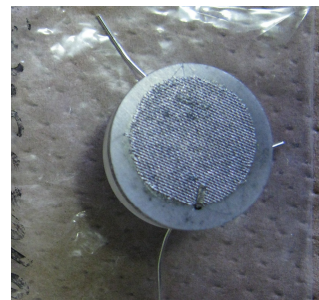
図6 YSZ-Ptメッシュ成形体



裏面図



側面図



表面図

図7 ガスセンサー素子試作体の外観写真

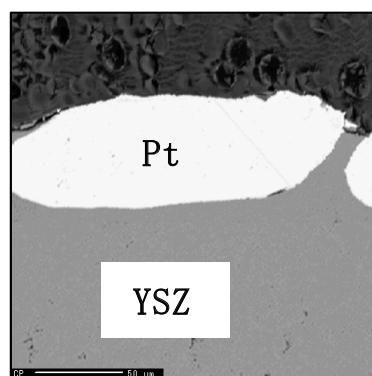
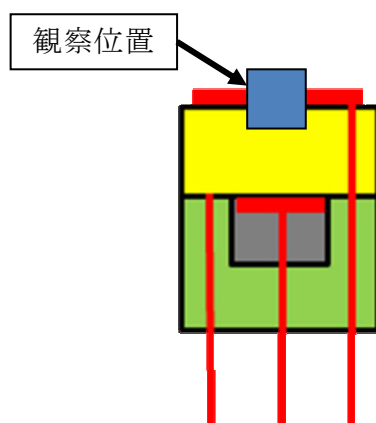


図8 YSZ-Ptメッシュ接合部の金相観察

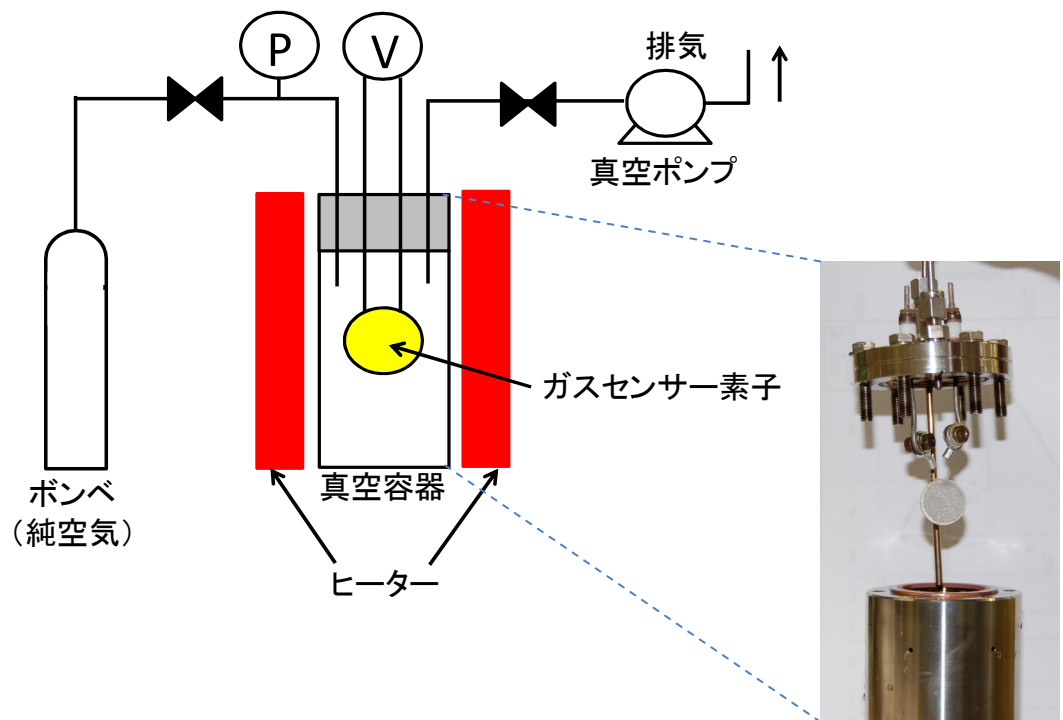


図9 ガス中における起電力測定試験装置の概略図

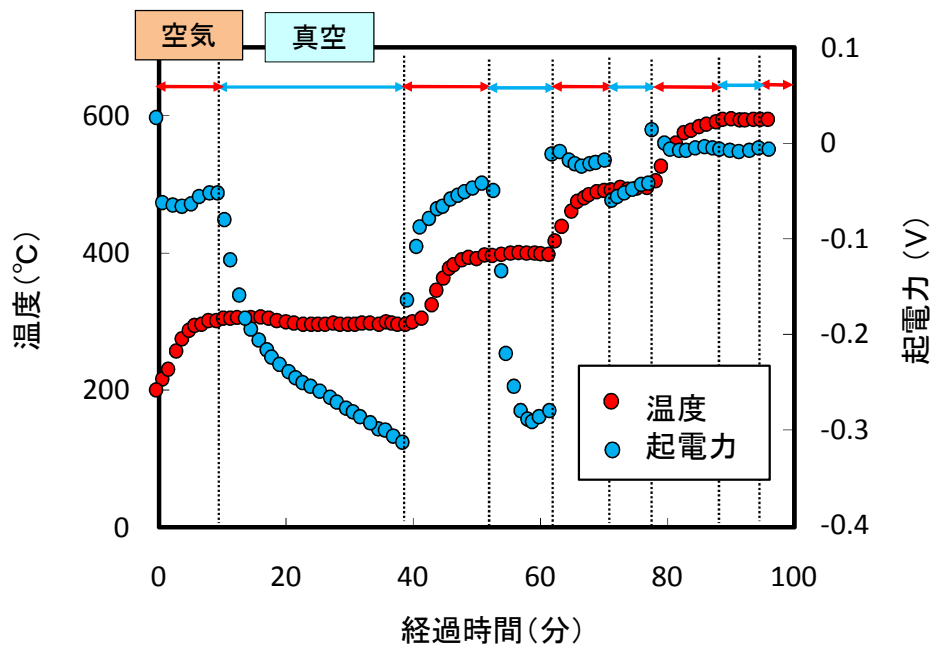


図10 空気-真空繰り返し試験の結果

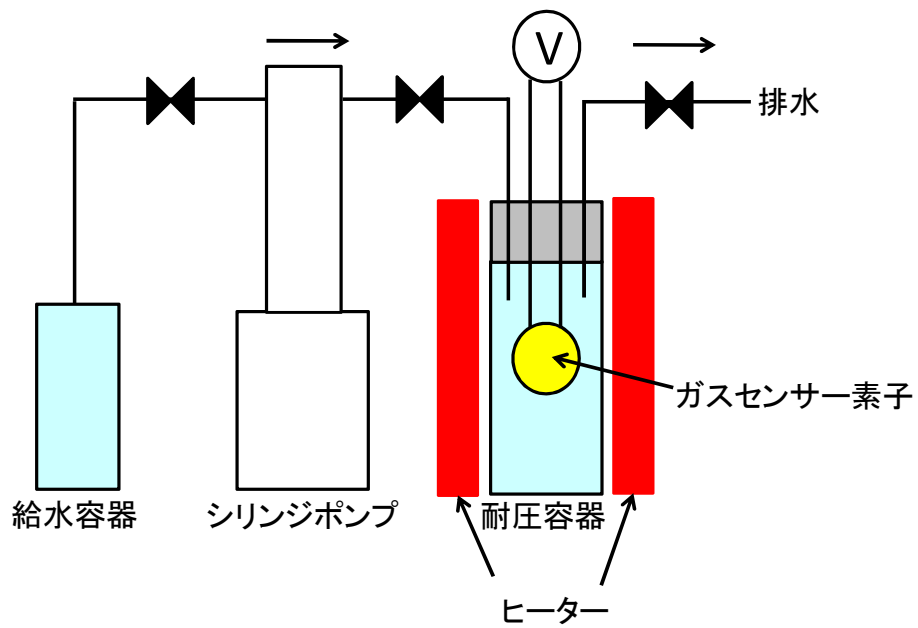


図 1 1 水中における起電力測定試験装置の概略図

表 4 水中起電力測定試験の試験条件

	試験①	試験②
温度(°C)	室温	200
圧力(MPa)	0.1	10
H ₂ O ₂ 濃度(ppm)	0, 10, 100, 500, 1000	0, 10, 100

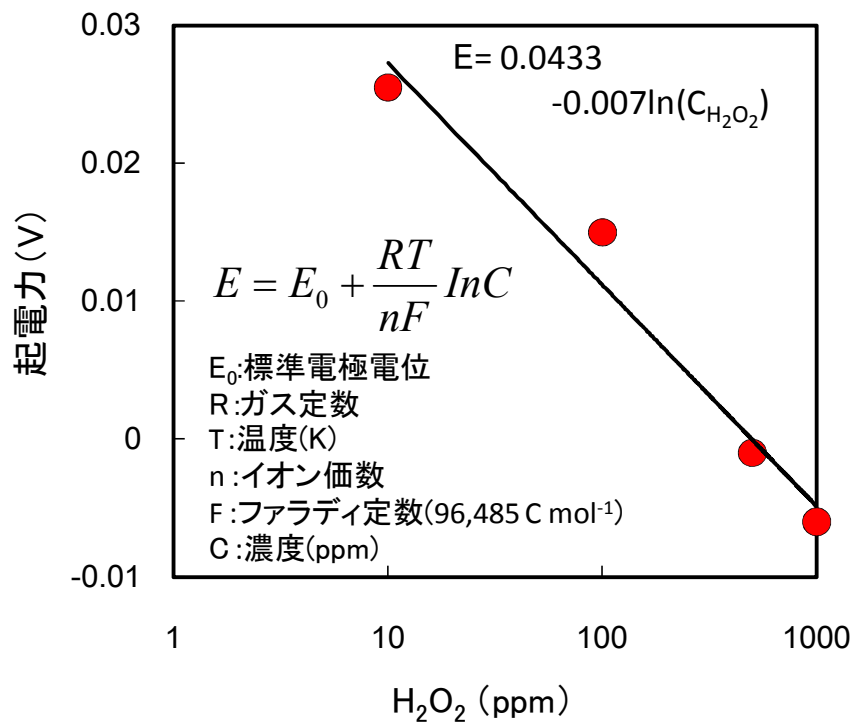
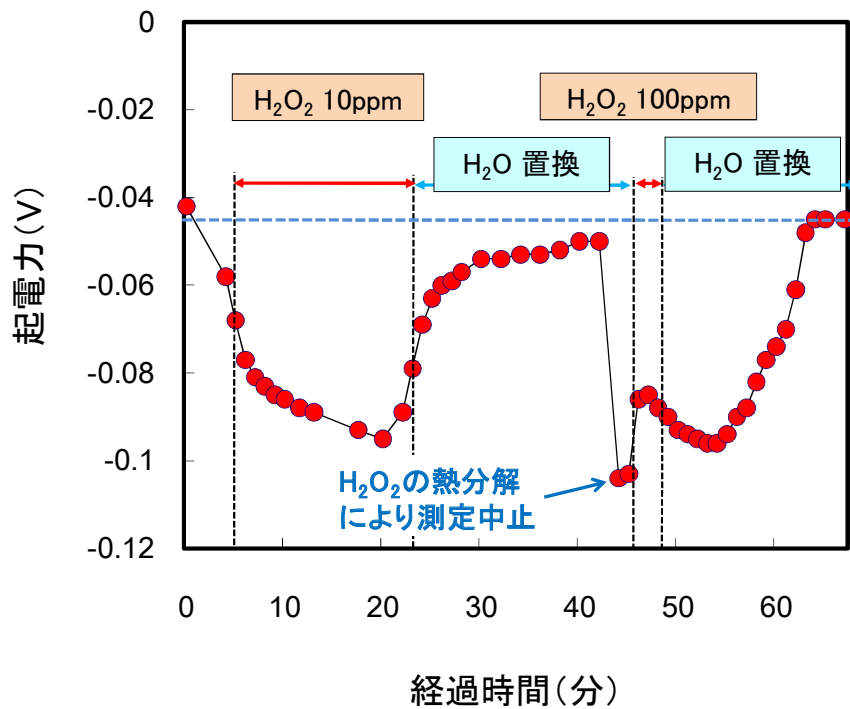


図 1 2 常温常圧における水中起電力測定試験の結果

図 1 3 $200^\circ\text{C} \times 10\text{MPa}$ 水中における水中起電力測定試験の結果

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	積	m ²
体積	立方メートル	積	m ³
速度	メートル毎秒	度	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	度	m/s ²
波数	毎メートル	数	m ⁻¹
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	密度	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	密度	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	積	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	密度	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	密度	A/m
量濃度 ^(a) 、濃度	モル毎立方メートル	濃度	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	濃度	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	度	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)		1
比誘磁率 ^(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) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²	
周期	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	m ⁻¹ kg s ⁻²	
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²	
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³	
電荷、電気量	クーロン	C		s A	
電位差 (電圧)、起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹	
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²	
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²	
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹	
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹	
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²	
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光強度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd	
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²	
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	m ² s ⁻²	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや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 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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	度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ト	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度、放射照度	度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エン트로ピー	度	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트로ピー	度	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	度	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	度	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	度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表面電荷	度	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電束密度、電気変率	度	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	度	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	度	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	度	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエン트로ピー、モル熱容量	度	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)	度	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	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	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	デ	シ
10 ²¹	ゼ	タ	Z	セ	ン
10 ¹⁸	エ	ク	E	ミ	リ
10 ¹⁵	ペ	タ	P	マイ	クロ
10 ¹²	テ	ラ	T	ナ	ノ
10 ⁹	ギ	ガ	G	ピ	コ
10 ⁶	メ	ガ	M	フェ	ト
10 ³	キ	ロ	k	ア	ト
10 ²	ヘ	ク	h	ゼ	ブ
10 ¹	デ	カ	da	ヨ	ク

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	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=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	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻¹² cm ² =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
エール	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 ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ² =10 ⁴ cd m ²
フォトル	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3 元素の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=1cGy=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	f	1フェルミ=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	cal	1cal=4.1858J (「15℃」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

