

ジルコニア式酸素濃度測定とは。

酸素計の測定原理の基本①

「酸素(濃度)」を測定する

では、どんな酸素濃度計を選択したら良いでしょうか？

驚くほどに測定レンジが広く、とてつもなく高精度で、並外れた応答速度を持っていて、表示分解能も低く、物凄く多機能で、びっくりするほど不具合が発生しない、そのような素晴らしい酸素計であっても測定環境に適していなければ、正確で安全な酸素測定は実現できません。サンプリングシステムを完璧に仕上げ、モニタリング体制も万全に構築し、良い製品を導入しても、測定環境に適していない測定原理を用いている酸素計を取り付けてしまえば台無しです。

酸素測定に限ったことではありませんが、測定環境（アプリケーション要件）に適した測定器を選択することが、安全かつ正確な測定を実現することにとって重要です。

酸素計を選定するにあたり「測定原理」は、重要な選択項目の一つです。

今回は代表的な6つの酸素測定原理のうち、もっともポピュラーな「ジルコニア式酸素測定」について簡単に解説します。

酸素計の代表的な測定原理

- ① ジルコニア（濃淡電池）式
- ② 電気化学（ガルバニ電池）式
- ③ 磁気式
- ④ 光学式
- ⑤ レーザー分光式
- ⑥ 黄燐発光式

1. ジルコニアとは

ジルコニアとは、一般的にジルコニウムの酸化物である酸化ジルコニウム (ZrO_2)を指します。

純粋（酸化物無添加）なジルコニアは、高温からの冷却に対して弱くひび割れなど破損することがあります。

純粋なジルコニアに酸化物（酸化マグネシウム、酸化イットリウムなど）を添加することで機械的強度が増し、様々な産業部材として使用されます。

この酸化物を添付したジルコニアを安定化ジルコニアと呼び、燃料電池の部材、酸素センサー検知部、歯科治療材料、セラミックの刃物などに使用されています。



純粋なジルコニアに 4%~15%の酸化物を添加したものをキュービックジルコニア(立方晶ジルコニア)と呼び、模造ダイヤモンド（人工ダイヤモンド）として広く使用されています。また、モアサナイトを使用した人工ダイヤモンドは、キュービックジルコニアとは結晶構造が異なるため「ファイヤ」や「硬度」が異なります。

2. ジルコニア式 酸素センサーとは

ジルコニア式酸素センサー（酸化ジルコニウム酸素センサー）は、酸素濃度%を測定するのではなく、ガスまたは混合ガスの酸素分圧を測定します。

酸化ジルコニウムセンサーは、固体電気化学セルの原理に基づいています。イットリア安定化酸化ジルコニウム層は、通常 $+600^{\circ}C \sim +700^{\circ}C$ に加熱されると酸素イオンが高濃度から低濃度に流れる固体電解質（イオン導電性固体）の性質を持ちます。イオンが位相間を移動すると、内外電極間に酸素濃度比による起電力が発生し、酸素濃度を決定します。電極間の酸素濃度の差が大きいほど、生成される電圧が高くなり、100%から 100 万分の 1 未満（ppm レベル）までの測定が可能になります。

ジルコニア式は、酸素イオンの特性を指して「濃淡電池式」とも呼ばれています。

酸化ジルコニウム (ZrO_2) 酸素センサーの特長

- 固定電解質
- 乾式
- 酸素イオンの淡から濃への移動を補助する

異なる酸素濃度のガスを流すことで酸素イオンに流れが生じ、イオン流が生じることで電流値に差が表れ、電流値を酸素濃度として測定しています。一般的にはサンプルガスは校正ガスより濃度が低いものを使用し、電流値（酸素分圧の比）を測定します。

酸化ジルコニウム酸素センサーは、高温下でのみ活性化する特性があり、高温下でないと使用できません。

酸化ジルコニウム酸素センサーは、そのままサンプルラインに暴露（取付け）するだけで測ることができるので、サンプリングシステムなどの専用の設備を必要としません。さらに、大気を基準として用いているので、リファレンスガス及び比較用に特別なガスを用意する必要もありません。

しかし、サンプルに可燃性物質が含まれている場合、酸素センサー自身を高温に保っているため燃焼反応を引き起こす危険性を含んでいます。サンプルライン上に酸素が含まれていたとしても、燃焼反応によって酸化ジルコニウムに含まれる酸素を消費してしまうため、可燃性ガスの測定には向いていません。

3. ジルコニア式酸素測定原理の背景

ジルコニア式酸素センサーの特長についてさっくりとご紹介したところで、酸素測定原理の物理学的背景についてお話ししたいと思います。

3-1. 酸素の分圧

分圧は、混合ガスを単一としたガス成分の圧力として定義されます。これは、単一のガス成分だけで全体積を占める場合の全圧に対応します。

3-2. ドルトンの法則

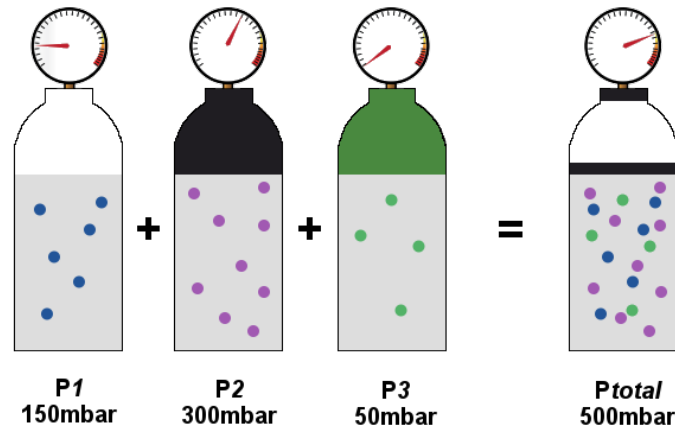
理想気体の混合ガスの全圧（P-total）は、その混合ガス中の個々の気体の分圧（Pi）の合計に等しくなります。

数式(1)
$$P_{total} = \sum_{i=1}^k P_i$$

式 1 から、“混合ガスの粒子の総数(ntotal)”に対する“個々のガス成分の粒子数(ni)”の比は、“混合ガスの全圧(Ptotal)”に対する“個々のガス成分の分圧(Pi)”の比に等しいことが導き出すことができます。

数式(2)
$$\frac{n_i}{n_{total}} = \frac{P_i}{P_{total}}$$

ni	ガス中の粒子数 i
ntotal	混合ガスの粒子の総数
pi	ガスの分圧 i
Ptotal	全圧



例 1 :

海面での大気圧（標準的な大気条件下）は、101.325kPa です。

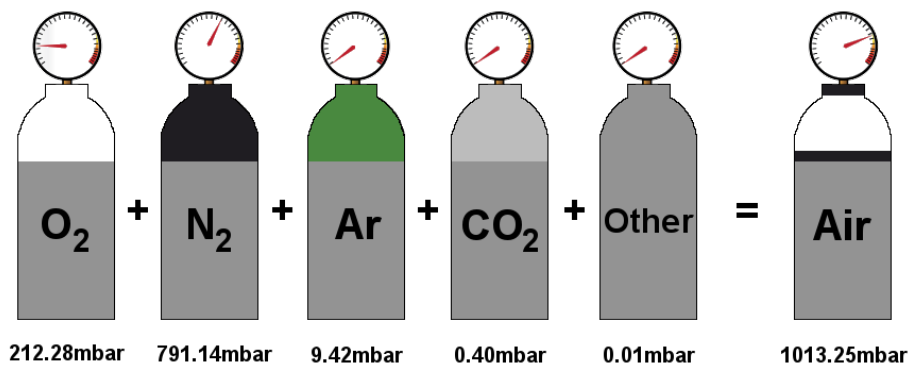
ここで、乾燥空気（大気）の主成分は、窒素（78.08%Vol）、酸素（20.95%Vol）、アルゴン（0.93%Vol）および二酸化炭素（0.040%Vol）です。この乾燥空気は理想気体として近似であるため、体積含有量（%）は粒子数（n）と等しくなります。

式 2 は、個々のガスの分圧（ P_i ）について解くことができ、次のようになります。

$$\text{数式(3)} \quad P_i = \frac{n_i}{n_{total}} \times P_{total}$$

この場合、酸素の分圧は次のようになります。

$$P_i = \frac{20.95\%}{100\%} \times 1013.25\text{mbar} = 212.28\text{mbar}$$



もちろん、この値は大気が乾燥している（湿度が 0%）場合にのみ関係します。大気中に水分が存在する場合、全圧の一部が水蒸気圧によって占められます。したがって、相対湿度と周囲温度を全気圧と同時に測定すると、酸素分圧（ppO2）をより正確に計算できます。



最初に、水分含有量を計算します。

$$\text{数式(4)} \quad WVP = \left(\frac{H_{Rel}}{100} \right) \times WVP_{max}$$

WVP 水蒸気圧 (mbar)

HRel 相対湿度 (%)

WVPmax 最大水蒸気圧 (mbar)

既知の周囲温度の場合、最大水蒸気圧 (WVPmax) は付録 A の表から参照します。最大水蒸気圧は、「露点温度」とも呼ばれます。暖かい空気はより多くの水蒸気を保持できるため、WVPmax が高くなります。その場合、酸素分圧(ppO₂)は次のようになります。

$$\text{数式(5)} \quad ppO_2 = (BP - WVP) \times \left(\frac{20.95}{100} \right)$$

ppO₂ 酸素分圧 (mbar)

BP 気圧 (mbar)

WVP 水蒸気圧 (mbar)

以下の例 2 は、湿度(水分)が酸素分圧を低下させ、酸素の体積含有量を低下させる効果を持つことを示しています。

例 2 :

一般的に気象観測所には以下の情報 (温度、湿度、大気圧) が記録され、得ることができます。

温度 22°C

湿度 32%

大気圧 986mbar

付録 A の表を参照すると、この時 WVP_{MAX}=26.43mbar です。

$$WVP = \left(\frac{32}{100} \right) \times 26.43 = 8.458mbar$$

その場合、酸素分圧は次のようになります。

$$ppO_2 = (986 - 8.458) \times \left(\frac{20.95}{100} \right) = 204.795mbar$$

酸素分圧と全気圧がわかったので、酸素の体積含有量を計算できます。

$$O_2\% = \left(\frac{204.8}{986}\right) \times 100 = 20.77\%$$

4. SST 社 ジルコニア式酸素計

本記事では、SST Senssing 社の二酸化ジルコニウム酸素センサー（ジルコニア式酸素センサー）を軸としてご説明します。

以下の点にご注意ください。

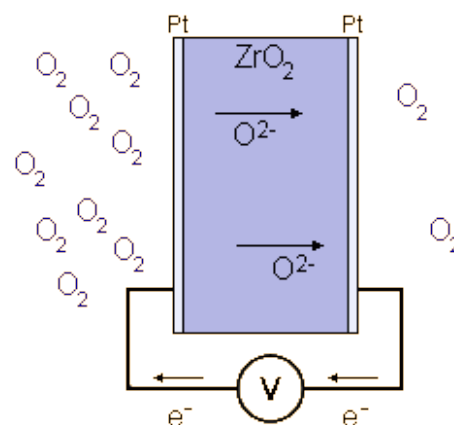
- ① SST 社のジルコニア式酸素センサーは「酸素濃度%」ではなく、「ガスまたは混合ガス中の酸素の分圧」を測定します。
- ② SST 社のジルコニア式酸素センサーはリファレンスガスを用意する必要がありません。

4-1. 酸化ジルコニウム (ZrO₂)

高温 (> 650° C) では、安定化された酸化ジルコニウム (ZrO₂) は2つのメカニズムを示します。

酸化ジルコニウムは、酸素分子を解離させてイオン化させる電解質の特性があります。円板状の酸化ジルコニウムには、ポーラス状の薄膜電極が塗布されており、一定の直流電流を流すことで大気中の酸素イオンを透過させます。ファラデーの電気分解の法則より各電極で発生した物質の量は、流れた電荷に比例するため以下の式が成り立ちます。

酸化ジルコニウムは電解質のようにふるまうため、もし異なる酸素分圧が存在した場合、ネルンストの式より電圧が発生します。この電圧は、異なる二つのイオン濃度の自然対数比と比例関係にあります。

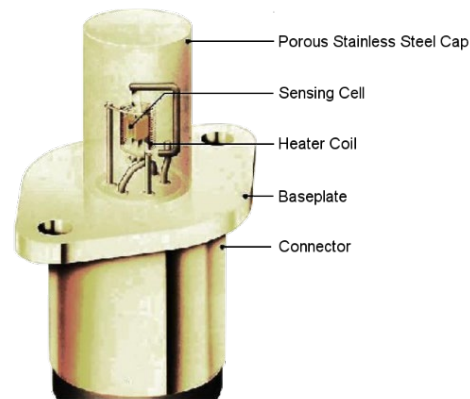
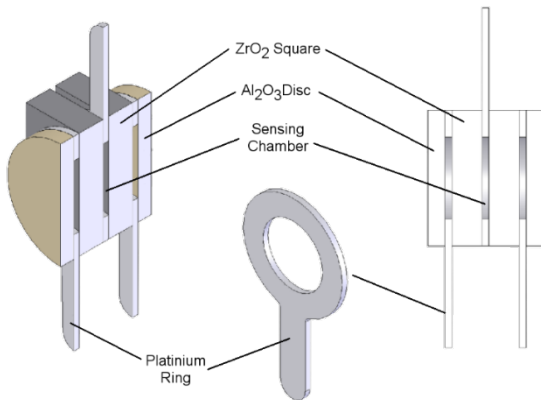


いずれかの法則は、さまざまな酸素濃度計に採用されているテクノロジーですが、SST 社ではその両方を活用しています。それにより密閉されたリファレンスガスの必要性がなくなり、幅広いアプリケーションに対応可能となりました。

4-2. センサーセルの構造

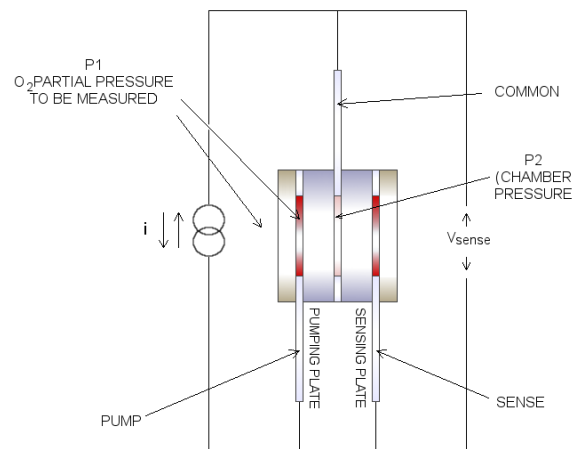
センサーセルは、薄膜の白金層が塗布された四角形の酸化ジルコニウム 2 枚から成り立っており、中心に白金電極があります。白金電極は、酸素が解離して酸素イオンが酸化ジルコニウムを出入り出来るよう触媒の役割をします。

上記のセンサーセルのコア部は、ハーメチックシールされてセンサーチャンバーとなります。酸化ジルコニウムの外側それぞれに白金リングが取り付けられ、中心の白金リングと対になるところでセンサーセルの電気接続口となります。



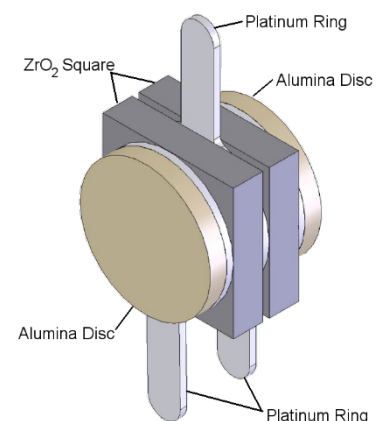
更にその外側に酸化アルミニウム (Al₂O₃) のディスクが取り付けられ、これが大気中のパーティクルや燃焼されなかったガスからセンサーコア部を守ります。

センサーセルの周りには、700°Cまで加熱出来るようヒーターコイルが配置されます。このセルとヒーターコイルの外周にポラス状のステンレス鋼のキャップが取り付けられて、更に大きなパーティクルやダスト等から内側を守ります。



4-3. ポンピング・プレート

最初の酸化ジルコニウムのプレートは、電気化学式の酸素ポンプの役割をします。ハーメチックシールされたチャンバー内を減圧・再加圧します。DC 電流の向きによって、酸素イオンが電極間を移動します。このポンピングによりチャンバー内の酸素濃度（酸素分圧）が変化します。このポンピング動作は、チャンバー内の酸素分圧が大気中の酸素分圧よりも低くなるよう制御されています。



4-4. センシング・プレート

650°C以上に加熱された環境では第二の酸化ジルコニウムにおける酸素分圧の違いがネルンスト電圧を発生させます。この電圧は、酸素分圧に対数比例した比率となります。チャンバー内の酸素分圧は、常に外界の酸素分圧より低いいため、SENSE-COM 間の電圧は、常にポジティブになります。

この電圧は、二つのリファレンス電圧（図 4-1 における V1 と V5）と比較測定され、いずれかのリファレンス電圧に到達すると逆電圧に転換します。酸素分圧 (ppO₂) が高いと、ポンプに逆電圧がかかるのに時間を要し、酸素分圧が低いと短い時間で転換します。これは、酸素分圧と同じ比率の酸素イオンをポンピングするのに余分に時間を要するためです。

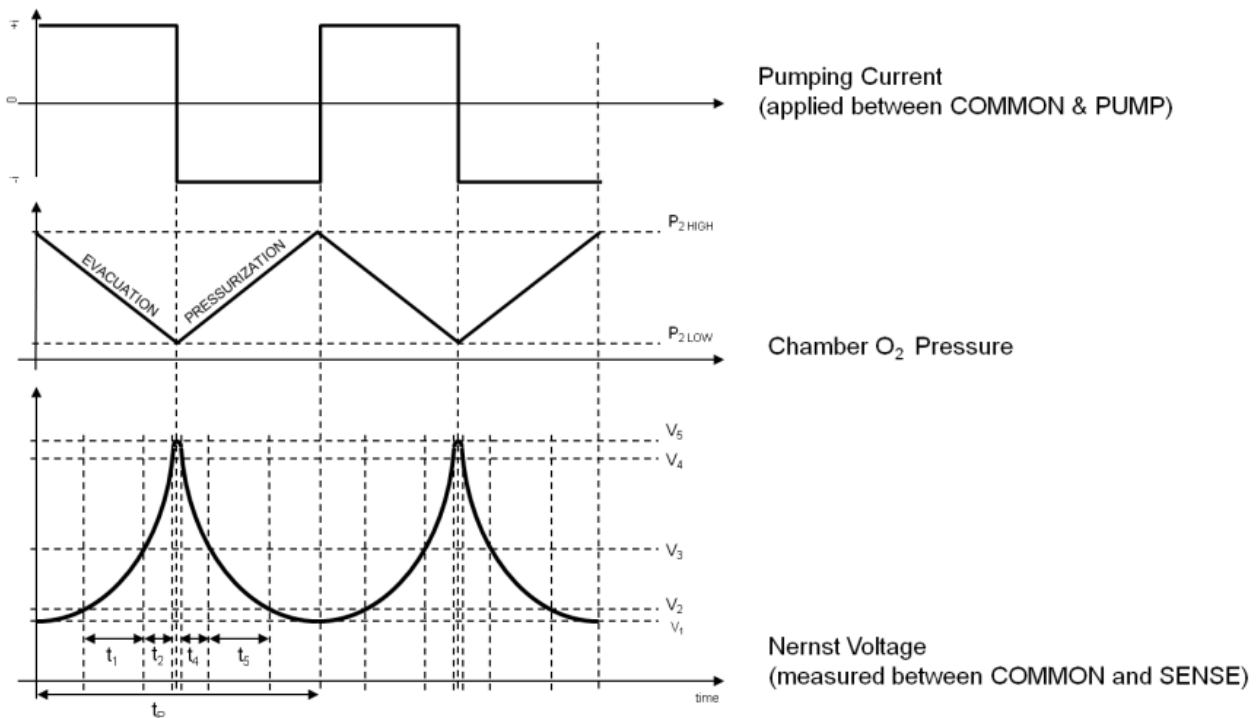
4-5. 測定

SST の酸素濃度計には、5 つの接続があります。

ヒーター用接続×2：セルの動作温度をきちんと確保するために正確な電圧が要求されます。

セル用接続×4：電気化学式ポンプ駆動のため PUMP-COM 間に可逆的定格 DC 電圧をかけます。結果として出力されるネルンスト電圧は、SENSE-COM間で測定します。

測定信号が既定のリファレンス電圧の振幅幅に到達すると、定格電流が反転します。このポンプの減・加圧の総サイクル時間は、測定するガスの酸素分圧によって変化します。このサイクル時間は、ネルンスト電圧のサイクル時間と同じです。雰囲気中の酸素濃度が高ければ、リファレンス電圧に到達する時間が長くなります。つまりネルンスト電圧のサイクル時間とは酸素分圧に直線的な比例関係にあります。



ご利用にあたっての考慮

理論上、V1 と V5 は任意に設定出来ます。以下の点への考慮が必要となります。

- ① 酸化ジルコニウムの電気二重層の影響の排除
- ② アプリケーションに最適な応答時間
- ③ 温度依存の軽減

5. 電気二重層の補正

定格電流により移動する全ての電荷がチャンバー内の圧力変化に影響するわけではありません。電流源が逆になると、一部は酸化ジルコニウム(ZrO₂)界面に形成された電気二重層に吸収されます。この作用は、ポンプ反転電圧の近くで顕著になります。

圧力が上昇すると、チャンバー圧力の切換えに必要な充電量も増加します。充電量増加の影響を減らすために、チャンバー圧力を周囲圧力から 1~10%以内の変化に収めてください。ポンプ反転点付近の電気二重層の影響を軽減するためネルンスト電圧は、V1 と V5 から十分な距離を保つようにします。(図 4 V2、V3、および V4 参照)

5-1. 反応時間

酸素圧が高くなるとポンプのサイクル時間が長くなるため、より高い酸素圧分では、高速応答を確保するために V1 と V5 を近づける必要があります。

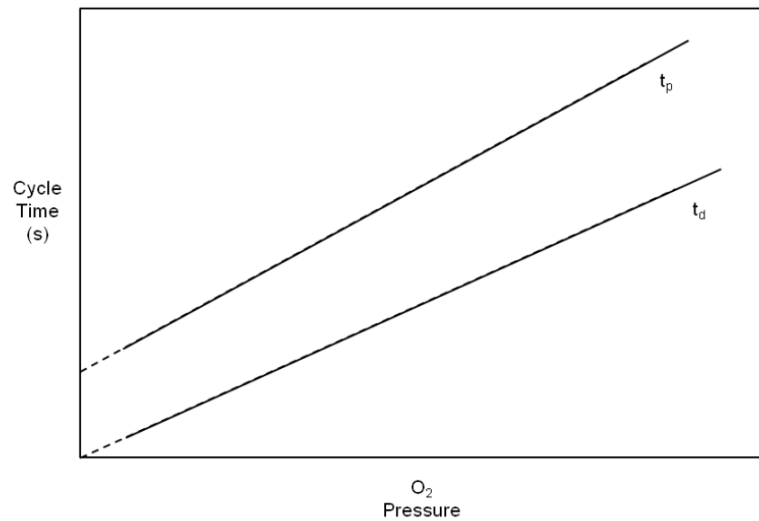
5-2. 温度依存性の補正

ネルンスト電圧 (式 7) は温度に依存します。この温度依存性は、特定の動作条件下でネルンストの法則と酸素に関するガス法則を組み合わせることで大幅に低減することができます。この場合も、温度依存の特性の多くはポンプの反転周辺で発生するため、V2、V3、V4 でネルンスト電圧を測定することで温度係数 (TC) を実質的にゼロに等しくすることができます。

TC=0 モードで動作している場合、V2、V3、V4 に到達までの時間が測定されます。これらは、図 4 で t₁、t₂、t₄、t₅ として強調表示されます。次に、サイクル時間 (t_d) が次のように計算されます。

$$\text{数式(8)} \quad t_d = (t_1 - t_2) + (t_5 - t_4)$$

t_d は、周囲の酸素分圧に比例する線形出力を提供するだけでなく、t_p とは異なり原点を通過します。下図は、t_d と t_p を計算したときの出力を示しています。



発生点を通過する線形応答のメリットは、センサーの校正（ゲイン）が線形上の任意の点で発生する可能性があることです。tp を測定することでゲインを設定し、ゼロオフセットを除去するための2点校正が可能になります。

tp と td の応答は、酸素分圧（ppO2）が0に近づくにつれて点線で表されることに注意してください。これは、センサーが動作するために、定義上少なくともある程度の周囲 ppO2 を必要とするためです。ppO2 が0の場合、定電流源が適用されているためセンサーが酸化ジルコニウム内に酸素を送り込もうとすることで、最終的に酸化ジルコニウムが損傷してセンサーパフォーマンスが低下します。したがって、センサーは非常に低い酸素濃度環境（1 mbar ppO2 未満）、特に還元性雰囲気（酸素がほとんど消費されない雰囲気）で長期間使用しないでください。

注意：

tp の計算は、高精度が必要とされない非常に基本的なアプリケーションにのみ推奨されます。SST 社は次項に従って td を計算することをお勧めします。

5-3. 感度/傾き

感度または傾きは、ミリ秒単位のサイクル時間（td）を既知の校正雰囲気の ppO2（mbar）で割ったものとして定義されます。

td（1つの校正ポイントのみ）を計算する場合、感度は次のように定義されます。

$$\text{数式(9)} \quad \text{Sensitivity} = \frac{t_d}{ppO_2}$$

td を計算するときのセンサーの感度/傾きは、通常 1.05ms/mbar です。感度に影響を与える可能性のある要因（チャンバーの容積、酸化ジルコニウムの厚さなど）により、±15%の製造公差があります。これにより、センサー間の再現性を確保するために校正が必要とされます。

5-4. 大気圧使用時の推奨値

センサーを使用して約 1~1000mbar (通常の気圧の 0.1~100%) ppO₂ を測定する場合、次の値が推奨されます。

td	(TC = 0 モード)
定電流源	i=40 μ A
ポンプ反転電圧	V1=40mV および V5=90mV
センス電圧	45mV、V3 = 64mV、V4 = 85mV

より高い酸素分圧でセンサーを使用する場合は、要求に応じて別の値を推奨します。

注意：

センサーを TC = 0 モード (td の計算) で使用すると多くのメリットがあるため、これが推奨操作モードです。

典型的な測定手順

- ① 酸素センサーは、動作温度に到達するまで (最低 60 秒程度) 大気から加熱します。
- ② 電気化学的ポンピングを開始するために、セルは最初に PUMP と COMMON 間に定電流源を適用し、排気をおこないます。
- ③ SENSE と COMMON の両端のネルンスト電圧は、V5 に達するまで増加します。
- ④ ポンプ電流接続が反転し、COMMON と PUMP の間に定電流が流れます。セルは再加圧を開始します。
- ⑤ SENSE と COMMON 間のネルンスト電圧は、V1 に達するまで減少します。
- ⑥ V1 に達すると、1 つのポンピングサイクルが完了し、プロセスが繰り返されます。
- ⑦ このサイクルは無期限に繰り返され、完全な波形が捕捉されるたびに td が計算されます。

5-5. 初期のセンサードリフトと慣らし稼働期間

ジルコニア式酸素センサーは、最初の使用開始から 200 時間の間にセンサー出力が最大 $\pm 3\%$ 程度ドリフトする可能性を持っています。これは、以下の要因によるものが多いです。

- ① 酸化ジルコニウム中の不純物が粒界および白金電極結合の表面に移動して付着する
- ② 多孔性白金電極の焼き付き
- ③ ヒーターコイルの経年劣化
- ④ 熱酸化により、フィルター内側の SUS 表面が反射しにくくなる

定期校正は、既知のセンサー出力の校正ガスを常に参照して実施するためセンサーの初期ドリフトの影響を取り除くことができます。ただし、定期校正が不可能で使用する前に出力を安定させる必要がある場合は、センサーを積極的にアプリケーションに慣らす必要があります。

慣らし稼働期間は通常 200 時間程度とされ、清潔な雰囲気でセンサーを正常に動作させます。ほとんどのアプリケーションでは、単純プロセスとされセンサー出力はモニタリングされません。

センサーの安定性を重要視するアプリケーションの場合、慣らし稼働では既知の ppO₂ 濃度で正確に制御された雰囲気センサーを通常通りに動作させます。これが新鮮な空気である場合、全ての環境データを記録し ppO₂ 濃度を計算する必要があります。

既知の ppO₂ を使用して、式 9 に示すようにセンサー出力 (td) を正規化できます。勾配を計算することにより、センサー出力の変動は、環境変動によるものではなく、ドリフトと見なすことができます。求められる安定性のレベルはアプリケーションにより異なります。一般的に、過去 48 時間以内のスロープ値が読取値 ±0.2%未満変化の場合、出力は安定していると判断することができます。

SST 社の慣らし稼働運転は、12 時間間隔で測定が行われ、センサー出力が示す可能性のある温度依存性を打ち消すために環境温度が一定に保たれます。

5-6. 校正プロセス – td を ppO₂ および O₂% に変換する

以下の手順は、動作モード「TC=0」推奨です。TC=0 モードで行われる td 測定に関連します。

td から ppO₂ 測定値への変換は、最初に既知の ppO₂ 雰囲気で感度を計算します。ガス混合物の全圧がわかっている場合、容積含有量はダルトンの法則から簡単に計算できます。

全圧を測定せず相対含有量 (体積%) を求める場合は、酸素濃度を既知の測定環境で感度を計算する必要があります。測定値は、この全圧を参照します。：数式(2)参照

一般的にこの場合は、平均湿度レベルを考慮して通常大気 20.7%(20.95%ではない)に調整することが含まれます。精度を維持するために定期的な校正を行い、気圧 (アプリケーション圧力) の変化による影響を除去する必要があります。気圧は比較的ゆっくりと変化するため、毎日校正することをお勧めします。定期校正は、前述の通り最初の使用から 200 時間に発生する可能性のある潜在的なドリフトによる影響も取り除きます。

新鮮な空気での定期校正が不可能な場合は、センサーと一緒に圧力センサーを使用して気圧 (またはアプリケーション圧力) の変化に対して出力を自動的に補正することを求められる場合があります。これは、気圧変化と同じ割合でセンサー出力が変化するため比較的単純なプロセスです。

例) 気圧 1%変化 = センサー出力変化 1%。

理想的には、センサーの慣らし稼働期間 (200 時間) が終了した後、最初のシステム校正を実施してください。これにより将来的に制度に影響を与える可能性のあるセンサードリフトを事前に除去されることが保証されます。

5-7. ppO₂ 測定のみ

- ① ppO₂ が既知の校正ガス中にセンサーを置きます。これが新鮮な空気の場合、環境（気象）データを使用して ppO₂ を正確に計算します。
- ② 酸素センサーを適切な動作温度に達するまで加熱します。
- ③ ポンピングサイクルが始まります。
- ④ 完全に安定するまで、酸素センサーを動作温度で 5 ~ 10 分間放置します。
- ⑤ 出力 t_d を計算します。ノイズを平均化するため、少なくとも 10 サイクル以上サンプルしてください。
- ⑥ 数式(9)を使用して感度を計算します。
- ⑦ 数式(10)のように、すべての t_d 測定値に対して ppO₂ を計算できます。

数式(10)
$$ppO_2 = \frac{t_d}{Sensitivity}$$

5-8. O₂% 測定のみ – 圧力補正なし

- ① 酸素センサーを校正ガス、通常は大気（空気）20.7% O₂ に入れますが、既知の濃度の校正ガスであればかまいません。
- ② 酸素センサーを適切な動作温度に達するまで加熱します。
- ③ ポンピングサイクルが始まります。
- ④ 完全に安定するまで、センサーを動作温度で 5 ~ 10 分間放置します。
- ⑤ 出力 t_d を計算します。ノイズを平均化するため、少なくとも 10 サイクル以上サンプルしてください。
- ⑥ 数式(11)を利用して感度を計算します。

数式(11)
$$Sensitivity\% = \frac{t_d}{O_2\%}$$

- ⑦ 数式(12)のように、すべての t_d 測定値に対して ppO₂ を計算できます。

注意：

圧力（アプリケーション圧力）が変化すると、測定時の圧力と感度 % が計算されたときの圧力との差に比例して測定誤差が生じます。

数式(12)
$$O_2\% = \frac{t_d}{Sensitivity\%}$$

5-9. ppO₂ および O₂% 測定 – 圧力補正付き

- ① 酸素センサーを校正ガス、通常は大気（空気）20.7% O₂ に入れますが、既知の濃度の校正ガスであればかまいません。
- ② 数式(13)を使用して、既知の酸素濃度と環境の全圧から ppO₂ を計算します。

数式(13)
$$ppO_2 = Total\ Pressure \times \frac{O_2\% \text{ cal gas}}{100}$$

- ③ 酸素センサーを適切な動作温度に達するまで加熱します。
- ④ ポンピングサイクルが始まります。
- ⑤ 完全に安定するまで、センサーを動作温度で 5 ~ 10 分間放置します。
- ⑥ 出力 td を計算します。ノイズを平均化するため、少なくとも 10 サイクル以上サンプルしてください。
- ⑦ 数式(9)を使用して感度を計算します。
- ⑧ 数式(10)のように、すべての td 測定値に対して ppO₂ を計算できます。
- ⑨ 数式(13) を使用して、新しい ppO₂ 測定値と全圧から O₂% を計算できます。：数式(14)

数式(14)
$$O_2\% = \frac{ppO_2}{Total\ Pressure} \times 100$$

6. 最後に

センサーは、その中心に実績のある小さな酸化ジルコニウムベースの要素を採用しており、その革新的な設計により、参照ガスを必要としません。これにより、センサーを高温、湿度、酸素圧で操作できる環境の制限がなくなります。したがって、SST センシングの一連の酸素センサーは、次のアプリケーションでの使用に最適です。

- 実験室での測定
- 天然ガス、石油、バイオマスなどを使用したシステムの燃焼制御
- 自動車排出ガス試験
- 医療および航空宇宙市場での酸素生成
- 航空宇宙燃料タンクの不活性化アプリケーション
- 堆肥化や耕作を含む農業用途
- ベーカーリーオープンと熱処理炉

付録 A 水蒸気圧参照表 ss

Temperature (°C)	Max water vapour pressure (mbar)	Temperature (°C)	Max water vapour pressure (mbar)
0	6.10	31	44.92
1	6.57	32	47.54
2	7.06	33	50.30
3	7.58	34	53.19
4	8.13	35	56.23
5	8.72	36	59.42
6	9.35	37	62.76
7	10.01	38	66.27
8	10.72	39	69.93
9	11.47	40	73.77
10	12.27	42.5	84.19
11	13.12	45	95.85
12	14.02	47.5	108.86
13	14.97	50	123.38
14	15.98	52.5	139.50
15	17.04	55	157.42
16	18.17	57.5	177.25
17	19.37	60	199.17
18	20.63	62.5	223.36
19	21.96	65	250.01
20	23.37	67.5	279.31
21	24.86	70	311.48
22	26.43	75	385.21
23	28.11	80	473.30
24	29.82	85	577.69
25	31.66	90	700.73
26	33.60	95	844.98
27	35.64	100	1013.17
28	37.78	110	1433.61
29	40.04	120	1988.84
30	42.42	130	2709.58