

コリオリ流量計を使用した CO₂ 測定の最適化

Jacob Sexton、エリアセールスマネージャ - Endress+Hauser Flow USA

Victor Rojas Sossa、プリンシパルエキスパート（コリオリ製品管理担当） -
Endress+Hauser Flow Switzerland

Adam Booth、ビジネス開発マネージャ - Endress+Hauser Flow USA

2024 年 11 月

エグゼクティブサマリー

産業間の垣根を超えて、高圧の二酸化炭素の測定に対する関心が非常に高まっています。持続可能性目標は財務面にも影響を与えるため、CO₂ を生産/排出する企業は最適な測定ソリューションを模索してきました。コリオリ流量計は、このような測定に対する明確な選択肢として浮上してきました。コリオリ流量計は高精度測定を実現しますが、新たに CO₂ 測定システムを構築する場合には理解しておくべき検討事項があります。このホワイトペーパーでは、推奨事項を調査し、急成長している CO₂ 産業に参入する測定事業者を提供します。

1 概要

二酸化炭素 (CO₂) 排出に対する政府の規制により、多くの産業生産者は、エネルギーと気候に関する世界的な目標を達成するための建設的なソリューションを模索しています。これらのソリューションの多くは、CO₂ 回収・有効利用・貯留 (CCUS) の技術を利用しています。CCUS では、化石燃料やバイオマスをエネルギー源として利用する発電所や産業施設など、影響の大きい排出源から CO₂ を回収します。回収された CO₂ は加圧され、パイプライン、船舶、鉄道、トラックを使用して、さまざまな再利用アプリケーションに輸送されます。また、枯渇した石油やガスの貯留層といった深い地層に CO₂ を注入し、そこで恒久的に貯留することもできます。

CCUS プロセスのすべての段階で正確な CO₂ 測定が必要とされる理由は、税制政策や政府の優遇措置があるためです。たとえば、カナダの「連邦温室効果ガス汚染価格付け法 (Greenhouse Gas Pollution Pricing Act)」では、2030 年まで CO₂ 排出量 1 トンごとに企業に税金が課されます。1 日あたり 30 万バレルの生産能力を持つ製油所の場合、CO₂ の年間排出量は最大 400 万トンに達する可能性があります。このような生産規模の場合、1.0 % というわずかな測定の不確かさでも 680 万カナダドルの経済的損失につながる可能性があります。

CO₂ の測定には独自の課題があります。コリオリ流量計は、その優れた精度と信頼性で高く評価されており、CCUS 内のアプリケーションを含むさまざまなアプリケーションにとって魅力的な選択肢となっています。ただし、CO₂ の正確な測定は、さまざまな圧力/温度条件下で想定される相変化によって複雑になる可能性があります。CO₂ は、気体、液体、固体、さらには超臨界流体として存在し、それぞれ密度と流量の特性が異なります。この変動性に対して、CCUS プロセスで生じるすべての条件下で必要な測定精度を確保するには、適切なプロセス設計、流量計の選定、サイジング、および設定が必要です。このホワイトペーパーでは、CCUS プロセスで CO₂ を適切かつ確実に測定するために、これらの課題への正しい対処方法に焦点を当てています。

2 CO₂ の基礎

2.1 CO₂ の状態図

CO₂ の特性を理解するための下地を作るために、最初に CO₂ の状態図をご覧ください。状態図は、圧力と温度の組合せにおいて想定される集合状態を視覚的に表したものです。図 1 では、色付きの線が両方の状態が平衡状態で共存できる圧力と温度の組合せを表しており、これを境界線として集合状態が変化します。たとえば、緑色の線は固体 CO₂ を蒸気昇華させる圧力と温度の組合せを表しています。紫色の線は、CO₂ を固体から液体に融解、または液体から固体に凝固させる圧力と温度の組合せを示しています。黄色の線は、CO₂ を液体から気体に蒸発、または気体から液体に凝縮させる圧力と温度の組合せを示しています。

青色の点は CO_2 の三重点を示しています。この圧力と温度では、すべての集合状態が同時に存在できます。測定において重要な指標の 1 つは臨界点と呼ばれており、赤色の点で表されています。臨界点を超える温度と圧力では、 CO_2 は超臨界状態となり、液相とも気相とも識別できない状態になります。

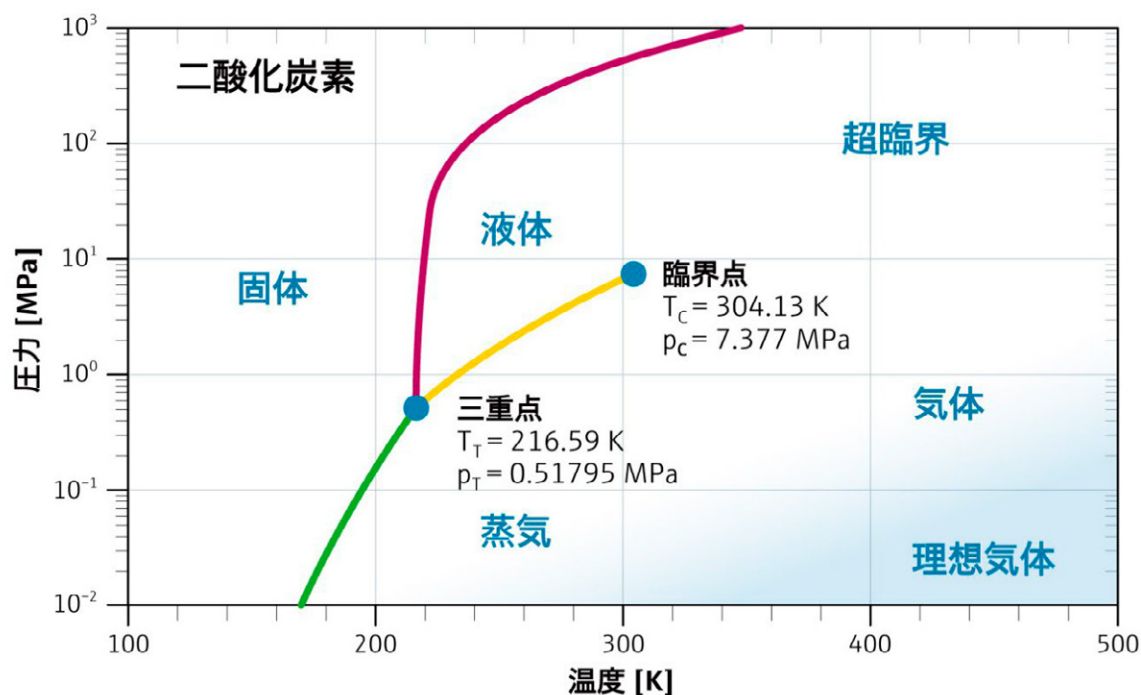


図 1：二酸化炭素の状態図

液体および気体状態の流体の流量測定については研究が進んでおり、さまざまな測定原理を利用できます。現在では、さらに研究が進み、二酸化炭素の流量測定に対する各技術の適合性が評価されています。超臨界領域でのアプリケーションは少なく、高精度の流量測定が必要とされるアプリケーションはごくわずかであるため、 CO_2 の測定性能評価に関する参考資料はあまりありません。コリオリ質量流量計は、3 つの集合状態すべてに活用できるという利点を備えます。

2.2 CO_2 の超臨界状態と 2 相領域の説明

CO_2 の臨界点は $30.8^\circ\text{C}/73.7 \text{ bar}$ です。この温度と圧力を超えると超臨界状態になります。この状態では、気体のように配管全体を満たし、液体のような高密度と気体のような低粘度を示します。臨界点付近および臨界点では圧縮性が高くなり、流体特性が非常に急速に変化します。

CCUS アプリケーションで想定される一部の動作条件では、高圧が必要であり（高密度液相）、周囲温度の日々の変動により、システムが超臨界状態になる可能性があります。同様に、低圧/低温条件では、温度が上昇したときに液体二酸化炭素が蒸発する可能性があります。この場合、2 相混合物がシステム内を流れる可能性があります。図 2 では、さまざまな圧力と温度における液体、気体および 2 相混合物中の CO_2 密度を確認できます。性能を最大限に高めるには、コリオリ流量計を単相流体（液体または気体）で使用する必要があります。綿密なプロセス設計により、2 相領域を回避した方がよいです。2 相領域は、グラフ内の釣鐘曲線およびその下の領域です。臨界圧を超えると、流体は圧縮性液体または高密度気体として挙動し、周囲温度が変化しても相転移は起こりません。超臨界状態は一般的に均一であると考えられていますが、Simeoni 他（G. G. Simeoni, 2010 年）および Bolmatov 他（Bolmatov, Brazhkin, Trachenko, 2013 年）のレポートによると、熱特性はそれほど均一ではないと見られ、さまざまな条件下において液体に似た挙動または気体に似た挙動を示す場合があります。

さまざまなプロセス条件における流体の挙動を十分に理解することで、適切なコリオリ流量計の選定、サイジング、設置を確かなものにでき、最良の測定結果を得ることができます。

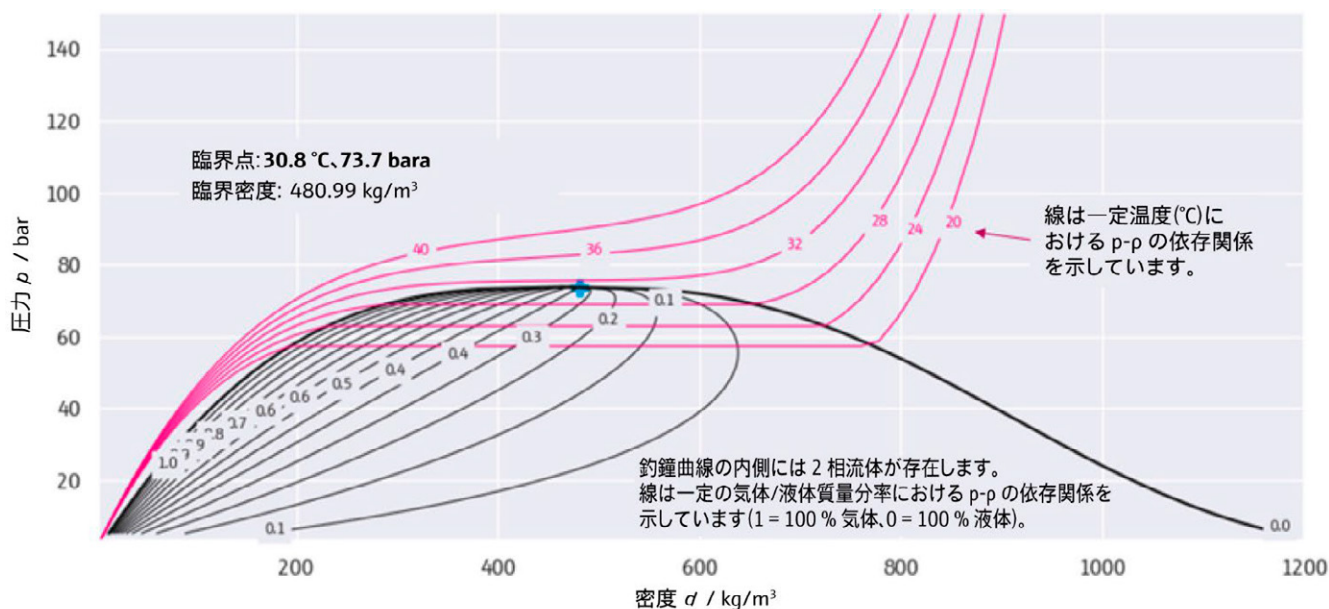


図 2 : 20～40 °C の等温線（赤紫色）を示した圧力 - 密度 (p-ρ) 図。さまざまな品質係数の飽和曲線（黒色）が 0（液体のみの状態）から 1（蒸気のみ状態）まで示されています。

2.3 コリオリ質量流量計の測定原理

コリオリ質量流量計は、計測チューブに加励して共振周波数で振動させることによって動作します。質量が流れると、コリオリ力によって計測チューブに「ねじれ」が生じます。流入口と流出口のセンサ（図3：コリオリ質量流量計のチューブとピックアップコイルの信号の概略図 (i)、コリオリ質量流量計の測定原理および質量流量と密度測定の計算式 (ii)、要素AとBを参照）は、この移動の時間差、つまり、2つの信号の位相差を記録します。信号の位相差 ($\Delta\varphi$) は、配管内の質量流量 ($\dot{m}$) に比例します。システムの共振周波数 (f_r) は、チューブの剛性 (K) とその総質量に関連しており、チューブの総質量はチューブを満たす流体の質量 (m_f) + 空のチューブ自体の質量 (m_t) に等しくなります。したがって、共振周波数はチューブの体積を満たす流体の密度 (ρ) に関連しています ($m_f = V_f \rho$)。コリオリ流量計は通常、水を使用して校正され、質量流量の比例関係が特定されます。密度校正は一般的に水と空気を使用して行われます。

図に示されるように、流体の集合状態に制限がないため、コリオリ流量計は液体、気体、超臨界状態など、あらゆる流体状態の物質を測定できます。ただし、これまでの経験と研究により、特定の条件下では流体の音速が測定値に影響を与える可能性があることがわかっています。

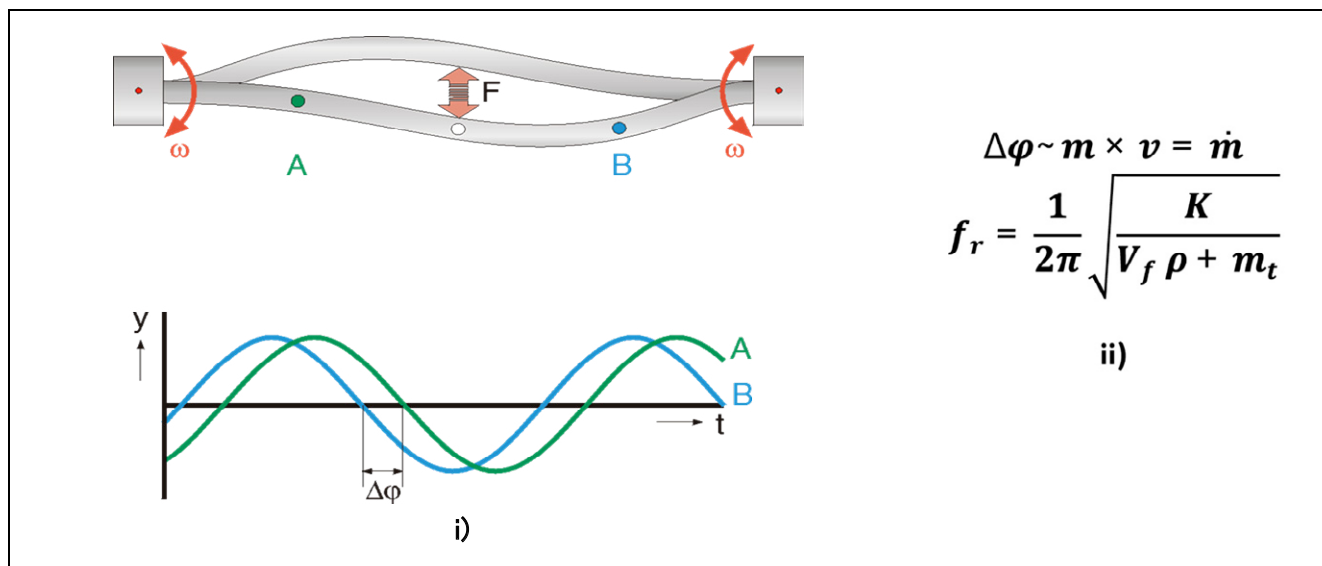


図3：コリオリ質量流量計のチューブとピックアップコイルの信号の概略図 (i)、コリオリ質量流量計の測定原理および質量流量と密度測定の計算式 (ii)

2.4 測定精度に対する音速の影響

音速とは、音波が弾性媒体を伝搬するときに、単位時間あたりに移動する距離です。通常、音波は気体中よりも液体中の方が速く移動します。

コリオリ質量流量計を気体のような遅い音速の流体で使用する場合、水を使用して得られた校正ファクタの補正が必要であることがわかっています。この補正は体系化されており、理論的に決定され、実験に基づいて証明されています (M. Anklin, 2000 年)。誤差が発生する仕組みは共振器効果として知られています。チューブ内の流体が振動すると、機械的振動が圧縮波（音波）として流体に伝わります。流体は圧縮および減圧され、流体の重心とチューブの重心が実質的に分離します。この分離により、チューブ壁に対してコリオリ力の方向に力が発生するため、計測機器は実際よりも大きい測定値を計測します。この分離量は、流体の音速、振動周波数、チューブの直径に応じて異なります。

この現象が発見された後、Hemp と Kutin (Hemp & Kutin, 2006 年) が共振器効果による誤差のシンプルな近似を提唱しました。その解決法は計算式 $E_m = \frac{1}{2} \left(\frac{f}{c} r \right)^2$ と表されます (c: 音速、r: チューブの半径、f: 動作周波数)。音速が低く、動作周波数が高い場合、必要な補正量は大きくなります。音速が高い場合、つまり、液体アプリケーションでは、この効果は消え、補正は必要ありません。

図 4 では、さまざまな圧力と温度における二酸化炭素の音速をグラフに表しています。低温/高压条件では、音速は飛躍的に高くなります。流体は液体のような挙動を示し、この動作領域では補正は必要ありません。臨界点に近づくと、CO₂ の音速は非常に急速に変化し、気体特有の低い値になります。この領域では、流体の挙動は気体に近くなるため音速の補正が必要であり、コリオリ流量計の慎重なパラメータ設定が必要となります。高温/低压条件では、CO₂ の音速は大幅に低下し、温度と圧力に伴う変化はほとんどありません。この領域では、圧力と温度の変化に伴う音速値の微小な変化について、補正を行うための詳しい知識は必要ありません。

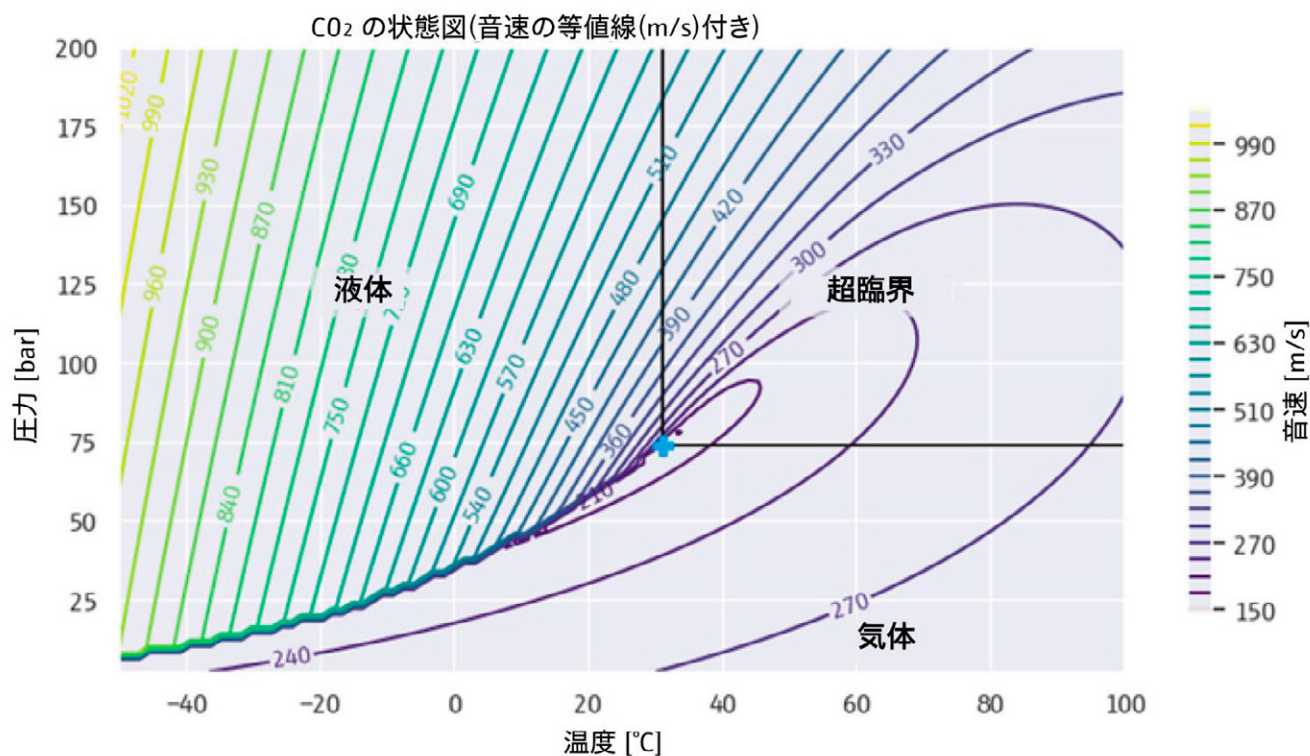


図 4: CO₂ 状態図 (線はさまざまな圧力と温度における一定の音速を示しています)

CCUS アプリケーションでコリオリ質量流量計を使用して CO₂ を測定する場合、この音速の変動を考慮する必要があります。コリオリ質量流量計を臨界点付近で使用する場合、または前のセクションで説明したように、温度の変動によって二酸化炭素が超臨界状態になったり、ならなかったりする場合、音速の変化を追うことは非常に重要です。

一部のメーカーでは、特定の気体用の気体モード機能で設定することにより、音速の誤差を補正しています。流体が選択されると、流量計は組み込まれた係数を適用して、多数の圧力範囲と温度範囲において音速の影響による誤差を補正します。この補正は、通常は流量計で直接測定される温度に大きく依存し、圧力値は固定値として設定するか、または外部圧力センサから機器に取り込むことができます。

2.5 ガス組成の影響

正確な CO₂ 測定に関する議論や考察の多くは、高純度の CO₂、つまり 99 mol% を前提として行われています。CCUS などの産業用 CO₂ アプリケーションでは、使用するガス組成が大きく異なる場合があります。実際に使用されるレベルは多くの場合、85~99 mol% です。混合物の組成に別の気体成分がわずか 4 mol% 含まれるだけで、図 6 に示すように 2 相流状態が生じる可能性があります。さらに、流体の音速は組成に依存しており、アプリケーションで最高の性能を確保するためには、プロセス条件による音速の変動を考慮して適切な機器パラメータ設定を行う必要があります。ほとんどのメーカーでは、気体モード用のカスタムパラメータ設定を調整して、アプリケーションに適したガス組成特性に設定できます。たとえば、これを使用して、基準音速と音速の温度依存係数をプログラム設定できます。これにより、流量計ではガス組成に適した補正を適用できるようになります。

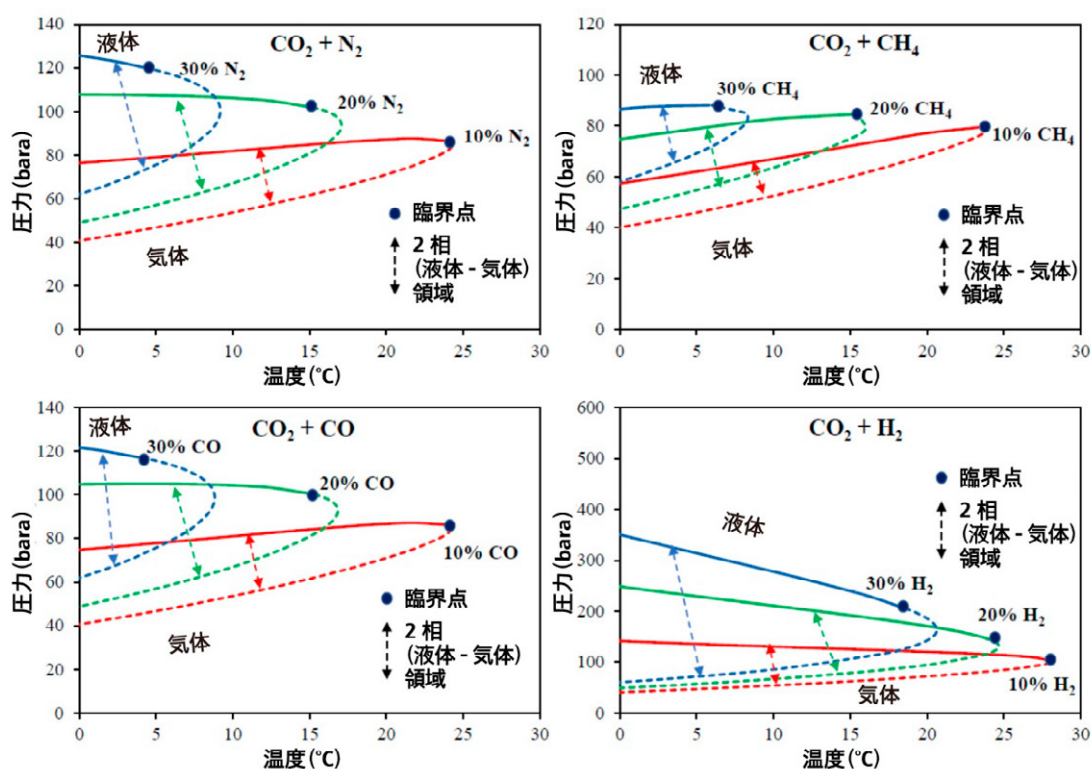


図 6：さまざまな CO₂ 混合物の相包絡線は、2 相流体が存在できるプロセス条件の変化を示しています。
(Laboratory, TÜV SÜD National Engineering, 2021) の許可を得て転載しています。

不純物を含む CO₂ によるその他の注目すべき影響としては、以前に CO₂ の状態図で概説した臨界点と 2 相領域での変化があります。これは、CO₂ の純度が低下するにつれて、特に注意して調べる必要があります。また、変化するガス組成に対する材質の適合性についても、プロセスを再検討する必要があります。SUS 316L 相当、SUS 890L 相当、アロイ C22、スーパー二相鋼など、コリオリ流量計で一般的に使用される材質は、相状態に関係なく、すべて純粋な CO₂ プロセスに適合しています。ただし、炭素鋼パイプラインが使用される超臨界相プロセスでは、H₂O により不純物が酸に変化して配管と流量計を劣化させる可能性があります。O₂ も存在する場合、炭素鋼の腐食プロセスが促進されます。材質の選定とプロセス条件には細心の注意を払い、変化するガス組成に伴うリスクを軽減する必要があります。材質の適合性に加えて、炭素鋼を使用する CO₂ プロセスでは湿度値の監視が不可欠です。

湿度値を 500 ppm 以下に維持することで、腐食のリスクを軽減できます (Gan Cuia, 2019 年)。

3 アプリケーション、サイジング、選定

3.1 測定点の決定

産業用 CCUS プロセスでは、プロセスの圧力と温度の構成が大きく異なります。図 7 は、一般的な CCUS バリューチェーンの概要を示しています。CO₂ はまず気体として回収されてから圧縮されます。この圧縮気体は、船舶、鉄道、パイプラインによって液体または超臨界流体として輸送されます。輸送先では、炭素隔離のためにさらに圧縮されるか、または気相に戻されて CO₂ 消費プロセスで利用されます。このチェーンの各ステップでは、異なる相状態で存在するため、さまざまなアプローチが必要になります。生産者の最初のステップは、プロセス内の測定が必要なポイントと、そのポイントでどの相が存在するかを特定することです。流量計の精度に関係なく、プロセスの圧力と温度が不安定で、2 相流が生じると、測定精度が大きく低下します。

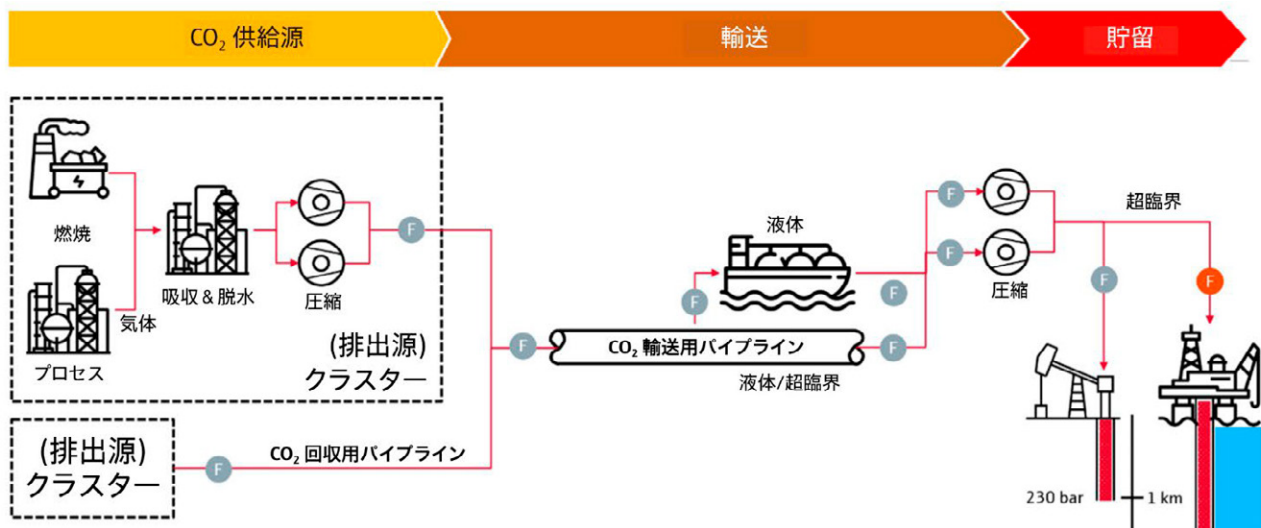


図 7：一般的な集合状態を示した二酸化炭素回収・貯留プロセスマップ

3.2 サイジングツールの適切な活用

測定点の定義が完了したら、適合する機器を選定する必要があります。多くの流量計メーカーでは、高度なサイジングツール/選定ツールを提供して、お客様がアプリケーションに最適な流量計を選定できるよう支援しています。このようなツールでサイジング/選定を正しく行うための手順を以下に示します。

3.2.1 プロセス入力データから CO₂ の状態を特定

図 8 は、プロセス条件から二酸化炭素の集合状態を特定するデシジョンツリー（決定木）の概要を示したものです。このデシジョンツリーは、機器メーカーのサイジングツールの一部ですが、CCUS プロセスについて検討するときに参照資料としても活用できます。

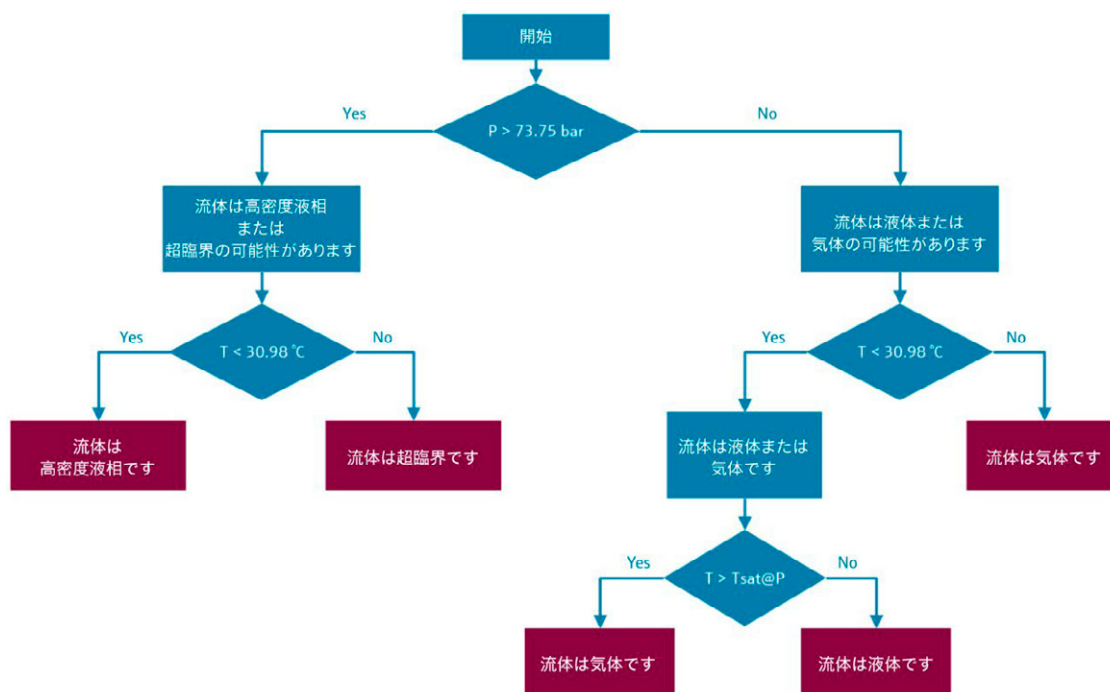


図 8 : CO₂ の集合状態を特定するためのデシジョンツリー

3.2.2 適切な流体モデルの選定

流量計メーカーは、さまざまな流体の状態方程式をエミュレートするサイジングアプリケーションを公開しています。これらのアプリケーションは、特定のアプリケーションごとに適した流量計サイズを決定するのに役立ちます。図 9 は別の視点から見た状態図であり、圧力/温度領域に基づく推奨流体モデルが示されています。サイジングの段階では、適切な流体モデルを選定することが最も重要であり、これによりサイジングに適した流体特性が正しく特定され、指定された流量計がアプリケーションで期待どおりに動作します。

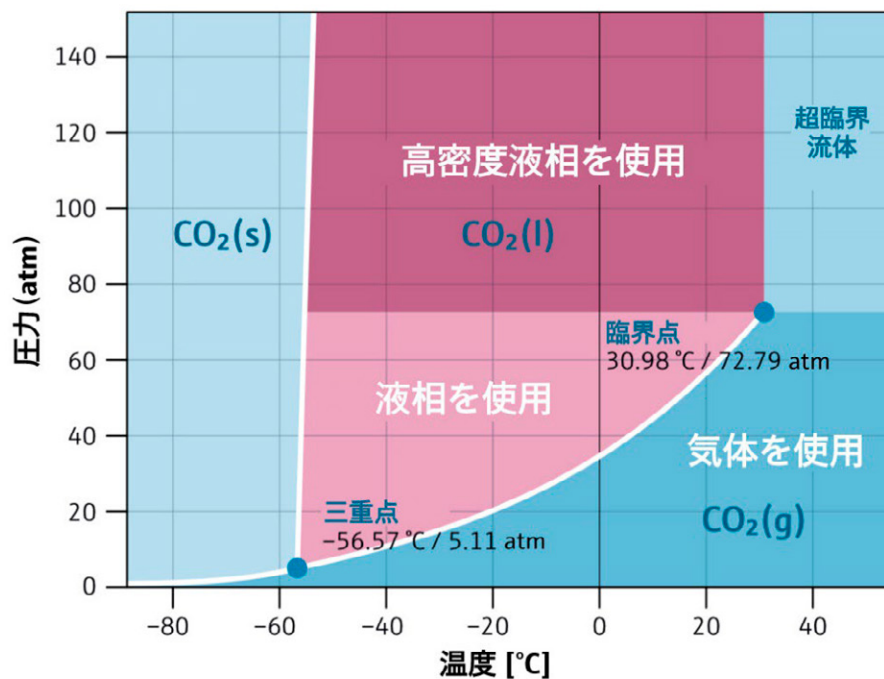


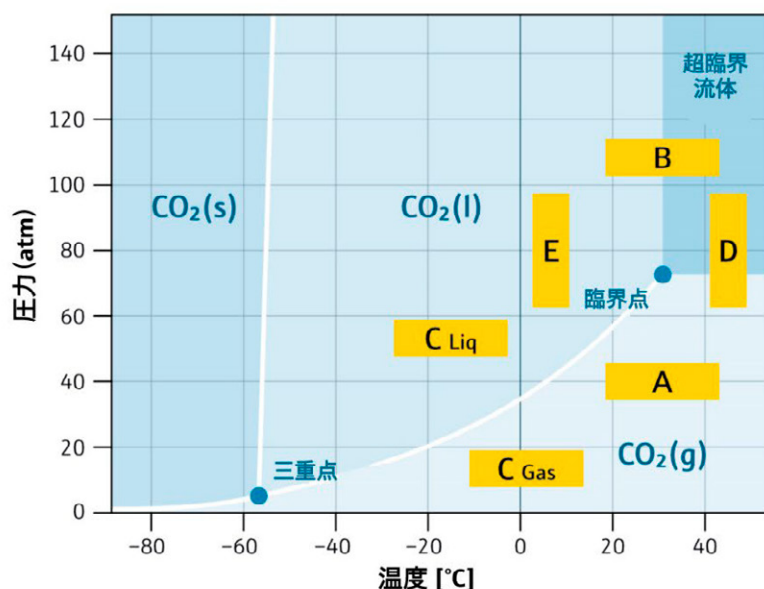
図 9 : 圧力/温度領域に基づく推奨流体モデル。

3.2.3 サイジングの実行

メーカーのサイジングツールでは、プロセスデータを活用することで、使用するプロセスに適した流量計サイズを選定できます。また、このツールは、プロセスに対して推奨された流量計が期待される精度を確保できることを確認でき、広範囲の流速における流量計精度が釣鐘曲線のグラフで視覚化されます。サイジングの評価については、メーカーや販売代理店のサポートをいつでも受けることができます。

3.2.4 相変化や前提条件からの逸脱の有無を確認

CCUS 測定点の動作条件があまりにも広範囲に及ぶ場合、相変化が起こる可能性があります。単相状態で流量計が動作することを確認するために、プロセスデータを再確認することが重要です。図 10 は、このような場合に予測される状況を示しています。事例「B」は、プロセス条件が高密度液相と超臨界状態の境界を越える特殊な状況を示しています。これは、CO₂ 測定の最も複雑な使用事例の 1 つであり、前述のとおり、それぞれの相ごとに流体特性が変化します。流量計メーカーは、液体状態と気体状態の流体に対して異なるリファレンスシステムを使用して、機器の校正を検証しています。そのため、リファレンス精度は使用されるリファレンスシステムに基づいており、リファレンスシステムは気体と液体で異なります。気体の場合、流れている気体の質量を求めるには特有の難しさがあり、リファレンスシステムの不確かさが非常に大きくなります。事例 B では、流体は相変化を示さずに液体領域から超臨界領域に移行し、密度と音速が連続的に変化するだけです。では、どちらの精度仕様が有効なのでしょう？これは、流量測定コミュニティにおいて継続的に研究されている分野です。したがって、メーカーでは性能の限界点を定めていることが多く、コンセンサスが得られるまでは各領域に対して 2 つの精度仕様を使用することを推奨しています。このような場合、両方の相で流量計のサイジングを行う必要があります。サイジングツールで高密度液相のデータポイントを使用して流量計の推奨ラインサイズを確認したら、次にプロセスの超臨界相についてサイジングをもう一度実行する必要があります。推奨される計測機器のラインサイズが相間で異なる場合は、一方のラインサイズに固有の流量計を選定し、その機器をもう一方の相で使用したときの性能への悪影響について評価する必要があります。液体と気体の間の相転移については、一部のメーカーでは、制御システムでトレンド表示して、このような相変化やプロセスの不調を通知できる高度な診断機能を提供しています。このような機能については、セクション 4.4 で詳しく説明します。



事例	説明
A	気体領域
B	高密度液相から超臨界へ: 温度範囲を分けて 2 回のサイジング 計算を行います。1 回は高密度液相 用、もう 1 回は超臨界用です。
C	蒸気または液体アプリケーション: 圧力または温度の変動が相変化に つながる可能性があります。
D	気体領域から超臨界領域へ: 気体モデルではよく外挿を使用し、必要に応じて 個別にサイジングを行うこともできます。
E	高密度液相から液体へ: 温度範囲を分けて 2 回のサイジング 計算を行います。1 回は高密度液相 用、もう 1 回は液体用です。

図 10：さまざまな集合状態における CO₂ 測定の使用事例

3.2.5 サイジングの完了

最終チェックとして前の手順を再確認し、流量計の注文に進みます。

4 設定

4.1 圧力補正（固定値入力か、外部入力か）

固定値圧力は依然として実行可能なオプションですが、実際の圧力が所定の値から外れた場合、測定誤差が生じる可能性があります。したがって、ベストプラクティスに従い、外部での圧力測定の使用を推奨します。これは、特に流体の臨界点付近でコリオリ質量流量計を使用する場合に当てはまります。また、圧力測定点を可能な限り流量測定点に近づけて配置することをお勧めします。下流側直管長 3D は十分有効な経験則に基づいており、コリオリ流量計での断面積の減少による圧力損失から圧力が回復することが確かです。プロセス信号を介してこの測定値を流量計に直接取り込むことで、圧力の生データが得られるだけでなく、流量測定値の補正も可能になり、可能な限り最大の精度が約束されます。

4.2 調整前検証を実行してベースライン値を取得

一部のメーカーでは、流量計の状態を現場で判断するために使用できるオンボード検証技術を実装しています。計測機器の設置直後に調整前検証を行うことは、実際のプロセス条件におけるベースライン値を確立するために不可欠です。この手法は、あらゆる産業で広く採用されており、複数の目的に使用できます。まず、今後の測定値を比較できる初期状態のデータが得られ、計測機器の健全性を経時的に監視できます。トレンド分析機能は、測定精度の偏差やドリフトの特定に不可欠であり、計測機器やプロセス条件の潜在的な問題を把握できます。

さらに、調整前検証は、報告された測定値が正確で信頼できるものであることを確認することにより、デューデリジェンス（事前調査による評価）を実施したことにもなります。このプロセスにより、実際の動作条件下での計測機器の性能を精査できるため、起こり得る故障や不確かさの早期検出に役立ちます。これらの問題を迅速に特定して対処することで、測定システムの完全性を保持することができます。

4.3 予知診断

コリオリ質量流量計には、制御システムに統合できる豊富な診断データが含まれています。この診断データからプロセスに関する有益な情報が得られます。一部のソフトウェアスイートでは、測定性能に対する信頼性を高めるために検証レポートを提供しています。この検証レポートでは、機器の生データが工場で設定されたしきい値と比較して評価されます。生データの測定値が工場設定されたしきい値を超過した場合、検証レポートではオペレータのレビューのため、この値を報告します。不合格の検証レポートは、機器の機能的整合性を検査する必要があることを示す重要な指標です。設定されたしきい値を超過した値によっては、再校正が必要な場合があります。逆に言うと、合格の検証レポートは、流量計が工場仕様の範囲内で動作しているという信頼感を与えてくれます。

詳細な検証レポートの他にも高度な診断機能が提供されていますが、全体的な機能構成はユーザーが選択する機器メーカーごとに異なります。たとえば、Endress+Hauser の特許取得済みの Heartbeat Technology を使用すると、オペレータは Heartbeat Sensor Integrity (HBSI : Heartbeat センサの健全性) などの値を監視し、トレンド表示できます。このテスト項目を使用すると、コリオリ流量計のチューブ内壁の腐食/摩耗など、CO₂ プロセスにおける安全上の重大な懸念事項を検出できます。産業用 CO₂ プロセスでは酸による劣化が大きな懸念事項であるため、このような監視機能により、予知保全計画を作成できます。ベストプラクティスとしては、このようなツールの具体的なプロセス条件にカスタムされた適用方法について、メーカーに協力してもらうことです。以下に、一般的なテスト項目の概要を述べます。

4.4 密度監視

密度監視は、CCUS アプリケーションにおける重要な指標です。前出の相変化図に示されるように、密度値は CO₂ がどの相を示すかによって大きな影響を受けます。この変数の監視とトレンド分析により、プロセスの不安定化や相変化が起こった場合にユーザーに情報を提供できます。これにより、制御システムのアラームを設定して、プロセスの不調を迅速に解決できます。この予防的なアプローチは、CCUS プロセスの効率と信頼性の確保に役立ちます。

4.5 励磁コイル電流

励磁コイル電流は重要な診断ツールとして機能し、流量計の励磁コイルに流れる電流の大きさに関する情報を提供します。高い励磁電流は、気体アプリケーションにおける液体の混入、流体中の固形分割割合の大幅な増加、計測チューブのプロセス付着物、流量計コンポーネントの故障など、プロセスのさまざまな異常状態を示している可能性があります。

4.6 振動ダンピング

振動ダンピングは、振動振幅に対する励磁コイル電流の比率で構成され、工学単位 A/m で表されます。励磁コイル電流とは異なり、振動ダンピングはより高度な診断ツールとして機能し、比率を利用して、気泡（不均一な流れ/スラグ流、マイクロバブルなど）や固形分、高粘度流体の存在、または複合したプロセス異常を識別することができます。このデータのトレンドを分析および監視して、正常なトレンドと確立された標準からの逸脱を見分けることをお勧めします。

4.7 信号の非対称性

信号の非対称性とは、流量計測チューブの入口と出口の振動振幅の差です。信号の非対称性の値の変動を検出することで、固形分の粒子を含む速い流速による摩耗の指標として使用できます。

また、一部の流量計の内部検証テストによっても、このようなプロセスの影響を検出できるため、ユーザーはコリオリ流量計に関する深い知識は必要ありません。

5 結論

正確な CO₂ 測定は、産業生産者が規制要件を満たし、経済的な負担を最小限に抑えるために重要です。CO₂ 排出量に対する厳格な規制により、CCUS（二酸化炭素回収・有効利用・貯留）バリューチェーン全体で正確な測定が求められています。たとえわずかな不確かさであっても大きな経済的損失につながる可能性があり、運用効率を高めるために信頼性の高い測定が不可欠となっています。

コリオリ流量計は、液体、気体、超臨界など、さまざまな集合状態で高い精度と信頼性を確保できるため、CO₂ 測定の堅牢なソリューションであることが証明されています。ただし、相変化、音速の変動、不純物の存在など、CO₂ 特有の課題があり、測定システムの設計と実装においては慎重に検討する必要があります。

CO₂ 測定を最適化するための重要な要素を以下に示します。

1. **適切なサイジングと選定**：高度なサイジングツールを使用して、特定のプロセス条件に基づいて適切な流量計を選定することで、最適なパフォーマンスを確かなものにできます。
2. **ベストプラクティスに基づいた設定**：外部圧力測定と予知診断機能を導入すると、測定の精度と信頼性が向上します。
3. **材質の適合性**：流量計とパイプラインに使用される材質が、変化する CO₂ 組成に適合していることを確認することで腐食や劣化を防止します。
4. **高度な診断機能**：流量計の診断データを活用して、プロセスの状態を監視し、潜在的な問題を早期に検出することで、予防的なメンテナンスを可能にします。

これらのベストプラクティスに従うことで、各産業は正確な CO₂ 測定を実現でき、法規制の遵守をサポートするだけでなく、税制上の優遇措置や運用効率の向上により経済的利益を生み出すこともできます。持続可能性と気候に関する目標に対して世界的な関心が高まるにつれて、正確な CO₂ 測定の重要性はますます高まり、現代の産業活動に欠かせない重要な要素となるでしょう。

6 参考資料

- Bolmatov, D., Brazhkin, V. V., & Trachenko, K. (2013). Thermodynamic behaviour of supercritical matter. *Nature Communications*.
- G. G. Simeoni, T. B. (2010). The Widom line as the crossover between liquid-like and gas-like behaviour in supercritical fluids. *Nature Physics*.
- Gan Cuia, Z. Y. (2019). A comprehensive review of metal corrosion in a supercritical CO2 environment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*.
- Hemp, J., & Kutin, J. (2006). Theory of errors in Coriolis flowmeter readings due to compressibility of the fluid being metered. *Flow Measurement and Instrumentation Volume 17, Issue 6*, 359-369.
- Laboratory, TÜV SÜD National Engineering. (2021, 03 10). *RESOURCE CENTRE WEBINARS CCS AND HYDROGEN ECONOMY: GOING THROUGH TRANSPORTATION MEDIA WITH CHEMICAL THERMODYNAMICS*. 引用元 : https://www.tuvsud.com/en-gb/-/media/regions/uk/pdf-files/webinar-presentations/2021-tuv-sud-nel-ccs_hydrogen-webinar_final.pdf
- M. Anklin, G. E. (2000). EFFECT OF FINITE MEDIUM SPEED OF SOUND ON CORIOLIS MASSFLOWMETERS. *FLOMEKO*.

www.addresses.endress.com
