

特集 第31回 日本NCSLI技術フォーラム

ガス中の微量水分計測のトレーサビリティ体系と二次標準器の開発 小型CRDS微量水分計の実用化

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター
物質計測標準研究部門 ガス・湿度標準研究グループ

上級主任研究員 阿 部 恒

神栄テクノロジー株式会社 専務取締役 柴 田 真 一

1 はじめに

気体中にごくわずかに含まれる水蒸気のことを微量水分と呼ぶ。物質質量分率（モル分率）であれば $1\mu\text{mol}/\text{mol}$ (1 ppm)以下、露点（正確には霜点）であれば -75°C 以下のときに使われることが多い。半導体製造分野では、この微量水分の計測が30年以上も前から重要な課題となっている。半導体デバイスの製造プロセスでは、多種類の高純度材料ガスが大量に使われているが、デバイスが微細化・高機能化・高集積化するにしたがって、それらガスの純度管理がより厳しく求められるようになってきた。材料ガス中の不純物で、デバイスの性能や歩留まりに深刻な影響を与える成分の一つとして水分が挙げられており、必要とされる管理レベルは、多くのガス種に対して1 ppm以下と言われている¹⁾。

このような背景のもと、各種ガスから水分を除去する精製器の性能向上が進められ、現状では残留水分をモル分率で $1\text{nmol}/\text{mol}$ (1 ppb)以下とする仕様の製品も入手可能となっている。ただし、そのような精製器を使用しても、実際に目的とするレベルまで水分除去が行われているかを確認することは必須であり、そのためには微量水分計測が必要となる。1 ppm以下の領域で使用可能な微量水分計については、30年近く前から測定下限がppbレベルの仕様の製品が販売されている。しかし、それらの微量水分計を同じ計測現場で使用すると、計測値が製品ごとに大きく異なる問題が生じた(図1)。このような場合、水分濃度が既知の標準となるガス(微量水分標準)を使うことで、各製品の性能試験を行うことができるが、その当時は微量水分の標準がなかったため、性能の確認ができなかった。

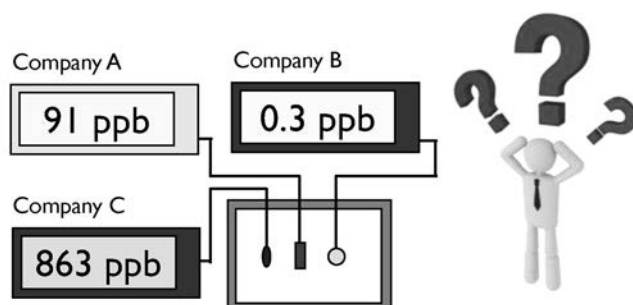


図1：微量水分計測の問題のイメージ図

この状況は、日本を含むいくつかの国で微量水分標準が整備された15年ほど前まで続いた。それらの国の微量水分標準の同等性が国際比較を通じて確認され、微量水分標準を用いた各種微量水分計の性能試験も行われた。その結果、従来から使用されていた多くの微量水分計の性能には問題があることが明らかになった。さらに、今世紀になって市販された、キャビティリングダウン分光法(CRDS)²⁾を測定原理とする微量水分計が高性能であることも明らかになった。しかし、このCRDS微量水分計にも別の問題があった。

本稿の2章では、微量水分計測の現状と課題について、特に産業技術総合研究所(産総研)で開発された、微量水分の一次標準と小型CRDS微量水分計について紹介する。3章では、産総研から国内の民間企業(神栄テクノロジー株式会社)に技術移転され2023年に製品化された小型CRDS微量水分計について紹介する。

2 微量水分計測の現状と課題

2.1 ガス中微量水分の一次標準

2.1.1 ガス中微量水分の標準とは

ガス中微量水分の標準とは、一定の濃度(モル分率)の水分を含み、その濃度と不確かさが既知である気体

を指す。この時の濃度と不確かさは国際単位系(SI)に繋がる形で示す必要がある。ガス分析の分野でよく使われる標準ガスと同様の考え方であるが、標準ガスのようにボンベ等の容器に充填して提供されることはない。これは、水が吸着性の高い物質であり、さらに大気中に水蒸気の形で大量に存在していることに起因する。すなわち、ボンベに既知の一定濃度の水分を含むガスを充填したとしても、ボンベ内面へ水分が吸着したり、ボンベにチューブを接続する際に大気中水分がチューブ内面に吸着してそれが測定時に脱離したりするなど、実際の使用時には充填時の水分濃度と異なってしまう可能性があるからである。この影響は水分量が少なくなるほど深刻になるため、現在の技術では、微量水分領域ではボンベを使った標準ガスの提供は極めて困難と考えられている。そのため、既知の一定濃度の水分を含むガスを発生させる装置を整備して、この発生装置で発生させたガスを標準とする方法が一般的となっている。ガスを流し続けて吸着・脱離水分を平衡状態にさせることで、それらの影響を抑えることが可能となるが、ボンベ詰め比べて手間のかかる方法となる。微量水分計の校正は、微量水分発生装置に配管・接続して標準となるガスを導入し、微量水分計の指示と標準の値とを比較することで行われる。

発生装置以外の方法としては、SIトレーサブルな方法で微量水分を測定できる計測器を開発して、それを一次標準とする方法が考えられる。しかし、湿度計測の分野では、計測器よりも発生装置を一次標準とする方が現状では信頼性が高いため(あるいはSIにつなげやすいため)、校正用の一次標準として計測器を採用している国は現在のところ存在しない。

2.1.2 微量水分発生装置

2.1.1で述べたように、微量水分標準の整備のためには、発生装置を開発する必要がある。ガス中の微量水分の発生法にはいくつかの方法があるが、ここでは産総研が採用した拡散管法と呼ばれる方法を紹介する。この発生法の原理を図2に示す。ステンレスを材料とした、水溜めと拡散管からなる拡散セルを、温度・圧力が制御された発生槽内に入れる。セルの水溜め部分には水が入れてあり、そこでは温度に依存した蒸気圧をもつ水蒸気が発生している。この水蒸気は拡散管の中を通り発生槽内へと移動する。これを流量制御され

た乾燥ガス(窒素)と混合することで、ガス中の微量水分を発生させる。ガス中の水のモル分率は、単位時間に蒸発した水分の質量測定(水分蒸発速度の測定)と単位時間に流れた乾燥ガスの質量測定(質量流量の測定)から決定する。産総研では水分蒸発速度の測定には磁気吊下天秤を、乾燥ガスの質量流量の測定には臨界ノズル(音速ノズル)式流量計を採用した。磁気吊下天秤は、図3に示したように、発生槽内部にある拡散セルの質量を発生槽外部にある電子天秤に、2つの磁石を使い磁力で非接触に吊り下げることができる構造をしている。磁気吊下天秤を使うことにより、発生槽内部にある拡散セルの質量変化を、発生槽を大気開放することなく、連続的に測定することができる。臨界ノズル式流量計は、臨界ノズルを用いて気体流速を一定(音速)にさせ、ノズル上流の気体密度とノズル断面積の

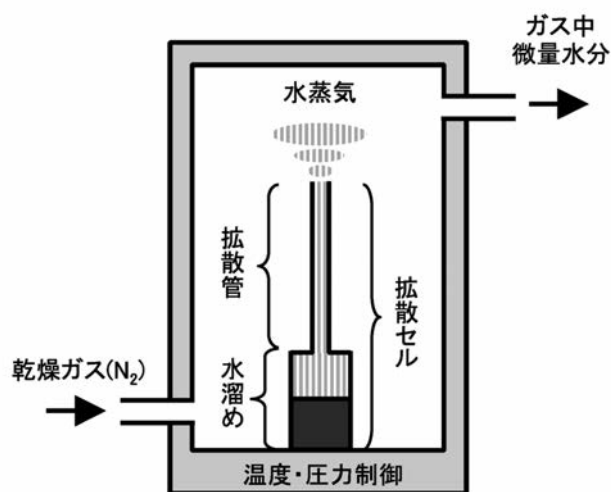


図2：拡散管法の模式図

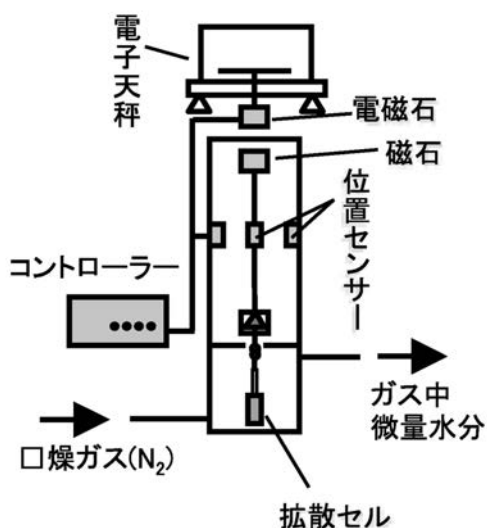


図3：磁気吊下天秤の模式図

情報を使い質量流量を求める方法で、気体小流量の測定法として、現状では最も信頼性が高い方法である。図4に産総研が開発したガス中微量水分の標準発生装置³⁾の写真を示す。



図4：ガス中微量水分の標準発生装置

2.1.3 微量水分標準の確立と国際同等性の確認

開発した微量水分発生装置を用いて、産総研は2007年に12ppb~240ppbの範囲で微量水分標準を確立した。その後、範囲を拡張し、現在は10ppb~5300ppbの範囲で校正サービスを実施している。この範囲の校正・測定能力は相対拡張不確かさ(95%の信頼水準)で6.5%~0.43%である⁴⁾。拡散管法を用いてガス中微量水分の一次標準を確立したのは産総研が世界で初めてとなる。産総研が微量水分標準を整備した頃、他国の標準研究機関でも、微量水分標準の整備が行われていた。それらの標準の同等性を確認する目的で、2007年に欧州国家計量標準機関協会が予備的な国際比較(パイロット比較)を主催した。これは微量水分領域(1ppm以下)で行われた世界で初めての国際比較であり、これには産総研、英国物理学研究所(NPL)、ド

イツ物理工学研究所(PTB)、米国標準技術研究所(NIST)の4つの国立標準研究機関が参加した。各標準研究機関の発生装置の詳細については、文献⁵⁾を参照されたい。この国際比較によって、各国の微量水分標準の国際的同等性が不確かさの範囲内で確認された。

2.2 市販の微量水分計の性能試験

微量水分標準が整備されたことで、微量水分計の性能試験を信頼性高く行うことが可能となった。ここでは、産総研の微量水分標準に基づいて行った性能試験の結果の一部について紹介する。図5は鏡面冷却式露点計の結果である。試験した鏡面冷却式露点計は2社の製品で、カタログ記載の測定範囲の下限は両製品とも霜点-100℃(大気圧でのモル分率14ppb)以下となっている。鏡面冷却式露点計は、標準を参照しなくても露点(霜点)を直接測定(いわゆる絶対測定)できるので、湿度の計測器としては現在最も信頼性が高い装置であるが、微量水分領域になるといかに鏡面冷却式といえども測定が容易ではないことがこの結果から分かる。図6は現在も半導体製造分野を中心として大量に使用されている酸化アルミ静電容量式センサーの結果である。ここでは4社の製品の結果を示しており、それらの製品のカタログ記載の測定範囲の下限は全て霜点-100℃(14ppb)以下となっている。ここで試験した全てのセンサーは、指示の正確性・応答性・感度に問題があることがわかった。一方、2001年頃に市販されたキャビティリングダウン分光法(CRDS)を測定原理とする微量水分計が、高性能であることが明らかになった。図7にCRDS微量水分計の試験結果を示す。他の計測器の結果とは異なり、水分濃度の変化にも素早く応答していることがわかる。これらの試験の詳細については、文献⁶⁾を参照されたい。

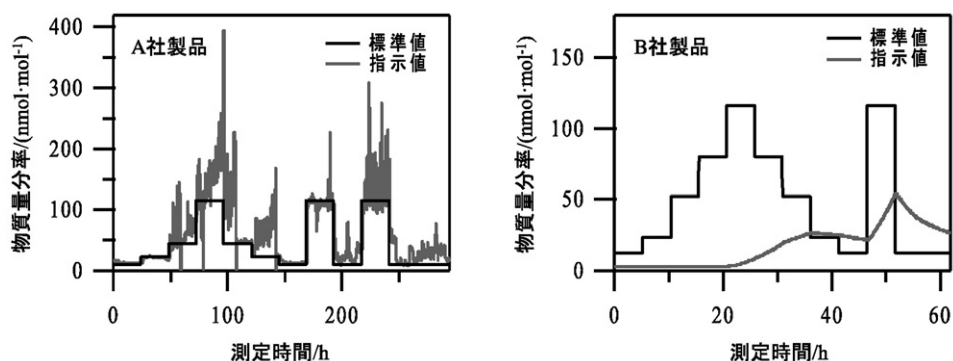


図5：微量水分標準と鏡面冷却式露点計の指示との比較⁶⁾(国立研究開発法人産業技術総合研究所(AIST)提供)

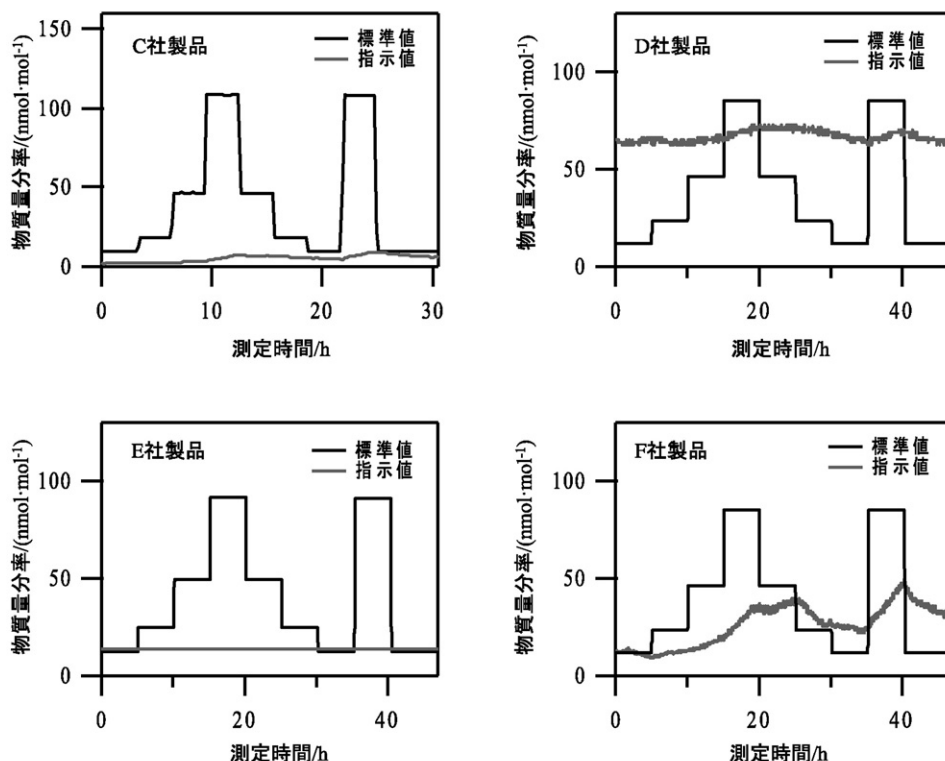


図6：微量水分標準と酸化アルミ静電容量式センサーの指示との比較⁶⁾(国立研究開発法人産業技術総合研究所(AIST)提供)

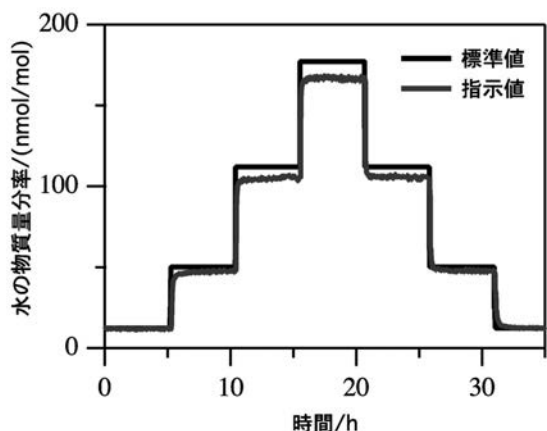


図7：微量水分標準とCRDS微量水分計の指示との比較

2.3 CRDS微量水分計の問題

図5～図7の結果からもわかるように、CRDS微量水分計はガス中微量水分の計測において、発売当時は革命的とも言える性能を有する計測器であった。しかし、この装置はコンパクトタイプの製品でも従来型の他原理の小型微量水分センサーに比べてサイズが大きく、半導体製造ラインに直接組み込んでの使用が難しかった。また、CRDS微量水分計は米国1社のみが製造する独占状態にあり、価格も他原理の微量水分計に比べてかなり高額であった。光学系の修理は米国本社で行われるので、修理費とは別に米国への輸送費・通

関費用が必要となり、修理完了までは通常数ヶ月を要した。これらは微量水分計ユーザーにとって大きな負担となっていた。この問題に対応するため、産総研では小型CRDS微量水分計の研究を計画した。

2.4 CRDSの測定原理

ここではCRDSの測定原理を簡単に説明する。図8にCRDSの概念図を示す。2枚の高反射率ミラーで構成された光共振器(キャビティ)の外部からレーザー光を照射する。キャビティの共振周波数とレーザー周波数が一致すると、レーザー光は入射側のミラーを透過してキャビティ内に進入する。キャビティ内に光パワーが十分蓄えられたところで、レーザー光を遮断する

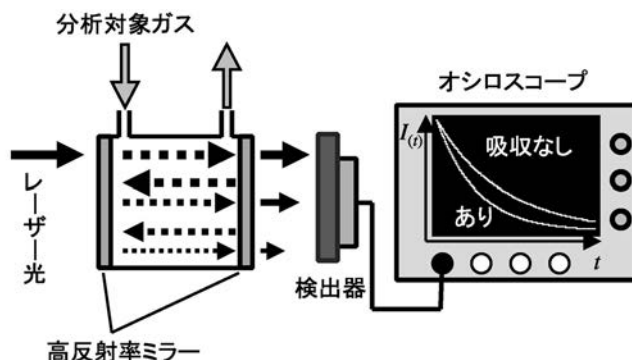


図8：CRDSの測定原理の概念図

と、キャビティ内に閉じ込められたレーザー光は、ミラー間での反射を繰り返しながら、反射損失・散乱損失によって、次第にその強度を減衰させていく。この間、レーザー光は両側のミラーから少しずつ漏れ出すので、入射と反対側のミラー後方に置いた検出器で、その光強度を検出してオシロスコープ等で観察すると、信号が指数関数的に減衰するのが分かる。この減衰信号の時定数はリングダウンタイムと呼ばれている。キャビティ内にレーザー光を吸収する物質(水分等)が存在した場合、吸収による減衰効果が追加されるため、リングダウンタイムは吸収がない場合に比べて短くなる。いま、キャビティ内に数密度 n の水分が存在し、ある周波数における水の吸収断面積が σ である場合を考える。キャビティ内に水分が存在しない場合とする場合のリングダウンタイムをそれぞれ τ_0 と τ とし、光速を c とすると、 $n = (c\sigma)^{-1}(\tau^{-1} - \tau_0^{-1})$ の関係が成り立つ。すなわち、 σ が既知の吸収線を使えば τ_0 と τ の測定から n を決定することができる。CRDSでは、高反射率ミラーを用いてレーザー光をキャビティ内で何度も往復させ、長い光路長を得ることで高感度化を実現させている。例えば、長さ50 cmのキャビティに反射率99.995%のミラーを使った場合、 τ_0 は約33 μs となり、実効光路長 $c\tau_0$ は10 kmにもなる。また、CRDSは通常のレーザー吸収分光法と異なり、吸収による光強度の変化からではなく、リングダウンタイムの変化から数密度を決定するので、レーザー光強度のゆらぎの影響をほとんど受けずに測定できることも高感度化に繋がっている。

2.5 小型CRDS微量水分計の開発

産総研は2009年からCRDSの研究を開始した。小型化の研究については、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の宇宙探査イノベーションハブ(TansaX)への参加を契機に、2016年に本格的に開始した。TansaXは将来的な宇宙探査への応用を目的としつつ、地上での事業化・イノベーション創出を目指す事業である。TansaXに採用された研究テーマ「ガス中微量水分計の小型・軽量・ロバスト化技術の研究(2016年12月～2019年3月)」において、産総研は小型CRDS微量水分計の光学系の設計とプロトタイプの開発を担当した。この研究テーマの地上応用については、半導体製造分野向け、宇宙応用についてはローバー搭載可能な月面

水水探査向けを目標にした。産総研の小型CRDSの光学設計は、現在進行中のJAXAの月極域探査ミッション(LUPEX)で開発中のレーザー微量水分・同位体分析装置(ADORE)にも採用されている。

CRDS小型化の課題の一つに分解能の低下が挙げられる。CRDSはレーザー周波数とキャビティの共振周波数とが一致した場合のみ測定可能な計測法である。共振周波数は共振器の長さに反比例するため、小型化のために共振器長を短くすると、周波数軸上で隣り合う2つの周波数間隔が広がる。図9は共振器長が50 cmと5 cmの場合の共振周波数と水の吸収線の関係を表している。共振器長が50 cmの場合、共振周波数は周波数軸上に密に多数存在しているのですが、5 cmの場合は隙間が大きいため、吸収線の中心周波数付近での測定が困難になる。中心周波数付近で測定できないと、信号強度が弱くなり感度が低下すると、測定周波数の特定が難しくなり、水分濃度決定の不確かさが大きくなる問題が発生する。この問題に対応するため、産総研では水の吸収線付近でレーザー周波数を高速に掃引して、図中の白丸で示された全ての共振周波数でリングダウンタイムを測定して吸収スペクトルを取得し、吸収線の高さからではなく面積から水分濃度をリアルタイムに決定する技術を開発した⁷⁾。これによって小型化による分解能低下の問題を解決した。

開発したプロトタイプ的小型CRDSは、産総研の微量水分の一次標準を用いて評価され、12 ppb～1.3 ppmの範囲において高い性能を有することが確認された。窒素中微量水分の一次標準との比較結果を図10に示す。図中のエラーバーは拡張不確かさ(信頼

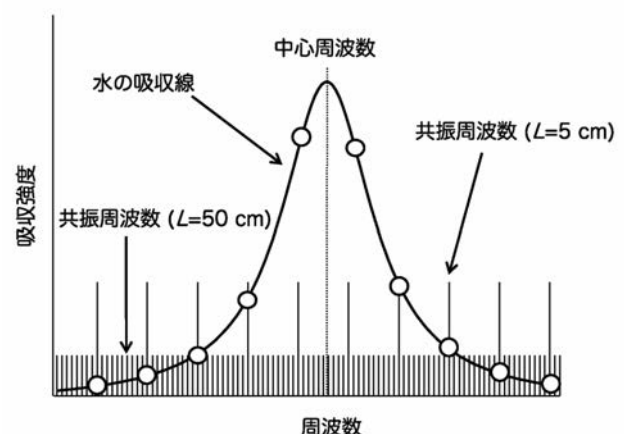


図9：共振周波数と水の吸収線の関係

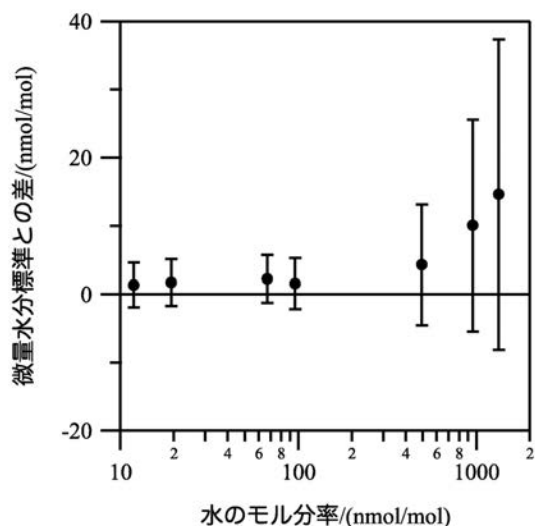


図10：微量水分標準を用いた小型CRDSの性能評価

の水準95%)である。小型CRDS微量水分計の測定値は一次標準と独立に決定している。一次標準との差が不確かさの範囲で一致していることが図からわかる。

2.6 小型CRDS微量水分計の技術移転

2.3で示した問題を解決するため、産総研で開発された小型CRDS微量水分計の技術は、共同研究を通じて国内の民間企業(神栄テクノロジー株式会社)へと移転された。(阿部 恒)

3 小型CRDS微量水分計の実用化

3.1 背景と経緯

半導体、バッテリー、機能性フィルムなど、次世代技術を必要とする製品では、製造過程で残留するごく微量な水分が、品質、性能、歩留まりへ大きな影響を与える。この課題を解決するため、応答性に優れ、高精度で長期信頼性も高いCRDS方式を用いたガス中微量水分測定の研究開発が各国の研究機関や企業で進められているが、実用化に至った例は少なく、また、これまでに製品化されていたCRDS微量水分計は、海外メーカー製しかなく、国内では、導入時の価格が高額であることと、保守に関わる納期や費用が問題となり、微量水分計としてのサイズも大きいことから、製造現場での積極的な導入は難しく、多くの製造業から、CRDS微量水分計の国産化と小型化を強く要望されていた。

今回、産総研が新たに開発した小型CRDS微量水分計の技術を実用化すべく、産総研と神栄テクノロジー

による産官での共同研究取組みを進めた結果、SIトレーサブルな性能評価がされて、一次標準とのトレーサビリティを確保する二次標準器の性能を有しながら、産業界の現場測定で求められる各種要件にも対応する、世界初の小型CRDS微量水分計 mini CRDS を国産で実現した。

3.2 mini CRDSの主な特長

製品化した mini CRDS の主な仕様を表1に示す。ガス中の微量水分を、12ppb~20ppm (露点 -100~-55℃) の範囲で高精度(±4%または±12ppb)に測定することができ、ppbレベルの変化にも瞬時に追従する優れた応答性も兼ね備えており、信頼性の高い微量水分測定性能を有する。また、産総研が開発し、産総研と神栄テクノロジーで共同特許を取得した、画期的な独自のスペクトル解析技術により、CRDS微量水分計としては、これまでにない小型サイズを実現した。センサー部とモニター部は分離可能な構造となっており、モニター部は専用ソフトウェアを利用すればパソコンでも代用することができるなど、図11、図12、図13のように、利用する用途や場所に応じて適切な形態を選択することができる。

表1：小型CRDS微量水分計 mini CRDSの主な仕様

測定範囲	12ppb~20ppm (モル分率)
サンプルガス種	Air, N ₂ , O ₂ , Ar, CO ₂ 他
センサー部 寸法	150(W) × 300(D) × 165(H) mm
モニター部 寸法	150(W) × 80(D) × 200(H) mm
電源	100~240 VAC, 1.4 Amax



図11：mini CRDS (専用モニター + センサー部)



図12：mini CRDS (専用ソフトウェアをインストールしたPC + USBケーブル + センサー部)



図13：mini CRDS (センサー部を壁面へ取付け)

3.3 小型・軽量化

mini CRDSの内部構造を図14に示す。キャビティの両端に高反射率ミラーが搭載されており、その外側にはレーザー光を入射するためのウインドが取り付けられている。オプティカルファイバーからレーザー光が入射され、キャビティから透過するレーザー光の強度をフォトディテクターで検出する。レーザーダイオードからの出力をオフにした直後、キャビティの両端の二つの高反射率ミラー間でレーザー光の反射が繰り返され、その間にフォトディテクターで検出するレーザー光の強度が一定の率まで減衰する時間を測定することで、微量水分を算出することができる。

CRDS方式を用いた測定では、波長分解能がキャビティの長さに反比例することが知られている。波長分

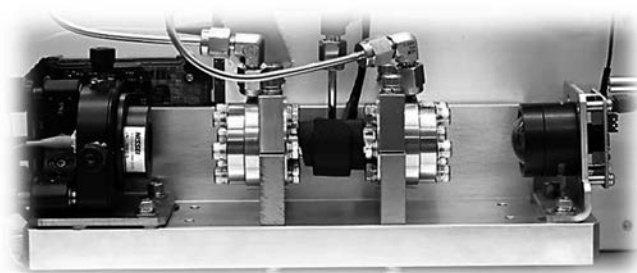


図14：mini CRDSのセンサー部構造

解能が低いと測定精度も低下する。従来のCRDS微量水分計では、キャビティの長さを30cm以上必要としており、これがCRDS微量水分計の小型、軽量化を阻む主要因となっていた。産総研が開発した画期的なスペクトル解析手法により、キャビティの長さを5cmまで短くしながらも、高い測定精度を確保する技術を構築できたことで、表2および図15に示すとおり、ベンチマークとした海外製のCRDS微量水分計に対して、mini CRDSのサイズは全長で半分以下、重さは1/3以下と、大幅な小型軽量化を実現し、測定現場における設置性や使い勝手を大幅に向上させた。

表2：〈参考データ〉サイズの比較

	mini CRDS	海外製CRDS微量水分計
高さ	165 mm	約 220 mm
幅	150 mm	約 220 mm
奥行	300 mm	約 600 mm
重さ	約 5 kg	約 15 kg



図15：mini CRDSと海外製CRDS微量水分計の形状比較

3.4 性能評価

N₂ガス中の微量水分測定について、産総研の供給する一次標準との比較試験結果(グラフ)を図16、図17、図18に示す。10ppb近辺から40,000ppb近辺までの幅広い領域でmini CRDSの測定結果は一次標準に近似しており、精度と安定性で良好な結果が確認された。

また、応答性の評価として、N₂ガス中の微量水分量を50ppb⇔1,000ppbで変化させた場合の、ベンチマークとした海外製CRDS微量水分計との比較試験結果を表3および図19と図20に示す。

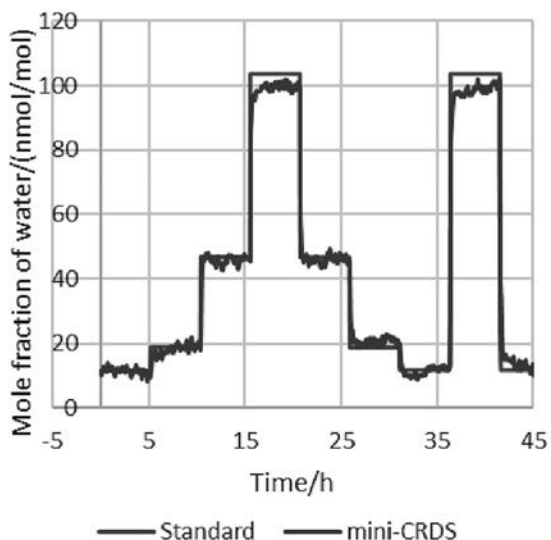


図16：一次標準と mini CRDS の指示との比較 (1)

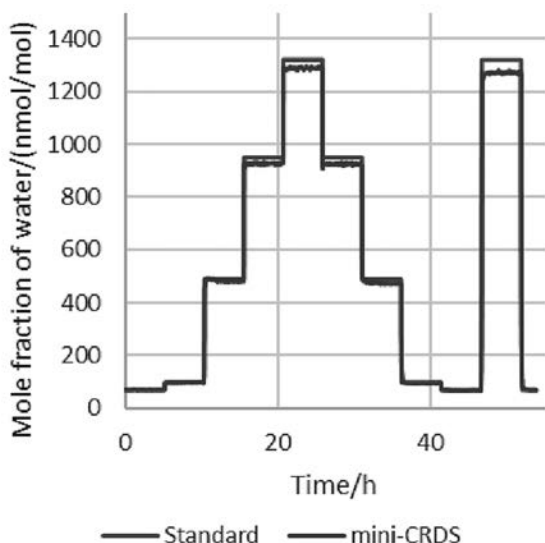


図17：一次標準と mini CRDS の指示との比較 (2)

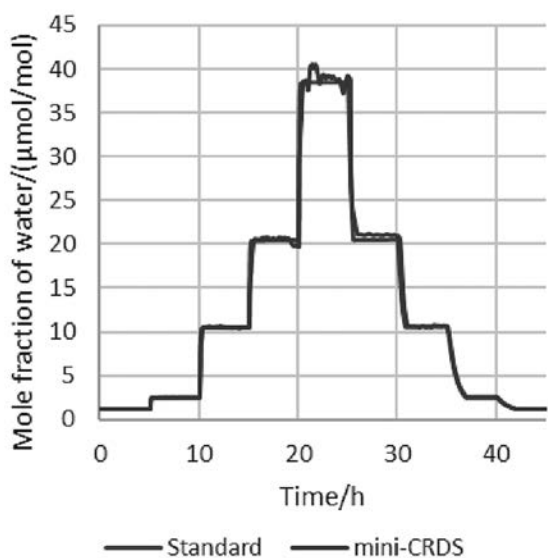


図18：一次標準と mini CRDS の指示との比較 (3)

表 3：〈参考データ〉 応答性評価結果 (50 ppb ⇄ 1,000 ppb)

	mini CRDS	海外製 CRDS 微量水分計
50 ppb → 1,000 ppb		
63 % 応答	26.5 s	217.2 s
90 % 応答	37.4 s	267.6 s
1,000 ppb → 50 ppb		
63 % 応答	15.4 s	229.7 s
90 % 応答	52.4 s	306.9 s

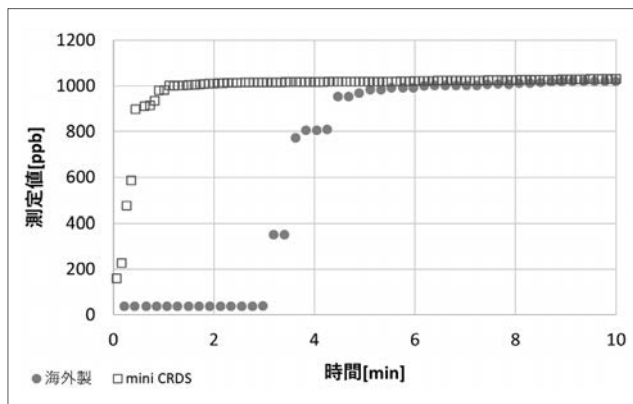


図19：mini CRDS と海外製 CRDS の応答性 (1)

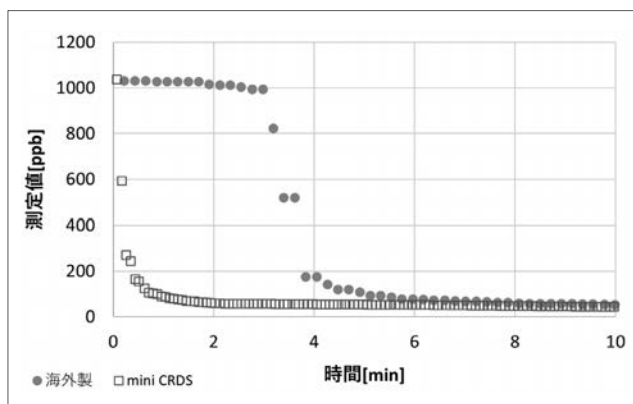


図20：mini CRDS と海外製 CRDS の応答性 (2)

2.2 で示すとおり、微量水分領域において、海外製の CRDS 微量水分計は、他の測定方式に比べると桁違いにすぐれた応答性を持つが、mini CRDS では、更に飛躍的に性能が向上していることが確認された。これは、キャビティの超小型化を実現したことで、キャビティ内のサンプルガスの置換時間を各段に短くし、吸着脱離水分の影響を最小限にしていることが寄与していると考えられる。

3.5 供給・保守への対応整備

実用化した mini CRDS の供給と保守に必要な対応として、微量水分校正システムを構築した。図21 およ

び図22に示すとおり、拡散管方式を用いた微量水分発生装置を整備し、産総研の供給する一次標準とトレーサブルなmini CRDSを標準器としている。mini CRDSの新規供給分の出荷検査や保守での定期校正で一次標準にトレーサブルな校正を実施することで、微量水分測定において、日本国内の国家標準と現場測定をつなげる体系と測定器を、高い信頼性と品質で提供することができるようになった。



図21：微量水分発生装置



図22：微量水分発生装置中の拡散管

また、mini CRDSは開発、生産、アフターメンテナンスまで、すべて日本国内で対応しており、微量水分計の導入前、導入時、導入後、いずれの段階においても、迅速にエンジニアリング対応できる体制も整備している。

3.6 今後の取り組み

実用化したmini CRDSの技術を更に発展させるかたちで、今後、微量水分から低露点(露点 -70°C ～ -10°C 近辺)の領域へ測定範囲を拡大していく検討を

産総研と進めていく予定にある。また、CRDS方式としてはこれまでにない小型化が出来たことで、mini CRDSのセンサー部のみを設備の中に組み込むようなOEM形態も可能であり、測定対象のガス種を拡大していくなど、用途や要望に応じてmini CRDSの用途拡大を図っていく計画にある。

4 おわりに

産総研が開発したCRDS小型化技術を活用し、世界でも類を見ない小型サイズのCRDS微量水分計mini CRDSを国産で実現した。SIトレーサブルな性能評価により、mini CRDSは、標準器としても現場測定器としても適した性能と機能を有する優れた微量水分計であることが実証された。これにより、微量水分管理が製造品質に直結する半導体や全固体電池など、次世代産業分野での日本の競争力強化への一助を担うことが出来れば幸いである。

また、今回のmini CRDSの開発と製品化の過程で得られた新たな技術ノウハウを活用し、湿度、水分、露点に関わる市場でのさまざまな課題解決や品質向上へ貢献できるよう、mini CRDSのさらなる進化と発展に向けて今後も取り組んでいく所存にある。

(柴田真一)

参考文献

- 1) IRDS™ 2022: Yield Enhancement, <https://irds.ieee.org/editions/2022/irds™-2022-yield-enhancement>
- 2) A. O'Keefe, D. A. G. Deacon, Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources, *Rev. Sci. Instrum.*, **59**(1988) 2544-2551.
- 3) H. Abe, H. Kitano, N. Matsumoto, C. Takahashi, Uncertainty analysis for trace-moisture standard realized using magnetic suspension balance/diffusion-tube humidity generator at NMIJ, *Metrologia*, **52**(2015) 731-740.
- 4) M. Amano, H. Abe, Primary measurement standards for trace moisture in multiple gases: extension of gas species to He and O₂, *Metrologia*, **60**(2023) 045003.
- 5) <https://eprintspublications.npl.co.uk/5003/>
- 6) 阿部 恒, ガス中微量水分測定信頼性の飛躍的向上—計量トレーサビリティの確立と計測器の性能評価, *Synthesiology*, **2-3**(2009) 223-236.
- 7) H. Abe, K. Hashiguchi, D. Lisak, S. Honda, T. Miyake, H. Shimizu, A miniaturized trace-moisture sensor based on cavity ring-down spectroscopy, *Sens. Actuators A Phys.* **320**(2021) 112559.