

日本発の新イオン化原理「Energy Shuttle イオン化」を提唱

—窒素キャリアガスでヘリウム同等感度を実現、世界的ヘリウム枯渇危機に解決策—

1. 発表者：

布施 泰朗（京都工芸繊維大学分子化学系 准教授）

初 雪（京都工芸繊維大学分子化学系 助教）

2. 発表のポイント：

- ◆窒素キャリアガスに微量のエチレンを添加するだけで、GC-MS（注 1）の感度をヘリウム使用時と同等まで回復させる新イオン化法「Energy Shuttle（エネルギーシャトル）イオン化」（注 2）を提唱しました。
- ◆3 体以上の分子の連鎖的衝突によりエネルギーが伝播する新しい物理理論体系を提案。従来「エネルギー散逸の要因」とされてきた気相中の分子衝突が「エネルギーの能動的中継機構」として機能しうることを示した。日本発の新しいイオン化原理の提案です。
- ◆本成果は世界的ヘリウム枯渇危機への実用的解決策となるほか、液体クロマトグラフィー質量分析（LC-MS）や化学気相成長（CVD）（注 3）など広範な気相反応場への応用が期待される。論文 2 報を発表、特許 2 件を出願済みです。

3. 発表概要：

京都工芸繊維大学分子化学系 布施泰朗 准教授らの研究グループは、窒素キャリアガス（注 4）に約 9%のエチレンをドーパントとして添加することで、ガスクロマトグラフ質量分析装置（GC-MS）の感度をヘリウム使用時と同等レベルまで回復させる新しいイオン化法「Energy Shuttle（エネルギーシャトル）イオン化」を提唱しました。この手法は、エチレン分子がイオン源内でエネルギーの能動的な中継者として機能する「3 体以上の連鎖的衝突によるエネルギー伝播」という新しい物理メカニズムに基づくものです。本手法は日本発の新しいイオン化原理の提案です。本成果は、深刻化する世界的ヘリウム枯渇危機に対する実用的解決策を提示するとともに、LC-MS や CVD 分野への波及が期待されます。

本研究成果は、2 報の論文として学術雑誌『Communications Chemistry』（2026 年 2 月 13 日オンライン公開）および『Journal of Chromatography A』（2026 年 3 月 27 日オンライン公開）に掲載されました。また、関連する技術について 2 件の特許を併せて出願しています。

4. 発表内容：

研究の背景

ヘリウムは質量分析装置のキャリアガスとして不可欠な希少ガスですが、世界的な供給不安定化と価格高騰が深刻化しています。2024年6月には米国連邦ヘリウム備蓄が民間売却され、さらに中東情勢の緊迫化（ホルムズ海峡リスク）により、世界生産量の約3割を占めるカタールからの供給にも懸念が生じています。世界で5万台以上稼働するGC-MS装置のヘリウム依存からの脱却は、環境モニタリング、食品安全、臨床診断など広範な分野で喫緊の課題です。代替キャリアガスとして窒素は大気から無尽蔵に得られますが、従来条件ではヘリウムの1~5%程度の感度しか得られず、実用化の障壁となっていました。「Energy Shuttle イオン化」は、日本発の新しいイオン化原理として、このヘリウム依存の問題に対する根本的な解決策を提示するものです。

研究内容

本研究では、窒素キャリアガス（1.0 mL/min）に微量のエチレン（0.1 mL/min、約9%）を添加するという極めて簡便な手法によりヘリウム使用時と同等レベルまで回復させることに成功しました。さらに、70 eV 電子イオン化（EI）（注5）で得られる標準的なフラグメンテーションパターンが完全に保持され、既存のNISTマスペクトルライブラリとの直接照合が可能であることを実証しました。提唱する「Energy Shuttle イオン化」のメカニズムは以下の3段階です。（1）標準的な70 eV 電子イオン化により短寿命の窒素分子イオン N_2^+ （寿命約1ナノ秒）が生成。（2）熱力学的に有利な電荷移動反応により、約1000倍長寿命のエチレン分子イオン $C_2H_4^+$ が生成。（3） $C_2H_4^+$ が連鎖的に目的分子と衝突し、EI様のイオン化を実現。この効果が分子衝突に依存することは、クヌーセン数（Kn）（注6）を系統的に変化させた実験により実証されました。衝突優勢領域（ $Kn \approx 0.1$ ）では最大27.6倍の感度増強が得られる一方、分子流領域（ $Kn > 10$ ）では逆に感度が低下します。第1報では、この高感度化をもたらすEnergy Shuttle イオン化の基礎メカニズムを明らかにしました。第2報では、イオンソースのレンズ口径がEnergy Shuttle 効果の発現を支配することを見出し、クヌーセン数に基づく局所圧力制御の物理的根拠を明らかにしました。2機種（Agilent社製、島津製作所製）での再現性確認、17化合物にわたる検証を完了しています。既存装置への導入はY字管とマスフローコントローラーの追加のみです。

今後の展開

本研究成果により、今後はLC-MS（液体クロマトグラフィー質量分析）への展開が期待されます。大気圧化学イオン化（APCI）条件下では衝突頻度がGC-MSの10万~100万倍に達するため、理論的にはさらなる感度向上が予測されます。コレステロールや中性脂肪、脂溶性ビタミン等の非極性脂質分析への適用が有望です。また、化学気相成長（CVD）分野でも前駆体活性化の効率向上への応用が見込まれます。本研究で提案した「気相エネルギー移送」の一般理論は、プラズマ科学や大気化学など広範な気相反応場の理解と設計に資する可能性があります。本研究成果は、国際出願を含む2件の特許出願を行っており、今後は国内外の分析機器メーカーとの技術連携も視野に入れていきます。

5. 発表雑誌：

1. 雑誌名： *Communications Chemistry* (Nature Portfolio) , 9, 129 (2026)

論文タイトル： Nitrogen carrier gas enhancement in GC-MS via ethylene dopant improves sensitivity and preserves EI-like spectra

著者： Yasuro Fuse, Xue Chu

DOI 番号： <https://doi.org/10.1038/s42004-026-01930-x>

2. 雑誌名： *Journal of Chromatography A* (Elsevier) , 1776, 466940 (2026)

論文タイトル： Energy Shuttle ionization for high-sensitivity nitrogen-carrier gas chromatography-mass spectrometry: aperture scaling and Knudsen-regime control

著者： Yasuro Fuse, Xue Chu

DOI 番号： <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2026.466940>

関連特許：

1. 「ガスクロマトグラフ質量分析方法およびガスクロマトグラフ質量分析装置」

出願人： 国立大学法人京都工芸繊維大学、発明者： 布施泰朗、初雪

日本出願番号： 特願 2024-173057 (2024 年 10 月 2 日出願)

国際出願番号： PCT/JP2025/030086 (2025 年 8 月 27 日出願)

2. 「物質イオン化方法および物質イオン化装置」

出願人： 国立大学法人京都工芸繊維大学、発明者： 布施泰朗、初雪

日本出願番号： 特願 2025-174567 (2025 年 10 月 16 日出願)

6. 用語解説：

注 1) GC-MS (ガスクロマトグラフ質量分析装置)

混合物中の化学物質を分離 (ガスクロマトグラフ) し、各成分を同定・定量 (質量分析) する装置。環境汚染物質の検出、食品安全検査、臨床検査、法医学鑑定など幅広い分野で使用されている。世界で 5 万台以上が稼働しており、従来はヘリウムをキャリアガスとして使用することが標準であった。

注 2) Energy Shuttle (エネルギーシャトル) イオン化

本研究で提唱された新しいイオン化メカニズム。エチレン分子が、短寿命の窒素イオンからエネルギーを受け取り、長寿命の中間担体イオンとしてそのエネルギーを目的分子へ「シャトル (運搬)」する 3 段階の連鎖的衝突過程に基づく。「衝突がエネルギーを散逸させるのではなく中継する」という概念は従来のイオン化理論ではなく、新しい物理理論体系として提案された。

注 3) 化学気相成長 (CVD: Chemical Vapor Deposition)

気体状の原料を化学反応させて基板上に薄膜を形成する技術。半導体デバイス製造や太陽電池などに広く用いられる。Energy Shuttle 理論の気相エネルギー移送原理は CVD プロセスにおける前駆体活性化にも応用可能と予測されている。

注 4) 窒素キャリアガス

ガスクロマトグラフにおいて試料を分離カラム中で運搬する不活性ガス。従来はヘリウムが標準であったが、近年急速に枯渇が進んでいる。窒素は大気の約 78% を占めほぼ無尽蔵に利用可能だが、質量分析の感度がヘリウムに比べ大きく低下する課題があった。

注5) 電子イオン化 (EI: Electron Ionization)

質量分析で最も広く使われるイオン化法。高エネルギー (70 eV) の電子を気化した試料分子に衝突させてイオン化する。得られるフラグメンテーションパターン (壊れ方のパターン) は化合物ごとに固有であり、60 年以上にわたり蓄積された NIST ライブラリ (約 35 万化合物) との照合による化合物同定が標準手法となっている。

注6) クヌーセン数 (Kn: Knudsen number)

気体分子の平均自由行程 (分子が他の分子と衝突するまでに飛ぶ平均距離) と装置の代表的長さの比で定義される無次元数。値が小さいほど分子同士の衝突が頻繁に起こる (衝突優勢領域)。Energy Shuttle 効果はこの衝突優勢領域でのみ発現し、分子流領域では効果が消失する。

7. 添付資料:

