

1234 • LISA VOL.11 NO.1 2004-1

徹底分析
シリーズ

プラネタリーヘルスと麻酔

▼表1 手術室でよく遭遇する製剤の環境負荷 (CO₂ 換算)

https://healthcarelca.com/database (2026年3月7日閲覧) をもとに独自に作成

		CO ₂ 換算 (gCO ₂ e)
リドカイン	100 mg	2.9
ブピバカイン	20 mg	0.46
ロビバカイン	75 mg	2.7
プロポフォール	20 mg	0.42
ケタミン	50 mg	7
モルヒネ	10 mg	15.1
フェンタニル	0.1 mg	0.0096
レミフェンタニル	5 mg	0.515
ロクロニウム	50 mg	7.2
エフェドリン	40 mg	3.28
スガマデクス	200 mg	2.4
輸液バッグ	50 mL	130
輸液バッグ	100 mL	150
輸液バッグ	500 mL	390
輸液バッグ	1000 mL	580
バイアル (1 mL) / ガラス		65.6
バイアル (1 mL) / ポリマー		50.5
アセトアミノフェンと ケトプロフェン (NSAIDs) を個別に静脈投与	1000 mg/50 mg 1000 mg/50 mg	65.1
アセトアミノフェンと ケトプロフェン (NSAIDs) を個別に経口投与	1000 mg/50 mg 1000 mg/50 mg	11.4

13g 15g/100g (W6) (M下H)

することは可能である。

CF_{API}: 表1より20 mgのプロポフォールのCFは0.42 gCO₂eなので、1キット500 mgは25倍の10.5 gCO₂e。

CF_{vial}: 表1より1 mLのガラスバイアルは65.6 gCO₂eであり、1バイアルの質量を2 gとすると、バイアルのCFPは質量に比例するので、1キットのガラスバイアルの質量はその20倍程度であり、1312 gCO₂eと推計。

CF_{closure}: Loftusら³⁾の包装LCAによると、ゴム栓やアルミキャップ、ラベルなどの小部材は、ガラス本体に比べるとCO₂寄与は小さく、多くても10 gCO₂e程度と推測されるとあるので、これを採用し10 gCO₂eと推計。

CF_{secondary}: 小さな医薬品用紙箱+添付文書は、1セットあたり数〜10 gCO₂e程度であり、10 gCO₂eと推測。

CF_{transport}: 1 gあたり0.2 gCO₂eと仮定すると、約100 g/1キットであるので、20 gCO₂eと推測。

CF_{waste}: 主に紙箱、ラベル、残液などが燃焼起源CO₂となり、1本あたりの寄与は5 gCO₂e。

したがって、1%ディプリバン注-キットのCFPは下記のように推測される。

$$CFP = 10.5 + 1312 + 10 + 10 + 20 + 5 = 1367.5 \text{ gCO}_2\text{e}$$

127

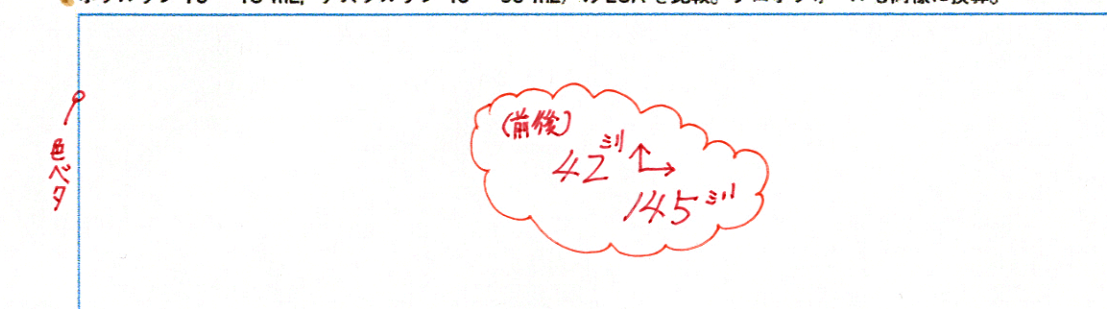
レミゾラム (50 mg) 78.5g

レミゾラムのCF_{API}は未公開であり、論文でも検索できなかった。レミマゾ

▼図2 総流量1 Lにおける麻酔薬の環境負荷

https://healthcarelca.com/database (2026年3月7日閲覧) をもとに独自に図を作成

吸入麻酔薬は最新の製造プロセスを想定し、発生ガスを回収して、材料の70%をリサイクルするという前提で環境負荷を計算した。総流量1 L/minで、70 kg成人、1 MAC (最低肺泡濃度) を1時間維持するために必要な麻酔薬量 (セボフルラン10〜15 mL、デスフルラン40〜60 mL) のLCAを比較。プロポフォールも同様に換算。



ラムは乾燥粉末であり、正確な意味では液体のミダゾラムのCF_{API}とは異なるが、多少の誤差を許容し、公開されているミダゾラムのCF_{API}を利用する。

CF_{API}: ミダゾラム1 gのAPIは444 gCO₂eである。レミマゾラムは1バイアル50 mgなので22.2 gCO₂eと推測。

CF_{vial}: レミマゾラムのガラスバイアルの質量は7 g程度であり、1 mLバイアルの3.5倍であるので229.6 gCO₂e程度と推計。

CF_{closure}: レミマゾラムは、準備に生理食塩液 (a)、50 mLシリンジ (b)、18 G ピンク針 (c) を使用する。それぞれについて計算する。

(a) = 生理食塩液6 gCO₂e, ポリプロピレン (PP) ボトル63 gCO₂eであり、その半分を使用するので、34.5 gCO₂eと推計。

(b) = 質量ベースで検討。PP: 1.9 gCO₂e/g, 合成ゴム: 3.0 gCO₂e/g, 紙: 0.9 gCO₂e/gと仮定する。

ロ・バレル (筒) = PP18〜22 g→20 gとして38 gCO₂e/g。

・プランジャー (押し子) = PP4〜6 g

→5 gとして9.5 gCO₂e/g。

・ガセット (黒ゴム) = 合成ゴム1〜2 g→1.5 gとして4.5 gCO₂e/g。

・滅菌包装+紙5〜8 g+外箱 (複数包装) 1 g→7.5 gとして6.8 gCO₂e/g。

したがって、合計58.8 gCO₂eと推計。

(c) = ステンレス鋼: 3.0 gCO₂e/g, プラ+紙: 1.3 gCO₂e/gと仮定する。

・ステンレス針0.4 gとして1.2 gCO₂e/g。

・PP (ハブ+キャップ) 0.7 gとして1.33 gCO₂e/g。

・包装材 (プラ+紙) 1.5 gとして1.95 gCO₂e/g。

したがって、合計4.48 gCO₂e/本と推計。

CF_{secondary}: 包装LCAでは、非常に少ないので1 gCO₂e程度。

CF_{transport}: 2 gCO₂e程度。

CF_{waste}: 紙箱・ラベル・残液などが燃焼起源のCO₂となり、5 gCO₂e程度。

したがって、レミマゾラム50 mgのCFPは下記のように推測される。

$$CFP = 22.2 + 229.6 + (34.5 + 58.8 + 4.48) + 1 + 2 + 5 = 357.6 \text{ gCO}_2\text{e}$$

実際に使用する際には、延長チューブ (100 cm) を使用する。その分として約20 gCO₂eを加えて、最終的な試算は以下のように推計される。

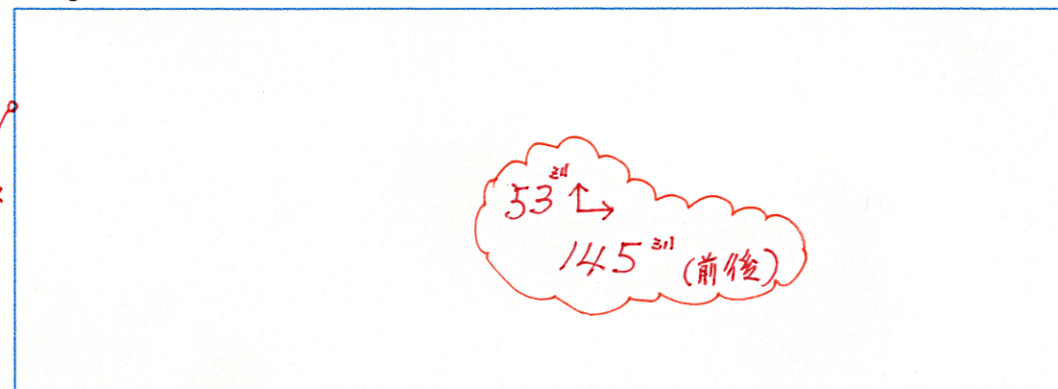
$$CFP = 1367.5 \text{ gCO}_2\text{e}$$

$$CFP = 377.6 \text{ gCO}_2\text{e}$$

以上の数値はあくまで筆者の推計であり、文献上、レミマゾラムのCFPや両薬物を比較した研究は存在しないので、現時点でどちらがより環境負荷が少ない麻酔方法であるか明確な結論は出せないが、レミマゾラムを使用した静脈麻酔は環境負荷がより少ないことが予想される。いずれにしても、1時間程度の全身麻酔に使用される1キットもしくは1バイアルあたりの両薬物のCFPは1.5 kgCO₂e以下であるので、低流量麻酔で1 MACで1時間管理された吸入麻酔薬の全身麻酔と比較して、静脈麻酔薬は圧倒的に環境負荷が少ないことがわかる (図2)。

図3 人工呼吸による環境負荷

https://healthcarelca.com/database (2026年3月7日閲覧) をもとに独自に作成
fresh gas flow (FIO₂ = 0.3/1 時間> hr) の場合。麻酔器の消費電力も含む。



麻酔回路 ② ベタ

すべてに共通する全身麻酔時の麻酔回路や気管チューブなどである。プラスチック製品が3 g CO₂e だと仮定して、それぞれの質量から CFP を求めると、

$$\begin{aligned} \text{CFP 麻酔回路} &= 400 \times 3.0 = 1200 \text{ g CO}_2\text{e} \\ \text{CFP 麻酔マスク} &= 50 \times 3.0 = 150 \text{ g CO}_2\text{e} \\ \text{CFP 人工鼻 (HME/HMEF)} &= 30 \times 3.0 = 90 \text{ g CO}_2\text{e} \\ \text{CFP 気管チューブ} &= 30 \times 3.0 = 90 \text{ g CO}_2\text{e} \end{aligned}$$

で、1 症例で CFP = 1530 g CO₂e となる。ソーダライムは約 100 g CO₂e/hr 程度で加算される。そして、静脈麻酔中の麻酔器の総流量であるが、図3が示すとおり、1 L/min でも6 L/min でもほとんど変わらず、150 g CO₂e/hr 程度で加算される。いずれにしても単回使用の麻酔回路は、酸素消費量をはるかに超える環境負荷が非常に大きいことが理解できる。

ほかの麻酔方法との比較

最近、Elson ら⁴⁾ は興味深い論文を報告した。彼らは、静脈麻酔で導入後に

吸入麻酔薬セボフルランとプロポフォール・レミフェンタニル併用全静脈麻酔 (TIVA) で使用されるすべての消耗品を含めたCFPを比較した。22分まではセボフルランを使用した群で、TIVA より CFP が低かった。しかし44分を過ぎると、TIVA が低かった。TIVA の CFP の内訳は、消耗品が60%、薬物が40%であった。360分の時点でのセボフルラン群の CFP は99.5%がセボフルランのCFPであった。つまり超短時間の全身麻酔では、セボフルランの環境負荷は少ないが、長時間の手術ではセボフルランそれ自体の強力な環境負荷への影響がほかを無視できるほどに CFP を増大させるということである。

最後に環境負荷が少なそうな、末梢神経ブロックや脊髄くも膜下麻酔といった区域麻酔について、消毒を10~20 g CO₂e、滅菌手袋を200~300 g CO₂e、針を10 g CO₂e 程度と推定すると、局所麻酔薬は一桁なので1回の区域麻酔で300 g CO₂e 程度になる(超音波診断装置や電力などを未評価)。したがって区域麻酔は環境負荷が少ないと考えられるが、静脈麻酔と区域麻酔を

直接比較した研究はほとんどなく、麻酔回路を再使用するとして評価すると、環境負荷の関係性は“区域麻酔≦静脈麻酔”となり、こちらも今後の研究が待たれる。

静脈麻酔薬の水質汚染

TIVAには特有の問題がある。開栓した薬液全量を投与することはまれであり、ほとんどのケースで残液が生じ、これによる水質汚染が発生する。Rieff ら⁵⁾ は、7日間の手術室で廃棄されたプロポフォールは22% (6784 mL)、レミフェンタニルは14% (2069 mL) であったと、実際の写真とともに報告している。プロポフォールの未使用薬液が適切に処理されずにそのまま排水や一般廃棄物に混入すると、水生環境への濃縮汚染へと進展する。プロポフォールは脂溶性が高く、生分解性がきわめて低いので、水生生物に対する長期的な影響を伴う毒性が指摘されている。いったん投与されたプロポフォールは、グルクロン酸抱合や硫酸抱合を受け、その約70%は代謝物として尿から排

泄され、未変化プロポフォールはごく少量が排泄される。プロポフォールは、覚醒は早くとも、代謝物としての体外排泄は比較的長く継続し、全身麻酔後、数日以上にわたり尿中で検出される。プロポフォールは静脈麻酔薬として大量に使用されるが、投与期間が短く、慢性投与が少ないため、廃棄総量としてはほかの慢性投与薬物(降圧薬、抗うつ薬)などに比べると、環境中の「常在濃度」は低いとされる。しかし、プロポフォールを使用したTIVAの増加により、将来的に環境濃度が上昇する可能性が懸念される。一方で、レミマゾラムは水生生態系に対する安全性が非常に高い有望な代替薬であるとの報告⁶⁾があり、“Green Anesthesia”を目指す麻酔科医にとって最適な選択肢かもしれない。いずれにしても重要なのは、“プロポフォール原液は絶対に下水道・一般廃棄物に直接破棄してはならない”ということである。医薬品または感染性汚染容器に破棄し、焼却されるようにすることである。臨床的には、導入に使用した残液の術中持続投与や、TIVAで維持しているときにプロポフォールやレミマゾラムを使い切った場合に、手術終了まで短時間であれば吸入麻酔薬を一時的に投与するなどして、残薬を発生させない工夫も考慮に入れる必要があるかもしれない。

最後に、医療プラスチックは海洋マイクロプラスチック源であるとWHOで報告されており、プロポフォール残液がマイクロプラスチック粒子に吸着され、食物連鎖に入る可能性も指摘されている。プロポフォールはバイアル・包装の負荷など、吸入麻酔に劣る科学的環境負荷の側面も有しており、1 症

例で複数のシリンジを使用することによるバイアル・包装廃棄量の増加も問題である。今後、これらのリサイクルが課題となるであろう。

麻酔薬の最終的な水質汚染に関しては、ほとんどまだ何もわかっていないに等しい。今回、現時点で入手できる最大限の情報をもとに試算したが、さらなる知見の集積により、この分野の研究が進展し、麻酔科医一人一人の行動が地球環境保全へと改善されることを切に期待する。現段階の筆者の最終的な結論は、CFPを考慮し、環境負荷が少ない麻酔方法は、区域麻酔≦全静脈麻酔薬<吸入麻酔ということになるが、それぞれに特有の問題もある。われわれ麻酔科医師は、選択する麻酔方法に関して経済的な要因も重要であるが、第一に患者、第二に多面的かつ総合的なプラネタリーヘルスへの配慮が重要である。

麻酔方法の提案

- ・区域麻酔単独または併用。
- ・全身麻酔回路、麻酔マスクなどは再使用可能製品を使用。
- ・長時間手術では吸入麻酔を避け、TIVAを選択し、可能な限りの残液の最小化、プラスチックの最小化を考慮。
- ・吸入麻酔を使用する場合には、低流量麻酔(<1 L)で、亜酸化窒素は使わない。
- ・3R (廃液の reduce, 回路の reuse, シリンジと針の分離などの recycle) などにより、プラスチック廃棄の減量対策。

文献 ① ③a ⑤a ⑥ MB ③f

1. Lattanzio S, Stefanizzi P, D'ambrosio M, et al. Waste management and the perspective of a green hospital-a systematic narrative review. Int J Environ Res Public Health 2022; 19: 15812.
2. American Society of Anesthesiologists. Waste Disposal Management. (https://www.asahq.org/about-asa/governance-and-committees/asa-committees/environmental-sustainability/greening-the-operating-room/waste-disposal) (2026年●月●日閲覧)
3. Loftus MJ, Forrester C, Shul LY, et al. The carbon footprint of different medication. トル packaging items at an Australian tertiary hospital. J Pharm Pract Res 2026; 56: 147-55.
4. Elson B, Steinbach I, Hillson R. Carbon footprint of total intravenous anaesthesia vs. inhalational sevoflurane anaesthesia in adults: a modelling study. Anaesthesia 2025
5. Rieff EA, Jacobs TG, Spema Weiland NH, et al. Waste and cost assessment of total intravenous anaesthesia in the context of environmental sustainability: insights from a Dutch academic hospital. Eur J Anaesthesiol 2025; 42: 649-69.
6. Ho CH, Lu CW. Aquatic toxicity of propofol vs. remimazolam: an in-silico comparison. Anaesthesia 2026; 81: 888-9.