

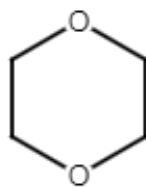
優先評価化学物質のリスク評価（一次）

人健康影響に係る評価Ⅱ

有害性情報の詳細資料

1, 4-ジオキサン

優先評価化学物質通し番号 80



令和8年1月

厚生労働省

目 次

有害性評価（人健康影響）	1
1. 有害性評価に関する国内外の評価	1
1-1. 非発がん影響	1
(1) 経口	1
(2) 吸入	3
1-2. 発がん影響	7
(1) 発がん性分類	7
(2) 発がん性の定量的評価	9
1-3. 国内の他法令による規制値等	15
2. 一般毒性	16
2-1. 経口	16
(1) ヒト	16
(2) 実験動物	16
2-2. 吸入	17
(1) ヒト	17
(2) 実験動物	17
3. 生殖発生毒性	18
3-1 経口	18
(1) ヒト	18
(2) 実験動物	18
3-2 吸入	18
(1) ヒト	18
(2) 実験動物	18
4. 変異原性（遺伝毒性）	19
＜本評価における結論＞	21
5. 発がん性	26
5-1 経口	26
(1) ヒト	26
(2) 実験動物	26
5-2 吸入	28
(1) ヒト	28
(2) 実験動物	29
6. その他の有害性に関する情報	29
6-1. 生体内運命（体内動態）	29
＜吸収＞	30
＜分布＞	30
＜代謝＞	30
＜排泄＞	32
6-2. 急性毒性	32

(1) ヒト.....	32
(2) 実験動物.....	33
6-3. 刺激性・腐食性及び感作性.....	33
(1) 刺激性・腐食性.....	33
(2) 感作性.....	34
7. 作用機序.....	34
8. 有害性評価値の導出.....	37
9. 参考文献.....	40
9-1. 国内外の評価書・試験報告書.....	40
9-2. 文献.....	43
10. (参考) BMD 解析データ.....	48
10-1. 経口暴露による発がんリスク解析.....	48
10-2. 吸入暴露による発がんリスク解析.....	51

1 有害性評価（人健康影響）

2 はじめに

1, 4-ジオキサン（CAS 番号 123-91-1）は、人健康に関する有害性評価の優先度を検討するため 2010 年に実施されたスクリーニング評価において、人健康影響の有害性クラス「2」、暴露クラス「3」と評価され、優先度「高」となったことから優先評価化学物質として指定することが適当であるとされ、2011 年 4 月 1 日に優先評価化学物質（通し番号 80）に指定された。その後、2022 年 3 月 30 日に公表されたリスク評価（一次）評価Ⅰの優先順位付けの結果を踏まえ、詳細なリスク評価としてリスク評価（一次）評価Ⅱを実施することとなった。

国内外の評価機関による公表された既存の評価書等及び新しい知見を調査し、9.参照文献に挙げた資料を用いて 1, 4-ジオキサンの有害性評価を実施した。新しい知見の調査は、総合的な評価を実施していた最新の評価書（2022 年末時点）として AICIS⁽¹⁾ (2022) を選定し、その評価年である 2022 年より 2 年遡った 2020 年 1 月 1 日から 2025 年 3 月 12 日までに発表された文献について、PubMed 等のデータベースを活用した文献調査を行った。

なお、本評価においては、1, 4-ジオキサンの分子量は 88.11、吸入濃度の単位換算係数は $1 \text{ mg/m}^3 = 0.273 \text{ ppm}$ 、 $1 \text{ ppm} = 3.66 \text{ mg/m}^3$ （1 気圧 20℃）を用いた⁽²⁾。ただし、引用文献中に吸入濃度の換算値の記載がある場合は、引用元の記載を優先する。

1. 有害性評価に関する国内外の評価

国内外の各機関が実施した 1, 4-ジオキサンの中・長期暴露による非発がん影響及び発がん影響に関する定量的評価（有害性評価値の根拠及び導出方法等）、発がん性及び変異原性（遺伝毒性）に関する定性的評価等について調査した。

毒性情報の包括的レビューによる 1, 4-ジオキサンの定量的評価が実施された最も新しい評価書は US EPA (2020, 2024) であった。国内で定量的評価が実施されていたのは、厚生労働省「化学物質のリスク評価検討会」で実施する化学物質による労働者の健康障害の初期リスク評価の資料であるリスク評価書（案）（有害性評価部分）(2018)（以下 厚労省 (2018) と略）であった。

1-1. 非発がん影響

(1) 経口

経口暴露による非発がん影響に関する主要な定量的評価について、表 1 に示した。ECHA に

⁽¹⁾ Australian Industrial Chemicals Introduction Scheme

⁽²⁾ (独) 製品評価技術基盤機構 (NITE)：「化学物質の初期リスク評価書」Ver.1.0 No.13 (2005.5) より

29 は推定無影響レベル (DNEL⁽³⁾) が記載されていたが、参考扱いとする⁽⁴⁾。

30 表 1 1, 4-ジオキサンの経口経路の非発がん影響に関する国内外の定量的評価

評価機関 発表年	根拠データ	エンドポイント	NOAEL/ LOAEL 等	評価値	備考
ECHA dossier (accessed on 2025/3/12)	ラット 2 年間飲水投 与毒性試験 (雄: 0, 9.6, 94, 1,015, 雌: 0, 19, 148, 1,599 mg/kg/day) (Kociba <i>et al.</i> 1974)	肝細胞及び腎尿 細管上皮細胞の 変性・壊死	NOAEL (雄)=9.6 mg/kg/day	DNEL=0.096 mg/kg/day	AF=100
US EPA (2024)	ラット 2 年間飲水投 与毒性試験 (雄: 0, 11, 55, 274 mg/kg/day、雌: 0, 18, 83, 429 mg/kg/day) (Kano <i>et al.</i> 2009)	肝毒性 (逸脱酵 素の増加、肝相 対重量増加、変 異肝細胞巣の増 加)	NOAEL (雄)= 11 mg/kg/day	POD : NOAEL _{HEC} = 2.6 mg/kg	動物からヒトの等価 用量への変換
Health Canada (2021)	ラット 2 年間飲水投 与毒性試験 (雄: 0, 9.6, 94, 1,015, 雌: 0, 19, 148, 1,599 mg/kg/day) (Kociba <i>et al.</i> 1974)	肝細胞壊死	BMDL ₅ =5.4 mg/kg/day	TDI: 5.4 µg/kg/day HBV=0.050 mg /L	雌雄合計の発生例数 から BMD 解析 UF=1,000
IRIS (2013)	同上試験 (Kociba <i>et al.</i> 1974)	肝細胞及び腎尿 細管上皮細胞の 変性・壊死	NOAEL 9.6 mg/kg/day	Chronic RfD=0.03 mg/kg/day	UF=300
ATSDR (2012)	同上試験 (Kociba <i>et al.</i> 1974)	肝細胞及び腎尿 細管上皮細胞の 変性・壊死	NOAEL 9.6 mg/kg/day	Chronic MRL=0.1 mg/kg/day	UF=100
環境省 (2003)	同上試験 (Kociba <i>et al.</i> 1974)	肝細胞の変性, 壊死, 肝細胞腺 腫, 腎臓の尿細 管上皮細胞の変 性, 再生	NOAEL (雄)=9.6 mg/kg/day	MOE=2,400超 (予測最大暴露量 =0.40 µg/kg/day 未滿) MOE=29 (浄水場の水源井 戸検出最大濃度 =33 µg/kg/day)	—

31
32 ECHA dossier⁽⁵⁾ (accessed on 2025/3/12) では、経口経路の非発がん影響について、一般人に対
33 する長期暴露に関して、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974) を選定し、肝細胞
34 及び腎尿細管上皮細胞の変性と壊死の所見を指標として、雄に対する NOAEL⁽⁶⁾ 9.6 mg/kg/day を
35 評価係数 (AF) 100 (種差 10、個体差 10) で除して DNEL 0.096 mg/kg/day を算出している。

36 US EPA⁽⁷⁾ (2024) では、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) を選定し、肝毒性
37 (逸脱酵素の増加、肝相対重量増加、変異肝細胞巣の増加) を指標として、雄に対する NOAEL
38 を 11 mg/kg/day とし、POD⁽⁸⁾ としてヒト等価 NOAEL (NOAEL_{HEC}⁽⁹⁾) を 2.6 mg/kg/day⁽¹⁰⁾ と算出

⁽³⁾ Derived No Effect Level

⁽⁴⁾ DNEL は、事業者が導出した値であり、ECHA が承認した値ではないため、参考扱いとした。なお、本物質に
ついては定量的評価値に相当する値が他になかったため記載した。

⁽⁵⁾ European Chemical Agency, Dossier

⁽⁶⁾ No Observed Adverse Effect Level

⁽⁷⁾ United States Environmental Protection Agency

⁽⁸⁾ Point of departure (= NOAE/LOAEL, 許容摂取量等を求める際の出発点)

⁽⁹⁾ NOAEL_{HEC}: ヒト等価 NOAEL

⁽¹⁰⁾ NOAEL_{HEC} = NOAEL × (ラット体重 0.35 kg/ヒト体重 70 kg)^{0.25} ≒ 2.6 mg/kg/day

していた。

Health Canada (2021) では、飲料水中の健康基準値 (HBV⁽¹¹⁾) の設定にあたり、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974) を選定し、肝細胞壊死の雌雄合計の発生例数から BMD 解析⁽¹²⁾ にて BMDL₅⁽¹³⁾ 5.4 mg/kg/day を算出し、不確実係数 (UF⁽¹⁴⁾) 1,000 (種差 10、個体差 10、データ不足 [生殖発生毒性の評価が不十分] 10) で除した 5.4 µg/kg/day を耐容一日摂取量 (TDI⁽¹⁵⁾) とし、この値から HBV 50 µg/L⁽¹⁶⁾を算出している。

EPA IRIS⁽¹⁷⁾ (IRIS と略) (2013) では、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974) の雄 94 mg/kg/day 以上にみられた肝細胞及び尿細管上皮細胞の変性・壊死を指標にした NOAEL 9.6 mg/kg/day を UF 300 (種差 10、個体差 10、データ不足 [多世代生殖発生毒性試験の不足] 3) で除して、RfD⁽¹⁸⁾ 0.03 mg/kg/day を算出している。

ATSDR⁽¹⁹⁾ (2012) では、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974) の雄 94 mg/kg/day 以上にみられた肝細胞及び尿細管上皮細胞の変性・壊死を指標にした NOAEL 9.6 mg/kg/day を UF 100 (種差 10、個体差 10) で除して Chronic MRL⁽²⁰⁾ 0.1 mg/kg/day を算出している。

環境省 (2003) では、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974) の肝細胞の変性・壊死、肝細胞腺腫、尿細管上皮細胞の変性・再生を認めない用量である雄ラットの NOAEL 9.6 mg/kg/day を無毒性量等とした。井戸水 (地下水) からの予測最大暴露量 0.40 µg/kg/day 未満から MOE⁽²¹⁾≒2,400⁽²²⁾ 超を算出した。しかし、浄水場の水源井戸からの検出最大濃度 33 µg/kg/day を用いると MOE≒29⁽²³⁾となり、健康リスクについては情報収集が必要であるとしている。

(2) 吸入

吸入暴露による非発がん影響に関する主要な定量的評価について、表 2 に示した。ECHA には推定無影響レベル (DNEL) が記載されていたが、参考扱いとする。

表 2 1, 4-ジオキサンの吸入経路の非発がん影響に関する国内外の定量的評価

評価機関 発表年	根拠データ	エンドポイント	NOAEL/LOAEL 等	評価値	備考
ECHA dossier (accessed on 2025/3/12)	DFG MAK (2019) の MAK 値 10 ppm = 37 mg/m ³ から、一般人の慢性吸入 DNEL 算出			一般人の慢性吸入 DNEL= 6.6 mg/m ³	(労働日数変換 0.71, 労働時呼吸 量変換 0.5, 個人 差 2)
US EPA	雄ラット 2 年間吸	呼吸上皮細	ラット BMCL ₁₀ :	POD の算出	

⁽¹¹⁾ Health-based value

⁽¹²⁾ BenchMark Dose Analysis

⁽¹³⁾ BenchMark Dose Lower confidence limits : 5%発現レベルをもたらす用量-反応曲線の 95%信頼区間下限値

⁽¹⁴⁾ Uncertainty Factor

⁽¹⁵⁾ Tolerable Daily Intake

⁽¹⁶⁾ HBV=5.4 µg/kg/day×70 kg×0.2/1.5L=50 µg/L (70 kg 体重、飲料水デフォルト配分係数 20%、飲水量 1.5L/day)

⁽¹⁷⁾ Environmental Protection Agency Integrated Risk Information System

⁽¹⁸⁾ Reference Dose

⁽¹⁹⁾ Agency for Toxic Substances and Disease Registry

⁽²⁰⁾ Minimal Risk Levels

⁽²¹⁾ Margin Of Exposure

⁽²²⁾ MOE=9.6×1,000×1/10×1/0.4≒2,400

⁽²³⁾ MOE=9.6×1,000×1/10×1/33≒29

(2020, 2024)	入毒性試験 (6 h/day, 5 days/ week) (0, 50, 250, 1,250 ppm) (0, 180, 900, 4,500 mg/m ³) (Kasai <i>et al.</i> 2009)	胞及び嗅上 皮細胞の化 生	4.74 ppm (17.1 mg/m ³)	労働者(8h/day, 5 days/week) : POD: BMCL _{HEC} =12.8 mg/m ³ 一般人(24h/day, 7days/week) : POD: BMCL _{HEC} =3 mg/m ³	労働者: ラット 6h からヒト 8h 暴 露に変換 DAF: 1 一般人: 連続暴露 に変換
DFG MAK (2019)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	近位尿細管 細胞の核腫 大 鼻腔に病理 変化	全身性 NOAEC=50 ppm 局所 LOAEC= 50 ppm	労働時呼吸量 (2), 種差 (2)を考慮し て補正: 50/4=12.5≒10 ppm NOAEC を LOAEC x 1/3 と仮 定: 16.67 ppm	総合して MAK 値 (8h TWA) 10 ppm (37 mg/m ³)
	ヒトボランティア 試験 (50 ppm 6h) (Young <i>et al.</i> 1977)	眼の刺激作 用	NOAEC=20 ppm	発がん性(2)を考慮 して補正	
厚労省 (2018)	ドイツ人労働者 コホート研究 (0.06~0.69 ppm) (Thiess <i>et al.</i> 1976)	最高濃度の 0.69 ppm で も各種検査 で影響なし	NOAEL=0.69 ppm	労働者における評 価レベル=0.7 ppm (2.5 mg/m ³)	暴露時間補正 6/8h, UF=100 (LOAEL 使用 10, 種差 10)
	(参考) 雄ラット同 上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	50 ppm で 鼻腔の上皮 細胞に毒性 所見	LOAEL=50 ppm	労働者における評 価レベル=0.38 ppm (1.35 mg/m ³)	
産衛学会 (2015)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	50 ppm で 鼻腔の上皮 細胞に病変	LOAEL=50 ppm	2 ppm (7.2 mg/m ³)	UF 25 (LOAEL使用10, 種差 pharmacodynamics の差として2.5)
IRIS (2013)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	嗅上皮細胞 の萎縮と呼 吸上皮化生	LOAEL=50 ppm LOAEL POD _{ADJ} = 8.9 ppm LOAEL POD _{HEC} = 32.2 mg/m ³	Chronic RfC =0.03 mg/m ³	UF=1,000 (LOAEL10, 種差 3, 個体差 10, デ ータ不十分 3)
ATSDR (2012)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	同上	LOAEL=50 ppm LOAEL _{ADJ} =8.9 ppm	Chronic MRL =0.03 ppm	UF=300 (LOAEL 使用 10, 個人差 10, 動物からの外 挿 3)
Health Council of the Netherlands (2015)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	鼻病変	LOAEL=50 ppm	8h TWA OEL= 6 ppm (20 mg/m ³)	UF 9 (LOAEL 使 用, 個体差 3)
環境省 (2003)	ラット 2 年間吸入 毒性試験 (7 h/day, 5 days/week) (雌雄: 0, 400 mg/m ³) (Torkelson <i>et al.</i> 1974)	肝臓, 腎臓, 血液に有害 な影響なし	NOAEL=400 mg/m ³ 暴露状況補正 =83 mg/m ³	MOE=18,000 (一般環境大気中 濃度の予測最大量 =0.45 µg/m ³)	—
ACGIH (2001)	ラット同上試験 (Torkelson <i>et al.</i> 1974) ヒト薬物動態試験 (Young <i>et al.</i> 1977)	毒性なし 薬物動態	NOAEL=111 ppm (400 mg/m ³) 1, 4 -ジオキ サンの蓄積が起 こらない職場環 境濃度=50 ppm	TLV-TWA=20 ppm (72 mg/m ³)	—

ECHA dossier (accessed on 2025/3/12) では、DFG MAK⁽²⁴⁾ (2019) の MAK 値 (最大現場濃度) 10 ppm (37 mg/m³) を、労働日数変換 (5/7 days、0.71)、労働時呼吸量変換 (20 m³→10 m³=0.5)、個人差 (2) で変換して、一般人における慢性吸入 DNEL を 6.6 mg/m³⁽²⁵⁾と算出している。

US EPA (2020, 2024) では、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) (1, 4-ジオキサン蒸気: 0、50、250、1,250 ppm、6 時間/日、週 5 日暴露、0、180、900、4,500 mg/m³相当) をキースタディ⁽²⁶⁾に選定し、嗅上皮細胞の呼吸上皮化生や呼吸上皮細胞の扁平上皮化生の発生例数に基づき、BMD 解析により BMCL₁₀⁽²⁷⁾ 4.74 ppm (17.1 mg/m³) を得て、労働者作業時間 (1 日 8 時間、週 5 日労働) に変換し、さらに動物からヒトへの用量補正係数 (DAF: Dosimetric adjustment factor) =1.12 (但し 1 を超える場合は既定値 1.0 を用いる (US-EPA 1994)) で補正し、労働者におけるヒト等価 BMCL_{10HEC}⁽²⁸⁾ 12.8 mg/m³⁽²⁹⁾ を POD として算出している。また、一般人 (1 日 24 時間、週 7 日) に換算して 3 mg/m³⁽³⁰⁾ を POD として算出している。

DFG MAK (2019) では、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) の全身性 NOAEC⁽³¹⁾ を近位尿細管上皮細胞の核腫大を指標に、50 ppm と判断した。労働時呼吸量の増加 (2)、ラットからヒトへの種差 (2) を考慮して補正し、MAK 値 (最大現場濃度, 8h TWA⁽³²⁾) 10 ppm⁽³³⁾ を導出した。また、上記ラット試験の 50 ppm で、鼻腔局所に病理変化 (呼吸上皮及び嗅上皮細胞の核肥大、嗅上皮細胞萎縮、呼吸上皮化生など) がみられたことから LOAEC⁽³⁴⁾ を 50 ppm と判断し、その 1/3 を NOAEC と仮定して 16.7 ppm とした。これは、1996 年の MAK 値を設定した際のヒトボランティア試験 (Young *et al.* 1977) の眼刺激作用の NOAEC 20 ppm と同じ範囲にあった。さらに、1, 4-ジオキサンは鼻腔に対して発がん性があるため、MAK 値を 2018 年に 20 ppm から 10 ppm に引き下げ、これらを総合して MAK 値を 10 ppm (37 mg/m³) としている。

厚労省 (2018) では、1, 4-ジオキサンに暴露されたドイツ人労働者 (24 名、経験: ~41 年) のコホート研究 (Thiess *et al.* 1976、空気中 1, 4-ジオキサン濃度 0.06~0.69 ppm) において、病理所見及び悪性疾患の徴候も認められず、血液検査の結果も概ね正常であり、肝臓の肥大や黄疸はみられず、腎機能検査も尿検査も正常であったことから、最高濃度 0.69 ppm を NOAEL として、評価レベルを 0.7 ppm (2.5 mg/m³) としている。

また、参考として雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) における 50 ppm 群の鼻腔の上皮細胞に毒性所見 (呼吸上皮細胞の核肥大、嗅上皮細胞の核肥大、嗅上皮細胞の萎縮、嗅

⁽²⁴⁾ Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK=Maximum Workplace Concentration)

⁽²⁵⁾ DNEL=37 mg/m³×0.71×0.5/2 = 6.6 mg/m³

⁽²⁶⁾ キースタディとは、各機関の評価書において、定量的評価の根拠とされたものを指す。

⁽²⁷⁾ Benchmark Concentration Limit 10%

⁽²⁸⁾ BMCL human equivalent concentration

⁽²⁹⁾ BMCL_{HEC} = 17.1 mg/m³×6/8 = 12.8 mg/m³

⁽³⁰⁾ BMCL_{HEC} = 17.1 mg/m³×6/24×5/7 = 3 mg/m³

⁽³¹⁾ No observed adverse effective concentration

⁽³²⁾ Time Weighted Average

⁽³³⁾ 50 ppm / 2 / 2 = 12.5≒10 ppm

⁽³⁴⁾ Lowest observed adverse effective concentration

上皮細胞の呼吸上皮化生など) がみられたことから、LOAEL⁽³⁵⁾ を 50 ppm とし、暴露時間補正 6/8h、UF 100 (LOAEL10、種差 10) で除して、労働者 (8 時間、週 5 日労働) における評価レベル 0.38 ppm⁽³⁶⁾ (1.35 mg/m³) を算出している。

日本産業衛生学会 (産衛学会と略) (2015) は、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) で観察された呼吸上皮細胞、嗅上皮細胞の変化から得られた LOAEL 50 ppm を UF 25 (LOAEL 使用 10、種差 [pharmacodynamics の差として] 2.5) で除して、非発がん影響の濃度を 2 ppm (7.2 mg/m³) と算出した。ただし、1, 4-ジオキサン⁽³⁷⁾の許容濃度は、発がん影響から求められた 1 ppm (3.6 mg/m³) を採用している (1-2.発がん影響 (2) 発がん性の定量的評価 参照)。

IRIS (2013) では、ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) における嗅上皮細胞の萎縮と呼吸上皮化生を根拠とした LOAEL 50 ppm に基づき、連続暴露条件に補正して、LOAEL POD_{ADJ}⁽³⁷⁾ 8.9 ppm⁽³⁸⁾ (32.2 mg/m³) とし、動物からヒトへの用量補正係数 (DAF=1, US EPA (2020) と同様) で補正したヒト等価 LOAEL POD_{HEC} 32.2 mg/m³を得た。これを UF 1,000 (LOAEL 使用 10、種差 3、個体差 10、データ不十分 3) で除して、慢性参照濃度 (Chronic RfC⁽³⁹⁾) 0.03 mg/m³⁽⁴⁰⁾ を算出している。

ATSDR (2012) では、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) で観察された鼻腔の呼吸上皮細胞、嗅上皮細胞の変化から得られた非発がん影響の LOAEL 50 ppm を連続暴露に変換し、動物からヒトへの用量補正係数 (DAF=1, US EPA (2020) と同様) で補正し、LOAEL_{ADJ} 8.9286 ppm⁽⁴¹⁾を算出した。これに、UF 300 (LOAEL 使用 10、個人差 10、動物からの外挿 3) で除して、慢性吸入 MRL を 0.03 ppm と算出している。

Health Council of the Netherlands (2015) では、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) で観察された鼻病変から得られた LOAEL 50 ppm を UF 9 (LOAEL 使用 3、個体差 3) で除して、8hTWA OEL⁽⁴²⁾ を 6 ppm (20 mg/m³) と算出している。

環境省 (2003) では、ラット 2 年間吸入毒性試験 (Torkelson *et al.* 1974) において、肝臓や腎臓、血液に有害な影響を認めない 400 mg/m³を NOAEL とし、暴露状況で補正して無毒性量 83 mg/m³を得た。UF (種差 10) と一般環境大気中濃度の予測最大量 0.45 µg/m³で除し、MOE⁽⁴³⁾ = 18,000⁽⁴³⁾を算出した。一般環境大気の吸入暴露による健康リスクについては現時点では作業は必要ないとしている。

ACGIH⁽⁴⁴⁾ (2001) では、ラット 2 年間吸入毒性試験 (Torkelson *et al.* 1974) における NOAEL

⁽³⁵⁾ Lowest observed adverse effect level

⁽³⁶⁾ 評価レベル = $50 \text{ ppm} \times 6/8\text{h} \times 1/100 = 0.375 \approx 0.38 \text{ ppm}$ (1.35 mg/m³)

⁽³⁷⁾ Point of departure, Adjusted (許容摂取量等を求める際の出発点としての LOAEL)

⁽³⁸⁾ $\text{POD}_{\text{Adj}} = 50 \text{ ppm} \times 6/24\text{h} \times 5/7\text{days} = 8.9 \text{ ppm}$ (32.2 mg/m³)

⁽³⁹⁾ Reference concentration

⁽⁴⁰⁾ $\text{Chronic RfC} = 8.9 \times 3.6 \times 1/1,000 = 0.03 \text{ mg/m}^3$

⁽⁴¹⁾ $\text{LOAEL}_{\text{ADJ}} = 50 \text{ ppm} \times 6/24 \text{ hours} \times 5/7 \text{ days} \times 1 \text{ (DAF)} = 8.9286 \text{ ppm}$, $\text{MRL} = 8.9286/300 \approx 0.03 \text{ ppm}$

⁽⁴²⁾ Occupational exposure limit

⁽⁴³⁾ $\text{MOE} = 83 \text{ mg/m}^3 \times 1,000/0.45 \approx 18,000$

⁽⁴⁴⁾ American Conference of Governmental Industrial Hygienists

111 ppm (400 mg/m³)、及びヒトボランティア試験における 1, 4-ジオキサン⁽⁴⁵⁾の蓄積が起こらない職場環境濃度 50 ppm (Young *et al.* 1977) などから、1981 年に TLV-TWA⁽⁴⁵⁾ 25 ppm を設定した (詳細不明)。その後、1999 年に他の国際的職業暴露基準との調和を促進するため、TLV-TWA を 20 ppm に改定している。

1-2. 発がん影響

(1) 発がん性分類

主な機関による発がん性分類 (表 3) 及び定性評価の概要を以下にまとめた。

表 3 1, 4-ジオキサンの発がん性分類

評価機関 発表年	分類	分類基準
日本政府による GHS 分類結果 (2024)	1B	ヒトに対しておそらく発がん性がある
AICIS (2022)	1B	ヒトに対しておそらく発がん性がある
US NTP (2021)	R	合理的にヒト発がん性因子であることが予想される
ECHA Scientific report (2021)	1B	ヒトに対しておそらく発がん性がある
UK HSE (2021)	1B	ヒトに対しておそらく発がん性がある
EU RAC (2019)	1B	ヒトに対しておそらく発がん性がある
DFG MAK (2019)	4	実験動物での発がん性は変異原性には基づいていない作用機構によるもので MAK 及び BAT が守られていればヒトに対する発がんのリスクは有意でない物質
ECHA CLH report (2018)	1B	ヒトに対しておそらく発がん性がある
厚労省 (2018)	—	ヒトに対する発がん性が疑われる
産衛学会 (2015)	第 2 群 B	証拠が比較的十分でないが、ヒトに対しておそらく発がん性があると判断できる
IRIS (2013)	L	ヒト発がん性である可能性が高い
ACGIH (2001)	A3	確認された動物発がん因子であるが、ヒトとの関連は不明
IARC (1999)	2B	ヒトに対して発がん性がある可能性がある

日本政府による GHS⁽⁴⁶⁾ 分類結果 (2024) では、ヒトでは発がん性を示す証拠は示されていない。動物試験結果 (雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009)、ラット及びマウスの厚労省委託がん原性試験 (2 年間飲水投与) (1990) より、2 種 2 経路において、腹膜、肝臓、鼻腔を中心に悪性を含む腫瘍の発生増加が認められている) に基づき、EU RAC (2019)、AICIS (2022)、産衛学会 (2015)、IRIS (2013)、ATSDR (2012)、厚労省 (1990) を参照し、発がん性分類について 1B (ヒトに対しておそらく発がん性がある) としている。

AICIS (2022) では、ラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) と雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) に基づき、動物実験において発がん性に関して十分な証拠があるとしているが、US NTP⁽⁴⁷⁾ (2021)、UK HSE⁽⁴⁸⁾ (2021)、US EPA (2020)、EU RAC⁽⁴⁹⁾ (2019) を参照し、ヒトに対する発がん性の証拠は不十分であるとし、発がん性分類について 1B (ヒトに対しておそらく発がん性がある) としている。

⁽⁴⁵⁾ Threshold Limit Value - Time Weighted Average : 作業環境許容濃度

⁽⁴⁶⁾ Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals

⁽⁴⁷⁾ US national toxicology program

⁽⁴⁸⁾ United Kingdom Health and Safety Executive

⁽⁴⁹⁾ European Union (EU) Committee for Risk Assessment (RAC)

US NTP (2021) では、ラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) と雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) に基づき、動物実験で発がん性の十分な証拠があるとしている。ヒトに関しては Buffler *et al.* (1978) のコホート研究を取り上げているが、ヒトに対する発がん性を実証するには十分でないとし、発がん性分類について R (合理的にヒト発がん性因子であることが予想される) としている。

ECHA Scientific report (2021) では、EU RAC (2019) を参照して、発がん性分類について 1B (ヒトに対しておそらく発がん性がある) としている。

UK HSE (2021) では、EU RAC (2019) を参照して、発がん性分類について 1B (ヒトに対しておそらく発がん性がある) としている。

EU RAC (2019) では、ラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) と雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) に基づき、動物実験で発がん性の十分な証拠があるとしている。ヒトに関しては Buffler *et al.* (1978)、NIOSH (1977) と Thiess *et al.* (1976) のコホート研究について、1A (ヒトに対する発がん性が知られている) 分類の根拠にはならないと判断し、発がん性分類について 1B (ヒトに対しておそらく発がん性がある) としている。

DFG MAK (2019) では、ラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) と雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) 及び、遺伝毒性に関する報告の用量反応性に基づき、発がん性分類について 4 (実験動物での発がん性は変異原性には基づいていない作用機構によるもので、MAK 値及び生物学的許容値 (BAT⁽⁵⁰⁾) が守られていれば、ヒトに対する発がんのリスクは有意でない物質) としている。

ECHA CLH report⁽⁵¹⁾ (2018) では、ラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) と雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) に基づき、動物実験において発がん性の十分な証拠があるとしている。ヒトに関しては、1A (ヒトに対しておそらく発がん性がある) 分類の根拠となる報告がないとして、発がん性分類について 1B (ヒトに対して発がん性があるとみなされるべき物質) としている。

厚労省 (2018) では、ラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) と雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009)、産衛学会 (2015)、IRIS (2013)、IARC⁽⁵²⁾ (1999) を参照し、発がん性分類についてヒトに対する発がん性が疑われるとしている。

産衛学会 (2015) では、ラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) とラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) に基づき、ACGIH (2001) と IARC (1999) を参照して、微生物変異原性は陰性であるが、マウス及びラットで発がん性があるとしている。ヒトにおける発がん性は確認できていないとして、発がん性分類について第 2 群 B (証拠が比較的十分でないが、ヒトに対しておそらく発がん性があると判断できる) としている。

⁽⁵⁰⁾ Biological tolerance value

⁽⁵¹⁾ ECHA Harmonised Classification and Labelling (CLH) report

⁽⁵²⁾ International Agency for Research on Cancer

IRIS (2013) では、ラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) と雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009)、モルモット及びウサギ 5 日間吸入毒性試験 (Fairley *et al.* 1934)、及び、コホート研究 (Buffler *et al.* 1978、Thiess *et al.* 1976) に基づき、発がん性分類について L (ヒト発がん性である可能性が高い) としている。

ACGIH (2001) では、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974) とラット 110 週間及びマウス 90 週間飲水投与試験 (NCI 1978) に基づき、発がん性分類について A3 (確認された動物発がん因子であるが、ヒトとの関連は不明) としている。

IARC (1999) では、ラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Yamazaki *et al.* 1994) とコホート研究 (Buffler *et al.* 1978) に基づき、発がん性分類について 2B (ヒトに対して発がんの可能性はある) としている。

(2) 発がん性の定量的評価

① 経口

経口暴露による発がん性に関する主要な定量的評価について表 4 に示した。

表 4 1, 4-ジオキサンを経口経路の発がん性に関する国内外の定量評価

評価機関 発表年	根拠データ	エンドポイント	評価値・算出方法	10 ⁻⁵ 発がんリスク レベル
UK HSE (2021)	マウス 2 年間飲水投与毒性試験 (雄: 0, 49, 191, 677 mg/kg/day、雌: 0, 66, 278, 964 mg/kg/day) (Kano <i>et al.</i> 2009)	肝細胞腺腫/がん	T25 (経口) マウス(雌)= 18.4 [#] mg/kg/day (#: 24.7 mg/kg/day の誤り)	SCL は提案なし
US EPA (2020)	同上試験 (Kano <i>et al.</i> 2009)	同上	BMD 解析 MSW time-to-tumor model BMDL ₅₀ =27.0 mg/kg/day BMDL _{50HEC} 3.93 mg/kg/day SF=1.2×10 ⁻¹ (mg/kg/day) ⁻¹	(0.83 µg/kg/day, =10 ⁻⁵ /SF x 1,000) ^s
EU RAC (2019)	同上試験 (Kano <i>et al.</i> 2009)	同上	T25 (経口) マウス(雌)= 18.4 [#] mg/kg/day (#: 24.7 mg/kg/day の誤り)	(1 µg/kg/day, =24.7x1,000/25,000) ^s
ECHA CLH report (2018)	同上試験 (Kano <i>et al.</i> 2009) ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (雄: 0, 11, 55, 274 mg/kg/day、雌: 0, 18, 83, 429 mg/kg/day) (Kano <i>et al.</i> 2009)	同上	T25 (経口) マウス(雄)=92.2 mg/kg/day マウス(雌)=18.4 [#] mg/kg/day (#: 24.7 mg/kg/day の誤り) ラット(雄)=89.4 mg/kg/day ラット(雌)=114.3 mg/kg/day	SCL は提案なし
IRIS (2013)	マウス同上試験 (Kano <i>et al.</i> 2009)	同上	BMD 解析 Log-Logistic model BMDL ₅₀ 32.93 mg/kg/day BMDL _{50HED} 4.95 mg/kg/day SF=1.0×10 ⁻¹ (mg/kg/day) ⁻¹ UR (飲水)=2.9×10 ⁻⁶ (µg/m ³) ⁻¹	飲水中 3.5 µg/L (0.14 µg/kg/day 体重 50 kg, 飲水 2L/day) ^s
AICIS (2022)	SCCS (2015) で評価した「一般人の生涯 10 ⁻⁵ レベル発がんリスクは、化粧品内などの含有量を 10 ppm 以下 (55 µg/day 相当) に抑えるべき」とした報告を記載している。			55 µg/day (0.92 µg/kg/day, SCCS 2015)
SCCS (2015)	マウス 2 年間飲水投与毒性試験(雄: 0, 66, 250, 770 mg/kg/day、雌: 0, 77, 320, 1,070 mg/kg/day) (Yamazaki <i>et al.</i> 1994)	肝細胞がん (雌 0/50 例, 77 mg/kg 群 6/50 例=12%)	T25=162 mg/kg/day Human T25 = 23 mg/kg/day 生涯 10 ⁻⁵ 発がんリスク=0.92 µg/kg/day (体重 60 kg=55 µg/day)	0.92 µg/kg/day

食安委 (2007)	ラット 2 年間飲水投与毒性試験(雄: 0, 16, 81, 398 mg/kg/day、雌: 0, 21, 103, 514 mg/kg/day) (Yamazaki <i>et al.</i> 1994)	肝腫瘍及び肝臓の過形成	NOAEL=16 mg/kg/day UF=1,000	TDI=16 µg/kg/day
WHO GDWQ (2005)	ラット同上試験 (Yamazaki <i>et al.</i> 1994)	肝細胞腫瘍増加	線形多段階モデルからの 10 ⁻⁵ 発がんリスク算出: 飲料水濃度= 54 µg/L 肝細胞腫瘍 NOAEL= 16 mg/kg/day, UF=1,000 TDI= 16 µg/kg 飲料水中の等価濃度=48µg/L 両計算から 50 µg/L を採用	飲水中ガイドライン値: 50 µg/L
厚労省 (2003)	ラット同上試験 (Yamazaki <i>et al.</i> 1994)	肝細胞腫瘍	線形マルチステージモデルによる 10 ⁻⁵ 発がんリスクに相当する飲水濃度	飲水中 54 µg/L (2.16 µg/kg/day, 体重 50 kg, 飲水 2L/day) ⁵
参 考				
産総研 (2005)	ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba <i>et al.</i> 1974)	肝臓におけるがんの発生	MOE 算出	

＜表中の補足事項＞

: UK HSE (2021)、EU RAC (2019)、ECHA CLH report (2018) の「評価値・算出方法」欄: マウス (雌) T25 = 18.4 mg/kg/day は、24.7 mg/kg/day の誤り

§ : 各評価機関の報告書に数値記載はないが、本評価に際して算出した値を括弧内に 10⁻⁵ 発がんリスクレベルとして記載した。

網掛け (AICIS (2022)、SCCS (2015)～厚労省(2003)) : これらの評価書は、Yamazaki *et al.* (1994) のデータを用いて記載されているため参考扱いとする。

UK HSE (2021) では、マウス及びラット 2 年間飲水投与試験 (Kano *et al.* 2009) より、最小 T25 値 (雌マウスにおける肝細胞腺腫/がんの担腫瘍動物より算出) が 18.4[#] mg/kg/day であったことから、1, 4 – ジオキサン⁵³の発がん効力⁽⁵³⁾ は中程度と判断され、特定濃度規制値 (SCL⁽⁵⁴⁾) は提案されなかった。(表中の補足事項⁽⁵⁵⁾ : # 18.4 mg/kg/day は、24.7 mg/kg/day の誤り)

US EPA (2020) では、マウスの 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) をキースタディとし、雌マウスにおける肝細胞腺腫/がんの発生率に基づき、BMD 解析の Multistage Weibull (MSW) time-to-tumor Model から BMDL₅₀ 27.0 mg/kg/day を得て、ヒト体重 (80 kg)、マウス平均体重 (0.0359 kg) に 0.25 乗して、ヒト等価 BMDL_{50HEC} 3.93 mg/kg/day⁽⁵⁶⁾ 及び SF 1.2 × 10⁻¹ (57) (mg/kg/day)⁻¹ を算出している。

EU RAC (2019) では、マウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) をキースタディと

⁽⁵³⁾ EC (1999) 及び旧指令 67/548/EEC の基準による、発がん効力の分類 (高効力発がん物質は T25: <1 mg/kg/day、中効力発がん物質は T25: 1～100 mg/kg/day の間、低効力発がん物質は T25: >100 mg/kg/day)

⁽⁵⁴⁾ Specific concentration limit

⁽⁵⁵⁾ ECHA CLH report (2018) に算出方法の詳細が記載されており、雌マウス (投与用量: 0、500、2,000、8,000 ppm : 0、66、278、964 mg/kg/day 相当) における肝細胞腺腫/がんの発生率は、500 ppm 群で 35/50 例 (70%)、対照群で 5/50 例 (10%) で、正味の発生率 66.7% (計算式: (35-5)/(50-5)×100=66.7)。T25= 49 mg/kg/day (500 ppm 摂取量)×25/((35-5)/(50-5)×100)=18.4 mg/kg/day と算出されていた。しかし、500 ppm 雌の摂取量は 49 mg/kg/day ではなく 66 mg/kg/day の誤り、従って、正しくは T25=66 mg/kg/day×25/((35-5)/(50-5)×100) = 27.4 mg/kg/day となる。UK HSE (2021)、EU RAC (2019) 及び ECHA CLH report (2018) 共通の誤り。

⁽⁵⁶⁾ BMDL_{50HEC}= 27.0 mg/kg/day×(0.0359/80)^{0.25} = 3.93 mg/kg/day

⁽⁵⁷⁾ SF = 0.5/3.93 = 1.2×10⁻¹ (mg/kg/day)⁻¹

し、雌マウスにおける肝細胞腺腫/がんの発生率（対照群 5/50 例、500 ppm 群 35/50 例）に基づく T25 値を 18.4[#] mg/kg/day と算出している（表中の補足事項：[#] 18.4 mg/kg/day は 24.7 mg/kg/day の誤り）。

ECHA CLH report (2018) では、マウス及びラット 1, 4-ジオキサン¹の 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) をキースタディとし、肝細胞腺腫/がんの発生率に基づき、マウス及びラットについての各 T25 を算出し（ラット、マウス試験の雌雄各 T25 値は、Table 4 の「評価値・算出方法」欄を参照）、最も小さい値を示した雌マウスの肝細胞腺腫/がんの発生率からの T25 値 18.4[#] mg/kg/day を採用している（表中の補足事項：[#] 18.4 mg/kg/day は、24.7 mg/kg/day の誤り）。

IRIS (2013) では、マウスの 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) をキースタディとし、雌マウスにおける肝細胞腺腫/がんの発生動物数に基づき、BMD 解析 (BMDS ver. 2.1.1.) により解析し、Log-Logistic model から BMDL₅₀ 32.93 mg/kg/day を得た。ヒト体重 (70 kg)、マウスの平均体重 (35.9 g) として、ヒト等価 BMDL_{50HED} 4.95 mg/kg/day⁽⁵⁸⁾ を得て、SF 0.10⁽⁵⁹⁾ (mg/kg/day)⁻¹ 及びユニットリスク (UR、飲水) $2.9 \times 10^{-6} (\mu\text{g/L})^{-1}$ ⁽⁶⁰⁾ を算出し、飲水による 10⁻⁵ 発がんリスクレベルは 3.5 $\mu\text{g/L}$ ⁽⁶¹⁾ と算出している。

表 4 の網掛け部分²に示した AICIS (2022)、SCCS (2015)、食安委 (2007)、WHO GDWQ (2005)、厚労省 (2003) では、Yamazaki *et al.* (1994) のラット及びマウス 2 年間飲水投与毒性試験の報告書を根拠データにしていたが、Yamazaki *et al.* (1994) のレポートは、その後、摂餌量の再計算や病理組織学的検査の再実施（変異肝細胞巣や肝細胞腺腫に関する見直し）が行われ、修正された最終成績は前述の Kano *et al.* (2009) として報告されている。従って、Yamazaki *et al.* (1994) のデータを参照して記載された評価書は、参考扱いとする。

AICIS (2022) では、SCCS (2015) で評価した「一般人の生涯 10⁻⁵ レベル発がんリスクは、化粧品内などの含有量を 10 ppm 以下 (55 $\mu\text{g/day}$ 相当) に抑えるべき」とした報告を記載しているが、この値を算出するのに Yamazaki *et al.* (1994) のデータを用いている。

SCCS⁽⁶²⁾ (2015) では、化粧品内に微量に含まれる 1, 4-ジオキサンの量を管理して、一般人の発がんリスクを 10⁻⁵ に抑えるには、化粧品内のレベルを 10 ppm 以下 (55 $\mu\text{g/day}$) に抑えるべきであるとした提言⁽⁶³⁾をしており、その算出には、マウス 2 年間飲水投与毒性試験（雄: 0、66、250、770 mg/kg/day、雌: 0、77、320、1,070 mg/kg/day）(Yamazaki *et al.* 1994) から、雌の肝細胞がん発生例数（対照群 0/50 例=0%、77 mg/kg 群 6/50 例=12%）から T25 を 162 mg/kg/day⁽⁶⁴⁾ と算出している。さらに、マウスからヒトへの代謝スケーリングファクターに基づく変換（雌

⁽⁵⁸⁾ $\text{BMDL}_{50\text{HED}} = \text{BMDL}_{50} (32.93 \text{ mg/kg/day}) \times (0.0359/70 \text{ kg})^{0.25} = 4.95 \text{ mg/kg/day}$

⁽⁵⁹⁾ $\text{SF} = 0.5/4.95 = 0.10 (\text{mg/kg/day})^{-1}$

⁽⁶⁰⁾ $\text{UR} = 0.5/(4.95 \times 70 \text{ kg}/2 \text{ L} \times 1,000) = 2.9 \times 10^{-6} (\mu\text{g/L})^{-1}$ (ヒト体重 70 kg、1 日飲水量 2L として算出)

⁽⁶¹⁾ 飲水による 10⁻⁵ 発がんリスク $= 10^{-5}/(2.9 \times 10^{-6}) = 3.5 \mu\text{g/L}$

⁽⁶²⁾ Scientific Committee on Consumer Safety

⁽⁶³⁾ 化粧品 1 日使用量 17.4 g として 10 ppm 含有で 174 $\mu\text{g/day}$ 、経皮 50%吸収で 87 $\mu\text{g/day}$ 、約 65%の化粧品の含有量は 1 ppm であることを考慮すると、実質吸収量は 87 $\mu\text{g/day}$ 以下が予想されることから 10⁻⁵ 発がんリスクをクリアーすると考えている (SCCS 2015)。

⁽⁶⁴⁾ $\text{T25 after 104 weeks} = 104/104 \times 105/104 \times 77 \times 25/12 \text{ mg/kg/day} = 162 \text{ mg/kg/day}$ (105 週目屠殺補正含む)

マウス 25 g、ヒト体重 60 kg) にて、Human T25 を 23 mg/kg/day⁽⁶⁵⁾と算出し、 10^{-5} 生涯発がんリスクを 9.2×10^{-4} mg/kg/day⁽⁶⁶⁾ (0.92 µg/kg/day、体重 60 kg として 55 µg/day) と算出している。

食安委 (2007) では、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Yamazaki *et al.* 1994) における肝腫瘍 (及び肝臓での過形成) の増加に関する NOAEL=16 mg/kg/day を UF 1,000 (種差 10、個体差 10、毒性の重篤性 [肝腫瘍] 10) で除して TDI 16 µg/kg/day を算出している。

WHO GDWQ⁽⁶⁷⁾ (2005) は、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (雄:0、16、81、398 mg/kg/day、雌:0、21、103、514 mg/kg/day、Yamazaki *et al.* 1994) における肝細胞腫瘍発生動物数に基づき、線形多段階モデルによって 10^{-5} 発がんリスク飲料水濃度を 54 µg/L と算出している (詳細な記載なし)。一方、肝細胞腫瘍の NOAEL を低用量の 16~21 mg/kg/day と判断し、NOAEL=16 mg/kg/day を UF 1,000 (種差 10、個体差 10、非遺伝毒性発がんに関わる係数 10) にて除して TDI を 16 µg/kg/day とし、飲料水中の等価濃度を TDI の暴露源配分係数 10%適用、体重 60 kg、1 日飲水量 2L として 48 µg/L⁽⁶⁸⁾と算出した。以上の 2 つの方法にて算出された値から飲水中ガイドライン値を 50 µg/L としている。

厚労省 (2003) では、ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Yamazaki *et al.* 1994) をキースタディとし、雌雄ラットへの 1, 4-ジオキサン濃度が 0、200、1,000、5,000 ppm による肝細胞腫瘍の発生率に基づき、線形マルチステージモデルによる 10^{-5} 発がんリスクに相当する飲水濃度を、0.054 mg/L とした (発がん動物数などの詳細な記載なし)。これにより、飲料水質基準値を 0.05 mg/L と設定している。

以下は、評価値を導出した定量的評価結果ではないため参考扱いとするが、産業技術総合研究所 (産総研と略) (2005)では、ラットの 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974) をキースタディとし、肝臓にがんが認められず、かつ毒性試験結果および代謝プロファイルから適当と考えられた 10 mg/kg/day を経口経路の NOAEL とし、この値と一般の集団の経口+経皮暴露量の 95%上限値である 0.079 µg/kg/day との比 Margin of Exposure (MOE) を算出した。MOE は 130,000 と計算され、不確実性係数 1,000 (種差:10、個体差:10、腫瘍性変化:10) を大きく上回っていたことから「リスクの懸念がなく、対策をとる必要はない」と判断できるとしていた。なお、産総研 (2005)では、経口暴露による非発がん影響は、発がん影響と同様に未変化体 (1, 4-ジオキサン) による細胞障害性が原因と考えられており、非発がん影響のヒトにおける評価は、発がん性に関わる評価で担保されるとし、非発がん影響に関わる定量的なリスク評価を行っていない。

⁽⁶⁵⁾ Human T25 = $163 / (60 / 0.025)^{0.25} = 23$ mg/kg/day

⁽⁶⁶⁾ 10^{-5} 生涯発がんリスク = $10^{-5} \times 23 / 0.025 = 9.2 \times 10^{-4}$ = 0.92 µg/kg/day、体重 60 kg として 55 µg/day

⁽⁶⁷⁾ World Health Organization / Guidelines for Drinking-Water Quality

⁽⁶⁸⁾ 飲料水中の等価濃度 = $16 \mu\text{g/kg/day} \times 0.1 \times 60 \text{ kg} / 2 \text{ L} = 48 \mu\text{g/L}$

262 ② 吸入

263 吸入暴露による発がん影響について主要な定量的評価について表5に示した。

264 表5 1, 4-ジオキサン吸入経路の発がん性に関する国内外の定量的評価

評価機関 発表年	根拠データ	エンドポイント	評価値・算出方法	10 ⁻⁵ 発がんリ スクレベル
UK HSE (2021)	雄ラット2年間吸入毒性試験(6時間/日、週5日) (雄: 0, 50, 250, 1,250 ppm (0, 180, 900, 4,500 mg/m ³)) (Kasai <i>et al.</i> 2009)	腹膜中皮腫	T25 (吸入)=46.6 mg/kg/day (ECHA CLH report 2018と同じ)	(1.9 µg/kg/day =46.6/25,000) [§]
US EPA (2020)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	鼻腔扁平上皮がん/肝細胞腺腫・がん/腹膜中皮腫/腎細胞がん/乳腺線維腺腫/乳腺腺腫/ジンバル腺腫/皮下線維腫	<労働者> UR (吸入)=1.18×10 ⁻⁶ (µg/m ³) ⁻¹ BMCL _{10HEC} =84.6 mg/m ³	<労働者> (8.47 µg/m ³ = 10 ⁻⁵ / (1.18×10 ⁻⁶)) [§]
EU RAC (2019)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	腹膜中皮腫	T25 (吸入)=46.6 (mg/kg/day) (ECHA CLH report 2018と同じ)	SCL は 提案なし (1.9 µg/kg/day =46.6/25,000) [§]
ECHA CLH report (2018)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	腹膜中皮腫 (腹膜中皮腫の発生率: 250 ppm 群 14/50 例 =28%対照群 2/50 例 =4% 正味の発生率の25%か ら T25 65.2 mg/kg/day 算出)	1, 4-ジオキサン蒸 気は100%吸収すると 仮定250 ppm群の暴露 量65.2 mg/kg/dayを 1日当たりに換算 (週5日暴露) T25 = 65.2×5/7=46.6 mg/kg/day	SCL は 提案なし (1.9 µg/kg/day =46.6/25,000) [§]
厚労省 (2018)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	鼻腔扁平上皮がん/肝細胞腺腫/腹膜中皮腫	<労働者> 「閾値あり」の場合 NOAEL 50 ppm UF 100 (種差 10, がん の重大性に基づく不確 実係数 10), 暴露時間 補正(6/8h) =0.38 ppm (1.35 mg/m ³) (参考)「閾値なし」 の場合 IRIS 2013 による UR (吸入)=5×10 ⁻⁶ (µg/m ³) ⁻¹ に基づき発がんの過剰 発生リスク (10 ⁻⁴) に 相当する労働者を対象 としたばく露濃度を導 出	— (2 µg/m ³) [§]
産衛学会 (2015)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	発がんに関する NOAEL= 50 ppm	UF=50 (種差 10, 発がんの影響としての重大性 5) 許容濃度=1 ppm (3.6 mg/m ³)	—
IRIS (2013)	雄ラット同上試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009)	鼻腔扁平上皮がん/肝細胞腺腫/腹膜中皮腫/腎細胞がん/乳腺線維腺腫/乳腺腺腫/ジンバル腺腫/皮下線維腫	UR (吸入)=5×10 ⁻⁶ (µg/m ³) ⁻¹ BMCL _{10 HEC} =19.5 mg/m ³	(2 µg/m ³) [§]

参 考

産総研 (2005)	ラット 2 年間吸入毒性試験 (Torkelson <i>et al.</i> 1974)	400 mg/m ³ (111 ppm)でも腫瘍の増加腫及び非腫瘍性変化の発生認めず	MOE 算出	
---------------	--	---	--------	--

<表中の補足事項>

§: 各評価機関の評価書に数値記載はないが、本評価に際して算出した値を括弧内に 10⁻⁵ 発がんリスクレベルとして記載した。

UK HSE (2021) では、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) (雄: 0、50、250、1,250 ppm、6 時間/日、週 5 日、2 年間暴露) における腹膜中皮腫の発生動物数から求めた T25 を 46.6 mg/kg/day としている。

US EPA (2020) では、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) をキースタディとし、鼻腔扁平上皮がん、肝細胞腺腫/がん、腹膜中皮腫、腎細胞がん、乳腺線維腺腫、皮下線維腫を含む全ての腺腫/がんの発生率に基づき、BMD 解析 (BMDs ver. 2.704) により解析し、BMCL₁₀ 31.3 ppm を得て、ppm から mg へ単位換算 (×3.6) し、暴露時間 (6 時間/日、週 5 日) を労働者の暴露時間 (8 時間/日、週 5 日) に変換し、労働者におけるヒト等価 BMCL_{10HEC} 84.6 mg/m³ ⁽⁶⁹⁾ 及び UR (吸入) 1.18×10⁻⁶ (μg/m³)⁻¹ ⁽⁷⁰⁾ を算出している。

EU RAC (2019) 及び ECHA CLH report (2018) では、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) をキースタディとし、腹膜中皮腫の発生率に基づき、T25 を算出した。統計学的に有意な腹膜中皮腫の発生率の増加は、中間用量 (250.9 ppm) 以上群でみられ、250.9 ppm (904.27 mg/m³ ⁽⁷¹⁾) 群において 14/50 例 (28%) であった。なお、対照群の発生率は 2/50 例 (4%) であった。正味の発生率は 25% (= (14-2)/(50-2)×100)。また、1, 4-ジオキサン蒸気は 100% 吸収すると仮定し、暴露量 (雄ラット体重 500 g、呼吸量 6L/h、1 日 6 時間、週 5 日の暴露) を 46.6 mg/kg/day ⁽⁷²⁾ と算出している。

厚労省 (2018) では、遺伝毒性なしという判断に基づき、発がん性に関して「閾値あり」と判断し、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) における発がん性に関する NOAEL (50 ppm) を、暴露時間 (6 時間/日、週 5 日) を労働者の暴露時間 (8 時間/日、週 5 日) に換算し、UF 100 (種差 10、がんの重大性に基づく不確実係数 10) で除した 0.38 ppm (1.35 mg/m³) ⁽⁷³⁾ を労働者に対する評価値として算出している。なお、厚労省 (2018) では、参考として、発がん性に関して「閾値なし」とする場合の労働者を対象とした発がんの過剰発生リスク (10⁻⁴) に相当するばく露濃度を、IRIS (2013) による UR (吸入) 5×10⁻⁶ (μg/m³)⁻¹ に基づき導出している。

産衛学会 (2015) では、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) の発がんに関する NOAEL 50 ppm を UF 50 (種差 10、発がんの影響としての重大性 5) で除して、許容濃度 1 ppm (3.6 mg/m³) を算出している。

IRIS (2013) では、雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) の雄ラットにみられた複

⁽⁶⁹⁾ BMCL_{HEC} = 31.3 ppm × 88.1/24.45 × 6/8 = 84.5 mg/m³

⁽⁷⁰⁾ UR = 0.1/84.6/1,000 = 1.18×10⁻⁶ (μg/m³)⁻¹

⁽⁷¹⁾ ppm→mg/m³ 換算 = 250.9 × 3.6 = 904.27 mg/m³

⁽⁷²⁾ 暴露量 = 904 mg/m³/1,000 × 6L/h × 6h/day × 0.5 kg × 5/7days = 46.6 mg/kg/day

⁽⁷³⁾ 評価レベル = 50 ppm × 6/8h × 5/5 × 1/100 = 0.375 ppm = 1.35 mg/m³

295 合腫瘍担癌動物数（鼻腔扁平上皮がん、肝細胞腺腫/がん、腹膜中皮腫、腎細胞がん、乳腺線維
 296 腺腫、皮下線維腫を含む全ての腺腫/がん）に基づき、BMD 解析 (BMDS ver.2.2 beta) により得
 297 られた BMCL₁₀ 30.3 ppm から、ヒト連続暴露変換にて BMCL_{10HEC} 19.5 mg/m³ ⁽⁷⁴⁾を算出して、
 298 UR（吸入） $5 \times 10^{-6} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$ ⁽⁷⁵⁾を算出している。

299 以下は、評価値を導出した定量的評価結果ではないため参考扱いとするが、産総研 (2005)で
 300 は、ラットの2年間吸入毒性試験 (Torkelson *et al.*1974) をキースタディとし、非腫瘍性変化も
 301 腫瘍の増加もなかったとされている気中濃度 400 mg/m³ (111 ppm) を暴露時間（7 時間/日）及
 302 び暴露日数（5 日間/週）で補正した 83 mg/m³を吸入経路の NOAEL とした。この値を体重当
 303 り 1 日当たりの暴露量に換算した 25 mg/kg/day と一般の集団の吸入暴露量の 95%上限値であ
 304 る 0.072 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ との比 MOE は 350,000 と計算され、不確実性係数 1,000（種差：10、個体
 305 差：10、腫瘍性変化：10）を大きく上回っていたことから「リスクの懸念がなく、対策をとる必
 306 要はない」と判断できるとしていた。

307 1-3. 国内の他法令による規制値等

308 国内の一般環境、労働環境等における大気や水の基準値、指針値、勧告値等の主な規制値に
 309 ついて表 6 にまとめた。

310 表 6 1, 4-ジオキサンの国内の他法令による規制値

法令	規制値
大気汚染防止法	大気基準：設定されていない 有害大気汚染物質に該当する可能性がある物質（中環審第9次答申の71）
水質汚濁防止法	一般排水基準：0.5 mg/L 地下水浄化基準：0.05 mg/L 排水基準を定める省令の一部を改正する省令の一部を改正する省令 （平成24年5月23日環境省令第15号） 水質汚濁防止法施行規則の一部を改正する省令（平成24年5月23日環境省令第14号）
水道法	水道水質基準：0.05mg/L 以下 水質基準に関する省令（平成15年5月30日厚生労働省令第101号）
環境基本法	水質環境基準：0.05 mg/L 以下 地下水環境基準：0.05 mg/L 以下 土壌環境基準：0.05 mg/L 以下 水質汚濁に係る環境基準について（平成21年11月30日環境省告示78号） 地下水の水質汚濁に係る環境基準について（平成21年11月30日環境省告示79号） 土壌の汚染に係る環境基準についての一部を改正する件（平成28年3月29日環境省告示第30号）
室内濃度指針値	設定されていない
労働安全衛生法	管理濃度：10 ppm 令和2年4月22日厚生労働省告示第192号「作業環境評価基準」別表（第2条関係） 「16の3 1, 4-ジオキサン 10 ppm」

⁽⁷⁴⁾ BMCL_{10HEC}=30.3 ppm×6/24h×5/7days×3.6 = 19.5 mg/m³ (6h/day, 5/7 days, 1 ppm=3.6 mg/m³)

⁽⁷⁵⁾ UR（吸入）= 0.10/19.5 / 1,000 = $5 \times 10^{-6} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$

2. 一般毒性

各機関の評価書において、評価値導出の根拠となったキースタディを収集し、その概要を以下にまとめた。

2-1. 経口

(1) ヒト

経口暴露によるヒトの一般毒性に関する情報は得られなかった。

(2) 実験動物

ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974 ; ECHA dossier (accessed on 2025/3/12)、Health Canada (2021)、IRIS (2013)、ATSDR (2012)、産総研 (2005)、環境省 (2003) のキースタディ) では、6～8 週齢の Sherman ラット (雌雄各群 60 例) に 1, 4-ジオキサン (純度不明) を 0、0.01、0.1、1% (雄 : 0、9.6、94、1,015 mg/kg/day、雌 : 0、19、148、1,599 mg/kg/day 相当) の用量で 716 日間飲水投与した。その結果、1%群の雌雄では、対照群と比較して、有意な体重の低値がみられ、投与 4 か月までにほぼ半数が死亡した。その他の群の生存率は対照群と同等であった。病理組織学的検査では、非発がん影響として、0.1%以上の群の雌雄に肝細胞の変性と壊死、腎尿細管上皮細胞の変性と壊死がみられた。

以上の結果から、本評価では、本試験における非腫瘍性変化の NOAEL を 9.6 mg/kg/day (雄の 0.01%の用量) と判断した。

ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009 ; US EPA (2020) のキースタディ) では、F344/DuCrj ラット (雌雄各群 50 例) に 1, 4-ジオキサン (純度 99%以上) を 0、200、1,000、5,000 ppm (雄 : 0、11、55、274 mg/kg/day、雌 : 0、18、83、429 mg/kg/day 相当) の用量で 2 年間飲水投与した。その結果、雌雄ともに 5,000 ppm 群で体重増加の抑制及び最終体重の減少、血清中の肝酵素 (AST、ALT、LDH、ALP) の増加、1,000 ppm 以上の群の雄で肝相対重量の増加、変異肝細胞巢の増加がみられた。

以上の結果から、本評価では、本試験における非腫瘍性変化の NOAEL を 11 mg/kg/day (雄の 200 ppm の用量) と判断した。

マウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009 ; US EPA (2020) のキースタディ) では、Crj:BDF1 マウス (雌雄各群 50 例) に 1, 4-ジオキサン (純度 99%以上) を 0、200、1,000、8,000 ppm (雄 : 0、49、191、677 mg/kg/day、雌 : 0、66、278、964 mg/kg/day 相当) の用量で 2 年間飲水投与した。その結果、8,000 ppm 群の雌で死亡率が増加し、雌雄ともに体重増加率の減少、最終体重の減少、飲水量の減少がみられ、1,000 ppm 以上の群ではヘモグロビンとヘマトクリットの減少、血清中の肝酵素 (AST、ALT、LDH、ALP) の増加、相対肺重量の増加、鼻腔粘膜の炎症、嗅上皮細胞の萎縮または鼻腔の炎症などが観察された。

以上の結果から、本評価では、本試験における非腫瘍性変化の NOAEL を 49 mg/kg/day (雄の 200 ppm の用量) と判断した。

2-2. 吸入

(1) ヒト

ドイツ人労働者を対象に横断的に実施されたコホート研究 (Thiess *et al.* 1976 ; IRIS (2013)、厚労省 (2018) から二次引用) では、1, 4-ジオキサンに暴露された1, 4-ジオキサン製造の現役従事者 (24 名、経験 5~41 年)、他作業就労中の現役従事者 (23 名、経験 3~38 年)、及び退職した過去従事者 (27 名、経験 12~41 年) の合計 74 名を調査した。空气中 1, 4-ジオキサン濃度は、プラント調査時において 0.06~0.69 ppm、過去におけるシミュレーション濃度は 0.06~7.2 ppm であった。現役の 1, 4-ジオキサン製造従事者及び他作業従事者について、徹底的な臨床検査、X 線検査、血液検査が行われたが、いずれの労働者にも病理所見は認められず、悪性疾患の徴候もみられなかった。血液検査の結果は概ね正常であった。肝臓の肥大や黄疸はみられなかった。腎機能検査と尿検査は正常であった。退職労働者について、医療記録をレビューした結果、肝臓や腎臓の疾患、がんの報告はなかった。退職の理由として 1, 4-ジオキサン暴露に関連した健康上の理由 (例えば、肺気腫、関節炎) は見当たらなかった。6 名の現役 1, 4-ジオキサン製造従事者の染色体検査において、異常所見はなかった。死亡統計は 74 名を対象とした。1964~1974 年における期待死亡数は 14.5 人だったが、観察死亡数は 12 人であった。2 件の腫瘍 (lamella epithelial carcinoma 及び myelofibrosis leukemia) がみられたが、死因との関連性はないと考えられた。がんの標準化死亡比 (SMR) は、対照集団と有意な差はなかった (全人口 SMR=0.83、65~75 歳男性の SMR=1.61)。

(2) 実験動物

雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009 ; USEPA (2020)、DFG MAK (2019)、IRIS (2013) のキースタディ) では、F344/DuCrj ラット (各群雄 50 例) に 1, 4-ジオキサン蒸気 (純度 99% 以上) を 0、50、250、1,250 ppm (0、180、900、4,500 mg/m³) の用量で 2 年間吸入暴露 (6 時間/日、週 5 日) した。その結果、1,250 ppm 群では、死亡率の増加、体重増加抑制、肝臓及び肺相対重量の増加、ヘモグロビン、MCV、MCH の減少、AST、ALT、ALP、 γ GTP の上昇、尿 pH の低下がみられ、病理組織学的検査では、50 ppm 以上の群で呼吸上皮細胞の核肥大、嗅上皮細胞の核肥大、嗅上皮細胞の萎縮、嗅上皮細胞の呼吸上皮化生がみられ、250 ppm 以上の群では近位尿細管上皮細胞の核腫大、呼吸上皮細胞の扁平上皮化成、1,250 ppm では肝細胞に小葉中心性壊死及び海綿状変性がみられた。

以上の結果から、本評価では、本試験における非腫瘍性変化の LOAEL を 50 ppm と判断した。

ラット 2 年間吸入毒性試験 (Torkelson *et al.* 1974 ; 産総研 (2005)、環境省 (2003)、ACGIH (2001) のキースタディ) では、Wistar ラット (雌雄各群 192 例) に、1, 4-ジオキサン蒸気を 0 及び 111 ppm (400 mg/m³) の用量で 2 年間吸入暴露 (7 時間/日、週 5 日) した。その結果、1, 4-ジオキサン暴露の雄ラットにおいて、血中尿素窒素、ALP 及び白血球数の減少、赤血球数の増加がみられたが、いずれも正常範囲内の変化とされた。また、雌雄ともに肝臓、腎臓を含む主要臓器の肉眼的及び病理組織学的変化はみられなかった。

以上の結果から、本試験における非腫瘍性変化の NOAEL を 111 ppm としていたが、本評価

381 では、単用量の試験であることから NOAEL を採用しない。

382 3. 生殖発生毒性

383 生殖発生毒性に関する情報（試験数）は乏しく、経口経路ではラット発生毒性に関する試験
384 が1つあるが、吸入経路に関しては、安定化剤として1, 4-ジオキサンを少量含む1, 1,
385 1-トリクロロエタンのラット及びマウスの発生毒性試験しかない。このように、1, 4-ジ
386 オキサンの生殖発生毒性を十分に評価するうえで必要な生殖毒性（2世代試験等）及び児動物の
387 発達に関する情報は得られなかった。

388 3-1 経口

389 (1) ヒト

390 経口暴露によるヒトの生殖発生毒性に関する情報は得られなかった。

391 (2) 実験動物

392 ラット経口投与による発生毒性試験（Giavini *et al.* 1985 : US EPA (2020)、DFG MAK (2019)、
393 厚労省 (2018)、産衛学会 (2015)、IRIS (2013) に掲載）では、妊娠 Sprague Dawley (SD) ラット
394 （各群 18～20 例）の妊娠 6～15 日目に1, 4-ジオキサン（純度 99%）を 0、0.25、0.5、1.0
395 mL/kg/day（0、250、500、1,000 mg/kg/day 相当）の用量で強制経口投与した。その結果、1,000
396 mg/kg/day 群では、母動物の摂餌量が投与期間初期に減少し、投与期間後期には増加したが、体
397 重増加量は軽度に低下した。また、1,000 mg/kg/day 群では胎児体重の低値、胸骨分節の骨化遅
398 延を認めた。

399 以上の結果から、本評価では、本試験の NOAEL を 500 mg/kg/day と判断した。

400 3-2 吸入

401 (1) ヒト

402 吸入暴露によるヒトの生殖発生毒性に関する情報は得られなかった。

403 (2) 実験動物

404 1, 4-ジオキサンを対象とした吸入暴露による実験動物の生殖発生毒性に関する情報は得
405 られなかった。なお、1, 4-ジオキサンを 3.5%含む1, 1, 1-トリクロロエタン 300 ppm
406 の発生毒性試験（Schwetz *et al.* 1975 ; 環境省 (2003)、AU NICNAS ⁽⁷⁶⁾ (1998) に掲載）があるの
407 で、参考情報として記載した。

408 SD ラット（雌 23 例）及び Swiss Webster マウス（雌 13 例）の妊娠 6 日目から 15 日目に吸
409 入暴露（1, 4-ジオキサンの用量として 32 ppm、7 時間/日）した。その結果、胎児への影響

⁽⁷⁶⁾ Australia, National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme、名称変更により現在は Australian Industrial Chemicals Introduction Scheme (AICIS)

は認められなかったと報告されている。この試験は、1, 4-ジオキサン単体による試験ではないため、本評価では参考扱いとする。

4. 変異原性（遺伝毒性）

調査した範囲において、ヒトの遺伝毒性に関する情報は得られなかった。

表 7 及び表 8 に、*in vitro* 試験及び *in vivo* 試験結果の概要をまとめた。

1, 4-ジオキサンは、ほとんどの *in vitro* 試験で陰性を示すが、*in vivo* 試験に関しては、陰性、陽性の両方の結果が混在し、変異原性の有無を結論付けるには証拠が不十分としている評価書もあるが、多くの評価機関では「直接的な変異原性はなく、酸化ストレス等を介した二次的な遺伝毒性作用が認められる」と評価している。主な評価機関による変異原性（遺伝毒性）の定性評価の結論を以下に記載した。

UK HSE (2025)では、ほとんどの *in vitro* 及び *in vivo* 試験が陰性であり、一部の *in vivo* 試験で陽性結果があったものの、高用量のみの反応であったことから、1, 4-ジオキサンは非遺伝毒性であり、遺伝毒性があったとしてもごく軽微であるとしている。

日本政府による GHS 分類結果 (2024) では、*in vitro* 試験はいずれも陰性を示したこと、*in vivo* 試験では陰性、陽性が混在し一貫性がなかったが、小核試験で陽性を示した用量は 2000 mg/kg 以上と高用量であったこと、高用量暴露による酸化ストレスが、活性酸素システムの調節不全を引き起こし、DNA 鎖切断や DNA 付加体などの遺伝毒性事象を引き起こす (Lafranconi *et al.* 2023) こと、また、*in vivo* 試験の高用量では遺伝毒性が見られる場合があるが、本物質が変異原性であるとする証拠は不十分である (US EPA 2020) ことなどを理由に、*in vivo* 試験の高用量で見られた陽性知見は間接的な影響と判断し、区分に該当しないとしている。

ECHA dossier (accessed on 2025/3/12) では、1, 4-ジオキサンは *in vitro* 試験において陰性を示し、*in vivo* 試験では、点突然変異や染色体異常誘発を示す陽性結果も得られているが、高用量レベルでのみみられたことに注目する必要があるとし、科学的証拠の重みづけから、1, 4-ジオキサンは変異原性を示さないと結論づけられるとしている。

AICIS (2022) では、1, 4-ジオキサンは *in vitro* で遺伝毒性を誘発しなかったことから、直接的な変異原性の可能性はないものと考えられるが、利用可能なデータは、生殖細胞変異原性の分類には十分ではないとしている。

ECHA Scientific report (2021) では、細菌及び哺乳類細胞を用いた *in vitro* 試験は陰性であるが、*in vivo* 試験の一部は陽性であった。この陽性結果は、主に 2,000 mg/kg を超える高用量でみられ、細胞増殖の誘導につながる細胞毒性に起因した非遺伝毒性による変化と判断されるが、2000 mg/kg 以下の用量で小核陽性が認められた試験もあり、二次的な作用機序として遺伝毒性機序があることは否定できないとしている。

Health Canada (2021) では、1, 4-ジオキサンは、多くの *in vitro* 試験で遺伝毒性を示さず、遺伝毒性が観察された場合は細胞毒性を伴っていた。また、*in vivo* 突然変異及び DNA 修復は陰性で、小核試験では陽性と陰性結果が認められた。1, 4-ジオキサンによる *in vivo* での DNA 損傷に関する研究は不明確であり、低用量では遺伝毒性がなく、陽性結果は高用量のみでみられたとしている。

US EPA (2020) では、高用量での *in vivo* 遺伝毒性に関する証拠はあるが、科学的証拠の重み付けに基づき、「1, 4-ジオキサンに変異原性がある、あるいは、変異原性作用様式を通じてがんを誘発すると結論付けるには証拠が不十分である」と結論付けている。

EURAC (2019) では、1, 4-ジオキサンは *in vitro* で遺伝毒性を誘発せず、直接的な変異原性を示さなかった。*in vivo* 試験では、骨髄細胞と肝細胞におけるいくつかの試験で小核形成の増加を示したが、末梢血細胞では示さず、結果は一貫していなかった。最終的に 1, 4-ジオキサンの変異原性に対する CLP 規制 (Classification, Labelling and Packaging Regulation) による分類はできないと判断している。

厚労省 (2018) では、*in vitro* 試験、*in vivo* 試験においてほとんどが陰性であり、遺伝毒性はないと判断している。

ECHA CLH report (2018) では、1, 4-ジオキサンは、ほとんどの *in vitro* 試験で陰性を示す一方で、*in vivo* 試験においては、小核試験で限界用量を超える用量で陽性を示すとの報告や細胞増殖の指標である複製 DNA 合成試験で陽性を示すとの報告があることから、二次作用機序としての遺伝毒性機序を除外することはできない。結論として、1, 4-ジオキサンは哺乳類細胞において *in vivo* で変異原性を示す。従って、1, 4-ジオキサンを生殖細胞変異原性物質として区分 2 (ヒトの生殖細胞に遺伝性突然変異を誘発する可能性があるため、ヒトに懸念をもたらす物質) に分類することが推奨されたとしている。

(補足コメント：ただし、上記 EURAC (2019) では、最終的に 1, 4-ジオキサンの変異原性に対する CLP 規制による分類はできないと判断している)。

Health Council of the Netherlands (2015) では、重要な *in vitro* 試験では陰性であったが、*in vivo* 試験の一部では予想外に制限用量を超える用量で主に陽性であったことから、1, 4-ジオキサンは、非確率的⁽⁷⁷⁾ 遺伝毒性物質であると考えべきであり、陽性結果は細胞毒性、ひいては増殖誘導によるものであると結論することができる。細胞増殖のマーカーとしての複製 DNA 合成を測定する試験で認められた陽性結果は、この作用機序を裏付けている。一方、小核試験では、制限用量である 2,000 mg/kg 未満の用量でも時折陽性結果が認められたことから、二次作用機序としての確率的遺伝毒性機序を排除することはできない。しかし、全体としては、1, 4-ジオキサンは哺乳類細胞において *in vivo* で変異原性を示すが、主に非確率的遺伝毒性機序によって作用するとしている⁽⁷⁸⁾。

⁽⁷⁷⁾ 「非確率的」とは、その影響がランダムではなく、特定の条件や刺激に依存して発生するということを指す

⁽⁷⁸⁾ 補足コメント：主に、制限用量を超える用量で陽性を示すが、陽性の結果は、細胞毒性や増殖誘導によるものと判断されたとの主旨

ATSDR (2012) では、1, 4-ジオキサンは *in vitro* 試験で遺伝毒性を示さず、*in vivo* 試験では、その多くが陰性であったとしている。

食安委 (2007) では、遺伝毒性・発がん性試験のまとめの項目において、1, 4-ジオキサンは、ほとんどの *in vitro* 試験で陰性であり、マウスの肝細胞を用いた小核試験で陽性であったが、この陽性反応は非遺伝毒性のメカニズムによるものであらうと結論付けられている。また、ラットを用いた DNA 合成、DNA 修復試験で 1,000 mg/kg 以下では陰性であることと、1, 4-ジオキサンによるラット・マウスの発がん性が、明らかに遺伝毒性を介したものとは言えないとしている。

産総研 (2005) では、調査した範囲内の遺伝毒性に関する実験的証拠の多くが陰性を示しているとして、1, 4-ジオキサンの発がんメカニズムを判断する際に 1, 4-ジオキサンが非遺伝毒性物質であるとしている。

NITE ⁽⁷⁹⁾ (2005) では、*in vitro* 試験で、ネズミチフス菌での復帰突然変異試験、CHO 細胞を用いた染色体異常試験、マウスリンフォーマ試験、大腸菌を用いた DNA 修復試験で代謝活性化の有無にかかわらず陰性であり、CHO 細胞を用いた姉妹染色分体交換 (SCE ⁽⁸⁰⁾) 試験で代謝活性化した場合は陰性で、活性化しない場合に弱い陽性を示し、肝臓の初代培養細胞を用いた不定期 DNA 合成 (UDS ⁽⁸¹⁾) 試験でも陰性を示していること、*in vivo* 試験で、マウスを用いた小核試験では陰性を示し、その他、雄の F344 ラットを用いた UDS 試験、ショウジョウバエを用いた伴性劣性致死試験で陰性を示していることから、1, 4-ジオキサンは遺伝毒性を示さないとしている。

EU RAR ⁽⁸²⁾ (2002) では、*in vitro* で染色体異常誘発作用及び変異原性作用がみられていないが、*in vivo* のキイロショウジョウバエを用いた伴性劣性致死試験で陽性、C57BL6 マウスを用いた経口投与試験の 1 件で陽性を示し、またアルカリ溶出試験において *in vitro* 及び *in vivo* ともに、高用量で DNA 鎖の切断が起こることが指摘されているなど、1, 4-ジオキサンが弱い遺伝子毒性を有する可能性を示唆する結果がいくつか報告されている。しかし、全体的な証拠の重みづけに基づくと、1, 4-ジオキサンは遺伝毒性を有さない物質であると判断されるとし、さらに肝毒性が発現する用量で DNA 付加体が認められなかったことも、これを裏づけるものとしている。

＜本評価における結論＞

遺伝毒性試験結果及び上記の国内外の評価機関による判断などを参考に、本評価における結論を記載した。

1, 4-ジオキサンは、Ames 試験を含む *in vitro* 試験では、ほぼ陰性を示した。唯一陽性を示した SCE 試験 (Galloway et al. 1987) の 10.5 mg/mL は試験限度濃度の 5 mg/mL を超えた非常

⁽⁷⁹⁾ National Institute of Technology and Evaluation

⁽⁸⁰⁾ Sister chromatid exchange

⁽⁸¹⁾ Unscheduled DNA synthesis test

⁽⁸²⁾ European Union Risk Assessment Report

に高い濃度であり、非生理的条件下での陽性反応であるため、本評価で陽性知見として取り扱うのは妥当ではないと判断した。

In vivo で陽性を示した骨髄小核試験は、多くが試験限度用量の 2000 mg/kg を超えた高用量暴露の結果であった。また、同じ試験条件で実施した結果は再現性を示さず、遺伝毒性影響として認識するには一貫性がなかった。同様に、*in vivo* 肝臓小核試験の陽性結果は高用量暴露によるものであり、多くが幼若動物の使用や部分肝切除により細胞増殖活性を亢進させた状態での知見であった。以上の通り、*in vivo* 小核試験の陽性結果は、主に高用量暴露で得られたものであること、また、染色体損傷性を検出するすべての *in vitro* 試験において陰性であったことから、証拠の重み付けに基づく総合的な評価が必要であると判断した。

また、Gi *et al.* (2018) による *gpt delta transgenic rat* (*gpt delta TGR* と略) の肝臓を用いた遺伝子突然変異試験 (16 週間飲水投与) では、最高用量 5,000 ppm で、肝細胞腫瘍の前がん病変として知られる GST-P (glutathione *S*-transferase placental form) 陽性変異肝細胞巢の単位面積あたりの数、突然変異頻度、DNA 修復酵素 (MGMT⁽⁸³⁾) の誘導が統計学的に有意に増加していた。ただし、中間用量 (1000 ppm) 及び低用量 (200 ppm) ではこれらについて増加傾向も統計学的有意差も認められなかった。これらの結果から、著者らは 1, 4-ジオキサンがラットにおいて遺伝毒性肝発がん物質であるとしていた。なお、OECD テストガイドライン 488 (OECD TG488)⁽⁸⁴⁾ では、1 日 1 回 28 日間の反復投与を求め、同時陽性対照動物を通常用いるとしているものの、Gi *et al.* (2018) による試験では投与期間が 16 週間であり、かつ、陽性対照が設定されていない。これら高用量暴露のみの陽性結果、OECD TG488 からの逸脱は、本試験結果の規制利用時には慎重な解釈が必要と考えられる。

さらに、上記 *gpt delta TGR* の背景系統である F344 ラットに本物質を最高 5000 ppm の用量で 16 週間飲水投与して得た肝臓における DNA 付加体形成を解析したところ、200 ppm 及び 5000 ppm で 8-OHdG⁽⁸⁵⁾ であることが特定された付加体の形成が対照群及び低用量群 (20 ppm) に比し増加し、5000 ppm では統計学的有意に増加していた (Totsuka *et al.* 2020)。著者らは、8-OHdG は活性酸素種から生成され、酸化ストレス関連の付加体であることが知られていることから、前述の 5000 ppm でみられた肝臓における突然変異頻度増加のメカニズムには、酸化ストレスが関与している可能性が高いとしている。8-OHdG は酸化ストレスによる二次的な反応を介して形成されることが考えられること、用量反応関係を欠いているとされることも考慮し、Gi *et al.* (2018) による試験においてみられた 1, 4-ジオキサン投与による突然変異誘発のメカニズムは、DNA との直接的な結合作用を必要としない可能性があると考えられている (Totsuka *et al.* 2020)。また、この研究では、8-OHdG 以外の構造を特定できない 2 種の DNA 付加体が対照群を含む全群に検出され、200 ppm 以上で増加傾向又は統計学的有意な増加がみられた。これらの付加体は、対照群でも検出されたこと、8-OHdG の生成増加が確認された 200 ppm 用量以上で増加したことに基づくと、1, 4-ジオキサンが直接 DNA に作用して生成したのではなく、酸化的ストレス等の二次的な作用により生成した可能性が高く、その生成には閾値を設定できると考えた。

⁽⁸³⁾ Methyl guanine methyl transferase.

⁽⁸⁴⁾ トランスジェニックげっ歯類の体細胞および生殖細胞を用いた遺伝子突然変異試験

⁽⁸⁵⁾ 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine

遺伝毒性に関する Cho *et al.* (2022) の AOP⁽⁸⁶⁾ 報告では、酸化 DNA 損傷と突然変異及び染色体異常（小核）が関連づけられている。酸化ストレスの原因となる活性酸素種やフリーラジカルは、特定の化学物質の暴露がない定常状態であっても様々な原因で細胞内に発生するため、酸化 DNA 損傷は絶えず誘発されるものの、修復機構が働き修復される。しかし、化学物質の暴露により酸化 DNA 損傷が増加し、DNA 修復能や内因性抗酸化能を超えると、DNA は修復されず塩基置換や DNA 鎖切断等が生じ、突然変異や染色体異常に陥る。すなわち、本物質による肝臓及び骨髄における小核形成は、酸化 DNA 損傷による二次的な影響であることが示唆される。また、Itoh and Hattori (2019) のラット末梢血 *pig-a* 試験⁽⁸⁷⁾では、3000 mg/kg までの単回経口投与で陰性であった（15 日後及び 30 日後）。このことは、本実験条件下において、本物質あるいは代謝物の全身循環物には、突然変異作用はないことを示唆している。

現時点までに得ることができた *in vitro* 及び *in vivo* 試験の知見を総合的に考察すると、本物質による *in vivo* 試験の一部でみられた陽性反応（骨髄細胞小核、肝小核、肝突然変異）は、高用量暴露のみでみられた結果あるいは 8-OHdG など DNA 付加体の生成に代表される酸化ストレスに起因する二次的な遺伝毒性と推測することが可能であり、本評価において閾値を設定できると考えた。また、これらの知見から、1, 4-ジオキサンが直接 DNA に作用して突然変異を誘発するものではないと考えた。

表 7 主な *in vitro* 遺伝毒性試験

試験系	試験材料	処理条件	用量 (μg/plate)	結果		文献 (引用元の評価書)
				S9-	S9+	
復帰突然変異試験	ネズミチフス菌 TA98 TA100 TA1530 TA1535 TA1537	Fluctuation test	ND	— — — — —	— — — — —	Khudoley <i>et al.</i> 1987 (NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
	ネズミチフス菌 TA98 TA100 TA1535 TA1537	ブレインキューベーション法 (ラット及びハムスター S9)	100-10,000 100-10,000 100-10,000 100-10,000	— — — —	— — — —	Haworth <i>et al.</i> 1983 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
	ネズミチフス菌 TA1535 TA100 TA98 TA1538 TA1537	ND	(mg/plate) 5.17-103 5.17-103 5.17-103 5.17-103 5.17-103	— — — — — —	— — — — — —	Stott <i>et al.</i> 1981 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
	ネズミチフス菌 TA98 TA100 TA1535 TA1537 大腸菌 WP2 (pKM101) WP2uvrA (pKM101)	プレート法及びブレインキューベーション法	156-5,000 156-5,000 156-5,000 156-5,000 156-5,000 156-5,000	— — — — — —	— — — — — —	Morita and Hayashi 1998 (NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
	マウスリンフォーマ tk 試験	L5178Y 細胞	4 時間処理	1,250-5,000 (μg/mL)	—	—

⁽⁸⁶⁾ Adverse Outcome Pathway 有害性発現経路：化学物質が生体内でどのように有害な影響を及ぼすかを説明するための概念的なフレームワーク

⁽⁸⁷⁾ Phosphatidylinositol glycan anchor biosynthesis, class A Assay

	L5178Y 細胞	3 時間処理 24 時間処理 3 時間処理-2%S9 濃度 3 時間処理-5%S9 濃度	(µg/mL) 1,250-5,000 1,250-5,000 1,250-5,000 1,250-5,000	— — — —	— — — —	Morita and Hayashi 1998 (NITE 2005, 食 安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
小核試験	CHO-K1 細胞	5 時間処理-42 時間回復 44 時間処理-0 時間回復	(µg/mL) 1,250-5,000 1,250-5,000	— —	— —	Morita and Hayashi 1998 (NITE 2005, 食 安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
染色体 異常試験	CHO-WBL 細胞	-S9mix 10.5 時間処理 +S9mix 2 時間処理	1,050-10,500 1,050-10,500	—	—	Galloway <i>et al.</i> 1987 (NITE 2005, ATSDR 2012, EU RAR 2019, US EPA 2020)
	CHO-K1 細胞	5 時間処理-18 時間回復 20 時間処理-24 時間回復 20 時間処理-0 時間回復 44 時間処理-0 時間回復 5 時間処理-42 時間回復	(µg/mL) 1,250-5,000 1,250-5,000 1,250-5,000 1,250-5,000 1,250-5,000	— — — — —	— — — — —	Morita and Hayashi 1998 (NITE 2005, 食 安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
SCE 試験	CHO-WBL 細胞	-S9mix 約 25 時間処理 +S9mix 2 時間処理	(µg/mL) 1,050-10,500 1,050-10,500	+ (10, 500)	—	Galloway <i>et al.</i> 1987 (NITE 2005, ATSDR 2012, EU RAR 2019, US EPA 2020)
	CHO-K1 細胞	3 時間処理-23 時間回復 26 時間処理	(µg/mL) 1,250-5,000 1,250-5,000	— —	— —	Morita and Hayashi 1998 (NITE 2005, 食 安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
酵母異 数性試験	Saccharomyces cerevisiae, D61.M	4 時間処理	1.48-4.75(%)	—		Zimmermann <i>et al.</i> 1985 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
不定期 DNA 合 成(UDS) 試験	ラット初代肝細胞	ND	10 ⁻⁸ -1 M	—		Stott <i>et al.</i> 1981 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
	ラット初代肝細胞	ND	0.001, 0.01, 0.1, 1 mM	—	ND	Goldsworthy <i>et al.</i> 1991 (EU CLH Report 2018)
DNA 修 復試験	E. coli K-12、 343/636 株、 343/591 株	90 分処理	1,150 mmol/L	—	—	Hellmér and Bolcsfoldi 1992 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)

—：陰性、+：陽性、ND: Not described（文献中に記載なし）

表 8 主な *in vivo* 遺伝毒性試験

試験系	試験材料	処理条件	用量	結果	文献 (引用元の評価書)
遺伝子変異 試験 (<i>gpt</i> assay)	<i>gpt</i> delta TGR F344 ラット肝臓 (6 週齢)	16 週間経口 (飲水) 投与	200, 1,000, 5,000 ppm	<i>gpt</i> 突然変異, MGMT 誘導 + (5,000 ppm)	Gi <i>et al.</i> 2018 (EPA 2020, ECHA dossier accessed on 2025/3/12)
	<i>gpt</i> delta TGR F344 ラット肝臓 (6 週齢)	16 週間経口 (飲水) 投与	0.2, 2, 20 ppm	<i>gpt</i> 突然変異 —	
	Wild-type F344 ラ ット肝臓 (3 週齢)	16 週間経口 (飲水) 投与	2, 20, 200, 2,000, 5,000 ppm	GST-P 陽性細胞 巢 + (≥2,000 ppm)	
遺伝子変異 試験 (<i>Pig-a</i> assay)	ラット, F344, 雄, 末梢血	単回経口投与 後 15 日または 30 日後検査	1,000, 2,000, 3,000 mg/kg	—	Itoh and Hattori 2019 (EPA 2020, ECHA dossier accessed on 2025/3/12)

ラット肝 小核試験	ラット, F344, 雄 ・ 幼若ラット法 ・ 部分肝切除 1 日 前投与法 ・ 部分肝切除 1 日 後投与法	・ 2 日間経口 投与して 4 日 後検査 ・ 切除前日に 単回投与して 5 日後検査 ・ 切除翌日に 単回投与して 3 日後検査	1,000, 2,000, 3,000 mg/kg	+ (1,000, 2,000, 3,000 mg/kg×2) + (1,000, 2,000, 3,000 mg/kg) + (2,000, 3,000 mg/kg)	Itoh and Hattori 2019 (EPA 2020, ECHA dossier accessed on 2025/3/12)
マウス肝 小核試験	マウス, CD-1, 雄	単回経口投与 後, 1 日目に部 分肝切除し, 6 日目に検査	1,000-3,000 mg/kg	+ (2,000 mg/kg 以上)	Morita and Hayashi 1998 (NITE 2005, 食 安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
ラット 骨髄細胞 小核試験	ラット, F344, 雄	単回経口投与 後 24 または 48 時間	1,000, 2,000, 3,000 mg/kg	—	Itoh and Hattori 2019 (EPA 2020, ECHA dossier accessed on 2025/3/12)
マウス 骨髄細胞 小核試験	マウス, CBA 雄	単回強制経口 投与後 24 時間	1,800 mg/kg	—	Tinwell and Ashby 1994 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
	マウス, C57BL6 雄	単回強制経口 投与後 24 時間	3,600 mg/kg	—	Tinwell and Ashby 1994 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
	マウス, C57BL6 雌雄	単回強制経口 投与後 24, 48 時間	450-3,600 mg/kg (雄)	+ (900-3,600 mg/kg)	Mirkova 1994 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
			5000 mg/kg (雌)	+	
	マウス, BALB/c 雄	単回強制経口 投与後 24 時間	5,000 mg/kg	—	Mirkova 1994 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
	マウス, B6C3F1 雄	・ 単回腹腔内 投与後 24 時間 ・ 3 日間連続 投与後 24, 48 時間	2,000-4,000 mg/kg 500, 1,000, 2,000 mg/kg ×3 (daily dose)	再現性がなく、 用量依存性を示 さない散発的な 陽性結果 (明確な結論が得 られなかった)	McFee <i>et al.</i> 1994 (食安委 2007, ATSDR 2012)
	マウス, CD-1, 雄	24 時間間隔で 2 回腹腔内投 与後 24, 48, 72 時間	500, 1000, 2000, 3200 mg/kg×2	—	Morita 1994 (US EPA 2020) Morita <i>et al.</i> 1997
	マウス, CD-1, 雄 3 週齢 骨髄及び肝臓	5 日間強制経 口投与後 24 時 間目	1,500, 2,500, 3,500 mg/kg×5	+ (骨髄, 1,500 mg/kg×5 以上) + (肝臓, 2,500 mg/kg×5 以上)	Roy <i>et al.</i> 2005 (ATSDR 2012, US EPA 2020)
マウス 末梢血 小核試験	ICR マウス (雄)	強制経口投与 後 48 時間	1,000, 2,000, 3,000 mg/kg	—	Morita and Hayashi 1998 (NITE 2005, 食 安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
伴性劣性致 死試験	ショウジョウバエ Carton-S 雄, Basc, 雌	給餌	35,000 ppm	—	Yoon <i>et al.</i> 1985 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
	ショウジョウバエ Carton-S 雄, Basc, 雌	注射	50,000 ppm	—	Yoon <i>et al.</i> 1985 (EU RAR 2002, NITE 2005, ATSDR 2012, US EPA 2020)

ラット肝 DNA 損傷	ラット, SD (CD 種)雌	2 回投与 (解剖 の 21 及び 4 時 間前)	168, 840, 2,550, 4,200 mg/kg	＋ (2,550, 4,200 mg/kg)	Kitchin and Brown 1990 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)
DNA 合成	ラット, SD, 雄 肝細胞	単回強制経口	10, 100, 1,000 mg/kg	－	Stott <i>et al.</i> 1981 (EU RAR 2002, NITE 2005)
		飲水, 11 週間	10, 1,000 mg/kg	＋ (1,000 mg/kg)	Stott <i>et al.</i> 1981 (EU RAR 2002, NITE 2005)
	ラット, F344, 雄 肝細胞	単回強制経口 後 24, 48 時間	1,000, 1,500, 2,000 and 4,000 mg/kg	＋ (24h : 1,000- 2,000 mg/kg で 用量依存あり, 細胞毒性なし 48 h : 細胞毒 性なし)	Miyagawa <i>et al.</i> 1999 (EU CLH Report 2018)
DNA 修復 DNA アルキ ル化	ラット, SD, 雄	単回強制経口	1,000 mg/kg	－ －	Stott <i>et al.</i> 1981 (EU RAR 2002, 食安委 2007, ATSDR 2012)
不定期 DNA 合成(UDS) 試験	ラット, F344, 雄	飲水, 8 日間	1%溶液	－	Goldsworthy <i>et al.</i> 1991 (EU RAR 2002, NITE 2005, 食安委 2007, ATSDR 2012, US EPA 2020)

562 ー：陰性、＋：陽性

563 5. 発がん性

564 5-1 経口

565 (1) ヒト

566 経口暴露によるヒトの発がん性に関する情報は得られなかった。

567 (2) 実験動物

568 マウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009 ; UK HSE (2021)、US EPA (2020)、EU RAC
569 (2019)、ECHA CLH report (2018)、IRIS (2013) のキースタディ) において、Crj:BDF1 マウス (雌
570 雄各群 50 例) に 1, 4-ジオキサン (純度 99%以上) を 0、500、2,000、8,000 ppm (雄 : 0、
571 49、191、677 mg/kg/day、雌 : 0、66、278、964 mg/kg/day 相当) の用量で 2 年間飲水投与した。
572 その結果、雄では、2,000 ppm 以上の群で肝細胞腺腫あるいは肝細胞がん複合、8,000 ppm 群で
573 肝細胞がんの用量依存的で統計学的に有意な増加、2,000 ppm 群で肝細胞腺腫の統計学的に有意
574 な増加が認められた。雌では、500 ppm 以上の群で肝細胞がん、肝細胞腺腫あるいは肝細胞がん
575 複合の用量依存的で統計学的に有意な増加、500 及び 2000 ppm 群で肝細胞腺腫の統計学的に有
576 意な増加が認められた。また、8,000 ppm 群では、鼻腔に神経上皮細胞腫が雄 1 例、腺がんが雌
577 1 例認められた。観察した担腫瘍動物数を表 9 に示した。

578 表9 マウス2年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) における担腫瘍動物数

飲水中 1, 4-ジオキサン濃度 (ppm)	0	500	2,000	8,000	Peto 検定
雄 : 投与量 (mg/kg/day)	0	49	191	677	
雄例数	50	50	50	50	
鼻腔 : 神経上皮腫	0	0	0	1	
肝臓 : 肝細胞腺腫	9	17	23**	11	

肝細胞がん	15	20	23	36**	↑↑
肝細胞腺腫/がん 複合	23	31	37**	40**	↑↑
雌：投与量 (mg/kg/day)	0	66	278	964	
雌例数	50	50	50	50	
鼻腔：腺がん	0	0	0	1	
肝臓：肝細胞腺腫	5	31**	20**	3	
肝細胞がん	0	6*	30**	45**	↑↑
肝細胞腺腫/がん 複合	5	35**	41**	46**	↑↑

フィッシャーの正確確率検定: *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$ 、Peto 検定: ↑↑: $p \leq 0.01$

ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009 ; UK HSE (2021)、ECHA CLH report (2018) のキースタディ) において、F344/DuCrj ラット (雌雄各群 50 例) に 1, 4-ジオキサン (純度 99% 以上) を 0、200、1,000、5,000 ppm (雄: 0、11、55、274 mg/kg/day、雌: 0、18、83、429 mg/kg/day 相当) の用量で 2 年間飲水投与した。その結果、雌雄ともに 5,000 ppm 群で鼻腔の悪性腫瘍 (主として扁平上皮がん)、肝細胞腺腫及び肝細胞がん、乳腺腫瘍の用量依存的で統計学的に有意な増加が認められた。また、雄の 5,000 ppm 群には腹膜の中皮腫の用量依存的で統計学的に有意な増加も認められた。観察した担腫瘍動物数を表 10 に示した。

表10 ラット2年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) における担腫瘍動物数

飲水中 1, 4-ジオキサン濃度 (ppm)	0	200	1,000	5,000	Peto 検定
雄 投与量 (mg/kg/day)	0	11	55	274	
雄例数	50	50	50	50	
鼻腔：扁平上皮がん	0	0	0	3	↑↑
神経上皮腫	0	0	0	1	
横紋筋肉腫	0	0	0	1	
肉腫 (詳細不明)	0	0	0	2	
肝臓：肝細胞腺腫	3	4	7	32**	↑↑
肝細胞がん	0	0	0	14**	↑↑
肝細胞腺腫/がん 複合	3	4	7	39**	↑↑
腹膜：中皮腫	2	2	5	28**	↑↑
乳腺：線維腺腫/腺腫	1	2	2	6	↑↑
線維腺腫	1	1	0	4	↑↑
腺腫	0	1	2	2	
皮下：線維腫	5	3	5	12	↑↑
雌 投与量 (mg/kg/day)	0	18	83	429	
雌例数	50	50	50	50	
鼻腔：扁平上皮がん	0	0	0	7**	↑↑
神経上皮腫	0	0	0	1	
横紋筋肉腫	0	0	0	0	
肉腫 (詳細不明)	0	0	0	0	
肝臓：肝細胞腺腫	3	1	6	48**	↑↑
肝細胞がん	0	0	0	10**	↑↑
肝細胞腺腫/がん 複合	3	1	6	48**	↑↑
腹膜：中皮腫	1	0	0	0	
乳腺：線維腺腫/腺腫	8	8	11	18*	↑↑
線維腺腫	3	2	1	3	
腺腫	6	7	10	16*	↑↑
皮下：線維腫	0	2	1	0	

フィッシャーの正確確率検定: *: $p \leq 0.05$, **: $p \leq 0.01$ 、Peto検定: ↑↑: $p \leq 0.01$

ラット 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974 ; US EPA (2020)、EU RAC (2019)、ECHA CLH report (2018) に掲載) では、6~8 週齢の Sherman ラット (雌雄各群 60 例) に 1, 4-ジオキサン (純度不明) を 0、0.01、0.1、1% (雄: 0、9.6、94、1,015 mg/kg/day、雌: 0、19、148、

592 1,599 mg/kg/day 相当) の用量で 716 日間飲水投与した。その結果、1%群で肝臓における悪性腫
593 瘍及び鼻腔扁平上皮がんの統計学的に有意な増加が認められた (表 11)。

594 表11 ラット2年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974) における担腫瘍動物数

飲水中 1, 4-ジオキサン濃度 (%)	0	0.01	0.1	1
用量 雄/雌 mg/kg/day	0/0	10/19	94/148	1015/1599
雌雄合計例数	120	120	120	120
肝臓：肝臓がん(すべてのタイプ)	2	0	1	12 ^a
肝臓：肝細胞がん	1	0	1	10 ^b (6 M, 4F)
鼻腔：扁平上皮がん	0	0	0	3 ^c (1M, 2F)

595 フィッシャーの正確確率検定：^a: p=0.00022, ^b: p=0.00033, ^c: p=0.05491、

596 M: Male, F: Female、記載の無い欄：性別不明

597 AICIS (2022)、SCCS (2015) のキースタディとされたマウス 2 年間飲水投与毒性試験
598 (Yamazaki *et al.* 1994) は試験結果の見直しが行われたため (1-2 (2) ①経口の項参照)、本評価で
599 は採用しなかった。

600 また、キースタディではないが、US EPA (2020) には、ラット 110 週間飲水投与試験 (NCI 1978)
601 及びマウス 90 週間飲水投与試験が掲載されていた。

602 Osborne-Mendel ラット (雌雄各群 35 例) に 1, 4-ジオキサンを雄: 0、240、530 mg/kg/day、
603 雌: 0、350、640 mg/kg/day の用量で 110 週間飲水投与した。その結果、鼻腔扁平上皮がんの発生
604 率は、雌雄において有意に増加した (雄: 0/33、12/33、16/34、雌: 0/34、10/35、8/35)。また、雌
605 において、用量に依存した肝臓腺腫の有意な増加が認められた (0/31、10/33、11/32)。

606 B6C3F1 マウス (雌雄各群 50 例) に 1, 4-ジオキサンを雄: 0、720、830 mg/kg/day、雌: 0、
607 380、860 mg/kg/day の用量で 90 週間飲水投与した。その結果、雌雄ともに、用量に依存して肝
608 細胞腺腫又はがんの発生率が増加した (雄: 8/49、19/50、28/47、雌: 0/50、21/48、35/37)。

609 しかし、これらのラット、マウス試験はともに、対照群 (0 mg/kg/day) として他試験のデータ
610 (matched-control data) を使用し、用量設定幅が狭く、死亡例が多いなど、US EPA (2020) ではデ
611 ータの信頼性が低いとされていたため、本評価では使用しなかった。

612 5-2 吸入

613 (1) ヒト

614 以下の情報があつたが、いずれも 1, 4-ジオキサンの暴露と発がんとの関連は見い出され
615 ていない。

616 1, 4-ジオキサンに暴露された作業員のコホート研究 (Buffler *et al.* 1978 : 厚労省 (2018)、
617 IRIS (2013) に掲載) によると、テキサス州の化学製造施設で 1954 年以降に低濃度 1, 4-ジオ
618 キサン暴露を受けていた製造工場 (100 人) 及び加工場 (65 人) の前向き死亡率調査 (環境中
619 の 1, 4-ジオキサン濃度は、両者とも 25 ppm 未満と推定) では、1975 年時点で製造工場 (従
620 事者の 7 人が死亡した。そのうち 2 名ががんによる死亡であった。加工場従事者では 5 人が死
621 亡し、そのうち 1 名ががんによる死亡であった。いずれも観察された死亡数は、期待数と比較

し統計学的有意差を認めなかった（製造工場：観察値 7.9、期待値 4.9、加工場：観察値 4.9、期待値 5）。

1, 4-ジオキサンの大気濃度と乳がん発生率に関する大規模コホート研究 (Garcia *et al.* 2015、US EPA (2020) に掲載) によると、カリフォルニアの教師（1995 年～2011 年に、現役及び退職した女性教師及び管理者）の参加者（112,378 名の女性）における乳がん発生率と 1, 4-ジオキサンの大気濃度暴露の関係を調査したが、統計学的に有意な関連性はみられなかった。

(2) 実験動物

雄のラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009 : UK HSE (2021)、US EPA (2020)、EU RAC (2019)、ECHA CLH report (2018)、厚労省 (2018)、産衛学会 (2015)、IRIS (2013) のキースタディ) では、F344/DuCrj ラット (各群 50 例) に 1, 4-ジオキサン蒸気を 0、50、250、1,250 ppm (0、180、900、4,500 mg/m³) の用量で 6 時間/日、週 5 日、2 年間吸入暴露した。その結果、腹膜中皮腫、鼻腔扁平上皮がん、肝細胞腺腫/がん、腎細胞がん、乳腺線維腺腫、ジンバル腺の腺腫、皮下線維腫が発生し、鼻腔扁平上皮がんと肝細胞腺腫は 1,250 ppm 群で、腹膜中皮腫が 250 ppm 以上の群で、皮下線維腫が 250 ppm 群で、統計学的に有意な発生率の増加を示した。観察した担腫瘍動物数を表 12 に示した。

表 12 雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) における担腫瘍動物数

1, 4-ジオキサン蒸気濃度 (ppm, 吸入)	0	50	250	1,250	Peto 検定
mg/m ³	0	180	900	4,500	
雄例数	50	50	50	50	
鼻腔：扁平上皮がん	0	0	1	6*	↑↑
肝臓：肝細胞腺腫	1	2	3	21**	↑↑
肝臓：肝細胞がん	0	0	1	2	
腎臓：腎細胞がん	0	0	0	4	↑↑
腹膜：中皮腫#	2	4	14**	41**	↑↑
乳腺：線維腺腫	1	2	3	5	↑
乳腺：腺腫	0	0	0	1	
ジンバル腺：腺腫	0	0	0	4	↑↑
皮膚：皮下線維腫	1	4	9**	5	

フィッシャーの正確確率検定: *, $p \leq 0.05$, **, $p \leq 0.01$ 、Peto 検定: ↑, $p \leq 0.05$, ↑↑, $p \leq 0.01$

#: 同施設 (日本バイオアッセイ研究センター) F344/DuCrj 雄ラットを用いた 10 年間 (2005-2014 年) の吸入試験での中皮腫の背景値は 18/697 例、発生率 2.6% (最小 0～最大 6%) (高信 健司ら 2015)

ラット 2 年間吸入毒性試験 (Torkelson *et al.* 1974 : 産総研 (2005)、環境省 (2003)、ACGIH (2001) のキースタディ) では、Wistar ラット (雌雄各群 192 例) に、1, 4-ジオキサンを 0 及び 111 ppm (400 mg/m³) の用量で 2 年間吸入暴露 (7 時間/日、週 5 日) した。その結果、1, 4-ジオキサン暴露に関連したと思われる腫瘍は認められなかった。

6. その他の有害性に関する情報

6-1. 生体内運命 (体内動態)

US EPA (2020) では、1, 4-ジオキサンの体内動態に関するヒト及びラットの情報を以下のようにレビューしている。

649 <吸収>

650 1, 4-ジオキサンの経口吸収を評価するためのヒト情報はなかった。

651 雄ラットに [¹⁴C]-1, 4-ジオキサン 10、100、1,000 mg/kg を単回投与、又は 10、1,000 mg/kg/day
652 を 17 回連続投与したところ、消化管から速やかに吸収され、放射能の 75～98%が尿中に、1～
653 2%が糞中に回収された (Young *et al.* 1978 a, b)。また、1, 4-ジオキサン 65 mg/kg を単回経口
654 投与した雄ラットでは、投与 1 時間後に最大血中濃度に達し、8 時間後には血中に検出された
655 が、12 時間後には検出されなくなった (Take *et al.* 2012)。

656 1, 4-ジオキサンを 50 ppm の濃度で吸入暴露した 4 人の成人男性ボランティアを対象とし
657 た研究では、速やかに血漿中に取り込まれ、6 時間後までに定常状態に近づいた (Young *et al.*
658 1977)。また、20 ppm の濃度で 8 時間吸入暴露された研究では、平均血中濃度が 4 時間後に 0.98
659 mg/L、8 時間後に 1.1 mg/L で、4 時間以内に定常状態に近づいたことが示された。さらに、吸
660 入暴露の各時間中に 10 分間運動したボランティアでは平均血中濃度が高く、4 時間後に 1.48
661 mg/L、8 時間後に 1.47 mg/L に達した (Göen *et al.* 2016, Young *et al.* 1976, 1977)。

662 動物の吸入暴露では、1, 4-ジオキサンを 50 ppm の濃度で 6 時間吸入暴露したラットの血
663 漿中濃度は平均 7.3 µg/mL であった (Young *et al.* 1978a, b)。また、250 ppm の濃度で吸入暴露し
664 た雄ラットでは、3 時間以内に定常状態の血中濃度に達した (Take *et al.* 2012)。

665 <分布>

666 1, 4-ジオキサンのヒト組織における分布に関する情報はなかった。

667 動物実験では、ラットに 1, 4-ジオキサンを吸入暴露し、肺、肝臓、脳、腎臓、腹部脂肪へ
668 の分布を観察した試験では、すべての臓器で、暴露 3 時間後には定常状態に達した。また、暴
669 露を中止してから 2 時間後までは、これらの臓器で検出可能であったが、6 時間後には検出不
670 可能となった。ラットへの単回経口投与では、これらの臓器のすべてで暴露後 1 時間後にピー
671 ク濃度に達し、12 時間後には検出されなくなった (Take *et al.* 2012)。

672 なお、ヒト及び動物において、1, 4-ジオキサンまたはその代謝物が胎盤を通過するかと
673 うか、また、母乳に入るかどうかはわかっていない (EPA 2020)。

674 <代謝>

675 ECHA Scientific report (2021) に記載された代謝経路を図 1 に示す。

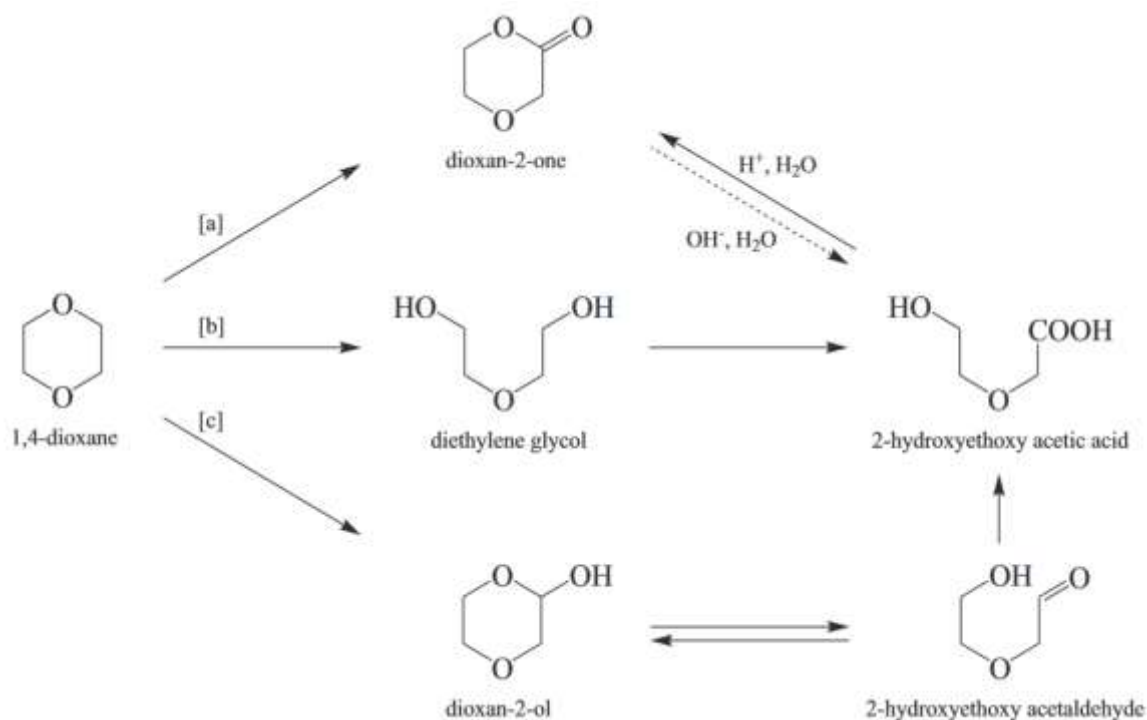


図1 1, 4-ジオキサン代謝経路

(ECHA Scientific report 2021 より [Woo et al. 1977a より改変])

[a] Cytochromes P450 (CYP) による酸化とそれに続くヒドロキシル化

[b] CYP による酸化、ジエチレングリコールへの開環とそれに続く

2-hydroxyethoxy acetic acid への酸化

[c] 上記の経路が飽和した場合の代謝の仮説： α -ヒドロキシル化によるジ

オキサン-2-オール生成、2-ヒドロキシ-エトキシアセトアルデヒド

への開環、それに続く HEAA への酸化（アルデヒド中間体は実験的

に観察されていない）

ヒトやラットにおいて、1, 4-ジオキサンは [a]及び[b]経路の酸化により代謝されるが、飽和した場合に [c] 経路が想定されている。全身循環における一次代謝産物は、*p*-ヒドロキシエトキシ酢酸 (HEAA, 2-hydroxyethoxy acetic acid) である (EPA 2020)。

1, 4-ジオキサン 50 ppm を 6 時間吸入した成人男性ボランティアでは、その 99%以上（呼吸排泄は無視できると仮定）が HEAA として尿中に出現した (Young et al. 1977)。1.6 ppm の 1, 4-ジオキサンに 7.5 時間暴露された労働者の尿中に検出された HEAA 量と 1, 4-ジオキサン量の比は 118 : 1 の割合 (Young et al. 1976)、また、50 ppm の 1, 4-ジオキサンを 6 時間吸入したラットでは 3,100 : 1 の割合であった (Young et al. 1978a, b)。CYP450 の誘導は尿中の HEAA 量を増加させ、CYP450 の抑制は尿中の HEAA 量を減少させたことから、1, 4-ジオキサンの代謝が一部 CYP450 によって媒介されていることが示された (Woo et al. 1978, 1977b)。また、経口暴露後、1, 4-ジオキサンは、肝ミクロソームにおいて、CYP2B1/2、CYP2C11、CYP2E1、CYP3A などいくつかの CYP450 異性体を誘導するが、CYP4A1 は誘導しなかった

(Nannelli *et al.* 2005)。In vitro の肝ミクロソーム CYP2E1 酵素活性を測定した代謝研究から、1, 4-ジオキサンは、CYP2E1 を介した p-ニトロフェノールヒドロラーゼ活性の用量依存的阻害を示すこと (Patil *et al.* 2015)、肝臓ミクロソームにおける CYP450 の水溶性基質の代謝を阻害することがわかった (Shah *et al.* 2015)。

また、1, 4-ジオキサンの局所代謝により、組織特異的な代謝物が生じ、組織特異的な毒性に寄与する可能性がある。ラットの経口暴露後、1, 4-ジオキサンは肝臓、鼻粘膜と腎臓で CYP2E1 を誘導したが、肺組織では CYP2E1 の誘導はみられなかった。このように、組織特異的に CYP 誘導が制御されていることが示唆された (Nannelli *et al.* 2005)。

1, 4-ジオキサンの代謝は一次速度論に従うと思われ、高用量での経口または静脈内暴露により代謝が飽和することを示す証拠がいくつか存在する。一方、吸入暴露後の代謝飽和の証拠は報告されていない。13 週間の吸入試験では、雄ラット及び雌ラットの血漿中濃度がそれぞれ 730 及び 1,054 µg/mL まで、代謝飽和は観察されなかった (Kasai *et al.* 2008)。この研究で代謝が飽和しなかったのは、1, 4-ジオキサンの反復吸入暴露による P450 酵素 (CYP2E1 含む) の誘導による代謝の促進、あるいは、経口暴露と吸入暴露のトキシコキネティックの違い (経口暴露の場合、摂取後の初回通過効果により、肝臓が高い暴露量を受けるため飽和効果が高まる可能性) によると考えられる (EPA 2020)。

<排泄>

ヒト及びラットにおける 1, 4-ジオキサンの排泄は、主に代謝物 HEAA として尿を介して排泄される (Göen *et al.* 2016、Young *et al.* 1976, 1978a)。血漿中の 1, 4-ジオキサンの消失半減期は、ヒトとラットで約 1 時間、尿中の HEAA の消失は 2.7 時間であった (Young *et al.* 1977)。1, 4-ジオキサン及び代謝物 HEAA の半減期が短いことから、毎日反復暴露されても 1, 4-ジオキサンまたは HEAA の体内蓄積をもたらす可能性が少なくと推察される。

なお、ECHA dossier (accessed on 2025/3/12) には、1, 4-ジオキサンの代謝・排泄過程は、経口投与の場合、高用量で飽和するが、その飽和する用量レベルは、ラットで 9.6~42 mg/kg/day、マウスで 57~66 mg/kg/day の範囲であると報告されている (Dourson *et al.* 2017)

6-2. 急性毒性

(1) ヒト

厚労省 (2018) によると、ヒトでの急性 (短期間暴露) 毒性について以下の情報があった。閉鎖され換気のない屋内におけるマスクなしでの作業により 1, 4-ジオキサンに 1 週間暴露され、死亡した症例がある。初めは消化器症状、次いで筋緊張亢進と神経症状が出現した。入院 1 週間後に腎機能不全で死亡した。剖検では、間質内出血を伴う腎皮質の壊死、尿細管腔に赤血球像、肝細胞壊死、脳での脱髄と神経線維消失を認めた。職場での暴露濃度は、208~650 ppm (平均 470 ppm) であった (産衛学会 2015)。

レーヨン製造工場での 1, 4-ジオキサン暴露による死亡例が報告されている。5 名の作業者が高濃度の 1, 4-ジオキサン (暴露濃度不明) に吸入暴露され、重度の出血性腎炎及び小葉

中心性肝細胞壊死を発症し、約 1 週間後に急性腎不全で死亡した。黄疸はみられなかった。他の労働者は悪心、嘔吐、眼や気道の刺激を訴えた (ACGIH 2001)。

男女それぞれ 6 人のボランティアに、1, 4-ジオキサン 20 ppm を 2 時間吸入暴露したが、「溶剤臭」の感知はあったものの、眼、鼻、及び喉の不快感、呼吸困難、頭痛、疲労、悪心、めまい、中毒感などの訴えはなく、また血漿中の炎症マーカー (C-反応性タンパク質及びインターロイキン-6 など) の上昇、及びまばたき頻度、肺機能または鼻の腫脹などの有意な影響はなかった (IRIS 2013)。

(2) 実験動物

厚労省 (2018) によると、動物での急性毒性について以下の情報があった (表 13、NIOSH(1994)、ACGIH (2001)、MAK (2003)より)。

表 13 1, 4-ジオキサンの急性毒性試験結果

	マウス	ラット	ウサギ
経口 LD ₅₀	5,660 mg/kg 5,900 mg/kg	5,170 mg/kg 5,400 mg/kg	2,060 mg/kg 2,500 mg/kg
吸入 LC ₅₀	10,109 ppm/2h	12,568 ppm/2h 14,250 ppm/4h	—

ラット (雌雄各群 3 例) を 155,000 mg/m³ (43,400 ppm) の 1, 4-ジオキサンに、1、3 または 7 時間吸入暴露したところ、毒性徴候として呼吸困難、無関心、昏睡、眼及び気道の粘膜刺激、眼瞼反射の喪失、被毛状態の異常、及び歩行失調がみられ、また剖検では急性心臓拡張、胃粘膜の出血性びらん、及び血液のまじった胃腸内容物がみられた (EU RAR 2002)。

また、ラット、マウス、及びモルモットに経口投与 (用量不明) した際の毒性徴候は、麻酔作用、昏睡、胃腸粘膜の刺激、及び肝臓と腎臓の損傷などであった (EU RAR 2002)。

雄ラットを 1 日 2 回、各 4 時間、3,660 または 7,320 mg/m³ の 1, 4-ジオキサンに吸入暴露したところ、血清 ALT、AST 及びオルニチンカルバミルトランスフェラーゼ活性の有意な上昇が認められた (EU RAR 2002)。

モルモットへの 2,000 ppm の数時間吸入暴露で、重度の症状はみられなかった (ACGIH 2001)。

6-3. 刺激性・腐食性及び感作性

(1) 刺激性・腐食性

① ヒト

厚労省 (2018) によると、1930~40 年代にボランティアを種々の濃度の 1, 4-ジオキサンに暴露し、その影響を調べた試験がいくつか報告されている。5,500 ppm の 1 分間の吸入暴露で、眼の刺激、鼻と喉の灼熱感、軽度のめまいの申告があり、1,600 ppm の 10 分間でも、程度は軽減したが同様の申告がなされた。1,000 ppm の 5 分間では、直ちに臭いが感知され、4 名中 1 名が喉の締め付け感を訴えた。2,000 ppm の 3 分間では不快感の訴えはなかった。280 ppm 以

上の数分間暴露で鼻と喉粘膜のわずかな刺激、1,400 ppm の数分間では、鼻に痒み、喉に乾きとヒリヒリ感の訴えがあった。200 ppm は許容できると報告され、300 ppm では眼、鼻及び喉に刺激があった。また、ヒトへの 50 ppm、6 時間、単回吸入暴露で、眼の刺激が報告されている (IRIS 2013)。

② 実験動物

刺激性に関して、以下の結果が厚労省 (2018) に掲載されている。

マウスへの吸入暴露で、2,800 ppm の 1, 4-ジオキサンを 8~9.5 時間暴露、あるいは 8,300 ~3,900 ppm の 3.5~1 時間暴露により、粘膜刺激症状を認めた。

モルモットへの吸入暴露で、2,000 ppm で 8 時間暴露、あるいは 3,000 ppm で 8 時間暴露により、粘膜刺激症状を認めた。

ウサギの背部皮膚に、1, 4-ジオキサン原液を 1、5、15 分間、閉塞適用したが、一次皮膚刺激はほとんど引き起こされなかった。20 時間適用後は浮腫が認められた。

(2) 感作性

呼吸器感作性に関する情報は得られなかった。

皮膚感作性に関しては、日本政府による GHS 分類結果 (2024) に以下の結果が掲載されている。動物試験では陰性を示したが、ヒトでは症例数が少ないながら皮膚炎に関連した知見が得られているが、データ不足のため分類できないとしている。

モルモット (10 例) を用いたマキシマイゼーション試験 (EU Method B.6、GLP：皮内感作：5%、経皮感作及び惹起：100%) では、惹起終了 24 時間後の陽性率は 0% (0/10) で、陰性と判定された。

本物質を含む溶剤に 3 年間毎日浸漬した後、左手に皮膚炎を発症した 52 歳の男性で本物質 (0.5%水溶液) に対するパッチテストで陽性反応がみられた。

本物質に数週間経皮ばく露を受けた 47 歳女性臨床検査技師が上肢及び顔面に炎症性皮膚変化を生じた。4 週間仕事を休んで皮膚が無傷に回復した後、患者は職務を再開した。しかし、わずか数日のばく露で再発した。皮膚を組織学的に調べた結果、湿疹の臨床症状が認められた。皮膚パッチテストにより、本物質原液に対する陽性反応がみられた。

脱脂溶剤として用いた本物質との接触によって明らかに皮膚炎を生じた作業者で本物質に対するパッチテスト陽性例の報告がある。

7. 作用機序

1, 4-ジオキサンの *in vitro* 変異原性は陰性と判断される。一方、*in vivo* 変異原性 (遺伝毒性) は、一部の比較的高用量で実施された遺伝子突然変異試験 (*gpt assay*)、骨髄や肝臓小核試験で陽性の結果が得られているが、4. 変異原性 (遺伝毒性) の <本評価における結論> に記載したように、これらの陽性反応は、活性酸素種の産生など酸化ストレスを介した DNA あるいは染色体への二次的な影響と考えられ本物質が直接 DNA に作用したことを示すものではない

と判断した。したがって、発がん性については、閾値の設定が可能であると判断した。

1, 4-ジオキサンのはとにおける発がん性に関しては、吸入暴露による限られた疫学調査によると暴露との関連性は報告されていない。一方、ラットとマウスの2年間飲水投与毒性試験、及び雄ラットの2年間吸入毒性試験では、肝臓、鼻腔、腎臓、腹膜、乳腺などに腫瘍の発生が報告されている。

経口投与では、1, 4-ジオキサンの代謝・排泄過程は高用量投与で飽和するとされ、肝臓における肝細胞の核腫大、壊死または過形成などの傷害性変化及び腫瘍形成は、その飽和レベルを超えた用量で観察されている。また、ラットの鼻腔の発がんに関連する持続的な傷害性変化は、吸入暴露に加えて、飲水による経口投与でもみられている。飲水投与でも吸入暴露と同様に、呼吸器への局所暴露、局所的な刺激事象を排除できないことが指摘されている。

肝腫瘍の発生機序に関しては、① 1, 4-ジオキサンの代謝飽和とその後の細胞毒性・再生過形成機序、② 代謝飽和を超えた場合の細胞分裂促進作用機序(肝細胞の傷害を伴わない機序)、③ DNA修復系の飽和後の遺伝毒性、④ DNA損傷を伴う酸化ストレス反応などのメカニズムが提案されている。以下に、それら論文の概要とコメントを記載した。

① 代謝飽和とその後の細胞毒性・再生過形成機序

Dourson *et al.* (2014, 2017) は、ラットあるいはマウスへの1, 4-ジオキサンの高用量暴露で、代謝物 HEAA への代謝飽和が起こり、肝臓への1, 4-ジオキサンの蓄積、肝細胞肥大、肝重量の増加につながり、肝肥大、炎症、肝細胞壊死、過形成及び前腫瘍性病変、さらには肝細胞腺腫及び腺がんに行進すると考えた。ECHA dossier (accessed on 2025/3/12) 及び ECHA Scientific report (2021) では、この作用機序を支持している。

② 代謝飽和を超えた場合の細胞分裂促進作用機序

Lafranconi *et al.* (2021) は、マウスの90日間飲水投与試験の代謝飽和を超えた用量(6000 ppm)において、肝重量増加、グリコーゲン様空胞化、小葉中心性肝細胞肥大に加え、単細胞壊死、細胞増殖活性、GST-P陽性変異肝細胞巢の増加がみられたことから、肝細胞分裂が促進されることを示し、さらに、Chappell *et al.* (2021) は、Lafranconiらの研究と同じ肝臓サンプルを用いてトランスクリプトーム解析を行った結果、GST-P陽性変異肝細胞巢の増加がみられた用量と同じ6000 ppmでは、グルタチオン抱合の第Ⅱフェーズ及び細胞周期シグナリングに係る遺伝子の発現増加がみられたが、DNA損傷反応に関係する遺伝子の発現増加がみられなかったことから、1, 4-ジオキサンによる肝腫瘍は、代謝飽和を超えた場合に惹起される非変異原性の細胞分裂促進作用機序を支持するとした。

③ DNA修復系の飽和後の遺伝毒性機序

Gi *et al.* (2018) は、*gpt delta* TGRラットに1, 4-ジオキサンを16週間飲水投与したところ、5,000 ppm群では*gpt transgene*の変異頻度の有意な増加(A:TからG:C及びA:TからT:Aへの変異など)がみられた。さらに、5,000 ppmの用量でDNA修復酵素MGMTが有意に誘導されたことから、広範な遺伝子損傷が肝細胞の修復能力を超え、結果として肝臓発がんに至ったことを示唆しているとした。

④ DNA 損傷を伴う酸化ストレス反応

正常マウスとグルタチオン欠損 (GCLM⁽⁸⁸⁾-null) マウスに 1,000 mg/kg/day の 1, 4-ジオキサンを 1 週間経口強制投与する群と 5,000 ppm の濃度で 3 か月間飲水投与する群を設定する試験を実施した。その結果、両群ともに軽度の肝細胞毒性を生じたが、その背景には NRF2⁽⁸⁹⁾ の活性化、CYP2E1 誘導、GSH プールの酸化、脂質過酸化、酸化的ストレス発現、酸化性 DNA 損傷及び DNA 修復反応上昇に関連した遺伝子発現の変動が肝臓で観察され、これらの反応は、GSH 欠損マウスでより強く認められた。これは、1, 4-ジオキサンによる肝がん発症メカニズムが酸化ストレスであることを示唆するとした (Chen *et al.* 2022)。また、前述の *gpt delta* TGR の背景系統である F344 ラットを用いた 16 週間飲水投与試験 (Gi *et al.* 2018) において得られた 1, 4-ジオキサン処理後のラット肝臓における DNA 付加体形成を解析したところ、酸化的 DNA 損傷関連分子である 8-OHdG が、*gpt transgene* の突然変異頻度が増加した用量で統計学的有意に増加した (詳細は、4. 変異原性 (遺伝毒性) <本評価における結論> 参照) (Totsuka *et al.* 2020)。

Ginsberg *et al.* (2022) のレビューでは、酸化的ストレスが肝発がんに関与している可能性を示しつつも、代謝の飽和による本物質の発がん性への影響や肝毒性、細胞増殖、低用量域における遺伝毒性機序の詳細が解明されていないこと等から、本物質による発がん性の低用量域への外挿に、閾値なしとする線形アプローチ (non-threshold linear approach) を採用する理由を補強しているとしている。

一方、Lafranconi *et al.* (2023) のレビューでは、本物質の発がん機序として、上記の①~④を統合して、吸収された本物質の代謝クリアランス超過、直接的な有糸分裂促進、CYP2E1 活性の上昇、酸化ストレスによる二次的な遺伝毒性及び細胞毒性の発現、再生修復による持続的増殖による腫瘍発生を提言しており、1, 4-ジオキサンによる直接的な遺伝毒性の関与はないとする判断を支持している。また、Kirman *et al.* (2026) によると、独立した 6 名の専門家が行った 1, 4-ジオキサンの発がん作用機序 (Mode of Action, MOA) に関するデータの信頼性評価では、肝腫瘍について、本物質を代謝する CYP2E1 の代謝飽和による間接的な遺伝毒性 MOA が初期のキーイベントであり、最も支持する機序であるとし、CYP2E1 の誘導、酸化ストレス、細胞毒性および再生増殖がその他の MOA であるとしている。また、鼻腔および腹膜腫瘍に関する利用可能な証拠は限られていたものの、肝臓と同様の非遺伝毒性 MOA が妥当であるとしていた。専門家らに最も支持された機序の信頼性は、直接的な遺伝毒性 MOA に関する信頼性に比し有意に高いことから、本物質によるげっ歯類腫瘍のヒト健康リスク評価における非線形外挿手法の使用を支持するとしている。

飲水及び吸入による 2 年間反復投与試験 (Kano *et al.* 2009; Kasai *et al.* 2009) において、雄性 F344 ラットの腹膜に中皮腫が発生した。この腫瘍は対照群にも認められ、用量の増加と共に発生増加し、各々の試験の最高用量または中間用量以上での発生頻度には統計学的有意差が認められた。この腫瘍は、雄性 F344 ラットの自然発生腫瘍として知られ、加齢に伴い発生する。当

⁽⁸⁸⁾ Glutamate-cysteine ligase modifier subunit

⁽⁸⁹⁾ Nuclear factor erythroid 2-related factor 2 : 酸化ストレスにより活性化する核内転写因子

該試験で認められた中皮腫の発生機序は特定されていないが、前述の通り 1, 4-ジオキサンには酸化ストレスを発生するポテンシャルがあること、本物質が直接 DNA に作用することを示すエビデンスがないことを踏まえると、雄性 F344 ラットにおいて自然発生する腹膜中皮腫の発生増加には、本物質による直接 DNA 損傷の関与はなく、酸化ストレスなどその他の機序が関与した可能性があると考えた。

現時点までに得られたデータからは、低用量域での詳細な分子レベルの機序等が解明されていないため、1, 4-ジオキサンの発がん機序については一定の不確実性があるものの、DNA に直接作用することを示す知見は認められず、酸化ストレス等二次的影響に起因する知見が認められていることから、1, 4-ジオキサンの発がん性については実質的な閾値を設定することは可能と判断される。

8. 有害性評価値の導出

ヒト及び実験動物において、1, 4-ジオキサンの毒性情報をレビューしたところ、ヒトから得られた情報は吸入経路に限られ、さらに 1, 4-ジオキサンの暴露量と各種エンドポイントの間の用量反応関係が評価できないことが確認された。したがって、本評価では、動物試験成績を基に有害性に関する定量的な評価を実施することとした。

経口経路に関して、動物における非発がん影響として一般毒性の標的は、肝臓（肝細胞の変性、壊死など）及び腎臓（腎臓尿細管上皮細胞の変性、再生など）などであった。発生毒性については胎児体重の低値、胸骨分節の骨化遅延などがみられたが、生殖毒性、児動物の発達に関する情報及び 2 世代試験などの情報はなかったため、生殖発生毒性の十分な評価はできなかった。

吸入経路に関して、動物における非発がん影響は、鼻腔（嗅上皮細胞の萎縮と呼吸上皮化生など）への影響が認められた。安定化剤として 1, 4-ジオキサンを低用量添加した他剤の発生毒性試験では、胎児への影響は認められなかったとされるが、詳細な情報はなく、1, 4-ジオキサンの生殖発生毒性に関する十分な評価はできなかった。

変異原性については、4. 変異原性（遺伝毒性）で総合的に考察したごとく、*in vitro* 試験系で陰性、*in vivo* 試験系では、高用量暴露で二次的な陽性がみられたが、直接的な突然変異（変異原性）を示すものではないと判断した。

発がん性については、げっ歯類において経口、吸入経路で肝臓、鼻腔、腎臓、腹膜、乳腺などに腫瘍がみられているが、その発生機序は、7. 作用機序に記載したごとく、吸収された本物質の代謝クリアランス超過、直接的な有糸分裂促進、CYP2E1 活性の上昇、酸化ストレスによる遺伝毒性及び細胞毒性の発現、再生修復による持続的増殖により、腫瘍が発生すると考えられ、直接的な遺伝毒性機序による発がんではないと判断した。したがって、後述の発がん性に関する有害性評価値導出においては、「閾値あり」として対応することとした。

以上の知見を考慮し、経口、吸入経路ともに、非発がん影響（一般毒性）、発がん影響に関する各毒性項目の有害性評価値を導出したのち、安全面を考慮して最も小さい値を経口経路、吸

入経路それぞれの有害性評価値とすることとした。

経口経路に関しては、一般毒性は、最も低い NOAEL が得られたラットの 2 年間飲水投与毒性試験 (Kociba *et al.* 1974) をキースタディに選定し、肝臓 (肝細胞の変性と壊死)、及び腎臓 (腎尿細管上皮細胞の変性と壊死) への影響を指標とした NOAEL 9.6 mg/kg/day を UF100 (種差 10、個体差 10) で除した 96 µg/kg/day を有害性評価値として導出した。

発がん性については、最も発がんに対する感受性が高かったマウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) をキースタディに選定し、他の腫瘍と比較して、最低用量から統計学的に有意に、用量に依存した増加を示した雌の肝細胞腺腫あるいは肝細胞がん複合の担腫瘍動物数 (表 9 参照) を選択した。本試験では、NOAEL が得られなかったことから、BMD 法 (BMDS online Version 24.1) を用いた POD の算出を試みた (10. (参考) BMD 解析データ 10-1. 経口暴露による発がんリスク解析 <通常の BMDL₁₀ 解析 (BMR 10%) > 参照)。NOAEL 相当と考えられる BMDL₁₀ の算出のための適合モデルは得られなかったが、BMDL₅₀ は算出することができ、13.0 mg/kg/day を得た。この BMDL₅₀ の値から BMDL₁₀ 相当値を求めた結果 (10-1. 経口暴露による発がんリスク解析 <BMDL₅₀ 解析 (BMR 50%) > 参照)、2.6 mg/kg/day⁽⁹⁰⁾ となったため、この BMDL₁₀ 相当値を POD とした。発がん性に関しては「閾値あり」と判断したことから、POD を UF 1,000 (種差 10、個体差 10、重篤な影響 [発がん性] 10) にて除した 2.6 µg/kg/day を経口経路による発がん性に関する有害性評価値として導出した。

上記のうち、値が最小であった発がん性に関する有害性評価値 2.6 µg/kg/day を経口経路による有害性評価値とした (表 14 参照)。

吸入経路に関しては、一般毒性は、雄ラットの 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) (6 時間/日、週 5 日) をキースタディに選定した。鼻腔 (呼吸/嗅上皮細胞の核肥大、嗅上皮細胞の萎縮/呼吸上皮化生など)、腎臓 (近位尿細管上皮細胞の核腫大)、及び肝臓 (小葉中心性肝細胞壊死など) への影響を指標とした LOAEL 50 ppm (180 mg/m³) を連続暴露補正した LOAEL 32.1 mg/m³⁽⁹¹⁾ をラットの体重 (0.35 kg)、呼吸量 (0.26 m³/day)、呼吸率 (1.0) と仮定して内部暴露量 23.8 mg/kg/day⁽⁹²⁾ に換算し、UF 1,000 (種差 10、個体差 10、LOAEL 使用 10) を適用して 0.0238 mg/kg/day を得た。さらに、ヒトの体重 (50 kg) 及び呼吸量 (20 m³/day) を用いてヒト等価用量に換算した 59.5 µg/m³ (0.016 ppm)⁽⁹³⁾ を有害性評価値として導出した。

発がん性については、雄ラットの 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) をキースタディに選定し、他の腫瘍と比較して、中間用量から統計学的に有意に、用量に依存した発生増加を示した腹膜中皮腫の担腫瘍動物数 (表 12 参照) を用い、経口経路と同様に、BMD 解析にて POD の算出を試みた。その結果、BMCL₁₀ 170 mg/m³、連続暴露補正で BMCL_{10ADJ} 30.4 mg/m³ を得て、ラットの体重 (0.35 kg)、1 日呼吸量 (0.26 m³/day) とヒトの体重 (50 kg)、1 日呼吸量 (20 m³/day)

⁽⁹⁰⁾ BMDL₁₀ 相当値 = BMDL₅₀ / 5 = 13.0 / 5 = 2.6 mg/kg/day

⁽⁹¹⁾ 連続暴露補正 = $180 \times 6/24 \times 5/7 = 32.1 \text{ mg/m}^3$

⁽⁹²⁾ 内部暴露量 = $32.1 \times 0.26/0.35 \times 1 = 23.8 \text{ mg/kg/day}$

⁽⁹³⁾ ヒト等価用量換算 = $0.0238 \times 50/20 = 59.5 \text{ µg/m}^3 (0.016 \text{ ppm})$

から、ヒト等価用量換算した $BMCL_{10HEC}$ 56.5 mg/m^3 ⁽⁹⁴⁾、 UR $1.77 \times 10^{-3} (\text{mg/m}^3)^{-1}$ が得られ、 $BMCL_{10HEC}$ の値 56.5 mg/m^3 を POD とした。発がん性に関しては「閾値あり」と判断したことから、 POD を UF 1,000（種差 10、個体差 10、重篤な影響 [発がん性] 10）にて除した $56.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (0.015 ppm) を吸入経路による発がん性に関する有害性評価値として導出した（10.（参考） BMD 解析データ 10-2. 吸入経路 参照）。

上記のうち、値が最小であった発がん性に関する有害性評価値 $56.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (0.015 ppm) を吸入経路による有害性評価値とした。なお、この値はヒトにおける 1 日当たりの摂取量 $22.6 \text{ } \mu\text{g/kg/day}$ ⁽⁹⁵⁾ に相当する（表 14 参照）。

本評価における経口及び吸入経路の有害性評価値の根拠としたエンドポイント（発がん性）はともに、1，4-ジオキサンが全身に吸収されることによって発現する毒性であることが考えられるが、現時点までに得られたデータに基づくと、暴露経路や標的臓器に関わらず同じメカニズムにより毒性（発がん性）が誘発される可能性が高いことから、経口及び吸入経路のハザード比（ HQ ）を合算することによりリスク推計を行うことが適切と考えられる。

表 14 1，4-ジオキサンの有害性評価値のまとめ

暴露経路	有害性評価値	根拠データ及び導出方法
経口	$2.6 \text{ } \mu\text{g/kg/day}$	マウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano <i>et al.</i> 2009) をキースタディに選定した。雌の肝細胞腺腫あるいは肝細胞がん複合の担腫瘍動物数を用い、 BMD 解析を用いて $BMDL_{10}$ 相当の値 2.6 mg/kg/day を算出し、この値を POD とした。発がん性に関しては「閾値あり」と判断し、 UF 1,000（種差 10、個体差 10、重篤な影響 [発がん性] 10）にて除した $2.6 \text{ } \mu\text{g/kg/day}$ を経口経路による発がん性に関する有害性評価値として導出した。
吸入	$56.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (0.015 ppm) (1 日摂取量 $22.6 \text{ } \mu\text{g/kg/day}$ に相当)	雄ラットの 2 年間吸入毒性試験 (Kasai <i>et al.</i> 2009) をキースタディに選定した。腹膜中皮腫の担腫瘍動物数を用い、 BMD 解析にて $BMCL_{10}$ 170 mg/m^3 を得て、連続暴露補正した $BMCL_{10ADJ}$ 30.4 mg/m^3 を、ヒト等価用量換算した $BMCL_{10HEC}$ 56.5 mg/m^3 (0.015 ppm) を得て、この値を POD とした。発がん性に関しては「閾値あり」と判断し、 UF 1,000（種差 10、個体差 10、重篤な影響 [発がん性] 10）にて除した $56.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (0.015 ppm) を吸入経路による発がん性に関する有害性評価値として導出した。

⁽⁹⁴⁾ $BMCL_{10HEC} = 30.4 \times 0.26/0.35 \times 50/20 = 56.5 \text{ mg/m}^3$

⁽⁹⁵⁾ ヒト 1 日当たりの摂取量 $= 56.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3 \times 20/50 = 22.6 \text{ } \mu\text{g/kg/day}$

9. 参照文献

9-1. 国内外の評価書・試験報告書

- ACGIH (2001): American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), TLVs and BEIs with 7th Edition Documentation (Booklet) : 1,4-Dioxane.
- AICIS (2022): Australian Government Department of Health, Australian Industrial Chemicals Introduction Scheme, 1,4-Dioxane, Evaluation statement (June 2022).
<https://www.industrialchemicals.gov.au/sites/default/files/2022-06/EVA00003%20-%20Evaluation%20statement%20-%2030%20June%202022.pdf> (accessed on 2025/3/12)
- ATSDR (2012): U.S. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Toxicological Profile for 1,4-Dioxane.
<https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp187.pdf> (accessed on 2025/3/12)
- DFG MAK (2019): 1,4-Dioxane MAK Value Documentation, supplement – Translation of the German version from 2019
https://series.publisso.de/sites/default/files/documents/series/mak/dam/Vol2020/Iss1/Doc008/mb12391e5_1.pdf (accessed on 2025/3/12)
- ECHA dossier (accessed on 2025/3/12): European Chemical Agency (ECHA). REACH Registration dossier, 1,4-Dioxane.
<https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/15842/7/1> (accessed on 2025/3/12)
- ECHA CLH report (2018): European Chemical Agency (ECHA) Harmonised Classification and Labelling (CLH) report for 1,4-dioxane.
<https://echa.europa.eu/documents/10162/8d441e6e-348d-90a5-b23c-5fe36e5564d5> (accessed on 2025/3/12)
- ECHA Scientific report (2021): European Chemical Agency (ECHA) Scientific report for evaluation of limit values for 1,4-dioxane at the workplace.
<https://echa.europa.eu/documents/10162/ffebd37d-e38c-0b15-7376-229481dd9619> (accessed on 2025/3/12)
- EU RAC (2019): European Union (EU) Committee for Risk Assessment (RAC), Opinion proposing harmonised classification and labelling at EU level of 1,4-dioxane.
<https://echa.europa.eu/documents/10162/024a7c7e-eb2a-827d-0d88-5ef4a48e932e> (accessed on 2025/3/12)
- EU RAR (2002): Information from the Existing Substances Regulation (ESR), European Union Risk Assessment Report (RAR), PL-2 Vol.21, 1,4-Dioxane.
<https://echa.europa.eu/documents/10162/a4e83a6a-c421-4243-a8df-3e84893082aa> (accessed on 2025/3/12)
- Health Canada (2021): Health of Canada, Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document - 1,4-Dioxane.
<https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/publications/healthy->

987 [living/guidelines-canadian-drinking-water-quality-guideline-1-4-dioxane/1-4-dioxane-pdf-eng.pdf](https://www.healthcouncil.nl/binaries/healthcouncil/documenten/advisory-reports/2015/11/13/14-dioxane-re-evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity/advisory-report-1-4-dioxane-re-evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity.pdf)
 988 (accessed on 2025/3/12)
 989 Health Council of the Netherlands (2015) 1,4-Dioxane, Re-evaluation of the carcinogenicity and
 990 genotoxicity
 991 [https://www.healthcouncil.nl/binaries/healthcouncil/documenten/advisory-reports/2015/11/13/14-](https://www.healthcouncil.nl/binaries/healthcouncil/documenten/advisory-reports/2015/11/13/14-dioxane-re-evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity/advisory-report-1-4-dioxane-re-evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity.pdf)
 992 [dioxane-re-evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity/advisory-report-1-4-dioxane-re-](https://www.healthcouncil.nl/binaries/healthcouncil/documenten/advisory-reports/2015/11/13/14-dioxane-re-evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity/advisory-report-1-4-dioxane-re-evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity.pdf)
 993 [evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity.pdf](https://www.healthcouncil.nl/binaries/healthcouncil/documenten/advisory-reports/2015/11/13/14-dioxane-re-evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity/advisory-report-1-4-dioxane-re-evaluation-of-the-carcinogenicity-and-genotoxicity.pdf) (accessed on 2025/3/12)
 994 IARC (1999): International Agency for Research on Cancer, IARC Monographs on the Evaluation of
 995 Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 71, p589-602, 1,4-Dioxane.
 996 [https://publications.iarc.who.int/_publications/media/download/2279/d7e4bcce9c42cec078b965c](https://publications.iarc.who.int/_publications/media/download/2279/d7e4bcce9c42cec078b965c33b0298cf0a3aff3d.pdf)
 997 [33b0298cf0a3aff3d.pdf](https://publications.iarc.who.int/_publications/media/download/2279/d7e4bcce9c42cec078b965c33b0298cf0a3aff3d.pdf) (accessed on 2025/3/12)
 998 IRIS (2013): U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Integrated Risk Information System (IRIA).
 999 Toxicological review of 1,4-Dioxane (CAS RN. 123-91-1).
 1000 https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/toxreviews/0326tr.pdf (accessed on
 1001 2025/3/12)
 1002 IRIS Summary (2013): Chemical Assessment Summary of 1,4-Dioxane (CAS RN. 123-91-1).
 1003 https://iris.epa.gov/static/pdfs/0326_summary.pdf (accessed on 2025/3/12)
 1004 NICNAS (1998): National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (NICNAS) : 1,4-
 1005 Dioxane, Priority Existing Chemical (PEC) No.7, Full public report.
 1006 <https://www.industrialchemicals.gov.au/sites/default/files/PEC7-1-4-Dioxane.pdf> (accessed on
 1007 2025/3/12)
 1008 NIOSH (1977): "Criteria for a recommended standard: Occupational Exposure to Dioxane." In. Washington:
 1009 U.S . Department of Health, Education and Welfare, Center for Disease Control, National Institute
 1010 for Occupational Safety and Health (NIOSH).
 1011 <https://www.cdc.gov/niosh/docs/77-226> (accessed on 2025/3/12)
 1012 NITE (2005): (独)製品評価技術基盤機構 (NITE) 化学物質の初期リスク評価書 Ver. 1.0 No.13 1 ,
 1013 4-ジオキサン.
 1014 [https://www.chem-](https://www.chem-info.nite.go.jp/chem/chrip/chrip_search/dt/pdf/CI_02_001/risk/pdf_hyoukasyo/113riskdoc.pdf)
 1015 [info.nite.go.jp/chem/chrip/chrip_search/dt/pdf/CI_02_001/risk/pdf_hyoukasyo/113riskdoc.pdf](https://www.chem-info.nite.go.jp/chem/chrip/chrip_search/dt/pdf/CI_02_001/risk/pdf_hyoukasyo/113riskdoc.pdf)
 1016 (accessed on 2025/3/12)
 1017 SCCS (2015): Scientific Committee on Consumer Safety, SCIENTIFIC OPINION ON: The Report of the
 1018 ICCR Working Group: Considerations on Acceptable Trace Level of 1,4-Dioxane in Cosmetic
 1019 Products, 15 December 2015, SCCS/1570/15
 1020 https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_o_194.pdf(accessed
 1021 on 2025/3/12)
 1022 UK HSE (2021): United Kingdom Health and Safety Executive (HSE), Agency technical report on the
 1023 classification and labelling of 1,4-dioxane (CAS RN. 123-91-1).
 1024 [https://www.hse.gov.uk/chemical-classification/classification/harmonised-classification-self-](https://www.hse.gov.uk/chemical-classification/classification/harmonised-classification-self-classification/mcl-azaa-0076.pdf)
 1025 [classification/mcl-azaa-0076.pdf](https://www.hse.gov.uk/chemical-classification/classification/harmonised-classification-self-classification/mcl-azaa-0076.pdf) (accessed on 2023/12/08) 2025/3/12 現在アクセス不可

1026 UK HSE (2025): United Kingdom Health and Safety Executive (HSE), Agency technical report. Substance
 1027 name: 1,4-dioxane. CAS RN. 123-91-1.
 1028 <https://www.hse.gov.uk/reach/assets/docs/technical-report-1-4-dioxane.pdf>
 1029 US NCI (1978): Bioassay of 1,4-Dioxane for Possible Carcinogenicity (CAS No. 123-91-1). NCI-CG-TR-
 1030 80. U.S. Dept. of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, U.S. National Institutes
 1031 of Health, Bethesda, MD
 1032 https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/ntp/htdocs/lt_rpts/tr080.pdf (accessed on 2025/3/12)
 1033 US NTP (2021): U. S. Department of Health and Human Services/National Toxicology Program (NTP), RoC
 1034 Profile: 1,4-Dioxane: 15th Roc 2021.
 1035 <https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/content/profiles/dioxane.pdf> (accessed on 2025/3/12)
 1036 US EPA (2020): U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Final Risk Evaluation for 1,4-Dioxane (CAS
 1037 RN. 123-91-1).
 1038 [https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/1._risk_evaluation_for_14-](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/1._risk_evaluation_for_14-dioxane_casrn_123-91-1.pdf)
 1039 [dioxane_casrn_123-91-1.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-12/documents/1._risk_evaluation_for_14-dioxane_casrn_123-91-1.pdf) (accessed on 2025/3/12)
 1040 US EPA (2024): U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Supplement to the Risk Evaluation for 1,4-
 1041 Dioxane (CAS RN. 123-91-1).
 1042 [https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/1.-1-4-dioxane-.supplement-to-the-risk-](https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/1.-1-4-dioxane-.supplement-to-the-risk-evaluation-.public-release-.hero.-nov-2024.pdf)
 1043 [evaluation-.public-release-.hero.-nov-2024.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/1.-1-4-dioxane-.supplement-to-the-risk-evaluation-.public-release-.hero.-nov-2024.pdf) (accessed on 2025/7/4)
 1044 WHO/GDWQ (2005): 1,4-Dioxane in Drinking-water, Background document for development of WHO
 1045 Guidelines for Drinking-water Quality WHO/SDE/WSH/05.08/120.
 1046 [https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/dioxane-](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/dioxane-bd.pdf?sfvrsn=1910104c_4)
 1047 [bd.pdf?sfvrsn=1910104c_4](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/dioxane-bd.pdf?sfvrsn=1910104c_4) (accessed on 2025/3/12)
 1048 環境省 (2003): 環境省環境リスク評価室: 化学物質の環境リスク初期評価 第2巻 [9] 1,4-ジオ
 1049 オキサン.
 1050 <https://www.env.go.jp/chemi/report/h15-01/pdf/chap01/02-2/09.pdf> (accessed on 2025/3/12)
 1051 厚労省 (1990): 厚労省委託がん原性試験実施結果: 1,4-ジオキサンのラット及びマウスを用
 1052 いた経口(混水)投与によるがん原性試験.
 1053 https://anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/kag/carcino_report.htm (accessed on 2025/3/12)
 1054 厚労省 (2003): 厚生科学審議会 (生活環境水道部会水質管理専門委員会) 水質基準の見直しにお
 1055 ける検討概要 (平成15年4月) 1,4-ジオキサン.
 1056 (令和6年4月1日より、環境省へ移管)
 1057 <https://www.env.go.jp/content/000219051.pdf> (accessed on 2025/3/12)
 1058 厚労省 (2018): 厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質対策課化学物質評価室: 化学物質のリ
 1059 スク評価検討会 (2018年12月17日)「1,4-ジオキサン リスク評価書(案)(有害性
 1060 評価部分)」.
 1061 <https://www.mhlw.go.jp/content/11201000/000454949.pdf>
 1062 <https://www.mhlw.go.jp/content/11201000/000454950.pdf>
 1063 <https://www.mhlw.go.jp/content/11201000/000454951.pdf> (accessed on 2025/3/12)
 1064 産衛学会 (2015): 日本産業衛生学会 許容濃度の暫定値(2015)の提案理由 1,4-ジオキサン 産

1065 衛誌 57 巻 4 号 178-182 頁 (2015)

1066 https://www.jstage.jst.go.jp/article/sangyoeisei/57/4/57_S15002/_article/-char/ja (accessed on

1067 2025/3/12)

1068 産総研 (2005): 国立研究開発法人産業技術総合研究所化学物質リスク管理研究センター詳細リ

1069 ク評価書シリーズ 2 1, 4-ジオキサン.

1070 https://unit.aist.go.jp/riss/crm/mainmenu/1,4-Dioxane_executive_summary.pdf

1071 http://www.aist-riss.jp/projects/RAD/download01/download01.cgi?RISS_1_4-dioxane_e

1072 (accessed on 2025/8/18)

1073 食安委 (2007): 内閣府食品安全委員会清涼飲料水評価書 1, 4-ジオキサン(府食第 274 号、平

1074 成 19 年 3 月 15 日).

1075 [https://www.fsc.go.jp/fsciis/attachedFile/download?retrievalId=kya20071024062&fileId=06_001](https://www.fsc.go.jp/fsciis/attachedFile/download?retrievalId=kya20071024062&fileId=06_001_001)

1076 [_001](https://www.fsc.go.jp/fsciis/attachedFile/download?retrievalId=kya20071024062&fileId=06_001_001) (accessed on 2025/3/12)

1077 日本政府による GHS 分類結果 (2024) : 1, 4-ジオキサン.

1078 <https://www.chem-info.nite.go.jp/chem/ghs/24-jniosh-2009.html>

1079

1080 9-2. 文献

1081 Buffler, P.A., Wood, S.M., Suarez, L., Kilian, D.J. (1978): Mortality follow-up of workers exposed to 1,4-

1082 dioxane. *J. Occup. Environ. Med.*, **20**, 255-259.

1083 Chappell, G.A., Heintz, M.M., Haws, L.C. (2021): Transcriptomic analyses of livers from mice exposed to

1084 1,4-dioxane for up to 90 days to assess potential mode(s) of action underlying liver tumor

1085 development. *Current Research in Toxicology*, **12**(2), 30–41.

1086 Chen, Y., Wang, Y., Charkoftaki, G., Orlicky, D.J., Davidson, E., Wan, F., Ginsberg, G., Thompson, D.C.,

1087 Vasilou, V. (2022): Oxidative stress and genotoxicity in 1,4-dioxane liver toxicity as evidenced in

1088 a mouse model of glutathione deficiency. *The Science of the Total Environment*, **806** (Pt 2), 150703.

1089 Cho Eunara, Allemang Ashley, Audebert Marc, Chauhan Vinita, Dertinger Stephen, Hendriks Giel, Luijten

1090 Mirjam, Marchetti Francesco, Minocherhomji Sheroy, Pfuhler Stefan, Roberts Daniel J., Trenz

1091 Kristina, Yauk Carole L. (2022): AOP report: Development of an adverse outcome pathway for

1092 oxidative DNA damage leading to mutations and chromosomal aberrations. *Environmental and*

1093 *Molecular Mutagenesis* **63**(3), 118–134

1094 Dourson, M., Reichard, J., Nance, P., Burleigh-Flayer, H., Parker, A., Vincent, M., McConnell, E.E. (2014):

1095 Mode of action analysis for liver tumors from oral 1,4-dioxane exposures and evidence-based dose

1096 response assessment. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **68** (3), 387–401.

1097 Dourson, M., Higginbotham, J., Crum, J., Burleigh-Flayer, H., Nance, P., Forsberg, N.D., Lafranconi, M.,

1098 Reichard, J. (2017): Update: Mode of action (MOA) for liver tumors induced by oral exposure to

1099 1,4-dioxane. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **88**, 45-55.

1100 Fairley, A., Linton, EC, Ford-Moore, AH. (1934): The toxicity to animals of 1:4 dioxan. *J Hyg* **34**: 486-501.

1101 Galloway SM, Armstrong MJ, Reuben C, *et al* (1987): Chromosome aberrations and sister chromatid

1102 exchanges in Chinese hamster ovary cells: Evaluations of 108 chemicals. *Environ. Mol. Mutagen.*,

1103 **10** (Suppl 10), 1-175.

1104 Garcia, E., Hurley, S., Nelson, D.O., Hertz, A., Reynolds, P. (2015): Hazardous air pollutants and breast
 1105 cancer risk in California teachers: a cohort study. *Environ. Health.*, **14**: 14.

1106 Gi, M., Fujioka, M., Kakehashi, A., Okuno, T., Masumura, K., Nohmi, T., Matsumoto, M., Omori, M.,
 1107 Wanibuchi, H., Fukushima, S. (2018): *In vivo* positive mutagenicity of 1,4-dioxane and quantitative
 1108 analysis of its mutagenicity and carcinogenicity in rats. *Arch. Toxicol.*, **92**. 3207-3221.

1109 Giavini, E., Vismara, C., Broccia, M.L. (1985): Teratogenesis study of dioxane in rats. *Toxicol Lett.*, **26**: 85-
 1110 88.

1111 Göen, T., von Helden, F., Eckert, E., Knecht, U., Drexler, H., Walter, D. (2016). Metabolism and
 1112 toxicokinetics of 1,4-dioxane in humans after inhalational exposure at rest and under physical stress.
 1113 *Arch. Toxicol.*, **90**, 1315-1324.

1114 Goldsworthy T.L., Monticello T.M., Morgan K.T., Bermudez E., Wilson D.M., Jäckh R. and Butterworth
 1115 B.E. (1991): Examination of potential mechanisms of carcinogenicity of 1,4-dioxane in rat nasal
 1116 epithelial cells and hepatocytes. *Arch. Toxicol.*, **65**, 1-9.

1117 Haworth S., Lawlor T., Mortelmans K., *et al.* (1983): Salmonella mutagenicity test results for 250 chemicals.
 1118 *Environ. Mutag.*, **5**, Suppl. 1, 1-142.

1119 Hellmér L. and Bolcsfoldi G. (1992): An evaluation of the E.coli K-12 uvrB/recA DNA repair host-mediated
 1120 assay. I. *In vitro* sensitivity of the bacteria to 61 compounds. *Mut. Res.*, **272**, 145-160.

1121 Itoh, S. and Hattori, C. (2019): *In vivo* genotoxicity of 1,4-dioxane evaluated by liver and bone marrow
 1122 micronucleus tests and *Pig-a* assay in rats Mutation Research/Genetic Toxicology and
 1123 Environmental Mutagenesis, **837**, 8-14.

1124 Kano, H., Umeda, Y., Kasai, T., Sasaki, T., Matsumoto, M., Yamazaki, K., Nagano, K., Arito, H., Fukushima,
 1125 S. (2009): Carcinogenicity studies of 1,4-dioxane administered in drinking water to rats and mice
 1126 for 2 years. *Food. Chem. Toxicol.*, **47**, 2776-2784.

1127 Kasai, T., Saito, M, Senoh, H; Umeda, Y., Aiso, S., Ohbayashi, H., Nishizawa, T., Nagano, K., Fukushima, S.
 1128 (2008). Thirteen-week inhalation toxicity of 1,4-dioxane in rats. *Inhal.Toxicol* 20: 961-971.

1129 Kasai, T., Kano, H., Umeda, Y., Sasaki, T., Ikawa, N., Nishizawa, T., Nagano, K., Arito, H., Nagashima, H.,
 1130 Fukushima, S. (2009): Two-year inhalation study of carcinogenicity and chronic toxicity of 1,4-
 1131 dioxane in male rats. *Inhal. Toxicol.*, **21**, 889-897.

1132 Khudoley V.V., Mizgireuv I., Pliss G.B. (1987): The study of mutagenic activity of carcinogens and other
 1133 chemical agents with Salmonella typhimurium assays: Testing of 126 compounds. *Arch.*
 1134 *Geschwulstforsch*, **57**, 453-462.

1135 Kirman, C.R., Bus, J.S., Gupta, S., Klaunig, J.E., Meek, M.E., Hays, S.M. (2026): Expert panel evaluation
 1136 of the tumor modes of action for 1,4-dioxane and their implications for human risk assessment.
 1137 *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, **164**, 105950.

1138 Kitchin K.T. and Brown J.L. (1990): Is 1,4-dioxane a genotoxic carcinogen? *Cancer Lett.*, **53**, 67-71.

1139 Kociba, R.J., Mccollister, S.B., Park, C., Torkelson, T.R., (1974): Gehring, P.J. 1,4-dioxane. I. Results of a 2-
 1140 year ingestion study in rats. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **30**, 275-286.

1141 Lafranconi M., Budinsky, R., Corey, L., Klapacz, J., Crissman, J., LeBaron, M., Golden, R., Pleus, R. (2021):

A 90-day drinking water study in mice to characterize early events in the cancer mode of action of 1,4-dioxane. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **119**, 104819.

Lafranconi M, Anderson J, Budinsky R, Corey L, Forsberg N, Klapacz J, LeBaron MJ. (2023): An integrated assessment of the 1,4-dioxane cancer mode of action and threshold response in rodents. *Regul Toxicol Pharmacol.* **142**:105428.

McFee A.F., Abbott M.G., Gulati D.K., and Shelby M.D. (1994): Results of mouse bone marrow micronucleus studies on 1,4-dioxane. *Mut. Res.*, **322**, 145-148.

McGregor D.B., Brown A.G., Howgate S., *et al.* (1991): Responses of the L5178Y mouse lymphoma cell forward-mutation assay. V. 27 coded chemicals. *Environ. Mol. Mutagen.*, **17**(3), 196-219.

Mirkova E.T. (1994): Activity of the rodent carcinogen 1,4-dioxane in the mouse bone marrow micronucleus assay. *Mut. Res.*, **322**, 142-144.

Miyagawa, M, Shirotori, T., Tsuchitani M., and Yoshikawa, K. (1999): Repeat-assessment of 1,4-dioxane in a rat-hepatocyte replicative DNA synthesis (RDS) test: Evidence for stimulus of hepatocyte proliferation. *Experimental and Toxicologic Pathology*, **51**, 555-558.

Morita, T. (1994). No clastogenicity of 1,4-dioxane as examined in the mouse peripheral blood micronucleus test. *Mammalian Mutagenicity Study Group Communications* 2: 7-8.

Morita T, Asano N, Awogi T, Sasaki YF, Sato S, Shimada H, Sutou S, Suzuki T, Wakata A, Sofuni T, Hayashi M. (1997) Evaluation of the rodent micronucleus assay in the screening of IARC carcinogens (groups 1, 2A and 2B) the summary report of the 6th collaborative study by CSGMT/JEMS MMS. Collaborative Study of the Micronucleus Group Test. *Mammalian Mutagenicity Study Group. Mutat Res.* Feb 28;389(1):3-122.

Morita T., Hayashi M. (1998): 1,4-dioxane is not mutagenic in five *in vitro* assays and mouse peripheral blood micronucleus assay, but is in mouse liver micronucleus assay. *Environ. Mol. Mutagen.*, **32**, 269-280.

Nannelli, A., De Rubertis, A., Longo, V., Gervasi, P.G. (2005). Effects of dioxane on cytochrome P450 enzymes in liver, kidney, lung and nasal mucosa of rat. *Arch. Toxicol.*, **79**, 74-82.

Patil, P.G., Kamble, S.H., Shah, T.S., Iyer, K.R. (2015). Effect of water miscible organic solvents on p-nitrophenol hydroxylase (CYP2E1) activity in rat liver microsomes. *Indian J. Pharmaceut. Sci.*, **77**, 283-289.

Roy S.K., Thilagar A.K., Eastmond D.A. (2005): Chromosome breakage is primarily responsible for the micronuclei induced by 1,4-dioxane in the bone marrow and liver of young CD-1 mice. *Mutat. Res.*, **586** (1), 28-37.

Schwetz, B.A., Leong, B.K.J., Gehring, P.J. (1975): The Effect of Maternally Inhaled Trichloroethylene, Perchloroethylene, Methyl Chloroform and Methylene Chloride on Embryonal and Fetal Development in Mice and Rats. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **32**, 84-96. (厚労省 2018、NICNAS 1998 より引用)

Shah, T.S., Kamble, S.H., Patil, P.G., Iyer, K.R. (2015): Effect of Water-miscible Organic Solvents on CYP450-mediated Metoprolol and Imipramine Metabolism in Rat Liver Microsomes. *Indian J. Pharmaceut. Sci.*, **77**, 382-390.

- Sheu C.W., Moreland F.M., Keun L.J. and Dunkel V.C. (1988): *In vitro* BALB/3T3 cell transformation assay of nonoxynol-9 and 1,4-dioxane. *Environ. Mol. Mutag.*, **11**, 41-48.
- Stott W.T., Quast J.F. and Watanabe P.G. (1981): Differentiation of the mechanisms of oncogenicity of 1,4-dioxane and 1,3-hexachlorobutadiene in the rat. *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **60**, 287-300.
- Take, M., Ohnishi, M., Yamamoto, S., Matsumoto, M., Nagano, K., Fukushima, S. (2012). Distribution of 1,4-dioxane by combined inhalation plus oral exposure routes in rats. *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, **92**, 1715-1728.
- Thiess, A.M., Tress, E., Fleig, I. (1976): [Industrial-medical investigation results in the case of workers exposed to dioxane]. *Arbeitsmed Sozialmed Praventivmed*, **11**: 35-46. (厚労省 2018 より引用)
- Tinwell H. and Ashby J. (1994): Activity of 1,4-dioxane in mouse bone marrow micronucleus assays. *Mut. Res.*, **322**, 148-150.
- Torkelson, T.R., Leong B.K.J., Kociba R.J., Richter W.A., Gehring P.J.,(1974): 1,4-Dioxane. II. Results of a 2-year inhalation study in rats *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, **30**, 287-298
- Totsuka, Y., Maesako, Y., Ono, H., Nagai, M., Kato, M., Gi, M., Wanibuchi, H., Fukushima, S., Shiizaki, K., Nakagama, H. (2020): Comprehensive analysis of DNA adducts (DNA adductome analysis) in the liver of rats treated with 1,4-dioxane *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and biological sciences*, **96**, 180-87.
- Woo, Y., Argus, M., Arcos, J., 1977a. Metabolism in vivo of dioxane: effect of inducers and inhibitors of hepatic mixed-function oxidases. *Biochem. Pharmacol.* **26**, 1539–1542.
- Woo, Y.T., Argus, M.F., Arcos, J.C. (1977b): Tissue and subcellular distribution of 3H-dioxane in the rat and apparent lack of microsome-catalyzed covalent binding in the target tissue. *Life Sci.*, **21**, 1447-1456.
- Woo, Y.T., Argus, M.F., Arcos, J.C. (1978): Effect of mixed-function oxidase modifiers on metabolism and toxicity of the oncogen dioxane. *Cancer Res.*, **38**, 1621-1625.
- Yamazaki, K., Ohno, H., Asakura, M., Narumi, A., Ohbayashi, H., Fujita, H., Ohnishi, M., Katagiri, T., Senoh, H., Yamanouchi, K., Nakayama, E., Yamamoto, S., Noguchi, T., Nagano, K., Enomoto, M., Sakabe, H. (1994): Two-year toxicological and carcinogenesis studies of 1,4-dioxane in F344 rats and B6Df1 mice. *Proceedings: Second Asia-Pacific Symposium on Environmental and Occupational Health 22-24 July 1993: Kobe* (pp. 193-198). (食安委 2007 より引用)
- Yoon J.S., Mason J.M., Nalepa R, *et al.* (1985): Chemical mutagenesis testing in *Drosophila*. IV. Results of 45 coded compounds tested for the national toxicology program. *Environ. Mutagen.*, **7**, 349-367.
- Young, J.D., Braun, W.H., Gehring, P.J., Horvath, B.S., Daniel, R.L. (1976). 1,4-Dioxane and beta-hydroxyethoxyacetic acid excretion in urine of humans exposed to dioxane vapors. *Toxicol Appl. Pharmacol.*, **38**, 643-646.
- Young, J.D., Braun, W.H., Rampy, L.W., Chenoweth, M.B., Blau, G.E. (1977): Pharmacokinetics of 1,4-dioxane in humans. *Toxicol. Environm. Health*, **3**, 507–520
- Young, J.D., Braun, W.H., Gehring, P.J. (1978a). The dose-dependent fate of 1,4-dioxane in rats. *J. Environ. Pathol. Toxicol.*, **2**, 263-282.
- Young, J.D., Braun, W.H., Gehring, P.J. (1978b). Dose-dependent fate of 1,4-dioxane in rats(b). *J. Toxicol.*

- 1220 Environ. Health., **4**, 709-726.
- 1221 Zimmermann F.K., Mayer V.W., Scheel I. and Resnick M.A. (1985): Acetone, methyl ethyl ketone, ethyl
- 1222 acetate, acetonitrile and other polar aprotic solvents are strong inducers of aneuploidy in
- 1223 *Saccharomyces cerevisiae*. Mut. Res., **149**, 339-351.
- 1224 高信 健司ら(2015) : F344/DuCrI CrIj ラットの自然発生腫瘍 産衛誌; **57** (3): 85-96
- 1225

10. (参考) BMD 解析データ

US EPA が公開しているソフトウェア BMDS Online Version 24.1⁽⁹⁶⁾ を用いて、BMD 解析を行った。モデル選定等の解析方法は、「ベンチマークドース法の適用に関するガイダンス」(http://dra4.nihs.go.jp/bmd/BMDS_guidance.pdf) に示された方法に従った。

現在、化審法で採用されている「非連続データ」に関する BMDL の選定方法では、適合したモデルから算出された BMDL の中から、安全サイドの観点に立ち、最も低い BMDL を選定するが、この時、最適な数値を選定するための除外基準 (P : <0.1、最低用量/BMDL 比 : >10、BMD/BMDL 比 : >10) を採用している。

10-1. 経口暴露による発がんリスク解析

<通常の BMDL₁₀ 解析 (BMR 10%)>

1, 4-ジオキサンの経口経路の発がん性に関する有害性評価値導出 (「閾値なし」の場合) において、マウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) の雌の肝細胞腺腫/がんの発生例数を用いて、通常の BMDL₁₀ 解析を実施 (BMR 10%) したところ、以下に示すように、全てのモデルが除外され、適合したモデルが得られなかった。(灰色カラムは除外値)

Data : マウス 2 年間飲水投与毒性試験 (Kano *et al.* 2009) 雌 肝臓 肝細胞腺腫/がん発生頻度

Dose (mg/kg)	N	Incidence
0	50	5
66	50	35**
278	50	41**
964	50	46**

フィッシャーの正確確率検定: **: $p \leq 0.01$

Model	BMDL	BMD	BMDU	除外基準 P-Value <0.1	AIC	Scaled Residual at Control	Scaled Residual near BMD	Show Recommendati on and note	除外基準 最低用量/ BMDL 比 >10	除外基準 BMD/BMDL >10	適合
Restricted Models											
Hill	1.228	3.372	42.692	0.428	175.225	-0.01	-0.01	Questionable	53.75	2.75	×
Gamma	19.504	26.431	37.711	< 0.0001	203.331	-2.654	-2.654	Questionable	3.38	1.36	×
LogLogistic	3.658	5.542	9.436	0.142	176.214	-0.121	-0.121	Questionable	18.04	1.52	×
Multistage 1	19.504	26.431	37.558	< 0.0001	203.331	-2.654	-2.654	Questionable	3.38	1.36	×
Multistage 2	19.504	26.431	37.558	< 0.0001	203.331	-2.654	-2.654	Questionable	3.38	1.36	×
Multistage 3	19.504	26.431	37.558	< 0.0001	203.331	-2.654	-2.654	Questionable	3.38	1.36	×
Weibull	19.504	26.431	37.561	< 0.0001	203.331	-2.654	-2.654	Questionable	3.38	1.36	×
LogProbit	19.572	26.37	37.859	< 0.0001	198.354	-1.166	-1.166	Questionable	3.37	1.35	×
Unrestricted Models											
Logistic	44.436	58.047	77.50	< 0.0001	214.951	-4.411	3.201	Questionable	1.49	1.31	×
LogProbit	7.22E-05	0.418	4.555	0.768	174.698	-0.002	-0.002	Questionable	914127.42	5789.47	×
Probit	56.223	69.895	89.37	< 0.0001	217.671	-4.659	3.114	Questionable	1.17	1.24	×
Quantal Linear	19.504	26.431	37.558	< 0.0001	203.331	-2.654	-2.654	Questionable	3.38	1.36	×
Hill	1.03E-04	0.495	4.958	0.711	174.748	-0.003	-0.003	Questionable	640776.70	4805.83	×
Gamma	0.005	0.007	0.169	0.63	173.516	-0.157	-0.157	Questionable	13200.00	1.40	×
LogLogistic	1.03E-04	0.495	4.958	0.711	174.748	-0.003	-0.003	Questionable	640776.70	4805.83	×
Multistage 1	19.504	26.431	37.558	< 0.0001	203.331	-2.654	-2.654	Questionable	3.38	1.36	×
Multistage 2	8.034	10.421	14.132	0.00186	183.755	-0.574	-0.574	Questionable	8.22	1.30	×
Multistage 3	7.595	9.178	11.51	-	182.382	-4.99E-01	-4.99E-01	Questionable	8.69	1.21	×
Weibull	0	0.024	0.848	0.858	174.643	-0.002	-0.002	Unusable	#DIV/0!	#DIV/0!	×

⁽⁹⁶⁾ EPA Benchmark Dose Software (BMDS) は、2024 年 11 月に BMDS Online Version 24.1 としてリリースされ、これまでの Download 版の BMDS (Version 3.3.2) に代わり、現在、FDA の主要な用量反応モデリングプラットフォームとなっている。

< BMDL₅₀ 解析 (BMR 50%) >

BMR10%で適用モデルが得られなかった理由を考察すると、この試験では、最低用量 (66 mg/kg/day) でも肝細胞腺腫/がんの発生頻度が 50%を超えており、BMR10%まで下方に外挿するのは、値の信頼性に問題生じる可能性があり、用量反応曲線から判断すると外挿可能なレベルは BMR50%くらいまでではないかと考えられた。従って、BMR10%を使用するより、BMR50%を算出すべきと判断した⁽⁹⁷⁾。

なお、IRIS (2013)、EPA (2020) でも同じデータを用いて BMDL₅₀ を得て、ヒト等価 BMDL₅₀HEC 及び SF を導出している (Page 10、1-2. 発がん影響、(2) 発がん性の定量的評価、① 経口 参照)。

また、信頼性限界曲線の幅について、BMR10%を前提に検討した 95%信頼限界の許容される幅の大きさ (BMD/BMDL 比 : >10) から考察すると、BMR50%の場合の幅は、それより小さい幅で許容されるべき (信頼性限界曲線の幅は一般的に 50%付近が狭くなる) と考えられるため、今回の除外基準は BMD/BMDL 比:>10 ではなく、BMD/BMDL 比>3 を採用することとした⁽⁹⁸⁾。

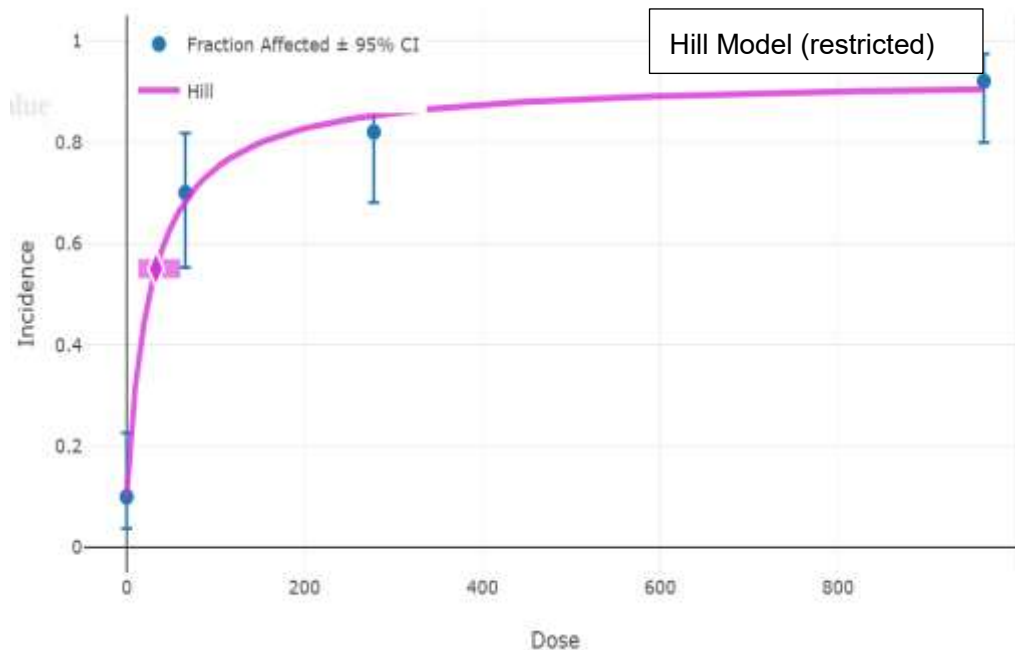
上記に沿って、BMR 50%として BMDS Online Version 24.1 にて再計算後、除外基準 (P : <0.1、最低用量/BMDL 比 : >10、BMD/BMDL 比 : >3) を適用すると、Restricted model の Hill、Logistic、Unrestricted model の Gamma が適合した (灰色カラムは除外値) が、そのうち最小の BMDL₅₀ 値を示した Hill model を選択した。

Model : Hill
BMDL₅₀ = 13.0 mg/kg/day
BMDL₁₀ 相当値 = 13.0/5 = 2.6 mg/kg/day = POD

Model	BMDL	BMD	BMDU	除外基準 P-Value <0.1	AIC	Scaled Residual at Control	Scaled Residual near BMD	Show Recommendation and note	除外基準 最低用量/ BMDL 比 >10	除外基準 BMD/BMDL >3	適合
Restricted Models											
Hill	13.02	32.961	60.41	0.428	175.225	-0.01	-0.01	Viable	2.00	2.53	○
Gamma	128.316	173.884	247.084	< 0.0001	203.331	-2.654	1.03	Questionable	0.38	1.36	×
LogLogistic	32.926	49.88	75.895	0.142	176.214	-0.121	1.237	Viable	1.32	1.51	○
Multistage 1	128.314	173.884	247.087	< 0.0001	203.331	-2.654	1.03	Questionable	0.38	1.36	×
Multistage 2	128.314	173.884	247.084	< 0.0001	203.331	-2.654	1.03	Questionable	0.38	1.36	×
Multistage 3	128.314	173.884	247.084	< 0.0001	203.331	-2.654	1.03	Questionable	0.38	1.36	×
Weibull	128.316	173.884	247.084	< 0.0001	203.331	-2.654	1.03	Questionable	0.38	1.36	×
LogProbit	70.501	94.989	139.108	< 0.0001	198.354	-1.166	3.391	Questionable	0.69	1.35	×
Unrestricted Models											
Logistic	226.632	298.148	404.772	< 0.0001	214.951	-4.411	2.05	Questionable	0.22	1.32	×
LogProbit	0.602	19.301	54.807	0.768	174.698	-0.002	-0.002	Questionable	3.42	32.06	×
Probit	290.246	361.008	466.431	< 0.0001	217.671	-4.659	2.499	Questionable	0.18	1.24	×
Quantal Linear	128.316	173.884	247.084	< 0.0001	203.331	-2.654	1.03	Questionable	0.38	1.36	×
Hill	0.806	21.407	56.248	0.711	174.748	-0.003	-0.003	Questionable	3.08	26.56	×
Gamma	15.267	23.809	52.378	0.63	173.516	-0.157	-0.157	Viable	2.77	1.56	○
LogLogistic	0.806	21.407	56.248	0.711	174.748	-0.003	-0.003	Questionable	3.08	26.56	×
Multistage 1	128.314	173.884	247.084	< 0.0001	203.331	-2.654	1.03	Questionable	0.38	1.36	×
Multistage 2	55.065	72.115	98.963	0.00186	183.755	-0.574	2.289	Questionable	0.92	1.31	×
Multistage 3	53.283	66.566	86.111	-	182.382	-0.499	2.004	Questionable	0.99	1.25	×
Weibull	0.265	14.424	50.442	0.858	174.643	-0.002	-0.002	Questionable	4.58	54.43	×

⁽⁹⁷⁾ 2024 年 3 月から 4 月において、厚生労働省 化学物質調査会 委員によって実施された「1, 4-ジオキサンのヒト健康影響に係る評価 II 評価方法の検討」に関する意見聴取と BMD 解析の研究経験を持つ委員による打合せとその経過報告 (2024 年 4 月) において、当該内容 (データの特性を考慮して BMR 50% を使用するべき) が報告された。

⁽⁹⁸⁾ 同「評価方法の検討」のなかで、当該内容 (今回の除外基準を BMD/BMDL 比 : >10 ではなく、BMD/BMDL 比>3 を採用するべき) が報告された。



最小 BMDL₅₀ は、Hill Model からの BMDL₅₀ 13.0 mg/kg/day（小数点以下 2 位で四捨五入）であった。BMDL₁₀ は NOAEL 相当と考えられること***から、最小 BMDL₅₀ を 5 で除することにより BMDL₁₀ 相当値を求めた結果、2.6 mg/kg/day となったため、この BMDL₁₀ 相当値を POD とした。

* 様々な研究が、NOAEL における過剰リスクの上限の中央値が 10%に近いことを推計している。"Various studies estimated that the median of the upper bounds of extra risk at the NOAEL was close to 10%, suggesting that the BMDL₁₀ may be an appropriate default (Allen *et al.*, 1994; Fowles *et al.*, 1999; Sand *et al.*, 2011). Also, a BMR of 10% appears preferable for quantal data because the BMDL can become substantially dependent on the choice of dose-response model at lower BMRs (Sand *et al.*, 2002) (EFSA 2017) <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2903/j.efsa.2017.4658>

**：「理想的な POD と考えられる真の有害性反応の閾値を求めることは理論的に不可能なので、経験的に NOAEL に近い BMDL が算出されるように BMR の条件を設定することとなり動物実験における有害性の誘発率の有無を示す二値データについては、BMR として 10%の動物に有害反応を誘発する用量に対応する BMDL₁₀ が POD として妥当であると考えられた。」（広瀬明彦 2021）化学物質のリスクアセスメントにおける用量反応評価の現状と課題－動物実験データの適用を中心に－ *Bull. Natl Inst. Health Sci.*, 139, 29-42 (2021) <https://www.nihs.go.jp/library/eikenhoukoku/2021/029-042.pdf>

1281 10-2. 吸入暴露による発がんリスク解析

1282 Data：雄ラット 2 年間吸入毒性試験 (Kasai *et al.* 2009) 雄 腹膜 中皮腫 発生頻度

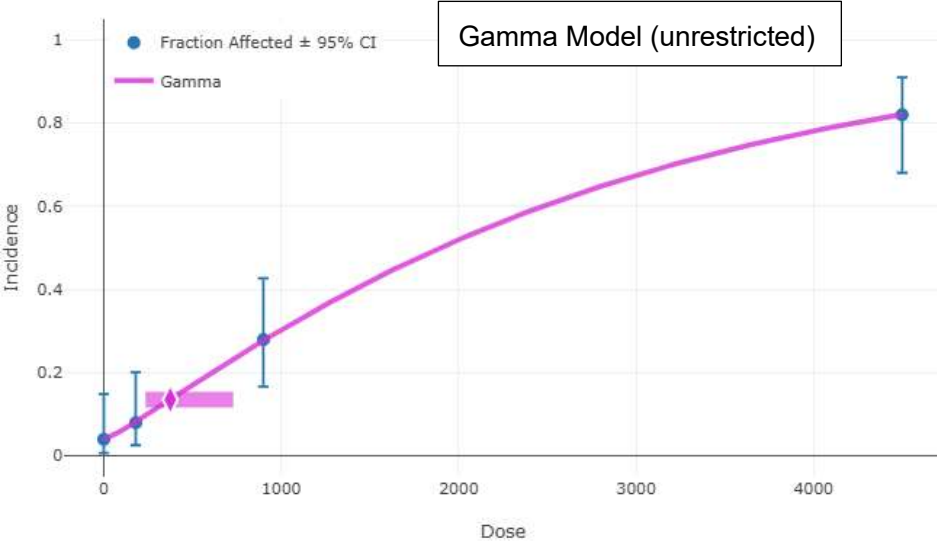
Dose (mg/m ³)	N	Incidence	Model : Gamma BMCL ₁₀ = 170 mg/m ³ BMCL ₁₀ 連続暴露換算=170×(6/24h)×(5/7days)=30.4 mg/m ³ (ラット 1 日呼吸量 0.26 m ³ /day、ラット体重 0.35kg、ヒト 1 日呼吸量 20 m ³ /day、ヒト体重 50 kg) BMCL _{10HEC} = 30.4×(0.26/0.35)×(50/20)= 56.5 mg/m ³ = POD UR = 0.1/56.5 = 1.77×10 ⁻³ (mg/m ³) ⁻¹
0	50	2	
180	50	4	
900	50	14**	
4,500	50	41**	

1283 フィッシャーの正確確率検定: **: $p \leq 0.01$
1284 (暴露：6 時間/日、週 5 日)

1285 本試験では、「ベンチマークドース法の適用に関するガイダンス」に従い、BMR10%、除外基準
1286 (P：<0.1、最低用量/BMDL 比：>10、BMD/BMDL 比：>10) 適用し、最小の BMDL₁₀ (吸入暴露
1287 では BMCL₁₀ と読み替え) を示した Gamma Model を採用し、BMCL₁₀ 170 mg/m³ を得た。連続暴
1288 露換算にて BMCL₁₀ 30.4 mg/m³、ヒト等価用量換算にて BMCL_{10HEC} 56.5 mg/m³、Unit risk (UR)
1289 $1.77 \times 10^{-3} \text{ (mg/m}^3\text{)}^{-1}$ を算出した。この BMCL_{10HEC} 56.5 mg/m³ を POD として採用した。

Model	BMDL	BMD	BMDU	除外基準 P-Value <0.1	AIC	Scaled Residual at Control	Scaled Residual near BMD	Show Recommendation and note	除外基準 最低用量/ BMDL 比 >10	除外基準 BMD/ BMDL >10	適合
Restricted Models											
Hill	227.034	437.955	757.894	0.736	157.219	-0.166	0.257	Viable	0.79	1.93	○
Gamma	235.142	374.745	729.956	0.944	157.111	0.023	-0.051	Viable	0.77	1.59	○
LogLogistic	227.034	437.955	757.894	0.736	157.219	-0.166	0.257	Viable	0.79	1.93	○
Multistage 1	231.763	295.941	386.988	0.851	155.433	0.25	-0.331	Viable	0.78	1.28	○
Multistage 2	234.526	346.432	689.204	0.97	155.168	0.099	-0.204	Viable	0.77	1.48	○
Multistage 3	234.526	346.432	689.201	0.97	155.168	0.099	-0.204	Viable	0.77	1.48	○
Weibull	235.031	368.113	715.049	0.903	157.121	0.043	-0.093	Viable	0.77	1.57	○
LogProbit	392.793	509.816	793.535	0.807	155.536	-0.436	0.479	Viable	0.46	1.30	○
Unrestricted Models											
Logistic	727.423	903.773	1,118.15	0.0706	160.497	-1.28	1.781	Questionable	0.25	1.24	×
LogProbit	234.728	465.293	788.744	0.547	157.463	-0.336	0.45	Viable	0.77	1.98	○
Probit	695.107	842.377	1,022.18	0.0961	159.813	-1.166	1.717	Questionable	0.26	1.21	○
Quantal Linear	231.765	295.941	386.981	0.851	155.433	0.25	-0.331	Viable	0.78	1.28	○
Hill	227.034	437.955	757.894	0.736	157.219	-0.166	0.257	Viable	0.79	1.93	○
Gamma	170.216	374.745	729.956	0.944	157.111	0.023	-0.051	Viable	1.06	2.20	○
LogLogistic	227.034	437.955	757.894	0.736	157.219	-0.166	0.257	Viable	0.79	1.93	○
Multistage 1	231.763	295.941	386.985	0.851	155.433	0.25	-0.331	Viable	0.78	1.28	○
Multistage 2	206.668	346.432	689.206	0.805	157.168	0.099	-0.204	Viable	0.87	1.68	○
Multistage 3	132.926	398.675	734.358	-	159.106	6.07E-08	-7.10E-08	Questionable	1.35	3.00	×
Weibull	177.788	368.113	715.049	0.903	157.121	0.043	-0.093	Viable	1.01	2.07	○

1290



1291