

それは地下からやってきた

気化物質の侵入の検出と軽減

Rachel Cernansky

翻訳：五島廉輔、五島綾子、上田昌文

原題：It Came From Beneath: Detecting and Mitigating Vapor Intrusion

<http://ehp.niehs.nih.gov/124-a141/>

『環境健康展望』124巻8号 2016年8月

Environ Health Perspect, volume 124, issue 8, August 2016

Rachel Cernansky は科学、健康、環境分野を扱うコロラド州デンバーのフリージャーナリストである。 *Yale Environment 360, Nature, Civil Eats*, 及び *The New York Times*. などに執筆している。

※ 訳文中の段落番号は「原文テキスト」(PDF) との対応付けを容易にするために訳者の方で付したものです。



© JG Photography/Alamy Stock Photo

1) 室内の空気の質は長い間重大な公衆衛生の議論の的であったが、気化物質の侵入が室内空気汚染の源として認められたのは比較的最近のことであった。今日、研究者たちは建物下の土壌や地下水から侵入してくる揮発性化学物質の測定と制御のためにより良い方法を探し求めている。



© George Rinhart/Getty Images

2) 気化物質侵入はしばしば汚染した地下水と関係づけられている。揮発性物質の広範囲の使用がアメリカ合衆国全体にわたって、無数の地下水プルーム¹⁾を生じていた。記録がとられている地下水プルームもあるが、そうでないものもある。1958年頃にみられた、ニューヨーク州エンディコットにあるIBMの製造工場がよく研究された用地の一つである。

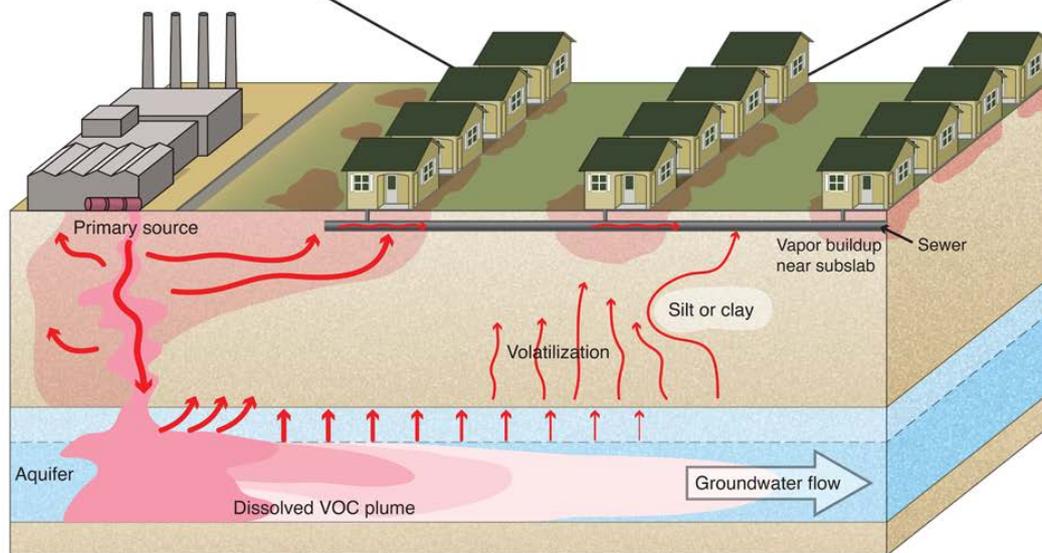
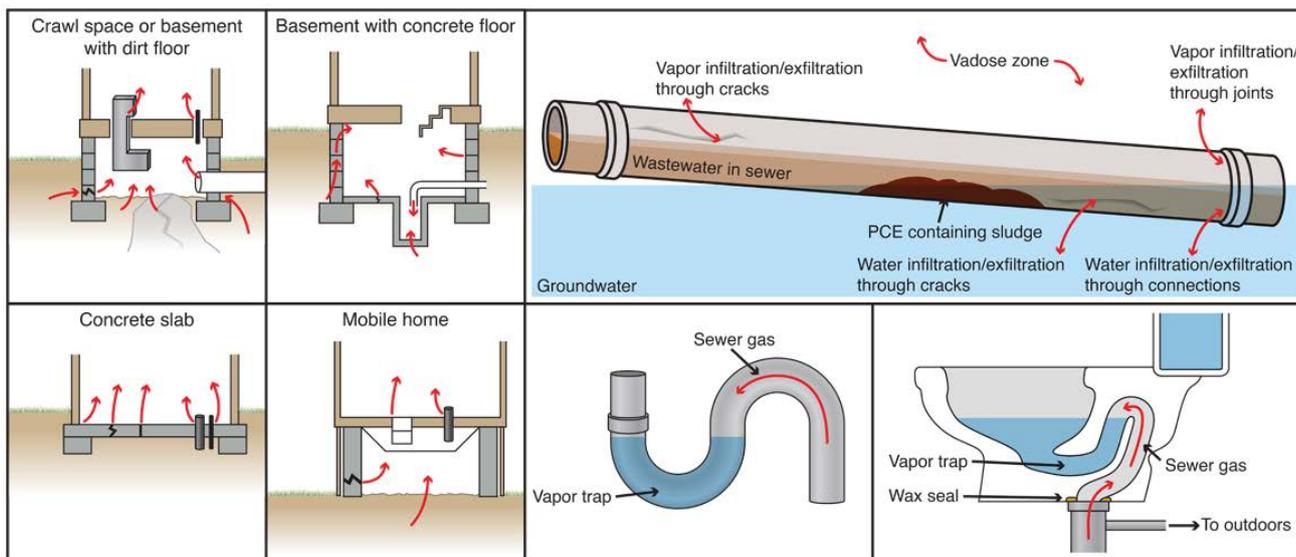


Illustration: Jane Whitney for EHP. Adapted from EPA (2008),11 Pennell et al. (2013),16 and Dawit Bekele and Ravi Naidu (unpublished)

- Crawl space or basement with dirt floor・・・土の床のある狭い空間または地下室
- Basement with concrete floor・・・コンクリートの床のある地下室
- Vapor infiltration/exfiltration through cracks・・・裂け目を通して気化物質の浸入と浸出
- Vadose zone・・・通気帯ゾーン
- Vapor infiltration/exfiltration through joints・・・継ぎ目を通して気化物質の浸入と浸出
- Wastewater in sewer・・・下水中の汚水
- PCE containing sludge・・・PCE(perchloroethylene)を含んだ汚泥

Water infiltration/exfiltration through connections . . . 接続部を通して水の浸入と浸出
Groundwater . . . 地下水
Concrete slab . . . コンクリートスラブ
Mobile home . . . 動きやすいホーム
Vapor trap . . . 気化物質トラップ
Sewer gas . . . 下水ガス
Wax seal . . . ワックスシール
To outdoors . . . 屋外へ
Primary source . . . 最初の発生源
Vapor buildup near subslab . . . サブスラブに近い気化物質の集積
Sewer . . . 下水
Aquifer . . . 帯水層
Dissolved VOC plume . . . 溶解した VOC (揮発性有機物質) のプルーム
Volatilization . . . 揮発
Silt or clay . . . 沈泥または粘土
Groundwater flow . . . 地下水の流れ

3) 化学物質が地面にこぼれたり、または投棄された時に、気化物質が作られ、土壌を通してはるか遠くに移動する。条件が合えば、地下水へ流れ込む化学物質は抵抗の最も少ない経路をたどりながら、その発生源から数マイルも移動できる。気化物質は建物の基礎や廊下にある裂け目、継ぎ目または開口部、コンクリートスラブ中の伸縮ジョイント、床下の狭い空間に露出している粉砕岩石を含めた多くの径路のいくつかを経て家に侵入してくる可能性がある。

ごく最近の研究では下水パイプが気化物質の侵入に同様に関わっているかもしれないことを示している。気化物質は裂け目または合っていないジョイントを通して下水パイプに入る可能性があるし、下水汚物それ自身が下水の中に合法的または不法に投棄された揮発性化学物質を含んでいるかもしれない。漏れやすい、または故障している配管のせいで下水ライン中の気化物質が家の中に侵入するおそれもある。

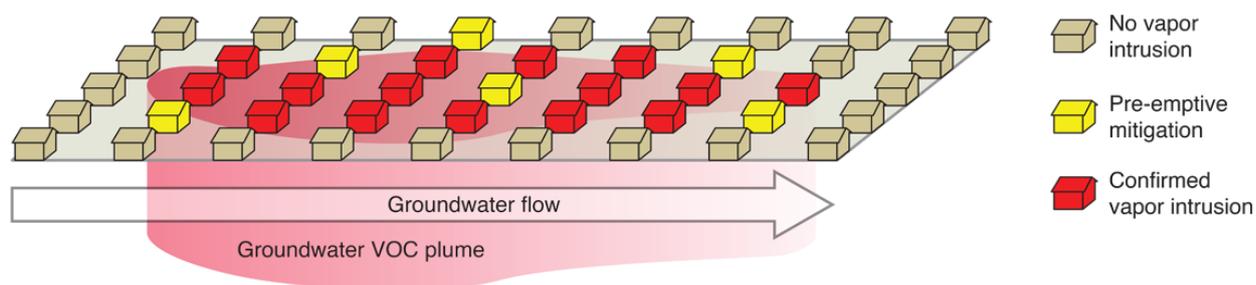


Illustration: Jane Whitney for EHP. Adapted from EPA (2015)¹⁸

Groundwater flow・・・地下水の流れ

Groundwater VOC plume・・・地下水中の VOC（揮発性有機物質）のプルーム

No vapor intrusion・・・気化物質侵入なし

Pre-emptive mitigation・・・事前の軽減

Confirmed vapor intrusion・・・確認された気化物質侵入

4) もし 2, 3 の家庭の室内空気サンプルが気化物質の侵入を示しているとするならば、たとえサンプリングデータを入手できなくても、同じような構造をした同時代の家に対して侵入の可能性が推測できる。これらの場合、予め気化物質の使用を抑えておくことが推奨されるだろう。



5) ここで働く労働者達は通気用床を取り付けている。昔からの気化物質軽減システムと同様に、通気用床は建物の地下から生じる気化物質を安全に屋外に排気することができる。

6) 1980年代以来、自然発生するラドンガスの室内曝露が公衆の意識を急上昇させが、今では、似たような室内曝露ではあるもののあまり知られてはいない室内汚染に注意が向けられている。その形態は気化物質の侵入、すなわち地下水や土壌からその上の建物の中へ入ってくる揮発性化学物質の移動である。

7) 気化物質の侵入には4つの供給源がある。工業用地、軍事用地、ドライクリーニング店およびガソリンスタンドである。これらのすべての場所では溶媒、脱脂用洗浄剤および他の揮発性化学物質を生産したか、多量に使用していたか、またはいまだに生産し、使用している。合衆国のどんな専門家でも、どの程度の気化物質の侵入が生じているかについて、もうこれで十分推定できたと感じている人はいないだろう。しかしケンタッキー大学スーパーファンド研究センター准教授の **Kelly Pennell** は次のよう

に述べている。我々が住んでいるほぼすべての都市環境は気化物質の侵入に関連して数種の歴史的な汚染の経験がある。もし揮発性化学物質が汚染源として存在するならば、その時には気化物質の侵入の恐れが出てくる。

8) “気化物質の侵入については、1990年代後半までさらに2000年代に入ってさえ、事実誰もが知らなかったのであるが、その当時から多くの影響をもたらす可能性をもっていた。それは非常に新しい科学であったために多くの脅威、未知のもの、不確かさがあった。我々は事実それについてほとんど何も知らなかったのだ。我々はどう応急の対処をすればよいか見つけ出そうとそこら中を駆けずり廻っていた”と Geosyntec Consultants のコロラドを基盤とする上級首席エンジニアである Dave Folkes は言っている。

9) 今日、その分野はより成熟していると Folkes はいう。すなわち気化物質の侵入を判断し、軽減するための手段があり、その取扱い方を管理する規則があるからである。成熟するにつれて、気化物質の侵入がどのようにして生じるのか、そしてそれがもたらす健康リスクについての理解に微妙な違いが生まれてきた。それは、それ故に新しい問題も生まれてきた。

10) “気化物質の侵入は、それを問題として明示させるためには多数の学問分野の統合が必要になる、複雑な問題だ。健康面と技術面に目を向けて、科学者は化学物質検出と曝露暴露予測の方法を把握し、健康の懸念事項を識別し、そしてその問題が大きくなるようにするために研究している”と気化物質の侵入に関する多くのプロジェクトに資金を出している国立環境保健科学研究所 (NIEHS) のスーパーファンド研究プログラムの指導者である William Suk は語る。

懸念する化学物質

11) 気化物質の侵入に関して最も懸念される化学物質は塩素化された溶媒である。これらには一般に金属の脱脂用洗浄剤として使用されるトリクロロエチレン(TCE)やドライクリーニングに広く用いられる別の脱脂用薬剤であるテトラクロロエチレン (パークロロエチレンまたはパークとして知られている) がある。石油由来の化合物 (ガソリンやモーターオイル汚染として知られている) はTCEやパークより多少脅威は少ないと考えられており、これらの化合物がより安定なクロル化された溶媒と比べて土壤中で生分解しやすいためであると、ブラウン大学のスーパーファンド研究プログラムの共同指導者である Eric Suuberg が述べている。

12) パーク (パーククロロエチレン) による長期間曝露は、認知や運動神経機能への悪影響、多種のがん、肝臓や腎臓への障害、そして免疫と血液への有害な影響と関連があると考えられてきた。同様に低レベルの曝露さえもやがて神経学のおよび神経行動学的な影響をもたらすという証拠がある。¹

13) 2011年、研究者たちは青年時代における危険な行動 (喫煙やドラッグの使用のような) の上昇率と妊娠中や幼年期初期における飲料水中の高レベルのパーク (パーククロロエチレン) への曝露との関係を報告した。² 別の最近の過去に遡った研究では、若い頃パークで汚染した飲料水を飲んだ成人では、てんかんのリスク上昇とある種のがん (特に頸部のがん) との間に関係があることを見出した。³ また、結論を出すには程遠いけれども、飲料水中のパークが先天異常を起こす可能性を示唆する証拠もある。¹

14) TCE (トリクロロエチレン) 曝露が、一方ではヒトにいくつかの種類のがんを発生させることが知られ、あるいは疑われている。疫学研究と動物実験では、飲料水摂取と体重減少ならびに肝臓や腎臓の損傷のマーカーの発現に関係があることが示されてきた。そして吸入曝露は神経学的、免疫学的、生殖的及び発育的影響を生じる可能性も示されている。⁴ TCEは発育中の胎児の心臓に構造的な異常を生じるかもしれないとの証拠もある。⁵

15) 2011年にEPA (アメリカ合衆国環境保護庁) はTCEに対する健康ハザード評価を更新し、許容できる生涯の経口および吸入曝露に用いられる基準値を低くした。⁴ これは胎児の心臓発育に対するTCEおよびその代謝物の影響についての懸念によって大きく進展した。しかし、ボストン大学公衆衛生学部スーパーファンドプログラムの環境保健学科準教授の Wendy Heiger-Bernays は極低濃度については重大な論争の的になっていると述べている。何故ならば動物の器官、細胞および分子レベルの研究に基づいているからである

16) 研究者や取締官の中には次のような懸念を抱く者もいる。心臓への影響については、リスク管理政策を再構築ができるほどには証拠は強固ではないし、一貫してもいない。^{5, 6} “この論争は、濃度が低いという点、しかし気化物質が侵入してくる用地やその影響を受ける家庭や事業が数多くあるという点、そしてリスクコミュニケーションにかかる費用やそのやり方の難しさが大きいという点を認識しているからこそ起こっているのだ”と Heiger-Bernays は説明している。

汚染の遺産

17) 合衆国ではよく知られている汚染された用地がいくつかあり、そこからは気化物質の侵入がどのように生じているかについての重要な知見が得られている。これらの一つが1980年代までIBMが

操業していたニューヨーク州エンディコットにある生産工場である。ダウタウンと居住区域の約320エーカーの下の地下水がTCE（テトラクロロエチレン）、パーク（パーククロロエチレン）、その他の化学物質で汚染された。現在でもこの汚染はある程度残っている。エンディコット用地の疫学的研究によって、TCEとパークの気化物質の侵入が問題になった地域では、心臓異常と母方の居住箇所との間に相関があることが見出された。それと同様に、主としてTCEで汚染された地域に住んでいた母親たちの間には、低出産体重と胎児の発育不全が見出された。⁷

18) 別の著名な用地はコロラド州、デンバーにあった。そこでは何十年もRedfield生産工場がライフルの照準望遠鏡や類似品を製造していた。その用地の下にある地下水がTCEを含む洗浄溶媒で汚染されていることが見いだされた後で、州当局に注目されるようになった。⁸ Redfield用地は合衆国で確認された最初の主要な気化物質が侵入した用地の一つであり、この用地は比較的小規模の汚染がいかに深刻な環境へ影響をもたらすかを速やかに示した事例であった。

19) “Redfield用地はライフル照準望遠鏡容器からただ単にグリースを除去している非常に小さな製造工場であった。漏れを起こしていた脱脂溶剤製品のサイズは4インチ×8インチといった程度だったのだが、それが約2マイルも移動する地下水プルームを生じた。”とその用地の調査と軽減プログラムのプロジェクトマネージャーとして勤務していたFolkesは述べている。

20) 一方では、数年前カリフォルニア州マウンテンビューにあるGoogle営業所でTCEレベルの上昇を検出したことは気化物質の侵入の可能性がいかに容易に現実となるかの事例である。非営利のカリフォルニア州を基盤とするCenter for Public Environmental Oversightの事務局長であるLenny Siegelによると、その建物は汚染していることがわかっている用地の上に建てられたが、サンプリングの結果から工場のHVAC（Heating Ventilating Air Conditioning, 暖房換気空調）システムが気化物質の侵入を防いだことを確認できた。しかしながら、HVACシステムの障害とスラブ内の隙間により建物内の空気圧が変わった時にTCEの室内レベルが上昇し始めた。これらの問題点が修正されると、TCE濃度は許容できる濃度に戻った。⁹

21) こうした事例のように詳細に記録されている場合は別にして、国内のいたるところに無数の小さいプルームがあることがますますはっきりしてきている。ニューヨーク州やほかの大都市のどこであっても、地面に穴をあければ、古いドライクリーニングによる汚染が見つかることになるだろうと、Siegelは言う。

22) ニューヨークを基盤として環境問題を取り扱う弁護士であるLarry Schnapfは次のように述べている。“都市のいたる所で公式の証拠書類が存在しない地下水プルームがあるのだと気づかされていた。というのも、買い手または売り手が不動産取引の最中にプルームがあることを発見したら、その取引は

その汚染のことは公にしないままキャンセルになるからだ。” “買い手がその結果を見て、「素性の怪しいものは買いたくないんだよ」と言ったために成立しなかった取引の実例あったからである。そのことを買い手は報告していないし、売り手はその後取引をしなかったので報告しようとしていない。そして汚染はまさにそのままである。”

23) 気化物質の侵入を特徴づけることは難しい。室内の空気中には揮発性化学物質の別の発生源があるからというのがその理由の一つである。室内または付属のガレージの中にガソリンの保存、ある市販の脱脂剤の使用、そして新たにドライクリーニングした衣類の家庭への持ち帰りさえもが、気化物質の侵入と関連付けられる化学物質の室内レベルを上昇させると **Suuberg** は述べている。

24) それは室内の空気サンプルの中に懸念すべき化学物質を単に検出するだけでは、気化物質の侵入の問題で診断を下すのに不十分であることを意味している。住民が自身で管理しているものが発生源になっている場合は、ある建物について気化物質の侵入のハザードについて評価する際には、何らかの方法で、そうした発生源はいかなる種類のものであれ、どう評価に組み入れたらよいかの説明されなければならないし、さもなければそうした発生源を全部除外して考えなければならないのだ、と **Suuberg** は言う。

25) 多くの研究者たちは、室内汚染のレベルが天気や季節変動のために経時的に顕著に変化する—時には最大の変動がそのことで生じることもある—と仮定しつつ、建物への気化物質侵入を定量化する方法を探求している。¹⁰ “適正な規制を決めていくのに役立つことのできるデータを、限られた時間の中でいかに綿密にとらねばならないかを明確にしようとしているのだが、これこそまさに今のこの分野の核心部分である。”と、**Suuberg** は語る。“誰も答を持っていない。”とも言っている。室内空気汚染の特性を明らかにする一般的に合意された方法がいまだにないのは、確実性が欠如していることも理由の一つになっているのだ。

問題の軽減

26) 明るい兆しもあって、それは、いったん気化物質の侵入が発見され、それが確認されさえすれば、その問題の影響を軽減していくことは比較的単純であることである。曝露を減らす当面の処置は携帯式空気ろ過機を備えることであると、環境保護マサチューセッツ部局の汚染用地浄化を担当するアシスタントコミッショナーである **Paul Locke** は述べている。彼は、汚染が見つかった居住区域で一時しのぎの措置として使用するために、いくつかの空気ろ過機を手元に備えている。“我々はそのおかげで非常に素早く、数日中に、初期の処置ができる”とも言っている。

27) 解決には長期間かかるので、多くの場合、その答えは気化物質軽減システムを取り付けることである。従来の軽減システムは、ガスが移動するための空間を作る床スラブの下の砂利層と気化物質を集め排気する垂直なパイプからなっている。そのシステムでは、気化物質を遮り、屋外に排気するために建物の下にある土壌をそのまままたは送風機を用いて減圧することになる。¹¹

28) Folkes によると、改良はどこに一番力を入れているかと言うと、ただ、これまでの標準システムに、より良い材料を使用するか、もっと持続的に動く（例えば自動化された）ようにするか、である。彼は次のように述べている。「従来のシステムに代わる最も進んだ、そして将来有望なものは、Pontarolo Engineering という会社が開拓した“通気された床 (aerated floor)”という考え方のシステムです。この会社は、コンクリートスラブの下の砂利層の代わりなる Cupolex®として知られているリサイクルされたプラスチック性の製品を開発したのです。¹² Cupolex®によって大きな隙間ができることで、砂利の場合より空気の流れがよくなり、その結果、より効果的に通気を促し、より小さい送風機でやっていけるようになるのです。」

29) いく人かの専門家や取締役は、地下水汚染が知られている地域に近い所で新しく建設用地にする場合には、こうした軽減システムを設置するのを推奨している。これは、後になって問題が起こって見直しをして対策をほどこしたり、あるいは見落としはないかと心配したりするよりは、むしろ最初から潜在的风险及びコストを減らせるからである。（この予防的な戦略は米国肺協会にのみにあるラドン作業グループからの勧告を反映している。2015年にそのグループは、州および地方の建物基準において、例えばラドン軽減システムを導入するといった、ラドンのリスク軽減策を講じることを推奨する、という内容に更新したのだった。）

13)

30) Entanglement Technologies²⁾ の経営最高責任者 Tony Miller にとっては、最終のビジョンはサンプリング技術が気化物質軽減システムと一体になって、建築工程のあたりまえの一部になることが、最終的な目標である。彼の会社 Autonomous Rugged Optical Multigas Analyzer (AROMA) は建物内のいろいろな地点で速やかに多くの測定値を得ることができる携帯式の簡便なセンサーを設計し、査定コストを減らせるようにした。¹⁴ そのセンサーの試作版で実地試験が計画されているが、そのシステムは、現行の測定器よりもずっと簡単にそして素早く気化物質の発生源を特定することができる。

31) 汚染した土壌をバイオ炭（活性炭の一種）のような有機物で改良することがなんらかのリスクの軽減になるかもしれないという証拠も出てきている。¹⁵ “汚染していない無機化した粘質土壌や有機物が汚染した地下水プルームにかぶさって存在するところでは、その土壌媒体が揮発性物質に非常に強く結合する表面を備えているのです”と、ニューカッスルにあるオーストラリア大学の環境改善グローバ

ルセンター長（the Global Centre for Environmental Remediation）である Ravi Naidu は述べている。“有機物は揮発性化学物質に結合し、その脅威を軽減することができるのです。ですから、土壌の中に存在する粘土、有機物および二次鉱物³⁾の量がわかれば、気化物質がどれくらい侵入するかのリスクを予測することに大きく役立つのです”と、彼は説明している。¹⁵⁾

慣例に従わないルート

3 2) しかし気化物質はいつも土壌を通して建物の中に入るとは限らないことが明らかにされている。2013年に発表された事例研究では、Pennell と共著者たちは、パーク（パーククロロエチレン）が下水ラインから、恐らくトイレの封蠟（シールワックス）の欠陥のせいで、家の中に入ってくることを実証した。¹⁶⁾ トイレの接続部をシールすると、パークのレベルは許容できるレベルに下がった。「我々は給排水システムを修理する時には、通常、水に注目するが、有害臭でない限り、我々は気化物質のもれについて考えないだろう」と彼女は述べている。

3 3) Pennell の研究グループはどのようにして気化物質が下水管を通して室内の空気の中へ運ばれてくるかをより良く理解するためのモデルを作成することを試みている。化学物質は合法及び非合法的な排出の結果、廃水それ自身に含まれて下水システムに入ると彼女は説明している。汚染した地下水と気化物質は、ひびが入っているか、あるいはひびは入っていても劣化した下水ラインを通して入ることができる。「下水ラインへ地下水が流入する問題がよく知られていますが、インフラの老朽化は自治体が抱える難題の一つとなっています」と彼女は指摘している。¹⁷⁾

3 4) 慣例に従わないルートに沿って気化物質が建物内部に運ばれる可能性は研究者にとって悩みの種であった。彼らは気化物質がどのように運ばれるかを予測するために既存の方法にこの余分な変わりやすいルートをいかに取り込むべきか見いだそうとしている。

3 5) “我々は過去10年から15年でこうした経験則を築き上げてきたが、これが調査の助けになっている。例えば、地下水プルームの端からおおよそ100フィートを超えた所での影響は通常ないと考えている”と Folkesh は言う。“しかし、我々が優先的経路と呼ぶもの—下水、高い透過性の砂利層、岩の裂け目かもしれないが—があって、経験則以上にはるか遠くに、より速くそしてより高濃度に気化物質を進ませてしまっているのではないかという懸念がある。

3 6) Folkesh は概してこのようなことは起きるとは思っていないが、状況によっては心配が生じる。例えば、アリゾナ州立大学が所有している研究棟で、基礎の配水管が汚染された地下水を含む雨水配水管

に接続していることがわかった。これは事実上、研究棟の中へ気化物質を運ぶ直接のラインになってしまっていると **Folkes** は説明している。

37) 地下水汚染は発展した都市ではかなりよくみられることあるので、気化物質の侵入はほとんどの人々が気づいている以上にはるかに頻繁に起こっている。しかし明るい見通しがあるとするれば、それは気化物質の侵入について意識が高まることによって、室内空気の質の重要性と健康への影響に目が向けられるようになってきたことであると、**Pennell** は述べている。

38) 軽減システムを設置し、揮発性化学物質を含む消費者向け製品の使用を制限し、汚染した地下水を回復させ、そして建物の排気システムが室内空気の質にいかに関与しているかを理解することによって、我々は多くの環境による健康リスクを防御でき、そしてより健康な共同社会を促進できると **Pennell** は語っている。

注

1) 地下水プルーム

地下水プルームは地下水中の汚染濃度の高い部分を指しており、時には雲のようにかたまって移動する。プルームは一般的に汚染源から立ち上がる汚染物質の雲のようなものである。

2) Entanglement Technologies

National Institute of Environmental Health Science(NIH)のスーパーファンドプログラムを請け負っている会社。

3) 二次鉱物

既存の鉱物の分解、変質などによって生成された鉱物の総称

References

1. EPA. Integrated Risk Information System (IRIS). Chemical Assessment Summary. Tetrachloroethylene (Perchloroethylene); CASRN 127-18-4. Washington, DC:National Center for Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency (revised 10 February 2012). Available: https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0106_summary.pdf [accessed 22 July 2016].
2. Aschengrau A, et al. Affinity for risky behaviors following prenatal and childhood exposure to tetrachloroethylene (PCE)-contaminated drinking water. *Environ Health* 10:102 (2011), doi: [10.1186/1476-069X-10-102](https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-102).
3. Aschengrau A, et al. Long-term health effects of early life exposure to tetrachloroethylene (PCE)-contaminated drinking water: a retrospective cohort study. *Environ Health* 14:36 (2015), doi: [10.1186/s12940-015-0021-z](https://doi.org/10.1186/s12940-015-0021-z).
4. EPA. Integrated Risk Information System (IRIS). Chemical Assessment Summary. Trichloroethylene; CASRN 79-01-6. Washington, DC:National Center for Environmental Assessment, U.S. Environmental Protection Agency (revised 28 September 2011). Available: https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/subst/0199_summary.pdf [accessed 22 July 2016].
5. Chiu WA, et al. Human health effects of trichloroethylene: key findings and scientific issues. *Environ Health Perspect* 121(3):303–311 (2013), doi: [10.1289/ehp.1205879](https://doi.org/10.1289/ehp.1205879).
6. IDEM. 2016 Screening Levels Table Now Available. Clarification Regarding Application of Trichloroethene Indoor Air Screening Levels [press release]. Indianapolis, IN:Indiana Department of Environmental Management (7 March 2016). Available: http://www.in.gov/idem/landquality/files/risc_screening_table_2016_announce.pdf [accessed 22 July 2016].
7. Forand SP, et al. Adverse birth outcomes and maternal exposure to trichloroethylene and tetrachloroethylene through soil vapor intrusion in New York State. *Environ Health Perspect* 120(4):616–621 (2012), doi: [10.1289/ehp.1103884](https://doi.org/10.1289/ehp.1103884).

8. Brown Group Retail. Redfield Site: Environmental Fact Sheet (September 2006). Available: http://www.redfieldsite.org/pdfs/redfield_site_environmental_fact_sheet_-_september_2006.pdf [accessed 22 July 2016].
9. Welt SB, Bice NT. Indoor Air Sampling Report. Former Fairchild Buildings – Google Quad, 369, 379, 389 and 399 North Whisman Road and 468 Ellis Street. Oakland, CA:Geosyntec Consultants (22 February 2013). Available: <https://www.documentcloud.org/documents/612000-369-399-n-whisman-ia-report-22february13-final.html> [accessed 22 July 2016].
10. Schumacher B, et al. Fluctuation of Indoor Radon and VOC Concentrations Due to Seasonal Variations. EPA/600/R-12/673. Washington, DC:U.S. Environmental Protection Agency (2012). Available: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=247212 [accessed 22 July 2016].
11. EPA. Engineering Issue: Indoor Air Vapor Intrusion Mitigation Approaches. Cincinnati, OH:National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency (October 2008). Available: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100AE72.pdf> [accessed 22 July 2016].
12. Cupolex [website]. Vaughan, Ontario, Canada:Pontarolo Engineering (2007). Available: <http://www.pontarolo.ca/html/cupolex.shtml> [accessed 22 July 2016].
13. EPA. The National Radon Action Plan: A Strategy for Saving Lives. Washington, DC:U.S. Environmental Protection Agency (2015). Available: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-11/documents/nrap_guide_2015_final.pdf [accessed 22 July 2016].
14. Environmental Sensing [website]. Burlingame, CA:Entanglement Technologies, Inc. (2016). Available: <http://www.entanglementtech.com/environmental.html> [accessed 22 July 2016].
15. Bekele DN, et al. Influence of soil properties on vapor-phase sorption of trichloroethylene. J Hazard Mater 306:34–40 (2015), doi: [10.1016/j.jhazmat.2015.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.002).
16. Pennell KG, et al. Sewer gas: an indoor air source of PCE to consider during vapor intrusion investigations. Ground Water Monit Remediat 33(3):119–126 (2013), PMID:[23950637](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23950637/).

17. ASCE. Report Card for America's Infrastructure. Reston, VA: American Society of Civil Engineers (March 2013). Available: <http://infrastructurereportcard.org/a/documents/2013-Report-Card.pdf> [accessed 22 July 2016].

18. EPA. OSWER Technical Guide for Assessing and Mitigating the Vapor Intrusion Pathway from Subsurface Vapor Sources to Indoor Air. OSWER Publication 9200.2-154. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. Environmental Protection Agency (2015). Available: <https://www.epa.gov/vaporintrusion/technical-guide-assessing-and-mitigating-vapor-intrusion-pathway-subsurface-vapor> [accessed 22 July 2016].