

Cleaning indoor air—what works for respiratory health: An updated literature review and recommendations

Nicole M.

J AllergyClin Immunol 2024;154:847-60.

室内空気の浄化 - 呼吸器の健康に効果的なもの: 最新の文献レビューと推奨事項

要旨

屋内空気汚染は、世界中で公衆衛生上の懸念が高まっており、呼吸器症状や罹患率の増加と関連しています。人々はほとんどの時間を屋内で過ごし、汚染物質に関連する健康への影響は、多くの場合、屋内環境によって引き起こされます。屋内空気の質を改善するための効果的な介入と、それが呼吸器系の結果に与える影響を理解することは、生涯にわたって高リスク集団の大気汚染の負担を軽減するための鍵となります。このレビューでは、呼吸器系の健康への影響に特化した介入の階層フレームワークを適用し、過去 3 年間に発表された慢性呼吸器疾患の高リスク集団の屋内空気の質を改善するための介入に関する最近の研究に焦点を当てています。政策および発生源制御介入は、屋内空気の質を改善し、集団の健康に利益をもたらす最も効果的で公平なアプローチである可能性が高いですが、これらはあまり広範囲に調査されていません。空気清浄機介入などの工学的介入が最も広く研究されました。喘息や慢性閉塞性肺疾患に焦点を当てた研究を含むいくつかの研究では、家庭と学校の両方の環境で介入を行うことで症状と投薬量が改善されたことが実証されています。工学的介入と行動的介入を組み合わせたマルチレベル介入により、一部の研究で呼吸器疾患の結果が改善されましたが、すべての研究で改善されたわけではありません。最近の研究をより広範な文献の文脈に置くと、研究のギャップが明らかになります。介入の有効性を長期にわたって理解し、脆弱な集団のリスクを軽減できる政策と感染源管理介入に重点を置くには、さらなる研究が必要です。

室内空気汚染は世界的に大きな公衆衛生上の懸念事項であり、世界中で 320 万人が室内空気汚染が原因で早期に死亡しています。屋外の空気汚染が健康に及ぼす有害な影響を定量化する証拠は多数ありますが、室内空気質 (IAQ) とそれに伴う健康への影響はより複雑です。室内空気汚染の負担を定義する証拠の大部分は、低所得国と中所得国に関するものであり、室内空気汚染は喘息、急性呼吸器感染症、結核、慢性閉塞性肺疾患 (COPD)、肺がんに関連しています。高所得国で実施された研究は少ないですが、これらの研究では、室内環境で一般的に見られる汚染物質の濃度が低い場合でも、IAQ (室内空気質) が呼吸器疾患の罹患率と関連していることが実証されています。高所得国では、室内空気汚染は、喘息や COPD 患者の呼吸器症状の増加、呼吸状態の悪化、増悪リスクの増加と関連しています。

室内空気汚染の健康への影響は、人々がほとんどの時間 (80% 以上) を屋内で過ごし、基礎疾患のある人や高齢の人は屋内で過ごす時間がさらに長いことを考えると、特に懸念されます。そのため、屋内環境での曝露が累積曝露の大部分を占めます。IAQ (室内空気質) は、屋内の発生源と屋内に流入する屋外の空気の影響を受けます。周囲の空気の質が悪い場合、既存の呼吸器疾患のある人は屋内にいることが推奨されることがよくあります。ただし、屋内の発生源を考慮すると、汚染物質のレベルが屋外のレベルを超える可能性があります。IAQ (室内空気質) は、周囲の空気が侵入する結果として、極端な空気質イベント (例、山火事) によっても影響を受ける可能性があります。健康の社会的決定要因は、いくつかの経路を通じて曝露リスクに影響します。たとえば、低所得世帯と有色人種は、空気の質が悪いコミュニティに住む可能性が高くなります。最近の研究では、これらのグループの子供も受動喫煙 (SHS) 曝露のリスクが高いことが示されています。室内空気汚染への曝露は、健康格差の潜在的な要因です。

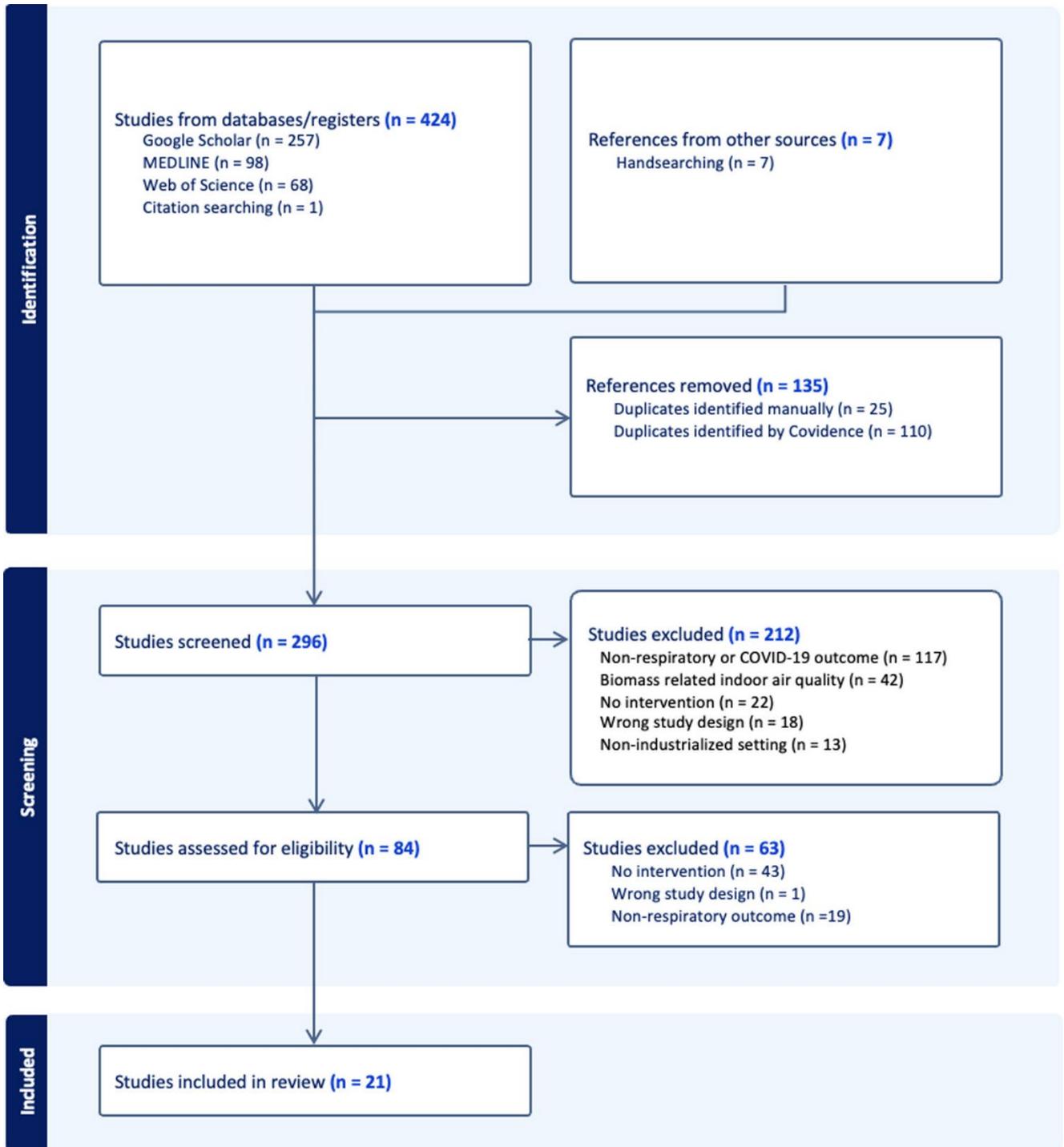
したがって、IAQ (室内空気質) を改善するための介入を特定することが極めて重要です。これまでのシステマティックレビューでは、粒子状物質 (PM)、二酸化窒素 (NO₂)、揮発性有機化合物 (VOC)、および多環芳香族炭化水素の濃度を低減することで IAQ (室内空気質) を改善するための規制および人口ベースの介入が報告されています。IAQ を改善したりアレルゲンへの曝露を低減したりするための技術の研究は 1970 年代に始まり、現在も続いています。高効率粒子状空気 (HEPA) クリーナーを使用した空気清浄技術が最も頻繁に研究されてきました。ただし、汚染物質の排出を削減する (例: 屋内喫煙禁止、ガス器具から電気器具への切り替え) 方が曝露の低減に効果的である可能性があります。全米科学アカデミーのワークショップを含む最近の全国的な取り組みでは、呼吸器の健康を改善する可能性が最も高い IAQ (室内空気質) 介入に関するガイドラインと普及計画の策定に重点が置かれています。しかし、呼吸器疾患患者などの感受性の高い集団を

保護するために IAQ（室内空気質）介入研究を優先することは、介入を利用可能かつ手頃な価格にするための政策を支援するために依然として必要です。

範囲と目的

ここでの我々の目的は、現在の知識を拡大・更新し、安定した電力供給のある工業化地域において過去 3 年間に室内空気汚染への曝露を減らすための介入が呼吸器系の健康状態に与えた影響を評価し、研究のギャップと推奨事項を特定することです。このレビューでは、喘息や COPD などの慢性呼吸器疾患を持つ人々が室内空気汚染による呼吸器系の健康への影響に最も脆弱であるため、これらの人々の急性呼吸器系の健康状態に主に焦点を当てています。一般集団を対象に実施された研究は参考として掲載されており、本論文のオンライン リポジトリ (www.jacionline.org) の表 E1 に詳細な説明が記載されています。私たちは、2021 年から 2024 年に発表された介入に基づくランダム化比較試験 (RCT) とクロスオーバー研究の手作業による検索と組み合わせて、データベースの包括的な検索を実施しました。新型コロナウイルス感染症の成果のみを報告している研究と、バイオマス燃焼によって生成された IAQ（室内空気質）に焦点を当てた研究は除外しました。系統的レビューとメタ分析のための推奨報告項目 (PRISMA) 図を含む完全な検索戦略は、オンライン リポジトリ (データベース) の図 E1 で確認できます。私たちは、IAQ（室内空気質）に対する介入の階層的フレームワークを提案します。家庭や学校での IAQ（室内空気質）介入の対象を特定し、(1) 大気汚染の主な発生源、(2) 人口と介入方法別に層別化した IAQ 改善の最近の取り組み、(3) 介入の有効性、普及、遵守を特定し、最後に、(4) 文献全体から、研究のギャップと推奨事項を特定します。

表 E1

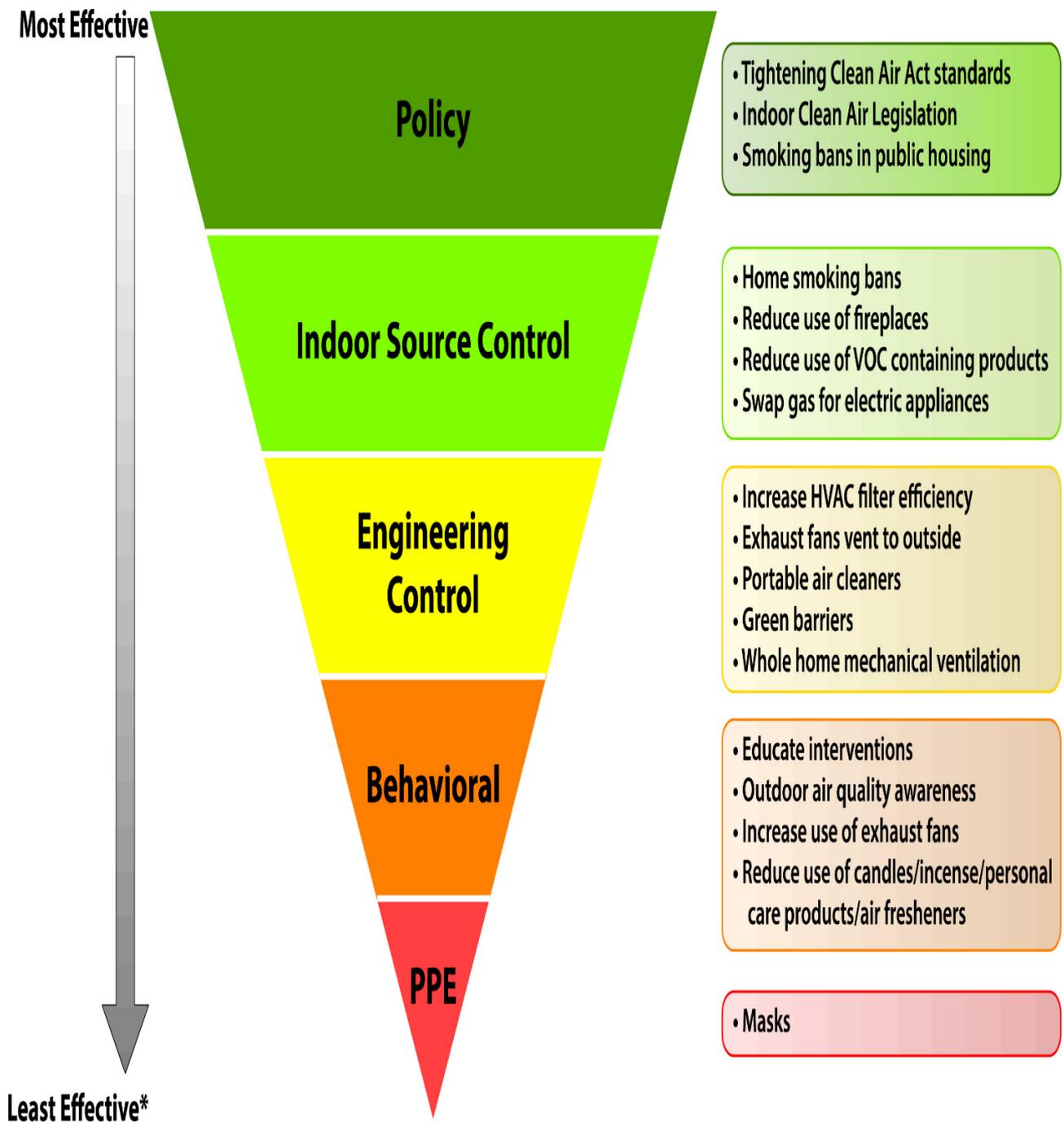


室内空気汚染の原因

IAQ（室内空気質）は、人間の活動による汚染物質の排出、屋外の空気からの汚染物質の浸透、生物学的汚染物質（細菌、カビ、花粉、ほこりなど）の影響を受けます。大気汚染の原因は、国、その場所で行われる活動、周囲の自然環境または都市環境（道路、産業活動、自然空間への近さなど）によって異なります。大半の人はほとんどの時間を屋内で過ごしており、汚染への一般的な曝露源としては、調理、タバコの煙、ろうそくやお香、パーソナルケア製品、洗浄製品、屋内殺虫剤、電化製品の使用による排出物、建築材料からの排出物、屋外の大気汚染の浸透などがあります。研究では、場所によっては、PM、NO₂、黒色炭素、重金属などの屋内大気汚染物質の濃度が、周囲の空気と比較して家庭や学校で大幅に上昇していることがわかっています。低所得国および中所得国では、調理や暖房用のコンロでのバイオマス燃焼により、室内の大気汚染物質濃度が非常に高くなる可能性があり、PMと一酸化炭素（CO）が最も広範に研究されています。燃焼効率を改善したコンロ、液化石油ガスコンロ、または換気を改善して IAQ（室内空気質）を改善する介入に関する研究は数多く行われてきました。複数の研究とシステマティックレビューで、これらの介入が呼吸器疾患の結果を改善する上で有効であることが説明されているため、このレビューでは、コンロに関連しない介入に焦点を当てます

IAQ（室内空気質）への介入の階層

このレビューの構成は、産業環境での曝露低減のために米国労働安全衛生研究所（NIOSH）が開発した確立された制御階層に基づいた IAQ（室内空気質）介入の階層を中心としています。NIOSH の制御カテゴリの階層（除去、代替、工学的制御、管理的制御、および個人用保護具 [PPE]）は、逆ピラミッドとして表示され、最も効果的な介入が最上部に、最も効果の低い介入が最下部に配置されています。非産業環境における IAQ（室内空気質）に関する議論に合わせるために、いくつかの新しいカテゴリを特定し、この更新された階層に行動介入としての PPE（個人用保護具）の使用を含めました（図 1）。このレビューの多くの IAQ（室内空気質）研究には、この階層のカテゴリと重複する複数のコンポーネントの介入が含まれていたため、主な介入に従って研究を分類することに焦点を当てました。この IAQ（室内空気質）の階層をさらに説明するために、図 2 は、家庭環境での IAQ（室内空気質）介入カテゴリの提案された介入階層を例示しています



* Effectiveness as measured by intervention impact by population scale and individuals reached

図 1 IAQ（室内空気質）に対する介入の階層

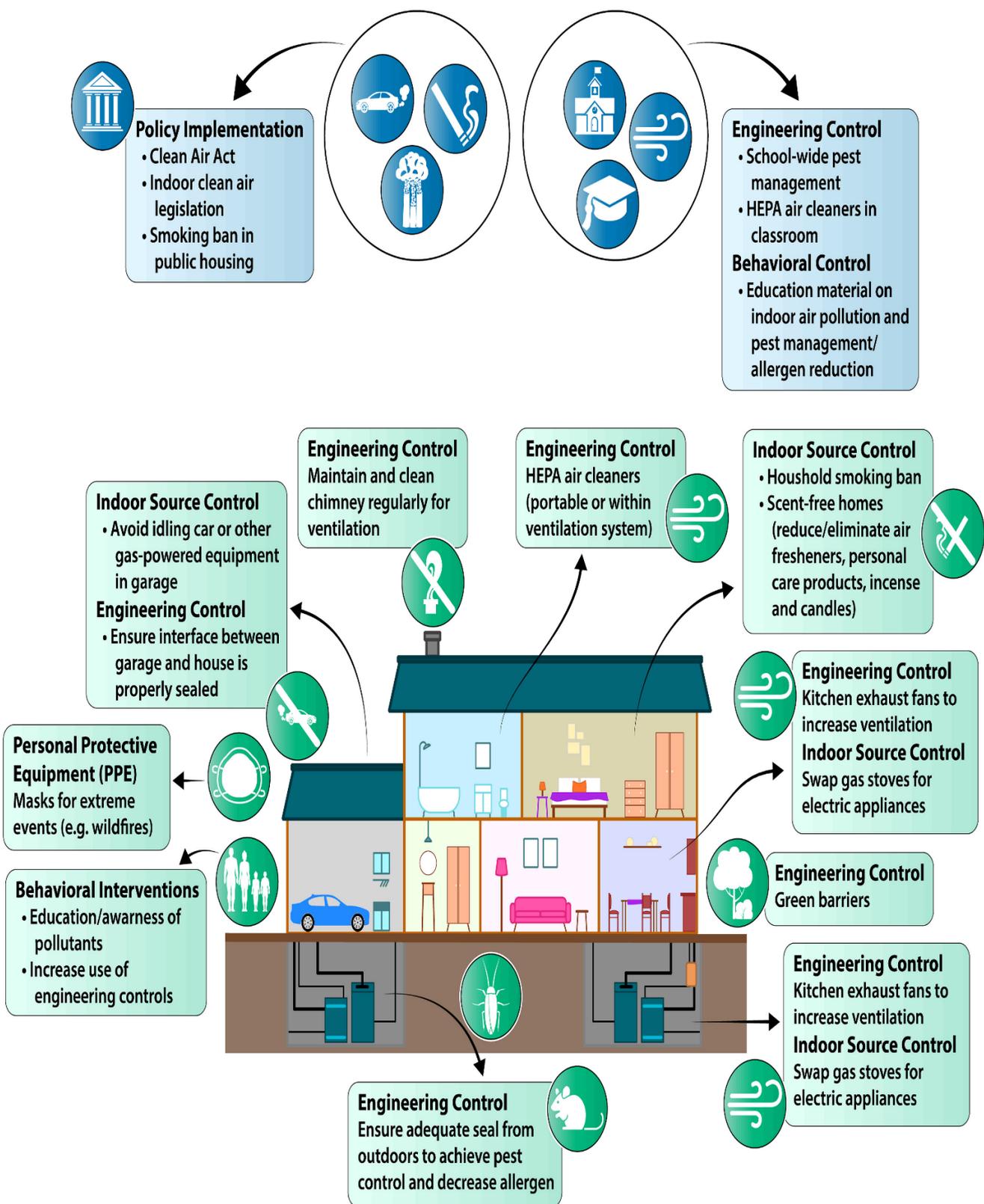


図 2 IAQ (室内空気質) を改善するための制御戦略

公共政策

屋外の大気汚染物質の排出と濃度については公共政策規制が確立されていますが、住宅や公共の屋内空間の IAQ（室内空気質）についても同様の国家基準が生まれつつあります。1963年に米国で制定された大気浄化法では、米国環境保護庁が6つの基準となる大気汚染物質について国家大気環境基準を制定することを義務付けています。世界的には、世界保健機関（WHO）が2015年に大気汚染レベルに関するガイドラインを制定し、このガイドラインは2021年に更新され、世界中の政策立案者が基準設定の参考に使用しています。ただし、IAQ（室内空気質）を制御するための政策が必要であり、実現可能であるという認識も高まっています。WHOは、PM、CO、NO₂、二酸化硫黄などの大気汚染物質の推奨レベルに関するIAQ（室内空気質）ガイドライン（法的強制力はない）を定めています。ヨーロッパでは、ドイツ、オーストリア、ポルトガル、イギリスなどの国々が、大気汚染物質への曝露による健康への悪影響に関する過去の研究に基づいて、少なくとも6種類の有毒汚染物質の曝露レベルを低く設定する法律を制定しています。

最近では、デラウェア州が、2025年までに学校での定期的なIAQ（室内空気質）モニタリングを義務付ける新しい法律を制定しました。2020年、カリフォルニア州大気資源局は、ガス器具と比較して室内のNO₂濃度を低減できる電気器具を支持する決議を可決しました。カナダは、カナダ環境保護法に基づいて住宅の室内空気汚染物質に関する自主ガイドラインを定めており、山火事の煙発生時の公共の屋内スペースに関するガイダンスも追加されています。さらに、カナダは最近、カナダ保健省室内空気プログラムを導入しました。このプログラムには、リスク評価、健康研究、IAQ（室内空気質）に関するアウトリーチとエンゲージメントが含まれており、劣悪なIAQの健康への影響を評価して伝達します。米国の新たな法律（モデル州室内空気質法など）は、規制と発生源管理を通じてIAQ（室内空気質）を改善することを目的としています。公共政策は、世界中でSHS（Socioeconomic status）への曝露を減らすのに非常に効果的でした。

公共スペースでの屋内禁煙は、SHS（Socioeconomic status）への曝露と喫煙の減少を通じて、肺機能の改善、入院を必要とする重度の喘息増悪の減少、一般住民および以前に慢性呼吸器疾患を患っていた人々の急性心筋梗塞の減少に関連付けられています。SHSへの曝露を軽減することは最も重要であり、HEPAクリーナーはPMレベルを低下させることが示されているが、SHSに曝露した子供の空気中のニコチンレベルは低下させないことが示されています。最近では、公営住宅での喫煙禁止も実施されています。政策の実施に焦点を当てた最近の研究は私たちの包含基準を満たしていませんでしたが、これらの政策

レベルの介入は効果的であると予想され、IAQ (Indoor air quality) 政策の制定後の健康成果に関する研究が必要です。

ソース管理

汚染源管理のカテゴリーは、政策の実施以外での大気汚染源の削減または除去に焦点を当てています。たとえば、法律で課せられた公共の場での喫煙禁止とは対照的に、個人が自宅で課す喫煙禁止などです。ろうそく、お香、芳香剤などの屋内汚染源を家庭または学校レベルで標的として除去すると、有益な場合があります。このレビューに記載されている多くの研究では、学校での総合的病害虫管理を利用してアレルゲンへの曝露を制御しています。家庭でのバイオマス関連の大気汚染を減らすために、家庭用の薪ストーブ交換プログラムが実施されています。一部の都市では、ガスストーブから電気ストーブへの交換をサポートするパイロットプログラムが実施されており、ガス燃料の調理によって生成される NO₂ やその他の汚染物質を減らすための汚染源管理の新たな例となっています。個人または家庭レベルでの屋内汚染源管理に焦点を当てた介入の健康上の利点と呼吸器系の健康結果への影響を定量化した研究はほとんどありません。

エンジニアリング介入

空気清浄機は工学的介入の最も一般的な例であり、多くの場合、HEPA フィルターとカーボン フィルターが含まれます。HEPA フィルターは空気中の粒子を除去し、カーボン フィルターは NO₂ と VOC の濃度を低減します。初期の技術 (イオン化装置) の中には、屋内でオゾンを生成することが示されており、イオン化技術を使用する新しいデバイスはオゾン生成量が大幅に少ないものの、HEPA フィルターを使用する場合は不要である可能性があります。フィルターは換気システム (全館機械換気) に取り付けることも、ポータブル空気清浄機に組み込むこともできます。ストーブの上に設置して屋外に排気する排気ファンも、汚染物質の濃度を低減できます。屋外インフラストラクチャの設置により、グリーン インフラストラクチャを含む屋内環境への大気汚染の浸透を減らすことができます。

行動介入

行動介入は、曝露の期間、強度、頻度を減らすことで、屋内空気汚染への曝露を軽減します。行動介入には、個人が活動を変えられるように IAQ（室内空気質）への意識を高めることが含まれます。行動介入には、汚染物質の排出を減らす介入（例：屋内喫煙禁止を促進する支援戦略）、工学的介入の利用を増やす介入（例：調理前および調理中の換気扇の利用を促進する）、または PPE の利用を増やす介入（例：突発的なイベント中のマスクの使用を促す）も含まれます。PPE は一部の極端な状況（例：山火事への曝露）では役立つ可能性がありますが、特定の感染症管理状況以外では、PPE は屋内空気汚染物質の持続的な削減には適していません。そのため、このレビューでは PPE に関するさらなる議論は限定されています。

最近の文献のレビュー：健康アウトカムと臨床エンドポイント

このレビューでは、過去 3 年間に発表された研究で、慢性呼吸器疾患（喘息や COPD を含む）の患者と一般集団の両方を対象に、IAQ（Indoor air quality）と呼吸器の健康状態を改善するための介入の有効性を評価します。この更新は、IAQ に対する学校および家庭ベースの介入について説明した以前の文献に基づいています。含まれている研究はすべて、HEPA クリーナーの使用を中心にしており（1つの例外を除く）、これはおそらくその有効性と入手しやすさによるものです。発表された研究で HEPA クリーナーが頻繁に使用されていることは、屋内 PM の軽減戦略に関する最近のレビューと一致しています。表 I は、このレビューに含まれる記事を呼吸器疾患別にまとめたものです。このレビューでは、介入に複数のモダリティ（大まかな手段）を使用するいくつかの研究が取り上げられています。たとえば、空気清浄機の介入試験は、単一施設研究と多施設研究で実施されており、多面的な環境介入の一部として含まれることがよくあります。全体として、症状、投薬、増悪などの呼吸器系の臨床的利益に関する結果はまちまちであり、1つまたは複数のエンドポイントで改善が見られた研究もあれば、有意な改善が見られなかった研究もある。次に、呼吸器疾患別および一般集団における介入の有効性、受け入れ度、遵守のばらつきなど、このような結果の潜在的な理由を検討する。

喘息

大規模な疫学研究では、IAQ（Indoor air quality）と喘息の発症および関連する罹患

率との間に関連があることが一貫して明らかにされています。SHS (Secondhand smoke)、PM、NO₂などの室内空気汚染物質は、喘息の症状や罹患率の増加と関連しています。カビ、ほこり、ペット、害虫アレルゲンなど、アレルゲンは、感作された人の喘息増悪の引き金になることも知られています。アレルゲンは、粒子状汚染の生物学的組成の一部を構成します。たとえば、マウスアレルゲンは空気中の PM で測定可能であり、このようなアレルゲンの存在を減らすための介入は、発生源制御と見なされます。

我々の選択基準を満たした 3 件の研究では、アレルゲンによる IAQ (Indoor air quality) 悪化への寄与を減らすための発生源制御介入戦略として総合的害虫管理が含まれていた。最近の RCT (Randomized controlled trial) では、ボルチモアで持続性喘息の小児を対象にカスタマイズされた環境制御戦略の使用が調査された。介入には、寝具の変更、空気清浄機の使用、害虫管理と喘息管理薬の滴定投与（副作用を伴わずに最大の効果が得られるように薬剤の量を調整することで）を組み合わせたアレルゲン曝露と室内汚染生成の削減が含まれ、Grant らはこれを薬の滴定投与のみと比較した。環境介入と薬の滴定投与を行ったグループと薬の滴定投与のみを行ったグループとの間に、喘息の結果（救急外来受診、喘息症状日数、喘息重症度、肺機能）に統計的に有意な差はなかった。注目すべきことに、この家庭内介入は学校での汚染曝露を対象としていなかったため、1 日の大部分の曝露が不明な状態になっていた。ボストンでは、総合的害虫管理、教室内 HEPA フィルター、小学生の印刷教材に関する学校都心部喘息研究 2 (SICAS-2) RCT において、介入群では対照群と比較して欠席日数が有意に少なかったことが確認されました。介入群と対照群の間で喘息症状日数に差はありませんでしたが、教室でのカビへの曝露が改善したサブスタディの参加者では、肺機能（1 秒間の努力呼気量[FEV₁]で測定）に有意な改善が見られました。

工学的介入には主に能動型 HEPA クリーナーが含まれ、さまざまな呼吸器アウトカムに対する結果は、改善したものも改善しなかったものも含め、一貫性がなく、結果もさまざまでした。複数の研究により、家庭や教室で能動型 HEPA クリーナーを使用すると、喘息の症状やコントロールが改善し、予定外の臨床利用のリスクが減り、喘息による学校欠席日数が減り、鼻結膜炎の生活の質 (QoL) スコアが改善することがわかりました。事後解析では、中等度の持続性およびコントロール不良の喘息を持つ成人を対象とした英国の 1 つの研究で、HEPA 使用により、偽フィルターと比較して鼻炎と睡眠の QoL が改善したと報告されています。喘息を抱えるアメリカの農村部の子供たちでは、家庭用 HEPA クリーナー介入は、対照群と比較して喘息の症状と予定外の臨床利用を減らすのに効果的であり、喘息管理と QoL が大幅に改善しました。

対照的に、その他の工学的介入研究では、呼吸器の健康状態の改善は示唆されなかった。持続性喘息のあるアメリカの都市部の小児では、炭素フィルターを含む家庭用 HEPA および NO₂ 除去空気清浄機は、介入なしと比較して、喘息のコントロール、QOL、または肺機能に有意な変化をもたらさなかった。喘息の小児を対象とした別の都市部の研究で、Gent らは、NO₂ 削減治療を用いた介入群と対照群との間に喘息症状日数に差がなかったことを発見した。喘息の小児に対するこれらの空気清浄機介入は、肺機能と複雑な関連性を示した。米国と英国のこれらの研究は、都市部と農村部に住む小児と成人の異なる集団で構成されていた。研究対象集団は健康リテラシー、文化的信念、医療へのアクセスが異なり、研究の追跡期間もさまざまであったため、結果がまちまちになった可能性が高い。これらの研究の一部は一般化または他の医療システムに転用できない可能性があるが、これらの結果は、喘息を患う子供と大人の両方において、空気清浄機が主要な喘息の結果を改善する能力があることを示す証拠を提供している。

研究された行動介入には、印刷された教育資料の配布、曝露回避を勧告する毎日の通知、および主に喘息のある子供と大人の学校と家庭で設定された曝露を減らすための慣行の促進が含まれていました。ワシントン州で行われた RCT では、毎日の勧告や掲示板のヒントを通じて屋内の山火の煙への曝露を減らす行動を促進するためにアプリベース（スマートフォンやタブレット端末からネットショップを作成・管理できるアプリ）の介入を使用し、毎日のスパイロメトリーで肺機能へのリアルタイムの影響を評価しました。このアプリベースの介入は、喘息のある成人の呼吸器症状や肺機能に有意な利益を示さなかった。対照的に、喘息のある小学生に対する行動介入と工学的介入（空気清浄機）を組み合わせた学校ベースの介入は、肺機能、症状管理、および QOL の改善に有効でした。たとえば、キプロスとギリシャでは、砂漠の砂嵐への曝露を避けるための早期警報システムの使用と、家庭や学校の教室での室内用 HEPA クリーナーの使用が、予測 FEV₁ の改善、喘息治療薬の服用の減少、予定外の医師の診察の減少と関連していました。複数の設定を伴うこれらの複雑で多層的な介入では、呼吸器系の健康成果に対する個々の介入の相対的な重要性を判断することは依然として困難です。

喘息患者にとって受け入れ可能かつ文化的に適切な行動介入を開発し、行動の変化に影響を与える技術統合との役割を評価するには、さらなる研究が必要です。

慢性閉塞性肺疾患

IAQ（室内空気質）が不十分だと、症状、QOL、病気の経過を通じて、COPD 患者に短期的および長期的に大きな影響を及ぼす可能性があります。研究では、IAQ（室内空気質）が不十分だと COPD の悪化、入院、死亡率の発生率が上昇する可能性があることが明らかになっています。47、77そのため、COPD 患者は IAQ（Indoor air quality）介入の重要な対象となります。

空気清浄機介入が COPD の症状や QOL に及ぼす影響については、世界的に十分に研究されていません。CLEAN AIR 研究では、中等度から重度の COPD を患う元喫煙者を対象に、HEPA フィルターとカーボンフィルターを備えたポータブル空気清浄機が室内の汚染物質濃度を低下させ、健康状態を改善する効果を調査しました。この研究では、空気清浄機の使用は、呼吸器症状の大幅な改善、COPD 増悪頻度の減少、投薬量の減少と関連していました。呼吸器症状のこの改善は、自宅での PM が 40% 以上減少した参加者でより顕著でした。在宅介入アプローチは、特に COPD を患う高齢者の多くは移動が制限されており、自宅で多くの時間を過ごすため、観察された有効性に寄与している可能性があります。

空気清浄機介入による臨床イベントへの効果を研究するだけでなく、中間マーカーを調査することで、空気の質が COPD に影響を及ぼすメカニズムの理解が深まる可能性があります。屋内の空気汚染にさらされると炎症や酸化ストレスが増加し、慢性呼吸器疾患の悪化リスクが高まります。COPD の有無にかかわらず、非喫煙高齢者では、HEPA クリーナーの使用により、介入群では対照群と比較して、成長分化因子-15、オステオプロテゲリン（骨の保護因子として知られる骨粗鬆症の抑制因子）、IP-10（インターフェロン γ 誘導性サイトカイン）、IL-4、ミエロペルオキシダーゼの値が 35% ~ 65%低下しました。この研究では、空気清浄によるリンパ球活性化、単球活性化、組織修復指標の改善も強調されています。

現在、多くの COPD 患者は呼吸器系の原因よりも心血管系の原因で死亡する可能性が高く、室内空気汚染の影響を受けやすいことが COPD における心血管系の健康の主要因であると考えられます。最近の研究では、室内空気清浄機が心臓損傷や心疾患の進行経路に関係するバイオマーカーの大幅な減少に関連していることが実証されています。CLEAN AIR の補助研究でも、6 か月間の空気清浄機介入により、心血管疾患の中間マーカーである心拍変動が改善することが実証されています。これらの中間マーカーの改善は、空気清浄機介入によって COPD と診断された人々が得られる可能性のある心肺機能への利点を例示しています。

これらには、COPD 患者を対象とした研究が含まれ、主に工学的介入を表しています

が、屋内発生源制御および行動介入として分類された研究はなく、空気清浄機介入におけるギャップとさらなる研究の必要性を示している可能性があります。

一般人口の呼吸器の健康

最近の研究では、一般集団における IAQ（室内空気質）介入の呼吸器系の健康マーカーへの影響も調査されています。これらの研究は、表 E1 に詳しくまとめられています。これらの最近の研究は、主に工学的制御が大気汚染物質への曝露を軽減し、心肺系の健康のバイオマーカーを改善する効果に焦点を当てています。一般集団で調査された工学的介入には、害虫管理の補足とともに、HEPA クリーナー、真のマイナスイオン空気清浄機、脱臭フィルターと集塵システムを備えた空気清浄機の使用が含まれていました。これらの介入は、室内空気汚染を減らし、全身バイオマーカーの濃度を改善するのに効果的であることがわかりましたが、肺機能に対する一貫した効果は示されませんでした。臨床エンドポイントには、既知の肺疾患のないこの一般集団の肺機能、急性呼吸器症状、およびバイオマーカーが含まれていましたが、将来の研究では、慢性肺疾患発症のリスク評価を含めることを検討する必要があります。さらに、一般の人々の間では、呼吸器の健康に焦点を当てた空気清浄機介入は、政策、屋内発生源制御、または行動介入にまで及んでおらず、IAQ を改善するためのより効果的な上流介入の必要性が浮き彫りになりました。

実行

介入の有効性、受け入れ、遵守

このレビューには、空気清浄機介入に関する 9 件の独自の研究が含まれていました（研究結果が複数公表されているものもいくつかあります）。すべての研究で、空気清浄機介入が何らかの汚染物質の濃度に及ぼす平均的な有効性が報告されていました。しかし、空気清浄機の清浄空気供給率、ろ過媒体（HEPA 以外）の詳細、または空気清浄機のその他の技術仕様について詳細を提供している研究はほとんどありませんでした。空気清浄機間の違いが、研究間のばらつきの原因である可能性があります。今後の研究では、空気清浄機のモデル、清浄空気供給率、およびガス相汚染物質を除去する空気清浄機の性能に関する情報が可能な限り提供される必要があります。さらに、参加者の受容性と取り入れを強調

するために介入の遵守を報告した研究はほとんどなく、遵守について統一された定義が使用されていませんでした。空気清浄機の導入に関する 3 件の介入研究では、高い時間分解能で空気清浄機の遵守を客観的に測定。最近の研究では、空気清浄機に対する参加者の受容は肯定的であったが、ほとんど報告されていない。空気清浄機介入に対するより高い遵守は、一般的に研究期間が短い間に観察されたが、遵守が維持された場合により高い有効性が達成された。これらの屋内環境介入に対する長期的な受容と遵守のギャップを判断するには、今後の研究が必要である。

空気清浄機の費用対効果

これらの介入の費用対効果を包括的に理解することが、大規模で効果的な実施と普及の鍵となる。Yang et al は、シミュレーションモデルを使用して中国の 6 つの都市で HEPA クリーナーの費用対効果を分析し、空気清浄機は教室と家庭の環境で PM 2.5 レベルを削減するのに費用対効果が高く効率的であることを発見した。同様に、カナダの研究では、山火事の煙への曝露を減らすために家庭用 HEPA フィルターの継続的な使用をシミュレートし、研究環境では合計 4,418 件の重度の悪化、643 件の救急室受診、および 425 件の入院を回避できると推定した。IAQ を改善するための世界規模の空気清浄機介入の費用対効果を評価するには、より大規模なサンプル サイズでさらに強力な研究が必要である。

環境正義と健康の公平性を達成するための取り組み

近年の研究努力は、肺の発達の重要な段階にある喘息のある学童から COPD のある高齢者まで、敏感な集団を対象とした IAQ (Indoor air quality) 介入に焦点が当てられてきました。ますます多くの証拠が、疎外され社会経済的に恵まれない集団は、これらの慢性呼吸器疾患の発症率が高いことと、呼吸器系の悪影響をもたらす屋内環境への曝露にさらされる機会が多いことを示唆しています。これらのサービスが行き届いていないコミュニティでは、劣悪な IAQ (Indoor air quality) と呼吸器系の健康格差の間には確立された関連性があります。これらの最近の研究は、貧困で疎外されたコミュニティにおける呼吸器系の健康格差は、換気が悪く、さらに高レベルの汚染を永続させる屋外の発生源に近い古い家や学校を含む構築環境によってさらに悪化していることをさらに強調しています。同時に、学校や家庭に HEPA 濾過システムを設置したり、クリーンな調理方法を採用

用したり（例：クリーンなエネルギー源やエネルギー効率の高い最新のストーブの使用）、換気システムをアップグレードするなど、屋内での曝露を軽減するシステムを容易に導入および維持するためのリソースが不足している家庭やコミュニティに多くの人が住んでいます。曝露によるリスクの増加は、個人の行動、栄養要因、および社会経済的地位の低いコミュニティでのリスクを増大させる合併症と結びついています。

IAQ の改善は、健康の公平性と環境正義を達成するための重要な要素であり続けています。屋内曝露を減らすための学校ベースの介入は、人生の重要な発達段階の早い段階で始まる環境正義プラットフォームの必要な部分です。特に、過小評価された人口からの生徒の割合が高い学校は、主要な産業汚染物質の発生源や道路の近くにある可能性が高くなります。こうした主要な発生源は、軽減されなければ、慢性的な呼吸器の健康に加えて、認知機能や学校の成績にも影響を与える可能性があります。

そのため、学校の IAQ を改善する取り組みがなければ、長期的な格差が永続する可能性があります。最近の研究では、学校区レベルでの換気システムの改善に向けた地域の取り組みが呼吸器の健康に有益であることが実証されていますが、この問題をより大規模に取り組むには、最終的には政策イニシアチブが必要になる可能性があります。

最近の研究では、IAQ を改善し格差を緩和するためにポータブル HEPA クリーナーの使用など、家庭内介入に重点が置かれています。空気清浄機は有用なツールですが、残念ながら、社会的に疎外された人々は、空気清浄機や大気汚染物質の排出量が少ない機器を購入、使用、維持するための知識やリソースが不足していることがよくあります。第三者支払者による補償と政府の払い戻しにより、空気清浄機のコストが削減され、アクセスが改善される可能性があります。

こうした多面的な健康格差への対処には複雑さが伴うため、IAQ を改善するための戦略は、IAQ を持続的に改善し、恵まれないコミュニティで公平に実施できる取り組みに注意しながら、慎重に検討する必要があります。生涯にわたる健康の公平性に対処する可能性のある集団レベルの介入に焦点を当てた推奨事項を表 II にまとめています。

結論と勧告

感受性の高い集団において、室内環境が呼吸器系の悪影響をもたらすという見解が広まりつつある。これらの最近の研究は、多少の矛盾はあるものの、喘息および COPD 患者の両方において IAQ（室内空気質）の改善に焦点を当てた介入の潜在的な利点を示唆し

ており、学校での成績に加えて、肺機能、呼吸器症状のコントロール、および QoL の改善が観察されている。このレビューでは、以前の研究およびこの更新されたレビューで検討された研究におけるさまざまな結果を認めつつ、IAQ（室内空気質）介入の全体的な利点を認識している。調査結果に基づき、このレビューで取り上げた最近の研究と以前の研究努力の両方に基づく推奨事項、および未知のものを評価し、現在発表されている文献を拡張するための将来の研究の方向性を表 II にまとめた。私たちは一般集団を対象とした推奨事項を提供しているが、既知の慢性呼吸器疾患を有する高リスク集団は、室内空気汚染を減らす活動から最大の利益を得る可能性があることを認識している（表 II）。さらに、図 2 に IAQ 改善に関するこれらの推奨事項の例を示す。

具体的には、政策および汚染源管理介入を通じて汚染源を排除および削減するための介入の提案階層において、大規模な集団規模の IAQ 介入をサポートする研究を優先することを推奨します。特に喘息や COPD の発生率が不釣り合いに高い集団に対しては、一貫性のある効果的な汚染源管理介入（喫煙禁止、クリーンな調理器具の導入努力など）を推奨します。学校で最近実施された、汚染源管理（害虫駆除など）と工学的介入（HEPA 濾過、換気の改善など）の両方を取り入れたマルチモーダルアプローチは、喘息の健康転帰の改善に有望であることが示されました。喘息や COPD の患者に対する家庭用空気清浄機の使用などの工学的介入は、多くの研究、特に追跡期間が長い研究において、室内汚染を効果的に削減し、転帰を改善しました。教育的介入と組み合わせた空気清浄機の有効性はまちまちでしたが、IAQ に対する認識が高まるにつれて健康転帰も改善しました。空気清浄介入に伴う呼吸器の健康改善は、集団、有効性、導入、および潜在的な利点の認識に依存していました。

このレビューに含まれる研究は、介入後数週間から数か月の短期的な追跡調査に限られており、健康状態の改善が観察可能になるにはどのくらいの期間の環境介入が必要なのか、また、これらの改善が持続するのか、または時間の経過とともに増加するのかは明らかではありません。注目すべきことに、室内空気清浄機介入の最大のメリットを示した研究は、追跡期間が短い研究と比較して、少なくとも 6 か月間実施されました。したがって、より長い期間と追跡期間の介入の有効性を評価する研究が必要です。さらに、最近の研究は地理的代表性に限界がありました。さまざまな都市人口に対する IAQ（室内空気質）介入の効果は調査されていますが、米国の農村地域で実施された研究は少ないです。米国の農村貧困地域は、独特の環境曝露と COPD の不均衡な負担に直面しており、IAQ（室内空気質）介入の重要なターゲットとなる可能性があります。これらの現在の制限に対処することに加えて、将来の研究では、介入の採用と長期的な遵守を改善するための取り組みにさらに焦点を当てる必要があります。当然のことながら、空気清浄機の介入から

最大の恩恵を受けているのは、継続的に空気清浄機を使っている人々です。空気清浄機のコストは依然として導入の大きな障壁であり、社会経済的地位の低いコミュニティに不釣り合いな影響を与え、導入を制限しています。したがって、空気清浄機のコストを補うか削減し、アクセスを改善する政策が必要です。IAQ（室内空気質）の認識を高めることも、効果的な介入の重要な要素です。将来的には、家庭や学校に設置された正確な汚染センサーが実用的な情報を提供する可能性があります。限られた数の汚染物質を測定する低コストのデバイスでも、不十分な換気を特定し、IAQの悪化につながる原因を特定し、IAQの認識を高めるのに役立ちます。

近年、屋外の大気汚染は改善し続けていますが、IAQ（室内空気質）を削減する戦略には、現在、さらなる注意と優先順位付けが必要です。近年、私たちは屋内環境の重要性を認識する上で大きな進歩を遂げ、脆弱なコミュニティのIAQ（室内空気質）を改善する介入策を採用し始めました。今後、屋内環境の緩和に焦点を当てた政策は、生涯にわたる呼吸器系の健康状態の改善の重要な部分になる可能性があります。