

紫外線（UV-C）による N95 マスク再使用に関するリスク管理についての技術レポート Technical Report for UV-C-Based N95 Reuse Risk Management¹

N95 マスク（訳注：N95 規格の使い捨てタイプの呼吸用保護具、N95 filtering facepiece respirator、N95 FFRs、本技術レポートでは主に「N95 FFRs」という。）の除染に関する文献の一部は、SARS-CoV-2 アウトブレイクによる N95 FFRs の不足を解消するため、ごく最近に行われたものである。このため、本書で引用する研究には、まだ査読を受けていないものがある。**本報告書では、明確にするために、査読を受けていない研究結果を引用する場合は、著者の名前の前に "*"を付した。**

レポート v2.0 の更新の概要：他の微生物に対する紫外線（以下、UV-C※）による不活化の有効性（付録 A）および除染における太陽光の有効性（付録 B）に関する文献レビューおよび考察を加えた。また、不適切な紫外線源（太陽光、日焼け用ランプ、偽造 UV-C 源、オゾン発生ランプ）に関する警告を追加した。校正済みで NIST トレサブルな UV-C 専用センサーを用いた UV-C 照度測定の必要性を強調した。査読文献は無査読文献から区別した（上記注を参照）。

※訳注：UV-C は「Ultraviolet C」の略語で、波長が 200～280 ナノメートルの紫外線のこと。太陽光線に含まれるがオゾン層があるため地表には到達しない。殺菌灯などに利用されている。短波長紫外線とも呼ばれる。

Executive Summary

紫外線殺菌照射（UVGI）は、ゲノム物質にダメージを与えることで病原体を不活化させる。UVGI は空気、水、表面の除染に広く応用されている。最近では、UVGI は N95 使い捨てタイプの呼吸用保護具（N95 FFR、「N95 マスク」とも呼ばれる）除染のための最も有望な方法の一つとして CDC（米国疾病対策センター）に認定されており、ネブラスカ大学医療センター（UNMC）などが UVGI を用いた除染のワークフローの導入に成功している。病原体の不活化は、紫外線（UV）波長（不活化効果は、260nm 付近の UV-C 光で最大化する）と UV-C 線量に大きく依存する。したがって、処置時間中に最低許容線量に達していることを検証するために、センサー（254 nm での感度と適切なダイナミックレンジを持つ放射照度計やセンサーstripp）を使用することが不可欠である。太陽光や日焼け用ランプなど、260nm よりもはるかに長い波長で放射する紫外線源は、殺菌効果がごく小さいか、または全くない。

文献からは、**FFR 表面で 1.0J/cm² 以上の照射量が得られるよう UV-C を照射すると、対象の N95 FFRs の面体の大部分で SARS-CoV-2 類似体が不活性化(3-log 以上の減少(1/1000 以下)の減少)されることがわかっている。**しかしながら、(i)内部の FFR 層や特定の FFR の型式では光透過率が異なるため、十分な線量を得られない可能性があること、(ii)FFR のしめひもには残留汚染のリスクがあるため二次除染が必要であること、(iii)影になる部分ができるので、全ての表面・層を完全に除染することは困難であること、(iv)他の病原体(特に細菌芽胞)を不活化するためにはより高い線量が必要であること、などのエビデンスも示されている。

¹Translated to Japanese from N95Decon Research Document. Not Peer Reviewed. Version 2.0, 4/23/2020.

https://static1.squarespace.com/static/5e8126f89327941b9453eeef/t/5ea25d6a6f10a37dfff207f0/1587699050864/2020-04-23_N95DECON_UV-C_Technical_Report_v2.0_final.pdf

UVGI プロトコルは、N95 FFR が著しく不足している場合にのみ実施すべきである。また、N95 FFR の再使用は FFR のフィット性に影響を与える可能性があることに留意し、各再使用毎に必ずユーザーシールチェックを行うべきであると強調する。また、FFR は SARS-CoV-2 以外の病原体で汚染されている可能性があり、これらの病原体のすべてが本報告書で提案するワークフローで 3-log 以上の減少(1/1000 以下に減少)の不活化が得られるとは限らないことも強調する。どのような除染アプローチでも、ユーザートレーニングや無菌処理、食品医薬品局（FDA）および米国労働安全衛生局（OSHA）のガイドラインに準拠した労働衛生ワークフローを伴うべきである。

1. 概要

我々の包括的な目標は、新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）に対する最前線であり、またコロナウイルス疾患 2019（COVID-19）への堅牢な対応を維持するために不可欠である医療従事者のために、N95 使い捨てタイプの呼吸用保護具（FFR）除染アプローチに関する統合情報へのアクセスを迅速化することである。本文書では、文献で議論されている紫外線殺菌照射（UVGI）を用いた N95 FFR 処置について総括する。効果的な除染には、SARS-CoV-2 ウイルスを不活化し、交差汚染のリスクを最小限に抑えながら、N95 FFR のフィット性とろ過効率の両方を維持することが必要である。

室内上部型 UVGI や空調機用 UVGI は、高性能フィルタリング（HEPA）の補助として、病院で空気中の病原体を不活化するために適用されてきた（[Schulster et al., 2004](#)）。**UVGI の有効性は、UV 波長**

（260nm 付近の UV-C 光でピークの有効性）と UV-C 照射量（J/cm²）に大きく依存する。照射量

（J/cm²）は、放射照度（W/cm²）と露光時間（s）の積である。UV-C 照度は UV-C 線源からの距離と角度に依存するため、UV-C センサ（254 nm での感度と適切なダイナミックレンジを持つ放射照度計またはセンサストリップ）を使用して各 FFR の位置で UV-C 照度を測定する必要がある。測定された照度は、1.0 J/cm² の限界許容線量を達成するために必要な照射時間を計算するために使用される。N95 FFR を通る UV-C の透過率が限られているため、FFR の両側を照射する必要があり、UV-C 線量に余裕が無いと、すべての FFR モデルを効果的に除染できない場合がある。

文献によると、254 nm のピーク波長の ≥ 1.0 J/cm² の UV-C 照射量は、実験対象の大部分の N95 の面体で SARS-CoV-2 類似体を不活性化（**3-log 以上の減少(1/1000 以下に減少)**）できる。ただし、しめひもは別の除染方法を必要とする。この UV-C 用量では、N95 FFR のフィット性およびろ過性能は、少なくとも 10 サイクルの間は変化しないと予想されている（*[Heimbuch & Harnish, 2019](#)）。着脱は、N95 の信頼性を大きく損ねる可能性がある。いくつかの N95 の型式（モデル）では、5 回の着脱サイクルの後にフィット性が OSHA 基準を下回る事が判明したが、他の型式では 15 回以上の着脱サイクルでフィット性を維持した（[Bergman et al., 2012](#)）。

他のエンベロープをもつプラス鎖一本鎖 RNA ウイルス((+)ssRNA ウイルス、訳者注:SARS、MERS、ヒトコロナウイルスもこのグループに含まれる)の結果から、この UV-C 照射量は SARS-CoV-2 を不活化する可能性が高いと考えられるが、SARS-CoV-2 について直接確認した査読文献は、2020 年 4 月 22 日現在ではまだ存在しない。UV-C は FFR 上の他の病原体（非エンベロープウイルス、植物性細菌および細菌孢子）を不活化することが確認されているが、多くの場合、3-log 以上の減少(1/1000 以下に減少)にはより高い UV-C 照射量が必要であったか、もしくは本試験で採用している照射量では除染が達成されなかった。UVGI 処理は汚染のリスクを大幅に軽減することが

期待されているが、医療従事者は汚染された場合と同様に呼吸用保護具（マスク）の取り扱いを継続し、再使用するのには自分の FFR のみにすべきである。どのような除染アプローチであっても、ユーザートレーニングと交差汚染のリスクを最小限に抑えるための滅菌（除染）処理を含む技術的根拠に基づく衛生的な作業手順を伴うべきである。

UVGI による除染のためのワークフローは、ネブラスカ大学医療センター（UNMC）で、サイクルあたり FFR90 個の処理量で成功しており（Lowe et al., 2020）、米国内のいくつかの他の医療センターでも同様の UV-C N95 除染システムの開発が進められている。

2. 連邦によるガイダンスの状況

この前例のない COVID-19 パンデミックでは、N95 FFR の供給が限られているため、米国疾病予防管理センター（CDC）は、医療従事者が N95 FFR の延長使用または限定的な再使用を実践できるようにガイダンスを提供している（CDC, 2020b）。さらに、CDC は病院に対し、危機時における N95 FFR の除染方法についてのガイダンスを提供している（CDC, 2020c）。

米国労働安全衛生局（OSHA）は、呼吸用保護具の使用時には化粧品やその他のバリア（訳者注：呼吸用保護具の面体と顔面の間メリヤスや布などをあてて利用すること、または髭のようなフィット性を低下させるようなバリアなど）になるようなものを介在させてはならないとしている（OSHA, n.d.）。緊急使用許可（EUAs）は、COVID-19 パンデミックの間における N95 FFR 除染のために FDA が承認したものであるが、これもまた、除染のために（除菌室などに）送られた呼吸用保護具（訳者注：N95 マスクをさすと思われる）に化粧品が付着していないことを承認の条件として規定している（Battelle, 2020）。

CDC は、除染後、適切な密着性を確保するために、N95 マスク着用の際に「ユーザーシールチェック」を行うことを推奨している（CDC, 2020c）。各除染サイクル毎のユーザーシールチェックは特に重要である。なぜなら、N95 マスクのフィット率は、繰り返す着脱により低下することが確認されているからである（Bergman et al., 2012）。

N95 FFR 除染緊急使用許可のための FDA ガイドラインによると、ウイルスの除染には、ウイルス活性の 3 -log 以上の減少（99.9%の減少に相当、1/1000 以下）が必要である（FDA, 2020）。このガイドラインに基づき、我々は、ウイルス活性の 3 -log 以上の減少（1/1000 以下に減少）をもたらす場合にのみ、プロセスを十分に「除染」または「不活性化」と記述する。**なお、本報告書における除染の定義は、特に指定がない限り、ウイルス活性のみを考慮し、抗酸菌活性や芽胞活性（FDA による他のガイドラインあり）については考慮していないことに留意されたい（FDA, 2020）。SARS-CoV-2 のための N95 FFR の除染プロセスは、必ずしも N95 FFR の滅菌（すべての微生物の死滅）をもたらすものではない。**

UVGI 処置は、危機的状況下での N95 呼吸用保護具の処置のための最も有望な方法の一つとして、米国疾病予防管理センター（CDC）により認識されている（CDC, 2020c）。この文書では、N95 FFR の UV-C 除染に関するエビデンスの要約を提供する。UV-C 除染の用途は多岐にわたる。CDC および医療感染管理諮問委員会（HICPAC）の勧告によると、UV-C（254 nm ピーク）を使用した UVGI は、空気中の病原体を減少させるために米国の医療施設で広く使用されている（Schulster et al., 2004）。一部の施設では、UVGI は表面の除染にも使用されている（Marra et al., 2018）。米国労働安全衛生研究所（NIOSH）と CDC は、病院内の空気中の結核菌を死滅させたり不活化させたりするために、室内上部型 UVGI を適用するためのガイドラインを提供してい

る (CDC, 2014)。

いかなる新規の除染方法も、実施前には、FDA の取扱許可を含む組織の内部プロセスで検証されるべきである。なお、詳細については、定期的に更新される最新 CDC ガイドライン、および N95DECON の法的免責事項 (N95DECON's Full Legal Disclaimer) を参照のこと。

3. UVGI の作用機序と N95 FFR への適切な照射量

UVGI は主に DNA および RNA を損傷することにより病原体を不活化する (260 nm で吸収量が最大となる) (Anderson et al., 2000; Ito & Ito, 1986; Jay, 1995; Kowalski, 2009)。除染は、適切な UV 波長 (UV-C, 260 nm 付近に高い効率を持つもの (EPA, 2006)) および線量 (N95 FFRs 上の SARS-CoV-2 類似体の不活性化では $\geq 1.0 \text{ J/cm}^2$) に大きく左右される。UV-C は、N95 FFR 層を通過する際に減衰し、したがって、内部フィルタリング媒体での UV-C 放射照度は、FFR モデルによっては、FFR 表面よりも約 3-400 倍低い値となる (Fisher & Shaffer, 2011)。最近の未査読プレプリント (*Syphers, 2020) は、UV-C の N95 FFR 透過が、Fisher & Shaffer による測定と同様レベルであったことを報告している。その結果、N95 FFR のウイルスの不活化に必要な N95 表面での UV-C 線量は、表面または空気中での同ウイルスの不活化に必要な線量よりも数百倍大きい (表 S1)。繊維表面上のインフルエンザウイルスを不活化するための米国材料試験協会 (ASTM) 規格の UVGI 法が選択されている。

また、影は対象物品が受ける線量を減少させるため、対象 N95 FFR の照射遮蔽を避けるために、(1) FFR の両側に当たる UV-C 照明を用いるか、N95 FFR を治療の途中で反転させることで、すべての表面が最小許容 UV-C 線量に曝露していることを確認すること、(2) 照射 UV-C 線量を増加させるために UV-C 反射材で壁、天井、および他の表面を覆うこと (Rutala et al., 2014)、(3) N95 FFR と UV-C 線源の間に、照射を遮ったり、N95 に到達する前に UV-C を減衰させる可能性のある障害物や何らかの物が無いことを確認することをすべきである。なおガラスは、殆ど全ての UV-C を遮断することに留意されたい (International Ultraviolet Association, n.d.)。

照射の遮蔽に加えて、使用者の皮膚から呼吸用保護マスクに付着した物質 (たとえば化粧品や日焼け止め) は、UV-C 光を遮断し、UV-C 除染の妨げになる可能性がある。したがって、このような皮膚に塗布する商品はマスク着用時には使用すべきでない。OSHA はまた、呼吸用保護具使用時には化粧品やその他のバリアになるようなものを介在させてはならないとしている (OSHA, n.d.)。再使用のための N95 FFR 処置でもアドバイスされているように、UV-C は完全な除染ではなく、特別な状況下でのリスク軽減策と見なされている。医療従事者の N95 再利用の際、処置済みの N95 FFR はリスク軽減されているとはいえ、まだ汚染されているものとして取り扱うよう留意されたい。

4. SARS-CoV-2 不活化の可能性

いくつかの研究で、N95 FFR 上のインフルエンザおよびコロナウイルスの UV-C 不活化が実証されている。インフルエンザおよびコロナウイルスは、エンベロープを持つ一本鎖 RNA ウイルスであるため、SARS-CoV-2 類似ウイルスとして用いるのに適していると仮定できる。委託研究機関 ARA による FDA への未査読論文 (*Heimbuch & Harnish, 2019) は、 1.0 J/cm^2 の UV-C 処理をある N95 FFR モデルのフィルター部分の試験片の表面上に行い、6 種のインフルエンザウイルス、MERS-CoV ならびに SARS-CoV を含むコロナウイルス が検出以下まで減少 (3.95-log

以上の減少、約 1/8,900 以下に減少）したことを明らかにした。ウイルス塗布したものを人工汚染剤（皮脂または唾液）で覆った場合でも、UV-C 処理後の N95 片上のウイルスは検出できなかった。H5N1 および H1N1 に対しても同様の UVGI 照射量が、別の査読研究（[Heimbuch et al., 2011](#); [Lore et al., 2012](#)）で有効であった（**表 1**）。0.5 J/cm² の UV-C 照射量では、N95 FFR 片上に残存する感染性ウイルスは、UV-C に曝露されていない片上よりも 2~3 桁低かった(1/100~1/1,000)。しかし、検出可能であったことから、0.5 J/cm² の UV-C 用量では除染が不十分である可能性があることが示唆された(*[Heimbuch & Harnish, 2019](#))。

2020 年 4 月 22 日現在、N95 FFR における SARS-CoV-2 の UV-C 不活化は査読研究では証明されていない。最近の 2 つの未査読プレプリント原稿は、いくつかの N95 FFR モデルにおいて SARS-CoV-2 の不活化を報告しているが、いずれの原稿も UV-C に感度を持つ検出器を用いて UV-C 照度を測定していないため、適用された UV-C 照射量は明確に特定できない (*[Fischer et al., 2020](#); *[Smith et al., 2020](#))。まだ査読を受けていない研究からの結果は、特に注意して解釈すべきである。

N95 FFR の型式（モデル）間の差異を考慮して、[Heimbuch & Harnish](#) は 15 の異なるモデルにわたって UV-C によるウイルス不活化の有効性を研究した。試験した 15 モデルのうち 11 モデルでは、N95 表面での UV-C 投与量 1.0 J/cm² が H1N1 インフルエンザの不活化に有効であった（3-log 以上の減少(1/1000 以下に減少)）。同研究では、しめひもにも UVGI 処理が効果的だったのは 15 モデル中 4 モデルのみであった。これは、しめひもの二次除染が必要な場合があることを示している。親水性のフェイスピースを備えた N95 FFR モデルは、疎水性モデルよりも UV-C での除染効果が低かった(*[Heimbuch & Harnish, 2019](#))。同様に、関連する査読文献では、試験を行った 15 モデル中 12 モデルのフェイスピース上および試験した 15 モデル中 7 モデルの弾性しめひも上で、生存する H1N1 の 3-log 以上の低下減少（1/1000 以下に減少）が観測された（[Mills et al., 2018](#)）。

N95 FFR モデルに加えて、他の要因も UV-C 不活化効果に影響を与える可能性がある。総じて一般的な表面（[Tseng & Li, 2007](#)）、および N95 FFR の表面（[Woo et al., 2012](#)）では、高湿度が UV-C 不活化効果を低下させる。これは、N95 FFR 処理前の乾燥ステップが有効であることが示唆している。[Heimbuch & Harnish](#) とは対照的に、汚染剤は、N95 FFR の MS2 バクテリオファージ（[Woo et al., 2012](#)）およびガラスおよびプラスチック表面の *C. difficile* 胞子（[Wallace et al., 2019](#)）の両方の UV-C 不活化効果を減少させることが知られている。UV-C 除染に対する汚染剤の影響は、汚染剤の正確な濃度・組成に加え、汚染剤の適用方法（例えば、病原体と混合する、接種した病原体の上に付ける）に依存する可能性がある。病原体の透過様式もまた、UV-C 除染の有効性に影響を与える可能性がある。より大きな MS2 液滴（9-10µm）を接種した N95 FFR は、より小さな MS2 エアロゾル（1-2µm）を接種した FFR と比較して、一般的に UV-C 除染効率が低かった（[Woo et al., 2012](#)）。N95 FFR に病原体を適用するために様々な方法（エアロゾル、飛沫、ピペッティング液）を用いた研究が行われていることを鑑みるに、病原体の適用方法が UV-C 除染効率に影響を与えるかどうかという問題は、更なる研究に値するものである。

N95 FFR 表面での 1.0 J/cm² の UV-C 照射量は、多くのモデルでコロナウイルス類似体を不活化するが、非エンベロープウイルス、細菌および細菌胞子、および真菌などの他のクラスの病原体を不活化するためには、より高い線量が必要とされる可能性がある。医療関連感染症の予防に対する UVGI の影響を調査したメタアナリシスでは、病原体の種類によって異なる結果が示された（[Marra et al., 2018](#)）。他の病原体で実施された UV-C 不活化研究

の概要については、**付録 A** および**表 S1** を参照のこと。

5. N95 使い捨てタイプの呼吸用保護具（N95 FFR）の信頼性

全体的に、N95 FFR 上の SARS-CoV-2 類似体の不活化に必要な UV-C 照射量では、10~20 の処理サイクルを繰り返しても N95 のフィット性およびろ過性能に対して、悪影響を殆ど与えないことがわかっている。しかしながら、着脱プロセスにより、それよりも短いサイクル数で FFR フィットが許容できないレベルに達する可能性がある。ある研究では、何も除染処理を行わなくても、着脱を行う度に N95 の FFR 適合度が低下することがわかった。ある N95 モデルでは、5 回の着脱サイクルでフィット性が OSHA 基準を下回ったが、他のモデルは 15 回以上の着脱サイクルでもフィット性が維持された (Bergman et al., 2012)。

コントロールされた実験室での研究では、**15 の呼吸用保護マスクモデルで 10-20 回の着脱サイクルと UVGI 処理**（1 サイクルあたり 1.0-1.2 J/cm²）を行った。次に、しめひもの弾性（イマダフォーステスターを使用）、粒子通過性および呼吸抵抗（CDC (CDC, 1997) 準拠のマスク機能を評価するための TSI 8130 自動フィルターテスター）、およびフィットファクター（Static Advanced Headform StAH（訳者注：人頭モデルのこと）を TSI Portacount 8038 自動呼吸器に接続し、240 秒間の呼吸テストにより、フィットファクター 100 以上（訳者注：1%以下の漏れ率であること）であることを試験）を評価した (*Heimbuch & Harnish, 2019)。いくつかのモデルにおけるフィットファクターに統計的に有意な差は着脱によるものであったが、UV-C 曝露に由来するよる非常に僅かな悪影響が、マスクのフィット性、空気流抵抗、粒子通過が、UV-C のこの照射量（10 サイクル、1 サイクルあたり 1.0~1.2 J/cm²）において観察された (*Heimbuch & Harnish, 2019)。低照射量での他の評価は、UVGI 処理後の良好な FFR 性能を裏付けた(Viscusi et al., 2009)。10²-10³ 倍ほど高い UVGI 線量（120-950 J/cm²）では、マスクの材料の破断強度に対するかなりの効果（いくつかのケースでは 90%以上であるが、N95 FFR モデル間で大きく変動する）が観察された (Lindsley et al., 2015)。異なる N95FFR モデルで、UVGI への反応にはばらつきがあることが予想されるので、除染した呼吸用保護マスクは、フィットの信頼性が維持されているかを確認するために CDC が推奨する「ユーザーシールチェック」に合格しなければならない(CDC, 2018)

6. データの要約表

表 1. UV-C のエンベロープウイルスに与える影響

Author 著者	Organism, soiling agent, & method of application 病原体、汚染物質、適用方法	Material マスク等の 種類	UV-C dose UV-C 照射量	Efficacy 有効性
Influenza & coronavirus strains: ssRNA enveloped virus インフルエンザ & コロナウイルス：エンベロープ(+ssRNA ウイルス)				
A	H5N1 droplets (~5 μm) H5N1 飛沫 (~5 μm)	N95 FFR (3M 1860, 3M 1870)	1.8 J/cm ²	> 4-log reduction 4 桁より大きな減少 (99.99%)

B	<p>H1N1, pipetted on as 1 μL drops. Artificial saliva or artificial skin oil were placed on top of dried virus solution to study the effects of soiling.</p> <p>H1N1、1μL 滴としてピペッティング 乾燥したウイルス溶液の上に人工唾液または人工皮脂を置き、汚れの影響を研究した</p>	N95 FFR (15 models)	1.0 J/cm ²	<p>\geq 3-log reduction for 12/15 FFR models and 7/15 FFR straps for all soiling conditions</p> <p>全ての汚染条件で 12/15 の FFR モデルと 7/15 の FFR しめひもで 3 桁以上の減少</p>
C	<p>Influenza strains (H1N1, H5N1, H7N9), MERS-CoV, SARS-CoV, all pipetted as 1 μL drops and dried. Artificial saliva or artificial skin oil were placed on top of dried virus solution to study the effects of soiling.</p> <p>すべてを 1μL の滴下液としてピペッティングし、乾燥。 乾燥したウイルス溶液の上に人工唾液または人工皮脂を置き、汚れの影響を研究した。</p>	N95 FFR (3M 1870)	1.0 J/cm ²	<p>No detectable virus (\geq 3.95-log reduction) for all organisms for all soiling conditions</p> <p>全ての汚染条件で、すべての病原体について検出値以下（1/8,900 以上の減少）</p>
C	<p>H1N1, pipetted as 1 μL drops and dried. Artificial saliva or artificial skin oil were placed on top of dried virus solution to study the effects of soiling.</p> <p>H1N1 を 1μL 滴としてピペッティングし、乾燥。 乾燥したウイルス溶液の上に人工唾液または人工皮脂を置き、汚れの影響を検討。</p>	N95 FFR (15 models)	1.0 J/cm ²	<p>\geq 3-log reduction for 11/15 FFR models and 4/15 FFR straps for all soiling conditions</p> <p>全ての汚染条件で 11/15 FFR モデルと 4/15 FFR しめひもで、3 桁の減少</p>
D	<p>Murine hepatitis virus (coronavirus) マウス肝炎ウイルス（コロナウイルス</p>	Air	1.83 \times 10 ⁻³ J/cm ²	<p>3-log reduction*</p> <p>*estimated based on measured viral susceptibility to UV-C in air</p> <p>3 桁の減少*</p> <p>*空気中の UV-C に対するウイルス感受性の測定値に基づいて推定</p>

A: (Lore et al., 2012), B: (Mills et al., 2018), C: (*Heimbuch & Harnish, 2019), D: (Walker & Ko, 2007)

表 2. UV-C の N95 FFR に与える影響

Author 著者	FFR Model FFR モデル	UVGI dose (J/cm ²) UVGI 照 射量 (J/cm ²)	Particle Penetration 粒子通過	Breathing Resistance (mmH ₂ O) (max = 25) 呼吸抵抗	Respirator Material Damage (out of 13 layers) マスク材質ダメージ	Strap Damage しめひもダメージ
E	N95 FFRs (15 models)	1.0-1.2	0.18-3.29% (10 cycles) 0.12- 2.74% (20 cycles)	4.53-14.93	No obvious effect from UV-C. Some fit degradation from donning/doffing UV-C による影響なし。 着脱による若干のフィット 感の低下	No significant difference from UV-C alone. Some fit degradation from donning/doffing. UV-C 単独による差異なし。 着脱による若干のフィット感の 低下。
F	3M 1860	120-950	1-2.5%	10-13	General decrease of strength	Statistically significant decrease in breaking strength for dosage ≥590 J/cm ² (≥10% decrease of mean strength) 照射量 ≥590 J/cm ² におい て破壊強度の統計的に有意 な減少(平均強度の 10%以 上の低下)
	3M 9210	120- 950	1-2.5%	10-13	120 J/cm ² dose = 2 layers significantly impacted	
	GE1730	120- 950	3-5%	10	950 J/cm ² = 10 layers significantly impacted	
	KC46727	120- 950	3-5%	15-20	全般的な強度の低下 120 J/cm ² の線量 = 2 層で有意な影響あり 950 J/cm ² = 10 層で 有意な影響あり	

E: (*Heimbuch & Harnish, 2019), F: (Lindsley et al., 2015)

7. 戦略

ネブラスカ大学医療センター(UNMC)が公開した (N95 FFR の取扱いと処置に関する)手順書は、2020 年の SARS-CoV-2 パンデミックの間に広く採用され、**初版から更新して、N95 FFR への UV-C の最小必要照射量として限界許容 UV-C 照射量として 0.6-1.0 J/cm² を示した(Lowe et al., 2020)**。この UNMC プロセスフローは、役割 (医療従事者、配達業者、UVGI 技術者) によって定義された 51 段階のプロセスであり、安全な取り扱い (採用、輸送、処理、返却)、ラベリング (N95 FFR は医療従事者用)、プロトコルに必要な補助 PPE と衛生管理を網羅している。他の除染戦略と同様に、ユーザートレーニング (Beam & Hayes, 2020)、無菌処理、およびその他の重要な考慮事項を含む適切な産業衛生ワークフローを実施し、二次汚染や N95 の損傷を回避しなければならない。

適切な波長を持つ UV-C 照射源を使用しなければならない。照射源は、UV-C 処理時間内に 1.0 J/cm² の線量を得るために十分な UV-C 照射を供給できなければならない。公表されている UNMC の手順では、市販の室内スケール UVGI システムで、複数の低圧水銀低オゾン UV-C ランプを備えたものを使用している。クリーブランド・クリニックは、他の供給源がない場合の方法として、UVGI 処置を提供するために UV-C 電球を装備したアイドル状態のバイオセーフティキャビネットの使用を提案している(*Card et al., 2020)。しかし、典型的なバイオセーフティキャビネットからの UV-C 照射出力は低いため、ウイルス不活化のための限界許容線量に到達するためには、長い曝露時間が必要となる。

(1) UV-C による除染効果（例：ウイルス不活化）、(2) N95 FFR の再利用適性（例：ろ過機能、フィットファクター）の検証は、査読文献で広く検討されており、すべての新規プロセスにおいても検討されるべきである。**UV-C 照射量の設計は、各 N95 FFR の全表面に対して 1.0 J/cm² 以上の値を満たし、理想的には UVGI サイクルごとに検証を行うべきであるが、最低でも定期的に（例えば、毎日、設定されたサイクル数の後に）検証を行うべきである。**検証においては、各 FFR 位置での UV-C 放射照度または線量を測定するために、NIST トレーサブルで校正済みの UV-C 専用のセンサを用いて実施されるべきである。照射量のばらつきは曝露領域全体で測定される可能性が高く、全曝露時間は、すべての N95 FFR が少なくとも 1.0 J/cm² の許容範囲内の線量に曝露されるように選択されるべきである。

すべての紫外線源が必要な UV-C 波長範囲、放射照度、または放射照度の均一性を提供しているわけではないことに注意が必要である。特に、太陽光（付録 B を参照）や消費者製品（日焼け用ランプやマニキュアキュアランプなど）は、N95 FFR を除染するのに十分な UV-C 放射照度を発生しない（CDC, 2020a; O'Sullivan & Tait, 2014）。さらに厄介なのは、殺菌効果があると偽って主張する UV 光源で、その波長範囲が殺菌効果と一致していないものが報告されている。さらに、210nm 以下の波長を発生する UV-C 光源は、オゾンが発生させる可能性があり（Kowalski, 2009）、これは人の健康に有害である。その結果、UV-C 線源が UV-C 殺菌効果の範囲内で放射されることを確実にするためには、UV-C 線源の波長および放射照度を UV-C 用のセンサーで測定することが重要である（ピーク効果は 260 nm 付近で、300 nm では 254 nm と比較してウイルスの不活化効果が約 1/10 に低下する（EPA, 2006; Lytle & Sagripanti, 2005）。測定された UV-C の照度は、すべての N95 FFR 表面全体で最低でも 1.0 J/cm² の UV-C 線量に到達するための所用時間を計算するのに使用する。

8. 主なリスクと不明点

N95 FFR の UVGI 除染による主なリスクと不明な点は以下の通りであると考えられる。

1. UV-C 光への直接曝露は人体に有害である。UV-C システムを使用するにあたっては、UV-C 源の点灯前に、すべてのユーザーが UV-C 源から確実に保護されるよう、適切な工学的管理を確立する必要がある。
2. 175-210 nm の紫外線波長は、人間の健康に有害なオゾンを生じうる。いくつかの低圧 UV ランプとほとんどの中圧 UV ランプは、185nm の UV を放出するため、オゾンが発生させる（Kowalski, 2009）。オゾンの発生が最小限または全くない UV-C 光源を選択し、オゾンのリスクを最小化するために十分な換気を確保する必要がある。
3. UV-C は、必要な UV-C 線量にさらされたウイルスのみを不活化する。N95 FFR 材料への UV-C の透過に

ついて未解決の疑問が残っており、透過量はおそらく N95 FFR モデルによって大きく異なる(Fisher & Shaffer, 2011)。ARA 報告書(*Heimbuch & Harnish, 2019)および関連する査読文献(Mills et al., 2018)は 3-log 以上(1/1000 以下)のウイルス減少(N95 FFR 材料からの液体抽出から測定された)を実証しているが、生きたウイルスが N95 FFR の内部に残留する可能性がある。このように、UV-C および他の不活性化アプローチは、完全な除染ではなく、非常時の状況下でのリスク軽減と見なすべきである。

4. UV-C 源は（他の光源がそうであるように）影を発生させる可能性があり、N95FFR は、FFR 表面での影の発生を避けるか、または軽減するような形状に設計されるべきである。例えば、UV 反射性材料を使用したり、N95FFR を回転させたり、ひっくり返したりして、適切な線量が確実に FFR の全表面にわたって適用されるようにする（そしてこの照射量は UV-C 用センサを用いて検証されるべきである）。
5. いくつかの報告で、UV-C 照射後の N95 FFR しめひも上の残留ウイルスが実証されており（おそらく、N95 FFR アタッチメントしめひもがねじれて UV-C 光から遮蔽されるため）、しめひもの追加除染の必要性を示唆している（*Heimbuch & Harnish, 2019; Mills et al., 2018）。Mills らは、適合した消毒剤で N95 FFR しめひもを拭くことを勧めている(Mills et al., 2018)。この追加のステップを行う場合、普通の消毒剤の化学物質が N95 FFR の機能を劣化させる可能性があるため、N95 FFR フェイスピースに触れないように細心の注意を払うべきである(Price & Chu, 2020)。
6. UV-C1.0J/cm² 以上の照射は、SARS-CoV-2 類似ウイルス活性の 3-log 以上の減少(1/1000 以下に減少)をもたらすが、その所見は、N95 FFR の完全な除染を示唆するものではない。N95 は、UV-C 照射からの影響をうけにくい他の病原体で汚染されている可能性がある。

9. 結論

UVGI プロトコルは、N95 FFR の深刻な不足があり、それ以外に方法がないことが承認された場合にのみ実施されるべきである。実施が適切に行われ、**FFR に到達する UV-C 線量を検証する場合**、類似ウイルスでの結果に基づけば、UVGI は N95 の影になっていない外層上の SARS-CoV-2 を不活化する可能性が高い。ただし、2020 年 4 月 22 日の時点では、SARS-CoV-2 について直接確かめた査読付き論文はない。UVGI は、N95 呼吸用保護具の材料上のウイルスや細菌芽胞を不活化するために効果的な方法として期待されているが、UVGI は光が届かない病原体を不活化することはできない。そのため、UVGI は FFR の内層を効果的に除染できない可能性があり、FFR のしめひもには追加補助的な除染方法が必要となる可能性がある。また、UVGI 処理ですべての病原体が有効に不活化されとは限らないため、使用者間の交差汚染を避けるためにも、N95 FFR は元の使用者に戻して使用するべきである。特定の N95 FFR モデルに依存する除染効果が報告されている。以下の点を改めて強調する：(i)各除染毎に必ずユーザーシールチェックを行うこと、(ii)外したり着けたりの繰り返しは FFR のフィット感に影響を与える可能性があること、(iii)UVGI では活性が低下しない他の病原体が FFR を汚染している可能性があるため、完全な除染であるとは考えないこと。**したがって、UVGI 処理は完全な除染ではなく、リスク管理と考えるべきである。医療従事者は、汚染されているものとして呼吸用保護具を扱い続け、自分の N95 FFR のみを再利用すべきである。**

N95DECON が提供するコンテンツは、情報提供のみを目的としたものであり、医学的なアドバイスを提供するものではなく、また個別の専門家による医学的判断、アドバイス、診断、治療の代わりになるものではありません。N95DECON が提供するコンテンツの使用または信頼は、個人の責任において行ってください。N95DECON の免責事項の詳細は以下をご覧ください。

<https://www.n95decon.org/disclaimer>

付録 A: UV-C の他の病原体に対する効果

空気中、水中、および表面上におけるさまざまな病原体の UV-C 感受性

空気中、水中、および表面上の病原体を不活化するために必要な UV-C 線量は、病原体によって異なる。なぜなら、核酸構造およびヌクレオチド含有量、ならびに紫外線吸収タンパク質およびその他の光保護成分の量が病原体ごとに違うからである。細菌芽胞や真菌胞子を不活化するためには、ウイルスや植物性細菌と比較して、一般により高い UV-C 照射量が必要である (Kowalski, 2009)。ウイルスの中でも、二本鎖 RNA または DNA を持つウイルスを不活化するためには、一本鎖のウイルスと比較して、約 3 倍高い UV-C 照射量が必要とされる。高い照射量が必要なのは、鎖の片方がダメージをうけても、2 番目の鎖をテンプレートとして修復できるためである (Tseng & Li, 2007)。エンベロープウイルスは一般的に機械的および化学的薬剤による不活化に対してより感受性が高い（より容易に不活化される）が (世界保健機関(WHO), 2004)、エンベロープウイルスと非エンベロープウイルスの UV-C 感受性が異なるかどうかは不明である。Blazquez らは、水中においては、エンベロープウイルスは、非エンベロープウイルスよりも低い UV-C 線量で不活化されることを発見した (Blázquez et al., 2019) ; しかしながら、観察された違いのメカニズムが何であるか、また、同様の傾向が空気中のウイルスや他の物質上のウイルスにもあるかどうかは不明である。

N95 FFR および繊維製品の異なる病原体の UV-C 感受性

UV-C 照射により、N95 FFR から複数の病原体を 3-log 以上の減少(1/1000 以下に減少)させることが示されている。ただし、N95 FFR を除染する場合には、FFR 材料の各層の UV-C 透過率が低い場合、より高い UV-C 照射量が必要である(Fisher & Shaffer, 2011)。N95 FFR 内層からエンベロープ型および非エンベロープ型ウイルスを不活化するために必要な UV-C 線量は、表面上において同ウイルスを不活化するために必要な線量の数百倍である (表 S1)。非エンベロープ型ウイルスである MS2 は、エンベロープ型インフルエンザおよびコロナウイルス (*Heimbuch & Harnish, 2019; Mills et al., 2018) と比較して、一般に、N95 FFR から 3-log 以上の減少 (1/1000 以下に減少)を達成するために、より高い UV-C 用量を必要とすることが報告されている (Fisher & Shaffer, 2011; Vo et al., 2009) ; しかしながら、試験デザインにおける他の違い (FFR モデルおよび FFR へのウイルス適用方法など) が、必要な UV-C 用量の違いに寄与しているかどうかは不明である。

UV-C は、N95 FFR および他の繊維製品において植物性細菌および細菌芽胞のいくつかの種を不活化することが実証されている(Bentley et al., 2016; Fu et al., 2020; Kenar et al., 2007; Lin et al., 2018; Smolle et al., 2018; Tomas et al., 2015)。しかし、3-log 以上の減少 (1/1000 以下に減少)が必ずしも実証されておらず、かつ N95 上のコロナウイルスを不活化できる 1.0 J/cm² の UV-C 線量でどれだけ多くの細菌病

原体が不活化されるかは不明である。例えば、N95 FFR 上の *C. difficile* の UV-C 不活化は研究されていない。しかし、表面上の MS2 ($\sim 0.006 \sim 0.010$ J/cm²; (Tseng & Li, 2007)) と比較して、表面上の *C. difficile* 芽胞を不活化するためには、はるかに高い UV-C 用量が必要である ($\sim 0.17 - 0.63$ J/cm²; (Wallace et al., 2019))。同じ傾向 (表面上の MS2 と比較して、表面上の *C. difficile* の胞子を不活化するのに必要な UV-C 線量は高い) が、これらの病原体が N95 FFR 上に存在する場合にも当てはまるかどうかは不明である。さらに、ポリコットン生地中の *E. faecium* は、洗濯 (3-4 桁減少) ((Tano & Melhus, 2014) と比較すると、UV-C での不活化の程度は低い (1/93 未満の減少) (Smolle et al., 2018))。

表 S1. UV-C の微生物等 (ウイルス含む) に与える影響

Author 著者	Organism, soiling agent, & method of application 病原体, 汚染物質, 適用方法	Material マスク等物品	UV-C dose UV-C 照射量	Efficacy 有効性
Influenza & coronavirus strains: ssRNA enveloped virus インフルエンザ&コロナウイルス :エンベロープ(+) ss RNA ウイルス				
(Lore et al., 2012)	H5N1 droplets H5N1 飛沫	N95 FFR (3M 1860, 3M 1870)	1.8 J/cm ²	> 4-log reduction 4 桁より大きな減少
(Mills et al., 2018)	H1N1. 1 μ L drops of suspension pipetted on. Artificial saliva or artificial skin oil were placed on top of dried virus solution to study the effects of soiling. H1N1 1 μ L の懸濁液ピペッティング 人工唾液または人工皮脂を乾燥ウイルス溶液の上に置き、汚染による影響を研究	N95 FFR (15 models)	1.0 J/cm ²	≥ 3 -log reduction for 12/15 FFR models and 7/15 FFR straps for all soiling conditions 全ての汚染条件で 12/15 の FFR モデルと 7/15 の FFR しめひもで 3 桁以上の減少
(*Heimbuch & Harnish, 2019) - Option Task B	Influenza strains (H1N1, H5N1, H7N9), MERS-CoV, SARS-CoV, all pipetted as 1 μ L drops and dried. Artificial saliva or artificial skin oil were placed on top of dried virus solution to study the effects of soiling. すべてを 1 μ L の滴下液としてピペッティングし、乾燥 乾燥したウイルス溶液の上に人工唾液または人工皮脂を置き、汚れの影響を研究	N95 FFR (3M 1870)	1.0 J/cm ²	No detectable virus (≥ 3.95 -log reduction) for all organisms for all soiling conditions 全て汚染条件で、すべての病原体について検出値以下 (1/8,900 以上の減少)
(*Heimbuch & Harnish, 2019) - Base Task 4	H1N1, pipetted as 1 μ L drops and dried. Artificial saliva or artificial skin oil were placed on top of dried virus solution to study the effects of soiling. すべてを 1 μ L の滴下液としてピペッティ	N95 FFR (15 models)	1.0 J/cm ²	≥ 3 -log reduction for 11/15 FFR models and 4/15 FFR straps for all soiling conditions 全ての汚染条件で 11/15 FFR モデルと 4/15 FFR しめひもで、3 桁の減少

	ングし、乾燥 乾燥したウイルス溶液の上に人工唾液 または人工皮脂を置き、汚れの影響を 研究			
(Walker & Ko, 2007)	Murine hepatitis virus (coronavirus) マウス肝炎ウイルス(コロナウイルス)	Air	$1.83 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$	3-log reduction* *estimated based measured viral susceptibility to UV-C in air 3桁の減少* *空気中の UV-C に対するウイ ルス感受性の測定値に基づい て推定
MS2: ssRNA nonenveloped virus MS2: 非エンベロープ ssRNA ウィルス				
(Vo et al., 2009)	MS2 droplets MS2 飛沫	N95 FFR (Willson N1105)	4.32 J/cm ²	3-log reduction 3桁減少
(Fisher & Shaffer, 2011)	MS2 aerosol MS2 エアロゾル	N95 FFR (6 models)	0.32-40 J/cm ² (equates to 0.1 J/cm ² at the internal filtering medium)	≥ 2.9-log reduction 1/790 以上の減少
(Woo et al., 2012)	MS2 droplets (9-10 μm) and aerosol (1-2 μm), in water, beef extract (BE), or artificial saliva (AS) MS2 飛沫 (9-10 μm) とエアロゾル (1- 2 μm) 水中, 牛肉抽出物 (BE), 人工唾液 (AS)	N95 FFR (3M 1870)	3.6 J/cm ²	Droplets: 4.8-, 2.7-, 2.5-log reduction in water, BE, AS 飛沫: 約 1/63,000 (水中), 約 1/500 (BE), 約 1/320 (AS) に減 少 Aerosols: 5.2-, 3.0-, 2.7-log reduction in water, BE, AS エアロゾル: 約 1/168,000 (水 中), 1/1,000 (BE), 約 1/500 (AS) に減少
(Tseng & Li, 2007)	MS2	Surfaces	~0.006-0.010 J/cm ²	> 3-log reduction 3桁の減少
Vegetative bacteria & bacterial spores 植物性バクテリア & 細菌芽胞				
(Lin et al., 2018)	<i>Bacillus subtilis</i> spores, aerosolized エアロゾル化した枯草菌芽胞	N95 FFR (3M 8210)	2.27 J/cm ² , 5.7 J/cm ²	2.27 J/cm ² → ~2.7-log reduction 5.7 J/cm ² → No detectable spores 2.27 J/cm ² → 1/500 に減少 5.7 J/cm ² → 芽胞の検出なし

(Bentley et al., 2016)	<i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>S. aureus</i> (drug-sensitive and drug-resistant), <i>S. pseudointermedius</i> (drug-sensitive and drug-resistant). 1-2 mL suspension pipetted on. 大腸菌、緑膿菌、黄色ブドウ球菌(薬剤感受性、薬剤耐性)、犬の常在性ブドウ球菌(薬剤感受性、薬剤耐性) 1-2 mL の懸濁液をピペティング	Microfiber, polyester, and cotton fabric swatches	0.27 J/cm ²	>2.5-log reduction for all bacteria on all fabrics. No detectable bacteria in 20/24 conditions. 布地の全バクテリアに対して 1/316 を超える減少 20/24 のでは検出可能なバクテリアなし
(Wallace et al., 2019)	<i>C. difficile</i> spores (with and without tri-part soiling agent) MRSA and MS2 (with and without 5% FBS) クロストリディオイデス・ディフィシル芽胞(3種類の汚染剤あり 3種類の汚染剤なし) MRSA と MS2(5%FBS あり、5%FBS なし)	Glass & plastic	0.17-0.63 J/cm ²	<i>C. diff</i> : mean 2.1-log reduction with soiling agent across all UV-C doses; mean 3.2-log reduction without soiling agent across upper 3 doses. MRSA: mean 2.9-log reduction with FBS, mean 3.4-log reduction without FBS MS2: mean 3.7-log reduction with FBS, mean 2.9-log reduction without FBS クロストリディオイデス・ディフィシル芽胞: 全 UV-C の照射量汚染剤ありで、平均 2.1 対数(約 1/125)の減少; 汚染剤なしで平均平均 3.2 対数(約 1/1600)の減少 MRSA: FBS ありで平均 1/800 の減少、FBS なしで平均 3.4 対数の減少 MS2: FBS ありで平均 1/5000 の減少、FBS なしで平均 1/800 の減少
Vegetative fungi 不完全菌				
(Fu et al., 2020)	5 <i>Candida</i> strains 5種類のカンジダ菌種	Bed sheets	0.075 J/cm ²	>3-log reduction in all strains 全ての菌種で 3 桁より大きな減少

付録 B: 太陽光は N95FFR の有効な除染アプローチではない

2020 年 4 月 22 日現在、CDC は N95 FFR の適切な除染方法として太陽光を挙げていない (CDC, 2020c)。ピーク波長 254nm、線量 ≥ 1.0 J/cm² の UV-C 放射は、N95 FFR のウイルス粒子を不活化させることがわかっている (*Heimbuch & Harnish, 2019)。しかし、太陽光からの UV-C 放射は大気の上層で吸収されるため、地表に到達する UV-C 放射はごくわずかである (CDC, 2019)。地表の太陽光は、UV-A 放射 (320-400nm) と UV-B 放射 (280-320nm) で構成されている。UV-A 放射は非殺菌性と考えられている。一方 UV-B 放射は、UV-C 放射よりもはるかに弱いとはいえ、殺菌効果を持つ (Kowalski, 2009)。米国の都市で UV-B 線による殺菌効果を得るために必要な日照時間を理論的に計算すると (UV-C 線量 1.0 J/cm² に相当)、季節や地理的な場所にもよるが、57~5000 日の時間スケールが示唆されている (Sagripanti & Lytle, 2007)。

さらに、模擬太陽光を用いた研究では、生鮮食品の表面に付着した MS2 とヒトアデノウイルスを不活化する効果は全くないか、あってもごく僅かであることが示された（Carratalà et al., 2013）。

UV-B 照射はある程度の殺菌効果を有する。MS2 バクテリオファージおよびマウスノロウイルス（MSV）の懸濁液（表面上ではない）への UV-B 照射の研究では、それぞれ 0.909 J/cm² および 0.367 J/cm² の UV-B 線量で 4-log 以上の減少（1/10000 以下に減少）が示された（Lee & Ko, 2013）。日光からの UV-B 放射照度を 60～300μW/cm² と仮定すると、これらの線量に到達するためには、0.34～4.2 時間の日光暴露が必要となる（ただし、日光からの UV 放射照度は、地理的な場所、季節、時間帯によって大きく異なる）（Heisler et al., 2007）。しかしながら、N95 FFR におけるウイルスの不活化に必要な UV-C 線量は、水、空気、または硬い非多孔質表面におけるウイルスの不活化に比べて約 1000 倍高い（表 S1）（Kowalski, 2009）。これは、理論的な推定値（Lytle & Sagripanti, 2005; Sagripanti & Lytle, 2007）と一致しており、N95 FFR で十分なウイルス性用量を達成するためには、何日も日光に曝露する必要があると考えられる。

2020 年 4 月 22 日現在、我々の知る限り、太陽光を用いて N95 呼吸用保護具上の SARS-CoV-2 のウイルス不活化ができるというエビデンスを示す査読文献はない。また 2020 年 4 月 22 日現在、太陽光に曝露した後の N95 呼吸用保護具の信頼性を評価した研究は、査読文献には見当たらない。したがって、N95 FFRs の太陽光での消毒・除染を支持する具体的なエビデンスは、査読文献にはないと結論付けている。太陽光を N95 FFR の消毒方法として検討するのであれば、事前に広範囲の実験的検証と妥当性確認を行う必要がある。ただし、太陽光に含まれる波長（UV-C ではなく UV-A と UV-B）によるウイルスの不活化に関する査読文献のエビデンスは、太陽光を利用した N95 除染は効果的ではないことを示唆している。

参考文献

- Anderson, J. G., Rowan, N. J., MacGregor, S. J., Fouracre, R. A., & Farish, O. (2000). Inactivation of food-borne enteropathogenic bacteria and spoilage fungi using pulsed-light. *IEEE Transactions on Plasma Science. IEEE Nuclear and Plasma Sciences Society*, 28(1), 83–88. <https://doi.org/10.1109/27.842870>
- Battelle. (2020, March 29). *Instructions for Healthcare Personnel: Preparation of Compatible N95 Respirators for Decontamination by the Battelle Memorial Institute Using the Battelle Decontamination System*. <https://www.fda.gov/media/136532/download>
- Beam, B. L., & Hayes, K. A. (2020, March 27). *N95 Respirator Limited Reuse - Healthcare Professionals Providing Clinical Care*. University of Nebraska Medical Center. <https://app1.unmc.edu/nursing/heroes/mpv.cfm?updateindex=132&src=yt>
- Bentley, J. J., Santoro, D., Gram, D. W., Dujowich, M., & Marsella, R. (2016). Can ultraviolet light C decrease the environmental burden of antimicrobial-resistant and -sensitive bacteria on textiles? *Veterinary Dermatology*, 27(6), 457–e121. <https://doi.org/10.1111/vde.12377>
- Bergman, M. S., Viscusi, D. J., Zhuang, Z., Palmiero, A. J., Powell, J. B., & Shaffer, R. E. (2012). Impact of multiple consecutive donnings on filtering facepiece respirator fit. *American Journal of Infection Control*, 40(4), 375–380. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2011.05.003>
- Blázquez, E., Rodríguez, C., Ródenas, J., Navarro, N., Riquelme, C., Rosell, R., Campbell, J., Crenshaw, J., Segalés, J., Pujols, J., & Polo, J. (2019). Evaluation of the effectiveness of the SurePure Turbulator

ultraviolet-C irradiation equipment on inactivation of different enveloped and non-enveloped viruses inoculated in commercially collected liquid animal plasma. *PLoS One*, 14(2), e0212332.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212332>

- *Card, K. J., Crozier, D., Dhawan, A., Dinh, M., Dolson, E., Farrokhan, N., Gopalakrishnan, V., Ho, E., King, E. S., Krishnan, N., Kuzmin, G., Maltas, J., Pelesko, J., Scarborough, J. A., Scott, J. G., Sedor, G., & Weaver, D. T. (2020). *Theory Division, Cleveland Clinic Lerner Research Institute*. UV Sterilization of Personal Protective Equipment with Idle Laboratory Biosafety Cabinets During the Covid-19 Pandemic. *medRxiv*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1101/2020.03.25.20043489>
- Carratalà, A., Rodriguez-Manzano, J., Hundesa, A., Rusiñol, M., Fresno, S., Cook, N., & Girones, R. (2013). Effect of temperature and sunlight on the stability of human adenoviruses and MS2 as fecal contaminants on fresh produce surfaces. *International Journal of Food Microbiology*, 164(2-3), 128–134.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.04.007>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (1997, March 4). *42 CFR Part 84 Respiratory Protective Devices*. <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/pt84abs2.html>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2014, June 6). *Environmental Control for Tuberculosis: Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings*.
<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-105/pdfs/2009-105.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB2009105>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2018, April 6). *Filtering out Confusion: Frequently Asked Questions about Respiratory Protection*. <https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB2018130>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). (2019, May 20). *UV Radiation*.
<https://www.cdc.gov/nceh/features/uv-radiation-safety/index.html>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDCa). (2020, March 23). *UV Radiation Safety*. Centers for Disease Control and Prevention. <https://www.cdc.gov/nceh/features/uv-radiation-safety/index.html>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDCb). (2020, March 27). *Recommended Guidance for Extended Use and Limited Reuse of N95 Filtering Facepiece Respirators in Healthcare Settings*.
<https://www.cdc.gov/niosh/topics/hcwcontrols/RecommendedGuidanceExtUse.html#ref16>
- Centers for Disease Control and Prevention (CDCc). (2020, April 9). *Decontamination and Reuse of Filtering Facepiece Respirators*. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/ppe-strategy/decontamination-reuse-respirators.html>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2006, November). *Ultraviolet Disinfection Guidance Manual for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule*.
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=600006T3.txt>
- U.S. Food & Drug Administration (FDA). (2020, April). *Enforcement Policy for Face Masks and Respirators During the Coronavirus Disease (COVID-19) Public Health Emergency (Revised)*.
<https://www.fda.gov/media/136449/download>
- *Fischer, R., Morris, D. H., van Doremalen, N., Sarchette, S., Matson, J., Bushmaker, T., Yinda, C. K., Seifert, S., Gamble, A., Williamson, B., Judson, S., de Wit, E., Lloyd-Smith, J., & Munster, V. (2020). Assessment of N95 respirator decontamination and re-use for SARS-CoV-2. *medRxiv*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1101/2020.04.11.20062018>
- Fisher, E. M., & Shaffer, R. E. (2011). A method to determine the available UV-C dose for the decontamination of filtering facepiece respirators. *Journal of Applied Microbiology*, 110(1), 287–295.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04881.x>
- Fu, L., Le, T., Liu, Z., Wang, L., Guo, H., Yang, J., Chen, Q., & Hu, J. (2020). Different efficacies of common

disinfection methods against candida auris and other candida species. *Journal of Infection and Public Health*.
<https://doi.org/10.1016/j.jiph.2020.01.008>

- *Heimbuch, B., & Harnish, D. (2019). *Research to Mitigate a Shortage of Respiratory Protection Devices During Public Health Emergencies (Report to the FDA No. HHSF223201400158C)*.
https://www.ara.com/sites/default/files/MitigateShortageofRespiratoryProtectionDevices_2.pdf
- Heimbuch, B. K., Wallace, W. H., Kinney, K., Lumley, A. E., Wu, C.-Y., Woo, M.-H., & Wander, J. D. (2011). A pandemic influenza preparedness study: use of energetic methods to decontaminate filtering facepiece respirators contaminated with H1N1 aerosols and droplets. *American Journal of Infection Control*, 39(1), e1–e9. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2010.07.004>
- Heisler, G. M., Grant, R. H., Gao, W., & Slusser, J. R. (2007). Solar Ultraviolet-B Radiation in Urban Environments: The Case of Baltimore, Maryland††. *Photochemistry and Photobiology*, 80(3), 422–428.
<https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2004.tb00108.x>
- International Ultraviolet Association. (n.d.). *UV FAQs*. Retrieved April 18, 2020, from <http://www.iuva.org/UV-FAQs>
- Ito, A., & Ito, T. (1986). Absorption spectra of deoxyribose, ribosephosphate, ATP and DNA by direct transmission measurements in the vacuum-UV (150-190 nm) and far-UV (190-260 nm) regions using synchrotron radiation as a light source. *Photochemistry and Photobiology*, 44(3), 355–358. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1986.tb04675.x>
- Jay, J. M. (1995). *Modern Food Microbiology*. Springer, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7476-7>
- Kenar, L., Ortatatli, M., Yaren, H., Karayilanoglu, T., & Aydogan, H. (2007). Comparative sporicidal effects of disinfectants after release of a biological agent. *Military Medicine*, 172(6), 616–621.
<https://doi.org/10.7205/milmed.172.6.616>
- Kowalski, W. (2009). *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook: UVGI for Air and Surface Disinfection*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>
- Lee, J. E., & Ko, G. (2013). Norovirus and MS2 inactivation kinetics of UV-A and UV-B with and without TiO2. *Water Research*, 47(15), 5607–5613. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.035>
- Lindsley, W. G., Martin, S. B., Thewlis, R. E., Sarkisian, K., Nwoko, J. O., Mead, K. R., & Noti, J. D. (2015). Effects of Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) on N95 Respirator Filtration Performance and Structural Integrity. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(8), 509–517.
<https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1018518>
- Lin, T.-H., Tang, F.-C., Hung, P.-C., Hua, Z.-C., & Lai, C.-Y. (2018). Relative survival of Bacillus subtilis spores loaded on filtering facepiece respirators after five decontamination methods. *Indoor Air*.
<https://doi.org/10.1111/ina.12475>
- Lore, M. B., Heimbuch, B. K., Brown, T. L., Wander, J. D., & Hinrichs, S. H. (2012). Effectiveness of three decontamination treatments against influenza virus applied to filtering facepiece respirators. *The Annals of Occupational Hygiene*, 56(1), 92–101. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer054>
- Lowe, J. J., Paladino, K. D., Farke, J. D., Boulter, K., Cawcutt, K., Emodi, M., Gibbs, S., Hankins, R., Hinkle, L., Micheels, T., Schwedhelm, S., Vasa, A., Wadman, M., Watson, S., & Rupp, M. E. (2020). *N95 Filtering Facepiece Respirator Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) Process for Decontamination and Reuse*. Nebraska Medicine. <https://www.nebraskamed.com/sites/default/files/documents/covid-19/n-95-decon-process.pdf>
- Lytle, C. D., & Sagripanti, J.-L. (2005). Predicted inactivation of viruses of relevance to biodefense by solar radiation. *Journal of Virology*, 79(22), 14244–14252. <https://doi.org/10.1128/JVI.79.22.14244-14252.2005>

- Marra, A. R., Schweizer, M. L., & Edmond, M. B. (2018). No-Touch Disinfection Methods to Decrease Multidrug-Resistant Organism Infections: A Systematic Review and Meta-analysis. *Infection Control and Hospital Epidemiology: The Official Journal of the Society of Hospital Epidemiologists of America*, 39(1), 20–31. <https://doi.org/10.1017/ice.2017.226>
- Mills, D., Harnish, D. A., Lawrence, C., Sandoval-Powers, M., & Heimbuch, B. K. (2018). Ultraviolet germicidal irradiation of influenza-contaminated N95 filtering facepiece respirators. *American Journal of Infection Control*, 46(7), e49–e55. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2018.02.018>
- United States. Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). *OSHA Technical Manual, Section VIII - Use of Respirators*. Retrieved April 22, 2020, from https://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_viii/otm_viii_2.html#8
- O'Sullivan, N.-A., & Tait, C. P. (2014). Tanning bed and nail lamp use and the risk of cutaneous malignancy: A review of the literature: Tanning beds and cutaneous malignancy. *The Australasian Journal of Dermatology*, 55(2), 99–106. <https://doi.org/10.1111/ajd.12145>
- Price, A., & Chu, L. (2020). *Addressing COVID-19 Face Mask Shortages [v1.3]*. Stanford Anesthesia Informatics and Media Lab & Lernaly COVID-19 Evidence Service. <https://stanfordmedicine.app.box.com/v/covid19-PPE-1-2>
- Rutala, W. A., Gergen, M. F., Tande, B. M., & Weber, D. J. (2014). Room decontamination using an ultraviolet-C device with short ultraviolet exposure time. *Infection Control and Hospital Epidemiology: The Official Journal of the Society of Hospital Epidemiologists of America*, 35(8), 1070–1072. <https://doi.org/10.1086/677149>
- Sagripanti, J.-L., & Lytle, C. D. (2007). Inactivation of influenza virus by solar radiation. *Photochemistry and Photobiology*, 83(5), 1278–1282. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2007.00177.x>
- Sehulster, L. M., Chinn, R. Y. W., Arduino, M. J., Carpenter, J., Donlan, R., Ashford, D., Besser, R., Fields, B., McNeil, M. M., Whitney, C., Wong, S., Juraneck, D., & Cleveland, J. (2004). *Guidelines for environmental infection control in health-care facilities. Recommendations from CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC)*. American Society for Healthcare Engineering/American Hospital Association. <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/pdf/guidelines/environmental-guidelines-P.pdf>
- *Smith, J. S., Hanseler, H., Welle, J., Rattray, R., Campbell, M., Brotherton, T., Moudgil, T., Pack, T. F., Wegmann, K., Jensen, S., Jin, J. S., Bifulco, C. B., Fox, B. A., & Stucky, N. L. (2020). Effect of various decontamination procedures on disposable N95 mask integrity and SARS-CoV-2 infectivity. *medRxiv*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1101/2020.04.11.20062331>
- Smolle, C., Huss, F., Lindblad, M., Reischies, F., & Tano, E. (2018). Effectiveness of automated ultraviolet-C light for decontamination of textiles inoculated with *Enterococcus faecium*. *The Journal of Hospital Infection*, 98(1), 102–104. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2017.07.034>
- *Syphers, D. A. (2020). *Determining Exposure Times for UV-C Irradiation of PPE Filtration Facemasks for Sterilization and Potential Reuse in Times of Shortages*. Advance online publication. <https://www.bowdoin.edu/profiles/faculty/dsyphers/pdf/determining-exposure-times.pdf>
- Tano, E., & Melhus, Å. (2014). Level of decontamination after washing textiles at 60°C or 70°C followed by tumble drying. In *Infection Ecology & Epidemiology* (Vol. 4, Issue 1, p. 24314). <https://doi.org/10.3402/iee.v4.24314>
- Tomas, M. E., Cadnum, J. L., Jencson, A., & Donskey, C. J. (2015). The Ebola disinfection booth: evaluation of an enclosed ultraviolet light booth for disinfection of contaminated personal protective equipment prior to removal. *Infection Control and Hospital Epidemiology: The Official Journal of the Society of Hospital Epidemiologists of America*, 36(10), 1226–1228. <https://doi.org/10.1017/ice.2015.166>
- Tseng, C.-C., & Li, C.-S. (2007). Inactivation of viruses on surfaces by ultraviolet germicidal irradiation. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(6), 400–405. <https://doi.org/10.1080/15459620701329012>

- Viscusi, D. J., Bergman, M. S., Eimer, B. C., & Shaffer, R. E. (2009). Evaluation of five decontamination methods for filtering facepiece respirators. *The Annals of Occupational Hygiene*, 53(8), 815–827. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mep070>
- Vo, E., Rengasamy, S., & Shaffer, R. (2009). Development of a test system to evaluate procedures for decontamination of respirators containing viral droplets. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(23), 7303–7309. <https://doi.org/10.1128/AEM.00799-09>
- Walker, C. M., & Ko, G. (2007). Effect of ultraviolet germicidal irradiation on viral aerosols. *Environmental Science & Technology*, 41(15), 5460–5465. <https://doi.org/10.1021/es070056u>
- Wallace, R. L., Ouellette, M., & Jean, J. (2019). Effect of UV-C light or hydrogen peroxide wipes on the inactivation of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, *Clostridium difficile* spores and norovirus surrogate. *Journal of Applied Microbiology*, 127(2), 586–597. <https://doi.org/10.1111/jam.14308>
- Woo, M.-H., Grippin, A., Anwar, D., Smith, T., Wu, C.-Y., & Wander, J. D. (2012). Effects of relative humidity and spraying medium on UV decontamination of filters loaded with viral aerosols. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(16), 5781–5787. <https://doi.org/10.1128/AEM.00465-12>
- World Health Organization. (2004). *Guidelines on viral inactivation and removal procedures intended to assure the viral safety of human blood plasma products*. https://www.who.int/bloodproducts/publications/WHO_TRS_924_A4.pdf