

米国における脱炭素に向けた エネルギーレトロフィット事例

Decarbonization of Buildings: Energy Retrofit Projects in the US

北畠いずみ*

1. 脱炭素化に向けた米国建築業界の現状

米国建築業界では、ここ10年余りで脱炭素化に向けての動きが急速に進んできている。米国は連邦制のため、州ごと、更には市、コミュニティごとに目標、それに向けての法規等はさまざまである。一

例として、新築、又は大規模な改修の際に一般的に使われている International Energy Conservation Code (省エネ法規) の中の住宅での断熱法規基準の変化を、相当する日本の省エネ基準地域区分、そして国際単位系に変換したものを表1に示した。変化を敬遠するといわれる建築業界でも、ここ10年での省エネに対する変化をこの表から垣間見ることができる。

米国エネルギー省は2050年までに建物すべての脱炭素化を目標にしている。また、非営利団体である Architecture 2030³⁾ が2006年に始めた2030 Challenge プロジェクトは米国建築業界に大きな影響を与えている。2030 Challenge とは、以下の1,2,3を目標に掲げ、化石燃料消費量と温室効果ガス排出量を削減し、持続可能で回復力(レジリエンス)があり、カーボンニュートラルな建物や都市の開発を推進するための運動である。米国建築協会はこの2030 Challenge を念頭におき、設計中にエネルギー性能向上と炭素削減を優先的におこなう、という実務の変革を、「AIA 2030 Commitment」と呼ばれるミッションとして掲げている。

1. すべての新しい建物、開発、及び大規模な改修は、建物タイプ別に異なる、化石燃料、温室効果ガス、エネルギー消費において、その地域の平均値を70%下回るよう設計する。
2. 更に、少なくとも1.と同量の既存の建物面積を、1.と同様に化石燃料、温室効果ガス、エネルギー消費において、その地域、建物タイプの平均値を70%下回るようレトロフィットする。
3. 1.と2.の化石燃料削減基準は2006年の消費量に比べ、2020年に80%削減、2025年に90%削減

表1 米国住宅断熱法規 (IECC) の変化^{1), 2)}

屋根、天井 U 値 (W/m2K)			
省エネ基準 地域区分相当	2009年	2021年	2021年オプション
1	0.12	0.095	
2	0.12	0.095	
3	0.15	0.095	
4,5	0.15	0.095	
6,7,8	0.19	0.12	
壁 U 値 (W/m2K)			
省エネ基準 地域区分相当	2009年	2021年	2021年オプション
1	0.27	0.28 + 1.14 or 0.44 + 0.57	0 + 0.28
2	0.28/0.44+1.14	0.28 + 1.14 or 0.44 + 0.57	0 + 0.28
3	0.28/0.44+1.14	0.28 + 1.14 or 0.44 + 0.57	0 + 0.38
4,5	0.44	0.28 + 1.14 or 0.44 + 0.58	0 + 0.38
6,7,8	0.44	0.28 or 0.44 + 1.14	0 + 0.38
地下壁 U 値 (W/m2K)			
省エネ基準 地域区分相当	2009年	2021年	2021年オプション
1	0.38 / 0.30	0.38 / 0.30	0.44 + 1.14
2	0.38 / 0.30	0.38 / 0.30	0.44 + 1.14
3	0.57 / 0.44	0.38 / 0.30	0.44 + 1.14
4,5	0.57 / 0.44	0.57 / 0.44	
6,7,8	1.14 / 0.44	1.14 / 0.44	
床 (車庫上・換気口がある床含む) U 値 (W/m2K)			
省エネ基準 地域区分相当	2009年	2021年	2021年オプション
1	0.15	0.15	
2	0.19	0.19	
3	0.19	0.19	
4,5	0.3	0.3	
6,7,8	0.3	0.3	
窓 U 値 (W/m2K)			
省エネ基準 地域区分相当	2009年	2021年	日射熱取得率
1	1.99	1.7	
2	1.99	1.7	
3	1.99	1.7	0.4
4,5	1.99	1.7	0.4
6,7,8	2.84	1.7	0.25

* x + xx はxが充填断熱をさし、xxが外断熱をさす。
** x / xx はx値の連続断熱又は、xx値の充填断熱をさす。

*Project Manager, Peabody | Fine Architects

減、2030年にカーボンニュートラル達成を目標とする。(化石燃料、温室効果ガス排出エネルギーを使用せずに建物を稼働させる)。

2. 既存建築レトロフィットの重要性と難しさ

米国に今現在ある約1億3千万の建物のうち75%に相当する、1億もの建物が2050年に残っていると予想されている。2050年までに建てられる新築の数は数千万と予想されているため、2050年にある建物のうち既存建築の割合は80%程になる。2050年までにすべての建物の脱炭素化という目標達成には既存建築が大きな割合を占めることになる。

しかし、エネルギーレトロフィット (Energy Retrofit) でのCO₂削減は、ネットゼロの新築を建てるより、難しい面が多くある。

1. コストが割高である。
2. 制限が多い。
3. 開けてみないとわからない。
4. すでに人が住んでいる。

建物の増築・大改修と一緒に断熱・気密を希望するようなプロジェクトの場合、1.のコストの面で、レトロフィットを選択するには高いハードルになる。既存建築を壊して新しいものを建てることこそ、最もCO₂を排出することになるが、残念ながら、レトロフィットよりも新しく建て替えてしまった方が、建築費用が安くなる場合が現状としてある。設計士としては、大改修が本当に必要なのか、既存の箱の中で断熱・気密を施し、希望とする建物を達成できないかを施主と相談することが重要になる。

次に、既存の建物が相手なので、変えられない既存の形状、構造、建材に対応した断熱・気密をデザインしなければならないというハードルがある。例えば長屋で隣と構造を共有している場合や、歴史建造物のため外観を変えてはいけなない場合には内側からのみの改修となり、断熱の選び方、気密の取り方が新築とは変わってくる。既存の柱などの構造体のサイズ、軒先・ケラバの深さが変えられないので、そのサイズに対応して断熱材の厚さとタイプ・気密方法をデザインしなければならない。また、既存の充填断熱や気密材を使いながら、断熱・気密をアップグレードする場合も、残された建材に対応した適格なデザインを考える必要がある。最後に、アクセスできる範囲の制限がレトロフィットにはある。構

造上、又コストの面で基礎外側・フーチング下・土間コンクリート下にはアクセスできない場合が多くあり、その場合の代替案を考える必要がある。このような制限にレトロフィットの難しさがある。

更に、レトロフィットの場合はプロジェクトの箱となる既存建築の外皮状態が、工事が始まるまで確実には予想ができないことも難しさの一つにある。既存の合板が使えることを条件に設計をしていたが、開けてみたら腐っていたため、コストが大幅に増え、他でコスト調整しなければならない場合や、コンクリートやレンガで作られている集合住宅のエネルギーレトロフィットに参加した際には、本来なければならない鉄筋がなかったり、劣化がひどかったり、構造修復のコストがかさみ、新しく建て替えざるを得なくなった場合もある。予想ができないところにレトロフィットの難しさがある。

最後に、改修の場合は、人が建物の中で生活していながらレトロフィットをしなければならない場合が多くある。一戸建て住宅の場合は、ローンを払いながら違う場所に住む家賃を捻出することはなかなかできない。アパート改修の場合も、改修期間に家賃収入がゼロになるのであれば、オーナーは断熱・気密改修はしない。新築は箱を作ってから人が入るのに対し、改修は人の生活の中に入っていき難しさがある。

このようにレトロフィットには難しい面があるなかで、エネルギーレトロフィットが最もやりやすいのは、屋根材・外壁材といった仕上げ材を変える時と、機械設備を変える時である。次に、仕上げ材、機械設備を変えることをきっかけに行ったエネルギーレトロフィットの例を紹介する。

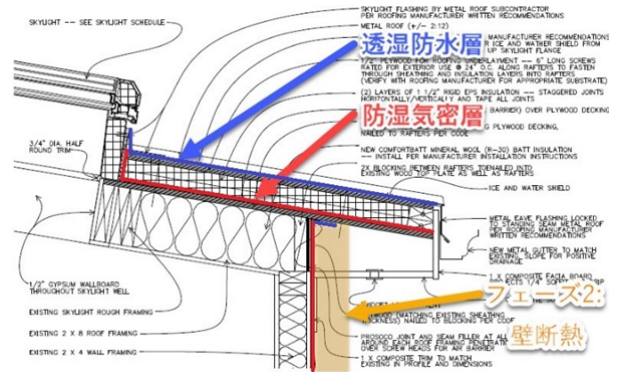
3. 屋根の断熱・気密改修例

ここで紹介するエネルギーレトロフィットは、屋根材を変えるついでに断熱・気密を考えたいと依頼されたプロジェクトである。米国では良く使われている屋根材のアスファルトシングルが傷んできており、雨漏りもみられることからこのプロジェクトが始まった(写真1)。

天井裏に既存の冷暖房ダクトがあるため(ダクトは断熱層の内側に設ける必要がある)、既存の屋根断熱は天井裏ではなく、垂木でグラスウールを使った充填断熱が採用されていた(写真2)。エネルギーレトロフィットの場合も新築と同様に、防水、気密、断熱をどの場所に、どの方法・タイプ・量でとるかを既存建築に合わせて考えていく必要がある。



写真1 既存の屋根



図面1 屋根のレトロフィット



写真2 既存の屋根断熱



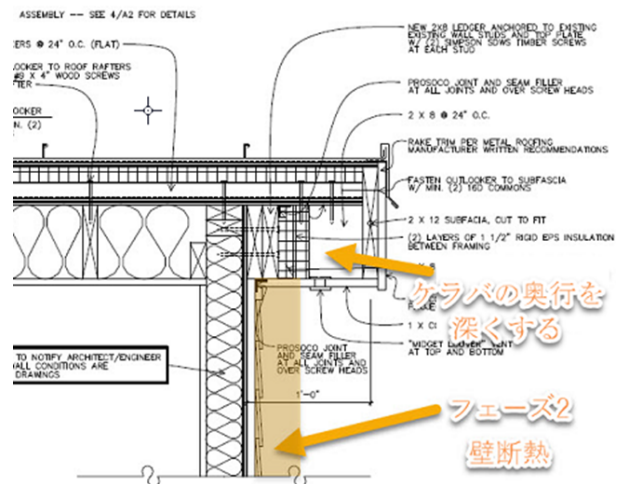
写真3 既存のケラバ

表2 結露防止断熱²⁾

省エネ基準地域区分	気密性断熱ボードの最高U値(W/m ² K)
6,7,8	1.14
4,5	0.38
3	0.28
2	0.23
1	0.19

ワシントン DC エリアは日本の省エネ地域区分の4相当にあたり、この当時の気候区4の屋根断熱基準、0.12 W/m²Kを満たすには、既存の2x8 (184mm)での充填断熱だけでは基準にとどかない。またこの家のように屋根合板下に通気がない場合は法規上 (IRC 2021, R806.5), 屋根合板下面での結露防止のために、気密性能がある断熱材 (フォーム系断熱材) を下面に追加するか、気候区別に設けられた一定U値以下のフォーム系断熱材を使った外断熱をしなくてはならない (表2)。発泡ウレタンはCO₂排出量が非常に高い上に、高い技術が必要となるため、どうしても手の届かない箇所以外はできるだけ避け、充填断熱にはロックウールを、外断熱には地球温暖化係数が1でU値が0.028W/mKのEPSを用いた。

2x8上の構造用合板上面には粘着性の気密防湿シートが貼られているため、防湿材でEPSを挟むことのないよう、防水は新しいメタルパネルの下地合板上面に透湿防水シートをはった (図面1)。



図面2 ケラバの改修

施主は将来的に壁での断熱・気密によるエネルギーレトロフィットを行いたいという希望があった。既存建築の軒は400mmほどの奥行があるため、将来、壁外断熱を受け止めるには十分な奥行があった。しかし、既存のケラバは奥行が全くないため (写真3)、フェーズ2を考慮し、今回、屋根の改修をする際に奥行のあるケラバを将来のために施工した (図面2)。このように、エネルギーレトロフィットの場合は、段階的に改修していくことが可能であるため、プロジェクトを総体的に考えて計画していくことが重要である。

4. 壁断熱・気密と機械設備のオール電化改修例

次に紹介するエネルギーレトロフィットは、スクリーンポーチの増築に伴う壁断熱・気密改修と、設備機械のオール電化改修例である。先ほどの例は、建材の寿命又は欠陥により屋根材を変えることに便乗した改修例であったが、今回の例は増築により外壁材を剥がさなければならぬことに便乗したエネルギーレトロフィットの例になる。コスト面から、フェーズ1はスクリーンポーチ増築の一階部分の外壁のみ（写真4）断熱・気密改修を行い、フェーズ2として、残ったエリアのサイディングを変える際に断熱・気密改修を行うことになった。

一階部分の既存構造はコンクリートブロックである。その外側に75mmのネオポールを施工した（図面3）。

今回の増築・改修で施主が希望していたことは、建物をオール電化にすることであった。既存建築の暖房は灯油による燃焼系ボイラーを通しての全館温水ラジエーター、冷房はヒートポンプ、給湯はガス給湯機を使っていた（写真5）。施主は放射による暖房を気に入っており、できれば冷温風ではなく、既存のラジエーターを利用できればという希望であった。いろいろ検討した結果、Air to Water（空

気熱源温水）ヒートポンプを採用することにした（写真6）。Air to Waterヒートポンプに交換するメリットを以下にまとめる。

- ・ 冷暖房だけでなく、給湯にも使える（冷暖房、給湯すべてが一つのヒートポンプでカバーできる）。
- ・ 灯油、ガスといった化石燃料の排除。
- ・ オール電化にすることで、フェーズ2での断熱・気密改修後はソーラーパネルのみで建物の稼働が可能になる。
- ・ エネルギー消費効率が既存システムに比べて4倍以上になる。
- ・ エネルギー熱交換の媒体として、温暖化係数の高い冷媒ではなく、不凍液を利用している。
- ・ アメリカでは全館空調が好まれているため、Air to Air（空気熱源冷温風）ヒートポンプを使う場合はダクトが必要となる。Air to Waterの場合はPEXチューブを使うため、ダクトに比べるとスペースが削減できる。

デメリットは、灯油を燃焼させて出せる温水温度に比べ、ヒートポンプが出せる温度が低いという点である。既存のラジエーターを新たなAir to Waterヒートポンプにつなげる形で残すのが理想だったが、ラジエーターのみで暖房需要を満たすには非常に大きな面積が必要となるため、既存のラジエーターの表面積では足りない。床暖房などで表面積をとることも考えたが、コストの面から多くのラジエーターをファンコイルに変更した。

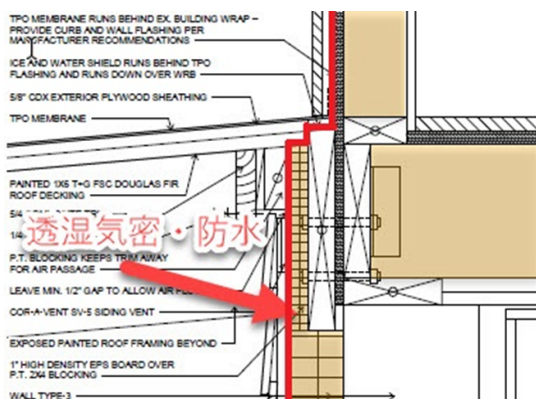
増築・改修のプロジェクトを引き受ける際、増築・改修後の二酸化炭素排出量を増築前よりも減らすことを一つの基準としている。延べ面積が増えるのに、二酸化炭素排出量を減らすことは難しい、と思うかもしれないが、断熱・気密をとり、設備を効率の良いものに変えることで可能になる。



写真4 増築前



増築中



図面3 外壁断熱改修



写真5 既存の暖房・給湯設備

5. 内側からのエネルギーレトロフィット

先の2例は、既存建築の形、断熱の位置、設備機械に合わせたレトロフィットを紹介した。次に紹介する例は、歴史建造物の内側からのレトロフィット（米国建築家協会ワシントン DC 支部サステイナブルデザイン賞受賞）例である。

この建物（写真7）は1905年に建造され、もともとは一階が馬車・馬の倉庫として、二階が使用人の住居として使われていた。110年余りの歴史の中で、カーディーラーやレストランに変わり、現在の建物のオーナーが買収した時は、空き家状態が続いていたため、内装の傷みは激しいものであった。この建物は国家歴史登録財に登録されている建物で、外観を残し（写真8）、できるだけオリジナルのものを保存することが義務づけられていたため、建物の中に建物を作る必要があった（図面4、太線は気



写真6 新しい Air to Water ヒートポンプとタンク



写真7 レトロフィット前の建物



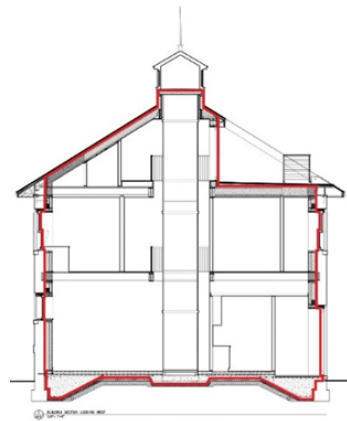
写真8 レトロフィット後の建物

密ライン)。

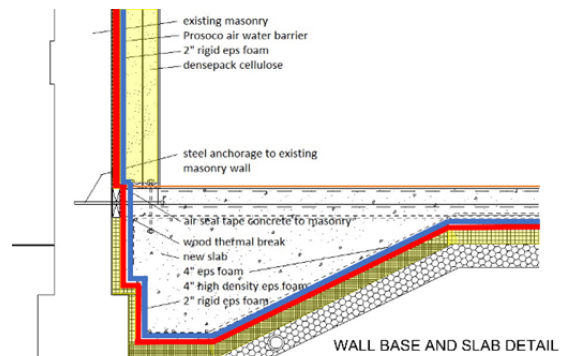
もともとは、気密・断熱は法規レベルでデザインが進んでいたが、機械設備にかかるコストを聞いた施主と設計士が、気密・断熱・窓性能をアップグレードして、その分、機械設備投資と将来の電気代を下げることはできないかと、相談されたのが始まりであった。このプロジェクトは、設計士としてではなく、コンサルタントとして関わったプロジェクトである。

既存のコンクリートスラブと屋根は状態が悪く、構造上問題があったため、ワシントン DC 歴史建造物保存事務所からは、新しいものに変えても良いとの判断を頂いた。そのため、スラブ下に断熱ボード（図面5、ハイライト部分が断熱）と防水シート（図面5、太線が気密、防水ライン）を確保することができた。

壁は、レンガ造りなので、防水性能・気密性能・断熱性能はない。まず、レンガ壁の内表面に防水・気密・透湿性能をもった塗料系メンブレン（写真9、左のオレンジ色の塗料）を塗り、その内側にEPSを施工した（写真9の白い部分）。2階、3階の床根太は状態良く保存されていた。床根太はレンガ壁の中に納まっているので、一つ一つの根太回りに、気



図面4 断面図



図面5 スラブ床と壁の結合部分での矩計図



写真9 レンガ壁内表面での防水・気密・断熱



写真10 オリジナルに合わせた窓

密を取る必要があり、手間のかかる作業になった(写真9, 右)。レンガ壁内側のメンブレンに直接張る断熱材は、レンガ壁内表面での結露を防ぐために、繊維系ではなく気密のとれたフォーム系断熱材を選んだ。フォーム系断熱材の中でも、温暖化係数が高いEPSを選んだ。

歴史建造物の場合、窓のタイプを元々の窓と同じタイプにしなければならない。既存の窓は上げ下げタイプであった。上げ下げ窓は気密を取ることが難しいため、新しい窓は気密性の高いドレーキップを採用した。ただ、見た目は上げ下げ窓にしなければならないため、下のガラス部分がドレーキップで、上のガラス部分がはめ殺しで、框の形状・サイズもオリジナルに合わせた、トリプルガラス窓をカスタムオーダーした(写真10)。

高断熱改修においては、一般的に外断熱工法がシンプルで、建物が長持ちする。しかし、今回の例のように、構造の内側からレトロフィットしなければならない場合は、気密の位置、結露を防ぐ断熱材選び、水蒸気を逃がすためのメンブレン選びなどがデザインの際重要なポイントになる。

6. 集合住宅でのエネルギーレトロフィット

ワシントンDCは工業や農業といった産業はほとんどなく政治の街であるため、街の温室効果ガス排

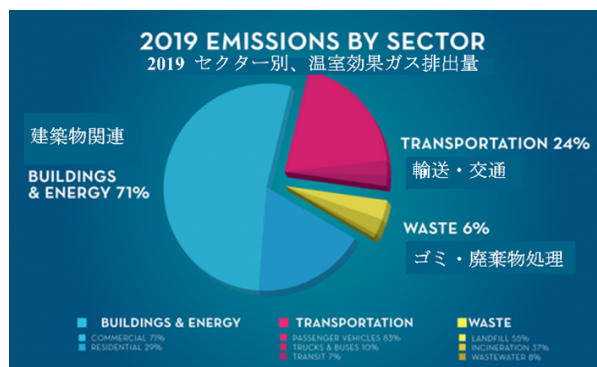


図1 2019年温室効果ガス排出量⁴⁾



写真11 1950年代に建てられた集合住宅

出量の75%は建物によるものである(図1)。そのうち、30%が住宅によるもので、居住人口の65%が集合住宅に住んでいる。

現在ある集合住宅のうち、70%は1980年以前に建てられたものである。築40年以上になると、屋根の修繕や、設備機械を変える時期になる。外装や設備機械の改修時はエネルギーレトロフィットを実施し易い大きなチャンスである。ワシントンDCのような都市は、80年代前に建てられた集合住宅が、今後どんどん改修されるセクターであり、改修とともにカーボンニュートラルに近づけていかななくてはならない。

最後に紹介する例は、ワシントンDC市内、又は近郊に多く残っている、写真11のような、集合住宅のゼロエネルギーレトロフィットのケーススタディである。

写真11の建物は、1階が300mm、2階が200mmのレンガ壁、屋根・床は軽量鉄骨でコンクリートスラブが鉄骨躯体にのっている。断熱材は全くなく、窓は一枚ガラスで、地下に機械室がある。給湯は天然ガスを燃料とするボイラーで、冷暖房はファンコイルが各ユニットにある。

集合住宅の様に一つの屋根の下に多くの人が住んでいると、限られた屋根面積を使った太陽パネルの数で、住人すべてのエネルギー消費量をカバーすることは難しいため、(図2)まずはエネルギー消費



図2 既存建築のエネルギー消費量とネットゼロにするために必要なソーラーパネルの数

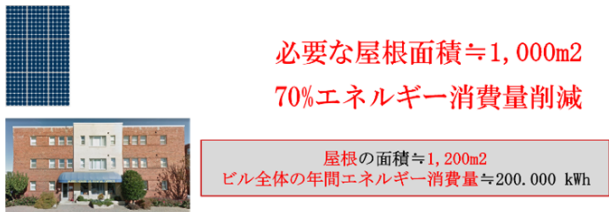


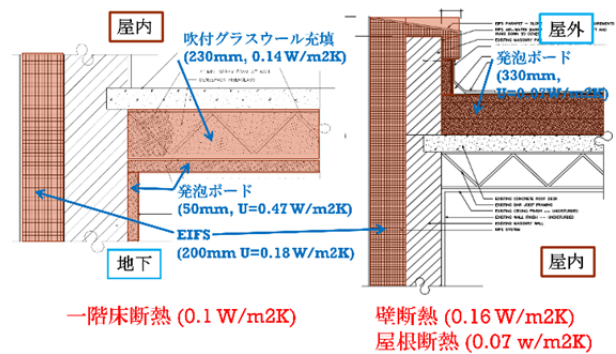
図3 エネルギー消費量を70%削減した場合に必要なソーラーパネルの数

量を70%削減する方法を考える必要があった。

どの程度の断熱、気密、窓性能と設備機械効率を投入すれば70%のエネルギー削減が可能になるのかを、エネルギーモデルを使ってシミュレーションし、費用対効果が高い案をまとめた。

次にビルオーナーの総体的な費用を考えたとき、入居者を入れたまま改修し、家賃収入を減らさず改修することが大きな要素になる。断熱・気密改修をすべて外側から行うには、EIFs（湿式外断熱工法）は防湿、気密、断熱がワンパッケージとなっており、複数の施工業者を使うことなく、一つの業者にすべてを任せられる点で、工事管理がやすくコストも抑えられる点で最善だと考えた（図面6）。窓は一枚ガラスから0.9 W/m²Kの性能がある窓に変え、EIFsと高性能の窓で気密を上げる。また、既存の機械設備から化石燃料を使った設備を排除し、効率が良いヒートポンプに切り替える。このレトロフィットの方法で、70%のエネルギー削減が可能になり、ネットゼロエネルギーにするために必要な太陽パネルの数を既存の屋根面積内に収めることができる（図3）。

集合住宅だけに限らず、一戸建てでも、住みながらエネルギーレトロフィットを望むクライアントが増えてきている。最近では、オランダから始まった、Energiesprong⁵⁾のような、断熱・気密・外装が一つになった壁パネル、冷暖房・給湯が一緒になった設備機械、そして屋根断熱・気密・屋根材・ソーラーパネルが一つになった屋根パネルを、短期間で外側からレトロフィットができるシステムがアメリカで



図面6 外断熱・気密・防水



図4 Architecture 2030での既存建築がとるべき3つの行動³⁾

は普及し始めている。

Architecture 2030は、既存建築の脱炭素化を達成するには、エネルギーレトロフィットにより、二酸化炭素排出量の削減、化石燃料から電気を使う設備機械への変換、再生可能エネルギーを使った発電又は使用、の3つをあげている（図4）。そして、建物のオーナー、使用している人の負担をできるだけ抑え、これら3つを行うには、大規模な改修、外装、設備機械の交換の際が、エネルギーレトロフィットを促進する大きな機会である、としている。

7. 今後の動き

米国に今現在ある約1億3千万の建物のうち75%に相当する、1億の建物が2050年まで残っていると予想されており、既存建築のエネルギー改修は建物の脱炭素化に向けた大きな役割を担っている、ということを目頭で書いた。しかし、屋根材・壁材、設備機械は場合によっては、40-50年は変換する必要がない。変換の機会にエネルギーレトロフィットをしていくだけでは、2050年までにすべての建物の脱炭素化は実現不可能である。

ワシントンDCでは、2050年までに街全体をカーボンニュートラルにするという目標を掲げ、目標達成のために2018年にクリーンエネルギー法が可決された。建物に関しては、例えば、新築住宅は2022年以降、新築商業ビルは2026年以降、すべてネットゼロにすることが義務づけられている。既存

建築に関しては、2021 年以降は 5,000m² 以上の既存建築、2026 年以降は 1,000m² 以上の既存建築すべて、5 年以内に、米国エネルギー省が出している、Energy Star Score の平均値（建物の気候区、サイズ、入居者数、パソコンの数などを参考に出される、同じタイプの建物エネルギー消費量の平均値）以下にする義務がある。その義務を怠ると、罰金が課される⁴⁾。

このような罰金又は奨励措置などにより、新築や大規模改修だけでなく、既存する建物すべてに対してのエネルギー政策がこれから重要になると予想される。

参考文献

- 1) 2009 International Energy Conservation Code (IECC)
- 2) 2021 International Energy Conservation Code (IECC)
- 3) Architecture 2030.org
- 4) Washington DC Government, Department of Energy & Environment
- 5) Energiesprong.org

著者略歴



北畠いずみ（キタジマ イズミ）
長野県出身。カンザス大学建築学部大学院卒業。現在、ワシントン DC 近郊にある Peabody | Fine Architects 勤務。エネルギー改修、ネットゼロ、パッシブビルディング住宅設計に携わる。パッシブハウスコンサルタント（CPHC[®]）。PHIJP 理事。