

積雪寒冷地の公共建築物におけるZEB実現に向けた空調システムの分析について

北海道開発局 営繕部 営繕整備課 ○徳島 竜弥
杉田 瑞季
宮崎 龍介

「地球温暖化対策計画」は2030年までに新築公共建築物でZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）基準の水准确保を目指している。

積雪寒冷地では暖房時のエネルギー消費量が多いため、建物規模や用途を踏まえて最適な空調システムを構築することが重要である。

本研究では、建物規模毎に空調システムを踏まえた試算を行い、積雪寒冷地の公共建築物においてZEB基準の実現に向けた方向性の一考察を報告する。

キーワード：ZEB、省エネルギー、積雪寒冷地

1. はじめに

日本は、「2050年カーボンニュートラル」を目指すこと、また2030年度に温室効果ガスを2013年度比で46%の削減を目指すことを宣言している。

我が国の最終エネルギー消費は減少傾向にあるが、事務所、店舗、病院、学校等の建築物を含む「業務他部門」は全体の約2割を占め増加傾向にあり、建築物の省エネルギー化は有効と考えられ、その手法の策定は喫緊の課題になっている。（図-1）

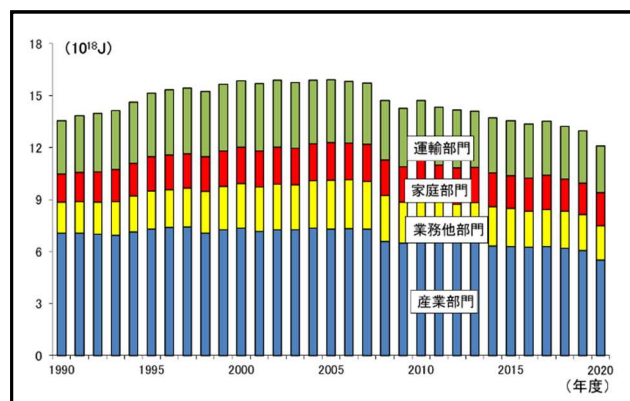


図-1 我が国の最終エネルギー消費の推移¹⁾

「地球温暖化対策計画」では、2030年までに新築公共建築物でZEB基準の水准确保を目指していることを踏まえ、「政府がその事務及び事業に関し温室効果ガスの排出の削減等のため実行すべき措置について定める計画（政府実行計画）」で、公共建築物の新築事業で原則ZEB Oriented (BEI \leq 0.6+未評価技術)相当以上とし、2030年までに新築建築物の平均でZEB Ready (BEI \leq 0.5)相当になることを目指している。

2. ZEBの定義

現在、ZEBには4種類の定義があり、平成28年省エネルギー基準に準拠した「エネルギー消費性能計算プログラム（以下、「WEBPRO」という。）」または、これと同等の方法を用いて計算を行い、BEI (Building Energy Index) を指標として評価するとされている。

BEIは平成25年省エネルギー基準を満たすモデルビルと、設計を行う建築物の一次エネルギー消費量の比率で算出される。（図-2）

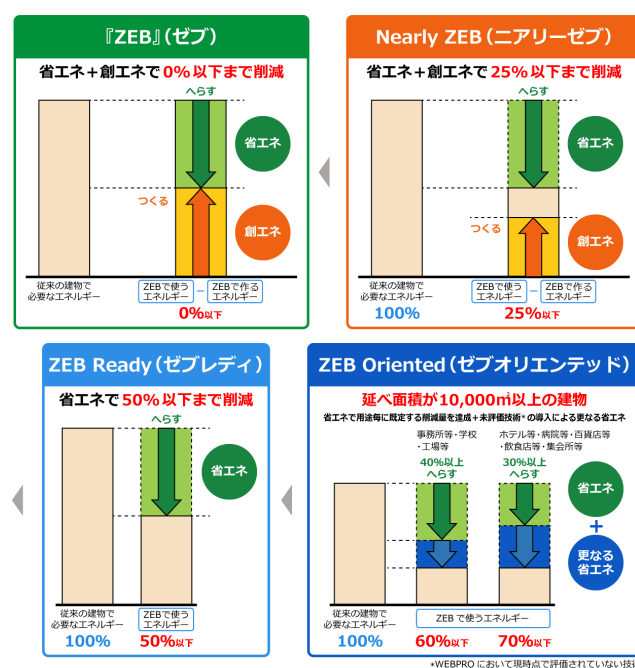


図-2 ZEBの定義²⁾

□ 建築省エネ技術 (パッシブ技術)	□ 設備 (空調) 省エネ技術 (アクティブ技術)		■ 未評価技術 (評価要望が高いもの)
高性能断熱材 高性能断熱窓	高性能空調機(個別分散型)	ルームエアコン パッケージエアコン(ビルマル)	CO2濃度による外気量制御 自然換気システム
	高性能熱源機(中央式)	チリングユニット(空冷式) 吸収冷温水機	空調ポンプ制御の高度化(VWV、適正容量分割等) 空調ファン制御の高度化(VAV、適正容量分割等)
	補助熱源利用システム	地中熱利用ヒートポンプユニット等	冷却塔ファン・インバーター制御
	外気利用・制御システム	全熱交換器システム 外気冷房システム	照明のゾーニング制御 フリークーリングシステム
	流量可変システム	VAV・VWV空調システム(INV) 大温度差送水システム	デシカント空調システム クール・ヒートトレンチシステム
	その他 空調システム	輻射冷暖房システム デシカント空調システム 氷蓄熱システム	

表-1 ZEB 実現に向けた省エネ技術 (空調関連抜粋)

ZEBを実現するための技術は、エネルギーを減らすための技術 (省エネ技術)、エネルギーを作るための技術 (創エネ技術) がある。

省エネ技術には、室内の環境を維持するために必要なエネルギー量を減らすための技術 (パッシブ技術) である外皮断熱 (高性能断熱材、高性能断熱窓) 等、またエネルギーを効率的に利用するための技術 (アクティブ技術) である高性能空調、高効率照明等がある。(表-1)

また創エネ技術として太陽光発電、バイオマス発電等がある。

平成31年に新設されたZEB Orientedは一次エネルギー消費量削減に加えて、更なる省エネルギーの実現に向けた措置としてWEBPROにおいて未評価の技術を導入することが必要である。

ZEB定義の拡充により、ZEB Readyを目標とする取り組みにおいて、新たに未評価技術を活用することでZEBが促進され、また国が補助する実証事業等を通じて同技術の定量的な評価が早期に確立されることが重要とされている。

3. 空調エネルギー消費量削減の重要性

オフィスビルにおけるエネルギー消費量の内、空調のエネルギー消費量は一般的に約4割を占めるが、暖房エネルギー消費量が多い積雪寒冷地において当営繕部で整備した実績では約6割弱まで達している建物も見受けられる。(図-3) (図-4)

積雪寒冷地においてZEBを達成するためには、消費量の多い空調エネルギーの削減が重要となる。

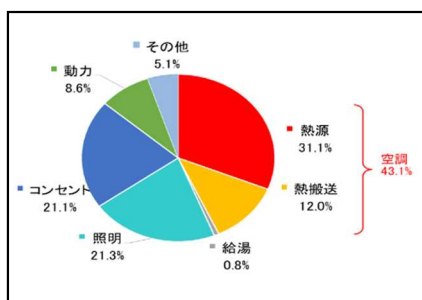


図-3 オフィスビルにおけるエネルギー消費割合³⁾

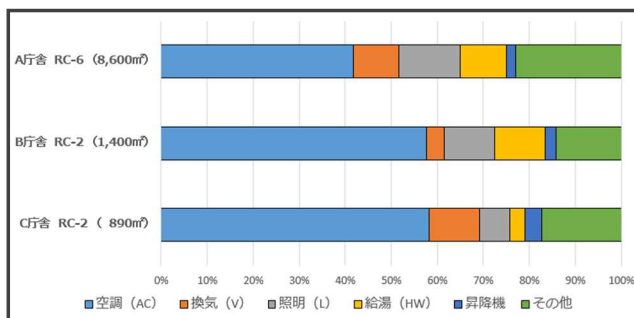


図-4 北海道の官庁施設におけるエネルギー消費割合

2018年度北海道開発技術研究発表会の研究⁴⁾では、RC造の約3,000m²4階建ての庁舎で地中熱利用ヒートポンプユニットを導入して、BEIが0.50となりZEB Readyを達成する試算結果となった。

更に180kwの太陽光発電設備を導入してZEB (BEI ≤ 0) を達成する結果になったが、地中熱利用ヒートポンプユニットは取得可能な熱交換量を把握するために事前調査が必要となるとともに、建設コストも高いため採用に際しては検討の余地がある。

積雪寒冷地においてZEBの実現を達成するには、積雪寒冷地固有の省エネ技術が必要となることに加え、当部では官庁施設として要求される水準 (室内空気環境の確保、維持管理、コスト、災害時の活動、故障によるリスク管理等)、地域による外気温度の違い、制御機能性等 (以下、「官庁施設の要求水準等」という。) を勘案した上でシステム選定を行っている。

本研究では当部で採用事例が多い空調システムを用いて建物規模毎の試算を行い、積雪寒冷地の公共建築物においてZEB基準の達成に向けた方向性を考察し報告する。

4. 建物規模によるBEI/AC (空調) の比較

ZEB Ready実現のために設計や技術採用の考え方等を解説したZEB設計ガイドライン⁵⁾において、ZEB Ready達成にはBEI/ACで0.55~0.45程度が求められるとされていることから、ZEB Oriented達成にはBEI/ACで0.65~0.55程度を目安として比較を行うこととした。

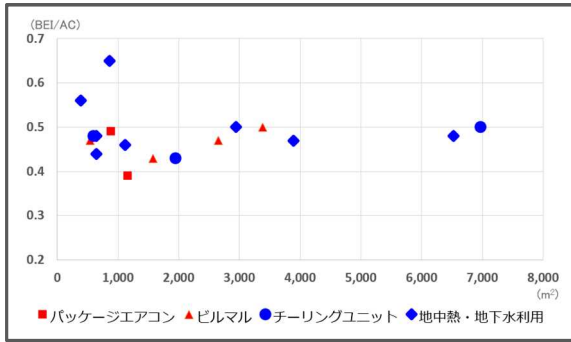


図-5 道内ZEB事例の建物規模・BEI/ACの分布

先導的建築物のオーナーがZEBの普及目標、導入計画、導入実績を公表しているZEBリーディング・オーナー一覧⁶⁾において、道内のZEB達成事例では1,000㎡以下の事例が多く、4,000㎡を超える施設は2施設に留まっていた。

また、空調熱源もパッケージ形空気調和機や地中熱・地下水利用ヒートポンプユニットが多く、当部において中規模以上の建物で採用している吸収冷温水機は見られなかった。(図-5)

なお、パッケージ形空気調和機は外気温度が低い積雪寒冷地において選定可能な機種が増えてきたものの、除霜運転により複数回発生する暖房運転停止、消費電力量の増大等に課題があることから、当部では採用事例が少ない。

ここでは官庁施設の要求水準等を確保するために、中規模以上の建物で採用事例の多い吸収冷温水機を熱源とする中央空調方式を対象とし、ZEB Orientedが達成可能なWEBPROを用いて試算を行い検討する。

試算は、WEBPROで評価される省エネ技術の採用の有無、熱源機および二次ポンプの台数制御の有無に分類し建物規模毎にBEI/ACの比較を行った。(表-2)

所在地	札幌市(省エネ基準地域区分2)
断熱材仕様	外壁: 押出法ポリスチレンフォーム保温板2種b 75mm 屋根: 押出法ポリスチレンフォーム保温板3種b 100mm
建築面積	735㎡/1フロア(奥行21m×幅35m)
階数	750形 平屋建、1500形 2階建、3000形 4階建、6000形 8階建
機器構成	熱源機側: 吸収冷温水機(ガス焚)、一次ポンプ、冷却塔、冷却水ポンプ 空調機側: 二次ポンプ、ユニット形空気調和機、ファンコイルユニット
機器台数	熱源機側: 750形 1台 [※] 、1500形~6000形 2台 空調機側: 二次ポンプ750形~3000形 2台、6000形 4台 ユニット形空気調和機 1台/階 ファンコイルユニット 8台/階
比較項目	試算A: 省エネ技術未採用、台数制御無 試算B: 省エネ技術採用、台数制御無 試算C: 省エネ技術採用、台数制御有
省エネ技術	二次ポンプ: 回転数制御 空調機: ファン回転数制御、運転開始時外気カット、外気冷房、全熱交換器

※ 建物規模を考慮して1台とした。

表-2 空調システムの試算条件

建物規模はそれぞれ1階あたり約750㎡の平屋750形、2階建1,500形、4階建3,000形、8階建6,000形を想定した事

TOKUSHIMA Tatuya, SUGITA Mizuki, MIYAZAKI Ryusuke

務庁舎用途のモデル建物とした。

また比較を容易にするため平面レイアウトを簡素化し空調室、非空調室の2室の構成とした。(図-6)

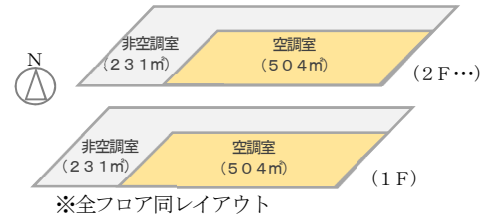


図-6 モデル建物の平面レイアウト

5. 試算結果の傾向

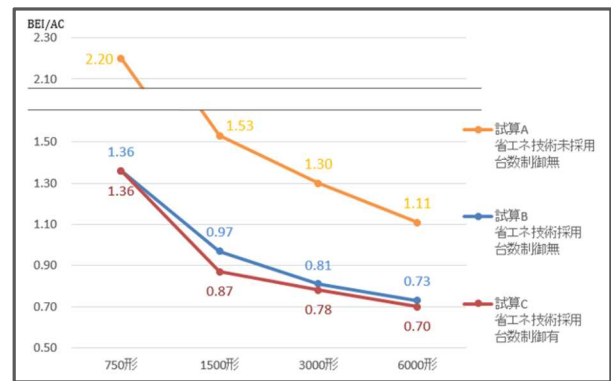


図-7 建物規模によるBEI/ACの変化

試算B 省エネ技術有・台数制御無

MJ/延床㎡/年

機器	750形		1500形		3000形		6000形	
	電力	燃料	電力	燃料	電力	燃料	電力	燃料
空調機	665	0	271	0	184	0	134	0
二次ポンプ	40	0	25	0	27	0	27	0
熱源機	55	544	57	561	50	519	31	522
一次ポンプ	105	0	74	0	54	0	27	0
冷却塔	12	0	13	0	13	0	10	0
冷却水ポンプ	24	0	26	0	13	0	16	0
計	901	544	466	561	341	519	245	522
合計	1445		1027		860		767	

試算C 省エネ技術有・台数制御有

MJ/延床㎡/年

機器	750形		1500形		3000形		6000形	
	電力	燃料	電力	燃料	電力	燃料	電力	燃料
空調機	665	0	271	0	184	0	134	0
二次ポンプ	35	0	22	0	25	0	26	0
熱源機	55	543	50	520	48	507	30	512
一次ポンプ	105	0	38	0	45	0	23	0
冷却塔	12	0	7	0	8	0	6	0
冷却水ポンプ	24	0	13	0	8	0	11	0
計	896	543	401	520	318	507	230	512
合計	1439		921		825		742	

表-3 空調一次エネルギー消費量の内訳

グラフでは全ての試算において、建物規模が大きくなるにしたがってBEI/ACが下がる傾向にあり、その中でも750形は1500～6000形と比較してBEI/ACが高いことがわかる。(図-7)

次に、省エネ技術の1つである台数制御で分類した試算B、Cについて、WEBPROで算出された空調一次エネルギー消費量の内訳を基に分析を行った。(表-3)

最もBEI/ACが低い試算Cにおける建物規模毎の比較では、空調一次エネルギー消費量合計に占める電力消費量の割合は建物規模が大きくなるにしたがって低くなった。(表-4)

試算C	750形	1500形	3000形	6000形
電力/合計	62%	44%	39%	31%

表-4 空調一次エネルギー消費量全体に占める電力消費量の割合

また、750形に対して6000形では電力消費量/m²が約1/4であったが、燃料消費量/m²に大きな差がなかった。

このことから、建物規模が大きくなると電力消費量/m²及びBEI/ACが小さくなり、負の相関があることがわかる。

試算B、Cの比較において750形では熱源機が1台で、台数制御は二次ポンプのみであったことでBEI/ACが同一になった。

一方で熱源機を2台とした1500形から6000形では電力消費量/m²、燃料消費量/m²がともに削減された。

(表-5)

試算C/B	750形	1500形	3000形	6000形
電力	▲1%	▲14%	▲7%	▲6%
燃料	0%	▲7%	▲2%	▲3%

表-5 電力消費量及び燃料消費量の増減率

このことから、特に熱源機を複数台設置可能な1500形以上の建物規模においては、空調一次エネルギー消費量が削減されることでBEI/ACが下がる傾向にあるといえる。

これらの試算の結果、台数制御を含めた省エネ技術の採用によるBEI/ACの低減効果はあるといえる。

なお、どの建物規模においてもZEB Orientedの達成の目安には届かなかったものの、BEI/ACは部屋の用途やレイアウト等により大きく変動するものであり、分析結果を踏まえて中規模以上の建物では中央空調方式の採用は可能であるといえる。

6. 台数分割の最適化

(1) 定常負荷への対応

空調設備においては、空調システムの負荷傾向を表現

する上で運転開始から室内が適温になるまでが「ピーク負荷」、室温を維持させる運転状態が「定常負荷」と呼ばれる。

運転時間の多くを占める定常負荷時に高効率な運転を行い、台数及び分割割合を最適化させることで実際の建物運用時に空調エネルギー消費量の削減が可能と考えられる。

建物規模毎の試算を基に6000形の熱源機の必要能力を1台当たりの機器効率が高い50～70%程度の出力時に、定常負荷に対応させるために6:4に分割し、省エネ効果が得られると想定していたが、空調一次エネルギー消費量において均等分割では742MJ延床m²/年、6:4の2台分割では753MJ延床m²/年になり約1.5%の増加になった。

WEBPROの計算上では、熱源機側は燃焼効率が一定で、負荷の変動に応じて燃焼量を比例制御することで、台数及び分割割合を変えても空調一次エネルギー消費量に差が生じない結果となったと考えられる。

(2) 選定機器の最適化

必要能力に対して定格能力の差が大きい場合、余力が生まれる反面、WEBPROを用いた計算では空調機側のエネルギー消費量が増えることになりBEI/ACが増大する。

そのため、定格能力が細かく設定されている機種においては、必要能力と定格能力の差が大きくなること、また定格能力の合計値が大きくなることを考慮した上で最適な機器選定が重要である。

なお、熱源機側は前述6.(1)のとおり、燃焼量を比例制御することでBEI/ACに差が生じないと考えられる。

建物規模毎の試算を基に6000形の二次ポンプを4台とした試算では、必要能力と定格能力の差が大きく電動機出力の合計が6.0kw (1.5kw/台)であったが、6台に見直した合計は4.5kw (0.75kw/台)になった。

WEBPROにおいては空調一次エネルギー消費量が4台で742MJ延床m²/年、6台で736MJ延床m²/年になり約1%の低減になった。

定格能力でエネルギー消費量が算出されるため、必要能力と定格能力の差が大きくなること、また定格能力の合計値が大きくなることを考慮し、台数や能力割合の最適化を図ることでBEI/ACの低減が可能となる。

7. 台数分割以外のエネルギー消費量削減に向けて

(1) 高効率機種を考慮した機器選定

冷暖房能力や電動機出力は、「建築設備設計基準⁷⁾」を目安とした機器で選定されているが、より効率が高い機種を製造している複数のメーカーや機種に絞り込むことにより、高効率化が図られて空調エネルギー消費量の削減が可能となる。

例として、高効率の機器が多いマルチパッケージ形空調機について、暖房定格能力50kwの機器では暖房定

格能力から電動機出力を除いた効率（以降、「成績係数」という。）は建築設備設計基準と製造メーカー6社の高効率機器を比較すると23%以上の差がある。

今後、電動機や変圧器のように高効率機器の規格化が進むことで、省エネルギーへの取り組みが促進されると考えられる。

建物規模毎の試算を基に6000形の吸収冷温水機で効率差を比較した試算では、成績係数が1.22の機種から最も成績係数が高い1.43の機種では効率が約15%改善される。

WEBPROにおいては、空調一次エネルギー消費量合計に占める電力消費量は、成績係数1.22で742MJ延床 m^2 /年、成績係数1.43で687MJ延床 m^2 /年になり約7%減になった。

高効率機器の採用によりBEI/ACの低減が可能となり、BEI/ACが0.70から0.65に低減になり建物規模毎の試算でZEB Orientedの目安とした $\text{BEI/AC} \geq 0.65$ が達成される。

設計時において高効率な機器のみに絞る場合、設計図の機器仕様により燃料消費量、電動機出力、成績係数等を条件明示する必要がある。

なお、施工時においては、採用予定機種で再計算を行い、機器の効率や必要能力と定格能力との差を確認し、設計時と比較して同等以上の性能であるか検証を行っている。

(2) 冷暖房機器の能力差への対応

吸収冷温水機は冷暖房兼用の熱源機器であるが、冷房定格能力 $>$ 暖房定格能力の機器であり、冷房定格能力 $<$ 暖房定格能力の積雪寒冷地において、暖房定格能力を基準に選定した場合は冷房必要能力に余力が生じることになる。

この余力への対応として、暖房専用の熱源機器である温水発生機を併用する手法があり、同機の電動機出力が吸収冷温水機と比較して小さいため、実際の建物運用時に暖房時の空調エネルギー消費量の削減が可能となる。

WEBPROにおいても同様に電気消費量の削減によりBEI/ACの低減が可能であると考えられる。

(3) 未評価技術のエネルギー消費量削減効果

WEBPROは省エネ技術毎に採用の有無等を入力するフォーマットになっており、評価できる省エネ技術が限定されている。

ZEB Orientedの判断基準で更なる省エネルギーの実現に向けた措置として現時点で評価されていないが、「公益財団法人 空気調和・衛生工学会」において省エネ効果が高いと見込まれている15項目の省エネ技術のうち1項目以上の導入を求めている。

現時点では部分的な評価に留まっている省エネ技術、また同学会において実績値に関する論文発表等でエネルギー削減効果が高いと認められている省エネ技術なども未評価技術になっているのが現状である。

当部で採用実績のある未評価技術としてCO₂濃度によ

る外気量制御がある。

これは、室内のCO₂濃度に応じて外気導入量を変化させ、在室人数に対して最適になるよう制御を行うことで、空調エネルギーを抑制する省エネ技術である。（図-8）

冬期に外気温との温度差が大きくなる積雪寒冷地において、外気負荷抑制によるエネルギー消費量の削減効果が高く、今後、効果検証が進み将来的に評価されることによりBEI/ACが低減する余地がある。

評価技術になるためには、CO₂濃度の推移をデータとして蓄積して設計外気量との差を評価する必要がある。

そのためには、BEMS（ビルエネルギーマネジメントシステム）等で時間毎のCO₂濃度、外気風量、在室人員数等を計測できるよう設計段階から考慮し、CO₂濃度による外気量制御の効果を定量化することで評価技術化への一助になると考えられる。

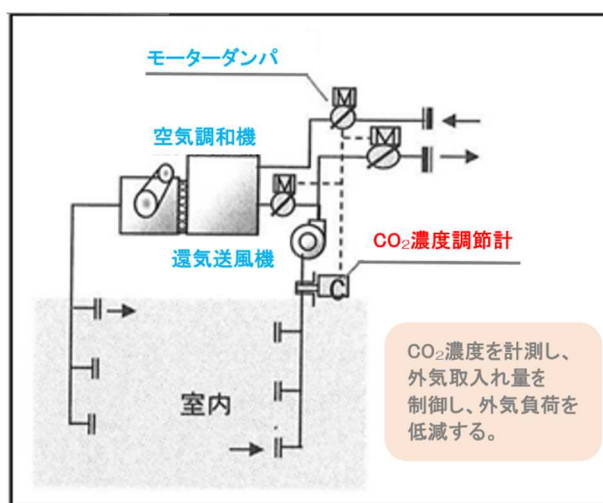


図-8 CO₂濃度による外気導入量制御の例⁸⁾

8. 考察

中央空調方式において試算した結果、WEBPROで評価されている省エネ技術の採用、二次ポンプ等の適正な能力選定、高効率機器の採用については、本研究で効果があることが検証できた。

ただし、当初効果を期待していた熱源機器の定常負荷への対応、冷暖房能力の適正化を考慮した省エネ技術のみでは本研究でBEI/ACの低減には至らなかった。

効果が確認された省エネ技術と、試算していない空調以外の省エネルギー技術の併用により、ZEB Oriented達成に近づくと思われる。

省エネ効果の高い技術を中心に検討することにより、作業量が多かった空調システム選定時の絞り込みができて業務効率化が図られる。

高効率機器などの採用により建設コスト、更新コストが増大する省エネ技術については、計画段階から予算面を考慮する必要がある。

なお、中央空調方式で原則ZEB Oriented相当以上とし

た「政府実行計画」の実現には、更なる省エネ技術が必要になるため、CO2濃度による外気量制御の評価手法の確立、高効率機器の更なる高効率化や選定手法の標準化が望まれる。

9. おわりに

2030年までのZEB Ready達成に向けて、更なるエネルギー消費量の削減が必須になるが、今後の当部発注事業においてZEB Orientedを達成した空調システムの採用事例が増え、ZEB基準に対応したノウハウのアップデートを繰り返し行うことにより積雪寒冷地において全ての公共建築物でZEBが達成することに繋がると考えている。

今後の実務において新たな標準仕様になりうる事例や、省エネ技術があれば継続して検証を行っていきたい。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：エネルギー白書2022
- 2) 環境省：ZEB PORTALサイト
- 3) 一般財団法人 省エネルギーセンター：オフィビルの省エネルギー
- 4) 国土交通省北海道開発局：2018年度北海道開発技術研究発表会論文 積雪寒冷地の公共建築物におけるZEBの推進について ―積雪寒冷地のZEBの実現をめざして―
- 5) ZEBロードマップ フォローアップ委員会：ZEB設計ガイドライン【ZEB Ready・小規模事務所編】
- 6) 一般社団法人環境共創イニシアチブ：ZEBリーディングオーナー
- 7) 一般社団法人 公共建築協会（国土交通省大臣官庁官庁官舎部設備・環境課監修）：建築設備設計基準
- 8) 環境省：温室効果ガス排出削減等指針