

東北支店建て替えにおける環境計画 —各種『ZEB』技術の検討—

森 一顕^{*1}・関城剛志^{*2}・高瀬知章^{*1}・星野賢司^{*1}・細田敏章^{*2}・小川泰男^{*3}

安藤ハザマ FM 事業として東北支店ビル建替プロジェクトが計画実施された。その際、総合建設業の保有建物としての社会的責任に鑑み、『ZEB』認証取得、カーボンフットプリント認証取得など環境性能の向上と認証取得を行った。本報では、オフィス部分へ適用した省エネルギー技術として、井水カスケード利用熱源、放射冷暖房と自然換気の併用、放射パネルの照明反射板活用といった各種技術についての取り組みを紹介する。

キーワード：『ZEB』、井水利用、放射冷暖房、自然換気、放射パネルの活用

1. はじめに

今後の建築において、カーボンニュートラル化への取り組みは必須と考えられる。当社 FM 事業として実施する東北支店ビル建て替えプロジェクト（以降、本プロジェクトと称す）においては、その先導的役割を果たすために、複数の省エネルギー・環境配慮技術を採用している。表-1に建物概要を、図-1に建物外観を、図-3に環境・省エネルギーに関して採用技術を紹介する断面図を示す。オフィス部では『ZEB』を、住宅部では ZEH-M Oriented を取得しており、また、国内初となるエコリーフや運用時を含めたカーボンフットプリントによる評価などを行っている。それぞれの認証について図-2に示す。

本報ではオフィス部の省エネルギー技術に特に注目して紹介する。オフィス部では建築・設備技術の連携、さらに高度な運用を意識した構成としており、具体的には、井水のカスケード利用熱源システム、放射冷暖房と自然換気の併用、放射パネルを利用した間接照明方式などの取組技術を採用している。



図-1 建物外観図

表-1 建物概要

名称	仙台 安藤ハザマビル
計画地	宮城県仙台市青葉区片平 1-2-32
構造規模	S 造, 一部 RC 造 地上 10 階 地下 1 階 延床面積 約 7,900 m ²



図-2 認証取得した環境ラベル
(BELS, エコリーフ, カーボンフットプリント)

*1 環境建築設計部 *2 設備設計部 *3 建築設計統括部

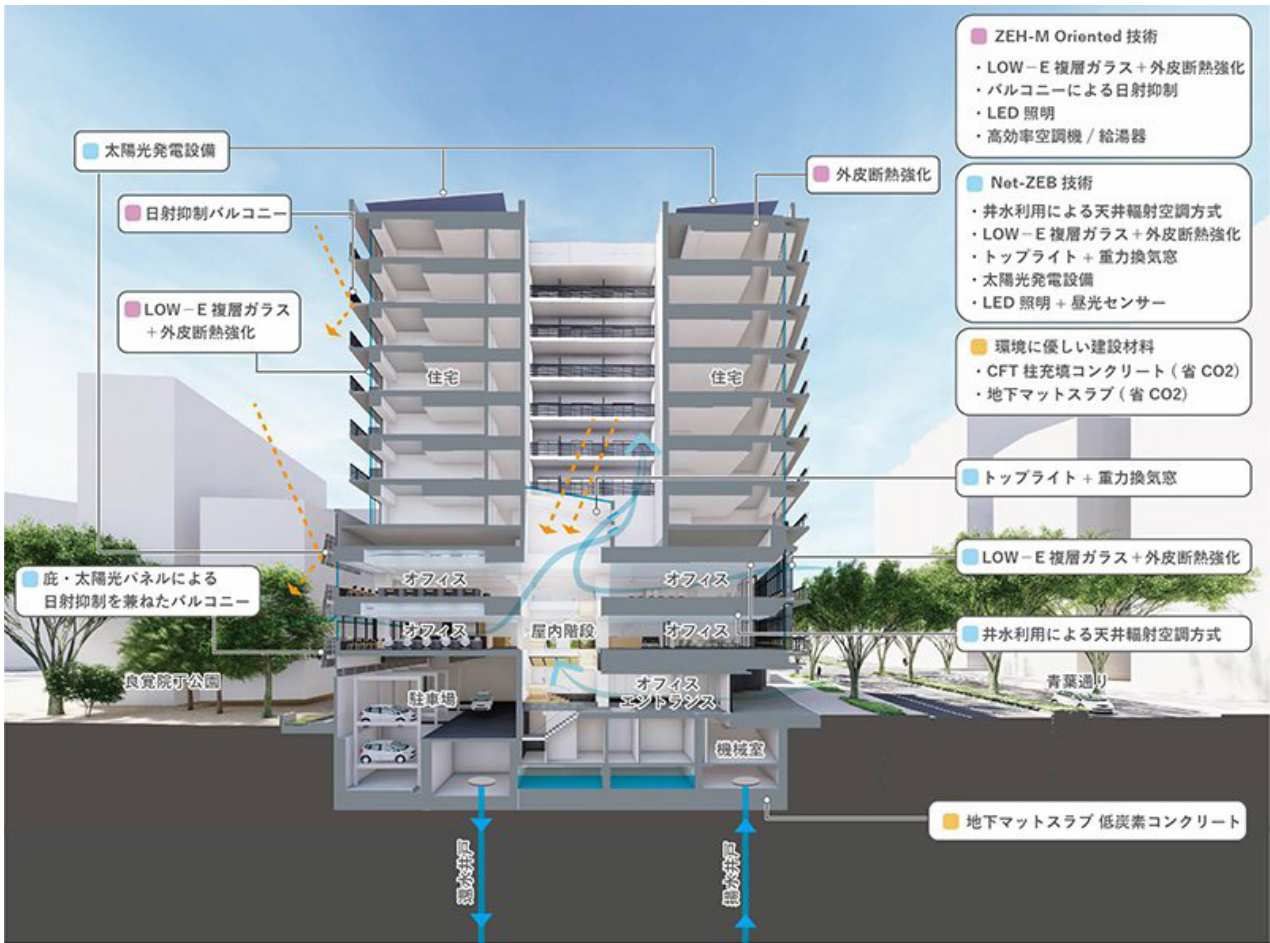


図-3 取り組み技術紹介断面図

2. 省エネルギーシステム決定プロセス

『ZEB』認証取得にあたっての取り組みとしては、断熱強化等の建築的性能の向上とともに、空調および熱源として井水利用の放射冷暖房（一部図中などに、「輻射空調」等表現があるが同意）、自然換気などを利用する。いずれも建築と設備が融合した形で実現される。本章ではこれら技術について採用にいたる経緯を紹介する。

2.1 熱源システム

事務所建物においては空調に多くのエネルギーが利用されるため、その省エネルギー化は最も重要となる。まず、熱源では敷地内の加熱・冷却のポテンシャルの活用を考えるべきとした。仙台は比較的井水が豊富なことで知られており、隣接建物での井水利用などの状況も確認された。また、井水は年間を通じておおそ該当地域の年間平均気温程度とも言われており、冷暖房の熱源として優れることで知られる。本プロジェクトでも、この井水利用に着目して計画を進めた。

一般的に、井水を熱源とした場合、水熱源冷凍機にて7℃程度の冷水を製造し空調機に供給する方式、あるいは

は冷媒ガスを直接室内機に供給する直膨方式が考えられる。いずれも、夏季30℃を超える外気を熱源として冷熱を製造する空気熱源と比べると高い効率が見込まれる方式である。

本プロジェクトでは、さらに高い省エネルギー水準を目指し、放射冷暖房方式を組み合わせ、冷房時には極力圧縮機を利用しない井水熱直接利用を主体とした熱源方式を採用した。天井放射冷房本方式では18℃程度の冷水にて顕熱処理を行うことから、圧縮機を利用せず熱源の大きな省エネルギー化が期待される。

具体的なフローについて、図-4に模式的に示す。本システムでは冷房時が特徴となる。井水や負荷の変化に対応できるよう、井水直接での冷房を優先しつつ、負荷を賅いきれない際には水熱源の冷凍機にて追いかける方式とした。熱源1次側のフローから確認する。井水はまずHE2の熱交換器を通過し、室内負荷側の戻り冷水を冷却する。その後HE1にて空調冷熱源となる①冷凍機の冷熱源となり、冷凍機排熱を得た井水はHE4のデシカント空調機再生温水熱源として利用され中水利用水槽などへ送られる。室内負荷・冷凍機温排熱を加熱源とするカスケード利用により井水利用の省エネルギー性能をさらに

高めている。

次いで2次側について確認する。室内負荷要求に応じて①冷凍機の発停が行われる。負荷処理に余裕がある際にはHE2での井水冷却のみで室内負荷およびデシカント外調機の熱源は賄われる。不足する場合には①冷凍機が起動しHE5にて冷水が追加冷却される。

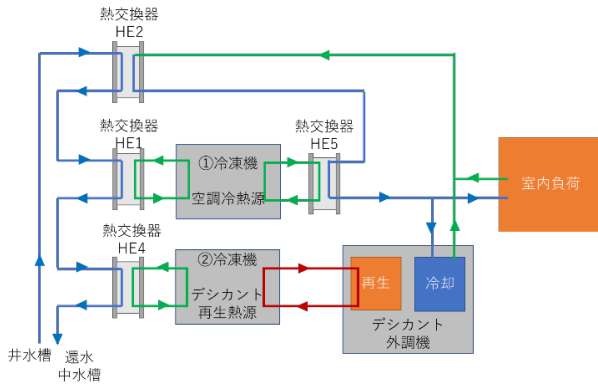


図-4 熱源システム模式図

2.2 空調方式

空調方式については、熱源との整合および居住性・快適性への配慮より放射冷暖房方式を採用した。採否に先立ち、室内温度分布等を比較・確認した。表-2にその一部として鉛直断面温度分布の計算例を示す。空調吹き出しによるドラフトが放射冷暖房では生じず、温度ムラも小さくて居住性が高まることがわかる。

放射冷暖房方式には、いくつかの方法がある。冷温水を配管と金属フィンで構成する天井パネル方式、縦型に結露受けと併せて設置することで結露を許容し、水温度を下げ、設置面積を抑制する壁型の方式¹⁾、別途空調空気により天井チャンパー内を冷却し天井面を2次冷却する空気式などである²⁾。その他に、躯体蓄熱を併用することで熱源・搬送機器容量を極小化する、躯体蓄熱放射冷暖房方式と呼ばれる、省エネルギー化やコスト面で魅力的な方式がある。この方式では床・天井に増し打ちしたコンクリート内に配管を敷設し、冷温水を通じることで冷暖房を行う。その際、1日での室温変動をコンクリート等の熱容量に抑制しつつ快適域の範囲で許容する。これにより設備容量を抑制し、また高効率な動作点での運用が可能となる。

本建物の構造はS造、一部RCであることから、スラブ等のコンクリート部熱容量に着目し、躯体蓄熱を利用した放射冷暖房とするかについても初期段階で検討を行った。試算方法は割愛するが、熱容量質点系のモデルにて解いており、室内空気を1質点として柱、什器等の熱容量を集中させている簡易な計算である。その結果の一部として夏季代表日の室温を図-5に示す。室内熱容

量3ケースにて1日の室温変動を計算している。室温24℃～27℃を目標の範囲と定めた。図中網掛け範囲である。現設計では室温が始業時24℃から終業時刻に28.5℃程度に達する。現状のS造梁がRCとなる程度を想定し、コンクリートが100mm/床面積㎡程度まで増加させると目標の範囲に収まった。最終的には、本増加量では鉄骨造の構造的有利さを損なうほどと判断されたため、本プロジェクトでの躯体蓄熱放射冷暖房の採用は見送った。但し、OA機器や照明などの省エネルギー性能向上が今後も見込まれることから、近い将来には成立する可能性もある。今後に期待し検討結果の一部を示した。

表-2 冷房時の空気温度比較（一般空調と放射冷房）

検討ケース	評価結果（鉛直断面空気温度分布）
ケース1 一般空調方式	
ケース2 放射冷暖房	

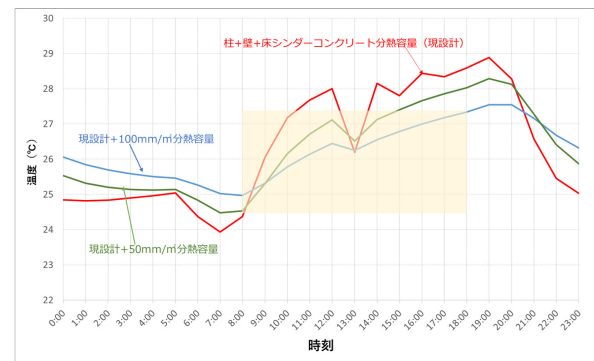


図-5 建物熱容量ごとの1日の室温変動

以上の検討を踏まえ計画された天井パネルの配置を図-6に示す。外気導入および潜熱処理については、デシカント外調機にて対応している。放射パネルの除去熱量は通常60W/㎡程度で、天井面積に対する敷設率は40～60%程度となる。デシカント外調機は床下給気の一部室内負荷も負担する。意匠面よりフルハイトの開口を設けており、外周部の熱負荷処理には天井パネルのみでは不足することが見込まれた。そのため一般のパネルよりも単位面積あたりの熱処理能力の大きな機器として、コイルと誘引空気とを組み合わせる熱除去を行うチルドビームと呼ばれる機器を建物ペリメーターエリアに配置した。



図-6 天井パネル配置図

3. 設計の検証

ここまで、空調・熱源の決定プロセスについて記載したが、本章では実施設計、施工段階における検証内容について紹介する。

3.1 熱源システム

本プロジェクトの省エネルギーにおいては井水が重要な役割を果たす。井水採用にあたっては取水量、還水量や水質等を試掘にて事前に調査した。なお試掘作業にあたっては先行して建物解体が必要となる。そのため、本来先行して決めるべき井水量について設計段階のやや後半で確定する工程となった。当初想定と異なる調査結果

に備え、本施工時の井戸本数など、いくつか代替案を持って設計を進めた。本プロジェクトでは想定通りの水量、水質が得られたが、井水利用にあたっては試掘のタイミングを含め事前における十分な検討が重要である。

本システムでは井水熱源の直接利用を極力長時間運用することが省エネルギーにつながる。そのため、システム上のボトルネックの有無の確認のためシステムシミュレーションを実施した。システムシミュレーションには各種ソフトが提供されているが、今回は簡易なシミュレーションのため独自で作成したものを利用した。詳細は割愛するが、室内負荷に基づき供給冷水温度・流量を定め、順次1次側動作点を定める方法にて計算している。熱交換器など一部非線形項を含むが、収束計算により結果を求めた。

図-7に構築したシステムシミュレーションの結果の一部を示す。前述の通り、低負荷時には井水直接利用として冷凍機は稼働せず、冷水流量制御にて負荷追従させる。負荷増大時には冷凍機を稼働し、結露を発生しないよう、送水温度一定にて、流量制御にて負荷追従する。各負荷条件下での動作状況は、各機器能力についてボトルネック等が発生していないかを確認した。本計算結果の事例として、図-8に冷凍機の稼働開始の負荷率（室内想定ピーク負荷に対する実負荷の比率）について、熱交換器の伝熱面積毎に算出した結果を示す。熱交換器伝熱面積はより大きいことが省エネルギー上、特に井水直接利用時間を長く取る上で好ましいが、過大となると設置面積がかさみ、コストを圧迫する。本試算の結果では伝熱面積15㎡程度までは面積の影響が大きいですが、以降は負荷率80%程度に向けて漸近する。本プロジェクトでは設置面積、コスト等から伝熱面積約18㎡弱とした。本熱源システムは実際の制御もかなり難解で、運用中に

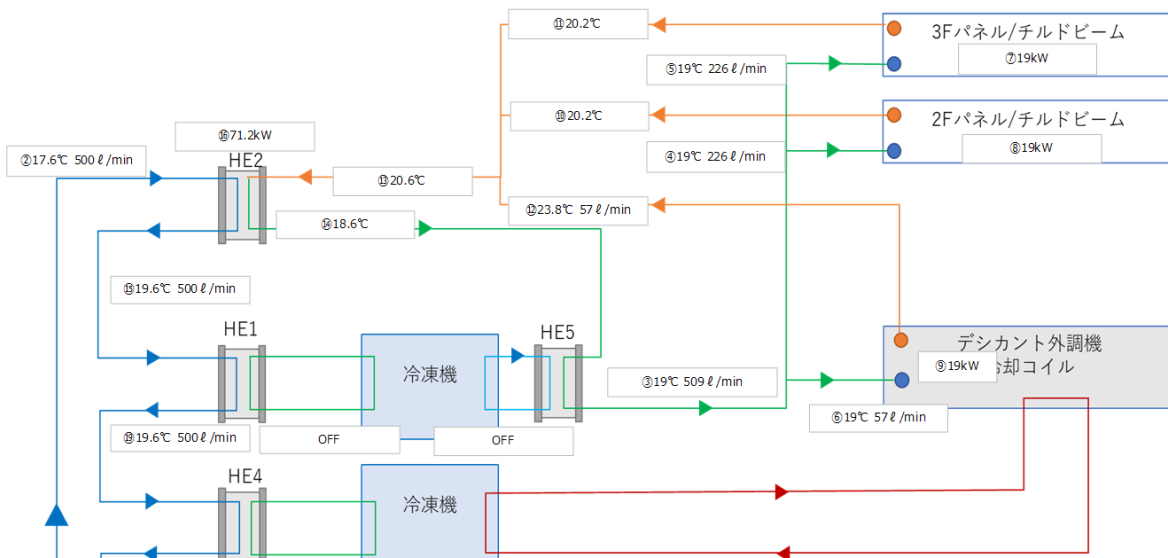


図-7 熱源システムシミュレーション

稼働の妥当性を即座に判断するのは困難である。システムシミュレーションと運用とを適時比較するなど、誤動作有無の確認、あるいは竣工後の性能検証、コミッショニングなどに役立てることが可能である。

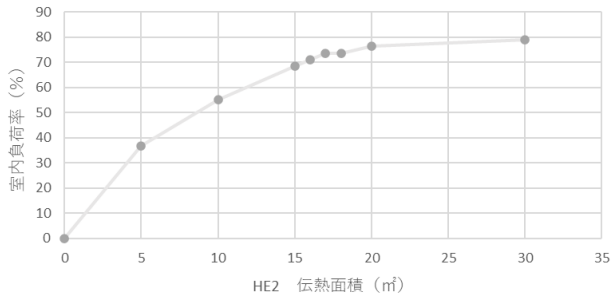


図-8 熱交換器伝熱面積毎の冷凍機起動負荷率

3.2 空調システム

温調としては放射冷暖房方式を主として一部チルドビームにて対応している。天井放射パネルは通常水平に配置されるが、ボルト状に配置することで敷設面積を稼いだ。さらに照明を中央に配し、間接照明を得ることで、空間の明るさ感を確保する計画とした。図-9、図-10に断面図、照明模式図を示す。施工にあたっては標準施工と異なるため、いくつかの懸念があった。地震時の揺れや部材間の干渉、明るさ感、通水障害等による冷却能力の増減有無である。これらを確認するため実大模型により試験を行った。その様子を写真-1に示す。各試験に関する詳述は紙幅の関係より割愛するが、除去熱量について計画値が得られることを出入り水温・流量と周囲空気温度から確認し、写真-2のとおり熱画像にてパネル内通水障害などが無いことを確認した。まぶしさを感じず、明るさ感を得るための妥当な照明器具の設置高さについて、段階的に変化させながら輝度・明るさ感³⁾・照度計測と目視により確認した。模型中央で測定した輝度、明るさ感を写真-3、写真-4に示す。照明器具の発光が天井面に沿って拡散する様子から、本方式の有効性を確認し、また、天井、床ともNB値5-9程度と、適切な明るさ感が得られる設置高さを設定することができた。

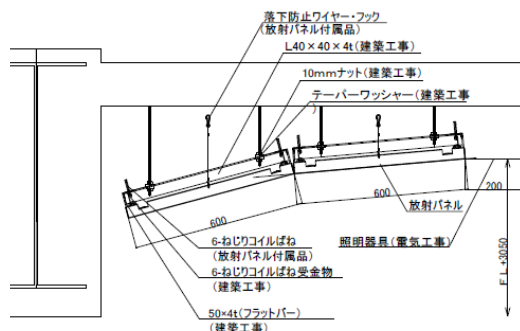
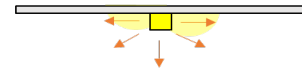


図-9 断面図

◆水平：天井面を照らしにくい



◆ボルト：天井面が明るい

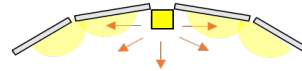


図-10 照明模式図



写真-1 実大模型実験状況

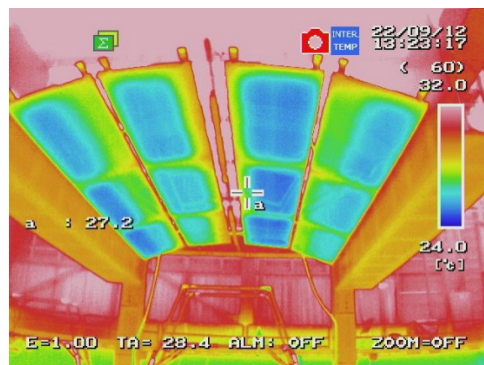


写真-2 通水時熱画像

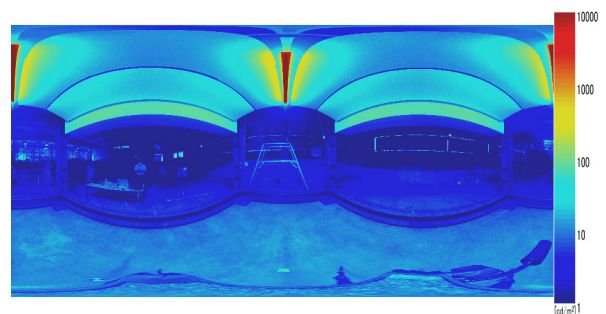


写真-3 輝度分布

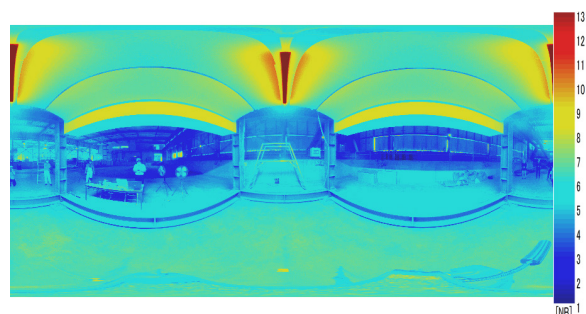


写真-4 明るさ感分布

3.3 放射冷暖房と自然換気併用の検討

空調エネルギーの削減にあたっては、自然換気についても有効と考えられる。ZEB 認証取得にあたっては未評価技術として省エネ効果を算入できないが、関東と比べて冷涼な東北地方においては積極的採用を検討すべきである。一方で放射冷暖房との併用にあたっては天井に冷却面を有することから、運用・制御を誤れば結露の懸念がある。効果的な運用かつ不具合防止のため検討を行った。

本プロジェクトの自然換気ルートは図-3に示した採用技術紹介断面図の通りである。対向窓での換気とともに、階段頂部にトップライトの側窓がバルンサー付き窓（室内正圧時には排気し、屋外正圧時には閉塞し逆流を防止する機構）を設け煙突効果での排気を計画している。なおバルンサーにより逆流を防止している。

自然換気時の室温について試算した際の計算モデルを図-11に、結果を表-3に示す。地域の卓越風向は北北西、南東と確認されたので、当該風向2ケース、10m高さでの風速0.5m/s、1.0m/s、2.0m/s、5.0m/sの延べ8ケースを試算した。計算条件としては、高さ方向1/4べき乗測にて流入風速分布条件を与え、内部発熱はピークの70%、低風速時には外周開口からとし、外皮負荷については無視しトップライトの日射負荷のみ考慮した。放射冷暖房は稼働していない。表中割愛したが、南東風ケースではすべての風速ケースにて外気温度+5℃

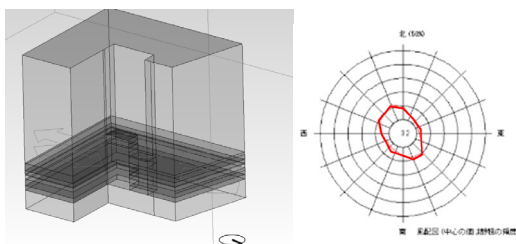


図-11 計算モデルと風象図
(オフィス部2,3層再現, 外周部各方位建物2倍程度再現)

以内が確認された。一方北北西風のケースでは風速0.5m/sのケースにおいて室温28℃程度とやや高温となったが、本水準は許容範囲と判断した。その相対的に高温となる原因としては、北北西弱風時にはトップライト部分が屋外風にて押し込まれ正圧となるため、煙突効果によるトップライトからの排気が阻害され、またもう一つの換気ルートである対向窓での換気量が弱風のためやや少ないことと考えた。本条件下で室温が許容範囲であり、他条件下でも弱風時でトップライトの煙突効果による換気にて、有風時で対向窓の換気にて室温確保が可能であることを確認した。

なお、自然換気検討初期には、対象フロア内の間仕切り等は検討していなかったが、会議室等の小部屋において自然換気の効果が期待できない室の発生が見込まれた。また、究極の省エネルギーを考えるのであれば、極力自然換気を活用し、補助的に放射冷暖房を稼働させることが最も合理的となる。以上より自然換気と放射冷暖房の併用を許容する自然換気制御について検討した。

窓開閉については、条件に応じて自動開放する方式を採用した。人の手で開閉する方法も考えられたが、確実な履行と省エネルギーの実現、閉め忘れなどの防止等への配慮による。なお局所的な気流での寒さなどに配慮し手動閉については許容している。

開放条件判断には、外気条件によるシンプルな方法のほか、内外エンタルピー条件による方法、など幾つか提案されており、それらについては文献4)にて類型化とその効果について整理されている。本文を参考に、また今回実施する放射冷暖房と自然換気の併用についての最大の懸念点である結露リスクに配慮し、外気温度上下限と露点温度にて制御する方式とした。

ただ、会議室と事務所との要求送水温度の不一致の懸念や結露発生リスクなど、室利用時の各種条件下での成立性については個々慎重に検討する必要があると考えた。そこで各条件を洗い出し各条件下で起こりえる状況

表-3 計算結果 (北北西風)

外部風速0.5m/s	外部風速1.0m/s	外部風速2.0m/s	外部風速5.0m/s
室温21.0~27.5℃	室温21~25.5℃	室温20.0~25℃	室温20.0~21.5℃

を個別検討した。その結果を表-4に示す。一覧にてリスク発生が予見されたケースでは図-12のように具体的な動作状況を想定し不具合となりうるか個別検討した。外気乾燥による低湿度状況など一部懸念はあるものの重大なものはないとの確認を経て、実装に至った。

表-4 自然換気 制御上の発生事象の洗い出し

ケース	運用状況						リスク評価					
	外気温(℃)	外気DP(℃)	換気量	オフィス内部負荷	会議室内部負荷	送水温度	オフィス			会議室		
							結露リスク	乾燥リスク	高湿リスク	結露リスク	乾燥リスク	高湿リスク
1	24	16	大	大	大	17	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
2	17	16	大	大	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
3	24	8	大	大	大	17	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
4	17	8	大	大	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
5	24	16	小	大	大	17	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE
6	17	16	小	大	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
7	24	8	小	大	大	17	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE
8	17	8	小	大	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
9	24	16	大	小	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
10	17	16	大	大	大	19	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	TRUE
11	24	8	大	小	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE
12	17	8	大	小	大	19	FALSE	FALSE	TRUE	TRUE	FALSE	TRUE
13	24	16	小	小	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
14	17	16	小	小	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
15	24	8	小	小	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
16	17	8	小	小	大	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
17	24	16	大	大	小	17	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE
18	17	16	大	大	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
19	24	8	大	大	小	17	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE
20	17	8	大	大	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
21	24	16	小	大	小	17	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE
22	17	16	小	大	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE
23	24	8	小	大	小	17	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	FALSE
24	17	8	小	大	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
25	24	16	大	小	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
26	17	16	大	小	小	19	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE
27	24	8	大	小	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE
28	17	8	大	小	小	19	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE
29	24	16	小	小	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
30	17	16	小	小	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
31	24	8	小	小	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE
32	17	8	小	小	小	19	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	FALSE

評価し、所定目標に届くことを確認したのち認証手続きへと進む。当初計画にて試算した結果では目標とする『ZEB』に届かなかった。熱源は高効率であったが、井戸を含む搬送動力が大きかったことの影響があったためである。そこで、ポンプの余力などを見直し適正化など改善を図った。また太陽光発電についても壁面設置を増設するなどした。熱源のカスケード利用など複雑な構成のため、試算方法についても、評価機関との協議が必要であった。設計の早い段階より協議を重ねたことで、大きな混乱なく変更に対応できた。

5. まとめ

本報では、本プロジェクトの『ZEB』達成に向け、井水カスケード利用熱源、放射冷暖房と自然換気の併用、放射パネルの照明反射板活用といった各種技術について実施してきた検証を紹介した。

関係各位には本プロジェクトの計画、設計、施工にあたり多大なご尽力をいただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) ピーエス工業ホームページ
<https://ps-group.co.jp/product/lineup-r/hr-c> (2023.09 入手)
- 2) 株式会社インターセントラルホームページ
<https://www.i-central.co.jp/system/> (2023.09 入手)
- 3) 中村芳樹：明るさと明るさ感、照明学会誌, 86 巻, 10 号 pp. 746-753, 2002
- 4) 山本佳嗣, 田辺新一：自然換気システムの換気口開放条件に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 722 号 pp374-384, 2016 年 4 月

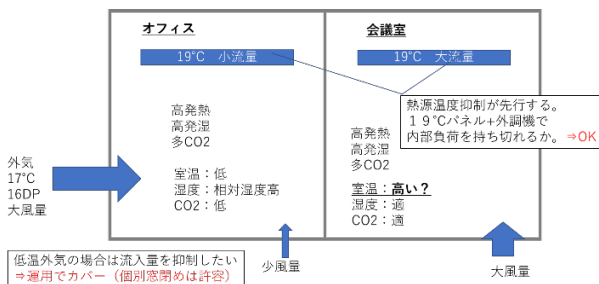


図-12 個別検討例

4. 外部評価の取得

本計画では事務所部分で『ZEB』認証を得ている。認証取得にあたっては、WEB プログラムにより建物性能を

Environmental plan for the Tohoku branch building reconstruction project
 -Consideration of various 『ZEB』 technologies-

Kazuaki MORI, Tsuyoshi SEKISHIRO, Tomoaki TAKASE, Kenji HOSHINO, Toshiaki HOSODA and Yasuo OGAWA

The Tohoku branch building reconstruction project has acquired 『ZEB』 and carbon footprint certification. This report introduces various technologies used in this project, such as the use of well water cascades as a heat source, the combination of radiant heating and cooling with natural ventilation, and the use of lighting reflectors on radiant panels.