HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	地中熱源ヒートポンプのフィージビリティースタディーと導入ポテンシャル
Author(s)	長野, 克則
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 11, 43-48
Issue Date	2003-10-31
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/7043
Type	bulletin (article)
Note	第11回衛生工学シンポジウム（平成15年11月6日（木）-11月7日（金） 北海道大学学術交流会館）. 企画セッション2. 産学官連携によるエネルギー有効利用の推進をめざして. 「学」の視点から
File Information	11-PS2-4_p43-48.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

企画セッション

地中熱源ヒートポンプのフィージビリティースタディーと導入ポテンシャル

長 野 克 則（北海道大学・大学院工学研究科）

Potential of CO_2 Reduction by Ground Source Heat Pump Systems in Hokkaido

Katsunori NAGANO (Hokkaido University)

１．はじめに

北海道における一人当たりの年間 CO_2 排出量は 1996 年度で 3.35 トンであり、我が国平均値である 2.50 トンに比べ 1.34 倍となっている。これは、関東地域の 2 倍以上の暖房用消費エネルギーに起因している。戸建て住宅における年間の暖房エネルギー使用量は灯油換算で平均約 1500L であり、その熱源は 94%以上が灯油である。したがって、暖房用エネルギーの削減と石油依存からの脱却はセキュリティや地球環境から考えて急務である。

1997 年春に我々は写真 1 に示すように北海道大学構内にローエネルギー実験住宅を建設し、実験を行ってきたが、寒冷地のローエネルギー建物においては地中熱源ヒートポンプシステム（Ground Source Heat Pump System, 以降 GSHP とする）を暖房システムに適用することは必要不可欠であるとの結論を得た。

２．GSHP の構成と現状

我が国では GSHP と言えば、図 1 に示すよう地上部のヒートポンプユニットと地盤の熱交換器が結合されたシステム(Ground-coupled type）を指すことが多い。1997 年以降、欧米では地中熱源 GSHP の設置台数が飛躍的に増加している。2001 年の実績および伸び率から推定すると、2002 年は米国で年間約 6 万台、スウェーデンだけでも 3.5 万台以上が設置されたと予想できる。特にスウェーデンではそのほとんどが Ground-coupled type であり、人口が 890 万人であるを考えると驚異的な数値といえる。現在、全世界の市場規模は年間 12 万件以上に成長していると見込まれる。一方、我が国では、1950 年代から断続的に研究や導入がされてきたが、2002 年末、国内で稼働しているシステムは未だ合計 50 件程度である。これは、国内では設置コストが非常に高く、家庭用暖房システムを例に取ると灯油温水システムに比べて 4～5 倍となることが大きな原因である。しかし、ここ数年にいくつかの研究会等が立ち上げられ、その中から欧州レベルに近い地中熱交換器設置費の達成、世界初の地下熱源対応オールインワンパッケージ・インバーターヒートポンプユニットの開発など国内企業の努力によりここ 2 年以内には住宅用 GCHP 暖房システム設置コストは欧州レベルとほぼ同等になる目処が立ってきた。

３．GSHP 設計支援ツールの開発

今後の健全な市場の発展には標準的な GSHP 設計ツールの存在が欠かせないと考え、国内市場に見合った設計ツールを開発した。その特徴は、1)超高速：年間時刻毎の計算が数十秒以内、2)ユーザーフレンドリー：誰もが簡単に使える、特に、簡易建物熱負荷計算、建物データ、地中熱交換器種類、使用ヒートポンプ性能、循環ポンプ、土壌データ、LCA データベースを内蔵、3）グラフィカルな出力：イニシャルコスト、ランニングコスト、年間システム挙動、SCOP、LCC、$LCCO_2$ 等の計算結果をビジュアル表示できる点にある。

写真１　北海道大学ローエネルギーハウス

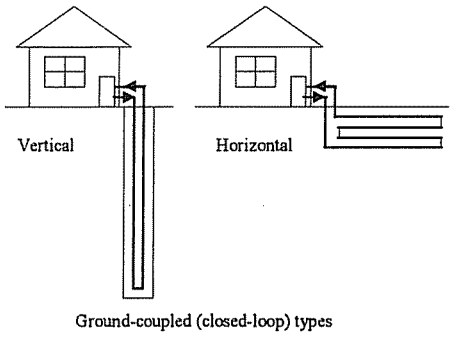


図１　地中熱源ヒートポンプシステムの構成

地中内の熱移動計算エンジンには地下水流れの無い土中に埋設されている単一の長い地中熱交換器を想定して、無限円筒熱流理論を用いた。国外の設計ツールでは扱われていない地中熱交換器内の熱媒の熱容量を考慮することで、熱媒温度の負荷への追従がうまく再現され、特に建物基礎杭利用の大口径地中熱交換器システムの計算では有用である。

4．札幌市郊外の公共建物への導入検討例

本設計支援ツールを用いて、札幌市近郊に建設予定の公共建物の暖冷房システムにGSHP導入を検討した(図2)。建物の延べ床面積2,000m^2、室内高さ5.5mの平屋である。建設予定地は地下36mまでN値50以下の泥炭と火山灰、河川堆積物が積層となった軟弱地盤であり、建物基礎として回転圧入鋼管杭の使用を検討している。鋼管杭は約7mピッチで70カ所(10×7)、代表的には口径400mm、長さ37mの鋼管杭を合計80本を設置する見込みで、今回はこの中空の鋼管杭の中に熱媒として水を満たして地中熱交換器として使用することを考えた。この場合、GSHP工事費の中で大きな割合を占める地中熱交換器埋設のための掘削費用をゼロとすることができる。限界に近いものの鋼管杭内の水を直接熱媒として利用できる可能性があること、そのときSCOPは4.2で、暖房の1次側に関わる年間CO_2排出量は10t以下であり、灯油システムに比べ1/4以下となる計算結果が得られた。

5．戸建て住宅への導入検討例

次に、図3に示すような暖房面積が100m^{2}の戸建て住宅の暖房に導入した場合の計算を示す。Uチューブ型熱交換器を100mを1m当たり8千円で工事した場合の計算例である。暖房期間中の熱媒温度は約-14℃まで低下するが、SCOPは4.0以上となっている。図4はUチューブ型地中熱交換器長さに対する60年間のライフタイム期間における平均年間コストを示したものである。長さが短くなるつれてコストは低くなる。これは、このコスト条件であっても長さを増したことによるイニシャルコストの増分は、COP向上に伴う電力消費量の減少では賄えないことを意味している。この計算条件では年間コストは8万円となり、温水ボイラー＋エアコンによる方式の14万円に比べ大幅に小さくなっている。この場合、回収年数は10年と計算された。

6．GSHP導入によるCO_2排出量削減効果

次に、上記の結果を基に北海道の新築住宅の3%、既存住宅の0.5%、普及増加率が年率5%で導入されるとした場合の10年後のCO_2削減効果の検討を行った。10年間では合計8.5万件の住宅に導入される計算となるが、そのとき約33万トンのCO_2排出量が削減できるポテンシャルを有することがわかった。

7．まとめ

関係機関や企業の努力により地中熱源ヒートポンプシステムは我が国でも徐々に注目されるようになってきた。今後2年以内にはコスト的にも欧州並みに近づく目処が付いた。北海道でもスウェーデン並みに年間1%程度の住宅に導入された場合、10年間では年間数十万トンのCO_2排出量が削減できるポテンシャルを有する。ここで、紹介した設計支援ツールが普及の一助となることを期待する。

参考文献：長野克則他、土壌熱源ヒートポンプをめぐる世界的状況、平成14年度日本冷凍空調学会学術講演論文集、pp.15-18

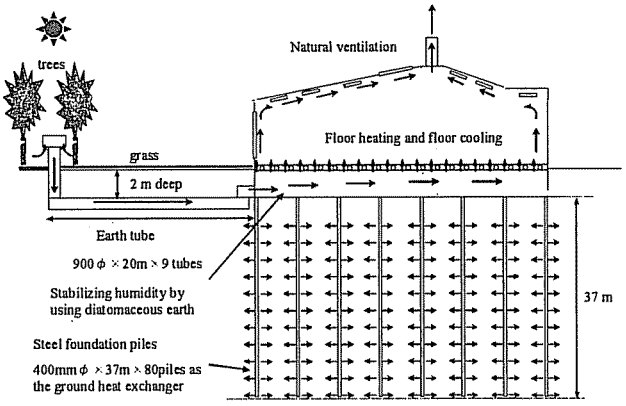


図2 公共建物の自然エネルギー利用空調概念図

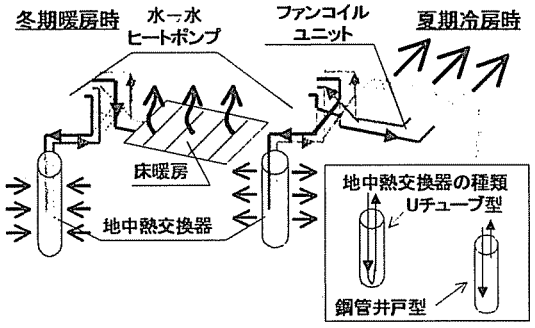


図3 計算対象とした住宅のGSHP暖冷房システム

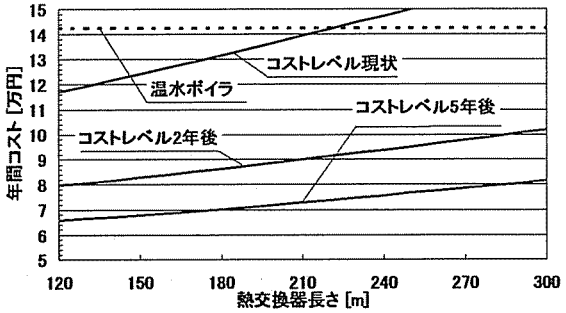


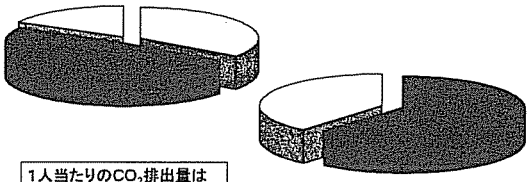
図4 ライフタイムを60年間とした場合の熱交換器長さに対する年間コストの変化

地中熱源ヒートポンプのフィージビリティースタディーと導入ポテンシャル

北海道大学
長野克則

1

北海道の最終エネルギー消費動向と住宅の消費ｴﾈﾙｷﾞｰ割合



1人当たりのCO_2排出量は3.35 CO_2-t/年（1996年）であり、日本平均の1.34倍

家庭用暖房エネルギーの94%が灯油

特に、暖房の省エネルギー化が重要

グランドソースヒートポンプシステム(GSHPs)

⇩

欧米ではコスト競争力のある省エネルギーシステムとして認知されている

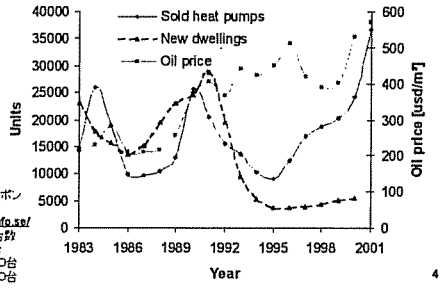
2002年末の各国の導入(2000年末の実績値と伸び率から推定)

米国	：	55万台、年間5.5万台
スウェーデン	：	23万台、年間3.5万台
ドイツ	：	6万台、年間6,000台
スイス	：	4万台、年間3,500台
オーストリア	：	3万台、年間2,500台

導入実績100万台規模,年間10万台以上のマーケット

スウェーデンのヒートポンプの市場
石油価格、新築住宅着工件数

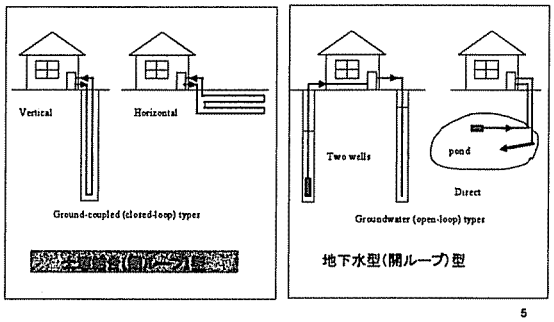
2001年は年間37,000システム販売
（その72%が、土壌熱源である）



スウェーデンヒートポンプ協会:SVEP
http://www.svepinfo.se/
ヒートポンプ販売台数
1995年:7000台
1998年:20, 000台
2001年:36, 000台

4

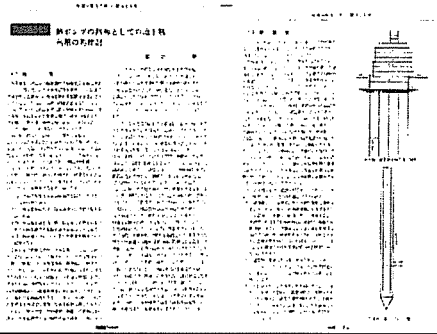
1. 土壌熱源ヒートポンプの形態



5

熱ポンプの熱源としての地下熱利用の再検討、 高志 勤、1962年 冷凍

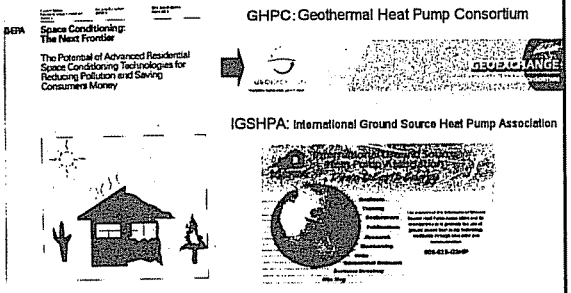
・都市空気中への冷凍機排熱の放出による都市の昼熱化の予測
・建物コンクリート基礎杭のヒートポンプ地中熱交換器としての利用可能性
・冷房排熱の地中への放熱による都市の昼熱化防止
　　→建物高さの2.5倍以上の基礎杭長さが必要



6

1993年 EPA Report

近い将来出現するGSHPは最も環境に優れたシステムであると結論

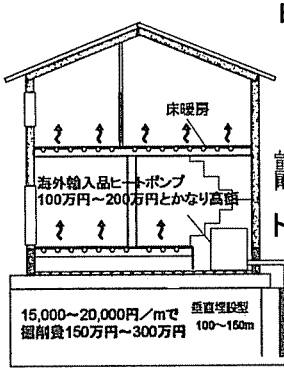


GHPC: Geothermal Heat Pump Consortium

IGSHPA: International Ground Source Heat Pump Association

7

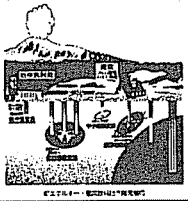
日本国内での問題点



高額なイニシャルコストにより ペイバック不可能なシステム

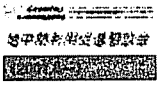
トータルシステムコスト：
550～600万円

我が国での普及拡大への動き



HPTCJ

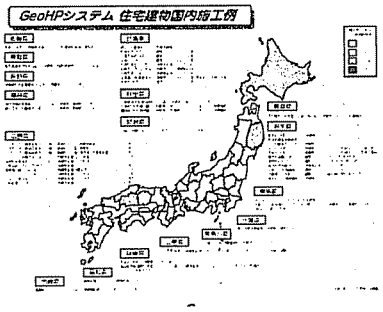
地下熱利用とヒートポンプシステム研究会
(2002.4～, 主査：長野克則)



9

・我が国のGSHPs普及状況

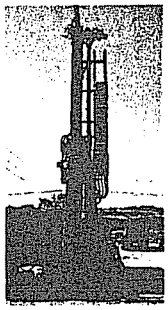
暖冷房・給湯システム：計50件程度、融雪システム計20件程度

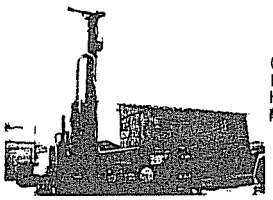


(NEDOパンフレットより)

10

小型・高速度削孔の熱源用ボアホール専用削孔マシンの使用による掘削単価低減の実現





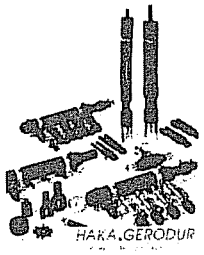
(写真：札幌市
日伸テクノ所有、
ドイツHUTTE社
削孔機)

高性能削孔機械の導入、合理的作業、経営努力による地中熱交換器設置コスト8,000円／mの実現

（掘削費、Uチューブ代、Uチューブ挿入費、グラウト代、充填不凍液代の合計コスト）

11

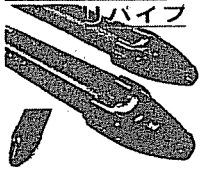
輸入品のUチューブ



国産Uチューブの販売（2003年夏から）

地中熱交換システム用パイプ

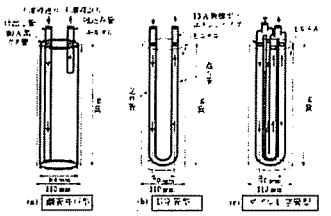
Uパイプ



INOAC社パンフレットより

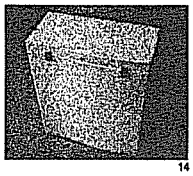
12

U字管、ダブルU字管の採熱特性に関する実験と解析（1993年～1994年、北大、長野、濱田、落藤、朝桐）



小型・高性能オールインワンパッケージの量産型インバータ地中熱源ヒートポンプの2004年7月量販へ向けた開発

平成14年度 北大・サンポット共同研究成果
・最大出力7.4kW, COP4.0
※国内品(a社製:4.9kW, COP3.5)
(b社製:4.3kW, COP1.8)
・世界初インバーター搭載
GSHP
・新冷媒R410A
・コンパクトボディの暖房専用機



14

・潜在市場

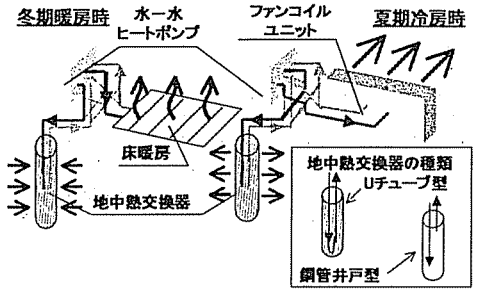
オール電化住宅の伸び
東北・北海道で年間13,500棟がオール電化住宅
オール電化住宅の新築着工比率は年々増加中
セントラルヒーティングの南下
・セントラルヒーティングの南下に伴う関東圏や北陸における需要
・北海道の新築戸建て住宅の94%はセントラルヒーティングシステムを採用(そのうち、ハウスメーカーにおいては灯油温水システムは74%にのぼる。また全体の20%は電気蓄熱暖房器による)
熱源買い換え需要
床暖などのインフラがある住宅における熱源の買い換え需要
基礎杭使用住宅への採用
基礎杭を採用しているハウスメーカーは多く、その住宅への採用など潜在市場規模としてはかなり大きいものがある。

Simulation tool for GSHP "Ground Club" made by Nagano & Kazura

- User friendly
  MS Visual Basic
- Fast for calculation time
  hourly annual transient calculation < 30 sec
- Output
  - Energy consumption
  - Cost evaluation: LCC
  - Environmental evaluation:LCCO2

16

計算対象システム



17

Calculation Engine

4. Heat transfer in soil and pile surface temperature

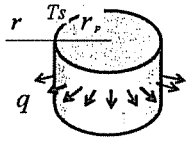
cylindrical heat source theory in infinite solid

4.1 Basic equation ;

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_s}{\partial r}\right)$$

B.C ; $-\lambda \left.\frac{\partial T_s}{\partial r}\right|_{r=r_p} = q$

I.C ; $T_s = T_{s0}$



4.2 Outside surface temperature of pile;

$$T_s\big|_{r=r_p} = T_{s0} - \frac{2q}{\pi\lambda_0}\int_0^\infty (1-e^{-a_s t_c})\frac{J_0(ur)Y_1(ur_p) - Y_0(ur)J_1(ur_p)}{u^2[J_1^2(ur_p)+Y_1^2(ur_p)]}du$$

(1) for Type1; $q = \frac{Q_{wz}}{A_p}$ $\quad Q_{wz} = K_{wz}A_p(T_s|_{r=r_p} - T_w)$

(2) for Type2; $q = \frac{Q_{bz}}{A_p}$ $\quad Q_{bz} = K_{bz}A_p(T_s|_{r=r_p} - T_b)$

18

北海道の住宅へのGSHP導入効果
一戸あたりの一次エネルギー消費量と二酸化炭素排出量

ストック住宅

	一次エネルギー消費量 [GJ]			二酸化炭素排出量 [kg-CO_2]		
	札幌	仙台	東京	札幌	仙台	東京
GSHP	40.8	27.5	26.5	1505.9	1017.4	979.6
灯油ボイラ	65.1	40.9	27.2	4126.9	2465.0	1597.5
ガスボイラ	65.1	40.9	27.2	2905.4	1787.5	1176.5

(1)北海道における住宅GSHPシステムへの改修(補助無し、床暖房設置済み住宅)
投資額155万円(熱源個のみ)=1,605 kg-CO2/年の削減効果=10.4 kg-CO2/万円
(2)家庭用太陽光発電システムの設置(30万円の補助有りと仮定)
投資額195万円(個人負担)=1,051 kg-CO2/年の削減効果=5.4 kg-CO2/万円

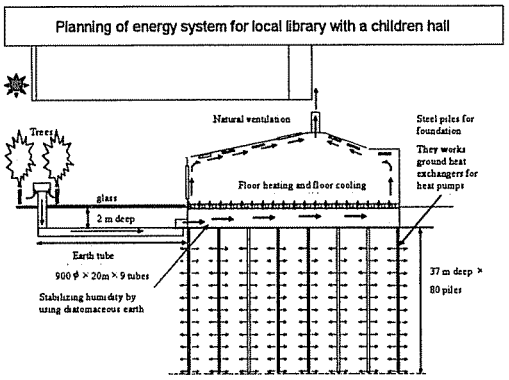
北海道において住宅にGSHPシステムへの改修への投資は
太陽光発電システムに比べ、2倍のCO2削減効果がある

19

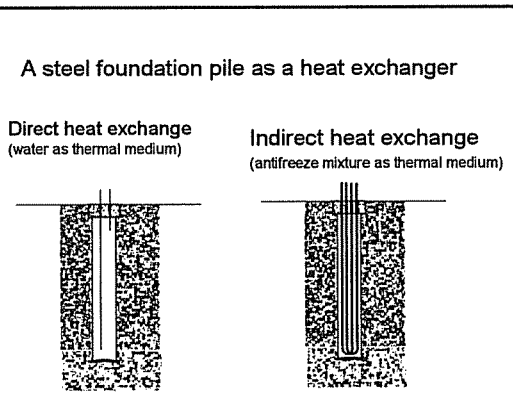
北海道への導入効果

- ストック住宅:110万戸、暖房負荷46.2GJ/y
- 新築住宅 3.2万戸／年、38GJ/y
- 導入条件
  - 1. 全体戸数は110万戸一定、全て灯油暖房である
  - 2. HP単体COPは4.5が確保できる地中熱交換器設置とする
  - 3. 初年度導入割合:既築0.5%、新築3%
    それぞれ、年率5%で導入割合増加
- 10年後導入戸数:既築9.2万戸/78万戸(普及率12%)
  新築4.8万戸/32万戸(普及率15%)
  合計13万戸/110万戸(平均普及率12%)
- 10年後CO_2削減量:合計35.3万t-CO_2/年

20



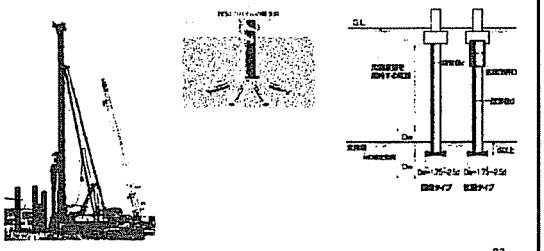
21



22

大口径回転圧入鋼管基礎杭の使用
(1999年より建設大臣認定)

- 1999年より建設大臣認定
- 2002年では、年間約300棟の建物に使用されている



23

講演のまとめ

- GSHPは寒冷地の暖房システムにおいて、投資対支出コスト削減、投資対CO2排出量削減効果が高い。
  - 来年度市場に投入されるHPの性能とコスト、地中熱交換器設置工事費用であれば、現在の灯油ボイラー温水セントラルヒーティングシステムに十分に対抗できる。
  - 投資対CO2排出量削減効果は太陽光発電システムの約2倍
- 住宅市場に既築0.5%(年率5%)、新築3%(年率5%)の導入目標が達成されれば、10年後には年間35万トンのCO2排出量が削減できる可能性がある。
- 現在年間300棟以上に採用されている回転圧入の鋼管基礎杭を利用したGSHPシステムは、特に単純なシステム形態とすることが可能であり、コスト、環境面から非常に有望である。

24