

カーボンニュートラル社会 へ向けた 地中熱利用の展開

長野 克則

北海道大学大学院 工学研究院 教授
nagano@eng.hokudai.ac.jp



1

1. GXと地中熱

蓄エネルギーによる
デマンドリスポンス

ヒートポンプと地下蓄熱

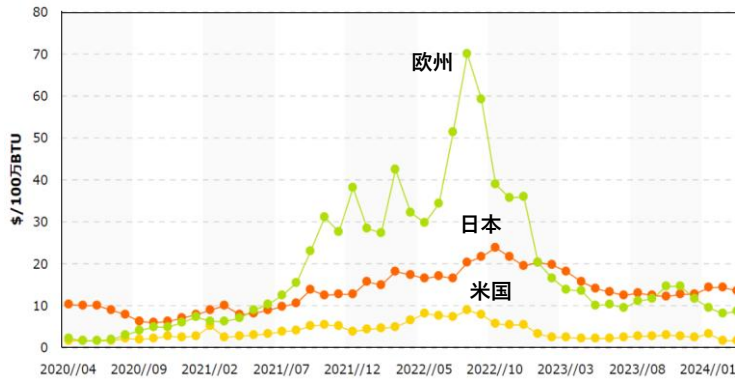


HOKKAIDO UNIVERSITY

2

欧州、米国、日本における最近の天然ガス価格変動

3



データ元: <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>
 グラフ引用: <https://pps-net.org/statistics/gas>



HOKKAIDO UNIVERSITY

3

GXと我が国のカーボンニュートラルの実現

「GX実現に向けた基本方針」～今後10年を見据えたロードマップ～
 内閣官房（令和5年2月）

GX: グリーントランスフォーメーション

・産業革命以来の化石エネルギー中心の産業構造・社会構造を
クリーンエネルギー中心へ転換する、戦後における産業・エネルギー政策の大転換

GXの実現を通して、

- ・**2030年度の温室効果ガス46%削減**や
2050年カーボンニュートラルの国際公約の達成を目指す
- ・安定的で安価なエネルギー供給につながる**エネルギー需給構造の転換**の実現、我が国の産業構造・社会構造を変革
- ・将来世代を含む全ての国民が**希望を持って暮らせる社会**を実現



HOKKAIDO UNIVERSITY

4

1) 徹底した省エネルギーの推進、製造業の構造転換 (燃料・原料転換)

「GX実現に向けた基本方針」～今後10年を見据えたロードマップ～
内閣官房（令和5年2月）

省エネルギー（以下「省エネ」という。）は、エネルギー使用量の削減を通じた脱炭素社会への貢献のみならず、危機にも強いエネルギー需給体制の構築にも資するため・支援一体型で大胆な省エネの取組を進める。、家庭・業務・産業・運輸の各分野において、改正省エネ法等を活用し、規制・支援一体型で大胆な省エネの取組を進める。

- **熱需要の脱炭素化・熱の有効利用**に向け、家庭向けには**ヒートポンプ給湯器**や家庭用燃料電池などの省エネ機器の普及を促進するとともに、産業向けには**産業用ヒートポンプ**やコージェネレーションも含めた省エネ設備等の導入を促進
- **ダイヤモンドリスポンス**については、これに活用可能な**蓄電池**や**制御システムの導入**支援、改正省エネ法におけるダイヤモンドリスポンスの実績を評価する枠組みの創設等を通じ、更なる拡大を図る



HOKKAIDO UNIVERSITY

5

2) 再生可能エネルギーの主力電源化

「GX実現に向けた基本方針」～今後10年を見据えたロードマップ～
内閣官房（令和5年2月）

脱炭素電源として重要な**再生可能エネルギー**については、引き続き導入拡大に向けて、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら、

- S+3E**
- 1) 安全性 (Safety)
 - 2) 安定供給 (Energy security)
 - 3) 経済性 (Economic efficiency)
 - 4) 環境 (Environment)

を大前提に、**主力電源として最優先の原則で最大限導入拡大**に取り組み、**2030年度の電源構成に占める再生可能エネルギー比率36～38%**の達成を目指す

長期脱炭素電源オークションを活用した**揚水発電所**の維持・強化を進めるとともに、**分散型エネルギーリソースの制御システムの導入支援によりダイヤモンドリスポンスを拡大することや、余剰電気を水素で蓄えることを可能とするための研究開発や実用化を進めることなど、効果的・効率的に出力変動が行える環境を整える。**



HOKKAIDO UNIVERSITY

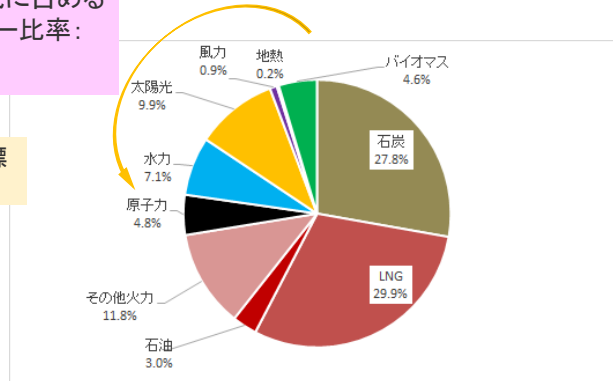
6

日本全体の電源構成(2022年速報)

日本全体の電源構成に占める
再生可能エネルギー比率:

22.7 %

国の2030年の目標
36～38%



出所: 経済産業省 令和4年度(2022年度)エネルギー需給実績から作図
<https://www.meti.go.jp/press/2023/11/20231129003/20231129003-1.pdf>



HOKKAIDO UNIVERSITY

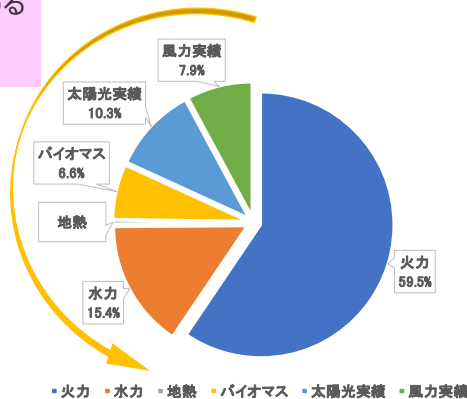
7

2023年度の北海道エリアの電力需給実績 (2023年4月～2024年3月)

北海道エリアの電源構成に占める
再生可能エネルギー比率:

40.5%

国の2030年の目標
36～38%
を既に超えている!

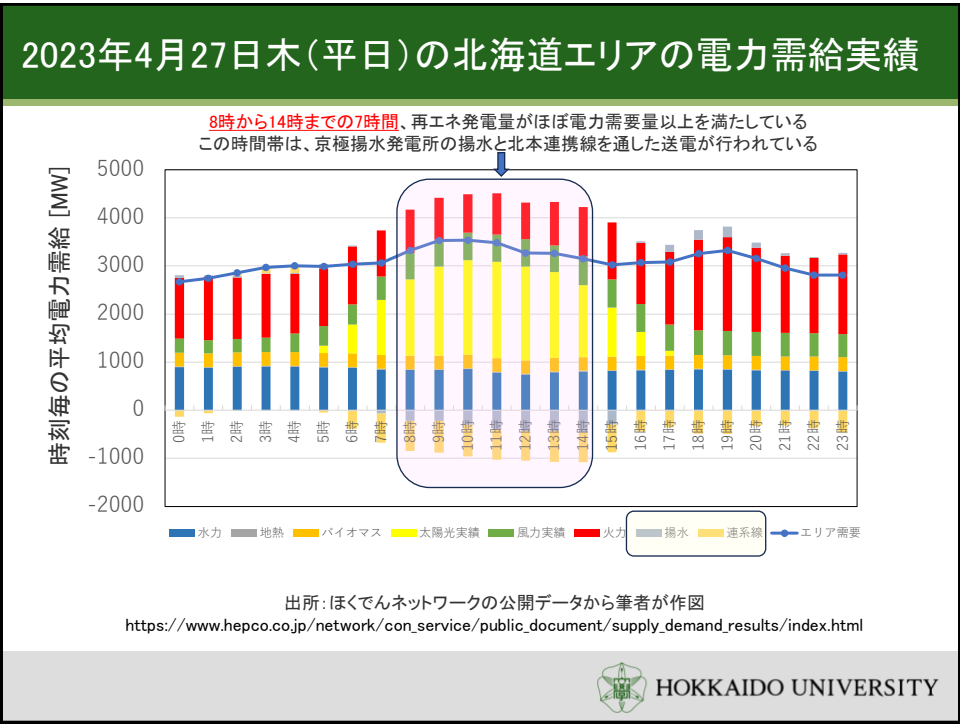


出所: ほくでんネットワーク公開データから筆者が作図
https://www.hepco.co.jp/network/con_service/public_document/supply_demand_results/index.html



HOKKAIDO UNIVERSITY

8



北海道の洋上風力発電建設計画(合計1,463万kW)

石狩湾新港洋上風力発電所の商業運転 (2024年1月1日～)
引用先: 株式会社グリーンパワーインベストメントホームページ(2024)
https://greenpower.co.jp/2024/01/04/ishikari_offshore_cod/

単機出力8.0 MWのSiemens Gamesa Renewable Energy製風力発電機を14基設置、総出力は11.2万kW

180 MWhの蓄電池容量を持つプロジェクト変電所を経由し、北海道電力ネットワーク(株)へ供給

建設事業者	建設海域	発電規模 (万kW)	発電開始時期
①グリーンパワー石狩※	石狩湾新港内	9.9	2023年12月
②石狩湾洋上風力発電※	石狩市と小樽市の沖合	133	未定
③石狩湾洋上風力発電※	石狩市と小樽市の沖合	103.3	未定
④グリーンパワーインベストメント	石狩湾内	96	未定
⑤日本風力開発	石狩市と小樽市の沖合	300	未定
⑥関西電力	石狩市沖合	178.5	未定
⑦JERA	石狩市と小樽市の沖合	52	未定
⑧丸紅	石狩市と小樽市の沖合	100	未定
⑨コスモエコパワー	石狩市と小樽市の沖合	100	未定
※シーアイ北海道※	石狩湾沖	100	未定
⑪北海道洋上風力開発※	島牧村の沖合	58.5	未定
⑫コスモエコパワー	島牧村の沖合	100	未定
⑬日本風力エネルギー	島牧村の沖合	60	未定
⑭電源開発	せたな町～上ノ国町沿岸	72.2	未定
		合計 1463.4	

※ 社名には前が後ろに「合同会社」が付く

HOKKAIDO UNIVERSITY

蓄エネルギーによる ダイヤモンドリスpons



HOKKAIDO UNIVERSITY

11

蓄エネルギー；P2 ES 2P

蓄エネルギーの種類	方式名	総合効率	備考
位置エネルギー	揚水発電	65～75%	
圧力エネルギー	圧縮空気貯蔵	～max70%	
運動エネルギー	フライホイール	90 ～ 95 %	
磁気エネルギー	超電導電力貯蔵	85～95%	
電気エネルギー	電気二重層キャパシタ	85%程度	
化学エネルギー	鉛蓄電池	87%程度	
	NaS電池	85%程度	
	リチウムイオン電池	95%程度	
	ニッケル水素電池	66%程度	
	水の電気分解による水素発生、燃料電池で発電	約25～35%	水を電気分解して水素を作る場合の電解効率は約60～70%、燃料電池の発電効率はPEFC(固体高分子型)で約40%、SOFC(固体酸化物型)で約50%
熱エネルギー	カルノーバッテリー		
	電気ヒーターによる高温蓄熱からランキンサイクルで発電	約30～40%	蓄熱体は碎石など顕熱蓄熱、熔融塩による潜熱蓄熱など
	ヒートポンプによる高温蓄熱からランキンサイクルで発電	約40～50%	蓄熱体は熔融塩や他の相変化温度の材料



HOKKAIDO UNIVERSITY

12

蓄エネルギーによるディマンドリスポンス：揚水発電



京極発電所上部調整池と羊蹄山
「月刊ダム日本」2015年1月号表紙から

計画時の役割：夜間、泊原子力発電所1～3号機
(計207万kW)の余剰電力への対応、
夜間揚水→昼間発電

現在の利用状況：日中、再エネ発電量を含む
総発電量の余剰電力に対応、
昼間揚水→夕方発電

- ・京極発電所上部調整池は、北海道電力が北海道虻田郡京極町に建設した純揚水式発電所である京極発電所の上部調整池
- ・表面アスファルト遮水壁型フィルで下部調整池の京極ダムとの間の有効落差369mにより最大出力60万kWの発電を行う



北海道電力 Facebook (2014.10.27)
https://www.facebook.com/photo/?fbid=643888142387412&set=pcb.643888249054068&locale=ja_JP



HOKKAIDO UNIVERSITY

13

蓄エネルギーによるデマンドレスポンス：カルノーバッテリー

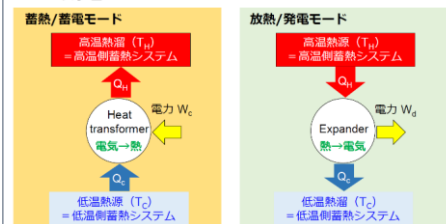
引用先：北海道大学 能村貴宏准教授“カルノーバッテリー技術と高温蓄熱技術の最新動向”講演スライド(2020)

カルノーバッテリー（蓄熱発電）：

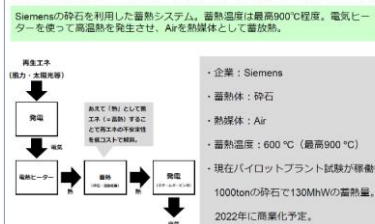
電力を一旦熱に変換して蓄熱し、
蓄熱した熱から動力を取り出す。
すなわち、充電過程では、電気は
熱に変換される。この熱を蓄熱シ
ステムにて貯蔵し、放電過程では、
貯蔵した熱を電気に変換する



PTESの原理



例：Siemens社 Electric Thermal Energy Storage (ETES)



HOKKAIDO UNIVERSITY

14

溶融塩を熱媒体・蓄熱材と利用した中央タワー式集光型太陽熱発電所 15

世界初、通称: Gemasolarはトレソル・エナジー社によりスペインに2011年5月誕生



米国加州・モハーベ砂漠のイバンパ太陽発電所：世界最大級392MWの集光型太陽熱発電所、7m²の鏡X35万枚(2013) 出典：米NRG Energy



中国甘粛省敦煌市でアジア初の溶融塩太陽熱発電所(2016)

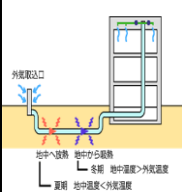
革新的な技術の一つが熱媒体と蓄熱体に溶融を採用。2650基の反射鏡を利用して、内部に熱媒体として溶融塩が流れている中央のタワーに光を集め、昼間に溶融塩を溶かして熱を蓄え、溶融塩が固体に戻るときの潜熱によって夜間でも蒸気を発生させ発電する仕組み
太陽光が全くないときでも15時間は継続して発電できる。夜間や太陽光の乏しい冬場でさえ、1年のうち何ヶ月間も1日24時間発電できる



HOKKAIDO UNIVERSITY

15

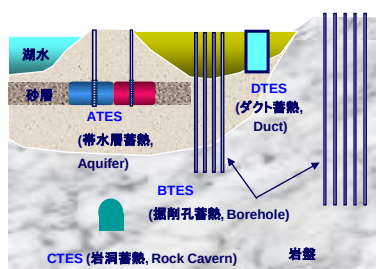
低温蓄熱によるデマンドレスポンス： 大地の蓄熱利用: ATES, BTES, CTES 16



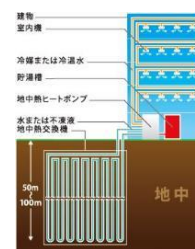
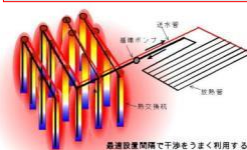
換気予冷・予熱



道路・歩道・屋根 融雪



地下蓄熱UTES



1. 直接熱利用

2. 蓄熱利用

3. ヒートポンプ熱源利用



HOKKAIDO UNIVERSITY

16



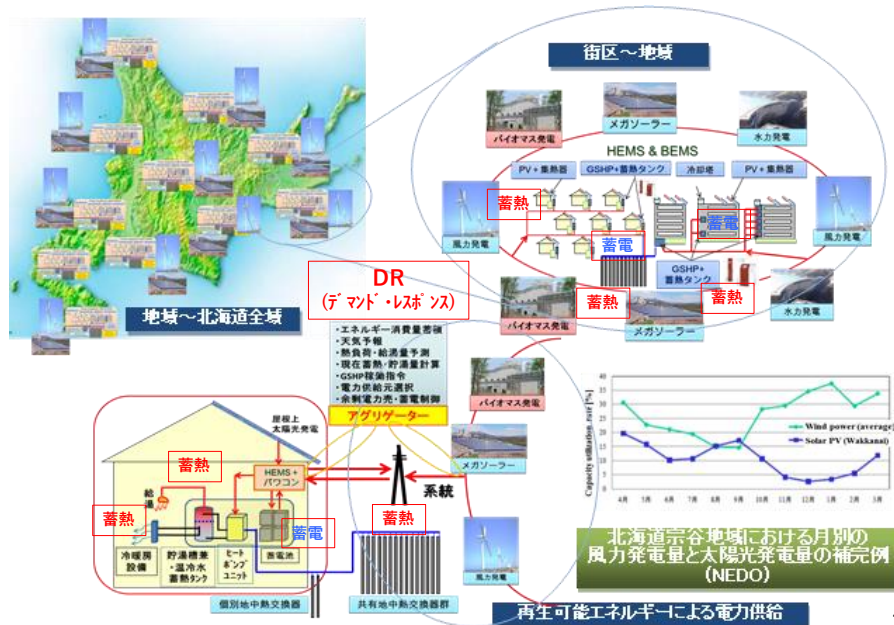
引用先: <https://www.bundestag.de/en/visittheBundestag/energy>



HOKKAIDO UNIVERSITY

17

地中熱利用を核としたデマンドリスポンスを伴うスマートシティ構想 18

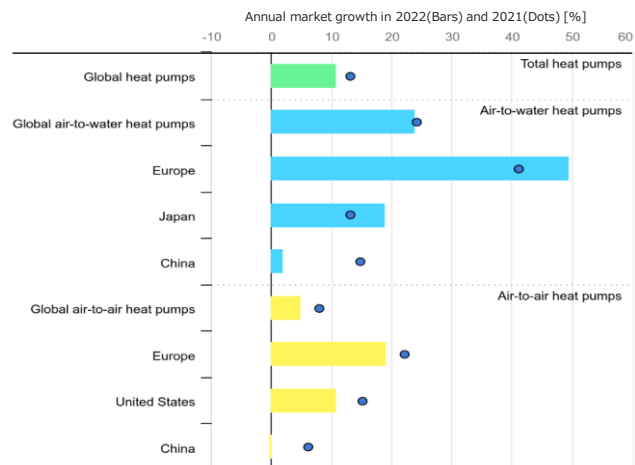


18

2. 欧州と中国のGSHP市場の概況

19

2022年の世界のヒートポンプ市場の伸び



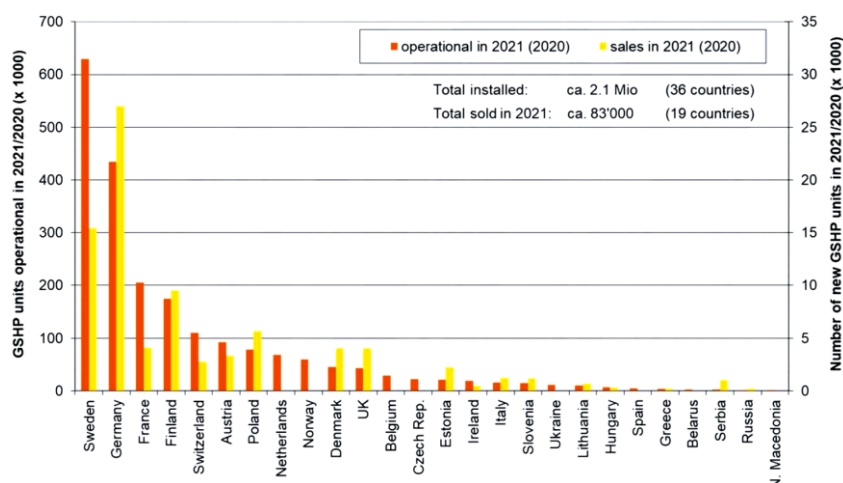
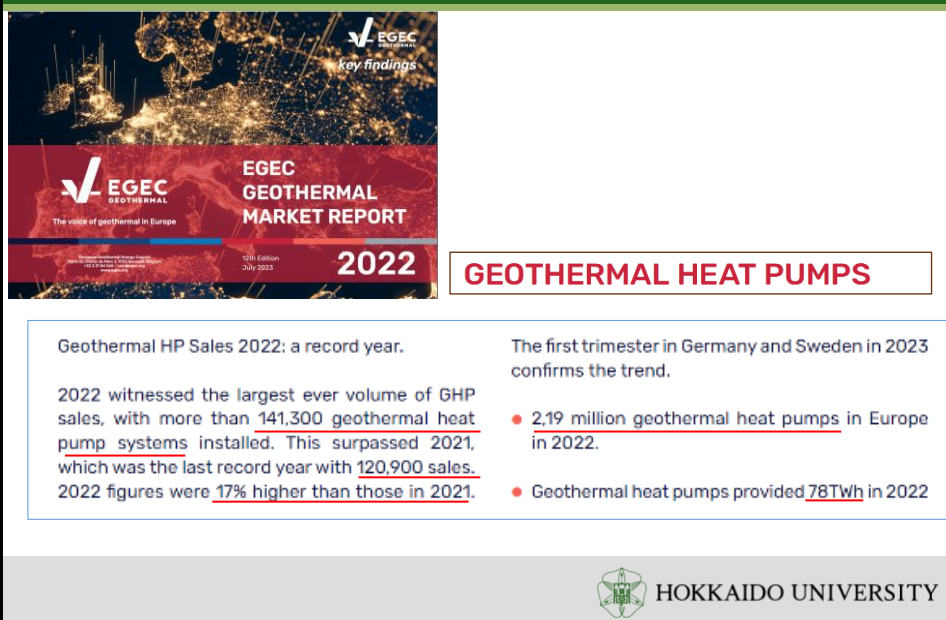
図中、黒丸は2021年の伸び):

引用先: <https://www.ehpa.org/news-and-resources/press-releases/pump-it-down-why-heat-pump-sales-dropped-in-2023/> (2024).



HOKKAIDO UNIVERSITY

20

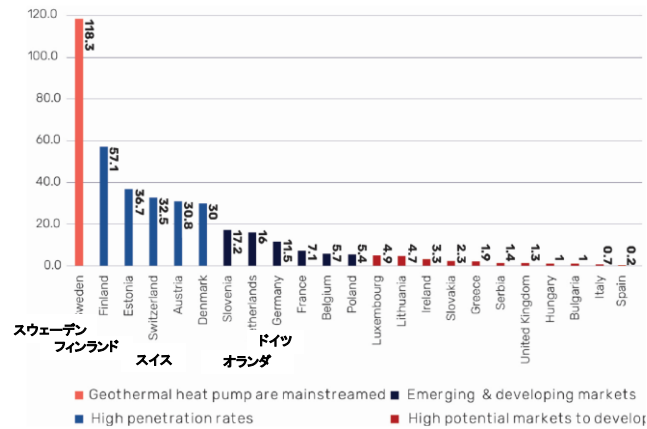


2023年7月発行のEGEC2022市場レポートを引用の上、Sannerが加筆修正

引用先: <https://geothermie-schweiz.ch/wp-live/wp-content/uploads/2022/12/00-EUROPEAN-SUMMARY-EGC-2022-country-updates.pdf> (2022).

欧州各国の1000世帯あたりの地中熱ヒートポンプシステム件数²³ (2019~2021)

Number of geothermal heat pump systems per 1,000 households



Geothermal Energy Use in Germany, Country Update 2019-2021
 Josef Weber¹, josef.weber@uni-goettingen.de
 European Geothermal Congress 2022
 Berlin, Germany | 17-21 October 2022
 www.europeangeothermalcongress.eu

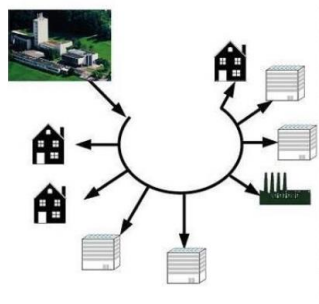


HOKKAIDO UNIVERSITY

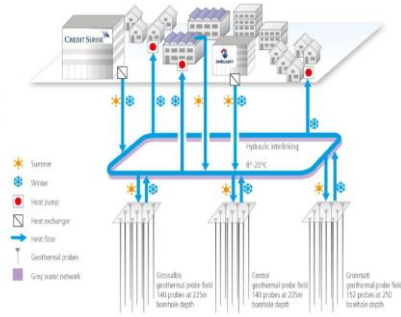
23

第5世代地域熱供給(5GDHC、アネルギーネットワーク)の構成

第4世代までの地域熱供給
一方向



第5世代熱供給
双方向



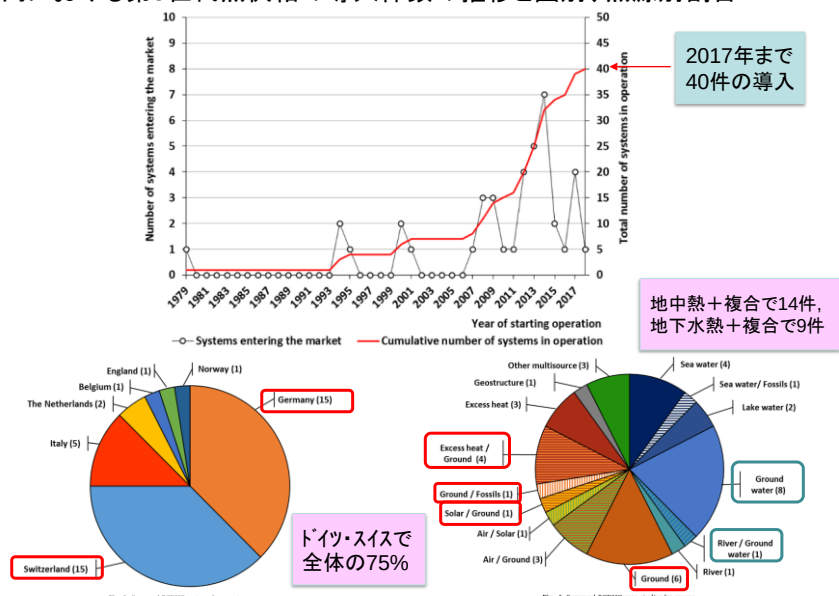
従来型熱供給システム

アネルギーネットワークシステム

引用先: http://www.geothermaleranet.is/media/publications-2015/5_Presentation_KOLB.pdf (2015).

24

25

 北海道大学

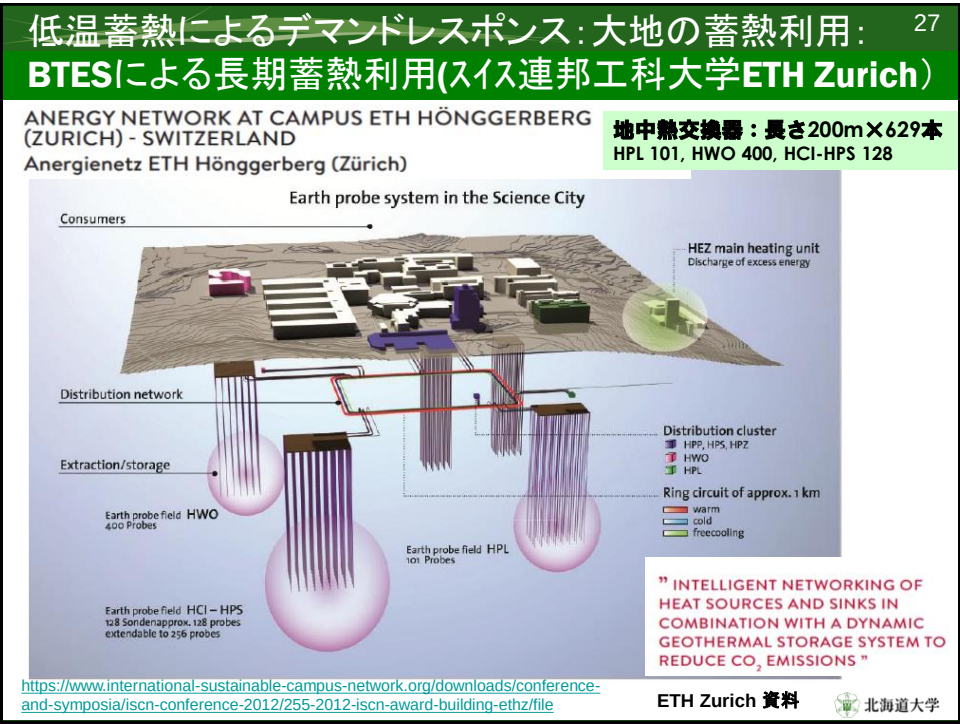
25

26

COUNTRY	CITY, NAME	NO. BHE	DEPTH BHE (M)	TOTAL BHE (M)	YEAR
RO	Magurele near Bucharest, ELI-NP	1080	126	136000	2016
FI	Sipoo, SDK Logistics Centre	300	300	90000	2012/2016
CH	Zurich, ETH-Campus Hönggerberg	436	200	87000	2014-16
CH	Rotkreuz, Suurstoffi 2	193	280	64040	2016
FI	Espoo, Lippulaiva shopping centre	148	360	61900	under construction
CH	Wallisellen, Rhohti-Areal	220	226	49600	2012
SE	Karlstad, Campus Karlstad	204	240	48240	2014
NO	Lerenskog, Nye Åhus hospital	228	200	46600	
CH	Zurich, Neues Wohnquartier Freilager	206	220	46100	2013/14
CH	Zurich, FGZ Friesenberg, BHE-field Grünmatt	179	260	44760	2016
SE	Lund, IKDC / Chemical Inst.	166	230	37960	
CH	Basel, Novartis Campus	170	220	37400	2012
NO	Oslo, office/flats Nydalen	180	200	36000	
SE	Stockholm Saltjöbaden, flats Brf. Ljuskärrsberget	166	230	36880	
UK	Cambridge, Astra Zeneca new HQ Building	176	200	36200	under construction

 北海道大学

26



27



1. 地中熱利用の世界的なトレンド No.1 大規模

29

北京大興国際空港、1万本の地中熱交換器

2019年9月、北京大興国際空港が開港、フルオープン後は年間利用者1億人を見込む



導入された荏原製作所のターボ冷凍機

引用先: <http://global.chinadaily.com.cn/a/202009/25/WS5f6da951a31024ad0ba7be8f.html> (2020).

地中熱ヒートポンプシステム1号、2号の合計熱供給床面積257万m² (Record China)
(推定冷暖房負荷: 凡そ 300 MW, 260 MWと推定される)
大興国際空港の地上熱源ヒートポンプは冷暖房需要の10%を受け持つと推測
8台の地中熱ヒートポンプ(ターボ冷凍機)、CO₂排出量年間15,800トン削減見込み

北海道大学

29

3. NEDO技術開発事業 の成果

30

地中熱利用システムの低コスト化・高度化に向けた

NEDO技術開発事業

「低コスト化のための共通基盤技術開発/
見かけ熱伝導率の推定手法と簡易熱応答試験法
および統合型設計ツールの開発・規格化」

受託元

(国)北海道大学, (国)秋田大学, (国研)産業技術総合研究所

再委託先

(一社)全国さく井協会, (国)京都大学

共同実施

(学法)金沢大学, (学法)工学院大学, (学法)静岡理工科大学, (国)広島大学,

(国)東京海洋大学, (公)日本地下水学会

30

研究開発概要

【研究開発テーマ名】
見かけ熱伝導率の推定手法と簡易熱応答試験法および統合型設計ツールの開発・規格化

【事業名】
国立大学法人北海道大学・国立大学法人秋田大学・国立研究開発法人産業技術総合研究所（研究代表：長野克則北海道大学大学院工学研究院教授）

【開発目標】
地中熱システムのコスト低減を目的に、以下3項目の開発・規格化を行う。

- ① 見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化
（北海道大学・産業技術総合研究所・京都大学（再委託））
- ② 簡易熱応答試験（TRT）法の開発・規格化
（北海道大学・秋田大学）
- ③ 統合型設計ツールの開発・規格化
（北海道大学・産業技術総合研究所・工学院大学（共同実施）・静岡理工科大学（共同実施）・広島大学（共同実施）・公益社団法人日本地下水学会（共同実施）・一般社団法人全国さく井協会（再委託））

【研究開発概要】
各項目参照

②簡易熱応答試験（TRT）法の開発・規格化

1) 井戸の管壁に密着する電熱石付ヒーターユニットを用いたTRT（秋田大）
2) 垂直型地中熱交換器対応：a. 発熱ヒーター付き光ファイバー温度計を用いた簡易TRT, b. 周期加熱法による温度位相解析による迅速TRT（以上、北大）

1) 大口径井戸でのTRT

2)-a ヒーター付き光ファイバー温度計

2)-b 周期加熱による温度位相解析

③統合型設計ツールの開発・規格化

クローズド・オープンループシステムに対応した世界初の統合型ツール

- 1) 地盤・帯水層データベースからの入力（北大）
- 2) オープンループシステムの実証実験に基づく最適な地中熱利用形態の判定技術開発（産総研）
- 3) 任意の地中熱交換器モデルを実装、4) 建物・空調設備との連成計算、5) LCEM, Webプログラムとの連携、6) 簡易測定機を用いた実測による検証、7) 上記を踏まえた規格化（以上、北大）

①見かけ熱伝導率の推定手法の開発・規格化

水文地質学的推定手法・地下水情報の簡易推定手法（産総研）と統計学的推定手法（北大）を組み合わせた推定技術と全国データベースの構築

4. 講演のまとめ

32

1) 世界の潮流に後れを取ってはならない

- ・大規模化へ向かって→特に、暖房加熱需要が大きな地域で大深度BHEが有効
- ・季節間蓄熱を伴う熱源ネットワーク化へ → 熱融通、通年COP向上
- ・全ての建物・構造物へ地中熱交換器設置推奨

2) 5thDHC導入への新しいビジネスモデルの構築

- ・Win-Win-Winの関係のビジネスモデルの構築、例えば、地中熱ESCO
- ・トータル・施工コスト低減； BHE施工の無人化・省力化、配管のプレファブ化
- ・電力供給とヒートポンプ・蓄熱の地域最適化制御・運用方法

3) 地中熱利用システムのZEBへの貢献

- ・まずは自然温度での利用：フリークーリング、ヒート/クールチューブ、融雪
- ・ヒートポンプの熱源として利用：高効率、より高効率に利用するためには、
 - (1) 建物の熱容量・断熱性能に見合った最適制御、
 - (2) 天候を加味した電力・熱利用の予測制御、スマートエネルギーハウス
- ・季節間蓄熱体として利用：熱源ループ→夏冬、適切な温度範囲に制御

HOKKAIDO UNIVERSITY