

日本における地中熱および 帯水層蓄熱（ATES）システム普及の可能性と課題

株式会社H&Sエナジー・コンサルタンツ パートナー

石丸 美奈

目次

- | | |
|----------------------|------------------------------|
| 1. はじめに | 5. 日本での地中熱・ATES導入の可能性
と課題 |
| 2. 地中熱とは | 6. おわりに |
| 3. オランダにおけるATES利用の動向 | |
| 4. 日本における地中熱利用の現状 | |

1. はじめに

これまで再生可能エネルギー（再エネ）の導入は主として発電部門に焦点が当てられてきた。しかし、無秩序な大規模太陽光・風力発電や地熱の開発などにより、自然環境や生物多様性を損なう弊害が憂慮されるようになっている。日本では、地方公共団体・自治体でこうした再エネ発電設備の設置などを制限する条例の数が増えており、2024年6月の時点ですべて285が制定されている¹。

一方で、世界的に最終エネルギー消費のおよそ半分を占めるのは冷暖房や給湯などの熱利用であり、その脱炭素化は急務となっているが、2022年現在で熱利用部門での再エネ比率は11.6%とまだ低い²。

再エネ熱には太陽熱、バイオマス熱、地中熱³、地熱（温泉熱）、下水熱、海水熱、河川熱、雪氷熱などがある。中でも地中熱は、低温ではあるが、天候に左右されず、季節・昼夜を問わずどこででも利用できる安定的な熱源で、生態系に与える負荷が比較的小さい

（図表1）。直接利用だけでなく、ヒートポンプ（HP）⁴と組み合わせることで投入される電力の何倍もの熱エネルギーを得ることができ、温熱も冷熱も作ることができる。電力のピークカット（電力需要の平準化）にも役立ち、節電・省エネ効果が高く、エネルギーの脱炭素化に貢献する。また、通常のエアコン（空気熱源HP）のように冷房時の排熱を戸外ではなく地中に排出するので、ヒートアイランド現象を抑制できる。

近年は、地盤やそこに存在する地下水を熱源や排熱の吸収源として利用するだけでなく、地下の帯水層（後述）を蓄熱のために、いわば「蓄電池」として利用する帯水層蓄熱（Aquifer Thermal Energy Storage、ATES）システムが再注目されている。

しかし、日本での地中熱利用はあまり進んでおらず、その認知度も低い。日本の2021年度時点での地中熱利用HP導入量226MWtに比べて、中国は約117倍（26,450MWt）、アメリカはおよそ90倍（20,230MWt）あり、国土面積が

1 一般財団法人 地方自治研究機構「太陽光発電設備の規制に関する条例」2024年7月9日更新
http://www.rilg.or.jp/htdocs/img/reiki/005_solar.htm

2 IEA “Renewables 2023” <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/heat>

3 本稿での地中熱は地下水が持つ熱を含む。

4 ヒートポンプとは低い温度の物体（空気、水、地中等）から熱を奪い、高い温度の物体（同）に伝える装置で、たとえば家庭のエアコンはこの技術を使い空気との間で熱交換をおこない、夏に冷房、冬に暖房をおこなっている。

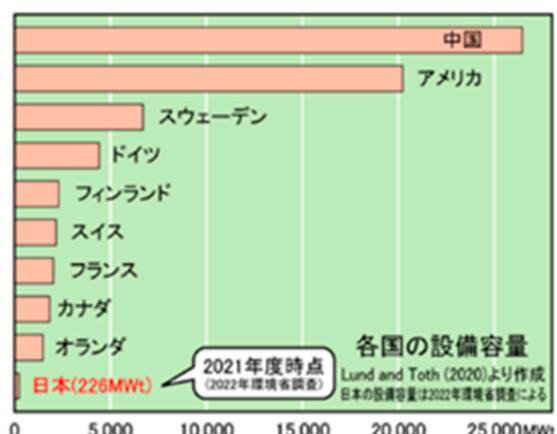
(図表1) 地中熱と他の再エネとの比較

		地中熱	地熱	太陽熱	太陽光	風力	小水力	バイオマス	雪氷
場所の制約	なし	火山・温泉の近傍	なし	なし	なし	風況調査が必要	落差のある河川	(要搬送)	積雪地近傍(要搬送)
時間の制約	なし	なし	昼間	昼間	風の吹く時間帯	渇水期以外	(要搬送)	(要搬送)	
エネルギー利用形態	電気	—	主に事業用発電	主に事業用発電	自家用発電 事業用発電	事業用発電 自家用発電	主に事業用発電	主に事業用発電	—
	熱	冷暖房 給湯 融雪	暖房 給湯 融雪	給湯 (冷)暖房	—	—	—	暖房 給湯	冷蔵 冷房

(出所) 地中熱利用促進協会Webページを加工
<https://www.geohpaj.org/introduction/index1/geohp>

ほぼ同じドイツでおよそ20倍(4,400MWt)、九州と同程度の面積で、人口は日本の7分の1程度のオランダでもおよそ6.6倍(1,486MWt)と世界との差は大きい⁵ (図表2)。

(図表2) 地中熱利用ヒートポンプシステムの各国での設備容量



(出所) 地中熱利用促進協会Webページ
<http://www.geohpaj.org/introduction/index1/disadv>

本稿では、まず、地中熱とATESについて説明し、次いで地中熱利用が盛んで、ATES利用の最先進国であるオランダの動向を紹介する。さらに日本の現状を概観し、最後に日本の農業分野での地中熱・ATES導入可能性と、地中熱・ATES普及にあたっての課題について考察する。

5 Lund J, Toth A “Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review” 2020
<https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf>

2. 地中熱とは

(1) 地中熱とは

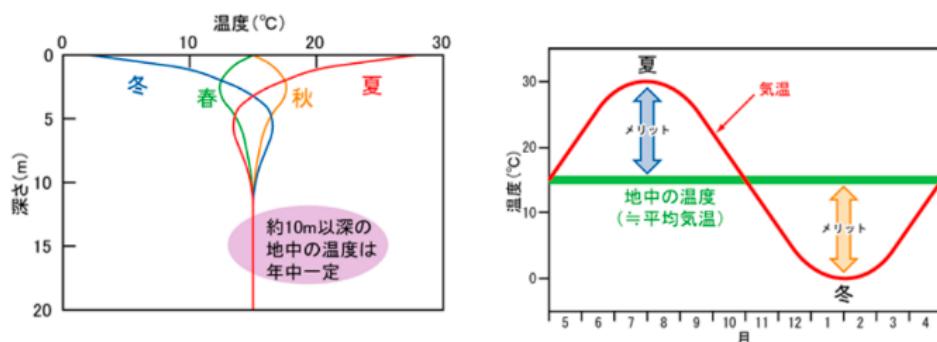
地中熱は地表からおよそ200mの深さまでに賦存する、温度が数十度以下の低温の熱エネルギーで、主に地表面からの太陽熱がその源であり、地球の深部に由来する高温の熱エネルギーである地熱とは異なる。但し、日本で地中熱と地熱は別のカテゴリーで論じられるが、海外ではGeothermal energyと総称されており、区別が必要な場合、地中熱はShallow geothermal energy、地熱はDeep geothermal energyと特定される。一般的に地表の下10mより深い地点の温度はその地域の年平均気温より1～2℃高く、1年を通じて一定している。夏や冬には地中と地上の温度差は15℃ほどになるので、この熱エネルギーを取り出して使えば省エネになる(図表3)。

利用する温度帯により、そのままで十分であれば直接、より高温や低温の熱が必要な場合にはHPを使用して、路面の融雪・凍結防止、建物の冷暖房や給湯、温水プールや温浴施設の加温などに利用する。

(2) 地中熱の利用方式

地中熱はHPの熱源として利用されることが多く、HPシステムの方式は大きくクローズドループとオープンループの2種類に分

(図表3) 深さと温度の関係(左)、地中の温度と気温の年変化(右)



(出所) 地中熱利用促進協会Webページ
<http://www.geohpaj.org/introduction/index1/howto>

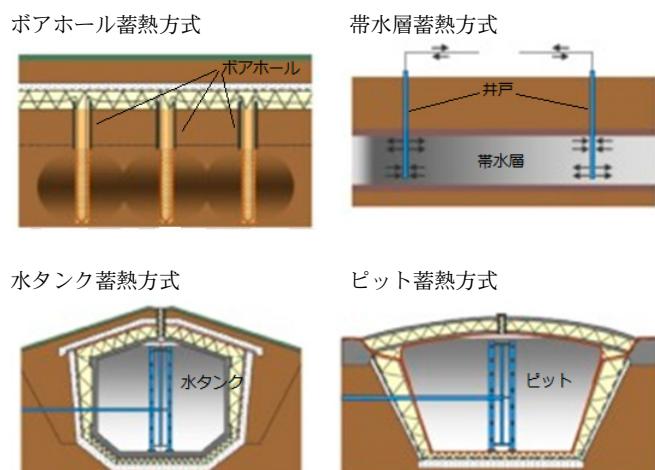
けられる。クローズドループでは、地盤と熱のやり取りのために地中に熱交換器を埋設する。ループ状に挿入されたパイプの中を水や不凍液が循環し、地中の熱を間接的に取り出す。一方、地下水を利用できる場合に使われるオープンループでは、地下水を揚水井から直接くみ上げ、その熱を利用する。熱を取り出した後の地下水は、地盤沈下等を防ぐために還元井から地中に戻すのが望ましいが、そのまま下水等に流す場合もある。

クローズドループは全国どこでも利用でき、システムを設置した後は殆どメンテナンスが不要となる。一方、オープンループは揚水に規制がある地域では使えず、井戸のメンテナンスが必要な場合がある。しかし、クローズドループに比べて一本あたりの井戸から利用可能な熱量が多いため、掘削しなければならない孔の本数が少なくて済み、導入コストは低くなる。

蓄熱システムとして地下を使う地下蓄熱には、大別してクローズドループのボアホール蓄熱(BTES)⁶、オープンループの帯水層

蓄熱(ATES)、水タンク蓄熱(TTES)⁷、ピット蓄熱(PTES)⁸などの方式⁹がある(図表4)。中でも蓄熱ポテンシャルが大きく、高効率なATESは、地上では使える土地に制約がある都市部でも比較的導入が容易で、個々の建物から大規模複合施設、そして地域熱供

(図表4) 地中蓄熱方式の概念図



(出所) Solar District Heating Guidelines. Collection of Fact Sheets. Deliverable of SDHplus (Solar District Heating) project under "Intelligent Energy for Europe programme" August 2012を加工。
<http://www.solar-district-heating.eu/>

6 ボアホールとは垂直に掘削した熱交換器を埋設するための穴で、BETSでは数十から数百本の熱交換器を格子状に埋設し蓄熱する。

7 地下に埋めたタンクの水で蓄熱する。

8 人工的に掘削した大型の貯水装置で、掘削した土を土手として使用し、装置を防水措置後に水で満たし、上部を断熱バーで覆い蓄熱する。

9 これ以外に自然の地下洞窟や廃坑の地下洞窟などを蓄熱体として利用する洞窟蓄熱(CTES)もある。

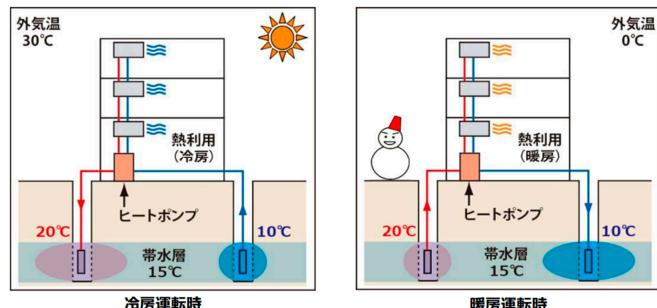
給（D H）へと、再エネ熱利用を面的にスケールアップしやすい。他の方式と比べて、スケールメリットによるコスト低下が見込まれるため、地中熱利用にあたって最大の課題である高い初期導入コストの低減につながる。

(3) ATESシステムとは

ATESシステムでは、冷暖房を行った際の排熱を地下の帯水層に蓄熱し、熱エネルギーとして活用する。帯水層とは地中にある地下水で満たされた地層で、透水性や貯留性が良く、降水や河川水が地中に浸透することで形成される。ATESは地下水の流れがほとんどない帯水層のある地域¹⁰に適したシステムで、帯水層に蓄えられた温熱や冷熱は長期間保たれ、逃げていくことがない。水の比熱¹¹は大きいため、温まりにくく冷めにくい性質を持っており、単位体積あたりの蓄熱量が大きい。

このシステムでは、夏に冷熱井から冷たい地下水を汲み上げて冷房に使い、使用後に生じる温まった地下水は温熱井に戻す。冬は反対に、温熱井から暖かい地下水を汲み上げて暖房に使い、冷えた地下水を冷熱井に戻す

(図表5) ATESシステムのイメージ



(出所) 環境省「帯水層蓄熱の利用にあたって」
<https://www.env.go.jp/content/900542334.pdf>

10 沖積平野の地下の地層の一部は良好な帯水層となりえ、日本の場合は関東平野、濃尾平野、大阪平野など大都市圏が位置するところに好適地がある。

三田村宗樹 「帯水層蓄熱に関わる大都市圏下の中一上部更新統」日本地質学会第129年学術大会 2022年9月
https://www.jstage.jst.go.jp/article/geosocabst/2022/0/2022_202/_article/-char/ja/

11 1 g の物質を 1°C 上昇させるのに必要な熱量。

(図表5)。温熱井と冷熱井はお互いに干渉しあわないよう十分な間隔をとって配置する。帯水層内に作られる温水塊と冷水塊は年間を通じてほとんど温度変化しないので、この季節間蓄熱により、高効率のエネルギー利用が可能となり省エネ、脱炭素に資する。オランダではATESの導入が盛んで、現在の導入事例は3000件を超える、農業分野での利用も多い。

3. オランダにおけるATES利用の動向

(1) オランダのエネルギー状況

オランダの国土面積（約415万ha）は日本の約9分の1で、そのおよそ1/4が海拔0m以下といわれている。人口3位までを占めるアムステルダム、ロッテルダム、デン・ハーグの3都市はほぼ海平面以下に位置しており、人口の3分の2が干拓により作り出された土地で暮らしている。そのため地下水が豊富で流れも遅く、ATESに適した地域が多い。

同国では1959年に北部のフローニンゲンで世界有数のガス田が発見されたため、エネルギーの天然ガス依存度が高い。しかし、2010年代に採掘により誘発された地震の急増が問題化した。そのため、気候変動問題への対応と相まって、政府は2014年から国内生産量の調整を始め、2018年3月には段階的閉鎖を決定した。事実上の採掘は2023年10月に停止されており、2024年10月1日には生産が永久停止となる。

国内での減産分はロシアなどからの輸入で賄われてきたが、新型コロナウイルス感染症収束後のインフレや、2022年2月のロシアのウクライナ侵攻により、エネルギー価格が高騰し、エネルギー安全保障上の問題が浮き彫りとなっている。

こうした背景から、2022年の第一次エネルギー供給量に占める天然ガスの割合は前年から大きく減少して石油に抜かれたが、依然として36.6%に上る（図表6）。また、2022年の電源構成に関しては、前年より天然ガスによる発電量は減少したものの39.34%を占めており、2位の風力（17.78%）の倍以上を供給している（図表7）。

他方、2023年のオランダの総エネルギー消

（図表6）オランダの第一次エネルギー供給量
(燃料別、単位:TJ)

エネルギー源	2021年		2022年	
	供給量	構成比	供給量	構成比
石油	1,068,705	36.12%	1,026,022	38.44%
天然ガス	1,262,068	42.65%	977,086	36.60%
バイオマス	239,854	8.11%	241,674	9.05%
石炭	230,693	7.80%	230,693	8.64%
風力・太陽光など	115,571	3.91%	148,289	5.56%
原子力	41,759	1.41%	45,341	1.70%
水力	317	0.01%	179	0.01%
合計	2,958,967	100.00%	2,669,284	100.00%

（出所）The Netherlands—Countries & Regions
—IEA

<https://www.iea.org/countries/the-netherlands/energy-mix>

（図表7）オランダの電源構成

エネルギー源	2021年		2022年	
	供給量	構成比	供給量	構成比
天然ガス	56,632	46.37%	47,842	39.34%
風力	18,004	14.74%	21,623	17.78%
石炭	17,356	14.21%	17,407	14.31%
太陽光	11,495	9.41%	16,826	13.84%
バイオマス	8,674	7.10%	7,441	6.12%
廃棄物	4,197	3.44%	4,208	3.46%
原子力	3,827	3.13%	4,156	3.42%
石油	1,332	1.09%	1,532	1.26%
その他	521	0.43%	529	0.43%
水力	88	0.07%	49	0.04%
合計	122,126	100.00%	121,613	100.00%

（出所）図表6に同じ。

費に対する再生エネの割合は前年の15%から2ポイント上昇し17%（暫定値）で、同国が2013年に設定した2023年の再エネ導入目標16%は達成している¹²。内訳はバイオマス5.85%、風力5.31%、太陽光4.04%、HP1.43%、その他0.38%となっている。大気または地中を熱源とするHPによる熱エネルギー消費量は前年比で26%増加し、HPの設置容量は前年比22%増の16GWとなっている。

しかし、オランダにおける再エネ比率はEU27か国の平均と比べるとかなり低い。2022年の再エネ率15%はEU27か国中23位（27か国の平均は23%）で¹³、オランダより下位にはルクセンブルク、ベルギー、マルタ、アイルランドしかいない。このため、国産かつ低炭素エネルギーへの転換は一層、急務となっている。

再エネ熱に関しては、太陽熱、バイオマス熱（但し、森林が少ないため輸入に頼る木質バイオマス由来は除く）、地中熱・地熱、河川熱などのポテンシャルが高いが、なかでも地中熱・地熱は注目されており、限られた国土での未利用の地下空間と豊富な地下水を生かせるATESは2000年代から国策としてその普及が促進されている。

（2）オランダでのATES導入状況

オランダでのATESの利用内訳（2018年）はオフィスビルなど45%、大学や学校などの公共施設・ショッピングモール14%、病院12%、温室11%、産業10%、住居5%、データセンター2%、温泉・サウナ1%となっており、代表的な導入例にはアムステルダム・スキポール空港、かつての貿易埠頭で、現在はクルーズ船ターミナル、オフィスビル、居住区などの複合施設となっているOostelijke

12 CBS “Energy from renewable sources rises to 17 percent” 7 June 2024

<https://www.cbs.nl/en-gb/news/2024/23/energy-from-renewable-sources-rises-to-17-percent#:~:text=In%202023%20solar%20energy%20consumption,to%20over%202024%20thousand%20GW.>

13 但し、2017年の再エネ比率は6.51%（EU27か国の平均は18.41%）でルクセンブルクのみを上回る26位であったことを考慮すると、導入スピードは加速している。

(図表8) Oostelijke Handelskade、アムステルダム



(出所) Bakema G, Godschalk B “20,000 ATES Systems in the Netherlands in 2020—Major step towards a sustainable energy supply” July 2009

https://www.researchgate.net/publication/326326020_20000ATES_SYSTEMS_IN_THE_NETHERLANDS_IN_2020-MAJOR_STEP_TOWARDS_A_SUSTAINABLE_ENERGY_SUPPLY

(図表9) ワーヘニンゲン大学の全景



(出所) ワーヘニンゲン大学Webサイト
<https://edepot.wur.nl/548830>

Handelskade（アムステルダム）（図表8）、同国で最初にATESを導入し（1985年）広くシステムが普及しているズヴォレ（Zwolle）市、ATESにより全キャンパスの年間の天然ガス使用量95%削減を目指すワーヘニンゲン（Wageningen）大学（図表9）や、数多くの大規模施設園芸温室などがある。

オランダで唯一、農業と食品に特化した大学であるワーヘニンゲン大学では、5年以内にキャンパス内の大学と研究施設のほぼすべての建物と温室をATESに接続して、天然ガスの使用削減、CO₂排出削減、エネルギーコスト削減を実現すべく、2020年～2021年にかけてシステムの大規模な整備・増強をおこなった。熱需要を賄うために既存の温熱井と冷熱井（6本ずつ合計12本で深さは90m）の容量を拡張するとともに、新たに6本の井戸を掘削（温熱源3本、冷熱源3本）し、温熱井と冷熱井をそれぞれループで接続することにより、熱需要の状況が異なる建物間での過不足を融通しあい、キャンパス全体としてより効率的なシステム運用を可能とした。

基本的に、古い建物は天然ガスを使用している設備の更新が必要になり次第、順次、ATESシステムに接続される。すべての建物が接続されると、年間で130万m³以上の天然ガス（消費量の95%）の削減となり、2,400トンのCO₂排出（ガス関連の排出量の63%）が削減できる。これはオランダの約900世帯分の年間排出量に相当するという。15年以内の投資回収が見込まれており、ポンプやその他の設備に使用する電力は、すでに太陽光や風力発電による再エネで賄われていて、電力余剰が生じていることだ¹⁴。

(3) オランダの施設園芸とATES

国土は狭いながら、農産物の輸出金額が米国に次いで世界第2位のオランダは、施設園芸が農業の主力部門である。採光性の高い大規模なガラス温室¹⁵での温度、湿度、CO₂濃度、灌水量、施肥量などの徹底的な管理と自動化・合理化で、単位面積当たりの生産量を最大化し、トマト、パプリカ等の野菜や観葉植物、

14 <https://www.wur.nl/en/show/aquifer-thermal-energy-storage.htm>及びリンク

15 オランダでは同国で開発されたフェンロー式と呼ばれる高度環境制御型のガラス温室が使われている。高価ではあるが、骨材が細く、影になる部分が少ないので採光性がよく、軒高が高く換気効率も上げることができる。

(図表10) オランダの温室でのATES導入例

プロジェクト	場所
Hederakwekerij Van den Berg & Zn.	Luttelgeest
Wooning Orchideeen	Bleiswijk
Freesiakwekerij Mol-Meissen	Nibbixwoud
Havenaar Amaryllis	Berkel en Rodenrijs
Kwekerij Martinique B.V.	's-Gravenzande
Rozenkwekerij De Groot	Luttelgeest
Red Star Trading	De Lier
Kwekerij Piet Vrijerberg	Monster
Kwekerij A.G. Boers	's-Gravenzande
Duijn Orchids B.V.	Maasdijk
Kwekerij Loochorn	Bleiswijk
Kwekerij Bernard B.V.	Luttelgeest
Van Veen Alstroemeria	Schipholuiden
Greenpack	Maasdijk
Kwekerij Concorde	Honselersdijk
Rozenkwekerij Kwintsheuvel	Kwintheul
ECW Energy	Middenmeer
De Zonnebloem	De Kwakel

(出所) Bas Godschalk "ATES : a sustainable H&C solution for greenhouses" 17 June 2024
(プレゼンテーション資料) を加工

胡蝶蘭等の花卉など付加価値の高い品目を輸出向けに大量生産している。こうした生産者の平均的な温室規模はヘクタール単位であるため、膨大に消費されるエネルギーコストの削減と、脱炭素化は経営の持続可能性を左右する極めて重要なファクターとなっている。

オランダではオイルショックの後、1980年代初頭からATESの試験的な取組みが始まり、1990年代中頃には商業化され、2000年頃には標準的手法が確立して、普及拡大が進んだ¹⁶。ATES技術は早い時期からこうした温室で取り入れられている(図表10)。

(4) 近年の動向：MT-ATESとHT-ATESの開発

近年は、より高温での蓄熱をおこなうATESシステム技術の開発が進められている。オランダの地中の平均温度は12°C程度で、通常のATES(低温ATES(LT-ATES))では、井戸の深さが200m未満、地中での蓄熱温度帶

が5~25°Cとなっており、帯水層への還元水温度は25°Cまでと制限されている。しかし、都市の大規模な建物や地域暖房での利用拡大には、より小さい地下容積で大きな熱量を貯めることが望ましい。また、夏季に使いきれない余剰熱があれば、それを蓄熱し、冬季に利用することで、省エネとCO₂排出の削減が促進される。このため、中温ATES(MT-ATES、地中での蓄熱温度帯30~45°C)や高温ATES(HT-ATES、地中での蓄熱温度帯50~95°C)と称される、より深い井戸を使うATESの実証プロジェクトで、ソーラーコレクター(太陽光集熱器)からの熱エネルギーや、様々な未利用熱を取り込み、効率よく利用するための技術改良や、水質、地下への環境影響調査データの蓄積がおこなわれている。

先に挙げたワーヘニンゲン大学キャンパスの向かいに位置するオランダ生態学研究所(NIOO)では、2011年にMT-ATESが導入され、300m超の井戸を使って太陽光集熱器を熱源とし、45°Cでの蓄熱をおこなっている。このレベルの温熱であれば、直接、暖房に使えるので、HPの電力が節約できる。

また、オランダ南部アンデル(Andel)のButterfly Orchids社では現在、胡蝶蘭栽培用の温室にATES(LT-ATES)を導入しているが、来年に新設予定の6~12ヘクタールの温室にはMT-ATESの導入を考えている。当局の許可が下りれば45~50°Cでの蓄熱を目指しており、熱源として地表水の熱エネルギーとHPを使う。温室周辺の地表水からの熱を集め、電力が安価な時にHPを使い昇温してMT-ATESに貯め、熱のコストが高い時に取り出して使用する予定である(図表11)。

¹⁶ Bolton R, Cameron L, Kerr N, Winskel M, Desguers T "Seasonal thermal energy storage as a complementary technology : Case study insights from Denmark and The Netherlands" Journal of Energy Storage Volume 73, 20 December 2023

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23026476>

(図表11) Butterfly Orchids社、アンデルの胡蝶蘭用温室

ATES – Butterfly Orchids, Andel, NL

Building	Greenhouse
Energy concept	Current: ATES New built: MT-ATES
Aquifer depth MT-ATES	20 – 55 m-bsl
No. of wells	2 cold - 2 warm
Max. infiltration temp.	25 °C
Max. flow rate	150 m ³ /h
Heat	1,750 kW; 2,600 MWh
Cold	1,050 kW; 2,600 MWh



(出所) Bas Godschalk “ATES : a sustainable H&C solution for greenhouses” 17 June 2024 (プレゼンテーション資料) を加工

(5) ATES普及の要因

オランダでATESの導入が進んだのは、システムに適した帯水層が存在するという地理的な条件に加えて、長年の天然ガス事業により蓄積された地下開発に関するデータや技術・ノウハウの存在がある。加えて、政府がエネルギー・気候変動政策として、天然ガスからの燃料転換を明確に掲げ、ATES開発段階における様々な法律や規制による障害の排除に尽力していることが追い風となっている¹⁷。

地下開発に関しては、国のガイドラインがあり、リスクアセスメントと継続的なモニタリングによる、明確で透明性の高い基準に基づく許可制となっている。潜在的なリスクを明らかにし、現状に即して基準をアップデートしていくために、国家的なプロジェクトを実施し、地下開発による地盤沈下、地震の誘発、水質への影響、生態系への影響などの詳細なリサーチがおこなわれている。

こうした調査結果と開発許可を得た事業者からのデータ提供により、ATES導入に必

要となる地質、地下水、既存の井戸の位置情報をはじめとする様々な関連データが国のデータベースに全て蓄積され、無料で一般公開されているため、関係者は事業開発にあたってのコストや手間が大幅に削減でき、開発リスクが下がる。

さらに、政府、自治体、企業、その他専門組織の役割分担と連携が図られており、国による教育プログラムが実施され、セクターの専門化も図られている。

一方で、政府による財政支援に関しては明確な方針があり、技術が普及するにつれて、その技術を採用するために必要となる追加投資に対する補助金のパーセンテージが段階的に下がり、一定のレベルに達すると補助金がなくなり税制優遇のみとなる。メリハリの利いた支援により、公的資金の効率的な活用が図られており、現在、すでに技術が成熟段階にあり、利用が拡大しているATES導入にあたっての補助金はなく、税制優遇だけになっている。

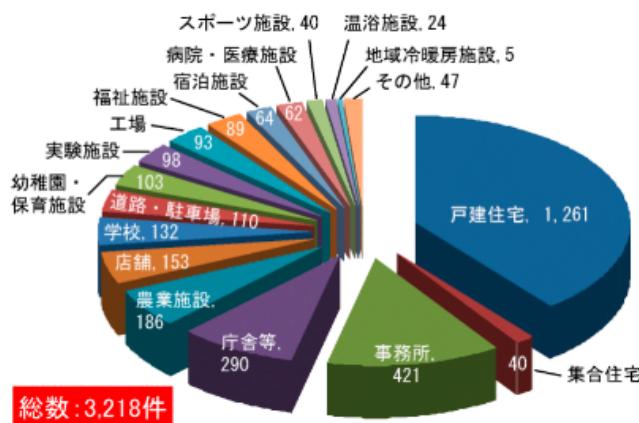
17 例えば10年以上にわたり検討協議され、2024年1月に発効した環境計画法(Omgevingswet)は、空間計画法(Wet ruimtelijke ordening)、危機および復興法(Crisis-en herstelwet)、土壤保護法(Wet bodembescherming)、水法(Water Act)など、既存の26の法律を一本化したもので、これまで煩雑で時間のかかった空間開発事業に関する許可申請を、基本的に1か所かつオンラインで行うことができ、処理も迅速化(原則8週間)される。

4. 日本における地中熱利用の現状

(1) 日本における地中熱利用

2021年度末の日本における地中熱HPの累積設置数は3,218件で、多い順に、戸建住宅が39.2%（1,261件）、事務所が13.1%（421件）、庁舎等が9.0%（290件）、農業施設が5.8%（186件）となっている（図表12）。農業関連ではほとんどが施設園芸での利用で、イチゴ、みかん、バナナなどの果物、トマト、カラーピーマン、レタスなどの野菜、シイタケ、きくらげ、はなびらたけ等のキノコ類、胡蝶蘭、アストロメリアなどの花卉の温室栽培に使われている¹⁸。

（図表12）地中熱利用ヒートポンプの導入箇所別累積設置件数（2021年度末）



（出所）環境省「地中熱利用システム」2023年7月
<https://www.env.go.jp/content/000141999.pdf>

一般的な園芸用施設では、90%が加温設備にA重油を使用しており、燃油価格の高騰とCO₂削減のために空気熱源HPが導入されているが、機器の導入コストが高く、また寒冷地で戸外の気温が非常に低くなると暖房能力が低下したり、室外機で除霜運転が始まることで暖房が止まってしまうなどの不都合が生じる場合がある。地中熱HPであれば安定した運用ができるが、日本の一般的な温室は建築基準法との兼ね合いもあり、いわゆるビニールハウスで、広さも数アール規模であるため、ボーリング調査や掘削、埋設などの作業コストが嵩み、なかなか普及につながらない。

2013年度から2016年度にかけて、農林水産省の補助事業により、数ヘクタール規模のオランダ式大規模施設園芸を日本型にアレンジした高収益型施設園芸のモデル拠点が全国10カ所に整備された¹⁹が、地中熱HPは木質バイオマスと共に宮城県石巻市で導入されているのみで、化石燃料からの燃料転換には基本的に地域の木質バイオマスが選択されている²⁰。こうしたモデル地域での利用が増えれば、日本での普及の糸口になるのではないかと考えられる。

(2) 日本における地中熱とATESの導入例

ここでは日本での地中熱・ATESの利用例を概観するが、日本の農業分野ではまだATESは導入されていないため、地中熱の普及に資する農業利用を行っている福島県広野町の事例、日本においてATES導入の先駆けとなった山形県山形市の日本地下水開発株式会社の事例、そして、今後のATES普及に大きな役割を果たす可能性がある大阪市の取組みを紹介する。

① 【福島県広野町トロピカルフルーツミュージアム】

農業の分野で地中熱を省エネとCO₂排出削減に加えて環境教育、地域ブランド化に結び付けているのが福島県広野町である。同市で

18 特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会の情報による。

19 次世代施設園芸導入加速化支援事業（2013年度（補正）～2016年度）

<https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/NextGenerationHorticulture/index.html>

20 10拠点中で地域の木質バイオマス利用以外は大分県九重町で地熱、愛知県豊橋市で下水処理場放流水熱、富山県富山市で廃棄物由来燃料が利用されている。

は、市が100%出資する広野町振興公社が、東日本大震災と福島第一原子力発電所事故後の地域住民の「心の復興」を後押しして、地域ブランド品の開発、交流・関係人口の拡大を目指し、近隣市町村が手掛ける農産品と競合しない熱帯性植物であるバナナを選択して、2018年からトロピカルフルーツミュージアム内の8アールのビニールハウス2棟で150株の無農薬栽培を始めた²¹（図表13）。

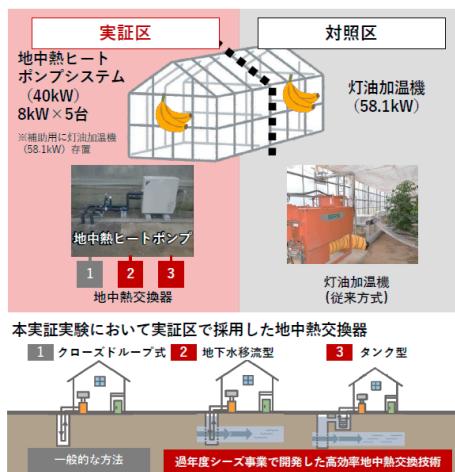
2021年からは国立研究開発法人 産業技術

（図表13）広野町トロピカルフルーツミュージアム温室内のバナナ



（出所）2024年6月に筆者撮影

（図表14）広野町における地中熱利用システムによるバナナ栽培実証実験の概要



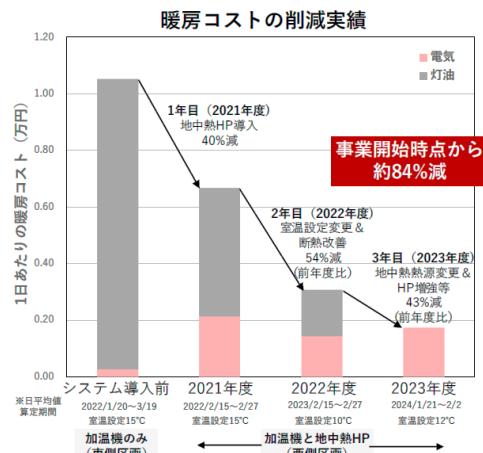
（出所）「被災地企業のシーズ支援事業概要 開発技術⑤：共同開発技術の農業利用への適用&栽培技術開発」FREA提供資料

21 同施設ではこのほかにパパイヤ（年間300個を収穫）とコーヒー（2024年10月収穫予定）も栽培されている。

22 2021年度～2023年度「被災地企業等再生可能エネルギー技術シーズ開発・事業化支援事業」。FREAのノウハウや研究設備等を利用し、被災地企業の持つ再エネ関連技術やノウハウを生かした事業化を支援。

総合研究所（FREA）や地元企業と連携し、ハウス1棟を半分に区切って地中熱HPシステムを導入し、地中熱利用による暖房コストの削減効果測定や、3種類の地中熱交換手法の比較などの実証実験をおこなった²²。同地域は地下水の流れが速く、ATESのような蓄熱システムの利用はできないが、地下50mの掘削で年間15°Cと地中温度は安定しており、地中熱HP導入後は暖房コストを40%削減でき、その後の室温設定変更や技術的な改良で最終的な削減幅は約84%となっている（図表14）。また、CO₂排出量は、事業開始時点の対照区（灯油加温機のみで室温管理を行った区画）に比べて、2023年度の実証区（地中熱HPメインで室温管理を行った区画）では約83%の削減になったとのことである。

「朝陽に輝く水平線がとても綺麗なみかんの丘のある町のバナナ（愛称：綺麗）」と名付けられたバナナは年間およそ1万本が収穫できる。生食用として一部を1本あたり200～300円で販売し、残りは地域の企業や学校などと協働しながらジュースやスイーツに加



工・販売し、地域のブランド力を高めている²³。また、同施設は福島の復興をテーマとした修学旅行生の研修コースにもなっており、見学者数は年間で2万人を超えるという。こうした場所で地中熱導入の省エネとCO₂削減効果やその他のメリットが広く知られるようになれば、その普及の一助となろう。

但し、同地域で1mあたり2万円かかる掘削費用、HP機器やコンピュータ制御システム導入費、地下水に含まれる鉄分の付着が防げる樹脂製のシート式熱交換器などへの初期投資をどのように回収してゆくかは課題として残る。

② 【日本地下水開発株式会社、山形県山形市】

日本地下水開発は1983年、本社に日本初となるATESシステムを導入した。1962年の創業以来、豪雪地域で冬季に地下水を汲み上げ散水することで消融雪をおこなう事業に関わってきたが、地下水の過剰汲み上げによる枯渇に対する懸念が高まってきたことを背景に、1975年からは地下水は元に戻し、取り出した低熱エネルギーだけを消雪に使う「地下水還元式無散水消雪システム」の研究開発を行っていた。同時期に、オイルショックを契機とした省エネの機運が高まる中で、その応用として、低熱エネルギーを一年を通じた冷暖房システムの熱源として利用するための共同研究を山形大学と開始し、ATES導入へとつながった。

その後、日本ではATESに対する興味が薄れたが、2000年以降の地球温暖化対策として再度、関心が高まり、同社は、2011年～2013年に環境省の補助事業として本社システムを

リニューアルし、ATESのランニングコストが夏季に従来のエアコン冷房に比べて42.3%、冬季は従来の重油焚き温風機暖房に比べて45.9%、年間では45%の削減となり、CO₂排出量も夏季には42.4%、冬季には25.8%、年間では30%の削減となることを実証した。

2014年～2018年には国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の補助事業で、ATESシステムで大きな課題となっている汲み上げた地下水の全量還元や、寒冷地において冷熱の蓄熱が卓越するため生じるシステムの効率低下などの問題を取り組んだ。地下水の還元には、地下水が外気に触れることにより生じるスケールによる井戸の目詰まりを防ぎ、100%加圧注入が可能となる密閉構造の井戸を開発した。システム効率問題については、夏に冷房利用で温度が上昇した地下水を、太陽光集熱器で加温し、より高い温熱として蓄え、冬季には暖房利用で温度が低下した地下水を無散水融雪設備の熱源として使い、より低温で蓄えることにより、夏のランニングコスト64%、CO₂排出量64%削減、冬のランニングコスト58%、CO₂排出量58%削減と、高効率なATESシステムの運用（図表15）を可能とした。

2021年1月末には、近隣に位置する関連会社である日本環境科学株式会社（JESC）に、実証施設として新たにNEDOからの助成²⁴を受けた、高効率ATESを利用したZEB²⁵仕様の事業所（「JESC-ZEB棟」）が完成している。これまでの高効率ATESシステムのHPに給湯機能を追加し、冷暖房に加えて給湯、そして冬の来客用駐車場の消雪と全ての熱需要に

23 バナナ樹皮からは和紙づくりがおこなわれているほか、福島工業高等専門学校との共同研究ではバナナ酵母菌の新株発見といった成果も上がっている。

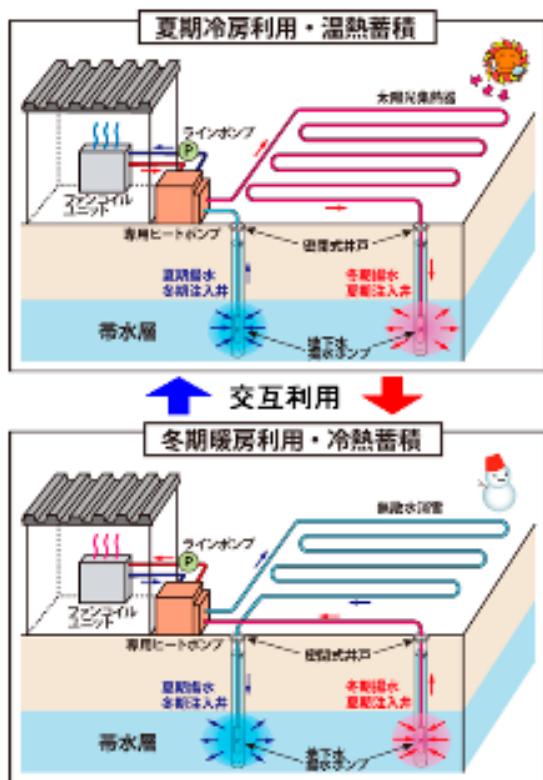
（株）広野町振興公社資料「被災地広野町の新たな創生に向けた取り組み～熱帯性作物栽培への挑戦～」

24 2019年度～2023年度NEDO「再生可能エネルギー熱利用にかかるコスト低減技術開発」事業

25 Net Zero Energy Building（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）は快適な室内環境を実現しつつ、消費する年間の一次エネルギーの収支をゼロにすることを目指した建物。国により [ZEB]、Nearly ZEB、ZEB Ready、ZEB Orientedの4段階が定義されている。

<https://www.env.go.jp/earth/zeb/detail/01.html>

(図表15) 高効率帯水層蓄熱冷暖房システムのしくみ



(出所) NEDO「国内初、高効率帯水層蓄熱システムを開発」2018年6月11日
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100971.html

対応可能としている。冬季には温熱井から20°Cの温水を汲み上げ、社屋での熱利用後に15°Cとなった地下水を駐車場の無散水消雪に利用し10°Cの冷熱を冷熱井に戻す。夏季には13°Cの地下水を冷熱井から汲み上げ、社屋での熱利用後に18°Cとなった地下水を駐車場の太陽光集熱器で25°Cまで昇温して温熱井に蓄熱する。

国が定めるネットゼロビル（ZEB）基準値と比較して、ATESシステム以外の様々な省エネ設備も加えた63%の省エネルギーと、屋上に設置された太陽光発電からの創エネルギー-39%により、同建物はトータルでプラスの

エネルギーを生み出しており、[ZEB] 基準²⁶を達成した。

同社には農業関係者からも地中熱・ATES利用の相談が寄せられているが、現状ではやはり、導入コストが大きな壁になっているとのことだ²⁷。

③ 【大阪市】

熱需要の大きい建物が集中し、再エネ利用の可能な土地が限られている一方で、地下は豊かな帯水層に恵まれている大阪市では、より大規模なATESの導入を目指している。同市のATES導入ポテンシャルは高いが、高度経済成長期に大量の地下水汲み上げにより大規模な地盤沈下が発生したため、揚水制限が続いている。規制緩和に向けてATESの実証実験を続けており、2015年度～2018年度にかけて環境省の実証事業としてJ R 大阪駅北側の「うめきた2期地区」²⁸で深さ60mの大容量熱源井を掘り、地盤沈下などの影響なく従来システムに比べて35%の省エネ効果が得られることを確認した。さらに同市此花区舞洲（まいしま）の宿泊施設を併設した障がい者スポーツセンター「アミティ舞洲」では、2018年度～2020年度の環境省の実証事業で、都市部での利用を想定し、冷暖房能力を向上させるため深さの異なる2つの帯水層を利用したシステム「W-ATES」を構築し、消費エネルギーを年間約43%、CO₂の年間排出量を約58%削減できていることだ²⁹。

こうした実証結果の積み重ねにより、2019年8月には、国による国家戦略特区における建物用揚水の規制緩和が実現し、「うめきた2期地区」におけるATES事業推進が可能となつた。現在は、緩和要件の一つである「実証実験による確認」をシミュレーションによる

26 脚注25を参照

27 同社でのヒアリングによる。

28 うめきた2期については<https://www.pref.osaka.lg.jp/o140030/daitoshimachi/umekita2ki/index.html>を参照。

29 2023年8月22日、読売新聞記事

確認でも可とする、さらなる規制緩和を求めている。

一方、アミティ舞洲では2023年度～2025年度にかけての新たな環境省実証事業として、都市域や工場などで稼働する複数のATESシステムを余剰再エネ電力の吸収に役立て、再エネ電力の導入拡大とCO₂排出削減を目指す取組みが進行中である。

大阪市は2025年の万博会場である人工島の夢洲（ゆめしま）で、ATESシステムをパビリオンなどの冷房に活用する計画である。こうした機会をとらえ、ATESの積極的な普及・啓発を狙っており、アミティ舞洲などの見学を含む、環境技術ツアーや開催などのアイディアも出ているという³⁰。

5. 日本での地中熱・ATES導入の可能性と課題

(1) 農業分野での導入可能性

現状、2030年度にむけての日本のGHG排出削減目標は2013年度比46%で、うち農林水産分野では3.5%の削減を目指しており、内訳は排出削減対策で0.2%減、吸収源対策（森林や農地土壤によるCO₂吸収）で3.3%減となっている。排出削減対策に含まれる施設園芸分野ではCO₂換算で155万トンの削減が求められており、生産現場での具体的な省エネ対策として地中熱などの再エネ熱やHPの利用などが促されている³¹。

今後は人口減少、農業の担い手不足、耕作放棄地の拡大といった問題がさらに深刻化し、農業の集約化や合理化を今以上に迫られることになるだろう。日本でもオランダのような規模の事業をエネルギー効率よく、CO₂排出を最小限に抑えながら持続可能なものにしてゆかなければならぬ。

地域での再エネ熱として活用されることが多い木質バイオマスについては、様々な状況の変化で将来にわたり低価格での安定供給が可能であるかどうか不透明な部分があり、またカーボンニュートラルを見なせるには適切な森林管理が不可欠となる。地中熱・ATESは初期の設備投資の問題がクリアされれば、掘削した井戸などの設備は何十年でも使用可能で、燃料費はかかるないのであるから、変動性再エネである太陽光や風力のバッファーとしてのみならず、物理的なサプライチェーンでのリスクがある木質バイオマスを補完する形での導入として、魅力的な選択肢の一つになると思われる。

また、施設園芸のみならず、ますます重要性を増すであろう陸上養殖の分野でも、省エネ・脱炭素化のための利用の広がりが期待される。

(2) 地中熱・ATES普及にあたっての課題

まずは初期コストが大きな課題であるが、一度、設備やシステムが構築されれば、燃料代は大幅に削減でき、メンテナンスコストも殆どかかりず、井戸は半永久的に使用でき、脱炭素化への貢献も大きい。こうしたシステムの利点が目に見える形で示され、導入実績が増えれば、日本でも技術が成熟し、必要となる部品や機器の標準的な仕様が決まり、量産効果で初期コストは下がる。オランダが長年かけておこなってきたように、先駆的事業者には補助金を厚くし、まずは導入事例を増やすことが必要であろう。

また、国や自治体が主導して、環境や生態系に影響をおよぼさない限りにおいて、法や規制の壁を低くし、明確で透明性の高い基準を作るとともに、手続きの簡素化を図り、事業者の初期開発リスクを軽減することが重要

30 大阪市役所からのヒアリングによる。

31 農林水産省、農産局農業環境対策課 「農業分野における気候変動・地球温暖化対策について」 2024年1月
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/pdf/ondanka_taisaku.pdf

である。

さらに、関連データの収集・蓄積と誰でもアクセスできるデータベースの構築は必須で、大阪市がATESの普及に向けて、同市の詳細な帯水層蓄熱情報マップ³²を作成したように、国、そして自治体が主導する形での情報環境整備が望まれる。

6. おわりに

2024年4月4日に大阪市・大阪公立大学とオランダとの間で日本におけるATESの社会実装に向けた覚書が締結された³³。今後、同国の協力を得て、ATESがうめきた2期地区で大規模に商用利用され、2025年大阪・関西万博会場にも導入されて、省エネと脱炭素化ならびにエネルギーコスト削減に寄与すれば宣伝効果は大きいだろう。

まずは日本国内で地中熱技術への認知度を上げることが大切で、注目を浴びる形で事業を成功させ、その存在を広く知らしめる必要があろう。

参考文献（本文中に記載したものは除く）

- ・環境省 水・大気環境局 環境管理課 環境汚染対策室「地中熱利用にあたってのガイドライン（第4版）」2024年3月
<https://www.env.go.jp/content/000122999.pdf>
- ・環境省 水・大気環境局 土壌環境課 地下水・地盤環境室「地中熱読本 2021」2021年3月
- ・環境省 水・大気環境局 水環境課 地下水・地盤環境室「帯水層蓄熱の利用にあたって～熱エネルギーを大地に蓄熱 大規模施設の冷暖房に活かす技術～」
<https://www.env.go.jp/content/900542334.pdf>

32 大阪市Webサイト <https://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000476996.html>

33 https://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/cmsfiles/contents/0000476/476996/JP_ATES_MOU.pdf

- ・北海道大学 環境システム工学研究室編「地中熱ヒートポンプシステム（改訂2版）」2020年10月20日
- ・Fleuchaus P, Godschalk B, Stober I, Blum P “Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 94 October 2018
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118304933>
- ・Godschalk B, Provoost M, Schoof F “Netherlands Country Update” April –October 2021
http://www.geothermica.eu/media/ates/8.3.1._Godschalk_2021_Country-Update-Netherlands.pdf