

FVEE25 周年記念大会：ドイツの熱エネルギー事情 “Wärmewende”

未来技術フォーラム神戸 板山克広

2015年11月3日から2日間にわたり独・ベルリンで開催された FVEE25 周年記念大会に参加した。FVEE(Forschungsverbund Erneubare Enegie:再生可能エネルギー研究協会)は、1990年に当時のワレッカー大統領ほかの呼びかけで結成された研究協議会で、2800名の会員を擁しドイツにおける再生可能エネルギー(以下 RE と略記)研究活動の80%を占めている。この分野の課題は近年、学際的色彩が強くなったこともあり、複数の研究機関、大学が研究チームを組み、供給、システム、エネルギー変換、利用技術、エネルギーシステム改革など、RE 導入拡大に関わる研究課題全般に取り組んでいる。2年前に参加したフライブルグでの年次大会では、PV、風力等の“出力変動型”RE 主体のエネルギー/電力システムへの移行(= “Energiewende”)に伴う問題への対応を広く議論していたが、今回は25周年の節目ということもあり、2050年CO₂ゼロ社会実現に向けてドイツにとって目下最大の課題と見做される“熱エネルギーシステムの低炭素化”にテーマが絞られた。政策的課題から技術的課題まであらゆる側面からの議論が行われたが、以下にその概要を紹介する。

1. ドイツの熱エネルギーシステムの現状と2050年目標達成に向けた課題

ドイツの熱エネルギーの現状について、Wuppertal Institut、Fraunhofer IWES などから報告があった。2013年における一次エネルギー需要は3,610TWh で、そのうち発電部門が39%、熱利用が35%、運輸関連が残り26%となっている。そのエネルギー源は化石燃料の石油、天然ガス、石炭が約80%を占め、782.3Mrd.tのCO₂を排出するとともに、特に輸入に頼る石油と天然ガスだけで燃料コストの90%がかかっている。つまりこの輸入原料の削減を図ることが、環境対策、国民経済の両方にとって極めて重要な課題となっている。

一方、最終エネルギー消費で見ると、総計2,575TWh の58%が暖房、温水、冷熱、プロセス用熱などの熱利用で、その90%が化石燃料を用いたボイラー、コージェネ(熱-電併給)により供給されている。RE への電源シフトが急速に進む電力分野に対して(2014年時点で発電比率27.8%)、熱供給分野でのRE 化比率は9.9%(2020年目標14%)で2010年以降殆ど進んでいない。安価な褐炭を多用する発電部門に対してガス、石油、黒炭等の高価な燃料を多用する熱供給分野でのRE 化が、ドイツ社会にとっての喫緊の課題と認識されている。これが本会議のスロガン「“Wärmewende”(熱変革)なくして“Energiewende(エネルギー変革)”なし」の根拠となっている。

環境省は熱分野のCO₂削減量に2030年▲62%(2008年比)と非常に高い目標を掲げる。この数値目標の達成シナリオとして、省エネ・熱効率改善等による熱需要の削減と熱源のCO₂排出削減技術へのシフトによる達成、をイメージする。例えば70%の省エネ化と熱源のCO₂排出削減率50%を組み合わせれば達成可能となる。ドイツではバイオマスを中心に熱源のRE 化が進んできたが、その勢いは2010年にはほぼ頭打ちとなり、その後、太陽熱、地中熱などの他の熱源が少しずつ伸びてきているものの、未だRE 化10%の壁を越えられていない。そこで2050年での80~100%RE 化がほぼ軌道に乗りつつある電力を熱に変換する技術に着目する。特に投入電力に対して何倍もの熱エネルギーを生み出せる“ヒートポンプ(以下HP と略記)”への期待が大きい。次に各熱エネルギー利用分野における省エネ、熱源RE 化への取り組みの具体例を紹介する。

2. 各利用分野における省エネ、CO₂フリー熱源化に向けた取り組み

2-1. 個人住宅部門 (ISFH、Fraunhofer ISE の報告より)

2013年のドイツ国内の最終エネルギー消費2,575TWh の内訳は、製造業28.5%、運輸交通28.2%、個人住宅28.1%、商業等業務関連15.2%と、各利用分野がほぼ均等に消費している。前述

のように、全体ではその58%が熱利用となっているが、個人住宅分野では723TWhの約80%を熱利用が占めており、各家庭における省エネ、熱源の見直しが重要な位置づけとなっている。このため1970年初頭より新築家屋に**エネルギー消費基準**を定め(売買・賃貸時に必要となるエネルギー証明書を発行)、その基準レベルも順次見直しを行い、現在では50kWh/m²・年にまで引き下げている。またこれと並行してゼロ(プラス)エネルギーハウスの奨励、更には省エネレベルに応じた**ドイツ復興銀行融資制度**(KfWxx:例えば基準の70%ならKfW70と呼ぶ)を実施。このような取組みにより生活レベルの向上による一人当たり居住面積の増加にも拘らず、住宅用の熱エネルギー消費合計は直近の20年で30%近く減少している。熱源としては戸建て住宅の多くが重油/ガスボイラーを利用しており、その効率改善(condensing boilerの採用)あるいはRE利用(太陽熱、地中熱/PV電力=HP)の推進が進められている。その一例としてペレット焚きボイラー(15kW)と太陽熱(集光面積10m²)を組み合わせると12MWhの年間需要を賄うモデル等が紹介された。

しかしながら、現存住宅約2千万戸の築年数を見ると、1970年以前に建設された住居が50%を占め、最近の新築件数は年間10万戸程度にすぎない。つまり使い続けている古い家屋の省エネタイプへの**改修(Sanierung)**が住宅部門での熱エネルギー削減にとって重要な課題となっている。このための有効かつ低コストの改修技術の開発が種々行われており、その例として外部壁にHPを熱源とする冷暖房機能付与、太陽熱集光器で直接外気を加熱する換気システム、家屋自体(例えば床)を熱貯蔵に活用する構造物活用蓄熱システムなどが紹介された。またこのような建屋改造による経済効果は非常に大きく、太陽エネルギー・水素研究センター(ZSW)によるとRE関連産業の雇用創出効果が7万人程度なのに対して、改修市場は27.8万人、市場規模で140億€に上るといふ。

ところで住宅が密集する地域では、発電所(HKW:電気・熱製造)、ごみ焼却場等の排熱を利用した**熱供給網(Fernwärme)**が整備され、工場、住宅への熱供給を行っている。一方で、日本のスマートタウンのように新たに開発される比較的小規模の**住宅集合地**などでは、数MW以下の電力を生み出す小規模発電所(BHKW:Blockheizkraftwerk)からの熱を利用した**熱供給システム(Nahwärme)**の設置を進めている。住宅床面積でいうとドイツでは集合住宅が57%を占めており、このような熱エネルギーシステムの統合化は、マンションなどの共同住宅・複合施設などへの適用も含め、地域全体のエネルギー効率の向上の為に極めて有効な手法と認識されている。電気と熱を併給するコージェネ(CHP:combined Heat&Power)はこれまでガス、石炭を燃料としてきたが、これらのボイラー燃料をバイオ燃料(ペレット、ガス)に切り替えるか、後述のように熱源自体をREに求めていく必要がある。これと並ぶCHPの課題として電力システムの不安定化(変動電源比率増大による卸売電力価格の大幅変動)による“経済性が不透明”という問題が挙げられる。CHPは熱供給を目的に運転し同時に生じる電力を市場に供出するが、熱需要と電力事情のミスマッチがその経済性を損なう。この問題の克服の為に、熱貯蔵機能の付与による電力価格連動型運転、余剰電力のバイオガス製造・熱変換へ利用するハイブリッドシステムなどの新しい事業モデルが紹介された。

2.2. 商業・サービス部門 (Fraunhofer ISE/IWESの報告より)

国内最終エネルギー消費の約16%(376TWh、2013年)を占める商業・サービス部門。その建屋数は180万棟で、建造物総計の35%のエネルギーを消費し、その50%が暖房・温水供給に使われており、また更に冷熱利用(空調)も増加傾向にある。個別住宅と同様に省エネ化に向けたSanierungが重要との認識で、外壁・窓の断熱化、或いは熱貯蔵機能の建屋への組込み等が進められている。

熱供給源は、現状、住宅部門と同様に自家保有するボイラー(一部は CHP)か地域熱供給に頼っているが、このボイラーの HP への切替えが商業部門における CO₂削減の決め手と考えられている。HP は環境熱(大気熱、地中熱)を汲み上げることにより、それに要する電力消費量の数倍の熱エネルギーを得るもので、その効率(Jahresarbeitszahl=熱エネルギー/電気エネルギー: 以下 JAZ と略記) 2~6 は電気ヒータの<1 とは比べものにならない程大きい。現状の電源ミックスにおいても平均的な効率(JAZ=4)を持った HP の CO₂排出量は高効率ボイラーの 1/2 以下で、更に電源の RE 化が進む 2030 年頃には 1/3 以下になると期待される。現状、暖房機器の 70%以上を占めるガス/重油ボイラーを大気、ガス、地中熱を熱源とする HP に順次置き換え、2040 年台には化石燃料ボイラーを駆逐することにより 2050 年目標の達成を目指す。とは言え、HP 導入は地域で大きく異なるもの全国平均では新築建屋の 31.8%、6 万台/年程度に留まり、2030 年に向けた成長予想も 9~23 万台と大きくバラつくのが現状である。市場拡大に向け、コッペラーなしの Sorption タイプ(10~40kW 能力)や熱源・用途に応じた様々な機種が開発・上市が盛んに行われている。

当面のエネルギーコスト削減の対策としては、複数の熱/エネルギー源を組み合わせ燃料コストの最小化を図る手法も有効で、ガス、電気料金の変動に応じて供給源を切り替える”Fuel Switch”が注目されている。建屋当たりのエネルギー消費量が多いこの部門では、安価な熱源を極力利用することに積極的だが、大口需要を武器に調整電力向けのデマンドレスポンス市場(米国で急速な拡大)において重要な役割を果たすことも可能である。また建屋全体のエネルギーシステム的设计により、HP の JAZ も 4~6 と大きく影響を受けるとの検討結果もある。エネルギーコスト削減、環境対応に向けて、この部門におけるエネルギー管理手法を更に高度化することの重要性が指摘された。

2-3. 製造業部門 (Jülich 研究センター、DLR の報告より)

2012 年の統計データによると製造業部門の熱需要は 534TWh で、これを賄うために消費される燃料は、3.1EJ と国内総計 13.4EJ の 23%に及び 159Mio.t(電力等を含めた総エネルギー消費では 333Mio.t)の CO₂を排出している。主要な熱源はガス(48%)と石炭(19%)で、熱供給網(9%)、電力(8%)、バイオマス(6%)の利用比率は低い。高温利用が多い製造業では、熱効率改善に並んで排熱の有効利用がエネルギー消費削減の基本となる。その排熱温度レベルにより発電機、スターリングモーター、ORC、吸収式冷凍機、熱供給網への供給、予熱プロセスへの活用、暖房熱源への活用等、様々な工夫がなされている。熱需要合計の 40%以上に当たる利用可能な排熱 225TWh を完全に利用できれば、60Mio.tの CO₂排出削減に結びつくことから、この技術への政策的支援の必要性が指摘された。また、この排熱により 37.5MWh の発電を行うことでも、60Mio.tの CO₂排出削減が期待できるという。

前述のように熱供給源に占める電力と熱供給網の比率は 17%と低く、残り(300°C以下の熱需要)をボイラーと CHP がほぼ同割合で担っている。一方、独立に運転されている自家発電設備も多く、これらの発電設備とボイラーを CHP に置き換えれば、同じ電力量、熱量を生み出すに必要な燃料を 40%減らすことができる。2013 年のデータでは、CHP による発電量は 28.9TWh(製造業総需要の 13%)、熱エネルギー量は 84.8TWh(同 40%)であるが、BMW は 2050 年までにそれぞれ 45~59TWh、111~132TWh まで拡大できると見込む。この CHP 化による新たな CO₂削減効果は 3~20Mio.tに及ぶと期待している。

製造工場では、プロセス(加工工程)用熱と暖房用熱を統合して工場全体のエネルギーシステム(プロセス-建屋構造物-設備技術)を取扱う総合エネルギー効率という概念が重要であり、そのための最適化設計手法の確立の必要性が指摘された。また排ガス・排熱の利用率を上げるために必須

の**熱貯蔵**。特に高温での貯蔵効率を高めることを目指した技術開発が推進されており、その例として断熱(真空断熱)、熱輸送(高圧蒸気用補強パイプ、熔融塩)、熱貯蔵媒体(PCM：相変化型、TCM：熱化学反応型)などの開発事例と適用例が紹介された。

3. 化石燃料に替わる RE 熱源

3-1. バイマス (ドイツバイマス研究センター、Jülich 研究センターの報告より)

本稿の冒頭で述べたように、RE 化の進捗が思わしくない熱エネルギー分野ではあるが、その中心的役割(2014 年実績で RE の 87%)を担うバイオマス。エネルギー源 RE 化による CO₂ 排出量削減総量へのバイオマスの寄与度 43%は導入が進む風力や PV を大きく上回っている。バイオマスの主な使い方は、ボイラーと CHP に大別され、その比率は 2:1 となっている。これまで暖房用途での市場拡大を目指して、室内設置の小型タイプから 500kW 規模の大型のものを対象に、欠点とされる**有毒ガス排出、粉塵、温度制御性・安定性、燃焼効率を改善するための技術開発**が行われ製品化もされているが、競合技術に対する更なる明確な**経済優位性確立**が求められている。また冷熱にも対応する mini-CHP(Nanostir)の開発が行われており、太陽熱、HP、蓄電池等と組み合わせて住居に組み込む“スマートバイオマス”という将来構想の紹介もあった。

日本でバイオマスの持続可能性にとっての障害と認識される**燃料調達問題**。ドイツでは林業(残材も含め)だけで 218PJ/a、そして農業関連の副産物でほぼ同規模の燃料調達のポテンシャルがあるという(因みにごみ、汚泥などでは僅か 4PJ/a)。これはバイオマスへの置換えが容易とみられる工場プロセス熱用の石炭消費量 390PJ/a を十分にかゝるだけでなく、電力の一部も賄える量と云える。経済性が厳しく問われる応用分野ではあるが、低コスト化に向けた技術開発次第で、**2-3**で紹介した BMWi の**製造業用 CHP 倍増化構想**をバイオマスにより実現することが期待される。

3-2. 太陽熱 (ZSW、Fraunhofer IBP、ISFH の報告より)

第 1 章で述べた電力に対する熱エネルギーの RE 化比率の遅れと同様に、太陽エネルギーの利用においても PV の累積設置能力 38.2GW、発電量 35.2TWh/a に対して、太陽熱はそれぞれ 12.9GW、7TWh/a(いずれも 2014 年データ)とその導入に遅れが見られる。2050 年に向けた導入量予測でも、20~70TWh/a と楽観的から悲観的見通しまで種々の見方がある。この状況を打破するために、**市場成長に向けた応用分野拡大の試み**が多くなされている。

一つが先にも述べた集合住宅地の熱源としての適用である。KfW70 基準の 130 戸からなる **Kassel の新興住宅地**では、各戸に設置した集光パネルとボイラーの併用により、熱需要 1,500MWh/a を賄う。これにより全体で一次エネルギー消費を 61%削減し、エネルギーコストも 5%減らすことができた。今後の予定として、後に述べる集中型地中熱交換機及び HP を加えた地域熱供給網を新たに構築し、ガスからの完全脱却を図る計画とのこと。また 37 戸の建屋(500 家族、床面積 4 万 m²)で構成される **Gutleutmatten 地区**では、これも戸別に配置された屋上平面集光パネル(2000m², 700MWh/a)を CHP プラントからの熱供給網に繋げ、両者の最適組合せ運用を 2017 年より検証する計画とのこと。更には CHP 熱供給網の電力市場対応のレジリエンスを上げるために、大規模太陽熱設備と連携させる計画も進む。この目的の為に、既にデンマークで実用化された集光効率アップ、熱貯蔵能力向上の狙えるパラボラ集光器の採用も有効という。

プロセス(加工工程)用熱エネルギーの一部を**太陽熱で補完**する試みも行われている。平面集光器でも 110℃程度の熱を得ることが可能となっているが、より高温(~130℃)の熱を低コストで得るための材料・構造の開発が進む。洗濯工場、食品工場、繊維工場のプロセスに適用する試み

が行われているが、その成功例として Singen-Bohlingen にある温室栽培工場が紹介された。9棟からなる温室は 650kW の木質チップ・薪ボイラーで 70℃に加熱されているが、平面集光器(960m²)と熱貯蔵槽(100m³)の設置により総熱需要 1.5GWh/a の 30%をカバーできる。その設置コストは 460€/m²と経済性が見込めるレベルとのこと。しかしながら経済性が優先されるこの応用分野では、熱貯蔵方式の工夫と更なる量産効果による低コスト化が普及に向けた大きな課題とされた。

3-3.地(中)熱 (ドイツ地学研究センター GFZ、Fraunhofer IBP、DLR の報告より)

地熱利用と云えば日本のお家芸のように聞こえるが、ドイツの北部あるいは南部でも地下 3000m まで掘れば 100℃以上の熱(水)の採取が可能となる。その中でバイエルン州には地中深くから地表に向けて斜めに走る石灰層に沿った水の流れがあり、例えばミュンヘン市直下では場所により 80~140℃の熱水が得られる。バイエルン州には既に 21 か所の熱供給拠点(内 8 か所は発電も)が設置され、26MW の電力と 260MW の熱を供給している。このような状況の下、ミュンヘン市の電力を一手に供給する“Münchenstadtwerk”(MSW)が、大規模地熱利用に向けて本格的な探索調査、市民向け広報活動を現在進めている。

MSW は 3 箇所の CHP 発電所を持ち(全電力需要の 70%をカバー、残りは水力と RE)、そこから市内に張り廻らされた配管による熱供給を行っている。この開発計画の背景として、「今後、4TWh/a にも上るミュンヘン市の熱需要を CO₂フリー化していくためには、地熱の活用が唯一の解決策であり、また家屋の改修を個別に行い積み上げるより効率的かつ迅速」、という理由を挙げている。2016 年 3 月に調査・準備を終了し、電力 50MW、熱 400MW の供給を目指した計画の実行段階に入る。現在、これとは別に既に AFK-Geothermie が深度 2,600m から 85℃の熱水 77L/s を汲み上げ(熱需要の 88%相当)、Aschheim 等 5 つの地域に熱供給する計画を 2017 年完成目標でスタートさせている。しかしながら本会議での報告者 GFZ はこのような動きに対し、「大深度地熱活用は未成熟の技術で、現状では資金調達、住民コンセンサスの困難さからミュンヘンのように状況に恵まれた地域に限られる」、との見解を示していた。

一方、浅い深度の地中熱も HP の熱源として重要である。Wüstenrot では PV、地下冷熱、HP、貯熱槽を組み合わせ、余剰電力を活用したプラスエネルギー住居地区を目指す。また前に述べた Kassel は太陽熱、地中熱、HP の組合せによる複合熱供給システムの例である。地中熱の活用法としては熱貯蔵との複合化も注目されている。大規模・長期熱貯蔵法として断熱材で囲んだ地中ピットに温水を貯める手法があるが、経済性に難点があると言われている。この対策として Attenkirchen では、大型太陽熱設備による地域熱供給システムを構築するに当たり、500m³のコンクリート製水槽を 30m 深さに打ち込んだ 90 本の地熱ポンプで取り囲んだ貯熱槽を設置した。水槽は断熱されていないため、地中に放熱するが、その熱を地熱ポンプが取込み、熱供給を行うという考え方である。これより断熱式地下貯熱の経済性と熱供給拡張性という欠点を克服できるとのことである(因みにカナダには地熱ポンプ 144 本、貯熱槽 15,800m³の同型設備がある)。

4. 所感

ドイツの熱エネルギー事情の全体像を把握する上で筆者にとって非常に役立つ会議であった。発表時間がいずれも 20 分程度と短く、いささか概括的なものとならざるを得ないきらいはあったが、1.5 日という短い日程であらゆる観点を網羅するためにはやむを得ないのである。とは言え、発表されたテーマは全て複数の研究機関が参加して活動したもので、この学際分野の研究開発の在り方として大変参考になる。

報告の中で最も注目したいのは、やはり“Stadtwerke”である。熱エネルギーシステムは電力、上

下水道と並んで本来は極めて社会インフラ性の高いものである。熱需要が EU に比べると少ないという事情はあるものの、日本ではスマートな取組みに留まりがちである。COP21 を受けて、エネルギー全体システムの中での対応が迫られているのは明確であり、“電気と熱の融合”の問題も含め、より効率的な社会システムの構築を議論すべき時代に入ったように思われる。昨年、ドイツ事情の視察を企画した SAP の報告によると、1400 社に達する Stadtwerke の熱供給事業のシェアは 65%にも及ぶとのこと。電力でも採算性は悪いものの 4 旧大手電力を凌ぐシェア 46%を誇る。電力に続いてガスの自由化が来年に迫るなか、我が国でも産業構造の抜本的变化が起こりうる状況を迎える。昨年末、総務省、経産省、林野庁、環境省が協力して全都道府県に「地域エネルギー事業センター」を 100 ヶ所立上げるとの発表があった。地方創生の流れもうけ、まさに Stadtwerke を念頭に置いた構想という。今後の動きに大いに期待したい。

以上