

技術解説

我が国における熱エネルギー技術開発の
動向

A Trend of Thermal Energy Technology Development in Japan

岡山大学大学院自然科学研究科
教授

稲葉 英男

Hideo Inaba



1 最近のエネルギー・環境問題の動向

我が国のエネルギー源の大部分は、輸入を主体とした石油・天然ガス等の化石燃料そして原子力に依存している。特に、石油に関しては1999年当初1バレル9ドルであった原油価格が中東産油国の減産政策で30ドル程度まで、約3倍もの上昇となり、我が国の石油依存体質の脱却に向けての新たな展開の必要に迫られている。この反動で米国では、昨年、ガソリンの値上げが80%にも達しており、我が国においても石油製品の値上げが続いている。さらに、東海村のウラン加工施設において発生した臨界事故は、将来原子力エネルギー依存度を増大しようとする我が国のエネルギー政策に大きな打撃を及ぼすものとなっている。これら二つの象徴的な出来事や1997年の地球温暖化防止京都会議(COP3)における炭酸ガスなどの地球温暖化ガスの削減量の国際的取り決め(我が国は1990年の温暖化ガス排出量に対して6%の排出削減)等で、新たなエネルギー源の探索や効果的な環境負荷低減法の展開に向けての、革新的な技術開発やその方法論の構築が急務となっている。このようなエネルギーや環境対策に向けて様々な規制緩和策や責任義務の強化策そして市民意識の向上などから、閉塞感のあったエネルギー関連分野の技術開発やサービスなどで、ダイナミックな動きが見られ始めた。例えば、コンピュータシステム技術の飛躍的進歩によるコンピュータのダウンサイジング化(小型高速化)や有線型固定式電話からデジタル型の携帯電話への移行など、小回りの利かないタイプのものから、需要側がその利用に対して大きな自由度を持てる、高性能小型化且つ移動型へあらゆるものが変革しつつある。

エネルギー分野では、石油、ガスや電力の規制緩和策から、外国供給者の参入など自由化競争時代に入り、それらの価格・料金の値下げと需要者側のエネルギーに対する選択枝の拡大が可能と成りそうである。現在、環境対策車として燃料電池車への取り組みが、固体高分子型燃料電池の出現により一気に加速し、車メーカーはその開発に鏑を削っている現状にある。当初、ガス供給会社が主体となり

200kW程度のリン酸型燃料電池の普及促進に力を入れているが、その導入速度は停滞気味である。ここにきて、米国などから小型分散電源として、数十キロワットから数百キロワットのマイクロ、ミニガスタービンコジェネシステム(熱電併給発電)の業務用などへ向けての売り込みが活発化し、国内メーカーもこの分野への参入せざるを得ない状況になっている。さらに、固体高分子燃料電池を用いた数キロワットの一般家庭向けのコジェネシステム開発に向けての取り組みも家電メーカーやガス会社等より行われ始めた。特に、従来の電力供給やガス供給という縦割りのエネルギー供給から、ガス供給産業が電力を販売するなどの総合エネルギー供給産業の出現が外資系資本の参入などで我が国でも起こりつつある。また、最近に至り、縦横25ミリ、厚さ2.5ミリのノート型パソコン等用ミニチュア燃料電池(燃料:メタノール、従来型充電式電池の十倍の能力)の開発もなされ、小型充電式電池に替わるものとして注目されている。このようなエネルギー関連産業の動向から、電力供給会社も分散型コジェネシステム分野へ進出する動きもあり、我が国の電力を中心としたエネルギー供給体制や形態が大幅に変化する時代へと移りつつある。また、21世紀におけるエネルギービジョンに関する環境・エネルギー関連のキーパーソン等に対する調査によると、現在の電力供給を含む大規模集中型から分散型エネルギーシステムへの変革を推進すべきであるとの回答が90%以上にも上るとの報告もある。さらに、改正省エネルギー法によるエネルギー使用の合理化の強化、長期エネルギー需給見通しにおける各種の分野での省エネルギーや新エネルギーの活用など政策的にもエネルギー資源の多様化やその利用の効率化が叫ばれている状況にある。すなわち、2000年からは、エネルギー、環境問題と経済の持続的発展(3E、トリレンマ)さらに、環境・エネルギー教育(4E)を含めた大きな4つの課題の克服に向けて大きく動き出す時期にある。

一方、物質の大量生産・消費・廃棄の時代から、4R(Reuse, Repair, Remanufacture (Reduce), Recycle)の時代へと環境を全面に出した資源保全型の社会システムの構築に

関する様々な試みが起こっている。例えば、一部のメジャー石油会社は、大量の地球温暖化ガス排出の元凶となる石油製品販売が将来の訴訟対象となることを見越して、太陽や風力エネルギー等の再生可能エネルギー供給への転換を計画している。さらに、自動車製造メーカーでは、エネルギー利用効率の悪い自動車の製造から、電気自動車などの脱化石燃料を用いた交通システムへの転換を模索し、燃料電池自動車の開発技術を家庭向け分散コジェネシステムへ利用することを考えている。環境ISOと言われるISO14000シリーズ取得数は我が国で2641件（1999年10月迄）となり、その数は世界第1位となる。さらに、割高でも環境配慮を優先した商品の購入を希望するグリーンコンシューマ化が進んでいる。環境関連の社会的動きとしては、環境税、税のグリーン化、炭素税等が政策として検討が進められており、さらに環境負荷の少ない製品やサービスを優先するグリーン購入、環境関連を志向する会社の株を売るエコファンド、再生可能なエネルギーを利用したグリーン電力購入、企業における環境コスト会計の公表などが企業を中心として進行している。

2 我が国のエネルギー需給における熱エネルギーの果たす役割

エネルギー供給の大部分を海外に依存する我が国は、エネルギー資源の有限性と産地の偏在や政治的要因により絶えずその供給の不安定な状態に置かれ、エネルギー購入価格も他の先進国に比べて割高な構造となっている。さらに、我が国の全般的なエネルギー多消費構造がエネルギー需要の増加を導き、結果的には様々な環境問題やエネルギー需給の不均衡を引き起こしている現状にある。この需給の不均衡を解消するには、単純に考えても、新エネルギーなどの供給の増大や安定化、そしてエネルギーの有効利用と使用量の絶対的縮小による需要の抑制を図ることである。21世紀の後半のエネルギーシステムは、太陽エネルギーと原子力エネルギーを基幹エネルギー源に配置し、その他の自然エネルギーや小規模化石燃料などを補助エネルギー源として、また中間媒体には電力や燃料電池によるコジェネシステムに必要となる水素などの気体を利用するシステムとなることが予想される。21世紀前半のエネルギーシステムとしては、環境保全とエネルギーの安定供給を考慮したエネルギー源の多様化（ベストミックス）及びエネルギーの有効利用や省エネルギーなどを中心としたものと成らざるを得ない。すなわち、エネルギー供給源の多様化の観点からは、天然ガス（メタンハイドレードを含む）、再生可能な自然エネルギー、リサイクル型エネルギー、排熱を含む未利用エネルギーなど、所謂新エネルギー依存率を大幅に増大する必要がある。しかしながら、現在のエネルギーシステムは、文明の発達と共に自然発生的にできあがったもので、最適性を満足するように構築されたものではない。

すなわち、そのシステムの要素は他とは独立に設計されており、エクセルギー効率の観点からは、極めて無駄の多いシステム構造となっている。

鉄鋼業などある特殊な産業内ではシステム化が行われているが、産業間や産業民生間のエネルギー連携はほとんど進んでいない。各プロセスで熱の温度は広い範囲に涉っていることを考えると、これらの熱利用を連携する熱のカスケード利用（Heat Cascading）の拡大が今後の大きな課題である。例えば、現在のエネルギーシステムを理想的に改編し、一プロセスの排熱を他プロセスへの入熱とするようにうまく組み合わせた場合、現行のヒートポンプその他の技術を利用することにより、我が国でもエネルギー需要のほぼ1/3に低減できるとの試算例もある。このように排熱を動かすには、その間に熱を売買する産業が必要で、地域エネルギーセンターや地域エネルギーネットワークの構築が必要である。すなわち、積算エネルギー消費増加傾向の抑制を目指して、エネルギーの総合利用効率の向上を図るには、地域冷暖房、工業団地規模のエネルギー連携、産業間のエネルギー連携すなわち地域エネルギーネットワークの段階的普及を着実に押し進める必要がある。

狭い範囲でのエネルギーネットワークとしては地域熱供給事業がある。平成11年10月まで我が国において、熱供給21GJ以上の熱供給事業が1347件あるが、この5年間は、その事業数が年平均数件程度と不況の影響もあるが減少傾向にある。このように熱供給事業もその普及には規模を小さくした分散型でも採算のとれるようなエネルギーシステムへの方向性を模索している状況にある。

今後は、エネルギー源の多様化すなわち複合エネルギー時代になるものと思われ、エネルギーの発生から最終利用に至るエネルギーの流れの中に新たな要素技術やシステム化技術を組み込むことにより、新たなエネルギーシステムの提案が可能となる。魅力的なエネルギーシステムの獲得は世界的な趨勢にある。

3 熱エネルギー源の開発とその利用促進（熱のカスケード利用）

3.1 熱源としての排熱の現状

将来の化石燃料や原子力などのフロー型資源の枯渇を考えると極力再生可能な新エネルギーへの依存度を将来にわたって増大すべきである。また、太陽光発電などの再生可能エネルギー利用機器のコストが高い現状にあり、化石燃料を効率的に使う技術開発も重要となる。各種のエネルギーは、変換しながら利用され最終的に排熱の形で大気や海水のヒートシンクへ散逸する。我が国の1次エネルギー供給は、1975年から約20年間に30%の増加となり、エネルギー利用機器の効率の向上にも関わらず、その損失は63%から66%へと3%も増加している。すなわち、この20年間に1次エネルギーの電化率は27.5%から40%へと増加

し、発電に伴う温排水損失が1次エネルギー利用に伴う全体損失を支配するようになった。

ここで、我が国の利用可能な排熱を100とした場合に、太陽光発電可能量は38、風力発電量5、廃棄物発電量5、バイオマス（木材など）17となり、リサイクル型エネルギーである排熱がエネルギー資源として有望であることがわかる。また、ヒートシンクとしての低温自然エネルギーである大気、下水、河川水なども膨大なヒートポンプ熱源として、エクセルギー回収に寄与しており、今後も革新的省エネルギー型ヒートポンプの開発が望まれる。

3.2 排熱の種類

(a)産業排熱：電力業、鉄鋼業、化学産業などから排ガス（250 Tkal/年）、温排水（40 Tcal/年）、高温固体（10 Tcal/年）排蒸気、温風、高温固体等の形で様々な温度水準の排熱が放出され、その産業内で有効利用が図られている。排熱の他部門での利用は、熱エネルギーの輸送の困難さからあまりなされていない。

(b)業務ビル排熱：主に冷暖房機器や給湯機器、情報機器などからの排熱で、一部蓄熱されて利用されているがその利用率は低い現状にある。

(c)一般住宅排熱：給湯機器や冷暖房機器などからの排熱で、その排熱量が少ないことから利用が遅れている。

3.3 排熱のカスケード利用（環境親和型熱利用技術；グリーンサーモテクノロジー）

(a)100℃以上の高温水や低圧蒸気（100℃～150℃；2～5 kgf/cm²）、中圧蒸気（150℃～170℃；5～9 kgf/cm²）、高圧蒸気（180℃以上；10 kgf/cm²以上）：一般に高品質廃熱として、電力や動力、給湯、暖房、乾燥、冷房、冷凍などへの利用そして産業プロセス熱源として活用されている。しかしながら、排熱源の発生源は、発電所、工場そして焼却施設など限定されており、また一般に需要地域と離れていることから、その利用が問題となる場合が多い。

(b)30℃以下の大気そして温水、低温水や低温ガス排熱：電動やエンジン駆動ヒートポンプの熱源としての利用が可能であり、大気、下水、河川水や海水など大容量の熱源水として活用されている。さらに、熱サイクルのヒートシンクとしての利用もなされている。

(c)50℃～100℃程度の中温水や排ガスなどの排熱：現在、直接熱交換器を介して給湯、暖房や乾燥にその一部が利用されているに過ぎず、その大部分は排熱の形で捨てられている現状にある。この領域の排熱は、工場の製造過程でのプロセス排熱、ごみ焼却施設の排ガス蒸気ボイラー後の低温排ガス、ゴミ・汚泥焼却施設でのダイオキシン対策などでの排ガスクレパー冷却水、コージェネシステムガスエンジン冷却水や排ガスボイラー後の低温排ガス、今後発展が期待される固体高分子型燃料電池の排熱など多岐にわたる。

40℃から100℃の産業排熱量は、395Tkal/年であり、そ

のうち40℃～80℃の排熱が80%を占める。この中温度領域である40～80℃の排熱の利用は、従来より適当な熱源機器や低温排熱の貯蔵や輸送技術が確立されていないことと小温度差で効率良く機能する熱交換器の開発が遅れていたことによる。

こうした排熱利用の進まない理由としては、エネルギーが豊富で安価であったため、省エネルギー或いは地球環境問題に対する関心が比較的 low だったことが挙げられる。これまであまり取り上げられなかった中小事業所や一般家庭等を対象とした比較的小規模な高度排熱利用技術の展開が必要である。すなわち、熱ばかりでなく、電力、ガス等も含めたトータルなエネルギー供給システムを対象とすべきである。トータルシステムには、熱輸送・貯蔵だけでなく、ガスタービン・コージェネシステム、燃料電池等の熱供給型分散電源を組み込んだものとすべきである。

4 蓄熱技術の展開

4.1 蓄熱技術

蓄熱の意味は熱の供給側と利用側にある時間的、空間的、質的（温度、熱量）なミスマッチを埋める技術である。また、熱のリサイクルとして蓄熱技術が位置づけられる。蓄熱技術は、アクティブな省エネルギー技術で環境負荷低減に寄与する。蓄熱は、目的でなく（蓄熱＝電力負荷平準化は問題である）、適切な用途や使い方といった面からの効用をもたらす技術との認識が必要である。すなわち、蓄熱は熱の生産から運用までをインテグレートした要素技術である。

○蓄熱の用語の分類：氷蓄熱などの冷熱貯蔵は、常温以上の熱エネルギーの貯蔵である蓄熱とは区別して「蓄冷」と呼ぶべきである。

○蓄熱の普及程度：ビル・事業所での氷蓄熱の普及は、1996年度500件程度、1997年度900件程度、1998年度1600件程度とその採用は著しく増加している。我が国の業務用ビルは、床面積約20億m²の5～6%への蓄熱が普及しており、今後さらなる蓄熱システムの展開が期待されている。民生部門で全て蓄熱を採用すると年間160万トンの炭酸ガス削減効果がある（2010年全炭酸ガス削減目標である5600万トンの3%に相当する）。深夜電力利用蓄熱で、2～3%の電力年間負荷率の向上が電力会社で検討されている。

○蓄熱槽の多目的化：

・大規模水蓄熱：消防用利水、災害時の生活用水などの利用

・小規模中温蓄熱：住宅の暖房、給湯、乾燥熱源として利用

○電力負荷平準化への蓄熱システムの利用メリット：改正省エネルギー法で夜間電力使用へのシフトは企業の省エネルギー活動と評価される。夜間電力利用は、昼間電力の

炭酸ガス排出の19%減となる。夜間電力の1次エネルギー換算値は、9620 kJ/kWhとし、昼間電力に比較して6%投入エネルギーの少ない電気として扱う。

○高密度蓄熱槽による余剰床面積の活用：高密度蓄熱槽設置による余剰床面積の評価が必要である。

4.2 蓄熱技術開発の動向

現在、蓄熱システムに要求されるものは、高密度・小型化、長周期化、温度領域の拡大などである。

○大規模蓄熱：公園や道路などの下の地盤（深さ50メートル程度）の大きな熱容量や地下水などの滞留水を利用して排熱、自然エネルギーや深夜電力エネルギーを大規模且つ長期間に亘り蓄熱する。

○化学蓄熱：対象温度：-100℃～200℃程度；排熱などの熱源を用いて化学物質の熱分解反応を行わせ、熱が必要な時に分解反応生成物から再合成反応を行わせ、その時の反応熱を利用する。60種類位の組み合わせ有り。反応系としては、水素吸蔵合金/水素、無機水和塩/水又はアンモニア、クラスレートなどがあり、実質的反應条件として反応が100%進み、副反応が見られないことなどクリアすべき課題も多いようである。

○躯体蓄熱：熱容量の大きい鉄筋コンクリート建物の床や天井の顕熱を利用し、深夜電力駆動型熱源機器により蓄熱・蓄冷する。また、壁などに室温と外気温度の平均温度の融点を有する潜熱蓄熱材で、凝固・融解の際の熱の出入れを利用した、断熱材フリー防熱潜熱蓄熱壁が可能である。

○土壌蓄熱：床下の改質、大きな熱容量土壌による蓄熱、蓄冷技術であり、ヒートポンプの熱源ともなる。15℃前後の融点を持つ安価な潜熱蓄熱材の開発が鍵となる。

○小型高密度蓄熱槽：一般住宅などへの深夜電力利用潜熱又は顕熱高密度中温度コンパクト蓄熱槽の開発が志向されている。100℃～200℃程度の潜熱蓄熱材（高分子材料や溶融塩）の開発（給湯、暖房、乾燥熱源）や500℃～600℃の顕熱煉瓦・セラミックへの蓄熱などが考えられる。

○潜熱蓄熱機能を有する機能性熱流体による蓄熱材の管搬送：潜熱蓄熱材が熱媒体に分散混合し、管輸送が可能なダイナミック蓄熱システムである。例えば、氷水スラリー、潜熱マイクロカプセル、潜熱エマルジョン、クラスレートなどが提案されており、配管径の減少や搬送動力当たりの輸送熱量増大が見込める。

○空気による潜熱蓄熱材の高速搬送：潜熱蓄熱材で融解状態でもその形状を保持しているもので、遠洋量の小さな空気などで潜熱蓄熱材そのものを高速輸送する。例えば、形状安定処理パラフィンや表面架橋処理ポリエチレンの高速配管搬送、角水の空気搬送などがある。

○10℃前後の環境に優しい安価な潜熱蓄熱材の開発：露点の回避した冷房空調用向け潜熱蓄熱材で冷凍機の成績係数向上等のメリットがある。

○100℃前後の環境に優しい安価な潜熱蓄熱材の開発：高密度蓄熱による小型蓄熱槽の開発と給湯。暖房以外に乾燥など利用目的の拡大に寄与する。

○人工合成型の新蓄熱材の開発：利用温度帯の拡大や蓄熱量の増大などを意図して、環境負荷の小さな且つ安価な複合潜熱蓄熱材の開発を化学合成物質で製造する。

○オフラインによる熱エネルギーの輸送（カセット型蓄熱技術）：現状の我が国における配管敷設費が高価で、中・長距離の熱エネルギー型の蓄熱材の輸送は不可能である。配管に代わって、タンクローリ、はしけや鉄道により、各種の蓄熱材を輸送する技術開発が望まれる。

5 まとめ

ここでは、エネルギー利用効率向上の立場から我が国のエネルギー需給の現状の分析と環境保全を意識した排熱や再生可能なエネルギーの活用に関する見解を述べさせて戴いた。この種の変動性に富む熱エネルギーの有効利用には、蓄熱システムが必要不可欠であり、相変化に伴う潜熱貯蔵、分離膜や吸着系熱交換器などに関する現状の紹介と将来展望を述べた。結論的には、低温度排熱回収利用する諸技術の展開が重要な意味を持つことと機能性熱流体利用が熱エネルギーの供給側と利用側の中間に位置することにより、排熱等の熱エネルギー利用システムを組む上で効果的であることを提案した。排熱や自然エネルギー等熱の形で存在するエネルギーの多段的、多面的利用に際しての経済性は、熱エネルギー輸送、貯蔵そして熱交換などの全体的システムでの高効率化を図る技術的展開と熱輸送配管設備などを国や自治体のインフラ設備の一貫として整備する政策が必要と思える。