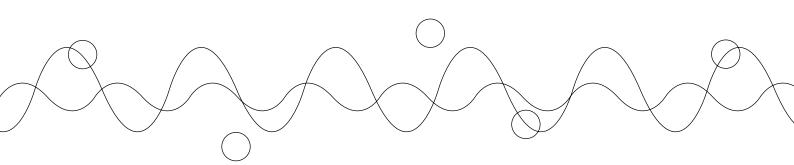
調査報告書

中低温熱利用の高度化に関する 技術調査報告書

RESEARCH REPORT

Technology Survey on Advanced Utilization of Medium to Low Temperature Heat



目 次

1. 背景および目的	2
1.1 現状と課題	2
1.2 目指すべき姿	6
2. 熱需要の削減	7
2.1 断熱	7
2.2 熱再生1	0
3. 運用による改善1	2
3.1 建築物における熱需要の実態把握と省エネルギー対策1	2
3.2 空調・給湯利用における課題1	3
3.3 自動車における熱利用技術1	4
4. 損失削減技術1	6
4.1 バイナリー発電1	6
4.2 重化学コンビナートにおける熱利用技術1	8
4.3 石炭利用における熱技術2	1
4.4 吸着剤を利用した省エネルギー技術2	2
4.5 太陽熱利用2	3
4.6 地熱·地中熱利用2	5
5. 現象解明および要素技術開発2	7
5.1 化学蓄熱2	7
5.2 新材料と熱伝導2	8
5.3 顕熱熱交換2	9
5.4 気液相変化3	1
5.5 混相流制御3	2
5.6 物質輸送促進3	3
5.7 製造プロセスの革新3	4
6. まとめと今後の展望3	6
7. 検討の経緯3	8
参考文献4	3

1. 背景および目的

1.1 現状と課題

燃料の燃焼熱から熱機関を利用して動力を取り出す、あるいは給湯や乾燥等に直接利用するという現在の熱技術の体系は、オイルショックのときに脱石油に転じて以降、1980 年代半ばから約20 年続いた燃料・素材価格の低位安定時代を経て不動の地位を確立している。この技術体系は社会経済活動と密接に関わり、我が国の繁栄を支えてきた。しかしながら、2000 年代半ば以降の途上国の著しい経済発展、東日本大震災による福島第一原発事故、アラブの春に伴う中東北アフリカ情勢の混迷、シェールガス革命等、エネルギーを取り巻く状況は、大きく変わりつつある。特に、燃料・資源価格の高騰と乱高下は、これらが安定で安価に入手できることを前提とした技術体系に大きな影響を与えることは必至である。従来から熱利用については様々な技術開発が行われてきているが、その一部あるいは多くが日の目を見ずに埋もれてしまったことも事実である。しかしながら、境界条件がこれだけ変化している中で、従来の価格ではコスト的に引き合わなかった技術、周辺技術が未成熟だったために普及しなかった技術、国内市場では受け入れられなかった技術、周辺技術が未成熟だったために普及しなかった技術、国内市場では受け入れられなかったが途上国や海外で普及する可能性のある技術など、将来的に大きな可能性を持つ技術が数多く存在すると思われる(コラム1参照)。現在は、そのような新しい熱技術が登場する直前の転換期にあるとも考えられる。本報告では、特に中低温域の熱利用技術に関して、その現状と課題を示し、今後の研究開発課題について整理する。

図1に、2009年の我が国のエネルギーフローを示す。最終エネルギー消費として消費される2次エネルギー量は、1次エネルギー供給量の約2/3であり、転換時に約1/3のエネルギーが失われている。また、需要家の効用を充足するためのエネルギーサービス量はさらに減少し、1次エネルギー供給量の約1/3程度であると推定されている(1)。ここでエネルギーサービス量とは、暖かさ、涼しさ、明るさ、利便性、生産性など需要家が真に必要とする効用の量のことであり、本報告では電気や都市ガスなどの最終エネルギー消費量とは明確に区別する。以下、我が国のエネルギー需給の具体的な課題について述べる。

第一の課題は、需要家のエネルギーサービス量の定量化が難しい点である。系の断熱性が高く、物質が出入りする際に熱再生すれば、エネルギーは保存するので系への加熱は本来不要である。例えば、工場における中低温熱需要の多くは蒸気ボイラーにより賄われているが、その4割程度が熱源と利用端間の配管での放熱ロスやリークにより失われているとの報告もある⁽²⁾。つまり、需要家の真に必要なエネルギー量が不明確なまま、過剰にエネルギーが消費されている。需要家の便益を損ねることなく、加熱量を減らすことは原理的には十分可能である。まずは必要な温度を、加熱せずに得られる手段がないか十分に吟味する必要がある。

第二に、需要家での利用の実態が明らかでないために、利用している機器が所定の性能で稼働していない運用上の課題がある。例えば、予想される最大電力量と真夏の最高温度にさらに安全率をかけた冷房装置を設置し、実際には非常に低い負荷率で設計点から大きく外れた条件で運転している例などが多いことが報告されている(3)。また、自動車においては、定常走行時には排熱している一方で、低温始動時や暖房時は熱が不足するなど、時空間的そして温度域の需給ミスマッチが生じている(4)。その詳細を明らかにし、需給ギャップを埋めるための技術開発が求められ

る。

第三の課題は、熱を利用する際の不可逆損失が大きい点である。図1に示したように、1次エネルギー供給の約80%は化石燃料であり、そのエクセルギー率は100%に近い(エクセルギーについてはコラム2参照)。それにもかかわらず、その約2/3が損失となり失われている。その本質的な原因は、エクセルギー率の高い1次エネルギーを、エクセルギー率の低い中低温の熱として使ってしまうことにある。火力発電では、燃焼によって得られる高温の火炎温度からたかだか2000℃以下の熱を作動流体に伝え、熱機関を駆動している。給湯や暖房に至っては100℃以下の低温にもかかわらず、大量の化石燃料を消費している。図2に、我が国の最終エネルギー消費の内訳を、図3に民生部門における給湯、暖房の熱源の内訳を示す⑤。暖房や給湯は、最終エネルギー消費の13%弱を占めており、そのほとんどが化石燃料の直接燃焼によって賄われていることがわかる。図4には、産業用熱需要の利用温度および排熱温度を示す⑥。石油化学や鉄鋼といった一部の業界以外は、180℃以下の濃縮、乾燥、殺菌等の中低温の熱需要がほとんどである。このように、燃料の化学エネルギーを温度の低い熱エネルギーに変換して利用することが、この膨大な損失の主たる要因である。熱力学に基づいたエクセルギー損失の小さい熱利用技術を普及させる必要がある。

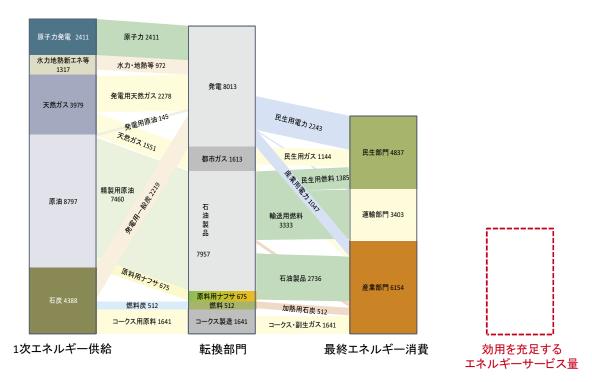


図 1 我が国のエネルギーバランス (2009年) 単位 1015J

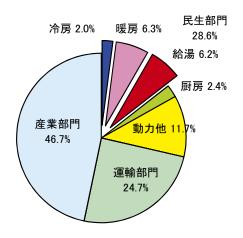


図 2 我が国の最終エネルギー消費の内訳 (2010年)

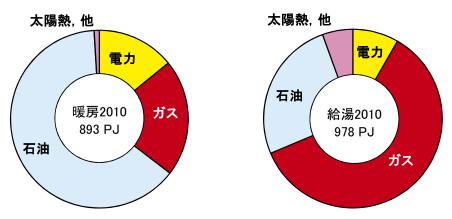


図3 民生部門の暖房、給湯需要熱源の内訳 (2010年)

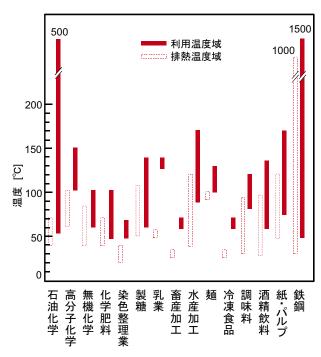


図 4 産業部門熱需要の利用温度および排熱温度 (文献(6)をもとに作成)

コラム1 熱の価格

家庭用電力は約7円/MJであるが、都市ガスは2.9円/MJのように、熱は電力に比べ て著しく安価である。そのため、熱機器の価格も安価なものとならざるを得ず、新技術 が安価な従来技術に対して競争力をもつためには非常に大きなコストの壁を越えなけ ればならない。例えば、一般的な家庭用の給湯器で考えると、ガス燃焼式の給湯器の能 力あたりの実売価格は 3000 円/kW 程度に対し、 CO_2 ヒートポンプ給湯器は 80000 円 /kW 程度と一桁以上の差がある。このような差が生まれる本質は、温度差にある。燃焼 式のガス給湯器の給湯能力 Qを約 50 kW、火炎と水との温度差 ΔT を約 1500 K とす ると、熱交換器のコストの目安となる KA 値 (=Q/ Δ T) は 33 W/K である。一方、 CO_2 ヒートポンプ式給湯器は、給湯能力 $4.5~\mathrm{kW}$ で、水と冷媒の温度差 Δ Tは約 $10~\mathrm{K}$ なの で、KA 値は 450 W/K である。KA 値の差は伝熱面積や筐体寸法の差と言い換えること ができるので、KA値が1桁も違うということは、それだけコストに差があるというこ とである。ちなみに重量は、ガス給湯器が約 30 kg なのに対し、エコキュートは貯湯槽 を含めて約130 kg である。実は、重量あたりの価格でみるとガス給湯器は約4500円 /kg、ヒートポンプ式は 2500 円/kg であり、ヒートポンプ式は技術的には非常に軽量化 が進んでいる。それでも製品としては非常に大きな差があり、熱利用における新技術が いかに大きなハンディを背負っているかがわかる。

コラム2 エクセルギー

「エネルギーが枯渇する」といった表現がよく用いられる。しかしながら、熱力学第一法則から明らかなように孤立系のエネルギーは減少することはない。我々は、無意識のうちに使いやすく価値の高いエネルギーを指して、このような表現を使っていることになる。この使いやすい価値のあるエネルギーを定量的に表現するために導入されたのがエクセルギーである。エクセルギーとは、標準周囲状態(25℃、1気圧、大気組成)の環境と力学的、熱的、化学的に非平衡にある系が、可逆過程によって平衡状態に達するまでに発生することができる最大仕事と定義される。エネルギーの価値とは、どれだけ仕事を取り出せるか、つまりエクセルギーをどれだけ有しているかということである。

タービンやコンプレッサー等の流体機械や、ボイラーやラジエータ等の熱交換器は外界とエネルギーと物質の出入りがある系であり開いた系と呼ばれる。開いた系のエクセルギーEは、次式で表される。

$$E = (H - H^{\circ}) - T^{\circ}(S - S^{\circ})$$
 (1)

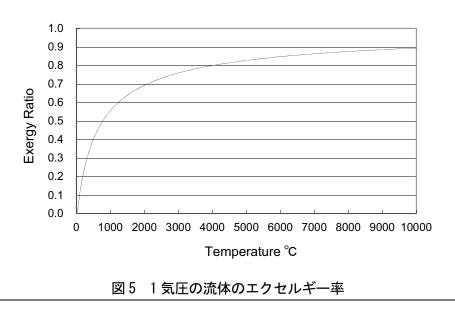
ここで、Hはエンタルピー、Tは絶対温度、Sはエントロピーである。上付き添え字。は、標準周囲条件であることを表す。定圧で比熱が一定の場合は、

$$dE = -mc_{p}dT + mc_{p}T^{\circ}\frac{dT}{T}$$
 (2)

となり、積分して以下の式を得る。

$$E = mc_{p}(T - T^{\circ}) + mc_{p}T^{\circ} \ln \frac{T^{\circ}}{T}$$
 (3)

ただし、mは質量、 c_p は定圧比熱である。式(3)の右辺第一項は、定圧(すなわち 1 気圧)において、温度 Tの流体が周囲温度 T° まで温度変化する際に放出されるエネルギーの総量であり、エクセルギーは右辺第二項の分だけ総量よりも小さくなる(T>T° の場合、右辺第二項は負となることに注意)。図 5 に、エクセルギーを式(3)の右辺第一項であるエンタルピー量で除したエクセルギー率を示す。図から明らかなように高温ほど流体の有するエクセルギー率は高く、周囲温度においてゼロとなる。説明は省略するが、化学燃料のエクセルギー率は 100%に近いが、それを燃焼して流体に熱として与えると、式(3)右辺第二項の分だけエクセルギーは失われてしまう。同様に、高温の流体から低温の流体に熱を伝えると、その温度差に応じてエクセルギーが失われる。人類が工業上扱える温度はたかだか 2000℃程度以下である。その時点で約 3 割の損失となっている。温度 180℃以下の濃縮、乾燥、殺菌、給湯、暖房といった中低温熱需要に至っては 80%以上が損失である。本来、エクセルギー率の高いエネルギー源を用いながら、その温度を下げて熱として使ってしまうことこそに損失の本質がある。



1.2 目指すべき姿

上述した損失を抑制するためには、①熱需要そのものを把握する、②機器を実際の使用状況に合わせて適切に運用する、③機器の高性能化を図る、の3点が重要である。図6に、新たな熱技術のパスを示す。図中の黒線は従来技術を、緑線は新たな技術であることを表す。また実線はエネルギーの流れを、点線は情報の流れであることを示している。従来は、加熱プロセスとして化石燃料の燃焼が用いられ、発電、素材製造、中低温熱需要を賄ってきた。今後は、加熱しないで済むための断熱や熱再生技術、エネルギーサービスや運用を適正化するためのセンシングやエネルギーマネージメント技術、不可逆損失を抑制するための高温燃料電池や輸送・蓄熱技術、排熱利用技術等が不可欠となる。温度差というポテンシャル差を有効に使い尽くすための努力が非常に重要となる。

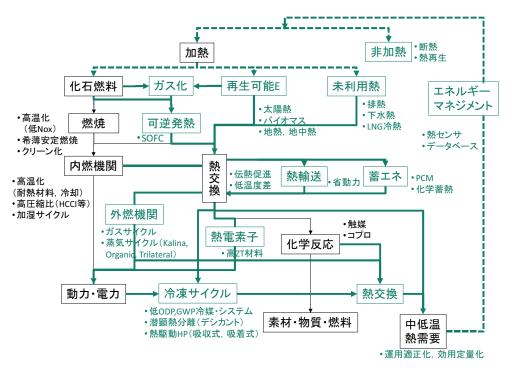


図6 新たな熱技術のパス

2. 熱需要の削減

2.1 断熱

わが国ではオイルショック以降に省エネ法およびそれに基づく省エネルギー基準が制定され、 住宅における断熱が普及した。断熱は住居内外での熱の侵入・流出を抑えることで住居内温度を 一定に保ち、結果として冷暖房の省エネルギー、住居内の快適性向上、結露防止などに効果があ る。

国内の住宅の新規着工戸数は 1996 年度以降概ね減少傾向にあり、120 万戸前後で推移している。将来的にも減少の見通しであり、2005 年の予測では 2010 年には 109 万戸、2020 年には 81 万戸になると予測されている⁽⁷⁾。また既存住宅は 2003 年時点で 4,686 万戸にのぼるが、省エネ新基準または次世代基準に適合する住宅は 1 割弱に過ぎない。

一方、住宅用断熱材の出荷量は増加傾向にある。(財)建築環境・省エネルギー機構の統計資料によれば、1990年度から 2006年度までの 16年間での住宅用断熱材主要 8素材の出荷数量合計は重量ベースで 1.53 倍(235,710トンから 360,096トン)、面積ベースで 1.39 倍(276,054千 m^2 から 384,953 千 m^2)の増加が見られた⁽⁸⁾。新規住宅あるいは既存の住宅への断熱材普及が進む様子がうかがえる。ちなみに断熱材の重量ベースでの伸び率が面積ベースの伸び率を上回っているのは住宅に使用する断熱材が厚手化していることを示している。

主な断熱材の種類を表1に示す。これら以外にも真空断熱材、炭化コルク断熱材、羊毛断熱材など新たな材料開発も進められている。

断熱材の使用は住宅の工法や施行部位によって異なる。従来は繊維系断熱材のグラスウールやロックウールが利用される充填断熱工法が主であったが、2001 年頃より発泡系断熱材が利用される外張断熱工法が増加してきた。まだ市場でのシェアは小さいが、従来工法の欠点を補う工法であったこと、一般消費者の住宅における温熱環境に対する意識が高まったことなど複数の要因によって増加してきたと考えられている(®)。

断熱材は、性能を示す指標である「熱伝導率」によって区分されている(表 2)。A から C までの区分は主に繊維系断熱材であり、C から F までの区分は主にプラスチック系断熱材である。これらの区分ごとの断熱材出荷量を同じく下表に記載する。

国内ではこれまで、オゾン層保護に加え、地球温暖化係数(GWP)の高い代替フロン等を使用しないこと(ノンフロン化)による地球温暖化対策、断熱性の高性能化による省エネルギー推進などを目的として、表3に示すような研究開発プロジェクトが進められてきた。その他の研究とともにこうした取組みを通じて基礎基盤研究や技術開発、実用化・導入が図られてきている。

	我! 工な	四十六ペーク・シュー・エスク
種類		主要断熱材
繊維系 無機質繊維系		・グラスウール
		・ロックウール
	木質繊維系	・セルロースファイバー
		・インシュレーションボード(軟質繊維板)
発泡プラスチック系		・ビーズ法ポリスチレンフォーム
		・押出法ポリスチレンフォーム
		・硬質ウレタンフォーム
		・ポリエチレンフォーム
		・フェノールフォーム

表1 主な断熱材の種類

表 2 断熱材の熱伝導率

区分	熱伝導率 [W/mK]	出荷量 [千 m²]	種類との対応
A-1	$0.052 \sim 0.051$	41,874	
A-2	$0.050 \sim 0.046$		主に繊維系断熱材
В	$0.045 \sim 0.041$	3,607	
C	$0.040 \sim 0.035$	59,395	主に繊維系断熱材/プラスチック系断熱材
D	$0.034 \sim 0.029$	16,894	
Е	0.028~0.023	51,609	主にプラスチック系断熱材
F	0.022 以下		

表3 断熱材に関わる国家プロジェクト

プロジェクト名	期間	担当	実施主体	事業・制度の目標
高性能断熱建	平成 11	経産省	(社) 日	最も性能が高いとされている発泡系断
材技術開発等	(1999)	製造産業	本建材産	熱建材(当時)以上の断熱性能を有し、
対策事業	年度~平成 14	局	業協会	かつ代替フロンを用いない高性能断熱
	(2002) 年度			建材 (①グリーンガスを発泡剤とした高
				性能断熱建材、②高断熱フェノールフォ
				ーム、③真空パネル新断熱建材)に関す
				る技術開発。
エネルギー使	平成 15	経産省	パナソニ	2006 年に策定された「新・国家エネル
用合理化技術	(2003) 年度	NEDO	ック (株)	ギー戦略」及びこれに基づく省エネルギ
戦略的開発	~平成 22			一技術戦略の趣旨を踏まえた上で、
	(2010) 年度			2015 年及びそれ以降での高い省エネル
				ギー効果が見込める研究開発の実施。ま
				た実用化・導入にあたり高い事業効果が
				期待できる研究開発の実施。採択テーマ
				の中に家電向け、建材向けの高性能、高
				機能真空断熱材に関する研究開発など
				含む。
革新的ノンフ	平成 19	経産省	京都大	現状 (当時) のノンフロン系硬質ウレタ
ロン系断熱材	(2007) 年度	NEDO	学、ウレ	ンフォームと同等以上の断熱性能を有
技術開発	~平成 23		タンフォ	する革新的なノンフロン系断熱材技術
	(2011) 年度		ーム工業	の開発。
			会	

建築用断熱建材として用いられる断熱材の発泡にはGWPが高い代替フロン等が使用されている。これに対してノンフロン系断熱材など低GWPガスを利用した断熱材の研究開発が進められている。しかしながら、現状では断熱性能、燃焼性、施工性、強度、長期性などに課題がある。断熱材の熱伝導率は多孔体材料、その孔に封じ込められたガスなど個々の要素の熱伝導率によって決まる。したがって材料および孔、孔に充填するガスに関する研究開発を行なうことで熱伝導度を下げようとする方策がとられている。

多孔体材料に関しては、熱伝導率と同時に強度部材としての機能も必要である。そのため構造 強度の低下を防ぎながら発泡を微細化(ナノ化)させることが課題となっている。これに対して 異なる特性を持つ材料による複合材化(ハイブリッド化)なども試みられている。またガスに関 しては、低熱伝導率のガスや物質を孔に封じこめる研究なども行なわれている。

断熱材としてはグラスウールや既存の発泡ボードと比べてコストが高いことも課題となっている。さらに新規技術へのシフトには建築家など利用者の心理的障壁等もある。これらに対して用途展開を図るなど別途工夫が必要との指摘がある。

2.2 熱再生

従来、排熱を作動流体の余熱に用いて熱効率を向上させる再生サイクルが、ブレイトンサイクルや蒸気サイクルで広く用いられている。最近では、ガスタービンサイクルにおいて、水を作動流体に加える高湿分空気(AHAT)サイクルが開発されており、2013年2月に40MWの実証機が完成した⁽⁹⁾。通常の再生ブレイトンサイクルでは、圧縮空気が余熱されるため、排熱を完全に利用することができないが、高湿分空気サイクルでは水の余熱まで行うことができるので、より完全な熱再生を行うことができる。

従来の熱再生は顕熱が主であったが、近年では自己熱再生技術⁽¹⁰⁾ によって潜熱の回収も含めて可能となってきている。自己熱再生技術では、高温が必要となるプロセスからの排気を昇圧することで、熱交換に必要な温度差を確保する。排気と吸気の飽和温度が変化し、潜熱回収が可能となる。蒸発、濃縮、分離、蒸留、乾燥等のプロセスにおいて、燃焼加熱に比べて投入エネルギーを約 1/5~1/20 と大幅に削減できる可能性がある。バイオエタノール蒸留プロセスにおいて85%の省エネルギー効果がすでに実証されている⁽¹¹⁾。

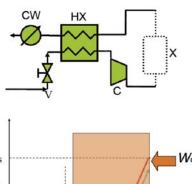
また、近年 CO_2 給湯ヒートポンプにおいて、風呂の残湯を熱回収し投入エネルギーを削減するシステムが販売されている $^{(12,13)}$ 。翌日の給湯エネルギーを最大約 10%節約できると報告されている $^{(13)}$ 。

さらに、ハイブリッド車等の低燃費自動車においては、コールドスタート時のエンジン暖機や車室内暖房のために、エンジンを駆動せざるを得ず、特に冬季の実用燃費が低下することが課題になっている。そこで、エンジン排気からの熱回収を行い、暖機運転での燃料消費を抑制するための排気熱回収システムが実用化されている(14,15)。実用燃費 8%の改善が得られたことが報告されている。





図 7 高湿分空気 (AHAT) サイクル 40 MW 実証機⁽⁹⁾



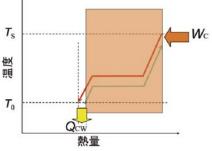


図8 自己熱再生技術による潜熱回収



図 9 風呂残湯熱回収 CO₂ ヒートポンプシステム (13)

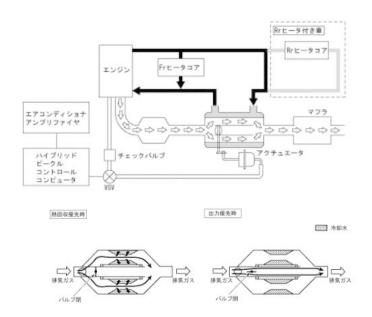


図 10 自動車用排気熱回収システム(14,15)

3. 運用による改善

3.1 建築物における熱需要の実態把握と省エネルギー対策

熱需要の実態を把握できる総合的なデータベースは現在のところ存在せず、表 4 に示すように「家庭」、「業務その他」、「産業」、「運輸」の各部門で独自の視点から状況が把握されるにとどまっている。

	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
部門	熱需要の内容
「民生家庭部門」	空調や給湯のための熱需要が主。これらは最終エネルギー消費
	の過半を占める
「民生業務部門」	空調、給湯、厨房等のための熱需要
「産業部門」	反応熱、溶融、成形、蒸留、乾燥、洗浄、殺菌等、各種の工業
	プロセスを進めるための熱需要
「運輸部門」	空調、暖機、触媒温度管理等

表4 部門ごとの熱需要

住宅および業務ビルに関しては、熱需要に顕著な影響を与える要因の分析も行われている。住宅における熱需要は気象条件、建物外皮性能(断熱、日射遮蔽、通風など)、設備仕様、居住者の使用条件(全館連続暖冷房 vs.人のいる部屋で在室時間帯のみ使用)などによって大幅に変わる。気象条件のような地域性は住宅の熱需要にとって重要な要因である。これに対して業務ビルにおける熱需要は、営業時間や日数、換気量によっても大きく影響を受ける。気象条件の影響は住宅と比べると小さいが、建物外皮性能とともに換気量に対して影響を与える要因である。温熱需要は特定用途の建物(ホテル、病院など)で見られる。他方、こうした熱需要以外についての詳細な把握は十分には進んでいない。例えば、業務ビルには多様な建物、ユーザー、慣例等があり熱需要は非常に複雑で、実測データも推定方法も十分に整備されていない。

産業部門では工場における熱の有効利用、とりわけ排熱利用が重要な課題である。業種別、温度域別の排熱量を見ると現在は 100℃~300℃あたりの中低温熱が排熱としていまだに多く排出されており、それ以上の高温熱は再利用が進んでいると言われている。こうした排熱の有効利用の実態は後述するが、実態把握に関しては、これ以上に詳細な情報は明らかにされていない。

以上のように、現状では熱需要の詳細な把握は十分に進んでいるとは言い難い。熱需要を推定するためには豊富な実測データが必要であるが、現状では非常に限られている。さらに、技術的に困難な面もある。電力と違い熱は利用量のうち熱媒体の流量が特に捉えにくい。どのように実態把握をすべきかについてはこれまでの議論から得られたいくつかの視点、情報を以下に示す。

- ・安価な温度および流量センサーを開発し、データ収集の費用対効果を高める必要がある。
- ・産業、運輸(たとえば自動車)は機能が明確だが、住宅、建築はエネルギーの用途が多様で 把握が困難である。産業部門であっても、そもそも未利用部分はその所在すら把握できてい ない場合もある。しかし、改善の余地はあるので「見える化」「スマート化」などを国が方 針として示し、またデータ取得・蓄積に係る仕組みを標準化する必要がある。
- ・数理モデルを構築し、入手可能な範囲のデータを使ってモデルを検証し、そして精度の高い

予測を行うというアプローチもありうる。現在はすでにその方向に向かっていて、たとえば 空調・給湯システムでそのような評価が行われつつある。

熱需給の改善にとって省エネルギー対策は有効である。住宅に関しては通風、昼光利用、太陽 光発電、太陽熱給湯、断熱と日射遮蔽、暖冷房設備、換気設備、コジェネなど、すでに 15 種類 の「実効性ある省エネルギー手法」が提案されている。新技術による改善と並んでこうした既存 の要素技術による改善も重要である。

以下、暖房、冷房、給湯に関する重要対策項目を個別にあげる。まず暖房に関しては次の4点が挙げられる。

- (1) 建物外皮の断熱(業務ビルの場合は内部発熱の削減と日射遮蔽性能の向上)
- (2) 換気量のデマンド制御
- (3) 日射熱取得
- (4) 熱搬送系設備の動力エネルギーの低減

冷房に関しては次の4点が挙げられる。

- (1) 日射遮蔽
- (2) 内部発熱の低減
- (3)通風
- (4) 熱搬送系設備の動力エネルギーの低減

最後に給湯に関しては次の3点が挙げられる。

- (1) 節湯器具の使用
- (2) 配管や浴槽の断熱、小口径の配管使用
- (3) 太陽熱給湯システム

3.2 空調・給湯利用における課題

空調、給湯利用は、現状で家庭用、業務用のエネルギー需要の5割前後を占める。しかしながら ZEB(Zero Energy Building)、BEMS(Building Energy Management System)、HEMS(Home Energy Management System)、デマンドレスポンスなどによるエネルギー利用のスマート化、再生可能エネルギーの導入拡大、東日本大震災発生以降のユーザー側の省エネ・節電意識の高まりなどが社会の中でいっそう進めば、今後は同分野の需要を大きく低減できる可能性がある。ただし、顕著に気温が高いまたは低い日は当然発生しうるため、これらへの対応(最大負荷対応)も引き続き重要になる。同分野における今後の技術開発はこうした将来見通しを基に検討がなされる必要がある。

空調、給湯分野の現在の代表的機器を表 5 に示す。燃焼式以外の技術はコストの面で大きなブレークスルーが求められる。将来の理想的なエネルギー需給の姿に照らして技術開発を着実に進めておく必要がある。

分野	機器名称	現在の性能	理論限界
空調	エアコン (ヒートポンプ)	COP=7.0	7.0~8.0
	ビル等における	COP=1.6	1.8~2.0
	吸収式ヒートポンプ		
	ガスエンジンヒートポンプ	APF=5.7(電力換算)	6~7
給湯	ガス給湯器	η=0.95	0.95
	エコキュート (ヒートポンプ)	年間給湯保温効率=3.2	3.5~4.0
	燃料電池	発電効率=35%	45~55%
	太陽熱集熱器	_	_

表 5 各種熱機器の性能

高効率化に関しては、これまでの機器開発の主な方向は、定格条件あるいは JIS 規格等の仮想条件での性能向上であった。しかし実際の運転条件は停止と運転を繰り返すなど多様であり、実測するとカタログ値の半分程度の効率で運転されているケースが多く報告されている。そのため今後は、こうした非定常条件も含めた実運転に対応した要素開発、設計制御手法が必要になる。またそうした非定常条件も含めて、広範囲な運転条件下での機器性能を評価できる予測手法(評価装置やシミュレーション技術など)の確立も併せて必要になる。

ヒートポンプ技術の今後の主たる技術開発項目は以下のとおりである。

- (1)機器単体の高効率化(広範囲な運転条件下での高効率化、これらの性能を評価できる手法の開発など)
- (2) トータルシステム化(未利用エネルギーなど熱源の多様化)
- (3) 負荷平準化・管理技術(蓄熱、デマンドレスポンス、双方向通信などとの連携)
- (4) 適用範囲の拡大(とくに高温化)
- (5) 低価格化(機器のコンパクト化、レアメタル低減など)
- (6) 国際展開(対象国の気象や生活様式に対応した機器開発)
- (7) 地球温暖化対策(適切な冷媒の選択・少量化・回収、新冷媒の開発など)

3.3 自動車における熱利用技術

ハイブリッド自動車、燃料電池自動車、電気自動車では効率向上と燃費向上において熱マネジメントの重要性が高まっている。

エネルギー効率に関しては、たとえばハイブリッド自動車では燃焼エネルギーのうち走行に使われるのは約 23%で、残りの 77%は各種損失として、大半は熱として、排出されている。また燃費に関しては、首都圏では走行条件(渋滞など)が、その他の地域でも季節に応じた冷暖房ニーズ(夏季:冷房、冬季:暖房・暖機)が実用燃費に影響を及ぼしている。こうした車両全体の熱を管理し、バランスを最適化させること(熱マネジメント)が課題となっている。

熱マネジメントは、車両を構成するエンジン、触媒、トランスアクスル、電池といった各要素の動作に適した温度域と熱が必要なタイミングを考慮した「時間と空間の最適化」、および「全体としての熱需要削減」が方向として重要である。これらを実現するための熱の輸送、蓄熱、変換に係る新規デバイス開発が今後の課題となる。表 6 に各項目に関する技術課題例をあげる。

まとめと今後の展望

表 6 自動車における熱マネジメント技術

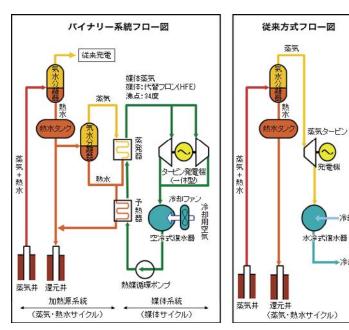
項目	方向	技術課題例
輸送	熱の空間的最適化	・暖機熱ロス(ヒータ放熱、排気ガス損失)の低減
		・排気ガスの高温熱の回収とエアコンなどへの活用(様々な作
		動域で働く熱交換器、高沸点で高熱容量の媒体)
蓄熱	熱の時間的最適化	・軽くコンパクトな高熱容量のデバイスの開発
		・顕熱(高沸点で高熱容量の媒体、部品としての各要素)、潜熱
		(高い熱密度で高温利用できる PCM 材料の開発、要求温度域と
		のマッチング)、化学蓄熱(材料、反応器、熱交換器、伝熱、シ
		ステム制御技術の構築)
変換	熱の温度域最適化	・ヒートポンプによる排熱からの冷熱・温熱生成(小型・軽量
		化、高効率化、吸着材料などの高熱密度化、新規媒体、材料、
		システム構築)

その他の自動車における熱利用技術、たとえば空調に関しては、自動車は住宅ほど断熱されないため外部の熱負荷の影響が大きい。そのためエアコンは使用環境が-40℃~50℃と広く、家庭用よりも割高な能力のものが付けられている。これに対して家庭用エアコンで使われる技術の応用や、内部発熱と日射熱の低減(エンジンルームの熱の遮断や屋根表面との遮断)のための技術などが指摘されているが、これらはコストや運転の安全性確保等の総合的な観点から技術開発の必要性が検討されるべきである。

4. 捐失削減技術

4.1 バイナリー発電

中低温熱を熱源とする発電システムの代表的なものにバイナリー発電がある。図 11 は地熱バ イナリー発電のフロー図であるが、地中からの蒸気に加え、ペンタン、イソブタンといった有機 物質や代替フロンなどの低沸点媒体を利用した発電システムも備えることで2つ(binary)のサ イクルを利用した発電が可能になる。一般に後者の低沸点媒体を利用した発電システムをバイナ リー発電システム、有機物質を冷媒とするサイクルを Organic Ranking Cycle (ORC) と呼ぶ。 地熱(温泉含む)、太陽熱、バイオマスといった再生可能エネルギー関連の熱を使った発電で期 待されるが、産業排熱の未利用エネルギー、ガスエンジンの排温水、化学プラントの排温水など の排熱利用においても適用が期待されている。



地熱発電システムのフロー比較(16) 図 11

世界的にはバイナリー発電に関する技術は欧米が先行している。特に、イスラエル系米国企業 のオーマット社が、図12に示すように累計設置量で9割のシェアを占める業界最大手である。 近年、新興の企業が相次いでいる。米国の航空機用エンジンメーカー、プラット&ホイットニー パワーシステムズ社(PWPS)は、もともと航空機・宇宙分野技術で有名な会社であるが、現在 は 250 kW の小型バイナリー発電システム「ピュアパワー」も販売している。また、イタリアの ミラノ工科大学が開発したバイナリーシステムを実用化するために創設された研究開発型メー カー、ターボデン社も注目されている。同社は各種再生可能エネルギーや未利用熱を利用して低 沸点の ORC の発電プラントを開発した。このシステムにはバイオマスボイラーからの熱や工場 排熱を利用したサーマル・オイル・ループも組み合わせることができる。

冷却水

▶冷却塔

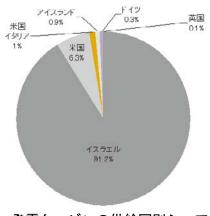


図 12 バイナリー発電タービンの供給国別シェア (設備容量) (17)

国内ではバイナリー発電の設置は12例あるが、稼働中の設備は4ヶ所に過ぎない。しかしながら、多くの企業がバイナリー発電の製造に参入している。川崎重工業、神戸製鋼所、JFEエンジニアリング、富士電機、三菱重工業、IHI、東芝、第一実業、ゼネシス、アルバック理工などが製品開発や実証事業を展開する。

先行するのは川崎重工業、神戸製鋼所である。川崎重工は工場内排熱の活用を主用途とした小規模バイナリーシステム「グリーンバイナリータービン」(250 kW)を開発した。吸収式冷房機で蓄積したノウハウを活かし、熱交換を行う蒸発器に流下液膜式熱交換器を採用することで温泉や工場排熱など汚れのある熱体を扱いやすくし、また媒体保有量を最小化することも可能とした。その他にも稼動停止を繰り返す運転にも対応可能なため、工場の操業時間に弾力的に対応できるといった特徴がある。経済産業省のスマートコミュニティ実証補助事業の一環としてごみ焼却施設の排熱を利用した発電事業の実証にも大阪で取り組んでいる。一方、神戸製鋼は、空気圧縮機で培ったスクリューローター技術を活用したバイナリー発電に取り組み、100 kW 以下クラスでは国産初となる「マイクロバイナリー」(70 kW)を開発した。世界初となる半密閉型スクリュータービン方式を採用し、70~95℃の温水や温水に変換できる排液・ガスなどの熱源を利用する。そのため湯布院の温泉旅館に第1号を納入するなど小規模の温泉・地熱発電への活用が可能だが、同時に産業排熱などの未利用エネルギーによる発電にも利用できる。

表 7 国内でのバイナリー発電事例(17)

+ tri	中华之丛	扣拱	加田山舟	JIMH	44:0
事例	実施主体	規模	利用対象	状況	補足
八丁原発電所	九州電力	容量	130°C⊘	稼働	国内第 1 号の地熱バイナリ
		$2000 \mathrm{kW}$	熱水		一発電
鹿島製鉄所	住友金属工業	容量		稼働	
		$3800~\mathrm{kW}$			
袖ヶ浦製油所	富士石油	容量		稼働	
		$4000~\mathrm{kW}$			
霧島国際ホテ	_	容量		稼働	富士電機による国産機第 1
ル		$220~\mathrm{kW}$			号のテスト機を 2006 年から
					使用
山川発電所	九州電力、川	出力	工場排熱、	実証	小規模バイナリー発電の実
	崎重工業	$250~\mathrm{kW}$	離島での		証事業。熱回収技術・スケー
			地熱、温泉		ル(坑井内に形成される炭酸
			など		カルシウムなどの沈殿物) 対
					策・腐食対策・設備性能・経
					済性などの検証を行う
福島県土湯温	温泉組合、	2年後に	150°C⊘	調査	_
泉	JFE エンジニ	$500~\mathrm{kW}$	温泉未利	検討	
	アリング、宝	級・将来的	用分		
	輪プラント工	には 1000			
	業	kW 級を目			
		指す			
新潟県十日町	_	定格出力	97°C⊅	試験	_
市松之山温泉		87 kW ∅	温泉	運転	
		設備で運			
		転			
大分県九重町	-	_	_	調査	既設の実験用地熱井戸の実
				検討	用化を検討中
大分県ゆふい	_	最大	95°C⊅	導入	神戸製鋼の小型バイナリー
ん庄屋の館		70 kW	温水	予定	発電を導入
<u> </u>	<u>l</u>		l .	1	1

4.2 重化学コンビナートにおける熱利用技術

工場の排熱は $100\sim150$ であたりの温度域に大量に存在する。工場の省エネルギーは高い温度域の熱利用から進み、使いにくい 150 で以下の熱が結果として残っている。産業別の排熱状況は表8のとおりである。

表 8 産業別の排熱の特徴(18)

産業	排熱の特徴
電力	150℃以下の低温ガス排熱部分が約95%と圧倒的な割合を占めている。
化学	150~200℃の比較的回収しにくい低温のガス排熱部分が 45%と半分程度を占
	めている。排熱は比較的に全温度範囲に分布している。また、40~60℃の低温
	排水もかなりある。
鉄鋼	200℃までの比較的回収しにくい低温ガス排熱が、50%弱と大きな割合を占めて
	いると同時に350℃までの回収しやすい高温排熱もかなりある。また、500℃以
	上の固体排熱がかなりある。
清掃	150~300℃の排熱が多いことおよび蒸気排熱の多いことが特徴である。
窯業	150℃までの低温ガス排熱が40%弱と大部分を占め、低温排熱もかなりある。
紙・パルプ	150℃までの低温ガス排熱が大部分を占める。
石油	150~200℃の比較的回収のしにくい低温排熱部分が多い。

コンビナートにおける排熱の有効利用技術の一つとして蓄熱輸送が挙げられる。工場内、複数工場間、地域間で生じうる熱力の時間的・空間的な需給の不一致を解消して余剰な熱を有効利用する方法である。蓄熱技術に関しては後段(6.1 化学蓄熱)で述べることにして、ここでは蓄熱輸送の全体像を示す。

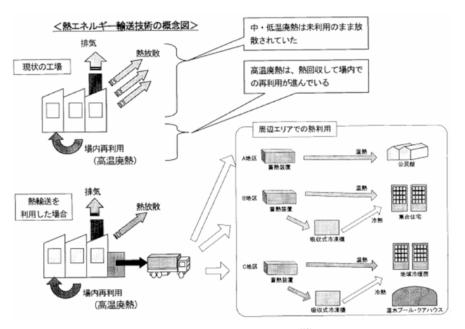


図 13 蓄熱輸送の概念図 (19)

図 13 に神戸製鋼所での蓄熱輸送の取り組みを示す。2007 年には、神鋼環境ソリューションと 共同開発した高効率蓄熱輸送システム「サーモウェイ」による中距離の公道輸送実験が報告され、 商業規模を想定した実証が最終段階に入った⁽²⁰⁾。同技術は製鉄所や工場、ごみ焼却場などにおけ る 200°C以下の中低温熱を、エリスリトールを潜熱蓄熱材として蓄熱装置に蓄えてトラックで 40 キロ離れた地点へ輸送するという技術で、世界で始めて90℃以上の高温水を取り出すことに成功している。なお同技術に関する研究開発はNEDOにおける2005~2006年度のバイオマスエネルギー高効率転換技術開発の一環としても行われていた。

他には複数工場間での排熱利用システムがある。千代田化工建設(株)、富士石油(株)、住友化学(株)3 社は、平成 18 年度の日本機械工業連合会の優秀省エネルギー機器表彰で資源エネルギー庁長官賞を受賞している。同事例による省エネ量は、合計の年間原油換算量で 10,700 kL、年間 CO2排出削減量では 28,000 t とされた。鍵となる技術は熱利用解析技術(ピンチテクノロジー、pinch technology)である。工場内にある 100 基もの熱交換器内の流体の情報を収集、解析しつつ、捨てていた熱を他方に供給できるような熱交換プロセスの組み合わせを探索する。その結果、たとえば冷却水に捨てられていた熱を回収して 120℃程度の低圧スチームを作ることで、従来スチームを作るために使われていたエネルギーを削減することができる。また冷却水の量も減らせるためそれを循環させるポンプを駆動する電力やスチームも減らすことができる。本事例では富士石油(株)内の複数プロセスプラントにおいて廃棄されていた 80~150℃程度の低位排熱を熱水として回収し、新たに敷設した工場間熱水配管を経由して隣接する住友化学(株)へと供給された。

さらに、熱融通だけでなく富士石油(株)の蒸留塔の塔頂ガス (117~120℃)を処理していたエアフィンクーラー部分の冷却負荷を熱源にした発電システムも新たに開発された。この発電システムは低位熱で93%アンモニア水を蒸発させ、蒸気をタービンに導入して4000 kW の発電を行っている。これにより従来廃棄されていた熱源を利用することができ、それに使われていた化石燃料分が削減された。

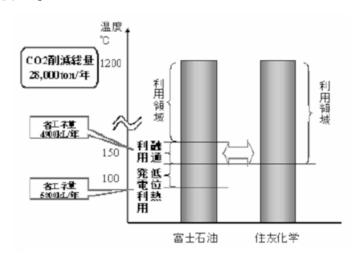


図 14 2 社が使用する熱領域の中での排熱利用システムの効果の位置づけ(19)

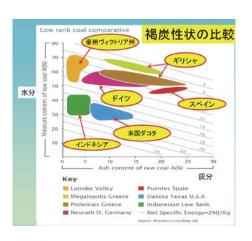
中低温域の熱は、まずは熱としての直接利用を考えることが基本である。特に、工場間など近隣と連携することにより有効利用が促進される。技術的には確立されているので、工場間の調整が重要になる。融通してもなお余る熱は、たとえば低位熱発電で電力に変換して利用する。その場合、低位熱発電システムの低コスト化が鍵となる。そこでは、伝熱係数を良くして熱交換器をダウンサイジングさせること、タービンを低コスト化させること、高濃度アンモニア水よりも低沸点の作動媒体を開発すること、などが課題となる。

4.3 石炭利用における熱技術

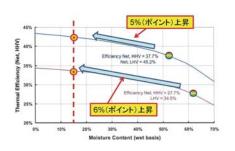
石炭は世界の火力発電の中心であるが、 CO_2 の発生が非常に多く、硫黄酸化物、窒素酸化物、ばいじんなどの大気汚染の原因ともなりうる。これらの除去技術は先進国では普及しており大気汚染の問題はなくなったが、 CO_2 発生の面から今後もさらなる発電効率の向上が重要である。また、石炭の質についても、これまで広範に利用されてきた瀝青炭・亜瀝青炭から、世界の石炭資源量の半分を占める褐炭へと利用の拡大が望まれている。

図 15 に示すように褐炭は水分が 50%以上と多いため、水分の気化潜熱が原因となりエネルギー効率が非常に低く、結果として CO_2 排出量が多くなる。豪州ヴィクトリア州の褐炭の場合、水分が 65%と多いが灰分は非常に少なく、脱水さえすれば超優良炭となりうる。褐炭を普通の石炭と同程度に乾燥できれば、エネルギー効率が $5\sim6$ ポイント上がり、非常に大きな寄与となる。

水を取るという点では、事前に脱水する方法と、燃焼排ガスから凝縮熱を回収する方法が考えられる。しかし排気からの凝縮熱回収は、凝縮水のpHが3以下(強酸性)になり、煙突や低温側の熱交換器が劣化してしまうため現実的ではない。これに対し、自己熱再生型蒸気流動層乾燥などの技術を用いて褐炭を高効率に乾燥することが可能である。これは燃料を予熱して水分を飛ばし、その水分(蒸気)を加圧することで飽和温度を上げ、燃料を乾燥させる際に潜熱を回収する技術である。褐炭の場合、温度を上げていくと 100°Cから 200°Cで水分の放出が起こり、200°Cくらいから揮発分が放出され、400°C以上で熱分解が起こり、さらに温度を上げると燃焼が起こる。この 100°Cから 200°Cにおける伝熱・乾燥工程の高度化が望まれる。



褐炭乾燥による熱効率の向上の例



褐炭乾燥装置の原理比較

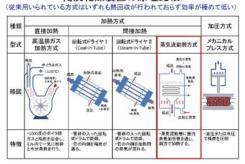


図 15 褐炭石炭火力発電の高効率化(18)

熱工学の研究者が石炭の乾燥に取り組んでいるケースは少なく、熱流体の最新テクノロジーを適用することでさらなる効率向上が可能になる。昇温にともなって外表面から温度が上がり水分揮発が起こるため、伝熱手法の高度化による水分放出高効率化のためにもこの分野における熱流体の知見の適用が必要である。また、ジメチルエーテルを用いた脱水など、従来の脱水と異なる手法についても提案されており、これらの研究開発の高度化によるエネルギー効率向上についても期待されるところである。

4.4 吸着剤を利用した省エネルギー技術

再生可能エネルギーや未利用エネルギー(コジェネレーション、工場、自動車、燃料電池などから得られる 100℃以下の低温排熱)を有効活用することによって、省エネルギーや CO₂排出削減に貢献することが強く求められている。これらの技術として、冷房・冷蔵などを行う吸着式ヒートポンプ(Adsorption Heat Pump: AHP)や、除湿を行うデシカント空調が開発・実用化されている。

吸着式ヒートポンプは、図 16 のように吸着材を用いて冷媒を蒸発させることにより冷熱を得て、その冷熱を冷房・冷蔵等に用いるシステムである。吸着した冷媒を脱着させるために低温排熱が利用される。冷媒には、価格、安全性、蒸発潜熱の大きさなどから一般には水が用いられる。一方、デシカント空調は、図 17 のように吸着剤(乾燥剤; デシカント)を塗布した円柱状のローターを用いて除湿を行う空調システムである。吸着した水分は、低温排熱により脱着される。

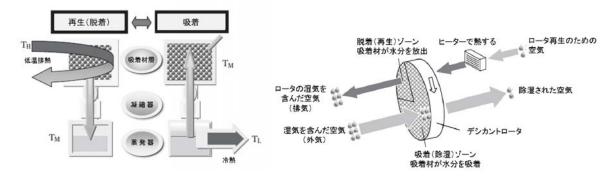


図 16 吸着式ヒートポンプの概略図 (文献(21)をもとに作成)

図 17 デシカント空調の概略図 (文献(21)をもとに作成)

吸着式ヒートポンプやデシカント空調システムに用いられる吸着材は、狭い相対圧範囲で多くの水蒸気を吸着でき、かつ100℃以下の低温で脱着できる特性をもつことが望まれる。これまで吸着材として検討されてきたものとして、ゼオライトやシリカゲルがある。ゼオライトは細孔が均一で細孔容積も大きいため多くの水蒸気を吸着する。また、狭い相対圧範囲で水蒸気を吸着する。しかしながら、ゼオライトには水蒸気を化学的に吸着する特性もあるため、吸着した水蒸気を完全に脱着するには200℃以上の高温が必要であるといわれている。一方、シリカゲルには均一な細孔はなく、低温で再生できることが特徴である。また、広い湿度範囲で平均的に水蒸気を吸着することから吸着式ヒートポンプやデシカント空調システムで使用されている。しかし、操作湿度範囲で吸脱着する有効水蒸気量が少ないため装置が大型化するという課題がある。さらに、細孔が不均一で大きいため、水蒸気と同時に臭気成分も吸着してしまうという課題が指摘されて

いる。また、吸着材の吸着・脱離性能及び選択性の向上は、省エネルギー、装置の小型化、プロセスの簡略化などに直結する重要な課題となっている。

三菱化学 (株) および (株) 三菱化学科学技術研究センターが基礎開発し、三菱樹脂 (株) が事業化した新規の水蒸気吸着材 (商品名: AQSOA® (アクソア)) は、ゼオライト系の機能性吸着材である。ゼオライトやシリカゲルといった従来の水蒸気吸着材と比べ、60~80℃の低温度領域で効率よく多量の水蒸気を吸脱着することが可能である(22)。「AQSOA®」を用いた吸着式冷凍機やデシカント空調機は、低い熱源で装置が稼動するため、今までは利用されないまま大量に廃棄されていた工場の低温排熱や太陽エネルギーを有効利用できる。また、冷媒にはノンフロンの「水」を使用しているため、地球環境にもやさしく、省エネや CO₂排出量削減につながる吸着材もしくは熱交換器として、排熱利用が可能な化学工場や太陽エネルギーを利用したビル空調などへと幅広く活用していくことが可能である(23)。

4.5 太陽熱利用

温度が 40℃程度の給湯や暖房需要は、太陽熱によっても十分に供給が可能である。 太陽熱給湯 器は、第二次オイルショック後には出荷台数が灯油燃焼式の給湯器を越えるなど爆発的に普及が 進んだが、その後原油価格が長期にわたって低位に推移したこと、快適性・利便性の面で魅力的 な製品開発が遅れたこと、デザインやイメージの悪化、太陽光発電やヒートポンプ給湯器との競 合、有効な補助政策の不足、強引な訪問販売等々、多くの複合的な原因により販売台数の低迷が 続いている。一方で、投資回収期間は 10~15 年とされており、太陽光発電と比較しても十分に 魅力的であり(24)、省エネルギーの観点からはその復活が望まれている。一般に、高価な技術はな るべく小型化し稼働率を上げた上で、安価なバックアップ熱源と組み合わせることでシステム全 体のコストを下げることが有効である。太陽熱給湯器は、ベースロードを担う熱源として、省エ ネの観点からは理想的である。このような中、平成20年度の省エネ大賞(省エネルギーセンタ ー会長賞)を受賞した長府製作所のエネワイター(25)、東京ガス、矢崎総業、三協立山アルミ、リ ンナイ、ガスターの5社が共同開発したSolamoシステム(26)、東京電力、デンソー、矢崎総業が 共同開発した CO2 ヒートポンプ給湯器と太陽熱集熱器を組み合わせたシステム(27)等、利便性と快 適性も備えたシステムが開発されている。東京ガスら Solamo システムは、ベランダの手すりに 設置可能で、特に給湯需要が増え太陽高度が低くなる冬場の集熱効率が高いことが報告されてい る。

また、地域で熱を融通する面的利用の試みが始まっている。東京ガス千住スマートエネルギーネットワークでは、ガスエンジン(370 kW、700 kW 各 1 台)、冷暖同時供給型蒸気吸収 HP、蒸気焚ソーラージェネリンク、ガス焚ソーラージェネリンク、ターボ冷凍機、三重効用吸収式冷凍機に太陽光発電や太陽熱集熱器を加えた地域エネルギーシステム実証実験を行っている(28)。合計 166 kW の真空管式太陽熱集熱器を備え、近隣建物と太陽熱とコージェネレーション排熱を融通するシステムとなっている。

太陽熱は、ややローテクのイメージがあり地味であるが、低温の熱を利用する給湯や暖房で需要に対しては、太陽熱を組み入れたシステムの普及が期待される。



図 18 太陽熱給湯システム(25)



図 19 集合住宅用太陽熱給湯システム(26)



図 20 地域エネルギーシステムに設置された真空管式太陽熱集熱器(28)

4.6 地熱・地中熱利用

地熱は地球内部の熱エネルギーを指し、地中熱はその中で最も低い温度域の熱として他と区別する場合がある。地中熱利用促進協会によれば、「利用の仕方から見ると、火山に近い場所にある高温のエネルギーを発電等に利用する地熱と、足もとにある恒温のエネルギーを温熱・冷熱として利用する地中熱とは、似て非なるもの」とある⁽²⁹⁾。本報でも地熱と地中熱を区別して記載する。

地熱・地中熱の利用は地熱発電と直接利用に大別できる。地熱発電では、地下に浸透した雨水が貯留層を形成し、地下数 km~数十 km より供給される熱源によって温められ高温の蒸気と熱水になったものを利用する。地熱発電のうち実用化されていて広く用いられているのはフラッシュ方式とバイナリー方式である。フラッシュ方式(蒸気発電方式)は約 200~350℃の高温の蒸気と熱水を取り出し、気水分離器で分離した後に蒸気でタービンを回して発電する。バイナリー方式は約 80~150℃の中高温の蒸気と熱水を熱源として低沸点の媒体を加熱し、蒸発させてタービンを回し発電する(30)。

直接利用には熱水利用と地中熱水利用がある。熱水利用では発電に利用できない低い温度域の 熱が給湯、暖房、融雪などに使われる。地中熱水利用も同様で、比較的低い温度域の熱を地中熱 交換器内を循環させる媒体を介して、あるいは揚水した地下水を使ってヒートポンプで熱を取り 出す。これらは木材やセメントの乾燥、食品加工、温室暖房、道路融雪、養魚、入浴・室内暖房 など農業、漁業、工業など多様な産業にわたる用途に利用される。

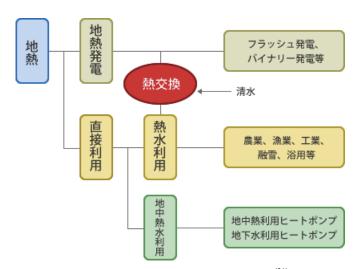


図 21 地熱・地中熱の利用形態 (31)

世界有数の火山国と言われる日本での地熱発電の賦存量は 3,314 万 kW、導入ポテンシャルでは 1,420 万 kW と推計されている (温泉発電を含む合計値) (32)。こうした資源の活用に向け、1990 年代半ばには 53 万 kW にまで増加するなど日本の地熱技術は世界をリードしていた(33)。 しかし 1997 年に制定された新エネ法で「新エネルギー」から除外されたのを境として、研究開発投資は徐々に減少し、同時にそれまで順調に増えていた年間発電電力量も減少していった(34)。

日本の地熱発電システムの技術力は高く、日本企業が海外に発電プラントを輸出している。その世界シェアは東芝(25%)、三菱重工(23%)、富士電機(19%)の三社で6割強にもなる(タ

ービン・発電機の世界シェア⁽³⁴⁾。現時点での主たる障壁は、主に社会的・制度的な側面にあるが、 昨今の情勢を踏まえれば今後は中長期的には導入が進むと見られる。したがって、技術開発も着 実に進展させる必要がある。特に今後の研究開発課題として以下の課題が挙げられる。掘削は地 熱発電のコスト構造の中では約4割を占める⁽³⁴⁾。

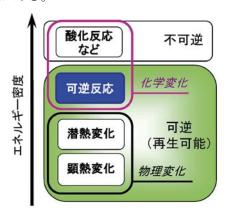
- (1) 探査技術…精度、確度の向上
- (2) 掘削技術…斜め堀技術の確立や低コスト化など。規制緩和も必要
- (3) 温泉発電技術…小規模、低温での発電技術の開発。精緻な泉源把握や斜め堀技術の開発

5. 現象解明および要素技術開発

5.1 化学蓄熱

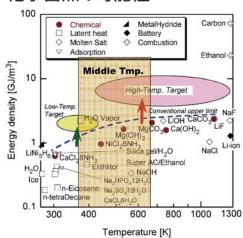
化学産業や鉄鋼業などからの 200 $^{\circ}$ $^{\circ}$

手法としては、水和や水素化といった発熱反応とその逆反応(吸熱)を組み合わせることが考えられる。現時点での課題は、低い温度における反応速度の向上、系全体の伝熱効率の向上であり、前者は触媒技術、後者は材料開発が肝要である。また、応用展開としては自動車、産業熱プロセス、再生可能エネルギーの負荷平準化など、未利用な中温排熱の有効利用への展開の可能性がある。



種々のエネルギー変化のエネルギー密度

化学蓄熱の可能性



反応の高速化、高性能化

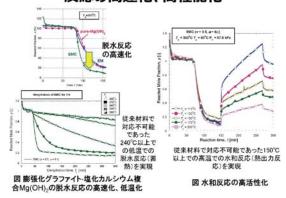


図 22 化学蓄熱の位置づけ(18)

熱力学的視点からの反応の選定、触媒の活性化エネルギーを低下させるための触媒微細構造制御・非ファラデー系電気化学利用などの適用、無機材料の高伝熱・高活性化等が検討されている。吸熱反応は熱力学平衡としては高温が有利であるため、低温化は平衡と速度の両面から難しい。しかしながら、メタノールの水蒸気改質などは200℃程度の低温でも比較的高い平衡転化率と反応速度を示すため、化学蓄熱への適用の可能性がある。また、MgO や金属塩添加水酸化マグネシウムなどの無機材料の水和・脱水なども蓄熱材料の開発を進めることで高度な化学蓄熱体を確立しうる。今後、高伝熱性物質の高機能化と併せて、化学工学的視点から熱移動と反応の最適化を進めることが重要な技術的課題となる。

5.2 新材料と熱伝導

フラーレンやグラフェン、カーボンナノチューブ (CNT) などの炭素系新材料をナノ (分子) スケールで制御することにより、伝熱や蓄熱あるいは熱電変換などの革新的な熱工学的機能を発現させた材料が得られる可能性がある。なかでも CNT は高い熱伝導率を有することが知られている。この特性を利用して高熱伝導性あるいは低熱伝導性を有する材料、高効率エネルギー変換(変換先は電気や光)につながる材料、あるいは熱の輸送を制御する熱スイッチ素子など、さまざまな機能性材料の研究開発が行われている。

CNT の成長形状や配向性を制御することで、CNT を薄膜状に形成することができる。例えば、CNT バッキーペーパーは、カーボンナノチューブ分子からなるもので、銅やシリコンのように電気を通し、鉄や真ちゅうのように熱を拡散させるユニークな性質を持つ。積み重ねて圧力をかけることで複合素材を作ると、鋼鉄に比べて強度は 500 倍、軽さは 10 倍になる。その性質からエレクトロニクスデバイス中の熱除去、電磁波の遮へい、防弾チョッキ、熱線反射体など様々な用途としての研究が重ねられている。また、多くの単層 CNT を厚さ方向(垂直方向)に均一に成長させた CNT 垂直配向膜は、ガラスやプラスチックなどの基板上に CNT を一方向に配向させたもので、電極基板として用いることができる。

金属やポリマーなど既存の材料に CNT を添加することにより、母材の特性を高めた高分子基複合材料 (CNT/Polymer 複合材料)を形成することができる。CNT をポリマーに添加した CNT /ポリマー複合材は、高い強度や熱伝導率、電気伝導性を示すことから、構造材料や熱伝導材料、電子デバイスへの応用が期待される。ポリプロピレン、ポリカーボネート、エポキシ樹脂等のプラスチックを中心に複合化が検討され、最近ではゴムとの複合化も検討されている。

ナノ流体は作動媒体(溶液)にナノオーダーの金属・非金属粒子を混合させた新しい種類の流体である。CNTナノ流体はCNTを混合、分散させたもので、長時間安定な状態を保ち、伝熱性能が高い流体であるとされる。

相変化材は、温度に応じて固相(固体)や液相(液体)に変化する性質をもった材料である。 具体的には、脂肪族炭化水素化合物(テトラデカン・ヘキサデカン・オクタデカン・パラフィン など)や脂肪酸類(オクタン酸、デカン酸など)および無機塩類などである。相変化材料を母材 として、黒鉛ナノプレートレットを強化材として加えることで、熱伝導率の良い潜熱蓄熱材が得 られる。相変化の際に、周囲から熱を吸収したり(融解熱)放出したり(凝固熱)する特性を利 用し、相変化蓄熱材として電子機器の過熱防止、人や生物などの体温上昇防止など熱対策に利用 されている。 へキサデカンにグラファイトを混合させた懸濁液では、液体一固体の相転移により熱伝導率が変化することが報告されている。液体状態では熱伝導率はほとんど変化しないが、凝固すると熱伝導率が急激に上昇する。グラファイトの体積分率が 0.8%の懸濁液では約 3.2 倍の熱伝導率変化が見られた。温度変化によるスイッチングでは実用への展開が困難であると考えられるため、温度ではなく他の状態量で制御することなどが課題である。類似の報告例はまだ少ないが、熱の輸送を制御できる熱スイッチング素子が存在すれば、様々な分野に応用することが可能である。

5.3 顕熱熱交換

熱交換器は、熱を利用するエネルギー機器の中でエネルギー変換を担う技術として中心的役割を担っている。熱交換器は産業部門だけでなく、民生部門の空調、給湯、冷蔵、冷凍等で広く用いられており、一層の省エネルギーおよび省資源を目指す上で、高効率化に向けた研究開発に対する期待は大きい。

一般に、金属、液体、気体という順に熱伝導率が低下する。とくに気相は密度が小さいため低 風速で熱交換される場合が多く、その場合の気相伝熱促進が重要になる。すなわち、熱交換器の 高効率化では空気側の伝熱促進が鍵になる。

一方、熱交換器の開発では低コスト化も重要である。低コスト化では「固定費」以外に「伝熱面積あたりの材料費」と「伝熱面積」の2要素を考える必要がある⁽³⁵⁾。1990年代は材料費が比較的安かったため、熱交換器を大型化して伝熱面積を拡大することが可能であった。しかし、近年は材料費が高騰しているため、より小型で軽量な熱交換器のニーズが高まっている。そのため、いかにして伝熱面積を削減しながら効率的な熱交換を実現するかが重要な課題となる。このとき熱交換器では熱抵抗の73%が空気側に起因しており、その大きさは冷媒が流れる管内側(15%)の約5倍にもなる⁽³⁶⁾。したがって、ここでの最大の課題も空気側の伝熱促進となる。

空調用熱交換器内で見られる空気の流れはレイノルズ数が 100 程度の層流であるが、近年の熱工学あるいは流体工学分野の数値シミュレーションや理論解析によれば、これを乱流化させることで伝熱性能が向上する可能性が示されている。層流から乱流への遷移は経験的にレイノルズ数 2000 程度で生じることが知られているが、その機構はこれまで十分に解明されていなかった。しかし、その物理過程が明らかにされつつあり、対応する理論の整備も進んでいる。乱流制御に対する制御理論の応用も進展してきた。これらを背景に、これまで乱流を抑制することに焦点が置かれてきた乱流制御研究を、反対に乱流促進やそれに伴う伝熱性能の向上に応用しようとする試みが行なわれている。

新しい伝熱技術のニーズとシーズ

• 前縁効果 vs. 乱流化

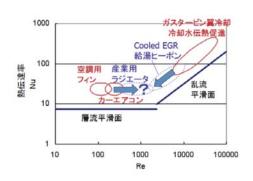


図 23 新しい伝熱促進技術のニーズ(18)

また、さらなる伝熱性能の向上を目指す場合には圧力損失の低減が課題になる。伝熱量と圧力 損失は熱交換器の伝熱性能の重要な評価因子であるが、一般的に両者はトレードオフの関係にあ る。数学的なアプローチから、非相似に伝熱促進と通風抵抗低減を両立しうる可能性が示されて いる。現在は実証のための数値実験や、随伴解析に基づく最適化手法の開発などが行なわれてい る。

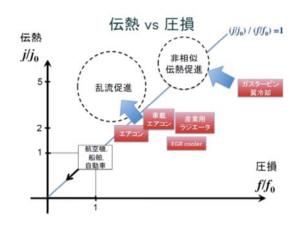


図 24 圧力損失(横軸)と伝熱(縦軸)のトレードオフ関係(18)

日本冷凍空調学会熱交換技術分科会では、関連する技術者・研究者に対するアンケートを通じて冷凍空調機器やヒートポンプの熱交換器における技術課題の調査を行った^(37,38)。そこでは表 8 に示す 8 つの調査項目に対し、"取り組むべき(取り組んだらよいと思われる)研究開発課題(テーマ)"、およびその"重要度"と"完了時期"についての評価、および"コンソーシアムとして取り組むべき課題"の特定を行なっている。

表 9 熱交換器の課題(37,38)

項目	調査事項
1	冷媒の種類(次世代冷媒、将来冷媒、混合冷媒、その他の視点から)
2	冷媒側伝熱形態 (凝縮、蒸発、吸収、吸着、その他の視点から)
3	伝熱面(伝熱面の種類や形状、銅管、アルミ管、微細流路、その他の視点から)
4	空気やブラインなどの二次冷媒側伝熱(フィン伝熱、着霜、除霜、ミスト、その他の
	視点から)
5	熱交換器(熱交換器タイプ、冷媒分配、高性能化、小型化、その他の視点から)
6	熱交換器技術応用新規分野
7	ナノテクノロジー等の応用技術
8	上記の項目以外のその他の課題

各調査項目で重要度の高かった研究開発課題は下表のとおりであった。コンソーシアム化の要求は低 GWP 冷媒・HFO 系冷媒に関するもので最も高く、新規冷媒に対する課題解決へのニーズが高いことが示された。続いて着霜・除霜・結露に関するもの、新しい領域である太陽熱や地中熱利用に関するものも関心が高かった。

表 10 重要度が高いと判断された課題(38)

項目	"重要度"の高かった"研究開発課題"の例
1	低 GWP(Global Warming Potential)冷媒、可燃性冷媒
2	HFO 系冷媒(低 GWP 冷媒)、HFO 系の混合冷媒の伝熱(前回調査で重要度が高か
	った CO2の伝熱から HFO ヘシフト)
3	流路細径化、内面溝付管の更なる高性能化
4	空気側伝熱促進、着霜・除霜・結露。ただし着霜・除霜・結露は重要度が高いが解決
	までの時期も比較的長期に見込まれている(以前からなかなか解決されない課題)
5	オールアルミ熱交換器、フィンチューブ熱交換器、マイクロチャンネル
6	排熱回収技術、省冷媒化技術、電気自動車用ヒートポンプ
7	フィン表面微細加工、伝熱面微細加工
8	熱交換器の性能解析技術、冷媒パス

5.4 気液相変化

高性能伝熱管の開発により小温度差熱利用技術が進み、さらにミニ、マイクロ、ナノと微細化が進んで、微細加工技術を使ったマイクロミニチャンネルの創出や応用が図られている。これらは電子機器の冷却や燃料電池の熱物質移動、バッテリーの熱管理、水素電解、熱物質伝達などの分野において、大きな進展をもたらした。

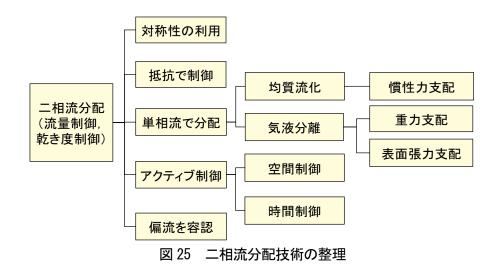
排熱利用の例として、給湯器では現在 95%の熱を回収しているが、1 mm 程度の細径化により 伝熱面積を増やすことで、より小型で高効率な給湯器を実現できる。また、プレート式熱交換器 においてマイクロギャップ化したうえでガスと蒸気とを交互に流し、比較的高温の排ガスから効

率よく蒸気をつくることも可能である。さらには、燃料電池においてはガス拡散層における濡れ 性制御による液滴排出とガス拡散促進によりさらなる性能向上を図ることができる。

このような気液相変化においては、蒸気と伝熱面の間に形成される薄液層の制御が伝熱特性を決定する重要な因子であることが知られる。とくに今後利用拡大が見込まれるマイクロチャネルのような微細構造内の気液相変化においては、気泡と壁面間の液膜における蒸発の速度が全体の伝熱量を支配するため、表面物性制御による濡れ性制御などが今後重要な課題となる。

5.5 混相流制御

熱機関では、作動流体が高温高圧の状態で吸熱して低温低圧の状態で熱を放出する。その際、放熱量よりも多く受熱することでその差分を仕事として取り出している。ヒートポンプはその逆で、仕事を加えることで低温から吸熱し、高温へ放熱する装置である。熱機関やヒートポンプの基本サイクルである蒸気サイクルや冷凍サイクルは、ほぼ等温とみなせる相変化中に受放熱を行うため、温度一定の熱源や温度差の小さい熱源に対して高効率なサイクルである。蒸気サイクルの熱交換器においては、流れる作動流体は気液二相となっているが、この作動流体を広い伝熱面積に熱交換器の熱負荷分布に応じて分配させる必要がある。しかしながら、気液二相流は流量と乾き度(気液の質量流量比)の2つの独立パラメータがあるため、両者を非定常時も含む広い作動範囲においてダイナミックに制御することは容易ではない。例えば、冷凍サイクル蒸発器は液相を気相に相変化させることが主たる機能なので、液相を複数のパスに分配することが重要となるが、一般に蒸発器入口乾き度は約0.2であり、気液界面に大きな変動を伴う複雑な流動となっているため、高精度な分配が非常に難しい。これが製品性能のバラつきや、高性能細径熱交換器採用の障害等の課題の原因となっている。図25に、気液二相流の制御技術を整理した結果を示す。新たな取組として、表面張力を利用した気液分離技術の開発が進められており、従来技術に対して約1/7のコンパクト化が実現できることが報告されている⁽²⁷⁾。



一方、冷凍サイクルの圧縮機においては潤滑油が冷媒に混入するため、圧縮機中の油量減少や、 冷媒粘性の増加などの悪影響を与えることが課題となっている。圧縮機から吐出される潤滑油は、 数ミクロン程度のミスト状になっており、これを気相中から効果的に除去し、圧縮機に戻す機構 が必要である。また、蒸気サイクルにおいてはボイラーから膨張機に流入する蒸気中に液滴ミストが混入していると、固体壁に衝突してエロージョンによる機器が破壊する可能性がある。このため、膨張機入口において蒸気を過熱状態とする必要があり、効率低下やコスト増加を招く。以上のようなニーズに対して高性能なミスト分離手法が求められている。圧力損失を増大させることなく、気液両相を効果的に分離することができれば、サイクル全体の高性能化、信頼性向上、コスト低減が実現できる。

5.6 物質輸送促進

電池の電極反応においては、界面における電気化学反応の促進だけでなく、反応場まで反応物や生成物・イオン・電子などを輸送する抵抗を抑制することも非常に重要である。電極においては、固相・気相・液相内の輸送が非常に微細で複雑な多孔体構造内で生じるため、材料自体の導電性向上に加えて、その複雑構造内での輸送促進が鍵を握る。図 26 に、一例として固体酸化物形燃料電池(SOFC)燃料極内のイオン電流線(赤)および電子電流線(青)を示す(39)。左端が電解質、右端が集電層であり、電極厚みは約50ミクロンである。SOFC燃料極は、イオン導電体であるYSZ粒子、電子導電体であるNi粒子および空隙からなる多孔体で構成されるが、酸化物イオンが電解質からYSZのネットワーク中をイオン電流(赤線)として拡散し、三相界面における電気化学反応で電子が放出され、Ni 相を導電して電子電流(青線)集電層に至る様子が示されている。イオン電流も電子電流も非常に屈曲しており、理想的な導電パスになっているとは言い難い。電解質から三相界面に至るまでのイオン輸送において駆動力である酸素ポテンシャルを失ってしまうため、結果として電解質からおよそ10ミクロン程度という非常に限られた領域でしか電気化学反応が生じていないことがわかる。このような物質輸送における損失を減少させることができれば、大きな性能向上や無駄となっている材料コストの削減が期待できるとともに、局所電流密度が減少することで耐久性や信頼性の向上も期待できる。

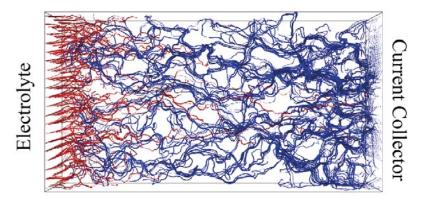


図 26 固体酸化物形燃料電池燃料極内のイオン電流線(赤)および電子電流線(青) (39)

このような電極における物質輸送を取り扱うためには、ナノからミリメータにわたるマルチスケールのダイナミックな現象を扱う総合的な取り組みが不可欠であり、以下のようなステップでの取組が有効であると考えられる。

(1) 局所の輸送や反応現象を解明するための先端的な計測技術の開発

- (2) 上記観察結果から現象をマルチスケールにモデル化するための研究
- (3) 上記モデルを導入したシミュレーション技術を開発し、要求特性を満たす材料や構造を実現するための設計研究
- (4) 上記設計指針に基づいて得られ他材料や構造を具体的に製造するプロセスの研究開発 このような取り組みの一部は、すでに国内外(DOE、NEDO、JST、民間会社等)でも実施さ れはじめているが、それぞれの現象が非常に複雑であることに加え、用途や現象自体が多岐にわ たることから、その取り組みはまだ限られた学術範囲に止まっており、成熟したレベルにあると は言えない。特に、計測には先端的で高額な観察型研究施設が必要であること等の理由から、産 官学からの広範な学術分野の集積を進め、集中的に進める必要がある。実際のデバイスや製品で の課題を熟知した上で、ナノからミリにいたるマルチスケールでの研究を遂行しマネージできる 人材の育成も不可欠である。

5.7 製造プロセスの革新

前節で記したように、最適構造を実際に製造するプロセスを実現することが最終的には不可欠 である。例えば、図 26 に示した固体酸化物形燃料電池の燃料極では、イオン導電相である YSZ の屈曲度ファクターは5~10程度の値となっている。すなわち、有効導電率が理想的な場合に対 して一桁程度低い構造となっている。理想的な構造としては、柱状のイオン導電相が平行に電極 厚み方向に整列している状態が考えられるが、このような構造をいかに実際に製造するかが大き な課題となる。また、電気化学的反応場である三相界面密度を増加させるためには、一般に粒径 の細かい粒子を分散させれば良い。しかしながら、細かい粒子は焼結が進みやすいので、製造す る過程や長期運転中に微細な構造を保持することは困難である。微細な構造をいかに安定に製造 した上で、その長期的な形態変化を抑制して維持するかは非常に大きな課題である。従来の製造 プロセスは、そのほとんどの工程が試行錯誤的な経験知に依存しており、上記のような課題に応 えるのは困難である。製造過程を解明し、形式知化するための科学的なアプローチが必要である。 具体的な製造プロセスの例として、図 27 に円筒平板型 SOFC の製造プロセスを示す(40)。原料粉 末の合成、スラリー調整における粒子の凝集挙動、押し出し成形時の原料粉末およびスラリー流 動、スクリーン印刷やディップコート等の塗布行程、乾燥時のバインダーや粒子の相変化及び流 動、焼成時の焼結プロセス等、実に様々な工程が複数回実行される。個々のプロセスにおける熱 や物質輸送現象も非常に複雑である。このように、製造プロセスでは多くの熱物質輸送が非常に 複雑に重畳しているが、このような複雑な輸送現象を制御し、設計する手法の構築が非常に重要 である。

検討の経緯

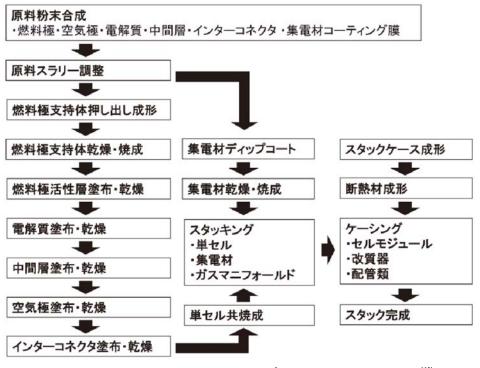


図 27 固体酸化物形燃料電池の製造プロセス (円筒平板型) (40)

6. まとめと今後の展望

産業革命以降、燃料を燃焼しその熱を利用するという技術体系が人類文明の発展を支えてきた。 第二次大戦後に石炭から石油へ、オイルショック時に石油から天然ガスあるいは原子力へという 燃料転換はあったものの、基本的な構造に大きな変化はない。特に、1980年代半ばから燃料・ 素材価格が約20年間低位に安定したために、新しい熱技術が登場することはほとんどなかった。 しかしながら、2000年代半ばからの燃料・素材価格の高騰および乱高下、2011年の東日本大震 災とそれに引き続く福島原発事故は、この技術体系に大きな影響を与える可能性がある。理論的 にはもっと高効率な熱利用のパスが存在するが、従来の価格では見合わなかったり、周辺技術が 未成熟だったりといった理由で実用化しなかった技術は多い。また、国内市場では受け入れられ なかったけれども途上国や海外で受け入れられる可能性のある技術など、大きな可能性を持つ技 術も多い。現在は、そのような新しい熱技術が登場する直前の転換期にあると考えられる。

第1.2節で記したように、熱利用における損失を抑制するためには、①熱需要そのものを抑制 する、②機器を実際の使用状況に合わせて適切に運用する、③機器自体の高性能化を図る、3 つ のアプローチが重要である。図6に示したような新たな熱技術のニーズを実際に実現する必要が ある。社会ニーズに応えるということは、実製品として他の競合技術に対して競争力を有する商 品が社会に普及するということである。その鍵を握るのは、前章までに紹介した基礎技術シーズ であるが、一般に基礎技術がコスト、耐久性、製法や様々な外乱の壁を乗り越えて社会ニーズと 直接結び付くことは非常に稀である。コラム2で紹介したように、圧倒的なコスト競争力を有す る燃焼式機器に勝つことは極めて高い技術的ハードルを越える必要がある。そこで、あとわずか で競争力を有するようになって社会ニーズを満たすことができそうな新たな機器を具体的に想 定し、そのもとで技術シーズを結集して製品競争力を革新するアプローチが有効と考えられる。 そのイメージを図 28 に示す。左側がニーズ、右側が技術シーズ、その中間にある技術群が具体 的な新しい機器のイメージである。現在は、この新たな機器のターゲット市場、市場規模、制約 条件、評価指標等が、顕在化、共有化されていないため、研究開発投資も進まず、新技術が育つ サイクルが回っていない状態である。技術シーズ側も従来のニーズに対しては極めて高いレベル にあるが、顕在化されていないニーズ(制約条件・評価指標)に対しては適用範囲を超えるなど、 工学としての完成度は高いとは言えない。ニーズを顕在化した上で具体的な機器をユーザーとメ ーカーで共有し、その中で具体的な技術課題を掘り起こして技術シーズを育成することで技術力 を向上させ、その結果として製品競争力が上がり、導入が促進されるという好循環を回す必要が ある。そのために、具体的なニーズが想定されていて技術課題が見えているものは、ターゲット となる機器の具体的なスペックを示してトップダウンで技術開発推進すべきである。一方、具体 的な製品像が見えていないものについては、ニーズとシーズを東ねたコンセプトのコンペティシ ョンを行う等の対策が有効だと考えられる。

検討の経緯

加熱しないための技術
再生可能熱エネルギー
可逆発熱
高温クリーン燃焼
熱交換
熱輸送

蓄エネルギー

外燃機関 化学反応

冷凍サイクル

中低温熱需要の省エネ

エネルギーマネジメント

断熱材, 再生器, 蓄熱システム

太陽熱, バイオマス熱, 地熱, 地中熱

高温燃料電池(SOFC), ガス化

高温化(耐熱材料, 余熱), 褐炭乾燥, 低エミッション

高性能低コスト材料熱交換器

省搬送動力, 低放熱損失輸送

PCM, 化学蓄熱, 濃度差

蒸気サイクル (Kalina, ORC, Trilateral), ガスサイクル

化学再生, コプロダクション, 低活性化エネルギー触媒

高温HP, 低GWP冷媒, 潜顕熱分離, 熱駆動

負荷特性,動特性, 設備と建築の融合

熱センサ, データベース構築

材料開発

断熱, 蓄熱, 耐熱, 熱電, 熱光, 吸着, 冷媒, ···

混相流(固気, 気液, 固液) 予測·制御

メゾ多孔体内熱物質輸送・反応・吸脱着・相変化, 気液冷媒分配,・・・

小温度差熱交換 伝熱促進,3次元最適化,ファウ リング,着霜,防錆,表面制御, 材料転換,・・・

需要予測・制御

熱量・温度データベース, センサー, 使用条件とのマッチング, 効用定量化,

図 28 社会ニーズと技術シーズのリンク

7. 検討の経緯

研究開発戦略センターにおける取組み

研究開発戦略センター (CRDS) では、科学技術に対する社会の期待を、全体として「豊かな持続性社会の実現」と定義し、①健康、②生物多様性、③持続可能なエネルギーシステム、④持続可能な物質循環、⑤共通基盤事項(基礎・基盤科学、人材、グローバル化対応等)の5つを重要項目として掲げている。また、温室効果ガスの排出削減やエネルギーセキュリティーは、我が国の最重要課題の一つであり、ブレークスルーをもたらすような研究成果が強く求められている点も重要視している。

CRDS は、「第 4 期科学技術基本計画」に盛り込まれたグリーン・イノベーション、あるいは政府が打ち出した「日本再興戦略」の中のクリーン・経済的なエネルギー需給の実現は、わが国がリスクを回避して世界に貢献するためには避けて通れない道であり、その道を辿る上で科学技術が重要な役割を果たすものと理解している。そして、環境(Environment)・エネルギー(Energy)・経済(Economy)の 3E を同時克服し、さらには生物多様性や人類の衡平性にも配慮する必要があると認識している。平成 22 年 6 月には、エネルギー政策基本法に基づくエネルギー基本計画(11)が 3 年ぶりに改訂された。同計画はエネルギー安定供給の確保、環境への適合、市場原理の活用を基本方針としているが、東日本大震災と東京電力(株)福島第一原子力発電所事故を受けて更なる改定の議論が行われている。CRDS でもこうした国の目標を達成するための目的基礎研究のあり方を議論してきた。

この間、関連分野の専門家へのヒアリングなどを重ねつつ、今後国が取り組むべき目的基礎研究課題の抽出作業を継続してきた。その結果、重要課題の一つとして、エネルギー利用における多大な損失発生源として熱利用技術体系を取り上げ、根本から見直すための基礎研究を推進するべきという基本認識を得た。すなわち、熱利用の実態を明らかにし、熱需要を抑制し、機器を実際の使用状況に合わせて適切に運用した上で、機器自体の高性能化を図るというアプローチが、将来の我が国の、あるいは世界の持続的エネルギー利用に大きく貢献できると考えるに至った。熱エネルギーの総量は膨大なものであるため、社会的重要性も高く、我が国が世界に先んじて研究開発すべき課題であると考えられる。

このような認識に基づき、平成 24 年 7 月 21 日にはワークショップ「中低温熱需給の革新に向けた基盤技術開発」を開催した(18)。表 10 に参加した専門識者リストを示す。事例紹介と討論を通じ、熱利用技術に関わる活発な意見交換が交わされ、我が国のエネルギー総供給を削減するためには熱利用技術体系の大幅な見直しが重要であるとの認識を再確認した。表 11 にワークショップで発表された演題を示す。このワークショップの議論は、本調査報告の基本構成にも反映されている。

表 11 ワークショップ参加者名簿(事前登録分、敬称略)

氏名	所属	役職	
講演者 (五十音順)			
飯山 明裕	日産自動車(株)総合研究所 EV システム研究所	エキスパートリーダ	
上原 一浩	神鋼リサーチ (株) 産業戦略情報本部	主席研究員	
宇高 義郎	横浜国立大学 大学院工学研究院 システムの創生部門	教授	
大嶋 正裕	京都大学 大学院工学研究科 化学工学専攻	教授	
小澤 守	関西大学社会安全学部	副学部長、教授	
加藤 之貴	東京工業大学原子炉工学研究所 エネルギー工学部門	准教授	
金子 祥三	東京大学 生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター	特任教授	
窪川 清一	三菱樹脂(株) 平塚工場 製造第3部技術開発グループ	グループリーダ	
齋藤 潔	早稲田大学基幹理工学部 機械科学・航空学科	教授	
澤地 孝男	(独) 建築研究所 環境研究グループ	環境研究グループ長	
塩見 淳一郎	東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻	准教授	
志満津 孝	(株)豊田中央研究所 機械システム研究部 熱制御研究室	研究室長	
長谷川 洋介	東京大学 生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター	助教	
松田 一夫	千代田化工建設 (株) サスティナナブルビジネス開発セクション	リーダ	
研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット関係者			
笠木 伸英	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	上席フェロー	
鹿園 直毅	東京大学 生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター	教授/特任フェロー	
屁图 旦教	/JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット		
久保田 純	東京大学 大学院工学系研究科 化学システム工学専攻	准教授/特任フェロー	
八床山 祀	/JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット		
関根を秦	早稲田大学 理工学術院 先進理工学部 応用化学科	教授/フェロー	
	/JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット		
鈴木 至	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー	
中村 亮二	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー	
福田 哲也	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー	
増田 耕一	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー	
宮下 永	JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー	
府省関係者			
篠崎 資志	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	環境エネルギー課長	
福井 俊英	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	環境科学技術推進官	
今村 剛志	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	課長補佐	
鈴木 せいら	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	係長	
工藤研一	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	科学技術・学術行政	
		調査員	
吉田 健一郎	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	企画官	

嘉藤 徹	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課	研究開発調査官	
鈴木 俊男	経済産業省 製造産業局 ファインセラミックス・ナノテクノロジー・ 材料戦略室 (非鉄金属課)	産業技術企画調査員	
科学技術振興機構関係者			
奈良坂 智	経営企画部 科学技術イノベーション戦略室	室長	
金子 博之	経営企画部 科学技術イノベーション戦略室	チームリーダ	
	グリーンイノベーション戦略チーム		
古川 雅士	戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ	調査役	
原田 千夏子	環境エネルギー研究開発推進部 低炭素研究担当	主査	
海邉 健二	環境エネルギー研究開発推進部 低炭素研究担当	主査	
古旗 憲一	低炭素社会戦略センター 企画運営室	室長	
永井 諭子	低炭素社会戦略センター 企画運営室	主査	
門平 卓也	物質・材料研究機構 つくばイノベーションアリーナ推進室	主任エンジニア/	
	/低炭素社会戦略センター	客員研究員	

表 12 ワークショップで発表された演題

- 1. 建築物における中低温熱需要の実態把握と省エネルギー対策 澤地孝男(建築研究所環境研究グループ環境研究グループ長)
- 2. 自動車に求められる熱利用技術

志満津孝(豊田中央研究所機械システム研究部熱制御研究室室長)

- 3. 空調・給湯における熱利用コア技術 齋藤潔(早稲田大学基幹理工学部機械科学・航空学科教授)
- 4. 高効率小型分散発電システムについて
 - 上原一浩(神鋼リサーチ(株)産業戦略情報本部主席研究員)
- 5. 重化学コンビナートにおける低位熱利用と低位熱発電システムの導入 松田一夫(千代田化工建設(株)サスティナブルビジネス開発セクションリーダ)
- 6. 石炭利用における熱関連技術の開発 金子祥三(東京大学生産技術研究所エネルギー工学連携研究センター特任教授)
- 7. 断熱

大嶋正裕(京都大学大学院工学研究科化学工学専攻教授)

- 8. 吸着材 AQSOA (アクソア) を適用した新エネルギー・省エネルギーシステム 窪川清一 (三菱樹脂 (株) 平塚工場製造第3部技術開発グループグループリーダー)
- 9. 蓄熱-化学蓄熱技術の展望-加藤之貴(東京工業大学原子炉工学研究所准教授)
- 10. 熱伝導と新材料 塩見淳一郎(東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻准教授)
- 11. 顕熱熱交換 長谷川洋介(東京大学生産技術研究所エネルギー工学連携研究センター助教)
- 12. 気液相変化伝熱と中低温熱利用技術 宇高義郎(横浜国立大学大学院工学研究院システムの創生部門教授)

関連府省の動向との関わり

政府は、「第4期科学技術基本計画」の中のグリーン・イノベーションあるいは「日本再興戦略」に盛り込まれたクリーン・経済的なエネルギー需給の実現に向けて研究開発の推進に取り組んでいるが、「政府全体としてプロジェクト(期間、予算総額、市場導入目標等)や実施者を決定」する新たな仕組みの検討を文部科学省研究開発局と経済産業省産業技術環境局が平成23年度に始めた(新たな国家プロジェクト制度の具体化について(未来開拓研究開発制度)、経済産業省産業技術環境局、平成24年1月)。

両省の連携は「文部科学省・経済産業省合同検討会」(以下、合同検討会)として進められ、概算要求作成作業の前段階から、「2030 年頃の実用化を目指して取り組むべき革新的技術」を特定し、また特定された技術の研究開発推進における両省連携の仕組み等について議論するものとされた。CRDS ではこの合同検討会での取組みに対して前述のワークショップの内容をとりまとめた報告書を紹介する等、情報提供を行った。結果として両省は、平成 25 年度の概算要求に向けて、「次世代二次電池」、「エネルギー貯蔵・輸送」等とならんで「未利用熱エネルギー」をテーマとして取り上げた。

なお、合同検討会ではテーマの特定と同時に連携体制のあり方についても検討が行われた。具体的には、技術シーズの発掘や基礎的研究開発を主に担う文部科学省のプロジェクトと、事業化

を見据えた実用化研究開発を主に担う経済産業省のプロジェクトを一体的に運営するための、両省プロジェクトの主要参加者(産学官)等によって構成される「ガバニング・ボード」が議論された。「未利用熱エネルギー」の推進のためのガバニング・ボードに関しては資料が公開されていないが、「エネルギー貯蔵・輸送」に関しては、JST で新規に始まる「エネルギーキャリアプロジェクト」についての公開資料から概観が確認できる(図 29)。こうした、ガバニング・ボードを中心とした研究開発の一体的な推進は、効率的、効果的な成果の創出に向けて今後極めて重要になる。

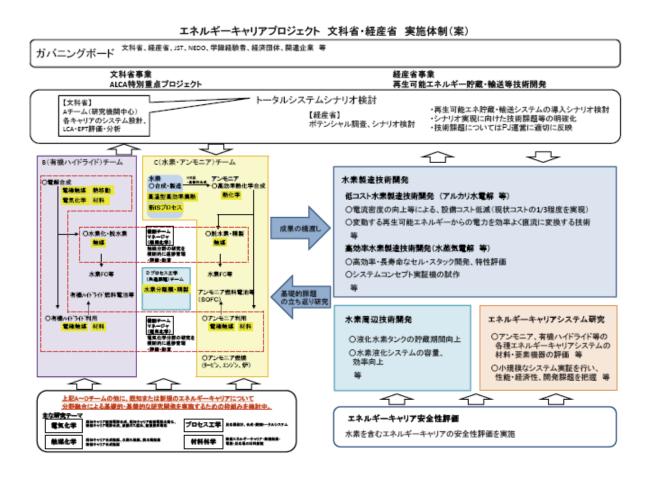


図 29 ガバニング・ボードの位置づけ(エネルギーキャリアプロジェクトの例)

参考文献

- (1) 西尾, 平成 18 年度科学研究費補助金研究終了報告書, (2006).
- (2) 梅沢, 甘利, 安田, 川村, 加藤, 久世, 実工場における蒸気配管からの熱損失を考慮したボイラ総合効率の計測, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集(3), 3-4 (2010).
- (3) 田中, 省エネルギーシステム概論, オーム社, (2003).
- (4) 志満津, 自動車における熱技術, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012 プレコンファレンスセミナー資料, 19-29 (2012).
- (5) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編,エネルギー経済統計要覧,財団法人省エネルギーセンター,(2012).
- (6) 高田、黒田、産業用ヒートポンプ、財団法人省エネルギーセンター、(1991).
- (7) (財) 建設経済研究所,建設投資等の中長期予測~2010 年度及び 2020 年度の見直し~, (2005).
- (8) 矢野経済研究所, 断熱材市場の動向調査, (2007).
- (9) (株) 日立製作所ニュースリリース, http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2013/02/0214.html, (2013).
- (10) 堤, 低炭素社会に向けた革新的エネルギー技術, http://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/tsutsumi/contents.html, (2010).
- (11) 東京大学,新日鉄エンジニアリング株式会社ニュースリリース, http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/publication/topics/2012/20120202press1.pdf, (2012).
- (12) 東京電力株式会社,株式会社デンソー,矢崎総業株式会社プレスリリース, http://www.tepco.co.jp/cc/press/09072702-j.html, (2009).
- (13) パナソニック株式会社ニュースリリース, http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn120402-2/jn120402-2.html, (2012).
- (14) 中川, 坪内, 鈴木, 排気熱再循環システムによる冬季実用燃費向上, 自動車技術, 61(7), 49-54 (2007).
- (15) トヨタ自動車ホームページ,

http://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/data/automotive_business/products_technology/technology_development/body/details.html, (2013).

- (16) 九州電力ホームページ, http://www.kyuden.co.jp, (2013).
- (17) 山家公雄, 再生可能エネルギーの真実, 日経 BP 社, (2012).
- (18) 科学技術未来戦略ワークショップ報告書,中低温熱需給の革新に向けた基盤技術開発, CRDS -FY2012-WR-03, http://crds.jst.go.jp/type/workshop/201210180002, (2012).
- (19) (社) 日本機械工業連合会,省エネルギー技術の活用による新たな事業展開についての調査研究-保有技術の再評価による事業機会調査専門部会報告書 (II), (2007).
- (20) 神鋼環境ソリューション,トピックス, (2007).
- (21) 吉田, 伊藤, 小川, 東ソー研究・技術報告, 54, pp.17-23, (2010).
- (22) 三菱ケミカルホールディングスグループ,低温排熱や太陽光エネルギーを有効利用する新素

材「AQSOA®」、ぷらこむ、Vol. 5, (2009).

- (23) 経済産業省,第3回ものづくり日本大賞優秀賞(製品・技術開発部門)"太陽の熱で冷房する"革新的な水蒸気吸着材の開発,
 - http://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/seizousangyou/monodukuri/data/monotai3_mitsubi shi.pdf, (2009).
- (24) 木村, 太陽熱温水器の普及は何故停滞しているのか, 電力中央研究所報告 Y08002 (2008).
- (25) 長府製作所ホームページ, http://www.chofu.co.jp/products/solar/solar_system/pdf/20090130.pdf, (2009).
- (26) 東京ガスホームページ, http://home.tokyo-gas.co.jp/living/solamo/index.html, (2013).
- (27) 鹿園直毅監修、次世代高効率冷凍・空調・給湯機器の最新技術、CMC 出版(2012).
- (28) 東京ガスプレスリリース, http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20100514-01.html, (2010).
- (29) 地中熱利用促進協会ホームページ, http://www.geohpaj.org, (2013).
- (30) NEDO 再生可能エネルギー技術白書, (2010).
- (31) 日本地熱開発企業協議会ホームページ、http://www.chikaikyo.com, (2013).
- (32) 環境省, 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書、(2011).
- (33) 火力原子力発電技術協会,地熱発電の現状と動向 2010・2011 年, (2012).
- (34) 環境省,2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会, http://www.env.go.jp/council/06earth/y0613-11/mat01.pdf,(2012).
- (35) 鹿園,冷凍, 86, pp.100-105, (2011).
- (36) 佐々木, 冷凍, 85, pp.9-13, (2010).
- (37) 小山ら, 冷凍, 82, pp. 154-160, (2007).
- (38) 宮良, 小山, 2012 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, B205, pp. 45-50, (2012)...
- (39) Kanno, D. et al., Evaluation of SOFC Anode Polarization Simulation using Three-Dimensional Microstructures Reconstructed by FIB Tomography, *ElectrochimicaActa*, 56 (11), pp. 4015-4021 (2011).
- (40) JST 低炭素社会戦略センター(LCS), 低炭素社会づくりのための総合戦略とシナリオ http://www.jst-lcs.jp/documents/item/s08_2-4.pdf, (2012).

■作成メンバー■

笠木 伸英 (環境・エネルギーユニット) 上席フェロー (環境・エネルギーユニット) 鹿園 直毅 特任フェロー 鈴木 至 (環境・エネルギーユニット) フェロー (環境・エネルギーユニット) 関根 泰 フェロー 中村 亮二 (環境・エネルギーユニット) フェロー

※お問い合せ等は環境・エネルギーユニットまでお願いいたします。

CRDS-FY2013-RR-02

調査報告書

中低温熱利用の高度化に関する技術調査報告書

RESEARCH REPORT

Technology Survey on Advanced Utilization of Medium to Low Temperature Heat

平成 25 年 9 月 September 2013

独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター環境・エネルギーユニット Environment and Energy Unit, Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

〒 102-0084 東京都千代田区五番町7 K's五番町

電 話 03-5214-7481 ファックス 03-5214-7385

©2013 JST/CRDS

許可無く複写/複製することを禁じます。 引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission. Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

