

CRDS-FY2012-WR-03

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

平成24年7月21日（土）開催



エグゼクティブサマリー

我が国において熱の有効利用は十分に進んでいるとは言い難い。そうした現状を背景に、独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）環境・エネルギーユニットでは、熱利用に関する研究開発の推進のあるべき姿について検討を行なっている。2012年7月21日には、検討の一環として「中低温熱需給の革新にむけた基盤技術開発ワークショップ」を開催した。本書は同ワークショップに関する記録である。

ワークショップでは、（1）わが国の熱需要の実態を明らかにし、（2）熱の損失を減少させる代替技術の研究開発の領域や課題を同定した上で、（3）それらの研究領域や課題を解決するための時間軸や体制といった推進方策等について議論すること、を目的とした。また議論においては、エネルギー供給全体への量的貢献、技術競争力、産業競争力、経済成長への貢献、などを論点として設定した。民間企業、大学、公的研究機関、行政から当該分野と関連の深い科学者、研究開発担当者、施策立案担当者など約30名が集まり、わが国における熱利用の実態や研究開発の現状、ならびに海外動向を踏まえて、今後国として推進すべき研究開発の課題やその推進方策について議論を行った。

議論の結果、以下の共通認識を得た。

■**分野**……建築、給湯、空調、自動車、化学工業、石炭利用などの分野に未だ多くの課題が残されている。

■**関連する技術項目**……断熱、蓄熱、吸脱着、熱輸送（輸送、伝熱、乾燥など）、エネルギー変換・転換、熱再生、システム化などが主な関連技術項目である。基礎研究からのアプローチとしては、熱という観点からの材料設計、理論の応用、シミュレーション、先端計測などが重要である。またこうした研究の前提となる熱需要の実態把握に関する研究も同様に重要である。

■**研究開発の方向性**……既存技術の革新と新しい技術シーズの創出の両方が必要である。まず既存技術の革新では、基礎から応用、製品化までを見据えた一貫した体制のもと特定の技術が実際に使用される環境や使用条件をも踏まえた技術開発が必要である。そして新しい技術シーズの創出では、現状において必ずしも明らかでない熱需要の実態把握やそれに基づく技術への要求仕様等の明確化、あるいは新しいコンセプトに基づき特定の熱需要と技術シーズを束ねた新技術についての提案などを互いに競わせるような場の形成が必要である。

■**技術の社会への導入、普及**……高効率だが初期導入コストが高い技術、国内ではなく海外での需要を見込んだ技術などを、どのように研究開発戦略に位置づけるかは重要な視点の一つである。研究開発に対するインセンティブ付与など規制・制度面での環境整備も重要である。

JST-CRDS 環境・エネルギーユニットでは、今回のワークショップで得られた以上の結果をもとにして、国として推進すべき熱利用に関する研究開発領域・課題やその推進方策について引き続き検討を行なう予定である。

目 次

エグゼクティブサマリー

1. ワークショップ開催趣旨	1
1.1 背景	1
1.2 目的	1
1.3 概要	1
1.4 趣旨説明抜粋	2
2. セッション1	5
2.1 「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」.....	5
2.2 「自動車に求められる熱利用技術」.....	11
2.3 「空調・給湯における熱利用コア技術」.....	17
2.4 「高効率小型分散発電システムについて」.....	23
2.5 「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」.....	27
2.6 「石炭利用における熱関連技術の開発」.....	33
2.7 「セッション1に関する質疑応答」	40
3. セッション2	43
3.1 「断熱」.....	43
3.2 「新吸着材 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」	50
3.3 「蓄熱ー化学蓄熱技術の展望ー」.....	57
3.4 「熱伝導と新材料」.....	63
3.5 「顕熱熱交換」.....	71
3.6 「気液相変化伝熱と中低温熱利用技術」.....	78
4. セッション3	85
5. まとめ	95
6. 付録	97
付録1 開催概要・プログラム.....	97
付録2 参加者名簿（事前登録分、敬称略）	99

1. ワークショップ開催趣旨

1.1 背景

JST 研究開発戦略センターでは、5つの技術専門ユニットがそれぞれ担当の科学技術分野の現状を広く俯瞰し、それに基づき今後国として推進すべき研究開発領域や課題、あるいはその推進方策等について検討を行っている。検討結果は提言として関連府省などへ発信し、JST 基礎研究事業における研究開発領域の設定や政府の各種施策の策定などに活用されている。

技術専門ユニットの1つである環境・エネルギーユニットでは、現在エネルギー分野を中心とした研究開発の俯瞰を実施している。また俯瞰の過程で同定されたいくつかの重要課題については個別の検討も行っている。現在検討中の課題の1つは「中低温熱高効率利用のための基盤技術開発」である。

わが国において熱の有効利用は十分に進んでいるとは言い難い。例えば、業務や家庭といった民生部門のエネルギー消費の過半は暖房と給湯における低温の熱利用であるが、その8割以上が直接燃焼により賄われており、大きな不可逆損失が発生している。また産業部門においても、その多くは乾燥や殺菌など150度程度以下の中低温熱需要である。これらの中低温熱需要における利用効率の抜本的な向上を図るためには、まずは社会の中での熱需要の実態を把握して損失発生プロセスを明確にした上で、それを最小限のエネルギー投入で賄うための代替技術の研究開発を戦略的に推進する必要がある。

1.2 目的

本ワークショップでは、(1) わが国の熱需要の実態を明らかにし、(2) 熱の損失を減少させる代替技術の研究開発の領域や課題を同定した上で、(3) それらの研究領域や課題を解決するための時間軸や体制といった推進方策等について議論することを目的とする。

1.3 概要

【日時】

平成24年7月21日(土) 9:30～18:00

【場所】

JST 東京本部別館 2階セミナー室

【主催】

JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット

【プログラム基本構成】

(1) セッション1

熱の有効利用の重要性や熱利用技術の必要性など、わが国の熱需給の実態について話題提供いただく。

(2) セッション2

熱の不可逆的な損失を減少させる代替技術などに関する研究開発の現状、課題について話題提供いただく。

(3) セッション3

国として今後取り組むべき熱利用に関する研究開発課題とその推進方策について、セッション1、2の話題提供も踏まえて広く議論いただく。

1.4 趣旨説明抜粋

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）

過去を振り返ると、1980～90年代は大型の科学研究費や、経産省のサンシャイン、ムーンライト計画など大型の国家プロジェクトが走り、しかもそれはエネルギーという言葉で括られていたため、いろいろな分野の科学者、技術者のネットワークを生み出した。そういう中で、若い研究者も横断的な領域で育成された時期があった。最近はその少し欠けているのではないかという認識がある。

過去10～15年の科学技術基本計画は科学技術分野で駆動してきたので、分野毎の科学は進展したが、具体的な成果が社会に還元されていないのではないかという指摘がある。

我々は国際比較を専門家、識者の方々の助けを借りて実施しているが、少し陰りがあるとはいえ依然として日本の優位性はあると認識している。産業競争力も、やや心配するところはあるが、まだまだ良い位置に在ると言える。

分野ごとには良くなったがなかなか社会還元ができていないということについて、政府のイノベーション戦略協議会でも同様な認識がされていると感じた。

何か新しい物ができて社会へ出てくるのは、産業とか社会からよく見える部分である。しかし、そういう新しい製品やシステムが出てくるためには膨大な基礎あるいは応用開発研究の成果があると思う。社会からはこの部分がなかなか見えないので誤解も多いが、そこには膨大で地道な研究の努力があることが、現代技術の実態と言える。

分析的な研究もあればごく基礎的な研究もあり、さらに目的に沿ってある種の形にしていくような応用開発に至るまでの流れがあるが、問題はここの連結がうまくつながっていないことである。さらに、仮に新しい製品ができて市場に入っていけるかどうかは別問題である。科学研究費、JSTの研究費、あるいは各省庁の研究開発事業のようなものが水面下の部分を支えているが、本当にひとつのシナリオとしてつながっているかどうかは問題である。

さらに大事なものは政府である。省庁がばらばらで、全体をコーディネートする司令塔として機能していないのではないか。本来連携して協力してやるべきところが機能していない状況にある。

最近、環境・エネルギーユニットが主催する「環境・エネルギー研究戦略会議」では、国民の期待に応えるためのテーマの同定、つまりプライオリティ・セッティングを幾つかの指標を重視しながら進めてはどうかということを議論している。ただしこれも方法論の一つに過ぎない。

科学的根拠を持って課題を抽出するという一つの例として、エネルギーフローを使った検討がありうる。日本の1次エネルギーのインプットから発電、非発電、それらがさらに産業や交通輸送関係、民生等へと、エネルギーがどのように使われていくかという流れが表されている。このチャートから抽出される本質的な課題として、低温の熱需要効率をどうやって向上させるか、化学産業の熱ロスをどうするか、あるいは自動車の熱効率向上をどう解決するかなどが挙げられる。

熱エネルギー技術には何も課題がないと考える方もいるが、ここでは改めて先端的な知識を集約し、あるいは足りない部分を拡充しながら本質的な熱の問題に取り組むための作業を実施している。そういう意味で、本日は産業界からは建築、自動車、材料と幅広い方々にお集まりいただき、基礎科学の分野からも材料や熱などの方々にお集まりいただいている。

最近の政策レベルの動きとして、文科省と経産省が昨年秋に合同の検討会を設置したことを紹介したい。今までは総合科学技術会議が投げたメッセージに対して各省が個別に反応して研究開発事業がスタートするということが多かったので、現場の研究者から見るとほとんどコーディネーションがない状態に見えた。今回は両省が協力して、一気通貫で基礎から応用開発までつなげることを意識して、テーマ選定から研究開発のスキームまで検討いただけると期待している。非常に画期的な取組みである。現在、有力なテーマとして挙げられているのは二次電池、エネルギーキャリア、熱エネルギーである。本日のワークショップはこの3番目のテーマに関係している。ただ、ここではこれをそれほど意識せず、あくまでも科学的、客観的な議論を重ね、こうした科学技術分野を国として進めるべきかどうか、あるいは進めるべきテーマは何なのかを、議論していきたい。

2. セッション1

「革新的熱需給のための課題」

2.1 「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）

中低温熱需要のデータベースは、きちんとしたものが未だない。そこで今回は中低温熱需要の実態についてまず紹介し、その上で建築物における省エネルギー対策の現状を話したい。

「業務その他」（業務ビル）と「家庭」（住宅）は、「産業」や「運輸」と比べてCO₂排出量の増加が大きい。自動車は少しずつ減り始めている一方、建築は増え続けている。IPCC第4次報告書には2030年時点で比較的経済妥当性の高いCO₂排出削減ポテンシャルが記載されているが（CO₂を1トン減らすのに要する費用、アメリカドル換算）、そこでは建築分野の削減可能性が大きいという。

省エネルギー基準に基づき、日本を寒冷地域、準寒冷地域（中部の内陸も）、温暖地域、蒸暑地域の4つに分けることが出来る。大部分は温暖地域に含まれるが、南九州や南四国や沖縄は蒸暑地域になる。逆に準寒冷地域は北東北から、中部山岳地帯や岐阜県などに及ぶ。北海道はさらに寒いという状況。こういう気象条件の違いが、住宅では特に熱需要に関係してくる。

そこで住宅における暖冷房・給湯のための熱需要を調べてみると、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 人のいる部屋でいる時間帯だけ使用）などによって大幅に変わることが分かっている。特に、気象条件のような地域性が住宅では重要な要因になる。

例えば、比較的熱需要が大きい地域の戸建住宅の標準的な（省エネの取り組みなし）一次エネルギー消費量を見ると、準寒冷地域と温暖地域では寒冷度が随分違うため暖房需要の大きさ、暖房と給湯需要の比率が異なる。省エネルギー戦略を考える時はそうした地域性を考慮することが不可欠である。

人口が多い温暖地域（例：関東）では暖房需要が非常に小さい。給湯は倍くらいになる。極端な場合だと那覇の住宅では暖房需要がほとんどなく、冷房や給湯が主になる。

住宅に対する実効性ある省エネルギー手法は15種ほどある（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、コージェネレーションなど）。それぞれ関係するエネルギー用途があり、設計の内容に応じてエネルギーを一定の幅で削減できる。表中の数字は実証実験や現場の測定、理論的計算などにより算出された値でそれなりに信用できる値となっている。中低温熱需要のための新技術の開発を行おうという場合、ここで挙げられている要素技術と比較して性能を評価し、それに基づき投資先を決めていくことが重要。これからの省エネルギーは、住宅もビルもそうだが、初期コストの増加分をランニングコストの削減分によって何年で回収できるかが最も重要な判断基準になる。

業務建築では、暖冷房、給湯、洗濯消毒の熱需要がある。気象条件の影響は住宅に比べると少なく、むしろ営業時間、日数などで随分変わる。一般的に業務用建築は暖房よりも冷房の熱需要が圧倒的に大きい（寒冷地でも）。換気量も効いてくるので気象条件と外皮の性能等が影響要因となる。温熱需要は特定用途の建物（ホテル、病院など）に偏っているため地域冷暖房やコージェネレーションシステムを考えるとときに悩みの種になる。

熱需要の推定には実測データが豊富であればいいが、現状では非常に限られる。代わりに負荷計算（理論計算による推定）がこれからは有望ではないか。ただし検証のために実測データとの比較は結局必要になる。最近、比較的大規模な建物を中心にエネルギーマネジメントシステムが入っているが、これも残念ながら我々が欲しい用途別のデータがない。以上より熱需要の推定において誤差は不可避である。したがって想定値を増減させてシステム全体の効率への影響を事前に検討することが必要。例えば、国の施策で中低温の熱需要をまかなうための新しい技術開発をするならば、その技術がどの程度有用かをこのような検討を通じて確認する必要がある。

事務所ビルのエネルギー消費量は主に熱源と熱搬送で、熱源もほとんどが冷熱需要。熱搬送のポンプや送風機のエネルギー消費量はばかにできない量だが、わからないことが多い。エネルギー消費はほとんど在来技術で発生していると思うが、それも不明。

業務用ビルには実に様々な用途の建物・部屋が含まれ、熱・エネルギー需要は複雑である。それらは空調・照明時間、発熱、換気量に関する条件が随分違う（例えばホテルでも、客室と宴会場では随分違う）ため、エネルギー消費量の計算や省エネ対策も変わるだろう。業務用ビルでは、気象条件と同程度かそれ以上に建物や室使用条件の影響が大きい。

省エネルギー対策について、暖房では次の4点に大別される。まずは①外皮の断熱。ただし業務用ビルでは冷房需要が非常に大きいため断熱の効果は少なく、むしろ内部発熱の削減と日射遮蔽性能の向上がこれに含まれる。つぎに②換気量のデマンド制御と、③日射熱取得。これらは内部発熱の小さい住宅や学校などの用途の建物で有用である。最後に④熱搬送系設備の動力エネルギーの低減。これは大きな課題であり、大きなビルの空調の熱搬送系は半分ぐらいは期待どおり動いていないのが現状。設計・施工しても、その後の調整がビジネスの関係でできないためで、何らかの対策を要する。

冷房では、①日射遮蔽、②内部発熱の低減、③通風、④動力エネルギーの低減、が重要。

給湯は、まずは最も経済妥当性が高いと言われる①節湯器具。シャワーの手もとスイッチや適温を得やすい湯水混合栓に換えるだけでも給湯消費量は10～15%減らせると言われている。つぎに②配管や浴槽の断熱、口径の小さな配管の使用。これにより残り湯（配管の中に残るお湯）の量を少なくすることができる。そして③太陽熱給湯システムの採用。コスト妥当性が高いにも関わらず、残念ながら廃れてしまった。なぜ出荷台数や普及率が下がったのかを検証することが、今後の技術開発に必要。

わが国の住宅・建築の省エネルギー基準や設計方法が変わりつつある。従来はエネルギー消費量の名義的な負荷に対する評価（取り決めに基づく評価）が多かったが、実証的な裏づけをもって評価する方向に向かっている。

技術者、研究者、出資者（ファンディングエージェンシー）、マスコミには新しい技術を開発すれば問題が解決するというような見方が多い。しかし、2050年に国がCO₂排出量を1990年比で80%に減らそうという中で、当面は従来技術や製品がエネルギーを使って我々の暮らしを支えているので、従来技術の問題点を改良していくことは非常に大きな省エネルギー、省CO₂のポテンシャルがある。

国際エネルギー機関（IEA）では、「低温熱源の活用に関する技術開発」（Annex 49）の Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme が行われている。使われていない炭坑の水やお湯を地域の暖房や冷房に利用するといったオランダの事例がある。

まとめると、（ここでは省略したが）寒冷地ほど安定した熱需要が存在する。また実効性のある省エネ手法も既に存在するので、面的な中低温排熱の利用を考える際には費用対効果で比較する必要がある。

IST研究開発戦略センター 熱需給の革新に向けた基盤技術開発ワークショップ
 (2012年7月21日(土)10:00-10:20)

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

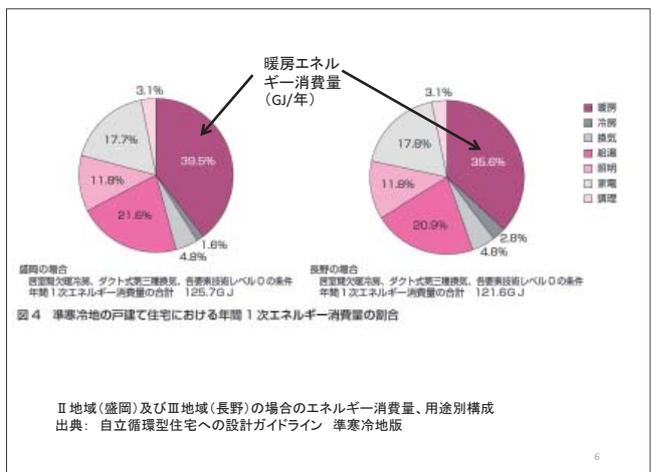
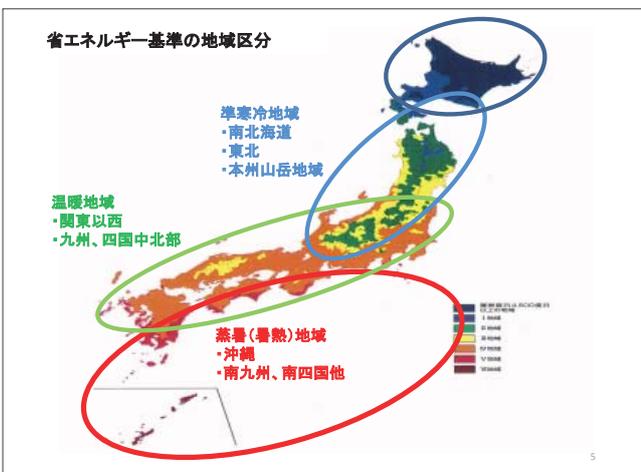
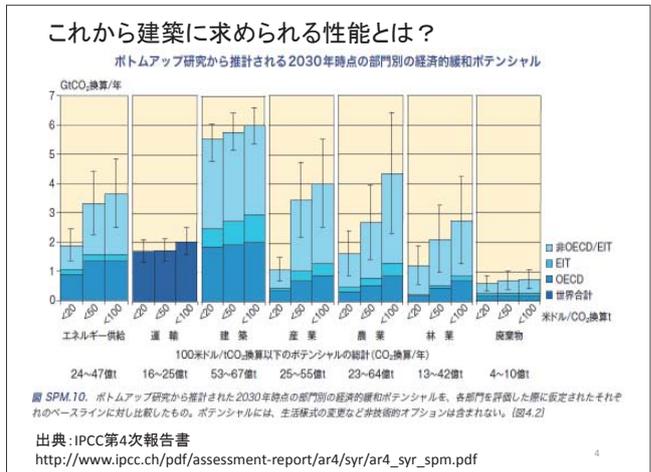
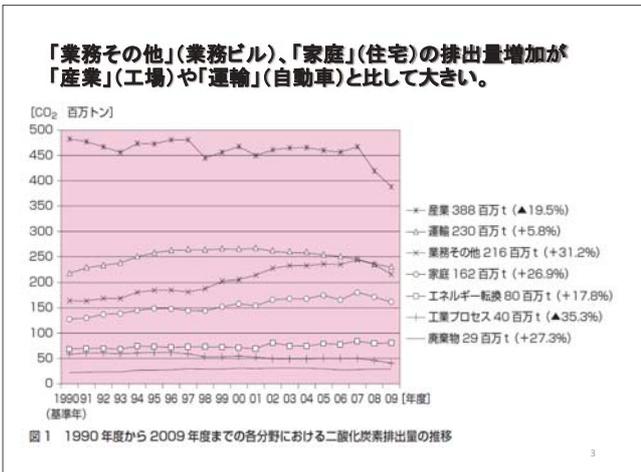
澤地孝男
 (独)建築研究所
 環境研究グループ長

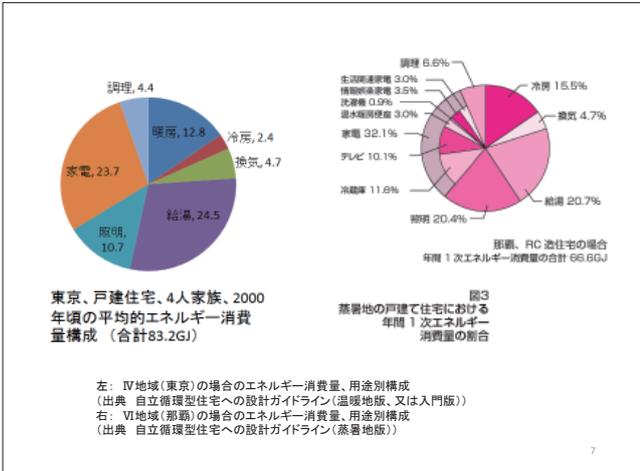
1

内容

- 建築物における熱需要のあらまし
 - 住宅と業務建築
 - 地域による差
- 熱需要に係る省エネルギー対策のあらまし
 - 暖房
 - 冷房
 - 給湯
- 低温熱源の活用に関する技術開発(IEAの例)

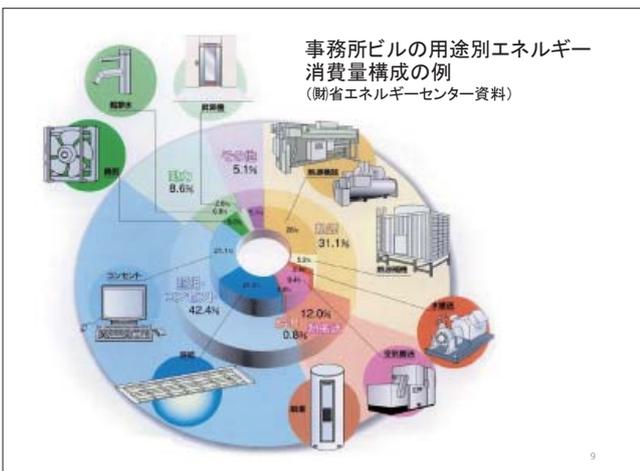
2





住宅の実効性のある省エネルギー手法の一覧(準寒冷地のケース)

省エネ技術	削減対象のエネルギー用途	省エネルギー効果とレベル
自然エネルギー活用技術	自然風の利用・制御	冷房 7~25%削減 (レベル1~3)
	昼光利用	照明 2~10%削減 (レベル1~3)
	太陽光発電	電力 29.8GJ~39.7GJ削減 (レベル1~2)
	日射熱の利用	暖房 3~8%削減 (レベル1~3)
	層間空気循環式ノーラシステム	暖房・給湯・換気 10~20%削減 (レベル1~3)
建物外皮の熱遮蔽技術	太陽熱遮断	10~50%以上削減 (レベル1~5)
	断熱外皮計画	暖房 25~60%削減 (レベル1~3)
	日射遮蔽手法	冷房 3~60%削減 (レベル1~4)
省エネルギー設備技術	暖冷房設備計画	暖房 10~30%削減 (レベル1~3)
	暖房設備計画	冷房 10~30%削減 (レベル1~3)
	給湯設備計画	ダクト式(一機) 15~55%削減 (レベル1~4)
	照明設備計画	ダクト式(二、三機、ハイブリッド) 40~75%削減 (レベル1~3)
	給湯設備計画	壁掛け式換気 20%削減 (レベル1)
	照明設備計画	給湯 10~30%以上削減 (レベル1~3)
	高効率家電機器の導入	照明 40~50%削減 (レベル1~3)
	コージェネレーションシステムの導入	空調 20~40%削減 (レベル1~2)
水と生ゴミの処理と効率的利用	全体 5~11%削減 (レベル1~3)	
	水	節水型機器 10~40%削減 (レベル1~2)



新省エネ基準での室分類案

事務所等 : 11 室用途
 ホテル等 : 18 室用途
 病院等 : 13 室用途
 物販店舗等 : 5 室用途
 学校等 : 9 室用途
 飲食店等 : 8 室用途
 集会所等 : 19 室用途
 合計 : 83 室用途

ホテル及び病院の室用途分類案

ホテル等		病院等	
室番号	室名	室番号	室名
1	居室	1	検査
2	ロビー(客室部)	2	手術室(手術室)
3	廊下(客室部)	3	手術(手術室)
4	宴会室(接客部)	4	診察室(外来診療)
5	宴会室(接客部)	5	待合室、ロビー(外来診療)
6	宴会室(接客部)	6	検査室(中央診療)
7	ロビー(宴会部)	7	病室(病室)
8	レストラン	8	手術室(中央診療)
9	ラウンジ(宴会)	9	廊下(中央診療)
10	ラウンジ(宴会)	10	事務室
11	廊下	11	ICU
12	廊下(事務部)	12	検査、検査
13	廊下(事務部)	13	放射線部
14	事務室(24時間稼働)		
15	従業員食堂		
16	廊下		
17	廊下(宴会部)		
18	廊下(宴会部)		

「業務ビル」には実に様々な用途の建物が含まれ、それらは、空調・照明時間、内部発熱(機器+在室者)、換気量、に関する条件が異なり、エネルギー消費量の計算や省エネ対策も異なってくる可能性が大きい。「業務ビル」では、気象条件と同程度かそれ以上に建物・室使用条件の影響が大きい可能性がある。

わが国の住宅・建築省エネルギー基準の方向性(1)

住宅と建築に共通して:
 (従前) 外皮の評価(断熱性・日射遮蔽性)が主であり、設備機器については効率(名義的なエネルギー消費量の名義的な負荷に対する比率)による評価が存在した。

名義的: 検証裏付けが不十分で、実効性の担保が弱い、の意味。

(今後) 暖冷房(空調)、照明、給湯、換気、昇降機といった用途毎のエネルギー消費量(一次換算)を合算したものにより評価。

・期間暖冷房負荷
 ・年間熱負荷係数
 ・熱貫流率
 ・熱抵抗

暖冷房E+照明E+給湯E+換気E+昇降機E ≤ Σ(各用途のE基準値)

わが国の住宅・建築省エネルギー基準の方向性(2)

➢ 建物・室の使用条件を考慮した評価

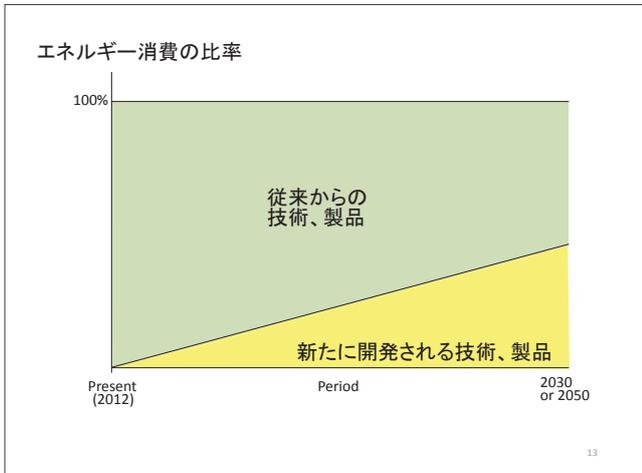
- ・使用に係るカレンダー、室使用時間帯、在室密度
- ・内部発熱、換気量、給湯消費量、照度

➢ 設備機器の実働エネルギー効率を考慮した評価

- ・設備機器の容量設計の良し悪しを評価可能とする
- ・特に中央式空調における調整の良し悪し、運用方法の整備
- ・建物レベルでの設計法/評価法と、設備機器の規格との連携

➢ 国によるエネルギー計算プログラムの提供

- ・設計者や施主の手間を削減
- ・評価の透明性を確保



低温熱源の活用に関する技術開発 (IEAの例)

„Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities“

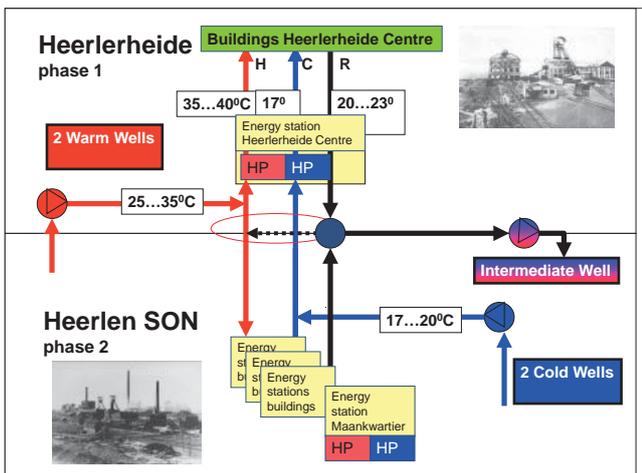
Heating plant CHP

Industry Waste heat

Annex 49
Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities

International Energy Agency
Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme

14



まとめ

- 民生部門(業務用建築と住宅)における熱需要を概観した。
- 寒冷地ほど安定した熱需要が存在する(長期間、比較的大きなもの)。
- 暖冷房、給湯を含め各用途のエネルギー消費に対しては、建物単体レベルでの実効性ある省エネ手法もあるため、面的な対策の検討においては、特に費用対効果の点で比較検討する必要がある。

16

2.2 「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）

「自動車に求められる熱利用技術」について、①環境・エネルギー戦略と自動車開発、②ハイブリッド車の省動力化への取組み（熱マネジメント、熱デバイス）、③熱デバイス開発状況とニーズ紹介、という視点で話を進める。

なぜ自動車の熱マネジメントが必要なのか。自動車分野には、運輸部門のCO₂排出割合への関与の大きさや生産台数・保有台数の増加傾向など、環境に対するインパクトが依然大きいことから環境負荷軽減を含めた燃費向上、効率向上のための技術革新が求められている。また輸送用燃料の「well-to-wheel 評価」を見るとハイブリッド自動車や燃料電池自動車はより高効率になるポテンシャルを持っていることが分かる。こうしたことを背景に「サステナブル・モビリティ」への取組みを進めており、そのなかで燃費や熱効率向上に向けた熱マネジメントの重要性が高まっている。

どういうことかと言うと、まずエネルギー効率向上への要求がある。ハイブリッド車の例で見ると燃焼エネルギーのうち走行に使われるのは約23%、残りの77%は各種損失として排出され、そのほとんどが熱としての排出である。この熱をうまくバランスさせて最適化することがエネルギー効率の向上につながると考えている。二つめには実用燃費改善への要求がある。首都圏では走行条件（渋滞）により燃費が悪化するが、各地域でも夏季の冷房ニーズ、冬季の暖房や暖機ニーズが燃費に影響を及ぼしている。こうした熱をうまく管理し、実用燃費を上げていく取組みを進めている。

自動車の熱マネジメントをどのように考えるか。定常状態（暖機が完了し車両が十分に暖まった状態）のエネルギー収支では車両の仕事量が25%であるのに対して排気熱が26%、冷却水を介した排気が35%と、おおよそ6～7割が熱として排出される。ところが冬の寒い朝など低温始動時にはエンジン、触媒、トランスアクスル、電池といった各要素にとっての熱源が不足している。また各要素は動作に適した温度域があるため、それらに対応した暖機をしなければならない。さらに暖機が完了すると今度は逆に冷却が必要になる。これらを踏まえた時間と空間を超えた最適化と、全体としての熱需要削減が必要になる。電池、エンジン、触媒、空調などを対象に、余っている高温の熱を一時的に輸送したり、蓄えたり、使いやすなものに変換したり、時間をずらして低温の時に使うというような全体としてのバランスをとることが効率を上げるために必要である。これらを実現する新規の熱デバイスが必要である。

「輸送」について。冬季の低温始動時では、暖機熱ロス（ヒータ放熱、排気ガス損失）が大きく燃費を悪化させている。そこで排気ガスの高温熱を回収して低温の水（エンジン）に渡してエアコンなどに活用する取組みを行っている。ここでは単相、二相も含めて様々な作動域で動く熱交換器や、高沸点で高熱容量の媒体にブレークスルーが求められている。

「蓄熱」について。蓄熱の形態で見ると顕熱、潜熱、化学蓄熱の順にエネルギー密度は高くなり熱の保持時間は長くなる。しかし反対にシステムは複雑化するというデメリットもある。自動車には、非常にコンパクトな空間に、軽くて高熱容量のデバイスを効率よく載せたい、という難しいニーズがある。低コストも求められるためより難しくなっていく。

顕熱の例としては、ハイブリッド車に搭載したお湯のタンク（魔法瓶）がある。エンジンの冷却水をためておき、翌日、エンジンに戻すことでエミッション、排気規制をクリアするのに非常に有効であった事例である。ただしこのような顕熱の蓄熱に関しても、高沸点で高熱容量の媒体が必要である。水はすぐれた媒体だが、まだ不満もあるので、より優れた媒体が求められている。さらにこうした部品を構成するための断熱技術、構造技術の革新も必要と考えている。

潜熱の例としては、アメリカの研究機関の事例がある。排気触媒の碍子筒にフェーズ・チェンジ・マテリアル（PCM）をパッキングし、潜熱、融解熱を使って停車後しばらく温度環境を保持し、再始動時のエミッションを改善するという事例である。高い熱密度で高温利用できるような PCM 材料の開発、要求温度域とのマッチングが課題である。

化学蓄熱も、資料には記載していないが原料、構造、反応器、システムに関する取組みが必要で、特に材料開発が重要である。たとえば水酸化カルシウムの水和反応は通常、粉体化による耐久劣化が問題となるが、材料調製技術により改善することができる。こうした材料・調製プロセスの技術革新が必要である。短時間に集中して高温の熱を放出する、あるいは長時間同じ熱を放出し続けるといった制御技術も必要である。最終的には材料から反応器や熱交換器、伝熱、システム制御まですべてができて初めて応用研究が完了し製品化に向かうことになる。基礎研究における材料と応用研究、構造制御、この先の部分まで含めた一貫した研究が必要である。

「変換」について。自動車から出る多くの排熱を利用し、ヒートポンプによって冷熱や温熱を生成することができる。吸着式ヒートポンプが非常に有効であると考えている。ヨーロッパでの研究事例を紹介したが、体格の大きさ（重量）や効率などに課題が山積している。現状では吸着材料を含む高熱密度化、新規媒体、材料、システムといった基礎研究のもとに大きなブレークスルーを果たさなければ実際には搭載利用できないと考えている。

自動車の熱マネージメントは国際的な動きとしても見られる。ここ数年で国際会議が多数開催されており、世界的にも研究者が注力している研究領域となっている。米国 DOE では ORNL（Oak Ridge National Laboratory）が主体となりトヨタのハイブリッド車を分解・評価するなどして 2010 年にベンチマークレポートを作成している。同様にイギリスでは LCVTP（Low Carbon Vehicle Technology Project）プロジェクトから 2012 年にレポートが出ている。日産や GM の電気自動車を分解・評価している。このように、世界的な開発競争が激化しているだけでなく、技術・商品力の優位性を確保するため皆が必死に取り組んでいる状況が続いている。世界と競争していく上では基礎研究を含め、開発領域全体で非常に頑張らなければいけない。

1

12/07/21 中低温熱需給の革新に向けた基盤技術開発ワークショップ

自動車に求められる熱利用技術

(株)豊田中央研究所
 機械システム研究部 熱制御研究室
 志満津 孝

- ① 環境・エネルギー戦略と自動車開発
- ② ハイブリッド車の省動力化への取組み
 - ・熱マネージメント
 - ・熱デバイス
- ③ 熱デバイス開発状況とニーズ紹介

3

CO₂排出割合と世界の自動車数

分野別エネルギー起源CO₂排出量^{*1}

世界の保有台数(億台)^{*2}

世界の生産台数(万台)^{*3}

^{*1} 経済産業省2010年度エネルギー需給実績(運輸)データ
^{*2} 出展: 日本自動車工業会
^{*3} 出展: 2011年度版日本自動車工業

4

輸送用燃料のWell-to-Wheel 評価

日本における輸送用燃料製造(Well-to-Tank)を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書(トヨタ自動車㈱, みずほ情報総研)

出展: <http://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2004/wtwg041130.html>

5

トヨタ「サステイナブル・モビリティ」への取り組み

出展: <http://www.toyota.co.jp/jp/tech/hybrid/future/index.html>

5

トヨタ「サステイナブル・モビリティ」への取り組み

HV, PHV, FCHV, EVの進化
 燃費・環境性能向上
 エネルギー多様化
 ハイブリッド技術

燃費・熱効率向上に向けた
 車両熱マネージメントの重要性が高まる
 エネルギー

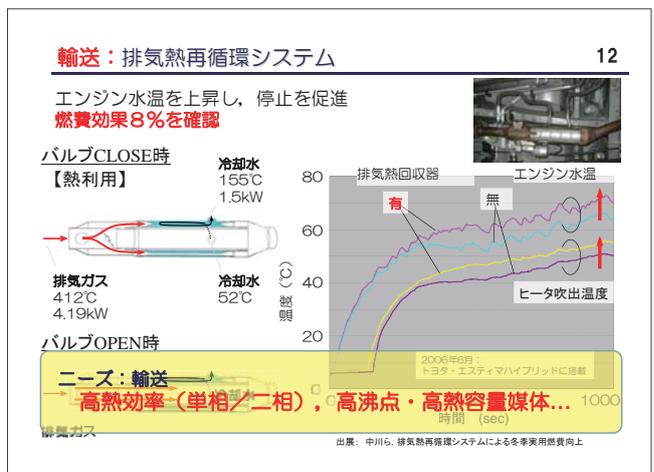
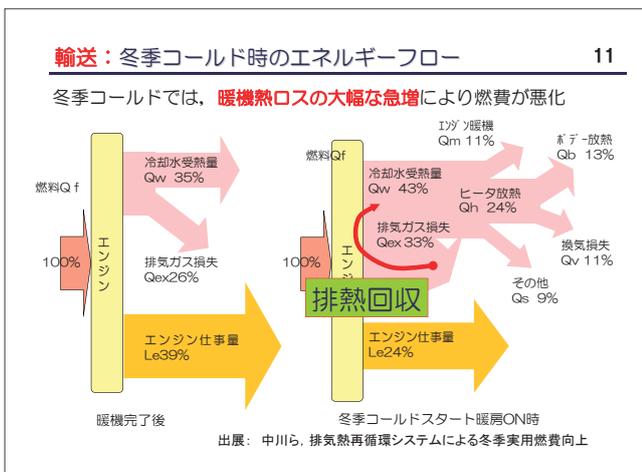
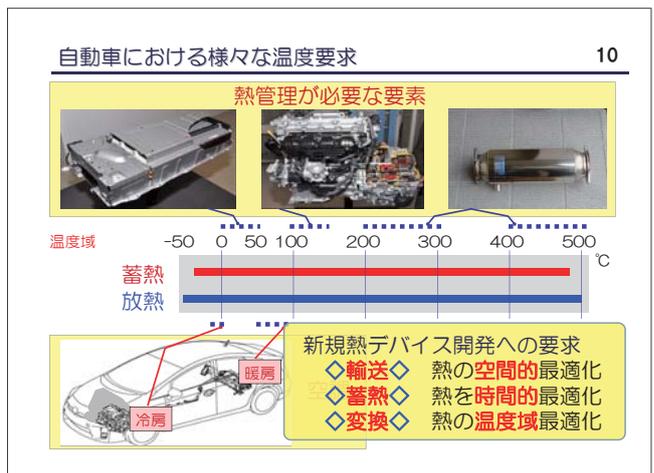
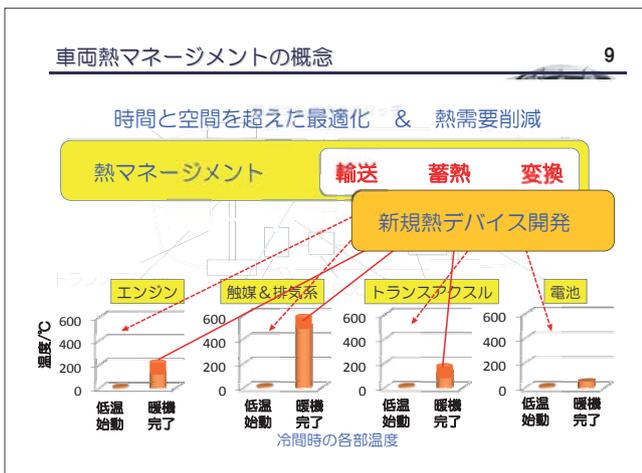
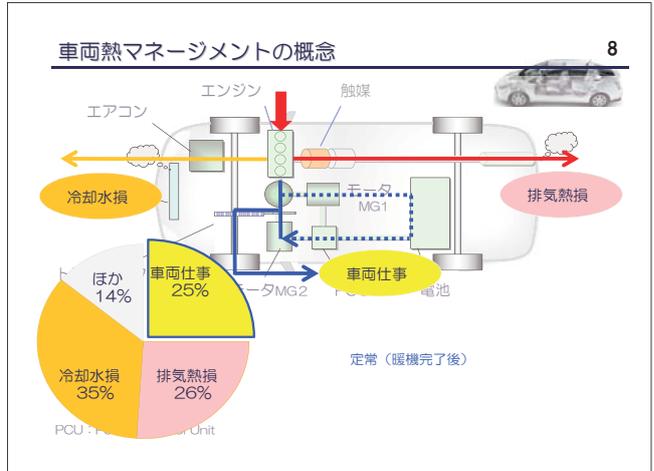
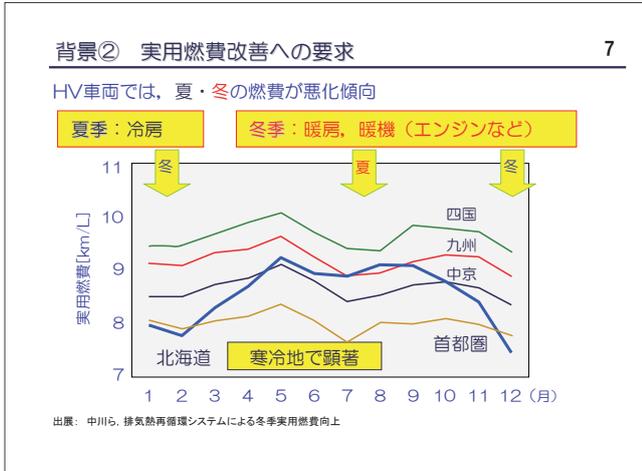
出展: <http://www.toyota.co.jp/jp/tech/hybrid/future/index.html>

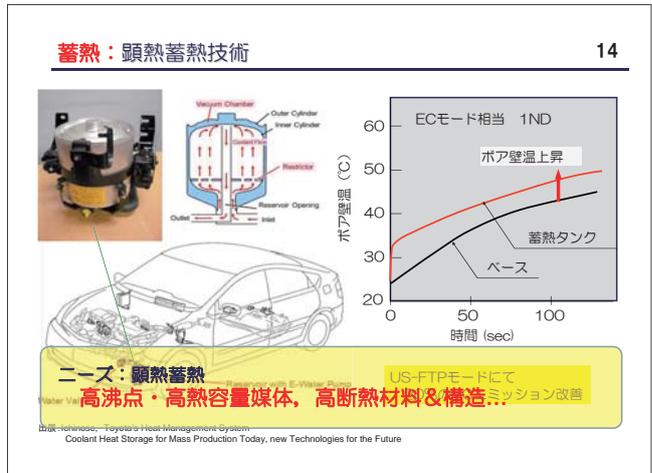
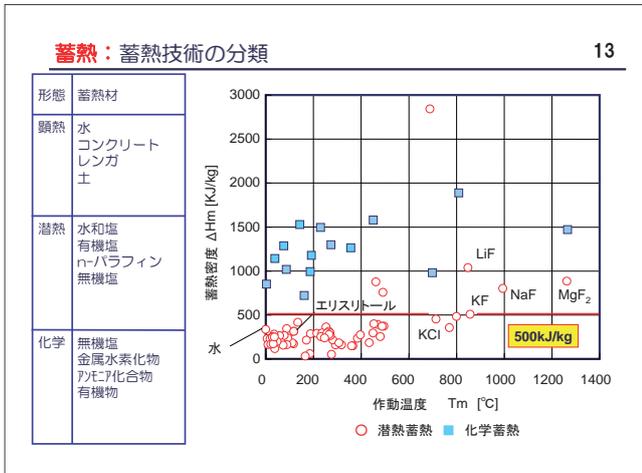
6

背景① エネルギー効率向上への要求

車両のエネルギー効率向上には、熱バランスの最適化が必須。

各種損失 77%
 エネルギー効率 23%
 車内仕事量
 プリウス/2nd





LCVTPベンチマークレポート (2012/6) 24

Thermal Benchmarking of the Nissan Leaf and Chevrolet Volt
LCVTP **Low Carbon Vehicle Technology Project**
Sponsor: Advance West Midlands, European Regional Development Fund
Participants: Company: Jaguar Land Rover, TATA Motor European Technical Centre
Engineering: MIRA LTD, Zytec, Ricardo, WMG
Universities: Warwick, Coventry

Two vehicles studied in detail to better understand the current level of EV/HEV
Nissan Leaf and **Chevrolet Volt**

Engineering activities

- Aerodynamic
- Braking
- **Thermal**
 - Body Leakage
 - Installed Airflows
 - HMI
 - Subjective Appraisals
- Climatic Wind Tunnel
 - Cooling system requirements
 - HVAC
- Ride & handling



世界的な開発競争激化
高効率 & グリーン

出版: 2nd international conference Thermal Management for EV/HEV

2.3 「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）

家庭用と業務用のエネルギー需要はともに50%近くが空調・給湯分野で消費される。そのため同分野での化石燃料の低減、省エネルギー、再生可能エネルギー導入、さらにはスマート化が重要と言われている。

空調・給湯分野における代表的な機器は次の通り。空調分野ではエアコンでヒートポンプの技術、ビル等では吸収式（主にガスの熱で動かすヒートポンプ）が使われている。エアコンは通常、電気で動かすが、駆動にガスエンジンをつけたガスエンジンヒートポンプも比較的使われている。給湯分野ではガス給湯機が大変使われているが、最近エコキュート（電気で動くヒートポンプの技術）が広まっている。燃料電池も徐々に市場に広まりつつある。太陽熱集熱器はこれからの技術だと思うが、今はあまり普及していない。

それぞれの機器を効率とシェアで整理した。空調では上記の全てにヒートポンプの技術が使われているが、いずれも効率はほとんど限界値に達している。ただしシェアにはばらつきがある。給湯も究極の限界値は1だが、ガス給湯機は0.95まで来ているのでほとんど限界。電動式のヒートポンプを使ったエコキュートも、まだ出てきたばかりだが、もともとの技術があるため限界に近いと言われている。太陽熱集熱器は現時点で限界の議論をするのは問題だと思うが、これを多用すれば非常に良いことは間違いない。唯一、燃料電池はまだ発展途上にあると考えている。

空調・給湯分野ではヒートポンプ技術がキーテクノロジーとして広く使われ、日本の技術は世界でも最高性能を誇り、ほとんどの機械で性能は限界に到達している。特にルームエアコンなどでは年間の性能（Annual Performance Factor, APF）が今は7.0で、8.0程度が限界と言われる。したがって高効率化に関してはやることがないと考えている専門家もいるが、まだまだやることがいくらかもあると考えている。

将来展望のためには、今後、この分野を取り巻くエネルギーのシナリオをしておく必要がある。ZEB（Zero Energy Building）、スマート化、エネルギーのベストミックス、BEMS（Building Energy Management System）、HEMS（Home Energy Management System）など。再生可能エネルギーの導入も進むだろう。デマンドレスポンスという取り組みもある。ユーザーのレベルでは省エネルギー・節電の意識が3.11以降高まっている。こうした状況を見ると、空調・給湯負荷は今後さらに低減すると考えられる。しかしながら、一方では非常に暑い日や寒い日の利用もあるため、最大負荷には耐えないといけない。これら双方を考慮して今後どのような機器が必要かを考えなければいけない。今までのように比較的安定した条件下で空調したり給湯したりするという時代ではなくなっていくと考えられる。

ヒートポンプの技術はこれからも空調・給湯分野の中心になる。燃料電池も増えているので、本発表でも多少言及したい。ガスの給湯機に関しては、もはや技術ではなくコストダウンだけと思われるので本発表では特に説明しない。

ヒートポンプ技術の今後の開発軸として、まず①機器単体の高効率化が必要。また、未利用エネルギーや再生可能エネルギーを利用しながらより高効率化できるので、②トータルシ

ステム化も重要。蓄熱技術を使えば③負荷の平準化ができ、ヒートポンプ機器自身の動かし方(管理技術)と並んで重要になる。ヒートポンプの有効活用のためには④適用範囲の拡大(特に高温側にも)重要。その他、⑤低コスト化や⑥国際展開もある(日本だけでは需要が少ない)。フロンを使う問題もあり、⑦低GWP(Global Warming Potential)化は引き続き重要。

ヒートポンプの開発はもともと、サイクルの高効率化が主だった(理論効率を上げることと、膨張や圧縮機のエクセルギーのロスをどうなくすか)。ところが実際に動かすところを見ると、とまったり動いたりと色々な運転条件の中ではかなり性能が低下していることがわかってきた(APFで7.0だが、実測するとその半分の3~4でしか動いていない)。負荷が非常に低くなったり、運転の変動が大きくなってきたりするとハンチングを起こし、インバータでは動かなくなるといった問題が生じている。サイクル(定常)の性能を上げる技術は日本で非常に発展したので、逆の発想で非定常の実運転をいかに容易にするかという要素開発、設計制御手法が今後は必要。またその時に大事なこととして、負荷が非常に軽くなった状態でのヒートポンプの性能を評価する方法が分かっていないという点もある。以上より、機器単体では低負荷かつ広範囲の運転条件下で運転を高効率化させるための諸課題がある。具体的には低負荷時に圧縮機の性能が落ち、オイルがうまく循環しなくなる;冷媒は二相流で流れるが、その分配がうまくいかない;低負荷でハンチングする、など。ガスエンジンヒートポンプならエンジンの性能向上や排熱の有効利用も非常に重要になる。機器単体はやることがないという風潮を非常に危惧しているが、機器単体の性能向上をきちんと行い、これからのエネルギーシナリオに合ったシステム化を進めなければいけない。機器の年間性能をきちんと評価できる高度シミュレーション技術も非常に重要であろう。

機器単体の性能を将来のエネルギーシナリオに合ったものにしていった場合、課題は再生可能エネルギーを使ったさらなる高効率化や、除湿、加湿で非常にエネルギーを使うので、そうした部分との複合化など、トータルシステム化である。また蓄熱を使った負荷の平準化も重要。例えば、夏場に氷をつくる時に効率が低減しないような凝固点が違う新しい蓄熱剤の探索(まだまだブレイクスルーが必要)が挙げられる。管理技術としてのデマンドレスポンスは作業効率が悪くならないよう慎重に行うべきである。むしろ、ユーザーの使い方は非常に多様なので、各ユーザーに合った機器の運転方法をインターネットなどを通じてアップデート(改善)できると便利。また国際展開を考えると、様々な地域の需要を満足できるような機器開発も必要。

ヒートポンプは現状では120℃を超えると非常に苦しいが、利用拡大には200℃まで作り出せることが必要で、冷媒・オイル、圧縮機、サイクルを全部考え直さないといけない。また低コスト化のためにはレアメタルを使わず、不必要な機能や材料を減らしていくことが必要。熱的な性能向上によりコンパクト化することも必要。部品を統一化してリサイクルを進めるべき。低GWP化のためには自然冷媒の使用や冷媒の漏えい防止技術、回収技術なども必要。燃料電池は、信頼性と何よりコスト低減が大事。

以上のように、次の時代に対応可能な新しい機器単体開発の考え方と、それに見合った基礎研究をきちんとやり直すことが必要。研究開発領域も短期、中期、長期それぞれで様々ある。これからの新しい時代に合ったヒートポンプを考え直すことが特に重要。

空調・給湯における熱利用コア技術

早稲田大学
 基幹理工学部 機械科学・航空学科
 先端生産システム研究所
 齋藤 潔

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

空調・給湯分野の現状

家庭用

業務用

家庭用では55%、業務用では40%が空調・給湯分野でエネルギーを消費
 この分野の化石燃料利用低減(省エネルギー、再生可能エネルギーの導入、スマート化)が必要不可欠

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

空調・給湯分野の現状

空調

●RAC: エアコン (ヒートポンプ) ●AHP: 吸収式ヒートポンプ
 ●GHP: ガスエンジンヒートポンプ

限界
 効率

燃料電池以外はほぼ効率は限界に達していると考えられている!!

給湯

●EHP: エコキュート (ヒートポンプ) ●FC: 燃料電池
 ●SC: 太陽熱集熱器 ●GH: ガス給湯機

限界
 効率

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

空調・給湯分野の現状

ヒートポンプ技術が空調・給湯分野のキーテクノロジーとなった。
 日本製は圧縮機のインバーター化等の技術革新により世界でも最高性能を誇る
 ほとんどの機器で性能はほぼ限界に到達(冷凍空調工業会:「ヒートポンプの実用性能と可能性より」
 高効率化に対してはやることはない?そう考える専門家も多い)

空調・給湯分野を取り巻くエネルギーの今後のシナリオ

- ZEB, エネルギーベストミックス, スマート化
- BEMS, HEMS(すべての機器の連携)
- 再生可能エネルギーの積極活用
- デマンドレスポンス
- 省エネ意識高まり, 節電

空調・給湯の後は・・・
空調・給湯負荷は大きく低減, 最大負荷対応も必要
 再生可能エネルギー等の導入によりこのような状況はさらに進む。
 このような状況下でいったいどのような機器が必要か?

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

技術開発の方向性(ヒートポンプ)

今後も、空調・給湯分野では、ヒートポンプが中心となる→本日の説明もこれが中心
 今後期待される燃料電池にも言及 ※ガス給湯機については言及せず

ヒートポンプの技術開発軸

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

課題(機器単体高効率化)

これまでの機器開発の方向性

→サイクルの高効率化, 年間性能APFを向上させる開発
 キーワード: 高・低温側温度差の減少による理論効率向上,
 エネルギーロス低減

- 熱交換器伝熱性能向上, 未利用エネルギー活用, 潜熱分離による高・低温側温度差の低減
- 圧縮機ロス低減, 膨張ロス回収, 熱交換器圧損低減

非定常実運転で性能が大きく悪化

→ヒートポンプが苦手な低負荷運転多発
 キーワード: 高気密・高断熱, 省エネ意識の高まり, 過剰設計

- 低負荷時にハンチング等の発生で大きく性能低下
- 低負荷時に高効率となる高低の温度差を低減した運転不能(オイル循環等により)
- 低負荷ではインバーター運転できない

- 非定常実運転を容易とする要素開発, 設計・制御手法のような逆転発想必要
- このような性能評価を評価する方法の確立

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

課題(機器単体高効率化)

非常定常運転(低負荷、広範囲な運転条件)の高効率化が主たる課題

- 低負荷時に強い**圧縮機**が必要(低負荷運転が得意ではないスクロール圧縮機でよいのか?)
- 低負荷時**オイルの循環**が容易となる機構が必要(低負荷時に高圧保持制御を回避できること)
- 低負荷時(低流量下)に強い**分流器**が必要
- 低負荷時**ハンチング回避制御**方法確立(定常ループゲインの決定法?、非常定常シミュレーション)
- 断続運転時に強い**熱交換器**(低冷媒熱流束、低空気流量時の偏流・・・)?
- 停止時の冷媒が適切なく所でない
- 起動時**オイルヒーター**によるオイル余熱
- 広範囲な運転の変動に対して強い**膨張弁**が必要(リニアな特性でよいのか?)
- 広範囲な運転の変動に対して**効率よく運転できるサイクル**→二重?二段?インジェクション?(冷房時に除温、暖房時の高温風を維持しながら)
- GHPは低負荷時の**エンジン性能向上**が必要
- GHP**排熱の活用**方法

このような本質的な**機器単体性能向上**の取り組みによってはじめて今後のエネルギーシナリオにあった**ヒートポンプ**となる。

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

課題(トータルシステム化, 負荷平準化, 管理技術, 国際展開)

トータルシステム化

- 再生可能エネルギー利用** (下水、河川水、地中熱、地下水、太陽熱・・・)
 - 低コストで**シンプル**な熱交換技術。
 - 安価に再生可能エネルギーが直接活用できる**新しい熱駆動ヒートポンプ**(エジェクター式、ケミカル式・・・)、**腐食**、**晶析**のない新しい吸収溶液に期待(空冷化、OC以下の達成・・・)
- 除温・加温との複合化**
 - 除温、加温時に必要なエネルギーが大幅に増大、この低減

負荷平準化(電力)：蓄熱技術再考

- ハンチングが多発している現状では、蓄熱が有効、**低コストな蓄熱技術の確立**
- ケミカル蓄エネルギー**(濃度、湿度等)も有効か?
- 潜熱大で適切な凝固点の蓄熱剤の探索

管理技術：デマンドレスポンス、双方向通信技術

- デマンドレスポンスにより、ユーザー側の意思に関係なく強制的に室内温度等を変更し、省エネルギーを実現可能だが、ユーザーの作業効率の低下を招く可能性もあり、採用には慎重であるべき。
- インターネットを使い、機器の運転状況を集中管理、機器の使われ方はユーザーによって多様→ユーザーに適する**制御方法をパソコンのソフトのようにアップデート**。

国際展開

- 気象、生活様式に適した機器開発(東南アジア：冷房・除温、寒冷地での高効率暖房・給湯、デフロスト)

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

課題(適用用途拡大, 低コスト化, 低GWP化, FC)

適用用途拡大

- 圧縮式ヒートポンプの**高温化**が最大の課題**200℃位まで**
- 高温でも利用できる**冷媒**、**オイル**の開発
 - 高温化を容易とする**圧縮機**の開発
 - 高圧力差でも効率の良い**機器の開発**、**サイクルの考案**
- 吸収式では**180℃の蒸気生成を達成**(早大,NEDO)→低コスト化
- 熱源の複合化**(温度レベルの異なる)
- 寒冷地向けの給湯対応**

FC

- PEFCはコスト低減がキー
- より高い温度が取り出せる**SOFCの開発**はコストダウンに加えて**耐久性、信頼性**の確立

低コスト化

- レアメタル低減**(例：レアメタルレスモーター)、省材料、必要機能の選択と集中
- 伝熱性能向上による**機器のコンパクト化**(快適性を損なわないように)
- 部品の統一化等による**リサイクル**

低GWP化

- 自然冷媒の可能性の探索
 - 空調への**自然冷媒の導入**、毒性、可燃性を有する冷媒の要素開発が課題
 - 冷媒漏えいの検知、防止技術の確立
 - 冷媒**充填量の低減**→微細管を利用した熱交換器の開発等
 - 冷媒**回収技術の確立**
 - 機器から冷媒を容易に回収できる技術
 - 冷媒の**追跡回収**→学会でも検討中
 - 新冷媒の適切な導入シナリオ策定**
 - 冷媒は政治的な側面多大、国内のメーカーは冷媒問題で疲弊(中国等はぎりぎりまでR22)

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

基礎研究の必要性

次の時代に対応可能な**機器単体の開発**に必要な基礎研究こそが重要

ヒートポンプ

- 用途に応じた**冷媒・オイル**の基本特性の把握、開発、**低GWP化**
- 高効率な**圧縮機**(低負荷、広範囲に高性能)
- 微細管内の2相流動現象の把握、伝熱促進技術→冷媒充填量低減のため
- 微細管への**冷媒分配技術**
- 低流量冷媒分流通**
- 膨張エネルギー回収技術**(高速二相流動現象解明)：膨張弁→膨張機、エジェクター、膨張弁特性
- 高性能モーター、高性能インバータ技術
- 高度制御、**シミュレーション技術**→ハンチング回避、快適運転→右図例
- 新蓄熱技術**(濃度差、湿度差、ケミカル)
- 広範囲な運転条件に対して**高性能なサイクル**構成(二重、二段、インジェクション?)
- 低負荷**高性能ガスエンジン**
- ガスエンジン**排熱利用**技術(冷房側?)

燃料電池

- PEFC
 - スタックコストダウン：炭化水素系電解質膜の研究、**低白金・代替白金触媒**の研究
 - システムコストダウン：**無加温運転に向けた電解質膜**研究、不純物のセルへの影響・機構の究明等
- SOFC
 - 耐久性の確立に向けて、**劣化機構の解明**
 - 加速試験方法の確立

例：運転方法によって低負荷の性能が大きく変わる

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

必要とされる研究・開発領域

ヒートポンプ

短期：

- 冷媒充填量を低減できる**要素技術**(高性能微細管伝熱技術、分流通技術)
- 低コスト蓄熱技術
- 性能評価方法確立**(低負荷、実運転)、**性能予測技術**(シミュレーション)
- 低冷媒漏洩技術
- 大きな運転条件変動(負荷、熱源)に対応できる**制御技術**
- 新熱駆動**ヒートポンプ**(エジェクター式、新吸収溶液利用)
- 再生可能エネルギー、未利用エネルギーを活用する**ヒートポンプ**
- 建築設備側との連携を可能とする**インターフェース統一化**

中期：

- 高温に耐える**冷媒**、**オイル**技術
- 空調への**自然冷媒**適用技術
- 広範囲な運転条件(負荷、熱源)に耐える**新要素技術**(圧縮機、膨張機構)
- 潜・顕熱分離**技術、高効率加温技術
- 濃度差、湿度差等を活用したり、適切な凝固点を有する**新蓄熱技術**
- 非常定常運転の活用：風速や風温の**揺らぎ**とサイクルの可変速運転の組み合わせ
- 複合システム**：太陽熱の利用と床暖房・空調・給湯の融合
- 燃焼と融合**した空調・給湯システム→節電の観点から
- 用途を拡大する**高温ヒートポンプ200℃程度まで**(圧縮技術、サイクル技術)

長期：

- 空気質、水質等も含めた**統合環境・省エネ技術**(換気をどの程度減らせる?)、マルチセンシング技術
- ノンレアメタル**機器開発

WASEDA SAITO LAB.

2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術

必要とされる研究・開発領域

燃料電池

短期：

- PEFC：**低白金触媒の研究開発**、無加温運転、不純物のセルへの影響・機構の究明
- SOFC：**劣化機構の解明**、加速試験方法の確立

中期：

- PEFC：**炭化水素系電解質膜**の研究開発
- PEFC：**代替白金触媒**の研究開発
- SOFC：大型化・タービンなどの**ハイブリッド化**

長期：

- 中温**無加温**プロトン伝導燃料電池開発
- セルスタックコスト低減や補機フローの大幅簡素化
- 燃料電池**排熱有効活用**技術

WASEDA SAITO LAB.
2012.07.21 空調・給湯における熱利用コア技術
まとめ
<ul style="list-style-type: none"> • ヒートポンプは、エネルギー分野の今後のあり方に対応可能な形に進化する必要がある（低負荷、広範囲運転条件変動）。現行の延長線上でのヒートポンプは低負荷駆動時燃焼系の機器よりも性能が悪くなることすらある。 本質的なヒートポンプ本体の性能向上を可能とする基礎研究・開発こそ重要 • ヒートポンプが苦手な運転状況を克服する基礎技術を確認すれば、真に高性能な機器となり、あらゆる状況に対応可能となる。これにより、再生可能(未利用)エネルギーの有効活用、システムの複合化による高効率化等が極めて有効となる。 • ヒートポンプの広範囲な運転条件下での性能を評価できる手法が未確立。確立なくして、機器開発はあり得ない(評価装置、シミュレーション技術)。 • 海外への展開を見据えた機器開発の方向性を決める必要がある（熱帯地域での冷房・除湿専用機、寒冷地での高効率暖房・給湯技術） • 冷媒への対応は政治的な側面が大きい。これを見据えながらも、低GWP化、用途拡大(高温化)に対して先手を打てるような基礎研究を進めるべきである。 • ガスで駆動できるGHP、燃料電池は、節電対策として、今後も検討が必要。低コスト化、排熱の有効利用が鍵であろう。売電を容易とする。
-13-

2.4 「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）

中低温熱を利用した発電システムとして代表的なものにバイナリー発電がある。これは低沸点媒体を用いて水よりも低い温度での蒸気サイクルを利用するもので、媒体には代替フロン、アンモニアなどが使われている。日本での活用例としては、製鉄業では住友金属の鹿島製鉄所が 3,800kW クラスの発電を、地熱発電では九州電力の八丁原発電所が 2,000kW、石油精製では富士石油の袖ヶ浦製油所が 4,000kW といった例がある。

対象となる中低温の排熱について、業種別の実態を図に示す。100～149℃が圧倒的に多く、その半分以上は電力関係である。次いで 150～199℃が多く、その主体は化学関係である。

主なタービンの形式には図に示すように、軸流タービンとラジアルタービンとがある。回転軸に沿って平行に高圧の蒸気が流れてきて、その流れによって風車のようにタービンブレードが回転するのが軸流タービン、ラジアルタービンは、回転軸に対してラジアル方向、いわゆる直角方向に流れができてタービンブレードが回転する。一般的にタービンというと、軸流タービンを意味することが多い。ただし中小流量、中低圧の蒸気を使う場合にはラジアルタービンのほうが効率が低い。軸流タービンのタービン効率は大型発電の場合は 90% 程度であるが、1,000kW 前後の出力レンジになってくると 30～50% 程度にまで低下する。ラジアルタービンは空力設計のいろいろな工夫を凝らすことによって、このレンジで最終的には 75～85% くらいのタービン効率が期待できる。

ラジアルタービンが使われているバイナリー発電システムを示す。アンモニアと水の混合媒体を使ってプラントで発電している。

ラジアルタービン式蒸気発電システムでコストダウンを図った改善例として最近神戸製鋼で開発した「エコ・ラジアル」がある。蒸気量 10ton/h の場合軸流タービンで 300kW のところが 400kW ぐらいと、1.3 倍ぐらいの発電量が期待できるものになる。

ラジアルタービンよりもさらに小容量の蒸気量の発電に適したタービンとしてスクリュータービンがある。軸流タービン、ラジアルタービン、スクリュータービンこれら 3 つのタイプの蒸気量とタービン効率の関係比較を図に示す。大型の火力発電所、原発などで使われる大容量の蒸気発電では軸流タービンが圧倒的に効率高いが、1,000kW 級になってくるとラジアルタービンの効率高く、さらに小容量の 100kW 級になってくるとスクリュータービンの効率高い。蒸気量もしくは期待する発電量に適したタービンがあるということである。

スクリュータービンを用いてバイナリー発電を行う「マイクロバイナリー」のシステム例を紹介する。95℃の温水 75t/h を取り入れ、媒体として代替フロン R245fa によるバイナリー発電の発電端出力は 72kW となるが、この媒体ポンプなどで 10kW の電力を消費するので、送電端出力は 60kW くらいとなる。産業排熱の未利用エネルギー、ガスエンジンの排温水、

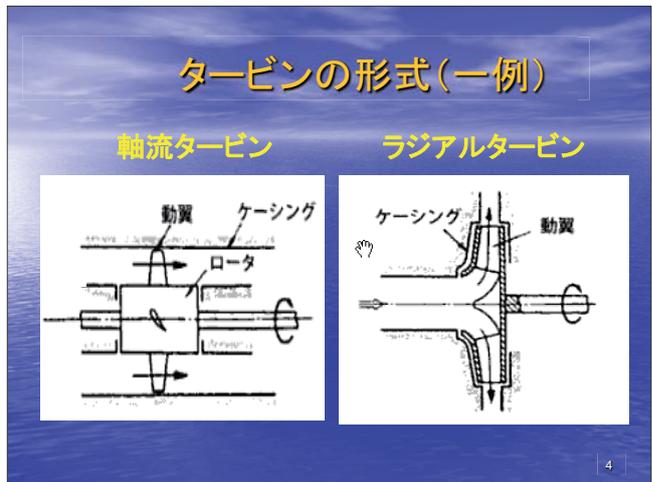
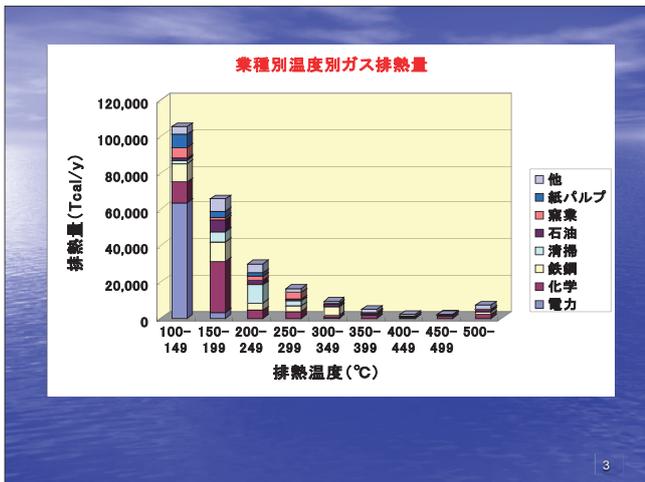
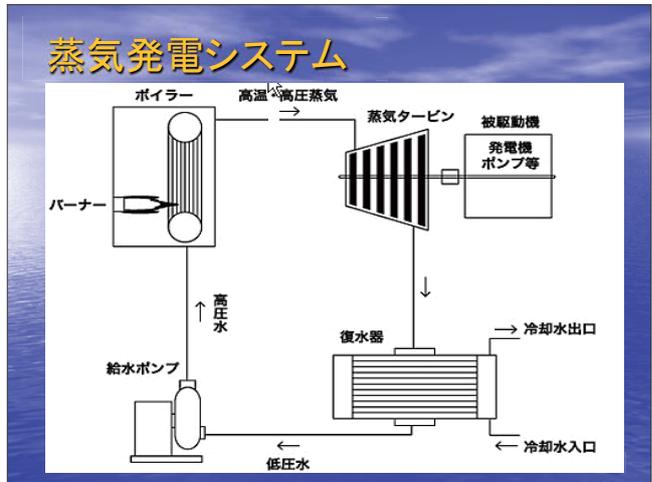
化学プラントの排温水などいろいろな排温水があるが、70℃以上の排温水があれば、マイクロバイナリーを使って発電できるということである。もちろん、温泉（地熱）、太陽熱、バイオマスといった再生可能エネルギー関連の熱を使って発電することも可能。こうした小型の分散発電により、余剰な熱を発電して我々の生活に役立てていくことができると考えている。

科学技術振興機構 研究開発戦略センター
 中低温熱需給の革新に向けた基盤技術開発ワークショップ

高効率小型分散発電システムについて

平成24年7月21日

神鋼リサーチ株式会社
 産業戦略情報本部
 上原 一浩



軸流タービンとラジアルタービンの比較

中小流量、中低圧域の1000kW前後以下の出力レンジでは...

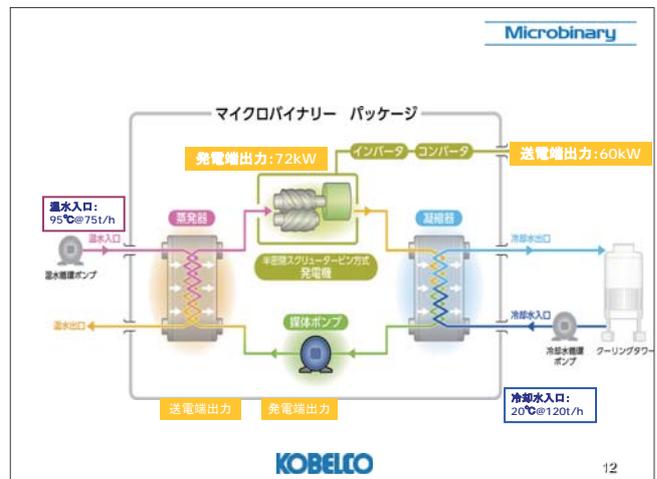
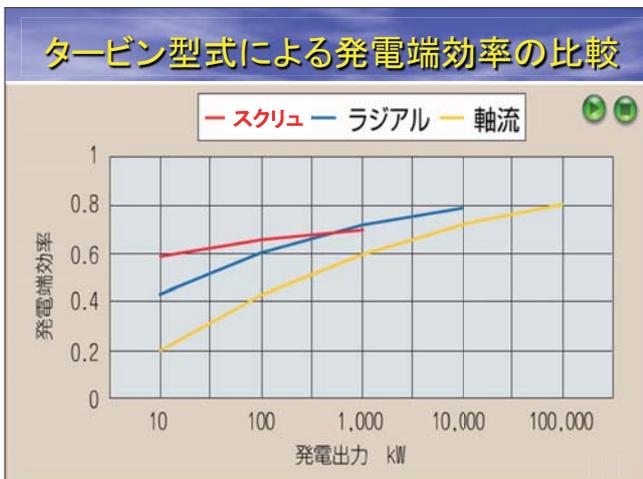
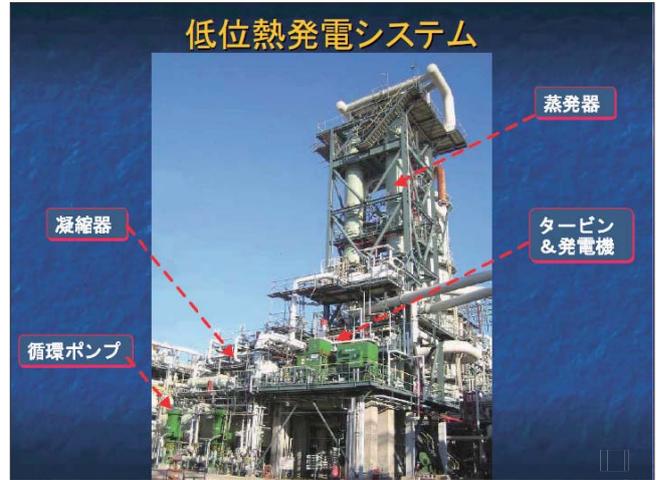
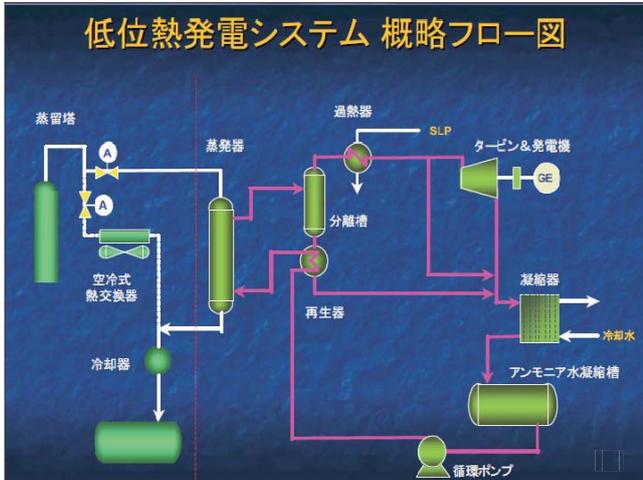
軸流タービン

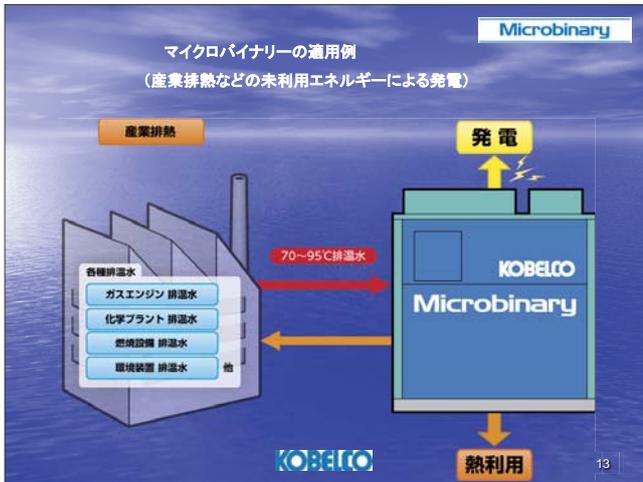
単段、低速回転であるため効率低い。
通常このレンジでは効率30~50%程度。

ラジアルタービン

高速回転数(ピニオン)軸を利用するため空力的にほぼ最適条件設計可。
その結果、非常に高効率(通常75~85%)。

場合によっ
ては倍半分
の違い





セッション
1

2.5 「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）サステイナブルビジネス開発セクション リーダ）

石油、石油化学、化学、医薬、食品、鉄鋼など産業界の省エネルギーを仕事としている。ここでは重化学コンビナートにおける低位熱利用と低位熱発電の導入について説明する。

まず、工場の排熱の分布について。排熱量（年あたり10の15乗ジュール）を温度帯（℃）ごとに分けて示している。排熱は100-150℃あたりの温度のものが多く、工場の省エネルギーは高い温度域の熱の利用から進み、150℃以下の熱が使いにくいので残っている。

こうした熱を有効利用するために、我々はピンチテクノロジー（pinch technology）という熱利用解析技術を使っている。一つの工場を模式的に示した図を見ると、工場はプロセスシステムとその外側のエネルギーシステムで構成されている。プロセスシステムは付加価値のある製品を作る物の流れで、石油化学の場合、蒸留塔や反応塔がある。その外側には、エネルギーシステムがある。この図ではボイラーで熱を作ってガスタービンとスチームタービンで電気を起こすコージェネシステムと、高圧・中圧・低圧のスチームを供給するスチームシステムが組み合わさっている。我々は、これらのシステムの境界に位置する熱交換器の情報を収集し、解析する。熱交換器には熱い流体が出てくるところにあるスチームヒーターや蒸留塔のリボイラー、流体を冷やすところにある冷却水クーラー、エアフィンクーラー、スチームジェネレーターなどがある。

ピンチテクノロジーでは図で示すようなチャートを使う。縦軸が温度、横軸がエンタルピーであり、2つの熱交換器群の情報をいっしょに表示している。先に、その次の図で示す簡単な例を説明する。流体1は180℃から80℃まで利用されている。流体2は130℃から40℃まで冷やしている。これの組み合わせを考えるために、両方が重なっている温度帯を対角線で結ぶと一本の折れ線グラフになる。このようにして、100基ぐらいの熱交換器の流体の情報をまとめて示すことができる。前の図に戻り、図は多数の熱交換器を、冷たい流体を暖めるプロセス（右側）と熱い流体を冷やすプロセス（左側）の2つの群にまとめて示している。実線は目指す温度で破線は実際の温度。この間の温度差が大きいところは利用されずに熱の温度が下がっているため、利用すれば省エネルギーになる。ピンチテクノロジーの名前の語源はせんたくばさみのピンチであり、あいているところをはさむということである。2つの熱交換器を組み合わせると、一方で捨てていたものによって他方のほしいものを供給できることがある。具体的には、冷却水に捨てられていた熱を回収し、120℃程度の低圧スチームを作ればスチームを作るのに使われるエネルギーを減らせる。そして冷却水の量が減らせるので、それを循環させるポンプを駆動する電力なりスチームなりも減らすことができる。

この技術を適用した事例を紹介する。日本に10か所あるコンビナートのうち5か所（鹿島、千葉、水島、宇部、大分）を調査した。そのうち千葉コンビナートについて述べる。これは幅2km、長さ15kmにわたって広がっているが、配管の敷設のコストパフォーマンスを考えて長さ5kmぐらいの3つのブロックに分けた。まずデータ調査票という書式を用意して、各社の工場に記入してもらった。かなり手間がかかるが工場の側にも関心があるので協力して

もらえた。そして、まず工場ごとにピンチテクノロジー解析をし、それからコンピュータ上でブロック全体を1つの仮想工場として解析して省エネルギー余地を評価した。

その結果できる提案はたとえば図のようなものになる。A工場ではエアフィンクーラーで大気に熱を捨てているが、これは温水で回収することができる。B工場では加熱に低圧スチームを使っているが、これは温水でもさしつかえない。こういう解析結果に基づいて、温水の回収・融通といった熱共有による省エネを、はじめは他社データを隠した状態で提案し、提案を受け入れてくれることになった時点で社名を明らかにする。

こうしたやり方で進めた結果、共同省エネルギーが実現した。代表例は富士石油と住友化学の熱共有である。富士石油は200℃くらいまで利用した熱を冷却水クーラーで捨てていた。住友化学は燃料を使ってボイラーを暖めていた。そこに片道1.5km、往復3kmの配管を敷設して、35℃の水を100℃強まで暖めて循環させることによってボイラーの燃料を節約できた。

またこの熱融通に加えて富士石油では、エアフィンクーラーに捨てていた蒸留塔塔頂ガスの117-120℃の低位熱を使った発電システムをわれわれといっしょに開発し、低位熱を発電利用することに成功した。世界初のシステムで国内外からおおぜいの見学がある。93%アンモニア水を使って熱交換し蒸気をタービンに入れて4000kW発電している。無人運転している。プロセスフローの概略は図のとおり。温度差が小さいので熱交換器を大きくする必要があることがコストを下げるための制約になっている。

こうした低位熱発電システムの熱機関効率(カルノー効率)は、理想値で16%だが、実現できるのは10%以下になる。太陽光や風力と違って年間稼働率は高い。しかしコストは50万円/kWあたりになる。地熱発電の20万円/kWに勝つことを目標にしている。規模は4～5MWを考えている。

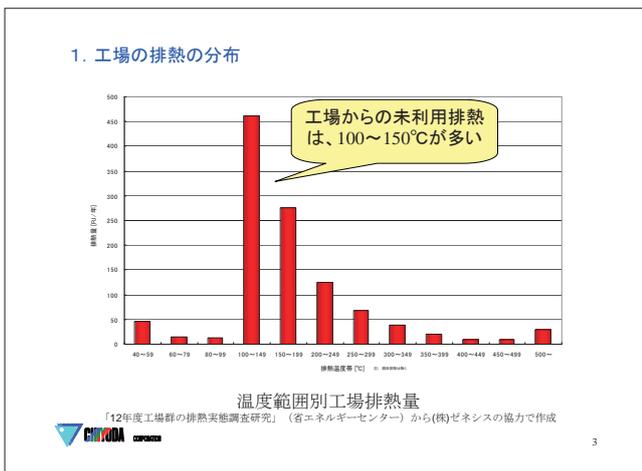
中低温域の熱の利用は、熱として利用するのが基本である。近隣と連携すれば有効利用できる。技術はむずかしくないが、調整する人の働きが必要である。

それでも余る熱は、低位熱発電で電力に変換して利用する。低位熱発電システムのコストダウンが鍵となる。そのために期待することは、熱交換器のサイズを小さくし伝熱係数などをよくして高効率化すること、タービンのコストを下げること、高濃度アンモニア水よりもさらに沸点の低い作動媒体が開発されることである。



目次

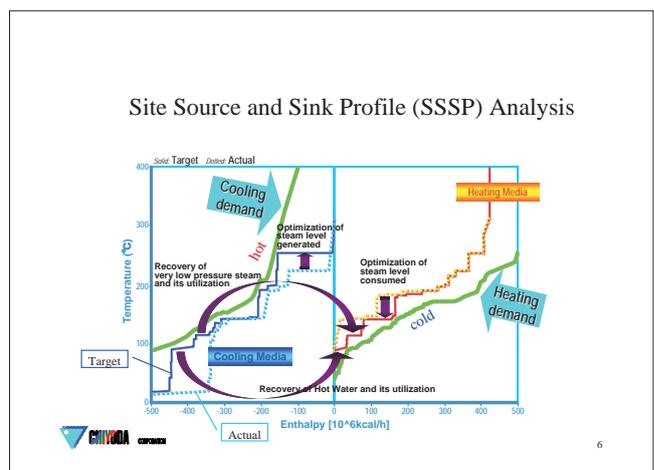
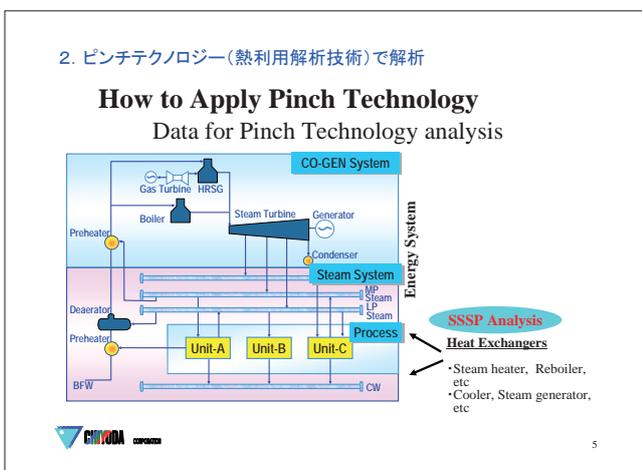
1. 工場の排熱の分布
2. ピンチテクノロジー(熱利用解析技術)で解析
3. 日本の主要コンビナートの省エネ調査／解析
4. 省エネルギーポテンシャル
5. 千葉コンビナートでの共同省エネルギー
6. 低位熱発電システムの普及の課題
7. まとめ

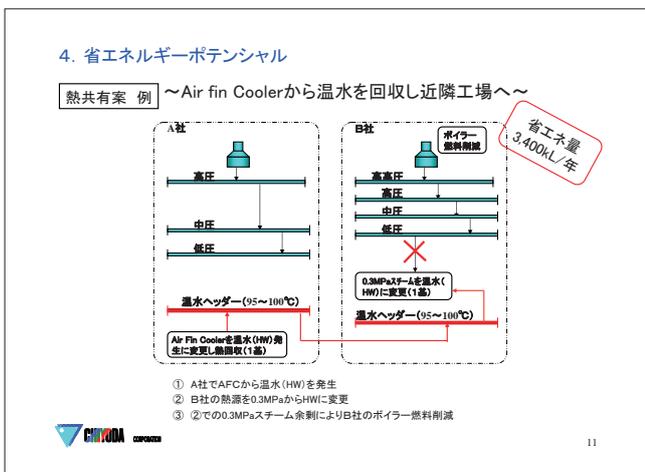
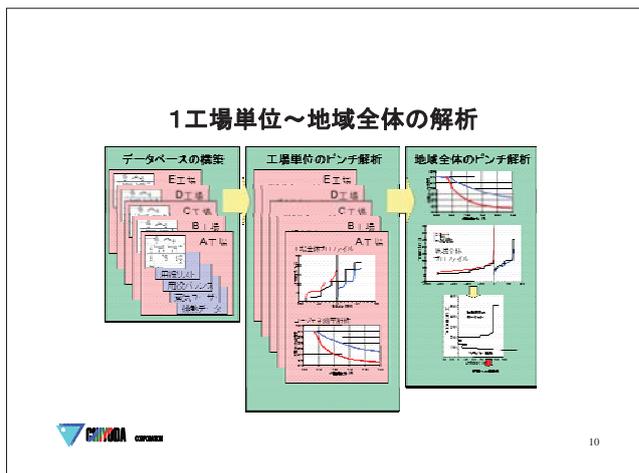
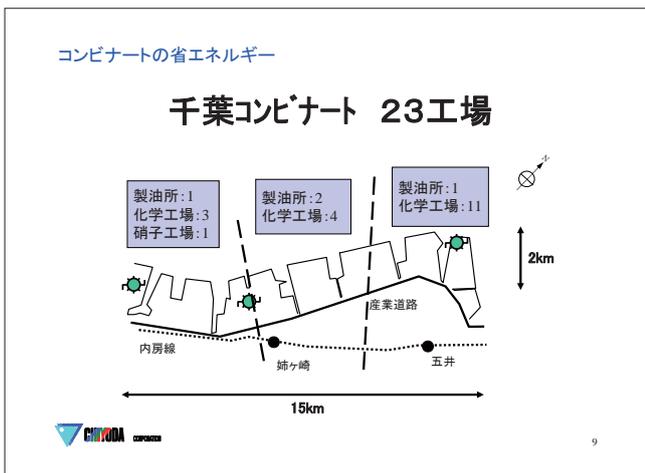
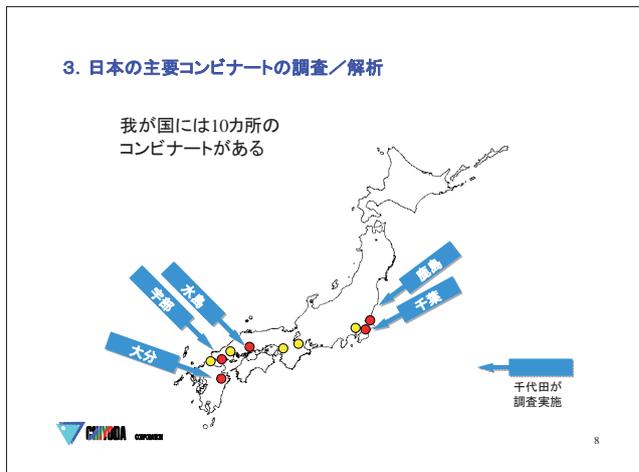
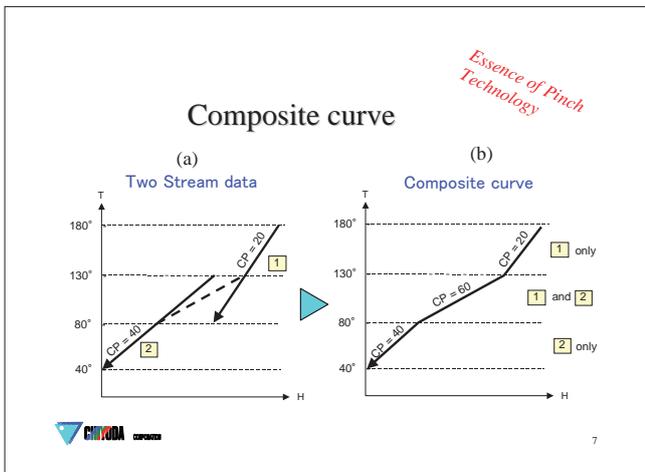


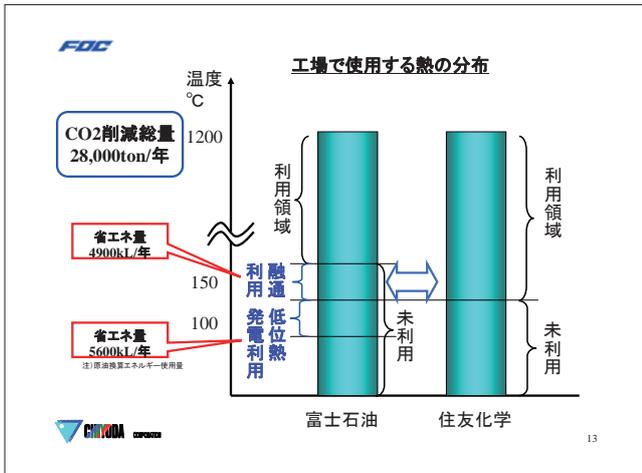
産業別の排熱の特徴

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℃の比較的回収の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。排熱は比較的低温領域に分布している。また、40～60℃の低温排熱もかなりある。
鉄鋼	200℃までの比較的回収の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うち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	150～200℃の排熱が多いことおよび悪臭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	150℃までの低温ガス排熱が大部分を占める。
石種	150～200℃の比較的回収のしにくい低温排熱部分が多い。

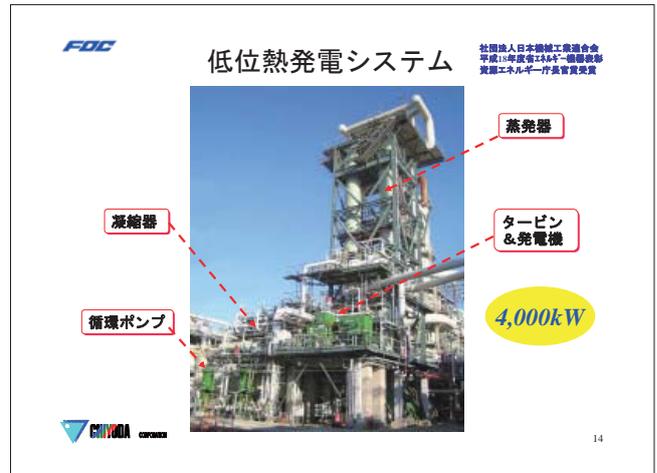
省エネルギーセンターホームページ



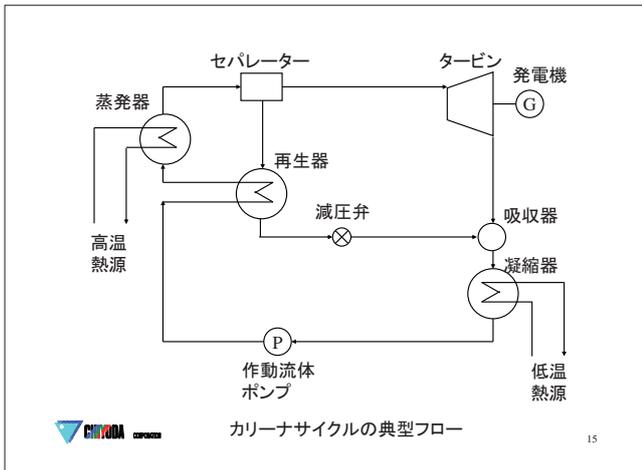




13



14



15

6. 低位熱発電システムの普及の課題

電力回収の熱サイクルのカルノー効率比較

サイクルの種類	カルノー効率	作動温度(例)
ディーゼルサイクル (ディーゼルエンジン)	85~90%	高温 約2600K 低温 約300K
フレイトンサイクル (ガスタービン)	70~80%	高温 約1100K 低温 約300K
ランキンサイクル (ボイラー発電)	60~65%	高温 約900K 低温 約300K
ランキンサイクル (低位熱発電)	3~7%	高温 約400K 低温 約300K

理想気体90°Cでのカルノー効率は約16%。これは理想値。
 現実には、タービン効率、発電機効率を乗じることや、循環ポンプ動力を差し引く必要あり。→実機での効率は10%を下回る

16

まとめ

中低温領域の熱は、

- ① 熱は熱として利用するが最良→近隣との連携で更に有効利用が可能・・・調整役の第三者が必要
- ② それでも余る熱は、低位熱発電システムで電力変換して利用→低位熱発電システムのコストダウンがカギ
 - 1) 熱交換器のサイズダウン→高効率化
 - 2) タービンのコストダウン→メーカー間の競争促進
 - 3) より低沸点の作動媒体の開発

17

2.6 「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）

今日は特に低温の熱を石炭にうまく利用することで大幅に効率を上げる余地があるという話をしたい。

原子力の比率が大きな議論になっているが、いずれとなっても火力発電の比率は確実に増える（50～65%）。分散型の自家発電等（15%）も実質的には火力発電の一部である。火力発電の比率が上がるということは、燃料費が増えるということ（2011年の化石燃料費は約22兆円）。日本は化石燃料の96%を輸入しており、様々な製品を輸出して得た差額で燃料を購入している。かつては自動車輸出による収入で燃料を買うことができたが、最近の経済状況下では22兆円の燃料を何で買うかが問題となっている。現在は電力会社を買ってきているが、昨年度、関西電力は2,000億、他の電力会社も1,000億程度の赤字を出した。内部留保を崩しても1年か2年しかもたないので、いずれ全電力会社が電力料金を上げて、それを燃料を買う費用に充てなければいけなくなるだろう。

LNGの値段はもともとは100万BTUあたり5ドルのオーダーだったのが最近では17～19ドルになっている。米国は現在シェールガスのお陰で2～3ドルになっているので、比べるとおよそ6倍の値段で買っていることになる。韓国、台湾、中国もLNGを欲しがっているため、日本としては石炭もあるというオプションを持たない限り交渉にならない。

そこで、世界の火力発電の中心である石炭をきちんと位置づけることが重要になるが、石炭はCO₂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もある。今や技術が進歩して大気汚染の問題はなくなったが、CO₂が増えるのはどうしようもない。これらに対処するためには、ひとえに発電効率を上げるしか手はない。第1世代のボイラータービンの効率、第2世代の複合発電の効率、第3世代のトリプル複合発電と次第に効率を上げてゆき、燃料消費量を削減すると同時にCO₂も減らす、というのが日本のとるべき道である。

1700年以來の火力発電の効率の変遷をたどると、戦後急速に効率が上がったが、2000年頃までの40年間では5ポイントしか上げられなかった。そのうちの3ポイントはアメリカからの輸入技術で、日本が上げたのは超超臨界圧（USC）の2ポイント（当時は、0.1あるいは0.2ポイント上がるだけで話題になった）。

ところが15年前からガスタービンを使ったダブルの複合発電が入ってくると、一気に15ポイントも効率が上がった（最初40%だったのが今は54～55%）。この技術がいかに画期的だったかがわかる。天然ガスにおいてはこの技術が完全に実用化しており、日本の各電力が建設する天然ガス火力は現在全てこの形式になっている。これを石炭にも使えるようにしたのがIGCCであり、これもまた画期的な効率向上を示す結果となった（40%から46～48%に向上）。

さらに現在は、トリプルの複合発電システム（IGFC：SOFCとカップルして3つの要素で発電）もできている。これは天然ガスで65ポイント以上（10ポイント分）、石炭の場合は

55 ポイント（6～8 ポイント分）まで上がる。かつてに比べると考えられないほど発電効率が向上している。またこれにより 1kW あたりの CO₂ 量の削減も可能になる。

低温の熱利用で問題になるのが褐炭（水分が 50% 以上）をたく石炭火力である。効率が非常に低く、CO₂ 排出量も多い。今は経済的にペイするだけでなく、CO₂ 排出を下げることも求められるため、褐炭の発電所が使用できなくなりつつある。一方で、水分の多い褐炭や亜瀝青が世界の石炭資源量の半分を占めており、これを有効に使う技術を開発しないと石炭不足に陥る。今は中国も石炭を買いあさっており、インドも自国の石炭の 40% が灰分の多い石炭のため、インドネシアから石炭を輸入しようとしている。従来の瀝青炭だけでは、世界の石炭利用も限界に近づきつつある。

代表例はヴィクトリアの褐炭。まだ木のイメージが残っており水分が 65% と多いが灰分は非常に少なく、水分を取りさえすれば超優良炭である。褐炭を使ったときに CO₂ 発生量が多いのは効率が低い（水分が 62% の場合、効率は 28% くらい）。これを普通の石炭と同程度に乾燥できれば、5～6 ポイント効率が上がる。このオーダーが持つ意味の大きさは先の火力発電効率の歴史に照らせば明らかで、乾燥技術で達成できるとすれば同技術にぜひ取り組むべきということになる。

水分の含有量が増えると図のように熱効率が下がるのは、煙突から出る煙の中に水蒸気の熱が放出されるため。煙突から凝縮して熱回収できればよいが、実際には水の 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。そのため現在は排煙が絶対に酸露点以下に下がらないようなポイント（100℃や 150℃）で煙を出している。したがって煙からは熱回収できない。ただし水分の多い石炭では、図にあるように、全体の損失の半分以上が水分損失でそのうち 9 割は潜熱の損失である。この潜熱さえ回収できれば劇的に効率を上げることができる。

乾燥方法は色々ある。しかし従来の乾燥方法はいずれも熱回収をしていないため効率が低い。こうした方法は CO₂ 排出の低減が求められる中では次第に許されなくなる。

これに対し、例えば「自己熱再生型蒸気流動層乾燥システム」という技術が考えられる。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、蒸気自身で加熱する。そして減圧して水になる（液化）際に潜熱を回収する。また水分を少なくした状態の褐炭はボイラーやガス化炉に入れれば水分が 15% しかない石炭と同じ効率が得られる。

熱を上げていくと 200℃以上から少しずつ揮発分が蒸発し、400～500℃以上で熱分解、それから燃焼という領域に入っていく。石炭に熱を加えると、（ベンゼン環をつなぐ）チェーンが切れてベンゼン、ナフタリン、トリエンが出てくる。石炭を扱うのはほとんどが化学工学の分野の問題だが、200℃以下は単純に水分をどう飛ばすかという熱工学（機械工学）の分野の問題になる。残念ながら熱工学の専門家は石炭をほとんどやっておらず、熱流体のテクノロジーをぜひここに反映していただきたい。

褐炭の塊を 170℃の水蒸気で加熱していくと、まずは表面温度が上がり、最後に中心温度

も上がる。ここまでいくとほとんどの水分が蒸発し、重量の減少も次第に落ち着く。このあたりの現象はまさに伝熱の問題（低温だから伝熱面積等の問題）であり、ぜひ熱流体の知見を入れて解明して欲しい。またこれを実用化して、世界の褐炭焚きの発電所等に適用していくべき。

オーストラリアでは、CO₂を1kg/kWh以上出す160万kW発電所（ヴィクトリア州）が今年運転停止になる。ポーランドも褐炭焚きの発電所が複数あり、現在、EU指令でCO₂を下げるよう圧力がかかっている。こうした事例に対して熱工学を中心とした200℃以下の乾燥技術を適用し、世界のCO₂排出の低減と、さらに熱交換器等が経済的な成立に寄与したい。

CRDSワークショップ

石炭利用における熱関連技術の開発



2012年7月21日

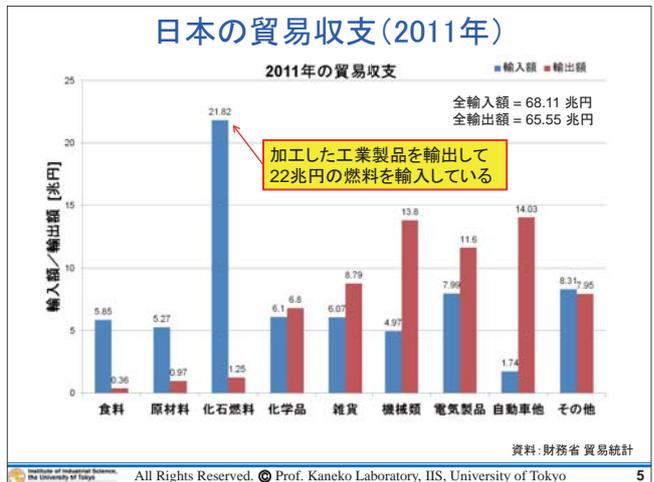
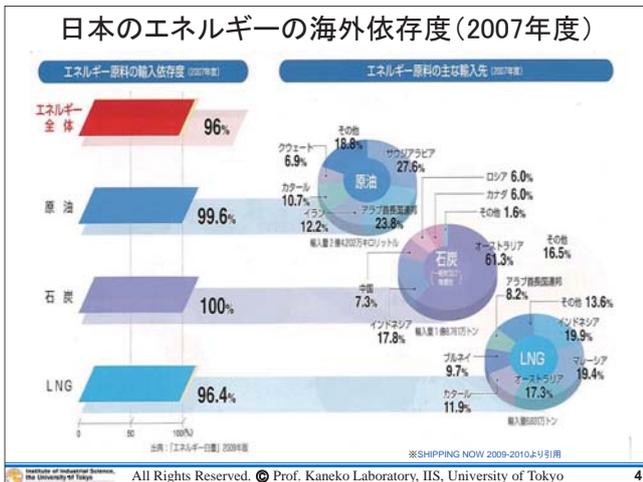
東京大学生産技術研究所
 特任教授 金子 祥三

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo. All Rights Reserved. © Prof. Kaneko Laboratory, IIS, University of Tokyo

2. 輸入燃料費の増加

1. 日本は化石燃料の96%を輸入している。
2. この輸入金額は年間20兆円以上である。
3. 火力発電の増加に伴い燃料費が急速に増加している。
4. このままでは電力料金の値上げ、国際収支の大幅赤字など日本経済に致命的な打撃を与える。
5. 従って高効率化により燃料輸入量の増加を抑える必要がある。
6. また天然ガス(LNG)の消費が急速に増えているが、**LNG依存が大きすぎるとセキュリティ上問題である。**
7. なおかつ価格交渉を行う上でもオプションが必要
 従ってLNGのみならず**石炭の使用も確実に増やす必要がある。**

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo. All Rights Reserved. © Prof. Kaneko Laboratory, IIS, University of Tokyo

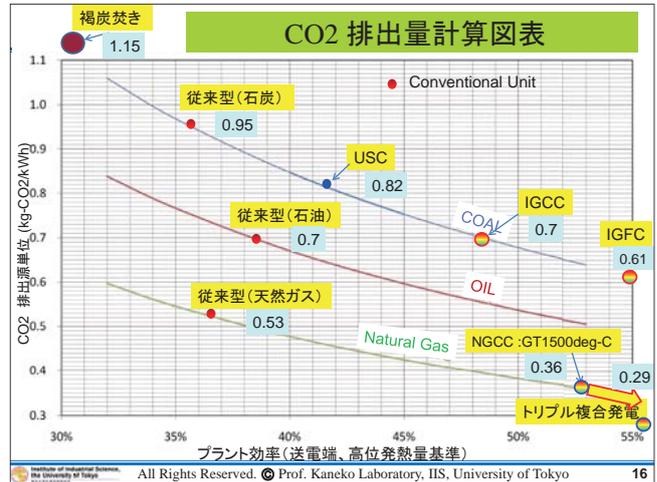
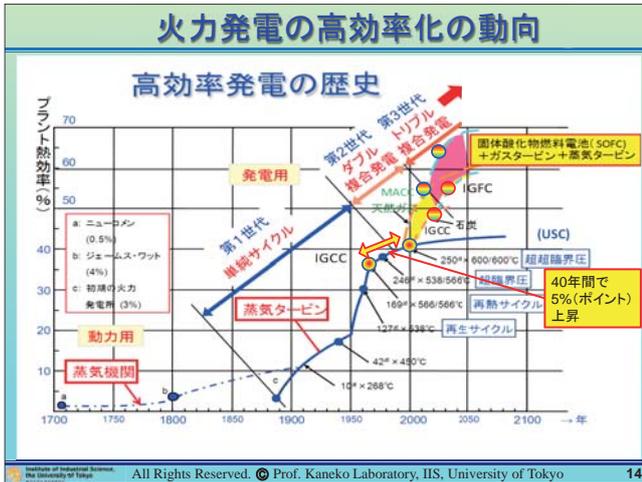
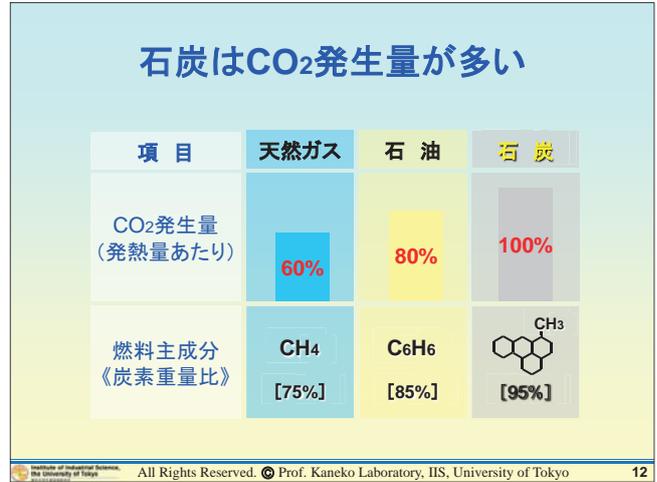
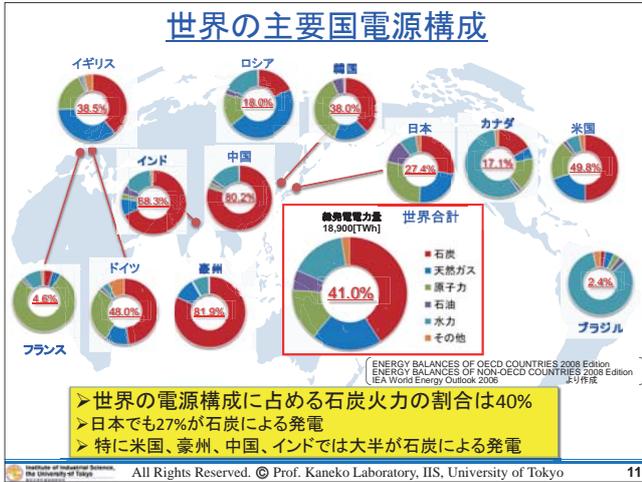


国別石炭資源量

	可採埋蔵量R (億トン)	年間採掘量P (百万トン)	可採年数R/P (年)
1 米国	2373	98,455	241
2 ロシア	1570	31,690	495
3 中国	1145	324,000	35
4 オーストラリア	764	42,386	180
5 インド	606	56,995	106
6 ドイツ	407	18,230	223
7 ウクライナ	339	7,330	462
8 カザフスタン	336	11,081	305
9 南アフリカ	302	25,381	119

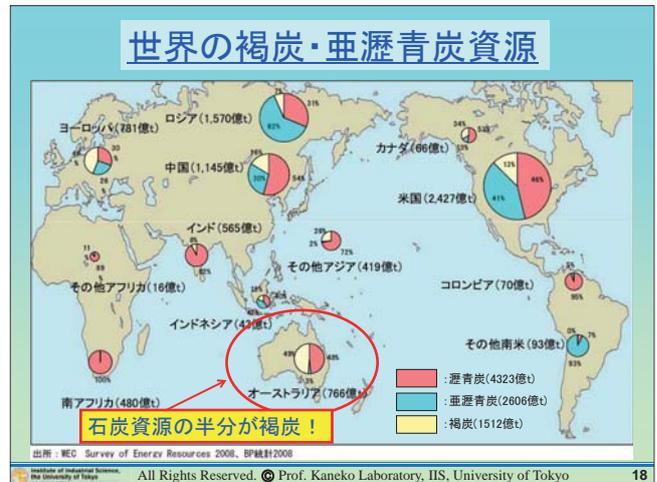
(2010 BP資料)

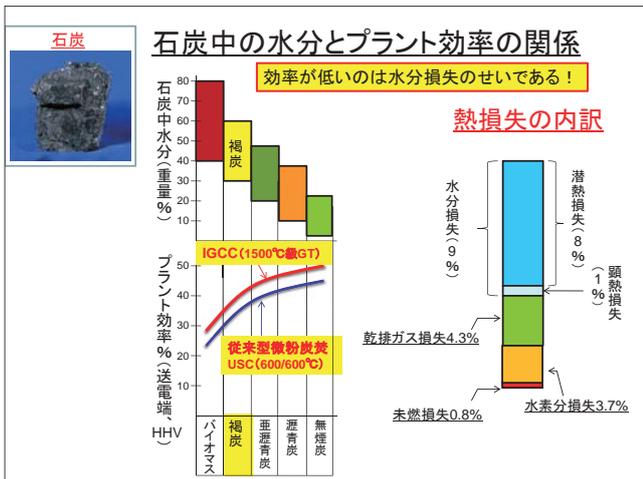
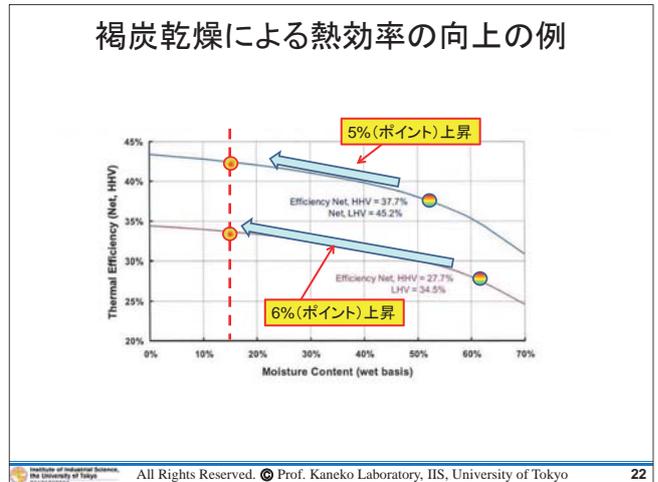
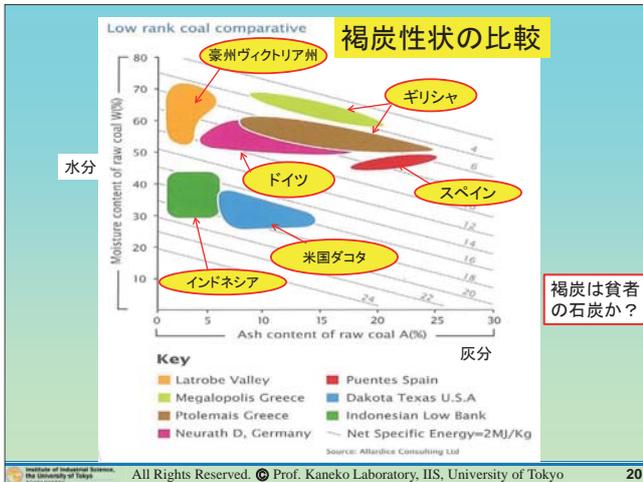
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo. All Rights Reserved. © Prof. Kaneko Laboratory, IIS, University of Tokyo



4. 低品位炭の利用拡大の必要性

1. 経済的な石炭の利用拡大のためには低位品位炭の利用も重要である。しかし低品位炭はその技術的困難さのゆえに現状では利用がほとんど進んでいない。
2. 低品位炭の代表例は褐炭であるが、膨大な水分を含むため効率が非常に低く、したがってCO₂の発生も多い。
3. したがって褐炭の高効率乾燥技術は非常に重要である。

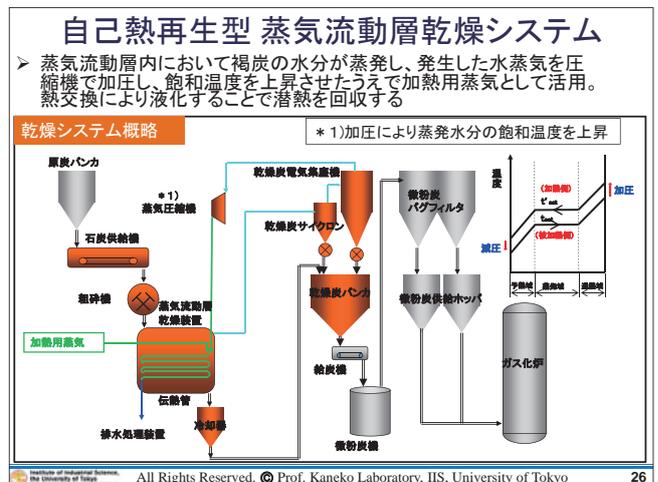
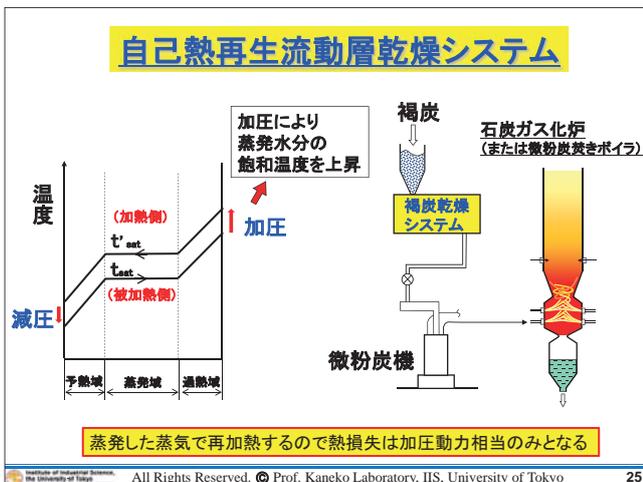


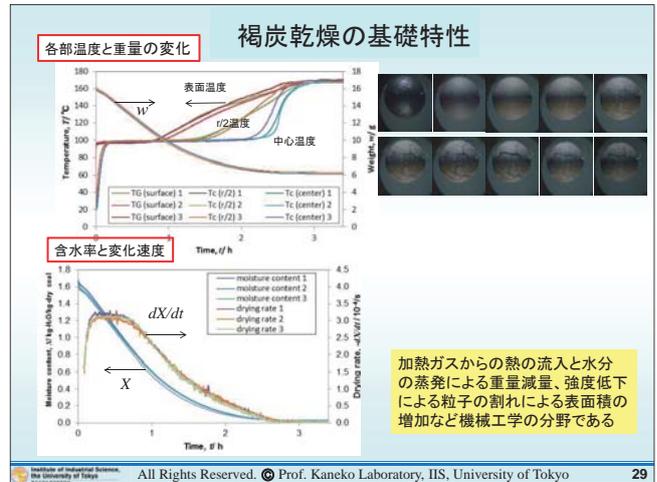
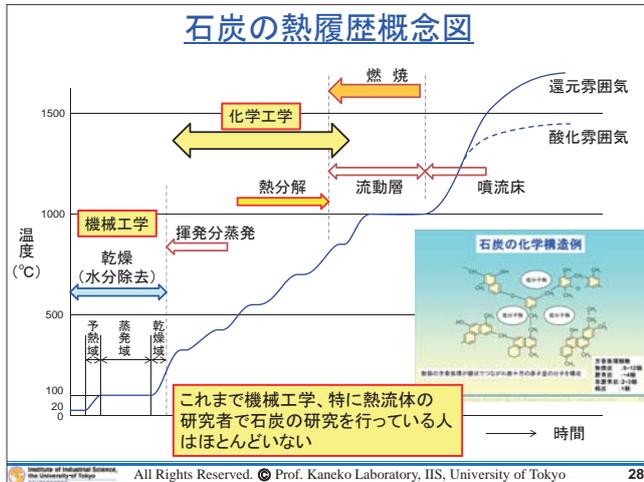


褐炭乾燥装置の原理比較

(従来用いられている方式はいずれも熱回収が行われておらず効率が極めて低い)

種類	加熱方式			加圧方式
	直接加熱	間接加熱		
型式	高温排ガス加熱方式	回転式ドライヤ I (Coal-in-Tube)	回転式ドライヤ II (Steam-in-Tube)	蒸気流動層方式
略図				
特徴	・1000度のボイラ排ガスを混合し、ミル内で一気粉砕と水分蒸発を行う。	・管群の入った回転式ドラムで乾燥。 ・管の内側を褐炭が通る。	・管群の入った回転式ドラムで乾燥。 ・管の内側を加熱用の蒸気が流れる。	・蒸気流動層に層内蒸気加熱管を通し、両方で加熱する。
				・油圧または水圧で褐炭を圧縮





セッション 1

- ### 提言
1. 原子力の停滞が予想される中、火力発電の比重はますます大きくなる
 2. 輸入燃料費の急増やCO2発生量の大幅増加を抑えるためには発電の高効率化が絶対に必要である
 3. 火力発電用燃料についてはセキュリティ上、天然ガスに偏重することなく石炭の利用も重要である。また石炭資源の半分を占めながら、利用がほとんど進んでいない低品位炭(亜瀝青炭、褐炭など)の利用拡大を行っていく必要がある。
 4. 石炭は単位発熱量当たりのCO2発生量が多いので高効率化が特に重要である。
 5. 低品位炭は一般に利用効率が低い。特に水分量の多い褐炭は水分の潜熱損失のためきわめて低い効率となっており、効果的な水分除去---乾燥技術が待ち望まれている。つまり100~200°Cの温度域での褐炭石炭粒子からの高効率水分除去---乾燥が基幹技術である。
 7. 一見易しく見えるこの乾燥技術は未だ世界で実用化されておらず、早急な開発実用化が世界中で待ち望まれている。



2.7 「セッション1に関する質疑応答」

- Q. : 自動車の電動化が進むと熱がたりなくなる
- A. : 電気自動車はエアコンを入れると走行距離が減る。100 km -> 70 km など。高温熱がなく電力が消費されるためである。

- Q. : 電力と違い、エネルギー需給の中で熱エネルギーフローはとらえにくい。エントロピーベースで把握しても意味がなく、温度域ごとに需要をおさえたい。そのための基礎的なデータベースが必要だと思うが、なかなか見つからない。ICTの進展もあるので、できるだけ安いセンサーを開発し、たとえば1時間に1回の信号を集めて全体としてビッグデータとして利用していくことが必要。その難しさや可能性、センサー技術の有無などについて現状を知りたい。
- A. : 熱需要の把握に関して実態調査は大変。空調設備の容量設計さえしっかりしていない。データで検証したモデルを使って精度の高い予測を行なう手法は可能である。現在はその方向に向かっていて、たとえば空調・給湯システムを評価しようとしている。また、センサー類を使ってのオンラインデータ収集や最適化は理論的にはありうるが実際には厳しい。コストパフォーマンスが低いと考える。
- Q. : まずは static なデータの収集が必要ということか？
- A. : とれるデータだけとって、あとは理論モデルでという発想でよい。業務用ビルもいろいろあるので、カテゴリー別にデータを集めるのは不可能に近い。むしろ、あるデータを使ってどれだけ合理的な負荷の推定ができるかが大事。
- Q. : かつて日本病院協会とタイアップして病院のエネルギー収支を調査したことがある。事務長などはコスト削減という観点で積極的だった。調べるのが難しいというハードルは何か？
- A. : 産業、運輸（例：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さまざまに把握が難しい。しかし改善できるポテンシャルは大きいので、いったん火がつけばうまくまわる可能性もある。
- A. : (今回発表したように) 大工場ではエネルギー管理の担当者がいることが多い。熱利用の形態をきくと工場が意識しているものにはセンサーがはいっているが、未利用の部分はそもそも分からないので出てこない。冷却水に出ていくぶんはわかるが、煙突から出ていく蒸気は不明だった。リアルタイムではなく年間を代表する期間を指定し、そのデータをもらうようにしている。それでまとめて解析し、大体のイメージを掴んでから可能な範囲で徐々にデータを増やそうと考える。実際に共同利用を考え始めた場合に、8モードくらい聞く。
- A. : 空調・給湯は温度もはかっている比較的データを出しやすい。しかし空気の出入り口の温度と流量がわかりにくい。「見える化」「スマート化」を国が方針として言えば能力・負荷のはかりかたも進歩するのではないか。データをすいあげるしくみの標準化をすると出しやすいと思われる。

- A. : 製鉄所でバイナリー発電機の適用を検討したことがある。熱量は全体ではあるのだが、まとまったものは限られたところ(例えば転炉ガス)にしかない。また蒸気配管が張り巡らされているが、枝管それぞれの量がよくわからない。非接触の質量流量計があるとよい。
- A. : 三菱化学にいたときプラントの廃熱を調べた。カスケード利用されていなかったのは100℃未満(温水)しかなかった。しかも drain に散らばっている。これらを集めて利用しようとするコストがかかる。温水のオフラインでの融通の可能性はないか? 「熱の宅配便」といった話もきく。
- A. : そういう話は昔からある。熱を輸送する研究開発は NEDO で H13 ごろに行われた。片道 16km を越えると日当・ガソリン代がひきあわないという結果だった。蓄熱 upload/download の速度にもよる。いちばんいいのは近いところでのオンライン。その次は蓄熱でためて demand shift。ごみ発電所と温水プール、根岸の JX 製油所と日本赤十字病院(仮想)、神戸製鋼の三宮 IPP から低圧蒸気を近くの酒造工場へなどの事例がある。2t/h くらいなので酒屋のボイラーが不要になる。ほかに融雪などもありうる。ローリーで運んでビルに蓄えることもできるが、駐車場が必要になるし往復を考えると現実的でない。三菱化学はピンチテクノロジーを早くから利用している。三番目はヒートポンプで高めて low pressure steam にすること。四番目は化学ヒートポンプ(反応熱を利用)で高温をつくること。しかし大学での研究の規模はまだ 2 桁くらい小さい。
- Q. : スクリュー膨張機は非常にいいものと思うが、効率の考えかた、熱を仕事に変える効率は何のくらいか?
- A. : タービン効率。あるいはインバーター・コンバーターを含めた発電システムの効率ということ。熱から始めると複雑。未利用なものだとなおさら。そこで蒸気からスタートしたタービン効率を述べた。それがスクリューは 70% 以上。
- A. : 太陽光発電パネルと、太陽光集熱でタービンをまわすのを比較するとどうか。
- A. : 効率では太陽熱で蒸気をつくる太陽熱発電の方が高い。コストは砂漠ならば太陽熱が勝つだろうと言われる。安定性では熱ならば蓄熱によって時間的に比較的安定な出力が出せる。スクリュータービンは負荷変動に対応できる効率はよい。
- Q. : 車のエアコン負荷の住宅用との共通点、相違点は?
- A. : まず使用環境で、車は -40℃~ 50℃と広い。車用は住宅ほど断熱されないので外部の熱負荷の影響を受ける。したがって住宅よりも割高な能力のものをつけている。
- A. : 車では家庭用よりも非常に厳しい条件で動かすが、家庭用で使われている最新技術が一部まだ応用できていないので効率向上の余地はある。
- A. : エアコンの負荷が大きいならば、まずは室内の冷房負荷を極限まで減らすことが必要。そのためには、内部発熱と日射熱を減らす。前者はエンジンルームの熱の遮断や屋根表面との遮断(香港のタクシーは二重屋根にしている)。後者は窓ガラス。熱線を通さないガラスがある。
- A. : 技術はあってもコストでのらないものもある。熱を遮断して視認性のあるガラスなどはよい素材があれば進むと思う。

3. セッション2

「熱需要を克服するための研究開発課題」

3.1 「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）

NEDO のプロジェクト「革新的ノンフロン系断熱材の開発」（H19-23 年度）で取り組んだ内容のうち大学で取り組んだ部分をベースに説明する。

まず社会的背景は、地球温暖化防止に向けたフロン系建築用断熱発泡剤代替物への要請である。かつてはウレタンフォームの現場発泡でフロン（HFC）を使っていたが、フロンは温室効果が大きい。そこでプロジェクトでは、ノンフロン系の高断熱材を開発するため、高い数値目標が設定された（ 0.024W/mk ）。これにより代替フロン系がすべて削減できれば断熱材関係で 500~1,000t の CO_2 が削減できる（H22 年経済産業省）ということだったが、実際には容易に達成できる数字ではない。

発泡体のセル径（気泡の直径）をどんどん小さくしかつ空隙を大きくしていけば、ガス量の熱伝導率が支配的になって母体（材料）の熱伝導率の影響は減る。熱輻射に関しては、気泡の直径が小さくなれば熱伝導率が下がる。ただしセルとセルの間の壁が薄くなっていくと、今度は輻射の効果が支配的になる。これは発泡させ過ぎて壁を薄くしてしまうような場合で、熱伝導率 0.024W/mk の 4 のけたぐらいで効いてくる。

表に断熱建材と発泡ガスの熱伝導度をそれぞれ示す。断熱建材で見られる熱伝導度 0.024 や 0.026 というのは空気よりも低い値である。これは断熱建材の中にガスを閉じ込めた直後に値を測定し、その後出荷するためである。実際は、図にあるとおりの日数を経ると徐々に圧が抜けて空気が入り、熱伝導度は上がる。

プロジェクトでは低い熱伝導率を 10 年、100 年と長期にもたせるための方策がいろいろ検討された。たとえば、結果的に成功しなかったが、セル径をとにかく小さくしてナノセルにするというもの。そうすれば空気の平均自由行程よりも短くなり、互いにぶつかる確率が減って見かけの熱伝導度は下がると考えた。また、ガスを逃さないため外側にアルミのシートを蒸着させるという考えがあるが、代わりに穴の周りを樹脂でコーティングするということも考えた。あるいは熱伝導度がより低いナノオーダーの多孔性のもの、エアロゲルやキセルゲルをセル内に入れるということも考えた。吸着材を使って逃げていくガスを吸収させようとも考えた。しかしこれは吸着剤のために熱伝導度が上がってしまったので成功しなかった。

熱光変換や熱電変換技術との融合も考えたが、施工性（これまでどおり使えるかという要求）がネックとなった。熱流制御技術という、半導体などでは応用されている異方性をもたせる技術も検討した。しかし熱をどこに逃がすのかが難しいということで建築家は興味を示さなかった。新規技術へのシフトには心理的な障壁もあると感じられた。

最終的には微細化でナノセルラーをつくること、またエアロゲルと発泡体をハイブリッド化させることに取り組んだ。断熱材のガス自体の開発は産総研に、熱伝導度の測定は東工大に担当していただいた。

取り組みの結果、発泡を工夫することで熱伝導度の改善は見られたが、0.024 という数値目標には達しなかった。この目標値は大変難しく、最初の3年間で半分か程度の研究主体が断念した。しかしながらセルサイズが小さいほうが、ナノオーダーにいけばそれなりに熱伝導度が下がるということは分かった。

エアロゲルに関しては、熱伝導度が非常に低く、長期的には水分に弱く、強度が極めて低い。そこで強度改善について考えた。ポリマーの発泡体をハウジングして空隙のところにキセロゲルをつくることや、コンポジット化してセルロースナノファイバーを絡めてつくること、あるいはゲルの中のナノオーダーの空隙の表面をコートして接着性をよくすることなど、3種類ぐらいを検討した。結果、熱伝導度をクリアし、長期性も耐熱性も実用上問題のないところまで来たが、今度は断熱材としてはコストが高すぎるということになった。

以上の取り組みを纏めると、スライドに示した結論になる。

なお、最近、Honeywell 社が新しい冷媒ならびに発泡剤を発表した。プロジェクトで産総研が作ったものと全く同じで、プロジェクトとしては（先を越されて）痛手となった。どういう発泡剤かという、GWP が7でブタン以下。引火性がないため工場で作るのが楽になる。発泡剤として市場に出て普及し始めれば独占状態が予想される。また、同様に開発された GWP が低い冷媒が車用のエアコンなどで使われることになれば、日本の車産業にとっては冷媒のコストのコントロールが Honeywell 社でなされ、車全体のコストに問題が出てくるだろう。

- Q. : セル径が小さくなると熱伝導率が下がるというのはどのような理屈か？
- A. : Knudsen 効果が起こると考えている。空間の中で分子どうしが衝突する確率が大きければ熱が伝わる、というのがガス系の熱伝導度の考え方。ここで圧を下げれば平均自由行程が伸びるが、圧を真空まで下げずに空間を縮めれば、平均自由行程が小さくなり分子同士が衝突する確率が小さくなると考えた。
- Q. : 分子間の衝突よりも壁との衝突の頻度がふえるということか。壁との衝突は分子間の衝突とは異なるわけで、それらの比率まで最適化しようとしているということか。
- A. : 内圧は大気圧と等しいので、分子の衝突量は変わらないはず。ただ、構造の最適化までにはいたっていない。
- Q. : 材料とガスの affinity が小さいものを選んで使っているということか。
- A. : 今まで使っていた材料でどこまでできるかということを検討した。エアロゲル自体がそういう細孔構造を持っていて、空隙率が95%以上で熱伝導率が0.015W/mkである。材料特性等の問題があるが実現可能などころにはあると考えている。ただし理論的にはまだ詰めないといけないところが多い。

- Q. : 材料の熱伝導に方向性はあるか。
- A. : つくりかたによる。射出成型などで応力を与えて固めれば方向性は出てくる。しかし

熱伝導をきちんとはかることが技術的にできていないため、実際にある方向への熱伝導度を落としているのか、単に熱を逃がしているだけなのかといった区別がつかない。

- Q. : 建材の断熱特性が時間経過とともに低減するということが、材料としてはそういうことでよいと考えているのか？
- A. : 値を測るということ自体は一定の基準の下で行われており、材料を作る側としてはそれに従っているだけである。しかし、そもそもポリマーである限り、ガスは逃げてしまう。あとはどのような状況で施行するかも大きく影響する。現在、建材センターなどで住宅の長期性に関する法令化の動きがあるようだがこの数値に関しては検討がとまっているように思う。
- Q. : 施工方法には課題があり、改善すべきだろう。また断熱材の JIS 規格の方でも長期性能を表記するという方向に向かっているので、経時劣化への対応のニーズは高い。
- A. : 技術者はいいものをつくりたいと考えているが、たとえば震災で需要が大きく増えたのは熱伝導度もそれほど高くないグラスウールだった。使う側の考えかたによる影響が大きい。断熱効率がよいなど、新しい情報が伝わらないと従来の安いほうにいつてしまう。したがって研究開発のモチベーションという点では厳しい面もある。

- Q. : Honeywell の新冷媒に関連し、クーラーやヒートポンプの冷媒開発で日本はいつも遅れを取るが、どこに問題があると考えるか？
- A. : 冷媒については政策的な側面もあるかもしれない。中国などでは一斉に同じものをおうとするので、製造するほうも計画を進めやすい。日本には開発能力はあるはず。
- A. : 需要見通しが立たないと生産が始まらない。アメリカ、中国は政策として出している。物質代替は 3-4 年間議論してきたが震災でとぎれてしまった。

中低温熱需給の革新に向けた基盤技術開発

断熱

革新的ノンフロン系断熱材の開発プロジェクトを通して

京都大学 工学研究科 化学工学専攻
大嶋正裕

発表の内容

- ・ イントロダクション
 - NEDOノンフロン系革新的断熱材開発プロジェクト
 - 目指すべき革新的断熱材とは
- ・ 熱伝導度を低下させるための方策
 - 高空隙率・微細化
 - 低熱伝導空間の導入
- ・ ナノセルラー作製の基本的手法
- ・ ポリマーとキセロゲルの複合材による断熱材

2/5

革新的ノンフロン系断熱材技術開発プロジェクト

社会的背景 (H19-23年度)

○断熱材用途のフロン系硬質ウレタンフォームの発泡剤：
 HCFC-141b→HFC-245fa/HFC-365mfc

○地球温暖化係数GWP100は920
 地球温暖化防止の観点からは好ましいものではない。

○現在、ノンフロン系発泡剤としてCO₂、シクロペンタン、超臨界CO₂が開発されているが、**既存の上記フッ素系発泡剤と比較すると断熱性能が大きく低下している。**

断熱材 (▲36.6%)

千t-CO₂

経産省資料H22年

プロジェクトの概要

○フロン系の建築用断熱発泡剤に代わる**ノンフロン系の革新的な高断熱材**を開発し地球温暖化防止に貢献する。 (熱伝導率0.024 W/(mK))

[超微細発泡、熱電光変換、熱流制御、高断熱素材製造技術開発等を検討]

断熱材の熱伝導率

$$\lambda = \lambda_{gas} + \lambda_{solid} + \lambda_{rad}$$

$$\lambda_{solid} = \lambda_{poly} \frac{\rho_{foam} (2 - V_{strut})}{\rho_{poly} 3}$$

$$\lambda_{rad} = \frac{16\sigma T^3 d_{bubble}}{3 \left[4.1 \sqrt{\frac{\rho_{foam} V_{strut}}{\rho_{poly}}} \right]}$$

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

Figure 1. The percent contribution from λ_g , λ_s , and λ_r to the λ factor of a foam from density (g/cm³).

T : 温度, σ : ボルツマン係数,
 V_{strut} : 気泡間の高分子の支柱の体積率 d_{bubble} : 気泡の直径
 ρ_{foam} ρ_{poly} : 発泡体と高分子の密度 λ_{poly} : 高分子の熱伝導率

断熱建材と熱伝導度

建築環境省エネルギー機構：住宅の次世代省エネルギー基準

$$\lambda = \lambda_{gas} + \lambda_{solid} + \lambda_{rad}$$

断熱材	熱伝導度 λ (W/mK)
ポリスチレンフォーム	0.028
ビーズ法ポリスチレンフォーム	0.034-0.040
ポリエチレンフォーム	0.026-0.042
フェノールフォーム	0.030-0.036
硬質ウレタンフォーム	0.024-0.026
吹き付けウレタン	0.026
グラスウール	0.036-0.050
ロックウール	0.047-0.058
紙繊維圧縮ボード	0.049

繊維系は25℃で、発泡系は20℃で測定

断熱材の基本的な考え方

- ・ もともと熱伝導度の低い材料で孔がいっぱい空いている。
- ・ 空気よりもっと熱を伝えにくいガスを孔に封じ込めれば、もっと熱伝導度の低い断熱材ができる。

発泡ガス	熱伝導度	GWP
フロンガス (CFC&HCFC)	0.011(HCFC142b)	7900-8500(CFC12) 4200(HCFC142b)
代替フロン(HFC)	0.0106(HFC365mf) 0.012 (HFC245fa)	890 560 (HFC245fa)
ブタン	0.0136 (0℃) (n-), 0.0159 (iso)	3
シクロペンタン	0.012(10℃) —0.0155 (50℃)	3
二酸化炭素	0.0165	1
窒素	0.024(25℃)	0

断熱性も経時劣化する

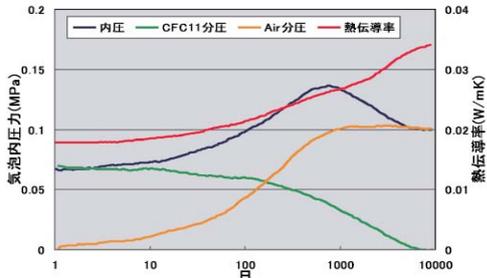


図4 フロンを使用した断熱材の気体組成と熱伝導率

小浦孝次氏 (株) S P
 断熱材の長期性能評価に関する研究

低熱伝導度方策1:微細化

MCPET (古河) 微細発泡で構造強度低下を緩和させながら、高発泡率を実現し増加

開発されて上梓されている10 μm以下の気泡群で作られているPET発泡体

ナノセルラー発泡体 (PMMA+PS) 10nm サイズ (京大)

500 ~ 100 μm Less than 10 μm Less than 60 nm

高断熱性 熱伝導率 0.024 W / (mK)以下
 断熱性の長期維持 25年?

低熱伝導率のガス/物質を樹脂で封印・発生

低熱伝導率のガスを入れても拡散で逃げてしまう。製造時の60%まで低下

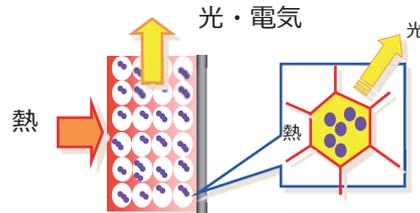
- CO₂でも、発泡体内に封印できれば、CO₂:0.016(W/m/K)を活かして低熱伝導率を保てる。
- CO₂を発生させる、エージングによる効率の変化は多少は少なくできる。

検討項目:

- 炭カル化・珪素化等を行い気泡壁のガスバリア性を上げる。
- 発泡体の最外殻(側)をガス透過性の低い物質でナノコートする。
- エアロゲル・キセルゲルを気泡内に封じ込める
- CO₂を発生させる(吸着材でガスを貯めておく/反応により発生させる。)

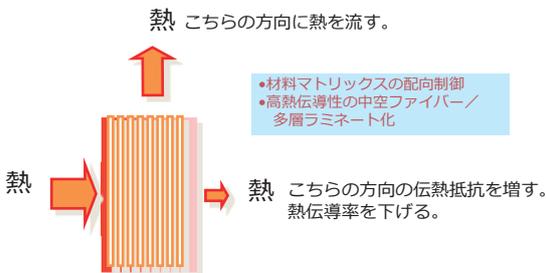
従来の断熱原理とは異なる断熱法

- 熱-光変換技術との融合
 - 熱エネルギーを光エネルギーに(研究者がいない。これからの技術)
- 熱-電変換技術との融合
 - 従来の熱・電変換材料による特殊断熱材開発



従来の断熱原理とは異なる断熱法(その2)

- 熱流制御技術
 - 熱の能動的制御のための最適発泡体設計



NEDOプロジェクト組織鳥瞰図(H19-20)

	コア実施内容	気泡微細化	気泡分布制御	低熱伝導性ガス封止	低熱伝導空間の導入 (ナノゲルハイブリッド)	装置開発	
京大	基本コンセプト+熱伝導度測定	○	○	○			PL
産総研(環境化学)	発泡剤ガスの開発			◎			ウレタン発泡
日清紡	ペンタンの安全管理			◎			
BASF-INOAC	炭化水素の吸着材			◎			
アキレス	バブル発生装置開発による気泡の微細化	◎				◎	
旭硝子	ポリオールの改良	◎					
産総研+シーアイ	ナノゲル+可変弾性				◎		ハイブリッド
アキレス	ナノゲル+ウレタン				◎		
旭ファイバーガラス	ナノゲル+繊維				◎		
カネカ	多層発泡ボード		◎			◎	発泡ボード
東レ	ナノアロイ+バリア性強化	◎		◎			

NEDOプロジェクト組織鳥瞰図(H21-22)

	コア実施内容	気泡微細化	気泡分布制御	低熱伝導性ガス封止	低熱伝導空間の導入 (ナノゲルハイブリッド)	装置開発
京大	基本コンセプト+熱伝導度測定	○	○		○	PL
産総研(環境化学)	発泡剤ガスの開発			◎		ウレタン発泡
旭硝子	ポリオールの改良	◎				
産総研(依田Gr)	ナノゲル+可塑剤				◎	ハイブリッド
アキレス	ナノゲル+ウレタン				◎	
カネカ	多層発泡ボード		◎			◎
東レ	ナノアロイ+バリア性強化	◎		◎		発泡ボード

基本の方針

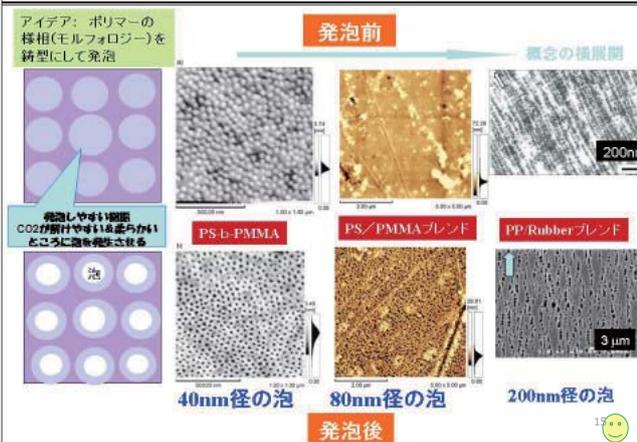
・高空隙率・微細化

* 炭酸ガスによるプラスチックの発泡成形
 ナノセルラー・マイクロセルラー

・低熱伝導空間の導入

* ナノゲル+多孔性樹脂のハイブリッド材

2009年までのナノセルラー微細化の研究



ナノセルラーの熱伝導率

発泡後 / 発泡前

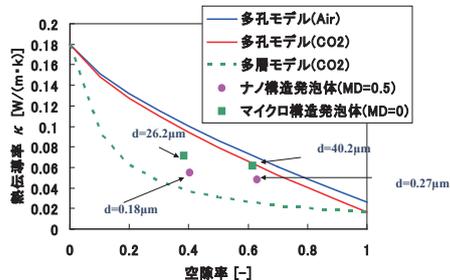
- PP/SEBS(80/20): 0.135 / 0.151 W/(mK)
- PEEK/m-PEI(60/40): 0.054 / 0.146 W/(mK)
- m-PEI 透明発泡体: 0.070 / 0.137 W/(mK)

下がるが目標0.024 W/(mK)に届かない

さらなる高空隙率が必要

ナノスケールの孔の効果

iPP/LIPP=5/5 blend系

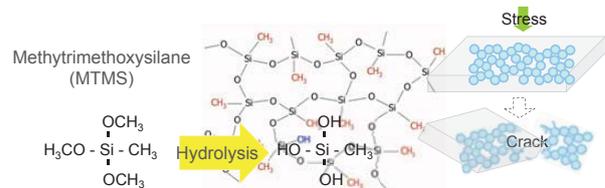


同一空隙率下でナノ構造発泡体の熱伝導率はマイクロ構造発泡体の熱伝導率値よりも0.01~0.015 [W/(m·K)]程度低い値を示す

エアロゲル・キセロゲルとポリマーのハイブリッド化

シリカエアロゲル

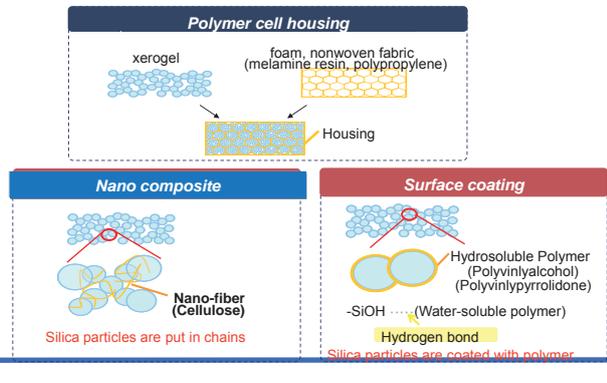
- ナノ孔で高い空隙率(90%)
- 熱伝導率が低い 0.015 W m⁻¹ K⁻¹
- 現状、2つの弱点: 1) 機械的強度がない 2) 超臨界乾燥(コスト高い)



複合材化

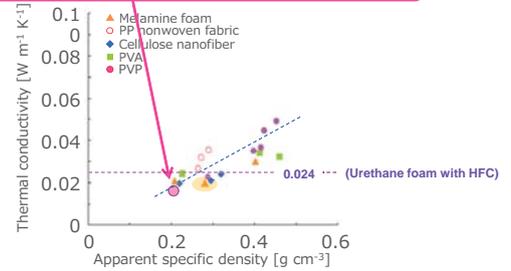
開発(ハイブリッド化)の基本方針

1. ポリマーでハウジング、2. ポリマーとコンポジット 3. ゲル粒子の表面塗布



熱伝導度

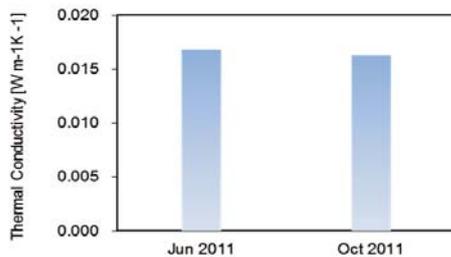
キセロゲル (単体) $0.016 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$



メラミン発泡体強化キセロゲル: $0.019 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

1wt%PVPコートキセロゲル: $0.023 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

メラミン強化キセロゲルの熱伝導率の長期性



おわりに

- ナノセルラー発泡の創製法のいくつかは確立できた。
- しかし、建材分野では、断熱材は厚みで抵抗が確保できるというコンセプトがある。用途展開の必要性
- キセロゲルと発泡可塑性樹脂発泡体の複合体は、プロセス開発によりコストと処理時間を低減していけば普及可能。(用途展開の必要性)
- ウレタン発泡については、ハネウエルの新ガスがHFCにとって変わる。(セントラル硝子日本では生産)

課題

- 真空断熱材
 - 施工性(カットすると真空が破れる)
 - 強度(コア材の開発)
- 長期性
 - 10年単位での低熱伝導率の保証をどうするか
 - ウレタンフォームについては新ガス(HFO1234系)が展開する
- 用途展開
 - グラスウールや既存の発泡ボードと比してコスト高。このコスト高をPay出来るほどの機能

3.2 「新吸着材 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）

再生可能エネルギーや未利用熱の有効利用による省エネ・CO₂排出削減という市場ニーズを背景として、新しい吸着材であるAQSOA（アクソア）を開発した。これを吸着式冷凍機やデシカント除湿機に適用している。

AQSOAは商品名であり、その製品は新規なゼオライト系無機材質の水蒸気吸着材である。低温で再生（水を放出）できることと、耐久性があることが特徴である。もともと三菱化学で10年くらい前に開発したもので、開発の過程では経産省・NEDOの補助金を受け、事業化は三菱樹脂でやることになった。粉としては売らず、部材、熱交換器、冷凍機などの形で売ることになっている。

水蒸気吸着材は、分子の格子状の構造の中に孔があいていて吸着工程ではその中にH₂Oが取りこまれていく。このH₂Oを取り出すのが脱着工程あるいは再生工程と呼ばれていて、エネルギーを必要とする。従来のシリカゲルやゼオライトよりも低温の熱を利用して脱着できるようにした。

電子顕微鏡写真で示されているように2つの構造をとり、それぞれ0.73nmと0.38nmの孔をもっている。このように孔の設計を精密にして合成できるようになったところに新規性がある。この孔には水だけがはいり、におい成分がはいらないので、脱着で出てくる水蒸気を加湿に使うこともできる。

吸着能力について、横軸に相対湿度、縦軸に吸着されている水の量をとったグラフで見ると、従来のシリカゲル（黒線）やY型ゼオライト（青線）が単調なグラフなのに対して、AQSOA（3種類の製品）はS型のグラフになっており、それぞれ狭い相対湿度範囲で大きな吸着量がある。さらに、相対湿度が10%から20%あっても吸着している水の量をほぼゼロにできるので、低温で再生できる。

また温度依存性が高いのも特徴である。従来のゼオライトの曲線（青線）は温度が違ってあまり変わらないが、AQSOAの曲線（赤線）は温度によって大きく違う。これを利用すると、狭い湿度範囲の中で、多量のH₂Oを低温で吸着し高温で脱着することができる。

ある吸着式冷凍機のサイクルの温度条件で比較した場合、AQSOAの吸着量はシリカゲルの約4倍ある。

耐久性については、吸着・脱着を百万回繰り返しても性能低下は約5%にすぎない。熱交換器としては20万回のサイクルを経てもほとんど性能が低下しない。

高い吸着能力を持つAQSOAを利用するには従来の熱交換機では伝熱が追いつかない。そこで、従来は熱交換器にシリカゲルの粉をつめこむところ、われわれは粉状のAQSOAで熱交換器をコーティングした。結果、粉1kgあたりでシリカゲルの10倍の性能となった。

吸着式冷凍機の原理は図のようになっている。動く媒体は水である。普通の電気式はフロンが液化したり、膨張したりするが、これは水が媒体となる。そのためノンフロンの冷凍機

と言える。

冷凍機の中は100分の1気圧くらいの低圧になっているため蒸発器(下)の水が約10°Cで気化する。その気化熱で蒸発器の中を通る管の中の水を冷やして冷水が作られる。気化した水蒸気はAQSOAを塗布した吸着型熱交換器(左)に吸われる。このとき発生する吸着熱は、管を通して冷却塔の水を流して除去する。4~5分ぐらいで吸着量が飽和するため、熱交換器の状態を左右で切りかえて、管を通して温水で熱を与え、水蒸気が脱着して凝縮器(上)に行くようにする。凝縮器にも冷却水を流している。凝縮器で結露した水は蒸発器に戻る。

従来の吸収式冷凍機(単効用)、シリカゲルを使った従来の吸着式、そしてAQSOAを使った新しい吸着式を比較すると、従来の吸収式では定格出力を出すのに88度の温水が必要である。従来の吸着式でも90%の出力まで到達するには80度の温水が必要であるため、吸収式に対する優位性に乏しかった。対して新しい吸着式では65度くらいの温水で定格出力が出る。以上はAQSOA-Z01品種によるものだが、前川製作所はAQSOA-Z05品種を適用したAHPを学校空調に適用し、さらに温度の低い60°C以下の温水でほぼ定格出力が出ることを実証している。

環境性について。吸着式冷凍機は、排熱を使うため電気冷凍機を使う場合に比べて電力消費を減らすことができる。これにより、1年間1冷凍トンあたり2~4トンのCO₂排出を削減できる。CO₂を1トン削減するのに必要な初期投資は2万円ぐらいと見積もられている。なお、定量的評価は困難だが、排熱を減らすことによって都市ヒートアイランド現象の抑制にも寄与する。

環境省地球温暖化対策技術開発事業の平成22~23年度の住宅オフィス等分野では、15件中5件が吸着材関連、うち3件(前川製作所、東京大学生産技術研究所、三菱樹脂)がAQSOAを使った技術開発だった。このうち三菱樹脂では熱交換器の最適化をした。フィンピッチを従来の3分の1の0.62mmまで細かくし、ソーラー駆動の10kWのヒートポンプ設備で従来型と比較評価した。その結果、従来の冷凍機の2~3倍の性能が出た。

熱交換器を最適化すると装置をコンパクトにできる。冷却塔一体型の10kWの冷凍機を商品化した。ドイツの吸着式冷凍機メーカーの製品と比較しても優位の性能をもつ。もう少し大きな規模では、太陽熱利用の冷房システムの、ショッピングセンターに導入した事例、先に述べた前川製作所による学校に導入した事例がある。後者では室内の冷却は輻射冷房により潜熱負荷除去はデシカントによる潜熱顕熱分離空調である。また、コジェネと組み合わせて電力・冷水・温水を取り出せるシステムも考えている。

今後の取り組みについて。短期的にはコストダウンと性能向上、適用システムの構成・提案が課題である。中長期的には、コジェネを含む中低温排熱利用に対するインセンティブが社会の構造としてほしい。たとえばドイツではコジェネの電力が再生可能エネルギー電力として認められているため、冷房は熱の側でやろうというインセンティブがある。

- Q. : 耐久性に関して、20万回というのは実際はどれくらいの期間になるか？
- A. : 4分で吸着脱着を繰り返すので、昼間だけ使うとして5年くらいになる。継続評価中であるが、少なくとも10年以上保持することを確認したい。

- Q. : 太陽光発電+電気式ヒートポンプと、太陽熱吸着型ヒートポンプのコストを比較するとどうか。
- A. : 電気式ヒートポンプの電力COPが3くらいならば同等か勝っているが、7~8だと負ける。しかし熱は熱で使おうという発想も大事だと考えている。

- Q. : SCP'のベースになっているkW/Lの数值は、従来の熱交換器ではどのくらいか？
- A. : AQSOAを適用した従来の熱交換器がSCP' = 30 ~ 60kW/L程度なのに対して、フィンピッチを狭めた新開発の熱交換器ではSCP' = 60 ~ 150kW/L程度である、運転温度条件によって変動するが、新開発の熱交換器は従来のものと比較して、概略2~3倍の性能を実現した。一方、SCP (kW/kg)で比較すると、シリカゲル熱交換器の4倍から6倍(最大で10倍程度)の性能が見込め、SCP = 0.5 ~ 0.6 kW/kg程度である。

- Q. : 工場の80℃以下の熱を使って冷水をつくれるのはよい。熱COP = 0.5だと、さらに冷却が必要になる。80℃の熱が100kWあったときに、凝縮器のところで冷やす熱量は100kWか50kWか。
- A. : 熱COP=0.5の場合、温水100Wだとできる冷水は50Wとなり、合計150Wを冷却塔で処理する必要がある。
- Q. : 工場には大量の排熱があるので、サイズを100倍くらいにして、冷却水を冷やして蒸留塔などいろいろなところに供給するようにすると、たとえばガソリンの収率が上がって、収益に貢献できると思う。どこまで大きくできるか？
- A. : 今のところラインナップできているのは100冷凍トンまで。将来的には1ユニットあたり300~500冷凍トンで、トレーラーで運べる大きさで考えている。
- Q. : 固定型でその10倍以上のものがほしい。
- A. : まず300~500冷凍トンを目指すが、それができれば大規模化はむずかしくないようだ。コンビナートで冷却水が余っているところならば使えそうだ。そのほかには船舶利用で海水による冷却でもエンジン排熱利用をすることも考えている。

- Q. : ドイツとの比較を踏まえて、日本が競争力をつけるためには何が必要か？
- A. : コスト優先、品質優先だけでなく、熱を使わざるを得ない状況が必要ではないか。ドイツでは総合効率の条件もあるが、コジェネ排熱利用を進めようという意志がある。もちろん両国の情勢の違いはあるが、こういう動きが日本でも起きることを希望している。技術面では冷凍機のCOP向上、小型化などが課題。

MITSUBISHI PLASTICS

中低温熱需給の革新に向けた基盤技術開発ワークショップ
 <セッション2 熱需要を克服するための研究開発課題>

新吸着材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

2012年7月21日
 三菱樹脂株式会社

MITSUBISHI PLASTICS

★背景・目的

★市場ニーズ：再生可能エネルギーや低温排熱の有効利用による
 ①省エネルギー
 ②省CO2

★膨大で未利用の低温排熱をもっと利用したい・・・

- ◆低温排熱の冷熱需要への適用 (燃料電池、コジェネレーション、産業排熱)
- ◆再生可能エネルギーの一層の有効活用 (太陽熱、地熱、バイオマス熱)

80~100°C以下の熱

MITSUBISHI PLASTICS

AQSOA®システム概念

再生可能エネルギー	コジェネレーション熱	未利用熱	エンジン排熱
ソーラー熱 地熱(温泉熱) バイオマス熱 (発電・チップBなど)	ガスコジェネレーション μガスコジェネレーション 燃料電池	工場排熱 ゴミ焼却熱 その他未利用熱	車両 船舶 その他

新吸着材 AQSOA® アクソア®

吸着式冷凍機(AHP) 温水→冷水への転換 冷水供給 冷房空調

デシカント除湿機 除湿・加湿 涼房空調 調湿

MITSUBISHI PLASTICS

水蒸気吸着材

湿潤空気(水分子) → 吸着 → 飽和 → 完全脱着 → 脱着(再生) → 加熱(乾燥)空気 → ヒーター → 排熱利用

吸着・脱着サイクル 耐久性が必要

●シリカゲル: 菓子の乾燥剤
 ●ゼオライト: 家庭用除湿機

MITSUBISHI PLASTICS

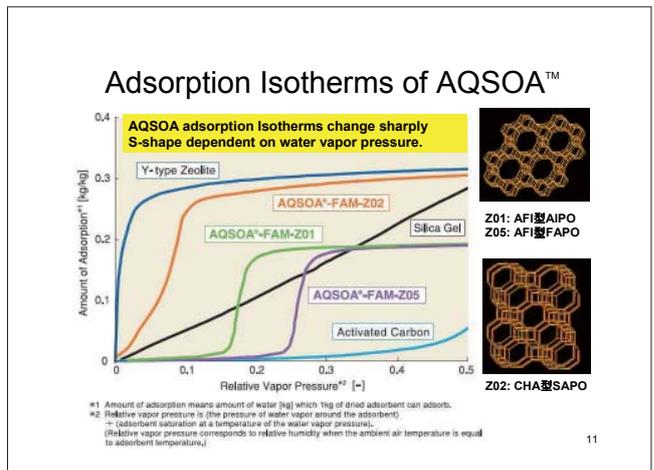
新吸着材AQSOA®の特徴

▲AQSOA®の電子顕微鏡写真と構造

- ・三菱化学が独自に開発したゼオライトからなる新しい水蒸気吸着材です。
- ・低温再生が可能です。
- ・狭い操作範囲で大きな吸着量が得られます。
- ・臭気の移行が少なく、加湿が可能です。
- ・20万回以上の吸着・脱着の耐久性を確認しています。

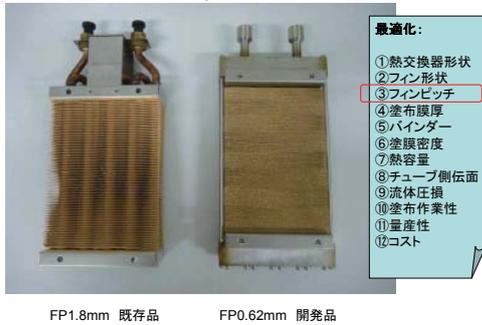
▲H17-19年度: 経済産業省 エネルギー使用合理化技術開発費補助金(新規高性能吸着材の開発)に係る補助事業

▲H21年度: NEDO イノベーション実用化開発費助成金 量産化に成功、現在、三菱樹脂で事業化



セッション2

塗布熱交換器の最適化



FP1.8mm 既存品 FP0.62mm 開発品

30

ソーラークーリングシステム



* 地球温暖化対策技術開発等事業の一環として、二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金の助成を受けて設置

31

塗布熱交換器評価用10kW級AHP設備



32

SCP' (kW/ℓ-HEX) 比較

SCP' 比	冷水出口温度 °C									
	7.8~8.1			10.3~10.5			11.8~12.0			
	温水入口温度 °C									
(-)	75	70	65	75	70	65	75	70	65	
冷却水入口温度 °C	27	1.9	2.1	-	2.3	2.3	-	1.9	2.2	-
	29	2.4	2.2	-	1.9	2.2	-	2.6	2.4	-
	31	2.0	2.7	-	2.3	2.3	-	2.0	3.0	-

* 上表の数値=開発した新熱交換器SCP' /従来の熱交換器SCP'

33

従来AHP(10kW級中型)との性能比較

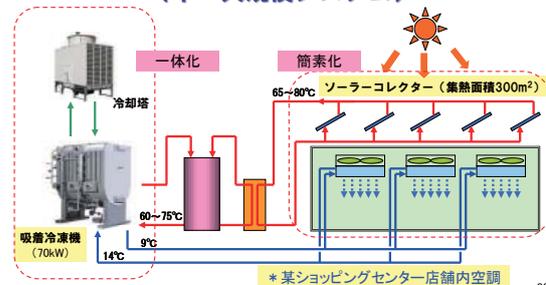
Maker	Union Industry	Invsor	Invsor	Sortech	Sortech
Model	Prototype	LTC-09	LTC-10	AGS08	AGS15
Absorbent	AGSOA-201	AGSOA-201	AGSOA-201	Silica Gel	Silica Gel
(German Standard) Cooling Capacity [kW] 72-27-18-15 [C]	17	9	10	8	15
(German Standard) COP [-] 72-27-18-15 [C]	0.54	0.61	0.6	0.6	0.6
L [mm]	1260	1300	1100	1060	1340
H [mm]	1150	1650	1370	940	1390
W [mm]	800	650	750	790	790
Weight [kg]	550	370	330	265	530
Volume [m ³]	1.2	1.4	1.1	0.8	1.5
[G]CP/weight [kW/ℓ] *従来比	30.9 (100)	24.3 (80)	30.3 (100)	38.2 (100)	28.3 (85)
[G]CP/volume [kW/m ³] *従来比	14.7 (144)	6.5 (64)	8.8 (87)	10.2 (100)	10.2 (100)

AHPユニット外観

37

太陽エネルギーによる冷水利用 MITSUBISHI PLASTICS

ソーラークーリングシステム事例 (中・大規模システム)



38

3.3 「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）

200～400℃程度の中温熱、主にエンジンからの排熱等に着目し、その有効利用技術として化学反応を利用した蓄熱技術の可能性を検討している。

自動車では省エネが進み排熱が減っている。電気自動車に至ってはむしろいかにして空調等に熱エネルギーを渡すかが課題となっている。例えば、トヨタのデータを基に整理してみると100km走る電気自動車の場合、夏場の冷房使用により30%減の70km、冬場であれば暖房、除湿、防眩などにより40%減の60kmしか走れない。この減少部分は空調エネルギーであり、リチウムイオン電池で賄わなければいけない。しかし高価なリチウムイオン電池を使って暖房、冷房を供給するのはもったいない。この部分を安価な材料でカバーできれば電気自動車は安くなるのではないか。そこに蓄熱技術を利用したいと考えている。

一方、内燃エンジンは、大量の熱を排出している。エンタルピー収支では燃料が持つエネルギーを10割とすると、走行には2割程度しか使われず、残りの8割は損失である。排気損失が3割、冷却水損失が3割、合計6割程度の熱を排出しているため、最新技術によりこれらの排熱を回収し利用することが望ましい。

そこでサーマル・ハイブリッド・ヴィークルという夢の車を考えている。既存のハイブリッド車では余剰の軸出力や制動出力を無駄なく電気に蓄え、再生利用することで省エネを実現している。フェーズはかなり異なるが、熱に関しても同様に、余剰熱を蓄える装置があれば、必要な時に熱を供給することができる。このような蓄熱装置が実現すれば面白いと思う。

蓄熱装置としての化学反応利用に、どのような技術課題があるか述べる。ターゲットは中温熱である。わが国の工場からの200℃以上のガス排熱は、日本の全ガス排熱量の30%に相当する。エクセルギーから考えると、200℃以上の熱は価値が高いため、この排熱を有効利用できるような技術が必要であろう。電力産業では排熱のエンタルピー量は大きい、ほとんどは100℃以下であり、エクセルギー的には極めて上手く回収されている。一方、化学産業や鉄鋼業では200℃以上の排熱が多く、これらを利用することは日本全体に効果がある。よって、この温度域において蓄える技術、変換する技術が必要である。

従来は顕熱変化、潜熱変化が使用されていた。これらは物理変化なので再生可能で信頼性も高いので広く普及している。一方、化学蓄熱はまだあまり進んでいない。しかし化学変化は物理変化に比してエネルギー密度が高く、損失の少ない長期間の蓄熱が可能のため、うまくマネジメントできれば従来に無い高効率なエネルギー貯蔵装置になると考えている。可逆的な化学反応があれば、高密度なエネルギー貯蔵・出力ができる可能性があるため、そこに注目して化学蓄熱材料開発と蓄熱実証研究を進めている。

化学蓄熱のもう一つの可能性は作動温度である。中低温域（100～300℃）には、相変化材用途の候補が多数あるが、高温域（300℃～）には候補が少ない。化学蓄熱はこれら中温、高温域の蓄熱を高効率に実現できる可能性がある。

「酸化マグネシウム／水系化学蓄熱」の研究を例に説明する。酸化マグネシウムは水と反応して水酸化マグネシウムになり熱を放出する。逆に水酸化マグネシウムに熱を加えると分解して酸化マグネシウムと水になる。分解反応で熱を蓄え、水和反応で熱を取り出すことができる。ただし化学式自体は単純だが実際に利用しようとする材料設計、反応器設計に課題がある。この反応は水の蒸発をとまなうため蒸発熱が必要であり、その熱源確保にも配慮が必要である。しかしながらエンジン排熱、太陽熱、地熱等の中・高温熱の蓄熱・出力を高効率に行うことが可能なので材料、蓄熱装置の検討を進めている。以降で材料の高性能化の方向性について述べる。

まず操作温度域の拡大が可能であることを明らかにしている。酸化マグネシウムの反応は、用いる水酸化マグネシウム ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) の化学物性に依存して使える温度域が決まる。水酸化物の反応温度と分解圧力の関係は反応平衡線として算出できる。分解圧がほぼ1気圧になる温度域がその材料の蓄熱操作温度域である。水酸化マグネシウムの場合は約200～300℃である。さまざまな材料の反応平衡線を描くと、100℃以下の低温側には水酸化ニッケル ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) や水酸化コバルト ($\text{Co}(\text{OH})_2$) があるが、100～200℃の領域には化学反応が存在しないことが分かる。100～200℃域の蓄熱は重要でありながら、実用が遅れている。そこでこの中温領域の蓄熱を対象に材料開発を検討し、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と $\text{Ni}(\text{OH})_2$ との、また $\text{Mg}(\text{OH})_2$ と $\text{Co}(\text{OH})_2$ との複合化を考案した。複合材料 $\text{Mg}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}(\text{OH})_2$ と $\text{Ni}(\text{OH})_2$ - $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 物理混合物との熱分解曲線比較を図に示す。単に物理的に水酸化マグネシウムと水酸化ニッケル粉末を混合した場合（図中の破線）、温度を常温から高温に上げるとまず $\text{Ni}(\text{OH})_2$ の分解反応により熱を吸収して重量が減少し、続いて330℃付近で $\text{Mg}(\text{OH})_2$ が熱を吸収して再び重量が減少した。一方、原子オーダーで混合した場合（図中の実線）、熱分解曲線が一つのみになった。すなわち蓄熱温度が低い、新しい温度域に対応した材料を合成することが分かった。加えて混合比に応じて脱水蓄熱温度の設定が可能になることも分かった。これらより、蓄熱温度需要に応じた蓄熱材料のオーダーメイドが可能になることが明らかになった。この手法を用いて、新しい蓄熱材料の開発のために色々な組み合わせを検討することも必要であろう。

次に、伝熱性の向上が重要である。現在、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ のペレット粒子を用いているが、伝熱性が悪い。そこで伝熱性が高く化学的にも安定な膨張化グラファイト (EG) と混合して複合化材料の作成を試みた。さらに、塩化カルシウムを助剤に用いることで反応活性が高くかつ、反応耐久性のある複合化学蓄熱材料 (EMC) ができた。EGの混合、助剤の導入がブレークスルーだった。EMCは成形性に優れているため熱交換器に合わせた成形が可能となった。これにより従来のペレット材料に比べて伝熱面の熱伝導性が格段に向上し、化学蓄熱の高性能化が期待できる。

最後に、脱水反応の高速化がある。 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ペレット粒子に比べ EMC は反応速度が速く、短時間で熱吸収、熱放出が可能である。EMC は従来困難であった中温熱の蓄熱ができることが重要な点である。

化学蓄熱の経済性は、EVの暖房に使うことを仮定した場合、リチウムイオン電池を水酸化マグネシウムの化学蓄熱で代替できるのであれば材料費は1/30に抑えられる。パッケージを考えると高価になるが、価格競争性はあると考えられ、EVの低価格化に貢献可能である。

以上を踏まえて中温熱利用技術のポテンシャルをまとめた。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、未利用の中温排熱の有効利用を検討する余地がある。対応する技術は化学蓄熱材料の開発。化学蓄熱材料と高伝熱性物質を複合化することで高伝熱性化と高活性化ができることが重要である。技術開発項目としては複合化学蓄熱材料の開発があるが、未開拓である。今回はマグネシウムとニッケルの例を示したが、その他にどのような候補があるか、多くの組み合わせを考える必要がある。またいかにして熱交換器を含むトータル蓄熱装置を形作るかも、重要な技術開発項目であると考えている。

- Q. : どうやって混ぜているか。

- A. : 今は水、エタノールなどの溶媒に分散させたところで膨張化グラファイトを混ぜている。MgOをどう分散させるか、そこにどうグラファイトと複合させるかがキーポイント。

- Q. : 材料の熱伝導率はどれくらい変わるか。

- A. : 水酸化マグネシウムペレットは0.1 ~ 0.2 W/mK、膨張化グラファイトは10 ~ 20 W/mK。複合材料は0.2 ~ 10程度までに向上できる可能性がある。蓄熱密度の観点から膨張化グラファイトの複合量を減らしたいので、材料調整の最適化の検討が必要である。



Material

**セッション2 熱需要を克服するための研究開発課題
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
 yukitaka@nr.titech.ac.jp

中低温熱需給の革新に向けた基盤技術開発
 平成24年7月21日(土) 14:20-14:50
 独立行政法人科学技術振興機構(STR)
 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット
 JST東京本都別館：東京都千代田区五番町7 Ks五番町

© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 1

講演趣旨

エネルギー利用には大量の熱の排出が伴う。排出された熱の活用はエネルギー利用において重要である。熱を貯蔵する技術(蓄熱)が重要な機能になる。ここでは高性能が期待される化学反応を用いた化学蓄熱の可能性を提示する。

とくに、エンジン等から排出される200～400℃域の中温熱の回収・有効利用に着目し、中温排熱利活用にむけた化学蓄熱導入の意義を説明する。さらに、新たな材料開発事例など化学蓄熱関連の発展可能性を解説する。

© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 2

ハイブリッド、電気自動車の排熱不足

図 発表時に提示

37 km/L
2 million JPY

HV

ICE ハイブリッド, HV, PRIUS
3rd, トヨタ, 2008-
1st: 1997, 2nd: 2003
<http://toyota.jp/prius/>

図 発表時に提示

55 km/L

PHV

プラグインハイブリッド PRIUS, PHV, トヨタ, 2009-

http://www2.toyota.co.jp/news/09/12/n09_087.html

図 発表時に提示

3 JPY/km
(22 JPY/kWh)
5 million JPY

EV

電気自動車, EV 日産Leaf
<http://ev.nissan.co.jp/LEAF/>

燃費向上で排熱が減少
→室内暖房が困難

© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 4

電気自動車と室内空調

室内空調 無し 100 km
 夏季、冷房 あり 70 km (-30%)
 冬季、暖房、除湿(防眩) あり 60 km (-40%)

Li-ion 電池の空調利用

Ref. E. Ono, Toyota, 3rd meeting for market development of environmental friendly car, Ministry of Environment of Japan, Feb. 2010.
 © Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 5

内燃エンジンのエネルギー収支

- 乗用車のエネルギー収支
 - 走行20%
 - 排気損失30%

燃焼エネルギー

排気損失 30%

冷却水損失 30%

エンジン本体損失 10%

摩擦・補機損失 10%

出力 20%

出力 20%

走行

図 エンジン廃熱エネルギーの熱量ポテンシャル(上) 熱量収支、(左) 排出温度分布
 参考: 鈴木、青木「乗用車のエネルギーフローマップ」、化学工業社、2005

© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 6

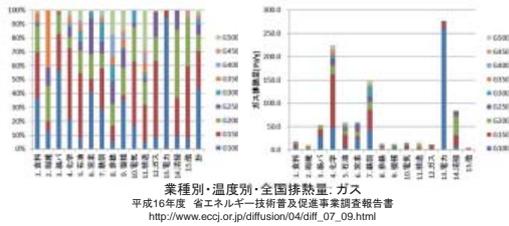
サーマルハイブリッドヴィークル

エンジンむけ蓄熱ハイブリッドと電力ハイブリッドとの機能対応

加藤之貴ら、エネルギー―資源、Vol. 29, No. 2, pp. 17-21 (2008)
 © Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 7

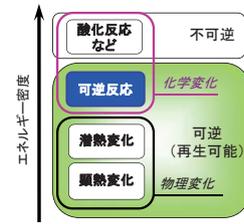
中温排熱の発生

- 200°C以上のガス排熱量はC重油熱量換算で日本の年間総CO₂排出量13.4億ton(H15)の1.6%に相当。
- わが国の工場からの200°C以上のガス排熱は日本の全ガス排熱量1.00 x 10¹⁸ J/yの30%に相当
- 200°C以上の中温熱の利用は化学、鉄鋼、石油、清掃産業で重要



© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 8

反応熱：凝縮、吸着、化学反応



種々のエネルギー変化のエネルギー密度

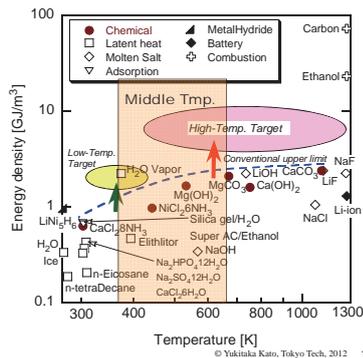
参考：加藤之良、蓄熱技術-理論とその応用-第一編
 一 潜熱蓄熱、化学蓄熱、蓄熱システム、蓄熱システム、2007

© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 10

化学蓄熱の可能性

Fig. 種々のエネルギー材料のエネルギー貯蔵密度と作動温度の関係

加藤「蓄熱のエネルギーロードマップ」、化学工業社 (2005)



© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 11

MgO/H₂O化学蓄熱の構成

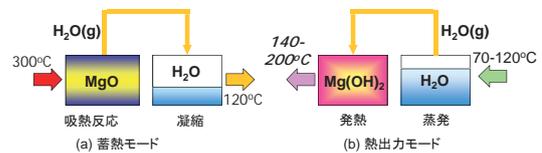
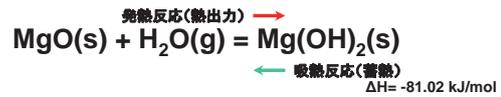


Fig. 夜間余剰電力利用型の化学蓄熱駆動原理(増熱モード)

© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 13

反応材料複合効果

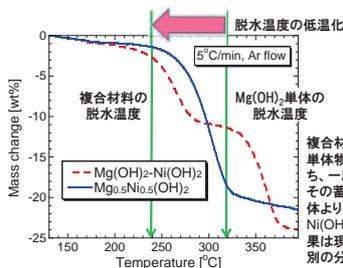


図 複合材料Mg_{0.5}Ni_{0.5}(OH)₂とNi(OH)₂-Mg(OH)₂物理混合物との熱分解曲線比較

J. Ryu, R. Takahashi, N. Hirao and Y. Kato, J. Chem. Eng. Japan, 40(13), pp. 1281-1286 (2007).

© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 15

複合混合による反応平衡の移動

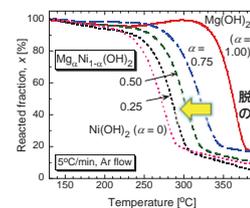


図 水酸化マグネシウム/水酸化ニッケル複合水酸化物、Mg_αNi_{1-α}(OH)₂の混合比と脱水分解温度の温度変化

J. Ryu, R. Takahashi, N. Hirao and Y. Kato, J. Chem. Eng. Japan, 40(13), pp. 1281-1286 (2007).

© Yukitaka Kato, Tokyo Tech, 2012 16

熱伝導性の向上: 膨張化グラファイトの導入

化学蓄熱の課題	解答
Mg(OH) ₂ 粒子の低い熱伝導度。→蓄熱速度の伝熱律速による限界	高い熱伝導性を有する膨張化グラファイト (EG) の導入 → EGは高い熱伝導度性、熱交換形状にあわせた柔軟な成形性、化学的不活性 → ミクロオーダーでのEGとMg(OH) ₂ の混合 → 反応促進、結合材料として塩化カルシウム (CaCl ₂) の添加



Mg(OH)₂ 粒子 → 低熱伝導度性
 膨張化グラファイト(EG) → 高熱伝導度性
 膨張化グラファイト-塩化カルシウム複合水酸化マグネシウム (EMC)

Progress in Nuclear Energy, 53, pp. 1027-1033 (2011).

蓄熱材料の成形性と伝熱性向上

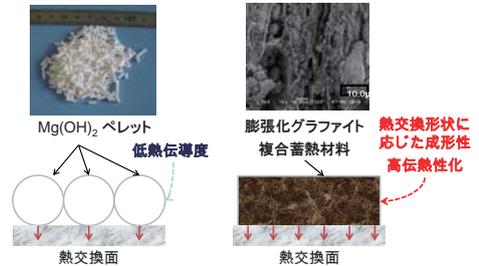


図 膨張化グラファイトの複合による化学蓄熱材料の成形性、伝熱性の向上

© Yukinaka Kato, Tokyo Tech, 2012 18

反応の高速化、高性能化

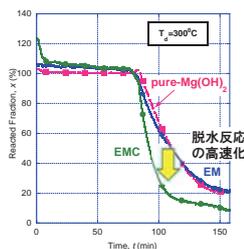


図 膨張化グラファイト-塩化カルシウム複合Mg(OH)₂の脱水反応の高速化

ST Kim, Y Kato, Prog. Nuclear Energy, 53, 1027-1033 (2011).

© Yukinaka Kato, Tokyo Tech, 2012 19

EV向け化学蓄熱の経済性

表. 電気自動車暖房に対するLiイオン電池とMgO化学蓄熱の経済性比較

	Li-ion 電池	MgO/H ₂ O 化学蓄熱 [1]	化学蓄熱/電池比
エネルギー貯蔵量 [MJ]		86.4 [2]	
冬季空調需要割合 [%]		40 [3]	-
冬季空調需要 [MJ]		34.6	
熱エネルギー貯蔵質量密度 [kJ/kg]	540 [4]	500 [5]	0.93
熱エネルギー貯蔵体積密度 [kJ/L]	900 [4]	275 [5]	0.31
価格 [JPY/kg]	15,000 [4]	500 [6]	0.03
車載質量 [kg]	64	69.1	1.1
車載体積 [L]	38.4	125.7	3.3
価格 [円]	960,000 (パッケージ)	34,560 (材料費のみ)	0.036

*MgO/H₂O化学蓄熱はシステム費用を今後検討する必要がある。

Y. Kato, Innstock2012, Lleida, Spain (2012)

© Yukinaka Kato, Tokyo Tech, 2012 20

中温熱利用技術のポテンシャル

- 中温排熱(100-300°C)は未だ未利用で有効利用の検討の余地あり
 - 自動車の効率的な燃料利用、CO₂排出削減のための熱マネジメント技術の必要性
 - 産業熱プロセス、再生可能エネルギーの負荷平準化
- 求められる蓄熱技術: 排熱回収、サーマルバッテリー
- 技術対応: 蓄熱材料開発、熱利用むけ熱交換機構開発
 - 反応平衡の移動→化学物質の複合化
 - 材料の高伝熱性化と高活性化→高伝熱性物質の複合化

© Yukinaka Kato, Tokyo Tech, 2012 21

化学蓄熱材料の技術開発項目

- 複合材料の開発(→今まで未開拓)
 - 化学材料
 - 伝熱促進材料
- 材料の最適化(→今まで未開拓)
 - 混合比、成型方法
 - 熱交換機を含むトータル蓄熱装置の開発
- 実装置の貢献性の検討
 - 移動体→高効率化、低価格化
 - 産業熱プロセス→化学、製鉄産業の省エネルギー
 - 再生可能エネルギー→負荷平準化、高効率化

© Yukinaka Kato, Tokyo Tech, 2012 22

3.4 「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）

ナノチューブをはじめとした少し変わった材料と熱伝導との関連について、ナノ材料分野の現状を紹介する。ただしナノチューブは発見からもう 20 年経つので「新」材料というよりも中堅の材料かもしれない。なお、ナノチューブの熱応用に関してはデータが足りていないという認識のため中立的な立場に立っている。

分子熱工学という分野がある。そこでは熱工学で言われる 3 つの機能、熱を伝える、蓄える、換える、ということを既存の材料の組合せではなく、材料そのものを設計してシステムに統合していこうというアプローチをとる。伝える、の部分が今回の話で、蓄える、の部分は既に化学蓄熱としてご紹介があった。換える、の部分は熱電変換が含まれる。

ナノ材料とは次元が異なる材料、言い換えると低次元材料である。具体的な材料として、ナノチューブまたはフラーレンについて述べる。炭素で考えると 0 次元結晶のフラーレン、1 次元のナノチューブ、2 次元のグラフェン、3 次元のダイヤモンドとなる。炭素に限らず、最近ではポリマー鎖のようなものも 1 次元と考えてよいのではないかとされている。

熱という観点からの低次元材料の機能について紹介する。高熱伝導性または低熱伝導性が得られる材料、高効率エネルギー変換（変換先は電気や光）につながる材料などがある。最近、問い合わせが多いのは熱スイッチ。その他には熱ダイオード、フォノンックスと呼ばれる概念がある。

固体の熱伝導を考えるにあたり、念のためフォノンについて説明する。結晶がある運動エネルギーをもって振動している時、その運動エネルギーが左から右へ伝わることで熱伝導という現象が起きる。この結晶振動をフーリエ変換するとさまざまな周波数や波数を持つ波に分解される。それぞれの波をフォノンと呼ぶ。ただし、フォノンは量子であり波の振幅は量子化される。フォノン粒子は、ある比熱、ある速度、ある平均自由行程、という量を持って移動していると考えることができる。そうしたフォノン気体モデルという式（概念）で議論されることが多い。粒子が持つ 3 種の量を掛け合わせたものが熱伝導率となる。高い熱伝導率が必要な時は、いずれかの量が非常に高い、またはすべてが高い材料がよいということになる。低い熱伝導率が必要な時はその反対。こうした考え方が材料探索の基本的な指針である。

以上の概念をベースに、当該分野の研究者は低次元材料を用いて熱伝導機能を有する材料の開発を過去 10 年くらい続けてきた。それによる利点は、たとえば高熱伝導率を追求する場合は表面があると波が伝播しづらいが、ナノチューブは表面を持たないため伝播させることができること。あるいは 1 次元であることで配向性が保たれること。反対に低熱伝導率を達成したい場合は界面を多数作ることでフォノンを何度も散乱させられること、などいろいろ挙げられる。

では実際に計測した熱伝導率はどうかという話になると、ナノチューブ 1 本とナノチューブ

ブ 10 本程度の束の熱伝導率データの表にあるとおり、必ずしも値は一致しない。合成方向の違いや研究の一貫性のなさ（合成する人と計測する人が異なる）など原因は様々。しかし複数研究が行われればおおよそその値は見えてくる。そういう現状にある。

他の材料ももちろんありうる。MIT のグループの報告ではポリエチレンというポリマーをスピニングして作るナノファイバーは、アモルファス状態で 0.1W だったものが 100W まで上げられたとのこと。ただしこの場合の課題はスケールアップ性。

実際に使うためには材料をスケールアップさせて膜材料やバルク材料にしていく必要がある。大きく分ければ膜材料、複合材料、相変化材料に分類される。ナノチューブだと、米国のベンチャー企業が、大人が横になれるサイズの膜材料を作れるところまで実現させた。またファイバーであれば 1 日あたりキロメートル単位の生産が可能になっている。まだ十分ではないが、進歩している。また材料としては熱伝導率だけを上げればよいというわけではないが、カーボンナノチューブをとってみれば他の性能はほどほどに良好で一番遅れているのが熱伝導性であるという状況。

膜材料にしたときの熱伝導率の変化について。下がるという報告が数件あり、ナノチューブのロバスト性が検証された。いくつかの要因が徹底的に調べられた結果、1 本であれば何をやっても結構強固な熱伝導率を持つことが分かってきた。したがって熱伝導率を下げないためにはナノチューブ間でちゃんと熱を伝えないといけないということ。

そのようなとき、ちょうど 1 ヶ月前の学会で、ケンブリッジ大学のグループが直径の大きいナノチューブを作って潰し、ナノチューブ間の接触面を点から線へと大きくするというアプローチを紹介していた。密度を高めることでバルク材でも高い熱伝導率が実現できる可能性を示していた。

もう一つ複合材の話について。液体にナノ粒子を入れる方法は自動車のクーラントで多く見られる。アメリカで 34 の大学・研究機関が、特定の標準化サンプルに対して同じ計測を行うというベンチマークテストが行われた。ナノ粒子を入れると劇的に熱伝導率が上がると昔から言われていたが、そのようなことはないということが示された。ただし特別な結果が得られなかったからといって価値が無いわけではない。この場合はナノ粒子を入れたときの粘性と分散の安定性の両立が課題である。

ナノ粒子の候補が得られない場合は、元々の熱伝導率が低い材料に入れるという手法も見られる。最近では熱伝導率が 20 倍になったという報告もある。

こうした研究では設計性も重要になる。シミュレーション技術が非常に発達してきており、様々な設計が可能になってきている。

緻密な構造で熱伝導率を下げるアプローチもある。ナノ粒子やナノワイヤを使いワイヤの表面に粗さをつけて熱伝導率を下げる。また、極小の穴を等間隔に空ける技術を使った研究も盛んである。ただし設計指針がまだ無いことが課題。これに対して我々は穴を空けたり粗さをつけたりする時にどのくらい熱伝導率が下がるかという指標を示す設計ツールの作成に

取り組んでいる。

熱スイッチング素子について。ヘキサデカンにグラファイトを入れ、熱伝導率をスイッチングする例がある。相変化によるスイッチングなので温度を変える必要がある。熱物性を制御するために温度変化でスイッチングさせるとするのは、アプリケーションへの適用が難しいだろう。

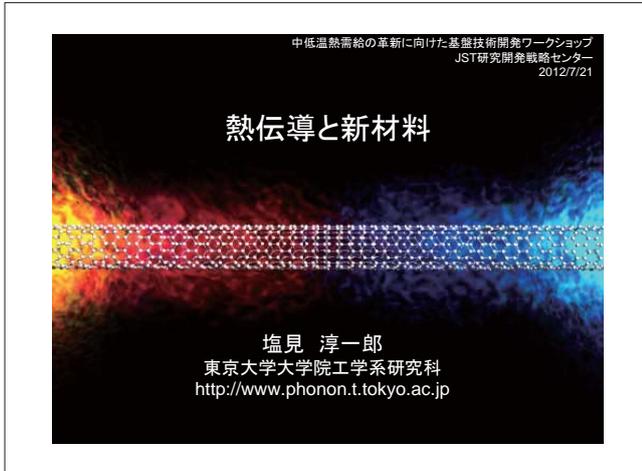
最近では、熱ダイオードあるいはフォノンニックスという、左から右へ、右から左へ、熱伝導率が異なる材料の研究開発が進んでいる。中国では大きな研究所を立ち上げ、本格的に取り組み始めた。しかし、熱が非常に強い非平衡性を持つことを利用した技術なので、熱の非平衡長の範囲でしか使えないという問題点もある。興味深く、現実的であるとは思いますが、エネルギーに直結するのか分からない。

まとめとして、ナノ材料の熱伝導率は良さそうである。コントロールされた実験環境下でとても良いデータが出ているが、実用環境下でそれがいかに存続するかが今後重要になる。その他、短期、中期、長期の研究開発項目を挙げる。物理研究として非常に面白い材料であるが、ものづくりへのシフトも重要。最終的にはシステム全体の熱インピーダンスを考慮した3次元アーキテクチャの創成を行う流れに進めば成り立つと思う。

- Q. : um オーダーから mm オーダーへスケールアップしたときの材料の性能の連続性が重要だが、それに対するアプローチはどうなっているか。ナノ構造をつぶしたら性能がよくなったというのは単にグラファイトに近づいただけではないか。ナノ材料の伝熱性のよさは何か。
- A. : 性能の連続性は以前からボトルネックだった。ナノ構造をつぶすというアプローチは、必ずしもグラファイトに近づいたわけではない。もう1つのアプローチとしてナノ材料界面の機能化がありうるが、熱をターゲットとしてやっているのは少ない。電子をターゲットとする場合と構造が違うことも一因であろう。
- Q. : カーボンナノチューブを膜材料として自動車に応用としたときに、横には熱を逃がせるが、その膜に熱がはいらないということがある。膜を作る技術として自在に配向という研究はあるか。
- A. : まだそこまで行っていない。表面修飾でくっつける、焼結などなら進むだろう。またダイヤモンドに替わる機能性の検証も進んでいない。
- Q. : 接合すると安定な材料になりほかのものにくっつきにくい。研究がもっと進むと実用的アプリケーションに進むだろう。
- A. : 材料合成の人はきれいなものをつくりたがる。接合の立場から見るときれいでないほうがよいかもしれない。ものづくりからの最適化はこれからのテーマだろう。

- Q. : ケンブリッジ大のアプローチはどちらから進んだか (図参照)。
- A. : つくったのはワイヤー状まで。ほしい構造にするところはまだ。発表で紹介した材料の大部分はアメリカのもの。

- Q. : 機能性という意味では、熱、電気、光、化学とある。たとえば電子は通すが熱は通しにくいとか、光は通すが熱は通しにくいとか、実際に作れるかどうかは別としても理論的な材料設計の形として方向性を示すようなことはできるのか。
- A. : JST のファンディングで熱電プロジェクトを進めている。熱伝導と電気伝導を decouple しようとしているが、普通はむずかしい。金属ではどちらも電子がはこぶ。結晶だと、対称性が悪いとどちらも運びにくい。ところがナノの世界になると、それが decouple することが知られている。平均自由行程が電子よりもフォノンのほうがずっと長くなるためである。このあたりが基本的なアプローチになる。一方の光については、究極のフォノンアブゾーバがあって、そこで熱を吸収したり光を散乱したりできればよいという話はする。そういう技術ができれば、薄膜にして光が透過できるくらい薄くするという事は考えられるだろう。
- Q. : 研究の動向は。
- A. : 電子と熱については応用物理学会系の先生方がやっている。光は別で、しかも熱を気にしている印象はあまりない。アメリカでは機械工学(熱)の人が物理を勉強してやっている。



分子熱工学

分子スケールで素材・現象を制御することによって、
 革新的な伝熱機能を発現する

マクロスケール 分子スケール

熱を伝える

熱を蓄える

熱を換える

2

「新」ナノ材料

0次元 フラーレン ナノ粒子 1次元 CNT ポリマー鎖

2次元 グラフェン 超格子構造 3次元 ダイヤモンド

熱伝導機能

- 高熱伝導
- 低熱伝導
- 高効率熱エネルギー変換(→電気, 光)
- ON/OFF熱スイッチ
- 熱ダイオード, フォノンニクス

フォノン

$u(r, R)$
 $\ddot{u}(\omega_1, k_1)$
 $\ddot{u}(\omega_2, k_2)$
 $\ddot{u}(\omega_3, k_3)$
 \vdots

- Phonon: quantized lattice vibration (quasi-particle)
- State of phonon is defined by
 - Frequency: ω
 - Wavenumber: k
 - quantum number: n
- Energy of phonon with frequency ω : $n\hbar\omega$

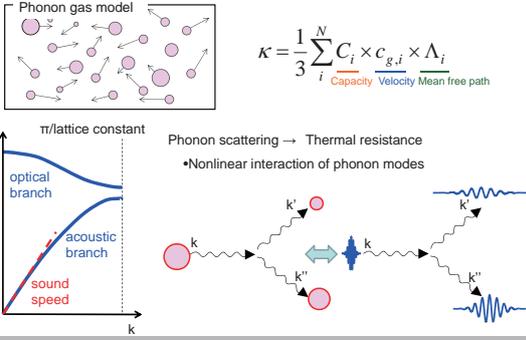
フォノン気体

Wave picture (normal modes) Particle picture (phonon gas)

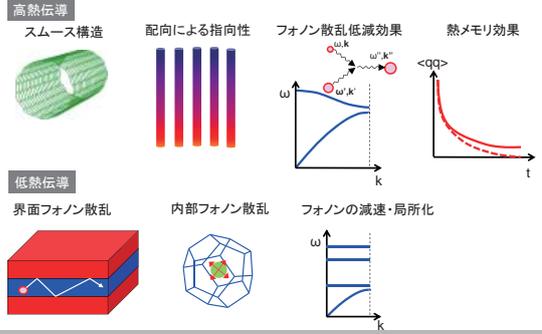
Phonon gas model

セッション2

フォノン輸送



低次元材料の熱伝導機能性



CNTの熱伝導率

孤立CNT

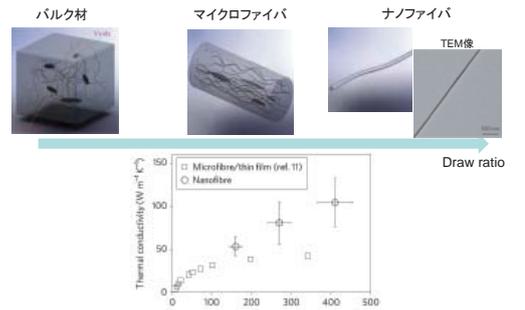
Authors	Year	Measurement Method	Multi/single	Length (μm)	Diameter [inner] (nm)	Growth method	Temp (K)	Thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹) @R.T.	Cross section (nm ²)
Kim, et al	2001	Steady state (Micro device)	Multi	2.5	14(-)	Arc discharge	8-370	3100	md ² /4
Fuji, et al	2005	Steady state (r-type)	Multi	3.71, 8.91, 28.24, 21	9.8[5.1]16.1[4.9]	Arc discharge	100-320	2069/1550/500	md ² /4
Choi, et al	2005	3ω (Self heating)	Multi	1.1/1	42[26]/46[27]	CVD	R.T.	830/650	md ² /4
Choi, et al	2006	3ω (Self heating)	Multi	1.4	20[10]	CVD	R.T.	300	md ² /4
Pop, et al	2006	Electrical measurements	Single	2.6	1.7	CVD	300-800	3500	mbd
Aliev, et al	2010	3ω (Self heating)	Multi	10	10	CVD	R.T.	600	-

CNT束

Authors	Year	Measurement Method	Multi/single	Length (μm)	Bundle diameter [CNT] (nm)	Growth method	Temp (K)	Thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹) @R.T.	Cross section (mm ²)
Kim, et al	2001	Steady state (Micro device)	Multi	2.5	80/200[14]	Arc discharge	8-330	1300/330	md ² /4
Shi, et al	2003	Steady state (Micro device)	Single	4.2/2.66	10/148	CVD	20-300	140/3	md ² /4
Hsu, et al	2009	Raman	Single	11.7-12.3	7.4-10.3	CVD	R.T.	118-683	md ² /4
Aliev, et al	2010	3ω (Self heating)	Multi	10	120-150[10]	CVD	R.T.	150	-

9/22

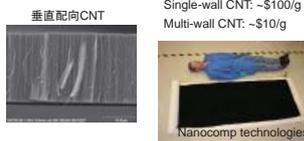
超高熱伝導率ポリエチレン (MIT)



S. Shen et al Nature Nanotech. (2010)

ナノ材料を用いた機能性材料

- 膜材料
 - CNT/パッケージペーパー
 - CNT配向膜



- 複合材
 - 添加 (ポリマー, ナノ流体)
 - 焼結・析出 (ナノ構造化バルク材)



応用例: パッケージングでの熱界面材料

Thermal conductivity
 X
 Mechanical compliance
 X
 Electrical conductivity
 X
 Chemical stability

- 相変化材

CNT膜材料の熱伝導率

Authors	Year	Measurement Method	Single/multi	Film thickness / length (μm)	Diameter (nm)	Alignment	Growth method	Temp (K)	Thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹) @R.T.	Filling rate (%)
Hone, et al	1999	Steady state (comparative)	Single	5000	1.4	Random	Arc discharge	8-350	35	70
Yi, et al	1999	3ω (Self heating)	Multi	1000-2000	30	Random	CVD	10-300	25	1.5
Hone, et al	2000	Steady state (comparative)	Single	1.35	1.4	Magnet aligned	Laser ablation	10-410	220	70
Yang, et al	2002	Thermo reflectance	Multi	10-50	40-100	Vertical aligned	PECVD	R.T.	15 (200/tube)	7-8
Wang, et al	2005	Photothermal	Multi	20	100-200	Vertical aligned	PECVD	R.T.	0.15 (27.3/tube)	0.5
Iwai, et al	2005	Steady state	Multi	15	10	Vertical aligned	CVD	R.T.	(1400/tube)	-
Hu, et al	2006	3ω	Multi	13	10-80	Vertical aligned	PECVD	295-325	74-83	-
Tong, et al	2007	Thermo reflectance	Multi	100	20-30	Vertical aligned	CVD	R.T.	250	10
Shaikh, et al	2007	Laser Flash	Multi	200	10	Vertical aligned	CVD	R.T.	8.3	-
Pal, et al	2008	Steady state (comparative)	Multi	14/40/70	10-70	Vertical aligned	CVD	R.T.	0.8 (37/tube)	2
Panzer, et al	2008	Thermo reflectance	Single	28	1-2	Vertical aligned	PECVD	R.T.	8	12
Akoshima, et al	2009	Laser Flash	Single	1000	3	Vertical aligned	CVD	R.T.	1.9 (52/tube)	3
Ishikawa, et al	2011	Raman	Single	11-17	2	Vertical aligned	CVD	R.T.	2	1.6

12/22

CNT熱伝導のロバストネス

Intrinsic resistance $R < 1 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{K/W}$, $\sigma > 10 \text{GWm}^{-2} \text{K}^{-1}$

Phonon waveguides

Kondo, Yamamoto et al (2006) | Chang et al. PRL 92 (2004) | Nishimura et al. APEX 2 (2009) | Nishimura et al. IJAP 91 (2012) 015102

Extrinsic resistance

Graph showing K/K_0 vs Inter-tube distance / nm

5.00um

ケンブリッジ大のアプローチ

km/day furnace | Fiber spinning | ミクロ構造 | ナノ構造

CNT同士の接触面積が大きく、密度の高い構造を作ることによって、バルク材であっても高い熱伝導が実現できる可能性。

Dr. Krzysztof Koziol and Prof. Alan Windle
 Materials Science & Metallurgy, Macromolecular Materials Laboratory

ナノ流体 (Nano particles, Nanorods)

Buongiorno et al, "A Benchmark Study on the Thermal Conductivity of Nanofluids", Journal of Applied physics 106, 094312 (2009).

34大学・研究機関によるベンチマーク

"The nanofluids tested in the exercise were comprised of aqueous and nonaqueous basefluids, metal and metal oxide particles, near-spherical and elongated particles, at low and high particle concentrations. The data analysis reveals that the data from most organizations lie within a relatively narrow band 10% or less about the sample average with only few outliers. The thermal conductivity of the nanofluids was found to increase with particle concentration and aspect ratio, as expected from classical theory. There are small systematic differences in the absolute values of the nanofluid thermal conductivity among the various experimental approaches; however, such differences tend to disappear when the data are normalized to the measured thermal conductivity of the basefluid. The effective medium theory was found to be in good agreement with the experimental data, suggesting that no anomalous enhancement of thermal conductivity was achieved in the nanofluids tested in this exercise."

ただし、「Anomalous」でないからといって、価値がないわけではない。課題は、粘性や分散の安定性との高立にある。

炭素ナノ・ポリマー複合材

Aligned multi-wall CNT/Epoxy | Multi-layer graphene/Epoxy

Thermal Conductivity Enhancement (D_{eff}) vs Volume Fraction | Enhancement Factor (E) vs Volume Loading Fraction (%)

Marconnet et al, ACS Nano, 5, 4818 (2011) | Shahil et al, Nano Lett. (2012)

メリット: 機械的強度、電気伝導性と合せた効果
 課題: さらなる高密度化を実現する方法、スケールアップ性。

シミュレーション技術の発展

Intrinsic defects^[1] | Environmental effects^[3,4] | Films^[5]

Deformation^[2]

[1] Kondo, Yamamoto et al (2006) | [2] Nishimura et al (2012) | [3] Hida et al (2012) | [4] Ong, et al, Phys. Rev. B 84, 165418 (2011) | [5] Volkov, et al, J. Appl. Phys. 111, 053501 (2012)

ナノ構造化による低熱伝導率

Nanograins | Rough nanowires (Silicon) | Holey structure (Silicon)

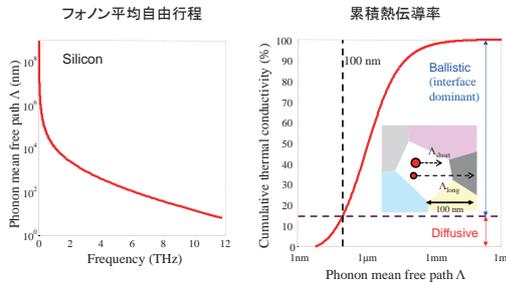
Precipitated nanostructures: Q-dot, Nanowire, Nano-vacancy

Tang et al, Nano Lett. 10 4279 (2010)

課題: 熱伝導低減効果を予測する解析ツールが未発達。

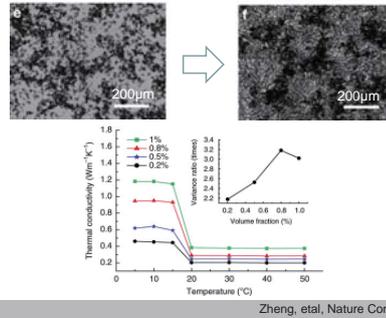
セッション2

フォノン輸送のマルチスケール性



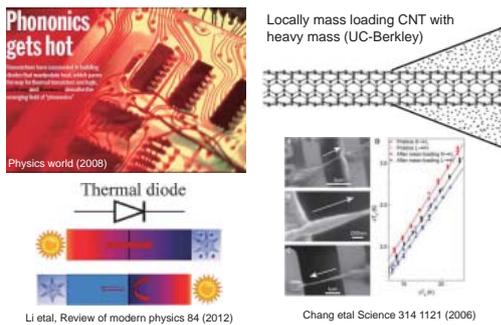
熱スイッチング素子

Graphite flakes in Hexadecane



Zheng, et al, Nature Comm. 2 (2011)

熱ダイオード、フォノンクス(?)



まとめ

- ナノ材料の熱伝導特性
 - 1次元, 2次元ナノ材料は潜在的に高い熱伝導率を有すると同時に、比表面積が大きいため境界フォノン散乱の影響を強く受ける(←熱伝導低減)
- 膜材, 複合材, パルク材の性能
 - CNT配向膜の熱伝導率は孤立CNTよりも1~2桁低い、不純物、欠陥、変形等には比較的ロバストであること考えると、CNT間の弱い熱接触が主要因と考えられる
 - CNT集合体の高機能化への課題は、スケールアップ、高密度に加えて、マイクロ構造の最適化(点→線→(準)面熱接触)
 - ナノ流体に「Anomalous」な効果はない→高アスペクト材料が良い。
 - ポリマーなどの低熱伝導率材料の向上であれば添加は効果的。
- 低熱伝導材料
 - フォノンの平均自由行程の理解が進んだことで、ナノ構造によってフォノン効果を散乱し、熱伝導を低減する「設計」が可能になりつつある。
- 熱スイッチ(素子)
 - まだ報告例が少ない、温度ではなく他の状態量の制御、ON/OFF比の向上が課題
- 熱ダイオード、フォノンクス
 - 原理的には可能だが、フォノンの非平衡長の範囲に限られる。

これからの研究開発項目

- 短期
 - 実用の構造、環境における性能ベースでのナノ材料の評価、選択、性能向上。
- 中期
 - スケールアップ合成技術
 - 熱物性をターゲットにした材料合成研究 } 合成と熱物性評価の一体型研究
 - マルチスケール解析技術による設計
 - 物理研究→モノづくりへのシフト(eg. 単層VS多層, 質VS量)
- 長期
 - ナノ材料界面の熱機能化
 - 機能の複合化(機械, 電子, 光, 化学)
 - 低次元材料の3次元アーキテクチャ
 - システム全体の熱インピーダンスを考慮した性能向上

3.5 「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）

熱を利用する際には必ず流体間での熱移動を伴うが、この流体間の温度差が大きい程、仕事として本来取り出せるはずのエクセルギーが失われる。従って熱エネルギー利用において熱交換の温度差を小さくすることは、本質的に重要な課題である。

一般に金属、液体、気体という順に熱伝導率は低下するため、気体側の伝熱促進はエネルギー機器全体の効率に大きな影響がある。また気相は密度も小さいためポンプ動力の問題から低風速で熱交換される場合が多い。このような低風速時における気相伝熱促進が重要である。例えば空調用熱交換器では熱抵抗の7割程度が空気側に起因しており、そこでの伝熱促進は空調機の性能向上を支配する重要な技術である。

1990年代は材料費も比較的安かったため、熱交換器を大型化し、伝熱面積を拡大することで空調機の性能向上が達成できた。しかし近年の材料費の高騰を受け、より小型で軽量の熱交換器のニーズが高まり、結果として伝熱促進が強く求められるようになった。

熱交換器では伝熱量と同時に圧力損失も重要な評価因子であるが、一般に両者はトレードオフの関係にある。たとえば空調用熱交換器内の流れは層流であり、そこでは前縁効果が平板に対する数倍の伝熱促進を実現しているが、同時に圧力損失も同程度以上増加する。一方、ガスタービン翼冷却では流れは乱流であるが、伝熱量を確保するためかなり大きな圧力損失が許容される。このように用途に応じて流動条件や評価指標は異なるため、それらに適した伝熱促進技術を提案する必要がある。以下では、今後期待される伝熱促進技術として層流域における乱流促進技術、および乱流域における非相似伝熱促進技術を紹介する。

空調用熱交換器内の流れはレイノルズ数が100程度の層流であり、前縁効果による伝熱促進技術が用いられる。一方、産業用ラジエータや給湯用ヒートポンプ等の次世代のエネルギー機器のニーズに対応するためには数百から千程度のレイノルズ数域における伝熱促進が必要となるが、研究例が少なく熱交換器の最適化も十分なされていないとは言い難い。

一般に乱流では層流と比べて伝熱が顕著に促進されるが、圧力損失あたりの伝熱量も層流より優れている。従って従来層流と考えられてきた低レイノルズ域において、効果的に乱流を生み出すことができれば、伝熱性能の飛躍的な向上に繋がる。

乱流遷移現象は100年以上の研究の歴史があるものの、依然として古典力学の未解決問題の一つである。実際、経験的にレイノルズ数2000程度で乱流に遷移することは知られているが、その機構解明には至っていない。

しかし、近年の数値シミュレーションや理論解析の発展により、乱流遷移に至る物理過程が明らかにされつつあり、それに対応する理論の整備も進んでいる。また乱流制御に対する制御理論の応用もこの20年で大きく進展している。これまでの乱流制御研究は主に乱流抑制、剥離抑制を通じた抵抗低減に焦点が置かれてきたが、今後は同様の手法を逆の発想に、すなわち乱流促進およびそれに伴う伝熱性能向上に応用することで低レイノルズ数域における伝熱特性を飛躍的に向上できる可能性がある。

更なる伝熱性能の向上を目指す場合、圧力損失の低減が課題となる。通常の伝熱促進技術は、伝熱促進と同程度以上に圧力損失が増大する。この課題に対して、近年、我々のグループでは流れ場と温度場の支配方程式や境界条件に立ち返り、伝熱を増やしつつ圧力損失を低減する非相似伝熱促進の可能性を精査してきた。その結果、数学的には様々な非相似伝熱促進のシナリオがあり得ることが分かった。特に速度場はベクトル量だが温度場はスカラー量であるという本質的な違いは、非相似伝熱促進を実現する上で普遍的な指針を与えてくれることが分かった。

このような考えのもと、我々のグループでは、平行平板間における完全発達乱流場において、圧力損失を抑えつつ、伝熱のみを選択的に促進する制御を実証するための数値実験を行っている。理想的な制御入力としては壁面から任意の吹き出し／吸い込みを仮定する。

一般に、流体システムの最適化は多自由度の非線形最適化問題となり、数学的にも困難な課題である。例えば壁面上の全ての点において任意の吹き出し／吸い込みや変形を与える場合、その自由度は壁面上の計算格子点数と等しくなる。またその時間的な変化を許す場合は、更に自由度が増加する。

このような多自由度最適化問題に対して設計パラメータの自由度を縮退させずに最適化を行う手法として、流体制御の分野では、随伴解析に基づく最適化手法が開発されている。制御入力のコスト、圧力損失のコスト、そして伝熱のメリットの線形和としてコスト汎関数を定義し、それら各項の重み係数を変えることによって応用先のニーズに応じた伝熱面の製造コストや圧力損失と伝熱のバランスを考慮した最適化が可能になる。こうした最適化を行った結果、比較的小さな吹き出し／吸い込み量（バルク流速の5%程度）において、伝熱を非制御時の2倍に促進しつつ圧力損失を20%以上低減することに成功した。また最適制御入力は流れ方向に周期的な波の様相を呈し、一定の位相速度で下流に伝播する進行波であることが分かった。このような制御入力モードは直感的には得ることが難しく、随伴解析を応用することで初めて得ることができる。

一般に、流体と固体の界面は、熱・物質移動や化学反応等の機能を創出する場であり、単位体積あたりの界面密度を増やすことで、エネルギー機器の性能向上が達成される。界面密度の増加に伴って、その逆数で流路の長さスケールは小さくなるが、依然として1 μ mもしくはそれ以下の領域は工学的に十分に設計できていない。例えば燃料電池電極では、多孔質材料を用いることで電気化学反応の生じるサイトを増加させ発電性能を高めている。しかしこのような大きな可能性を秘めた多孔質体ではあるが、その工学応用は依然として限られており十分に活用されていないのが現状である。その理由として複雑形状内部の輸送現象、反応現象の予測、3次元構造の最適化およびその製造プロセスの確立等の課題が残っているためと考えられる。多孔質体の3次元構造最適化では性能を支配する輸送と反応といった複数現象のトレードオフを考慮する必要がある。しかし複数の現象が全体性能に影響を及ぼす条件下において最適な3次元構造を求めることは容易ではない。大きな自由度を有する多孔体の3次元構造に対しても随伴解析に基づく最適化が強力な設計ツールとなると期待される。

以上述べてきたように、これまで流体の分野で発展してきた理論や流体制御に関する知見はエネルギー機器の設計にも転用できる。これまでは研究者の直感に頼った設計が主であったが、今後、流体制御の分野で培われた数学的、理論的手法を応用することで、従来の性能を凌駕する革新的なエネルギー機器を実現できることが期待される。具体的な課題としては層流域における乱流促進技術、乱流域における非相似伝熱促進技術、そして多孔質3次元構造の最適化が挙げられる。これらは次世代のエネルギー機器を支える基盤技術の一つとなりうる。

- Q. : 壁から吹き出し吸い込みを行うというのは仕事を加えているということか。
- A. : 仕事を加えているが、それはポンプ動力に比べて小さく、ポンプ動力と吹き出し動力を合わせた仕事量は減少する。
- Q. : 現実の応用を考えると流速（レイノルズ数）は一定の変動幅をもつ。これに対して遷移域を固定するような制御というのには不安がある。
- A. : 試した例ではレイノルズ数を4倍にするくらいでは制御波の形は変わらなかった。ただし一般的には注意が必要。

- Q. : マイクロチャンネル熱交換器が開発されていると思うが、ここでのご発表は、スケールのどの程度をイメージしているか。
- A. : 紹介した例ではエアコンなどを想定しているが、マイクロチャンネル熱交換器を想定しても計算できる。マイクロチャンネルになると圧損が大きくなるので、壁の形を工夫することで圧損だけを下げることができれば、伝熱を保ちながら圧損は比較的小さいという状態が見つかるのではないかと考えている。

- Q. : 3次元最適化問題について、計算上は可能だが実際に製作できるのかという問題があると思うが、いかがか。
- A. : 多孔体に関しては、焼結温度や昇温速度などを扱ったシミュレーションが始まってきているので、それが進めば製造方法を考慮した最適化も可能となるだろうと考えている。アカデミアではカナダの研究室でレーザーを利用した三次元造形の動きはある。

2012年7月21日
 JST 研究開発戦略センター
 ワークショップ

顕熱熱交換

東京大学生産技術研究所
 長谷川 洋介, 鹿園直毅

損失=失った仕事

温度 T の熱媒体から取り出せる最大仕事 $= \frac{c_p (T - T_0) + c_p T_0 \ln \frac{T_0}{T}}{T_0 - 25^\circ\text{C}}$
 温度 T の熱媒体が放出できる全エネルギー量 $= \frac{c_p (T - T_0)}{T_0 - 25^\circ\text{C}}$

T_{high} から T_{low} まで温度を下げたときに減少する仕事 $\propto \frac{T_0 \ln \frac{T_0}{T_{\text{high}}}}{(T_{\text{high}} - T_0)} - \frac{T_0 \ln \frac{T_0}{T_{\text{low}}}}{(T_{\text{low}} - T_0)}$

物質の熱伝導率

$$q = \lambda \frac{dT}{dx}$$

q : 熱流束 (W/m^2)
 λ : 熱伝導率 (W/mK)

- 金属 ≫ 液体 ≫ 気体
- 気体の伝熱促進が重要
- かつ、ポンプ動力の少ない **低速域** が重要

伝熱工学資料より

空調用熱交換器の熱抵抗比

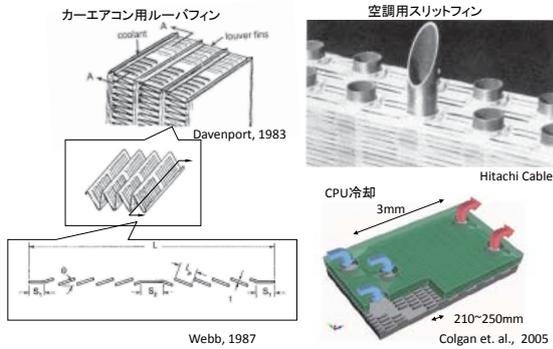
高効率冷凍・空調・給湯機器の最新技術, 2011

素材価格

日刊鉄鋼新聞 <http://www.japanmetaldaily.com/>

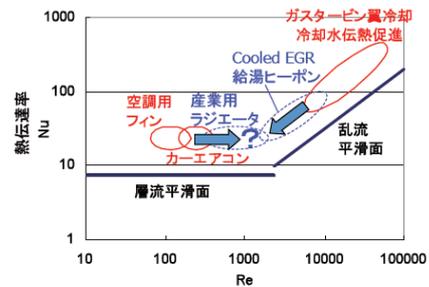
伝熱 vs 圧損

前縁効果の応用例

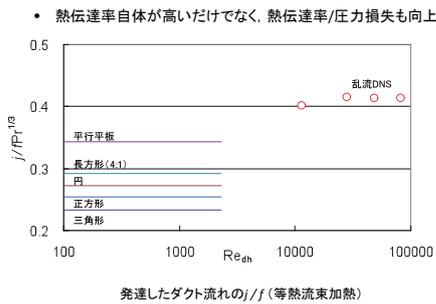


新しい伝熱技術のニーズとシーズ

・ 前縁効果 vs. 乱流化

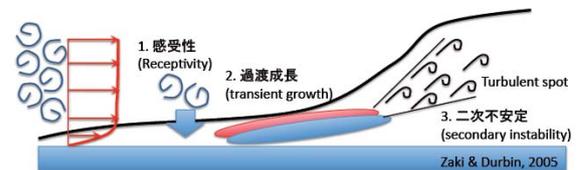


層流と乱流



乱流遷移機構

- 自然遷移
 - ✓ 古典的線形安定論に基づく (Tollmien, 1929; Schlichting, 1933)
 - ✓ 外部攪乱が0.5%以下のみ適用可能 (Schubauer & Skramstad, 1947)
- バイパス遷移
 - ✓ 外部攪乱が大きい場合、遷移が早まる
 - ✓ 自然遷移の不安定モードであるTS波を経由せずに遷移

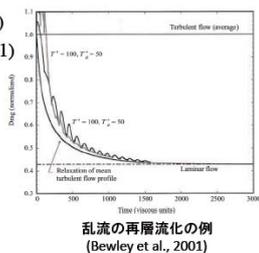


乱流制御への制御理論の応用

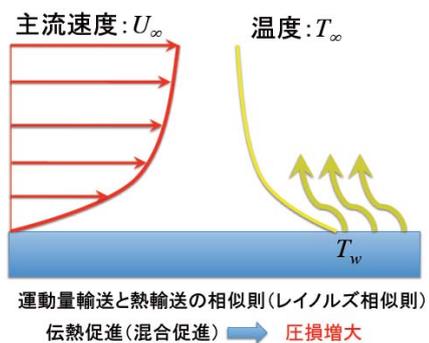
- 壁乱流の直接数値シミュレーション (Kim, Moin & Moser, 1989)
- 物理モデルに基づく能動制御
 - ✓ アクティブ・キャンセレーション (Choi et al., 1993)
- 制御理論の応用
 - ✓ 準最適制御 (Lee et al., 1998)
 - ✓ 最適制御 (Bewley et al., 2001)

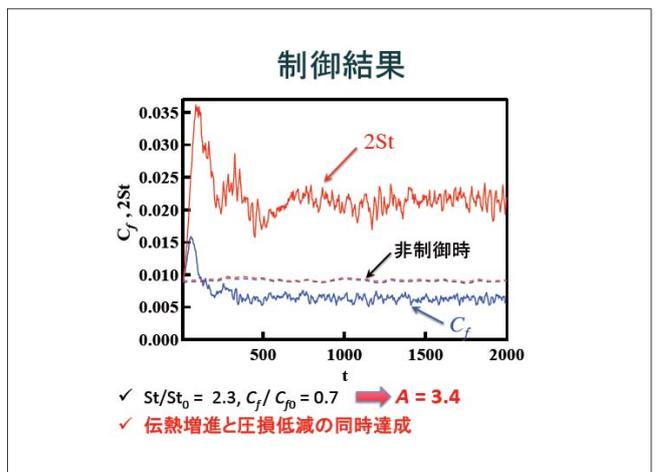
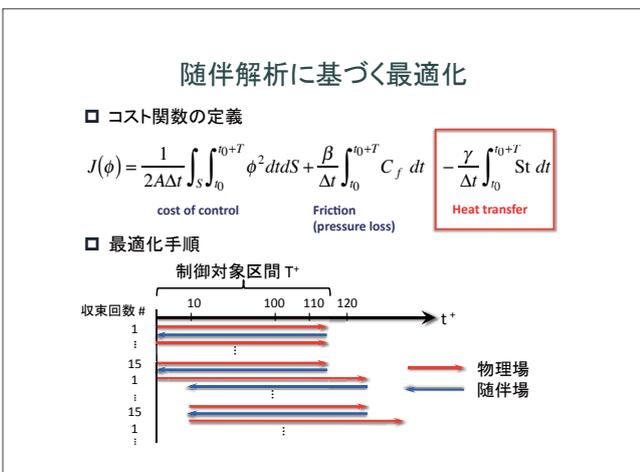
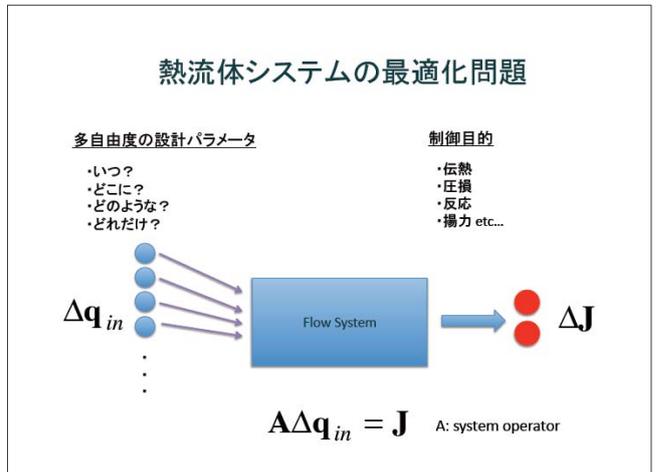
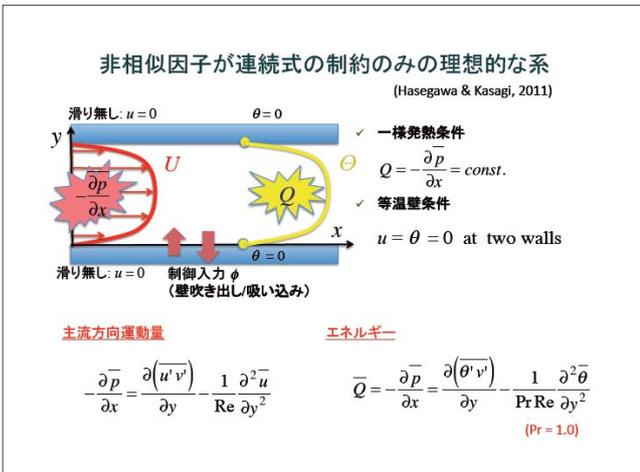
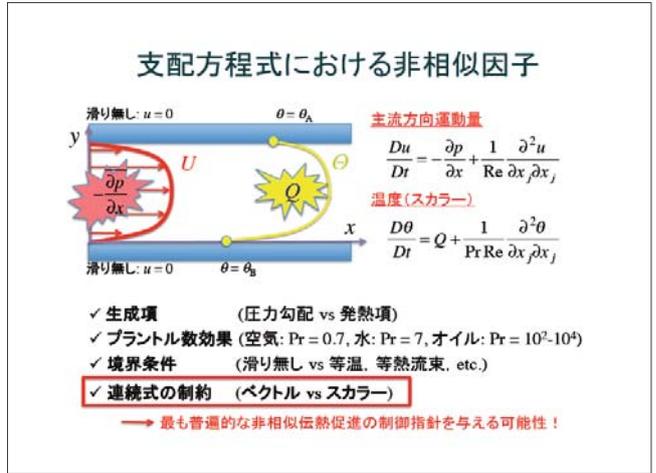
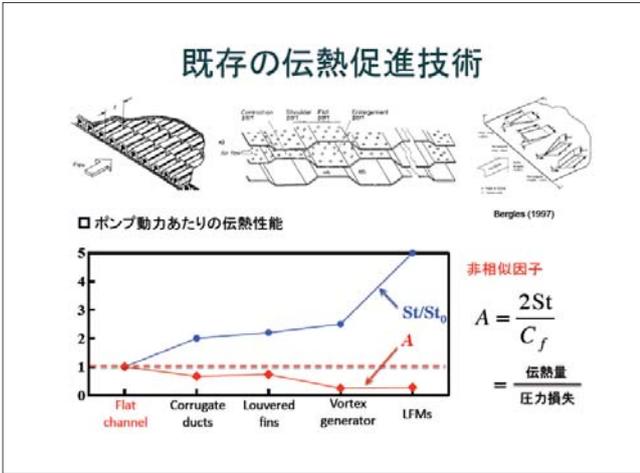
主に、抵抗低減、乱流低減が目的

全く同じ手法で伝熱促進、乱流促進への適用可能

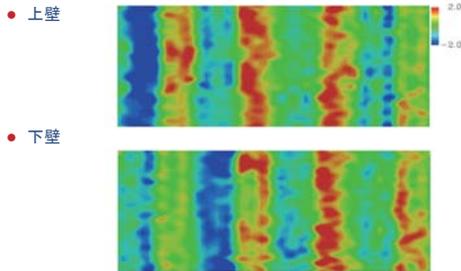


非相似伝熱促進の困難さ



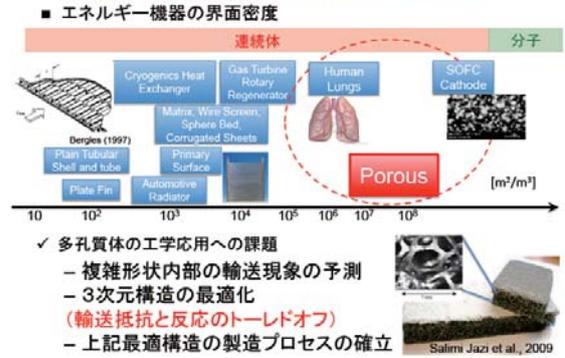


最適制御入力

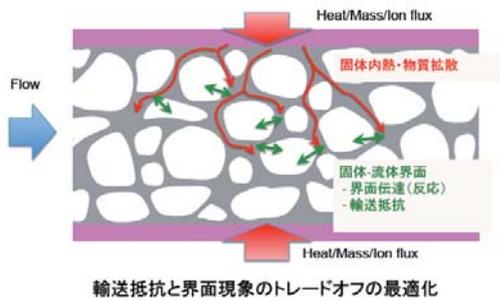


自由度: 平板上の全ての格子点($\sim 10^4$) x 時間
 最適入力: 下流に一定速度で伝播する進行波

メソスケール多孔体内輸送現象



3次元多孔体構造の最適化問題



まとめ

- 流体, 乱流分野で発展しつつある理論や制御手法が, 未だエネルギー機器の設計に十分活かされているとはいえない。
- 研究者の直感に頼るのみではなく, 数学的, 理論的手法を用いることで, 従来の性能を凌駕するエネルギー機器開発が期待できる。
- 具体的な研究課題として, 層流の乱流化, 乱流非相似伝熱促進, 多孔体三次元構造の最適化が挙げられる。

3.6 「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）

専門分野である伝熱のうちの気液相変化を伴う熱伝達、沸騰及び凝縮伝熱という範囲と中低温熱利用技術との関係について、発電や冷暖房の話为例にとりて考える。Newcomen の蒸気機関は1%の熱効率もなかったが、今はコンバインドサイクル発電が用いられ発電効率としては低位発熱量基準で60%を超えるところまで来ている。かつて熱は極めて低質なエネルギーだと言われてきたが、最近は半分以上がきちんと実際に仕事あるいは電気として利用されている。

冷凍機も電気で圧縮機を動かす場合が多いが、中で作動流体、冷媒が凝縮と沸騰の圧力変動を繰り返して熱の移動をしている。10年少々前はCOPが3.5ぐらいだったのが、今は倍増している。これは、気液相変化の分野の貢献が大きい。

他に、高性能伝熱管により小温度差の技術が進み、さらにミニ、マイクロ、ナノという方向に微細化が進んで、分子レベルとかMEMS技術を使ったマイクロミニチャンネル技術あるいは応用境界領域も大分進んでいる。電子機器の冷却とか燃料電池の熱物質移動、バッテリーの熱管理とか水素電解、熱物質伝達は、気液相変化を含めた領域に大きな進展があった。

現在、工場等で熱がたくさんありマネジメントが進んだところでは、ほとんどの熱を100度以下のところまで使い尽くしている。一方で今後、家庭、オフィスビル、マンションなど熱源のないところは、コジェネレーションを活用すべきである。コジェネレーションの有効活用においては電気と熱を併用することだが、規模に適したもの、あるいは使用温度レベルに応じた色々なタイプがある。

各種工場や発電などで排出される熱エネルギーを中低温の熱源として使えるようになることが重要だが、併せて煙道の排気ガスの熱の有効利用も重要だ。車の場合は熱電発電が候補となる。

水素製造など700度以上といった高温のプロセスでは、排熱利用は難しいが、再生可能エネルギーのバイオマスから発酵で作られたエタノールを水蒸気改質するならば200～300度で改質できると熱回収となる。（注：現時点ではエタノールの場合450度程度が必要）

また、昇温用のヒートポンプとして、200度程度の中温用があれば、排熱を少し温度が足りないときに温度を上げて用いるといったことが可能になる。ヒートポンプについてはもっと高い温度範囲まで適用可能なものがあると良い。

このような視点で、大事となるコジェネと排ガス利用について、熱交換器と燃料電池の高性能化、熱物質伝達についてお話ししたい。

初めに排熱利用の話として、給湯器ではすでに95%の熱を回収しているが、1mmくらいまでの細径化によって伝熱面積をふやす、あるいは熱伝達を上げるということで、非常に短い長さで180度ぐらいの排気ガスが常温まで下げられる。プレート式熱交換器でマイクロギャップの熱交換器を考え、ガスと蒸気とを交互に流してプレート式蒸発器を用いて比較的高温の排ガスを流して蒸気をつくる。こういった際にはマイクロチャンネルの中の沸騰現象が重要になってくる。沸騰曲線を考え、加熱に対して熱流速を見るとマイクロレイヤという液

層が重要な役割を演じる。

もう一つ、固体高分子型の燃料電池の酸素拡散の促進という観点で、液水を管理してうまく酸素を通すことが重要である。燃料電池では触媒層で水ができて、多孔質体（GDL）から水を出してチャンネルから水を排出する。その際に、酸素が逆方向に透過しないといけない。水がここにたまってしまうと、酸素の透過を阻害するというので、特に出力の大きいときに酸素の透過を阻害する濃度分極というものが大きくなる。これを改善したい。

まず現象把握の方法としては、酸素拡散特性の測定方法の開発とか、液水分布の可視化を合わせてそれらの関係を明らかにするなどが考えられる。そして現象を明らかにした上で、もう少し具体的に酸素が液水の存在下でうまく透過するようなメカニズムを考える。

GDLにおける空孔径が10 μオーダーで、厚さが数百 μである。この際測定のために考えたのが、酸素の吸収体を探し、大気との間に濃度差をつけるということで、ガルバニ電池式酸素吸収体を選んだ。これは酸素をほとんど通さないで酸素をセンサーに使うことが出来、液水の存在する状態でも非常にうまくはかれるようになった。横軸に液水の含有率、縦軸に酸素の拡散係数をはかると、液水があると非常に酸素の透過を阻害する。それで液がなくなると急激に上がるという特性を示す。そこで、ぬれ性の分布を横方向に交互に持たすことによって、液水があると濡れたところに液を吸引するという性質を使って、ここに酸素を透過するパスをつくる。部分的にPTFEを付加して3 mmほどの小さい非ぬれ領域をつくると、空隙が非ぬれの部分から生じていって徐々に広がり、そこを酸素が透過しやすくなる。結果として酸素の拡散計数が幅広い領域で約3倍くらいに上がる。

GDLの上のガスチャンネルにおいて、せっかく水を排出してもこの上に残っていたらしょうがない。そこで、横に0.2 mm角とか0.4 mm角でマイクログループを気流の向きに掘って液を運ぶ。これにより数 mm/secの流れがここに生じて、燃料電池の生成水が完全に運べるようになる。このようにして、燃料電池における酸素拡散の促進が可能になる。

- Q. : エクセルギー回収再生の考え方は重要で、水素へというところはもちろんである。吸熱反応でエンタルピー差が大きくてかつ低温で動く反応になかなかいい反応がない。ジメチルエーテルの水蒸気改質とメタノールの水蒸気改質ぐらいしか水素をつくってエクセルギー再生につなげられる反応がない。何かそういうところで、次につながるいいヒントはないか？
- A. : メタノール、ジメチルエーテルが候補となる。ヒートポンプに限らず、排熱を一般的に使うのにどの温度レベルでももう少し排熱が大量に出るところがあるとして、先ほどの工場の話みたいにすぐ隣から持ってこられれば別だが、少し温度を上げれば良いというような技術には対応しておくが良い。
- Q. : エクセルギー再生の500度の T_H を考えた場合というのがまさにそのパターンか。
- A. : そのとおり。LNG利用の高効率化の可能性もある。
- A. : LNGの伝熱発電は実現されている。大阪ガスでLNGが60 t/hでランキンサイクルにより1450 kWの発電をしている。
- A. : 千代田化工はLNGのプロジェクトの世界シェアが50%であり、国内のLNG受け入れ基地もほとんど手がけている。その中でコンビナート調査をして、水島とか大分とかLNGの冷熱利用の提案を進め、これまで認められたのが、水島基地で6%程度である。

これは発電利用ではなくて熱の利用として、液体炭酸をつくる形で進めた。安定電力への影響を嫌う面があり、抵抗できない状況である。中国では、政策的に LNG の冷熱発電が今後動く可能性がある。

- A. : せっかく低温で持ってきた LNG を、発電所のサイクルの中に何とか組み込めないかというのは、色々な検討がされているが、最大の問題は排ガスの量と LNG の量が圧倒的に違い、1 対 15 ぐらい、燃料というのは 15 分の 1 ぐらいしかないこと。それを完全にシステムに組み込むというのは、バランス上成り立たない。冷熱だけ取り出して発電しようというのは、先ほど紹介があったように、幾つか具体化された例があるが、得られる出力とコストの関係ということで、余り大々的には普及していないのが現状である。

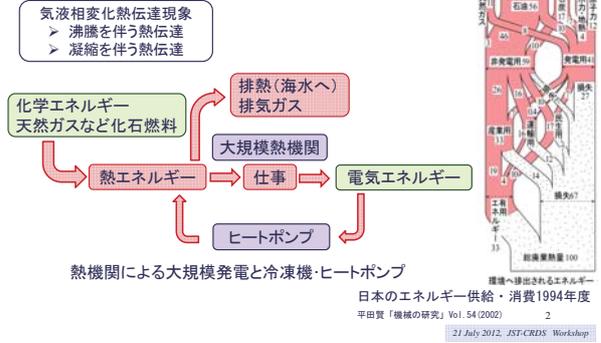
- Q. : 最後の燃料電池の事例で、酸素の拡散促進というのが非常におもしろいが、最終的には、酸素が消費される事による窒素の濃縮とその拡散層の中からの離脱が重要ではないか。このへんを機構的に改善するようなアイデアは、今研究されているか？
- A. : 定常的な酸素拡散を測定しており、窒素が特別濃縮されて困るということは特にないと考えられる。

気液相変化伝熱と中低温熱利用技術

1. 相変化伝熱分野とエネルギー問題との関わり
2. 中低温熱利用技術と今後の研究開発項目・研究事例

21 July 2012, JST-CRDS Workshop

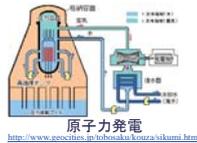
エネルギー利用における熱工学、特に相変化伝熱の貢献例



21 July 2012, JST-CRDS Workshop

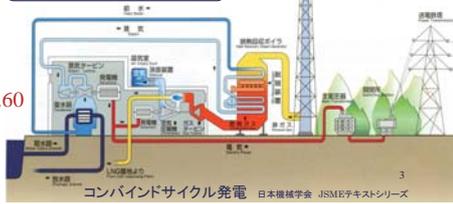


Newcomenの蒸気機関 $\eta < 0.01$
 Power Hall, The Museum of Science & Industry in Manchester



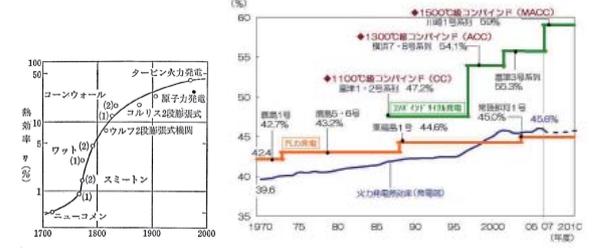
気液相変化伝熱
 沸騰・凝縮を伴う熱伝達

$\eta \approx 0.60$



3

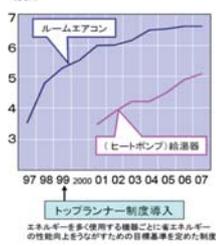
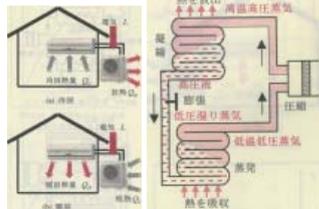
熱効率・発電効率の向上



21 July 2012, JST-CRDS Workshop

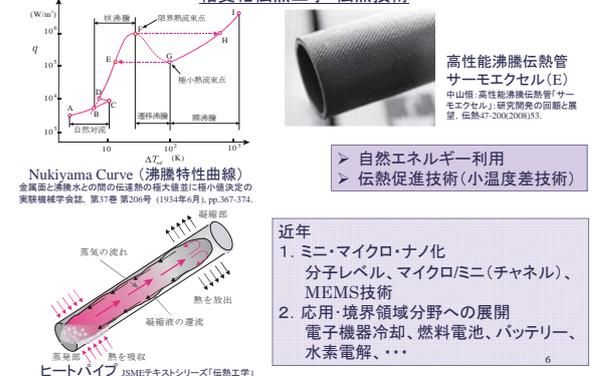
ヒートポンプ・エネルギー効率の向上

気液相変化伝熱
 沸騰・凝縮を伴う熱伝達



21 July 2012, JST-CRDS Workshop

相変化伝熱工学・伝熱技術

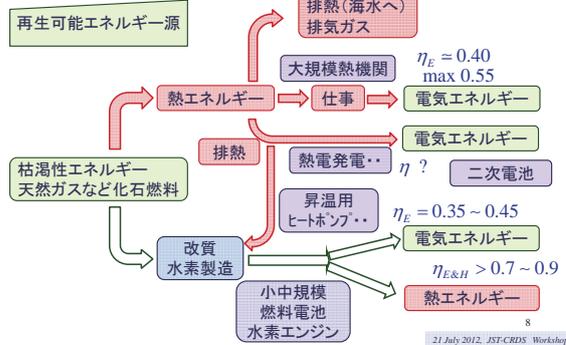


気液相変化伝熱と中低温熱利用技術

1. 相変化伝熱分野とエネルギー問題との関わり
2. 中低温熱利用技術と今後の研究開発項目・研究事例

21 July 2012, JST-CRDS Workshop

方向性: エクセルギーの有効利用
 大規模熱機関発電+排熱利用、直接発電(熱電併給)



21 July 2012, JST-CRDS Workshop

中低温熱利用について(考えること)

研究開発の方向: エクセルギーの有効利用

1. 化石燃料は高温利用に限り、中低温熱利用には使用しない
2. 高温利用の排熱を利用し尽くす
 - 熱としてそのまま利用
 - 排熱の価値向上
 - ・ 水素製造(温度)へのシフト
 - ・ 低温熱源との組み合わせ(温度差の拡大)
3. 燃料電池など直接発電と熱利用(熱電併給)
4. 二次電池の温度管理、素材製造などの各種技術に付随する熱技術

中低温熱利用技術に関する研究開発課題例

1. 排熱利用のための熱交換技術
2. 燃料電池の低価格・高性能化技術

21 July 2012, JST-CRDS Workshop

相変化伝熱を中心とする中低温熱利用に関連する研究開発課題例

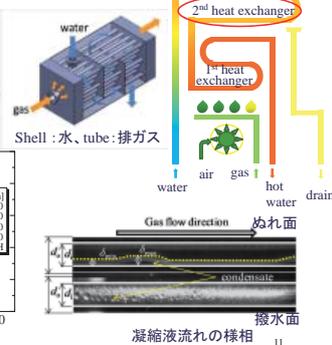
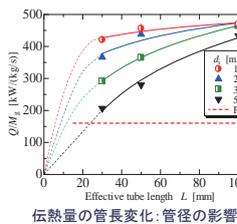
- (1) 相変化伝熱のメカニズム・特性・高性能化
 - 滴状凝縮
 - マランゴニ凝縮(2成分蒸気、Positive system)
 - マイクロチャネル内の沸騰現象
 - 冷熱蓄熱
- (2) 伝熱機器の高性能化 排熱利用のための熱交換
 - 直接接触式冷熱蓄熱
 - マランゴニ凝縮自発液滴移動を利用するヒートパイプ
 - マイクロチャネル式蒸気発生器
 - 燃焼排ガスからの顕熱・凝縮潜熱回収熱交換器
- (3) 燃料電池の低価格・高性能化技術
 - PEFC液水管理・酸素拡散促進による濃度分極低減
 - ガス拡散層の液水制御
 - セパレーター内ガスチャネル内GDLからの液水排除

21 July 2012, JST-CRDS Workshop

排熱熱交換器: 燃焼排ガスからの顕熱・凝縮潜熱回収

排ガス熱交換器の細管化による性能向上・コンパクト化
 例: ガス給湯器の2次熱交換器

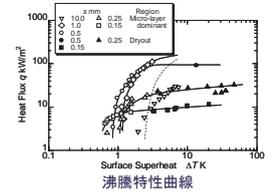
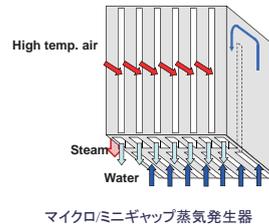
- ・ 細管化による伝熱面積増大・伝熱促進
- ・ ガス流れによる凝縮液の排出促進
- ・ 水圧・水抜き等(凍結)対策



21 July 2012, JST-CRDS Workshop

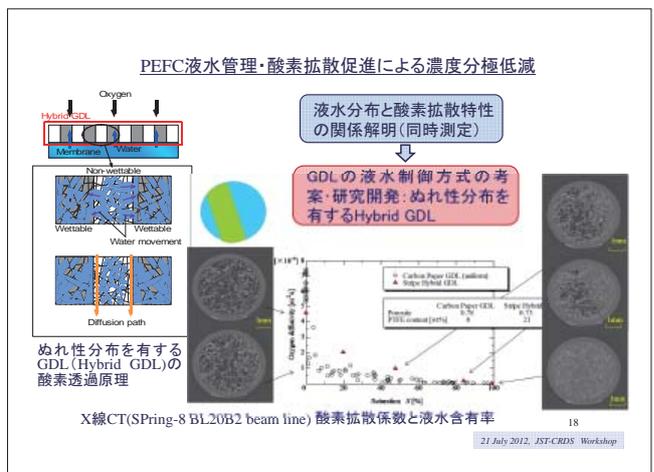
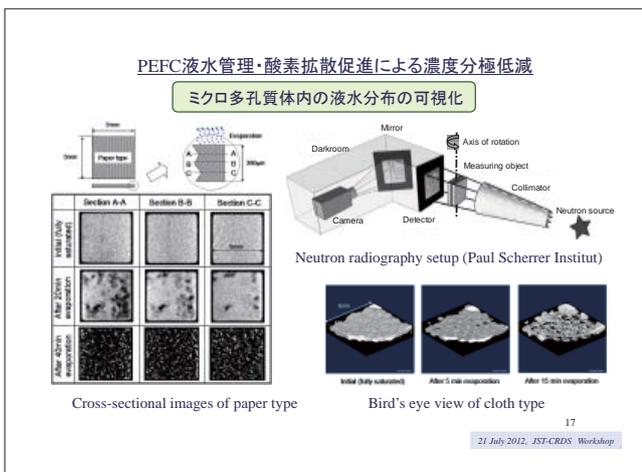
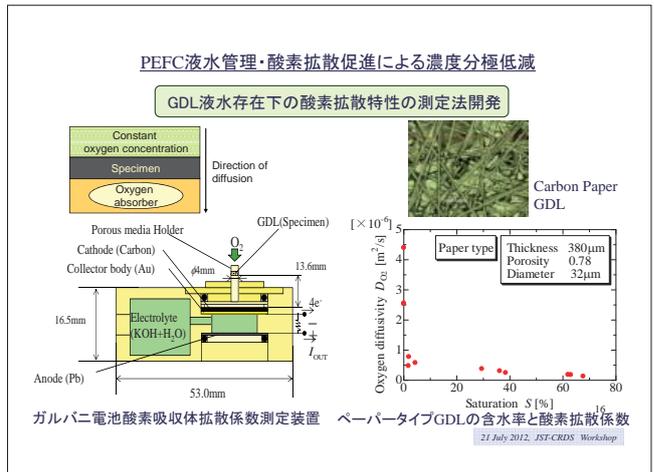
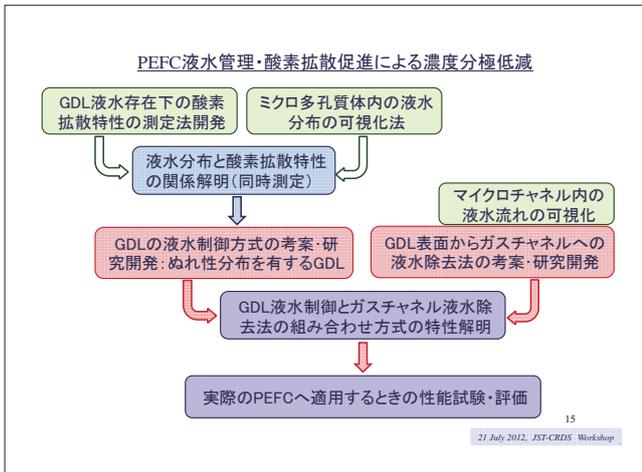
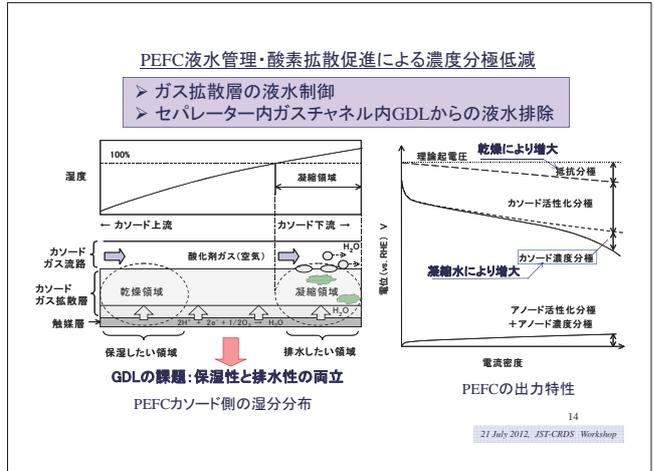
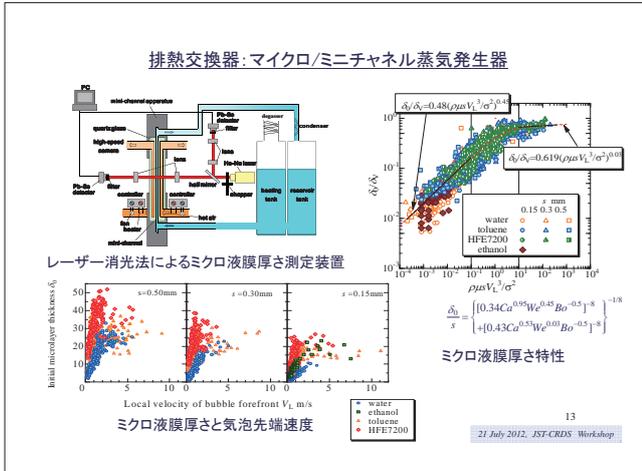
排熱熱交換器: マイクロ/ミニチャネル蒸気発生器

マイクロ/ミニギャップによる蒸気発生器の性能向上・コンパクト化
 例: 電解水素製造

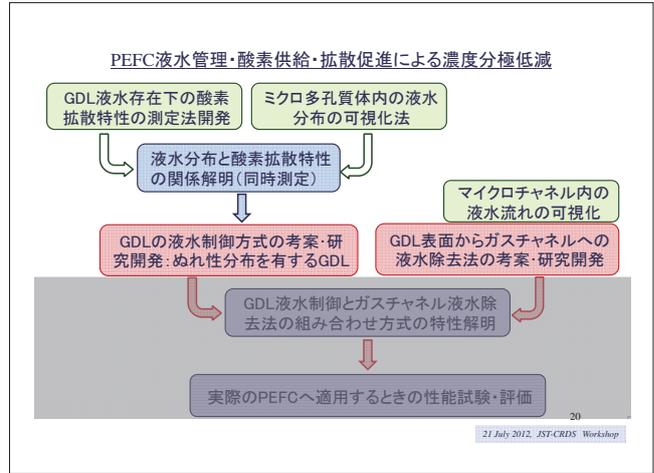
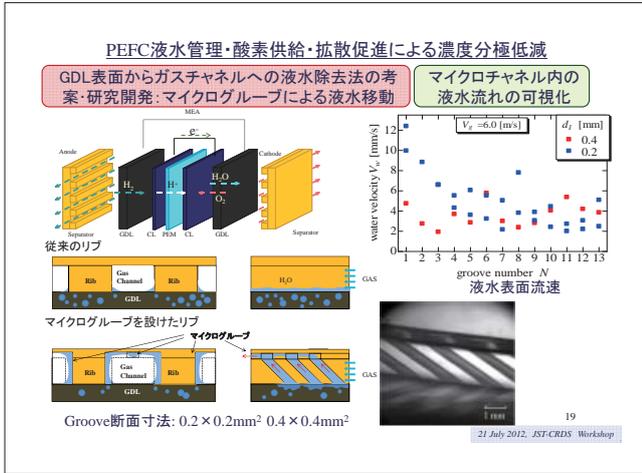


マイクロ/ミニギャップ蒸気発生器

21 July 2012, JST-CRDS Workshop



セッション2



おわりに

- これまで相変化伝熱を含む伝熱工学は、エネルギー機器の効率向上、CO₂排出削減により社会経済へ大きく貢献してきている。
- エネルギー機器の効率向上は、伝熱や流動の基礎的な改善の積み上げ技術の集大成でなされてきており、さらにその継続が重要である。
- 化石燃料における高温利用の排熱を利用し尽くすことが重要である。また移動体などの動力源としては、電池を推進すべきである。
- 大規模発電との共存のため、直接発電の発電効率をさらに高めるとともに、その中低温熱を利用(熱電併給)する方向へ進める。
- 燃料電池直接発電など今後のエネルギー技術の進展には、基礎研究から応用・開発研究までの多様な研究推進と、関連分野間あるいは産官学の協力による連絡、連携が重要である。
- 伝熱工学は、例えば二次電池、エネルギー技術に関連する素材製造過程などにおける温度管理など基盤技術として重要性が高い。

21

付録：中低温熱利用技術について(考えること)

原則：エクセルギーの有効利用

- 化石燃料は高温利用に限り、中低温熱利用には使用しない
- 燃料電池など直接発電の高性能化と付随する中低温熱利用の促進(熱電併給)
- 高温利用の排熱を利用し尽くす
 - 熱としてそのまま利用
 - 高エクセルギー化によるエネルギー利用
 - 水素製造(温度)への変換
 - 低中温を中高温にするための機器：
 - 中高用ヒートポンプの開発、気体圧縮、...
 - 低温熱源との組み合わせ(温度差の拡大)
 - LNGの冷熱利用(沸騰熱伝達)発電、...

21 July 2012, JST-CRDS Workshop

付録：中低温熱利用技術について(考えること)

簡単な見積り(逆カルノーサイクルを仮定)

(3) 排ガスの高エクセルギー化

中高用ヒートポンプ: $T_L=300^\circ\text{C} \rightarrow T_H=500^\circ\text{C}$ に昇温

$$\epsilon_H = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{500 + 273}{500 - 300} = 3.9$$

$$\epsilon_{HR} = \frac{T_H + \Delta T_{HR}}{(T_H + \Delta T_{HR}) - (T_L - \Delta T_{LR})}$$

$$= \frac{(500 + 273) + 50}{(500 + 50) - (300 - 50)} = 2.7$$

21 July 2012, JST-CRDS Workshop

付録：中低温熱利用技術について(考えること)

簡単な見積り(カルノーサイクルを仮定)

(4) LNG低温熱源と排熱高温熱源の蒸気サイクル:

> [排熱・冷熱: $T_H=300^\circ\text{C} \leftrightarrow T_L=-162^\circ\text{C}$]と[火力: $500^\circ\text{C} \leftrightarrow 20^\circ\text{C}$]の比較

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{-162 + 273}{300 + 273} = 0.81 \text{ (排熱・冷熱 } 300^\circ\text{C} \leftrightarrow -162^\circ\text{C)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{20 + 273}{500 + 273} = 0.62 \text{ (火力 } 500^\circ\text{C} \leftrightarrow 20^\circ\text{C)}$$

> LNG火力発電との比率:

メタンCH₄:

蒸発潜熱/燃焼熱 $509.9 / 55500 = 0.0092 \approx 0.01$

カルノー効率 $\eta = 0.81 \text{ (} 300^\circ\text{C} \leftrightarrow -162^\circ\text{C)}$

高温源からの熱量倍率 $1 / (1 - \eta) = 1 / 0.19 = 5.26$

冷熱・排熱発電/LNG火力発電 $\frac{(0.0092 \times 5.26) \times 0.81}{1 \times 0.62} = 0.063$

21 July 2012, JST-CRDS Workshop

4. セッション3

モデレータ：

笠木伸英（JST-CRDS 上席フェロー）

コメンテータ（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）

小澤守（関西大学 社会安全学部 副学部長、教授）

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、
JST-CRDS 特任フェロー）

■ モデレータからの論点提案（笠木伸英）

1. 国として国民のためにどのような研究開発に注力すべきか

- 大きな観点
 - * 性能やコストに関する技術開発でどれほどの量的貢献が可能か
 - * 技術としての競争力にどれほど貢献できるか
 - * 産業力、経済成長にどれほど貢献できるか
- 2つの方向性
 - 1. 既存技術の革新
 - 2. 新しい技術シーズの創出
- 分野…建築物、給湯、空調、自動車、石炭
- 前提…データベース整備（むずかしいという意見も）、中低温利用
- 熱技術…断熱、蓄熱、吸脱着、熱輸送（輸送、伝熱、乾燥など）、エネルギー変換・転換（タービン、バイナリなど）、再生、システム化
- 技術シーズ…材料設計法（熱という観点から）
- 基礎分野の方法論…理論、シミュレーション、先端計測

2. どのように推進すべきか

- 助成による研究開発、動機づけ（市場改革など）
- 技術開発のゴールを見据えられる環境づくり

■ コメント1（鹿園直毅）

エネルギーフローを見ると、有効に利用されているエネルギーはだいたい3分の1程度となる。しかし今日のご発表では、空調、給湯といった直接の熱利用のところでも実態がよく分かっていないということだった。また自動車の場合は効率を上げると熱がむしろ足りなくなるというご発表もあった。こういった実際をふまえた議論がこれからもっと出てくるべきである。

これまでは化石燃料をエネルギー源として全ての物事が進んできた。今後は従来の熱利用技術に加えて新しいパスが必要になる。今日の話で言えば石炭の高効率利用、マイクロバイナリー、スチームスター、低位熱発電、アクソア、といった技術などである。

しかし新しいパスが増えるにはまだ壁がある。たとえばエコキュートは、ガス給湯器と比べて能力あたりの価格が30倍といったように、競争力という観点では大きなハンディを背負っている。これが、ポテンシャル差が小さいところで動かすという、不可逆を減らすことの対価である。コストを下げるためには伝熱促進が重要になる。もうやることはないのではと思われているが、そうではない。顕在化されたニーズに対しては優れた性能が出ているが、新しいニーズに対してはまだ技術は未熟である。そのため設計段階でどこまで安くできるかという見通しがたたない。新しいニーズが新しい課題を生み、新しい技術シーズを育て、これがニーズの発展に寄与するサイクルが回るのが理想である。

競争力とは一言で言えばコストである。SOFCはあと1桁以上コストを下げないといけない。新しい機器はここが最大の課題になる。量産、安い素材への転換、軽量化といったあたりが重要になり、メーカーとしてはこの可能性が見通せないとなら新規開発に踏み込みづらい。

エクセルギーロスを減らすなど、やるべきことは既に明らか。シーズもそれなりにある。具体的にどのような形で世に出るかが見えない。メーカーサイドも、市場性や技術シーズが分からない状態で従来技術を前提に設計してしまい、コストが高すぎて見込みがない、という結論に至るケースが多くあるのではないか。実際には見逃していた技術シーズで可能性のあるものも多いと思われる。

以上より、目指す方向性としてはまずは本当に必要なものは何かを明らかにし、その上でエクセルギーロスを減らす良い機器を作るということ。10年前とは明らかに境界条件も変わっているのだから、かつては成立しなかった技術も対象となる可能性がある。具体的なターゲット、仕様、実環境などの制約条件、評価指標を明らかにすることで技術の見通しがある程度立つのではないかと期待できる。そうすれば一歩踏み出すことができ、次第に技術が育ち、競争力を上げていくと期待できる。そういうサイクルを回すことが必要である。

具体案として、まずは澤地先生や斉藤先生のご発表にあったような何が大事なのかを決めるための研究が必要ではないか。車の場合はターゲットが既にある程度はつきりしているが、まだ明確でないものについてはそれを明らかにすること自体を目的にした研究を提案してもらってもよいのではないかと。

後は企業がそれぞれ内々に取り組んでいるような技術課題のうち、日本としてチームを組

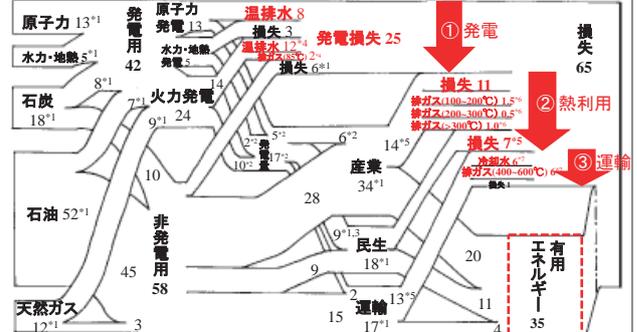
んで開発すべき技術課題については一堂に集めてスクリーニングにかけるようなコンペがあってもよいのではないか。米 DARPA でやっているような、種々の技術を競争させ、ふるいにかけてというやり方を、熱分野でも行ってみてもよいのではないか。

○ ニーズ、シーズを束ねた新技術、コンセプトのコンペをやる。技術課題が見えているならばそれに対するソリューション、技術提案のコンペをやる。あるいはそういうコンペができる土俵を創る。そういう推進方策の具体的な提案をいただいた。

熱研究のこれからの進め方

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
 JST CRDS 特任フェロー
 鹿園直毅

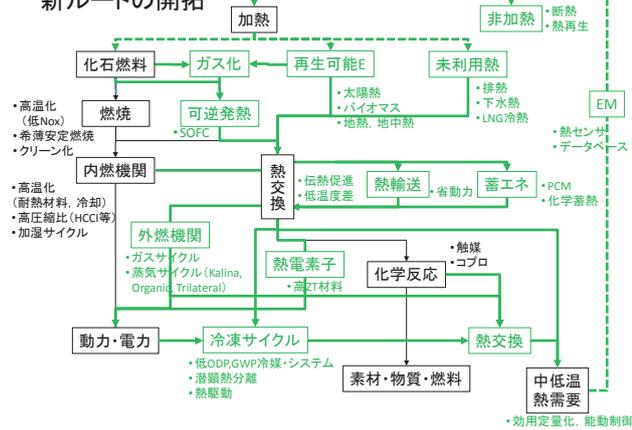
1次エネルギー供給から需要まで



* 1... 産産省「EDMFC総合エネルギー戦略」1997年度、* 2... 日本電気協会「電気事業概要」1997年度、
 * 3... EDMC「民生のエネルギー消費実態調査」1995.6年度、* 4... 川崎火力発電所平成16年度以降建設予定のコンバインドサイクル発電方式、
 * 5... 平田賢「省エネルギー論」1992年度、* 6... 省エネルギーセンター「工場群のエネルギーシステムに関する調査研究 平成9年度成果報告書」
 * 7... 赤清ら、「自動車用移動発電装置」日本機械学会熱工学講演会講演論文集1998年度

西尾, 2006

従来ルートの効率化と 新ルートの開拓



従来技術 vs. 新技術

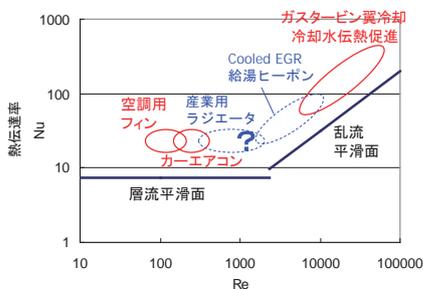


Model	Dimensions (mm)	Weight (kg)	Capacity (kW)
Rinnai RUF-A2400AW	600 x 470 x 240	27.5	50
Panasonic HE-W37EQS (370L)	660 x 799 x 299mm	47	4.5
Panasonic HE-W37EQS (370L)	1843 x 1078 x 440mm	85	4.5

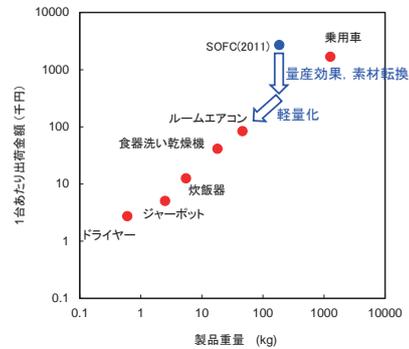
不可逆損失 $\propto \frac{T_0 \ln \frac{T_0}{T_{high}}}{(T_{high} - T_0)} - \frac{T_0 \ln \frac{T_0}{T_{low}}}{(T_{low} - T_0)}$ 熱交換のコスト $\propto \frac{1}{K} \frac{1}{(T_{high} - T_{low})}$

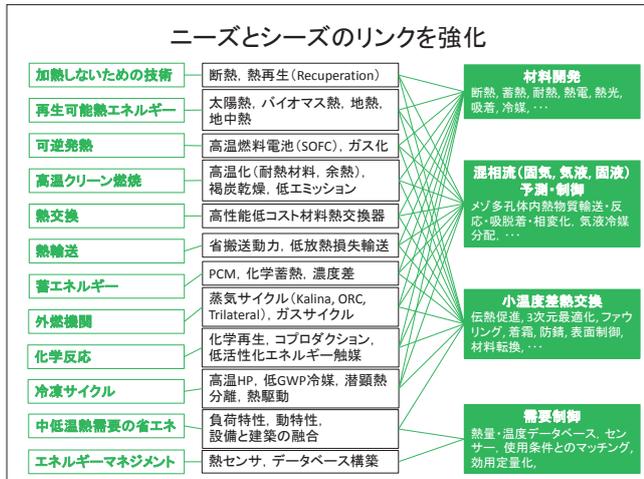
新しいニーズから来る技術課題

- 作動条件や評価指標には空白地帯が多い



コスト低減 (SOFCの例)





- ### まとめ
- 目指す方向は明確
 - ・ 効用と真に必要な需要を定量化し,
 - ・ 不可逆損失 (エクセルギーロス) を減らす
 - まだ具体的な製品の姿は見えないが
 - ・ 10年前とは明らかに違う燃料・素材価格と新興市場
 - ・ 技術的ハードルの高さと, どこまで安く作れるかが見通せない
 - ニーズとシーズのマッチング
 - ・ 具体的なターゲット・制約条件・評価指標が顕在化・共有化されていない
 - 顕在化 → シーズの育成 → 競争力 → 導入促進のサイクル
 - ・ シーズ側も従来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) に対しては未熟
 - 工学としての完成度は高いとは言えない
 - ・ 研究推進策
 - 具体的な技術課題を定量化するための研究
 - 技術課題が見えているなら, ターゲットを示して, コンペ
 - ニーズとシーズを束ねた新技術コンセプトのコンペ

■ コメント2 (小澤守)

まず、エネルギーの問題に関わるような商品というのはトン100万円の世界であるということ。あまりにも高級なものというのは合わない。

次に、まわりの環境、経済的、社会的、気象的な環境が変わると開発すべきターゲットが変わるということ。たとえば都市のビルや戸建ての空調を考えたとき、ビルの建て方をひとつ変えるだけでヒートアイランド現象が緩和されることがある。開発目標も変わってくるかもしれない。そういう意味では国交省も交えて国土全体まで見据えてエネルギー問題を考えないといけないのではないか。

また自動車であれば、何をどう輸送するのかということをはきちんと明確に考えることが重要。重要な人間を運ぶのか、高いものを運ぶのか、安いものを運ぶのかといったことは海運では当たり前に行っていること。最近の野菜も高価なものは飛行機で運んだほうが合理的であるというような場合もある。何をどういうふうにするのかということをよく考えておくべき。かつて旧運輸省がテクノスーパーライナーというプロジェクトを立ち上げて造船各社の開発を推進したが、プロジェクト終了後に何も残らなかった。

発表にあったバイナリー発電システムはだいたい45万円/kW。これでは石炭火力の4～5倍の値段である。これをもし通常の発電クラスまで持っていこうとするならば、国としての中長期的な方針を議論した上で取り組むべき。少なくとも企業努力だけではすまない。

在来技術が切り替わるまでには時間がかかる。在来技術にどれだけ力を投入し、同時に新しい技術開発をどうやるかが非常に重要。システムの考えることが必要で、要素ごとではなく周辺と合わせてバランスをとるべき。その意味では褐炭が重要という金子先生のご指摘は非常に印象的。日本はまだ有効な手を打っていないのではないか。

○ 国の目標という意味では第四期科学技術基本計画ができていて、その具体的なアクションプランがイノベーション戦略協議会等で議論されている。しかしもう少し個別のことについて、開発目標のようなものがそれに沿って出てくるかは分からないのが現状。

■ コメント3 (飯山明裕)

各発表を聞いて、観察型研究としての基礎科学研究、目的基礎研究と、構成型研究としての応用研究、目的基礎研究の間の分断を改めて感じた。自動車で言うと、性能開発の要求から材料開発をしていくと最終的にどういう材料を設計すればよいかに行き着く。しかしそこで材料の分子構造をどうすればよいかというところがなかなか分からない、という場面がよくある。そのため材料について、熱の輸送の観点から、あるいはガスや液体などの作用している物質の輸送などを含めて総合的な観点から、材料構造と性能構造設計を分子のレベルでどうできるかが分断を克服する上で最後ハードルになってくるのではないかと感じた。

そういう意味では、材料の機能予測を分子、ナノのレベルから、もう少し大きなところの、材料の周囲のサブシステムまで含めた、マルチスケールで行えるような理論・シミュレーションの構築がベースツールとして必要になるのではないか。たとえば物理の世界でヒントを得たシーズをエンジニアあるいは工学者が引き取っていくというときに、有用なツールとなる

と思われる。どういう物性が発現するのかというところを描ききることができれば、産業界として使えるか、使えないか、また、改良の指針がよく分かってくるとと思われる。産業界も結局はここで壁にぶつかっているのではないだろうか。

○ 基礎の部分は産学が一緒にやりやすいところだろう。材料、物質関連の基礎研究をやっている優れた研究者は日本にたくさんいる。しかしエネルギーのマクロな話が通じない。うまく橋渡しができるかどうか。トップダウンで見出される研究領域にも知識を還元できる余地が広がっていることを基礎研究者に気づいてもらうことが大事。

■ 総合討論における主たる発言

1. 国として国民のためにどのような研究開発に注力すべきか

○ 次の2つの課題についてご意見を伺いたい。定格で高い性能を持つものも、定格でないところでは性能を発揮できないということがある点。Operationalでは効率よいがcapital expenseが高いという場合の、理想と現実の乖離を埋める戦略が見えてこなかった点。

○ 理想と現実の乖離を埋めるためには、現実をきちんと把握することが出発点。しかしエアコンの低負荷での性能、ヒートポンプ給湯器のいろいろなモードに対応した効率の増減などに取り組んでいる人が大学でも少ない。民間との連携があると大きいですが、中立的な資金により取り組むことが今後は必要。

○ 広域的に、業種も超えて国の熱利用の実態を把握しようということであれば国が取り組むべき課題である。

○ 研究開発のゴールとして、たとえば排熱利用する技術、新たな技術が国内で普及、成立すればよいというところで終わらせるか、それとも日本がベストなものを作って、それを最終的に外貨獲得に使っていくところまで考えるのか。

量的インパクトという観点があったが、これはお金に換算すると分かりやすい。日本国内では評判が良くても海外では値段が高くてだめという製品がよくある。マーケットオリエンテッドで考えるならば具体的なマーケットを意識すべき。国内なのか、アジアなのか、グローバルなのか。

○ ここでは科学技術を通じてイノベーションや経済にいかに関与できるかというところを議論する。国内・国外は両方で、海外へ展開できる技術も出てきてほしい。また海外では性能は落ちて安いの売れるだろうという場合、それを否定するつもりはないが、技術的なバリアはないということなのでここでの議論対象にはならない。

○ 自然条件は考慮すべきではないか。コージェネレーションが非常に発達しているようなヨーロッパの特定の地域は日本の寒冷地域と条件が近いだろうが、温暖湿潤地帯は暖房需要が少なく冷房需要が多いので状況が異なるだろう。逆にいえば、そうした地域で必要になる独自の技術を日本から熱帯地域へと輸出できればよいということになる。こうした視点で重点を置くのもよいのではと感じた。

○ 米 DOE ARPA-E のあるプロジェクトの審査員をした。昨年度の話だが ARPA-E では中高温の蓄熱材料に焦点を当てることにして、かなり短期間でいろいろなアイデアを集めていた。驚いたのはスピード。やると決めてから審査開始までが2週間くらいで、2か月目くらいには課題が決まって予算が出ているといった具合。もちろん速ければよいというわけではないが。

日本が世界といま戦えるのは材料ではないか。たとえば本日発表のあった AQSOA はこれ自体も活かせるが、これを凌駕する更なる目標を日本がたてられるとよい。吸収式もあるが、こちらは中国にコストで負けてしまうのが現状。まねができる技術はすぐに持っていかれるので、今やっていない分野でやるのが重要。その意味では中低温は対象となりうる。

○ ARPA-E の審査では将来の市場性やエネルギーセキュリティへの貢献度などに関する見通しを応募者に対してどの程度求めているか。重点領域は DOE が決めているので、それと整合性を保つよう提案してもらっているということか。

○ 中高温の熱で言うと、応募者は、狙う温度域を明確にしてエビデンスとともに大体 10 ページくらいのプロポーザルにまとめてくる。DOE も色々なデータを持っているので、それと照らしてこうした提案を評価していたのではないかと思う。一方で日本はデータベースが弱いので、同じようなことをやろうとすると現状ではデータが限られる。

2. どのように推進すべきか

○ 材料と機械をつなぐとかシーズとニーズのマッチングという話は同感。材料も、材料や素材だけではない。たとえば蓄熱やヒートポンプだと、拡散や伝熱という現象があり、それがまた反応器に入るといったシステムとしての現象がある。これらが全部包含されて性能というものが出てくる。欧州など海外の研究機関はこういうものをパッケージで研究しているが、日本にはそれがないように見える。日本でこうした部分が抜本的に改善されないと、材料開発にだけ過度に高負荷な要求をすとか、的外れな開発が進んでしまうと危惧される。

○ 米 DOE はそういう体制で進めている。日本でも第4期科学技術基本計画のねらいがその点にあるはずである。しかし研究現場はまだそうしたマインドになっていない。

○ 経産省と文科省が合同検討会を開催している。未利用熱エネルギーもその必要性を感じて課題の1つに挙げているが、分野が広いためブレークスルーポイントを絞り込めないかと議論している。

○ 昨今の厳しい財政状況のなかでも環境・エネルギー分野には社会的な期待が大きい。これに応えるべく検討している。量的な貢献度合いなどを考慮しながら、研究のシーズやリソース（どこにどういう人がいて何をやっているか）を把握し、これらを踏まえた上でどういう制度設計がありうるかを CRDS とともに連携して考えていきたい。

○ シーズやリソースの母体としては、たとえば熱の輸送や伝熱であれば日本伝熱学会で、もう少し広くいうと空調衛生学会、建築学会、化学工学会など色々ありうる。

○ 革新的な素材の開発をベースにシステム設計をして産業応用する、というストーリーを考えた場合、熱利用実態の詳細なフロー・データが出てこないのが一番のネック。その意味

では排熱利用の実態のデータベースが必要という議論はよく理解できる。

○ **Static** なデータだけでは十分でないという話があった。ではどういうデータが必要かという、それ自体も定義するのは実は難しい。

また大学と企業の連携の在り方も意識的に変えていくべき。たとえば空調機を考えると、大学側は二相流の伝熱に関する部分のデータしか出さないといったことが予想される。しかしそれでは空調機というシステム全体の研究という中ではあまり役に立たないデータになる。一方で非定常な状態のデータを取ろうとなれば、今度は回数を重ねただけデータはばらつくので研究としてはまともにならないということになる。大学側はこういった研究対象にもっと目を向けるべきで、企業側は大学の連携を実際に考えていくべき。

5. まとめ

熱需要は、家庭か業務かといった用途、あるいは気象条件のような地域性などに応じて多様である。しかしそうした実態を把握するデータベースや予測ツールがないのが現状である。有用なデータを広く収集するのは実際には困難な作業であるため、入手可能なデータに基づきモデルを構築し、それによる評価、予測を試みるのが現実的な対応だと考えられる。したがって広範な基礎的データの取得や予測ツールの開発が必要である。

民生部門においては、定格条件を外れた場合の空調、給湯機器の効率低下、運輸部門においては、高効率化に伴う自動車の排気熱の不足、産業部門では発電所や工場などにおける大量の低温排熱などの課題が存在する。自動車では蓄熱、熱輸送、変換技術の高度化、空調・給湯では低負荷での効率や動特性の改善、発電所や工場等ではバイナリー発電や熱融通利用、等の対応がありうる。さらには、エネルギー安全保障の観点から、石炭の重要性も明白であり、低品位炭の乾燥といった課題がある。

こうした課題の克服と関連の深い基礎研究としては、断熱、吸脱着、蓄熱、熱伝導を向上させた材料や化学反応プロセスに関する研究開発が挙げられる。また、伝熱促進や相変化伝熱では応用的な理論研究やメカニズム解明も行われている。ただし、こうした取組みが実際の社会に適用されるためには、適用先の探索、最適化、高機能化・複合材料化、材料マイクロ設計、シミュレーション高度化、現象解明などに未だ課題が残されている。

当該分野の研究開発推進方策に関しては、社会ニーズと技術シーズを結び付けるための施策が求められる。例えば、新しいアイデアを提案しあうコンペ形式の場の設定などがありうる。そこでは、ターゲットとすべき特定の熱需要や技術への要求仕様、制約条件（実環境など）、評価指標などを同定するための研究や、特定の熱需要と幾つかの技術シーズを束ねた新技術コンセプトを育成するための研究を行なう。また、具体的な社会ニーズに対して、基礎から応用、製品化までを予め視野に入れたパッケージ型の研究開発推進体制を構築することも重要である。特定の要素技術に関する基礎研究であっても実際の製品との関連性を常に意識し、必要に応じて研究課題に反映できる体制を構築する。

技術の社会への導入、普及に関しては、高効率だが初期導入コストが高い技術、国内ではなく海外での需要を見込んだ技術などを研究開発戦略上、どのように位置づけるかは重要な点の1つである。また研究開発に対するインセンティブ付与など、規制・制度面での環境整備も重要である。これらの点も含めた総合的な研究開発戦略の検討が必要である。

6. 付録

付録1 開催概要・プログラム

- 日時： 平成 24 年 7 月 21 日（土）9：30～18：00
- 場所： JST 東京本部別館（K's 五番町）2階セミナー室
- 主催： JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット
- プログラム（敬称略）：

◆司会進行 関根泰（早稲田大学 理工学術院 先進理工学部 教授、CRDS フェロー）

9:30～10:00 開会挨拶・趣旨説明

笠木伸英（CRDS 上席フェロー）

10:00～12:00 セッション1：革新的熱需給のための課題 *発表各 20 分

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） サステイ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）

12:00～12:40 <休憩 40 分>

12:40～13:20 セッション1（続き） *質疑応答・討論 40 分

13:20 ~ 14:50 セッション2：熱需要を克服するための研究開発課題

*発表各20分、質疑応答各10分

1. 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）

2. 新吸着材 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）

3. 蓄熱ー化学蓄熱技術の展望ー

加藤之貴（東京工業大学 原子炉工学研究所 准教授）

14:50 ~ 15:00 <休憩 10分>

15:00 ~ 16:30 セッション2（続き）

4. 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）

5. 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）

6. 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）

16:30 ~ 17:55 セッション3：総合討論

モデレータ 笠木伸英（CRDS 上席フェロー）

コメンテータ（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）

小澤守（関西大学 社会安全学部 副学部長、教授）

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、
CRDS 特任フェロー）

17:55 ~ 18:00 閉会挨拶

笠木伸英（CRDS 上席フェロー）

付録2 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ー
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	グループリーダー
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）サステイナナブルビジネス開発セクション	リーダー
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 ／ JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	教授／特任フェロー
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 ／ JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	准教授／特任フェロー
関根 泰	早稲田大学 理工学術院 先進理工学部 応用化学科 ／ JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	教授／フェロー
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 グリーンイノベーション戦略チーム	チームリーダー
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
海邊 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	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 ／低炭素社会戦略センター	主任エンジニア/ 客員研究員

■ワークショップ報告書作成メンバー■

笠木 伸英	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	(環境・エネルギーユニット)
鈴木 至	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
関根 泰	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
中村 亮二	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
福田 哲也	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
増田 耕一	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
宮下 永	フェロー	(環境・エネルギーユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2012-WR-03

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

平成 24 年 10 月 October 2012

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

〒 102-0076 東京都千代田区 5 番町 7 番地

電 話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

© 2012 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.