

---

## 低温度差エネルギーの有効利用に関する研究

Research on the efficient use of energy with small temperature difference

- 代表研究者 日本機械学会研究協力部会「低温度差エネルギーの有効利用に関する研究分科会 (RC-SC47)」主査・東京工業大学工学部教授 一色 尚次  
Chairman, Res. Committee on the Efficient Use of Energy with Small Temperature Difference (RC-SC47), Res. Cooperation Div., The Japan Society of Mechanical Engineers, Prof., Tokyo Inst. of Tech. Naotsugu ISSHIKI
- 協同研究者 同分科会委員・東京工業大学工学部教授 片山 功蔵  
Committee-member, RC-SC47, Prof., Tokyo Inst. of Tech. Kozo KATAYAMA
- 同分科会委員・東京大学工学部教授 平田 賢  
Committee-member, RC-SC47, Prof., Univ. of Tokyo Masaru HIRATA
- 同分科会委員・慶應義塾大学工学部教授 渡部 康一  
Committee-member, RC-SC47, Prof., Keio Univ. Koichi WATANABE
- 同分科会委員・運輸省船舶技術研究所主任・・・ 徳田 仁  
Committee-member, RC-SC47, Chief Res. Officer, Ship Res. Inst., Ministry of Transport Hitoshi TOKUDA
- (ほか同分科会委員 12 名)

The Committee RC-SC47 at the Japan Society of Mechanical Engineers, Yoyogi, Shinjuku, Tokyo, has been established in January, 1977 with the chairmanship of Prof. N. Isshiki, Tokyo Institute of Technology. The Committee is composed of 67 members either from the universities and some national research institutes or from about 50 leading member companies.

The final goal of the Committee is to study and propose several possibilities with respect to the efficient utilization of various thermal energy with small temperature differences, including those available widely in the nature. Currently, the Committee is composed of three working groups (WG) and some fundamental discussions including various information exchange of the available knowledge are being performed among the members and additional experts invited to the monthly-held meetings of the Committee. In addition, 17 individual research programs are being conducted among the members, and they are briefly introduced in this second-year report.

---

### 研究目的

1973 年のオイルショック以来、石油エネルギーのみへの依存は極めて危険であり、何等かの代替エネルギー、いわゆるポスト石油エネルギーの探究が極めて急務となって来た。米国ではカーター大統領自らが提案者となってエネルギー対策の諸施策を打ち出している。また我が国でもサンシャイン計

画、ムーンライト計画、その一環としての高効率ガスタービンプロジェクトなどもすでに動き出している。

日本機械学会においては、その会員、特別員諸会社、団体に極めて多くのエネルギー関係の会員を含み、早くからその問題に特別の関心があった。そのため特に研究協力部会の中に関連の研究分科

会を作ろうとする動きが活発となり、次第にその形をなして来たが、機械学会としては、対象を多くに低温度差、低密度エネルギーの活用に向けて、できるだけ広く新エネルギーや大自然エネルギーを研究対象に含めることとし、すでに熱伝達、熱交換器、地熱、海洋温度差発電、フロンサイクル、地域暖冷房、エネルギー変換と蓄積等を研究しておられる研究者を結集し、自家の省エネルギーは勿論、あらゆる将来のエネルギー開発に関心のある多数の会社・団体の参加を募って、将来は必須のものとなるであろう低温度差エネルギーの利用への打開の道を探ることとなった。

昭和 51 年秋、本研究分科会の呼びかけがなされたが、そのときの研究目的はつぎのようなものであり、現在にいたっても変わっていない。

これからの省エネルギーの時代に対応して、本研究により、各種熱機関・工場・産業等の廃熱や、太陽熱を始めとする各種大自然エネルギーのように、量的には莫大であるが、温度差が低く、従来よりその利用に着手されることの少なかった、いわゆる低温度差エネルギーの実態調査と、その回収、蓄積、変換等の技術的手段の比較検討と、そのうちの重要な方式についての実験研究を行ない、かつ回収されたエネルギーの最終利用形態についての調査も行なって、もって省エネルギーと新エネルギー開発に重要な、新しい低温度差エネルギーの利用システムを提案することを目的とする。

また研究対象としては、その関連する所が広範であって、その有効利用についての対象も極めて多岐にわたるが、問題としては機械工学的見地より重要であると考えられるものを中心とし、実験研究の実施も考慮にいれ、発足時の対象はつぎのとおりとなった。すなわち；

- (1) 低温度差エネルギー源の調査
  - (a) ディーゼル、ガスタービン、火力、原子力等熱機関排熱の実態とその回収利用現状の調査
  - (b) 各種機械工業、製鉄、石油、自動車等の産業における排熱の実態とその回収利用現状の把握
  - (c) 太陽熱、寒冷等の大自然熱エネルギー源の

- 量、温度等条件の調査研究
- (d) 生物による低温度差エネルギーの活用の調査研究
- (2) 低温度差エネルギーの回収、蓄積、変換、輸送、技術の調査研究
  - (a) 熱源を温度別に見たときの最適変換システムの比較検討と重点の実験研究（ランキンサイクル、濃度差サイクル等を含めた広い範囲のサイクル、作動流体、動力変換装置、熱交換器等にわたる）
  - (b) 熱エネルギーの蓄積、集約システムの比較検討と重点の実験研究（顕熱、潜熱、濃度差、反応熱等による蓄積と放出）
  - (c) エネルギー変換システムの問題点の把握検討（環境・公害等）
- (3) エネルギーの利用面の調整
  - (a) 産業、工場等内部での最終利用形態の検討
  - (b) 地域、民需面における最終利用形態の検討
- (4) 総合的新エネルギーシステムの提案と検討等であった。その後 2 年間に及んで諸項目についての精力的な研究と、世界各国にわたる調査等が行なわれ、ここに中間報告としての本書を出せるようになったのは誠に幸いであった。

また本研究分科会は発足に引き続いて三つのワーキンググループ (WG) を設置している。WG I では主として低温度差エネルギーの資源の調査、評価などを行ない、WG II では低温度差での高能率を目標とする熱交換器と伝熱促進など、また WG III では低温度差エネルギーの貯蔵、蓄積ならびにその利用サイクルなどの分野の研究を進めることとし、すでに 13 回以上の各 WG 会合 (I と III は合同のこと多し) を行なって来た。

#### 研究分科会における研究成果

上述した一連の研究分科会における研究成果を列挙すると以下のとおりである。

- (1) 排熱エネルギー利用状況に関する調査

##### 1.1 排熱エネルギー実態調査結果および評価

織田(日立造船)

片山(東工大)

- 谷口(北 大)
- 1.2 大阪科学技術 センター 研究報告「工場排熱  
の広域的利用に関する調査報告」概要  
織田(日立造船)
- 1.3 米国排熱利用技術調査報告(概要)  
椿 (日本鋼管)
- 1.4 米国の新エネルギー開発事情  
一色(東工大)
- (2) 低温度差エネルギー資源
- 2.1 工場排水(食品工業, 石油化学, 鉄鋼)
- 2.1.1 食品工業排熱(調査)  
一木, 斎藤(味の素)
- 2.1.2 鉄鋼業における廃熱  
内田(神戸製鋼)
- 2.1.3 製鉄所における排熱発生状況とその  
利用について 坂田(日本鋼管)
- 2.1.4 廃熱利用技術システム  
山西(機械技研)
- 2.1.5 石油化学工業における排熱調査  
内田(出光石油化学)
- 2.2 海 洋
- 2.2.1 海洋エネルギー資源量評価  
本間(電総研)
- 2.3 太陽エネルギー
- 2.3.1 サンシャイン計画 本間(電総研)
- (3) 低温度差エネルギー利用方式
- 3.1 熱管理
- 3.1.1 ボイラのエネルギーバランス分析の一資  
料 福谷(タクマ)
- 3.2 冷暖房(地域冷暖房)
- 3.2.1 地域冷暖房 谷口(北 大)
- 3.2.2 空調設備と蓄熱運転  
千葉(高砂熱学)
- 3.2.3 空気調和を対象とした蓄熱水槽の伝熱  
片山(東工大)
- 3.3 動力化(サイクル, 熱物性)
- 3.3.1 濃度差エネルギー(1)  
一色(東工大)
- 3.3.2 同 上 (2)  
二階(石川島)
- 3.3.3 硝酸サイクルによる熱利用
- 若尾(横国大)
- 3.3.4 低温度差エネルギー利用と流体熱物性  
渡部(慶 大)
- 3.3.5 ランキン・サイクル作動流体(各種流体  
の物性値の比較) 上原(佐賀大)
- 3.3.6 ランキン・サイクルの作業媒体選定方  
法の考察 中原(三菱重工)
- 3.3.7 ディーゼル機関廃熱回収  
青木(新潟鉄工)
- 3.3.8 中低温度廃熱回収発電装置の開発  
鈴木(三井造船)
- 3.4 システム(コミュニティ発電)
- 3.4.1 輸送機関とサイズ 徳田(船研)
- 3.4.2 高効率 コミュニティエネルギー・システ  
ム 平田(東 大)
- 3.5 大自然エネルギー(風力, 太陽, 地熱, 海洋等)
- 3.5.1 低温度差海洋温度差発電  
上原(佐賀大)
- 3.5.2 風力エネルギー 牛山(足利工大)
- 3.5.3 地熱開発 幾世橋(東北大)
- 3.5.4 太陽熱発電システム  
坂元(日 立)
- 3.5.5 地熱発電について 寺山(東 芝)
- 3.5.6 太陽電池の現状と将来  
大沢(小松電子)
- 3.6 その他
- 3.6.1 LNG の冷熱利用 富岡(東京ガス)
- 3.6.2 熱水配管について 明城(日立造船)
- (4) 蓄エネルギー
- 4.1 熱の蓄積
- 4.1.1 可逆的化学反应サイクルによる蓄熱  
藤井(明 大)
- 4.1.2 地下帯水槽の蓄熱  
横山, 梅宮(山形大)
- 4.2 動力の蓄積
- 4.2.1 フライホイールによるエネルギーの貯蔵  
松野(機械技研)
- 4.2.2 超電導マグネットによる蓄エネルギー  
小山(電総研)
- 4.2.3 熱および動力蓄積の能力表  
一色(東工大)

- (5) 低温度差用熱交換器
- 5.1 低温度差用熱交換器における伝熱面の高性能化
- 5.1.1 滴状凝縮過程について  
棚沢(東大生研)
- 5.1.2 幾何学形状の滴状凝縮における影響  
勝田(関西大)
- 5.1.3 高性能伝熱面“サーモエクスセル”  
大黒(日立)
- 5.1.4 水平管外面の凝縮熱伝達の改善について  
塩治(石川島)
- 5.1.5 加振時における液滴の挙動  
西脇(東京農工大)
- 5.1.6 管内旋回流による伝熱促進  
—減衰旋回流を中心として—  
波江(船研)
- 5.1.7 Heat Transfer Promoter の有効利用  
に対する一考察 赤川(神戸大)
- 5.2 低温度差用熱交換器におけるヒート・パイプの利用
- 5.2.1 ヒート・パイプ 大串(三菱電機)
- 5.2.2 EHD 効果による熱伝達の促進  
菊地(機械技研)
- 5.2.3 ヒート・パイプに関する文献調査  
(報告—1) 勝田(関西大)
- 5.3 低温度差用熱交換器における直接接触伝熱の利用
- 5.3.1 フラッシュ蒸発の促進  
宮武(九大生研)
- 5.3.2 混相流による伝熱促進  
相原(東北大速研)
- 5.3.3 ジェット・コンデンサについて  
大場(阪大)
- 5.4 低温度差用新形式熱交換器
- 5.4.1 片状フィンを有するプレートフィン型熱交換器  
望月(東京農工大)
- 5.4.2 交番流熱交換器について  
藤掛(豊田中央研)
- 5.4.3 流動層式熱交換器について  
田尻(ガデリウス)
- 5.4.4 全熱交換器“ロスナイ”

田中(三菱電機)

- 5.5 低温度差熱交換器の具体例・その他
- 5.5.1 電気機械における熱除去について  
—低温度差での熱移動—  
河田(富士電機)
- 5.5.2 自然通風式冷却塔 相原(東北大速研)
- 5.5.3 水中油分による対流伝熱面の汚れについて  
波江(船研)

#### 各研究分担課題とその成果

上述した研究分科会における調査・研究活動とは別に、各研究分担課題を定め、以下に列挙するようにそれぞれ多くの成果を収めることができた。

- (1) 低温度差エネルギー利用のための濃度差エネルギーシステムの研究

東京工業大学工学部 一色尚次

低温度差エネルギーを集めて活用するためにはそれを何らかの方法で他のエネルギー形態に変える必要がある。我々はその方法の一つとして濃度差エネルギーに変換してエネルギーを出入させる方法を研究している。

本年はまず従来より進めて来た LiCl と CaCl<sub>2</sub> の混合溶液の特性について研究し、LiCl の多い方が蓄積エネルギーが大きいことを確認した。

ついで同溶液についての耐食材料の研究を行ない、多くの金属試験片を使用し、各種の温度における上記溶液の腐食性を調べた。その結果として銅合金、キューブロニッケル等の従来より海水淡水化プラントに使用されている材料が優れており、この組み合わせによって現方式は前進させられることがわかった。

また水溶液による沸騰熱伝達および対流伝達の実験を進め、また従来より問題になっていた希釈熱と潜熱の関係をも調べた。また水溶液による動力の発生については、さらに 1kW 級の実験装置を用いてその実証を行ない、予想どおりの性能を得た。また有人塩水エンジンカーも走行できた。実験値の示すところでは濃度差による動力の蓄積は在来バッテリー(鉛～硫酸)の約 1/3 くらいがすでに第 1 回のバラックテストで到達されており、さらに改良を加えることにより同等程度までの前進は可能と思われる。

今後は対象を 100°C 近傍の温水利用に絞り、インゼクターによるエネルギーの蓄積を実験研究する予定である。

## (2) 太陽エネルギー利用を対象とした蓄熱に関する研究

東京工業大学工学部 片山功蔵

太陽エネルギーの利用を考える際には、地球の太陽に対する自転・公転に基づく入射エネルギーの変動のために蓄熱装置を利用することが必要である。太陽エネルギーの利用は、建物の冷暖房などを対象とした熱としての利用と、太陽熱発電を目的とした利用が主として考えられているが、蓄熱の温度域としては、前者の場合には 100°C 以下の低温蓄熱が、後者の場合 Rankine Cycle による 100~450°C の中温蓄熱と Brayton Cycle による 500°C 以上の高温蓄熱に分類されるのが通例である。

研究経過：蓄熱に関する研究の基本的問題点を明らかにするために、低温蓄熱の代表的例である水—水系（蓄熱水槽）について、水槽内の水流・温度分布に関する模形実験と実用規模蓄熱槽の比較によって完全混合形蓄熱槽に対する相似関係を明らかにすることができ、この成果に基づいて蓄熱水槽外周より地層内への熱損失を解析し、測定結果と比較しその有効度を明らかにし、熱損失が水温変化の周期によって左右されること、断熱材の使用が有効であり、周期の長い場合に特に顕著であることを示した。

次に、水蒸気サイクルを利用する太陽熱発電の場合の中温度域蓄熱方法に上記の方法の適用の研究を開始した。この場合、熔融、凝固の際の潜熱を含む蓄熱系が有望と考えられるので、中温度域に利用可能な主として熔融塩類について、その熱力学的性質について調査研究を行なうとともに、有望な塩類について融点近傍の伝熱学的物性値についての測定を行なうための実験装置を作成中である。なお、これと並行して熔融、凝固を伴う蓄熱系についての、熱伝導解析を行ない、蓄熱系の形状寸法についての検討を明らかにしている。

## (3) ディーゼル・スターリング複合サイクル機関に関する研究

東京大学工学部 平田 賢

スターリング機関は、熱機関の中では本質的に低温度の熱を動力に変換する「低温型機関」である。したがって排熱回収等の目的に適した機関であるが、ディーゼル機関をトッピングとし、その排気でボトムングとしてのスターリング機関を駆動する「ディーゼル・スターリング複合機関」の開発研究を行なう。この機関は、ピストン機関どうしの組み合わせであるので、設計がしやすいと考えられる。現在その熱効率、最適複合条件などを理論的に算定するため、まず、スターリング機関の性能予測法の確立から着手している。スターリング機関は、作動流体によって性能が異なるが、二相流領域を用いることや、LNG 冷熱を利用することなど併行に検討中である。

## (4) 低温度差エネルギー利用のための作動流体の熱物性に関する研究

慶應義塾大学工学部 渡部康一

低温度差エネルギーを有効に利用するシステムを開発するためには、必要不可欠な作動流体の当該温度・圧力領域における熱物性を解明する必要がある。特に、各種の熱物性値のなかで、この目的のためには熱力学的性質の究明がもっとも重要かつ基礎的であり、本研究課題においてはバーネット膨張法による圧縮係数の実測と気体の定圧比熱の実測との二つの課題を中心に研究を実施した。

前者については、比較的近年に開発され今後ますますニーズが多くなると予想される共沸混合系ハロゲン化炭化水素 R 502 (48.8 wt % R 22 + 51.2 wt % R 115) を対象に、その圧縮係数をバーネット膨張法により実測した。従来この物質の熱力学的性質はほとんど未解明といっても過言ではなく、本研究では現在までに温度 0~90°C、圧力 45 bar までの領域において良好な結果を得ることができた。今後さらに実験領域を拡張する一方、ビリアル係数の算出なども行ない利用上便利な形で熱力学的性質に関する情報を集大成する計画である。

後者の研究に関しては、既設の気体定圧比熱測定用フロー・カロリメータの圧力調整機構を本研究において一部改良することができ、これによ

て高圧下の気体の定圧比熱の実測が可能になった。現在までに、圧力約 30 bar までの領域における二酸化炭素の定圧比熱を実測することができた。今後は、さらに低温域 (0°C 以下) においても同種の実験的研究を継続する予定である。

#### (5) 排熱利用に関する研究

##### (a) 輸送機関とサイズ

船舶技術研究所 徳田 仁

本研究は排熱利用を輸送機械に適用する場合の排熱回収熱交換器の高性能化を主たる目的とするものである。したがって一般の陸上プラントに使用する場合に比べ、その性質においてかなりの相違点が出るのが予想される。

このため、52 年度はこのような熱交換器を開発する場合にどこに問題点があり、どこに主眼を置くべきかについて考察を行なった。

その結果熱交換器が非常に大きくなる場合には熱交換器の伝熱係数は輸送機械の速度と非常に大きな関係があることが明らかになった。また、輸送速度と輸送機械の市場占有率とは密接な関係があるため、結局伝熱係数が輸送機械における排熱利用の実用化を決定するものであることが明らかになった。特にこれを船舶の動力として使用し、実用化する場合には従来の熱交換器の伝熱係数を 1 桁程度上げることが必要であり、また自動車等の輸送速度の大きなものに対してはより以上の伝熱係数の増加が望まれることが明らかになった。

##### (b) 排熱利用方式

船舶技術研究所 波江貞弘

ディーゼル排熱利用法の一案として、排熱源による冷凍サイクルとディーゼルサイクルとの合成サイクルについて概略検討を行なった。すなわち、ディーゼル過給機後の給気を冷凍機によって、たとえば 0°C 程度まで冷却することにより、ディーゼルサイクルの作動最高温度を下げ、これによって生じる材料強度の余剰分に相当する作動最高圧力の上昇をはかって (圧縮比ならびに高温側平均温度を高める)、ディーゼルサイクルの熱効率を高めようとするものである。

熱効率の具体値を求めるためには、燃焼条件、材料強度に関する情報を必要とし、現時点では推

定の域を出ないが条件によっては数%の理論サイクル効率上昇が可能と思われる。

#### ま と め

既述してきたような低温度差エネルギー利用を頭に置いた上で、とくにエネルギー資源を外国に頼る我が国としては、エネルギー消費を最小にして最大の生産効果を上げるためには多くの省エネルギーを計らねばならないが、それには幾つかの段階があることが確かめられた。また産業によって最も適した方式と段階があることが配慮されねばならない。

このような省エネルギーの諸段階とはつぎのようなものと考えられる。

(1) 機器の改良と熱管理段階: これは一つ一つの単位機器を改良して熱効率を上げ、摩擦を減らし、小形化、軽量化して所要エネルギーを減らす段階でありすべての機器にあてはまる。とくに熱機器に対しては、保温の改善、バーナの改善、バルブのもれ止め、外部もれ止め、等を行なって熱管理を強化する段階であり、新しい装置を追加しなくても可能である。

(2) 多様燃料資源段階: これは従来の石油を石炭・天然ガス・その他に切り替えるか、もしくはどれも使用できるように改善する段階である。これには今までのようにクリーン燃料化一本で進むのとは方向が逆となり、どんな粗悪重油や石炭でも使用できるように考える必要がある。クリーンと多種とが同時に成立するのが最も好ましい。

(3) ホットチャージ段階: これはむしろプロセス改良段階ともいうべきであって、製品 (未完成品) や原料を何度も炉で加熱したり、放冷したりするプロセスを変更、改良し、熱いままの製品を次の炉に入れるホットチャージを計る段階である。これには従来の冷間検査を熱間検査にしたり、また放熱防止のためのカバーをするなどの改良が必要である。また物々熱交換も好ましい。

(4) エネルギー回収段階: これは工場や産業、民生等で棄てられる廃熱や廃動力を積極的に回収し、それらを有効に使用しようとするものであって、とくに熱は低温度差エネルギーに属する範囲のものが最も多い。回収には空気予熱のように隔

壁，ヒートパイプ等を通じて直接回収するものと，蒸気，空気，ドライクエンチング，フロン，等の他の媒体を利用して回収する間接的なものとの両方がある。また用途としては同一プロセス内と，同一工場内，および外部地域利用がある。

(5) 動力化と発電段階：これは上のエネルギー回収のさらに高度の分野であって，例えばフロンタービンやトッピングタービンなどで，熱エネルギーを動力化し，主として発電によって他へ転用するものであり，トッピングサイクル，中間熱利用サイクル，ボトミングサイクル等に分けられる。

(6) これは，例えば蓄電池，顕熱，化学エネルギー（解離，濃度差）等によって，種々の廃エネルギーや，次の大自然エネルギーなどを蓄積し，利用端のピークに放出しようとするもので，総合的にはさらに高級な省エネルギー段階である。

(7) 大自然エネルギー利用段階：これは化石燃料や在来電力だけに頼ることなく，風力，太陽熱，地熱，海洋熱などを捕集して，補助的もしくは本格的に使用するもので，在来エネルギーから代替エネルギーへの転換を計らんとするものである。

以上のように省エネルギーと大自然エネルギーの利用には広範囲の段階があるが，本報告にはすべての段階についての併列的な報告が行なわれているといえよう。またこれらの段階は現在の経済的な周辺条件，とくに企業ではそうである，によってきまってくるが，エネルギー危機対策としては全く順位が逆となるであろう。

なお，本報告の終わりにあたり，2年間にわたり調査研究助成をいただいた日産科学振興財団に対し深甚なる謝意を表すものである。