

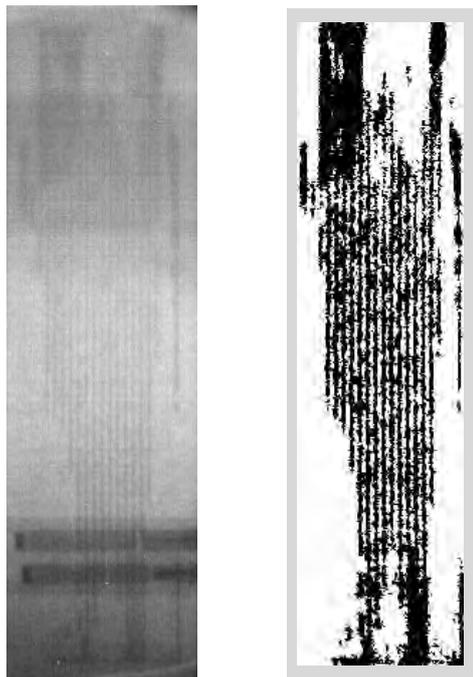
伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 51, No. 217
2012. 10

HETSJ

◆特集：古くて新しいヒートパイプ



(a) 可視化画像 (b) 二値化画像

図1 中性子ラジオグラフィによる可視化と画像処理

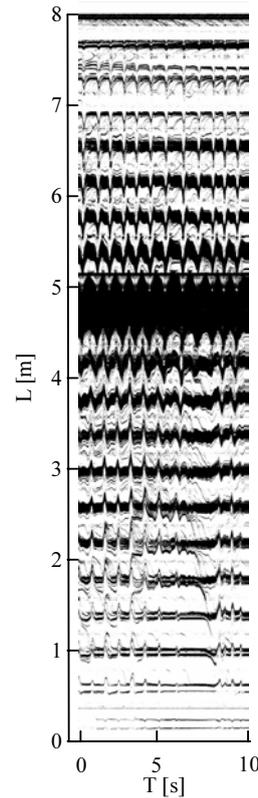


図2 引き伸ばし時系列変化

自励振動式ヒートパイプの可視化

Visualization of the Self-vibration Heat Pipe

自励振動式ヒートパイプは、1本の蛇行した流路に作動流体を封入し、高温部と低温部の圧力差によって生じた自励振動によって熱を輸送することができる。その作動原理は十分に解明されておらず、内部流動観察が熱輸送現象把握に有効であると考え中性子ラジオグラフィによる可視化実験を行った。図1は動作時の自励振動式ヒートパイプの可視化画像と画像処理により作動液のみとした二値化画像である。作動流体であるブタンが可視化され、作動液が隔列で存在し振動しているのが確認できた。この振動は流路全域に伝播しヒートパイプ全域で作動流体が振動しているのが観察された。さらにこの振動を把握するため、蛇行した流路を画像処理により1本に引き伸ばし、時系列に整列させたものが図2である。これにより液注が振動を繰り返す、周期的に大きな振幅をしているのが確認できた。この液注の振動が多く速い程、高い熱輸送能力が得られた。また、液注の振動を質量-ばねモデルとして計算し、振動周期を予測することが可能であることを確認している⁽¹⁾。

(1) 杉本, 他 6 名, "自励振動型ヒートパイプ内の熱流動現象に関する研究 (中性子ラジオグラフィによる冷媒挙動の可視化)", 日本機械学会論文集, B 編, 76(766), pp.975-982, 2010.

杉本勝美*, 竹中信幸 (神戸大学)

Katsumi SUGIMOTO, Nobuyuki TAKENAKA (Kobe University)*

伝 熱

目 次

〈伝熱学会特別委員会報告〉

「福島第一原子力発電所災害に係る伝熱学会特別委員会」報告 ……小澤 守（関西大学） ……	1
--	---

〈特集：古くて新しいヒートパイプ〉

ヒートパイプ技術最近の進展 ……	勝田 正文（早稲田大学） ……	14
ヒートパイプの理論 ……	宮崎 芳郎（福井工業大学） ……	20
ヒートパイプの設計 ……	望月 正孝（株式会社フジクラ） ……	27
ヒートパイプの製造と試験 ……	木村 裕一（古河電気工業株式会社） ……	33
各種熱輸送デバイス ……	大串 哲朗（広島国際大学） ……	39

〈特別寄稿〉

ロハスの家とコミュニティ – 21世紀の持続可能社会形成のために – ……	加藤 康司（日本大学） ……	47
--	----------------	----

〈国際活動・会議報告〉

熱物質輸送国際センター（ICHMT）の2011年以降の活動 ……	吉田 英生（京都大学） ……	52
-------------------------------------	----------------	----

〈巻頭グラビア〉

自励振動式ヒートパイプの可視化 ……	杉本 勝美，竹中 信幸（神戸大学） ……	表紙裏
--------------------	----------------------	-----

〈行事カレンダー〉 ……	55
--------------	----

〈お知らせ〉

平成24年度日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ ……	57
第50回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集 ……	58
優秀プレゼンテーション賞（第50回日本伝熱シンポジウム）について ……	60
日本伝熱学会主催 第3回 国際伝熱フォーラム ……	61
第15回国際伝熱会議 ……	62
編集出版部会からのお知らせ ……	63
編集出版部会ノート ……	68

Vol.51, No.217, October 2012

CONTENTS

<Report from the special committee>

Report from the Special Committee on Fukushima Nuclear Accident Mamoru OZAWA (Kansai University)	1
---	---

<Special Issue>

Recent Advance of Heat Pipe Technology Masahumi KATSUTA(Waseda University)	14
Theory of Heat Pipes Yoshiro MIYAZAKI (Fukui University of Technology)	20
Design for Heat Pipes Masataka MOCHIZUKI (Fujikura Ltd.)	27
How to Manufacture and Test the Heat Pipe Yuichi KIMURA (Furukawa Electric Co., Ltd.)	33
Various Heat Transport Devices Tetsuro OGUSHI (Hiroshima International University)	39

<Contribution>

House and Community of LOHAS – for forming sustainable society in 21st century – Koji KATO (Nihon University)	47
--	----

<Report on International Conference>

International Centre for Heat and Mass Transfer (ICHMT) – Its Activities since 2011 – Hideo YOSHIDA (Kyoto University)	52
---	----

<Opening-page Gravure:heat-page>

Visualization of the Self-vibration Heat Pipe Katsumi SUGIMOTO, Nobuyuki TAKENAKA (Kobe University)	Opening Page
--	--------------

<Calendar>	55
------------------	----

<Announcements>	57
-----------------------	----

<Note from the Editorial Board>	68
---------------------------------------	----

「福島第一原子力発電所災害に係る伝熱学会特別委員会」報告

Report from the Special Committee on Fukushima Nuclear Accident

小澤 守 (関西大学)

Mamoru OZAWA (Kansai University)

e-mail: ozawa@kansai-u.ac.jp

1. はじめに

我が国における原子力開発が本格的に開始したのは、原子力3法制定、日本原子力研究所設立の1955年であろう。米国においては早くも1957年にShippingportにおいて商業用加圧水型原子炉(PWR)が、そして1960年には本格的な商業用沸騰水型原子炉(BWR)がDresdenに建設された。我が国では1966年に英国からの炭酸ガス冷却炉である東海発電所が運転運開し、本格的な軽水炉として1970年に敦賀1号(BWR)と美浜1号(PWR)が、1971年に福島第一原子力発電所の1号機が運転運開した。以来、今日まで美浜2号, 3号, JCO, 中越沖地震による柏崎原発など、事故やトラブルを経験しながらも60年近く原子力技術、特に安全面において経験を蓄積してきた。今日、日本伝熱学会も伝熱研究会の創立から数えて50年が経過した。その間の伝熱研究の進展は原子力・原子力発電技術開発に密接に関連してきたといっても過言ではない。

さて、2011年3月11日14時46分にマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が勃発し、それに伴うおよそ数100年から1000年に1度とも言われる津波によって、福島第一原発においては、系統外部電源並びに非常用電源も損なわれ、1~3号機では冷却喪失状態に立ち至り、燃料棒露出から炉心溶融へと時間発展し、典型的なシビアアクシデント状態に立ち至った。これに伴う放射性物質の放出、周囲住民の避難、電力不足など製造産業や市民生活にいたるまで非常に大きなネガティブインパクトを与える結果となった。この事態の收拾は短期的に解決できるものではなく、廃炉措置から地域復興まで含めると20数年から30年にも及ぶ長期間にわたることが予想される。今回の事故は各種のフェイルセーフ機構やその運用などの技術的な問題だけでなく、事故時のマネジメントにも大きな問題があることが露呈されたが、同

時に科学技術一般に対する国民の信頼の低下をも招いたように思える。

今回の大震災に際して、かつての阪神淡路、能登半島、中越沖などの震災時と同じように日本学術会議や日本機械学会、日本原子力学会、土木学会、地震工学会、日本建築学会などが調査委員会を上げた。なお政府の設置した「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会」や財団法人日本再建イニシアティブによる民間の事故調査委員会、東京電力自身による調査、さらには国会に設置された事故調査委員会などからはすでに調査報告書が公開されている[1-4]。日本伝熱学会の会員は、同時に日本機械学会や日本原子力学会の会員であることが多い。その意味で会員個人としてはそれぞれの分野で調査検討に関与していることも考えられるが、一方で、日本伝熱学会は主として炉心の冷却技術、二相流、限界熱流束、シビアアクシデントなどのキーワードで代表される分野において直接的な関連があり、またカバーする領域に熱エネルギーが含まれることから、今回の原発災害ならびにそれに伴う電力不足問題に関係した専門学会と位置づけられてもおかしくない。この点において、日本伝熱学会は今回の原発事故ならびにそれによる社会的な影響や今後の伝熱研究のあり方などについて広く議論をし、見解を取りまとめ、社会に公表することが必要であると考え。そこで表題に記載の「福島第一原子力発電所災害に係る伝熱学会特別委員会」を会長の諮問機関として立上げ、上記の種々の問題を検討することとした(2011.4.23 理事会承認)。

本特別委員会は岡山(2011)、富山(2012)両シンポジウムにおける特別セッションを企画し、その間に合計4回の会合を重ねた。本報告はそれらの議論を踏まえて本委員会委員長が独自に取りまとめたものである。今回のような重大な問題に学会として応分の意見表明をする必要があることに

は会員諸氏も異存がないと思料するが、以下の内容が伝熱学会全体を代表するとは言い難く、また学会として本報告の内容について完全なレビューを行ったわけでもない。しかし福島第一原発事故におけるような重大問題について、その発信元が特定のグループ・個人に限定されるとしても、学会誌という公共の場で意見表明をすることの重要性を考え、またこれによって活発な議論が展開されるきっかけとなればとの思いから、あえて本特別委員会の1年間の取りまとめとして本稿を執筆した次第である。

2. 本委員会の課題

本特別委員会が当初設定した検討課題は以下のように集約できる。

- * 原子力技術の進展とともに伝熱研究はどのように展開してきたのか。
- * 伝熱という学問・技術分野における専門家集団としての役割はどのようなものか。
- * 福島原発事故を受けて我が国のエネルギーについての展望

次項以降において、これら課題を受けて行った検討結果について述べる。ただし以下の各節がこれら課題と一対一で対応しているわけではなく、本報告全体として設定した課題について議論がされていることを予めお断りしておく。

3. 伝熱研究進展の背景

原子力発電、特に軽水炉開発は1957年のShippingport (PWR)、1960年Dresden (BWR)の運開が典型的に示しているように1950年代から始まった。世界中の原発設置は図1から見てても明らかのように1970年を境にして非常に活発に行われた。図中には原子力に係わる重大事故などもリストアップしてあり、とくに我が国では1990年代以降に美浜2号のSG細管破断、もんじゅナトリウム火災、JCO臨界事故、美浜3号における復水配管破断などを経験してきた。図中の◎印は我が国に設置された原発の積算基数で、軽水炉については1995年ころから以降はほぼ横ばい状態で、世界的な状況をおおよそ反映している。なお我が国においてはBWRとPWRがほぼ3:2となっている。

このような1970年以降40年間の急速な原発(軽水炉)の進展は、同時に、電気事業や鉱工業、商社の事業活動にも反映され、図2に示すように1970年代からの原子力関連支出は原発設置と見事に符合している。また電気事業の支出は鉱工業分野での売上高にほぼ対応し、政府予算もこの時期大きく膨れている。原子力関係予算は1995年ころの建設停滞期までは順調な伸びで、原子力は4~5兆円産業であることがわかる。その半数を電力が、そして鉱工業、商社などが残りの半額を分

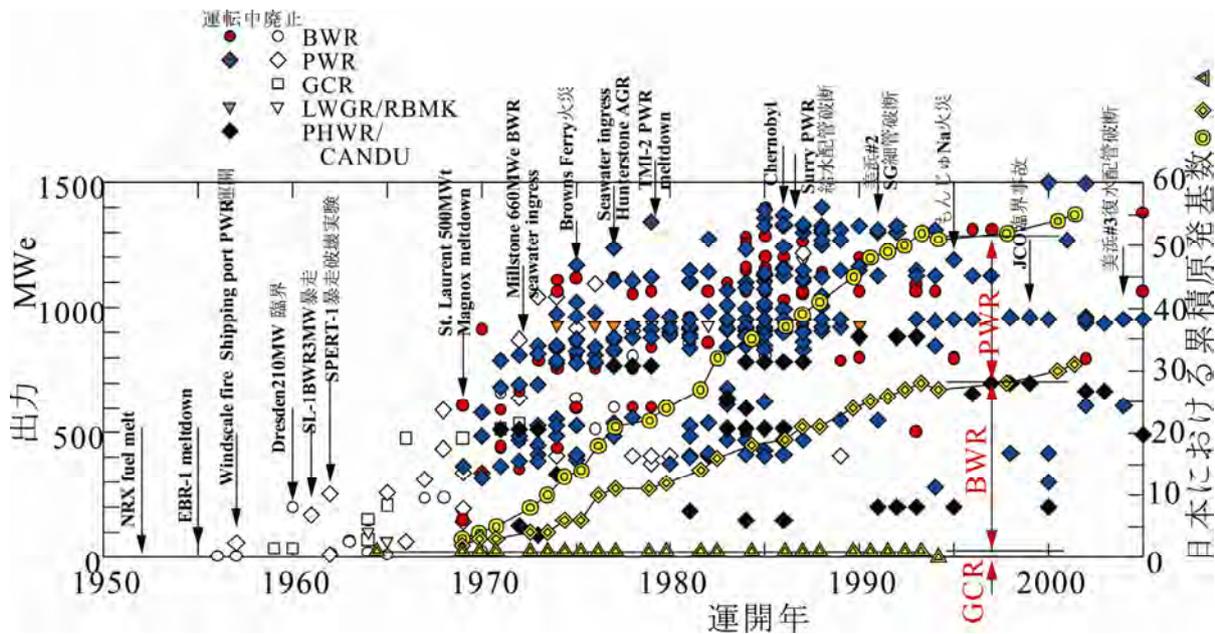


図1 世界の原発の運開時期と容量および日本の積算原発設置基数の推移 (World Nuclear Association/Nuclear Database[5]による)

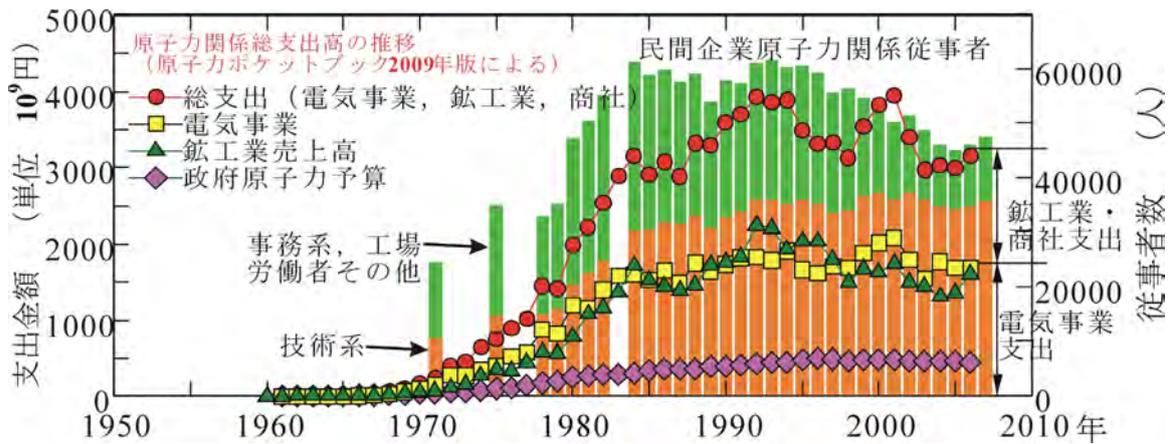


図2 原子力関係従事者数の推移 (原子力ポケットブック[6]による)

担した形となっている。

この一大産業分野の形成によって、技術者ならびに工場労働者、事務職のポジションも1970年代から80年代にかけて大きく増加する。原発の新規設置が少なくなるのに伴い、事務系と工場労働者の数は1万人以上減少しているが、技術系は政府予算がおおよそ一定であるのに呼応するかのようになり1990年レベルが2007年ころまで維持され、全体で5~6万人の雇用を生んでいたことになる。

我が国においては原研を中心とした動力試験炉JPDRの研究開発の一方で、コールダーホール改良型(GCR, 原電, 東海発電所, 1965 運開)を導入、さらには軽水炉(LWR)として Westinghouse

Electric Corporation (WH) から PWR, General Electric Company (GE) から BWR を導入し、これらが1970年の敦賀1号機(BWR), 美浜1号機(PWR), そして1971年には福島第一原発1号機(BWR)へとつながっていった。GCRもLWRもともに輸入技術であり、明治以来一貫して我が国の大型技術は輸入に頼っていることからして奇異なことではないが、まず自主技術の育成としなかったことに問題はなかったのだろうか。つまり機器開発にともなうトラブルを克服すること、そしてその経験を蓄積することなしに、真の技術は成立しえないのであって、その初期の開発・運用におけるトラブルこそが重要である。日本における当

表1 福島第1発電所の概要[10]

設備概要	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
建設着工	1967	1969	1970	1972	1971	1973
運開	1971	1974	1976	1978	1978	1979
原子炉形式	BWR3	BWR4	BWR4	BWR4	BWR4	BWR5
格納容器	Mark I	Mark II				
国産化率 %	56	53	91	91	93	63
主契約者	GE	GE・東芝	東芝	日立	東芝	GE・東芝
電気出力 MWe	460	784	784	784	784	1100
熱出力 MWt	1380	2381	2381	2381	2381	3293
燃料集合体数	400	548	548	548	548	764
燃料集合体全長 m	4.35	4.47	4.47	4.47	4.47	4.47
制御棒本数	97	137	137	137	137	185
圧力容器 内径 m	4.8	5.6	5.6	5.6	5.6	6.4
全高 m	20	22	22	22	22	23
全重量 ton	440	500	500	500	500	750
格納容器 全高 m	32	33	33	34	34	48
円筒部直径 m	10	11	11	11	11	10(上部)
球部直径 m	18	20	20	20	20	25(底部)
圧力抑制プール水量 ton	1750	2980	2980	2980	2980	3200

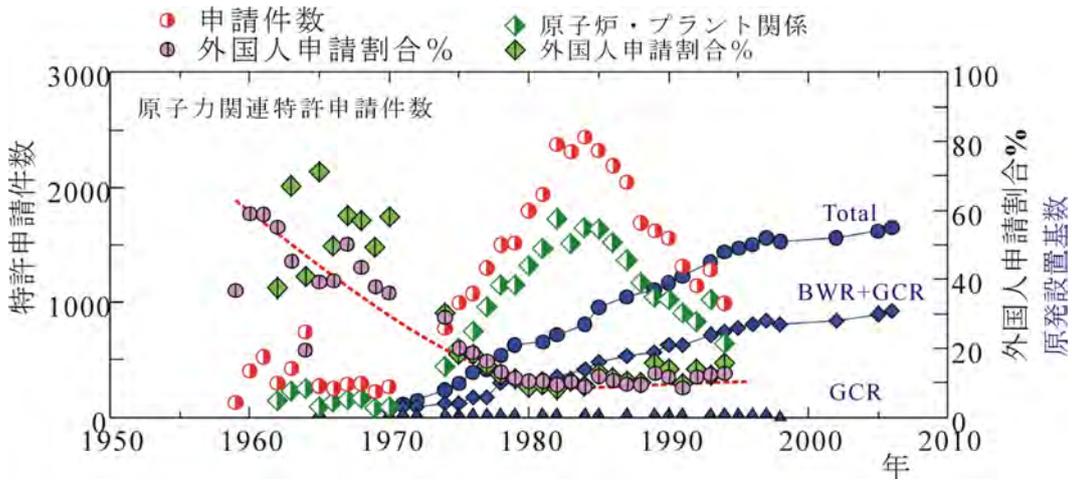


図3 原子力関連特許申請件数の推移と外国人申請割合（原子力ポケットブック[6]による）

初の軽水炉は、米国で開発されたものをターン・キー契約によって輸入したものであって、運開後、応力腐食割れなど数々のトラブルを克服してきたとはいえ、開発過程での幾多の問題を自ら解決してきたわけではない[7-9].

表1は今回事故を起こした福島第一原発の概要である。1号機の主契約者はGEで、まさにターン・キー契約で建設されたが、年を追うごとに、日米企業の共同、さらには日本企業のみが単独で主契約者になっていった経緯が明確に表れている。

このような技術導入を典型的に示すものとして原子力関連特許の統計をみると、図3に示すように1960年代には我が国に登録される原子力関連

特許の60%程度が海外発のものであり、1970年ころでも40%の高水準となっている。

しかし福島第一原発の例にもあるように、徐々に自主技術が進展し、申請特許件数の増大の割には、海外発の特許の割合は低下し、1980年代にはほぼ10%程度にまで、つまり90%程度は我が国技術者によるものとなった。その代表格が沸騰水型原子炉でいえばABWRであり、柏崎刈羽の6号機、7号機、そして浜岡5号機といいいだろう。現状では我が国に原発が導入された第1世代の原発が国産化率の進んだ第2世代、あるいは我が国で開発された第3世代のものと同様に混在して運用されているのである。その意味で原発はボイラ、蒸気

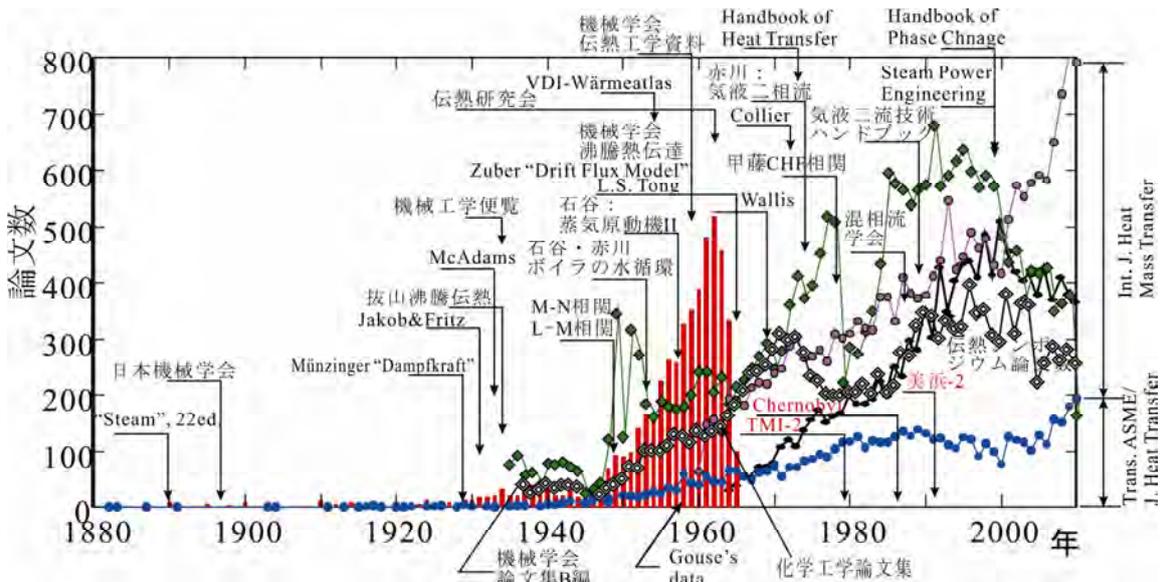


図4 二相流、伝熱関連研究論文数の推移

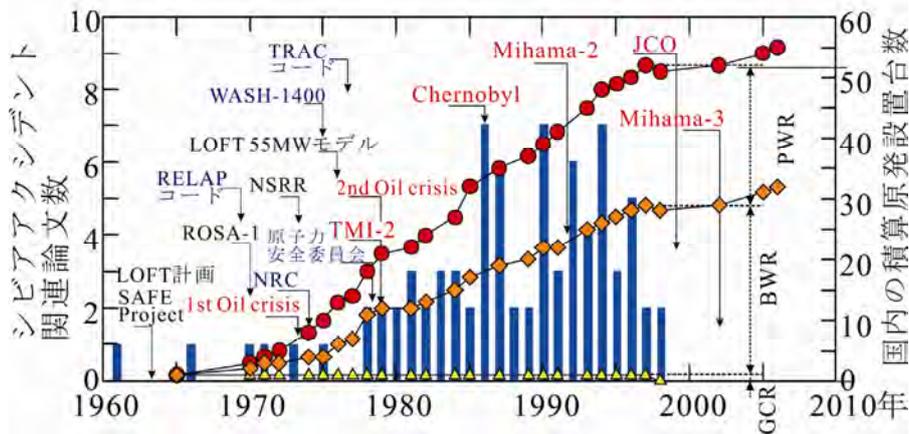


図5 原発設置台数の推移と事故，シビアアクシデント研究

タービン，ディーゼルエンジンなどのように十分な世代交代を経ているのであって，安全のための思想やそれに合致した設計思想，経験がまだまだ十分ではないともいえる。

原子力開発に伴って，さまざまな研究開発が行われたのではあるが，その状況は伝熱や二相流の論文数の推移からも窺うことができる。図4は1880年代から現在にいたるまでの二相流，伝熱の論文数の推移で，伝熱に関しては *Trans. ASME J. Heat Transfer*, *Int. J. Heat & Mass Transfer*, 国内を代表するものとして日本機械学会論文集B編，化学工学論文集および伝熱シンポジウムにおける講演件数をプロットしている。また二相流に関してはMITのGouseが1966年に取りまとめた論文数[11]（棒グラフ，1966以降のデータは補充していない），さらには伝熱・二相流研究にとって重要と思われる成果や書籍の公表年を示している。1940年代後半からの飛躍的な論文数の増大は，明確に原子炉開発に同調していて，原子力開発が非常に大きな牽引力であったのは間違いない。

このような原子力開発に伴う1950～1960年以降の論文数の急増は沸騰伝熱においても同様で[12]，機械学会や化学工学会においても同様であった。

もう一つ，原子力を取り巻く問題において考慮しておく必要があると思われるのは計算機の発達である。計算機は手回し計算機の時代（1920年代）からリレー式，真空管式の代表格である1940年ころのENIAC，トランジスタの開発に伴う発展と進化していったが，そののちの集積回路，大規模

集積回路による大型化・高速化の時代（1960年～1990年）を迎えて計算機がコンピュータと呼ばれるようになったのはまさしく伝熱研究，二相流研究の発展期に合致している。大型コンピュータならびにスパコンの発達は当然ながら大規模数値計算コードの発展を促し，例えば原子力分野ではRELAPやTRACなどの原子炉安全性評価のための数値解析コード[8]へとつながった。これ以降，伝熱や二相流の要素研究としては依然として実験に基づくものが中心であったが，システム全体の挙動については実機による実証よりは計算コードによる評価が通例になっていったのは原子力分野だけではない。また多くの商用のシミュレーションソフトが開発されたのもこの時期であった。数値シミュレーションは効率的であるという反面，非定常問題に際しては実時間経過の実感を持つことがむずかしいこと，起こっている現象が初期条件，境界条件の設定に大きく依存し，計画・設計で想定されたシナリオ以外の事象については調べることができないこと，すなわちCRT上に描き出された事象と実現象の乖離を埋めることが困難であるという問題を有する。

Three-Mile Island 原発2号機(TMI-2)事故(1979年)以降，米国 Nuclear Regulatory Commission (NRC) を中心としてシビアアクシデント研究が多数行われ，その代表的な研究成果は図5に示すように1980年～1995年の間に多く公表されている。80年代後半より大学はおろか原研においてさえ基礎科学重視へと方向転換がなされ，ハイテクやマイクロ・ナノ関連研究に資源と人材が投入さ

れ、現実プラントを対象とした、ある一面、泥臭い研究が縮小されていった[8]。実はこの泥臭い研究そのものが基盤技術であり、我々が検討すべきすべての問題は現実プラントに埋め込まれていることを忘れてはならない。

Ishii はシビアアクシデントに関する講演の中で、TMI-2 以前のいわゆる large-break LOCA (Loss of Coolant Accident) には想定されるシナリオは精々数例であるのに対して、TMI-2 が提議した small-break LOCA に端を発する事象の時間発展シナリオは非常に多岐にわたり、設計基準事故で想定されるものから大きく異なったものとなること、しかも単一の事象というより複数の事象が絡み合ったものとなることを指摘している[13]。つまりシビアアクシデントでは、想定するシナリオに大きな制約を受ける数値シミュレーションを超えた現実に直面するのである。

参考のために、図 5 にはシビアアクシデント関連論文の推移 (棒グラフ) とともに計算コード、安全研究などの例も示している。原子力研究開発の当初から Loss of Flow Test (LOFT) 計画や我が国でも Safety Assessment and Facilities Establishment (SAFE) プロジェクトが立ち上がり、1960 年代終わりから Rig of Safety Assessment (ROSA) 計画のもと大型再冠水実験などが行われ、反応度事故 (NSRR) なども研究された[8, 9]。原子力の安全性評価に確率的評価手法が導入された典型は WASH-1400 [14]であろう。大型計算コードのなかでも代表的な RELAP や TRAC が開発されたのは TMI-2 以前であった。TMI-2 以降、我が国でもシビアアクシデント研究が多数行われた[8, 15, 16] が、蒸気爆発を含めて要素研究が中心で、大型実験はどちらかといえば海外頼みだったように思う。このような研究が活発であったころの 1991 年に美浜 2 号機においては SG 細管破断が起こったが、幸いにも非常用炉心冷却系 (ECCS) により炉心損傷にまでは発展しなかった。これによって原子炉システムには ECCS があるため、本質的に安全であるかのような思いが定着したのかもしれない。Chernobyl 事故に関しては炉型が違うといい、また TMI-2 の炉心溶融事故から時間が経過してシビアアクシデント研究に予算がつかなくなっていくにしたがって、我が国においては電力会社、政府ともにシビアアクシデントに対する感度が低下

していったのだろう。

4. 福島第一発電所事故の経過

福島第一原発事故の経過の詳細は我が国政府の International Atomic Energy Agency (IAEA) への報告書[17, 18]、政府事故調査・検証委員会[1]、民間事故調査委員会[2]、東電の事故調査委員会[3]、国会事故調査委員会[4]などに詳しい。さらには原子力学会誌[19]あるいは成合の記事[7]にも詳細な説明が行われている。とくに 1 号機では直流電源喪失により津波の来襲直後から原子炉パラメータの測定データがほとんどないこと、炉心溶融により現状では十分な事故調査結果が得られていないこともあり、いずれの説明もある程度の前提を置かざるをえないのが現状である。東京電力などでは数値計算コードによる検討を行っていくつかの傍証データとともに事象経過を説明している。一方、本委員会メンバーでもある東北大学圓山重直教授は事故直後から熱力学や伝熱工学を基礎として活発な検討を続けられ、多くの重要な問題を指摘されている[20]。原発事故の現場にあって事態の推移を詳細に把握することは困難なのは当然で、たとえ集中定数系モデルであっても、電卓レベルでおおよその傾向を大掴みするのはきわめて重要であり、その意味で事故後であっても基本的な理解をするうえで圓山の検討は非常に重要なアプローチであると考えられる。しかし本稿においてその検討結果を集約するのは量的にも困難で、会員各位には個々に圓山のホームページなどを参照してもらおうとして、ここではより簡単に炉心溶融に至るまでの時間経過を中心として有富らの検証結果[21]に基づいて説明しておこう。

東日本大震災時の福島第一原発 1 号機以下 2, 3 号機までは運転中であり、4 号機は圧力容器から全燃料を燃料プールに移動しての運転停止状態であった。1 号機から 4 号機までの原子炉の概略は表 1 に示している。通常運転時には炉心圧力約 7MPa、燃料下部の冷却材 (水) 入口温度は約 270°C の若干サブクールした状態で、炉心で加熱されるとともに沸騰状態となり、燃料出口部のクオリティは炉心平均で約 14%程度である。また BWR の特徴として再循環ポンプを停止しての自然循環運転もできる。

さて 1 号機には非常時冷却系として非常用復水

器 (IC), 高圧注水系 (HPCI), 炉心スプレー系 (CS) が設置されている. IC は炉心で発生した水蒸気を凝縮させ自然循環力により圧力容器 (RPV) 内に戻す. そのため, IC の作動は弁の開閉により制御でき, 電動ポンプを使わずに崩壊熱除去できるものである. IC で蒸発した冷却水の蒸気は大気中に放出することになるため, 長時間作動させるには蒸発によって失われた冷却水を補給する必要がある. 1号機では地震直後に IC が自動起動し, 地震後約 50 分間は IC の断続的作動により崩壊熱除去が行われていた. この間の崩壊熱量は $6.6 \times 10^4 \text{MJ}$ と推定され, 炉心入口冷却材温度は約 270°C , 圧力を 7MPa とすれば蒸発潜熱は約 1506kJ/kg であるので, この間の IC による凝縮量は約 44 トンに達するが, RPV からの冷却材の流出は殆どなかった.

津波来襲(15:35)によって全ての電源が喪失し, IC を作動させる弁開閉信号用電源と動力源がなくなったことにより弁が自動的に閉止された. IC を作動させるには直接的に弁を開く必要があった. IC の作動がなくなると RPV の圧力が増加して RPV 内の蒸気は逃し安全弁を通じて格納容器 (PCV) 内の圧力抑制プールに放出され, LOCA が起きたのと同様に RPV 内の冷却材が減少し, 炉心内水位が低下, そしてついには炉心が空焚き状態になってしまう. なお IC が作動したとしても水は再循環ポンプ入口側から, すなわち RPV 内ではシュラウドの外側へ戻ることになる. そのためシュラウドの外側の水位がジェットポンプ吸込口より低下すると, 図 6 に示すように RPV 内での自然循環ができなくなり, 炉心冷却上大きな問題となる. つまり津波被災後 IC が停止してからは, 何を

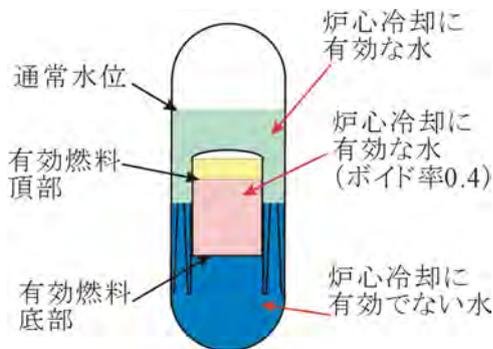


図 6 原子炉圧力容器の概略と強制循環のない場合に炉心冷却に有効な水

差し置いても炉心に崩壊熱除去用の水を注入すべく努力する必要があった. なお津波来襲後に実際に IC を作動できたのは 18:18~18:25 の間だけであったと推定される.

1号機の炉心入口流体の温度は約 270°C で圧力を 7MPa , 炉心を含むシュラウド内の平均ボイド率を 40% , 炉心が空焚きになるまでは崩壊熱は水の蒸発に使われると仮定とすれば, 蒸発潜熱は約 1506kJ/kg であるので, 炉心が空焚きとなる時刻は 17:21, つまり津波被災後わずか 1 時間 46 分後と想定される. また水位が燃料上部から下部に達する迄の時間は約 34 分となる.

炉心空焚き後は RPV 内での新たな蒸気発生つまり冷却は期待できず, 炉心燃料は崩壊熱により加熱され続けて燃料溶融は時間の問題であった. 1号機で非常に早く炉心の空焚き状態に至ったのは, 原子炉スクラム後の経過時間が少なく崩壊熱レベルが高かった状況のなかで RPV 内に注水できなくなったことによる. 高温になった被覆管やチャンネルボックスの材料であるジルコニウムが高温の水蒸気と反応して大量の水素が発生した. この水素が格納容器フランジ部シール材の過温損傷など (推定) により原子炉建屋の上部に溜まり, 酸素と反応し水素爆発を起こして放射性物質が環境に大量に放出されてしまった. この 1号機の水素爆発は 3月 12日 15:36 頃で, この爆発により 2号機と 3号機で準備していた炉心注水にも大きな障害を与えたと考えられる.

2号機と 3号機の構成や大きさは同一である. 両号機共に非常時の冷却系として IC ではなく, 炉心で発生した水蒸気で作動する原子炉隔離時冷却系 (RCIC) と高圧注水系 (HPCI) が設置されている. RCIC は地震直後の 15:02 および 15:05 にそれぞれ手動起動させ, RPV 外部から水を注入した. 2号機では RCIC の機能が 3月 14日 7:30 頃迄に喪失し, HPCI は作動しなかった. 3号機では RCIC は 3月 12日 11:36 まで断続的に作動し, RCIC 停止後約 1 時間後に HPCI が自動起動し, 同日 19:00 頃に機能喪失したと推定される. 2号機の炉心が空焚きになる時間は RCIC の停止時のシュラウド内水位にもよるが, RCIC 機能停止後の圧力 5.3MPa , 注水温度 60°C として計算すると, 3月 14日 13:24~16:46 の間と推定される. 3号機では炉心の空焚き開始時間は HPCI 停止時のシュラウド

内水位にもよるが、HPCI機能停止後の圧力1MPa、温度60℃として計算すると、3月12日23:23～3月13日01:53の間と推定される。

以上の推定結果から考えると、原子炉スクラム直後の崩壊熱レベルが高い状態では、ICにより凝縮させた水を戻すか、炉心で発生する蒸気によって駆動されるRCICやHPCIを用いて炉心に注水して安定した沸騰伝熱二相流動を用いて冷却し、崩壊熱レベルが低くなった段階で炉心が冠水状態にある間に格納容器ベントを行ない、炉心圧力を下げて低圧で炉心注水できるようにするべきであった。つまり早期の格納容器ベントによって環境へ放射性物質を放出しない状況の中で大気を崩壊熱のヒートシンクとして利用するといった事態収束に向けた大局観が持てなかった、あるいは持っていたとしても実行できなかったところに問題がある。

5. ポストFUKUSHIMAのエネルギー問題

福島原発事故以降、我が国の原発は定期点検とともに順次停止し、定検後も炉型の違いや新旧の別なく再稼働できず2012年5月に全原発が停止した。電力の50%余りを原発に依存していた関西電力においては6月末の段階で大飯3号機、4号機の再稼働が認められ、7月上旬には3号機が、同下旬には4号機も再稼働にこぎつけた。しかし関西電力管内の電力事情は、長期休止火力の再開も含め

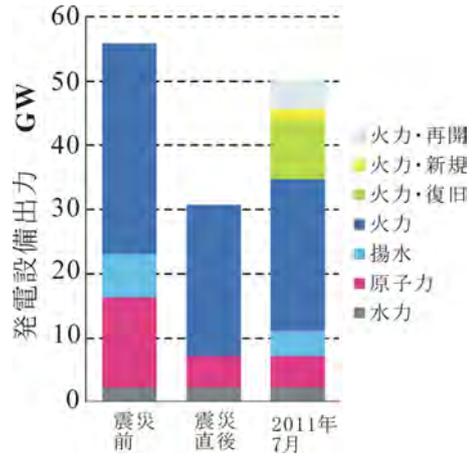


図7 東京電力の供給力と電源構成

て対応しているとしても、9月中旬までまだまだ厳しい状況が続くと予想されている。

図7は東京電力の供給力とその電源構成を示したもので、3.11の震災以前には3割近くを原発がカバーし、残りの大部分を火力が受け持っていた[22]。震災・津波災害を受けて原発が停止し、同時に火力も多く被災したため、全体としての供給力は30GW程度まで落ち込んでいる。これが2011年7月には休止火力の再開、被災火力の復旧に加えてガスタービン、ディーゼル発電機、ガスエンジンなどが臨時措置として非常に多数導入され、2011年12月までに1.37GWの電力を供給し、2012年にはさらに追加して2.8GW程度にも達すると

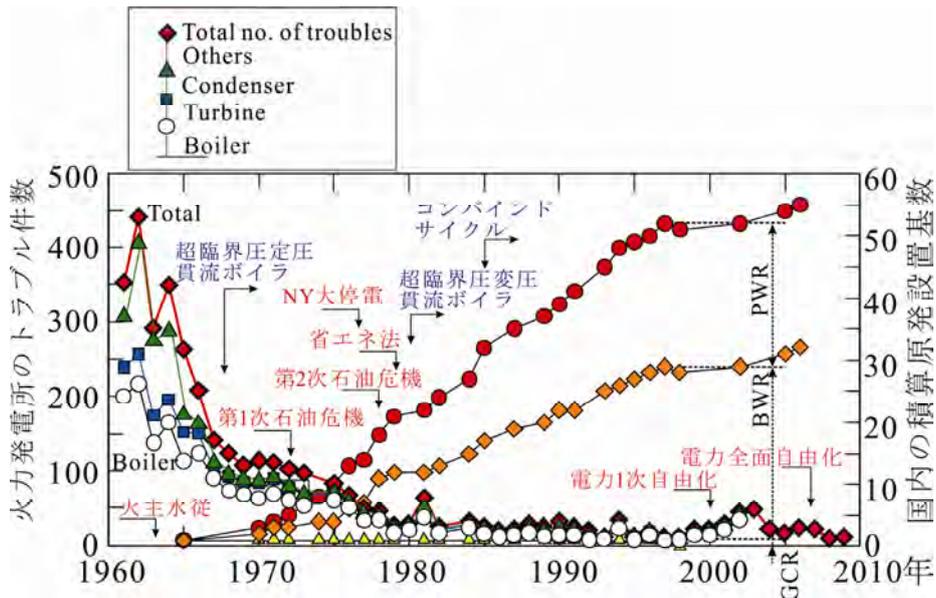


図8 原発設置基数と火力発電トラブル件数の推移

いう[23]. さらに注意すべきことは揚水発電である. これは夜間など電力供給に余裕があって初めて可能になる電力で, 揚水発電のみを単独で周辺電力から切り離して運転できるわけではない. 揚水発電は大型のバッテリーである事実は, 一部マスコミや多くの一般市民には十分に理解されていないのではないだろうか.

図8は我が国における原発設置の累積基数の推移と我が国の電気事業法下の発電設備のトラブル件数[24]の推移をプロットしたものである. 1960年以前のデータはここには示していないが, おそらく1960年ころ「水主火従」から「火主水従」への転換があったことから1960年以前には火力発電設備そのものの基数が少なかったために件数としては大きな値にはならなかったと推測される. その火力発電トラブルは1960年以降, 設置基数の増加にも関わらず顕著に減少していった. これには材料技術, 計測技術, 制御技術の進展などが大きく寄与したのは間違いない. その減少傾向は1970年ころには停滞気味で, 1975年を過ぎたころ再び大きく減少し, 1980年には年間40件を下回る程度にまでに低下している. これはベースロードを担う原子力の出現によって, それまでベースロードを担っていた, 従って長期にわたる連続運転が行われていた火力が, Daily Start and Stop (DSS) 運転なども含めて休止させることができるようになった, 言い換えれば相対的に連続運転時間が短くなったことが大きな原因として考えられる. なお火力発電のトラブルの内容をみると, 中心はボイラであり, 通常運転時には単位体積当

たりの発熱密度としては原発 (BWR: 50MW/m³, PWR: 100MW/m³) よりもかなり低く, 原発と同程度の発電容量では200~400kW/m³ではあるが, 温度は2000℃近くで, 水管の材料強度的にははるかに厳しい状況におかれている. また最新鋭の天然ガス焚コンバインド発電用ガスタービンでは非常に精緻な冷却技術に支えられているとはいえ, その入口温度は1600℃にも達しているのである.

さて東電では緊急避難的な対応によって夜間の電力供給に余裕ができ, それによって揚水発電が利用できるようになっている. しかし現状をそのまま継続するとすれば, つまり老朽・休止火力の運転再開や定期点検の先のぼしによって連続的に運転を続ければトラブル発生件数が増加する恐れがある. 実際, J-Powerの磯子火力(600MW×2)ではベルトコンベア火災が2011年11月に発生したし, 関電の堺港発電所2号機(定格400MW)では2009年8月に運開した新しいプラントであるにもかかわらずガスタービン翼の破損が発生(2011年8月)したのである.

図9に火力発電の単機容量の推移を示す[25]. 1950年代中盤から1970年代にかけて先にも述べた関連技術の進展によって, 火力発電の大容量化が大きく進んだ. 図9には2011年12月現在で東電が受発電している火力発電所の運開年と積算容量を示している[24]. 福島第1原発事故以降2011年12月現在運転中の火力発電所の運開時期をみると, 最も古いものは1955年であり, 運開以降40年以上経過したプラントの総発電量は10GW(1000万kW)にも達する. このように原発停止

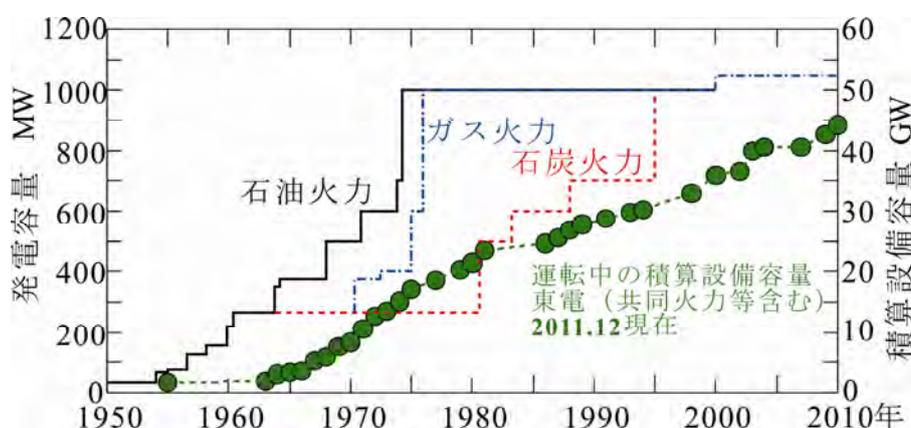


図9 火力発電の単機出力の変遷と東電受発電火力(2011年12月現在)の積算発電容量の推移

に伴って老朽火力に大きな負担がかかっている状況は実は原発依存のより高い関電においても同様で、1968年から1973年の間に運開した火力発電所は3750MW、関電にも電力を供給している J-Power の火力では500MWにも達している[26].

このような東電や関電の現状はあくまでも短期的にアクセス可能な過渡的な対応策であって、決して最終的な解ではないことに留意する必要がある。さらに現状の過渡的対応による燃料費が顕著に増大していることも忘れてはならない。すなわち2010年実績で発電用燃料費は3.6兆円程度であったのが、2011年では2.3兆円の増加、2012年では3.1兆円程度の増加と予測されている[22].これは当然発電コストの増加であり、それによって燃料の市場価格の高騰とも相まって食品からあらゆる商品にいたるまでの価格に転嫁される恐れもある。

家庭部門ならびに業務部門での電力負荷は空調負荷が約50%で、ある程度の節電は可能であろうが、製造部門では電力負荷の80%以上を生産設備が占めている。我が国の海外生産比率は1985年以降、ほぼ直線的に増加しており、2010年現在で見ると輸送機械では40%、製造業全体では20%程度にまで達している。さらには電力供給ならびにその安定性の先行き不透明（電力状況の「空洞化」）は製造部門ならびにサプライチェーン、特に我が国の世界シェアの高い素材産業や高付加価値製品の海外移転が促進される可能性もある[22].

一方の新エネ、再生可能エネの現状はどうか。現状では先の図7に記入できない程度の量しかない。だからと言ってこれらの発展の可能性について否定はしないが、短期的に有意なシェアを確保できるほど簡単には事態は運ばない。太陽光、太陽熱、風力、海洋などの希薄分散エネルギーを単純に足し合わせ、全体で30%にも及ぶ原子力などなくてもやっていけるかのような議論が横行しているマスコミもあるが、通常火力以上に立地には制約がかかるし、小規模であっても周辺機器は必要であり、経費は莫大な規模になるだろう。例えば60MW程度の太陽熱発電プラントでは1km四方のスケールを有する集熱装置と蓄熱システムを組み合わせた発電システムとなり、建設コストは単位出力あたりでみて石炭火力の数倍に達し、政府によるかなりの補助金が供給されない限

り現状では採算が取れないという。中長期にわたってこのような再生可能エネルギー利用を考えるならば、その利用形態、用途、規模、立地、関連して都市・ビル・家屋の構造、交通・物流にまで立ち入った検討と政府の積極的な政策・財政的関与なしには成立しえない。

中長期のエネルギー戦略を考えるとき、半ば強制的あるいは定期検査によって、我が国の全原発が停止した2012年5月時点を初期条件とし、廃炉が決まった福島第1発電所の1~4号機を除く新旧取り混ぜた約50基の原発、老朽・休止から最新鋭までの各種火力、自然・再生可能エネルギー、さらに資源確保の現状や国際政治情勢、そして局地的あるいはグローバルな意味での環境を境界条件として、感情にとらわれない冷静な議論・検討がなされなければならない。

6. 学会の社会的役割

産業革命期の経済発展や技術発展に支えられて蒸気動力技術は大きく進展した。その発端は Thomas Newcomen の大気圧機関(1712年)や James Watt の分離復水器(1769年)、回転式機関(1781年)であろう。Wattはその特許においてボイラ圧力を大気圧程度に制限したため、特許が満了する1800年までボイラの高圧化はなかった。特許満了後、当然の結果としてボイラ圧力は上昇し、当時のボイラ製造技術からして必然的にボイラ破裂が続発することになる。Martenが *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMech. E)* 誌上で公表した資料[27]によれば1866年までに1046件のボイラ破裂が挙げられ、さらに1866年からの4年間で570件が記録されている。つまり2~3日に1回の破裂があったことになる。米国ではボイラ破裂事故の多発を受けて、1830年に Franklin Institute of Philadelphia がボイラ破裂の原因究明のための委員会を設立し、ボイラに関する実験、材料強度に関する研究、ボイラ破裂の原因として考えられる各種問題などについて研究を開始したが、容易には破裂事故は減少しなかった[28, 29].

このような時代背景のなか、英国では IMech. E (1847年) また米国では The American Society of Mechanical Engineers (ASME, 1880年) が設立されたのである。我が国では通常、英国機械学会、米国機械学会と呼ばれているが、その設立当初のメ

ンバー，社会的使命などを勘案すると，学会というより機械技術者協会と呼んだ方が適切であろう。事実，IMech. Eは機械製造企業などのマネージャーが組織したもので，社会との関わりが必然的に組織の中に取り込まれた形となっているのである[30]。またASMEでは設立に際して2つの基本理念が置かれた。一つはProfessionalとしての評価・評判の確保であり，2つ目は専門知識の印刷物を通じての公表であり，これが社会への貢献とされたのである。そして構成メンバーとしては，技術のProfessionalと技術経営・ビジネスマンが設定されていた[31-33]。Franklin Instituteの研究成果を受け継いだASMEは1911年にBoiler Code Committeeを立ち上げ，1919年にASME定置式ボイラ製造コード(Boiler and Pressure Vessel Code Section Iの一部に相当)を発行した。同年，National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors (NBBI，全米ボイラ圧力容器検査官協会)が発足した。それ以降，ASMEによるボイラ製造にかかわる標準化とコードの維持管理およびNBBIによる第三者検査というボイラの安全確保の体制が出来上がっていったのである。

つぎにIMech.EやASMEと対比する形で伝熱学会について述べてみよう。伝熱学会は定款に「伝熱に関する学理及び応用についての発表，知識の普及，会員相互及び国際的な交流を図ることにより，伝熱学の進歩普及を図り，もって我が国における学術の発展に寄与することを目的とする」と規定している。つまり伝熱学会は分野横断的ないわば伝熱研究の共通のプラットフォームともいべき存在を志向している。この点が先に例示したIMech.EやASMEと大きく異なる点である。つまり伝熱学会は当初から工学的システムを扱う組織というよりは，分野横断的な要素技術としての伝熱を扱う組織と理解される。伝熱シンポジウムにおけるセッション名が伝統的に強制対流，自然対流，熱伝導，放射伝熱，沸騰，凝縮，二相流などとされているのがこれを端的に表している。長島[34]は創立50年の特集記事において，初期段階では「実現象から理論化へ，そして学術的な体系確立」へと進展したことを述べている。理論化は数式に乗せることを可能にし，それによって相似則が確立され，定量予測が可能になることを意味している。理論化は当然ながら現象の分類，基本メ

カニズムの抽出と理想化を内包している。さらに長島はそののちの段階として「複合現実課題からきれいな表現可能な課題」へと対象が変化してきたことを指摘している。そのような流れの中で，伝熱学会ではシビアアクシデントなど実現象についてはほとんど議論されてこなかったのは当然といえは言い過ぎだろうか。

今回の原発事故についていえば，要素技術としては高温面の冷却，相変化などが挙げられるが，実現象においてはこれら要素的現象が炉心冷却喪失状況の中で複雑にまたダイナミックに複合したのであって，単純に個々の要素技術やメカニズムだけで説明できるものではなかった。しかし伝熱や熱エネルギーを専門とする学会構成員としては，細部はともかく，先に記載した大局的な内容については十分説明可能であり，社会の中に学会として存立を認められている，あるいは上記のASMEのいう「Professionalとしての評価・評判の確保」のためには，原発事故という「具体的な課題に専門家の意見や提案を集約し，統一的な見解を示す[34]」必要があり，公益社団法人であればなおさらこの点が重要となろう。その意味で，統一見解ではないにしても原発事故当初からの圓山の情報発信[20]や有富らの検討[21]は非常に貴重であるといえる。立場は異なるかも知れないがASMEによる特別委員会報告[35]などは学会の社会的責任を果たすものとして参考にすべきだろう。

なお今回，福島原発事故で問題となったのは原発というシステムそのものであり，冷却不能状態を如何にしたら抜け出せたかというマネジメントの問題でもあった。これらの問題は要素技術を単に積み上げるだけで解決するものではない。今回の事故を踏まえて伝熱学会において今後の新たな展開を図るとすれば，単に昔帰りではなく，具体的なシステムをも，なおその際には当然ながらシステムの運用上の問題や安全性確保などマネジメントに係るものも含まれるのではあるが，学会の場で議論する間口の広さを併せ持つことが重要ではないだろうか。我々が扱っている工学システムにはまだまだ未解決の問題，特に多数のメカニズムが複合した未説明現象が多く残されている。詳細なメカニズムを検討しているそのそばで現実問題を扱うことこそ，学会の場としてふさわしい。逆にそのような共通の場を学会として提供する必

要があると考える。これこそが長島[34]のいうように「歴史臨場感こそが若い研究者を分野に誘い込み、研究を進展させる原動力となる」のである。

7. 結びにかえて

熱エネルギーの利用には必ず伝熱現象が関係し、その意味で、エネルギー利用は伝熱学会の範疇にあり、伝熱の立場からエネルギーの有効利用や安全性に積極的に関与してきたし、今後もすべきであると思う。ただしそれら研究において分野横断的技術・研究領域を対象として研究・開発を行うのは当然であるが、俯瞰的な視点から実際の現場で伝熱がどのような役割を果たし、どのような問題が存在するのか、またそのシステムが社会的・経済的にどのような意味を持つのかということにも留意し、社会に発信することも合わせて必要であると思う。

さて、本特別委員会は当初よりオープンフォーラム的な構成をとっており、委員長と幹事を決めただけで、委員を明確に特定することはしなかった。したがって会合に参加され、また貴重な意見をいただいた方々には申し訳ないが、ここではお名前を挙げることを控えさせていただいている。本報告の原稿段階で委員会に提示し、あるいはメールにてご意見をいただき、ある程度の加筆修正を行ってはいるが、委員長の独断による部分が多数残されている。事実誤認などあったとすれば、それは全て本稿を執筆した委員長の不明によるものであり、そして本特別委員会での議論が「専門学会として統一的な見解を示す」までには至らなかったのはまさしく委員長の非力のせいであると自戒しつつ、1年以上にわたってご協力いただいた委員各位に心より感謝申し上げる次第である。とくに成合英樹先生、長島昭先生、藤岡恵子様、東工大プラント検討チームの各位、圓山重直先生、丸山結様、門出政則先生には貴重なご意見や資料をいただいたことを記し、心よりの謝意を表す。

参考文献

- [1] 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会，中間報告（2011.12），最終報告書（2012.7）。
- [2] 福島原発事故独立検証委員会 調査・検証報告

- 書，日本再建イニシアティブ（2012.3）。
- [3] 東京電力，福島原子力事故調査報告書，中間報告（2011.12），最終報告（2012.6）。
- [4] 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会，最終報告（2012.7）。
- [5] World Nuclear Association, WNA Reactor Database, <http://world-nuclear.org/NuclearDatabase/>.
- [6] 原子力ポケットブック 1964～2011 年版，当初は科学技術庁原子力局編，現在は日本電気協会新聞部編。
- [7] 成合英樹，福島第一原子力発電所事故について，Radioisotopes, Vol.61, No.4 (2012), pp. 193 - 207.
- [8] 成合英樹，原子力発電プラントと伝熱，伝熱，Vol.50, No.213 (2011), pp. 28 - 35.
- [9] 成合英樹，本特別委員会宛私信，（2012.3.29）。
- [10] 東京電力，福島第一原子力発電所 設備の概要，（2011）。
- [11] S. W. Gouse, Jr., An Index to the Two-Phase Gas-Liquid Flow Literature, The MIT Press, (1966).
- [12] 庄司正弘，沸騰研究の 50 年，伝熱，Vol. 51, No. 214 (2012), pp. 21 - 29.
- [13] M. Ishii, Challenges in Two-Phase Flow and Reactor Safety Research after Fukushima Accident, Japan-US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics 2012, Tokyo, (2012).
- [14] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Reactor Safety Study - An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400 (NUREG 75/014), (1975), (ラスムッセン報告としてよく知られている)。
- [15] 日本原子力学会誌，特集「軽水炉のシビアアクシデント研究の現状」，Vo. 35, No. 9 (1993), 762 - 794.
- [16] 成合英樹ほか，シビアアクシデントに関する熱流動研究の最近の動向，日本原子力学会誌，Vol. 39, No. 9 (1997), 739 - 752.
- [17] 原子力災害対策本部，原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書－東京電力原子力発電所の事故について－，（2011）。
- [18] 原子力災害対策本部，原子力安全に関する

- IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書
－東京電力原子力発電所の事故について－
(第2報), (2011).
- [19] たとえば奈良林直, 杉山憲一郎, 東日本大震災に伴う原子力発電所の事故と災害－福島第一原子力発電所の事故の要因分析と教訓, 日本原子力学会誌, Vol. 53, No. 6 (2011), pp. 387 - 400.
- [20] 圓山重直, 伝熱学会の役割: 現象の究明・検証のあり方を考える, 伝熱シンポジウム特別セッション「福島第一原発事故を受けて我が国のエネルギー問題を考える」配布資料, (2012), <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/maru/atom/>.
- [21] 有富正憲 (編著), 今, 原子力研究者技術者ができること, 培風館, (2012).
- [22] 藤岡恵子, 大震災後の持続可能な電力需給にむけて, 第49回日本伝熱シンポジウム特別セッション配布資料, (2012).
- [23] 電気新聞, 2011年12月7日版
- [24] 原子力安全保安院, 電気保安統計 (各年度)
- [25] 黒石卓司, 小川道隆, 発電用ボイラ制御の歴史 (1) 空気式からアナログ電気式の導入へ, 火力原子力発電, Vol. 63, No. 4 (2012), pp. 287 - 297.
- [26] 関西電力, 各発電所の概要
<http://www1.kepco.co.jp/energy/fpac/community/plant/>.
- [27] W. B. Marten, Records of Steam Boiler Explosions, E. & F. Spon, London, (1872).
- [28] A. M. Greene, Jr., History of the Boiler Code, ASME, (1953).
- [29] 石谷清幹, 工学概論 (増補版), コロナ社, (1982), pp. 121 - 133.
- [30] R. H. Parsons, History of the Institution of Mechanical Engineers 1847 - 1947, IMech. E, London, (1947).
- [31] F. R. Hutton, A History of the American Society of Mechanical Engineers from 1880 to 1915, ASME, New York, (1915).
- [32] B. Sinclair, A Centennial History of the American Society of Mechanical Engineers 1880 - 1980, ASME, New York, (1980).
- [33] 廣瀬幹好, 技師とマネジメント思想—アメリカにおけるマネジメントの思想の生成, 1880年～1920年, 文眞堂 (2005).
- [34] 長島昭, 学会のライフサイクルとサステイナビリティ—日本伝熱学会の半世紀, 伝熱, Vol. 51, No. 215 (2012), pp. 6 - 19.
- [35] The ASME Presidential Task Force on Response to Japan Nuclear Power Plant Events, Forging a New Nuclear Safety Construct-, (2012), <http://files.asme.org/asmeorg/Publications/32419.pdf>.
-

ヒートパイプ技術最近の進展

Recent Advance of Heat Pipe Technology

勝田 正文 (早稲田大学)
日本ヒートパイプ協会会長
Masahumi KATSUTA (Waseda University)
e-mail: katsuta@waseda.jp

1. はじめに

2012年4月発行の伝熱, 創立50周年特別号[1]「学会のライフサイクルとサステナビリティー日本伝熱学会半世紀」の中で長島先生が「若者を惹きつけたトピックス」で次のように述べておられる。“この半世紀の間には, 伝熱学の分野でも, ある日突然面白い報告が登場して話題をさらう動きもあった。これは若い研究者を惹きつけるのに効果があった。1960年代後半にヒートパイプが登場した。銅の棒よりはるかに軽い金属棒が, 銅よりもはるかに多くの熱を伝えるというのである。中略 ヒートパイプの面白い点は科学的発見でなく技術的発見であることであった。原理は古代から誰でも知っている蒸発・凝縮と毛細管現象である。このようなものが20世紀後半になって初めて登場することもあるのだと大いに刺激を受けた。”

実は本原稿を担当する筆者も1970年代前半に研究室生活に入ったばかりの駆け出しで, 長島先生がおっしゃるこの現象に惹きつけられた若き研究者(?)の一人であると思われる。1970年代から恩師でもある柴山信三教授がヒートパイプの基礎研究を始められ, いわゆる各種ウィックの伝熱, 流動特性を仔細に検討されていた(この研究は後に師岡慎一氏の博士論文「ヒートパイプの蒸発熱伝達機構および作動限界機構に関する研究」に集約されている)。柴山は1971年7月号の日本機械学会誌[2]で“ヒートパイプ”という題名で現象に忠実でかなり踏み込んだ解説を書いており, 最後のまとめには「今後もっと広く利用されてよい装置である」と記している。

日本におけるヒートパイプ研究の黎明期をここに紹介したが, 現在では日本機械学会, 日本伝熱シンポジウムでの複数セッションを設定, さらにヒートパイプに特化した国際学会の開催など大いに発展し, 高性能伝熱素子, 高性能熱輸送素子としての代

名詞になるまで発展した。ここでは, 特に2000年以降のヒートパイプ技術の進展とその応用について述べる。

2. ヒートパイプの開発から現状まで

簡単に歴史を振り返ってみる。機械学会誌の解説で柴山は, 次のように述べている。閉じた管の一端を加熱して内部の液体を蒸発させ他端で凝縮させることによって小さい温度差で管の断面積あたり多量の熱を輸送することが出来る。凝縮した液体を再び蒸発部にもどすために管の内壁に毛管作用のよく働くような組織(これを Wick という)を内張りしたようなものを用いる装置を Grover らがヒートパイプと名付けて1964年に発表[3]し, つづいて翌1965年に Cotter がその基礎理論発表して[4]そののち広く一般にも紹介されこの名称が一般的になった[5]。一方, ヒートパイプ協会編実用ヒートパイプ[6]では, “ヒートパイプのルーツは, アメリカオハイオ州にある G.M 社の S.Gaugler が出願した「Heat Transfer Device」(出願 1942年12月21日)がヒートパイプの文献1号であり[7], 当時の米国では実用化されずに埋もれてしまっている。”としている。このように, Grover は Gaugler とは全く関係なくヒートパイプを発明し, その実用化に成功した。また発明の名称をヒートパイプとして, 広く受け入れられることとなった。Grover はニューメキシコの Los Alamos 研究所で研究グループを指導し, 人工衛星用のヒートパイプの研究に傾注しており, その成果を基に製作された水-ステンレス鋼ヒートパイプを有する宇宙船は1967年に打ち上げられた。

一方, ヨーロッパでは原子力研究所を中心に高温側のヒートパイプ開発が行われた。英国の原子力研究所, イタリアの ISPRA (Joint Nuclear Research Center) が中心となり, 熱電子発電用であった。ド

イツ, Stuttgart の IKE やフランス, Grenoble の原子力研究所等もヒートパイプ研究に貢献しており, 後の国際会議開催地や国際会議組織委員会の主要メンバーを輩出している。

以上のようにヒートパイプの初期の研究は, 時代の要請に応えるものであり人工衛星への適用を中心に進められ, 熱電子発電等へ波及した。ヒートパイプを初めて商品化したのもアメリカであるが(1966), これを契機としてヒートパイプは世界各国で熱交換器や電子機器の冷却等, 地上用各種機器の冷却に用いられるようになった。現在も放熱部材, 素材の世界規模の市場は 2011 年, 3061 億円, 2017 年予測では 4256 億円と言われており, ここにはヒートパイプ以外の素材や部材も含まれるものの, 市場は堅調に伸びるものと思われる(株式会社 富士経済による)。

3. この間のエポックメイキングな出来事 (2000 年以降も含む)

- 1966 年 F.J. Stenger CPL(Capillary Pumped Loop)を提案
- 1969 年 V.H. Gray Rotating Heat Pipe を提案
- 1975 年 ATS-F(Application Technology Satellite)
CTS(Communication Technology Satellite)
温度制御用ヒートパイプ採用と可変コンダクタンスヒートパイプの搭載
- 1976 年 122000 本の低温ヒートパイプをアラスカパイプラインシステムに設置 (図 5 参照)
- 1984 年 T.P.Cotter Micro Heat Pipe の概念を発表 [8]
- 1987 年 H.Akachi 自励振動型HPの提案[9]
- 1999 年 第 11 回 IHPC を東京 成蹊大学で開催 (実行委員長 成蹊大学 前沢教授)
Oscillatory-Flow Heat-Transport Device (Forced Oscillatory Flow Type and Bubble Driven Type) Prof. Nishio いわゆるドリームパイプと気泡駆動型の振動型のHPの比較 [10]
- 2006 年 第 8 回 IHPS を熊本大学で開催 (実行委員長 熊本大学 井村教授)
- 2011 年 A.Fagri 太陽熱集熱へのHPの応用を提唱[11]
Mochizuki 原子力事故の分析からヒートパイプによる自然循環冷却を提唱[12]

4. 国際会議や日本ヒートパイプ協会の貢献

ヒートパイプ研究の進展及び広範な用途開発を背景として, 第 1 回の国際ヒートパイプ会議 (International Heat Pipe Conference) が 1973 年ドイツ (Stuttgart) で開催され, 41 編の論文が受理され発表された。宇宙対象が 8 編に対して地上用の応用例が 6 編, VCHP も 6 編あったことは注目される。その後, IHTC は 3 年ごとに大体開催されてきている。開催年と開催地を表にまとめているので参照されたい。中でも第 5 回と第 11 回は東京で開催されている。特に第 5 回 (1984) は, 日本でのヒートパイプ生産が量産段階に入ろうとした時代で, 応用分野も多岐にわたり, 加えて大学や研究所の基礎研究は独創的なものが多く世界的にもトップレベルにあったことは間違いない。このような時に産学官が連携して協力し, 大島耕一, 本田一郎を中心として日本ヒートパイプ協会が 1982 年 6 月に設立され[13], 大島耕一教授 (東京大学) に会長をお願いした。この協会の主要メンバーを中心に第 5 回 IHPC 実行委員会が構成され, 2 年後の開催に向けて活動を開始している。なお, 昨年 6 月にヒートパイプ協会は 30 周年を迎えているが, 本年 2012 年 7 月 7 日に開催された総会の後に 30 周年の記念懇親会を行っている。日本伝熱学会の 50 周年に遅れること 20 年であることは, 興味深い。

第 11 回 (1999) は, 東京の成蹊大学で前沢教授を中心に開催されたが, 1984 年のマイクロヒートパイプ, 87 年の自励振動型ヒートパイプの提案を受け, また PC の高速化による CPU 冷却側の要請も受けて, 7 件のキーノートレクチャーが行われ (マイクロ/ミニチアヒートパイプ, CPL と LHP ヒートパイプ技術, 二相サーモサイフォン, 自励振動型ヒートパイプ理論, 宇宙関連の CPL と LHP の問題点), この分野の将来を示唆する多くの提言がなされている。また, 日本からの論文の増加と同時に韓国を筆頭に東南アジアからの発表もこのころから盛況となった。

日本ヒートパイプ協会では, 特に東南アジアにおけるヒートパイプ研究と開発, 産業の育成を支援する目的から, 世界的な組織である IHPC とは別に国際ヒートパイプシンポジウム (IHPS) を主催することを提唱し, こちらも概ね 3 年おきに第 1 回から 4 回までを日本で, その後は東南アジア各地で開催され現在にいたっている。表に示すように現在では環太平洋地域も巻き込み大きく成長している。いよいよ

よ第 11 回は、経済的にも格段の飛躍をみた中国で開催される予定である。

最近、台湾で開催された第 10 回の IHPS では、以下のような発表があった[14].

第 10 回 IHPC

実行委員長 Prof. Kang Tamkan Univ. Taiwan

全論文数 49 件

Key note lecture	5 件
Mini, Micro Heat Pipe	10 件
Loop Heat Pipe	10 件
Thermosyphon	4 件
Oscillating Heat Pipe	8 件
High Temperature Heat Pipe	2 件
Aerospace Application	2 件
Environmental Protection and Energy Saving	4 件
Others	5 件

残念なことではあるが、日本からの論文発表は減少傾向にあり、最盛期の 2 割程度である。やはり、世界の工場と言われヒートパイプでも技術力の上昇が著しい中国からの論文が多いのが特徴である。

表 1 IHPC 開催地

IHPC	LOCATION	YEAR
1st	Stuttgart, Germany	1973
2nd	Bologna, Italy	1976
3rd	Palo Alto, CA, USA	1978
4th	London, UK	1981
5th	Tsukuba, Japan	1984
6th	Grenoble, France	1987
7th	Minsk, Belarus	1990
8th	Beijing, China	1992
9th	Albuquerque, NM, USA	1995
10th	Stuttgart, Germany	1997
11th	Tokyo, Japan	1999
12th	Moscow, Russia	2002
13th	Shanghai, China	2004
14th	Florianopolis, Brazil	2007
15th	Clemson, SC, USA	2010
16th	Lyon, France	2012

表 2 IHPS 開催地

IHPS	Location	Year
1st	Tokyo	1985
2nd	Osaka	1987
3rd	Tsukuba	1988
4th	Tsukuba	1994
5th	Australia	1996
6th	Thailand	2000
7th	Korea	2003
8th	Kumamoto	2006
9th	Malaysia	2008
10th	Taiwan	2011

5. 論文動向に見る研究開発の傾向と変遷

5.1 日本伝熱学会 日本伝熱シンポジウム

日本伝熱シンポジウムにおけるヒートパイプ講演数を研究テーマ別に整理して図 1 に示す。伝熱シンポジウムにおけるヒートパイプの最初の講演論文は、第 10 回に初めて見られる(ヒートパイプの非定常挙動の研究 第 1 報 当時慶応大 長島教授)。講演数は回を重ねるごとに増加傾向にあり、研究開発、特に基礎的な現象に対して非常に活発であることがうかがえる。

累計別では、ヒートパイプの原形と言うべきウィック型およびサーモサイフンの数が減少し、LHP、マイクロ、自励振動型が増加傾向にある。最近では特に挙動メカニズムに着目した研究や、そのメカニズムによる伝熱解析モデルの構築が多い。より詳細な類型による分類である図 2 から同様な傾向が見られる。

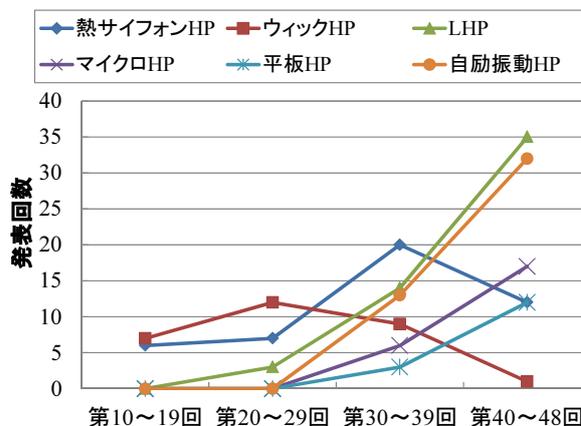


図 1 伝熱シンポジウム HP 別発表回数推移

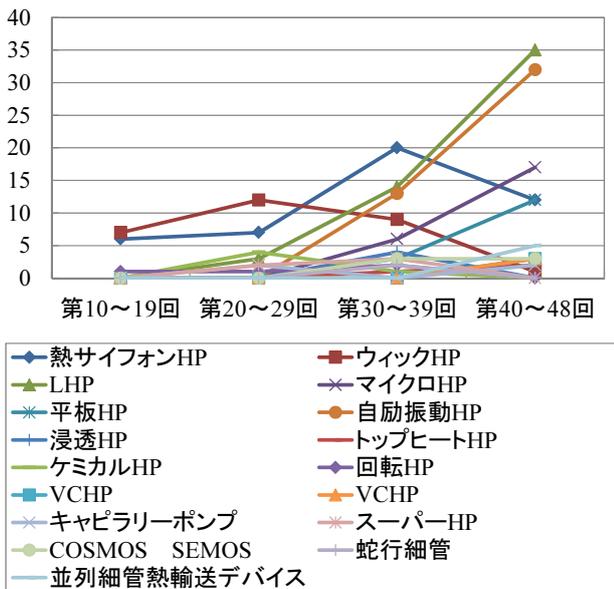


図2 伝熱シンポジウム HP別発表回数推移(詳細)

5.2 学会誌 伝熱

計13編(内 伝熱シンポジウムのレビューが3編)の解説があるが、自励振動型ドリームパイプ、より応用に特化した(融雪、凍土利用の低温貯蔵庫)内容である。

5.3 国際学会

性格が若干異なる国際会議ではあるが、手元資料が豊富にある第11回IHPC(成蹊大学)と第10回IHPSの講演やキーノートについて比較を試みた。

図3はキーノートレクチャーの内容による比較である。基礎現象や解析を重視した1999年から2011年では、応用面に重点が置かれ、震災後の原子炉事故に対する対策や(パンプな冷却にHPを利用)、環境の側面が強調されていることが分かる。

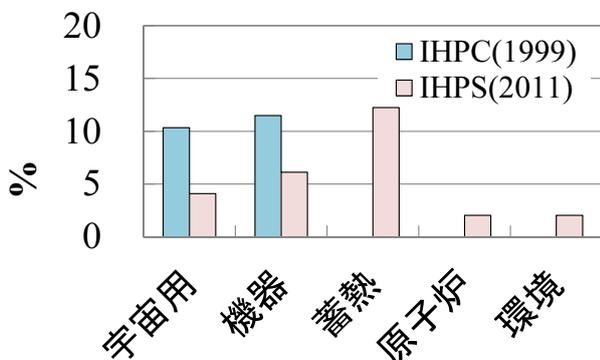


図3 IHPC(1999), IHPS(2011)(Keynote Lecture 比較)

図4は一般講演内容による変遷である。もともと全発表論文数が異なるので、割合で表示しているが、LHPおよび自励振動型の増加、幅広い応用に裏打ちされた研究対象の多様化が最近の特徴であると判断される。

ヒートパイプの原形型に関する基礎研究も安定した割合を占めている。

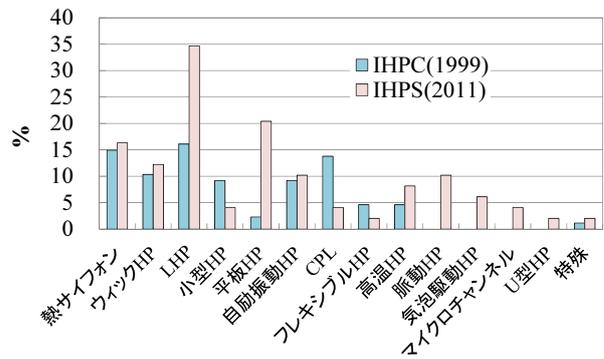


図4 IHPC(1999), IHPS(2011)一般講演比較

6. 特許から見る動向

日本国内の特許分析を行っている創知(株)の分析を基に述べる。分析対象は要約・請求項に「ヒートパイプ」を含む、2001年以降に公開された国内特許である。2001年から2011年10月末までに3000件を超える特許が公開されている。年次推移をみると、2008年公開まで年間で300件を超える特許がコンスタントに公開されている。その後やや減少する傾向が見られる。クラスター解析によれば、ヒートパイプそのものに関する特許ではウィックや冷媒、コンテナあるいはヒートシンクといった技術が多く公開されている。一方、応用面では電力変換装置や電子機器、光源、画像形成装置あるいはエンジン等に関する特許が公開されている。主要な出願領域の推移をみると、2001年から2003年公開の特許ではヒートシンクに関連するものが多かったが、2004年～2009年の範囲では画像形成装置が、そして2010年以降ではエンジン関連の応用が増加している。

日本伝熱学会の主要メンバーである大学を含む公的機関からの出願では、その数は必ずしも多くはなく、2001年以降で50件程度が公開されているに留まる。

特許から見ると、原油価格の高騰や温暖化防止さらには原子力発電所の事故などによる、更なるエネルギー効率の向上を求められる我が国においては、

多面的に取り組む必要がある。ヒートパイプを代表とする熱輸送技術に加えて蓄熱や断熱などエネルギーマネジメント技術は今後注目されることとなる。その中で公的研究機関をいかに活用し、技術を効果的に開発していくかが日本企業の課題となるものと考えられる（ヒートパイプとプレーヤーより）[15].

7. あとがき

特に 2000 年以降のヒートパイプ技術に注目して、技術を歴史的な観点で解説した。黎明期に若い研究者を惹き付けたヒートパイプも、奇しくも先達が指摘したように幅広い応用に裏打ちされた研究対象の多様化が最近の特徴である。一方、我が国のこの分野における競争力は、最盛時に比較してかなり衰えを見せており、代わって東南アジアの国々が力を増している。ヒートパイプ協会が総力を挙げて 1985 年に出版した「実用ヒートパイプ」の復刊を望む声も、最近あちこちから聞こえている。近い将来、このような声にお答えする機会が持てるように協会も一丸となって努力していきたい。

参考文献

- [1] 長島, 学会のライフサイクルとサステナビリティ—日本伝熱学会の半世紀, 伝熱, Vol.51, No.215, (2012-4), 6-19.
- [2] 柴山, ヒートパイプ, 日本機械学会誌, 第 74 巻, 630 号, (1971-7), 65-69.
- [3] G.M. Grover, T.P. Cotter and C.A. Erikson, Structure of Very High Thermal Conductance, J. Appl. Phys. Vol.35, No.6, (1964-6), 1990.
- [4] T. P. Cotter, Theory of Heat Pipe, USAEC Report LA-3278, Contract W-7405-eng-36, Los Alamos Research Center (1965).
- [5] K.T. Feldman and G.H. Whiting, Mech. Eengng. Vol.89, No.2 (1967-2), 30. Rngr's Digest, Vol.28, No.3 (1967-3), 85.
- [6] 日本ヒートパイプ協会編, 実用ヒートパイプ, 日刊工業新聞社, (2001-7).
- [7] P.D. Dunn and D.A. Reay (伊藤訳), ヒートパイプ, 学術社, (1978).
- [8] T.P. Cotter, Principles and Prospects of Micro Heat Pipes, Proc. 5th Heat Pipe Conference, Tsukuba Japan, (1984), 328-335.

- [9] H. Akachi, F. Polasek and P. Stlc, Pulsating Heat Pipes, Proceedings of the 5th IHPS, (1996), 208-217.
- [10] S.Nishio, Oscillatory-Flow Heat-Transport Device (Forced Oscillatory Flow Type and Bubble Driven Type), Proc. 11th Heat Pipe Conference, Tokyo Japan, (1999), 39-49.
- [11] Fagri, Integration of Heat Pipes in Thermal Energy Storage System for Concentrating Solar Power, Proc. 10th IHPS, (2011), 7.
- [12] M.Mochizuki 他 6 名, Nuclear Reactor Must Need Heat Pipe for Cooling, Proc. 10th IHPS, (2011), 8-12.
- [13] <http://www.jahp.jp/>
- [14] Proceedings of The 10th International Heat Pipes Symposium,(2011).
- [15] <http://so-ti.com/>

付録 ヒートパイプ応用例

本文に登場した多くのヒートパイプについて、特にその構造や伝熱機構について述べることなく、技術の視点、歴史的な観点を強調した。

ここに、いくつかの応用例を写真やモデル図で示すことにより、読者諸兄の参考としたい。

個別のヒートパイプ詳細解説は、それぞれの専門家をお願いしている。

・永久凍土融解防止用ヒートパイプ



図 5 永久凍土融解防止用ヒートパイプ
(勝田所蔵写真)

・ループヒートパイプ

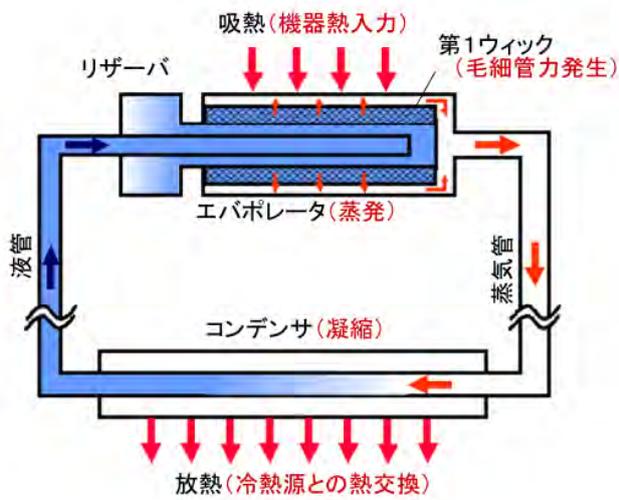


図6 ループヒートパイプ作動原理

<http://www.nedo.go.jp/content/100080342pdf>

・自励振動ヒートパイプ

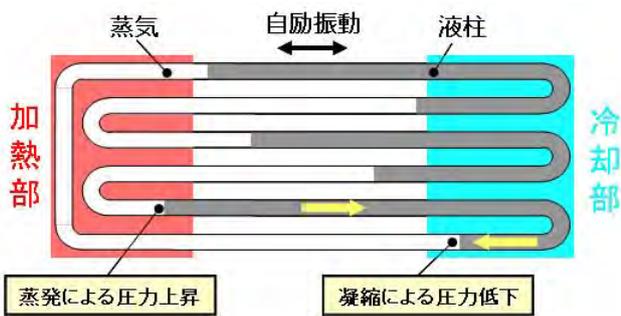


図7 自励振動ヒートパイプ作動原理

<http://www.es.titech.ac.jp/nagasaki/npicture/study/OHP.html>

・パワーキッカー（インバーター等冷却用）



通常タイプ 電気絶縁体 U字HP利用型

図8 パワーキッカー

(古河電工(株)ホームページより)

・平板型ヒートパイプ

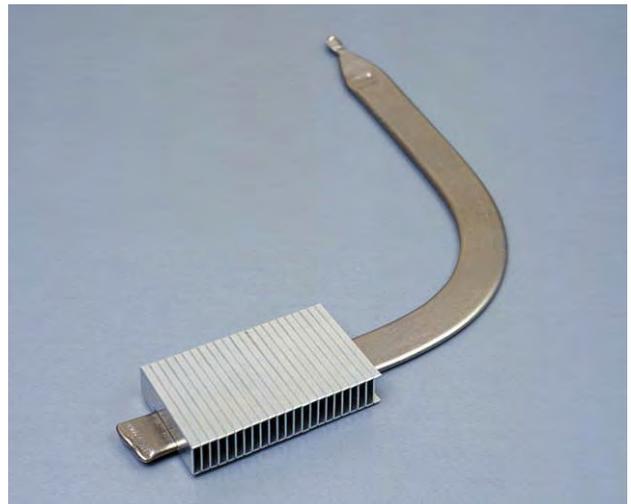


図9 平板型ヒートパイプ（フィン接続）
(古河電工(株)ホームページより)

・PC冷却用ヒートパイプ



図10 PC冷却用平板型ヒートパイプ
(フジクラ 望月氏提供)

ヒートパイプの理論 Theory of Heat Pipes

宮崎 芳郎 (福井工業大学)

Yoshiro MIYAZAKI (Fukui University of Technology)

1. はじめに

ヒートパイプは作動流体が高温で蒸発し、低温で凝縮するという過程を含む熱力学サイクルを構成している。この熱力学サイクルは熱機関としての機能とともに高温部から低温部へ潜熱として熱を輸送する機能を持っている。ヒートパイプの特長である、外部からの動力を必要としない受動的な動作と高い熱輸送性能はこの熱力学サイクルの機能からもたらされている。

ヒートパイプの熱力学サイクルは様々な種類があるが、基本的には二つのタイプに分けられる。一つはランキンサイクルのように蒸発や凝縮の過程が等温の静的な熱力学サイクルであり、もう一つは自励振動によって構成される動的な熱力学サイクルである。

前者は毛細管力型ヒートパイプやサーモサイフォン等の従来型ヒートパイプの熱力学サイクルである。すでに明かな理論の体系が構築されており、設計技術と実績に裏打ちされた製造技術が完成されている。

後者は自励振動ヒートパイプの熱力学サイクルである。自励振動ヒートパイプは加熱部と冷却部を何回も往復する細管に内容積の半分程度の作動流体が封入された構造をしている。赤地により、この構造がヒートパイプの機能を持つことが発見され、ヒートレーンの名称で実用化された[1]。その後、このヒートパイプの熱力学サイクルは圧力とボイド率の相互作用による自励振動によって構成されるという物理モデルが提案された[2]。現在、このモデルを基に自励振動ヒートパイプの現象を理解しようという試みが進んでいる。

本稿ではヒートパイプの二種類の熱力学サイクルの概略とともに自励振動ヒートパイプに対する新しい理論の発展の様子を紹介したい。

2. ヒートパイプの熱力学サイクル

2.1 相変化の過程が等温の熱力学サイクル

相変化が等温で行われるヒートパイプの熱力学サイクルの例として毛細管力型ヒートパイプの熱力学サイクルを図1に示す。

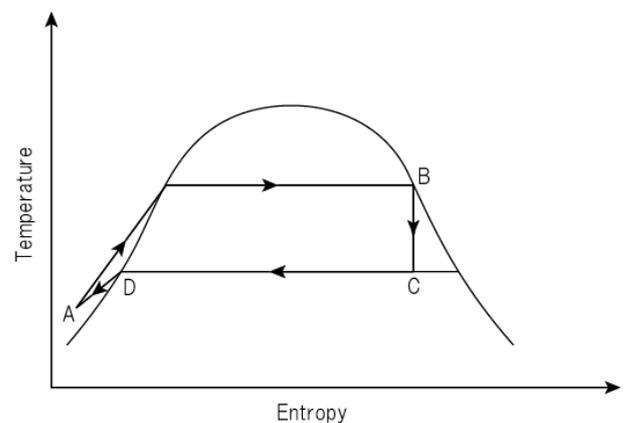


図1 毛細管力型ヒートパイプの熱力学サイクル

作動流体は圧縮液の状態:A で加熱部に流入し飽和蒸気:B となり加熱部を出る。蒸気は蒸気流路を断熱的に流れ、冷却部に入り:C 凝縮される。凝縮液は飽和状態:D で冷却部を出て、液路を通り、加熱部に戻る。

このサイクルを維持するためには加熱部に飽和蒸気圧に抗して液膜を形成する必要がある。このために毛細管力が利用されている。サーモサイフォンでは重力が、回転型ヒートパイプでは遠心力が各々毛細管力と同じ役目を果たしている。

作動流体の状態変化は温度-エントロピ線図上の右回りのサイクルを構成しており、サイクルが囲む面積は発生する仕事の量を示している。ヒートパイプでは外部との仕事の出入りがないので、熱力学サイクルが発生する仕事は作動流体がヒートパイプ内を循環する力学的仕事に等しい。

熱輸送量は作動流体の流量と潜熱の積で得られ

る。熱輸送量が増すと作動流体の流量が増え、必要な仕事も増える。この仕事の増加によるサイクルの面積の増加は蒸発と凝縮の温度差の拡大を招き、蒸気と液の圧力差が大きくなる。この圧力差が毛細管圧力の最大値を超えると加熱面での液膜が形成できなくなる。これが毛細管力型ヒートパイプの作動限界となる。

このような熱力学サイクルによって得られる仕事と熱輸送のための作動流体の流れの関係がヒートパイプの理論の基礎をなしている。

2.2 自励振動による熱力学サイクル

自励振動ヒートパイプの動作の様子を図 2 に示す。加熱部と冷却部を何回も往復する細管に内容積の半分ほどの作動流体が封入されており、管軸方向に蒸気泡と液プラグとが交互に分布している。

作動流体は自励的に発生する圧力振動により駆動され、加熱部と冷却部を往復する。この振動流により加熱部で発生した蒸気は冷却部へ運ばれ凝縮し、凝縮液は加熱部へ戻る。このような作動液の相変化を伴ったサイクルにより熱は潜熱として加熱部から冷却部へ運ばれる。

自励振動は圧力とボイド率が互いに相手を変える効果を持っていることによって起こる。

圧力振動がボイド率を変えるのは圧力の振動によって起こる振動流がボイド率の変化を生むからである。すなわち、流れは高い圧力の部分から、低い圧力の部分に向かうので圧力の高い部分のボイド率は大きくなり、圧力の低い部分のボイド率は小さくなる。

一方、ボイド率が圧力を変える効果を持つのは圧力が蒸発量と凝縮量のバランスによって定まることによる。すなわちボイド率の大きい部分は凝縮が支配的なので圧力は低下し、ボイド率が小さい部分は蒸発が支配的なので圧力は高くなる。

このような圧力とボイド率の相互作用は図 3 に示すように、圧力 - ボイド率線図上の右回りの円として表わされる。

このサイクルは高压での膨張と低压での圧縮とからなり、力学的仕事を発生している。円の面積は得られる仕事の大きさを表わしており、振動流の仕事となる。

これまでにこの作動原理に基づき、圧力振動の特性と熱輸送性能との関係が検討されている。ま

た自励振動によって形成される熱力学サイクルの効率はレイノルズ数とともに低下し、これが自励振動ヒートパイプの作動限界の原因であるという理論が提案されている。

以下の章において、このような自励振動ヒートパイプの理論の概要を紹介する。

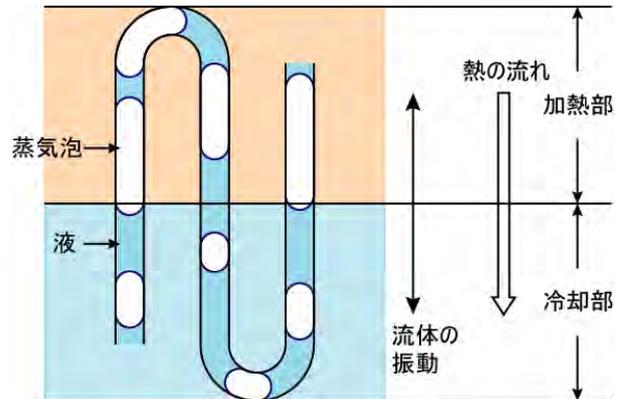


図 2 自励振動ヒートパイプの動作

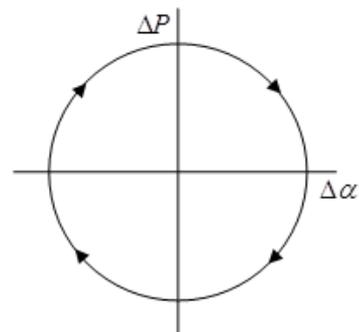


図 3 自励振動ヒートパイプの熱力学サイクル

3. 自励振動の機構と圧力振動の波

3.1 振動流と流路間の位相差

自励振動ヒートパイプの加熱部と冷却部を往復する一組の流路をターンという。作動流体は各々のターンで振動しており、その位相が隣り合うターンで少しずつずれているため、ターン間を伝播する波を形成している。

振動流が形成する波の様子を図 4 に示す。図の上部が蒸発部、下部が冷却部であり、各ターン内の液が黒い U 字状の液柱で示されている。

この波は流路方向に振動する縦波であり、流路方向に疎密の波、すなわちボイド率の波を生じる。

本章では自励振動の機構を解析することにより、このような波の特性を検討している。

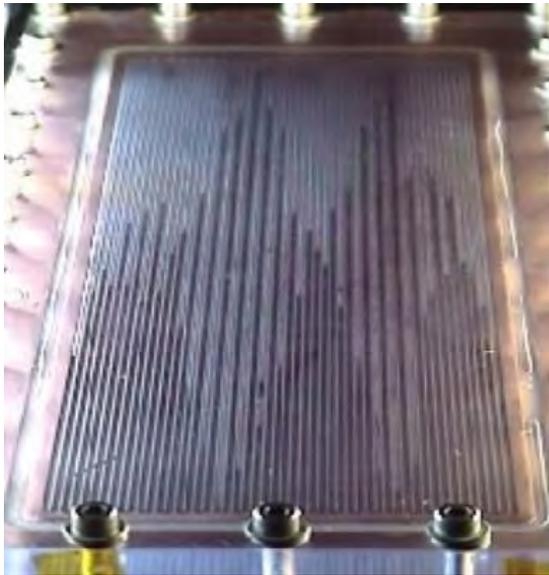


図4 振動流の波

3.2 圧力によるボイド率の変化

管路内では管軸方向に蒸気泡と液プラグとが交互に分布しているが、解析モデルの簡単化のためにボイド率が連続的に変化していると考え、この仮定のもとで円管内層流の流量 \dot{m} は次式で表わされる。

$$\dot{m} = -\frac{\pi d^4}{128\nu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

流れによる密度 ρ の変化は質量保存則により、次式で与えられる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{d^2}{32\nu} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (2)$$

通常のヒートパイプの運転状態では液の密度 ρ_l は蒸気の密度より非常に大きいので作動流体の密度とボイド率 α の関係は次のように近似できる。

$$\rho = \rho_l(1-\alpha) \quad (3)$$

したがって、圧力によるボイド率の変化は次式で表わされる。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\frac{d^2}{32\rho_l\nu} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (4)$$

3.3 ボイド率による圧力の変化

ボイド率が圧力を変化させる効果を持つのは、ボイド率によって蒸発と凝縮の実効的な伝熱面積が変化し、蒸発と凝縮の速度が変わるためである。ここで蒸発速度は液で覆われた面積、凝縮速度は蒸気で覆われた面積に各々比例するという単純化のための仮定をすると、ターン当たりの蒸発伝熱量 q_e と凝縮伝熱量 q_c の平衡状態からの変化は、ボイド率の平衡状態からの変化に次式で関係付けられる。

$$\Delta q_e = -\frac{q_0}{1-\alpha_0} \Delta \alpha \quad (5)$$

$$\Delta q_c = \frac{q_0}{\alpha_0} \Delta \alpha \quad (6)$$

ここで添え字 0 は平衡状態を表している。

式(5)と式(6)より、正味の蒸発伝熱量の変化は次式となる。

$$\Delta q = -\frac{q_0}{\alpha_0(1-\alpha_0)} \Delta \alpha \quad (7)$$

この伝熱量の変化によって生じる蒸気量の変化が次式で与えられる。

$$\frac{\partial(\rho_v \alpha)}{\partial t} = -\frac{q^* \Delta \alpha}{rV} \quad (8)$$

$$q^* = \frac{q_0}{\alpha_0(1-\alpha_0)} \quad (9)$$

ここで ρ_v , r , V は各々、蒸気の密度、蒸発潜熱、1ターンの内容積である。

蒸気量の変化によって蒸気の密度が変化するとすれば次式が得られる。

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = -\frac{q^* \Delta \alpha}{rV\alpha_0} \quad (10)$$

蒸気の状態は理想気体の状態式とクラペイロン-クラウジューズの式に従うとするとボイド率による圧力の変化は次式のように得られる。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{q^* RT_0}{\alpha_0 V(r - RT_0)} \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (11)$$

3.4 波の速度

自励振動の機構、すなわち、圧力のボイド率に対する効果を示す式(4)とボイド率の圧力に対する効果を示す式(11)から、圧力に関する波動方程式が次のように得られ、波の速度 c は式(13)で表わされる[3]。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (12)$$

$$c = \sqrt{\frac{q^* RT_0}{8\pi\alpha_0\rho_l\nu(r - RT_0)}} \quad (13)$$

ここで l はターンの長さである。

図4の画像データから得た波の速度を理論値と比較して図5に示す[4].

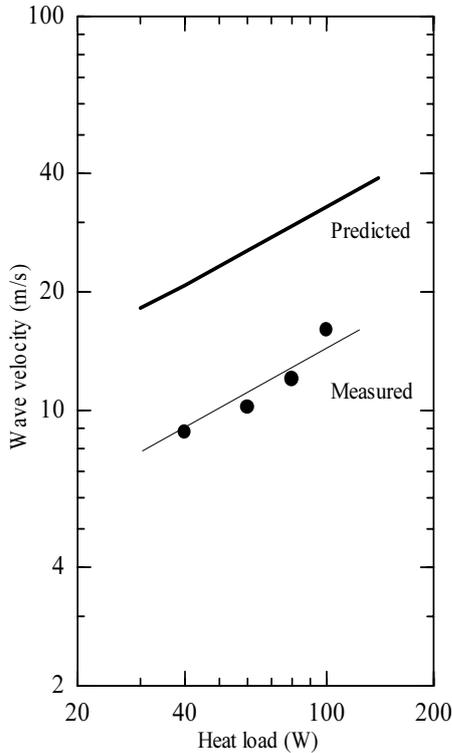


図5 波の速度

4. 圧力振動の特性

4.1 圧力振動の特性と熱輸送現象

自励振動ヒートパイプでは圧力振動が振動流を起こし、振動流により熱が輸送される。したがって、熱輸送の量と距離は振動流の流量と振幅によって定まり、振動流は圧力振動の振動数と振幅によって定まると考えられる[5].

本章ではこれらの関係を解析することにより、自励振動ヒートパイプで発生する圧力振動の特性を検討している。

4.2 熱輸送量

熱が潜熱によって輸送されれば、加熱部から冷却部へ向かう蒸気の流れと冷却部から蒸発部へ向かう液の流れは熱の輸送に有効であるが、逆方向の流れは熱の輸送に貢献しない。また有効な方向の流れもすべてが熱の輸送にかかわるので

はなく、その一部が相変化を行い熱の輸送を行うと考え、その割合を η とする。

このような条件のもとで熱輸送量は次式で表される。

$$q = \eta r \dot{m} / 2 \quad (14)$$

ここで、圧力振動の波を正弦波で表わす。

$$p = p_a \sin(\omega t - kx) \quad (15)$$

この波の圧力勾配の平均は次式で与えられる。

$$\left| \frac{\partial P}{\partial x} \right|_m = \frac{2kP_a}{\pi} \quad (16)$$

この圧力勾配を用いて、流量を求め、式(14)に代入すると、圧力振動の特性と熱輸送量の関係が次のように得られる。

$$q = \eta r \frac{\pi d^4}{64} \frac{n P_a}{c} \quad (17)$$

4.3 熱輸送距離

振動流の流速は次式で表わされる。

$$u = \frac{d^2}{32\rho\nu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (18)$$

圧力振動の波が正弦波で表わされるとすると、振動流の流速も正弦波であらわされ、圧力振動と振動流の速度の振幅に関して次の関係が得られる。

$$u_a = \frac{d^2}{32\rho\nu} k p_a \quad (19)$$

また、振動流の振幅 y_a と振動流の速度の振幅の間には次の関係がある。

$$y_a = \frac{u_a}{\omega} \quad (20)$$

式(19)と式(20)から、振動流の振幅と圧力振動の振幅の関係が次のように得られる。

$$y_a = \frac{d^2}{32\rho\nu} \frac{p_a}{c} \quad (21)$$

自励振動ヒートパイプの正常な動作状態では振動流は加熱部の端から冷却部の端まで流れるので、ターンの長さ l と振動流の振幅には次の関係がある。

$$2y_a = \frac{l}{2} \quad (22)$$

したがって、ターンの長さ l と圧力振動の特性との関係がえられる。

$$l = \frac{d^2 p_a}{8\rho v c} \quad (23)$$

4.4 圧力振動特性

圧力振動は波を形成しており、その特性は振幅、振動数と波の速度によって表される。

波の速度は3章で述べたように圧力振動とボイド率の相互作用によって定まることが示されている。振幅と振動数は熱輸送現象との関係、式(17)と式(23)から次のように得られる。

$$p_a = \frac{8l\mu}{d^2} c \quad (24)$$

$$n = \frac{8q}{\eta\rho r\pi d^2 l} \quad (25)$$

圧力振動の振幅と振動数の理論値と実験値を比較して各々、図6と図7に示す[5]。

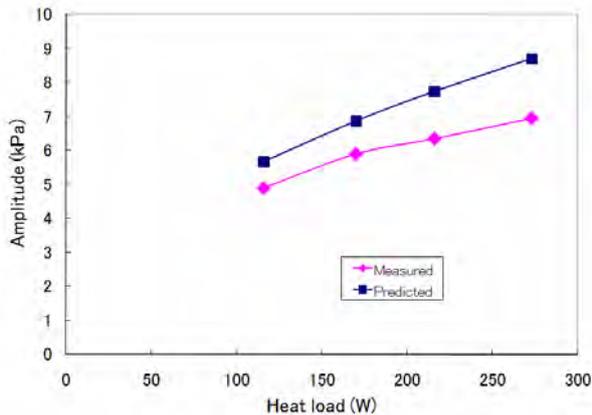


図6 圧力振動の振幅

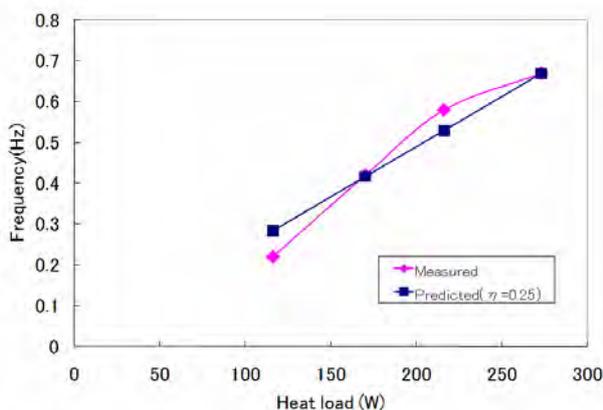


図7 圧力振動の振動数

5. 作動限界

5.1 熱力学サイクルの発達限界

毛細管力型ヒートパイプでは2章で述べたよう

に熱輸送量とともに熱力学サイクルは発達し、必要な仕事を供給する。熱力学サイクルの発達は蒸気と液の圧力差が大きくなることによりもたらされるが、毛細管力の最大値で限界に至る。これが毛細管力型ヒートパイプの作動限界である。

自励振動ヒートパイプの場合は熱力学サイクルの発達自体に限界があり、作動限界に至ると考えられる[6]。

本章ではその概略を述べる。

5.2 圧力とボイド率の位相差

振動流が形成する波の変位を次式で表す。

$$y = y_0 \sin(\omega t - kx) \quad (26)$$

この波は、流路内を伝播する縦波であり、流路内に疎密の波、すなわちボイド率の波を生じる。ボイド率は変位とは位相が $\pi/2$ 異なり、次のように表わされる。

$$\alpha = \alpha_0 \sin(\omega t - kx - \frac{\pi}{2}) \quad (27)$$

一方、振動流と圧力振動との関係を与える運動量保存式は、細管内振動流に対して次のように単純化される。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_e \frac{\partial y}{\partial t} \quad (28)$$

慣性項が無視できる場合、式(26)の振動流に対する圧力振動は次のようになりボイド率とは $\pi/2$ の位相差がある。

$$p = p_0 \sin(\omega t - kx) \quad (29)$$

一方、粘性項が無視できる場合の圧力振動は次のようになり、ボイド率との位相差は π である。

$$p = p_0 \sin(\omega t - kx + \frac{\pi}{2}) \quad (30)$$

このように、圧力振動とボイド率振動の位相差は慣性項と粘性項の比、すなわちレイノルズ数によって $\pi/2$ から π の間で変化する。

5.3 サイクル効率と作動限界

自励振動ヒートパイプの熱力学サイクルは圧力とボイド率の振動が互いに相手の振動を励起することによって構成されている。得られる仕事、すなわちサイクルで囲まれた面積は圧力振動とボイド率振動の位相差によって変わる。図8にその様子を示す。

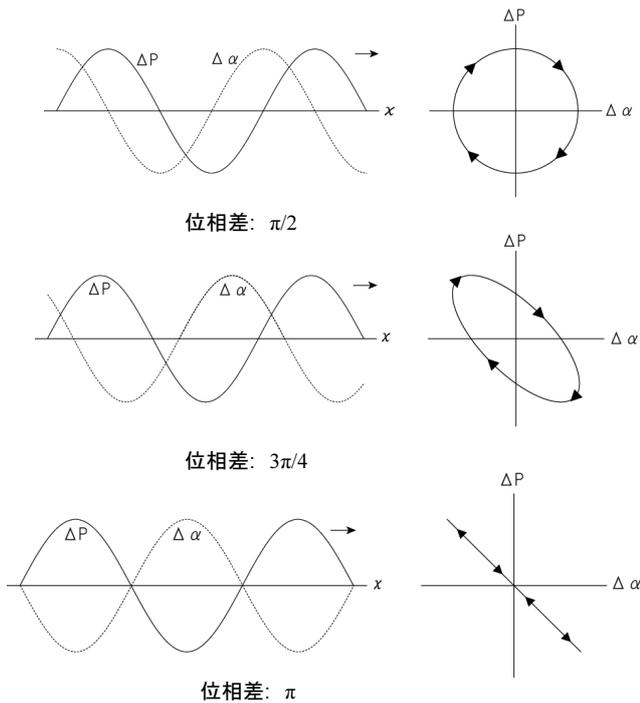


図 8 圧力とボイド率の位相差と熱力学サイクルの効率

位相差が $\pi/2$ の場合、相互励振の効果は有効に働いているが、位相差が大きくなるにつれ、その効果は小さくなり、位相差が π になると熱力学サイクルとしての機能が失われることがわかる。

位相差は、前述したように、レイノルズ数が大きくなるとともに大きくなる。このことは熱輸送量が増加し、作動流体の流量が増えるとともに、熱機関として得ることが出来る仕事は減少することを意味しており、熱輸送量には限界があることを示している。これが自励振動ヒートパイプの作動限界と考えられる。

5.4 臨界レイノルズ数

自励振動ヒートパイプの流れ方向の代表寸法として伝熱面の長さ L 、流れに直角方向の代表寸法として管の内径 d をとり、レイノルズ数を次のように表わす。

$$Re = \frac{ud^2}{\nu L} \quad (31)$$

一方、熱輸送量と必要な振動流の流速の関係を次式で表す。

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \rho u r \quad (32)$$

これらの関係から最大熱輸送量 Q_{max} と対応する臨界レイノルズ数 Re^* との関係が次のように得られる。

$$\frac{Q_{max}}{Re^*} = \frac{\pi}{4} \mu r L \quad (33)$$

ここで、臨界レイノルズ数が一定であると仮定すると最大熱輸送量は伝熱面長さに比例し、管径には依存しない。

この予測を実験的に検証した結果を図9と図10に示す。実験に用いたヒートパイプは加熱部と冷却部の長さが等しく、断熱部のない単純な形状であり、水平状態で3種類の封入量に対して実験が行われている[6]。

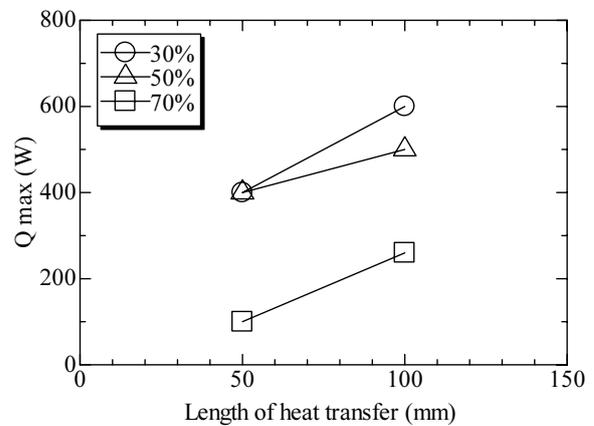


図 9 最大熱輸送量と伝熱面長さ

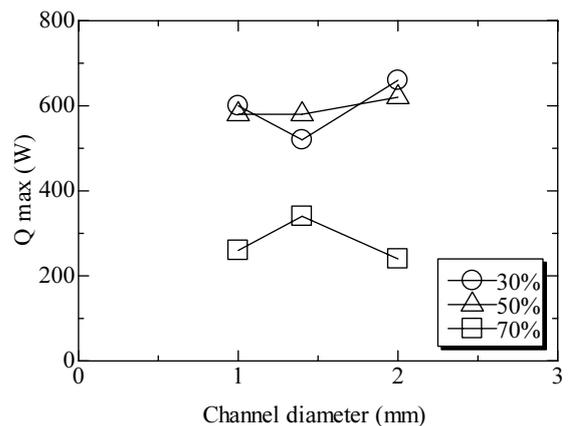


図 10 最大熱輸送量と管径

6. おわりに

主に自励振動ヒートパイプの萌芽的な理論を紹介した。その概要は以下のとおりである。

- ・圧力振動がボイド率との相互励振作用で起こる.
- ・圧力振動によりターン内を往復する振動流が起こる.
- ・振動流は波を形成し, ボイド率の波を作る.
- ・自励振動はレイノルズ数が大きくなると減衰する.

このように自励振動ヒートパイプの現象の基礎的な理解は進みつつあり, 理論の枠組みも見えつつある. しかし, この理論は現象の全体像の把握のため, 極限まで単純化したモデルを用いている. このため, 様々な機能, 形状, 動作形態をもつ実際のヒートパイプの設計開発に, 直接, 役に立つ段階には程遠い.

この技術の発展のためには様々な視点からの幅広い, そして体系的な研究が望まれる.

参考文献

- [1] Akachi, H. and Polasek, F., 5th International Heat Pipe Symposium, (1996)
- [2] Miyazaki, Y. and Akachi, H., 5th International Heat Pipe Symposium, (1996)
- [3] Miyazaki, Y. and Akachi, H., 3rd International Conference On Multi-Phase Flow, (1998)
- [4] Miyazaki, Y., and Arikawa, M., 11th International Heat Pipe Conference, (1999)
- [5] Miyazaki, Y., Ogawa, H. and Iwata, N., 40th International Conference on Environmental Systems, (2010)
- [6] Miyazaki, Y., Kawai, H., Iwata, N. and Ogawa, H., 16th International Heat Pipe Conference, (2012)

ヒートパイプの設計 Design for Heat Pipes

望月 正孝 (株)フジクラ

Masataka MOCHIZUKI (Fujikura Ltd.)

e-mail: mmotizuk@fujikura.co.jp

1. はじめに

ヒートパイプの種類は多々あるが、ここでは、ウイック式ヒートパイプと熱サイホンを取り上げて設計方法について解説する。設計には、熱設計と材料選定、構造設計がある。図1に、ヒートパイプの設計手順をフローチャートにて示す。[1]

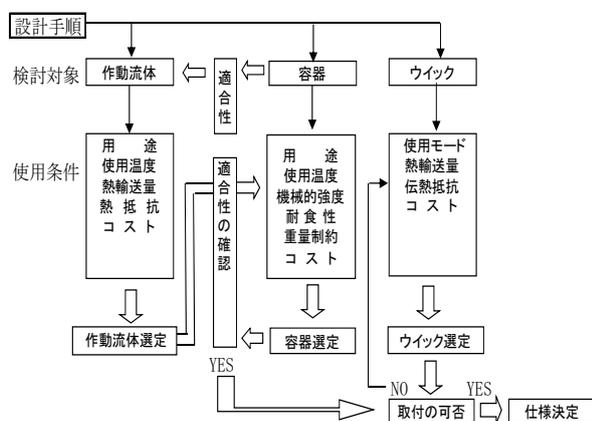


図1 ヒートパイプの設計手順フローチャート

2. ヒートパイプの材料設計

2.1 作動流体の選定

ヒートパイプを構成する三つの要素のうち最初に選定されるものに作動流体がある。作動流体はヒートパイプの用途、使用温度、熱輸送量、許容熱抵抗及び経済性の5項目を検討して選定する必要がある。図2に示すチェックリストのうち設計仕様で容器材質の指定のある場合、作動流体と容器材質の適合性を参考にして検討されなければならない。ヒートパイプの用途によっては、たとえば食品関係に使用される場合、作動流体は食品添加物として認定されたもの、または食品衛生上無害と認められたもの以外は使用できないので注意を要する。同様に引火性、爆発性、公害性等の危険性のある作動流体を対象として検討する場合には、関連法規をはじめとして安全性が明確にされなければならない。ヒートパイプの使用温度は作

動流体の蒸気圧と密接な関係にある。通常ヒートパイプは、飽和蒸気圧力線を温度の上下動に伴い自然に変化していくが、蒸発部と凝縮部の温度圧力はほぼ一定である。

仕様	検討項目	検証内容
*1	容器材質	容器との適合性
	用途	安全性
	使用温度	蒸気圧力
	熱輸送量	メリット数蒸気流速
	許容熱抵抗	相変化熱伝達率
	コスト	経済性
	作動流体の選定	
		場合によっては二重構造の管の採用
		人畜への影響、引火、爆発などの危険性など
		压力容器の適用は極力さける *2
		熱流速、ドライアウト、還流液の飛散 など *3、音速限界
		内部伝熱面積の増加 *3
		入手、取扱いなどの容易さ

*1. あらかじめ容器材質の指定があるとき
*2. 容器内容積との関連
*3. ウイック構造との関連

図2 作動流体選定のチェックリスト

ヒートパイプの容器が大径で長尺である場合、蒸気圧力が高すぎると労働安全衛生法に定める各種压力容器に抵触する可能性があり、圧力 $P(\text{kg/cm}^2\text{G}) \times$ 容器内容積 $V(\text{m}^3)$ の積である PV 値が法規制値以下になるように設計して、压力容器の適用を避けるのが賢明である。 PV 値が 0.04 を超えるものは第一種压力容器となり、压力容器の設計、検査の他安全装置の設置を義務づけられる。このような場合、容器内容積を小さくする為、パイプ径を小径にして対応するのが一般的である。不要に高い蒸気圧の作動流体を選定する事は、容器を一層頑丈にする必要を生じ経済性を損なう結果となる。あらかじめ指定された熱輸送量を満足させるためには作動流体のメリット数 $(\rho_l \sigma L / \eta T)$ をチェックする。ここで液体の密度: ρ_l 、表面張力: σ 、蒸発潜熱: L 、粘度: η 、使用温度: T に応じて作動流体を選ぶが、毛細管限界からくる最大熱輸送量の式に含まれるメリット数が大きくなるよう作

動流体を選定すべきである。

- (1) 表面張力が大きい
- (2) 密度が大である
- (3) 潜熱が大きい
- (4) 粘度が小さい

定性的には、次の理由でヒートパイプの熱輸送量が大きくなるからである。即ち表面張力が大きいと毛細管力が大きくなるので、熱輸送量が増加する。密度と潜熱が大きいと流体の単位体積当たりの熱輸送量が大きくなる。粘度が小さいと流

路抵抗が小さくなり、流体の熱輸送量が大きくなる。一つの流体の作動温度範囲は、融点から臨界温度までの中でメリット数が比較的大きい範囲内に限られる。また熱分解が起きない範囲に抑える必要もある。さらに作動流体と容器やウイックとの濡れ性の良いことも考慮に入れなければならない。表 1 に、代表的な作動流体の融点、沸点、臨界温度、作動温度（圧力）範囲と各種作動流体に適合したウイック容器材料を示す。作動流体の充てん量は、ウイックのあるヒートパイプでは、ウ

表 1 代表的な作動流体の融点、沸点、臨界温度、作動温度(圧力)範囲、適合材料

作動流体 (分子式)	融点 [°C]	沸点 [°C]	臨界温度°C [臨界圧力 Pa]	作動温度°C [作動圧力 Pa]	容器 ウイック
ヘリウム (He)	-272.2	-268.9	-267.9 (2.20×10^5)	-271~-269 ($5.88 \times 10^3 \sim 9.81 \times 10^4$)	SUS304L 銅
窒素 (N ₂)	-209.9	-195.8	-147.2 (3.28×10^6)	-200~-160 ($5.69 \times 10^4 \sim 1.67 \times 10^6$)	SUS304 銅
フロン 22 (CHClF ₂)	-160	-40.8	96 (4.93×10^6)	-80~80 ($1.27 \times 10^4 \sim 3.63 \times 10^6$)	SUS304 アルミニウム 銅
HFC-134a (CH ₂ F-CF ₃)	-101.0	-26.0	101.3 (4.07×10^6)	-25~90 ($1.06 \times 10^5 \sim 3.3 \times 10^6$)	SUS304 アルミニウム 銅
アンモニア (NH ₃)	-77.7	-33.4	132.5 (1.10×10^7)	-60~100 ($2.65 \times 10^4 \sim 6.18 \times 10^6$)	アルミニウム 炭素鋼
フロン 113 (CCl ₂ F-CCIF ₂)	-35	47.6	214 (3.41×10^6)	0~100 ($1.47 \times 10^4 \sim 4.42 \times 10^5$)	SUS304 アルミニウム 銅
HCFC-123 (1,1-ジクロロ-2,2,2-トリフルオロエタン)	-107.0	27.8	183.9 (3.67×10^6)	-10~105 ($2.08 \times 10^4 \sim 0.87 \times 10^6$)	SUS304 アルミニウム 銅
アセトン (C ₃ H ₆ O)	-94.3	56.5	235 (4.55×10^6)	0~120 ($8.43 \times 10^3 \sim 5.79 \times 10^5$)	銅
メタノール (CH ₄ O)	-97.8	64.5	240 (7.70×10^6)	10~130 ($7.06 \times 10^3 \sim 7.75 \times 10^5$)	銅 SUS304
水 (H ₂ O)	0	100	374.1 (2.14×10^7)	30~250 ($4.22 \times 10^3 \sim 4.02 \times 10^6$)	銅
ダウサム A ((C ₆ H ₅) ₂ +(C ₆ H ₅) ₂ O)	12	257.7	497 (3.06×10^6)	150~400 ($4.90 \times 10^3 \sim 1.07 \times 10^6$)	銅
ナフタリン (C ₁₀ H ₈)	80.3	218	475 (3.98×10^7)	150~400 ($1.57 \times 10^4 \sim 1.96 \times 10^6$)	SUS304 炭素鋼 Ti 99.4
セシウム (Cs)	28.5	669	1778 (1.14×10^7)	450~900 ($6.37 \times 10^3 \sim 4.90 \times 10^5$)	チタン Nb+1% Zr
ナトリウム (Na)	97.9	883	2236 (2.48×10^7)	600~1200 ($3.24 \times 10^4 \sim 9.22 \times 10^5$)	SUS316 インコネル 600
リチウム (Li)	180.6	1342	2950 (6.67×10^7)	1000~1800 ($7.85 \times 10^3 \sim 1.23 \times 10^6$)	Nb+1% Zr タンタル
銀 (Ag)	962	2212	—	1800~2300 ($7.85 \times 10^3 \sim$ —)	タンタル タンダステン

ウィックの空隙を満たす程度でよい。

また、密閉二相熱サイホンの場合、加熱部とその他の部分の長さが複雑に関係するが、一般的に加熱部内容積の20-35%が適当とされている。

ドライアウトに関連する熱流束の大きさや、作動流体還流量は、ウィック構造との兼ね合いであり、合わせて検討する必要がある。また作動流体の蒸発量と蒸気通路空間から求められる蒸気速度も重要な検討項目である。蒸気速度が大きすぎると、圧力損失に伴う温度降下や還流する作動流体の飛散を生ずるので、容器の大きさやウィック構造との関連検討事項となる。

なお高温用ヒートパイプにおいて、作動流体にアルカリ金属を用いる場合、蒸気速度がしばしば音速限界に達する場合があります。熱抵抗に対する作動流体の影響は、蒸発、凝縮における相変化熱伝達率の大小となって現れる。一般の作動流体の蒸発、凝縮熱伝達率の値は、 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ ($W/m^2 \cdot k$)の範囲にあって値が大きいから、実用上のヒートパイプにおいては熱の流入、流出における熱抵抗が支配要因となる。

しかし微小な温度差で熱輸送を行う必要がある場合には、蒸発と凝縮熱伝達率の大きい作動流体を選定しなければならない。この熱伝達率の値は伝熱面の形状で大幅に変化するから、ウィック構造との関連検討事項となる。ヒートパイプが工業製品である以上、製造コストは大切な検討項目である。作動流体のコストは、単に材料単価だけでなく、作動流体の封入作業における取扱の難易度とそれにかかわる附帯設備まで考慮する必要がある。

2.2 容器の設計

ヒートパイプの容器は、真空度の維持及び使用圧力に耐える構造でなくてはならない。実用ヒートパイプの容器には、金属材料が用いられその材質は銅及び銅合金が採用される。その他アルミニウム、ステンレス鋼、炭素鋼等が一般的である。併せて作動流体に適合性のある材質を選ぶ必要がある。容器材料の選定基準の一つに、ヒートパイプの使用温度における耐熱性と、内部蒸気圧及び外力に耐え得る機械強度が必要である。円筒状ヒートパイプの強度計算は、アメリカにおいてはASMEコードに準じているが、我が国においてはJIS B 8423 (圧力容器の構造規格)による。円筒と

端板の強度計算式はJISを参照されたい。なお、長期間の寿命を要求されるヒートパイプでは、高温クリープによる強度の低下、振動や撓動による披露と摩耗も考慮する必要がある。同時に容器材料の耐候性や耐食性も重要な検討項目である。例えば重電機関連の寿命保証要求は20年間、パソコンでも10年間であり、屋外設置の場合は耐候性の検討は避けては通れない問題である。また重質油燃焼排ガス用熱交換器で問題となる硫酸による腐食対策としては、ステン鋼など種々の耐食材料が提案されている。人工衛星等に搭載されるヒートパイプは、重量低減が問題である。多くの場合、アルミニウム及びアルミニウム合金が使用される理由の一つはここにある。容器材料のコスト検討では、作動流体と同じく単に素材価格だけの比較ではなく、機械加工や溶接性も考慮されなければならない。

2.3 ウィックの設計

作動流体の還流を重力によらない場合、ウィックの選定が重要な検討項目となる。特に使用モードがトップヒートである場合には、ウィックの性能がヒートパイプの伝熱能力を左右する要因となる。毛細管力の優れているウィックは、 $50\mu m$ 程度の銅粒を銅管内壁に焼結したものや、銅の極細線束、金網等がある。カーボンファイバーの場合約1mの濡れ高さが得られる。ボトムヒートで使用される場合は、銅やアルミニウム管の内面に軸方向に溝を切った簡単な構造を採用する場合がある。表2に種々のウィックと作動流体との組み合わせによる最大毛細管圧力差、有効平均気孔径、公称気孔径、空隙率、浸透率を示す。溝型ウィックは流路抵抗が小さく、ウィックと容器が一体化されているので、金網などにみられる容器とウィックの間の熱抵抗がなく、振動や衝撃に強く経済的に有利である。ナトリウムのような液体金属を作動流体としたヒートパイプを除いて、ウィックの毛細管限界が一般に熱輸送限界を支配する。したがってウィックは作動流体との接触角が小さく、毛細管径の小さい、しかも浸透率の大きな材料を選ぶと熱輸送量が増大する。蒸発部の熱流束が比較的小さく沸騰が生じていない場合では、熱は容器と同様ウィックと液膜の熱伝導にて伝えられるから、ウィック材料は熱伝導率が大きく、ウィックの厚さは薄い方が望ましい。しかし、ウィック

内の液体の圧力損失はウィックの厚さに反比例することから、圧力バランスも考慮に入れて厚さを決定する必要がある。ウィックのコストは材料費そのものより、組立てまたは取り付け加工費に比重がかかる場合が多いので注意を要する[1]。

3. ヒートパイプの熱設計

3.1 ヒートパイプの熱抵抗

ヒートパイプの片端を加熱し、他端の一部を冷却した場合、ヒートパイプの各部に温度差が生じる。加熱部(蒸発部)と冷却部(凝縮部)の温度差を $\Delta T(K)$ とし、熱輸送量を $Q(W)$ とすると、熱抵抗 R_{hp}

は(1)式で示される。

$$R_{hp} = \frac{\Delta T}{Q} \quad (K/W) \quad (1)$$

この熱抵抗が小さいほど多量の熱輸送が可能となる。ヒートパイプ内部の熱等価回路を図3に示す。加熱部には熱源から伝導、対流、放射のいずれかまたはこれらの組み合わせた伝熱形態により熱が入力される。

蒸発に伴う熱抵抗 R_l は(2)式で示される。

$$R_l = \frac{1}{h_h A_h} \quad (K/W) \quad (2)$$

表2 種々のウィック特性

ウィック	作動流体	最大毛管 圧力差 ΔP_{emax} [Pa]	有効平均 気孔径 d_{eff} [m]	公称気孔径 d_n [m]	平均空隙率 [%]	浸透率 K [m ²]	K/r_{eff} [m]	参考 文献
200 メッシュステンレススクリーン	メタノール	824	1.1×10^{-4}	8.8×10^{-5}	73.3	5.5×10^{-11}	1.0×10^{-6}	7)
	ベンゼン	1030	1.1×10^{-4}	8.8×10^{-5}	73.3			
	水	2480	1.1×10^{-4}	8.8×10^{-5}	73.3			
200 メッシュ黄銅スクリーン	メタノール	824	1.1×10^{-4}	7.4×10^{-5}				8)
	水	2412	1.2×10^{-4}	7.4×10^{-5}				
200 メッシュニッケルスクリーン	水	2275	1.2×10^{-4}		67.6			9)
銅フォーム	水	607	4.8×10^{-4}	$3.0 \times 10^{-4} \sim 1.01 \times 10^{-3}$	91.2	2.3×10^{-9}	9.7×10^{-6}	7)
銅フォーム	メタノール	196	4.6×10^{-4}	$2.0 \times 10^{-4} \sim 1.01 \times 10^{-3}$	94.5	2.0×10^{-9}	9.4×10^{-6}	7)
	ベンゼン	255	4.6×10^{-4}		94.5			
	水	667	4.3×10^{-4}		94.5			
ニッケルフォーム	水	922	4.6×10^{-4}	$4.6 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-3}$	94.4	2.7×10^{-9}	1.2×10^{-5}	7)
ニッケルフォーム	メタノール	166	5.3×10^{-4}	$2.5 \times 10^{-4} \sim 6.4 \times 10^{-4}$	96.0	3.7×10^{-9}	1.6×10^{-5}	7)
	ベンゼン	262	4.3×10^{-4}		96.0			
	水	621	4.6×10^{-4}		96.0			
銅フェルト	メタノール	159	5.6×10^{-4}	$2.0 \times 10^{-4} \sim 8.1 \times 10^{-4}$	89.5	1.2×10^{-9}	5.4×10^{-6}	7)
	ベンゼン	262	4.3×10^{-4}		89.5			
	水	621	4.6×10^{-4}		89.5			
ニッケルフェルト	水	896	3.3×10^{-4}	3.3×10^{-4}	89.1	5.2×10^{-10}	3.3×10^{-6}	7)
ニッケルフェルト	水	676				1.5×10^{-11}		10)
ニッケル焼結体	水	632				2.7×10^{-10}		10)
銅焼結体	水	7883	3.6×10^{-5}			8.9×10^{-12}	2.47×10^{-7}	11)
銅焼結体	水	15377	1.8×10^{-5}		52	1.74×10^{-12}	4.83×10^{-8}	12)
5層100メッシュ銅スクリーン	水	1735	1.6×10^{-4}			4.4×10^{-10}	1.1×10^{-5}	13)
溝形 (幅深さ各1mm)	メタノール	37		1.3×10^{-3}		5.6×10^{-5}		14)

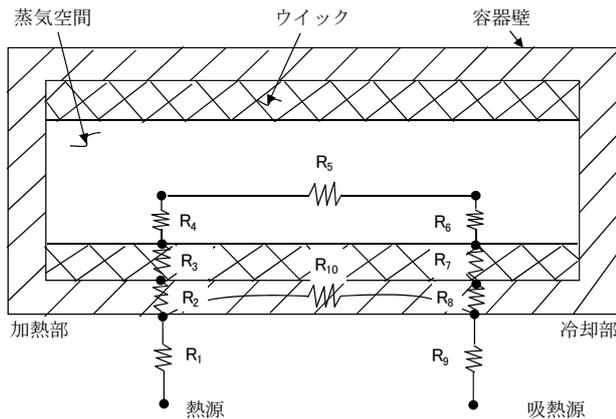


図3 ヒートパイプの熱抵抗回路

ここで h_h は容器外表面の熱伝達率 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), $A_h (= \pi D_o L_e)$ は加熱部の表面積 (m^2) である。 D_o は蒸発部外径 (m), L_e は蒸発部長さを示す。ヒートパイプ容器壁の半径方向熱伝導抵抗 (R_2, R_8) は円管の熱伝導抵抗であるが、通常は非常に小さく無視し得るので省略する。 R_3 と R_7 はウイックの半径方向熱抵抗であるが、簡易的にそれぞれ蒸発と凝縮の熱抵抗に組み込んで求める事とする。 R_{10} は容器の軸方向への熱伝導抵抗であるがほとんど無視し得る。 R_5 は蒸発部から凝縮部に移動する蒸気流の損失抵抗であるが、通常小さな値であり無視し得る範囲である。ウイック内部から蒸発熱伝達が起こっていると考え、容器の内壁から加熱部内の蒸気温度までの温度差に対して蒸発熱伝達率を h_e とすると、蒸発熱抵抗 ($R_3 + R_4$) は(3)式で示される。

$$(R_3 + R_4) = \frac{1}{h_e A_e} \quad (\text{K/W}) \quad (3)$$

ここで h_e は蒸発熱伝達率 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), $A_e (= \pi D_e L_e)$ は蒸発部の内表面積 (m^2) である。 D_e は蒸発部内径 (m), L_e は蒸発部長さを示す。作動流体を含む多孔質体ウイック内部の蒸発熱伝達率については、種々の計算式が提案されているが詳細は割愛する。通常、作動流体に水を用いた銅-水系ヒートパイプでは、 $10,000 \sim 20,000 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ が得られる。同様に、凝縮部の蒸気からウイックを通じて冷却部内容器内壁までを凝縮部の熱抵抗 ($R_6 + R_7$) とすると、(4)式にて示される。

$$(R_6 + R_7) = \frac{1}{h_c A_c} \quad (\text{K/W}) \quad (4)$$

ここで、 h_c は凝縮熱伝達率 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), $A_c (= \pi D_c L_c)$

は凝縮部の内表面積 (m^2) である。 D_c は凝縮部内径 (m), L_c は凝縮部長さを示す。通常 Nusselt や上原等凝縮熱伝達率の計算式が用いられているが、詳細は割愛する。通常、作動流体に水を用いた銅-水系ヒートパイプでは、 $10,000 \sim 20,000 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$ が用いられる。

冷却部外吸熱源とヒートパイプ凝縮部間の熱抵抗 R_9 も、熱伝達率の値は異なるが、前述の高温熱源と加熱部表面の間の熱抵抗 R_1 と同様の式となる。総じてヒートパイプ内部の熱抵抗を考えると、蒸発部と凝縮部の熱抵抗が支配しており、これらの値を如何に小さくするかがヒートパイプの性能を向上せしめる。蒸発と凝縮の熱抵抗だけでヒートパイプの熱抵抗を示すと(5)式のようになり簡単に熱抵抗を計算できる。 [1]

$$R_{hp} = \frac{1}{(h_e A_e)} + \frac{1}{(h_c A_c)} \quad (\text{K/W}) \quad (5)$$

一方密閉二相熱サイホンでは、井村らの蒸発熱伝達率実験整理式が提案されており、現実とよくマッチングする。凝縮熱伝達率は、Nusselt の膜状凝縮熱伝達の式がよく使われる。

3.2 ヒートパイプの最大熱輸送量

ヒートパイプの熱抵抗がわかると設計条件における熱輸送量が求まるが、ヒートパイプの最大熱輸送量を求めて余裕があることを確認しなくてはならない。ヒートパイプの最大熱輸送量には作動条件によりいくつかの限界値がある。この限界値はウイックの毛細管力、ウイック内の液体の流れ、コア部分の蒸気の流れ、作動流体の種類、作動流体の封入量、ヒートパイプの形状 (直径と長さ)、傾き角などに依存する。ヒートパイプの熱輸送量は次の五つの限界によって制限される。

- (1) 粘性限界
- (2) 音速限界
- (3) 飛散限界
- (4) 毛細管圧力限界
- (5) 沸騰限界

各々限界値を計算する式があるが詳細は割愛する。一般的に、ヒートパイプの熱輸送限界は蒸発部で起こる事が多く、毛細管限界が支配する場合が大半である。

一方、密閉二相熱サイホンの最大熱輸送量は比

較的封入量が少ない場合は、凝縮液が蒸発しながら下降する為、次第に液膜が薄くなり蒸発部途中で消滅しドライアウトが生じる場合と、封入量は比較的多いが発生した蒸気によって多くの液体が凝縮部に吹き上げられ、蒸発部に戻ってくる量が不足するため、壁面の一部が乾き限界に達するフラッシング限界がある。基本的に、加熱部長さ L_e 、加熱部の内径 D_i 、と作動流体封入量の三要素に依存する。井村、Tien-Chung などの実験整理式があり限界値が計算できる。[1]

4. ヒートパイプ冷却モジュールの設計

ここでは、最近のノートブックパソコンのCPU冷却に使われているヒートパイプ冷却モジュールの設計に関して記述する。

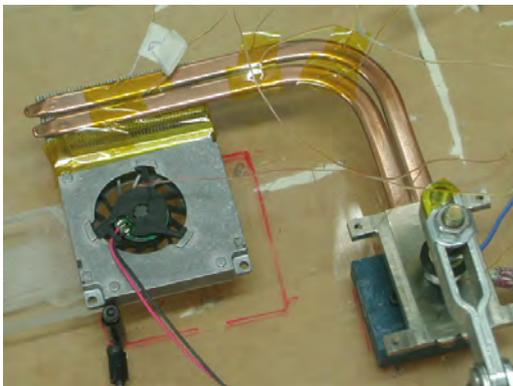


図4 ノート PC 冷却用ヒートパイプモジュール

ノート PC の CPU 冷却用に使われている典型的なヒートパイプモジュールを、図4に示す。この場合、薄型にするため円筒上ヒートパイプを厚さ2mmに平つぶしされ、更に配置上L型に曲げられている。ヒートパイプの蒸発部は銅のブロックに半田接合され、銅ブロックは熱伝導グリスを介してCPUに接合される。ヒートパイプの他端の凝縮部には高密度のアルミフィン群がハンダ接合されている。フィンの前面には薄型のDCブラシレスモータファンが取り付けられ、ファンは上部より空気を吸い込みフィン側に吐出する事で冷却する。図5にモジュール全体の熱抵抗等価回路を示す。

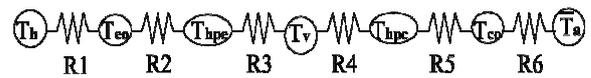


図5 ヒートパイプ冷却モジュールの熱抵抗等価回路

- ここで、
- R1:CPU～ヒートパイプまでの熱抵抗(K/W)
- R2:蒸発部分の管熱伝導熱抵抗(K/W)
- R3:蒸発熱抵抗(K/W)
- R4:凝縮熱抵抗(K/W)
- R5:凝縮部分の管熱伝導熱抵抗(K/W)
- R6:フィン部の強制対流熱伝達熱抵抗(K/W)

図6に冷却ファンの性能線図(圧力/風量)を示す。フィンの圧力損失(破線)を計算にて求め、ファンのP-Q曲線との交点が実風量となる風量に相当する熱抵抗が、冷却ユニットとしての冷却性能となる。

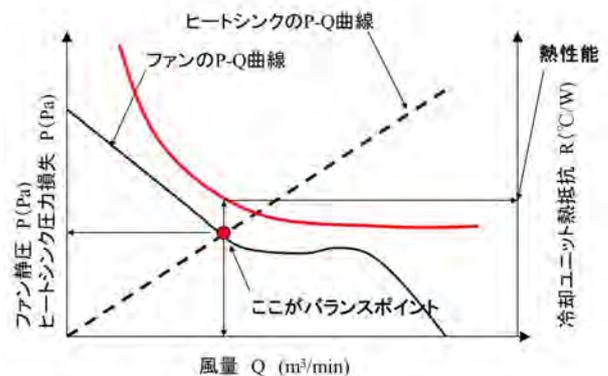


図6 冷却ファンの性能線図 (P-Q カーブ)

5. 結言

ヒートパイプは、今や電子機器等の冷却部品として大量に使用されている。紙面の都合上詳細な設計計算式は割愛したが、日本ヒートパイプ協会の著書“実用ヒートパイプ”を参照されたい。ループヒートパイプ、キャピラリーポンプ、振動型ヒートパイプ、回転式ヒートパイプ等、特殊なものがあるがこれも省略をさせて頂いた。

参考文献

- [1] 日本ヒートパイプ教会, 実用ヒートパイプ 第2版, 17-21, 36, 64-69, 83-86

ヒートパイプの製造と試験

How to Manufacture and Test the Heat Pipe

木村 裕一 (古河電気工業株式会社)

Yuichi KIMURA (Furukawa Electric Co., Ltd.)

e-mail: kimura@hira.furukawa.co.jp

1. ヒートパイプの製造方法[1-3]

1.1 材料の準備

ヒートパイプは、基本的にコンテナ (容器)・ウィック・作動液 (熱媒体) より構成されており、設計の段階でコンテナの形状や材質、ウィックの構造や材質、作動液の種類が決定される。その際、入手する材料の製造方法を考慮し、製造可能な寸法範囲内の形状にしておくことも必要である。ヒートパイプに用いられるコンテナおよびウィック材としては、主に銅、アルミニウム、ステンレスが用いられるが、コンテナの場合その形状が管状のものであれば、押出加工や引抜加工、板状のものであればプレス加工や鍛造加工が用いられる。また、ウィックの場合もその構造によって異なっており、グループ (溝) 型のものではコンテナ製造時に一体的に加工する場合が多く、ワイヤ (細線) 型では線引き加工により、メッシュ (金網) 型では細線の編込み加工により、焼結型ではアトマイズや電解加工により製造される。コンテナとウィック材は、基本的に同種の使用材料が前提となる。作動液の場合は、種類によって全く異なった化学プロセスで製造されるため、使用環境温度に合わせて選定された媒体を購入することになる。ただし、不純物が含まれて純度が低い場合には、別途精製等を行い、純度を最も高めておく必要がある。

1.2 ヒートパイプの製造工程

通常ヒートパイプ単体で使用するのではないので、使用対象へ接続するためのブロックや、放熱・受熱促進のためのフィンなどが別途取り付けられることになるが、ここではヒートパイプ単体での製造工程の概要を図1に示す。各工程の詳細については、ヒートパイプの種類や適用対象によって異なるため、以下においてはそれぞれの代表例について紹介していく。

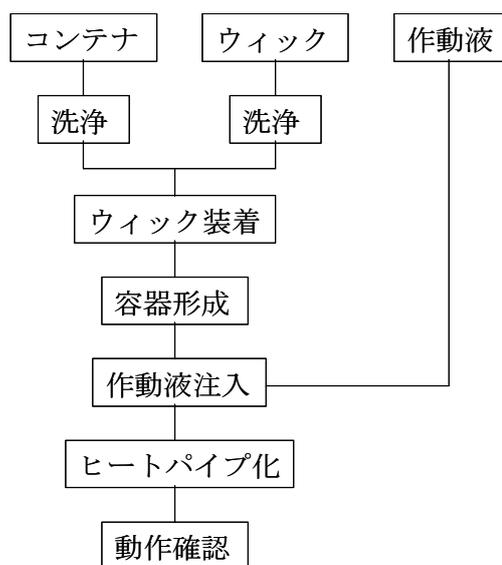


図1 ヒートパイプ製造工程

1.2.1 洗浄

コンテナ材料製造の際には潤滑材が用いられたり、輸送の際に飛散物やほこりなどが付着したりしているため、表面を清浄な状態にする必要がある。特に作動液と接する表面においては、清浄度によってヒートパイプの性能や長期信頼性 (寿命) が変わってくるため、洗浄は確実にかつ完全に行なっておく必要がある。洗浄方法としては、酸洗および水洗によって完全に除去することが望ましいが、溶剤による洗浄や還元ガスなどによる反応で除去する場合もある。付着している可能性のあるものの成分や状況によって、洗浄方法や洗浄剤の種類を変える必要がある。ウィックについても同様に、洗浄は確実にかつ完全に行なっておく必要があるが、グループ型のようなコンテナと一体となったものについては同時に、焼結型のような微細金属粉を用いるものは、金属粉の製造の段階で清浄度を高めて納入してもらうことが多い。

1.2.2 ウィック装着

ウィックの形状により、その装着方法が異なってくる。グループ型は既に一体成形されているため装着の必要はないが、現在では他のウィックと組み合わせて使用する場合もでてきている。

ウィックの装着に際しては、管状のものであれば一端を加工して封止した状態で行なう場合が多く、板状のものであれば組み立ての際に行われる。一端加工の方法については、1.2.3 に示す。ワイヤ型のウィックでは、複数本の線材を束ねて内部に入れ、重力で下部に配置したり、コンテナを潰すことによってコンテナ自体で押えたり、スプリング（バネ）などの別材料でコンテナ内表面に弾性力で押えたりすることにより装着される。メッシュ型の場合は、上記以外にメッシュ自体の弾性力により、コンテナ内表面に装着される。

焼結型の場合は、金属粉を加圧成形したものをそのまま挿入したり、管状のものではコンテナの中心部に心金を入れその周りの空間部に金属粉を入れて、融点近くで一体焼結したりすることによって装着される。焼結の際には、内部に空間ができたり、詰め込み過ぎたりしないようにする必要があるとともに、焼結後に心金が抜き取れるようにしておく必要がある。また板形の場合は、熱源が取り付け側の板材に予め金属粉を焼結して使用するが多い。

1.2.3 容器形成

管状のものと板状のもので、容器の形成方法が異なる。管状のものについては、管端の処理方法としては主に図2に示すものがある。

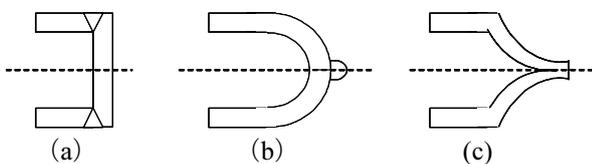


図2 管端処理方法

ヒートパイプの径が比較的大きい場合（例えば20mm以上）、図2の(a)に示すようにキャップを接合することによって管端処理を行なう方法がよく用いられる。接合にはTig溶接やロウ付けが用いられる。キャップの厚さや接合形状に関しては、圧力容器の設計指針に基づき決定することが好ま

しい。径が比較的小さい場合には、図2の(b)や(c)の方法が用いられる。(b)はスウェーピングやスピニング処理と呼ばれる絞り加工により絞られ、同様にTig溶接やロウ付けで処理される。(c)はカシメ機等を用いて潰すように内面を合わせ、同様にTig溶接やロウ付けで処理される。

ヒートパイプ加工を行うには作動液を封入する必要があるため、一方の端部は最初から完全に封止しておいても良いが、もう一方の端部は、(a)の場合は封入用の細管付きキャップを取り付けておく必要がある。(b)や(c)の場合は、片端は開放状態にしておく必要がある。また、ヒートパイプ化の際にバルブ等を使用する場合には、別途ロウ付けなどにより細管を取り付ける。

板状のものに関しては、プレスや鍛造加工で成形された2枚の板を貼り合わせるようになるが、貼り合わせる方法としてはロウ付けや溶接、拡散接合等の方法が用いられる。接合する材料の種類や構造によって、最適な方法を選定する必要がある。板状のものについても、作動液を封入する必要があるため、封入用に未接合部分を残したり、別途細管取り付けたりしておく必要がある。

容器を形成した際には、接合部での漏れが無いことが前提となる。ヒートパイプが最初に利用されたのがNASAであったこともあり、致命的な影響を与える役割を担うものについての漏れの確認は重要であり、各種方法で確認を行っている。詳細については2の試験方法にて述べる。コンピュータのCPU冷却用などに用いられる民生用のヒートパイプの漏れ確認については、プロセス管理や後工程の検査による代替評価により省略される場合が多い。

1.2.4 作動液注入

1.2.3で形成された容器に作動液を注入する際、作動液の種類やコンテナの材質等によってその方法は大きく異なる。ヒートパイプの大部分は金属材料で形成されているが、金属は多かれ少なかれガスを吸蔵している。コンテナの材料や吸蔵されるガス種により、吸蔵されるガスの最大量は異なるため、影響の度合いによって作動液の注入際の考慮の仕方が変わってくる。

図3に宇宙用途用などの、厳しい条件にて製造を行なう際の注液配管図の例を示す。分岐する配

管の前後には、できるだけバルブを設けまた作動液の状態が把握できるように、圧力計や温度計を設置することが望まれる。コンテナやウィックを可能な限り清浄に維持するため、配管自体も外部の影響をできるだけ受けないようにするため、交換等が必要な箇所には必ずバルブを設け、外部からの影響が無いようにする。また、保管等をする場合は、配管内部に空気が入らないように、不活性ガスを充填できるようにしておく。

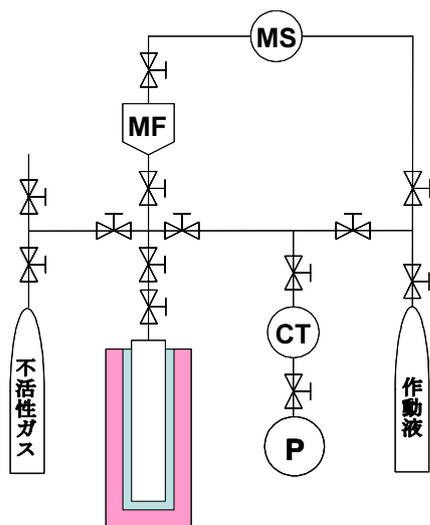


図3 作動液注液配管図

まず液を注入する前に、コンテナやウィックに吸着や吸蔵されるガスを除去する必要がある。吸着や吸蔵しているガスは、温度を高くすることによって放出されるため、コンテナをヒータ等で加熱しながら拡散ポンプなどの真空ポンプ(P)で除去を行なう。その際、前の加工の際に残留した作動液が、直接真空ポンプに入らないようにするため、コールドトラップ(CT)などの分離装置にて除去できるようにしておく。また加熱する温度は、高くし過ぎると材料の強度が低下する場合がありますので、選定される材料によって処理条件を決定する必要がある。

ガスの除去を行なった後に作動液を注入することになるが、まず配管系内を真空ポンプ(P)により真空に引く。真空に引いた後は、作動液の注入ライン以外のバルブを閉じる。注入する作動液は、先にも述べたように最高の純度のものを使用することが必要である。特にアルコールなどの有機系の作動液を使用する場合には、水分が既に含まれ

ていたり、空気中の水分を吸湿したりするため、モレキュラーシーブ(MS)と呼ばれる装置を用いて、水分をできるだけ除去できるようにしておく。ヒートパイプに封入される作動液量は、内部構造や使用温度・使用方法によって最適量が異なるため、別途評価して決定しておく必要がある。

所定の液量を導入するには、マスフローコントローラ(MF)を用いたり、シリンジを用いたりする。注入の方式によって、作動液を気化させたり液化させたりする必要がある場合には、それぞれの部分で加熱や冷却を行なう。所定量の液が入ったところでコンテナ手前の2つのバルブを閉にし、2つのバルブの間を外すことで、作動液の注液を終了する。続けて作動液を注入する際には、取り外した部分に別のバルブ付きコンテナを取り付け、真空ポンプにつながる最短ライン以外のバルブを閉め、コンテナ手前の2つのバルブを開にして、先の脱ガス工程から限られた配管ラインの中で同様な工程で実施していく。

以上が比較的厳密に管理された状態での作動液の注入となるが、媒体の種類あるいは使われ方によっては、大気開放状態でシリンジ等を用いて注液することも行われる。

1.2.5 ヒートパイプ化

1.2.4の作動液の注入の際に、脱ガスや脱気が行なわれ、純粋な作動液が適量注入できていれば、図4のようにバルブにより分離されたコンテナ(a)は、既にヒートパイプとなっている。ただし、バルブの状態ではリークの可能性や、使用際に邪魔になるので、完全な密封化を目的として、細管部を油圧のカシメ機などで潰し(b)、潰した箇所をTig溶接などにより溶かし(c)、完全に密封する。

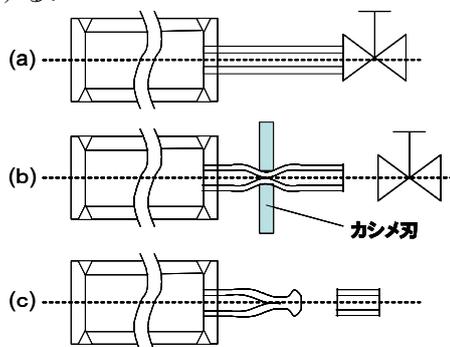


図4 封止フロー

ヒートパイプ化の方法として、主に2通りある。1つが真空脱気法、もう1つが沸騰法である。

真空脱気法は、図3の作動液注入配管図にあるように、真空ポンプを用いて強制的にコンテナ内の残留ガスを除去して密封する方法である。開放状態で作動液を注入する場合も、真空ポンプを用いることにより、強制的に残留ガスを除去することができる。ただし、作動液注入後に真空に引くと、作動液の液体や蒸気も同時に吸引されるため、液量が増えるので注意が必要である。また、真空ポンプ側のコールドトラップも、十分な能力があるものを選定しておく必要がある。

VCHPのように、不活性ガスを封入する場合には、所定量のガスを注入する必要があるため、図3のフローで不活性ガスを計量し、最終段階でガス注入し封止を行う。

もう一つ沸騰法は、作動液を沸点まで加熱することにより蒸気を発生させ、蒸気の力（流れ）で残留ガスを押し出す方法である。バルブを用いず大気開放状態でも脱ガスができるため、細管等を取り付けなくても加工が可能である。ただし、蒸気の力のみでの脱気のため、脱気が十分に行なわれているかの条件出しが重要となる。

1.3 動作確認

動作確認の簡易的な方法として、ヒートパイプの特徴でもある等温性の評価により、行なうことができる。これは、ヒートパイプ内部の不凝縮性ガスの脱気が、十分に行なわれているかのどうかの確認になる。

図5に示すように、所定温度の媒体（例えばお湯）に、ヒートパイプの一端（1/4～1/2程度）を浸漬し、ヒートパイプの中央部と先端部の温度を測定することにより、動作判定を行なう。通常脱ガスが十分に行なわれていれば、T1とT2はほぼ同じ温度を示す。脱ガスが不十分だと、T1の温度がT2に比べ極端に低くなる。測定の温度条件や使用媒体は、ヒートパイプの用途によって決定する。

また、媒体の温度TLとT2の温度差が小さいほど、ヒートパイプの熱抵抗が小さいという目安になるため、温度差が大きくなる場合には、脱ガスが全く不十分な場合や、作動液が少な過ぎる場合、内部のウィックが脱落した場合などが考えられるため、原因を確認する必要がある。

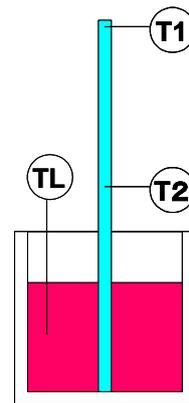


図5 動作確認温度測定

2. ヒートパイプの試験方法[4, 5]

2.1 性能試験

詳細な評価内容としては、ヒートパイプの最大熱輸送量の測定と熱輸送デバイスとしての性能である熱伝達率の測定がある。そのためには、図6に示すような測定系にて行なう必要がある。ヒートパイプ表面の、加熱部・断熱部・冷却部に相当する部分に熱電対を取り付け、加熱部となる蒸発部にはニクロム線などのヒータを巻き、その外側を断熱材で覆う。冷却部となる凝縮部には、所定の冷却性能が確保できるようフィンを取り付け、ファンにより空冷する方法か、冷却が不足する場合にはジャケットで被い、水冷する方法を用いる場合がある。加熱部と冷却部の中間部には断熱部を設け、そこで測定する温度をヒートパイプの作動温度として近似する。測定上のポイントとしては、各部の温度の差が僅かであるため、熱電対はヒートパイプの管壁に確実に付くようにハンダなどで固定し、電圧で測定し温度換算するとよい。また、冷却部以外からの放熱が無いよう、十分に断熱を行なうことである。

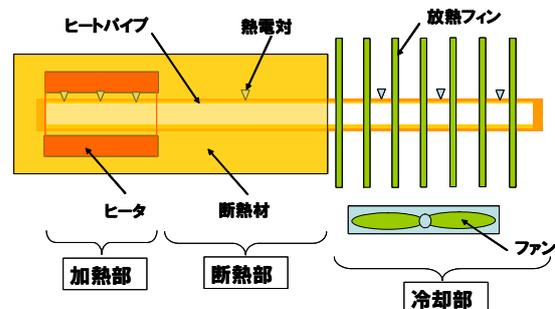


図6 性能測定方法

測定は、所定量の入力をヒータに加え、断熱部の温度が一定になるよう風量ないしは水量を変化させて調整を行い、一定時間各部の温度が一定(定常)となった後に温度測定を行なう。その後に入力を上げ、図7に示すように同様な操作を、加熱部の温度が下がらなくなる、最大熱輸送量まで行う。

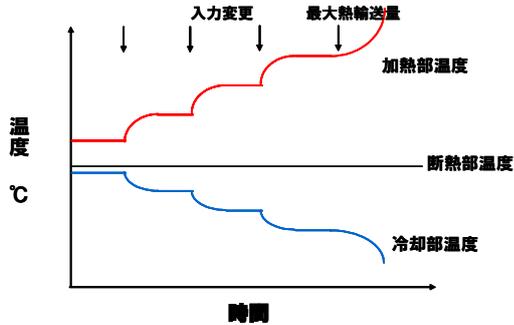


図7 動作確認温度測定

2.2 信頼性試験

2.2.1 ヒートパイプの劣化

ヒートパイプは比較的単純な構造であり、外部動力を必要としない完全に外部と独立した密閉容器である。従って、密閉にする段階と密閉にした後に、本来求めざる状態が起きた場合に信頼性がないと言うことができる。ヒートパイプの内部は、本来作動液とその飽和蒸気のみで空間が満たされていなければならない。しかし、密閉にする際に不凝縮性ガスが混入したり、容器の気密度が完全でないためにリークしたり、あるいは内部の清浄度が不十分なために何らかの反応が起こり、不凝縮ガスを発生させてしまう場合が劣化と考えられる。いずれの場合も、不凝縮性ガスがヒートパイプ劣化に影響するもので、これにより本来熱輸送すべき領域まで蒸気が移動しなくなるために、等温部分の長さが減少し、結果的に性能不足を引き起こすのである。

特に径の細いヒートパイプほど、不凝縮性ガスの発生に対して敏感である。なぜなら、ガスが発生する場合は、反応がその内表面積に比例すると考えられ、ガス発生が温度低下に及ぼす影響は、その内容積に反比例するためである。したがって、内表面積が相対的に大きく、内容積が相対的に小さい、すなわち小径のヒートパイプほどガス発生の影響は大きいことになる。

2.2.2 信頼性試験方法

信頼性確認のために、寿命試験(ライフテスト)と言われる試験を行なう。この場合、ヒートパイプが使用される温度よりも作動温度を上げたり、加える熱密度を上げたりして行う、一種の加速試験である。図8に信頼性試験装置の一例を示す。

ヒートパイプは垂直に立てられ、下部(加熱部)には一定の熱負荷が加えられる。また上部(冷却部)はファンで適度に冷却され、ヒートパイプの断熱部温度(作動温度)が一定の温度になるように調整される。ヒートパイプの作動温度に対し、ヒートパイプ先端部の温度の経時変化を測定することによって判断を行っていく。非凝縮性ガスが発生すれば先端部の温度は低下し、作動温度との温度差は大きくなる。一方非凝縮性ガスの発生がない場合には、10,000時間経過後も、温度差は初期からほとんど変化はない。

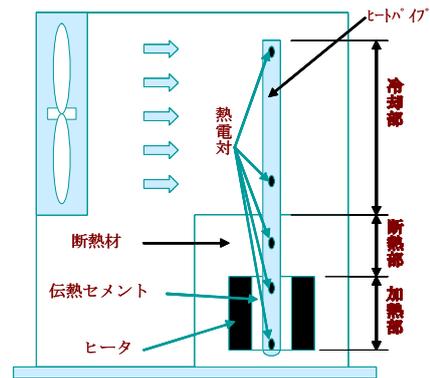


図8 信頼性試験装置

図9にこの方法による、信頼性試験結果の一例で、不凝縮性ガス(分解ガス等)の経時的な生成パターンを示している。寿命試験は加速を行うために、通常の使用温度よりも高温で運転を行なっているため、非凝縮性ガスの影響を見る際には、作動温度を下げることで内部圧力を下げ、ガス検出感度を上げて測定を行なう場合もある。

不凝縮性ガスが多く存在する場合は、温度差は大きく現れる。ここで直線A、Bに関しては、封止の際の状態が決まり、経時的な変化がないものを示すもので、十分に脱気できている場合はA、そうでない場合にはBのような状態となる。またDの場合は、時間の推移にほぼ比例するように温度差が拡大していく場合である。この場合には、コンテナ容器に微少なリーク箇所があり、内圧が

低い場合には、空気が外部よりヒートパイプ内部に徐々に侵入していくことで劣化が進む場合が多い。また曲線Cでは、ヒートパイプの試験を開始して、初期に急激に劣化したあと徐々に変化が少なくなる場合で、このような曲線を描く場合は、ヒートパイプ内部に初めから付着していた不凝縮性ガスが作動に伴い分離されていく場合が多い。一方曲線Eでは、最初はほとんど劣化がみられないものの、ある時点から急激に温度差が生じはじめるタイプで、このカーブを描く場合には、作動液とコンテナ材料との不適合や容器に付着した汚れや油分などが作動に伴い分離分解し、非凝縮性ガスが発生していることが多い。いずれにしても、温度差は初期では低い値に抑えられ、長期に渡って変化の少ないものが、長期信頼性があるということができる。

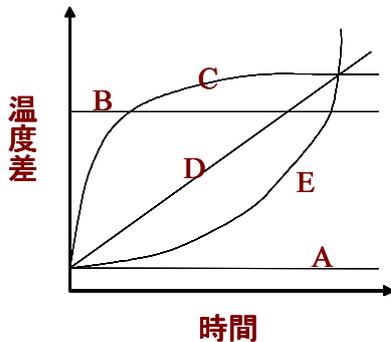


図9 信頼性試験結果の例

2.3 気密性試験

2.2.2 で示した信頼性の評価試験を、すべてのヒートパイプに対して行うことは不可能であるため、現実的には製造工程確定後抜き取りで評価を行う。その他のものに関しては、スクリーニングによって行っている。ヒートパイプの性能を維持するためには、ヒートパイプ容器の気密性が重要であるが、その気密性を検査する手法には、直接的な方法として気泡検出法が、一種のスクリーニング法としてボンピング法や作動液の種類によってはハロゲンリークディテクターによる方法などがある。スクリーニング法とは、電子部品の選別によく使用される強制的非破壊的選別技術であり、初期故障を起こしやすい部品や、潜在的弱点を有する部品を短時間で経済的に検出する方法のことである。

また 1.2.3 で示したように、ヒートパイプ加工の前であれば、He リークディテクターを用いての検

査方法などがあり、状況に応じてこれらの検査法が単独あるいは組み合わせによって行われる。以下に各々の方法を簡単に説明する。

a. 気泡検出法

リークがある場合にでてくる蒸気あるいは空気を水中や石鹼水などの泡を利用し、目視で見つける方法である。ヒートパイプとして封止する前の容器の漏れは、封止用細管から内部に空気圧を加えるとともに、容器の外表面に石鹼水などを塗り、その発泡の状態を確認することで漏れを検出できる。

b. ボンピング法

ヒートパイプ加工後の製品検査で、ヒートパイプを気体加圧室内に収納し、そのまま所定圧力下で所定時間放置したのちに、大気中に取り出してヒートパイプの等温性の確認を行うものである。気密性が損なわれていれば、加圧することによって気体が強制的に内部に送り込まれ、温度差として検出することができる。

c. ハロゲンリークディテクター法

作動液が代替フロンなど、ハロゲンを含むものを検出する装置を用いて行なう方法である。ヒートパイプを加熱し内部の蒸気圧を大気圧以上にすることで、容器の微小な穴から漏れてくるハロゲンを検出するものである。ハロゲンリークディテクターは冷蔵庫やエアコンなどに対しても、広く用いられている方法である。

d. He リークディテクター法

ヒートパイプ加工前に、容器としての健全性をみる最も確実な方法がこの方法である。測定の方法は磁界偏向型の質量分析計を用い、ヘリウムのみを定量的に分析するように考えられた He リークディテクターを用いるものである。

参考文献

- [1] P.D.Dunn, D.A.Reay, Heat Pipes, Pergamon Press Ltd., (1977).138-172
- [2] 山西哲夫, 清水定明, ヒートパイプとその応用, オーム社, (1980) 199-212
- [3] 日本ヒートパイプ協会編, 実用ヒートパイプ, 日刊工業新聞社, (1985)53-85
- [4] 齋川潤, 木村裕一, マイクロヒートパイプと放熱技術入門, 日刊工業新聞社, (1999) 23-55
- [5] 日本機械学会編, 機械工学便覧応用システム編 3 熱機器, 丸善, (2005).92-111

各種熱輸送デバイス

Various Heat Transport Devices

大串 哲朗 (広島国際大学)

Tetsuro OGUSHI (Hiroshima International University)

e-mail: t-ogushi@it.hirokoku-u.ac.jp

1. はじめに

ヒートパイプの研究開発者にとって、図1に示すようにフレキシブルな配管を用い、熱源から冷却源へその上下の位置に関係なく多量の熱を自由に伝えることができる熱輸送デバイスを実現することは夢であったと思われる。このような熱輸送はウィックの毛管圧力を利用した毛細管型ヒートパイプや重力を利用した二相密閉型熱サイホンなどの従来型ヒートパイプでは困難であった。各種熱輸送デバイスはこのようなヒートパイプの実現を目指して発展してきたとも言える。

これまで多くの熱輸送デバイスの研究開発が行われてきたが、その代表的なものを表1に示す。この中では従来型ヒートパイプを除く熱輸送デバイスを、作動流体を循環させるために用いる駆動力で大きく3種類に分類した。すなわちリザーバを用いることにより作動流体の蒸気圧を利用できるようにしたもの、沸騰気泡による気泡ポンプ作用を利用したもの、沸騰による自励振動現象を利用したものの3種類である。また、ヒートパイプの特殊な機能として可変コンダクタンスヒートパイプも取り上げた。表中のデバイス名称は引用した文献中に使用されている名称をそのまま記載した。ここではこれらの各種熱輸送デバイスの構造や特徴また動作特性について紹介する。

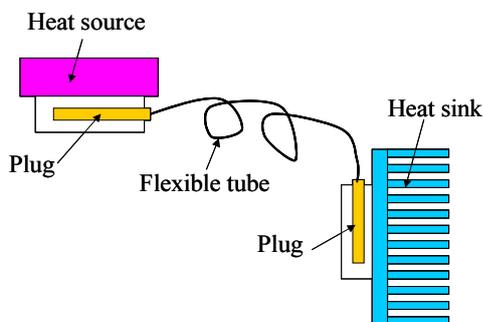


図1 フレキシブル熱輸送デバイス

表1 熱輸送デバイスの種類

熱輸送デバイスの名称	作動流体の還流力	特徴	文献番号
T-SYSTEM	蒸気圧	蒸気圧変動を利用	[1]
Device for Passive Downward Heat Transport			[2]
Downward Heat Transport Device, DWHD	蒸気圧+重力	時間変動小	[3]~[5]
トップヒート型熱輸送ループ			[6]
LHP	蒸気圧+毛管力	定常熱輸送が可能	[7]~[11]
Bubble-Actuated Circulating Heat pipe, BACH	気泡ポンプ作用	単相ループ トップヒート動作	[12][13]
Top-heat-mode loop thermosyphon, TLT			[14][15]
自励振動ヒートパイプ	自励振動現象	蛇行管	[16]~[18]
単一直管自励振動ヒートパイプ			[19]
可変コンダクタンスヒートパイプ VCHP	各種	温度制御	[20]~[22]

2. 蒸気圧利用ヒートパイプ (リザーバ型)

蒸発部から凝縮部への作動流体蒸気の流動に用いられている駆動力は、蒸発部と凝縮部間の蒸気の温度差にともなう蒸気圧差でありこれは従来型のヒートパイプでも同様である。ここではリザーバ (文献によってはアキュムレータ、補償チャンバーとも称されている) を有し、蒸発器から凝縮器を通りさらにリザーバまでの作動流体の駆動力に蒸気の圧力を積極的に利用しているものを蒸気圧利用ヒートパイプとした。このヒートパイプはリザーバから蒸発器への液体の還流力によって以下のように分類できる。

2.1 蒸気圧の時間変動利用型

作動流体の循環力として作動流体の蒸気圧が利用できることが、1978年の第2回ヒートパイプ国際学会における T-SYSTEM[1]という名称のヒートパイプで初めて示された。図2に示すこの T-SYSTEM では蒸発器と凝縮器間が蒸気管、液管でループ状に連結され、液管の中途に2個の逆止弁を出入口に持つアキュムレータが設けられている。凝縮器からの液流は蒸発器からの蒸気圧に押されてアキュムレータに流れ込みそこに溜まりこむ。蒸発器内の液体は時間とともに消費されて蒸発量が減少し、それに伴い蒸発器の圧力も低下し

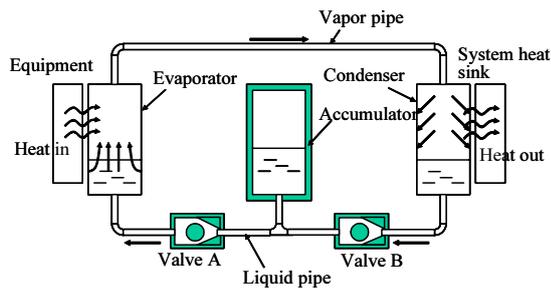


図2 “T-SYSTEM” Basic concept[1]

てくる。蒸発器の圧力がアキュムレータの圧力よりも低下すると、アキュムレータと蒸発器間の蒸気圧差によりアキュムレータから蒸発器へ液が還流する。

この論文では蒸気圧の時間変動が熱輸送の循環力として利用できることが試験管規模の熱輸送実験で示されただけでなく、沸点の低い作動流体を使用することにより小さな温度変動で大きな圧力差が得られ、蒸発器が凝縮器よりも高い位置にあるトップヒートモードでの動作や長距離熱輸送が可能となり、太陽熱を利用した温水器のポンプレス化が実現できること、また逆に水のような高沸点の作動流体は圧力差にともなう温度差が大きくなるため利用に適さないことが言及されている。

この T-SYSTEM では圧力低下時のアキュムレータからの液還流がわずかでもあるとすぐに蒸発量が増え圧力が上昇するため、1 回の液還流量がわずかな量となり、熱輸送能力が小さくなるという欠点がある。

この点を改良した熱輸送デバイス[2]が 1981 年の第 3 回ヒートパイプ国際学会で発表され、図 3

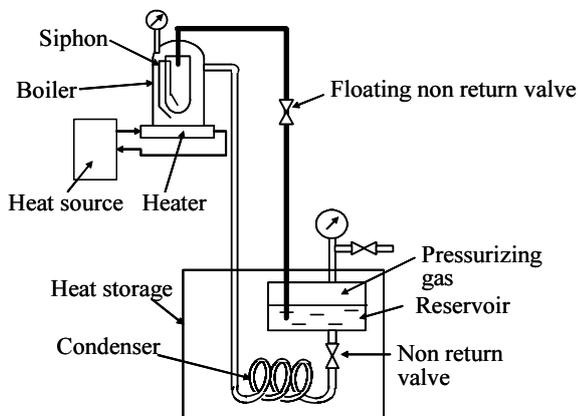


図3 Device for passive downward heat transport[2]

に示す装置を用いた動作実証が会場で行われた。

このデバイスではリザーバからの一定量の液が蒸発器内にあるサイホンを用いた容器に溜まりこんだ後にサイホンの働きで自動的に蒸発器ヒーター部に還流するため、圧力低下時の液還流量が多くなり、大きな熱輸送量が得られる。我が国でもサイホンではなく“ししおどし”を用いた同様の原理の抗重力形熱輸送装置が開発され、蒸発器と凝縮器間の高低差 1.5m で 600W の熱輸送能力が実証されている[3]。しかし、これらのデバイスは本質的に蒸発器での蒸発量の減少に伴う圧力変動を利用しているため、蒸発器が時間平均的に液不足となり、蒸発部の伝熱面積の低下により熱抵抗が増大し、蒸発器と凝縮器間の熱コンダクタンスが小さくなるという欠点をもっている。

2.2 重力利用型

リザーバから蒸発器への液還流に重力を利用することにより 2.1 項で述べた蒸発器が液不足となるという欠点を解消できる。その 1 例として Downward Heat Transport Device, DWHD を図 4 に示す[4]。この装置では 2 個のリザーバを蒸発器の上部に位置させ、リザーバの下部と蒸発器に付随したレシーバ下部を逆止弁付きの液流出管で連結し、レシーバ上部とリザーバ上部間とを電磁弁を介した均圧管で連結している。どちらか一方の電磁弁を開けるとリザーバとレシーバが連通され均圧される結果、重力の作用でリザーバ中の液体がレシーバに還流する。その間、蒸発器で発生した蒸気はレシーバから凝縮器へ流れ、放熱して凝縮した後に液体となって電磁弁が開いていない他方

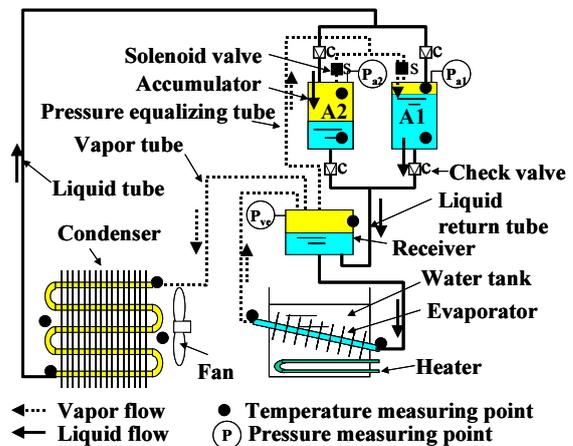


図4 Downward Heat Transport Device[4]

のリザーバに溜まりこむ。一定時間の後、電磁弁の開閉を切り替えるとリザーバが入れ替わって同様な熱輸送動作が行われる。この動作の間、蒸発器には一定量以上の作動液体が保持され、熱コンダクタンスも一定の動作となる。作動流体に R114 が使用され、外気温度 18°C の時、温水温度 40°C で 1kW、80°C で 3kW の熱輸送能力が実証されている。同様な原理でリザーバ 1 個の場合のデバイスの研究も報告されている[5]。

上記の熱輸送デバイスでは蒸発器から凝縮器までの熱輸送に蒸気流を用いているため、蒸気管の圧力損失や蒸発器と凝縮器間の液柱の重力差に打ち勝つ蒸気圧差が必要となる。そのため、水などの高沸点の作動流体はこの蒸気圧差に伴う大きな温度差を生じるため適していない。この点を改良し、水を作動流体として使用しできるようにしたヒートパイプ[6]を図 5 に示す。このシステムでは蒸発器で発生する蒸気圧を、蒸発器からリザーバまでの単相の液流の輸送力として利用していることが特徴である。リザーバを蒸発器の上部に設置

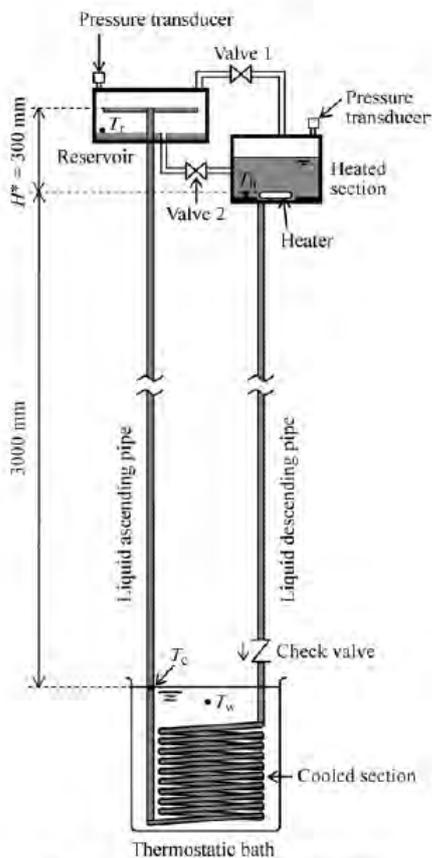


図 5 トップヒート型熱輸送ループ[6]

しているため、蒸発器と凝縮器間に液柱による重力差が生じない。このデバイスにより蒸発器と凝縮器間の 3m の高低差において 1.2kW の熱輸送能力が実証されている。

これら、電磁弁の開閉によりリザーバから蒸発器へ液を還流するデバイスは、電磁弁の開閉周期が短いと開閉回数が多くなりその耐久性に問題が生じ、逆に開閉周期が長いとリザーバ容積が大きくなる欠点を持っている。

2.3 毛管力利用型 (LHP)

リザーバから蒸発器への液還流力にウイックの毛管力を利用した LHP (Loop Heat Pipe) と呼ばれるヒートパイプが主に宇宙における無重力下での動作を目的として、ロシアや欧米を中心に各国で精力的に開発が進められてきた。その基本的な構成を図 6 に示す[7]。蒸発器に隣接してリザーバが設けられており (リザーバ外付型)、蒸発器には気孔径が数 μm の大きな毛管力を持つウイックが使

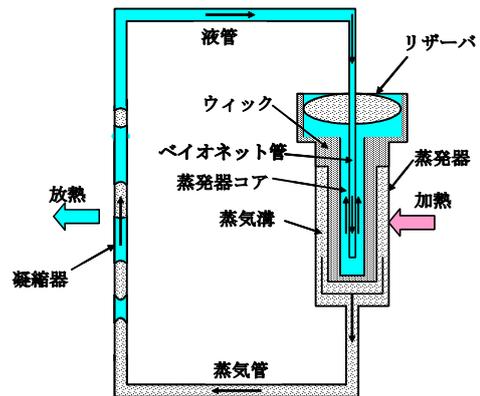


図 6 Loop Heat Pipe の構成[7]

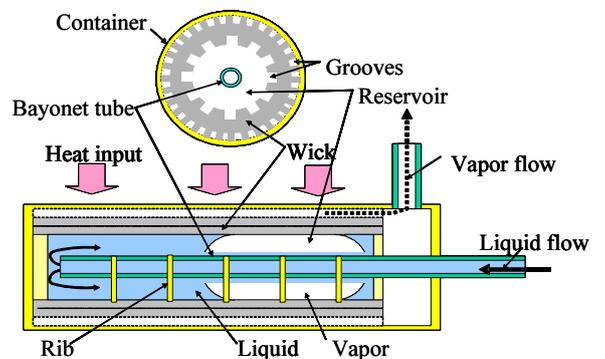


図 7 Cross sectional view of an evaporator in a RELHP [8]

用され、凝縮器からの液管に連結したベイオネット管と呼ばれる管がリザーバから蒸発器コア中を貫通して設けられている。我が国で人工衛星の展開型ラジエータ用に開発された LHP は Reservoir Embedded Loop Heat Pipe, RELHP と称し図 7 に示すようにリザーバがウイックコア中に内蔵された構造（リザーバ内蔵型）となっている [8]。

蒸発器のウイック外壁面側から加熱され蒸発した作動流体蒸気はウイック外壁に設けられた溝に排出されて蒸気管に流入し、凝縮器へ蒸気圧差で流れて凝縮する。凝縮器からの液体は液管を通った後、図 7 中の矢印で示すようにベイオネット管内を通って蒸発器端部で排出された後、ベイオネット管とウイック内壁面の間を通ってリザーバへ還流する。この間に液体はウイック中をウイック内壁面から外壁面に向かって毛管現象により浸透し、ウイック外壁面で加熱されて再び蒸発する。このような動作で熱輸送が行われるが、従来の毛管型ヒートパイプと異なり LHP は以下の特徴を持っている。すなわちウイックが蒸発器のみに用いられているため配管がフレキシブルとなること、ウイック外壁面で加熱されて蒸発した蒸気はウイック外壁面側に排出される Stenger [9]型蒸発器となっていること、ベイオネット管によりリザーバ内部が凝縮器からの過冷却液体により冷却される構造となっていることなどである。

これまで述べたリザーバ利用型のヒートパイプでは凝縮液が蒸気管の蒸気圧力に駆動されてリザーバに流れこむことから、一般に蒸気管の温度で定義されるヒートパイプの動作温度はリザーバの圧力が基準となって決定されることになる。したがって、リザーバ容器やウイックの熱伝導によりリザーバが蒸発器からの熱で加熱される場合（一般にこの熱量を蒸発器からリザーバへの熱損と称される）、この熱損によりリザーバの蒸気温度が上昇し圧力が上昇すると、ヒートパイプの動作温度が上昇することになる。同時に凝縮器ではこの熱損に等しい熱流量を持つ凝縮液体の過冷却領域が生じる。ベイオネット管内を流れるこの過冷却液体でリザーバ内の蒸気が冷却され、リザーバの温度が一定に保たれることになる。

LHP の起動時においてはウイック中に液体が存在する必要があるが、リザーバからウイックへの液体の輸送を確実なものとするため、外付リザー

バ型では気孔径が大きな第 2 ウイックがリザーバとウイック間に設けられている場合が多い。リザーバ内蔵型 RELHP ではリザーバをウイック内部に設けることにより起動時におけるウイック中に液体が存在することに対する信頼性が高められている。RELHP はループ長 12m で 1kW の熱輸送が地上で実証され、宇宙での 400W の動作実績が報告されている [10] [11]。

LHP は図 1 に示したような熱源から冷却源間の高低差を気にせず、フレキシブル配管で多量の熱を伝えることができる熱輸送デバイスとして最も適したものと思われ、地上用としても多くの開発が行われてきた。しかし一般にウイックなどの製造コストが高く実用が進んでいないのが現状と思われる。

3. 気泡ポンプ利用ヒートパイプ

流体の循環力に気泡ポンプ作用を利用したヒートパイプも開発されている。その一つに気泡駆動型循環式ヒートパイプ (Bubble-Actuated Circulating Heat pipe, BACH) がある。BACH は吸熱部に気泡生成部があることが特徴であり、そこから発生する蒸気泡の浮力により液体が循環し、熱輸送が行われる。図 8 に示すように、このヒートパイプを利用した防火水槽融雪システムにおいて、熱輸送特性把握やフィールド試験が行なわれ、放熱部入口水温 0°C、吸熱部入口水温 15°C で吸熱部壁温と放熱部壁温の差 8K で 500 W の熱輸送性能が得られ、この性能は単管二相密閉型熱サイホン 2 本分の熱輸送量より大きな値であったことが報告されている [12]。

BACH では気泡の浮力を利用する点から、図 9

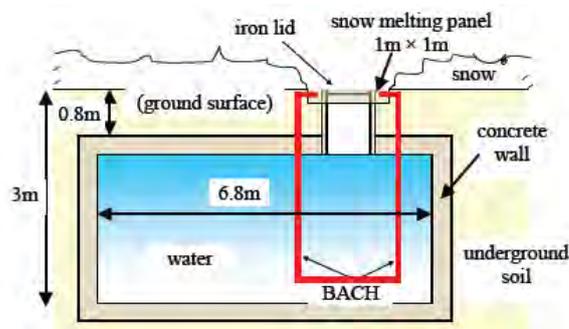


図 8 Outline of snow melting system around water tank for fire prevention using a heat pipe BACH [12]

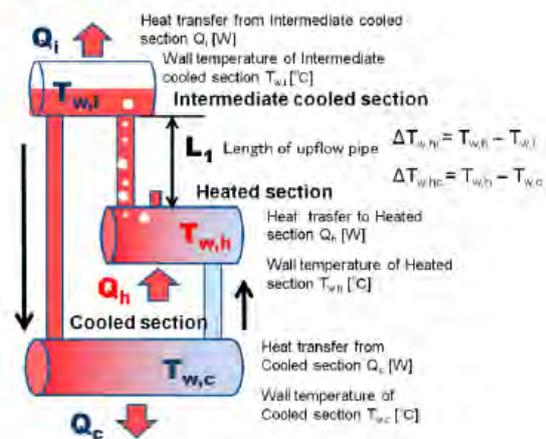


図9 Overall view of Top-heat BACH [13]

に示すように管を一部上方に延ばすことによってトップヒートが可能となる[13]. このトップヒート BACH は、吸熱部、中間放熱部、放熱部、これらを繋ぐ中間パイプ部で構成され、吸熱部壁面温度を中間放熱部壁面温度より高くすることによって、吸熱部や上昇管内で蒸気泡が発生し、気泡浮力によって液循環が誘起され、吸熱部壁面温度よりも放熱部壁面温度が低い場合に熱が下方に輸送される。作動流体に水、上昇管長さ 280mm、吸熱部-中間放熱部壁面温度差 15K において 300W の熱輸送性能が実証されている。

一方、気泡ポンプ作用を利用したヒートパイプとして BACH よりも早い時期に図 10 に原理図を示す構造のヒートパイプ (TLT: Top-heat-mode Loop Thermosyphon) が開発されている[14]. この構造の特徴は蒸発器の上部にある BACH という中間放熱部に熱交換器が挿入され、放熱器からの液体で冷却される構造になっている。したがって、中間放熱部が不要な構造となっている。この TLT の原理を使用して図 11 に示す大容量のポンプレス水冷システムが開発された[15]. このシステムでは体積が従来のポンプ水冷システムと比べ 20% 小さく、高さ 500mm 以下、幅 1000mm 以下、奥行き 250mm 以下の寸法で 10kW の冷却性能が実現されている。

4. 自励振動ヒートパイプ

4.1 蛇行流路型

自励振動ヒートパイプ (Pulsating Heat Pipe, PHP, Oscillating Heat Pipe, OHP) は円管もしくは矩形断面の蛇行流路内に作動媒体を一定割合封入し、一

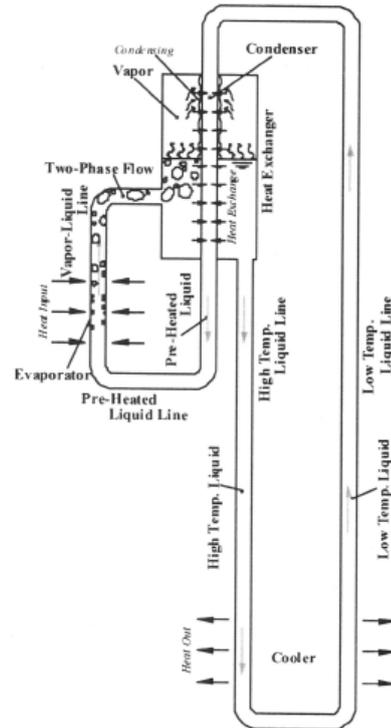


図10 Model of top-heat-mode loop thermosyphon[14]

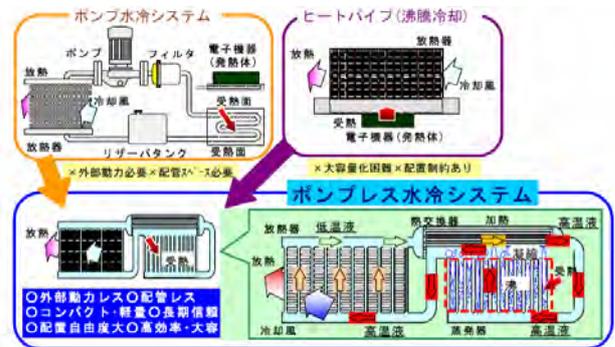


図11 ポンプレス水冷システムの概要[15]

端を加熱、もう一端を冷却すると気液の自励振動流が生じ、効果的に熱輸送が行われる装置である。市販されている PHP の形状の 1 例を図 12 に示す。全長 300mm、幅 50mm、厚さ 1.9mm の平板状のアルミ製で内部にブタンが封入されている。内部は幅 1mm、高さ 1mm の矩形の溝が 41 本設けられ、それぞれの溝は端部で連結され 1 本の蛇行流路となっている[16].

加熱面積が幅 50mm、長さ 100mm の場合の温度分布の例として、水平設置状態で各部温度が定常に達したときの 1 分間の温度変動の時間平均値を

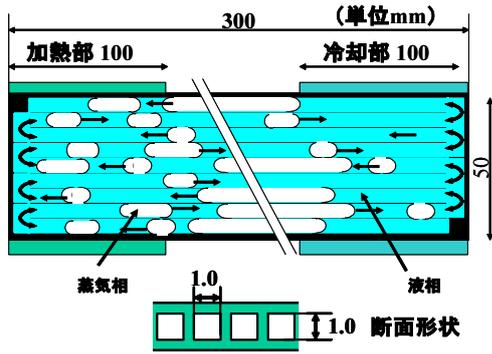


図 12 自励振動ヒートパイプ構造

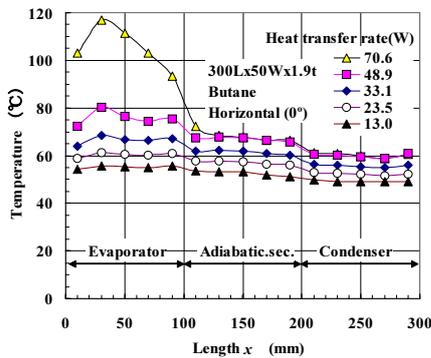


図 13 Temperature distribution of pulsating heat pipe[16]

図 13 に示す[16]。どの傾斜においても従来型ヒートパイプと同様、蒸発部、断熱部、凝縮部では、ほぼ一様な温度分布を示し、各部分間に主な温度差が生じている。このことから、本ヒートパイプでは作動流体の相変化による潜熱輸送が支配的になっていると考えられる。このヒートパイプの熱伝達特性を図 14、図 15 に示す[17]。蒸発部の熱伝達率は $1000 \sim 2000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、凝縮部の熱伝達率は $500 \sim 1500 \text{ W/m}^2\text{K}$ の値を示した。これらの熱伝達率の値は従来型ヒートパイプの場合とほぼ同程度の値である。本 PHP は動作温度が 50°C では傾斜が 90° (トップヒート) でも 75 W の熱輸送性能を示したが、動作温度が 70°C 以上では傾斜が 0° 以下 (ボトムヒート) を除くと最大熱輸送量が急激に小さくなった。また、加熱部長さが 50 mm 以下と短くなるとほとんど動作しなくなる特性も示した。

従来の PHP は流路サイズが全て同一の等断面流路によって形成されているが、溝幅の異なる流路を交互に配置する不等断面流路を用いると細い流路の方がより強く毛管効果が作用するため自励

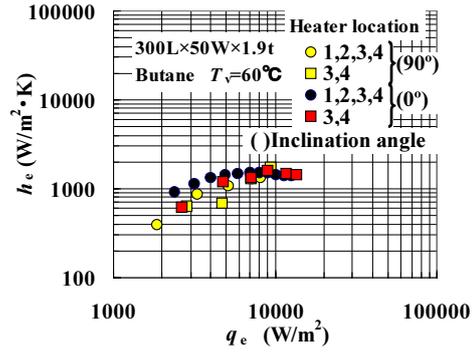


図 14 Evaporative heat transfer coefficient for different inclination angles and heater locations[17].

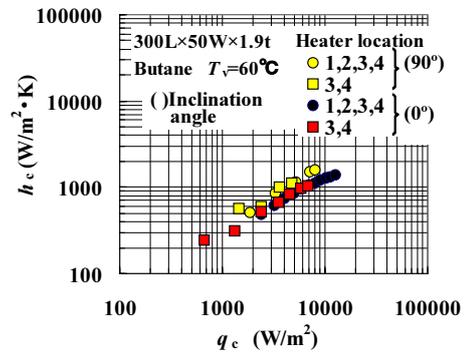


図 15 Condensing heat transfer coefficient for different inclination angles and heater locations[17].

振動が発生しやすくなり、少ないターン数の PHP の水平設置でも作動することが報告されている[18].

4.2 単管型

気液相変化による自励振動系の典型として、19 世紀末以来、玩具として愛用されているポンポン船を参考にして一本の直管からなる自励振動型ヒートパイプが研究されている。実験装置の構造を図 16 に示す[19]。試験部は主に加熱部、熱輸送管

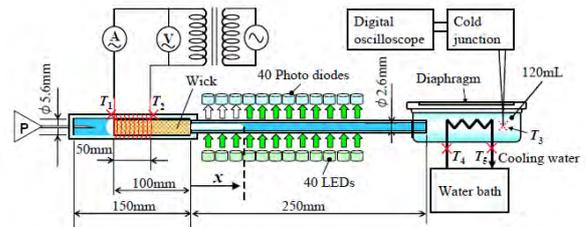


図 16 Experimental apparatus of single tube pulsating heat pipe[19]

部及び冷却部の三部分で構成される。加熱部は内径 5.6mm, 外径 7.9mm, 長さ 150mm, 熱輸送管部は内径 2.6mm, 外径 4.9mm, 長さ 250mm のそれぞれ石英ガラス製円管であり, 内部の蒸気泡の挙動が可視化されている。約 40 kW/(m·K)の実効熱伝導率で約 75W の熱を輸送することができることが報告されている。

5. 可変コンダクタンスヒートパイプ

従来の可変コンダクタンスヒートパイプ (Variable Conductance Heat Pipe, VCHP) は凝縮部端にガス溜めを設け, その中に水素, 窒素, アルゴンガスなどの非凝縮性ガスを封入したものからなり, ガス溜めの圧力や温度を制御することによりヒートパイプの動作温度を制御するようにしたヒートパイプである。蒸発器と凝縮器間の熱コンダクタンスが変化するため可変コンダクタンスヒートパイプと呼ばれている[20]。ここでは従来型ヒートパイプ以外のもので温度制御作用をもつヒートパイプの例を紹介する。

2 節で述べたリザーバ付きヒートパイプはリザーバの温度を一定に制御することにより, ヒートパイプの動作温度を一定に保つことができる。LHP の温度制御作用を能動的に行わせた例として, リザーバの温度制御をペルチェデバイス (Thermoelectric converters, TEC) を用いて行っている例を図 17 に示す[21]。この LHP ではリザーバ (CC) に密着して TEC が装着され, TEC と蒸発器間がサーマルストラップにより熱的に結合され, TEC の正負を逆転することによりリザーバの加熱, 冷却を行いリザーバの温度を制御している。

熱負荷を変化させたときの CC の温度を 40°C に

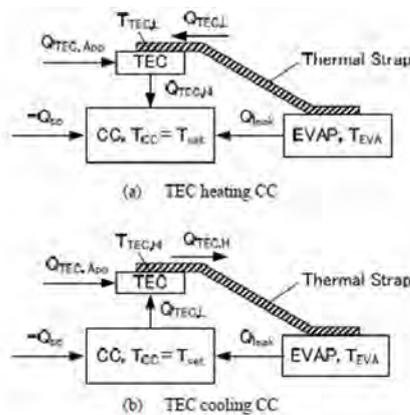


図 17 CC加熱冷却時のエネルギーバランス [21]

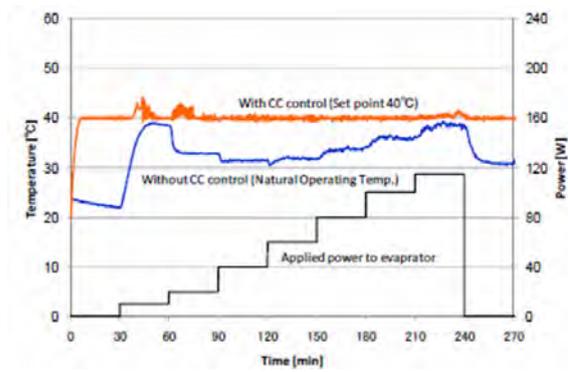


図 18 CC 温度履歴 (CC 制御あり・制御なし) [21]

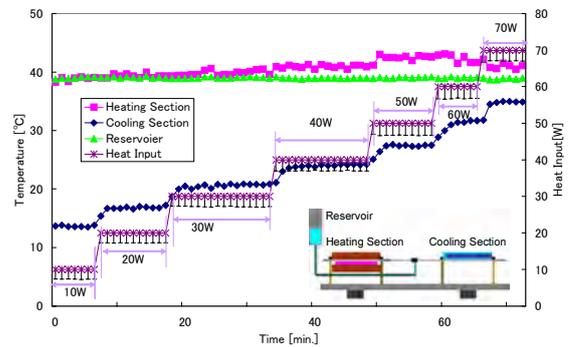


図 19 Experimental results on horizontally placed OHP with reservoir in vertical direction [22]

制御した場合と制御しない場合の CC 温度の変化を図 18 に示す。熱負荷 40W 以上では, $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内の精度で温度制御が行えていることが分かる。

自励振動ヒートパイプにリザーバ (液溜め) を取り付け, リザーバの温度制御を行うことによって, OHP の動作温度を能動的に制御できている例を図 19 に示す[22]。実験装置は, OHP とリザーバから構成され OHP とリザーバ間は内径 1mm, 長さ 600mm のテフロンチューブで接続され, OHP は外径 1mm, 内径 0.8mm の 1 本のステンレス管が 30 回折り曲げられた (15 ターン) 後, 管の両端が接続されて閉ループとなっている。熱負荷を変えても, 加熱部の温度がほぼリザーバの温度付近 (40°C 程度) で保たれていることが分かる。

6. あとがき

従来の毛細管型ヒートパイプや二相密閉型サーモサイホンとは異なる種々の熱輸送デバイスの研究・開発例について紹介した。これまで多くの種類のヒートパイプが開発されており, ここではそ

の一端を垣間見たにすぎないと思われる。しかしここで示した各種熱輸送デバイスの形態や動作特性が今後のヒートパイプ技術の発展の一助になれば幸いである。

参考文献

- [1] Tamburini, P., "T-SYSTEM" Proposal of a new concept heat transport system, *Proceedings of 3rd International Heat Pipe Conference* (1978) 346-353.
- [2] Beni, G.De., Friesen, R., Thoma, H., and Veneroni, R., Device for Passive Downward Heat Transport: Design Criteria and Operational Results, *Proceedings of 4th International Heat Pipe Conference* (1981) 673-683.
- [3] 大串哲朗, 村上政明, 山中晤郎, 蒸気圧利用抗重力形熱輸送装置の研究 (第1報, 定常特性の解析), 日本機械学会論文集 B 編, **152-481** (1986) 3348-3352.
- [4] 大串哲朗, 村上政明, 山中晤郎, 蒸気圧利用抗重力形熱輸送装置の研究, 第41回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2004) 323-324.
- [5] 井村英明, 小糸康志, 一ノ宮拓哉, 反重力二相熱サイホンによる熱輸送, 第40回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2003) 1-2.
- [6] 小糸康志, 池水敬勇, 鳥居修一, 富村寿夫, 蒸気圧を利用したトップヒート型熱輸送ループの作動特性 (基礎実験と理論解析), 化学工学論文集, **35-5** (2009) 495-501.
- [7] 機械工学便覧 応用システム編 γ 3 熱機器, 日本機械学会(2005) 105.
- [8] 大串哲朗, 展開型ラジエータ用リザーバ内蔵ループ型ヒートパイプ(RELHP)の開発, 日本機械学会熱工学カンファレンス2007講演論文集, A12 (2007) 15-24.
- [9] Stenger, F.J., NASA TMX-1310 (1966) 1-32
- [10] 石川博章, 野村武秀, 斉藤康之, 川崎春夫, 岡本篤, 畠中龍太, リザーバ内蔵ループ形ヒートパイプの熱特性に関する研究(きく8号搭載展開型ラジエータの軌道上熱輸送特性), 日本機械学会論文集B編, **76-768** (2010) 1273-1280
- [11] 石川博章, 野村武秀, 大串哲朗, 野田浩幸, 川崎春夫, 矢部高宏, きく8号搭載展開型ラジエータの開発” プロジェクトQ, J.HTSJ, **147-1988** (2008) 22-27
- [12] 永井二郎, 鈴木健介, 前川義和, 谷口晴紀, ヒートパイプ BACH を用いた防火水槽融雪システムの検討, 第47回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2009) 1-2.
- [13] 永井二郎, 浅野真臣, 鳥取章二, 気泡駆動型循環式ヒートパイプ (BACH) のトップヒート化と熱輸送特性, 日本機械学会 2011 年次大会, G060023 (2011) 1-5.
- [14] 一法師茂俊, 井村英昭, 田原慎太郎, 武藤彰男, 元松一騎, “トップヒート型ループ熱サイホンの開発”, 第38回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D323 (2001) 745-746.
- [15] 三菱電機広報資料, 冷却性能が 10kW のポンプレス水冷システムを開発, 開発 No.0801 (2008),1-3
- [16] 大串哲朗, ブタンを作動流体とした自励振動ヒートパイプの熱伝達性能, 日本機械学会 2010 年度年次大会, J0601-1-2 (2010) 241-242
- [17] 大串哲朗, トップヒート条件での自励振動ヒートパイプの熱伝達特性, 日本機械学会 2012 年度年次大会, J061021 (2012) 1-5.
- [18] 福田俊大, 長崎孝夫, 伊藤優, 不等断面自励振動ヒートパイプの熱輸送特性, 第45回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2008) 1-2.
- [19] 奥山邦人, 上堂菌聖, 家島純, 加藤俊介, 森昌司, 単一の直管からなる自励振動ヒートパイプに関する研究 (振動の挙動と熱輸送性能), 日本機械学会論文集 B 編, **78-788** (2012) 881-893
- [20] Chi, S.W., 著, 大島耕一, 松下正, 村上正秀 共訳, ヒートパイプの理論と応用, ジャテック出版 (1978) 131-167
- [21] 福吉芙由子, 長野方星, 小川博之, 永井大樹, 小型ループヒートパイプのリザーバ制御による動作特性の向上, 航空宇宙技術, Vol.9 (2010) 49-55
- [22] 岩田直子, 小川博之, 宮崎芳郎, 温度制御可能な自励振動ヒートパイプの実験的研究, 日本伝熱学会論文集, **18-4** (2010) 127-132

ロハスの家とコミュニティ
 -21世紀の持続可能社会形成のために-
 House and Community of LOHAS
 -for forming sustainable society in 21st century-

加藤 康司 (日本大学)
 Koji KATO (Nihon University)
 e-mail: koji@mech.ce.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

産業革命以降 260 年間、資本主義のルールのもとで先進工業国の経済的発展を可能にした科学と技術は、地球の資源と汚染許容力を無限であるかのように扱ってきた。

しかしそれらは有限であり、現在の大量生産大量消費大規模長期汚染の経済と生活の在り方は 21 世紀半ばまでに不可能になる。

1750 年以降栄えた科学技術万能信仰の現在文明は明らかに終焉を目前にしており、人類は必然的に次の文明を創造すべき歴史の曲がり角に来つつある。

このような背景の中で資源輸入加工輸出立国を策として戦後の経済成長を遂げた日本は、これからの時代に必要となる新しい産業と社会を構築し、世界を先導することが期待される。

以下にこれらの方を考究し、求められる産業の一形態を試行し論じる。

2. 21 世紀日本の三要諦

図 1[1, 2]が示すように、鉱物とエネルギー資源の可採年数は多くの物について、これから 100 年以内である。長い物でも石炭が 100 年、アルミニウムが 150 年である。これらの年数は 2009 年度のものであり、年々短くなる傾向にある。

図 2[3]が示すように、1972 年当時の資源の採掘と消費速度を前提にした地球環境の汚染と資源の枯渇による食料と工業製品の生産量の急減は、2020~2030 年に顕著になると予測されている。現在の BRICs (ブラジル、ロシア、インド、中国) 等の猛烈な資源消費は計算に含まれていない。2011 年現在は図 2 の予測よりさらに悪い結果を覚悟しなければならない。資源輸入加工輸出立国の策はどの国にとっても根本的に不可能になる。

一方で日本の人口は図 3[4]に示すように 2004 年にピークを越え、2050 年には 9500 万人へ、2100

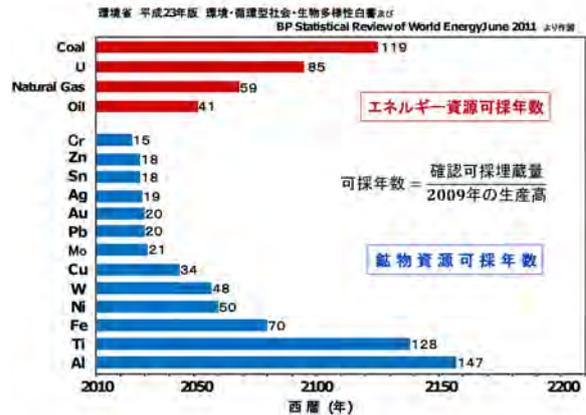


図 1 資源可採埋蔵量の可採年数の予測 (環境省の平成 23 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書[1]及び BP Statistical Review of World Energy June 2011[2]もとに作成)

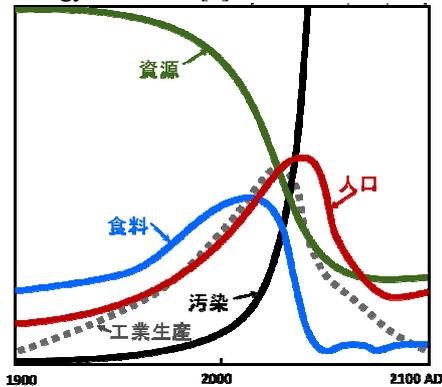


図 2 成長の限界 (Meadows らの 1972 年の予測[3])

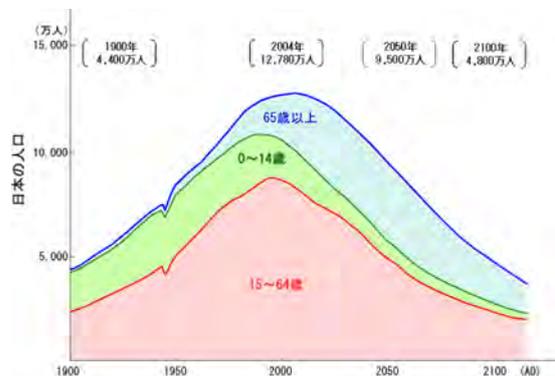


図 3 日本の人口 (国立社会保障・人口問題研究所資料[4]もとに作図)

年には 4800 万人へ減少する。その内訳は 65 歳以上の高齢者が 40% を超え 0~14 歳の子供が 10% 以下である。大都市に集中し戦後の経済復興を可能にした人口パワーはもはや存在しない。子供達のために親が働いた社会から、親達のために子が働く社会へ変わることになる。

今 20 歳の若者は 30 歳から退職までの間に図 2 の破局のほぼ全過程を家族とともに経験することになる。今 0 歳の子どもたちが 30 歳で家族を持つときには、鉱物とエネルギーの資源の多くが枯渇し汚染され尽くした地球環境の中で、生活の糧を入手する仕事が必要になる。

このような過程を経て人口がピーク時の 1/3 にまで減少し、エネルギーと物の消費が 1/3 ですむ 100 年後の日本は、現在の資源輸入加工輸出とはまったく異なった新しい産業と経済の構造を確立し、資源と人口パワーに依らない幸せな社会を永く構築することが望まれる。それが世界への手本となることが期待される。

そのために今の 10 代、20 代の若者を導き励ますのは現在 50 代、60 代にある世の指導者たちの役割である。その際、古くなりつつあるスタイルの資本主義のもとで今日明日の成果競争をしている親たちのレースに若者を誘い込むことは厳然として避けなければならない。限界が見込まれる産業を子に押し付けるのは酷なことである。アフターケアが膨らみ負の遺産が増すとわかっている産業を子に残すのは無責任である。若者には新しい時代に合う新しい産業を興してもらい、それに支えられた新しい社会を構築してもらわなければならない。そこに今の親の仕事の利害を入れてはならない。70 代、80 代にある人生の達人は身を捨てて若者の背を押すことが望まれる。

3. 21 世紀の新文明：第 2 のルネサンス

現在の日本の 10~30 代の若者には夢が無いとよく言われる。飽食・大量消費・使い捨て・情報過多の中で偏差値至上主義の教育を受ければ当然の結果である。質の悪い食・物・情報があふれているとき、それらに夢を持って期待する方が無理である。物づくり立国とは、物が無い時代に物に夢を抱く貧しい若者たちが多数いて初めて成り立つことである。今の 60 代、70 代が経験した古い価値観である。

飽食・大量消費・使い捨てに加えてマネーゲー

ムを体験した米国民の約 1/3 の心ある人々が大切にする生活の価値観は、2000 年時点ですでに「健康で持続可能な生活スタイル (Lifestyles Of Health And Sustainability; LOHAS)」に移っている。P. Ray と S. Anderson が米国民の意識について 13 年間の調査結果をまとめた 2000 年の著書[5]にそのことは詳述されている。オバマ大統領の Green New Deal はその土壌の上に建てられている。

Catch-up America の旗の下に、敗戦後の親たちが必死になって実現した飽食と大量消費に続く環境破壊とバブル崩壊を超えて、次世代の若者たちが幸せな新しい社会を形成しようとする場合、LOHAS の生き方が選択肢の一つになることは必然の流れであろう。その際、オバマ流の Green New Deal の盲目的なコピーが日本で成功することは無理であろう。

過去に日本は漢字と墨・毛筆・紙を中国から輸入しながらも、ひらがな・和文・和紙を開発し、インドからの仏教をもとに、日本流の諸宗派を形成し、神道と共存させた。LOHAS の生き方のための技と思想も日本で独自の多様な発展を遂げるであろう。

そのために「再生されるべき日本の文明」は、資源の無い地震列島上に 2000 年かけて形成された「自然共生の農耕と木の文明」である。それは質実剛健ともったいないの精神により形成されたものである。

LOHAS の生き方を可能にする「技と物」及び「思想と社会」の構築が江戸時代までに形成された「日本文明の復興」であることを日本の次世代の若者たちが強く自覚し、米国が出来ない社会と国を形成するとき、日本は資本主義金融工業社会の次の社会を創成する先進国として、資源枯渇時代の人類と地球のために歴史的役割を務めることになるであろう。それが優れた省エネ技術を有する日本に可能なことであり、「21 世紀の新文明」を興すことになるであろう。

そのような革新的運動と活動は次世紀以降の歴史家により「日本から世界へ広がった第 2 のルネサンス」と語られるであろう。今の日本の若者たちの歴史的役割はそこに在る。

このような歴史的認識のもとに、資源枯渇、環境破壊、空気・水・土壌汚染の問題に対峙する産業の一つとして、「ロハスの家」を考える。

4. ロハスの家：エネルギー自立と自然共生の家

家は専業主婦や在宅業を営む人にとっては人生のほとんどの時間を過ごす場である。子ども・若者にとっては健康と感性を育み、家族との思い出をつくる場である。100歳が寿命となりつつある老人にとっては引退後の30～40年の長い期間を健康第一として過ごす安住の場である。

そのような家がLOHASを指向する人々にとって満足できる住居であるためには、「エネルギー自立と自然共生」が必須のことと考えられる。

このような考えのもとに、エネルギー自立と自然共生の条件を満たす家を『ロハスの家』と呼び、開発の目標とする。そのような家が日本において満たすべき条件として、以下の三つを考える。

- (1) 構築面積内で得られる再生可能エネルギーのみで酷暑極寒時の冷暖房を含めた生活に必要なエネルギーを可能とする。
- (2) 構築面積内雨水を生活用水とし、使用水の浄化再使用によるキッチン・バス・トイレを可能とする。
- (3) 建材をリサイクル及び再生可能材のみとする。

これらの条件を満たすロハスの家を実現するために、機能を分けて作製した実験設備であるロハスの家1号、2号、3号及び地中熱センターについて以下に説明する。それらは日本大学工学部キャンパスに設置されており、機械工学科を中心とする全6学科の共同プロジェクトとして2008年以降研究が続けられているものである。

5. ロハスの家1号：自立共生冷暖房の木の家

図4に愛称「ロハスの家1号」の外観を示す。2009年1月にキャンパス内の敷地に建てられ、太陽光発電パネルが南を向いている。床面積が10m²あり、0.21kW/枚の太陽光発電パネル10枚と1.2kW/枚の太陽熱採集パネル2枚が屋根に取り付けてある。直径200mm、長さ4～6mの免震鋼管杭6本が基礎下地中に埋設してある。杭の中には採熱管が内蔵されている。240W/台の風車2台が屋根に取り付けてある。これら3種類のエネルギー機器から得られる電気と熱を用いて床暖房とエアコンによる冷房が行われる。仲介機器としてヒートポンプが用いられる。電気を蓄えるバッテリー

は25kWhの容量を持つ。エネルギーの出入りを制御するための制御パネルとコンピューターを備えている。家からの熱の出入りを最小限に保つために高断熱高气密の構造とし、壁には古紙を再利用した断熱材を用いている。建材には地元産檜を用いている。このような構造と設備を有する1号について、その温熱特性とエネルギー収支を四季の種々の条件のもとで測定し続けている。これまでのところ、郡山市の真夏日に約28℃の室内温度、真冬日に約20℃の平均室内温度を得ている。今後は、冷暖房の効率をさらに向上させるために、エネルギー採集機器と蓄エネ機器の性能向上と制御系の改良の研究を続ける。



図4 ロハスの家1号 自立共生冷暖房の木の家

6. ロハスの家2号：自立共生健康のガラスの家

図5に愛称「ロハスの家2号」の外観を示す。2010年3月にキャンパス内の1号の隣に建てられており、床面積が38m²である。総ガラス張りで鉄骨構造。1階はLow Eペアガラス壁であり、2階のように見える屋上はシングルガラス壁である。ガラスの壁は0.9m×2.8mのユニットを組み込んだ構造になっており、種々の壁材のユニットと交換できる。1階の床は蓄熱のために厚さ200mmのコンクリートにしてあり、中には床暖房のための配管を通してある。採熱用のカーペットが敷いてあり、蓄熱用のトロンブウォールが1階ガラス壁近くに備えてある。屋上には蓄断熱のために8tの土を入れた緑化層があり花が植えられている。1階4面のガラス壁には計8個のLow Eペアガラスの窓が付けられている。屋上4面のガラス壁には計8個の窓と庇に出るための1個のドアが付いている。庇は夏に太陽光を遮り、冬に太陽光を通す構造になっている。屋根に降った雨水を屋上のタ

ンクに貯え緑化層への散水などに用いる。玄関の外ドアは人の体重で開閉する無電自動ドアである。家全体がレールの上に乗っており360度の回転と東西南北方向への移動を1人の力で行うことができる。照明にはLEDを用いている。このような構造と設備を有する2号について、その温熱特性と快適性を四季の種々の条件のもとで測定し続けている。これまでのところ、エアコンなしで真夏日の日中に外気温より約3℃低く、真冬日の夜に外気温より約5℃高い室内温度を実現している。今後は高齢者や幼児の健康増進に良い採光と換気、及び快適な温熱環境を実現するために、採光と蓄熱、断熱と遮熱及び窓換気と散水のための機器を改良開発し、それらを巧みに組み合わせ制御する技術の研究を続ける。



図5 ロハスの家2号 自立共生健康のガラスの家

7. ロハスの家3号：

自立共生水自給浄化の木とガラスの家

図6に生活用水浄化再使用の実験棟として2011年11月に完成した、愛称「ロハスの家3号」の外観を示す。床面積が約70m²あり、建材は木とガラスを主としている。実用のキッチン、バス（洗面台・洗濯機を含む）、トイレを備え、使用水の浄化と再使用のための装置及び生ゴミ処理のためのディスポーザーが備えられている。基礎下には地中熱採集パイプが埋設されている。

約100m²の屋根に受けた雨水をタンクに貯える。その水を浄化し、温水をつくり、家中に循環させる。そのためのエネルギー及び照明と換気と制御のエネルギーは屋根に設置した太陽光発電パネルと太陽熱採集パネルから採集され、電力は蓄電池に蓄えられる。

信頼性が高く安価でエネルギー消費の少ない水

浄化システムの開発を第1の目標とし、併せて太陽光と地中熱のみで快適な温熱環境を可能にする技術及び生ゴミ利用技術の開発を目標としている。

これらロハスの家1, 2, 3号の研究成果を集約し、ロハスの家の設計基準を確立し家の要素部品を高性能化することが長期的な目標である。



図6 ロハスの家3号
自立共生水自給浄化の木とガラスの家

8. 地中熱センター：

浅部地中熱採集供給と温冷熱地中備蓄

地表が日中の太陽光より受けたエネルギーは熱として地下約100mまでの地中に蓄えられ、夜は宇宙へ放出され、年間を通して一定のバランスが保たれている。そのバランスを全体として保ちつつ、開放されている大面積の地表から出入りする熱を一時的に家の冷暖房と給湯に用いることは、ロハスの家のコミュニティーが自然と共生するための再生可能エネルギー活用法として重要である。このような位置づけのもとに、図7に示す地中熱



図7 ロハスエリアの地中熱センター

センターが2011年11月にロハスの家1, 2, 3号のエリアに建設された。採熱用の鋼管杭と採熱管及び地中熱用ヒートポンプのシステムとしての熱特性を実測中である。浅部地中熱採集供給及び温冷熱地中備蓄のための機器の性能向上とシステムの設計基準の確立が目標である。

9. おわりに

「健康で持続可能な社会を形成するための『エネルギー自立と自然共生の家』づくり」は船、鉄道、自動車、自動生産ライン、無人工場などに挑戦してきた地震の国・日本のエンジニアにとって、21世紀の魅力ある挑戦課題になると考えられる。進化した家とそのコミュニティーが求める安全で高度な社会インフラは、港、鉄道網、高速道路の規模を越えるであろう。

「21世紀の家とコミュニティー」は伝統技術とハイテクとアートを総合した各地域に固有で高度なシステムとなり、新たな輸出産業と観光産業を地域に育てることになると期待される。このような家とコミュニティーを産業の核とする社会の形成に3世代が継続して挑戦するとき、日本は明治維新と戦後復興に続く第3の奇跡として「新しい文明を有する幸福な国の形成」を今の1/3の人口と1/3以下のエネルギー消費と物の消費で達成することになるであろう。

資源枯渇と地球環境破壊及びそれをもたらした資本主義金融工業社会の限界状態の中で、このような健康で持続可能な社会の形成に挑戦することは、人類が持続可能で自然共生の生き方をしていた時代の文明を再生させ進化させようとするものである。

人類にとってその歴史的意味は「文明復興」であり、第2のルネサンスと呼ぶべきものである。

次世代を担う日本の若者達がそれを自覚し、21世紀の社会構築のために貢献度の高い仕事に挑戦することが心より望まれる。

参考文献

- [1] Ministry of the Environment. “Annual Report on the Environment, the Sound Material-Cycle Society and the Biodiversity in Japan 2011”. Ministry of Environment Government of Japan. (online), <<http://www.env.go.jp/en/wpaper/2011/index.html>>, (accessed 2012-02-22).
- [2] BP Statistical Review. “BP Statistical Review of World Energy June 2011”. BP Global homepage. (online), <<http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481>>, (accessed 2012-02-22).
- [3] Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W., Limits to Growth, Universe Books, (1972).
- [4] National Institute of Population and Social Security Research “Population Projection for Japan (Projection in December 2006)”, National Institute of Population and Social Security Research, (online), <<http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/suikai07/index.asp>>, (accessed 2012-03-05).
- [5] Ray, P.H., Anderson, S.R., The Cultural Creatives, Harmony Books, USA, (2000).

熱物質輸送国際センター(ICHMT)の2011年以降の活動

*International Centre for Heat and Mass Transfer (ICHMT)**-Its Activities since 2011-*

吉田 英生 (京都大学)

*Hideo YOSHIDA (Kyoto University)**e-mail: sakura@hideoyoshida.com*

1. はじめに

熱物質輸送国際センター(ICHMT)の理事を筆者は2010年8月から拝命しておりますので、近況をご報告させていただきます。同センターにつきましては本学会誌に何度か報告記事が寄せられており[1-3]、とりわけ直近2011年1月の笠木伸英ICHMT副会長による記事[3]は、極めて包括的に整理された内容の報告ですので、本稿ではそれ以降の進展についてのみご報告します。なお、センターのウェブページ (<http://www.ichmt.org/>) には1968年9月の設立時の議事録をはじめとする充実した内容が掲載されておりますので、ぜひご覧下さい。

2. 最近3回の理事会と吉報2件

これまで年に2回開催されてきた理事会は、センターが主催・協賛する国際集会の機会を利用してきました。2011年以降では、

- ・2011年7月 1日, Antalya, Turkey
- ・2011年9月11日, Minsk, Belarus
- ・2012年7月 4日, Bath, England

の計3回です。今年は都合により7月4日の1回のみですが、国際伝熱会議アセンブリー(The Assembly for International Heat Transfer Conferences, AIHTC)が隔年で開催されることと同期して、同日午前AIHTC会議、午後ICHMT理事会というダブルヘッダーになりました。実はこのような会議開催の形態(両組織の理事の重複も多い)こそ、国際的な伝熱分野の問題を明示しているのですが、そのことは後まわしにして、まず吉報2件をお知らせします。

一つ目は、センター運営・活動に多大な貢献のあった個人に対する2012年のICHMT Fellowship Awardが笠木副会長に贈られることが決定しました。

二つ目は、センターが主催・協賛する国際集会で

発表された論文を対象として、最優秀論文に対するHartnett-Irvine Awardが以下の日本の研究者グループの論文に決定しました。

“A Molecular Dynamics Study on the Effects of Nanoparticle Layers on a Liquid-Solid Interfacial Thermal Resistance” by Takuya Matsumoto (松本拓也), Satoshi Miyanaga (宮永賢史) and Masahiko Shibahara (芝原正彦), The Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow 2011, Kyoto, Japan.

なお、本会が11月13-15日に長崎で主催するThe Third International Forum on Heat Transfer (IFHT 2012)もセンター協賛の国際会議ですので、発表論文は同賞選考の対象となります。

3. ICHMT関連国際集會

2011年には表1に示すような国内での二つの交際会議がセンターの協賛のもとで開催されました。先にご紹介したHartnett-Irvine Awardは、後者の京都での会議で発表されたものです。このようにわが国で開催される国際会議をセンターの協賛とすることにより、会議そのものに国際伝熱コミュニティのバックアップが得られますし、また逆にセンターに対してもいろいろな面での貢献ができ、わが国の国際的存在感を増せる可能性があります。今後、国際会議を企画される場合は積極的にセンターへの協賛を依頼されることをおすすめします。わが国からの提案であれば先約の国際会議との日程的オーバーラップがないかぎり、概ねサポートが得られると思います。

表1 ICHMTの協賛した日本での行事(2011年以降)

4th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale (HTFFM-IV)	Sep.4-9 2011	福岡
Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT-11)	Sep. 23-25 2011	京都

4. ICHMTとAIHTC

まず笠木副会長の前報告から引用させていただきます。

「センターと国際伝熱会議アセンブリーとの関係を見直すことが、もう一つの課題です。世界の伝熱研究者コミュニティを代表する組織が独立に二つあることは、前述の背景から考えてもマイナスが大きく、第14回国際伝熱会議の折りに、今後統一に向けて対話を始めるべきであるとの認識が共有されました。現在、アドホック委員会が設置され（メンバーは、A. Bar-Cohen, J.-M. Delhaye, K. Hanjalic, J. Padetと筆者）、具体策を検討中ですので、近い将来に何か動きが出てくるのが期待されます。（中略）3年後京都の第15回国際伝熱会議は、少なくとも熱物質輸送国際センターが主催団体として名を連ねるべきではないかと考えております。」

上記の指摘どおり、BathでのAIHTC・ICHMTのダブルヘッダー会議では、このことが最も重要な議題でした。そして、笠木副会長がAIHTC副会長も兼務されて両者の融合に向け周到かつ粘り強い調停努力を続けてこられたことが実を結び、両者は今後できる限りの協調関係を見いだしてゆくことが両会議で満場一致で承認されました。

京都での第15回国際伝熱会議は、すでにICHMTの協賛を初めて得ることになっております。また、上記会議に先立ち、ICHMTとBegell House社の間で合意に至っていたICHMT Digital Libraryに加え、AIHTCと同社の間でも同様にIHTC Libraryとして、過去の全てのプロシーディングスを含め、今後のプロシーディングスをオンライン・アーカイブ化することが合意され、両組織の密接な連携が現実的になっていた状況もありました。

上記会議では、AIHTCとICHMTの協力連携に関して、より具体的なスキームを検討するための特別委員会（F. Arinc, A. Bar-Cohen, G. de Vahl Davis, K. Hanjalic, N. Kasagi, T. Simon）が設置されました。目標としては、伝熱・熱科学の国際連合組織を両組織を核として形成し、The International Council for Science (ICSU) のメンバーシップを獲得することです。なお、当面の組織的な融合形式としては、AIHTCの現在の自治権を尊重しつつ、AIHTCがICHMTの傘下に入るということが提案されています。

以上、この1年半ほどのセンターの動きをご報告させていただきました。ご提言やご意見がありましたら、筆者を含め、上記センター関係者にお気軽にお伝え下さい。どうぞ、よろしく願い申し上げます。

参考文献

- [1] 森康夫, 国際熱・物質伝達センター (International Centre for Heat and Mass Transfer) について**24-95**, (1985) 23.
- [2] 鈴木健二郎, International Centre for Heat and Mass Transfer (ICHMT) –その最近の活動報告と会員各位へのお願い–, 伝熱, **43-182** (2004) 3.
- [3] 笠木伸英, 熱物質輸送国際センター (ICHMT) の最近の活動と今後の課題, 伝熱, **50-210** (2011) 48.



2012年7月4日Bathでの理事会にて
左からA. van Steenhoven, P. Stephan, K. Hanjalic (副会長), R.M. Cotta, G. de Vahl Davis (会長)



Y. Jaluria, N. Kasagi (副会長), Y. Bayazitoglu



G.F. Hewitt, R.J. Goldstein, F. Arinc (事務局長), T. W. Simon
なお、写真には写っていませんが、L. Dombrovsky (A.I. Leontiev代理), J. Padet, H. Yoshida, X. Zhangも出席しました。(以上敬称略)

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2012年					
11月 13(火) ～ 15(木)	第3回 国際伝熱フォーラム 3rd International Forum on Heat Transfer	事前参加 申込締切 2012.8.31	2012.7.31	〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学 研究系 IFHT2012 実行委員会事務局 宮崎康次 Tel/Fax:093-884-3168 E-mail:miyazaki@mech.kyutech.ac.jp	Vol.50, No.213 2011.10

本会共催、協賛、後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2012年					
10月 3(水) ～5(金)	第33回日本熱物性シンポジウム (開催場所:大阪市立大学杉本キャンパス)	2012.9.7	2012.8.10	〒599-8531 大阪府堺市千中区学園町 1-1 大阪府立大学大学院工学研究科機械工学分野 環境工学研究室 木下進一 Tel/ Fax: 072-254-9231 E-mail: jstp2012@me.osakafu-u.ac.jp URL: http://www.jstp2012.me.osakafu-u.ac.jp	
10月 4(木) ～5(金)	可視化情報全国講演会(姫路 2012) (開催場所: 姫路商工会議所)	2012.6.15	2012.7.30	実行委員幹事 伊藤和宏 兵庫県立大学 大学院工学研究科 〒671-2280 兵庫県姫路市書写 2167 Tel: 079-266-1661(代表) Fax: 079-267-4830(代表) E-mail: kashika@eng.u-hyogo.ac.jp 実行委員幹事 木村文義 兵庫県立大学 大学院工学研究科 E-mail: vsj@eng.u-hyogo.ac.jp	
10月 17(水) ～18(木)	第40回日本ガスタービン学会定期講演会 (開催場所: 釧路市観光国際交流センター)	2012.6.18	2012.8.27	社団法人 日本ガスタービン学会事務局 Tel: 03-3365-0095 Fax: 03-3365-0387 E-mail:gtsj-office@gtsj.org	
10月 24(水) ～ 26(金)	日本地熱学会平成24年度学術講演会 (開催場所: 湯沢文化会館)	2012.7.28	2012.8.26	日本地熱学会 行事委員 小山弘 〒210-9530 神奈川県川崎市川崎区田辺新田 1-1 富士電機株式会社 火力・地熱プラント総合技術部 Tel: 044-329-2123 E-mail: oyama-hiroshi@fujielectric.co.jp URL: http://grsj.gr.jp	
11月 17(土)	日本機械学会No.12-45 講演会「第15回 スターリングサイクルシンポジウム」 (開催場所: 明星大学日野キャンパス)	2012.6.29	2012.9.28	実行委員長 濱口和洋(明星大学) 幹事 齊藤剛(明星大学) Tel: 042-591-9614 Fax: 042-591-9594 E-mail: tsaito@me.meisei-u.ac.jp 上田祐樹(農工大) Tel/Fax: 042-388-7853 E-mail: uedayuki@cc.tuat.ac.jp	
11月 17(土) ～18(日)	熱工学コンファレンス 2012 (開催場所: 熊本大学黒髪南地区)	2012.7.13	2012.9.28	熱工学コンファレンス 2012 実行委員会事務局 〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2 丁目 39-1 熊本大学 工学部機械システム工学科内 幹事 小系康志 Tel/Fax: 096-342-3760 E-mail: tedconf12@jsme.or.jp	
12月 1(土) ～2(日)	第36回人間-生活環境系シンポジウム (開催場所: 大同大学滝春校舎 B 棟 4 F)	2012.8.31	2012.10.15	人間-生活環境系学会事務局 〒813-8529 福岡市東区香住ヶ丘 1-1-1 福岡女子大国際文理学部大中研究室内 E-mail: hes.fwu@gmail.com	
12月 5(水) ～7(金)	第50回回燃焼シンポジウム (開催場所: 愛知県産業労働センター ウイंक あいち)	2012.7.20	2012.9.14	第50回回燃焼シンポジウム事務局 〒458-0015 愛知県名古屋市中種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻内 Tel:052-789-2710 Fax:052-789-5123 E-mail:sympo50@combustionsociety.jp URL: http://www.combustionsociety.jp/sympo50/	
12月 17(月) ～18(火)	第21回微粒化シンポジウム (開催場所: 東京工業大学大岡山キャン パス西 9 号館)	2012.8.31	2012.10.26	日本液体微粒化学会 事務局 (株)学術出版 印刷 事務局長 近藤 健 〒554-0022 大阪市此花区春日出中 2-14-9 Tel: 06-6466-1588 Fax: 06-6463-2522 E-mail: info@ilass-japan.gr.jp	
12月 18(火) ～ 20(木)	第26回数値流体力学シンポジウム (開催場所: 国立オリンピック記念青少 年総合センター)	2012.9.24	2012.10.29	一般社団法人 日本流体力学会 〒152-0011 東京都目黒区原町 1-16-5 Tel: 03-3714-0427 Fax: 03-3714-0434 URL: http://www.nagare.or.jp	

行事カレンダー

12月	22(土)	2012年度 計算力学技術者(CAE技術者) 資格認定試験 (開催場所: 東京工業大学大岡山キャンパス他)	2012.8.24		一般社団法人 日本機械学会事業企画 G 関根 〒160-0016 東京都新宿区信濃町 35 番地 信濃町煉瓦館 5 階 Tel: 03-5360-3506 Fax: 03-5360-3509 E-mail: sekine@jsme.or.jp	
-----	-------	--	-----------	--	---	--

平成 24 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ

日本伝熱学会では本年度も各賞の表彰を実施いたします。つきましては、下記の要領に従って本年度の学術賞、技術賞、および奨励賞の候補者推薦募集を行いますので、自薦、他薦を問わず、多数ご応募下さい。

1. 対象となる業績

- (1) 学術賞の対象は、原則として、最近3年間の **Thermal Science and Engineering** 誌に掲載された、あるいは、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、国内外で審査のある学術論文集に掲載された伝熱に関する優秀な研究を主体的に行った研究者とその共同研究者とします。なお、受賞対象研究課題名は、必ずしも論文題目と厳密に一致する必要はありません。また、**Thermal Science and Engineering** 誌に掲載された論文は、日本伝熱シンポジウムにおける発表の有無にかかわらず、授賞の対象となります。
- (2) 技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術を開発した者とします。
- (3) 奨励賞の対象は、原則として、最近3回の日本伝熱シンポジウムのいずれかにおいて優秀な論文を発表した若手研究者（発表時に30歳程度以下の者）とします。
- (4) 学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本会会員に限ります。
- (5) 贈賞数は、学術賞2件程度、技術賞1件程度、奨励賞4件程度とします。

2. 選考方法

- (1) 各賞の選考は、「表彰選考委員会」が「日本伝熱学会賞審査・選考方法内規」によって行います。
- (2) 表彰選考委員会は、公募の他に、各賞の候補を推薦することが出来るものとします。

3. 提出書類

- (1) 申請書・推薦書 1通
 - ・ 申請書・推薦書の書式は、学会ホームページからダウンロードしてご使用下さい。
 - ・ 学術賞、技術賞、奨励賞それぞれに申請書・推薦書の書式が異なりますので、ご注意ください。
- (2) 論文抜刷または技術内容参考資料 6部
- (3) 日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6部 (学術賞、奨励賞のみ)

4. 提出期限

平成 24 年 12 月 21 日 (金)

5. 提出先および問い合わせ先：

〒939-0398 富山県射水郡小杉町黒河 5180

富山県立大学工学部 機械システム工学科 石塚 勝 宛

E-mail : ishizuka@pu-toyama.ac.jp Tel: 0766-56-7500 内線 387, Fax: 0766-56-6131

第 50 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第 50 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 円山 重直

幹事 小宮 敦樹

開催日： 平成 25 年 5 月 29 日（水）～5 月 31 日（金）

会場： ウェスティンホテル仙台 および 仙台トラストシティ (<http://www.westin-sendai.com/index.html>)

所在地 〒980-0811 宮城県仙台市青葉区一番町 1-9-1 電話 022-722-1234（代表）

アクセス JR 仙台駅西口より徒歩約 9 分

仙台空港より JR 仙台駅まで「仙台空港アクセス鉄道」で最速 17 分

講演申込締切： 平成 25 年 1 月 18 日（金）

講演論文原稿提出締切： 平成 25 年 3 月 15 日（金）

事前参加申込締切： 平成 25 年 4 月 12 日（金）

ホームページ URL：<http://web.tohoku.ac.jp/nhts2013/index.html>

【シンポジウムの形式】

- ・ 講演発表形式として
 - a) 通常の一般セッション（口頭発表）
 - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
 - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- ・ 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分（発表 10 分、個別討論 5 分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従ってください。
- ・ 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 50 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。

【研究発表申し込み方法】

- ・ 原則としてウェブによる申込みに限らせていただきます。本シンポジウムで準備するウェブサイトへ必要なデータを入力してください。ウェブによる申込みができない場合には、実行委員会事務局にお問い合わせください。
- ・ 申込みの際に、一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択してください。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 50 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。
- ・ 発表申込み時に、論文のアブストラクト（日本語で 200～250 字）を入力してください。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- ・ 講演発表申込みは、講演者 1 名につき 1 題目とさせていただきます。
- ・ 講演の採否およびセッションへの振分けは、実行委員会にご一任ください。

【講演論文集】

- ・ 講演論文集として、オフセット印刷版（白黒）と電子版（CD-ROM 版）の作製を予定しています。講演論文集（電子版）はウェブ上で公開する予定です。会員にはパスワードを配布して、電子版をウェブ上で閲覧できるようにします。なお、会員が当該講演論文をのちに原著論文として学術論文誌等に投稿されることを考慮し、本講演論文集に限られた範囲に配布されたものであることを明確にするため、パスワードは近い将来には公開しません。
- ・ 講演論文集の印刷版と電子版を参加者に配布する予定です。なお、電子版は参加できなかった会員にも希望があれば配布しますので、シンポジウム終了後に実行委員会事務局にお申込みください。

- ・講演論文の長さは1題目あたりA4サイズで2ページを予定しています。講演論文の作成様式は、前回と同様の2段組×片側26字×60行とする予定です。
- ・電子版には、印刷版と同じものか、または8ページ以内のフルペーパーを掲載することができます。電子版の様式は印刷版と同じですが、カラーの使用が可能です。ファイル容量は最大で2MBまでとし、動画は含まないものとします。
- ・電子版に掲載された講演論文は、本学会の論文誌“Thermal Science and Engineering”にそのまま投稿することができます。詳細は会誌1月号の「お知らせ」に掲載します。ただし、掲載の可否は通常の査読プロセスを経て決まります。
- ・執筆要綱は、会誌1月号の「お知らせ」および本シンポジウムのホームページに掲載します。
- ・講演論文原稿は、講演論文を電子化するために、原則としてPDFファイルで提出していただきます。
- ・原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文は、講演論文集（印刷版・電子版）およびウェブに掲載されません。十分にご注意ください。

【講演論文の公開日】

- ・会員を対象に、シンポジウム開催日の1週間程前からウェブ上で公開します。したがって、特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますので、ご注意ください。

【参加費等】

- ・シンポジウム参加費
 - 一般（事前申込：12,000円、会場申込：14,000円）
 - 学生（事前申込：5,000円、会場申込：6,000円）
- ・講演論文集
 - 日本伝熱学会会員：無料（電子版はウェブ上で事前に公開します。参加者には当日印刷版・電子版を配布します。参加されない会員のうち希望者には電子版を事後にお送りします。）
 - 非会員：8,000円（印刷版） 会場受付にて日本伝熱学会に入会を申し込まれる場合は無料となります。

【懇親会】

- ・開催日：平成25年5月30日（木）
- ・会場：ウェスティンホテル仙台
- ・参加費：一般（事前申込：8,000円、会場申込：10,000円 同伴配偶者無料）
学生（事前申込：4,000円、会場申込：5,000円）

【交通と宿泊】

- ・交通と宿泊につきましては、本シンポジウムのホームページをご参照ください。

【ご注意】

- ・講演申込みの取消および講演論文原稿の差替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのご遠慮ください。
- ・論文題目と著者名が、講演申込み時と論文提出時で相違しないように特にご注意ください。
- ・口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクタのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参ください。
- ・参加費、懇親会費等は参加取消しの場合でも返金いたしません。
- ・本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認ください。
- ・その他、ご不明な点がありましたら、実行委員会事務局までe-mailまたはFAXでお問い合わせください。

【お問い合わせ先】

第50回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局
東北大学 流体科学研究所内
e-mail：nhts50@pixy.ifs.tohoku.ac.jp
FAX：022-217-5244

優秀プレゼンテーション賞（第50回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会
委員長 齊藤卓志

第50回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生および若手研究者を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開 催 日：平成25年5月29日（水） シンポジウム第1日
- 発 表 形 式：発表者1名あたり3分程度のショートプレゼンテーションと60分程度のポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。詳細については、決定し次第、シンポジウムのホームページに掲載いたします。
- 対 象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成25年3月31日現在で28歳以下の者、または、申込当日に学生である者（ただし、社会人大学院生を除く）。
- 応 募 資 格：発表時（審査時）に、日本伝熱学会の会員（正員・学生員）であること、または入会申込中であること。**なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。**
- 応 募 件 数：指導教員または研究グループ長等あたり、1名（1件）とします。
- 応 募 方 法：第50回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本号掲載の研究発表申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”の項目を選択し、“指導教員または研究グループ長等の氏名”および“研究分野の分類番号”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表 彰：受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰されます。

日本伝熱学会主催 第3回 国際伝熱フォーラム
International Forum on Heat Transfer (IFHT2012)

2004年に京都で第1回フォーラム、2008年に東京で第2回のフォーラムが開催され、150件を超える発表で盛り上がりを見せたIFHTがいよいよ11月に迫ってまいりました。第3回目の長崎では、欧米アジア各国から、およそ200件の発表が予定され、伝熱工学各分野での研究動向を把握できる良い機会と期待されています。伝熱学会創立50周年を記念して設立された抜山記念国際賞(第1回)を受賞されたPeter Stephan教授の受賞講演と授与式が2日目午後に予定されている他、エネルギー分野の最先端を走る7名の研究者によるキーノート講演も予定されています。開催前日の11月12日(月)には会場の長崎ブリックホールでレセプション、14日(水)にガーデンテラス長崎に会場を移し、バンケットを開催します。週末には熊本で熱工学コンファレンスが始まりますので、九州へ足を運んでいただく良い機会となっております。多くの方々に是非フォーラムに参加いただけますよう、お願い申し上げます。

開催日時・場所 2012年11月13日(火)～15日(木)・長崎ブリックホール
(11月12日(月)レセプション・長崎ブリックホール)
(11月14日(水)バンケット・ガーデンテラス長崎)

参加費

当日は混雑が予想されますので、IFHT2012サイト経由でクレジットカード払いをお願い致します
(事前申込み9月15日締切) 一般：50,000円、学生30,000円
(申込み9月16日以降) 一般：60,000円、学生40,000円

抜山賞受賞講演

Peter Stephan Technische Universität Darmstadt, Germany

キーノート講演

Gang Chen Massachusetts Institute of Technology, USA
Takemi Chikahisa Hokkaido University, Japan
Zeng-Yuan Guo Tsinghua University, China
Sung Jin Kim Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea
Kim Choon Ng National University of Singapore, Singapore
Mamoru Tanahashi Tokyo Institute of Technology, Japan
Peng Zhang Shanghai Jiao Tong University, China

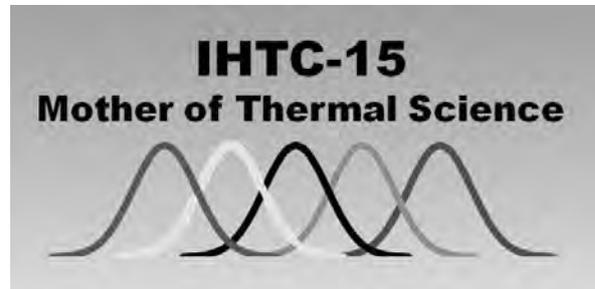
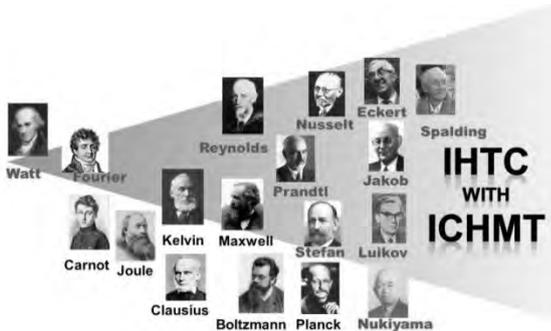
ポスターセッション(7セッション：200件を予定：ショットガン形式の口頭発表+ポスター)

ホームページ <http://www.ifht2012.com>

問い合わせ先 組織委員会委員長 高田 保之
〒819-0395 福岡市西区元岡 744
九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門
Tel: 092-802-3100, FAX: 092-802-3098 E-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp

実行委員会委員長 宮崎 康次
〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1
九州工業大学 大学院工学研究院 機械知能工学研究系
Tel&FAX: 093-884-3168 E-mail: miyazaki@mech.kyutech.ac.jp

第 15 回国際伝熱会議
The 15th International Heat Transfer Conference (IHTC-15)
2014 年 8 月 10~15 日 国立京都国際会館



<http://www.ihtc-15.org/index.html>

主催 日本伝熱学会, 日本学会会議

共催 The Assembly for International Heat Transfer Conferences

協賛 International Centre for Heat and Mass Transfer, 日本機械学会, 化学工学会

趣旨

1974 年の IHTC-5 (東京) 以来, 40 年ぶりの日本開催となる国際伝熱会議が迫ってまいりました. 持続性社会への確かな道筋を確立するために伝熱学・熱科学研究の役割がますます重要になる中で, “Heat Transfer Olympic” のニックネームを有する最大規模の国際会議としてとして, 新時代の研究活動を幅広く牽引するとともに, 社会に向けて確かなメッセージを発信できる国際会議とすべく, 準備が進行中です.

IHTC-15 では, 個々のセッションをこれまでのポスター発表ではなく, 吟味された議論を可能とする口頭発表形式とします. また, Begell House 社の協力により国際誌と同等の評価に耐えるオンライン・プラットフォームが導入されますので, 査読後採択された全ての発表論文は, 過去のプロシーディングスと共に電子アーカイブ化される予定です. さらに, 個々の研究発表の成果だけでなく, 新世紀の社会の期待に伝熱・熱科学コミュニティがどのように応えていくべきかといった課題についても全体討議を企画します. 5 日間にわたる本国際会議の全てのプログラムが国内外の多くの参加者々々にとって意義深いものとなるよう, またコミュニティの社会的役割を解り易く発信できるよう鋭意検討中です.

日本伝熱学会諸賢の積極的なご参加, ご協力, ご助言をお願いいたします.

各種表彰

第 2 回目となる抜山賞をはじめとして以下の国際賞の贈賞を行います. 各賞への本会会員の推薦も積極的にお願いします.

- ・ The William Begell Medal
- ・ The Max Jakob Memorial Award
- ・ The Luikov Medal
- ・ The Nukiyama Memorial Award

委員会

組織委員会: 委員長 笠木伸英, 副委員長 吉田英生・円山重直
実行委員会: 委員長 吉田英生, 副委員長 功刀資彰, 幹事 岩井裕
国際論文委員会: 委員長 円山重直, 副委員長 高田保之, 幹事 小宮敦樹
日本地区論文委員会: 委員長 高田保之, 幹事 河野正道

(ご意見・ご要望は info@ihtc-15.org をお願いいたします.)

今後の予定 (日程は変更の可能性があります. 詳細・最新情報は上記ウェブページに掲載します.)

アーカイブ化を踏まえ, 厳正な 2 段審査を経て論文の採択を決定します.

- ・ 2013 年 9 月: アブストラクト提出締め切り
- ・ 2013 年 10 月: アブストラクト採否通知
- ・ 2013 年 12 月: 論文原稿提出締め切り
- ・ 2014 年 3 月: 論文採否通知
- ・ 2014 年 5 月: 最終論文原稿提出締め切り



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



インターネットの普及により情報発信・交換能力の比類ない進展がもたらされました。一方、ハードコピーとしての学会誌には、アーカイブ的な価値のある内容を手にとって熟読できる点や、一連のページを眺めて全貌が容易に理解できる点など、いくら電子媒体が発達してもかなわない長所があるのではないかと思います。ただし、学会誌の印刷・発送には多額の経費も伴いますので、当部会ではこのほど、密度のより高い誌面、すなわちハードコピーとしてぜひとも残すべき内容を厳選し、インターネット（HP：ホームページ、ML：メーリングリスト）で扱う情報との棲み分けをした編集方針を検討いたしました。

この結果、これまで会告ページで取り扱ってきた各種行事・広告などの掲載につき、以下のような方針で対応させていただきたく、ご理解とご協力をお願いする次第です。

対 象	対 応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています。)
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を、会誌とHPに掲載、MLでも配信	申込者は、総務部会長・編集出版部会長・広報委員会委員長・総務担当副会長補佐評議員に記事を同時送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による 国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載しリンク形成（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐評議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐評議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関係のある分野に限る）	会誌：掲載せず HP：条件付き掲載（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、公募内容を説明する資料を総務担当副会長補佐評議員に送信してください。審議の結果掲載可となった場合には総務担当副会長補佐評議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載 （バナー広告のみ、有料）	申込者は、編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HPバナー広告担当）に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長又は広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：宗像鉄雄（産業技術総合研究所）：t.munakata@aist.go.jp
- ・編集出版部会長：高松洋（九州大学）：takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：小宮敦樹（東北大学）：komy@pixy.ifs.tohoku.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐評議員：党超鋌（東京大学）：dangcb@k.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局：大澤毅士・倉水裕子：office@htsj.or.jp

【注意】

- ・原稿はWordファイルまたはTextファイルでお願いします。
- ・HPはメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います。
- ・MLでは、原則としてテキスト文の送信となります。pdf等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

事務局からの連絡

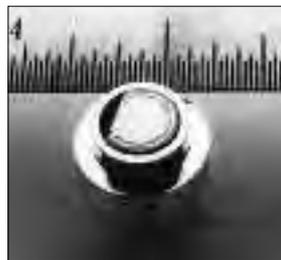
第 51 期入会 (2012.6.15~2012.7.31) 正 3 名

資	氏 名	所 属	資	氏 名	所 属
正	長尾 和也	(株)リコー 中央研究所	正	伊賀 由佳	東北大学 流体科学研究所
正	藤原 祥雅	パナソニック (株) デバイス社			

熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 (W/cm^2) に比例した直流電圧を出力します。弊社の製品は米国バージニア工科大学が開発した新しい技術をVatell社で商品化したもので、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束マイクロセンサー



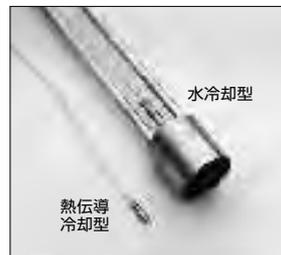
特徴

- 最高速の応答 (約 6μ 秒)
- $850^{\circ}C$ まで外部冷却不要
- 低雑音 / 高感度
- 熱流束と温度を測定
- 伝導、対流、輻射に等感度

使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラバース実験
- タービンブレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

ガードン型円形フォイルセンサー



センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657,5658,5660)
- 米国連邦航空局のファイヤー・スモークテスト

シート状熱流束センサー



センサーは銅とニッケルのサーモパイルから構成されており、測定対象物に貼り付けて使います。センサーは厚さが0.2mmと薄いので、柔軟性に富んでおり、直径1インチの円筒形に湾曲させる事が出来ますので、パイプなどに貼り付けてお使いになるには最適です。

使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定

熱流束センサー 校正サービス

熱流束センサーの校正作業をお引き受けいたします。校正証明書は米国基準局NISTにトレーサブルです。校正設備の物理的な制約で、お引き受けできない場合もあります。ご相談ください。

センサテクノ株式会社

〒106-0031 東京都港区西麻布3-24-17 霞ビル4F
TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2323

URL www.senstech.jp

E-mail senstech@td6.so-net.ne.jp



■ CAPTEC 社日本総代理店 ■ MEDTHERM 社輸入販売店 ■ ITI 社輸入販売店

当社は、独自の高度技術を持つ、海外メーカーの熱計測機器をご提供致しております。

CAPTEC 社(フランス)

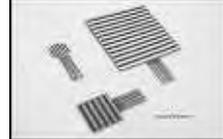
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



サイズ: 5×5mm～300×300mm
厚み: 0.4mm (平面用・曲面用)
温度範囲: -200～200°C
応答速度: 約 200ms
オプション: 温度計測用熱電対内蔵
形状: 正方形・長方形・円形
特注品: 高温用・高圧用・防水加工

輻射センサー



サイズ: 5×5mm～50×50mm
厚み: 0.25mm
温度範囲: -200～250°C
応答速度: 約 50ms
オプション: 温度計測用熱電対内蔵
形状: 正方形・長方形・円形
波長領域: 赤外/可視+赤外

MEDTHERM 社(アメリカ)

MEDTHERM(メドサーム)社は、これまで30年以上にわたり、高品質の熱流計及び超高速応答の熱電対を提供してまいりました。航空宇宙・火災・燃焼分野における豊富な実績を有しています。用途に応じ、様々な形状・仕様の製品を製造可能です。

熱流計/輻射計



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft²sec(フルスケール)
サイズ: 1/16インチ(約1.6mm)～1インチ(約25.4mm)
最高温度: 200°C(水冷なし)/1500°C(水冷)
出力信号: 0-10mV(DC・線形出力)
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

応答速度: 50ms以下*
再現性: ±0.5%
較正精度: ±2%
オプション: 輻射窓・視野角指定等

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

本同軸型熱電対は、第1熱電対のチューブの中に第2熱電対ワイヤーが挿入された同軸構造になっています。第2熱電対ワイヤーは、厚み0.0005インチ(約0.013mm)の特殊なセラミックで絶縁コーティングされています。プローブ先端の熱電対接点は、厚み1～2ミクロンの金属皮膜で真空蒸着されており、最高1マイクロ秒の応答速度を実現しています。



【主な用途】
表面温度及び表面熱流束計測
風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等

【最小プローブ径】
0.015インチ(約0.39mm)

【熱電対タイプ】
T型(銅/コンスタンタン) -270°C～+400°C
J型(鉄/コンスタンタン) -210°C～+1200°C
E型(クロメル/コンスタンタン) -270°C～+1000°C
K型(クロメル/アルメル) -270°C～+1372°C
S型(白金10%ロジウム/白金) +200°C～+1700°C

ITI 社(アメリカ)

ITI(International Thermal Instrument Company)社は、1969年の設立以来、高温用熱流板や火災強度熱流計など、特殊な用途に対応した製品を提供しています。特注品の設計・製造も承っております。

高温用熱流板



最高温度: 980°C
応答速度: 0.1s
直径: 8mm～25.5mm 厚み: 2.5mm

水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900°C
応答速度: 0.1s
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm²

当社取扱製品の適用分野

- 伝熱一般
- 温熱環境
- 炉・ボイラー
- 航空宇宙
- 火災
- 燃焼
- 各種エンジン

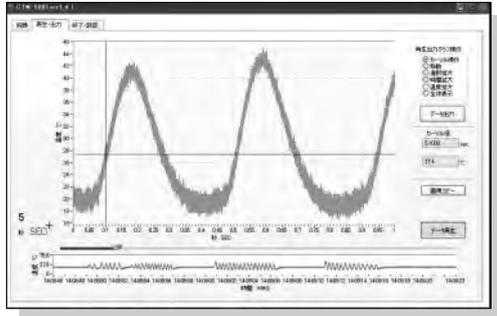
有限会社 テクノオフィス

〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B
TEL. 045-901-9861 FAX. 045-901-9522
URL: <http://www.techno-office.com>

高速温度測定装置 CTM-5001K

冷接点補償を確実にする熱電対と同じ素材で製作された
脱着容易なコネクタを採用。

測定データは USB 接続された PC に保存されます。



<主な仕様>

- ・サンプリングレート 0.1msec~1min
- ・-200~1250℃測定
- ・温度測定数 1 ch
- ・K型熱電対接続
- ・USBにて電源供給
- ・温度分解能 約0.5℃
- ・寸法：82 (W) × 130 (D) × 24 (H) mm

<主な用途>

- ・内燃機関測定
- ・射出成型、鑄造温度測定
- ・急冷、急加熱想定

販売価格 税込み 136,500円 (送料別途)

国内総販売元



株式会社

新興精機

〒812-0054 福岡市東区馬出一丁目18番3号

TEL : 092-641-8451 FAX : 092-641-8786 担当 : SAM課・堀ノ内

Email: horinouchi@shinkouseiki.co.jp <http://www.shinkouseiki.co.jp>

編集出版部会ノート *Note from the Editorial Board*

昨年3月11日に発生した東日本大震災以降、あっという間に1年半もの歳月が経過していることに驚きを感じつつ、私の住む福島県郡山市から約60kmの距離にある福島第一原子力発電所の事故後の処置が遅々として進まないことに言葉では表現できない焦燥感を感じながら、何事も無かったかのように日常生活を送っていることにまた驚きを感じています。

「驚き」と言うと、今回の特集の主役である「ヒートパイプ」との出会い、その当時の私にとっては大きな驚きでした。今から二十数年前、新入社員教育の一環で、当時量産体制に入ったばかりのマイクロヒートパイプ工場を見学した際に、可視化窓の付いた見学者用ヒートパイプを手で握っただけで気泡が発生してヒートパイプが動作する様子を目にしたときの驚きは今でも鮮明に蘇ってきます。

そんなヒートパイプの大ファンである私が編集部会で特集の企画を任されたとき、いっの一番に頭に浮かんだフレーズが「古くて新しいヒートパイプ」でした。幸いにも同じ企画グループの小原先生や堀部先生からも御同意が得られ、勝田先生をはじめとする日本ヒートパイプ協会会員の先生方にご執筆の協力をいただいで、本特集が実現できたことは本当に幸運なことと感じています。

この特集が現状におけるヒートパイプを理解するためのバイブル的な存在となり、我が国におけるこの分野の競争力復活の一助となれば幸いです。

佐々木 直栄 (日本大学)
Naoe SASAKI (Nihon University)
e-mail: chokuei@mech.ce.nihon-u.ac.jp

副会長 石塚 勝 (富山県立大学)	部会長 高松 洋 (九州大学)
委員	
(理事) 小原 拓 (東北大学)	田川正人 (名古屋工業大学)
堀部明彦 (岡山大学)	安田俊彦 (日立造船)
(協議員) 上野一郎 (東京理科大学)	梅川尚嗣 (関西大学)
奥山正明 (山形大学)	佐々木直栄 (日本大学)
佐藤恒之 (秋田工業高専)	芝原正彦 (大阪大学)
瀬名波 出 (琉球大学)	野村信福 (愛媛大学)
森 昌司 (横浜国立大学)	
TSE チーフエディター 花村克悟 (東京工業大学)	
編集幹事 伏信一慶 (東京工業大学)	

編集出版事務局：
九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 高松 洋
〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地
Tel&Fax: 092-802-3123, takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp