

蒸気工学研の歩みと蒸気動力

昭和59年2月15日

植田辰洋

大学・講義

研究・著作

委員会・学会

火力発電事情等

昭22(1947)

9月: 東京大学工学部機械科卒業

10月: " " 機械科大学院入学(特別研究生)

昭23(1948)

多元および多段圧縮冷凍サイクルの理論成績係数  
繊維の乾燥(谷下先生)

昭24(1949)

[蒸気エビクタ実験]

12/22: 専任講師

回転復水管における諸伝熱率(山中先生ほか)

電源は戦前の状態, 水ま火従

[火力プラントの戦前の最高レベル  
42.5 atg, 450°C, 高速機 53 MW  
低速機 75 MW]

昭25(1950)

卒業実験担当

織物の乾燥

蒸気エビクタに関する研究—オ1, 2報

蒸気エビクタに関する研究—オ3報

朝鮮戦争(25/6~28/7)

[以後10年間の前半は戦後復興期,  
後半は技術輸入の時期]

昭26(1951)

蒸気エビクタに関する研究—オ4報

回転復水管における諸伝熱率(山中先生ほか)

昭27(1952)

蒸気原動機(ボイラ)の講義開始

水噴射ポンプに関する研究

釜上#1: 60 atg, 482°C,  
35 MW.

昭28(1953)

2/5: 助教授に昇任

旧制・新制同時卒業, 新制大学院設置

空気エビクタに関する考察

津田#3: 40 atg, 435°C,  
55 MW.

昭29(1954)

4/16: 工博

10/20: 大学院課程担当

[気液二相流の実験に着手]

[蒸気エビクタ実験再開]

名港#4: 60 atg, 485°C,  
55 MW.

昭30(1955)

火力協会, 蒸気タービン標準規程委

ボイラ便覧分担執筆

機械学会, 蒸気動力部門委

鶴見#1: 60 atg, 480°C,  
66 MW.

昭31(1956)

気液混合流に関する研究—垂直上昇流

気液混合流に関する研究—障害物の影響

〇 短技機工学講座, ボイラの部執筆

[輸入プラントによる高温高圧化]

荏田#1: 102 atg, 538/538°C,  
75 MW.

昭32(1957)

〇 共立機機工学講座, 蒸気原動機の部執筆

千葉#1: 127 atg, 538/538°C,  
125 MW.

昭33(1958)

大学院演習担当

電力中研,

超高压ボイラ・タービン調査会

大学・講義

研究・著作

委員会・学会

火力・原子力発電事情

昭34(1959)

蒸気タービンの講義担当  
(~昭44年度)

蒸気エゼクタの性能特性について  
蒸気エゼクタの特性と性能計算法

千葉#3: 169 atg, 566/538°C,  
175 MW.

昭35(1960)

産業機械工学科設立.  
2講座転換によりスタート(昭38年度, 6講座となり, 学生40名収容)  
大学院講義, 蒸気工学を演習形式ではじめる.  
5月: 機械工学科拡充接協会世話人会発足  
11月: E2号館アネックス増築  
12/1: 教授(工学部)に昇任, 機械工-講座担任

貫流ボイラの蒸発管群内流動

新名古屋#2: 169 atg, 566/538°C  
220 MW.  
横須賀#1: 169 atg, 566/566°C  
265 MW.

[高度成長期]

昭36(1961)

工業熱力学代講  
船用機械工学科設立.  
(昭38年度, 5講座となり, 学生35名収容)  
(昭39年度, 6講座となり, 学生40名収容)  
6/1: 機械科拡充接協会設立総会

機械科拡充接協会事務, 多忙.

○機誌"貫流ボイラの展望"執筆

昭37(1962)

10月: E8号館地鎮祭  
11/1: 熱機関実験室, E2号館に移転

フィン付伝熱面の熱伝達(原田)

火力プラント急増により, 火主水従

昭38(1963)

9月: E8号館1期工事完成

Prof. Giedt 初来日(3/11~7/20)

[気液=相流研究, 引きつり継続]

石炭→重油への燃料転換が進む  
姫路才2#1: 169 atg, 566/538°C  
250 MW.

動力試験炉運用(着工 35/12)  
BWR, 12.5 MWe.

昭39(1964)

9月: E8号館2期工事(着工)完成.  
半径流ラビリンス・パッキン(久保)

○兼務, "熱伝達特論"分担執筆

昭40(1965)

11月: E8号館全館竣工.  
大学院講義を二相流中心とする.  
スラグフロウにおける相対速度の解析(花岡)  
気液混合物の垂直管内上昇流-オ1報  
気液混合物の垂直管内上昇流-オ2報

昭41(1966)

文部省在外研究員(41/10~42/10)  
UC. Davis

気液混合物の垂直管内上昇流-オ3報(花岡)

東海#1(着工 35/1)  
GCR, 166 MWe.

昭42(1967)

10/24 帰国

○二相流講義ノート.

MIT Seminar  
"Two Phase Flow"出席

原子炉安全専門委  
(~46/12)

堺特#1: 246 atg, 538/538°C  
600 MW, CC.

大学・講義

研究・著作

委員会・学会

火力・原子力発電事情

昭43(1968)

6月: 大学紛争はじまる  
工学部スト  
10月: スト頻発  
大学紛争本格化

管寄せの合流・分流に関する研究(久保)

機械学会動力委  
日本伝熱研事務担当  
都清掃工場委 (~46/6)  
7th Int. Conf. on Properties  
of Steam, Tokyo.

姫路#2#4: 246 atg, 538/552/556 °C,  
450 MW, TC.

知多#3: 246 atg, 538/538 °C,  
500 MW, TC.

大気汚染防止法制定

Comb. 丸佳製紙, 川之江, 32.9 MW  
(再燃)

昭44(1969)

V10: 秩父宮ラグビー場「確認書」  
V18, 19: 機動隊導入, 安田講堂封鎖解除  
9/27: 大学復入試一部妨害さる

機械学会動力委  
日本伝熱研事務担当  
通産, 原子力発電顧問会  
(~47/1)

昭45(1970)

管内蒸気流の凝縮熱伝達(秋吉, 松井, 井上)  
[原子炉安全委, 清掃工場委, とともに多忙]

噴霧=相流における液滴輸送-オ1報(渡江)  
噴霧=相流における液滴輸送-オ2報(渡江)

敦賀#1(着工4/4) BWR,  
357 MWe.

美浜#1(着工4/12) PWR,  
340 MWe.

Comb. 坂出, 225 MW (再燃)

昭46(1971)

機械系総務主任

○機誌展望「気液=相流-環状流, 噴霧流」執筆

管寄せによる気液混合物の合流(久保)  
環状=相流における液膜流-下降流(田中稔)

福島#1(着工4/12)  
BWR, 460 MWe.

昭47(1972)

機械系大学院主任

環状=相流における液膜流-上昇流(能勢)

海南#3: 246 atg, 538/552/556 °C  
600 MW, TC.

美浜#2(着工4/5)  
PWR, 500 MWe.

昭48(1973)

Steam Condensation inside a Vertical  
Tube (久保, 井上)  
流下液膜の流動状態に関する研究(田中稔)

鹿島#5: 246 atg, 538/566 °C  
1000 MW, CC(1B).

オ1次オイルショック

昭49(1974)

○共立, 「ボイラ及蒸気原動機」ボイラの章 改訂

5th Int. Heat Transfer  
Conf. (Tokyo)

管内蒸気流の凝縮熱伝達, 水平管(井上)

知多#4: 246 atg, 538/538 °C,  
700 MW, TC.

福島#2(着工4/5)  
BWR, 786 MWe.

高浜#1(着工4/12)  
PWR, 826 MWe.

昭50(1975)

流下液膜の伝熱と破断-オ1報(藤田)  
○共立, 「ボイラ及蒸気原動機」9-7の章, 改訂  
機械学会オ4標準委  
対向=相流の液膜挙動とフラッディング-オ1報(鈴木)

昭51(1976)

流下液膜の伝熱と破断-オ2報(藤田)  
機械学会オ4標準委  
対向=相流の液膜挙動とフラッディング-オ2報(鈴木)  
蒸発管内噴霧流領域の伝熱特性-オ1報(小泉, 田中稔)

大学・講義

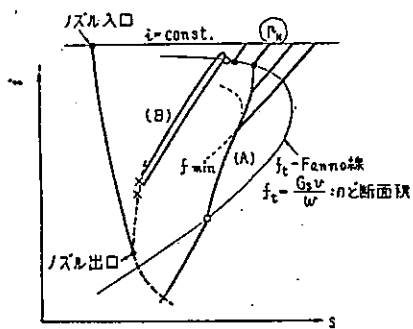
研究・著作

委員会・学会

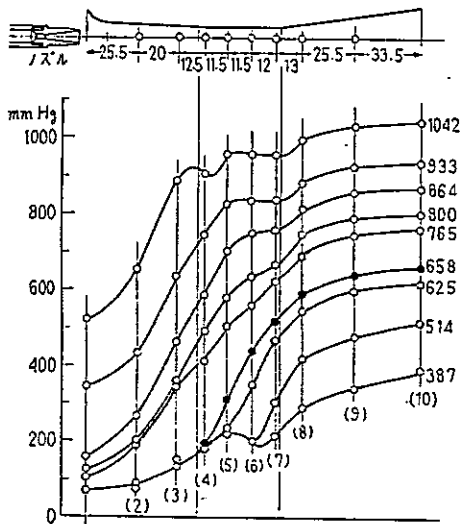
火力・原子力発電事情

<p>昭52(1977)</p> <p>4/12: 東大創立100年記念</p> <p>"原動機設計"講義開始</p>	<p>環状=相流における液滴発生と液滴径</p> <p>Dryout of Liquid Film in High Quality R-113 Upflow (田中茂, 小泉)</p> <p>★14回 日本伝熱シンポ</p> <p>蒸発管内噴霧流領域の伝熱特性-オ2報(小泉, 田中茂)</p>	
<p>昭53(1978)</p> <p>カナダ出張</p>	<p>地熱バリエーション委員会</p> <p>Heat Transfer and Dynamics of Saturated Droplets Impinging on a Heated Surface (橋本, 鐘肇)</p> <p>機械学会 熱工学委</p> <p>6th Int. Heat Transfer Conf. (Toronto).</p> <p>○連載講座"気液=相流の流れと伝熱"執筆開始</p>	<p>★2次オレシヨフ7</p>
<p>昭54(1979)</p>	<p>強制流動沸騰系のドライアウト熱流束と液滴径(金)</p> <p>Japan-U.S. Seminar on Two Phase Flow Dynamics (Kobe)</p>	<p>6ヶ年(着工45/10), ATR 165 MWe.</p> <p>大飯#1(着工47/10), PWR, 1175 MWe.</p> <p>福島#6(着工47/5) BWR. 1100 MWe.</p>
<p>昭55(1980)</p>	<p>沸騰流下液膜の限界熱流束と液滴発生率(井上, 永留)</p> <p>流動沸騰系の限界熱流束と液膜流量(諺山)</p> <p>Heat Transfer in Emerge Problems, Japan-US Joint Seminar.</p> <p>ボイラ協会, ボイラ構造委</p>	
<p>昭56(1981)</p>	<p>○養賢堂"気液=相流-流れと熱伝達"執筆</p> <p>○機論B展覧"流動沸騰-凝縮系熱伝達研究現況"</p>	<p>Comb. 国鉄川崎 141 MW(排熱回収)</p>
<p>昭57(1982)</p>	<p>垂直高温面の液膜冷却(井上, 若田, 繁川)</p> <p>サブクール沸騰流の伝熱・流動特性-オ1報(日野)</p> <p>流動沸騰系のCHFとRewetting(恒成, 小柳)</p> <p>直産 機械安全無公害化委</p> <p>ボイラ分科会</p> <p>労働省, ボイラの安全性評価研.</p> <p>学術会議, 混相流シンポ</p> <p>機試研振, 低品位熱利用熱供給分科</p>	
<p>昭58(1983)</p> <p>豊橋技科大併任</p> <p>1-ルウェイ出張</p>	<p>サブクール沸騰流の伝熱・流動特性-オ2報(日野)</p> <p>垂直高温面の液膜冷却-液サブクール(井上, 小谷)</p> <p>日本伝熱研究会22期</p> <p>机協会, 原子力発電所定期検査委</p> <p>7th Lecture Series on Two Phase Flow, Norwegian Inst. of Technology, NTH, Trondheim.</p>	
<p>昭59(1984)</p>	<p>サブクール沸騰流の伝熱と膜沸騰遷移(金, 犬丸)</p> <p>高温面リフラッディング過程の熱伝達(井上, 山本, 神原)</p>	

○ 蒸気エゼクタの性能特性

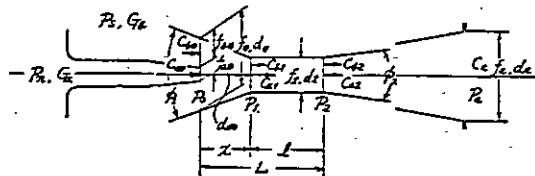


× 先細部入口 ○ のど入口 ● のど出口  
第3図 i-s 線図上の状態変化

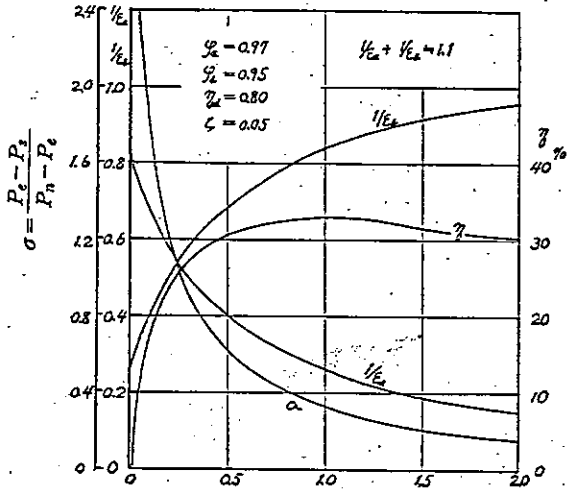


(1)  $N_{II_2}X_0C_2T_2D$   
ノズル入口圧 6.0atg  
第4図 エゼクタ各部の圧力 (ノズル入口圧一定)

○ 水噴射ポンプの最適条件



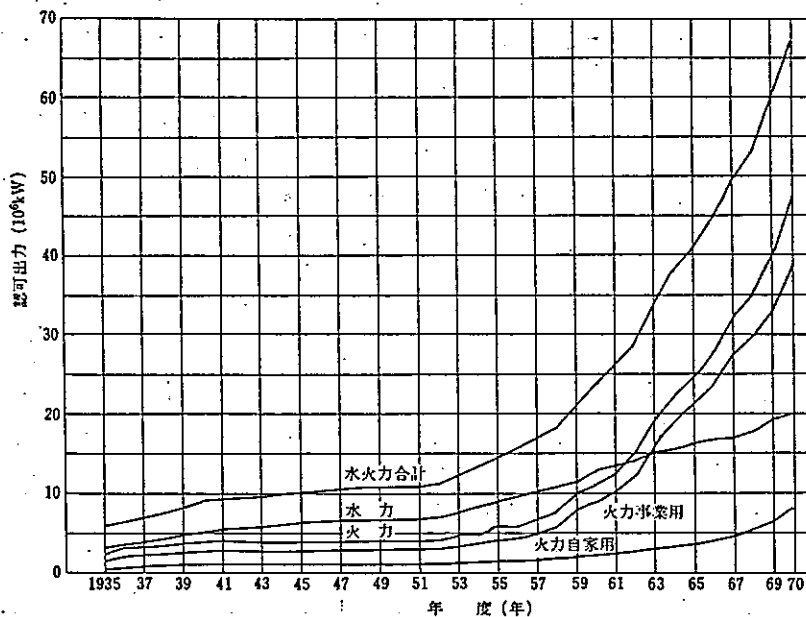
$\epsilon_a = f_e/f_{a0}$ ,  $\epsilon_b = f_e/f_{b0}$  : 面積比

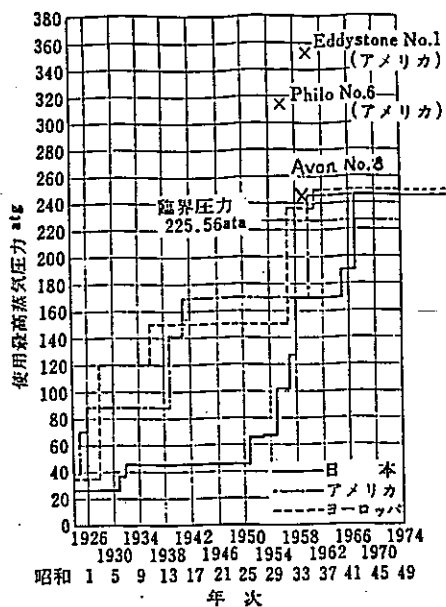


第II図 与えられた  $\mu$  に対して  $\eta_{max}$  なる条件

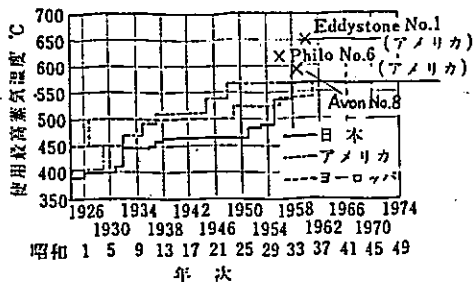
○ 蒸気動力プラントの発展

発電所認可出力の変遷 (500kW 以上)

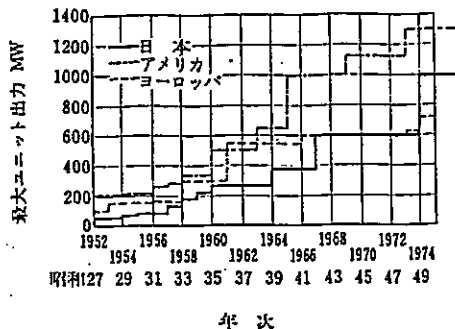




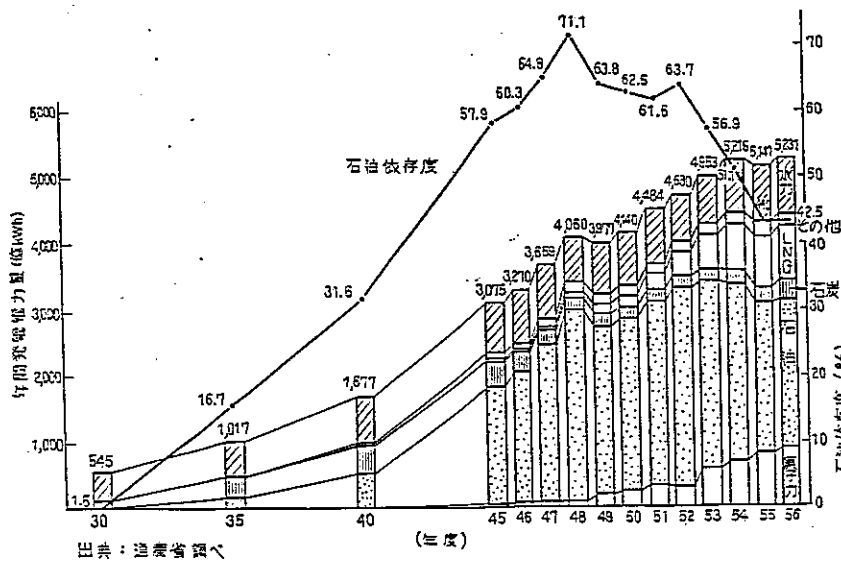
第293図 使用最高蒸気圧力の変遷(事業用火力)



第294図 使用最高蒸気温度の変遷(事業用火力)



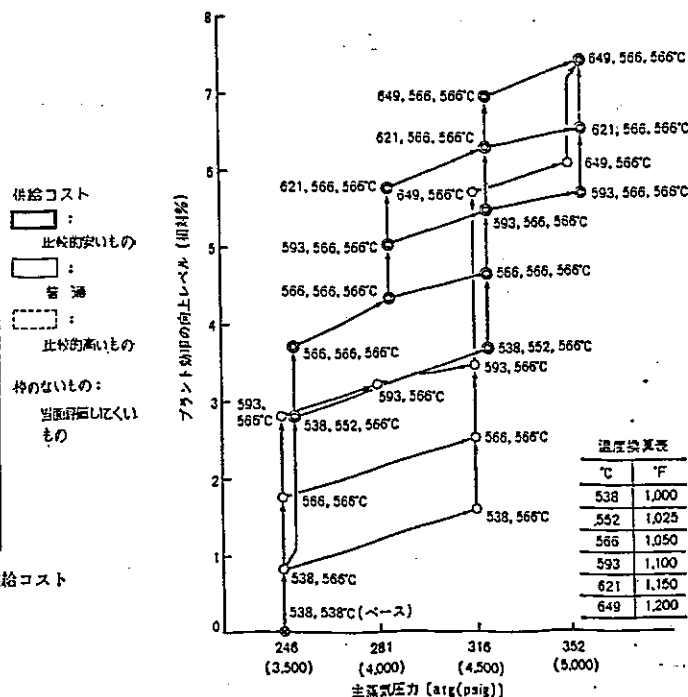
第295図 最大ユニット出力の変遷(事業用火力)



第4図 年間発電電力量の推移(電気事業用)

現在技術～1990年	1990～2000年	2000～2020年	2020年以降
<ul style="list-style-type: none"> <li>陸水炉</li> <li>石油火力</li> <li>LNG火力</li> <li>石炭火力(亜矽)</li> <li>水力(一般)</li> <li>水力(揚水)</li> <li>地熱(浅部)</li> <li>燃料電池(固体)</li> <li>太陽熱発電</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>蒸気複合発電(LNG)</li> <li>超超臨界圧火力発電</li> <li>石炭ガス化複合発電</li> <li>新型転炉炉</li> <li>燃料電池(液体膜型)</li> <li>地熱(深部)</li> <li>蒸気貯蔵</li> <li>太陽光発電</li> <li>電力貯蔵用電池</li> <li>風力発電</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高速増殖炉</li> <li>太陽光発電</li> <li>石炭液化</li> <li>燃料電池(固体燃料型)</li> <li>地熱(高温液体)</li> <li>制洋発電</li> <li>バイオマス</li> <li>超超導コイル</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>核融合発電</li> <li>宇宙衛星発電</li> </ul>

第6図 各種発電技術を中心とした新エネルギーの実用化可能性時期・供給力・供給コスト



°C	°F
538	1,000
552	1,025
566	1,050
593	1,100
621	1,150
649	1,200

○ 二成分系二相流による流れの研究

A) 垂直管内二相流の摩擦損失とポイド率

Lockhart-Martinelli 相関の適用範囲  
 気相平均流速  
 液膜流動状態の考察

a-1) 貫流ボイラの蒸発管群内流動

圧力降下型不安定の限界

a-2) 管寄せの合流・分流に関する研究(久保)

管寄せ管群系内の流量配分

B) スラッグフロウにおける相対速度の解析(花岡)

液相が上にある気液界面の不安定伝播速度によって  
 スラッグ流気泡上昇速度がきまるとして解析

C) 環状二相流における液膜流(田中裕)(能勢)

気液界面に大きい波動をともなうにも関わらず、液膜の  
 平均厚さは単相流壁面直傍流れの近似でかなり予測できる。

但し、層流から乱流に移る領域の粘性底層厚さは単  
 相流とはかなり相異なる。熱伝達率の予測にはこれが大きく

C-1) 流下液膜の流動状態(田中裕)

C-2) 管内蒸気流の凝縮熱伝達(秋吉, 松井, 井上), (久保, 井上)

C-3) 管内蒸気流の凝縮熱伝達, 水平管(井上)

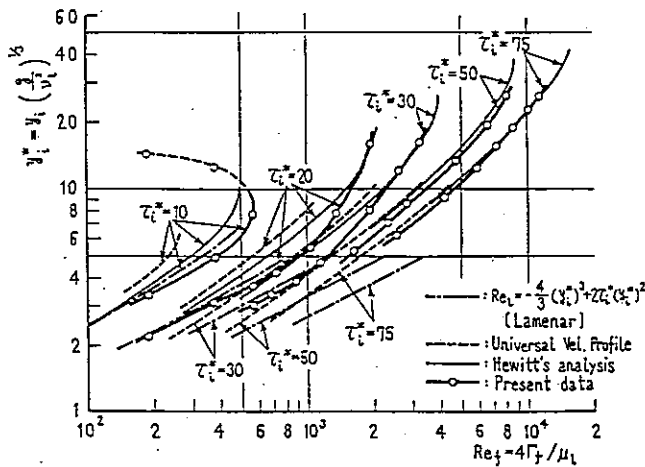


Fig. 10 Mean liquid film thickness for upflow

D) 噴霧二相流における液滴輸送(波江)

乱流気相流中の液滴が壁面方向に拡散し、  
 壁面に deposit する過程と壁面への液滴伝  
 達係数の算出。

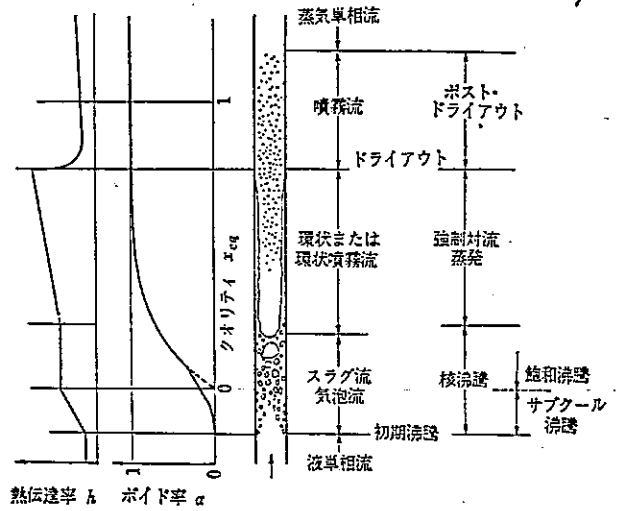


図 12.1 蒸発管における流動, 伝熱様式の変化

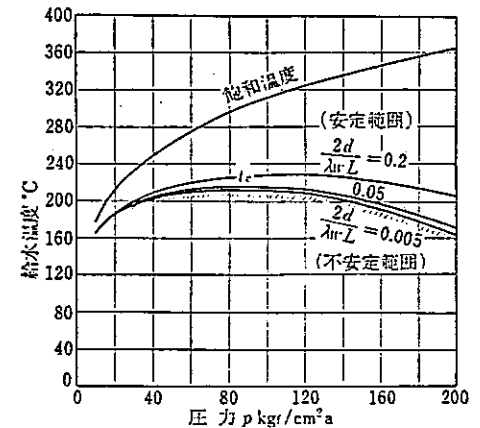


図 6.12 入口給水の限界温度

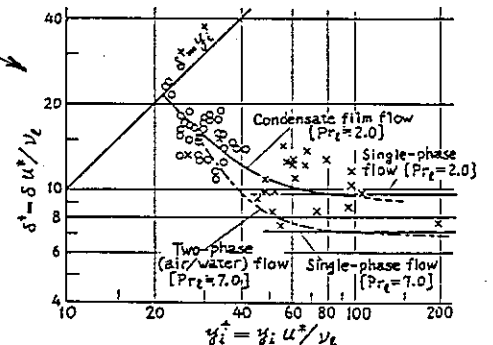


Fig. 8 Non-dimensional Thickness of Laminar Sublayer

	$\rho_f$	$\rho_l$	$\mu_f$
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/ms
— 空気-水系 (1ata, 20°C)	1.16	1000	0.179 × 10 <sup>-4</sup>
- - - 飽和 R113 (3.1ata)	20.8	1530	0.117 × 10 <sup>-4</sup>

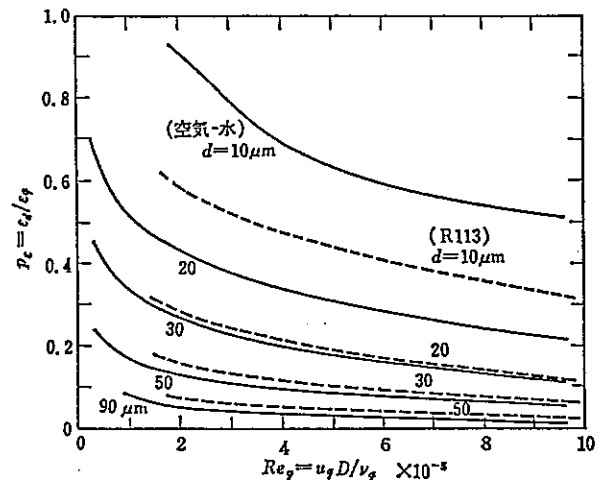


図 9.13 5°拡散係数比



○ 流下液膜の伝熱と破断(藤田)

サブクール液—表面張力差による偏り破断

飽和液—沸騰による液滴発生と蒸発による

液膜流量喪失による破断. Min. Wetting Rate.

沸騰流下液膜の限界熱流束と液滴発生率(井上, 永留).

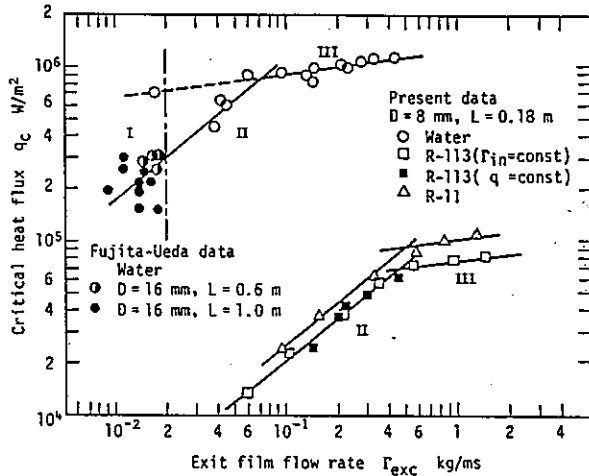


Fig. 4. Relation between critical heat flux and exit film flow rate.

○ 対向=相流の液膜挙動とフラッシング(鈴木)

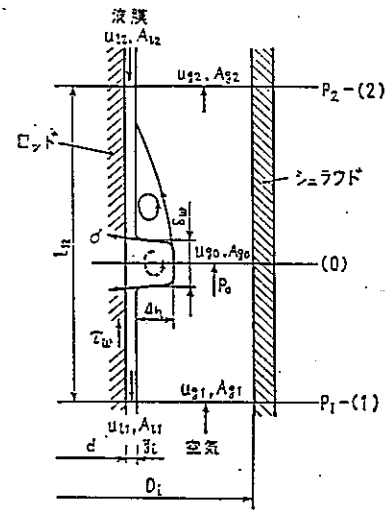


図 8 解析モデル

○ 流動沸騰系の熱伝達と限界熱流束状態

A) 蒸発管内噴霧流領域の伝熱特性(小泉, 田中宏)

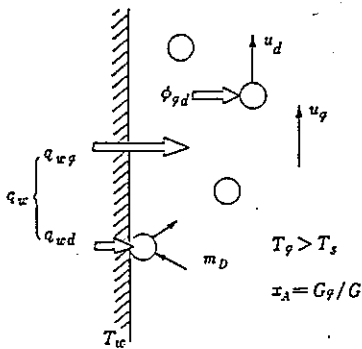


図 16.9 ドライアウト後の伝熱過程

a-1) Heat Transfer and Dynamics of Saturated Droplets impinging on a Heated Surface (橋本, 鐘繁)

a-2) 環状=相流における液滴発生と液滴径.

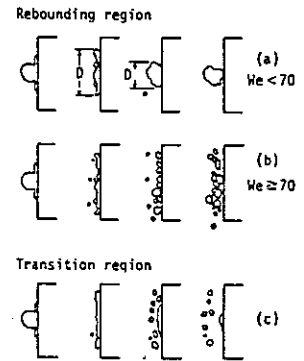


Fig. 8 Behavior of impinging droplets

B) 流動沸騰系のドライアウト熱流束と液滴径(金)

流動沸騰系の限界熱流束と液膜流量(鎌山)

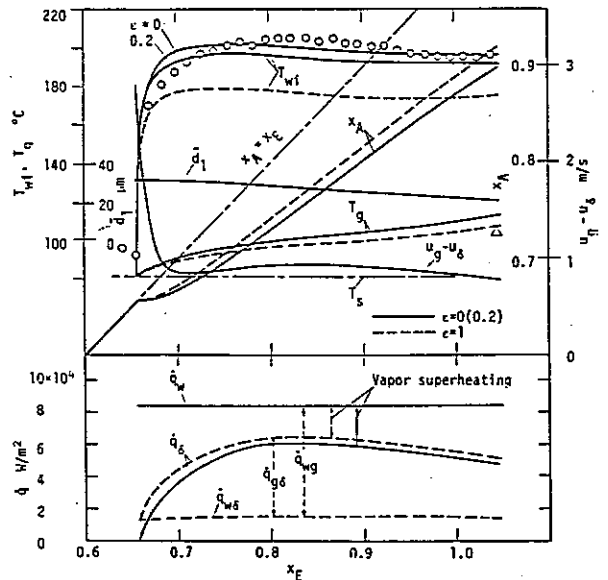
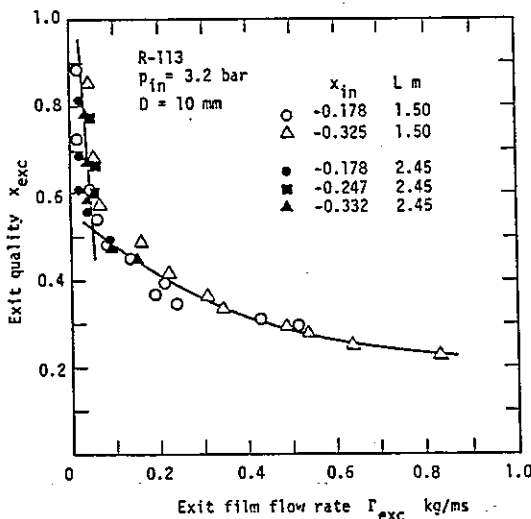


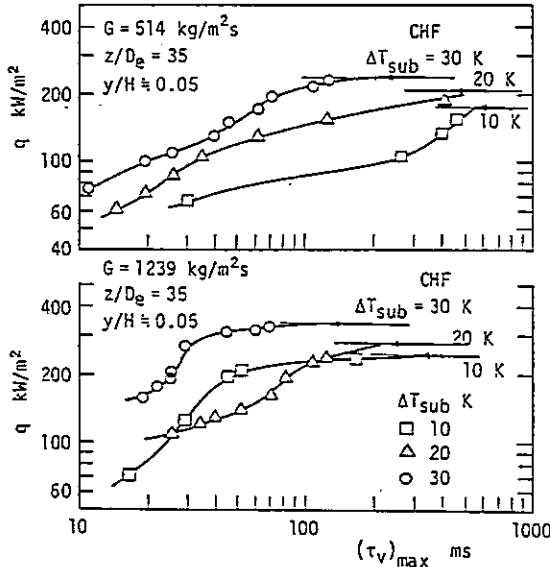
FIG. 4. Comparison between measured and predicted results (2).

FIG. 8. Exit film flow rate at critical heat flux condition.

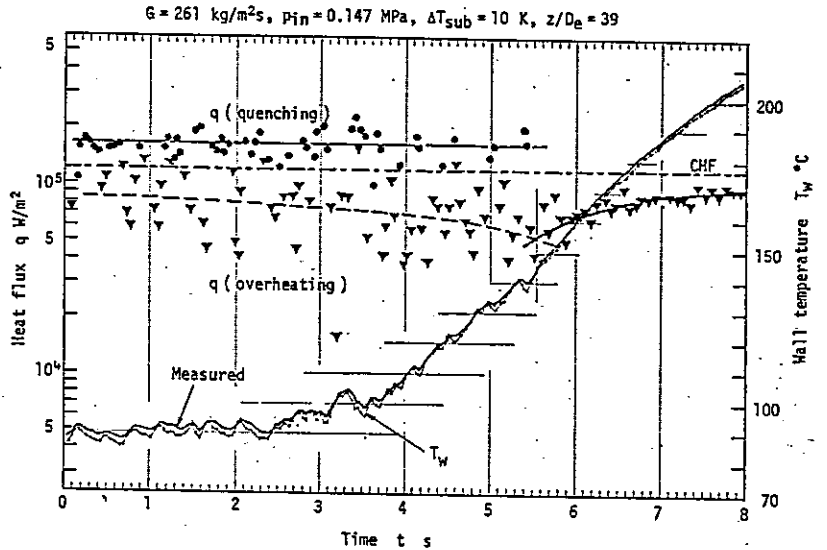
C) サブクール沸騰流の伝熱・流動特性(日野)

サブクール沸騰流の伝熱と膜沸騰遷移(金丸)

流れの状態と micro-thermocouple により調べ、合体気泡通過による CHF 状態の熱伝達特性を求めた。



加熱熱流束と最大気相通過時間の関係



限界熱流束(CHF)状態の熱伝達特性

○ 高温面 Rewetting

A) 流動沸騰系の CHF と Rewetting (恒成, 小柳)

流動沸騰系の冷却能力—沸騰曲線—を求めた。  
リフエツト臭および最大熱流束臭の壁面過熱度は  
クオリティによって変化し、低クオリティ域では高い値を示す。

B) 垂直高温面の液膜冷却(井上, 若田, 惣川)

垂直高温面の液膜冷却—液サブクール  
(井上, 小谷)

C) 高温面リフラッティング過程の熱伝達

(井上, 山本, 神原)

流下液膜冷却の沸騰曲線は流量、壁面厚さによって異なる。

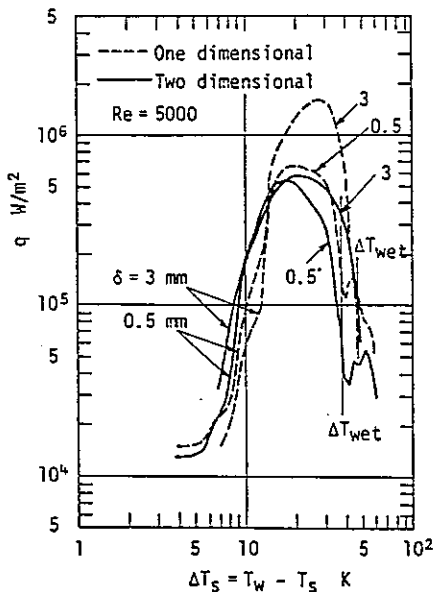


図 11 流下液膜スプラッティング時の沸騰曲線 (一次元と二次元解析の比較)

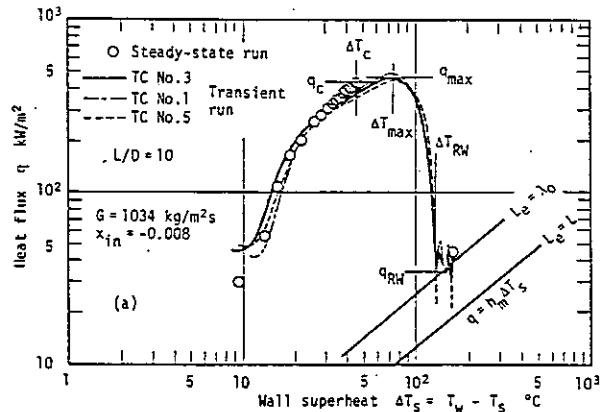
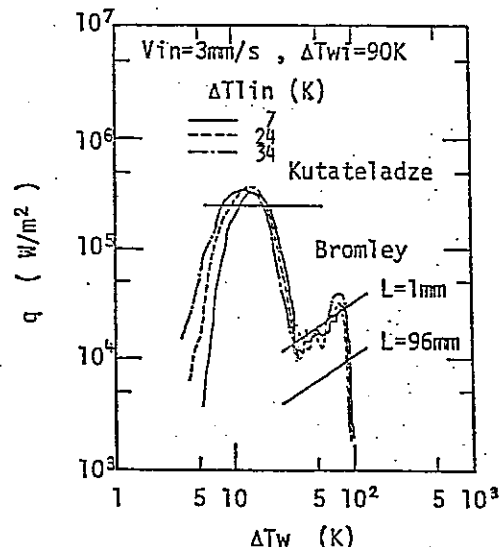


FIG. 4. Boiling curves.

リフラッティング過程の沸騰曲線は膜沸騰部をもち、その区間長さが高温面冷却速度に強く関連する。



リフラッティング過程の沸騰曲線

## 気液二相流熱伝達の研究

植田 辰洋 (機械)

気液二相流という、どのような状態を頭に画かれるであろうか。日常よく見られるとともに、この二相流は工業的にもいろいろのシステムのなかに存在する。ある人は気相と液相が別々の層をなして流れる成層流を、ある人は液流のなかに気泡が分散している気泡流を、またある人は速い気流中に液滴が同伴されている噴霧流などを考えられるであろう。

このようにいろいろな流動様式をとり、各流動様式ごとにかなり異なった力学的挙動を含んでいる。個々の現象の幾つかについては昔から研究がある。しかし、機械の方面で気液二相流が伝熱とからんだ問題として取上げられるようになったのは、水管ボイラの水循環に関連してであろう。1930年代のことである。

**ボイラ水の循環** 水管ボイラでは細い管が炎からの強い加熱をうけ、内部の水を蒸発させる。管内面では一般に沸騰による蒸気泡が生成される。ところが、この蒸気をどんどん流して管内面に水が接しているようにしないと、この蒸発管は過熱されて壊れてしまう。したがって、水管ボイラでは蒸発管と別に設けた降水管とでボイラ水の循環ループを構成し、蒸発管内に定常的な流動を行わせるようにする必要がある。そうすると、沸騰二相流の摩擦損失や平均密度はどうなるか、ということが問題になる。流路断面での平均密度  $\rho_m$  は、流路断面のうち気相の占める面積割合を  $\alpha$  (ボイド率という)、気相と液相の密度を  $\rho_g$ 、 $\rho_l$  とすると、 $\rho_m = \rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha)$ 。二相流の巨視的な流れの問題である。

ところで、水循環の目的は蒸発管の壁温を低く保つことである。熱伝達が問題にならないか、ということになるが、沸騰二相流の熱伝達率は極めて高く、1955年頃までは殆んど問題にならなかった。例えば1500°Cの炎に面した蒸発管でも、なかを流れる飽和水の温度(圧力100 atで310°C)より僅かに30°C高い程度におさまる。

**沸騰の限界熱流束** ところが、ボイラが高圧高熱負荷に進んでくると、またボイラより平均的に数倍も加熱熱流束の高い軽水形原子炉が現われてくると、熱伝達の方にも問題がでてくる。沸騰二相流の熱伝達率は極めて高いが、どんどん熱流束を増していくと、やがてある熱流束で熱伝達率が急劣化し、蒸発管が温度の急上昇により酸化焼損や溶融破断するに至る。いつまでも調子よくはいかないわけである。この値を限界熱流束(CHF)という。限界熱流束状

態を生ずる理由は、現状でも十分明らかというわけではないが、少なくとも二つの場合が考えられる。一つは熱流束の増大によって蒸発が進行する結果、出口付近で管壁が乾いてしまうためである。実際にはかなりの割合の水が残っていても、水の大部分が蒸気流中の液滴として流れる噴霧流になるため、壁面に沿って流れる液膜が消失して乾いてしまう。もう一つは、水が管内を十分流れているにもかかわらず、壁面から発生する気泡量が過大になると、壁面への水の補給が追いつかなくなり、壁面が蒸気膜でおおわれはじめるためである。

前者の場合は、条件によっては蒸発管に耐熱鋼を使うことで何とかできるが、後者の場合はそれでも大抵は破損してしまう。限界熱流束とよばれる所<sup>※</sup>である。高熱流束蒸発管では、この値を予測することが設計の最重要問題であるが、流れの条件によって大幅に変わる。したがって、二相流の流れの状態とか流動機構をはっきりさせなければならぬし、二相流動と伝熱による蒸気発生との相互作用も問題になる。

**ポストCHF状態** 限界熱流束を超すと、管壁温度がどのように上昇するかは、そのときの二相流の冷却能力に関係する。原子炉のような高熱流束伝熱面では、事故時の状況を予測し、生じた高温面の冷却対策を考えておかなければならない。それには、このポストCHF状態の熱伝達が問題になる。この際の流れは、壁面が乾いた状態の噴霧流とか気泡流で、伝熱支配二相流というべきものとなる。なお、極低温液体や冷媒の蒸発管ではしばしばポストCHF状態が現われる。この場合は高温水とちがって壁温レベルが元来低いので、壁温が急上昇しても壁温が損傷をうけるほどのことはない。しかし、この状態の伝熱特性を明らかにしておくことは、やはり重要な問題である。

気液二相流熱伝達の研究は、このような問題に沿って進められている。限界熱流束やポストCHFのように伝熱支配形に近づくほど現状の知識は乏しく、実際の場合の伝熱特性のみならず、どのような流動形態が現われるかを予測することさえむずかしい場合が少なくない。熱伝達はもちろんエネルギー問題と重要なかわりをもつが、元来、熱エネルギーが単にどう伝達されるかを扱う地味な分野である。それでも、どんな現象になるかをまず実験的に調べなければならぬような研究テーマが次々に現われてくる。興味ある分野であると考え仕事を進めている。