

# 毛細管現象を活用した 伝熱性能の飛躍的な向上

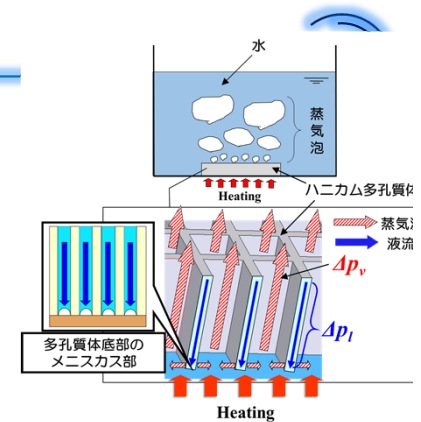
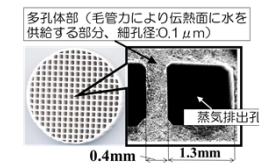
九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門

森 昌司

# これまでの主な研究：

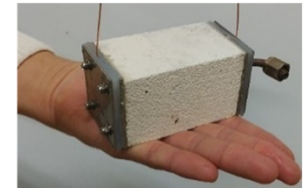
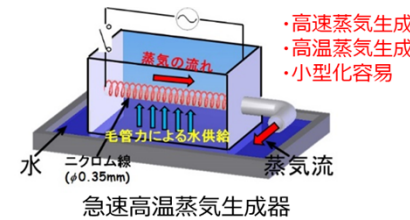
## ① 八ニカム多孔質体を用いた限界熱流束の向上（2007年～）

八ニカム多孔質体を用いた限界熱流束を大幅に向上させる研究



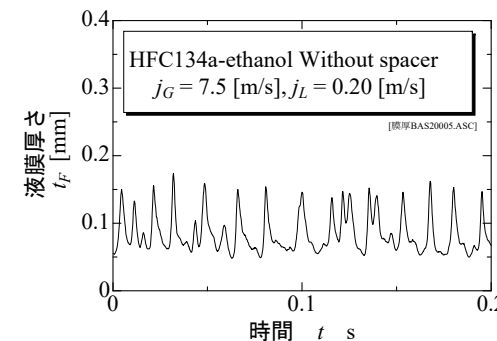
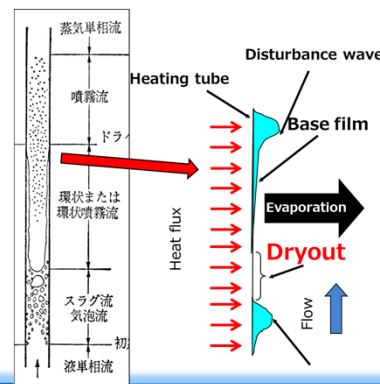
## ② 含水多孔質を利用した過熱水蒸気の急速生成に関する研究（2006年～）

含水多孔質体とヒータの設置構造を工夫することで300℃以上の過熱水蒸気を常温水からわずか数秒で生成する研究

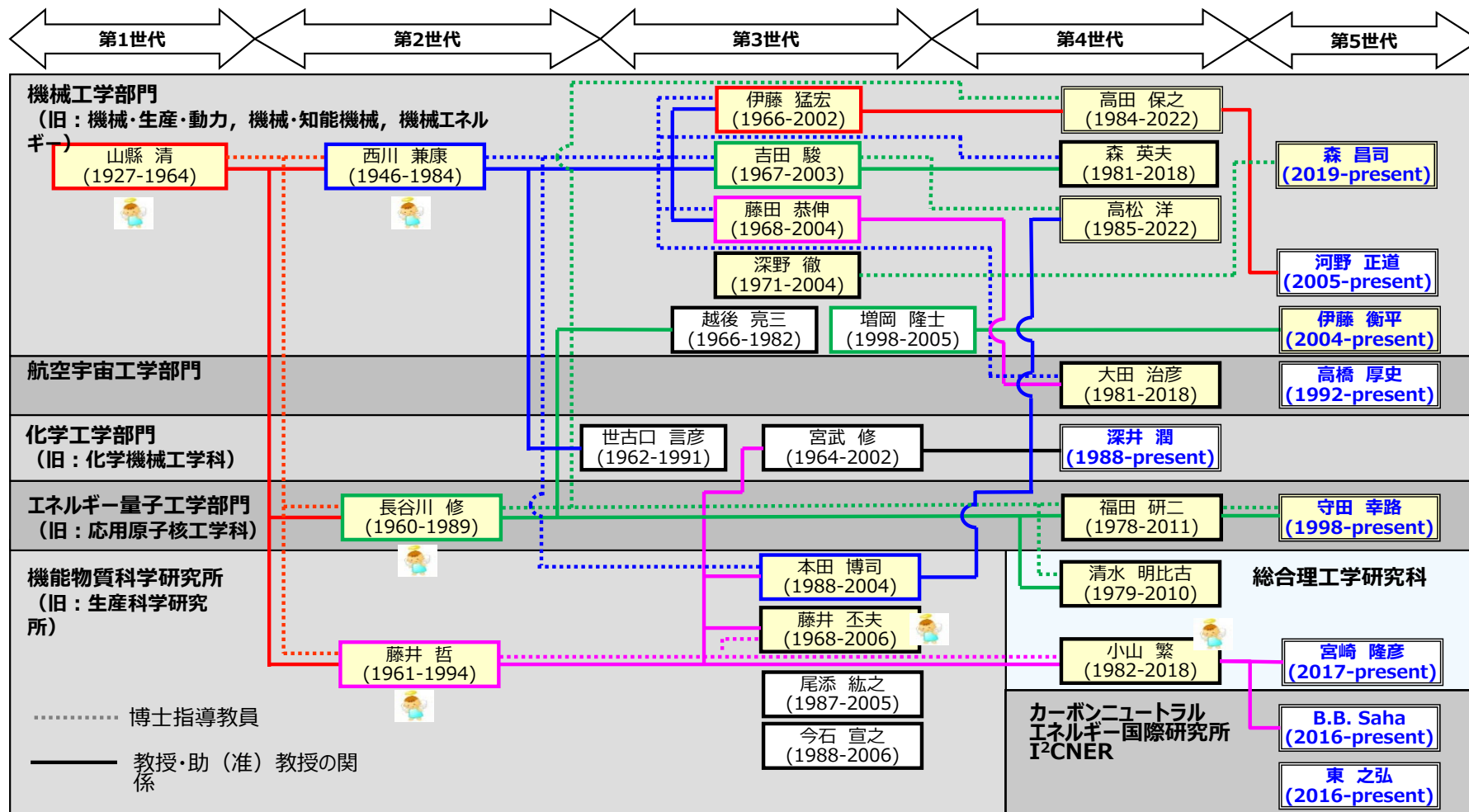


## ③ 気液二相流に関する研究（1998年～）

高温高圧下の気液二相流、特に環状流領域の液膜の挙動を普遍的にまとめる手法に関する研究



# 九州大学蒸気工学研究室の系図 (高田名誉教授作)



90年以上、歴史のある沸騰研究を九大では継続的に実施

沸騰研究は古い! ?

やること、あるの! ?



## イベント EVENT

### 2022年度

#### 第19.0回研究会 (担当幹事：森)

(後援：日本熱科学研究支援機構)

日時： **2022年8月29日(月) 15:00-16:30**

方法・サイト：事前登録制 WEB会議システムWebexによるWEB研究会

参加費： 無料

ご参加いただける方は、8/25(木) までに以下のサイトからご登録のほど宜しくお願いします。

[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc57yPP1cF41n-ZWi9Lr2EpGHO\\_5-ZtQ-QpdKFhAGRZe5J0rQ/viewform?vc=0&c=0&w=1&flr=0](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc57yPP1cF41n-ZWi9Lr2EpGHO_5-ZtQ-QpdKFhAGRZe5J0rQ/viewform?vc=0&c=0&w=1&flr=0)

#### プログラム

1. 15:00-15:45 宇高 義郎 (天津大学)  
「天津の7年」
2. 15:45-16:30 塩見 淳一郎 (東京大学)  
「動的濡れ現象の理解と制御：「接触線摩擦」でどこまで行けるか？」

日本機械学会 熱工学部門  
相変化界面研究会

主査：高田保之 (九大)

幹事：森 昌司 (九大)

劉 維 (九大)

永井二郎 (福井大)

毎月1回のペースでオンラインで実施

毎回100名程度の登録

無料ですので、ご興味あればご参加を！

#### 第18.5回研究会 (担当幹事：劉)

(後援：日本熱科学研究支援機構)

# 講演内容（沸騰・蒸発）

## ①冷却技術

①-1 **ハニカム冷却**（高熱流束除去、熱伝達率向上）

①-2 **ヒートパイプ**（熱の超伝導体：銅の100倍の有効熱伝導率）

## ②沸騰・蒸発の工学的活用

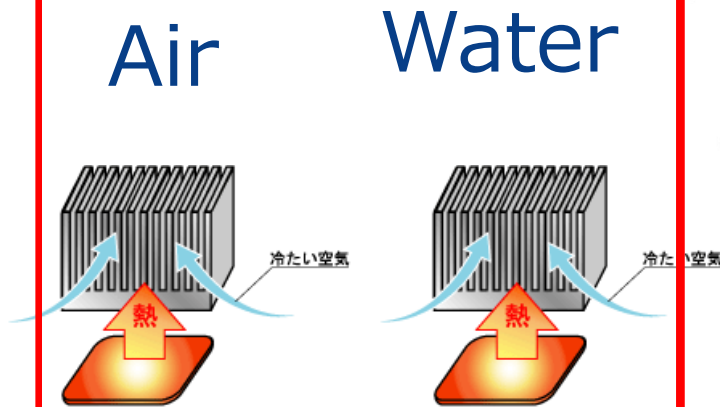
②-1 **マイクロポンプ**（突沸活用）

②-2 **瞬間高温蒸気生成**（メニスカス蒸発活用）

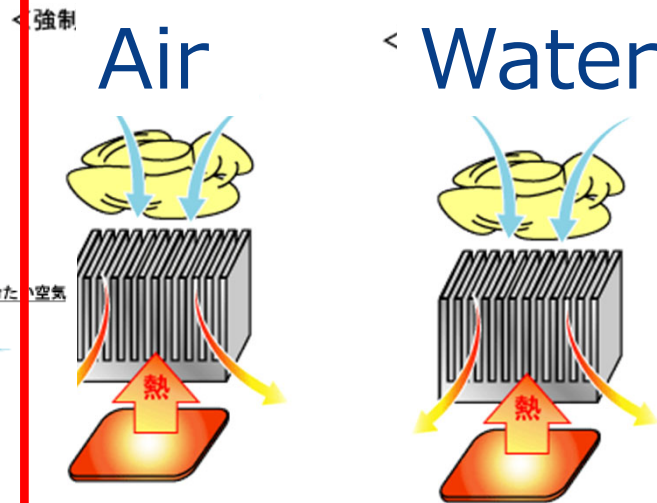


# 冷却の種類

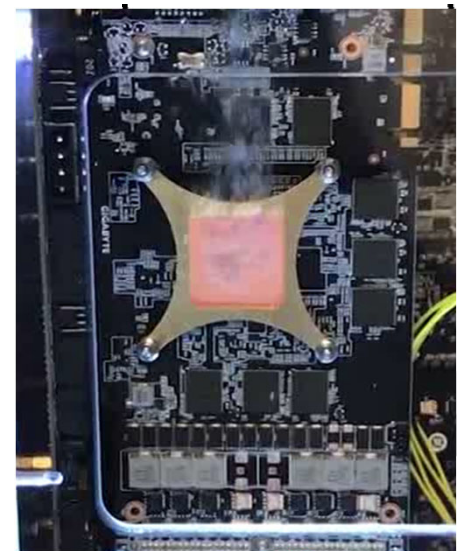
自然空冷  
(外部動力が不要)



強制空冷  
(外部動力が必要)



沸騰冷却  
(外部動力が不要)



熱伝達率

1 : 10 : 10 : 100 : 10000

↑  
10 W/(m<sup>2</sup>K)

# 講演内容（沸騰・蒸発）

## ①冷却技術

①-1 **ハニカム冷却**（高熱流束除去、熱伝達率向上）

①-2 **ヒートパイプ**（熱の超伝導体：銅の100倍の有効熱伝導率）

## ②沸騰・蒸発の工学的活用

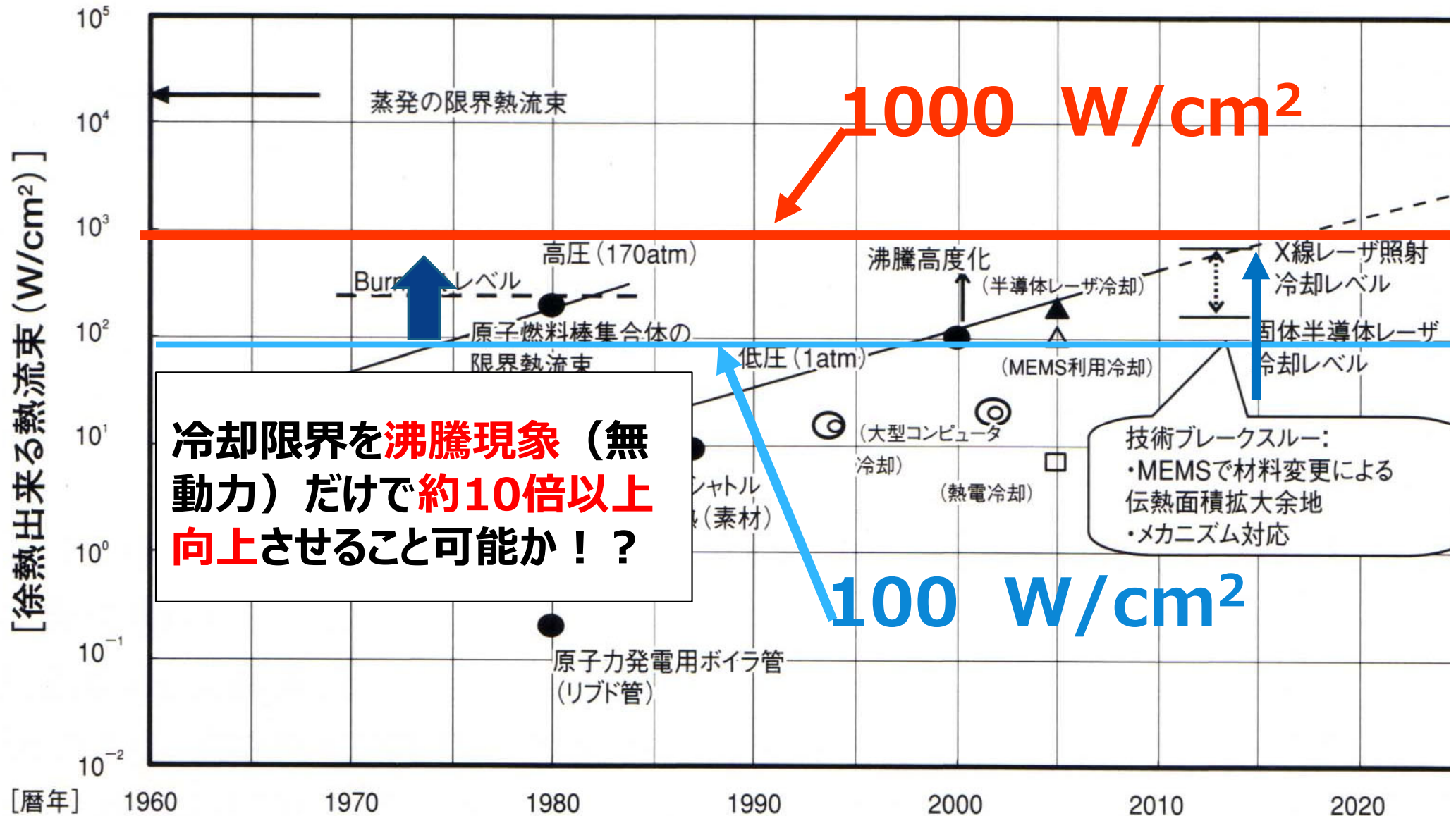
②-1 **マイクロポンプ**（突沸活用）

②-2 **瞬間高温蒸気生成**（メニスカス蒸発活用）



# 高熱流束除熱技術ロードマップ

(JSME技術ロードマップより)

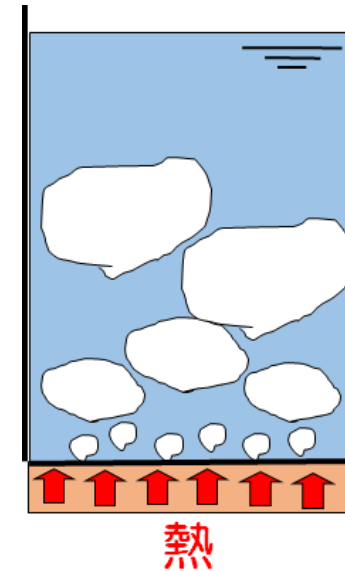




# 沸騰・蒸発冷却の限界

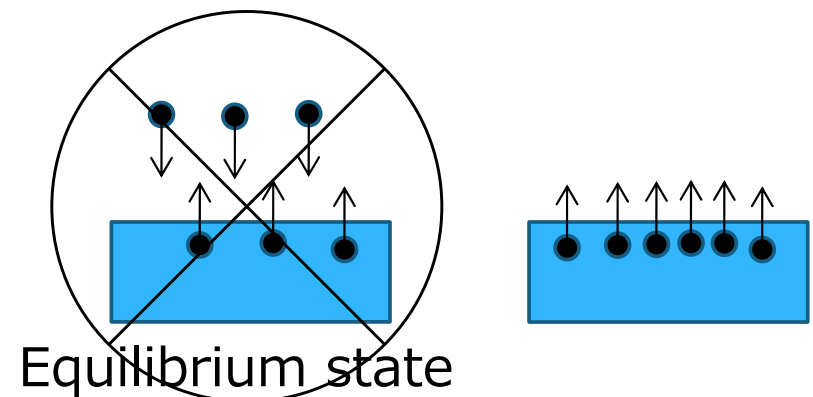
## 1. 沸騰による冷却限界

**100 W/cm<sup>2</sup> (水の場合、実験値)**



## 2. 蒸発による冷却限界

**22,000 W/cm<sup>2</sup> (水の場合、理論値)**  
**沸騰冷却の200倍以上!**



---

外部動力無しで $1000 \text{ W/cm}^2$ 除熱できる？



どうやるか？

沸騰の限界  
 $100 \text{ W/cm}^2$

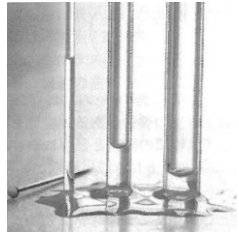
目標 熱流束  
 $1000 \text{ W/cm}^2$

蒸発限界  
 $22,000 \text{ W/cm}^2$



# CHF向上のアイデア

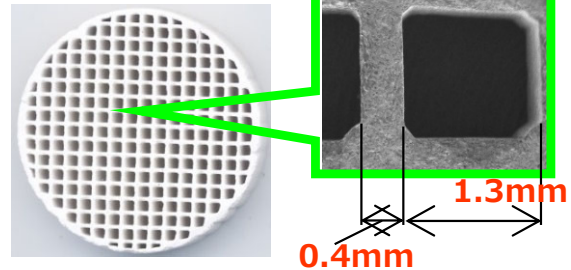
## ① 活用する自然現象



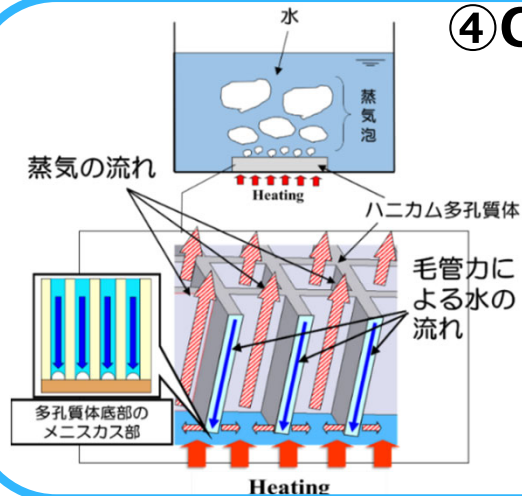
毛細管現象  
(細孔径が $0.1\mu\text{m}$ の時  
吸い上げ高さ:  $100\text{mH}_2\text{O}$ )

## ② 気液の循環促進部材 (ハニカム多孔質体、以下、HPP)

平均細孔径:  $0.1\mu\text{m}$



## ④ CHF向上原理図



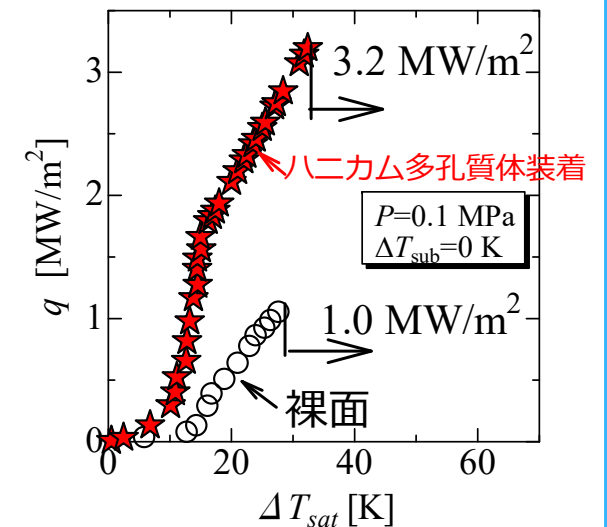
気液の循環を促進



大幅なCHFの向上

第5882292号, EP特許2977700号  
その他、関連特許7件出願中

## ③ ハニカム多孔質体による CHF向上結果



沸騰曲線

3.2 MW/m<sup>2</sup>  
(従来比320%向上)

# 多孔体内部構造の制御

**HPPによる限界熱流束(CHF)向上メカニズム**

**限界熱流束(CHF)発生条件**  
 $P_{c,max} = \Delta P_l + \Delta P_v$

**限界熱流束(CHF)向上のための条件**

- 細孔径：小(理由：ラプラス圧が大きくなる)
- 透過係数：大
- HPPの厚さを薄くする(理由： $\Delta P_l + \Delta P_v$ が小さくなる)

**ハニカム多孔質体(HPP)を二層構造化する意義**

**HPPが薄すぎると合体大気泡滞留中にHPPが乾いてしまう**

**HPPの二層構造化**

- 緻密な多孔質層
- 液保持部

⇒液枯れを防ぎつつ毛管力を最大限に活用可能なHPPが重要

**電解析出法による二層構造化**

**Anode**  
 $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e^-$

**Cathode**  
 $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$   
 $2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$

**真上から観察**  
 6A - 5min

**サンプルを割って横から観察**  
 3A - 5min

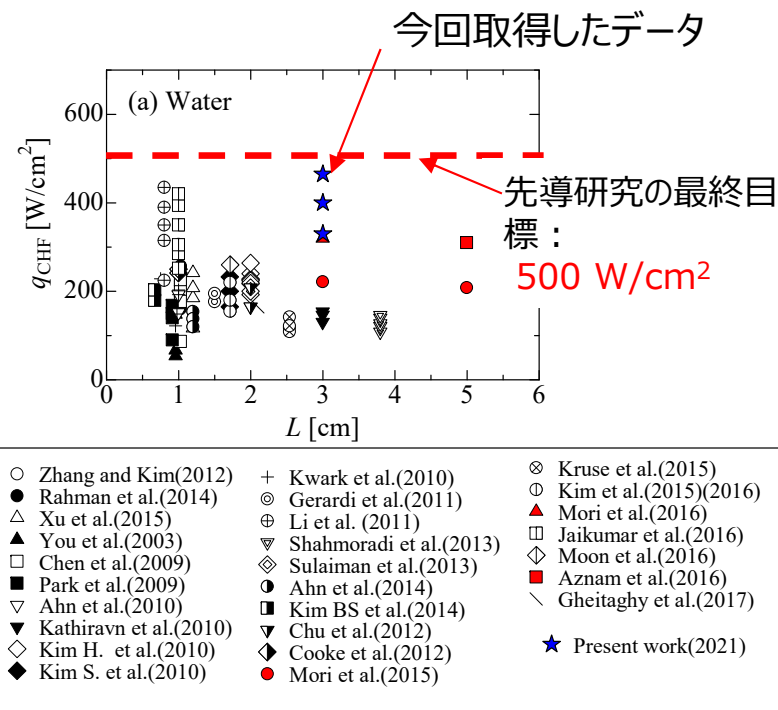
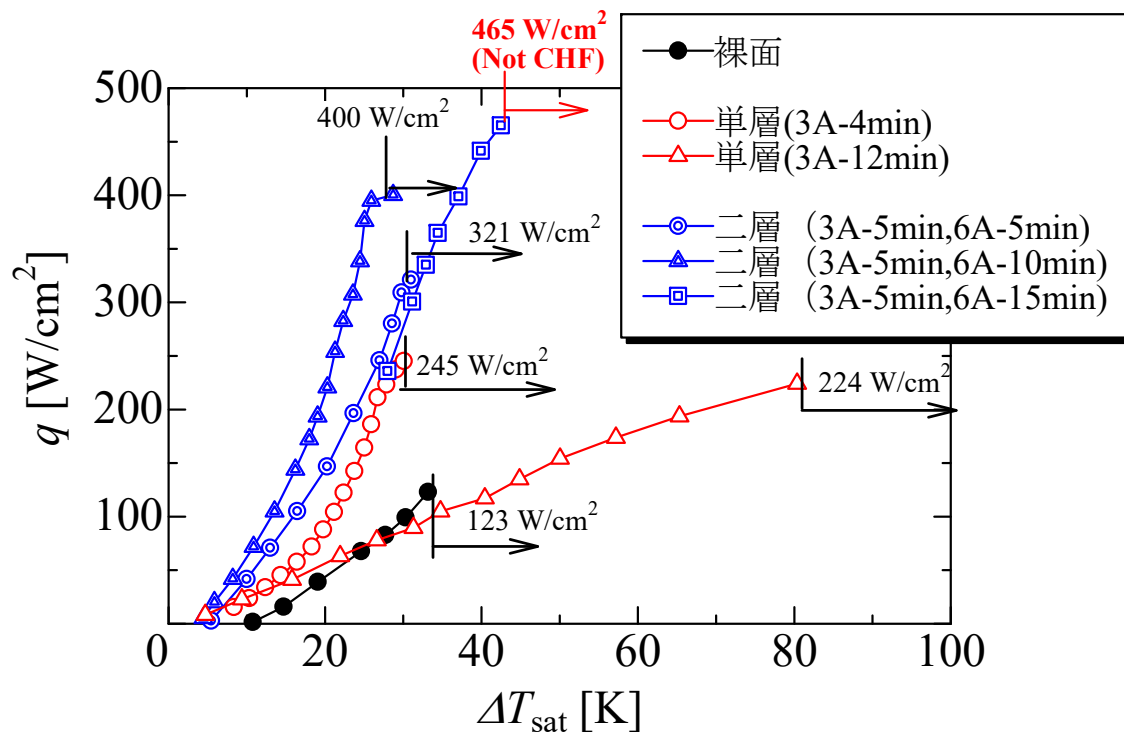
- 多孔質構造：水素気泡が細孔に影響
- 電流の大きさで細孔径を制御
- 真空焼結(950℃--30min)

電流値：小 ⇒ 水素気泡径：小 ⇒ 形成される細孔径：小

電流値を時間的に変化

多孔質体内部の細孔径分布を**傾斜化可能**

# CHF向上効果



・均一多孔質体で**465 W/cm<sup>2</sup>**

・上図中の色つきシンボルは、本研究グループのデータである。  
 ・ヒータサイズが大きくなると、一般的には限界熱流束(CHF)は低下する。

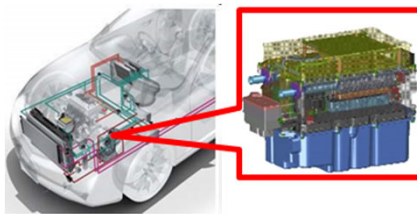
# 冷却技術の応用先①

## 電子デバイス分野に適用した場合のCO<sub>2</sub>削減へのインパクト

### パワーデバイス

WBGパワーデバイスの発熱密度増大への対応が必要  
・限界熱流束の向上・動作温度の低減による省電力損失

#### <高熱流束下の発熱体冷却>



次世代半導体  
500W/cm<sup>2</sup>~

直接  
効果

734 万t-CO<sub>2</sub>/年

間接  
効果

1,515 万t-CO<sub>2</sub>/年

※電力変換効率1.0%向上を仮定して、産業、民生、運輸分野の電動化を想定した試算

※NEDO資料(2016)より、SiC半導体の普及効果

### データセンター

電子チップの発熱量増大に対応した省エネルギー化が必要  
・沸騰開始温度の低減 ・伝熱促進による小温度差熱交換



直接  
効果

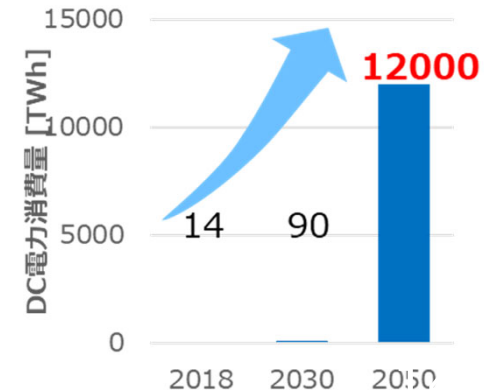
1240 万t-CO<sub>2</sub>/年

世界全体  
では…

27,500 万t-CO<sub>2</sub>/年

※2030年のDC消費電力予測&現状の空調系の電力消費割合に基づき試算

#### データセンター電力消費量の予測



2030年 CO<sub>2</sub>削減量  
(ton-CO<sub>2</sub>/年)

1,974万

2050年 CO<sub>2</sub>削減量  
(ton-CO<sub>2</sub>/年)

∞

※参考資料を基に作成 (JST低炭素社会戦略センター、情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.2) -データセンター消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題-、LCS-FY2020-PP-03、2021年2月)

## 冷却技術の応用先②

原子力発電所における苛酷事故時

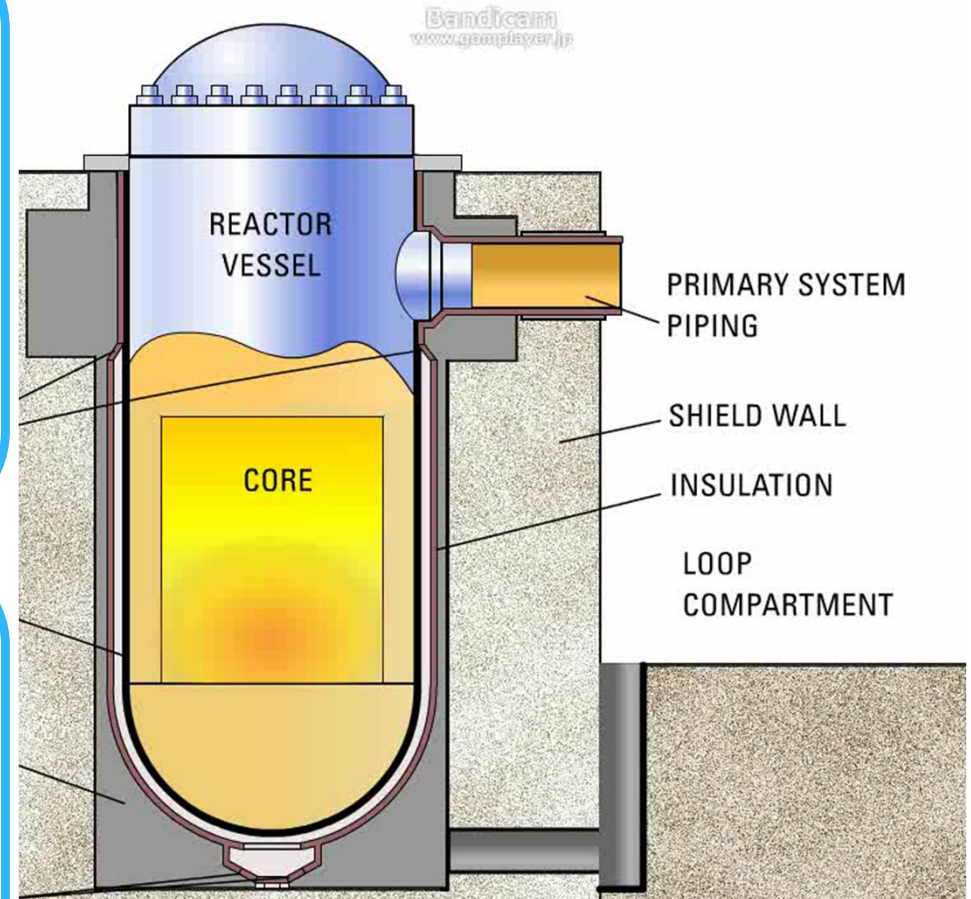
↓  
圧力容器の水没

↓  
水没だけでは冷却不足

↓  
沸騰冷却限界を上げることが重要

### 重要な点

1. 大気圧下において無限大伝熱面・高熱流束を除熱できること
2. シンプルで安価なこと



緊急時冷却手法

# 講演内容（沸騰・蒸発）

## ① 冷却技術

①-1 **ハニカム冷却**（高熱流束除去、熱伝達率向上）

①-2 **ヒートパイプ**（熱の超伝導体：銅の100倍の有効熱伝導率）

## ② 沸騰・蒸発の工学的活用

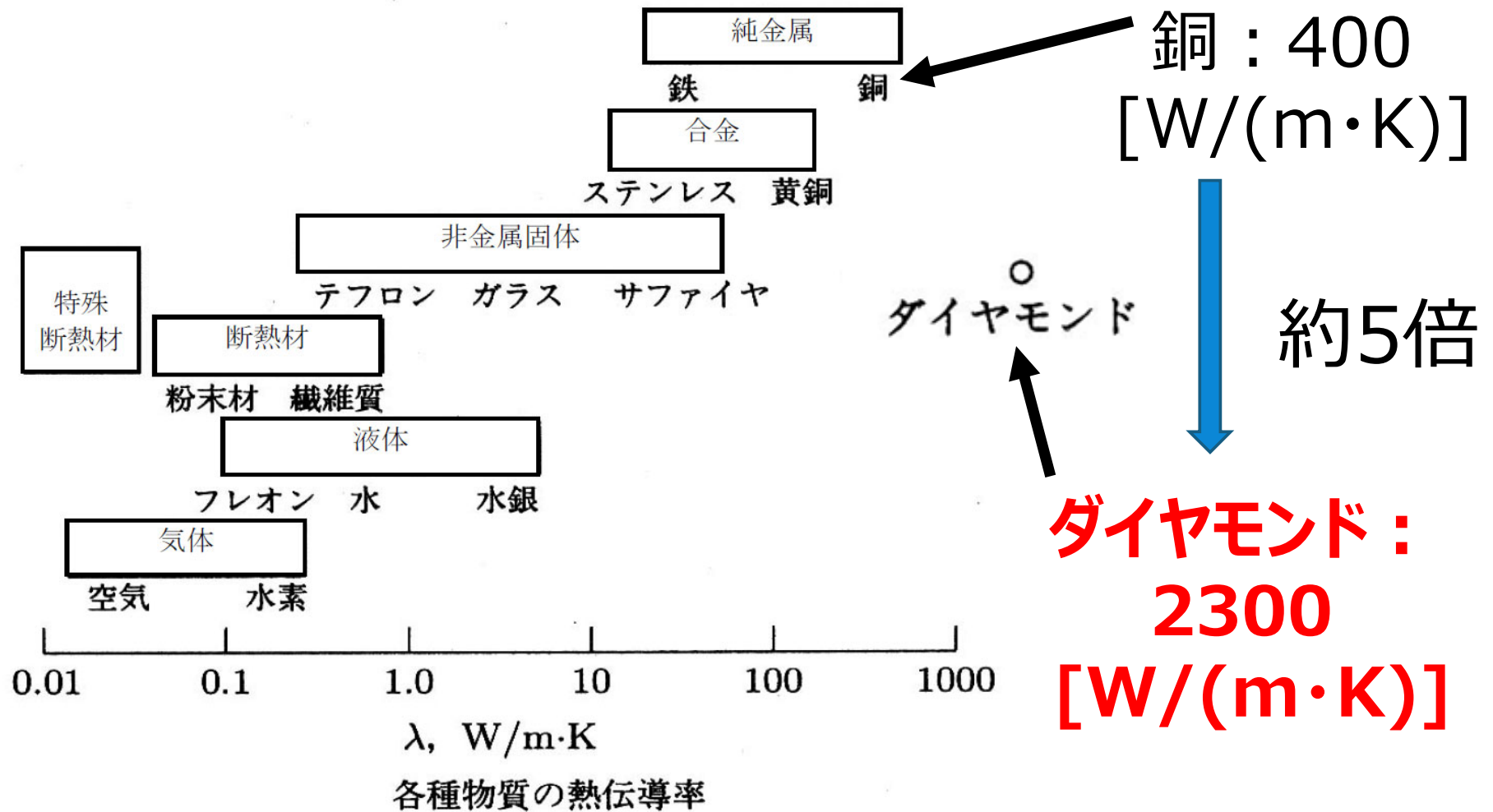
②-1 **マイクロポンプ**（突沸活用）

②-2 **瞬間高温蒸気生成**（メニスカス蒸発活用）

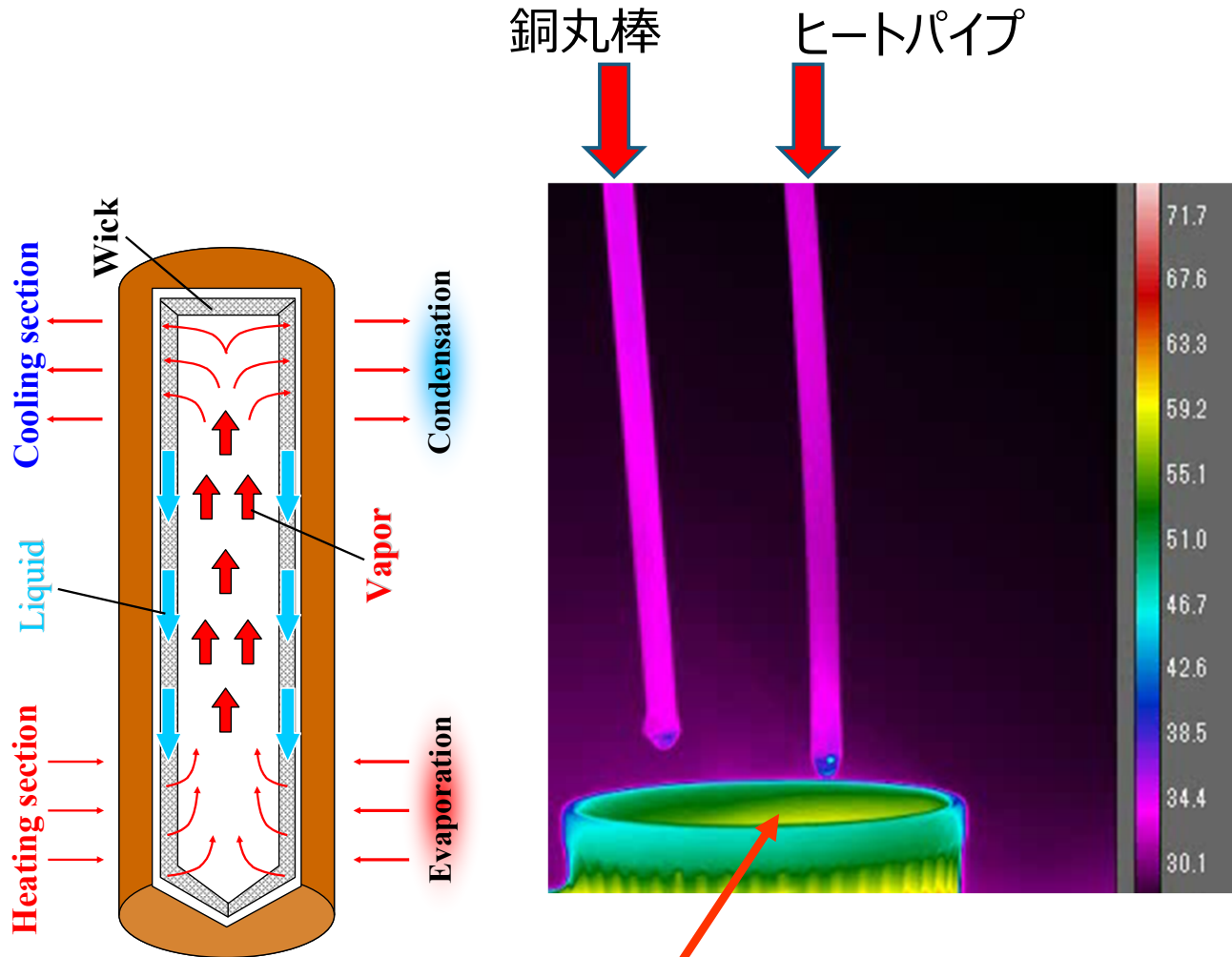




# 世の中で一番熱伝導率の高い物質は？



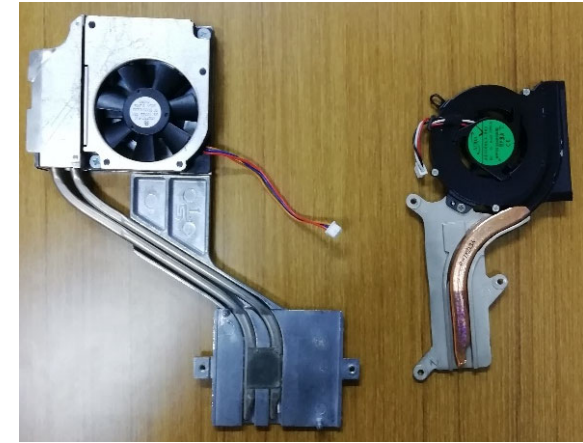
# 熱の超伝導体 (ヒートパイプ)



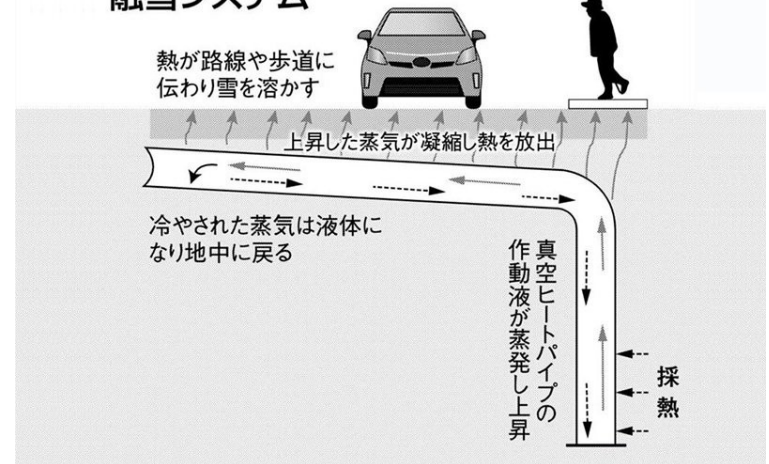
銅丸棒      ヒートパイプ

80℃のお湯が入ったコップ

銅の100倍の有効熱伝導率



## 融雪システム



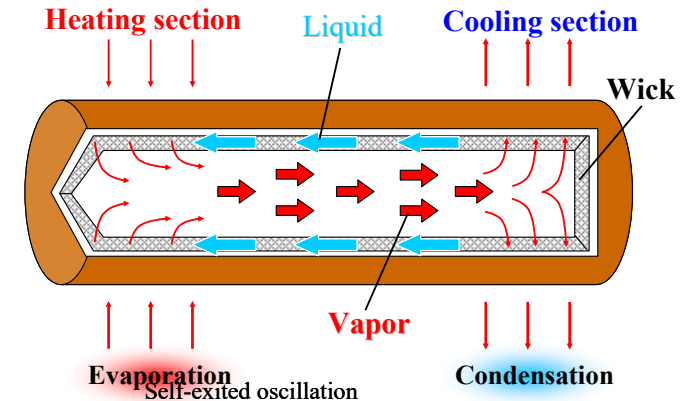
# 従来型ヒートパイプの問題点

## ①毛管型ヒートパイプ (φ3mm、300mm)

最大熱輸送速度 $Q_{max}$  : 10W

実効熱伝導率 $k_{ef}$  : 銅の40倍

細径化 → 急激に性能が低下



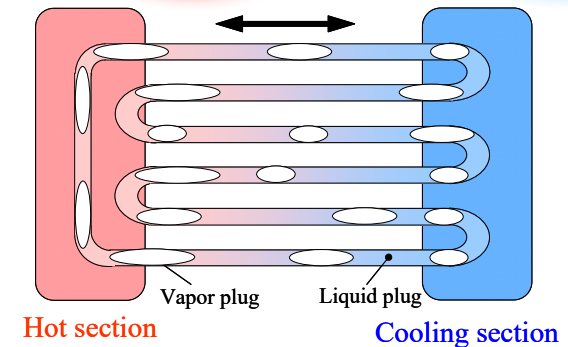
## ②蛇行管式自励振動ヒートパイプ

最大熱輸送速度 $Q_{max}$  : 4 W

実効熱伝導率 $k_{ef}$  : 銅の100倍

ターン数を多く要する

水平設置で作動しにくい



自励振動をどうやって安定に起こす？

# ポンポン船の駆動力は自励振動！



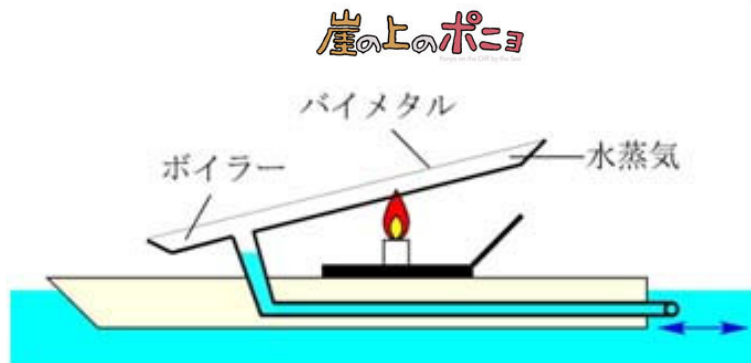
崖の上のポニョ  
宗介の  
ポンポン船

ローソクの炎で動く！  
なつかしのプリキ玩具！

【本体サイズ】  
約W200×H70×D80mm

映画に登場する「宗介のポンポン船」を、日本のプリキ玩具技術で再現！  
蒸気力で「ポンポン」と、軽快な音を立てながら、水面を進みます！  
科学の心を刺激する不思議なおもちゃ「ポンポン船」の復活です！

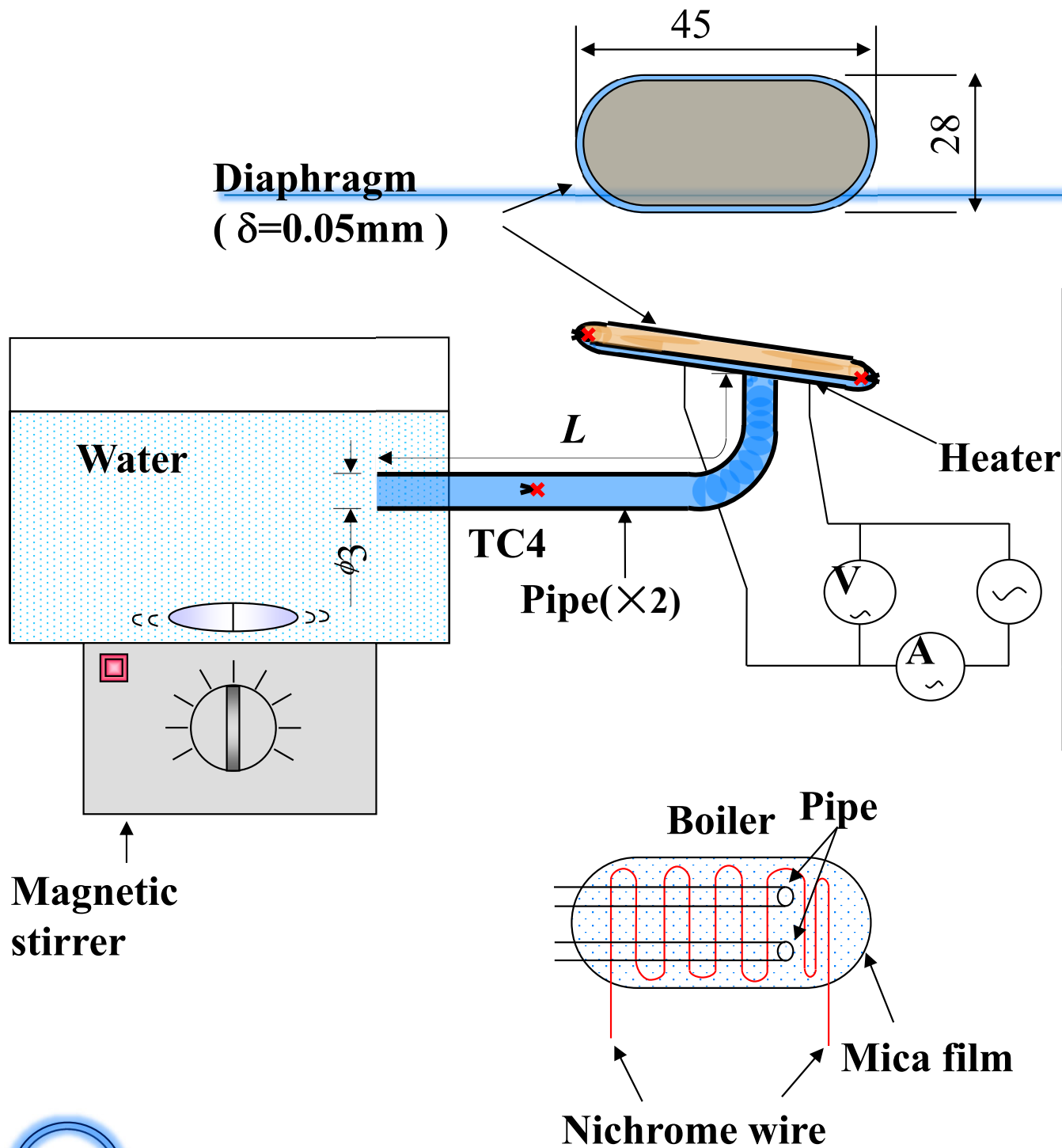
【セット内容】  
●ポンポン船本体 ●ローソク10本 ●ローソクトレー ●スポイト ●取扱説明書  
【パッケージ(内箱)サイズ】約W230×H90×D120mm



¥ 22,800

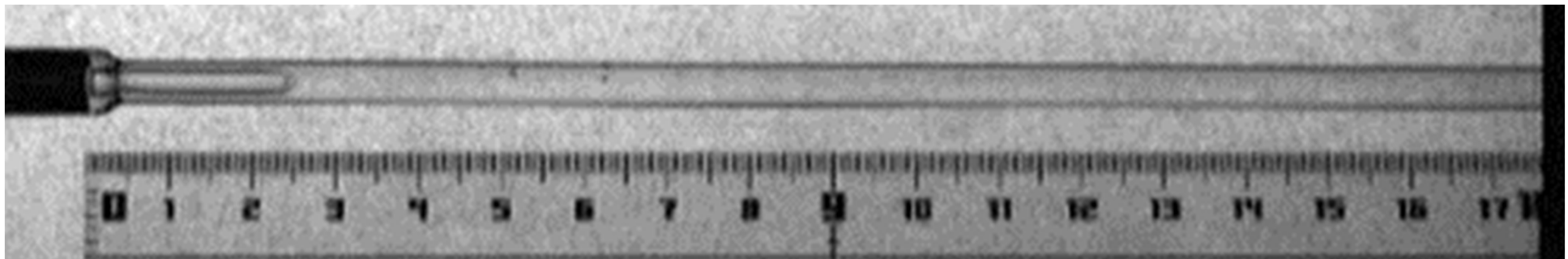


¥ 1,000



振動周波数：3~5Hz

# 単一の直管からなる自励振動ヒートパイプ



$$Q_h = 40W$$

撮影コマ数  
500frame/sec

再生コマ数  
30frame/sec

最大加熱量  $Q_{h,max} = 90W$  (従来の約10倍)

実効熱伝導率  $k_{ef}$  : 銅の100倍

# 講演内容（沸騰・蒸発）

## ①冷却技術

①-1 **ハニカム冷却**（高熱流束除去、熱伝達率向上）

①-2 **ヒートパイプ**（熱の超伝導体：銅の100倍の有効熱伝導率）

## ②沸騰・蒸発の工学的活用

②-1 **マイクロポンプ**（突沸活用）

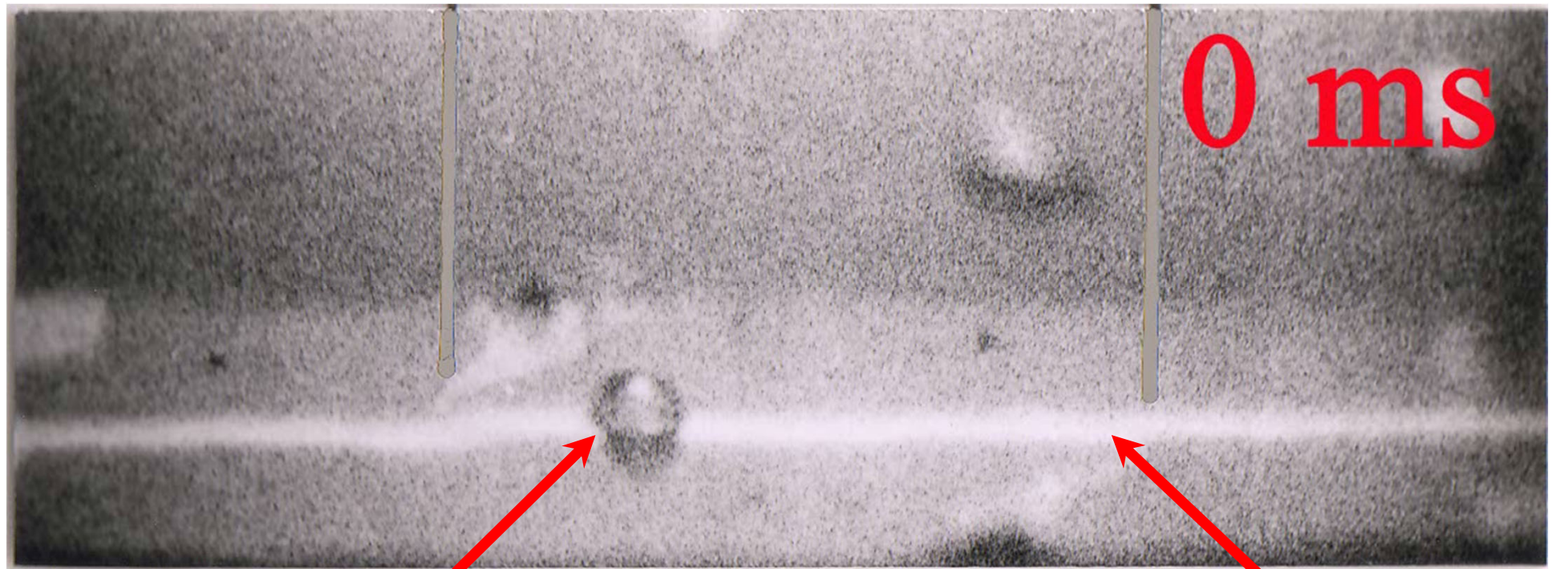
②-2 **瞬間高温蒸気生成**（メニスカス蒸発活用）



# 麦わら帽子型気泡

## 沸騰伝播現象：

高過熱度で沸騰が開始した直後に加熱面に沿って沸騰領域が急速に広がる特異な現象



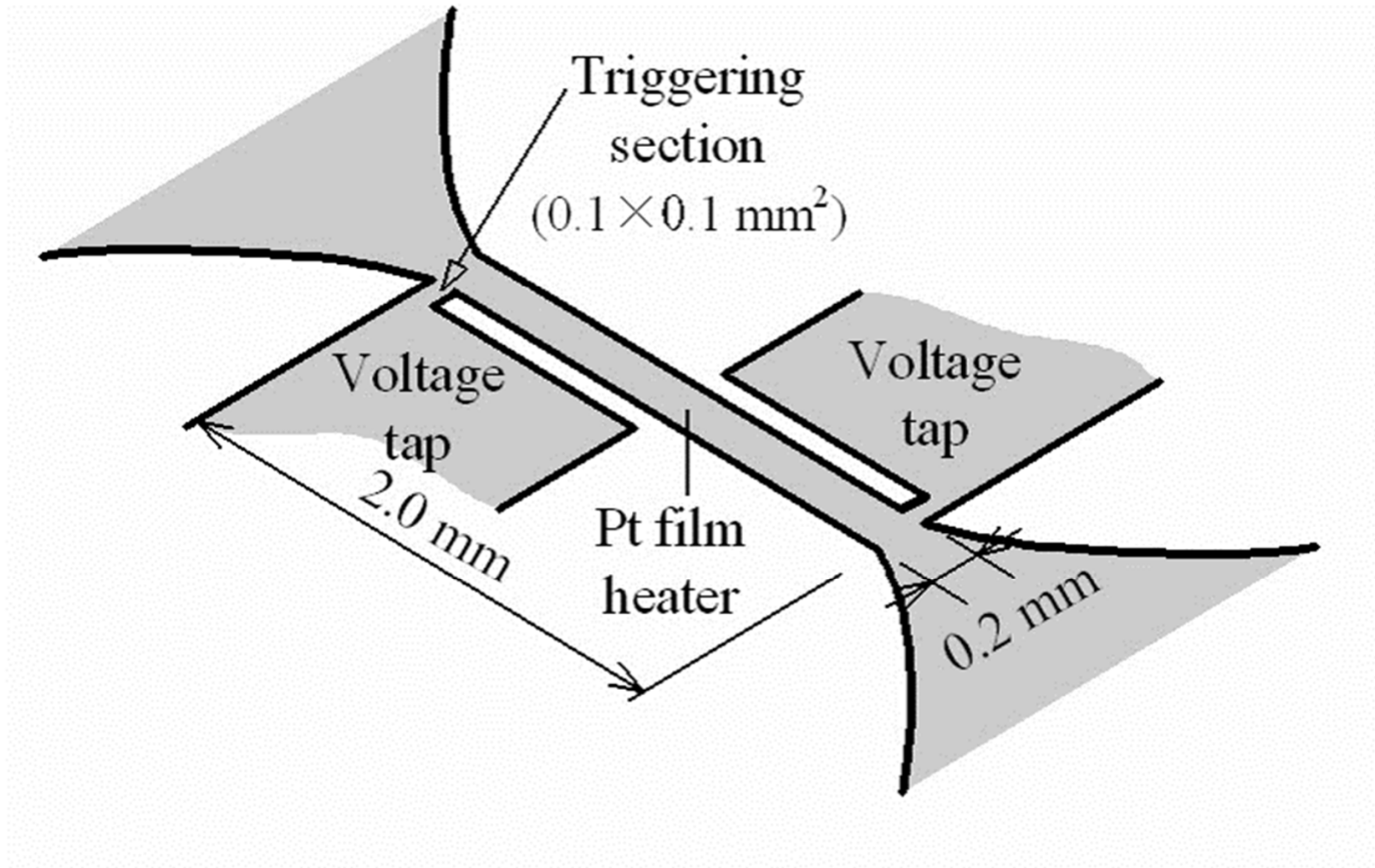
初期気泡

ヒータ  
(4 mm×40 mm)

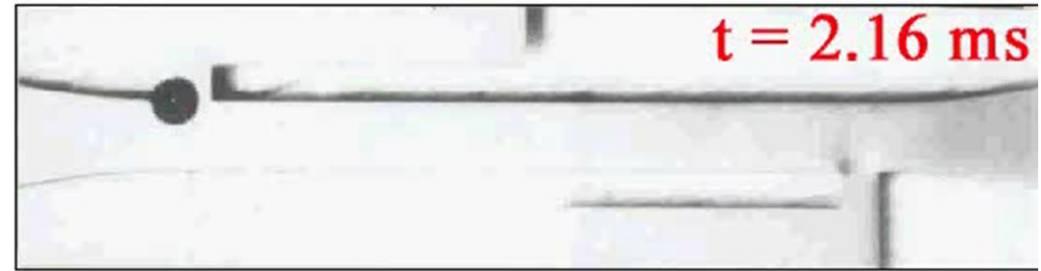
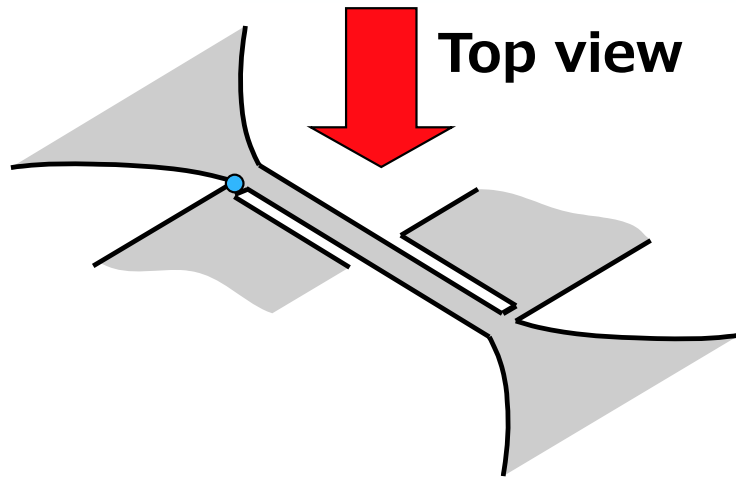
ステップ状に急速加熱(液体窒素・大気圧)、 $Q = 66 \text{ kW/m}^2$ 、 $\Delta T_{sat} = 24.4 \text{ K}$



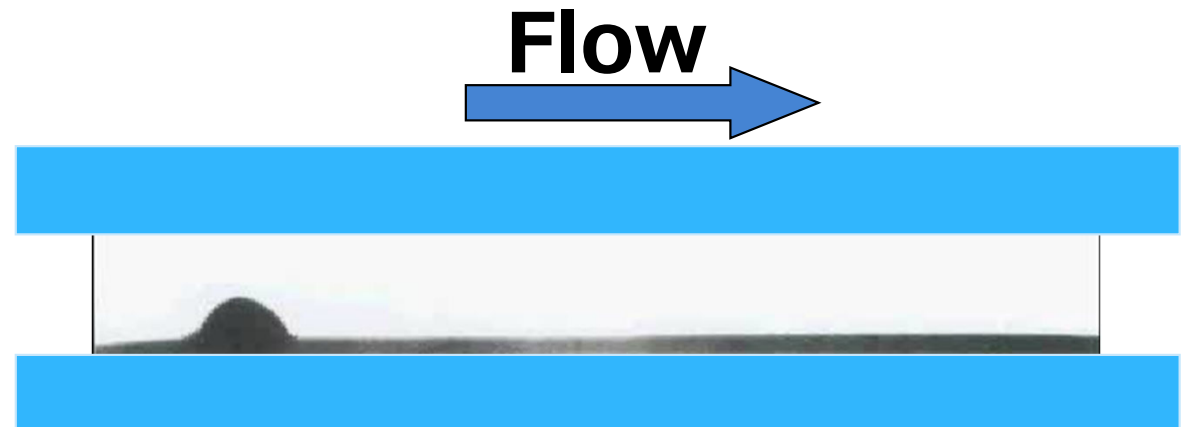
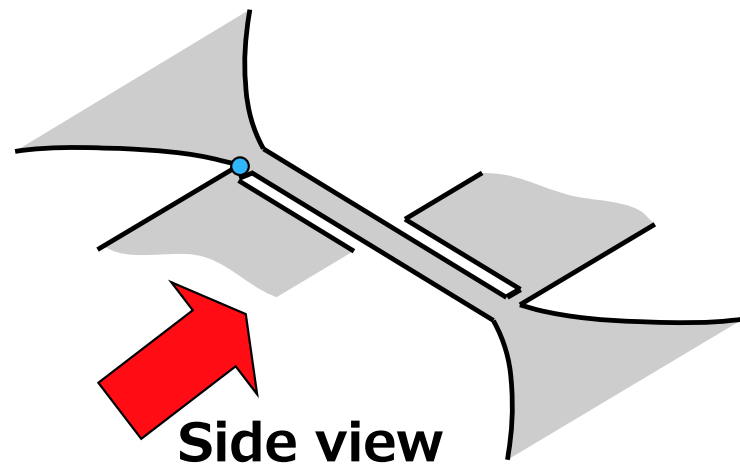
# 沸騰伝播現象の制御



# 沸騰伝播現象の制御



(a) Top view



(b) Side view

(Printer ink,  $Q_{av} = 12.5 \text{ MW/m}^2$ ,  $\Delta T_{sat, trig} = 110 \text{ K}$ )

**機械的駆動部不要**

# 講演内容（沸騰・蒸発）

## ① 冷却技術

①-1 **ハニカム冷却**（高熱流束除去、熱伝達率向上）

①-2 **ヒートパイプ**（熱の超伝導体：銅の100倍の有効熱伝導率）

## ② 沸騰・蒸発の工学的活用

②-1 **マイクロポンプ**（突沸活用）

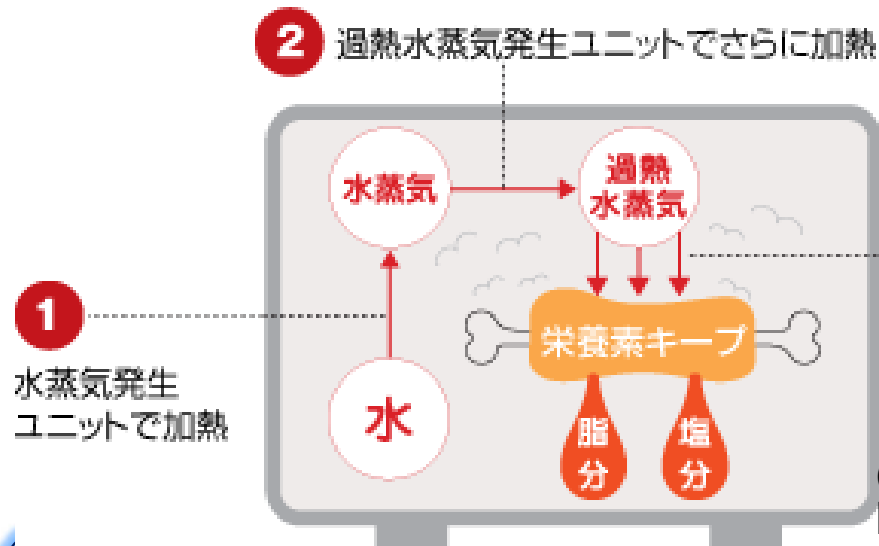
②-2 **瞬間高温蒸気生成**（メニスカス蒸発活用）



# 水で焼く、新発想の調理器です。 300℃の蒸気で調理



過熱水蒸気システムの仕組み(概念図)



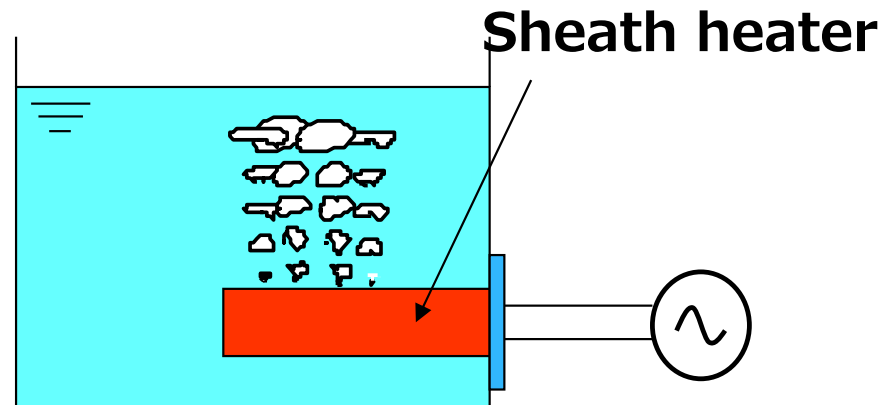
ヘルシオ効果 (1) **脱油**

ヘルシオ効果 (2) **減塩**

ヘルシオ効果 (3) **ビタミンCキープ**

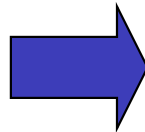
(Sharp HPより抜粋,  
<http://www.sharp.co.jp/products/axhc1/text/p2.html>;

# 従来の蒸気生成法



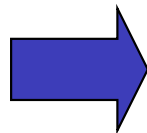
## シースヒータと水の熱容量を減らす

シースヒータの熱容量減少



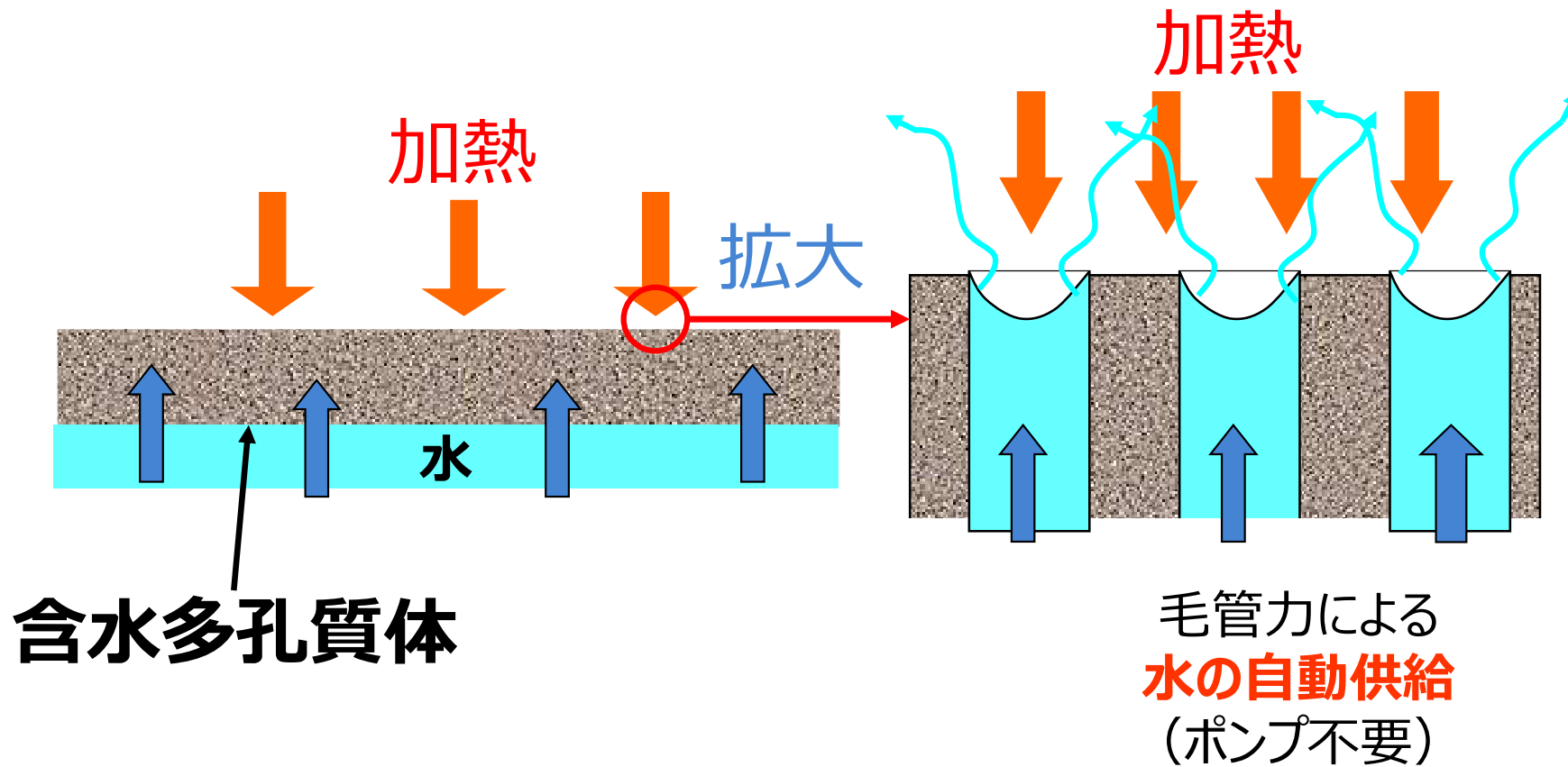
細いニクロム線 ( $\Phi 0.3\text{mm}$ )

水の熱容量減少



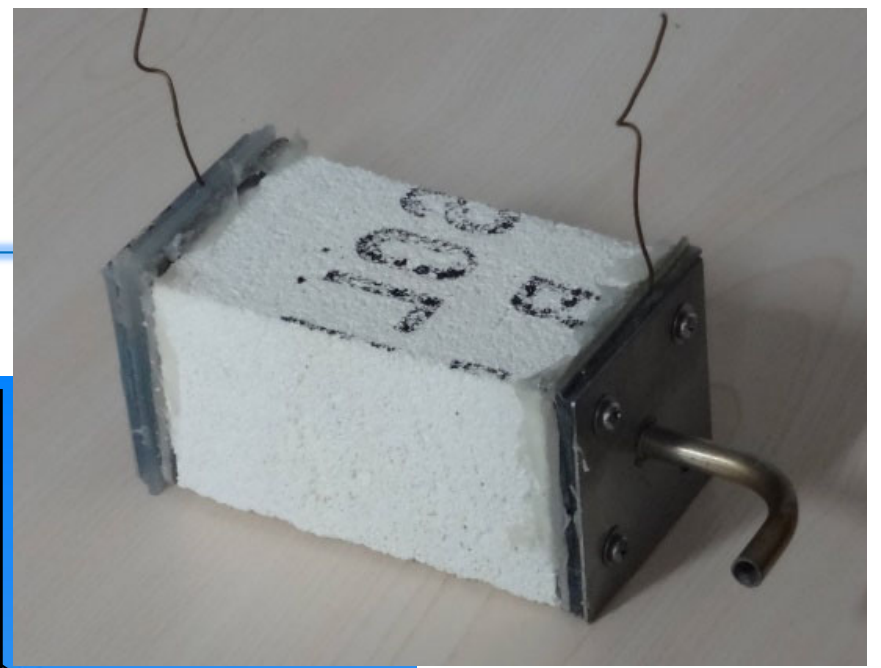
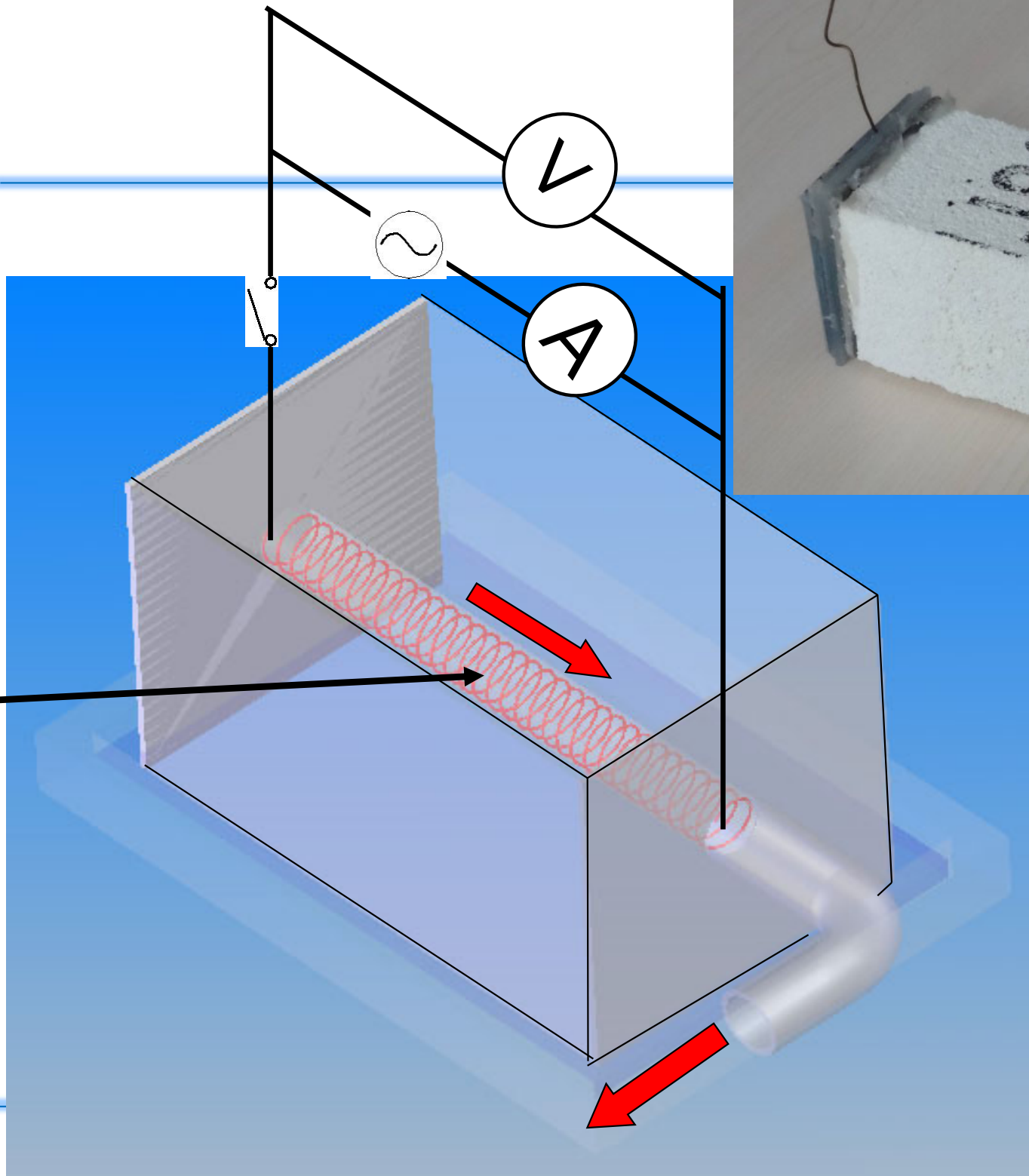
含水多孔質体の利用

# 含水多孔質体を用いた蒸発法

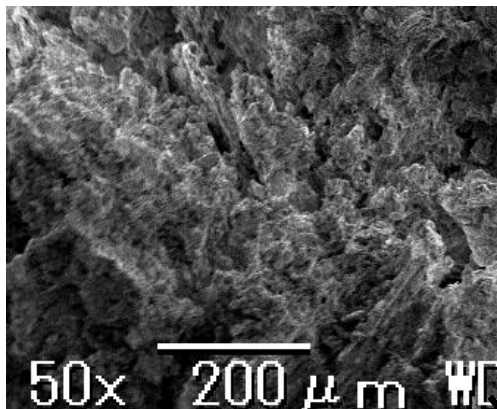


原理的には**飽和蒸気は一瞬で生成できるはず！**

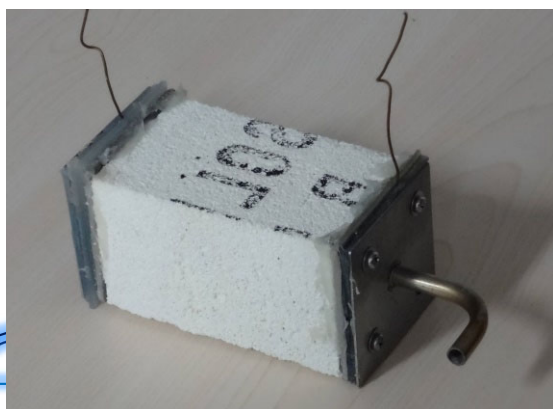
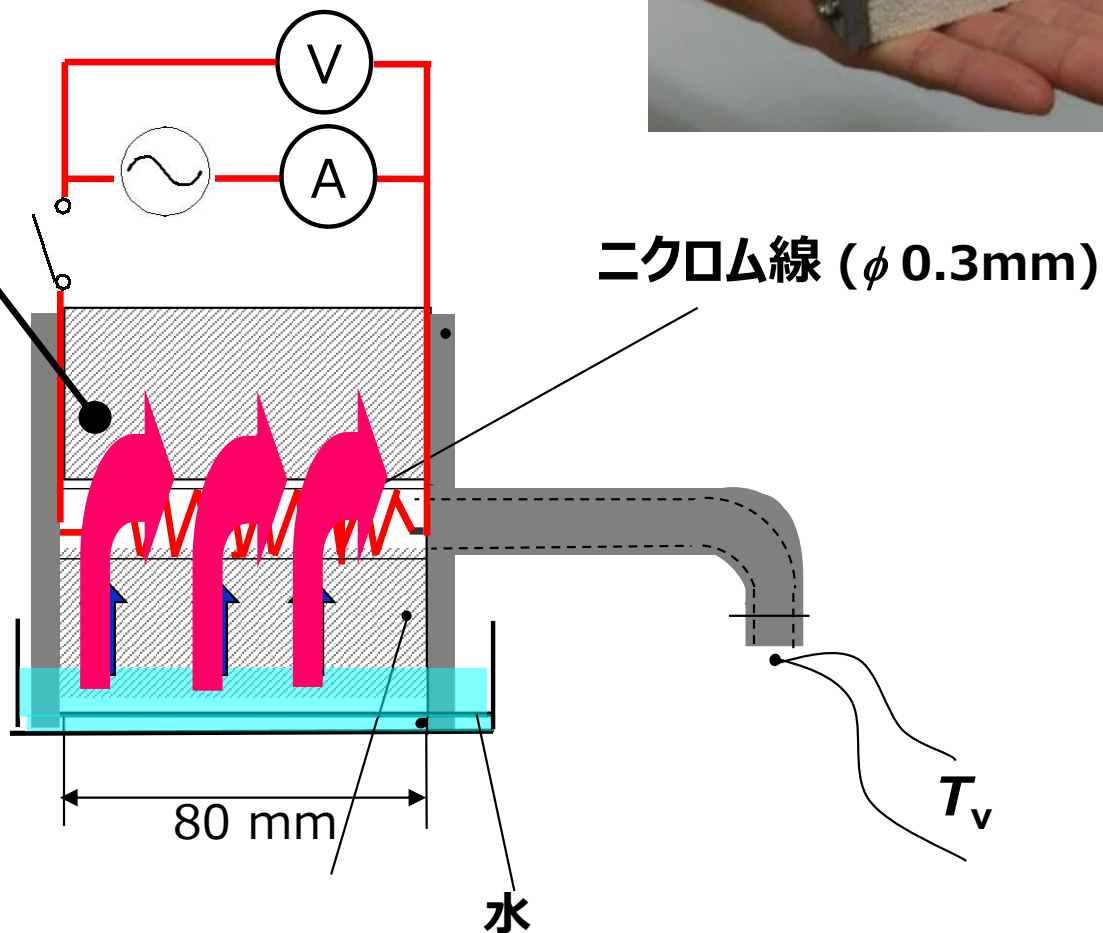
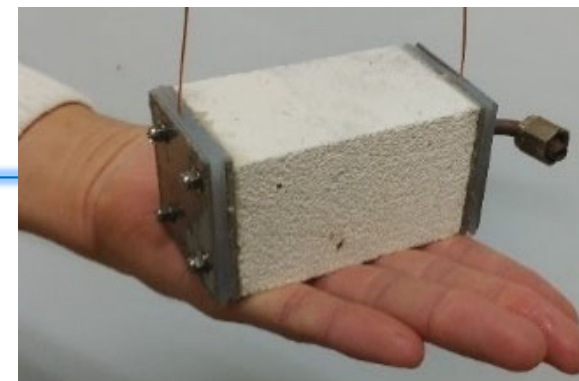
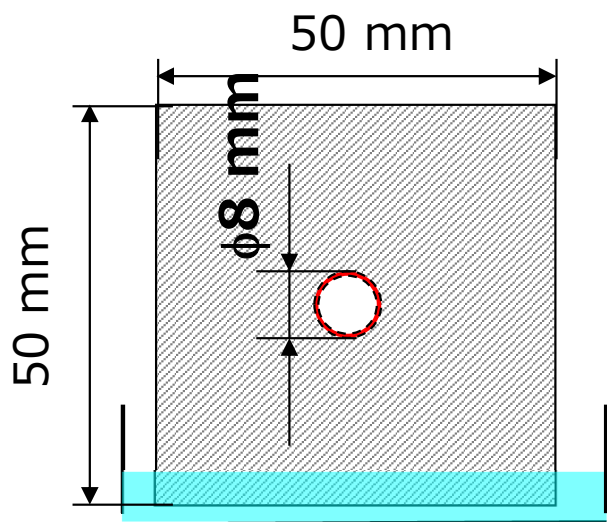
ニクロム線  
( $\phi$  0.3mm)



# 装置概要

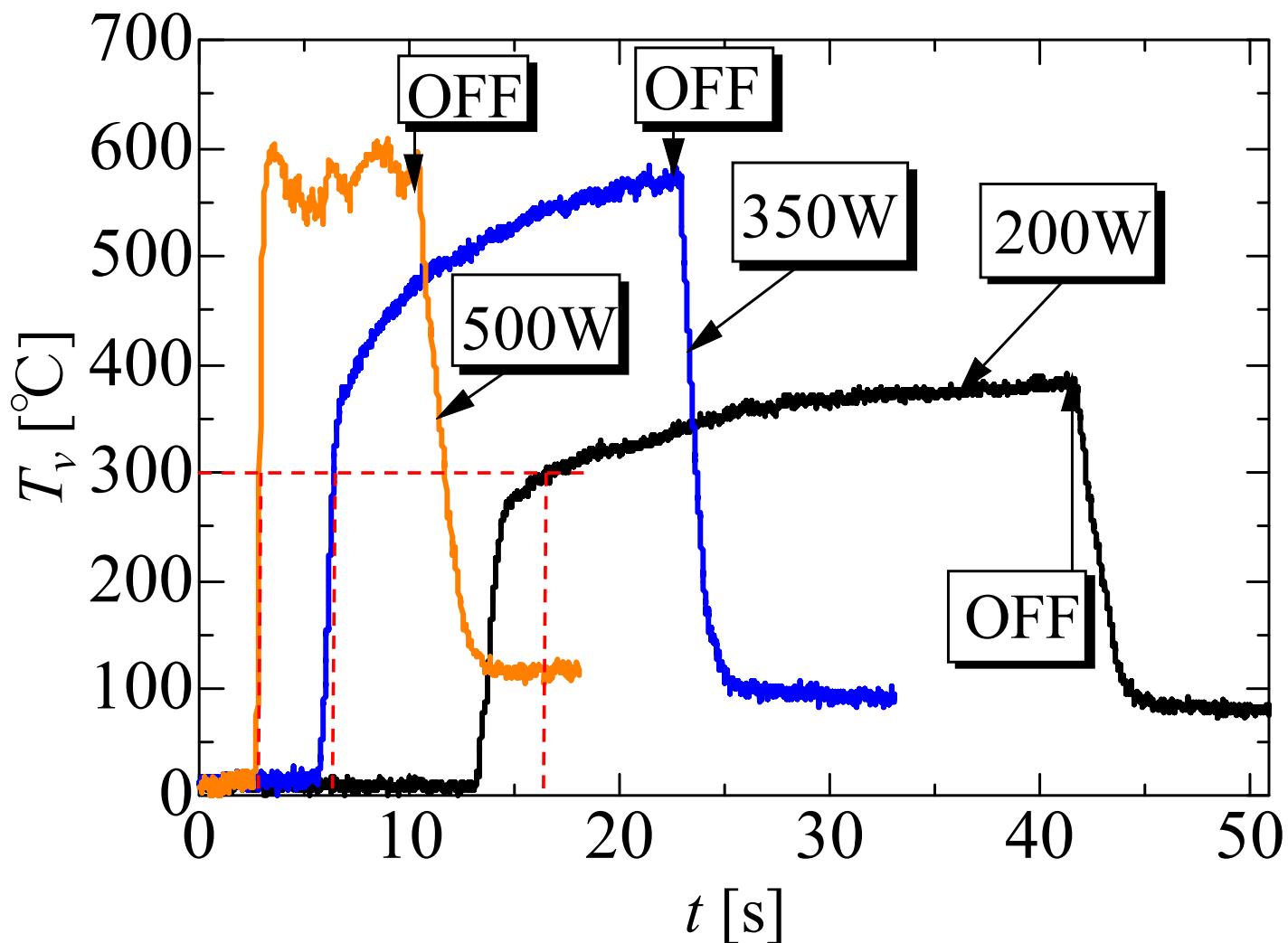


断熱レンガブロック





# ステップ状に加熱した場合における発生蒸気温度の変化

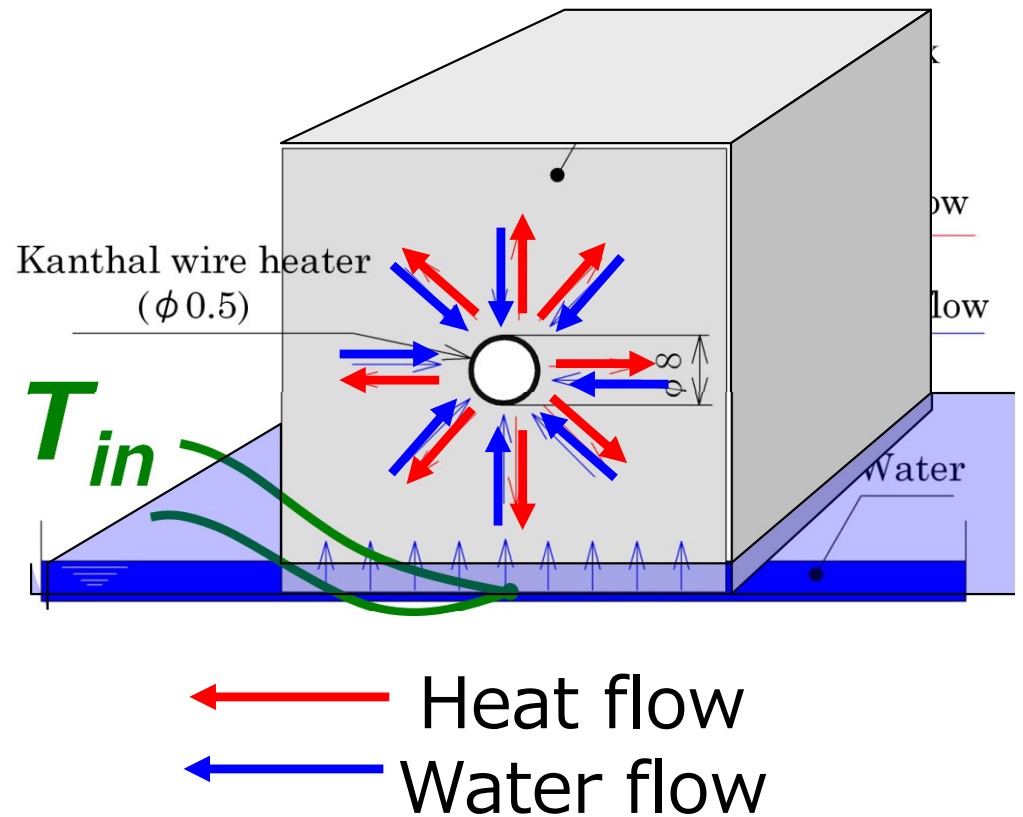
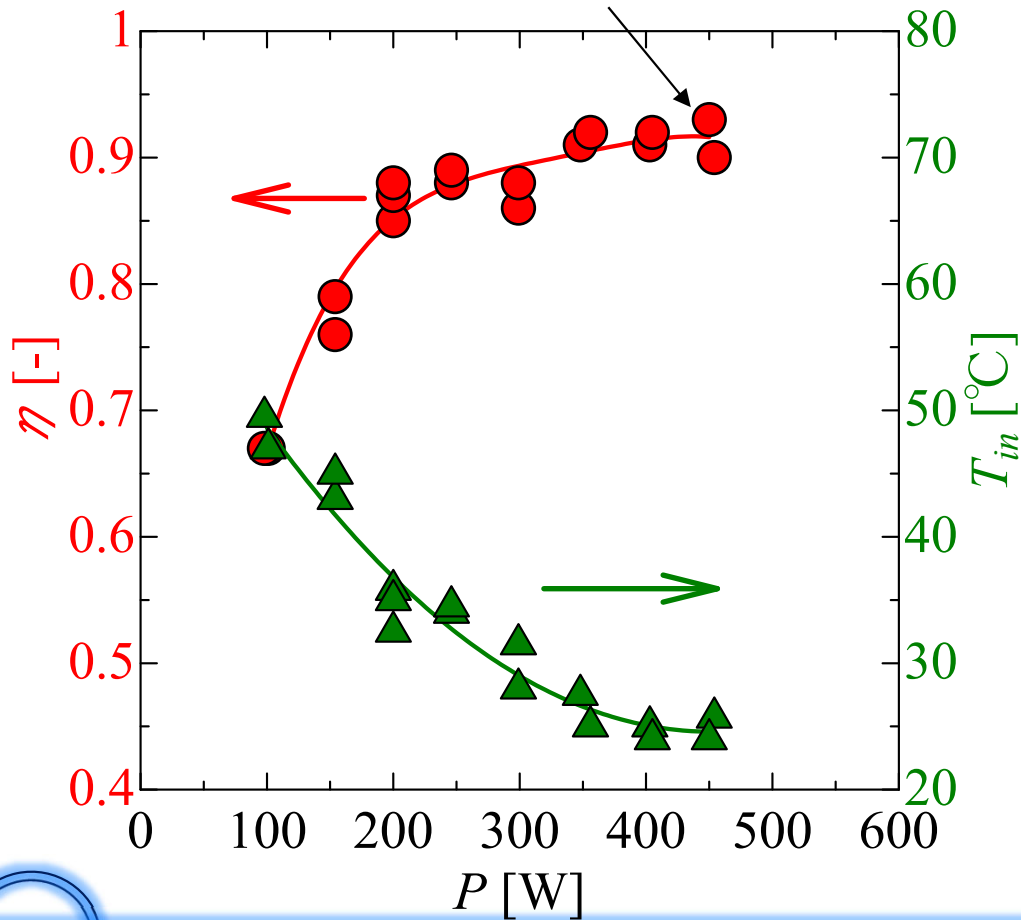


たったの2秒で常温水から300°Cの蒸気を生成！！

# エネルギー利用効率

$$\eta \equiv \frac{Q}{P} = \frac{\text{流体に伝わったエネルギー}}{\text{投入エネルギー}}$$

エネルギー利用効率:  
90% at 450 W

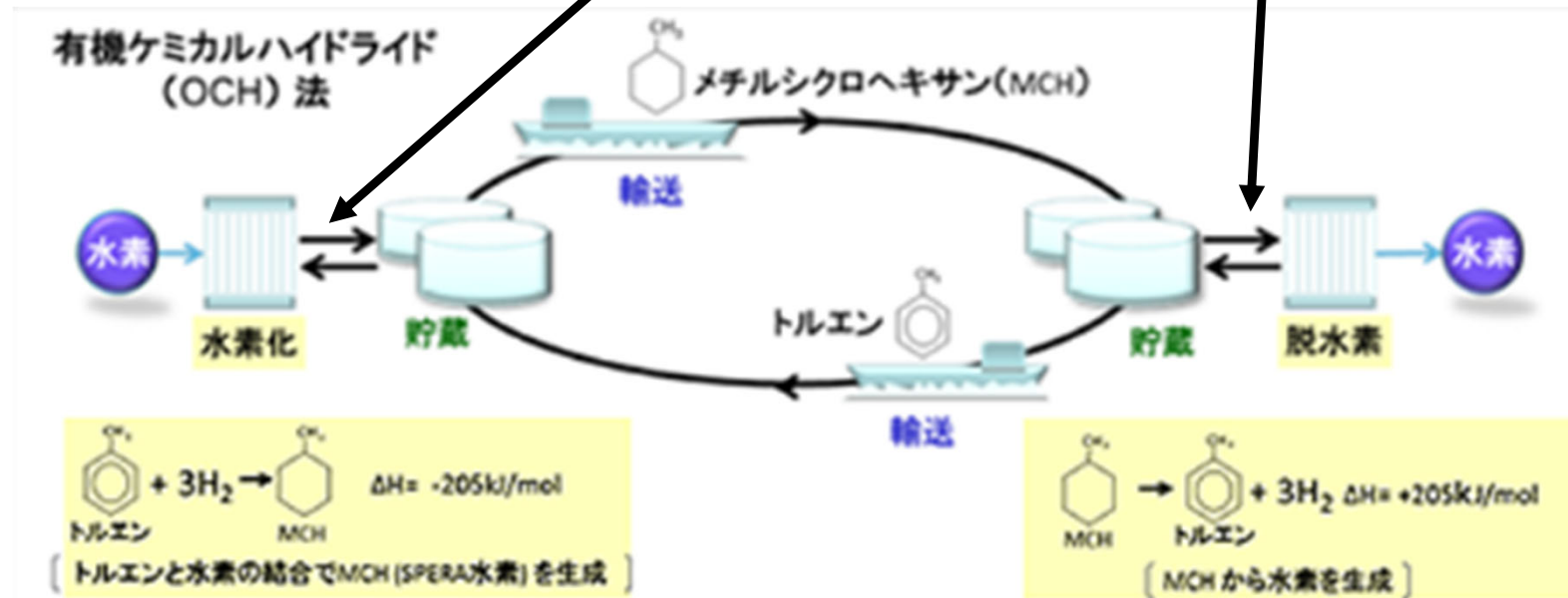


# 蒸発技術高度化の必要性



## 気相反応用気化器の要求

- 高速スタートアップによる**転化率低下**を抑制



## 有機ケミカルハイドライド法

# まとめ

## 伝熱：伝導・対流・ふく射


### 熱工学講座

熱エネルギー変換工学：対流

熱流体物理：伝導・ふく射

これまで森が実施してきた一部の研究（沸騰・蒸発）を紹介させて頂きました。これからも、カーボンニュートラルに資する研究を継続的に行っていきますので、ご協力、ご支援の程宜しく申し上げます。

---



ご清聴ありがとうございました！