

蒸発・沸騰を用いた 飛躍的な伝熱促進技術の開発

NEDO先導研究プログラム・相界面制御による熱・物質移動促進プロセス技術開発
(B2)「表面・構造機能化による次世代熱物質交換プロセス・制御技術開発」



株式会社UACJ



ダイカテック株式会社



産業技術総合技術研究所

- ①省エネルギー研究部門
- ②極限機能材料研究部門
- ③福島再生可能エネルギー研究所
- ④化学プロセス研究部門



株式会社長峰製作所



徳島大学



山形大学



「相界面制御による熱・物質移動促進プロセス技術開発」によるCO₂削減へのインパクト (2030年～2050年)

化学プラント分野

化学産業の40%は分離
(ほとんどは蒸留)
(約2,950 万ton-CO₂/年)
蒸留の省エネ化が必要



解決手段の鍵となる技術

熱伝達率向上技術

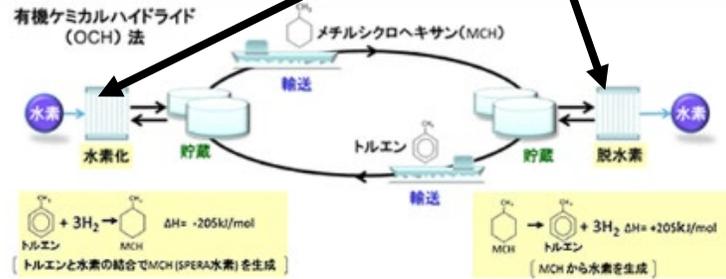
蒸発技術高度化の必要性

従来の問題点

- ・低応答性
- ・低制御性

気相反応用気化器の要求

- ・ロード変動対応 (ロード負荷による転化率低下を抑制)
- ・**高速スタートアップ**



有機ケミカルハイドライド法

15%の省エネを見込むと

約1,000万 ton-CO₂/年
(2030年)

解決手段の鍵となる技術

急速高温蒸気生成技術

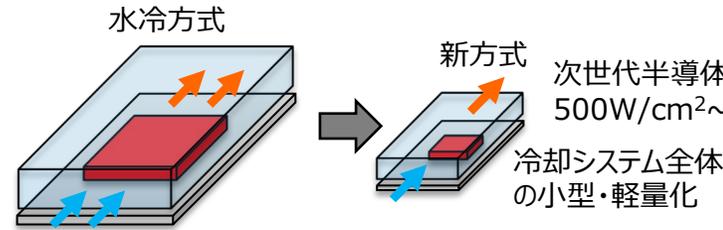
質問4 省エネへの貢献(15%)の内、蒸発・沸騰技術の貢献割合は？

回答：沸騰技術の方が適用できる領域が広い

電子デバイス分野

パワーデバイス<高熱流束下の発熱体冷却>

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



直接

効果

734 万t-CO₂/年

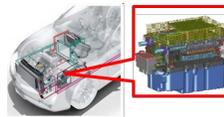
※電力変換効率1.0%向上を仮定して、産業、民生、運輸分野の電動化を想定した試算

間接

効果

1,515 万t-CO₂/年

※NEDO資料(2016)より、SiC半導体の普及効果

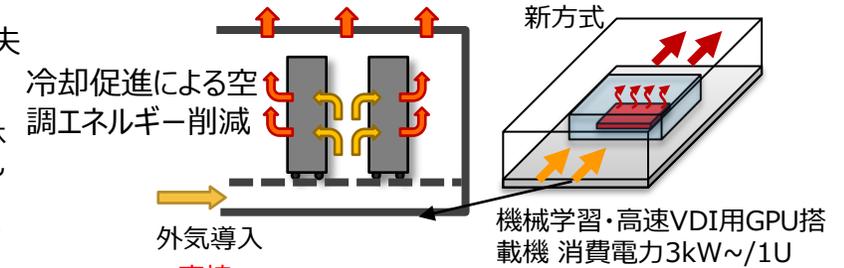


解決手段の鍵となる技術

限界熱流束向上技術+熱伝達率向上技術

データセンター <小温度差での熱交換性能向上>

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-CO₂/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

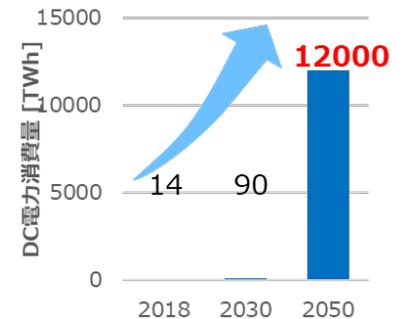
世界全体では…

27,500 万t-CO₂/年



	2030年 CO ₂ 削減量 (ton-CO ₂ /年)	2050年 CO ₂ 削減量 (ton-CO ₂ /年)
化学プラント分野	1,000万	2,000万
電子デバイス分野	1,974万	∞
合計	2,974万	∞

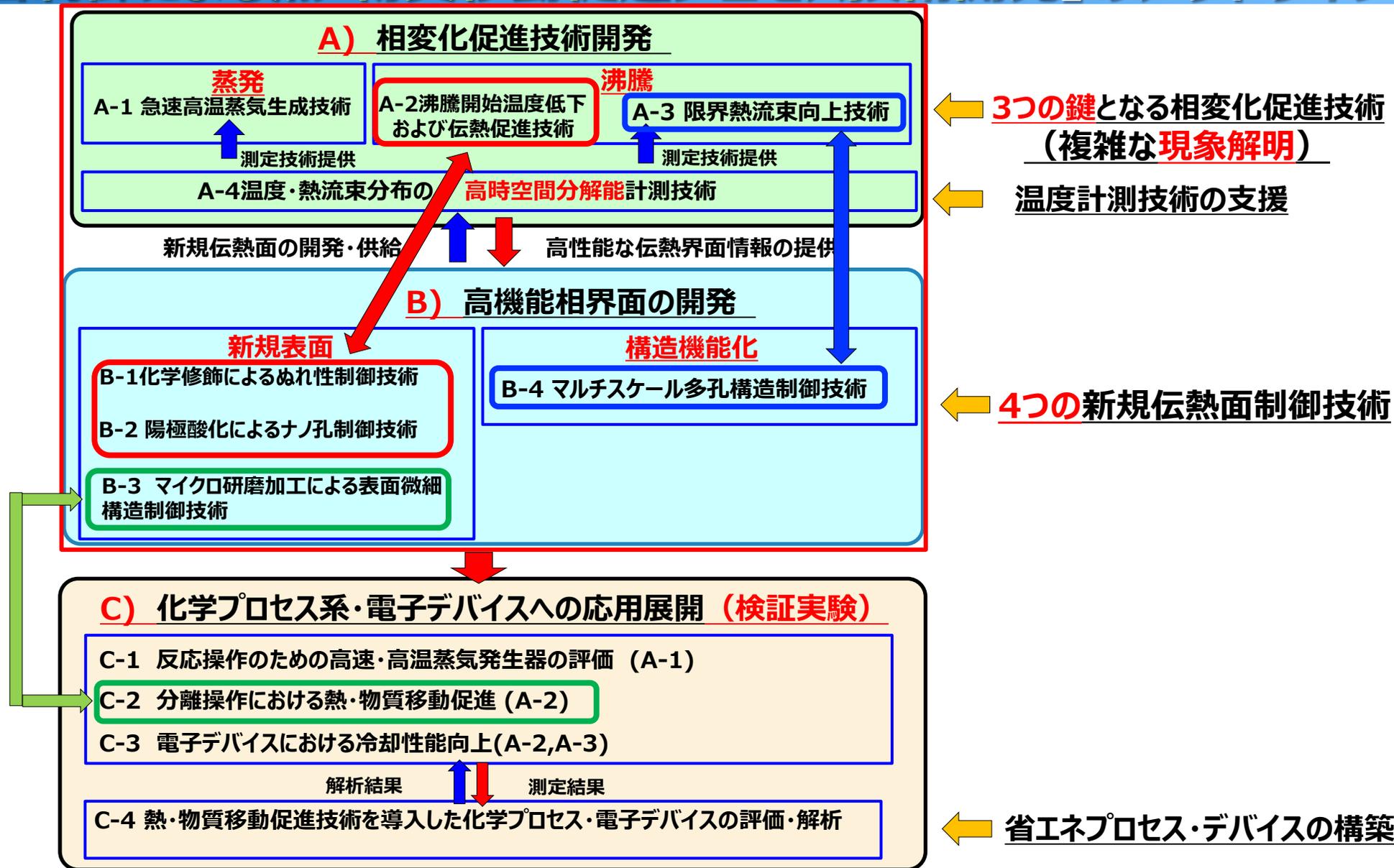
データセンター電力消費量の予測



※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)

I-1. 研究開発の進捗 (概要)

「相界面制御による熱・物質移動促進プロセス技術開発」のアウトライン

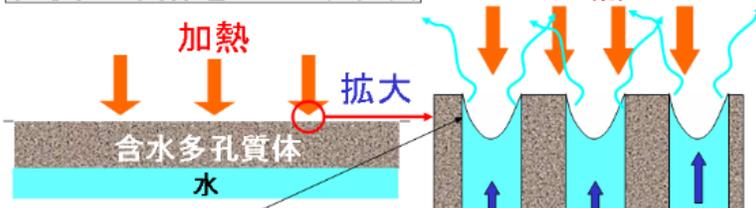


I - 2. 研究開発の進捗 (具体的内容・ポイント)

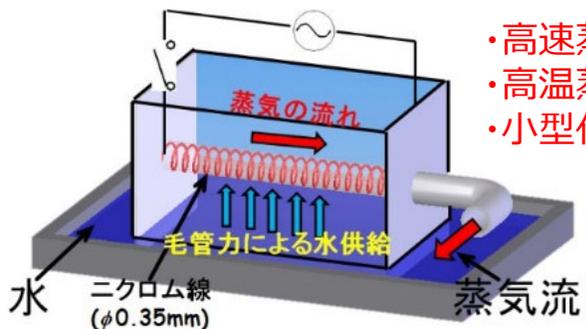
A-1 急速高温蒸気生成技術(蒸発) (九州大学)

C-1の要素実験テーマ

含水多孔質体を用いた蒸発法

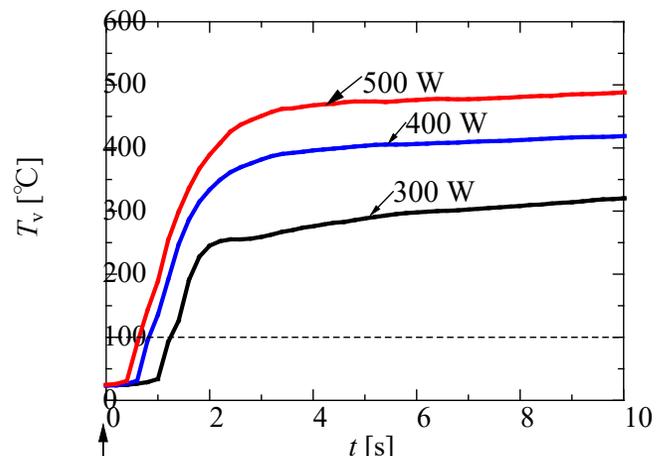
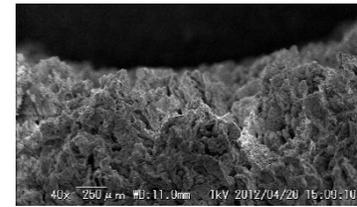
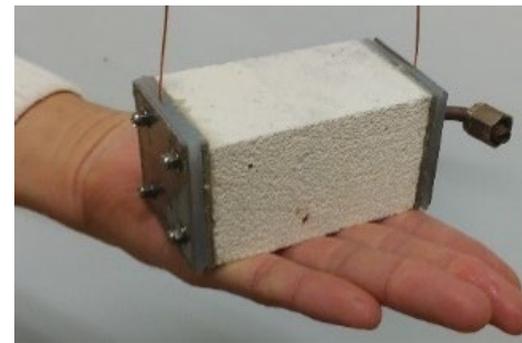


メニスカス部: 熱容量は極小 → 瞬時に100°C以上になり蒸発 → 毛管力による水の自動供給 (ポンプ不要)

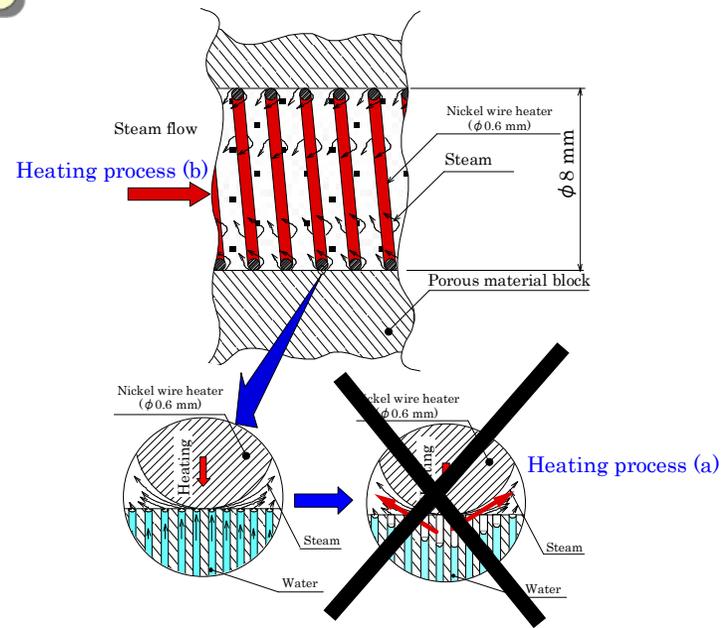


- ・高速蒸気生成
- ・高温蒸気生成
- ・小型化容易

急速高温蒸気生成器



ON 過熱蒸気生成の応答性 (数秒で常温から高温過熱蒸気を生成)

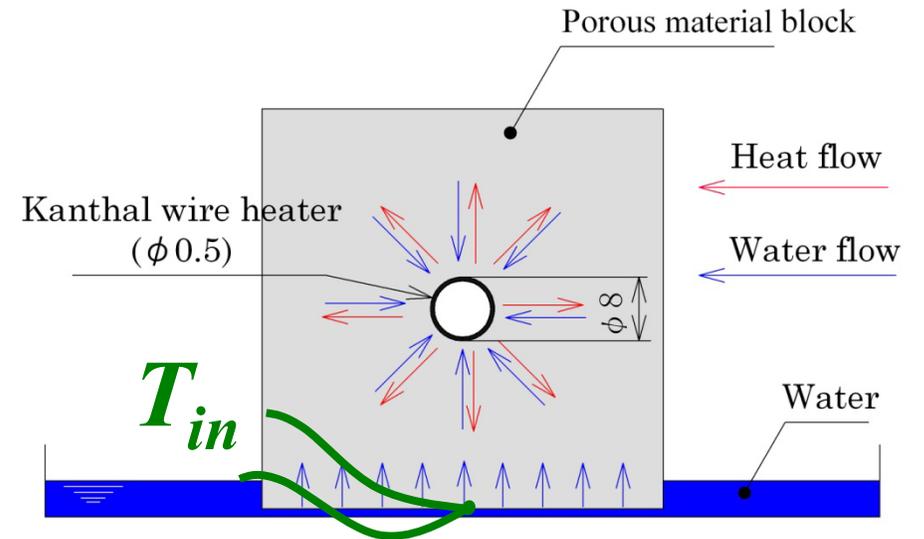
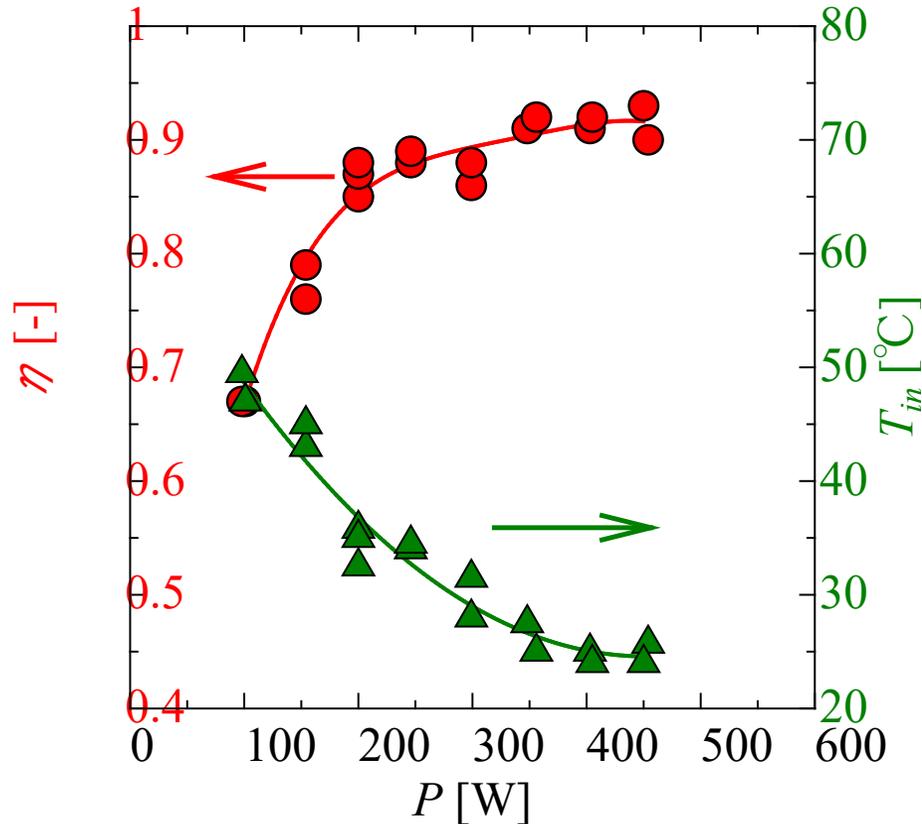
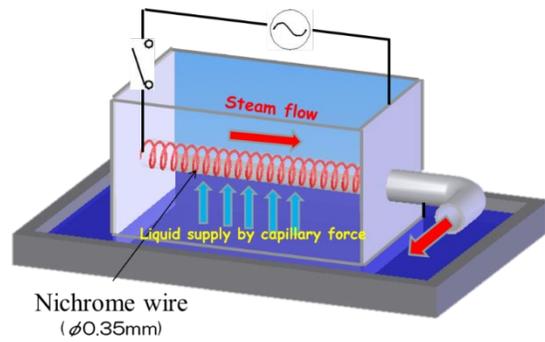


- 当初の想定した過熱蒸気の過熱過程
- ①ヒータ直下のドライアウト領域における加熱 (マイクロチャンネル効果)
 - ②軸方向に流出する際に加熱

Energy utilization rate and inlet temperature T_{in} as a function of input power (steady state condition)

$$\eta \equiv \frac{Q}{P} = \frac{\text{Heat transfer rate to fluid}}{\text{Input power}} = \frac{\dot{m}c_{pl}(T_{sat} - T_{in}) + \dot{m}h_{fg} + \dot{m}c_{pv}(T_v - T_{sat})}{I \cdot V}$$

Sensible heat of water
Latent heat of vaporization
Sensible heat of steam



Energy conversion rate:
More than 90% at 450W

I - 2. 研究開発の進捗 (具体的内容・ポイント)

A-2 沸騰開始過熱度低下技術および伝熱促進技術の開発 (九州大学)

沸騰曲線と各種熱問題

- **ONB** : 沸騰開始点(Onset of Nucleate Boiling)
ヒートパイプの初期動作の安定化
- **CHF** : 限界熱流束点(Critical Heat Flux)
パワーデバイス冷却 (高熱流束熱除去)
原子炉熱出力の上昇
- **HTC** : 熱伝達率(Heat Transfer Coefficient)
熱交換性能の高度化 (蒸発部)
特に減圧沸騰でHTC低下が深刻

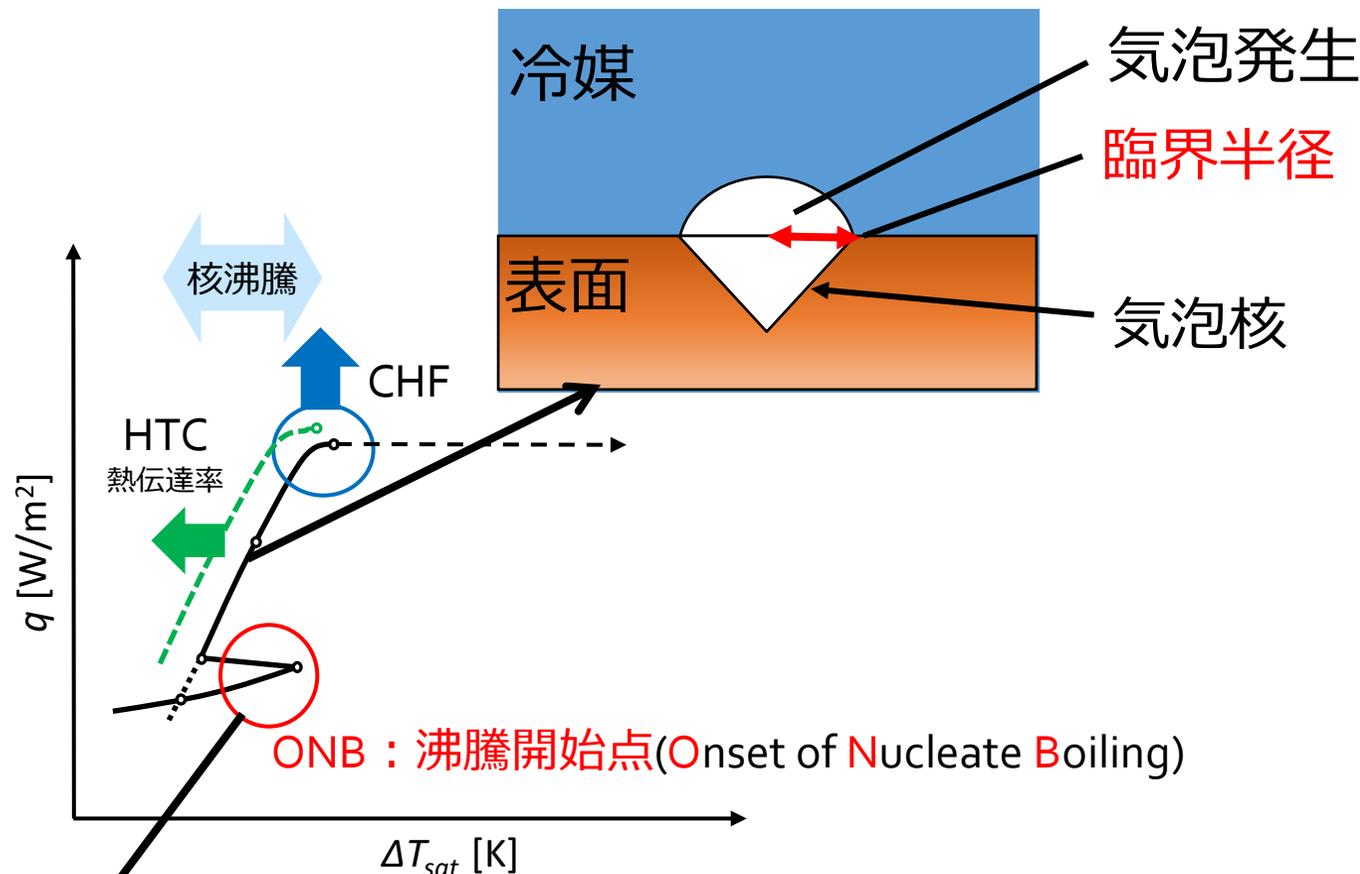
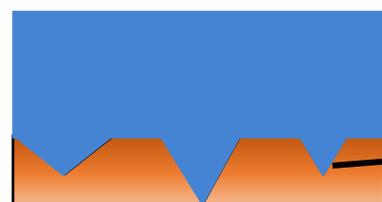
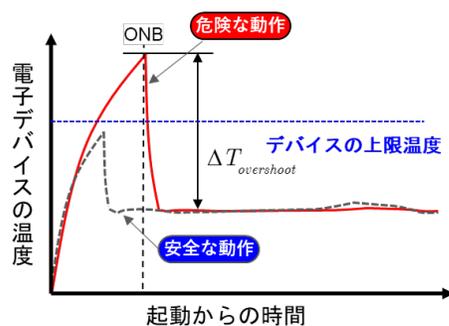
電子部品の動作上限温度

CPU: 85~105°C

FPGA: 85~105°C

Siパワーデバイス: 150°C

SiCパワーデバイス: 300~400°C



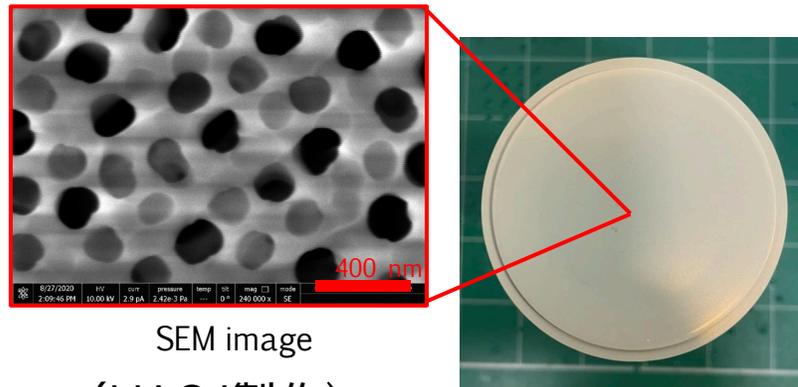
ぬれが良いとキャビティがぬらされ気泡核消滅

過熱され突沸現象が起きる

I-2. 研究開発の進捗 (具体的内容・ポイント)

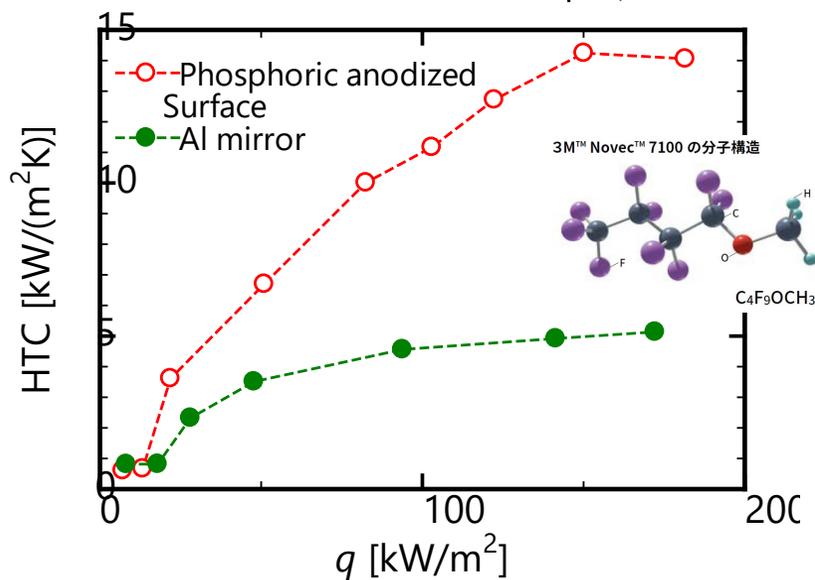
A-2 沸騰開始過熱度低下技術および伝熱促進技術の開発(九州大学)

B-1化学修飾によるぬれ性制御技術, B-2陽極酸化によるナノ孔制御技術



SEM image
(UACJ製作)

リン酸アルマイト処理面
($h = 10 \mu\text{m}$, $d = 200 \text{ nm}$)



熱伝達率が、約3倍まで大幅に促進！

(作動流体：HFE7100 (電気絶縁性流体))

I - 2. 研究開発の進捗 (具体的内容・ポイント)

A-3 限界熱流束向上技術 (九州大学)

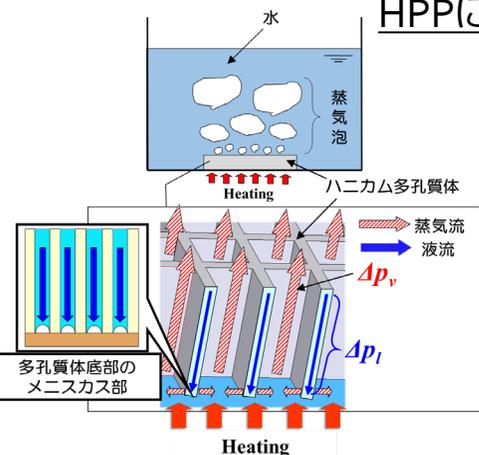
HPPによる限界熱流束(CHF)向上メカニズム

限界熱流束(CHF)発生条件

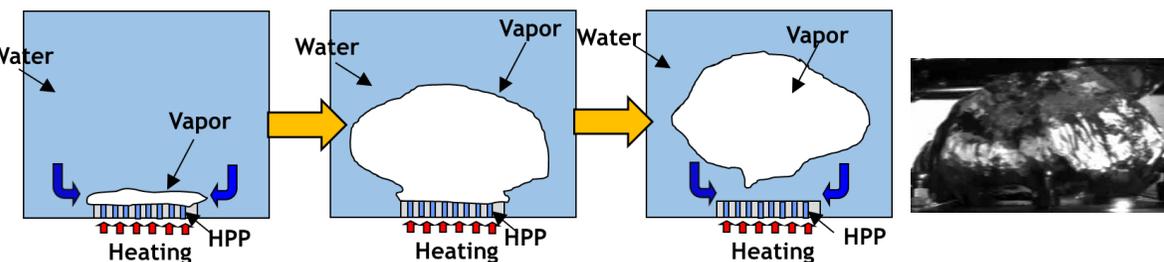
$$P_{c,max} = \Delta P_l + \Delta P_v$$

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)



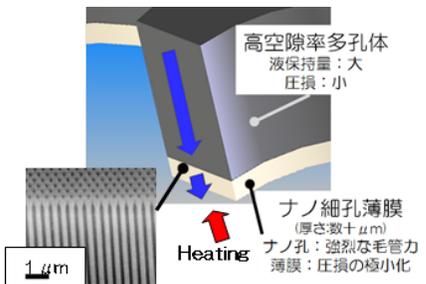
ハニカム多孔質体(HPP)を二層構造化する意義



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



まとめ

伝熱面性状を陽極酸化技術、多孔質体形成技術を用いることで、相変化（沸騰・蒸発）を伴う伝熱性能を大幅に改善する技術を開発した。具体的には以下の通りである。

- ・含水多孔質体を用いることで高温の蒸気（～1000℃）を短時間（秒オーダー）で生成する技術（適用先：過熱水蒸気調理器、殺菌器、瞬間熱水生成器、化学プラントの蒸発器）
- ・沸騰開始過熱度を改善する技術（適用先：データセンター、パワーデバイス）
陽極酸化技術に作成したリエントラントキャビティ孔活用
【性能：裸面の場合：23K→新技術：15K、74℃】
- ・多孔質体と加熱細線の活用
【性能：裸面の場合：35K→新技術：20K、80℃】
- ・金属多孔質体内部構造制御による超高熱流束除去技術（適用先：データセンター、パワーデバイス、車載用インバーター）
【性能：裸面の場合：120 W/cm²→新技術：500 W/cm²以上】