



樹脂コーティングを用いた液体窒素の 沸騰伝熱促進機構の解明

高畑 一也 (NIFS)

内容

- はじめに
- 断熱層のパラドックスとは
- 研究の背景
- 実験方法と結果
- まとめ



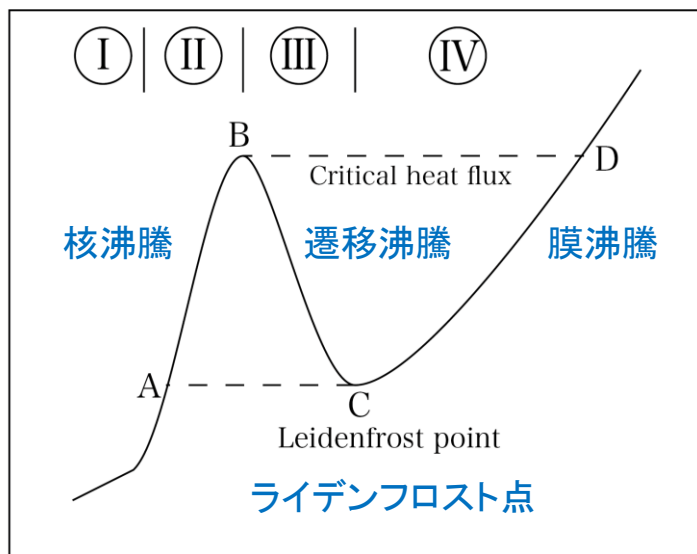
はじめに

- 極低温機器の配管、タンクなどを、液体窒素などの飽和液体を用いて初期冷却する際、冷媒の消費量削減、時間効率の観点から予冷時間の短縮が重要となる。
- 過去の研究では、伝熱面に樹脂など低熱伝導率の材料をコーティングすることにより、沸騰伝熱が促進し、予冷時間が短縮することが実験的に知られている。これを「断熱層のパラドックス」と呼んでいる。
- 本研究では、各種フッ素樹脂をコーティングした銅板で急冷実験を行い、伝熱促進機構の解明に取り組んだ。



断熱層のパラドックスとは

熱流束
 $\text{Log}(Q/A)$

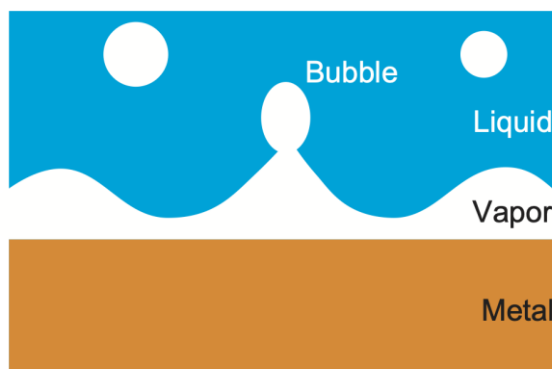


$\text{Log}(T_w - T_{\text{sat}})$ 過熱度

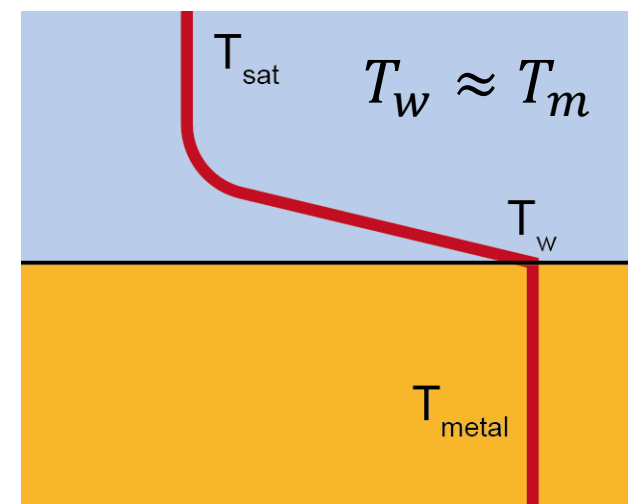
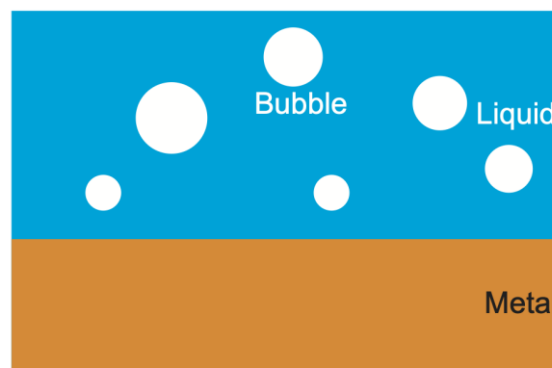
I: natural convection, II: nucleate boiling, III: transition boiling, and IV: film boiling

典型的なプール沸騰曲線

膜沸騰

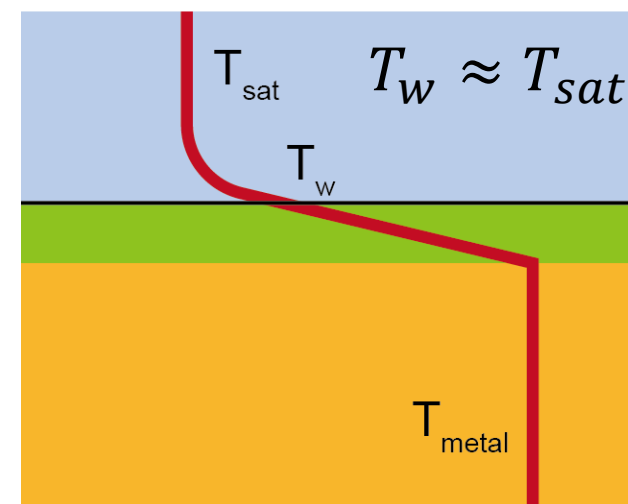


核沸騰



液体

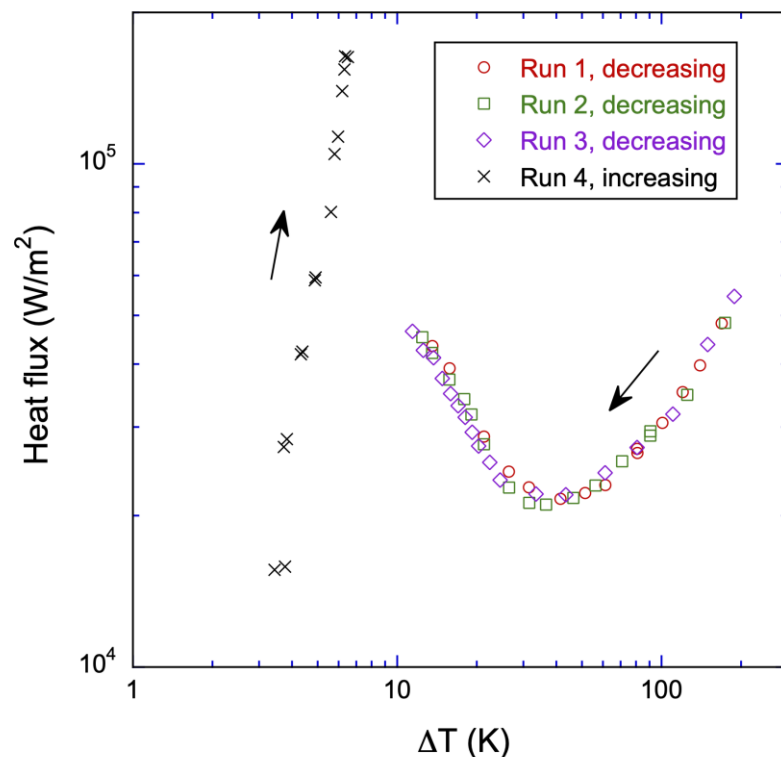
金属



断熱層

伝熱面の温度を飽和液体の温度に近づけ、ライデンフロスト点に早く到達させることで、予冷時間を短縮できる

断熱層のパラドックスにおける未解決問題



液体窒素のプール沸騰曲線(銅裸面)

間欠的に液体が固体伝熱面に接触する現象(Intermittent Liquid-Solid Contact, ILSC)によるパルス的な温度低下が、蒸気膜の早期崩壊をもたらし、ライデンフロスト温度に影響している可能性

フーリエの法則

$$T_w - T_m = -(\delta/\kappa_c) q$$

T_w : 伝熱面の温度

T_m : 金属の温度

q : 熱流束

δ : 膜厚

κ_c : 断熱層の熱伝導率

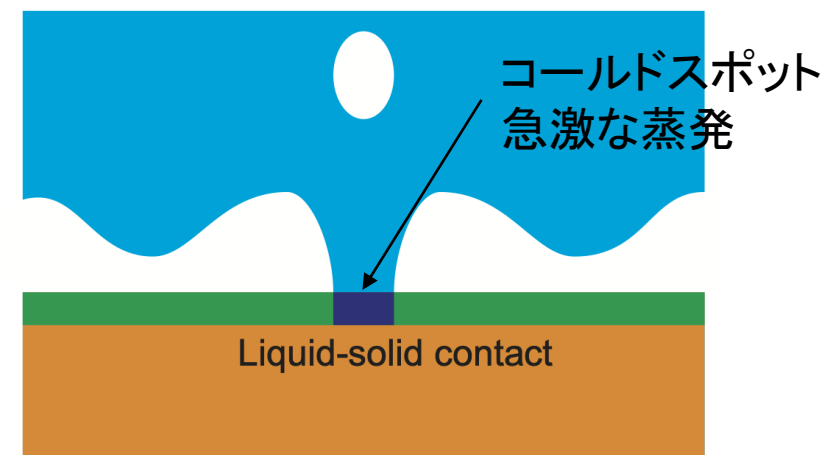
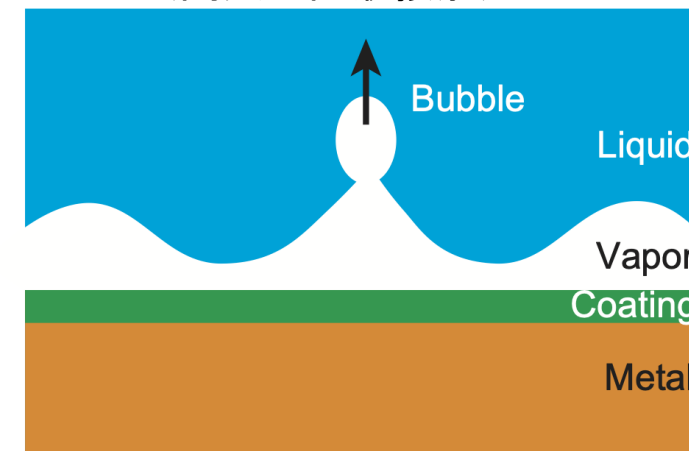
$$q = 2 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

$$\delta = 100 \text{ }\mu\text{m}$$

$$k_c = 0.25 \text{ W/mK}$$

$$\therefore T_w - T_m = 8 \text{ K}$$

ILSCの模式化
(間欠的固液接触)





液体窒素を冷媒とした過去の研究

- 1962年, **ワセリン**を塗布したアルミニウム棒を液体窒素に浸漬し, 予冷時間の短縮を確認
C.W. Cowlwy, et al., A method for improving heat transfer to a cryogenic fluid, Advances in Cryogenic Engineering, Vol.7 (1962) 385

- 現在に至るまで, 様々な断熱層を付加した急冷実験が行われている

PTFE(スプレー、シート貼り付け)

K. Fukiba, et al., Heat transfer enhancement in pool boiling of liquid nitrogen using a low thermal conductive layer with openings, International Communications in Heat and Mass Transfer 127 (2021) 105545

エポキシ樹脂塗布

S. Jagga and S. Vanapalli, Cooldown of insulated metals in saturated and subcooled liquid nitrogen, Cryogenics, 109 (2020) 103114

真空グリース塗布

A.N. Tsoi and A.N. Pavlenko, Enhancement of transient heat transfer at boiling on a plate surface with low thermoconductive coatings, Thermophysics and Aeromechanics, 22 (2015) 707

テフロンコーティング(PTFE)

Le-Duy Nguyen, et al., Optimum coating thickness for the fastest chilldown of Teflon-coated stainless steel flat plate in liquid nitrogen pool, International Journal of Heat and Mass Transfer 194 (2022) 123030

これら過去の研究を参考に, 2種類のフッ素樹脂コーティングを用いて伝熱促進機構の解明とその応用に着手した



フッ素樹脂コーティング材

- ① NEW TFE コート FC-102
ファインケミカルジャパン(株)
塗布方法:スプレー
膜厚:3~ 43 μm
参考文献に使われていたものと
同じ製品

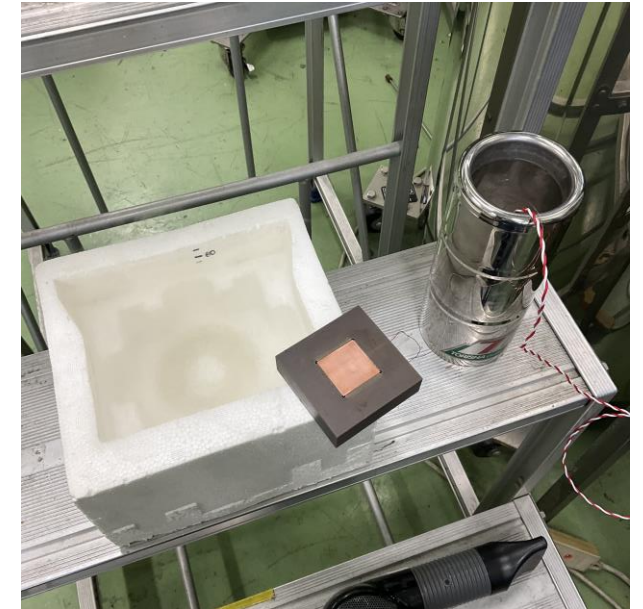
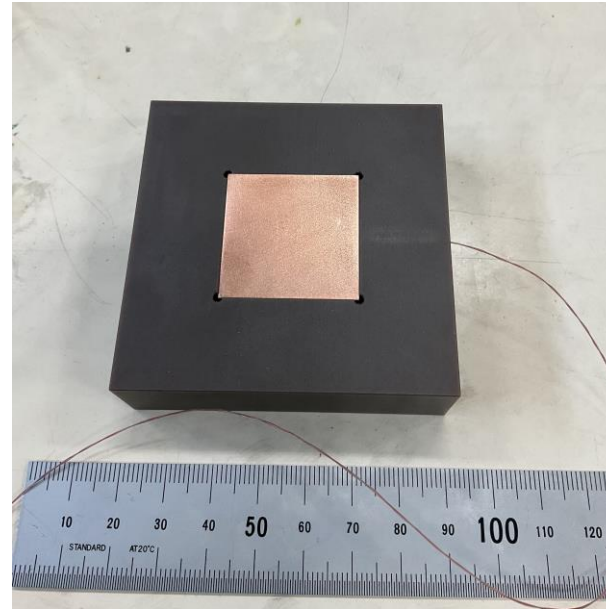
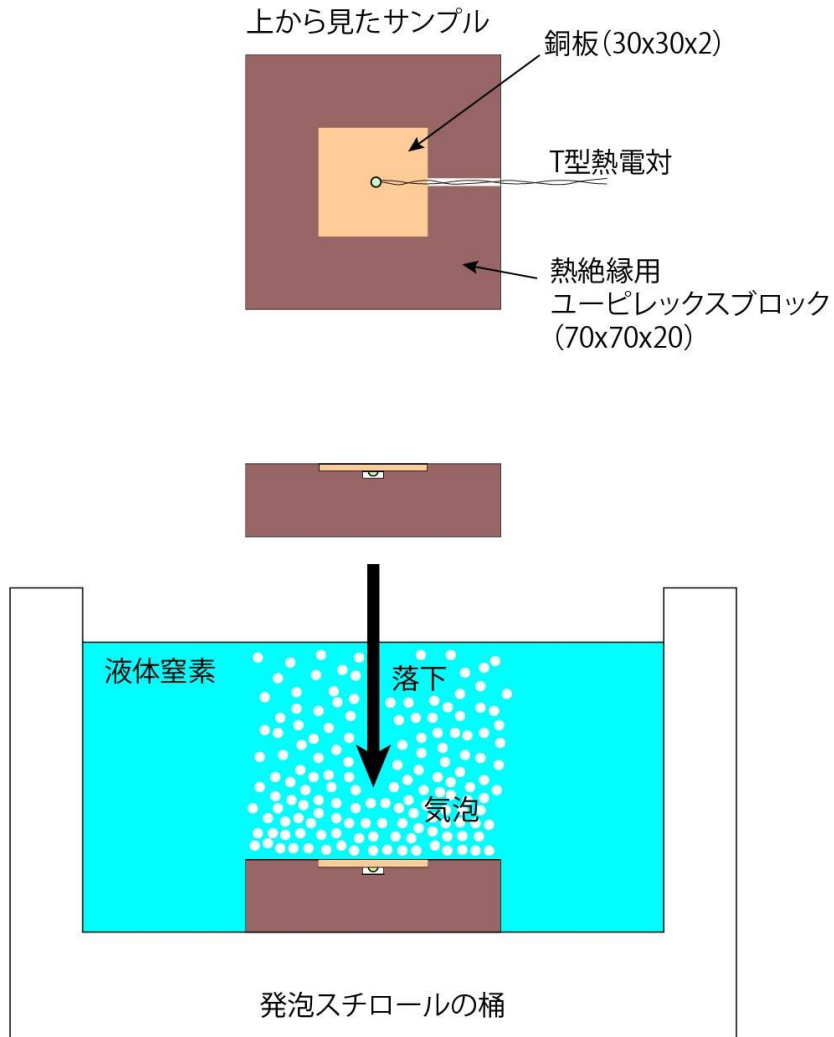
K. Fukiba, et al., International Communications in
Heat and Mass Transfer 127 (2021) 105545

- ② フロロサーフ® FG-3650C-20
(株)フロロテクノロジー
塗布方法:刷毛塗り
膜厚:5~21 μm



常温で乾燥する

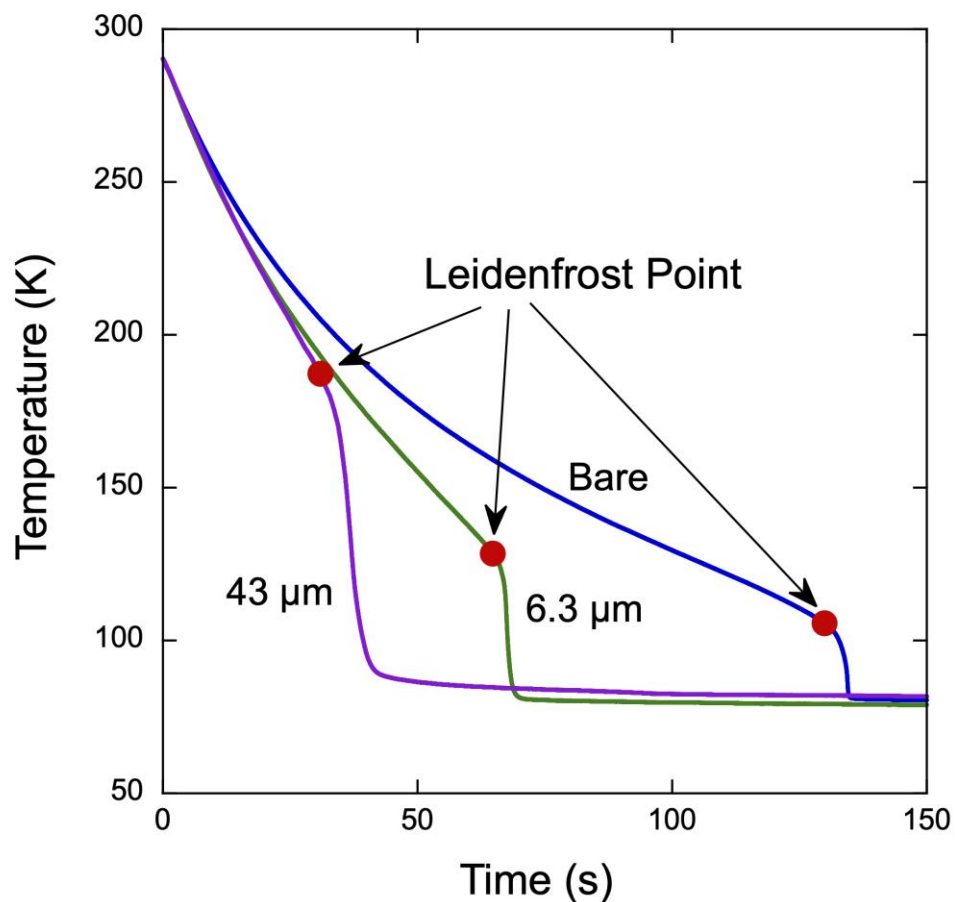
実験方法 — 急冷実験



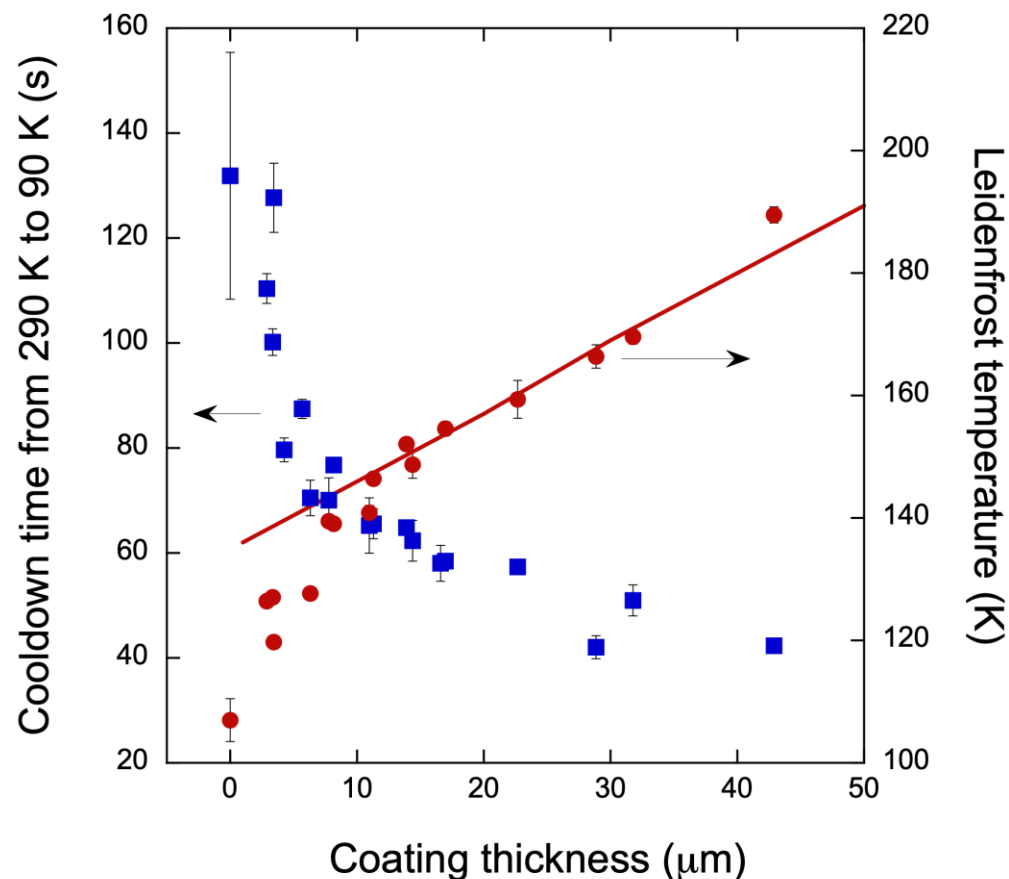
- 30 mm × 30 mmの伝熱面(伝熱面以外はすべて熱絶縁)
- 厚さ 2 mmの銅板の裏側中央に熱電対を半田付け
- 液体窒素の浴槽(発泡スチロール製)に、伝熱面を上にして落下
- 銅板温度の時間変化を測定



実験結果 — 予冷時間とライデンフロスト温度



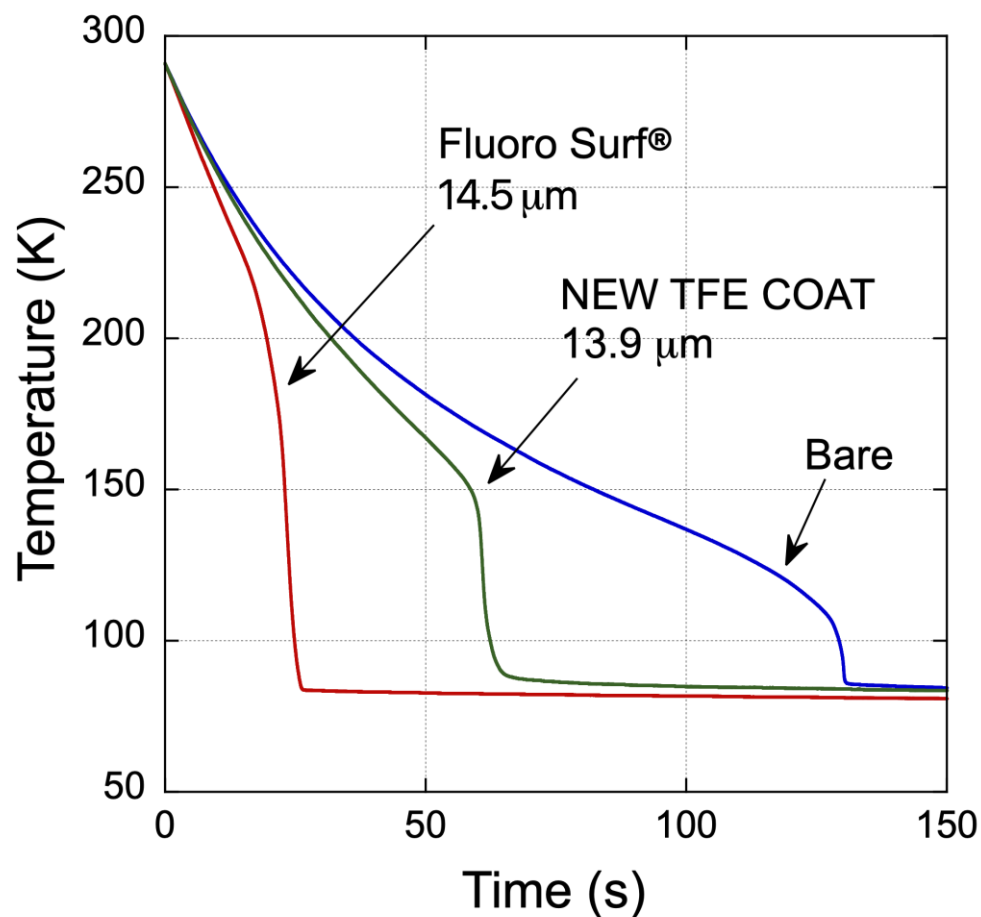
代表的な冷却曲線 (NEW TFEコート)
43 μmのコーティングで予冷時間が約70%短縮
ライデンフロスト温度は約80 K増加



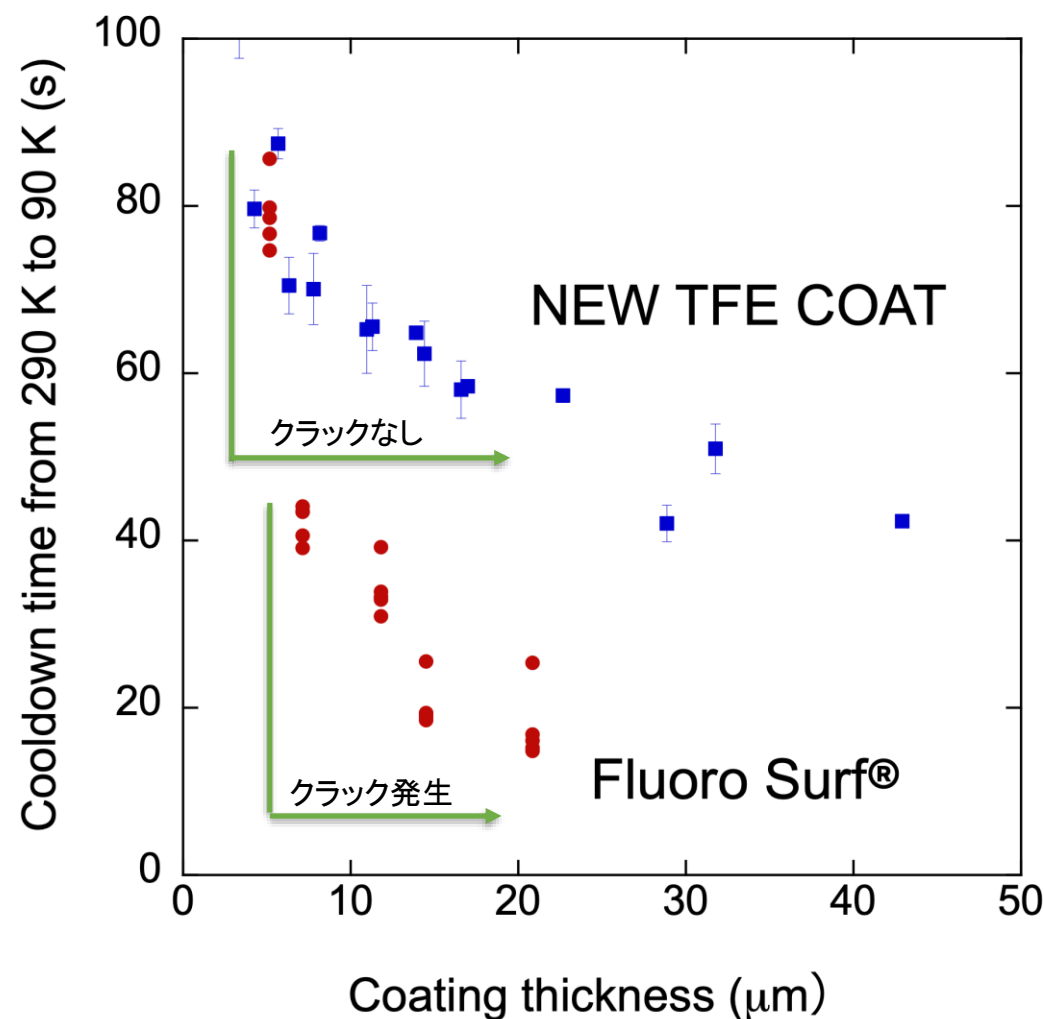
予冷時間とライデンフロスト温度の膜厚依存性
実線は、コールドスポットにおける蒸発熱流束を280 kW/m²と仮定した計算値
(限界熱流束: 約200 kW/m²)



実験結果 — 予冷時間に対する表面状態の影響

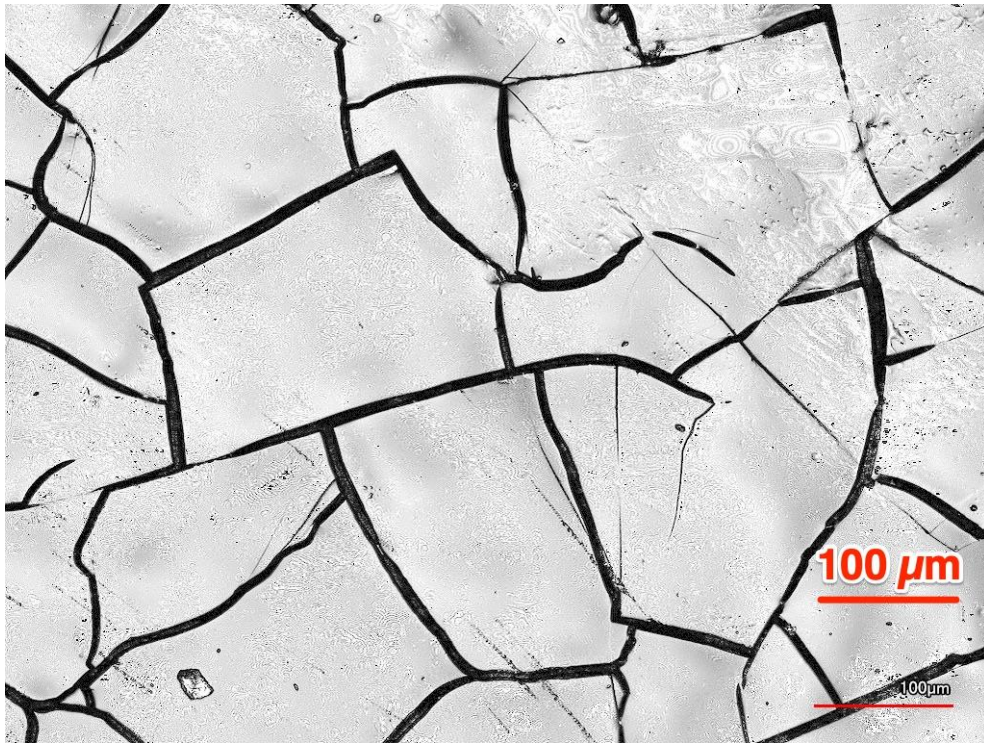


代表的な冷却曲線(フロロサーフ)
14.5 μm のコーティングで予冷時間が約80%短縮



急冷実験における予冷時間の膜厚依存性

表面クラックの観察



急冷実験後のコーティング表面の顕微鏡写真
フロロサーフ® 14.5 μm

- 表面に観察されたクラックは、天然の泥層の表面に発生するマッドクラックに酷似する。



- クラックに囲まれた小片（ポリゴン）の大きさは100 μm～300 μm
- 冷却中に、樹脂内に熱収縮による引張力が働き、クラックが発生したと考えられる。

- フッ素樹脂コーティングを銅伝熱面に付加することで、液体窒素中における予冷時間が大幅に短縮された。
- 予冷時間短縮にはライデンフロスト温度の増加が必要であるが、そのメカニズムを理解するにはコールドスポットの存在を考慮する必要がある。
- 表面の微細構造（例えばクラック）が伝熱促進に寄与する。

今後の研究課題

膜沸騰域におけるコールドスポットの観測、理論的解析
表面微細構造による伝熱促進のメカニズム解明
応用分野の開拓

本研究は、産学官連携の枠組みを活用して実施しており、複数の企業との共同開発により進められています。