

# 液体窒素などの低温液化ガスによる 低温機器の冷却時間を 大幅に短縮できる樹脂コーティング

自然科学研究機構 核融合科学研究所  
超伝導・低温工学ユニット  
教授 高畑 一也

2024年1月23日

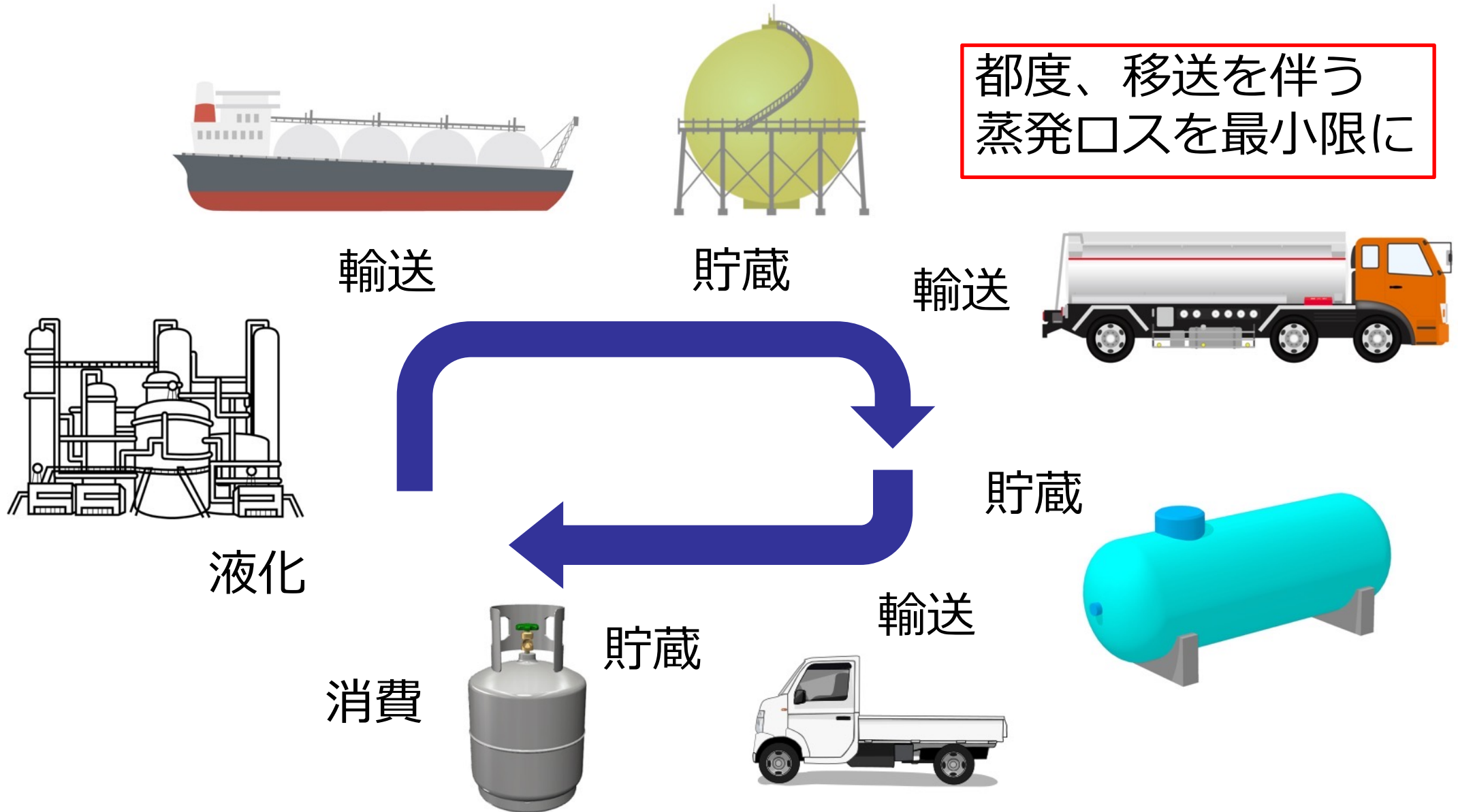
# 新技術の概要

- 液体窒素や液体水素を用いて低温機器を予冷（稼働前の初期冷却）する際、液化ガスの消費量削減、時間効率の観点から予冷時間の短縮が重要となる。
- 本技術は、伝熱面に樹脂をコーティングし、その表面に微細なクラックを形成することで、予冷時間を大幅に短縮できる高性能伝熱面を提供する。

# 代表的な液化ガスの物性と用途

液化ガス	飽和温度	主な用途
液化天然ガス (LNG)	111 K (-162°C)	メタンガスの輸送・貯蔵 火力発電の燃料、都市ガス
液体酸素	90 K (-183°C)	ロケットの酸化剤 酸素ガスの輸送・貯蔵 鉄鋼、化学、医療現場などで使用
液体窒素	77 K (-196°C)	生体・食品の凍結 超伝導機器の冷却 土木工事における土壌凍結
液体水素	20 K (-253°C)	ロケット燃料、航空機燃料 水素ガスの輸送・貯蔵 将来のクリーンなエネルギー源として期待

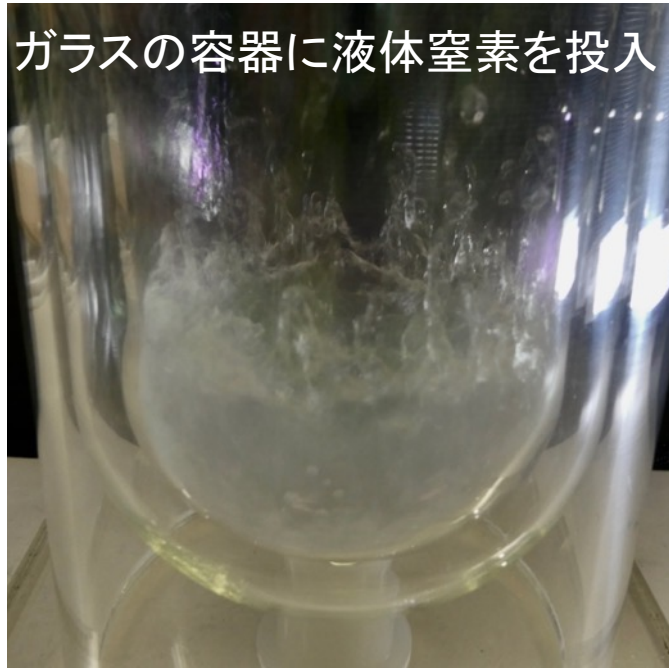
# 液化ガスのサプライチェーン



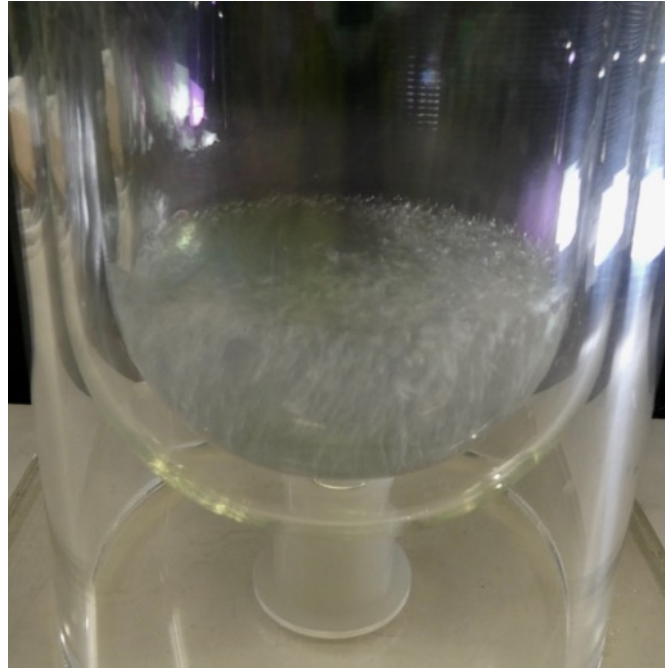
# 予冷における工学的課題

時間 

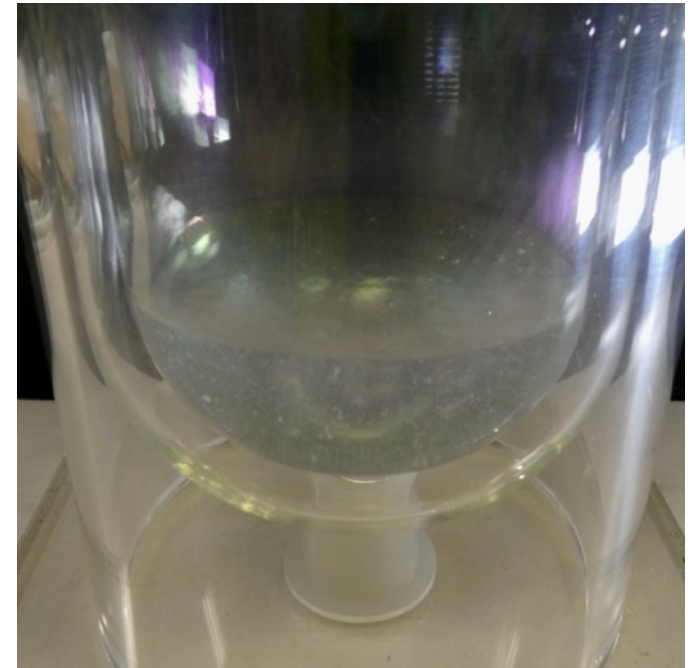
膜沸騰 (遷移沸騰) 核沸騰 予冷完了



激しい沸騰  
蒸気の膜によって壁  
面への伝熱が悪化



液体が壁面に接触  
良好な伝熱



膜沸騰から核沸騰に速やかに移行させることが  
予冷時間短縮にとって重要 ⇒ 高性能伝熱面

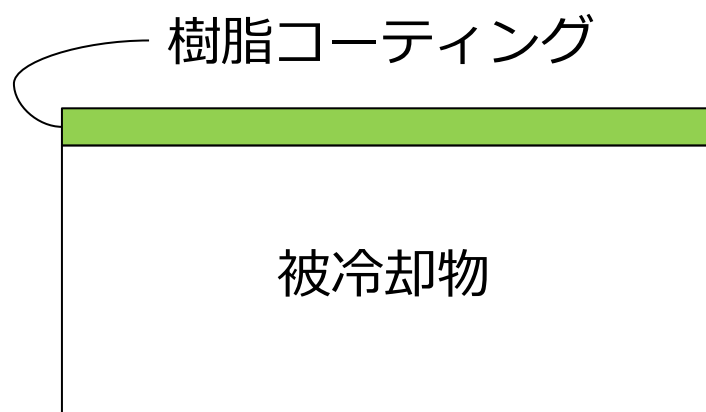
## 従来技術とその問題点

LNGや冷媒を対象に、既に実用化されているものには、金属壁面に微細加工（テクスチャリング、多孔質化）を施す方法があるが、  
加工に特別な装置が必要  
広範囲、曲面への応用が難しい  
等の問題があり、極低温の機器に利用されるまでには至っていない。

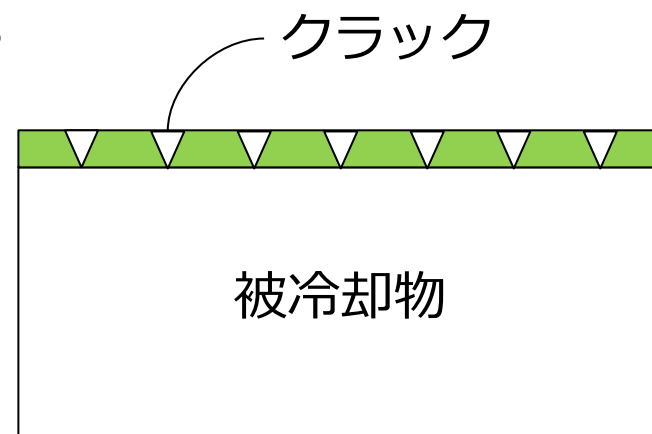
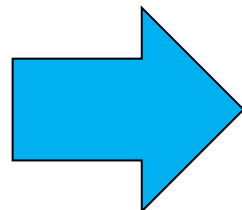
# 新技術の説明

被冷却物の表面に樹脂コーティングを行う

樹脂コーティングにクラックが発生



被冷却物を冷却する



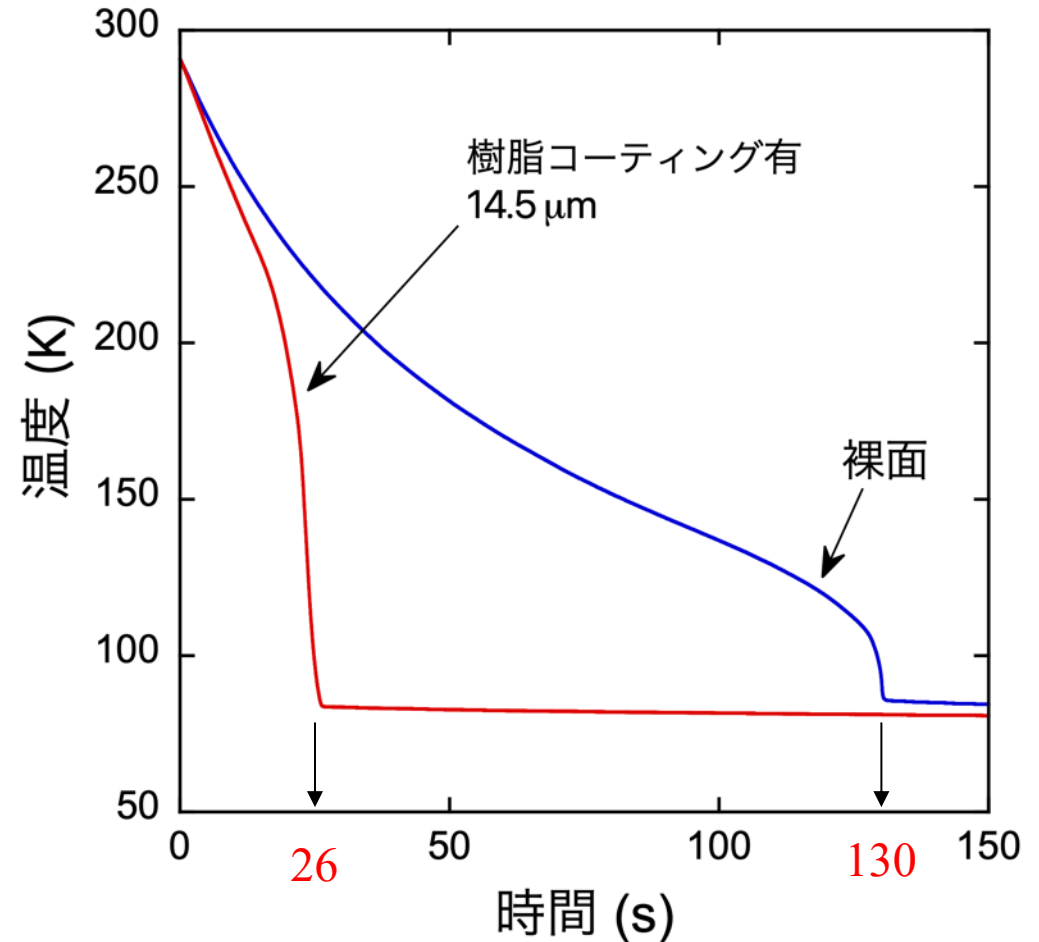
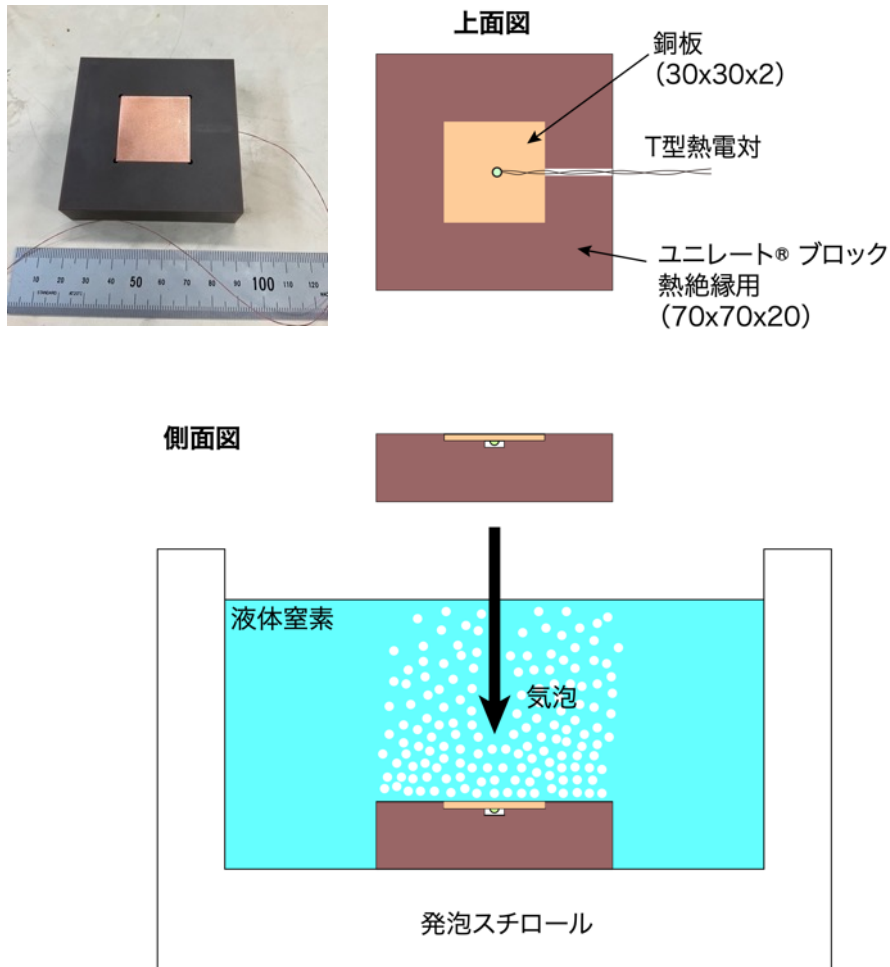
## 樹脂コーティングの実施例

常温型フッ素系コーティング剤  
膜厚 約10  $\mu\text{m}$   
刷毛塗り

- クラックが伝熱を促進する（蒸気膜を破壊）
- クラックは冷却時に自発的に発生するため、特別な加工が不要

# 新技術の実証～冷却曲線

銅伝熱面を液体窒素中に落下

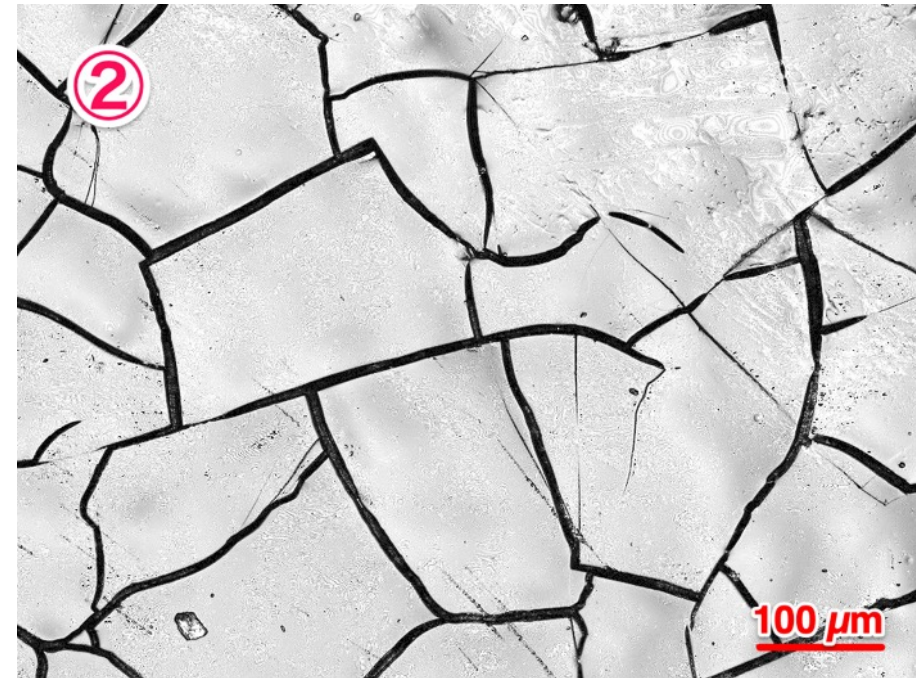
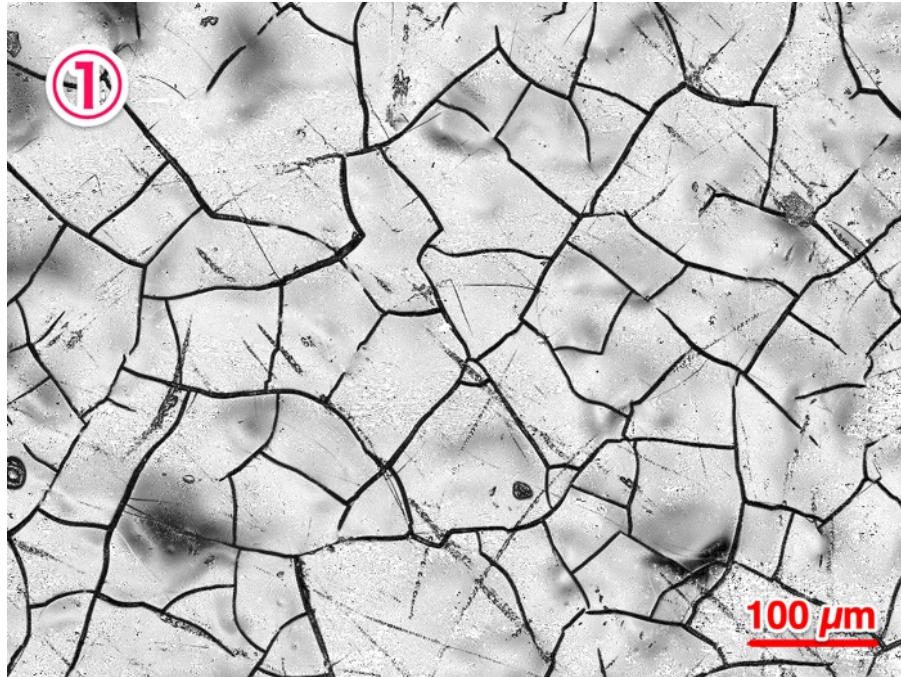


冷却曲線：コーティングの有無による予冷時間の比較

**80%の予冷時間短縮に成功**



# 新技術の実証～表面クラックの観察



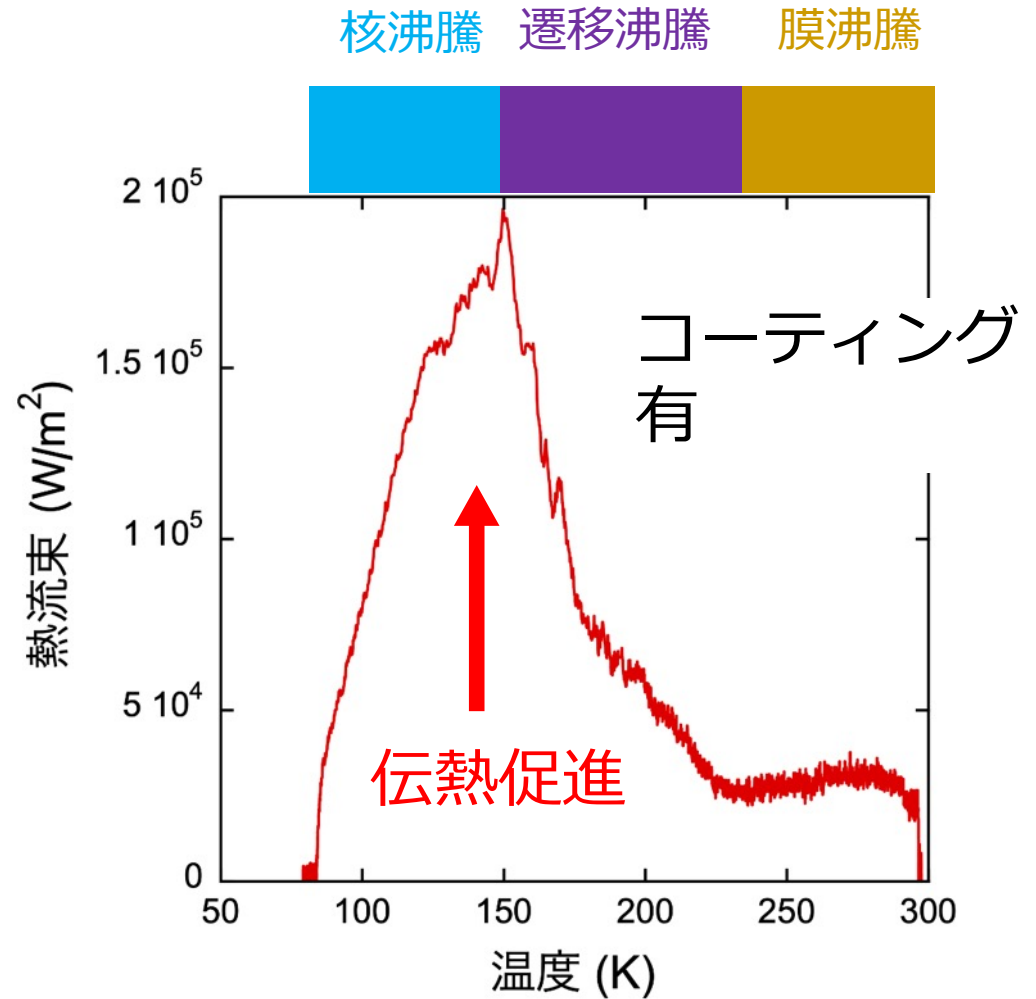
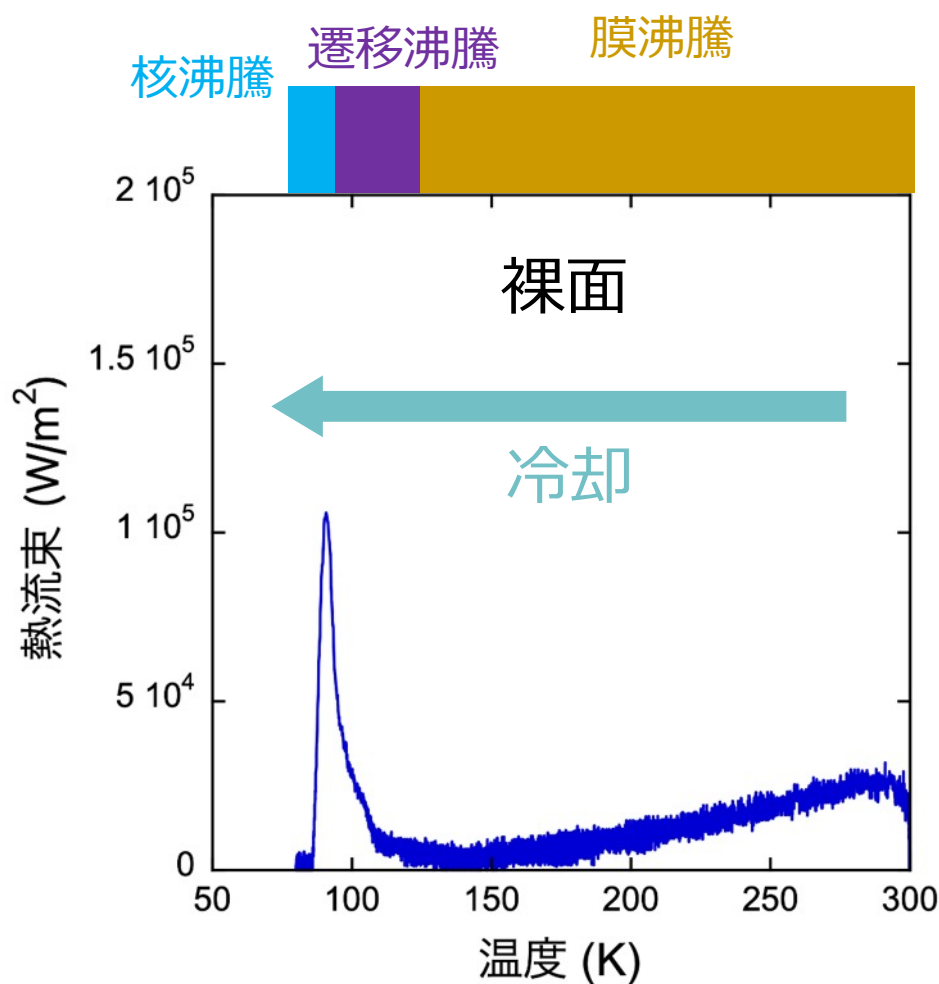
冷却後のコーティング表面の顕微鏡観察 ①膜厚7.1  $\mu\text{m}$ , ②14.5  $\mu\text{m}$

220 K (-50°C) でクラックが発生

天然の泥層が乾燥するときに表面に発生するマッドクラックに酷似  
ポリゴンの大きさは100  $\mu\text{m}$ オーダー

このクラックが気泡発生の核となり、伝熱を促進

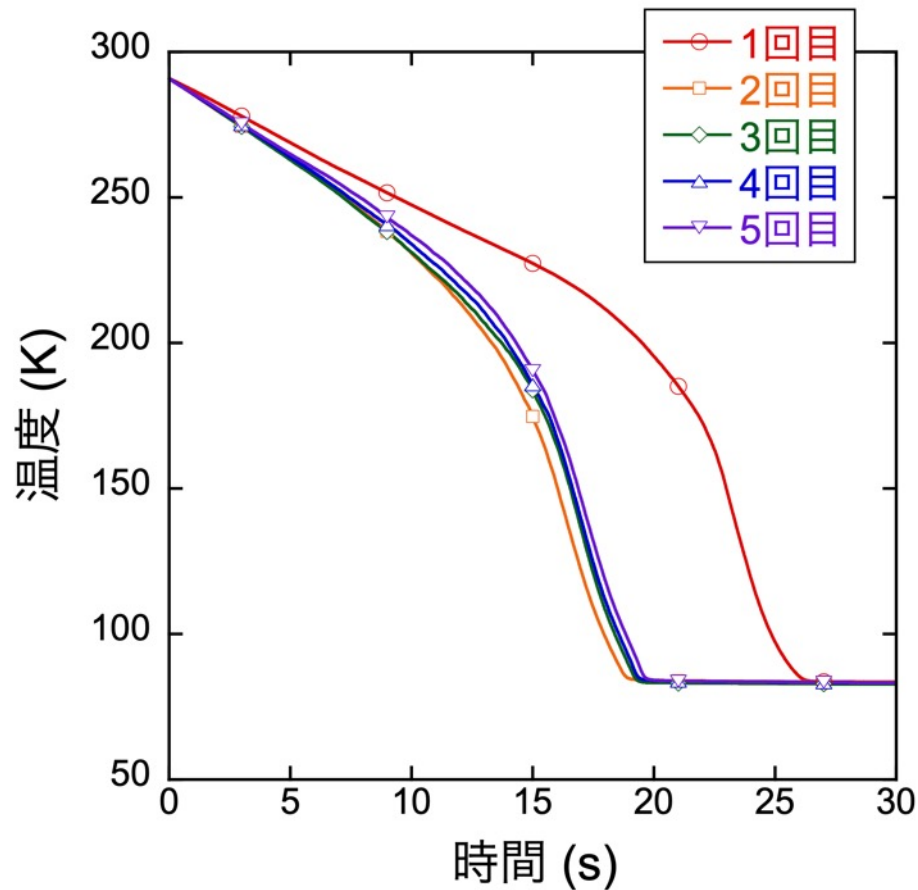
# 新技術の実証～沸騰曲線



冷却曲線から評価した沸騰曲線

膜沸騰から遷移沸騰、核沸騰への移行が高温側にシフトし、伝熱が促進

# 新技術の実証～繰り返し冷却

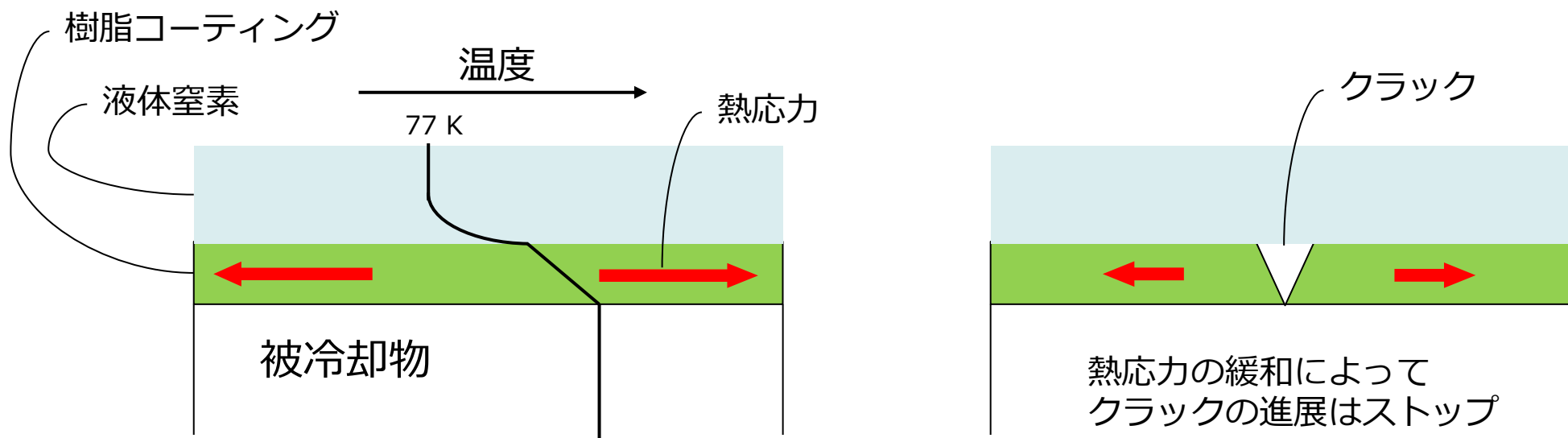


- 1回目にクラックが形成されているため、2回目以降は、室温ですでに膜沸騰領域が消滅し、さらに予冷時間が短縮された。
- 2回目以降は冷却曲線に変化がないことから、クラックの形成にも変化がないと考えられる。

実用の繰り返し回数を想定した実証は今後の課題

5回の繰り返し冷却に対する予冷時間への影響

# 今後の開発の方向性



被冷却物との密着性が強固で、かつ膜方向の応力に対してはクラックが入りやすい特性を持つ樹脂の開発が必要

# 新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来は加工機械や加熱・加圧装置が必要であり狭い範囲、平面での使用に限られていたが、樹脂を **ディッピング、刷毛、スプレー** で塗布するだけという簡便性から、**広範囲、狭い空間、曲面（容器や配管の内面）** にも高性能伝熱面を付与することが可能となる。
- 本技術の適用により、金属伝熱面の場合、**予冷時間を80%短縮** できることが期待される。

# 想定される用途



From Wikimedia Commons ©Space X 2012

ロケット燃料  
液体水素・酸素



From Wikimedia Commons ©Hunini 2021

水素の輸送  
液体水素



From Flickr ©IITA 2020

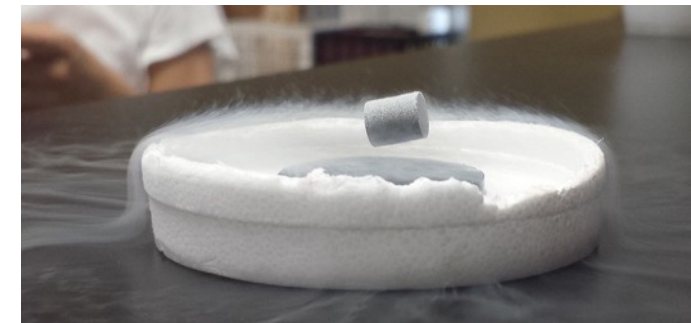
生体の凍結  
液体窒素



From Wikimedia Commons @NASA

将来の航空機燃料  
液体水素

移送管、貯槽の予冷時間短縮  
生体細胞の急冷凍結、細胞の  
生存率向上  
液化ガスの蒸発器の性能向上



From Wikimedia Commons ©PointsofNoReturn 2014

超伝導応用  
液体窒素、液体水素

## 実用化に向けた課題

- 現在、冷却中に自発的にクラックが発生する樹脂は、フッ素系樹脂のうちの1種類しか見つかっていない。どのような樹脂であれば、クラックが発生するのかは未知である。
- 今後、樹脂のミクロな構造も理解し、最適な樹脂を探索していく。
- 実用化に向けて、冷却と昇温の繰り返しによる耐久性の検証も必要である。

## 企業への期待

- 未解決の、樹脂の最適化については、高分子工学の知見により克服できると考えている。
- 高分子工学の知見と樹脂合成の技術を持つ、企業との共同研究を希望する。
- また、生体細胞の急冷凍結技術を開発中の企業には、本技術の導入が有効と思われる。被冷却物の形状、材質、目標の冷却速度を教えていただければ、検討いたします。



## 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 冷却構造
- 出願番号 : 特願2023-065528
- 出願人 : 自然科学研究機構
- 発明者 : 高畑一也

# お問い合わせ先

**自然科学研究機構事務局研究協力課**

**TEL 03-5425-1316**

**FAX 03-5425-2049**

**e-mail [nins-sangaku@nins.jp](mailto:nins-sangaku@nins.jp)**