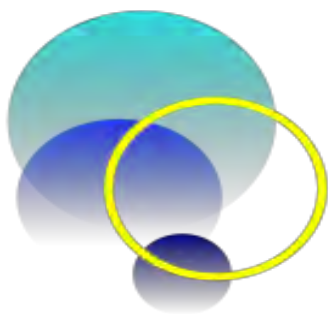




直線型プラズマ装置を用いた プラズマ-液体金属相互作用研究の進捗

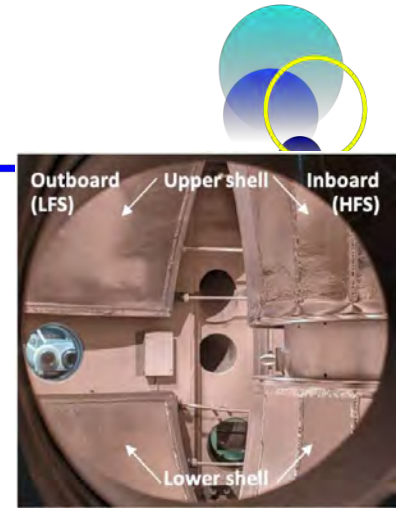
浜地 志憲(NIFS),

増崎 貴(NIFS),

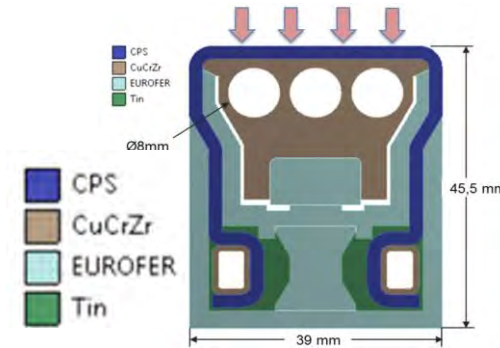
林 祐貴(東京大学), 夏目 祥揮(東海大学),
利根川 昭(東海大学), 難波 慎一(広島大学)

液体金属PFCへの期待と課題

- ◆ 1980年代から、多くのトーラス装置でLM壁研究が行われ、特にリチウムによる低リサイクリング環境での閉じ込め改善が報告
 - PFCのほぼ全域を液体Li壁としたLTX, LTX-βでの研究でも性能向上が報告されており、低リサイクリング環境の定常維持への期待が高まっている
- ◆ 近年ダイバータ熱負荷の観点で、流動による潜在的な高熱除去性能への期待、自己修復性によるType I ELMやディスラプション等によるPFC破壊の回避への期待
- ◆ 小規模装置での実験研究も近年増加、発泡現象の観察などが進展



LTX-βのLi壁[1]



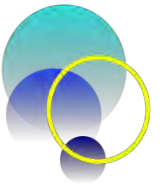
自己修復性を主眼としたEU-DEMO PCD活動でまとめられたCPS Snダイバータ[2]

トーラス装置では系が複雑で、ミクロな現象の理解（数値化/モデル化＝数値計算に統合可能）に至っておらず、実験室実験でのアプローチが重要

- 局所的なリサイクリング率の数値的解明
- LM流による粒子輸送や放出挙動
- プラズマ中での原子分子過程などの理解
- 発泡現象の解明と抑制手法の確立

長期的な大目標

小目標: 直線型プラズマ装置TPD-IIでの自由表面流実験



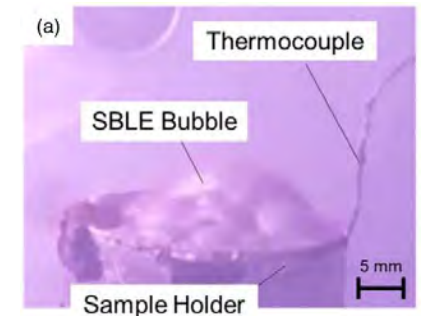
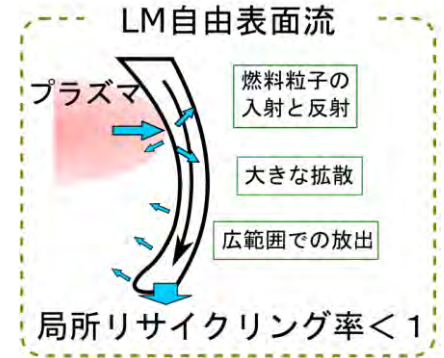
◆ 先行研究での実験室実験

- 静的な液体金属（プール/CPS）での実験
 - リサイクリング率の動的変化: 打ち込み粒子の蓄積
 - 発泡とそれに伴う液滴放出への表面不純物の影響: 多様な放電形態（RF, ECR, アーク放電）、多様なプラズマ種（Ar, He, H）でSn, Liでの発泡現象が確認
 - 不安定性ではない液滴放出と不純物膜の影響が示唆
- LiによるHeの輸送・吸蔵
 - 化学結合を伴わないLMでの粒子輸送研究の必要性を示唆

一定の局所リサイクリング率の実現

不純物影響の除外

LM流動による粒子輸送研究



RF水素プラズマによるSnLi系合金表面での発泡[1]

直線型プラズマ装置TPD-II（NIFSに既設）に、熔融Snの自由表面流をプラズマに曝露する実験機構を設計・製作して、実験を行う

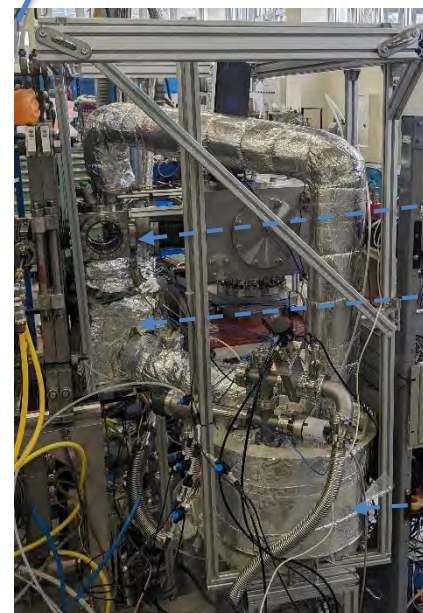
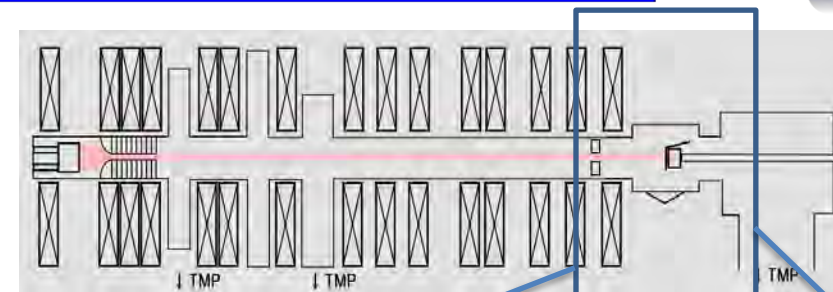
ガス圧駆動Sn流動機構を用いた TPD-IIでのHe放電実験

TPD-II

TPD-II(Test Plasma produced by Direct current discharge) の最下流部にGaLF機構を設置

放電条件

- He
- 放電電圧: 160 ~165 V
- 放電電流: 35 A
- 曝露チャンバー圧力: 0.24 ~ 0.28 Pa
- ベース真空度: $\sim 2 \times 10^{-4}$ Pa
- ターゲット部温度(Sn): 400 ~450 °C (ヒーター加熱)
- ターゲット温度 (SuS): < 400 °C

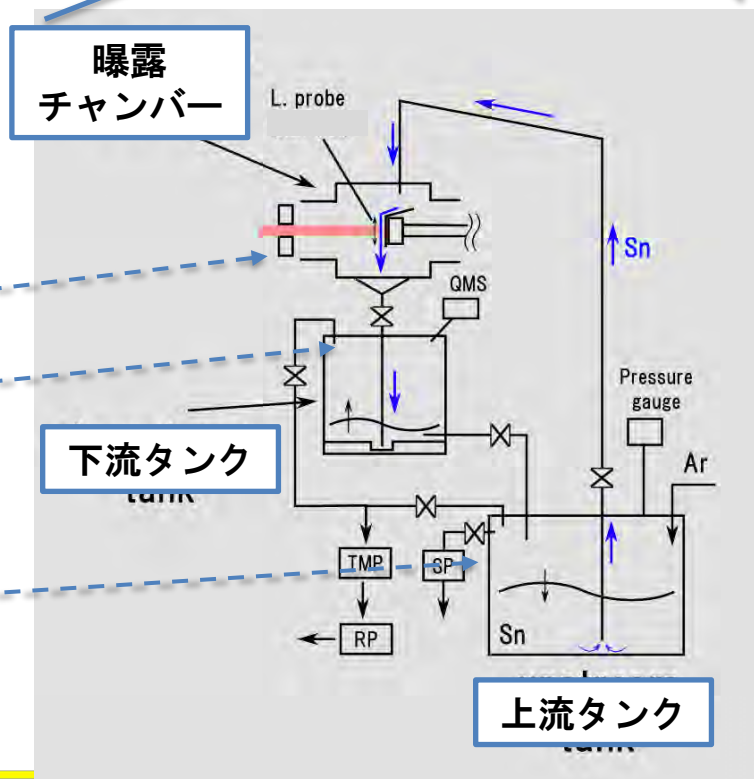


GaLF部

曝露
チャンバー

下流タンク
DOWN TANK

上流タンク
UP TANK



TPD-IIでのLM-PSI実験の開始にむけて

□ 実験的簡便性: 安価で安定なSnを流体として設定

FY 2023

ガス圧駆動流動装置
の設計・製作

Fe-Sn合金層による濡れ性改善手法の確立

FY 2024

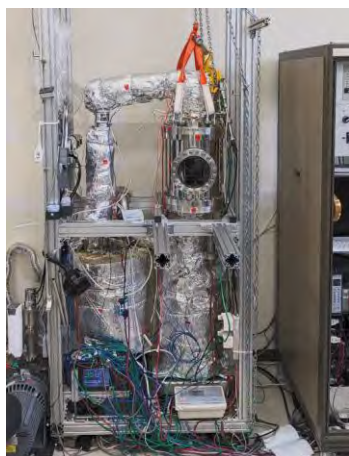
今日の発表

FY 2025~

TPD-IIへのGaLF機構の組み込みと稼働

TPD-IIでの実験

ガス圧駆動LM
流動装置 GaLF



未処理

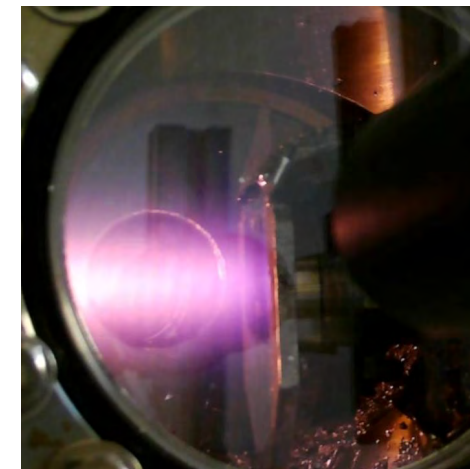
処理済み



Fe-Sn合金層形成処理による濡れ性改善

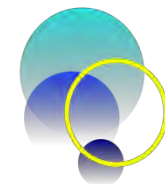
GaLF + TPD-II

直線型プラズマ装置TPD-II

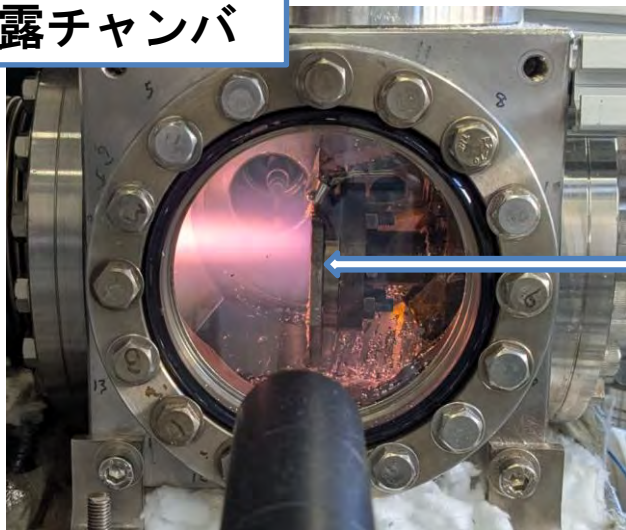


プラズマ曝露の様子

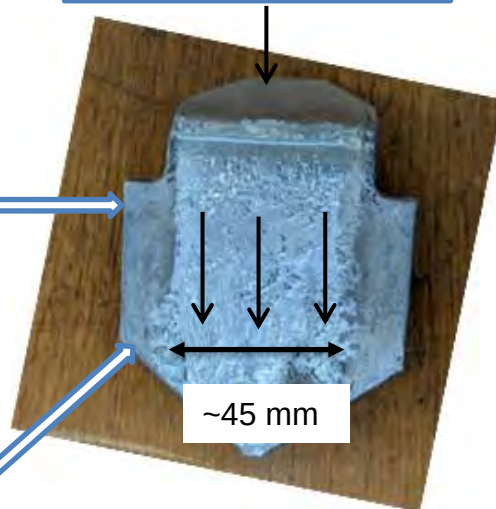
Sn ↓



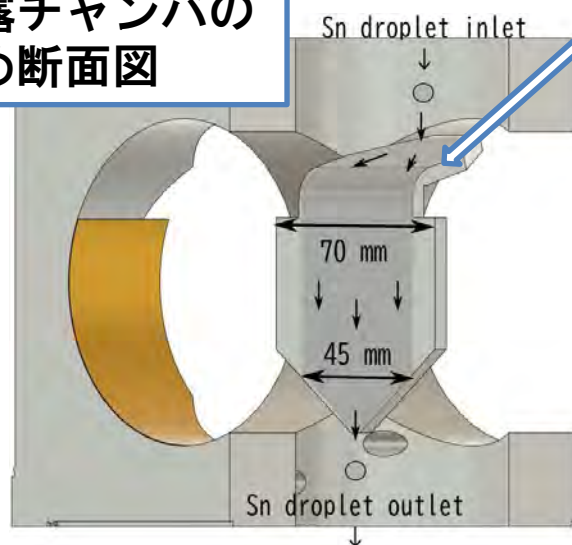
曝露チャンバ



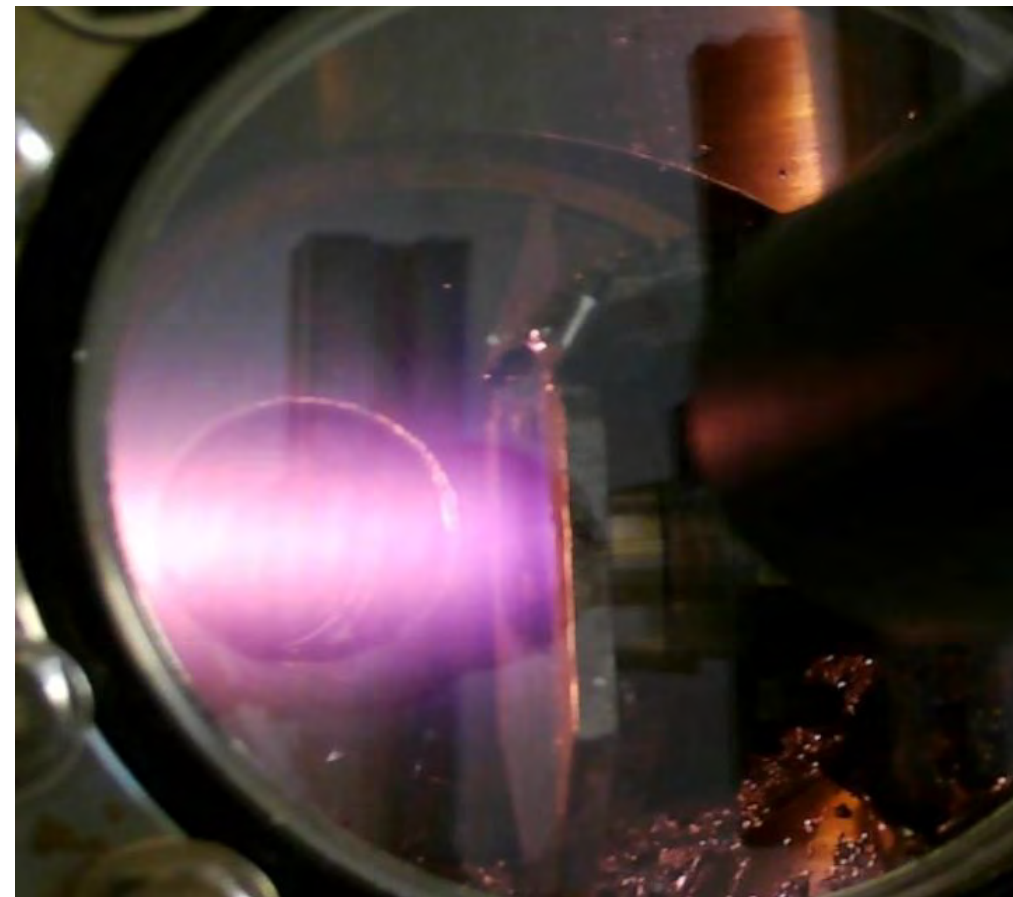
ターゲット面



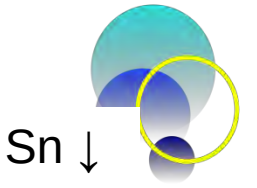
曝露チャンバの
斜め断面図



濡れ性改善処理によって、
液滴として投入されたSnが、
曝露面に自由表面流（液膜
流）を形成



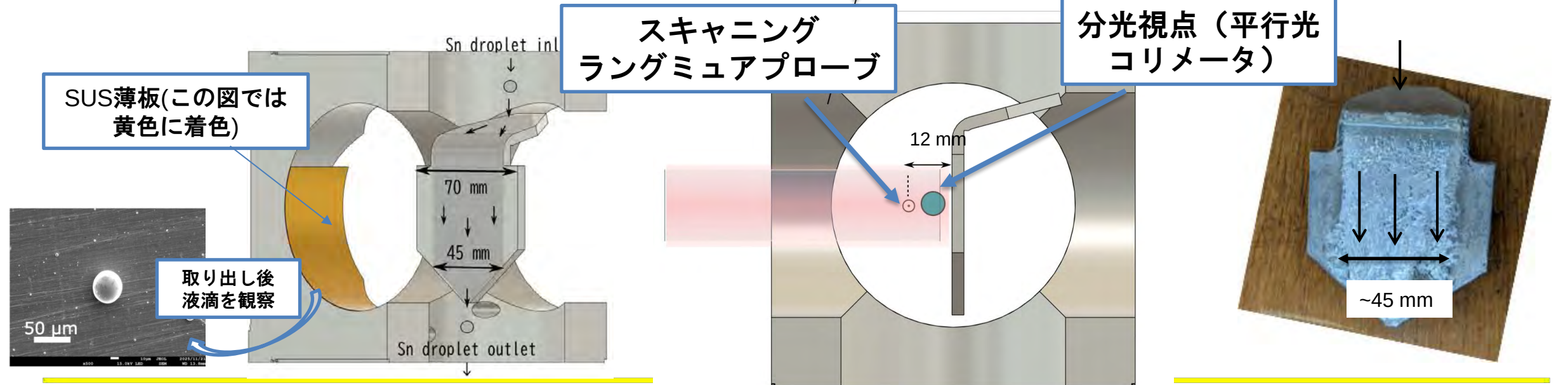
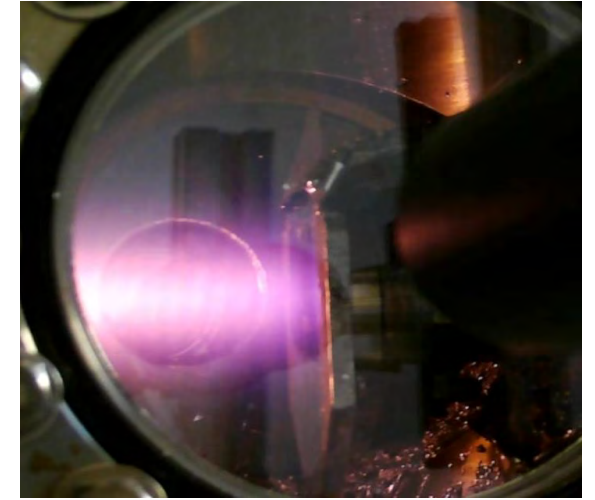
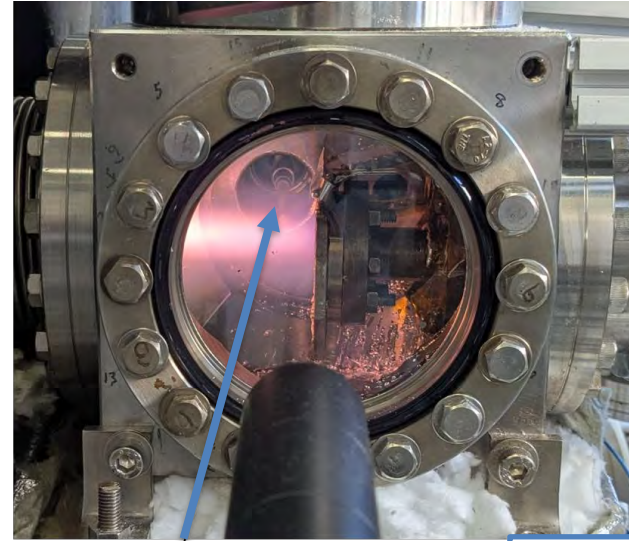
実装されている計測など



- ◆ Snは液滴として上部から投入（試験表面を浮遊電位とするため）し、照射面を液膜として流れる

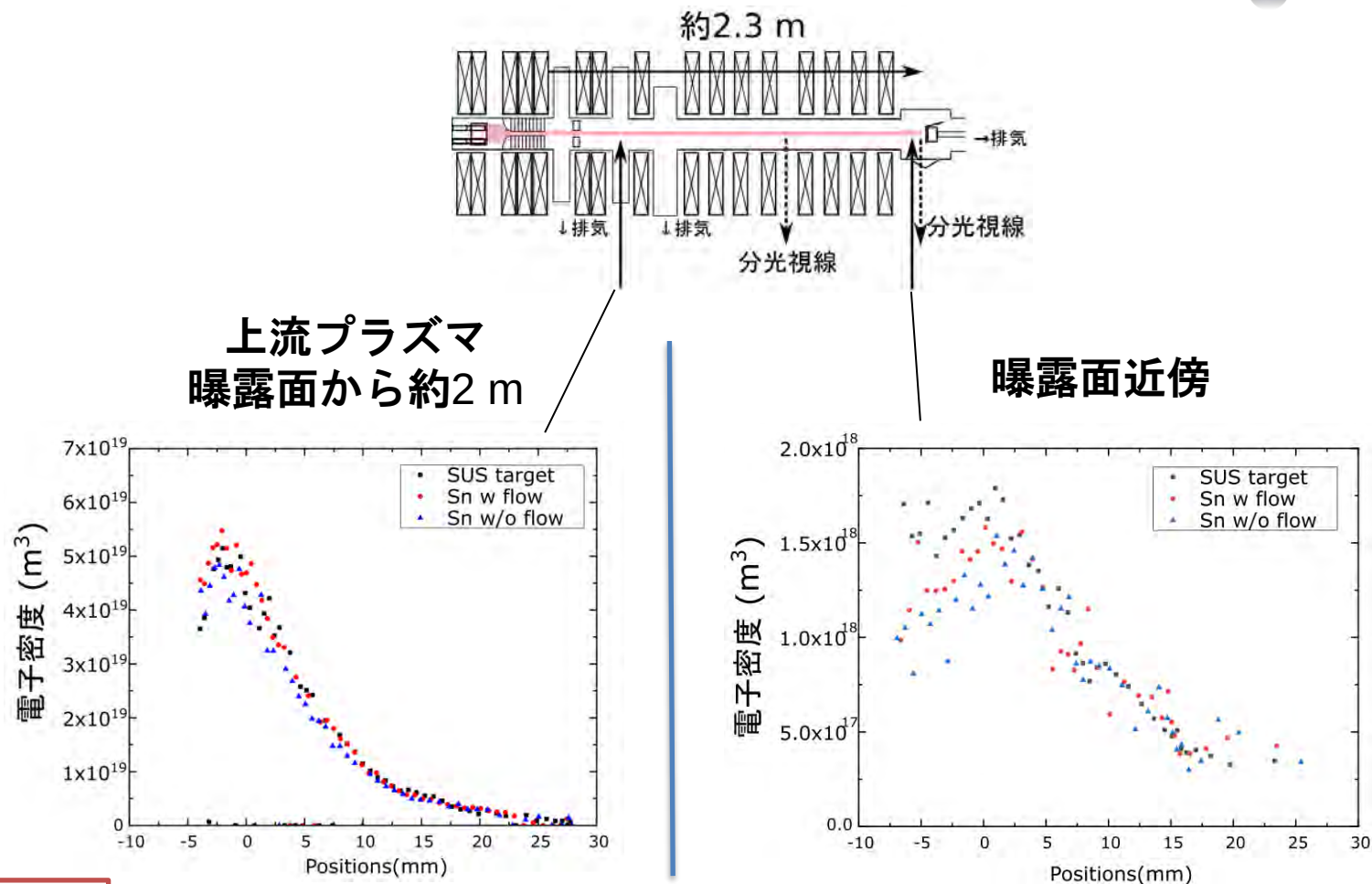
計測手法

- ターゲット電位（浮遊）
- スキャニングラングミュアプローブ
- 分光
- Sn液滴を捕えるためのSUS薄板



初期的な比較: ラングミュアプローブ

- ◆ SUS円板ターゲットとSnターゲット（低温）とSn流動ありを比較
- ◆ 特に上流プラズマでは電子温度、密度に顕著な変化は見られず
- ◆ 曝露面近傍でのSn流動時と流動なしでの変化は、ターゲット交換での大気解放や実験中の曝露チャンバ一部ガス圧の時間的変化の影響が否定できず

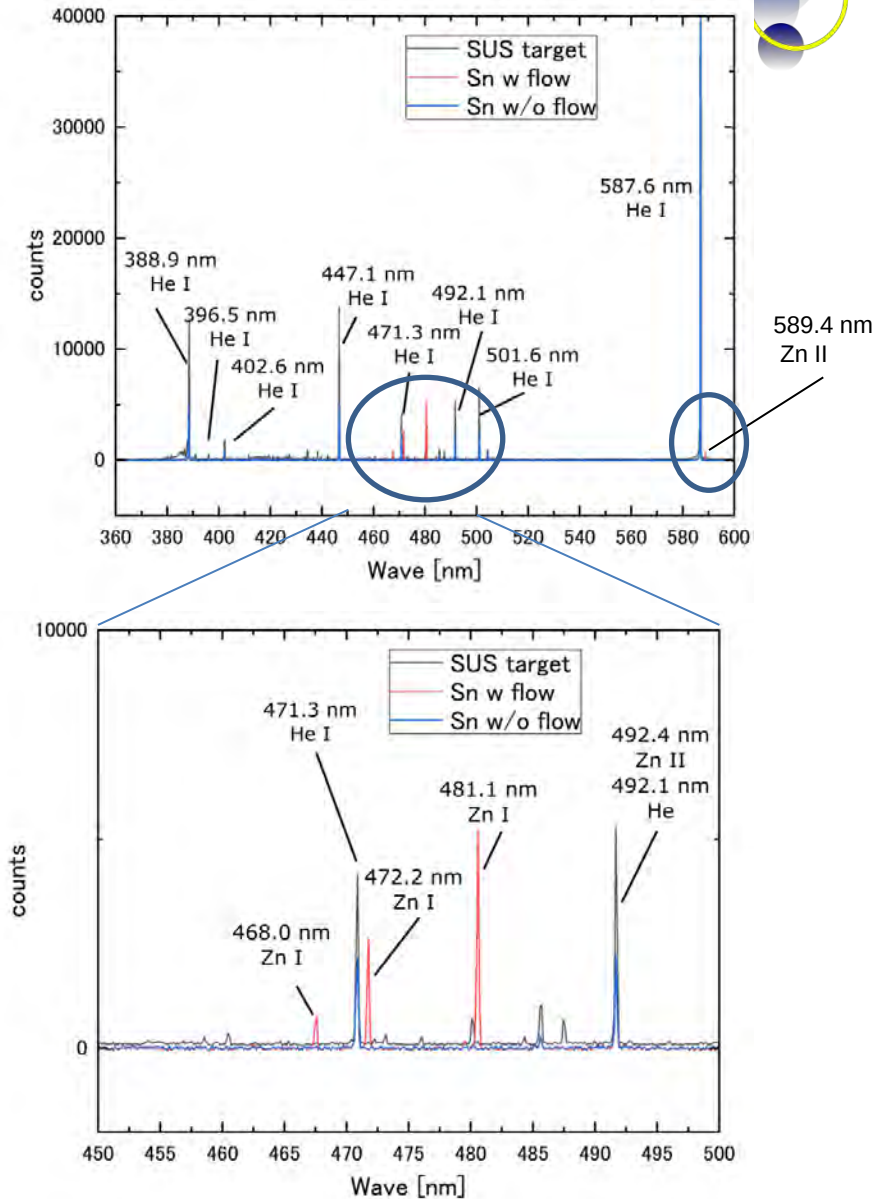


詳細な実験条件の固定や計測回数の増加などによる詳細な分析を検討中

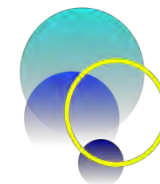
分光ではSnは見えず 不純物であるZnのみ検出

- ◆ ターゲットは浮遊電位であり（空間電位-ターゲット浮遊電位 ~ 10 V） Snのスputタリングは非常に小さく、蒸気圧も低いいため放出メカニズムがない
- ◆ Sn流動中のみ見える非He発光を確認
 - Sn の発光線とは不一致
 - ピーク位置がZnとよく一致(NIST strong lines[1]の相対強度の上位5つのうち4つが一致,一つはHeピークと近く弁別できない)
- ◆ ZnはSn原料に不純物として存在(~ 0.0001 wt %)
 - Znの蒸気圧は大(1.5 Pa @ 350 °C)、スputタリングはしきい値近傍
 - 原子数率と蒸気圧から推定した放出フラックスは 10^{16} at/m²/s

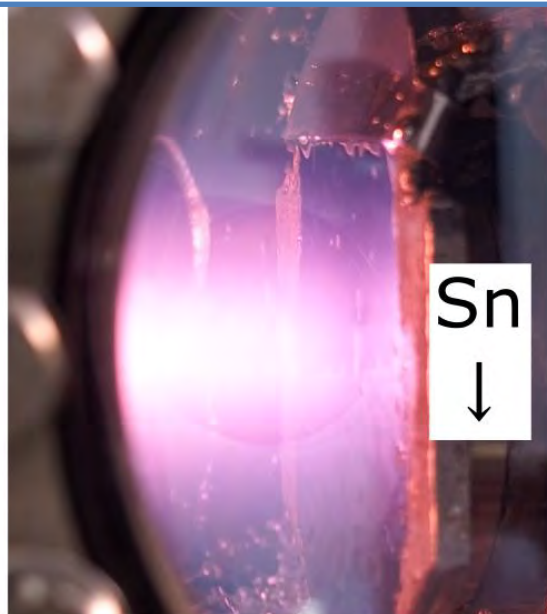
□ 今後はターゲットバイアスによるSnのプラズマ中での輸送の観察（バンドパスフィルタ+カメラ）やCRモデルでの検証を計画



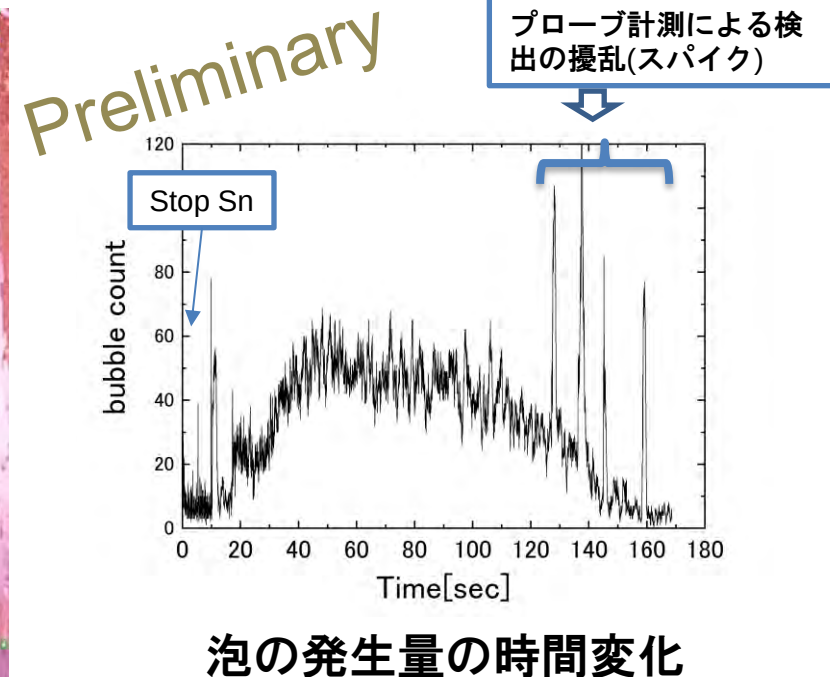
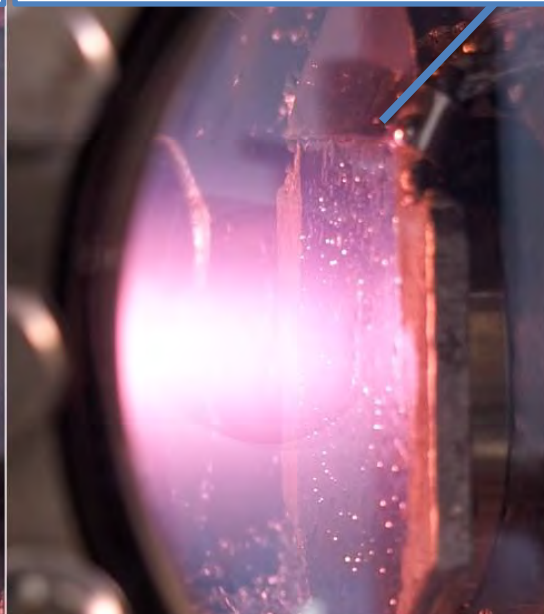
Sn投入停止後の静止溶融Snでの発泡現象



Sn投入中は表面での泡の発生は見られず
→成長 and/or 発生が抑制



Sn投入停止後数秒経過
すると多数の泡が発生



意図的な酸素導入実験やプラズマ条件依存性検証を計画

まとめ

- ◆ LM-PFCに向け必要な液体金属-プラズマ相互作用研究への装置・技術整備を進めた
 - 安価な液体金属駆動手法としてガス圧駆動方式（GaLF）を考案し実証した
 - 高い表面張力を持った熔融Snで液膜流を簡便に形成する手法として、FeSn系金属間化合物を利用する手法を考案
 - プラズマ実験に必要な数十mm程度の幅を持った液膜流が形成可能となった
 - TPD-IIへのガス圧駆動流動機構の統合により、熔融Sn自由表面流へのプラズマ曝露実験が可能となった
 - ラングミュアプローブ・分光計測・光学観察による計測からSn放出が小さいと思われる領域では熔融Snのプラズマへの影響は顕著には観察されなかった
 - Sn流動中のみに顕著に見られるピークが分光スペクトルに見られたが、これはSnに不純物として含まれるZnによるものであると考えられる
 - Sn流動中には観察可能な大きさの発泡は見られなかったが、Sn投入を停止した後一定時間後に静止熔融Sn表面に多数の発泡を検出した

所内外、ユニット内外との連携を推進していく