



高熱流大気圧プラズマが関与するプラズマ応用 研究について

金沢大学 上杉喜彦

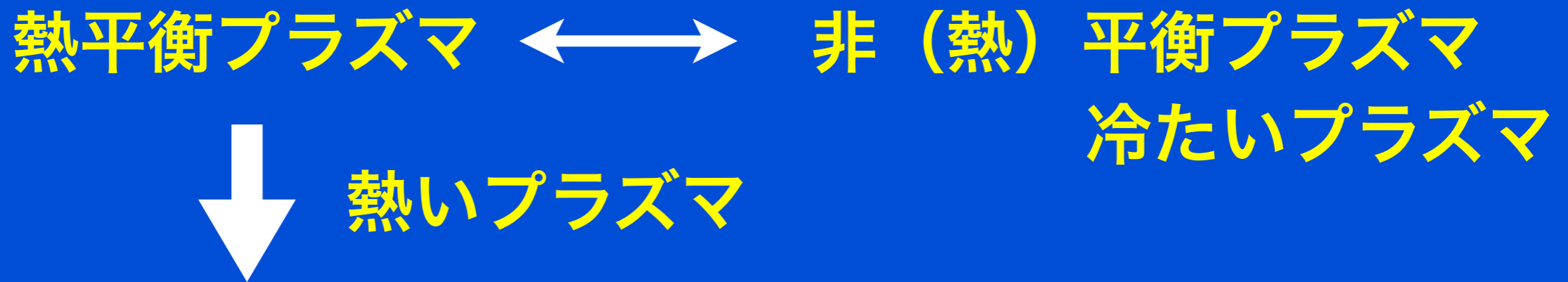
講演内容

1. 高熱流プラズマが関わる産業プラズマ
 - ・ 大電流遮断器、配線用遮断器の例
2. 産業用高熱流プラズマを用いたプラズマ-壁相互作用研究
 - ・ **大電流密素アークプラズマを用いた重相プラズマ研究**
 - ・ 高周波誘導プラズマを用いた炭素ダスト研究



高熱流大気圧プラズマを用いた応用例

0.1~10気圧付近の大気圧プラズマ

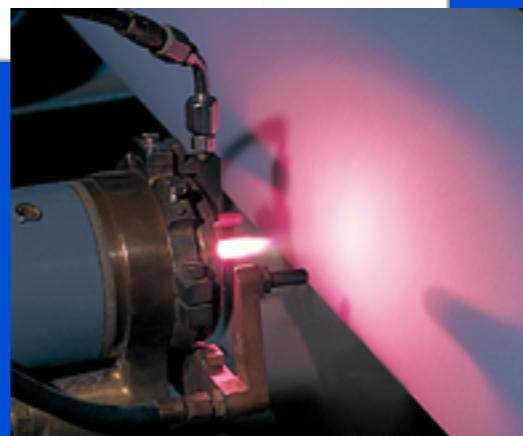
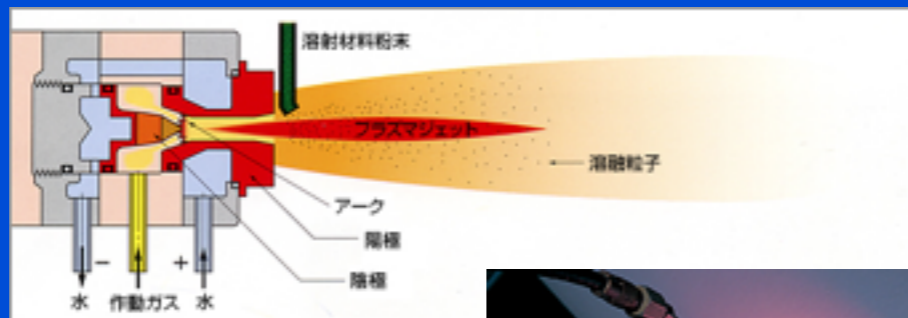


アークプラズマ応用例

HIDランプ



プラズマ溶射・プラズマ切断



電流遮断器





電力用大電流遮断（ガス遮断器）の課題1

電力用遮断器の消弧媒体 → SF₆に替わる環境低負荷ガス
→ 消弧能力がSF₆ガスより優れたものは見出されていない

ポリマー材料

- ・ 電力用遮断器のノズル材料
- ・ 配線用遮断器の筐体

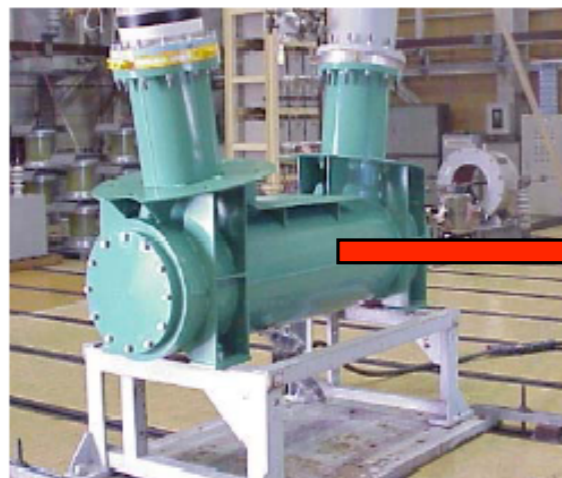
アークがポリマーに接触 → 溶発現象が生起

- ・ 高速ガス流
- ・ 冷却効果
- ・ アーク収縮
- ・ 消弧室内の圧力上昇

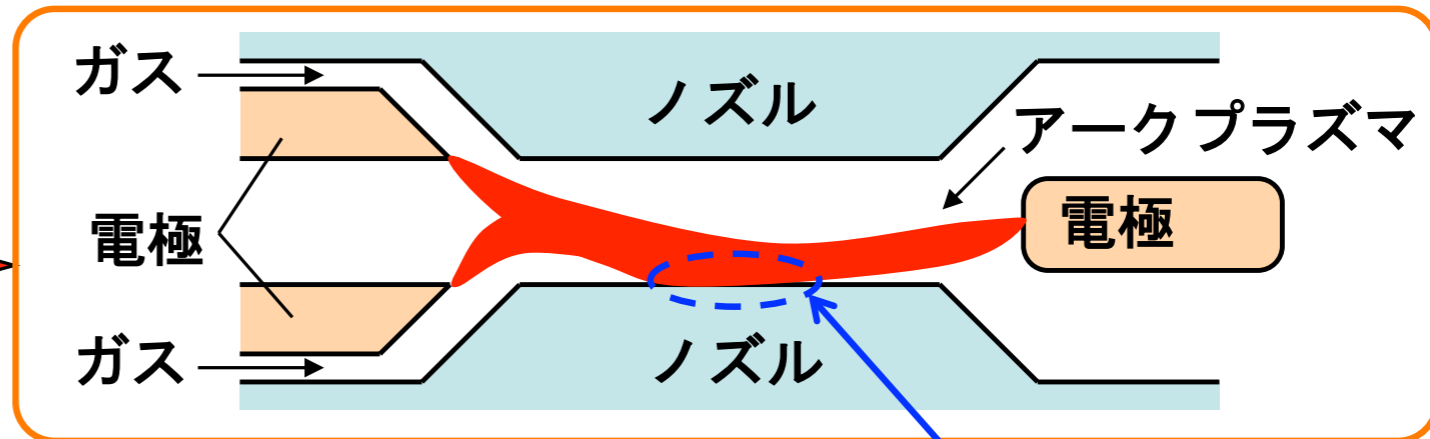
ポリマー材料の溶発現象により消弧能力が向上！！

現時点でどのような特性をもつポリマー材料が適しているかは未解明

ポリマー材料に対してAr誘導熱プラズマを直接照射することで
プラズマと材料間の相互作用を検討



72kV級 CO₂-GCB モデル
(高分子材料を適用) TMT&D (株)



アークがノズルに接触→溶発

電力用遮断器の内部の様子（電流遮断時）



電力用大電流遮断の課題 2

アークプラズマによる**ポリマー材料のアブレーション**現象

ポリマー溶発をアーク遮断に利用した機器

Ex.1 アークホーン

送電鉄塔・送電線への落雷
⇒アークの発生
⇒ポリマーノズル溶発



<http://www.nipponkatan.co.jp/denki/sinseihin.html>

- 溶発蒸気の混入(導電率・熱伝導率)
→アーク冷却
- 高速ガス流の吹き付け
→アーク収縮

Ex.2 配線用遮断器

電極の開く動作
⇒アークの発生
⇒ポリマー筐体溶発



http://www.fujielectric.co.jp/fcs/jpn/product/C_alpha/C_alpha_index.html

- 溶発蒸気の混入(導電率・熱伝導率)
→アーク電圧上昇
- 高速ガス流の吹き付け
→アーク収縮
アーク電圧上昇

ポリマー溶発現象による消弧能力の向上

非常に複雑な現象

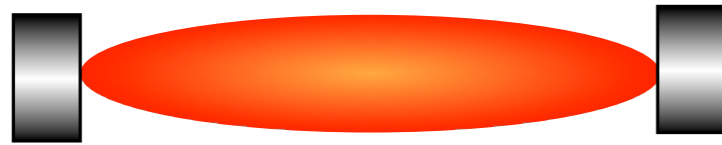
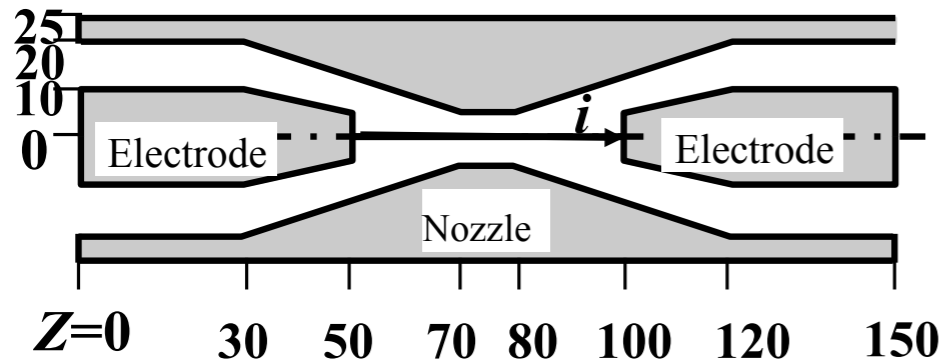
- 温度に非線形な特性
- 複数のパラメータ

ポリマー溶発現象の解明が必要不可欠



大電流遮断器の動作：電流ゼロ点遮断

ガス遮断器の模式図

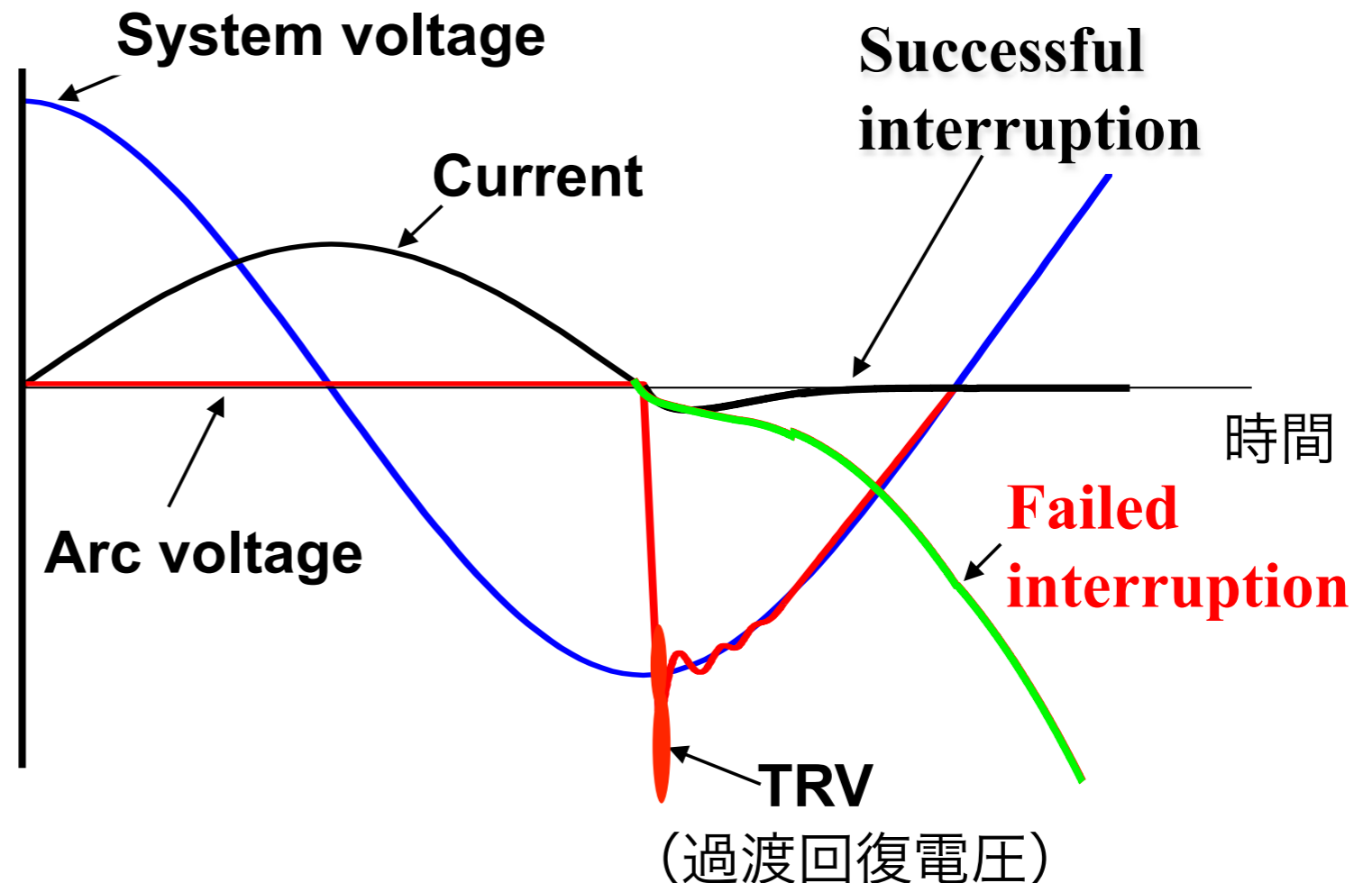


アーク遮断成功の鍵

- ・ プラズマ冷却
ジュール加熱 < 熱損失
(放射、対流、熱伝導損)
- ・ 電気伝導性の喪失
(再点弧の防止)

短絡事故時の電圧・電流波形

- ・ アーク発生時の低いアーク電圧と高い電流
- ・ アーク遮断成功に伴う回路電圧の急激な復帰



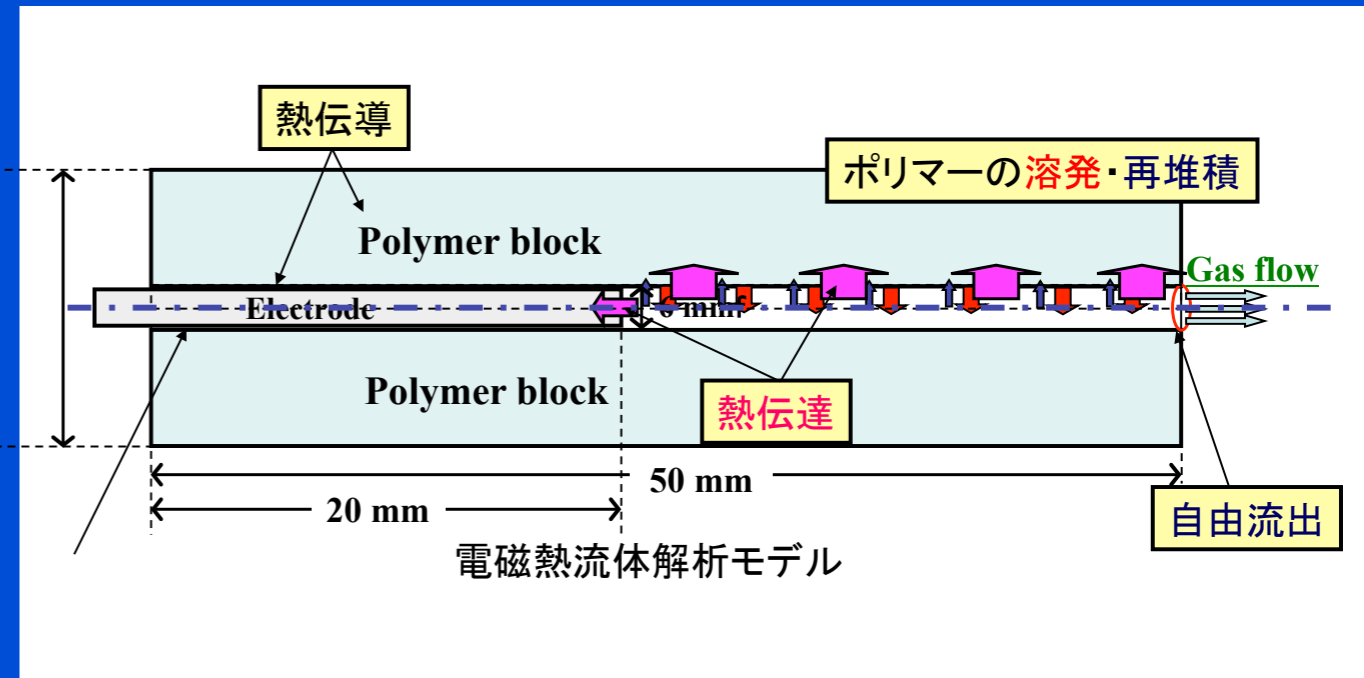


電流遮断の動作・実験例

配線用遮断器



アークホーン



配線用遮断器短絡事故時の動作例

アークプラズマ-ポリマー相互作用の例

POM : ポリアセタール (デルリン)

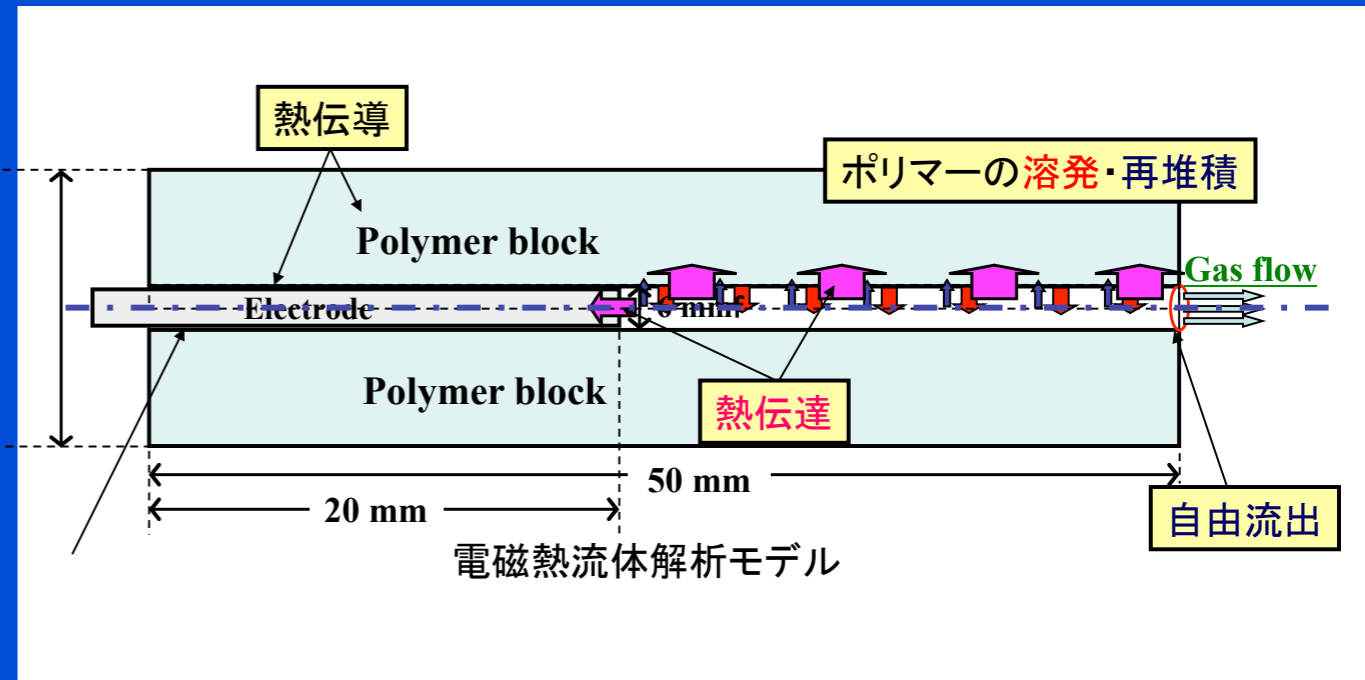


電流遮断の動作・実験例

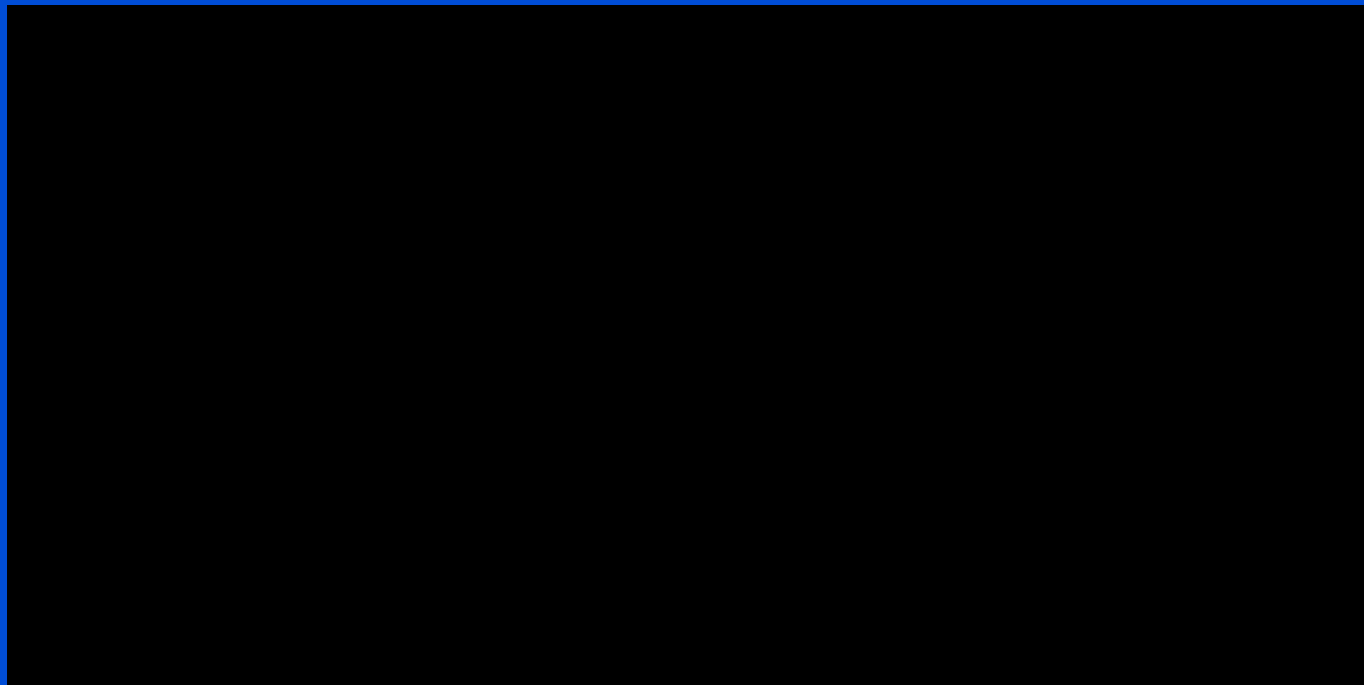
配線用遮断器



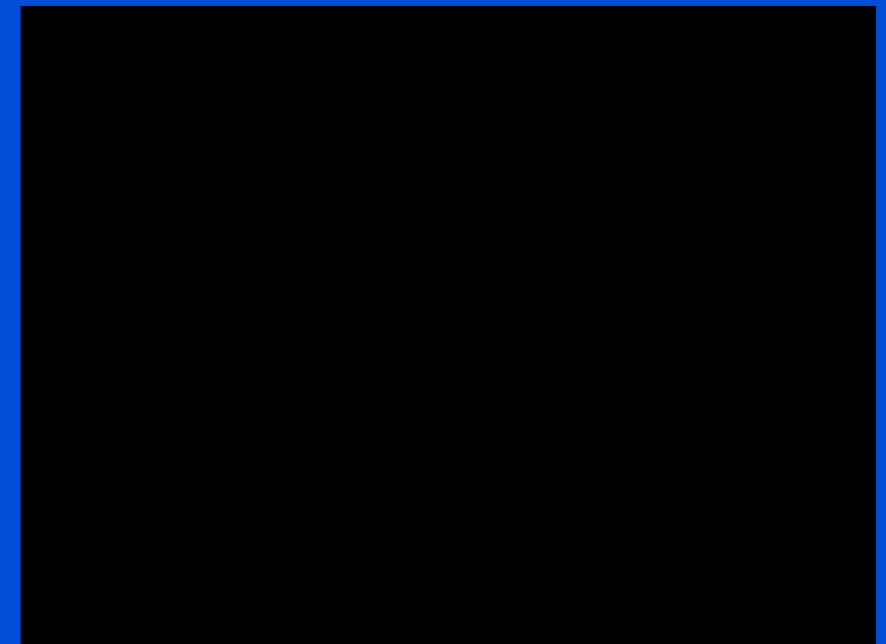
アークホーン



配線用遮断器短絡事故時の動作例



アークプラズマ-ポリマー相互作用の例



POM : ポリアセタール (デルリン)

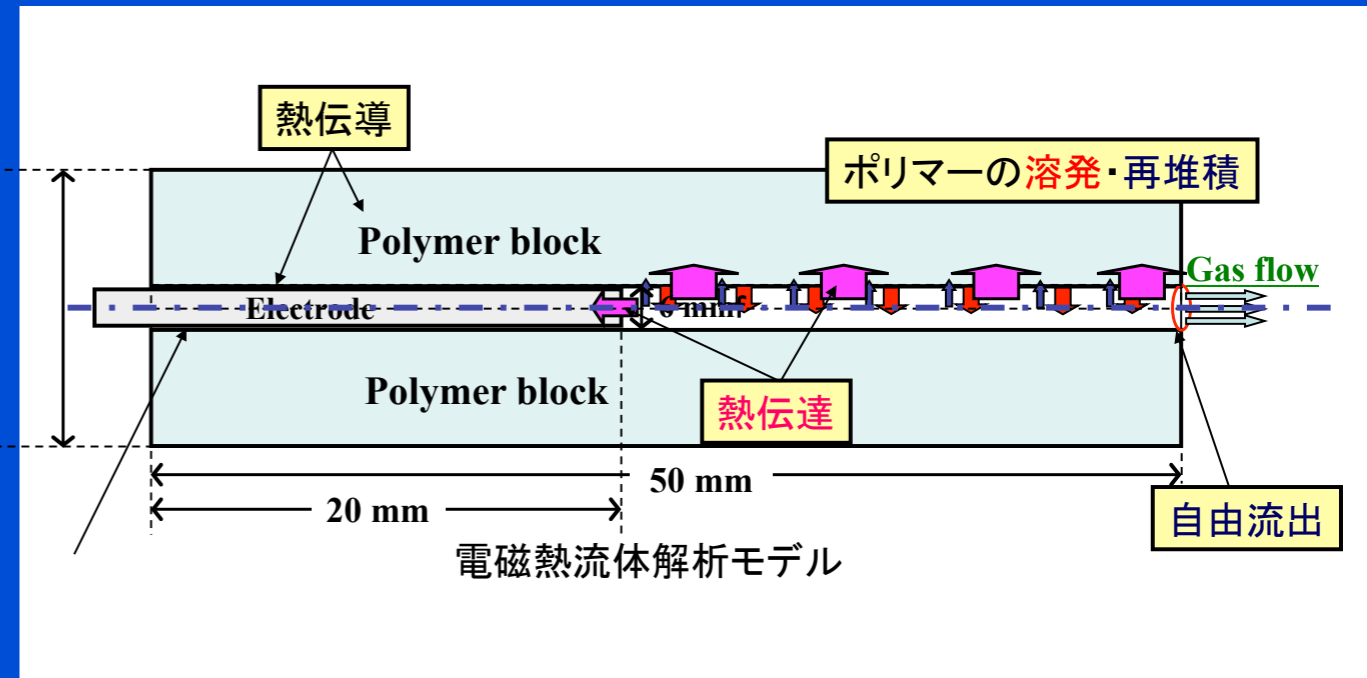


電流遮断の動作・実験例

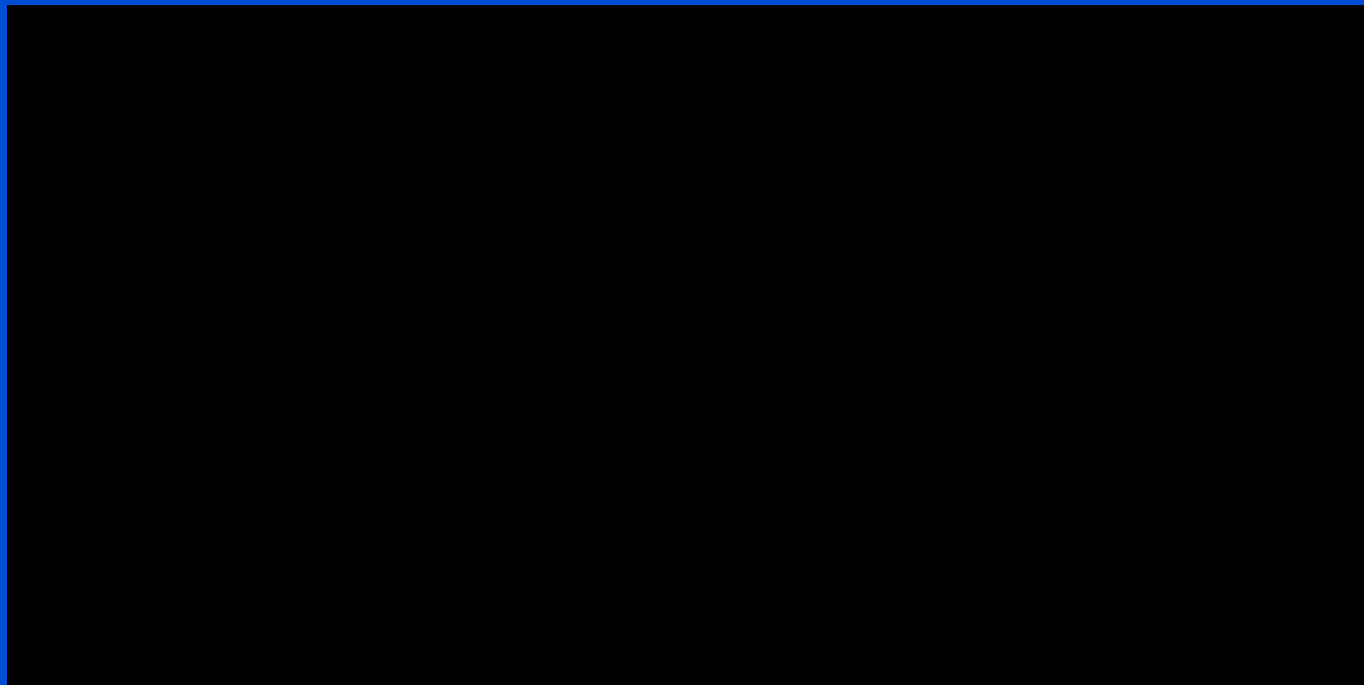
配線用遮断器



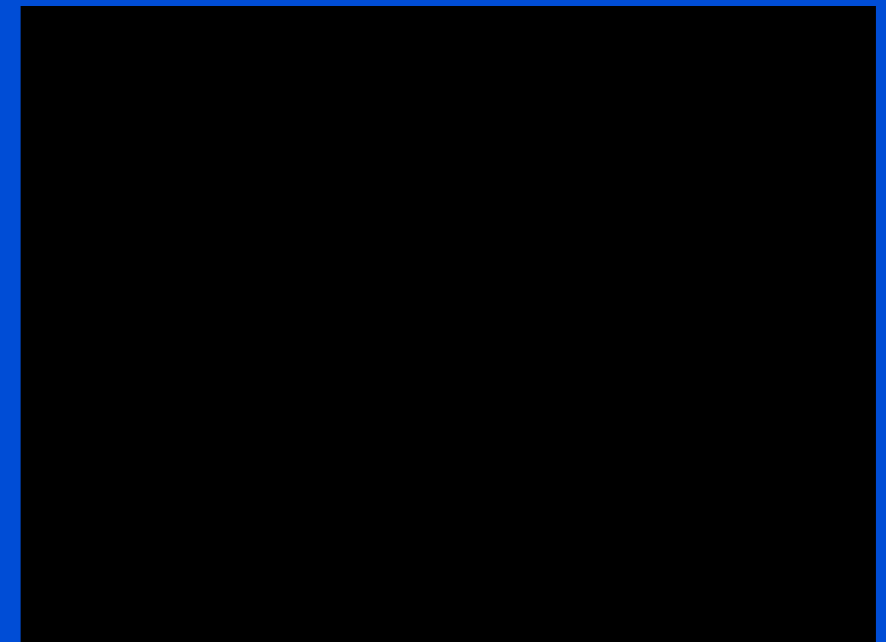
アークホーン



配線用遮断器短絡事故時の動作例



アークプラズマ-ポリマー相互作用の例

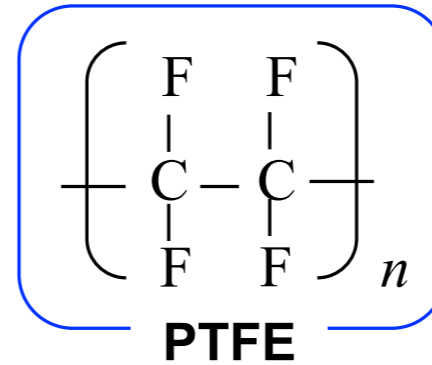
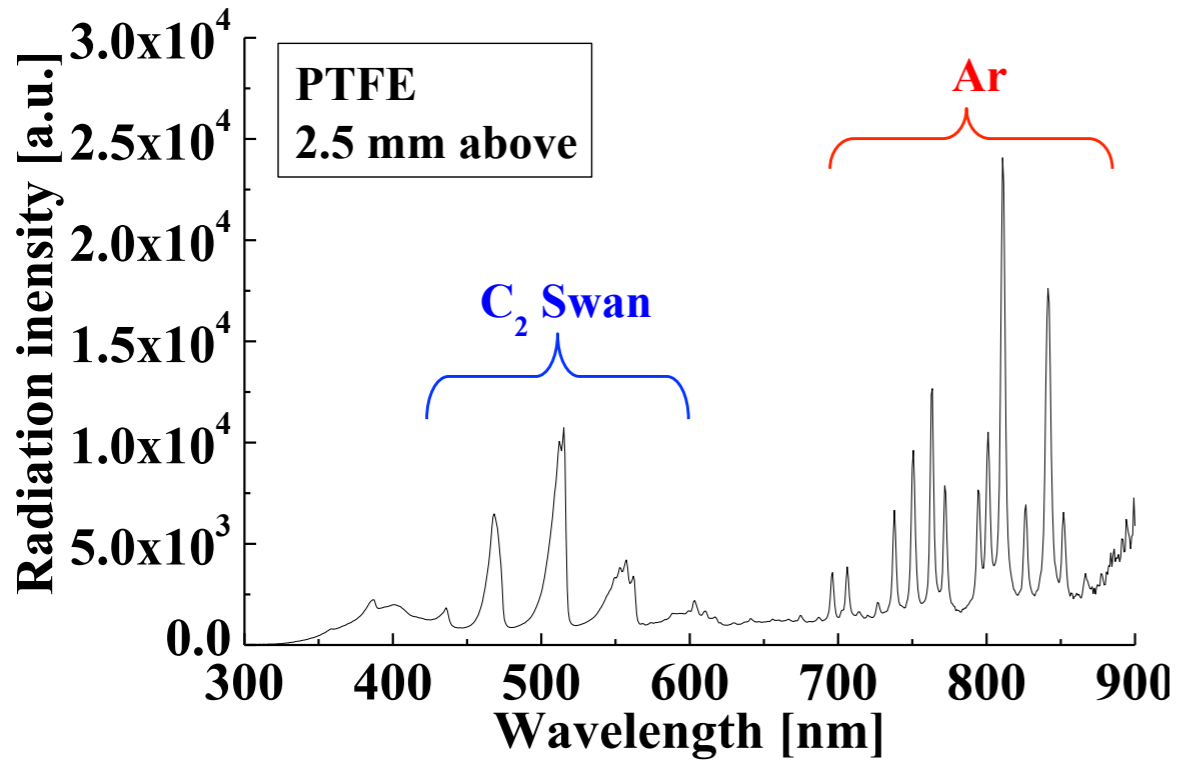


POM : ポリアセタール (デルリン)

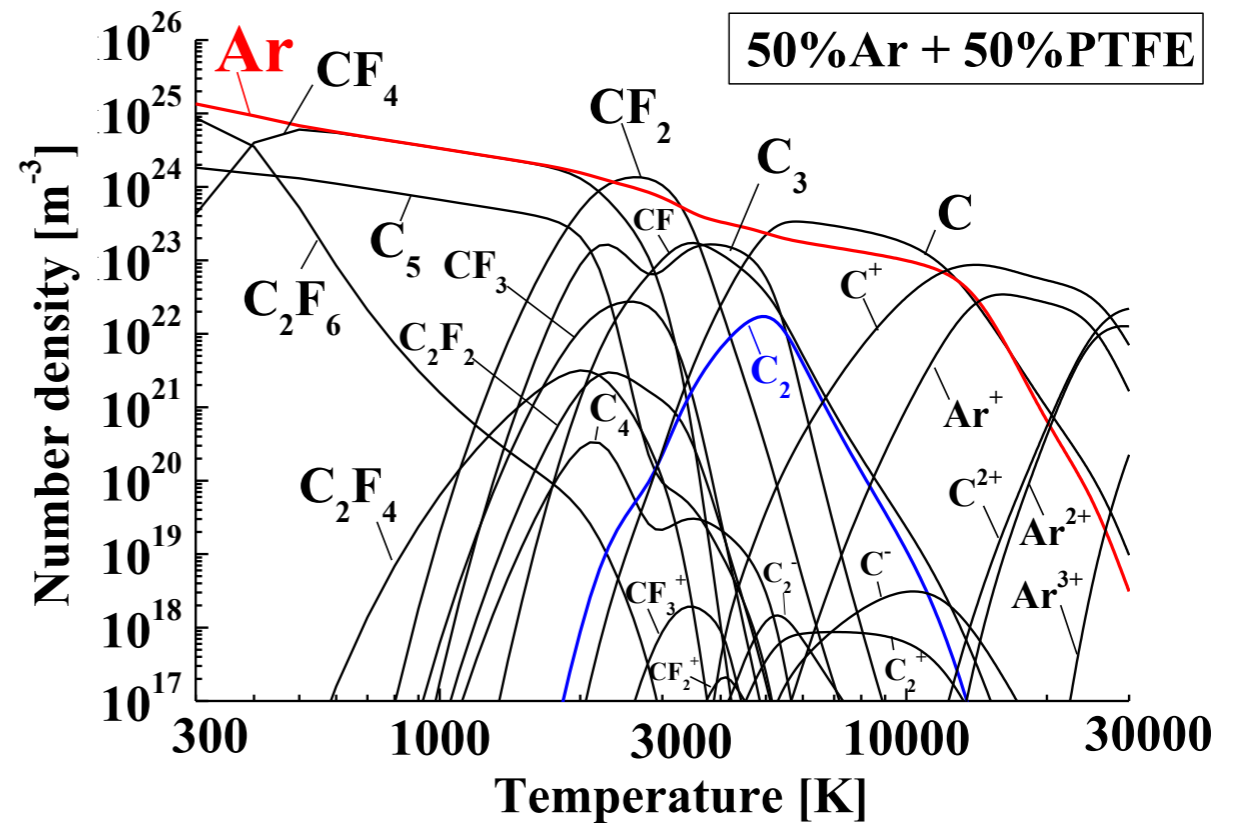


ポリマー溶発プラズマの解析例

ポリマー構成粒子に起因する発光分析



テフロンの場合の計算例



粒子組成計算

アークプラズマ温度：数百～3万K
 多様な分子の形成と熱力学的特性
 (比熱、熱伝導率等の把握)

PTFE蒸気50 %の各温度に対する構成粒子の数密度 (C,Arを含む)



大電流密度アークプラズマがもたらす重相構造の解明

伊藤九大教授・田中阪大教授が主導する

「非平衡極限プラズマ全国共同連携・研究ネットワーク計画」の一課題として、

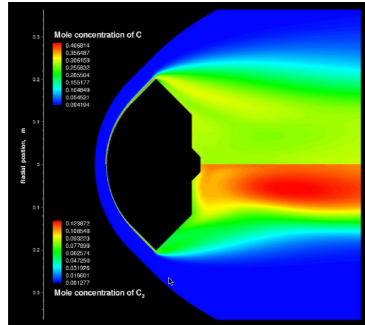
- 大電流（大電流密度）アークプラズマが形成する重相極限構造プラズマの解明
- アーク遮断器、アークプラズマ切断機などの高性能化
- 核融合炉におけるELM/Disruption 時のダイバータ壁の動的応答性の解明からその制御へ



重相（混相）極限構造プラズマ：未踏の物性領域

宇宙/アブレター

大気圏再突入時の空力加熱



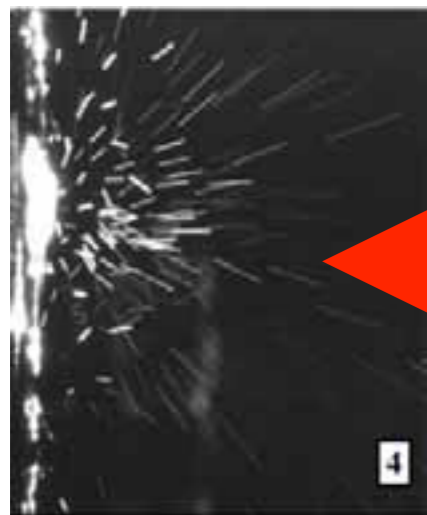
極限熱負荷
>50 MW/m²

大電流アーク



核融合/ダイバータ

パルス高熱流プラズマ
入射による溶融・液滴飛散



入射方向

本研究が扱う領域

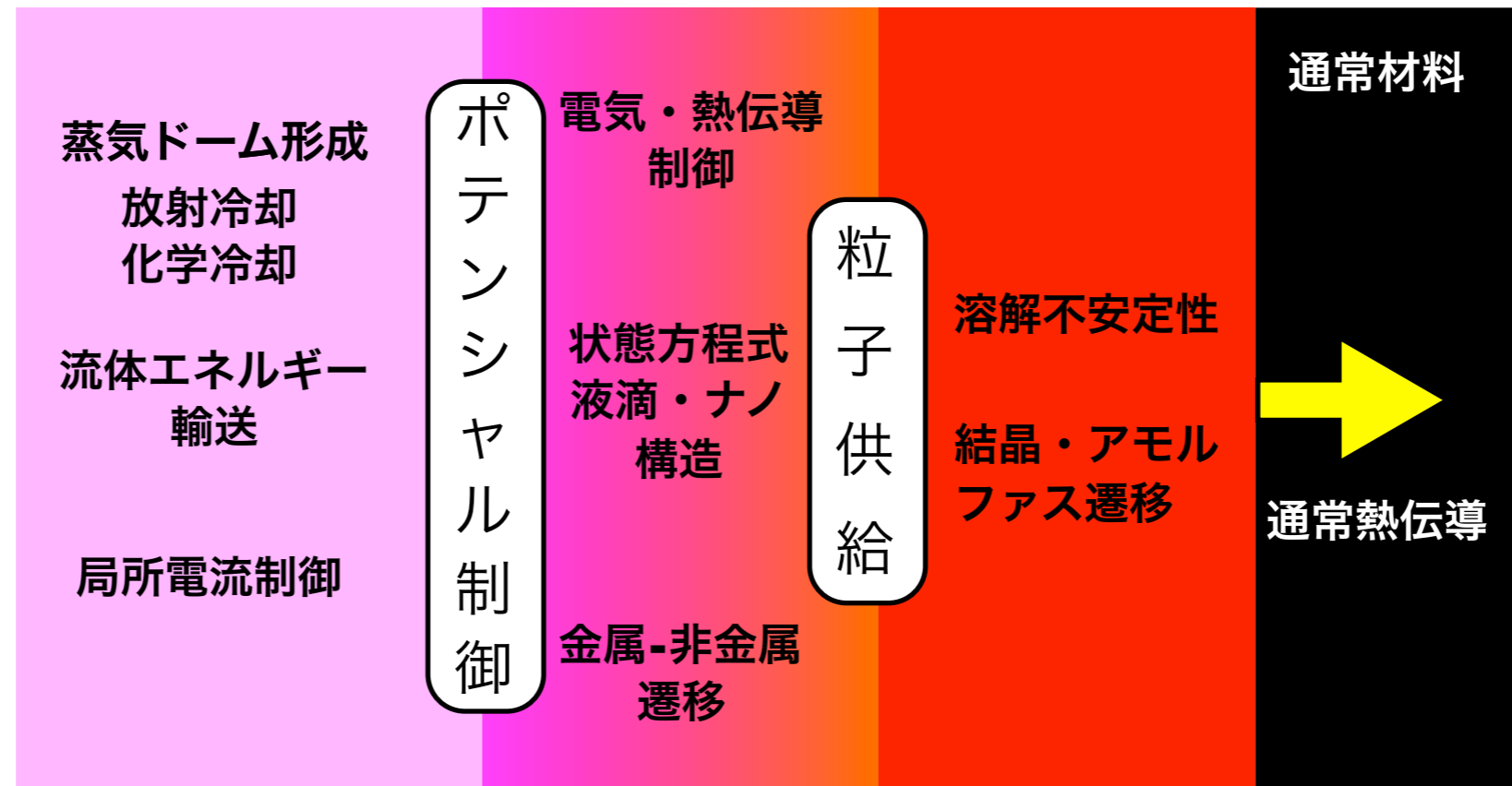
連携ネットワーク研究領域

プラズマ
コンタクト相

ウオームデンス
マター相

超臨界
固体密度相

名大・大野先生より提供



0.1MPa

10MPa

1MPa

圧力

$10^{20\sim 26} \text{m}^{-3}$

$10^{26\sim 28} \text{m}^{-3}$

$> 10^{28\sim 29} \text{m}^{-3}$

密度

$> 10^5 \text{K}$

$10^5 \sim 10^4 \text{K}$

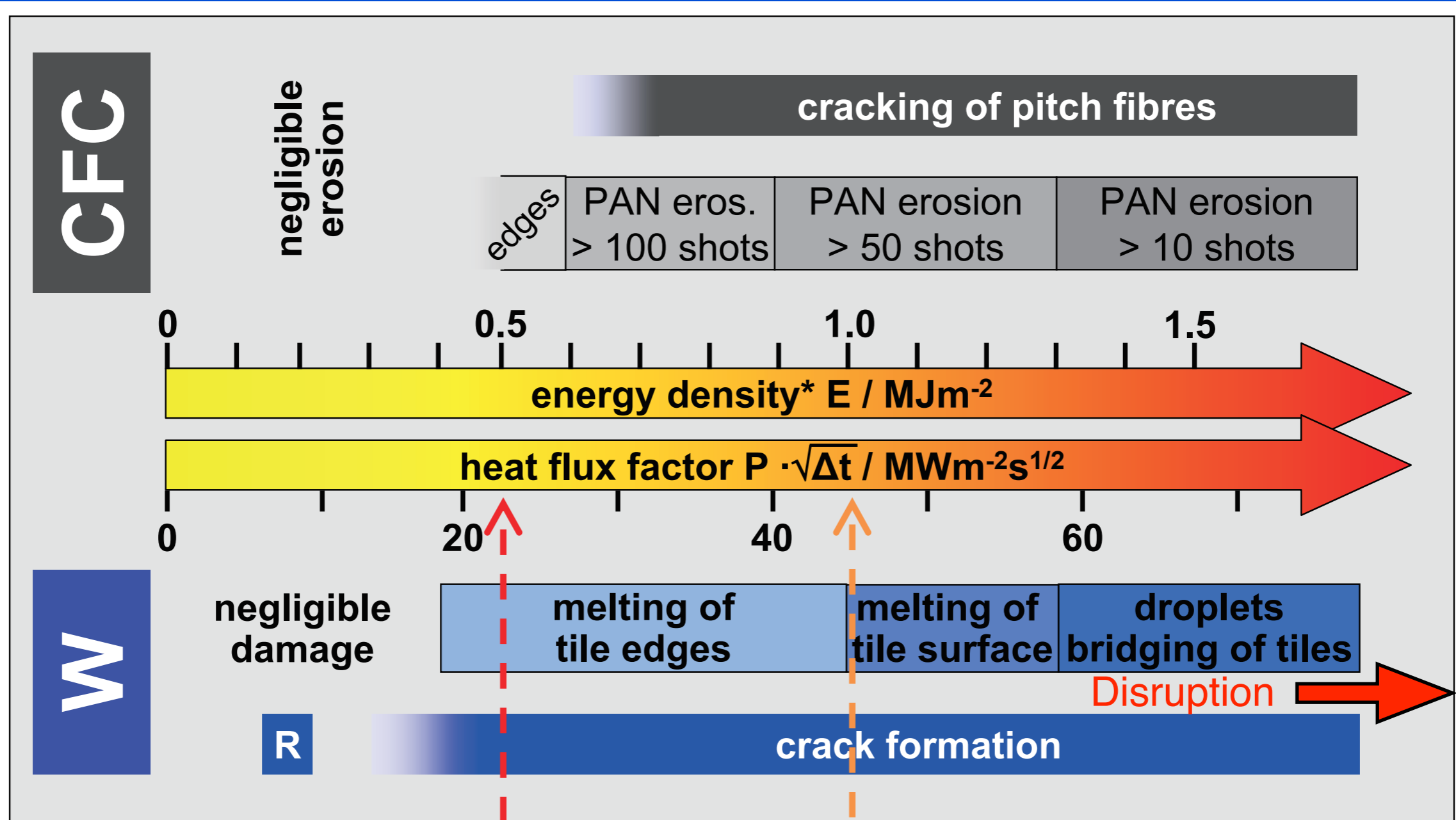
$< 10^4 \text{K}$

10^3K

温度



パルス高熱流負荷による核融合炉壁損耗



mitigated ELMs in ITER

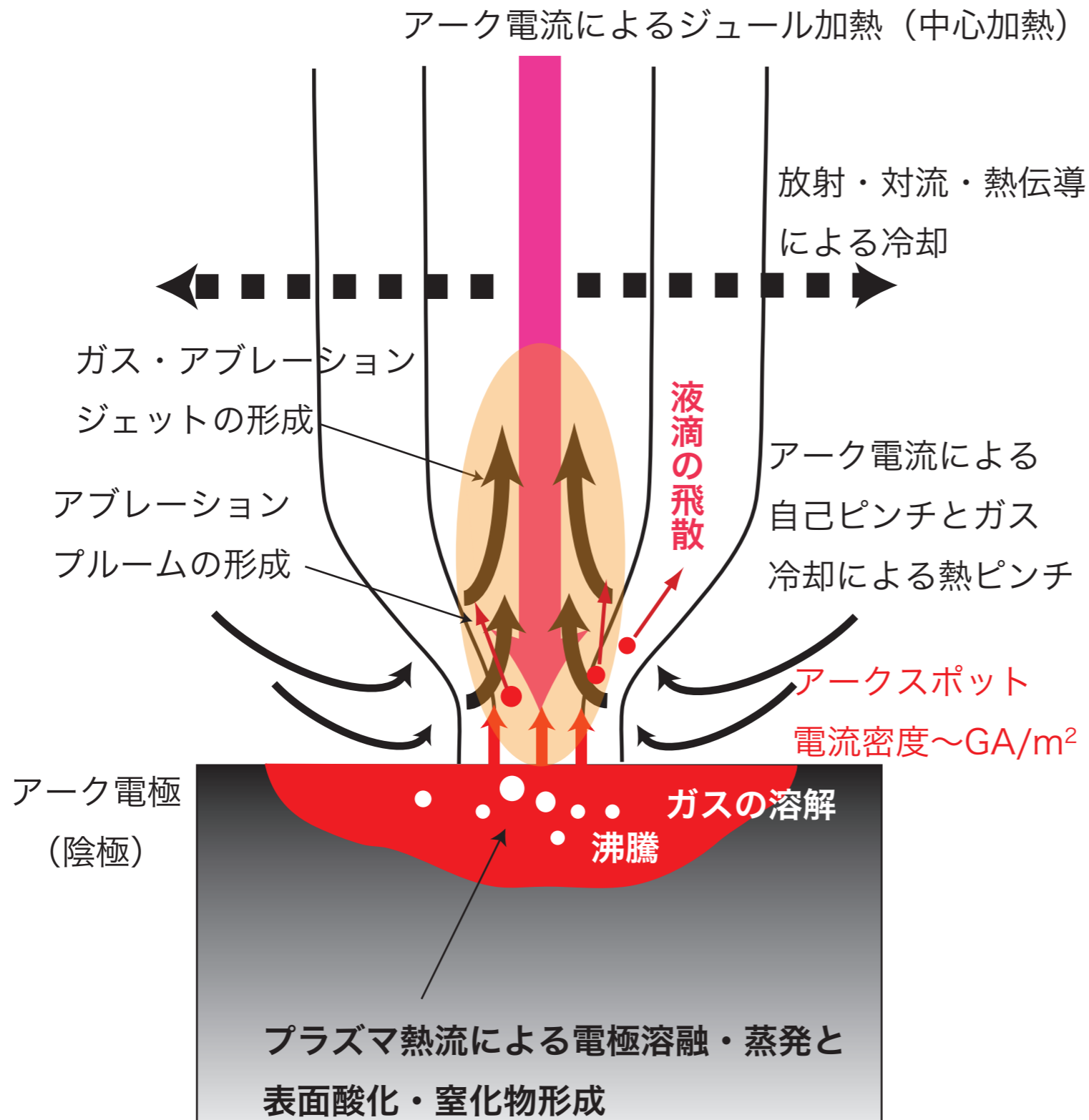
unmitigated ELMs in ITER

* $\Delta t = 500 \mu\text{s}$

R cracking of recrystallized tungsten at 420.000 shots



大電流密度アークプラズマが形成する重相構造



mmスケールの 重相極限構造

プラズマ相



液滴、金属蒸気
プラズマ混合相



液相（金属溶融池）



固相（電極）



プラズマ切断機用アークプラズマトーチを利用した 高融点金属材料損耗試験

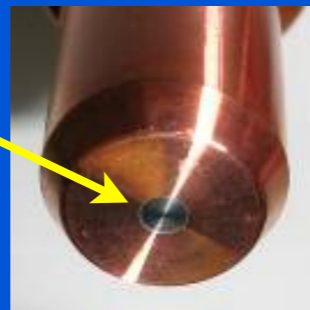
プラズマ切断機

電極-被切断物の間に酸素アークプラズマを発生
酸素プラズマの熱と
鉄の酸化燃焼反応を利用して切断溝を形成
軟鋼の中厚板を高効率切断
造船や建築・橋梁 など溶接構造物の切断工程で
多用

鋼板切断の様子

陰極 (直径 : 1.6 mm)

ハフニウム電極 (中心)
銅電極 (水冷ジャケット)

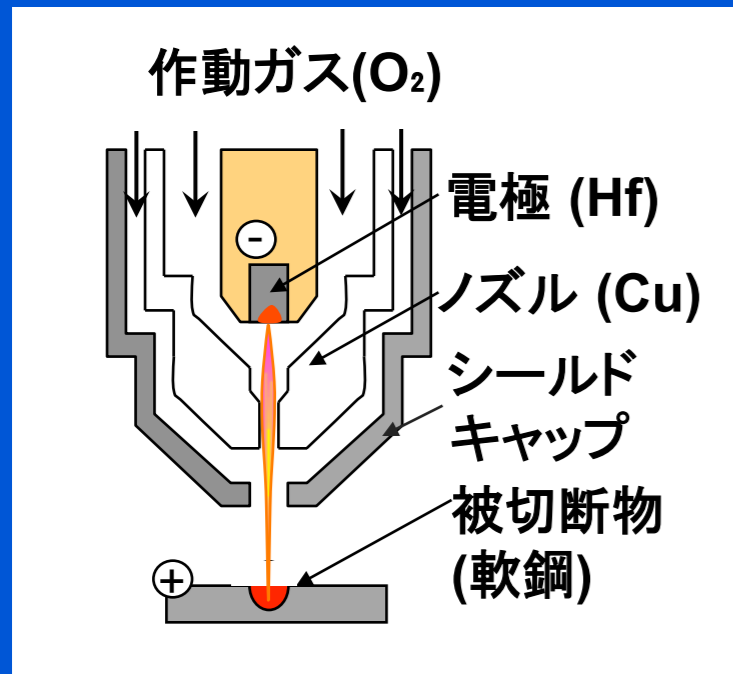


新品



使用済み

実験室でのアーク実験





プラズマ切断機用アークプラズマトーチを利用した 高融点金属材料損耗試験

プラズマ切断機

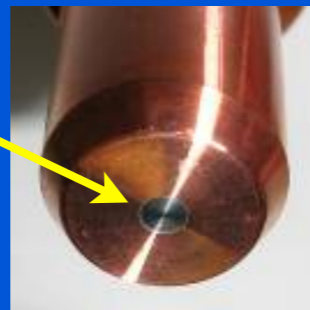
電極-被切断物の間に酸素アークプラズマを発生
酸素プラズマの熱と
鉄の酸化燃焼反応を利用して切断溝を形成
軟鋼の中厚板を高効率切断
造船や建築・橋梁 など溶接構造物の切断工程で
多用

鋼板切断の様子



陰極 (直径 : 1.6 mm)

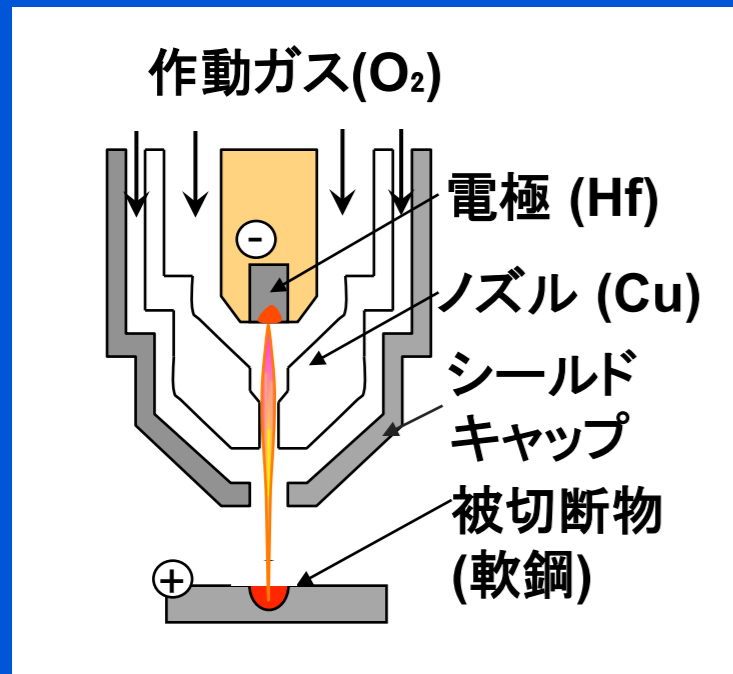
ハフニウム電極 (中心)
銅電極 (水冷ジャケット)



新品



使用済み



実験室でのアーク実験





プラズマ切断機用アークプラズマトーチを利用した 高融点金属材料損耗試験

プラズマ切断機

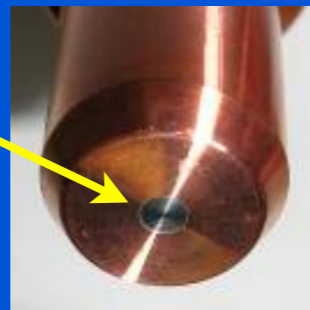
電極-被切断物の間に酸素アークプラズマを発生
酸素プラズマの熱と
鉄の酸化燃焼反応を利用して切断溝を形成
軟鋼の中厚板を高効率切断
造船や建築・橋梁 など溶接構造物の切断工程で
多用

鋼板切断の様子



陰極 (直径 : 1.6 mm)

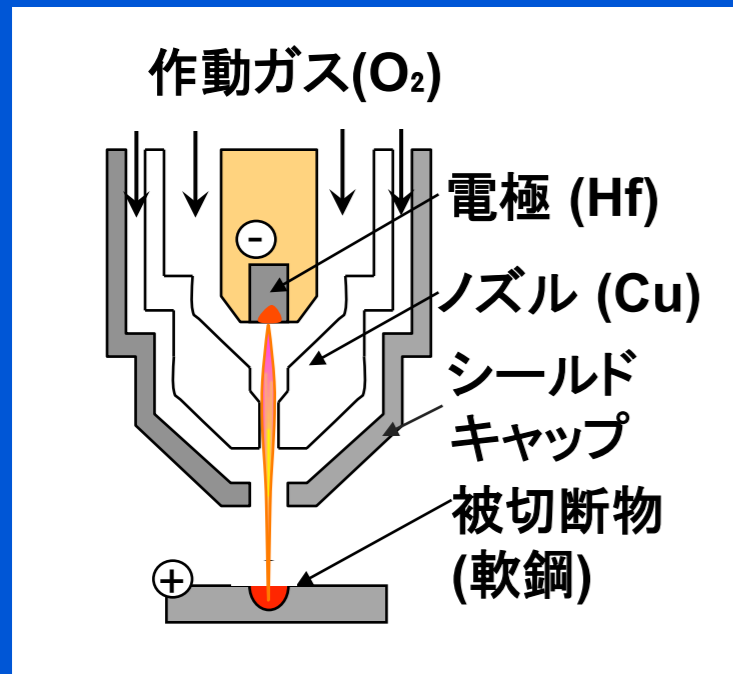
ハフニウム電極 (中心)
銅電極 (水冷ジャケット)



新品



使用済み



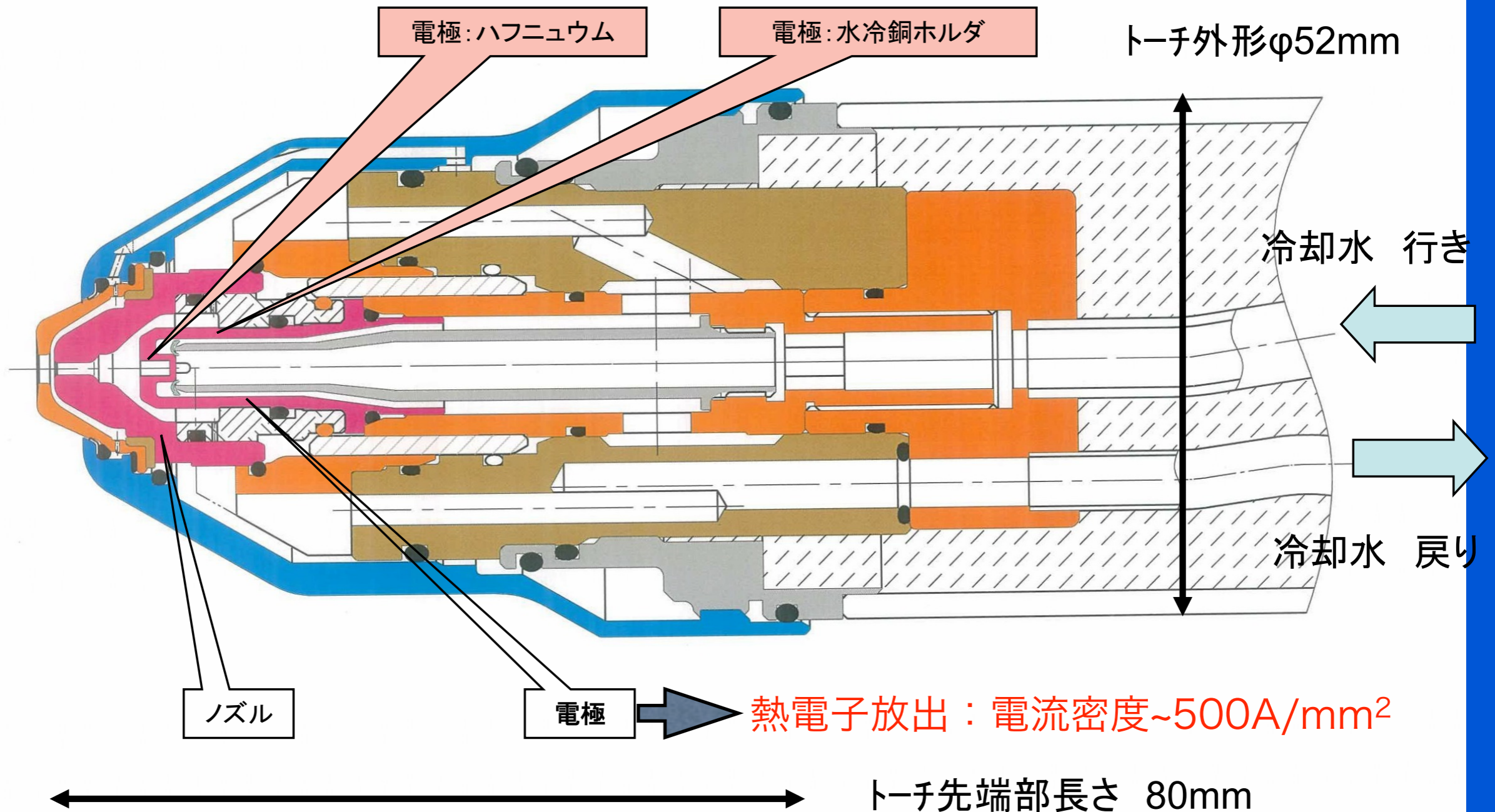
実験室でのアーク実験





プラズマ切断機用プラズマトーチの構造

電極ノズル冷却用配管



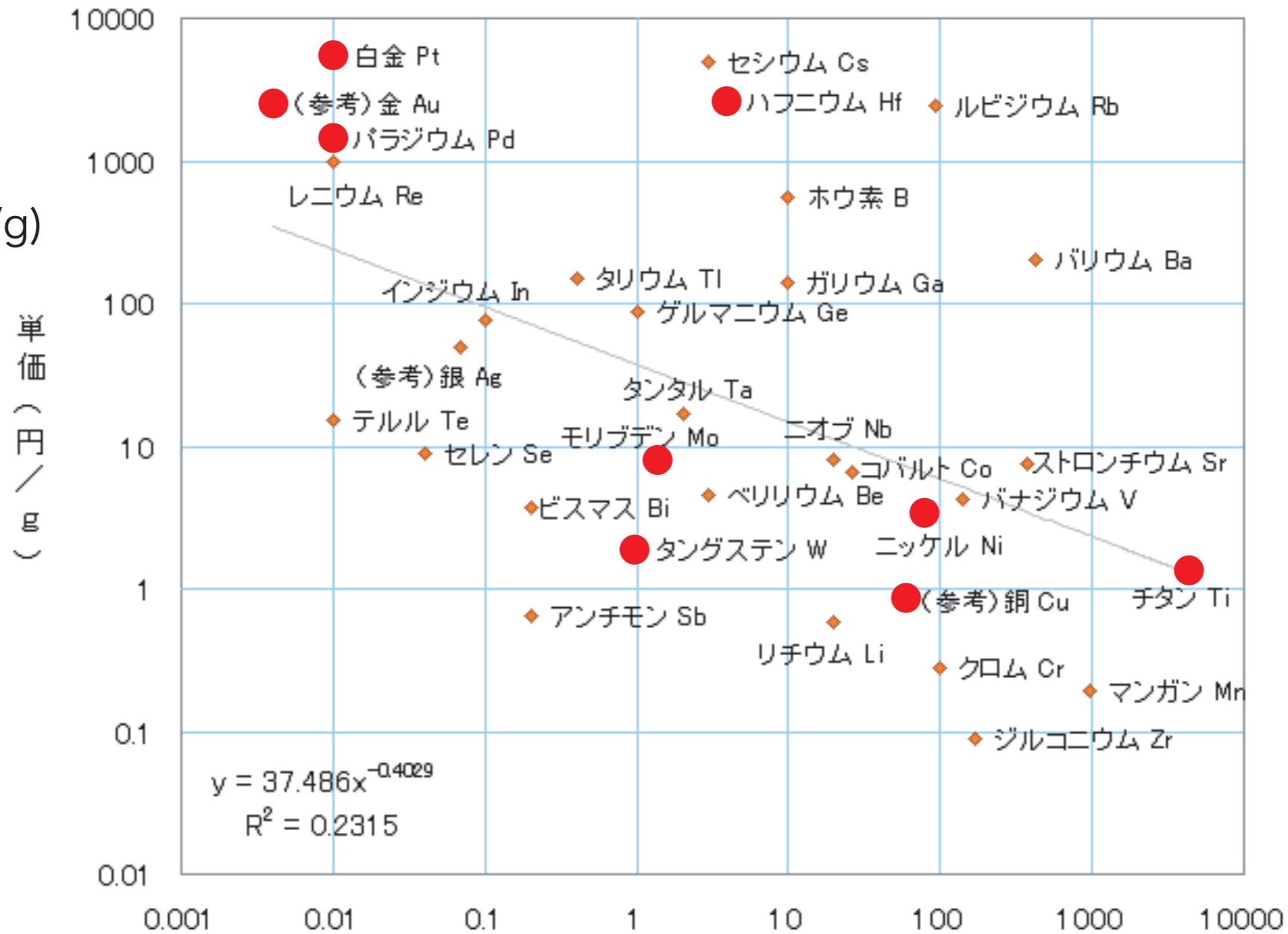


レアメタルの存在量と価格

単価 (円 /g)

レアメタルの存在量と価格

レアメタルの存在量と価格



地殻内存在量 (ppm, 100万分の1) 地殻内存在量 (ppm)

(注) 存在量は地殻内存在量。希土類は省略。x軸、y軸ともに対数目盛。価格は化合物の場合もある。

(資料) 小谷太郎「宇宙で一番美しい周期表入門」2007年



高融点金属とその酸化物：融点と沸点

遮断器電極：電力用遮断器 (WCu:60%W, 40%Cu)

配線用遮断器 (WCAg:~60%WC, ~40%Ag)

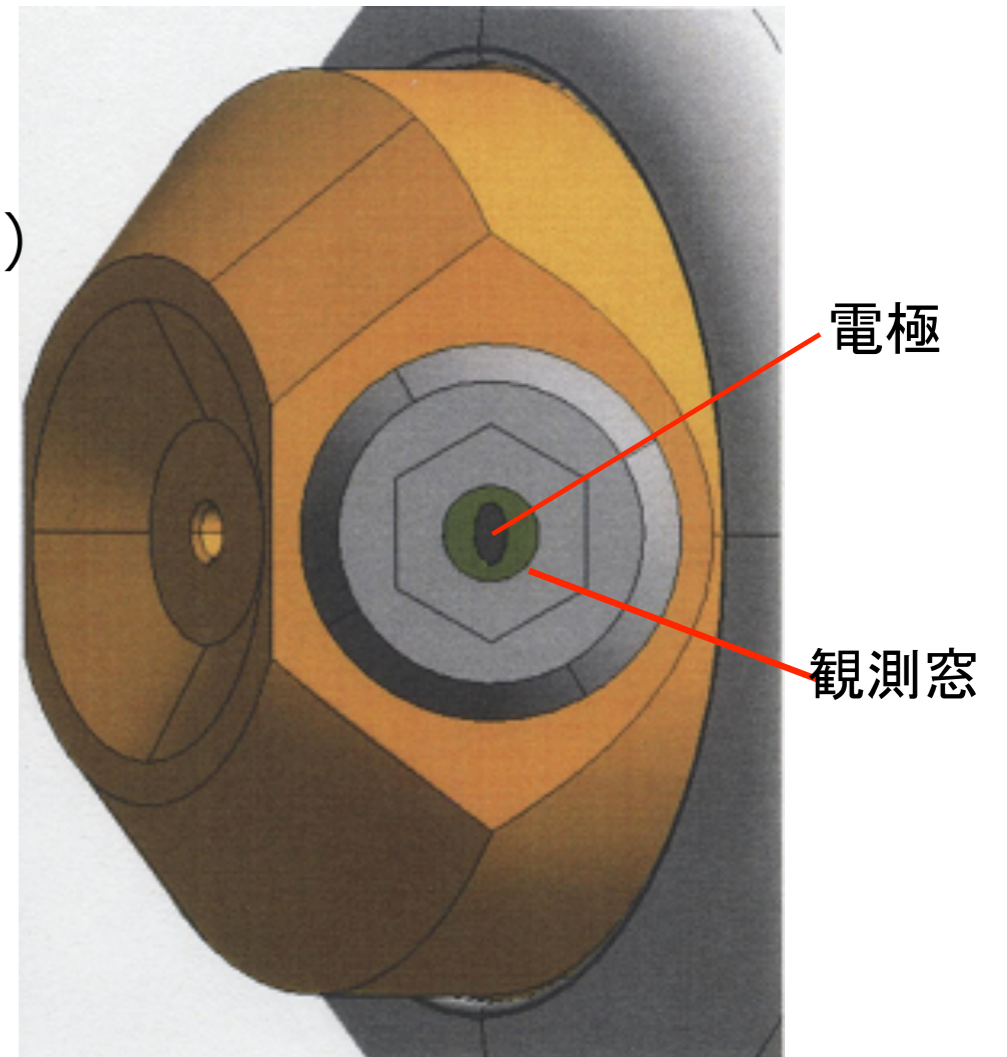
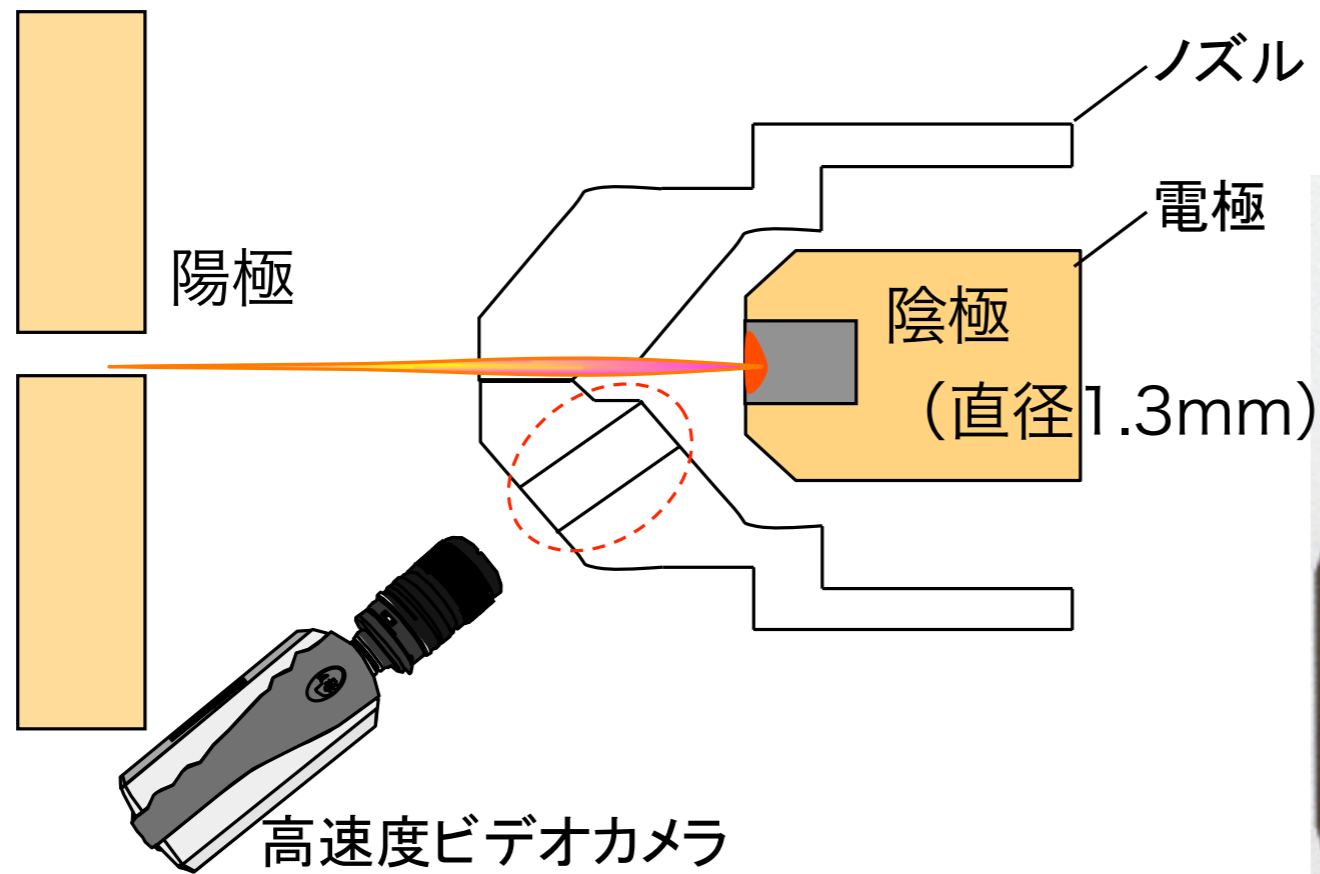
プラズマ切断機陰極：ハフニウム (銅ホルダー)

プラズマ溶射機陰極：タングステン

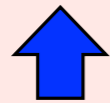
電極材料	融点(°C)	沸点(°C)	酸化物	融点(°C)	沸点(°C)
タングステン	3410	5550	WO ₃	1473	1840
モリブデン	2620	4650	MoO ₃	795	1155
ハフニウム	2230	4600	HfO₂	2812	5400
ジルコニウム	1852	4377	ZrO ₂	2679	4548



アークスポットの直接観察と表面温度計測



高速ビデオカメラにてアーク点火中の
ノズル内部の状態を観察

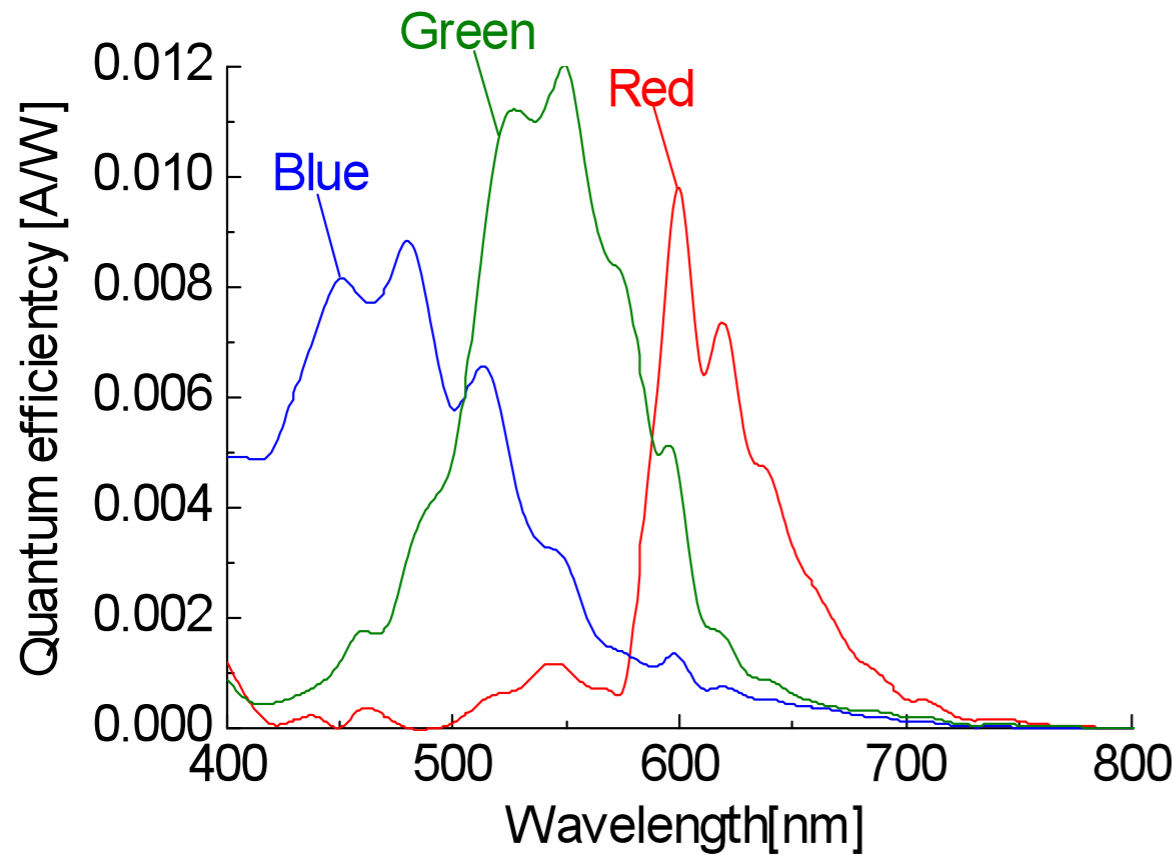


- ・電極の表面状態
- ・ノズル内部のアークの状態(アークの径, アークの挙動など)



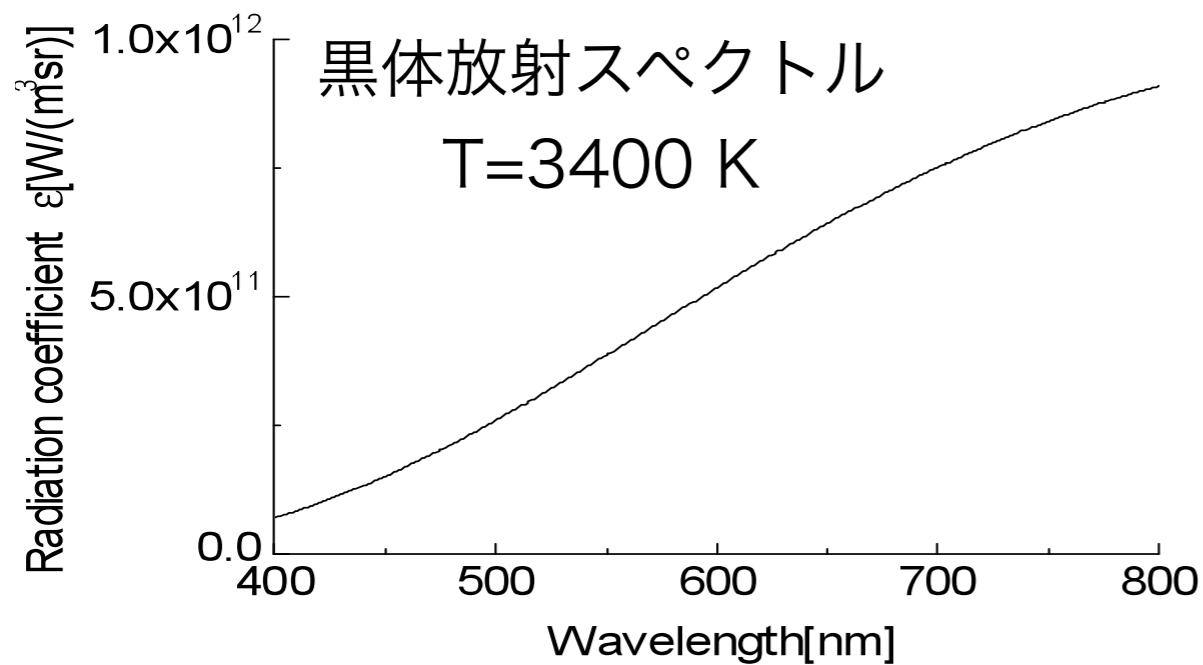
カラー高速カメラを用いた電極表面温度の評価

カラーカメラのRGB受光感度

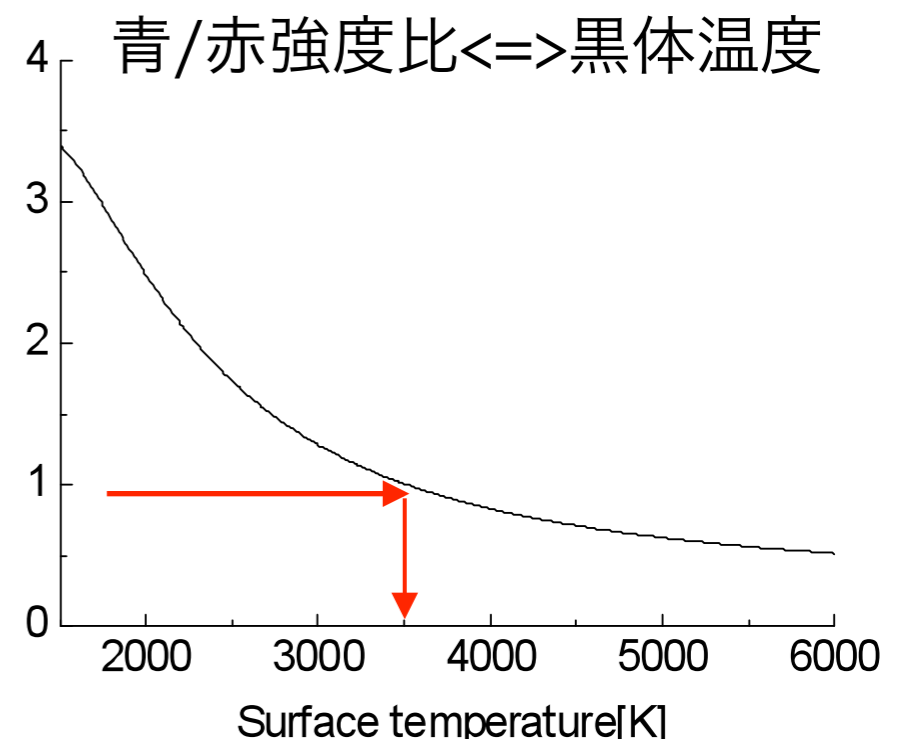


赤強度 $I_R = \int_{400}^{800} \epsilon_T Q_R d\lambda$

青強度 $I_B = \int_{400}^{800} \epsilon_T Q_B d\lambda$



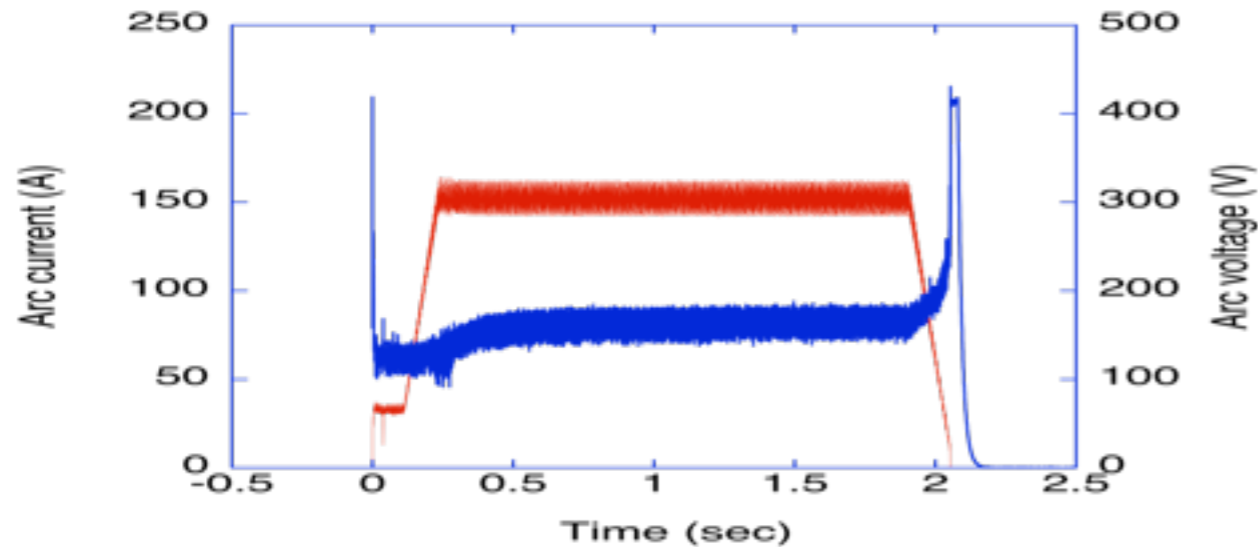
Ratio of red value to blue value
 I_R/I_B [a.u.]



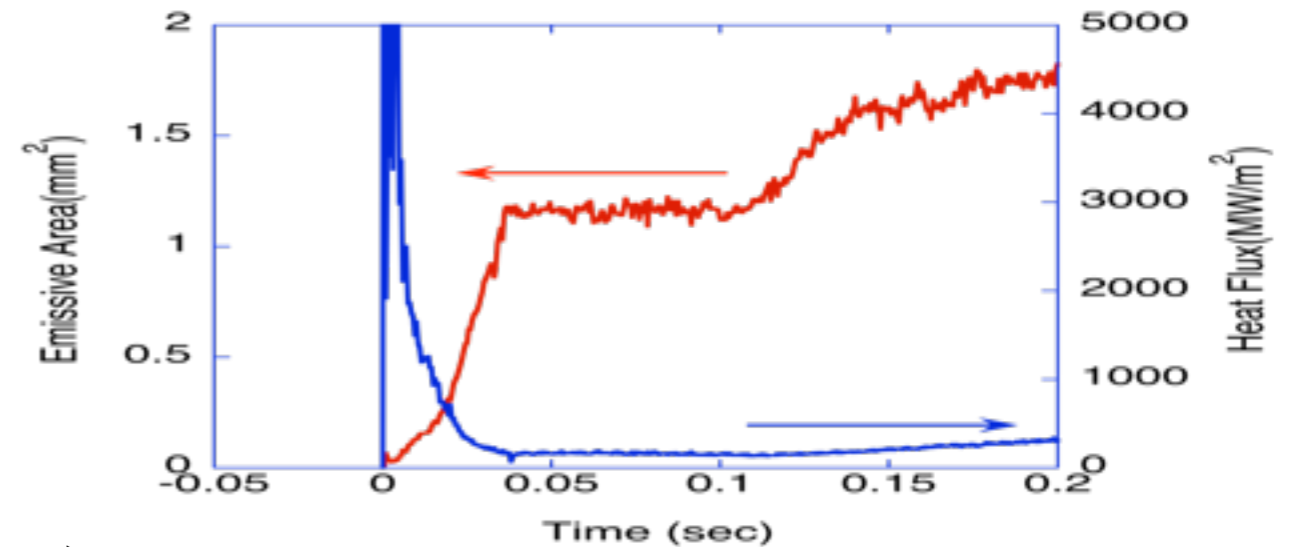


150A直流アーク放電の熱流束値

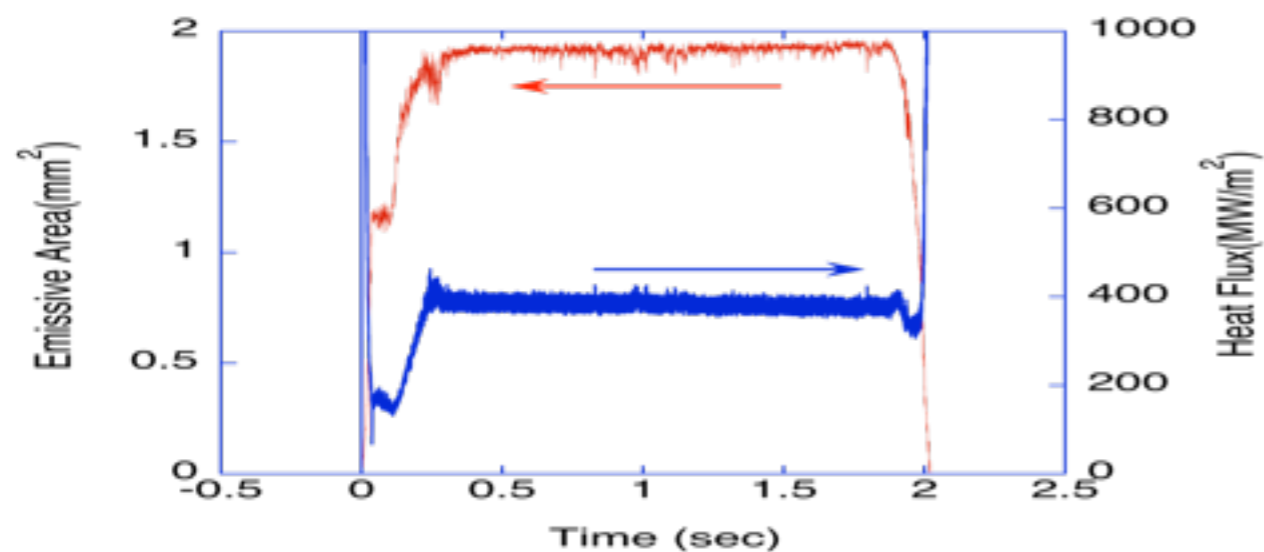
アーク電流・電圧



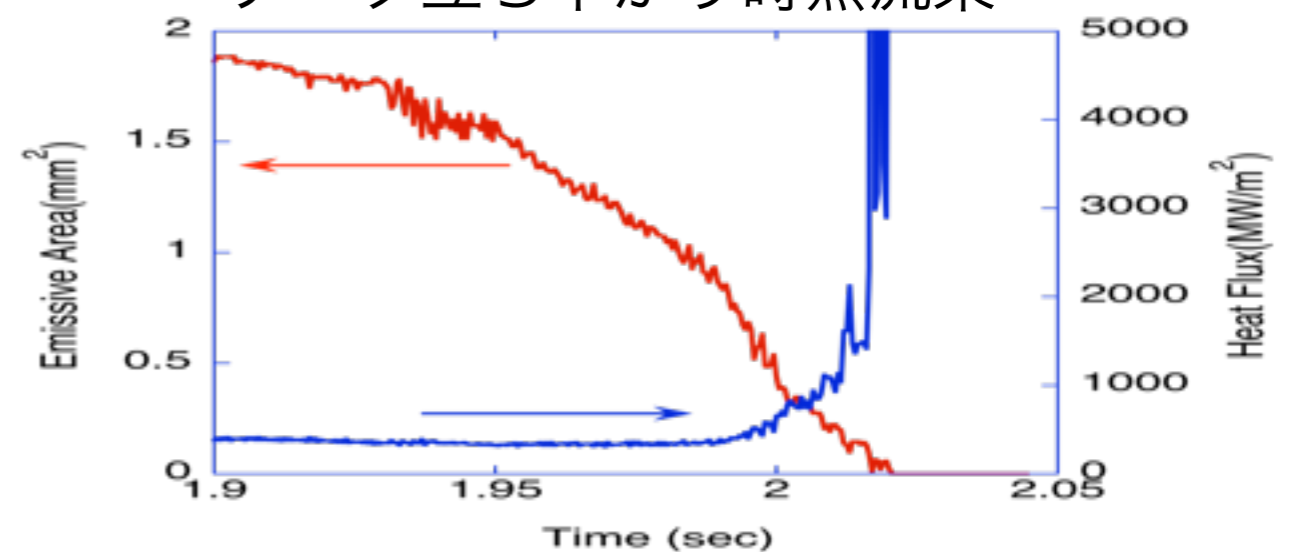
アーク立ち上がり時熱流束



陰極点面積・熱流束



アーク立ち下がり時熱流束



定常熱負荷：~400 MW/m², 過渡的熱負荷：数GW/m², 数ms

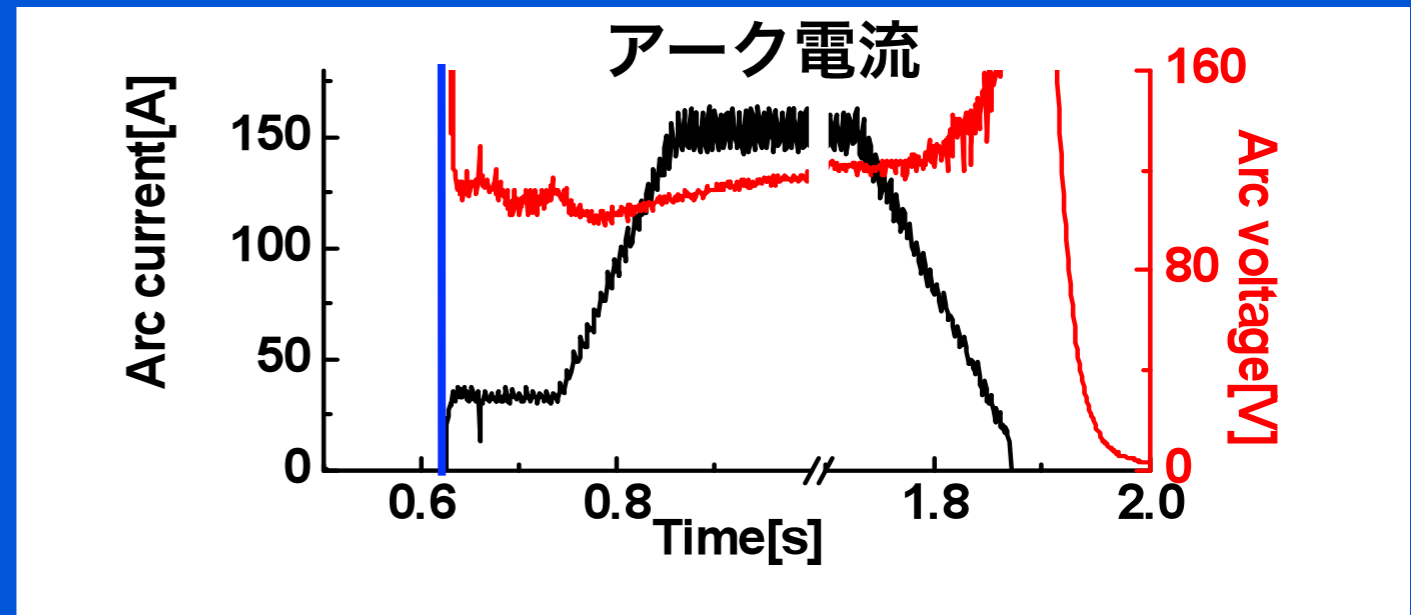
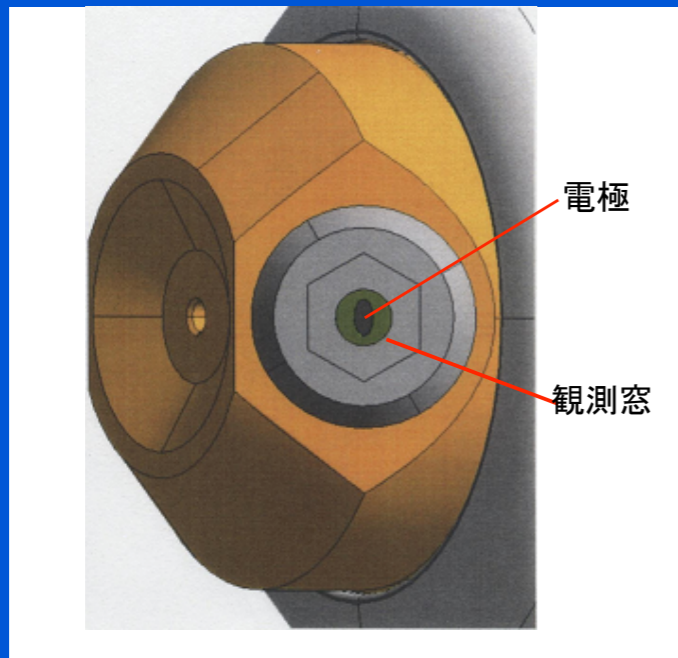
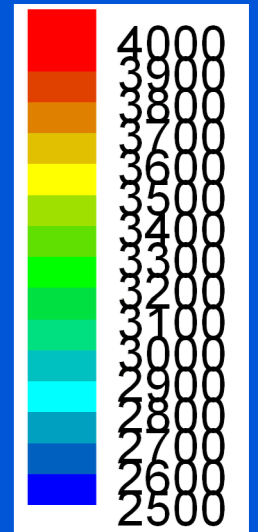


陰極アークスポットカラー画像と表面温度変化

アークスポットカラー画像

表面温度変化

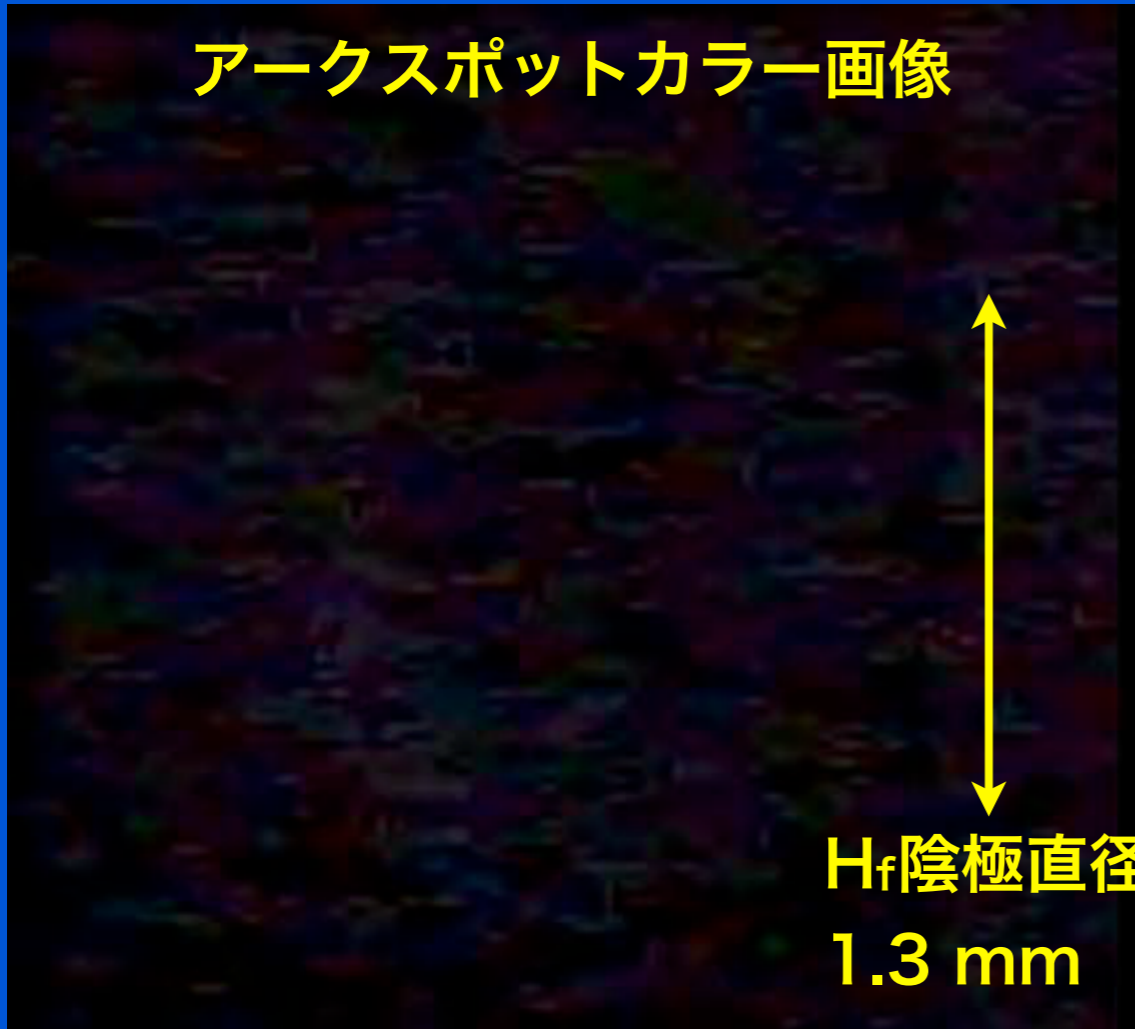
↑
↓
H_f陰極直径
1.3 mm



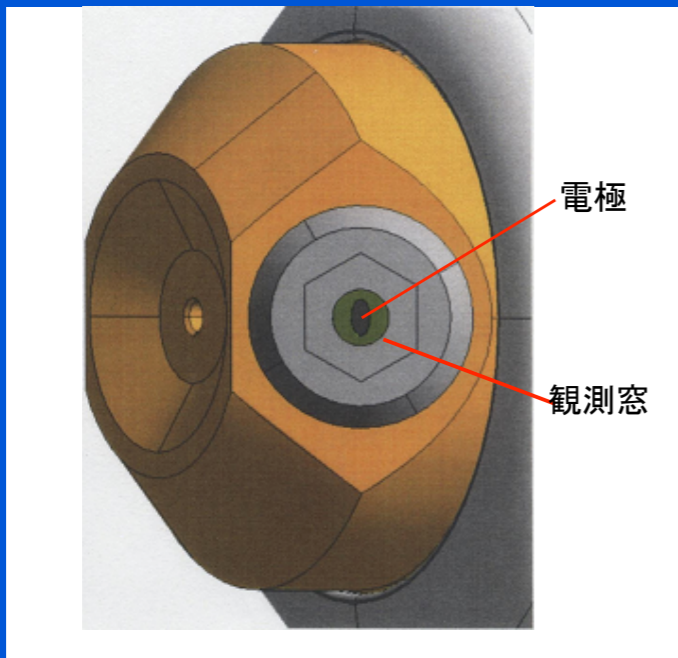
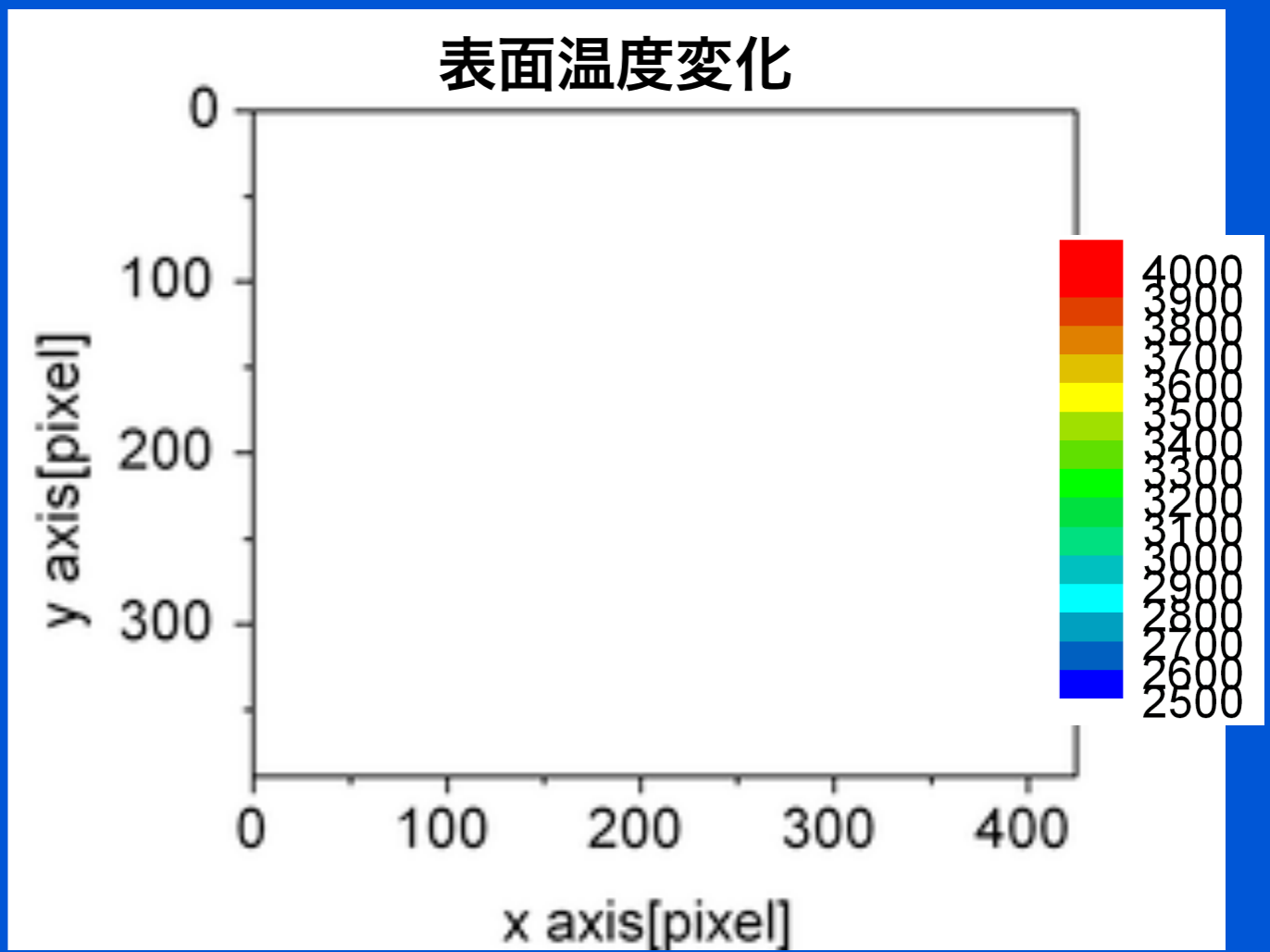


陰極アークスポットカラー画像と表面温度変化

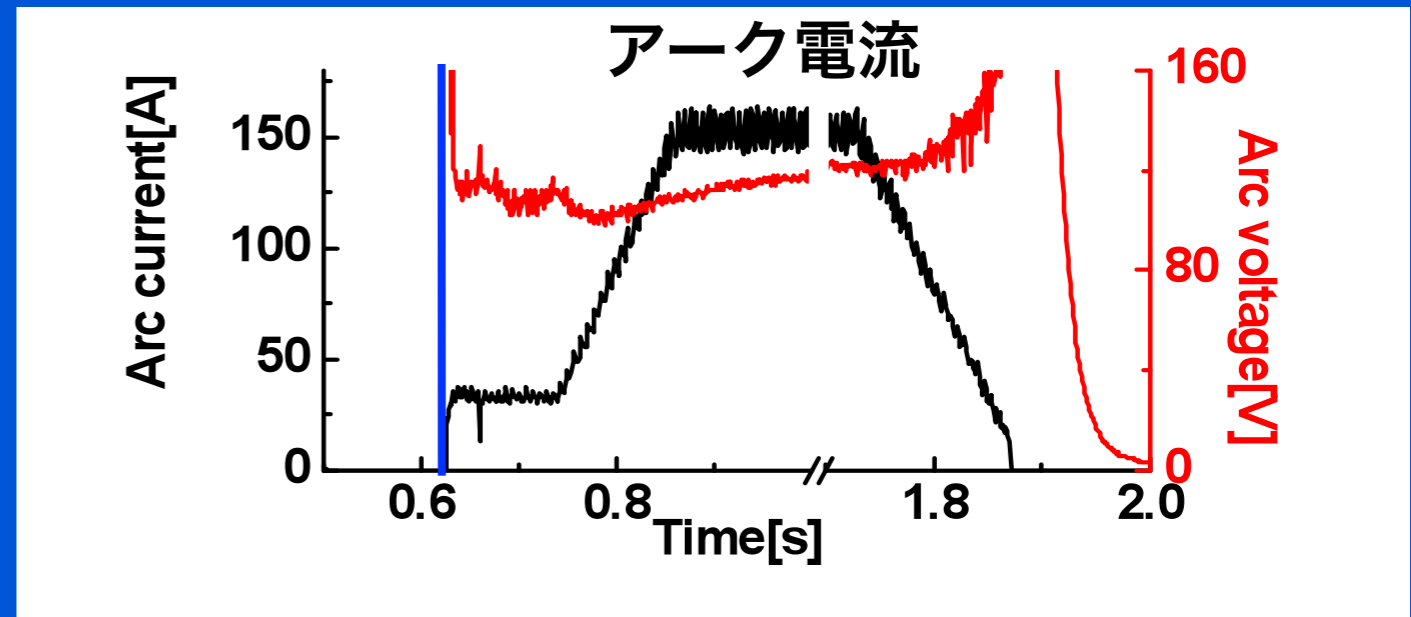
アークスポットカラー画像



表面温度変化

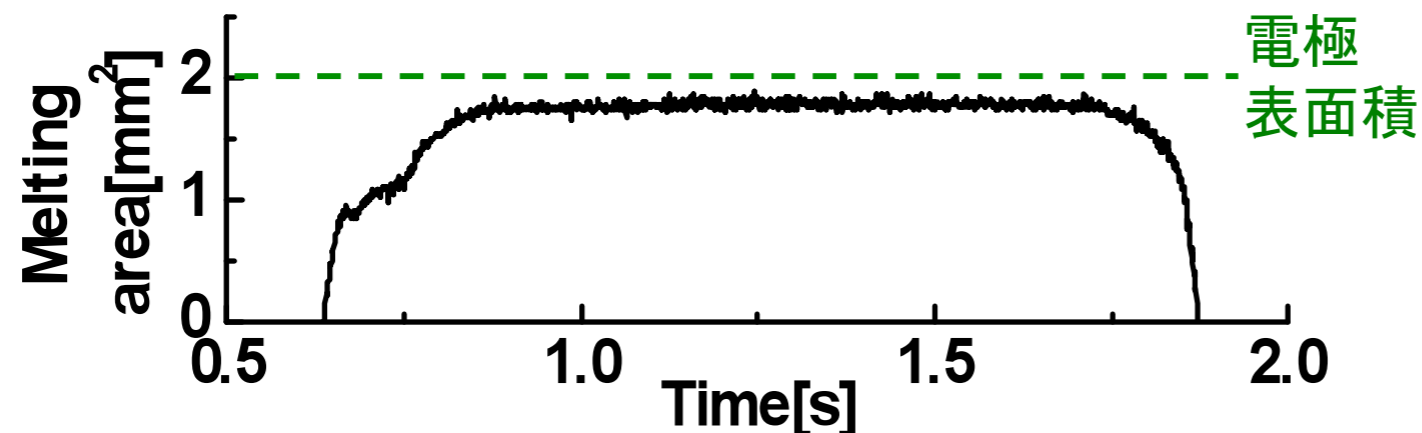
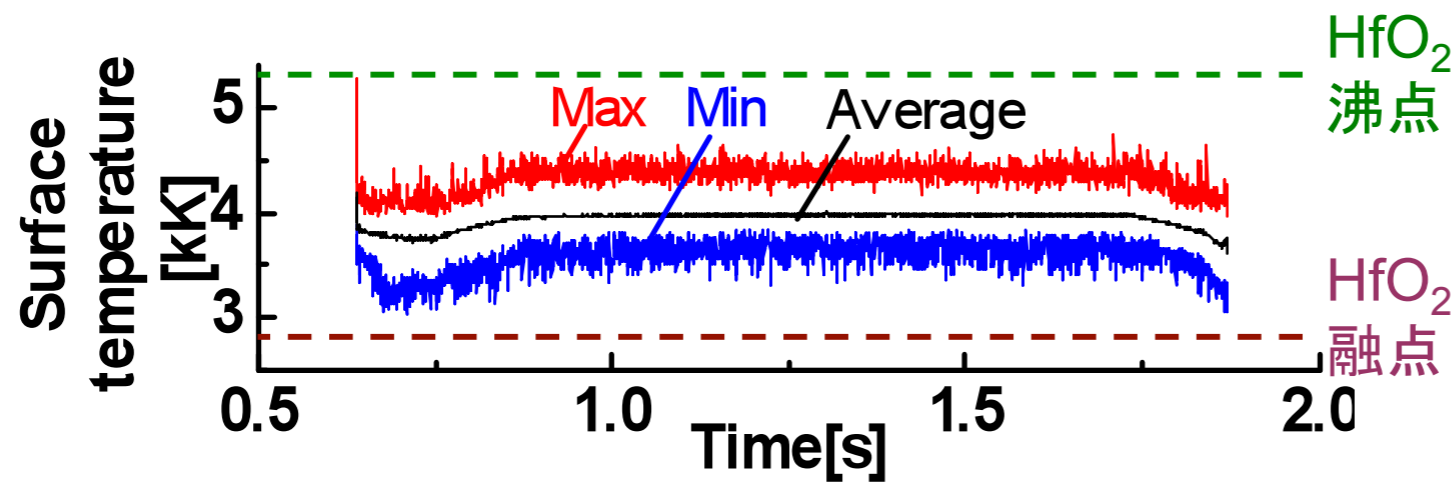
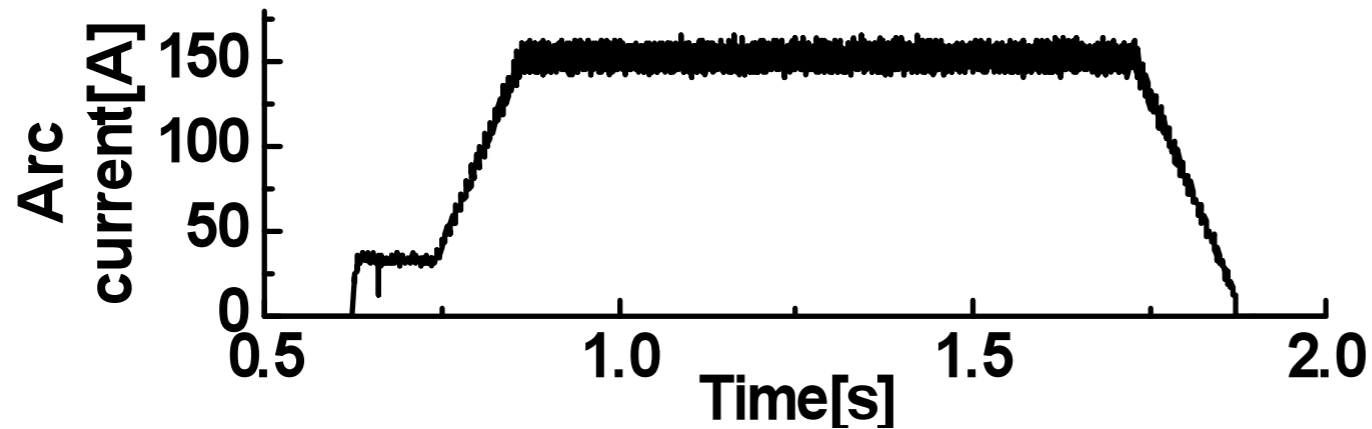


アーク電流





アーク電極表面温度の動的変化



・アーク発生直後

電極表面温度: 最大
(沸点近くまで上昇)

・定常時

電極表面温度:
4300K~3500K
溶融面積: 電極表面
89%

・アーク消弧時

電極表面温度:
電流低下と共に低下
溶融面積:
アーク消滅後に急速
に低下



熔融陰極からの熱電子放出電流の評価

リチャードソン・ダッシュマンの式

$$I_s = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

A係数

Hf : 1.4×10^5 A/m²K

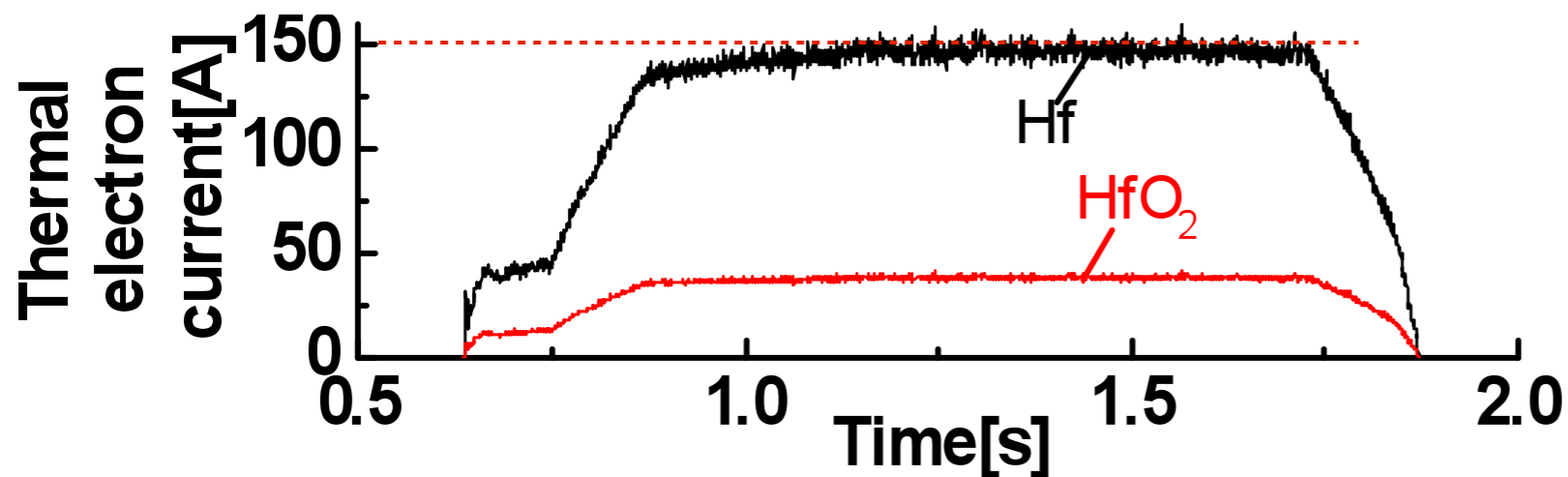
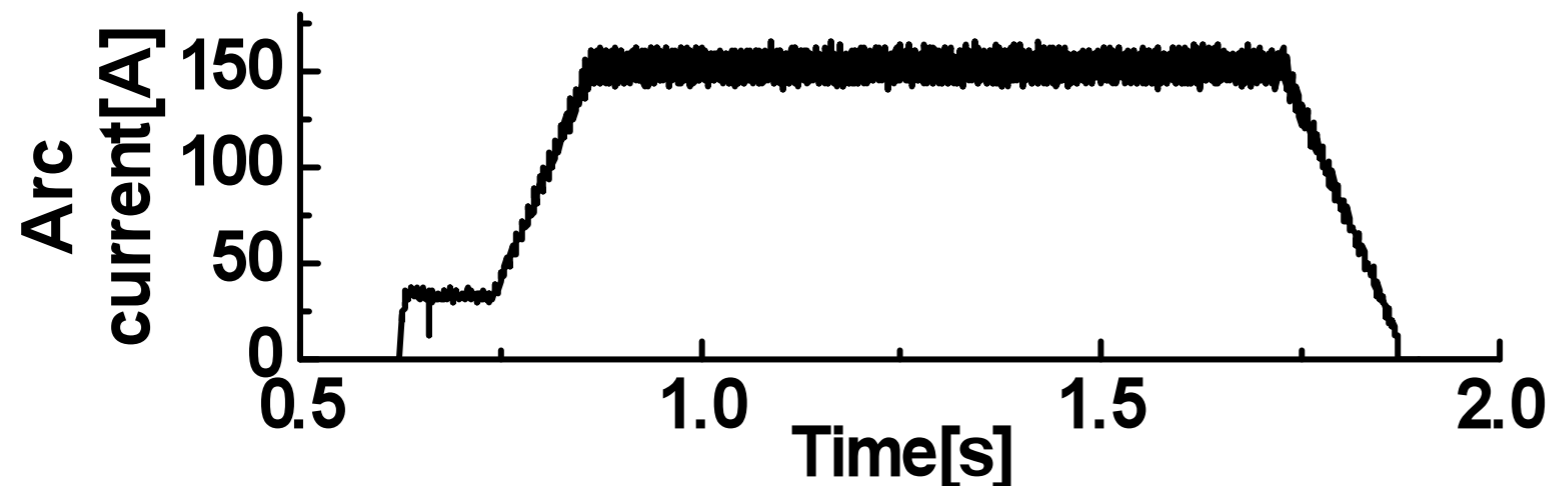
HfO₂ : 0.49 A/m²K²

仕事関数

Hf : 3.5 eV

HfO₂ : 2.8 eV

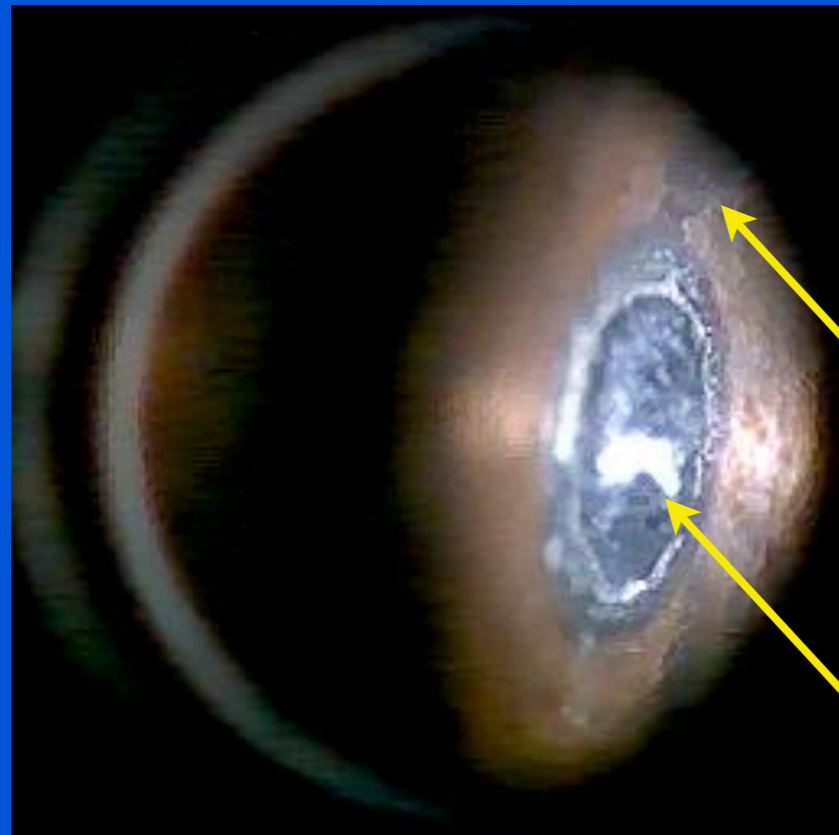
- アーク電流とほぼ比例した熱電子電流波形
- 金属Hf面とした時、熱電子放出が全電流の電流~95%を担う





アーク陰極点液相面からの過渡的液滴噴出例 1

放電後の電極（陰極）



銅水冷
ジャケット
Hf陰極

陰極熔融液面からの液滴飛散

4000 fps

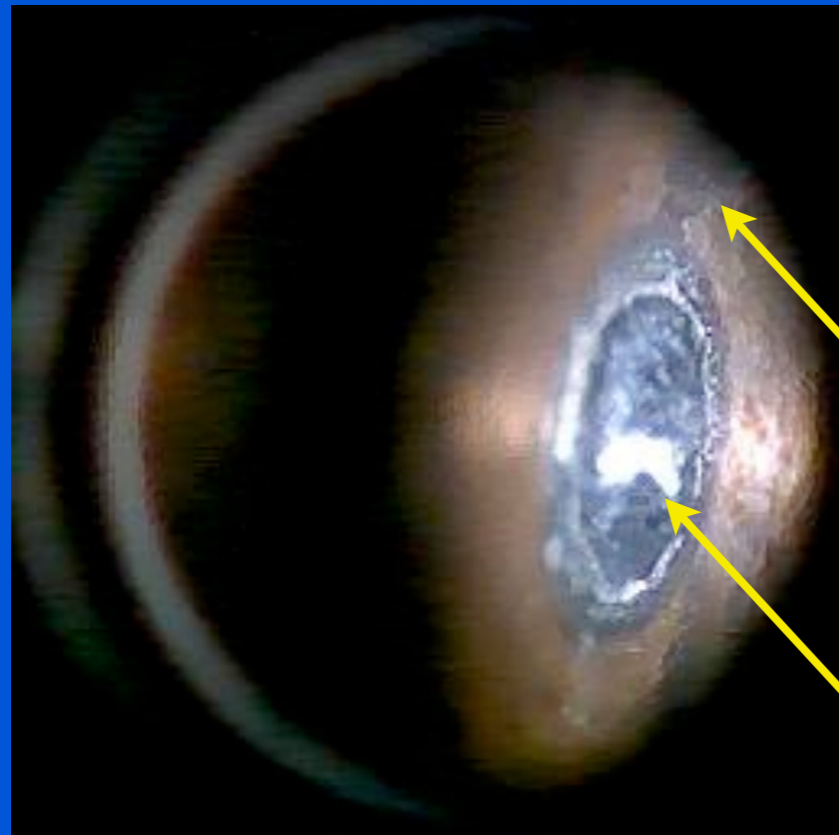
250 μ sec毎のコマ撮り写真





アーク陰極点液相面からの過渡的液滴噴出例 1

放電後の電極（陰極）



銅水冷
ジャケット
Hf陰極

陰極熔融液面からの液滴飛散



4000 fps

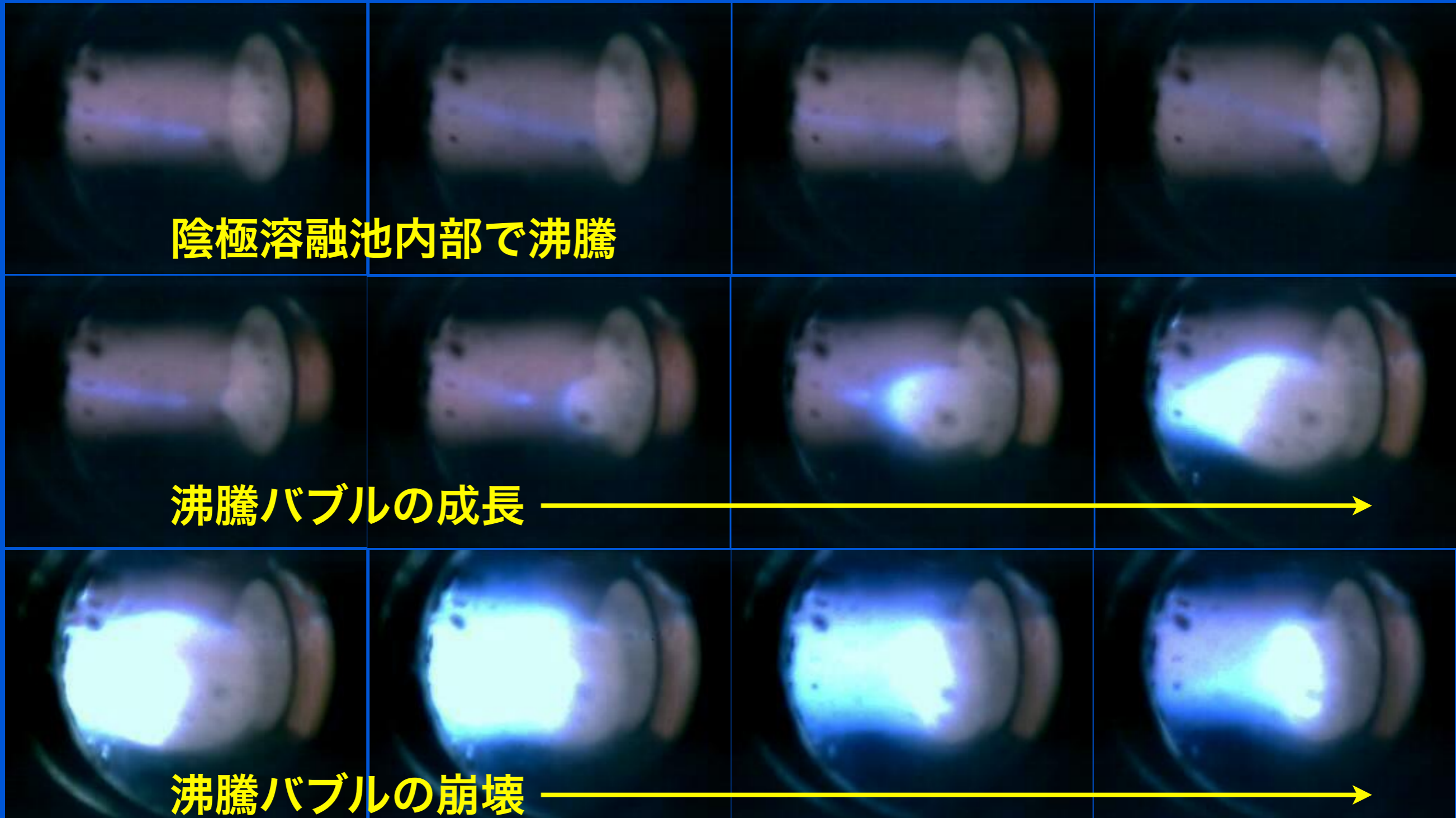
250 μ sec毎のコマ撮り写真





アーク陰極点液相面からの過渡的液滴噴出例 2

150 A放電：23000 fps/43.5 μ sで撮影

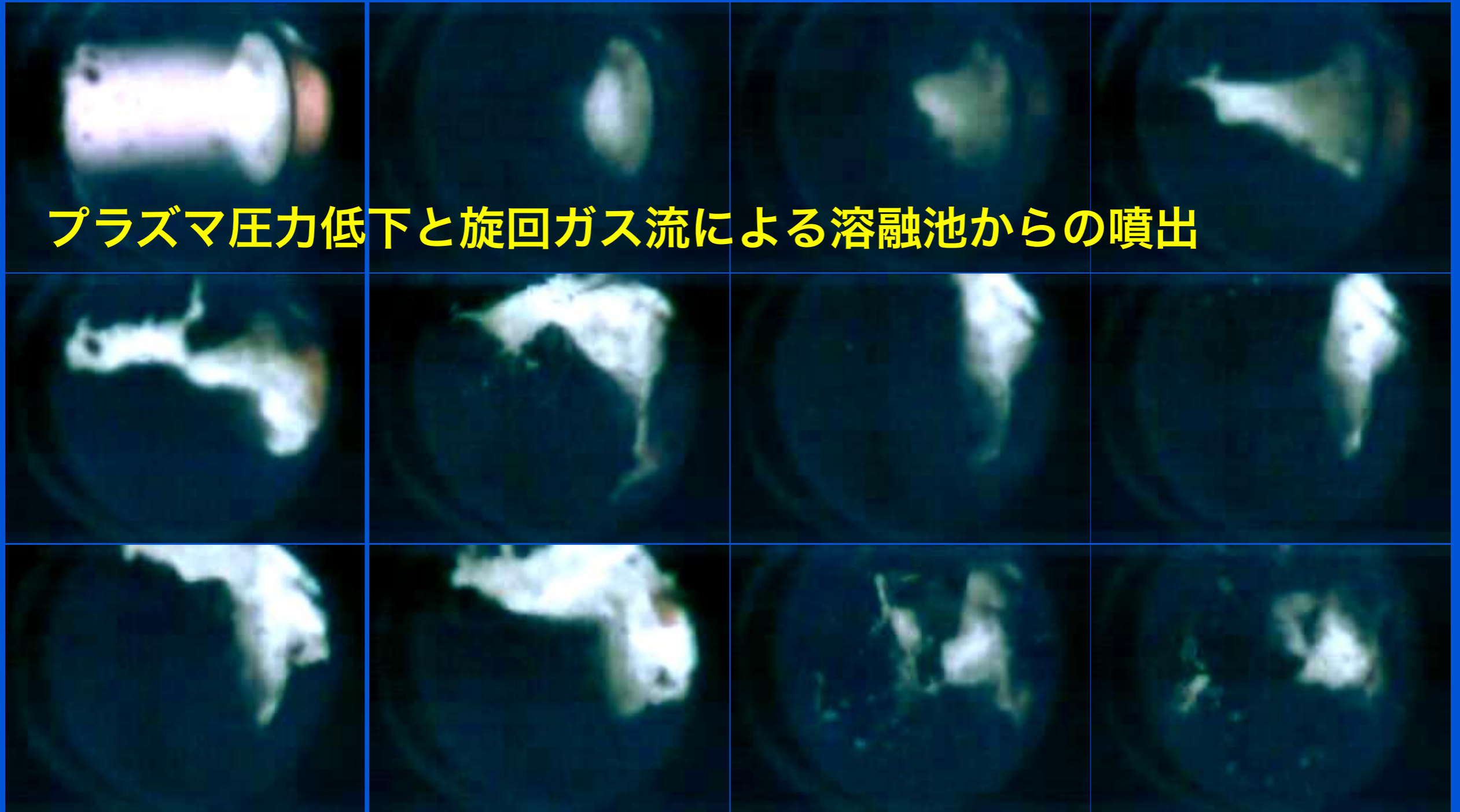




アーク陰極点液相面からの過渡的液滴噴出例 3

アーク放電停止時の陰極液滴噴出現象

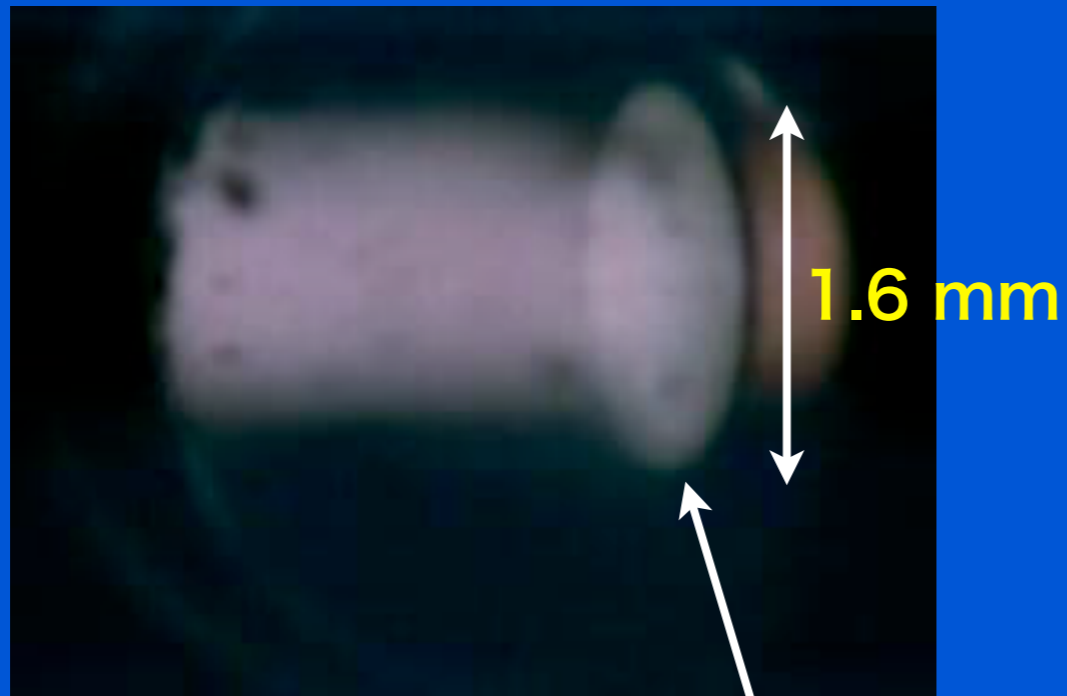
プラズマ圧力低下と旋回ガス流による溶融池からの噴出





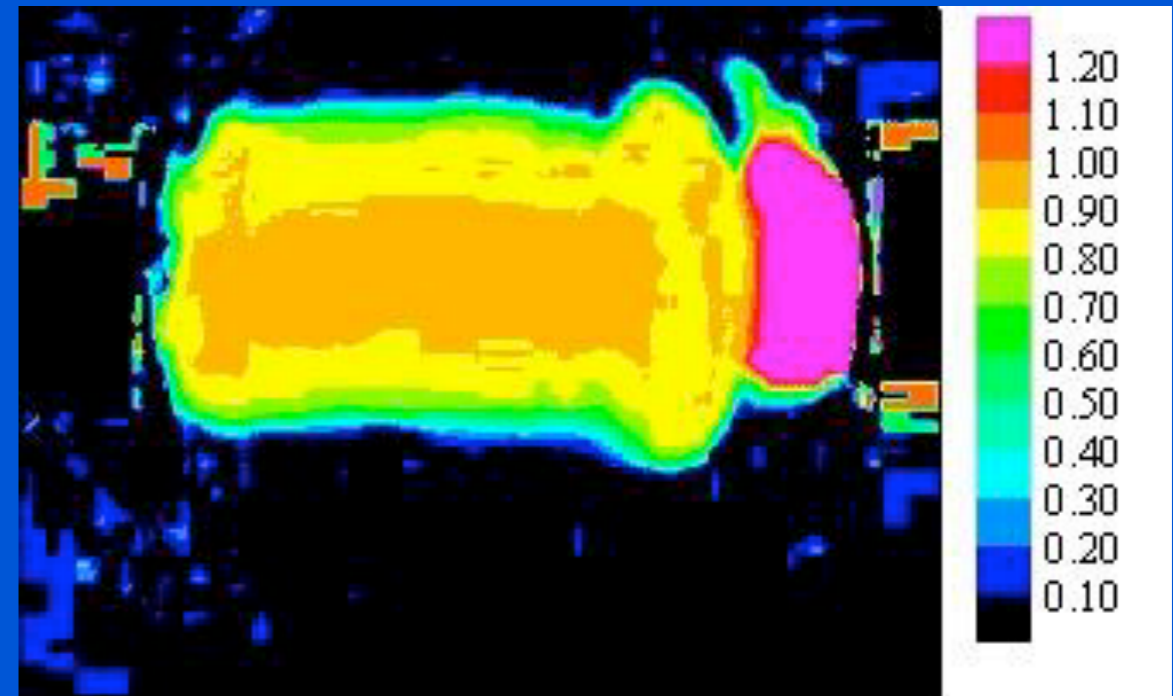
アーク陰極面動画像とRGB発光強度比

元カラー画像



H_f陰極面

B/G比画像





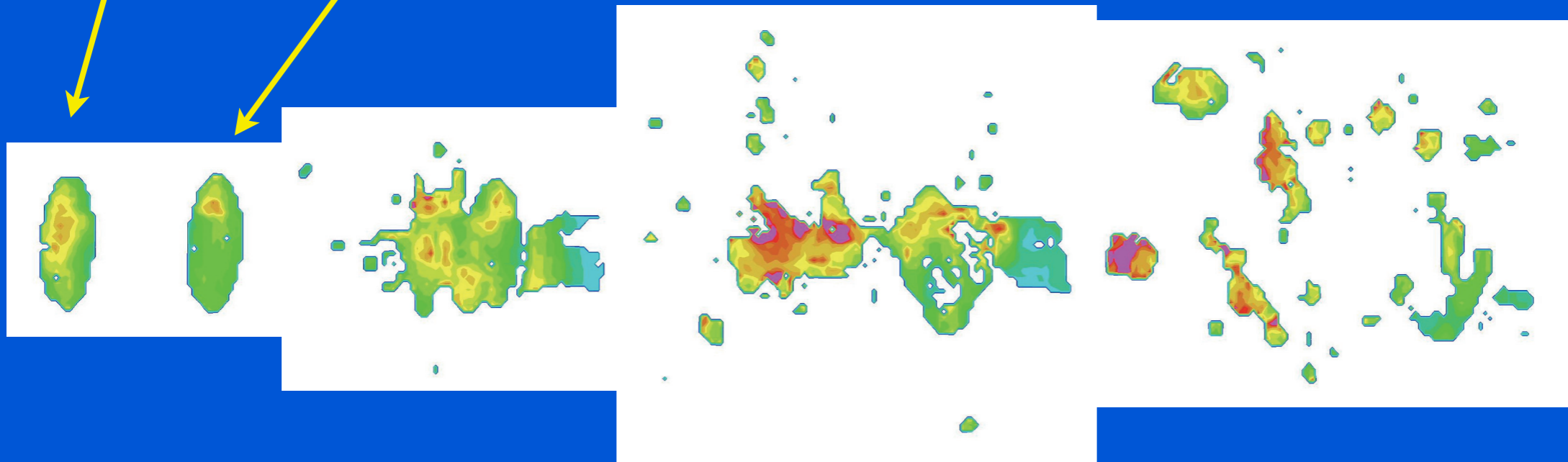
アークスポット液相面からの飛散液滴と温度評価

250 μ sec毎の陰極点液面変化

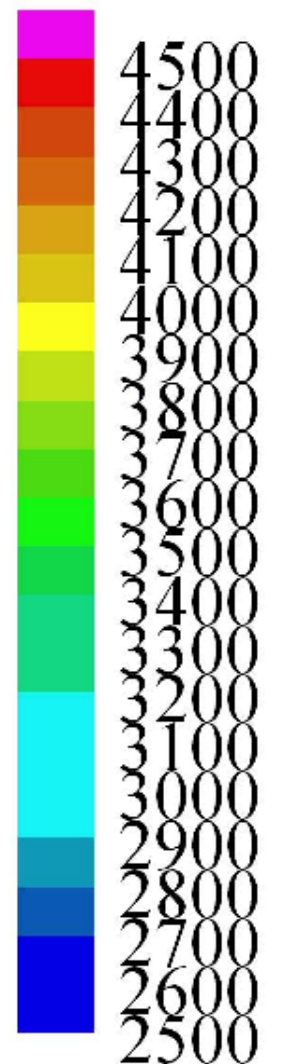


Hf融点 : 2230°C

Hf沸点 : 4600°C



表面温度スケール





まとめ

大電流密度安定化アーク放電を用いたPWI研究

1. GA/m²級の大電流密度アークプラズマ

- ・アーク放電立ち上げ時の熱流束：~数GW/m²
- ・定常アーク放電時の熱流束：~数百MW/m²

2. 大電流アークプラズマを利用した重相極限構造プラズマ研究

- ・熔融陰極面の直接観測：表面温度動的変化の観測
- ・陰極金属熔融池からの過渡的液滴放出現象の観測

今後、プラズマガンや高強度レーザを用いた研究グループと協力して「重相極限構造プラズマ」の物性解明に取り組む予定



最後に：Plasma Conference2011の案内

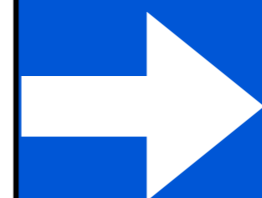
平成23年度

プラズマ・核融合学会第28回年会

日本物理学会秋季大会領域2

応用物理学会

プラズマエレクトロニクス分科会



三学会共同主催で

Plasma Conference2011

として開催

担当：プラズマ・核融合学会

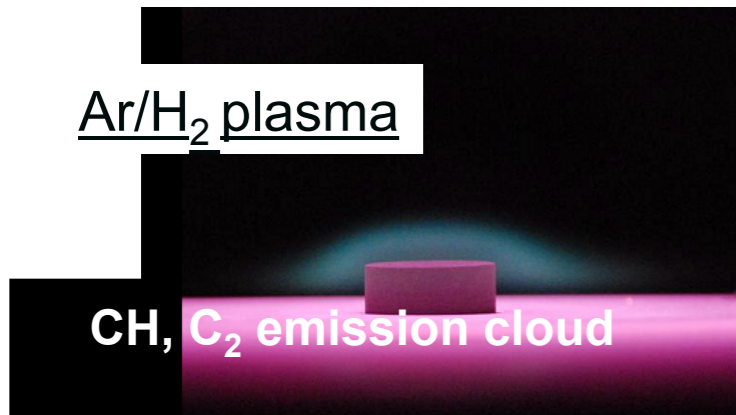
日時：平成23年11月22日（火）～25日（金）

場所：金沢市（石川県立音楽堂、他）

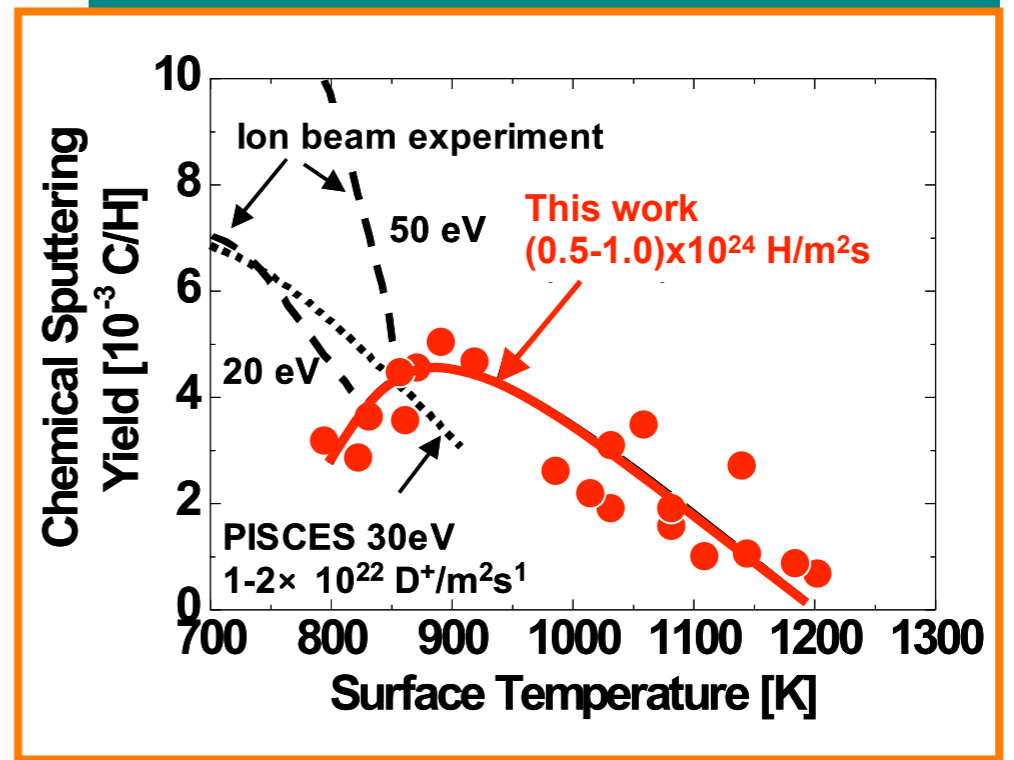
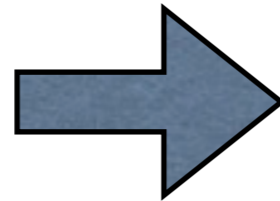


高気圧誘導プラズマを用いた炭素材損耗とダスト形成特性

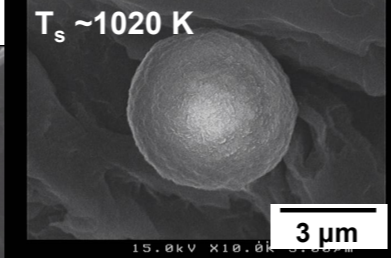
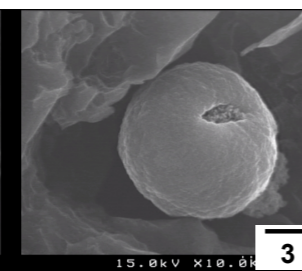
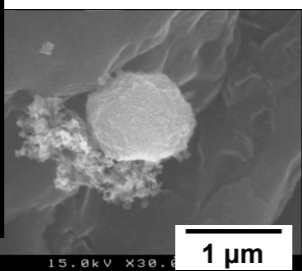
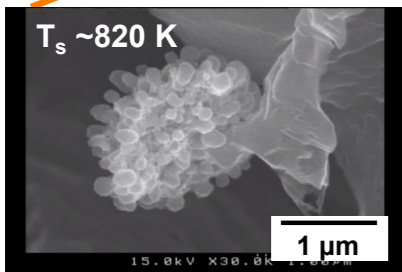
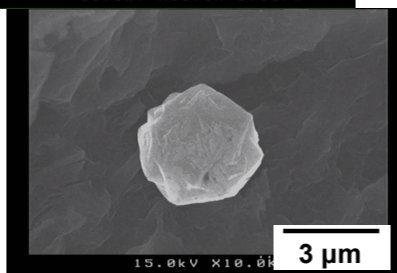
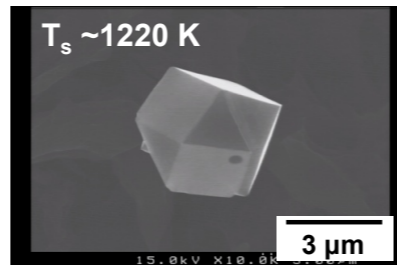
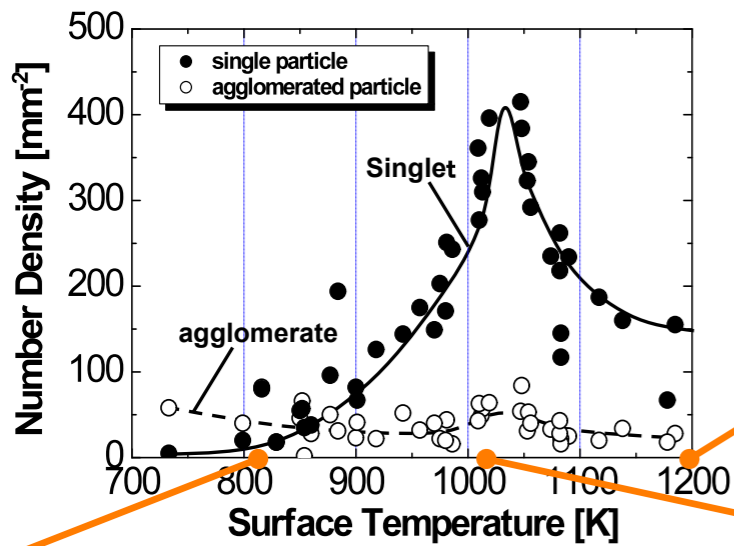
水素プラズマ照射時の発光



低エネルギー水素原子による化学スパッタリング

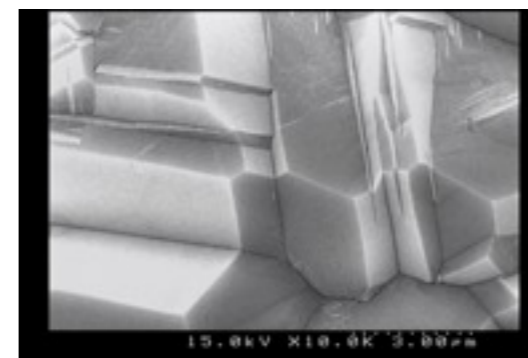


照射時表面温度による特徴的炭素粒子成長と構造化



多結晶ダイヤモンド膜の損耗：

グラファイトの1/100



照射前



照射後

表面温度に依存したダスト形状の変化 → ダスト粒子の表面成長

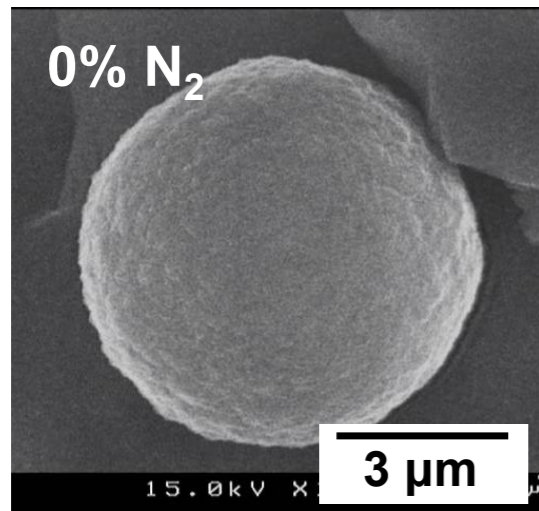


窒素ガス導入による炭素ダスト成長制御 1

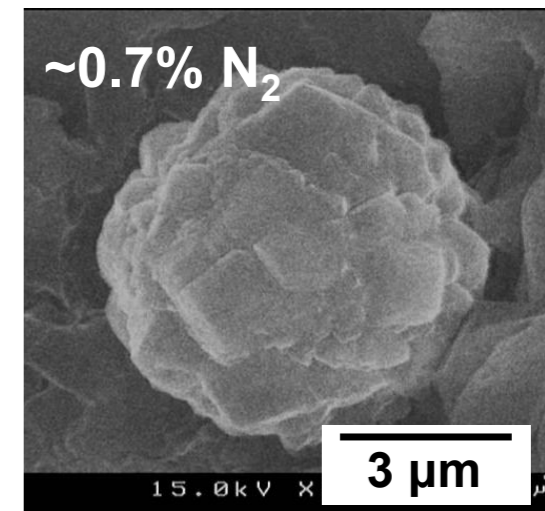
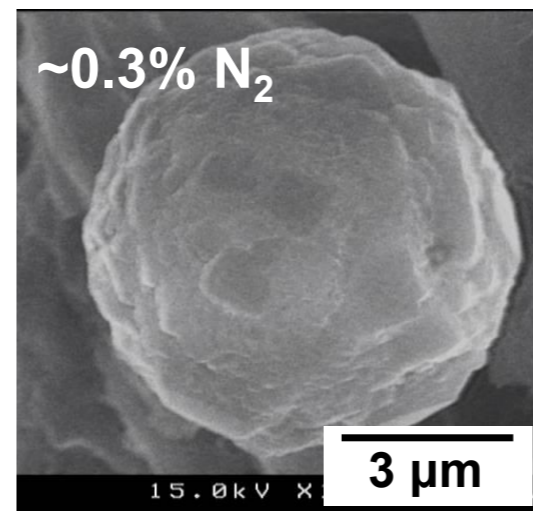
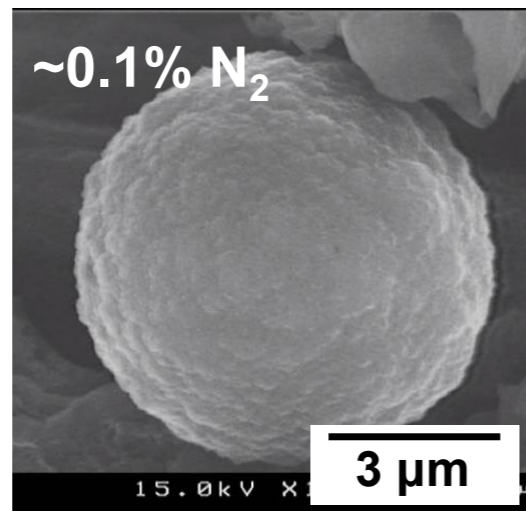
水素原子を内蔵した炭素粒子凝集・微粒子成長=>トリチウムの貯蔵源

$Q_{H_2} = 2, 3 \text{ slpm}$, $T_s \sim 1020 \text{ K}$

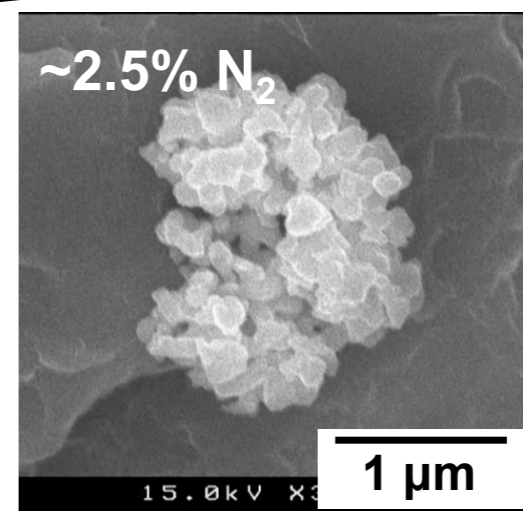
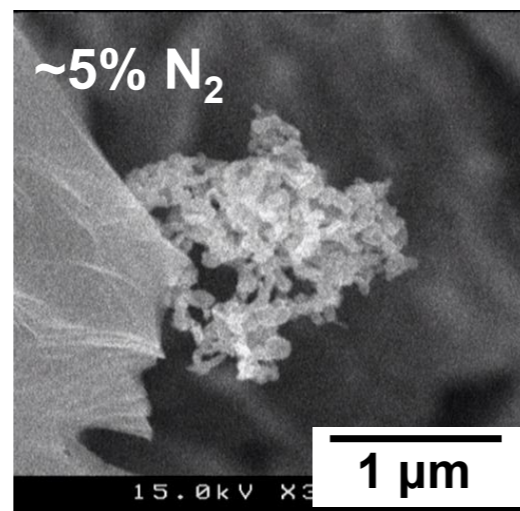
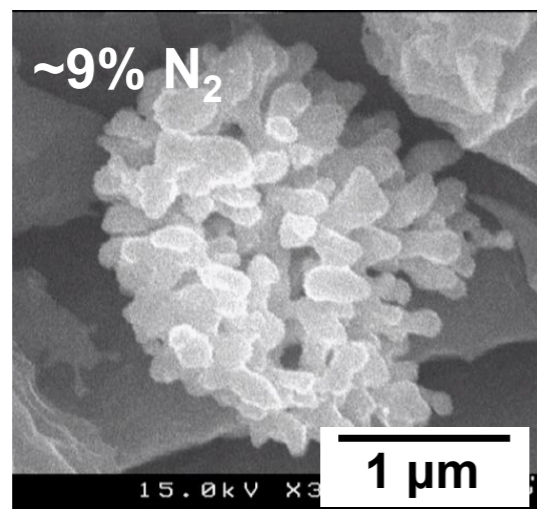
N_2 injection rate increases



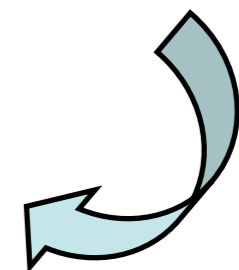
Spherical shape



Polyhedral shape

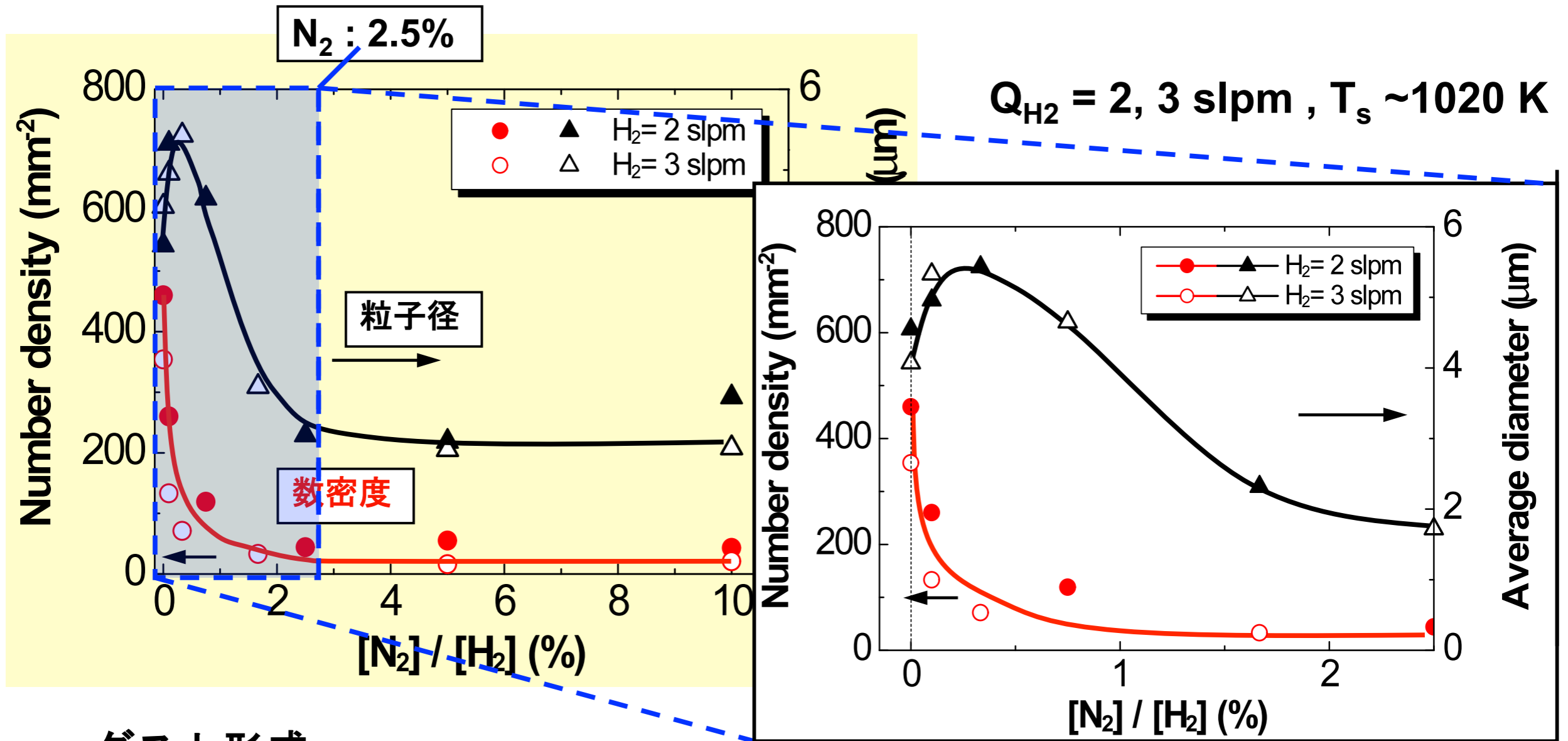


Agglomeration of small dust particles





窒素ガス導入による炭素ダスト成長制御 2 : 微粒子成長抑制

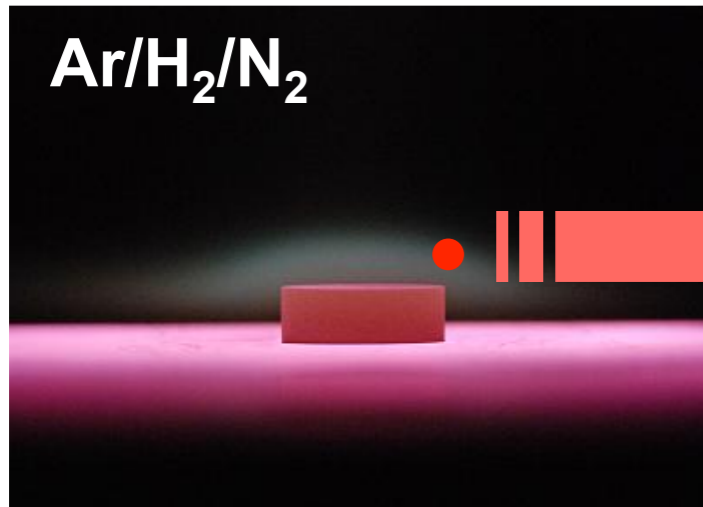


□ ダスト形成

- N_2/H_2 : ~2% の添加で数密度が大きく減少 (1/10)
- N_2/H_2 : < 1% の範囲ではダストの成長が促進



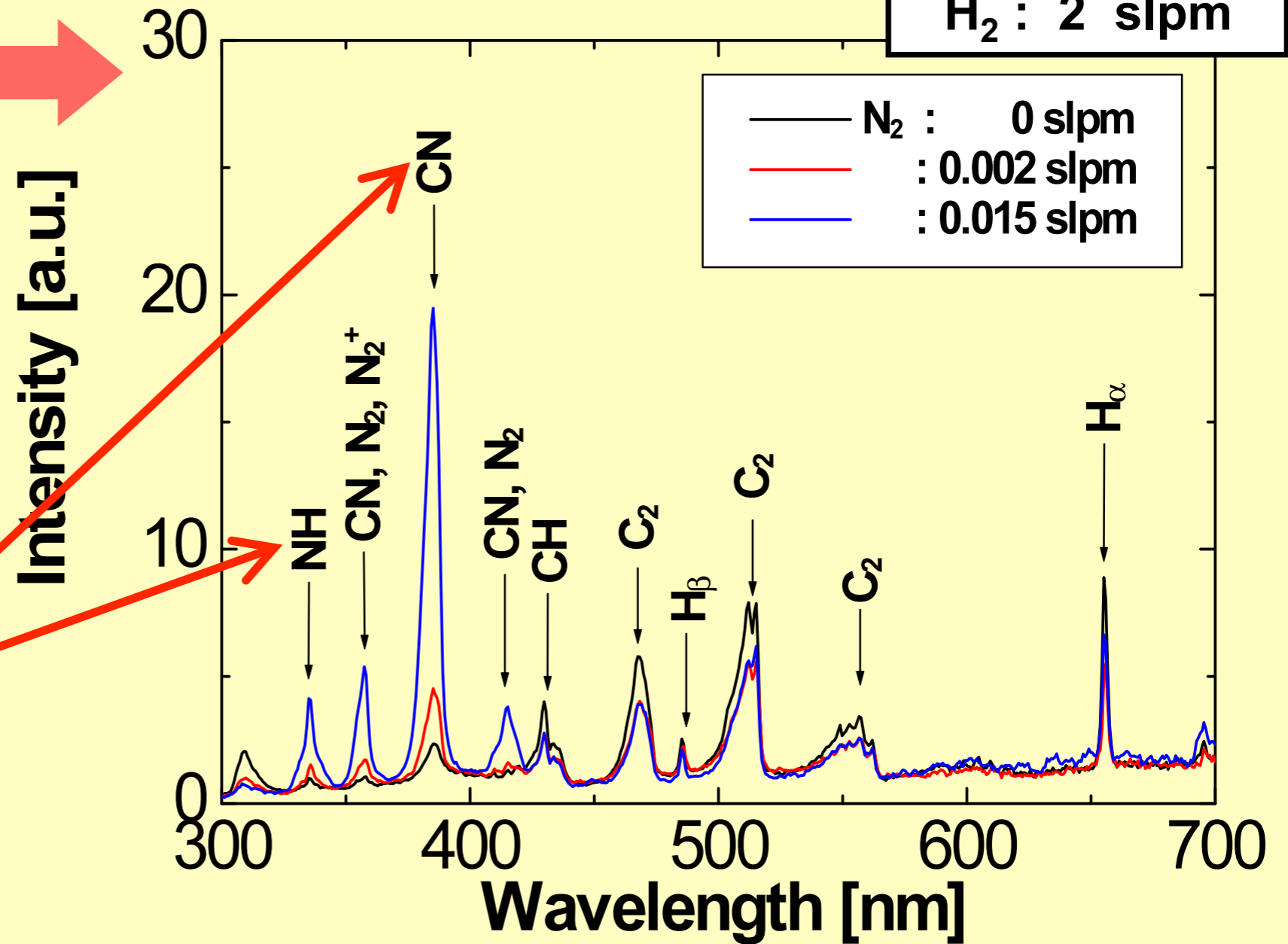
窒素ガス導入による炭素ダスト成長制御 2 : 分子スペクトル



3 mm above target

Ar : 60 slpm
H₂ : 2 slpm

窒素導入によって
NHやCNを生成





窒素ガス導入による炭素ダスト成長制御 3 : 粒子組成計算

凝集性炭化水素C_x粒子から揮発性シアンCN生成へ

熱平衡条件下で計算

計算条件

組成比 : C:H:N:Ar = 5:1000:25:1500

圧力 : 4 kPa

温度 : 300~30000 K

