

無酸素銅製の空洞とカソードの表面処理の戦略

富澤宏光, 谷内努, 出羽英紀, 水野明彦, 森脇太郎,
池本夕佳, 鈴木伸介, 花木博文, 熊谷教孝, 木村昌弘

高輝度光科学研究センター (SPring-8)

1. RF電子銃開発の目的と戦略
2. カソードおよび空洞の表面処理の方針
3. 空洞の化学エッチング処理の試み
4. エッチング処理空洞での実機試験
5. まとめと今後の計画

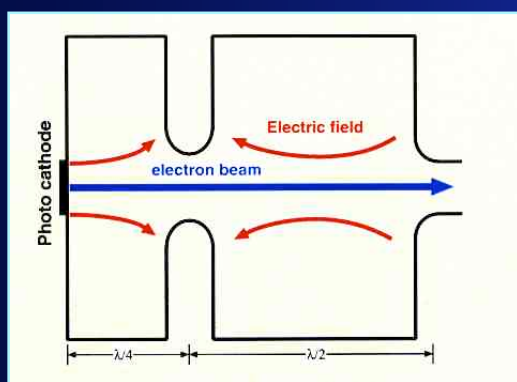
1. RF電子銃開発の目的と戦略

1-1. フォトカソードRF電子銃

世界の標準RF電子銃空洞は **BNL型**の1.6セルである。SPRING-8では、低エミッタンスを求める前に**基礎物理の研究**を優先した。

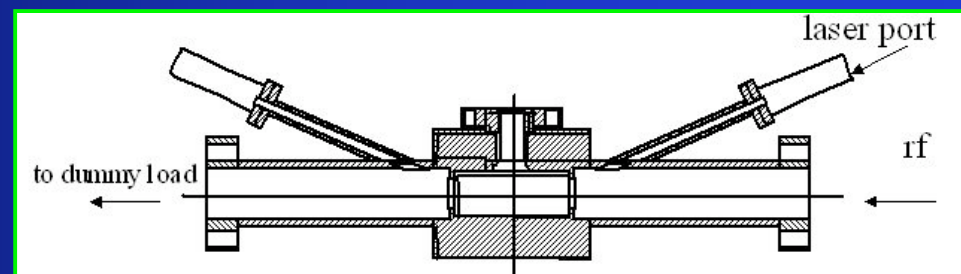
低エミッタンスのビーム物理 \Rightarrow 新型空洞の開発

RF電子銃空洞内の**電子ビームの挙動**、**表面／放電現象**などを詳細に解析するのに、**単純な単空洞**は**テスト用**として有用である。



BNL型 RF電子銃空洞

(カソード表面電界： $\sim 100 \text{ MV/m}$)



SP8 RF電子銃テスト空洞

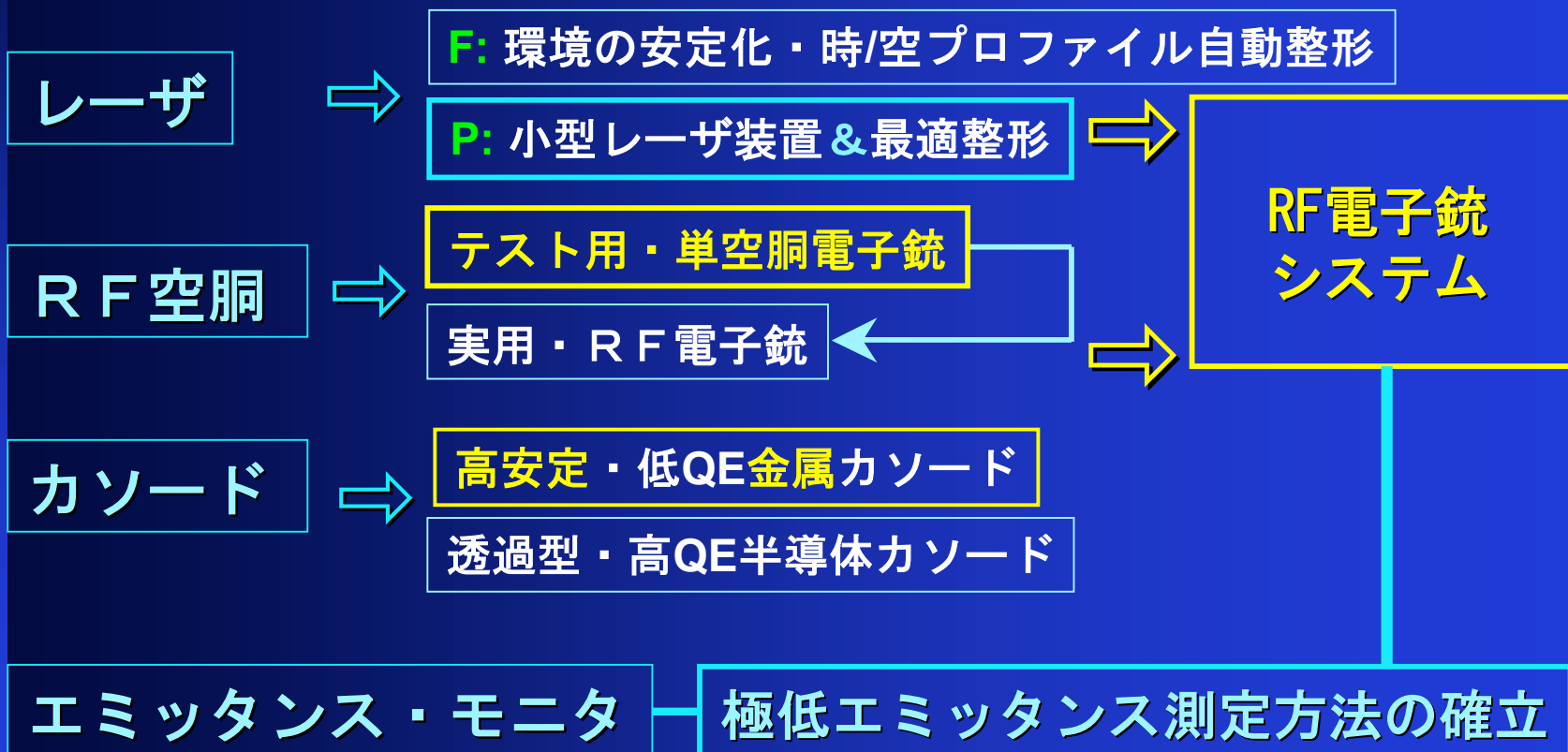
(カソード表面電界： 175 MV/m)

1. RF電子銃開発の目的と戦略

1-2. RF電子銃開発の戦略地図

RF電子銃の空胴とカソードの表面処理は必須！

RF電子銃は、その要素技術である光源、カソード、RF空胴と、そこで生成された電子ビームの評価をするための極低エミッタンスの測定方法の開発が必要である。



2. カソードおよび空洞の表面処理の方針

2-1. 金属カソード一体型空洞の表面処理の方針

- A. 最終的に実用に供する空洞内の表面はコンディショニング後の状態であるから、表面処理は、コンディショニングも表面処理の一環として捉えなければならない。

空洞としての条件 ⇨ RF Breakdownの頻度
コンディショニング時間
暗電流量

- B. 空洞の表面処理方法は、量産性と再現性が保証されるものでなければならない。（再現性の確認には表面同定方法の確立）

- C. カソード一体型の空洞の表面処理は、空洞としての性能とカソードとしての性能の両方を高めるものでなければならない。

陰極としての条件 ⇨ 量子効率

2. カソードおよび空洞の表面処理の方針

2-2. 金属カソードの仕事関数とQEの相違

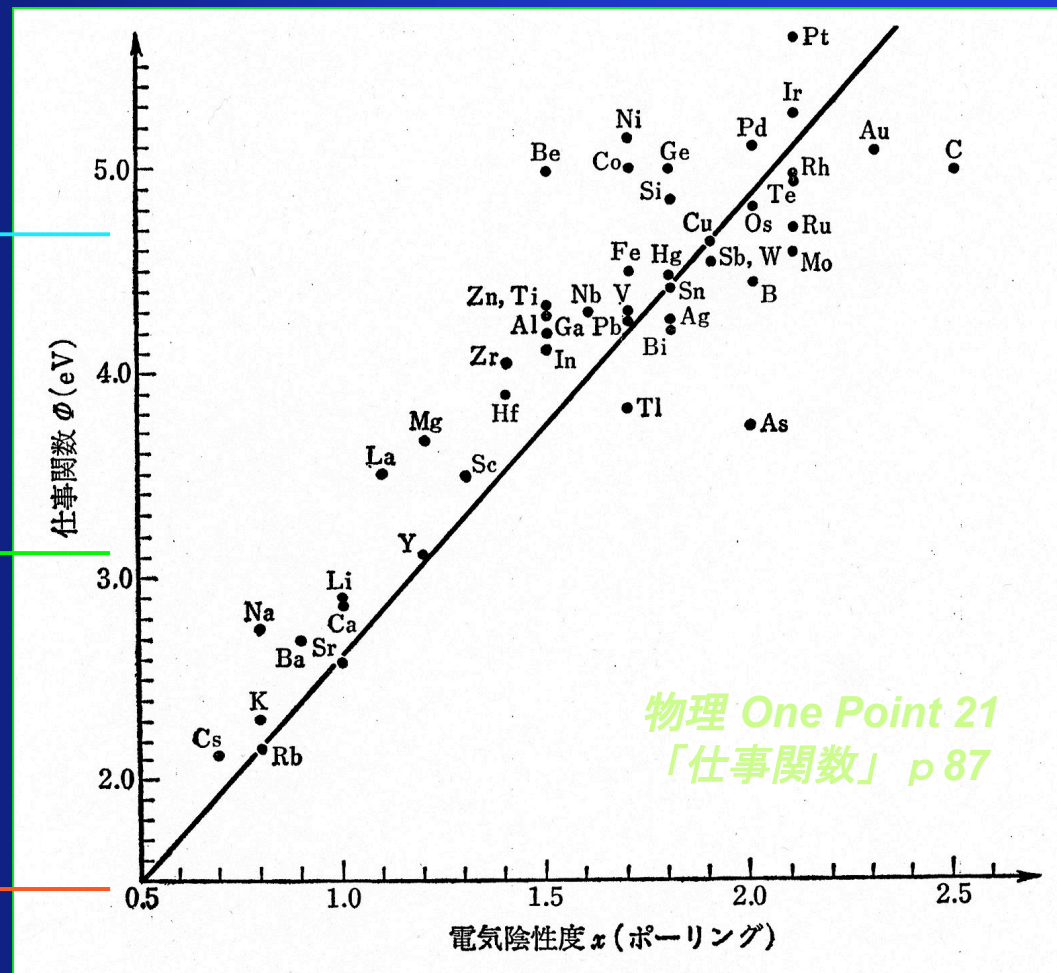
～ 仕事関数は電気陰性度と比例関係～

Cu: 4.48, 4.69, 4.94
fcc (110) (100) (111)
仕事関数は面方位による

263 nm

400 nm

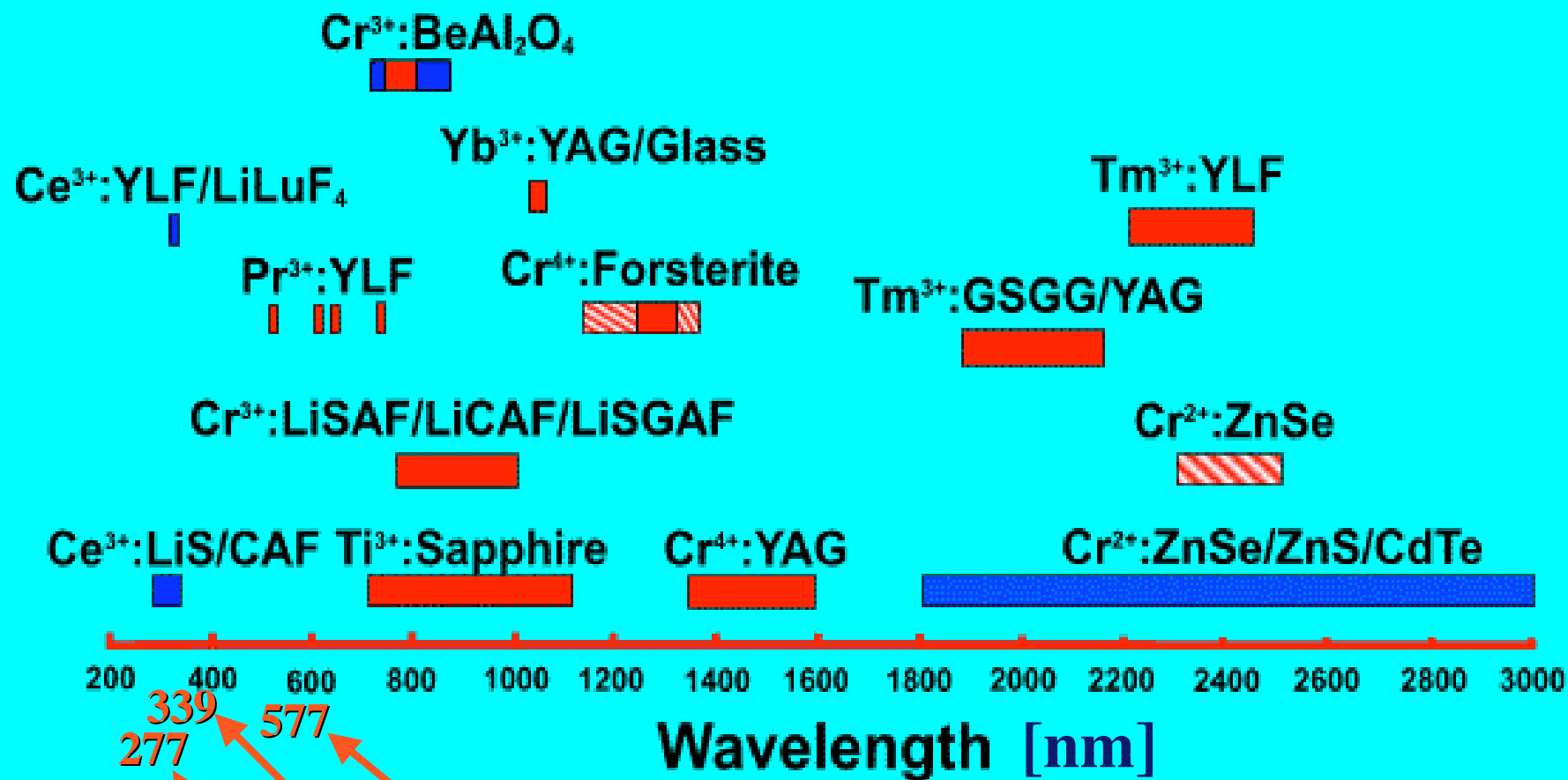
800 nm



$$\text{仕事関数} = 2.27 \times (\text{ポーリングの電気陰性度}) + 0.34 \text{ eV}$$

2. カソードおよび空洞の表面処理の方針

2-3. レーザ波長領域と金属カソードの仕事関数



Cu (110) 4.48 eV

Mg (?) 3.66 eV

K (111) 2.15 eV



カソード材料 (仕事関数)

2. カソードおよび空洞の表面処理の方針

2-4. 表面処理による金属カソードのQEの相違

～ 量子効率_{量子効率}は表面トリートメントによって数桁も変わる～

量子効率

Table 3
Quantum efficiency of different cathodes [%]

λ_L [nm]:	193	213	266	308	355	ref.
Metallic cathodes						
Al		8.4×10^{-2}	3.2×10^{-3}		3.4×10^{-5}	[38]
Ag ^a			2.0×10^{-3}			[40]
Au		4.0×10^{-2}	1.3×10^{-3}			[38]
Au ^a			4.7×10^{-3}			[40]
Cu	2.0×10^{-2}	1.5×10^{-2}	2.2×10^{-4}	1.6×10^{-5}	8.0×10^{-7}	[38]
Cu ^b	0.15	4.2×10^{-2}				[38]
Cu ^a			1.4×10^{-2}			[40]
Mg ^a			6.2×10^{-3}			[40]
Ni ^a			2.5×10^{-3}			[40]
Pd ^a			1.2×10^{-3}			[40]
St. steel		9.0×10^{-3}	1.6×10^{-4}			[38]
Sm				1.6×10^{-4}		[38]
Sm ^a			7.2×10^{-2}			[40]
Ta ^a			1.0×10^{-3}			[40]
Tb ^a			2.3×10^{-2}			[40]
Y			2.7×10^{-4}	1.1×10^{-4}		[38]
Y ^b			1.8×10^{-2}			[38]
Y ^a			5.0×10^{-2}			[40]
WK ^{+b}				1.2×10^{-3}		[38]
WBaO			3.5×10^{-2}	1.4×10^{-2}	2.3×10^{-3}	[39]
Zn ^a			1.4×10^{-3}			[40]
Zr ^a			1.0×10^{-3}			[40]
λ_L [nm]:	193	213	266	355	532	ref.
Alkali cathodes						
Cs ₃ Sb		3.5	2	1.8	0.38	[38]
CsK ₂ Sb					6	[11]
K ₃ Sb		1.4	1.6	0.76	2.3×10^{-2}	[38]
Na ₂ KSb		7.7	6.1	3.5	2.0×10^{-2}	[38]
CsI	9.6	6.8	0.71	1.9×10^{-4}		[38]
CsI + Ge		0.73	0.13	2.0×10^{-2}		[38]
Cs ₂ Te		6.0	5.7	2.0×10^{-2}		[38]

^a After laser activation at 2-5 mJ/cm² during 5-10 min.

^b Ionised controlled etching (ICE) cleaning process under vacuum.

C. Travier et al.
Nucl. Instr. And
Meth. In Phys. Res.
A340 (1994) 26-39

2. カソードおよび空洞の表面処理の方針

2-5. 高電界加速銅製空洞の表面処理研究の方針

表面物理： 高電界加速管とRF電子銃カソードの研究共通のテーマ

処理方法

⇒ 材料（母材）の処理

洗浄方法

表面処理

⇒ エッチング処理 . . .

ネオス

研究の指針

⇒ RF Breakdownの研究

脱ガスの研究

⇒ 放電分光 . . .

川鉄テ

表面の研究

表面研究方法

⇒ 表面元素/分子分析

⇒ FTIR . . .

BL43

XPS . . .

BL15

表面形状観察/測定

⇒ レーザ顕微鏡, DFM, デジタルホログラフィー

3. 空洞の化学エッチング処理の試み

3-1. RF電子銃空洞のエッチングのためのテスト

浸漬時間10分以下のテスト（エッチング量と表面粗度）

脱脂

水洗

エッチング

水洗

純水洗

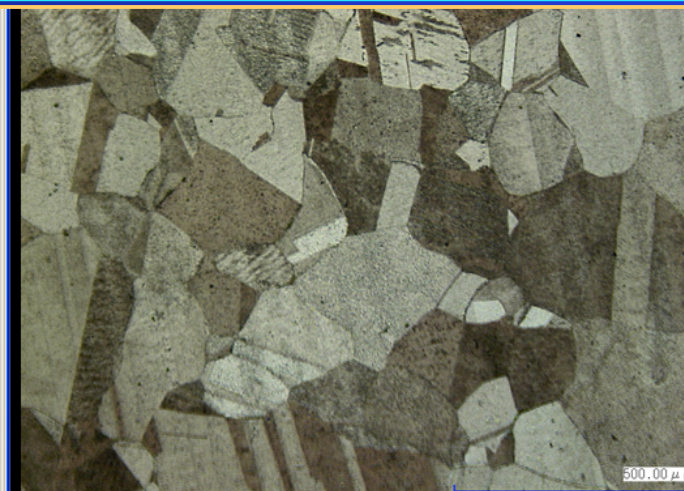
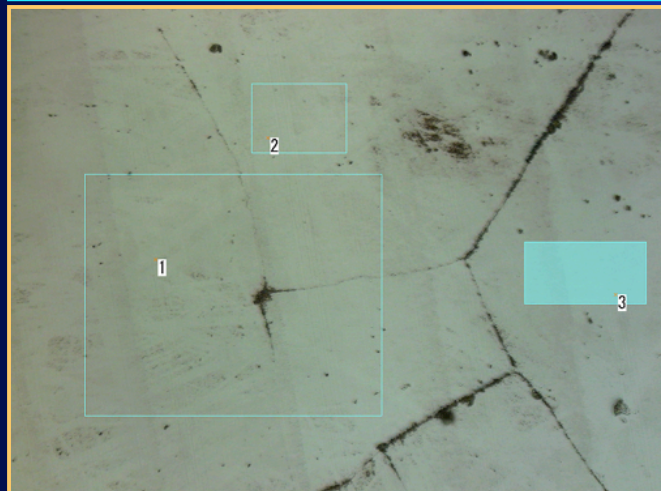
レーザー顕微鏡



前

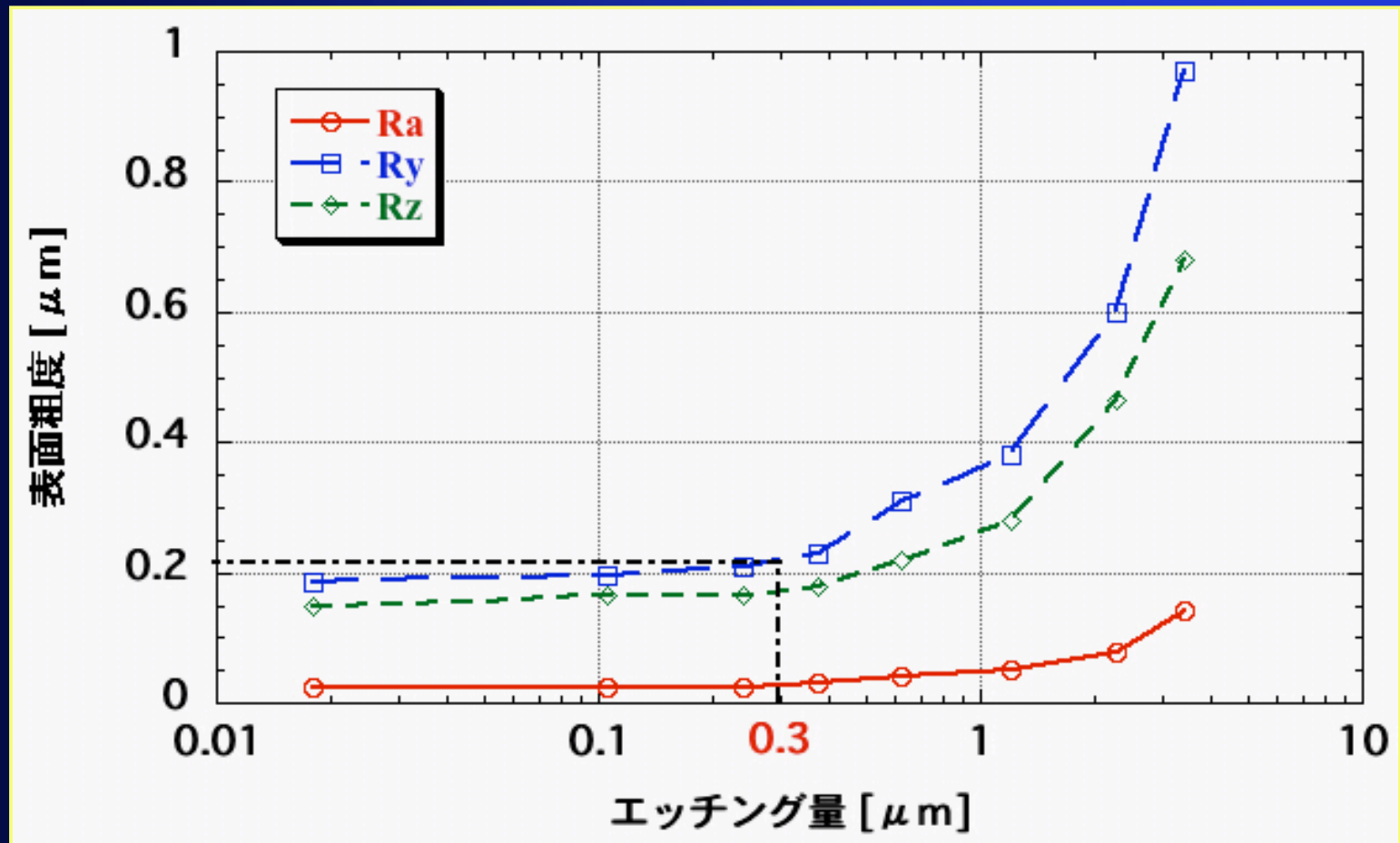


後



3. 空洞の化学エッチング処理の試み

3-2. 無酸素銅のエッチング量と表面粗さ

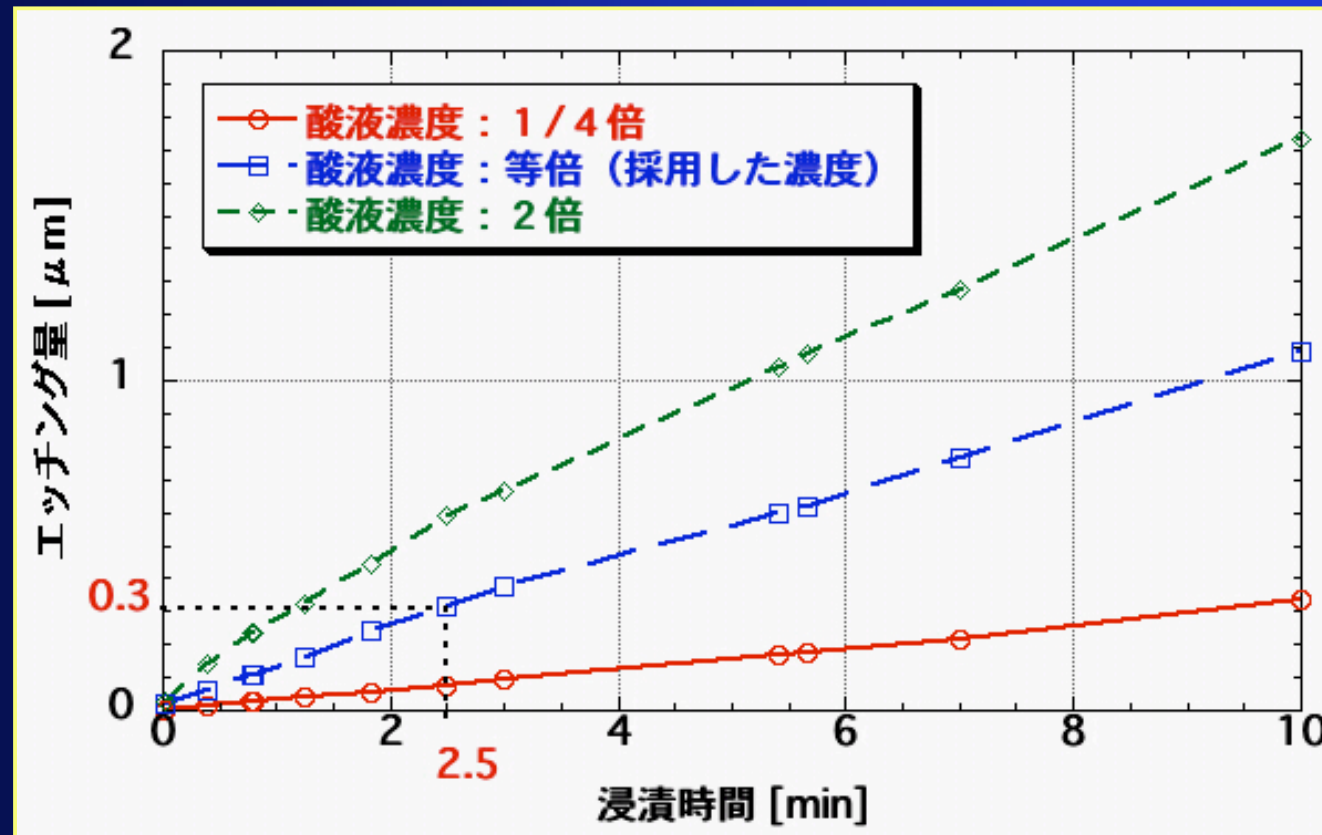


エッチング量が $0.3 \mu\text{m}$ 以下では、粗度はあまり変わらない

3. 空洞の化学エッチング処理の試み

3-3. 無酸素銅のエッチング量のテスト結果

エッチング酸液（硫酸と過酸化水素水）



表面形状：エッチング量が0.3 μm（2.5分）以下であれば、粗度再現。

元素分布：FTIRの測定から、表面が化学的に汚染がないこと確認。

3. 空洞の化学エッチング処理の試み

3-4. ステンレスのエッチング量と表面粗さ

⇒ SLACフランジへのエッチングの影響をテスト



ステンレスのエッチング量は検出限界以下で
影響なしと判断！

3. 空洞の化学エッチング処理の試み

3-5. RF電子銃空洞のエッチング工程

洗浄後は乾燥窒素パージ ⇨ 真空引き輸送後、乾燥窒素パージ

脱脂

水洗

エッチング

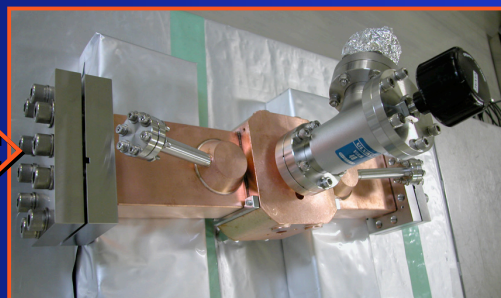
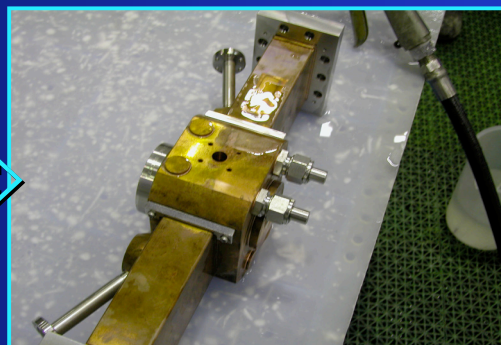
水洗

純水洗

乾燥

真空引

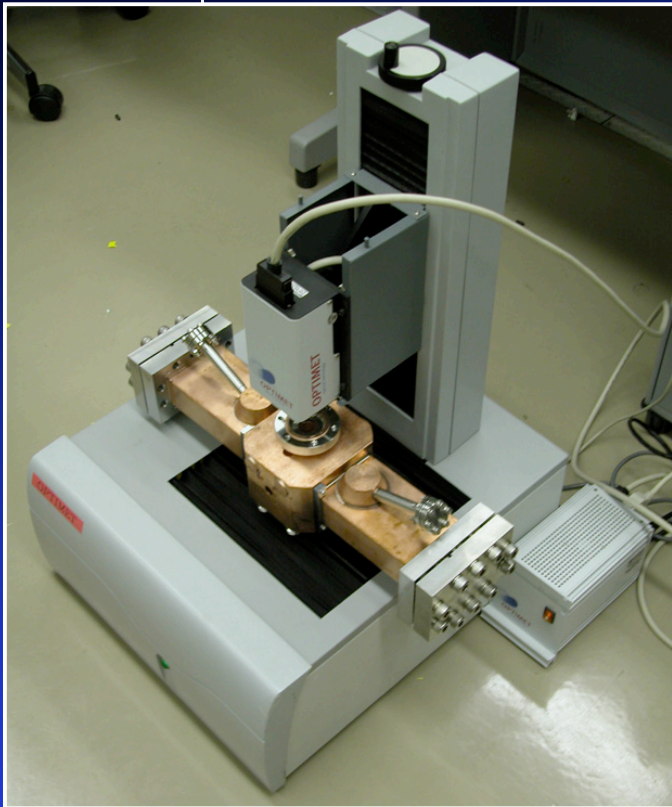
包装



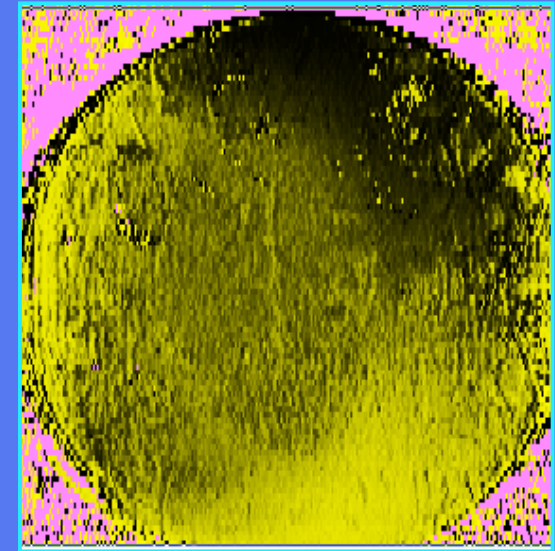
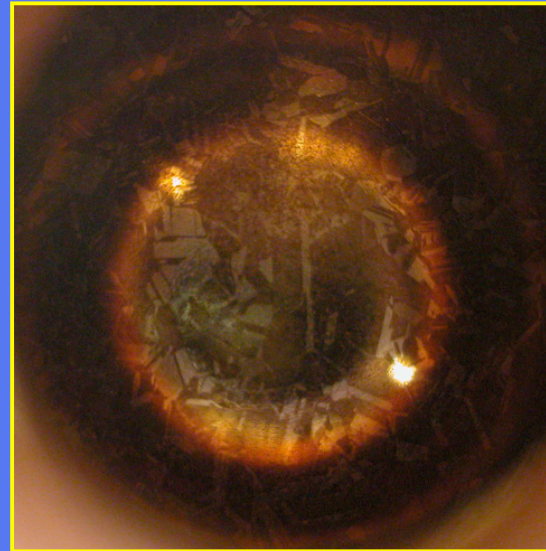
3. 空洞の化学エッチング処理の試み

3-6. エッチング後のRF電子銃カソード部の表面

カソード部の表面形状測定は顕微鏡では無理 ⇒ デジタルホログラフィー

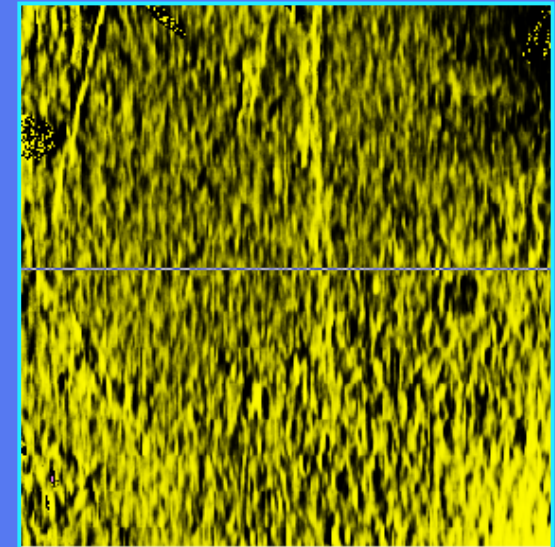


デジタルホログラフィー



左上： 写真
右上： ホログラム
(分解能：50 μm)

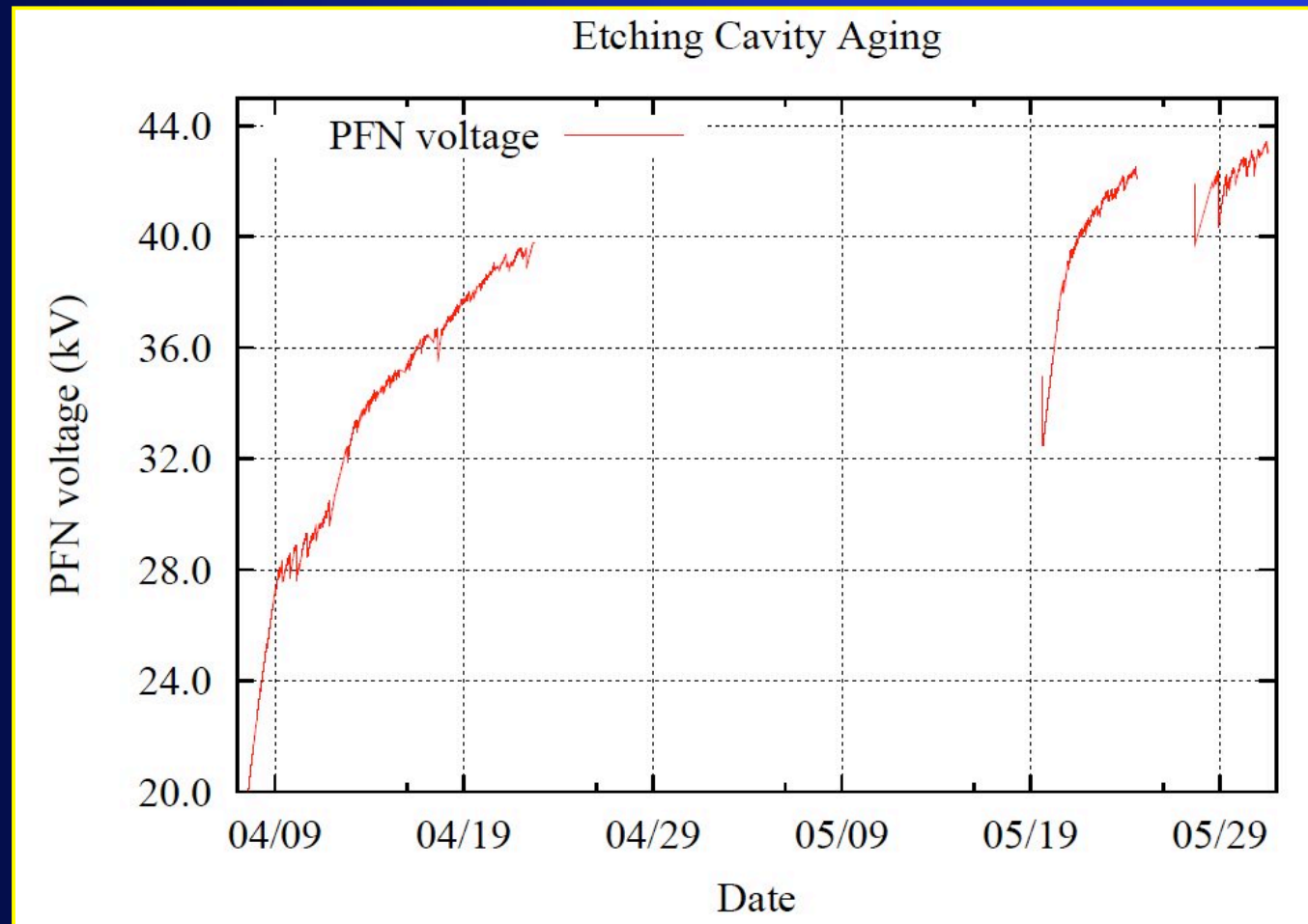
下： ホログラム
(分解能：30 μm)



4. エッチング処理空洞での実機試験

4-1. エッチング空洞のコンディショニング過程

～ 表面最大電界は206 MV/mでSバンドRF電子銃では世界最高～

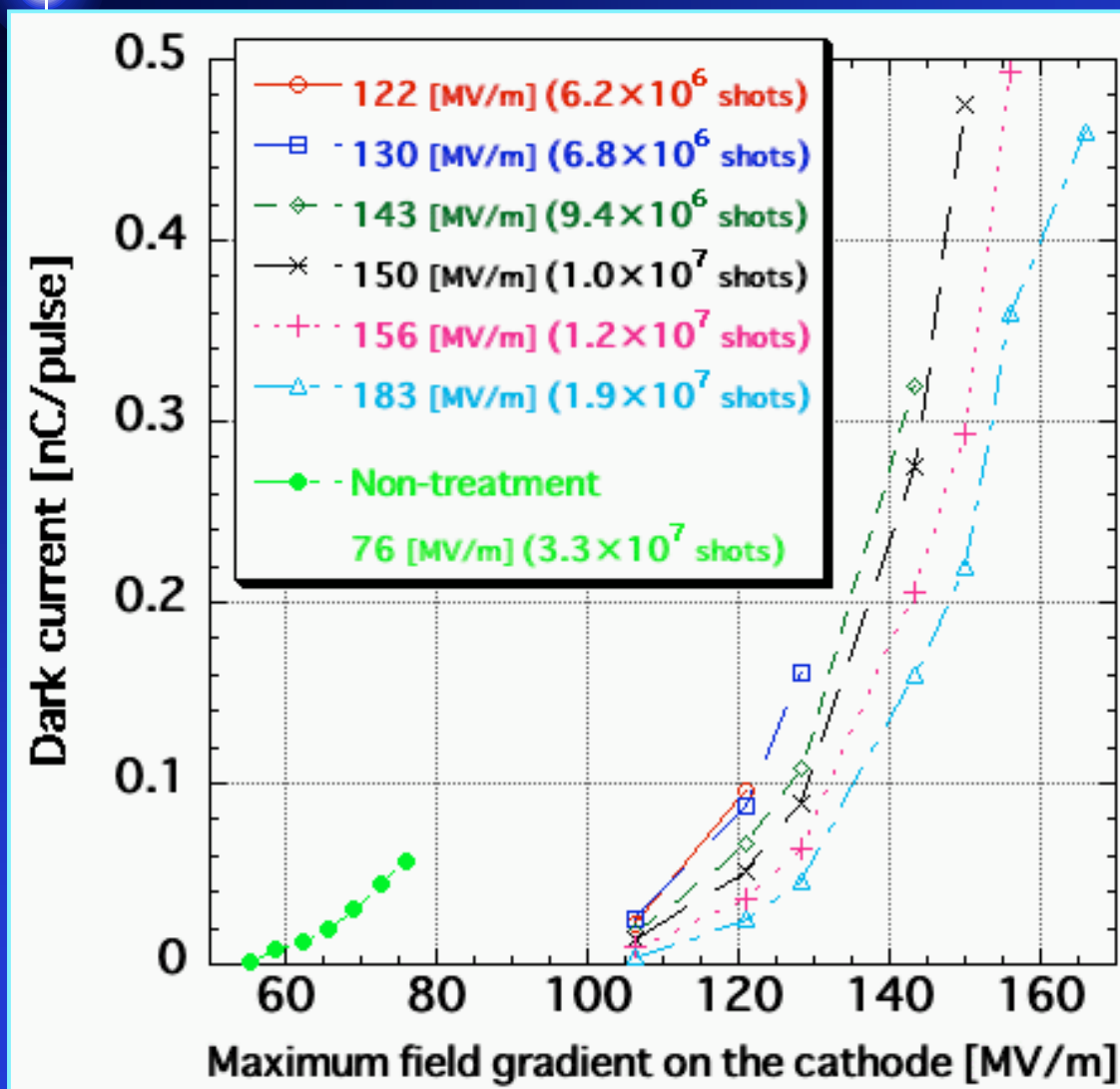


無人運転による自動コンディショニング（通算23日間）を実施。
モジュレータの故障により中断（高圧ケーブルの損傷）。

4. エッチング処理空洞での実機試験

4-2. エッチング処理の電子銃性能テスト結果

~ 量子効率は一桁向上! ~



以下の表面最大電界は、
レーザ光源入射下で達成し
ていることに注意!

最終段階の
コンディショニング終了!

量子効率: $1 \times 10^{-2} \%$

カソード最大表面電界:
190 MV/m

最大表面電界:
206 MV/m

5. まとめと今後の計画

5-1. 今回のエッチング処理試験のまとめ

A. エッチング処理のテスト結果

銅サンプル片を用いてエッチングテストと表面分析を実施。

今回用いた処理液では、SUS、銀ロウに影響なし。テストで決定した最適条件で、エッチングした電子銃で実機試験。

B. 洗浄後の実機試験の結果

カソード最大表面電界：190 MV/m

最大表面電界：206 MV/m

空洞端面の量子効率： $1 \times 10^{-2} \%$ (1桁大)

到達表面最大電界：自己世界記録を更新

コンディショニング時間：大幅に短縮

～ 自動RFコンディショニングが完成！

5. まとめと今後の計画

5-2. 今後の表面関連の計画

～ 表面処理のドライ化 / 分析装置の整備 ～

- ・ F- θ レンズの援用によるレーザドライエッチング、またはイオンエッチング装置の開発。
- ・ 光脱離研究用の表面分析装置（クリーンルーム内）、およびイオンエッチング用の表面分析装置の計2台の完成。
- ・ Ti:Saの第4高調波（197 nm）の設計・製作。ダイヤモンド透過型カソード、レーザドライエッチング光源として。
- ・ Rf-Breakdown研究用に紫外域での放電分光装置を新規開発。開発済みの可視域と合わせ、200～900 nmで観察可能。

～ Mg (3.66 eV) カソードの新たな可能性は？ ～

- ・ ドライエッチング必要
- ・ Ti:Saの第2高調波（375～425 nm 可能） / (2.9～3.3 eV)
- ・ 仕事関数への合わせ込み（ショットキー効果～0.6 eV；レーザ波長可変）

5. まとめと今後の計画

5-2-1. 金属カソードのIn-Situ QE復活装置

~ 表面の酸化膜等を物理/光化学的に除去！！ ~

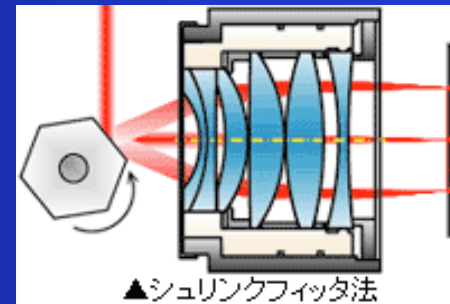
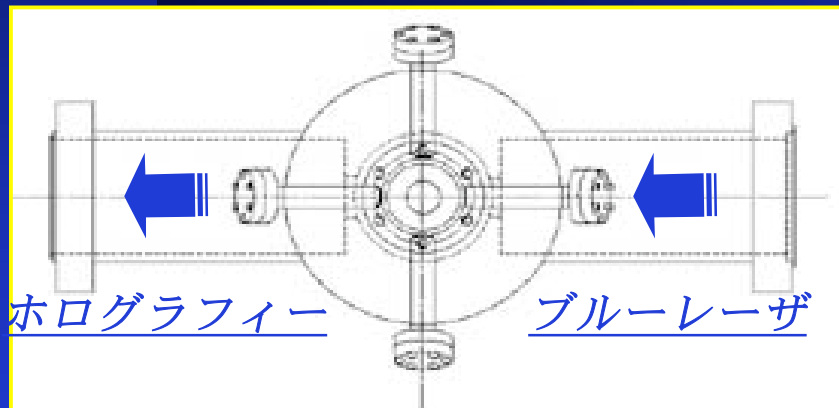
6 eV紫外光 (F- θ レンズ)
デジタルホログラフィ



光化学的に結合切断
表面3次元形状計測



イオン銃



- 銅の表面の化学結合は1重結合ならばそのエネルギーは高々、6 eV弱！！
- F- θ レンズの援用により、カソード表面上に均一なスポット径でスキャンして酸化膜等を取り除くことが可能。
- イオンエッチングをする必要がある場合は、表面形状をモニターしながら注意して行う必要がある。



197 nm 紫外レーザー ~ 6eV
(Ti:Saの4倍高調波)

5. まとめと今後の計画

5-2-2. 表面分析装置の完成間近！！

加速管ディスクの表面分析に対応

LEED (低速電子回折)

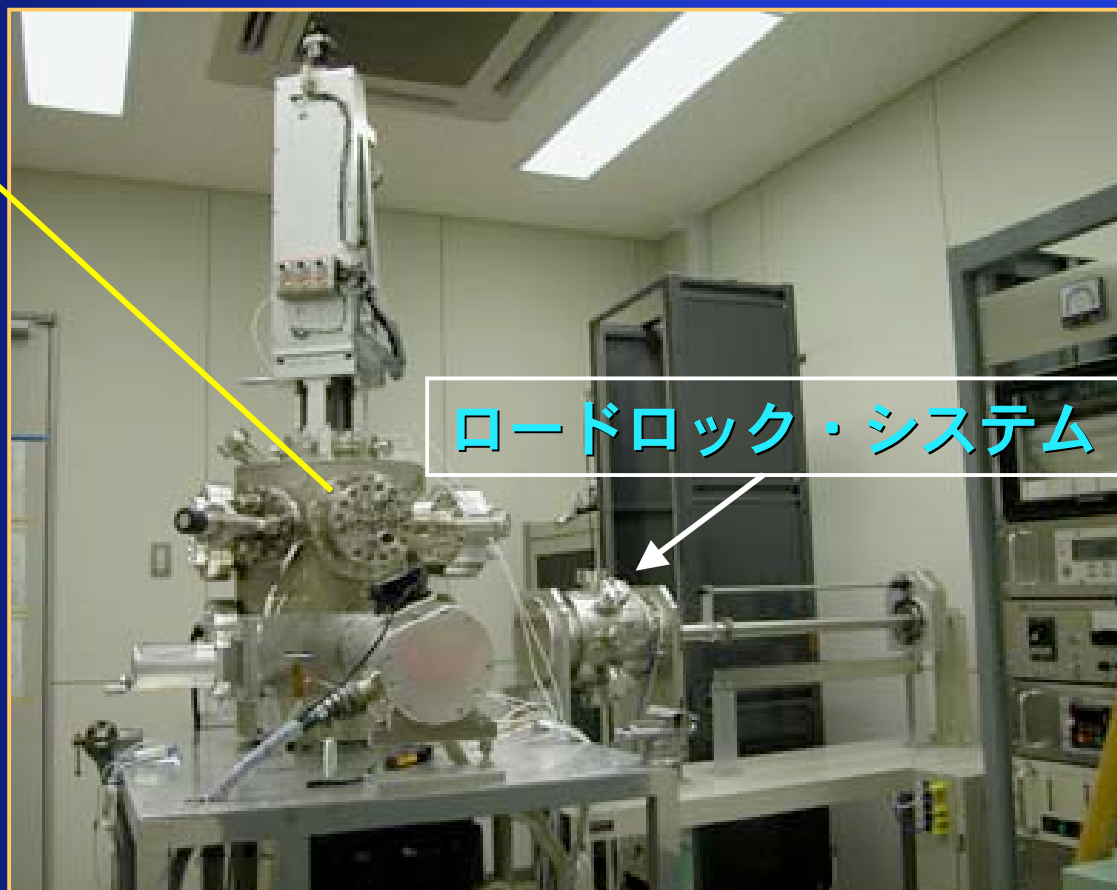
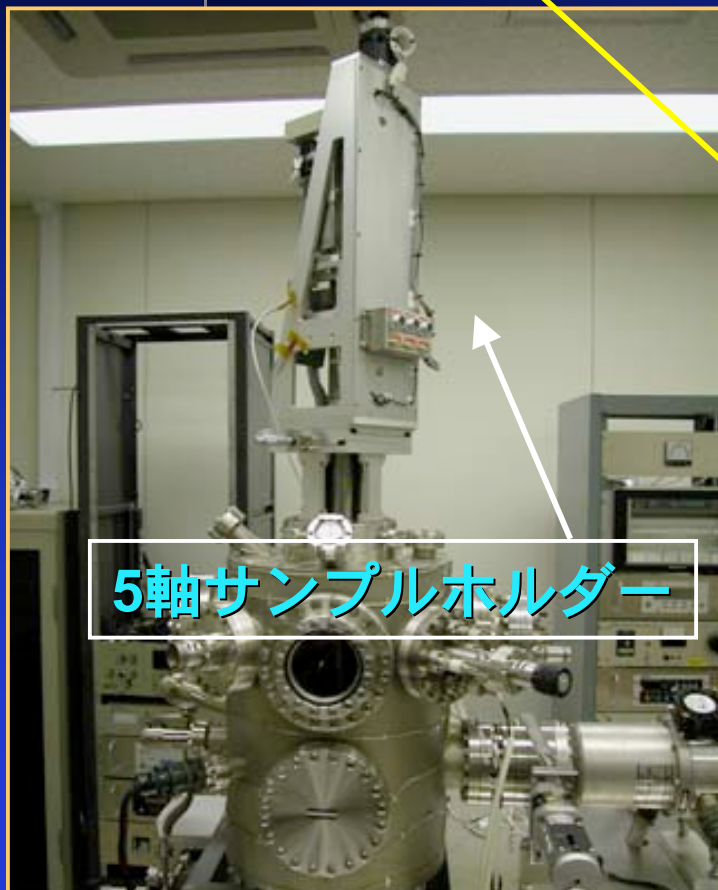


単結晶性

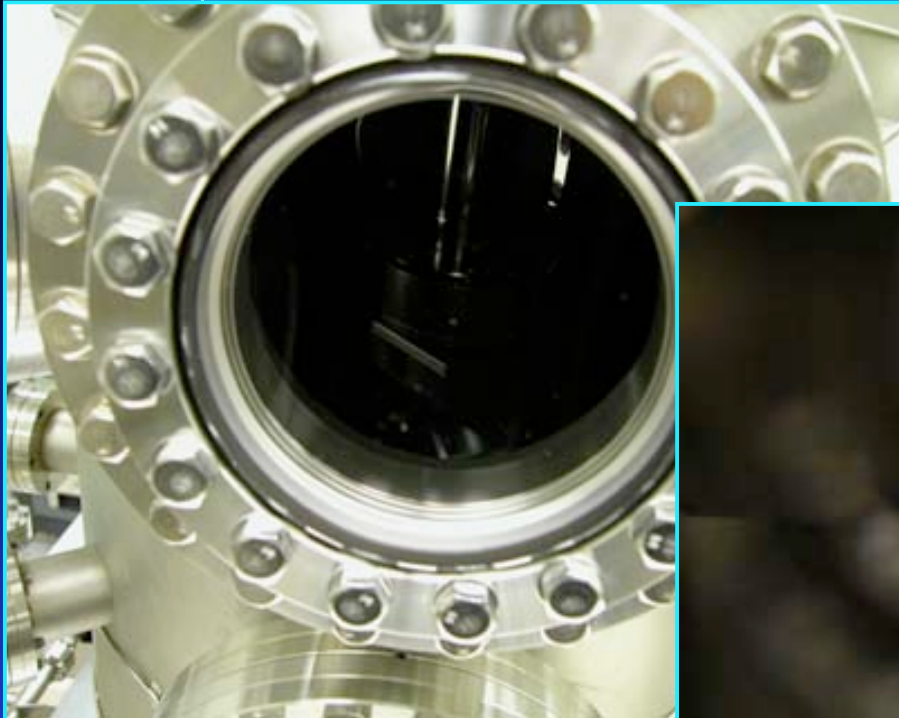
CMA (オージェ、XPS? が可能)



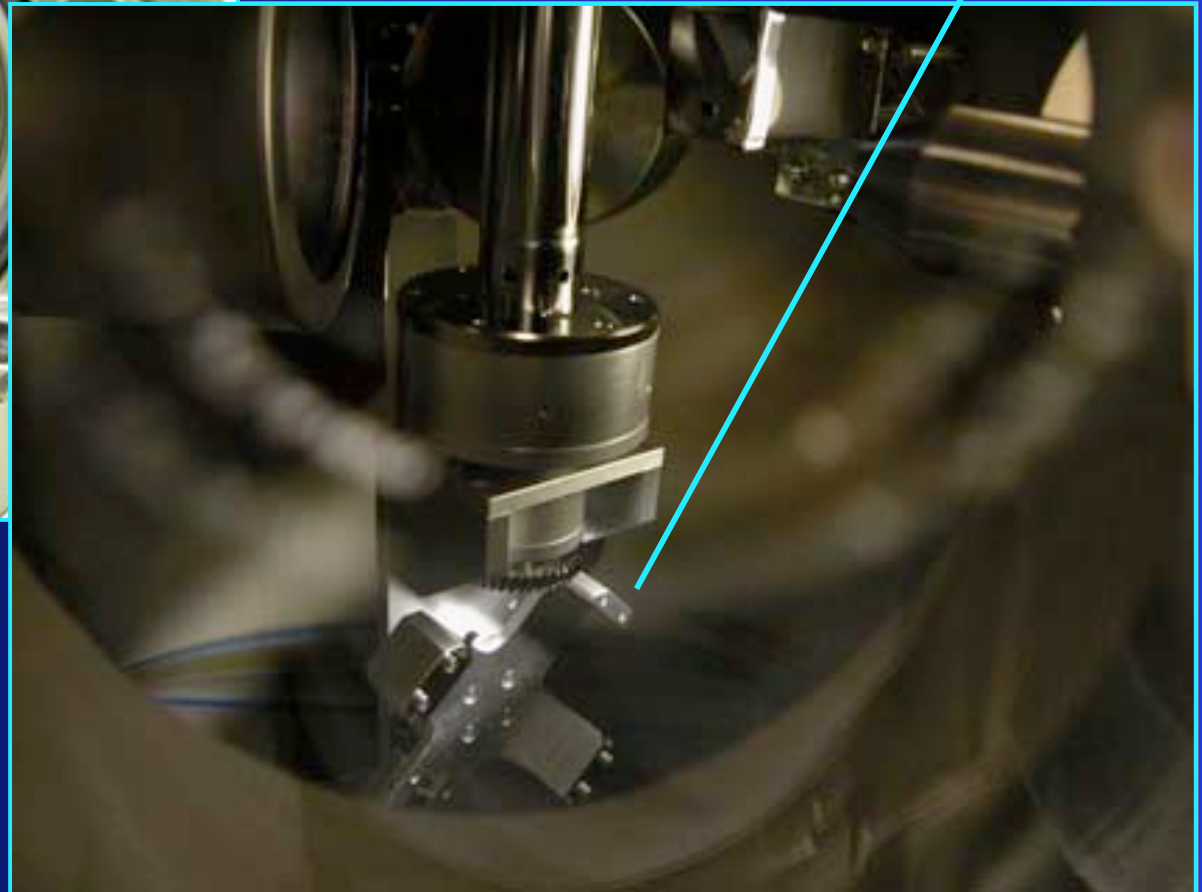
元素分析



洗淨&エッチング効果を表面物理学的に解析！
イオン銃も完備し、イオンエッチング試験も可能！



ロードロック・ハーケン



5. まとめと今後の計画

5-2-3. 高QEカソードのQEのレーザ波長依存性

変換効率が1/10で、QEが1000倍！！

Ti:SのFHG
の開発

現在、光学系
の準備中。

