



WEOH05



Ninjaカソードを用いたニオブ加速空洞の 縦型電解研磨 (VEP) における研磨量均一化と 高空洞加速性能の達成

第16回日本加速器学会年会 (京都府京都市)

2019年7月31日

仁井 啓介

マルイ鍍金工業株式会社

井田義明, Vijay Chouhan, 山口隆宣 (マルイ鍍金工業)
早野仁司, 加藤茂樹, 文珠四郎秀昭, 佐伯学行, 沢辺元明 (KEK)
井藤隼人 (総研大) 及川大基 (宇都宮大)

目次

- 1、はじめに・・・ VEPとHEP
マルイ鍍金のVEP設備
クーポン空洞の作製
- 2、単セル空洞VEPと加速性能評価・・・ 従来のVEPの問題点
Ninjaカソードの開発
研磨量分布、研磨内面の改善
VEPと加速性能評価
- 3、9セル空洞VEPと加速性能評価・・・ 9セル空洞VEPの気泡対策
研磨量分布、研磨内面の改善
VEPと加速性能評価
- 4、まとめと今後の取り組み・・・ ILCスペック(35MV/m@0.8E10)の達成を目指す
コストの検証と削減

縦型電解研磨(VEP)と横型電解研磨(HEP)

	HEP	VEP
セットアップ	複雑	◎ 簡単
空洞回転	必要	◎ 不要
シーリング	回転本体の シーリング必要	◎ シーリング不要
空洞の移動	排水時に横→縦に 動かす必要あり	◎ 縦向きで固定
設備スペース	大スペースが 必要	◎ 比較的小スペース で可能
コスト	高コスト	◎ 比較的低コスト で可能
技術	◎ 確立されている	確立されていない (研究開発中)
量産実績	◎ 実績多数 (EXFEL など)	実績なし

KEKのHEP設備



サクレーのVEP設備



HEP：技術は確立されており実績は多数あるが、
設備の複雑さや処理コストに課題あり
VEP：設備が簡単で処理コストを低減できる可能性
があるが、技術が確立されておらず、実績がない

マルイ鍍金のVEP設備



1号機 手動バルブ

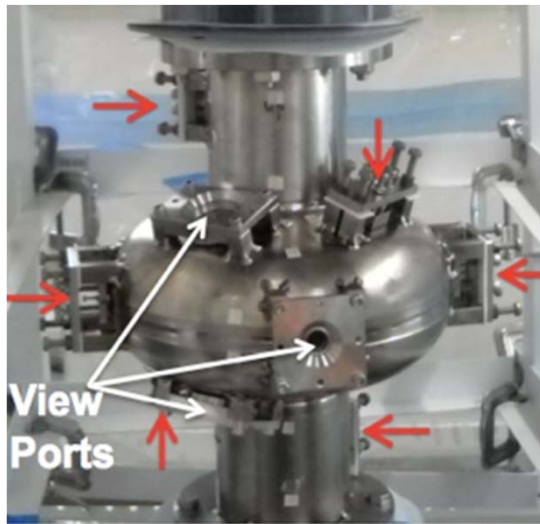
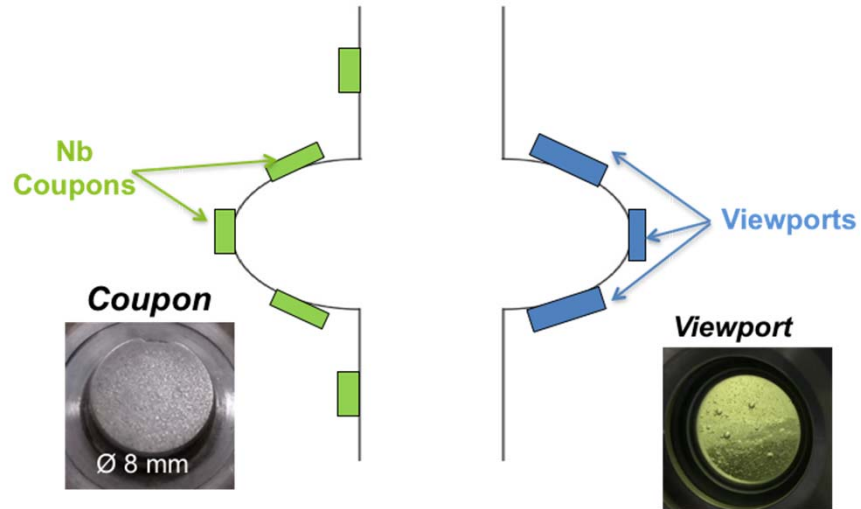


2号機 電動2方バルブ



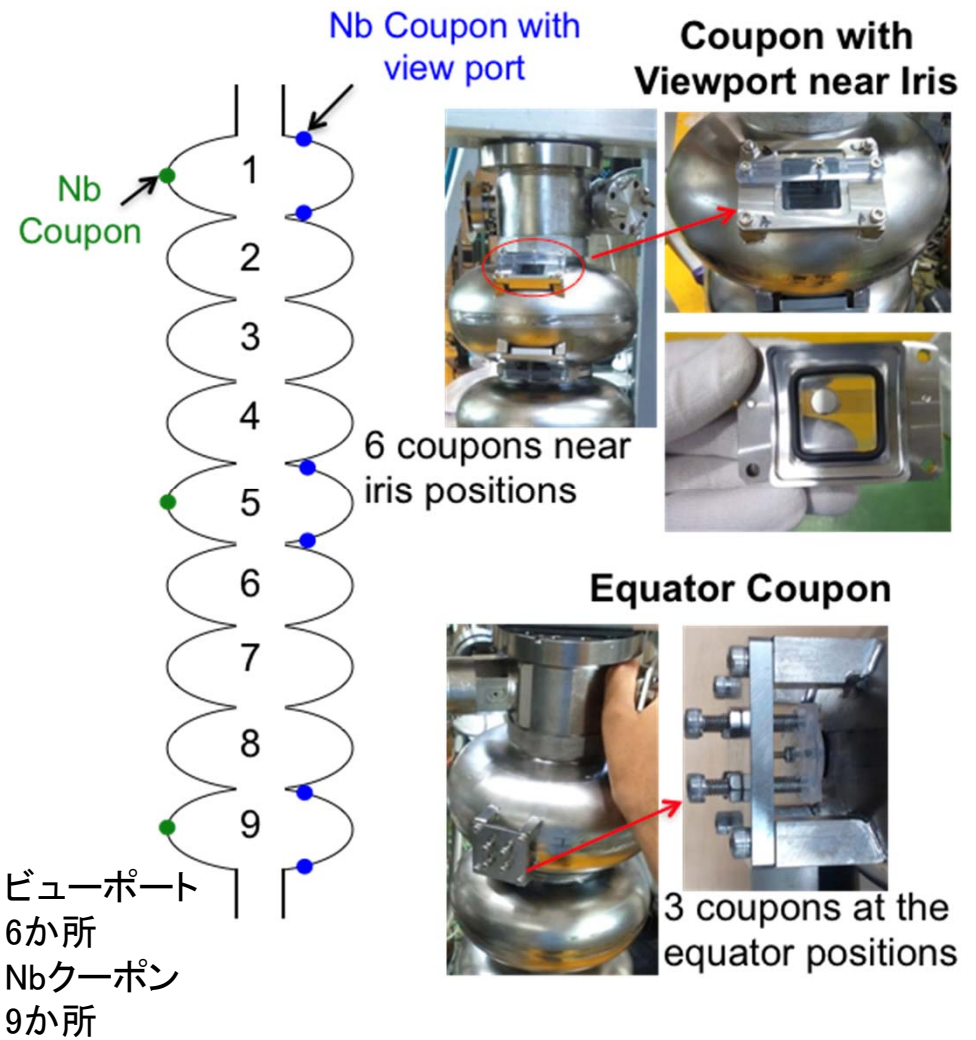
3号機 電動3方バルブ

単セルクーポン空洞



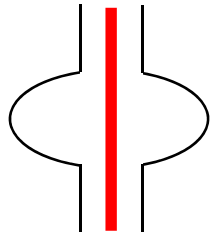
ビューポート
3か所
Nbクーポン
6か所

9セルクーポン空洞



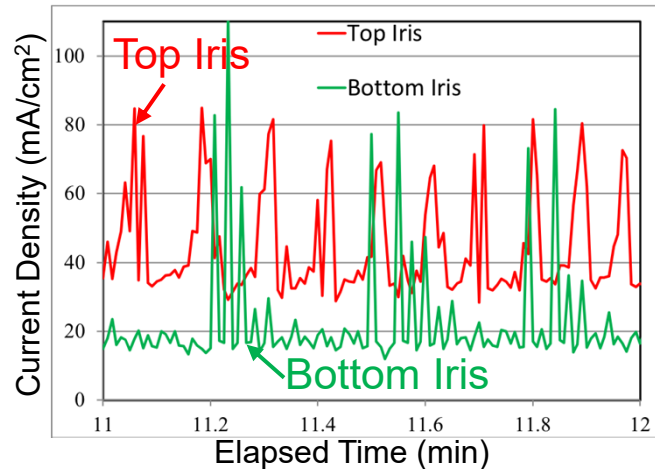
- ・ビューポートより、EP中の内部の気泡観察が可能
- ・クーポン電流が個別に測定でき、電流分布の評価が可能
- ・EP後のクーポン表面を個別に評価ができる(分析装置も使用可能)

従来のVEPの問題点



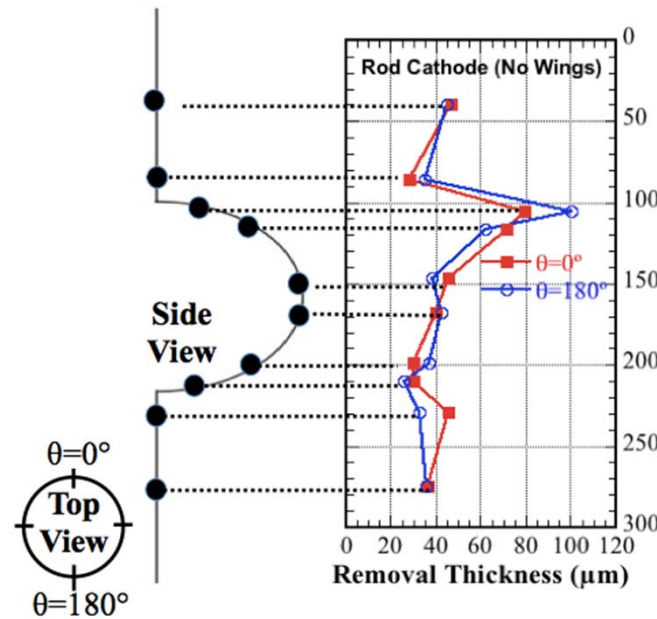
- EP液流量 ~ 5L/min
- 電圧 ~ 9 V
- Al棒電極

クーボン電流

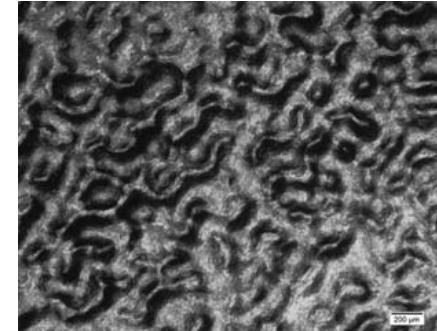


- 上アイリスが下アイリスに比べて電流が大きい

研磨量分布



上アイリス
荒れた表面と
気泡跡



500 μm

上アイリス
ビューポート

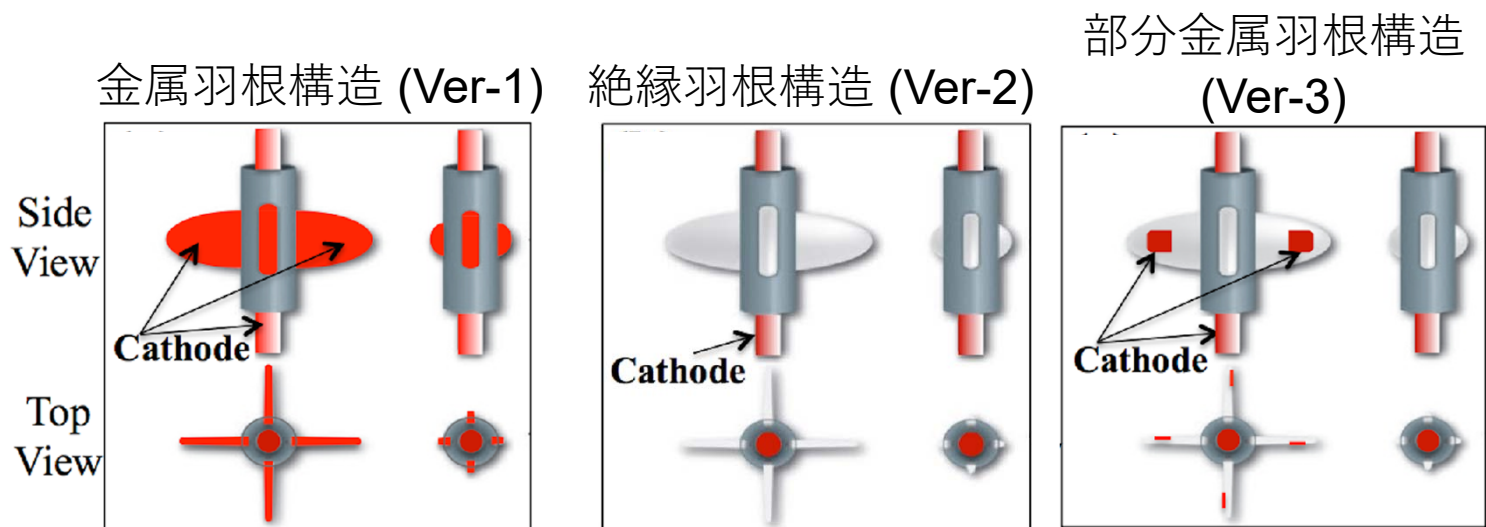


VEPの大きな問題:

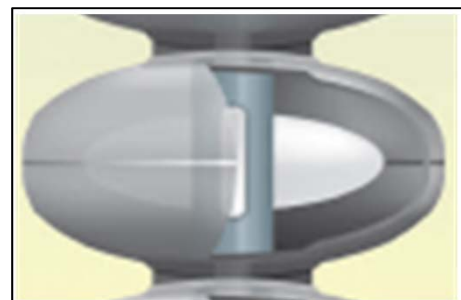
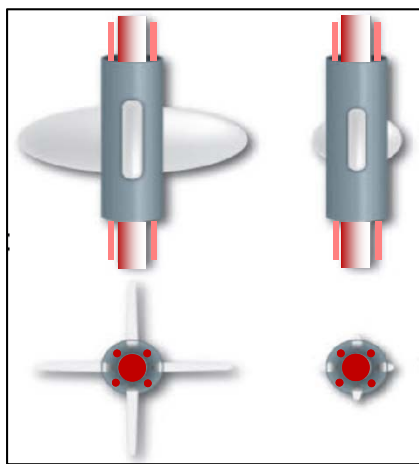
- 研磨量が不均一、非対称
 - 表面が粗い/気泡の跡がある
- EP中にカソードから発生した気泡が上アイリスにあたって研磨を促進するため、上側の研磨量が多くなってしまふ。

独自構造陰極「Ninjaカソード」の開発

- これらの問題を解決するために、独自構造陰極「Ninjaカソード」の開発、改良を行ってきた。

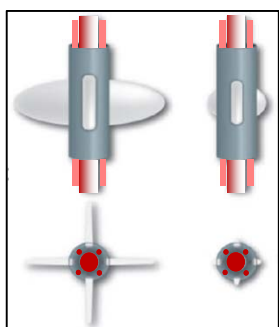


絶縁羽根+金属面積増加
メッシュカバー(Ver-5)



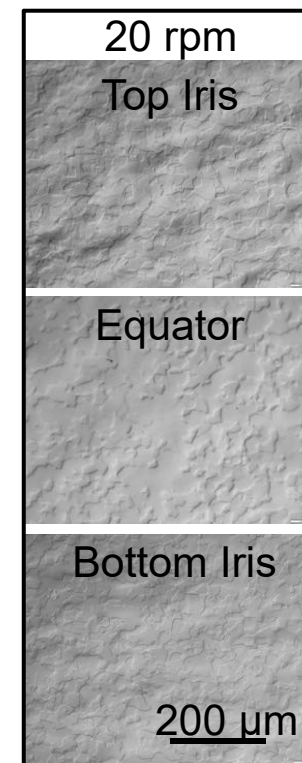
羽根を閉じた状態でカソードを挿入
→空洞内で羽根を開く
→EP中はカソードを回転して中を攪拌する

Ninjaカソードを用いたVEPと研磨量分布改善

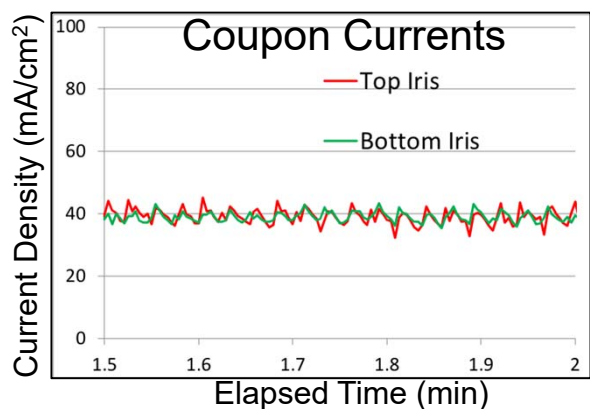
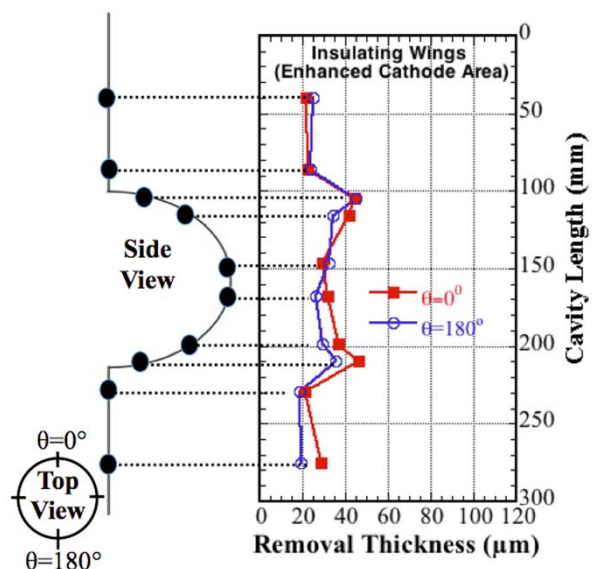


Ninjaカソード
Ver5を用いた
VEP

研磨後クーポン表面



研磨量分布



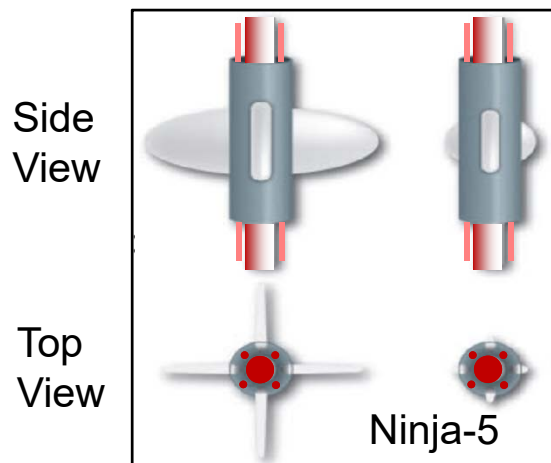
- 気泡が空洞内へ拡散しないため、上下のEP電流がほぼ同じになる
- カソード面積が大きくなることにより、気泡によるスクリーニング効果を防止

電圧: ~13 V, EP液流量: ~5 L/min, カソード回転数: 20 rpm, 温度 < 20 °C, 空洞水冷 (シャワー)

- 研磨量分布の均一性、対称性と研磨後表面状態が大幅に改善
- このカソード、条件にて単セル空洞VEPと加速性能評価を実施

1.3GHz単セル空洞VEP

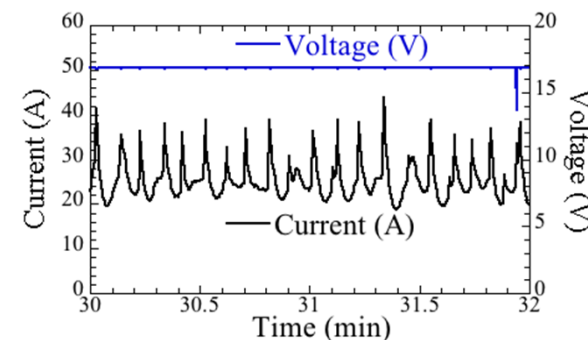
Ninjaカソード (v5)



単セル空洞：TB1-TSB02



VEP中の電流、電圧



電圧: 16-17 V

カソード回転数: 20 rpm

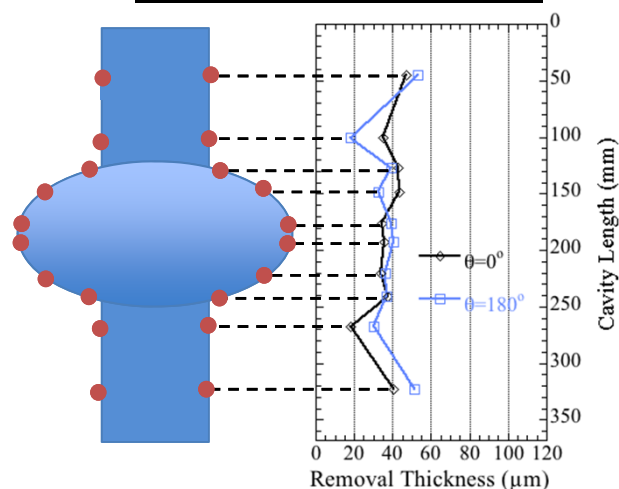
EP液流量 ~ 5 L/min

EP温度 ~ 20 °C

空洞プロセス

- VEP1 (36 μ m)
- ↓
- HPR & 120 °C baking
- ↓
- Annealing
- ↓
- VEP2 (10 μ m)
- ↓
- HPR & 120 °C baking
- ↓
- Vertical test

研磨量分布 (VEP1)



研磨量均一性、対称性は良好

研磨レート: 0.22 μ m/min

研磨後表面 (VEP1)



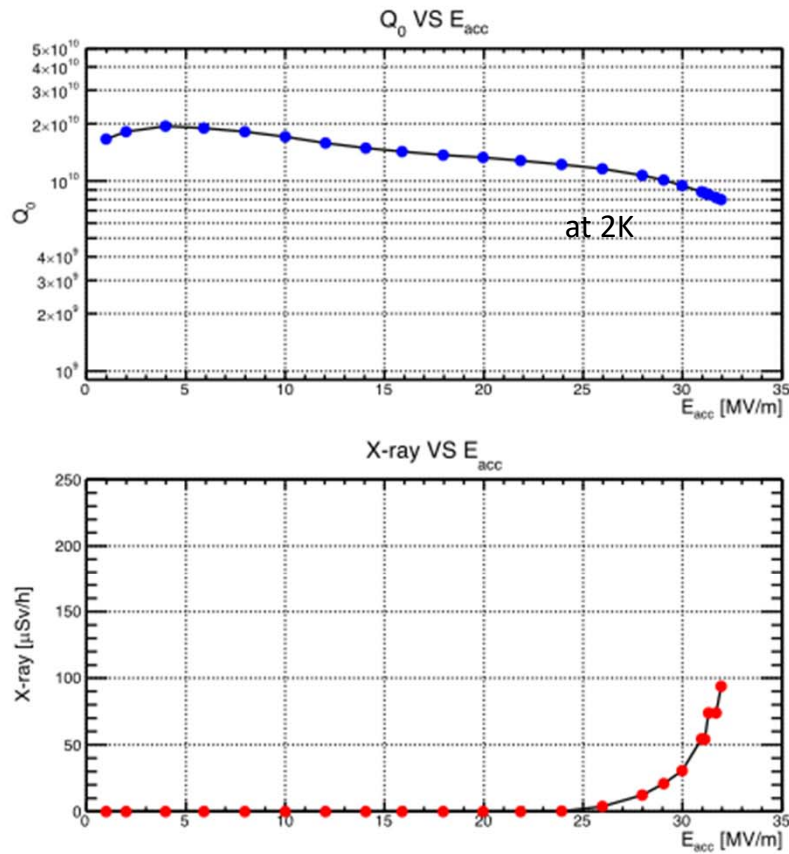
Equator

12 mm x 9 mm

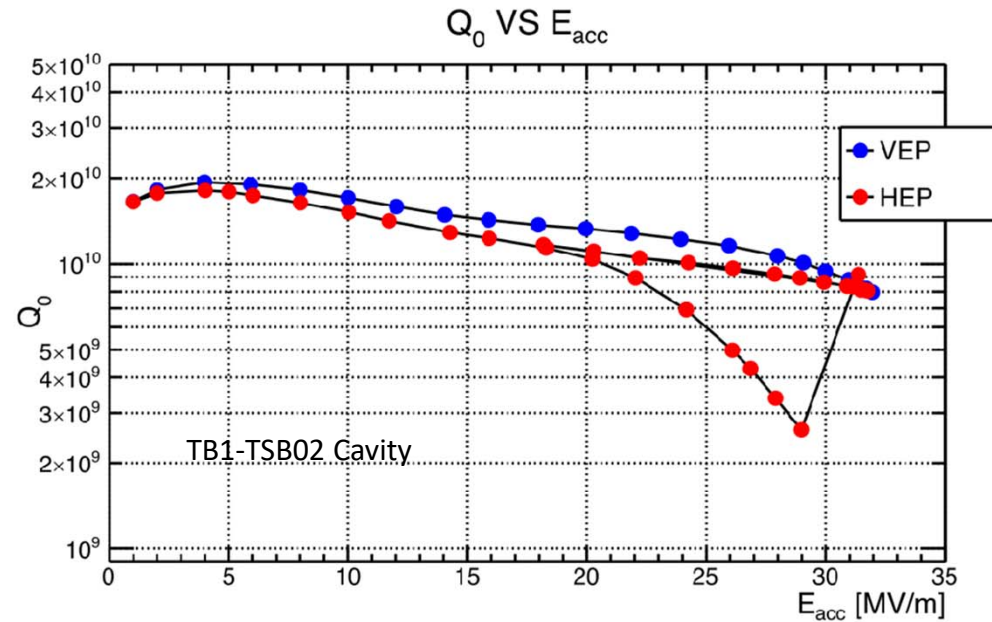
平坦で光沢ある表面 9

1.3GHz単セル空洞VEP後の縦測定評価

VEP後の加速性能評価



HEPとVEPの加速性能の比較

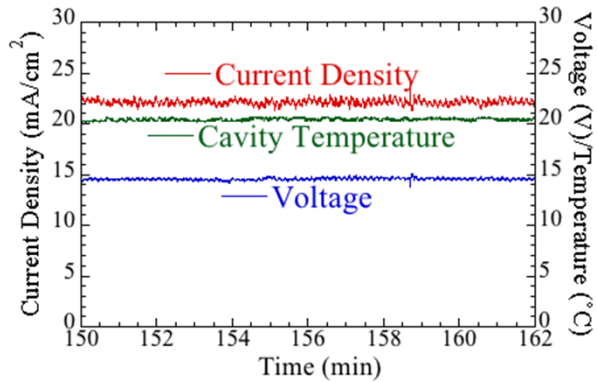


- 32 MV/m (Q₀=8.0E9)を達成
- 同じ空洞をHEPした場合と同程度の加速性能を達成

Ninjaカソードを用いた9セル空洞のVEP

- Ninjaカソード v 5を用いて9セル空洞のVEPを実施

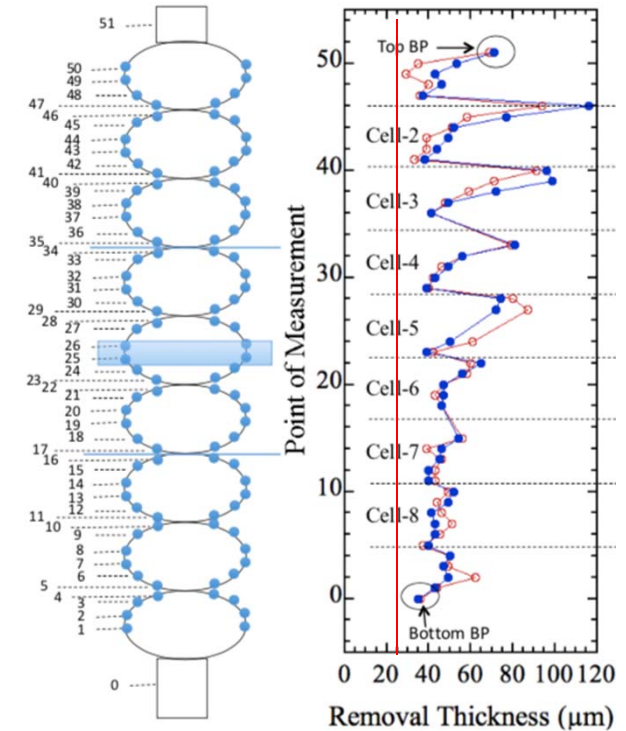
電圧、電流、温度



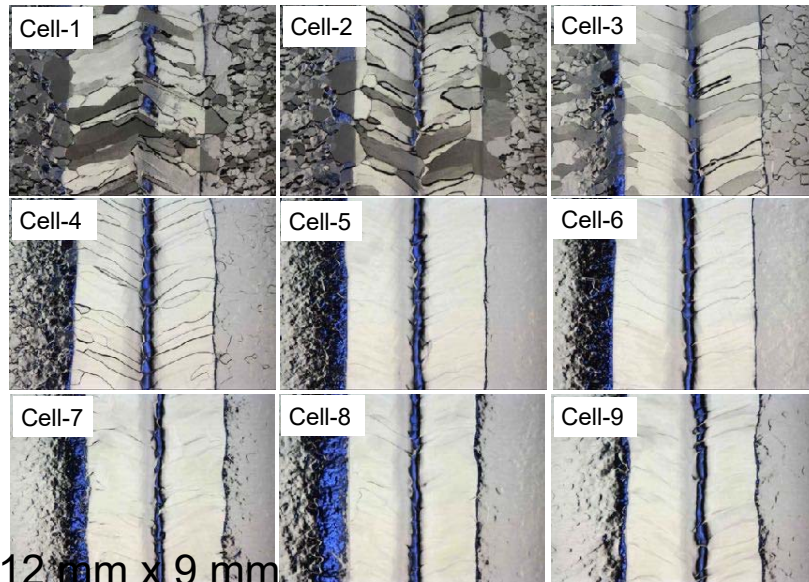
EP液流量：5 L/min
(下→上)
カソード回転数：20 rpm

平均研磨量: 50 μm

研磨量分布



VEP後の赤道部表面観察

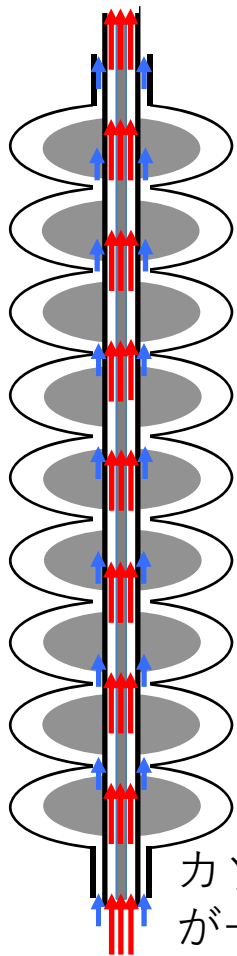


12 mm x 9 mm

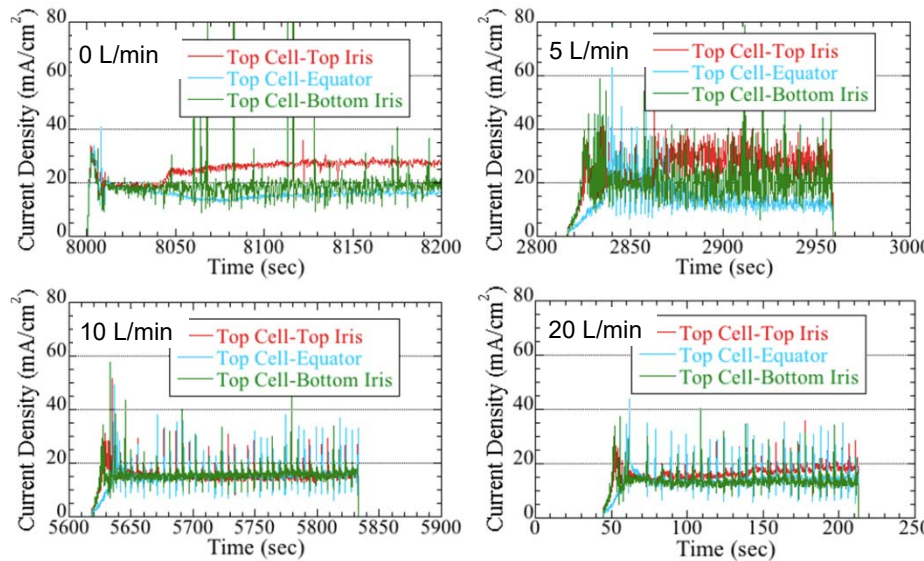
- 下のセルの研磨量分布は良好であるが、上のセルになるほど非対称が強くなる。
- 上のセル程、研磨後表面が荒れている。
- 上のセル程、カソードから発生する気泡の影響を強く受けていることがわかる。

9セル空洞VEPにおける気泡対策

- (a) 気泡を素早く除去するために、EP液流量をNinjaカソードの内外で別制御する方法を考案
 - (1) Ninjaカソード内：気泡を素早く排出するため流量を大きくする
 - (2) Ninjaカソード外：空洞内面に気泡の跡がつくのを防止するため流量を小さくする
- (b) 気泡を消すためEP中に電源OFF時間を入れる（電源カットオフ、3min-ON/3min-OFF）

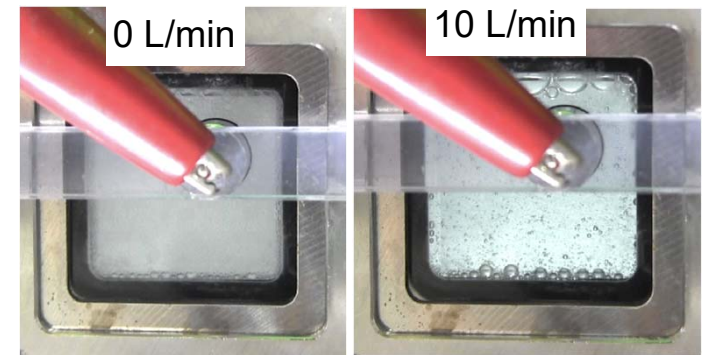


クーポン電流のカソード内流量依存性
(カソード外：5L/min)



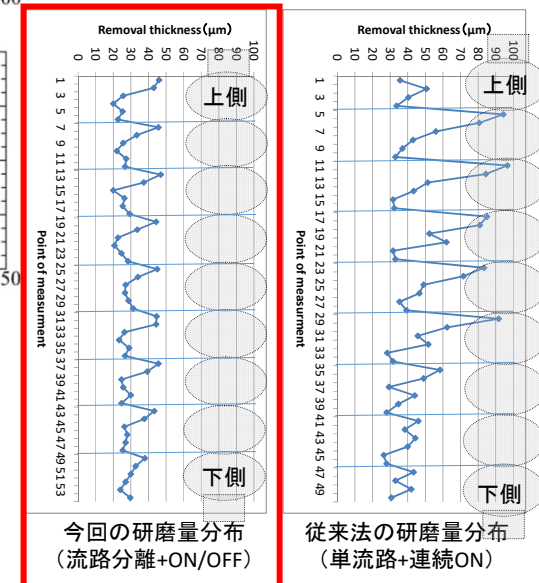
カソード内 ~ 10 L/min & カソード外 ~ 5 L/min
が一番クーポン電流の差が小さい

VEP中のビューポート観察



気泡が充満

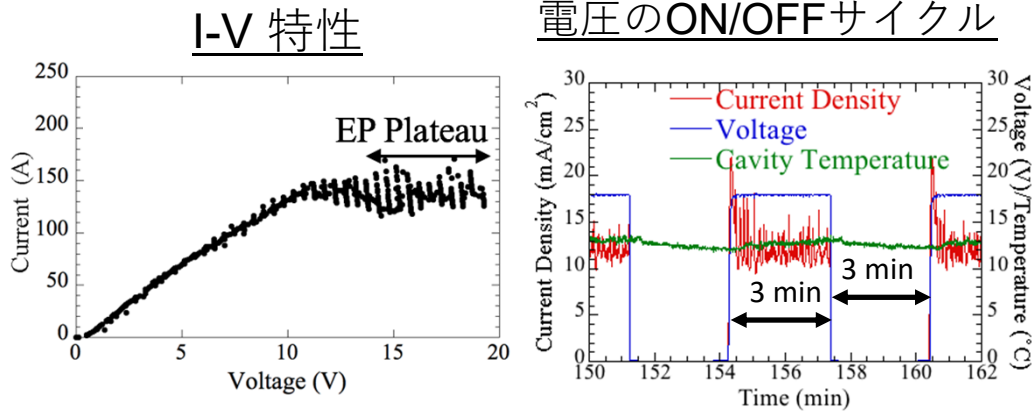
気泡が少ない



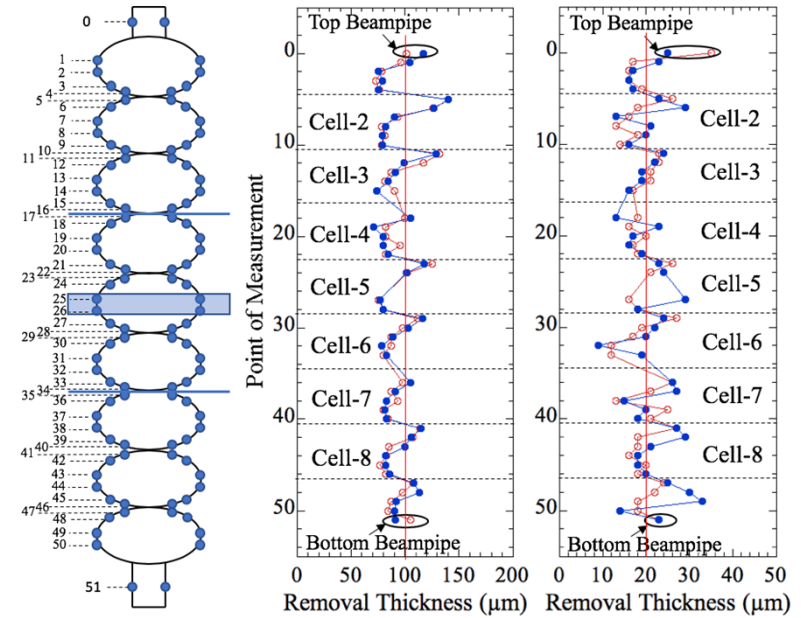
2フロー法を用いた1.3GHz9セル空洞VEP

EP液流量: カソード内-10L/min, カソード外-5L/min

9セル空洞: TB9-TSB01

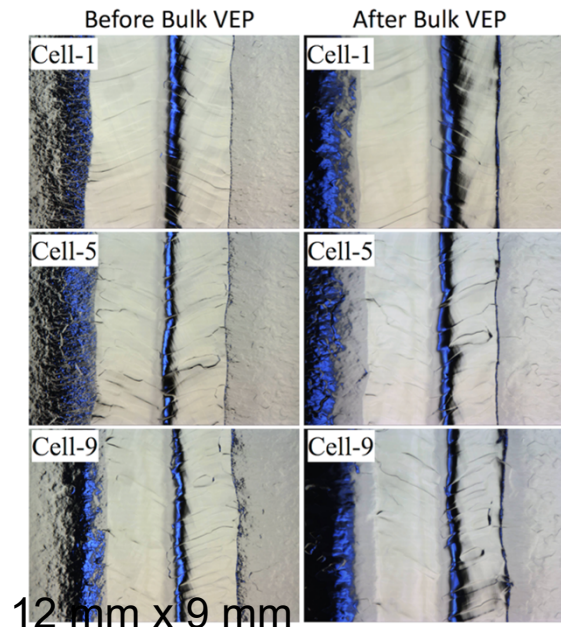
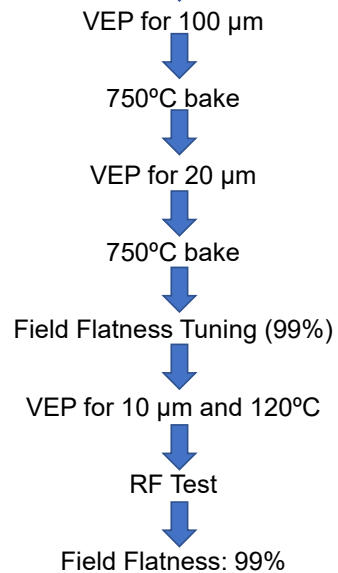


VEP for 100 μm VEP for 20 μm



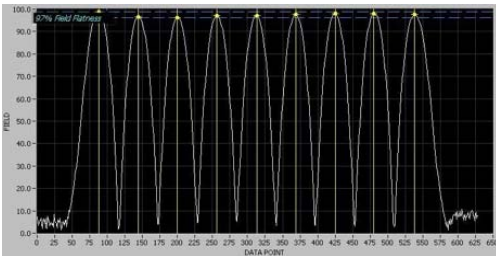
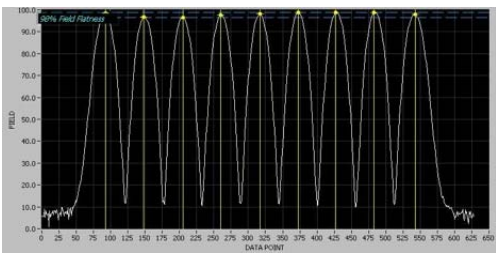
さらに気泡を減らすため、VEP中に電圧OFF時間を設けた (3min-ON/3min-OFF (電源カットオフ))

Horizontal EP (baseline RF test)



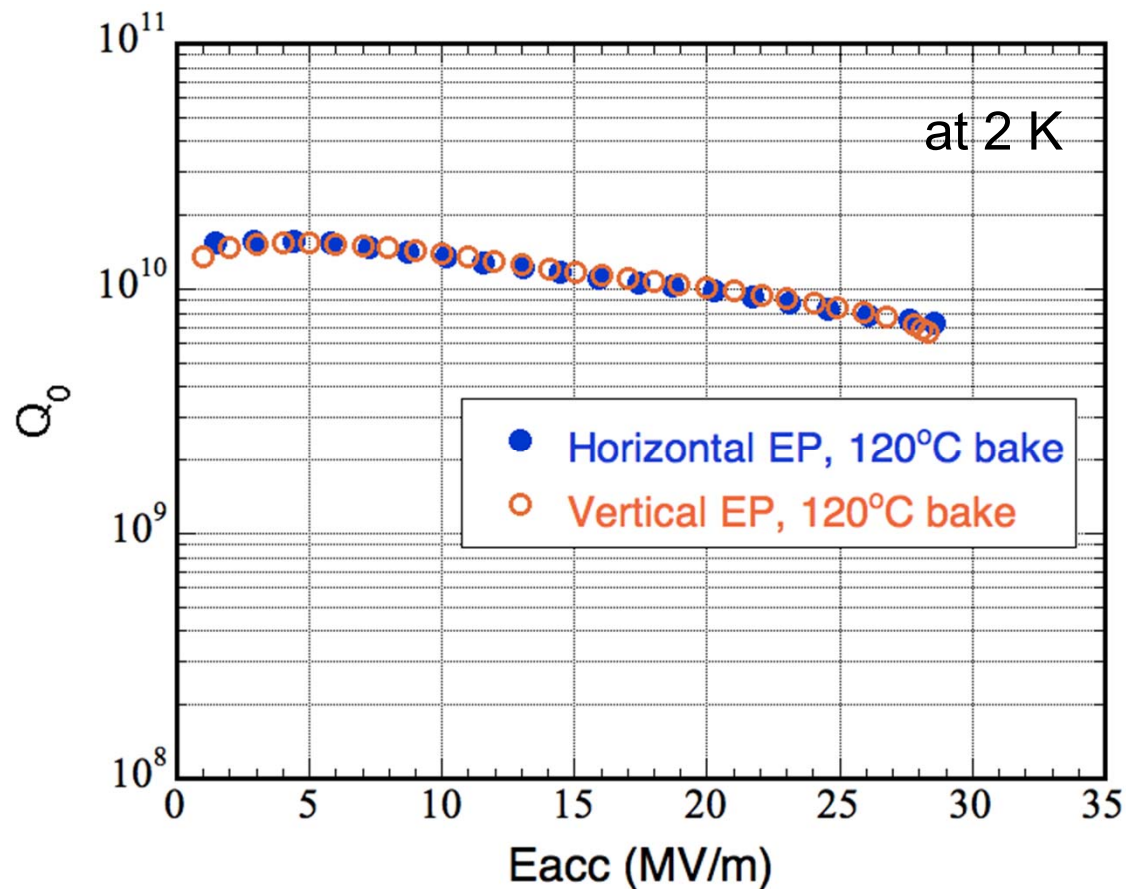
- 研磨の対称性は大幅に向上
- 研磨後の表面は良好、光沢あり

1.3GHz9セル空洞VEP後の加速性能評価

	VEP—20 μ m
VEP 前	97% 
VEP 後	98% 

フィールドフラットネス

VEP-20 μ mでほとんど変化なし



加速性能評価

28MV/m ($Q_0=6.7E9$)

同空洞のHEP後と同程度を達成

まとめと今後の取り組み

- マルイ鍍金工業では、コスト削減に適しているとされる加速空洞のVEP技術や設備の開発に取り組んできた。
- 研磨量の均一性や研磨表面を改善するため、独自構造陰極「Ninjaカソード」を開発、改良、最適化を重ねてきた。
- ニオブ単セル空洞のVEPを行い、研磨量均一性と研磨内面の改善、加速性能32 MV/m ($Q_0=8.0E9$)を達成した（HEPと同程度）。
- ニオブ9セル空洞では、さらに研磨量均一化のために2フロー法を開発、加えて電源OFF時間をいれることで研磨量分布と研磨内面が大きく改善し、加速性能28MV/m ($Q_0=6.7E9$)を達成した（HEPと同程度）。
- 今後の改善の取り組みとして
 - ①さらにVEP設備、カソード、パラメータの最適化を行い、VEPにてILC規格（35MV/m ($Q_0=8.0E9$))の達成を目指す
 - ②コストの検証とコスト削減に向けた取り組み
特にタクトタイムの減少と歩留まりの向上に取り組みたい

謝辞 VEP設備の開発、作製にあたり多大な協力をいただきました。
ここにお礼を申し上げます。

東日本機電開発株式会社 水戸谷様、赤堀様、宮野様
株式会社WING 高橋様、姉帯様

ご清聴ありがとうございました。

