

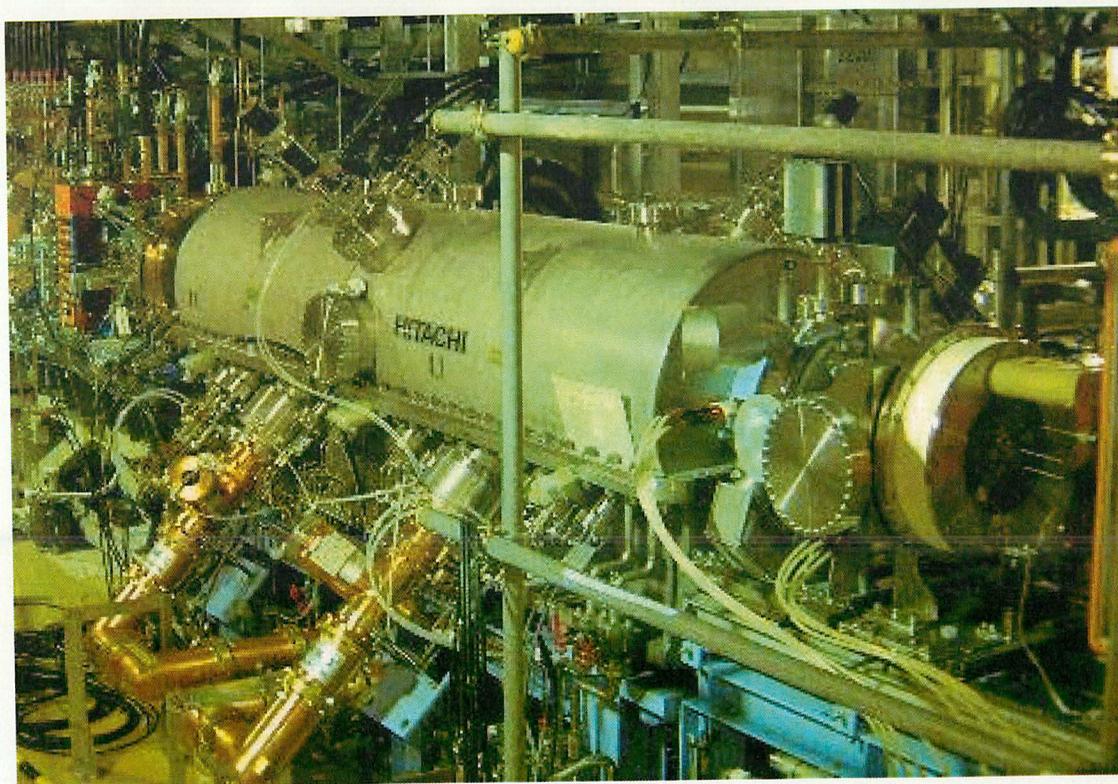
# RFQの現状と対策

ハドロン推進委員会  
2009年1月30日

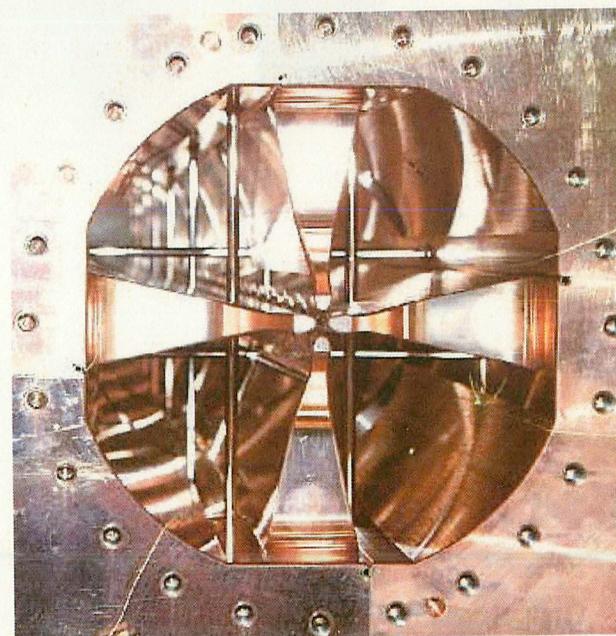


## 長谷川 和男、J-PARC リニアック

2008年9月からのRFQ不調の状況と対策・対応について



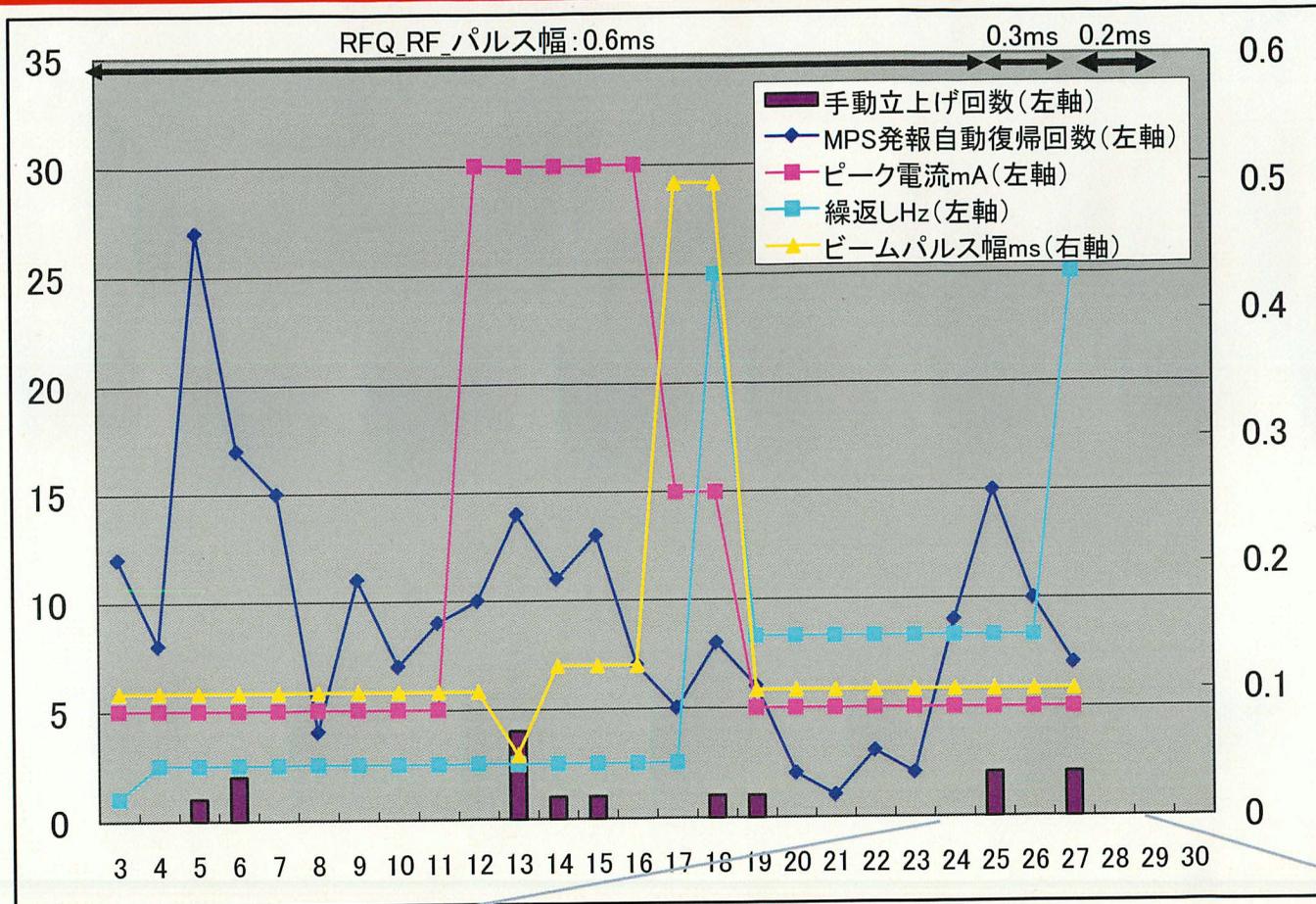
RFQの外観



RFQの内部:上下に貫く  
ロッドがパイモード安定  
化ループ(PISL)

# RFQ不調の経過

(復習: 前回 2008年11月報告)



2008年9月の後半  
トリップ多発  
電圧がかかりにくくなった



## RFQタンク電圧



# 2008年10月の対策

(復習 前回 2008年11月報告)



## インターロックの改良:

進行波パワーの上限インターロックを常に動作させられるようにした

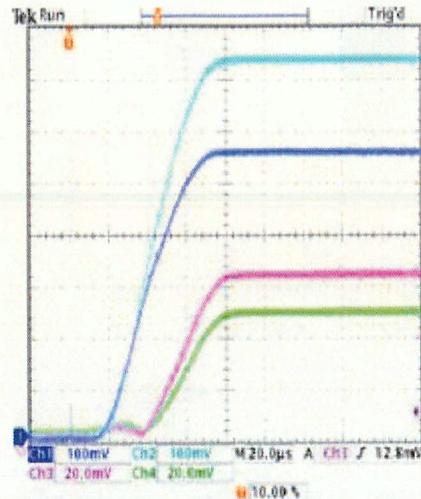
RFの立ち上がりを滑らかにしてパルス全幅で反射インターロックを取れるようにした

自動復帰時にフィードバック、フィードフォワードを切るようにした

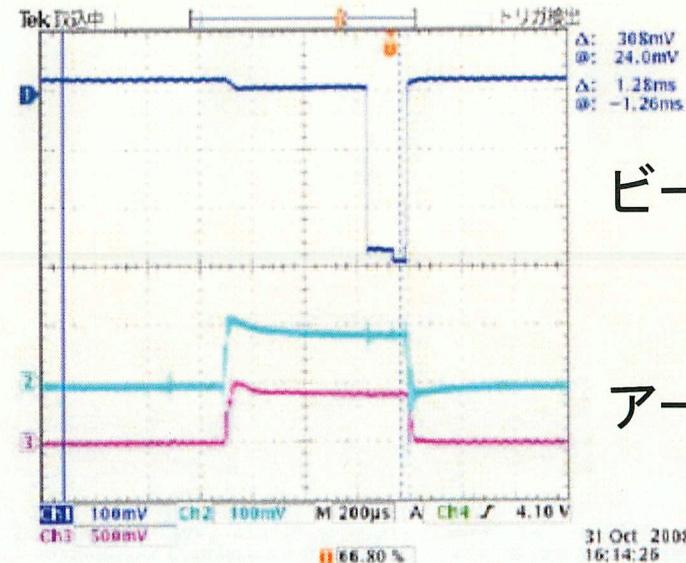
**無駄なビームを入れない改良:** 加速前からイオン源のビームを入れていたが引き出し電圧をOffにして入れないようにした

**コンディショニング**を時間をかけて行った(10月19日から11月7日)

→ その結果、RFQの耐電圧が以前の状態まで回復し、11月3日にビーム試験、181MeVまで加速して再現性の確認。約10時間の間に10回ほど落ちたがすべて自動復帰した。



RFの立ち上がり



ビーム電流

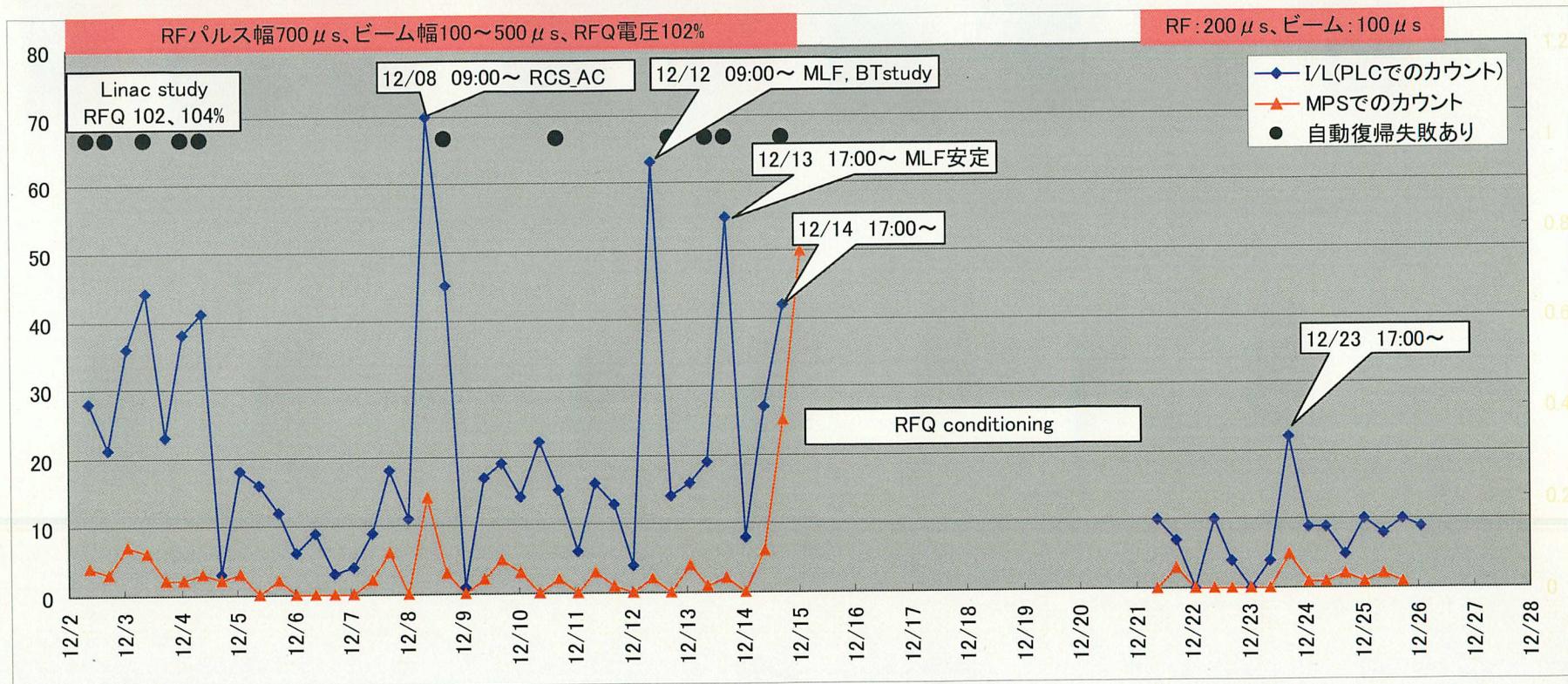
アーク電流、電圧

イオン源からのビーム電流

# 2008年12月(RUN20)RFQ運転経過



- 11月17日～ RFQコンディショニング開始
- 12月02日～ ビーム試験開始
- 12月15日～ **早朝立ち上げ失敗、コンディショニング開始**
- 12月21日～26日 RFパルス幅200 $\mu$ s、ビーム幅100 $\mu$ sでビーム運転再開



## ◆RF制御PLCでカウントされたRFQ I/L発生回数

自動復帰中のI/L発生もカウントされる(RFQ以外のMPS発報事象の一部もカウント)

## 4 ▲MPSでカウントされたRFQ I/L発生回数

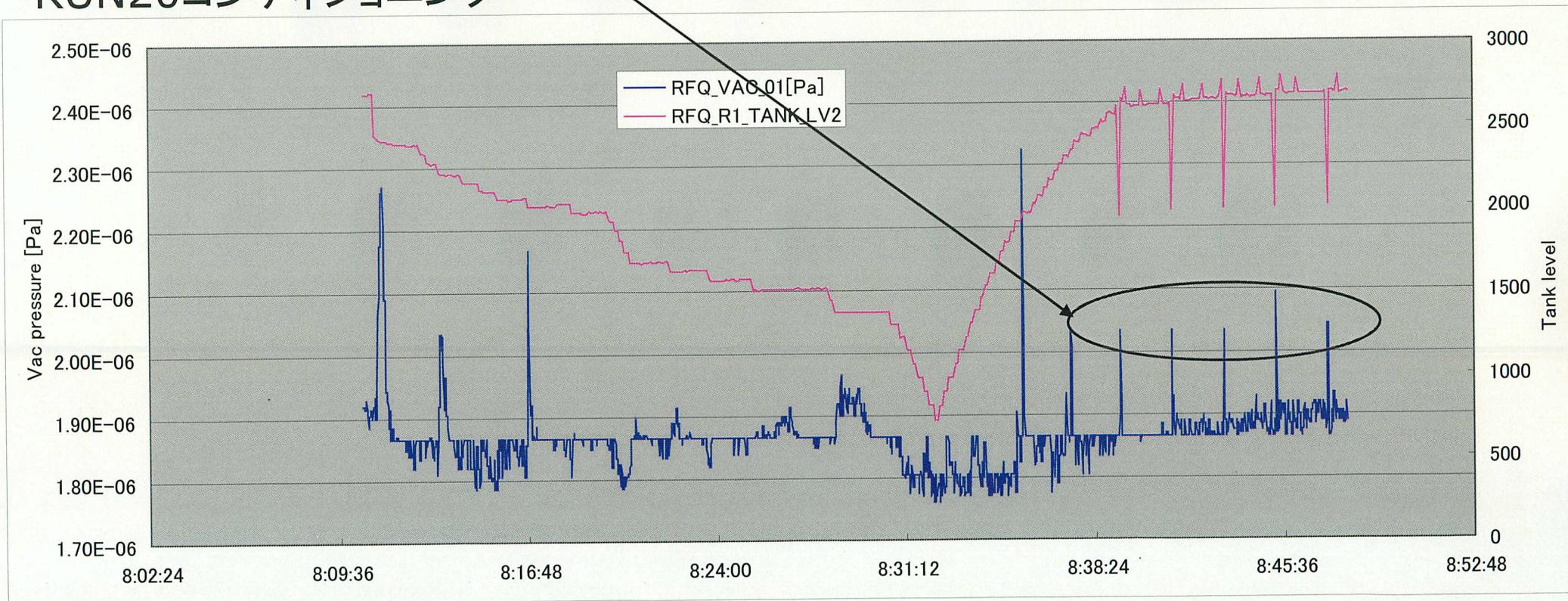
# コンディショニング(2008年12月)の状況



インターロック発生後の再投入(自動復帰)時の放電の原因

この付近で**ガス放出**(空洞温度が高いときに低い電圧でガスが出ている)

## RUN20コンディショニング



# RFQバックアップグループの立ち上げ



RFQの不調対応を**加速器全体の問題**として受け止め、  
J-PARC加速器グループに「**RFQバックアップグループ**」を  
立ち上げた。

メンバー:

責任者:長谷川(正)、吉岡(副)

コアメンバー:森下、松本、山口、内藤、近藤

専門家:川又(KEK工作)、堀、齊藤、魚田(以上真空)、千代(RF) (＋適宜)

## 1. 現状認識

- ・健全な状態でない。コンディショニングが不十分→手法の検討、監視体制強化で不調の兆候を見逃さない様にする。
- ・共振周波数がずれたところで**マルチパクターリング領域**があり、そこを越え難い。
- ・今のRFQをコンディショニングをしつつ大切に使うとともに、**早急にバックアップRFQの設計・製作に着手**することが必要である。

# RFQバックアップグループの立ち上げ (続き)

---

2. 短期的対応(バックアップRFQができるまで) →今のRFQを壊さずに大事に使う
  - ・トリップしたときの対応:自動復帰回数、コンディショニングに移行する条件設定
  - ・25Hzから50Hzでコンディショニングを行う準備・対応:コンディショニングの効率化
  - ・(今後の状況を見て)ビーム試験途中でのコンディショニングの必要性の判断
  
3. 中・長期的対応
  - ・不調原因の調査・解析
  - ・バックアップRFQの設計・製作、コンディショニングによる実戦配備準備

# RFQ/バックアップグループ活動



J-PARC RFQの不調原因の調査・解析

- ・JHP(432MHz)で使用したRFQの解体・観察
- ・真空度の解析
- ・電磁場解析
- ・マルチパクターリング解析(コード整備中)

バックアップ機建設に向けた設計検討事項の整理・確認

- ・現在運転中(SNS、ISIS)、過去に建設されたRFQ(JHP,原研、LEDA)などのRFQの比較検討
  - ・高電界空洞の材料、加工、表面処理の検討
- など

設計・検討作業、必要なR&D計画の策定

# 短期的対応: 50Hzでのコンディショニング



## コンディショニングの効率化:

25Hzから繰り返しを2倍の**50Hz**に上げる(ただし、25Hzの最大熱負荷と同程度までに制限)

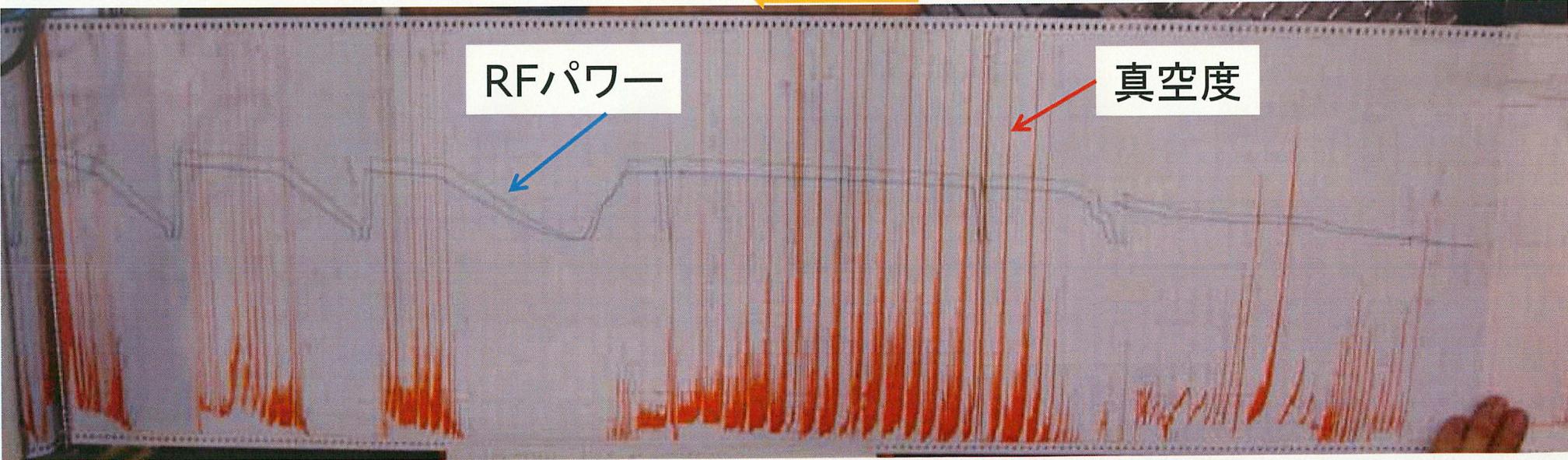
2009/1/9 6:00

時間の流れ



2009/1/7 14:00

コンディショニング開始



RFパワー

真空度

600 $\mu$ s  
6時間

650 $\mu$ s  
6時間

700 $\mu$ s  
6時間

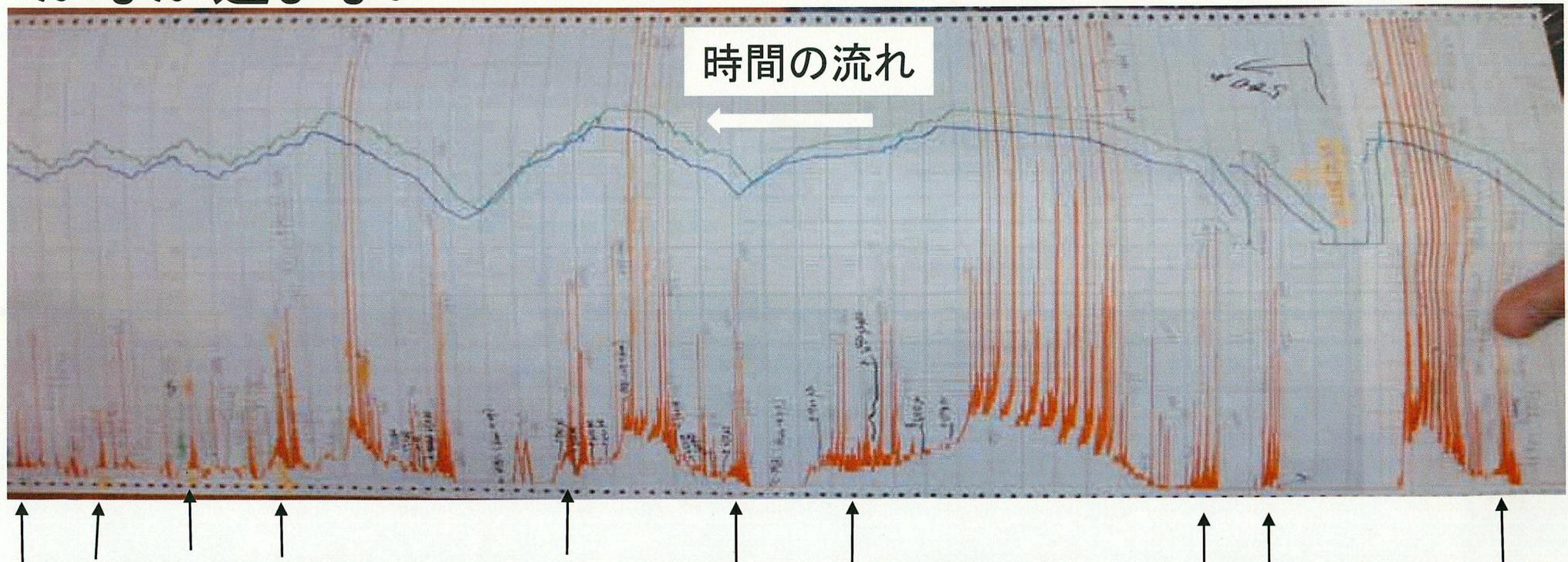
50Hz 700 $\mu$ s 23時間

# 50Hzでのコンディショニング経過



RFパワーを変化させ、空洞がある形状となったときに盛んにガスが出る→ベーンとタンクの熱的変動の時定数の違いによる

コンディショニングによるガス出しの効果は見られるが、なかなか進まない



設定値2500-3000のガスは、コンディショニングを重ねるごとに減少している

# 2009年1月の状況

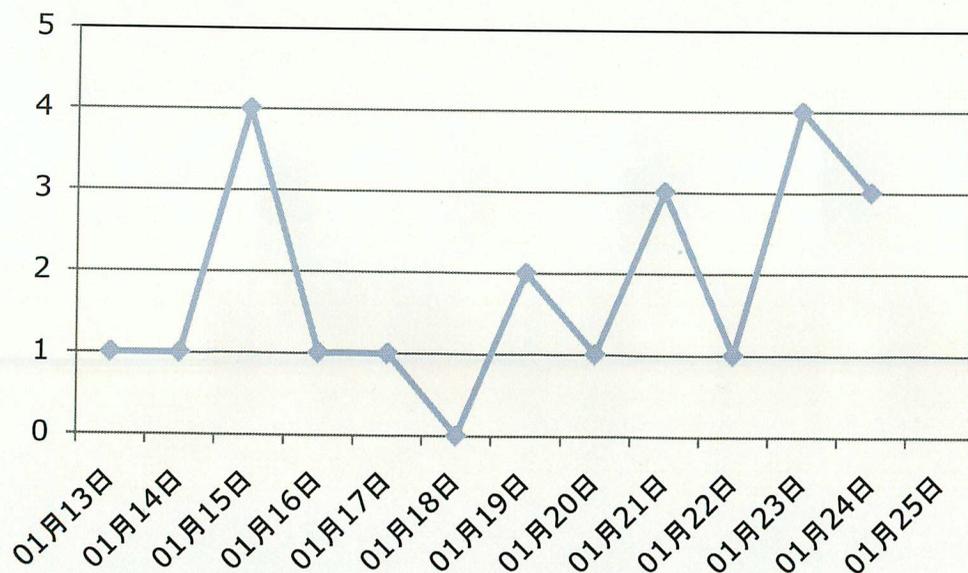


ビーム条件: 12月の運転時から変えず(無理しない)

ピーク電流5mA、繰り返し25Hz、

ビームパルス幅 100 $\mu$ s、RFパルス幅 200 $\mu$ s

状況: 運転時間につれてトリップが増えてくる(ようだ)



1日の自動復帰回数 (1/24まで)

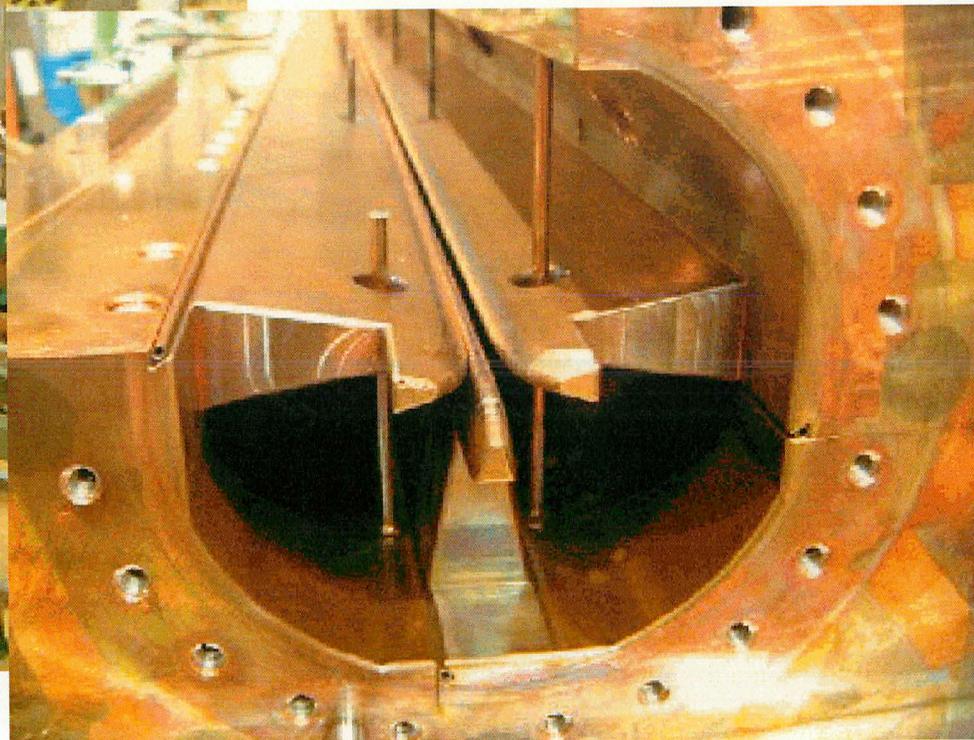
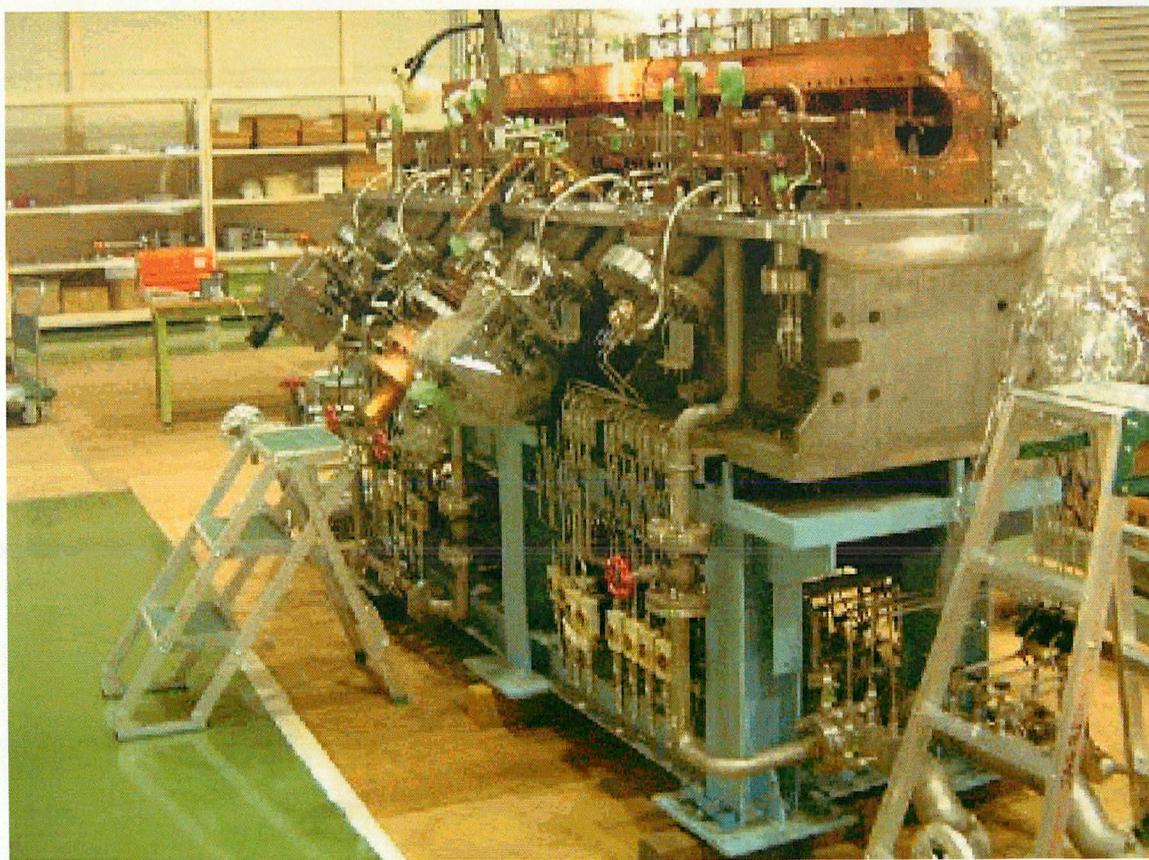
## 自動復帰しなかったケース

日時	備考	回復時間
2009/1/14 11:54	RF-PLCも発報	1h38m
22 5:03	RF-PLCも発報	1h12m
22 8:56		1h08m
23 11:59	コンディショニング	1h44m
25 0:09	立ち上げプログラム による立ち上げ失敗	1h32m

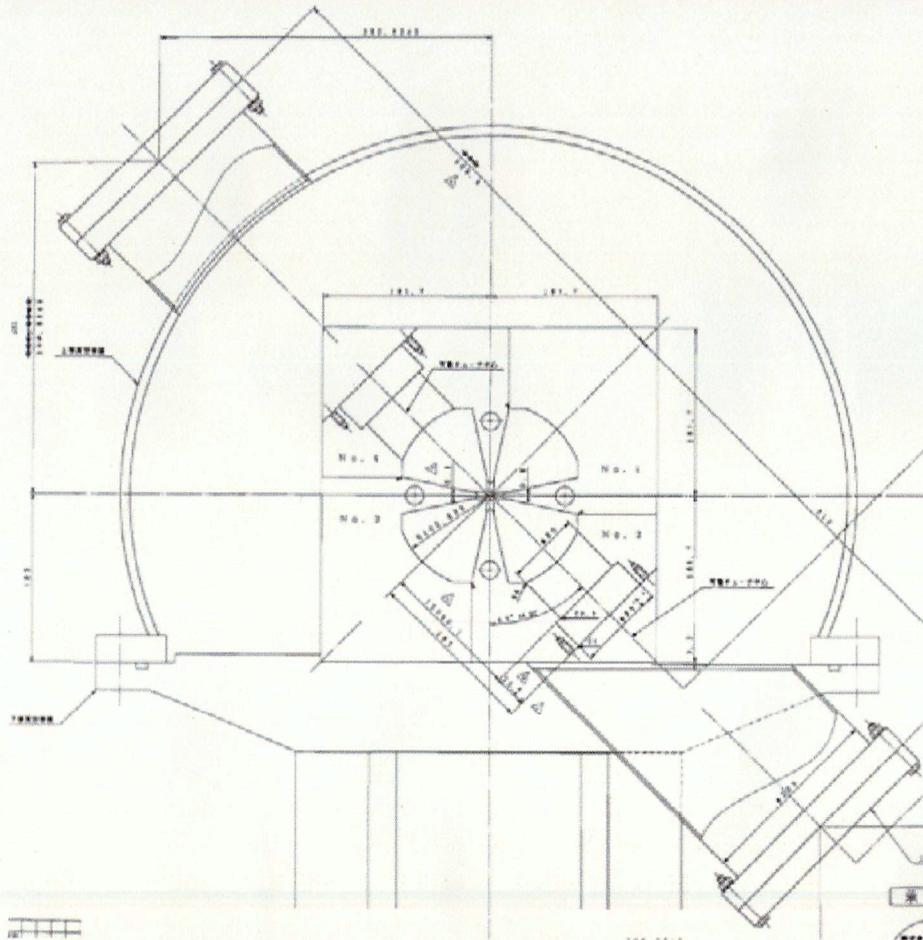
# JHPで使用したRFQの解体・調査



実機と製作方法が酷似しているR&D機をKEKから  
J-PARCリニアック棟に持ち込み、解体・調査を行った



# RFQの構造



実機の断面構造図

	JHP	実機
周波数(MHz)	432	324
長さ(m)	2.7	3.0
構造	RF/真空:2重構造 PISL使用	



JHP機の真空槽(手前)

# JHP-RFQの調査：ベーンの拡大

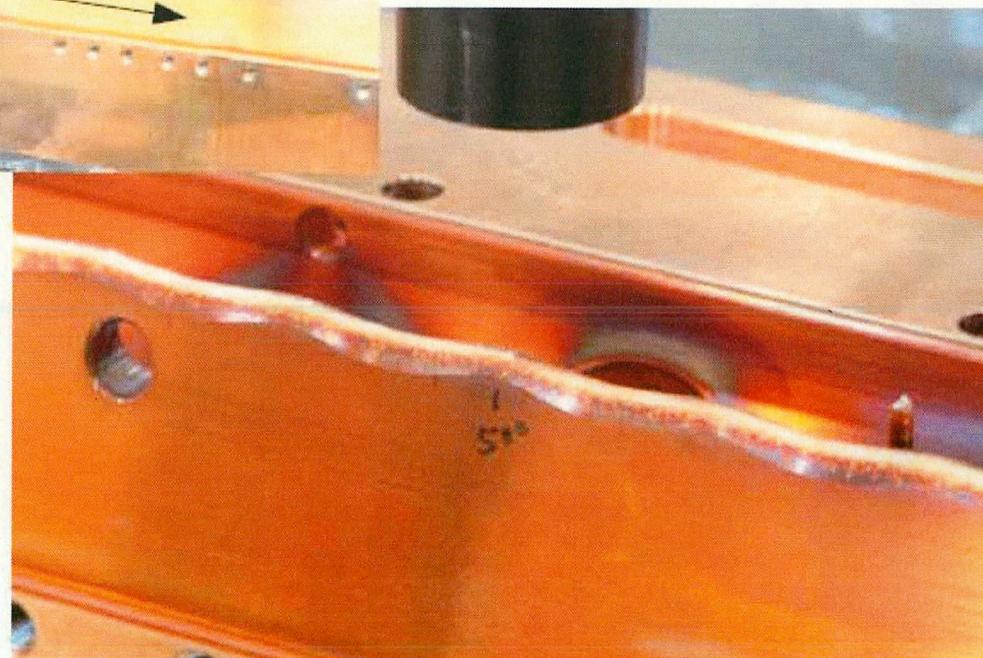


KEK機械工作センター  
川又氏

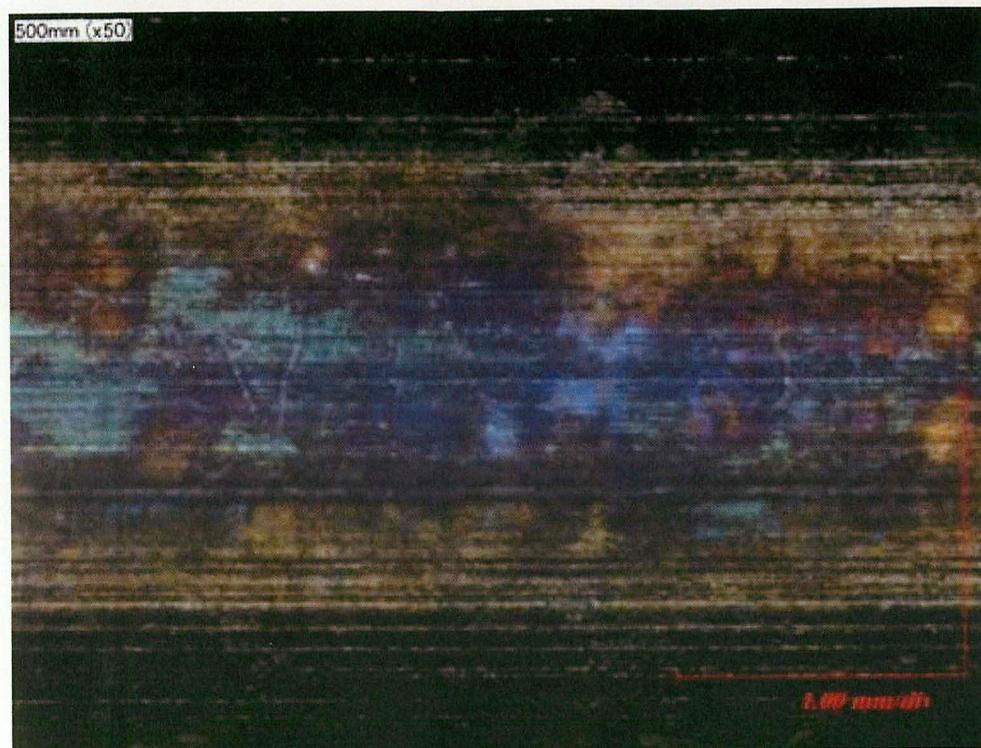
キーエンス VH-8000

500mmステップでベーン先端部を  
拡大、観測

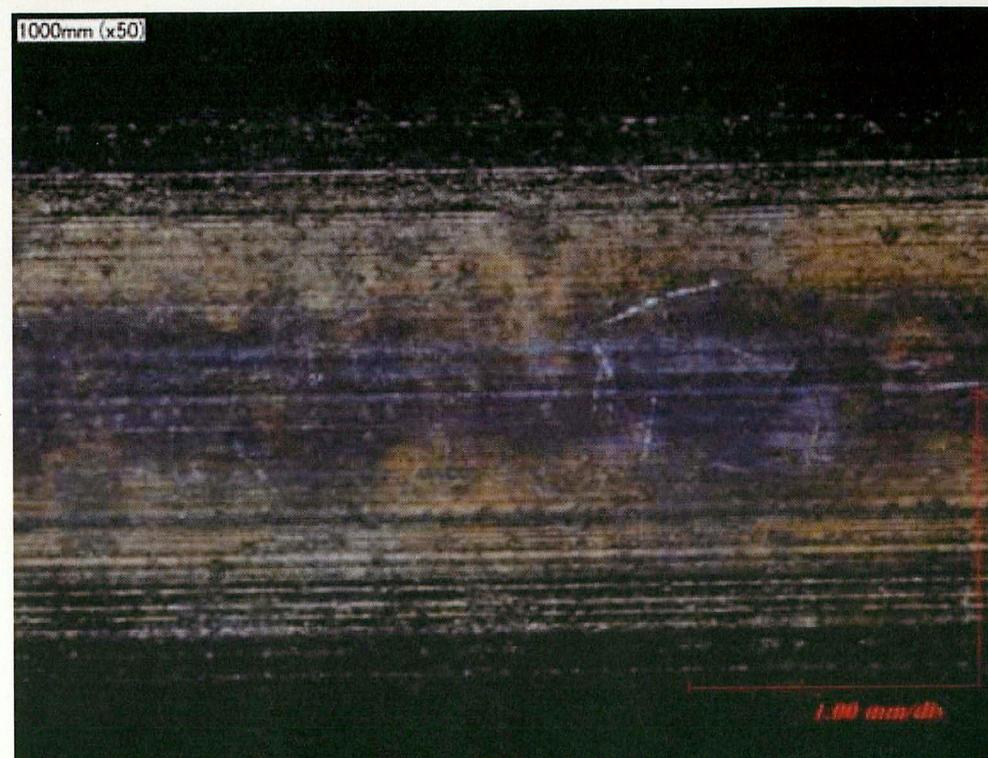
(参考：タンク壁面のPISL穴、チュー  
ナー穴の周りの変色も見える)



# ベーン先端の拡大写真



下流から500mm位置  
50倍

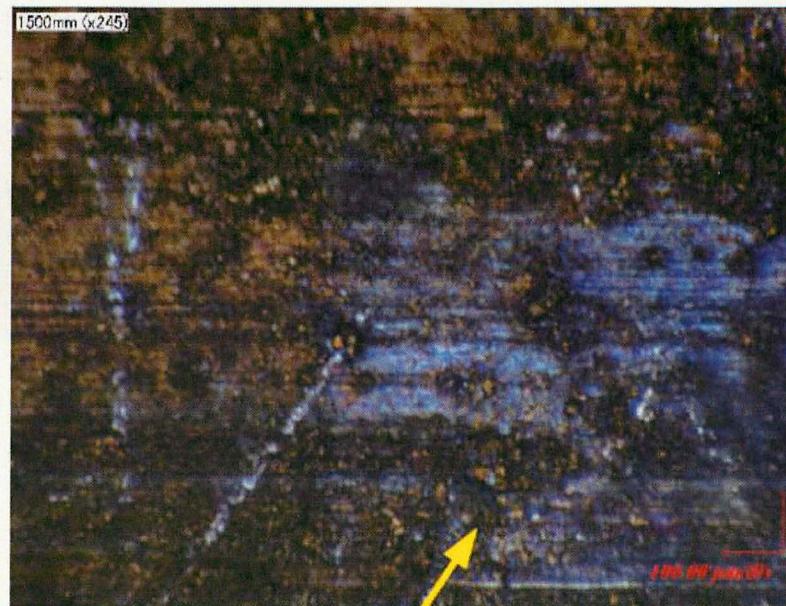


下流から1000mm位置  
50倍

加工の筋(8-9 $\mu\text{m}$ )、放電による変色、ひっかき傷のようなものが見られる (参考:高電界電子加速器の粗度は0.3-0.6 $\mu\text{m}$ 、それに比べるとはるかに粗い)

# ベーン先端の拡大写真(続き)

## 中央部分(1500mm位置)



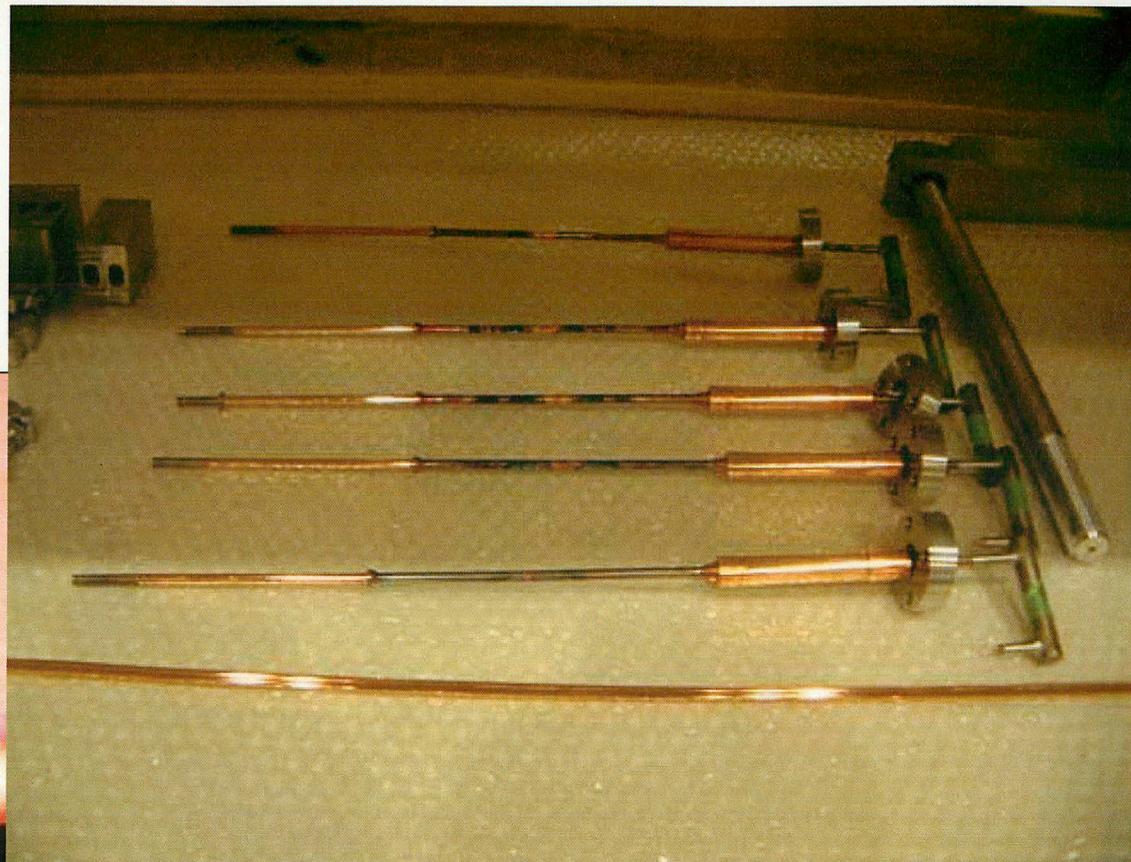
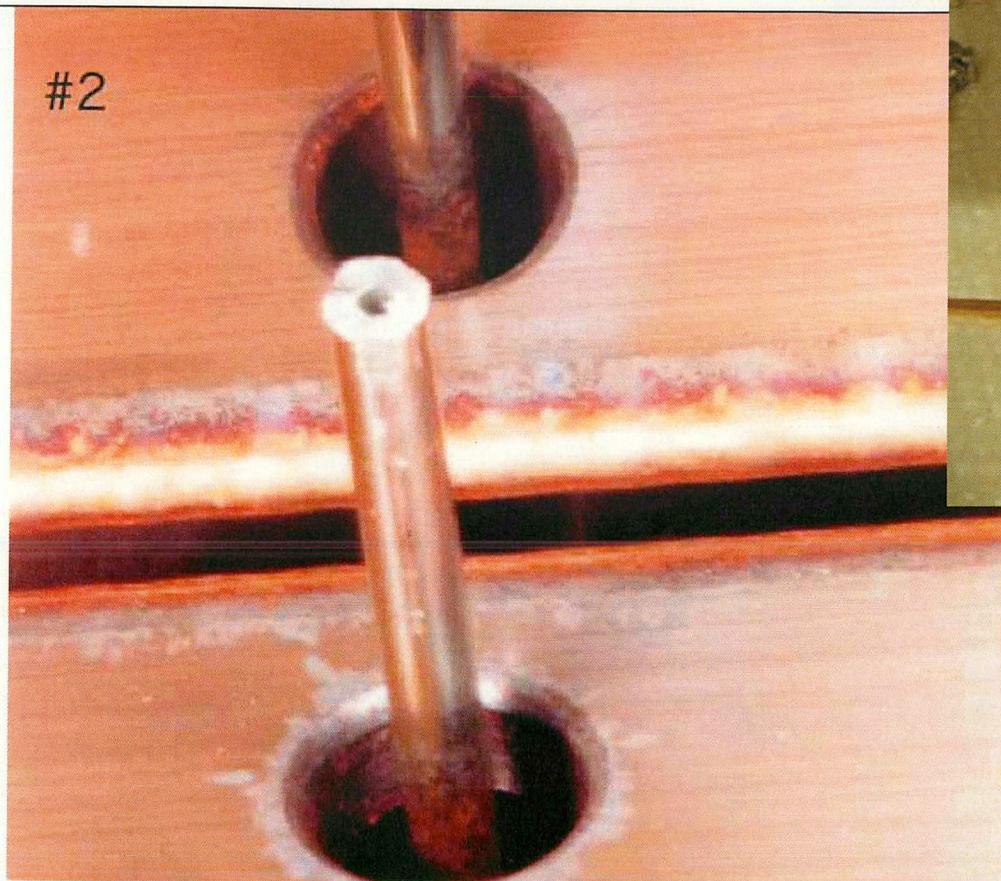
1500mm(中央部)近辺に  
粒状の突起物が多い

放電によってでき  
たものだろう

注 作業時についた傷

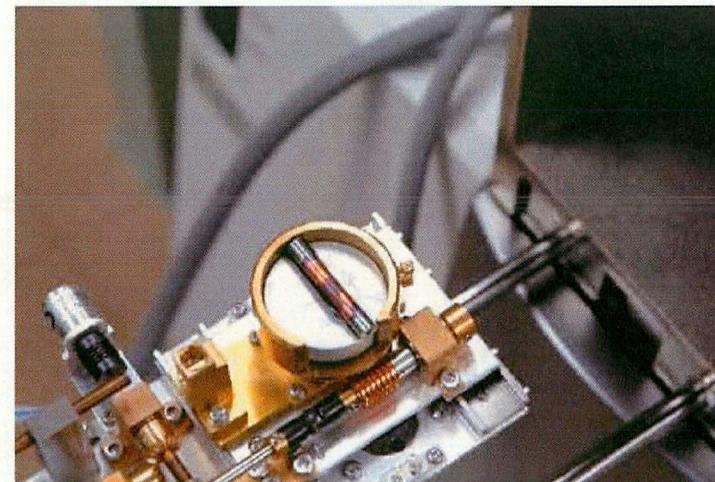
# PISL部

穴、ロッドともに変色が見られる



# PISLロッドの拡大観察

KEYENCE VE-8800 電子顕微鏡(SEM)



# PISL部拡大観察の結果

1000倍比較

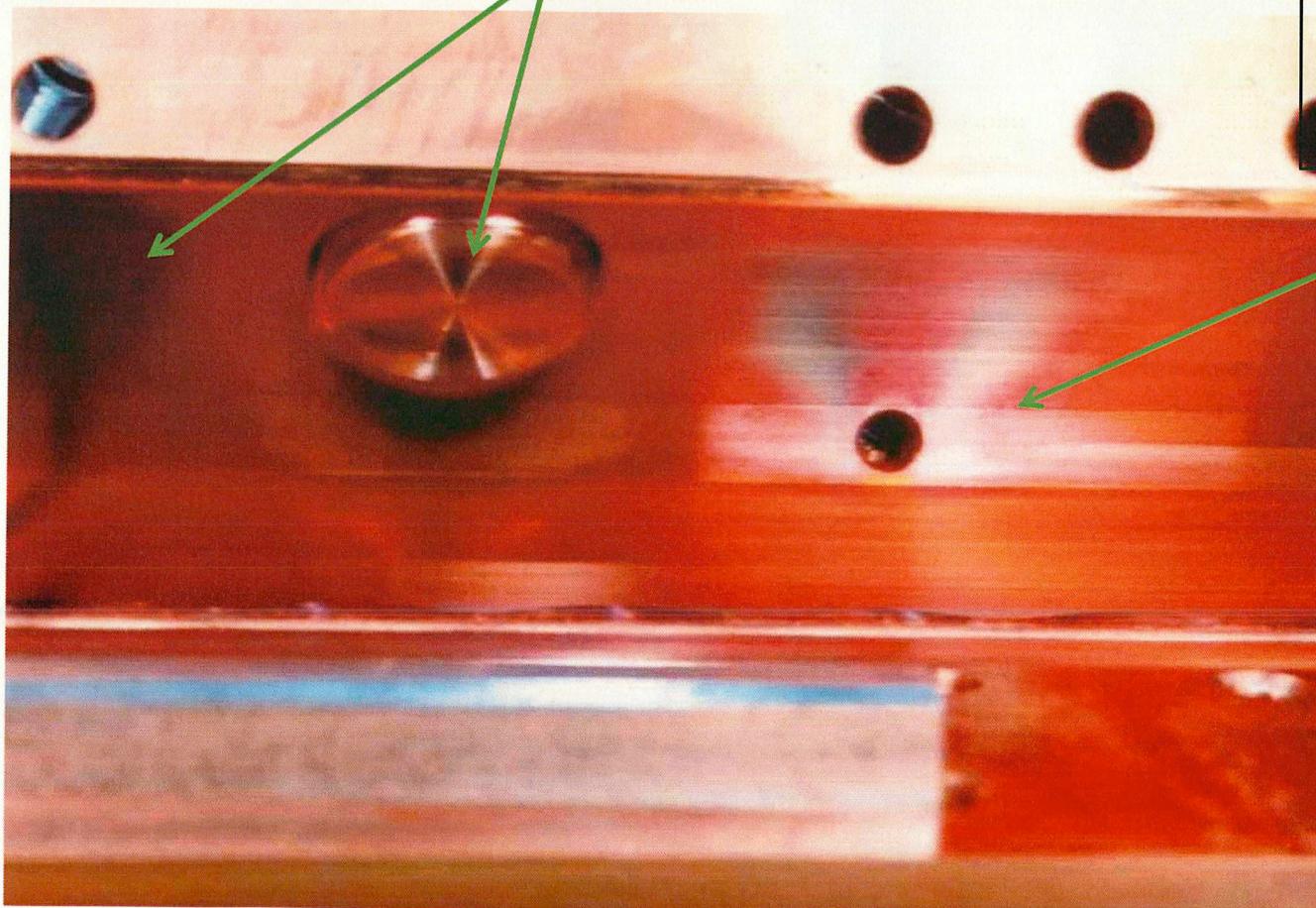


PISL穴の外側(左)には縦筋(加工跡?)とメッキの破れ(?)の穴、  
PISL穴の内側(右)には放電による肌荒れが見られる

# タンク壁面の観察

チューナ先端や周辺  
の黒い変色

PISLロッドの穴付近  
に白い変色  
(マルチパクタリング  
によるもの?)



## 観察結果

ベーン先端の筋、変色、突起

タンク・チューナー一部の変色

PISLロッド・穴の変色、肌荒れ

分解はかなり難しい

RF-真空の二重構造の複雑さ

PISLロッドの取り付けの複雑さ：今回はロッドを切断

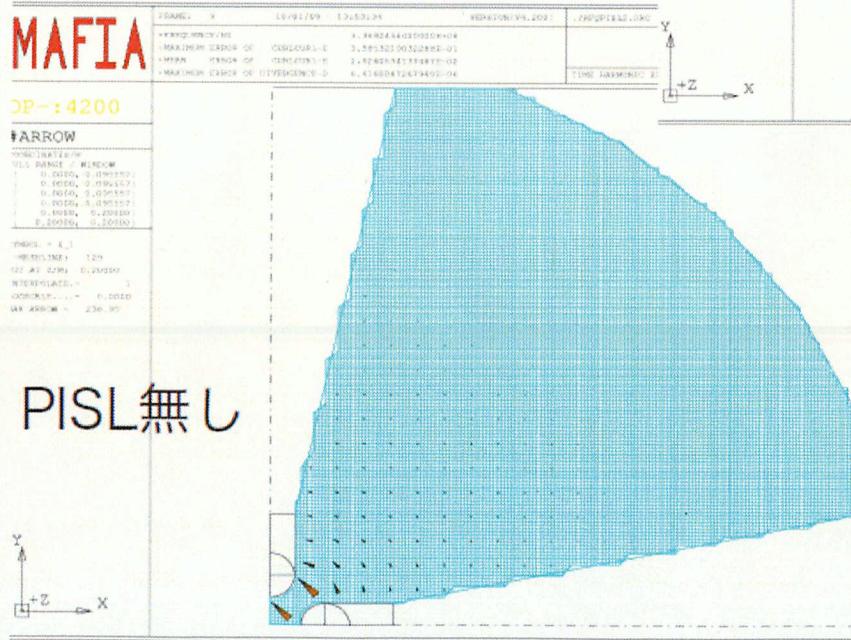
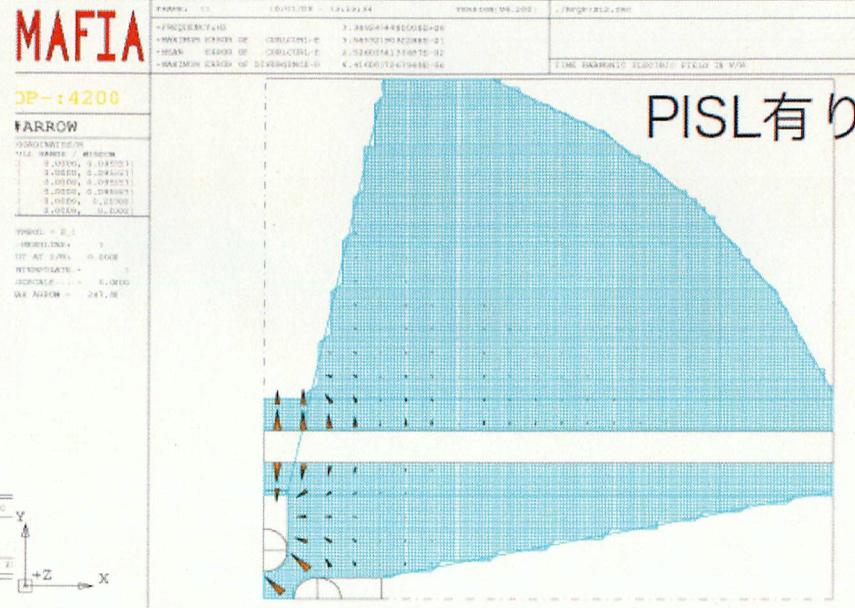
→ **実機の分解はリスクが高いので避ける**

**今回の観察でかなりの知見が得られた**

# 電磁場の評価 (tentative)

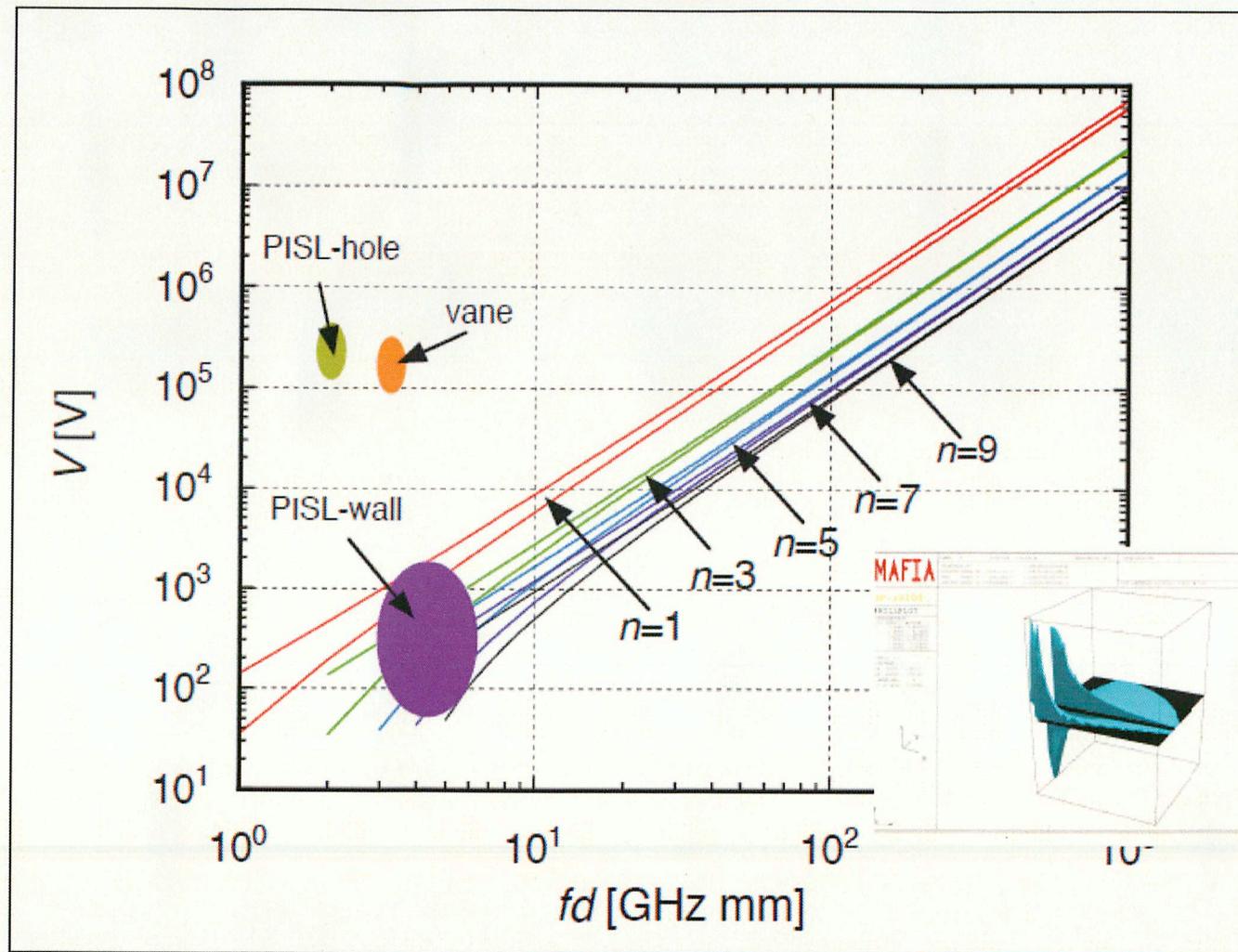


“TE210”モード  
( $d=2m$ , 両端磁氣的短絡)



PISLの穴・ロッドの  
電場強度は、ベーン  
先端の6-7割と比較  
的高い

# マルチパクタリングの評価



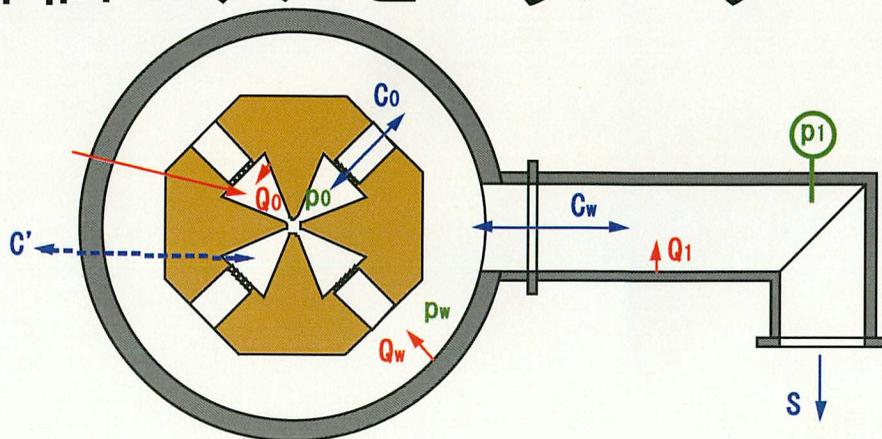
評価結果:

ベーン先端、PISLロッドー 穴の間: 放電

PISLロッドー 壁間: マルチパクタリング

## 評価モデルとパラメータ

KEK加速器  
堀氏



$$Q_0 + Q_w = q_{Cu} * A_{Cu} + q_{SS} * A_{SS}$$

$$A_{Cu} \sim 9.2 \text{ m}^2$$

$$A_{SS} \sim 13.8 \text{ m}^2$$

$$C_M = C_{Air} * SQR (M/MAir)$$

$$SH2 = 2.5 * SN2 \text{ @SIP}$$

$$PH2 \sim 2 * PBAG$$

$$D = 250, L=300$$

$$C_w = 3000 \times 2 \text{ L/s}$$

$$S = 0.800 + 0.500 \times 2 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$V(dp/dt) = q \rightarrow 0$$

$$Q_0 + C_{opw} = C_{op0}$$

$$Q_w + C_{op0} + C_{wp1} = C_{opw} + C_{wpw}$$

$$Q_1 + C_{wpw} = C_{wp1} + S p_1$$

$$p_0 = Q_0 / S_0$$

$$= Q_0 / C_0 + p_w$$

$$= Q_0 (1/C_0 + 1/C_w) + Q_w / C_w + p_1$$

$$p_1 = (Q_0 + Q_w + Q_1) / S$$

$$1/S_0 = 1/C_0 + 1/C_w + 1/S$$

$$1/S_w = 1/C_w + 1/S$$

$$1.5e-6 \text{ Pa @GV-close}$$

$$\rightarrow 3.0e-6 \text{ Pa (H2)}$$

$$7.3e-6 \text{ Pa @GV-open}$$

$$\rightarrow 1.46e-5 \text{ Pa (H2)}$$

$$Q_{H2} = 5Q_{N2} = 1.35e-5 \text{ [m}^3/\text{s]} \text{ @GV-close}$$

$$= 6.57e-5 \text{ [m}^3/\text{s]} \text{ @GV-open}$$

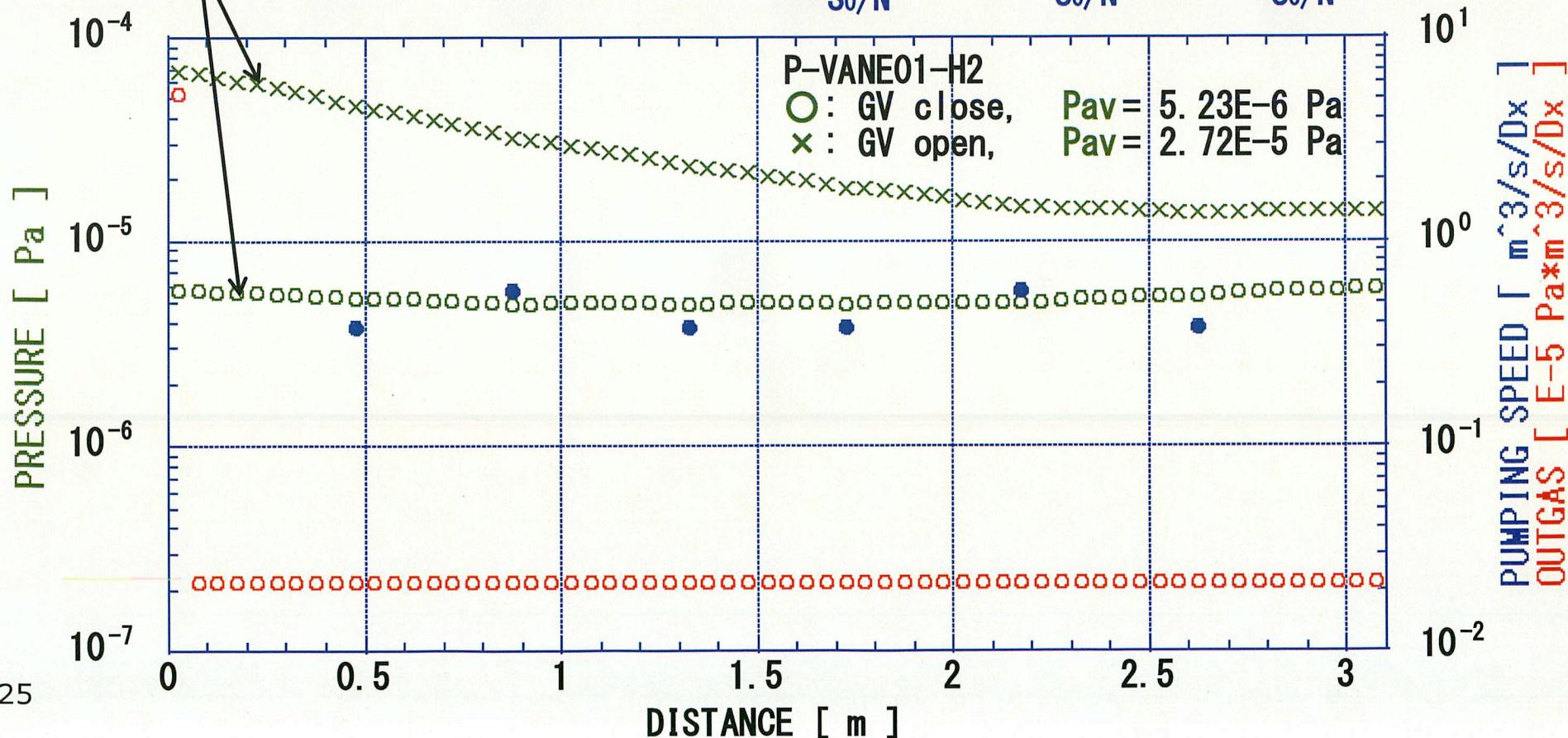
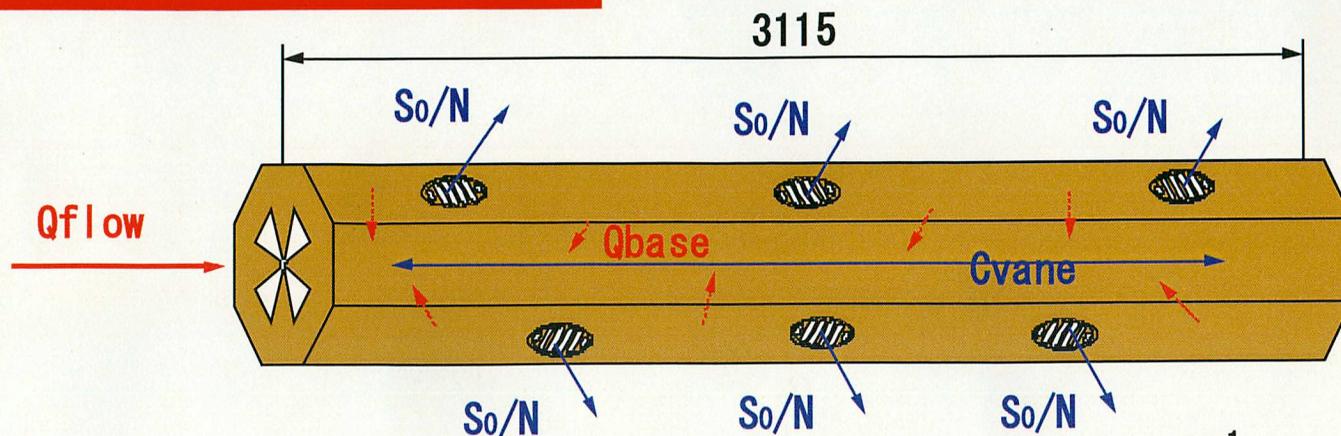
$$q_{av(N2eq.)} = (Q_0 + Q_w) / (A_{Cu} + A_{SS})$$

$$\sim 1.2e-7 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$$

$$S_0(Air) \sim 50 \times 14 \text{ L/s}$$

# 真空度の評価結果

上流のGVを開くと、  
イオン源からのガス  
流入で上流部の圧力  
が1桁上がる



# 今後の方針



目標:頑丈なバックアップ機的设计・製作、スタンバイ

主な検討内容 (【 】内は現時点でのベースライン)

- 電場強度の設定 (長さに相反する要素)
- 構造:真空1重 or 2重、軸方向一体 or 分割【1重、軸方向分割】
- 材料、切削方法、表面処理方法【無酸素銅、HIP、ケロシン系切削油、超純水高圧洗浄】
- 接合方法:ボルト締め or 金属接合
- PISLの是非
- 必要な要素技術開発

工程

来年度いっぱいでの製作、再来年度にコンディショニング・実戦配備可能を当面の目標

現在のRFQを少なくとも再来年までは大事に使わざるを得ない

無理しない条件での運転  
必要に応じたコンディショニング、ダメージを与えない取り扱い

バックアップ機の設計、製作を早急に行う

安定な運転を目指す  
原因調査と設計への反映  
製作  
RFコンディショニングまで行ってスタンバイ:テストスタンドを含めた整備計画