

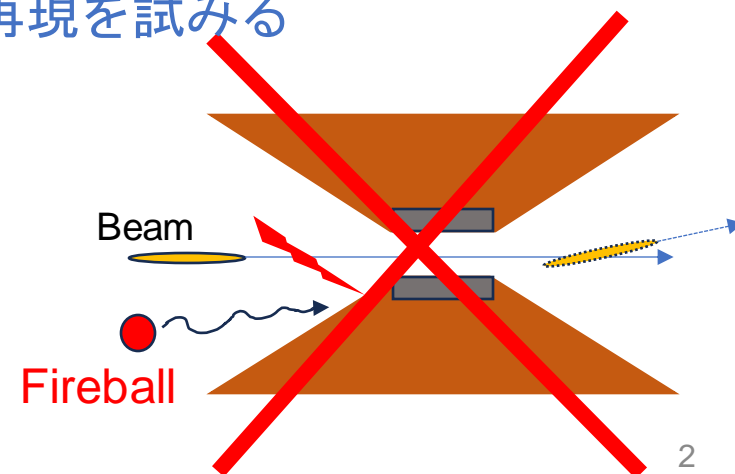
加速空洞ブレークダウン電流の観測実験 及びPICシミュレーションとの比較

山口孝明、阿部哲郎、小林鉄也
(KEK、加速器研究施設)

はじめに

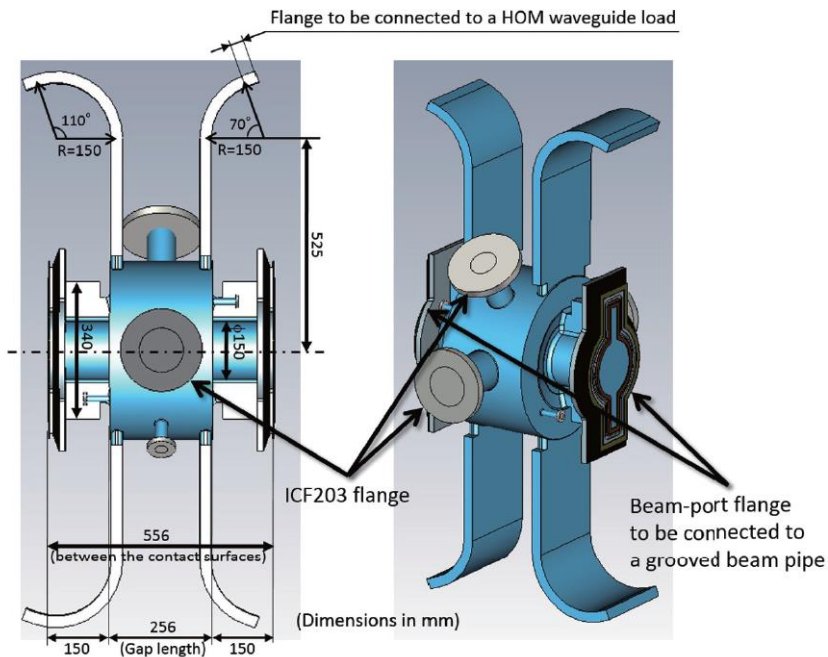
- 現代の加速構造(静電加速・高周波加速)における加速勾配の限界: **真空ブレークダウン現象**
 - ✓ 物理現象として非常に複雑、領域横断的: 分子動力学、熱流体力学、プラズマ物理...
 - 統一的な現象の理解には至っていない
- SuperKEKB RFグループでは、**ブレークダウン現象の直接観測実験**を行っている
 - ✓ 大電力試験中の空洞内をTVカメラでモニタし、ブレークダウンの観測
 - **高温の火の玉 (fireball)** がブレークダウンの引き金に
- 今回、Fireball起因ブレークダウンのより詳細な実験・シミュレーションを実施
 - ✓ 測定セットアップを変更 → **放電で生じる電子の電流 (ブレークダウン電流)** を測定
 - ✓ CST Particle-in-cell (PIC) solverを用いた**シミュレーションで実験の再現を試みる**
- 詳細測定の動機: SuperKEKB加速器での原因不明の突発的ビームロス
 - ✓ Fireballによる放電がビームコリメータで発生してビームロス?
 - 2024年5月以降のビームスタディで別の原因であることが判明*

* H. Ikeda, FRP023



これまでのfireball起因ブレークダウンの観測

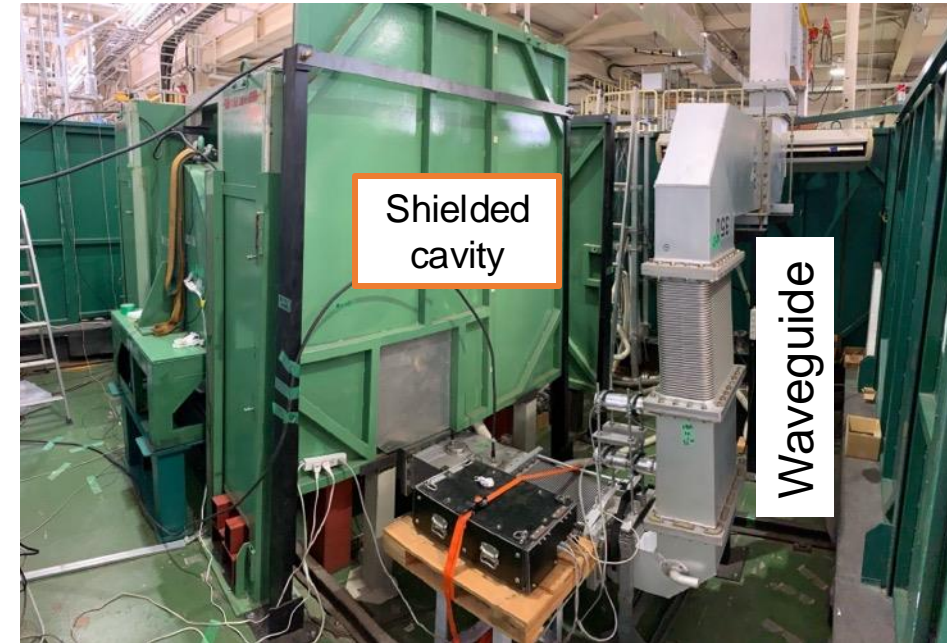
- SuperKEKB陽電子ダンピングリング用加速空洞を使ったブレークダウン観測実験
 - 常伝導
 - RF周波数: 508.9 MHz (CW)
 - RF電圧: 0.8 MV
 - 壁損失電力: 140 kW



(a) Conceptual diagram of the main body of the DR cavity (single cell). The blue region indicates the vacuum. The gap length of this cavity is 256 mm.



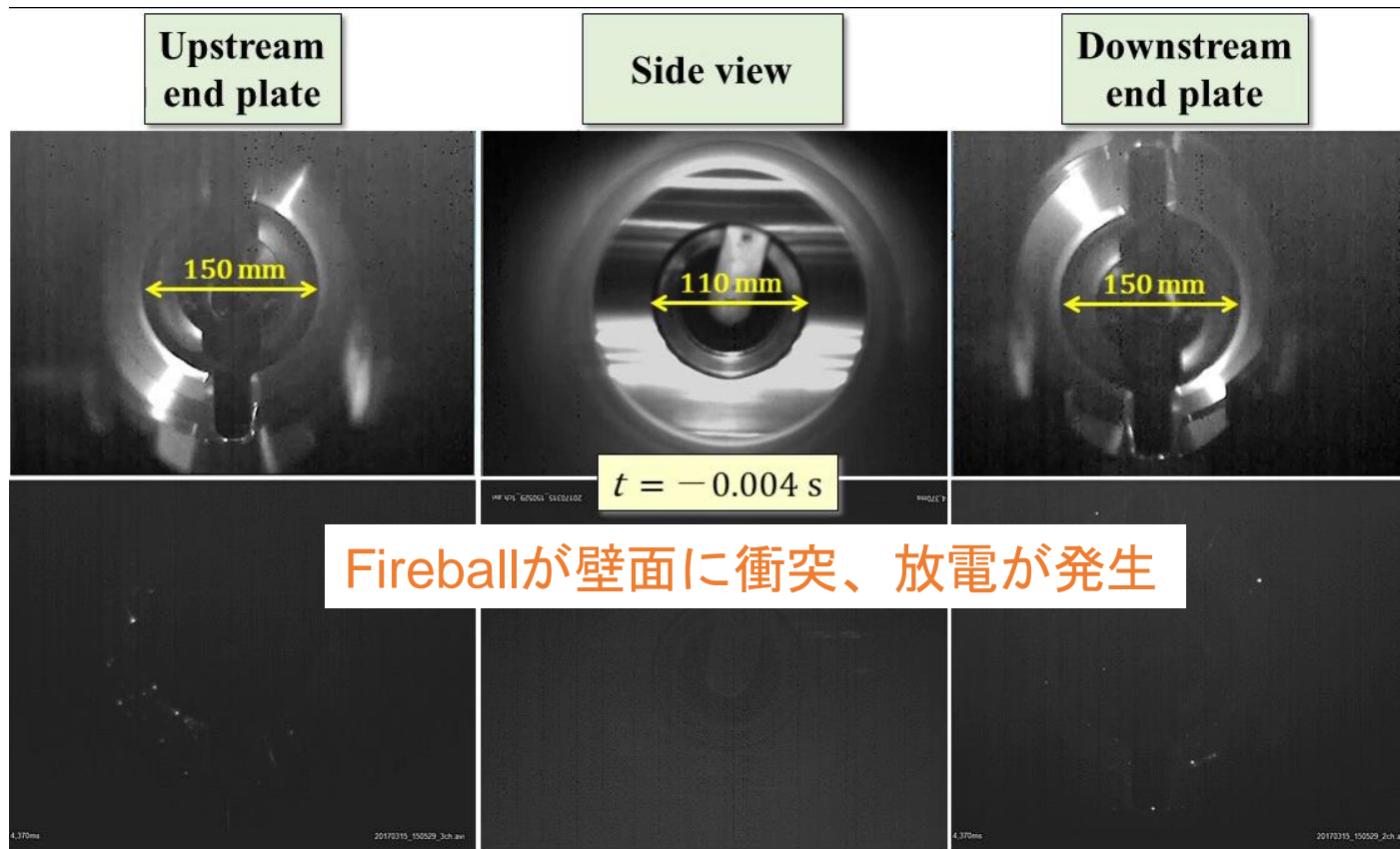
SuperKEKB陽電子ダンピングリング用
508.9 MHz加速空洞



大電力テストスタンド

これまでのFireball起因breakdownの観測

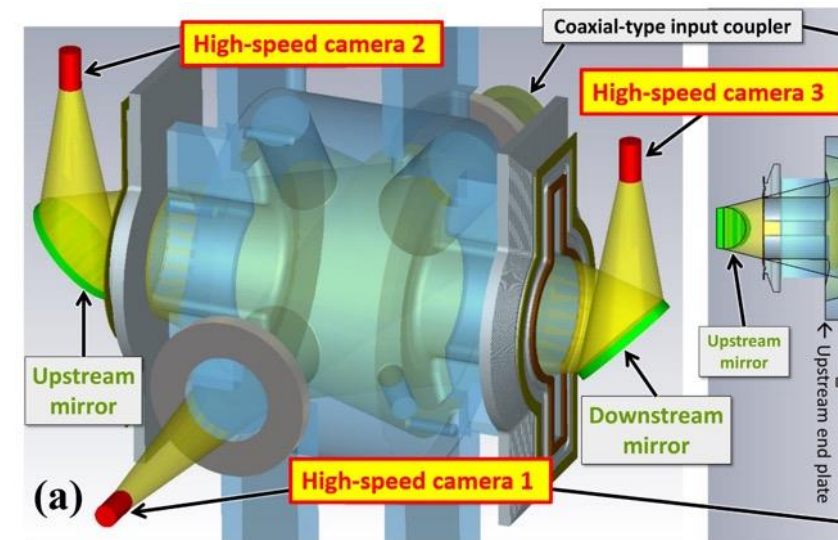
- ・ ハイスピードカメラでの観測



509 MHz cavity with a cavity gap voltage: 0.88 MV (= accelerating gradient: 3.4 MV/m)

Recorded by Tetsuo ABE (KEK)

Breakdown直前の空洞内の映像*
(RF電圧0.88 MVで運転中)

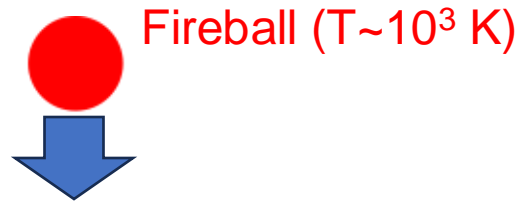


* T. Abe, in Presentation of Workshop on Dust Charging and Beam-Dust Interaction in Particle Accelerators, CERN, June 13, 2023.
<https://indico.cern.ch/event/1272104/contributions/5348243/>

Fireballとは

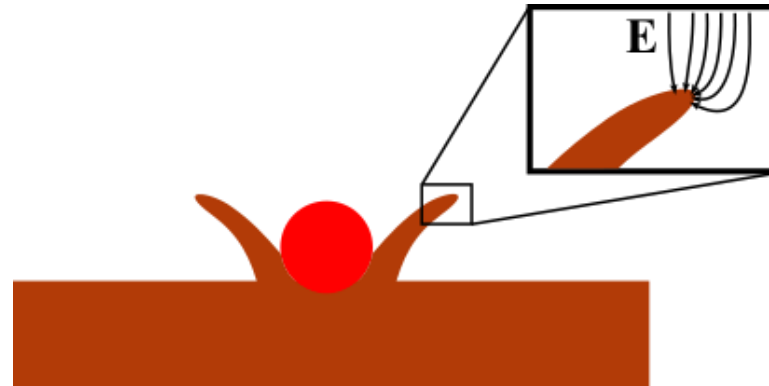
今までの実験で分かったこと:

- 粒径: $\sim 10\text{--}100\ \mu\text{m}$
- 温度: $\sim 1000\ \text{K}$
- 構成物質: 銅よりも高融点な物質(C(graphite), Mo, Ta, W, ...)



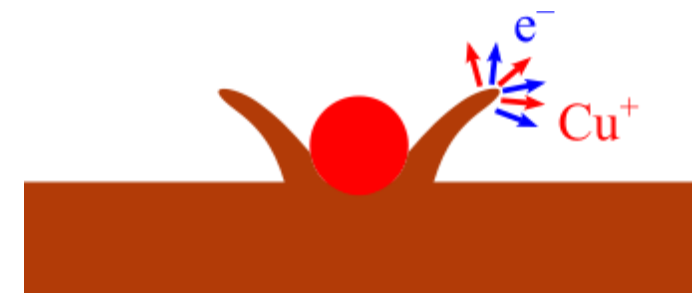
空洞の銅壁面($T \sim 300\ \text{K}$)

- 銅がプラズマ化し始める温度 $\sim 10^4\ \text{K}$
- fireballの熱だけではプラズマ化には至らない



- Fireball衝突時に局所的に電場が集中?
- 局所的発熱で銅がプラズマ化?

- 放電で生じる電荷量は?
- PICシミュレーションで現象を再現できるか?



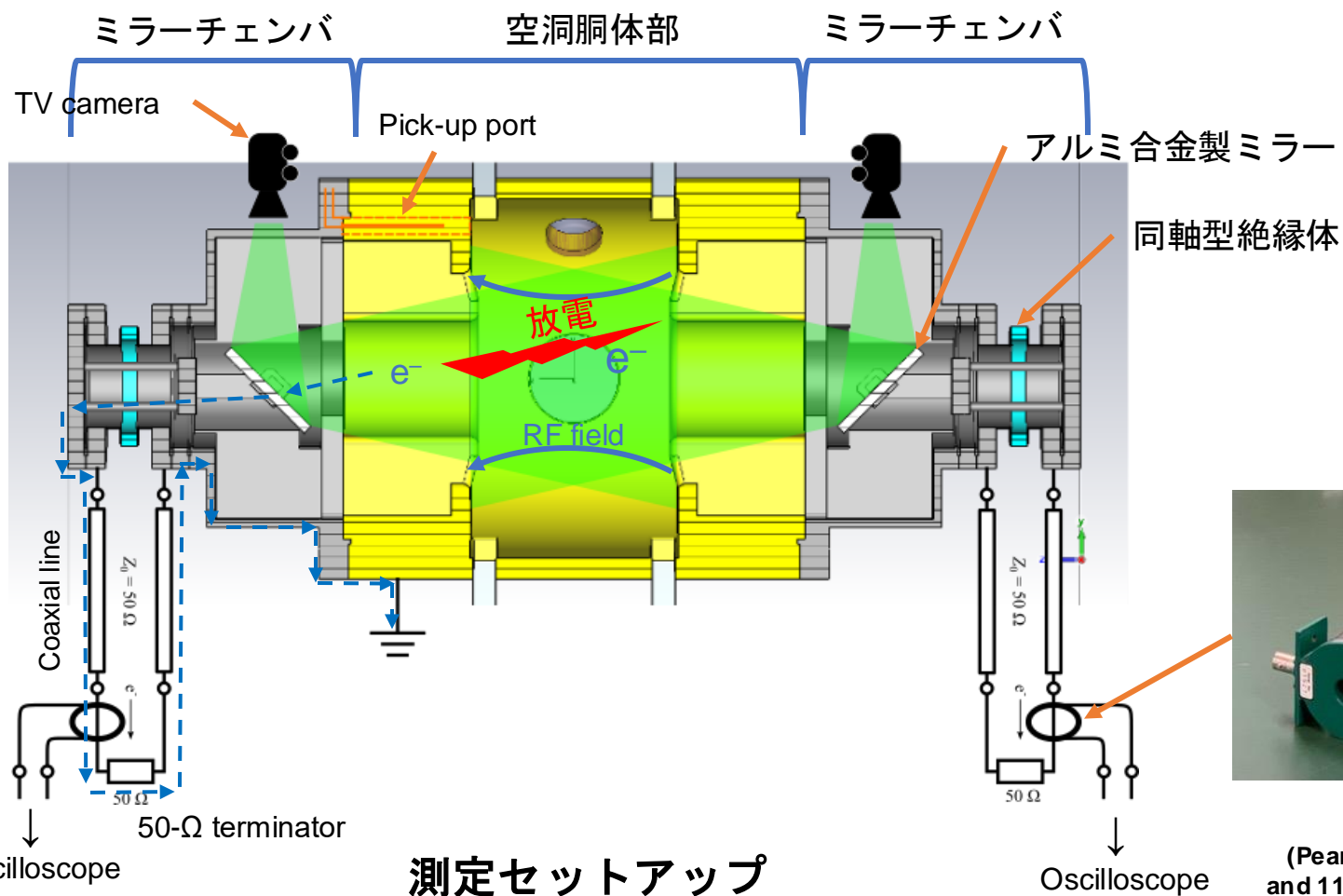
- 放電の発生

実験

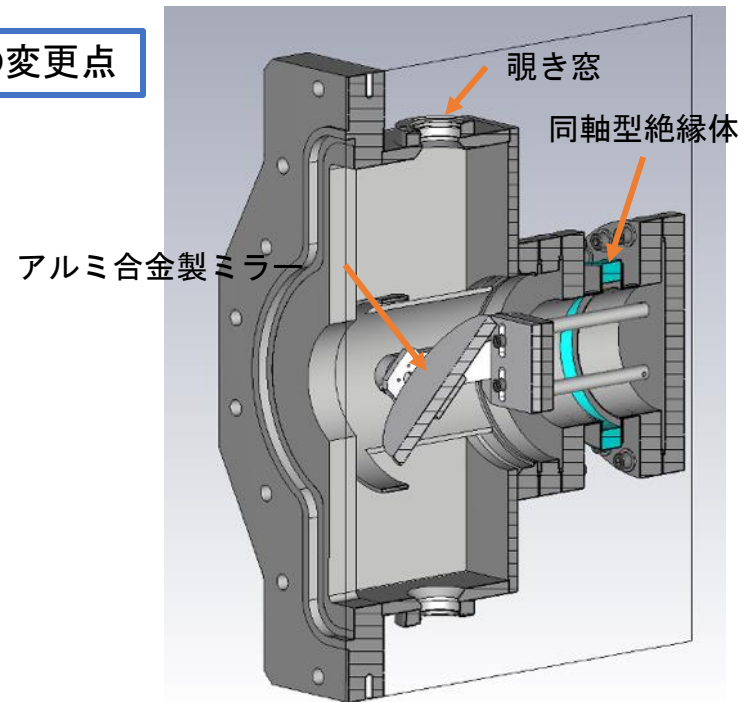
測定セットアップ

- ビームポートにアルミ合金製ミラーを設置
→ 大電力試験中の空洞内をモニタ、放電箇所の特定制
- 同軸型の絶縁体を使って、ミラーを空洞側から絶縁 ← 以前の測定セットアップからの変更点
→ 電流測定回路により、ミラーまで来た電子を測定

以前の測定セットアップからの変更点



測定セットアップ



ミラーチェンバ



電流測定器
(Pearson Electronics, Model 411 and 110, Bandwidth: 1 Hz - 20 MHz)

実験結果 (信号)

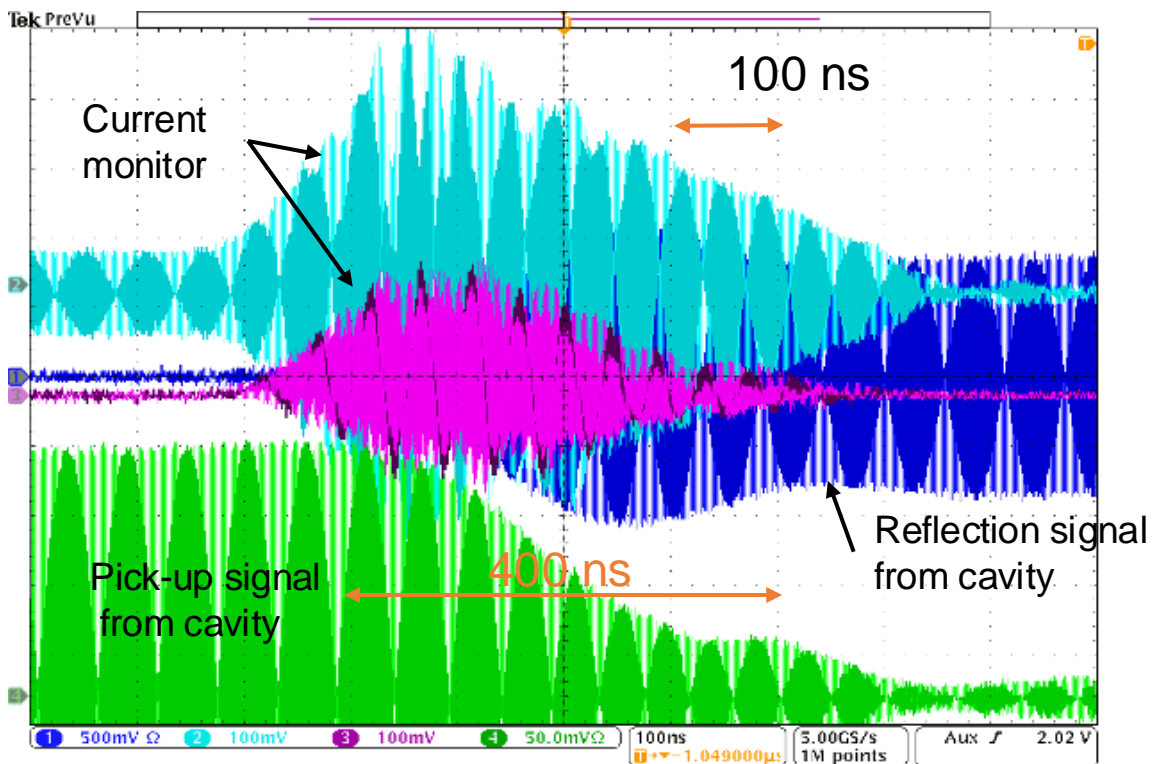
• 昨年10-12月にかけて大電力試験を実施、計18回のbreakdown事象の観測に成功

ミラーに衝突した電子の電流を測定することに成功

Breakdownが発生すると...

- ✓ 反射interlockまたは入力カップラーのarc interlockが働き、RF down
- ✓ Pick-up信号(=空洞からのRF信号)が空洞の時定数(= filling time ~8 μ s)よりも10倍以上速く減衰(放電現象がRFエネルギーを吸収)
- ✓ Pick-up信号の減衰と同期して電流測定器から大きな信号

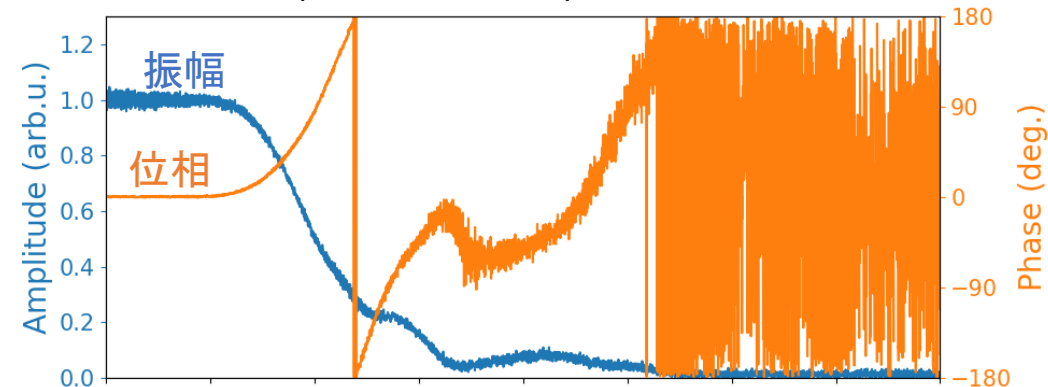
- ✓ Pick-up信号の振幅・位相を計算
- ✓ 電流測定器の信号からdigital LPF($f_c=100$ MHz)で高周波成分を除く



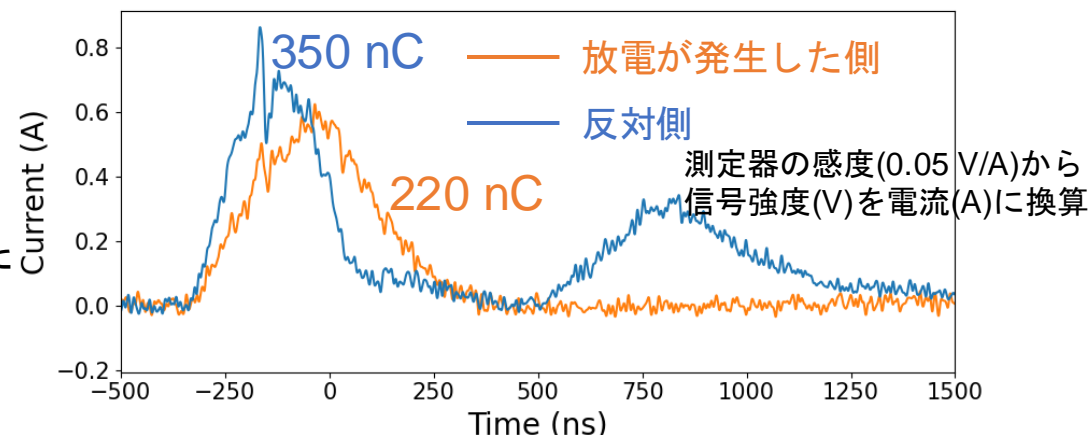
Breakdown発生前後の信号(Breakdown #13)
(Sampling rate: 5 GHz)

29 11月 2023
17:21:22

Pick-up信号

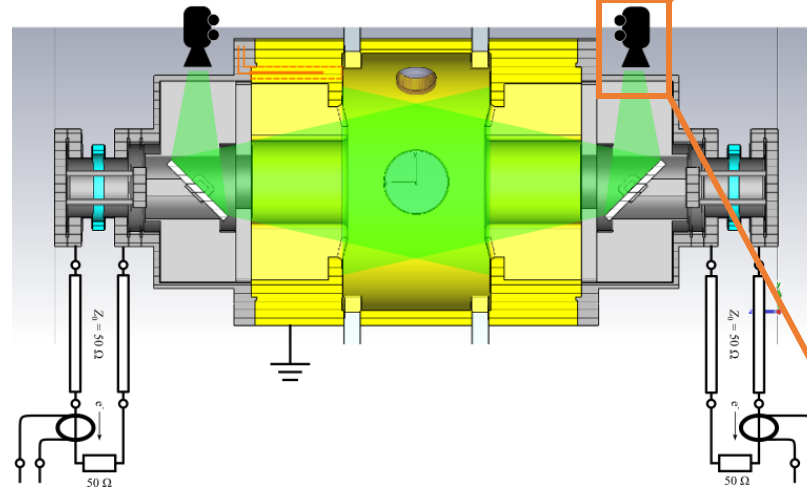


電流測定器
(ミラーに衝突した
電子の電流)



Pick-up信号と電流測定器の解析

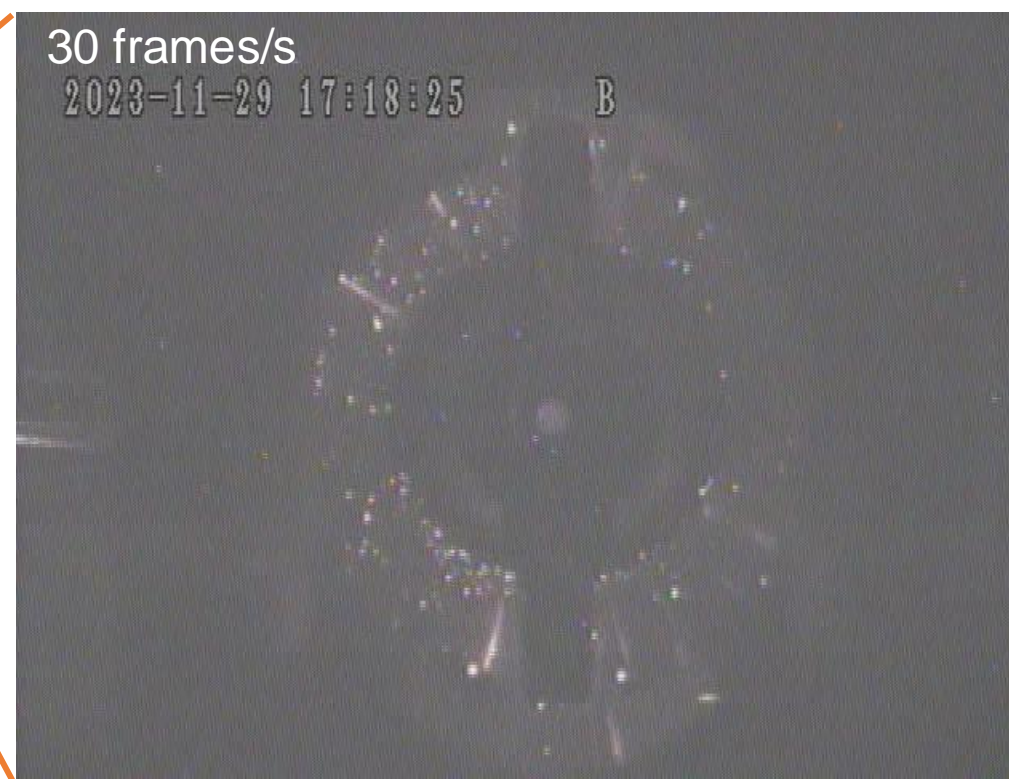
実験結果 (TVカメラ)



30 frames/s

2023-11-29 17:18:25

B



Breakdown前後のカメラ映像(Breakdown #13)
(上流側を見るカメラ)

- 大電力運転中では常に複数の輝点
- RF down直前のフレームに大きな輝点=放電箇所



放電前

輝点が発生

RF down後

他の測定例との比較

- 異なる端板（上流・下流）で放電が発生した例を比較

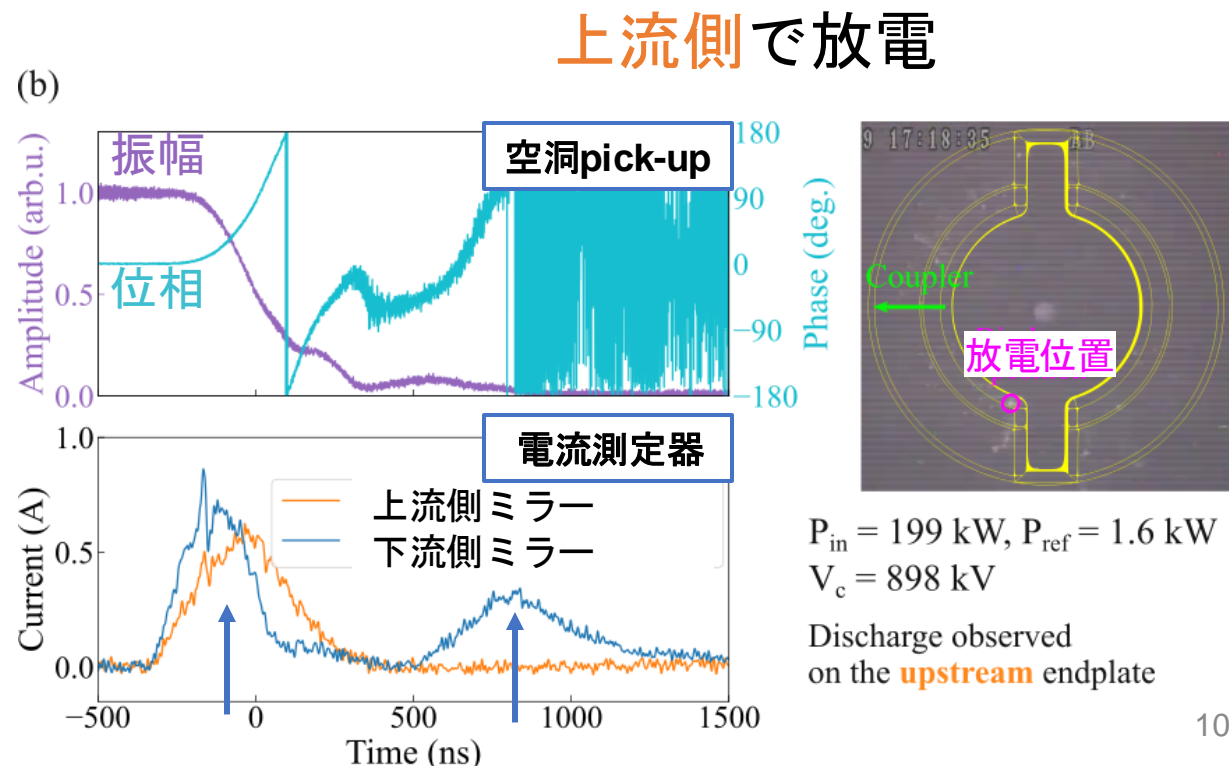
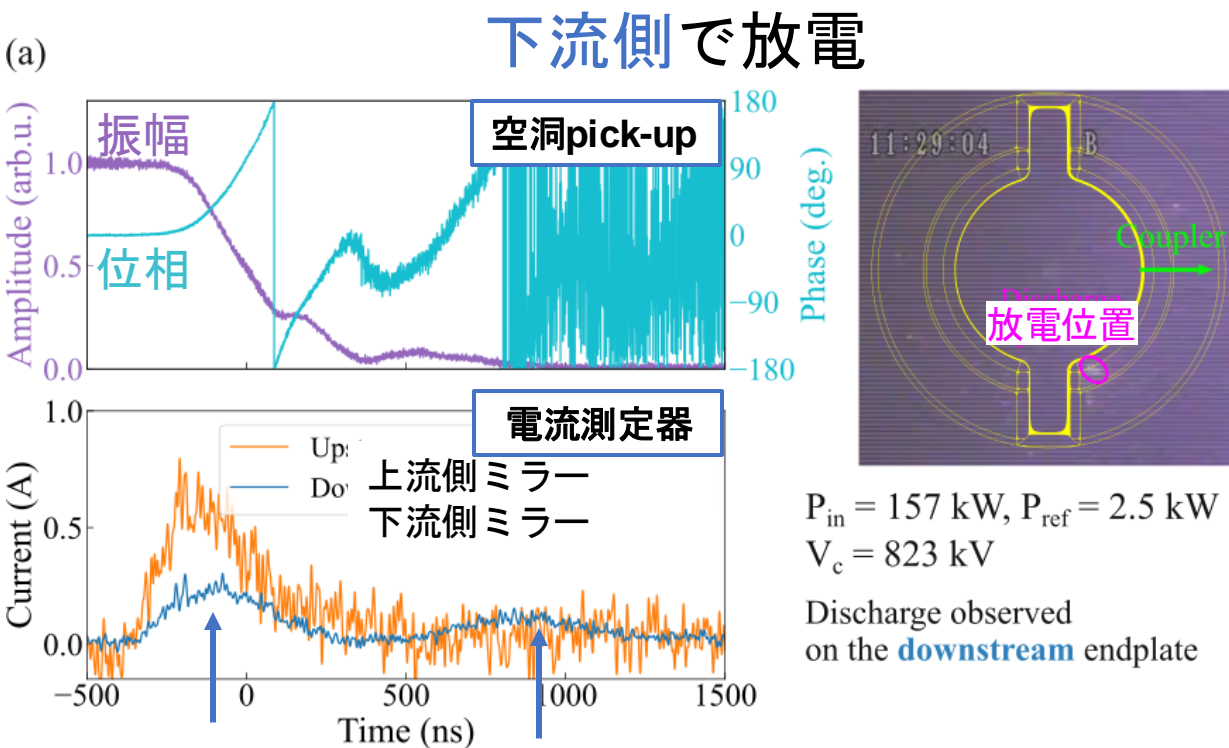
✓ Pick-up信号の減衰、位相回転の様子は両者とも同様

✓ どちら例でも下流側電流測定器の信号が2山に見える

□ その他の測定例も同様

□ 電流測定器を上流・下流で入れ替えても変わらない

ミラーまで到達する電子は全放出電子のうちごく一部
→ シミュレーションで放出された電子の合計を推定



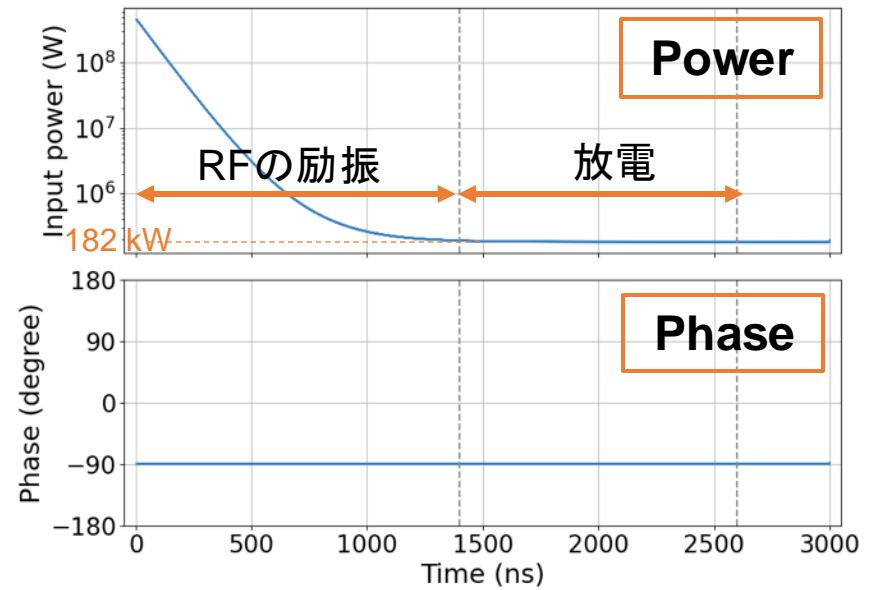
シミュレーション

Particle-in-cell simulation

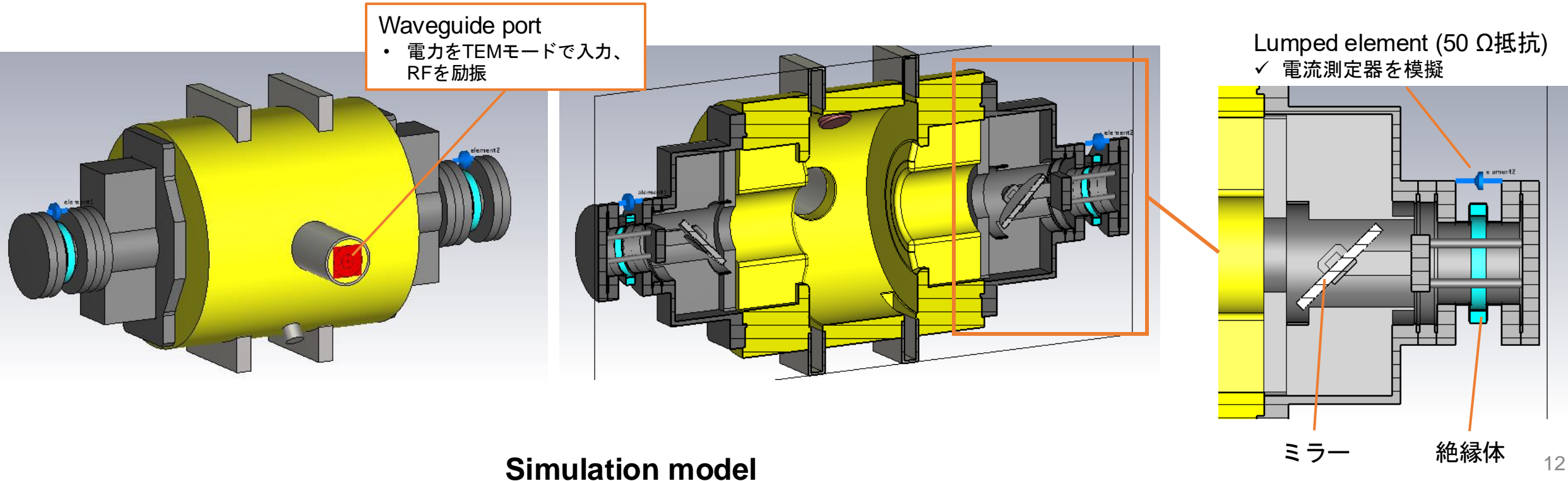
- CST Particle Studio, PIC solverを使用して、観測された放電現象を再現
→発生した全放電電流を推定

*シミュレーションではfireball自体は考慮せずに放電のみを考える

1. 入力カップラーから電力を入力、RF電圧(900 kV)を励振
2. 電子と銅イオンを空洞壁面（観測された発光点）から放出



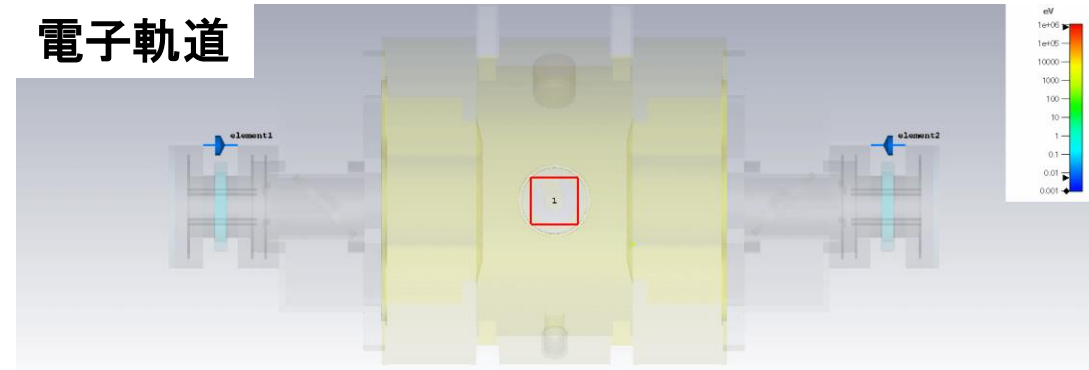
空洞への入力電力



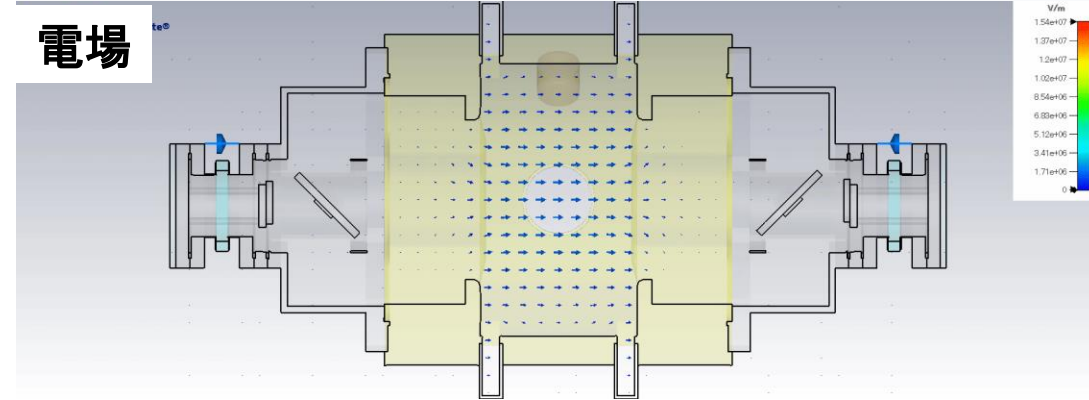
放出粒子の設定

- e^- , Cu^+ を等電荷、同時に放出
- Maxwell-Boltzmann速度分布で粒子の初期条件を与える:
 - 温度: $T_{\text{initial}} = 10^5 - 10^7 \text{ K}$ ($\sim 10 \text{ eV} - 1 \text{ keV}$)
 - 全電荷量: $0.1 - 1 \text{ mC}$

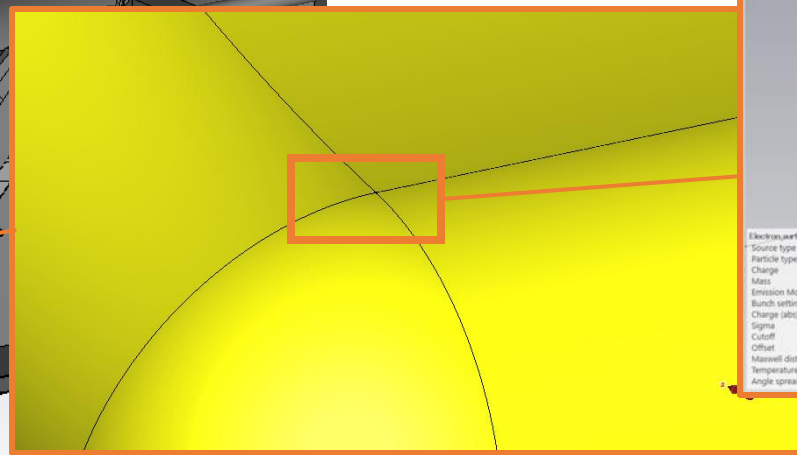
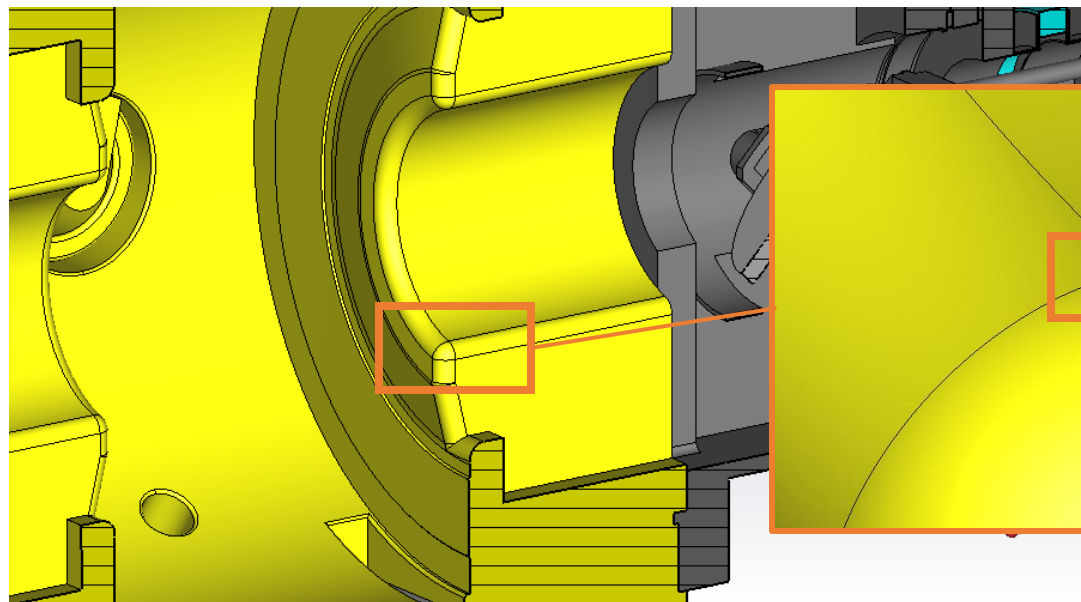
電子軌道



電場



放出箇所の表面電場: $\sim 10 \text{ MV/m}$



Emission surface

100 μm

| Electron surface, 1 | |
|----------------------|------------------|
| Source type | Area |
| Particle type | electron |
| Charge | -1.602177e-19 C |
| Mass | 9.1093829e-31 kg |
| Emission Model | Gauss |
| Bunch settings | |
| Charge (nC) | 1.065e-04 C |
| Sigma | 1.750e+02 ns |
| Cutoff | 5.100e+02 ns |
| Offset | 2.390e+03 ns |
| Maxwell distribution | |
| Temperature | 1000000.000 K |
| Angle spread | 85.000 ° |

Edit Particle Area Source

General: Name: OK Cancel

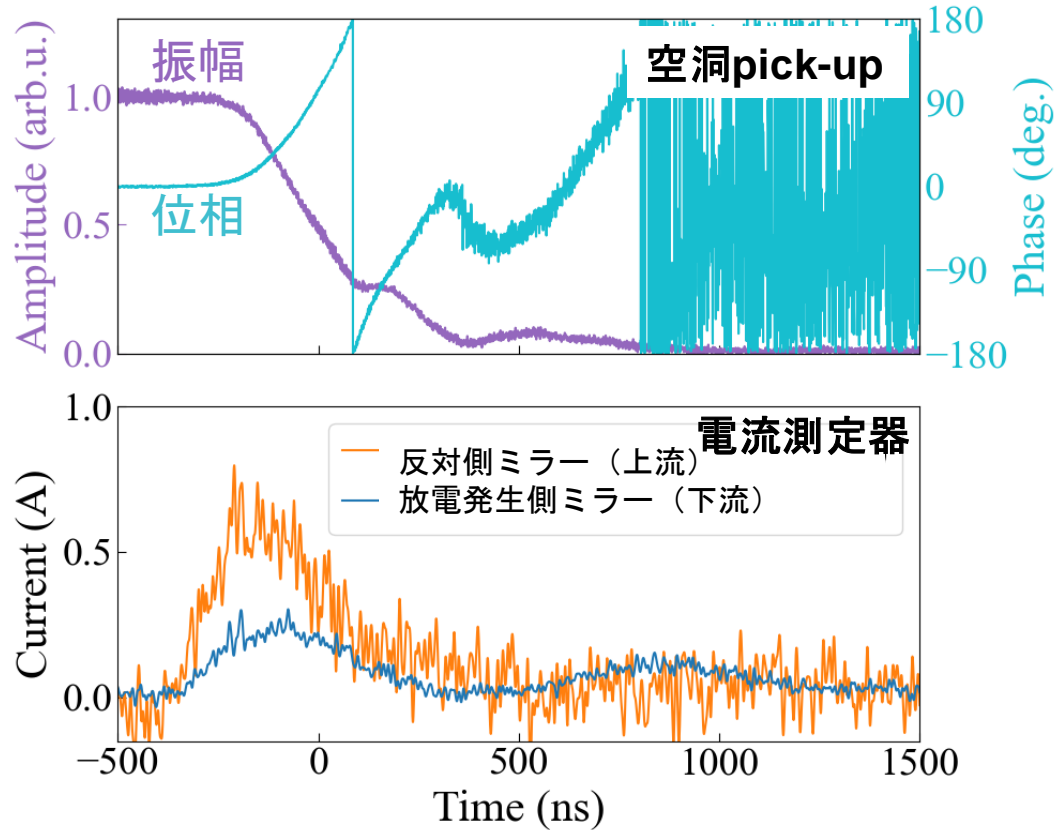
PIC emission model: Gauss Edit... Help

Emission density: Number of emission points: Adjust density to mesh

Particle properties: Particle type: Load...
Charge per particle: -1.60217653e-19 C
Mass per particle: 9.10938292e-31 kg

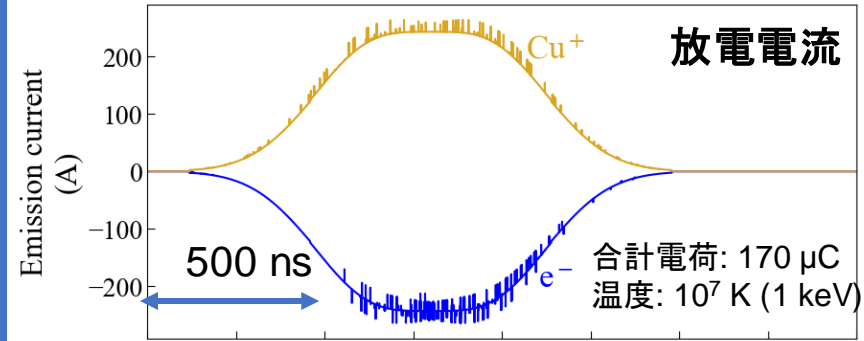
粒子の放出箇所

測定結果とシミュレーション結果の比較

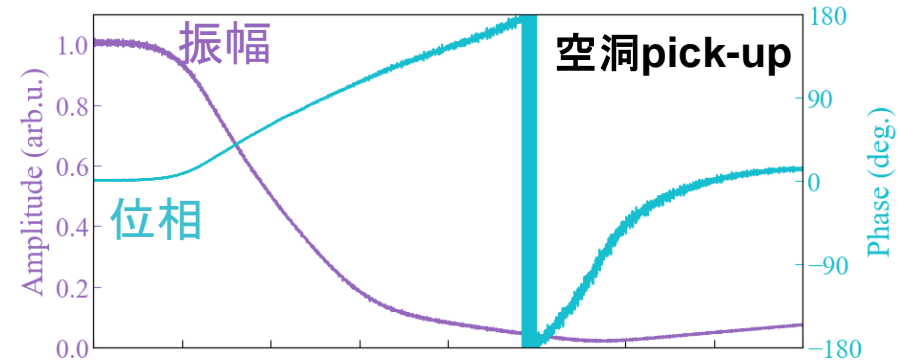


Measurement

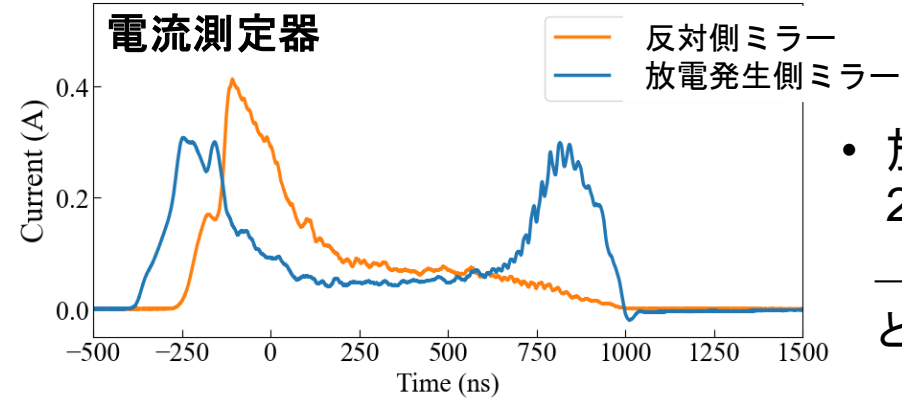
✓ 空洞pick-upの振幅やピーク電流等は大まかには一致



• 測定結果と合うよう
パラメータ調整



• 位相回転が遅い



• 放電発生側の信号が
2山になった
→測定結果と同じ現象
と言えるかは不明

Simulation

まとめ

- Fireball起因ブレークダウンで発生する**ブレークダウン電流の測定を実施**
 - ✓ 合計18回のブレークダウン現象を観測、**電流測定に成功**
 - ✓ Pick-up信号の振幅・位相の変化の詳細なデータを取得
- CST PIC solverで実験結果の再現を試みた
 - ✓ 実験結果に近い波形（電流測定器、pick-up信号）を再現することに成功
 - 実際に放出された電子は $\sim 100 \mu\text{C}$ （**ピーク電流 $\sim 100 \text{ A}$** ）か？
 - ✓ 電流測定器の信号が2山に見える現象については今後要検討

今後

実験

- テストスタンドのklystron電源(D01A)が故障等が原因で実験は中断
 - ✓ 復旧次第、実験を再開したい
 - ✓ 測定セットアップを改良: より帯域の広い電流測定器の導入、ハイパースペクトルカメラによるプラズマ初期温度の測定

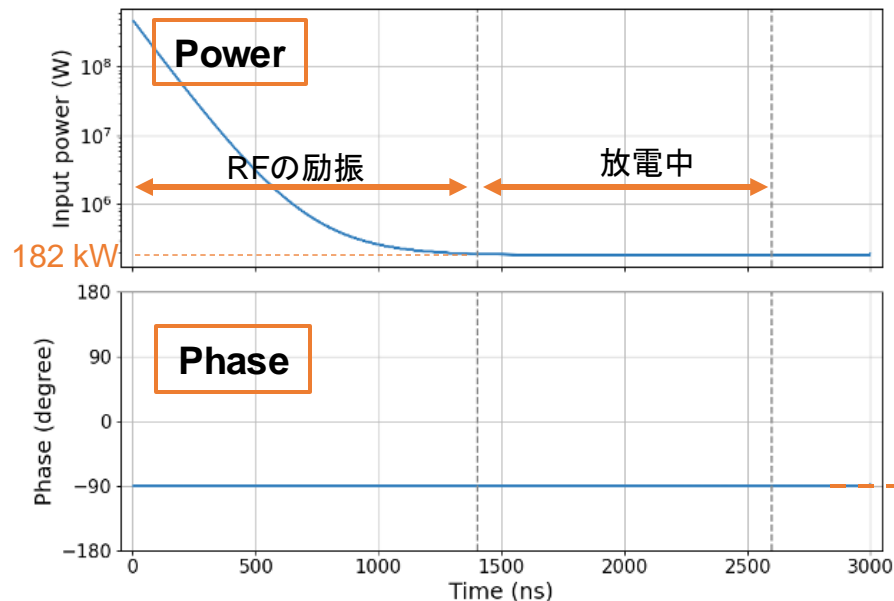
シミュレーション

- 初期パラメータ・放出電流のさらなる調整で実験により近い波形を再現したい

補足資料

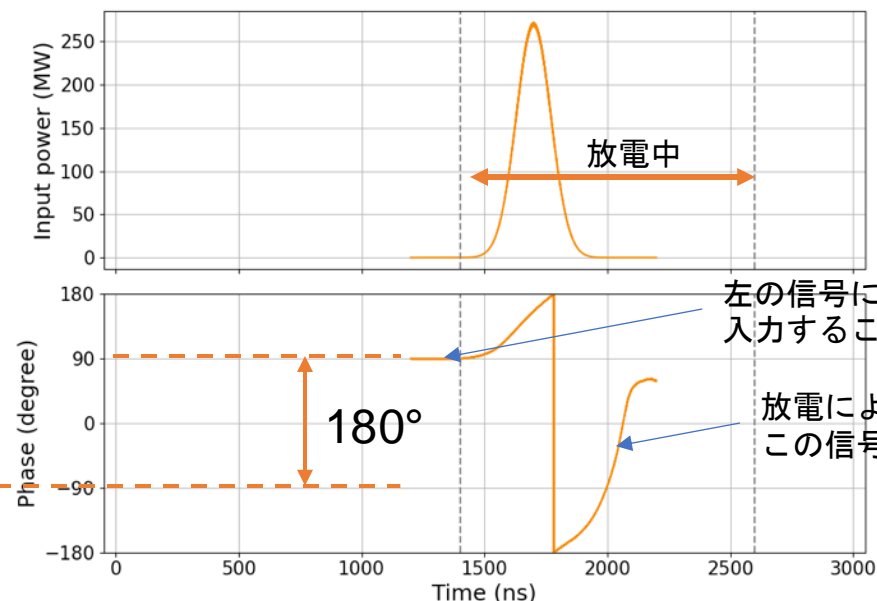
プラズマを作り出すエネルギー？

- CST PIC Solverは、エネルギー保存則を考慮した計算が可能
→ 粒子の加減速に伴う電磁場エネルギーの変化を計算可能
 - 但し、銅がプラズマ化する過程で消費されるエネルギーは考慮できない
✓ $T_{\text{initial}} = 10^7 \text{ K}$, $I_{\text{peak}} = 500 \text{ A}$, $\sigma_t = 330 \text{ ns}$ の場合、
(放出粒子の初期運動エネルギーの合計) $\sim 1 \text{ Joule}$ \sim (空洞の電磁場蓄積エネルギー)
- プラズマ化に使用されるエネルギーを、入力カップラーから引き抜くトリックを使う



RFの励振、RF電圧を一定に保つ入力電力

+



左の信号に対し、逆位相の信号を入力することで急速にRFを減衰

放電によりRF fieldの位相回転に同期して、この信号の位相も回転させる

RF電圧を減衰させる信号