

加速空洞ブレークダウン電流の観測実験および PIC シミュレーションとの比較 EXPERIMENTAL STUDY OF THE BREAKDOWN CURRENT IN A NORMAL-CONDUCTING ACCELERATING CAVITY AND COMPARISON WITH PIC SIMULATION

山口孝明, 阿部哲郎, 小林鉄也

Takaaki Yamaguchi *, Tetsuo Abe, Tetsuya Kobayashi
High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

In high-gradient accelerating components from DC to X-band accelerating structures, the vacuum breakdowns limit the maximum accelerating voltage. We have studied the breakdown phenomena by using the high-power teststand of the 508.9-MHz accelerating cavity for the position damping ring of SuperKEKB. In the previous experiment, attaching mirror chambers to the beam ports of the accelerating cavity, the breakdowns were directly observed by television cameras. To investigate the detail of these phenomena, we updated the measurement setup to measure the breakdown current. At the same time, we conducted PIC simulation study to reproduce the measurement results. In this paper, we describe the experimental and simulational results.

1. はじめに

高電界を発生させる、静電加速器から X バンド加速管に至る多くの加速構造では、真空中のブレークダウン現象により最大の加速勾配が制限を受ける。ブレークダウン現象は、微視的スケールの現象から巨視的な現象に発展するという点や、分子動力学、プラズマ物理、熱流体力学、表面物理等の領域横断的な物理現象 (multi-physics) であるという点で非常に複雑な物理現象であるといえる。そのため、真空ブレークダウンや関連する放電現象については長年研究が行われているものの統一的な理解には未だ及んでいないのが現状である。

SuperKEKB RF グループでは、SuperKEKB 陽電子ダンプリング用 508.9 MHz 加速空洞 [1] の大電力テストスタンドを用いて、ブレークダウン現象の観測実験 [2, 3] を行っている。加速空洞のビームポートに、空洞内部を観測するためのミラーを搭載したチェンバ (ミラーチェンバ) を取り付け、これにより大電力試験中に発生するブレークダウンの様子をテレビカメラで直接観測することに成功した [3]。この実験で、高温の微粒子 (粒径 $\sim 10\text{--}100\ \mu\text{m}$) が空洞内を飛翔し、空洞壁面に衝突後ブレークダウンが発生する様子が確認された。この観測事実から本空洞では、高温微粒子 (我々は後に fireball と呼称する) がブレークダウン発生の主な引き金になっていることが明らかになった。

今回は、fireball を発生原因とするブレークダウン現象をより深く理解するために詳細な測定を行った。ブレークダウンによって発生する放電電流 (ブレークダウン電流) を測定できるよう、ミラーチェンバを改良し電流測定器を用いた測定セットアップを構築した。このセットアップで実験を行ったところ、真空ブレークダウンが発生したときに放電電流の信号を捉えることに成功した。

この実験と並行して、Particle-in-cell (PIC) シミュレーションによるブレークダウン実験の再現も試みた。測定結果とシミュレーション結果を比較することで、ブレー

クダウンで発生した電子の合計電荷量を推定した。

本研究の元々の研究動機は、電子陽電子衝突型加速器 SuperKEKB 加速器で近年問題となっている突発的ビーム損失事象 (Sudden Beam Loss) [4] に関連している。この現象の発生原因として、空洞内の fireball 起因ブレークダウンと同様の現象がビームコリメータで発生し、コリメータ表面で放電が発生、これがビームを強く蹴ることで速いビームロスが発生するという仮説 (fireball 仮説 [5]) が有力視されていた。我々はこの fireball 仮説の検証を主な目的として、fireball による空洞ブレークダウン現象の詳細測定を実施した。但し、2024 年 5 月以降

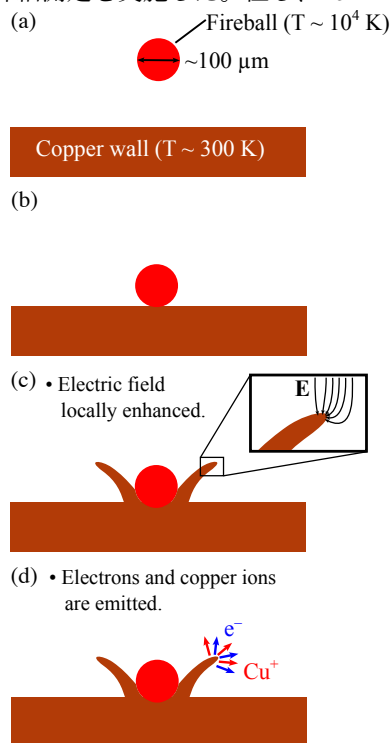


Figure 1: Schematic view of the fireball-triggered breakdown.

* yamaguc@post.kek.jp

に行われたビームスタディ [6] 等により、この仮説は否定されている。

本来の研究動機は失われたが、本研究で得られた結果は空洞ブレイクダウン現象の理解に大きく役立つ。本論文では、空洞ブレイクダウン実験と PIC シミュレーション、及びそれらの結果の比較検討について述べる。

2. FIREBALL 起因ブレイクダウン

Figure 1 に fireball 起因ブレイクダウンの模式図を示す。Figure 1(a) では、加速空洞の銅の壁面と粒径およそ 10–100 μm の fireball を示している。Fireball の構成物質は、銅よりも高い融点を持つグラファイト、モリブデン、タンタル、タングステン等が考えられる [3]。加速空洞の壁面は水冷されているため温度としては 300 K 程度に保たれている一方、fireball は加速電磁場に晒されているため、 ~ 1000 K と非常に高温の状態になっている。この fireball が Fig. 1(b) のように銅表面に衝突すると、何らかの理由で銅がプラズマ化して電子と銅イオンが飛散、放電が発生する。しかし、銅が電離し始める温度は $\sim 10^4$ K からであるため、fireball の熱だけではプラズマ化には至らない。そのためあくまで仮説ではあるが、Fig. 1(c) のように fireball の衝突で加速電磁場が局所的に集中するような形状が壁面に形成され、集中した電磁場による発熱で銅がプラズマ化、Fig. 1(d) のように放電が生ずるものと考えている。

3. 実験

3.1 実験セットアップ

今回の実験も以前の実験と同様に、SuperKEKB 陽電子ダンピングリング用 508.9-MHz 加速空洞（定在波）の大電力テストスタンド (Fig. 2) を用いて行った。加速空洞の大電力テストスタンドにおける測定セットアップを Fig. 3 に示す。図は空洞の断面を表示したもので中央が空洞胴体部である。両側のビームポートには、ミラーチェンバ [Fig. 2(b)] が搭載されている。このチェンバには、ビーム軸上にアルミ合金製ミラーが備わっており、ミラー上側の窓を通して空洞内部を観測できる設計となっている。大電力試験中は、ミラー上側の窓から覗くようにテレビカメラ (30 frames/s) を設置し、ブレイクダウン発生時の放電箇所の特定制を行った。

今回の実験の改良点として、ブレイクダウンにより生じる放電を測定するためのセットアップを構築した。まず、Fig. 2(b) のようにミラーチェンバに同軸型絶縁体を新たに導入しミラーを空洞胴体部から絶縁する構造とした。そして、ミラーと空洞胴体部の間を Fig. 3 のような電流測定回路で繋いだ。この回路は、同軸線路（特性インピーダンス 50 Ω ）の外導体と内導体をミラーと空洞胴体部側にそれぞれ接続し、50 Ω 無反射終端で終端したものである。終端側には Fig. 3 左下の電流測定器 (Pearson Electronics 社製 Model 411, 110) を取り付け、ブレイクダウン発生時の放電電流を測定した。使用した電流測定器の周波数帯域は 20 MHz である。

Figure 3 では、空洞の端板の片方から放電が発生した場合において、空洞内に放出された電子の流れを簡略化して青の破線で示した。放電で生じた電子は加速電場に

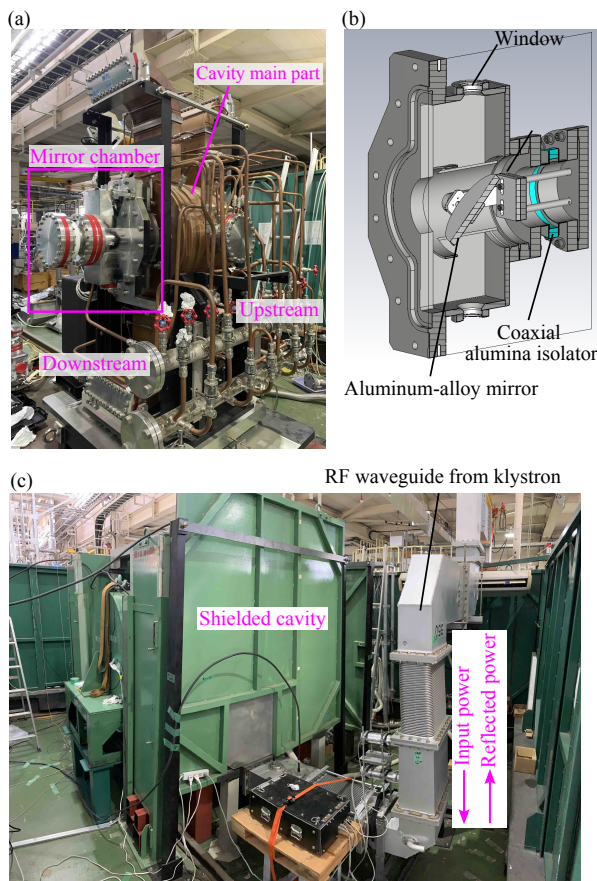


Figure 2: Accelerating cavity and high-power teststand used for the breakdown study. (a) 508.9-MHz accelerating cavity for the positron damping ring of the SuperKEKB, (b) mirror chamber, and (c) high-power teststand where the accelerating cavity was installed.

より加速され、一部は両側のミラーに衝突する。ミラーに衝突した電子は、測定回路を通して空洞胴体側へ流れる。そのため、ミラーに衝突した電子の電流を電流測定器で計測することが可能である。

実験では、電流測定器の信号と空洞関連の高周波信号をオシロスコープに入力し、RF interlock（主に空洞からの反射波レベル閾値）信号でトリガーを掛けた。空洞関連の信号として、空洞の pick-up 信号、クライストロン出力信号、空洞からの反射信号等を記録した。Pick-up 信号は空洞端板に取り付けている pick-up アンテナからの信号で、RF 電圧の相対値に相当する。

3.2 測定結果

前節のセットアップで加速空洞の大電力試験を行いブレイクダウンの観測を行った結果、計 18 回のブレイクダウン事象の観測に成功した。ブレイクダウン発生時の入力電力は約 100–200 kW（RF 加速電圧に換算して 680–920 kV に相当）であった。

放電が発生した瞬間におけるテレビカメラの画像の例を Fig. 3 左上に示す。この例では、上流側の端板で放電が観測された。放電が発生する瞬間の 1 フレームだけ強く光る点（図の丸で囲んだ場所）が現れるが、これを放電の発生箇所と仮定することができる。

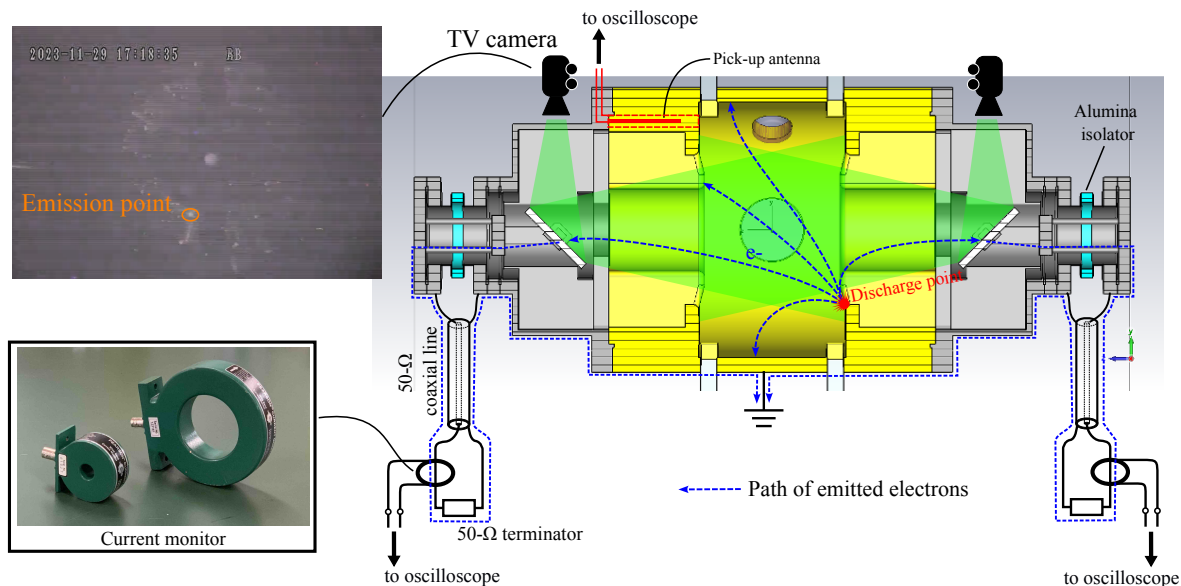


Figure 3: Measurement setup. The paths of emitted electrons are shown with blue dashed lines.

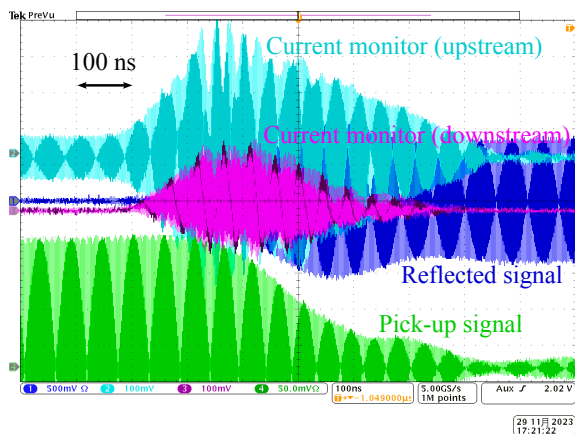


Figure 4: The oscilloscope snapshot for measured waveforms of RF pick-up and reflection signals and current monitor signals. The sampling rate was 5 GHz.

また Fig. 3 左上のブレイクダウン観測例で、オシロスコープで測定された RF pick-up 信号、反射信号、電流測定器の信号の snapshots を Fig. 4 に示す。信号のサンプリング周波数は 5 GHz である。

Figure 5 は、Fig. 4 の例を含む 2 つのブレイクダウン観測例で測定された pick-up 信号と電流測定器の信号の解析結果である (Fig. 5(b) が Fig. 4 と同じデータ)。Figures 5(a), (b) のそれぞれ右側に放電発生時のテレビカメラの画像と放電による輝点の場所を丸で示した。端板のビームポートの縁の位置をわかりやすくするため、黄色い線で示した。この図では、放電が発生した端板は異なるが放電の発生場所が似ているものを選んだ。

まず pick-up 信号については、デジタル低域通過フィルタを使用してサンプリング周波数 5 GHz の高周波のデータを IQ 復調した。取得した pick-up 信号の IQ 成分を信号の振幅・位相に変換した結果を Figs. 5(a), (b) 左側上段に示した。2 つのブレイクダウン発生例ともに、pick-up 信号の振幅は約 0.5 μ s で減衰した。本空洞の時定数 (filling time) は約 8 μ s であるから、その 10 倍以

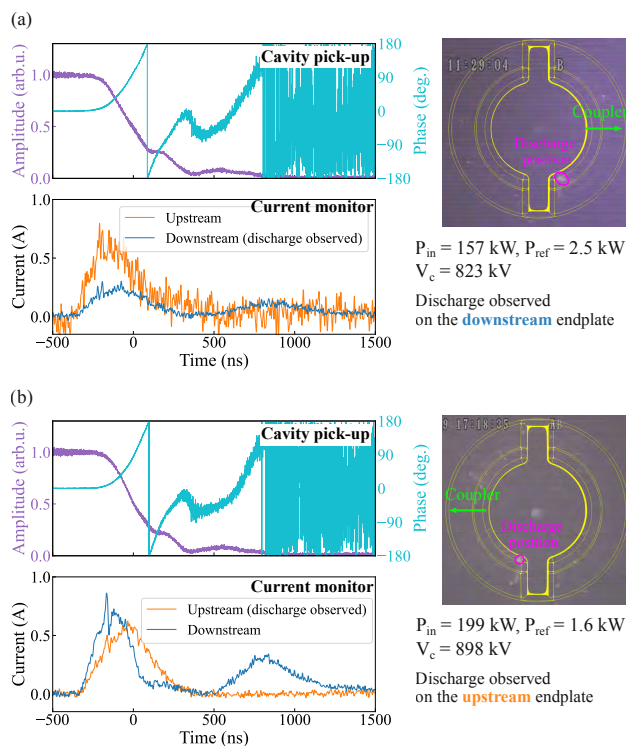


Figure 5: The amplitude and phase of the pick-up signal and the current monitor signal for two breakdown events where the discharge observed on (a) the downstream and (b) the upstream endplate. The right figure shows the TV camera snapshot when the breakdown occurred and the discharge point was displayed with circles.

上速く減衰したことになる。これは、放電発生箇所の銅のプラズマ化や放出された粒子の加速に、電磁場エネルギーが使用されたためである。振幅の減衰と同時に、位相も大きく回転している様子もわかる。

同図の下段は電流測定器の信号をデジタル低域通過フィルタ (cut-off 周波数: 100 MHz) に通した結果であ

る。これは、信号にのっている高周波の信号を除去するためであり、これによって実際の放電電流の波形を取得することができる。また、測定器の出力電圧 (V) を、電流測定器の応答 0.05 V/A を用いて電流値 (A) に換算した。高周波除去後の電流値は、ピークで 0.5–1 A であった。また、電流を積分した電荷量は、ミラー 1 台当たりで 60–400 nC であった。Figure 5 の 2 つの例では下流側の信号のみ 2 つのピークに分かれているが、この現象は他の測定例でも同様に見られた。放電の発生が上流下流に関わらず、また電流測定器を上流下流で入れ替えても必ず下流からの信号のみ 2 つのピークが見られた。

4. PIC シミュレーション

4.1 設定

CST Studio Suite 2023 [7] の Particle-in-cell (PIC) solver を用いて、測定されたブレイクダウン現象の再現を試みた。Figure 6 に使用したシミュレーションモデルを示す。このシミュレーションでは fireball の存在は考慮せず、放電現象のみを考慮した。実験で用いた電流測定回路を模擬するため、50 Ω の理想的な抵抗でミラー側と空洞胴体側を接続した。

シミュレーションでは最初に、実際の実験と同様に入力カップラーから電力を入力し、空洞内に加速電磁場を励振した。ここで、計算時間短縮のため、最初に非常に大きな電力を投入し次第に目標の入力電力の 180 kW にまで下げていくようにした。そして、目標の入力電力または RF 電圧に落ち着いた後、銅イオン (Cu^+) と電子を Fig. 6(b) に示した直径 0.1 mm の円錐の表面から放出させた。この粒子の放出点は、実際の実験でブレイクダウン発生時に輝点がカメラで観測された点である。

PIC solver では放出粒子の初期速度を Maxwell-Boltzmann 分布

$$f(v)dv = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{mv^2}{2k_B T} \right) dv \quad (1)$$

で与えることができる。ここで、 k_B は Boltzmann 定数、

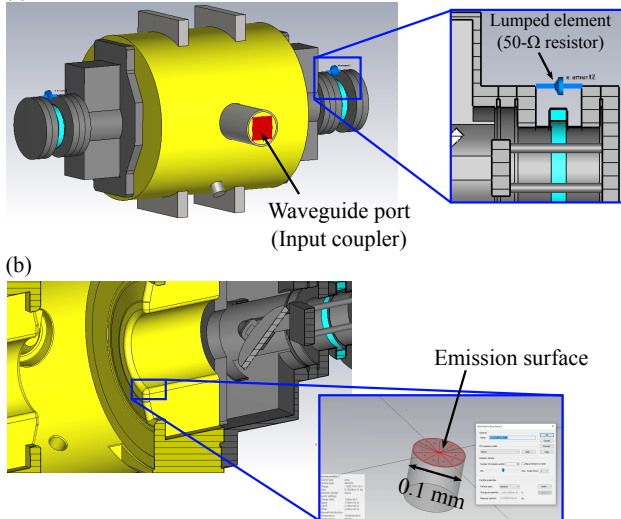


Figure 6: Simulation model. (a) The overall view of the model and (b) the emission position of particles.

v は粒子の初期速度、 m は質量、 T はプラズマ初期温度である。シミュレーション上、放出される電子・イオンの初期条件として、まだ測定されていない 2 つのパラメータ、つまり放出される粒子の合計電荷量と温度 T を決める必要がある。我々は、主にこの 2 つのパラメータを変えながらシミュレーションを行い、最も実際の測定結果に近いパラメータを探求した。ここで、合計電荷量と温度についてオーダーの検討を行う。

放出粒子の初期運動エネルギー

まず、放出される電子・イオンの初期運動エネルギーから合計電荷量と温度の上限値を見積もる。まず、放出される合計電子数を N_e 、イオン数を N_i 、電子の初期温度を T_e 、イオンの初期温度を T_i とおくと、放出される粒子の合計運動エネルギー $K_{\text{ini,tot}}$ は

$$K_{\text{ini,tot}} = \frac{3}{2} k_B (N_e T_e + N_i T_i) \quad (2)$$

と書ける。また、1 価のイオンの発生のみ考慮する場合、 $N_e = N_i (= N)$ であるから

$$K_{\text{ini,tot}} = \frac{3}{2} k_B N (T_e + T_i) \quad (3)$$

となる。一方、第 2 章で考察したように、上記の粒子の初期運動エネルギーは空洞内に蓄積された電磁場エネルギーを根源とするはずである。そのため、 $K_{\text{ini,tot}}$ は蓄積電磁場エネルギーよりも大きくなることはないと考えられる。ブレイクダウン発生時の RF 電圧を空洞蓄積エネルギーに換算すると、約 2 J である。それゆえ、合計運動エネルギーの条件は

$$K_{\text{ini,tot}} \lesssim 2 \text{ J} \quad (4)$$

となる。

プラズマ初期温度

次にプラズマ初期温度 T について検討する。前述した通り、銅は 10^4 K から電離し始めるから、 $T \gtrsim 10^4$ K である。一方、上限値はあまり明瞭ではない。

ここで、Fireball により銅表面に突起形状ができた場合の電場分布のシミュレーション結果を Fig. 7 に示す。シミュレーションでは、平らな金属表面上に高さ 25 μm (fireball の直径のおよそ 1/4 に相当) の円錐を置き、10 MV/m の電場を印加した。簡単のため高周波ではなく静電場のシミュレーションを行った。円錐の頂点は半径 0.5 μm で丸めている。この形状の場合、円錐の頂点では電場が集中する結果、印加した電場の 40 倍に相当する 400 MV/m の電場が発生する。我々が行った大電力試験の運転条件では、空洞端板のビームポートの縁辺りで最大 20 MV/m 程度の表面電場が発生していたと考えられる。そのような元々表面電場が強い場所で fireball により Fig. 7 のような形状が発生すると、~1 GV/m の局所電場が発生する可能性がある。このような電場が集中する場所で粒子が放出されると、粒子は 1 μm 加速されただけで 1 keV 相当の運動エネルギーに到達する。これを温度に換算すると、 10^7 K である。このことを考慮して、シミュレーションでは

$$10^4 \lesssim T \lesssim 10^7 \text{ K} \quad (5)$$

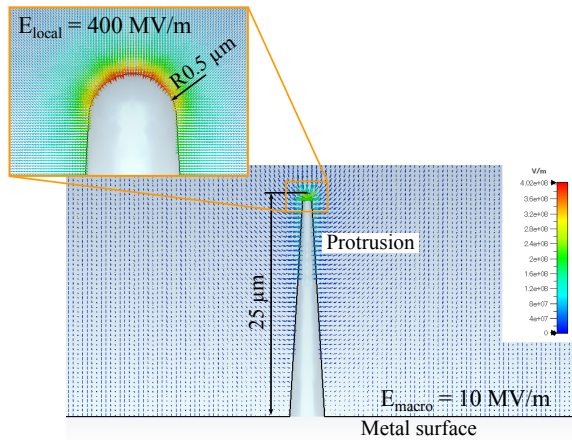


Figure 7: Simulated field enhancement effect caused by a protrusion on a metal flat surface.

の温度領域で温度を設定した。

合計電荷量

放出される電子・イオンの電荷量 eN についてもあまり判然としないが、仮に fireball の体積と同じ体積の銅がイオン化したと仮定する。固体の銅のパラメータ（質量密度 9.0 g/cm^3 、モル質量 63.55 g/mol ）を使用すると、 1 mm^3 の銅がイオン化すると 13.6 C の電子、銅イオン (Cu^+) が生成される。Fireball を粒径を 100 μm の球とすると体積は $5.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ となり、この体積の銅がイオン化すると約 7 mC の電荷量の電子、銅イオンがそれぞれ発生する。実際にプラズマ化する銅の体積は fireball よりもずっと小さいと思われるため、合計電荷量は多く見積もっても

$$eN \lesssim 1 \text{ mC} \quad (6)$$

であろうと考えられる。

シミュレーション研究では、これら3つの条件内の放出電荷量 eN と温度 T で PIC シミュレーションを実施し、実際の測定結果に近いパラメータを探索した。

銅のプラズマ化に消費されるエネルギーの考慮

第2章で示した通り、銅のプラズマ化に必要なエネルギーは空洞内に蓄積されている電磁場エネルギーで賄われているものと考えられる。プラズマ化に必要なエネルギーが蓄積電磁場エネルギー（約 2 J ）に匹敵する場合は、シミュレーションでもこのエネルギー損失を考慮すべきである。しかし、CST PIC solver では粒子放出後の粒子の加減速に伴う電磁場エネルギーの増減は考慮できるが、プラズマ化で消費される電磁場エネルギーまではシミュレートすることはできない。そこで、我々のシミュレーションではプラズマ化で消費されるエネルギーを入力カップラーから引き抜く、という方法でプラズマ化での電力消費を考慮した。これを行うためには、空洞に励振されている加速電磁場に対して逆位相の電磁場を励振するように入力電力を投入する必要がある。

4.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を Fig. 8 に示す。上段は Fig. 6 に示した場所から放出した電子と銅イオンの電流である。放出された電荷量はそれぞれ 170 μC 、初期温度は $T_i = T_e = 10^7 \text{ K}$ とした。電流パルスの時間幅は実際の

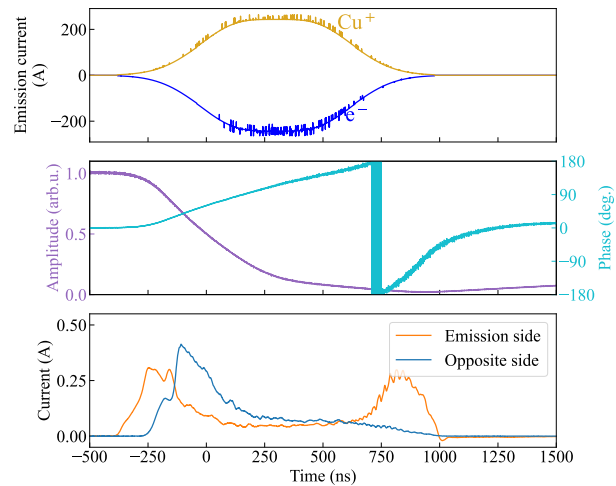


Figure 8: PIC simulation results: (upper) the emission current of copper ions and electrons, (center) cavity pick-up signal, and (lower) the current monitor signals.

測定結果に合わせ、電荷量や初期温度も各波形 (Fig. 8 中下段) が測定結果に近づくよう調整した。

中段の図は空洞内の空洞 pick-up 信号の振幅・位相のシミュレーション結果である。Figure 5 の測定結果と同様に 0.5 μs 程度の時間で振幅が減衰していることがわかる。しかし、位相回転は測定結果の方が速いようである。

下段が電流測定器を模擬した 50 Ω 抵抗から信号で、橙色の線が放電が発生した側、青がその反対側のミラーに設置した抵抗での電流値である。ピーク電流値や電荷量は、Fig. 5 の測定結果と概ね一致する。また、Figure 5(a) の測定結果と同様に、放電側の電流が2つのピークに分かれている。しかし、測定では放電発生側か反対側かに関係なく、特定のミラーに設置した測定器のみ2つのピークが現れるので、シミュレーション結果が測定結果と同じ現象を再現しているかは今のところ不明である。

5. まとめ

本研究では、fireball 起因ブレークダウン現象について理解を深めるため、実験とシミュレーションの両面から検証を行った。まず、加速空洞の大電力試験でブレークダウンによる放電電流の測定を行った。ブレークダウン発生時のミラーと空洞胴体部間に構築した測定回路によって、放電電流の信号を取得することに成功した。さらに、CST PIC solver を用いて測定の再現を試みた。パラメータを調整することで、測定された空洞 pick-up や電流測定器の信号に近い波形をシミュレーションで再現することに成功した。このことから、放出電子の全電荷量としては数百 μC 程度（ピーク電流で数百 A）と推測することができる。この電荷量は SuperKEKB のパンチ電荷と比べ4桁も大きい電荷量である。但し、放電中の pick-up 信号の位相回転は測定結果の方がより速かった点や、2つの電流測定器のうち片方のみ2つのピークが観測される点も、今後より詳しく調査する予定である。シミュレーション上の放出電流の波形をさらに最適化することで、より測定結果に近い波形が得られるのではないかと考えている。

参考文献

- [1] T. Abe, Y. Takeuchi, T. Kageyama, H. Sakai, and K. Yoshino, "Test results on RF accelerating cavities for the positron damping ring at SuperKEKB", Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2014), Aomori, Japan, Aug. 2014, pp. 605-613.
- [2] T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, Y. Takeuchi, and K. Yoshino, "Breakdown study based on direct in situ observation of inner surfaces of an rf accelerating cavity during a high-gradient test", *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 19, p. 102001, 2016. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.19.102001
- [3] T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, Y. Takeuchi, and K. Yoshino, "Direct observation of breakdown trigger seeds in a normal-conducting rf accelerating cavity", *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 21, p. 122002, 2018. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.21.122002
- [4] H. Ikeda, T. Abe, M. Aversano, H. Fukuma, Y. Funakoshi, T. Ishibashi, H. Kaji, T. Koga, Y. Liu, H. Nakayama, G. Mitsuka, S. Terui, M. Tobiyama, Y. Suetsugu, K. Yoshihara, "Observation of sudden beam loss in SuperKEKB", in *Proc. IPAC'23*, Venice, Italy, May 2023, pp. 716-719. doi:10.18429/jacow-ipac2023-mop1072
- [5] T. Abe, "Fireball hypothesis for the trigger of sudden beam losses at SuperKEKB", Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep. 2023, pp. 250-254.
- [6] H. Ikeda, "Observation and cause investigation of sudden beam loss at SuperKEKB", PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, FRP023, this meeting.
- [7] <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>