

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03671

研究課題名(和文) 加速空洞内部の直接観察によるブレイクダウン・トリガー・メカニズムの解明研究

研究課題名(英文) Experimental study based on direct in-situ observation of normal-conducting RF accelerating cavities for elucidating the breakdown-trigger mechanism

研究代表者

阿部 哲郎 (Abe, Tetsuo)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：70370070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,920,000円

研究成果の概要(和文)：常伝導高周波加速空洞は、多くの粒子加速器の心臓部であるが、そのブレイクダウン(空洞内の大真空放電)発生が加速器の性能を制限する。しかし、ブレイクダウンを引き起こす仕組みは未だ解明されていない。本研究代表者は、加速空洞の大電力試験中にその内部を直接観察して、ブレイクダウンは(安定的に発光していた)空洞内表面上の輝点の爆発、または、(輝点を伴わない)スポット型爆発のいずれかにより引き起こされることを発見した。本研究では、より高性能のカメラを使って直接観察を行い、輝点が1000以上の高温異物微粒子であること、及び、スポット型爆発は高温の飛行微粒子が空洞内表面に衝突した結果であることを突き止めた。

研究成果の概要(英文)：Normal-conducting RF accelerating cavities, made of copper, are hearts of many particle accelerators, where vacuum arcs in the cavities (breakdowns) could limit accelerator performance; however, we do not know what the real source of cavity breakdowns is. Performing experimental breakdown study based on direct in-situ observation, we demonstrated that cavity breakdown was caused by an explosion of a bright spot which maintained its intensity during high-power operation until the explosion, or by a spot-type explosion not originating from a stable bright spot. In this study, using higher-spec cameras, we have discovered that the bright spots were high-temperature (> 1000 degC) microparticles made of material(s) other than copper, and that spot-type explosions can be understood to be results of impact of flying high-temperature microparticles on cavity surface.

研究分野：加速器科学

キーワード：ブレイクダウン 真空放電 加速空洞 マイクロ波 高周波 高電界 粒子加速 加速器

1. 研究開始当初の背景

常伝導(室温)高周波加速構造(以下、「加速空洞」)は、多くの粒子加速器において心臓部となるコンポーネントである。加速空洞の例を図1に示す。加速空洞は、その運転時、

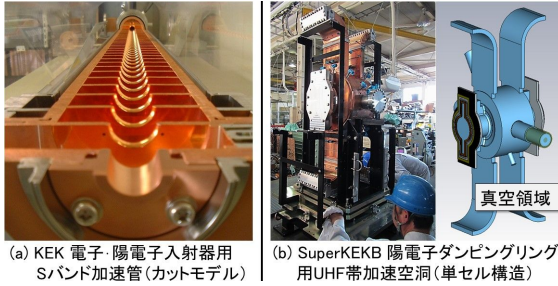


図1. 常伝導の高周波加速空洞の例。

内部を超高真空 (10^{-5} Pa 以下) に保つ。そして、外部から大電力のマイクロ波を投入することにより、図2に示すような電磁界(加速モード)を励振し、その高周波電界を使ってビーム軸(中心軸)上を走る荷電粒子を加速する。通常、加速空洞は無酸素銅で作る。

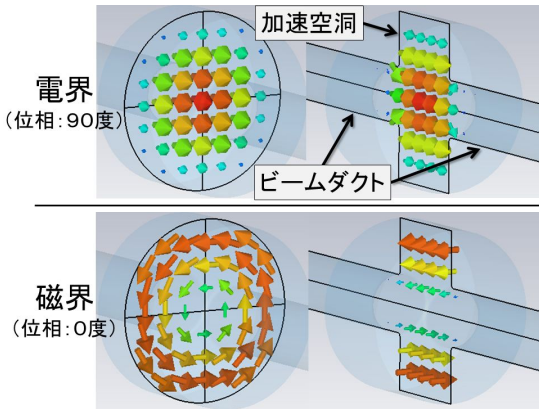


図2. 加速モードの電磁界。

これは、電気性能、真空性能、放電限界、加工のし易さ、価格等を総合的に評価して、無酸素銅に勝る材料はないからである。加速空洞は、その製作後、実際の加速器運転に使用する前に、「RF コンディショニング」と呼ばれる試験を行う。それは、加速空洞に高周波を少しずつ投入し、徐々にその電力を大きくしていく(加速電界を高くしていく)試験である。RF コンディショニングの初期には、低い加速電界でも、加速空洞内の真空圧力が跳ねたり、真空放電が起きたりして、加速空洞は頻繁にダウンする。これは、高周波電磁界により、内部の汚れや表面欠陥(微小な突起や結晶欠陥等)が除去されていくプロセスである。そして、一旦、最高加速電界まで到達すれば、それよりも低い加速電界では、もはや真空圧力が大きく跳ねることは無い。また、加速空洞内の大放電によるダウン(以下、「ブレークダウン」)の発生率は実用上問題無いレベルにまで下がる。以上のことは、加速空洞開発における一般論である。しかし、欧州 CERN 研究所の次世代の常伝導電子・陽電子リ

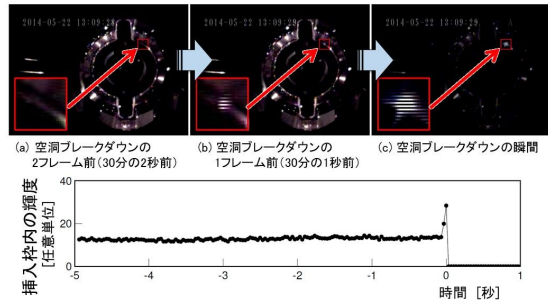


図3. ブレークダウンの瞬間にスポット型爆発が発生した例。

ニアコライダー(CLIC計画)のように可能な限り高い加速電界が欲しい場合や(100 MV/m 級以上)スーパーBファクトリー主リングの大電流貯蔵リング加速器のように極めて高い安定度が必要な場合には(ブレークダウン率 < 1回/加速空洞1台/数ヶ月連続運転)、無酸素銅で作る加速空洞の性能限界、すなわち、ブレークダウンを起こす源(以下、「ブレークダウン・トリガー機構」)を理解する必要がある。

2014年、本研究代表者が中心となって、UHF帯(509 MHz)の加速空洞(図1-(b))の試験を行った。その際、ビーム軸(空洞中心軸)上に斜鏡を内蔵した真空容器を接続し、加速空洞内部をビームポートから常時直接観察しながら高電界試験を行った[1]。そして、実験データを統計的に解析した結果、ブレークダウンの瞬間、加速空洞内では、火花や稲妻のような派手な現象は少ないことが判った(約10%で、RFコンディショニングの初期のみ)。最も多かったのは、ブレークダウンの瞬間、(電極に相当する)空洞端板上で突然小さな爆発が起こる「スポット型爆発」で、約40%あった(図3参照)。次に多かったのは、安定的に発光していた端板上の「輝点」が、ブレークダウンの瞬間に爆発・消滅した事象で、約25%あった(図4参照)。つまり、この輝点の正体、及び、スポット型爆発の原因を調べることが、加速空洞のブレークダウン・トリガー機構解明に繋がることになる。

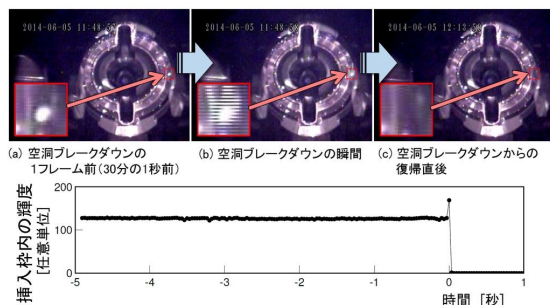


図4. ブレークダウンの瞬間に輝点の爆発→消滅が発生した例。

2. 研究の目的

2014年に行った上述の観測実験では、通常のカメラ（撮影速度：毎秒30フレーム、可視光のRGBのみ）を使用した。本研究では、より高性能のカメラを使って、ブレークダウンを引き起こす輝点の正体、及び、スポット型爆発の発生メカニズムを、加速空洞内の直接観察手法で解明する。

3. 研究の方法

輝点は安定的な点光源なので、そのスペクトルを調べることが最も重要である。本研究では、2次元分光を実現するハイパー・スペクトル技術を使って、大電力試験中の加速空洞内の輝点のスペクトルを測定した。ハイパー・スペクトル・カメラとして、エバ・ジャパン株式会社のNH-KE3を使った[2]。本カメラは、400 nm から 1000 nm の範囲の波長を 5 nm の分解能で分光する。

また、ハイスピード・カメラを使った直接観察も行い、スポット型爆発の直前にどのような現象が見えるかを調べた。ハイスピード・カメラとして、株式会社ディテクトのHAS-D3M を使った[3]。本カメラの最高撮影速度は毎秒10万フレームである。

4. 研究成果

ハイパー・スペクトル・カメラを使って、輝点のスペクトル測定に世界ではじめて成功した。観測スペクトルは、可視光と近赤外領域に相当する 400~1000 nm において連続スペクトルであり、線スペクトルは観測されな

かった。スペクトルの例を図5に示す。また、加速空洞へ投入するマイクロ波の電力を上げる（電磁界の強度を上げる）に従って、観測スペクトルは短波長側にシフトした。以上の観測事実から、輝点は熱輻射で光っていることが判明した。さらに、輝点の温度を求めるための補助実験を行った。銅ブロックに電子ビームを照射して高温にし、熱電対でその温度を測りながら、熱輻射スペクトルを測定した。この補助実験より得られたデータを使って、観測した輝点のスペクトルからその温度を求めることができた。10個の代表的な輝点の温度を求めた結果、どれも1000を超えていた。最も高いもので約1500であった。大電力試験中、加速空洞内は超高真空(10^{-5} Pa台)なので、空洞内表面上の銅は約800で昇華する。観測された輝点の温度が1000を超えているということは、輝点は(空洞材料である)銅ではないということになる。つまり、輝点は、ミクロの異物がマイクロ波によって高温になったものである。異物の候補は融点・沸点の高い物質で、炭素、タンゲステン、モリブデン、タンタル等が考えられる。

ハイスピード・カメラを使ったセットアップで40回のブレークダウン事象を検出した。その1割の4事象で、スポット型爆発の直前に、飛行する輝点がスポット型爆発発生場所へ衝突する現象を世界で初めてとらえた。本ハイスピード・カメラは可視光にのみ感度があるため、その飛行輝点もまた高温である。以前の直接観察では、通常のカメラを使っていたため、最後の爆発のみ観測され、その爆発は、高温の飛行微粒子が空洞内表面に「着弾」した結果であると考えられる。図6に、衝突の瞬間の例を示す。

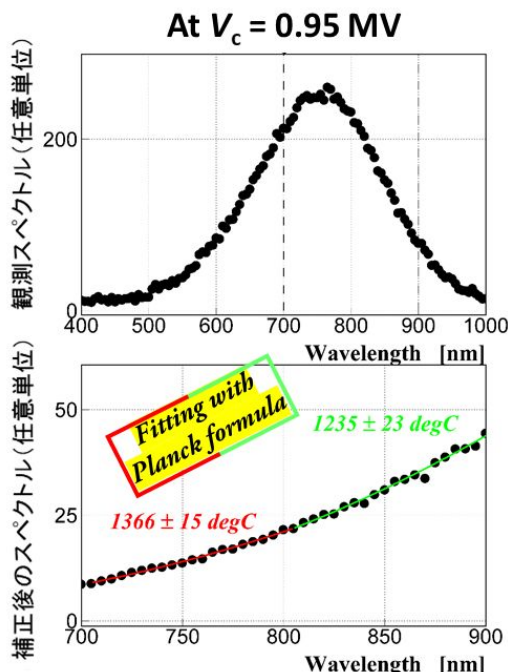


図5. 下流側端板上で最も明るかった輝点の観測スペクトル(上図)及び、補助実験結果を使って補正した物理スペクトルと推定温度(下図)

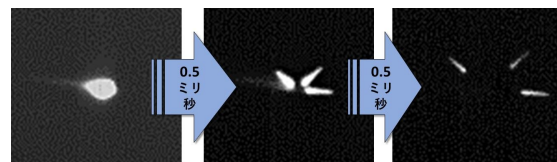


図6. 高温の飛行微粒子が空洞内表面に衝突(左図)後、3つに割れた(中・右図)。ブレークダウンは、左図の瞬間に発生。

本研究により、ブレークダウンのトリガー機構の解明研究は大きく進歩した。今後、完全解明のためには、輝点や飛行微粒子の成分特定、及び、それらの爆発メカニズムの理解が必要である。本研究成果は、国際真空放電研究会(MeVArc 2018)[4]にて発表した。

[1] "Breakdown Study Based on Direct In-Situ Observation of Inner Surfaces of an RF Accelerating Cavity during a High-Gradient Test", T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, Y. Takeuchi, and K. Yoshino, Physical Review Accelerators and Beams 19, 102001 (2016)

[2]

<https://ebajapan.jp/spectraltechnology/>

[3]

<http://www.ditect.co.jp/en/index.html>

[4] <https://indico.cern.ch/event/680402/>

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計1件)

Tetsuo Abe, “ Updated Results of Breakdown Study for 509-MHz Continuous-Wave Accelerating Cavities based on Direct In-situ Observation ”, 7th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs (MeVArc 2018), San Juan, Puerto Rico, 2018.

6．研究組織

(1)研究代表者

阿部 哲郎 (ABE, Tetsuo)
高エネルギー加速器研究機構・
加速器研究施設・准教授
研究者番号：70370070