

常伝導高周波加速空洞の真空絶縁破壊と高耐圧化の研究

素粒子、原子核、宇宙物理学
およびその関連分野

研究者所属・職名 : 加速器研究施設・教授

ふりがな あべ てつお

氏名 : 阿部 哲郎

主な採択課題 :

- [挑戦的研究\(萌芽\)「真空絶縁破壊の発生メカニズム解明による装置の超高耐圧化の研究」\(2022-2024\)](#)
- [基盤研究\(B\)「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」\(2015-2017\)](#)

分野 : 加速器科学、特に常伝導高電界加速関係

キーワード : 加速空洞、高電界粒子加速、真空絶縁破壊、ブレイクダウン、マイクロ波、高周波

課題

●なぜこの研究をおこなったのか？(研究の背景・目的)

医療・産業・学術の幅広い分野で活躍している粒子加速器の心臓部とも言えるのが「常伝導高周波加速空洞」と呼ばれる金属製空洞共振器である。その運転時は、空洞内部を超高真空に保ち、そこにメガワット級の大電力マイクロ波を共振的にため込む。そして、その強い電界で電子などの荷電粒子を(蹴るようにして)加速する。空洞内に高電界を励振できるのは、真空に高度な絶縁能力(真空絶縁)があるためである。近年、持続可能な社会の実現などから加速器の大幅なコンパクト化も求められている(図1参照)。その場合、空洞内の電磁界エネルギー密度は上がり、金属表面における電界強度が上がる。その高い電界によって、真空放電による真空絶縁破壊(ブレイクダウン)の発生頻度も上がり、加速性能が制限されてしまう問題がある。この根本的な問題に挑戦して、常伝導加速器の性能を大幅に上げることを目指した。

●研究するにあたっての苦労や工夫(研究の手法)

加速空洞のブレイクダウン発生メカニズムは、全くわかっていなかった。従来の実験的研究では、真空放電により発生する2次的情報の観測に頼ってきた。しかし、その「引き金の種」は些細で小さな存在と考えられるので、そのような情報は、大真空放電によってかき消されてしまうであろう。そこで、その瞬間(直前も含む)を直接・視覚的に調べるために、加速空洞内の直接観察手法を発案した。この手法であれば、大真空放電で「引き金の種」に関する情報が消えても問題ない。まさに、「百聞は一見にしかず」である。



図1 常伝導加速器のコンパクト化実現例

常伝導高周波加速空洞の真空絶縁破壊と高耐圧化の研究

素粒子、原子核、宇宙物理学
およびその関連分野

研究成果

●どんな成果がでたか？どんな発見があったか？

直接観察が比較的容易なUHF帯（509 MHz）常伝導高周波加速空洞を対象に、3方向からハイスピード・カメラを使ってブレークダウンの瞬間をとらえる観察実験を実施した（図2参照）。その結果、ブレークダウン発生の瞬間を視覚的に捕らえることに（加速空洞としては）世界で初めて成功した（図3参照）。さらに、ハイパースペクトル・カメラを使って発光スペクトルも測定した。それらの結果を統計的・系統的に解析した結果、ナノメートルレベルまで電解研磨されたUHF帯連続波空洞を大電力マイクロ波で十分コンディショニングした後のブレークダウンの殆どは、加速空洞の内表面に付着した、または、加速空洞の内部を浮遊する1,000℃以上の高温微粒子『ファイヤーボール』（図4参照）が「引き金の種」であることを発見した。それが、加速空洞の内表面上で爆発し、「局所的・急激な蒸発（昇華）→プラズマ発生→大真空放電へ発展」というプロセスで、真空絶縁破壊に至るのである。これは、加速空洞のブレークダウンとしては、その発生メカニズムが解明された世界初の研究成果である。

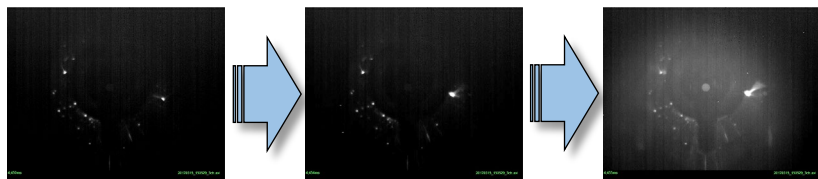
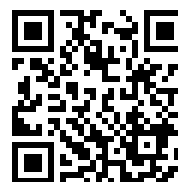


図3 ファイヤーボールが加速空洞のブレークダウンを起こす瞬間の映像例

実際の映像はこちら▶



3 TV cameras for Multi-directional and wide-field observation

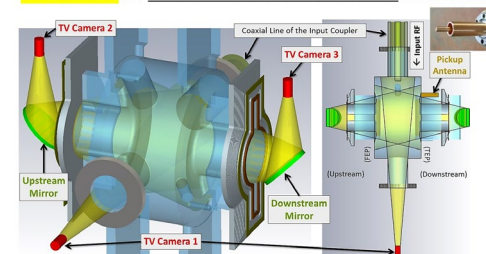


図2 加速空洞内部の直接観察手法

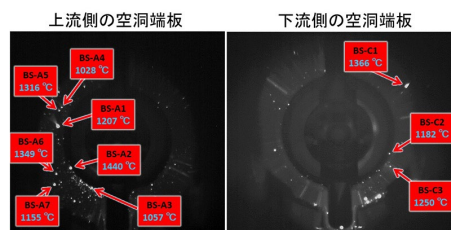


図4 加速空洞内表面に付着したファイヤーボール（ブレークダウン予備軍）

今後の展望

●今後の展望・期待される効果

上記の成果は、比較的電界強度の低い連続波空洞を対象にしたものであるが、加速器の大幅なコンパクト化を目指すという意味では、最終的には高電界加速空洞（通常はパルス波で運転）におけるブレークダウン発生メカニズムを解明する必要がある。そのために、高電界でもファイヤーボール起因のブレークダウンかどうかを調べる研究を継続している。図5は、Xバンド（11.4 GHz）高電界加速空洞に対して実施した直接観察例である。現時点で明確な証拠は見つかっていないが、定性的には説明できる現象もあり、今後、常伝導加速器の超コンパクト化を目指す上での試金石となっている。



図5 Xバンド高電界加速空洞のブレークダウン直接観察例