

平成22年05月31日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20740154

研究課題名（和文）高電界加速管のエネルギー圧縮系への応用

研究課題名（英文）Energy Equalization by using High-gradient accelerator modules

研究代表者

横山 和枝（YOKOYAMA KAZUE）

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・助教

研究者番号：70391711

研究成果の概要（和文）：高電界 RF 下における金属材料に対する放電特性を調べた。高電界試験は、50 MW の RF 入力で 140 MV/m の電界が得られるような導波管の幅と高さの両方を狭くした狭導波管を用いた。この手法で達成できる電界値や放電頻度、及び物質表面の放電痕の観測などを銅及びステンレス材で調べた。放電発生率はステンレス(AISI-316L)材の方が銅(OFC)材よりも低く、RF パルス幅および加速勾配への依存性も異なることがわかった。

研究成果の概要（英文）：To study the characteristics of breakdowns in different materials under a high RF field, a high-gradient experiment was proposed with using narrow waveguides which are reduced the height and the width in order to obtain a field of around 140 MV/m at 50 MW power. The breakdown rate, the sustainable electric field and the surface observation after high-gradient experiment were conducted on the two waveguide of copper (OFC) and stainless-steel (AISI-316L). The breakdown rate of the copper waveguide was found to be larger than that of the stainless-steel waveguide and they have different property corresponding to the electric fields and the pulse widths.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器、高周波、高電界、真空放電、銅、ステンレス

1. 研究開始当初の背景

陽電子ビームのエネルギー拡がりを小さくする方法としては、陽電子生成後にダンピングリングを用いたり、加速器の入射器最後でエネルギー圧縮系等を用いる手法が一般

的である。これに対し、本研究課題の手法は、入射器に異なる周波数の加速ユニットを用いてビームのエネルギー拡がりを抑えるシステムであり、世界初の試みである。

異なる周波数の加速ユニットを用いてビ

ームのエネルギー拡がりを抑える方法では、高い周波数を用いるほど効果が得られる。用いる周波数を S-band の周波数 (2856 MHz) の k 倍とすると、 $1/(k^2-1)$ の加速量で効いてくる。そのため、C-band ($k=2$) では X-band ($k=3$) より多くの加速ユニットを必要とする。一方、高い周波数になるほど高次成分の項が出てくるため、補正関数が扱いにくくなる。それゆえ、補正加速ユニットとして X-band を用いるのが技術的にもコスト的にも実現しやすい。最新の研究結果では、銅製の X バンド加速管は、100 MV/m を超える加速勾配での試験運転がなされている。この加速勾配の上限を決める要因の一つは、加速管内での放電である。100 MV/m 近傍での放電現象の理解と抑制は、高勾配を特徴とする X バンド加速管開発の重要な課題になっている。

実際の加速器では、RF 発生源、搬送系、加速管といった構成機器の RF にさらされる材料表面では、表面電界強度や RF パルス幅、圧力などに応じてある頻度で真空放電が発生する。パルス動作をさせる電子線型加速器内で放電が発生すると、当該パルスでの加速ビームのエネルギー減少やビーム特性の劣化につながる。したがって、放電発生率には、実用用途から決まる許容上限が課せられ、例えば、高エネルギー加速器では、数百万パルスに 1 回程度の放電に抑える必要がある。それ故、本研究で提案するシステムを実現するためには、高電界を発生させる加速ユニットに、低頻度の放電発生率、放電後の低ダメージが要求される。加速器用途を念頭にした異なる物質表面に関する放電の研究の例としては、European Organization for Nuclear Research (CERN) で電極間に DC 高電圧を印加し表面をプロセッシング後、放電頻度の測定をし、多くの金属で耐放電特性の系統的評価が行われている。また、常伝導加速器での安定な高電界加速の研究は、長年 SLAC National Accelerator Laboratory (SLAC) で行われてきた。しかし、高電界領域での RF 下で、多くの金属に対する耐放電特性の系統的評価はまだ行われていない。この研究では、この点に注目し、高電界 RF 下での材料の放電特性に関する基礎研究を行った。

2. 研究の目的

高電界領域での RF 下で、多くの金属に対する耐放電特性の系統的評価を行い、加速管製作に優れた材料や加工方法・洗浄処理等の研究を行う。

3. 研究の方法

加速管の性能は、試験加速管を設計製造し、高電力 RF を実際に投入してみることで評価される。しかし、これには、手間と時間、な

により費用がかかるので、広範囲にわたる系統的な試験研究の実施は容易でない。そこで本研究では加速管の代わりに 50 MW の RF 入力で 140 MV/m の電界が得られる狭導波管を使用して、材料や表面処理の違いによる高電界 RF 耐性を実験的に評価する。標準矩形導波管 (WR90、23 mm×10 mm) の E、H 両面間寸法を縮めた狭窄部 (14 mm×1 mm) を作り、そこに導波管伝送 TE₁₀ モードを通すと、狭窄部は周囲よりも電界強度が高くなる。図 1 に狭導波管の写真と計算による電界分布を示す。この狭窄部で起こる放電現象を詳しく調べることで、加速管内の放電現象の理解に役立て、更には、高電界下での放電現象の一般的な知見を得ることが期待できる。狭導波管による試験研究は、まずその構造が単純であることから、1) 製造費用が安く、2) 実験の期間を短くでき、3) 実験結果の解析が加速管ほど複雑でない、などの利点があり、さらに、4) 放電に伴う放射線の発生が少なく、簡単な遮蔽で済み、5) 必要な RF パワーも少なくすむ、など実験もしやすい。

本研究では、材料の持つ高電界 RF 耐性の定量的評価の指標として、放電の発生頻度 (BDR: Break-Down Rate : =放電発生回数/運転時間) を測定する。BDR に着目した理由は、加速器構成要素で稼働中に発生する放電頻度が、線型加速器の定量的性能の評価の一つによく取り上げられるからである。放電頻度の測定は、RF の最大定格 (パワー 50 MW、パルス幅 400 ns、繰り返し 50 pps) までのプロセッシングが終了した時点から開始する。計測時間は、一つの RF パルス幅とパワー値の組に対し約 24 時間とした。BDR 算出は、RF パルス幅と電力を一定に保って運転し、その間の放電発生回数を数えることによる。

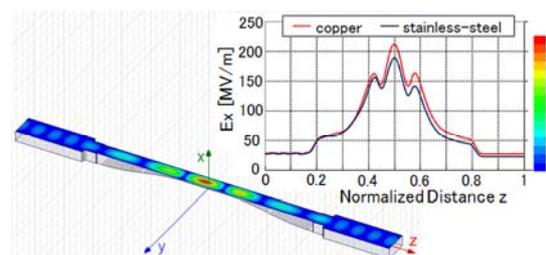


図 1. ステンレス製狭導波管の写真と z 軸電界分布。

4. 研究成果

(1) 2008 年度：放電解析システムの確立。

狭導波管の高電界試験は、KEK（高エネルギー加速器研究機構）にある X-band RF 試験施設 Nextef の KT-1 ステーションで行った。この試験施設では、クライストロンを用いて、パルス幅 400 ns、繰り返し 50 pps、RF パワー約 50 MW までの高電界試験が可能である。図 2 に放電解析システムの概略を示す。狭導波管試験体の上下流の導波管に備えた方向性結合器から取り出した RF 入出力、反射波形をクリスタルダイオードで検波し、オシロスコープ (DP07054) でデータ収集を行う。試験中に反射 RF パルス波形や透過 RF パルス波形が定常パルスと異なる波形であることを検知したら、次のパルスは止めて、変化したパルスとその直前の 9 パルスの RF 波形データを記録する。また、毎パルスの波形の積分値とピーク値を算出し、定常パルスと比較した値を保存している。保存された波形を解析することによって、狭導波管とそれ以外の場所での放電は容易に識別され、さらに狭導波管部での放電の詳しい解析も可能である。保存された波形データから放電解析を行った結果、以下のようなことがわかった。

(a) 狭導波管で見られる放電波形は、パルス毎に次第に成長するのではなく、ある 1 パルスの急激な変化である。

(b) 放電が短時間に集中して起こる傾向にある。放電に至るまでの保持時間の分布を調べると、相対的に短い保持時間ののち放電に至る場合が多い一方、少ない頻度だが保持時間の長いものもある。これは大きい放電の後には、放電ガスによる圧力上昇が次の放電の引き金を引きやすいこと等が原因と考えられる。集中した放電が終わると、また保持時間が長くなる。この安定性が回復する過程のメカニズムは良くわかっていないが、同様の過程は加速器稼働時の RF 機器でよく経験される。

(c) パルス先頭部での放電発生頻度が少ない。狭導波管部に放電が発生するとその時点で狭導波管部から RF の反射が生ずるが、単純に「放電開始時間」=「RF 反射が起こり始めた時間」として、RF パルス内での放電開始時間の分布を調べると、RF パルス先頭では放電発生頻度は低く、パルス印加後約 250 ns 経過するまで徐々に増加し、250 ns 以降は減少気味になっていた。パルス先頭部での放電発生頻度が少ない傾向は、狭導波管放電のみならずパルス RF が関連する放電でよく現れる特徴である。放電に達する前に局部的微小放電などの前駆現象があり、その後それが放電につながる等の時間遅れを伴うメカニズムが関係していると考えると理解しやすいが、明確なメカニズムを理論的に説明するまでには至っていない。

(d) 十分プロセッシングが行われたと見なされた後も、一度大きな放電が生ずると、元のパワー入力が可能になるまでは低いパワー、狭いパルス幅でも多くの放電が起きることがある。この現象は、大放電で荒れた表面が再度滑らかに改善されるまで放電が繰り返されるためと推測される。

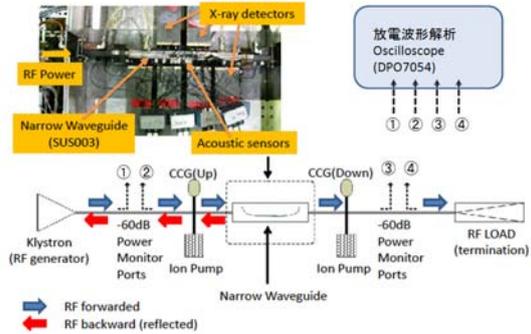


図 2. 放電解析システム。

(2) 2009 年度：無酸素銅 (OFC) とステンレス (AISI-316L) の放電特性の評価。

高電界試験の手順、解析・評価方法などを模索しながら、本研究期間内では、狭導波管材料として、RF 加速管に通常用いられる無酸素銅 (OFC) と DC 高電圧印加機器によく用いられるステンレス (AISI-316L) の高電界試験を終えた。本試験システムで達成できる電界値や放電頻度、及び物質表面の放電痕の観測などを行った。

図 3 に銅製及びステンレス製狭導波管で測定した BDR を示す。このグラフから明らかのように、放電発生率はステンレス材の方が銅材よりも低く、RF パルス幅および加速勾配への依存性も異なる。この電界強度の範囲では、ステンレスの BDR が銅のそれより全般的に小さいと言え、この領域ではステンレスの方が、放電発生率に関して、加速管材料として優れていることを示している。

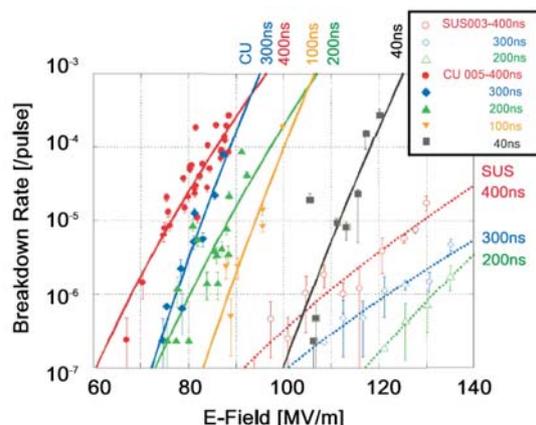


図 3. パルス幅と電界に対する放電頻度。CU は銅製、SUS はステンレス製狭導波管を示す。

狭導波管高電界試験後に放電部を観測した。図4にSEM、図5、図6にレーザー顕微鏡で観測した例を示す。銅、ステンレスともに、単一の放電スポットのサイズは、約10~30 μm 程度である。一方、放電痕の激しい部分では、銅では放電後の突起が細かいのに対して、ステンレスでは山谷が緩やかで全体として表面が熔融したように見える。また、凹凸のパターンが異なるにもかかわらず突起の高さは20~30 μm になっていて、ほぼ同じであった。このことから、電界が低い所では単発の放電による素過程の放電痕と思われるものが観測され、電界の高い中央部分では多くの放電が重なりあった結果としての複雑な表面状態として観測されたと推測される。また、放電成長後の材料物性による違いが見え、これが材料による放電特性の違いに結びついている可能性があると考えられる。放電特性をこのように実験的・観測的に調べることで、放電現象の理解も深まってきた。

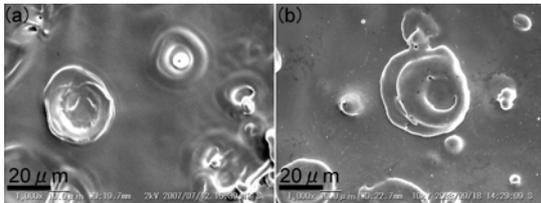


図4. 狭導波管の単一の放電痕をSEMで観測した例。(a)銅製、(b)ステンレス製。

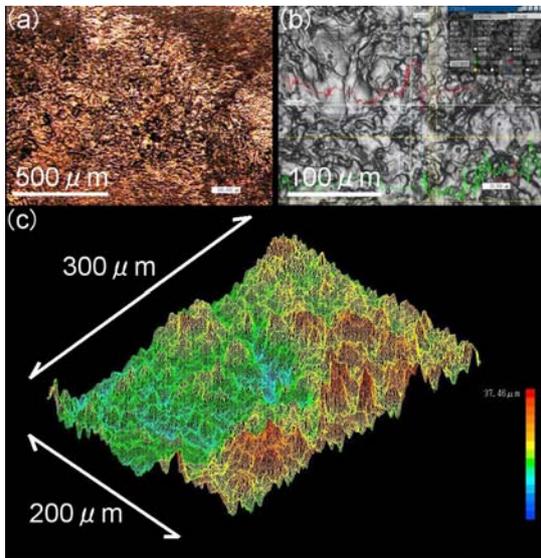


図5. 銅製狭導波管の放電部をレーザー顕微鏡で観測した例。

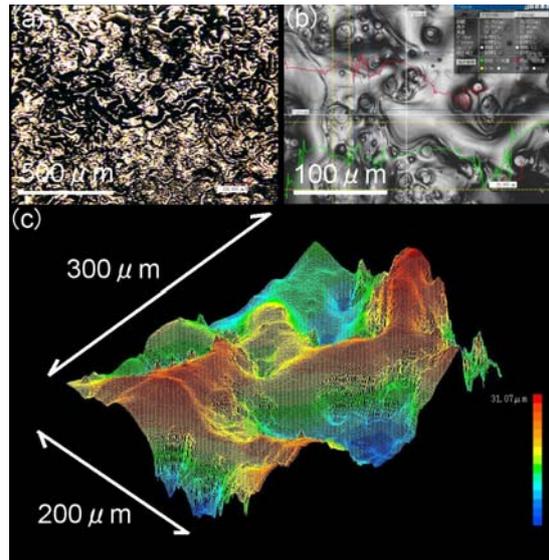


図6. ステンレス製狭導波管の放電部をレーザー顕微鏡で観測した例。

このように、狭導波管は加速管材料に関する研究の道具として使えることが確認できた。今後は、たとえばモリブデン等の高融点金属製の狭導波管を製作そして試験をおこなえば、さらにいろいろな材料の持つ高電界特性を明らかにできるだろう。本研究の様に高電界領域でのRF下で、多くの金属に対する耐放電特性の系統的評価は、国内外において初めてであるので、今後も継続できることを期待する。

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2件)

- ① K. Yokoyama, et al., "High-Gradient RF Breakdown Studies with Narrow Waveguide", Proc. of PAC09, May 2009,
- ② 横山和枝, 他, "狭導波管を用いた高電界放電特性", 第5回日本加速器学会・第33回リニアック技術研究会プロシーディングス、東広島市、2008年。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 和枝 (YOKOYAMA KAZUE)

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・助教

研究者番号：70391711