

氏 名 五十嵐 康 仁

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大甲第715号

学位授与の日付 平成15年9月30日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 高電界加速のためのリニアック加速管に関する研究

論 文 審 査 委 員

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| 主 査 教授    | 福田 茂樹                |
| 教授        | 榎本 收志                |
| 助教授       | 齊藤 芳男                |
| 助教授       | 齋藤 健治                |
| 助教授       | 山口 誠哉                |
| 助教授       | 肥後 寿泰（高エネルギー加速器研究機構） |
| 主任研究<br>官 | 花木 博文（高輝度光科学研究センター）  |

## 論文内容の要旨

次世代の線形加速器には、高電界で安定に動作する加速管の開発が必要となる。例えば NLC/JLC 計画 (Xバンド) では 70 MV/m, SuperKEKB (Cバンド) では 42 MV/m の加速電界強度が要求されている。高電界になると加速管内での放電が発生するようになり、クライストロンへの反射波の増大、真空圧力の上昇、電界放出電流の増加等が頻繁に起こるため安定したビーム加速が出来なくなる。その為、これまでに多くの高電界試験が行われ、S バンド、X バンドとも 80 MV/m 以上の加速電界強度が得られている。しかし、高い加速電界強度が得られても放電によってディスクやカプラー空洞アイリスを痛めてしまい、加速管の位相特性が変化してしまうことがあった。また、コンディショニング時の空洞表面の状態を表す指標である電界増倍係数 $\beta$ と加速電界強度との関係などまだよくわかっていないことが多くある。

本研究では KEKB 入射器用に製造した S バンド 2 m 加速管の高電界に関する特性を調べることにより、高電界で安定に働く加速管の設計、製作、運転に役立つ知見を得ることを目的とした。主な実施内容は次の 3 つである。

- [1] 3 種類の加速管について高電界試験を行い、コンディショニング時間と加速電界強度、放電頻度、電界増倍係数 $\beta$  との関係の詳細に調べた。また、加速管の上流、下流側での暗電流およびその運動量スペクトルの測定を行った。特に 3 本目の加速管については、電界放出の原因の一つである塵などの汚染物を取り除く方法である超純水高圧洗浄技術を適用した。加速管の洗浄を行う前に洗浄予備試験を行い、洗浄効果の確認も行った。
- [2] 高電界試験および加速器運転で使用された加速管の入出力カプラー空洞に黒く変色した箇所が、①カプラー空洞内部の三日月型窪み、②導波管-カプラー空洞アイリスのカプラー空洞側、③導波管-カプラー空洞アイリスの導波管側の 3 カ所に確認された。電磁場分布のシミュレーション等により、変色箇所で行っている現象についての考察を行った。
- [3] 加速管内部で発生する暗電流の運動量スペクトルは、空洞内部の状態を表す指標の 1 つである。暗電流の軌道および運動量スペクトルのシミュレーションを行い、試験結果と比較することにより、シミュレーションコードの検証、および加速管の上流、下流側で観測される暗電流の発生機構に関する知見を得る。

本論文で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 高電界試験を行った結果、KEKB 入射器用 S バンド 2 m 加速管は、最大平均加速電界強度 45 MV/m までは空洞が放電によるダメージを受けることは無く、十分実用的であることが確認できた。この値以上については試験設備の制限により確認はできなかったが、45 MV/m 以上も期待できる。
- (2) 加速管に対して超純水高圧洗浄を行うことにより、コンディショニング時間を半分以下に短縮し、放電等によるトリップ回数、暗電流を 1/3 以下に抑えられることが明らかになった。暗電流の減少は、洗浄により空洞表面の汚れや不純物が減り、電子放出面積が小さくなったためと考えられる。高電界試験前に実

## 論文内容の要旨

施した洗浄予備試験により、超純水高圧洗浄によってサンプルディスク上の不純物の数が 1/10 以下に減少することが確認されている。また、トリップ回数、暗電流値が大きく減っていることから、加速管内での放電は汚れや不純物の影響が大きいと考えられる。今後、加速器の運転に使用する加速管に対して超純水高圧洗浄を行うことにより、大幅なコンディショニング時間の短縮、および暗電流の減少が期待できる。

- (3) 3 種類の加速管とも、ショット数(コンディショニング時間)が増えるに従い、電界増倍係数  $\beta$  は指数関数的に減少し、平均加速電界強度  $E$  は指数関数的に増加すること、さらに、 $E$  と  $\beta$  の積はショット数によらずほぼ一定の値となることが実験的に明らかになった(局所的な表面電界強度  $E_m$  は約 6 GV/m となった)。したがって、平均加速電界強度  $E$  を上げるためには電界増倍係数  $\beta$  を下げなければならぬことがわかる。また、1 度コンディショニングが済んだ電界強度では、コンディショニング時よりも  $\beta$  は小さく、高い電界強度が可能となっている為、放電頻度が大きく下がることになる。さらに、加速管の放電頻度は、コンディショニングを行った時間数よりもコンディショニングを行った最大加速電界強度が大きく影響することも試験から明らかになった。その為、加速器の運転に使用する加速管に対しては、運転加速電界強度よりも 2 割程度高い加速電界強度でコンディショニングを行ったならば、運転時の 1 時間あたりのトリップ回数を 0.1 回以下に下げることが可能と思われる。
- (4) 入出力カップラー空洞の電磁場分布計算を HFSS により行った結果、黒く変色した箇所にはマルチパクタ放電を起こす条件に近い電磁場分布が存在することがわかった。表面電界強度は数 MV/m であり、これらの変色箇所が加速管の耐圧を制限している可能性はないと考えられる。
- (5) 計測される暗電流の運動量スペクトル形状は、コンディショニングの履歴や空洞の状態が異なるため加速管ごとに異なっているが、シミュレーションは計測されたスペクトル形状をほぼ再現した。特に、低エネルギー側については、ビームホールやスリットによるコリメーション効果を考慮することにより、測定結果に近い形状となった。また、シミュレーション結果から、下流側で計測される暗電流は広いエネルギースペクトル分布を持つ方向の揃った電子であることがわかり、試験結果も併せて考えるとその多くが 20~50 空洞付近から放出されていることが明らかになった。従って、加速管下流側で計測される暗電流によって求めた電界増倍係数  $\beta$  は、主に加速管の 20~50 空洞付近の状態を表していることになる。一方、上流側で計測される暗電流は、低いエネルギーのみを持った電子であり、そのほとんどが上流側の数空洞から放出していることも明らかになった。よって、上流側で計測される暗電流値より求めた電界増倍係数  $\beta$  は、加速管上流側の数空洞の状態を表していることになる。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、電子線形加速器に用いられている加速管の高電界加速試験に関する研究である。最近のリニャコライダー計画等で関心をもたれている高電界加速研究では、その到達値、試験をした供試体の内部表面の変化、プロセッシング過程の物理的理解が追及されている。本研究では、高エネルギー加速器研究機構のKEKB入射器である、電子陽電子ライナックで用いられている加速管を用いて、この高電界加速試験を行った。加速管入力結合部の構造の違いや加速管内部の洗浄法の違い等で、合計3種類の加速管の高電界加速試験を行いその結果を論じている。

論文の内容は第1章序論で、背景と目的について述べている。第2章、加速管では試験に用いた加速管についての概要が述べられている。第3章、電界放出電流では高電界試験の測定の重要量である暗電流に関する理論を紹介している。第4章の高電界試験の章は本論文の試験に関する中心的な記述である。4-1節では試験加速管についての形状、RF的特性のデータ、及び加速管に施した超純水高圧洗浄に関する目的、洗浄による不純物の除去効果、具体的な洗浄方法等説明されている。4-2節では高電界試験装置について試験スタンドの記述、測定した物理量の説明、高電界試験の進め方について説明し、4-3節で高電界試験の結果について述べている。一定の方法で投入マイクロ波電力を増加してプロセッシングを行い、マイクロ波パルスのショット数とともに加速管内での電界強度や暗電流がどう変化するか、3種類の加速管Typeでの違いはどうかについてデータが提示され、また暗電流の運動量スペクトラムもエージングプロセスの進行状況とともに測定している。ここで超純水高圧洗浄を施した加速管のプロセッシングは、他の構造の約半分の時間でエージングが終了することが示された。この洗浄法の優位性は超伝導や単空洞では既に示されているが、大電力パルス動作する加速管で示されたのは始めてである。又放電頻度はプロセッシングをした時間ではなく加速管に投入した最大RF電力に大きく依存することを実験的に示した。これは今後のエージング作業に指針を与えるものである。本試験ではSバンドで45MV/mの高電界を達成したが、その後の位相測定から加速管内部にダメージが無く、実用的に45MV/mの高電界をSバンドで実現できることを示したのも非常に意義がある。第5章で考察に入り、3種類の加速管での試験評価、他の試験との比較を行っている。電界増倍係数 $\beta$ と平均加速電界強度 $E$ がプロセッシングの途中でともに、時間の関数として同じ指数関数的になり、 $E$ の増加と $\beta$ の減少は同じ時定数となる、すなわちその積 $\beta E$ がプロセッシング中ほぼ一定になることを実験的に導き出したのは新しい知見と思われる。また暗電流のスペクトラム分布の解析をシミュレーションと比較しているが、二次電子の軌道解析を含めたこのような解析は初めてのものでスペクトラムを再現し説明できたことは評価できるものである。暗電流の上下流でのスペクトルの違いを明快に示したことも新知見である。更に考察ではRF入力結合部で見つかった黒く変色した部分について、HFSSコードによる解析からマルチパクター現象によるものであることを示したのも新知見である。従来加速管のエージングは経験的に行われることが多かったが、本論文の系統だった研究により一定の理解ができるようになり、且つ実用器に対するエージングの指針を与えた意義は大きい。以上を総合すると本論文は、学位論文に相応しい内容であると判断される。