

氏 名 三浦 禎雄

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大乙第 165 号

学位授与の日付 平成 18 年 9 月 29 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 進行波加速管の精密インピーダンス調整方法

論文審査委員	主 査	教授	小林 仁
		教授	黒川 眞一
		教授	榎本 收志
		教授	大澤 哲
		助教授	影山 達也
		助教授	山口 誠哉
		助教授	松本 浩（高エネルギー 加速器研究機構）
		教授	佐藤 勇（日本大学）

## 論文内容の要旨

本論文では、Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) 2 マイル線形加速器で確立された、進行波加速管のカプラーインピーダンス整合方法である R. L. KYHL の方法が適用できない場合、例えば本論文で論ずるチョークモード型加速管用ダブルフィード型カプラー等の、カプラーインピーダンス整合方法について述べる。このような加速管は、低エミッタンスビームを加速する第 4 世代の放射光光源 (X-FEL)、40MV/m を超える高電界加速に耐える高性能加速管であり、実用化が世界的に強く望まれている。

SLAC2 マイル線形加速器の建設依頼、約 40 年間にわたり、進行波加速管のカプラーインピーダンス整合方法として R. L. KYHL の方法が使用されてきた。この方法は、カプラー空胴の移相 (Phase shift per cell) とカップリングを独立に調整することができるので、調整が非常に容易で有効な方法である。但し、この方法においてはカプラー空胴とレギュラー空胴の構造が等しくなければならない (厳密にはカプラー空胴部とレギュラー空胴部の位相分散曲線が等しくなければならない) という制限条件がある。

近年の高性能加速管は、ビームエミッタンスの増大を抑えるため、電子ビームが誘起する高調波モード (Higher Order Mode, HOM) を減衰させる目的で、レギュラー空胴部が複雑な構造をとるようになった。そのためカプラー空胴部とレギュラー空胴部の構造が異なる進行波加速管が増えてきており、こうした進行波加速管のカプラーの調整は複雑で、多くの時間と多大な労力を要する。もちろん、前述の理由で R. L. KYHL の方法では適用できない。そのため高精度で能率的な調整方法は未だに確立されていない。また、クライストロンの大出力化に伴い、高電界加速 (20~40MV/m) が主流となってきている。加速管の高電界化に伴い、カプラー結合孔 (アイリス) の表面電界を下げる目的で、複数の結合孔 (アイリス) を持つようになってきた。実機においてはいくつかの方法が採用されており、マイクロ波の伝播特性を利用して、構造の単純化が図られている。この場合、カプラー調整時に運転周波数以外の周波数を用いる R. L. KYHL の方法は適当ではない。

筆者は、従来の進行波型加速管はもちろん、こうした R. L. KYHL の方法が適用できない場合の、進行波加速管のカプラーインピーダンス整合を可能とする方法を研究開発し、その方法の実際と理論的根拠を本論分にて明らかにする。また、本整合手法を実機に適用した結果を述べる。ここでは、運転周波数での入力および出力電圧定在波比 (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) 1.05 以下、91 加速空胴の累積位相誤差  $\pm 5$  度以内を達成することができた結果について述べる。

## [研究の背景]

電子リニアック加速管のカプラー空洞は矩形導波管から加速管へ電磁波のモード変換( $TE_{10} \rightarrow TM_{01}$ )とインピーダンス変換を行なう重要な役割を担っている。加速管が開発された当時(1940年代)から、導波管と加速管の間のインピーダンス整合調整は多大な労力を必要としてきた。カプラー空洞はアイリスと呼ばれる結合孔を有し構造が複雑であると同時に結合孔周辺は加速管における放電の主たる原因となっていた。さらに加速管が軸対象であるのに対し、一方向からマイクロ波をフィードするカプラーでは電磁界の対称性がくずれることから、ビームを偏向する力が働くこととなる。

1960年初頭、米国に電子ビームエネルギーが20-GeVのスタンフォード2マイルリニア加速器センターが建設された。ここでは、1000本規模のリニアック加速管が使用された。この計画を遂行するに当たり、初めてR. L. Kyhl氏により近代的なカプラー空洞のインピーダンス整合方法が確立された。これにより、システマチックにその寸法を調整することが可能となり、同時に当時問題となっていたカプラー結合孔部での放電現象は実用レベルまで向上を果たした。R. L. Kyhl氏(1963年)の方法は、カプラーと加速空洞が基本的に同じ空洞で構成されること、単一のカプラー孔からマイクロ波がフィードされることを前提とし、異なった3つの周波数を用いてカプラーの構造パラメータを決定する方式であった。

1990年代入り、マイクロ波源の大出力化が急速に進み、リニアック加速管の高電界加速( $\sim 20$  MV/m)の時代が訪れた。この時期に、TeV領域の電子・陽電子衝突型の超大型加速器の建設計画が世界的な規模で検討が開始された。ここでは、リニアック加速管の加速電界は、100-MV/mを目標とした。このR&Dにおいて、再びカプラー空洞部での放電現象は加速電界を制限するという大きな問題に直面した。同時にビームが誘起するマイクロ波によるビームの偏向とビームエミッタンスの劣化も高品質のビームを要求する利用の観点から解決が迫られることになった。

まず放電を抑制する観点からは、複数の結合孔を有するカプラー空洞構造により、結合孔部のエネルギー密度を下げる方式が提案された。これらは世界的にR&Dが行なわれ、3種類の2結合孔を有する(ダブルフィードカプラー)が実用化された。ダブルフィード型カプラーは、通常マイクロ波の管内波長に依存する特殊な構造を有するため、原理的に決まった周波数しかフィード出来ない。対称位置に結合孔を有するフィード方式は同時にビームの偏向力も解決する。

加速管内にビームによって誘起された高調波がビームを偏向することで加速ビームのエミッタンスが増加する問題では、基本周波数に対してはほとんどその性能を維持したままで、ビームの誘起する高調波を減衰させる特殊な形状を有する加速管を使用することで解決する試みが提案されようになり、カプラーは自身と異なった構造を有する加速管と組み合わせて使用されるようになった。

さて、前述のようにR. L. Kyhl氏(1963年)の方法は、カプラーと加速空洞が基本的に同じ空洞で構成されること、単一のカプラー孔からマイクロ波がフィードされることを前提とし、異なった3つの周波数を用いてカプラーの構造パラメータを決定するである。このためR. L. Kyhl氏の考案したインピーダンス整合方法は上述のような、ダブルフィードでカプラーと異なる加速構造を要する新しいコンセプトを有する加速管には適用出来ない。その為、カプラーの最終調整は実験的に反復するしか方法がなく、ここでもまた試行錯誤を繰り返すこととなった。その結果として、カプラー空洞の性能を評価する入力 VSWR および位相特性は、通常のカプラーに劣る場合が多かった。

本研究はR. L. Kyhlの調整方法が適用できない高電界、低エミッタンスを実現しようとする新しい構造の加速管と導波管を結ぶカプラーの新しいインピーダンス調整方法を開発したものである。

### [本研究の独創性と価値]

三浦氏の研究の価値は、独自の考えに基づき、最近とみにその要求の高まっている構造—カプラーが2つのフィード部をもち、かつ加速部は高調波を減衰させるため異なった構造を有する加速管—のカプラー空洞の精密な調整方法を考案した。これは、前述のように R. L. Kyhl の調整方法の制限は、フィード部は1つであること、カプラーと加速部が同じ構造を持つことである。これに対し、本研究ではカプラー調整用の精密な基準空洞を導入することで運転周波数のみで調整を可能としたものである。近來の高性能加速管は低エミッタンス加速と高電界加速(>30MV/m)は必須であり、これには特殊な構造の加速管が使用される。本方式はこれらにも適用可能である。これにより、長時間の実験的反復を必要としない調整が可能となり、従来広く用いられてきた R. L. Kyhl 氏が考案したインピーダンス整合方法の制限を取り除いた。

R. L. Kyhl は3種類の既知の周波数を用いることで、周波数が未調整( $\pm 3$ MHz)のカプラー空洞と加速空洞を数度の反復調整を行うことで精密なインピーダンス整合を可能とし、長い間広く用いられてきた方式である。三浦氏は高精度の基準空洞を導入する発想の転換をはかり、運転周波数のみで、R. L. Kyhl 方式のあらゆる制限を取り除くことに成功した。勿論三浦氏の方式は従来の1フィードでカプラーと同じ加速構造の加速管にも適用でき、より広い適用範囲を有する調整方式となっており、高く評価できるものである。

### [本研究論文の学術評価]

1960年初頭に開発された R. L. Kyhl のカプラー調整方法は数十年に亘って世界の標準として現在も広く使用されている。時代の要請となった新しい方式の加速管の出現に合わせ、世界に先駆けて従来方式を凌駕するといつて過言ではないカプラー調整方法を一般化したことは高く評価されるものである。博士論文においては、R. L. Kyhl 法を十分に調査し、その利点と弱点を整理した。本研究では、基準空洞を導入する発想の転換をはかり、基準空洞のショート位置を移動させることで使用周波数は一つでありながら、R. L. Kyhl 法と全く同様にシステムテックな調整方法を導いたものである。この方法は従来型の加速管にも適用可能である。この開発プロセスで、近來に多用される高周波のシミュレーションコードによる解析のみならず、回路網を用いた精密解析を行い比較検討した。更に、スミスチャートと電磁界モードを使用して、難解なインピーダンス整合をわかり易く視覚化した。

これらの手法はカプラーの整合方法のみならず、加速管空洞やクライストロン空洞の設計にも応用することが可能であり、この点においても評価されるものである。

### [本研究の実機適用の成果]

本研究で完成された新しいカプラー整合方法は実機 C-band (5712-MHz) のダブルフィード型高調波モードフリー加速管へ適用された。この結果、群速度( $v_g/c$ )が 0.0013 および 0.031 において、運転周波数で入力 VSWR: 1.03~1.05 を達成した。92 空洞の累積位相精度は  $\pm 5^\circ$  以内を達成した。C-band 帯のロー付け方法による加速管で無調整で得られた値としては非常に高精度である。また、高電界運転においても、33-MV/m で非常に安定である事が証明されている。

### [本研究の加速器科学への貢献度]

近代および近未来の高性能加速管は、高電界加速と低エミッタンスビーム加速は必須であり、カプラー

一内の電磁場の対称性と耐放電性に優れたダブルフィード型カップラーと高調波モードフリーの特殊形状の加速管が使用される。これらの新しい要求を満たす加速管のカップラーの高精度調整を可能とし、更には従来のカップラー整合作業の短縮化を行った。

又、本研究の新しいインピーダンス整合方法を検証するため、等価回路解析を用いた精密計算、MAFIA を用いたシミュレーションと精密実験を比較して、本方式の信頼性を検証し一般化した。これにより、広く基礎科学分野と産業界で利用されることが予想される。

#### [審査委員会の結論]

本論文審査委員会としては、三浦氏の本研究開発の成果とその使用実績を高く評価し、本審査は合格とした。