

氏名 松 本 浩

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大乙第2号

学位授与の日付 平成5年9月30日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位論文題目 リニアコライダーの為の大電力マイクロ波圧縮

論文審査委員 主査教授 高田 耕 治

教授 木村 嘉 孝

教授 佐藤 勇

助教授 吉岡 正 和

助教授 榎本 收 志

助教授 加藤 隆 夫

(高エネルギー物理学研究所)

助教授 吉田 勝 英 (東京大学)

論文内容の要旨

本論文では、SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) で開発され、使用されている SLED より更に大電力で運転可能な新しい型の SLED システムの研究について報告する。

近來、クライストロンのマイクロ波出力の急速な大型化が進んでいる。これによりリニアックはより高電界で運転可能となり、大型加速器のコンパクト化とコストの低減が可能となった。又、高エネルギー物理学の将来計画の一つとして重心系エネルギーが 300 GeV 以上のリニアコライダーの開発研究を行っている。リニアコライダーを現実的な長さにするためには従来の数倍から一桁近く高い 20 - 100 MV/m の加速電場勾配を実現しなければならない。これを設計する上で考慮すべき点で重要なことの一つに、大規模な加速器システムの信頼性を上げることがある。その本質はパッシブな構成要素に比べると一般的に言って寿命が短いクライストロンやその電源のようなアクティブな構成要素を出来る限り少なくすることである。即ち、一台の高周波源で出来るだけ高いピーク電力を発生させ、多数の加速管をドライブすることである。ここで、パッシブな素子によりマイクロ波電力のパルスを時間的に圧縮することができればクライストロンに対する要求を随分と軽減することになりシステム全体の信頼性を上げるために非常に有効である。このことがマイクロ波パルス圧縮の本質である。

本論文で取り扱う S-band 周波数帯では、*P. B. Wilson* 達が提案したように低損失の空洞にクライストロン出力電力を蓄積しそれを短時間に放出する方法が SLAC の SLC (SLAC Linear Collider) のエネルギー増強の為に開発された。これはクライストロン出力 65 MW、パルス幅 3.5 μ s から 300 MW のピーク出力を発生し、既に長期間の連続運転に使用されている。この運転で開発当初に予想できなかった問題として空洞の励振用結合孔部 (*iris*) からの強い X 線放射や放電等が生じ、動作が不安定になることが分かった。これは結合孔部に表面電界強度が高い部分があることが原因である。SLAC ではこの X 線発生や放電を起すマイクロ波電力レベルを SLED の限界としている。

我々の目標はクライストロン出力 85 MW、パルス幅 4.5 μ s をパルス圧縮し 400 MW の出力を得ることである。これは SLAC の SLED の限界を遥かに越えるレベルである。これを実現するには何等かの方法でこのレベルにおいても結合孔部の電界強度を SLAC 並かそれ以下にしなければならない。この可能性を試みるため、計算機コード (MAFIA, URMEL) による電磁界の解析や低電

力空洞による詳細な評価試験を行いその解決の方法を見つけた。それは、

- (1) 各空洞の結合孔をオリジナルの場合の1個から2個に増やし、
- (2) 更に矩形導波管の狭面で結合する方法を考案した。又、
- (3) 400 MW と言う大電力で使用する為、縮退モード(TM_{115})を常に自動的に抑制する結合方式とした。更に、
- (4) 安定な運転を保証するため、冷却方式、周波数調整機構も含め、全体を機械的に安定な構造とした。

マイクロ波エネルギーがある断面積の円形の孔を通過する時、マクロに見たその孔のインピーダンスは定性的に断面積に反比例すると言える。即ち通過電力が一定の場合、断面積が大きいほど孔に発生する電圧は低くなるということ

である。このことからマイクロ波電力と結合孔部表面の電場 E の関係は $E \propto \sqrt{P}/D$ のように表わすことができる。ここでの D および P は夫々結合孔の直径寸法とここを通過するマイクロ波電力である。空洞の結合係数 β は導波管や空洞の損失が十分少ない場合は $\beta \propto D^6$ 、および結合磁場の2乗に比例することが *J. C. Slater* によって証明されている。このことと $E \propto \sqrt{P}/D$ の関係から次のような解決方法を思いついた。先ず、 $\beta \propto D^6$ であるから $\beta =$ 一定のままで結合孔を倍にしても D の減少率は僅かである。従って、結合孔を増やすことは E を下げるのに非常に有効であることに気がついた。更に、マイクロ波エネルギーを蓄積する TE_{015} 空洞に縮退する TM_{115} モードも常に自動的に抑制するように2個の結合孔を導波管の狭面に配置することを考案した。低電力テスト空洞の測定と MAFIA によるシミュレーションの結果から考案した2-結合孔法式の β は $D^{8.4}$ および $\exp(-0.224 \times t_w)$ に比例することが分かった。 t_w は結合孔部の厚みである。実機においてはこの2-結合孔部の板厚を1.2 cm にすることでオリジナルの1-結合孔部の電界強度が同じレベルのところで、36%も電界を低くすることが可能となった。これは電力にして1.86倍に相当する。この効果は実機の大電力試験において、クライストロン出力80 MW、パルス幅4.5 μ s で380 MW のパルス圧縮に成功したことで証明された。今回の大電力試験ではスケジュールの関係でこのレベルで終了したが、動作は非常に安定であり、結合孔からの強いX線の放射も観測されなかった。このことから400 MW 運転にも何等问题がないと判断する。又、リニアコライダの試験加速器に必要なクライストロン出力80 MW、パルス幅4.5 μ s で380 MW 出力を得ることができた。

論文の審査結果の要旨

電子リニアックの加速電界向上はリニアコライダー等、高エネルギー加速器において特に強く要請されているところである。これは加速管に注入するマイクロ波電力を出来るだけ大きくすることにつながる。しかしクライストロン等高周波源のピーク出力を大幅に向上させることは技術的に大変困難である。そこで、出力のパルス幅を時間的に圧縮し、その分だけピーク値を高める工夫が色々行われている。そのうち技術的に最も確立されたものとしてスタンフォード大学リニアックセンター (SLAC) で発明されたいわゆる SLED 空洞方式がある。

今回松本浩氏が提出した博士論文はこの SLED 空洞の改良にかんする研究をまとめたものである。SLED 空洞が扱える電力ピーク値の限界は空洞結合孔における放電で決まっているが、同氏は結合孔における電磁場を詳細に検討し、穴の寸法、数、位置を根本的に改めた。その結果、SLAC 方式で 70MW 弱であった S バンド入力電力のピーク値の限界が 85MW 以上に改善された。本論文では電磁場の解析、モデル空洞によるコールドテスト、実用機の機械設計とその大電力テスト、放電限界の高電界加速管実験データによる比較検討、等が詳細に述べられている。

本研究は、結合孔の通過電力がその口径の 6 乗に比例する一方、孔面での電場はその 1 乗に比例することに着眼した独創的なものである。これから孔数を SLAC 方式の一個から二個に増やすことによって同一電力での孔面電場を減少させることができる。また孔の位置を導波管の正面から、管内磁場がより小さい側面にずらすことによりさらに孔面電場の減少を図っている。その上、空洞内電磁場ベクトルの方向と導波管内のそれが一致するように二個のあなを選び、縮退している Q 値の低いモードが空洞に励振されないような工夫も凝らしている。

このような設計思想をテスト空洞や 3 次元コードによるシミュレーションで詳しく確かめた上で、実用機の製作をおこなった。そこでは、高精度の機械加工、超高真空や超高電圧に配慮した組立、鍛付け等、大電力電子管技術に則った設計がおこなわれている。大電力試験においては、コンディショニングを注意深くおこない、取り扱い電力で 85MW、ピーク出力で 380MW という世界最高レベルの結果を実現した。同装置を現在、高エネルギー研究所で試作中の高電界 (33MV/m) リニアックに多数配備しつつあるが、その他のリニアックへの応用も検討されている。

以上のように、松本浩氏の研究は独創的な着想のみならず、高エネルギーリニアックの性能向上に非常に貢献しているものとして大変高く評価された。これは長年にわたる電子リニアック研究を通して培われた大電力高周波技術への深い造詣に基づくものであり、教物科学研究科加速器科学専攻として博士の学位を授与するに相応しいと判断した。また松本氏に対して博士論文にかかわる専門分野ならびに基礎となる分野の学識を口述により試験した。パルス圧縮の原理、円孔電磁場の計算、円孔のサセプタンスの決定、3 次元コードによる電磁場計算、空洞電磁場測定技術、空洞機械設計、空洞大電力テスト、などの項目についての基礎的および専門的理解を質疑応答により試すものであったが、同氏はこれらに的確に答えた。長年にわたりリニアック研究に従事し、数々の成果を上げてきたことによって、加速器物理学さらには一般物理学にたいしても博士課程を修了した者と同様以上の学力があると判断された。さらに英語の発表論文、国際学会での英語による発表の実績から、語学力も十分なものとみなされた。