

氏 名 加古 永治

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大乙第 206 号

学位授与の日付 平成 22 年 9 月 30 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 高電界応用のための L バンド超伝導加速空洞システム  
の開発に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 山本 明  
教授 山口 誠哉  
教授 赤井 和憲  
教授 佐藤 康太郎  
教授 影山 達也  
教授 古屋 貴章  
非常勤講師 佐藤 勇（日本大学）

## 論文内容の要旨

超伝導空洞は、放射光用エネルギー回収型線形加速器（E R L, Energy Recovery Linac）、加速器駆動核変換システム（ADS, Accelerator Driven System）、素粒子実験用円形加速器（例えば、B-factory）および衝突型線形加速器（リニアコライダ）、医療用小型加速器などを含め、基礎科学分野での広範囲な加速器への応用が可能であり、研究開発が活発に行なわれている。その中で、TeV領域での衝突型素粒子実験を目指したリニアコライダでは、特に高加速電界での安定なパルス運転が必須とされる。本論文においては、高電界応用に主眼をおいた超伝導加速空洞システム開発の研究成果をまとめている。

著者は、90年代初頭よりTESLA（TeV Energy Superconducting Linear Accelerator）への応用を目指して、Lバンド（1.3 GHz）の単セル空洞による高電界超伝導空洞の研究開発に着手した。この開発の初期段階においては、真空熱処理、電解研磨や高圧水洗などの表面処理技術の開発、組立クリーン環境の整備、低温測定計測システムの改善などにより、30 MV/m以上の高加速電界が単セル空洞では安定に達成できることを実証した。90年代後半には、CEA/Saclay（仏、研究所）との単セル空洞についての国際共同研究を通して、高加速電界達成における電解研磨および100℃ベーキングの重要性を明確に示し、また、DESY（独、研究所）のTTF(Tesla Test Facility)用クライオモジュールへ組み込む9セル空洞において、KEKでの表面処理技術の適用について国際協力を推進して、9セル超伝導空洞での高加速電界の性能向上への重要な寄与を重ねた。2000年からは、日本原子力研究所との共同研究によりJ-PARCの2期計画に予定されているADS超伝導リニアックに用いられる972MHz 9セル超伝導空洞2台を内蔵するクライオモジュールの開発に着手し、その大電力試験において入力結合器および周波数チューナーを含む超伝導空洞システムとしての総合的な基礎試験を行った。このように十数年以上にわたる高電界応用を目指した超伝導加速空洞の開発研究によって蓄積されてきた基盤技術と経験は、後述の研究開発に生かされ、本論文の主要部分として構成される。

国際協力プロジェクトILC（International Linear Collider）の建設を目指し、KEKでは超伝導高周波試験施設（STF, Superconducting RF Test Facility）の第1期計画として、1.3GHz,9セル超伝導加速空洞システム4機を収納するクライオモジュールの開発を2005年より開始した。超伝導加速空洞システムの構成要素としては、高電界を発生しビームを加速するためのニオブ製9セル空洞本体、空洞に高周波電力を供給するための同軸型アンテナである入力結合器（インプットカップラー）、空洞内を通過するビームによって誘起される有害な高調波モードを空洞外部に取り出すための高調波出力結合器（HOMカップラー）、および、空洞に軸方向の荷重を加えることにより変形を与えて共振周波数を制

御する周波数チューナーがあり、これらが主要な開発項目となる。また、チタン製ヘリウム槽ジャケット、極低温用磁気遮蔽シールド、ニオブチタン合金製フランジ、真空シール材、加速電界モニター用カップラー、RFコネクターなども重要な構成部品である。ILCを目指した超伝導加速空洞システムの開発においては、超伝導空洞の単体試験で35 MV/m以上の加速電界の達成、入力結合器のテストスタンドでの大電力試験で1 MW以上の透過高周波電力の確認、さらにクライオモジュール試験では加速電界31.5 MV/mでの安定なパルス運転の実証と発生するローレンツ・デチューニングの $\pm 50$  Hz以下へのピエゾチューナーによる周波数補正制御が、それぞれの数値目標として設定されている。本研究開発では、DESYで主に開発されてきたTESLA空洞システムについて、主要構成機器である超伝導空洞本体、入力結合器、周波数チューナーに、独自の改良を加えたTESLA改良型超伝導空洞システムを構築し、設計・製作、単体での性能確認およびクライオモジュールでの総合試験を行った。TESLA改良型超伝導空洞システム4台を内蔵するクライオモジュールの大電力高周波試験において、高加速電界での安定なパルス運転の達成とローレンツ・デチューニングの抑制効果に重点を置いた実験を行い、改善を行なった主要構成機器について設計の妥当性の検証を行なった。

本論文では、第1章において緒言として、研究の背景を述べ、本研究の主な課題を説明する。第2章では、超伝導空洞の高電界性能について行なった単セル・9セル空洞での基礎研究、および、実用機となるILC用9セル空洞およびERL (Energy Recovery Linac) 用2セル空洞での実験結果を示し、空洞性能を制限する要因について得られた知見を述べている。次に、第3章では、超伝導空洞システムの主要周辺機器である入力結合器の開発について、ADS用クライオモジュールおよびILC用空洞パッケージで行なった設計・製作から性能確認試験までを纏めている。さらに、第4章では、超伝導空洞2台を内蔵するADSクライオモジュールでの基礎実験、および、超伝導空洞4台を内蔵するSTFクライオモジュールでの周波数チューナーを含めた総合試験について述べ、実験結果から得られた問題点の抽出および改善点について論じている。最後に、第5章において、本論文のまとめを行っている。

## 博士論文の審査結果の要旨

本論文は、先端・高エネルギー粒子加速器において、重要な役割を担う超伝導加速空洞技術開発について、申請者の永年にわたる技術開発研究を基に、『Lバンド超伝導加速空洞システムの開発に関する研究』を、博士論文として纏めたものである。加古永治氏は、この研究に1990年代初頭より取り組み、特にシステムとして、超伝導加速空洞技術開発を重ね、その進展に多大な貢献をしている。論文は、基礎的研究からKEKベースライン空洞システムの開発にまで及び、実験的検証に基づき、研究開発成果を纏めている。

基礎研究では、空洞表面処理方法における化学研磨と電解研磨法を、実験的に再現性良く比較研究し、電界研磨の優位性を検証する成果を得た。また9セル空洞実機開発を念頭においたシステム技術開発研究では、空洞性能向上、製造技術の改善を目指し、『空洞本体形状、高周波入力結合器、高周波出力結合器、そして周波数調整機構等』を系統的に俯瞰した『空洞システム設計の最適化』の研究に取り組み、以下を特色として系統的な実験的検証の積み重ねとして、纏められている。

- 1) 超伝導加速空洞の機械剛性を高めることにより、ローレンツ・ディチューニングに対して、安定度の高い空洞設計の実現と実験検証、
- 2) 入力結合器と空洞本体が強い結合をもち、周波数変動に対する影響を抑制する設計。また、結合器外側導体を固定管とし、内導体（アンテナ）部にベローズ調整機構を持つ構造設計および組み立て作業の効率化および議論。
- 3) 周波数調整機構の配置の最適化、調整機構の保守作業を意識した効率的な設計および実験的検証。

これらの研究への取り組みの結果、ILCを目指したLバンド超伝導加速空洞の開発において、9セル空洞単体試験（縦測定）において、最高達成電界として、9セル空洞において38 MV/mを達成し、5空洞平均で、31MV/mを達成し、空洞工業化技術の進展にも大きく貢献した。本論文では、第一章で、研究の背景、目的を述べ、第二章では、超伝導空洞の高電界性能についての研究を纏めている。第三章、四章では、システム開発に重点を移し、入力結合器の開発から、クライオモジュールでの総合性能試験までを系統的に纏め、今後の技術開発展望について議論を行っている。第五章では、結論をまとめている。

本論文は申請者のこれまでの15年以上に亘る特色ある系統的な（システム

技術) 研究成果を纏めた内容であり、今後、この分野での研究に取り組む研究者に、多くの指針をもつものである。審査段階で、実験成果の検証に対する議論に、一層の充実を期待するコメントがあったが、実験的検証の深さ、的確さを評価し、博士論文として十分に値すると結論した。