

氏名 三 浦 厚

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第71号

学位授与の日付 平成6年3月24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 リニアコライダーの為の大電力高周波窓の開発

論文審査委員 主査 教授 小林 正典

教授 高田 耕治

教授 山崎 良成

助教授 斉藤 芳男

助教授 野口 修一

教授 諫川 秀

（高エネルギー物理学研究所）

論文の審査結果の要旨

高エネルギー領域での物理実験用粒子加速器は近年ますます加速エネルギーの増強が求められている状況にある。加速エネルギーは大電力高周波としてクライストロンから加速管本体に供給されるが、大電力を通過させ真空中には遮断する機能を有するセラミックスを用いた高周波窓がそれらの間に設置される。この高周波窓が大電力通過の際に破壊することが深刻な問題となっており、100MWという大電力通過が可能な高周波窓の開発が世界各国で急がれている。

今回、三浦 厚君が博士論文として行った研究はそれまで知られていた50MW程度の電力領域での破壊とは異なる破壊の原因が100MWを越える大電力領域にあることを明らかにし、レゾナントリングと呼ばれる試験器で300MWまでの大電力でも破壊しない高周波窓を開発する過程を通して破壊の原因を明らかにしたというものである。

高周波窓の破壊の原因としてマルチパクタとよばれる高周波と同期した電子衝撃のエネルギーによって破壊が起こることが知られ、高周波窓表面に二次電子放出係数を小さくするTiNコーティング法が開発され成功してきた。また、窓を取り付ける構造や接合技術によっても破壊がおこることは知られていた。しかし、これらを改善しても50MWを越えて大電力を通過させると破壊が起こった。本研究では破壊の原因がセラミックスの内部にあると推定し、セラミックス内部からの破壊を抑えるために、セラミックスを焼結する際に使用される焼結助剤の量と質を制御、ファインセラミックスとHIP法を用いることによる空孔率の制御、内部欠陥分布の均一性の確保などの対策を施し、窓を多数製作し実験試料とした。レゾナントリングに設置して大電力通過試験を行った結果、大電力領域でのセラミックス製の高周波窓の破壊を抑えるには、MgOを主成分とする焼結助剤の低減と空孔率低減が有効であることを明らかにすることができ、300MWまでの大電力高周波に耐える窓を開発することに成功した。

以上のように、三浦 厚君の論文は、大電力高周波窓の破壊のメカニズムを、原因と考えられる要素を除去し製作するという工学的手法によって明らかにしている。また実験によって100MWを越える領域での大電力高周波の通過に成功したという重要な結果を含んでいる。実験の進め方、結果への理解も含め、この分野での研究を足がかりに有能な研究者として成長していくことを示す内容をもつものとして、数物科学研究科加速器科学専攻の博士論文としてふさわしい内容を有している、と論文審査委員会として判断した。

この論文の学位授与に関し、平成6年2月18日に開催された加速器専攻委員会は、主査らによる論文審査経過概要の説明、審査結果報告書の「論文審査結果」及び「試験結果」に基づき慎重に審議した結果、論文審査委員会の結論を専攻委員会の審議として妥当なものと判断し、「可」とした。

論文内容の要旨

本研究は、透過電力100MW級の高周波窓の開発を目指して研究を進め、高周波窓破壊の主な原因が50MWを超える領域では高周波窓材料のセラミックス内部の空孔と焼結助剤にあることを明らかにし、これらを除去することによって300MWを超える大電力が透過しても破壊しない高周波窓を開発したものである。

素粒子の研究を今後もさらに押し進めるには重心系のエネルギーが300GeV以上のリニアコライダーが必要であるとされているが、このようなリニアコライダーで電子や陽電子を加速するには100～200MW級の大電力クライストロンが千本以上必要であり、そのほとんどすべてのクライストロンが同時に稼働条件を充たさなければならない。大電力クライストロンから加速管本体へ導波管を經由して大電力高周波を移送するが、クライストロンと導波管との間には真空を遮断しながら大電力を通過させる高純度セラミックス製の高周波窓が多数用いられている。大電力がこの高周波窓を通過する際に、大電力に耐えられず窓が破壊することが起こり、100MW級のクライストロンを開発しリニアコライダーを順調に運転するというので、信頼性の高い大電力高周波窓の開発は不可欠な課題である。

本論文は、高周波窓の破壊原因の追求をとうして、従来の技術では困難と考えられていた透過電力100MWを超える大電力高周波窓の開発に関し研究を進めたものである。

最初に、破壊の原因となると考えられた 1)誘電体材料(セラミックス)の材質選択、2)材料の表面処理条件、3)電磁気学的窓の構造などについて研究を進めた。その結果、数十MW程度の領域では破壊はセラミックス窓の表面でのマルチパクタが主な原因と考えられ、TiNを窓の表面にコーティングすることによって破壊を減らすことができることがわかった。しかし、透過電力がさらに増大していくと再び破壊が起こった。この破壊を調査したところ、破壊はセラミックス内部からも起こっていることが明かとなった。これらのことから、4)焼結助剤による局所的な誘電損失の増加、5)セラミックス焼結時に生じる内部空孔に電界が集中し内部放電による局所的な温度上昇、6)これらの過程によってついにはセラミックスの熔融や熱歪みによる亀裂の発生という破壊機構を推察した。

次いで、これらの推察された破壊原因を確定するために試料セラミックスの製作と実験による検証を行った。試料セラミックスとして、空孔率、焼結助剤の含有量と種類を制御したものを多数用意した。空孔率と焼結助剤の間には製作技術上の関連があったが、Hot Isostatic Pressing : HIP と呼ばれる処理技術を適用することによってそれぞれをかなり分離して製作した。破壊領域が内部にある電力領域なので、表面処理の影響を少なくするためのTiNコーティングをあえて行わず条件を統一した。

これらの試料をレゾナントリングに挿入設置して大電力による破壊実験を行った。使用したレゾナントリングでは310MWまでの試験が可能である。高周波窓で放電が生じた場合には位相が変化するため透過電力は自動的にすばやく減衰するので、レゾナントリングでの試験は誘電体が急激に最終破壊にまで至らずに破壊途中を観察するのに適している。

レゾナントリングに設置した試料セラミックスを通過する電力を徐々に大きくしながらアルミな表面での発光現象を観察した。発光パターン及びパルス的な時間依存性の結果をマルチパクタを想定した計算機シミュレーションの結果と比較検討したところよい一致がみ

られたことから、低電力領域での破壊現象の原因の一つにマルチパクタが強く関係することを明らかにした。

さらに通過電力を大きくして50MWを超える領域にはいるともはやマルチパクタは起こらなくなるのが明かとなったが、通過電力がパルスであるということは低電力領域と高電力領域との間を往復することから、TiNコーティングはマルチパクタの抑制に有効であり、破壊を防ぐのに役にたっている。50MW以上の領域での破壊原因を明らかにするため、セラミックス空孔率と焼結助剤の量をそれぞれパラメータを選んで破壊実験を繰り返した。実験の結果、純度が高く空孔率の低いアルミナほど高周波損失が低く破壊しないことがわかり、純度99.9%の高純度アルミナで空孔率を0.5%以下に抑えたものを製作できれば透過電力300MWまで破壊しないことが明かとなった。このような高純度低空孔率のアルミナセラミックスを製作できたのはHIP法の採用による。

次ぎに、高周波損失を増加させる原因となる焼結助剤にMgOがあるが、MgOを全く含まないアルミナセラミックスを用いて高周波窓を製作し大電力試験を行ったところ、高周波損失が最も少なく300MWを超える電力が通過しても破壊しないことが確かめられた。このことは誘電体中の空孔周りの電磁界の解析からも裏付けられた。

以上のように、実験と結果の解析からの推察とに基づいて、次の実験試料を製作し大電力通過実験を多数回繰り返すという手法によって、当初目標とした100MW級の大電力高周波窓を開発することに成功した。以上述べたような考えに従って材料を選択し、高周波窓を製作すれば大電力クライストロン用の窓として実用に耐える有効な窓を手にすることができるようになる。