

氏 名 許斐 太郎

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1492 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 超伝導加速空洞のための新しい高次モードダンパーの開発

論文審査委員 主 査 教授 松本 浩
教授 影山 達也
教授 古屋 貴章
教授 山口 誠哉
准教授 齋藤 健治
講師 竹内 保直
セクションリーダー 大内 伸夫
日本原子力研究開発機構

論文内容の要旨

超伝導加速空洞は次世代高エネルギー物理学実験機 ILC (International Linear Collider: 国際リニアコライダー)の中核技術として用いられる。ILC の特徴はビームが1つの加速空洞を1度しか通過しない線形加速器を使用する点である。このため ILC 加速器ではビーム衝突点までエミッタンスやエネルギー広がり等を保ったまま加速できる加速空洞が求められる。そこで、超伝導加速空洞の高電界化と高エネルギービームを高品質に保つことが重要である。また中心エネルギー500GeVを得るために、1.3GHzの9Cell超伝導加速空洞が約16000台必要であるため、建設コストを抑えるためにコンパクトな設計でなければならない。

加速空洞とはその内部にマイクロ波を閉じ込めた共振器であり、加速空洞の場合、加速に適した TM₀₁₀ モードを閉じ込めている。ただし、加速空洞にはビームの加速に用いる加速モード以外に HOM(Higher Order Mode:高次モード)と呼ばれる共振モードが数多く存在する。HOM はビームが空洞を通過するときに発生する Wakefield(航跡場)により励起され、後続のビームに作用しビームエミッタンス・エネルギー広がりを劣化させる。このため、HOM ダンパーと呼ばれる HOM をダンプする構造物が加速空洞には不可欠である。

HOM ダンパーは加速モードと HOM を選別し、加速モードは空洞内に閉じ込め、HOM のみをダンプする機能が必要である。既存の超伝導加速空洞用 HOM ダンパーでは主に2つの方法が使われている。1つ目は導波管やビームパイプの Cutoff 周波数を加速モード周波数以上に設定することで HOM のみ伝播させ RF 吸収体でダンプする方法である。2つ目はビームパイプ部に設置したループアンテナで加速モードと HOM を結合させ、カップラー内部に組み込んだ加速モード周波数を反射するバンドパスフィルターを使い加速モードを空洞内部に閉じ込め、HOM のみカップラーから空洞外部に取り出し RF ダンパーでダンプする TESLA 型 HOM Coupler と呼ばれる方法がある。後者の方法を ILC では Baseline として採用している。

導波管やビームパイプの Cutoff 周波数を利用する方法は HOM ダンパーのサイズが大きくなることや、ビームパイプ径を HOM が取り出せるように大きくしなければならず加速モード場のビームパイプへの染み出しが大きくなり加速勾配が低くなるため ILC には適さない。TESLA 型 HOM Coupler はコンパクトな形状ではあるが、ビーム軸に対し局所的に取り付けられるため、Dipole モードの縮退が解かれ HOM Coupler と結合が弱い HOM が生じる問題点を持つ。

一方、加速空洞の高電界化の観点から見ると、TESLA 型 HOM Coupler は複雑な形状を持ち洗浄が困難なため 40MV/m 付近から高電界で Q Slope を引き起こし、高電界を達成できないという問題がある。

我々は既存の HOM ダンパーに代わる Demountable Damped Cavity (DDC)と名付けた HOM ダンパーを ILC の Alternative Cavity Design(ACD)として提案する。

DDC の RF 構造について説明する。まず、加速モードと HOM を同軸管に結合させる。この同軸管の外導体には Beampipe を用いる。内導体の挿入長さによって結合を強くできる。次に、同軸管途中に設置した Choke で加速モードのみ加速空洞側に反射して、加速モードを加速空洞内に閉じ込める。一方、HOM は同軸管を伝播し同軸管終端まで到達する。最後に、同軸管終端には 77K のサーマルアンカーに保持された RF 吸収体(Ferrite)で熱に変換しダンプする。

DDC では高電界での Q Slope を克服するために Choke 部をフランジ構造にして Demountable にすることで、洗浄を容易にしている。なお、DDC では He Vessel の Baseplate を Choke 空洞の一部とし Demountable のフランジとしても用いることで、ILC に要求されるコンパクト化を実現する。

本研究では Ichiro 単セル空洞に DDC を適用して DDC の原理実証を行うことを目的とする。原理実証試験で検証した項目は主に以下の 5 つである。

[1] シミュレーションによるアイデアの検証

シミュレーションの結果、Choke のバンド幅は 25kHz であった。これは 9Cell 空洞の Lorentz Detuning 量~1 kHz に比べて十分に大きい。超伝導空洞は High-Q であるために周りの振動や Lorentz Detuning による周波数の離調問題がある。本アイデアは、こうした High-Q でも十分に使える事が検証された。

[2] 加速空洞と Choke の周波数マッチングの検証

加速空洞と Choke の周波数マッチングを室温で取った状態で 2K に冷却しても周波数マッチングを維持できた。空洞冷却時における空洞と Choke の周波数の離調問題がないことが分かった。Choke にチューナーなどを付ける必要がないことが分かった。

[3] Demountable 性の実証

Demountable 部の磁場強さは加速空洞の最大表面磁場の 1/6 であるので Demountable 部は Super-Joint でなければならない。Demountable のフランジ形状を修正する事で最終的に加速電界 19 MV/m 、 $Q_0=1.5 \times 10^{10}$ を得た。Demountable 構造が磁場の強い場所でも使える事を実証した。ただし再現性の追求が今後の課題である。

[4] 洗浄の容易さの実証

上に述べた Demountable 部の実証試験では X 線は観測されなかった。また、他の測定でも X 線が観測されていない。これにより Demountable にすることで容易に表面洗浄できる事を実証した。

[5] Multipacting(MP)、 Field Emission(FE)の検証

シミュレーションでは、Choke 内の MP は弱い事が予想されている。内導体を含めた試験では、最大加速電界まで X 線は観測されていない。このことから MP や FE は全く問題ないことが実証された。また内導体などを空洞に持ち込んでも、Field Emission や Multipacting が起きないことが分かった。

[6] 吸収体での HOM のダンプ率

吸収体を装着した試験の結果、吸収体での損失を表す Q 値 Q_{HOM} は常温で、TE111 は $Q_{\text{HOM}}=200$ 、TM110 は $Q_{\text{HOM}}=300$ を得た。これは TESLA 型 HOM Coupler に比べ 1~2 桁良い値である。このように高いダンプ力が得られる事が DDC の特徴の一つである。今後、2K に冷却した場合の吸収体での損失を測定する。

以上のように DDC の各項目を原理実証できた。

博士論文の審査結果の要旨

研究の背景： 夢の加速器リニアコライダー(ILC)を実現するには多くの加速器技術の向上が必要です。本研究はそのハードルの中で最も重要な加速器技術の一つである高次モードダンパーについて独創的なアイデアを提案し、それを実証したものです。

ILCは2004年に超伝導加速器技術を選択しました。その理由として超伝導技術は直ぐにでもILCを実現可能ということでした。しかしながら、加速電界強度やビームウェークを取り除く高次モードダンパー等の重要な技術課題は今日も懸案事項となっているのが現状です。本研究で初めてILCの仕様を満たすべく開発が行われ、その性能が実証されました。

重要な課題： 短いバンチ長のビームが加速空洞内を通過する際にビームが高調波をまき散らします。この高調波と空洞が共鳴すると高調波のエネルギーは空洞内に蓄積され、後続のビームのエミッタンスとエネルギー幅を増大させ、ビームの品質は低下します。これを低減するために実用化されたILCベースラインの高次モードダンパーは、その近傍にある高調波モードしか低減できないという問題があります。また、この高次モードダンパーは構造が複雑なため、RFに暴露される表面を清浄にするのが容易でないため、高電界領域で放電が生じ、加速空洞のQ値が急激に低下する原因にもなっています。

研究の独創性： 許斐氏の研究では、重要課題の一つであった空洞内の全方向の高調波モードを取り除くこと、高調波ダンパーを限られたスペースに単純形状で、且つ組立方式として洗浄が容易な構造を世界で初めて考案し、実験によりその性能を実証しました。具体的には、1/4波長共鳴型フィルターと同軸管、フェライト吸収体を組み合わせた簡潔な構造体で、量産が容易であることも利点の一つです。この高調波ダンパーは超伝導技術で重要な清浄な表面を実現するために分解可能な組立方式としたことです。実機の測定において、高調波ダンプ効率にはILCベースライン型より1桁から2桁高いことが実証されました。また、耐放電性を高めることに成功し空洞Q値の低下現象も解決しました。

研究能力： 組立方式の高調波ダンパーは、Super-jointと呼ばれる超伝導部でのフランジ結合を行うため、高度な技術力が必要です。ここでは、機能分離(真空気密とRFコンタクト)を導入し、課題を解決しました。これは超伝導空洞で世界初の成功例です。また、1/4波長共鳴型フィルターとフェライト吸収体の最適な寸法決定においては、CSTコードを自在に駆使してパラメーターを算出し、自ら設計した測定装置にて検証実験を行いました。実証された実験結果は、許斐氏の研究目的であった高調波モードの低減に世界に先駆けて新しいアイデアを提案し、それを成し遂げました。その研究能力

を評価致します。

判定：研究課題の独創性、実験研究の研究能力は本研究成果が示しているように、博士としての水準に達しており、審査員全員一致で加速器科学専攻の博士論文として十分な内容であると判定し、合格と致します。