

新博士紹介

氏名 許斐 太郎* (分子科学研究所)
 論文提出大学 総合研究大学院大学
 学位種類 博士 (理学)
 取得年月日 2012年3月23日
 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

1. はじめに

超伝導加速空洞は ILC や ERL などの次世代加速器の中核技術として用いられる。これらの次世代加速器の特徴はビームが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。このため加速勾配が高く、かつ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ている。

博士論文では Demountable Damped Cavity (DDC) と名付けた ILC Main Linac 超伝導空洞のための新しい高次モード (HOM) ダンパーの開発を行った。本稿では、この HOM ダンパーの特徴と単セル加速空洞を用いて行った原理実証試験の結果を述べる。最後に、新博士紹介として、著者の近況と抱負について述べる。

2. ILC Main Linac 用 HOM ダンパー

加速空洞にはビームを加速する加速モード以外に、HOM 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発生するウェーク場により励起され、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、質の良いビームを作るには HOM ダンパーが不可欠である。

ILC の Baseline ではビームパイプ部に TESLA 型 HOM カプラーと呼ばれるバンドパスフィルターを組み込んだアンテナを設置して HOM をダンプする。加速モードはバンドパスフィルターによって加速空洞側に反射して空洞側に閉じ込められる。一方、HOM はカプラーから空洞外部に取り出され RF ダンパーでダンプされる。この構造は形状がコンパクトであり、加速電場の漏れいも小さい点は ILC に適しているといえる。

しかし、ビーム軸に対し HOM カプラーが局所的に取り付けられるため、双極子モードの縮退が解かれ HOM カプラーと結合が弱い HOM が生じるという問題点もある。また、加速空洞の高電界化の観点からは、複雑な形状のために、洗浄が困難で 40 MV/m 付近から Q 値が減少し高電界を達成できていない。この現象を Q-Slope と呼んでいる。

3. Demountable Damped Cavity (DDC)

3.1 DDC の特徴と構造

本研究では Baseline 型の HOM ダンパーの問題点を克服するために Demountable Damped Cavity (DDC) と名付けた HOM ダンパーを ILC の Alternative Cavity Design (ACD) として提案した (図 1)。

DDC の RF 構造について説明する。まず、加速モードと HOM は同軸管と結合して、同軸管内に取り込まれる。同軸管内で加速モードは Choke によって反射されて空洞に閉じ込められる。一方 HOM は同軸管を伝播し、同軸管終端に置いた RF 吸収体で熱になり空洞外部に取り出される。

また、DDC では洗浄が容易な構造にすることで、高電界での Q-Slope 問題を克服することを目指した。そのために Choke 部をフランジ構造にして Demountable にしている。さらに、He 容器のベースプレートを

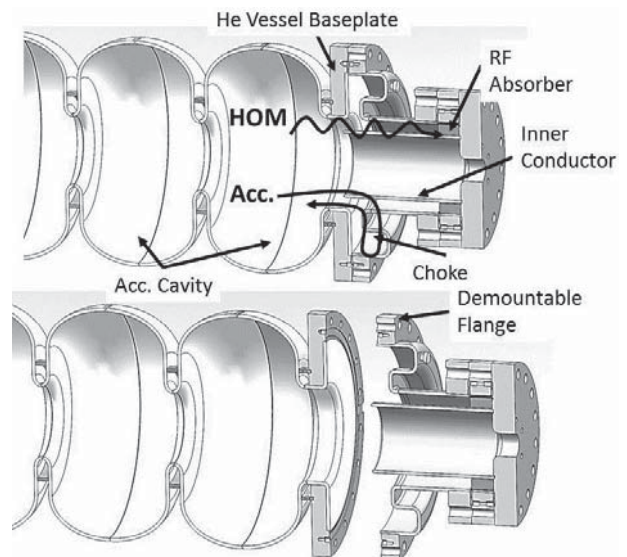


図 1 DDC の構造

* 分子科学研究所 Institute for Molecular Science (E-mail: konomi@ims.ac.jp)

Choke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。

3.2 単セル空洞での試験結果

本研究では ILC-ACD としてデザインされた、Ichiro 単セル空洞に DDC を適用し以下に述べる各項目の実証試験を個別に行った。

(1) シミュレーションによる Choke バンド幅の検証

超伝導空洞は High-Q であるためマイクロフォニックスによる振動や Lorentz Detuning による周波数の離調問題がある。9-Cell 空洞の Lorentz Detuning 量は約 1 kHz である。このため、Choke のバンド幅を 1 kHz 以上にする必要がある。RF 吸収体での加速モードの損失を空洞の壁面損失の 1% 以下を目標として設計した。つまり、空洞の無負荷 Q 値を 1×10^{10} とすれば RF 吸収体での損失 Q 値を 1×10^{12} 以上に設計する。設計方法は始めに、空洞と同軸管の結合 Q 値は同調曲線法により算出して結合 Q 値 800 を得た。これにより Choke に課す減衰量が -90 dB 以下とわかる。ILC で許容されるスペースで Choke を作る場合、図 2 に示すように -90 dB 以下になる区間が 25 kHz になり、目標を十分

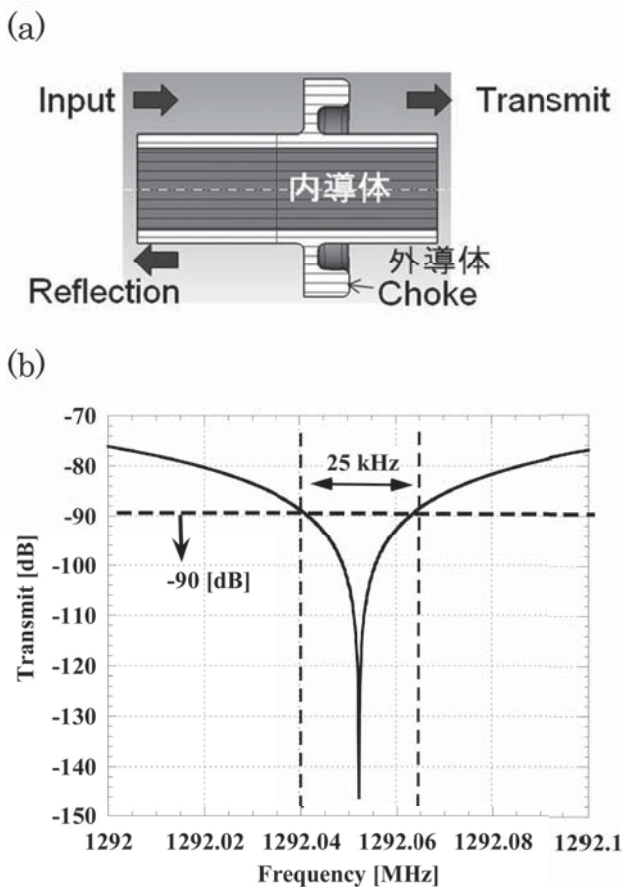


図 2 Choke による加速モードの減衰。(a) シミュレーションに用いた構造。(b) 透過率の周波数依存性。

に満足している (図 2)。

(2) 加速空洞と Choke の周波数マッチングの実証

空洞冷却時の熱収縮による空洞と Choke の周波数離調問題も懸念された。しかし、室温で加速空洞と Choke の周波数マッチングをとったのち、2 K に冷却しても周波数のマッチングが維持されることを実証できた。これにより冷却による周波数の離調問題がないことを証明できた。このことは、Choke にチューナー等を付ける必要がないことを意味している。

(3) Demountable 構造の Super-Joint 特性の実証

Demountable 部の磁場強さは加速空洞の最大表面磁場の 1/6 の強さを持つ。このため、Demountable 部は超伝導特性を持つフランジ (Super-Joint) でなければならない。図 3 に、この課題に取り組み始めてからの高電界試験 (Vertical Test: VT) 結果を示す。

加速モードに対する RF 特性は内導体、RF 吸収体の有無によらず同じであるため、この試験では Demountable 部のみの性能を検証するために内導体、RF 吸収体を挿入していない。実験当初 8th VT は加速電界 6 MV/m, $Q_0=8 \times 10^7$ であったが、フランジ形状を徐々に修正することで、最終的に 18th VT に示すように、加速電界 19 MV/m, $Q_0=1.5 \times 10^{10}$ を得ることができ、DDC の Demountable 構造が高い Super-Joint 特性を持つことを実証した。なお、本研究では DDC 構造の実証試験を急いだために、加速空洞の高電界化に必須の遠心バレル研磨を省いている。このため、18th VT での到達電界の制限は加速空洞側で生じたと考えている。

(4) Demountable による洗浄容易性の実証

Demountable の実証試験では、一切 X 線は観測され

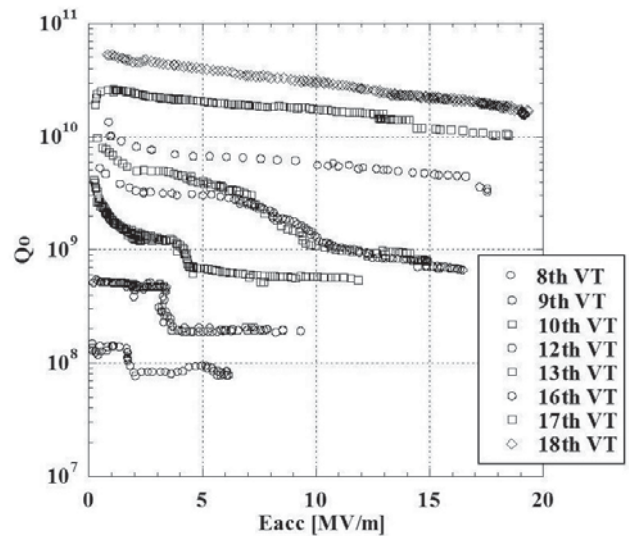


図 3 Demountable の実証試験結果

表1 DDCとILC Baseline HOM カプラーのHOM Q値の比較

	TE111	TE110 (1.8 GHz)		TM011
	(1.6 GHz)	Low	High	(2.4 GHz)
DDC	Not Found	620		180
TESLA 型 HOM Coupler	2×10^4	3.5×10^4	4.7×10^3	1×10^5

ていない。このことは Multipacting (MP)・Field Emission (FE) を克服できた事を示している。これにより Demountable 構造による洗浄容易性を実証できた。

(5) Multipacting, Field Emission の検証

シミュレーションでは Choke 内、同軸管内での MP は弱いことが予想された。内導体を挿入して行った高電界試験でも X 線は発生しなかった。このことから、MP や FE の問題はないことが実証された。また、同時に内導体を空洞に持ち込んでも MP や FE の種となるゴミが生じないことを実証できた。

(6) DDC の HOM 減衰特性

表1に77 Kに保持した吸収体を装着した空洞を2 Kに冷却してHOMのQ値を測定した結果と、比較のために ILC Baseline HOM カプラー¹⁾のHOMのQ値を示している。DDCで得られたQ値はILC Baseline HOM カプラーに比べ1から2桁低い値であり、双極子モードの分離も発生しなかった。これにより、軸対称構造である DDC が期待通りの高い減衰性能を持つことを実証できた。

4. 今後の展望

本研究では DDC 構造の原理実証を主目的に行った。DDC はビーム軸対称性と高い HOM 減衰特性を兼ね備えた HOM ダンパーであり、超伝導空洞に適している

と考えている。この構造を多連空洞に適用する場合の最適な方法を現在検討している

5. 近況と抱負

博士課程終了後、幸運にも自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設 (UVSOR) に助教として採用された。UVSOR は 750 MeV のシンクロトロン光源であり、2012 年 5 月現在、蓄積リングのアップグレード作業が行われており、これに従事している。6 月からの立上調整では、直線加速器、ブースターシンクロトロン、電子蓄積リングの運転調整に参加し、加速器の運転を経験できることを楽しみにしている。また、UVSOR では共振器型自由電子レーザー、外部レーザーを用いたコヒーレントシンクロトロン光源やレーザーコンプトン光源の開発、分子科学研究への応用を目指した偏極電子源の開発など、数多くの開発研究が進行しており、これらへも積極的に参加し、加速器応用技術に関して幅広く勉強したいと思っている。

一方、UVSOR では線形加速器を用いた真空紫外・軟 X 線自由電子レーザーを将来計画の候補の一つと考えている。現在、国内外で実用化されている XFEL 光源のパルス繰り返しは 10 ~ 100 Hz 程度であり、利用上の大きな制約となっている。このため、UVSOR 次期計画では kHz オーダーの高いビーム繰り返しの直線加速器の実現が求められている。私は現在、小型放射光施設に適した規模でかつ、高繰り返し可能な加速空洞のアイデアを探っている。このような新しい加速器建設の構想段階から参加できることに心躍る思いである。

参考文献

- 1) 渡邊謙. “超伝導 9 セル加速空洞の高次モードに関する研究”, 総合研究大学院大学博士論文, 2007.