

DEVELOPMENT OF DEMOUNTABLE DAMPED CAVITY

Taro Konomi ^{#,A)}, Fumiaki Yasuda ^{B)}, Fumio Furuta ^{C)}, Kenji Saito ^{D)}

^{A)} The Graduate University for Advanced Studies

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} University of Tokyo

7-3-1 Hongou, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8654

^{C)} Cornell University

330 Newman Lab., Garden Ave., Ithaca, NY 14850

^{D)} KEK; High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We have designed a new HOM free cavity named Demountable Damped Cavity (DDC) as an ILC R&D. DDC has two design concepts. The first one is an axial symmetry to eliminate kick off effect by HOM coupler itself. DDC is applied coaxial structure along the beam axis to make strong coupling with HOM. HOM is damped on RF absorber at the end of coaxial waveguide and the accelerating mode is reflected by the choke filter mounted on the entrance of coaxial waveguide. The second concept is demountable structure which can make cleaning of end group easy in order to suppress the Q-slope problem at high field. In this paper, we report about the DDC RF absorber shape designed at 80K, the 9Cell cavity design and preliminary vertical test result in single cell DDC.

Demountable Damped Cavity の開発

1. はじめに

我々は ILC Main Linac の R&D として Demountable Damped Cavity(DDC)と名付けた新型の HOM Damper を開発している(図 1)。DDC の特徴は 2 つあり、1 つ目の特徴はビーム軸に対して対称構造を持つことである。これにより ILC Baseline の TESLA 型 HOM Coupler が持つ Beam Kick による問題^[1]を生じない。2 つ目の特徴は加速空洞と HOM Damper の接続をフランジ接続にすることで洗浄しやすくしていることである。これにより高電界での Q-Slope^[2]を克服し、高電界空洞を実現することを目指している。

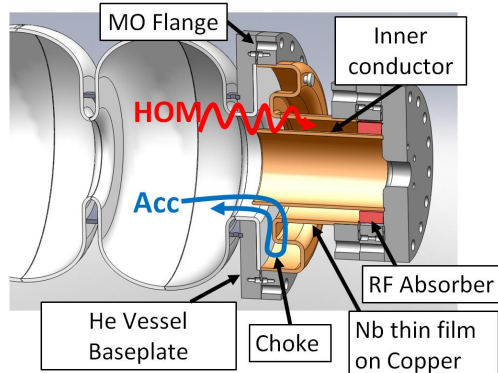


図 1 : Ichiro Cavity と DDC

2. RF 吸収体構造

ILC Main Linac では空洞は全てクライオモジュール内に置き、2K の液体ヘリウムへの入熱を厳しく

制限している。DDC は HOM を RF 吸収体で Damp する。この吸収体を常温で保持することは熱構造的に不利であるため 80K まで冷却する。80K での吸収体に関する情報は限られている。そこで、独自に構築した測定系を用いて GHz 帯で吸収力を持つ Ceramic Magnetic 社の Ni-Zn Ferrite 吸収体(CMD10)^[3]の測定を行った。そして、ILC の 1.3GHz 空洞では特に有害な HOM が 2~3GHz の領域に発生すること、ILC に必要な熱構造を考慮して吸収体形状を設計した。

2.1 吸収体測定系

Ferrite 吸収体の透磁率及び誘電率を同時測定するために、我々は Nicolson-Ross-Weir(NRW) Method^[4]を使用した。この方法は伝送ライン上に置かれた材料での反射率 Γ 及び減衰率 P から複素透磁率 $\mu = \mu' + i\mu''$ と複素誘電率 $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ を次式の関係より求める方法である。

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon} - 1}{\sqrt{\mu/\epsilon} + 1} \quad (1)$$

$$P = \exp\left(-\frac{j\omega d}{c} \sqrt{\mu\epsilon}\right) \quad (2)$$

ここで、 ω は角周波数、 d は被測定物の長さ、 c は光速を表している。

本実験ではサンプルを図 2 の様な 50Ω 同軸管サンプルホルダーで保持した状態で Network Analyzer で測定している。このサンプルホルダーはこのまま低温まで冷却できるように真空排気できる構造になっている。サンプル長さは我々が使用する Ferrite の特性が 1MHz~1GHz に現れるので 20mm としている。

[#] konomi@post.kek.jp

測定系の RF 強度と位相の校正は Ferrite サンプルと同形状の銅を挿入した状態とサンプルなしの状態を測定することにより行っている。

測定系の最終確認のために、特性が良く知られているポリエチレンの測定を行い、誘電率 $\epsilon=2.2\pm 0.1$ を得た。これまで測定された値と良く合致する結果であり、測定方法と計算プログラムに問題がないことを確認した。

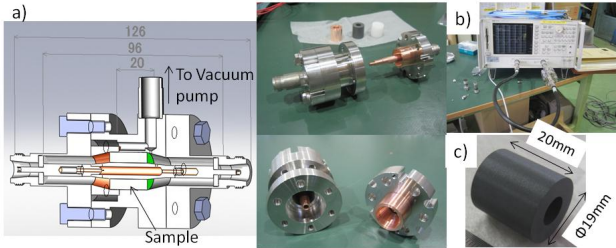


図 2 : 吸収体測定系。a)50Ω同軸管サンプルホルダー。b)Network Analyzer を持った測定の様子。c)Ferrite サンプル。

2.2 Ni-Zn Ferrite (CMD10)

Ferrite^[5]の透磁率は磁区(Spin)と磁壁 (Domain Wall)の影響を受けて変化する。Spin と Domain Wall による複素透磁率は次式のように表される。

$$\mu = 1 + \frac{\mu_{s0}\omega_{s0}(\omega_{s0} + i\omega\alpha)}{(\omega_s + i\omega\alpha)^2 - \omega^2} + \frac{\mu_{d0}\omega_{d0}^2}{\omega_{d0}^2 + \omega + i\omega\beta}$$

$$\approx 1 + \frac{\mu_{s0}}{1 + i\omega/\omega_s} + \frac{\mu_{d0}}{1 + i\omega/\omega_d} \quad (3)$$

ここで、 μ_{s0} と μ_{d0} はそれぞれ Spin と Domain Wall の DC での透磁率を表し、 ω_s と ω_d はそれぞれ Spin と Domain Wall の緩和周波数を表す。

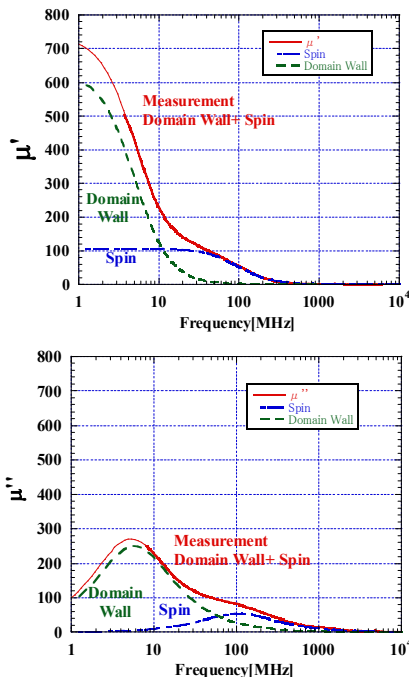


図 3 : 常温(10°C)での CMD10 の透磁率

図 3 は常温(10°C)で測定した CMD10 の透磁率である。Spin と Domain Wall の成分に分けて表すと、2~3GHz での透磁率は Spin による寄与が大きいことが分かる。このことから、ロウ付けなどにより CMD10 の結晶粒が大きくなって 2~3GHz での特性は変化しにくいと思われる。

次に CMD10 を付けた DDC シングルセル空洞で HOM の Q 値を常温で測定した。また、図 3 の結果を使い CST-Studio でのシミュレーション計算を行い比較した。表 1 のようにほぼ等しい結果を得ることができた。これは Ferrite パラメータの測定結果の正しさとシミュレーションの正確さを表している。なお、この Q 値の値は TESLA 型 HOM Coupler に比べ 1~2 桁小さい値である。

表 1 : DDC シングルセルでの HOM の Q 値

Mode	測定	シミュレーション
TE111	199	173
TM110	298	273
TM011	N.D.	N.D.

測定方法と結果の正しさが分かったので、液体窒素と液体ヘリウムにサンプルホルダーごと沈める方法を用いて低温での測定を行った。77K は液体窒素で十分に冷却された状態で測定しているので正確であると考えている。他の温度はクライオスタット中で昇温しながら測定している。このときサンプルホルダーの外部でモニターしているので、温度は正確である。図 4 は測定した CMD10 の 4 つのパラメータ(μ_{s0} , μ_{d0} , ω_s , ω_d)の温度特性を表している。

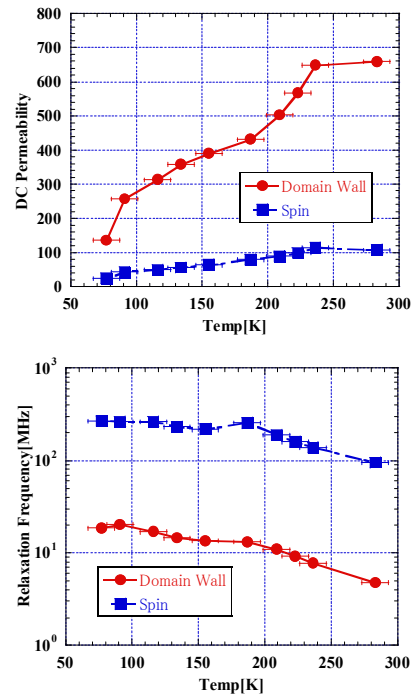


図 4 : CMD10 のパラメータの温度依存性

結果をまとめると、常温(10°C)-2GHzでの誘電率は12.5±0.7、透磁率は1.3-7.1iであり、液体窒素温度-2GHzでの誘電率は12.0±0.4、誘電率は1.4-4.5iである。吸収体でのRF損失は次式のように外部磁場と関係付けられる。

$$W = \omega \int H dM = \frac{1}{2} \omega H_m \mu'' = \frac{1}{2} \omega H_m \mu' \tan \delta \quad (4)$$

μ'' が損失に寄与している。測定結果から液体窒素温度でも常温の半分以上の損失がある。これは十分であると考えている。

2.3 DDC用吸収体のRF設計

液体窒素温度でのCMD10のパラメーターを元にRF吸収体の構造を決定した。設計は図5(a)のようにDDC空洞終端部と同じ外径φ80mm、内径φ60mmの同軸管の終端部に吸収体を置き、この同軸管の反射を見ることを行った。吸収体の形状は様々考えられる。図5(b)はシミュレーションの例を表しており、外径と長さを固定して、内径を変化させた場合の反射率の変化を表している。製作が容易な筒状としてシミュレーションした結果2~3GHzでの反射を最小にできる外径φ196mm、内径φ170mm、長さ20mmの形状に決定した。

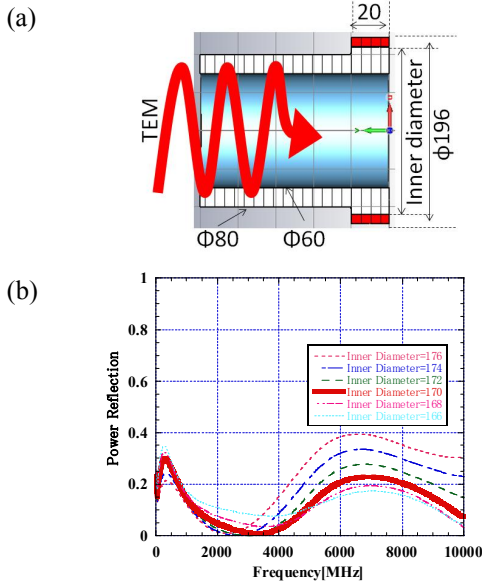


図5：吸収体形状と反射率の周波数依存性。(a)シミュレーションに用いた同軸管形状。(b)吸収体の外径をφ196mm、長さを20mmと固定した場合の内径による反射率の変化。

2.4 DDCの熱構造設計

ILCでは2Kの液体ヘリウムで直接冷却されるのは加速セルのみであり、他は真空断熱されている。この条件に基づきDDCの内導体など直接ヘリウムで冷却できない部分を2Kまで冷却するための構造を検討した。

図6は熱構造設計に用いた各種金属の熱伝導率を示している^{[6][7]}。図7は熱構造設計図である。熱構

造において考慮した点は3つある。1つはChokeと内導体にニオブ薄膜銅^[8]またはニオブ薄膜銅合金(NC50^[9]、大和合金株式会社)を用いて超伝導特性和高い熱伝導率を両立させること。2つ目に、80Kからの熱侵入は熱伝導率の低いSUSで断熱すること。3つ目は吸収体をマウントするフランジ材料に銅合金を用い、2Kで冷却される加速セルと真空断熱されている内導体との間に熱の伝達路を設けることである。図8は定常状態での温度分布を表している。定常状態での80Kから2Kへの熱の流入は20mWとなり、TESLA型と同等である。内導体先端温度は2.1Kまで冷却が可能である。このように、吸収体を80Kで保持することと2Kへの熱流入を防ぐことの両立が可能な熱設計ができた。

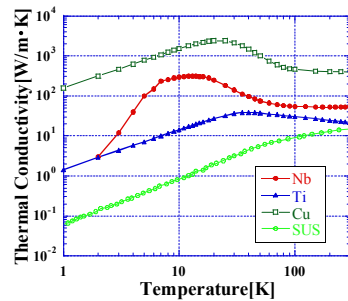


図6：各種金属の熱伝導率

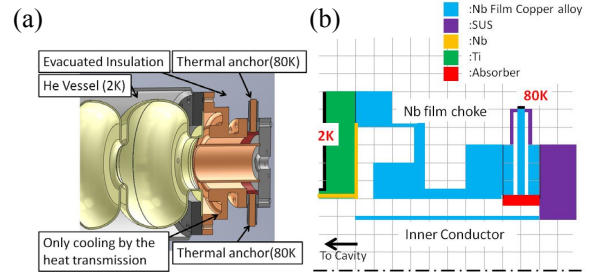


図7：DDCの熱条件と構造

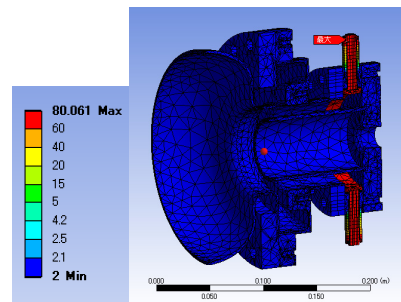


図8：定常状態でのDDC温度分布

3. 9Cell DDC

HOMのQ値はSingle Cell DDCでは表1に示したようにTESLA型に比べ小さくすることができる事が分かっている。ここではDDCを9Cellに適用した場合のHOMのQ値について考える。ILCでは各HOMのQ値は10⁵以下が望ましいと考えられている^[10]。

3.1 9Cell DDC Type-1

DDC の HOM Damper は Input Coupler の配置位置を考慮すると、9Cell 空洞の片側にのみ取り付け可能である。まず、図 9 の Type-1 形状のようにシンプルな構造をシミュレーションしたところ、DDC は結合が強いため 9Cell 空洞のビーム軸方向に対する鏡対称性が強く破れることが分かった。図 10 の TE111-1/9 π mode (Mode Number=28)はその例を示している。Input Coupler 側に偏る Mode は DDC と結合が弱く減衰が得られないので図 11 のように各 HOM の Q 値を計算すると値が高い Mode があることが分かる。ただし、TM010 Mode の Q が高いのは広帯域の Choke 特性によるものである。TM010 Mode は R/Q が十分に小さいのでビームに与える影響は十分に小さく問題とならないと考えている。また図 11 には比較のために TESLA 空洞^[11]と TESLA Like の STF Baseline 空洞^[12]の Q 値を示している。

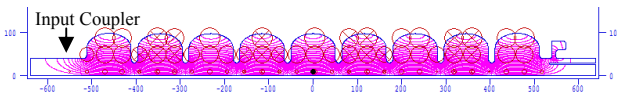


図 9 : 9Cell DDC Type-1

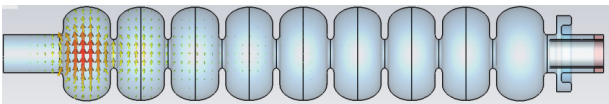


図 10 : 9Cell DDC Type-1 での TE111-1/9 π Mode の電場分布

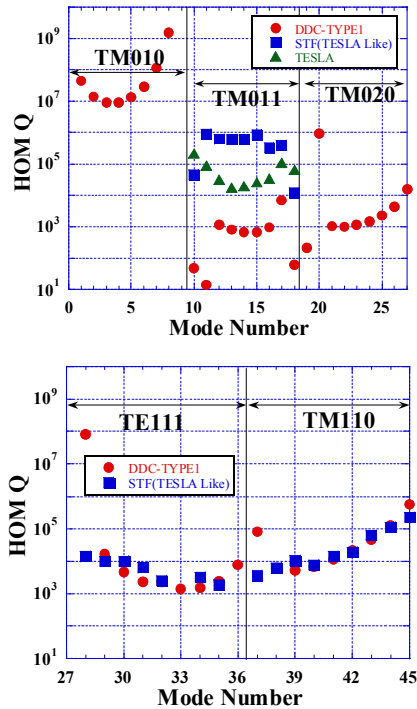


図 11 : 9Cell DDC Type-1 と TESLA、STF Baseline の HOM の Q 値

3.2 9Cell DDC Type-2

ビーム軸に対する鏡対称性の破れを軽減することで HOM の Q 値を改善できると考えられる。同軸構造による破れを解消するために Input Coupler 側も図 11 の Type-2 のように同軸構造にする。図 13 は Type-2 の HOM の Q 値である。TE111-1/9 π Mode (Mode Number=28)を見ると対称性が回復されたことにより Q 値は大きく改善できたことが分かる。しかし、Type-2 の同軸構造はまだ最適化できていないため TM020-1/9 π Mode (Mode Number=19)の Q 値が高いまま残っている。今後、対称性をより回復させる方法について検討を深め、9Cell DDC 空洞の最適化を行うことで TESLA と同程度かより低い HOM の Q 値を実現できると考えている。

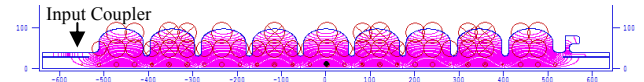


図 12 : 9Cell DDC Type-2

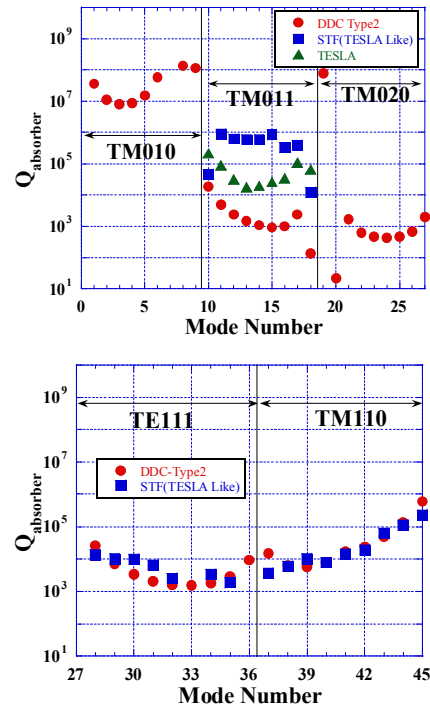


図 13 : 9Cell DDC Type-1 と TESLA、STF Baseline の HOM の Q 値

4. Single Cell DDC

DDC の 2 つ目の目標は高電界空洞の実現である。我々は Single Cell 空洞で DDC の高電界試験を開始した。ここでは、内導体を付けず高電界試験を行った結果について報告する。加速空洞と Choke 部分は全て巨大結晶ニオブで製作している。また、Choke 部分のシールにはインジウムシールを用いフランジ材料のチタンを RF にさらさないように組み立てている。これは図 15 のようにシール部分の表面磁場

が空洞表面の最大表面磁の 1/6 程度と大きいためである。図 16 は高電界試験の結果であり、Q 値が非常に低いことが判明した。これはビームパイプでの損失が考えられる。今後対策を施し、高電界の達成を目指し研究を進めていく。

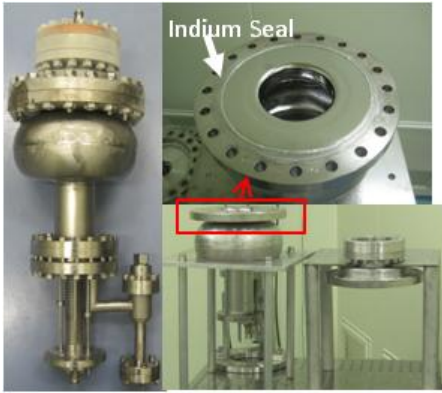


図 14 : Single Cell DDC と組み立て時の様子

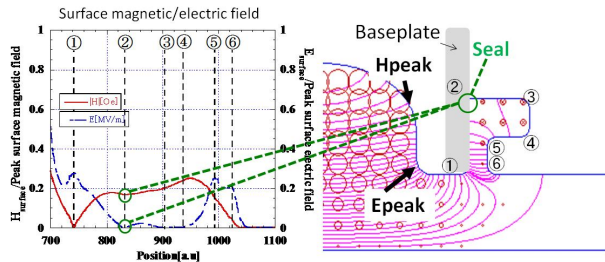


図 15 : 内導体なしの Single Cell DDC の表面電磁場分布

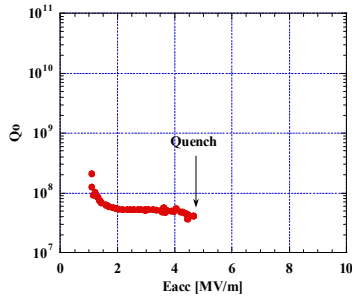


図 16 : Single Cell DDC の高電界試験結果

4. まとめ

我々は新型 HOM Damper として、DDC の開発を進めている。HOM Damper 材料として Ni-Zn Ferrite の低温特性を測定し、熱構造を考慮したうえで Damper 形状を決定した。また、DDC を 9Cell 空洞に適用するために必要な構造の検討を進めている。更に、DDC の要素を実証するためにシングルセル空洞を用いた高電界試験を開始した。

参考文献

- [1] M. Dohlus, et al., “Coupler kick for very short bunches and its compensation”, Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, MOPP013, p.580
- [2] F. Furuta, et al., “High Field Q-slope problem in end group cavities”, Proceedings of 10th EPAC2006, Edinburgh, June 2006, p. 750
- [3] [http:// www.cmi-ferrite.com](http://www.cmi-ferrite.com)
- [4] A. M. Nicolson, et al., “Broad-Band Microwave Transmission Characteristics from a Single Measurement of the Transient Response”, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. IM-17, NO. 4, DECEMBER 1968
- [5] T. Tsutaoka, “Frequency dispersion of complex permeability in Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites and their composite materials”, J. Appl. Phys. 93, 2789 (2003)
- [6] <http://riodb.ibase.aist.go.jp/TPDB/AJAX/>
- [7] F. Koechlin, “Parameterization of the niobium thermal conductivity in the superconducting state”, Supercond. Sci. Technol. 9, 453 (1996)
- [8] R. Russo, “Quality measurement of niobium thin films for Nb/Cu superconducting RF cavities”, Meas. Sci. Technol. 18, 2299(2007)
- [9] <http://www.yamatogokin.co.jp/>
- [10] ILC-RDR, <http://lcdev.kek.jp/RDR/>.
- [11] J. Sekutowicz, “Higher order mode coupler for TESLA”, Proceedings of 6th SRF 1993 p. 426
- [12] K. Watanabe, “New HOM coupler design for ILC superconducting cavity”, Nucl. Instr. and Meth. A 595 (2008) 299