

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04726

研究課題名(和文) 遮断周波数を持つ同軸管による高周波伝送とその応用研究

研究課題名(英文) RF transmission properties and its application research of coaxial-line-like waveguide with cutoff frequency

研究代表者

沢村 勝 (Sawamura, Masaru)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・首席研究員(定常)

研究者番号：30354905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：同軸導波管の内軸と外軸を接続板で連結した構造をもつC形導波管を提案した。このC形導波管は1) 遮断周波数を持つ、2) 同軸への変換が容易、3) 内軸の冷却が容易などの特徴を持つ。C形導波管の高周波特性を検証するとともに、この特徴を生かし、超伝導加速器の高調波(HOM)減衰器であるHOMカップラーに応用した。製作したC形導波管モデルによる高周波特性はシミュレーションコードを用いた計算結果と一致した。製作したHOMカップラーを3種類の空洞モデルに取り付けHOM減衰を検証し、加速モードへの影響はほとんどなく、HOMに対して減衰特性を持つことを確認した。

研究成果の概要(英文)：I proposed a C-shaped waveguide which structure had the plate connecting the inner and outer conductors of the coaxial waveguides. The C-shaped waveguide has characteristics of 1) cutoff frequency, 2) easy conversion to the coaxial line, and 3) easy cooling of inner conductor. RF properties of the C-shaped waveguide were investigated and it was applied to the HOM coupler to attenuate the higher-order modes (HOMs) of the superconducting accelerator. The measured results with the C-shaped waveguide model agreed with the calculated results with the RF simulation code. The HOM coupler model was attached to three types of cavities to investigate to HOM damping. The good HOM coupler properties were confirmed of little influence on the acceleration mode and sufficient damping of HOMs.

研究分野：加速器工学

キーワード：超伝導加速器 高調波 導波管 HOMカップラー

1. 研究開始当初の背景

高周波加速器や核融合炉などで使われる大電力高周波の伝送路としては、一般的に同軸管、矩形導波管が用いられる。

同軸管は内軸の支持が必要であり、さらに内軸が伝熱的に浮いた構造になっているため、大電力の場合には内軸での発熱を冷却する必要がある。そのため、水やガスなどの冷却材を内軸に流すための流路と高周波の入力部との整合を良くするための接続部の構造が複雑になる欠点がある。また同軸管は伝導モードに遮断周波数がないので、低い周波数でも比較的小さなサイズ同軸管を用いることができるが、低い周波数をカットしたい場合には、ハイパスフィルターなどを別に用意する必要がある。

矩形導波管は、同軸管のような伝熱的に浮いた構造がないため、冷却においても導波管の外側に冷却流路を取り付けることができるので、構造が簡単である。しかし矩形導波管は遮断周波数があるため、周波数が低くなるとサイズが大きくなってしまいう欠点がある。

これらの欠点を克服できる新しいタイプの高周波伝送管を提案する。ドアノブ型同軸導波管変換器の導波管部分を変形させていくと図1のように同軸と似たような構造(C形導波管)にすることができる。ただし内軸と外軸は接続板で連結されているため、導波管と同じように遮断周波数が存在する。両端の同軸間での伝搬係数を電磁界シミュレーションコードで計算した結果を図2に示す。内軸半径などの大きさを変えることにより遮断周波数の調整が可能である。

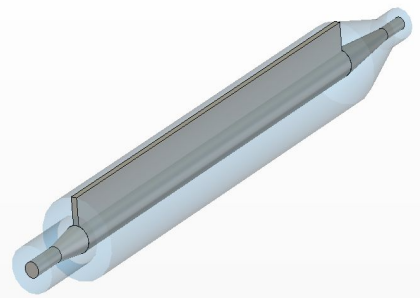


図1 C形導波管

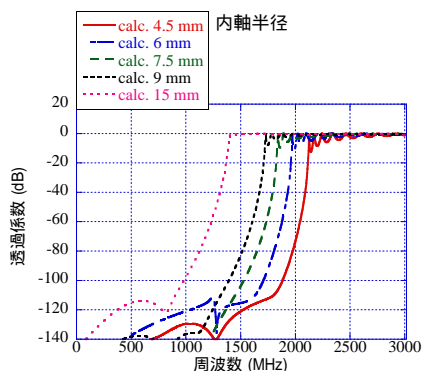


図2 C形導波管の透過係数計算

このC形導波管にはこれまでにない以下のような長所がある。

- 1) 矩形導波管と同様に大きさに応じて遮断周波数が存在する。
- 2) 同軸構造と同じように内軸と外軸を持つため、容易に同軸構造に変換できる。
- 3) 内軸と外軸が接続板で繋がっているため、内軸を容易に冷却することができる。

このC形導波管を用いて大電力高周波を伝送する場合は、遮断周波数を伝送周波数より低くすることで通常同軸管と同じように動作させることができる。さらに接続板を通して内軸を直接冷却できるため、内軸の冷却が容易で、冷却材流路と高周波の複雑な結合器が不要になる。

加速器において大電力高周波の伝送用として利用できるが、このC形導波管の遮断周波数を生かすと、効率的な超伝導加速器用の高調波減衰器を実現できる。

超伝導空洞は空洞損失が少なく、Q値が高いという長所を持つが、ビーム加速により高調波モード(Higher-Order Mode: HOM)が成長しやすいという欠点がある。より大電流の、より短パンチの超伝導加速器の要求が今後高まっていくが、その場合より大電力のHOMが発生することになる。空洞で発生するこれらのHOMを十分に減衰できなければ、ビームが不安定になるため、最終的にHOM減衰器が空洞性能の制限となってしまふ。

これまでHOMを減衰させる方法としては、アンテナ型HOMカップラー、導波管型HOMカップラーが用いられてきた。これらのHOMカップラーは空洞近くに取り付けるため、加速モードを遮断するハイパスフィルター構造が必要である。アンテナ型HOMカップラーは、複雑なハイパスフィルター構造を持っており、しかも冷却後の調整ができないという欠点がある。さらにHOM電力をカップラー外へ取り出すコネクタの内軸部分での発熱が、大電力HOMの場合には大きな問題となっている。

導波管型HOMカップラーは、大電力HOMに対応でき、導波管の遮断周波数を利用するため、アンテナ型HOMカップラーと違って調整不要という長所があるが、導波管の遮断周波数を利用するために導波管が大きくなり、それに伴って加速器全体も大きくなってしまふという欠点がある。

C形導波管をHOMカップラーに用いると、加速モードを容易に遮断するハイパスフィルター構造は調整不要であり、内軸を容易に冷却できるためコネクタ内軸での発熱も解消でき、しかも小型にできるなど、従来型の欠点を克服した、これまでにない超伝導加速器用HOMカップラーを実現できる。

2. 研究の目的

これまで研究代表者は、電磁界シミュレーションコードを用いた計算でC形導波管の高周波特性を調べてきた。これらの計算結果

をもとに、本研究ではC形導波管の実証に必要な以下の項目について結論を見出す。

1) C形導波管高周波性能試験

シミュレーション結果と比較するため、C形導波管モデルを製作し、高周波特性を測定して、高周波性能を確認する。

2) C形導波管型HOMカップラー高周波性能試験

C形導波管型HOMカップラーモデルを製作し、高周波特性の測定結果をシミュレーション結果と比較して、高周波性能を確認する。

3) 空洞HOM特性試験

空洞モデルにC形導波管型HOMカップラーモデルを取付け、空洞HOM特性を測定し、空洞用HOMカップラーとしての性能を確認する。

3. 研究の方法

(1) C形導波管高周波性能試験

C形導波管の伝搬特性を測定するため、C形導波管モデルを製作した。C形導波管の遮断周波数は内軸と外軸の大きさ、接続板の幅などによって変えることができ、遮断周波数以下での減衰量はC形導波管の長さで決まる。そのため、製作したC形導波管モデルにおいては外軸径を一定にし、内軸径、接続板幅を変えることにより、遮断周波数を変えられるようにした。また長さの違うC形導波管モデル組み合わせることにより長さを65mmから最大560mmまで変えることができるような構造になっている。両端の同軸部分のコンネクターにネットワークアナライザを取り付け、C形導波管形状パラメータを変えて、伝搬特性の変化を調べた。これらの測定結果とシミュレーション結果との比較を行った。

(2) C形導波管型HOMカップラー高周波性能試験

C形導波管型HOMカップラーモデルを製作し、同軸伝送路に取り付け、3端子での伝搬特性を調べた。このときC形導波管の径や長さを変え、C形導波管形状パラメータによる減衰特性の変化も測定する。これらの測定結果とシミュレーション結果との比較を行った。

(3) 空洞HOM特性試験

C形導波管型HOMカップラーによるHOM減衰の効果を調べるため、3種類の空洞モデルに取り付けた。1つ目は1.3GHz- TESLA型楕円空洞で、国際リニアコライダー計画で研究が進められているタイプである。この空洞にはアンテナ型HOMカップラーが取り付けられることになっているので、アンテナ型HOMカップラー位置にC形導波管型HOMカップラーを取り付けた。2つ目は1.3GHz-ERL用楕円空洞で、ERL用として研究代表者が高エネルギー加速器研究機構と共同で開発してきたもので、ビームラインHOMダンパーでHOMを吸収させるため、ビームパイプ径を大きくした空洞である。この空洞を用いてビームラインHOMダンパーの

位置にC形導波管型HOMカップラーを取り付けた。3つ目は650MHz-スポーク空洞である。この空洞は従来陽子やイオンなどの重い粒子の加速用に開発されてきたものであるが、研究代表者が電子用に応用するために開発を進めているもので、この空洞を用いることにより、空洞の種類による特性の違いを比較することができる。

4. 研究成果

C形導波管の内軸径の変化による遮断周波数の変化(図3)や、C形導波管の長さにより減衰量の変化(図4)など、測定と計算で一致することを確認した。またC形導波管の断面形状が極座標で単純に表せるような場合は、解析的に遮断周波数が得られるが、この解析値と測定・計算結果から得られる遮断周波数の値とが一致することを確認した。さらに解析解が求められない断面形状に関しても電磁界シミュレーションコードを使った計算値と測定値が一致することを確認した。

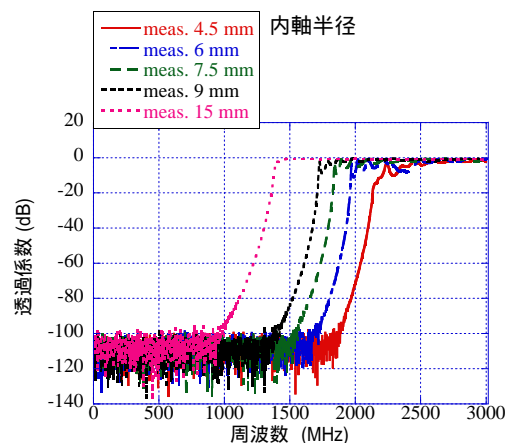


図3 C形導波管の内軸径の違いによる透過係数測定

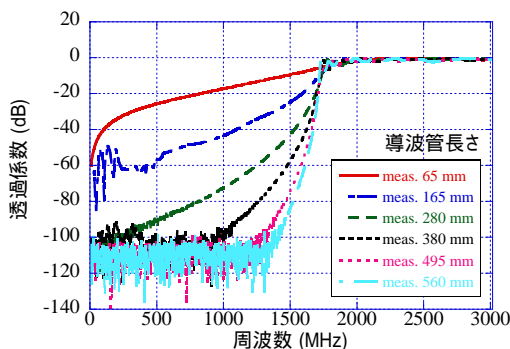


図4 C形導波管の長さの違いによる透過係数測定

C形導波管は高周波の入出力に際しては同軸構造に変換されるが、インピーダンスは同軸では周波数によらず一定であるのに対して、C形導波管では周波数によって変化する。そのため境界においてインピーダンスが異なるため不整合が生じ、周波数により反射

係数、透過係数が変化する。同軸とC形導波管のインピーダンスを全周波数領域で一致させることはできないが、ある特定の範囲で整合をとる構造を考案し、シミュレーション計算と製作したモデルでの測定により検証し、整合が取れることを確認した。

C形導波管型HOMカップラーを製作し、同軸伝送路での減衰特性の測定を行い、計算値と測定値で一致することを確認した。またHOMカップラーとして用いる場合に、先端部分で共振が起こる条件があり、遮断周波数以下で透過が大きくなる場合があることが分かった。

C形導波管型HOMカップラーによるHOM減衰の効果を調べるため、加速空洞モデルである1.3GHz- TESLA 型楕円空洞と1.3GHz-ERL 用楕円空洞に取り付けた。図5、図6のように、外部Q値が加速モードに対しては高く、HOMに対しては小さくなっており、空洞においてもHOMが減衰できることを確認した。

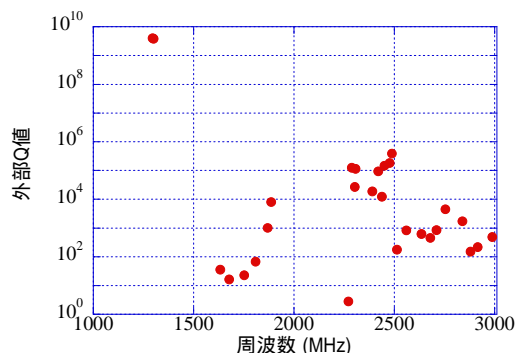


図5 C形導波管型HOMカップラーによるTESLA空洞の外部Q値

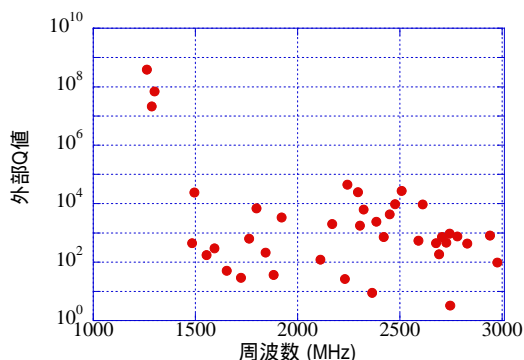


図6 C形導波管型HOMカップラーによるERL空洞の外部Q値

さらにC形導波管型HOMカップラーをスポーク型加速空洞にも取り付けた。楕円空洞の場合はHOMカップラーをビームパイプに取り付けられるが、スポーク空洞の場合はビームパイプが細くて取り付けられないため、空洞タンク側面に取り付けた。取付角度としてはスポークに対して平行/垂直あるいは45度の位置が考えられる。図7のように加速モードに関しては平行/垂直取付の方が45度取付よりカップリングが小さい。

HOMに関しては45度取付と平行/垂直取付では、ほぼ同じ減衰になっている。長さ当たりの減衰量は同じであるので、平行/垂直取付の方がC形導波管の長さを短くしても加速モードに対する影響を小さくすることができることが分かった。

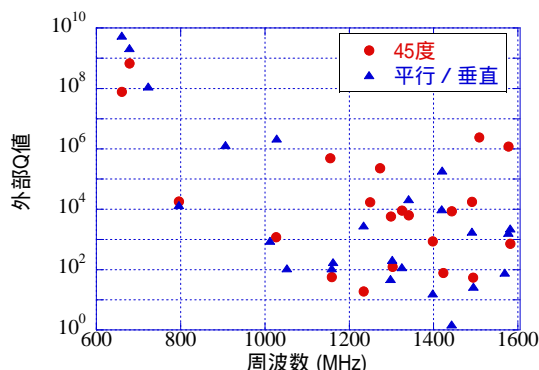


図7 C形導波管型HOMカップラーによるスポーク空洞の外部Q値

C形導波管型HOMカップラーを空洞に取り付ける場合、ストレートな状態では半径方向に大きくなってしまいうため、C形導波管型を90度曲げる必要がある。3次元電磁界シミュレーションコードで計算を行ったところ、折れ線状に曲げていくとき、1回の曲げ角度を90度、45度、30度と小さくしていくと滑らかな曲線に近づいていくが、曲げ角度を45度以下にしてもあまり変化がないことが分かった。また内軸と外軸を接続する接続板は曲げの外側に付けた時の方が曲げの影響が小さいことが分かった。これらの計算結果をもとに90度1回曲げと45度2回曲げのモデルを製作し、高周波特性を調べ、計算とほぼ一致することを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Masaru Sawamura, Masato Egi, Kazuhiro Enami, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Kensei Umemori, Properties of the RF transmission line of a C-shaped waveguide, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 査読有、A 882 (2018) 30-40

DOI: 10.1016/j.nima.2017.09.067

沢村 勝、阪井寛志、梅森健成、許斐太郎、古屋貴章、C形導波管を用いたHOMカップラーの高周波特性、第14回日本加速器学会年会プロシーディングス、査読無、953-956 (2017)

http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEP0/WEP047.pdf

沢村 勝、C形導波管の高周波特性、第13回日本加速器学会年会プロシーディ

ングス、査読無、885-888 (2016)
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP023.pdf

沢村 勝、梅森健成、阪井寛志、篠江憲治、古屋貴章、江並和宏、江木昌人、超伝導加速器用C形導波管型HOMカップラーの高周波特性、第12回日本加速器学会年会プロシーディングス、査読無、579-582 (2015)
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/WEP0/WEP053.pdf

〔学会発表〕(計4件)

沢村 勝、C形導波管を用いたHOMカップラーの高周波特性、日本加速器学会年会、2017年

沢村 勝、C形導波管の高周波特性、日本加速器学会年会、2016年

沢村 勝、C形導波管の高周波特性の研究、日本原子力学会春の年会、2016年

沢村 勝、梅森健成、阪井寛志、篠江憲治、古屋貴章、江並和宏、江木昌人、超伝導加速器用C形導波管型HOMカップラーの高周波特性、日本加速器学会年会、2015年

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沢村 勝 (SAWAMURA, Masaru)

量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所・東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員(定常)

研究者番号：30354905