

DESIGN OF WIDEBAND N-TYPE FEEDTHROUGHS WITH HIGH HEAT TRANSMISSION

Ayaka Kuramoto ^{#, A)}, Hitoshi Hayano ^{B)}, Ken Watanabe ^{B)}

^{A)} The Graduate University for Advanced Studies [SOKENDAI]

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

^{B)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

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

Abstract

In field measurement of 1.3GHz 9-cell superconducting cavity, pick up antenna of higher order mode (HOM) coupler is removed, because of pick up antennae's heating by magnetic field of 1.3GHz accelerating mode in the HOM coupler. Heat transmission characteristic and RF transmission characteristic of N-type feedthrough in the pick-up antenna are another reason of heating. A wideband N-type feedthroughs with high heat transmission are newly designed. According to the results of simulation by HFSS, VSWR of the new feedthrough can be less than 1.4 for DC to 12GHz. Heat transmission can be raised about three to four times bigger than existing feedthrough by using aluminum nitride as an insulator.

広帯域高伝熱度 N 型フィードスルーの設計

1. はじめに

9セル超伝導空洞内から高調波モード (HOM) を取り出すために、HOM カップラーが取り付けられている。HOM カップラーに結合されたパワーをピックアップアンテナで外部に取り出している。そこで、ピックアップアンテナを支持しているのが N 型フィードスルーである。支持部にはセラミックが用いられている。これは真空である空洞内と大気である外部との境界の役割をも同時に果たしている。

現在、9セル超伝導空洞に HOM ピックアップアンテナを取り付けた状態で RF パワーを投入し、加速電界を測定する試験において、HOM ピックアップアンテナの発熱が観測されている。[1] その原因として、ピックアッププローブの内導体での貫通磁場および定在波発生による発熱が考えられる。

その発熱があるために、測定される加速電界が制限されてしまう。この試験の本来の目的は空洞自身の性能を知ることなので、現状ではピックアップアンテナを取り外した状態で試験を行っている。ILC 空洞にピックアップアンテナを取り付けた状態で HPR による内面洗浄をして電界測定をすることが可能になれば、空洞内面への塵芥汚染のリスクを下げる事ができる。

そこで、発熱対策を施した N 型フィードスルーの設計を行う必要がある。フィードスルーにサーマルアンカーを巻き、内導体に生じた熱を外部に効率よく取り出すためには、セラミックの熱伝導率が良い必要がある。伝熱度の高いセラミックを使用し、さらにセラミックと外導体への接触部分が増えるようにする。また、N 型フィードスルーのセラミック部での反射が定在波の原因となってしまうので、広帯域にわたって透過特性を良くし、HOM 取り出し特性も向上させる必要がある。広帯域特性は VSWR を用いて評価し、設計を行う。ほとんどの応用では 12GHz くらいまでの帯域が必要であるので、目標を

12GHz まで VSWR が 1.2 程度以下となることとした。

2. フィードスルーの設計

2.1 N 型フィードスルー

$\phi 3\text{mm}$ の内導体と $\phi 7\text{mm}$ の外導体から成る同軸管に、内軸支持および真空封じの目的のための誘電体板を取り付けた形をしている。これは超伝導空洞付近で用いるために非磁性である必要がある。

同軸管のインピーダンスは式(1)から導出される。

$$\begin{aligned} z &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{b}{a} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu'}{\epsilon'}} \ln \frac{b}{a} \\ &= 60 \sqrt{\frac{\mu'}{\epsilon'}} \ln \frac{b}{a} \quad (1) \end{aligned}$$

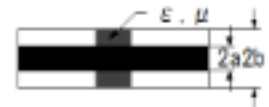


図 1: 同軸管形状

$\phi 3\text{mm}$ の内導体と $\phi 7\text{mm}$ の外導体から成る同軸管のインピーダンスは 50.8Ω である。誘電体板を挿入すると、式(1)から分かる通り、挿入部でのインピーダンスが変化する。そのために反射が生じる。この反射を抑える方法は次の三つである。

- 誘電体板の厚さを 0.02λ 程度以下にする方法
- 誘電体板の厚さを半波長にする方法
- 内導体・外導体サイズを変える方法

誘電体板の厚さを 0.02λ 程度以下にする方法では、12GHz までの電磁波を通過させるためには、誘電体板の厚さをおよそ 0.5mm 以下としなくてはならない。機械的強度の観点からこの方法は不適切である。

誘電体板の厚さを半波長にする方法ではターゲットとした周波数の VSWR を抑えることができるが、インピーダンス整合のとれる周波数範囲が狭いため、目的としている広帯域を得ることには適していない。

内導体・外導体サイズを変える方法では比誘電率を 8.8 と想定し、セラミックス挿入部のインピーダンスを 50Ω にすることを考える。比誘電率が 8.8、比透磁率が 1 では、式(1)より、外導体の半径 b の内導体の半径 a に対する比率は 11.8 となる。ここで、内導体の径は変えずに、外導体の径のみを変化させインピーダンスを 50Ω にすることを考えると、外導体は $\phi 35.5\text{mm}$ としなければならない。しかし、インピーダンスを 50Ω に設定しても、VSWR が 1.4 以下となる周波数領域は誘電体板の厚さを半波長とした場合とさほど変わらない。これは径を変えることでステップ状になった部分に局在するモードが生じるためである。つまり、内導体・外導体サイズを変えることは同時にその部分に並列キャパシタンスを加えること等価となる。したがって、キャパシタンスの影響を補償する必要がある。それは、内導体・外導体サイズを変えた部分の周囲に高インピーダンス領域をつくり、等価的に直列インダクタンスを作ることで対応できる。しかし、式から導出することは困難であるため、HFSS を用いて設計を行う必要がある。このときセラミックの誘電率が必要となる。

3. HFSS による設計

3.1 モデルの作成

従来使用されている広帯域 SMA フィードスルーの内部構造を N 型フィードスルーの寸法にスケールアップすることからはじめる。参考までに従来の N 型フィードスルーのモデル化をして比較する。前者を type1、後者を type2 とし、図 2a、2b にそれぞれのモデルを示す。



図 2a: type1

図 2b: type2

HFSS(version 9)でフィードスルーをモデル化するとき、端面からの影響を無くするために全長を 180mm とし、計算時間を短縮するために Z 軸に沿って四分の一に切断したモデルとした。計算結果を図 3 に示す。

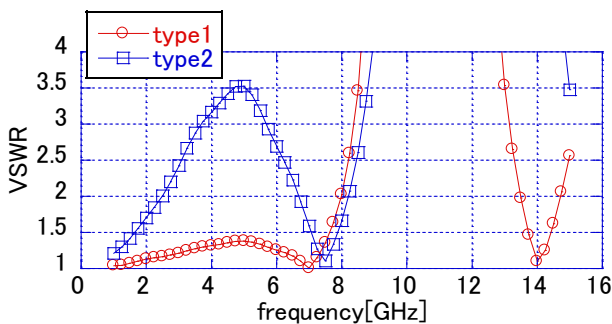


図 3: type1 と type2 の VSWR の比較

図 3 より type1 の方が type2 と比較して、VSWR が 1.4 以下となる領域が広い。よって、設計は SMA フィードスルーのスケールアップしたものを改良する方向で行うことに決めた。

4. セラミックの誘電率測定

4.1 HFSS による Δf - ϵ カーブ計算

フィードスルーを設計する上でセラミックの誘電率を詳細に知ることは重要である。マイクロ波空洞を用いて摂動法により誘電率を測定した。セラミックの大きさが摂動の範囲を超えても良いように HFSS を用いて、空洞にセラミック試料を挿入したときの共振周波数のずれを計算し、 Δf - ϵ カーブを求め、実測と比較して誘電率を算出する。図 4 に周波数 1.5, 3.0, 4.0 GHz の空洞を用いた時の Δf - ϵ カーブを示す。これに用いたメッシュ数は解変動がなくなる程度のもを用いている。

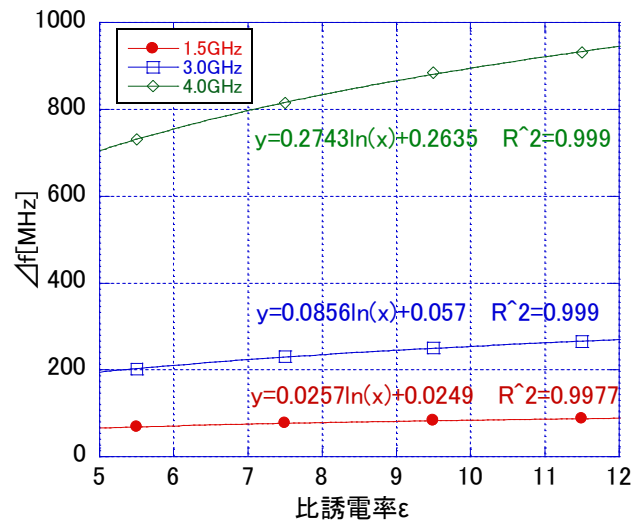


図 4: Δf - ϵ カーブ

4.2 空洞による測定

測定に使用した共振周波数 1.5GHz の空洞の写真を図 5a、5b に示す。使用したモードは TM010 モードである。空洞の下側端板の中心に円筒状セラミック試料 ($\phi 30\text{mm}$, 8t) を入れ、共振周波数の変化を測定した。測定に用いた試料を表 1 にまとめ、写真を図 6 に示す。通常のフィードスルーは高純度アルミナもしくはアルミナを使用する。高耐電圧のためには半導電アルミナが候補である。また、高熱伝導のためにはサファイアもしくは窒化アルミが候補である。アルミナの熱伝導率が室温で $20 \sim 30\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ であるのに対して、サファイアは $42\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ であり、窒化アルミは $170\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ である。

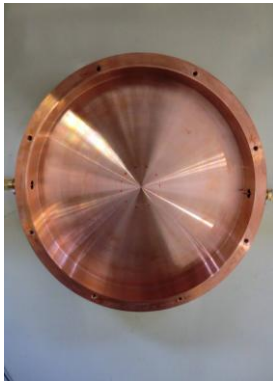


図 5a: 共振周波数 1.5GHz の空洞



図 5b: MAN-170 を挿入したとき



図 6: 測定に用いた試料

表 1: 測定に用いた試料の名称、会社名および型番

名称	会社名	型番
高純度アルミナ	(株) フェローテックセラミックス	AM997
高純度アルミナ	(株) フェローテックセラミックス	AM997Q
半導電アルミナ	(株) フェローテックセラミックス	半導電アルミナ
アルミナ (白 95%純度)	日立化成工業(株)	H538
アルミナ (ピンク 95%純度)	日立化成工業(株)	H537
窒化アルミ	有明マテリアル(株)	MAN-170
サファイア (結晶軸ランダム)	(株) 信光社	サファイア

4.3 測定結果

図 7 に各セラミックス試料の誘電率の測定結果を示す。熱伝導率の良い窒化アルミは 8.6~8.3 と求まった。今回の計算ではカタログ値 8.8 を用いているが、この値は 1MHz での値である。12GHz 程度までの広帯域を目的としているので、今後、その中心周波数に近い 4GHz での測定値 8.3 を設計計算に使用し、最終設計を行う。

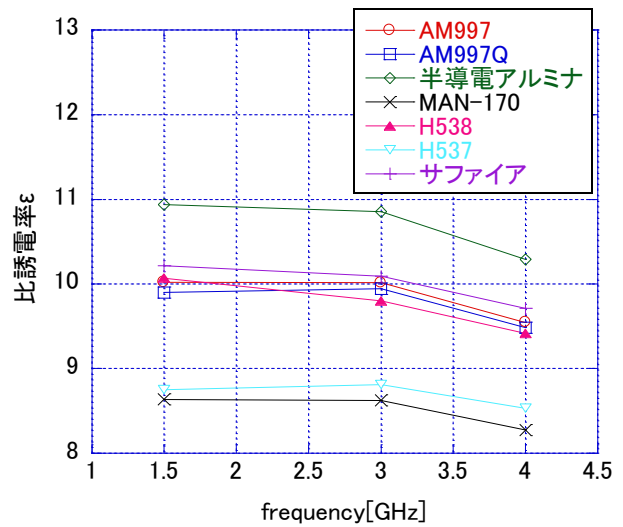


図 7: 各試料の周波数に対する比誘電率

5. 各形状パラメータと広帯域特性

5.1 形状パラメータ

各形状パラメータを図 8 のとおりに定めた。b は外導体とセラミックスの高さが一番高いところの幅であり、c' は b の両側にあるセラミックスが低くなった部分の高さである。f は外導体の一つ目の段差の幅である。b' と d' はそれぞれ内導体を削り出している部分の長さおよび深さである。d' を減少させることはその部分でのインピーダンスを減少させることと等しい。誘電率の異なる媒質が二つ以上含まれているときのインピーダンスは式 2 から導出できる。

$$z = \frac{1}{2\pi} \left[\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \ln \frac{a_2}{a_1} + \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \ln \frac{b}{a_2} \right] \quad (2)$$

セラミックスの誘電率が 8.8 の時には、d' を 0.35mm とすると、b の部分のインピーダンスを 48.5Ω とすることができる。d' が 0.40mm では、インピーダンスが 51.2Ω である。内導体を削り出し真空部を挿入することによって、径を小さくすることができる。

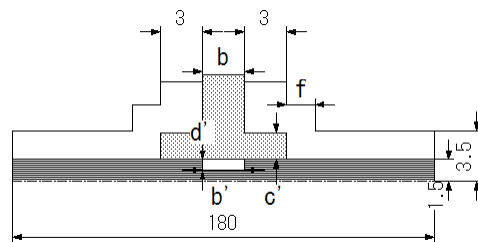


図 8: 形状パラメータ

内導体から外導体への熱伝導を大きくするために、接触面積をできるだけ大きくし、VSWR を 1.2 以下にするように設計した。

b' を増加させることは b の周りの高インピーダン

ス領域を広げることになる。b を増加させると、並列キャパシタンスが変化する。c' を変化させることは d' と同様にインピーダンス変化をもたらす。f の変化は高インピーダンス領域の広さを変えることになる。これらのパラメータを変化させることで、VSWR を 1.4 までに抑える形状が得られた。

5.2 設計結果

現在までに得られた最良のパラメータによる計算結果を図 9 に示す。そのときのパラメータの値を表 2 に示し、形状を図 10 に示す。

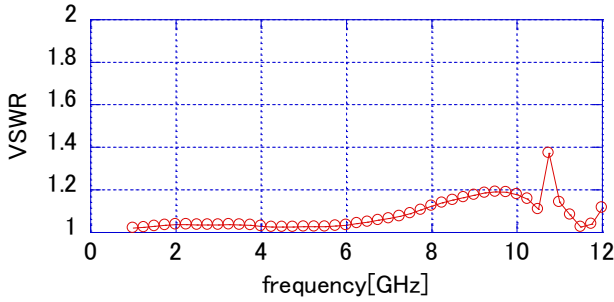


図 9：最良解

表 2：最良解のパラメータ値

パラメータ	[mm]
b	5.5
b'	6.5
c'	1.0
d'	0.35
f	0

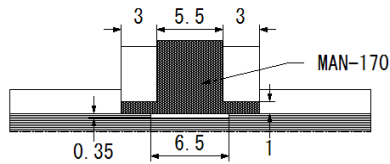


図 10：最良解の形状

5.3 従来設計のフィードスルー試作品とそのモデル計算

type1 の従来設計のフィードスルー試作品の測定結果とモデル計算を図 11 に示す。試作品では 6~7GHz 付近で VSWR が計算値より大きく出ており、VSWR が急激に立ち上がる周波数がずれている。ここで、その測定値と計算値が合わない原因を推定してみる。HFSS(version 12)を用いて、計算モデルの全長を 1500mm に変更し、加工誤差を d' に含ませ、メタライズおよびロウ材の浸み出しと内導体の勘合部の膨れを組み入れて測定値に合わせこんだのが図 13 である。その結果、図 12 のように幅 0.1mm、高さ 0.8mm のメタライズおよびロウ材浸み出しと中心から両側に 19mm 離れた点から 23mm 離れたまでに高さ 0.3mm の三角形の勘合部膨れを組み入れと、実測に近いモデルとなった。

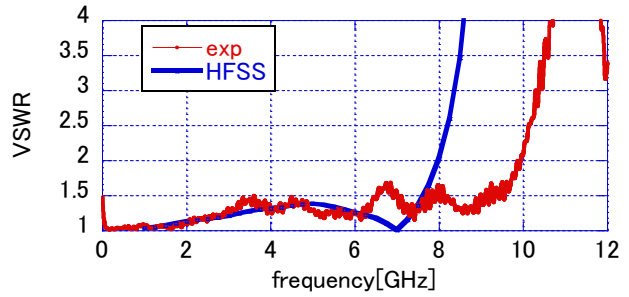


図 11：type1 試作品の測定値と HFSS 計算値の比較

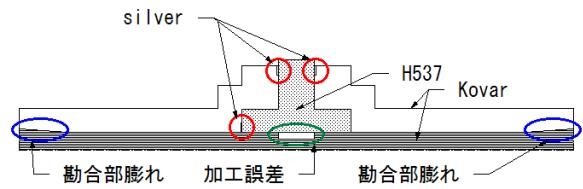


図 12：測定値に合わせこんだモデル

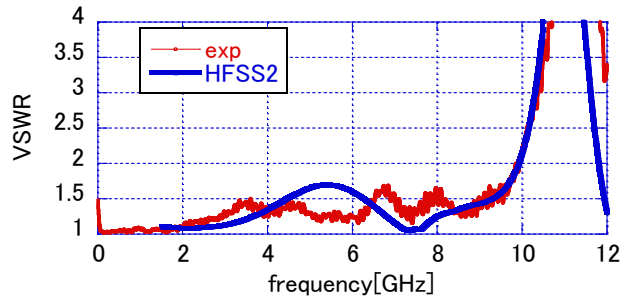


図 13：type1 測定値と図 12 のモデルの計算値

5.4 ロウ材と勘合部を考慮したモデル設計

幅 0.1mm、高さ 0.8mm のメタライズおよびロウ材浸み出しと中心から両側に 19mm 離れた点から 23mm 離れたまでに高さ 0.3mm の三角形の勘合部膨れを組み入れたモデルを図 14 に示し、その特性計算を図 15 に示す。HFSS(1)がメタライズおよびロウ材浸み出しと勘合部膨れを考慮前、HFSS(2)が考慮後である。これにより特性の悪化が見られるので、製作時にロウ材の浸み出しを小さくする必要があり、設計時点で勘合部の効果を組み入れたモデルにする必要がある。図 14 にある外導体とセラミックのロウ付け部を左側のみにする、図 16 での HFSS(3) が得られ、さらにメタライズおよびロウ材浸み出しの高さを 0.8mm から 0.5mm に小さくすることで、HFSS(4)が得られた。これより、外導体のロウ付け部を片側のみに減らし、メタライズおよびロウ材浸み出しを小さくすることが有効であることが分かる。

図 17 にはこれらを考慮する前の設計例を示す。このモデルでは少なくとも五倍程度は熱伝導が改善

する。

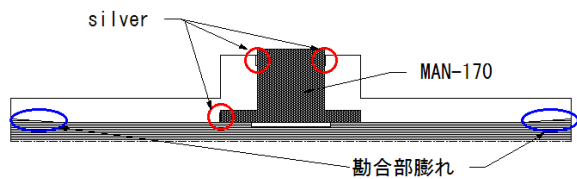


図 14: 最良のモデルにメタライズおよびロウ材浸み出しと勘合部の膨れを組み込んだモデル

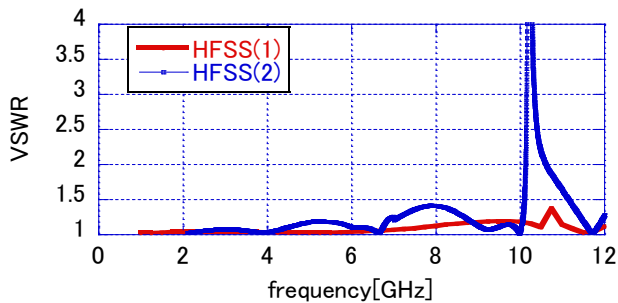


図 15: 最良のモデルと図 14 のモデルの透過特性

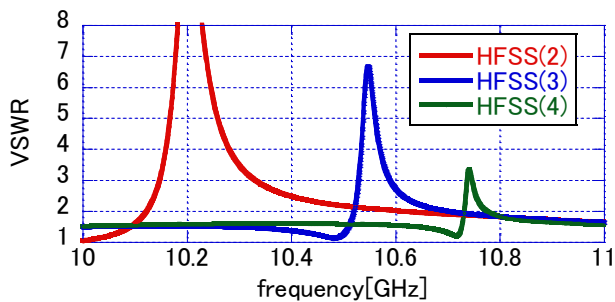


図 16: メタライズとロウ材浸み出しの変化による透過特性の変化

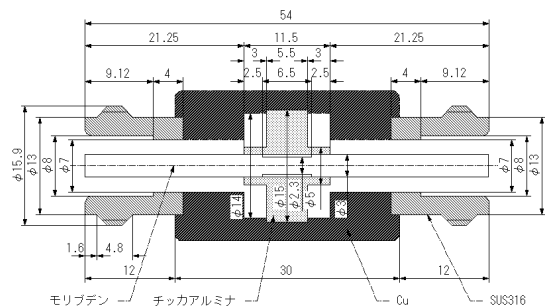


図 17: 設計例

6. まとめ

HFSS による N 型フィードスルーの設計を行った。使用する重要なパラメータである誘電率をマイクロ波空洞と HFSS 計算により測定した。内導体から外導体への熱伝導率を上げるために窒化アルミを使用し、広帯域となるような設計をした結果、12GHz まで VSWR が 1.4 以下となるようなフィードスルーが得られた。なお、これにはロウ材浸み出しと勘合部ふくれを考慮していない。熱伝導は従来品より少なくとも五倍程度は良くなる。今後、ロウ材浸み出しと勘合部膨れを考慮したモデルを作る必要がある。

参考文献

- [1] K. Watanabe et. al., N.I.M.-A, Vol. 595 (2008), 299-311.
- [2] 小西良弘, “実用マイクロ波技術講座”, 株式会社ケイラボラトリー.
- [3] 丹保博 et. al., “TM₀₁₀ モード円筒空洞共振器を用いた撰動法における誘電率の誤差検討”.
- [4] Eizi Ezura, “マイクロ波伝送と信号解析の基礎 (加速器設計シリーズ)”, KEK Internal 2003.