

3. 高周波デバイスの設計・製作・試験

1. はじめに

通常の RF デバイスのほとんどは、近年は設計～製造まで可能な会社が多数あり、電子管～超伝導空洞まで、性能仕様での発注による丸投げが可能である。さらに小規模な加速器であれば加速器全体を性能仕様で発注という事も可能でしょう。例えば、私の現在の専門である電子管は、企業での技術レベルが非常に上がってきており、近年は研究所での開発項目では無いとさえ囁かれております。

しかし製造過程を知らないばかりに、そもそも無理のある仕様を押し付けた挙句に、仕様を満たさないのを外注先の技術力のせいにするという事態を引き起こす事もある。また従来より性能を上げたい場合や、研究用等で試行錯誤が必要な場合、コスト削減などを目的として、試作に関しては、自力で仕様の決定～電気設計～機械設計～試験までを行い、製作のみ個別発注する事をお勧めしたい。

その後量産の最初は構造仕様で発注し、量産に入ったら性能仕様発注というのが正しい流れだと思わる。「事前の準備もなく予算が付いたのでとにかく性能仕様で発注」という事態も多いかと思いますが、そういった結果泥沼化する事もあり、試作を自力で行う事で、無理の無い仕様を認識するのが早道だったりもするのではないのでしょうか。

というわけで、ここでは高周波デバイスの試作をするための、"設計は全部自分でやって製作のみ個別発注" という前提で進める事とします。当然設計～評価まで自力で行うという事は、非常に大きな労力を必要とするため、合理的にかつ効率良く工程を進めるのに必要な情報を集めたつもりです。

個別発注の場合、

- 仕様の検討
- 電気・熱設計
- 機械設計
- 見積～製作～工程管理～組立

が主な仕事となる。

2. 電気設計

2.1. 電磁波シミュレーションの計算結果とその評価

基本仕様は理論式から検討が可能ですが、最終的には電磁波シミュレーションによる計算が必要になる事が多い。電磁波シミュレーションにおいて重要なのは、何をどのシミュレーターで効率良く計算するかを考え、むやみにシミュレーションをしない事でしょう。そこで例えば以下のようなポイントが参考になるかもしれません。

- 固有モード、S-パラメーター、タイムドメイン等の様々な方法を効率良く組み合わせて使用する。
- 計算格子の間隔は波長から決まるため、同じ周波数では、一般的に計算対象の体積に比例して計算時間が増えます。逆に例えば電磁波のモードの対称性などを利用して、計算時間を減らす事ができる。
- 必要なのは正確な絶対量ではなく、相対値である事が多い。この2つは所要計算が全く違う。
- Qの高い空洞のS-パラメーターを計算しない。

2.2. 反射係数と定在波比

マイクロ波の振る舞いについて記述する際、等価回路を用いて記述する場合がある。本節でも、反射係数と定在波比の説明をする為、Fig. 1 のような回路を用いて説明する。

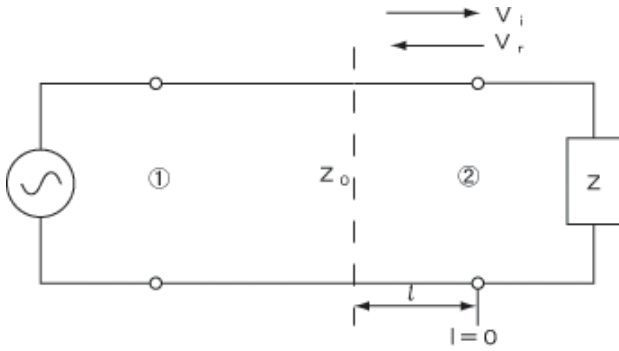


Fig. 1 伝送経路と不可インピーダンス

まず、反射係数について述べる。Fig. 1 のように、特性インピーダンス Z_0 の伝送線路の出力端（開口②）に被測定インピーダンス Z ($Z = R + jX$) が接続された場合、

$$z = \frac{Z}{Z_0} = r + jx \quad (2-1)$$

$$y = \frac{Z_0}{Z} = \frac{1}{z} = g + jb \quad (2-2)$$

と表すことができる z および y をそれぞれ Z の Z_0 に関する規準化インピーダンスおよび、規準化アドミタンスと称する。ここで $Z = Z_0$ ($z = 1$) の場合を整合状態といい、 $Z \neq Z_0$ ($z \neq 1$) の場合を不整合状態という。

入力端（開口①）から高周波電力を加えたとき、一般的に $z \neq 1$ の場合、伝送線上には入力波と反射波とが存在する。すなわち、高周波電源から負荷にむかって進行する入射波については

$$\text{入射波電圧} = V_i \exp j(\omega t + \beta l) \quad (2-3)$$

$$\text{入射波電流} = (V_i / Z_0) \exp j(\omega t + \beta l) \quad (2-4)$$

負荷から電源に向かって進行する反射波については

$$\text{入射波電圧} = V_r \exp j(\omega t - \beta l) \quad (2-5)$$

$$\text{入射波電流} = -(V_r / Z_0) \exp j(\omega t - \beta l) \quad (2-6)$$

となる。ここで V_i, V_r は $l = 0$ での入射波および反射波電圧であり、 β は位相定数で $\beta = 2\pi / \lambda_g$ 、 λ_g は管内波長である。

伝送線上負荷から、 l なる点における電圧、電流はその点における入射波と反射波の合成であり、その比はその点から負荷側をみたインピーダンス Z_l となる。すなわち、

$$Z_l = \frac{V_i e^{j\beta l} + V_r e^{-j\beta l}}{V_i e^{j\beta l} - V_r e^{-j\beta l}} Z_0 \quad (2-7)$$

ここで、 $l = 0$ となる場合の Z_l がすなわち Z であるから

$$Z = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r} Z_0 \quad (2-8)$$

となり、これより

$$\frac{V_r}{V_i} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{z - 1}{z + 1} \equiv \Gamma \quad (2-9)$$

となり、 Γ を電圧反射係数といい、式(2-3)~(2-6)より、電流反射係数は $-\Gamma$ であることがわかる。また、 V_r, V_i, z はいずれも複素量であるため、 Γ も複素量となり、一般的に極座標をもちいて $\Gamma = |\Gamma| \exp j\theta$ で表わす。そして、電圧反射係数 Γ は S-パラメーターと以下のような関係がある。

$$\Gamma = S_{11} \quad (2-10)$$

その為、ネットワークアナライザーで反射法を用いた場合、電圧反射係数を測定していると言い換えることもできる。

次に定在波比について述べる。伝送線上の電圧分布について考えてみると、 l なる点における電圧 V は式(2-3)、(2-4)および(2-9)から次のようになる。

$$\begin{aligned}
V &= V_i e^{j(\omega t + \beta l)} + V_i e^{j(\omega t - \beta l)} \\
&= V_i e^{j(\omega t + \beta l)} (1 + \Gamma \cdot e^{-j2\beta l}) \\
&= V_i e^{j(\omega t + \beta l)} (1 + |\Gamma| \cdot e^{j(\theta - 2\beta l)})
\end{aligned}
\tag{2-11}$$

したがって、 V の絶対値は

$$|V| = |V_i| \sqrt{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos(\theta - 2\beta l)}
\tag{2-12}$$

となり、Fig. 2 のように $\lambda_g / 2$ を周期として波状的に変化する。このような場合、伝送線上には定在波が存在しているという。この定在波の腹、および谷にあたる電圧は、式(2-11)より、

$$|V_{max}| = |V_i| (1 + |\Gamma|)
\tag{2-13}$$

$$|V_{min}| = |V_i| (1 - |\Gamma|)
\tag{2-14}$$

となる。ここで $|V_{max}|$ と $|V_{min}|$ の比を ρ とすると、

$$\rho = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}
\tag{2-15}$$

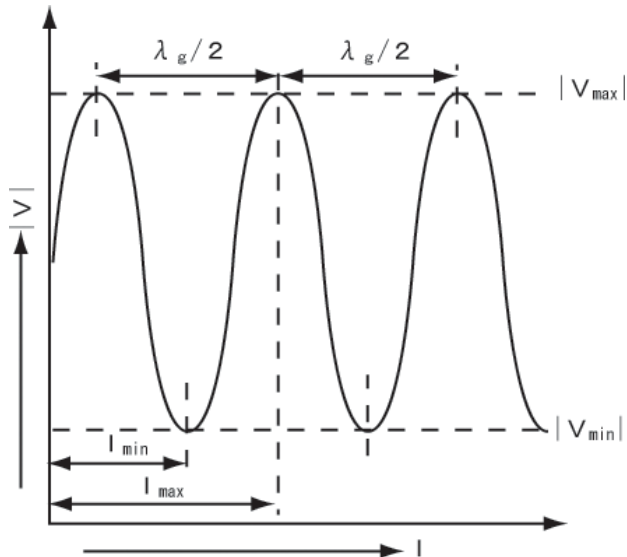


Fig. 2 定在波形

となり、この ρ を電圧定在波比という。先に求めた式(2-9)、式(2-15)を用いると、

$$|\Gamma| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1}
\tag{2-16}$$

$$z = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}
\tag{2-17}$$

という関係式を導きだすことができる。

2.3. スミスチャート

スミスチャートとは、インピーダンスと反射係数を対応させた計算図表である。今、 $z = r + jx$ 、 $\Gamma = |\Gamma| e^{j\theta} = \Gamma_I + j\Gamma_Q$ として、式(2-16)に代入し、 r 、 x を求めると、

$$r = \frac{1 - \Gamma_I^2 - \Gamma_Q^2}{(1 - \Gamma_I)^2 + \Gamma_Q^2}
\tag{2-18}$$

$$x = \frac{2\Gamma_Q}{(1 - \Gamma_I)^2 + \Gamma_Q^2}
\tag{2-19}$$

となり、これよりさらに

$$\left(1 - \frac{r}{r+1}\right)^2 + \Gamma_Q^2 = \frac{1}{(r+1)^2}
\tag{2-20}$$

$$(\Gamma_I - 1)^2 + \left(\Gamma_Q - \frac{1}{x}\right)^2 = \frac{1}{x^2}
\tag{2-21}$$

となり、 Γ 平面状で $r = \text{一定}$ の軌跡は中心が $\Gamma_I = r / (r + 1)$ 、 $\Gamma_Q = 0$ で半径が $1 / (r + 1)$ なる円群となり、また $x = \text{一定}$ の軌跡は中心が $\Gamma_I = 1$ 、 $\Gamma_Q = 1 / x$ で半径が $1 / x$ なる円群となることがわかるFig. 3。一方、 Γ を極座標で表したときの軌跡はFig. 4 のようになる。Fig. 3 の外周の半径は 1 ($r = 0$ の場合) であり、Fig. 4 の外周の半径も 1 ($|\Gamma| \leq 1$) であるので、この両者を重ねて書いたのが実際のスミスチャートである Fig. 5。

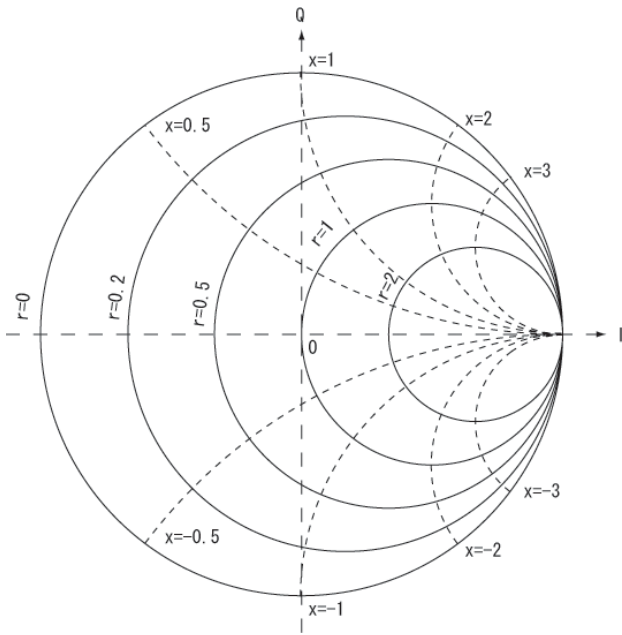


Fig. 3 $\Gamma = (z-1)/(z+1)$

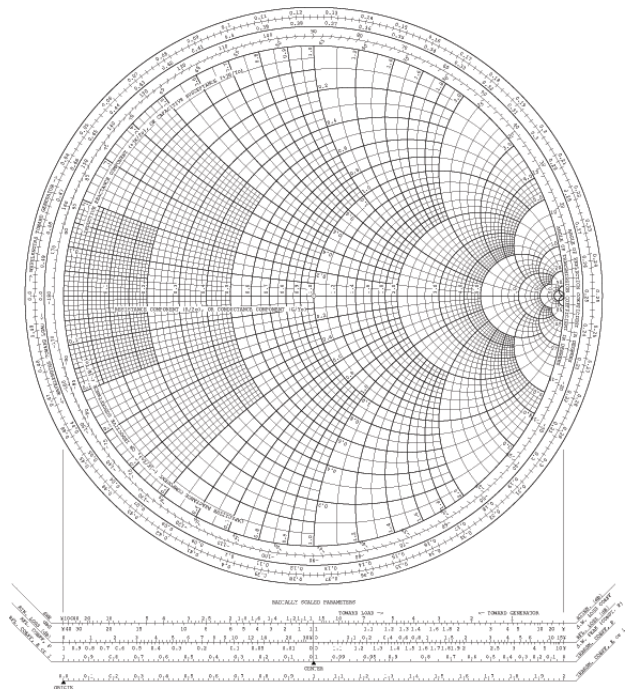


Fig. 5 スミスチャート

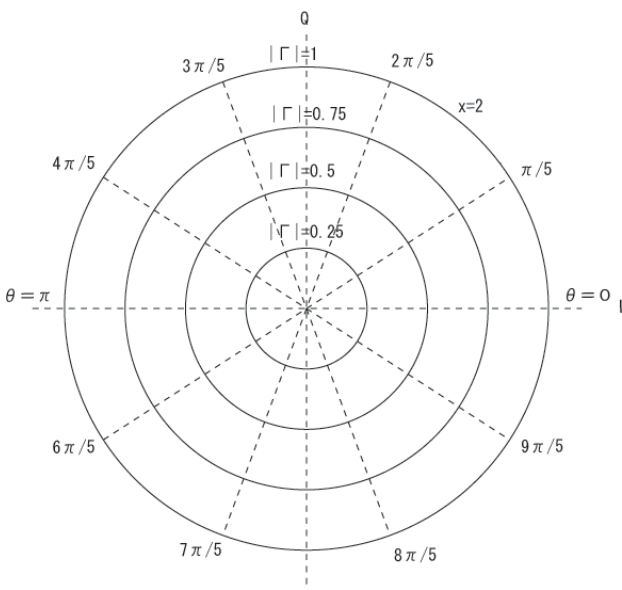


Fig. 4 $\Gamma = |\Gamma|e^{j\theta}$

2.4. スミスチャートを用いた Q 値の求め方

実際にスミスチャートを用いて Q 値を求める方法について説明する。はじめに、空洞共振器は等価回路を用いてあらわすことができ、Fig. 6 のように表すことにする。

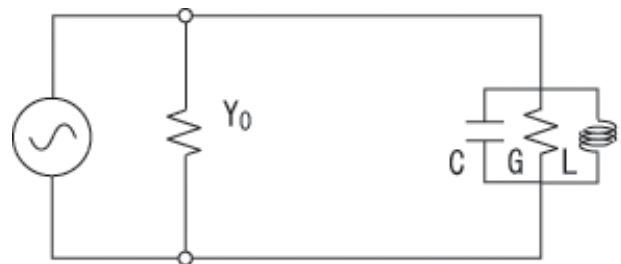


Fig. 6 空洞共振器の等価回路

伝送線に損失がないとすると、共振角周波数を ω_0 、無負荷時の Q (unloaded Q) を Q_0 とすると、

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-22)$$

$$Q_0 = \frac{\omega_0 C}{G} \quad (2-23)$$

$b = \pm g$ となる場合を考えると、式(2-34)より、

$$2Q_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 1 \quad (2-36)$$

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}$$

となり、このときの共振周波数からのズレを $\Delta\omega_0$ とすると、

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega_0} \quad (2-37)$$

となる。Fig. 7 のスミスチャートにおいて、 $b = \pm g$ の曲線は Q_0 で示した円弧になる為、 $\Delta\omega_0$ はこの円弧とアドミタンス円の交点の周波数から求められる。

次に $b = \pm 1$ となる場合を考えると、式(2-31)、式(2-34)より、

$$\frac{G}{Y_0} \times 2Q_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 1 \quad (2-38)$$

$$\frac{\omega_0}{2\Delta\omega} = Q_0 \times \frac{1}{\beta} = Q_{ext}$$

となり、このときの共振周波数からのズレを $\Delta\omega_{ext}$ とすると、

$$Q_{ext} = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega_{ext}} \quad (2-39)$$

なる。Fig. 7 のスミスチャートにおいて、 $b = \pm 1$ の曲線は Q_{ext} で示した円弧になる為、 $\Delta\omega_{ext}$ はこの円弧とアドミタンス円の交点の周波数から求められる。

次に $b = \pm(1 + g)$ となる場合を考えると、式(2-31)、式(2-33)、式(2-34)より、

$$\frac{G}{Y_0} \times 2Q_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 1 + \frac{G}{Y_0} \quad (2-40)$$

$$\frac{\omega_0}{2\Delta\omega} = Q_0 \times \frac{1}{\beta + 1} = Q_L$$

となり、このときの共振周波数からのズレを $\Delta\omega_L$ とすると、

$$Q_L = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega_L} \quad (2-41)$$

となる。Fig. 7 のスミスチャートにおいて、 $b = \pm(1 + g)$ は Q_L で示した直線になる為、 $\Delta\omega_L$ はこの円弧とアドミタンス円の交点の周波数から求められる。

以上の方法で、 Q_L 、 Q_0 、 Q_{ext} が求められ、式(2-32)を用いることで結合度 β も求めることができる。

2.5. 固有モードによる結合度の計算

Sパラメーターを用いた方法では、Q値が大きいと、共振周波数が先にある程度分かっていないと、計算できない。そのためにしばしば固有モードを先に解くと思うが、この固有モードを解く際に同調曲線を利用すれば、結合度は計算できる。同調曲線とは、結合孔に接続されている伝送線路に可変短絡を取り付けた際の共振周波数の変化を表す。これを定式化するのは式(2-7)で無損失の空洞が伝送線路に接続されているとして、

$$Z_0 = \frac{1}{jQ_{ext} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (2-42)$$

とすれば良く、

$$Z_l = \frac{V_i e^{j\beta l} + V_r e^{-j\beta l}}{V_i e^{j\beta l} - V_r e^{-j\beta l}} \frac{1}{jQ_{ext} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (2-43)$$

となる。ここで伝送線路終端を短絡した場合

$$Z_l = 0 \quad (2-44)$$

$$V_i = -V_r$$

なので、

$$0 = \frac{\cos(\beta l)}{j \sin(\beta l)} \frac{1}{j Q_{ext} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \quad (2-45)$$

と書き換えられ、

$$\begin{aligned} \frac{1}{Q_{ext}} &= \tan \left(\frac{2\pi l}{\lambda_g(\omega)} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \\ &\approx -\frac{2\pi \Delta l}{\lambda_{g0}} \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \\ &\left(\Delta l = l - \frac{\lambda_{g0}}{2}, \lambda_{g0} = \lambda_g(\omega_0) \right) \end{aligned} \quad (2-46)$$

となる。正確には1行目の関数を用いて関数をフィットするのが正しいが、一般的には2行目の式で十分である。まず導波管の長さを管内波長 λ_g の1/4にすると、導波管内にエネルギーが溜まらないため、 $\Delta\omega=0$ となり ω_0 が求まる($\Delta\omega$ の原点が定まる)。その後導波管の長さを半波長程度にし、その付近で Δl を変えながら、導波管の共振による全体の共振周波数のずれを見る事で、外部Qが求まり、結合度が求まる。ただし Δl の原点は分からないので、何点か計算する必要がある。

この方法は、実際の測定でも可変短絡器を使い、空洞に小さな穴を開けてアンテナを挿入するなどして同様な測定が可能である。

2.6. タイムドメインでの結合度の計算

Q値が非常に高く、結合度も1に近い場合、伝送線路側から空洞を見るというやり方は非常に計算時間が分かる。一般的に加速器の空洞の場合、空洞内部の固有モードは単純なモードでQ0も既知の事が多い。従って、空洞に固有モードを立てた状態から、タイムドメインで計算をし、結合孔から漏れ出てくる電磁波の電力を計算すれば、内部に蓄積されているエネルギーとの比から、QLが求まり、簡単に結合度が計算できる。

2.7. 差分情報

空洞の計算で最低限必要なのは、正確な絶対値ではなく、およその絶対値とおよその差分情報のみ

である、近年は計算機の向上により、正確な絶対値を追い求める事もできるようになってきたが、一般的にはシミュレーションは適当にやって、物を安全側に製作してから測定した後、調整機構によりチューニングもしくは、調整加工を行った方が早く製作できる。例えば空洞の長さLに対しての共振周波数の差分 $\Delta f/\Delta L$ や、結合度では結合孔の半径rに対しての、 $\Delta k/\Delta r$ などである。

この際の ΔL 、 Δr などはシミュレーションのメッシュ等よりも十分に大きくして、この1次の差分情報を求めれば十分である事が多い。

3. 製造工程

3.1. 構造仕様・図面

構造仕様を決める際や図面作成の際に気をつけるべき点としては、

- 機械加工における無理を強くない。
- 材料はできるだけ規格品を使う。
- 旋盤、次にフライスというように精度の出る順番で製造できる構造にする。
- 刃物の先端径をできるだけ大きい物を使用して角のRが大きくできる物はできる限り大きくする事で、刃物の振動を抑え、切削速度を速め、かつ平坦度を増す事ができる。
- 新しい製造方法、材料を使用する際には十分な試作費、試作時間を考慮する
- 超高真空機器なので材料、接合技術が非常に限定的である
- 材料は高純度かつ欠陥の無い物が求められる。必要に応じてだが、例えば銅の場合は電子管用無酸素銅、ステンレスの場合は低カーボンの物(SUS316L)を選択する。高純度材料は時期によって入手に数ヶ月かかる事もあるので、納期も考慮する必要がある。
- 超高真空機器における一般的な接合技術はロウ付け、TIG溶接、電子ビーム溶接、HIPなどと限られている。気密性はもちろん、放出ガスが少ない事や、ベーキングに耐えられる必要があるからである。当たり前だが、例

えばハンダ付け、接着剤はもちろん使えない。またゴムのOリングなども材質がバイトンでも耐熱温度は200℃程度なので、ベーキング温度によっては使えない。

これらを踏まえた上で、JIS規格に従って図面を書く。図面は組み立て図と、部品図で構成され、部品図は必ず1品一枚とする。1:1にできる物は1:1で書くと加工の方が物を合わせて確認ができる。

3.2. 機械加工

先端技術は日進月歩で進歩している割には、機械加工で高精度に製作できる形状は工作機械の種類や刃物の形状で制限されるため、昔からあまり変わっていない。大きく変化したのはCAMによる多軸加工が可能になったため、斜めや曲線の加工をするのに、以前のように冶具を工夫したりする必要がなくなった事だが、CAMのソフトウェアは現時点では高価であり、また専任のオペレーターが必要であるため、町工場にまで普及しているとは言えない。

• 旋盤

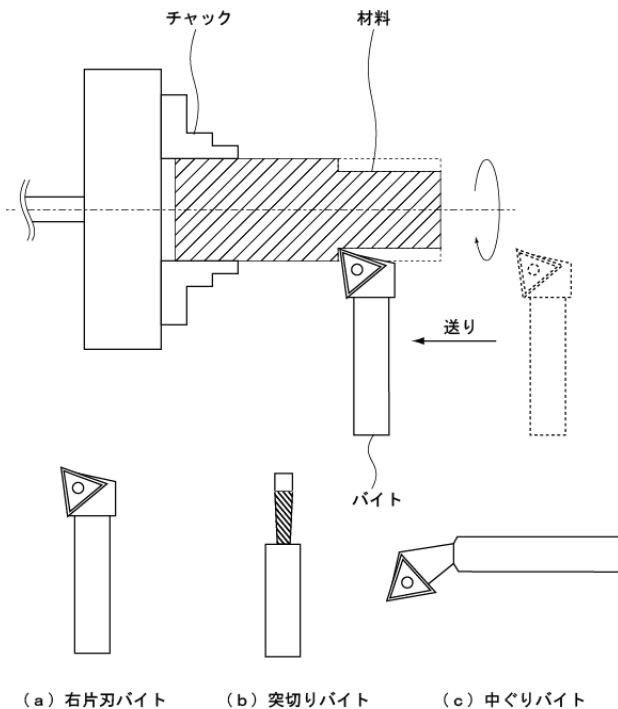


Fig. 8 旋盤

• フライス

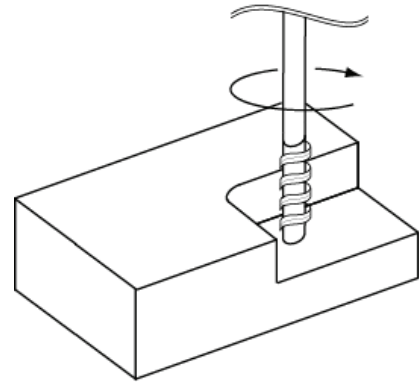


Fig. 9 フライス

• NC加工機とCAM

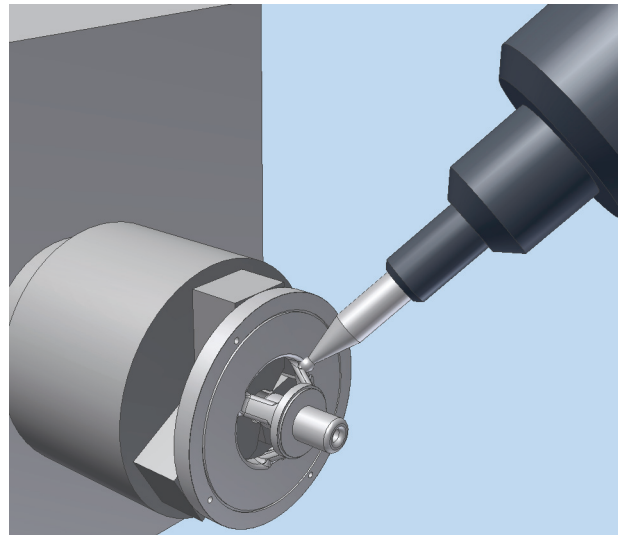


Fig. 10 多軸ターニングセンターの概念図

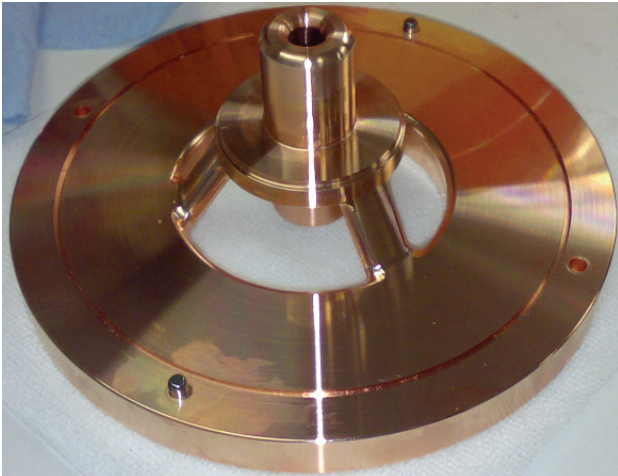


Fig. 11 実際に加工した高周波空洞の写真

ダイヤモンドバイト

非常に高い耐摩耗性により長時間使用でき、良好な仕上面が得られる。(0.025 μ mRa) また高速度の切削にも耐えられる。ただし、鉄系金属材料や、欠陥のある材料で使用したり、刃物を普通のバイトと同様に物に当てると刃物が欠けるため、細心の注意が必要である。

放電加工

ワイヤー放電加工と、形彫り放電加工がある。形彫り放電加工は被加工物に形成したい形状に対応する形に作られたグラフィート電極または銅電極等を、被加工物に近付けるように送ってゆく。ワイヤー放電加工は、細い金属ワイヤーを被加工物に近付けるように送ってゆく。ワイヤーはポピンから一定の速さで供給され、上下のガイドで保持される。一對のガイドが相対的に運動することによりテーパ加工、上下任意形状の加工を行うことができる。金属ならほとんど何でも加工可能であるが、放電加工面は溶解・再凝固を繰り返すため脆化するため、そのままでは空洞内壁の表面などには使えない。

3.3. 塑性加工

金属の塑性を利用した加工方法であり、加速器でも、例えば導波管は引き抜き加工により製造されている。また拡管による円形導波管の製作や、深絞り加工による空洞の試作などが行われている。

加工歪や弾性により加工時やロウ付け時に変形する事がある。

3.4. 表面処理

常伝導加速空洞では一般的には、ダイヤモンドバイトによる加工後、表面処理はしないのが最も良いとされている。しかし超伝導加速空洞では、空洞が塑性加工などで成形されるため、表面処理が性能を決める。

Table 1 表面処理法

技術	電解複合研磨	浸漬電解研磨	科学研磨	パフ研磨
	ECB	EP	CP	BUFF
平滑性	◎	○	△	○
下地面前処理	不要	必要 (下地粗さに依存)	必要 (下地粗さに依存)	～
研磨表面	(超) 鏡面	半光沢	光沢なし	光沢
実効面積	極小 (マクロ的粗さ改善)	中 (ミクロ的粗さ改善)	大	大
非付着性	◎	○	×	△
剥離性	◎	○	×	△
加工歪	なし	なし	なし	あり
耐食性	○	○	△	×

4. 接合技術

4.1. ろう付

ろう付けとは、金属を接合する方法の一つで、接合する母材よりも融点の低い合金(ろう)を溶かして一種の接着剤として用いる事により、母材自体を溶融させずに複数の部品を接合する方法である。

4.1.1. 炉の種類

接合する母材とろうを暖めるために炉と呼ばれる窯を用いる。ろう付けする際、炉の内部は高温になり、母材やろうが酸化しやすいため、酸素を除去するなどの対策が必要になる。炉には真空

炉、不活性ガス炉、水素ガス炉などがあり、以下それぞれについて説明する。

真空炉

真空炉とは真空ポンプを用いて炉の中を高真空の状態にしている炉のことである。炉を暖める場合は内部が真空の為、対流が起こらず、対流が起こる場合より時間がかかり、温度を下げる場合も同様に時間がかかる。

不活性ガス炉

不活性ガス炉とは 10-4torr くらいまで炉の内部の真空を引き、その後、窒素やアルゴンなどの不活性ガスで置換した炉のことである。一度真空にしてから、不活性ガスで置換するため、隅々までガスが行き渡る。

水素ガス炉

水素ガス炉とは不活性ガス炉と同様に 10-4torr くらいまで真空を引き、その後、水素ガスで置換した炉のことである。水素ガスは還元作用がある為、ろう付けする金属表面の酸化膜などを除去してくれるという利点もある一方、酸素との比率で爆発する可能性もある為、取り扱いには注意が必要である。

4.1.2. ろう付け時の炉の温度調整

ろう付け時の炉の温度調整について説明する。炉の温度を縦軸、時間を横軸にとったグラフをFig. 12 に示す。グラフの形は真空炉でも不活性ガス炉や水素ガス炉でも同じであるが、今回は真空炉の場合を考える。このグラフはろう付けする母材のある一箇所での温度のグラフであり、通常は数箇所の温度を測定しながらろう付けを行う。

グラフに振ってある数字の箇所ごとに、ろう付けする際の炉の温度変化、温度調整について説明する。

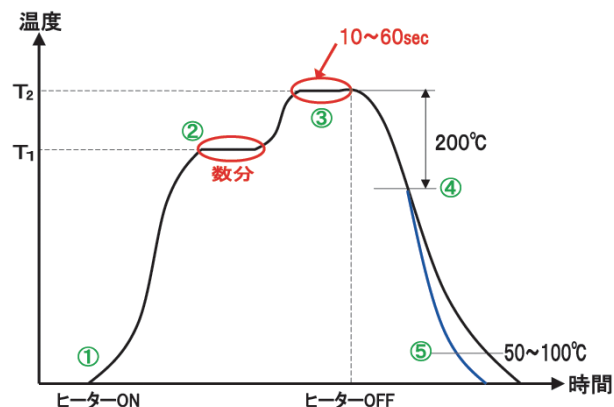


Fig. 12 ろう付け時の炉の温度変化

- (1) ヒーターをつけると exp 的に温度が上がっていく。この時ゆっくり温度を上げていく。
- (2) すべての測定箇所の温度が T_1 になったら数分間温度が一定になるようにヒーターを調整する。この温度 T_1 は固相線温度といい、この温度以下の場合、ろうは完全に固体である。なぜこの温度で数分間一定に保つかというと、ろう付けする物体の温度が一様になるようにする為である。その為、物体の形や大きさによって時間は変わってくる。
- (3) すべての測定箇所の温度が T_2 になったら数秒間温度が一定になるようにヒーターを調整する。その後ヒーターを OFF にし、そのままの状態ですぐ温度を下げていく。この温度 T_2 は液相線温度といい、この温度以上の場合、ろうは完全に液体である。なぜこの温度で数秒間一定に保った後、ヒーターを OFF にするかというと、この温度ではろうが液体になっている為、あまり長時間一定にしているとろうが流れ出てしまう為である。
- (4) $T_2 - 200^\circ\text{C}$ 付近で液体になっていたろうが固体に戻る。この後、このままの状態ですぐ温度を下がるのを待つ方法と、窒素やアルゴンを炉の中に注入する方法の二通りある。前者は炉の内部が真空で対流がない為、温度が下がりにくい。後者は窒素やアルゴンを注入することで対流が生まれ、温度を早く下げることができる。後者の場合をグラフの青い線で示す。

(5) 50～100℃になったら炉から取り出す。この温度よりも早く出してしまうと、酸化する可能性がある為、注意が必要である。

4.1.3. 母材の洗浄

ろう付けする面が汚れていると母材同士がうまく接合しない場合がある。その為、ろう付けをする前に母材を洗浄する必要がある。特に加速管など、高真空、高温で使用する母材の場合は複数回洗浄する。以下に洗浄を行う順に洗浄方法を説明する。

(1) 酸洗

硫酸などの2～5%の溶液で洗う。
長く洗うと酸化するので注意が必要。

(2) 純水洗

純水を用いて洗う。

(3) 純水液中で超音波洗浄

超音波を用いることで、細部まで洗うことができる。

(4) 純水洗（高温）＋攪拌

鏡面加工の銅などは40℃以下
SUS（ステンレス）は70℃以下

しかし、このように念入りな洗浄が必要な場合はとても特殊で、一般のろう付けはアクセサリなどに用いられており、その場合はこれほど丁寧に洗浄はしない。その為、ろう付けを依頼する場合は、高真空、高温で使用するものであることを相手に伝える必要がある。

4.1.4. ろうの種類

ろうには銅ろう、金ろう、パラジウムろう、銀ろうなどの種類があり、それぞれワイヤー状、帯状、粒状または粉末状などの形状がある。ろうの種類により固相線温度や液相線温度が異なり、またワイヤー状のろうを用いる場合はろう溝を切る必要がある。Fig. 13 に大まかなろうの種類によるろう付け温度の違い、Fig. 14 にろうの名前と形状、Table 2 には代表的なろうの化学成分、Table

3 には固相線温度、液相線温度、ろう付け温度を示す。

複数回ろう付けをする場合、この温度差を用いてろう付け温度が高いものから先にろう付けをする。


温度	ろうの種類	ろう付け温度(参考)
	Cu (銅ろう)	1090℃
	Au (金ろう)	1040℃
	Pd (パラジウムろう)	900℃
	Ag (銀ろう)	750℃

Fig. 13 ろうの種類によるろう付け温度




名前	形状	ろう溝
線ろう材	ワイヤー 	○
リボンろう材	帯 	×
粉末ろう材	粒 	×

Fig. 14 ろうの形状

Table 2 真空用貴金属ろうの種類と化学成分

種類		化学成分 (mass%)			
記号 A	記号 B	Ag	Au	Cu	その他
BVAg-0	BV-Ag100-961	99.95 以上	-	0.05 以下	-
BVAg-6B	BV-Cu50-780/870	49.0 ~ 51.0	-	残部	-
BVAg-8	BV-Ag72Cu-780	71.0 ~ 73.0	-	残部	-
BVAg-8B	BV-Ag71CuNi-780/795	70.5 ~ 72.5	-	残部	Ni : 0.3 ~ 0.7
BVAg-18	BV-Ag60CuSn-600/720	59.0 ~ 61.0	-	残部	Sn : 9.5 ~ 10.5
BVAg-29	BV-Ag61CuIn-625/710	60.5 ~ 62.5	-	残部	In : 14.0 ~ 15.0
BVAg-30	BV-Ag68CuPb-805/810	67.0 ~ 69.0	-	残部	Pd : 4.5 ~ 5.5
BVAg-31	BV-Ag58CuPd-825/850	57.0 ~ 59.0	-	残部	Pd : 9.5 ~ 10.5
BVAg-32	BV-Ag54PdCu-900/950	53.0 ~ 55.0	-	残部	Ni : 24.5 ~ 25.5
BVAu-1	BV-Cu63Au-990/1015	-	37.0 ~ 38.0	残部	-
BVAu-2	BV-Au80Cu-890	-	79.5 ~ 80.5	残部	-
BVAu-3	BV-Cu62AuNi-975/1030	-	34.5 ~ 35.5	残部	Ni : 2.5 ~ 3.5
BVAu-4	BV-Au82Cu-950	-	81.5 ~ 82.5	-	Ni : 残部
BVAu-11	BV-Cu50Au-955/970	-	49.5 ~ 50.5	残部	-
BVAu-12	BV-Au75CuAg-880/895	12.0 ~ 13.0	74.5 ~ 75.5	残部	-

Table 3 真空用貴金属ろうの種類と温度

種類		温度 (参考) °C		
記号 A	記号 B	固相線	液相線	ろう付温度
BVAg-0	BV-Ag100-961	約 961	約 961	961 ~ 1080
BVAg-6B	BV-Cu50-780/870	約 780	約 870	870 ~ 980
BVAg-8	BV-Ag72Cu-780	約 780	約 780	780 ~ 900
BVAg-8B	BV-Ag71CuNi-780/795	約 780	約 795	795 ~ 900
BVAg-18	BV-Ag60CuSn-600/720	約 600	約 720	720 ~ 840
BVAg-29	BV-Ag61CuIn-625/710	約 625	約 710	710 ~ 790
BVAg-30	BV-Ag68CuPb-805/810	約 805	約 810	810 ~ 930
BVAg-31	BV-Ag58CuPd-825/850	約 825	約 850	850 ~ 890
BVAg-32	BV-Ag54PdCu-900/950	約 900	約 950	950 ~ 990
BVAu-1	BV-Cu63Au-990/1015	約 990	約 1015	1015 ~ 1095
BVAu-2	BV-Au80Cu-890	約 890	約 890	890 ~ 1010
BVAu-3	BV-Cu62AuNi-975/1030	約 975	約 1030	1030 ~ 1090
BVAu-4	BV-Au82Cu-950	約 950	約 950	955 ~ 1005
BVAu-11	BV-Cu50Au-955/970	約 955	約 970	970 ~ 1020
BVAu-12	BV-Au75CuAg-880/895	約 880	約 895	895 ~ 950

4.1.5. ろう溝

带状や粒子状のろうを用いる場合は、接合する箇所へろうを置くだけだが、ワイヤー状の線ろうを用いる場合は、母材へろうが入る大きさの溝を切る必要がある、その溝をろう溝という。ろう溝はろう付けする際の母材の置き方で、溝の切り方が変わる。以下 2 つの場合について説明する。

Fig. 15 のように二つのパーツを縦に重ねてろう付けをする場合

ろう溝は経験上パーツ 2 の方に切ったほうが失敗が少ない。ろう溝は Fig. 16 の様に切り、溝はろう材がきちんと収まるようにろう材の直径 + 0.1mm の幅、深さで切る。青く塗りつぶされている箇所がろう溝であり、Fig. 15 は 1mmφ のろう材を用いた場合のろう溝が描かれている。

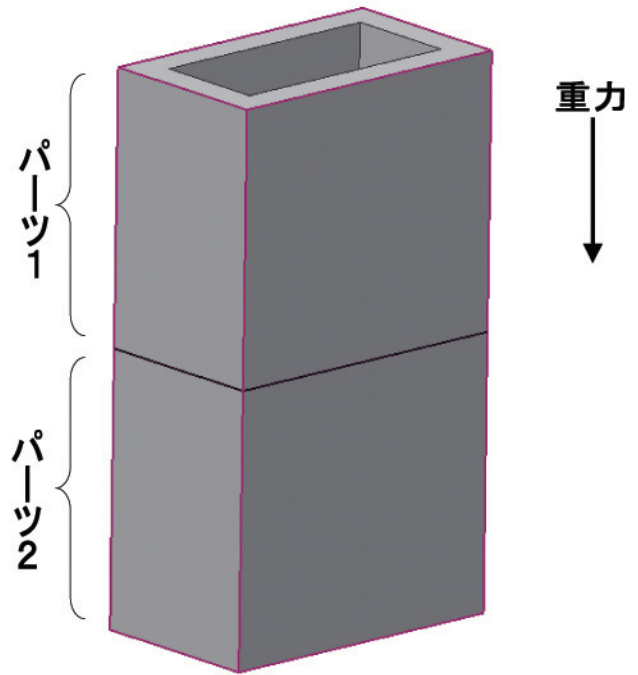


Fig. 15 縦置きの場合

Fig. 17 のように二つのパーツを横に重ねてろう付けする場合

ろう溝はパーツ 1、パーツ 2 どちらに切ってもよい。Fig. 16 の様に溝を切ると、重力で上のろうがすべて下に流れてしまい上の部分がろう付けされないということが起こる。その為、Fig. 18 の様に溝を分割することにより、ろうが流れ出てしまうことを防ぐ必要がある。しかし、分割した溝が長すぎると先ほどを同じことが起こる為、注意が必要である。また、Fig. 19 の様に溝の端が揃っていない場合、上の溝から染み出てきたろうが下の溝へ流れ込みにくい為、ろう付けに隙間ができてしまう可能性がある。その為、Fig. 20 の様に溝の端を揃える必要がある。揃えることで、上の溝から染み出てきたろうが下の溝に流れ込み、隙間なくろう付けされる。

今回は矩形のもので説明をしたが、円形のものや他の形のものでも同じように考えることができる。

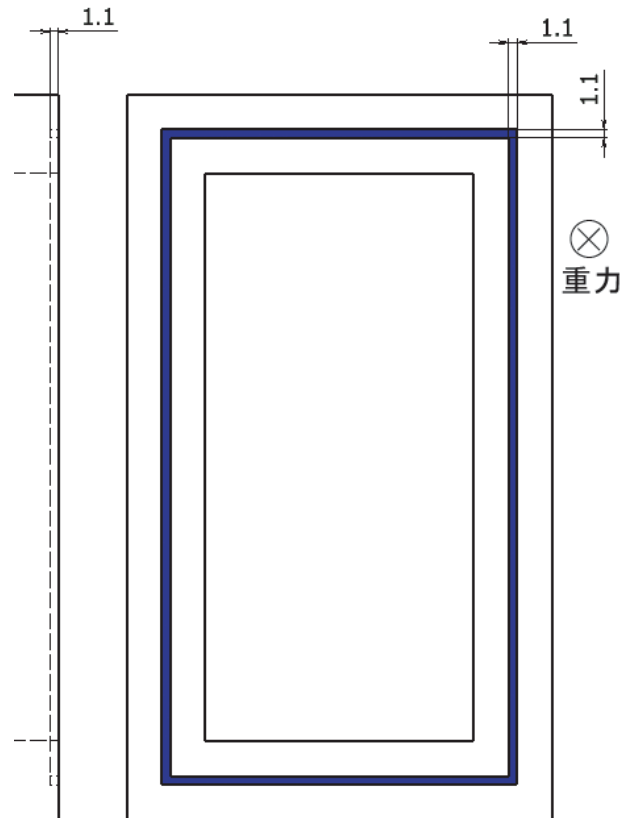


Fig. 16 縦置きの場合のろう溝

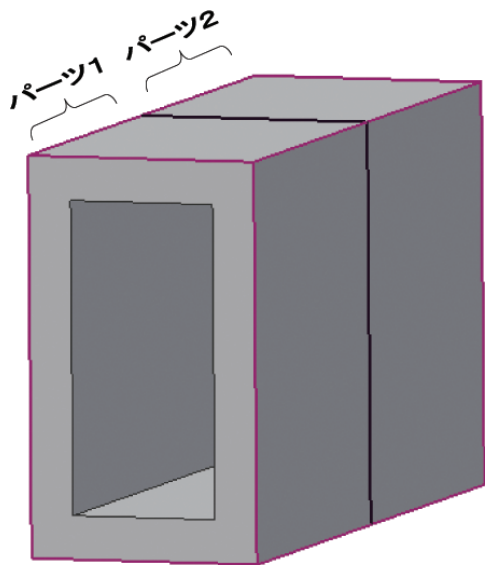
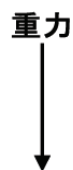


Fig. 17 横置きの場合



重力で上の溝から
下の溝へろうが流れ込む
しかし、溝の端が
合っていない為
溝と溝の間は
ろう付けされない
ろう付けされない
箇所が出来てしまう。

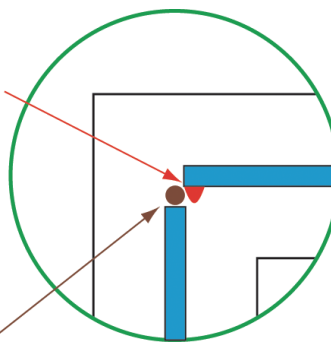


Fig. 19 正しくない溝の切り方

重力で上の溝から
下の溝へろうが流れ込む
溝と溝の間が
ろう付けされる

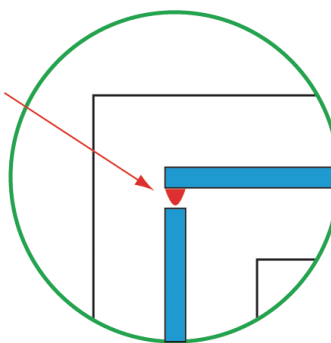


Fig. 20 正しい溝の切り方

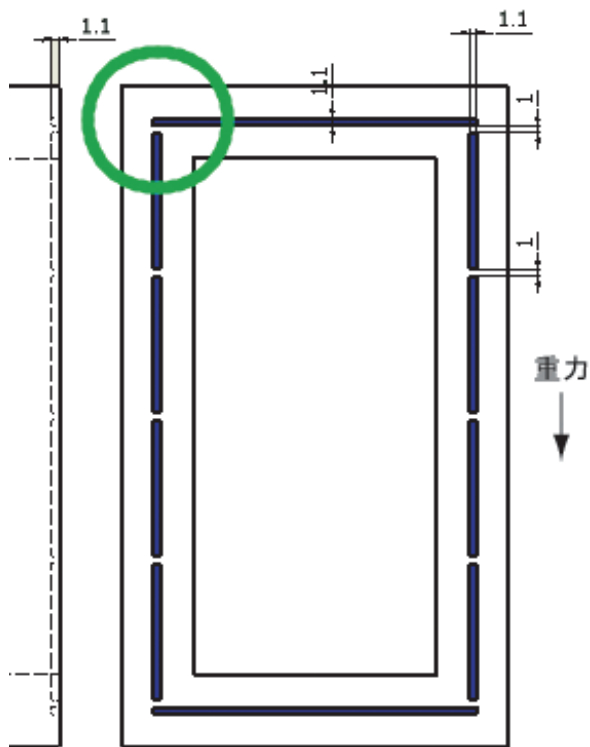


Fig. 18 横置きの場合のろう溝

4.1.6. ろうの動き

炉で温められたろうがどのような動きをするのか説明する。Fig. 15 の1部を横から見た図をFig. 21 のIに示す。

Fig. 21-Iの状態を上げていくと、ろうが溶け始める。また、ろう溝の中にある気体の圧力も上がっていく (Fig. 21-II) ろう溝の中の気体に押され、ろうが母材と母材の間に毛細管現象で進んでいく (Fig. 21-III)。毛細管現象とは細い空間内を、重力や上下左右に関係なく液体が浸透していく現象である。ろうはそのまま母材の端まで進みすこしはみ出た状態で固まる。加速管など高電圧をかける場合はこのろうの引っ張りが原因で放電が起こることがある (Fig. 21-IV)。その為、母材の角をろう材の半径~直径の cut やフィレットをし、ろう材が外に出っ張らないようにする必要がある (Fig. 21-V)。

先の説明は線ろう材の場合であったが、帯状や粉末状のろう材の場合もろう溝からろうが染み

出るとい行程以外は線ろう材の場合と同じである。

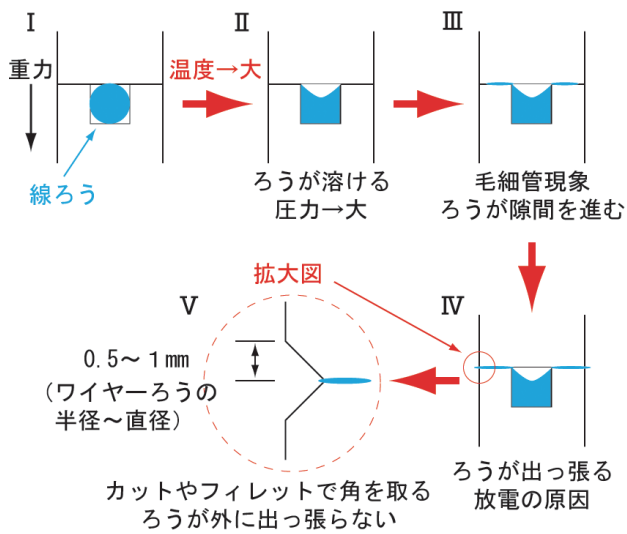


Fig. 21 ろうの動き

4.2. TIG 溶接

アーク溶接の一種。融点の非常に高いタングステン棒からアークを出し、その熱で母材を溶かす。アルゴンなどのシールドガスを用いる。溶加材を足すことも可能。精密な溶接に向く。高圧パイプや精密機器の溶接などに使われる。高融点のタングステンを電極にしているため電極自体は減りづらいがアーク熱を発生させるだけで溶着金属を付加するために左手で溶接棒を添加しなければならない。非鉄金属に対する溶接に適応力が広い。

4.2.1. 直流T I G 溶接法

最も一般的な溶接法で、直流の定電流特性の溶接電源を用いたタングステン電極を陰極に接続してアークを発生させます。直流T I G溶接法は、アルミニウムやマグネシウムなどの活性金属以外のほとんどすべての金属の溶接に適用できます。

4.2.2. 交流T I G 溶接法

アルミニウムやマグネシウム合金などの溶接では、母材表面の酸化皮膜を除去する必要があるため、母材側を陰極にしてアークのクリーニング作

用を利用する必要があります。しかし母材を陰極にするとタングステン電極は陽極となり、電極側へのアークの入熱量が大きくなるため、電極の消耗が激しくなって実用性に欠けます。この問題を解決したのが交流T I G溶接法で、電極棒マイナス、棒プラスの両極性の特徴を引き出しています。すなわちクリーニング作用を確保しつつ、電極消耗を極力抑えながら溶け込みを、棒マイナス時と棒プラス時の中間の形となって確保できます。

4.2.3. パルスT I G 溶接法

(1) 直流パルスT I G 溶接法

直流パルスT I G溶接法は溶接電流を一定周期でパルス状に変化させ、パルス電流が流れている時間に母材を溶融し、ベース電流が流れている時にはその溶融池を冷却凝固させて、周期的にできる溶融スポットを重ね合せながら溶接する方法です。直流パルスを使ったステンレス鋼の溶接は、数珠状のビードになり溶融スポットの重なり部分は溶接速度やパルス周波数によって制御されます。薄板や板厚違いの溶接や、裏波溶接、難姿勢溶接などが容易にできるなどの特徴があります。

(2) 交流パルスT I G 溶接法

交流パルスT I G溶接法のパルスの原理は直流パルスT I Gと同様です。アルミニウムの薄板溶接や裏波溶接、美しいビード外観やT I G溶加棒とタイミングに合わせて溶接ができるなどの特徴があります。

4.2.4. T I G 溶接の特徴

- 不活性ガスシールドなので、溶接金属への不純物混入が少なく、高品質。
- スパッタの発生がなく、溶接作業が容易。
- あらゆる継手形状に適用でき、かつ溶接姿勢に制限がない。
- 小電流でも安定したアークが得られ、薄板溶接にも適用でき、また裏波溶接がしやすい。

4.2.5. TIG 溶接の欠点

- 人の手で作業を行うため熟練が必要であり比較的難易度が高い。場合によって免許も必要。
- 比較的高価な不活性ガスを大気放出で必要とすること
- 溶接速度が MIG 溶接などの溶極式アーク溶接法に比べて遅いこと
- ガスシールドアーク溶接特有の風の影響を受けやすい

4.3. 電子ビーム溶接

電子ビーム溶接とは、高真空中でフィラメント（陰極）を加熱して、放出した数 100mA 程度の電子を数 10kV 程度の高電圧で加速し、電磁コイル（集束コイル等）で集束し、被溶接部に衝突させ、電子ビームの運動エネルギーを熱エネルギーに変換して溶接する方法です。

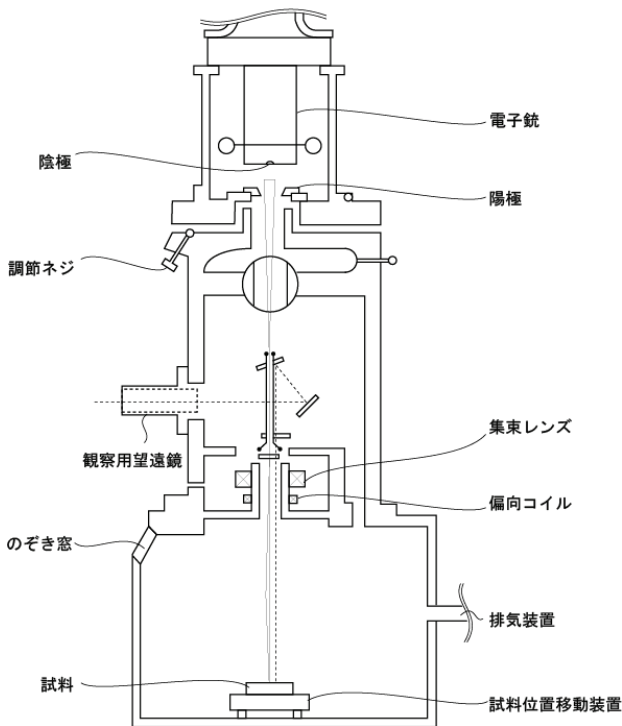


Fig. 22 電子ビーム溶接機概念図

4.3.1. 電子ビーム溶接の特徴

- 高エネルギービーム熱源（TIG 溶接の数千倍）なので、TIG 溶接では接合が難しい銅・アルミニウムなど高熱伝導率の金属の厚板でも予熱なしで溶接可能。また熱伝導を超える熱流入により異種金属の溶接が可能。
- 幅の狭い深溶け込み溶接が可能で、開先を取る必要がなく、突合せだけでよいので、低熱歪で段取りも簡単。
- 厚板から薄板まで欠陥の少ない溶接が可能で、溶接部の結晶粒が小さく、機械的性質に優れ、溶接部の切削も可能。
- 真空中での溶接なので、母材および溶接部の酸化と窒化を抑制し、Nb, Ti, Mg, Al 等活性な金属も容易に溶接が可能。また真空中なのでコンタミネーションも非常に少ない。
- NC 機構が付いているので複雑な溶接線にもならうことができ高信頼性繰り返し生産が可能。

4.3.2. 異種金属の接合

異種金属の接合の良好さは Table 4 のようになっている。例えば超伝導空洞材料の Nb と Ti の溶接性は良好である事が分かる。また異種金属の接合の際注意すべき事としては、熱伝導率の違いにより、溶け込みが違うため、オフセットして電子ビームを打つ必要がある事である。このオフセット量については各社データを持っているようだが、テストピースを一度接合した後、切断して断面の溶け込み状態を確認した方が良い。

Table 4 異種金属の接合の良好さ

	Ag	Al	Au	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Ag		○	◎	×	○	△	○	○	△	×	○	△	▲	○	○	◎	△	○	△	○	△	△	×
Al	○		×	○	×	×	×	○	×	○	×	×	×	×	○	×	▲	○	×	×	×	×	×
Au	◎	×		×	×	○	△	◎	○	×	×	○	▲	◎	×	◎	▲	×	▲	×	△	▲	×
Be	×	○	×		▲	×	×	×	×	×	×	×	×	×	▲	×	×	△	△	×	×	×	×
Cd	○	×	×	▲		△	△	×	△	◎	△	▲	▲	△	○	×	▲	○	▲	×	▲	▲	△
Co	△	×	○	×	△		○	○	○	×	○	×	×	◎	○	◎	◎	×	×	×	×	×	×
Cr	○	×	△	×	△	○		○	○	×	○	◎	×	○	○	○	◎	○	×	◎	△	◎	×
Cu	○	○	◎	×	×	○	○		○	×	◎	△	△	◎	○	◎	△	○	△	×	△	△	×
Fe	△	×	○	×	△	○	○	○		△	○	○	×	○	○	◎	×	×	×	×	◎	×	×
Mg	×	○	×	×	◎	×	×	×	△		×	△	▲	×	×	×	▲	×	▲	△	▲	△	△
Mn	○	×	×	×	△	○	○	◎	○	×		△	×	○	○	×	▲	×	×	×	×	△	×
Mo	△	×	○	×	▲	×	◎	△	○	△	△		◎	×	△	△	×	△	◎	◎	◎	◎	×
Nb	▲	×	▲	×	▲	×	×	△	×	▲	×	◎		×	▲	×	×	×	△	◎	◎	△	◎
Ni	○	×	◎	×	△	◎	○	◎	○	×	○	×	×		○	◎	△	×	×	×	×	×	×
Pb	○	○	×	▲	○	○	○	○	○	×	○	△	▲	○		×	▲	○	○	×	▲	△	×
Pt	◎	×	◎	×	×	◎	○	◎	◎	×	×	△	×	◎	×		○	×	×	×	×	×	×
Re	△	▲	▲	×	▲	◎	◎	△	×	▲	▲	×	×	△	▲	○		△	△	×	△	×	×
Sn	○	○	×	△	○	×	○	○	×	×	×	△	×	×	○	×	△		×	×	×	△	×
Ta	△	×	▲	△	▲	×	×	△	×	▲	×	◎	△	×	○	×	△	×		◎	△	△	×
Ti	○	×	×	×	×	×	◎	×	×	△	×	◎	◎	×	×	×	×	×	◎		◎	○	◎
V	△	×	△	×	▲	×	△	△	◎	▲	×	◎	◎	×	▲	×	△	×	△	◎		△	×
W	△	×	▲	×	▲	×	◎	△	×	△	△	◎	△	×	△	×	×	△	△	○	△		×
Zr	×	×	×	×	△	×	×	×	×	△	×	×	◎	×	×	×	×	×	×	◎	×	×	

4.4. HIP(熱間等方圧加圧法/Hot Isostatic Pressing)による拡散接合

表面を非常に平滑にすれば重さと温度だけで拡散接合が可能であり、超精密加工で製作された X バンドの加速管などでは従来行われてきた。しかしこの方法は通常加工の平面度や平滑度では使えない。

HIP はアルゴンなどの不活性ガスを圧力媒体とし、通常 100MPa 以上の圧力と 1000°C 以上の温度との相乗効果を利用して加圧処理する技術です。HIP は、高い等方圧力（あらゆる方向から均等に加わる圧力）と高温の相乗効果を利用する原理的に優れた方法であり、粉末の加圧焼結、鋳造品、焼結品の内部欠陥除去、拡散接合などに利用する事ができる。

異種材料の接合をする際には、全体を缶に入れ、内部を真空に引きながら、HIP を行う事で、接合が可能である。これにより数 μm の拡散層が得られ、混合率によって脆くなるような金属同士でない限り、強固な接合が可能である。従って、HIP で接合した塊は接合後に機械加工を行う事も可能である。

4.5. その他

摩擦圧接など新しい接合技術も開発されている。

5. 低電力測定

5.1. DBM の仕組み

低電力測定に必須なのがダブルバランスドミキサ(DBM)です。パッシブな DBM はダイオードで構成されており、ダイオードの I-V 特性は

$$I_s(V_s) = I_T \left(e^{\frac{V_s}{\eta V_T}} - 1 \right) \approx I_T e^{\frac{V_s - V_F}{\eta V_T}} \quad (5-1)$$

$$V_T = \frac{kT}{e} = 0.0257 \text{ [V @ 25°C]}$$

ここで

I_s : ダイオードの飽和電流

V_s : PN 接合への印加電圧

η : 1~2 の定数

k: ボルツマン定数

T: 温度

である。

DBM には V_F が低い事が望まれるため、片側を金属にしてショットキ障壁で V_F を下げた、ショットキーバリアダイオードが用いられている。例えば超高速スイッチングダイオード 1S1588 では $V_F=0.7 \text{ V @ } I_s=1\text{mA}$ だが、ミキサー用ショットキーバリアダイオードである 1SS315 では、 $V_F=0.25 \text{ V @ } I_s=1\text{mA}$ となっている。

ダイオードに以下のように RF と LO から入力された高周波の和を印加すると V_s は以下のようになる。

$$V_s = V_{RF} \sin(\omega_{RF} t) + V_{LO} \sin(\omega_{LO} t) \quad (5-2)$$

$$= \eta V_T (v_{RF} \sin(\omega_{RF} t) + v_{LO} \sin(\omega_{LO} t))$$

これを式(5-1)に代入し、2 次の項までテイラー展開すると、

$$i_s = \frac{I_s}{I_T} = v_{RF} \sin(\omega_{RF} t) + v_{LO} \sin(\omega_{LO} t) + \frac{1}{2} \left(v_{RF}^2 \frac{1 - \cos(2\omega_{RF} t)}{2} + v_{RF} v_{LO} (\cos((\omega_{RF} - \omega_{LO}) t) - \cos(\omega_{RF} + \omega_{LO} t)) + v_{LO}^2 \frac{1 - \cos(2\omega_{LO} t)}{2} \right) \quad (5-3)$$

これにより、差と和の項を含んでいる事が分かりミキサー用の素子として利用できる。実際には 3 次以上の項もあり、 $\omega = m\omega_{RF} + n\omega_{LO}$ の電流出力が含まれる。

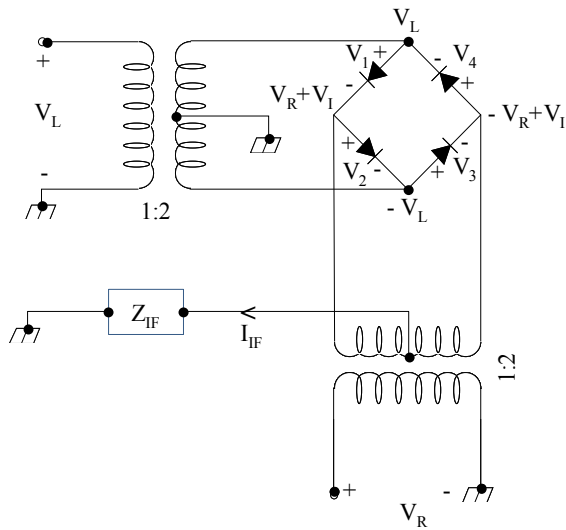


Fig. 23 DBM の回路の 1 例

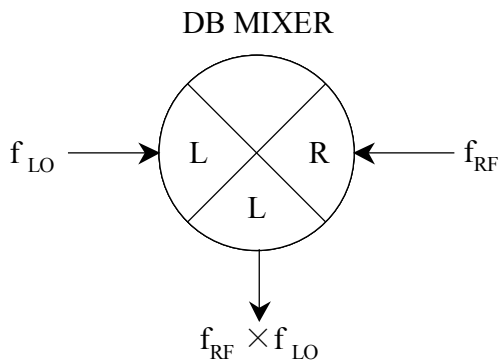


Fig. 24 DBM の概略記号

このダイオードの性質を利用して、ダイオード 4 つを使い Fig. 23 のような回路を構成する。例えば V_L, V_R が入力で IF を出力とした場合、 $V_L=$ 正、 $V_R=$ 正の時 V_2 が ON になり、式(5-3)のような電流が流れる事になり、 IF に和と差周波数の出力が得られる。一般的に LO と RF が高周波側、 LO が低周波側となっているため、フィルターを通す事により IF に差周波数の情報が得られ、ダウンコンバーターとして利用できる。逆に LO と IF を入力として RF を出力とした場合、和周波数の出力が得られ、アップコンバーターや RF スイッチとして利用できる。

5.2. 周波数ドメイン (ベクトルネットワークアナライザー)

周波数ドメインでの測定は、昔はスリット付きの導波管を用いて定在波比の測定などによっていたが、現在はベクトルネットワークアナライザーを用いて行う。ベクトルネットワークアナライザーは周波数を掃引した高周波をポートから測定物に送り、反射と透過の信号の強さと位相を測ることにより、 S -パラメーターを測定し、入射した周波数に対する測定物の特性を測定するものである。広帯域のベクトルネットワークアナライザーは一般的には狭帯域 IF 検波という方法により実現されており、内部は Fig. 25 のような構成になっている。

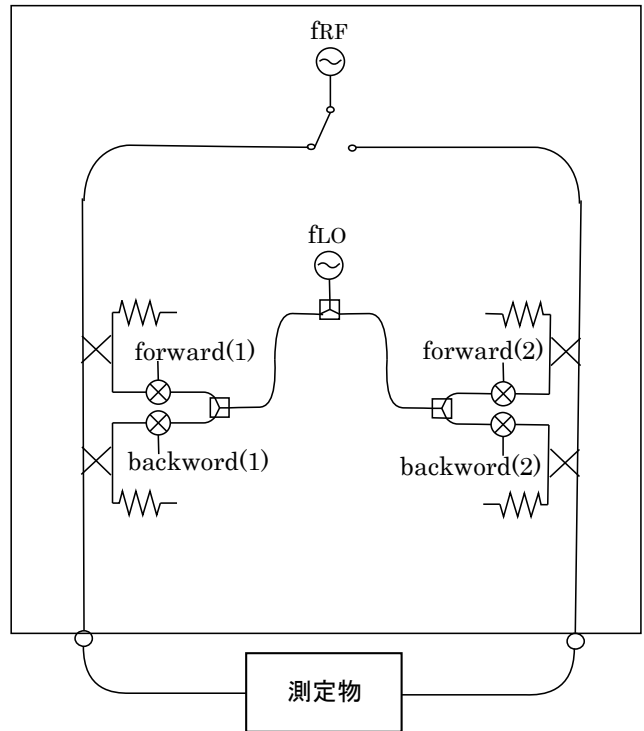


Fig. 25 ベクトルネットワークアナライザーの概念図

ネットワークアナライザーで被測定物の測定を行う際、高い Q 値の空洞の共振周波数を測るだけであれば、同軸ケーブルの先端を切断し加工したアンテナなどを用いれば良い。しかし、反射率や透過率などを測る際には、ネットワークアナライザーの校正が必要である。

ネットワークアナライザの校正

伝送線路は、伝送線路自体の損失や、コネクタによる変換、また導波管などへの変換による、損失や反射がある。これらは本当に測定したい反射や透過係数に被さった形で、測定されてしまう。そこで、ネットワークアナライザには真の測定値を得るために、伝送線路を無反射終端と、透過、位相を変えた2つの短絡を用いて、校正を行う機能が備わっている。一般的に校正を行う際には

無反射終端 (load)

透過 (thru)

短絡1 (例えば 1/8 short)

短絡2 (例えば 3/8 short)

を使用し、伝送線路終端での無反射終端を、真の0点に、短絡をスミスチャート上での半径1の円に変換する事で、真の測定値を得られる。

5.3. タイムドメイン

周波数ドメインでの測定とタイムドメインでの測定には常にフーリエ変換の関係が成り立つため、一般にはタイムドメインでの測定は必要無い。そもそも加速器ではタイムドメインな使用をする際の特性を予測するために、簡単に正確な測定が可能な周波数ドメインの量をターゲットとして設計を行っていると言って良いだろう。その過程には物理量の変換があるわけで、例えば結合度 k の定在波、進行波での違いなど、変換で係数を間違える事もあるだろう。

そこで設計した物理量が本当に正しいかどうかを間違いなく確認するためには、低電力でタイムドメインの測定を行うのが良いだろう。

DBM を使ったタイムドメイン測定

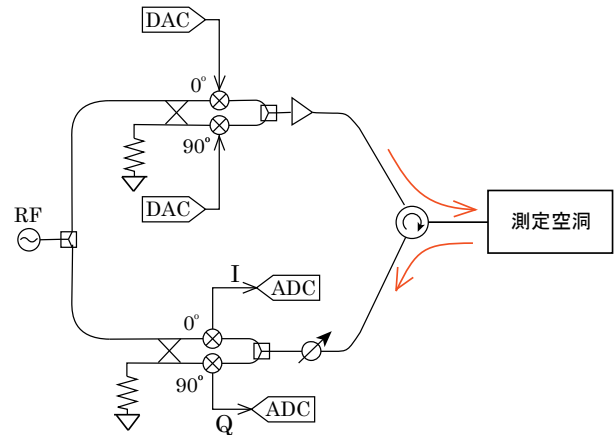


Fig. 26 タイムドメイン測定の例

5.4. Slater の摂動理論による電場の測定

空洞に小型の誘電体や導体球などの摂動体(V_δ)を入れた場合の共振周波数のずれは、以下の Slater の摂動式で表せる。

$$\begin{aligned} \frac{f^2}{f_0^2} &= 1 + \kappa \frac{\int_{V_\delta} (\mu H^2 - \epsilon E^2) dV_\delta}{\int_V (\mu H^2 + \epsilon E^2) dV} \\ &= 1 + \frac{\kappa}{2W} \int_{V_\delta} (\mu H^2 - \epsilon E^2) dV_\delta \end{aligned} \quad (5-4)$$

ここで κ は摂動体の形によって決まる定数であり、空洞内部のエネルギーを W とした。摂動が小さく、加速管のようにビームが走行する中心部に限定すれば磁場は小さいので無視でき、

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{f - f_0}{f_0} \approx \frac{f^2 - f_0^2}{2f_0^2} \\ &\approx \frac{-\kappa \epsilon E^2 V_\delta}{4W} \end{aligned} \quad (5-5)$$

となる。つまり摂導体を動かしながら、共振周波数の変化を測定すれば、電場の分布を知る事ができる。

5.5. 空洞の固有モードの測定

シミュレーションによる計算の確認などのために、空洞内部の固有モードの周波数だけが知りたい事が良くある。このためには同軸ケーブルを切

断して、内導体の先端を直線、L型、ループ型などのアンテナにし、空洞共振周波数に与えない程度の結合で、小さい穴から挿入し、ネットワークアナライザーで測定する事で、固有モードの周波数が測定できる。またアンテナの先端の向きによる結合を考慮する事によりおよそのモードも推定できる。

5.6. 雰囲気・温度補正

共振周波数の測定は一般に窒素雰囲気の室温で行われるが、実際の運転状態での共振周波数に補正を行う必要がある。補正項目としては

- 窒素の誘電率は 1.000547
- 物温から、実際の使用温度への熱膨張係数の積分
- 真空にする事による変形
- フランジを閉めた事による変形

があり、常伝導ではQ値内にほぼ正確に補正できるが、超伝導ではこれらを見込むのが難しく試験が必要である。

6. 大電力での試験

低電力での試験との違いは

- 耐圧が必要になるため、伝送路に導波管を使用する必要がある事。また伝送電力によって超高真空・加圧ガス・乾燥窒素などを適切に選ぶ必要がある事。
- 電子ビームを通す部分は少なくとも超高真空にする必要がある事。
- 高電圧によりマルチパクタ・絶縁破壊などの放電が起きる。またこの放電により破壊させずにエージングをさせて伝送電力を徐々に上げていく要領が、経験による勘所に頼る部分が多い事。
- 超高真空や加圧ガスを破らずに切り離せる構造にするためにはセラミックの真空窓等が必要である事
- 発熱による共振周波数や位相のずれ、超伝導の破れが生じる事

- 冷却による振動や腐食等がある事
- 放電などが原因で真空度の悪化などによる装置のインターロックが必要であり、休止時間をその都度設ける必要がある事
- 電圧の高い箇所から放射線が出る事があり、途中放射線の検査が必要である事。
- 大電力試験時は原因の箇所の特定が難しく、放射線や、放電音の分析が異常個所の特定をする手段である事。
- サーキュレーター等では磁場の B-H 特性により伝送特性が違う事
- 導波管の伝送電力を測定するには、ベータホールカプラー等の方向性結合器が必要になる。

なお、大電力試験に必要な導波管の規格や、高周波コンポーネントである 3dB ハイブリッド、サーキュレーターなどのコンポーネントは[1]に詳しく書いてあるので、それを参照して頂きたい。

参考文献

- [1] 福田茂樹、「高周波電力源の考え方とその設計」、OHO'06 高エネルギー加速器セミナー、(財)高エネルギー加速器科学研究奨励会 2006
- [2] J.C.Slater, Microwave Electronics
- [3] A.H.メレカ著、寺井清訳、「電子ビーム溶接：原理と実際」、産報