

マイクロ波化学を楽しもう！

第9章 マグネトロンの話

服部 昌*, 松村 竹子**

前回まで、マイクロ波の性質や利用についていろいろ紹介してきましたが、マイクロ波はどのようにして発生させるのでしょうか？…今回は電子レンジの心臓部であるマグネトロンについて、マイクロ波の発生原理やマグネトロン・電子レンジの裏話、トリビアを交えて紹介します。さて、マグネトロンにはどんな物語があるのでしょうか？

1. マグネトロンの構造

マグネトロンについては、「第7章 マイクロ波発振器について」でも原理が述べられていますが、今回はもう少し踏み込んで、皆さんがめったに目にする事のないマグネトロンの構造にも少し詳しく追ってみます。

1.1. マグネトロンの外観と構造

図1 (a) に電子レンジ用マグネトロンの外観、(b) に断面構造の模式図を示します。大きさはちょうど手のひらに乗るくらい（1辺10 cmに満たない程度）です。

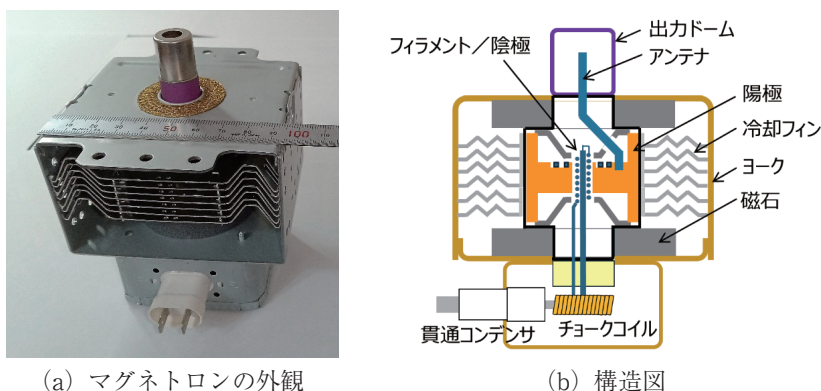


図1. マグネトロンの外観と構造模式図

どうでしょう？意外と簡単なものなのだなあと思われたのではないのでしょうか？

さあそれでは、これから図1の一つ一つの部分を見ていくことにしましょう。

1.2. マグネトロンの構成要素

1.2.1. ヨーク（筐体）・放熱フィン

マグネトロンの一番外側の部分です。家庭用電子レンジのマグネトロンの電力効率率は70%程度と決して悪くないのですが、500~600 Wの出力があるため発振器の温度が上がり、冷却が必要です。業務用電子レンジや工業用途の1.5 kWクラスまでは強力なファンによる強制空冷で対応ができますが、それを越える出力になると水冷が必要になります。温度に対し最も弱いのは磁石で、温度上昇により磁性が低下します。冷えると回復はしますがキュリー点（フェライト磁石では460℃）を超えると磁性が失われます。そのため放熱フィンは心臓部の発振器の性能を守る重要なパーツです。電子レンジの連続使用時間はマグネトロンの発熱により決まり、たいいていの電子レン

* (株) ジェイテクトサーモシステム 先行技術開発部, 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 招聘研究員

** (有) ミネルバライトラボ

ジには連続加熱の上限時間が設けられていて、高級機では温度センサーを使ってマグネトロン温度を測定して、一定温度を越えると出力を OFF にする機能が備わったものもあります。

また、マグネトロンには磁石が使われているため、ヨーク（筐体）は単なるカバーではなく、磁路としての役割も担っています。

1.2.2. フィルター部

図1では一番下側の部分です。ここはコイルとコンデンサで構成されます。マグネトロンの発振現象は高周波ですが、フィラメントも発振器（空洞共振器）も直流で動作します。そこに高周波が流れ込むと動作不安定を引き起こすため、マグネトロンに入ってくる高周波を落とし、マグネトロンから出ていく高周波も落とします。いわば、マグネトロンの門番・番兵の役割を果たします。

1.2.3. 発振部

ここがマグネトロンの心臓部です。フィラメント・陰極、磁石、陽極・空洞共振器、アンテナで構成されますが、これらはバラバラなものではなく、一体となって初めて機能するものです。

フィラメントと空洞共振器の部分は、真空構造となっています。

A. フィラメント・陰極

電磁波は荷電粒子の運動によって発生します。電磁波の発生については YouTube に視覚的に分かり易く説明した動画「電磁波は電荷の加速によって生まれる」¹⁾を見つけました。言葉では説明しにくい電磁波が発生する様子をシミュレーションで見せてくれます。マグネトロンでは、電磁波の素となる荷電粒子（電子）を連続的に供給しなければなりません。この役目を果たすのがフィラメント（ヒータ）で、1000℃以上に加熱して熱電子を発生させます。フィラメントにかかる電圧は3~4 V と低いのですが、10 A 以上の電流が流れます。このためフィラメントは熱劣化によ

る寿命があります。劣化が進むと振動により切れたり、重力の関係で水平にすると切れやすくなるため、「マグネトロンを横向きに使わないください」という表記がなされているものもあります。マグネトロンの中で一番弱いのはこの部分で、マグネトロンの寿命はフィラメントで決まると言っても良いくらいです。

電子レンジ用マグネトロンでは、ほとんどの場合フィラメントは陰極（カソードとも言います）と一体構造になっていますが、もっと高出力のレーダーなど軍事用途では、信頼性向上と熱電子放出の制御性向上を目的に、フィラメントはカソードを間接的に加熱するだけで、熱電子放出には別体のカソードを設けるケースがあります。

B. 磁石

フィラメントから放出された熱電子は次の項で述べるアノードにかかった高電圧（4000 V 程度）により加速されます。このままでは、二極真空管で電子は全てアノードに補足され発振現象は起こりません。そこで、アメリカのハルは、この二極真空管の軸方向に磁場をかけてマイクロ波発振をさせました。

ハルのマグネトロンは円筒形の陽極の中心に陰極となるフィラメントを置いただけのものでした。磁場が無い場合、電子は陽極に向かって直進しますが、磁場を強くしていくとローレンツ力により電子の軌道は円を描くようになります。磁場をドンドン強くしていくと円軌道の径は小さくなり、ある強度以上になると電子は陽極にたどり着けなくなり、空間を旋回しはじめます（サイクロイド運動といいます）。ここで陽極電流が一気に減少し、ついには陽極電流が流れなくなります。この陽極電流がゼロになる近辺で不安定な振動が生じ、この振動を陽極側に設けた空洞で共振させマイクロ波を取り出します。したがって、マグネトロンの陽極電圧と磁場はこのクリティカルな部分を利用するような関係になっています

つまり、強力な磁石を使えば、陽極電圧を低く

することができ、電源回路のトランスも、陽極の寸法も小さくできます。ただし、陽極電圧が低くなると電子の速度が落ちるため、電子の円軌道が大きくなり、より強い磁石が必要となり、,、, というように陽極電圧、磁場、陽極径の関係は絶妙なバランスの上に成り立っていることがわかっていきます。

C. 陽極・空洞共振器（キャビティ）

ここがマグネトロンの核心部です。

ハルのマグネトロンの陽極は単なる円筒でしたが、1928年、大阪大学の岡部金次郎が円筒形の陽極を分割してより強力なマイクロ波の発生ができるようにしました。これが現在の分割型マグネトロンにつながっています。発明当時は大阪管と呼ばれたそうです。

マグネトロン発振の理論研究にはノーベル物理学賞受賞の朝永振一郎も一役かっています。

戦時下、海軍技術研究所ではレーダーへの使用目的で強力なマイクロ波を発振できるマグネトロン（当時は「磁電管」と呼ばれていました）の開発が進められていました。しかし、それが非常に困難だったため、理化学研究所の仁科芳雄に相談が持ち込まれました。仁科は、東京文理科大学の朝永の弟子にあたり、電磁気学の講義をしていた宮島龍興を協力者に選びます。宮島から相談を受けた朝永は、マグネトロン内の電子集団の運動を前期量子論の「周期系に対する摂動論」を応用して、この困難を原理的に解決します。この朝永理論の本質的な部分をもっと一般的な微分方程式に置換え簡便に扱う手法を小谷正雄が見出し、マグネトロン研究が画期的に進歩しました。この功績に対し戦後1948年に日本学士院賞が与えられています。理論物理学からは原子核分野のS行列理論もマグネトロンの研究における立体回路の問題に 응용されて理学と工学の懸け橋となっています。

このような研究により波長10 cm、出力500 kWのマグネトロンができましたが、戦局が

悪化して資材の入手もできなくなって研究は停止となりました。この経緯については、「小谷-朝永のマグネトロン研究」²⁾、および、「第二海軍技術廠潮実験所遺跡の科学史的背景」³⁾という文献があります。

その具体的な計算について興味を持たれた方は「極超短波磁電管の研究」⁴⁾という書籍があります（絶版になっていますがAmazonで古本が出ています）。

余談が長くなってしまいました。分割型マグネトロンによるマイクロ波発生のお話を戻しましょう。

図2に電子レンジでよく使われるストレートベイン型の陽極・空洞共振器部分を上から見た断面を示します。

図では円筒を等分するように仕切りが設けられた共振空間が設けられています。この外周に向かって放射状に伸びている仕切りをベイン（陽極片）といい、偶数個のベインが一つ置きに同期リングという導体でつながっています。

磁場は、この断面に対して垂直の方向にかかっています。陰極から放射された熱電子は、磁場で軌道が曲げられ、陰極の周りにベインと内接する空間でサイクロイド軌道を描いて旋回します。電子がベインの近傍を通過すると、ベインに電荷が誘導され、ベインを電極、ベイン間の空間を誘電体とするコンデンサとなり、ここに電場ができます。そして陽極の外周円筒部が電流ループを形成して磁場を生み出すことでインダクタンスの役割

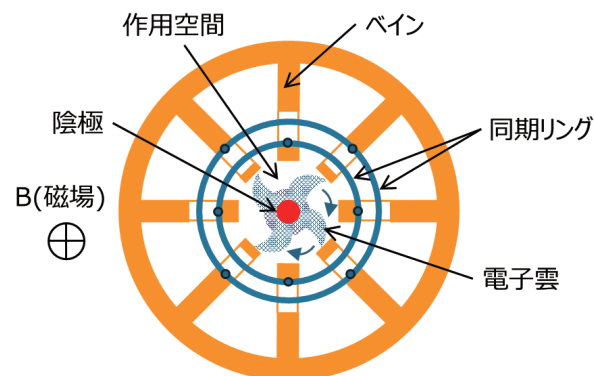


図2. 陽極・空洞共振器の断面

をし、LC共振回路を形成します。共振は、作用空間内のわずかな高周波振動がきっかけとなります。隣接するベインは2つの同期リングにより180度の位相差(π モードといいます)になり、高周波電位の高いベインには電子が引き付けられ、低いベインからは電子が遠ざけられ、作用空間に回転する電子雲が成長して電磁波を発生させます。

D. アンテナ

それぞれのキャビティで生成される磁力線は互いにリンクしているので、ベインの一つにアンテナを付ければ電磁波を取り出すことができます。

1.3. マグネトロンの駆動回路

マグネトロンには電気を供給しなければ動作しません。普及型の電子レンジでは、商用電源を変圧器で昇圧した後、倍電圧整流をして4000V程度の直流高電圧をマグネトロンに供給します。このトランスやコンデンサが大きく、電子レンジの容積や重量のかなりの部分を占めるようになります…どんな回路かは、電子レンジの側面にはたいてい回路図が貼ってありますので、それをご覧ください。

マグネトロンの出力は、磁場が固定の時、陽極電圧を変えれば可変にできるのですが、この方式ではそれができません。低価格で出力可変ができる機種は、例えば定格500Wの機種で200W出力を行うためには、10秒間のうち4秒ONで6秒間は発振しないというようにONとOFFの時間比率を変えることで行っています。ですから、ごく短い運転時間では500Wかかっているか、まったくかかっていないかのどちらかという結果となります。このような電子レンジでは、ON-OFF時に電源電圧が変動し、照明がちらちらするようなことがあります。

トランスにはリーケージトランスを使い、鉄共振動作により出力の安定化を図っているため、商用の電源周波数によってトランスを変える必要があります。日本では東と西で周波数が異なるため

普及型の電子レンジには50Hz用/60Hz用の区別があります。一般に、50Hz用のものを60Hzで使用すると出力が定格を超えてしまいレンジが壊れてしまうことがあります。逆の場合は内部の変圧器で過電流が発生し、焼損や温度ヒューズの溶断が起こることがあります。これを利用して、回路を50Hz用で設計し、60Hzで使用されていることを検知した場合には、自動的にマグネトロンを断続運転させて「時間平均」で出力の帳尻合わせを行って周波数フリーを実現している製品もあります。

最近では家庭用でも電源周波数に関係なく使え、瞬時電力をコントロールできるインバータ方式の電子レンジが出回っています。実験などで電子レンジを用いる場合は、価格は上がりますがインバータ方式を購入することを勧めます。

なお、マグネトロンは直流でも交流でも動作します。電子レンジが直流電圧をかけているのは、比較的安定した出力を低コストで実現するためです。違う用途、例えばレーダーではパルス状に高電圧をかけレーダー波を間欠発振させます。

1.4. まとめ

マグネトロンは、ハイテク製品ではなく、枯れてこなれた古典技術です。電子レンジも古典的な技術を組み合わせで作られています。だから、安価なものは数千円くらいで手に入るんですね。ちなみに、1962年日本初の量産電子レンジの価格は、大卒初任給が1万7千円の時代に54万円だったそうですから、当時は時代の最先端に行くハイテク技術だったと想像できるでしょう。

電子レンジの側面には回路図が貼ってあります。デジタル化された現在のハイテク製品の修理はユニットごと交換するしかないため回路図など付属しないのですが、サービスマンが現場で素早く診断・修理できるよう、特に電源系統やマグネトロン周りの高電圧部分の安全チェックに役立つようにという配慮で今も続いているのだそうです。知識があれば「触ることができる」ということで

すね。これは、知識のある人であれば電子レンジの改造に手を付けやすいということであり、大学や民間の研究機関で電子レンジが実験用に用いられることが多い一因です。しかし、電子レンジ内部には高電圧部分があり、また、後述する電磁波漏れ対策が有効でなくなるようなこともあるため、経験のない人が電子レンジを改造することは絶対止めていただきたいと思います。

2. マイクロ波の安全性について

以上、マグネトロンについて述べてきましたが、マイクロ波を浴びても大丈夫なものなのでしょうか？

マグネトロンの話を終わらせるにあたって、マグネトロン (=マイクロ波) の安全に関する話をしておきたいと思います。

2.1. マイクロ波の危険性

X線やガンマ線、紫外線などは多量に浴びると例えば日焼けのように目に見える形で体に悪影響が出ます。これらは波長の短い (=エネルギーの高い) 電磁波です。このような放射線に比べると電子レンジのマイクロ波は人体に当たっても放射線のような害ははるかに少ないものです。しかし、マグネトロンの出力がそのまま外部に放射された場合はどうでしょう。

マイクロ波は温熱治療器やハイパーサーミアというがん治療にも用いられます。温熱治療は電子レンジと同じ2.45 GHz、数100 Wのマイクロ波を照射して、表皮より奥の筋肉を加温し、痛みの治療や血行促進を行います。ハイパーサーミアはがん細胞が熱に弱いことを利用し、がん細胞を42~45℃に加熱して正常組織にはダメージを与えずがん細胞を死滅させます。従って、この程度のマイクロ波は長時間浴び過ぎなければ健康被害は無いでしょう。

電子レンジにまつわる都市伝説として「電子レンジで猫チン訴訟」というものをご存じの方もおられるのではないのでしょうか？この話はPL法を

めぐるブラックジョークなのだそうですが、猫を電子レンジに入れて殺害するという事件があったのは事実だそうです。

テレビドラマの「ガリレオ」でも、新興宗教の教祖が信者に向かい手をかざして念を送ると体に温かさを感じ (温熱治療ですね)、怒りで強い念を送ると念を受けた人は熱さに耐えられなくなり外へ飛び出して自殺してしまう (マイクロ波強過ぎ) という場面がありました。それを福山雅治演じる湯川先生がマイクロ波を使ったトリックだと見破ります。教祖が立つ舞台の下にはマイクロ波発振器が並び、一山離れた別荘には巨大な電源装置がありました。人をレンチンしてたんですね。

このように、大電力 (電力密度の高い) のマイクロ波はやはり危険なものとなります。

2.2. 安全なマイクロ波強度とは？

どの程度のマイクロ波を浴びれば健康被害があるのか？ということについて定量的にはわかっていません。現代社会では携帯電話のような高電界強度のマイクロ波の受信・発振装置を頭部に接触させて生活するのが当たり前になっています。このような環境になってから何年経ったのでしょうか？今のところ、こういう時間レンジで、ガンなどの晩発性影響がみられるというような例はあまり聞かないと思います。

電子レンジからのマイクロ波漏洩については、電気安全保安法では、「動作中の電子レンジ表面5 cmのあらゆる個所において、扉を閉めた状態で1 mW/cm²以下、扉を開ける際、動作停止直前で5 mW/cm²以下」、電波法施行規則には「耐久試験後において5 mW/cm²以下」という基準があります。

5 mW/cm²という数値は、普及型家庭用電子レンジの600 Wのマイクロ波電力が空間に一様に放射されたと考えて、1 m離れた位置では4.8 mW/cm²となり、ほぼ同じレベルの電力密度となります。

しかしながら、マイクロ波を用いた実験では、

実験装置の筐体直近でマイクロ波を浴びることになるでしょう。電力密度は、距離の2乗に反比例して強くなり、発生源に近づくと思わぬ電力密度を持つマイクロ波を浴びることも考えられます。最も多いのは、目の周辺にマイクロ波を浴び、血流の無い角膜が白濁を起し（白内障と同様の症状）てしまうことで、これは元に戻りません。TVドラマ「ガリレオ」で湯川先生がトリックを見破るきっかけとなったのは、死者の目がいずれも白濁しているという現象でした。電子レンジを改造した実験装置でまず一番怖いのはこれです。前項の温熱治療は血流のある部位の話で、危険性は、どの部位で浴びるか？という問題も含んでいいることを忘れないでください。実験においては、とにかく顔を近づけない、必ず電磁波の漏洩チェッカーを手元に用意するというのを忘れないでください。

携帯電話や無線LANは、電子レンジのマイクロ波と同じ周波数帯ですが、それらの放射電力は、実は電子レンジの漏洩電力よりも大きいのです。そこで、この項の最初の話に戻ると、生まれた時から電磁波が飛び交う環境で育っていくと、どうい影響が出るかということは、実はまだこれから検証されていくことなのです。

2.3. マイクロ波を外部に漏らさない工夫

動物園のライオンやトラがオリの中に入れられているように、マイクロ波を利用する装置にはマグネトロンが放射するマイクロ波を外に漏れださないように装置の中に閉じ込めておく工夫が必要

です。

電磁波は導体表面で反射をします。金属製の密閉空間にすればマイクロ波は漏れません。しかし、この空間にマイクロ波を供給し続けると内部にマイクロ波を“消費”してくれるのが無ければ空間内の電力密度はどんどん上昇し、マイクロ波を照射しているところへ逆流し、マグネトロンを破壊してしまうこともあります。電子レンジに加熱物を入れずに運転すると危険なのはこの理由です。

電子レンジの前面の窓には小さな穴が規則正しく並んだ金属板が組み込まれています。電磁波は波長以下の穴を通り抜けることができません。可視光の波長は、 $0.4\sim 0.8\mu\text{m}$ 程度です。それに比べ電子レンジのマイクロ波は 122mm と、15万倍以上も長い波長をもちます。だから、 mm 単位の穴であれば可視光は通り抜けて中の様子が見えますが、マイクロ波は通り抜けることができません。

扉は本体と電気的に完全に密着していれば電波漏洩はありません。しかし開閉を考えるとそれは不可能なので「 $\lambda/4$ チョーク」という工夫がされています。 λ は波長です。名前は $1/4$ 波長なのですが、実は、全長が $1/2$ 波長になるように溝を作り進行波と反射波を互いに打ち消し合わせるものです。その外側に接触片という弾性を持った導電体を挟みます。電子レンジのマイクロ波の波長は約 122mm なので $\lambda/4$ は 30.5mm となります。実装の様子を図3に示します。注意しないといけないのは溝のコーナー部が直角ではこの部分は $\lambda/4$ から外れるため、必ずRを取ることです。扉にはこういう工夫をした上で、もし扉が開いてい

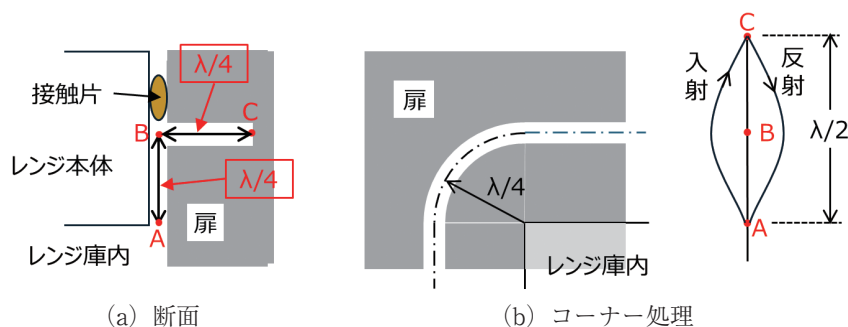


図3. $\lambda/4$ チョークとコーナー処理

る場合にはマグネトロンがONにならないようインターロックを必ず2重に取っています。

実際の使用状況では、レンジ内で複雑に散乱されたマイクロ波はチョークに対しいろいろな角度で進入し、加熱負荷の小さな空焚き状態で運転されるとレンジ内の電力密度がドンドン上昇します。これらの状況は、 $\lambda/4$ チョーク設計の理想状態と異なり、電磁波漏洩を完全にシャットアウトするわけにはいきません。あくまでも、前項の基準値以下に抑え込んでいますが、扉の取り付け部がひずんだり、破損したりすると、たちまち漏洩電磁波強度が上がります。改造する時にはこういうことにも気を使う必要があります。また、温度計測用などの開口部を設けることがあれば、そこには必ず漏洩防止処置を講ずる必要があります。

3. おわりに

マグネトロンはレーダー開発と切り離して考えることはできません。

海軍技術研究所が、当時の最先端の物理学者に協力を仰いでマグネトロンの開発を急いだのは、日本軍の攻撃がことごとくレーダーで事前に察知され、待ち伏せを受けるようになっていたという事情でした。

そのレーダーを巡っては、こんな話があります。戦争末期、日本では使える航空機が無くなり、「赤とんぼ」といわれる金属パイプの骨格に木製機体、翼は布張りの複葉練習機まで駆り出されました。ところが、この赤とんぼはレーダーに捕捉されることなくアメリカの艦隊に接近し、レーダーに映るようになって、よたよたと近づいてくる様子に「これはなんだ？」と迷っているうちに迎撃準備が間に合わない目前まで迫って来てたそうです。時代遅れの木製・布張りの飛行機はレーダーには想定外で役に立たなかったわけです。

スマホもアルミホイルで包めば電波圏外になりWi-Fiもつながりません。電子レンジも金箔の皿には火花が飛び、氷を解かすことはできません（一部が解けて水になったところを利用して解け

るようになるだけです）。

このように、マイクロ波はなんでもOKのゼネラリストではありません。ちょっと気難しいスペシャリストです。

それだけに上手く使えば素晴らしい効果が得られます。しかも、実験に使えるツール（電子レンジ）が手軽に入手できるという環境にあります。ぜひ、マイクロ波の特性を上手く生かした、いろいろなアイデアを試してみても新たな発見につながってみてください。

参考資料

- 1) 電磁波は電荷の加速によって生まれる
<https://youtu.be/fOxbk0Npd4Y>
- 2) 江沢洋「小谷－朝永のマグネトロン研究」
日本物理学会誌 vol.49, No.12 (1994)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/butsuri/1946/49/12/49_12_1009/_article/-char/ja/
- 3) 河村豊「第二海軍技術廠潮実験所遺跡の科学的背景」
https://www.city.shimada.shizuoka.jp/fs/8/9/1/9/6/_/fuhen.pdf
- 4) 朝永振一郎、小谷正雄「極超短波磁電管の研究」みすず書房（1952）
マグネトロンの構造については、5)、6) にマグネトロンを分解した画像が掲載されています。
- 5) 真空管マグネトロン物語
<https://kawoyama.la.coocan.jp/tubestory/magnetron.html>
- 6) 電子レンジの心臓部であるマグネトロンの分解
<https://abcdefg.jpn.org/elebunkai/magnetron/cc.html>
また、言葉では説明の難しいマグネトロンの発振原理は、7) に動画による分かり易い説明があります。
- 7) マグネトロンの仕組みとは
<https://www.youtube.com/watch?v=ZAFv5tMX2dk>