

第50回 CIS研究所パートナー会 議事録

日時 2015年6月29日(月) 13時～ 17時

場所 CIS会議室

- 1) サロン 講師 山本洋一
「真空管・応用技術 イオンエンジン」



会議風景

プロローグ:

クッションの紹介:

この半年ばかり、1時間以上座ると腰痛が出てくる。リハビリは効果的ではあるが、やった直後で腰痛はないが、一日後腰痛がぶり返すという状況が続いていた。日本製のエアークッション(商品名:ヨークシヨン Amazonで2,229円)を使用したところ、最近になって腰痛がなくなっている。

これを、今後会議の折に使用し、出席者全員で効果のほどを確かめることとした。

⇒会議後 空気は、あまり入れず中央を抑えると外側の土手部に空気が外側に移動し、挟み込むような使い方が効果的のように思われる。 背もたれにほしいとの意見あり。 効果有と評価！



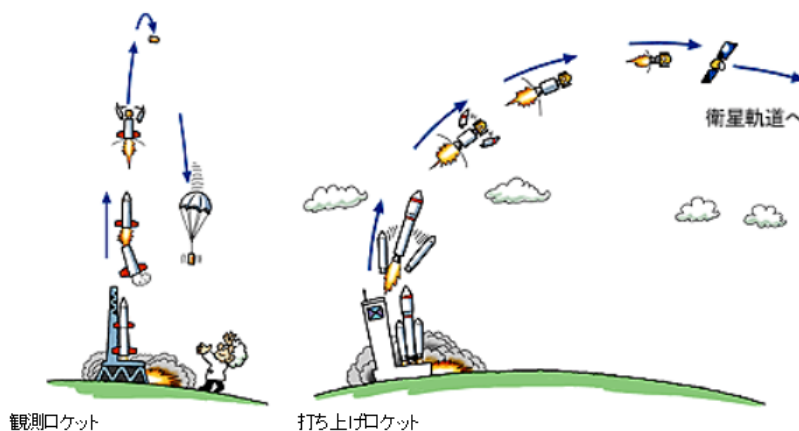
1-1) 「真空管・応用技術 イオンエンジン」概要

はやぶさが帰還したことがきっかけで、イオンエンジンに興味を覚え調べてみる気になった。
 多くの資料は、JAXAの発表資料を引用するのでJAXAのルールに従って資料を使わせて頂く。
 ・参照資料にはクレジット「宇宙航空研究開発機構(JAXA)提供」を附す。



地球の引力を脱出する第二宇宙速度(脱出速度)約 11.2 km/s になる前、化学ロケット3段を使って衛星軌道に達しても高度は500kmであり、宇宙空間から見るとほんの薄皮レベルでしかない。

このように、化学エンジンで到達できるのは衛星軌道までで、地球脱出はイオンエンジン+地球スイングバイにより加速して行われている。宇宙を2000日も飛行するには、長時間動作するイオンエンジンが必要である。イオンエンジンの文献を調べてみると、空間



「宇宙航空研究開発機構(JAXA)提供」

でんか電荷制限領域でのイオン流の形成、イオンエンジンの信頼性を決定づける加速電極の寿命に関する理論展開は、いまから60年前に真空管技術で構築された知識が形を変えて使われており興味深い。ここでは、イオンエンジンの話題に入る前に真空管技術者の技術開発成果とさらにそれ以前から行われていた先人の研究成果を大急ぎでまとめておくことにする。

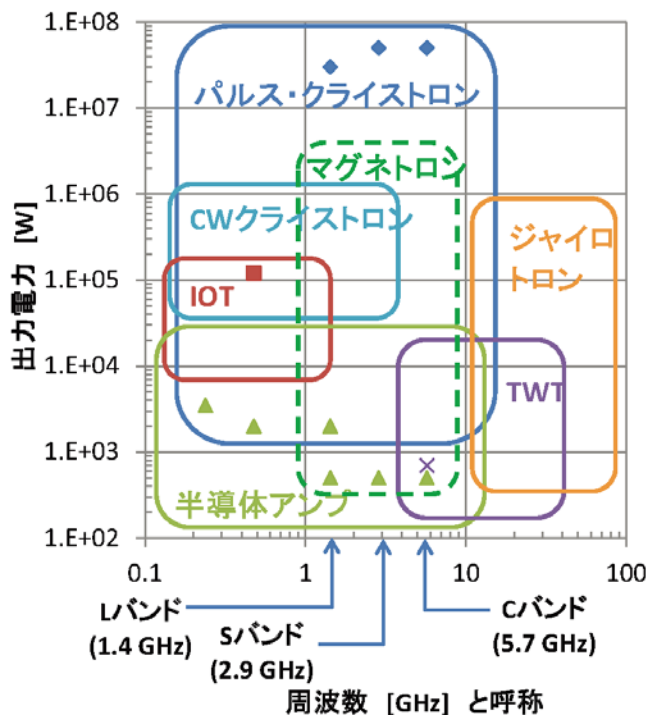
1-2) 真空管・応用技術

Key word は **熱電子放出**(金属表面から取り出せる電子の量)と使用環境下で無限に放出される場合空間電荷の果で一義的に決められる取り出しうる電子の量即ち、**空間電荷制限電流**の二つの項目である。真空管という表現より一般的な表現として電子管と呼ばれている。以後の記載は歴史を述べる表現を除き「電子管」と呼ぶことにする。

使われている

ここで、話を前に進める前に電子管(=真空管)の歴史を見ておく。

高周波源真空管:



出典: http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2013/08_inagaki_takahiro_20130710.pdf

イオンエンジンの仕組みは、電子管技術と類似技術が多様されており興味深い。即ち、熱電子放出量を理論づけした、リチャードソンと同じ原理を全く独立に同一結果に至ったダッシュマンの研究成果や、空間電化制限電流を理論解析した、ラングミュアー、共同研究者のプロジェクトの業績がある。

1-2-1) 熱電子放出

リチャードソン・ダッシュマンの式で与えられる

$$J = AT^2 e^{\frac{-W}{kT}}$$

ここで

T は 金属の温度)

W は 仕事関数 ($=e\phi_w$)

k はボルツマン定数であり

A はリチャードソン定数である

$$A = \frac{4\pi mk^2 e}{h^3} = 1.20173 \times 10^6 \left| \frac{A}{m^2 K^2} \right|$$

m と e は電子の質量と素電荷

h は プランク定数である。

この式の意味するところは、得られる電流は陰極(カソード)に使用される金属の表面温度と仕事関数により決まる。

1-2-2) 空間電化制限電流

チャイルド・ラングミュアーの式で与えられる

$$J = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{V_0^{3/2}}{d^2} .$$

ここで

ϵ_0 は 真空の誘電率

m は 電子の質量

e は 電子の電荷

V_0 は印加電圧

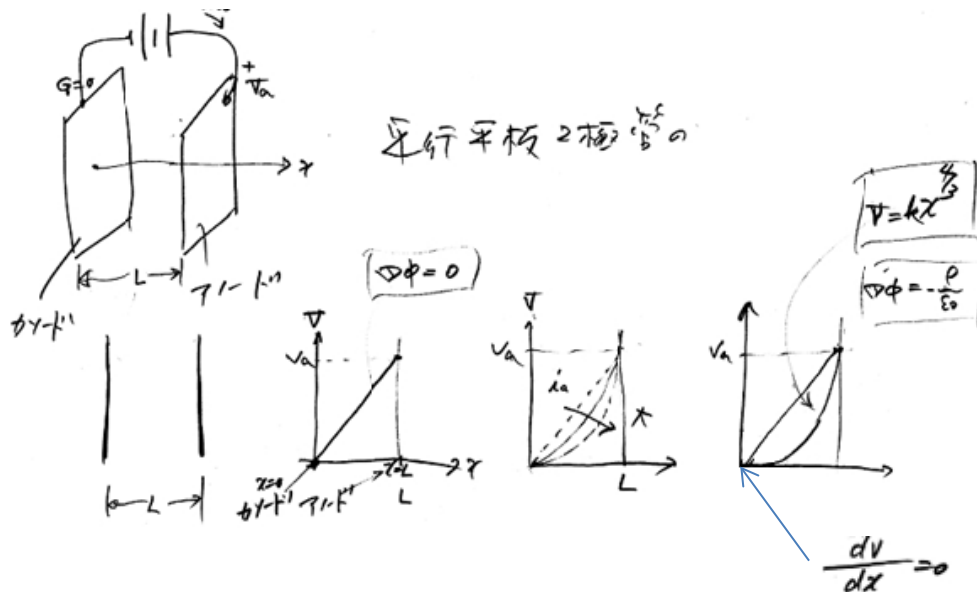
d は電極間距離

$$J = 2.33 \times 10^{-6} \frac{V_0^{3/2}}{d^2} [\text{A/m}^2]$$

である。

この式の意味するところは、系で使える電流の量は、幾何学的な構造と陽極(アノード)に加える電圧で決まる。 実用では熱電子放出量が圧倒的に大きいところが動作点として選ばれている。

図のような、平行平板電極配列でチャイルド・ラングミュアーの理論展開概略を示す。



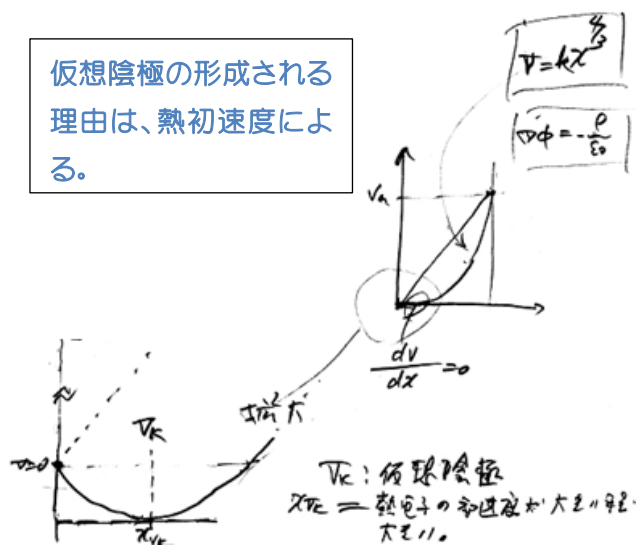
理論展開のポイントは、カソードとアノード間に電圧を加えた瞬間、電界は V_a/d [v/m] の電界が加わり電子はアノードに向かって移動を始める。電子がアノードに向かって走る中間部分は、電子の負電荷により電圧が下がり、この電圧降下に従ってカソード面での電界も小さくなり、最終的にはカソード上の電界がゼロになる瞬間までこの状況は続く。電子は電界に引っ張られて移動するのでカソード上の電界 $dV/dx (=0)$ がゼロになると電子の移動する力が働かず、それ以上電流が増えることはない。この状態を空間電荷制限状態といい、空間電化制限電流が流れる。

これがチャイルド・ラングミュアーが見出した結論(法則)である。

また、カソードーアノード両電極間を電子は移動を続けているが、移動中の電荷の分布は定常状態を保つ。この様な状態を準安定状態(Quasistatic)と呼ぶ(Metastable 遷移状態とは異なる)。

カソード面が熱で温められているので、電界がない場合でも熱電子は初速度をもってカソードを飛び出す。これは、空間電化制限領域であっても起こる現象で、熱エネルギーを持って飛び出した電子は運動エネルギーがゼロになる場所までは飛んでゆくの陰極面の近傍の電圧はマイナスになる、このように熱エネルギーをもってしても越えられないマイナス電圧ではこの状況が続き陰極面のごく近傍に $dV/dx=0$ となる場所があり、この場所はあたかも陰極のように見えるので仮想陰極と呼ばれる。委細参考文献↓

仮想陰極の形成される理由は、熱初速度による。



Spangenburg K.R., Fundamentals of Electron Devices, McGraw-Hill, 1957

1-2-3) 無限平板二極管から実使用の穴あき電極の二極管の取り扱い

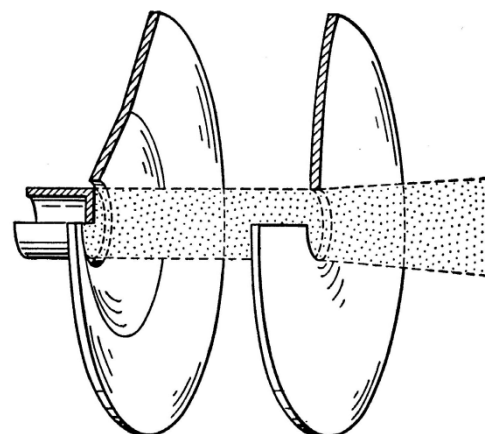
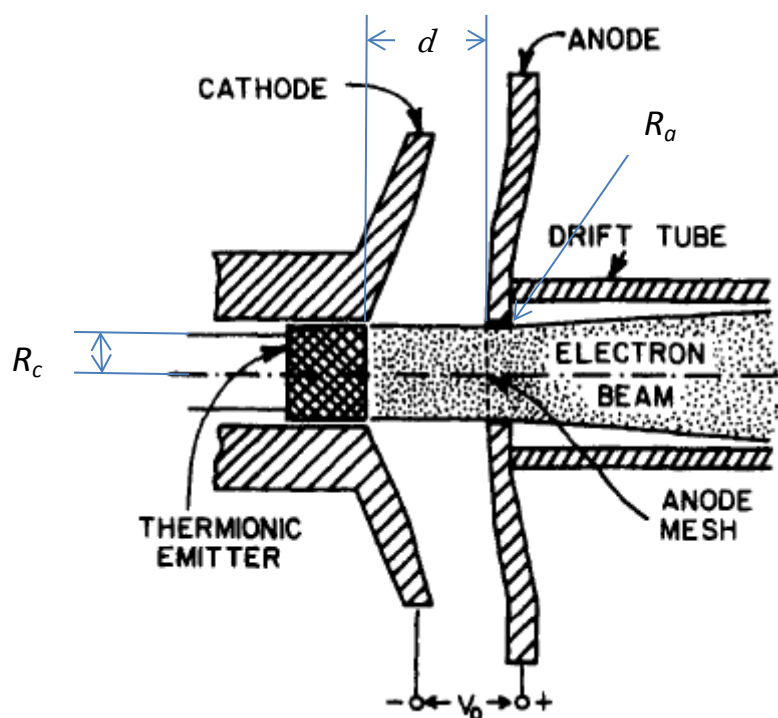


FIG. 10.9—An axially symmetrical electron gun.
J.R.Pierce, "Theory and Design of Electron Beams,
Van Nostrand, 1954

(平行平板でなく) 電極の穴あき効果を入れた空間電荷制限電流は、Langmuir and Blodgett (LB) により求められた。

$$J_{LB} = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{V_g^{3/2}}{R_a R_c \beta^2},$$

ここで

β は R_a/R_c の関数として数値で求められている, は下記参考文献を参照してください。

TABLE I

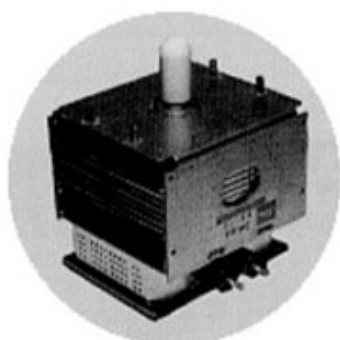
\bar{r}_c/\bar{r}	$(-\alpha)^2$	\bar{r}_c/\bar{r}	$(-\alpha)^2$	\bar{r}_c/\bar{r}	$(-\alpha)^2$
1.0	0.0000	1.6	0.2968	2.6	1.712
1.05	.0024	1.7	.394	2.7	1.901
1.1	.0096	1.8	.502	2.8	2.098
1.15	.0213	1.9	.621	2.9	2.302
1.2	.0372	2.0	.750	3.0	2.512
1.25	.0571	2.1	.888	3.2	2.954
1.3	.0809	2.2	1.036	3.4	3.421
1.35	.1084	2.3	1.193	3.6	3.913
1.4	.1396	2.4	1.358	3.8	4.429
1.45	.1740	2.5	1.531	4.0	4.968
1.5	0.2118				

Irving Langmuir and Katherine Blodgett, "Currents Limited by Space Charge between Coaxial Cylinders," Phys. Rev. 22, pp 450-486(1931)

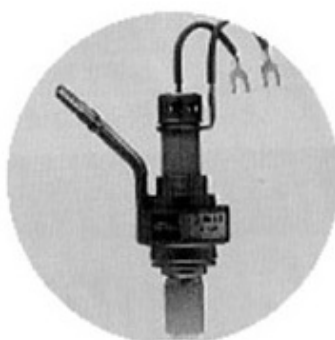
1-3) 現在も多くの電子管が使われる理由

固体素子の発達に伴い、電子管の用途は大幅に減少した。現在使われている電子管は大電力高周波用管、光電子増倍管、X線管のような特殊用途に限られている。一方、その古くて新しい技術は、マスアナライザー、荷電粒子発生、イオンインプラネーション、荷電粒子加速器、電子顕微鏡、そしてイオンエンジンへと形を変えながら発展している。

実用化されているマイクロ波管の例:



- 2M164(CWマグネトロン)
- ・発振出力: 1.5kW
 - ・発振周波数: 2450 ± 30MHz
 - ・冷却方式: 強制空冷



- 2M68(CWマグネトロン)
- ・発振出力: 5kW
 - ・発振周波数: 2450 ± 30MHz
 - ・冷却方式: 水冷式。3 昇/分

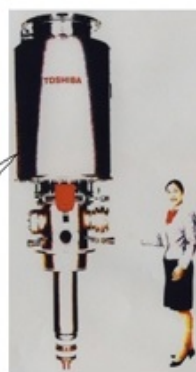


- 5M80(パルスマグネトロン)
- ・パルス率: 0.001
 - ・発振出力: 300kW(ピーク)
 - ・発振出力: 300W(平均)
 - ・発振周波数: 5250 ~ 5400MHz
 - ・冷却方式: 強制空冷

マグネトロンの外観と概略仕様



- クライストロン
- ・周波数: 508MHz
 - ・出力: 1200kW
 - ・長さ: 4.35m
 - ・重量: 1250kg



- ジャイロトロン
- ・周波数: 110GHz
 - ・出力: 500kW
 - ・長さ: 2.85m
 - ・重量: 1400kg



- 進行波管 (TWT)
- ・E3838:
周波数 ~ 8.7 ~ 9.2GHz
出力 ~ 25kW
 - ・E3842:
周波数 ~ 27.7 ~ 29.0GHz
出力 ~ 350kW

(a) CWクライストロン

(b) ジャイロトロン

(c) 進行波管 (TWT)

各種マイクロ波管の外観と概略仕様

<http://www.microwave.ne.jp/08/002.html>

実用化に当たって、電子源である熱陰極、電子ビームを形成する電極構造、電子ビームと高周波のインタラクションを論ずる基礎となる誘導電流、共振器、遅波回路の多くの研究がなされた。

1-3-1) 誘導電流とラモーの定理

電子ビームと高周波電界のインタラクションから高周波発振振、増幅メカニズム概要を述べる。

図のような、平行平板電極の中を荷電粒子(図では負の電荷をもつ粒子)が飛んでいる状態を考える。

平行平板間に1個の負電荷 $-e$ をおくと、両側の電極に静電誘導によって正電荷が現われる。 その大きさは、それぞれ、

$$e(d-x)/d \quad , \quad e(x/d)$$

である負電荷に近い極板が他よりも大きい正電荷を持つ、いまこの負電荷を左から右に動かせば、それにつれて右側の極板の正電荷が増し、左側の極板の正電荷が減って左側から右側へ正電荷が移る。

すなわち外部回路に電流が流れる。これを誘導電流という。

その大きさは、負電荷が x から $x+dx$ に移ったとき、極板の正電荷は $(e/d)dx$ だけ変化するから、単位時間に左側極板から右側へ移る正電荷すなわち

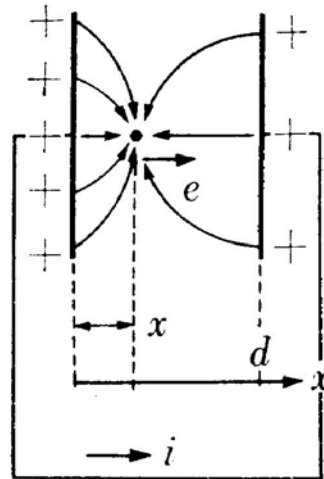
$$(e/d) \cdot (dx/dt)$$

で与えられる。

負電荷が右側の極板に到着する直前には、左側の極板の誘導電荷は0で、右側には e だけの正電荷がある。 極板に到着した瞬間にこの負電荷と正電荷は中和し、誘導電流も消える。

ここで、もし右側の極板に小さな孔があり、負電荷が極板に付着しないでその孔を通り抜けたときはどうなるか。

オリジナル論文 Ramo と Shockley は独立してほぼ同時に発表した。



S. Ramo, Proc. IRE, 27 (1939) p.584
Currents Induced by Electron Motion*
 SIMON RAMO¹, ASSOCIATE MEMBER, I.R.E.

METHOD OF COMPUTATION
 The method is based on the following equation whose derivation is given later:

$$i = \frac{e v}{d} \quad (1)$$

where i is the instantaneous current received by the given electrode due to a single electron's motion, v is the instantaneous velocity, and d is the component in the direction ν of that electric field which would exist at the electron's instantaneous position under the following circumstances: electron removed, given electrode raised to unit potential, all other conductors grounded. The equation involves the usual assumption that induced currents due to magnetic effects are negligible and that the electrostatic field propagates instantaneously.

EXAMPLE
 A single example is offered in the computation of the instantaneous current due to an electron's motion between two infinite plates (Fig. 1). (The result is a starting point for the analysis of a diode, for example, when the transit time is long.)
 From (1) we obtain immediately

$$i = e v \frac{x}{d}$$

In the literature² it is stated that this same result is deduced from image theory. This involves the setting up of an infinite series of image charges on each side of the plates for a given position of the electron and a consideration of the total flux crossing one of the plates due to the series of charges, a method which is lengthy and requires no kinship familiarity with methods of handling infinite series.

THE GENERAL CASE
 Consider a number of electrodes, A, B, C, D, \dots in the presence of a moving electron (Fig. 2) whose path and instantaneous velocity are known. A good way to find the current induced in, say, electrode A is to find the flux of the electric field of the electron through a surface S which is parallel to the surface of electrode A and which encloses it.

W. Shockley, J. Appl. Phys. 9, 635 (1938)
Currents to Conductors Induced by a Moving Point Charge
 W. SHOCKLEY
 Bell Telephone Laboratories, Inc., New York, N. Y.
 (Received May 14, 1938)

General expressions are derived for the currents which flow in the external circuit connecting a system of conductors when a point charge is moving among the conductors. The results are applied to obtain explicit expressions for several cases of practical interest.

IN the earlier days of vacuum tube technique when the radiofrequencies in use were relatively low compared to those attained at present, it was acceptable to regard the transit of an electron across a vacuum tube as an instantaneous burst of current. At present, however, the time of transit of the electron is of comparable duration with the periods of alternating circuits and it is consequently of interest to know the instantaneous value of the current induced by the moving charge over its entire time of transit.

Before discussing what effect the moving charge has, we must introduce certain conventions as to what part of the total field is to be attributed to the charge and what part to other causes. It proves most convenient to consider that all of the conductors are grounded and to examine the currents to them through the external circuit due to the motion of the charge. If the voltages on the conductors are varying, however, charges will be induced and currents will flow as dictated by the coefficients of capacity. In keeping with the superposition principle, the net current is found by adding the currents induced by the moving charge (or each moving charge if there are several) and the currents due to changing voltages.

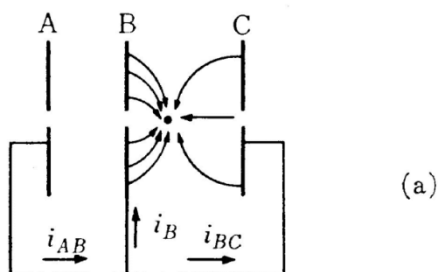
We are thus led to consider the charges and currents induced on a system of grounded stationary conductors by the motion of a point charge. If we have a system of grounded conductors, perhaps as illustrated in Fig. 1, numbered 1, 2, \dots , n , say, then the charge q_1 induced on conductor 1 due to a unit point charge in the space is calculated as follows: Let conductor 1 be at unit potential and the others be grounded and let the space between the conductors be free of charge. The electrostatic potential produced by this situation has the value $V_1(r)$ at the arbitrary point r of space. Then, in terms of this potential distribution, the charge, q_1 , induced on 1 by a unit charge at r is

$$q_1 = -V_1(r). \quad (1)$$

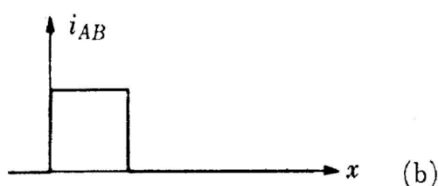
Shockley (Bell Labs) and Ramo (General Electric) found independently (!) a more efficient method to compute induced charges and currents in vacuum tubes, it turned out valid for gas/solid state detectors

易しい解説を試みる。

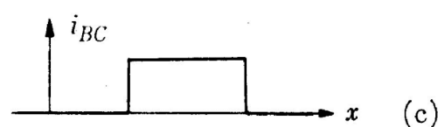
図のように、電極上にある無限に小さい穴を通して電荷が走り抜ける場合を想定する。



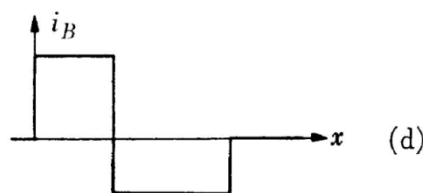
(a)のような電極配置で、負電荷が等速運動しているとする。極板 B を通り抜けたとき、その孔が十分小さければ、極板 A から負電荷に達する電気力線はないから、以後の電荷は 0 のままである。



電流 i_{AB} は、負電荷が B を通り抜けた以後は 0 である。すなわち、電流 i_{AB} は負電荷が B に付着するか、通り抜けてしまふかには本質的には関係しないことになる。



負電荷が B-C 空間にはいると、極板 B の、A 側にあつた誘起正電荷はそのまま C 側に移動し、負電荷が B→C へ移動するにつれて外部回路には極板 B から C への電流 i_{BC} が流れる(図(c))。



極板 B に流れ込む電流は、負電荷が B を通過する瞬間に逆転して図(d)のようになる。この図で、 x 軸の上下の面積は等しい。もし B と C の距離が A と B とのそれに比べて非常に大きければ i_B の負の電流は非常に小さくなる。

まとめると、電荷が電極の近くを動くとき、その動きに従って各電極に電荷が現れる。

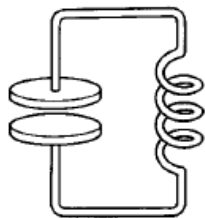
実際には、有限の穴径の電極が用いられ、荷電粒子も1個ではなく多数の電荷集団が通過する、特に高周波電子管のクライストロンや進行波管(TWT)では電子流(以降電子ビーム)の電子が後述するバンチング現象で塊になり連続した疎密の集団となって電極間を走り抜ける。



1-3-2) 共振器

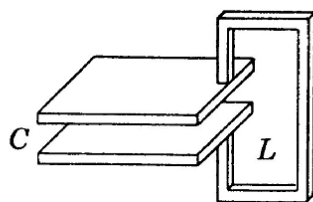
低周波の LC 共振回路

C部分では電圧振幅、L部では電流振幅となっている。

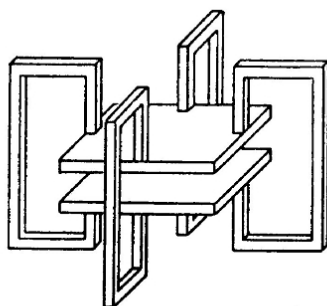


$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

高周波への展開

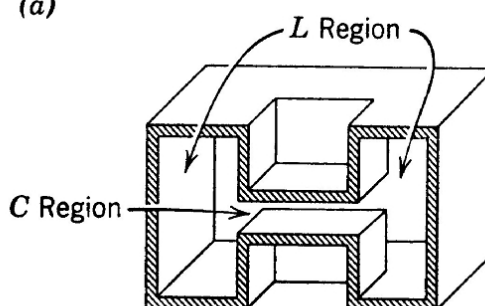


インダクタンスを小さく1ターン巻き



(b)

インダクタンスを小さくするために並列接続



(c)

インダクタンスを更に小さくするためにより並列に接続
この形状を空洞共振器、Cavity、キャビティと呼ぶ

低周波の LC 共振回路を高周波に適合するように、L、Cを極端に小さくした(c)を空洞共振器と呼ぶ。電子ビームと高周波のインタラクションは、この構造のデバイスで実現された。

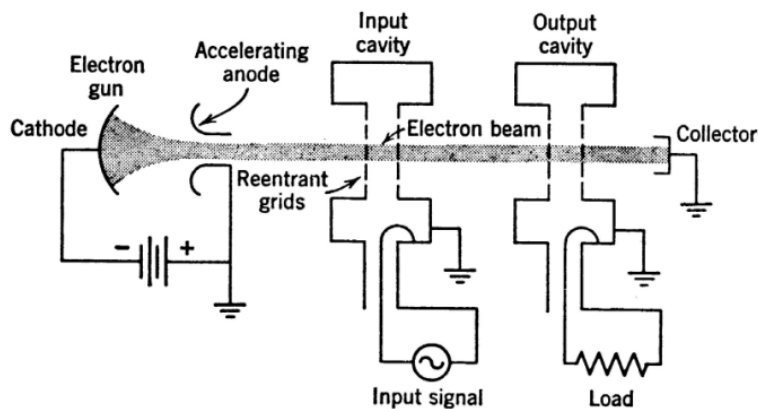


Fig. 15.6. Schematic representation of klystron amplifier.

1-3-3) クライストロン

Input Cavity で起こる現象は、電子ビームのドリフト速度(加速電極を通過するとそれ以上の加速がなく、一定速度で移動することからこの名前がついている) v_0 は空洞共振器から受ける角周波数 $\omega = \omega_0$ の高周波電圧(電界)により加減速される、これを電子ビームの速度変調という。

$$v = \sqrt{2\eta V} = \sqrt{2\eta (V_0 + V_1 \cos \omega t)}^{1/2}$$

$$V_1 \ll V_0,$$

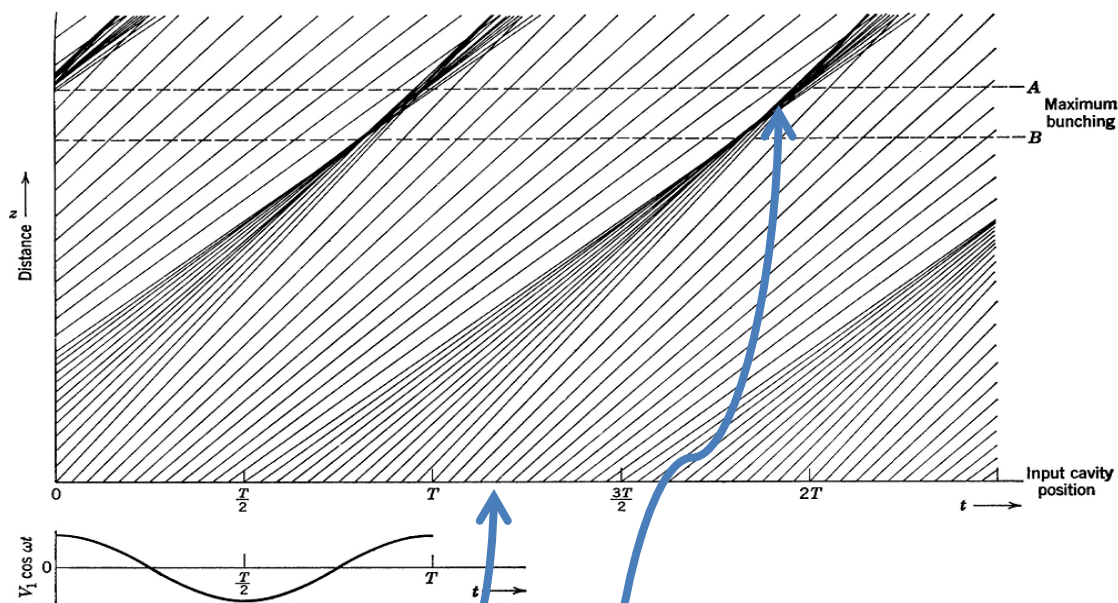
$$v \approx v_0 \left(1 + \frac{V_1}{2V_0} \cos \omega t \right)$$

V_0 加速電極電圧

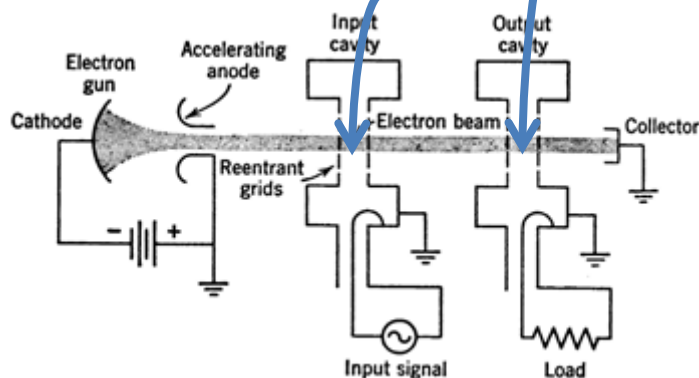
V_1 空洞共振器で与えられる高周波電圧の振幅

$$v_0 = \sqrt{2\eta V_0}$$

この様子を簡略図で示す。

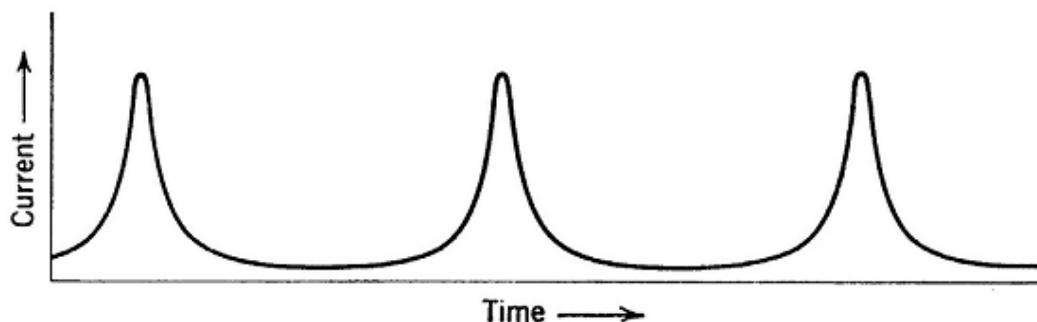


Applegate diagram, showing electron bunching as a function of position and time.

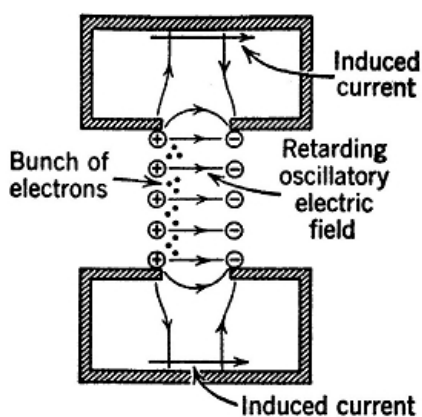


input cavity で加減速された電子ビームがバンチングするところに output cavity を配置する。

Output Cavity では dc の運動エネルギーがインプットキャビティーの中で高周波の ac の電磁エネルギーに変換される。



Current as a function of time at position of maximum bunching.

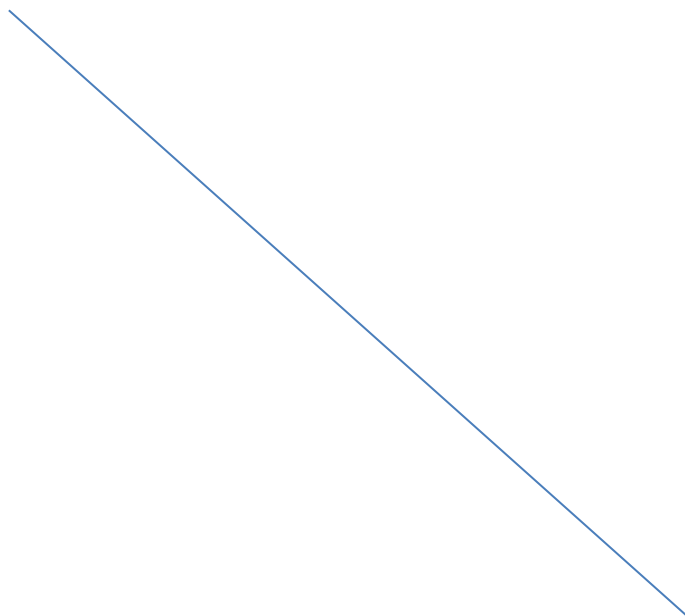


クライストロンでは小さな高周波の ac 入力エネルギーで電子を速度変調でき、結果バンチングされた電子ビームの運動エネルギーがアウトプットキャビティーで大きな電力に増幅され回収される。 実用化されているクライストロンでは、電力増幅は1000倍以上である。

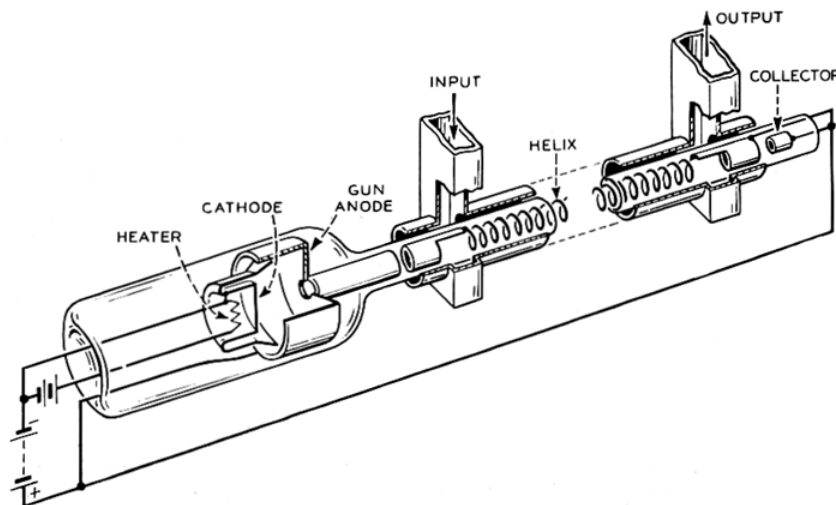
(註)

効率よく電力を取り出すために、Qの大きなキャビティーが必要となる。 このため、使用できるバンド幅が狭いのがクライストロン増幅の限界である。

そこで、特に大容量のデータ伝送に必要な通信用増幅器は、進行波管の出現を待たねばならなかった。

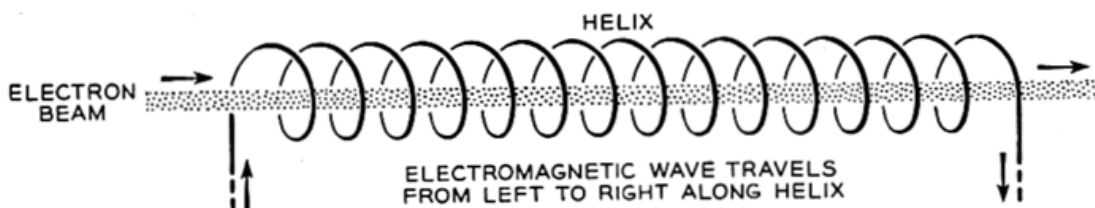


1-3-4) 進行波管(TWT:Traveling Wave Tube)



出典: J. R. Pierce, *Traveling-Wave Tubes*, New York: van Nostrand , 1950

マイクロ波領域の高周波増幅可能なクライストロンとの大きな違いは、遅波回路(Slow wave Circuit)と呼ばれる電磁波の速度(位相速度)を遅くする螺旋(Helix)を用いることにある。



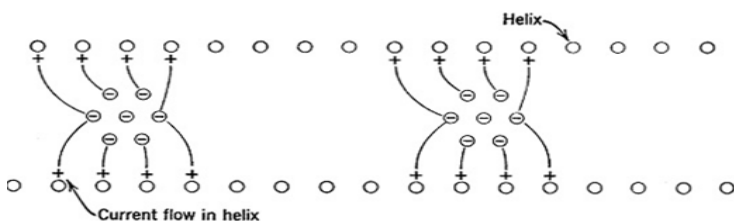
Helix の上を、マイクロ波が一回転する時間 $t = 2\pi a/c =$ ピッチ p の距離を電子ビームが走る時間 $= p/\text{ドリフト速度} = p/(2eV_a/m)^{1/2}$

この時

$$\text{遅波率} = c/\text{ドリフト速度} = c/(2eV_a/m)^{1/2}$$

という。

螺旋遅波回路を伝搬するマイクロ波の位相速度 = 電子ビームのドリフト速度(加速電圧 V_a) を等しくすることにより、クライストロン管で行われた、電子ビームと高周波のインタラクションが連続して行うことができる。



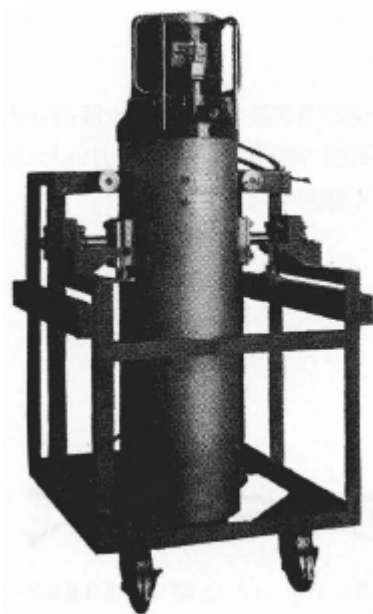
出典:C.L. Hemenway、Richard W. Henry、Martin Caulton
Physical Electronics, 1962 Wiley TOPPAN

改善される場所は、入出力に空洞共振器を用いることなく幅広く結合が可能のため、使用できるマイクロ波の領域、バンド幅が広いことが特徴である。

現在実用化されているTWTの例を示す。

UHF テレビ中継放送用大電力進行波管日立 1W31

東芝 E3838



1W31の外観



進行波管 (TWT)
 ・ E3838 ;
 周波数 - 8.7 ~ 9.2 GHz
 出力 - 25 kW
 ・ E3842 ;
 周波数 - 27.7 ~ 29.0 GHz
 出力 - 350 kW

(c) 進行波管 (TWT)

表1 1W31の定格

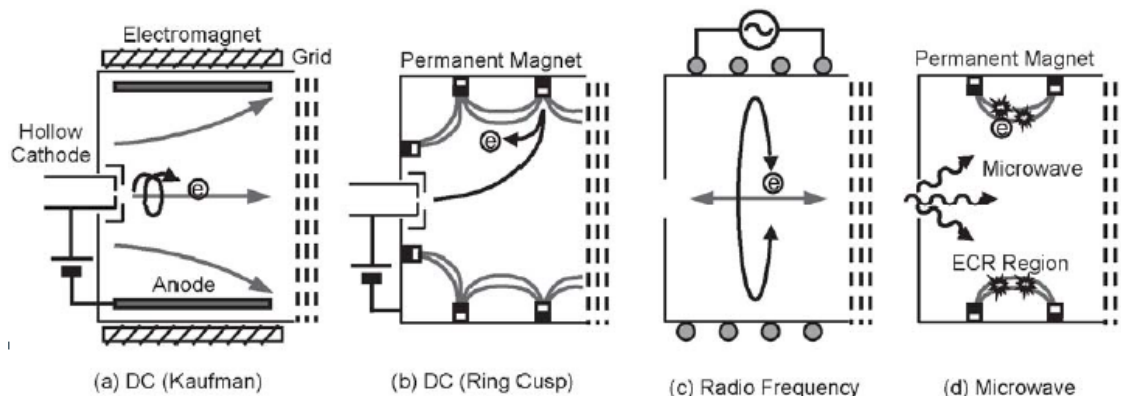
一般特性		動作例 (1kW サテライト条件)	
ヒータ電圧	10 V DC	周波数	650
ヒータ電流	10 A DC	加速電極電圧	4.
周波数範囲	470~770 MHz	加速電極電流	2
外形寸法	350φ×1,330	ヘリックス電圧	6.
重量	{管球	ヘリックス電流	10
	{電磁石	コレクタ電圧	6.
冷却	強制空冷	コレクタ電流	4.
集束磁界装置	電磁石	電磁石電流	15
最大定格	最小	電磁石電圧	46
	最大	電力利得	31
ヒータ電圧	9	飽和出力	6
加速電極電圧	5 kV	混変調量	-17
ヘリックス電流	100 mA	雑音(ランダム)	>55
ヘリックス損失	1 kW	冷却風量	45 r
コレクタ電圧	5	入出力定在波比	2
コレクタ電流	8 kV		
コレクタ電流	5 A		
コレクタ損失	33 kW		

いずれも、マイクロ波大電力の用途である。

1-4) イオン源(Ion Source)

イオンエンジンに使われているイオンのもとになる材料はキセノン、セシウムなど比較的原子番号の大きな物質が選ばれる。使用時はガス状でキセノンはマイクロ波による放電プラズマでイオン化し、セシウムはポーラスタングステンとの接触電離が用いられている。

1-4-1) 放電プラズマによるキセノンイオン



各放電形式概要.

- 1) 直流放電型(カウフマン型) ex) UK-10 (ESA)
- 2) 直流放電型(カスプ磁場型) ex) NSTAR (NASA), XIPS25 (Boeing)
- 3) 高周波誘導加熱型 ex) RIT10 (ESA)
- 4) マイクロ波放電型 ex) μ 10 (JAXA), HiPEP (NASA)

ハヤブサに使用されたマイクロ波による無電極放電イオン源

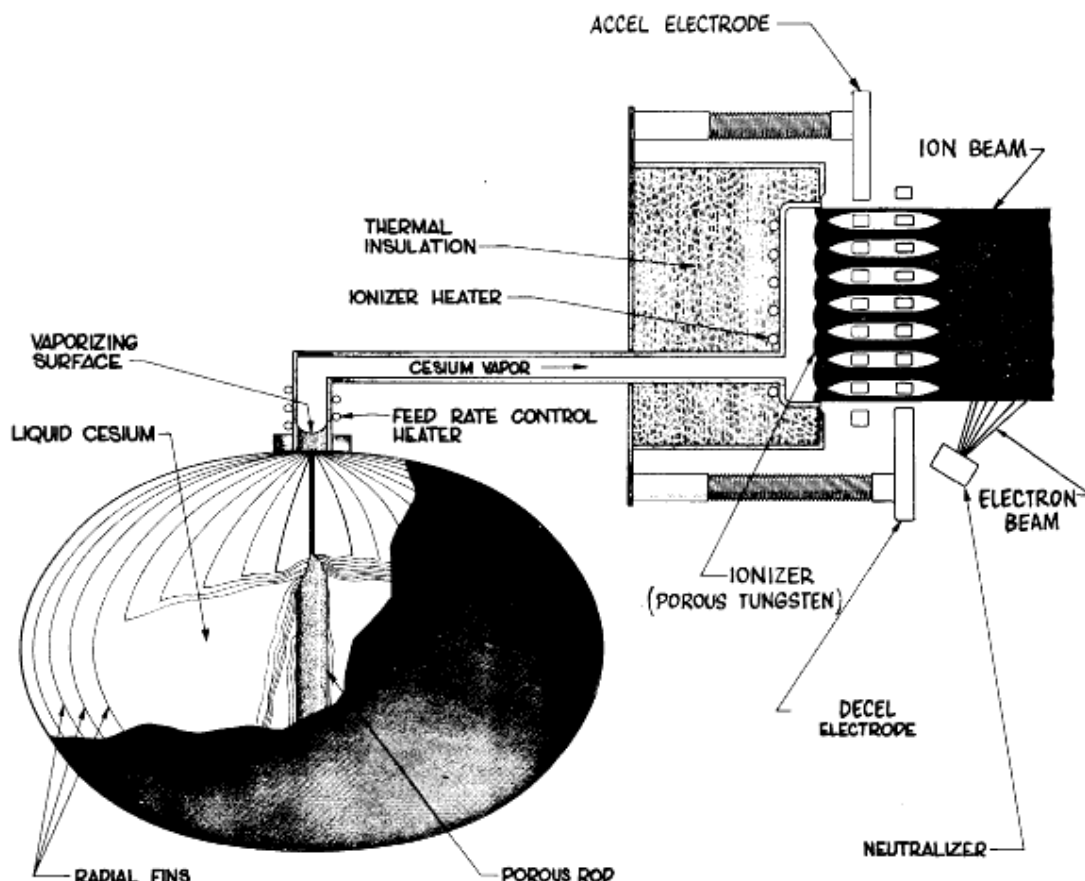
出典:

渡邊 裕樹、竹ヶ原 春貴、“イオンエンジンの作動原理および搭載状況”、Space Japan Review, No.70, October/November 2010

放電メカニズムの説明省略

1-4-2) 接触電離型イオン源を利用したイオンエンジン概略図

昭和44年(1968)ボストンで開催された、米国電子ビーム・イオンビーム技術学会と電気化学学会協賛の学会発表論文から引用している。当時は、わずかな電力で使用できるイオン源として、プラズマ放電を使用しない熱カソード型接触電離法が積極的に研究されていた。



Schematic of a multibeam surface ionization engine with zerogravity feed system. Ions emitted from hot porous tungsten surface are accelerated by the electrodes to form individual ion beams. These beams merge downstream into a single large beam which is neutralized by the introduction of electrons.

出典:

Robert A. Bakish, "ELECTRON AND ION BEAM SCIENCE AND TECHNOLOGY, THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE " The Electrochemical Society, Incorporated, 1968

接触電離法 (詳細省略)
サハ・ラングミュアーの式

$$\frac{n_+}{n_0} = \frac{g_+}{g_0} \exp\left(\frac{W - \Delta E_I}{kT}\right)$$

$\frac{n_+}{n_0}$ = ratio of ion number density to neutral number density
 $\frac{g_+}{g_0}$ = ratio of statistical weights (degeneracy) of ionic (g_+) and neutral (g_0) states

e = electron charge
 W = work function of surface
 ΔE_I = ionization energy of desorbed element
 k = Boltzmann's constant
 T = surface temperature (フィラメントの温度)

1-5) イオンエンジン(または、イオンスラスタ)

重力に逆らって飛び立つロケットシステムの話の順序では、推力の大きい地上発射の化学エンジンが重要な使命を果たしている。一方、話題にしているイオンエンジンは重力圏をはなれ宇宙空間を長時間飛行し再び地球に戻ってくる、長期間加速できることを実現するための比推力の大きいエンジンである。

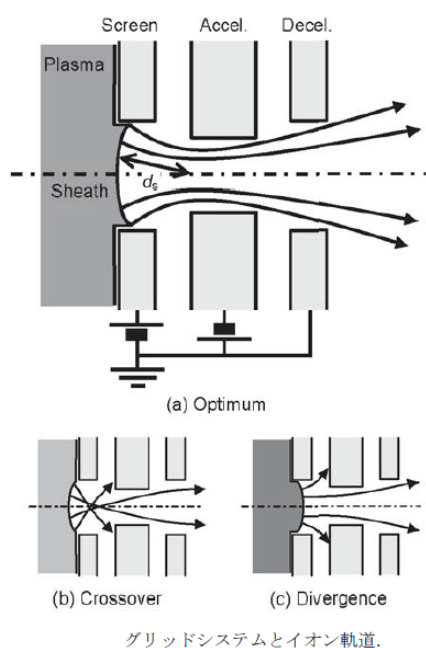
摩擦や大気による抵抗がない宇宙における推進力は、物体を後方に投げることによる反力により得られる。そして、宇宙空間での推進剤燃料補給なしでの条件下では、次のロケット方程式(Tsiolkovskiy の式)により説明できる。

$$\Delta v = v_{ex} \ln \frac{M_i}{M_f} \quad (1)$$

ここで、 v_{ex} は推進剤の排気速度(m/s)で、 M_i は宇宙機の初期質量 M_f は加速終了後の質量(Kg) ΔV は初期軌道から目標軌道までの速度増分(m/s) を表している。この式から、特定の ΔV に対して大きな最終質量を目的地において達成する。つまり、高い輸送能力を持った推進器には、高い排気速度が求められることがわかる。一般的に、推進器の性能は子の排気速度ではなく、推進器の燃料を表す次式で定義された比推力 I_{sp} により評価される。

$$I_{sp} = \frac{F}{mg} = \frac{\dot{m}v_{ex}}{\dot{m}g} = \frac{v_{ex}}{g} \quad (2)$$

F は推進力(N)、
 m は単位時間あたりに消費する推進剤の質量(Kg)
 g は重力の加速度(=9.8m/s²)である。



比推力の次元は秒(s)であり、その意味は「単位質量の推進剤で単位推力を発生することのできる時間」である。比推力は排気速度に対して比例関係にあり、(1)式および(2)式から、宇宙空間での輸送能力の向上は高い比推力の達成を意味し、これを達成すべくイオンエンジンは開発されてきた。

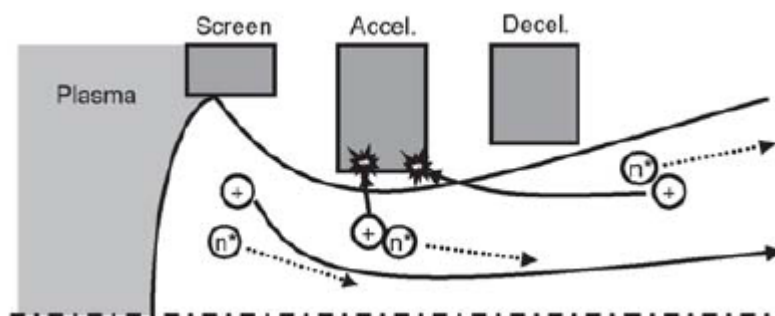
実用値:

$$v_p = \sqrt{2 \frac{q}{m_i} V_a} = 38 \text{Km/s}$$

一価のXe使用しスクリーングリッド 1KV。
 原理的には比推力 10,000s以上可能だが、実用では電気エネルギー供給用電源の重量その他のミッションの要求から 2500~5000s に設定する。

アクセルグリッドの損耗は寿命にかかわる。

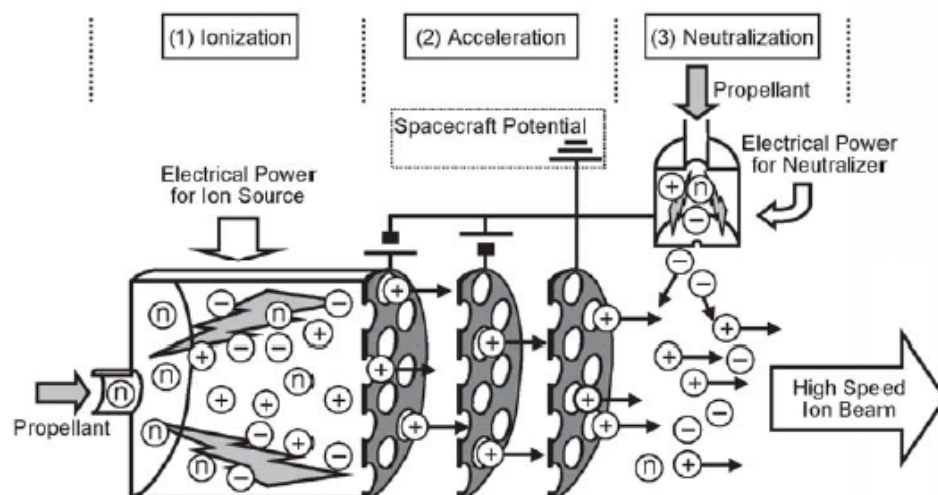
熱膨張係数が小さく、低スパッタ率のカーボン・カーボン複合材が使用されている。



電荷交換反応によるアクセルグリッドの損耗

1-6) 中和機(Newtralizer)

イオンエンジンには、正帯電した一価のキセノンイオンが宇宙船から高速イオンビームとなって宇宙空間に放射される。この為、宇宙船は正電荷を失い負に帯電し、イオンビームを弾き戻し推進力が得られなくなる。これを防ぐために、噴射直後にマイナスの電荷をもつ電子を等量放出する中和機 (Neutralizer) を配置し、総電荷を0に中和し宇宙船の電位変化を防いでいる。



イオンエンジン概要.

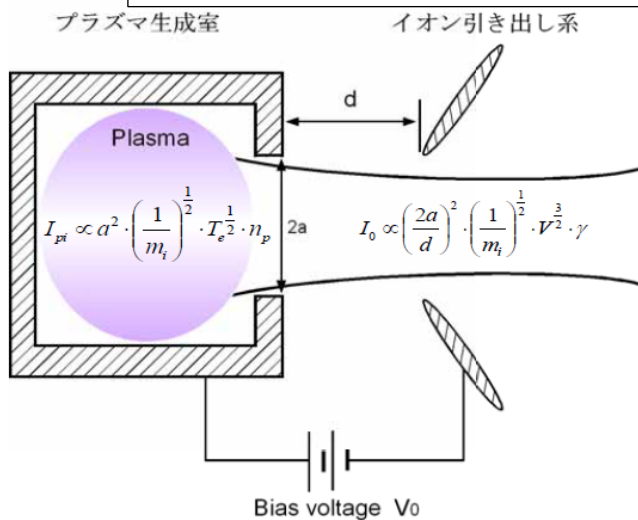
イオンスラスターの概略図:

イオンスラスターの物理過程は、1)プラズマ生成、2)イオンビーム抽出、3)イオンビーム中和の3段階構成に分けられる。電気推進機の一つであり、放電室で推進剤を加熱・電離させプラズマを作りイオンを静電的に加速して推力を得ることから静電加速型推進機とも呼ばれる。

出典:

渡邊 裕樹、竹々原 春貴、“イオンエンジンの作動原理および搭載状況”、Space Japan Review, No.70, October/November 2010

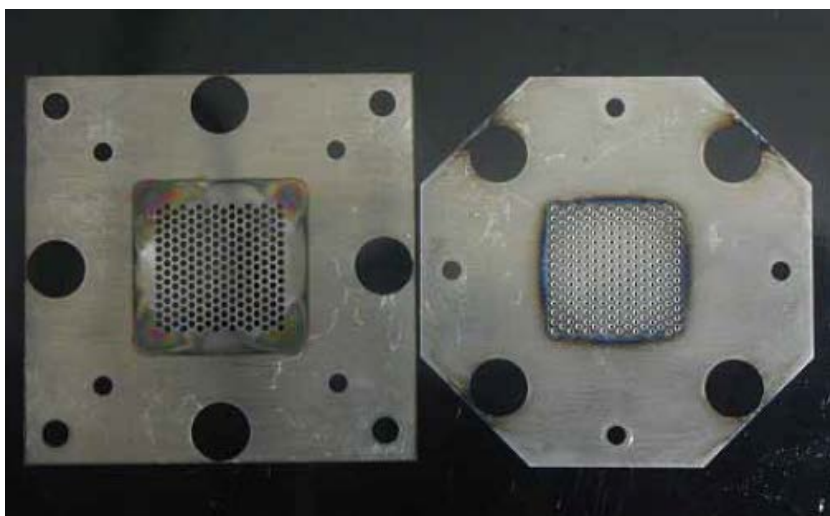
はやぶさに使われたイオンエンジンと同等の試作エンジン諸元



イオン源プラズマとイオンの引き出し

グリッドシステムのパラメータ

	Screen	Acceleration
Open ratio, %	51	14.5
Hole diameter, mm	0.9	0.48
Potential, V	1500	-300
Grid gap, mm		0.2
Hole number		211



出典: <http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/publications/2005/Bkondo.pdf>

1-7) イオンエンジンの搭載状況

イオンエンジンの代表性能値

Discharge type for ion production	DC (Kaufman)	DC (Ring Cusp)	RF (ICP)	μ wave (ECR)
Beam diameter [cm]	12	13	8.7	10
Thrust [mN]: $F = \dot{m}_i v_i = \sqrt{2(m_i/q)V_n}$	23.5	17.8	15	8.7
Specific Impulse [s]: $I_{sp} = F/(\dot{m}g) = \eta_u v_i/g$	2700	2600	3300	3100
Propellant utilization efficiency [%]: $\eta_u = \dot{m}_i/\dot{m}$	79.5*	78.7	69	85
Ion production cost [W/A]: $C_i = P_d/J_b$	256*	290*	393*	513*
Thrust-to-power ratio [mN/kW]: $F/P = F/P_0$	38.7	40.5	33.3	22

m_i : Mass of an ion, q : Electronic charge, g : Gravity, J_b : Ion beam current, V_n : Net acceleration voltage,
 \dot{m}_i : Ion mass flux, \dot{m} : Propellant mass flow, P_d : Discharge power for ion production, P_0 : Total power consumption.
 *は著者が他の公表値から算出.

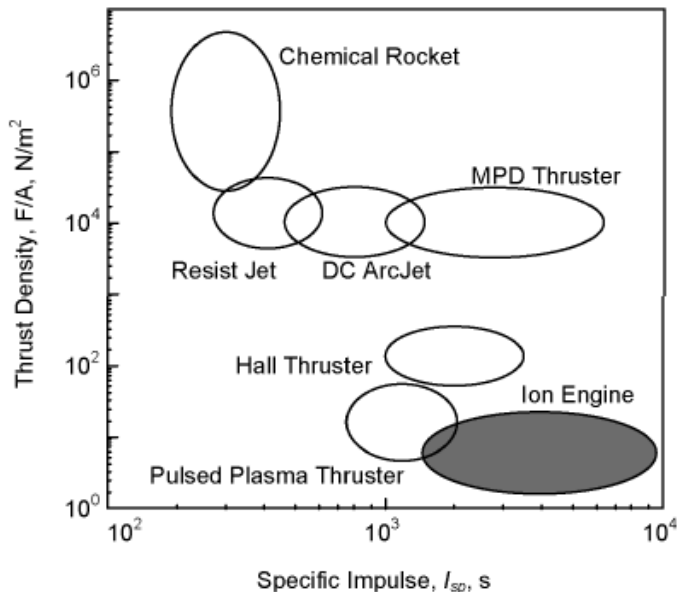
イオンエンジンの搭載実績.

Data	Country	Satellite	Mission	Beam diameter	Discharge Type	Propellant
1964	USA	SERT-1	Experiment	10cm	DC (Kaufman)	Mercury
1968	USA	ATS-4	Experiment	8cm	Contact	Cesium
1970	USA	SERT-2	Experiment	15cm	DC (Kaufman)	Mercury
1974	USA	ATS-6	Experiment	8cm	Contact	Cesium
1979	USA	SCATHA	Experiment	5cm	DC (Kaufman)	Xenon
1982	Japan	ETS-III	Experiment	5cm	DC (Kaufman)	Mercury
1993	Europe	EURECA	Experiment	8.7cm	RF (ICP)	Xenon
1994	Japan	ETS-VI	NSSK	12cm	DC (Kaufman)	Xenon
1998	USA	Deep Space 1	Exploration	30cm	DC (Ring Cusp)	Xenon
1998	Japan	COMETS	NSSK	12cm	DC (Kaufman)	Xenon
2001	Europe	ARTEMIS	NSSK	8.7cm	RF (ICP)	Xenon
2003	Japan	MUSES-C	(Orbit transfer)	10cm	DC (Kaufman)	Xenon
2006	Japan	ETS-VIII	Exploration	10cm	μ wave (ECR)	Xenon
2006	Japan	ETS-VIII	NSSK	12cm	DC (Kaufman)	Xenon
2007	USA	DAWN	Exploration	30cm	DC (Ring Cusp)	Xenon
2009	Europe	GOCE	Drag compensation of atmosphere	10cm	DC (Kaufman)	Xenon

出典:

渡邊 裕樹、竹々原 春貴、“イオンエンジンの作動原理および搭載状況”、Space Japan Review, No.70, October/November 2010

1-8) 補足1: 各種エンジンの比較



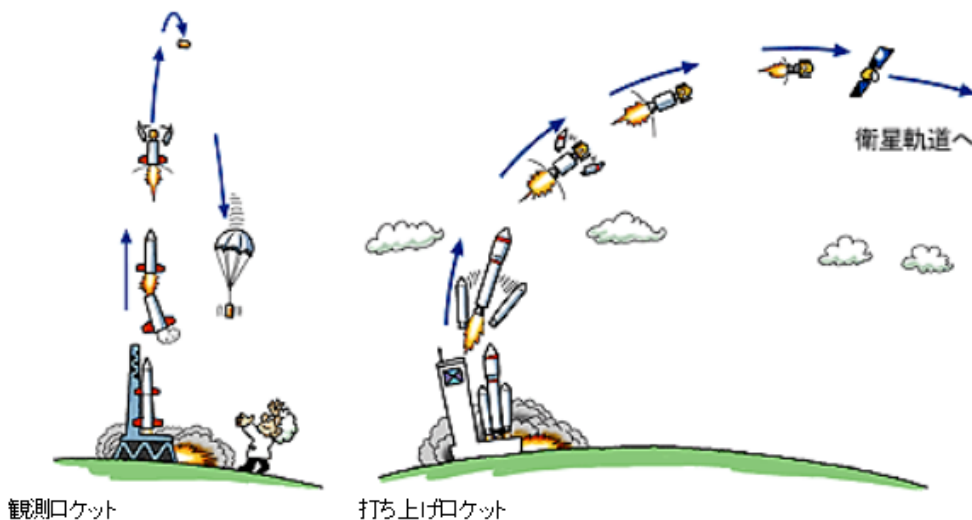
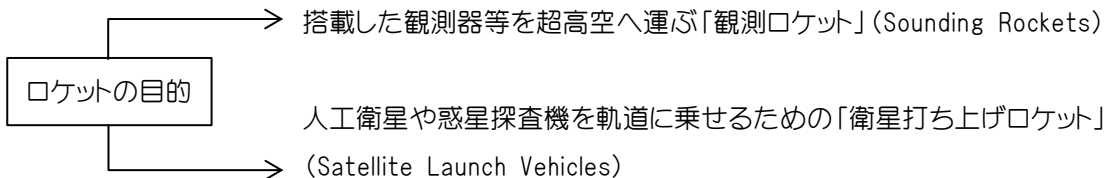
化学推進機および電機推進機の推力密度と比推力。

出典:

渡邊 裕樹、他、イオンエンジンの作動原理および搭載状況、

Space Japan Review, No. 70, October / November 2010

1-8) 補足2: ロケットの目的



「宇宙航空研究開発機構(JAXA)提供」

1-8) 補足3: ロケットの種類

【化学ロケット】

現在使用されている大型ロケットはすべて化学ロケットです。

化学反応で高温高圧のガスを発生させて、そのガスを噴射します。

反応に使用する物質(推進剤という)が

- 固体のものを「固体燃料ロケット」
- 液体のものを「液体燃料ロケット」
- 固体と液体と両方を使う物を「ハイブリッド・ロケット」

液体ロケット:

構造が複雑でかさばる欠点がありますが、推進剤の重量あたりのエネルギーが高いという長所があります。また燃料や酸化剤をタンクからパイプを通して燃焼室へ送るので、途中で蛇口のようなものを付けておけば、燃焼の制御が容易であるという重要な長所もあります。

固体ロケット:

構造が単純なので扱いやすく、重量あたりの性能は少し低いのですが、高密度の推進剤が使用できるためコンパクトな推進システムになります。おまけに燃料の保存が容易である、などの長所があります。

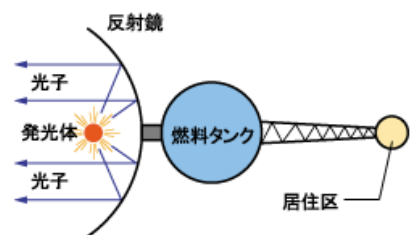
代表的な未来ロケットの原理図 「宇宙航空研究開発機構(JAXA)提供」

現在開発が進められているロケットエンジンの他にも、理論の上から考えられているロケットはいろいろあります。

かつて化学ロケットも、宇宙を夢見る人たちの想像の産物でしたが、科学の進歩はこれを実現させました。将来、光子ロケットやラム・ロケットが、宇宙を航行する日がきっとやってくるでしょう。

◎光子ロケット

光は光子という非常に軽い粒子です。この光子を噴き出して、その反動で飛行しようというのが光子ロケットです。

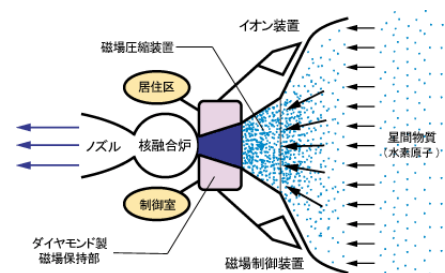


◎ラム・ロケット

宇宙空間には、わずかですが水素原子があります。ラム・ロケットは、この水素原子を集め、それを加速して噴出しながら進むロケットです。

<http://edu.jaxa.jp/materialDB/html/teacher/3/con1.html>

「宇宙航空研究開発機構(JAXA)提供」



1-9) 宇宙旅行

第50回CISパートナー会議は、JAXAの提供しているデータをもとに、イオンエンジンについて概略の調査報告となった。宇宙旅行に必要なロケットについて非常に興味を覚えている。なんとか時間を作り、引き続き調査を進めたい。

以上 調査担当 山本洋一

CIS ホームページ URL

<http://www.cis-laboratories.co.jp/>