

Practice Course in Plasma



Po-Yu Chang

Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University

2021 spring semester

Thursday 9:10-12:00

Material: <http://capst.ncku.edu.tw/PGS/index.php/teaching/>

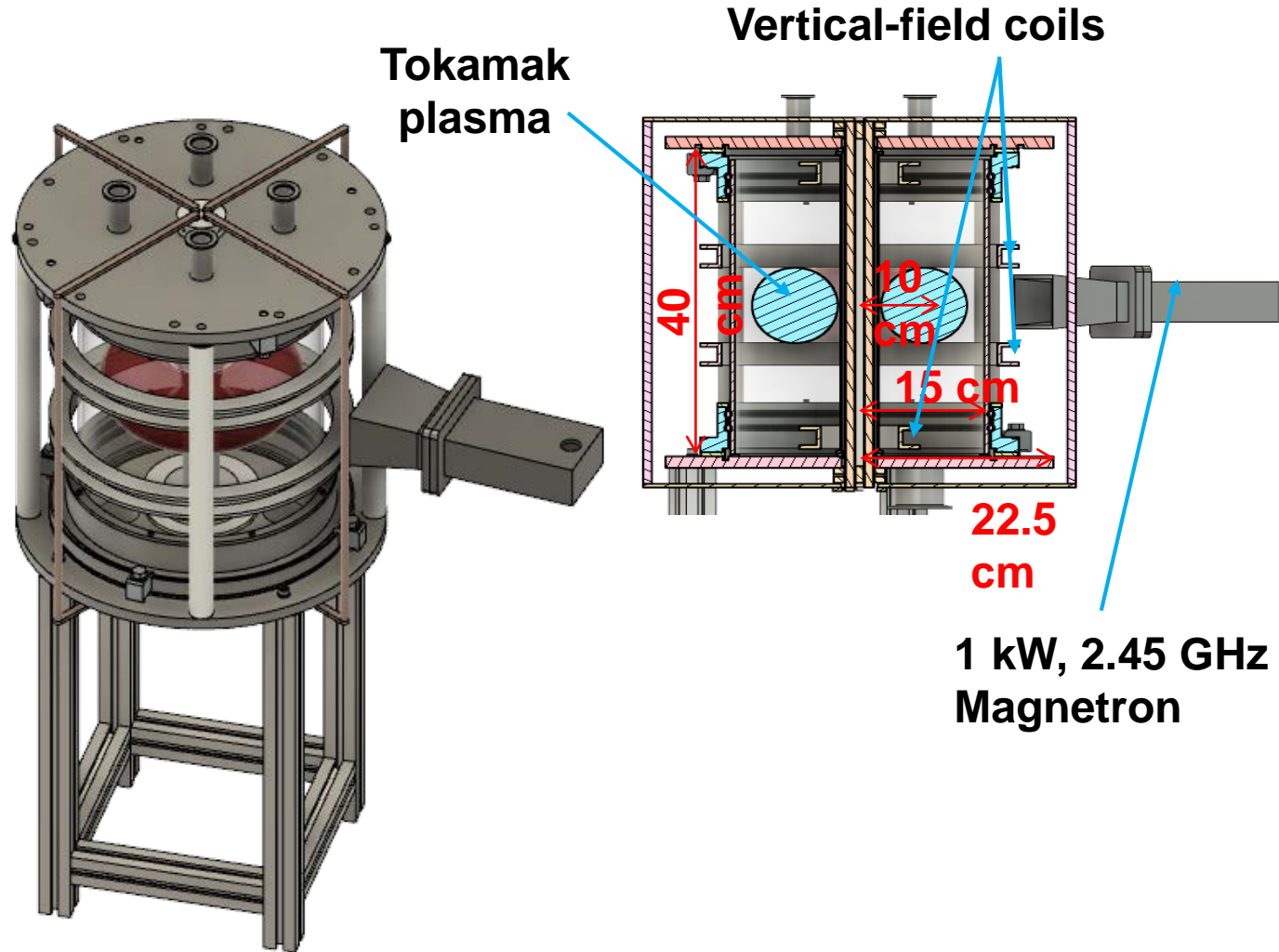
Lecture 4

Reference



- 真空技術與應用, 國家實驗研究院儀器科技研究中心出版

We need to work with a vacuum system

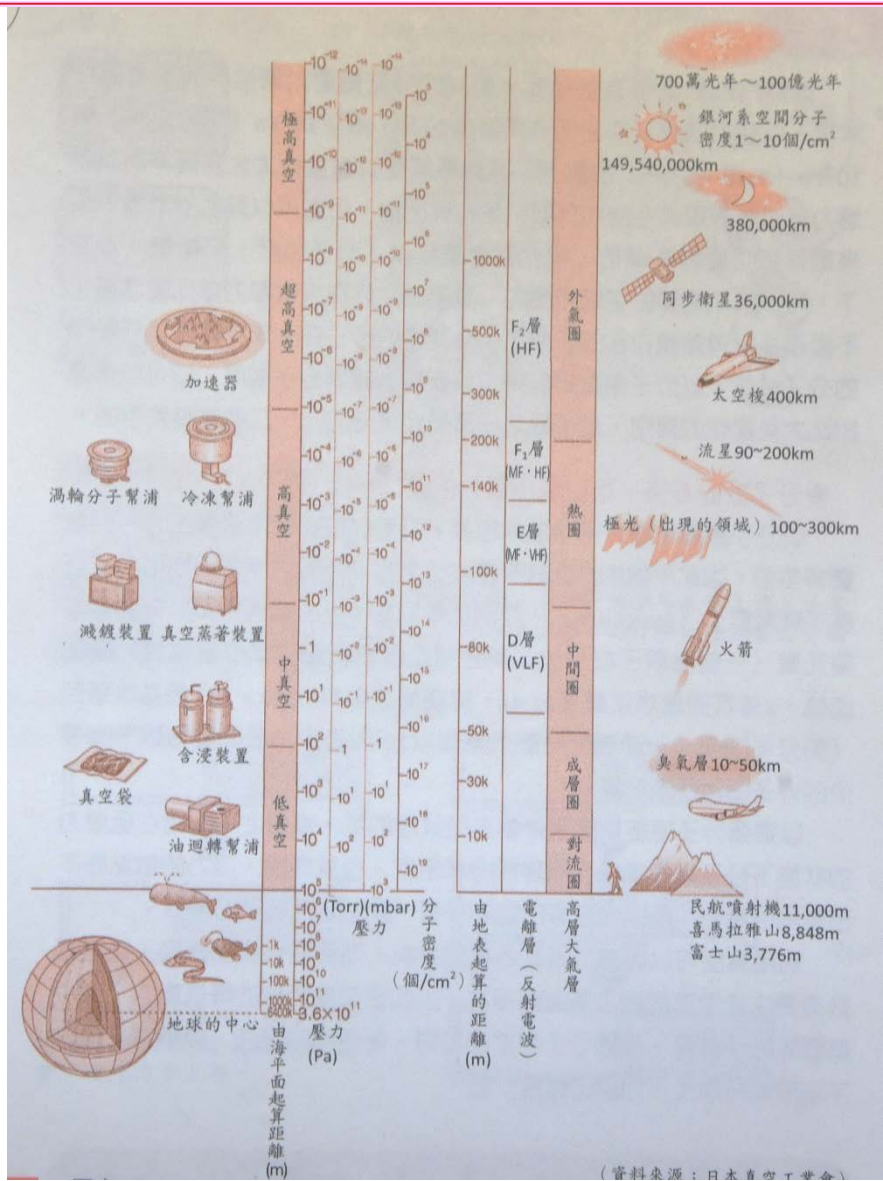


Space Plasma Operation Chamber (SPOC)



- Training of using SPOC is scheduled for next lecture (3/25)

Vacuum pressure in different systems

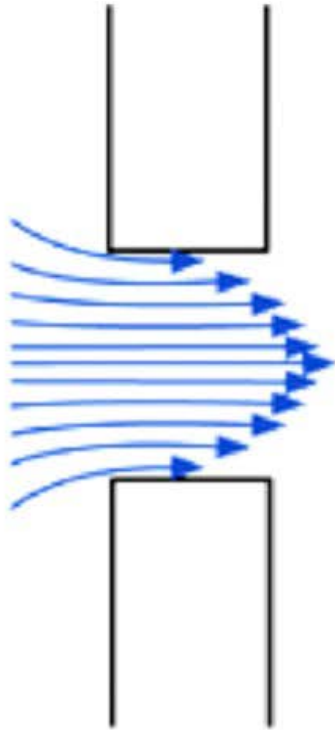


Vacuum Levels

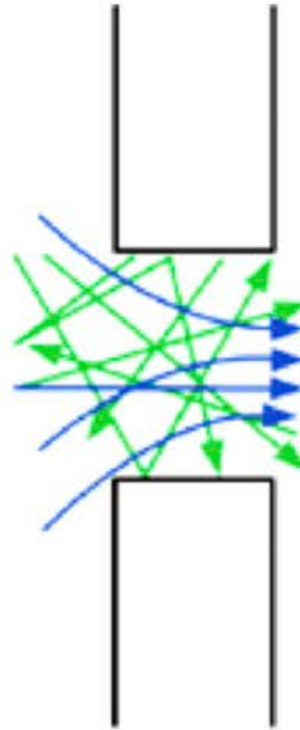


Levels	Pressure	Mean Free Path (λ) vs System size (d)	Flow type
Rough Vacuum (粗略真空)	$10^{-1} \sim 760$ Torr	$\lambda \ll d$	Viscos flow
Medium Vacuum (中度真空)	$10^{-5} \sim 10^{-1}$ Torr	$\lambda \sim d$	Transition flow
High Vacuum (高真空)	$10^{-9} \sim 10^{-5}$ Torr	$\lambda \gg d$	Molecular flow
Ultra High Vacuum (超高真空)	$< 10^{-9}$ Torr	$\lambda \gg d$	Molecular flow

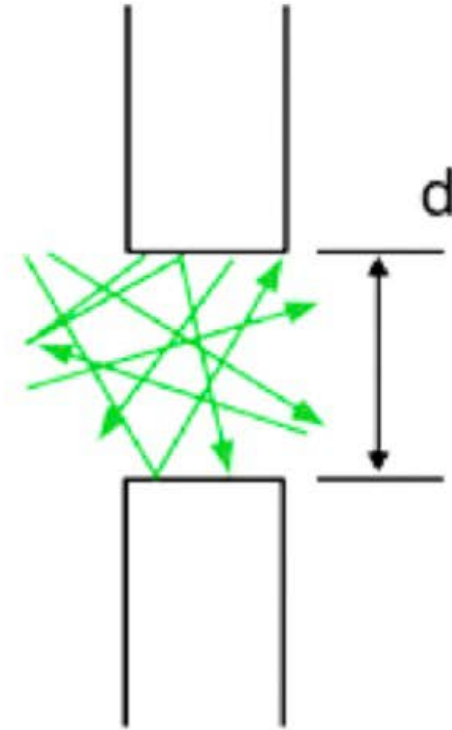
氣流與氣導



Continuous flow
 $Kn < 0.01$
Low vacuum



Knudsen flow
 $0.01 < Kn < 0.5$
Medium vacuum



Molecular flow
 $Kn > 0.5$
High/ Ultra-high vacuum

Larger tube can provide a higher flow rate in viscosity flow regime

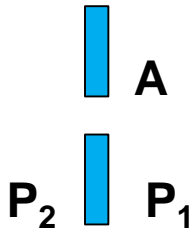


- 氣流通量：單位時間通過一平面的氣體的量。

$$Q \equiv d(PV)/dt \text{ (P}\cdot\text{m}^3\text{/s)}$$

- 氣導： $C \equiv Q/(P_1 - P_2)$ (L/s)

- 通孔：



$$1 > \frac{P_2}{P_1} \geq 0.52: \quad C = \frac{7.65 \times 10^5 C' A}{1 - \frac{P_2}{P_1}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.714} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.286} \right]^{0.5}$$

$$0.52 > \frac{P_2}{P_1}: \quad C \approx 2 \times 10^5 \frac{C' A}{1 - \frac{P_2}{P_1}}$$

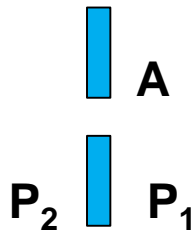
- 長圓管：

$$C = 1.38 \times 10^6 \frac{d^4}{l} \frac{P_1 + P_2}{2}$$

Larger tube can provide a higher flow rate in molecular flow regime

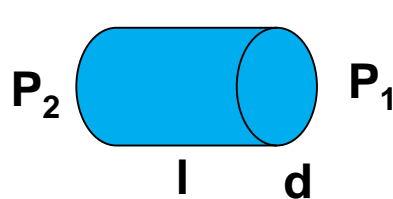


- 通孔：



$C = \frac{\nu}{4} A$ $C_{L/s} = 11.6 A_{\text{cm}^2}$

- 長圓管：



$C = 121 \frac{d^3}{l}$

- Connected tube in parallel: $C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$

- Connected tube in series: $\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$

Gas absorption and desorption against a chamber wall



- Vacuum pumping of a chamber:

$$V \frac{dP}{dt} = -SP + Q$$

S: 抽氣速率 / Q: 釋氣率

- 為了降低真空系統氣壓，需要(1) 增加幫浦的抽氣速率或(2) 減少表面釋氣。

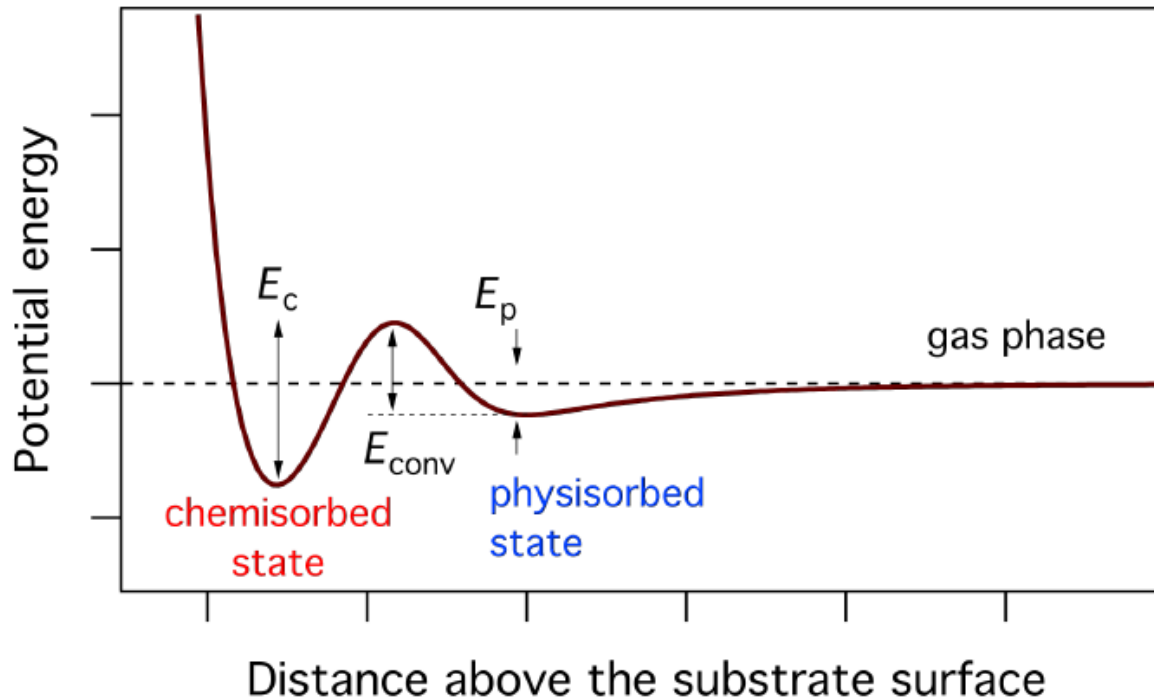
- 氣體組成：N₂, O₂ @ 1 atm ; H₂O @ vacuum.

水氣會附著在真空材料表面，需要透過加熱烘烤的方式去除。

- 氣體來源：

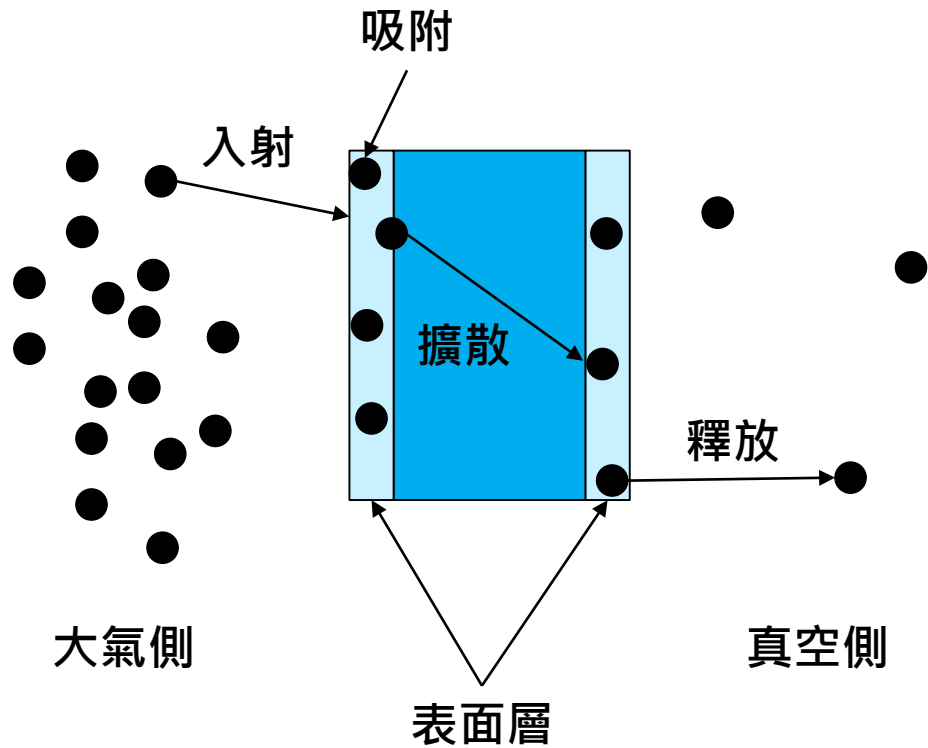
- 漏氣
- 蒸發
- 表面釋氣(脫附)
- 擴散
- 滲透
- 幫浦回流氣體

物理吸附 vs 化學吸附

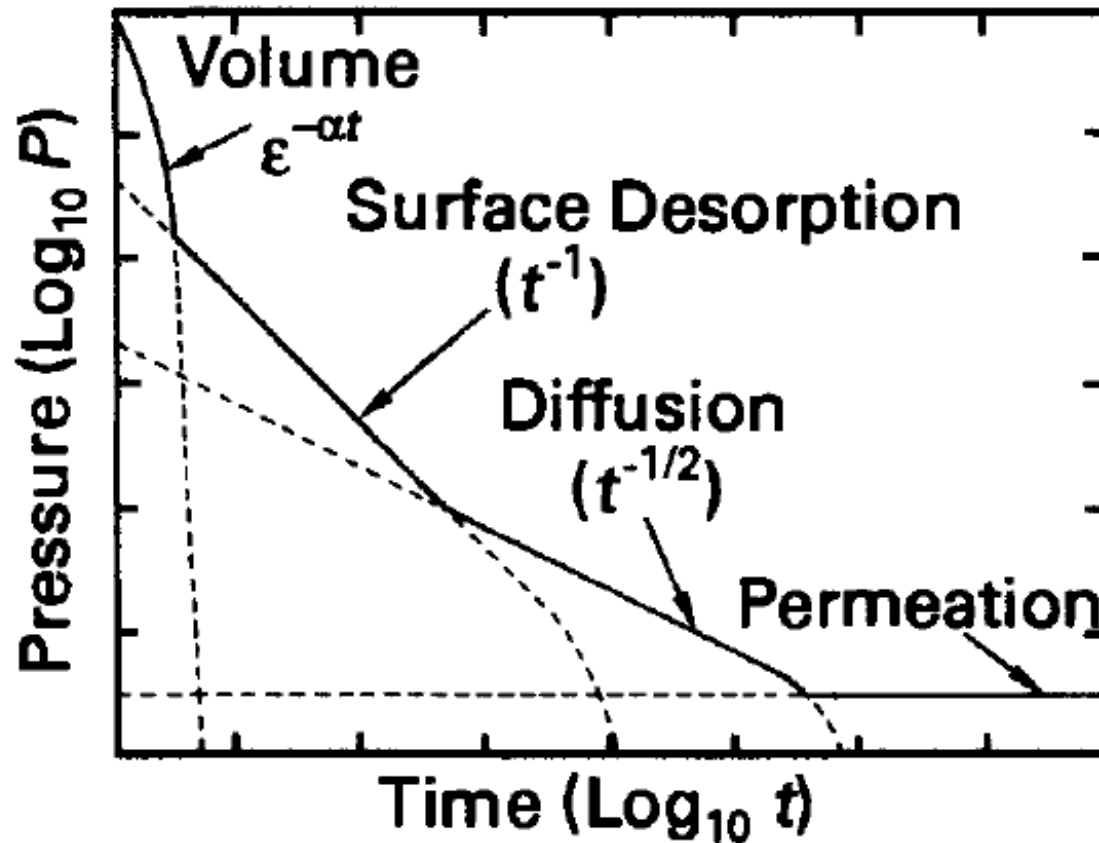


- 化學吸附(~250 kcal/mole) : 化學鍵結
 - 離子鍵結
 - 共價鍵結(主要)
- 物理吸附(~8 kcal/mole) : 凡德瓦力
 - 靜電偶矩力
 - 誘導力
 - 色散力

擴散及滲透造成氣壓上昇



Rate limiting steps during the pumping of a vacuum chamber



透過粒子激發誘導釋氣

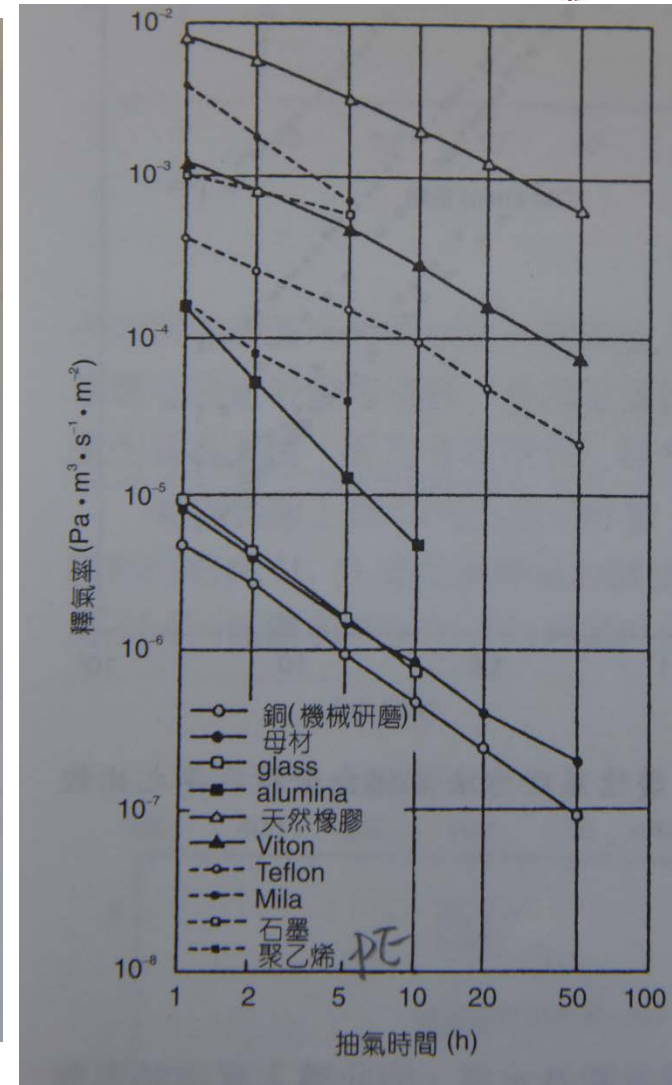
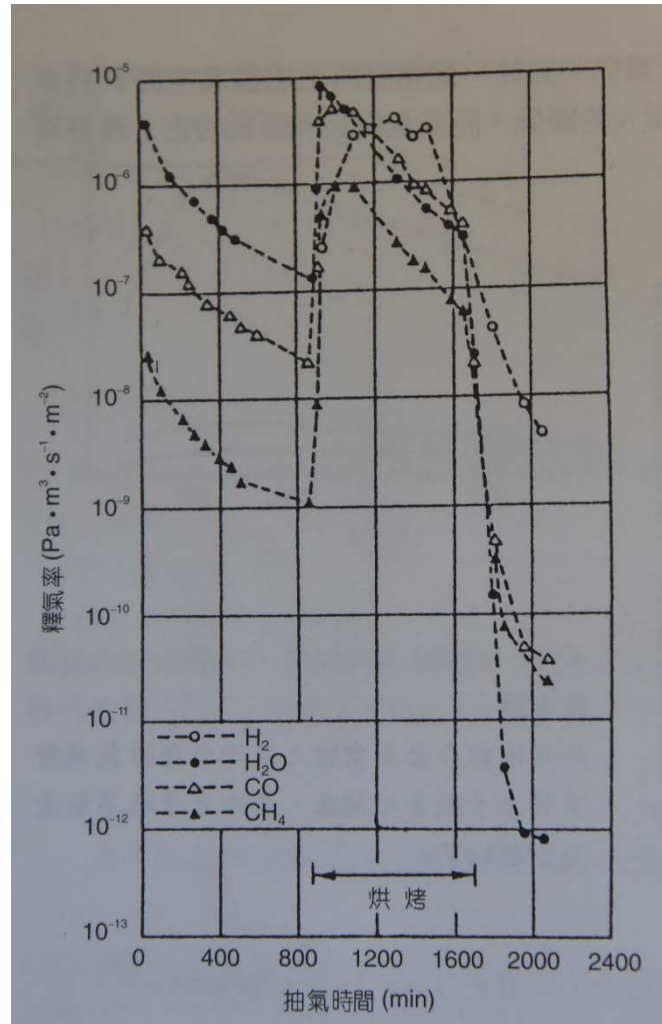


- 離子激發釋氣：質子加速器中高能之質子束游離殘餘氣體分子，游離氣體受到質子排斥撞擊腔體激發釋氣。
- 電子激發釋氣：
 - **MGR (Menzel, Gomer, Redhead) model**: 高能粒子(電子)撞擊材料表面時，吸附氣體與材料表面之複合體(adsorbate-substrate complex)進行電發躍遷(Frank-Condon transition)至較高能量的反鍵結態，進而引發氣體脫附。
- 光子激發釋氣：光子照射材料表面引發的氣體釋放。

影響氣體釋氣率的因素



- 烘烤溫度
- 材料性質
- 導入氣體的乾燥度
- 表面粗糙度



影響氣體釋氣率的因素



- 烘烤溫度
- 材料性質
- 導入氣體的乾燥度
- 表面粗糙度

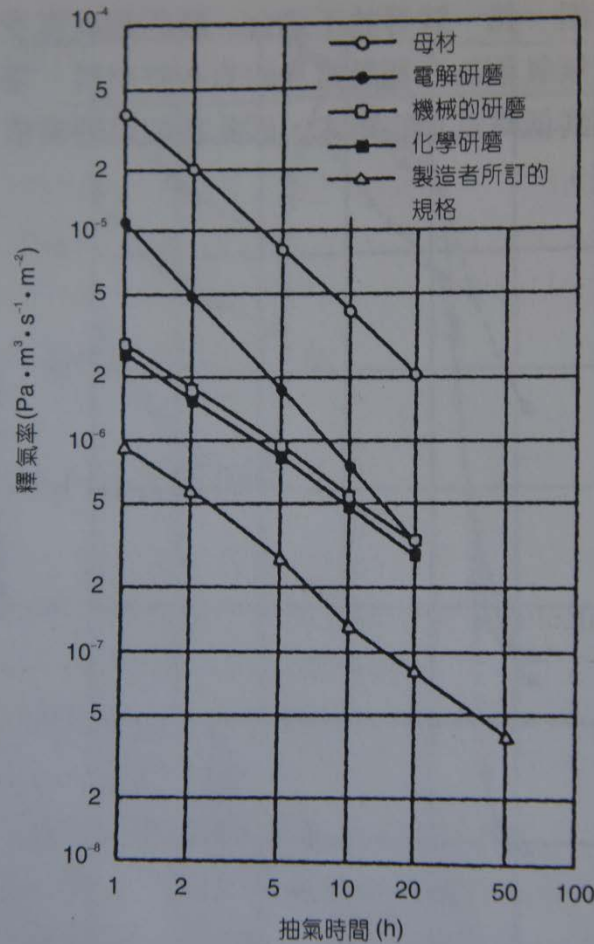


圖 4.17 不同的表面處理下的不銹鋼材料的表面釋氣率⁽³⁰⁾。

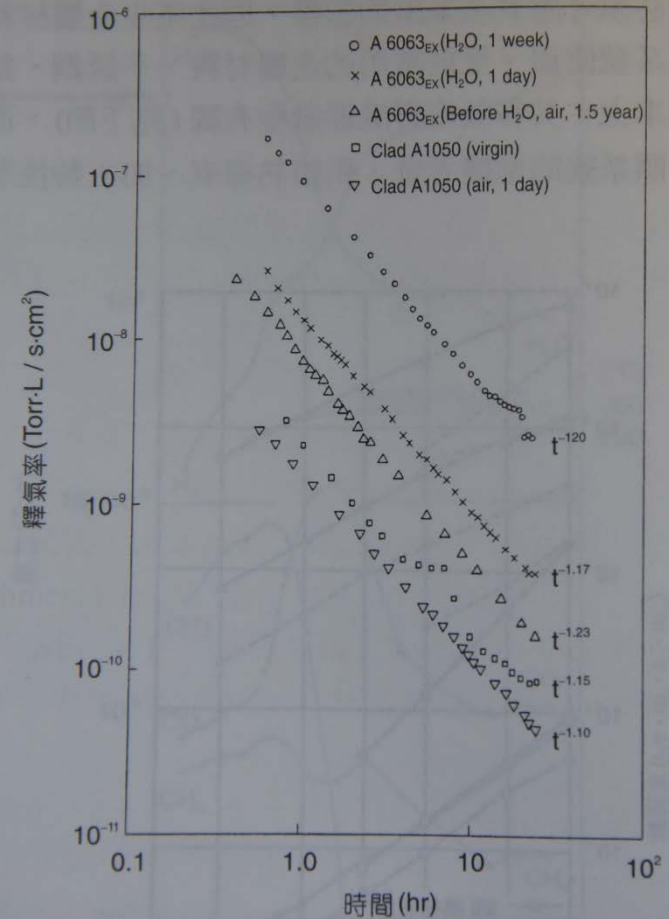
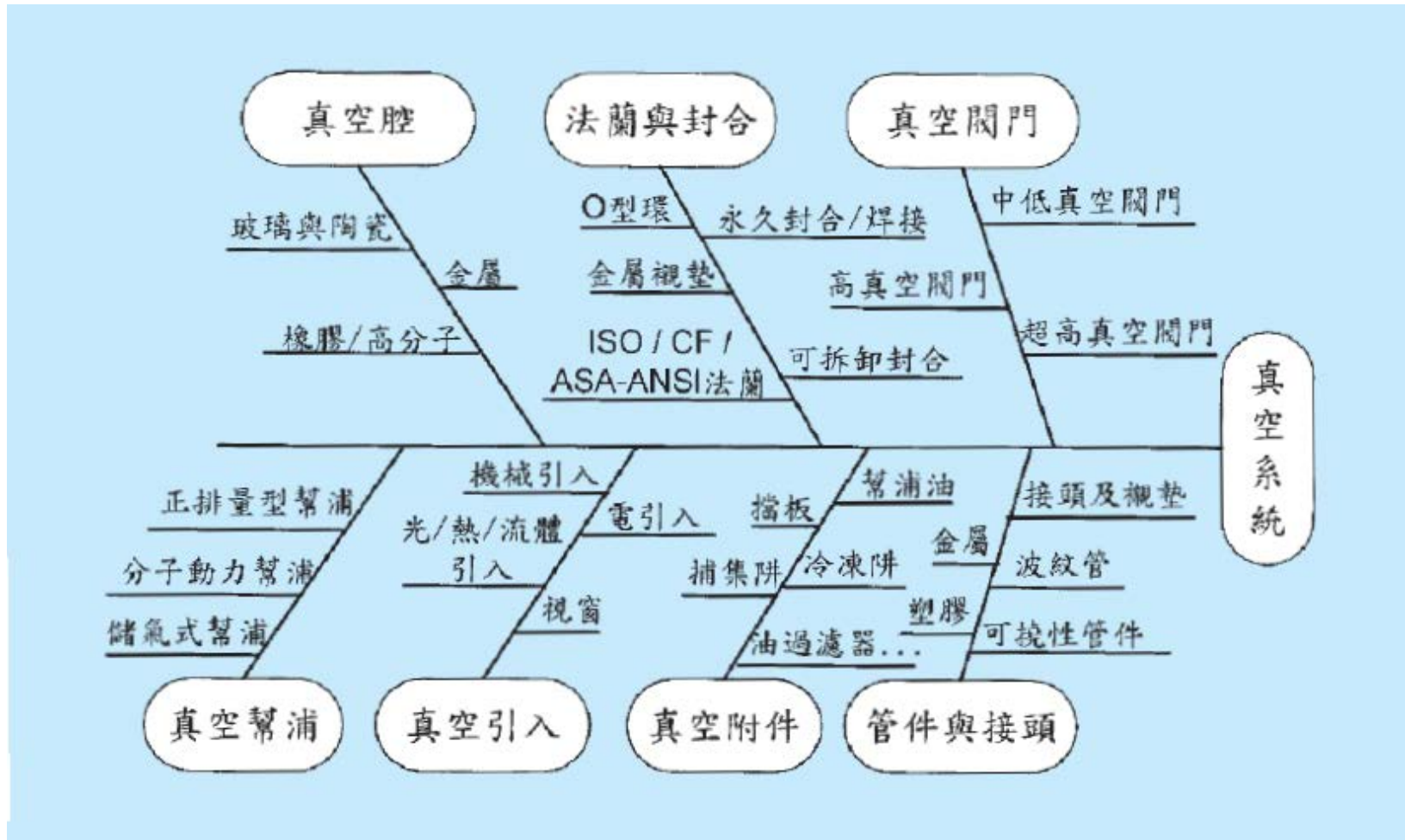
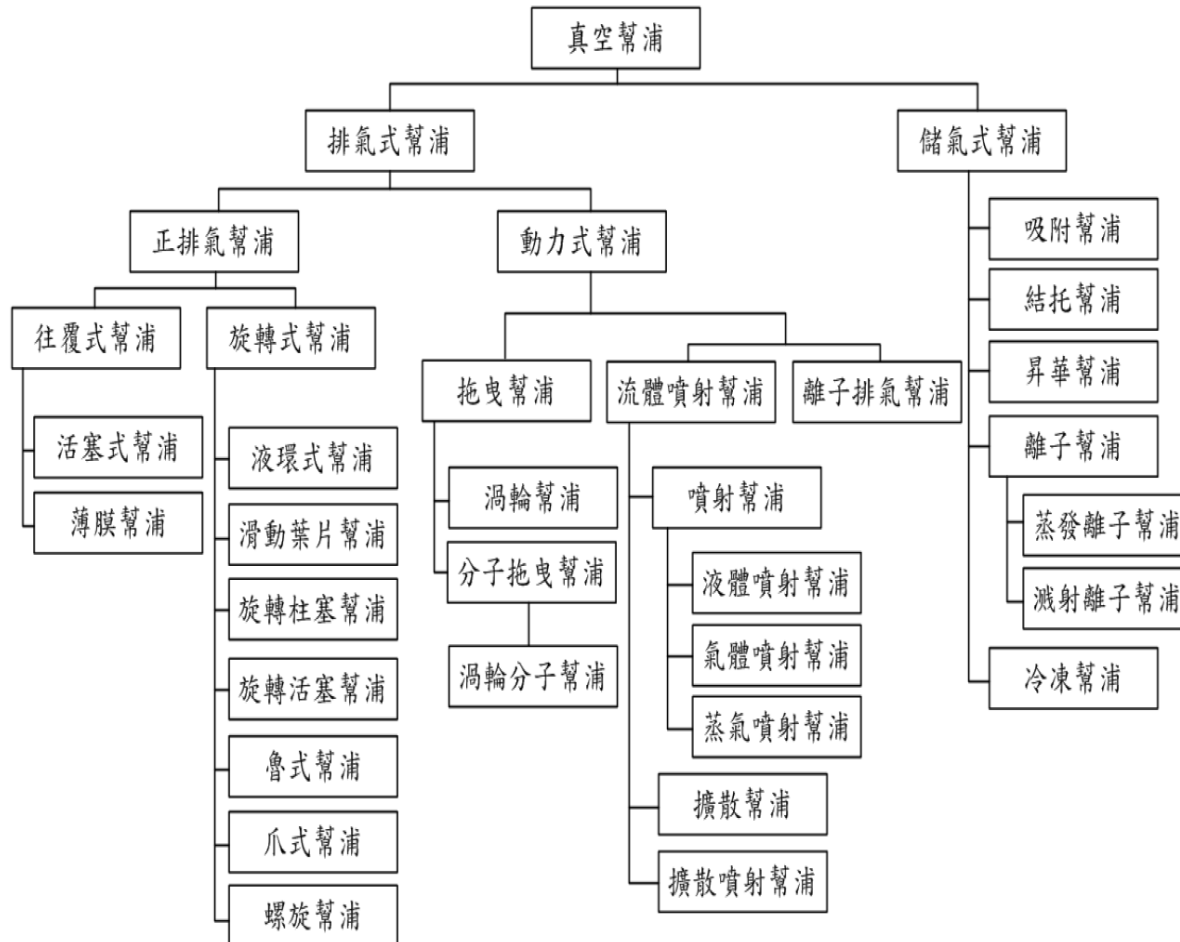


圖 4.18 幾種處理方法後鋁合金釋氣率之比較⁽²¹⁾。

Components of a vacuum system



依排氣方法區分真空幫浦



各類幫浦工作範圍



	粗略真空	中度真空	高真空	超高真空
壓力 (mbar)	1000 - 1	1 - 10 ⁻³	10 ⁻³ - 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ -
活塞式幫浦	1000 - 100			
薄膜式幫浦	1000 - 10			
液環式幫浦	1000 - 1			
滑動葉片式幫浦	1000 - 10 ⁻³			
旋轉柱塞幫浦	1000 - 10 ⁻³			
魯式幫浦	1000 - 10 ⁻³			
魯式/爪式幫浦	1000 - 10 ⁻³			
螺旋式幫浦	1000 - 10 ⁻³			
噴射幫浦	1000 - 10 ⁻³			
擴散幫浦			10 ⁻³ - 10 ⁻⁷	
擴散噴射幫浦			10 ⁻³ - 10 ⁻⁷	
渦輪分子幫浦			10 ⁻³ - 10 ⁻⁷	
離子幫浦			10 ⁻³ - 10 ⁻⁷	
冷凍幫浦			10 ⁻³ - 10 ⁻⁷	
吸附幫浦			10 ⁻³ - 10 ⁻⁷	
鈦昇華幫浦			10 ⁻³ - 10 ⁻⁷	

真空幫浦選用之要點



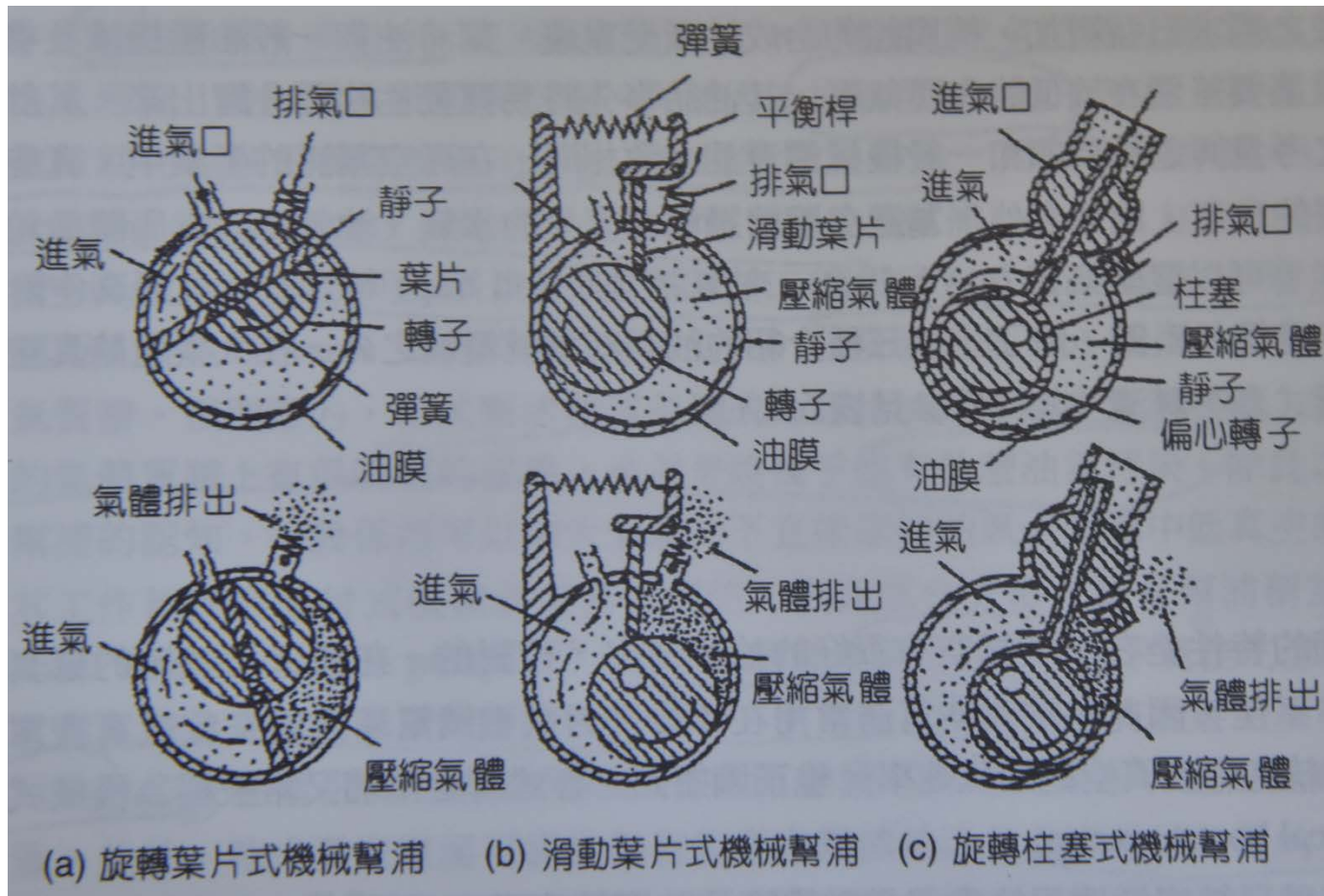
- 抽氣體壓縮比(**compression ratio**)
- 終極真空壓力(**ultimate vacuum pressure**)
- 有效抽氣的壓力範圍
- 抽氣速率(**pumping speed**)
- 幫浦排氣口壓力
- 幫浦之潔淨度
- 幫浦抽氣之氣體選擇性

各種真空系統相關功能之比較



	離子幫浦系統	擴散幫浦系統	渦輪分子幫浦系統	冷陳幫浦系統
抽氣速率	低	高	中	中
終極壓力	$< 10^{-9}$ Torr	$10^{-6} \sim 10^{-9}$ Torr	10^{-9} Torr	10^{-9} Torr
使用難易	簡單	普通	簡單	普通
使用壽命	有限時間	長久	長久	再生後使用
系統潔淨度	好	差	好	好
系統震動	最小	小	差	小
維護難易	容易	容易	難	難
裝置成本	高	低	高	高
運轉成本	低	高	中	中

三種油(液)幫式機械幫浦式意圖

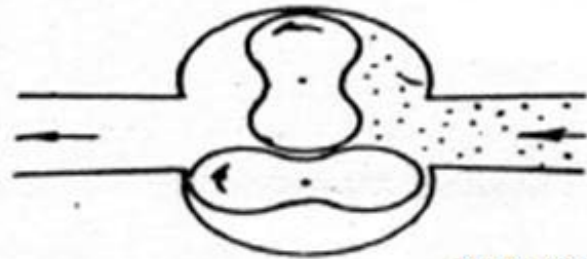


油(液)幫式機械幫浦特性與應用

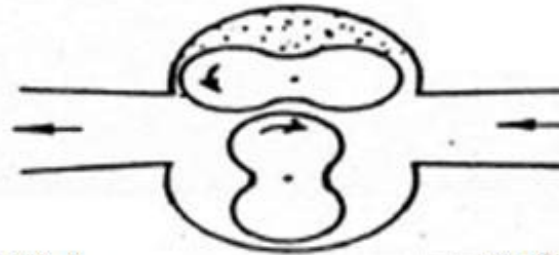


幫浦種類	壓力範圍	抽氣速度率(L/min)	備註
旋轉葉片式幫浦	1 atm-10 ⁻³ Torr	50-3000	最普遍被採用
滑動葉片式幫浦	1 atm-10 ⁻³ Torr	50-3000	為旋片式之倒置機構
旋轉柱塞式幫浦	1 atm-10 ⁻³ Torr	50-24000	適合於大系統粗抽用
水環式真空幫浦	1 atm-20 Torr	100-60000	粗略真空之大型系統

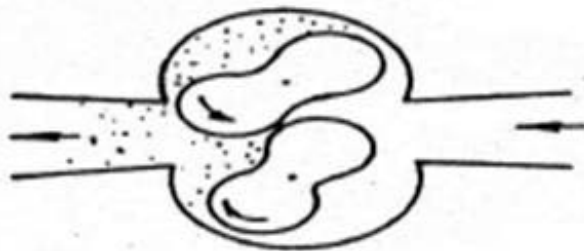
魯式幫浦



a) 進氣口內容積增大。



b) 泵進氣側封閉一部分氣體。



c) 內部氣體受兩轉子壓縮。

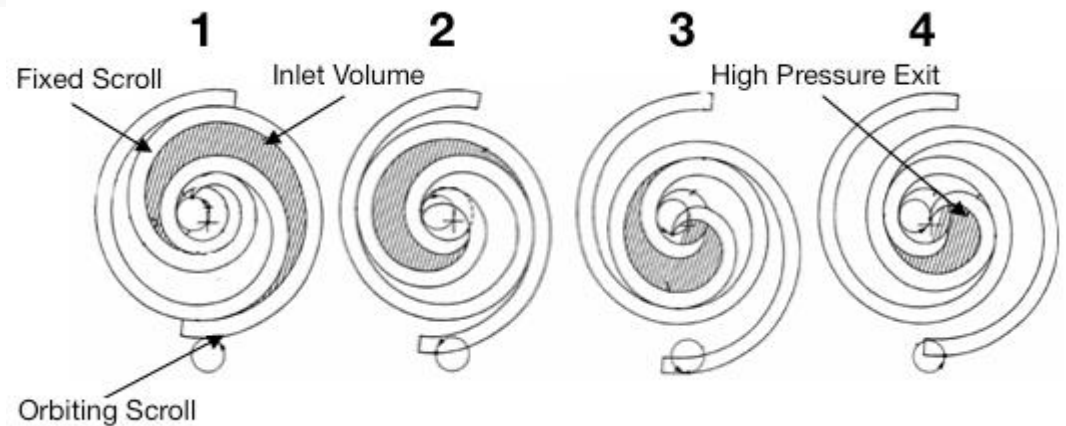
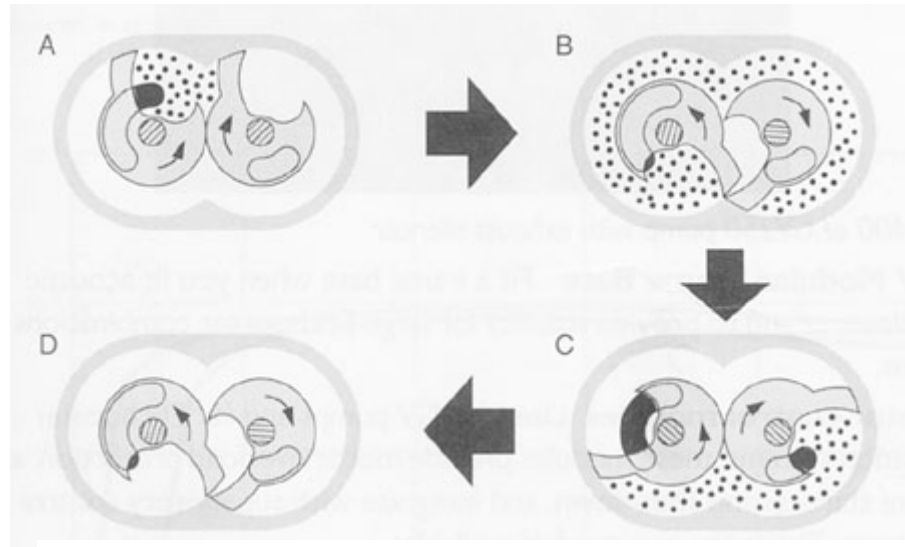


d) 氣體與排氣口相通

乾式真空幫浦



- 多級魯式幫浦
- 爪式幫浦
- 螺旋式幫浦
- 渦卷式幫浦
- 活塞式幫浦



http://sh-vacuum.com.tw/B4-Product-Information/B4-EDWARDS_1.html

<https://www.song-in.com.tw/3-2-9.html>

<http://www.hanbell.com/product-pd.html>

各種乾式真空幫浦壓力性能



幫浦型式	級數	單級壓縮比 (大氣端)	單級壓縮比 (真空端)	終極壓力 (Torr)	備註
魯式	3-6	2-5	30	0.004	易生高熱需冷卻系統
爪式	3-4	25	50	0.004	多級爪式或結合魯式
活塞式	4	15-20	15-20	0.01	潔淨真空固體微粒影響大
渦卷式	1-2	20	200	0.001	間隙小
螺旋式	1-2	20	30-100	0.005	高轉速、間隙小
石墨旋式	2	15-20	10-15	0.0005 (與螺旋式結合)	受固體微粒影響大

動力式幫浦



- Turbomolecular pump

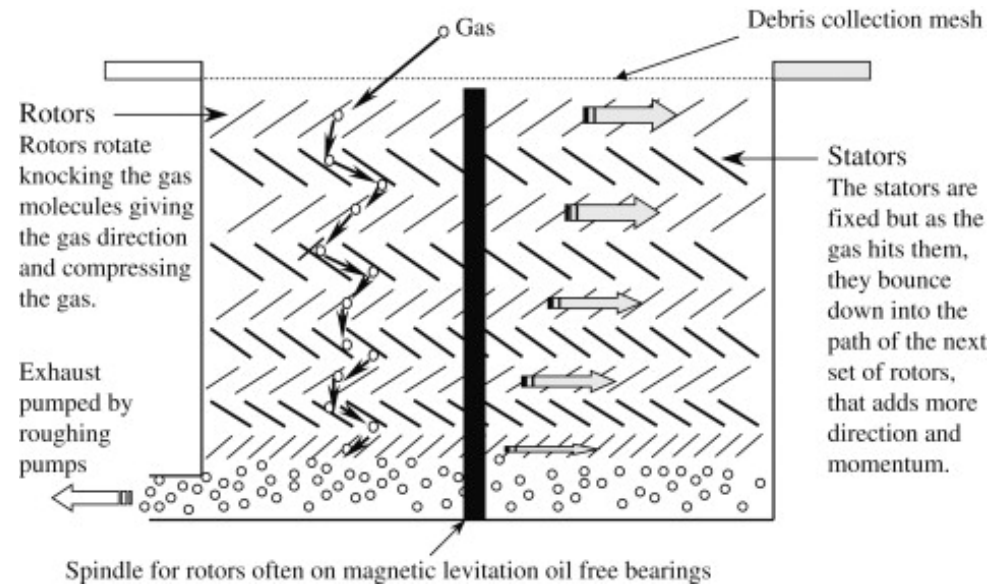


- Diffusion pump



https://en.wikipedia.org/wiki/Turbomolecular_pump
<http://thinfilmscience.com/en-US/Diffusionpumps.aspx>

氣體分子從渦輪葉片處獲得動量，並依循葉片傾斜方向的設計往排氣口移動產生抽氣效果

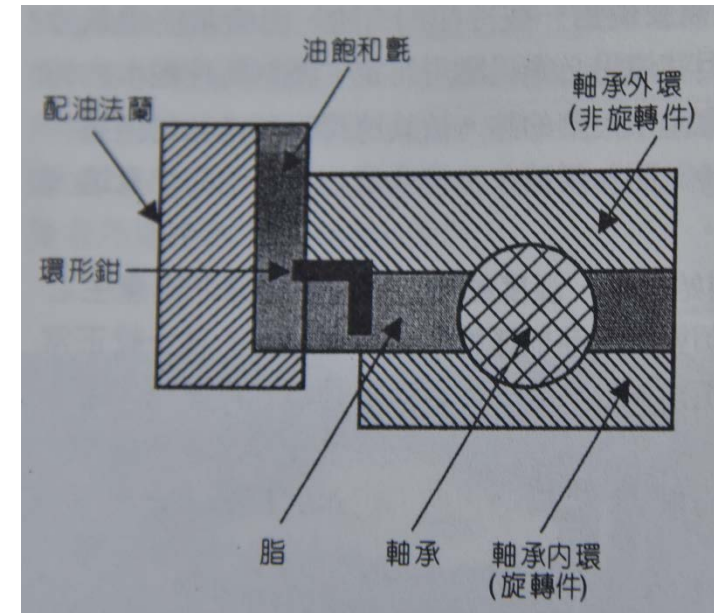
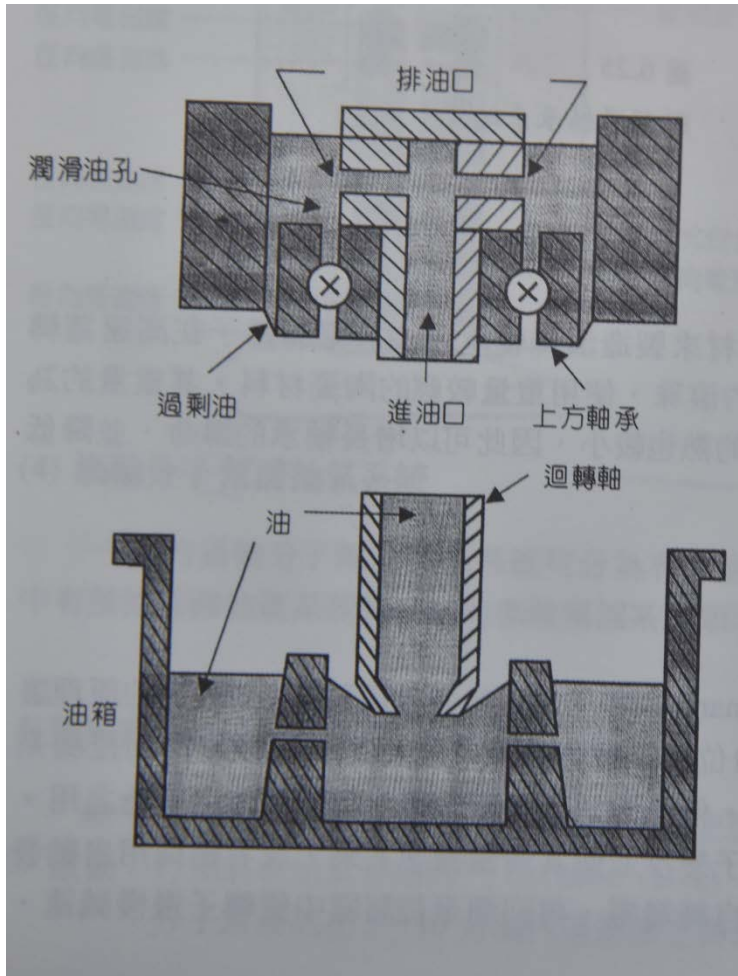


- 單轉子垂直式渦輪分子幫浦優點：
 - 製造容易，成本較低。
 - 被抽氣體可直接進入抽氣轉子，具有較大的抽氣速率。
 - 外型與擴散幫浦較類似，改裝容易，使用者較可以接受。

軸承種類



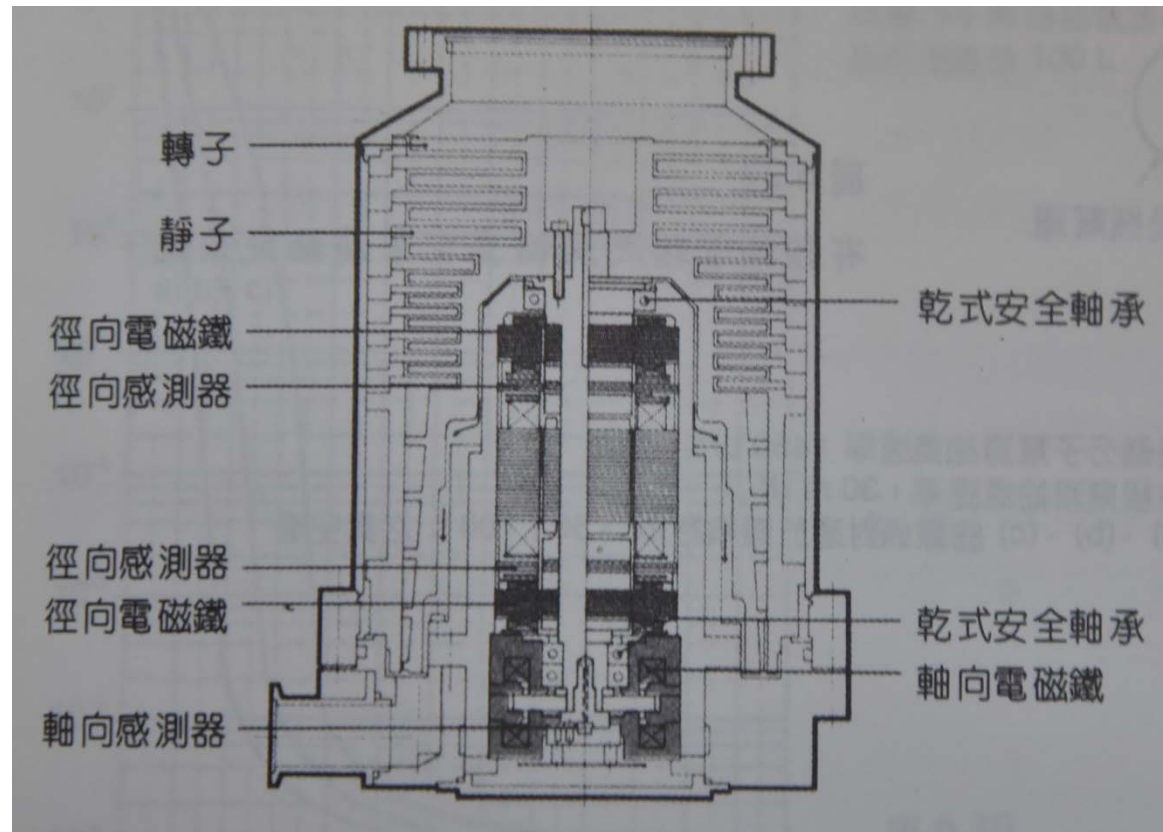
- 油潤滑滾珠軸承
- 脂潤滑軸承
- 陶瓷軸承
- 磁浮軸承



軸承種類



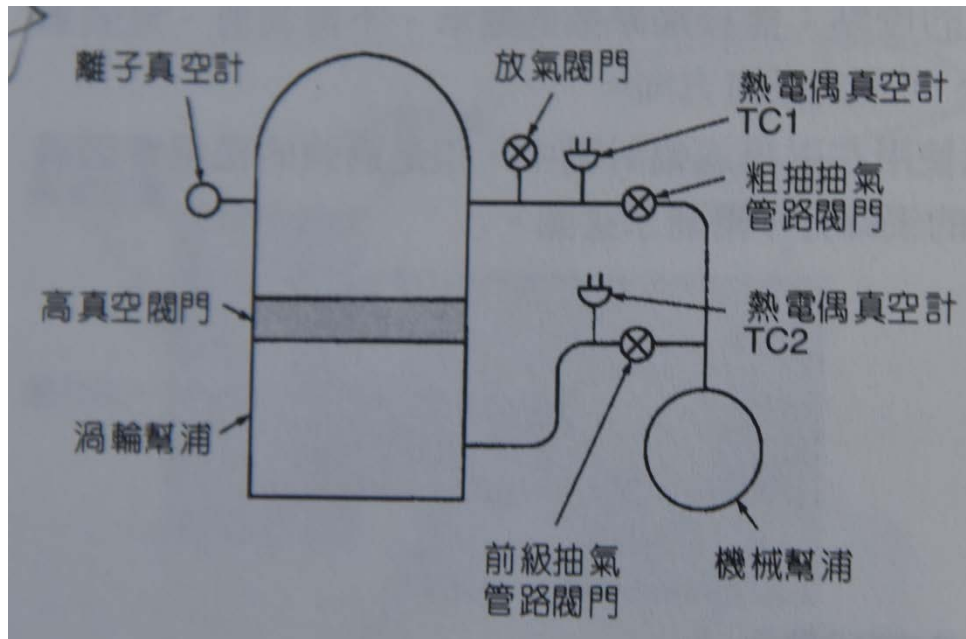
- 油潤滑滾珠軸承
- 脂潤滑軸承
- 陶瓷軸承
- 磁浮軸承



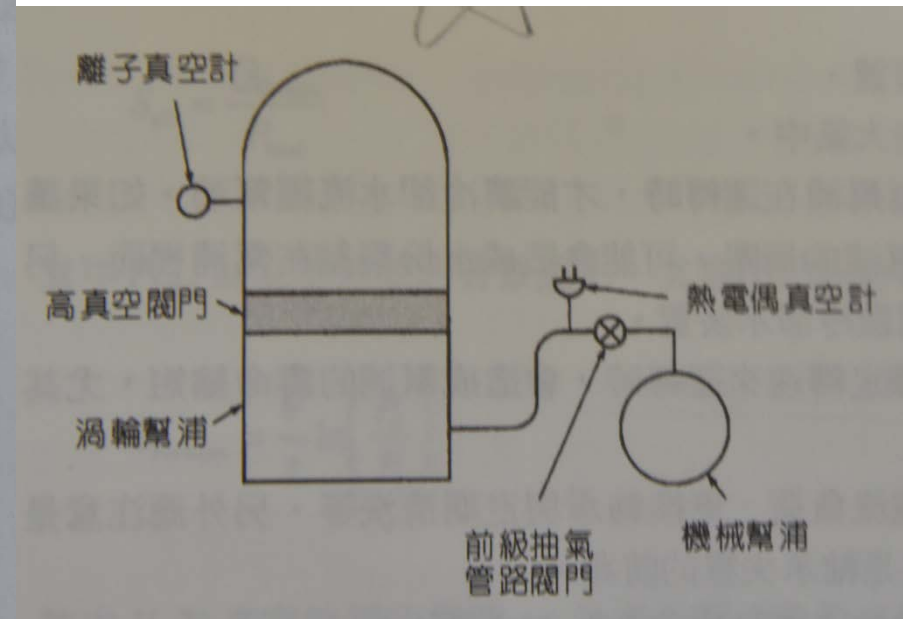
渦輪真空幫浦系統



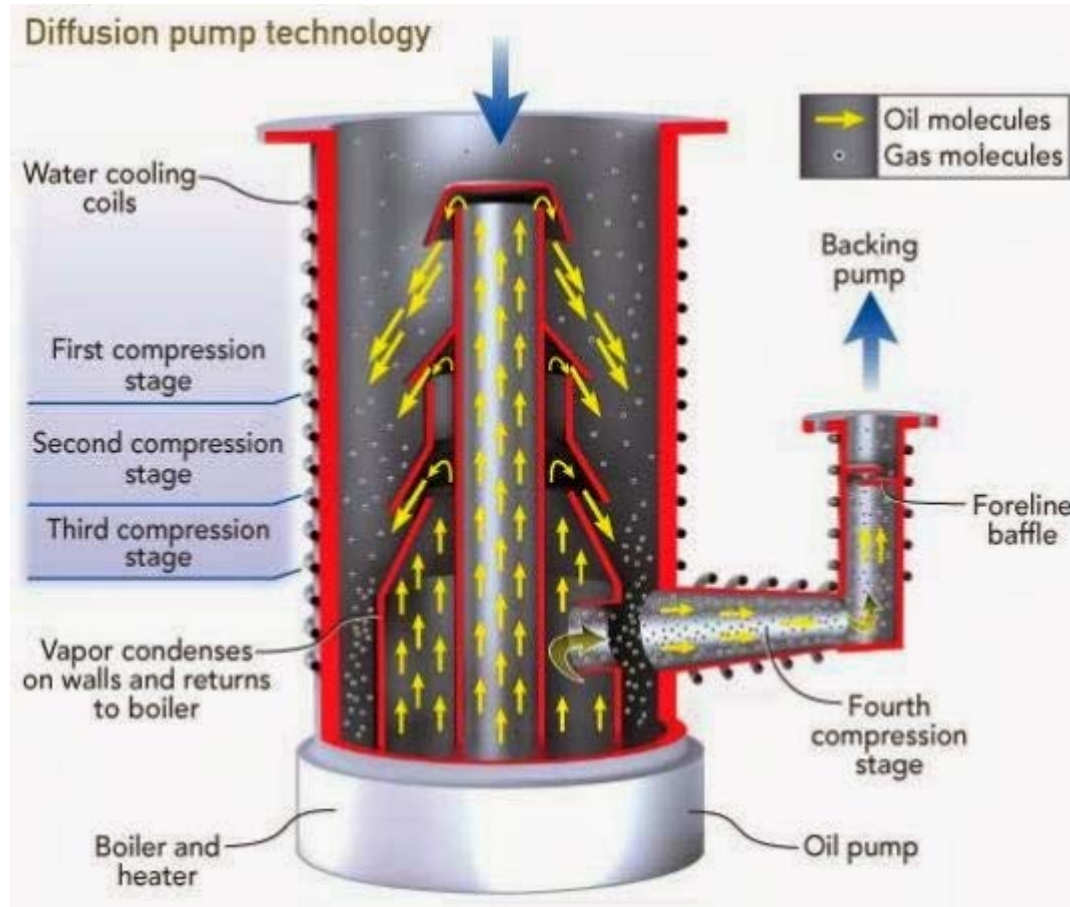
- 有預抽管



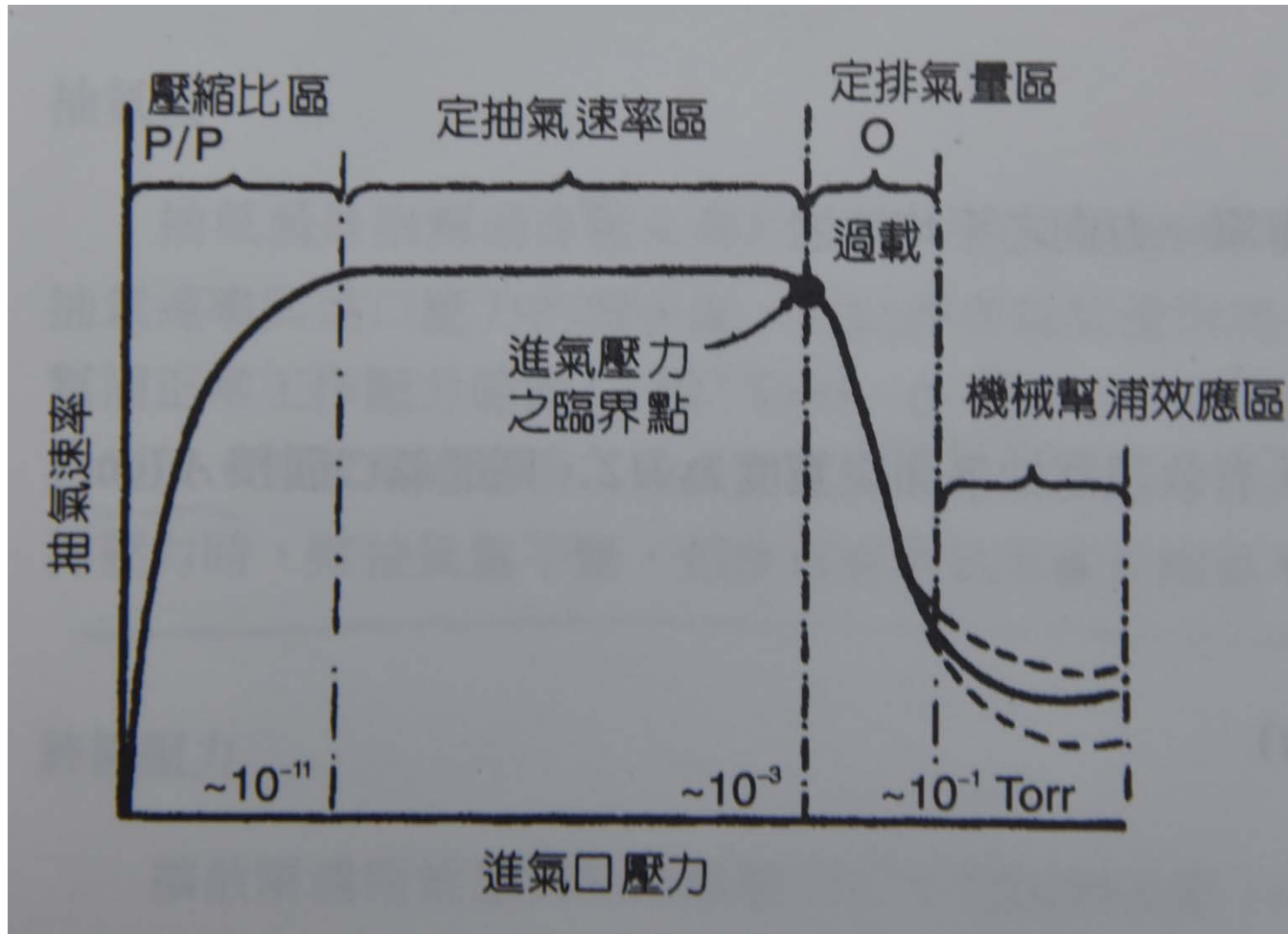
- 無預抽管



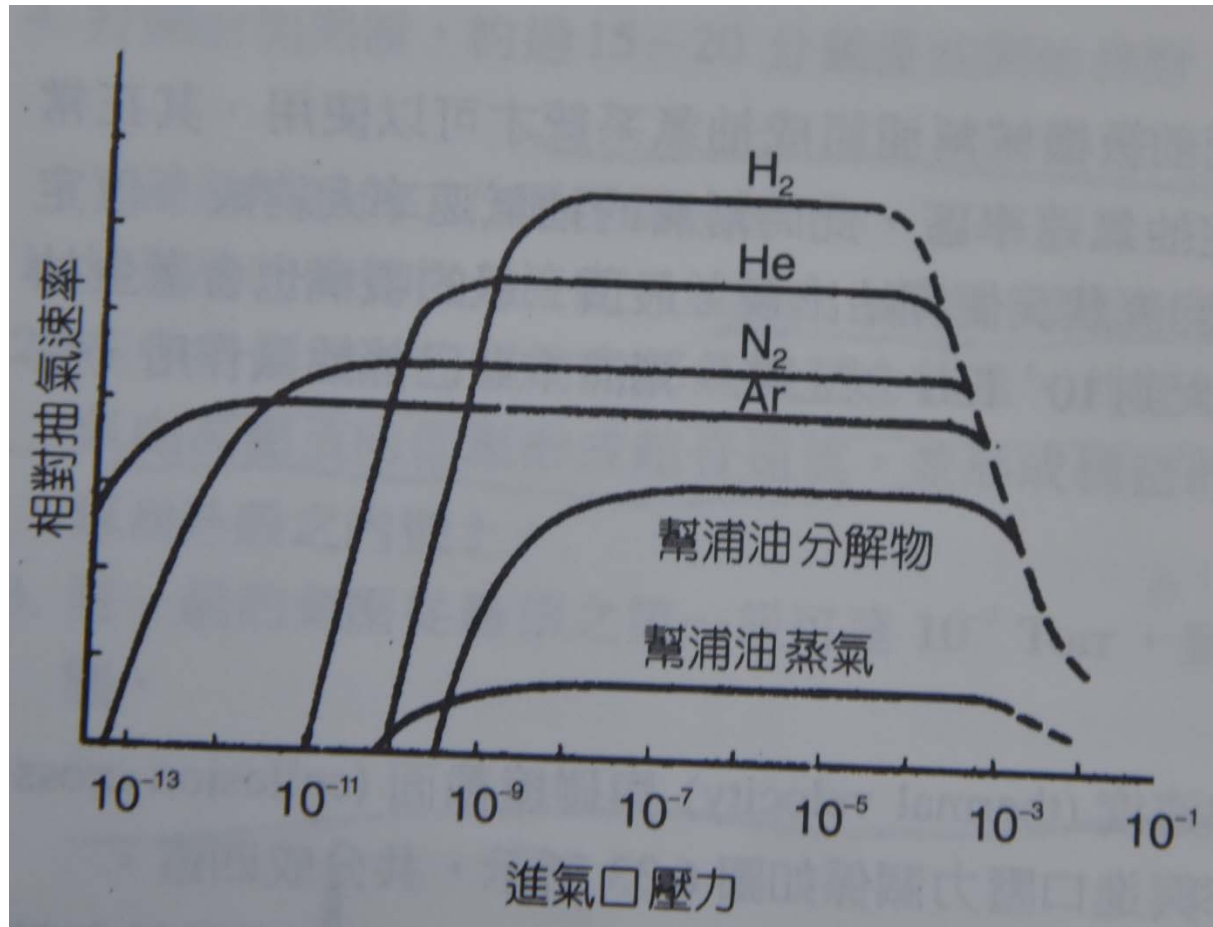
Gas molecular is pumped out by high speed oil vapor in a diffusion pump



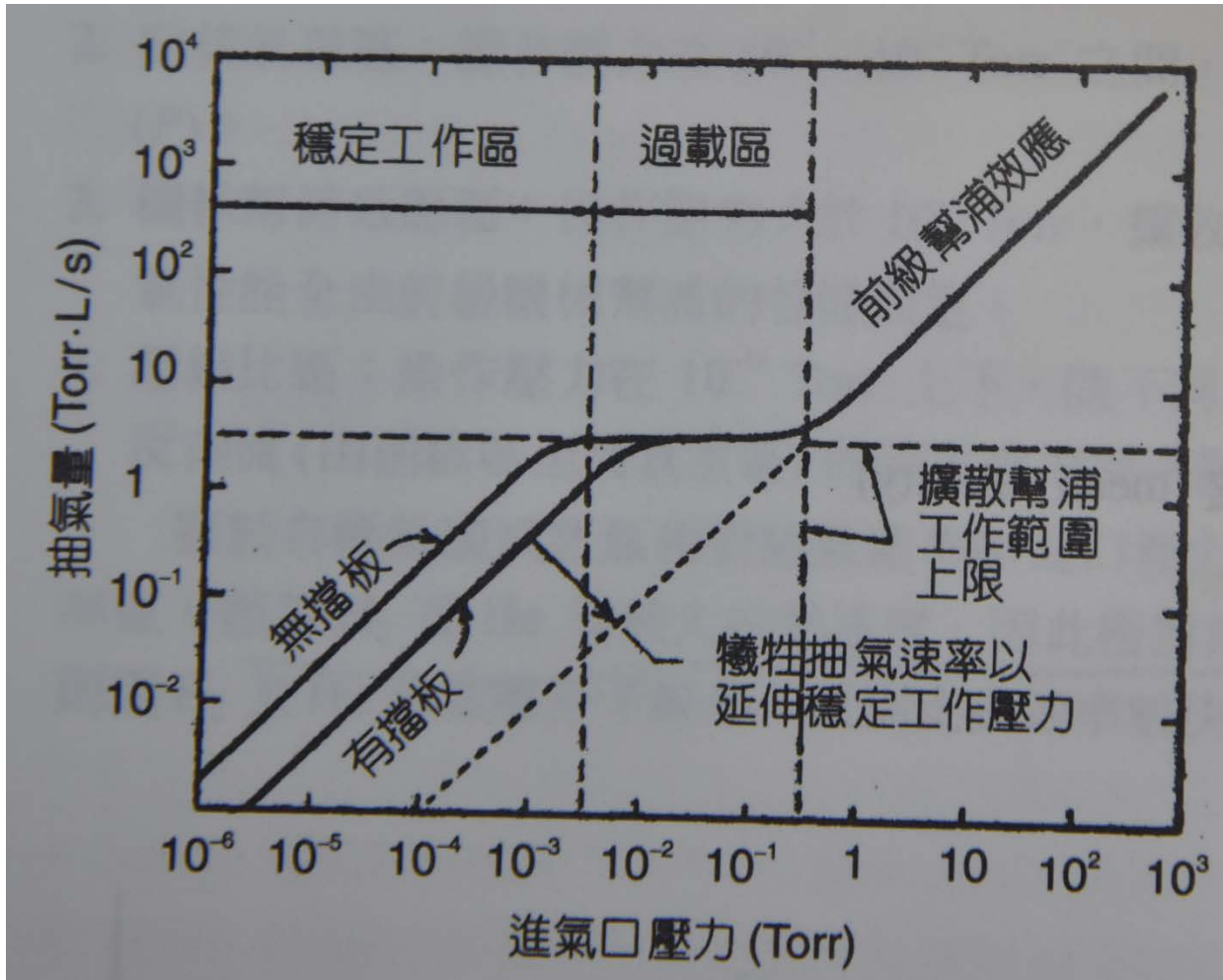
擴散幫浦抽氣特性



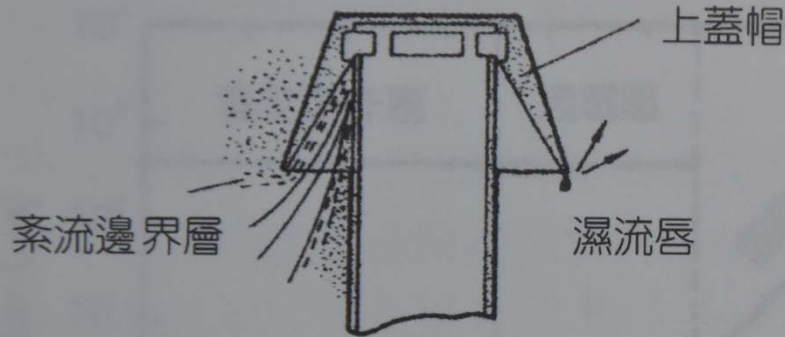
不同氣體或蒸氣相對抽氣速率曲線



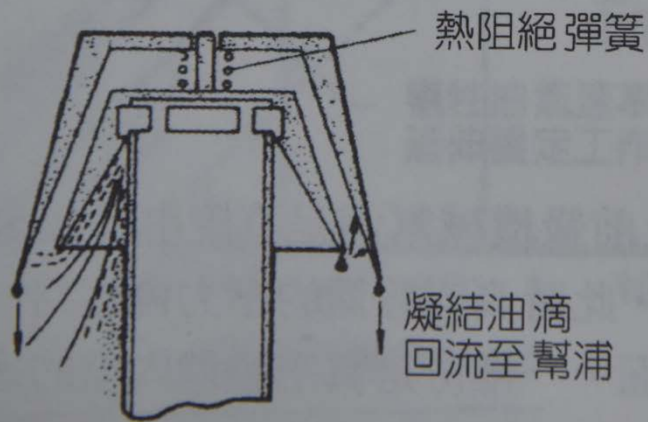
擴散幫浦抽氣速率與進氣口壓力關係



油蒸氣回流原因及解決方法

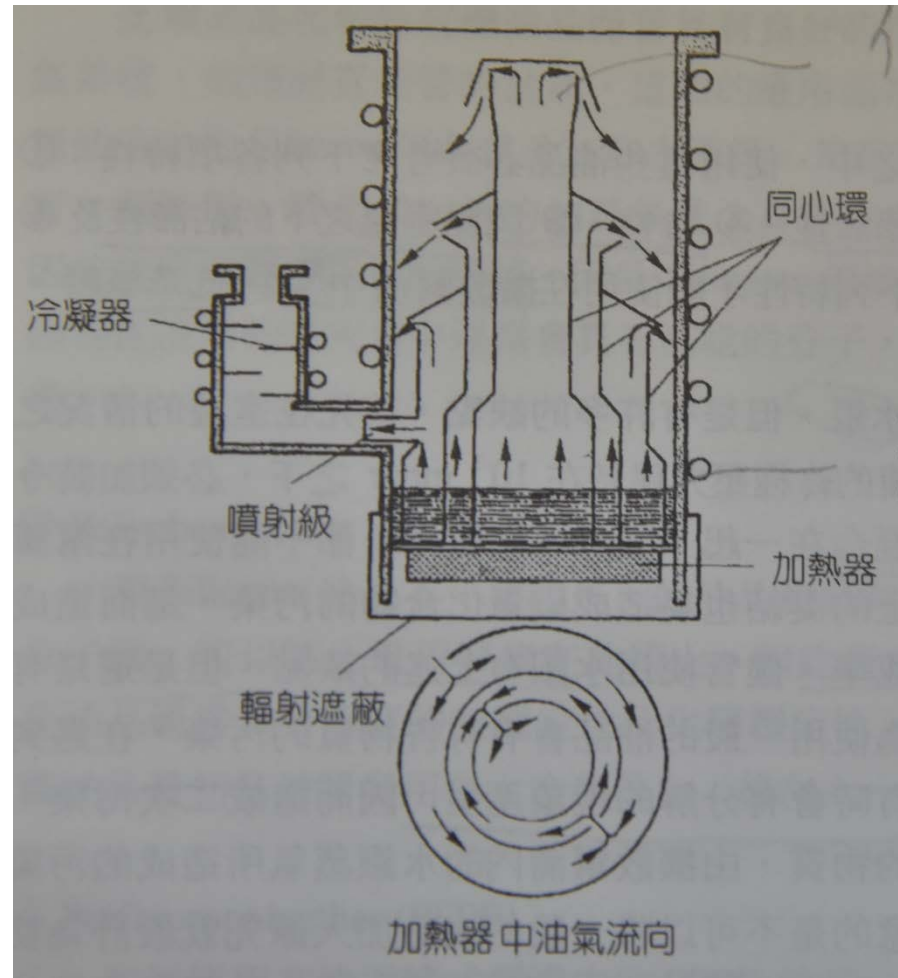


(a) 頂級結構中各種油氣來源



(b) 加裝冷帽後頂級結構中的油氣變化現象

• 液體純化及分餾



擴散幫浦使用油



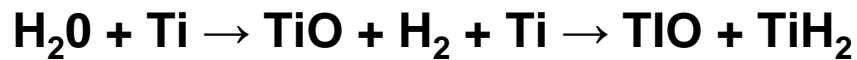
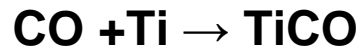
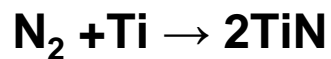
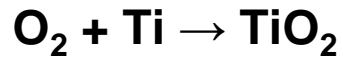
化學型式 商業名	Paraffinic Apiezon A, B, C Convoil Diffelen	Silicones 702 AN 120/130 704(F4), AN140 705(F5), AN175	Polyphenyl ether Santovac 5 Convalex 10	Perfluoropoly ether Fomblin/Krytox
@20°C的終極 真空壓力	$5 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$5 \times 10^{-6} - 10^{-9}$	10^{-9}	2×10^{-8}
在沸點時的 抗氧化性	不佳	極好	非常好	極好
抗化學反應性	不佳	中	高	高
價格	低	中	高	高
主要應用	一般用途， 科學應用	工廠	科學儀器	化學及氧化物 抽氣系統

儲氣式幫浦 - 離子幫浦



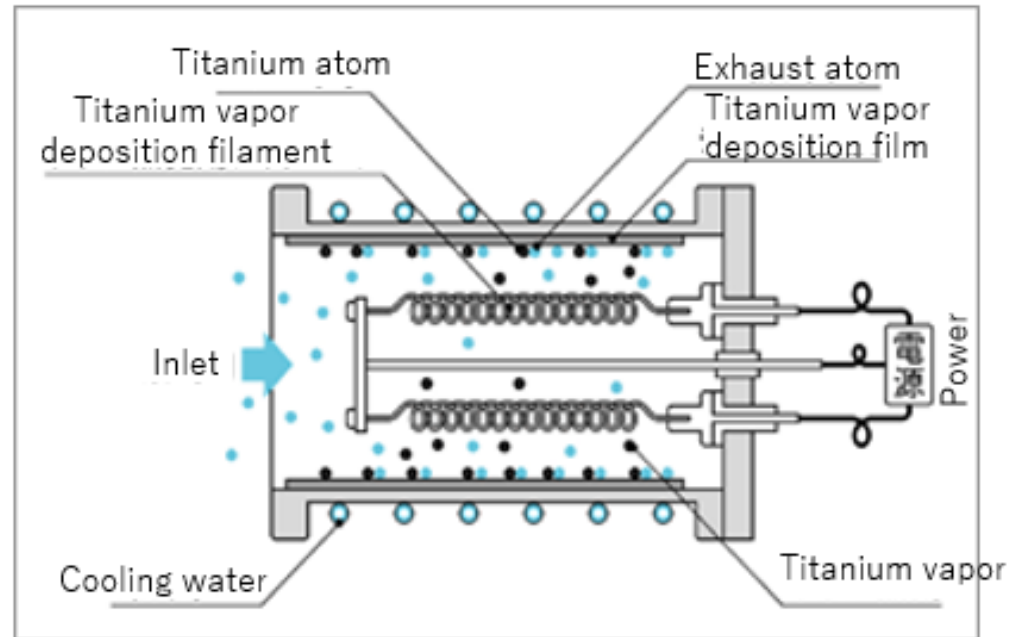
- 離子幫浦

- 化學結拖



- 離子埋入

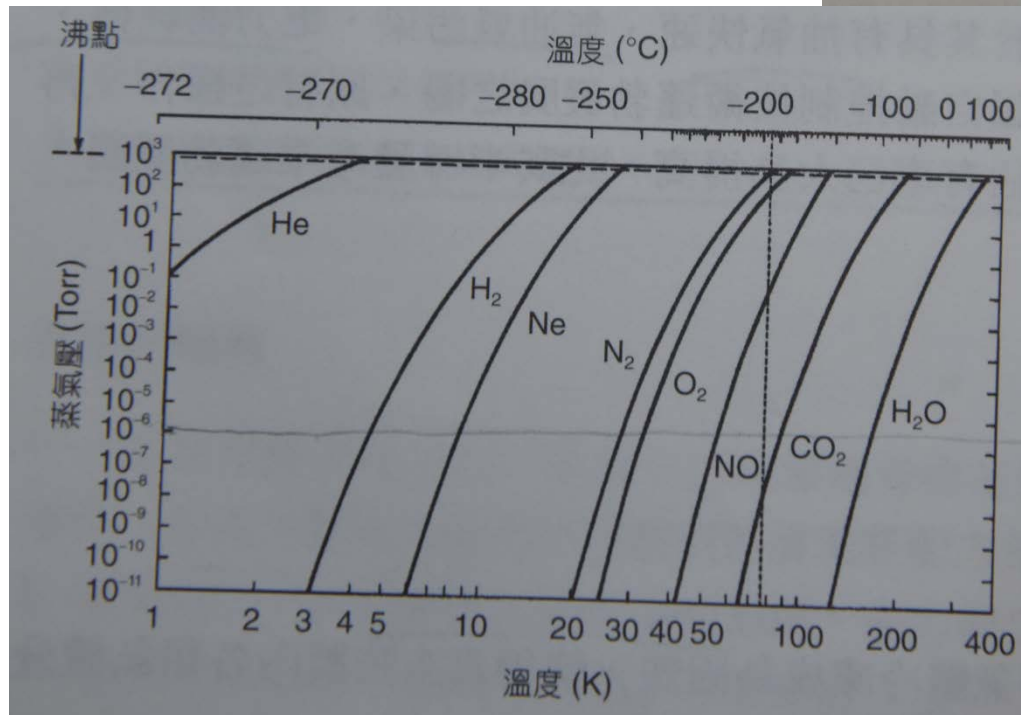
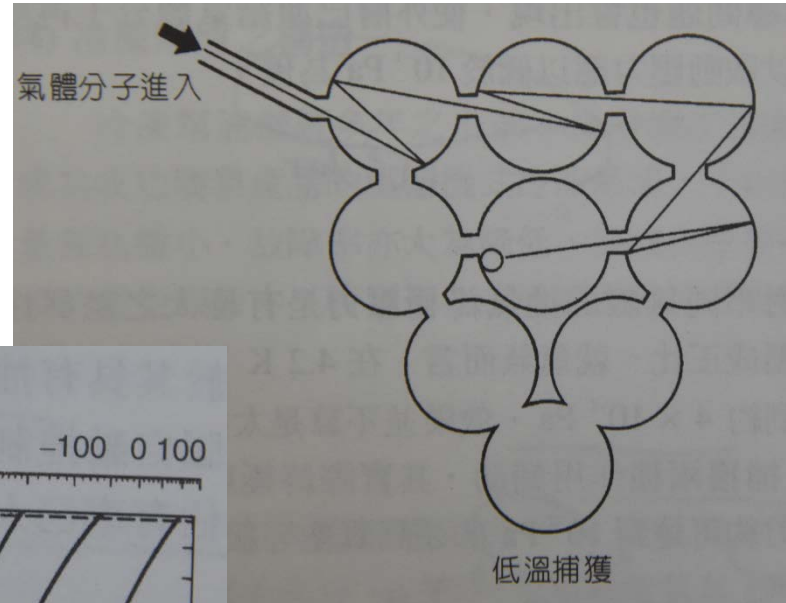
- 還原



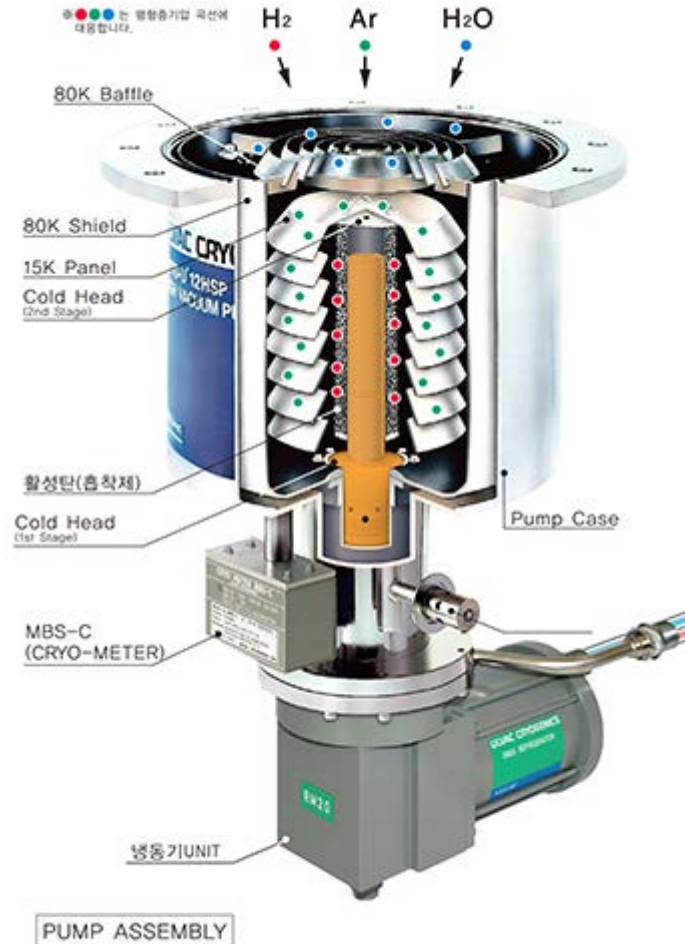
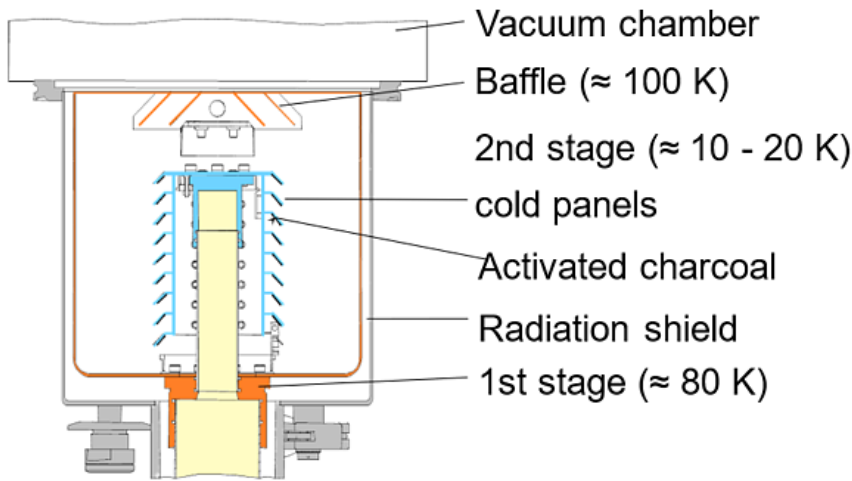
儲氣式幫浦 – 冷凍幫浦



- 低溫冷凝
- 低溫補獲
- 低溫吸附



Inside of a cryopump



各種幫浦真空系統比較



	離子幫浦系統	擴散幫浦系統	渦輪分子幫浦系統	冷陳幫浦系統
抽氣速率	低	高	中	中
終極壓力	$<10^{-9}$ Torr	$10^{-6} - 10^{-9}$ Torr	10^{-9} Torr	10^{-9} Torr
使用難易	簡單	普通	簡單	普通
使用壽命	有限時間	長久	長久	再生後使用
系統潔淨度	好	差	好	好
系統震動	最小	小	差	小
維護難易	容易	容易	難	難
裝置成本	高	低	高	高
運轉成本	低	高	中	中

典型真空計之量測範圍

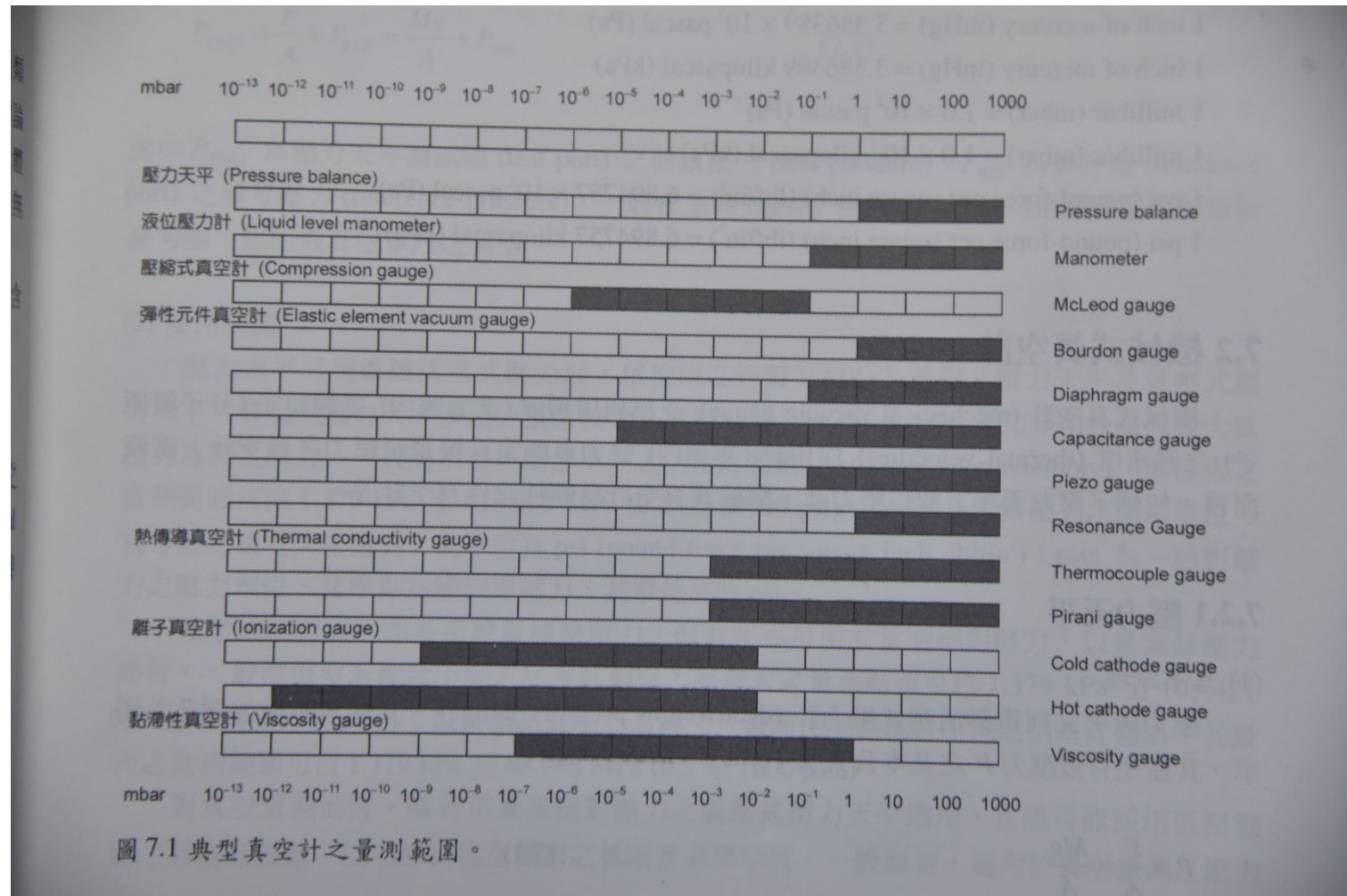
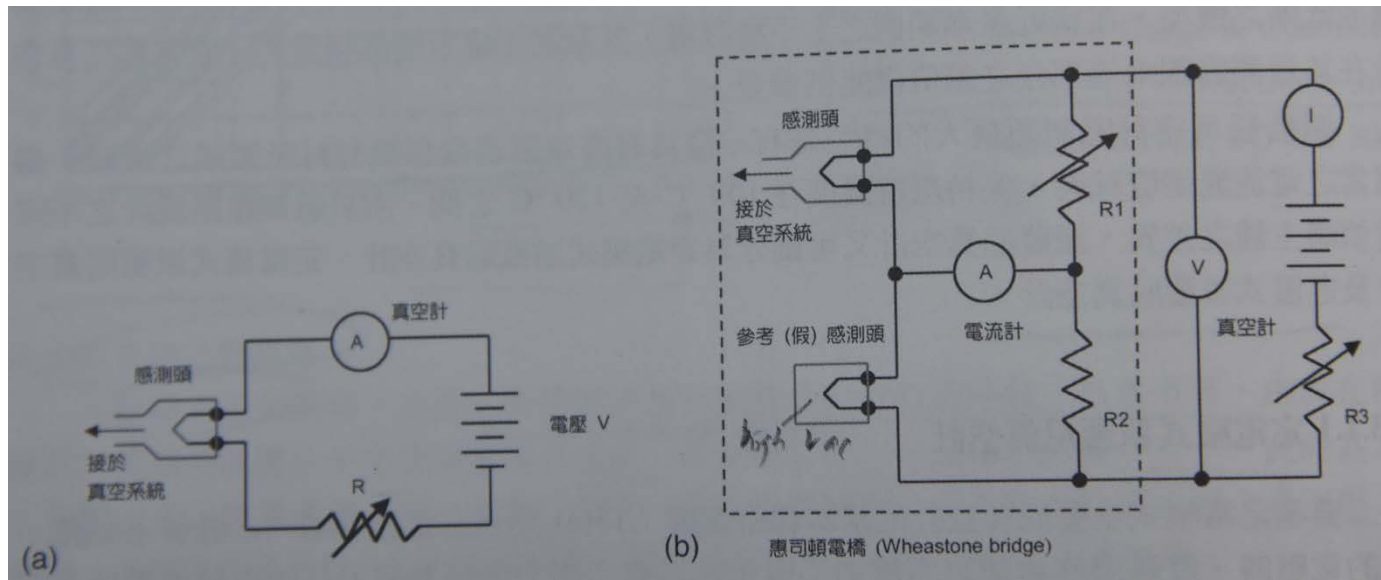


圖 7.1 典型真空計之量測範圍。

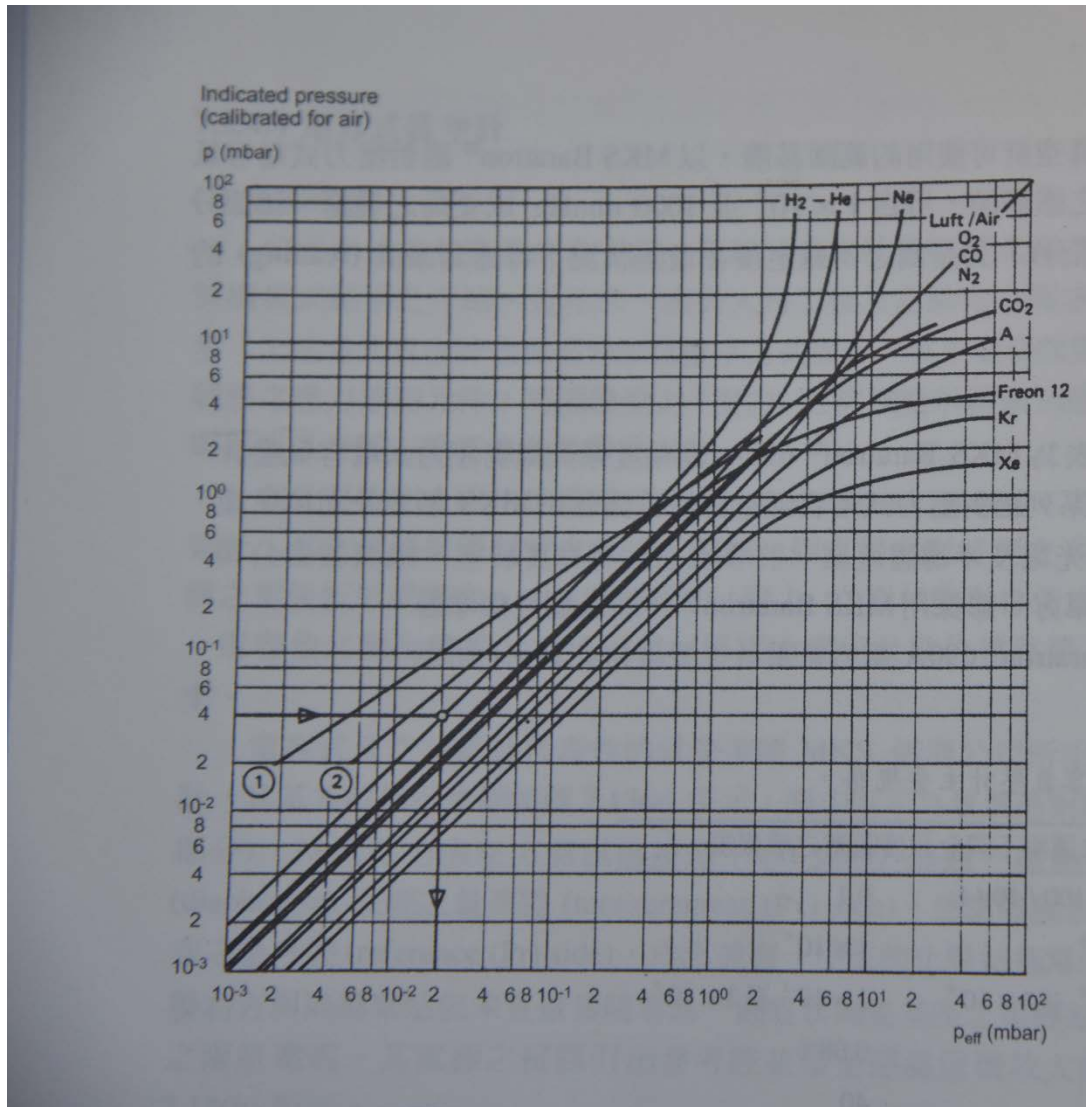
熱傳導真空計 – 派藍尼真空計(Pirani gauge)



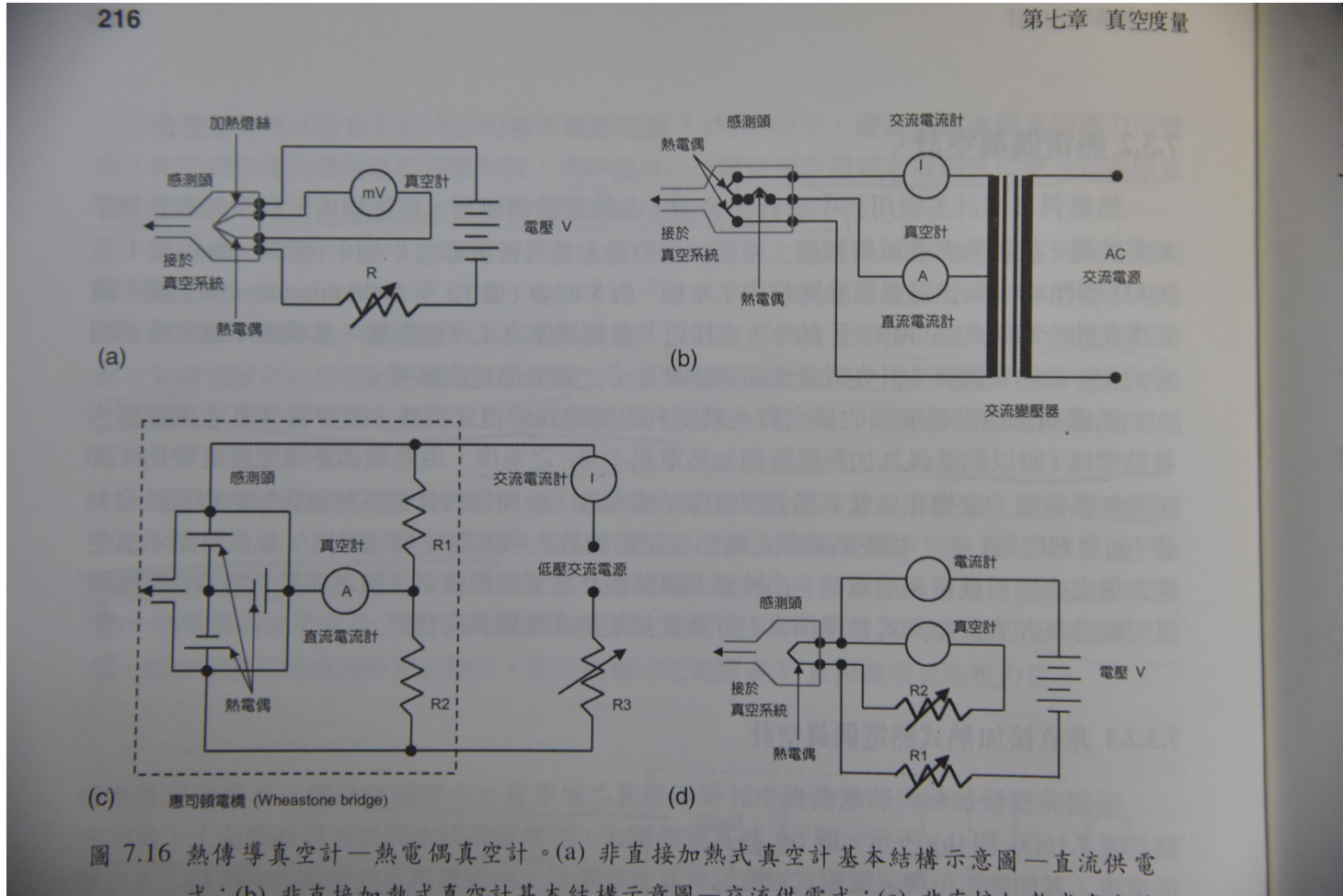
- 粗級真空：質體熱對流，與真空壓力無關 → 量測上限
- 中真空：氣體熱傳導 → 可量測範圍。燈絲溫度因熱傳導降溫，導致電阻改變。
- 高真空：熱輻射，與真空壓力無關 → 量測下限
- 方式：定電壓式、定電流式、定溫式



不同氣體之派藍尼真空計修正系數



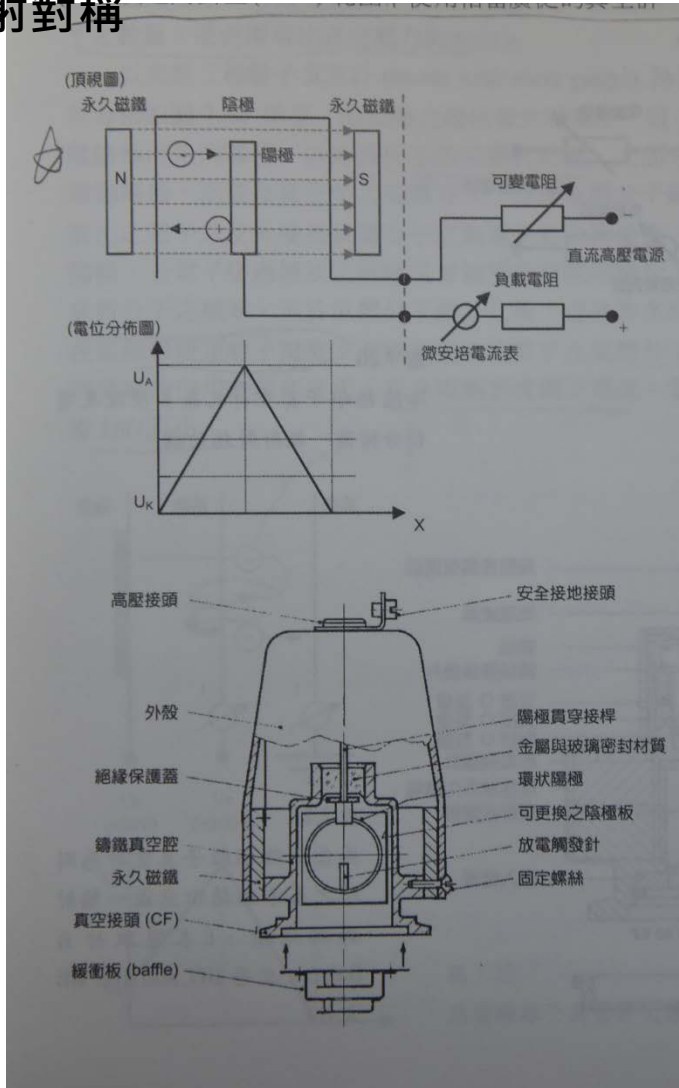
熱傳導真空計 – 熱電偶真空計(Thermocouple gauge)



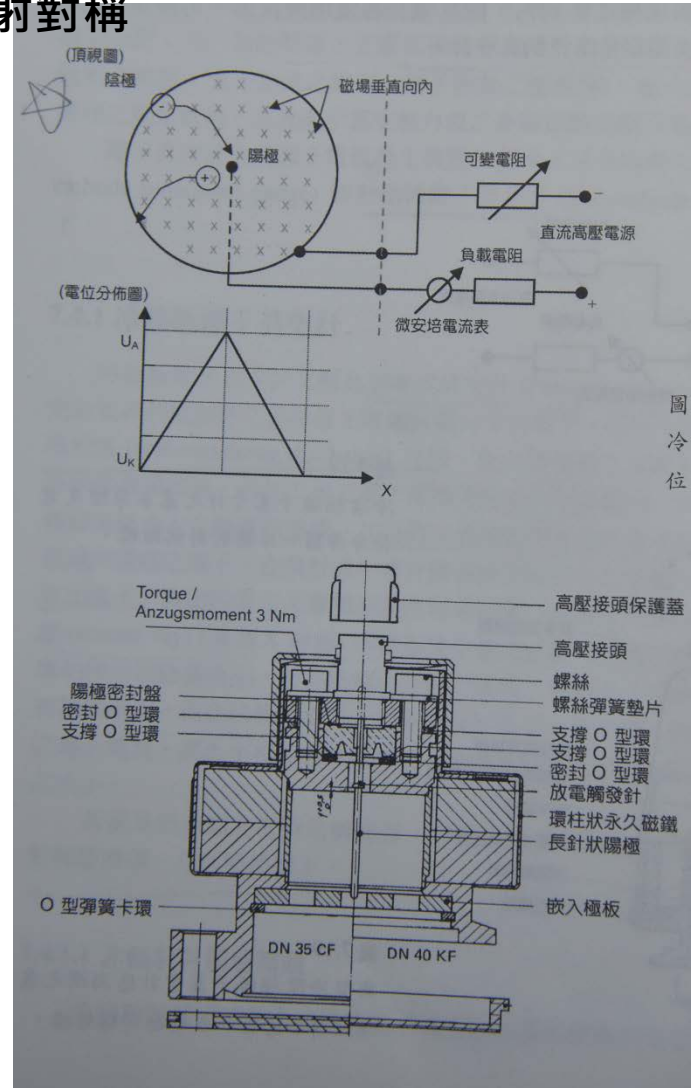
離子真空計 – 冷陰極離子真空計



● 非輻射對稱



● 輻射對稱



不同氣體之冷陰極離子真空計修正系數

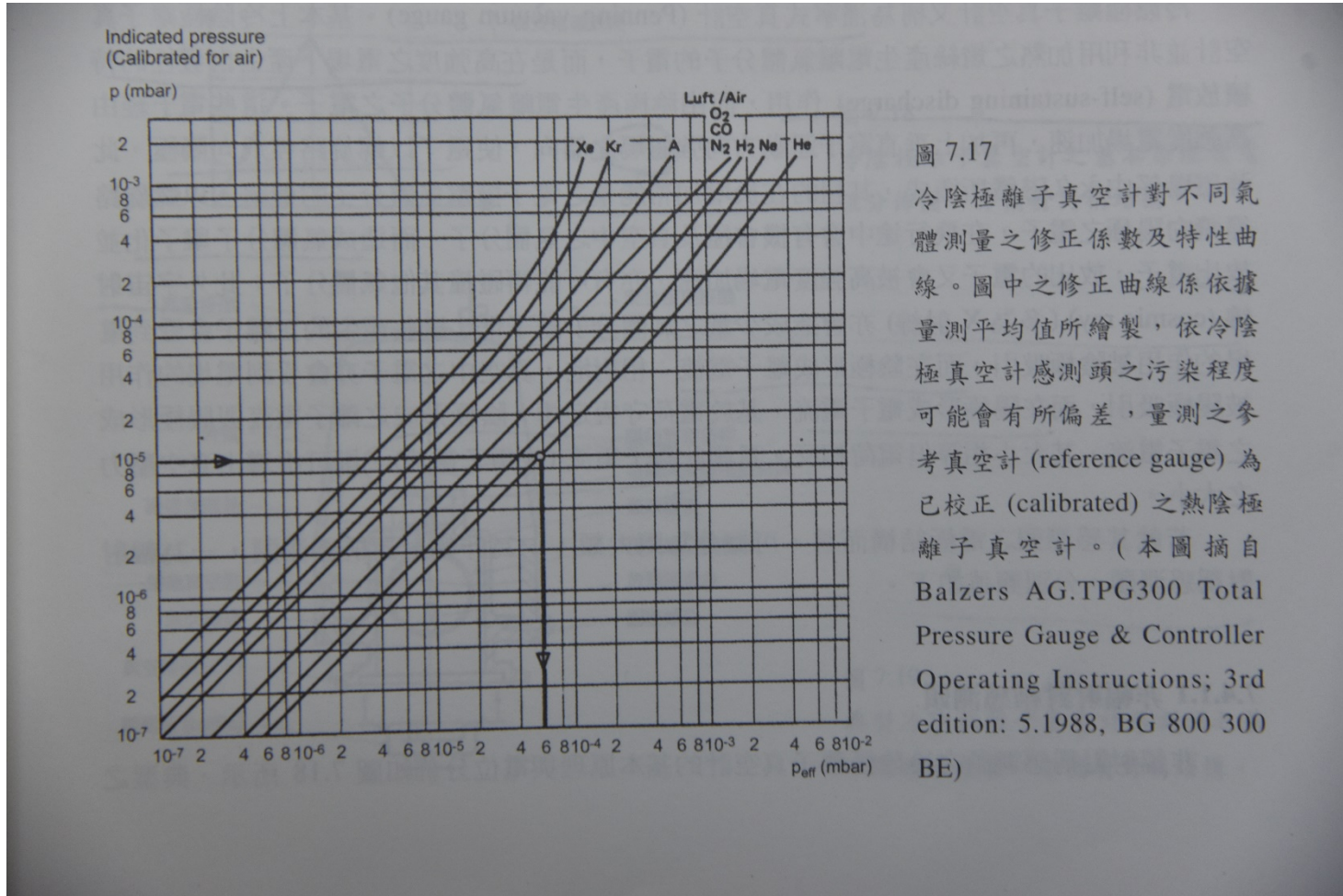


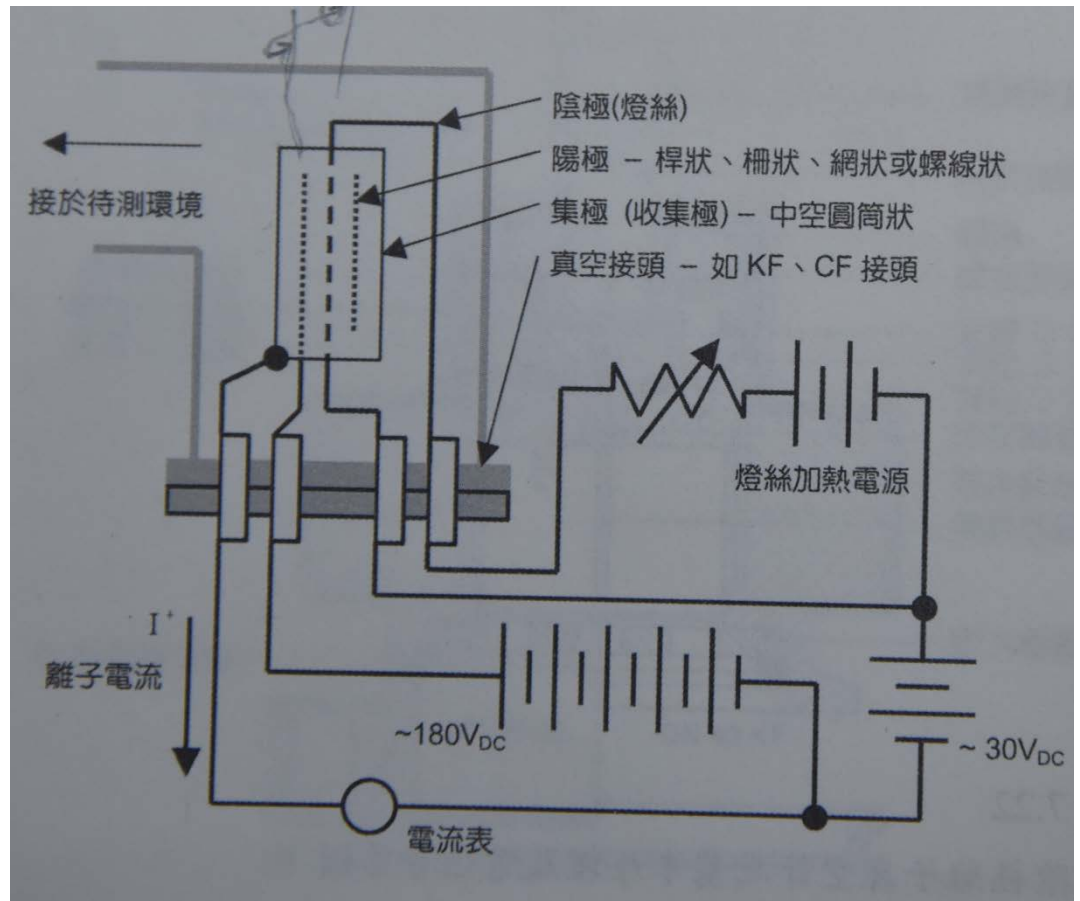
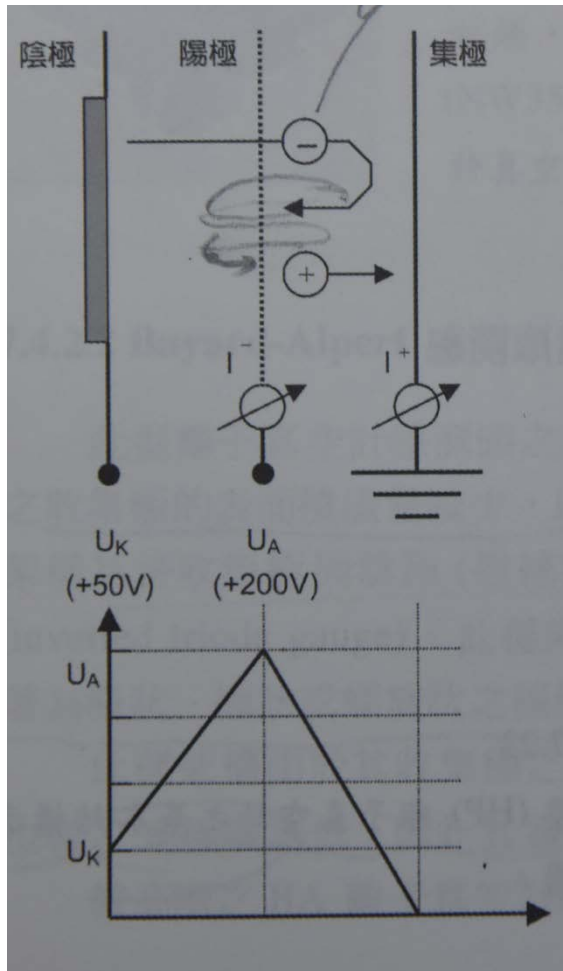
圖 7.17

冷陰極離子真空計對不同氣體測量之修正係數及特性曲線。圖中之修正曲線係依據量測平均值所繪製，依冷陰極真空計感測頭之污染程度可能會有所偏差，量測之參考真空計 (reference gauge) 為已校正 (calibrated) 之熱陰極離子真空計。(本圖摘自 Balzers AG.TPG300 Total Pressure Gauge & Controller Operating Instructions; 3rd edition: 5.1988, BG 800 300 BE)

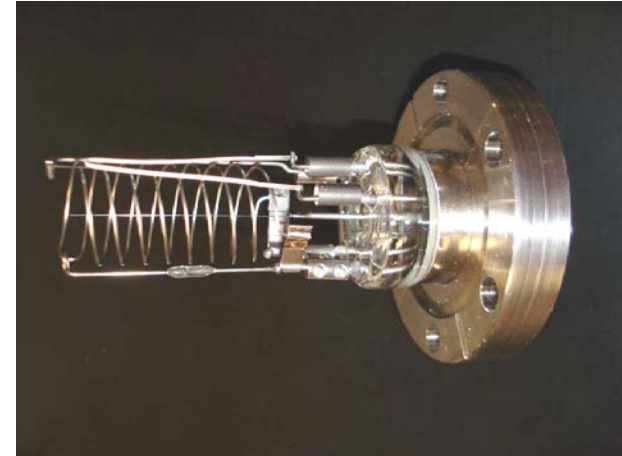
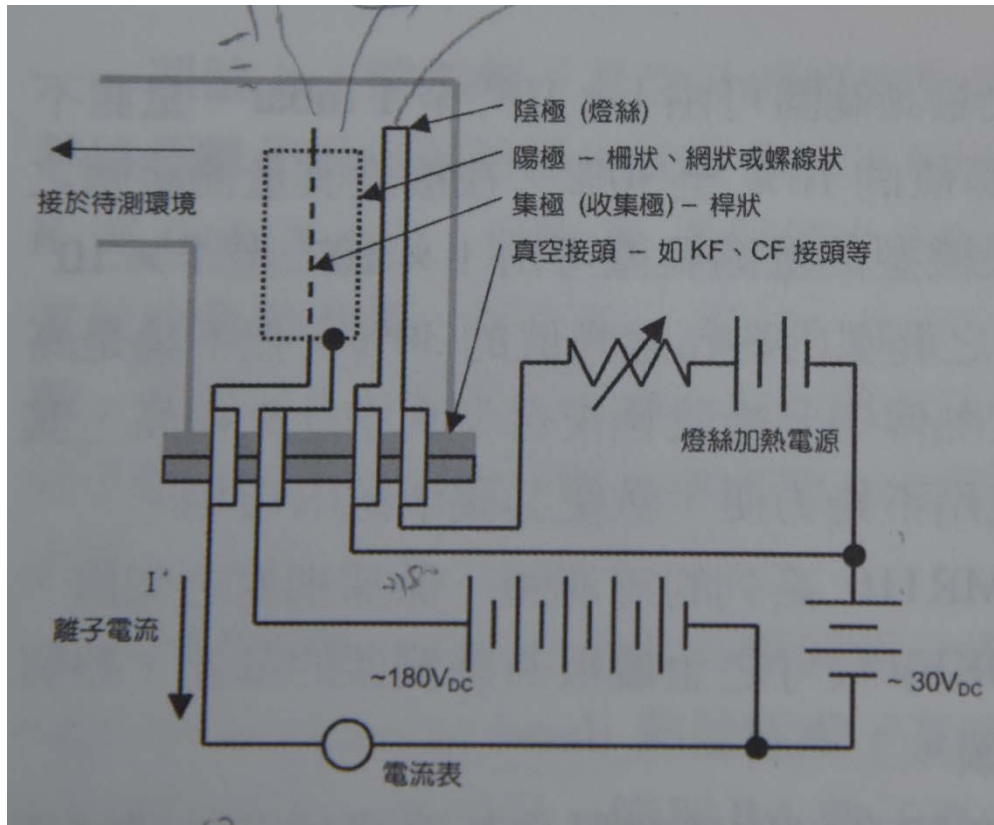
離子真空計 – 熱陰極離子真空計



- 高壓熱陰極離子真空計



離子真空計 – Bayard-Alpert熱陰極離子真空計



<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%86%B1%E7%B5%B2%E6%A5%B5%E9%9B%A2%E5%AD%90%E7%9C%9F%E7%A9%BA%E8%A8%88>

<https://www.idealvac.com/Iridium--Filament-Glass-Ion-Gauge-Tube/pp/P102037>

真空系統結構元件要求



- 機械強度能承受壓差所產生的外力。
- 氣密佳，不應是多乙結構，不能有裂縫、小孔等成為洩漏通道的缺陷。
- 低逸氣率與低滲透率。
- 在工作溫度及烘烤溫度下的蒸氣要低。
- 化學隱定性佳，不易氧化、耐腐蝕。
- 在一定溫度範圍內保持其真空性能及機械強度。
- 加工容易、銲接性佳。
- **Ex**：不銹鋼、無氧高導銅、碳鋼、鋁
- **Not good**：鋅、鉛、鎘、銓、鋰、鉀、硒、硫、...
- 氫氣滲透率：鋁<鉬<銅<鉑<鐵<鎳<鈮

常見橡膠與塑膠真空材料逸氣率



材料種類		q_1 (10^{-5} W/cm ²)	α_1	q_{10} (10^{-5} W/cm ²)	α_{10}
橡膠	Butyl DR 41	200	0.68	53	0.64
	Neoprene	4000	0.4	2400	0.4
	Perbunan	467	0.3	293	0.5
	Silicone	930	—	267	—
	Viton A (fresh)	152	0.8	—	—
	Viton A (bake 12h at 200 °C)	—	—	0.27	—
	Polyimide (bake 12h at 300 °C)	—	—	0.005	—
塑膠	Araldite (molded)	155	0.8	47	0.8
	Araldite D	253	0.3	167	0.5
	Araldite F	200	0.5	97	0.5
	Kel-F	5	0.57	2.3	0.53
	Methyl Methacrylate	560	0.9	187	0.57
	Mylar (24h at 95% RH)	307	0.75	53	—
	Nylon	1600	0.5	800	0.5
	Plexiglas	961	0.44	36	0.44
	Plexiglas	413	0.4	240	0.4
	Polyester-glass Laminate	333	0.84	107	0.81
	Polystyrene	2667	1.6	267	1.6
	PTFE	40	0.45	26	0.56
	PVC (24h at 95% RH)	113	1.0	2.4	—
	Teflon	8.7	0.5	3.3	0.2

常見高分子真空材料之氣體滲透率



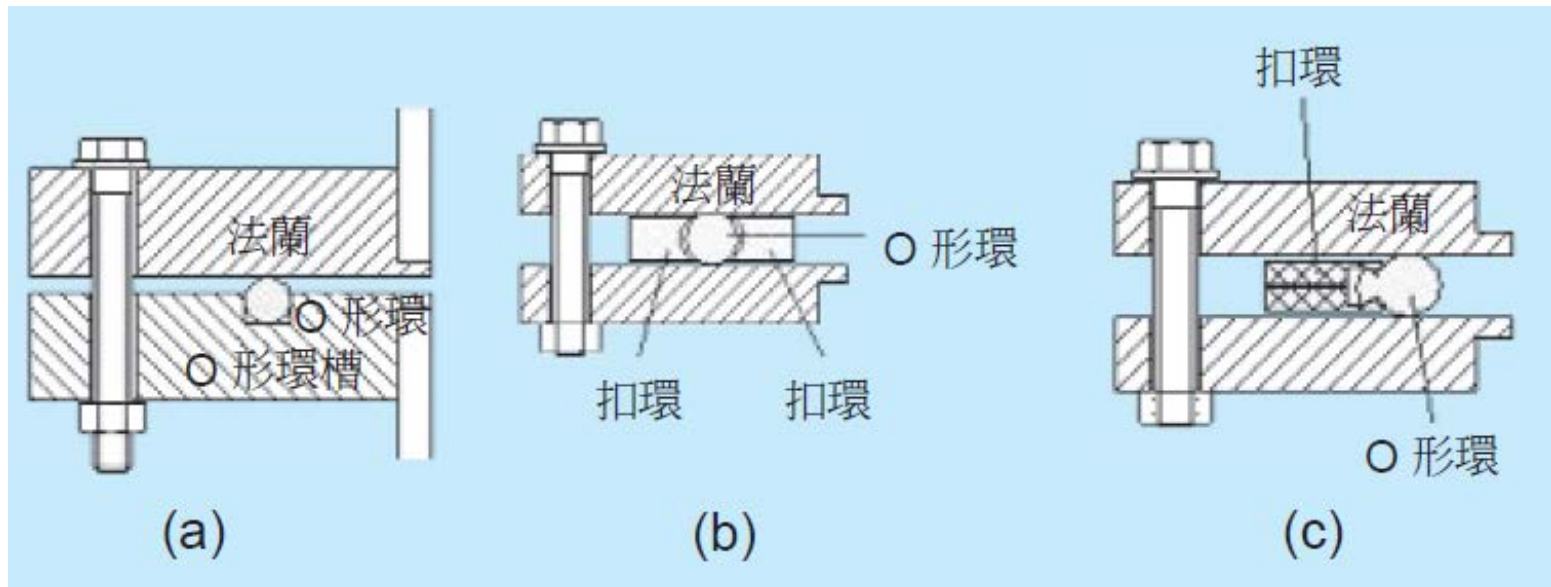
材料種類	滲透率 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)					
	N ₂	O ₂	H ₂	He	H ₂ O	CO ₂
PTFE	2.5	8.2	20	570	—	—
Perspex	—	—	2.7	5.7	—	—
Nylon 31	—	—	0.13	0.3	—	—
Neoprene CS2368B	0.21	1.5	8.2	7.9	—	—
Viton A	0.05	1.1	2.2	8.9	—	5.9
Kapton	0.03	0.1	1.1	1.9	—	0.2
Buna-S	4.8	—	—	—	—	940.0
Perbunan	0.8	—	—	—	—	23.0
Delrin	—	48.0	—	—	17.0	93.0
Kel-F	0.99	0.46	—	—	0.22	—

橡膠材料極限真空試驗結果



材料	極限真空度 (Torr)	極限真空度 (Torr)
	法蘭溫度 6°C 時	法蘭溫度 25°C 時
天然橡膠	4.5×10^{-9}	1.2×10^{-9}
丁基橡膠	1.0×10^{-9}	1.75×10^{-10}
氯丁橡膠	2.1×10^{-9}	2.1×10^{-10}
硝酸基橡膠	3.8×10^{-9}	4.8×10^{-10}
矽膠 (紅)	2.2×10^{-9}	—
矽膠 (紅)	3.2×10^{-9}	—
維通 (綠)	1.3×10^{-9}	5.6×10^{-10}
聚四氟乙烯	4.2×10^{-9}	1.0×10^{-9}

可拆卸真空封合 – O-ring



O-ring groove design



特徵尺寸					
A	$1.15d$	$1.4d$	$1.4d$	$0.9d - 0.95d$	d
B	$0.72d$	$0.7d$	$0.7d$	$0.75d - 0.8d$	$1.15d - 1.3d$
R	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu\text{m}$	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu\text{m}$	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu\text{m}$	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu\text{m}$	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu\text{m}$

More clamp

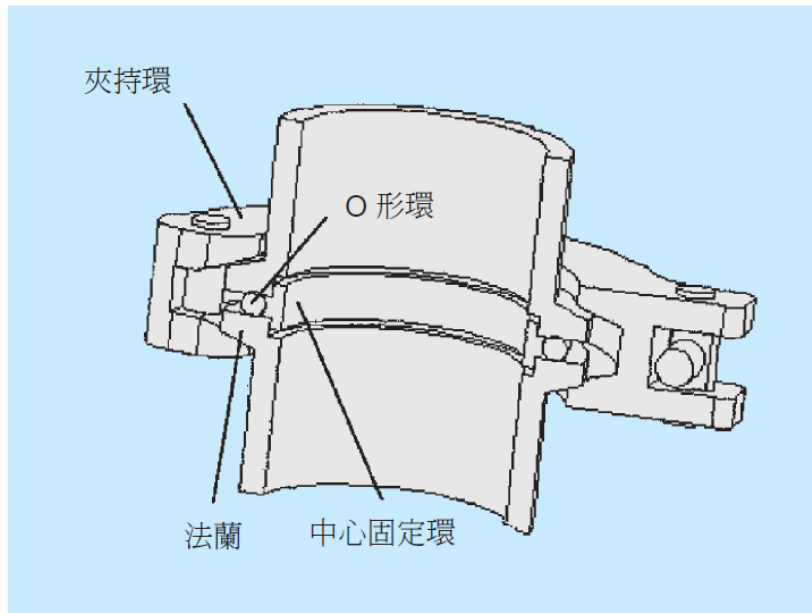


圖 3. KF 法蘭封合結構示意圖。

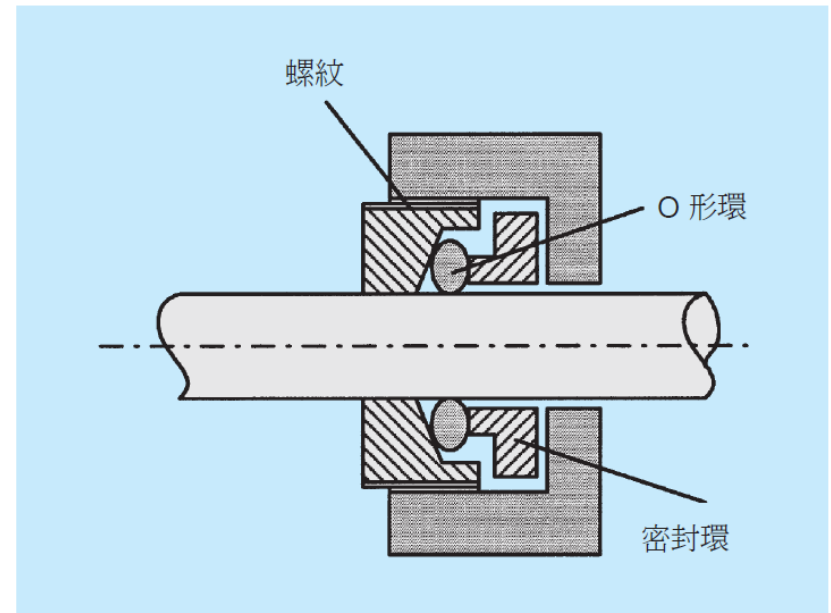
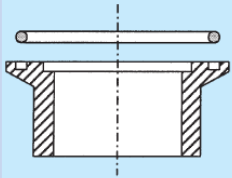
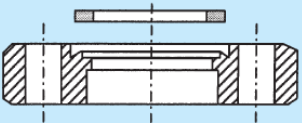
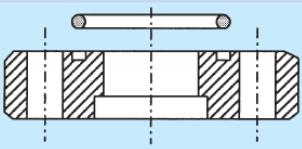


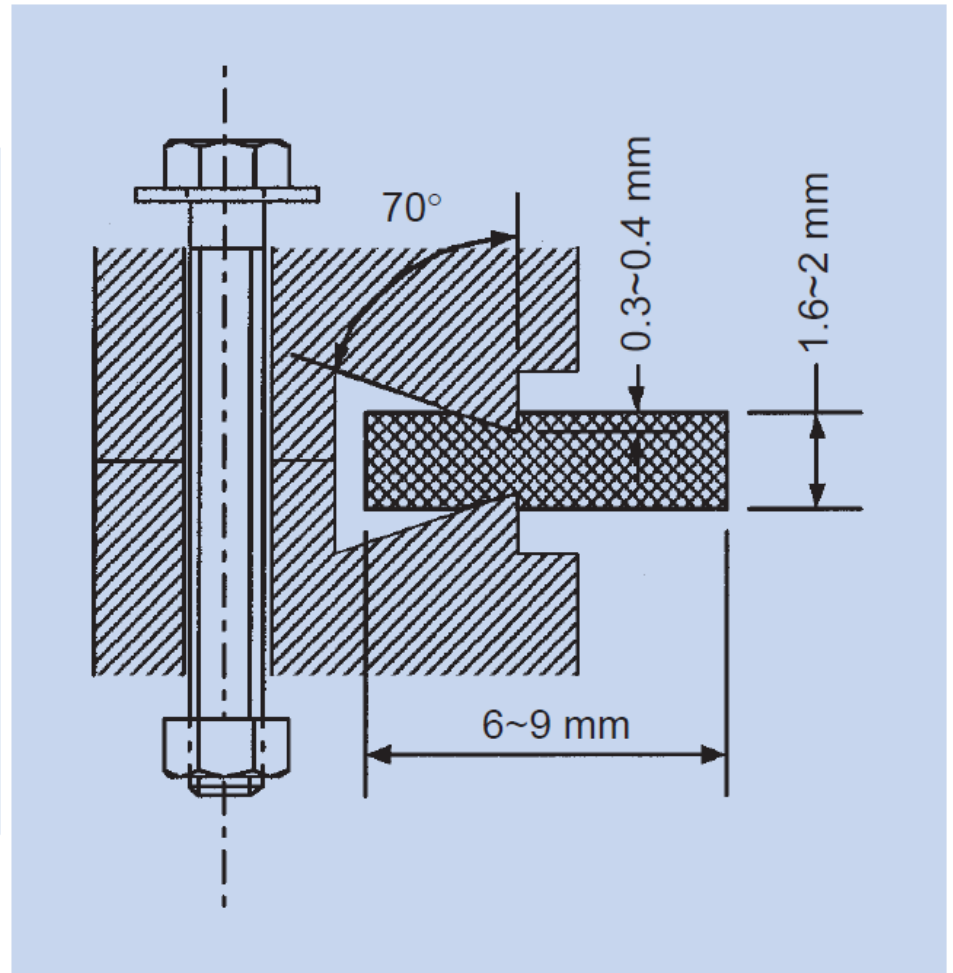
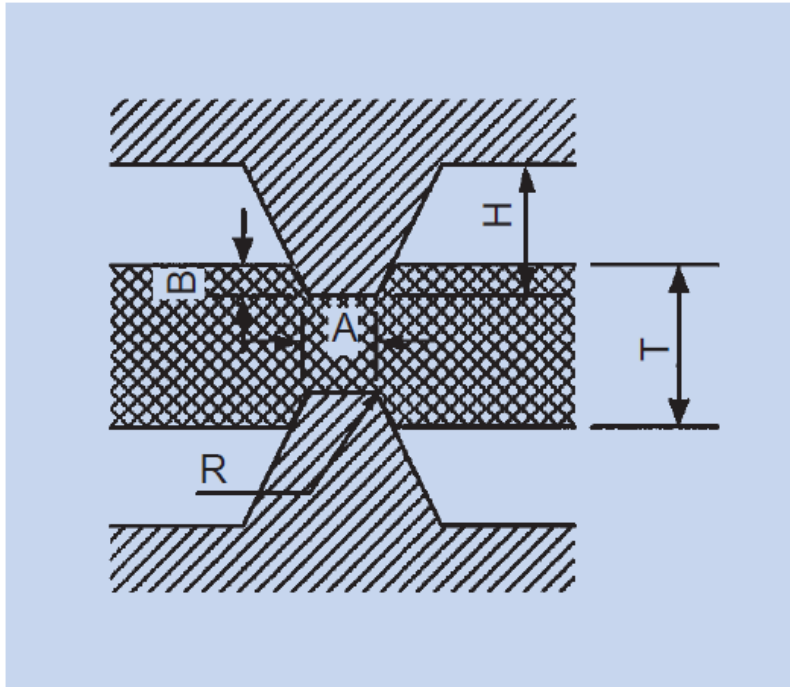
圖 4. 管路之錐形壓縮封合。

Comparison of different types of flange

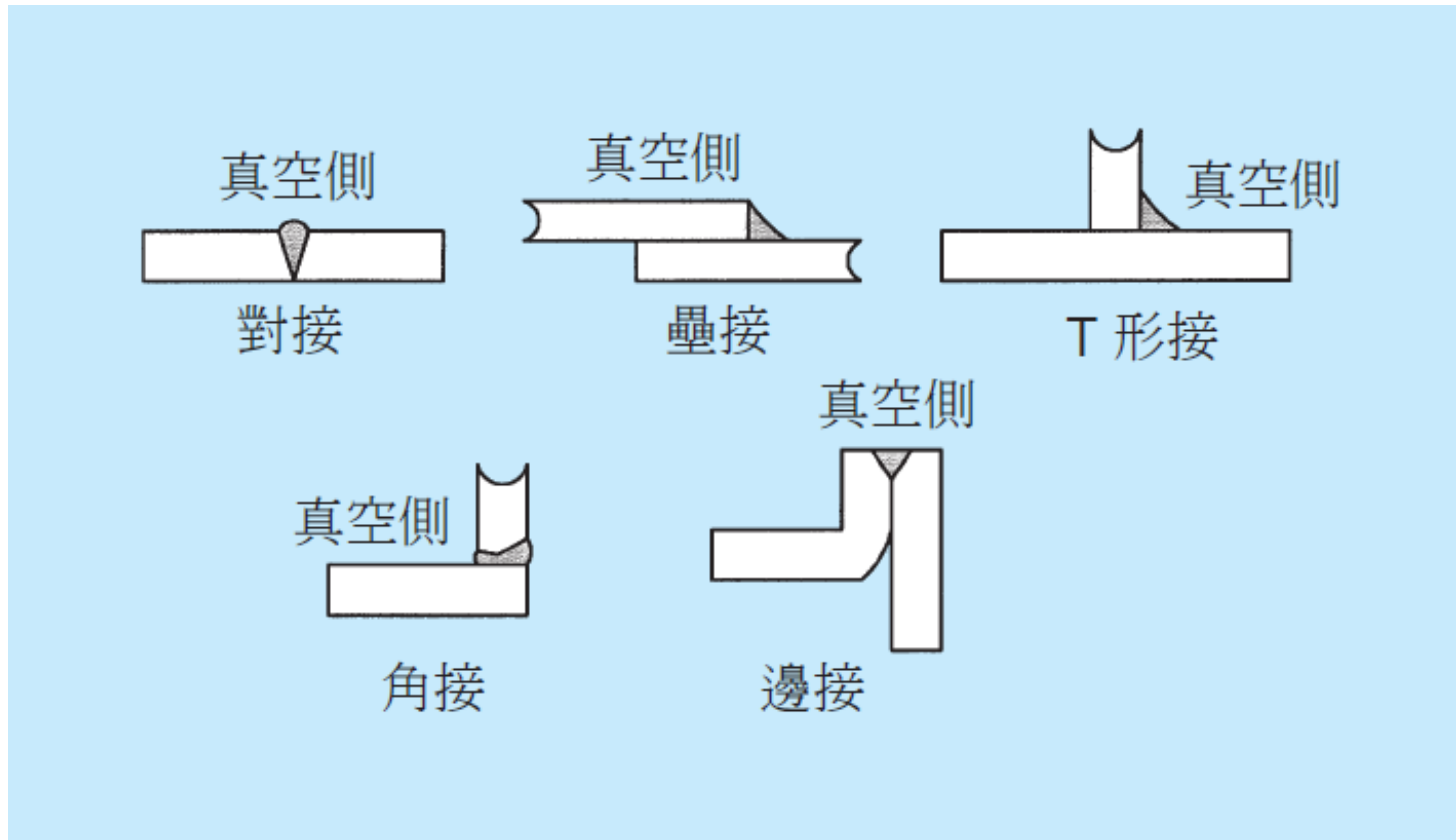


法蘭種類	適用系統	特 性
 <p>ISO 法蘭</p>	<p>中低真空系統及無需烘烤之高真空系統 (壓力大於 10^{-8} Torr 之系統使用) 使用 Viton O 形環烘烤至 200 °C，操作溫度可達 150 °C。</p>	<p>高分子封合材料 O 形環，可重覆使用，可以使用固定中心環和平面法蘭或在法蘭上以環槽固定 O 形環，組裝拆卸快速、成本較為經濟。 組裝時可使用真空油脂輕輕塗覆 O 形環，可以提高封合性能。 小管徑使用夾緊環 (hing clamp)，手動鎖緊即可，較為方便，大管徑則使用緊固扣環 (claw clamp)。</p>
 <p>CF 法蘭 (conflat 法蘭)</p>	<p>超高真空系統封合 (壓力小於 10^{-8} Torr 之系統使用)。 可使用金屬墊圈及 Viton O 形環，若使用 Viton O 形環可烘烤至 200 °C，操作溫度可達 150 °C。</p>	<p>金屬墊圈封合材料以及 Viton O 形環，封合滲漏很微小。法蘭刀口及封合面的尺寸精度及表面粗糙度要求高。需依要求進行清潔與螺絲組裝程序。</p>
 <p>ASA-ANSI 法蘭</p>	<p>中低真空系統及無需烘烤之高真空系統 (壓力大於 10^{-8} Torr 之系統使用) 使用 Viton O 形環可烘烤至 200 °C，操作溫度可達 150 °C。</p>	<p>高分子封合材料 O 形環，封合效果較 ISO 法蘭佳。 可熔接或硬焊於腔體或元件需依要求進行清潔與螺絲組裝程序。</p>

金屬墊圈刀刃及斜楔法蘭封合



永久封合

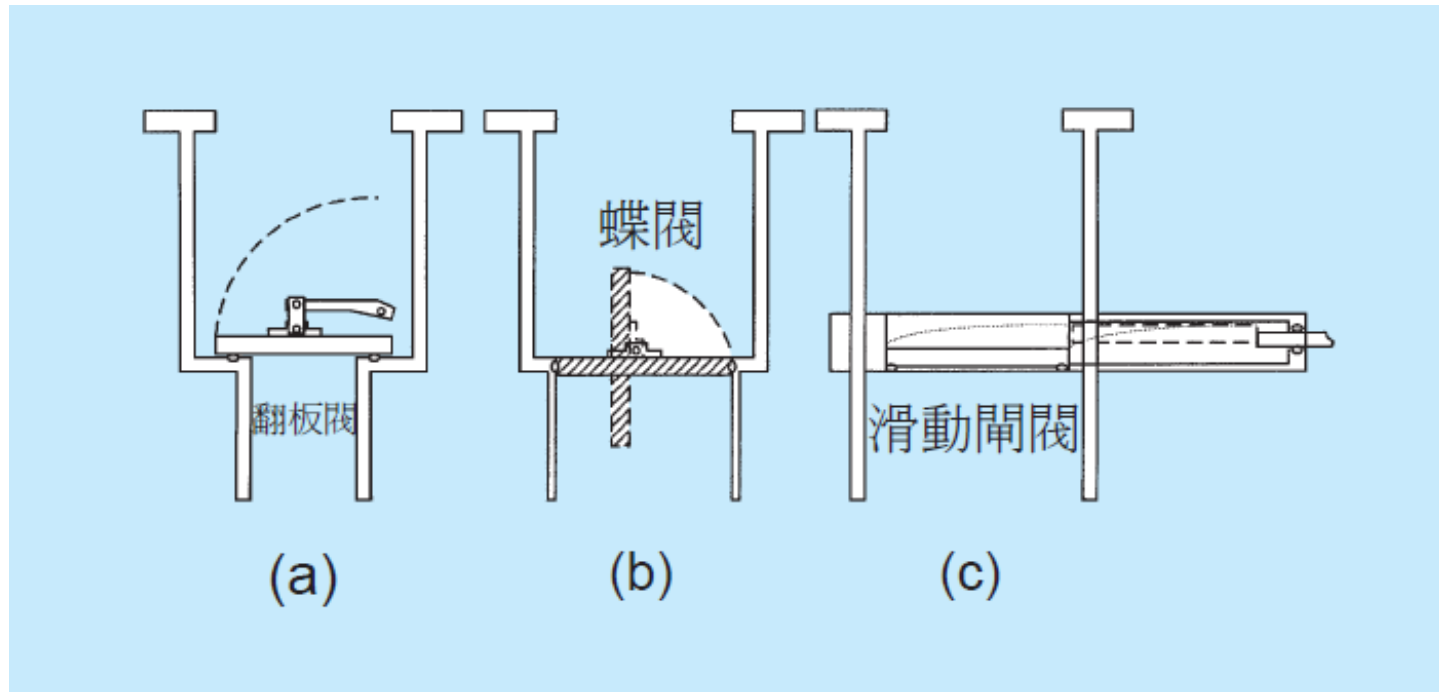


真空閥門分類

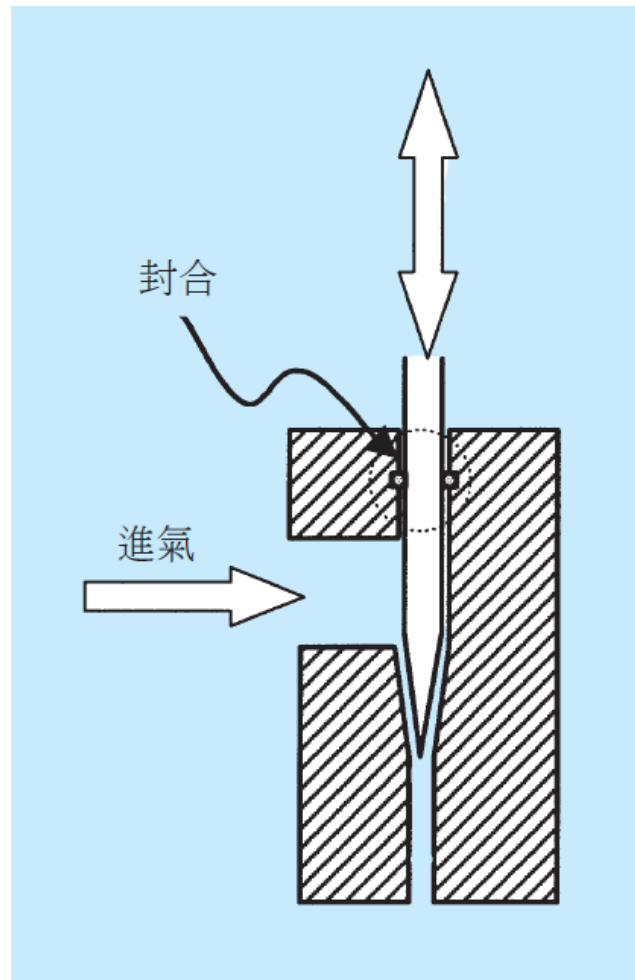
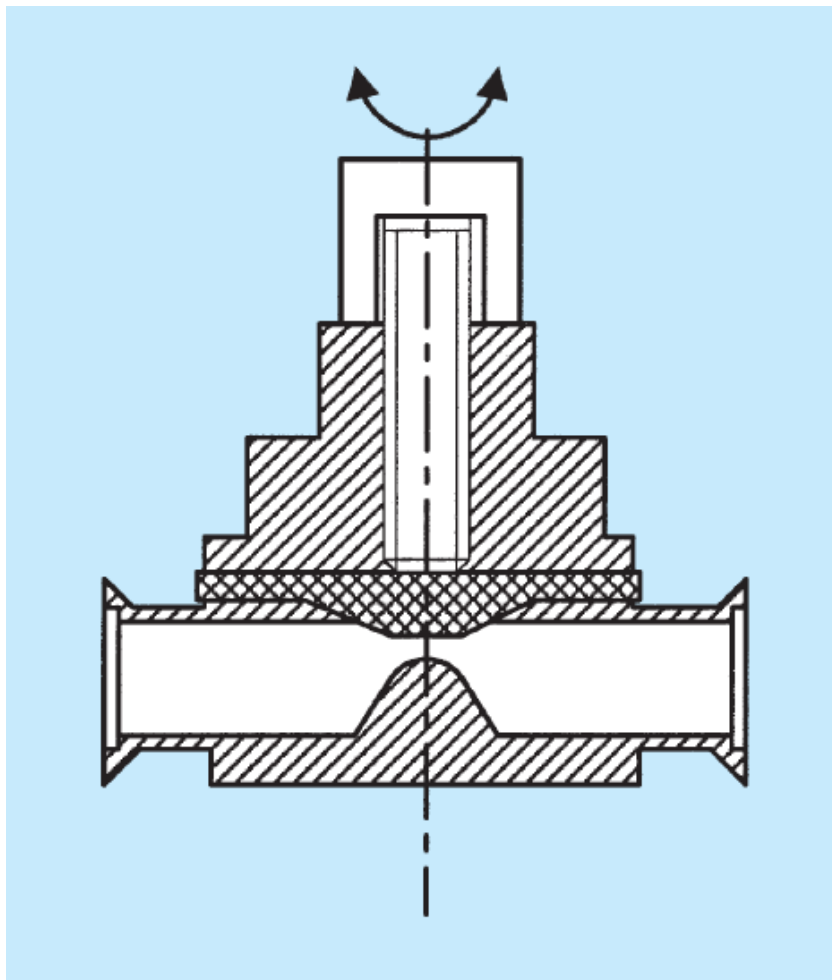


分類依據	閥門名稱
工作壓力	中低真空閥、高真空閥、超高真空閥
用途	截止閥、隔絕閥、放氣閥、節流閥、換向閥、封閉送料閥
驅動方式	手動閥、電動閥、手電兩用閥、電磁閥、氣動閥、液壓式真空閥
材料	玻璃龍頭閥、金屬真空閥
結構特點	擋板閥、翻板閥、蝶閥、連桿閥、隔板閥、閘閥、雙通閥、三通閥、四通閥、直通閥、角閥

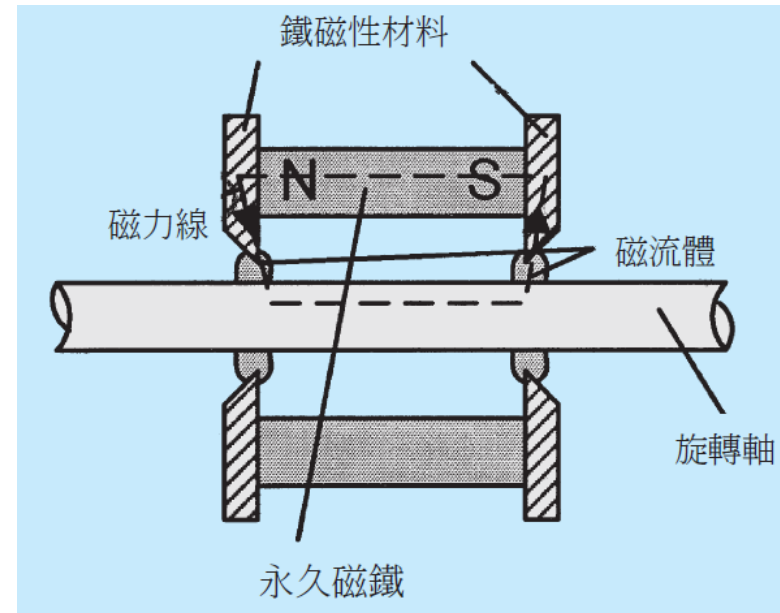
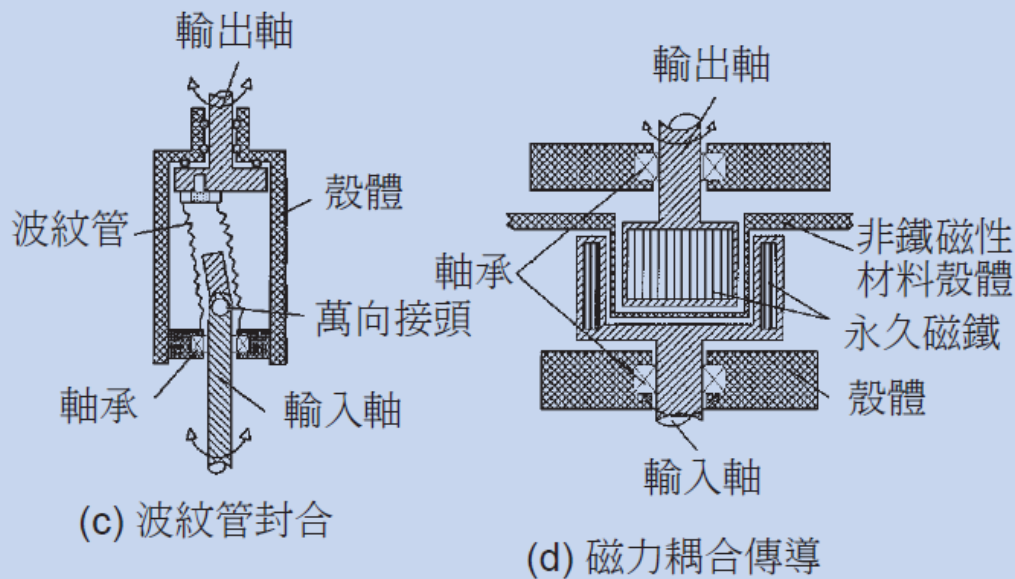
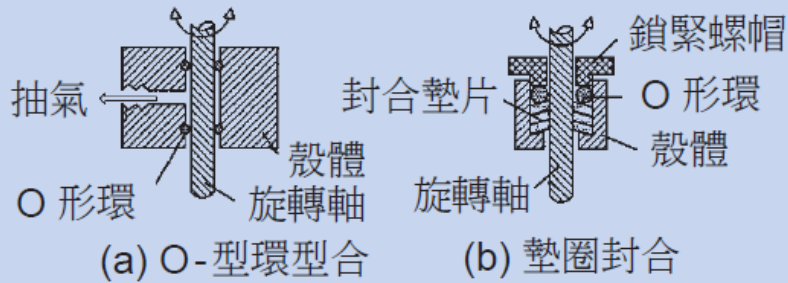
閘閥結構



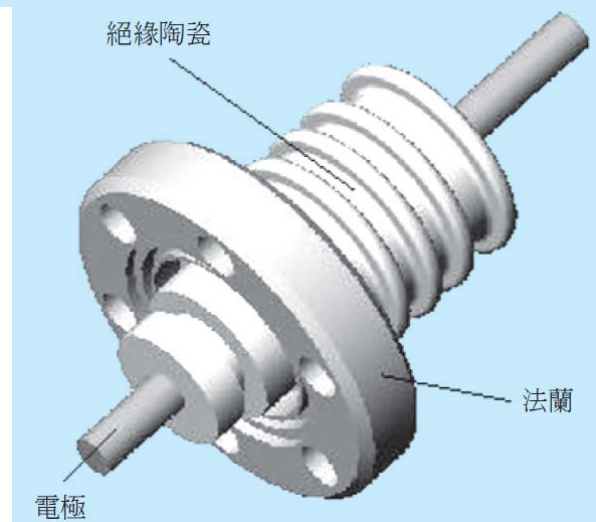
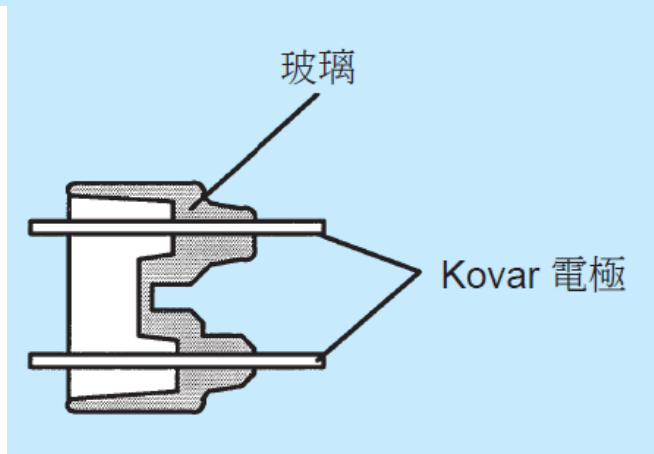
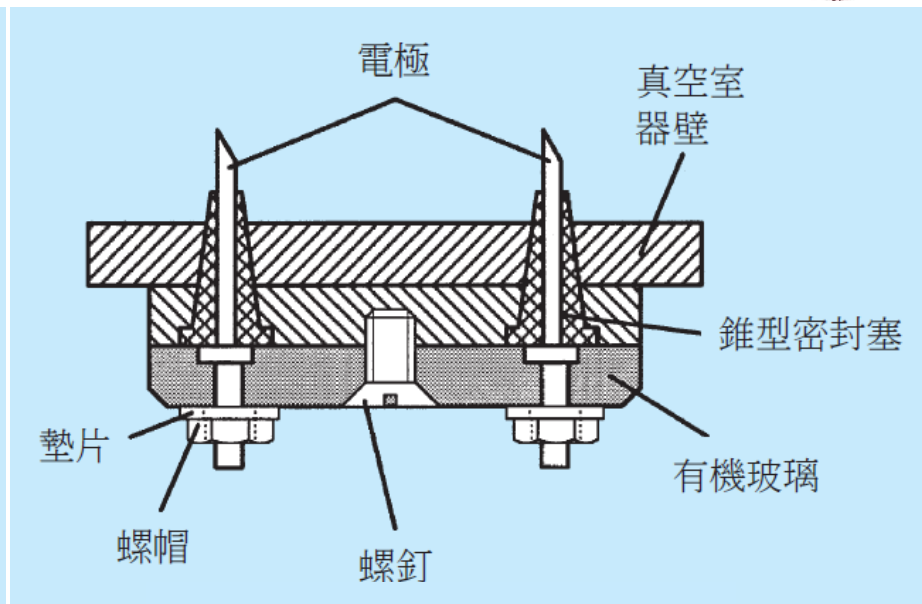
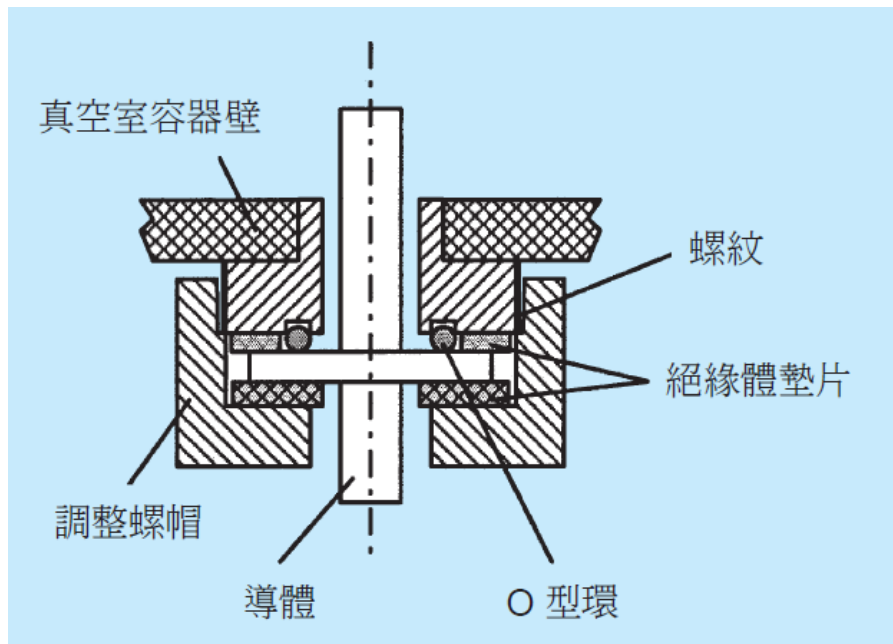
可調流量閥門 - 薄膜真空閥、針閥



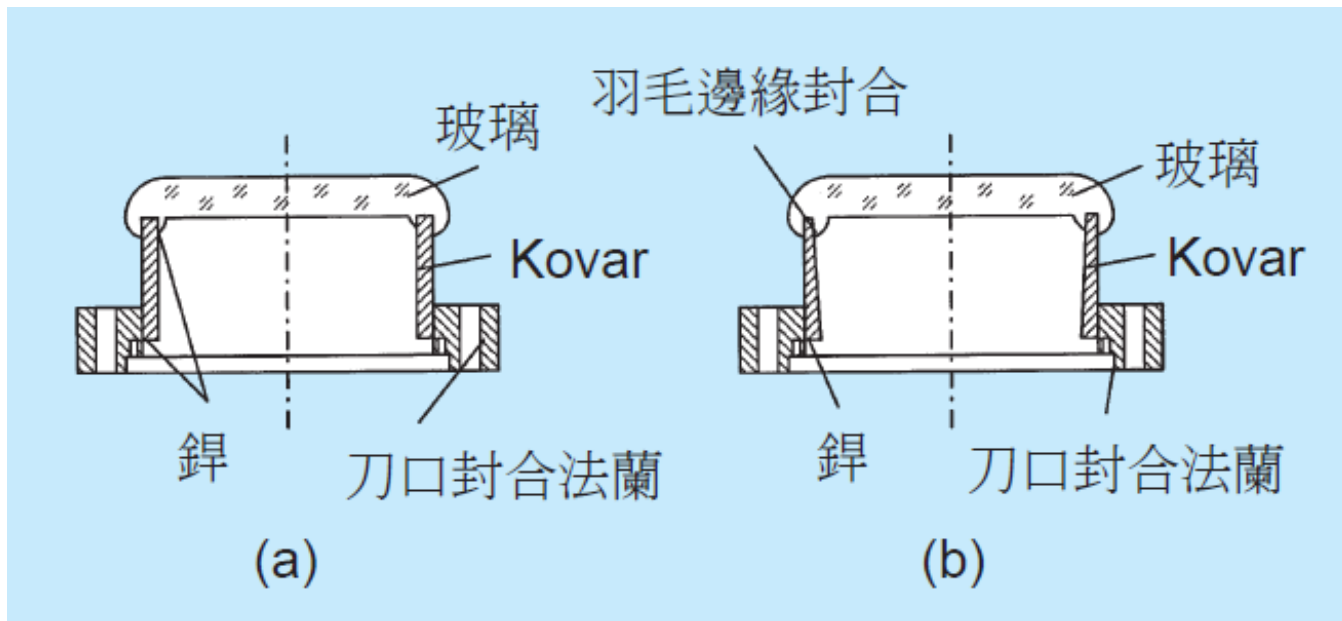
機械運動引入(feedthrough)



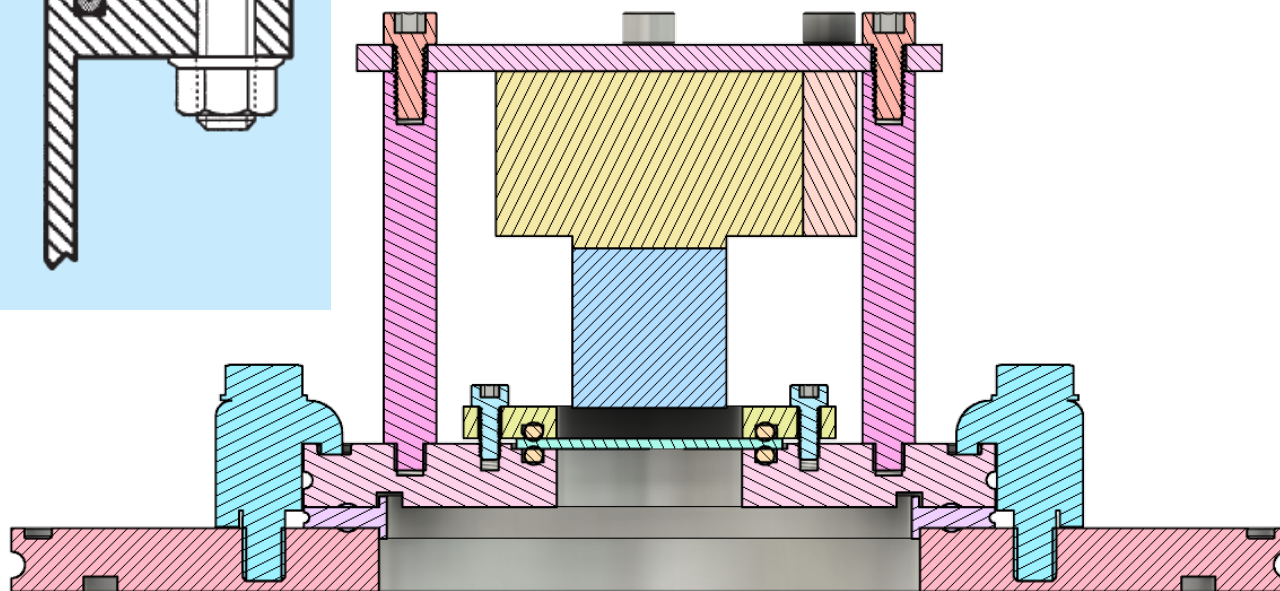
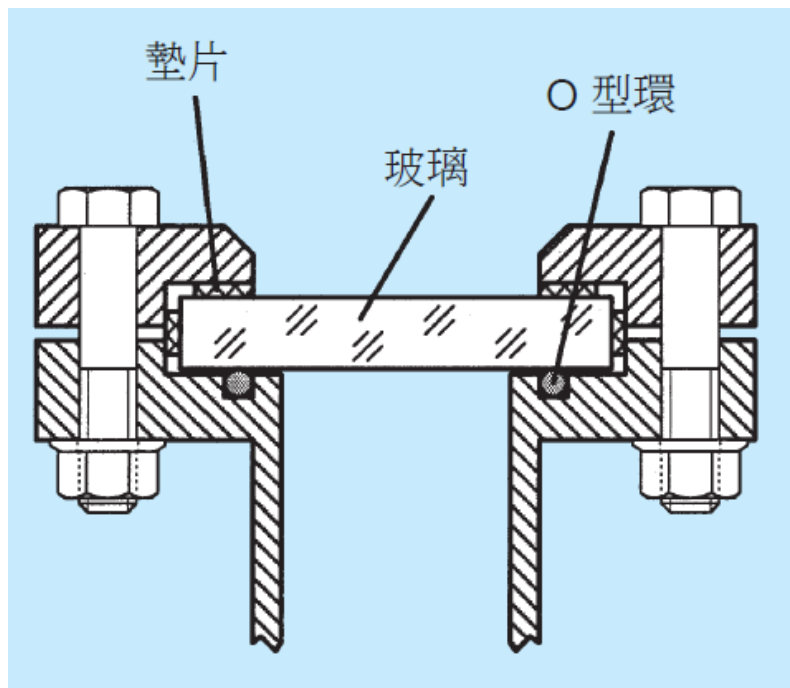
電引入



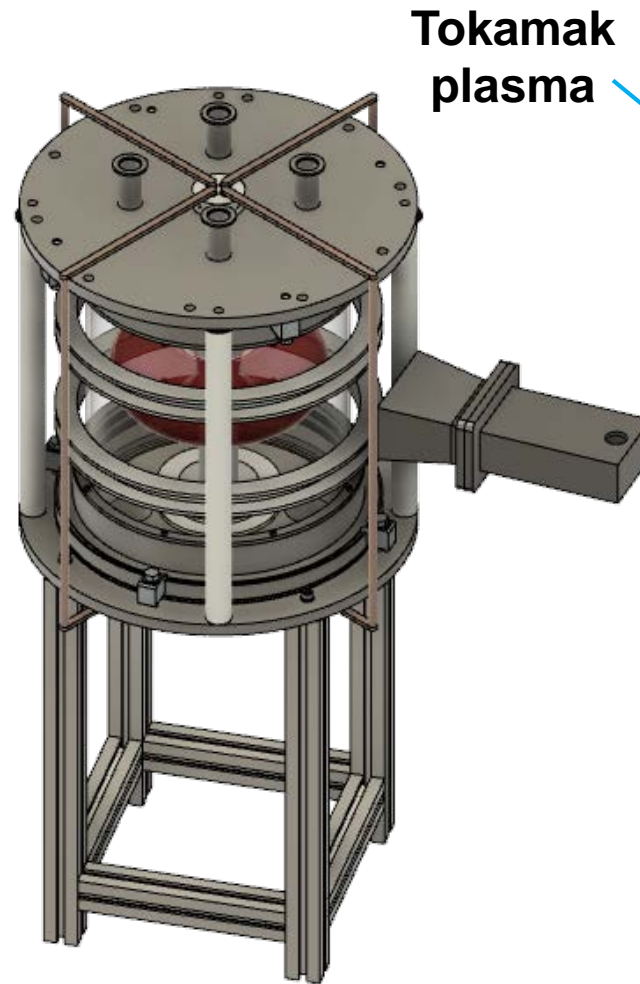
封合式視窗



可拆式視窗

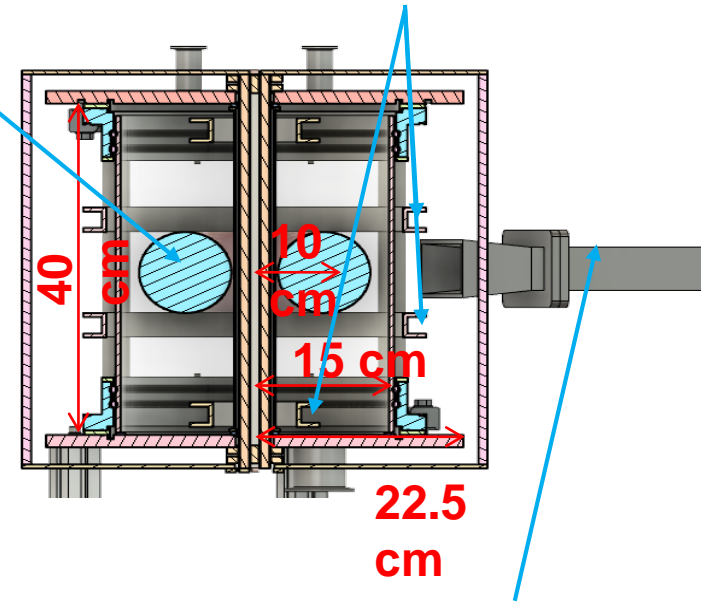


We need to work with a vacuum system



Tokamak plasma

Vertical-field coils



1 kW, 2.45 GHz
Magnetron