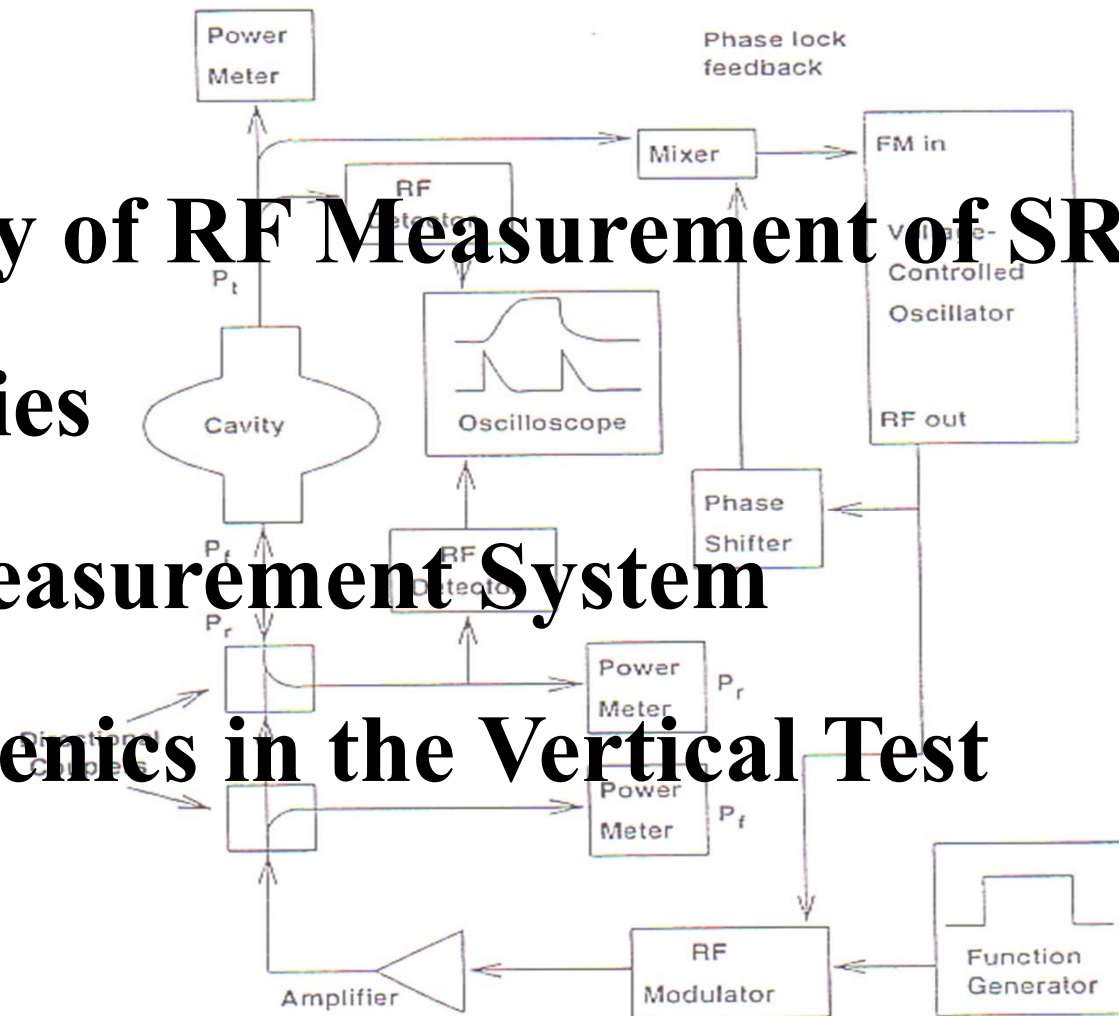
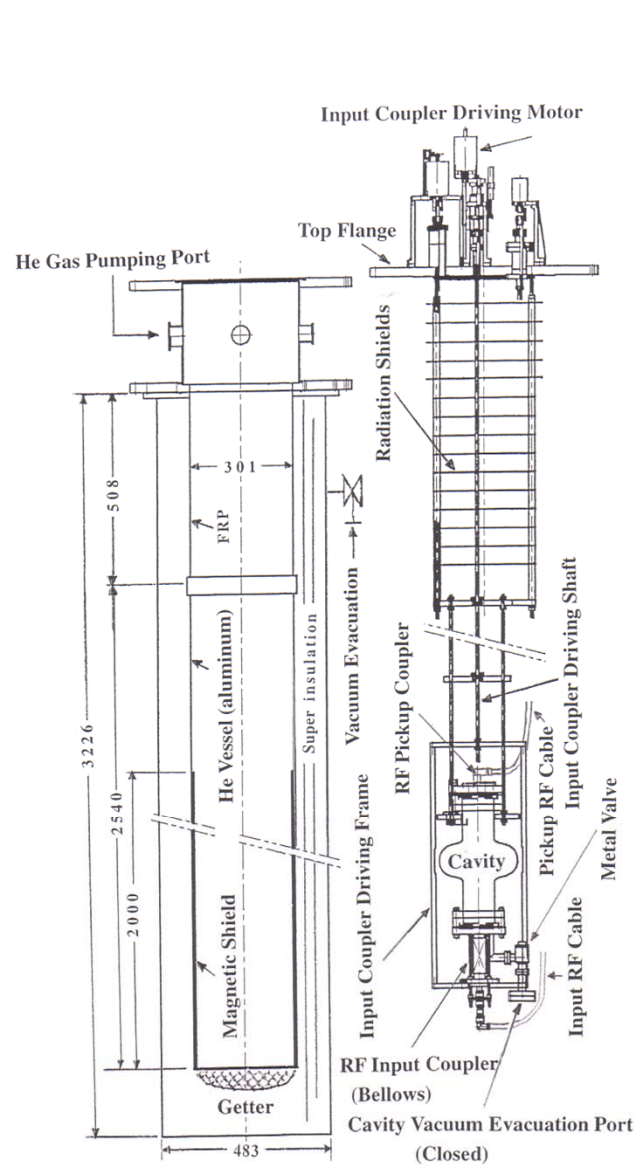


6. Performance Evaluation

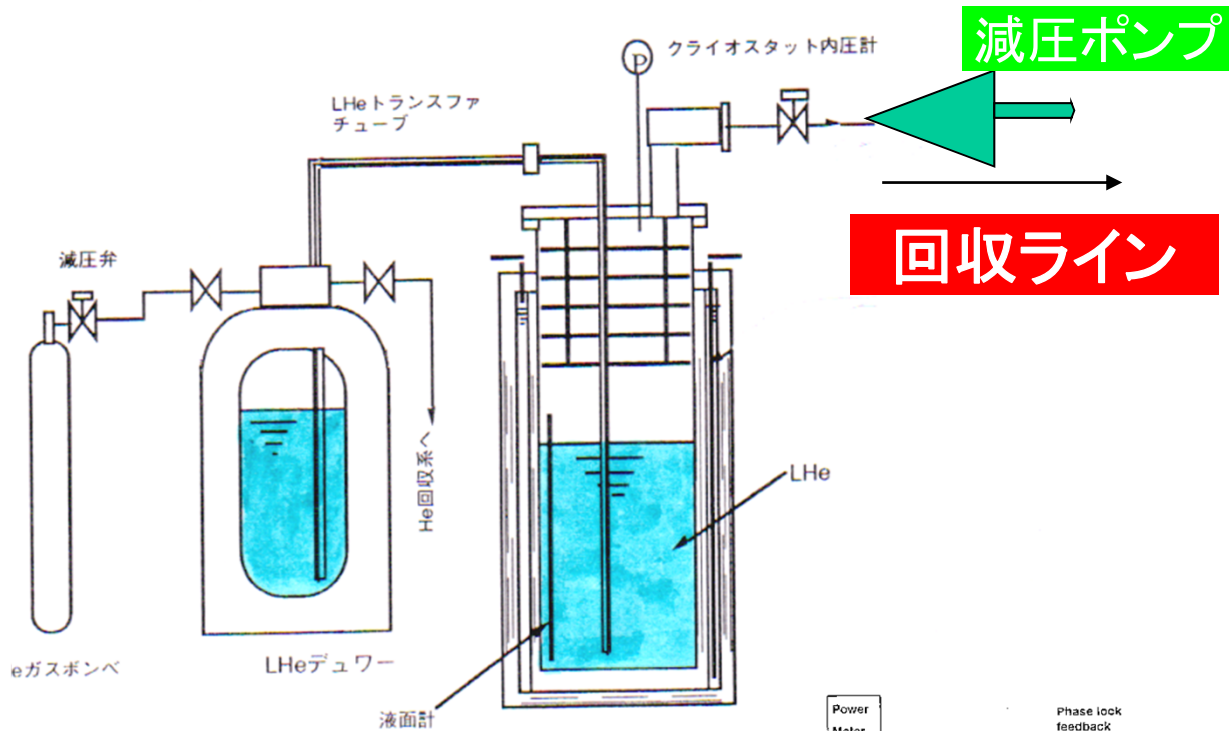
- Theory of RF Measurement of SRF Cavities
- RF Measurement System
- Cryogenics in the Vertical Test



SRF Cavity Measurement System

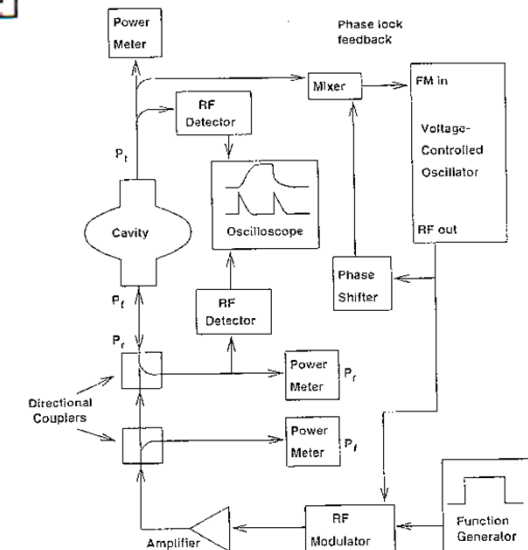


Vertical Cryostat Vertical Test Stand

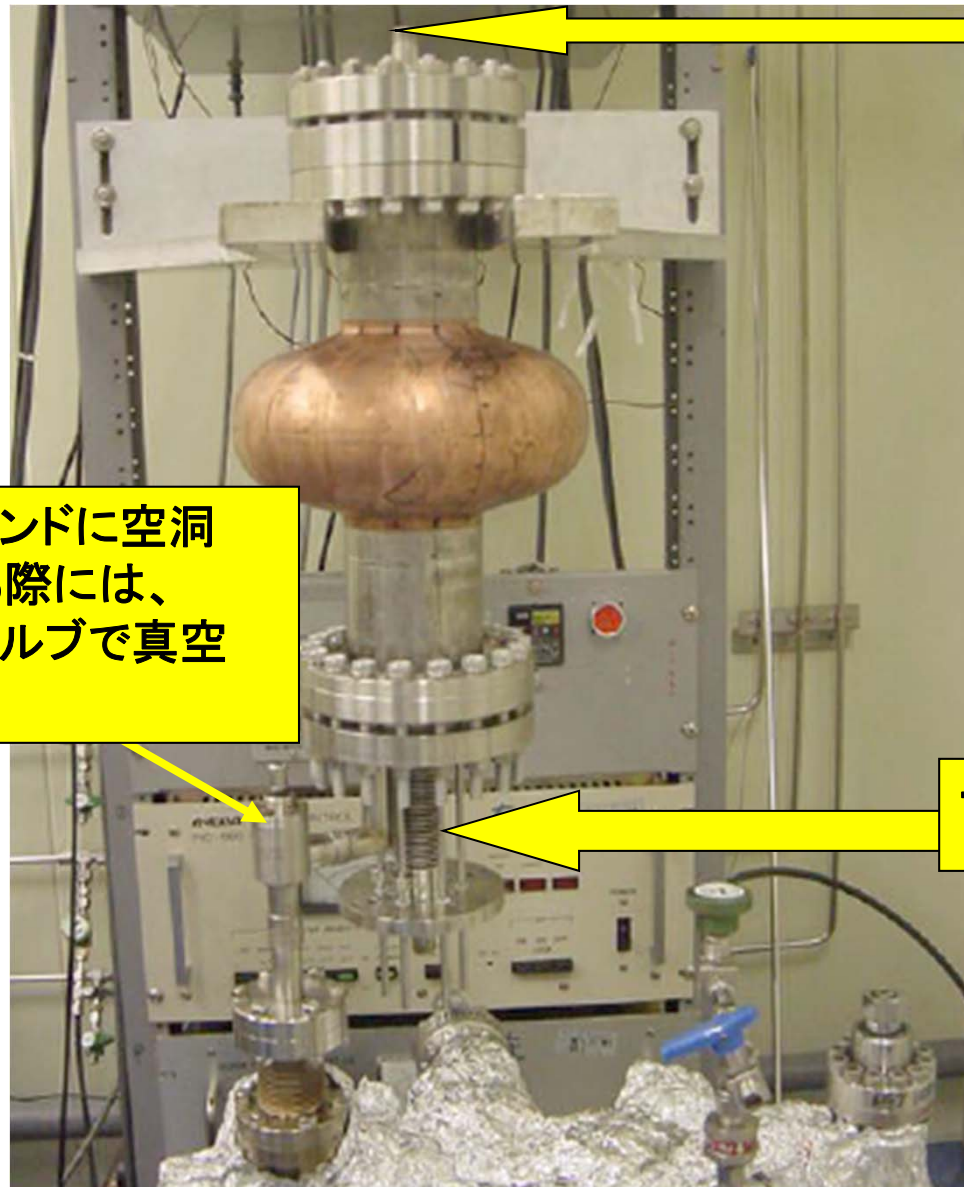


種々の物質の平均熱伝導率[W/mK]

物質	300K - 4K
銅(電解)	550
アルミ	250
ステンレス	10.3
真鍮	67
GFRP	0.35
テフロン	0.24
パイレックスガラス	0.67



超伝導空洞 (Nb/Cu clad cavity)

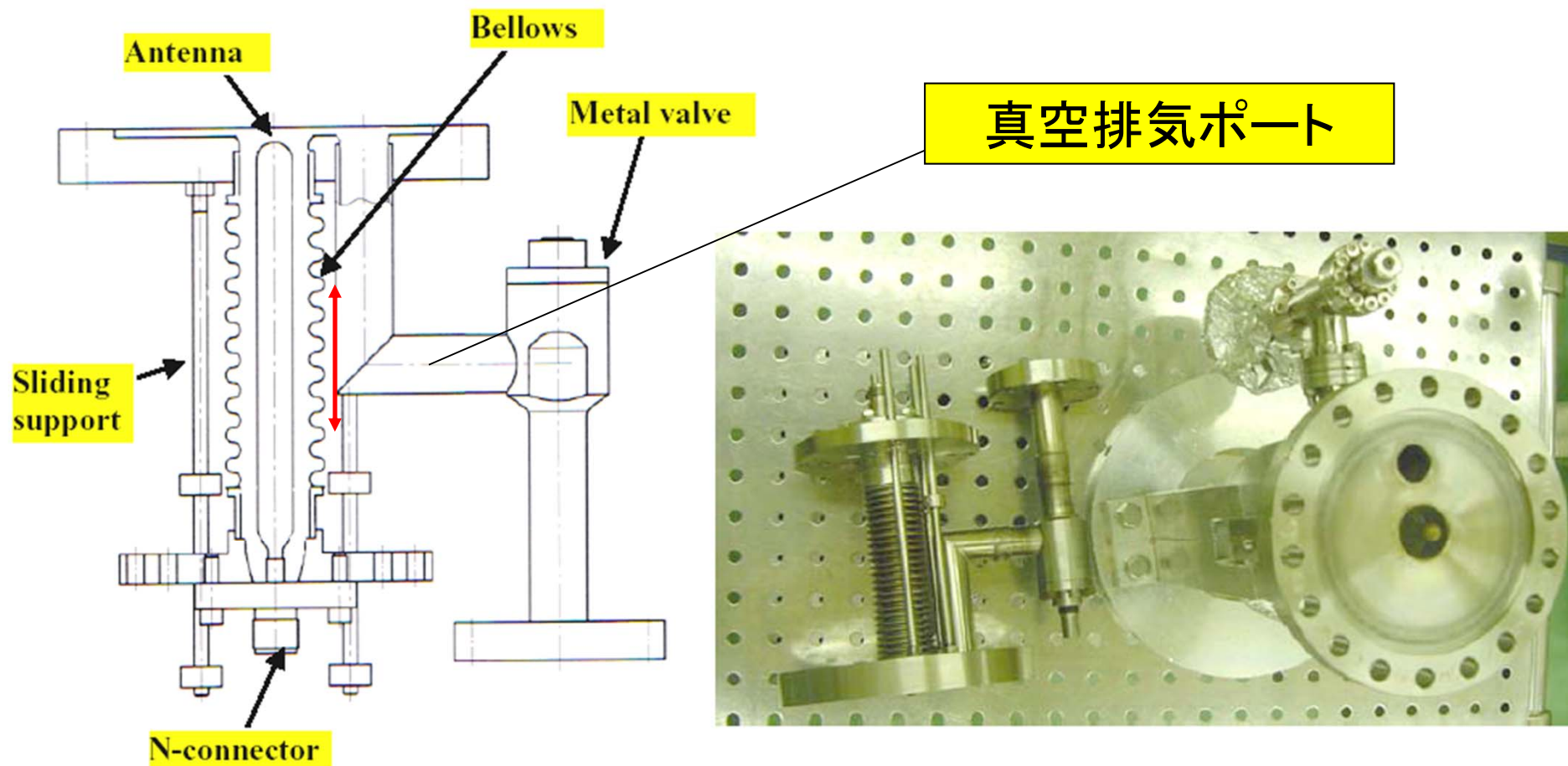


Pickup coupler

タテ測定スタンドに空洞を吊り下げる際には、このメタルバルブで真空封じする。

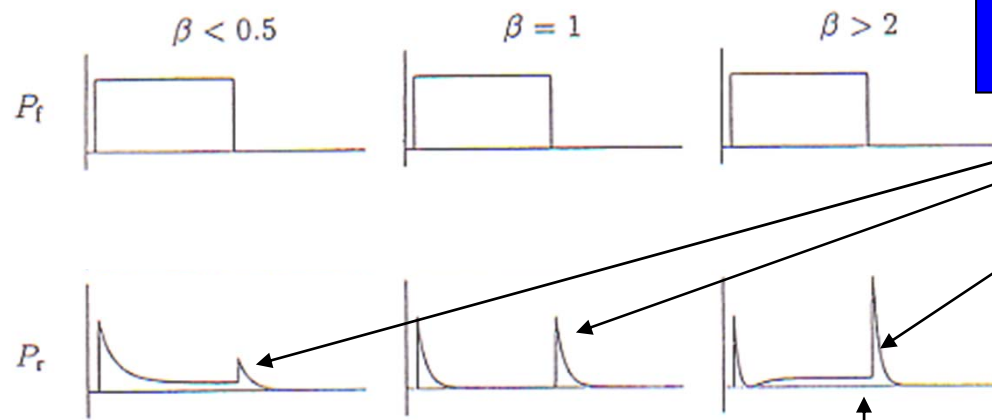
可変 RF Input coupler

可変 RF Input Coupler



Variable input coupler for the vertical test in KEK

Theory of Measurement



Pulse method

$$P_t(t) = P_o \exp\left(-\frac{\omega}{Q_L} t\right)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad Q_L : \text{Loaded } Q$$

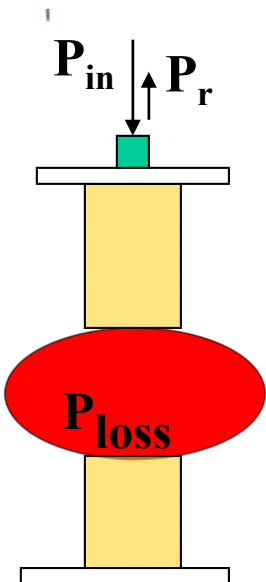
One-port

Decatime : $\tau_{1/2}$

$$P_t(\tau_{1/2}) = \frac{1}{2} P_o = P_o \exp\left(-\frac{\omega}{Q_L} \cdot \tau_{1/2}\right)$$

$$\ln(2) = \frac{2\pi f}{Q_L} \tau_{1/2}$$

$$Q_L = 2\pi f \cdot \frac{\tau_{1/2}}{\ln(2)}$$



One-Port Cavity

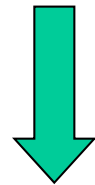
$$Q_O \equiv \frac{\omega U}{P_{\text{loss}}},$$

$$Q_L \equiv \frac{\omega U}{P_{\text{loss}} + P_e} = \frac{\omega U}{P_{\text{loss}} \left(1 + \frac{P_e}{P_{\text{loss}}}\right)} \quad (\text{for one port})$$

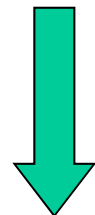
$$= \frac{Q_O}{(1 + \beta_{in})}$$

$\tau_{1/2}$
 P_{in}
 P_r

測定量



計算 Q_L, β_{in}



計算 Q_O

$$R_s = \frac{\Gamma}{Q_O}$$

$$Q_O = (1 + \beta_{in}) \cdot Q_L$$

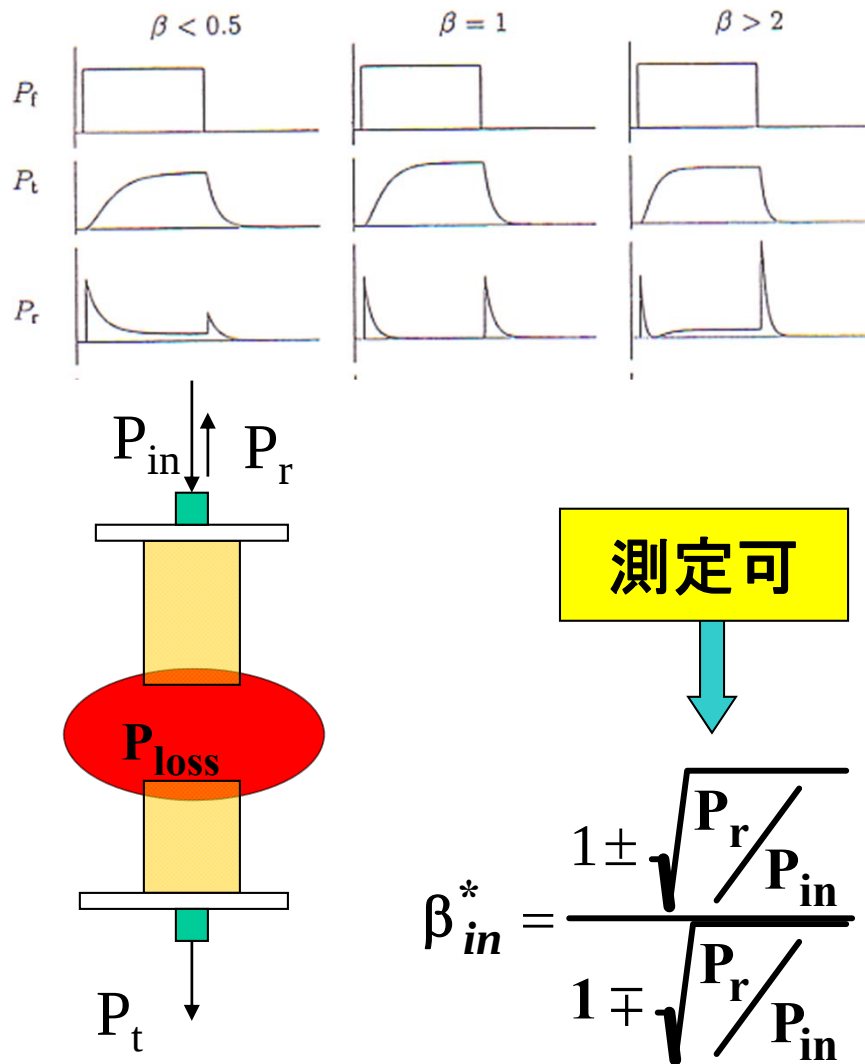
等価回路の計算

Prの波形から判断

$$\beta_{in} \equiv \frac{P_e}{P_{\text{loss}}} = \frac{1 \pm \sqrt{P_r / P_{in}}}{1 \mp \sqrt{P_r / P_{in}}}$$

(over > 1 / under < 1)

Two-Port Cavity



$$P_{loss}^* = P_{loss} + P_t$$

$$Q_o^* = \frac{\omega U}{P_{loss}^*} = \frac{\omega U}{P_{loss} + P_t}$$

$$= \frac{\omega U}{P_{loss} \left(1 + \frac{P_t}{P_{loss}} \right)}$$

測定可

$$= \frac{Q_o}{(1 + \beta_t)} \quad \because \beta_t \equiv \frac{P_t}{P_{loss}}$$

$$= (1 + \beta_{in}^*) Q_L$$

(over > 1 / under < 1)

$$\beta_{in}^* = \frac{1 \pm \sqrt{P_r / P_{in}}}{1 \mp \sqrt{P_r / P_{in}}}$$

$$Q_o^* = \frac{Q_o}{(1 + \beta_t)} = (1 + \beta_{in}^*) \cdot Q_L$$

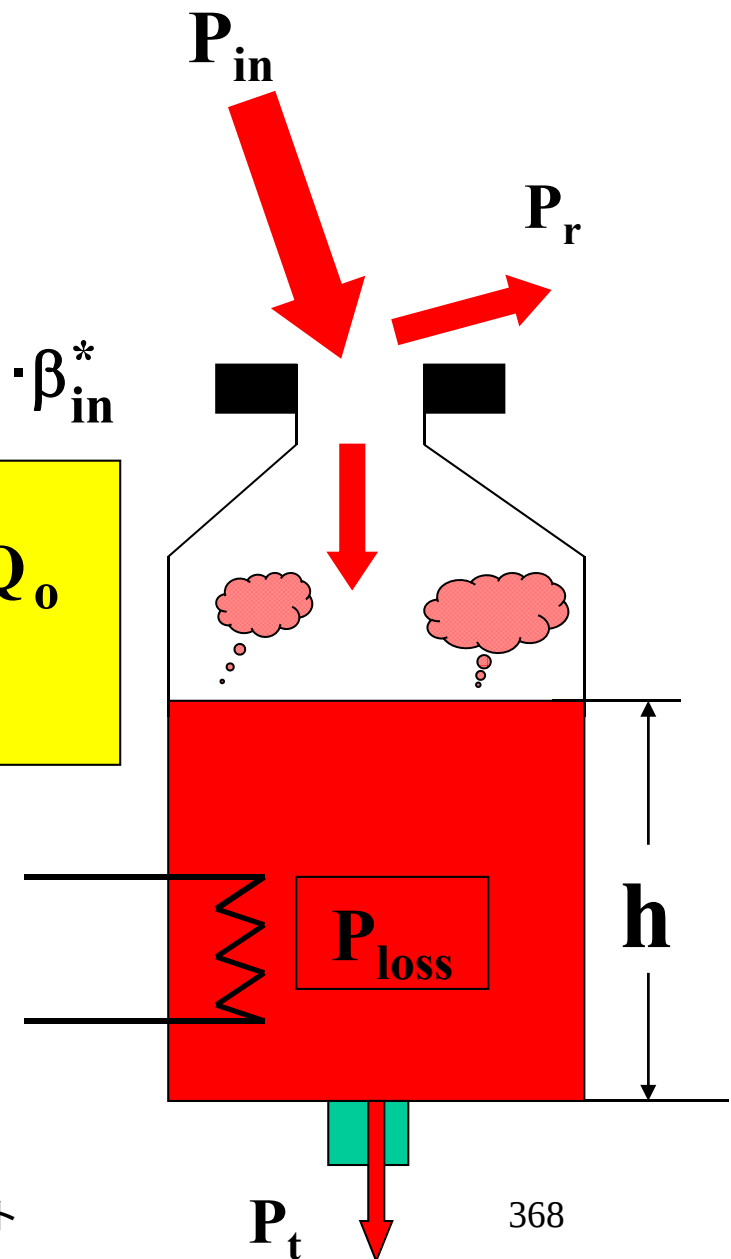
$$\begin{aligned} Q_o &= (1 + \beta_{in}^*) \cdot (1 + \beta_t) \cdot Q_L \\ &= \left[1 + (1 + \beta_t) \cdot \beta_{in}^* + \beta_t \right] \cdot Q_L \\ &= (1 + \beta_{in} + \beta_t) \cdot Q_L \quad \because \beta_{in} \equiv (1 + \beta_t) \cdot \beta_{in}^* \end{aligned}$$

$$Q_o \equiv \frac{\omega U}{P_{loss}}, \quad Q_t \equiv \frac{\omega U}{P_t} = \frac{\omega U / P_{loss}}{P_t / P_{loss}} = \beta_t \cdot Q_o$$

$$\omega U = Q_o \cdot P_{loss} = Q_t \cdot P_t$$

$$P_{loss} = P_{in} - P_r - P_t$$

定常状態: $h = \text{const}$ $\leftarrow U = \text{const}$



加速電界の計算

$$R_{sh} = \frac{V^2}{P_{loss}} \quad \because V = E_{acc} \cdot d_{eff}$$

$$= (E_{acc} \cdot d_{eff})^2$$

$$E_{acc} = \frac{1}{d_{eff}} \cdot \sqrt{R_{sh} \cdot P_{loss}} = \frac{1}{d_{eff}} \cdot \sqrt{\left(\frac{R_{sh}}{Q_o} \right) \cdot (Q_o \cdot P_{loss})}$$

$$= Z \sqrt{Q_o \cdot P_{loss}}$$

$$= Z \sqrt{Q_t \cdot P_t}$$

$$\because Q_t = \frac{\omega U}{P_t} = \frac{Q_o \cdot P_{loss}}{P_t}, \quad Q_o \cdot P_{loss} = Q_t \cdot P_t$$

Summary:

Measured parameters:

$$f, \tau_{1/2} \longrightarrow$$

$$P_{in}, P_r, P_t \longrightarrow$$

(定常状態 : CW)

$$Q_L = 2\pi f \tau_{1/2} / \ln(2)$$

$$\beta_{in}^* = \frac{1 \pm \sqrt{\frac{P_R}{P_{IN}}}}{1 \mp \sqrt{\frac{P_R}{P_{IN}}}}$$

$$P_{loss} = P_{in} - P_r - P_t$$

$$\beta_t = P_t / P_{loss}$$

$$Q_t = Q_o / \beta_t$$

$$\beta_{in} = (1 + \beta_t) \beta_{in}^*$$

$$Q_o = (1 + \beta_{in} + \beta_t) Q_L$$

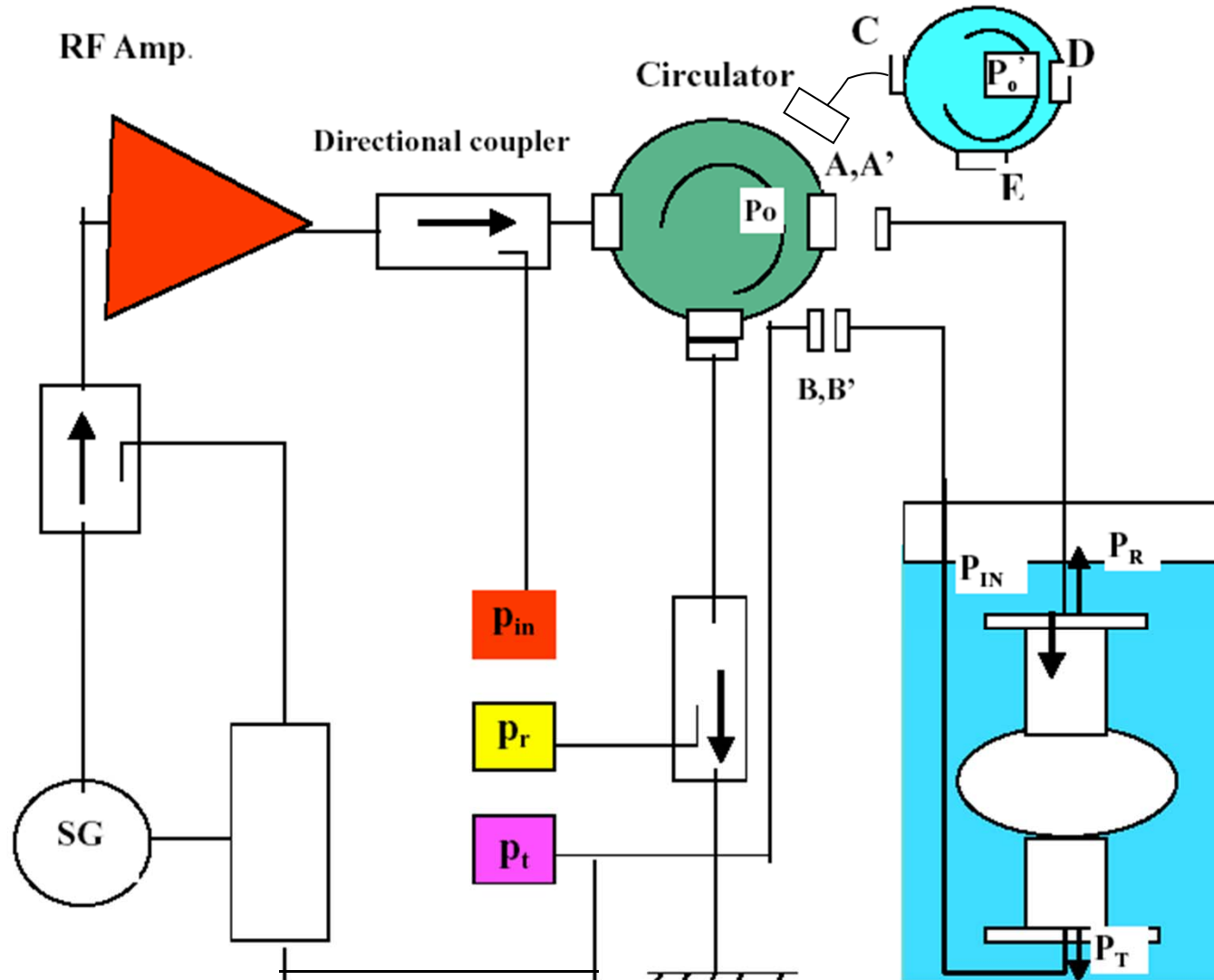
$$R_s = \frac{\Gamma}{Q_o}$$

$$E_{acc} = Z \cdot \sqrt{P_t \cdot Q_t}, \quad Q_o = Q_t \beta_t$$

Cable Correction

p_{in}, p_r, p_t : measured in the measurement room

P_{IN}, P_R, P_T : Power at the cavity (cooled), $P_{IN} = c_{in} \cdot p_{in}$, $P_R = c_r \cdot p_r$, $P_T = c_t \cdot p_t$



p_{in} , P_O at A,
 p_r : short A
 p_t : connect B to A
 P_O/p_{in} , P_O/p_r , P_O/p_t

P_O' at E : connect A and C,
 and short D

p_{in}' at E : connect D to A'

p_t' at E : connect D to B'

$$C_{in} = (P_O/p_{in}) \cdot (p_{in}'/P_O')^{1/2}$$

$$C_r = (P_O/p_r) \cdot (P_O'/p_{in}')^{1/2}$$

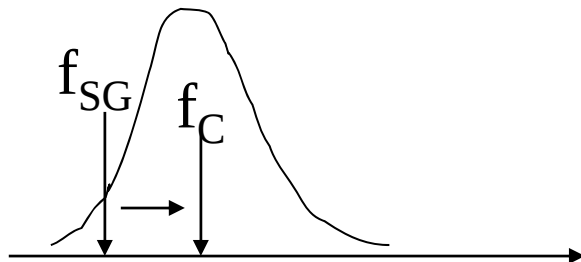
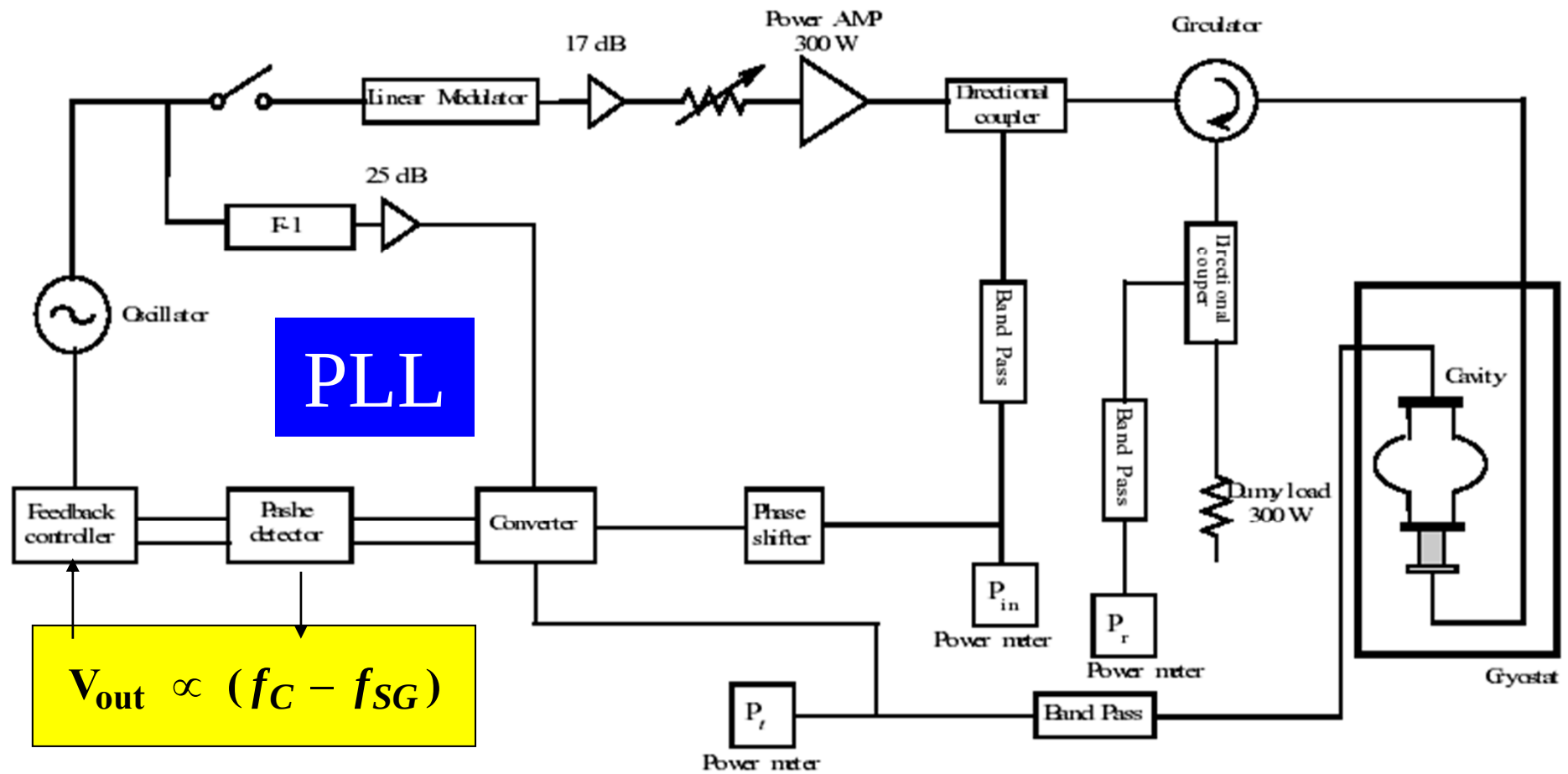
$$C_t = (P_O/p_t) \cdot (P_O'/p_t')^{1/2}$$

$$P_{IN} = c_{in} \cdot p_{in}$$

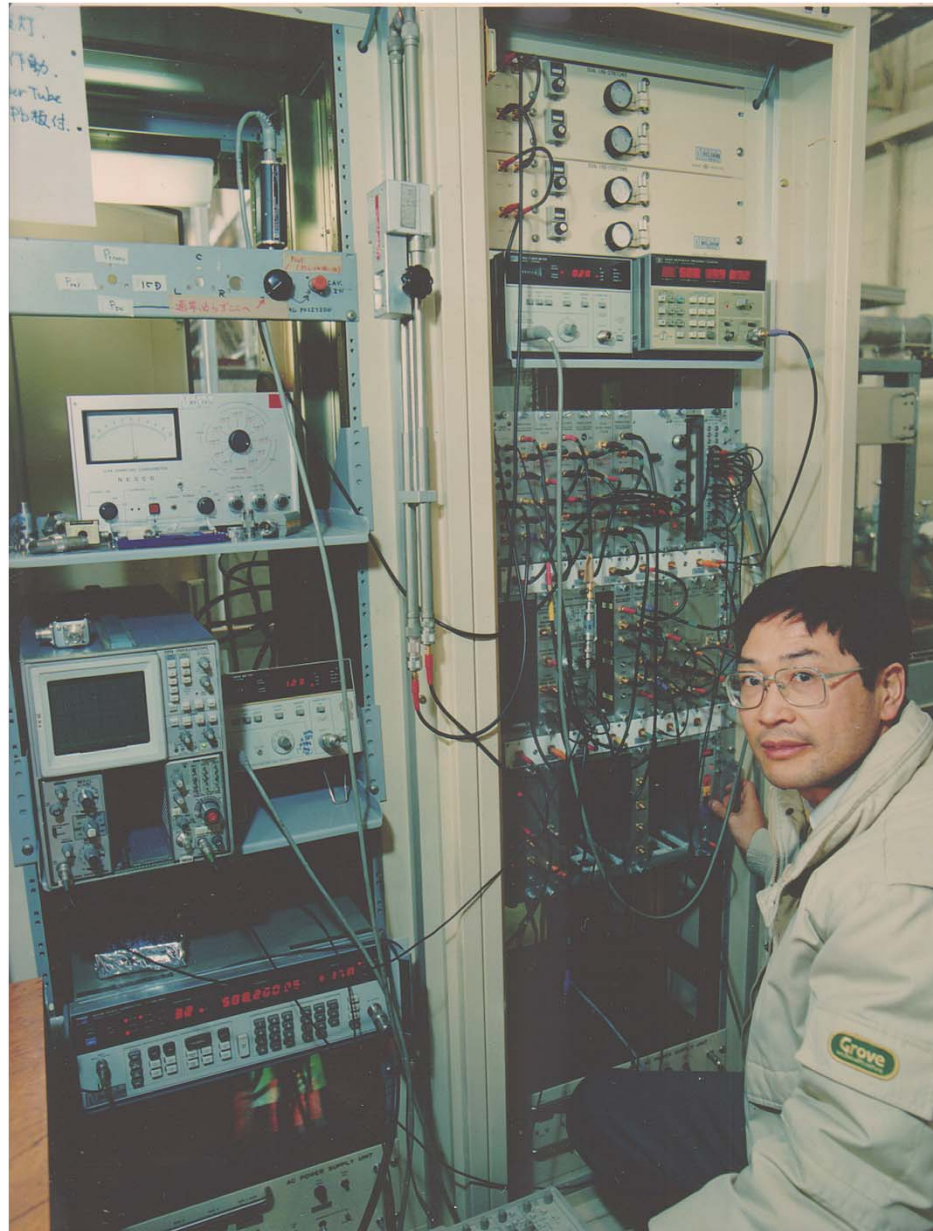
$$P_R = c_r \cdot p_r$$

$$P_T = c_t \cdot p_t$$

Feed Back System



RF System



TRISTAN

演習問題2

I. Cable correction

Cable correction measurement

$$p_{in}=55.5\mu W, p_o=50.0mW,$$

$$p_r=10.72\mu W, p_t=3.04mW$$

$$p_o'=39.0mW, p_{in}'=22.6mW$$

$$p_t'=27.9mW$$

左の測定値からケーブルcorrection factor
 C_{in} , C_r , C_t を計算せよ。

IIに示す測定値は1300MHzニオブ空洞の
4.2Kでの測定結果である。上で求めたCable
correction factorとこれらの測定から、

β_{in}^* , P_{loss} , β_{in} , β_t , Q_L , Q_{in} , Q_o , Q_t , R_s ,
 E_{acc} , E_p , H_p
を計算せよ。

II. Calculation of Q_o and E_{acc}

Measured power and decay time

$$f = 1303.590529 \text{ MHz}$$

$$\tau_{1/2} = 23.6 \text{ msec}$$

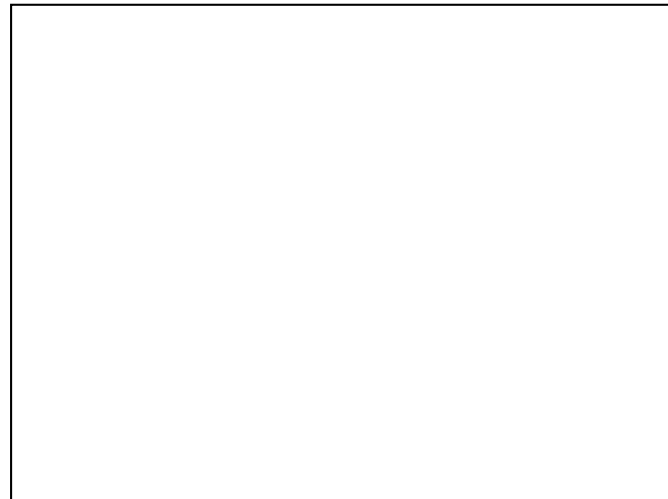
Coupling: over

$$p_{in} = 3.11 \text{ mW},$$

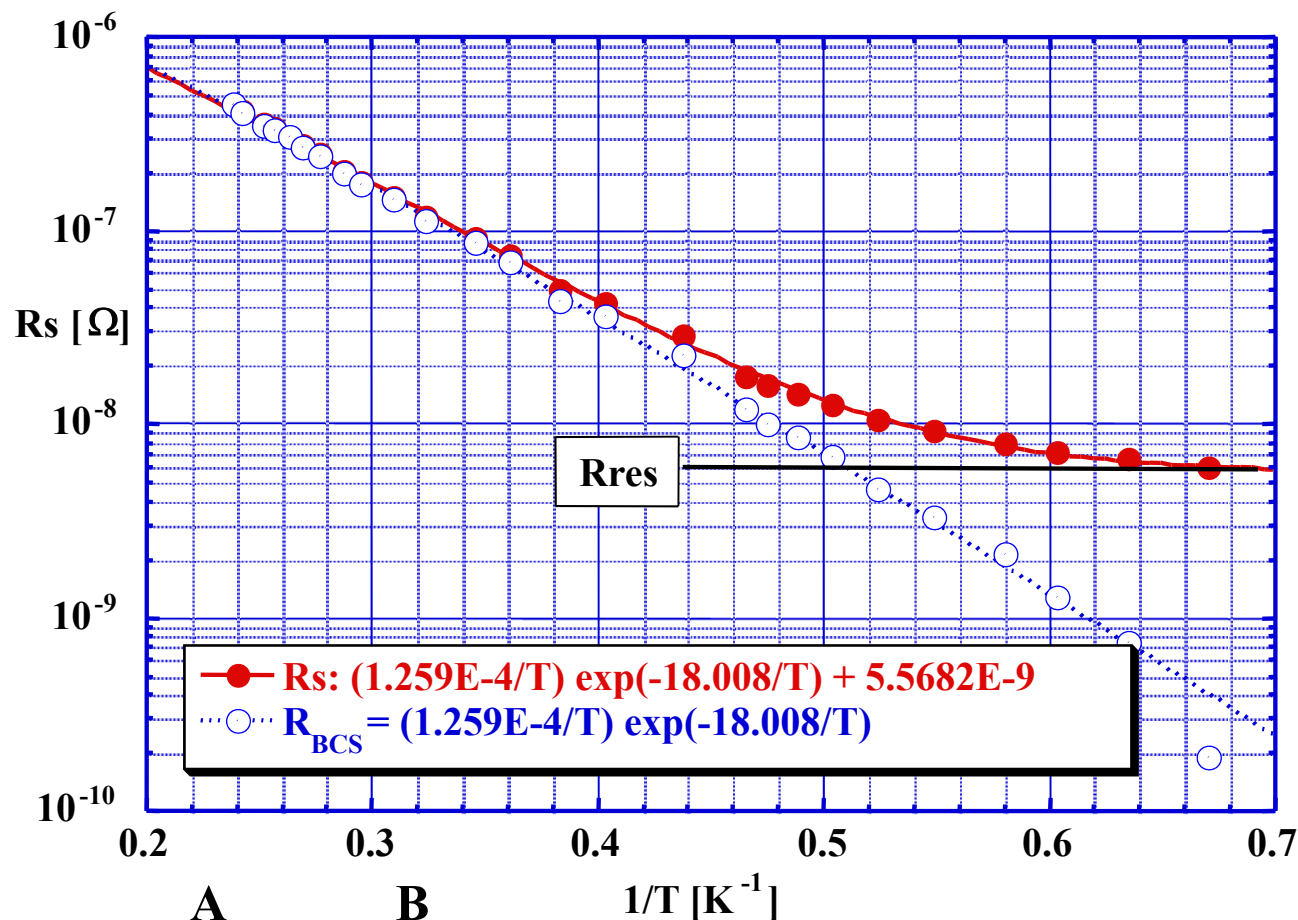
$$p_r = 192 \text{ nW},$$

$$p_t = 0.142 \text{ mW}$$

$$\text{He pressure} = 758.1 \text{ torr}$$



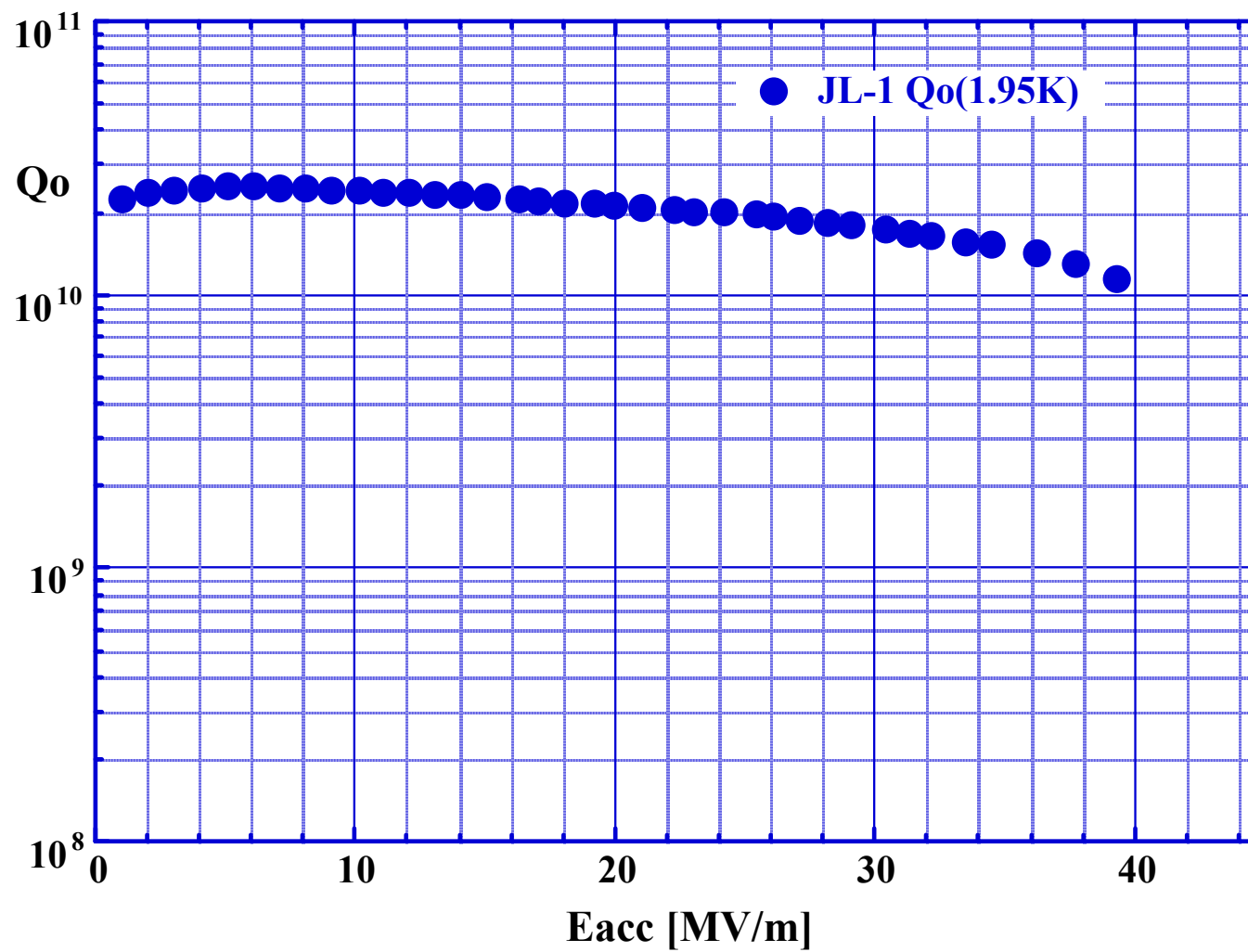
表面抵抗の温度依存性の測定



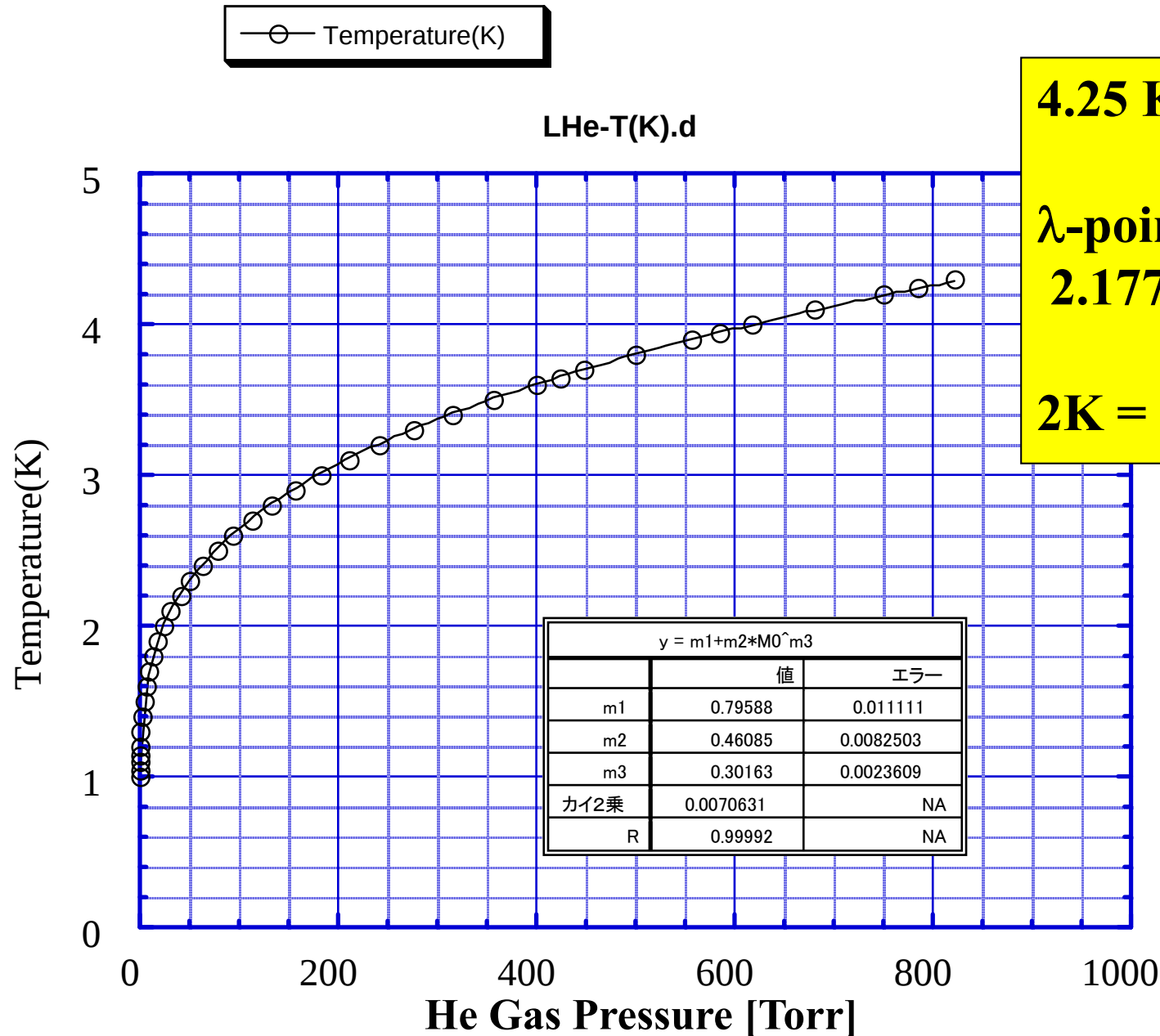
$$R_s - \text{fit} : R_s(T) = \frac{A}{T} \cdot \exp\left(-\frac{B}{T}\right) + R_{res}$$

$$B = \frac{\Delta}{k_B}$$

高電界の測定例 Q₀-E_{acc} curve



液体ヘリウムの温度 P vs. T



4.25 K = 760 Torr

λ -point :
2.1773K = 38.41 Torr

2K = 23.77 Torr

ヘリウム情報

- ・地殻中でのU、Thの α 崩壊によってできる。
- ・総埋蔵量： $5 \times 10^{14} \text{m}^3$
- ・天然ガスの副産物として採取。
- ・世界消費量の90%を米国で生産。
- ・数十年後、現在のガス田のヘリウム枯渇。大気から採取の必要あり。



1：ヒューゴトン・パンハンドル Hugoton・Panhandle (米国)，2：ライレーリッジ Riley Ridge (米国ワイオミング州)，3：アルバータ Alberta (カナダ)，4：ハッシルメル Hassi-R'Mel (アルジェリア)，5：北海 (英国)，6：オドラノフ Odolanow (ポーランド)，7：オレンブルグ Orenburg (旧ソ連)，8：ウェイユアン威遠 (中国四川省)，9：パーム溪谷 Palm Valley (オーストラリア)

世界の主要ヘリウム資源

液体ヘリウムの製造法

完全に熱力学

Heの場合は45K以下でJTバルブ作動

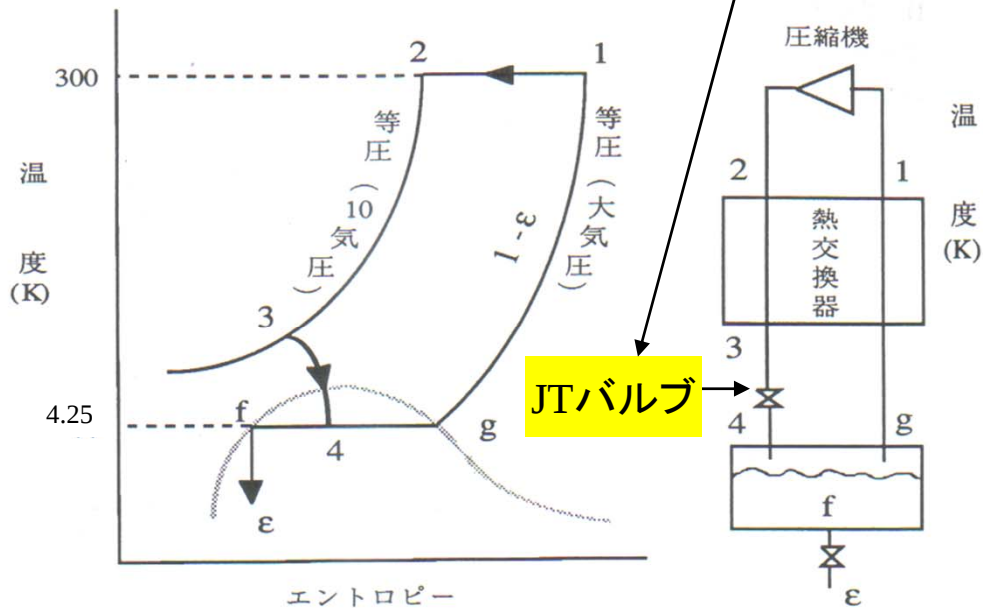


図 9-2 J-Tサイクル (液化機)

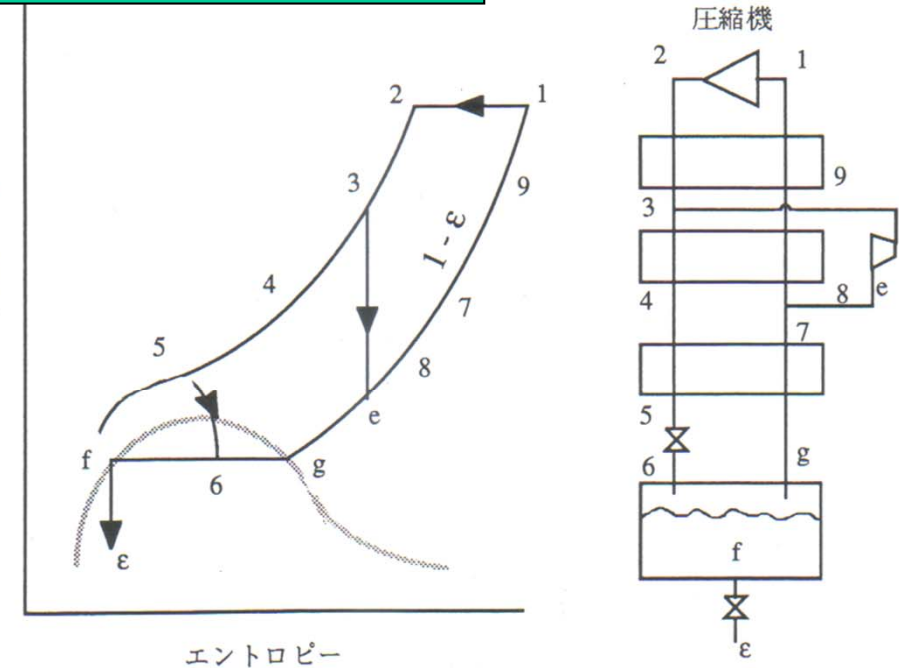


図 9-3 クロード液化サイクル (液化機)

JTバルブで断熱膨張させ、
ガスの温度を下げる。

ガスの一部にタービンを回させ、
温度を下げ、熱交換器の温度を下げる。

Efficiency of superconducting RF cavity

Efficiency of liquid He : η_{eff}

$$\eta_{\text{eff}} = \eta_c \cdot \eta_{\text{tech}}$$

$$= \frac{T}{300 - T} \cdot \eta_{\text{tech}}$$

$$T = 4.25\text{K}, \eta_c = 0.0142,$$

$$\eta_{\text{tech}} = 0.2 \sim 0.3 = 0.2$$

$$\eta_{\text{eff}} = 0.0142 \cdot 0.20 = 2.80 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{357}$$

$$\eta_{\text{eff}}^{\text{AC}} = \frac{P_b}{2 \times P_b + P_{\text{loss}}}$$

2K operationでは η_{eff} は、4.2Kのさらに1/3程度に下がる。

しかし、Q値が一桁上がるので、4.2K operationよりもgainが3倍上がる。

これが、2K operationにする一つの理由。

$$1.5 \times 357 = 535.5\text{W} = 0.54\text{KW}$$

CW operation @ 4.2K for SC	SC cavity	NC cavity
Q ₀	2x10 ⁹	2x10 ⁴
R/Q(Ω/m), rf frequency 500MHz	330	900
P _{loss} /L(W/m) for E _{acc} =1MV/m	1.5	56,000
AC power(KW/m) for E _{acc} =1MV/m	0.54	112
AC power(KW/m) for E _{acc} =5MV/m	13.5	2,800
Efficiency(%)@5MV/m&CW operation with 10mA beam (Klystron +P _{loss})	44	1.7

AC power 効率
0.5

$$\frac{P_{\text{loss}}}{L} = \frac{E_{\text{acc}}^2}{(R/Q) \cdot Q_0} \times 2$$

SuperはNormalの200倍
(4.2K)~600倍(2K)RFロス
効率が良い。

他冷媒との比較

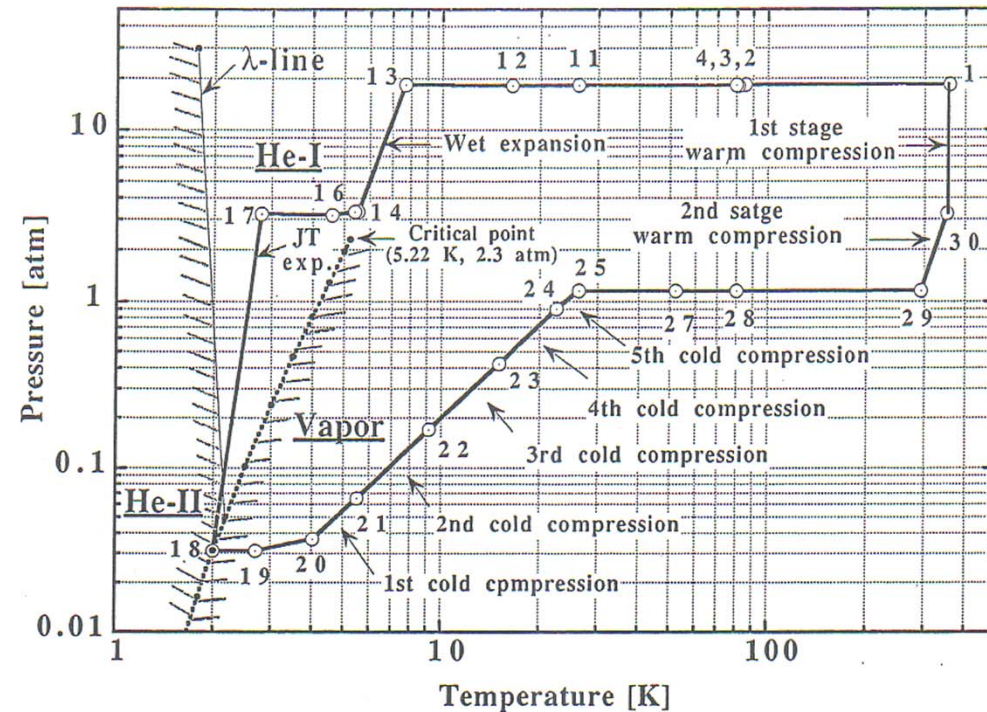
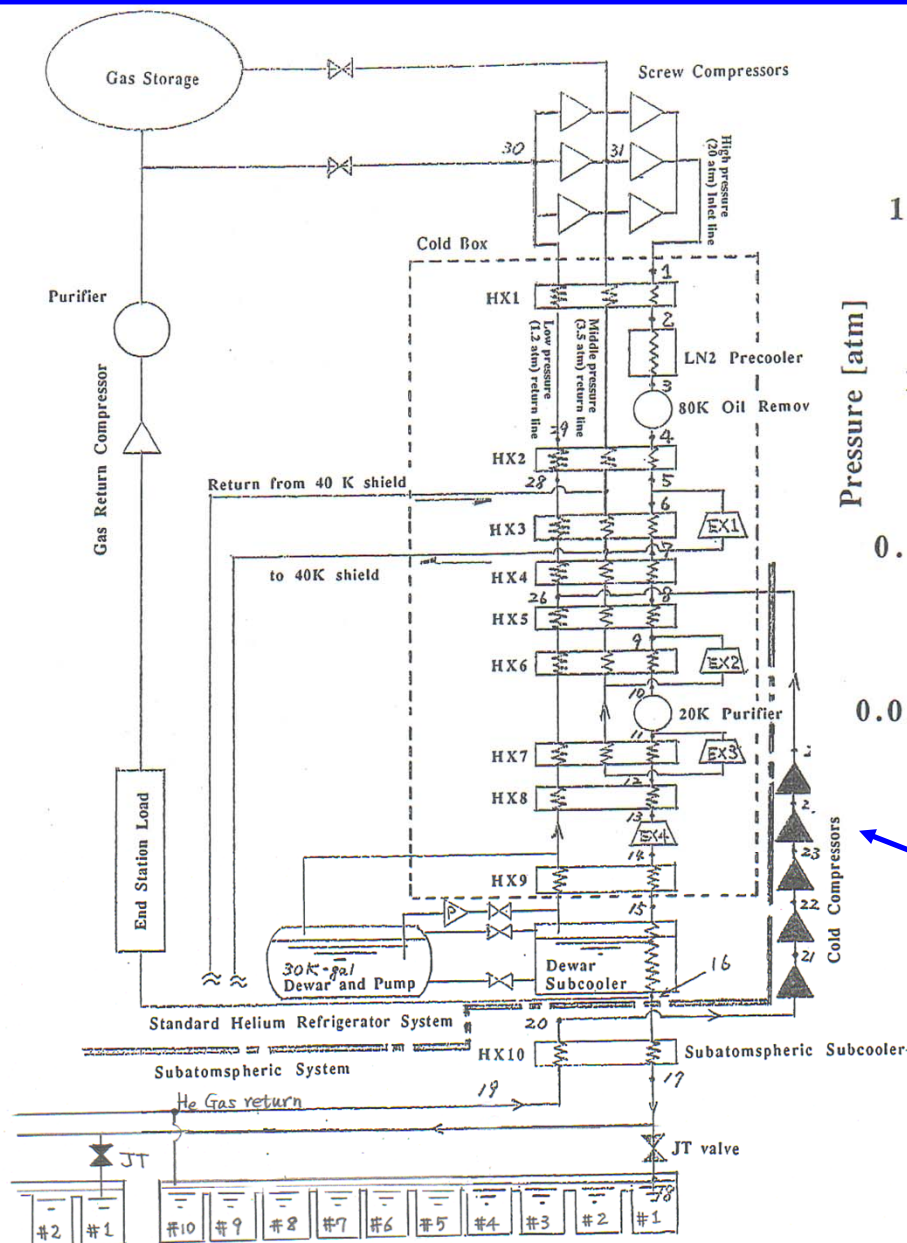
この数値を覚えておくと便利。
演習問題4を見よ。

表 5 - 1 冷媒の熱特性

		He	n-H ₂	N ₂	O ₂
分子量		4.003	2.016	28.013	32.00
沸点 (大気圧)	[K]	4.22	20.39	77.35	90.19
臨界点 温度	[K]	5.20	33.19	126.2	154.6
圧力 MPa		0.227	1.32	3.40	5.04
三重点 温度	[K]	2.18	13.96	63.15	54.36
圧力 kPa		5.04	7.20	12.5	0.146
密度 液体 (沸点)	[kg/l]	0.125	0.0708	0.809	1.14
蒸気 (沸点)	[kg/l]	0.0169	0.0133	0.0046	0.0045
ガス (300 K, 大気圧)	[kg/m ³]	0.1625	0.0819	1.139	1.301
ガス (300 K) と液体との体積比		769	864	710	876
蒸発潜熱 (沸点)	[kJ/kg]	20.4	452	199	212
	[kJ/l]	2.55	31.7	161	243
ガス顕熱 (沸点から300 Kまで)	[kJ/kg]	1543	3510	234	193
(液1リットル当りに換算)	[kJ/l]	193	249	189	220
ガス顕熱比 (顕熱/蒸発潜熱)		75.6	7.8	1.18	0.91

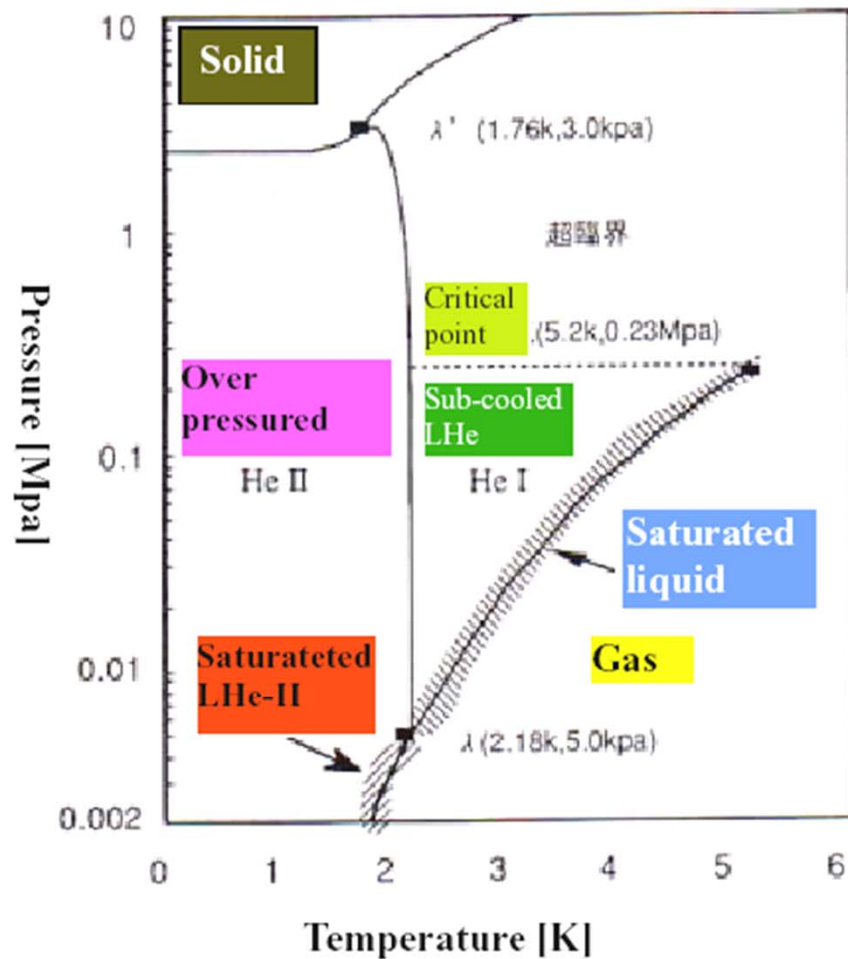
液体ヘリウムの蒸発潜熱は液体窒素の1/10。ヘリウムは液体窒素の10倍蒸発し易い。
1Wの発熱がある時、液体ヘリウムは1.41 l/hr蒸発する。
演習問題3、これを確認せよ。

2K 液体ヘリウム冷凍機(CEBAF)



Cold compressor
冷たいHeガスを圧縮して常温付近の
温度、圧力に戻す。

超流動液体ヘリウム(He-II)の性質



- ・ λ -point以下の温度領域で超流動状態になる。He-II
- ・He-IIでは粘性がなくなり、スパーリークを起こす。
- ・He-IIでは、液体の熱伝導率が著しく増大する。
銅(低温)の100倍。

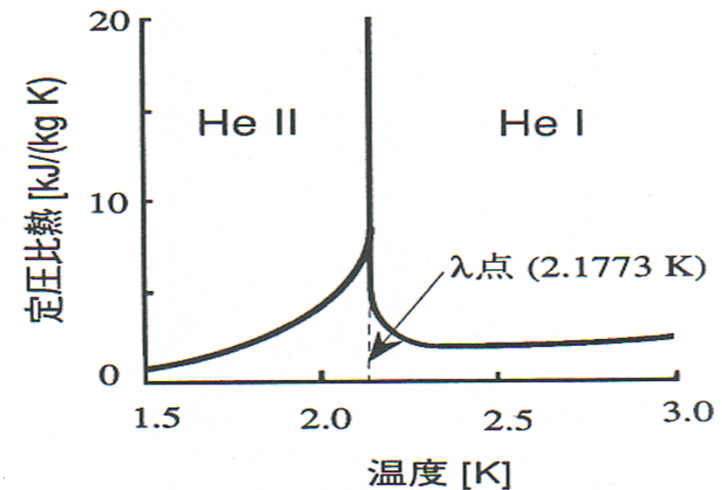


図 5 - 2 ヘリウム 4 の定圧比熱

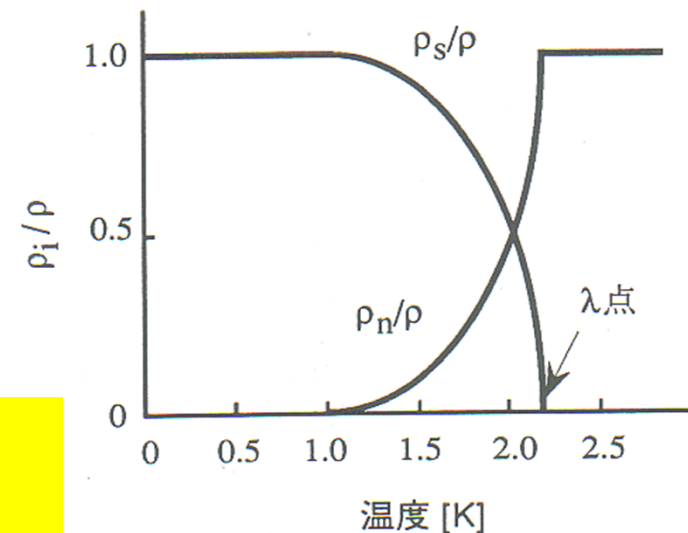


図 5 - 3 He II 中での超流動成分 (ρ_s/ρ) と常流動成分 (ρ_n/ρ) の比率の温度変化

演習問題4

超伝導空洞が1Wの発熱を発生する時、温度を一定に保つために必要な排気ポンプの容量を見積もれ。

演習問題4解答

1W・1hrの発熱で蒸発する液体ヘリウム(ここでは、4.2Kの密度を使う)は、
 $w = 1.41\text{ l}$ 。

これは300K-normal volumeに換算すると、

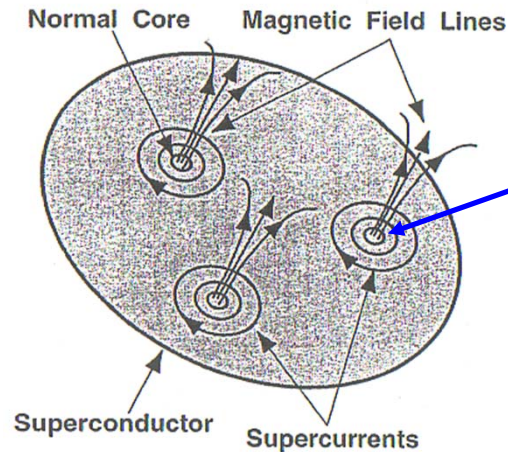
$$V = 1.41 \times 769 = 1084.29\text{ l} = 1.08429\text{ m}^3。$$

必要なヘリウムの排気速度は、

$$Q = 1084.29/60 = 18.07\text{ l/min} \text{ あるいは } 0.301\text{ l/sec}。$$

実際にはさらにコンダクタンスを考慮する必要がある。

残留磁場の影響



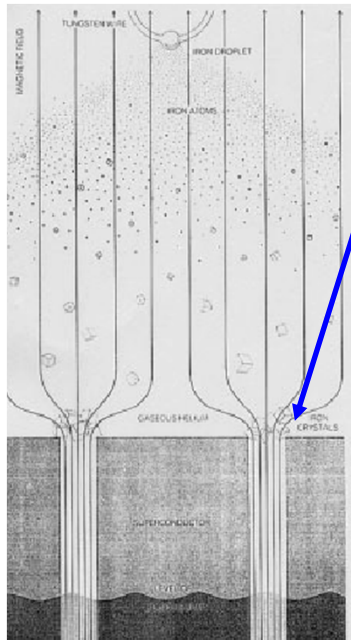
磁場が存在する状態で冷却されると、超伝導状態になった時、格子欠陥等で磁場がトラップされ、凍り付く。
この時、Fluxのcoreの部分normalになる。

$$R_s(H_{ext}) = R_n \cdot \frac{H_{ext}}{H_{c2}(T)}$$

$$R_n = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2\sigma}}$$

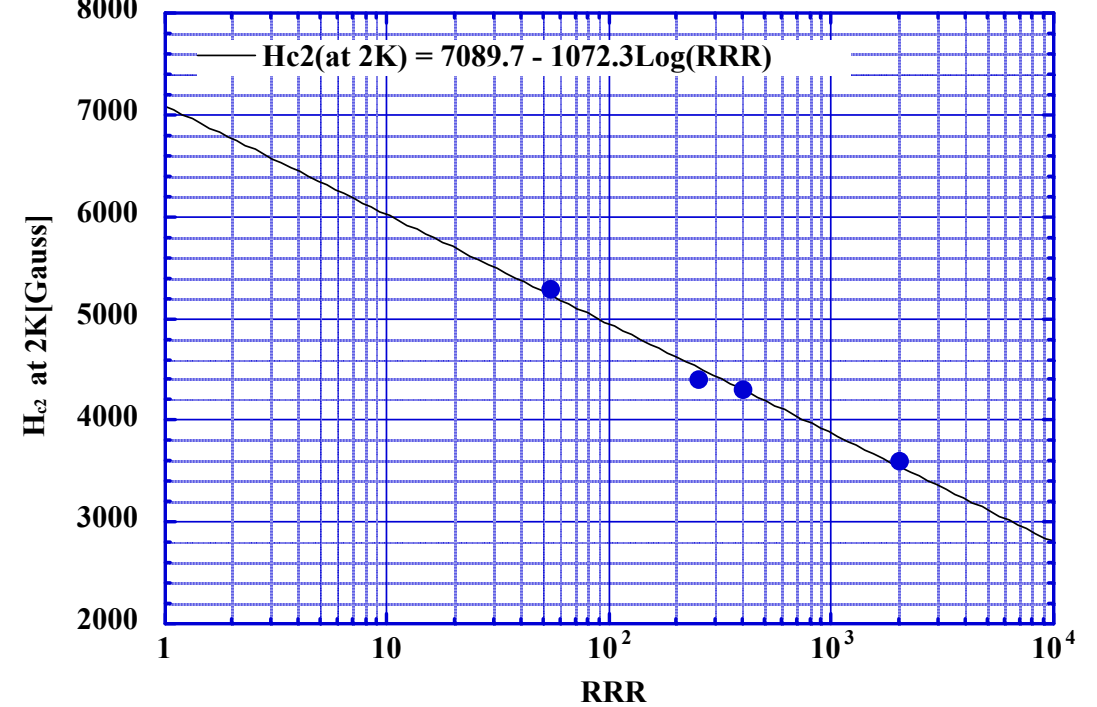
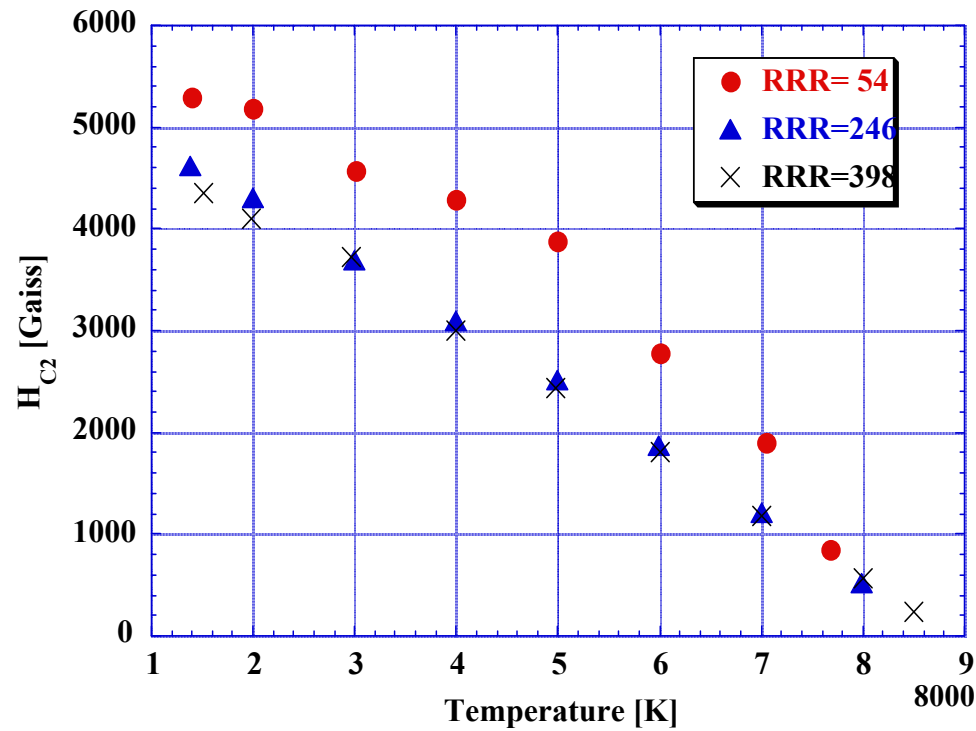
$$\begin{aligned} R_s(H_{ext}) &= \sqrt{\frac{\mu\omega}{RRR \cdot \sigma(300K)}} \cdot \frac{H_{ext}}{H_{c2}} \\ &= R_n(300K) \cdot \frac{H_{ext}}{\sqrt{RRR} \cdot H_{c2}(T, RRR)} \\ &= R_o(T, RRR) \cdot H_{ext} \end{aligned}$$

温度が高いほど小。

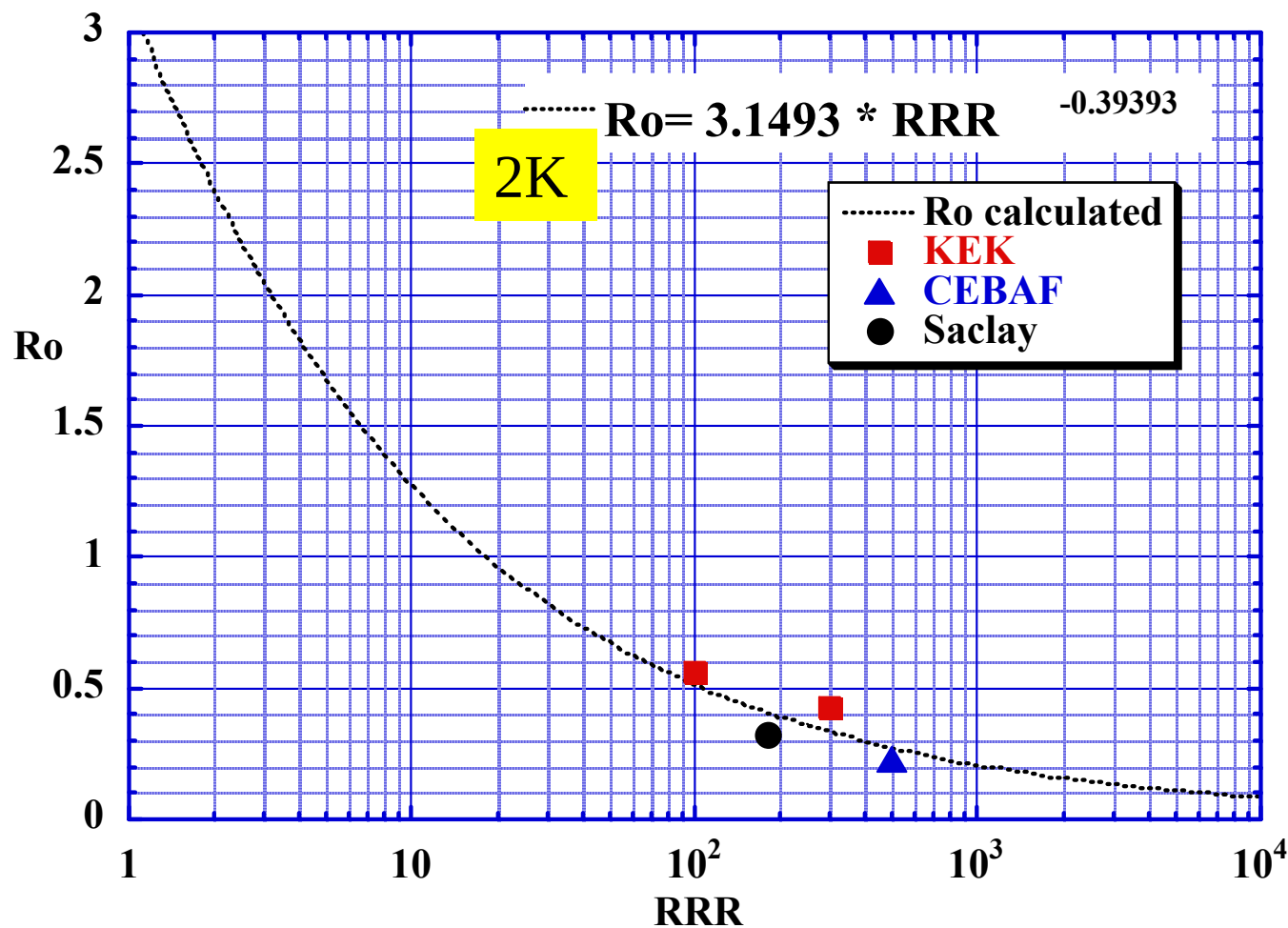


一般に、冷却温度が低いほど、Frozen flux trapping effectは小さい。

H_{C2}のRRR依存性



残留磁場とRRR



Frozen flux trapping 対策にはRRRの高いニオブ材を使うことが望ましい。
例えば、RRR=500ではRRR=100の場合の約半分。

6. Summary

- 超伝導空洞の性能測定法を示した。
- 超伝導空洞では、Q値が高いのでパルス法によりQ値を計算する。
- 空洞性能測定には、わずか数100WのRFソースで事足りる。液体ヘリウムで冷却する必要があるが、性能測定設備は常伝導ほど大きな負担は不要。
- 超伝導空洞の開発は、効率的に行える。