

1. 概要

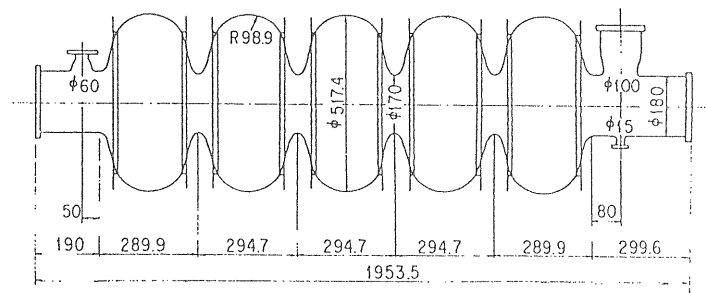
超伝導は永久電流にみられる様に通常電気抵抗が零となる現象として、大型の超伝導マグネット等に应用されている。一方高周波に対する超伝導体の表面抵抗は完全に零とはならないが、銅の場合の10万分の1程度であり、低損失の高周波加速装置として1965年にStanford大学で超伝導リニアックとして应用が始められ、現在は高エネルギー物理学研究所、CERN、DESY等で電子蓄積リングの加速装置として大規模に应用されている。又、米国のCEBAF等リニアック等の大規模な应用が始められようとしており、さらにTeV エネルギーのリニアコライダーをパルス化した超伝導空洞を用いて作る提案も出され、これに向けた高加速電界（ $\sim 30\text{MV/m}$ ）の超伝導空洞の開発が各国で進められている

又トリスタンの第3期計画としてB-Factoryが計画されているが、ここでも大電流のビーム（1～2 A）を加速するために超伝導空洞の使用が進められようとしており、高加速電界で大電力を使用した超伝導空洞の開発が進められている。この様に超伝導加速空洞は高効率のビームエネルギー変換が必要な分野において、今後大きく発展すると思われる。

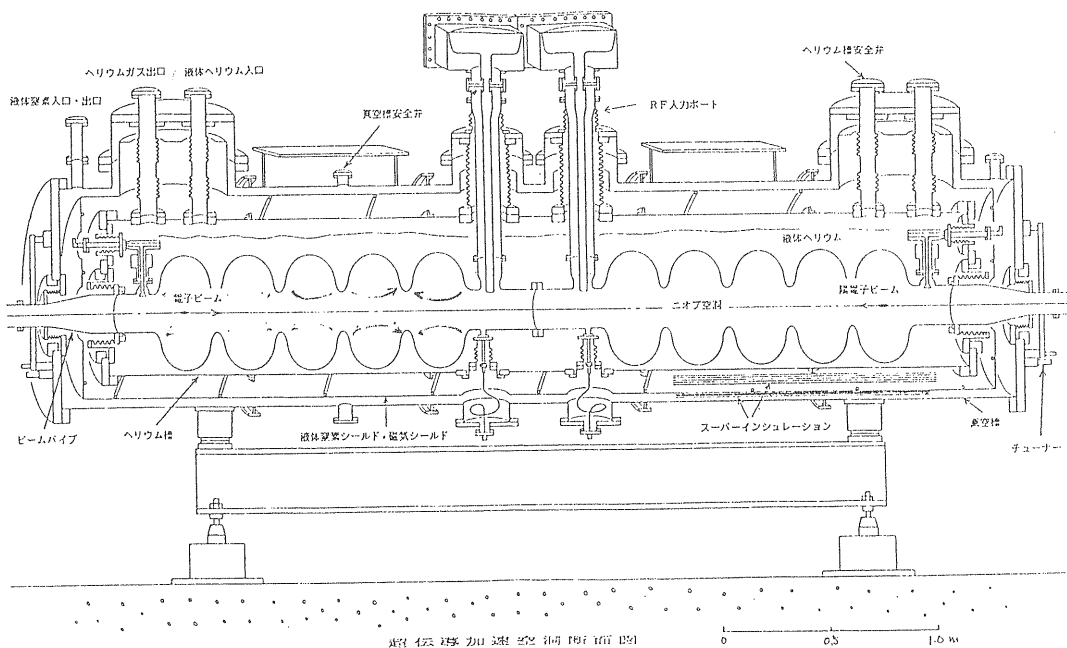
本講義では世界に先がけて大規模な超伝導加速空洞の実用化を行った高エネルギー研究所の超伝導加速空洞を中心に各種の応用、超伝導空洞の製作、測定、ビーム加速、現状と将来の見通し等について述べるが、筆者の力不足により非常に概説的なものとならざるを得ない。すぐれた総合的な解説等は参考文献に挙げておくので参照してほしい。又、このシリーズのOHOに野口氏による講義がある。

超伝導空洞は、超伝導、表面、超高真空、低温、高周波等々の総合的な技術であり、今後さらに多くの講義が行われるであろうと期待している。

下図にKEKの超伝導加速空洞の概念図を示す。真空断熱したHe槽内にNb製の5連空洞が2台おさまられている。RF入力ポートより508MHzのマイクロ波を入力し π モードの励起を行う。



The shape of 5-cell cavity for TRISTAN Main Ring in KEK.



2. 表面抵抗及びビームへのエネルギー変換効率

ここでRF空洞についての基本的な事のみを復習しておく。通常加速空洞は銅等の電気抵抗の小さな金属により製作される。高周波は金属表面に δ の深さまで侵入する。 δ は表皮厚さで次式で与えられる

$$\delta = (2 / \mu_0 \sigma \omega)^{1/2} \quad (1)$$

σ = 電気伝導度 (銅では室温で $5.80 \times 10^7 / \Omega\text{m}$)

μ_0 = 透磁率

500MHzでは表皮深さは約 $3 \mu\text{m}$ である。

単位面積当たりの高周波損失は表面抵抗が R_s で、表面での磁場 H_s の場合

$$P_s = R_s H_s^2 \quad (2)$$

で与えられる。表面抵抗は

$$R_s = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu \omega}{2\sigma} \right)^{1/2} = \frac{1}{2\sigma\delta} \quad (3)$$

で与えられる。高純度金属の場合、低温では平均自由行程 (l) が大きくなり、伝気伝導度が数千倍に上がる。しかし表面抵抗は異状表皮効果により数分の1にしか下がらない。異状表皮効果の表面抵抗は $l \gg \delta$ の場合に

$$R_s = \frac{1}{2} \frac{8}{9} \left(\frac{\sqrt{3}}{16\pi} \frac{\mu_0 \omega^2 l}{\sigma} \right)^{1/3} \quad (4)$$

で与えられる。

空洞のQ値 (Quality factor) は

$$Q_0 \equiv \frac{\omega W}{P_0} \quad (5)$$

で定義される。

ここで ω は共振角周波数、 W は空洞内の蓄積エネルギー、 P_0 は空洞壁での高周波損失であり次のよう

に与えられる

$$W = \frac{\mu_0}{2} \int |\vec{H}|^2 dV = \frac{\epsilon_0}{2} \int |\vec{E}|^2 dV \quad (6)$$

$$P_0 = \frac{R_s}{2} \int |\vec{H}|^2 dS \quad (7)$$

dV は体積要素、 dS は空洞の面積要素である。

(6)(7)を(5)に代入して

$$Q_0 = \frac{\omega \mu_0}{R_s} \frac{\int |\vec{H}|^2 dV}{\int |\vec{H}|^2 dS} = \frac{G}{R_s} \quad (8)$$

$$G = \omega \mu_0 \frac{\int |\vec{H}|^2 dV}{\int |\vec{H}|^2 dS} \quad (9)$$

G は形状因子 (geometrical factor) である。

又空洞のシャントインピーダンス R_{sh} は

$$R_{sh} = \frac{V_c^2}{P_0} = \frac{V_c^2 Q_0}{\omega W} \quad (10)$$

で与えられ、 V_c は空洞電圧である。さらに

$$[R/Q] = \frac{V_c^2}{\omega W} \text{ とすると } R_{sh} = \left[\frac{R}{Q} \right] Q_0 \quad (11)$$

ビームに与えられる電力を P_b とすると、必要な高周波電力 P_{RF} は

$$P_{RF} = P_0 + P_b \quad (12)$$

であり、ビーム加速の高エネルギー効率 ζ_b は

$$\zeta_b = P_b / P_{RF} \quad (13)$$

で与えられる。又、(11)(10)より

$$\zeta_b = 1 - \frac{P_0}{P_{RF}} = 1 - \frac{1}{P_{RF}} \left(\frac{V_c^2}{R_{sh}} \right) \quad (14)$$

効率を上げるためには R_{sh} を大きくする必要がある。

(11)より

$$R_{sh} = \left[\frac{R}{Q} \right] \frac{G}{R_s} \quad (15)$$

と表すと、常伝導空洞では空洞材質により R_s が決まるため R_{sh} を大きくするため $[R/Q] \cdot G$ を大きくするように空洞形状を設計する必要がある。

超伝導体の表面抵抗はマイスナー効果により超伝導体中に磁場が侵入深さ λ_L 以上侵入しないが、この部分にある有限温度で存在する常伝導電子による損失が発生することによって生じる。磁場の侵入深さは、クーペアーをこわす振動数より十分小さな $h\nu < 2\Delta$ の振動数に対しては、ほぼ一定とみなして良く、 $10^{-2} \mu\text{m}$ と常伝導の侵入深さの数 μm に比べ2桁小さく、又常伝導電子の数も小さいため超伝導体の表面抵抗の値は常伝導体に比べ十万分の一程度に小さくなる。

BCS理論による表面抵抗の値はMattis, Bardeen及びAbrikosovらにより求められている。

$$R_s = R_{BCS} + R_{res}$$

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^a}{T} \exp \left[-\frac{\Delta}{k_B T} \right] \quad 1.5 \leq a \leq 2 \quad (16)$$

で与えられる。(図1)

超伝導空洞の場合の空洞の発熱は液体ヘリウムにより冷却される。低温での発熱を室温に汲み上げるために冷却機の運転のエネルギーが必要となる、これは

$$P_{ref} = \left(\eta^{th} \frac{T_{4.2}}{T_{300} - T_{4.2}} \right)^{-1} (P_0 + P_{cryo})$$

$$= (\eta_{cr})^{-1} (P_0 + P_{cryo})$$

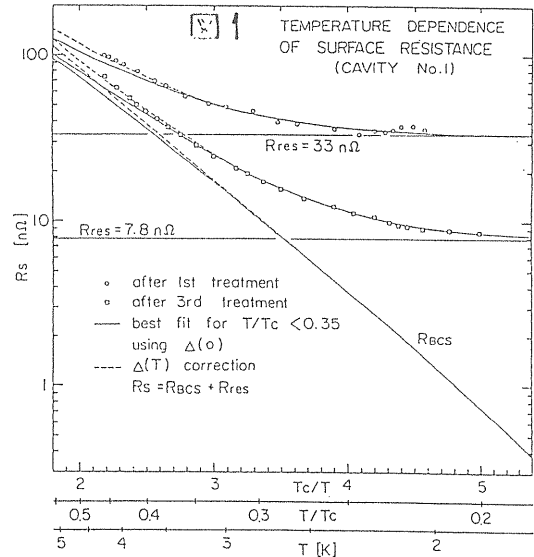
と与えられ

$$P = P_b + P_{ref}$$

であり、ビームへのエネルギー変換効率は

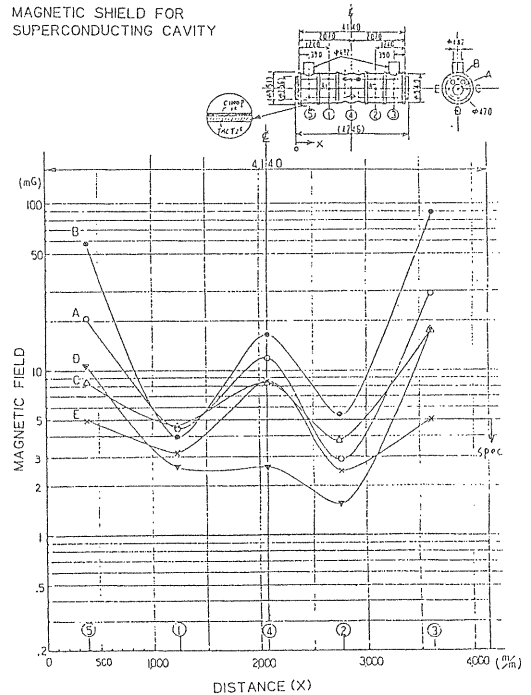
$$\eta_b = P_b / P = \frac{1}{1 + (P_0 + P_{cryo}) / (P_b \eta_{cr})}$$

となる η_{cryo} は $2 \sim 3 \times 10^{-3}$ である



表面抵抗は、超伝導転移の時に超伝導体にトラップされた磁束量子の数に比例した抵抗値の増加を示す。従って磁気シールドを行ったり、転移時にヘルムホルツコイルで地磁気を打ち消したりすることが必要である。下図はKEKでの磁気シールドの結果であり、空洞付近で10mG以下にシールドされている。

MAGNETIC SHIELD FOR SUPERCONDUCTING CAVITY



3. 超伝導物質の諸性質

超伝導空洞は超伝導体としてPb, Nb, Nb₃ Sn等を使用して製作されるが、今日ではニオブ(Nb)が最も多く使用されている。Nbは表3-1 に示すように融点が高く、溶接には電子ビーム溶接が使用される。又超伝導空洞の性能には微量のH, O, N等の混入が大きく作用するため、電子ビーム溶接(EBW) 時の真空度等にも十分注意する必要があり、高温から使用温度の低温までのNbの性質を、十分知らなくてはならないが、現状では十分なデータは毎回ごとに測定して決定している。

超伝導体の基本的なパラメーターに、臨界磁場H_c, H_{c2}があるが、高周波空洞の場合には高周波のピークの磁場がDCの場合より高くなり、H_{sh} (磁束密度B_{sh}) で与えられる。

表3-2 にPb, Nb, Nb₃ SnのH_{sh}等を示す。この表からNbにおいても原理的には約50MV/mの加速電場を発生出来る可能性があるが、現在は30~35MV/mにとどまっている。

表3-1

Material	T _c (°K)	B _c (mT)	B _{sh} (mT)	E _{acc} (MV/m)	K
Pb	7.18	80.4	105	26*	0.5
Nb	9.2	200	240	60*	1.0
Nb ₃ Sn	18.2	535	400	100*	20

*B_{sp}/E_{acc} = 4mT/1MV/m

Nb空洞の場合、半径r_Dの常伝導領域があった場合に、得られる最大加速電界は、λを熱伝導率として

$$E_{acc} \propto \sqrt{\lambda / R_D r_D}$$

で与えられ、純金属においては、常伝導の電気抵抗と熱伝導率は比例しており、常温と低温での電気抵抗の比RRRを測定してλを推定出来る。Nbの場合実験的に

$$\lambda = 0.25 \times RRR \text{ (W/mk)}$$

表3-2

タンタル・ニオブの物理的性質

性質 \ 種類	タンタル	ニオブ	チタン
原子番号	73	41	22
原子量	180.95	92.91	47.90
比重	16.6	8.57	4.54
結晶構造	B. C. C	B. C. C	H. C. P < 885°C B. C. C > 885°C
融点 (°C)	2996	2468	1668
縦弾性係数 kg/mm ²	18.9 × 10 ³	10.5 × 10 ³	10.85 × 10 ³
ポアソン比	0.35	0.38	0.34
比電気抵抗 (μΩ·cm)	12.4 (20°C)	15.2 (0°C)	47-55 (20°C)
熱伝導度 cal/cm·°C·sec	0.130	0.125	0.041
熱膨張係数 (1/°C)	6.5 × 10 ⁻⁶	7.1 × 10 ⁻⁶	9.0 × 10 ⁻⁶
比熱 (cal/g·°C)	0.036	0.065	0.13
熱中性子吸収断面積 (barns)	21.3	1.15	5.8

と与えられる。高い加速電界を得る為には高いRRRの材料が必要となる。その為には、不純物としてH, C, N, O等の軽元素を取り除く必要があり、電子ビーム溶解の真空度を上げ、溶解の回数を増やす等が行われており、RRR~20ぐらいだったものが現在は、RRR300 以上のものも工業的に入手出来るようになってきている。トリストランでは、国産のRRR100 ~200 のNbを使用している。

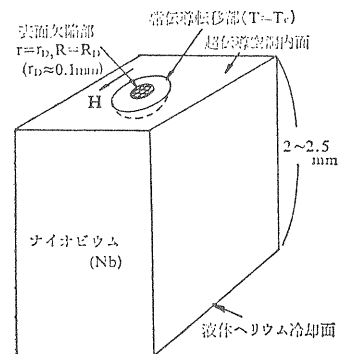
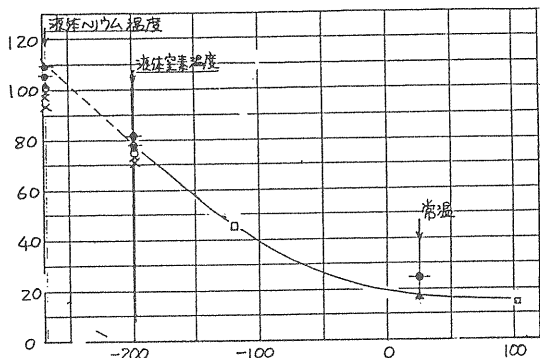


図3-1 超伝導空洞表面の欠陥による常伝導転移部モデル r_D: 表面欠陥部半径, R_D: 表面欠陥部の表面抵抗, T_c: 転移温度

RRRが高くなった場合、化学処理等における水素の吸収によるQ値の低下と、機械的強度の低下の問題があり注意が必要である。

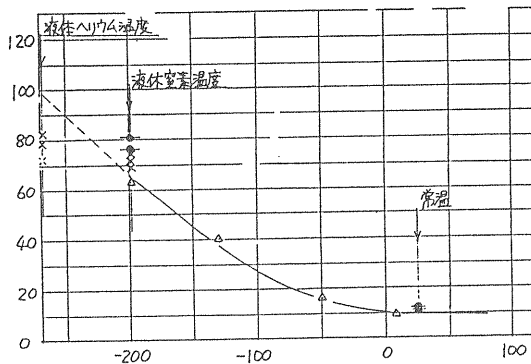
図3-2 にNb の温度による強度変化を示すが、高純度の場合、室温での強度が低下するので、室温で十分な強度を持たせておく必要がある。低温においては微量の不純物により、BCC 金属の特性として低温脆性が発生する可能性があるので溶接等の各工程では、細心の注意を払う必要がある。

図3-2 ニオブ材の引張応力と温度の関係



備考：○中記号；東京電解(株) S60.2 実験値---表(1)-1 参照
 ×；高エネ研での実験値 ---表(1)-2 参照
 □；AEROSPACE STRUCTURE METAL HANDBOOK CODE 5201 のデータ---表(1)-3 参照
 ▲；溶接部低温引張試験結果(高研)---表(1)-5 参照

ニオブ材の0.2%耐力と温度の関係



備考：○中記号 × } 図(1)-1 と同記号
 ▲；PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY OF LONDON VOL. A281 223 (1964) 277 表(1)-4 参照

4. 超伝導空洞の製作

Nbの超伝導体としての磁場の侵入深さは約 30nm であり、原理的にはこれの数倍の $1\mu\text{m}$ 以下の厚さの空洞壁があれば、空洞を作ることが出来るが、機械的に強度をもたせるためCu等の熱伝導の良い金属にメッキやスパッター法などで $1\sim$ 数 μm の超伝導体の膜をつけることが行われる場合もある。多くの場合には、Nbの $2\sim 3\text{mm}$ 厚さの板より成形し、溶接により製作される。Nbにより製作する場合についてKEKの例を紹介する。

- (1) Nb材の検査
- (2) 半割り空洞の成形 (液圧成形)
- (3) 内面のバフ研磨 $30\sim 50\mu\text{m}$
- (4) 塩酸 (18%) による外面の錆の除去
- (5) 水に浸した後、表面検査及び除去 (鉄分)
- (6) 電子ビーム溶接による単空洞の成形
- (7) 溶接部 (赤道部) の研磨と目視検査
- (8) 電子ビーム溶接による5連化 (図1)
- (9) 溶接部 (アイリス部) の研磨と目視検査
- (10) 電解研磨 ($80\mu\text{m}$)
- (11) 真空焼鈍 ($700\text{ }^\circ\text{C}$ 、1.5 時間、 $1\times 10^{-5}\text{Torr}$)
- (12) プリチューニング

各セル長を調節して、共振周波数の調整と電界分布の一様化

- (13) 仕上げ電解研磨 ($5\sim 10\mu\text{m}$)
- (14) H_2O_2 リンス、純水、超純水による洗浄
- (15) クリールーム (クラス100)内での組み立て
- (16) 空洞単体での性能試験 (縦測定)
- (17) 10連化及び周辺部品の実装 (横組み込み)
- (18) 最終状態での性能試験 (横測定)
- (19) 主リングへの設置

不純物、キズなどは性能低下に結びつくので、何回もの検査により取り除くと同時に、取り扱いに注意をする必要がある。

表面処理法には化学研磨と電解研磨がある。化学研磨は、 HNO_3 、 HF 、 H_2PO_3 の $1:1:1$ 液

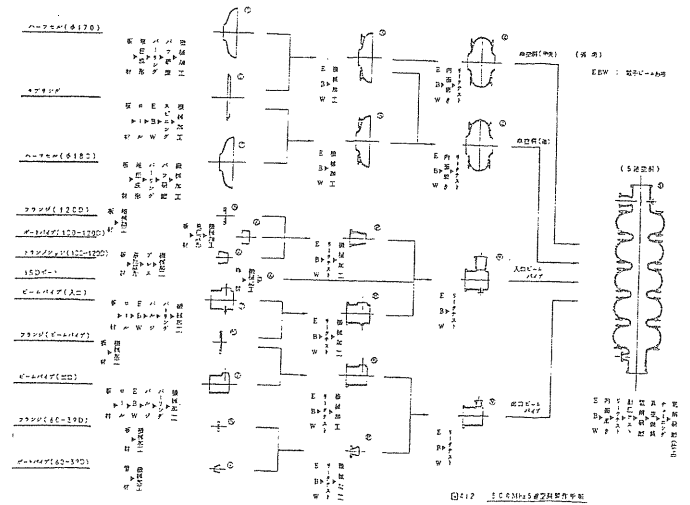


図1 超伝導空洞製作フロー図

にて数分から数十分の処理を行う。

電解研磨は $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HF} = 85 : 10$ の液で、空洞を陽極に、純アルミニウムを陰極にして行われる。

(図4-1) 研磨後の水洗は特に重要である。

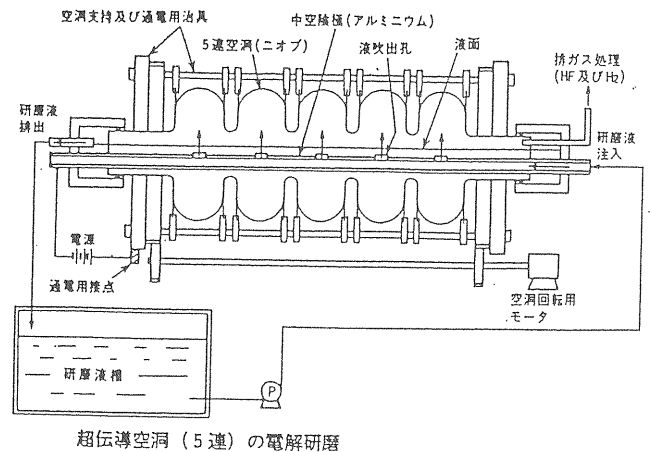


図4-1 模型回転電解研磨装置

各国においては、化学研磨が主流であるが、KEKでは独自の横型電界研磨法を開発し良い結果を得ている。(11)の真空焼鈍は(10)の電界研磨(80 μm)の時に、水素がNbの中に侵入しQ値の著しい低下を来すため(図4-2)、高真空焼炉により水素脱ガスを行うものである。図4-3に電界研磨サンプルの脱ガス特性を示すが、600 $^{\circ}\text{C}$ 付近で水素が出てくることが分かる。

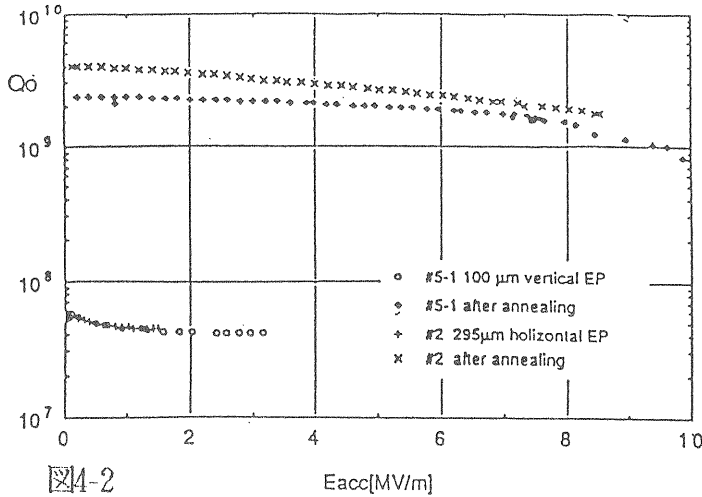


図4-2

Eacc[MV/m]

Effect of the heavy electropolishing on scc RF performance.

最近になって、RRRの高いNbについて化学研磨においても水素の侵入が問題になっている。現象としては、冷却をゆっくり行って100 $^{\circ}\text{K}$ ~150 $^{\circ}\text{K}$ に長くどまると空洞のQ値が低下することが見出された。図4-4はサックレー研究所で冷却時間とQ値の問題を調べたものであるが、100~150 $^{\circ}\text{K}$ に長く止まったものほどQ値が悪い。この現象は、固体Nb中に溶け込んでいる水素が、低温で溶解度が減少し表面付近に析出し、超伝導特性の悪いNbの水素化物が出来るためであろうと考えられている。対策としては、冷却を200 $^{\circ}\text{K}$ 付近より短時間で行うことであるが、基本的には化学研磨においても水素脱ガスが必要であることを示している。表面処理法を改良して水素が入らない様にする研究も行われている。

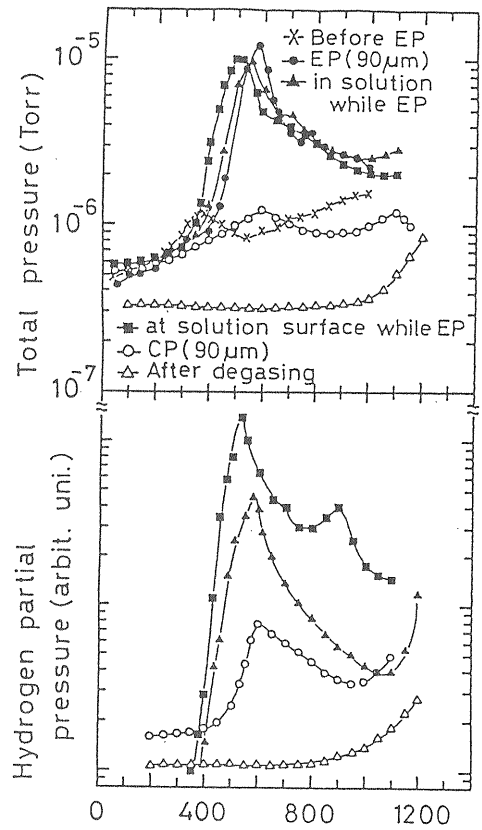


図4-3 Sample temperature (C°)

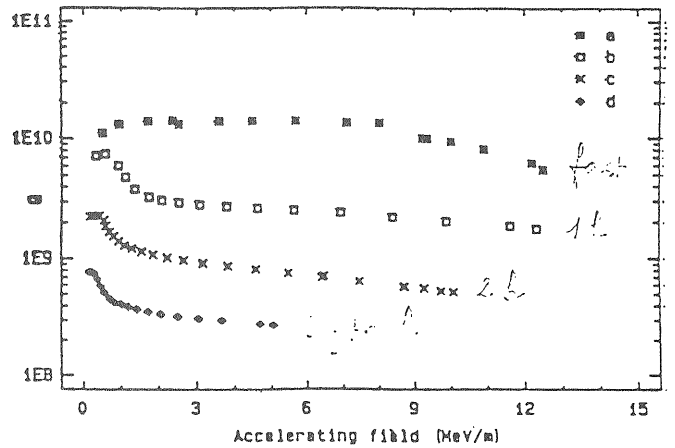
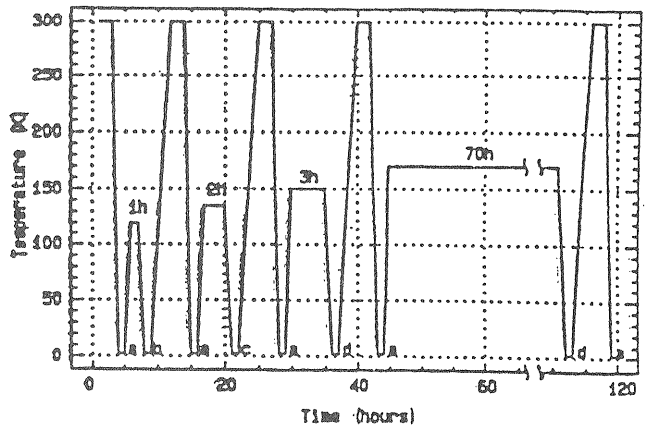


図4-4 Q(E) after thermal cycles. Labels refer to fig. 1.

5. 超伝導空洞の測定

超伝導加速空洞の性能は、目視等の外見だけでは判断することが不可能である。空洞内面の欠陥などは目視等で十分点検されるが、光沢度・滑らかさなどは必要条件ではあるが十分条件ではない。これは高周波超伝導特性が、数十ナノメートルの磁気侵入深さに相当する表面に支配されており、光の波長の数十分の1の欠陥・不純物・酸化膜などにより大きく影響されることによっている。又常伝導の空洞では、エージングにより問題とならない小さいホコリなどによっても性能が変化する。又、冷却時の真空度等によっても影響を受ける。従って超伝導空洞の性能測定は、製品の性能の確認という意味と同時に製作プロセスの最終的なチェックという意味でも重要である。多くの場合製品の途中での検査では、不具合が発見されないため、工程の管理を厳格に行うと同時に性能測定により、各工程の最終的なチェックを行う必要がある。通常縦型のクライオスタットによるチェックの測定が行われるため、縦測定と呼ばれている。

縦測定における超伝導空洞の測定項目としては、

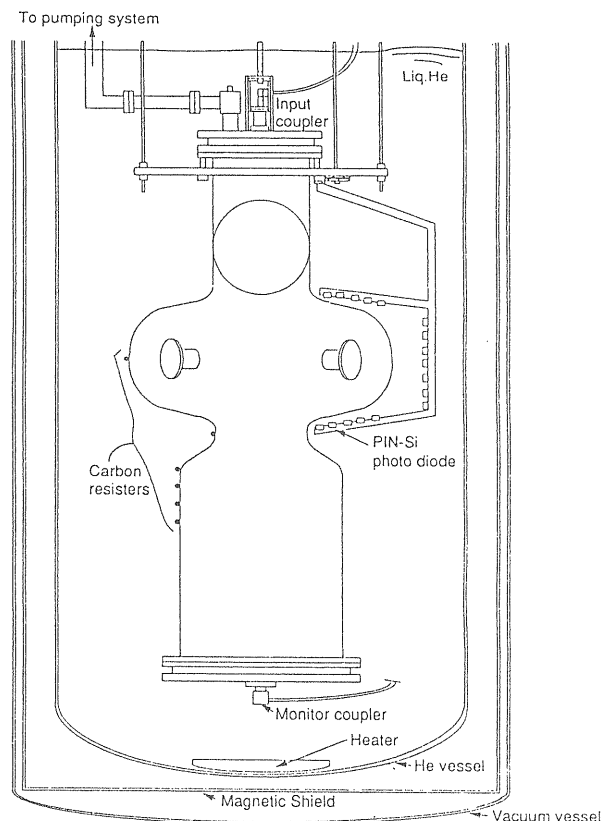
- ① 表面抵抗に関係した Q_0 値と加速電界の関係の測定
 - ② カーボン抵抗による空洞表面の温度分布の測定
 - ③ プロブによる放出電子の測定
 - ④ 高速に加速された電子の制動幅的によるX線の測定 (右図)
 - ⑤ 温度変化と表面抵抗の関係の測定等がある。
- ①は最も基本的な測定であり、これにより超伝導空洞としての性能の確認を行う事が出来る。②は空洞における不具合場所(Bad Spot)の発見等に使用される。発見されたBSは再研磨などにより取り除かれる。③④は表面の汚れ・微小なホコリ・残留ガス等の影響を強く反映する。⑤は残留抵抗値の測定に必要な。

その他ビーム加速に使用するまでには、模型クライ

オスタットへの組み込み、入力結合器・HOM結合器等の組み込み、チューナーの取り付け等があり、これらを全部行った後に、模型クライオスタットで、大電力クライストロンを用い(横測定)

- 0) 入力カップラーの常温エージング
- 1) 空洞共振周波数 f_0 、負荷 Q_L の測定
- 2) モニターポートの外部 Q 値の測定
- 3) 加速電界表示の較正
- 4) 空洞及びチューナーの機械的特性の測定
- 5) 高次モードカップラーのフィルター特性の測定
- 6) 空洞同調ループ(CTL)のパラメーター調整
- 7) 高次モードの負荷 Q 値 Q_L 及び高次モードカップラーの外部 Q 値の測定
- 8) 大電力による空洞エージング
- 9) 無負荷 Q 値、 Q_0 測定
- 10) 電界放出電子の測定

等の試験がおこなわれる。この後ビームラインに取りつけられ、ビーム加速に使用される。



縦測定でのQ値の測定は、図5-1 に示す 装置を用いて行う。超伝導空洞のQ値が 10^9 以上と高いので周波数を空調にロックして測定が行われる。図5-2 にQ値と E_{acc} のカーブを示す。図5-3 に E_{acc}^2 と $1/Q$ のカーブを示すが、電子放出しかなければ直線となるが、電子放出が始まると、ファウラーノルドハイムの式に従って指数函数的に上昇を始める。KEKのトリスタン空洞の場合多くは10MV/mまで直線にフィット出来る。図5-4 にはトリスタンでの最大 E_{acc} の分布を示す。

図5-4 において

(a)は1回目の縦測定の結果であり

(b)は5 MV/m以下の空洞を再表面処理を行った結果であり、

(c)は横測定での結果である。

- ① cavity
- ② RF input probe (movable)
- ③ RF pick up probe
- ④ evacuation line
- ⑤ 20l/sec ion pump
- ⑥ valve
- ⑦ ion gauge
- ⑧ cavity support
- ⑨ cryostat
- ⑩ LN₂ jacket
- ⑪ radiation reflector
- ⑫ spacer
- ⑬ magnetic shield

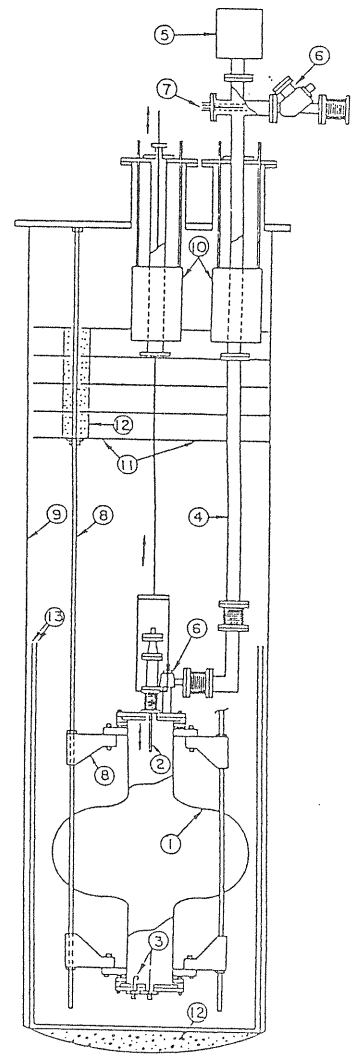
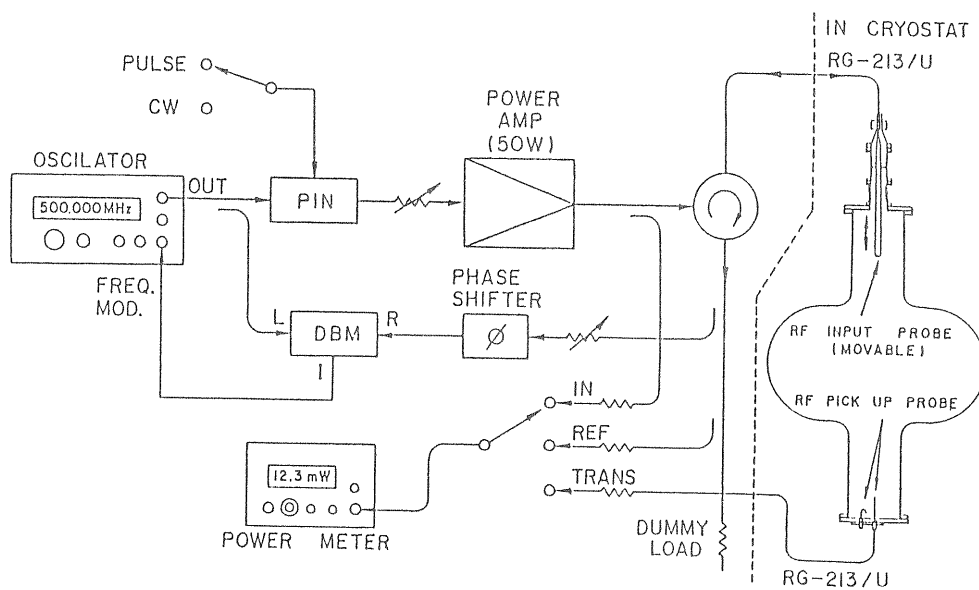
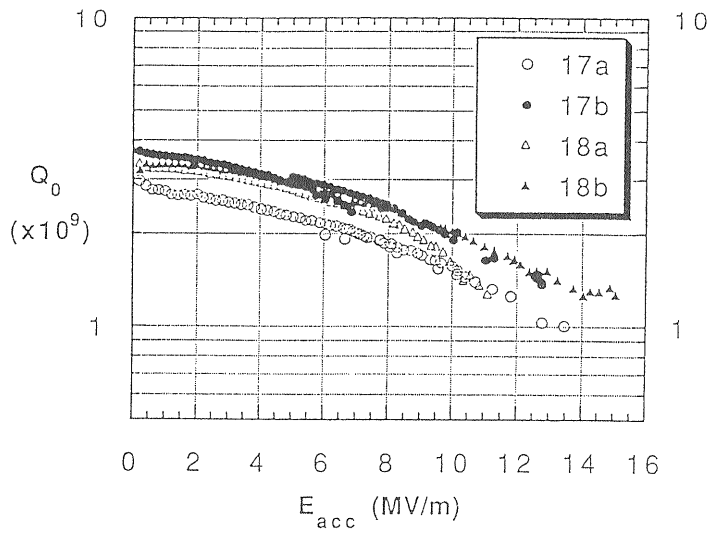


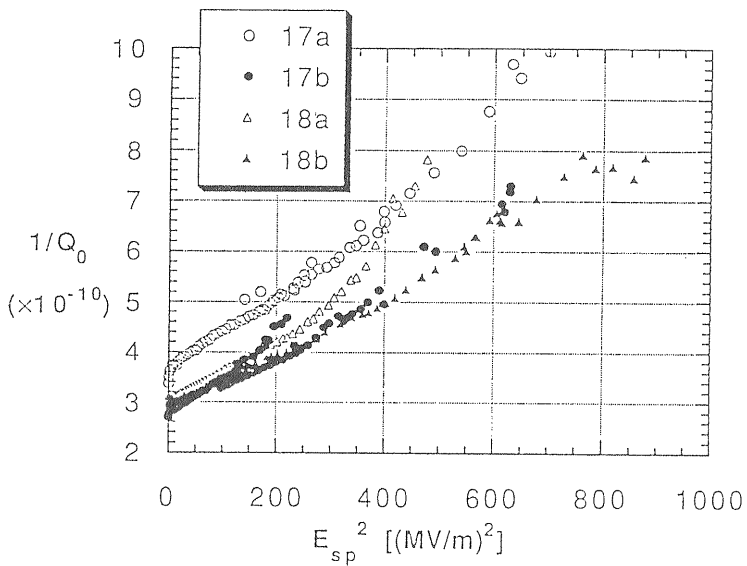
図5-1 縦測定クライオスタット概念図及びRF測定系概念図



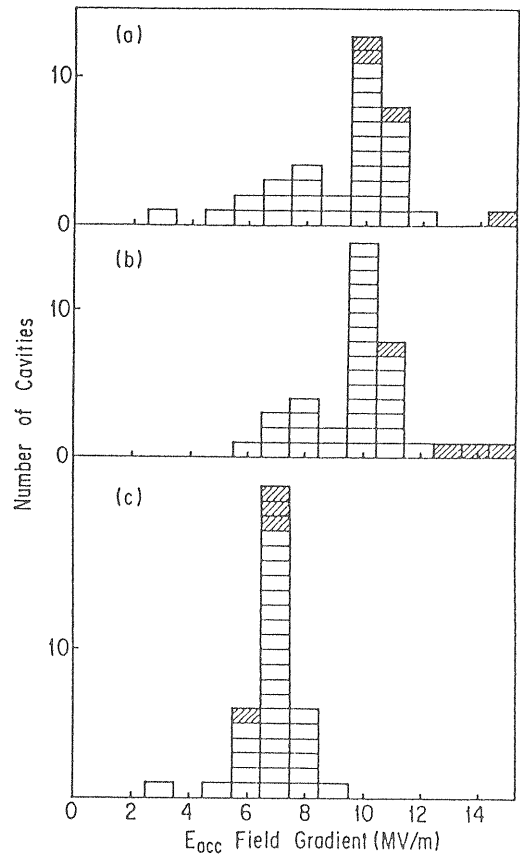
500MHz CAVITY RF MEASUREMENT SYSTEM



5-2 Q-E curves of four cavities obtained from final vertical measurements.



5-3 $1/Q_0$ vs E_{sp}^2 at the final vertical measurements.



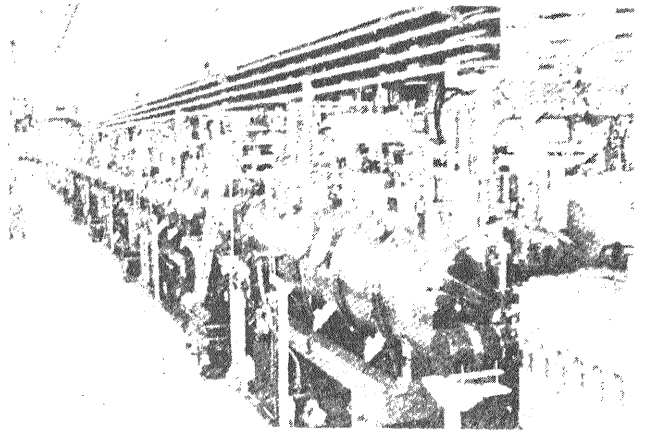
5-4

Distribution of accelerating field gradients of 32 TRISTAN cavities and spare cavities (hatched box)
 (a) initial vertical test
 (b) vertical test after retreatment
 (c) after full assembly (horizontal test)

これから縦測定ではほとんどの空洞において10MV/mの加速電界が得られている。

(c)の横測定後のピークが10MV/mから7MV/mに下がっている事が分かる。この原因については、未だ十分理解が進んでいない。横組み込みの時のゴミ等の混入、縦測定時の加速電圧を上げる為に最初は、7MV/m付近でエージング（RFプロセス）が必要であり、この付近で一時的にQ値が下がり、RFプロセスを続けるとQ値が回復することから2サイドマルチパクター等が生じている可能性があることが指摘されている。今後、10MV/m以上の応用を考えたときには重要な課題である。

図5-5 はトリスタン主リングの超伝導空洞の2年以上の運転後の最大加速電界の分布であり、図5-4 の(c)の横測定との比較により、加速器内での運転による性能の低下はみとめられない。



The string of SC cavities in the TRISTAN tunnel

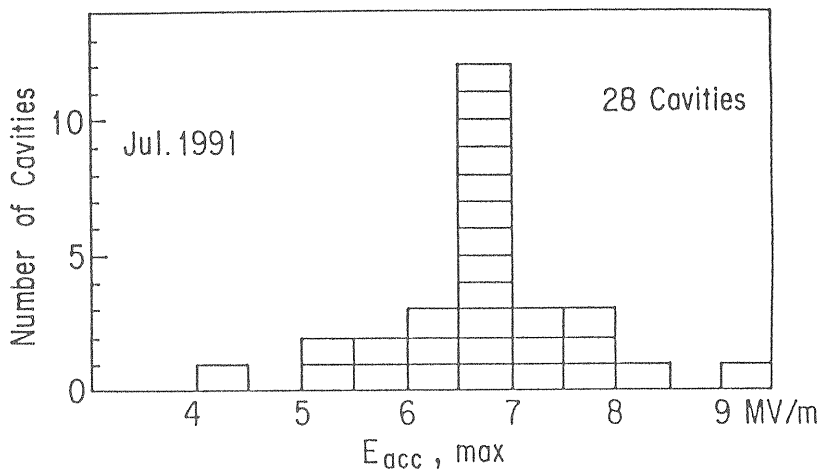


図5-5 Distribution of accelerating field gradients of 28 5-cell cavities after two year operation. (2 cavities were not connected with RF system. Another 2 cavities off-lined due to leak)

6. 超伝導空洞のカップラー、HOMカップラー及びチューナー

超伝導加速空洞は高いQ値 ($10^9 \sim 10^{10}$) をもっているため、電磁界を励起するだけの場合、結合係数 $\beta = 1$ の入力結合器を用いると、数10W ~ 100WのRF電力で十分であり、ビームパイプに小さなアンテナなどを取りつけて入力結合器とすることが出来る。ビーム加速を行う場合には、100kW程度のRF入力結合器を必要とし、結合係数 $\beta \approx 1,000$ とする必要がある。

ビームがロスのある小さい空洞の中を通過すると、高調波 (HOM) を励起し、高い電磁界を発生したり、ビームの不安定を引き起こしたりする可能性がある。このためHOMを空洞外へ取り出し、空洞のHOMに対するQ値を $10^4 \sim 10^5$ までさげる必要がある。加速モードに影響を与えないで、HOMのみを取り出す結合器をHOMカップラーという。

空洞の周波数は製作する際に精密に調整されているが、加速器の運転に必要な周波数の変化 (スローチューニング) 及び、圧力変動、振動等による周波数の変化をフィードバックにより一定値に保つ (ファーストチューニング) 必要がある。このために空洞長を変化させて周波数調整を行うチューナーを設ける必要がある。

〔入力カップラー〕

ビームに与えられるパワーは、ビーム電流 i_b として

$$P_b = i_b \cdot V_c \cos \Phi_s$$

であり、空洞内表面でのパワーロス、シャントインピーダンスを R_c として

$$P_c = V_c^2 / R_c$$

で与えられる。入力電力を P_g 、反射電力を P_r とすると

$$P_g = P_c + P_b + P_r$$

$P_c \ll P_b$ の場合 $P_r = 0$ とすると

$$\beta \approx P_b / P_c \text{ で非常に大きくなる}$$

トリスタンの場合 $P_b \approx 100\text{KW}$ 、 $P_c \approx 100\text{W}$ であり $\beta \approx 1,000$ となる。

図6-1 にトリスタンで使用されているカップラーを示す。空洞のビームパイプに取りつけられており、大気と高真空を分けるセラミック窓をもっている。セラミック窓は、ベーキングとエージングが必要であり、運転を行う上で最も注意が必要な部分である。今後B-Factory等を行う場合には300kW以上のパワーを通す必要があり、反射による定在波の低い最適位置にセラミック窓を持ってくる必要がある。コーネル大学では500kWの導波管カップラーを開発している。CBAFでは1.5GHzの導波管カップラーを使用している。

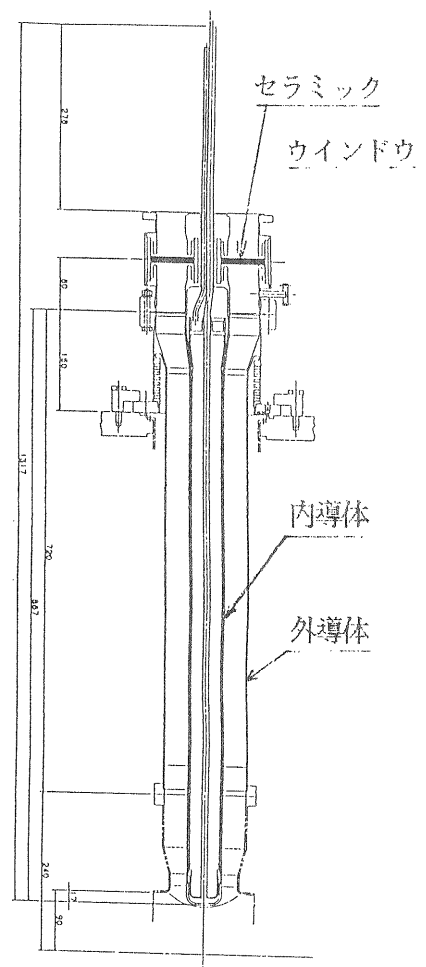


図6-1 インพุットカップラー

〔HOMカップラー〕

円筒空洞の励起モードはTE_lmn とTM_lmn で与えられるが、超伝導空洞に使用される空洞についても小さなl,m,n については電磁場のパターンを円筒空洞の場合に対応させて、モードの分類が行われている。加速に使用するのはTM₀10 モードで、基本モードと呼び、最も低い振動数を持っている。これより高い振動数のモードを高周波モード (H. O. M) と呼ぶ。高周波源からは基本モードのみを励起するが、ビームがδ函数的なパルス状であるため、回転周波数の整数倍の高周波成分をもっている。HOMの励起は

$$P_b = i_0^2 \cdot \left(\frac{R}{Q}\right) \cdot Q_L$$

で与えられる。

(R/Q) は規格化シャントインピーダンスで、

URMEL, SUPERFISH 等により計算される。Q_L はHOMカップラーにより、HOMを取り出した時の負荷Q値であり、空洞内での高周波ロス、TM₁10 モードによるビーム不安定などを生じない事から決まり、10³ ~10⁵ の値をとる。KEKの場合は~10⁵ である。図6-2 に各種のHOMカップラーの例を示す。図6-3 はKEKのHOMカップラーであり、基本モードの508MHzに対し、同軸共振器型のフィルターが入っており、基本モードのQ_{ext} は~10¹⁰となる。

B-Factory では電流が1~2 Aと大きいので (R/Q) を下げる空洞形状にすると共に、Q_L を100 以下にする必要がある。このためビームパイプを通してHOMを取り出すことが考えられている。図6-4 に B-Factory 空洞の概念図を示す。

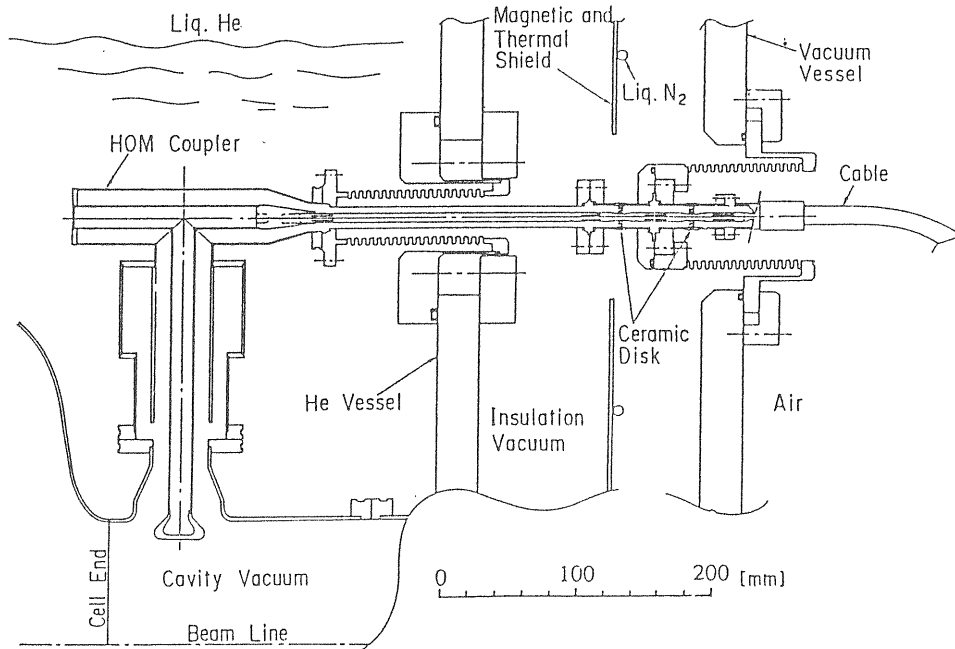


図6-3 A new developed higher order mode extraction system

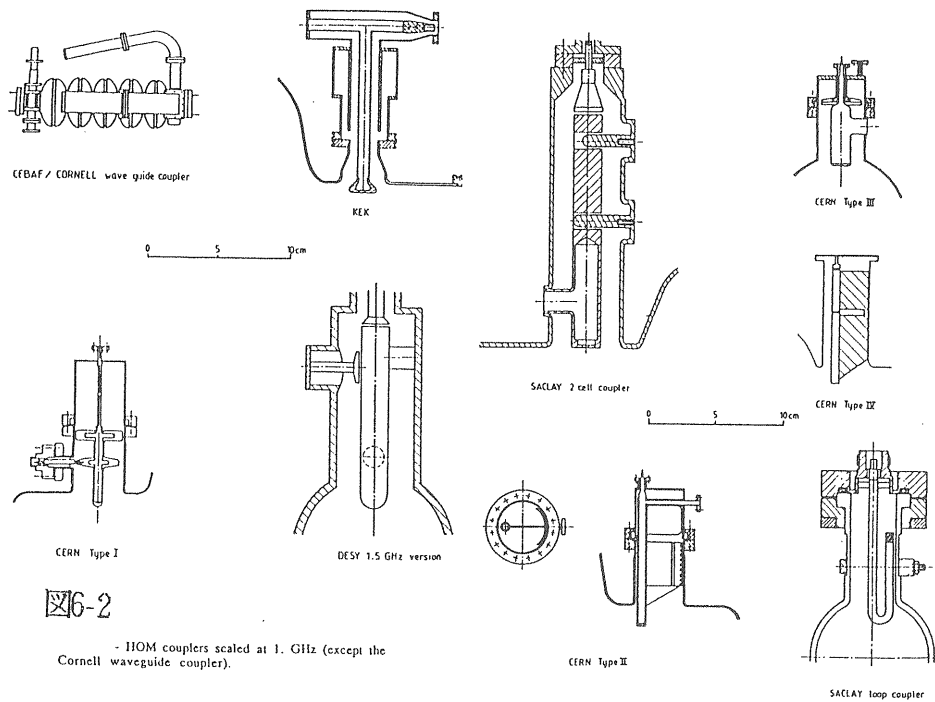


図6-2

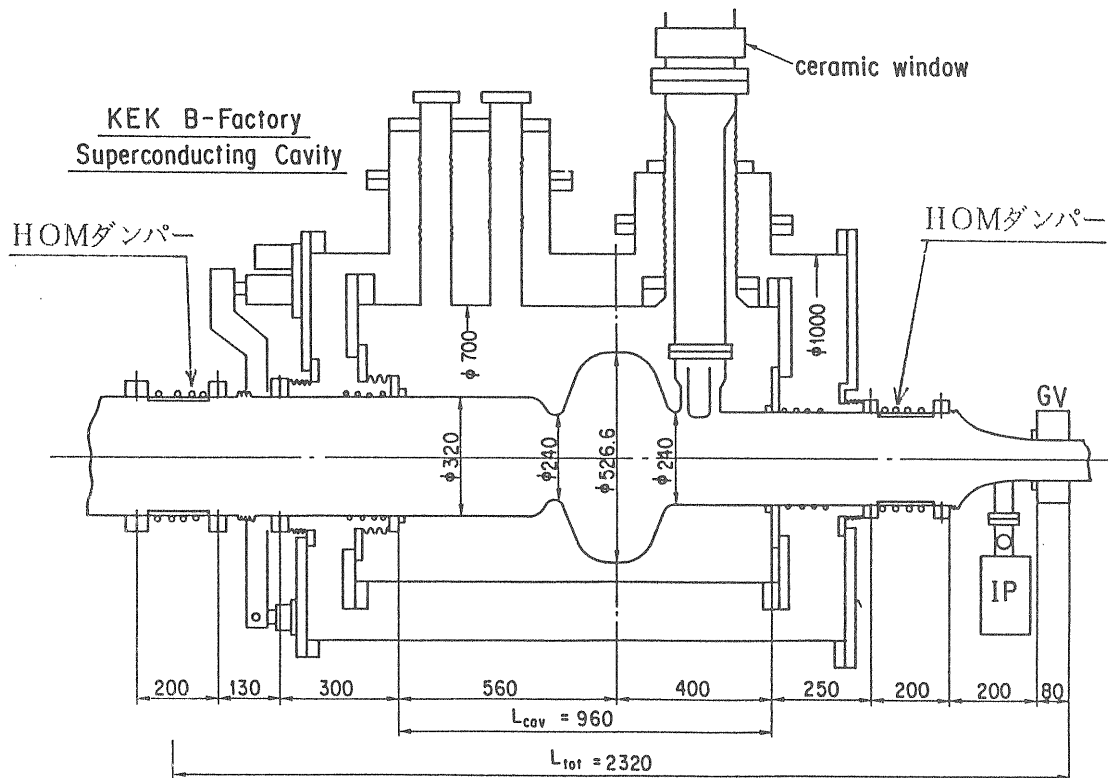


図6-4 KEK B-FACTORY用超伝導空洞概念図

[チューナー]

空洞の周波数を調整したり、圧力変動、振動などにより空洞の共振周波数が変化し、空洞の電界が大きく変動するのを抑える為、空洞全長を変化させるチューニングを取るのにチューナーが使用される。プランジャータイプのチューナーも使用された事はあるが、現在は空洞の長さを変化させる方式が多い。図6-5 KEKのチューナーを示す。大きな変化はパルスモーターによりジャッキボルトを回して調節し、早い微小変化 (Max 50 μ m) はピエゾ素子によっている。フィードバックを行っているが、ロータリーポンプ等の振動は十分小さくしておかなくてはならない。

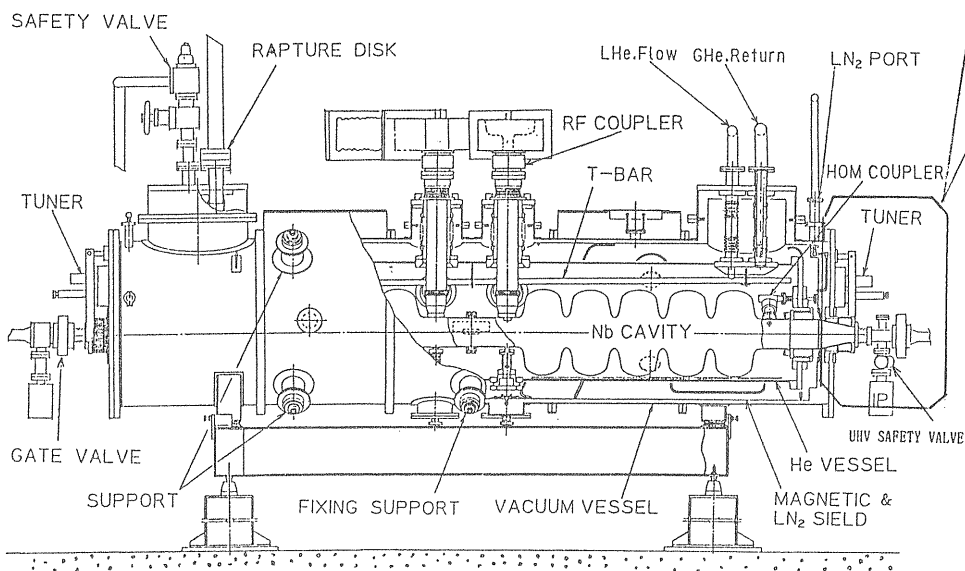
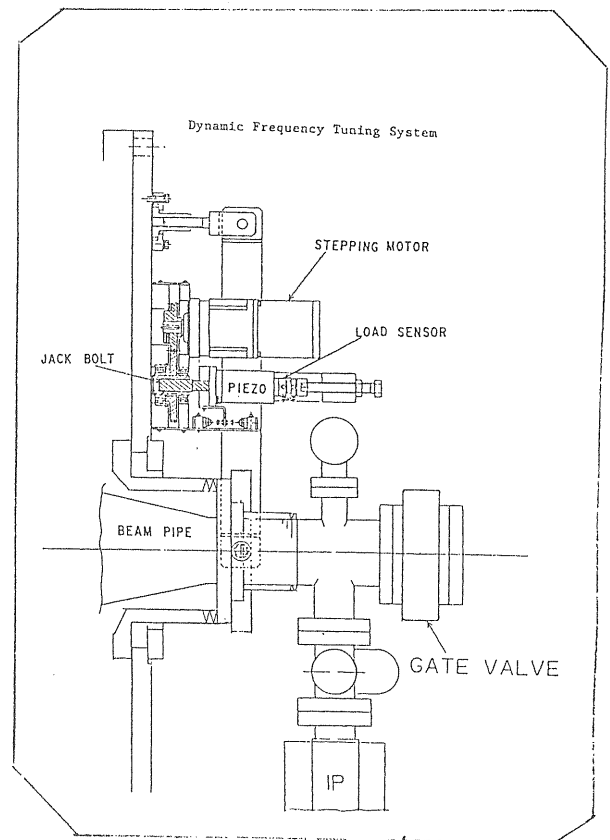


図6-5 クライオスタット及びチューニング装置

7. 超伝導空洞の現状と将来

超伝導空洞の応用は重イオンリニアック、電子リニアック、電子ストレージリングと多岐に渡っている。表7-1 に重イオンリニアック、表7-2 に電子リニアック、表7-3 にストレージリングについて現状と計画を示す。このほかにFEL用の計画、ロスアラモス研究所の π 中間子の加速用PILAC等がある。

今後の方向として、'B-Factory' にみられる大電流・大電力ビームへの応用の発展として核子変換等への応用が考えられる。

高い加速電場の応用として、TESLA計画がある。15MV/m~30MV/mの加速空洞を16Kmにわたりならべて150Gev~500Gevのリニアックを作り、これを向かい合わせに2台並べて、中心でビームを絞る衝突実験を行うものである。高い加速電界を得るためには、電子放出を低く抑える事が最も重要である。このため高温・高真空でのアニールを行ったり、パルス大電力RFによるエージング法などによる研究が進められており、シングルセルでは30MV/m以上の加速電界が得られている。

大量の加速空洞を使用するためには、コストダウンが必要である。今後多くの分野で利用が進めば大量生産によるコストダウンを計ることが可能となるかもしれない。従って、素粒子物理学のみならず多くの分野での超伝導加速空洞の応用を期待したい。

表7-1 重イオンリニアック

Laboratory	Material	Number	Operating Gradient	Commissioned
Argonne/ATLAS	Nb	46	2-4 (MV/m)	1978
Stony-Brook/SUNYLAC	Pb-Cu	56	2-2.5	1983
Saclay	Nb	50	2.2	1987
U. of Washington	Pb-Cu	36	2.5	1987
Florida State U.	Nb	14	2.0	1987

表7-2 電子リニアック

	Darmstadt	CEBAF	MACSE
Meters of Cavs installed	10	9(160) *	2
No. of Cavs Insalled	10	18(360) *	4
Installed Gradient without beam (MV/m)	6	7.5	5.9
Av. Grad. with beam	6	6.3	4.5
Operating current	40 μ A	200 μ A	35 μ A
Gradient limit	Refrig.	Design value exceeded	
Current limit	>Design	Design value Beam Dump	Machine
Hours in beam	4000	>1000	starting

* () 内は完成時の値を示す

表7-3 ストレージリング

	TRISTAN	HERA	LEP	SPS
Meters of Cavs installed	48	20	20	5
No. of Cavs Insalled	32	16	12	3
Installed Gradient without beam (MV/m)	7	6	4.8	7.1
Av. Grad. with beam	4.7	4	4.25/3.5	5.5
Operating current	10-12 mA	4	1-2/4 mA	<1mA
Gradient limit	Vac trips from S.R	Klystrons Available	Proc time allotted	
Current limit	HOM couplers	Machine	Machine	
Hours in beam	16000	>1000	1000	20000

(参考文献)

- 1) CERN Accelerator School
H.Piel Superconducting Cavity P.149
H.Lengeler P.197
- 2) ICFA Workshop on AC Superconductivity
KEK, June 1992
H.Padamsee
- 3) CERN Accelerator School
W.Weingalten
- 4) Proceedings of the 4th Workshop on
RF Superconductivity
August 14~18, 1989, KEK
- 5) 博士論文 鈴木敏司
- 6) 博士論文 中里俊晴
- 7) Proc. of the 5th Workshop on RF SC cavity
DESY, August 1991