

第 1 章 本研究の背景と動機・研究課題

1.1 超伝導加速空洞

超伝導高周波加速空洞の表面抵抗は、BCS 理論[1-1]により次式のように与えられる。

$$R_{BCS}(T, \omega) = A \cdot \frac{\omega^2}{T} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta_0}{k_B T}\right) \quad (1.1)$$

ここで、 $\omega = 2\pi f$ は高周波の角周波数、 A は定数であり、超伝導体の材質に依存する。 T は空洞の冷却温度である。 k_B はボルツマン定数である。 Δ_0 は超伝導体のバンドギャップ ($2\Delta_0$) である。超伝導空洞の Q 値 (無負荷の Q 値: Q_0) は表面抵抗: R_s から

$$Q_0 = \frac{\Gamma}{R_s}, \quad \Gamma = 274 \Omega \quad (1.2)$$

で計算される。 Γ は形状因子と呼ばれ、空洞の形状のみによる。我々の実験で使う 1300MHz のニオブ単セル空洞では 274 Ω である。実際に超伝導空洞の表面抵抗を測定すると、(1.1)式の抵抗の他に空洞の表面状態に依存し冷却温度に因らない定数項 R_{res} がある。この R_{res} のことを残留表面抵抗と呼ぶ。 R_{res} の値は現状技術で、5n Ω 程度である。

$$R_s(T, \omega) = R_{BCS}(T, \omega) + R_{res} \quad (1.3)$$

また、我々のニオブ製超伝導空洞では、2K で R_{BCS} 8n Ω である。超伝導空洞の表面抵抗は両方合わせても 13n Ω 程度である。一方、電気伝導の良い銅材料を使った常伝導空洞の表面抵抗は、次の式から計算出来て、

$$R_s(\omega) = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (1.4)$$

常温で 12m Ω 程度である。ここで、 σ は銅の電気伝導率 (3.77E-7/ Ω m) であり、 μ は透磁率である。このことからニオブ超伝導空洞の表面抵抗は銅空洞の 100 万分の 1 であり、非常に小さいことが分かる。

高周波空洞では、表面抵抗による表面発熱のために高周波熱損失が発生する (付録 A - 1)。その量は、次式で計算できる。

$$P_{loss} = \frac{1}{2} \cdot R_s \cdot \int_S H_s^2 \cdot dS \quad (1.5)$$

ここで、 H_s は空洞内表面の高周波磁場であり、式(1.5)は空洞内表面での全表面積分である。この式から分かるように、超伝導空洞での高周波熱損失は常伝導空洞の 100 万分の 1 程度である。液体ヘリウ

ムを使って冷却する分、冷却効率が悪くなる（1/100:4.2K 1/300:2K）が、これを考慮しても尚、常伝導空洞の 1/1000 程度である。つまり、超伝導空洞は常伝導空洞に比較して加速運転時の消費電力が極めて小さい。また、高周波熱損出が少ないので大きな高周波エネルギーを空洞内に蓄積できる。この結果空洞内に高い加速電界を発生させることができ、加速器の小型化が可能である。例えば TRISTAN の場合（CW 運転）では、常伝導空洞の 1MV/m に対して超伝導空洞では 5MV/m（潜在能力としては 10MV/m）であった。超伝導空洞はクライオモジュールに挿入されるので断熱部など多少余分なスペースが必要となるが、それを考慮しても尚、常伝導空洞の場合の 1/2 から 1/3 の長さで済む。

1.2 超伝導加速空洞の応用とその将来

1965 年にスタンフォード大学で銅空洞の内面に鉛めっきした超伝導高周波空洞を使って電子を加速することに成功して以来 [1-2]、超伝導加速空洞は KEK の TRISTAN[1-3]、CERN の LEP-II[1-4]、DESY の HERA[1-5]等、大型電子/陽電子衝突型シンクロトロンに応用された（HERA は現在も稼動中である）。これらのシンクロトロンでは電子/陽電子ビームを加速し、また所定のエネルギーに達した後は、ビームがリングの中で曲げられた時に放射光を発生して失ったエネルギーを補給するために超伝導加速空洞（ニオブバルク空洞または銅空洞内面にニオブをスパッタリングにより付けたニオブ薄膜空洞）が使われている[1-6]。これらの第一世代の超伝導空洞の応用では運転加速電界は 5MV/m 程度であった。

超伝導高周波加速空洞は電子/陽電子衝突型シンクロトロン以外にも、CEBAF（現在は Jefferson Lab）の原子核実験用のリサ・キュレ・ション型超伝導線形加速器にも実用化されている[1-7]。また、TESLA（TeV エネルギーの電子/陽電子衝突実験を行うリニアコライダー）の実現を目指して、その試験加速装置として建設された DESY の TTF(TESLA Test Facility)、自由電子レーザー発生用の線形加速器などの応用がある[1-8]。

また、超伝導空洞の特性をさらに発揮する注目すべき開発が最近、ジェファーソン研究所の FEL グループにより成功している[1-9]。彼等は、超伝導加速空洞に加速ビームを周回させ再度減速フェーズで戻すことでビームエネルギーを回収し、そのエネルギーで後続のビームを加速するエネルギー回収型リニアック(ERL: Energy Recovery Linac)の開発に成功した。また、この方法ではビームを減速した後

に低エネルギーで捨てることができるので、ビームダンプに伴う放射線の問題を大幅に低減できる。これらの二つのメリットから次世代の放射光光源の応用に向けてコーネル大学[1-10]や KEK で大型施設への応用 (ERL 放射光計画 : 5GeV 超伝導リニアック) の検討[1-11]が始まっている。

TESLA のような超伝導リニアコライダーでは、建設コストをできる限り抑えるために、加速器の長さを短くする必要がある。そのために、第一世代の運転加速電界 5MV/m を 25MV/m (5倍) に向上させる必要がある。TESLA では高価なニオブの消費量を減らすために空洞の周波数を上げ空洞の断面形状を小さくし、1300MHz の 9 連ニオブバルク空洞の採用が決まっている。電子 / 陽電子重心衝突エネルギーを 500GeV に設定した場合には、必要な空洞台数は 2 万台となる[1-12]。最近の我々のグループの研究により、TRISTAN で開発した電解研磨技術を適用することで 1300MHz のニオブ単セル空洞で 40MV/m の高電界を発生させることに成功している[1-13]。DESY/KEK との共同研究で DESY ・ TTF 超伝導空洞を電解研磨した結果、多くの空洞で 35MV/m の加速電界が達成されている[1-14]。こうして、現状 33km のトンネルスキームでも 800GeV が展望できるようになって来た。また、ERL 放射光計画でも 1300MHz の 9 連超伝導加速空洞の採用が検討されているが、ここでは、10 ~ 20MV/m での完全 CW 運転が想定されている。この場合、必要空洞台数は 300 台程度である。このように超伝導空洞の応用は益々大規模化している。そのために空洞性能の高性能化、さらにこの高性能が信頼性よく得られること、製作費のコスト削減が最重要課題となっている。本研究はこれらの課題の解決に超伝導空洞の性能にとって極めて重要な表面処理の観点から取り組むものである。

1.3 超伝導空洞の表面処理技術

本研究では、TRISTAN 超伝導空洞の表面処理技術をベースとし、その中に残された課題の解決を目指す。そのためにまず、TRISTAN 超伝導空洞の表面処理技術について記述する。次に本研究で使う表面処理技術全般について説明する。

1.3.1 TRISTAN 超伝導空洞の表面処理

超伝導高周波空洞の本格的な大規模長期運転は、1989 年に KEK に建設された TRISTAN 超伝導空洞プロジェクトにより世界で初めて実現した[1-15]。この加速器では 32 台の 508MHz の 5 連ニオブ超

伝導空洞（図 1-1）が、各 2 台ずつ 1 台の横クライオスタットに挿入され（図 1-2）、4.2K の液体ヘリウム温度で加速電界 5MV/m で長期（10 年間）運転された。そして超伝導空洞の当時としての高性能・高信頼性が実証された [1-17]。



図 1-1 . TRISTAN 508MHz 5 連ニオブ超伝導空洞

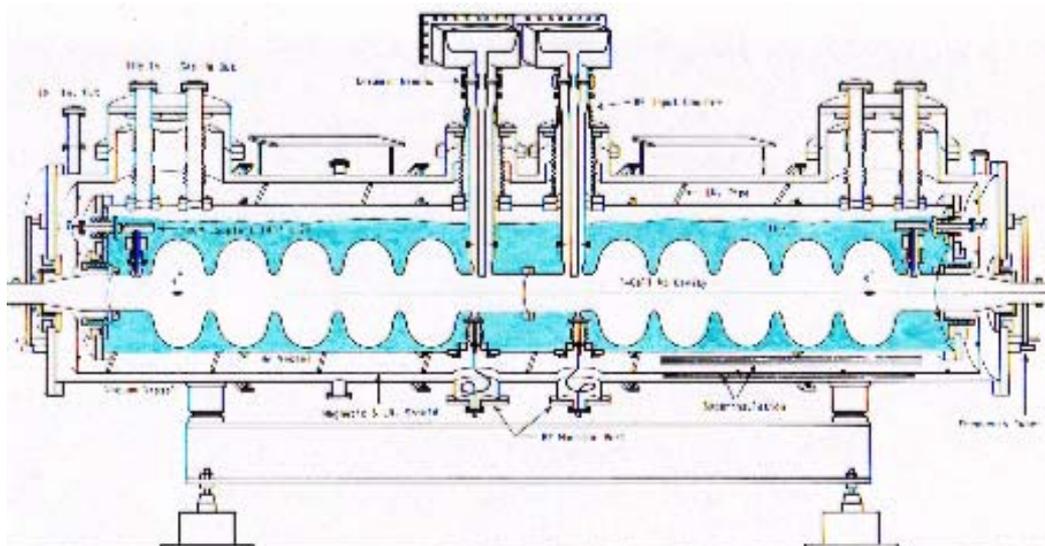


図 1-2 . TRISTAN 超伝導空洞と横型クライオスタット[1-16]

次に、TRISTAN 超伝導高周波空洞の製作法・表面処理法を示す。

機械研磨

1) 720mm、肉厚 2.5mm の純ニオブの平板 (RRR=150 180) から液圧成形法でハーフセルを成形し、2) その内面にバフ研磨による機械研磨を行った (図 1-3)。

機械研磨を実施した第一の理由は、成形時にハーフセル内表面に発生する傷・肌荒れを除去するためであった。第二の理由は、ハーフセルの空洞表面粗さを揃えることが品質管理上重要であると考えたためであった。電解研磨面の粗さは電解研磨前の初期表面粗さに強く依存する (図 1-4 参照)。そのため全てのハーフセルを機械研磨し初期表面粗さを揃えることで、電解研磨後の表面粗さを揃えた。



図 1-3 . TRISTAN 超伝導空洞で採用されたハーフセルのバフ研磨

ニオブ板製作時の圧延ロールにより鉄等の異種金属がニオブ表面に埋め込まれ、このバフ研磨でなお取り残されている可能性があると考え、3) バフ研磨したハーフセルを一晩塩酸溶液に漬けその後、目視検査による錆検査を行った。これらの検査に合格したハーフセルについて、4) その縁を機械加工 (トリム) して正寸ハーフセルを製作した。

そして、5) 溶接面をトリクレン脱脂した後、デフォーカス電子ビームを外側から当て赤道部を溶接し、単セル化した。ニオブは非常に酸化性が強いので真空中での電子ビーム溶接以外に信頼ある溶接法がない。補足に示すように、空洞に高周波電力を投入した時、

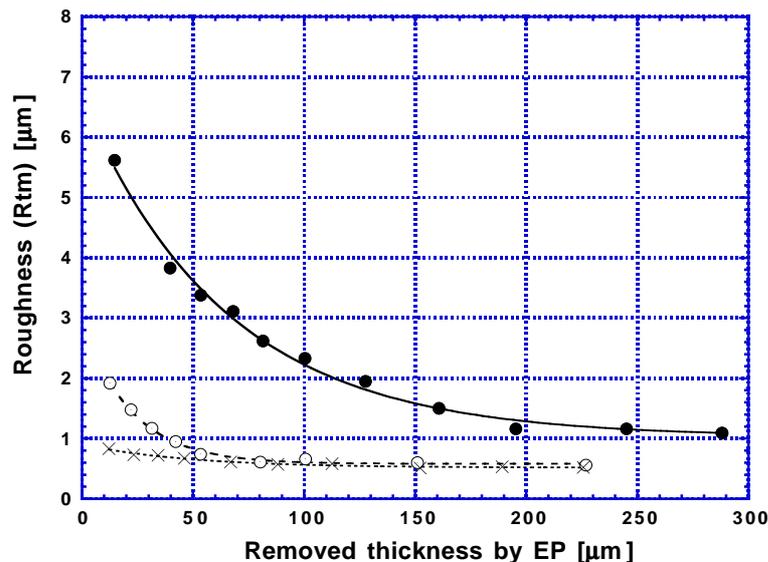


図 1-4. 電解研磨面粗度への初期粗さの履歴

空洞赤道部で溶接シームを横切るように高周波表面電流が流れる。溶接シームには溶接欠陥が存在する可能性がある。過去の超伝導空洞の製作法の研究では、しばしばこの赤道部の溶接欠陥での局部発熱が観察され、それが原因で加速電界が 5MV/m 以下に制限された経緯がある[1-18]。こうした経験から TRISTAN では、6) 単セル化した後内面グラインダーで全ての赤道溶接シームをグラインド研磨した。またセルの 5 連化作業では、単セルの片側アイリス部を電子ビーム溶接してつなげて行くが、7) その溶接毎に内面グラインダー装置でアイリス部溶接シームをも研磨した。更にビームパイプを出来上がった 5-セルに電子ビーム溶接する際にもそのシーム部を同様に研磨し、5 連空洞を完成した。

電解研磨

前述の機械研磨の後、図 1-5 に示す横型連続電解研磨法（図は L-バンド空洞用）で空洞内表面を 80μm 研磨した。電解研磨法は、研磨する金属を陽極に、適当な金属を陰極にして研磨金属の種類に適した電解研磨液の中で電圧をかけて電気化学反応により研磨する方法である。原理を図 1-6 に示す。この電気化学反応では被研磨金属（ワーク）の表面に金属酸化物が形成され、研磨液がそれを溶解して研磨が進行する。ニオブの電解研磨液として濃硫酸 (>95%) とフッ化水素酸 (46%)、それぞれ容量比 10 : 1 の混酸を使用する。これは極めて危険な酸であり、安全性に配慮した作業環境が要求される。ニオブ空洞の場合、陰強には純アルミを使用する。過去には

ニオブの電解研磨で現れる電流振動（図 1-7）が電解研磨の重要条件と見なされていた[1-19]。電流が振動するのは、ワーク表面での金属酸化物（抵抗膜）の生成による電流の減衰とその溶解による電流の回復が繰返されるためである。この電流振動は電気化学反応生成物の蓄積により次第に減衰する。振動を再び発生させるためには電圧を切り、液を攪拌するかワークを揺動してその生成物を研磨液に溶かしワーク表面から除去する必要がある。TRISTAN 以前にはこの間欠電解研磨法（3分通電—3分液攪拌のくり返し研磨）で多量電解研磨していた。そのような方法で研磨したニオブ空洞では電解研磨中に多量の水素が吸蔵される結果著しい Q 値（付録 A - 1）の劣化を来すことが分かっている[1-20]。従来はこの吸蔵水素を脱ガスするために 700 以上の真空炉で空洞をアニールした。

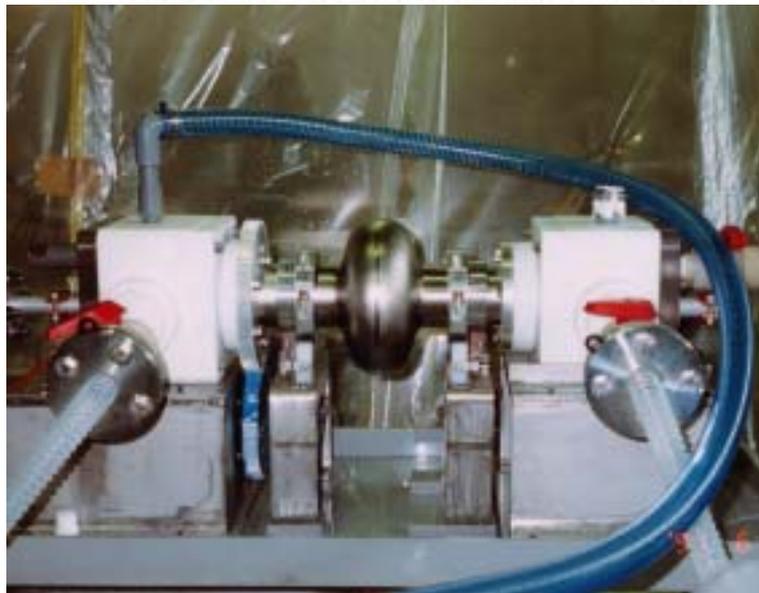
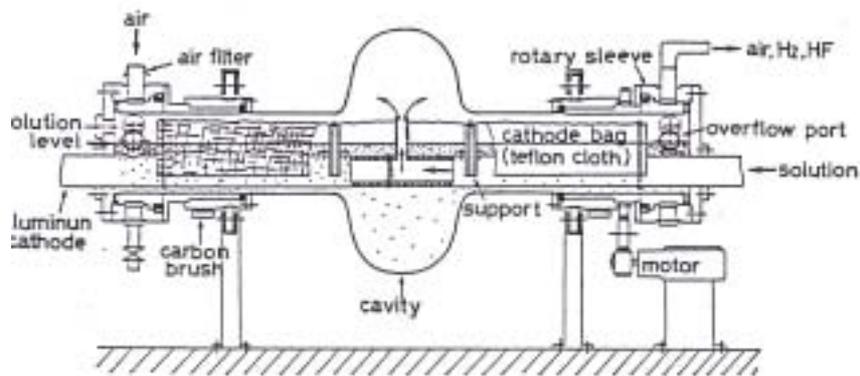


図 1-5 . TRISTAN 超伝導空洞で開発された電解研磨法
（写真は L-バンド空洞用）

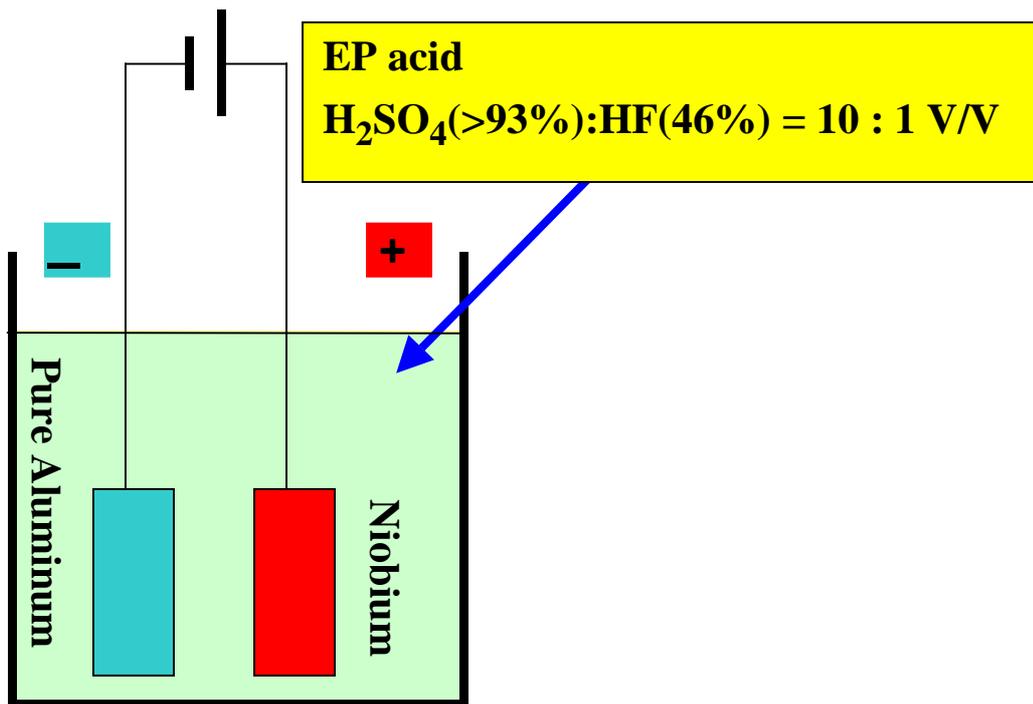


図 1-6 . ニオブの電解研磨

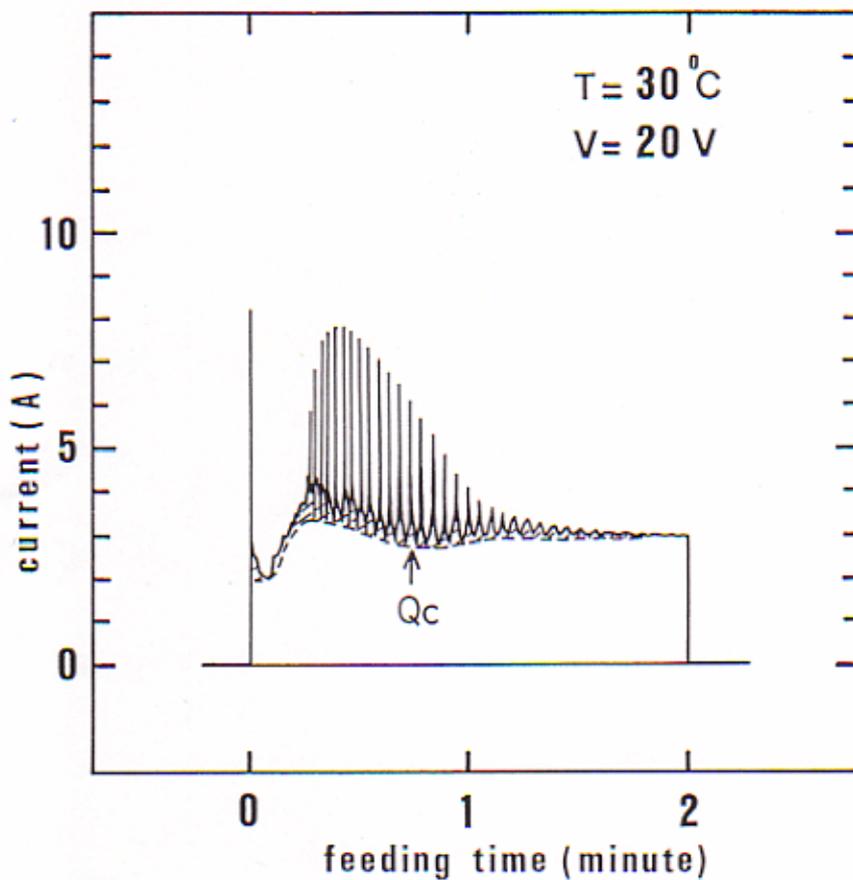


図 1-7 . ニオブの電解研磨で発生する電流振動

電解研磨では陰極で発生する水素ガスが陽極のニオブ表面に付着するとガス紋様（第5章図 5-3）ができる。空洞を縦に立てて電解研磨した場合には、水素ガスの流れ跡がニオブ表面に形成される。この問題を防ぐために KEK では陰極の回りをテフロンの布で囲み（テフロンバッグ）、水素の拡散を防ぐ工夫が従来から行なわれて来た。しかし、3連空洞をカソードバッグを使用して間欠電解研磨した場合、発生水素ガスが上のセルになるほど積算され、もはやテフロンバッグでは防ぐことができず、空洞内表面に水素ガスの流れ跡が観察された。空洞性能も十分ではなかった。この経験より水素ガスの抜け易い横姿勢での電解研磨が開発された（図 1-5）。

一方、水素吸蔵メカニズムでは、サイズの小さい水素陽イオン (H^+) が重要な役割を担っていると考えられる。電解研磨で連続的に電圧がかかっているニオブ（陽極）に H^+ は侵入し難いと予想される。TRISTAN 以前に使われていた間欠電解研磨では液攪拌時（電圧を切る）に液中の H^+ がニオブに侵入したと考えられる。こうした考察から連続電解研磨が水素吸蔵低減に有利であると期待された。

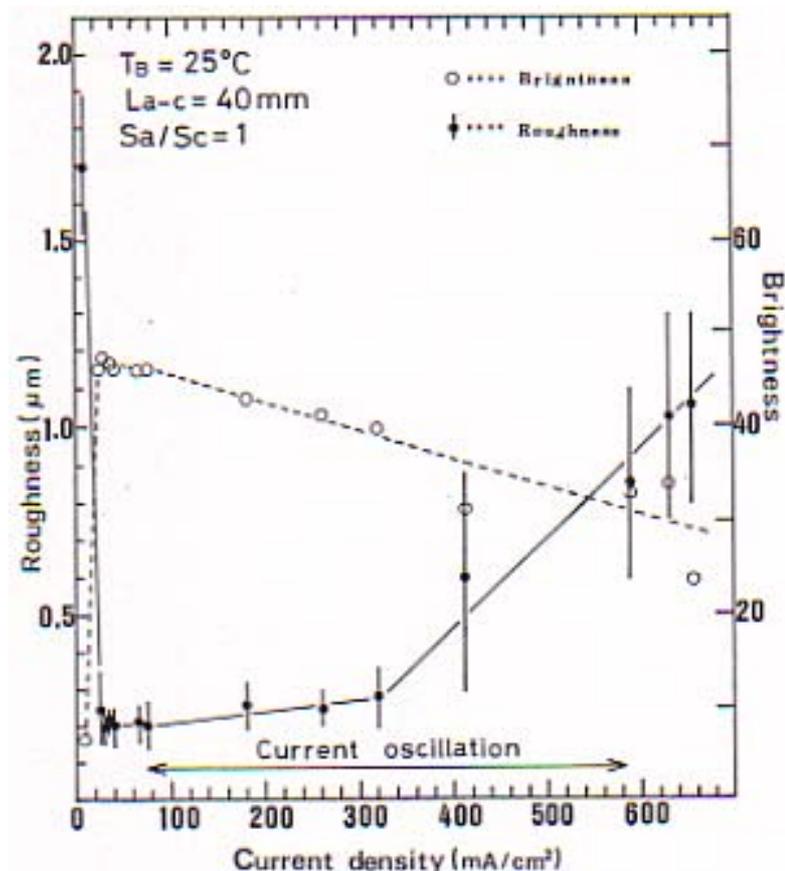


図 1-8 . ニオブの電解研磨条件 [1-20]
 (電流振動の発生しない場合でも滑らかな研磨面が得られる)

以上の背景から TRISTAN 超伝導空洞の開発期に横型連続電解磨が開発された。特に、従来重要とされた電流振動条件に対する批判的検討が加えられ、図 1-8 に見られるように電流振動の発生しない場合でも滑らかで、光沢度のある研磨面が得られることが突き止められた。最終的に電流密度($I_s=30\text{--}100\text{mA/cm}^2$)、研磨液温($T=25\text{--}35^\circ\text{C}$)が最も重要な条件であることが突き止められた[1-20]。

この新しい条件設定から最終的に横型連続電解研磨が開発された(図 1-5)。始めに空洞を倒立可能なベッドの上に横置きにして陰極パイプ(純アルミ)を通して空洞内に研磨液を供給する。液が空洞の中心よりやや上のレベルまで達すると、研磨液は空洞両端の開口部(オーバーフローポート)からテフロンチューブを介して重力によりリザーバタンクに戻る。タンクには熱交換器があり、電気化学反応で温度の上昇した液を冷却する。液は再びポンプで空洞に供給され循環する。電解研磨の間、空洞はゆっくり連続的に回転する。この回転は緩やかな液攪拌を与え、電解研磨に必要な電流密度を確保する。また、電圧は連続的に印加される。研磨中に陰極で発生する水素ガスは、テフロンバッグの中を通り両端開口部から容易に抜けるように工夫されている。電解研磨が終わるとベッドを倒立して、空洞内に残留する研磨液を抜いた後、洗浄工程にはいる。

電解研磨の前段階で TRISTAN 空洞の内面はバフ研磨やグラインダー研磨されているので、その砥粒が埋め込まれている。この汚染層を電解研磨で除去する際に使った研磨液をリザーバタンクに戻すと研磨液、循環システムが汚染され、空洞のフィールドエミッションの発生を招く。8) これを防ぐために空洞内に研磨液を溜め込み(循環しない)、横型連続研磨法で数ミクロン除去した後、その研磨液を捨てる方法(プレ電解研磨と呼ぶ)を行った。このプレ電解研磨の後に一旦空洞内を水洗した後、9) 多量電解研磨を行った。

TRISTAN 空洞の電解研磨では、水素について以上のように多くの対策が取られたので水素吸蔵の問題が解決し、水素脱ガスのための高価な真空熱処理工程が省けると期待された。しかし、508MHz 単セル空洞を用いた試験では水素病が起こり、10) TRISTAN の全ての超伝導空洞に真空熱処理が施された。当時としては TRISTAN 超伝導空洞の建設が迫り、水素病に関するそれ以上の追求を諦めざるを得なかった。この真空熱処理では工業炉を使用したために電解研磨した空洞内表面が汚染され、11) これを除去するために少量の仕上げ電解研磨を行った。

TRISTAN 超伝導空洞では、32 台の内 28 台は最初の縦精密性能試

験で仕様性能を達成した。残りの4台の内2台で性能が悪かったのは、量産途中に発生したバフ砥粒による電解研磨システムの汚染が原因であった。この問題が発生した後、すでに述べたプレ電解研磨を実施しこの問題を回避した。最後の2台の性能不良は表面欠陥に由来するものであった。この2台の空洞の欠陥除去・再処理により、最終的に全ての空洞が仕様性能を達成した。TRISTAN 空洞の平均の最大加速電界は

$$E_{acc,max} = 9.6 \pm 1.4 \text{ MV/m}$$

であり、目標性能の2倍に達した。この高電界性は当時、世界最高であった。このように TRISTAN 超伝導空洞で非常に高信頼度で高性能が得られた理由を考えると、1) 機械研磨による内表面、電子ビーム溶接部の欠陥除去、2) 電解研磨による高品位の表面仕上げであると考えられる。

既にのべたように、超伝導空洞の応用は益々大規模化することが予想される。TRISTAN の表面処理法は空洞性能とその信頼性には優れるものの煩雑であり高コストである。煩雑化の原因の一つは機械研磨にある。簡単な機械研磨法を開発することが切望されている。また、水素病の問題についてもまだ研究の余地が残されている。真空アニールを省くことができればそれだけでも大きなコスト削減となる。

1.3.2 種々の表面処理の特性

ここでは本研究でよく使う表面処理についてまとめておく。超伝導空洞の表面処理では化学研磨、電解研磨が行なわれている。前者が主流である。

1) 化学研磨の特性

化学研磨法は図 1-9 に示すように空洞内に研磨液を入れて化学エッチングによりニオブ表面を研磨除去する方法であり、非常に簡単である。しかし、図 1-10 に示すように研磨面の表面粗さは電解研磨に比べて粗い。典型的な値としては、10 点平均粗さ (R_z) で $5\mu\text{m}$ である。研磨液は硝酸 (61%)、フッ化水素酸 (46%)、リン酸 (83%) の混酸が使われる。硝酸は酸化剤として、フッ化水素酸は硝酸が酸化して出来たニオブ酸化物を溶解するために、リン酸はエッチング反応の速度調整 (バッファー) 用として使われる。その典型的な組成容積比は $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{H}_4\text{PO}_3 = 1 : 1 : 1$ である。後で詳しく述べるが高純度ニオブ材で作られた超伝導空洞における水素病の発見以

来、化学研磨でのニオブの水素吸蔵を少なくするために、低い温度でかつリン酸の量を増やした研磨液（例えば 1:1:2）が使われるようになって来た。化学研磨の研磨速度の温度、組成依存性が図 1-11 に与えられる。1 : 1 : 1 の組成比の場合、常温（25℃）で片面当り 10 μ m/min 程度である。これは電解研磨に比べて 20 倍程度速い。



図 1-9 . ニオブ超伝導空洞の化学研磨

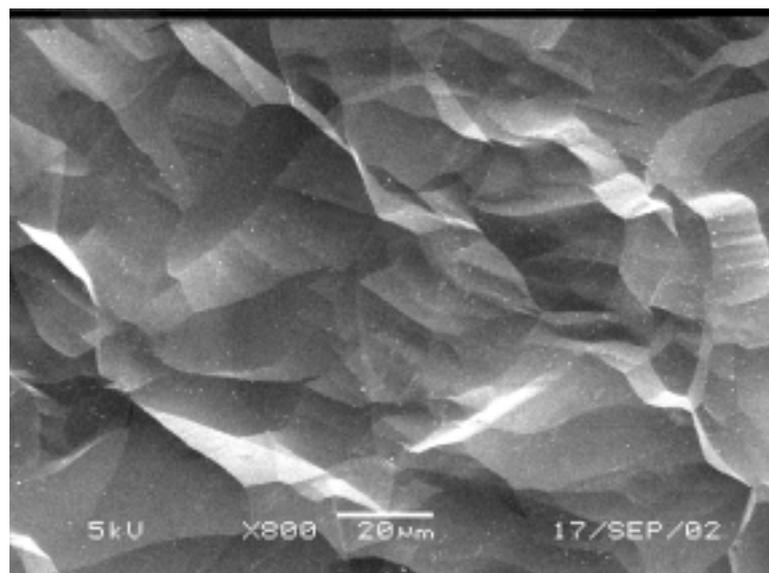


図 1-10 . ニオブの化学研磨で得られる典型的な研磨面

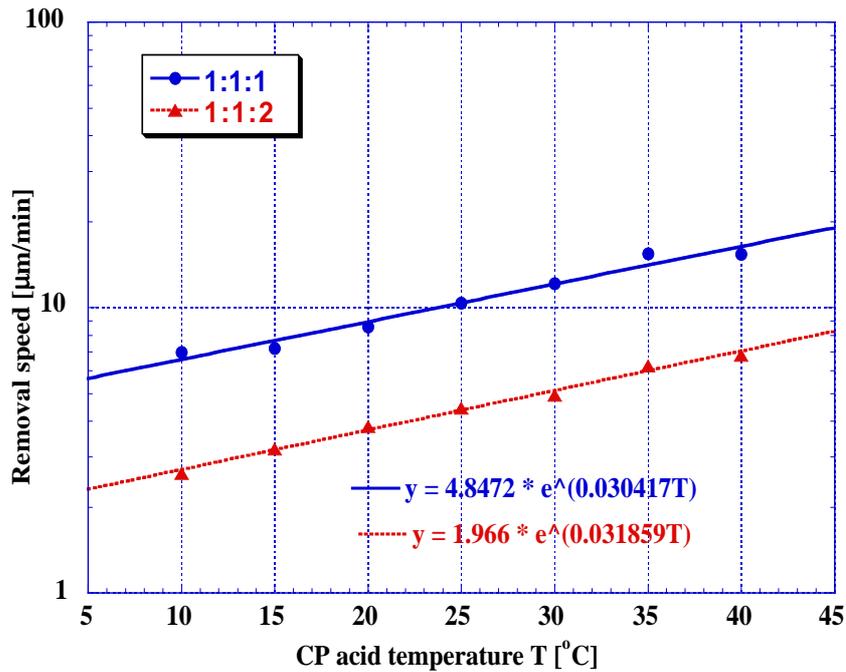


図 1-11 . ニオブの化学研磨速度の液温度、液組成依存性

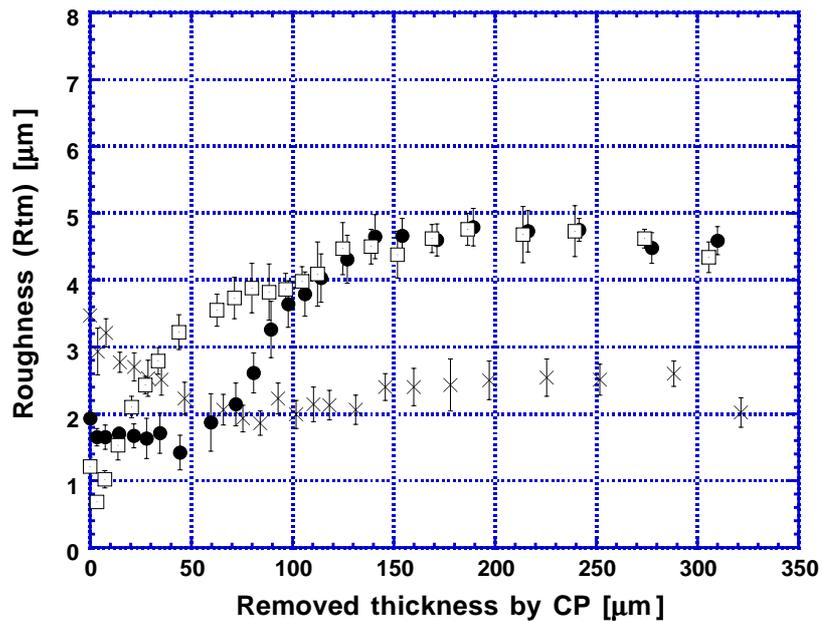


図 1-12 . ニオブの化学研磨面の粗さ

一方、化学研磨面の粗さは、ニオブ材の結晶粒界の大きさに強く依存し、そのコントロールが難しいという側面がある。図 1-12 は、粒径の異なるニオブサンプルを予め機械研磨で表面粗さを調整した後、化学研磨（1:1:1）で研磨量を増やしながら表面粗さを測定した

結果である。初期粗さが小さいからと言って必ずしも最終研磨粗さが小さいと言うわけではない。これは粒径の違いによる。これは、電解研磨と大きく異なる点である。従って、化学研磨の場合、ニオブ材の粒径のコントロール無しには、多量化学研磨後の表面粗さをコントロールすることが困難である。

2) 電解研磨の特性

一方、電解研磨では研磨面は滑らかである。研磨面の典型的な SEM 像を図 1-13 に示す。また、電解研磨面の粗さには既に図 1-4 に示した通り初期粗さが履歴する。初期粗さが $3\mu\text{m}$ 以下であれば、 $50\mu\text{m}$ の電解研磨で $0.5\mu\text{m}$ 程度の表面粗さに到達する。

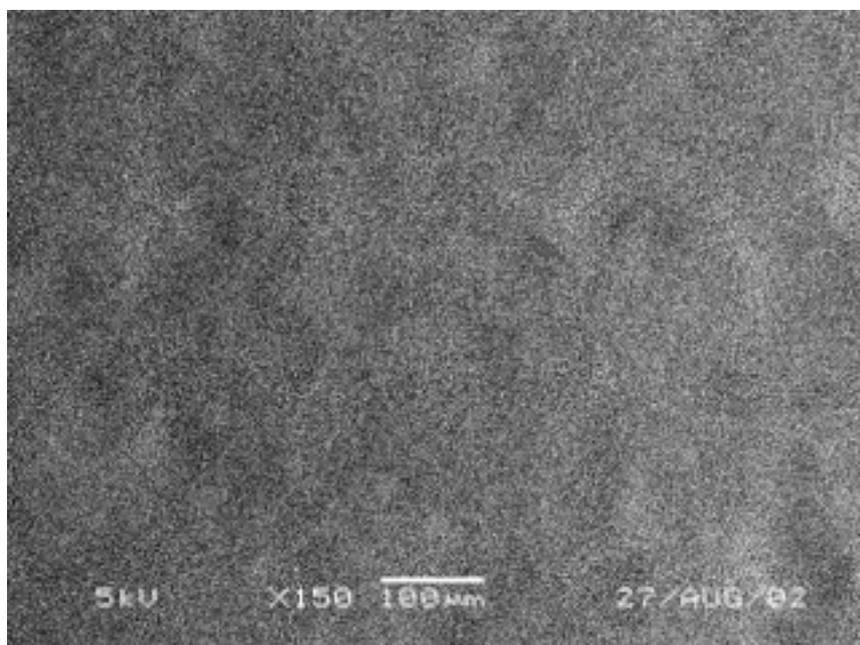


図 1-13 . ニオブの電解研磨($100\mu\text{m}$)面の SEM 像

3) 超純水高圧洗浄

TIRISTAN 以後、空洞表面に残留するゴミ等が原因で起こるフィールドエミッション対策として非常に重要な技術が開発されたことを指摘して置かなければならない。それは化学研磨や電解研磨した後、超純水或いは純水の $80\sim 100\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の水圧のジェットシャワーでニオブ空洞内表面を洗浄する方法である。その方法を図 1-14 に示す。これは、CERN で開発され、その後 KEK や Jefferson Lab で実用化され、その有効性が確立された。KEK の装置を図 1-15 に示す。この方法を使ってシリコンウエハー表面に残留するゴミが除去された例を図 1-16 に示す [1-21]。

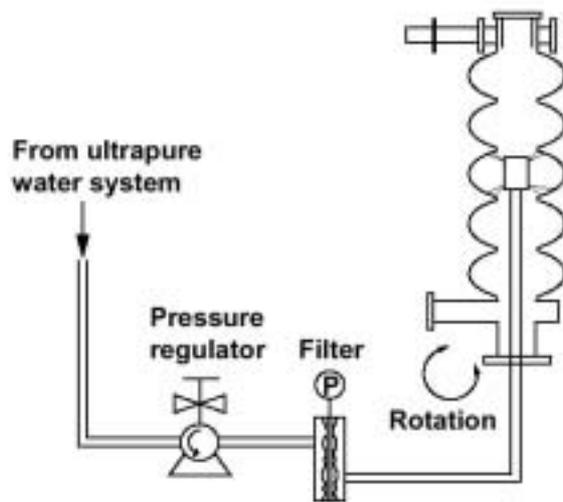


図 1-14 . 超純水高圧水洗(HPR)の原理図 [1-21]



図 1-15 . KEK のクラス 1000 クリーンルーム内に設置された HPR 装置

TRISTAN 時の方法（ここでは電解研磨は電解研磨液への浸漬に置き換えられている）とそれに高圧水洗を施した場合のトータルのごみの数を比較すると、高圧水洗でその数が 1/10 に減っていることが分かる。この方法の採用以後、フィールドエミッションの問題は基本的に解決された。本研究でも空洞を表面処理する場合には、超純水高圧洗浄の使用を前提とする。

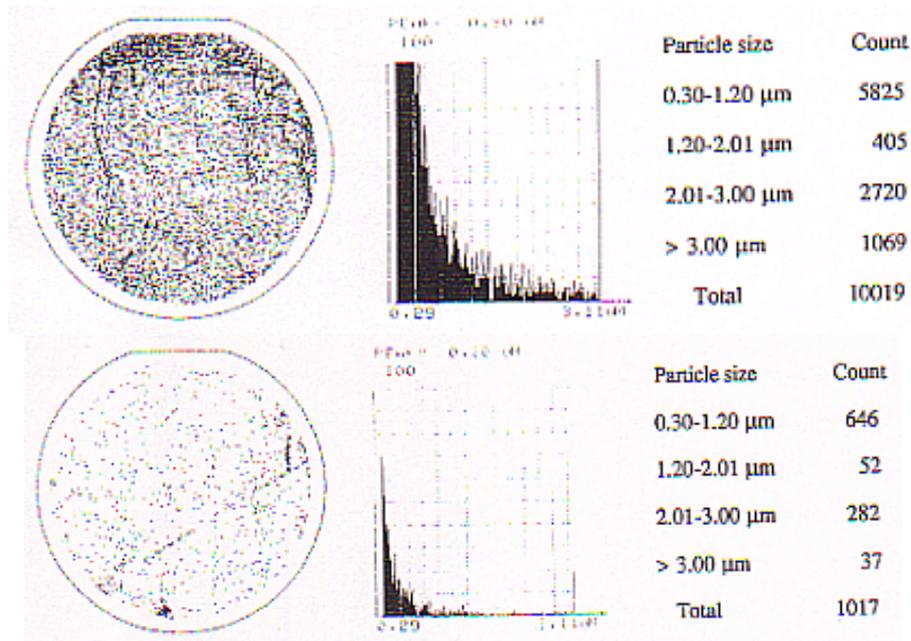


図 1-16 . 超純水高圧洗浄によるゴミ除去効果（上：TRISTAN 時の洗浄処理法、下：それに超純水高圧洗浄を施した場合 [1-21] ）

4) 水素脱ガス真空熱処理

ニオブ材は化学研磨や電解研磨処理中に水素を吸蔵する。この水素吸蔵のメカニズムを追求して、超伝導空洞の水素病の解決の道を開拓することが本研究の後半のテーマとなる。本研究では水素脱ガスを目的とした前処理として真空熱処理（アニール）を行っている。ここでは、この技術について述べておく。ニオブは酸化性が非常に強い金属であり、水素脱ガスのためには、真空中での熱処理が必要である。図 1-17 に KEK の工作センターの真空炉を示す。写真は、水素脱ガスのために L-バンドニオブ超伝導空洞をチタン箱の中に入れて真空炉内にセットするところを示す。チタン箱の回りをモリブデン板のヒーター、その外側を熱遮蔽版（ステンレス）が取り囲んでいる。最大 1300 までの加熱が可能である。油拡散ポンプとメカニカルポンプの組合せで排気し、加熱中の真空度は 10^{-6} トール程度である。チタン箱は、ニオブより酸化性が強いチタンでニオブ空洞を囲むことにより、残留ガスによるニオブ材の劣化をチタンゲッター作用により緩和することを目的として使用している。図 1-18 に示すように、ニオブ中に吸蔵された水素は、加熱温度 600 程度で脱ガスされる。本研究では、水素脱ガス処理として 750 、 3 5 時間の熱処理を選定している。

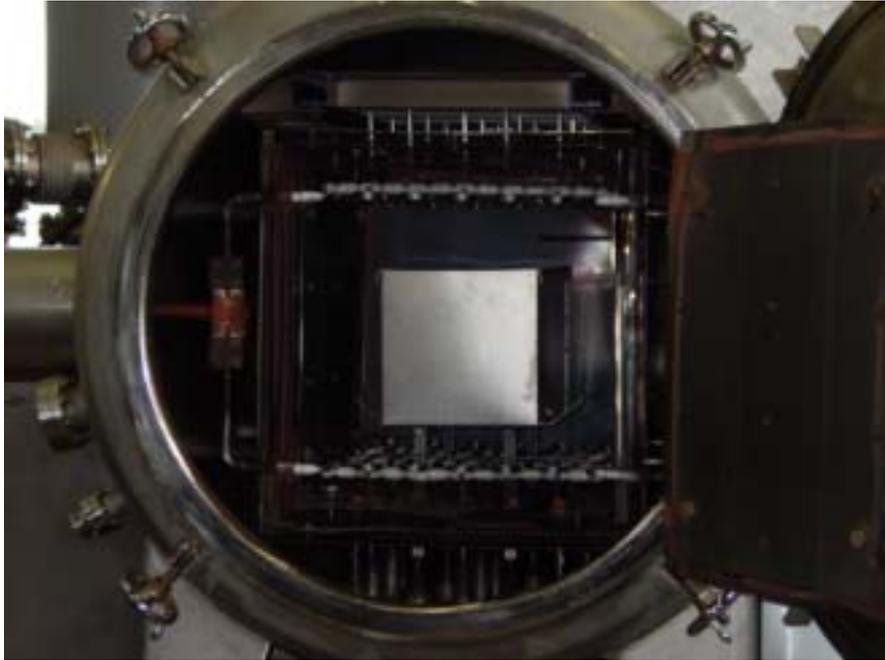


図 1-17 . KEK 工作センターの真空熱処理炉

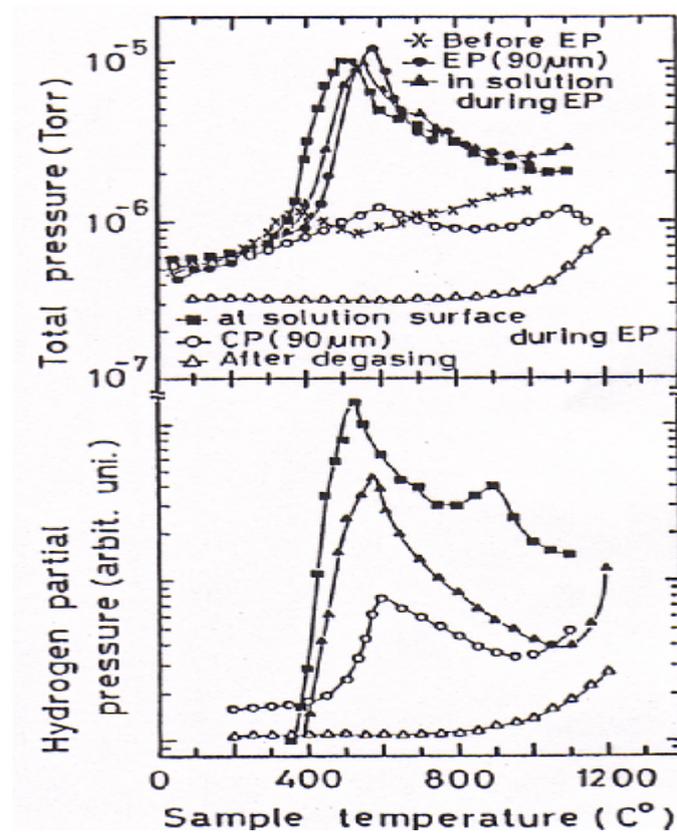


図 1-18 . 真空熱処理温度と水素脱ガス [1-20]

1.4 電解研磨の高電界の優位性

本研究の目的は超伝導ニオブ空洞の高性能性が保証され、最も簡単かつ低コストの表面処理を開拓することにある。そのために、TRISTAN の総括から機械研磨と電解研磨の組合せ処理をベースとして、コスト高なアニールを省きかつ水素病の問題を解決できる処理法の開拓を企てた。しかし、本研究を始めた時点では電解研磨をベースとすることに確信が持てる状況ではなかった。また、1990年代に入り世界の色々な研究所で TESLA のための基礎研究が開始され、化学研磨で 20~30MV/m の高加速電界が出始めていた。簡単・低コストという意味では電解研磨よりも化学研磨の方が優れている。

我々のグループでは、電解研磨が TRISTAN 超伝導空洞の成功の一つのカギであったかどうか統計性を含め再度調査した。その結果を図 1-19 に示す。新しい3個の 1300MHz L-バンドニオブ空洞に化学研磨を追加して最大加速電界を調べた結果、化学研磨した空洞では斜線が施された範囲の最大加速電界しか到達し得ないが、その空洞を電解研磨するとその領域を超えて、高電界が得られた。

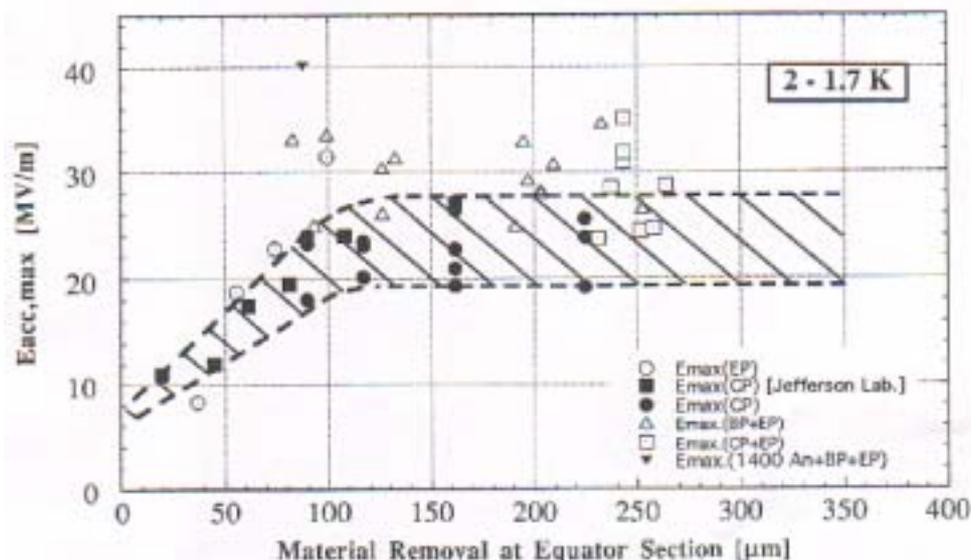


図 1-19 . 空洞性能についての電解研磨の化学研磨に対する優位性

最近、このことに関してより明確な実験結果が KEK で得られた。図 1-20 にその結果を示す。Saclay 研究所で製作された空洞を KEK で電解研磨 (50, 70 μm) することで 36MV/m の高加速電界が得られた。その後、化学研磨(60,70 μm)することで、24MV/m まで電界が低化した。さらに電解研磨(50,50,50 μm)を施すことで最終的には 40MV/m の高電界を回復した。この実験結果から電解研磨は、化学研磨よりも高電界性に優れることが再確認された [1-22]。

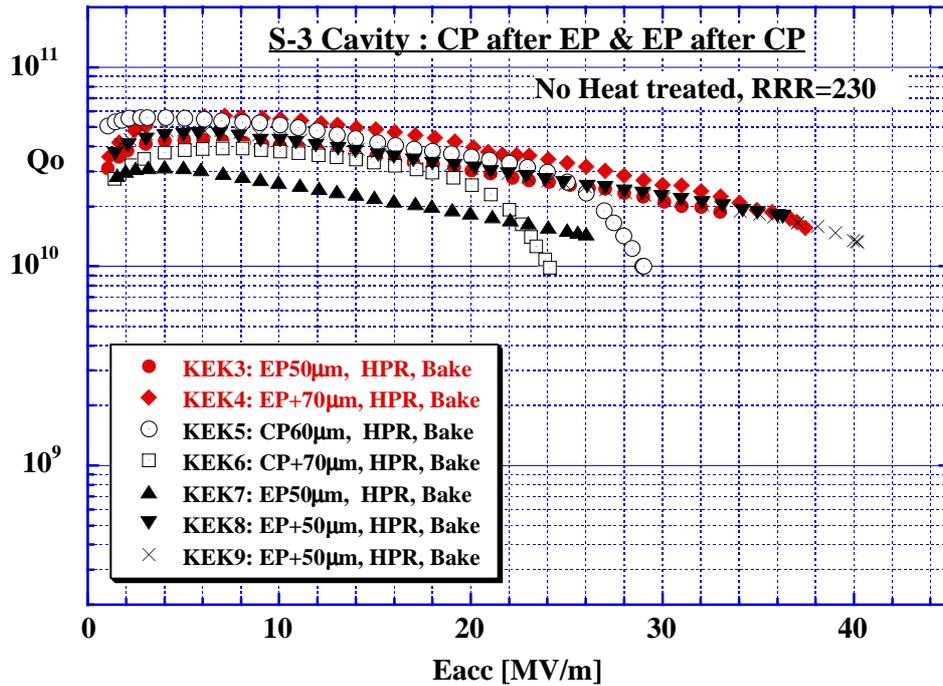


図 1-20 . 電解研磨の化学研磨に対する高電界優位性の実証試験結果 (KEK)

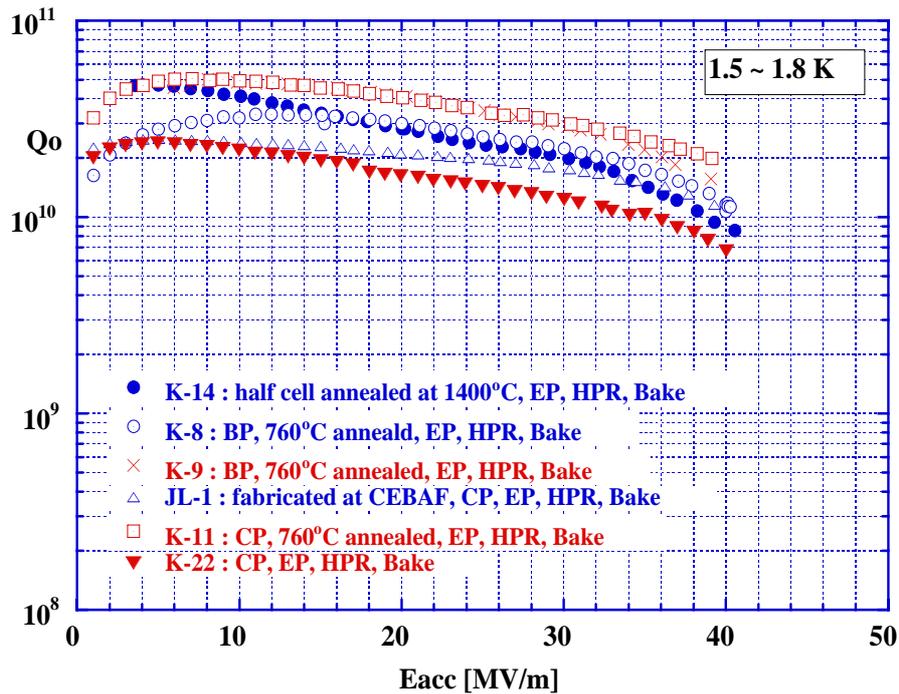


図 1-21 . 複数の空洞での加速電界 40MV/m の達成 (KEK)

同様の実験は、DESY/Saclay/CERN、KEK/Jefferson Lab の共同研究でも確かめられた。図 1-21 に示すように電解研磨により KEK が唯一多数の L-バント単セル空洞で 40MV/m の高加速電界達成に成功している。

1.5 本研究課題と研究プロセス

本研究の目的は TRISTAN 超伝導空洞の表面処理に於ける問題点を解決することにある。すでに見たように、電解研磨の採用により高電界が得られる。しかし、空洞内表面に存在する機械的表面欠陥（ピット、スクラッチ、ボイド、溶接欠陥等）の除去を電解研磨のみで行うのは非常な多量研磨となり現実的でない。そのような欠陥は強力な機械研磨で除去することが望ましい。これは、TRISTAN の経験でもある。しかし、機械研磨を採用することを考えた場合、TRISTAN での機械研磨工程は煩雑かつ高コストである。そこで本研究では電解研磨の前処理として、簡単かつ低コストの機械研磨を開発することが第一番目の課題である。

第二番目の課題は、その開発された機械研磨と電解研磨の組合せのみで表面処理を済ませ、現在の表面処理法を簡素化することである。そのために TRISTAN では消化不良となっていた電解研磨における水素病の問題を再検討し、その完全解決の道を探る。水素病の解決は、単にアニールを省くことによるコスト削減に留まらない。空洞の機械強度の確保のためにもアニールを省くことは重要である。また金属中の水素の問題は、水素脆性等金属における一般的な課題であり、ニオブ（体心構造金属）の水素吸蔵メカニズムを追求することで、こうした問題に寄与することができる可能性もある。

本研究課題の詳細は次章以下に記述される。その概要を図 1-22 にまとめる。第 2 章で簡単な機械研磨法としてバレル研磨法を開発し、空洞性能測定によりその有効性を実証したことについて述べる。しかしこの方法には、量産を考慮した場合に研磨速度が遅いという問題がある。

第 3 章ではその問題を解決するためになされた種々の試みについて述べる。最終的に遠心バレル研磨を開発し、この方法によりそれまでのバレル研磨に比較し 20 倍の研磨速度の高速化に成功した。また、空洞性能測定によりその有効性をも確認した。しかし、この簡便な機械研磨法を適用しアニーフリーで空洞を処理した結果水素病が発生した。

第 4 章からは、電解研磨の水素病の問題に移る。ここでは水素病及びニオブサンプルの水素分析について簡単に記述する。

第 5 章では、電解研磨による水素病の問題を再検討し、真の水素吸蔵プロセスを調査した結果について述べる。水素吸蔵は従来考えられていた電解研磨中ではなく、機械研磨（バレル研磨）中に起ることが突き止められた。

第 6 章では、バレル研磨中の水素吸蔵は研磨時に使用する水の中の水素であることを突き止め、水素原子を含まない研磨液を選定（FC-77）することでこの問題を解決したことについて記述する。また、その水素フリー遠心バレル研磨と化学研磨の組合せというアニールフリーの簡単な処理法を見つけたが、電解研磨との組合せでは水素病が発生した。化学研磨では空洞の高電界領域での性能が保証されないので、さらに電解研磨との組合せ処理の可能性を追求することとした。

第 7 章では、水素フリー遠心バレル研磨と電解研磨の組合せ処理でアニールフリーでも水素病を起こさない処理法を発明した。化学研磨の検討から定常的酸化プロセスの存在が水素吸蔵阻止に重要であることに気付き、電解研磨液に少量の硝酸を添加することで当初の目的を達成したことについて述べる。

第 8 章では、水素吸蔵のメカニズムについて議論を行う。また、我々の開発した方法の一般的応用について述べる。さらに、今回の開発が表面処理コストにもたらす効果についても述べる。

第 9 章でまとめを行う。

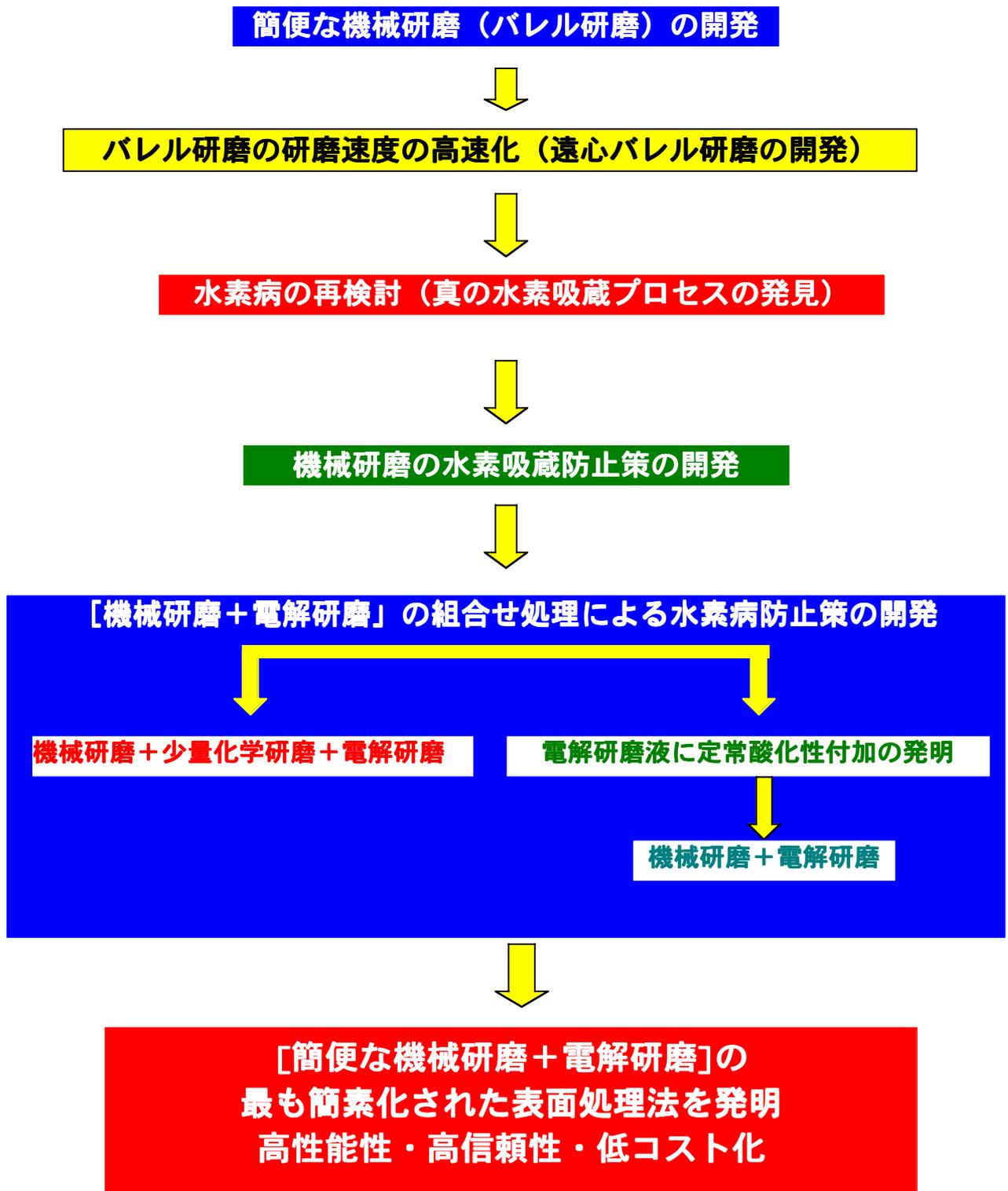


図 1-22 . 本研究課題の進行の概要