第 2 章 簡便な機械研磨法の開発

2.1 機械研磨の重要性と従来の機械研磨法の問題点

前章で述べたが TRISTAN では電解研磨の前処理としてバフ研磨による機械研磨、さらに電子ビーム溶接シーム部のグラインダー研磨を行い空洞性能において高い信頼性を実現した。しかし、その方法は煩雑かつ高コストであった。その理由は、バフ研磨は溶接された複雑形状な空洞に適用困難であり、ハーフセルにはバフ研磨、電子ビーム溶接部の研磨にはグラインダー研磨と、バフ研磨とグラインダー研磨の二つの機械研磨をしなければならなかったからである。また、当時はデータ不足のためにバフ仕上げ粗さがオバースペックであり、滑らかで光沢のある面を得るために 6 種類もの番手の研磨が施された。1 枚のハーフセルのバフ仕上げに作業者が半日以上を費やすという状況であった。溶接シームの研磨では特殊なグラインダー装置が開発された。こうしたことから機械研磨行程は非常に時間がかかり、コスト高なものであった。今後機械研磨を併用するためには、簡便な機械研磨法を開発する必要があった。その方法として、完成した空洞内面全体を研磨できる方法が最も簡単である。

2.2 バレル研磨法の提案

バフ研磨に代わるより簡便な機械研磨として我々は、バレル研磨法を試みた。通常のバレル研磨はバレル（8 角ないしは 6 角の樽）の中に品物、研磨メディア、水、コンパウンド（研磨かすによる目詰まりの解消、防錆などの目的で加える添加剤）を投入し、バレルを回転させることにより品物のバリの除去や光沢出しをするものである。我々の場合にはこれと異なり、空洞内に研磨メディアを入れて空洞を回転させて空洞内面を研磨する（図 2-1）。

このバレル研磨は、研磨中には一切人手がかからず、前出のバフ研磨に比較し以下の利点がある。

1）最終成形後一体となった複雑形状の空洞に適用できる。
そのため溶接シーム部を含めて空洞内面全体を一度に研磨できる。

2）バフ研磨と異なり仕上がり面の作業者依存性が無く、一旦研磨条件が定まれば、いつも同様の仕上がり面が得られるため品質管理が容易である。

3）赤道部では大きな高周波電流が流れる。この部分の欠陥が空洞性能に大きく影響する。バレル研磨で赤道部で研磨速

度最大であることはメリットである（赤道部で半径最大のため遠心力最大）。

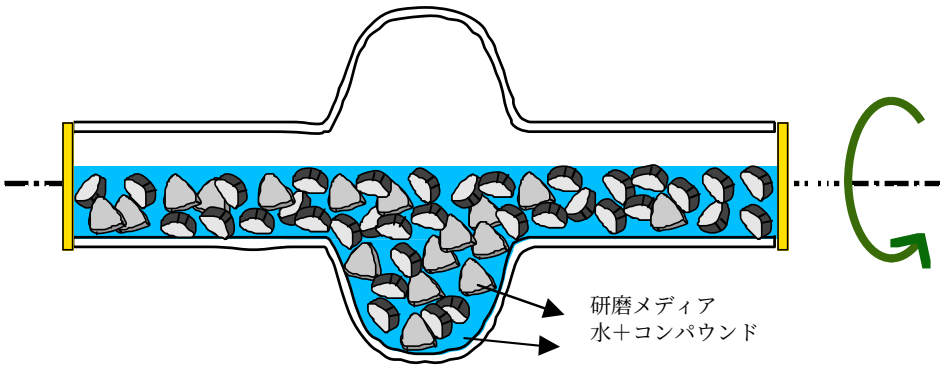

図 2-1．バレル研磨

2.3 バレル研磨の条件把握試験

バレル研磨の開発を始めるに際し、図 2-2 に示すように、先ず初めにステンレス製モデル空洞（L-バンド単セル空洞）の赤道部内側に取りつけたニオブサンプルを用い以下に述べる色々なパラメータを変えながら研磨速度を測定して、研磨条件の最適化を行った[2-1]。

図 2-2．ステンレス製 L-バンドモデル空洞と
これに取付けるニオブサンプル

2.3.1 空洞内に入れるべきメディア量と回転速度の適正化

PMG 社の粗研磨用のセラミック研磨メディア SGT を用いて空洞内に入れるべきメディア量の適正値を検討した。研磨速度は回転速度、水の量、コンパウンド等の他のパラメータとも相互に関連して

いる。そこで、とりあえずコンパウンドの量をメーカ推奨の 1%に固定し、メディア量を 300g、1kg、2kg の３条件に対して、空洞回転速度を 20rpm から、40、60、80、100、そして 110rpm(我々のシステムでの最大限界回転数)で回転させ、赤道部に取り付けたニオブサンプルの重量測定から研磨速度を割り出した。結果を図 2-3 に示す。ここで判明したことは、メディア量が多い場合（2kg）は遠心力によりメディアが空洞に張り付いてしまい研磨速度が取れないこと、

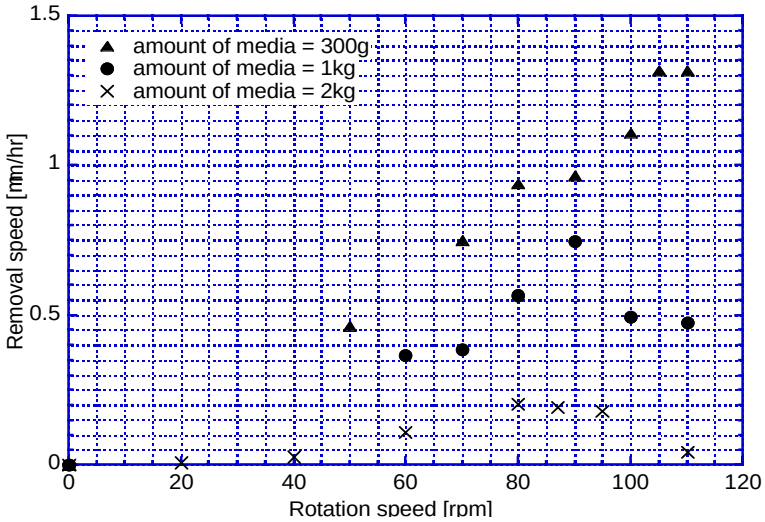

図 2-3. バレル研磨におけるメディア量・回転速度の適正条件

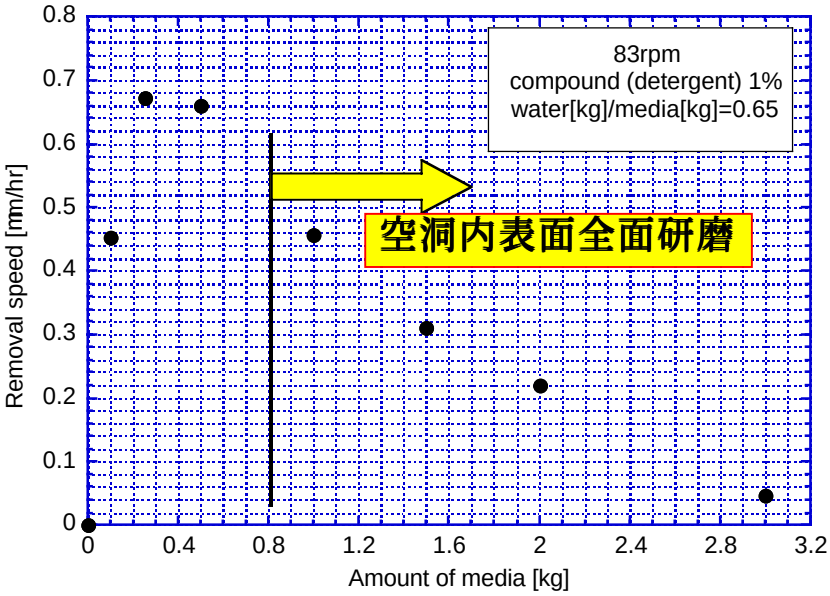

図 2-4. バレル研磨における適正メディア量

メディア量が少ない場合、赤道部での研磨速度が高いが赤道部付近しか研磨できないことである。内面全体が研磨でき、かつ研磨速度が高い条件として、メディア量～1kg、空洞回転速度 80~90rpm と判断した。さらに、適正メディア量をより詳しく調べるために、空洞回転数を 83rpm に固定して、メディア量を細かく変えて研磨速度を調べた。結果を図 2-4 に示す。この調査では、メディア量 400g 辺りに最大値を持つが、空洞内面全体が研磨されるためには、1kg 以上のメディアが必要であることが分かった。

2.3.2 適正液量

バレル研磨ではコンパウンドを水に溶かした溶液（一種の石鹸水）をメディアと一緒に空洞内に入れる。この溶液の適性量を調査した。ここでは液状コンパウンド（脱脂剤 R）をメーカー推奨量の１％溶かした液を使用した。結果を図 2-5 に示す。メディア量 1kg、回転速度 83rpm の下で 150cc から 1000cc の広範囲に渡って調べたが、研磨速度は水の量にはほとんど依存しないことが分かった。

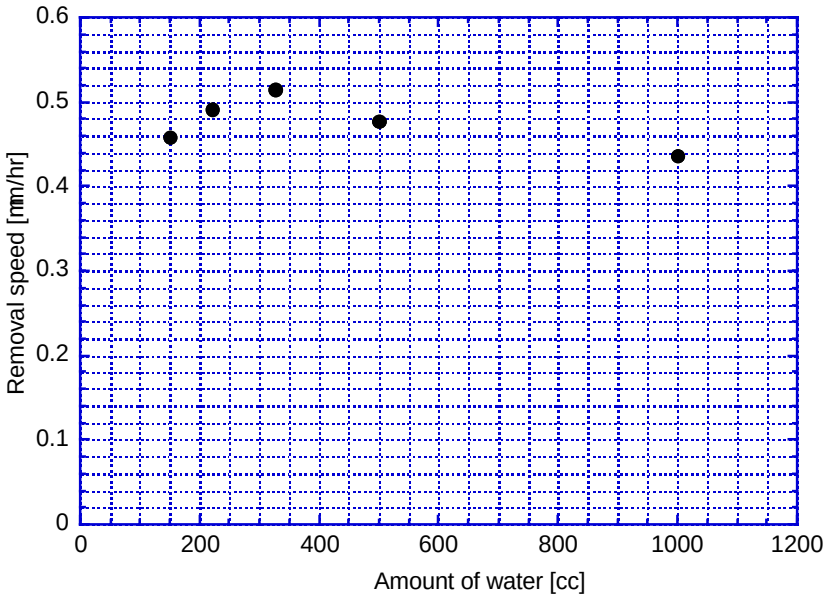

図 2-5. バレル研磨速度と液量の相関

2.3.3 適正コンパウンド濃度

バレル研磨溶液に使用するコンパウンドの濃度についてはメーカーの推奨濃度がある。ここでは、PMG 社のコンパウンドの脱脂剤Ｒについてニオブ金属に対する適正濃度を調査した。結果を図 2-6

に示す。メディア量 1kg、溶液 850cc、回転速度 100rpm の条件下で試験を行いメーカーの推奨値 1%で最大の研磨速度が得られた。

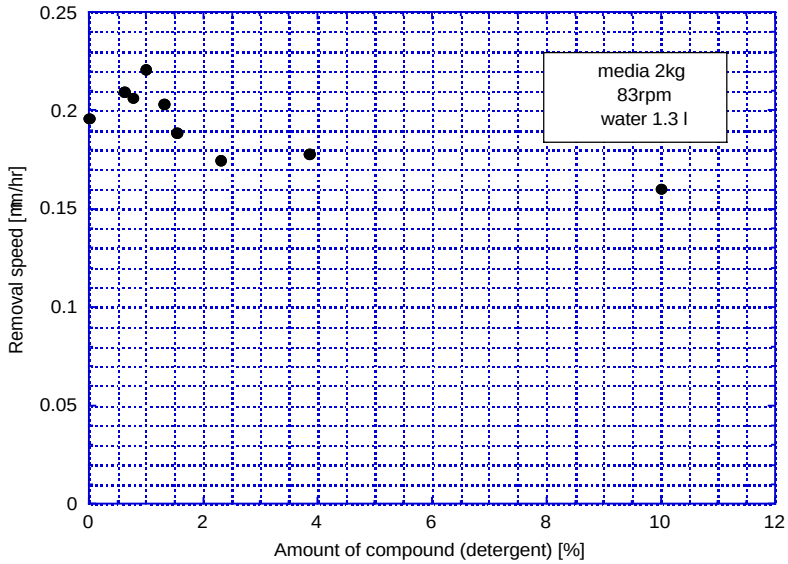

図 2-6. 適正コンパウンド濃度

2.3.4 色々なメディアでのバレル研磨速度と研磨面粗度

バレル研磨に用いる研磨メディアには種々の形状・材質のものがある。PMG 社の各種研磨メディアについて研磨速度を調べた結果を表 1 に示す。PV 以外のメディアの主成分はアルミナである。PV は結合剤がポリエステル樹脂のメディアである。また、SGT と PV は粗研磨用、SKT は仕上げ研磨用、BB は光沢仕上げ研磨用である。それぞれのメディアに対する研磨時間は 24 時間以上 90 時間未満である。表中の研磨面粗度 Rz はニオブサンプル上の 10 箇所で粗さを計測した平均である。尚、研磨面の粗さは研磨後 4 時間でメディアにより決まる一定の値にほぼ落着くことが確認された。

PV メディアがセラミック製の物よりも体積当りの重量が 6 割弱と軽く空洞面への当りが少ないにもかかわらず（PV：1.1kg／ℓ、SGT：2.0kg／ℓ）研磨速度が大きかった。このためこのプラスチック製メディアのシリーズについて改めて研磨特性を調査した結果を表 2 に示す。PV が粗研磨用、PW が仕上げ研磨用、PK が超仕上げ研磨用のプラスチック製メディアである。PK では表面 10 点粗さで Rz～1μm に匹敵する滑らかな研磨面を得ることができた。そのため、以後のバレル研磨では PV を用いた粗研磨の後に、PK による仕上げ研磨を行った。

表 2-1.　各種メディアを用いた場合の研磨面粗度と研磨速度

Media, size [mm]	Amount of media [cc]	Rotation speed [rpm]	Removal speed [μm/day]	Rz [μm]	Comment (shape, bond)
SGT, 10×8	500	90	12	3.31±0.36	prism, ceramics
PV, 10	500	90	14	3.25±0.57	cone, polyester
SKT, 6×6	500	90	2.1	2.64±0.34	prism, ceramics
BB, 6	500	90	0.54	1.88±0.35	sphere, ceramics

表 2-2.　プラスチック製メディアでの研磨面粗度と研磨速度

Media, size [mm]	Amount of media [cc]	Rotation speed [rpm]	Removal speed [μm/day]	Rz [μm]	Comment (shape, bond)
PV, 10	500	110	16.6	3.79±0.44	cone, polyester
PW, 10	500	110	16.3	2.32±0.36	cone, polyester
PK, 10	500	110	13.2	0.70±0.13	cone, polyester

2.3.5 L-バンドニオブ単セル空洞でのバレル研磨条件確認

ステンレスのモデル空洞による適正バレル研磨条件の把握の後、L バンドニオブ単セル空洞を用いて最適研磨条件の確認試験を行った。試験の結果、空洞全体の研磨には研磨メディア 700cc、回転速度 100～110rpm が最適との結果を得た。尚、赤道部（図 2-7）のみを集中的に研磨するには 300g 程度の少量のメディアを用いるのが効果的である。

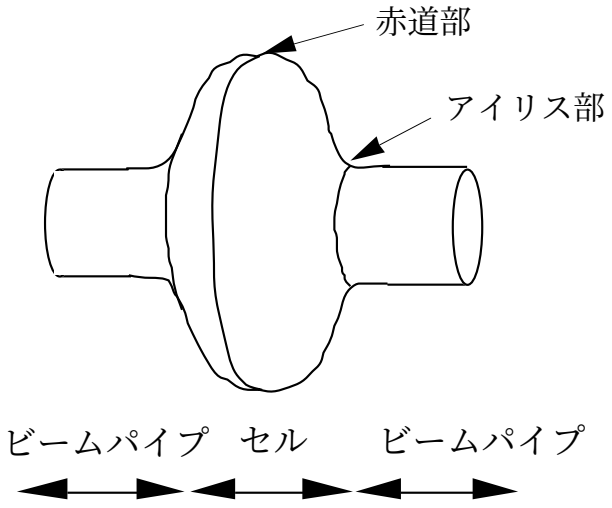

図 2-7.　空洞の各位置の通称

2.4　L-バンドニオブ空洞のバレル研磨特性

2.4.1 空洞内表面の研磨分布

L バンド単セル空洞にバレル研磨を施し、空洞内での研磨量分布を求めた。各位置での研磨量は、研磨前後の超音波厚み計を用いた厚み測定により求めた。空洞の端から端まで、厚み測定位置を電動ペンを用いてビーム軸方向に順に印し、常に同じ位置を測定するようにした。測定位置はビームパイプ上では端から順に 1.5cm 間隔、セル上では 1.3cm 間隔とした。ビームパイプで 7 箇所×2 の 14 箇所、セルで 12 箇所の合計 26 箇所を測定した。

Lバンド単セル空洞内についての研磨厚み分布を図 2-8 に示す。予想通り、半径が大きく遠心力が最大となる赤道部で研磨量最大となる山形の分布であった。空洞重量より算出した平均研磨厚みを 1 とすると、各部での大まかな研磨厚みは赤道部で 3、アイリス部で 1、ビームパイプで 1/3 であった[2-2]。機械研磨で最も研磨したい部分は空洞の運転時にもっとも RF 電流が大きく、かつ溶接箇所のある赤道部である。従ってこの赤道部で研磨量が大きいバレル研磨特性は、加速空洞にとり非常に好都合なものである。また、バレル研磨の後に行う電解研磨での研磨分布は、空洞と陰極の幾何学的配置が原因で赤道部で研磨量が小さい（図 2-9）。このことからも、赤道部で研磨量の大きいバレル研磨の研磨特性は非常に望ましいものである。

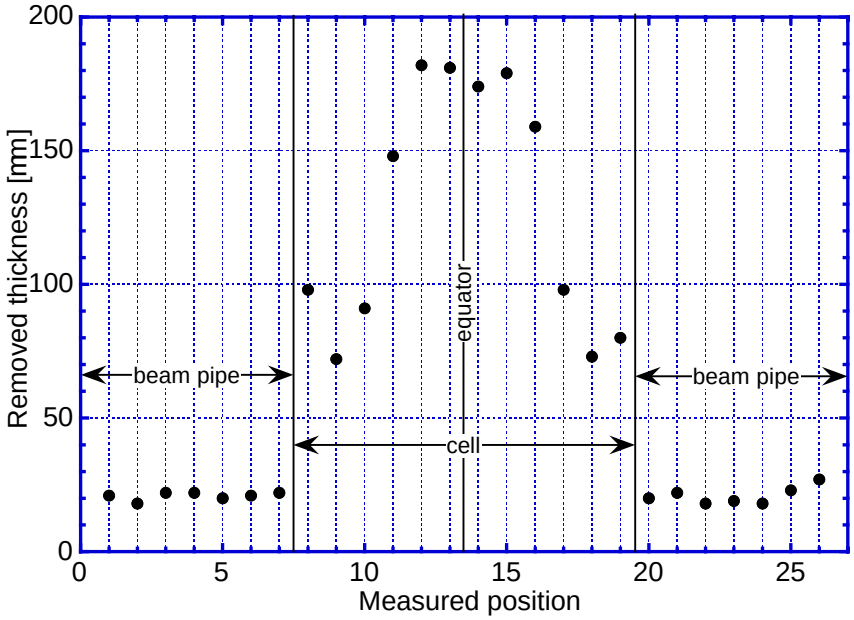

図 2-8.　単セル空洞内でのバレル研磨量分布

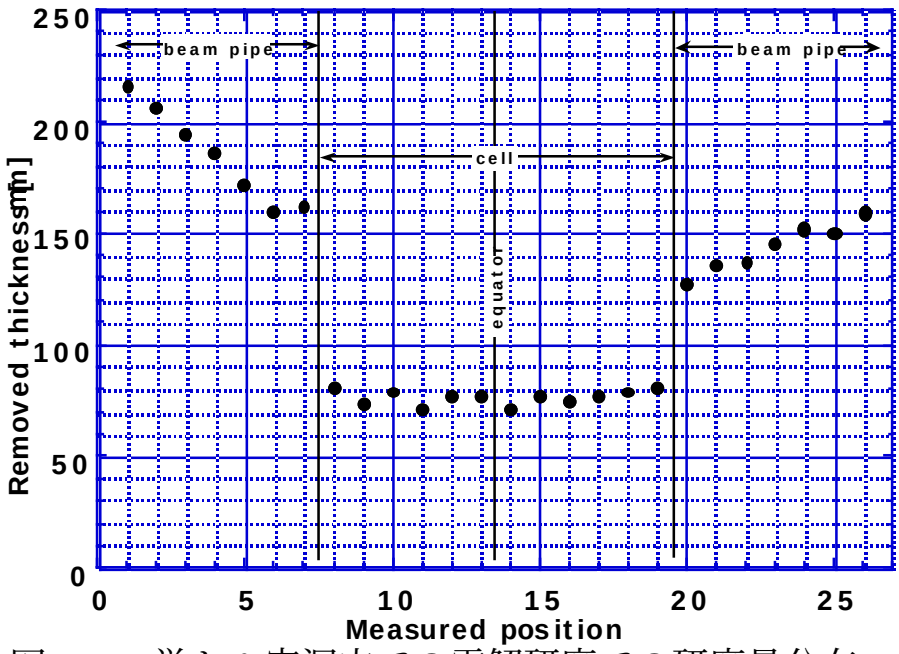

図 2-9.　単セル空洞内での電解研磨での研磨量分布

2.4.2 研磨速度

L バンド単セル空洞の典型的なバレル研磨条件を表 2-3 に示す。ここで用いた研磨メディア PV は、結合剤がポリエステル樹脂、研磨砥粒の主成分がアルミナであり、高さと底辺の直径が 10mm の三角錐形状の粗研磨用メディアである。表 2-3 に示す典型的な条件で連続バレル研磨をした際の研磨速度は赤道部で 14μm／日、アイリス部で 4.7μm／日、ビームパイプで 1.6μm／日であった。

表 2-3.　L バンド単セル空洞の典型的バレル研磨条件

連続研磨時間	72 時間
回転速度	100rpm
研磨メディア	PV800g
水	350cc
コンパウンド	脱脂剤 R：水に対し体積 1%（メーカー推奨量）

2.4.3 表面粗さ

前出のモデル空洞に取付けたニオブサンプルの測定では、バレル研磨面粗度は研磨に使用した研磨メディアにより変化した。空洞の研磨面粗度はサンプルと同じと考え、面粗度のみ再度表 2-4 に示す。

表 2-4.　バレル研磨面粗度

研磨メディア	研磨面粗度（Rz）［μm］	備考
PV	3.8±0.4	粗研磨用
PW	2.3±0.4	仕上げ研磨用
PK	0.7±0.1	超仕上げ研磨用
SGT	3.3±0.4	粗研磨用

2.5 溶接欠陥の著しい空洞へのバレル研磨の適用例

赤道部は内側からの非貫通ビームで電子ビーム溶接している（付録 A-3）。この溶接の際に電子ビームを絞り過ぎて空洞内面に溶接欠陥（スパッタボール、溶接シームのオーバーカット）が発生したのでバレル研磨を適用した。研磨前のスパッタボールを図 2-10 に示す。溶接部には一部オーバーカットと、大きな物で 500μm 程度のスパッタボールが赤道部よりアイリス部にかけて多数発生した。スパッタボールは空洞内面に溶着されているため、機械的に除去する必要があった。スパッタボールを 1 つずつ除去するグラインダー研磨に比較し、バレル研磨では一括して空洞内面を研磨でき簡便である。この空洞をバレル研磨 76μm、化学研磨 5μm、電解研磨 10μ

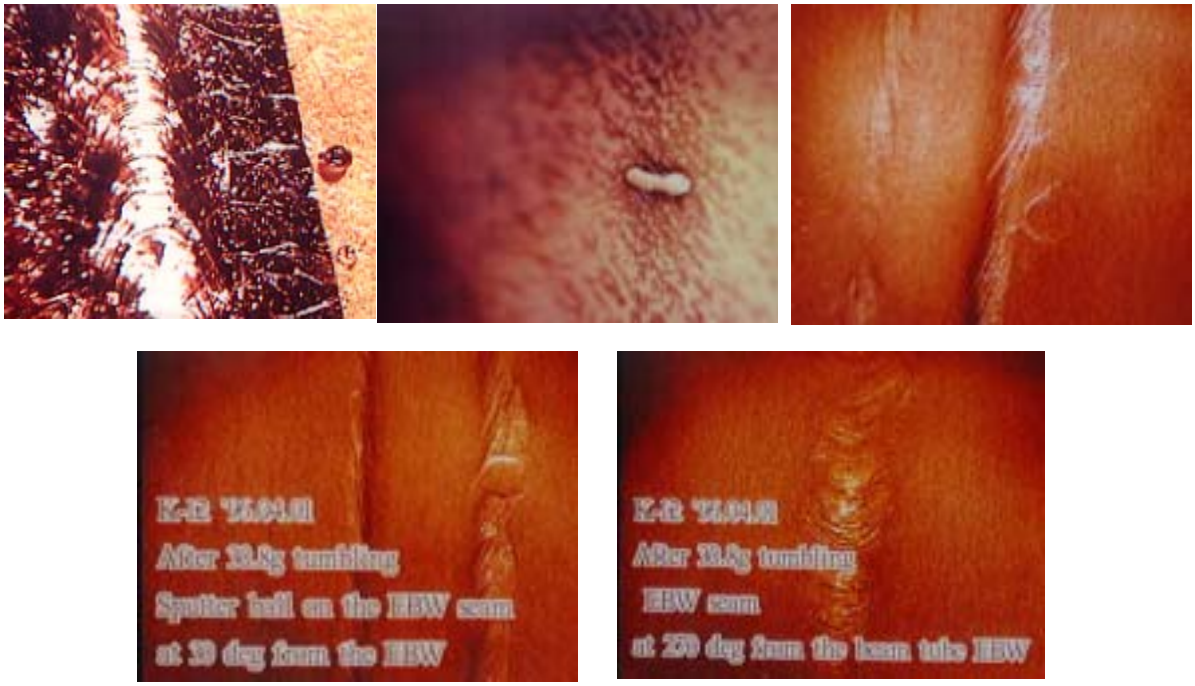

図　2-10.　　バレル研磨による溶接欠陥の除去
(上段左よりスパッタボール、6μm研磨後のアイリス部のスパッタボール、16μm研磨後の赤道部のスパッタボール。下段左より 21μm研磨後の赤道部のスパッタボール、21μm研磨後の赤道部の溶接部。)

m、アニール（800℃、5 時間）、高圧洗浄で仕上げて性能測定をした結果を図 2-11 に示す。溶接欠陥の著しい空洞でも 25MV/m を越える加速電界が達成された[2-2]。

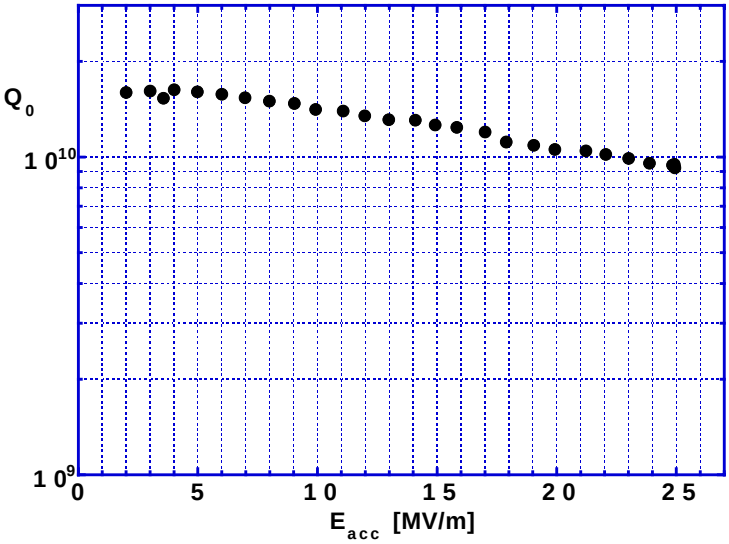

図 2-11.　バレル研磨で溶接欠陥を除去した空洞の性能

尚、この空洞では 30μm 以下のバレル研磨で全てのスパッタボールが除去され、50μm の研磨でスパッタボール痕（スパッタボールが除去された後に残る凹み）が滑らかになり、最終的には赤道部のオーバーカットも滑らかとなった。以上に述べたのは特別に欠陥の多い空洞の場合である。溶接に問題の無い通常の L バンド空洞にバレル研磨を適用し同様の観察を行った場合には、20μmのバレル研磨で内面全体が一様な研磨面となった。

2.6 バレル研磨を適用した超伝導空洞の性能確認試験

バレル研磨性能を超伝導空洞の性能面から評価するために、複数のニオブ L バンド単セル空洞を製作した。そして、バレル研磨を前処理として施し（30～50㎜ 研磨）、その後に電解研磨もしくは化学研磨で、あるいはその組合せで 10～40㎜ 除去した。これはバレル研磨による砥粒汚染層を除去するためである。この過程でニオブが水素を吸蔵して水素病を起こす恐れがあるので、水素脱ガスを目的として、引き続き 800℃5 時間のアニールを施した。TRISTAN ではこのアニールで研磨面が汚染されるとして電解研磨を施した。しかし、我々は今や超純水高圧洗浄による強力な洗浄法を有しているので、この実験ではアニール後に再度電解研磨を施すことなく超純

水高圧洗浄のみで済ませ空洞性能を測定した。結果を図 2-12 に示す。

6 個の空洞をテストしたが、全ての空洞で TESLA の当初の仕様性能である 25MV/m 以上の加速電界が達成された。K-4、K-8、K-9 の 3 個の空洞では、バレル研磨を含む全研磨量は 60～70㎜ である。一方、K-12 空洞は赤道部電子ビーム溶接で溶接スパッターが発生し、先に述べた通りこのスパッター跡を除去するために多量のバレル研磨を要した。また、N-2 空洞では電子ビーム溶接条件が不適切だったため赤道部、アイリス部の両方の溶接に失敗し、更に再溶接を行った結果溶接シームに大きな凹凸を生じ、この除去のために多量のバレル研磨を要した。

一つの注目すべき結果は、K-4、K-8、K-9 空洞では少ない研磨量（60～70㎜ 程度）で高電界が達成されたことである。図 1-19 から分かるように化学研磨のみで仕上げた空洞では、その程度の研磨量では 12～14MV/m の加速電界しか期待出来ない。また、同図より電解研磨のみで仕上げた空洞（○印）でも 18MV/m 程度であり、到底 25MV/m の高電界性は期待出来ない。このように少ない研磨量で高加速電界が得られた背景には、機械研磨の強力な欠陥除去力があると考えられる。従って品質管理上機械研磨が重要であり、その方法としてここで開発した簡便なバレル研磨が、量産での超伝導空洞性能の高信頼性をもたらすとの見通しを得た。

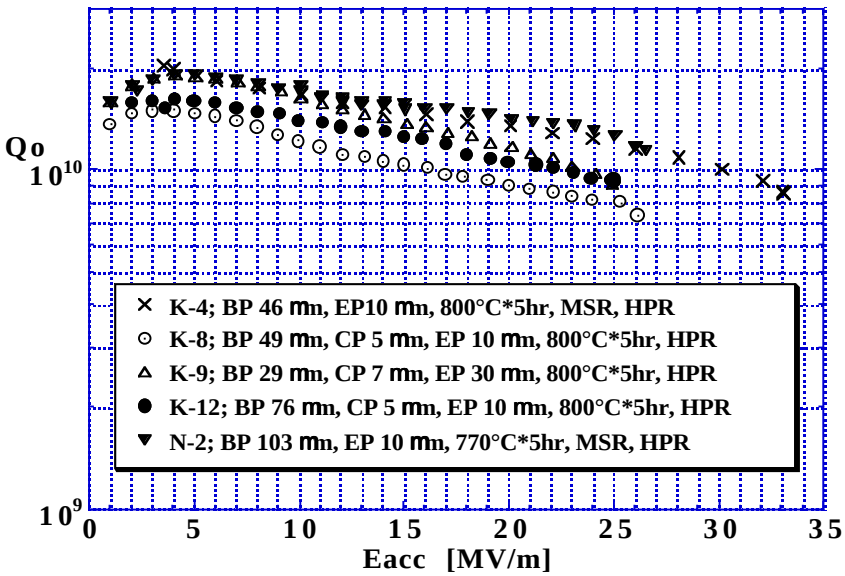

図 2-12. バレル研磨を施した超伝導空洞の高性能性と高信頼性

2.7 バレル研磨による全研磨量の軽減効果

我々のこれまで蓄積した空洞内表面の研磨量と最大加速電界に関する実験結果をプロットすることにより、機械研磨のもう一つのメリットが明確になる。図 2-13 は横軸に赤道部での研磨量、その時得られた最大加速電界を示している。化学研磨のみ繰返して研磨量を増やした場合（●）、120㎜ 以上で最大加速電界のサチレーションが起こる。電解研磨のみを繰り返した場合（○）、化学研磨に比べて研磨量増加に対する加速電界の伸びが大きい。また、バレル研磨と電解研磨を組合せた場合（△）はさらに急激な加速電界の伸びが観察される。図 2-13 より、目標加速電界を 30MV/m 程度に設定する場合、バレル研磨と電解研磨の組合せが最も少ない研磨量で済ませられると期待される。これについては第 8 章で再度議論する。

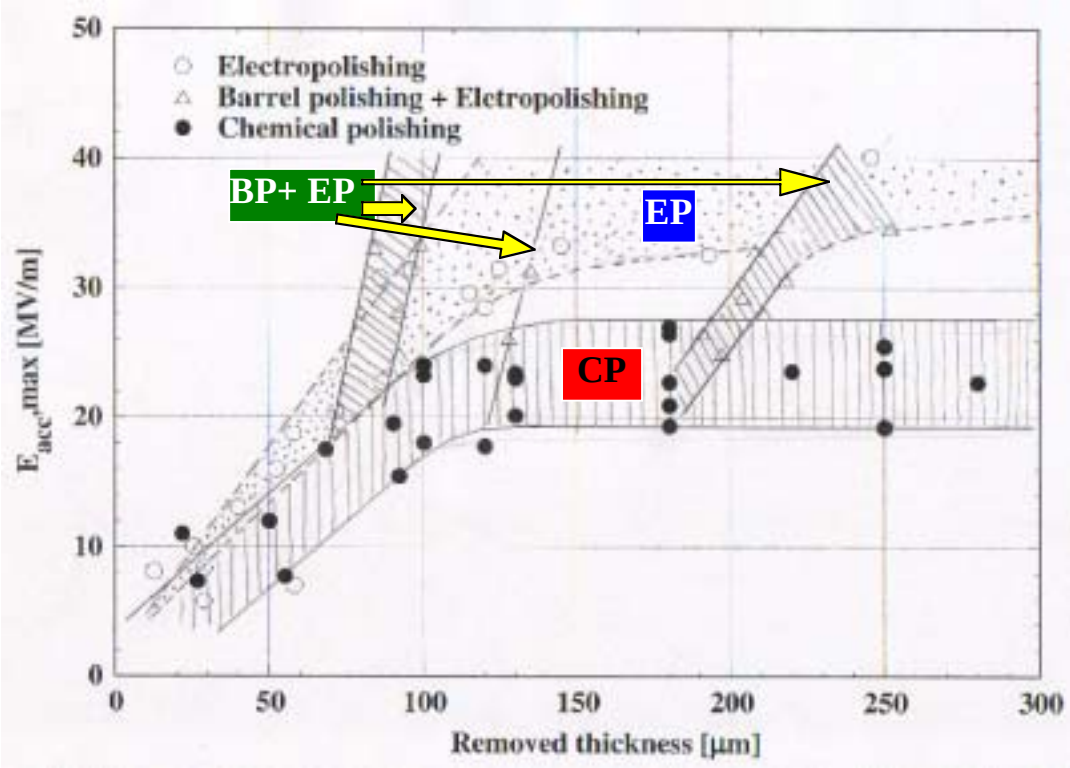

図 2-13. 赤道の研磨量と最大加速電界

参考文献

[2-1] T. Higuchi et al., ”Investigation on Barrel Polishing for Superconducting Niobium Cavities”, Proceedings of the 7th Workshop on RF Superconductivity, 723-727(1995)

[2-2] T. Higuchi et al., ”FINISHING NIOBIUM CAVITY SURFACE WITH BARREL POLISHING”, Proceedings of the 21st Linear Accelerator Meeting in Japan, 228-230 (1996)