「加速器」Vol. 3, No. 2, 2006（137–143）

講　座

超精密加工と高性能加速管への応用(4)

小泉　晋*

Ultra-precision Machining and its Application to Advanced Accelerators (4)

Susumu KOIZUMI*

第4章　加速器のための超精密加工

1.　超精密加工導入までの道

昭和61年（1986），つくばの高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）に電子・陽電子加速器研究施設トリスタンが完成した．

トリスタンには，超伝導に使用されるニオブ製5連空洞が装着されている．

5連空洞は，加速周波数508.581 MHzであることから，マイクロ波の周波数に適合した内径約500 mm，幅約300 mm，クビレの穴径が約160 mmの空洞（セル）を5個数珠繋ぎにした形状（図29）をしている．

各空洞の接合には，接合部を瞬間的に高エネルギーで加熱接合すると云う，当時，一番歪みの少ないと云われた電子ビーム溶接を採用して成功した．接合時，内面に若干発生した溶接歪みは，内面研削法で取り去り，表面粗さ3(S)と云う素晴らしい加速管に仕上がっている．

Sバンド（加速周波数2856 MHz）用の加速管（図30）においては，周波数が約6倍であるから，各空洞の形状は，内径約80 mm，幅約50 mm，穴径約25 mmと約1/6と小型になると同時に，精度は6倍高く要求される．すなわち，表面粗さも0.5(S)が要求されることになる．

この要求精度は，通常の工作機械では仕上げられない精度である．三菱重工名古屋は，輸入した超精密加工機による超精密加工によって，昭和35年（1960）に加速管を核研に納入した実績が認められたせいか，昭和46年（1971）の高エネルギー物理学研究所の設立からSバンド（加速周波数2856 MHz）用の加速管に携わった．

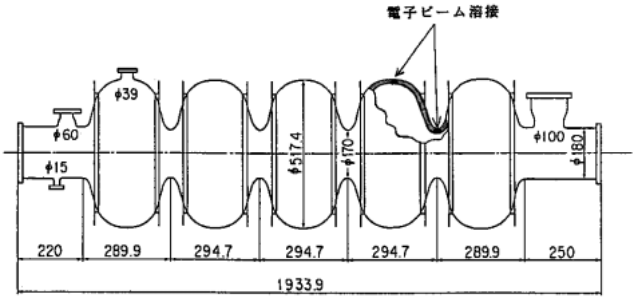

図29　5連空洞

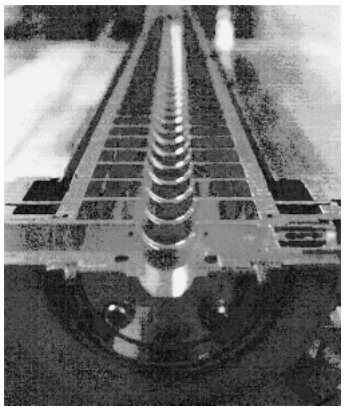

図30　Sバンド加速管

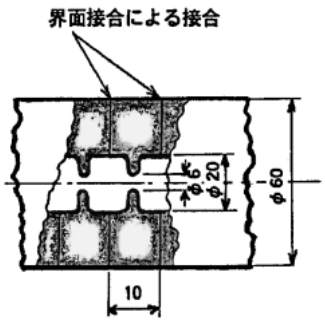

図31　Xバンド加速管模型図

* 高エネルギー加速器研究機構　KEK, High Energy Accelerator Research Organization

まず空洞を円板と円筒とに分解して加工を行い，加工表面を鏡面にすることに成功した．加工した各空洞を低温で歪み無く連結する接合方法については，当時，既に開発に成功していた電鋳法[1]を採用している．

それは，円筒外周面を厚く銅メッキした時に生ずる収縮力で精密に圧着すると云う方法で，この電鋳法に辿り着いたおかげで，ようやくのことで接合時の精度の問題は解決出来たのである．

私がつくばへ行った平成2年（1990）は，丁度，次世代Xバンド加速管（加速周波数11.424 GHz）（**図31**＝原理図であり，正確な形状形式や寸法は省略する）の開発に着手した時であった．

このXバンド加速管は，さらに周波数が約4倍となったので，形状はさらに約1/4にコンパクト化される．すなわち，各空洞は，内径約20 mm，幅約10 mm，穴径約6 mm程度となり，仕上げ精度も0.1(S)と完全に超精密加工に踏み込んだ領域の部品となった．

以上の経緯から，Xバンド加速管開発には，超精密加工が絶対必要不可欠なものと判断し，高エネルギー物理学研究所内に完全に温度管理された恒温室を装備し，超精密加工機の導入に踏み切ったのである．

2.　超精密加工への挑戦

Xバンド加速管用のセルを加工するためには，それに適合した超精密加工機が必要であるが，丁度適合する市販の超精密加工機が無かったことから，自分たちで超精密加工機を開発して，超精密加工に挑戦することを決意した．

超精密加工機を設計する場合には，次の3点を常に念頭に置いて構成を決める必要がある．すなわち，

⑴　運動要素には，出来得る限り静圧軸受を採用すること．
⑵　機械本体には，振動源と熱源を置かないこと．
⑶　常に，熱源対策を念頭に置くこと．

である．

採用すべき主軸を，静圧軸受にすることは当然であるが，流体を油にするか空気にするかは，意見の分かれるところである．

回転精度的にはどちらも同程度であるが，空気の粘性係数は油と比較して約1/1000であり，熱的には静圧空気軸受の方がはるかに有利である．しかしながら，軸受剛性は，静圧油軸受の方が数倍高いと云う有利さを持っており，用途により選択を誤らない様に注意しなければならない．

Xバンド加速管用のセルを加工する超精密旋盤の場合には，静圧空気軸受を採用した方が利点が多いように思われたので，東芝機械の静圧空気軸受を購入することにした．

東芝機械の静圧空気軸受[2]は，**図32**に示す様に東芝から受け継いだ独自の球面静圧空気軸受を採用し，駆動軸にインダクションモータをビルトインして，軸と同時に加工することにより，既製モータを使用する場合の芯違いやモータからの振動（ロータのアンバランスによる振動，ころがり軸受からの振動など）の影響を除去すると共に，ベルト駆動などの複雑な機構からも逃れる構造をしている．

回転精度は0.02 μm以下と云う世界最高クラスの高精度で，次世代のXバンドのセルを加工するのに最適と思われる優れた軸受であった．

図33は，試作した超精密加工機であり，主軸の選択が的確であったためか，被削材として鏡面加工用の無酸素銅を用いて，思ったよりも早く，きれいな鏡面を削り出すことに成功した．

この様な考えで，セルの超精密加工は可能であるとの判断から，本格的なXバンドのセル加工専用機の開発に着手し，**図34**の様なセル加工専用超精密加工機を完成させた．

これにより生産体制が整い，とにかくセル（材質は無酸素銅）の加工を開始した（**図35**）．

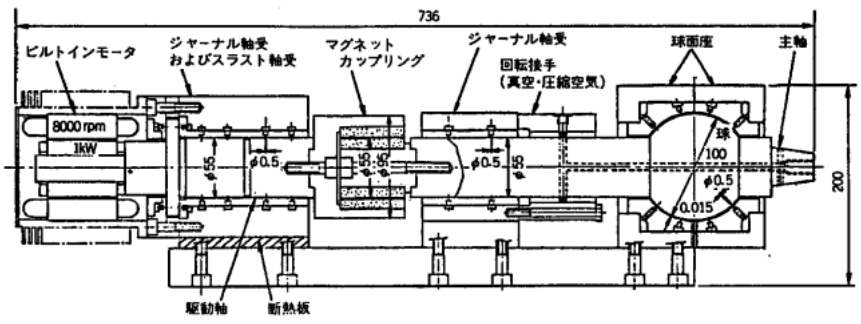

図32　東芝機械が採用している主軸[2]

セルが完成した後の問題は，各セルの接合法である．2つの物体を結合する場合，電気やガスの熱エネルギーを多量に使用して，半田付け，ろう付けのろう接合や，電気溶接，ガス溶接，抵抗溶接などの溶融接合が用いられる．しかしながら，大量に使用される熱による材料の変質・劣化やもろい反応層の形成，あるいは，熱変形・残留熱応力の発生があり，これらを嫌う精密部品や高信頼度を必要な部品の分野では，これらに代わるべき新しい接合法を模索しているのが現状である．

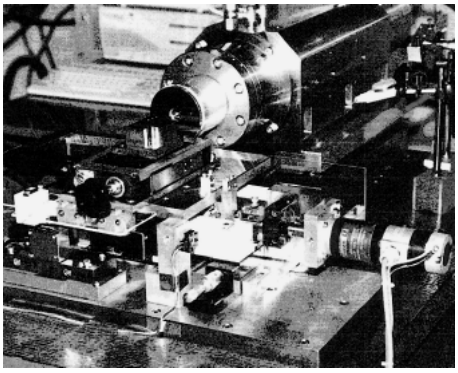

図33　試作した鏡面加工機

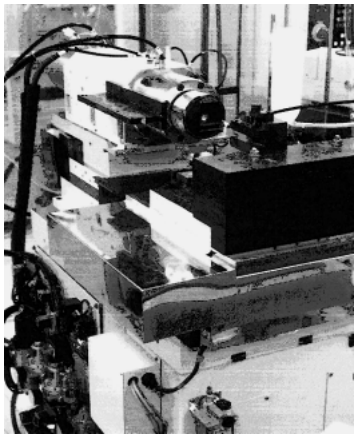

図34　Xバンドセル加工専用超精密加工機

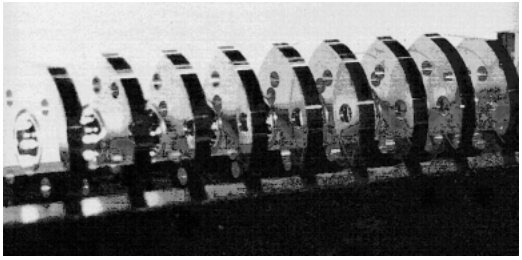

図35　試作されたXバンドセル

最近，有力な接合法として，母材融点以下の温度で，また，塑性変形が生じない程度の圧力を加えることにより，接合面に原子の拡散を生じさせて結合する拡散ロー付け・拡散接合法が発見されている．

種々検討の結果，各セルの接合に採用されたのは，拡散ロー付けと云われる方法で，接合両面を約1 μm程度の金メッキを施し，圧接しながら加熱すると，金が各セルの無酸素銅の内部に拡散して接着すると云う方法である．

かくして，各セルを接合してまがりなりにも試作用Xバンド加速管は完成した．

しかしながら，若干とは云え，加圧と加熱することで折角精密に加工されたセル自身の精度が狂ってしまい，接合後にセルを若干変形させて設計値に合致させるチュウニングなどの較正が必ず必要となること，また，拡散面はいわば金の合金となるので導電抵抗的にも面白くないし，第一メッキなどの処理に大変な手間がかかり，かなりの高額になるなどの欠点もあった．

3.　界面接合への挑戦

折角，超精密に加工したセルを接合時に歪ませてしまってはなんとも勿体ない．なんとか無歪で接合することは出来ないかと云うと，実は一つだけあるにはある．それは，究極の接合法と云われる界面接合と云う方法である．

すなわち，界面接合とは，接合面を原子間距離にまで近づけることが出来れば，圧力，熱，バインダーを使用することなく，原子間が引き合う力だけでお互いの材質にも関係なく無歪で接合することが出来ると云う「夢の接合法」と云われている接合法なのである．理屈は分かっていても馬鹿馬鹿しくて誰も本気で取り組んだことのない方法なのである．次世代加速管の共同研究しているスタンフォード大学に対して，各セルの接合に界面接合を採用したいと提案した際にも「クレイジィ」と云う声が上がったほどである．

界面接合を模型的に概念図で説明すれば，**図36**に示す様に，接合する両物体は，原子同士がそれぞれの持

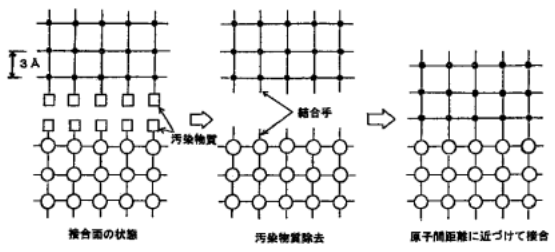

図36　界面接合の概念図[3)]

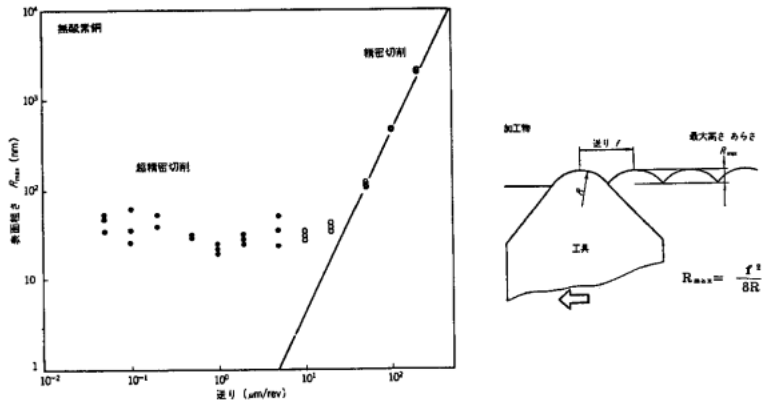

図37　切削の限界[4)]

つ結合手で，規則正しく格子状に結合していると考えると，表面の結合する相手のいない遊んでいる手には，酸素とか汚染物質が付着していると考えられる．そこで，その酸素とか汚染物質を取り除いて，お互いの手が結合できる原子間距離にまで接近させれば，2つの物体は，内部結合と同じ強さで結びついてくれるはずである．これが常温界面接合の概念[3)]である．

したがって，界面接合するためには，接合面を原子間力が働く距離にまで近づける必要がある．すなわち，接合両面を3 Å（0.3 nm）程度にまで近づけなければならないのである．

超精密加工の進展で，ようやく0.03 μmの限界精度に到達出来た時に，そのもう100倍，すなわち，もう2桁上の精度が要求されているのであるから，あきれられるのも無理のない話である．

3.1　ダイヤモンドバイトの切削限界

ダイヤモンドバイトでセルを仕上げている内に，いくら努力をしても，もうこれ以上表面精度が向上しない壁があることに気がついた．

実際に切削してみると，**図37**に示すように，最初は極めて良く理論値と一致，すなわち，$f^2/8R$の直線に沿って，表面粗さは限りなく0に近づいていくはずであるが，どうも20 nmを越えたあたりから急に一致しなくなり，粗さの値もほぼ一定の値にサチュレイトしてしまうのである．

どうも，バイトによる，いわゆる，楔型切削で可能な鏡面の精度にも限界があるらしい．すなわち，被加工物の表面粗さは，バイトの刃先を限りなく鋭くしていってもバイトで仕上げられる表面粗さには限界がある様である．

今のところここが切削の限界であると推定される．

原因を調査するために，**図38**に示す様に切削面の顕微鏡（ノマルスキー微分顕微鏡）写真を撮ってみると，

図38　結晶粒界からの剥離[4)]

良く切れるバイトで切削しても，合金などの場合には，結晶粒界の所で剥離してしまっていることが分かった．

この結晶粒界の段差が，10 nmから30 nmほどあり，これがバイト切削の限界粗さを決めていたのである．

この様な結晶粒界での剥離を避けるためには，結晶粒子に刃先が当たる衝撃を，剥離を起こさない程度に小さくすれば，若干の改善が見られるが，根本的な表面精度の改善にはならなかった．

一般に，どうしても結晶粒界の段差を避けたい場合には，多結晶の材料を止めて，単結晶の材料にするとか，非晶質のもの，すなわち，無電解ニッケルなどのメッキをして加工すれば，かなりの精度向上が見られるが，Xバンド用セルは，そう云うわけにはいかないので，別の方法を工夫しなければならない．

3.2　超精密切削加工から先の加工法

究極のダイヤモンドバイト切削より先の加工法は今のところ無いとされていた．

しかし，古い文献を調べているうちに，ついにそれから先の加工法を発見した．それは，今から30年ほ

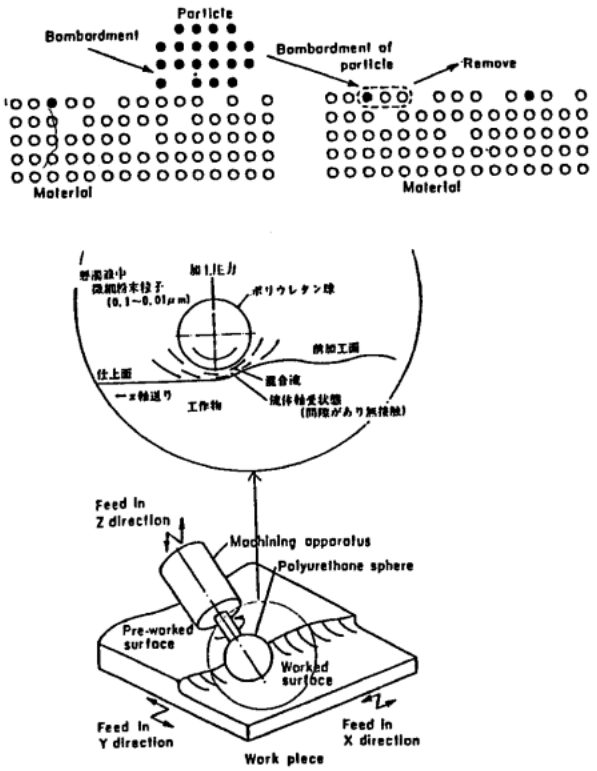

図39　EEM 加工法の原理図[5)]

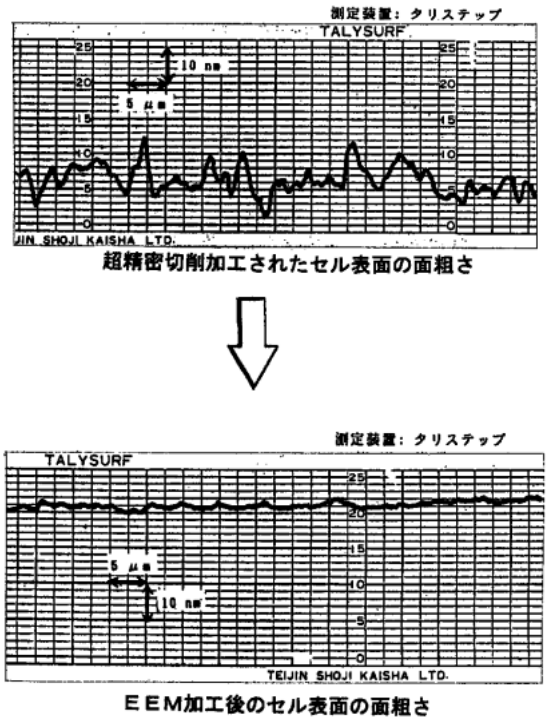

図40　EEM 加工された面の面粗さ

ど前，すなわち，超精密加工の黎明期に大阪大学森勇蔵が提案された EEM（Elastic Emission Machining）加工法（図39）[5)]である．

これは，原子オーダの極微小量弾性破壊現象を利用する方法，すなわち，回転するポリウレタンの球を工作物の表面に近づけ，その回転球と工作物の間に生じる極微細粉末粒子混濁液の流体軸受的流れを利用して，極微細粉末粒子を工作物の微小領域に衝突させて原子数個と云う超微量を取り去ると云う加工方法である．良く加工状況を観測してみると，微細粒子が工作物表面を転がる時，分子間結合によって，雪だるまの様に表面の分子［原子］を剥ぎ取る様子も明らかになってきている．

この様な加工は，もはや加工技術と云うよりは，芸術の領域であると称する学者もいる．森勇蔵が精密工学会で最初にこの方法を発表した際には，聴衆からブーイングが起きたほど，当時としては受け入れられない様な突拍子もない加工法であったのである．

しかしながら，今のところ先に進むには，この方法に頼るしかないのである．

早速，EEM 加工機を試作し，実験を開始してみると，加工には途方もない加工時間がかかるが，確実に精度を向上させることが確認出来た．

図40は，超精密切削加工後の粗さと，EEM 加工を施した加工面の粗さの比較である．すなわち，EEM 加工法によると，ダイヤモンドバイトの加工面の精度をさらに 10 倍（1 桁）も向上させることが可能の様である．すなわち，この方法によると，1 nm から 3 nm の面が得られることが分かった．もう 1 桁である．

しかし，微粒子（原子の塊）を叩き付けて加工するのであるから，微粒子より微少な除去加工は当然不可能であり，そこがこの加工方法の加工限界となる．すなわち，この実験で得られた加工面精度の 1 nm から 3 nm の面が，この EEM 加工方法の限界である様である．

それから先の精度を狙う加工手段としてはどうすれば良いかと云えば，EEM で使用している極微細粉末粒子をさらに細かくすることが考えられる．

極限の微粒子は，原子の粒そのものである．使用する最適の原子としては，加工面に進入することもない大きさで，また，結合もしない不活性のアルゴンが最適と考えられる．

そこで，EEM の極微細粉末粒子の代わりに，イオンガンから発射されるアルゴンイオン（原子）のビームを照射してさらに平滑化する研究を開始した．

構成原子 1 個を物質表面から飛び立たせるエネルギーは，5 eV 程度であるから，50～100 eV 程度のイオンビームガンを用意し，表面を掘り過ぎない様に

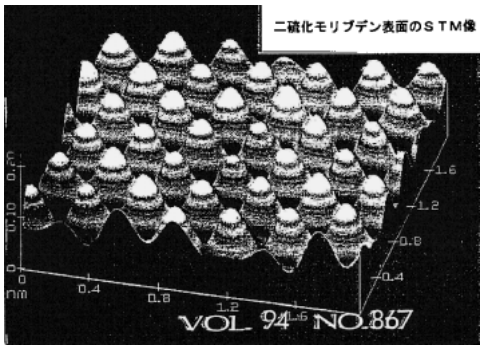

図41　究極の仕上げ面[6)]

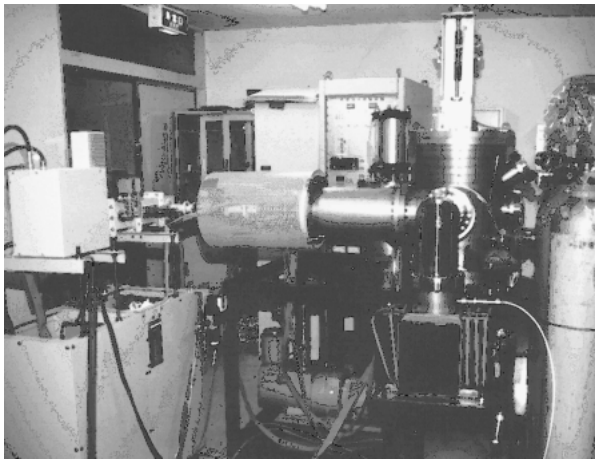

図42　高エネルギー物理学研究所の界面接合装置

20°程度の角度を付けてビームの束を，丁度サンドブラストの様に広く散布する様に照射すると，表面の酸素などの汚染物質が除去されると共に，物質表面もかなり滑らかになっていくことを発見した．

この方法がうまく行けば，ついに希望する 0.1 nm から 0.3 nm の面が得られることが分かった．

このレベルに達した加工面は，最早，原子配列（二硫化モリブデンの表面）に匹敵する面（**図41**）[6)]であって，これ以上の滑らかな面は作り得ない究極の仕上げ面と云える．すなわち，加工精度も，ここが極限の限界である．

3.3　界面接合への挑戦

通常空間で接合面の汚染物質を除去しても，すぐさま空中の酸素分子などの汚染物質が，また付着してしまうので，界面接合を行うためには，特殊な界面接合装置が必要である．

図42は，高エネルギー物理学研究所の界面接合装置であり，20°程度の角度を付けてアルゴン原子を照射し接合面の汚染物質を除去すると共に，表面粗さが

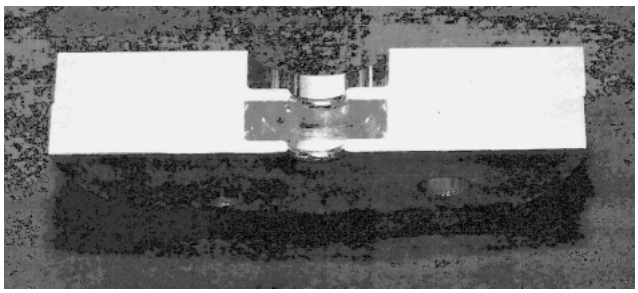

図43　界面接合に成功した 2 枚のセル

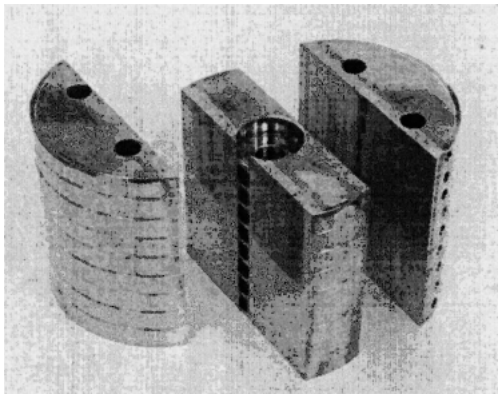

図44　界面接合に成功した 9 枚のセル

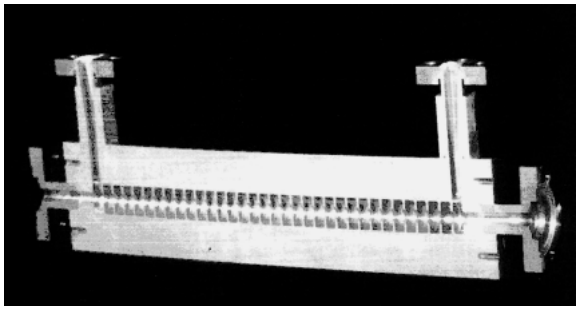

図45　界面接合に成功した 30 cm X バンド加速管

0.1 nm から 0.3 nm になる様に接合面を仕上げたのち，残留ガスの極端に少なくなる 10^{-8}～10^{-9} Pa と云う高真空中で，マジックハンドを使用して両面を接合させると云う界面接合用の装置である．

そして，ついに平成 5 年（1993）3 月，2 枚の無酸素銅の円板（セル）の界面接合に成功した（**図43**）．

続いて，翌平成 6 年（1994）2 月には，9 枚のセルの界面接合に成功した（**図44**）．

界面接合の実用化可能との結論を得て，早速，実用化に向けての実験を開始した．

約半年ほどの実験試作を繰り返した結果，平成 6 年（1994）8 月になって，30 枚のセルを使用した実用

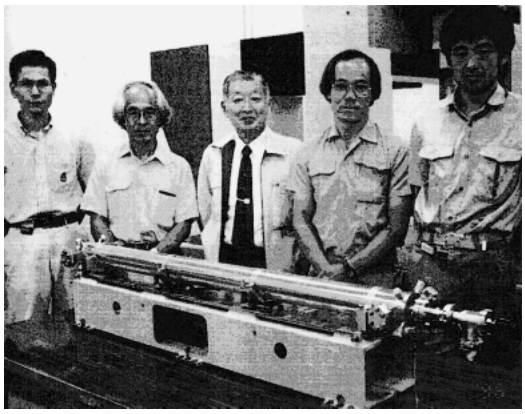

図46　界面接合に成功した1.3 m X バンド加速管
ビームテストのために米国SLACへ発送直前（1996年7月）に撮影した．
写真左から肥後壽泰，高田耕治，筆者，東　保男，鈴木敏一

型Xバンド加速管の試作に見事に成功した（**図45**）．

図45は，試作した30 cm実用型Xバンド加速管の切断面の写真であるが，各セルが見事に接合されていることが分かる．

実際に使用される次世代Xバンド加速管は，さらに多くのセルを必要とする，すなわち，セルを150枚も接合した1.3 m管である．

設備した界面接合装置は，炉の長さが足りなくなったため，実験室の天井を刳り抜いて，加速管に合わせた炉の長さに改造した．

100枚以上のセルを接合するのはそんなに簡単な事ではない．将来の量産のことも考えて，関連する種々の方法も同時に並行して実験し確かめた．

まず，接合面に付着している汚染物質が酸素のみを除去する場合には，水素還元炉の使用が考えられ，実際に実験してみても，かなりの確率で成功することが確認出来たが，しかし，若干温度が高いことが気になるのである．

次に確認した方法は，研究実験を重ねた結果，セルの接合面を互いに圧着した状態にして，真空炉の中に入れ，接着面の酸素等がセル物質内に拡散していく温度にまで加熱したらどうかと云う方法である．

実験を繰り返して発見出来たことは，酸素等の拡散は，セルの精度が狂うほど高い温度に加熱しなくても可能だと云う事である．この方法では，低温の雰囲気中に若干セル間に圧力をかけた状態にして放置することにより，酸素等が拡散した後にセル自身も拡散して接合出来るので，無歪接合法として，かなり有望な方法と考えられる．すなわち，この方法は，量産に転じた場合には，是非とも採用したい方法と考えられるからである．しかしながら，現在では，これもまた，かなり温度が高いことが気になるのである．

以上の様な必死の開発実験と界面接合の研究は，2年ほどかかってしまったが，ついに，平成8年(1996)，待望の1.3 mXバンド加速管の雛形が完成した（**図46**）．この試作された加速管は，直ちに米国のSLAC（米国スタンフォード線形加速器センター）に送られてビームテストが行なわれたが，予想通りの性能を発揮することが確認出来たと報告されている．

4. おわりに

これまでの長々とした異なる分野である超精密加工の講義にお付き合いをいただき，感謝に堪えない次第である．読者の皆様には，超精密加工とはどの様なものかと云う概要がお分かりいただけたことと思う．

高エネルギー加速器研究機構，すなわち，旧高エネルギー物理学研究所においては，超精密加工を応用した次世代高性能加速管の研究に挑戦し，ついには界面接合にまでたどり着き，加速管開発に成功したことを述べてきた．しかしながら，ここで述べてきた界面接合法は，現在のところは如何せん，手間や時間がかかり過ぎ，また，コストもかかり過ぎて，実験室的で実用的ではないと云う御指摘もある．しかし，それらの諸問題も，時の流れと共に，次々と急激に新開発されていく技術革新によって，かならずや解決されていくものと確信している．

なお，以上に述べてきた様に，加速器製作において，加工精度の極限にまで挑戦して世界で初めての界面接合にまでだどり着いた功績に対し，平成9年(1997)，高エネルギー加速器科学研究奨励会より第15回高エネルギー加速器科学奨励賞を戴いたことを，最後に謝意を込めて付記報告させて戴き，本講を閉じることにする．

参考文献

1) 佐藤　勇：電子線形加速器の発展Ⅰ，加速器，2[平17(2005)] No. 2, 125
2) 田中克敏：静圧空気軸受，機械設計，33[平元(1989)] 16, 207
3) 町田一道他：熱も力も接着剤も要らない新接合法，科学朝日，[昭61(1986)] Jul, 86
4) 和田龍児：バイトの形状と材料の問題，工作機械'84超精密加工，[昭59(1984)]，大河出版，12
5) 森　勇蔵，津和秀夫他：EEMの基礎研究，精密工学会誌，43[昭52(1977)] 5, 542
6) 機械学会編集部：二硫化モリブデン表面のSTM像，機械学会誌，94[平2(1991)] 867，表紙