

シームレス超伝導空洞の開発

DEVELOPMENT OF SEAMLESS SUPERCONDUCTING RF CAVITY

永田智啓^{#, A)}, 阿部知之^{A)}, 魚谷祐樹^{A)}, 長久保準基^{A)}, 篠澤精一^{A)}, 村上裕彦^{A)},
田島健^{B)}, 井上均^{C)}, 山中将^{C)}
Tomohiro Nagata^{#, A)}, Noriyuki Abe^{A)}, Yuuki Uotani^{A)}, Junki Nagakubo^{A)}, Seiichi Shinozawa^{A)},
Hirohiko Murakami^{A)}, Tsuyoshi Tajima^{B)}, Hitoshi Inoue^{C)}, Masashi Yamanaka^{C)}
^{A)} ULVAC, Inc., ^{B)} Los Alamos National Laboratory,
^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

We studied the seamless superconducting RF cavity which is expected to be low cost fabrication. Preliminary necking and hydroforming tests of three-cell cavities from seamless tubes made of niobium (Nb) have been performed. A machining of narrow part in seamless Nb pipe by necking machine was succeed, however a burst of pipe was caused in the middle of hydroforming process due to low purity of Nb raw materials. Also, we evaluated the deformation of crystal grain in ruptured seamless Nb pipe after hydroforming test. A slip plane of bcc ((110) plane) was mainly observed in iris part. In addition, machining ratio curves were obtained by rolling press for low and high purity Nb plates. In the case of low purity Nb, a work hardening and working limit were happened in machining ratio over 60 % and over 80 % respectively. On the other hand, high purity Nb arised the work hardening over 86 % and didn't show the working limit at 99 %.

1. はじめに

超伝導空洞の製造方法において、現在主流である方式は、高純度 Nb の板材をプレス加工し、それぞれのパーツを電子ビーム溶接により接合する手法であり、この方式で製作された超伝導空洞で高い加速性能も得られている¹⁾。しかしながら、この電子ビーム溶接を用いた方法は、電子ビーム溶接時間の長さもさることながら溶接で生成されたビードを平滑に研磨する工程にも長時間を要し、生産性の観点から見れば製造時間の短縮化が大きな課題として残されている。

近年では、上記のような課題を解決するために溶接ビードの存在しないシームレス空洞の開発も行われており、生産性の向上や低コスト化の実現、さらに、加速特性に関しては最も磁場の強くなる（加速性能に大きく影響する）空洞の赤道部に溶接ビードが存在しないことから高性能化に効果的であることも示唆されている^{2,3)}。しかしながら、現状ではシームレス空洞製造技術に関する報告例は少なく、シームレス空洞を製造する前段階に準備すべきである材料特性を制御したような成形性の高い Nb 製シームレスパイプの製法が確立しているとは言えない。

今回我々はシームレスパイプを用いてネッキング加工および液圧成形により、シームレス空洞の試作を行った。さらにそのパイプについて結晶組織の観察を行い、加工に伴う変形について調査した。また、成形性のよいシームレスパイプを製造する指針を得

るために、Nb の板材を圧延して加工を加え、その加工度と硬度の関係性を評価した。

2. Nb シームレスパイプを用いた空洞製造

社内にて 3 セル用の Nb シームレスパイプを開発し、液圧成形によりシームレス空洞の作製を試みた。本来、これに用いる Nb 材としては高純度であることが成形性や加速特性の点で望ましいが、高純度 Nb (RRR (残留抵抗比) >200) を用いたシームレスパイプは現状で試作段階であるので、今回は純度のそれほど高くない Nb (RRR ~ 50) をシームレス空洞成形の基礎検証の位置づけとして使用した (Figure 1)。

シームレスパイプを用いた空洞の製造方法として「ふくらみ」と「へこみ」をもった空洞形状にシームレスパイプを直接成形する場合を想定すると、加工前のパイプの直径をアイリス（空洞最小直径部）もしくは赤道部（空洞最大直径部）のものにして置き、所定の形状へと膨らますもしくは凹ませるといふ加工形態が考えられるが、このとき最も変形を要



Figure 1: Seamless Nb pipe for 3-cells cavity

[#] tomohiro_nagata@ulvac.com

するのは赤道部もしくはアイリス部であり（例えば、パイプの直径をアイリス部の直径にして膨らませていく場合、赤道部の変形が最も大きくなる）、共鳴周波数 1.3 GHz の加速空洞では、単純に直径変化から見積もった最大変形部で必要となる材料の伸び率は 64%程度となる。一般に、金属においてこのような伸び率の値は非常に高い部類に入り、さらにパイプ全体について均一にこのような伸び率を示すパイプ加工は困難である。そこで、空洞形状へと成形する前にパイプの直径を赤道部とアイリス部の直径の中間程度にしておきアイリス部を形成する絞り工程によるくびれ加工（ネッキング加工）と赤道部を含むセル形状に加工する液圧成形法により空洞を作製する方法が望ましいと考えている。

まず、シームレスパイプのネッキング加工については、高エネルギー加速器研究機構にある旋盤をベースとした絞り加工機を用いた (Figure 2)。シームレスパイプを機械主軸にクランプし、備え付けられたローラーをパイプの軸方向にしごきながら径方向に押し付けてくびれを作っていく。一つのかくびれができた隣のかくびれ作製に移る方式となっている。ネッキング工程の終了した 3 セル空洞用のシームレスパイプを Figure 3 に示す。パイプ自体に大きなひずみやひび割れは見られなかった。ネッキング後のパイプは蓄えられたひずみを除去するために 750°C × 4h のアニールを実施した。

アニール後のパイプを高エネルギー加速器研究機構にある液圧成形機 (Figure 4) にセットし成形を実施した。液圧成形の原理を表す概略図 (半割の正面図) を Figure 5 に示す。Fig.5 (a) がネッキング後にパイプを液圧成形機にセットした状態で、間隔を開けて金型が配置されており、パイプ内に充填された液体に内圧をかけつつ外圧を軸方向に引加して金型の間隔を閉じていく。その結果、パイプが金型に押し付けられることになり所定の形状を得ることができ

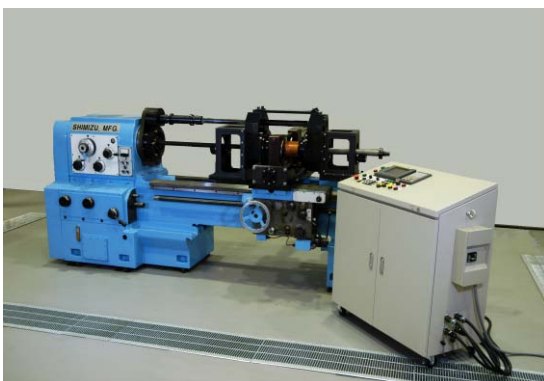


Figure 2: Necking machine



Figure 3: Seamless Nb pipe after necking process

る (Figure 5 (b))。実験では内圧をかけつつ金型を閉じていく途中段階でバーストが発生してしまった (Figure 6)。バーストした原因としては主に二つあると推察する。まず、シームレスパイプの Nb 材そのものの純度が悪かったことによると思われる。不純物が多いと、これに起因して材料の伸び特性が悪くなり、パイプ成形時にバーストするリスクが高くなる。また、塑性加工とアニールを経たシームレスパイプ全体の中で結晶粒径が不均一であったと考えられる。変形の際に隣り合う結晶粒のサイズの違いにより局所的に材料の伸びに差があると、その部分で亀裂が入ってしまうことになる。今後、このような点（高純度化と結晶粒径平均化）を改善したようなシームレスパイプの開発を進める必要があると考えている。

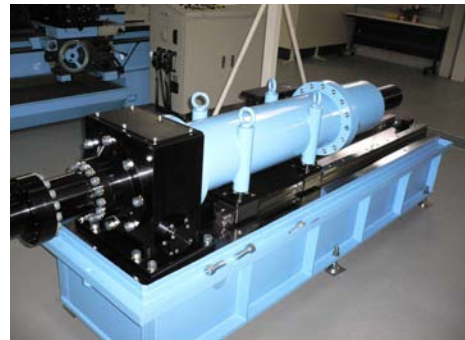


Figure 4: Hydroforming machine

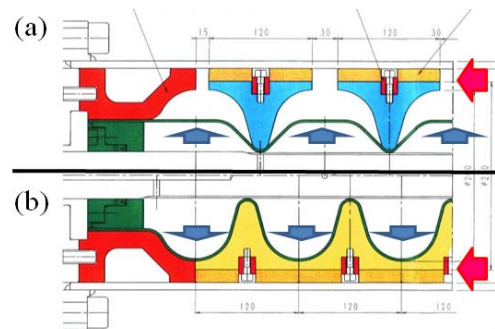


Figure 5: Schematic diagram of hydroforming, (a) As-setting, (b) After forming



Figure 6: Ruptured pipe after hydroforming process

3. EBSDによる結晶組織観察

今回、シームレスパイプが液圧成型工程でバーストしてしまったものの、アイリス部では大きくくびれた加工がなされ、赤道部でも元のパイプの径より膨らんだ変形が見られた。そこで、ネッキング加工および液圧成型により結晶がどのような変化をするのかというミクロ的な評価をするために、EBSD (Electron Backscatter Diffraction)法により空洞内面の結晶組織及び結晶方位の観察を行った。その結果を Figure 7 に示す。成形による組織変化の無い空洞端部(Figure 7(a))では、組織としては等方的な形状で(001)面や(111)面が多く見られる傾向にあり、また、平均粒径が約 64 μm であった。アイリス部では空洞の長手方向に非常に引き延ばされて、bcc である Nb のすべり面である(101)面が多く見られる組織となっており(Figure 7(b))、この部分では大きな折り曲げ変形を伴うため組織がこのように変化したことがわかる。また赤道部では非成形部と比べて結晶サイズに大きな変化は見られないが、図中のカラーマップで一つの結晶粒の中にグラデーションがかかっているところが多々ある(Figure 7(c))。これは結晶方位の角度がわずかに異なっていることを示しており、各結晶がそれぞれ少しずつ変形しているためであると推測する。

4. Nb 材の加工度曲線の作成

シームレスパイプを製造した際に結晶粒径のばらつきが存在すると空洞の成形性が低下してしまうことが懸念される。このようなパイプ内の結晶粒径を制御することが空洞成形成功の鍵を握ると考えている。そこで、シームレス空洞用のパイプ加工の指針を得るために、Nb の板材を用いて、圧延による加工を加えた際にどのように硬度が変化するかという加工度曲線の作成を試みた。ここで加工度とは、どの程度加工を加えたかを定量的に示した値のことであり、例えば、圧延により板厚が半分になれば加工度は 50%となり、板厚が 1/10 になれば加工度は約 90%となる。

実験には高純度である RRR \sim 240 の Nb 板材と、

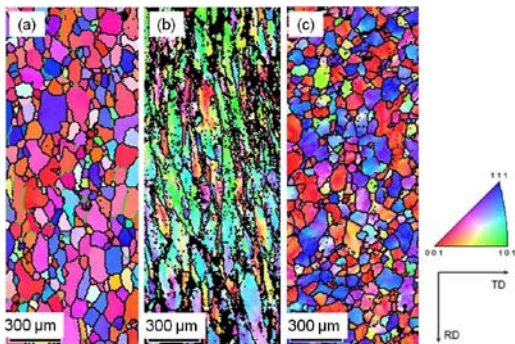


Figure 7: Inverse pole figure (IPF) map of internal surface in Nb seamless pipe, (a) Edge (no-deformation by hydroforming), (b) Iris, (c) equator

比較のため低純度(RRR \sim 40)の Nb 板材を準備した。それぞれ 10cm 程度の板厚から圧延を繰り返し、随時そのビッカース硬度を測定していく。加工度曲線の作成結果を Figure 8 に示す。まず、低純度 Nb 板に関しては、加工度 40%程度から硬度が上昇し、60%を超えると急激に硬度が上昇する。その後 80%を越えてくると硬度上昇が緩やかになるという振舞いを示す。このことは、低純度 Nb 板は不純物が多いために加工を加えていくと転位が不純物にからまり早々と硬度が上昇していくが、さらに加工を加えていくと転位がほぼそれ以上動かなくなる加工限界を迎えていると考えられる。一方、高純度 Nb 板では、比較的高い加工度まで加工硬化が起こらず、86%を超えたところでようやく硬度が上昇していく。99%まで加工を加えても加工限界は見られなかった。これは不純物が少ないため転位が絡まりにくいということを示している。今回はこの段階で板厚が 0.3mm となり、それ以上の圧延が困難であったため、この加工度までのデータ採取にとどまった。

一般に、強いひずみを溜めれば溜めるほど、アニールした時の再結晶粒径が小さくなり、結晶粒径均一化が容易になると考えられる。したがって、実際のシームレスパイプの加工時にも高純度材料を用いて極力強い加工を施すことで結晶粒径を制御しやすくなり、成形性の良いパイプが得られるものと思われる。

5. まとめ

シームレス空洞の試作を試み、今回は純度や結晶粒径不均一性に起因してバーストしてしまったが、変形部の結晶組織の大きな変化を見ることができ、また、今後成功するためには強い加工を加えたシームレスパイプの開発が必要であることが示された。

参考文献

- [1] <http://ilc.kek.jp/LCoffice/OfficeAdmin/>
- [2] 上野健治 他 “超伝導空洞のシームレス化に関する装置開発” 第 4 回日本加速器学会プロシーディングス (2007) pp.76-78
- [3] W. Singer “Seamless/bonded niobium cavities”, Physica C 441 (2006) pp.89-94

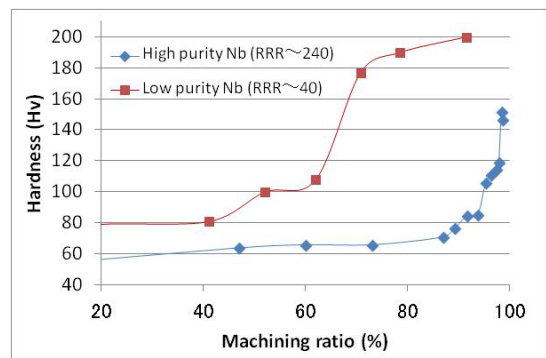


Figure 8: Machining ratio vs. Vickers Hardness