

加速器・ビーム科学部会セッション

南関東における加速器に関する最近の話題

Recent topics on particle accelerators in South Kanto

(3) アルバックにおける超伝導加速空洞開発
～材料精製から空洞試作・評価まで～

(3) Development of Superconducting Cavity in ULVAC

*永田 智啓¹, 村上 裕彦¹, 篠澤 精一¹, 増居 浩明¹, 山中 将², 井上 均², 加古 永治²¹株式会社アルバック, ²高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

超伝導加速空洞は加速器に搭載される部材であり、発生させた荷電粒子を高周波電場に乘せて加速させる一種の粒子加速方式に用いられるものである。近年では、特に高い加速エネルギーの粒子を得る場合には、投入エネルギーに対して得られるエネルギー効率が優れている超伝導状態のニオブが利用されている。しかしながら、ニオブは純金属の中でも高価な部類に入ることや現状では未だ加速空洞の量産技術には課題を抱えていることから、生産性が高く安価な加速空洞製造技術の確立が強く求められている。我々は課題を解決するために、高純度インゴットの精製技術、加速空洞部材の塑性加工技術、さらには加速空洞試作といった原料から空洞製造に渡る一貫した開発を進めている。

2. 高純度ニオブインゴットの製造

インゴットを精製するにあたり、ニオブ金属を溶解する手段として我々は電子ビーム溶解方式を採用している。電子ビーム溶解はインゴットを得るのにポピュラーな手法であるが、ガス成分や高融点金属の不純物を効率的に除去するために高真空中にて高出力で精製することが求められる。当社ではすでに電子ビーム溶解方式を用いて製造した金属製品の事業化が行われており、ここで蓄積された技術と真空装置メーカーである強みを活かして、高純度ニオブ精製用の 600 kW 電子ビーム溶解炉を独自の設計により導入した。電子ビーム溶解炉の外観写真を図 1 に示す。



図 1 600 kW 電子ビーム溶解炉外観図

この溶解炉を稼働させてから高純度精製条件を掴むために数十回の溶解テストを行ってきた(図 2)。高純度化の評価として、この分野では一般的に残留抵抗比 (Residual Resistivity Ratio、以下 RRR) と呼ばれる値が用いられ、加速器材料購買の仕様値としても盛り込まれていることが多い。ニオブの場合、RRR は以下の数式で記述される。

$$RRR = \rho(300K) / \rho(9.3K)$$

これは 300 K と 9.3 K における電気抵抗率の比を表すものであり、不純物量を判定する指標の一つとして用いら

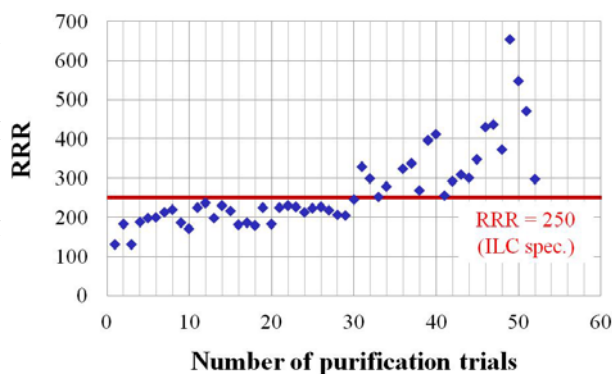


図 2 インゴット試作回数と RRR の変遷

れ、一般的に純度が高いほど RRR の値は大きくなる。現状この溶解炉において、国際リニアコライダー計画でニオブ素材の仕様に設定されているような RRR が 250 を超える高純度インゴットの生産が可能となっている。

3. 高純度ニオブ加工における結晶組織

加速空洞としてニオブの超伝導特性を活かす上では結晶化していることは必須であるが、素材を加工して製作するにあたり、不純物を多く含む材料に対してはひずみが十分に蓄積されて熱処理により再結晶化するような加工条件であったとしても、高純度材料ではその限りでなく、鑄造組織の破壊やひずみの蓄積が不十分な場合、加工後の熱処理において再結晶化の進行不足や結晶粒径不均一性を引き起こす可能性がある。以下に、実際に加工強度の違いによる結晶組織の差異についての事例を述べたい。RRR:

300 の高純度インゴットを用いて加速器用の部材を

作製するにあたり、従来未精製のニオブに採用していた製造工程で実施したものと、加工強度を改善した工程で実施したものについて取り挙げる。これらの結晶組織については EBSD 法 (Electron Back Scatter Diffraction 法) によって評価した (図 3)。高純度材料には不十分な加工強度と考えられる a) では、再結晶化しているものの図中矢印にあるように肥大結晶粒や集合組織が確認される。もし、さらに加工を加えて変形させるような場合には、これらの組織の周囲にある微細組織の伸びが追従せずに破断や欠陥発生の起点となりうるのでこのような結晶組織好ましくない。一方、ひずみが多く蓄積している段階と考えられる b) においては、肥大結晶粒や集合組織は確認されず、粒径の均一性が比較的良好な結晶組織を形成していることがわかる。このように高純度材料において良質な結晶組織を得るためには、ひずみが十分に蓄積するような工程となるよう注意を要することがわかった。

4. 加速空洞の試作と特性評価

RRR: 330 の高純度ニオブインゴットを用いて、溶接方式により単セル加速空洞の作製を試みた。工程は図 4 に示す通り、インゴットを切断・圧延して得た角板を経て円板状へと加工する。加工ひずみの蓄積状況により工程中に適宜熱処理を入れている。円板をプレス加工によりハーフセルと呼ばれるお椀状に成形した後、これらハーフセル 2 つの大口径部分を突き合わせて溶接し、またその両端にはビームパイプやフランジを溶接して接合させ、内面を鏡面研磨することで完成となる。加速空洞の膨らんだ部分を「セル」と呼び、今回の場合、セルが一つであるため単セル型となる。試作した単セル加速空洞は目視で確認した範囲では傷・変形や溶接不具合部分は観察されなかった。この加速空

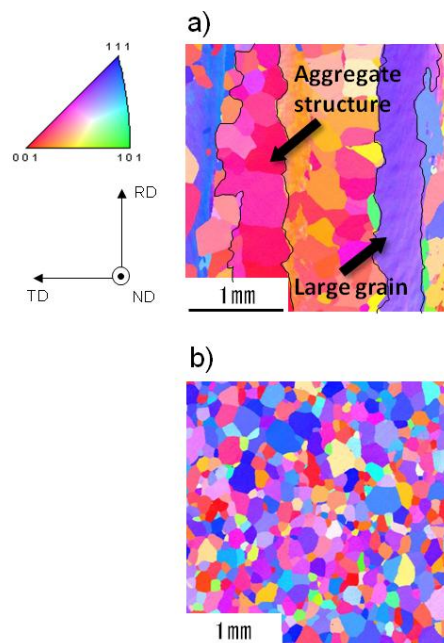


図 3 ニオブ材加工後の EBSD 測定における IPF 像
a) after weak process, b) after strong process.

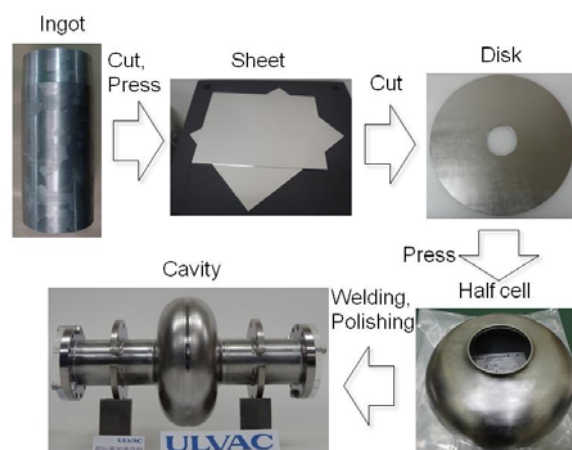


図 4 加速空洞の作製フロー

洞について、大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構（以下、高エネ研）において加速特性の評価を実施した(図5)。最大加速勾配 $E_{acc,max.} = 41$ MV/m が得られ、ILC 計画で要求されている特性 ($E_{acc,max.} > 35$ MV/m) を達成するものであり、我々の高純度ニオブ材は超伝導加速空洞用材料として十分に適用できるものであることが実証された。

4. さらなる低コスト化を目指した加速空洞開発

我々は加速空洞製造コストの低減を目指して、空洞本体に溶接を用いないシームレス空洞の開発にも取り組んでおり、高純度ニオブのストレート管から直接的に空洞の形状に成形する手法について検討を進めている。

空洞形状へ成形する（膨らます）手段としては、ベローズ管の製造に用いられるような液圧成形法を採用している。この手法によりストレート管を破裂させることなくセル形状に成形することができ(図6)、高エネ研において加速特性の評価を実施した結果、 $E_{acc,max.} = 37$ MV/m という良好な性能が得られた(図7)。現在はスケールアップ展開として、3セル形状に対応するストレート管をすでに完成させており、今後液圧成形を実施する予定である。

5. おわりに

アルバックでは高純度ニオブの精製技術を確立すると共に、超伝導加速空洞用素材として技術的にもコスト的にも優れたものを見出すことを目的とした一連の材料開発について進めている。精製したインゴットは加速空洞に十分適用可能であることを実証し、空洞作製における塑性加工に関する知見も蓄積している。今後も一層実用的に向けて生産スループットやコストダウンに焦点を合わせた開発を進めていく予定である。

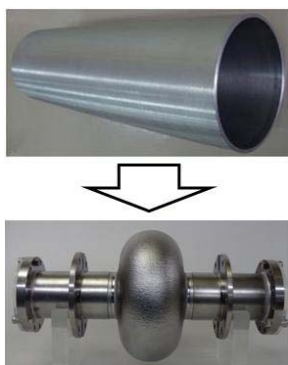


図6 上段：シームレス管、下段：液圧成形後のシームレス空洞

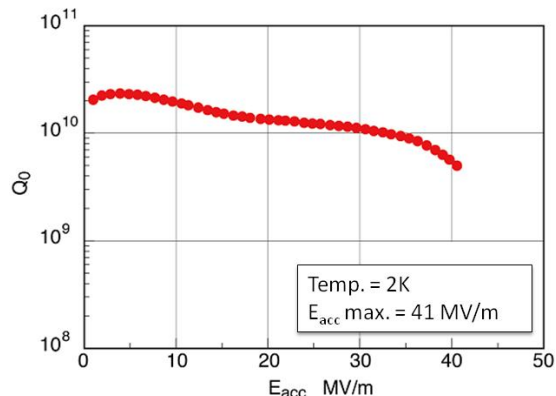


図5 試作した空洞の加速特性測定結果

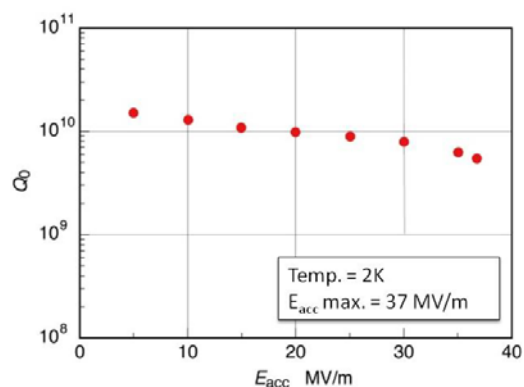


図7 シームレス空洞の加速特性測定結果

*Tomohiro Nagata¹, Hirohiko Murakami¹, Seiichi Shinozawa¹, Hiroaki Masui¹, Masashi Yamanaka², Hitoshi Inoue², and Eiji Kako²

¹ULVAC Inc., ²KEK