超伝導加速空洞の現状

小 島 融 三

高エネルギー物理学研究所 つくば市大穂 1-1

(1990年3月24日受理)

Present Status of Superconducting Accelerating Cavities

Yuzo KOJIMA

National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Oho, Tsukuba 305

(Received March 24, 1990)

Synopsis:

This paper reviews the development of superconducting RF cavities for particle accelerators during the past several years. Development of material and fabrication technique is described. Some of the accelerator project in the world using superconducting RF cavities are introduced. At present the most serious problem to get higher accelerating gradient is to understand and cure the electrons by field emission. If this problem is solved and the accelerating field of 20~30 MV/m is obtained, superconducting cavities could be used for a linear collider of TeV energy region.

1. 最近数年間の進歩

1985年の本誌に「加速器用超伝導高周波空洞の開発」¹⁾と題する解説を投稿したが、その後数年間の超伝導空洞に関するおもな進歩を以下に挙げ、現状を紹介する。

なおこの間1987年にChicagoのArgonne National Laboratoryで第3回の、また1989年につくば市のKEKで第4回のWorkshop on RF Superconductivityが開かれ、以後1991年にHamburgのDESY、1993年にNewport NewsのCEBAFでWorkshopが開催される予定である。超伝導空洞の研究が各国で盛んに行われるようになったためである。

1.1 空洞の材料

1.1.1 ニオブ (Nb)

Nb空洞の電場の上限を決める原因のうち最も多い例はthermal instabilityによるもので、空洞表面の、いわゆる欠陥部の発熱によって周囲のNbの温度が上がり、超伝導性が破れる現象である²⁾。この救済法のひとつはNbの熱伝導度を改善し、欠陥部の発熱を空洞の外側の液体ヘリウムによって効率よく冷却して、超伝導破壊を防ごうとするものである³⁾。熱伝導度の改善はおもにO, H, C, Nなどの不純物を減らす

ことによるが³⁾、Nbの電子ビーム溶解法それ自体の改善によるものと、できあがった後のNb材料や空洞の真空熱処理によってこれらの不純物を減らす方法とがある。ただし熱処理をする真空炉は、一般の工業用のものでは不十分で、とくに酸素に対する特別な注意を払った設計、たとえばtitaniumやyttriumでNbを覆うなどの考慮が必要である。

低温での熱伝導度はresidual resistivity ratio (RRR) に正比例し、RRRの測定の方が簡単なので、熱伝導度の代りにRRRの値をいうことが多い。1980年代の初めまでは、市販のreactor gradeと称するNbのRRRは20~30であったが、超伝導空洞からの要求によって、現在ではRRRが200~300の材料が市販されるようになり、超伝導空洞の加速電場が向上した大きな原因のひとつとなっている。

Nbの純度が良くなると、熱伝導度が改善されるのは良いが、その反面機械的な強度が下がり、またmean free pathの増大によって高周波表面抵抗 R_s が増加する⁴⁾。 R_s の増加による空洞のQ値の低下はRRRが200~300程度では実用上まだ大きな問題にはならないが、機械的性質、たとえばyield strengthの低下は、空洞の強度に必要な肉厚と関連して、無視できない。近年、板材を焼鈍した後に表面に軽い加工硬

化を加え、RRR の低下や R_c の増加を起こさずに、機械的強度を増加させる方法も考えられている⁹⁾。

Nb の純度の他に、空洞製作上問題となるのは、結晶粒の大きさと揃い方、内部の欠陥（層状組織、空孔など）、板材の場合は平坦度や肉厚の均一性などである。内部の欠陥は超音波やX線である程度の検査はできるが、細かい点までは無理である。とくに板材は圧延の工程に問題が多い。Nb は汎用性のない少量生産品なので品質管理がむずかしい。

以下に述べるように、Nb 以外の材料による空洞の研究も盛んに行われているが、現状ではNb が最も信頼性があり、KEK、CEBAF、DESY などの大規模な加速空洞はいずれも Nb 製である。

1.1.2 Cu-Nb

空洞壁の熱伝導度を上げる意味で、空洞の内壁を Nb で、外壁を Cu で作る方法がある⁹⁾。Nb 板と Cu 板を接合させたクラッド板で空洞を作るもの、Nb 空洞の外側を銅メッキするもの、銅空洞の内側に薄く Nb を sputter する方法などがある。

クラッド材は重イオン加速用の同軸型空洞に使われており^{7,8)}、Nb の蒸着空洞は CERN での研究が最も進んでいる⁹⁾。蒸着技術の進歩により Nb 蒸着空洞の性能は著しく進歩し、Nb 空洞と十分競争できるようになった。Cu-Nb 空洞が実用化すれば、冷却に現在のような bath cooling に代わって pipe cooling が使われる時代がくるかもしれない。ただし pipe 中のヘリウムの流れによる振動が障害になるかどうかなどの、実用上の問題はまだ知られていない。pipe cooling が実現すればクライオスタットの設計に大きな変化を与え、簡単で低価格な構造となることが予想される。

CERN の LEP に使う予定で建設中の、350 MHz の超伝導空洞は、最初は Nb 空洞と Nb 蒸着空洞（ただしいずれも bath cooling）両方を製作中¹⁰⁾であるが、4 セル空洞約 200 台の大規模製作は Cu-Nb 空洞になるであろう¹¹⁾。そのおもな理由は、

- 1) 低温での Cu の熱伝導度は Nb より遥かに良いので、たとえば表面に欠陥があったり、または汚れ、ごみなどが付いても Nb 空洞のように thermal instability によって超伝導破壊を起こさないであろう。
- 2) 将来 Nb より優れた物質、たとえば高温超伝導体や NbTiN などが適用可能になった場合に、Cu-Nb 空洞の Nb を剥がして、その物質を sputter できる可能性がある。

Fig. 1 Q_0 vs E_{acc} at 4.2 K for Nb and Cu-Nb cavities of CERN. 1) Cu-Nb, 5-cell, 350 MHz. 2) Extrapolated to 500 MHz from curve 1), supposing Q_0 is proportional to ω^{-2} . 3) Nb, 1-cell, 500 MHz.

- 3) CERN の技術は Nb より Cu-Nb のほうがレベルが高い。
- 4) CERN の特殊事情で、物資の調達を欧州内からする必要があり、Nb の材料を大量に調達しにくい。
- 5) Nb より Cu-Nb のほうが材料費が安い。

などである。Cu-Nb と Nb 空洞の現在の性能は、Fig. 1 に CERN おける代表的な結果を示すが、低い電場では Cu-Nb のほうが Q 値が高く、5~6 MV/m 以上で電界放出電子のために急激に Q 値が落ちる。LEP の目標値 5 MV/m では似たような性能である。

1.1.3 Nb₃Sn

BCS 理論による R_n は、 $\exp(-T_c/T)$ に比例するので、たとえばヘリウム温度で考えると、 T_c の高い物質ほど有利で、高い空洞の Q 値が期待される。 Q 値は大規模な加速空洞システムの冷却系では大きな問題であり、Nb の 9.2 K に比べて T_c が約 18 K の Nb₃Sn は、臨界磁場も Nb の 2.5 倍ほど大きいことと合わせて、空洞の材料として興味深い。

Nb₃Sn 空洞の研究は、西独の Wuppertal 大学¹²⁾で活発であり、Sn の vapor diffusion により Nb 空洞の内側に数 μm の Nb₃Sn をつくる方法で、500 MHz から 22 GHz に至る空洞の実験¹³⁾によれば、4.2 K で低い電場での表面抵抗は Nb より 1 桁半ほど小さいが、加速電場の強さはまだ Nb 空洞に及ばず、最大 10 MV/m ほどで、電界放出電子や部分的な欠陥による quench が見られ、ちょうど数年前の Nb 空洞のような状態であり、Nb₃Sn の表面の改善が必要である。

1.1.4 NbTiN

最近 CERN や Saclay で研究が始まり、まだ性能

Fig. 2 Frequency dependence of R_s (77 K) for polycrystalline bulk (open), c -axis textured bulk and thick-film (shaded and crossed), and single-crystalline thin-film (full symbols) samples of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ measured at Argonne (squares),¹⁵⁾ Cornell (triangles)¹⁶⁾ and Wuppertal (circles).¹⁷⁾

は Nb に及ばないが、将来性が期待される物質のひとつである。

1.1.5 High T_c material

セラミック高温超伝導体の高周波における性質の研究が多く、研究所で行われており、単結晶、バルク多結晶、sputtering, coevaporation, laser ablation などで epitaxial に成長させた膜などの特性が測定されている。Fig. 2 に種々の製法による YBaCuO の、77 K における表面抵抗 R_s の周波数依存性を示す¹⁴⁾。図には 77 K での Cu と 7.7 K での Nb の性質も同時に示してある。

種々の製法のうち、将来の加速空洞用材料として最も期待できるのは c -axis textured thin film¹⁴⁾ であろう。

1.2 空洞製作技術

空洞の成形に関してはハーフセルを spinning または液圧による深しぼりで作り、電子ビームで溶接する方法が一般的に行われている。外側から溶接した場合は、内面の裏ビードを機械的に平滑にすると、ビード

部に生ずる欠陥を除くことができる。そのため KEK では grinding で、DESY では tumbling を適用している。液圧成形は大量生産に適しており、肉厚の部分的相違も spinning より少ない。

Cu-Nb 空洞の Cu の成形には、継ぎ目なし銅管から液圧で、何段かのステップを経て単空洞を作る方法が Frascati や CERN で試みられ、また DESY, Frascati では aluminum または plastics の上に Cu の電着をし、後で aluminum または plastics を溶かす方法もテストしている。将来これを拡張して多連空洞が一度に作れるかもしれない。

Nb の表面処理は電解研磨、化学研磨、高温真空熱処理のひとつまたは複数の組合せであるが、KEK で開発された電解研磨と真空熱処理の優れていることがトリスタンの 500 MHz 空洞の性能によって明らかになった^{18,19)}。従来の表面処理法による空洞は、加速電場が 5~6 MV/m 以上になると、電界放出電子によって Q 値の低下が生ずるが、KEK のほとんどの空洞は約 10 MV/m まで電子放出がない。表面の滑らかさと清浄さによるもので、表面処理後の洗浄の技術の進歩も大いに貢献している。しかしまだすべての空洞で完全に同じ性能を得ることができないことが問題である。

Nb 空洞の進歩の歴史を振り返ると、電子の multipactor を防ぐ空洞形状の開発 (spherical cavity)、空洞壁の温度測定による欠陥の診断法の進歩、Nb の purification による熱伝導度改善による加速電場の向上があった。当面の問題は電子放出の阻止であるが、KEK の表面処理法はひとつの方向を示した。

2. 超伝導空洞を用いる加速器プロジェクト

2.1 重イオン加速器

超伝導空洞を使った加速器のなかで、重イオン加速器の場合はビーム電流が小さいので、高周波電力が少なく済み、たとえば大電力高周波を扱う RF カップラーのむずかしさがないことなどの利点もあり、この分野への応用は豊富な実績と将来計画をもっている。

アルゴンヌ国立研究所の ATLAS (Argonne Tandem Linear Accelerator System) は 1985 年から稼動しており、1989 年にはイオンソースの直後、すなわち粒子の速度が $\beta < 0.01$ ときわめて遅い粒子を加速する入射器も超伝導化された²⁰⁾。

他の研究所、CEN Saclay²¹⁾, Florida State University, Stony Brook, University of Washington など

Fig. 3 Layout of the electron recirculating accelerator at CEBAF.

でもそれぞれ重イオンリニアックが稼動しており、さらに INFN Legnaro, JAERI⁷⁾, Kansas State University, Sao Paulo, University of Munich²²⁾ などで建設計画が進行中である。

2.2 電子加速器

2.2.1 電子リニアック

原子核研究用の recirculation 形の電子リニアックが CEBAF²³⁾ および University of Darmstadt²⁴⁾ で建設されており、フランスの Saclay²⁵⁾ とイタリアの Frascati²⁶⁾ でもこの種の加速器建設を計画中である。

CEBAF の計画は 1,500 MHz の 5 セル 8 空洞を 1 台のクライオスタットに入れ（これをクライオモジュールという）、2 K で $Q_0 > 2.4 \times 10^9$, 加速電場 5 MV/m を目標とし、Fig. 3 に示すように 1 周 800 MV の加速管を 5 回通して最高 4 GeV のエネルギーを目指している。現在クライオモジュールのテストが進行中で、テストの結果は設計値を満足している。たとえば 1990 年 1 月に行った 5 セル 8 台が入ったクライオモジュールのテスト²⁷⁾ では、加速電場の平均値 7.4 MV/m を得ている。1994 年の稼動を目標に、最盛期には 1 カ月に 5 セル 12 台を建設する予定である。超伝導空洞を使う計画のうち現在では最も大規模なもので、量産体制における品質管理に成否がかかっている。また 2.0 K で 5 kW という、例を見ない大規模なヘリウム冷凍システムが予定どおり稼動するか興味深い。

Saclay は現在 MACSE という 1.5 GHz, Nb 製の 5 セル 4 空洞の電子リニアックを建設中で、将来計画として数 GeV の原子核研究用の電子加速器計画がある。

Frascati は 500 MHz, Nb 製 4 セル 4 空洞の電子リニアック LISA を建設中であり、将来計画は 4 セル 28 空洞を用い、recirculate による数百 MeV の電子

陽電子加速器 ARES を考えている。

他に free electron laser 用に超伝導電子リニアックの建設を計画しているところは、Stanford University (HEPL), TRW, JAERI²⁸⁾, Los Alamos などがある。

2.2.2 電子ストレージリング

大きなプロジェクトとして、KEK の TRISTAN, DESY の HERA, CERN の LEP II がある。

KEK の 508 MHz 超伝導 Nb 空洞は、accumulation ring における 3 セル空洞および 5 セル空洞のビームテストを経て、主リング用 5 セル 32 空洞の建設に入り、1988 年夏にそのうち 16 空洞がトンネル内に設置され、秋には運転を開始してビームエネルギーは 30 GeV に達した。1989 年秋にはさらに 16 空洞がトンネル内で運転を始め、ビームエネルギーは 32 GeV に上がった。ビーム運転に伴い高調波カップラーの発熱など、まだ改良を要する問題はあがるが、諸外国に先んじて大規模な超伝導空洞の運転に成功したことは、注目を浴びている。32 台の空洞をヘリウム温度に冷却するための、6.5 kW の冷凍システムも順調に稼動している²⁹⁾。TRISTAN トンネル内に設置されたクライオスタットの列を Fig. 4 に示す。

CERN の LEP II は 350 MHz の超伝導空洞を LEP に入れて、ビームエネルギーを 100 GeV に近づけようとする計画であり、4 セル空洞約 200 台を 1990 年秋に発注し、1994 年に運転開始の予定である。

DESY では 500 MHz の Nb 4 セル空洞 20 台を HERA に入れ、電子のエネルギーを 33.5 GeV へ増強する計画で 1990 年に完成を目指している³⁰⁾。

KEK でのビーム運転による経験や、DESY, CERN での予備実験で見られた現象に共通する問題は、高調波カップラーの発熱である。Fig. 5 にそれぞれの高調

Fig. 4 A string of cryostats for superconducting cavities installed in the tunnel of TRISTAN.

Fig. 5 Higher order mode couplers at CERN, DESY and KEK.

波カップラーを示すが³¹⁾、いずれも基本波に対するフィルターの構造が寸法的に微妙なところがあり、またカップラー内部の冷却が十分に行われにくい。そのため、発熱によって一部の寸法が変化し、フィルターの周波数特性が変わって大電力の基本波が外部に取り出される現象が生じ、ときにはコネクタやケーブルの焼損に及ぶこともある。

これら三研究所の計画で興味ある相違は、クライオスタットに対する考え方の違いで、たとえば空洞とクライオスタットの価格の比を比較すると、LEP はクライオスタットが空洞の約 1/4、HERA はクライオスタットのほうが空洞よりだいぶ高く、TRISTAN はほぼ両者同じである。この違いが長期の運転の後に何かの差を生ずるか興味がある。

3. 展 望

超伝導加速空洞の性能を制限している現象がしだいに理解され、その解決法が進んだことにより、いまや高エネルギー物理、原子核物理、free electron laser 用など多くの目的で超伝導空洞を使った加速器が建設され、あるいは建設されようとしている。

電界放出電子による電場の制限が差し当たっての問題となっており、これを解決して加速電場が 20~30 MV/m となれば、TeV 領域のエネルギーを目指す linear collider に超伝導空洞の利用が候補となりうるであろう。

本稿を書くにあたり、有益な議論をしていただいた KEK の古屋貴章氏、図面の製作をくださった岩井正明氏に厚く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 小島融三：低温工学 20 (1985) 144
- 2) H. Padamsee: IEEE Trans. **MAG-19** (1983) 1322
- 3) H. Padamsee: Proc. Second Workshop on RF Superconductivity, CERN, Switzerland, 1984 (1984) 339
- 4) E. Martinez and H. Padamsee: SRF 841201-Ex, Cornell (1984)
- 5) D. Proch: Proc. European Particle Accelerator Conference, Rome, 1988 (1988) 29
- 6) H. Padamsee: CERN/EF/RF 83-1 (1983)
- 7) S. Takeuchi: Proc. Third Workshop on RF Superconductivity, Argonne, Illinois, 1987 (1988) 469
- 8) J. Delayen: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 249
- 9) C. Benvenuti et al: CERN/EF 89-13, August (1989)
- 10) C. Arnaud et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 19
- 11) Ph. Bernard: Private communication
- 12) G. Arnold-Mayer and E. Chiaveri: Proc. Third Workshop on RF Superconductivity, Argonne, Illinois, 1987 (1988) 491
- 13) M. Becks et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 109
- 14) M. Hein et al: J. Appl. Phys. **66** (12) (1989) 5940
- 15) C.L. Bohn et al: IEEE Trans. **MAG-25** (1989) 2406
- 16) D.L. Rubin et al: Phys. Rev. **B38** (1988) 6538
- 17) N. Klein et al: Appl. Phys. Lett. **54** (1989) 757
- 18) Y. Kojima et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 85

- 19) K. Saito et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 635
- 20) K. Shepard: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 139
- 21) B. Cauvin and J.P. Fouan: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 175
- 22) T. Grundey et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 167
- 23) B. Almeida et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 1
- 24) K. Alrutz-Ziemssen et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 53
- 25) B. Aune et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 97
- 26) R. Boni et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 75
- 27) P. Kneisel: Private communication
- 28) S. Takeuchi: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989(1990) 151
- 29) K. Hosoyama et al: To be published in *Advance in Cryogenic Engineering*, Plenum Press, New York (1990) Vol. 35
- 30) B. Dwersteg et al: Proc. Fourth Workshop on RF Superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 65
- 31) A. Mosnier: Proc. Fourth Workshop on RF superconductivity, KEK, Tsukuba, 1989 (1990) 377