

会議報告

第 16 回 RF 超伝導国際会議 (SRF2013) 報告

久保 毅幸*

Report on the 16th International Conference on RF Superconductivity, SRF 2013

Takayuki KUBO*

1. はじめに

2013年9月23日から27日の5日間に亘り、第16回RF超伝導国際会議(The 16th International Conference on RF Superconductivity, SRF2013)がパリのCité Internationale Universitaireで開催されました(図1)。SRFは1980年の最初の開催以来、30年以上に亘り隔年で開催されている伝統ある会議です。登録者数は340名以上、発表された研究の数は370以上でした。超伝導

加速空洞の科学・技術を扱う会議としては最大規模です。本稿では、SRF2013で発表された最新かつ重要な研究成果¹⁾について紹介したいと思います。

2. 重要な研究の紹介

2.1 C. E. Reece, A New First-Principles Calculation of Field-Dependent RF Surface Impedance of BCS Superconductor²⁾

超伝導加速空洞の表面抵抗を議論する際、しば



図1 SRF2013 集合写真。後ろに見えるのが会場となった Maison Internationale.

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

しば Mattis-Bardeen の式が用いられます。しかし、この式は場が弱い極限でのみ妥当であり、この仮定が成立しない場合には妥当な結果を与えません。B. P. Xiao, C. E. Reece, M. J. Kelley は、有限の重心運動量を持つクーパー・ペアを出発点として Bardeen, Cooper, Schrieffer (BCS) 理論の枠内で表面インピーダンスを再評価し、場に依存する表面インピーダンスの式を導出しました。彼らの結果は、表面磁場の大きさがある値以下 (以上) では、表面磁場の増大とともに表面抵抗が減少 (増加) することを示しています。これにより、これまで理解が進んでいなかった “low field Q-increase” (加速電場が数 MV/m 以下の領域において加速電場の増加とともに Q 値が増加する現象) や後で述べます “medium field anti-Q-slope” (加速電場 10–20 MV/m まで Q 値が増加し続ける現象) を BCS 理論の帰結として統一的に説明できる可能性があります。

2.2 A. Grassellino, New Insights on the Physics of RF Surface Resistance and a Cure for the Medium Field Q-Slope³⁾

2012 年, A. Grassellino 達は、高温 bake 時の窒素ガス注入により (a) 空洞 Q 値が大幅に向上 (空洞によっては 2 K で $Q \sim 7 \times 10^{10}$ に到達) すること、及び (b) 10–20 MV/m 以下において場の増加とともに Q 値が増加すること (medium field anti-Q-slope) を発見しました。このような Q 値の振舞は旧来の空洞処理方法からは得られないものです。

彼女達は、bake 温度 (800–1200 度)、bake 時間、注入ガスの種類 (窒素 or アルゴン)、ガス注入時間、電界研磨量を変えて空洞の性能試験を行い、処理条件毎に、空洞表面磁場 B の関数として BCS 抵抗 $R_{BCS}(B)$ 及び残留抵抗 $R_{res}(B)$ を求めました。結果は、①窒素処理した空洞では、表面抵抗の dominant な成分が R_{BCS} であること、B の増加とともに R_{BCS} が減少すること、これにより anti-Q-slope が引き起こされることを示しています。また、②注入ガスとしてアルゴンを用いた場合にも、窒素の場合と同様の結果が得られることも分かりました。

彼女達は、①の R_{BCS} の振舞は Xiao 達の表面抵抗の計算と符合しており、BCS 抵抗の本来の振舞として説明出来るかもしれない、と指摘してい

ます。また当初、高い Q 値は表面が窒化されることにより得られると考えていたようですが、②の結果より、現在では窒素やアルゴンが格子間に入り込むことで平均自由行程が短縮された結果であると考えているようです。

窒素 / アルゴン注入の方法で確かに高い Q 値が得られるようですが、空洞の多くが ~ 20 MV/m でクエンチしている点が気になります。高い Q 値と高い加速電場は同時に実現できるのか、今後の展開に注目したいと思います。

2.3 J. M. Vogt, High Q_0 Research: The Dynamics of Flux Trapping in SC Niobium⁴⁾ (若手研究者最優秀口頭発表賞)

磁場中に置かれた超伝導試料を冷却していき、常伝導状態から超伝導状態に転移させることを考えましょう。ピンニング中心の無い理想的な試料であれば、超伝導への転移とともに磁束が試料から完全に排除されます。しかし、実際の Nb 試料では、特に印加磁場が $10\text{--}10^2 \mu\text{T}$ 程度の小さな磁場である場合には、その大部分が転移後も捕えられたままであることが知られています⁵⁾。RF 下においては、これらが残留抵抗に寄与 (経験的には $1 \mu\text{T}$ の磁束密度が $3.5 \text{ n}\Omega$ の残留抵抗に相当⁶⁾) します。したがって、高い Q 値を目指す際には、捕獲磁束の低減が大きな課題となります。

J. M. Vogt は、空洞を模擬した Nb 試料を使い、試料の残留磁束密度、冷却速度、温度分布の関係を調べました。彼女が明らかにしたことは、①冷却時の試料内温度勾配を小さくし、熱電流による磁場の発生を抑えることでピンニングされる磁束を減らすことができるということ、及び②試料温度を長時間に亘って転移温度 T_c 付近に留めておくことで、より多くの磁束を排除できるということ (T_c 付近で磁束の易動度が大きくなるためと考えられています) を明らかにしました。これらに加え、③高温 bake された単結晶 Nb は多結晶 Nb と比べて超伝導転移時に磁束が排除され易いという Aull 達による円盤状試料を用いた研究結果⁷⁾ も紹介されました。Buffered Chemical Polishing (BCP) 及び 800 度 bake 後の多結晶 Nb では超伝導転移後も転移前の 80% 以上の磁束が試料から排除されずに残存している一方、BCP 及び 800 度 (1200 度) bake 後の単結晶 Nb では 60% (40%) 程度になることが示されています。

これは large grain 空洞が示す高い Q 値を支持する結果です。まとめると、捕獲磁束の低減には (i) 試料内の温度勾配を無くすこと、(ii) T_c 付近での冷却速度をなるべく小さくすること、(iii) 高温で bake された large grain Nb を用いることが有効だということです。

彼女は、SRF2013 の若手研究者最優秀口頭発表賞のみならず、5 月に開催された IPAC'13 においても最優秀学生ポスター賞を受賞しています。この研究の注目度の高さを示しています。

2.4 M. Liepe, Nb₃Sn for SRF Application

この発表の意味を理解するには、少々予備知識が必要です。長くなりますが、簡単に背景を説明しておきたいと思います。

超伝導状態にある第二種超伝導体に磁場を印加することを考えます。印加磁場が十分に小さければ、磁束は超伝導体から完全に排除されます。しかし、印加磁場が十分大きくなると磁束が超伝導体に侵入し始めます。このときの印加磁場の大きさは材料に依存します。侵入磁束は損失に寄与するので、高い磁場まで磁束の侵入を拒み続けられる材料が空洞素材として望ましいと考えられます（もちろん表面抵抗や二次電子放出係数、熱伝導率、加工性の高さなど他にも様々な点から評価される必要があります）。

下部臨界磁場 B_{c1} は、磁束が侵入を開始する印加磁場の大きさを示す重要な指標です。印加磁場が B_{c1} より大きければ、超伝導体は磁束を排除するよりも受け入れた方が安定です。逆に、印加磁場が B_{c1} より小さければ磁束を受け入れる利点はありません。 B_{c1} が大きい超伝導材料は空洞素材として有望と言えます。例えば Nb の B_{c1} (2K) は ~ 170 mT であり、TESLA 空洞の加速電場 ~ 40 MV/m に相当します。一方、超伝導磁石で用いられる NbTi や Nb₃Sn の B_{c1} は僅か 20–30 mT であり、TESLA 空洞の ~ 5 –7 MV/m に相当します。YBCO などは更に低い値です。比較的大きな B_{c1} を持っていることが、Nb のような古典的な超伝導材料が空洞素材に使われ続けている理由の 1 つです。

磁束が侵入を開始する印加磁場の大きさを示すもう一つの重要な指標が superheating field B_{sh} です。理想的な表面を持つ超伝導体では、印加磁場が B_{c1} を超えても準安定な superheating 状態

として磁束の存在しない状態が続き、更に印加磁場を大きくしていくと、 B_{sh} に達したところで「突沸」すると考えられます。したがって、 B_{c1} が小さくとも、 B_{sh} が大きければ空洞の素材となる可能性があります。 B_{sh} の値は Ginzburg-Landau 方程式 ($T \sim T_c$) または Eilenberger 方程式 ($0 < T < T_c$) から計算可能です。極端な第二種超伝導体 ($\kappa \gg 1$) の任意温度における B_{sh} は、2008 年に Catelani と Sethna⁸⁾ によって Eilenberger 方程式を用いて計算されています。例えば、Nb₃Sn の B_{sh} は ~ 400 mT (TESLA 空洞の ~ 100 MV/m に対応) であり、実験から得られている Nb の $B_{sh} \sim 200$ mT⁹⁾ と比べて約 2 倍です。Nb₃Sn は最も有望な材料の 1 つです。

Cornell 大学の M. Liepe のグループは、Nb₃Sn 空洞の開発に取り組んでいます。彼らは、Nb 空洞内に Sn の蒸気を拡散させるという旧来の方法を用いて Nb₃Sn の単 cell 空洞を作成しました。そして、0.17 K/min で冷却の後、2 K 及び 4 K にて空洞の性能試験を行いました。Q > 10¹⁰ を維持したまま ~ 50 mT 付近でクエンチという結果でした。この Q 値の振る舞いは 1980 年代に Wuppertal 大学によって発表された結果と大きく異なります。Wuppertal の結果には、場の増加とともに急激に Q 値が (2 桁程度) 減少している様子が示されていますが、Cornell の結果にはそれがありません。 $B_{c1} \sim 30$ mT では何も起こらないように見えます。 B_{c1} が性能限界を決める量でないことを改めて示した重要な結果だと言えます。

発表では結果ばかりが強調され、(私の記憶では) 両グループの Q 値の振舞いが違う理由についてはコメントが無かったように思います。Proceedings には何らかのコメントがあるかもしれません。

2.5 T. Kubo, RF electromagnetic field and vortex penetration in multilayered superconductors¹⁰⁾ (若手研究者最優秀ポスター発表賞)

2006 年、A. Gurevich¹¹⁾ は、一様高周波磁場中の超伝導薄膜 (膜厚は London 長 ~ 10 – 10^2 nm 以下) の B_{c1} がバルクの超伝導体よりも大きいことに注目し、超伝導薄膜と絶縁層を交互に積層することで空洞壁の Nb を空洞内の大きな高周波磁

場から遮蔽・保護することを提案しました。大幅な加速電場の向上が期待されることに加え、臨界温度の高い超伝導薄膜を用いれば、表面抵抗の低減も可能です。この提案以降、各国は実証実験に乗り出しましたが、未だに確かな成功例はありません。

T. Kubo, Y. Iwashita, T. Saeki は、実証実験に成功していない理由が理論的な理解の不足にあると考えました。そこで最も簡単な場合として、Nb 上に絶縁層と超伝導層が 1 枚ずつ積層されている系を取り上げ、①積層薄膜構造内の電磁場分布及び②磁束侵入を妨げるバリア (Bean-Livingston barrier) が消失してしまう印加磁場の大きさを解析的に求めました。①と②を用いれば、超伝導積層薄膜構造の最大到達場及び各層の最適な厚みの評価が可能です。これまで手探りで行われていた実験に明確な理論的指針を与えたとと言えます。

超伝導積層薄膜構造による次世代超伝導空洞の実現は、加速電場の向上及び表面抵抗の低減により、超伝導加速空洞の小型化または高エネルギー化、そして省エネルギー化を促進し、加速器計画の建設費及び維持費の大幅な軽減に繋がると考えられています。SRF のような国際会議では必ず議論される話題ですが、残念ながら日本では活発な研究は行われておらず、世界から大きく遅れをとっている状況です。

3. おわりに

米国では、多くの人材を投入して、理論と実験の両輪で RF 超伝導の物理に係わる基礎研究を推進しており、新しい発見が *Physical Review B* や *Journal of Applied Physics* など物理系の論文誌から次々と発表されています。そして、これら基礎研究の成果が世界の trend を形成しています。Gurevich の Multilayer coating¹¹⁾ が良い例でしょう。また、本稿で紹介した Grassellino³⁾ の研究なども新たな trend の始まりを予感させるものです。

一方、日本では、RF 超伝導のテクノロジーの面では米国と同等のレベルに達しつつあるかも知れませんが、RF 超伝導の物理のような基礎研究



図 2 Gala Dinnerの様子。会場となった Salle Wagram は 1865 年の建築で、第二帝政時代には大規模なダンスショーが行われていたとのこと。

となると、人材も実績も殆どありません。理論と実験の両輪で着実に研究を推進してきた米国とは天と地の差です。これではいつまで経っても米国の基礎研究から生まれた trend を追いかけるばかりで、永久に米国には追いつけません。そろそろ日本も基礎研究で世界を「ぎゃふん」と言わさねばなりません。これは若手の活躍が重要となる部分です。次回の SRF (2015 年カナダ) までには大きな成果を出したいところです。

参考文献

- 1) 資料は <http://www.srf2013.fr/> にあります。
- 2) B. P. Xiao, C. E. Reece and M. J. Kelley, *Physica C* **490** (2013) 26.
- 3) A. Grassellino, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **26** (2013) 102001.
- 4) J.-M. Vogt, O. Kugeler, and J. Knobloch, *Phys. Rev. STAB* **16** (2013) 102002.
- 5) C. Vallet et al., in *Proceedings of the 3rd EPAC'92*, Berlin, Germany, p.1295.
- 6) B. Aune et al., *Phys. Rev. STAB* **3** (2000) 25.
- 7) S. Aull, O. Kugeler, and J. Knobloch, *Phys. Rev. STAB* **15** (2012) 062001.
- 8) G. Catelani and J. P. Sethna, *Phys. Rev. B* **78** (2008) 224509.
- 9) N. Valles, in *Proceedings of IPAC2012*, New Orleans, Louisiana, USA, p. 2197.
- 10) T. Kubo, Y. Iwashita and T. Saeki, arXiv : 1304.6876 [physics. acc-ph], to be published in *Applied Physics Letters*.
- 11) A. Gurevich, *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 012511.