

会議報告

LCWS 2016 報告：超伝導加速，進展と展望

久保 毅幸*^{1,2}

Report on LCWS 2016: Progress and Outlook of Superconducting Accelerating Cavity Technology

Takayuki KUBO*^{1,2}

1. はじめに

2016年12月5日から9日の5日間に亘り、International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS 2016) が開催された。開催地は International Linear Collider (ILC) の建設候補地である北上山地に程近い岩手県盛岡市である¹⁾。ILCの物理、測定器、加速器について議論するため、世界中から300名以上の参加者が集まった。本稿では、新たな展開が見られる超伝導加速技術を中心に話題を紹介し、さらに将来の研究の方向性についても触れる。

2. Joint Plenary

会議初日、超党派の国会議員から成るリニアコライダー国際研究所建設推進議員連盟 (ILC 議連) の河村建夫会長が基調講演を行った。氏は「日本こそは人類共通の言語・文化とも言える科学をもとにした世界の融和の役割を果たすべきだ」、「サイエンス・ファーストを合言葉に世界を科学でつないでいく、その象徴の一つが、国際リニアコライダーです」と述べた^{1,2)}。ILC実現に向けた非常に力強いメッセージであった。

山内正則 KEK 機構長からは日本における ILC の状況について、LCC Director の Lyn Evans 氏からは CLIC と ILC の現状について説明があった。文部科学省と米国エネルギー省が ILC に関する対話を開始したこと、そのアジェンダにはコスト削減のための共同研究が含まれることが述べられ

た。建設費用の大部分はメイン・ライナックが占めるため、この費用を如何にして削減するかが鍵である。特に超伝導高周波加速空洞 (SRF 空洞) の各種 R&D を通じたコスト削減案の紹介に多くが割かれた。

ILC をめぐるこのような状況下、SRF 空洞に注目が集まっている。次に紹介する Accelerator Plenary の講演は、複雑怪奇な空洞表面処理手順の背景等、SRF の物理と技術を理解するのに役立つだろう。

3. Accelerator Plenary

Accelerator Plenary の最初の講演のタイトルは “The Next SRF Technologies” (T. Kubo) で、SRF 物理の基本事項から始まり、次世代の SRF 空洞まで解説している。スライド³⁾を見ながら読むことをお勧めする。関連する参考文献はスライド中に示されている。

3.1 SRF 空洞の性能：加速勾配 E_{acc} と Q 値

SRF 空洞の性能は加速勾配 E_{acc} と Q 値で表される。 E_{acc} を大きくできれば、粒子を短い距離で目標エネルギーに到達させられる。Q 値は空洞内のエネルギーを RF 1 周期あたりの損失で割ったもので、Q 値の向上は冷凍機負荷の軽減を意味する。 E_{acc} 及び Q 値の両方を向上させることができれば、加速器の建設コスト・運転コストの削減につながる。

3.2 E_{acc} は何によって制限されているか、そして何故空洞材料は Nb なのか

*¹ 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: kubotaka@post.kek.jp)

*² 総合研究大学院大学 SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Studies

E_{acc} はパワーさえ入れればいくらでも上げられるわけではない。 E_{acc} が増加すると、表面磁場 B_0 も増加する。 B_0 が小さいうちは磁束が超伝導体から弾き出されるミスナー状態にある。 B_0 が大きくなると、渦糸と呼ばれる常伝導の芯を持つ量子化した磁束が超伝導体へと侵入し始める（渦糸状態）。渦糸は RF の周波数（ \sim GHz）で振動し大きなエネルギー損失を生み、発熱し、空洞をクエンチへと至らしめる。したがって、なるべく高い B_0 まで渦糸が侵入しないような超伝導材料を使うことが望ましい。高純度 Nb の下部臨界磁場 B_{c1} は 170 mT 程度あり（TESLA 形状の空洞の $E_{acc} \sim 40$ MV/m 程度に相当）、これより小さな磁場に対しては渦糸状態よりもミスナー状態が安定である。これは他の超伝導体と比べて非常に大きな値である（例えば NbN の B_{c1} は 20 mT 程度、 Nb_3Sn の B_{c1} は 50 mT 程度しかない）。これが、我々が高純度 Nb を用いる本質的な理由の一つである。

3.3 ILC レシピと 120 度 baking

では、高純度 Nb を用いれば簡単に $B_0 \sim B_{c1} = 170$ mT ($E_{acc} \sim 40$ MV/m) に到達できるかと言えばそうではない。170 mT (40 MV/m) に到達したのは長い R&D を経た 1995 年頃である。

まずは現在 ILC レシピと呼ばれている空洞表面処理のステップを振り返ろう。SRF 空洞は、高純度 Nb の円盤をプレスし、化学研磨の後、清浄な環境で電子ビーム溶接を行うことで製作される。出来上がった空洞は電解研磨 (EP) により空洞内面を 100 μ m 程度取り除き、洗浄した後、EP の過程で吸蔵された水素の除去を目的とするアニール (750-800 度) を行う。これを行わないと、形成された NbH が大きな損失を生み、field の上昇とともに Q 値が急激に落下する (Q-disease)。アニールの後、数 μ m の軽い EP を行って表面を削ぎ落とす。そして超純水による高圧洗浄を経て、クリーンルームに運ばれ組み立てられる（これを行わないと field emission で X 線が撒き散らせる上、Q 値が急激に減少する）。次に空洞を真空に引きながら 120 度で 48 時間放置する。この最後のステップが 120 度 baking と呼ばれるものであり、40 MV/m 達成の最後の鍵である。これを行わないと、 $E_{acc} \sim 30$ MV/m 辺りで Q 値が急激に減少する (high-field Q drop)。

ところが 120 度 baking を行えば、high-field Q drop は消え、さらに高い field に到達できるようになるのである。

ミュオン・スピン・ローテーションを使った実験によると、120 度 baking 後の Nb 表面の数十 nm の層ではロンドン侵入長が大きくなっていることが分かっている。すなわち、120 度 baking 後の Nb 表面は、ロンドン侵入長が大きい dirty な層 (数十 nm) と、ロンドン侵入長の短い clean なバルクの二層構造になっていることが分かっているのである。Dirty (clean) は不純物が多い (少ない) ことを指す超伝導用語である。因みに、120 度 baking 後の主な不純物は酸素であり、その供給源は表面の酸化物の層と考えられている。

3.4 Dirty/clean 二層構造の利点

表面抵抗の起源は、超伝導ギャップの上に励起された準粒子によるマイクロ波吸収である。これは有限温度では必ず存在する。ギャップが大きいほど励起準粒子が少なく、表面抵抗は小さい。したがってギャップは大きいほど良い。しかし、field を大きくすると（表面電流が強くなると）ギャップは縮む。特に clean な超伝導体の場合、高い field でギャップが消失してしまう。一方、dirty な超伝導体は有限のギャップが維持される。すなわち、dirty な方が clean な場合よりも高い field での振る舞いが良い。しかし、単純に dirty なバルクの超伝導体を使うのは良くない。なぜなら、dirty なバルク超伝導体は B_{c1} が小さく、低い field で渦糸が侵入しクエンチするため、高い field に到達できないからである。しかし、ILC レシピで実現されているような二層構造であれば、 B_{c1} は clean なバルクで与えられ ($B_{c1} \sim 170$ mT)、かつ表面は dirty であるから、ギャップの減少を抑えられるのである。

加えて、ILC レシピで処理された空洞の表面磁場はしばしば $B_{c1} \sim 170$ mT (40 MV/m) を超えることがある。これも層構造のおかげであると指摘されている。二層の境界が渦糸を弾き出す性質を持っているからである。

3.5 窒素 infusion

昨年 (2016 年)、Fermilab で窒素 infusion (あるいは窒素 infused modified baking) なる新たな表面処理方法が開発された。これまた奇々怪々

なものが出てきたと思われた方も多かったろうが，これまでの流れを振り返れば極めて自然な発想である。

2012年にFermilabで窒素 doping, JLabでチタン doping が発見された（窒素 infusion と窒素 doping は異なるものであることに注意）。Nb の材料内に不純物を敢えて導入し，dirty な Nb に変換すると Q 値が field の増大とともに増加するというものである（この振る舞いは dirty な超伝導体の状態密度の field 依存で説明できる）。しかし，既に述べたとおり，材料深くまで dirty にすると B_{cl} が減少する。したがって当然，高い field に到達することなくクエンチする。これが窒素 doping の欠点であった。

Fermilab の研究者は以前から 120 度 baking を研究していたため，Nb 表面の二層構造が high field の鍵であることをよく理解していた。そこで彼らは，表面の僅か数十 nm だけを窒素で dirty にできれば，高い Q 値と高い field の両方を達成できるのではないかと考えた。彼らはアニール後，真空炉から出さずに（つまり表面に酸化層がない状態のまま）窒素下で 120 度 baking を行った。これが窒素 infusion である。（実際に何が起きているか，まだ分かっていないが）目論見どおり，この新たな処理方法により high field かつ high-Q が得られるという結果が得られ始めている。他の研究所は現在これを再現しようとしているところである。今後，様々なデータが出てくるだろう。

3.6 次世代の SRF 空洞

超伝導体への印加磁場が B_{cl} を超えるとマイスナー状態は安定でなくなり準安定状態となる。完全に不安定となる磁場を superheating field B_s と呼ぶ。 B_s の大きさはだいたい熱力学的臨界磁場 B_c と同程度である。Nb のこれまでの最高到達 field は $B_c=200$ mT を超えており， B_s に迫る値に到達していると考えられる。最早これ以上の大幅な field の向上は見込めない。次世代の超伝導空洞の開発が急務である。

注目されているのは Nb_3Sn である。 Nb_3Sn の B_s は約 450 mT（～ 100 MV/m 相当）と非常に高いため，理想的で欠陥一つない Nb_3Sn を用意できれば 100 MV/m が達成できると考えられている。しかし $B_{cl} \sim 50$ mT（10 MV/m 程度）か

ら上は不安定で，何らかの摂動が加われば渦糸状態へと転落しクエンチに至るため，現実の空洞で B_{cl} を大幅に上回る field を達成するのは難しい。事実これまでに到達した最大の field は 70 mT 程度（20 MV/m 未満）である。

この状況を打破するには，渦糸の侵入を邪魔する何らかの仕掛けを導入する必要がある。注目されているのは，やはり，層構造の導入である。具体的には，clean なバルクの Nb の上に dirty な薄い（数十 nm の） Nb_3Sn を載せた構造を作るのである（SS 構造）。二層の境界が渦糸が弾き，マイスナー状態から渦糸状態への転落を妨害してくれる。二層の間に絶縁層を挟むと尚良い（SIS 構造）。そうすれば侵入を開始した渦糸が絶縁層で消失してくれる。この話題は，review 論文⁴⁾ に詳しい解説がある。

4. SRF mini workshop

これは（ILC を意識して）各研究所における今後数年の計画について情報共有しようという趣旨で開催された。ここでは Fermilab と JLab の計画のみ紹介する。前章で紹介した背景を思い出しながら眺めて頂ければと思う。

4.1 N. Solyak, “R&D on ILC cost reduction”

短期目標（2-3 年）は，単 cell 空洞で窒素 infusion のレシピを最適化，そのレシピの 9-cell 空洞への応用と統計の蓄積，さらにはクライオモジュールでの high-Q・high-gradient（以下 high-QG）の実証などである。

中期目標（4-5 年）には，high-gradient 空洞の設計・製作・試験，high-QG 技術の vendor への移転，クライオモジュールの field emission 改善方法開発，high-QG のクライオモジュールにビームを通す，という内容であった。

長期目標（10 年）も示された。 Nb_3Sn を Nb 上にコーティングし，80 MV/m を目指す。これが実現できれば ILC の high energy upgrade において大幅なコストダウンが可能となる。このための R&D 項目は，(1) まず Nb_3Sn の 9-cell 空洞の製作可能性を実証，(2) 縦測定で field を最大化するようなコーティングの最適化を進める，(3) high-Q かつ 60 MV/m 以上を目指す，(4) field emission を最小化する努力を続ける，(5) 100 MV/m を目指す，というものであった。

4.2 R. Rimmer, “JLab status and plans”

JLab における R&D 項目が紹介された。CEBAF の空洞をインゴット Nb から製作された high-current cell shape 空洞に入れ替えること、JLab Electron Ion Collider (JLEIC) 用の空洞開発、LCLSII 用クライオモジュール生産、Low Surface Field (LSF) 型空洞をインゴット Nb で製作、CEBAF の空洞を Nb₃Sn 空洞に入れ替える、窒素 doping, 窒素 infusion, 長期計画としては NbTiN による SIS 多層膜で Nb を超える high-gradient を目指す研究等が挙げられた。Fermilab と同様、Nb₃Sn をはじめとする新規材料研究が既に本格的に始まっている。

5. おわりに

LCWS 2016 の後、米国の SRF 研究の方向性を決める議論に進展があったので、最後にこれを紹介して締め括りたい。

2017 年 2 月に GARD-SRF Roadmap Workshop という会議に出席した。この会議は米国エネルギー省の指示で Fermilab が開催したものであり、ILC をはじめとする高エネルギー物理のため、今後 10 年の SRF 研究をどのように進めるか議論するというものであった（ここでの議論を踏まえた報告書は 3 月にエネルギー省に提出される予定である）。

私が招待されたのは、「革新的研究」のセッションで、ここでは層構造の理論や MgB₂ 成膜の話、SRF の表面抵抗の基礎的理解のための Point Contact Tunneling を使った実験等が議論された。司会を務めた Fermilab の Alex Romanenko 氏の議論は特に自由で独創的であった。B_{c3} を使って B_s を超える数百 MV/m を目指そうというアイデアや、B_s を超える field を一瞬だけ入れることで数百 MV/m を目指そうというアイデア等、突

拍子のない話が沢山出た。もちろん、これらのアイデアには問題があり (B_s を超えればクーペアの破壊、渦糸の核生成が始まる。空洞壁面の至る所から渦糸が侵入し、直ちにクエンチに至る)、すぐに議論の対象から消え去った。しかし、こういった新しいアイデアを出し、10 年先、20 年先の SRF を考えて自由に議論しよう、そして面白いサイエンスを追求しようという空気があった。

会議の最後に、米国に作る新施設の案が示された。その中で特に面白いのは Quantum computing test bed である。超伝導 qbit と結合している超伝導共振器の Q 値を向上させることができれば、qbit の decoherence 時間を延ばすことができる。SRF 業界の技術をそこに活かすとともに、SRF の低温・低 field における物理の理解を深めようという意図である。他にも、Atomic Layer Deposition (ALD) の設備を Argonne に作るという案や MgB₂ の成膜設備を新設するという話もあった。新規材料を用いた層構造で Nb の限界を超える high-gradient を目指す研究を本格化させるようである。

日本も米国を見習い、日本中の SRF 研究者を集め、(ILC の high energy upgrade を視野に入れて) SRF の科学及び技術の長期的な研究テーマについて議論してみてもはどうだろうか？

参考文献

- 1) LCWS 2016 ウェブサイト, <http://lcws2016.sgk.iwate-u.ac.jp/>
- 2) 衆議院議員河村建夫 “T’s PARK”, <https://ja-jp.facebook.com/tspark.net/>
- 3) LCWS 2016 プログラム, <https://agenda.linearcollider.org/event/7371/>
- 4) T. Kubo, Superconductor Science and Technology **30**, 023001 (2017).