CERN 原子核物理実験施設 ISOLDE の超伝導線形加速器 - 薄膜超伝導加速空洞共振器の開発 -

欧州原子核研究機構 (CERN), マンチェスター大学 宮 崎 彬

Akira.Miyazaki@cern.ch

2017年(平成 29年)8月4日

1 はじめに

欧州原子核研究機構 (CERN) の花形といえば Large Hadron Collider (LHC) を用いた高エネルギー物理学実 験である.エネルギーフロンティア以外にも比較的規模 の小さい実験も平行して行われており,反陽子実験など はその代表である.図1に示した The Isotope Separator On-Line DEvice (ISOLDE) は CERN の全実験中でも 最古参であり, 1967 年から 50 年にわたって運用され続 けている原子核実験施設である [1].

1.1 ISOLDE

CERN で実験に用いられる陽子はまず Linac2 を初段 加速器とし次いで Proton-Synchrotron Booster (PSB), Proton Synchrotron (PS), Super Protron Synchrotron (SPS) を経て LHC へと至る. PSB 後の陽子は 1.4 GeV まで加速されているが、このうち下流に送られるのはわ ずか 40% であり残りの約 60% は ISOLDE の固定標的実 験に利用される.この標的は比較的重く¹,したがって 主に原子核破砕反応によって生じる二次粒子は「殆ど止 まって」生成される.多孔質、粉状や液状のものが用い られる標的を 2000 度まで加熱し, かつ電位差を与える ことでこの二次粒子は徐々に標的内部に浸透さらには流 出し、それを用いて原子核の性質を調べる. これは理研 などの比較的重い粒子を軽い標的にぶつけ in flight で原 子核を研究する施設とは対照的であり、ISOL 方式と呼 ばれる. ISOL 方式は高いビームクオリティ²をもつため 精密分光実験などを得意とする. ISOLDE では 70 種を 越える元素のおよそ1300もの同位体を提供することが 出来る [1].

様々な物理成果があるが, 高エネルギーニュースにふ さわしい素粒子物理への貢献を 2,3 紹介しようと思う.



⊠ 1: ISOLDE

まずカビボ小林益川行列 (CKM) の対角成分の測定を挙 げよう. CKM 行列のユニタリティ条件から

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 1 + \Delta \tag{1}$$

であり, 標準模型では $\Delta = 0$ を予言する. ISOLDE にお いては, ペニングトラップ (ISOLTRAP) [2] による β 崩 壊の母核および娘核の精密質量分光が $|V_{ud}|$ 精密測定に 利用される [3].

β 崩壊に関連して行われている別の実験はニュートリ ノの質量決定である.¹⁶³Ho の electron capture を用い たニュートリノ質量測定はモデル依存性が少ないと考え られている [4]. この ¹⁶³Ho 線源の検出器へのインプラ ンテーションに ISOLDE が使用されている (ECHO コ ラボレーション) [5].

最後に atomic EDM 実験についても触れておこう. ISOLDE で生成される重い原子核を用いることで, 現在 最も強い制限をつけている¹⁹⁹Hg よりも精度良く EDM を測定できる可能性がある [6].特にこれから紹介する加 速器アップグレードによってクーロン障壁を越えるエネ ルギーまで²²⁵Ra 等を加速し, 二次標的に衝突させ励起 状態へ遷移させることで精度の向上が期待されている.

1.2 HIE-ISOLDE プロジェクト

ISOLDEの一次標的で生成された二次粒子 (重イオン) は、高純度で選別できる代わりにエネルギーが低いとい

¹例えば炭化ウラン, ビスマス, 鉛, タングステンなど

²核種の separation が非常に良い

う弱点を持つ. したがって, 二次粒子を再加速させてさ らに二次標的に衝突させれば, 様々な実験を行うことが 可能となる. それを目的とした加速器が High Intensity and Energy ISOLDE (HIE-ISOLDE) である [7].

土地面積の限られた ISOLDE の建屋に建設するため HIE-ISOLDE は超伝導線形加速器で構成されている.図 2 に 2017 年夏現在の加速器の全容を示す. ISOLDE 標的 で生成された重イオンはまずチャージブリーダー (REX-EBIS) によって余分な電子を剥ぎ取られ,質量電荷比 (A/q)を下げられる.高い電荷により加速しやすくなった イオンは 2002 年から運用されている常伝導 Linac (REX-ISOLDE) によって 2.8 MeV/u (およそ β = 7.8%に相 当) まで加速される. それをさらに加速するのが HIE-ISOLDE 超伝導線形加速器である.



図 2: 2017 年現在の HIE-ISOLDE 超伝導線形加速器 [7]

2015年に第一クライオモジュール,2016年に第二ク ライオモジュールが建設され,2017年現在は第三のクラ イオモジュールまでで最高7.5 MeV/uのビームをユー ザーに提供している.2018年に第四クライオモジュー ルの建設をもってアップグレード計画 (phase2)は完了 となり,10 MeV/uのビームが利用可能となる予定であ る.これは原子核のクーロン障壁を越えるエネルギー であり,新たな原子核実験の機会を提供する.今後の予 算次第で常伝導 Linac 部分を超伝導で置き換える計画 (phase3) もありうる.

クライオモジュール内部の写真を図3に示す. 全長お



図 3: クライオモジュール [8]

よそ2mという非常にコンパクトなクライオモジュール の内部に超伝導加速空洞共振器5台と収束用ソレノイド 1台が設置されている.HIE-ISOLDEクライオモジュー ルにおいて最も特徴的な設計は,ビーム真空と断熱真空 が共通になっていることである.それゆえ普通の加速空 洞共振器は共振器内部を封じきれば一般の室内で外部ア センブリが出来るのに対し,HIE-ISOLDEはクライオモ ジュール全体を封じきるまでクリーンルームで作業する 必要がある.

図4はアセンブリのためのクリーンルーム (クラス 100)の写真である.写真奥から横向きに風を流すこと で内部を清浄に保ち,かつ手前側から大きなクライオモ ジュールの出し入れが可能である.現在まで Linac に設 置した全15台の加速空洞共振器のうち,塵が共振器表 面に付着することで発生する電界放出 (Field Emission) はたった2台でしか観測されていない.これは予想以上 に良い値であり,クリーンルームにおける共振器のアセ ンブリが適切であったことを示している.



図 4: クリーンルーム

2017 年現在 15 台の超伝導加速空洞共振器が運用さ れている.図5 に加速空洞共振器のパフォーマンスを示 す[9].ほぼすべての共振器が設計値を超えた性能を示し ており,順調に物理実験に貢献している.HIE-ISOLDE 加速空洞共振器は12 Kから8 Kの間(超伝導転移温度 9.5 K)でゆっくり一様に冷やすと性能が上昇すること が知られており,現在の高いパフォーマンスは最適化さ れた冷却法によって実現されている.加速空洞共振器に 関しては次の章で説明する.

1.3 HIE-ISOLDE 加速空洞共振器

HIE-ISOLDEの超伝導加速空洞共振器は一般にあま りなじみのない設計をしている (図 6). BNC ケーブル のような同軸形状の共振器の固有モード電場は動径方 向であるため, 共振器を横切る荷電粒子は電場による加



図 5: HIE-ISOLDE 共振器の Q 値と加速勾配. 2017 年 のコミッショニングで測定されたクライオモジュール内 における測定結果. 図の星印は設計値, 点線は 10 W 電 力消費ライン [9].

速をうける.上部が固定端,下部が自由端の四分の一波 長で共振させるため四分の一波長共振器 (Quarter-wave Resonator; QWR) と呼ばれる [10].

LHCや International Linear Collider (ILC)で用いら れている楕円型共振器ではなく QWR を用いる理由は, 加速する粒子が電子や陽子ではなく重イオンであり,エ ネルギーのわりに速度が遅いからである. たとえ共振 周波数がビームの速度とシンクロしていても,共振器内 部の電場には空間構造があり時間によって振動するた め,加速効率は速度の関数となる. これを走行時間係数 (Transit Time Factor)と呼び,加速空洞共振器の形状 によって決定される [11]. 遅い粒子を効率よく加速する ためには共振波長に比べて加速領域が狭い必要があり, QWR は HIE-ISOLDE で加速される $\beta = 8-18\%$ の速度 に適した構造をしている.

表1に HIE-ISOLDE 加速空洞共振器のスペックをま とめた.この表で特に重要なのは高いQ値と低い消費 電力であり,これは超伝導体で共振器を作ることで初め て達成できる値である.この低い電力消費により共振器 を Continuous Wave (CW)で運用することが可能とな り,ビームのエミッタンス等のクオリティを保ったまま 加速することが出来る.

あとで詳しく説明するが,この加速空洞共振器は銅の 共振器に超伝導ニオブフィルムを貼った構造をしている. 図6にあるように,4.5Kの液体ヘリウムを内部に注ぎ, 銅の優れた熱伝導を活かして全体を冷やしてフィルムを 超伝導に保つ.

2 薄膜超伝導加速空洞共振器の開発

ILC を初めとして, 加速器で用いられる超伝導共振器 は一般にバルクのニオブから製造される.特に 90 年代



⊠ 6: HIE-ISOLDE QWR

表 1: HIE-ISOLDE 加速空洞共振器のスペック

周波数	$101.28 \mathrm{~MHz}$
加速電圧	1.8 MV
加速勾配	$6 \mathrm{MV/m}$
Q 値	4.7×10^{8}
消費電力	10 W
ピーク磁場	$58 \mathrm{mT}$
最適 <i>β</i>	11%

以降の電解研磨 (Electropolishing) や高圧水洗浄 (High Pressure Rinsing) の発達, ニオブ中の水素の扱い (Qdesease の解決), 環境磁場を排除する冷却法の確立, 等々 によってバルクのニオブの技術は成熟し世界中で実用さ れている.

しかし、このバルクニオブには本質的困難あるいは技術的限界がいくつかある.

- 1. 非常に高価である
- 2. 熱伝導が非常に悪いため熱的にクエンチする
- 3. 機械的に柔らかく振動の影響を受けやすい

第一の困難は重大であり,既存技術による巨大加速器建 設の大きな足かせになっている.第二の困難を解決する ためには極力純度の高く熱伝導のよいニオブを使用する 必要があるが,これがまた価格を釣り上げる.第三の困 難は加速器の安定なフィードバッグ制御の大きな妨げと なる.特に大電流の加速器の場合,狭い共振幅のまま電 場の振幅と位相を安定に抑える必要があるため,機械振 動による共振周波数の変化は非常にチャレンジングな問 題となりうる.

このような数々の困難を取り除くため, 我々はバルク ではなくニオブのフィルムを銅の表面に貼る Nb/Cu 共 振器を開発・運用してきた.以下では CERN における Nb/Cu 共振器の歴史, HIE-ISOLDE 加速空洞共振器へ の応用, 課題, そして今後の展望について述べる.

2.1 歴史と運用実績

薄膜超伝導体 Nb/Cu にはバルクに比べて大きな利点が4つある.

- 1. 共振器は銅でつくられるためバルクニオブ共振器よ り一桁以上安い
- 2. 銅の熱伝導が非常によいためニオブ薄膜は十分冷却 され熱的にクエンチしない
- 3. 銅は機械的にニオブより硬く振動の影響が少ない
- 外部磁場の影響がバルクのニオブより二桁ほど小さ いため磁気シールドが必要ない³ [12]

この革新的なアイデアは 1980 年代に CERN の C. Benvenuti らにより導入された [13].

Nb/Cu 共振器が初めて実用化されたのは CERN の LEP-II である.現在の ILC のような,1.3 GHz もの高 周波の共振器は小さいためバルクニオブでの製造も可能 である.しかし LEP-II の周波数は 350 MHz であり,共 振器が巨大であるためバルクニオブは金銭的にも機械的 にも現実的でない.LEP-II ではその困難を払拭するた め Nb/Cu 共振器を開発し,最終的に 256 台もの 4-セル 共振器を建設・運用した⁴.現在世界最大の LHC もその 技術を継承し,周波数 400 MHz で 1-セルの Nb/Cu 共 振器を 16 台運用している.

一方で1990年代に重イオン加速器でNb/Cu共振器を 初めて採用したのは INFN リニャーロ研究所の ALPI 加 速器である.これは QWR であったため, HIE-ISOLDE 加速器の基本設計はこの加速器の実績を元にしていると 言える.

以上のように Nb/Cu 共振器には大きな利点があり, すでに運用実績が有り, しかも LEP や LHC 等の重大な 物理実験に多大な貢献をしてきた. この技術をさらに発 展させることも HIE-ISOLDE プロジェクトの目的の一 つである.

2.2 HIE-ISOLDE における薄膜超伝導体

HIE-ISOLDE 加速空洞共振器は,まず銅で共振器部分 を製造し周波数を調整した後,直流バイアススパッタリ ングと呼ばれる手法で厚み数 μm のニオブ薄膜を銅表面 にコーティングしている. 図7にスパッタリング装置の 概要を示す.



図 7: スパッタリング装置 [14]

真空容器には純度の高いアルゴンガス 0.2 mbar が封 入されている.同軸状の共振器の内部・外部壁の中央に はニオブの円筒状カソードが置かれ, -1 kV の電圧がか けられる.カソードと共振器との間にはハニカム構造の グラウンドが設置され,封入されたアルゴンガスを電場 によって電離させる.共振器の電位は可変となっており, アルゴンプラズマの形状を最適化している.

アルゴンイオンは正の電荷を帯びているためニオブカ ソードに引きつけられ、その衝突エネルギーでもってニ オブ原子を遊離させる.このエネルギーレベルで遊離さ れるのはニオブ原子でありイオンではない.そのニオブ 原子は中性であるため電場の影響は受けず、プラズマと の多重散乱を繰り返しながら共振器壁に到達し、銅表面 をコーティングする.

この過程によって共振器は徐々に温まっていき,620度 になった時点で一旦スパッタリングを中止し冷却にはい る. それ以上の温度では銅が軟化してしまうからである. スパッタリングに25分,冷却に5時間35分かかるため, 一層のコーティングに6時間を要する.一連のスパッタ リング及び冷却のサイクルを14回繰り返すことで目的 の厚さのフィルムを実現する.よってHIE-ISOLDEの ニオブ薄膜は正確には14層の多層構造をもったフィル ムである.

スパッタリング前後の共振器の写真が図8である. こ のようにたった数 μm という材料の量としては極めて 少ないニオブでバルクのニオブのような超伝導共振器

³メカニズムはまだ完全には解明されていないが, 恐らく結晶粒界 面の影響だと考えられている.

⁴バルクニオブ共振器も 32 台製造されたため, 合計で 288 台の共 振器が使用された.

を製造できるのがスパッタリングの強みである. HIE-ISOLDE の QWR 構造に対しては以上のスパッタリン グ法を採用したが, 例えば LHC のような楕円形状の場 合は磁場をかけてプラズマをサイクロトロン振動させる マグネトロンスパッタリングが適していることが知られ ている. この場合はより低いガス圧でも効率よくプラズ マを生成できる.



図 8: Nb コーティングされた銅の共振器 [14].

図9は電子顕微鏡 (FIB-SEM) によるフィルムの断面 図である. プラズマの分布やカソード形状を反映して, 共振器の場所によってフィルムの厚みや結晶構造に差が 生まれているのが分かる. 共振器全体で最低数 µm の厚 みをもち, かつフィルムが剥がれないようなパラメタ最 適化がプロジェクトに先行して行われた. これは超伝導 状態における磁場の侵入長 (およそ 40 nm) よりも十分 厚いフィルムが要求されるためである. 一つ一つのニオ ブ結晶サイズが小さいのも特徴である. これによりバル クニオブにくらべ Nb/Cu 共振器は結晶粒界面が非常に 多いといえる.



図 9: サンプル上のニオブフィルムの例 [14].

2.3 課題

以上では Nb/Cu 共振器の利点と製造方法に関して概 観してきた.良いことずくめのようだが,実はバルクニ オブにはない問題を抱えていることが既に 80 年代から 知られている.

図 10 はバルクと Nb/Cu 共振器の典型的な Q 値を加 速勾配の関数としてプロットした実験データである [15]. 最大加速勾配は電界放出による放射線がインターロック を動作させることで決まっている.低い電場における Q 値は,このデータではフィルムがたまたまバルクを上回っ ているが,共振器表面状態のランダムな影響が大きく場 合による.注目すべきは Q 値の勾配である.Nb/Cu 共 振器には Q-slope 問題と呼ばれる未解決問題があり [12], バルクに比べ電場を上げると急激に Q 値が下がることが 知られている.そのため LEP-II や LHC あるいは ALPI や HIE-ISOLDE のような,共振器が大きく比較的低い加 速勾配のプロジェクトでは Nb/Cu 共振器は優れている が,非常に高い加速勾配が絶対条件となる ILC 等の加速 器には現状のままでは採用が難しい.そのため Q-slope 問題を理解し解決することが Nb/Cu 共振器開発におけ る最大の課題となっている.



図 10: TESLA 型加速空洞共振器 (ILC) の Q 値比較. 四 角点はバルクニオブ, 丸点はフィルム. いずれも 1.3 GHz, 2K [15].

2.3.1 超伝導体の表面抵抗

Q-slope を理解するためには超伝導加速空洞共振器の 物理を正しく知る必要がある.Q値は表面抵抗 R_s に反 比例する量である.低い電磁場の極限における表面抵 抗は Bardeen Cooper Schrieffer (BCS)理論とその線形 応答 (摂動論)により 1950 年代には知られており,近似 的に

$$R_s(T,\omega) = R_{BCS}(T,\omega) + R_{res}$$
(2)
= $\frac{A\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta_0}{k_B T}\right) + R_{res}$ (3)

と与えられる [16].線形応答であるため電磁場の強度依存性 (非線形抵抗成分) は含まれていない.ここで第一 項は BCS 抵抗と呼ばれ,有限温度でクーパーペアが熱 励起して生じる常伝導準粒子の影響である.印加された 電磁場が直流ならば準粒子の影響はないが,交流の場合 はクーパーペアの有限インダクタンスを経由して準粒子 が表面抵抗を担う.ω は電磁場の周波数, A は平均自由 行程, コヒーレンス長, ロンドン侵入長といった超伝導 体の物性によって決まる定数であり, Δ₀ は超伝導ギャッ プである. 周波数の高い加速器では温度を下げる必要が あることが分かる.

第二項 R_{res} は残留抵抗と呼ばれ, 温度依存性の小さい 表面抵抗成分であり現在の BCS 理論では説明されない. これは冷却時に束縛された磁束の影響など, より複雑な 物理を含む. 既に述べた表面の状態によるランダムな効 果というのは主にこの項の影響と考えられる.

以上は電磁場強度の弱い極限⁵で成り立つ話であるが, 現在でも高い電磁場では確立された表面抵抗の理論は存 在せず,これが Q-slope 問題が未だに解決されていない 一つの要因であるといえる.なぜバルクでは比較的小さ い電磁場依存性がフィルムでは大きいのか,というのは 面白い問題である.いくつか理論的可能性が考えられる ので節を分けて紹介しよう.

2.3.2 BCS 理論の拡張

R_{res} だけでなく R_{BCS} も電磁場に依存して上昇するこ とが分かっているため、これは線形応答を越える物理の 存在を示唆している可能性がある.これは非平衡統計力 学の分野に属する問題であり、一般に非摂動論的計算は 困難である.従来、現象論的に超伝導ギャップが電磁場 の影響で狭まるため準粒子の熱励起が増え、表面抵抗の 上昇が予想されてきた [17].

近年になって摂動論の代わりに半古典近似を用いた手 法を表面抵抗の計算に応用する手法が開発された [18]. その結果は驚くべきことに,電磁場による表面抵抗の減 少を予言する.電子の状態密度が電磁場の影響で変化 し,結果として抵抗値は下がることが指摘された.よっ て,BCS 理論の拡張は現状では Nb/Cu 共振器における Q-slope への説明を与えない.そのかわりに近年フェル ミ研究所にて発見されたバルクのニオブに窒素をドープ させたときに生じる Q 値上昇 (anti-Q-slope)の理論と して注目されている [19]. この新しい技術は実用化され, SLAC で建設中の自由電子レーザー LCLS-II の共振器 に適用されている [20].

2.3.3 結晶構造の影響

フィルム Nb の結晶構造はバルクに比べ細かいため多 くの結晶粒界面が存在する.これが新たな R_{res} の原因に なっている可能性があり, 様々なモデルが存在する.例 を上げれば,

- 1. 結晶間トンネル効果 (Internal Tunnel Exchange; ITE) [21]
- 2. ジョセフソン接合 [22]

などである.しかしそのいずれも実験値を満足に説明す るには至っていない.これらのモデルは低電磁場で抵抗 値変化がほぼなく,ある程度の電磁場強度で急激に立ち 上がる表面抵抗を予言する.高温超伝導体のような非常 に細かい多結晶の場合には実験を良く説明するが,加速 器に用いられる比較的高いクオリティのニオブフィルム の Q-slope にはうまくフィットしない. Nb/Cu 共振器で 観測される Q-slope は,低磁場から電磁場強度の一乗か ら二乗に比例して抵抗が徐々に上昇するからである.

HIE-ISOLDE 加速空洞共振器の場合もコーティング レシピの研究開発初期段階で Q 値が一桁低かった時代 は ITE モデルで上手く説明できたが, 最適化の行われた 後ではこの効果は見えなくなっている.また, 小さいサ ンプルを用いた研究でバルクと同等サイズまで結晶を成 長させても Q-slope が消せないことが知られている.以 上より, 現在のモデルでは Q-slope の説明は難しい.

2.3.4 熱的不安定性

Nb/Cu 共振器は熱的にクエンチしないことがバルク に対する大きな利点であった.実際,実験的にも Nb/Cu 共振器では普通クエンチは観測されない.これは銅の高 い熱伝導性に起因する.しかし,ニオブフィルムと銅の 界面に問題がある場合,熱伝導冷却が十分でない場合も ありうる.その場合,共振器全体が一度にクエンチする ことはなくても,局所的にクエンチした状態(マイクロ クエンチ)が起こりうる(図 11).電磁場強度を上げてマ イクロクエンチの面積が徐々に拡がれば,Q-slopeを生 じうる.このように,Nb/Cu は熱的クエンチ問題を解決 したのではなくただ隠しているだけかもしれない.この モデルは 2016 年に R. Vaglio と V. Palmieri によって定 式化された比較的新しいアイデアである [23].



図 11: マイクロクエンチモデル

⁵実際にはニオブの熱力学的臨界磁場 $H_c = 200 \text{ mT}$ に対して印 加磁場が十分小さければそれなりの精度で摂動論が適用できると期待 できる. HIE-ISOLDE 共振器の場合, 3 mT(300 kV/m) 程度の低電 磁場領域では BCS 抵抗の電磁場強度依存性は無視できるほど小さい. この領域の Q-slope は残留抵抗の影響が主である.

HIE-ISOLDE の Q-slope はこのモデルにより解析さ れ [24], Q-slope の温度依存性を説明し, さらに他の共振 器 (Quadrapole resonator) では周波数依存性も良く説 明することが分かっている [25]. もしこの仮説が正しい のであれば, スパッタリング前に銅表面の状態を改善さ せたり, 熱伝導を上昇させるバッファー層のコーティン グなどが解決策となるだろう. 特に溶接の有無が影響を 与えている可能性があるため, HIE-ISOLDE プロジェク トでは次節のように溶接なしの共振器を新たに開発した.

2.3.5 溶接の影響

現在のクライオモジュールに設置されている QWR は同軸形状の内部・外部を独立に削り出し, 締まりばめ (shrink fit)の後に電子ビーム溶接によって接合されて いる.この溶接時の熱の影響を受けて再結晶化した銅表 面 (Heat affected zone)において, 銅結晶粒界面に小さ な亀裂が生ずることがある (図 12).マイクロクエンチモ デルによれば,この上にコーティングされたニオブフィ ルムは Q-slope を生ずる可能性がある.



図 12: 溶接痕に発生した亀裂 [8].

溶接時における亀裂の発生条件は, 材料の機械的・熱 的・化学的処理の履歴によるため非常にナイーブな問題 であり, 完全な理解には至っていない. 例え亀裂を生じ なくとも溶接痕の表面には微細な凹凸があるためフィル ムにストレスを与える. また, HIE-ISOLDE は図6のよ うに熱伝導冷却で内部から外部を間接的に冷やすが, そ の熱伝導率も溶接に強く左右される.

このような状況から, 我々は 2016 年から新たに銅ビ レットを削り出して溶接を廃した新しい QWR の開発 を行った [26]. 削りだしは一般に材料が多くかかるが, HIE-ISOLDE 共振器の場合はそもそも内部・外部部品 を削り出しているため材料費は増えない. 溶接過程を スキップしたため, 結果的に全体として 25%ほど安価に 製作することが出来た. 共振器のパフォーマンス試験 の結果は良好であり,縦型クライオスタット試験では全

53

HIE-ISOLDE 共振器中最高の Q 値を示した (図 13). こ の共振器は来年第四クライオモジュールに設置され物理 ランを担う予定である.ただし Q-slope は小さくはなっ たが依然として存在する.共振器表面積は大きいため, 溶接以外の箇所の不完全なフィルムの張り付きを完全に 制御することが今後の課題である.



図 13: 削りだし共振器の試験結果 [26]. 図5と違いクラ イオモジュール内部ではなく専用の縦型クライオスタッ トで測定されたもの.

3 **今後の展望**

以上のように Q-slope 問題はさかんに研究されている が, まだバルクニオブと最大加速勾配で競合するための 糸口はつかめていない.しかし現状の Nb/Cu 共振器で もバルクニオブとはある種相補的な「売り」をもつため, プロジェクトの性質によっては採用が考えられる.最大 到達エネルギーへの要求が必須でない場合には,主に経 済的な理由から Nb/Cu は優位性を持つ.例えば

- 1. コンパクトなスペースで安価に粒子を加速したい
- 加速器に関わらず超伝導空洞共振器の高いQ値(10⁹ 以上)を利用したい

などの場合である.前者は HIE-ISOLDE のような重イ オン加速器が代表的である.後者に関しては例えば未知 粒子探索への応用などが考えられる⁶.

もうひとつ考えられる利点として

3. 機械的に複雑な形状の超伝導体が作れる可能性

⁶ただしニオブは 200 mT の磁場で超伝導破壊が起こるので強静 磁場下のアクシオン探索などには使えない

が挙げられる [27]. 必要な電磁場構造の要求によっては, バルクのニオブでは機械的に製作が難しかったり, 冷却 が困難な形状が必要になることがある. Nb/Cu はフィ ルムであるから原理的には色々な形状に対応でき, かつ 冷却は銅が担当するので問題がない. しかしそのために はスパッタリング時のプラズマ形状の最適化という非自 明な問題があるため, 必要に応じて R&D を行う必要の ある面白い課題である.

大規模プロジェクトに関する Nb/Cu 技術の利用や, Nb/Cu 以外のフィルムも研究されているので以下に紹 介しよう.

3.1 FCC への Nb/Cu 導入可能性

Future Circular Collider (FCC) 計画とは, LHC を越 える全長 100 km のシンクロトロンをジュネーブ地下に 作ろうという壮大な計画である. 電子陽電子コライダー (TLEP) ではヒッグスの精密測定を行い, 100 TeV 巨大 ハドロンコライダーで未知粒子探索を行う. LEP-II や LHC で Nb/Cu 共振器が使用されていることからも明 らかなように, このような巨大コライダーの加速空洞共 振器に Nb/Cu 技術が採用される可能性がある.

具体的には現状で加速器周波数に 2 オプションがあ る [28].

- 1. 800 MHz, 2.0 K
- 2. 400 MHz, 4.5 K

これは 400 MHz で運用されている LHC を前段加速器と して用いる際の必要条件である.前者の場合はスウェー デンの European Spallation Source (ESS) で開発され ている 704 MHz のバルクニオブ共振器の技術を応用す ることになる.周波数が高いため BCS 抵抗が大きく,超 流動へリウムによる 2.0 K への冷却が基本的に不可欠で ある.

後者ではLHCと同じく巨大な加速空洞共振器になる ためバルクでは大量生産が困難であり,Nb/Cu 共振器 が最も現実的な解となる.目指す物理によって要求され る加速勾配が異なるが,Q-slope 問題の解決ができれば Nb/Cu 採用の決定打となるだろう.

3.2 Nb/Cu以外のフィルム

薄膜超伝導はなにもニオブだけではない.より転移温 度や転移磁場の高い Nb₃Sn フィルムがブレイクスルー を産むことが期待されている.現在 Cornell 大学におい てバルクのニオブの上に Nb₃Sn を形成する研究が進ん でいる [29].ここでは二種の異なる金属の界面が存在す るため,特に冷却時の熱電効果に関して Nb/Cu 研究の 知見が役に立つと考えられる.

バルクのニオブを基板に使用した場合, 例え Nb₃Sn で 非常に高い Q 値を実現できても材料価格の問題は解決 できない. そこで銅の上に Nb₃Sn のフィルムをコーティ ングする研究も行われている. 単一ニオブをコーティン グする Nb/Cu とは異なり, 銅表面上に一様に合金結晶 を生成するレシピの実現は大きな課題である. CERN に おいては Nb₃Sn/Cu のサンプルを用いたコーティング パラメタの最適化がおこなわれている [30].

4 最後に

CERN における原子核実験のアップグレード計画で ある HIE-ISOLDE 線形超伝導加速器について概観した. 特に CERN で開発運用中の薄膜超伝導加速空洞共振器 は目的によっては有用な技術であることを指摘した.未 解決の Q-slope 問題に関する研究, およびさらに将来に 向けた研究も紹介した. Nb/Cu 共振器の応用先が増え ることを願ってやまない.

謝辞

この記事は以下の方々との共同研究によるものです. まず私のスーパーバイザーであり HIE-ISOLDE プロジェ クト副リーダーでもある Walter Venturini Delsolaro 氏 には特別のご支援をいただきました. ISOLDE に関し て Maria Jose Garcia Borge 氏, HIE-ISOLDE に関し て Yacine Kadi 氏, Nb/Cu 共振器に関して Sarah Aull 氏, 無溶接共振器に関して Silvia Teixeira Lopez 氏, HIE-ISOLDE 共振器のスパッタリングに関して Alban Sublet 氏, 新しいコーティングに関しては Guillaume Rosaz 氏 との有益な議論に感謝します. この他にも ISOLDE コ ラボレーション, HIE-ISOLDE コラボレーション, およ び CERN の BE-RF グループ, TE デパートメント, EN デパートメント等々非常に多くの皆様に支えられたプロ ジェクトです. この場を借りてお礼申し上げます.

参考文献

- M. Borge and Y. Kadi, "ISOLDE at CERN", Nuclear Physics News 26, 4 (2016).
- [2] K. Blaum, et al., J. Phys. B 36, 921 (2003).
- [3] J. C. Hardy and I. S. Towner, Phys. Rev. C 91, 025501 (2015).

- [4] S. Eliseev, et al., Phys. Rev. Lett. 115, 062501 (2015).
- [5] A. Faessler *et al.*, Phys. Rev. C **91**, 045505 (2015).
- [6] L. P. Gaffney, et al., Nature 497, 199 (2013).
- [7] Y. Kadi, et al., J. Phys. G 44, 084003 (2017).
- [8] W. V. Delsolaro, et al., "HIE-ISOLDE cavity production and cryomodule commissioning: lessons learned", 18th International Conference on RF Superconductivity, Lanzhou, China, July 17–21, 2017.
- [9] Y. Kadi, et al., "Status of Radioactive Ion Beam Post-Acceleration at CERN-ISOLDE", Proc. IPAC2017, pp. 2466–2469.
- [10] I. Ben-Zvi and J. M. Brennan, Nucl. Instrum. Meth. 212, 73 (1983).
- [11] J. R. Delayen, Nucl. Instrum. Meth. A 258, 15 (1987).
- [12] C. Benvenuti, et al., Physica C **316**, 153 (1999).
- [13] C. Benvenuti, et al., Appl. Phys. Lett. 45, 583 (1984).
- [14] A. Sublet, et al., "Niobium coated HIE-ISOLDE QWR superconducting accelerating cavities coating process and film characterization", in 6th International Workshop on Thin Films, INFN-LNL Legnaro, Italy, October 6–8, 2014.
- [15] S. Aull and T.Junginger, "Cold RF tests of M.2.3 with HIPIMS coating", EDMS: 362166 v.1.
- [16] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 108, 1175 (1957); D. C. Mattis and J. Bardeen, Phys. Rev. 111, 412 (1958);
 A. A. Abrikosov, L. P. Gor'kov, I. M. Khalatnikov, JTEP, 8, 1, 182 (1959); J. Halbritter, Z. Physik 266, 209 (1974)
- [17] A. Gurevich, Physica C 441, 38 (2006).
- [18] A. Gurevich Phy. Rev. Lett. **113**, 087001 (2014).
- [19] J. T. Maniscalco, et al., J. Apple. Phys. 121, 043910 (2017).

- [20] D. Gonnella, "Results and New Insights from Vertical Testing of LCLS-II Production Cavities", 18th International Conference on RF Superconductivity, Lanzhou, China, July 17–21, 2017.
- [21] L. P. Gaffney, et al., Nature 497, 199 (2013).
- [22] C. Attanasio, et al., Phys. Rev. B 43, 6128 (1991).
- [23] V. Palmieri and R. Vaglio, Supercond. Sci. Technol 29, 015004 (2016).
- [24] S. Calatroni, Phys. Rev. Accel. Beams 19, 092002 (2016).
- [25] S. Aull, "Trapped flux measurements and thermal boundary resistance analysis for an ECR Nb film", 7th International Workshop on Thin Films and New Ideas for Pushing the Limits of RF Superconductivity, Jefferson Lab, US, July 27–29, 2016.
- [26] S. T. Lopez, et al., "A Seamless Quarter-wave Resonator for HIE-ISOLDE", 18th International Conference on RF Superconductivity, Lanzhou, China, July 17–21, 2017.
- [27] P. B. Welander, et al., "A Test Cavity and Cryostat for Rapid RF Characterization of Superconducting Materials", 7th International Workshop on Thin Films, Jefferson National Accelerator Facility, USA, July 27–29, 2016
- [28] O. Brunner, et al., "RF system parameters for Z, W, H and tt", FCC Week 2016, Rome, Italy, 2016.
- [29] S. Posen, et al., Appl. Phys. Lett. 106, 082601 (2015).
- [30] G. J. Rosaz, et al., "SRF Cavity Coatings: Review of Alternative Materials and Coating Techniques", 18th International Conference on RF Superconductivity, Lanzhou, China, July 17–21, 2017.