

解 説

超伝導空洞技術：技術研修会（2）

加古 永治*

Technologies for Superconducting RF Cavities, (2)

Eiji KAKO *

Abstract

Essential technologies for achieving high performances in superconducting RF cavities are reviewed. After explanation of many useful experimental results obtained during the R&D phase in 1.3 GHz single-cell cavities, application to 9-cell cavities for construction of actual accelerators are presented. Recent efforts for improving cavity performance and future prospects on superconducting RF cavities are introduced.

1. はじめに

本論文は、2015年夏に敦賀市で開催された第12回日本加速器学会年会における超伝導空洞技術に関する技術研修会での発表資料を基にした解説である。前号では、高加速電界応用を目的とした1.3 GHz単セル超伝導空洞の開発初期に経験した数々の技術的問題点について記述した¹⁾。引き続き本編では、第2日の講義内容に関連する1.3 GHz単セル超伝導空洞での性能向上に向けたその後の過程を報告し、9セル超伝導空洞への適用と高加速電界の達成を解説し、さらに今後の展望についてまとめる。

超伝導加速器の心臓部はニオブ製超伝導空洞であるが、ビームを安定に加速するためには、高周波電力を空洞に供給するための入力結合器、ビームに誘起された有害な高調波モードを減衰させる高調波結合器、空洞の共振周波数を微調整するチューナー、磁気シールドや熱シールドなどが必要であり、これらの周辺機器と空洞本体が総合的に調和のとれたクライオモジュールの設計が重要となる。TRISTAN用508 MHzクライオモジュールをはじめとし、これまでにKEKで開発されたクライオモジュールを、**図1**にまとめて示す。

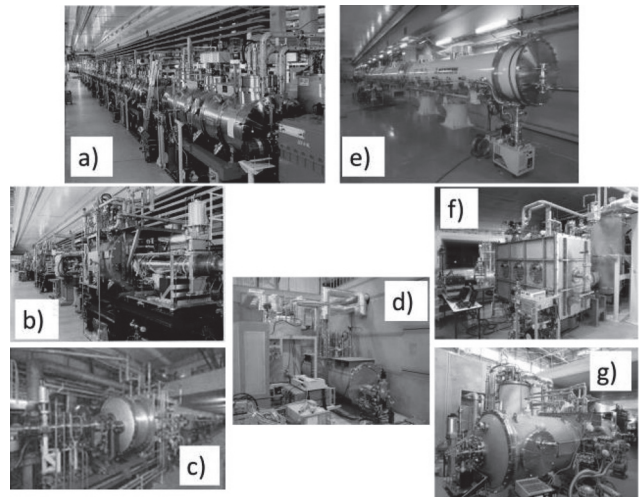


図1 KEKで開発されたクライオモジュール。a) TRISTAN Cryomodule²⁾, b) KEKB Cryomodule³⁾, c) KEKB-Crab Cryomodule⁴⁾, d) JADS Cryomodule⁵⁾, e) STF Cryomodule⁶⁾, f) cERL Injector Cryomodule⁷⁾, g) cERL Main-Linac Cryomodule⁸⁾。

2. TRISTAN から TESLA へ（後編）

2.1 水素病 (Q-disease)

1990年頃 DESY (独) では HERA 用 500 MHz-5セル空洞の開発が行われており、空洞単体試験の縦測定では通常の Q_0 値が得られるが、クライオモジュールに組み込み後の冷却試験では、 Q_0 値の低下する現象が頻繁に観測された。これは試験シ

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

システム特有の熱容量の差による空洞の冷却速度の違いが要因と考えられ、DESYでは図2に示すように冷却速度を変えた確認実験が行われた。さらに、Saclay（仏）では図3に示すように冷却途中での保持温度と保持時間を変えた実験を行い、100 Kから150 Kの温度領域で数時間保持することで著しい Q_0 値の低下が引き起こされることが示された。一方、室温から低温まで2、3時間で急速冷却される場合には Q_0 値の低下が観測されないことが分かった。この Q_0 値の低下現象をQ-diseaseと呼び、その原因は、ニオブ内部の吸蔵水素が100 K付近の温度でニオブ表面に析出してニオブ水素化物を形成し、表面抵抗が大きい超伝導体として高周波損失を増大させるためと理解される¹¹⁾ことから、「水素病」とも言う。したがって、この Q_0 値の低下現象を回避するために、

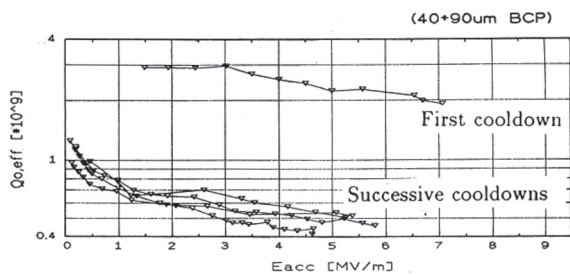


図2 冷却速度を変えた場合に観測される Q_0 値の変化を示すDESYでの実験結果⁹⁾。

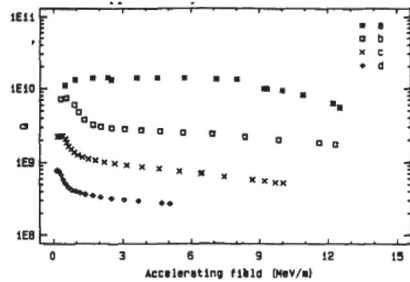
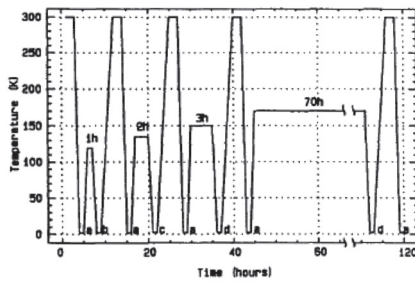


図3 Q_0 値の低下を示すSaclayでの実験結果¹⁰⁾。(上)冷却途中での保持温度と保持時間、(下)各冷却条件での2 K冷却後の Q_0 値の変化。

空洞の水素脱ガスを目的とする700～800°Cで数時間程度の真空熱処理を行うことが有効である。

2.2 高圧水洗浄 (HPR)

半導体産業におけるシリコンウェハの清浄化技術として、1990年頃にはすでに高圧力流体ジェットを用いたクリーニング法¹²⁾が開発されていた。超純水を用いた高圧水洗浄 (HPR, High Pressure water Rinsing) の技術を超伝導空洞に初めて応用したのはCERNであり、その効果は図4に示すようにニオブ薄膜空洞において確認された。その後、JLabにおいて図5に示すようなニオブ空洞についての検証実験が行われ、電界放出電子 (フィールドエミッション) の放出源がHPRによって除去されることが実証された。また、KEKでは図6に示すように、ウェハ上の

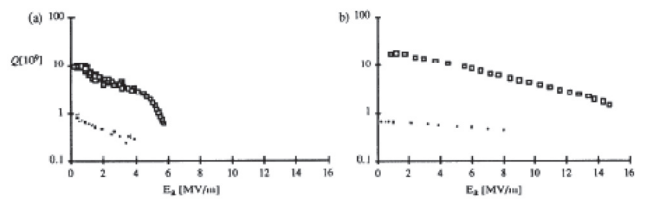


図4 CERNにおける1.5 GHzニオブ薄膜銅空洞でのHPRによる有効性の実証実験¹³⁾。(左)HPR前、(右)HPR後。

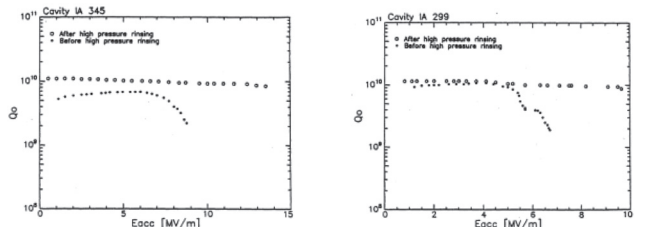


図5 JLabにおける1.5 GHzニオブ空洞でのHPRの有効性の検証実験 (HPR前後での比較、2例)¹⁴⁾。

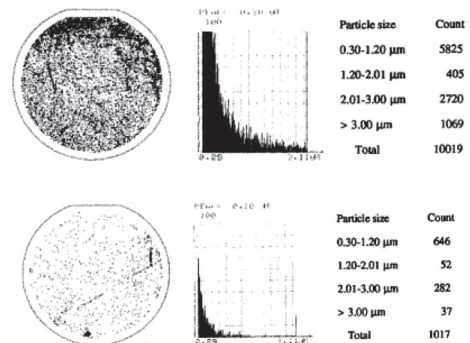


図6 KEKにおけるシリコンウェハを用いたゴミの除去に関するHPRの有効性の検証実験¹⁵⁾。

ゴミの除去に関する模擬実験が行われ、HPRの有効性がさらに明確となった。このように、電界放出電子を抑制する手段として、HPRの有効性は重要な役割を明確に担っている。

2.3 高加速電界の達成

開発初期に発生した数々の問題点（前号に記述¹⁾）を克服した1994年以降のKEKでは、EBW条件の改善、EPパラメータの最適化、HPRの圧力や時間の最適化、クリーンルーム内組立の向上などによって、**図7**に示すように25 MV/m以上の高加速電界が再現性よく達成されるようになった。さらに、**図8**に示すように1空洞において、理論的空洞性能限界に近い40 MV/mの加速電界が達成するまでに至った。

2.4 最大加速電界の温度依存性

空洞内表面での高周波損失により発生する熱流束は、ニオブ壁の熱伝導によって空洞の外表面へ伝搬し、He-Iでは核沸騰により、He-IIでは超流動ヘリウムにより冷却される。いずれの場合でも、過大な熱流束によって膜沸騰へと進展し、冷却能力が著しく悪化する結果として、表面欠陥がなくとも空洞表面全体が発熱(Global heatingという)して超伝導破壊(クエンチ)が引き起こされる。

4空洞について超伝導破壊が発生する加速電界の温度依存性が測定され、その結果を**図9**に示す。20 MV/m以下の低い最大加速電界で制限された2空洞は、不完全な溶接による表面欠陥がクエンチの原因であり、1.8 K~4.2 Kの間で発熱場所は同一であった。一方、30 MV/m以上の高い最大加速電界を達成した2空洞は、 λ -point(2.17 K)上で加速電界と Q_0 値の両方で急激な低下が観測され(**図8**参照)、クエンチ時の発熱場所も変化した。これは、He-IとHe-IIとの間での異なる冷却メカニズムによる冷却能力の差に起因している。He-Iでは空洞下側セルでの発熱が観測され、Heに対して下向きに直面する場所では、発生するバブルの除去が容易ではなく、核沸騰による冷却効率が悪くなり、膜沸騰が起こりやすいと考えられる。40 MV/mを達成した空洞において、He-I状態における超伝導破壊を発生する熱流束の温度依存性を**図10**に示す。ここで、4.2 Kにおける臨界熱流束が 0.2 W/cm^2 とすると、1.3 GHz空洞では18 MV/m、より低いBCS抵抗値をもつ500 MHz空洞でも22 MV/mが達成可能な最大加速電界と予想される。

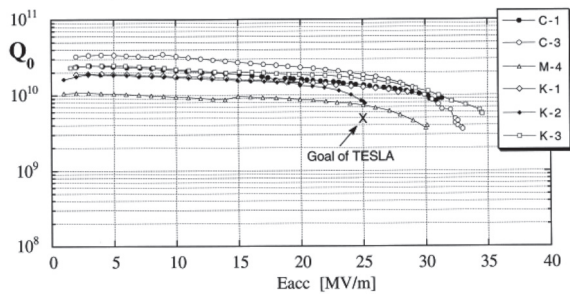


図7 TESLAの目標値 ($E_{acc} > 25 \text{ MV/m}$, $Q_0 > 5 \times 10^9$) を超える空洞性能を達成した6台の単セル空洞。

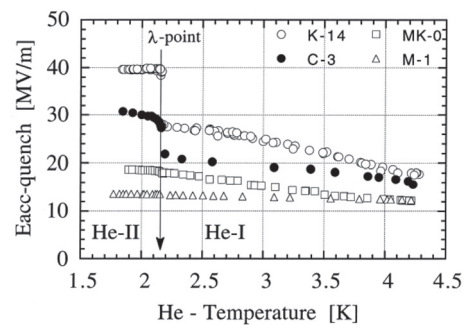


図9 最大加速電界 (E_{acc} -quench) の温度依存性。

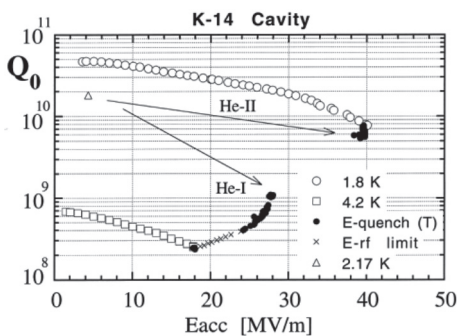


図8 40 MV/mを達成した空洞の Q_0 - E_{acc} 曲線。

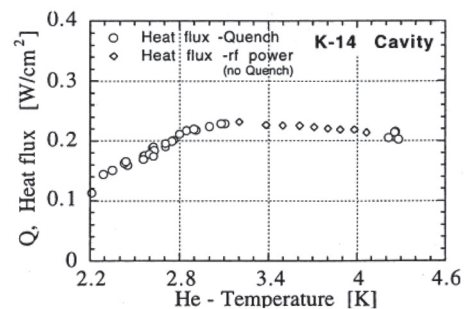


図10 He-I状態で膜沸騰によって超伝導破壊が引き起こされる熱流束 (Q) の温度依存性。

3. TESLA から ILC へ（単セル空洞）

3.1 Q-Slope

世界の各研究所において高圧水洗浄（HPR）の技術が導入され、1996年頃には電界放出電子の発生が著しく抑制され、25 MV/m 以上の高加速電界が高頻度で達成されるようになり、新しい現象が見えてきた。図 11 に示すように、電界放出電子や X 線が検出されなくても、20 MV/m から始まる Q_0 値の著しい悪化現象は、Q-Slope と呼ばれ Saclay（仏）で測定されたすべての空洞について例外なく同様に観測された。また、図 12 に示すように 3 台の KEK 空洞を Saclay に持ち込んで処理・測定を行った場合も同様な結果であった（図 7 に示す KEK での測定結果と比較すると、全く異なることが分かる）。空洞の表面温度測定から、 Q_0 値の低下に伴って空洞内表面全体での一様な温度上昇が観測され、この Q_0 値の悪化現象は、空洞の最表面層の性質（超伝導特性）に関係している現象と考えられた。

3.2 化学研磨（CP）と電解研磨（EP）

空洞の表面処理技術として、1996年頃の世界

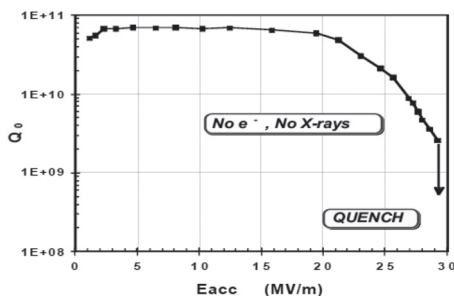


図 11 Saclay で観測された Q-Slope の現象¹⁶⁾。

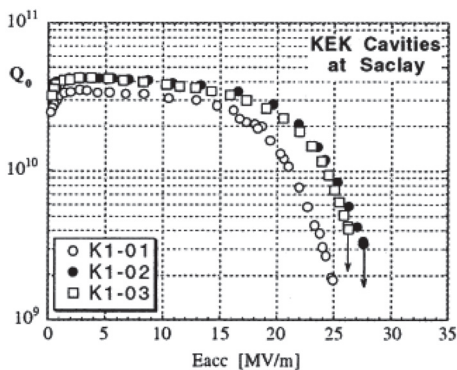


図 12 3 台の単セル KEK 空洞を Saclay で処理・測定を行った時に同様に起こった Q-Slope の実験結果。

の各研究所では化学研磨（CP, Chemical Polishing）を用いており、一方 KEK のみが電解研磨（EP, Electro-Polishing）を採用していた¹⁷⁾。当時の KEK で行われた CP と EP との処理に関する測定結果のまとめを図 13 に示す。ここで、EP により処理された空洞が、CP で処理された空洞より優れた高電界性能を有することが示唆されている。

3.3 電解研磨による空洞性能の改善

空洞性能における表面処理の効果をより組織的に試験するために、Saclay で製作・性能測定が行われた 3 台の空洞が KEK に送られ、KEK において各種表面処理による性能評価が行われた。図 14 に、3 空洞の Saclay での測定結果（上）と KEK における EP 後の測定結果（下）を示す。いずれの空洞においても、30 MV/m 以上の高加速電界が著しい Q_0 値の悪化なく達成されており、また EP 処理空洞においてはニオブ材料・熱処理・RRR などに依存せず高加速電界が得られることも示している。さらに、この EP の効果をより直接的に確認する目的で、EP 処理空洞に CP を行った測定結果を図 15（上）に示す。60 μ m の CP 後ではクエンチで制限される最大加速電界が低下し、 Q_0 値の悪化現象も再び起こっている。さらに 50 μ m の CP 後には、空洞性能は一段と悪化した。この空洞に再び EP を行くと、図 15（下）に示すように空洞性能は以前の状態に回復した。これら一連の実験結果から、EP による空洞性能の改善の効果がより明確になった。

3.4 100°C ベーキングの効果

Saclay と KEK における表面処理に関する相違点として、研磨方法（CP, EP）の他に、水洗後の乾燥方法が異なる。Saclay では HPR 後にクリー

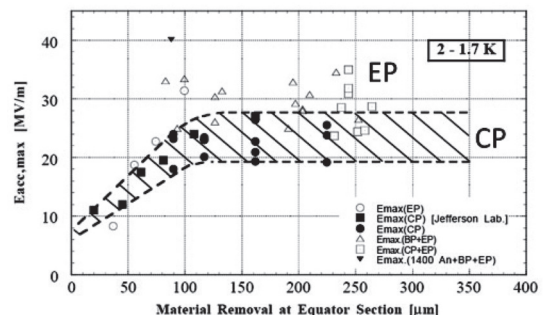


図 13 CP（●，■）および EP（○，□，△）による研磨量と最大加速電界との関係¹⁸⁾。

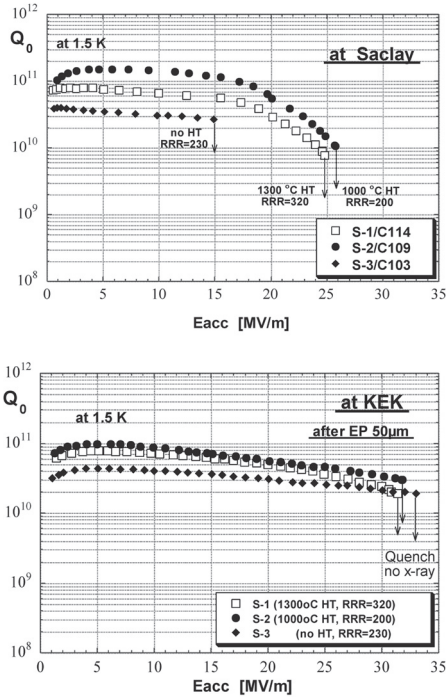


図 14 EPによる空洞性能の改善。(上) SaclayでのCP処理空洞による測定結果, (下) 同じ空洞をKEKにて50 μm のEPを行った後の測定結果。

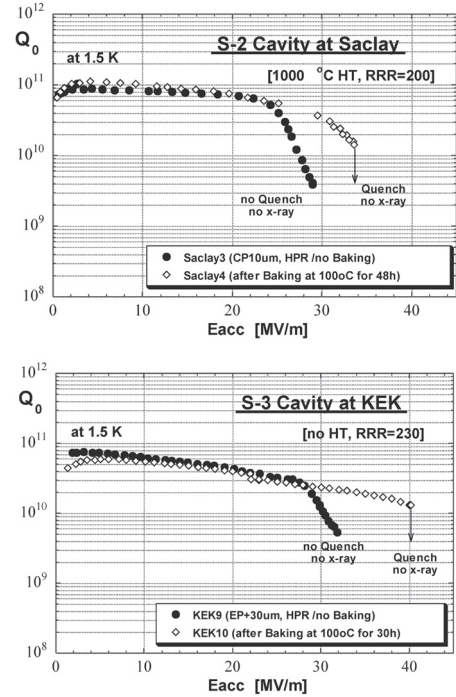


図 16 100°Cベーキングの効果。(上) SaclayでのCP空洞のベーキング前後の比較, (下) KEKでのEP空洞のベーキング前後の比較。

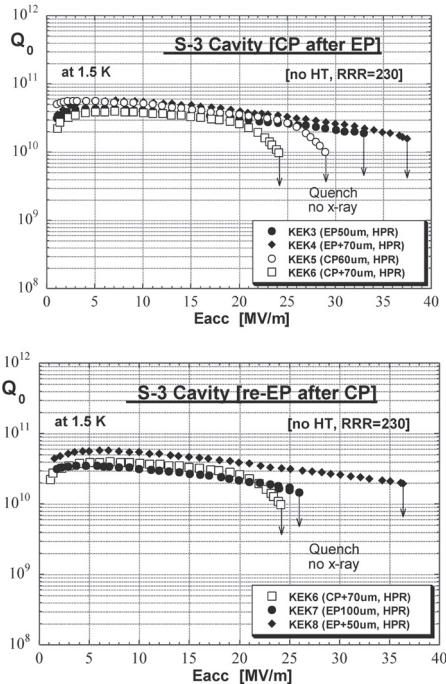


図 15 EPの有効性の確認実験。(上)EP後にCPを行った場合の空洞性能の低下, (下)その後再EPを行った場合の性能改善の実験結果。

ンルーム内において清浄空気流下で3時間放置することで乾燥させるが, KEKでは真空引き後にベーキングを行って空洞を乾燥させる。図 16は,

CP空洞とEP空洞における100°Cベーキング前後での比較を示している。いずれの場合においても, ベーキング前では著しい Q_0 値の悪化現象が観測され, ベーキング後には Q_0 値の低下が改善している。

したがって, Q-Slopeの対処策として, 高加速電界を Q_0 値の悪化なく安定に達成するためには, EPによる表面研磨と100°C程度のベーキングを相乗的に行うことが本質的に重要であることが示された。また, このQ-Slopeが起こる原因については, 酸素の拡散モデル¹⁹⁾によって説明されている。

3.5 高加速電界達成のための表面処理技術

これまでに述べてきた超伝導空洞の性能に関する諸現象を理解し, その回避する手段を取り入れることにより, 高加速電界を達成するための基本的な表面処理技術として, 図 17に示されるような一連の工程が, 現在確立されており, 多くの世界中の研究所において標準的な表面処理技術として適用されている。

3.6 空洞性能を制限する現象

超伝導空洞に特有な空洞性能を制限する現象について, Q_0 値の低下と加速電界の限界に関して,

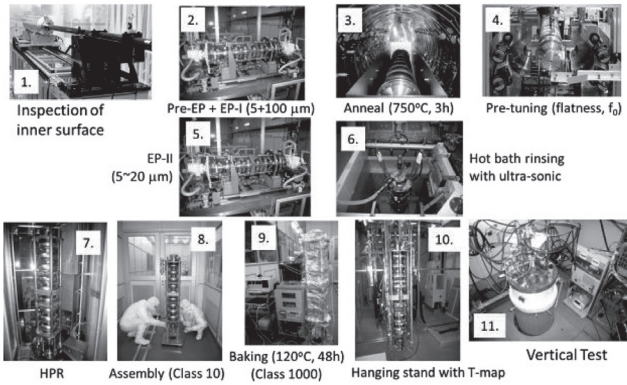


図 17 高加速電界を達成するための表面処理工程の確立 (1. 内面検査, 2. 初回多量 EP, 3. 真空熱処理, 4. プリチューニング, 5. 最終少量 EP, 6. 温水超音波洗浄, 7. 高圧水洗浄, 8. クリーンルーム内組立, 9. 100 ~ 120°Cベーキング, 10. たて型スタンド吊上げ, 11. たて型クライオスタット).

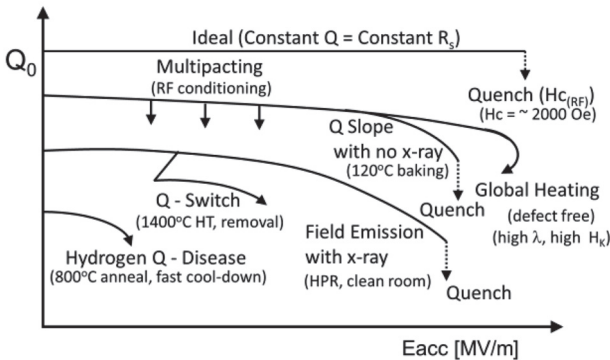


図 18 超伝導空洞において空洞性能を制限する現象のまとめ (カッコ内はその対処法).

これまでに種々の説明を行ってきたが、そのまとめを図 18 に示す (前号の図 3¹⁾ と比較して、かなり複雑である)。様々な空洞性能を制限する現象に対して、一つ一つ適切なその対処法をとることで、より高加速電界へと道が切り開かれてきた。また、より高加速電界の領域に進めば、これまでに見ることができなかった未知の現象が出現することにも繋がる。

4. TESLA から ILC へ (9 セル空洞)

4.1 DESY との共同研究

単セル空洞において電解研磨 (EP) による空洞性能の改善の効果がより明確に示された 1999 年以降、9 セル TESLA 空洞²⁰⁾ へ EP を適用し、実用空洞での高加速電界の達成を実証する方向へと開発を展開することが、DESY との共同研究によって実施された。図 19 に示すように、DESY

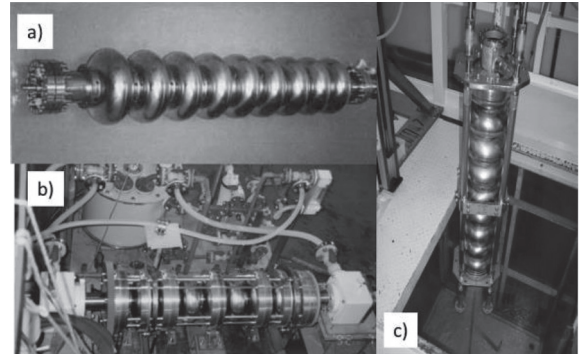


図 19 a) DESY からの最初の 9 セル TESLA 空洞, b) 9 セル空洞用 EP 装置, c) 9 セル空洞用 HPR 装置.

表 1 KEK で EP を行った 15 台の DESY-9 セル空洞.

No.	Cavity	Heat Treatment	Date of EP
1	P-1	1400°C HT	1999, May ~
2	A16	1400°C HT	2000, July 04
3	Z49	1400°C HT	2000, Aug. 22
4	AC63	800°C HT	2000, Oct. 24
5	S35	1400°C HT	2001, Feb. 20
6	Z50	1400°C HT	2001, Feb. 28
7	AC70	800°C HT	2001, May 08
8	AC71	800°C HT	2001, May 15
9	AC70	800°C HT	2001, Nov. 14
10	AC74	800°C HT	2001, Nov. 16
11	AC72	1400°C HT	2001, Nov. 20
12	AC73	1400°C HT	2002, Apr. 19
13	AC76	800°C HT	2002, Apr. 23
14	AC75	1400°C HT	2002, Apr. 25
15	AC78	1400°C HT	2002, Apr. 30

から輸送されたプロトタイプの 9 セル TESLA 空洞 (P-1) を用いて、9 セル空洞用電解研磨システムや 9 セル空洞用 HPR システムなどの表面処理装置が野村鍍金 (株) 鹿沼工場内に準備された。一連の表面処理工程後には、KEK のクリーンルームにて組立・真空排気・ベーキングが行われ、DESY に航空便で輸送された。表 1 に示されるように、2000 年には 3 台の 9 セル空洞が、2001 年には 7 台の 9 セル空洞が、2002 年には 4 台の 9 セル空洞が、KEK で EP 処理された。このように、4 年間で合計 15 台の EP 処理空洞が KEK から DESY に輸送され、低温での空洞性能の確認試験が DESY において着実に実施された。この間、DESY での性能測定において、初期の空洞では、フィールドエミッションによる制限で十分な空洞性能が得られず、クリーンルーム内での KEK の組立方法、KEK から DESY への輸送方法、DESY

での測定前の表面処理方法, DESY での空洞性能の試験方法などについて, 様々な工夫と改善案が KEK と DESY との協力で実施された. 最終的に, 2002 年に行われた空洞性能試験において, 図 20 (上) に示すように, 4 台の 9 セル空洞において 35 MV/m の加速電界を Q_0 値の大きな低下なく達成することができた. これにより, 9 セル空洞での EP による高加速電界の達成が実証された. また, 図 20 (下) に示されているように, 図 15 と同様な EP 後の CP による空洞性能の低下に関する検証実験も行われ, 矛盾のない結果が得られている. この一連の空洞性能実験では, 熱処理温度の異なる EP 処理空洞についての空洞性能の比較が含まれており, 図 21 (上) に示されているように, 800°C と 1400°C の熱処理について, 両者で明確な差がないことが確認された.

9 セル空洞の性能試験時に行われるパスバンド測定から得られるセル毎の到達加速電界の評価について, これら一連の EP 処理空洞とこれまでの DESY における CP 処理空洞との比較が図 21 (下) に示されており, 高加速電界達成のためには, EP 処理が必要不可欠であることが再度明確に実

証された. ここで, KEK と DESY での共同研究による 9 セル空洞の測定結果からの確認事項は, 1. EP による高電界性能の達成, 2. EP 後の CP による性能低下, 3. 10 μ m 以下の CP での性能低下は許容範囲, 4. 1400°C の高温熱処理の不要, 5. EP の有効性, としてまとめられる.

本件の一連の研究成果は, 2004 年 8 月に発表された国際リニアコライダー (ILC, International Linear Collider) における超伝導空洞の採択²²⁾ に多大な影響を与えたと筆者は考える.

4.2 STF における空洞性能評価

2005 年より開始された超伝導高周波試験施設 (STF, Superconducting RF Test Facility) における ILC 用 9 セル TESLA-like 空洞²³⁾ (通称, STF-9 セル空洞) の開発は順調に進行しており, 2015 年までの 10 年間に 30 台以上の 9 セル空洞が製作され, 図 22 (上) に示すように空洞性能の確認試験が繰り返し実施されている. 最近では, 図 22 (下) に示されるように, 空洞単体での目標性能である 35 MV/m 以上の加速電界が数多くの 9 セル空洞で達成できるようになり, 著しく進展している.

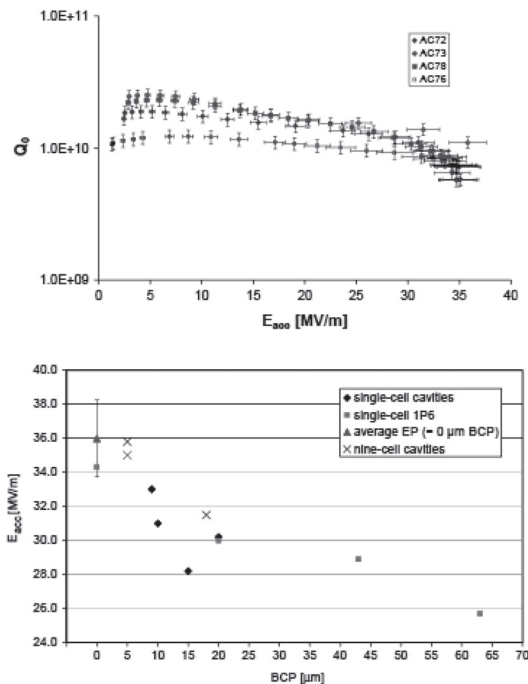


図 20 KEK で EP を行った 9 セル空洞の DESY での測定結果²¹⁾. (上) 35 MV/m を達成した 4 空洞, (下) EP 後の CP による空洞性能の低下.

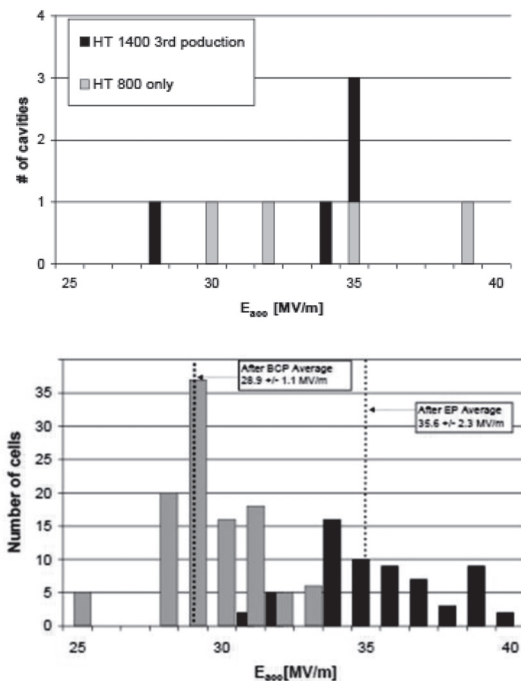


図 21 DESY での 9 セル空洞の測定結果のまとめ²¹⁾. (上) 800°C と 1400°C での熱処理温度による空洞性能の比較, (下) CP 空洞と EP 空洞でのパスバンド測定によるセル毎の到達加速電界の比較.

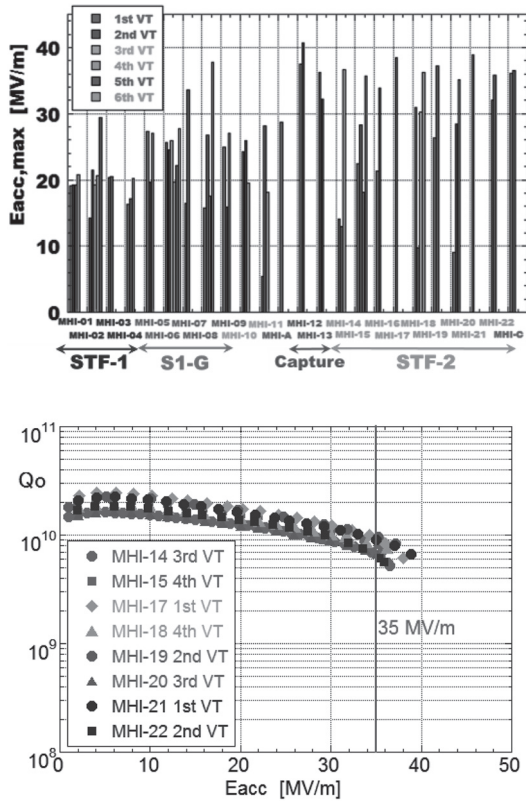


図 22 STFにおける9セル空洞の性能評価試験のまとめ²³⁾。(上) 23 空洞について 65 回のたて測定で達成された最大加速電界のまとめ、(下) ILC の仕様である 35 MV/m 以上 ($Q_0 > 8 \times 10^9$) の加速電界を達成した STF2 クライオモジュール用 9 セル空洞 8 台の Q_0 - E_{acc} 曲線。

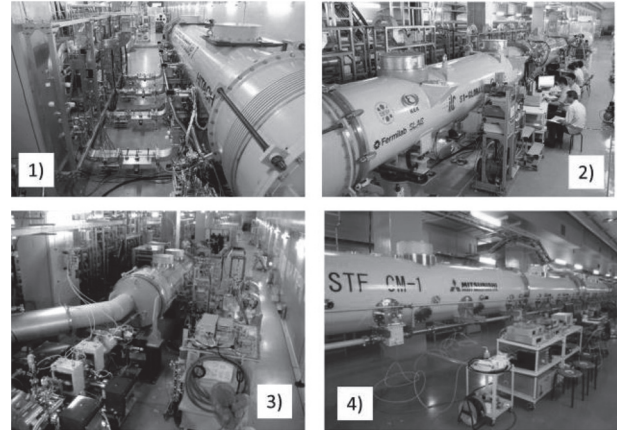


図 23 STFにおけるクライオモジュール試験 (2008 年～2015 年). 1) STF1 Cryomodule⁶⁾, 2) S1-Global Cryomodule²⁴⁾, 3) STF2-Capture Cryomodule²⁵⁾, 4) STF2-CM1+2a Cryomodule²⁶⁾.

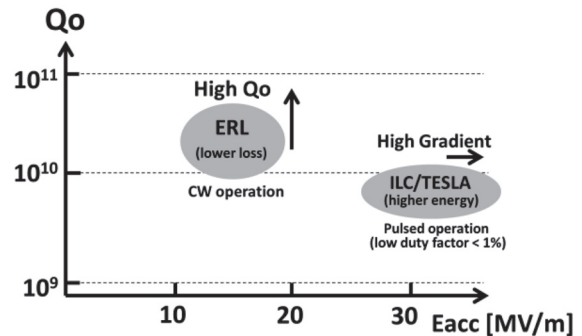


図 24 今後の開発の方向性を示す Q_0 - E_{acc} 図。

4.3 STFにおけるクライオモジュール試験

超伝導空洞単体での空洞性能と同様に、クライオモジュールに組込んだ状態での空洞性能の確認試験が重要である。KEKで独自に開発された STF-2 インプットカップラー、Slide-Jack 型周波数チューナー、ヘリウム槽内蔵型磁気シールド、チタン製ヘリウム槽タンクなどの周辺機器を STF-9 セル空洞に装着して、大電力高周波源を用いたクライオモジュールでの総合冷却試験で空洞性能が評価される。これまでに STF では、図 23 に示すように 4 台のクライオモジュールが建設され、冷却試験が実施された。トンネル内でのビームパイプやゲート弁などの取付け作業時に混入する微小汚染物質を原因とするフィールドエミッションの発生による空洞性能の低下現象が現在の最重要課題となっており、トンネル内でのクリーン環境の整備改善が今後の必須事項である。

5. 最近の話題から

5.1 高 Q 値と高電界

最近の超伝導空洞開発の方向性を示す Q_0 - E_{acc} を図 24 に示す。ILC (International Linear Collider) では、30 MV/m 以上の高い加速電界を低いデューティー (1%以下) でパルス運転する加速器であり、一方 ERL (Energy Recovery Linac) では比較的大電流を CW 運転する加速器という特徴をもつ。将来の大型加速器計画である両者にとって、コスト低減化を目指す観点から開発の方向性が異なる。ILC では、できるだけ高いエネルギーを短い距離で加速するために高い加速電界を達成できる超伝導空洞の開発が重要であるが、ERL では CW 運転での冷凍機負荷を少しでも軽減するために、空洞損失が小さく、 Q_0 値の高い超伝導空洞の開発が重要となる。両者の空洞開発において、電界放出電子 (フィールドエミッ

ション)による空洞性能の低下を抑制することは、共通の重要な課題である。最近の超伝導空洞の開発動向として、CW 運転での高い Q_0 値を目指した開発研究が世界中の研究所において、積極的に推進されている。

5.2 高 Q 値を達成するための方策

残留磁界の低減

残留抵抗 (R_{res}) の原因となる空洞周辺の残留磁界を効率よく遮蔽し²⁷⁾、空洞付近の磁性材料部品を徹底的に排除することで²⁸⁾、1 mGauss 以下にまで残留磁界を低減化することが、高 Q_0 値達成のために本質的に重要である。

冷却速度と熱電流

冷却途中で、ニオブ製超伝導空洞とチタン製ヘリウム槽タンクの異種材料接合部に温度勾配がある場合に熱電流が発生する。超伝導空洞が常伝導から超伝導に転移する瞬間、この熱電流に誘起された磁界が超伝導空洞にトラップされるため、 Q_0 値を低下させる原因となる²⁹⁾。適切な冷却速度で、空洞の温度勾配を制御することが重要となる。

窒素ドープ

水素脱ガスを目的とする 800°C での真空熱処理中に数 mTorr の窒素ガスを数分間導入することで、空洞の Q_0 値が著しく改善することが 2012 年に FNAL において発見された。これは、最表面層に形成された窒化ニオブを EP 処理で除去した後で、ニオブ表面内部にドープされた窒素の不純物効果によって BCS 抵抗 (R_{BCS}) が減少することで説明されている³⁰⁾。現在、様々な方向からの検証実験と活発な議論が各研究所において展開されている。

5.3 低ベータ空洞の開発

これまで KEK では、主に電子や陽電子を加速するための楕円形状をもつ高ベータ型超伝導空洞の開発が行われてきた。最近では、陽子や重イオンを加速するための低ベータ型と呼ばれる超伝導空洞の開発が、日本でも開始されている。図 25 に示すように、青森県六ヶ所村に建設中の IFMIF 加速器では 8 台の半波長型 (HWR, Half-Wave Resonator) 超伝導空洞を内蔵するクライオモジュールが設置予定であり、埼玉県和光市の理研では重イオン加速用の 1/4 波長型 (QWR, Quarter-Wave Resonator) 超伝導空洞の開発が進行中である。さらに、KEK でも将来の数 MW

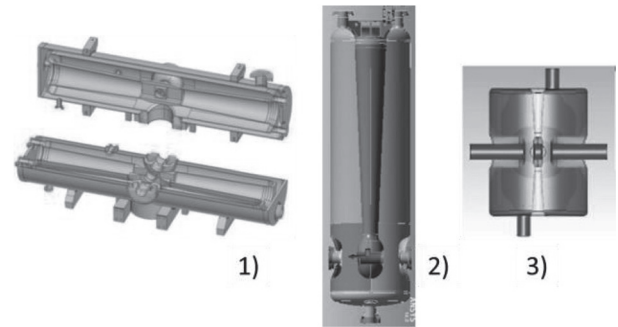


図 25 日本の建設計画である超伝導加速器用に開発中の低ベータ型超伝導空洞。1) IFMIF, 175 MHz-HWR 空洞³¹⁾、2) RIKEN, 80 MHz-QWR 空洞³²⁾、3) KEK, Proton-Driver, 325 MHz-HWR 空洞³³⁾。

級の超伝導陽子加速器計画への応用を目指して、半波長型超伝導空洞の開発に着手した。

6. まとめと今後の展望

1990 年から 2016 年までの超伝導空洞に関わる技術進歩を俯瞰して、この解説を執筆しました。最後に、次に述べる 2 項目に特に重点を置いた開発研究を、遂行すべきと考えています。

- 超伝導空洞システムは、クライオモジュールを含めて空洞本体と周辺機器がシステム全体として調和のとれた設計であることが本質的に重要。
- 超伝導加速器は、信頼性の高い機器の開発に重点を置いて展開し、その建設は段階的に進めることが重要。

今後、超伝導加速器の応用は益々広範囲に拡大し、著しい進歩・発展をすることでしょう。次の世代を自ら開拓していく研究者が活躍できる研究分野として、多くの若手研究者・技術者が超伝導空洞開発へ参加することを期待しています。

謝 辞

本解説を執筆するにあたり、Dr. Henry Safa (CEA-Saclay) には単セル空洞での共同研究において、Dr. Lutz Lilje (DESY) には 9 セル空洞に関する共同研究において、得られた業績に関して深く感謝致します。

一連の開発研究において、野口修一 KEK 名誉教授、および、斎藤健治 KEK 元教授 (現ミシガン州立大学) に深く感謝の意を表します。KEK での超伝導空洞技術の発展を今後担っていく、超

伝導空洞グループの若手メンバー全員に感謝致します。

参考文献

- 1) E. Kako, “Technologies for Superconducting RF Cavities, (1)”, 「加速器」 Vol. 13, No. 1 (2016) 2-11.
- 2) S. Noguchi, et al., “Status of TRISTAN Superconducting RF Program”, Proc. of SRF87, Chicago, USA (1987) 605-624.
- 3) T. Furuya, et al., “Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-Factory”, Proc. of SRF95, Gif-sur-Yvette, France (1995) 729-733.
- 4) K. Hosoyama, et al., “Fabrication of Full Scale Crab Cavity for KEKB”, Proc. of SRF97, Padova, Italy (1997) 547-552.
- 5) E. Kako, et al., “Pulsed Operation of the 972 MHz Prototype Cryomodule for ADS Superconducting Linac”, Physica C 441 (2006) 220-224.
- 6) E. Kako, et al., “Cryomodule Tests of Four TESLA-like Cavities in the Superconducting RF Test Facility at KEK”, PRST-AB Vol. 13, 041002, (2010).
- 7) K. Watanabe, et al., “Development of the Superconducting RF 2-cell Cavity for cERL Injector at KEK”, NIM-A, 714 (2013) 67-82.
- 8) K. Umemori, et al., “Status of 9-cell Superconducting Cavity Development for ERL Project in Japan”, Proc. of SRF09, Berlin, Germany (2009) 355-358.
- 9) A. Matheisen, et al., “Laboratory Activities on s.c. Cavities at DESY”, Proc. of SRF91, Hamburg, Germany (1991) 44-53.
- 10) B. Aune, et al., “Degradation of Niobium Superconducting RF Cavities during Cooling Time”, Proc. of LINAC90, Albuquerque, NM, USA (1990) 253-255.
- 11) B. Bonin and R.W. Roeth, “Q Degradation of Niobium Cavities due to Hydrogen Contamination”, Proc. of SRF91, Hamburg, Germany (1991) 210-244.
- 12) W. Kern, “The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology”, J. Electrochem. Soc., Vol. 137, No. 6 (1990) 1887-1892.
- 13) Ph. Bernard, et al., “Superconducting Niobium Sputter-Coated Copper Cavities at 1500 MHz”, Proc. of EPAC92, Berlin, Germany (1992) 1269-1271.
- 14) P. Kneisel, et al., “Experience with High Pressure Ultrapure Water Rinsing of Niobium Cavities”, Proc. of SRF93, Newport News, VA, USA (1993) 628-636.
- 15) K. Saito, et al., “Study of Ultraclean Surface for Niobium SC Cavities”, Proc. of SRF93, Newport News, VA, USA (1993) 1151-1159.
- 16) H. Safa, “High Gradients in SCRF Cavities”, Proc. of SRF97, Padova, Italy (1997) 814-821.
- 17) K. Saito, et al., “R&D of Superconducting Cavities at KEK”, Proc. of SRF89, Tsukuba, Japan (1989) 635-694.
- 18) K. Saito, et al., “Superiority of Electropolishing over Chemical Polishing on High Gradients”, Proc. of SRF97, Padova, Italy (1997) 795-813.
- 19) G. Ciovati, “Improved Oxygen Diffusion Model to Explain the Effect of Low-temperature Baking on High Field Losses in Niobium Superconducting Cavities”, Applied Physics Letters, 89, 022507, (2006).
- 20) B. Aune, et al., “Superconducting TESLA Cavities”, PRST-AB, 3 (9), 092001, (2000).
- 21) L. Lilje, et al., “Achievement of 35 MV/m in the Superconducting Nine-cell Cavities for TESLA”, NIM-A, 524 (2004) 1-12.
- 22) International Technology Recommendation Panel (ITRP); ITRP Final Report (2004, August).
- 23) E. Kako, “Development of Superconducting Cavities for ILC”, 低温工学 48 巻 8 号 (2013) 415-425.
- 24) E. Kako, et al., “S1-global module tests at STF/KEK”, Proc. of IPAC11, San Sebastian, Spain (2011) 38-40.
- 25) Y. Yamamoto, et al., “Construction and Beam Operation of Capture Cryomodule for Quantum Beam Experiments at KEK-STF”, Proc. of IPAC12, New Orleans, USA (2011) 2236-2238.
- 26) Y. Yamamoto, et al., “High Gradient Cavity Performance in STF-2 Cryomodule for the ILC at KEK”, Proc. of IPAC16, Busan, South Korea (2016) WEPMB017.
- 27) F. Furuta, et al., “Performance of the Cornell ERL Main Linac Prototype Cryomodule”, Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) FRAA04.
- 28) J. Plouin, et al., “CEA Experience and Effort to Limit Magnetic Flux Trapping in Super-conducting Cavities”, Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) TUPB100.
- 29) O. Kugeler, et al., “High-Q Operation of SRF Cavities: The Impact of Thermo-currents on the RF Surface Resistance”, Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) MOBA04.
- 30) A. Grassellino, et al., “N Doping: Progress in Development and Understanding”, Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) MOBA06.
- 31) G. Devanz, et al., “Progress in IFMIF Half Wave Resonators Manufacturing and Test Preparation”, Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) THPB045.
- 32) N. Sakamoto, et al., “Design Studies for Quarter-Wave Resonators and Cryomodules for the RIKEN SC-Linac”, Proc. of SRF15, Whistler, Canada (2015) WEBA06.
- 33) G.-T. Park, et al., “The Electromagnetic Design of $\beta = 0.13$, $f = 325\text{MHz}$ Half Wave Resonator for High Power, High Intensity Proton Driver”, Proc. of IPAC16, Busan, South Korea (2016) MOPOY025.