話　題

理研 RIBF における低速重イオン用超伝導線形加速器の開発

坂本 成彦 *

Development of Superconducting Linac-Booster for Low-beta Heavy Ions at RIKEN RIBF

Naruhiko SAKAMOTO*

Abstract

RIKEN Heavy-Ion Linac (RILAC) of Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) is undergoing an upgrade of its acceleration voltage to allow it to further investigate new super-heavy elements. In this project, a new superconducting (SC) booster linac has been developed and constructed. The SC-Linac consists of 10 TEM quarter-wavelength resonators (QWRs) made from pure niobium sheets which operate at 4 K. Recently we succeeded to develop high performance SC-cavities which satisfies the requirement as Q_0 of 1×10^9 with its accelerating gradient of 6.8 MV/m with a wide margin. The QWRs were integrated to three cryomodules and installed to the beam line. This paper describes about design, fabrication, processing and testing of newly developed superconducting cavity and commissioning status after installation.

1. はじめに

理化学研究所仁科加速器科学研究センターのRI ビームファクトリー（RIBF）[1,2] では，ニホニウムに続く新元素探索実験を行うため，重イオンビームを加速する線形加速器（RILAC）のエネルギーとビーム強度のアップグレードが進行中である．このプロジェクトでは，28 GHz の RF 源を用いた超伝導イオン源の導入[3] と従来の常伝導線形加速器の後段の4 台を10 台の高純度ニオブ板材から製作した超伝導空洞を収める3 台のクライオモジュールからなる線形加速器（SRILAC）（**図1**）[4,5] で置き換える計画で，これにより全加速電圧で14 MV の増強が実現される[4]．既存の限られた設置場所でこの加速電圧増強を実現するには，非常に高い加速勾配を実現する超伝導空洞技術の導入が不可欠であり，RIBF では初めての超伝導加速空洞の導入となった．

長年，国際リニアコライダー（ILC）やエネルギー回収型超伝導リニアック（ERL）に用いられる電子加速器用（$\beta=1$）に，非常に高い性能の（加速勾配が高く（High gradient），高周波損失が少ない（High Q））9 セル共振周波数1.3 GHz の超伝導空洞開発が世界中で盛んに行われ，その技術の進歩は近年目覚ましいものがある[7]．その一方，周波数が80 MHz 程度と低く構造が9 セル空洞と比較して複雑な低速重イオン用の空洞は，アルゴンヌ国立研究所（米）[8] を筆頭に TRIUMF（加）[9]，GANIL（仏）[10]，FRIB（米）[11]，IBS（韓）[12] 等の研究所が競って開発を進めている．

我が国では，旧原研においてクラッド材を用いた重イオンタンデム加速器用ブースター超伝導線形加速器[13] が建設され成功を収めた例があるが，ニオブ板材からいわゆる鈑金で製作された重イオン用の空洞の開発は例がなく，高エネ研 SRF グループの全面的な技術協力を得て重イオン用超伝導線形加速器の開発を行うこととなった．

2. 低速重イオン用超伝導空洞の設計

2.1　四分の一波長型超伝導空洞

今回新たに開発した超伝導空洞の概略を**図2** に示す．この空洞は，外導体と内導体からなる四分の一波長（$\lambda/4$）型空洞（QWR）と呼ばれるもので，上端を短絡端，下端を開放端とする同軸構造をしており，開放端で高周波電場が最大となる固有モードを有する．空洞の共振周波数は

* 理化学研究所仁科加速器科学研究センター加速器基盤研究部　Accelerator Division, Nishina Center, RIKEN
(Naruhiko Sakamoto　E-mail: nsakamot@ribf.riken.jp)

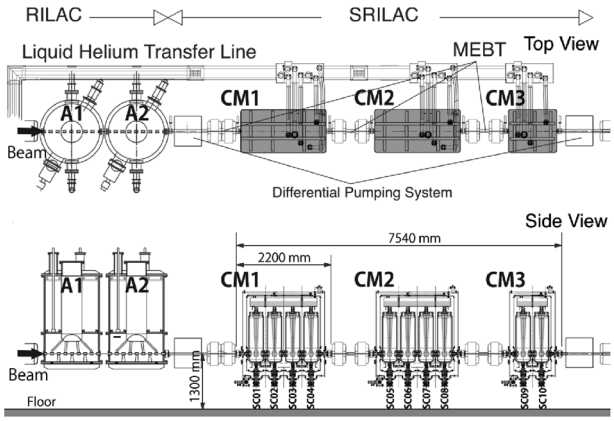

図1　理研低速重イオン用超伝導線形加速器（SRILAC）の概略図．常温部との接続部に新開発の差動排気システム[6]を配置する．

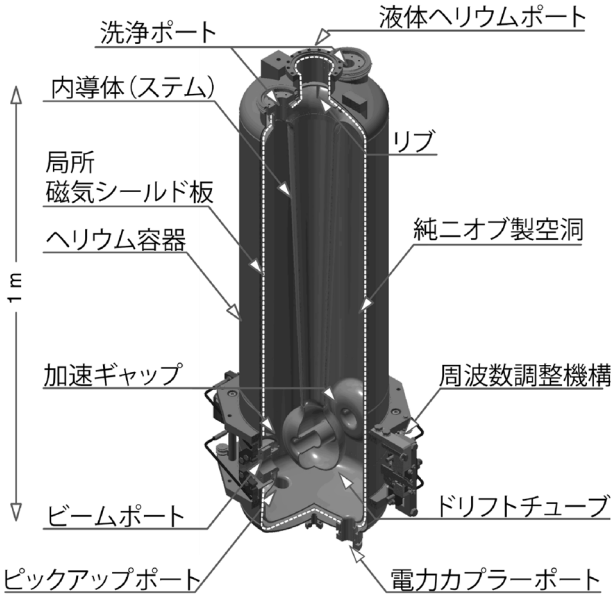

図2　理研重イオン超伝導線形加速器（SRILAC）用73 MHz超伝導空洞概略図．

73 MHz で，先に述べた 80 MHz より低い周波数であるが，RIBF での利用を考慮してウランビーム加速の基本周波数18.25 MHz の4倍の周波数とした．空洞の鉛直方向の長さは波長の4分の1で約1.1 m となる．ギャップ長を160 mm とし，加速効率が最適となるイオンのβは0.078 となる．空洞は10^6程度の高い外部 Q で運転される，すなわちカプラーから見た共振曲線の半値幅は，73 Hz と非常に狭いため，微細な共振周波数調整が必要となる．弾性の範囲で加速ギャップを圧縮することで周波数を一定に保つ周波数調整機構を備える．

ビームは，高周波電場が発生する開放端側に設けられたビームポートを一定のタイミング（同期位相）で通過することにより，2つの加速ギャップに発生した加速電圧を受けその速度が上がる．加速粒子が内導体先端のビームパイプを通過中に加速電場はその符号を変えるが，その間，短絡端側には高周波電流が流れる．この電流に対する表面抵抗（R_{surface}）は超伝導状態であってもゼロではないので，電流密度（i_{rf}）の分布に従って高周波損失（P_{loss}）が発生する[14]．

$$P_{\mathrm{loss}} = \int_S R_{\mathrm{surface}} \cdot i_{\mathrm{rf}}^2 dS$$

R_{surface} は，超伝導状態の場合，周波数と温度に依存する BCS 抵抗（R_{BCS}）と残留抵抗（R_{res}）の和で表される．

$$R_{\mathrm{surface}} = R_{\mathrm{BCS}} + R_{\mathrm{res}}$$

純ニオブの BCS 抵抗は，半経験式から周波数73 MHz，温度4.2 K で約2 nΩとなる．これは無酸素銅を用いた常伝導空洞の場合の表皮抵抗の約100 万分の1に相当する．

実際の空洞では特に周波数が低い場合，空洞の損失は表面状態，不純物の混入などに依存する残留抵抗（R_{res}）が支配的である．したがって，空洞の発熱を小さくするには，その形状を最適化することによって電流密度（i_{rf}）を分散させるとともに表面処理によって理想的に近い表面状態を実現（R_{res} を小さく）することが重要となる．

空洞の表面抵抗の度合い，すわなち超伝導空洞の性能を表すパラメータとして R_{surface} の逆数に比例する Q_0（$\equiv G/R_{\mathrm{surface}}$）と呼ばれる量が用いられる．ここで G は形状因子と呼ばれるパラメータで，空洞の形状によってのみ決まり，空洞の表面状態に依らない量である．

空洞の設計においてはこの G 及び高周波空洞の等価回路のシャント抵抗 R_{sh} を Q_0 で割った値 R_{sh}/Q_0（加速電場のエネルギーと空洞蓄積エネルギーの比）を大きくするとともに，空洞表面の電場・磁場のピーク値が小さくなるように形状を決定する．

2.2　空洞形状の高周波設計

高周波空洞の設計は，3次元の電磁場計算ソフトウェアを用いて詳細に検討される．CST[15] Microwave Studio パッケージを用いて得られた空洞表面の電場・磁場分布（すなわち電流密度）の

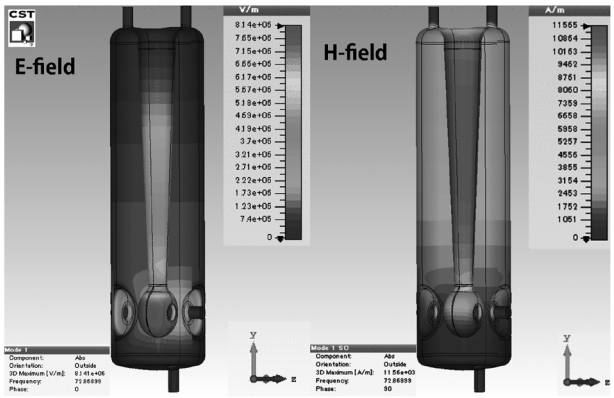

図3　CST Microwave Studio パッケージを用いた電磁場解析シミュレーション．左図が電場強度，右図が磁場の等高線図．電流密度は電場強度に比例する．ステム（内導体）をテーパー形状にすることにより短絡端での電流密度の集中を防いでいる．

表1　シミュレーションによって得られた空洞パラメータ．

設計パラメータ	
周波数	73.0 MHz
ギャップ電圧	2.4 MV
加速勾配（E_{acc}）	6.8 MV/m
G	22.4
R_{sh}/Q_0	579
E_{peak}/E_{acc}	6.2
B_{peak}/E_{acc}	9.6 mT/(MV/m)

等高線図を**図3** に示す．

電場（**図3** 左）は，電圧を発生する内導体先端で高くなり，磁場（**図3** 右）は内導体の短絡端側が大きくなるが，内導体の径を空洞上部短絡端に向かって大きくすることにより，ピーク値を下げていることがこの空洞の特徴である．最終的に得られた空洞の設計パラメータを**表1** に示す．ギャップ電圧（2つのギャップの電圧を足した値）は2.4 MV で，これにより，最大電場は，42.2 MV/m，磁場は65.3 mT と，電場は高めだが磁場はニオブの臨界磁場と比べて十分低い値となる．

空洞の高周波損失は実際の空洞内面の状態に依存するが，6.8 MV/m の加速勾配時の $R_{surface}$ を 22 nΩ とすると Q_0 が1×10^9 となる．これは，発熱する電力供給カプラーからの低温部への侵入熱を含めて，全体の静的動的熱負荷が空洞1台当たり25 W 以下になるようにするものである．空洞の損失をいくらに設定するかは導入する冷凍機の冷凍能力の選定のもととなり，建設コストに大きく影響する．設計段階において，理想的な形状と製作可能な形状をコスト面も考慮してバランスよく最終的に決定することが重要である．

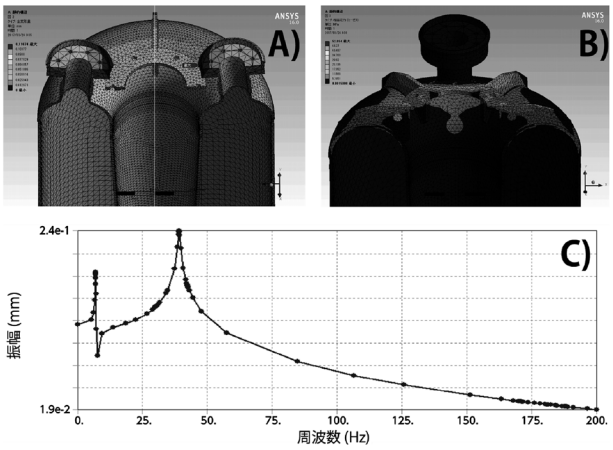

図4　ANSYS を用いた空洞上部のリブ構造計算の例．ヘリウム圧0.1313 MPa の時の変形 A）と応力 B）．C）は，ドリフトチューブを1 N の力でビーム軸方向に強制振動させた際の周波数応答．

2.3　空洞の機械設計

ここでは詳細は割愛するが，空洞は高圧ガス保安法に拠った圧力容器としての機械設計を行うことが求められる．具体的には，空洞にかかる応力が空洞の弾性変形の限界値を超えないよう設計する必要がある．

超伝導空洞は，純チタン製ヘリウムの容器内に収められ約1気圧・4 K の液体ヘリウムに浸すことにより超伝導状態となる．この際，空洞自体が変形し空洞共振周波数が大きく変化することを防ぐため変形・応力などのシミュレーションによりリブの形状などの機械設計を合わせて行う．この空洞には，ステムの根元の剛性を上げるためのリブが設けてある．**図4** に ANSYS[16] を用いたシミュレーションの例を示す．いずれも4.2 K での純ニオブ材の物性値としてヤング率125 kN/mm^2，ポアソン比0.38 を用いた．

このリブは同時にステムが振り子のように振動する機械振動モードを抑制する機能がある．ANSYS によって機械振動のシミュレーションを実施したところ（**図4C**）40〜50 Hz 付近に比較的振幅の大きい振動モードが見られる．

これとは別にこの空洞の周波数調整はビームポートフランジを押すことにより空洞の形を弾性変形させて実現する．このときに必要な力が過大

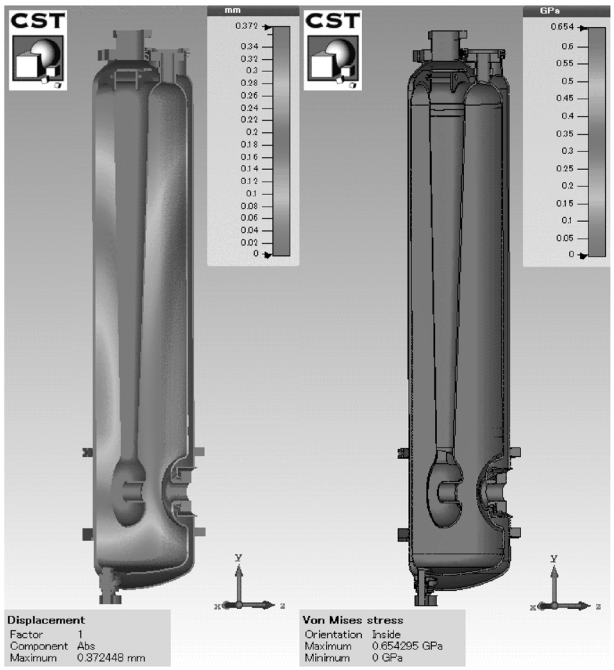

図5　CST を用いた変形シミュレーション．ここでは，ビームポートフランジにビーム軸方向に6000 N を印加．最大変位がビームポートフランジで0.298 mm, 応力の最大値はビームポートフランジとヘリウムジャケット接続部で270 MPa となっている．

にならないようにする必要があるためビームポートの形状を工夫し，エンドドリフトチューブ周辺にはリブを設けなかった．**図5** に CST を用いて評価した変位量と応力の例を示す．設計では，ビームポートを押す力を最大7,500 N とし，そのときギャップ間隔の変化は－0.37 mm で周波数変化は－14 kHz．共振周波数のヘリウム圧力変動に対する感度は，$\Delta f/\Delta p = -1.9$ Hz/hPa となった．

3. 空 洞 製 作

超伝導空洞は多くのプロセスを経て製作される．全てのプロセスが不純物の混入をさせない健全な方法で実施されなければ，高い性能の空洞を作ることはできない．本来ならば，空洞10 台の製作を開始する前に一つ一つのプロセスを検証しながら進める必要があるが，開発に与えられた時間が限られているため，プロトタイプ空洞を製作し，プロセス全体の健全性・妥当性を評価することとした．なお，プロトタイプを含む11 台の空洞は三菱重工機械システム(株)(以下 MHIMS) によって製作された．

3.1　空洞組み立て

空洞は，純ニオブの板材もしくは丸棒材を成形

図6　プロトタイプ空洞組み立ての様子．左上：内導体．先端部の穴はビームが通過するパイプ．左下：外導体，同様にビームポートが取り付けられる．右上：内外導体を繋ぐ部品．後に述べる表面処理のためのポートが2 つ装備される．右下：底板，空洞に高周波電力を供給する電力カプラーポートと加速電圧をモニターするピックアップポートを装備．

加工し，開先を化学研磨し，クリーンな環境下で電子ビーム溶接を用いて組み立てられる．純ニオブ材は，電子用の空洞で実績のある東京電解(株)の RRR 250 のものを用いた．また，フランジ材料として広く使われるニオブチタンではなく，Grade2 と呼ばれる純ニオブ材を用いた．**図6** は組み立て段階で撮影した空洞を構成する部品の写真である．溶接ビードの裏波が綺麗に出ていること，溶接部に不純物が溶け込むと後の表面処理のプロセスでいくら表面を研磨しても不純物を取り除くことが難しいため，電子ビーム溶接で不純物が溶接部に混入しないことが重要で，ILC 用の空洞製作で実績のある溶接機を用いている．多くの箇所の溶接を行うが，各溶接工程で高周波に露出する内面側の溶接ビードを注意深く観察し，溶接のための拘束治具などによる凹凸や傷がないことを目視で確認しながら注意深く進める．

同時に，この過程で重要なのは，空洞の共振周波数を調整しながら組み立てを進めることである．冷却後全ての空洞が73 MHz となるよう空洞の大きさを調整する必要がある．具体的には，**図6** の4 つのパーツが出来上がった段階で，仮組みをして共振周波数を測定し，内面の化学研磨，冷却や液体ヘリウム圧力による形状の変化，真空による空洞内の誘電率の変化，電力カプラーやピックアップアンテナを挿入することによる周波数の

	Processes (Fabrication, Polishing, Pumping, Cooling)	Δf (kHz)	f 0 (kHz)
20	1/2 of slow tuner frequency shift from 73 000 kHz	7.000	73 007.000
19	Remove FPC	1.000	73 008.000
18	Remove helium vessel	1.280	73 009.280
17	Undo pretuning by beam port	6.862	73 009.280
16	Cavity frequency cold in operation Eacc = 6.8 MV (Vgap = 2.4 MV)		73 016.142
15	Gap voltage 2.4 MV to 0 MV	0.038	73 016.180
14	Lower helium pressure from 0.13 to 0.1 MPa		
13	Warm cavity up to room temperature (4.2K to 293 K) (thermal. exp.)		
12	Add deformation by temperature variation (4.2 K to 293 K)	-124.147	
11	Vent rf space from vacuum to 0.1 MPa		
10	Frequency shift due to dielectric constant of air (1 atm, humid. 40%)	-15.437	72 876.377
9	Add back BCP of cavity surface (BCP2: 18.2 um)	-7.484	72 868.893
8	Undo annealing (750℃、3 h) Suraface Processing	-3.307	72 866.547
7	Add back BCP of cavity surface (BCP1: 114.3 um)	-26.688	72 839.859
6	Add weld shrinkage for bottom dome (0.51 mm) Fabrication		
5	Indium wire thickness clamping bottom dome (0.01755 mm)		
4	Add back cut of the straight section of bottom dome (6.034 mm)		
3	Add weld shrinkage for center/outer conductors and top dome (0.7 mm)	40.609	72 874.793
2	In wire thickness clamping center/outer cylinder and top dome (0.4 mm)		
1	Add back center/outer cylinder cuts (10.918/10.097 mm)	-598.077	72 213.256

Time-sequence

図7　MRQ01 空洞周波数調整テーブル.

変化など**図7** に示されるあらゆる項目を，想定した周波数になるよう上下2箇所，長さ方向の寸法を0.1 mm 単位で調整しながら電子ビーム溶接による組み立てを進めた[17]．**図7** の各項目を kHz の精度で予見することは非常に困難であるため，プロトタイプ空洞を製作し周波数の変遷を調べておくことが必要となる．

3.2　表面処理

電子ビーム溶接を終えて組み上がった空洞は，次に表面処理を施す．EP と呼ばれる電解研磨と BCP と呼ばれる化学研磨が広く使われているが，空洞形状が複雑で電極を挿入するのが困難なこと，低速イオン用の空洞は6 MV/m など中程度の加速勾配で用いることから，電子用の超伝導空洞で実績のあるレシピがもとになっている[14] 化学研磨を採用することとした．

図6 の4つのパーツの溶接を終えた段階で，再度内面を注意深く観察し溶接によって付着したスパッタ粒を丁寧に取り除き，溶接ジグによってついたと思われる傷の研磨を行い，表面処理のプロセスに移行する．

おおまかに，表面処理プロセスは以下の5つの工程（**図8**）からなる．

1（BCP1）：フッ酸，リン酸，硝酸（1 : 1 : 2）の混合液で粗く化学研磨を行う．このときの研磨量は100 μm 程度．研磨する量はあらかじめ決めておき温度を一定に保った研磨液に浸す時間で管理する．研磨液は純水と洗剤（FM20）によって迅速に除去される．実際に研磨された量（厚み）は重さの変化を内面の表面積と密度の積で割って求める．**図9** は研磨後の空洞の内面．

2（Annealing）：その後，化学研磨時に発生した水素を取り除くため真空炉を用いて熱処理（750℃, 3 時間）を行う．

3（BCP2）：再度，20 μm 程度の化学研磨を実施．研磨の後，超音波洗浄を行う．

4（HPR）：空洞内面を清浄な状態とするため，クリーンルームに設けた装置で高圧超純水洗浄を行う．ここでは，**図8** に示された順番でノズルを差し込み，高圧で吹き出す超純水で空洞内面をくまなくスキャンするように表面に付着した不純物を取り除く．

5（Baking）：HPR 後，ピックアップ電極，試験用の電力カプラー，真空排気のためのオールメタルアングルバルブをクリーンルームで取り付け，120℃，48 時間のベーキングを行う．内面

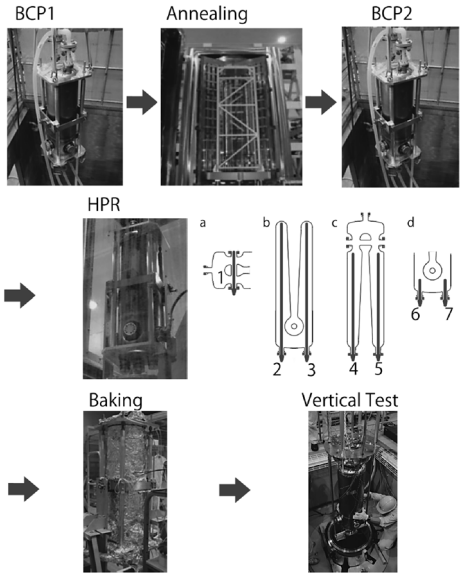

図8　表面処理プロセスの概念図.

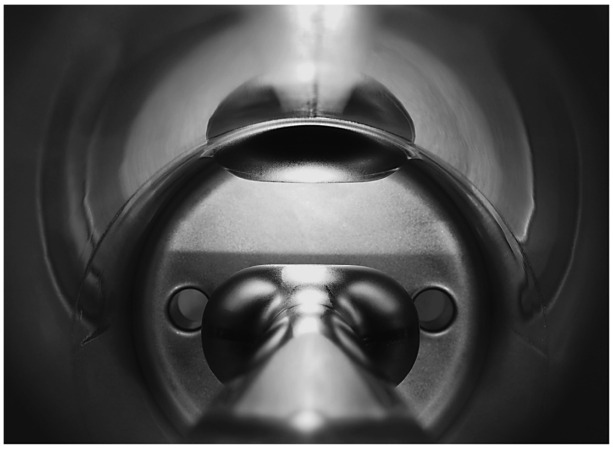

図9　化学研磨直後のプロトタイプ空洞の内面の様子．上部洗浄ポートより撮影.

のガス出しとともに表面の酸化膜を整える効果があると言われている．

化学研磨装置，超音波洗浄装置，熱処理のための高温真空炉などは超伝導空洞専用の MHIMS の設備を使用した．

以上，材料選定に始まり加工・溶接製作・表面処理・クリーンルームでの組み立て作業など，ありとあらゆる製作プロセスの妥当性は，続いて実施する空洞性能試験（Vertical Test）により初めて実証される．

4. 空洞性能試験

表面処理が終わった空洞に真空排気系を接続し，クライオスタット真空容器に設置し液体ヘリウムに浸けて4.2 K に冷却することにより空洞を超伝導状態にして性能を測定する．低温収縮により溶接不良などが顕れることがあるが，幸い低温リークは起こらなかった．励振試験は，空洞内面に汚れがある場合非常に高い電場によって放出された電子が加速され，エネルギーの高い X 線が発生する事象が懸念されるため，クライオスタット真空容器は建物床面に設けた縦穴に置き，上側開口部には放射線の遮蔽のための鉄板を設置した状態で実施される．また，超伝導空洞は数百 mGauss の地磁気レベルの環境磁場の影響を大きく受けるため，クライオスタットには磁気シールドを設置し 10 mGauss 以下となる環境で測定を行う．

具体的には空洞の蓄積エネルギーの減衰時間の測定により空洞の無負荷 Q を求める．ある一定レベルの励振状態から RF 電源をオフにし，ピックアップ信号の減衰時間から負荷 Q を計算する．電力カプラーのアンテナの位置を調整し，反射波（P_{ref}）がゼロとなる時の負荷 Q を2倍した値が Q_0 となる．この際，カプラーから見た周波数帯域は 0.1 Hz 以下と極端に狭くなるため，自励振モードで励振される．高周波系のブロック図を**図10** に示す．進行波と空洞ピックアップ信号の位相の変化を信号発生器に DC で入力して周波数変調をかけている．**表1** の（R_{sh}/Q_0）から R_{sh} が求まり，空洞損失 $P_{\mathrm{loss}}=P_{\mathrm{in}}-P_{\mathrm{ref}}-P_{\mathrm{t}}$ からギャップ当たりの電圧が求まる．ギャップ電圧と P_{t} から，Q_{t} あるいはピックアップ比が決まる．Q_{t}，ピックアップ比は，これ以降ピックアップを取り外さず，このときの値が最終的に用いられる．加速勾配（E_{acc}）は，ギャップ電圧に TTF をかけ $\beta\lambda$ で割った値を用いる．

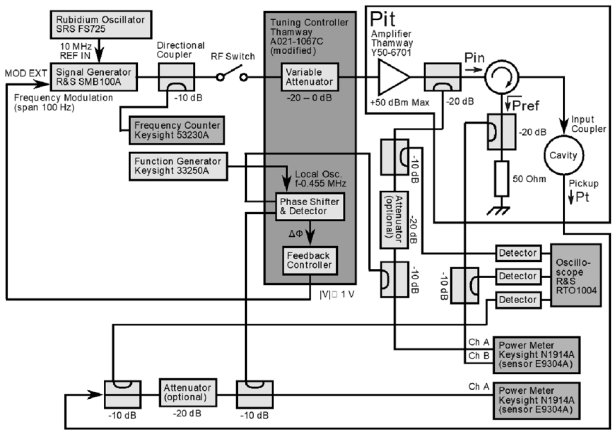

図10　性能試験のための高周波励振系ブロック図．空洞は自励振モードで励振される．

プロトタイプ空洞の試験では，加速勾配 6.8 MV/m において，Q_0 が 3.4×10^9 という結果を得た．この結果から，この空洞の一連の全ての製作過程，つまり，材料選定，部品の成形加工，溶接，表面処理の健全性・妥当性が適切であることが示されたことになる．これを受けて実機10 台の製作を開始した．実機の空洞についても，プロトタイプ製作と同じプロセスを適用した．

加速勾配を上げながら，Q_0 の変化（Q スロープと呼ぶ）を測定する（$Q_0=Q_{\mathrm{t}}\cdot P_{\mathrm{t}}/P_{\mathrm{loss}}$）ことで得られた結果を**図11** に示す．図からわかるように加速勾配がほぼゼロのときの Q_0 の値は 6.4×10^9．この値は表面抵抗に直すと 3.5 nΩ に相当する．R_{BCS} の値が約 2 nΩ であることから非常に理想的な状態に近い表面状態を実現したと言える．また，多くの場合，Q_0 は，加速勾配が大きくなるにつれて下がっていく．実際，**図11** の結果を見ると Q_0 が下がっていくが，その下り方が比較的緩やかで設計電場勾配 6.8 MV/m での Q_0 の目標値 1×10^9 に対し，得られた Q_0 は 3.5×10^9 で十分なマージンを持って目標値を満たす結果を得られた．また，加速勾配を 12 MV/m に上げても X 線の発生はほぼ検出されなかった．

次にヘリウム容器を空洞に溶接する工程に進む．空洞をクリーンルームでアルゴンリークし，カプラーと真空排気用エルボとアングルバルブを取り外し，ブランクフランジを取り付けて工場に

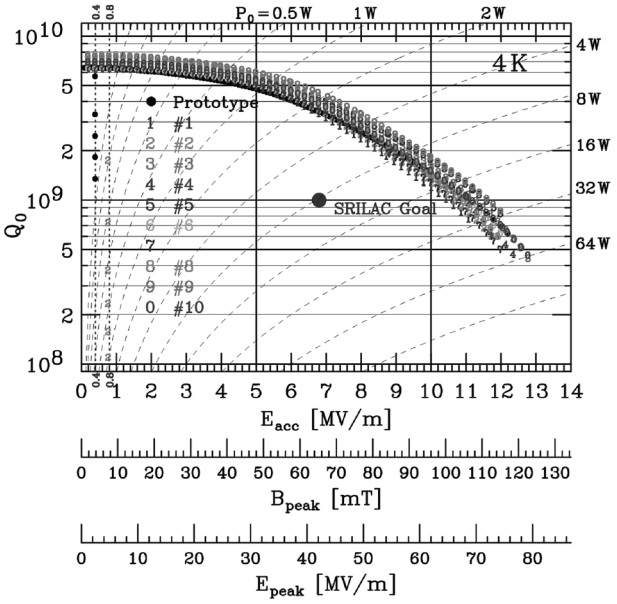

図11 全空洞の加速勾配に対する Q_0（無負荷 Q）をプロットしたもの．破線は，等空洞損失線．0.4 MV/m, 0.8 MV/m のところで Q_0 が急に下がっているのは，マルチパクタの影響．

図12 (1)ヘリウムジャケット装着の様子．(2)ジャケット付き空洞性能試験のセットアップ．真空排気用のダクトを接続し約1日120℃でベーキング．吊り下げ治具天板から空洞の下まで延びるシャフトはカプラー駆動機構．

送り返す．ここで，冷却試験で得られた低温での共振周波数が目標周波数より高かった場合，ビームポートフランジを治具で両側から押し，塑性変形を与えて周波数の調整を行った．

工場では局所磁気シールド（いわゆる常温用のμメタル：オータマ製）で空洞を覆い，その上から純チタン製のヘリウム容器を溶接する（**図12**(1)）．ヘリウム容器装着後，理研で再度性能

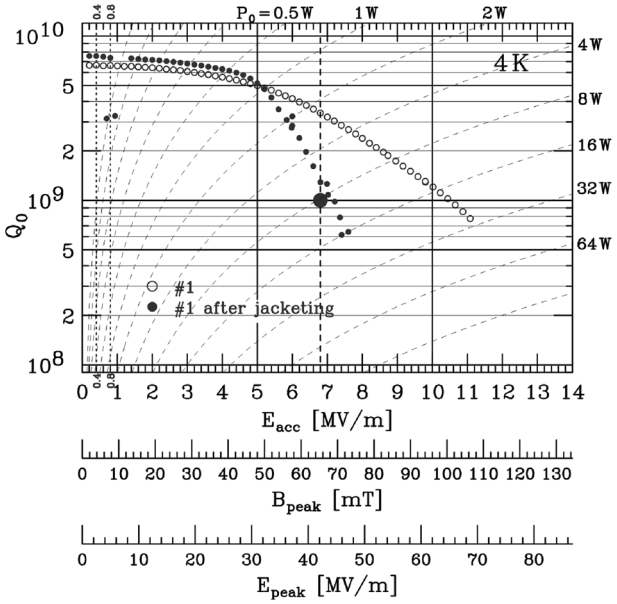

図13 ヘリウムジャケット装着後に再度測定された Q スロープ．加速勾配が低いところでわずかに Q_0 が大きくなっているのは，局所磁気シールドの効果．

試験（**図12**(2)）をしたところ4台のうち2台で加速勾配5 MV/m を超えたあたりから無負荷 Q_0 の急激な低下が見られた[17]（**図13**）．考えられる原因としては，フランジ交換のクリーンルーム作業の際に発熱の原因となる異物が空洞内部に入り込んだことが挙げられる．これを受けて，作業手順の見直しをし，ジャケット取り付け後に HPR を施す工程を追加した．また，異物混入の機会を減らすため5台目以降はジャケット取り付け後の性能試験を行わなかった．

5. クライオモジュール

4台または2台の空洞が1台のクライオモジュール断熱真空容器に組み込まれる．**図14** に，空洞を4台収容するクライオモジュールの概略図を示す．全長2200 mm．各空洞には，予めクリーンルームで洗浄して高周波で焼き出しを行った，高周波窓が一枚のいわゆるシングルウィンドウ同軸型の結合度可変電力カプラーが取り付けられる[4]．空洞は頑丈な底板に固定された4本の G10 製の支柱の上に 430 mm の間隔で配置される．冷却による収縮で空洞の位置が変わるが，一方向に押し付ける機構により，所定の位置に収まることを想定している．冷却後の位置は真空容器の覗き窓からアラインメントターゲットの位置を直視することによって確認できるようになっている．空

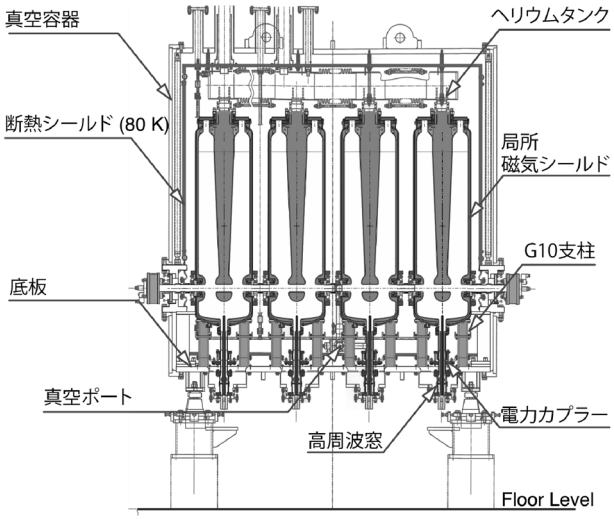

図14　クライオモジュール概略図.

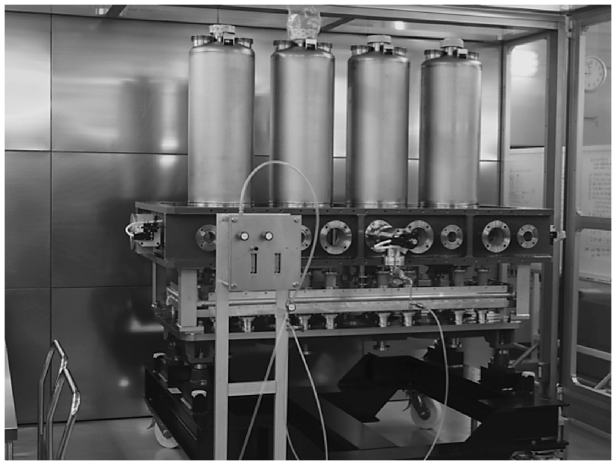

図15　クリーンルーム内の組み立て終了後のクライオモジュール内部．ヘリウムリーク試験後，毎分50 cc のアルゴンガスで空洞内を大気圧に戻す．クリーンルーム（ISO Class 1）は興研(株)のオープンクリーンシステム KOACH.

洞真空は空洞内への異物の混入を防ぐため，空洞はベローズで接続され，断熱真空とは隔離されている．空洞真空配管組み立て，クライオモジュール両端のゲート弁取り付けまでがクリーンルーム内組み立てとなる（**図15**）．常温部から4 K 部への熱侵入を減らすため液体窒素冷却の断熱シールドを備える．4 K 部分，80 K シールド，真空容器の間にはスーパーインシュレータを設置した．磁気シールドは前述の通り，空洞ごとに局所シールドを設けているほか，真空容器の材料として炭素鋼を用いることにより二重のシールドとなっている．

組み立てを終えたクライオモジュールは，加速器室に運搬され最終組み立てを行いビームライン上に設置された（**図16**）．その後冷凍機に接続し埼玉県庁の完成検査を受けた．冷凍機は Air Liquide 社の HERIAL MF というモデルで，圧縮機は RIBF の超伝導リングサイクロトロンの予備圧縮機（MYCOM）を利用した．高出力の圧縮機のおかげで，4.5 K で約700 W の冷却能力を持つ．最初の冷却は2019 年10 月で，大きなトラブルもなくクライオモジュールに液を貯めることに成功した．

図16　(A)加速器棟に移送し，最終組み立て中のクライオモジュール．(B)真空容器上下をかぶせてビームライン上に設置．(C)ヘリウムトランスファーラインとクライオモジュールを U チューブで接続.

表2　SRILAC 設計パラメータ.

空洞・周波数・数	QWR・73.0 MHz（CW）・10
加速勾配	6.8 MV/m
β_{opt}	0.078
$(\beta\lambda)/2$	16 cm
E_{inj} $(\varepsilon_{x,y})$	3.6 MeV/u（3 mm·mrad）
E_{ext}	6.5 MeV/u
同調位相	−25°
外部 Q	1.5×10^{6}
Q_t	1×10^{11}

6. コミッショニング

SRILAC の設計パラメータを**表2** に示す．冷却後，電力カプラーアンテナの差し込み位置を変えて，外部 Q が1.5×10^{6} 程度になるようネットワークアナライザで測定しながら調整した．空洞10 台の共振周波数は目標73.007 MHz に対して73.000 MHz＋3.1 kHz～＋7.5 kHz であることがわ

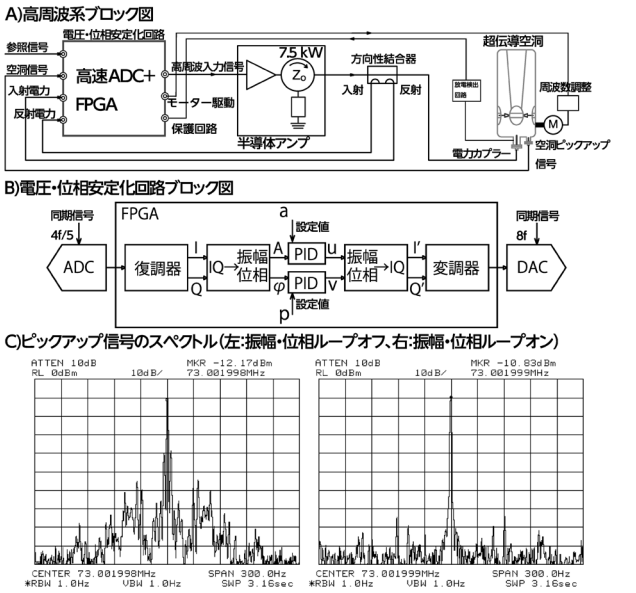

図17　新たに開発した超伝導空洞用高周波系ブロック図とループ開/閉でのピックアップ信号のスペクトル（表示周波数幅300 Hz）.

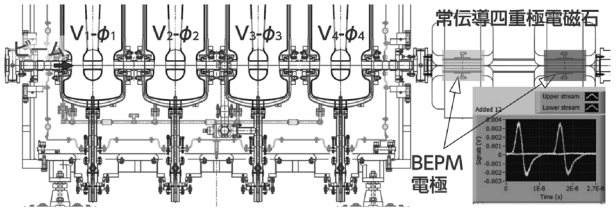

図18　超伝導空洞と BEPM の配置.

かった．周波数調整機構（MHIMS 特許）の調整範囲（0 から－14 kHz）に全ての空洞が収まった．ヘリウム圧変化に対する周波数の感度（$\Delta f/\Delta p$）は－2.0 Hz/hPa で，ほぼ計算値と一致した．

空洞の高周波損失は数 W のレベルであるが，約3桁低い外部 Q で運転するため，最大出力 7.5 kW の半導体アンプを用いる（**図17**）．小型のサーキュレータとダミーロードがアンプモジュールに内蔵され，CW かつ全反射状態で運転可能である．初期の励振時，0.1 MV/m より低いマルチパクタレベルのコンディショニングに概ね4, 5 時間要した．空洞は自励振モードからあるレベルで外部信号モードに切り替えて励振される．ローレベル回路は，新規開発のサムウエイ製のデジタル回路で，高速の ADC と Xilinx 社の FPGA（XC6S-LX75-2FGG484C）により，4f/5 サンプリングで高速なフィードバックを実現した．フィードバックなしでは，50 Hz 付近の大きな振幅・位相変調が

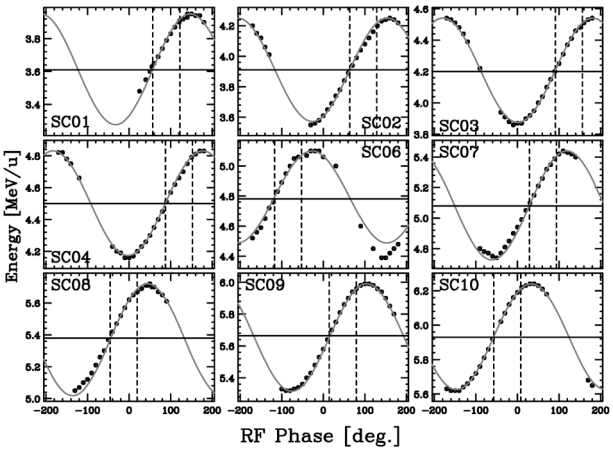

図19　各空洞（9 台）の位相とエネルギー.

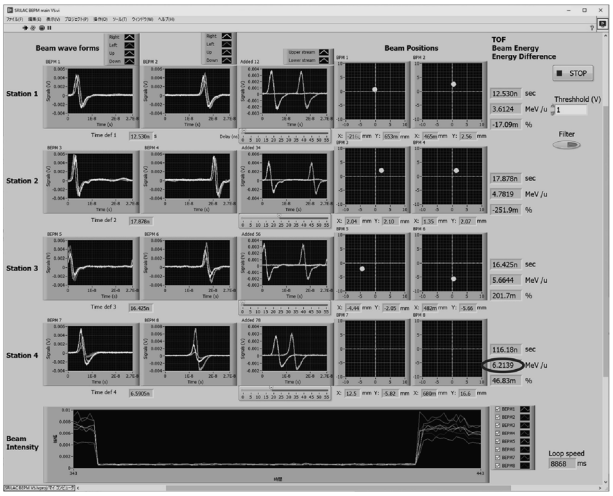

図20　BEPM モニタ画面．線で囲まれたところに加速エネルギー 6.2 MeV/u の表示．右端の2 列は，ビーム中心の位置．Section4 のビーム位置は調整後中心に寄った．

観測されたが（**図17C** 左），振幅・位相の PID 制御により振幅・位相変調をほぼ0.1%，0.3°以下に収めることができた（**図17C** 右）．

最初のビーム加速試験（$^{40}Ar^{13+}$, 6.2 MeV/u）は，SC05 空洞のカプラーウィンドウの真空トラブルにより9 台で行うこととなった．**図18** にビームラインの拡大図を示す．収束要素として常伝導の2 対の四重極電磁石をクライオモジュール間に配置．四重極電磁石内のビームパイプに BEPM（Beam-Energy-Position Monitor）[18] の電極が置かれている．ビームのエネルギーは，BEPM で検出したバイポーラのビーム波形のゼロクロスのタイミングをバンチ中心としてリアルタイムに測定される．電圧を1.13 MV に設定してエネル

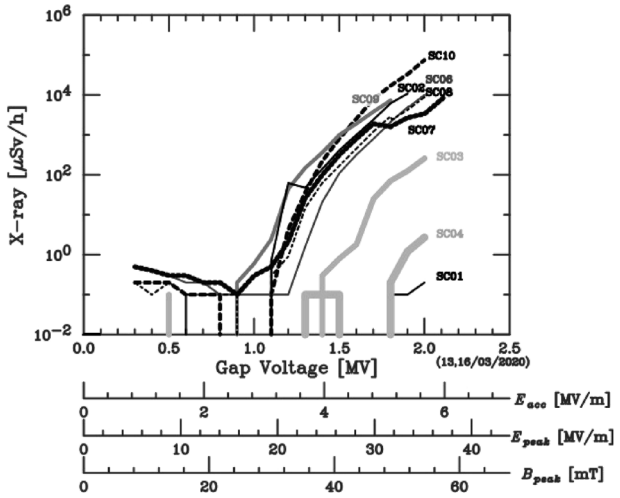

図21　ギャップ電圧に対する X 線レベル．超伝導空洞は上流から順に SC01, 02, 03, 04 は CM1，SC05, 06, 07, 08 は CM2, SC09, 10 は CM3 に配置される．

ギーを位相を変えて測定したデータを**図19** に，6.2 MeV/u まで加速した直後（2020 年 1 月 28 日午後 9 時）の BEPM のスクリーンのコピーを**図20** に示す．ビームのエネルギーから求めたギャップ電圧は空洞性能試験で得たピックアップ比から求めた値（ただし，再 HPR の際取り外したピックアップの P_t のずれは，フランジ位置の測定値 Δx からシミュレーションで求めた（$\Delta P_t/\Delta x$）を用いて補正）と $-8\% < (\Delta V/V) < +1\%$ で一致した．

初回のビーム加速試験において最終的に 0.47 pμA（CW）の強度に到達した．現在，ビーム強度 10 pμA の実現に向けてハードウエアの改造とビーム試験を進めている．

最後に，各空洞の電圧を上げた際に検出される X 線の様子を**図21** に示す．放射線モニターをクライオモジュールの左側中心付近，ビームラインの高さに設置して測定した．空洞 9 台のうち，3 台はほとんど X 線の発生は見られなかったが，SC02, 09, 10 について 10 mSv/h を超える強い X 線の発生が認められた．性能試験後の組み立て工程の中でどうしても空洞にゴミが入り空洞単体で確認した性能を維持できないことは，万国共通の問題である．

謝　　辞

SRF について全くの素人であった我々に根気強くご指導いただいた高エネ研加古永治教授を始め，高エネ研の SRF グループのメンバーに感謝します．プロトタイプ空洞の初回の性能試験では，AR 東の性能試験設備を使わせて頂きました．QST 六ヶ所の春日井敦氏に高圧ガス対応に関する多くの情報を頂きました．FRIB/MSU の齋藤健治教授には，材料選定やボルトの締め方までありとあらゆる相談にのって頂きました．SRILAC の開発に先行して内閣府 ImPACT プログラム（藤田玲子プロジェクトマネージャー）におけるプロトタイプ超伝導線形加速器の開発で得た知見[19] が，大いに役立ちました．

QWR 型の空洞を製作するに当たり我々もメーカーも経験がなく，極端に言うと発明しながら製作するといったこのプロジェクトを，引き受けてくださった MHIMS の皆様に感謝いたします．なかでも，製作現場に非常に近いところに立ち入りあれやこれやと議論しながら一つ一つ問題を解決できたのは，三菱重工機械システム三原工場のみなさまのおかげです．

現場作業やビーム調整では住重加速器サービス（株）の皆様に助けていただきました．

SRILAC の開発は，山田一成，須田健嗣，大関和貴，上垣外修一，N.S. をはじめ，渡邉裕，今尾浩士，長友傑，渡邉環，藤巻正樹，内山暁仁，込山美咲，西隆博，奥野広樹，池沢英二，熊谷桂子，段塚知志ほか仁科センター加速器基盤研究部を中心としたメンバーで実施しました．

最後になりますが，SRILAC 開発・建設・コミッショニングチームを代表し，これまで応援・サポート，また，温かく見守っていただきました理研内外の関係各方面にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます．

参 考 文 献

1) Y. Yano: Nucl. Instrum. Methods B **261**, 1009 (2007).
2) H. Okuno et al.: Prog. Theor. Exp. Phys. 03C002 (2012).
3) T. Nagatomo et al.: Rev. Sci. Instrum. **91**, 023318 (2020).
4) N. Sakamoto et al.: Proc. 29th Linear Accelerator Conference, Beijing, WE2A03 (2018).
5) K. Yamada et al.: Proc. SRF2019, Dresden, Germany, TUP037, 504-509 (2019).
6) H. Imao et al.: Proc. SRF2019, Dresden, Germany, TUP013, 419-423 (2019).
7) A. Grassellino: Proc. SRF2019, Dresden, Germany, TUFUA2 (2019).
8) Z. A. Conway et al.: Proc. HIAT2015, Yokohama, Japan, WEM1IO1 (2015).

9) M. Marchetto et al.: Proc. HIAT2015, Yokohama, Japan, WEM2IO1 (2015).
10) J.-M. Lagniel: Proc. HIAT2015, Yokohama, Japan, TUA2I01 (2015).
11) J. Wei et al.: Proc. SRF2019, Dresden, Germany, MOFAA3, 12-20 (2019).
12) H. C. Jung et al.: Proc. SRF2019, Dresden, Germany, MOFAB3 (2019).
13) S. Takeuchi, T. Ishii, H. Ikezoe and Y. Tomita: Nucl. Instrum. Methods **A287**, 257 (1990).
14) H. Padamsee et al.: RF Superconductivity for Accelerators, 2nd Edition (Wiley-VCH, ISBN-10 3527408428, 2008).
15) CST http://www.cst.com.
16) ANSYS http://www.ansys.com/.
17) K. Suda et al.: Proc. SRF2019, Dresden, Germany, MOP055, 504-509 (2019).
18) T. Watanabe et al.: Proc. IBIC2019, Malmö, Sweden, WEPP007 (2019).
19) N. Sakamoto et al.: Proc. SRF2019, Dresden, Germany, WETEB1, 752-759 (2019).