

## 会議報告

## SRF2011 会議報告

渡邊 謙\*

Report on SRF2011 (15<sup>th</sup> International Conference on RF Superconductivity)

Ken WATANABE\*

## 1. はじめに

2011年7月25日～7月29日にかけて15<sup>th</sup> International Conference on RF Superconductivity (SRF 2011)がアメリカ・シカゴで開催され、シカゴ市中心部にあるSheraton Chicago Hotel & Towers (図1)で行われた。ホストはANLとFNALであり、Co-ChairはMichael Kelly氏(ANL)とRobert Kephart氏(FNAL)が務めた。また、ConferenceのURLは、<http://conferences.fnal.gov/srf2011>である。

SRFの第1回目の会議は今から31年前の1980年にドイツのKarlsruheで開催された。1987年に開催された第3回目以降は2年おきに開催され、主に超伝導技術の研究が盛んな研究所の持ち回りで行われている。ここ数回は参加者数が急増し、今回の参加者数は前回と比べ約100人増の374人であった。第13回は北京(北京大学)で、第14回はベルリン(HZB: Helmholtz Zentrum Berlin)で開催され、次回2013年

の開催場所はフランス・パリ(CES Saclay)と決まった。第17回以降については、カナダ、インドが有力である。

本Conferenceは会議名の通り、超伝導の高周波特性とその応用について議論することが会議の趣旨である。そのため、発表内容は超伝導の高周波特性に関する基礎実験・理論から、材料開発、超伝導材料の性能を最大限引きだすための表面処理方法および製造技術、その応用である超伝導加速器システムについてなど非常に多岐に亘る。また、超伝導加速器の特徴として、High Duty (CW)の運転におけるRFコンポーネントの設計・製作・制御技術に関する発表もある。第1回からのプロシーディングスはJACoW.orgで検索可能である。

## 2. 会議報告

## 2.1 Conferenceの日程

SRFの特徴として、Conference開催の数日前にチュートリアルセッションがある。これは、主に学生や初心者を対象としたもので、超伝導の基礎や応用、最新の超伝導加速器技術を知ってもらうために行っている合宿である。そのあと、学生が主体のポスターセッションがあり、ここで最優秀賞に選ばれると賞金とConference内でOral Talkをする権利が与えられる。このセッションのMVPに選出されるには、研究内容のみではなく、基礎学力および非常に優れたコミュニケーション能力が問われる。今回の受賞者は、Cornell大学のSam Posen氏が選ばれた。題目は、Stoichiometric Nb<sub>3</sub>Sn in First Samples Coated at Cornellであり、Nbの表面にNb<sub>3</sub>Snの薄膜をコートし、かつ化学量論的に評価するためにSEM (Scanning Electron Microscope), EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometry), XPS (X-ray Photoelectron



図1 会場の Sheraton Chicago Hotel

\* KEK

Spectroscopy) などを用いて分析した。現状ではサンプルの成分分析と残留抵抗および  $T_c$  の測定 ( $T_c$ : 18 K, 10 K における抵抗値: 約 100 n $\Omega$ ) まで完了しており、今後は Pill Box 空洞 (TE-mode) を用いて、RF 試験を行う予定とのことである。

さて、Conference のスケジュールであるが、今回は朝 8:00 からセッションが始まり、一回のコーヒープレイクをはさんで 13:00 まで Oral talk、午後は昼食をはさみ 14:30 ~ 18:00 までポスターセッションという形がとられた。Oral talk のセッションは 6 つあり、計 63 の発表があった。また、18:00 ~ 19:00 の間は HOT TOPICS というセクションが設けられ、最近問題となっている話題について、各研究所および各企業から発表があり、問題解決に向けて議論し合った。今回、話題となったテーマは L-band 9-cell 超伝導空洞における性能制限の原因の一つである幾何学的欠陥の発生状況および発生原因について、超伝導材料・表面処理方法における超伝導空洞の Q-slope の振る舞いについて、L-band 9-cell 超伝導空洞における表面処理のパラメータおよび空洞製造方法の比較の 3 つであり、いずれも非常に面白くかつ一筋縄ではいかないテーマであった。これらを取りまとめた Chairman 達は非常に苦労されたと思う。図 2 に会議の様子、図 3 にグループフォトを示す。

Oral talk のセクションは以下のものがあった。

1. Overview of SRF Challenges for Projects Recent and New
2. New Material/Techniques
3. R&D/Diagnostics/Fabrication
4.  $\beta = 1$  Cavity,  $\beta < 1$  Cavity
5. SRF Technology
6. New/Emerging SRF



図 2 会議の様子

## 2.2 Overview of SRF Challenges for Projects Recent and New

現在進められている超伝導加速器を用いた大規模プロジェクトの進捗状況における Overview があり、European XFEL, ILC, ERL, CEBAF, Project X, Low- $\beta$  空洞, SNS, 超伝導 RF 電子銃 (ELBE, BERLin Pro など) の話があった。XFEL では、800 台の L-band 9-cell 空洞を 100 台のクライオモジュールに入れ、17.5 GeV で運転することが計画されている。そのクライオモジュールをどのように製造していくかについて、ヨーロッパにある研究機関の役割分担およびインフラ・トレーニングの進捗状況の報告があった。その際、加速器を構成する各コンポーネントおよびクライオモジュールはドイツ、フランス、イタリアにある研究所・企業間で製作・調整される。そのため XFEL の建設場所であるハンブルグ (ドイツ) へ性能を劣化させずに長距離間を輸送することがプロジェクト成功の鍵の一つとなり、その方法についても報告があった。このノウハウは複数の地域で超伝導加速器を製造し、建設サイトへ輸送を考えている大規模プロジェクトにとって非常に参考になるだろう。CEBAF では、現在、12 GeV へのアップグレードを行っている。その一環として、これまで使用しかつ 20 年間に亘る期間を運転した超伝導加速器に対して、最新のノウハウを生かして、再洗浄・組み立て・性能評価が行われて、5.5 MV/m だったものが 13.5 MV/m まで改善するという興味深い結果が得られていた。また、新たに超伝導空洞の処理設備が建設中とのことである。また、ELBE では 2010 年 2 月に世界で初めて、L-band 超伝導 RF 電子銃でビーム加速に成功したとの報告があった。使用したフォトカソードは Cs<sub>2</sub>Te であり、バンチあたり 60 pC のビーム電流が加速された。

## 2.3 New Material/Techniques

このセッションでは、新たな超伝導材料として研究されている薄膜の実験結果や薄膜の電気的特性を測定するための手法などについて議論された。ここで報告された研究のモチベーションはこれまで用いられてきた Nb 材では臨界磁場 ( $H_c$ ) が ~ 200 mT であり、この値で加速電界の上限が決まってしまう。また、 $Q_0$  値についても Nb 材単体では限界が見えていることにある。そこで、Nb 製空洞もしくは銅製空洞の表面に TFML (Thin Film Multi Layer) を構築することで、 $H_c$  が 500 ~ 1000 mT へ、さらに残留抵抗 (BCS 抵抗) が大幅に減少する可能性があるため、薄膜の研究が世界各国で行われている。薄膜として用いられる材料は、Nb, B<sub>0.6</sub>K<sub>0.4</sub>BiO<sub>3</sub>, Nb<sub>3</sub>Sn, NbN, MgB<sub>2</sub>, Ba<sub>0.6</sub>K<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>



図3 グループフォト (Courtesy of Argonne National Laboratory) <http://conferences.fnal.gov/srf2011/gp.jpg>

などがあり、また、Insulator として MgO などが用いられていた。

これら薄膜を評価するために、実際に Nb 製の 1.3 GHz, 6 GHz, X-band の単 cell 空洞を用いた RF 測定の結果が報告されていた。

#### 2.4 R&D/Diagnostics/Fabrication

次いで、Nb 製超伝導空洞の R&D の状況報告がなされた。報告には、Nb 製超伝導空洞の表面処理に用いられるスタンダードな処理方法である電解研磨 (Electro polishing: EP) やアニールなどの最適化と定量的・定性的理解について、大量生産を目的とした空洞製造における問題点について、性能が悪い空洞の原因の特定、空洞補修方法およびその結果について、などがあった。セッションの一番目の発表は、JLAB の Hui Tian 氏による “Quantitative EP Studies and Results for SRF Nb Cavity Production” であった。これは Nb 製超伝導空洞をアノード、アルミ製電極をカソードとした場合における EP のプロセスを定量的に理解するために行われている研究であり、EP における各パラメータの最適化・コントロールが主な目的である。報告では、EP 中に発生し、かつコンタミの一つである硫黄を如何にして抑制するかといったものや、電解液の組成や温度といったパラメータに対する電流密度の変化の測定結果があった。EP のプロセスを等価回路モデルで示し、研磨時の電流密度の変化を Diffusion, Migration Convection

の3つのパラメータで表した。そのパラメータに関する実験結果を示した。また、彼女の研究は今回の Conference の Career Award に選出された。Low- $\beta$  空洞の表面処理では、新しい EP システムとして、ヘリウムジャケット溶接後の空洞に対する横型の EP システムについて報告があった。2本のカソードバーを使用することや、EP 中の空洞の冷却はヘリウムジャケット内に通水するというユニークな方法である。対象とする空洞は 72 MHz の QWR (Quarter Wave Resonator) であり ATLAS のアップグレードを目的としている。

#### 2.5 $\beta=1$ の空洞, $\beta < 1$ の空洞 (low- $\beta$ ) の話

このセッションでは、世界各国の研究所で開発が行われている超伝導空洞の開発状況およびそのレビューについて報告があった。報告があったプロジェクトには以下のものがあった。 $\beta=1$  の空洞の報告では、S1-Global (KEK), U.S. における L-band 9-cell 空洞の状況報告 (FNAL), Deflecting と Crabbing に使用されている超伝導空洞のレビュー、 $\beta \sim 1$  の QWR らのレビュー、CW SC Linac として GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung : Helmholtz Center for Heavy Ion Research) の計画、CERN で計画されている SPL (Superconducting Proton Linac) の空洞設計について (CEA-Saclay)、インドにおける単セル超伝導空洞の開発状況などがあった。一方、 $\beta < 1$  (low- $\beta$ ) 空洞の報告では、Project X (FNAL)、日本の六ヶ所村に建設が

予定されている IFMIF project に用いる各コンポーネントおよびクライオモジュールの開発状況 (CEA-Saclay, CIEMAT-Madrid Spain, FZ-Julich), ATLAS のアップグレードや ANL の Proton Linac の状況, TRIUMF/ISAC の進捗状況や将来計画について, HIE-ISOLDE における Nb/Cu 製の QWC (Quarter Wave Cavity) の開発状況 (CERN) などがあつた。

### 2.6 SRF Technology (Cryomodules, Tuners, Couplers, Innovative Ancillary Systems)

最終日の始めのセッションは、クライオモジュール、周波数チューナー、カップラーの開発状況や運転周波数の補正などに関する革新的な補助システムに関する報告であつた。報告では、補助システムとして超伝導空洞のパルス運転で問題となるローレンツフォースデチューニングのピエゾ素子を用いた補正技術について L-band 9-cell cavity と 325 MHz SSR1 Spoke Resonator における実験結果の報告、Low- $\beta$  空洞におけるチューナーシステムについて、超伝導空洞システムにおいて非常に重要な HOM Damper の最新情報について (2010 年に行われた HOM Workshop at Cornell からの抜粋)、Spiral-2 で用いる入力カップラーの開発状況、ERL に使用することを目的とした CW 用入力カップラーのレビュー、KEK で建設が進められている cERL (Compact Energy Recovery Linac) における入射部・主加速部に用いられる超伝導空洞システムの開発状況であり、セッションの最後に HZB (Helmholtz Zentrum Berlin) の HoBiCat で試験が行われている超伝導 RF 電子銃を用いた Photo-injector の開発状況について報告があつた。HoBiCat ではプラズマアークとマスキングを用いて L-band 1.5-cell 空洞内に直接 Pb film (直径 5 mm) を蒸着し、この Pb のフィルムをカソード面 (Pb も超伝導物質であり、 $T_c$  は 7.2 K である) として用いた超伝導 RF 電子銃の試験を行っている。発表では、カソード有り無し空洞の単体試験の結果やエキシマレーザーを用いたカソードまわりのクリーニングの効果およびビーム試験の結果など興味深い内容が数多くあつた。ビーム試験では、バンチあたり 5~6 pC の電荷、3 から 4 psec のバンチ長、最大で 1.8 MeV を達成している。レーザーの波長は 258 nm である。現在、ビームプロファイルの測定中とのことであり、IPAC2011 (<http://www.ipac-2011.org/inicio.asp>) でその結果が報告される予定である。

### 2.7 New/Emerging SRF (Capability & Application)

最後のセッションでは、主に中国、インド、ヨーロッパにおける将来計画について報告があつた。報告には、北京大学における超伝導空洞のアクティビティ、

ADS (Accelerator Driven System) と CSNS (China Spallation Neutron Source) に対する中国の計画、インドにおける ADS の計画、LHC で計画されているクラブクロッシングの計画、ESS (European Spallation Source) 加速器における中性子生成の計画などがあつた。

## 3. 施設見学

今回企画された施設見学は FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory) コースと ANL (Argonne National Laboratory) コースの 2 コースあつた。筆者は FNAL コースに参加した。最終日の午後に会場である Sheraton Chicago Hotel & Towers からバスで発ち、シカゴ市中心部から西に約 1 時間 30 分かけて、イリノイ州 Batavia にある FNAL に到着した。

見学では、15 人程度の小グループに別れた。小さなスクールバスに乗り換え、広大な敷地内に点在する超伝導加速器 (Project X) 関連の施設を回つた。回つた施設は、クライオモジュール試験施設 (CMTF)、ドレスアップした L-band 9-cell 空洞および 325 MHz スポーク空洞などの空洞の単体試験を行う横測定試験施設、建設が進んでいる超伝導空洞の表面処理設備 (CPL)、現在稼働中の縦測定スタンド、クライオモジュールアセンブリ施設および超伝導空洞の各種検査設備であつた。

## 4. その他

会議の最後に次回の開催地と Chair の紹介があつた。次回の開催国は冒頭に述べたようにフランス (パリ)、Chair は Claire Antoine 氏 (CEA-Saclay) と Sebastien Bousson 氏 (IPN) に決まったことが報告された。また、SRF conference では、Captain Cap とベルが代々 Chair に引き継がれる (図 4)。これらの引き継ぎもこのとき行われた。



図 4 Chair の Robert Kephart 氏と代々引き継がれる Captain Cap とベル