

## 会議報告

## 2012 Seventh CW and High Average Power RF Workshop 報告

佐々木 茂樹\*

## Report on 2012 Seventh CW and High Average Power RF Workshop

Shigeki SASAKI\*

## 1. はじめに

本年(2012年)5月7日～11日の日程でBNLがホストとなり、米国ニューヨーク州ロングアイランドのPort JeffersonにあるDanfords Inn & Marinaというホテルを会場に2012 Seventh CW and High Average Power RF Workshopが開催されたので、簡単に報告します。

このワークショップは2000年に第1回が行われてその後隔年で、今回を含めて今まで北米で4回、欧州で3回開催されています。初回は約25名の参加で始まったものが、今回は約60名の参加をみています。

一昨年の報告<sup>1)</sup>にも記しましたが、前回はALBAでの開催で、その前がCERN、その前がAPSというところまでは把握しています。それ以前の歴史についてはよくわかりません。2009年の秋にChairをしているAPSのAli Nassiri氏から「SPRING-8も参加すれば世界の3大放射光施設からの参加がそろそろ、ついでにはSPRING-8から組織委員かプログラム委員を出してもらえないだろうか」という旨の打診があり、それを受けてALBAで開催された前回から参加することにしたのです。

ワークショップの概要や出席者等は、BNLのワークショップ概要のWEBページに記されています<sup>2)</sup>。また、プレゼンテーション資料等はCERNのindicoのページからダウンロードすることができますので、興味のある方はそちらをご覧ください<sup>3)</sup>。

前回と今回参加してみて、参加者のかなりの顔ぶれが重なっているように見えました。また、話も施設の報告に類する講演に関しては各施設の概要のあと前回の報告からの変化が伺えるというものが多かったとい

う印象です。

一日目は主に各施設のRFシステムの紹介や前回からの進捗の報告などに当てられました。二日目は午前中が主に半導体アンプ関係で午後はBNLへのツアーで、建設中のNSLS-IIとERLの見学でした。その後夕方からバンケットでした。三日目は午前中がIOT/Klystron関係で、午後はパワーシステム/キャビティ/カプラー等、四日目の午前中はその他の話題で、四日目の昼までで閉会となりました。

BNLへのツアーですが、セキュリティが厳しくなっているせいか、一ヶ月ほど前の4月7日までにゲスト登録をする必要がありました。何かの折りにBNLを訪問されることを考えている方は実際に連絡しても入構できないかもしれません。少なくとも一ヶ月くらい前に手続きをしておかないと入構できないようなので、注意した方がいいかもしれません。このような手続きの煩わしさもあって、BNLのサイトをワークショップの会場にするのが難しかったのではないかと想像しています。

NSLS-IIは200 MeVのLINACのコミッションングが一部開始されていますが、ブースター、光源リングは建設途上で、光源リングについては電磁石が運び入れられ始めた所です。写真にもあるように架台ごとカバーがかけられた磁石が並べられている状態でした。

RFシステムはブースターがPETRAタイプの7セル・キャビティに80 kWのIOTでパワーを供給するというもので3 GeVまで加速します。リングはCESERタイプの超伝導キャビティに300 kWクライストロンでパワーを供給するというものです。当初はキャビティ1個で始めて、2個で定格の500 mAまでの蓄積が可能となります。最終的には4個のキャビティまでの拡張

\* 高輝度光科学研究センター JASRI, Japan Synchrotron Radiation Research Institute  
(E-mail: sasaki@spring8.or.jp)



写真1 NSLS-IIの光源リング内に並べられ始めた電磁石

を計画しています。

光源リングのクライストロン、導波管ネットワーク等は設置されていましたが、キャビティ、冷凍機等はまだ製作中で設置予定場所の紹介がされた程度でした。2013年にコミッショニングを開始すべく建設が進んでいる所です。

## 2. HOT talk

このワークショップの特色として、HOT talk と称する discussion session の時間が取られていることです。前回の ALBA では IOT vs Klystrons vs SSA をタイトルに Paco Sanchez 氏が各コンポーネントの得失等をまとめて議論を誘発する形でした。今回は二日目の午前前半と三日目の午前前半がこれに当てられました。二日目は半導体アンプの vendor 2 社が、三日目は IOT の vendor 2 社がそれぞれの取り組みを紹介し、それに関する質疑応答等をきっかけに議論を誘導しようと言うものでした。

個人的な印象だと、半導体アンプのセッションは結構議論が盛りあがったけれど、IOT に関してはそれほどでもなかったと感じています。これは半導体アンプに関しては素子の技術開発が進行中の分野で2年前のワークショップからでもかなりの進化が認められるのに対し、IOT はそれに比べると大きな進捗がある訳ではないということに起因しているものと思われます。

IOT 関係の HOT talk のセッションでは技術的な議論というよりは、vendor の開発体制とか、そのための投資の回収に関する話とか、どちらかというところ economics 関係の議論に終始した感があります。加速器で使用されている IOT は元々は UHF 帯の放送用のものをベースにして加速器用途に変更/改造したものです。加速器ソサエティ側からは、なるべく安価に安定的に球を供給してもらいたいという要望があるのに対し、vendor としては開発コストの回収も視野に入れ

た供給体制を考えないといけないということで、必ずしも利害が一致しない間での議論がなされたという印象です。

## 3. 半導体アンプ

半導体アンプ関係の HOT talk のセッションは NXP と Freescale の最近の開発状況及び近未来の見通しに関するもので始まりました。半導体アンプに関しては、この数年での進捗は目覚ましいものがあるという印象で、単体のパッケージで 1 kW の CW 出力が扱えるレベルまで来ています。放射光施設として最初に本格的に半導体アンプを導入した SOLEIL では約 300 W のモジュールを組み合わせていました。同一の合計出力を得るには三分の一のモジュール数ですむことになります。

現在は第七世代の LDMOS で 50 V の電源で動作するタイプだと数百 MHz 程度以下の周波数で出力 1 kW、効率 60%、ゲイン 15 dB 前後のパフォーマンスが期待できるようです。

私が特に印象深いと思ったのは、ruggedness といっていました。負荷の整合がとれない状態でも壊れずに動作し続けることができるというもので、この種の耐故障性はここ 1~2 年で非常に向上しているようです。この ruggedness は VSWR で表現され、二社とも VWSR > 65:1 まで扱える製品があるということでした。CO<sub>2</sub> レーザーによる溶接とか、MRI 用途とかで、負荷が整合しない状態での使用が要求されるということから、開発が促進されたようです。火花を散らしながらも動作し続ける様子を映した動画も紹介されていますので、興味のある方はご覧下さい<sup>4,5)</sup>。

なお、現在第七世代 LDMOS と並行して、GaN 半導体の開発も進んでいるようで、NXP の発表資料によると、数年後には L~C バンドで数百 W/ 素子までが視野に入ってくるようです。

どこの施設でも同じかとは思いますが、Reliability, Obsolescence, Fatigue and Aging が担当者のキーワードとなっています。例えば obsolescence について言えば、半導体の進展はありがたいのだが、RF システム等加速器に適用した場合に、メンテナンスをしようと思ったら、既にパーツが入手不可になってしまう、というようなことを懸念しています。Freescale の講演で longevity program というのが紹介されました。これは通常よりも長い期間製造を保証するというもので、いくつかの製品についてはこの program のもとに生産されるというものです。出席者からはその年限はどのくらいか? という質問があり、答えは 15 年程度というものでした。ところが、それではまだ短い、30 年とか 40

年とかにならないのか?等の応答がなされました。

引き続き, ESRF のブースター用 150 kW 半導体アンプの紹介がありました。福島第一原発の汚染水処理で有名になったフランスの AREVA 傘下の ELTA という vendor が製作を担当し, 650 W モジュールを組み合わせて 2 台のタワーとし, その出力を合成して 150 kW の出力を得るといふものです。

最初に半導体アンプを導入した SOLEIL ではタワーが 4 台で 180 kW でしたが, ESRF ではタワー 2 台で 150 kW と設置スペースはかなり減らすことができるようになってきています。この 4 月にブースターへの受け入れテストをしたばかりで, 実稼働データはまだですが, ベンチテストでのパフォーマンスが紹介されました。出力パワー最大 170 kW まで試験済みで, 効率の要求値 55% 以上に対し, 57~8% 程度を達成, ゲインは 64 dB です。使用素子は第六世代の LDMOS ということなので, 第七世代が実用化に入ればさらなる性能向上が期待できます。

タワーを構成するには 650 W パワーモジュールからの出力を分配, 合成する必要がありますが, そのために何段もの同軸及び導波管の合成器を使用しています。ESRF では 132 個のパワーモジュールを一個のキャビティ合成器に直接取付けて合成しようという R&D を進めています。すべてのモジュールが正常に動作しているときは問題ないのですが, 一個が故障した時に他からのパワーを吸い込んでしまうのでその対策が問題となっています。うまくいけば同じ個数のパワーモジュールに対し省スペースの効果が期待できるということです。

SOLEIL も ESRF も直接には 352 MHz の klystron が入手できないところから半導体アンプの導入が始まっているようですが, IOT なり klystron なりの入手が困難な場合, 出力レベルが 200 kW 程度までであれば, 半導体アンプは有力な選択肢となると思われます。ただ, klystron の obsolescence が動機で始めた project ですが, 今度は個々の半導体素子の obsolescence が気になる所ではあります。

#### 4. その他の話題

その他の話題から私の興味に従ってかいつまんで簡単に紹介します。

LHC のトンネル内のアーク検出器が, 2011 年夏以降のビーム強度増強後, ビームフィルの度にトリップしてビームダンプするようになってしまったので, 新しいアーク検出器を開発したということです。放射線が検出器をたたくのが偽トリップの原因だということで,

実際にアークを発生させる装置を試作し, アーク検出時の波形と放射線が検出器を通過したときの波形との違いを調べ, 偽トリップの発生しにくい検出システムを開発したものです。まず, 4 個のフォトダイオードを組合せて四方向に検出エリアを向けます。放射線の場合は単一の検出器しか信号を出さないのに対し, 実際のアークの場合は複数個の検出器が信号を出すか, 信号の時間幅が異なるので, これを利用したインターロックロジックを組み, アークと放射線バックグラウンドを区別するというものです。このアーク検出器に変更してからは偽トリップは発生していないということです。IPAC2011 でも報告されているので詳しくはそちらをご覧ください<sup>6)</sup>。

また, CERN の Eric Montesinos の報告によると, SPL, ESRF/SOLEIL/APS, Linac 4 などのカプラーを開発してきているということでしたが, 自分たちで設計, 試作, 製造をしているようで, 少し日本とはやり方が違うのかな? という印象を持ちました。と同時に, 最近では mechanical test の一部に 3D printing を使い始め, 機械的構造とか, 組み立て時の取り合いとかの確認に活用しているようです。さらに導電性ペイントを用いて S パラメータのチェック等も行っているということでした。機械加工で試作するよりも短期間で安価にすむという利点があるということです。コンピュータ上で 3D-CAD のデータさえ作ってしまえば, あとはプリンターにデータを送れば試作品が手に入るということです。

以上, 偏った内容ではありますが報告とさせていただきます。なお, 次回は 2014 年 5 月頃に欧州で開催の予定です。ホストの第 1 候補は Sincrotrone Trieste, 第 2 候補は ESRF です。

#### 参考文献, 参考 URL

- 1) 佐々木, 加速器 Vol. 7, No. 2, p.144 (2010)
- 2) <http://www.bnl.gov/cwrf2012/>
- 3) <https://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?oww=True&confid=172231>
- 4) NXP の ruggedness のデモの動画  
<http://www.youtube.com/watch?v=8ziYqjMQGEQ>  
または, Youtube Video で  
“NXP’s Unbreakable BLF578XR LDMOS Power Transistor” でサーチ
- 5) Freescale の ruggedness のデモの動画  
<http://contact.freescale.com/content/RuggedVideo?t=el>
- 6) D. Valuch, N. Schwerg, O. Brunner: PERFORMANCE OF THE ARC DETECTORS OF LHC HIGH POWER RF SYSTEM, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, pp. 1704-1706.