

会議報告

2010 Sixth CW and High Average Power RF Workshop 報告

佐々木 茂樹*¹

Report on 2010 Sixth CW and High Average Power RF Workshop

Shigeki SASAKI*¹

1. はじめに

本年(2010年)5月4日~7日の日程でスペイン、バルセロナ郊外のALBAを会場に2010 Sixth CW and High Average Power RF Workshopが開催されたので、簡単に報告します。筆者の興味とか力量の問題もあるので、報告というよりは感想に近いものになるかもしれないことをあらかじめお断りしておきます。

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3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。前回はCERN、その前がAPSというところまでは把握しているのですが、それ以前の歴史についてはよくわかりません。昨年の秋にChairとなっている、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、については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、それを受けて参加することにしました。

会期中にAli Nassiri氏に会議名がCW and High Average Power RFとなっているので、CWRFというのはわかりやすいのだが、high average powerの定義は何か?と訪ねたのですが、明確な切り分けはないが、大方msくらいのロング・パルスか、ショートパルスの場合はデューティの高いものという程度ということでした。例えば60 Hzで動かそうとしている播磨サイトのXFEL等はカバーされる範囲に入るだろうということでした。ハイ・パワーのRFを何でも含んでしまうと会議が大きくなりすぎるとか、テーマが拡散してしまうとかを危惧して少し人数等を絞り込みたかったのでこのようなタイトルを採用したとい

うことのようにです。

ワークショップはALBAの加速器のheadのDieter Einfeld氏による、バルセロナの街、CELLSという組織、およびALBAの紹介で開幕しました。ここでCELLSはConsortium for the Exploitation of the Synchrotron Light Laboratoryに対応するスペイン語のacronymのようです。ALBAは放射光源施設の名前で、その運営組織がCELLSです。CELLSはスペイン政府とカタルーニャ自治州政府が50%ずつ出資して設立・運営している組織で、現在約150名のスタッフを擁しているということです(加速器、ビームライン、エンジニアリング、IT、事務などすべて含んだ人数)。

ALBAは100 MeVのLINAC、およびブースター・シンクロトロンを入射器とする3 GeVの放射光源リングで、周長は約270 m、蓄積電流400 mA、エミッタンスは4.3 nmradなどが主要パラメータです。既に2009年の12月にブースターまでビームを通す試験を終えています。蓄積リングとブースターが同じトンネル内にあり、ブースターは内周側の壁からサポートされる構造となっているため、ビームテストを中断して、目下蓄積リング、初期の7本のビームラインの建設を進めているところです。今年(2010)の秋からコミッショニングを開始して来年にはユーザーにビームを供給し始める予定です。また、できるだけ早期にトップ・アップ入射を開始するということでした。

ALBAの敷地入口の守衛所の手前に倉庫のような建物があり、そこに写真のような看板(図1)が張ってあります。ALBAのロゴの下に3カ国語で記されていて、一番下が英語のSYNCHROTRON LIGHT SOURCEとなっています。上の2カ国語は一体なん

*¹ 高輝度光科学研究センター JASRI, Japan Synchrotron Radiation Research Institute
(E-mail: sasaki@spring8.or.jp)

だろうと思い、今回のワークショップの co-chair となっている、Paco Sanchez 氏に聞いたら、一番上はカタルーニャ語で真ん中がスペイン語という答えでした。カタルーニャはスペインの中でも独立意識の高いところだと聞いたことがあります、CELLS の出資比率が 50% ずつということとも関連して、このような看板が掲げられているのかと、日本人からすると

よっと面白いものだと感じました。街の中の標識や看板もどうもカタルーニャ語のものがいっぱいあるようなのですが、元々近い言葉のようなのも手伝って、そもそもスペイン語がわからない筆者にはスペイン語とカタルーニャ語の区別はさっぱりつきませんでした。

話を戻して、引き続いて ALBA の RF と Diagnostics を supervise している Francis Perez 氏による ALBA の RF についての紹介が行われました。特徴的なのは、蓄積リングの RF に IOT を使用しているのですが、IOT の出力パワーの関係から、パワー合成が必要なため、2 本の IOT の出力を Cavity Combiner (CaCo) で合成して 1 個の加速用空洞にパワー供給しているところです。空洞は BESSY との collaboration で開発した DAMPY というニックネームの HOM (Higher Order Mode) damped cavity です。HOM の吸収用に 120° の間隔で 1 m ほどの長さの導波管が取り付けられています。導波管の中には吸収体のフェライトが入っています。空洞本体部分よりもダンパー部の方が大きいというユニークな形をしています。ワークショップの記念写真 (図 2) をこのキャビティの周りで撮ったので特徴的な外観がわかるかと思えます。



図 1

2. 半導体アンプ

その後のセッションでの発表内容を網羅するのは筆者の能力を超えていますので、ここでは印象に残った部分だけを記すことにします。プログラム、発表資料



図 2

などは web からダウンロードが可能となっていますので、そちらをご覧くださいと思えます^{†1}。

私が放射光施設所属ということもあり、どうしても放射光源関係に興味が向いてしまうのですが、いくつかの放射光施設において、従来はクライストロンが使用されていたところに半導体増幅器 (SSA: Solid State Amplifier) を使用したシステムが採用されたり、採用の検討がされたりしています。

今回も SSA のセッションがあったり、IOT vs Klystrons vs SSA というタイトルの HOT Talk と称する discussion session があって活発な分野であるという印象を受けました。これは、ハイ・パワー分野ではまだ発展途上の技術ということで、いきおい発表件数も多くなるという事情があるものと思います。

SSA 採用の先鞭を付けたのはフランス、パリ郊外にある SOLEIL という放射光施設です。SOLEIL の建設期にリングの RF のパワー・ソースをどうしようか? ということになったのですが、その時点で 352 MHz の tube が入手不可であり、また 35 kW の SSA が booster でうまく動いていたという事情もあって、180 kW の SSA の開発を Polyfet という LDMOS の供給メーカーと共同で行うことを決意したようです。352 MHz のパワー・ソースを入手する必要があったのは CERN で開発した超伝導キャビティを採用することが決まっていたという事情によるものです。

315 W のモジュールを 8 個組み合わせて 2.5 kW のグループを形成し、それをまた組み合わせてタワーと呼ばれる状態に組み上げ、このタワーをさらに 4 台組み合わせて 180 kW のアンプを形成するというものです。アンプは 726 モジュール (この数には standby 状態のモジュールも含まれます) で構成されています。

約 4 年間での運転からアンプ・モジュールの故障率は約 3% 程度ですが、初期の方が故障率が高く、例えば 1 年後以降は 1% を切るくらいまで下がるようです。DC-DC コンバータの故障は今までないということです。モジュール単位で順次交換すればよいのでビームのトリップには至らない、というのが利点です。年間のモジュール交換による保守コストは約 5 kユーロということでした。効率はアンプ全体で約 50% でゲインは 53 dB、位相ノイズは 0.06°以下、ハーモニクスは -50 dBc 等の性能を達成しています。

現在は半導体の製造プロセスがさらに進化し、6-th generation RF LDMOS と表現していましたが、この

世代のものを使うと 50VDC の供給電圧で動作させることができ、1 kW 程度までのモジュールが照準に入ってきます。効率は 352 MHz であればモジュール単体では 70% 程度まで、500 MHz だと 60% 程度ということでした。

ブラジルの LNLS でも SOLEIL との collaboration で 476 MHz のクライストロンを SSA で置き替えることにしたそうです。また、ESRF ではアップグレードに伴い、700 W のモジュールを用いた SSA を採用することにしています。1 個のアンプを形成するタワーは SOLEIL の 4 個から、2 個にすることができ、設置場所の専有面積の効率化がはかれるようになりました。

3. HOT talk

先ほど述べた、IOT vs Klystrons vs SSA というタイトルの HOT Talk と称する discussion session では各パワーソースについての特徴等の一通りのレビューのあと、コスト比較 (xx ユーロ/kW) の紹介をきっかけに議論が活発化しました。3 種類のパワー・ソースについてのコスト比較についても、クライストロンと IOT はタマの値段だけで SSA には電源まではいっているじゃないか! とか、それではと電源込みでのコスト比較を初めて見ると、購入費用だけの比較ではだめで製品寿命とか維持費用とかも入れないといけない! とか、結論らしきものは得られず、各施設での要求や境界条件にあわせて最適解を求めるというのが結論といえ結論ということになりました。

3 種類のパワー・ソースの中ではクライストロンが最もこなれているというか、枯れている技術で、運転寿命を評価するデータの蓄積も多いのですが、IOT の採用は比較的最近のことで運転寿命などの適正な比較ができるだけのデータが蓄積されているわけではないという事情も議論を活発化させたというか、議論をややくしくした一因ではないかと思われま。

各施設で考慮すべき境界条件としては、購入コスト、導入コスト、運転コスト、製品寿命、システムの寿命、maintenance (cost), hardware resource, human resource, reliability, availability, redundancy 等が考えられ、施設ごとにかなり異なることが想像できます。例えば、放射光施設の場合は同時に多数のユーザーが使用しているので、クライストロンの故障で運転不能になるとか、ビーム電流を大幅に下げて運転せざるを得ない状況になるよりは、SSA でアンプを構成する個々のモジュールが少々壊れてもほぼ定格のビーム電流を維持できる方が望ましいという事情があります。

^{†1} <http://cwrwf2010.cells.es/>

しかし、今までクライストロンを設置していたところに SSA をおくのは仮にクライストロン+高圧電源と専有面積が同程度だとしても、導波管等を含んだレイアウトまで含めると配置が難しく、導入には購入コストの他に建物の改造とか新たなコストが必要になる等が考えられるので、それぞれ考慮すべきことは異なるということです。Availability に関していえば、ビームの availability ということもあります。例えばメーカーからのクライストロンの供給が将来も安定的に続くかどうか？ などもこの範疇に入るのかと思います。

さらに、SSA の議論の中で何らかの標準化を行い、例えば 19 インチラックにユニットをいくつか取付けられず動かせるような規格を作るのはどうか？ という話が出ましたが、これに対して obsolescence の問題が提起されました。特に技術進歩の速い分野では規格がすぐに陳腐化してしまい、規格に縛られると新しい技術の性能へ最適化した設計が困難になる。また、規格を維持しようにも保守品等の供給が停止されてしまうリスクもあるであろうということで、共通規格の話はそこで立ち消え状態となりました。

ただ、obsolescence の問題はある程度大型の施設の場合、仕様が決まってから運用に入るまでそこそこの年数が経過するので、施設の設計時には最新の技術が完成時には陳腐化しているというリスクがある等、かなり難しい側面を含んでいるとの印象を持ちました。これはパワー・ソースに限らず LLRF (Low Level RF) などについても言えることではないかと思えます。

LLRF についても一件 HOT talk が割り当てられていたのですが、直前に講演者の都合がつかなくなったとかで、3 件の LLRF に関する短い講演で差し替えられました。いずれも digital LLRF に関するもので、コンディショニングや立ち上げの自動化が可能である、トリップ時の原因調査が容易になる、などがデジタル化の利点としてあげられていました。

LLRF 分野も AD/DA や FPGA の高性能化で現在急激な技術革新の最中にあると認識していますが、逆

に言う先述の obsolescence との戦い？ にもなるかと思えます。ある程度規格化しておけば、ADC や DAC が高性能化した際に単純にチップを差し替えて対応できるようにもなりますが、高性能化の度合いによっては全体性能の最適化を行って再設計ということも常に考える必要があると思います。その際は LLRF の高性能化が system 全体にどのくらいのインパクトとなるかを評価して cost-effectiveness tradeoff を考える必要があろうかと思えます。

その他、各施設の紹介、現状報告や、新規計画の紹介、新しいコンポーネントの導入経験、トラブル対応事例等の報告が行われました。これらについての詳細は省きます。

4. おわりに

ところで、「ALBA というのは何かの頭文字を集めた acronym に違いない、一体どの単語なんだろう？」と思っていたのですが、スペイン語で夜明けとか曙光とかいう意味の一つの単語で acronym ではないようです。「そういえばフランスの SOLEIL はフランス語で太陽のことだし、英国の DIAMOND はそれこそ日本語にもそのまま入っているダイヤモンドのことで、各国が自国の言葉でニックネームをつけていて、何かの acronym になっているわけではないようだ。なので、日本の加速器にも日本語の愛称をつけたらどうだろうか？ 播磨の X-FEL も来光とか曙とか何とか、なんか光に関係ある言葉はどうだろうか？ しばらく前に愛称の募集があったけど、まだ正式に発表があったとは聞いていないけど一体どうなったんだろう？」などとたわいもないことを思いながら帰り道につきました。ところがそんなことを考えているうちに、既に「はやぶさ」だの「あかつき」だの先にはいっぱい例があるのに気がつきました。だから何だ、というわけではありませんが、筆者の戯言だと聞き流して(読み流して?) おいてください。

以上、つたない報告ではありますが、ここで筆を置きます。