

会議報告

ICFA ビームダイナミクス ミニワークショップ報告
デフレクティング/クラビング空洞の加速器への応用

中里 俊晴*

Report on ICFA Beam Dynamics Mini-Workshop
on Deflecting/Crabbing Cavity Applications in Accelerators

Toshiharu NAKAZATO*

1. 概 要

このミニワークショップ（以下 WS）は 2008 年 4 月 23 日から 25 日まで上海の SSRF で行われた。その名のとおり小規模で家族的な雰囲気で行われ、ホスト研 SINAP（中国科学院上海応用物理研究所）の気配りに好感が持てた。本報告の題は WS の正式名称に従って「デフレクティング/クラビング空洞」と記述したが、以下、「デフレクタ」と略記する。ここでデフレクタとは高周波電磁場を使って荷電粒子をその進行方向に対して垂直方向（横方向）に偏向させる装置である。

主催者は WS の目的を「加速器研究者が集まり、デフレクタ研究開発の進捗状況について議論する」とし、次のようなトピックスを挙げている。

- コライダー（KEK-B, LHC, ILC, ...）
- 放射光源における短パルス X 線の生成
- ビームマニピュレーション, エミッタンス交換, ビーム診断

参加者リスト上の参加人数は 39 名（中国 22, アメリカ 9, 日本 3, イギリス 2, ドイツ 1, イタリア 1, スロベニア 1）であるが、筆者は出欠を確認していない。パラレルセッションはなく全員が同じ部屋（写真 1）に集合して進められた。

2. 発表内容

この発表内容の選択は筆者の興味と主観による。また、割愛した重要事項もあるので主催者のホームページ^{*1}にあるプログラムと発表資料を参照されたい。但



写真 1 ワークショップ会場風景

し、プログラム上のタイトルと発表資料のタイトルが異なる場合がある。本稿は Smith, Lab, 23（Smith 氏所属 Lab, 4 月 23 日発表）のように発表者と所属の他に発表資料検索の便宜のために発表日を記した。使用した記号は、 f : デフレクタの運転周波数, V_{\perp} : キック電圧, P : 入力電力, CW: 連続波, f_{rep} : 繰り返し周波数（パルス運転の場合）, SW: 定在波型, TW: 進行波型, LOM/SOM/HOM: 低次/同次/高次モード, ϵ : エミッタンスである。

- 1) 歓迎挨拶: 中国の加速器 (Z. Zhao (趙振堂), SINAP, 23)

中国科学院管轄の加速器（稼動中・計画中）をホストの立場で紹介。① BEPC-II（北京電子陽電子コライダ）, ② HLS（合肥光源）, ③ HIRFL-CSR

* (財)高輝度光科学研究センター
(E-mail: nakazato@spring8.or.jp)

*1 この WS のプログラムと発表資料は下記 URL にある。
<http://www.sinap.ac.cn/ICFA2008/Programs.htm>

(蘭州重イオン研究所), ④ SSRF (上海光源), ⑤ CSNS(中国核破砕中性子源: 広東州東莞に計画中), ⑥ SXFEL (軟 X 線 FEL: SSRF サイトに計画中). 概要説明であるが筆者には興味深かった.

2) コライダ

(1) KEK-B 衝突実験 (K. Oide (生出勝宣), KEK, 23)

デフレクタによる最初の衝突実験. パンチ傾斜を確認. 予想ルミノシティに達しない. 原因不明. クラブ空洞には問題なし. 測定時間が長いパラメータが多数あり, チューニングが難航. 位相安定性は $\pm 0.01^\circ$ (< 1 kHz), $\pm 0.1^\circ$ (10~数 100 Hz).

(2) KEK クラブ空洞 (K. Hosoyama (細山謙二), KEK, 25)

超伝導デフレクタ ($f=500$ MHz) 開発と成功の歴史. 空洞の製作と試験方法. 性能の改善. 発生した諸問題. 同軸結合器 (兼チューナ) とクライオモジュールの開発. 大電力試験と KEKB 設置. 聴衆の喝采.

(3) ILC 用デフレクタ (P. McIntosh, Daresbury, 23)

超伝導デフレクタ (3.9 GHz, 9-cell). 計算値とモデル空洞の測定値の比較. LOM カプラ試作機測定. SOM/LOM カプラの開発. 偏極面の精度が 1 mrad なので偏極面が直交する空洞を追加して補正. 位相安定性 0.1° . クライオスタットに空洞を 2 台入れて位相安定性を検証する予定. これに関連する結合器の開発と位相制御の仕事 (Graeme Brut, Cockcroft Inst., 24, 25) は重要. 地味だが充実した実践に敬意を表したい.

(4) LHC 用デフレクタ (Y. Sun (孫一鵬), CERN, 23), (D. Li (李徳潤), LBL, 23)

超伝導 ($f=400/800$ MHz, 2-cell, $\times 1\sim 2$ 台 $V_{\perp}=2.5\sim 3.0$ MV). 400 MHz の場合は場所の問題あり, 800 MHz の場合は要軌道解析. 位相精度は 1 mdeg 未満で大変. 9-cell 空洞で結合器の存在によるモードミキシング (偏極方向のねじれ現象) を発見. 考案された様々な形状の空洞の紹介.

3) 短パルス X 線生成

(1) APS の計画 (Al. Nassiri, APS, 23)

スリットスライスで得られる性能は, $V_{\perp}=4$ MV でパルス幅 1.5 psec, 取り出し効率 1%. このとき ε_y は 13 から 28 pmrad に増加. $V_{\perp} > 4$ MV にしても ε_y 悪化のためパルス幅が短くなら

ない. デフレクタは常伝導 ($f=2.815$ GHz, 3-cell, $P=2.8$ MW, $V_{\perp}=2$ MV, $f_{rep}=10$ kHz) と超伝導 ($f=2.815$ GHz, 1-cell $\times 12$, $V_{\perp}=4$ MV, CW) の両方を検討. 常伝導はパルス運転 (1.3 μ sec) でビーム運動学的諸問題あり. いずれも入出力結合器のお化け. 短パルス X 線応用の調査結果は参考になる.

(2) APS 用超伝導デフレクタ (H. Wang (王海鵬), J-Lab, 24)

超伝導モデル空洞 ($f=2.815$ GHz) の設計・最適化, 他研究所の空洞と結果の比較. 2.1 K 冷却試験で $Q_0=1\times 10^9$. $B_{peak}=100$ mT. Lorentz 力による周波数変化は計算と実験が合わない. 導波管結合器付き常温モデル空洞の製作・インピーダンス測定.

(3) APS 用常伝導デフレクタ (V. Dolgashev, SLAC, 24)

常伝導空洞 ($f=2.815$ GHz, 3-cell, SW, $V_{\perp}=2$ MV @ $P=4$ MW, $f_{rep}=1$ kHz). アイリス部形状を楕円にして発熱を 30% 軽減. ANSYS による温度安定性の計算は 3 回程度の逐次計算で収束. 2 つの空洞の Q 値の違いによって V_{\perp} が変化する問題. HOM/LOM 減衰導波管にダミー負荷の検討.

(4) SPring-8 の計画 (T. Nakazato (中里俊晴), SPring-8, 25)

SPring-8 の短パルス光計画の説明. 概念設計と得られる性能. SPring-8 の長直線部と KEK のクラブ空洞を活用し, 最小限の R&D で短パルス光を実現する. 位相安定性の問題は位相帰還で解決する見通し. そのための大電力高速移相器・同電源・チューナの開発とその現状.

4) エミッタンス交換 (EEX)

(1) デフレクタ理論と応用 (K-J. Kim, ANL, 23)

理論は主にパンチオフセットを打ち消す話. 応用は①縦方向位相空間分布の診断, ②コライダのルミノシティ増強, ③短パルス X 線生成, ④エミッタンス交換 (EEX). 筆者には EEX ($\varepsilon_x, \varepsilon_z$) \rightarrow ($\varepsilon_z, \varepsilon_x$) の話が新鮮だった.

(2) EEX 実験設備の建設 (W. Gai (盖焯), ANL, 24), (J. Shi (施佳儒), 清华大学, 24)

Argonne Wakefield Accelerator (AWA) の説明. 光陰極ビームの診断 (ペーパーポット・ストリークカメラ) 結果は計算と合う. EEX ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$) = (5, 5, 8) \rightarrow (1250, 0.02, 8) \rightarrow (8, 0.02, 1250) 実験の現状報告. 常伝導デフレクタ ($f=1.3$

GHz, 3-cell, SW, $V_{\perp}=3.4\text{ MV}@P=4.2\text{ MW}$) は軌道オフセットがゼロ, かつ平坦磁場になるように両端セルの長さや直径を設計. 設計製作は清華大学. 銀口ウ終了, チューニング中. 偏向電磁石と四極電磁石は納品済. デモンストレーションは2009~2010年.

5) その他

電磁場解析コード (Z. Li (李增海), SLAC, 24) SLAC で開発された電磁場解析 FEM コード (並列処理) の話. 要素数 67,000, 16CPU (6GB) で, 1 分以内に周波数誤差 15 ppm 以下に収束. 電磁場解析, 温度解析, 機械解析の組み合わせが可能. ANSYS とほぼ同じ結果を与える. 応用例として, 結合器・ノッチフィルタの計算, マルチパクティングの計算 (二次電子放出係数も考慮) など, 強力なツールである. 導波管型と同軸型の結合器の比較では導波管型が有利と結論. 同軸ビーブパイプ型の結合器で減衰を大きくできるが, マルチパクティング対策を要する.

3. 所 感

1) 短パルス X 線計画は SPring-8 が優位だが…

筆者がこの WS に参加した目的は, SPring-8 で行っている短パルス X 線の研究成果を世に問うことと, 諸外国, 特に同様の計画を進めている APS の進

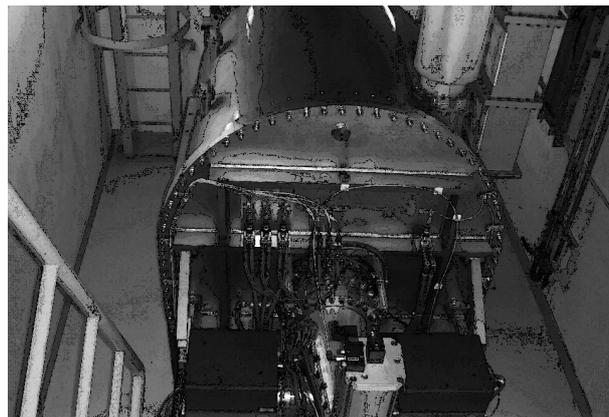


写真 2 SSRF 超伝導空洞のテストベンチ

捗状況を把握することにあつた. ここで得られた情報を総合すると, 現在, 技術的に最もゴールに近いのは SPring-8 であることは間違いない. SPring-8 のリングには長直線部があり, その中で他のユーザに影響を与えないようにバンチ処理が完結できる. また, 加速周波数が KEK-B にほぼ等しく KEK で開発されたクラブ空洞がそのまま導入できる利点大きい. 更に, クラブ空洞の位相変動対策は SPring-8 が最も進んでいる. まだ総合試験が残されているものの, 要素技術開発はほぼ終了し, 予算が認められれば建設がスタートできる状況にある.



写真 3 (主催者ご提供) オウム貝がモチーフの SSRF リング建屋を背景にして

一方、外国の放射光リングには長直線部がないため、概念設計の段階で苦勞している。これは「他のユーザに与える影響を最小限にする」という苦しい説明からも推察できる。しかし、その言葉を裏返せば「他のユーザに影響を与えてでも短パルス X 線を実現する」覚悟とも理解できる。既存のデフレクタが利用できないため、常伝導・超伝導ともに様々な案が検討されているが、基本方針はまだ定まっていない。しかし、APS で中心的に計画を推進している A. Nassiri 氏は、LBL, FNAL, J-Lab など米国内だけでなく中国の研究者の協力も取り付けて精力的に活動しており、今後は米中の激しい追撃が予想される。SPring-8 が現在優位にあるのは、スタート時点で有利な条件に恵まれた僥倖に過ぎない。

2) 将来が期待される中国の超伝導 RF

この旅のもうひとつの目的は SSRF の超伝導加速空洞の現状とアクティビティの調査にあった。超伝導空洞は冷凍機タービンのトラブルで使用できず、コミッションは常伝導空洞で行っていた。現在、北京の理化技術研究所の協力を得て冷凍機の立ち上げ準備を進めており、この秋には超伝導空洞で加速する予定とのことである。インストールする空洞は ACCEL 社からの購入品であるが、立派なテストベンチ（写真

2) を備えており、これから自分たちで超伝導空洞の R&D をしようという明確な意志を体現していた。超伝導 RF グループのリーダー劉建飛氏を中心に、研究者たちが自由闊達に議論する雰囲気、少人数ながらも大きな気概と活力を感じた。また、開催国が中国だったことを割り引いて考えたとしても、米国の超伝導 RF の研究現場が中国に移行している現状が、この WS を通じて明確に伝わってきた。将来この分野における中国の隆盛は確実なものに見えた。

3) 雑感

上海の高層ビル街を望む黄浦江でのバンケットクルーズは K-J Kim ご夫妻と一緒にあった。ホテル近くの書店で蘇東坡の詩集を探したという。同氏の祖国、韓国も中国文化を共有し、古典に通じる。宋代のクルージング「赤壁賦」の話題に興じた。「自其不變者而觀之 則物與我皆無尽也」（其の^{なりわい}変ぜざる者よりして之を觀れば、則ち物と我と皆尽くる無きなり）政治・経済の状況が加速度的に変化する現代、我々はその片棒を担ぐのを生業としている。しかしその一方で、変ぜざるものを追い求め、もがき悩んでいる。千年前、蘇東坡も同じ思いで十六夜の月を舟から眺めたに違いない。