

## ■会議報告

# Workshop on Accelerator R&D for Ultimate Storage Rings 報告

下崎義人 (公益財団法人 高輝度光科学研究センター)  
 早乙女光一 (公益財団法人 高輝度光科学研究センター)  
 大熊春夫 (公益財団法人 高輝度光科学研究センター)

表記のワークショップが2012年10月30日から3日間、IHEP(Institute of High Energy Physics : 高能物理研究所)が北京郊外に建設を計画している放射光施設“BAPS”の予定地に近い懐柔区の紅螺園ホテルにおいて開催された。IHEPはその名の通り高エネルギー物理を中心に研究する中国最大の加速器を有する研究所であるが、高エネルギー物理のための衝突型円形加速器 BEPC II のパラサイト利用による BSRF (Beijing Synchrotron Radiation Facility) において古くから放射光利用研究を行って来た歴史を持ち、また現在、中性子施設も広東に建設中で加速器ベースのサイエンスの総合研究所への道を目指しているようである。

IHEP の Qin 氏と共に議長を務めた SLAC の Hettel 氏が最初に送ってきた2012年8月22日のメールには「ESRFで2012年2月に回折限界光源を利用するサイエンスに関するワークショップが開かれ、次は12月に SPring-8 で開かれる予定だが、回折限界光源リングの加速器デザインについてのワークショップは定例化されていない。IHEP が5 GeV リング建設計画のデザインスタディと R&D のための予算要求を中国政府に出すのに関連してワークショップを計画しているが、これはその良いきっかけになると思う」というような事が書かれていた。その後、International Advisory Committee の組織化が行われ、セッションテーマの設定、プログラム委員の選出、各国の放射光施設などの研究者へ呼びかけて講演の選定などが慌ただしく行われた。

近年、世界の放射光施設では、放射光輝度と空間コヒーレンスの飛躍的向上を目指して、電子ビームのエミッタンスを極限まで低減させて「回折限界」光源を狙う diffraction-limited ultimate storage ring (USR) の検討が、盛んに行われるようになってきた。こうした状況を背景の下、世界の各施設で行われている加速器設計の比較検討や、技術的な問題点とそれを克服するための R&D 項目の洗い出しなどについて、具体的な議論を通してそれらを明らかにし、共通に抱える問題にどう対処していくかを探るといふ狙いで本ワークショップが位置づけられた。

参加者はアジア、南北アメリカ、ヨーロッパ、ロシアの



Fig. 1 Group photo at workshop on Accelerator R&D for Ultimate Storage Rings.

放射光施設から62名、このうち日本からの参加者は5名(SPring-8から4名)であった。ワークショップ開催と参加のためのやり取りを進めている最中の9月15日に大規模な反日デモが中国各地で起こったため、10月末の北京に行くには多少の不安もあったが、空港と会場間は送迎が準備され、会議も食事もすべてホテル内で済ますように準備されており、特に危険を感じることは無かった。会期中は会場に缶詰で、寝る時以外は食事中も加速器の話をしているという、非常に密度の濃いワークショップであった。lattice design, accelerator physics, injection, accelerator engineering, instrumentation and feedback, insertion devices の6つのセッションで構成され(パラレル無し)、各セッションにおいて加速器専門家による議論が白熱した。以下、著者らが特に気になった点について報告する。会議の詳細や発表スライドなどは <http://usr2012.ihep.ac.cn/> に既に公開されているので、そちらをご覧ください。

一般に放射光源として用いられる電子蓄積リングは、セルと呼ばれるある電磁石の並びを単位構造としてリング1周に渡って繰り返すことで作られる。セル当たりのビームの偏向角(これはリングの周長とセル数で決まる)とビームエネルギーが与えられた時、到達可能なエミッタンスの

**Table 1** Projects of sub-nmrad emittance rings presented in the workshop (E: beam energy, C: circumference,  $\epsilon$ : emittance)

Facility	E (GeV)	C (m)	$\epsilon$ (pmrad)
ALS (USA)	2	195	50~100
SOLEIL (France)	2.75?	354?	400
MAX IX (Sweden)*	3	528	326
Sirius (Brazil)#	3	518	280
Diamond (UK)	3	562	46~315
PEP-X (USA)	4.5	2199	12
BAPS (China)	5	1365	51
ESRF (France)	6	844	130
APS (USA)	6	1104	147
SPring-8 (Japan)	6	1436	68
Tevatron (USA)	9	6210	3

\* under construction, # approved

下限値は、セル内の電磁石配置（ラティス）で決まる。現在稼働中の第3世代放射光源では、セル内に偏向電磁石を2台配置し、端部に置かれた4極電磁石を使ってビームを水平方向に絞る double-bend ラティス、あるいは偏向電磁石3台とした triple-bend ラティスが用いられており、エミッタンスとしては数 nmrad 程度が限界である。

セル内の偏向電磁石数を増やして1台当たりの曲げ角を小さくすれば、エミッタンスはさらに低減させることが出来る。現在スウェーデンに建設中の MAX IV では、セル内の偏向電磁石を7台とする 7-bend ラティスが採用されており、エネルギー 3 GeV での設計エミッタンスは 326 pmrad である。（ちなみに、エネルギー 10 keV の光子に対しては、「回折限界」エミッタンスは 10 pmrad である。）USR へのアプローチは、こうした multi-bend ラティスを設計のベースとし、これに伴って生ずる様々な技術的課題をクリアする方向で行われている。Table 1 は本ワークショップで報告のあった各検討をまとめたものであり、セル当たりの偏向電磁石数は 5~7 となっている。今回のワークショップで、SPring-8 からは既存のトンネルを再利用する次期計画（SPring-8 II）に関して、ラティス設計、電磁石、バンチ長制御、入射スキーム、フィードバックについての5件の発表を行った。

Lattice design のセッションでは、Table 1 の各計画について、線形および非線形オプティクスの最適化手法や、その最適結果等について発表と議論が行われた。一般にラティスの multi-bend 化を進めていくと、ビーム収束用の4極電磁石や、収束力のエネルギー依存性（色収差）を補正する6極電磁石が強くなるなどの理由で、ビームが安定に周回できる領域が狭くなるため、これを回復させるためのオプティクスの最適化が multi-bend 化の大きなテーマ

である。ESRF からは、分散関数を局在させて瘤状に大きくすることにより、非線形オプティクスを緩和させ、電子ビームの安定領域を拡張するという特徴的なアップグレードプランが示された。また、既存のトンネルを利用する場合と新規に建設する場合の、オプティクス設計に関する設計指針、境界条件の違い等（「最適周長は？」、「最適な偏向電磁石の数は？」）などが繰り返し議論された。

安定領域の狭い USR にビーム入射するのは容易ではない。このため injection のセッションが設けられ、入射スキームが議論された。USR ではビーム寿命が短くなるため、減少した電流値分を常に継ぎ足すトップアップ入射が必須である。入射時に蓄積ビームを揺らさないために、パルス多極電磁石を用いた入射スキームも検討されているが、入射効率等に克服すべき課題があるとの報告もあった。SPring-8 からは、パルス幅数 ns の fast kicker を使って RF バケットごとにビームを入射する案を紹介した。このほか、入射器からのバンチトレインと蓄積ビームを一度に入れ替える on-axis swap-out 入射スキームの可能性が APS などから提案されている。

Instrumentation and feedback のセッションでは、USR でのビーム診断およびビーム不安定性の抑制について議論された。USR の電子ビームサイズは既存の第3世代放射光リングの垂直方向ビームサイズと同程度であるので、短期的なビームの振動（実効的なエミッタンスの増加）の抑制に関しては既存の技術の延長で対応できる。一方、長期的な軌道のドリフトについては、既存の放射光源でも十分には克服されておらず、USR のためのみならず克服すべき課題であると議論された。1つの解決策として、planar 挿入光源または偏向電磁石からの X 線の位置を観測して電子ビーム軌道の補正に利用し、スリット通過後の光子数の安定化に一定の成果を上げている例が報告された。

USR では、ラティスの設計から4極及び6極電磁石に強い磁場が要求されるため、電磁石のボア径をできるだけ小さくすることが望まれる。そのため、真空チェンバについても口径をどこまで狭くできるかが焦点となる。MAX IV からは、ビーム室の直径（内径）が 22 mm の NEG コーティング銅製真空チェンバについての報告があり、コーティング方法や排気系の配置、熱処理などが紹介された。NEG コーティングチェンバは、既存の光源リングでも用いられている技術であるが、口径の狭いチェンバへの適用のために、内面に均一にコーティングするための工夫について述べられた。NEG コーティングチェンバは、近々建設の始まるブラジルの Sirius でも採用を予定しているとのことであった。

ワークショップでは、ここに紹介した以外にも、高磁場勾配の電磁石、バンチ内電子電子散乱の影響、短パルス放射光生成の可能性、ラウンドビーム（水平および垂直エミッタンスを同じにする）の可能性など、加速器に関する多くの話題が取り上げられ議論されたが、紙面の都合もあり

---

割愛する。最後になったが、USR の目指す science case として“diffraction of single nano-objects”, “coherent diffraction imaging”, “X-ray photon correlation spectroscopy” が会議の冒頭で IHEP 関係者から紹介されていたことを付記しておく。今回は加速器に特化したワークショップであり、「回折限界」光源を使った新しいサイエン

スを議論する場は無かったが、これらは本来、加速器側の検討と並行してあるいは先導的に時には一緒に、時には個別に論じられ、お互いを擦り合わせて深化していくべきものであろう。放射光科学の将来に関わるこのような議論が、今後活発に行われることを期待したい。