

会議報告

第 80 回 IUVSTA ワークショップ “超低エミッタンス放射光源の真空システム”

末次 祐介^{*1}・谷本 育律^{*2}

80th IUVSTA Workshop “Ultra Low Emittance Light Source Vacuum Systems”

Yusuke SUETSUGU^{*1} and Yasunori TANIMOTO^{*2}

1. はじめに

2016 年 10 月 24 日から 28 日まで、80th IUVSTA Workshop “Ultra Low Emittance Light Source Vacuum Systems” が、台湾新竹市の NSRRC (National Synchrotron Radiation Research Center) で開催された (<http://iuvsta-80.nsrc.org.tw/>). IUVSTA (International Union for

Vacuum Science, Technology and Application) の支援を受け、台湾真空学会 (Taiwan Vacuum Society, TVS) と NSRRC が主催した。本ワークショップの最終目的は、0.5 nm・rad 以下の超低エミッタンスの実現を目指す放射光源に最適な加速器真空システムの設計指針を確立することである。世界各国の専門家が一堂に揃い、この難題に如何に取り組んでいくか、熱心な、また濃密な議



写真 1 80th IUVSTA Workshop 集合写真

*¹ 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: yusuke.suetsugu@kek.jp)

*² 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization (E-mail: yasunori.tanimoto@kek.jp)

論が繰り広げられた。

ワークショップには世界各地の約 25 の研究施設や企業から約 50 名の専門家が集まった。日本からは 7 名が参加した。招待講演は 12 件、一般講演は 13 件であった。主なトピックスは

- 低 / 超低エミッタンス放射光源真空システムの現状報告および将来計画
- 超低エミッタンス放射光源排気システムの設計
- ガス放出率を低減する表面処理
- NEG (Non-Evaporable Getter) コーティング (内面に NEG の材料である Ti, Zr, V をコーティングする手法)
- 低ビームインピーダンス, 大ビーム電流に対応した真空機器
- ビームパイプ内の圧力分布評価

等であった。光源の全体計画から真空機器の具体的な技術検討まで、多岐にわたる報告があった。以下、その中で印象深かった点を中心に報告する。

2. 放射光源現状報告および将来計画

講演で報告された放射光源とそのパラメータを表 1 にまとめている。水平方向エミッタンス (設計値) が大きい順に並べている。本ワークショップで特に重要なトピックスの一つであった NEG コーティングの採用具合も参考に載せている。要求される水平方向エミッタンスが小さく、また代表的なビームパイプ径が小さくなると NEG コーティングの採用が多くなる傾向が何となくわかる。

POSTECH の PLS-II は 3 GeV で 400 mA の運転を行っている。将来のアップグレードに向け、狭い開口のビームパイプを効率よく排気する方法に関して R&D が行われている。

SOLEIL は 2006 年から運転されている。リングの約 56% に NEG コーティングされたビームパイプを採用している。特に NEG コーティングに関して 10 年間にわたる様々な経験が報告された。大気に曝していない区間では再活性化を行っておらず、初期と同じレベルの圧力を保持しているようである。できるだけ内面全体に NEG コーティングすること、大気に曝さないこと、が重要とのことだった。

Diamond-I は 2007 年から運転されている。リングの一部のラティスを変更するため、新しい

ビームパイプの真空システムを検討している。今のところ保守的な真空システムが候補となっている。将来計画の Diamond-II を見据えた R&D のようである。

SPring-8 は 20 年の歴史を持つ。ストリップ型 NEG ポンプ、分布型イオンポンプと、放射光アブソーバ近くに置かれた局在型 NEG ポンプを主とした排気システムである。設計方針や途中で設置したビームパイプの圧力減少具合、運転中の様々な問題について報告がなされた。

SPring-8-II は SPring-8 のアップグレード計画である。限られた建設期間や、小さくかつ密な電磁石配置といった制限から、設置後のベーキングを省くという方針で設計が進んでいる。主ポンプは局在型 NEG ポンプとイオンポンプである。銅メッキされたステンレス製のビームパイプが検討されている。

TPS は 2014 年に運転を開始し、約 1 年のコミッションングで 500 mA の蓄積電流を達成した。前身の TLS の経験から、各種コンポーネントのインピーダンス低減、熱的ガス放出低減、特に水成分の低減に注目して設計が行われた。また、オゾン水洗浄による炭化水素系汚染の除去を目指していた。主ポンプは局在型 NEG ポンプ、ターボ分子ポンプ、イオンポンプである。

NSLS-II は 2014 年から運転を開始したリングで、これまで 900 A·h の積分ビーム電流を達成した。従来のストリップ型 NEG と局在型ポンプの排気システムで、実績重視の保守的な真空システムを採用している。一部の挿入光源 (Insertion Device, ID) 用ビームパイプには NEG コーティングが使用されている。真空の枯れがやや遅いという報告があったが、反射光の影響ではないか、という指摘があった。

MAX IV は、2015 年から運転を始めたリングで、2016 年 8 月までに蓄積ビーム電流 198 mA、積分ビーム電流 112 A·h を達成している。ほぼ全周にわたって NEG コーティングを施している。NEG コーティングに関して、R&D 初期に剥離等の問題があったものの、これまでのところ大きな問題はないようだ。運転開始後 NEG の再活性化は行っていないようである。

KEK では KEK-LS 計画が提案され、具体的検討が始まっている。Double Quadrupole-Bend

表 1 報告された放射光源とその主パラメータ (設計値). 放射光リングについては水平方向エミッタンスの順に並べている. NEG コーティングの採用割合は◎>○>△>-である.

Facility	Lab. (Country)	Energy [GeV]	Beam current [mA]	Circum. [m]	Hor. emittance* [nm·rad]	Typical aperture	NEG coating	Operation [years]
PLS-II	POSTECH (Korea)	3.0	400	281	5.8	66×22	-	5
SOLEIL	LURE (France)	2.75	500	354	3.9	70×25	○	10
Diamond-I	Diamond (UK)	3.0	300	562	2.7	80×24	△(ID)	9
SPring-8	JASRI/RIKEN (Japan)	8.0	100	1,436	2.4	70×40	-	20
TPS	NSRRC (Taiwan)	3.0	500	518	1.6	80×38	-	2
NLS-II	BNL (USA)	3.0	500	792	0.55	76×25	△(ID)	2
Diamond-II	Diamond (UK)	3.0	300	561	0.27	27×18	-	Plan
MAX IV	MAX IV (Sweden)	3.0	500	528	0.2	φ 22	◎	1
SPring-8-II	JASRI/RIKEN (Japan)	6.0	100	1,436	0.14	30×16	-	Plan
ESRF-EBS	ESRF (France)	6.0	200	844	0.14	20×13	△(ID)	Plan
KEK-LS	KEK (Japan)	3.0	500	570	0.13	φ 25	◎	Plan
APS-U	ANL (USA)	6.0	200	1,100	0.05-0.07	φ 22	○	Plan
HEPS	IHEP (China)	6.0	200	1,296	0.06	φ 22	◎	Plan
ALS-U	LBNL (USA)	2.0	500	196.5	0.05	≤ φ 6 (ID)**	R&D phase	Plan
SuperKEKB LER/HER	KEK (Japan)	4.0/7.0	3,600/ 2,600	3,016	3.2/4.6	φ 90/ 104×50	-	0.5

*バンチ内散乱効果抑制の程度で変わる.

**ID用ビームパイプの直径.

Achromat (DQBA) と呼ばれる独特なラティスを採用するのが特徴である. 小さい開口のビームパイプに対して NEG コーティングを主ポンプとして使用する予定である. ビームパイプ内圧力分布や圧力低減具合のシミュレーションも報告された.

ESRF のアップグレード計画が ESRF-EBS (Extreme Brilliant Source) である. 改造期間を短くするために, 保守的な排気システムが採用されている. 現場でベークングすることを前提とし,

局在型 NEG ポンプを使用する. ステンレス製とアルミ合金製のビームパイプを用いる.

ANL では APS-U (Upgrade) 計画が進行中である. イオンポンプ, 局在型 NEG ポンプ, ストリップ型 NEG ポンプ, NEG コーティングを複合的に使用したシステムを考えている. ビームパイプ内圧力分布について詳細なシミュレーションがなされていた.

IHEP では HEPS の R&D (HEPS-TF) が始まっている. ここの, 小さい開口のビームパイプを効



写真 2 ワークショップでの講演風景

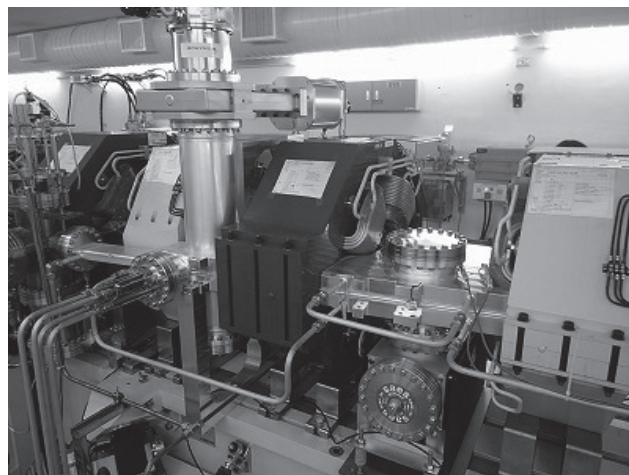


写真 3 放射光を切り出すクロッチアブソーバは主要なガス放出源であり、その近傍に排気ポンプを局在させて効率よく排気する (TPS)

率よく排気するために、NEG コーティングの採用を検討している。

LBNL では、ALS-U において 6 mm 以下の小開口 ID チェンバーを想定しており、 $\phi 6$ mm のビームパイプに対して NEG コーティングの R&D が行われていた。従来のマグネトロンスパッタリングを用いた方法での問題点が指摘されていた。

放射光源ではないが、低エミッタンス、大電流蓄積リングの真空システムの例として、KEKB と、2016 年からコミッションが始まった SuperKEKB の真空システムの経験、現状も報告された。

3. 排気システム、機器の設計

排気システムとしては、局在的に放射光アブソーバを置き、その傍に高排気速度の排気ポンプを置くシステムと、放射光をビームパイプに沿って受け、ビームパイプ内に分布型ポンプを置くシステムの大きく二つに分けられる。局在型の排気システムは、多くの放射光リングで実績があるが、

近年要求が厳しくなっている小さいボア径の電磁石への対応や密な電磁石配置を考えると、分布型の方が有利かもしれない。そして、ビームパイプの径が小さくなると、NEG コーティングが有力な候補となる。直接放射光は当たらないが、開口の小さい ID では NEG コーティングが既に多くの施設で用いられている。NEG コーティングされた表面からのガス放出（光刺激脱離）が小さいのも魅力である。NEG の剥離といった問題も指摘され、当初不安もあったが、NEG コーティングされたビームパイプを大規模に採用した蓄積リングの実績も増え（LHC, SOLEIL や MAX IV）、その不安も徐々に減っている印象があった。LHC ではビームパイプ約 1,300 本に対して剥離はなかったとの報告があった。また、本ワークショップへの参加はなかったが、ブラジルの Sirius もリングの 90% 以上に NEG コーティングを施すようである。NEG の再活性化の問題も、トンネル設置後再活性化しないと割り切って設計する方向もある。ただし、NEG コーティングしていない部分としている部分が混在していると、していない部分からのガス放出が問題となるので、特殊機器の多い区間やビームパイプの形状が複雑な部分では注意が必要である。現場でのベーキング（再活性化）の余地は残しておきたい気がする。

もちろん、NEG コーティング以外に、ビームパイプのアンテチェンバー部に、NEG ストリップ等による分布型排気ポンプを置くシステムも当

然考えることができる。NEG ストリップではなく、ある間隔で局在的にポンプを配置しても効率的な排気ができるという報告もあった。PLS-II の偏向電磁石用ビームパイプとして、ビームパイプ側面の溝にペレット状の NEG 焼結体を並べるといふ、独創的な構造も報告された。いずれにしろ、このシステムでは、NEG コーティングの場合に比べるとビームパイプの構造が複雑となるのは避けられないようだ。

なお、NEG の焼結体の一部は特許が切れる時期にあり、製作する会社も増えているようである。安価でかつ十分な性能を発揮する焼結体がユーザーとしては望まれる。

さて、特にトンネル設置後にベーキングを行わない、あるいは行えない場合、何かしらの原因で真空を破り大気圧に戻した後の圧力の下がり具合が問題となる。突発的な場合は仕方ないが、計画的な場合は対策が必要である。TPS では、水分組成 ppb レベルの超乾燥窒素導入システムを開発中である。

局在型ポンプ配置のシステムの場合、大部分のビームパイプには直接光が当たらない。そのため、放射光による真空焼きは期待できず、熱的ガス放出率を低減することが重要となる。オゾン水処理など、ガス放出を低減する表面処理が提案されている。企業の方でも、製品管理などに注意が注がれている。

低エミッタンス放射光リングでは、ビームの安定性がこれまで以上に重要となる。リングの真空機器はビームインピーダンスをできるだけ小さく抑える必要がある。この問題は、高ルミノシティーを目指す衝突型加速器リングでも同様である。講演では、TPS のベローズチェンバーやゲートバルブの RF シールド、BPM (Beam Position Monitor) チェンバーの構造、セラミックチェンバー、ポンプポート、ビームパイプのギャップやステップの管理方法などの詳しい報告があった。まだ ID が少ないものの所定のインピーダンスが得られているようだ。KEK の KEKB や SuperKEKB の真空機器の構造や 1 A 蓄積時の経験等の報告もあった。ゲートバルブの RF シールドについては、製作会社からも系統的な報告があった。ただし、TPS や KEKB 等ではまだビームチャンネルの内径は大きい。φ20 mm 程度以下のビームパイプ

に対応した上記機器、特にベローズチェンバーやゲートバルブについては、従来を踏襲した設計が多く示されていたが、実際的な設計、検討は今後の課題であろう。

4. NEG コーティング技術

繰り返しとなるが、超低エミッタンスを目指す放射光リングでは、強力で正確な磁場構成が必要であることから、電磁石のコア (磁極) がビームに近くなり、このまま行くと、将来にはビームパイプの大きさが 10 mm 以下となると予想される。コンダクタンスが大きく制限されたビームパイプを排気するのに最近採用されているのが、NEG コーティングである。課題は、この小さい、あるいは扁平なビームパイプ内面に均一な NEG 薄膜を作ることである。講演では、従来のワイヤあるいは合金を使ったマグネトロンスパッタリング法による開発状況が報告されたが、現状では直径約 6 mm が限界のようである。全く違うアプローチとして、まずアルミ棒の外周に NEG コーティングし、その上にビームパイプとなる銅メッキを施し、その後内側のアルミを溶かすといった斬新な方法も紹介された。まだ従来の方法に比べると排気速度が小さいようだ。また、ビームパイプ内に置いた NEG 合金にレーザー光を照射して蒸着する PLD (Pulsed Laser Deposition) 法も LBNL から提案されていた。まだ詳細は不明だが、この手法も面白い方法である。

NEG コーティングは CERN で開発されたものである。他の研究所や企業で量産する場合には、CERN とライセンス契約を結ぶことになっている。ESRF や KEK はライセンスを持っている。企業では、SAES Getters S.p.A. (Italy) が古くから行っているが、FMB Feinwerk- und Meßtechnik GmbH (Germany) でも請け負っている。様々な形状のビームパイプへのコーティングを独自に開発している。

NEG コーティングを採用する際、そのインピーダンスも懸念される点である。KEK-LS の検討では、例えば内径 25 mm の銅パイプでバンチ長数 mm の場合には、膜厚 1 μm 以下であれば特に問題はない、とのことだった。しかし、導電率がステンレス並みであることを考えると、ビームパイプ径がさらに小さくなり、電流もそれなりに大き

くると、より詳細な検討が必要となろう。

5. 圧力分布評価

狭い開口のビームパイプではより効率的な排気が求められる。平均圧力を下げることはもちろんのこと、運転開始から如何に早く所定の圧力を実現するかもリングの性能にとって重要である。NEG コーティングを採用する際には、その再活性化頻度も気になる場所である。そのため、設計段階から、リング内の放射光分布、そしてガス放出分布を評価し、必要なポンプを適切な場所に設置することが重要である。近年開発されたシミュレーションコード、Molflow+ と Synrad+ は、この目的に適したものである。

Molflow+ はモンテカルロ法による圧力計算コードで、CAD ファイルと組み合わせることで実機とほぼ同じ構造下での圧力分布計算が可能である。手持ちのノート PC でも使え、かつフリーという優れたものである。一方 Synrad+ は実機のラティスを用い、ビームから発生するシンクロトロン放射光をレイトレーシングするソフトである。直接照射される光子数だけでなく、照射面の吸収パワーの評価や、(照射面の粗さや相関係数等の情報があれば) 反射光のレイトレーシングも可能である。ビーム軌道が予期せず振られた時の放射光照射部位の推定もできる。

講演でも、CERN から参加したソフトウェア開発者による効果的な利用方法等の紹介に加え、APS-U や KEK-LS での圧力分布や圧力の枯れ具合評価の応用例が紹介された。SuperKEKB 衝突部での放射光分布、圧力分布計算も報告された。ビームパイプ内表面に放射光が斜めに照射された場合(多くの場合に当てはまる)には反射光の影響は無視できず、圧力分布の計算に大きな影響を及ぼす。これらのツールは、放射光リングに限らず、加速器の真空システムの設計において今後強力な武器となるであろう。

圧力分布評価で問題となるのは、表面からのガス放出率の仮定である。シミュレーションでは、これまでの様々な実験施設での光刺激脱離係数測定結果を用いて行われているが、そのデータは結構ばらつきが多い。光刺激脱離係数は照射される放射光の入射角、エネルギー、照射面の状態に大きく依存するためである。その結果、得られる圧

力分布も仮定した光刺激脱離係数によって 10 倍以上の差がでてしまう。

6. おわりに

超低エミッタンスの放射光リングの真空システムの設計にあたり、本ワークショップで指摘されたいくつかの課題をまとめる。

(1) 現在検討されている放射光リングでは、電磁石のボア径が小さく、かつ電磁石がこれまでになく密に配置されている。その結果、ビームパイプ断面は小さくなり、空間的な制限も非常に厳しくなっている。一つの問題は、加速器のビーム光学的設計の段階で真空システムの設計があまり考慮されていないことにある。加速器設計の段階から、真空のエキスパートが参加するべきで、結局はそれが加速器の性能向上につながる。

(2) 真空システム設計にあたり、ビームパイプ内の圧力分布の評価や枯れ具合の評価は重要なポイントである。Molflow+ や Synrad+ といった優れたツールが開発されてはいるが、計算の基となる光刺激脱離係数のデータが揃っていない。統一的なデータが必要であろう。現在、BINP, NSRRC, KEK, ANKA で光刺激脱離係数を測定する実験施設が揃いつつあり、協力してデータの蓄積を図るべきである。

(3) ビームパイプや真空機器のビームインピーダンスも今後ますます重要となろう。現状の設計は従来の構造を基本として進められているが、より詳細な検討が必要であろう。例えばベローズチャンバーではダブルフィンガータイプが基本となっているが、どうしても内面に 1 mm 弱の段差が生じる。ビームパイプの直径が 10 mm 以下となった場合には問題になる可能性がある。SuperKEKB や TPS では段差のない楕円型 RF シールドが採用されているが、直径が小さくなった場合にはさらなる検討・評価が必要である。ビームパイプの製造、溶接時の製作誤差も十分気を付ける必要がある。

(4) 直径が小さくなった場合のビームパイプのハンドリングも課題であろう。ビームパイプの搬送時やベーキング時の変形は大きい。製造業者による講演では、量産に入る前の初期段階での綿密な情報交換やプロトタイプによる R&D が重要であることが強調されていた。

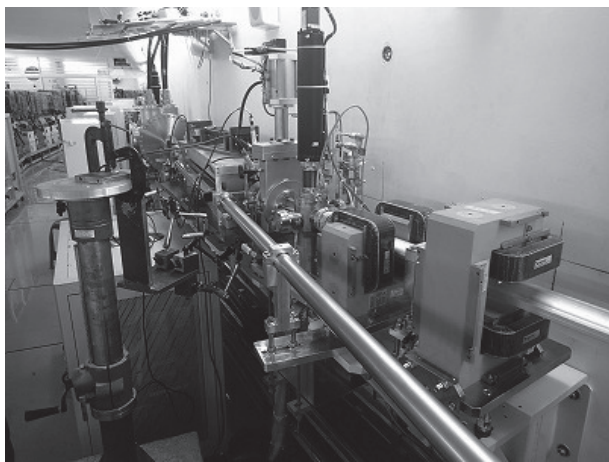


写真4 TPS ツアー

ワークショップには、TPS トンネルおよび制御室ツアーが含まれていた。運転開始から間もないこともあるが、非常にきれいな装置であった。入射部の特殊ビームパイプやID チェンバー、真空

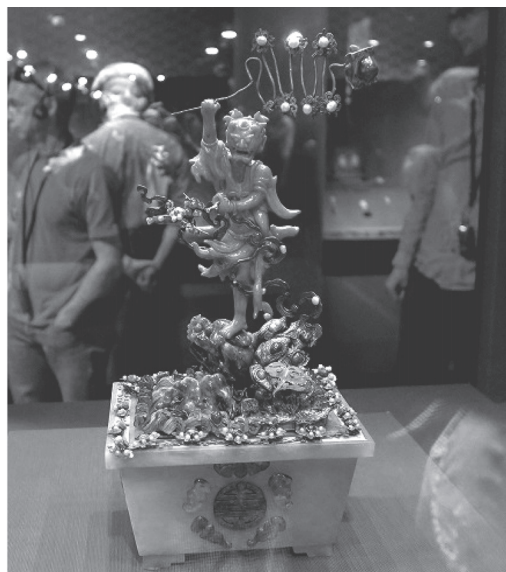


写真5 故宮博物院で一息

ポンプ、制御系等について詳しい説明を聞くことができた。マグネットセルが載ったガーダーやビームパイプやポンプのサポート、ビームパイプ搬送用具、ポータブルな粗排気装置など、リングの真空とは直接関係はないが重要な部分についても多くの工夫がなされ、大変興味深いものであった。

余談となるが、半日、台北市の故宮博物院と台北 101 ショッピングモール（展望台）を回る遠足も組み込まれていた。台湾の古代と現代を学ぶ、楽しい時間であった。それにしても、日本人に合うのか、台湾料理はいつものことながら大変美味しい。NSRRC のある新竹市の名物はビーフンらしく、一度試す時間があつたが、個人的には大変美味しく、また懐かしく思えた。

最後になつたが、本ワークショップの Chair である NSRRC の Gao-Yu Hsiung 氏、運営全般を担った Hsin-Pai Hsueh 氏、そして、プログラム委員会の Chair であつた BNL の Hsiao-Chaun Hsueh 氏には深く感謝を表したい。