UVSOR 光源加速器の高度化

加藤 政博*

Upgrades of UVSOR Accelerators

Masahiro Katoh *

Abstract

UVSOR has been operational for 27 years, providing synchrotron light in the wavelength range from the terahertz waves to soft X-rays. The accelerators have been continuously upgraded, especially in 2000's. The lattice of the storage ring was modified to achieve smaller emittance and to create new straight sections for undulators. At present, the ring is operated with small emittance, 27 nm-rad. Totally four undulators are in operation and two more can be installed. The injector and the beam transport line were upgraded to be compatible with full energy injection. The radiation shielding was reinforced. In 2010, top-up operation was fully introduced to users operation. A new straight section was created by moving the injection point, which will be used for developments of new light source technologies.

1. はじめに

自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施 設のシンクロトロン光源 UVSOR は, 1983 年の運転開 始以来, 順調に稼働を続けてきた. 高エネルギー加速 器研究機構の Photon Factory や産業技術総合研究所の TERAS などとほぼ同時期に建設された第2世代のシ ンクロトロン光源である.シンクロトロン光といえば X線のイメージが強く,実際, Photon Factory やその 後建設された SPring-8 などの大型施設では X 線領域を 中心に利用されているが、軟X線から真空紫外、さら に赤外線からミリ波に至る領域でもシンクロトロン光 は活発に利用されている. UVSOR は電子エネルギー が 750 MeV と比較的低いことから、これら低エネル ギー(長波長)シンクロトロン光の発生を得意とする. 放射光ビームラインは、現在、12本が稼働している. この中には世界に先駆けて建設された赤外線ビームラ インも含まれており、改良を経て、現在も活発に利用 されている. このような通常のシンクロトロン光利用 に加えて、UVSOR では設計段階から自由電子レーザー の導入が想定されていた。1990年代には当時の最短波 長記録を更新するなどの成果を上げ、その後、2000年 代に入ってからは外部レーザーを利用した光発生の研 究も活発に行われるようになっている.

UVSOR は全国共同利用施設として、年間約40週運 転され、利用者は年間延べ800名ほどである.運転は、 月曜日から金曜日まで行われ、月曜日はマシンスタディ に充てられ、加速器の性能向上に関する研究、新しい 光源技術の開発、ビーム物理学研究などが行われてい る.火曜日から金曜日までがユーザータイムであり、 火曜日、水曜日は9時から21時までの12時間運転し 夜間は停止する.木曜日から金曜日にかけては停止な しで36時間の連続運転を行っている.後述するように 2010年7月からはすべてのユーザータイムをいわゆる トップアップ運転で実施している.

UVSOR の加速器の構成は、15 MeV のライナック、 750 MeV のブースターシンクロトロン、750 MeV の電 子蓄積リングである.小型の放射光源であるが専用の フルエネルギー入射器を備えている.蓄積リング及び 放射光ビームラインの最近の様子を図1に、また、加 速器配置を図2に示す.

UVSOR は第2世代の放射光源, すなわち放射光専 用加速器として建設された最初の世代の加速器である. 主に偏向磁石からの放射光の利用を想定した設計と なっているが, Double Bend Achromat セルを基本とし たラティスを採用しているため, 直線部も4か所あり, 初期の段階からアンジュレータや超伝導ウィグラ等の 挿入光源も導入されている. しかしエミッタンスは

^{*} 自然科学研究機構分子科学研究所 Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences (E-mail: mkatoh@ims.ac.jp)

100 nm-rad を超える値であり,他の第2世代光源と同じく,高輝度を意識した設計ではなかった.

UVSOR は長らく建設当初のまま大幅な改造を加え



図1 UVSOR 蓄積リングと放射光ビームライン



図2 UVSOR 加速器配置

Electron Energy	750 MeV
Circumference	53.2 m
Natural Emittance	27 nm-rad
Natural Energy Spread	4.2 x10 ⁻⁴
RF Frequency	90.1 MHz
Harmonic Number	16
Bending Radius	2.2 m
Straight Sections	4 m x4, 1.5 m x4
RF Voltage	$\sim 100 \ {\rm kV}$
Betatron Tunes	(~3.75,~3.20)
Momentum Compaction	0.028
Natural Bunch Length	108 ps
Beam Current	
(multi-bunch mode)	300 mA (top-up)
(single bunch mode)	50 mA (top-up)

表 1	UVSOR-II	の主要パラ	1	3
-----	----------	-------	---	---

ることなく運転が継続されてきたが、第3世代光源が 世界各地で稼働を始めた 1990 年代以降,老朽化や競争 力の低下が深刻となった.2000 年代に入って,次期計 画の策定を急いだが,国内では当時,極紫外軟X線光 源の建設計画が大学を中心に進められていたことから, UVSOR では新光源の建設ではなく,既設装置の改良 で第3世代光源に対抗できる高輝度光源の実現を目指 すこととなった.

本稿では,2000年以降に行われたUVSOR光源加速 器の高度化に関して,2003年前後に行われた低エミッ タンス化・直線部増強,2006年以降のトップアップ運 転導入を中心に報告する.また,これら加速器改造と 並行して,リングの一部を利用して進めてきた光源開 発研究の進展についても触れる.

2. ラティス

UVSOR のような第2世代のシンクロトロン光源は, シンクロトロン光専用加速器としては最初の世代に属 する. 機器の製作誤差など様々な可能性を熟慮し安全 確実にビームの蓄積が出来ることを想定して設計され ているが,第3世代以降の蓄積リングの設計思想から するとやや冗長とみえる面もある. 我々はこの冗長性 を利用して,リングの形状を変えないまま,低エミッ タンス化とアンジュレータ用直線部の倍増を実現する ことを考えた¹⁾.

建設当初の UVSOR のラティス構造は Double Bend Achromat セル4つからなっていたが、(i) 2つの偏向 磁石の間に設置されていた四極磁石の triplet を, 2つ の doublet に置き換え、その間に短直線部を作りだす、 (ii) 四極磁石を六極磁場が発生できる複合機能型とし, 六極磁石を撤去する。(iii)エネルギー分散を消去せず、 また、セルあたりのベータトロン振動の位相進みを大 きくする,(iv) 直線部での垂直ベータトロン関数を極 小化する,の4点を中心とするラティス改造によりエ ミッタンスを 160 nm-rad から 27 nm-rad と約 1/6 に小 さくし、 見つ、 それまでの 4本の 3m 直線部を 4m ま で長くし、さらに1.5m直線部4本を新たに作り出す ことを提案した. 偏向磁石には手を加えないことから リングの形状が保たれ、既存のビームラインは移設す る必要はない、これは多数のビームラインが既に稼働 しているシンクロトロン光源を改造する際に考慮すべ き重要な点である.

UVSOR の競争力低下への危機感もあったものと思われるが、この提案は研究所の最優先課題として即座に承認され、2002 年度に予算化された.2003 年に実施された加速器の改造では約6ヵ月間共同利用を停止

加藤 政博



図3 蓄積リング光字関数(リング1/4 周. ト 2003 年高度化改造前,上;改造後)

した.停止期間は利用者への影響を最小限とするよう に,2002年度から2003年度にまたがって設定した.

上記のラティス改造のために偏向磁石を除く全ての 電磁石とその真空ダクト及び排気系が更新された. 蓄 積リングの全ての電磁石電源とその制御システムも更 新された.更新された機器類のほとんどは約20年間使 用されたものであり,この改造により老朽化にも対応 することができた.

改造そのものは約3カ月で予定通り終了し,その後 直ちに立上調整に入った.パルス電源関係のトラブル や真空ダクトの設置ミスなどのトラブルがあったもの の,立上開始から数日後にはビームの蓄積に成功した. 立上当初は,改造前のビームオプティクスに比較的近 い状態で運転を行ったが,1か月ほどの調整運転の後, 低エミッタンスオプティクスでの運転を試み,こちら は特に問題もなく,ビームの蓄積に成功した.その後 の真空調整やビームラインの調整も順調に進み,予定 通り6か月で利用実験を再開することが出来た²⁰.

この 2003 年の大幅な改造を機に,光源加速器を UVSOR-II と呼ぶこととした.その後現在に至るまで UVSOR-II のラティス構造は基本的に変わっていない. 電子エネルギー1 GeV 以下の極紫外放射光源としては 世界でも最も低エミッタンスのリングの一つである.



図4 UVSOR 蓄積リング機器配置図(上;2000年当時,下; 2010年現在). アンジュレータ設置可能直線部を丸 で示してある. 実線は設置済み箇所, 点線は設置可 能箇所を示す. 2010年現在,最大6台のアンジュレー タが設置可能であり,4台が既に稼働している

しかし、その後登場した MAX-III (スウェーデン)³⁾ に は及ばない.このため、さらなる改造案として、リン グの構成機器で唯一建設以来使用されてきた偏向磁石 8 台を複合機能型のものに交換し、さらにファクター2 程度低エミッタンス化することを検討している.

3. 挿入光源

UVSORには建設後間もない時期からアンジュレー タ,超伝導ウィグラが設置されていた.2000年当時は 直線偏光アンジュレータ1台,可変偏光アンジュレー タ1台,超伝導ウィグラ1台が設置されていた.この うち超伝導ウィグラに関しては,Photon Factoryを始 めとする他のエネルギーの高いシンクロトロン光源の 偏向磁石と競合すること,さらに,利用側の需要の減少, 運転維持管理に要する人手と予算を考慮して,シャッ トダウンすることを決定した.また,直線偏光型アン ジュレータに関しては制御系・駆動系の老朽化が進ん でいたことから,これもシャットダウンを決定した. 前述したラティス改造と前後して,これら挿入光源の 更新を進めた. ラティス改造では直線部の増設に加え, 直線部中での垂直ベータトロン関数を極小化しており, 磁極間隙の小さいアンジュレータの挿入が可能となった.

2002年に超伝導ウィグラの跡地に磁極長1mの真空 封止型アンジュレータを設置,2003年には老朽化した 直線偏光アンジュレータを散去し,磁極長2mの真空 封止型アンジュレータを設置した⁴⁾. さらに2005年に は高周波加速空洞が更新・移設された跡地に長さ3m の可変偏光アンジュレータを設置した⁵⁾. 改造前から 稼働しており自由電子レーザー駆動にも使用される可 変偏光型アンジュレータ/光クライストロン⁶⁾と合わ せて,2010年現在,アンジュレータ4台が稼働している. 後述する入射点の移設もあり,現在,1.5mと4mの 直線部がアンジュレータ用に利用可能である. 前者に ついては1m級のアンジュレータ1台とビームライン の建設を計画している. 後者については,光源開発用 アンジュレータを2011年に設置する予定である.

4. 高周波系

UVSOR では建設当初より 90 MHz の高周波加速シ ステムを利用している.高周波源は 20 kW のトランジ スタ増幅器である.高周波空洞は順調に稼働していた が、シャントインピーダンスなどの基本パラメタが設 計値を大きく下回っており、また、入力カプラーの発 熱の問題もあり、加速電圧は最大 45 kV 程度が限界で あった.前述した 2003 年の低エミッタンス化により、 Touschek 効果によるビーム寿命の低下に対応するた め、2005 年に高周波空洞の更新を行った.入力カプラー が改良された以外には基本設計は従来の空洞のものと 基本的に同じであったが、概ね設計通りの性能が実現 されており、最大で 150 kV を超える加速電圧も印加可 能となった⁷⁰.

上述した主加速空洞以外に,三倍高調波空洞が設置 され日常的に使用されている.縦方向の不安定性を抑 制するとともに,バンチ長を伸長させることで Touschek 効果を緩和しビーム寿命の低下を防いでい る⁸.

5. 入射系

UVSOR の入射器は前段加速器である 15 MeV 直線 加速器とブースターシンクロトロンからなるが,建設 当初はリングを 600 MeV で運転しており,ブースター シンクロトロンの最大エネルギーも 600 MeV であっ た. 稼働後間もなくリングの方は運転エネルギーを 750 MeV まであげたが, ブースターシンクロトロンの 方は最高エネルギーが 600 MeV に据え置かれたため に,長年,600 MeV でリングに入射したのち,750 MeV まで加速する,という運転形態を取っていた.

2000年当時,入射器も老朽化が進んでいたが,2003 年の改造の際に,直線加速器の一部(電子銃,クライ ストロンパルス変調器,冷却水装置)を更新すること ができた.電子銃についてはシングルバンチ入射に対 応した短パルスも発生可能なものとした.ブースター シンクロトロンについても老朽化が懸念されていたが, これを同時に更新した場合,電子銃からリングまで全 てを一から立上調整することになり,加速器立上調整 の長期化が予想されたため,更新を見送った.

シンクロトロンの構成機器の中でも電磁石電源の老 朽化は深刻で、2000年代中ごろには主要部品であるト ランジスタの調達が困難になるなど、運転維持が極め て困難になりつつあった.しかし、この当時からトッ プアップ運転がいくつかのシンクロトロン光源で導入 され成功を収めてきたことから、UVSOR でもその導 入を目指すことになり、その中での電源の更新を目指 した.

トップアップ運転は,蓄積リングに間欠的にビーム を入射することでビーム電流値を一定の範囲に保つ手 法であり,加速器技術的に新しいわけではないが,放 射光源において利用研究の最中にビーム入射を行うこ とによりビーム強度を一定に保つことで,強度の時間 変化がもたらす様々な問題を一気に解決できる.いく つかの放射光リングで行われその効果が実証されたこ とから,多くのシンクロトロン光源がそれに続いた⁹.

UVSOR は低エネルギー・低エミッタンスのリング であることから Touschek 効果の影響が深刻であり, トップアップ運転の導入は強く望まれるものであった が,最大の問題は入射器がフルエネルギーではないこ とであった.また,トップアップ入射では従来よりも 漏えい放射線レベルが高まる可能性があるため放射線 遮蔽の増強も必要であった.

放射線の遮蔽は 2005 年より開始され,それまでの簡 便なコンクリートブロックによる遮蔽から,蓄積リン グの周囲を厚さ約 10 cm の鉛製の壁で囲うように増強 した.また,入射用セプタム周辺については鉛及びポ リエチレンで遮蔽を強化した.

入射器及びビーム輸送路のフルエネルギー化につい ては、ブースターシンクロトロンの電磁石系、ビーム 輸送路の電磁石系、取り出し用高速キッカー電源を始 めとするパルス電磁石類の能力を確認した結果、ブー スターシンクロトロンの電磁石電源および入射路の偏



図5 UVSOR-IIの蓄積ビーム電流.1週間のユーザー運転(火曜日から金曜日まで)での蓄積ビーム電流の変化を示してある(上;トップアップ入射導入前,下; トップアップ入射導入後)

向磁石電源の2つの装置を増強更新するだけでフルエ ネルギー化に対応できることがわかった. 建設当初に ある程度の余裕を見てハードウエアの設計が行われて いたことが幸いした.

2006年にブースターシンクロトロンの電磁石電源の 更新,2007年に入射路偏向電磁石電源の更新を実施し, その後,直ちにフルエネルギー入射に成功した.2008 年にはトップアップ運転に向けたマシンスタディを開 始した.一定電流を保つために,ビーム電流に応じて 入射を開始または停止し,放射線安全管理のため予め 定められた以上の電荷量を入射した場合には入射器を 停止する機能を持つ入射制御システムを構築した.

2008 年秋からはユーザー運転の一部をトップアッ プ運転で実施し、入射系の安定性、利用実験への影響 を確認する作業を進めた¹⁰⁾. その結果、これまでの一 日数回の定時入射ではあまり見えていなかったライ ナックやパルス電磁石などの比較的ゆっくりした変動 が入射効率に大きな影響を与えることがわかってき た. デジタルオシロスコープなどを活用した簡便な フィードバックシステムを構築したところ入射効率の 変動を大幅に低減することができた.一方、利用実験

LINAC		
RF Frequency	2856 MHz	
Beam Energy	15 MeV	
Energy Spread	1.6%	
Beam Current	$\sim 100 \text{ mA}$	
Macro-pulse Duration		
(short)	5 nsec	
(long)	$1.5 \ \mu sec$	
Booster Synchrotron		
Maximum Beam Energy	750 MeV	
Injection Energy	15 MeV	
Beam Current	\sim 32 mA	
Circumference	26.6 m	
RF Frequency	90.1 MHz	
Harmonic Number	8	
Bending Radius	1.8	
Lattice	FODO x 8	
Horizontal Betatron Tune	2.25	
Vertical betatron Tune	1.25	
Momentum Comp. Factor	0.138	
Repetition Rate (750MeV)	1 Hz	
Repetition rate (600 MeV)	3 Hz	

では、一部のビームラインで入射の際の軌道変動の影響が計測結果に表れることがわかったため、入射タイ ミング信号を配信し、入射時にはデータ取得を停止す る対応をビームライン側で取った.この結果、全ビー ムラインでトップアップモードでの利用実験が可能と なり、2010年7月より利用実験を100%トップアップ モードで実施している(図5参照).

UVSOR のトップアップ運転では、1 Hz の繰り返し で1分間に最大 10 秒間,目標の電流値に到達するまで 入射を行う.この動作を毎分繰り返すことでビーム強 度を概ね一定電流値に保っている.マルチバンチ運転 では 300 mA を蓄積するが、ビーム変動量は 2~3 mA 程度であり、変動率は約 1%である.

6. その他の改良

2000 年以降の UVSOR 加速器に関する主要な改良は 上記の通りであるが、それ以外にも制御系、ビーム診 断系などにおいても改良を順次進めている. ビーム位 置検出器については 2001 年に、従来の切り替えスイッ チを用いた信号処理システムから Bergoz 社の信号処 理システムに更新し,毎秒一回のレートでビーム軌道 の計測が連続で出来るようになった.その他,スクレー パの設置,フォトンカウンティングやビームプロファ イルモニターなど光学モニターの更新や整備も段階的 に進めた.また,トップアップ運転に備えて入射路の CT やビームスリットなどの整備も行った.

加速器制御は、2000 年当時、VAX 計算機と CAMAC を用いたシステムであったが¹¹⁾、VAX 計算機の供給が 停止したことから、上位計算機を PC に置き換えたシ ステムに更新した.また、電磁石電源制御については、 2003 年の電源更新の際に PLC と PC を用いた制御シス テムに更新した.アンジュレータの制御については、 ビームラインの分光器と同期して制御できるシステム を導入した.その他、真空監視システムも更新した.

7. 光源技術開発

UVSOR では設計当初から自由電子レーザー研究を 想定してアンジュレータ用直線部上流側の偏向磁石真 空ダクトに上流を向いた光ポートが設けられており, これを利用して光共振器が建設できるようになってい た. 1990年代に発振に成功し¹²⁾,その後,円偏光タイ プ光クライストロンによる発振などの成果を挙げた が¹³⁾, 2000年当時には,通常レーザー技術の進歩や共 振器ミラーの反射率の制約による短波長化の限界が見 えてきたことなど、蓄積リングを用いた自由電子レー ザー研究そのものが、下火となっており、研究の方向 性を見失っていた. しかし, 2003 年の低エミッタンス 化や2005年の高周波加速空洞の増強により、特に短波 長域の増幅率が大幅に向上し,発振波長も199 nm に 到達し¹⁴⁾,平均出力も1Wを超えるまでになった¹⁵⁾. 可視から深紫外域の波長可変偏光可変大強度レーザー として十分に実用的であり、放射光との同期性を利用 した実験¹⁶⁾,磁気円二色性実験¹⁷⁾,生体物質への照射 実験¹⁸⁾ などの利用実験を行っている。また、自由電子 レーザーの発振過程に関する基礎的な研究でも成果が 上がっている¹⁹⁾.

一方,光共振器を流用して,外部レーザーを用いた 光発生に関する研究も開始した.フェムト秒レーザー を用いた広帯域のテラヘルツコヒーレント光の発生や その時間発展に関する研究^{20,21)},振幅変調レーザーパル スを用いた狭帯域のテラヘルツコヒーレント光発生²²⁾ 等の成果が上がっている.また,同じレーザー装置を 用いてコヒーレント高調波の発生に関する研究も行っ ている. 円偏光高調波の発生²³⁾,真空紫外域での高調 波発生²⁴⁾ などの成果が上がっている.また,レーザー コンプトン散乱によるガンマ線源の開発にも着手した²⁵⁾.



図6 2010 年春入射路改造前(左)と改造後(右)の入射路終端部とリング入射点付近

光源開発研究に関しては、2008年から5年間,文部 科学省の受託研究「量子ビーム基盤技術開発プログラ ム」に採択され、実用化を意識した研究開発を進める こととなった.建設以来、UVSORの直線部の一本は 入射に利用されてきたが、2010年春に入射路を延長し、 高周波空洞やビーム診断装置類の移設を行い、それま で入射点が設置されていた4m直線部を光源開発専用 に使用できるように改造を行った(図6参照).2011 年にはこの直線部に新しい光源開発専用アンジュレー タを設置する.また、レーザー装置の増強、専用ビー ムラインの建設も合わせて進めている.テラへルツコ ヒーレント光、極紫外コヒーレント高調波光などの光 源技術の実用化とその利用法の開拓を進める予定であ る.

8. 終わりに

UVSOR は 2000 年代に入り大幅な改造を経て UVSOR-II と改名され、電子エネルギー 1GeV 以下の シンクロトロン光源としては世界でもトップレベルの 高輝度光源となった.周長約50 mのリングでアンジュ レータ4台が稼働し、されに2台の設置を計画してい る.2010年7月以降、ユーザー運転は100%トップアッ プ入射で実施されている.利用技術の高度化に伴い電 子ビームのより高い安定性が求められるようになって おり、今後の大きな課題である.

近未来の将来計画としては,複合機能型の偏向磁石 の導入による低エミッタンス化とアンジュレータの増 設,さらにパルス多極磁石を用いたトップアップ運転 の高度化などを検討している.一方,世界では第3世 代をさらに上回る高輝度光源リングの建設が続いてお り,既存の装置の高度化でこれらに対抗していくには 限界も感じ始めている.既存装置の高度化を着実に進 めつつ,それと並行して,本格的な次期計画の検討を 進めたいと考えている.

UVSOR 施設の加速器系の研究職員は現在3名であ るが、内部昇格原則禁止という分子研特有の事情によ り、日本の加速器施設としては異例であるが、流動性 が極めて高く、人数、顔触れは頻繁に代わる.また技 術者は2名である.この体制で全国共同利用施設であ る放射光源を年間40週運転し、維持管理も行う.一 方で加速器研究者は研究業績も挙げてステップアップ していかなくてはいけない.

このような状況で、2000年以降我々がとってきた 戦略は、(i) ハードウェア開発には深入りしない、 (ii) 新しく且つある程度確立された技術を積極的に導 入することで加速器の性能向上を進め、全国共同利用 施設として世界水準の研究が行える状態を保つ、 (iii) 小回りのきく小型施設の特長を活かしながらビー ム物理学や光源技術の研究を進めて加速器研究グルー プとしての成果を挙げる、というものである.幸いこ れまでのところ、高輝度化、トップアップ運転など光 源としての性能向上を実現し、その一方で、小型低エ ネルギーという UVSOR-II の特質を生かした光源技術 開発でもユニークな成果を挙げつつある.しかし、マ ンパワー不足から、手つかずで残されている問題も数 多くあり、今後の課題である.

謝辞にも名前を挙げたが、人事の流動性は高く、若 手加速器研究者を各地の加速器施設に送り出してき た. さらにここ数年は総合研究大学院大学や名古屋大 学の大学院生を毎年数名受け入れており、また、国際 共同研究においてもこれまでに2名のフランス人大学 院生が UVSOR-II での実験をもとに学位を取得してい る. 人材育成という点でも一定の貢献ができているの ではないかと考えている.

謝辞

UVSOR の高度化・光源開発研究においては,江田 茂氏(現佐賀LS),保坂将人氏(現名大 SR センター), 持箸 晃氏(現 JASRI / SPring-8),島田美帆氏(現 KEK),阿達正浩助教,全炳俊助教ら若手研究者や山 崎潤一郎,林憲志両技術職員が活躍してくれました. また,春日俊夫氏,堀洋一郎氏,本田融氏,芳賀開一氏, 谷本育律氏を始めとする KEK の数多くの方々から技 術的な指導を得ることが出来ました.また,改造作業 では高嶋圭史,山本尚人,高見清,森本浩行各氏(名 大 SR センター)にご協力いただきました.感謝いた します.

参考文献

- M. Katoh, K. Hayashi, T. Honda, Y. Hori, M. Hosaka, T. Kinoshita, S. Kouda, Y. Takashima, And J. Yamazaki, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 467-468 (2001), 68-71.
- M. Katoh, M. Hosaka, A. Mochihashi, J. Yamazaki, K. Hayashi, Y. Hori, T. Honda, K. Haga, Y. Takashima, T. Koseki, S. Koda, H. Kitamura, T. Hara, T. Tanaka, AIP Conf. Proc. 705 (2004) 49-52
- M. Eriksson, M. Bergqvist, L. -J. Lindgren, M. Brandin, M. Sjoestroem, S. Thorin, Proc. EPAC 2006 (Edinburgh 2006), 3416
- A. Mochihashi, M. Katoh, M. Hosaka, J. Yamazaki, K. Hayashi, Y. Hori, Y. Takashima, H. Kitamura, T. Hara, T. Tanaka, AIP Conf. Proc. 705 (2004) 259-262
- S. Kimura, T. Ito, M. Sakai, E. Nakamura, N. Kondo, T. Horigome, K. Hayashi, M. Hosaka, M. Katoh, T. Goto, T. Ejima, K. Soda, Rev. Sci. Instr. 81, 053104-(1-7) (2010)
- S. Kimura, M. Kamada, H. Hama, X. M. Mar6chal, T. Tanaka, H. Kitamura, J. Electron Spectr. Rel. Phenom. 80 (1996) 437
- A. Mochihashi, M. Katoh, M. Hosaka, J. Yamazaki, K. Hayashi, Y. Takashima, H. Suzuki, Proc. EPAC 2006 (Edinburgh 2006) 1268
- M. Hosaka, M. Katoh, A. Mochihashi, J. Yamazaki, K. Hayashi, T. Kinoshita, Proc. 25th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop (Shanghai, 2001), 171
- 9) H. Ohkuma, Proc. EPAC 2008 (Genoa, 2008), 36
- M. Katoh, M. Adachi, H. Zen, J. Yamazaki, K. Hayashi, A. Mochihashi, M. Shimada, M. Hosaka, presented at SRI09 (Melbourne, 2009)
- N. Kanaya, H. Hama, J. Yarnazaki, O. Matsudo, G. Isoyama, Nucl. Insr. Meth. Phys. Res. Sec. A 352 (1994) 166
- 12) S. Takano, H. Hama, G. Isoyama, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 331 (1993) 20
- H. Hama, K. Kimura, M. Hosaka, J. Yamazaki, T. Kinoshita, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 393(1997) 23
- M. Hosaka, M. Koike, N. Yamamoto, Y. Takashima, M. Katoh, M. Shimada, J. Yamazaki, A. Mochihashi, UVSOR Activity Report 2007 (2008) 40
- M. Hosaka, M. Katoh, A. Mochihashi, M. Shimada, T. Hara, Y. Takashima, Proc. FEL2006 (2006, Berlin), 368
- 16) T. Gejo, E. Shigemasa, E. Nakamura, M. Hosaka, S. Koda, A. Mochihashi, M. Katoh, J. Yamazaki, K. Hayashi, Y. Takashima, H. Hama, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 528 (2004) 627
- 17) T. Nakagawa, T. Yokoyama, M. Hosaka, M. Katoh, Rev. Sci. Instr. 78, 023907 (2007)

- 18) J. Takahashi, H. Shinojima, M. Seyama, Y. Ueno, T. Kaneko, K. Kobayashi, H. Mita, M. Adachi, M. Hosaka, M. Katoh, Internat. J. Mol. Sci., 10 (2009) 3044-3064
- 19) C. Evain, C. Szwaj, S. Bielawski, M. Hosaka, A. Mochihashi, M. Katoh, M.-E. Couprie, Phys. Rev. Lett. 102, 134501 (2009)
- 20) M. Shimada, M. Katoh, S. Kimura, A. Mochihashi, M. Hosaka, Y. Takashima, T. Hara, T. Takahashi, Jpn. J. Appl. Phys., 46, 12 (2007) 7939
- M. Shimada, M. Katoh, M. Adachi, T. Tanikawa, S. Kimura, M. Hosaka, N. Yamamoto, Y. Takashima, T. Takahashi, Phys. Rev. Lett. 103, 144802 (2009)
- 22) S. Bielawski, C. Evain, T. Hara, M. Hosaka, M. Katoh, S. Kimura, A. Mochihashi, M. Shimada, C. Szwaj, T. Takahashi, Y. Takashima, Nat. Phys., 4 (2008) 390-393
- M. Labat, M. Hosaka, M. Shimada, M. Katoh, M. E. Couprie, Phys. Rev. Lett. 101, 164803 (2008)
- 24) T. Tanikawa, M. Adachi, M. Katoh, J. Yamazaki, H. Zen, M. Hosaka, Y. Taira, N. Yamamoto, Proc. iPAC10 (Kyoto, 2010) 2206
- 25) Y. Taira, M. Adachi, H. Zen, T. Tanikawa, M. Hosaka, Y. Takashima, N. Yamamoto, K. Soda, M. Katoh, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A (in press, available online)