

## 解 説

1990年のSORTEC蓄積リングtop-up運転  
(1 GeV-200 mA) が果たしたもの

富増 多喜夫\*

## Pioneering Role of the Top-up Operation of the SORTEC Ring in 1990

Takio TOMIMASU\*

## Abstract

The progress of top-up operation technology pioneered at the SORTEC 1-GeV ring in 1990 is briefly reviewed. At the SORTEC ring for lithography use, the top-up operation has been achieved with a 200 mA stored current, which was automatically controlled within 1% fluctuation, in May 1990. The stable top-up operation with the routine current stability in the range of  $10^{-3}$  to  $10^{-4}$  was finally established after intense efforts more than a decade at Swiss Light Source (routine use in 2001), Advanced Light Source (routine use in 2001), SPring-8 (routine use in 2004), Taiwan Light Source (routine use in 2005), etc. A contribution of the top-up operation for achieving the highest luminosity  $2.108 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$  in the world (in 2009) at the KEKB Factory is highly appreciated.

“Top-up”とは三省堂の英和辞典では、[つぎ足して容器を]一杯にする；{話}[人の]グラスにつぎ足す、とある。グラスにビールをつぎ足して一杯にするにもこつがあるが、電子蓄積リングではシンクロトロン放射の量子的揺らぎなどによって絶えず蓄積電子数が減少しているので、例えば1 GeV-200 mA蓄積電子ビームの電流安定度を1%レベルに制御するにも電子蓄積リングにそれ相応の精度で電子ビームをつぎ足し入射をする必要がある。

リング状真空槽内の安定軌道を周回する蓄積電子ビームは、バンチ状になって高周波加速空洞の電場と同期しながら加速され電子のエネルギーが一定に保たれているが、放射光量を一定に保つにはシンクロトロン放射の量子的揺らぎなどによって絶えず失われる蓄積電子ビームを入射によって補わなければならない。

蓄積電子ビームの粒子損失を生ずる効果としては、

- ① シンクロトロン放射の量子的揺らぎ
- ② バンチ内の電子との散乱 (Touschek 効果)
- ③ 残留ガス分子やイオンとの散乱

などがある。これらの効果により粒子数は安定軌道から外れ、蓄積電流は減少する。図1に示すようなフルエネルギー入射の蓄積リングでは、所定の電流値を蓄積するまで入射を行った後に、一旦入射を停止し、定常運転を行う。蓄積電流がある値まで減少すると再び

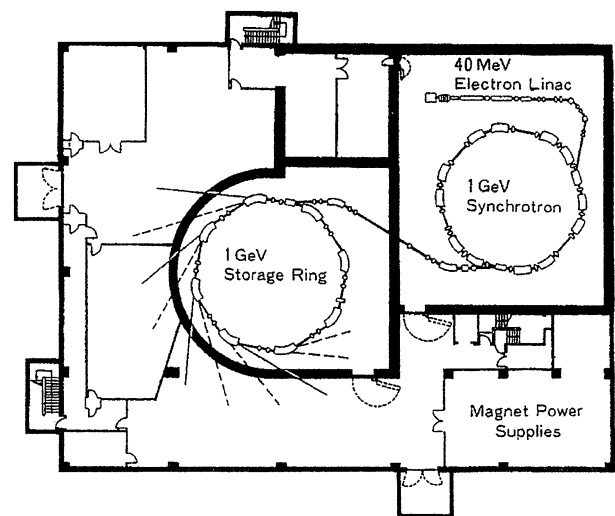


図1 SORTEC 1-GeV放射光施設のレイアウト

所定の電流値まで入射を繰り返すので、利用できる放射光量は図2に示すように鋸の歯状に変化する。放射光量をフラットトップ状に一定に保つには蓄積電流を一定に保つために絶えず減少する電流を電子入射器で補わねばならない。このような蓄積電流量を上限值以上にせず下限値以下にも減らさないような電子の入射運転を“top-up”運転という。トップアップ運転には蓄積リングとフルエネルギー入射器が必要である。

\* (E-mail: tomi3826@yel.m-net.ne.jp)

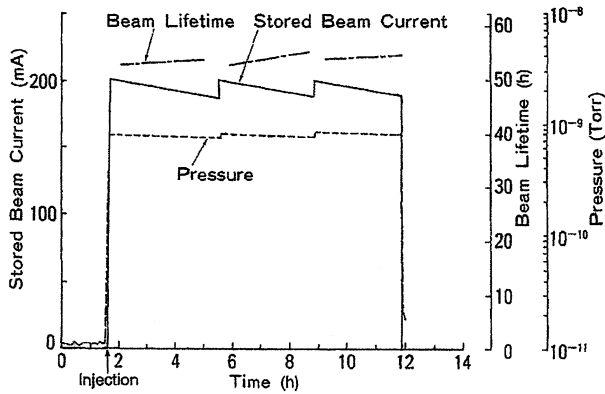


図2 通常運転時における蓄積ビーム電流, ビーム寿命, 真空圧

小型の放射光光源にはフルエネルギーの数分の1の低エネルギー入射器で電子蓄積リングに所定の電流値を蓄積した後, リングで蓄積しながら所定のエネルギーまで加速する“蓄積・加速型リング”が多い. このような構成ではトップアップ運転はできないが入射器が数分の一と小型で安価にできること, 建物と遮蔽のコストも下げられる利点は大きい.

以下の解説は, 1990年の第2回 European Particle Accelerator Conference (EPAC) で中村史朗らが発表したSORTEC<sup>11</sup>蓄積リングでの連続入射運転(1 GeV-200 mA)の論文<sup>1)</sup>等をもとにし, 田中均らの解説“SPring-8<sup>12</sup>に於けるトップアップ運転の現状と今後の課題—理想の放射光光源を目指して—<sup>2)</sup>”と, 生田勝宣の解説“KEKB<sup>13</sup>の切り拓いたもの<sup>3)</sup>”, などを参考にまとめたものである. 1990年頃の論文作成時には残念ながら“top-up”のような気の利いた英語を思い付かず“refilling”とか“flat top operation”という英語を使っている. 1990年のSORTEC蓄積リングのトップアップ運転(1 GeV-200 mA)の試みから十数年を経て, トップアップ運転技術が高輝度放射光光源の安定化ばかりか電子-陽電子リング衝突器の「連続入射運転モード」によるルミノシティ向上に貢献し, 蓄積リング入射方式の標準として使用されるまで成長してきた経過を述べる.

このトップアップ運転のアイデアを放射光光源の安定化のために最初に持込んだのはSORTECの1 GeV放射光光源<sup>1)</sup>で, 1990年のことである. その頃までのわが国における小型放射光光源の開発は素早く, 1974年12月には放射光利用を主目的とした最初の第二世代の放射光光源としてSOR-RING<sup>14</sup>(旧田無)が初ビーム蓄積に成功している. 続いて1980年にSRS<sup>15</sup>(英国), 1981年にTERAS<sup>16</sup>(つくば)とNSLS-I<sup>17</sup>(米国), 1982年にKEK-PF<sup>18</sup>(つくば)とBESSY<sup>19</sup>(独国), 1983年にUVSOR<sup>10</sup>(岡崎)が稼動している.

SORTECリングが建設された1980年代後半は, 放射光がULSIパターンの転写光源として有望視されていた頃であり, 民間企業を含めて1 GeV以下の小型放射光光源が11台稼動した<sup>4,5)</sup>. ㈱ソルテックは放射光によるパターン転写技術の基礎確立を目的として基盤技術研究促進センターと民間13社の出資によって1986年6月に設立された研究開発会社で, 研究期間は1996年3月までの10年の時限でつくばの北部工業団地に建設された. 転写光源用として試作された放射光光源施設は40 MeV電子リニアックと周長43.2 mの1 GeVブースターシンクロトロンを入射器とする周長45.7 mの1 GeV電子蓄積リングである. ブースターとリングの電磁石配列はいずれもFODO型で個別の遮蔽室に設置された. 10年の時限終了後, SORTECリングはタイ国政府に移管され, 1.2 GeVリングに改造されて現在も稼働中である<sup>6)</sup>.

しかし, 1985年頃までに稼動したいずれの放射光光源も200 mAの蓄積電流寿命(以下1/e寿命)が数時間以下と短かったので, SORTECリングは電流

<sup>11</sup> SORTEC: つくばに建設されたリソグラフィ専用放射光施設,  $E_{max}=1$  GeV (1989年稼働), 現在はタイで稼働中.

<sup>12</sup> SPring-8: 兵庫県佐用郡に設置された世界最大の第3世代放射光施設.  $E_{max}=8$  GeV (1997年稼働).

<sup>13</sup> KEB: つくばの高エネルギー物理学研究所に設置された電子・陽電子衝突型加速器,  $E_{max}$  電子8 GeV, 陽電子3.5 GeV (1998年稼働).

<sup>14</sup> SOR-Ring: 東京大学物性研究所(東京旧田無)に設置された世界初の放射光専用リング.  $E_{max}=0.4$  GeV (1975年稼働),

<sup>15</sup> SRS: 英国ダレスベリー研究所に設置された蓄積リング.  $E_{max}=2$  GeV (1980年稼働, 2008年停止),

<sup>16</sup> TERAS: つくばの旧工業技術院電子技術総合研究所で建設された蓄積リング.  $E_{max}=0.8$  GeV (1981年稼働),

<sup>17</sup> NSLS-I: 米国ブルックヘブン国立研究所に設置された蓄積リング.  $E_{max}=0.75$  GeV (1982年稼働),

<sup>18</sup> KEK-PF: つくばの高エネルギー物理学研究所に設置された放射光施設「フォトンファクトリー」 $E_{max}=2.5$  GeV (1982年稼働),

<sup>19</sup> BESSY: 西ドイツ(当時)ベルリンに建設された放射光施設.  $E_{max}=0.8$  GeV (1982年稼働), 現在はヨルダンで稼働中.

<sup>10</sup> UVSOR: 岡崎の分子科学研究所に設置された放射光施設.  $E_{max}=0.8$  GeV (1983年稼働).

寿命を 1 GeV-200 mA で一桁長い数十時間に向上することを目標に試作された。試作に先立って、TERAS リングで蓄積電子ビームの挙動を調べ、放射光による真空槽内面からのアウトガスの効果、タウシェック効果、イオン・クリアリングなどの寿命制御因子を定量的に明らかにした<sup>7)</sup>。これらに基づき SORTEC リングの動作条件を最適化し、大強度、高安定、長寿命な光源性能の実現に努めた。SORTEC リングの真空槽試作にあたっては、放射光照射によって真空槽内面から発生するアウトガスをできるだけ少なくするよう真空槽内面処理に重点をおき、SUS316L 製真空槽内面には電解研磨パフ仕上げ処理を行った<sup>8)</sup>。また真空ダクトの接続箇所ではダクト内面で段差が付かないようスムーズに接続するように努めた。

1-GeV ブースターによるリングのビーム初蓄積は 1989 年 9 月 28 日で、2 ヶ月後の 11 月 30 日には 1 GeV-200 mA 蓄積電流の減衰率が参考文献 4 の Fig. 17 に示すように 0.4 mA/min になり<sup>5)</sup>、ゼロ蓄積電流時の真空圧は  $2 \times 10^{-11}$  Torr の低真空圧であった<sup>9)</sup>。したがって 1989 年 11 月 30 日の時点でも 200 mA 蓄積電流が 2 mA (1%) 減衰する時間は 5 分であり、1 GeV ブースターの電流が 50 mA で入射効率が 20~25% なので、入射ビームの電流を絞って数秒掛かったとしても 5 分弱毎に 2 mA ずつ入射すれば 1 GeV-200 mA 蓄積電流の 1% 制御が可能であった。実際には第 2 回 EPAC 直前の 1990 年 5 月に 1 GeV-200 mA 蓄積電流の 1% 制御に成功している<sup>10)</sup>。図 3 に一例を示す。

1991 年 5 月頃にはゼロ蓄積電流時の真空圧は  $1 \times 10^{-11}$  Torr に下がり、イオン・クリアリングの状況で 1 GeV-200 mA 蓄積電流の減衰率は 0.1 mA/min

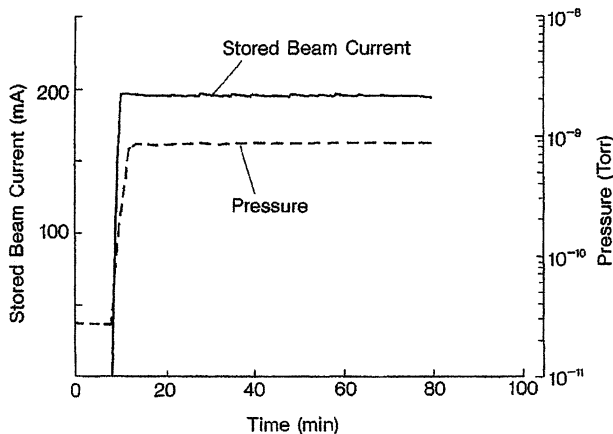


図 3 トップアップ運転時における蓄積ビーム電流，真空圧

まで下がった<sup>5)</sup>。そして 200 mA の蓄積電流寿命は 70 時間と当時では桁違いの長寿命で安定<sup>11)</sup>であったので、小平政宣らは応用物理学学会英文誌に“Development of Highly Stable Synchrotron Radiation Source at SORTEC”の論文を発表し 1% 制御のトップアップ入射の成果も報告している。

しかし、SORTEC 以外でこの試みが追試されユーザー利用に到るまでには時間が掛かった。それは、トップアップ入射の推進役であった SORTEC が 10 年の時限で 1986 年度に設立され 1995 年度で事業を終了したこと、光源の安定化とリングやビームラインの熱負荷が一定になるトップアップ運転の利点がすぐには充分理解されなかったこと、SORTEC リング以外では SORTEC リングの場合と違って蓄積電流の安定制御以外のビーム振動の低減などのユーザー要求に応える必要があったこと、試みるまでに多くの準備を必要としたことにある。必要な準備の一つは既に述べたように蓄積電流の長寿命化であり、放射光によるアウトガス量を少なくする真空槽の内面処理の変更などの改造が必要であり、既存の施設に適用するには大きな費用と時間が必要である。

SORTEC リングに次いでトップアップ運転を試みたのは台湾の NSRRC<sup>11)</sup>の 1.3 GeV Taiwan Light Source (TLS) であり 1995 年のことである。1993 年に稼動した 1.3 GeV TLS は大電流-長寿命蓄積を目指してアウトガスの少ないジュラルミン製の真空槽を用いている。1996 年にはリングの電磁石電源と加速空洞等の増強と改修をして 1.3 GeV 入射で 1.5 GeV まで加速できるようになり、1.5 GeV-200 mA の電流寿命は 9 時間に達していた<sup>12)</sup>。TLS でのトップアップ運転の成果が発表されたのが 1996 年の第 5 回 EPAC であり、1.3 GeV-200 mA ビームが約 15 分で 6 mA 減衰するので入射に数秒掛かったとしても 15 分弱毎 6 mA を入射して蓄積電流値を 194~200 mA の範囲 (3% 幅) に保ち約 6 時間のトップアップ運転を試みている<sup>13)</sup>。

TLS での本格的な 1.5 GeV-200 mA のトップアップ運転が試みられたのは 2000 年になって 1.3 GeV ブースターを含む入射系が 1.5 GeV に増強されてからである。2000 年の EPAC では 1.5 GeV TLS で蓄積電流値 199.4~200 mA の範囲 (0.3% 幅) でトップアップ運転を試みている<sup>14)</sup>。2004 年には蓄積電流値の変動は小さくなり、 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$  レベルと

<sup>11)</sup> NSRRC : 台湾新竹に建設された放射光施設,  $E_{max} = 1.3$  GeV (1993 年稼動)。

報じられている<sup>15)</sup>。トップアップ運転でのユーザー使用は2005年の10月に200 mAで、11月には300 mAでトップアップ運転を開始した。2008年には360 mAでトップアップ運転が試みられている<sup>16)</sup>。

放射光光源建設の計画段階からSORTECリングのトップアップ運転に興味を示したのはSwiss Light Source<sup>†12</sup>(SLS)の母体であるPaul Scherrer InstituteのW. JohoとL. Rivkin達である。W. Johoは池上栄胤に1991年11月大阪大学RCNPのリングサイクロトロン開所式に招かれた機会を利用してつくばのSORTECリングと電総研のTERASとNIJI-familyとを見学している<sup>17)</sup>。SLSはトップアップ運転を行うことを前提に1993年にJoho達によって設計された世界最初の高輝度放射光光源であり<sup>18,19)</sup>、SLSは2001年秋にトップアップ運転を実現している<sup>20)</sup>。SLSは光源建設が遅れたことで、SORTECの成果を設計に最大限に取り込めたことが幸いしたともいえる。

トップアップ運転には蓄積リングと高価で場所を取るフルエネルギー入射器が必要であるが、SLSの特徴は安価で場所を取らないフルエネルギー入射器を考案したところにある。

SLSのフルエネルギー入射用のブースターシンクロトロン(周長270 m)の半径と2.4 GeV蓄積リング(周長288 m)の半径がほぼ等しく、リング状遮蔽トンネル内の外周側にリング電磁石などを床置きにして、ブースターは同じトンネルの内周壁に取り付け、建物と遮蔽のコストを下げている<sup>21)</sup>。

FODO配列のブースター電磁石(BF, BD)の磁極間隔やヨーク等の寸法も小さく、トンネルの内周壁に取り付けられるように小型軽量で安価に設計されている。磁極間の真空ダクトはブースター電磁石のパルス励磁による渦電流損失を少なくするよう肉厚0.7 mmのステンレス製で断面形状は楕円(30×20 mm<sup>2</sup>)で、ダクトは下をくぐり抜け易いように床面から1.4 mの高さに設置されている。

入射器の消費電力は通常の入射方式では200 kWだが、トップアップ入射方式ではビーム寿命で減衰した分だけ補給すれば良いので30 kWで済む。正にトップアップ運転用の安価なフルエネルギー入射器である。

光源建設が早かったAdvanced Photon Source<sup>†13</sup>(APS)とSPring-8は途中からトップアップ運転方式

を導入したため、トップアップ入射方式でのユーザー使用開始までに手間取った。APSは1996年8月のユーザー使用開始以来5年の歳月をかけて2001年10月、ほぼSLSと同時期からユーザー使用へのトップアップ運転導入が開始された<sup>22)</sup>。

1997年稼働したSPring-8では1999年から理想的なトップアップ運転の導入に向けた検討が開始され<sup>23)</sup>、APSより2年半遅れた2004年5月にはトップアップ入射時の蓄積ビーム振動を低減するなど蓄積ビームの基本性能を阻害しない安定な運転が開始され、8 GeVビームのトップアップ運転では蓄積電流の変動は98.95~99.05 mAの範囲であり、0.1%という高い安定度が可能で、ユーザーに供されている<sup>24,25)</sup>。

2001年のSLSとAPSの二施設によるトップアップ運転成功により、その後計画または建設されているほぼ全ての高輝度光源、SOLEIL<sup>†14</sup>、DIAMOND<sup>†15</sup>、SSRF<sup>†16</sup>等でトップアップ運転方式が導入されている。

このトップアップ運転方式は、高輝度放射光光源の輝度と安定性の向上だけにとどまらず、2004年頃からの電子-陽電子リング衝突器KEKBでの「連続入射モード運転」の導入によるルミノシティ向上に利用された。これにより十分な統計精度で実験データの収集が可能となり、2004年1月のピーク・ルミノシティ $1.65 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ を<sup>26)</sup>、2009年春の $2.108 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ <sup>27)</sup>達成に大いに貢献した。この値は今のところKEKBでしか更新することのできない世界記録である<sup>28)</sup>。その間2001年にはB中間子の崩壊過程における大きなCP非保存を発見し<sup>29)</sup>、それが小林・益川理論で説明できることを実証して2008年のノーベル物理学賞の決め手となったのは、皆様ご存じのところである。

## 謝辞

SPring-8の田中均氏らが日本放射光学会誌やSPring-8利用者情報誌にトップアップ運転の解説記事を書かれ、1990年にSORTECの1 GeV放射光光源でトップアップ運転(連続入射運転)が試みられたことに触れ、参考文献1を引用されたことに感謝したい。

次いで1986年から1995年にわたってSORTEC

<sup>†12</sup> SLS: スイスの第3世代放射光施設,  $E_{\text{max}}=2.4$  GeV (2001年稼働)。

<sup>†13</sup> APS: 米国アルゴンヌ国立研究所に設置された第3世代放射光施設,  $E_{\text{max}}=7.0$  GeV (1996年稼働)。

<sup>†14</sup> SOLEIL: 仏サン・トールバンに建設された第3世代放射光施設,  $E_{\text{max}}=2.75$  GeV (2006年稼働)。

<sup>†15</sup> \*DIAMOND: 英国ダレスベリー研究所に設置された第3世代放射光施設,  $E_{\text{max}}=3$  GeV (2007年稼働)。

<sup>†16</sup> SSRF, 中国上海に建設された第3世代放射光施設,  $E_{\text{max}}=3.5$  GeV (2008年稼働)。

放射光光源の設計，組み立て調整，試運転，トップアップ運転等の光源開発と半導体リソグラフィ等の放射光利用技術の研究開発に努力されたSORTEC関係各位に光源開発に携わった一人として改めて感謝したい。

この解説の一部は九州大学大学院工学府の集中講義資料として使用した。機会を与えて下さった石橋健二教授と池田伸夫教授に感謝したい。

また解説を纏めるにあたり貴重なご助言を戴いた京都大学名誉教授山崎鉄夫氏，早稲田大学 研究戦略センター教授小林直人氏，産業界技術総合研究所 財務会計部門長伊東一明氏に感謝したい。

### 参考文献

- 1) S. Nakamura, et al., "Present Status of the 1 GeV Synchrotron Radiation Source at SORTEC", Proc. of the EPAC '90., Nice, June, pp. 472-474 (1990).
- 2) 田中 均ら，放射光，18(2)，pp. 57-73 (2005).
- 3) 生出勝宣，加速器，6(1)，pp. 28-34 (2009).
- 4) H. Takada, et al., "Development of a compact synchrotron radiation system for X-ray lithography", Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 773, 257 (1987).
- 5) T. Tomimasu, "Compact sources in Japan and their intended applications" Rev. Sci. Instr., 63(1), January, pp. 722-730 (1992).
- 6) P. Klysubun, et al., Proc. of EPAC '08, Genoa (2008).
- 7) T. Tomimasu, et al., "Estimations of Touschek effect and ion clearing by the decay rate plot", Rev. Sci. Instr., 60(7), July, pp. 1744-1747 (1989).
- 8) H. Usami, et al., Proc. of the SR Vacuum Symposium, RIKEN, Saitama, p. 108 (1991).
- 9) M. Ohno, et al., "Performance of the Vacuum System of SORTEC 1 GeV Electron Storage Ring", 参考文献 [1], pp. 1335-1378 (1990).
- 10) M. Kodaira, et al., "Development of Highly Stable Synchrotron Radiation Source at SORTEC", Jpn. J. Appl. Phys., 30(11B), pp. 3043-3047 (1991).
- 11) N. Awaji, et al., Rev. Sci. Instr., 63(1), January, pp. 745-748 (1992).
- 12) Y. C. Liu, et al., Proc. of the PAC '97, May, pp. 847-849 (1997).
- 13) T. S. Ueng, et al., Proc. of the EPAC '96., Sitges, June, pp. 2477-2479 (1996).
- 14) T. S. Ueng, et al., Proc. of the EPAC '00, Vienna, pp. 1874-1876 (2000).
- 15) G. N. Luo, et al., Proc. of the EPAC '04, Lucerne, pp. 2380-2382 (2004).
- 16) Y. C. Liu, et al., Proc. of the EPAC '08, Genoa, pp. 2082-2084 (2008).
- 17) 山崎鉄夫 (1991年11月JohoをSORTECと電総研に案内) 私信.
- 18) W. Joho, et al., Proc. of the EPAC '94., London, June, pp. 627-629 (1994).
- 19) J. Bengtsson, et al., Proc. of the EPAC '96, Sitges, pp. 685-687 (1996).
- 20) M. Boge, Proc. of the EPAC '02., Paris, June, pp. 39-43 (2002).
- 21) C. H. Gough, et al., Proc. of the EPAC '98, Stockholm, pp. 584-586 (1998).
- 22) L. Emery, Proc. of the PAC '01, Chicago, June, pp. 2599-2601 (2001).
- 23) 田中 均，大熊春夫，SPring-8 Information, 8(5)，pp. 298-304 (2003).
- 24) H. Tanaka, et al., Proc. of the EPAC '04, Lucerne, pp. 222-224 (2004).
- 25) H. Tanaka, et al., "Stable top-up operation at SPring-8", J. Synchrotron Rad., 13, pp. 378-391 (2006).
- 26) KEKB Accelerator Papers, Nucl. Instr. Meth. A499 (2003).
- 27) 船越義裕，加速器，6(3)，pp. 222-230 (2009).
- 28) 山内正則，加速器，6(1)，pp. 35-40 (2009)；榎本収志他，加速器，6(1)，69 (2009).
- 29) K. Abe, et al., Phys. Rev. Lett. 87, 091802 (2001)；相原博昭，B中間子における大きなCP非対称の発見，日本物理学会誌，56(11)，845 (2001).