

FROM SCIENCE TO INDUSTRIAL TECHNOLOGY -- NewSUBARU's INITIATIVE --

NewSUBARU Group (A. Ando¹)

NewSUBARU, Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo
1-1-2 Kouto, Kamigoori-cho, Ako, Hyogo 678-1205

Abstract

The NewSUBARU synchrotron radiation facility is constructed to enhance domestic industries in Hyogo prefecture with high technology and to develop new light sources. NewSUBARU is now pushing up activities in industrial micro fabrication in the world and will make a breakthrough in commercial mass production with synchrotron radiation. The negative alpha-p operation of the storage ring gives good opportunities not only for new understandings of beam physics but also for coherent mm-wave light by very short electron bunches.

科学から産業技術へ ----- ニュースバルの挑戦 -----

1. はじめに

ニュースバルは、放射光の産業利用により兵庫県下の企業の「ハイテク化」と新しい光源開発を目指して建設された。前者の目的からリングのエネルギーは、ミリメートル・オーダーの深さの微細加工 (LIGA) が可能な 3 - 6 keV の放射光が充分得られるように設定すると共に、時流の低エミッタンス化は重点から外した。産業利用では、全日本規模での共同研究が進捗しているだけでなく、具体的に商品の大量生産を念頭に置いた地元企業の進出があり、ほぼ初期目標を達成している。放射光産業利用の超微細加工分野では、世界的にも牽引車の役割を果たしている。光源開発では 15 m の長直線部を 2カ所設け (図 2)、レーザーなど他ビームとの相互作用を自由に行えるようにすると共に、逆偏向電磁石を導入し、極短バンチ長電子ビームの生成を目指すことにした。また「Negative Alpha-p」運転において、ビーム物理学に新しい知見をもたらす可能性があるだけでなく、全バンチ長: 1mm以下のビームを安定に蓄積し、コヒーレント・ミリ波を供給できる道が開けつつある。

2. NewSUBARU 蓄積リングの概要

NewSUBARU^{1,2)} は SPring-8 の LINAC を入射器とする 1.5 GeV の放射光源蓄積リングを中心とする施設 (図 2) で、SPring-8 の協力の下建設され運営されている。リングは表 1 に主要パラメータを示すが、15 m - 長直線部 2カ所と、6 台の逆偏向電磁石を持つ。逆偏向部での運動量分散をこの上下流にある 2 台の四極電磁石 (Q3 & Q4) で調整し、

momentum compaction factor を正負自由に変更でき、サイクロトロンのように等時性運転ができる。

表 1 : Main Parameters of NewSUBARU Storage Ring

周長	118.731	m
入射エネルギー	1.0	GeV
最大エネルギー	1.5	GeV
自然エミッタンス	38 (86)	nm (1.5 GeV)
最大蓄積電流	500 (> 50)	mA (Single)
Tune	6.30 / 2.23	ν_x / ν_y
RF 周波数	499.95	MHz
最大 RF 出力	140	kW
挿入光源数	4	
ビームライン数	8 (11)	(含分岐)

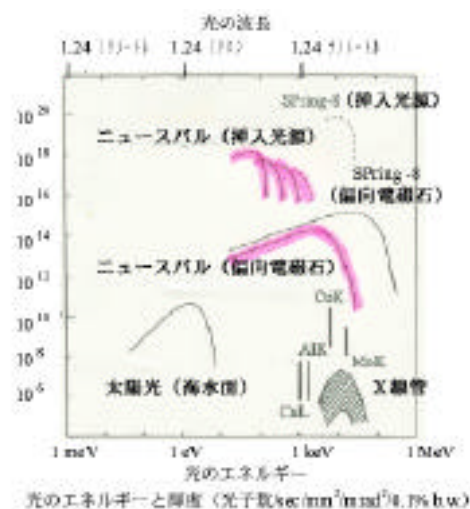


図 1 : ニュースバルの放射光スペクトル

¹ E-mail : ando@lasti.u-hyogo.ac.jp

² <http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/Index-J.html>

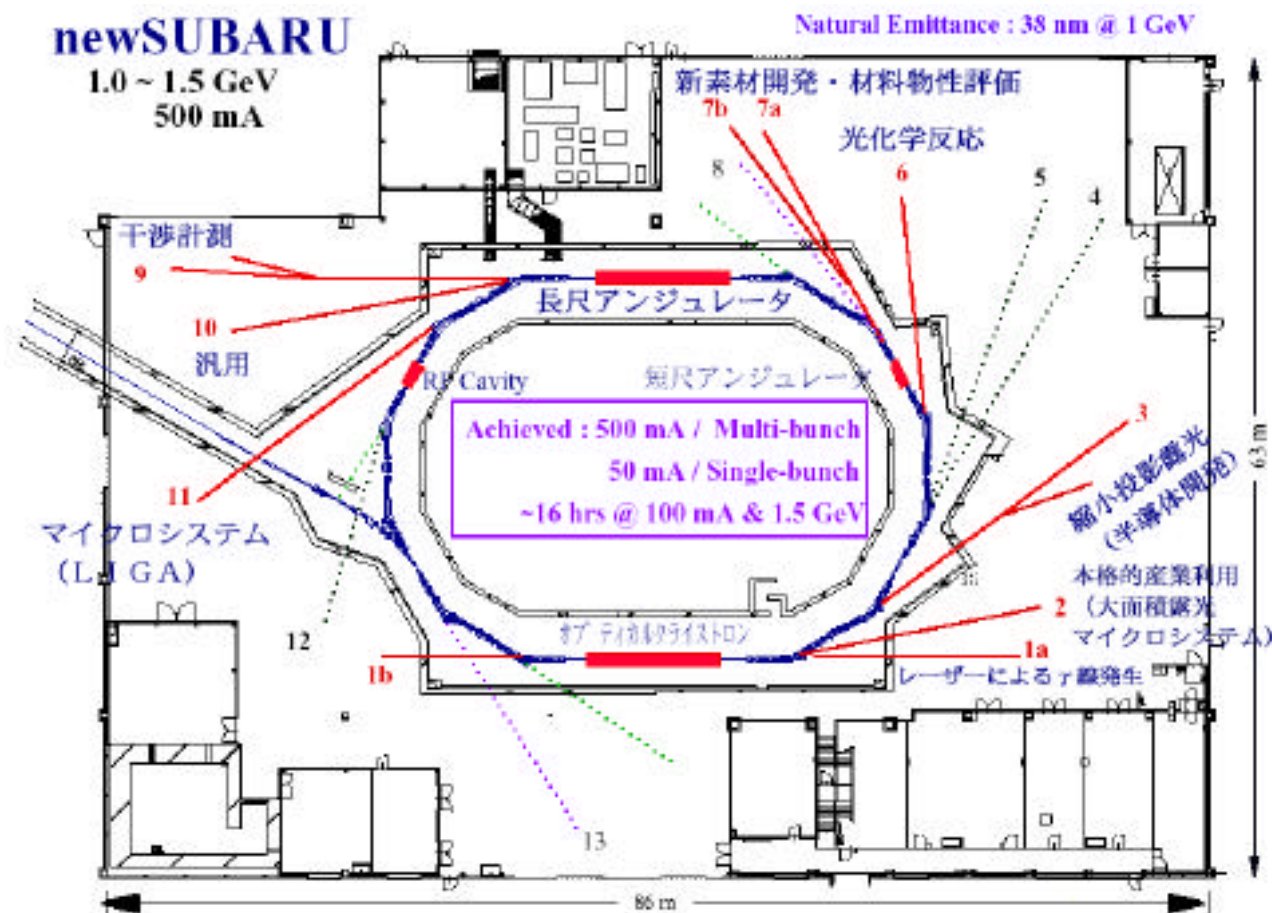


図 2 : NewSUBARU 施設の平面図

電子のエネルギーや偏向電磁石の磁場の強さは図 1 のスペクトルのように、1.5 GeV にて光子の臨界エネルギーが ~ 3 keV (2.9 keV) となるようにした。電磁石の口径は COD を見込まないぎりぎり一杯に小さくした。(電子ビームに有効な内径: 高さ ± 10 (14) mm / 偏向(四極)電磁石、幅 ± 34 mm)

3. 産業利用と材料物性評価

産業利用を目指した研究^[2]は大きく 3 分野に分かれる。(1) ビームライン (BL) 6, 7a & 7b での表面改質を中心とする新素材開発。ここでは光化学反応と物性評価が不可欠であり、産業利用の基礎的知見を与えるものである。(2) BL - 3, 9, 10 での極端紫外光縮小投影露光による超 LSI 開発。ここでは光学素子の反射率絶対値測定や縮小光学系の歪み・精度測定・評価がともなう。(3) BL - 2 & 11 での LIGA。ミクロン精度での大面積露光及び深さ 1 mm に迫るエッチングが基本であるが、更にマスク・パターン製作のみならず、金型への転写及び製品成形も重要である。

以下事例に従って産業利用を紹介する。

3.1 高性能な BL - 7b

図 3 左は本 BL で得られた清浄なシリコン (100) 表面での Si-2p 内殻光電子スペクトルであるが、矢印で示す、右の既存データでは明瞭でない dip が識別されている。

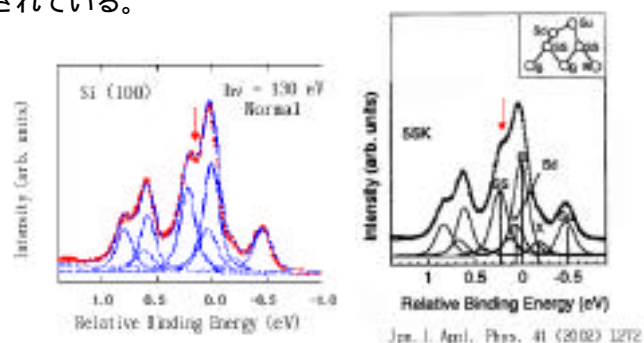


図 3 : (100) 表面での Si-2p 内殻光電子スペクトル

3.2 PTFE (テフロン) の表面改質

本研究は微細加工と組み合わせる局所的に表面物性を制御したナノパーツ製作を目標として、エンジニアリングプラスチックの代表例として PTFE の表

面改質を実施した。BL-6 で基板温度とガス雰囲気を変えた照射を行い、照射前後の顕微鏡観察と BL-7b での X 線光電子分光から、低温領域での親水性増加反応と高温での疎水性増加反応の存在を示した。電気配線分野などで有用な接触性表面実現へ向け更に実験を続けている。

4 . 本格的産業利用

本稿で紹介する研究は、中小企業から全日本規模での大企業を取り込んだ共同研究で、国の施策とも大いに関係し、商品の大量生産を視野に入れている。

4.1 EUVL (極端紫外光縮小投影露光)

情報機器に用いられている中央演算素子や記憶素子の高集積化は、1970年代より3年に4倍のペース開発が進められてきた。2007年には最小線幅 70 nmをもつ64 Gbit級の半導体メモリーや演算速度10 GHzのMPUの生産が計画されている。このためのキー技術がリソグラフィ技術であり、微細な線幅をもつ各種パターンをシリコン基板上に高精度に形成する加工技術である。ここでは、波長を13 nmまで短くした極端紫外線の反射鏡縮小光学系を用いる。高度研が開発した装置により、図4に示すように、

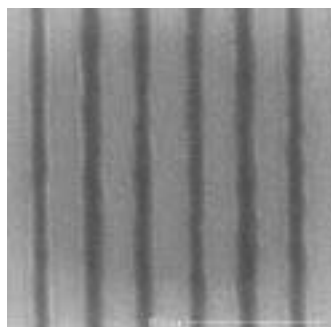


図4 : 微細転写パターン

線幅 (L) : 40nm、
間隔 (S) : 80nmの
パタンを形成した。レジストにはZEP520を用いており、レジスト膜は0.1 μmである。40nmの孤立パタン形成も可能である。図5はマスクとウェハのステージ走査によって大面積 10mm x10mm の露光領域を得たものである。垂直方向は60nmまでクリアに転写できているが、走査方向に垂直なパタンは同期精度の誤差で十分解像していない。このように大面積化ではステージの性能の向上が重要である。

本装置ではマスクパターンを反射鏡光学系で1/5に縮小しているが、反射鏡表面の一様性が決定的に重要であり、直径30cmに対して、1ナノメートル平方の領域毎に0.1ナノメートルの精度で測定できるシステムも開発中である。またマスク上やミラー面への不純物付着を極力押さえるため、付着のメカニズム及び除去法の研究も進展している。平行して多層膜の反射率の絶対測定系も確立されつつ

ある。これらは、超LSI開発だけではなく、精密光学機器商品の品質検査ラインとして有用であり、これを前提とした企業と共同研究中である。

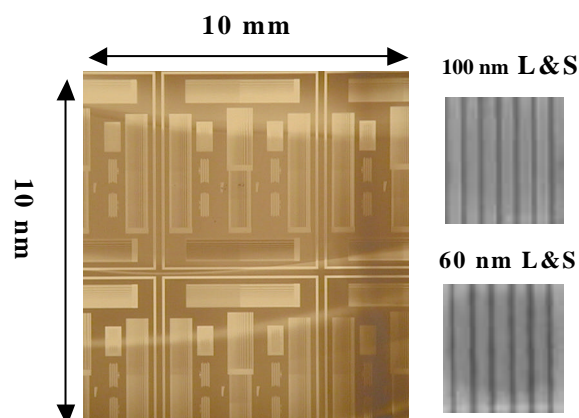


図5 : 大面積転写パターン

4.2 LIGA

高度研では、放射光にてレジストの加工を行うのみならず、パターンの生成から、(樹脂)成形・大量生産に到るプロセスを一つのものとして研究を進めている。

IT機器の普遍化・携帯化の進捗から、単一部分の小型化のみならず、システムとしての小型化と消費電力の低減が大きな課題となっている。そこでターゲットをこの課題に絞り、商品化を前提にした部品の製造に着手している。図6は、液晶表示パネルにて、明るい明瞭なディスプレイを実現するに不可欠な、ライティングパネル(大きさ5cm角)を高度研にて製作したものである。従来の機械加工で製作されたものに比べ、消費電力を1/3に低減できた。最低限A4サイズの量産化を目指し、国及び県の助勢のもと企業との共同研究が進んでおり、主企業はニュースバルの近隣に研究所・工場を建設した。BL-2は本計画のもと、

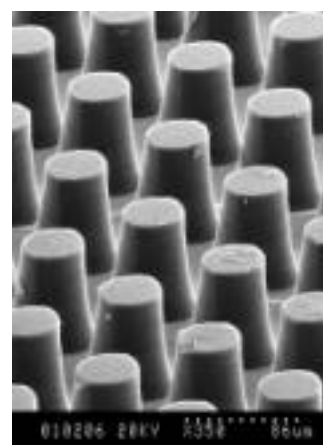


図6 : ラइटニング・パネルの径~10μm 構造

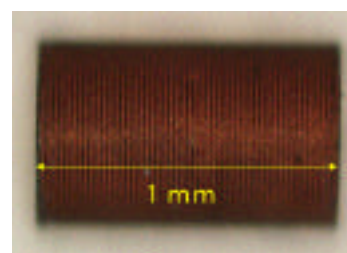


図7 : チョークコイル

設計され建設され、正に商品大量生産に向け Stand-by している。

図7はスパイラル構造を持つチョークコイルで、金型から成形し必要な加工を施した完成部品である。

5 . 光源開発

5.1 レーザー・コンプトン後方散乱 線

BL-1 にて波長1mmのレーザーを1GeV 電子ビームに衝突させ最大エネルギー~ 17 MeVの 線を発生させ、標的の透過率から断面積を図8のように得ている。他施設の(, n) 反応データと良く一致し

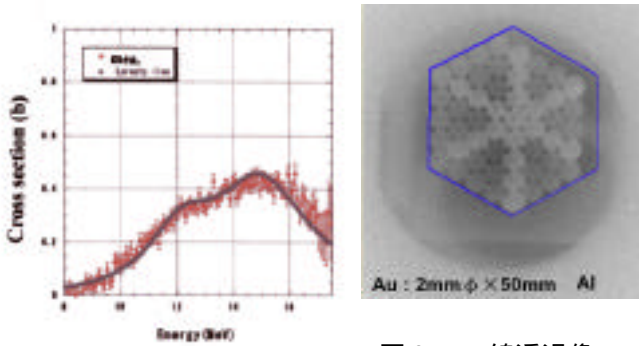


図8 : ^{181}Ta の γ -核
反応断面積

図9 : 線透過像

ている。また 線 Radiography の試みとして金とアルミニウムの棒の束を通過後の映像を観測したところ、図9のようにAl では 線 が収束した様な現象が見られる。

5.2 極短パルス電子ビーム

電子ビームは放射励起のため必ず有限のエネルギー広がりを持つ。エネルギーのずれた電子のリング周回時間は、中心の(同期した)電子のそれからエネルギーのずれに対応してずれている。またこれが電子ビームの時間的広がり：パルス長を決める。逆偏向電磁石(BI)での運動量分散を調整することにより、この周回時間のずれを任意に制御でき、パルス長を数ピコ秒まで短くできる。NewSUBARU蓄積リング^[3]はこれを正面に据えた世界初のリングであり、現在図10の様に、半値全幅で~ 1 mm を達成している。これは実測データとしてはリングにおける世界最短電子ビームである。

バンチ長を短くすると、電子の線密度或いはピーク電流が増大しビームが不安定になるため、蓄積電流は一般に微弱となる。しかしながらバンチ長と同程度の波長の放射光からみると、個々の電子は区別できず、バンチ全体が超電荷の1電子となる。即ちこの波長の放射光はコヒーレントで強度は電子数の

2乗に比例する。NewSUBARUの蓄積電流は最大500mA : 1.2×10^{12} electrons/sec であるが、超電荷電子ならば、 6.0×10^6 個 : $2.4 \mu\text{A}$ で同強度の放射光が得られる。

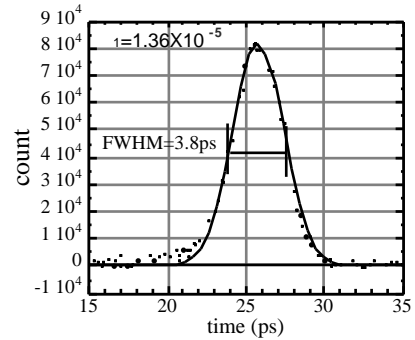


図10 : リングで世界最短のバンチ長

6 . Negative Alpha - p の世界

通常の電子リングではエネルギーが大きい方にずれた電子は偏向電磁石で曲げられ難く外側の軌道を回る。即ち周回時間はエネルギーのずれに比例して大きくなる。これを Positive Alpha - p という。 α_p (momentum compaction factor) > 0 . NewSUBARU蓄積リングでは、逆方向偏向電磁石の導入によりこの α_p を正負に自由に制御できる。 $\alpha_p < 0$ では $\alpha_p > 0$ より耐不安定性に優れているという解析^[4]があり、極短バンチ運転に優れている可能性がある。

6.1 Fast Head Tail Instability

クロマチシティの大きさを1或いはそれ以下に設定し、Fast Head Tail Instability (Transverse Mode Coupling Instability) を調べた。これはバンチの中で先頭から尻尾へと (NewSUBARU の場合) 垂直方向にいろいろなモードの振動が生じ、2つのモードの振動数が近づくと、振幅が増大しビーム損失に到る。 $m=0$ モードはバンチ全体が、 $m=1$ モードは先頭と尻尾が逆位相で、上下に振動する。

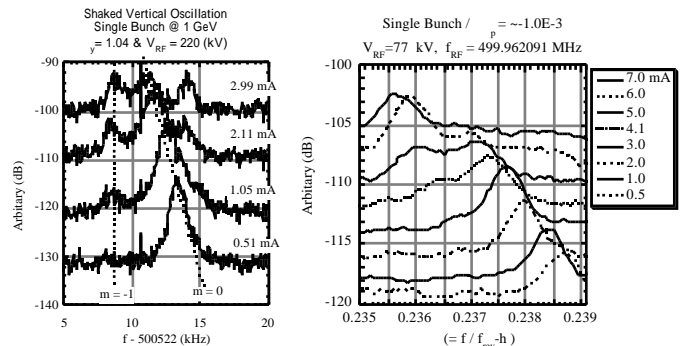


図11 : ベータトロン振動サイドバンドの
微細構造と蓄積電流

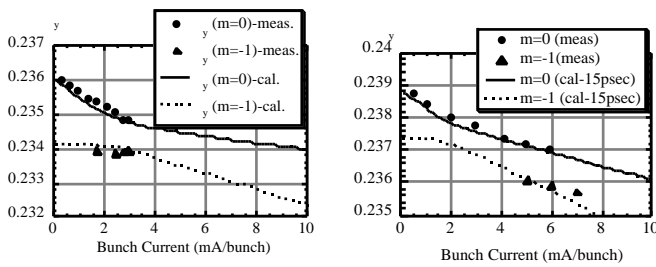


図 1 2 : Sacherer 理論による解析

図 1 1 はベータatron振動のサイドバンドを細かくみたものである。($m=1$ は固有振動の両側に現れるが、回転周波数に近い方の振動数を明示するために $m=-1$ と表記する。) 図 1 2 はその解析である。両図の比較から次のことが言える。

1) $p > 0$ では $\sim 3\text{mA/bunch}$ で両モードの振動数の差が ~ 0.001 となり、これ以上蓄積できない。固有振動は明瞭に存在する。Bunch Lengthening を考慮した理論とよく一致。

2) $p < 0$ ではバンチ長一定とした計算と良く合うが、両モードの振動数の差が ~ 0.001 でも安定で、 50mA/bunch 以上蓄積が可能である。

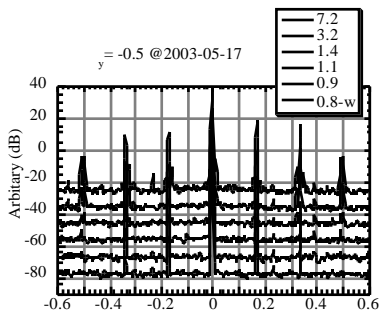


図 1 3 : 新振動の出現

ト振動があらわれる (図 1 3)。

通常のHead Tail に対しても振動は続くがビーム損失にはつながらない。

3) 計算で得られる増大率は測定から予想される値よりも $50 \sim 100$ 倍大きい。

6.2 Microwave Instability

バンチ内の電子は放射励起のためいろいろな振動をしているが、通常は放射減衰している。しかしバンチ電流が増大すると、真空チェンバーや加速空洞との相互作用で或る振動が増大することがある。特に縦方向振動 (エネルギー振動) では、この時エネルギー広がりやバンチ長が大きくなる。これらが大きくなると電子密度が下がり増大が鈍る。電子ビームはこの二つの機構が平衡するエネルギー広がりやバンチ長で安定化する。これを Microwave Instability と称す。図 1 4 は p 正負での本現象を比較している (シングル・バンチ)。

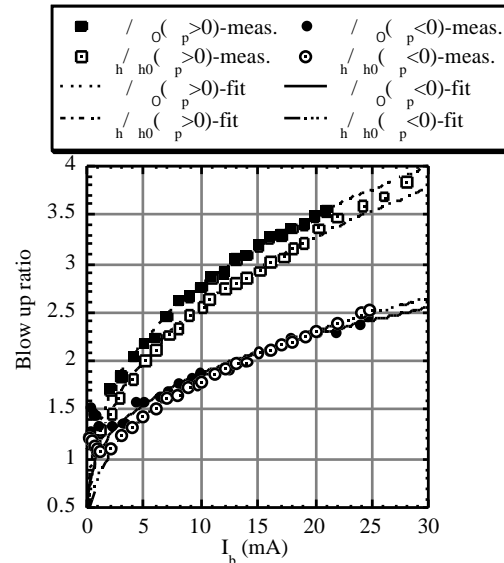


図 1 4 : バンチ長 & エネルギー幅とビーム強度

0 電流でのバンチ長 (h_0 :FWHM) とエネルギー広がり (σ_{rms}) はそれぞれ ~ 50 psec 及び $\sim 4.8E-4$ である。従来はESRFやSuperACOのデータから、 $p < 0$ では、 $p > 0$ に比べ、バンチ長増大は抑えられるが、エネルギー幅が極端に増大し、シンクロトロン振動の結果バンチ長も極端に増大する、と予想されていたが、NewSUBARUでは、増大はともに I_b (Bunch Current) の $1/3$ 乗の理論通りの結果を示した。($p < 0$ の方が増大が穏やかな理由は不明。)

理論解析では p 正負での唯一の差はバンチの時間的構造にあるが、これが実際の Beam Dynamics にどのように反映されるか、更に定量的に把握することは、ビーム物理学へ新たな知見を提供するであろう。

謝辞

NewSUBARU の安定な運転実現における SPring-8 の関係各位の多大な協力に深く感謝致します。

参考文献

- [1] A. Ando, et al., " Isochronous storage ring of the New SUBARU project ", J. Synchrotron Radiation, 5 (1998), pp. 342-344.
- [2] 安東愛之輔他, " ニュースパルの到達点 ", 放射光 第 1 5 巻第 6 号(2002), pp. 336 - 346.
- [3] Y. Shoji, et al., " Quasi-Isochronous Operation at NewSUBARU ", Proceedings of the 8-th Int. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation, AIP Conference Proceedings 705 (2004), pp. 57-60.
- [4] S. X. Fang, et al., " Microwave Instabilities in Electron Rings with Negative Momentum Compaction Factor ", KEK Preprint 94-190 (1998)