

## ニュースバルアップグレードの選択肢

### SOME REFORMATION PLANS OF NEWSUBARU STOREGAE RING

庄司善彦<sup>#</sup>

Yoshihiko Shoji<sup>#</sup>

University of Hyogo, NewSUBARU/SPring-8

#### Abstract

We have qualitative discussion about the up-grading plans of NewSUBARU. The minimum reformation plan would be removal of the inverse bending magnets. The lattice change would improve the natural emittance, momentum acceptance and also the injection at 1.0 GeV. The maximum reformation would be a use of newly designed MBA lattice. With this reformation, the ring would be one of the best in the world in this class. However, we need upgrade of the injector from 1.0 GeV to 1.5 GeV, or giving up operation at 1.5 GeV.

#### 1. はじめに

ニュースバルは SPring-8 施設内に設置されている兵庫県立大学の 1~1.5GeV 放射光用電子蓄積リングである。建設から 20 年以上が経過し、ハードウェアの老朽化だけでなく設計自体も旧式化している。更に入射器として使用中の SPring-8 linac のシャットダウンへの準備もあり、更新を考えるべき時期にある。すでに新しいラティス設計を初めており、簡単ではあるが 2017 年の学会で報告している[1]。ここでは別の観点からの検討の概略を報告する。この報告は加速器科学的詳細設計ではなく、それ以前の段階における検討記録という位置付けであり、かなり粗い内容である。

ニュースバルの建設及び運営母体は兵庫県立大学高度産業科学研究所であり、兵庫県の予算で運営されている。まとまったアップグレード予算は厳しく、将来の可能性を考える状況とは言えないが、複数のオプションを提示できる準備を進めておく必要がある。

ニュースバルの現状設計の問題点は戦略の不整合にあり、見直しに際してはそれを正す視点も必要になる。まず、当時としては異例であった 10 m のアンジュレーターを設置しながら、低エミッタンスに最適化されていない点が挙げられる。そのため、蓄積リングとしては当時主流であった第 3 世代ではなく、第 2 世代の位置づけである。さらにエミッタンスを犠牲にしてまで優先させた quasi-isochronous (low momentum compaction factor) operation も、その利用への配慮を欠いたために生かすことができず、R&D が進みにくい一因ともなってしまった。この 2 点はともに逆偏向電磁石を持つ変形 DBA ラティスに集約されて現れており、具体的にはこの電磁石の撤去が最低条件となる。

現状に対して考えられるアップグレード案は Fig. 1 のようなバリエーションになる。四角枠が案であり、左の現状から右に進むに従って変更が大きくなり予算も嵩む。複数の矢印は時間的な段階変化を示

すものではない。右に進むに従って自然エミッタンスが低下するので、ざっくりとした値を Table 1 に示しておく。現状での実際の top-energy である 1.46 GeV で  $100\pi$  nm であるのに対し、DBA では  $40\pi$  nm、TBA では  $15\pi$  nm、QBA では  $5\pi$  nm と、小さくすることが可能だろう。

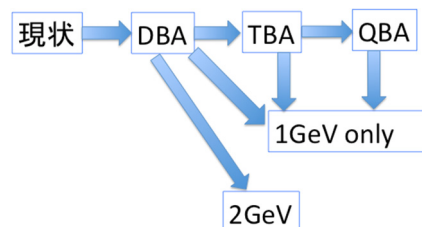


Figure1: Upgraded lattice plans for NewSUBARU.

Table 1: Comparison of the Possible Bending Lattices

Bending Lattice	Present	DB	TB	QB
Natural emittance at 1.5 GeV (nm)	$100\pi$	$\sim 40\pi$	$\sim 10\pi$	$\sim 5\pi$
Diffraction limit wavelength (nm)	4000	1600	400	200

ニュースバルの長尺アンジュレーターからの光は 1.0 GeV での最高値は  $\lambda/\Delta\lambda=81$  ( $\lambda=12.8$ nm) で、理想値である周期数  $N=200$  にはまだ遠い。ただし、電子エネルギーを 0.5GeV に減速してエミッタンスを下げた調整 (推定  $10\pi$ nm 程度) では 3 次光に対して  $\lambda/\Delta\lambda=281$  ( $\lambda=17.0$ nm) を得ている。Table 2 に現状の NewSUBARU および SPring-8 標準アンジュレーターのパラメーターを示す。将来設置可能性のあるアンジュレーターはもとより、現状の真空外アンジュレーターでもエミッタンス改善の効果は顕著に現れるはずである。

<sup>#</sup>shoji@lasti.u-hyogo.ac.jp

Table 2: Undulator Parameters

Undulator	LU	SU	SPRING-8
Period (mm)	54	76	32
Number of periods	200	30	140
Maximum K	~2.5	~5.3	~2.5

## 2. DBA への変更

### 2.1 蓄積リングの性能

現在のニュースバルのラティスは逆偏向電磁石を持つ特殊なものである。6つの bending cell があり、それぞれ NB(34°)+IB(-8°)+NB(34°)という3台の偏向電磁石で構成され、achromatic 条件下で運転している。この構造では achromatic condition を崩しても逆偏向電磁石があるために自然エミッタンスはほとんど下げることができない。蓄積リングの低エミッタンス化を考えるならば逆偏向電磁石の撤去が絶対条件になる。

Fig. 2 に示すように bending section 中央の逆偏向電磁石を撤去し、両側の偏向電磁石を直線部で接続するだけで、自然エミッタンスを半分以下にできる。偏向角は NB(30°)+NB(30°)となる。

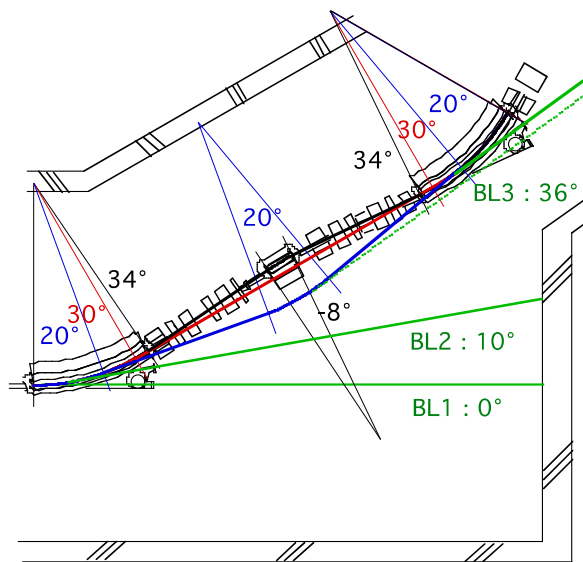


Figure 2: Layout of the bending section. Solid black, solid red, and solid blue lines are electron beam orbits for the present lattice, the double bend lattice, and the triple bend lattice, respectively.

この案の性能上のメリットは、1GeV の自然エミッタンスが  $50\pi\text{nm}$  から  $20\pi\text{nm}$  になる点と、momentum acceptance が現状の約 1%から約 3%に拡大する点にある。これは 1GeV における Toucek lifetime の大幅な改善を意味する。将来 NewSUBARU に真空封止型アンジュレーターを設置することにな

れば、垂直ビームサイズを縮小する必要性が出てくる。つまり、DBA への改造は narrow gap undulator への対応でもある。

同時に dynamic aperture の拡大も期待できる。これによって、蓄積ビームを大きく揺らす現状の入射からパルス 6 極入射への道も開かれることになる。

### 2.2 構成要素の変更

このプランの持つ更に大きなメリットは、電磁石系の主要な更新が偏向電磁石と逆偏向電磁石だけで済む点である。新たな電磁石電源も必要ない。何より重要な点は全てのビームラインの軸はそのまま、取合いも変更の必要がないことである。この点が満足されない案は利用者の理解を得難い。

偏向電磁石と逆偏向電磁石、さらにそれらの真空チェンバーは制作し直す必要があるが、真空系は流用するように設計できる。長さ 0.47m の逆偏向電磁石は不要となる代わりに、長さ 0.36m の収束電磁石を設置する。電源は逆偏向電磁石と同様に偏向電磁石と共通だが、トリム電源は不可欠である点も現状から変わらない。

一方で RF 加速系には深刻な問題が起きる。まず機械的に決まってしまう周長変化である。Beam line の軸を固定する DBA は自由度が無く、周長が約 77mm 縮む。これに伴い RF 周波数を 499.955MHz から 500.28MHz へと変更する必要がある。この場合は固定チューナーを作り変える必要があり、HOM の調整もやり直すことになるだろう。

より大きな問題は momentum compaction factor:  $\alpha_p$  の拡大である。現状は  $\alpha_p=0.0014$  で momentum acceptance は 0.9%で運転している。ところが DBA では  $\alpha_p=0.007$  となるので、over voltage を上げなければならぬ。偏向角減少による radiation loss の減少 ( $158\text{keV/turn} \rightarrow 124\text{keV/turn}$ )を考慮しても、同じ momentum acceptance 0.9%を保つのに必要な RF 電圧は 430kV に、300mA 蓄積するために必要な klystron power は 170kW となる。クライストロンは仕様 (180kW) ぎりぎりだが、RF cavity 1 台で 440kV は厳しい。更に磁石系で決まる momentum acceptance は 0.9%より広がると予想されるのに、これを活かすことはできない。RF bucket を拡大するにはさらに高い over voltage が求められるはずだからである。

### 2.3 その他のアップグレードオプション

1.5GeV 運転の厳しさについて書いたが、これは運転不可能という意味ではなく Toucek 寿命が短いというだけである。現状でも 1.5GeV における寿命を決めているのは Toucek 寿命ではなく真空寿命である。1.5GeV でのみ低エミッタンスを犠牲にするならば momentum compaction factor を小さくする lattice も可能である。つまり現状レベルの利用は可能であり、1.5GeV よりやや下のエネルギーの利用であれば現状より高性能になる。

1.0 GeV の自然エミッタンスは偏向電磁石を複合磁場型で設計することで更に下げることができ、同時に momentum compaction factor も下がると期待できる。しかし曲率半径を保つ条件であれば、最大エネ

ルギーを 1.5GeV より下げる必要が出てくるだろう。なぜなら偏向電磁石磁場は 1.5GeV の偏向電磁石磁場は 1.5 T に達しており、非線形透磁率の領域にあるからである。1.5GeV のままで局所的にさらに強磁場になる複合型への変更は厳しい。

### 3. TBA への変更

逆偏向電磁石を単に撤去するのではなく、通常偏向電磁石に変更し、Triple bend achromat を組むことで、自然エミッタンスをさらに下げることができる。ただし、triple bend でも double bend と同様で momentum compaction factor が大きくなる問題点がある。電磁石ハードの製作や operation が容易であるのは同じ長さの bending magnet 3 台を使う NB(20°)+NB(20°)+NB(20°)であるが  $\alpha_p=0.009$  程度になる。しかし中央の bend を長く NB(15°)+ NB(30°)+NB(15°)とするならば separated function TBA でも  $\alpha_p=0.002$  に抑えることができる。

中央 bend の長い TBA で RF 電圧を目一杯の 320kV とすると momentum acceptance は 1.3%、300mA 蓄積時の klystron power は 100kW である。Momentum acceptance は十分とは言えないが、RF cavity を増設せずに 1.5GeV で低エミッタンスの効果を享受できることになる。

この場合のハードウェアの変更は bending section 全体の変更になる。周長は 1.156 m 伸びるが、harmonic number を 198 から 200 に変更し、さらに RF 周波数を 500.142MHz とすることで対応できる。

最も重要なビームラインの軸変更はライン毎に異なる (Fig. 2)。既存のビームラインの種類は長直線部(LSS)、短直線部(SSS)、上流偏向電磁石 10 度(Up-B)、下流偏向電磁石 10 度(Dwn-B)の 4 種類である。偏向電磁石ビームラインで bending section 側は、平行移動または取り合い点の後方 (下流側) への移動が必要になる。

### 4. MBA への変更

Bending section を quadrupole bend とするならばかなりタイトなレイアウトを覚悟しなければならないが、不可能ではない。ここで参考になるのは MAX-IV の 1.5GeV リングである [2-4]。Table 3 に NewSUBARU の現状との比較を示す。Figure 3 はニューバルのレイアウトに MAX-IV のサイズを重ねたもので、アーク部分のサイズはほぼ同じであることが解る。MAX-IV は 12 の DBA だが、これを 6 つの QBA に配置し直すイメージで考えれば良い。つまりこれは、MAX-IV の magnet package をそのまま採用することでも実現できる案である。

当然ながら長直線部以外のビームラインの配置は全て変更になる。Triple Bend では現在の真空システムの流用も可能であったが、Quadrupole bend では困難となる。長直線部を除いてニューバルでも MAX-IV のような、combined functional magnet + NEG coated chamber のパッケージを採用することになるだろう。

この案のより大きな問題点は、1.5GeV であれば入

射器の増強 (1GeV から 1.5GeV) も行わない限り、top-up 運転が困難な点にある。むしろリングの top-energy を下げ、1.0GeV top-up に限定する方が現実的だろう。

Table 3: Comparison of the Present NewSUBARU and MAX-IV at 1.5GeV Operation

Ring	MAX-IV	NewSUBARU
Electron energy	1.5 GeV	1.5 GeV
Injector	1.5 GeV linac	1.0 GeV linac
Circumference	96 m	118.7 m
Number of bending cells	12	6
Type of bending cells	DBA	DBA w.IB
Straight sections for ID (BPM-BPM length)	10 (3.5m)	2 (13m) 2 (3.1m)
Horizontal tune	11.22	6.3
Natural emittance	6 $\pi$ nm	100 $\pi$ nm
Maximum stored current	500mA	350mA
Mom. comp. factor ( $\alpha_p$ )	0.003	0.0013
Radiation Loss	130 (keV/t)	139 (keV/t)
Momentum acceptance	$\pm 4\%$	-0.8~+1.5%
RF frequency (MHz)	100 MHz	499.955 MHz
Total RF voltage (kV)	560 kV	240 kV
Number RF of cavities	2	1
RF Power source	60kW X2 SS Amp	180kW X 1 Klystron

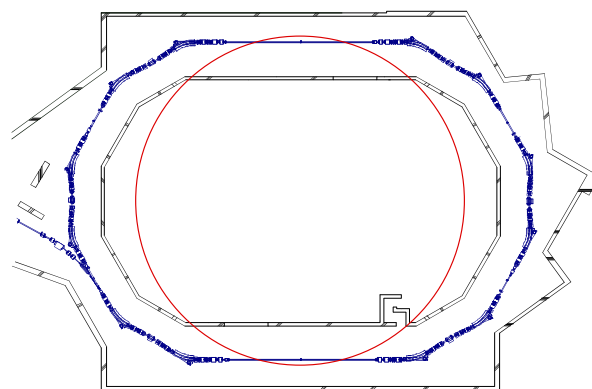


Figure 3: Ring size of NewSUBARU (blue) and MAX-IV (red circle).

### 5. 蓄積エネルギー変更

偏向電磁石を更新するのであれば、現状の蓄積電子最大エネルギー 1.5GeV の変更も視野に入る。ここでは最大エネルギーを上げて 2GeV へ、または下げ



て 1.0GeV へ変更した場合の課題を挙げる。

### 5.1 2GeV への増強

現時点で、より高エネルギーの X 線を求める声がユーザーからある。電子エネルギー 2GeV まで上げる目的は、分析を行う上で重元素のより内殻の電子励起を使えるようにすることである。ただし SPring8-II が現 SPring-8 より電子エネルギーを下げるのに対して、ニュースバルが電子エネルギーを上げるのは挿入光源ではなく偏向電磁石からの放射光重視を意味する。利用分野が分析であれば、偏向電磁石の連続光を分光して使うことになり、挿入光源に対する不利は避けられない。これは、利用戦略の問題である。

一方で加速器技術では、直線部の数 6 を保つならば、bending cell は Double Bend の 1 択になる。直線部をそのままに、bending cell を偏向した場合の layout を Fig. 4 に示す。収束電磁石の増強が必要になるとしても、不可能な配置ではない。

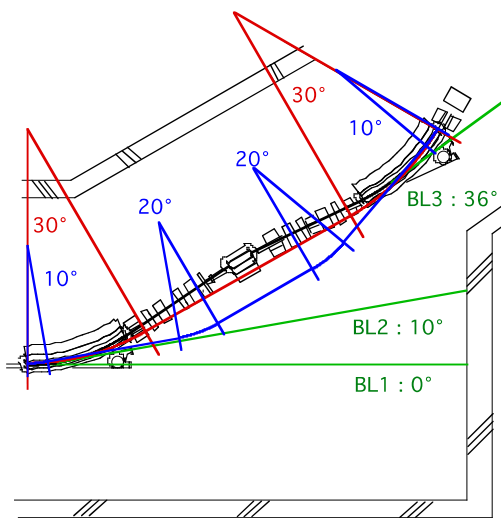


Figure 4: Layout image of 2.0 GeV DBA and 1.0 GeV QBA.

電磁石と真空以外では RF 増強が不可欠になる。現在と同じ直線部への設置が不可能とまでは言えないが、かなりの工夫が必要になる。ややコストが高むが別の直線部への設置であれば十分設置可能である。RF 増設となれば、受電設備などのユーティリティー増強も、当然ながら考える必要が出てくる。

### 5.2 1GeV への特化

上記とは逆方向に考え、入射後のエネルギー変更を諦めて 1.0 GeV top-up へ特化するプランも検討の余地がある。そのメリットは、外部（大学本部や兵庫県）に対するアピール力である。まず、1GeV クラスで世界最強クラスの旗印が可能となる。もう一点、永久磁石の採用による運転コストの大幅な軽減である。省エネルギーの旗印は、一般に受け入れられ易いからである。

デメリットは言うまでもなく、利用エネルギー領

域が長波長ヘシフトする点にある。とりわけ、LIGA プロセスは困難となる。また、現在でも電子エネルギー 1.5GeV の運転時間が 3/8 あり、これらの利用は困難になる。

加速器のレイアウトはエネルギーを 1.0GeV とするならばかなり楽になり、設計の自由度が増す。

偏向電磁石からの放射光利用は EUV から軟 X 線までの範囲であるが、蓄積エネルギーを 1.5GeV から下げて問題となるのは軟 X 線である。偏向電磁石からの放射光の critical photon energy は次式で与えられる。

$$E_c(\text{keV}) = 0.665 E_e^2(\text{GeV}) B(\text{T}) \quad (1)$$

現時点における実際の蓄積モードエネルギー 1.46GeV での磁場は  $B=1.51 \text{ T}$  この磁場強度でエネルギーを変えた場合の critical photon energy を Table 4 に示す。

Table 4: Critical Photon Energy for Various Settings

Electron energy (GeV)	1.0 GeV	1.46 GeV	2 GeV
Bending magnet field	1.51 T	1.51 T	1.51 T
Curvature of bends	4.41 m	3.22 m	2.21 m
Total length of bends	26.9 m	25.6 m	13.8 m
Critical photon energy	4.02 keV	2.14 keV	1.00 keV

## 6. 最後に

電子蓄積リングニュースバルの各種アップグレードプランを概観した。しかしながらさらに重要な利用計画の検討は進んでいない。新しい蓄積リングとなれば、最も早期の予想であっても、利用開始が 5 年程度先で利用停止は 20 年後となる。利用予測は容易ではないが、しっかりした戦略が求められている。

## 参考文献

- [1] 橋本智, 宮本修治, 「ニュースバル電子蓄積リングの upgrade に向けた検討」, 第 14 回日本加速器学会年会 (8/1-3, 2017) WEP015.
- [2] MAX IV Detailed Design Report (2010); <https://www.maxiv.lu.se/accelerators-beamlines/accelerators/accelerator-documentation/max-iv-ddr/>
- [3] A. Salom, F. Pérez, CELLS, Åke Andersson, Robert Lindvall, Lars G Malmgren, Antonio Milan, Aleksandar Mitrovic, "DIGITAL LLRF FOR MAX-IV", Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark THPAB135.
- [4] Å. Andersson, E. Elafiffi, M. Eriksson, D. Kumbaro, P. Lilja, L. Malmgren, R. Nilsson, H. Svensson, P. F. Tavares, MAX-lab, Lund, Sweden, J. Hottenbacher, Research Instruments GmbH, Germany, A. Salom, "THE 100 MHZ RF SYSTEM FOR THE MAX IV STORAGE RINGS", Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain MOPC051.