

[F18p06]

## Present Status of Storage Ring NIJI-IV Dedicated to Free Electron Laser at ETL

N. Sei, K. Yamada, H. Ohgaki, T. Mikado, S. Sugiyama, T. Yamazaki\*,  
R. Suzuki, T. Ohdaira, H. Toyokawa, M. Chiwaki, M. Kawai\*\*, M. Yokoyama\*\*

Quantum Radiation Division, Electrotechnical Laboratory  
1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, JAPAN

\*Institute of Advanced Energy Kyoto University

Gokasho, Uji-shi Kyoto 611, JAPAN

\*\* Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

118 Futatsuzuka, Noda, Chiba 278, JAPAN

### ABSTRACT

Quadrupole magnet and sextupole magnets (SQS magnet) have been installed in all of short straight sections in storage ring NIJI-IV in order to suppress a head-tail instability. The peak electron density in a bunch becomes higher than that before improvement. The wavelength of an FEL has been shortened from 349 to 228 nm, which is the shortest wavelength level of FELs in the world.

### 自由電子レーザー専用リング NIJI-IV の現状

— 6 極-4 極-6 極磁石による電子ビームの改善・FEL 短波長化 —

#### 1 はじめに

電子技術総合研究所では、世界初の自由電子レーザー専用電子蓄積リング NIJI-IV を用いて、自由電子レーザーの短波長化・高品質化の研究を進めている。NIJI-IV は川崎重工の協力の下で、1990 年に建設された [1]。NIJI-IV はトリプルバンドアクロマティック・ラティスのレーストラック型であり、29.6m の周長の中に 2 つの長直線部を持ち、その一つに 6.3m の光クライストロンが 1992 年 4 月から設置されている [2]。

1992 年 8 月には波長 590nm 付近で自由電子レーザー(FEL)の初発振を遂げ、同年 9 月には蓄積エネルギーを 265MeV に上げることで波長 488nm でも発振に成功した [2]。しかしながらこれらの FEL 実験では設計よりもかなり低いチューン( $v_x=1.595$ 、 $v_y=1.300$ )で行われていたため、バンチ長をはじめとする電子ビーム特性が悪く、さらにリニアックから供給される電子の入射効率が極端に低かった。そこで 1993 年にはセプタムチャンバーの改造と蓄積モードの改良を行い、より高いチューン( $v_x=2.230$ 、 $v_y=1.344$ )で FEL 実験が行えるようになり、シングルバンチで 10mA 程度の蓄積も可能になった [3]。こう

して 1994 年 4 月には、紫外域である波長 350nm 付近の FEL 発振を実現したのである [4]。

だが NIJI-IV では様々なビーム不安定性が観測されており、安定な FEL 発振を妨げていることが判明した。その中でも特に 10mA/bunch 程度から発現するヘッドテイル不安定性は、バンチ内のピーク電子密度を制限し、これ以上の短波長化を困難にしている主因であった [5]。ヘッドテイル不安定性を抑制するためには、分散関数の大きな所へ 6 極成分を補正できる磁石を挿入することが必要である。NIJI-IV の場合短直線部がそれに当たるが、既に 4 極磁石が挿入されており新たに 6 極磁石を入れられる空間がなかったため、真空チャンバーごと改造して 6 極-4 極-6 極磁石(SQS 磁石)を制作した [5]。1996 年にまず一組の SQS 磁石を短直線部に挿入して性能試験を行い、1997 年に全ての短直線部に SQS 磁石を導入した。

その結果、水平・垂直両方向のクロマティシティを完全に補正することが可能になり、ヘッドテイル不安定性によるピーク電子密度の制限が消滅して 30mA/bunch の電子ビームが得られるようになった。そして 1998 年 3 月には 300nm 付近の波長で [6]、5 月には 240nm 以下の波長で FEL 発振に成功し、世界最短波長レベルに達した [7]。本研究会では、ピーク電子密度の飛躍的向上に貢献した SQS 磁石の概

要と、それによる電子ビームの改善及び FEL 短波長化について説明する。

## 2 SQS 磁石

紫外域で初発振を遂げた当時の NIJI-IV には、効果的にクロマティシティを補正できる 6 極磁石がなかった。長直線部に 2 台の 6 極磁石が挿入されていたのだが、蓄積運転モードでは長直線部での分散関数がゼロになるように設定してあったのである。このためシングルバンチ運転時には 10mA 以上の電流値になると一瞬にしてバンチが無くなってしまうヘッドテイル不安定性という現象が生じていた。この不安定性はバンチの電子密度が増加すると成長する性質があるため、最大 FEL 利得を制限していた。図 1 が示すとおり、分散関数が大きくなるのは QF2 の挿入された短直線部である。クロマティシティを効果的に補正するには短直線部に 6 極磁石を設置する必要がある。しかし短直線部は僅か 47cm しかなく、しかもその大部分を従来の 4 極磁石が占めていた。短直線部に 2 台の 6 極磁石を挿入するためには、この 4 極磁石ごと作り直す必要があった。2 台の 6 極磁石と 1 台の 4 極磁石を挿入して以前と同程度の磁場勾配を得るために、ポール径を半分以下の 45mm にした。ポール長は 4 極・6 極それぞれで 14cm・5cm である。SQS 磁石の概略を図 2 に示す。

TRACY2[8]を用いてトラッキングを行い、入射後数十周の軌跡とダイナミカル・アパーチャーを計算した [5]。その結果、短直線部のポール径を 45mm にしても、入射・蓄積には影響を与えないことが判った。1997 年 12 月に全ての短直線部に SQS 磁石を設置するよう蓄積リングを改造し、1998 年より蓄積リングへの電子入射を再開した。

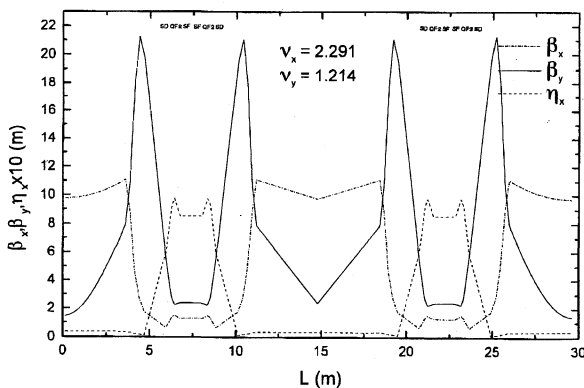


図 1 NIJI-IV の Machine Function

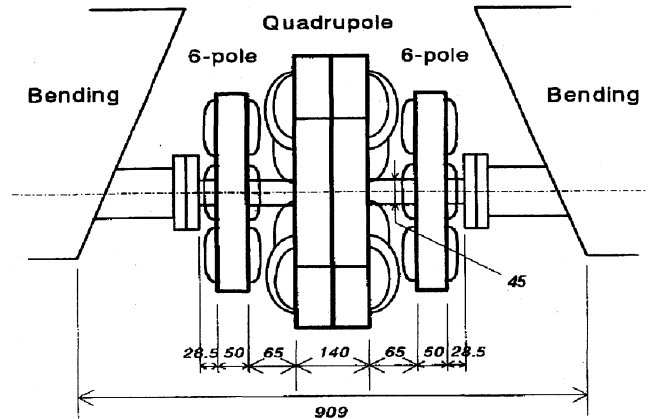


図 2 SQS 磁石

## 3 蓄積リング改造後の電子ビーム特性

電子ビームのシンクロトン放射による真空チェンバーの焼き出し効果が進むにつれ最大蓄積電流は 250mA まで伸び、ほぼ改造前のレベルに到達した。ただし、より多くの電流を蓄積できるように蓄積チューンを若干変更した ( $v_x=2.291$ ,  $v_y=1.214$ )。SQS 磁石は SF、SD とともに 5A ずつ電流を流したときに、水平・垂直の両方のクロマティシティ ( $\xi_x$ ,  $\xi_y$ ) をゼロにできるように設計されている。クロマティシティは RF 周波数を微量変化させた時のチューンシフトを測定することで算出される。実験によると、SF=5.094A、SD=4.988A の時に  $\xi_x=\xi_y=0$  となることが明らかになり (図 3)、計算と非常に一致をしている。ヘッドテイル不安定性を抑制するには  $\xi_x$ ,  $\xi_y$  共に小さな正值にするのが良いので、実際の運転では SF=5.29A、SD=5.18A としている ( $\xi_x=0.077$ ,  $\xi_y=0.154$ )。

シングルバンチを得るには、フルバンチ (16 バンチ) で入射した後に RF-KO 法が用いられている [9]。クロマティシティ補正を行っている蓄積モードでは、シングルバンチで 30mA 以上の電流値を得ることが可能になり、ヘッドテイル不安定性がほぼ完全に抑制されていることを示唆している。現在シングルバンチ電流を制限しているのは、フルバンチで蓄積しているときに生じているカップルドバンチ不安定性や、ビーム領域の異常な増大が主因だと推測されている。

バンチ長の測定は 2ps の分解能を持つストリークカメラを用いて行われた。フルバンチ運転では強烈なカップルドバンチ不安定性が発現するが、シングルバンチ運転ではこの不安定性が生じないためにバンチ長も短くなる。SQS 磁石の挿入と共に RF 電極の修理も行い、電極間により高電圧をかけられるようになったため、バンチ長は改造前よりも 30%~

40%ほど短くなった。しかしエネルギー広がりには2mA程度以上から増加の傾向があることや、バンチ長のバンチ電流依存性も1/3乗より急激な傾きであることから、マイクロウェーブ不安定性が生じていると考えられる。ビームサイズは光クライストロン分散部のシンクロトロン放射をCCDカメラで観測することで測定した。その結果、改造前に観測されていたような、電流増加に伴うビーム領域の増大は観測されなかった。電子の運動方向に対して垂直面内での不安定性は解消されていることが判った。

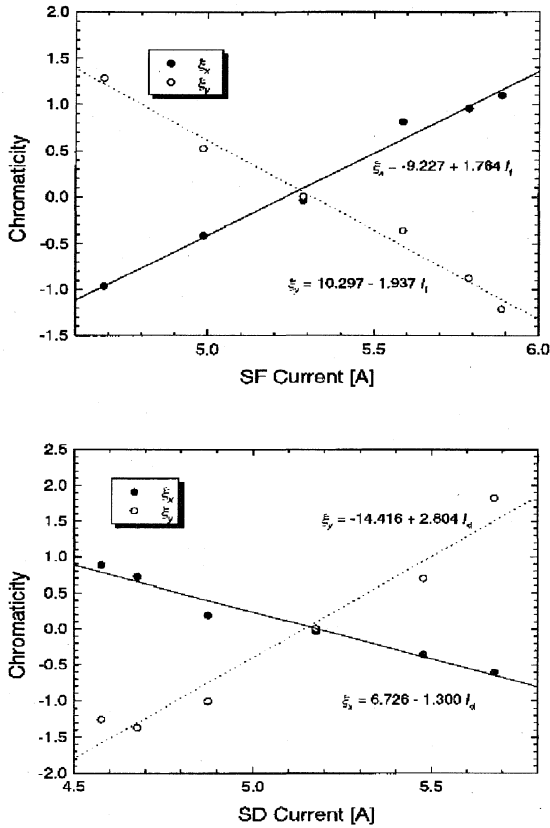


図3 SQS磁石によるクロマチシティ補正

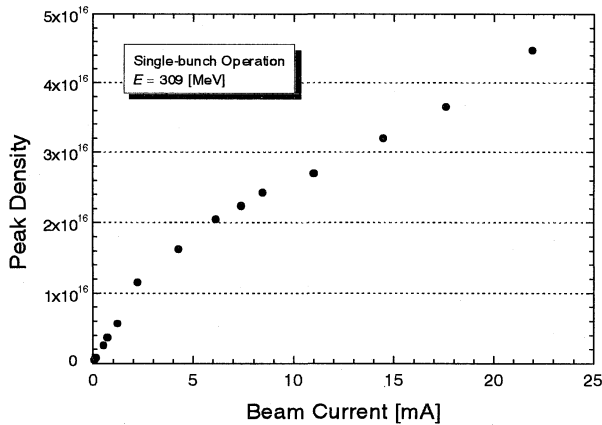


図4 ピーク電子密度の電流依存性

これらの測定から得られたバンチのピーク電子密度の電流依存性を図4に示す。310MeVの電子エネルギーで改造前の3倍以上にあたる  $4 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  以上のピーク電子密度が得られるようになった[7]。

#### 4 FELの短波長化

SQS磁石を用いたクロマチシティ補正によりピーク電子密度が増大したことで、FEL発振波長の短波長化が可能になった。1998年3月には波長300nmで、5月には240nm付近でのFEL発振に成功した[7]。殊に240nm付近に最大反射率を持つ誘電体多層膜ミラーを用いた実験では、最短波長228nmでの発振を記録し、FELとしての世界最短波長レベルに並んだ。これらの実験では波長350nmでのFEL実験とほぼ同じ電子エネルギー( $\sim 309\text{MeV}$ )で、光クライストロンの磁場を変化させることで発振波長を調整した。波長300nm、240nmの時のK値はそれぞれ2.02、1.70である。波長230nm以下でのFEL発振スペクトルの一例を図5に示す。

図4やエネルギー広がり電流依存性から計算される波長240nm付近での最大FEL利得は約2.5%であり、共振器ミラーの初期の共振器損失0.5%よりもはるかに大きい。そのため共振器長を $\pm 30\mu\text{m}$ 動かしても発振が持続した。発振を確認した平均電流は30mA $\sim$ 5.5mAであるが、電流の減少に伴いシングルバンチの純度(RF-KO法で完全にはシングル化を行っていない)が下がるので、実際の閾電流はさらに低いと考えられる。

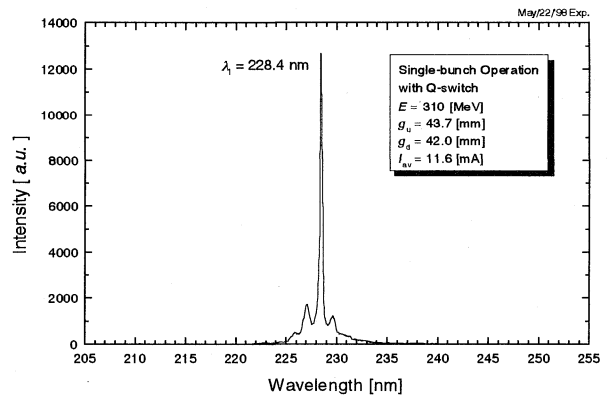


図5 波長230nm以下のFEL発振スペクトル

#### 5 まとめ

蓄積リングNIJI-IVの短直線部にSQS磁石を挿入する改造を行い、クロマチシティを補正することでヘッドテイル不安定性を抑制できるようになった。

これにより電子バンチのピーク電子密度が改造前の3倍以上も増大し、FELの発振波長を349nmから一気に228nmまで短くすることに成功した。今後は真空紫外域でのFEL発振の実現に近づけるため、電子ビームの更なる安定化、高品位化に取り組む予定である。次回の蓄積リング改造では、10kW入力が可能なRF加速空洞の交換を予定している。また、リニアックからの電子ビームを1ns幅にして蓄積リングに入射するシングルバンチ入射も、バンチ領域増大による電流の制限を受けないので、電流密度増加に有用であろう [10]。

## REFERENCES

- [1] M. Kawai et al., Nucl. Instr. and Meth. A318 (1992) 135
- [2] T. Yamazaki et al., Nucl. Instr. and Meth. A331 (1993) 27; N. Sei et al., Proceeding of the 9<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology (1993) 452
- [3] T. Yamazaki et al., Nucl. Instr. and Meth. A341 (1994) ABS 3.
- [4] T. Yamazaki et al., Nucl. Instr. and Meth. A358 (1995) 353.
- [5] N. Sei et al., Nucl. Instr. and Meth. A393 (1997) 38.
- [6] N. Sei et al., "Compact Storage Ring Free Electron Laser with the NIJI-IV" Proceeding of the First Asian Particle Accelerator Conference, (1998).
- [7] K. Yamada et al., to be published in Nucl. Instr. and Meth. A (1999); N. Sei et al., to be published in Nucl. Instr. and Meth. A (1999).
- [8] Rewritten from TRACY by J. Bengson. For original reference, see H. Nishimura, LBL Report 25236, ESG-4, 1988.
- [9] S. Sugiyama et al., Proceeding of the 6<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology (1987) 265.
- [10] M. Yokoyama et al., Nucl. Instr. and Meth. A341 (1994) 367.