

## Improvement of JAERI high power FEL

N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, T. Shizuma and E.J. Minehara

Japan Atomic Energy Research Institute

2-4 Shirane, Shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195, Japan

## ABSTRACT

The JAERI FEL achieved 1.7 kW lasing at macropulse average. This report describes experimental details how to have reached kW-level lasing at the JAERI FEL.

## 原研高出力 FEL の改良

## 1. はじめに

原研 FEL は 2000 年 2 月に quasi-CW での kW 発振に成功した。ここでは、1998 年 2 月の最初の発振 [1] 以降の改良の流れを簡単に概観し、最近の急速なパワー増に至る前段階を紹介する。最初の発振以降、電子銃の性能向上、ビームトランスポートの最適化等を経てマクロパルス内の平均出力 180W が 1999 年 7 月に得られた [2]。ところが、その際の加速後のパンチ幅を測定したところ 40~50ps 程度にしかならなかった。電子銃の改良により、パルス当たりの電荷量を保存したまま、パルス幅 (FWHM) を 4ns から 1ns に短くすることに成功したにも関わらず、加速後のパンチ幅は期待程短くならなかった。電子銃の短パルス化の効果はなく、加速後のパンチ幅の主決定要因は別のように思われた。ただ、1 ns まで短くすることでビームが加速途中で失われることはなくなり、加速器室内の放射線量が格段に減る効果はあった。また別の不本意な点として、SHB や加速器の位相調整に対して FEL パワーの変化が非常に鈍感であることがあった。極端に言えばどんな位相状態にしてもそこそこ発振するが、特に最適な位相の組合せが存在しなかった。もし最適な位相に組むことが出来れば FEL パワーが増えるように思われた。また最適な位相がないことと、パンチ幅が短くならないことは関連があるように思われた。

従来、SHB と前段加速器間のドリフト距離は 7.4m であった。ドリフト距離 4.5m と 9m でのストリークカメラによるパルス幅測定の結果、50ps と 200ps が得られた。これを理解するため、TRACE3D コードで計算を行なった。電子銃からのパルス幅を 0.8~4ns に設定し、ドリフト距離に応じて SHB の電圧を振り、前段加速器点での各最小パルス幅を求めた。その結果、電子銃からの初期ビーム幅に応じて圧縮に最適なドリフト距離が存在し、4.5m と 9m の実験結果も良く再現することがわかった。そこで、1999 年 8 月にドリフト距離を 7.4m から 4.5m に変更した結果、パンチ幅は 33ps 程度まで短くなった。しかしながらその時点ですぐに FEL 出力は増えず [2]、むしろ発振が不安定にさえなった。その大きな理由は以下の通りであるが、解決後ドリフト距離変更の効果が十分に発揮され、FEL 出力が急速に増えていくことになる。

1) ドリフト空間のソレノイド磁石の磁場は GPIB コントローラーを使って設定している。ところが、そのうちの 하나가壊れていて 0-10V で周期的 (50Hz) に波打っていた。いつの時点からかは不明。GPIB コントローラーを交換した。

2) ドリフト距離の変更に伴う電子銃加速管の移動の際に、加速管にリークが生じて SF<sub>6</sub> が洩れだした。知らずにコンディショニングを行なったため加速管内壁が汚れ、その後洩れ箇所を特定して塞いでも高圧が安定にかからなくなった。加速管内部をサンドブラストするなどして対処した [3]。

3) FEL の out-coupling が、必ずしも最適化されていなかった。hole から scraper に変更して out-coupling を可変にした [4]。

このレポートでは上記改造以降の高出力 FEL の増加要因、detuning 曲線、電子ビームから FEL への変換効率 ( $\eta$ ) 測定、またビームの幅が想像以上に短くアンジュレーター中で半値幅 5ps が得られていたこと等について述べる。

## 2. FEL パワー増、detuning 曲線

ソレノイド磁場変動の除去、電子銃の安定化後すぐに平均出力 180W を更新し 230W を記録した。その後 1700W (KRS5 窓が FEL 光に対して垂直に置かれている。プリユースター角にセットすれば 2.3kW 相当) を記録するまでの流れを簡単に Fig. 1 にまとめた。実線は平均出力を示し、点線は変更によるパワー増の割合を示す。ホールカップリング 6 $\phi$  から 4 $\phi$  に変更して 260W、カップリングをホールから横はねに変更し (上下流の共振器ミラーは 99.4% 反射)、SHB、加速器の位相調整を最適化することにより 480W を記録した。ここで、SHB のビームロードを一定に保つことで位相を固定する方法を確立した。その結果、後段の加速器の位相も容易に再現され FEL パワーの再現性が増し、毎日のビーム立ち上げが容易になった。また、パワー増に伴い、光共振器の detuning length  $\delta L \sim +0 \mu\text{m}$  から短くして行ったときのパワーの立ち上がりが早くなった。さらに  $\delta L \sim -1 \mu\text{m}$  から  $0 \mu\text{m}$  にかけてのパワーの立ち上がりがツノ状になることが始めて観測された。その後、電子銃のグリッドパルサーの故障

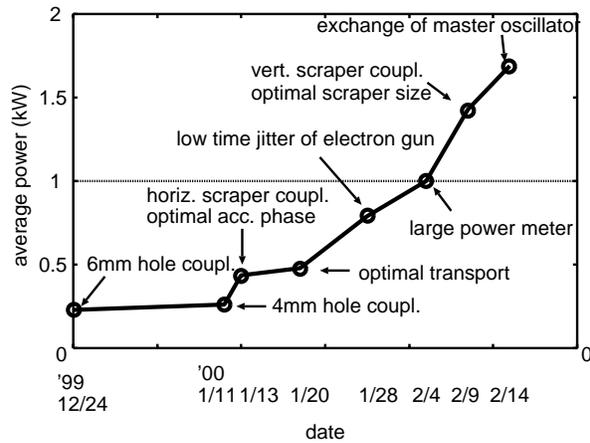


Fig. 1: '99 12 月 までに電子銃加速管のサンドブラスト、ソレノイド磁場変動の除去が行なわれ、安定な発振が'99 7 月 以来久しぶりに得られた。その後実線に示すように、改良を繰り返しながら短期間のうちにパワー増が得られ、今のところの最高平均出力は 1.7 kW となっている。

の際にジッターを低減する方法を見付け [3]、790W を記録。 $\delta L$  の+方向からの立ち上がりも一段と早くなり、ツノもさらに尖ってきた。その後、パワーメーターを口径の大きいものに変更し 1000W、さらに横はねカップリングから縦はねに変更し [4]、カップリングミラー径を  $10\phi$  から  $20\phi$  に変更することにより 1400W [4]、そして加速器のマスターオシレーターが故障し、周波数が周期的に並打っていたので交換すると 1700W を記録した。

以上の流れを簡単にまとめると、パワー増の過程には大きく分けて 2 種類の工夫が必要であった。1) 電子ビームのタイミングジッターや加速器の変動等をできるだけ除去して、電子ビームから FEL への変換効率 ( $\eta$ ) そのものを高めること。2) 光共振器からのカップリングを最適化して効率よく FEL を取り出すことである [4]。後で述べるように  $\eta$  は最大 5% にもなり、電子ビームエネルギーが 100kW 程度なので、KRS5 窓手前までに約半分の FEL を取り出せていることになる。

Fig. 2 に detuning 曲線示す。第一に気づくのは+側から短くしていった時の立ち上がりが急峻なことである。SHB や加速器の位相調整、ビームトランスポート調整、タイミングジッター減を実現して行く過程で立ち上がりが早くなって来た。パンチ幅、ビームの安定性などに依存するようだ。Thomas Jefferson National Laboratory (TJNL)[5]、Stanford 大 [6]、FELIX[7] の場合も同様に立ち上がりは急峻である。それに対して LOS ALAMOS[8] は立ち上がりが余り早くない。また、 $\delta L = -1 \mu\text{m}$  付近から  $0\mu\text{m}$  にかけて急速なパワー増が観測されている。詳しくは [9] で述べているが、JAERI で始めて観測された現象の可能性が高い。0.5nC 程度の多量のパンチ電荷を十分に圧縮し、かつ安定にアンジュレーターに導き、高ゲインを得ているためであると考えている。

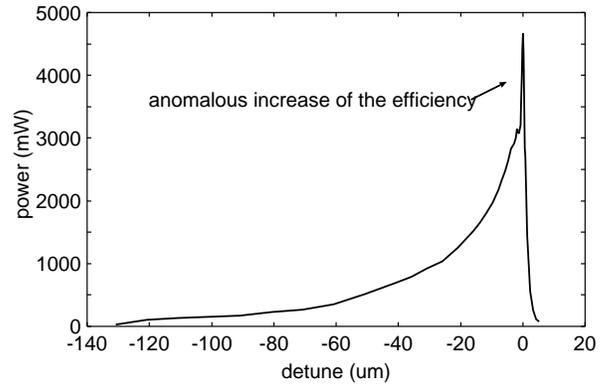


Fig. 2: マクロパルス幅を  $400\mu\text{s}$  に設定して得られた detuning 曲線。横軸は  $\delta L (\mu\text{m})$ 、縦軸はパワーメーターで観測されたパワー。

### 3. $\eta$ 測定

$10\phi$  の縦はねミラーを使って、FEL 光共振器内全ロス 6.8% (FEL 取り出し最大。以降 max と表記) と 2.3% (縦はねを抜いてロスを減らし、光共振器内の発振パワーを上げる。取り出しパワーは最大の 1/7 程度になる。以降 1/7 max と表記) で FEL パワーを取り出し、 $\Delta L=0\mu\text{m}$  付近で Faraday Cup (F.C.) の電流値を測定した。マクロ幅  $400 \mu\text{s}$  で FEL パワーを 3.4W (max)、0.5W (1/7 max) 程度に保持しながらアンジュレーター後の偏向磁石でエネルギー分析した。Fig. 3 から平均エネルギー (分布の中心値) を求めると、無発振、max、1/7 max で、180.7、172.4、169.5 となる。従って、max、1/7 max では、4.6%、6.2% のエネルギーシフトがおきている。発振が完全に立ち上がるのは  $50\mu\text{s}$  以降である。マクロパルス幅  $400\mu\text{s}$  で測定しているので、実質  $350\mu\text{s}$  相当と考えると、取り出し最大時の 4.6% のエネルギーシフトは 5.3% のエネルギーシフトに相当する。

LOS ALAMOS[10]、FELIX[11]、ELSA[12] 等全て電子ビームのエネルギーシフトから効率を求めている。彼らは偏向磁石後のスクリーンに写る電子ビームのエネルギー分布変化を、マクロパルス内の各時間で測定している。JAERI でも検討すべき。

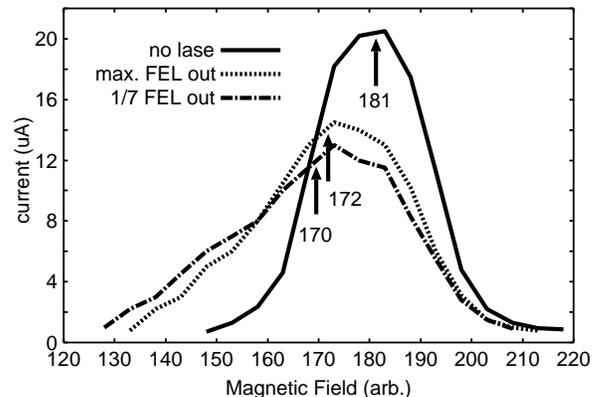


Fig. 3: undulator 後の F.C. で測定した電流値測定データ。偏向磁石の磁場を振って電流値を測定した。

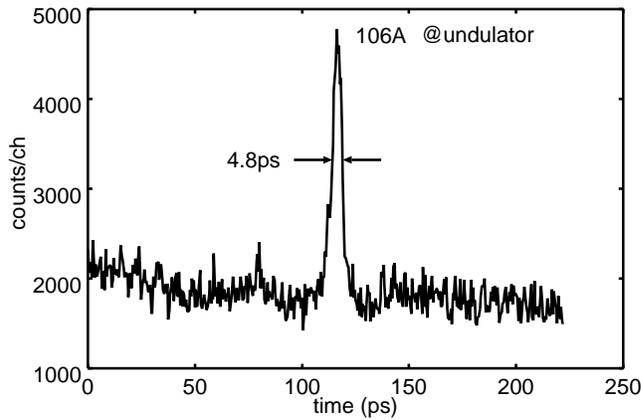


Fig. 4: アンジュレーター中心のスクリーンの OTR とシンクロスキャンストリークカメラ (ストリーク管は HAMAMATSU M1955 と M1954-10) を使って測定したパルス幅。いかなる補正もしていない。

#### 4. アンジュレーター中のビーム幅

FEL 出力の予想以上の増大のためアンジュレーター内のバンチ幅再測定を行なった。OTR をストリークカメラに輸送する際の、行路差によるエラーを減らすために、集光レンズを 1 枚だけ使う configuration にした。スクリーンの真上 15cm に集光レンズを置き集光点にストリークカメラをセットした。さらに、集光レンズの真下に直径 2 mm のアパーチャーをセットし、ストリークカメラのスリット幅を 20  $\mu\text{m}$  に設定した。Fig. 4 は測定例。横軸の目盛はトロンボーンを使った校正値。ストリークカメラの分解能が不明なのでそのエラー込の値。マクロパルス幅 100 ~ 200  $\mu\text{s}$  間のデータを 20 フレーム程度 (数秒間) 取り込んだものなので、マクロ間のふらつき等も全て入っている。特に JAERI FEL の場合、超伝導加速器の冷凍器の 1Hz 程度の振動がカブラーに伝わり、振動の度に位相が 0.2 度程度ふらつく。この影響はストリークカメラの CCD カメラのモニター信号で観測され、3ps 程度動いているように見える。これらの影響も全て入った状態で、5~6ps 程度の半値幅が得られていることから、ビームの FWHM は 5ps としている。また、この時の電流値はアンジュレーター後の F.C. (直径 45mm) で測定し発振 OFF 状態で 5.1 mA。また、同じ時に測定した 180 度アークの最初の 60 度偏向磁石後の F.C. (直径 114mm) では 5.3 mA。強い発振を得るためにアンジュレーター中でビームを絞っているため、F.C. の位置ではビームが広がっていると考えられる。そこで、アンジュレーター中にも 5.3 mA 通っていると考え、パルス当たりの電荷量は 0.51 nC なのでピーク電流は 106A ということになる。

現状のシンクロスキャンストリークカメラを使う限りにおいては、様々なエラーを除くことができないので、より高速なストリークカメラを使うか、シングルパルス幅測定ができるようにしなければならない。

TABLE 1. JAERI FEL parameters

Parameter	Measured
Kinetic energy	16.4 MeV
Average current	5.3 mA
Bunch Charge	0.51 nC
Bunch Length (rms)	2.5 ps
Peak current	100 A
Trans. emittance (rms)	40 mm mr (x) 22 mm mr (y)
Pulse repetition	10.4125 MHz
Wiggler period	3.3 cm
Number of periods	52
$K_{\text{rms}}$	0.7
Optical cavity length	14.4 m
Rayleigh range	1.00 m
Mirror radii	6 cm
Mirror reflectivity	99.4 %
Output wavelength	16-23 $\mu\text{m}$
Micropulse repetition	10.4125 MHz
Macropulse duration	1 ms (10Hz)

#### 5. まとめ

'99 12 月以降の JAERI FEL の平均出力増の流れを紹介した。Table 1 に現状の JAERI FEL パラメーターを記す。今回の高出力発振に寄与した加速器側の改善点として、1) 電子銃の性能が上がり安定化したこと、2) SHB と前段加速器間の距離が最適化され縦方向の効果的な圧縮が可能になったこと、3) 加速器の位相が最適化されたこと、4) その他、もろもろの不安定要因を潰したことが挙げられる。また、光共振器側では FEL 取り出しが最適化されたことが挙げられる。以上のように、バンチ幅の狭い高密度電子ビームを安定にアンジュレーターに導き効率良く FEL を取り出したことが quasi-CW kW 発振に繋がった。残る課題は x,y のエミッタンスの差異で、前段加速器の加速管中心を通っていないためと考えられている。

#### 参考文献

- [1] E.J. Minehara et al., NIM A **429** (1999) 9.
- [2] N. Nishimori et al., NIM A **445** (2000) 432.
- [3] N. Nishimori et al., "Performance of the thermionic electron gun at JAERI FEL", in this proceedings.
- [4] R. Nagai et al., "Optimization of the optical resonator for JAERI far infrared Free Electron Laser", in this proceedings.
- [5] S.V. Benson et al., NIM A **429** (1999) 27.
- [6] T.I. Smith et al., NIM A **296** (1990) 33.
- [7] D.A. Jaroszynski et al., NIM A **393** (1997) 332.
- [8] J.C. Goldstein et al., NIM A **250** (1986) 4.
- [9] N. Nishimori et al., "Comparison between JAERI FEL and other high power FELs", in this proceedings.
- [10] W.E. Stein et al., NIM A **250** (1986) 12.
- [11] W.A. Gillespie et al., NIM A **331** (1993) 786.
- [12] Ph. Guimbal et al., NIM A **358** (1995) 240.