

# CONSTRUCTION AND DEVELOPMENT OF AN UV FREE ELECTRON LASER UNDER THE COOPERATION OF NIHON U, KEK, PNC, ETL AND TOHOKU U

Y. Torizuka, K. Hayakawa, T. Tanaka, K. Sato, M. Iijima, J. Hatomi, Y. Matsubara, I. Kawakami, I. Sato<sup>\*</sup>, S. Anami<sup>\*</sup>, S. Fukuda<sup>\*</sup>, T. Kurihara<sup>\*</sup>, T. Kamitani<sup>\*</sup>, S. Ohsawa<sup>\*</sup>, A. Enomoto<sup>\*</sup>, S. Toyama<sup>\*\*</sup>, M. Nomura<sup>\*\*</sup>, Y. Yamazaki<sup>\*\*</sup>, T. Yamazaki<sup>\*\*\*</sup>, K. Yamada<sup>\*\*\*</sup>, M. Ikezawa<sup>\*\*\*\*</sup>, Y. Sibata<sup>\*\*\*\*</sup> and M. Oyamada<sup>\*\*\*\*</sup>

Atomic Energy Research Institute, Nihon University, Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101  
JAPAN

## ABSTRACT

The construction and development of an UV free electron laser has started under the cooperation of Nihon U, KEK, PNC, ETL and Tohoku U. The project requires a 125-MeV S band electron linear accelerator for the fundamental mode operation in the UV region and produces a high brightness electron beam at a micropulse of 70pC and 3.5ps with a macropulse width of 10-20  $\mu$ s and 200mA in average current. We have chosen the undulator period of 2cm and the number of period of 100 for the oscillation of a wave length of  $\sim$ 300nm.

## 日大、高エ研、動燃、電総研、東北大 紫外線領域自由電子レーザー協力開発

### 1 はじめに

自由電子レーザーは、通常のレーザーに対して、波長可変、大出力を特徴としており、現在、赤外・遠赤外領域では、実用の域に達している。自由電子レーザーが大きく期待されているのは、紫外・軟X線等の短波長領域で同位体分離、光化学反応、物質科学、生命科学への応用、医学治療への応用等があげられる。

自由電子レーザーの最初の増幅・発振が行われて以来、すでに20年近くになるが、短波長化が進まないのは、電子ビームに対する厳しい条件があるからである。我々は基本波でレーザーを発振を行うために電子ビームを125MeVに選んだ。エミッタンスやエネルギー幅が入射器で決まると考えると高エネルギー電子はビーム条件を緩和する。アンジュレータその

他の設計製作が容易になる。高調波によるレーザー発振と比較するとゲイン出力等でも大分有利である。本格的実用的な紫外自由電子レーザーを目指している。

我が国では、官民合同の自由電子レーザー研究所FELIが関西地区に設立された。赤外及び紫外領域の自由電子レーザーを開発し、産業界が利用する構想である。この他に、原研東海の超伝導ライナックによる自由電子レーザー、動燃大洗の大電流CW加速器のレーザー計画等がある。一方ここに述べる自由電子レーザー開発計画は、日大原研、高エ研、動燃、電総研東北大学の研究資材と開発能力を組織化して紫外領域の大出力レーザーを開発し、利用することを狙ったものである。

\* National Laboratory for High Energy Physics

\*\* Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

\*\*\* Electrotechnical Laboratory

\*\*\*\* Tohoku University

## 2 自由電子レーザーの目標値

開発目標の自由電子レーザーの加速器、光共振器、レーザー出力の値は次の表1のようになっている。

表1 自由電子レーザーの目標値

電子ライナック	
エネルギー	60~125MeV
周波数	2856MHz
マクロパルス幅	5~20 $\mu$ s
マクロパルス繰返し	1~12.5Hz
マクロパルス平均電流	200mA
ミクロパルス電流	20A
ミクロパルス幅	3.5ps
ミクロパルス長	1mm
ミクロパルス間隔	350ps
規格化エミッタンス	10 $\pi$ mm $\cdot$ mrاد
エネルギー幅	<0.25%
光共振器	
発振波長	300nm
アンジュレータ周期長	2cm
アンジュレータ周期数	100
アンジュレータ周パラメータK	0.75
光共振器長	~4m
ゲイン	>50%
立上がり時間	<3 $\mu$ s
レーザー出力	
ピーク出力	>10MW
平均出力	>1W

以上のパラメータの選択には次のような根拠がある。

自由電子レーザーの発振には光共振器内で入射された電子パルスと共振器を往復する光パルスが空間的及び時間的に重なり合って相互作用することが基本である。発振波長を $\lambda$ 、アンジュレータの中央での光パルスの半径を $w_0$ 、Rayleigh長を $Z$ とすると、

$$\pi w_0^2 = \lambda Z \quad (1)$$

ここで、 $Z = L/2$ で $L$ はアンジュレータの長さである。表1の数値から

$$w_0 = 0.3\text{mm} \quad (2)$$

となる。光パルスの断面積は $3 \times 10^{-7}\text{m}^2$ である。

光ビームの傾き角 $\theta$ は

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (3)$$

従ってエミッタンスは

$$\varepsilon = \lambda \quad (4)$$

規格化エミッタンス $\varepsilon_N$ は

$$\varepsilon_N = \beta \gamma \varepsilon \quad (5)$$

エネルギー125MeVに対し

$$\varepsilon_N = 23\pi \text{mm mrad} \quad (6)$$

なる。

ビームのエネルギー幅はアンジュレータの自然光の幅

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{1}{2N} \quad (7)$$

から求めた。すなわち $\omega \propto \gamma^2$ から

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \frac{1}{4N} \quad (8)$$

となる。 $N=100$ に対しては

$$\frac{\Delta E}{E} = 0.25\% \quad (9)$$

表1から電子ビームのパルス幅は3.5ps、長さ1mmで位相では3.5'に相当する。電子パルスと光パルスを10%以内の精度で重ねることを要求するとビームの位相変動を0.35'以内におさえる必要がある。クライストロンの位相変動はパルス電圧の変化 $\Delta V/V = 1\%$ に対して8'と推定されている。これからパルス電圧の変動は

$$\frac{\Delta V}{V} = 0.05\% \quad (10)$$

以内が目標値になる。

### 3 構成

図1にライナック本体、ビーム輸送系、アンジュレータ、光共振器の構成図を示した。30MWのクライストロンを2本使い、通常運転ではパルス幅は10 $\mu$ sである。第1のクライストロンのrfパワーの1/4はrf電子銃の空洞に供給し、残りの22MWのパワーは、まず0.3mの加速管に続いて4mのレギュラーの加速管に供給する。同じパワーの第2のクライス

トロンは出力を2分割し、それぞれ4m管にrfパワーを供給する。その結果、全加速エネルギーは125MeVになる。20 $\mu$ sのパルス幅のときはクライストロンパワーは15MW程度に低下すると考えられるので、全体の加速エネルギーは90MeV程度である。ライナックを出た後のビームは出口にある3個のQマグネット、2台の偏向電磁石の中間に置いてある4個のQマグネットによって2mのアンジュレータの中央で約0.3mmのビーム半径に収束される。

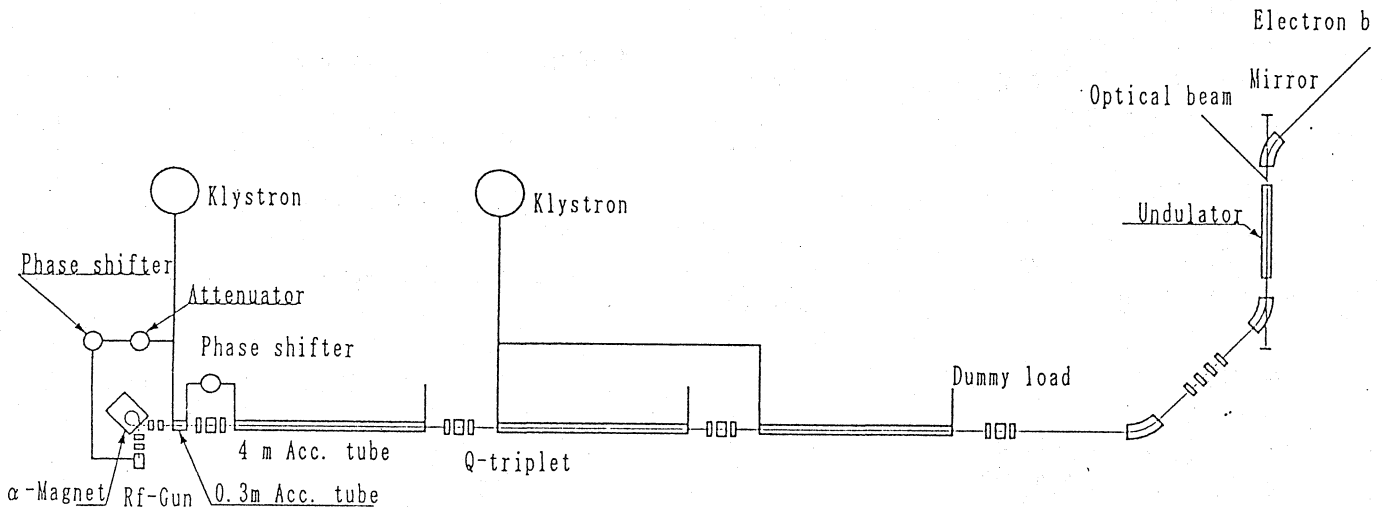


図1 ライナック本体、ビーム輸送系、アンジュレータ、光共振器の構成

### 4 開発研究項目

紫外自由電子レーザーはこれから開発し利用する分野である。従来型の電子銃では表1の性能を満たすことができないのは明らかである。そこで、rf電子銃を開発しなくてはならない。LaB<sub>6</sub>を熱陰極に用いる。大きな問題は、rfの半周期180°の前半の0~95°の位相で放出された電子は加速され空洞の外に出るが、後半の95~180°の電子は途中で位相が逆転し、電子がカソード方向に逆流してカソードを叩き、マクロパルス電流が上昇するバックボンバードメントの現象である。

前回の報告では対策として2個の空洞を連結する方式をとりあげたが、これは全く効果がないことがわかった。現在は単空洞で磁場を用いて逆方向電子の軌道をカソードからそらす方式を採用している。表2にバックボン

バードメント電子について解析した結果を示した。この表の第1列はバックボンバードメント電子の初期放射位相である。第2列は10°間隔の電子数、第3列はバックボンバードメントエネルギー、第4列はその平均エネルギーである。これらは全て電離損失によるものと見なすことができよう。第5列はカソード物質LaB<sub>6</sub>における電子の飛程である。第6列は平均エネルギーを飛程で割りさらにカソード表面積をで割った値である。最後の列は150Gの磁場によりバックボンバードメント電子が移動する距離である。電離損失/cm<sup>3</sup>が大きい低エネルギー電子を磁場で取り除くことは困難であることがわかる。

そこで、例えば図2に示す様な短冊形のカソードの形を考え磁場によって電子が振られる方向に沿って放出、非放出面を交互に並べたものをテストすることを準備中である。

表2 直径2.5 mm  $\phi$  のLaB<sub>6</sub>カソードについて

1 r f 周期当りの放出全電荷数  $7 \times 10^9$  個の場合のバックボンバードメント電子について解析した結果

$f=2856\text{MHZ}$        $\text{duty factor}=2.5 \times 10^{-5}$

initial emission phase	number of electron $\phi \pm 5^\circ$ $\times 10^8$	back-bombardment energy keV	average energy W	range cm	ionization loss W/cm <sup>3</sup>	deflected by the field (150G) mm
100	5	690	3.9	$1.0 \times 10^{-1}$	813	6.4
110	4.8	490	2.6	$6.6 \times 10^{-2}$	821	4.2
120	4.7	310	1.7	$3.25 \times 10^{-2}$	1090	2.6
130	4.3	170	0.84	$1.4 \times 10^{-2}$	1250	1.4
140	4	85	0.39	$4.56 \times 10^{-3}$	1782	0.6
150	3.4	31	0.12	$8.13 \times 10^{-4}$	3075	0.2
160	2.7	6.7	0.02	$5.4 \times 10^{-5}$	7716	0.037
170	2.06	0.48				

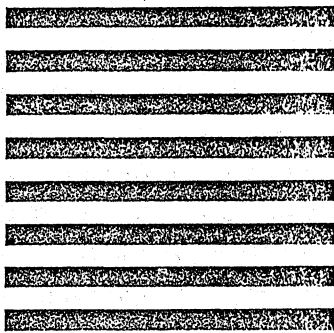


図2 短冊形カソード