

話 題

X線 FEL 試験加速器 レーザー増幅実験成功を支えた人間と技術

新竹 積*, XFEL 合同推進本部を代表して

Test Accelerator for the X-FEL in Japan: First Lasing, Technology and People

Tsumoru SHINTAKE* and on behalf of XFEL joint construction team

1. はじめに

すでに4ヶ月ほど前になりますが、本年6月20日、SCSS 試験加速器において、波長49 nmの真空紫外線領域でのSASE-FELの増幅実験に成功し、国内外にプレス発表を行い、各方面から大きな反響をいただきました。

さらに実験成功直後の6月26日～30日にイギリスのエディンバラにて開催されましたEPAC '06（ヨーロッパ加速器国際会議）にて報告しましたところ¹⁾、SCSS チームに対して、本当に数多くの方々からCongratulation!の言葉をいただきました。これは、SCSS チームが国際的には新参者でありながら、大御所のDESY TTFに短波長SASE-FELの建設チームとして堂々と肩を並べ、またプロジェクトでは先行していたはずのSLAC LCLS チームをある意味で追い越したということ。さらに業界のこれまでの通説となっていたphoto cathode rf-gun 電子源とは全く異なる新方式「単結晶CeB₆熱電子銃」による電子ビームでの実験成功というショッキングなニュースがEPACの開催でエディンバラに集まっていた加速器研究者の間に周知されたためでありました。

さて時間は前後しますが、実験の佳境であった6月15日の夕方、電子ビームの調整が順調に進んだため、ためしにアンジュレータのギャップを閉めてスペクトルを取ってみようということになり、予定していた電子ビームのエミッタンスの測定を中止し、16時から2台のうちの上流の1台のアンジュレータのギャップを4 mmまで閉じた。そしてスペクトル測定。最初は電子の軌道がまっすぐになっておらず、理解に



図1 最初のレーザー増幅を観測し記念撮影。

苦しむプロファイルがモノクロメータのCCDカメラで観測されたが、BPMを信じて軌道修正すると、急にスペクトルが狭くなった(図4)。その場にいた北村英男主任研究員は、さすがに長年のアンジュレータ開発の第一人者だけあって、だれより先に事態を理解し、「まちがいない、レーザーになった」と確信したという。確認のためアンジュレータの実質上の責任者でありFEL理論に精通している田中隆次君にスペクトルの解釈をお願いすると「いや、これFELですよ。間違いありませんよ」と、あっさりと言断した。これを聞いた一同は騒然となった。田中隆次君がどれほど皆から信頼されているか、これを見て私はとても頼もしく、そしてうれしく思った。そして駆けつけた石川哲也プロジェクトリーダーと共に記念撮影をしたのが図1である。

このあと、各種のデータをJASRIの田中均君を中

* 理化学研究所, 播磨研究所, 電子ビーム光学研究室
(E-mail: shintake@spring8.or.jp)

心に取得し、6月20日に2台のアンジュレータを使って大きな出力を観測し実験成功を宣言、6月23にプレス発表。報道陣に今回の成果を堂々と報告。報道陣の前でレーザー実験をするという緊張した演出にスタッフ一同、きびきびと対応してくれ、とても良い経

験をさせていただくことが出来た。

プレス発表後、EPAC '06 出席のため、すぐにイギリスはスコットランドへ出発。現地に着いたのは、EPAC 会議2日目の夕方、空港からレセプションが行われていた世界遺産のエディンバラ城へとタクシーで乗りつけた。西日に染まる城壁の美しいこと。見上げる立派な城を借り切ったレセプション。城の中庭に集まっていた数百名の EPAC 集団の中へなだれ込むと、次から次に握手、そして「よかったね、おめでとう」と声をかけてくれる。久しぶりに旧知の友と語り合う。そして、とてもありがたいと思ったのは、日本から参加していた研究者の方々から握手しながら「おめでとう。ご苦労さん」と祝辞をいただいたこと。そうか、見ていてくれたのだ。皆さん本当にありがとうございました。

EPAC での発表は時間が短かったので、レーザー増幅のデータを3枚と、電子銃からアンジュレータまでのチーム・プロフィールのムービーを上映しただけだったが大きな反響があった。発表後にいろんな方と話をしたが、SASE-FEL 実験に長年の経験のある研究者は「SCSS の電子ビームはとても安定で、ダーク電流が本当に少ないなあ。俺たちの加速器はダーク電流だらけで問題だ」と本音を漏らした。また、これ



図2 エディンバラ城のレセプションと EPAC '06 発表

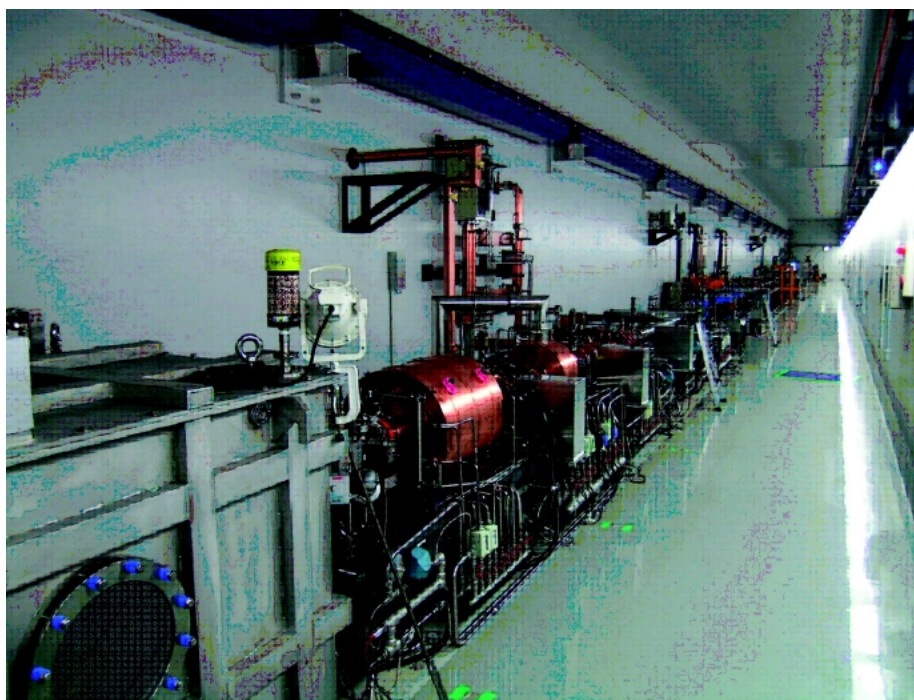


図3 SCSS 試験加速器。ビームエネルギー 250 MeV にて波長 49 nm の SASE 増幅に成功した。手前から 500 kV パルス熱電子銃、238 MHz サブハーモニックバンチャー、476 MHz ブースター、S-band APS バンチャー、S-band 進行波加速管、50 MeV ダンプ、C バンド加速部、アンジュレータ、光診断部と続いている。トンネル全長 60 m。地上施設、左の壁の外に電源、制御、コントロール卓があり、アクセスが容易。

から FEL を計画しているフランスやイタリアの研究者からは、「ぜひ SCSS の電子銃を使いたい。どうやったら手に入るのだ」と問い合わせがあった。またお前、知っているか「ヨーロッパの XFEL の建設コストは日本の SCSS に比べて倍以上も高い。だから試験加速器成功のニュースで議論が沸騰しているんだぞ」という話も聞いた。学会に大きな波紋を投げかけたのは間違いない。

帰国後 1 ヶ月。さらに慎重に系統的なデータを取り、FEL のゲインも 10^5 倍となり殆んど飽和に近いレベルに達した。そして 8 月 2 日～4 日、仙台に於いて開催された第 3 回加速器学会年会・第 31 回リニアック技術研究会にて、その詳細を報告。ここでは、グループから 23 本の発表を行った。レーザー発振成功のニュースを引き下げての参加であった。ようやく SCSS が正式のプロジェクトとして加速器学会で認知されたと感じた。

2. X 線 FEL 計画について

波長 1 \AA 領域のコヒーレント光源を目指す X 線自由電子レーザー (XFEL) 計画は、我が国が推進する国家基幹技術に選定され、本年より始まる第 3 次科学技術基本法に明記された。それは、SASE-FEL 原理に基づく X 線自由電子レーザーを、2006 年から 5 年間で播磨地区に建設し、2010 年以降にユーザー施設として利用を開始するという壮大な計画である。図 5 が完成予想図であり、現在の SPring-8 のリングから伸びる 1 km ビームラインに併設される予定であ

る。建設当初は、アンジュレータのビームラインは 1 本でスタートするが、ビームスイッチヤードの下流に左右に振り分けて、アンジュレータラインを増設する予定である。

この重要な決定の背後には、理事長率いる理化学研究所の上層部の XFEL に対する期待、企画課をはじめとする事務方の強力なサポート、そして SCSS チームの地道な技術開発があった。

さて XFEL から出てくる光の特徴は、

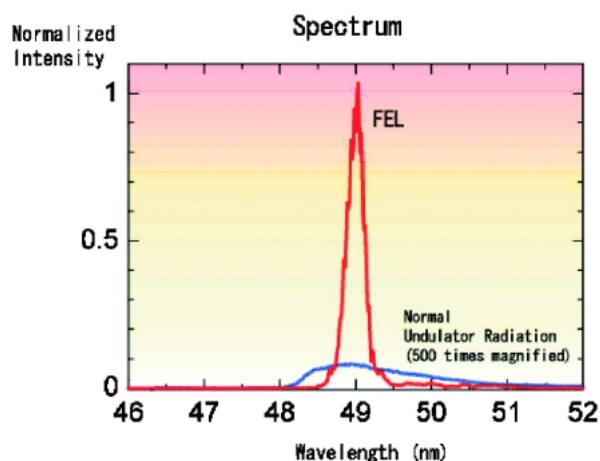


図 4 最初に観測された SASE 増幅を示唆するスペクトル。幅が狭く、左右対称。ビームの電荷量を下げゆくと、自然放射となり、幅が広く長波長側の裾が長くなり通常アンジュレータ放射に特有なスペクトルとなる。(下の青色の広いカーブが自然放射、見やすくするため 500 倍に拡大している)。

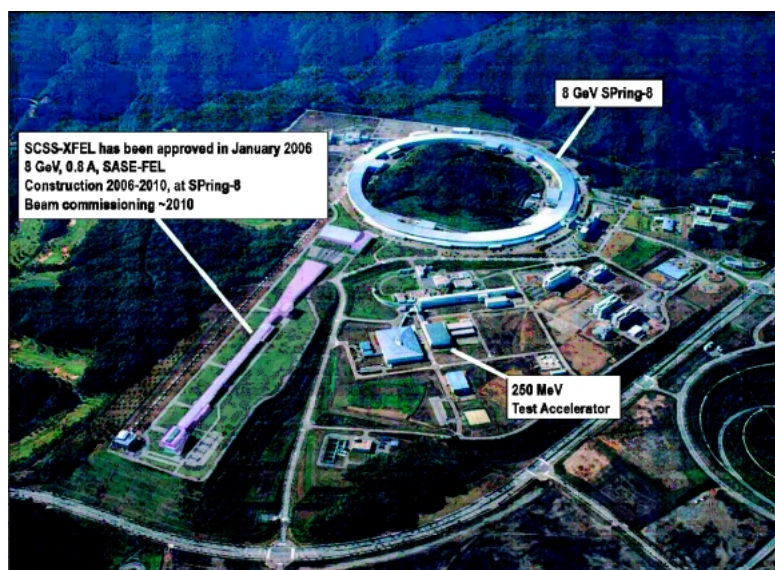


図 5 XFEL 完成予想図。

- (1) コヒーレント : 100% Transverse Coherent, longitudinal multimode.
- (2) 高ピーク電力 : >1 GW.
- (3) 極短パルス : <100 fsec.

という従来の放射光とは全く性質を異にする X 線領域のレーザーである。この特色を生かして、ナノ材料の構造解析、高速時間反応の追跡、大強度光による物性の基礎研究、そしてゆくゆくはタンパク質の単分子での構造解析。とくに、この単分子解析が出来るようになれば、タンパク質などの生命物質を結晶化せずに、または、微細結晶を用いて、構造を決定できるようになり、飛躍的に生命現象の理解が進むものと期待される²⁾。

3. SCSS 技術開発の目標

さて時間をさかのぼって 2001 年、XFEL に必要となる基礎技術の開発を進めることとなった。概略の計算をしてみると、電子ビームのエネルギー 6 GeV 以上が必要と判明。明らかに従来の S バンド加速器では、平均加速電界が 15 MV/m 以下であり、加速器が長くなりすぎて SPring-8 の敷地に入らない。そこで、30 MV/m 以上の加速電界を発生できる C バンド技術を採用することとした。SCSS は、SPring-8 Compact SASE Source の略であり、真空封止アンジュレータと C バンド技術の二つによって、諸外国の計画に比べてはるかに短い施設で XFEL が実現できる。このメリットを強調するため、2001 年に北村英男がプロジェクトの愛称を SCSS と命名した。

しかし、SCSS には大きな問題があった。真空封止アンジュレータは、永久磁石を真空の中に入れること

ができるために、二つの磁石配列を近い距離にまで近づけることが可能となり、その結果、周期長の短いアンジュレータが実現できる。これによって、電子ビームのエネルギーを低く出来るのである。が、しかし、アンジュレータの周期が短いと FEL ゲインが小さくなってしまふのである。FEL の増幅現象は、電子ビームを X 線の波長で小さなバンチに集めることであり (図 6, マイクロバンチング), その効率 (ゲイン) は、電子ビームのアンジュレータ磁場による横振動の振幅に比例する。これは電子が横に移動するときに、後ろから来る X 線の電界によって加速または減速の力を受ける力を利用しているからである。アンジュレータ周期が短いと、横に走る距離が短くなるので、X 線の電界から受け取る変調エネルギーが小さくなってしまふのである。

この小さなマイクロバンチングの力でも大きなゲインを得るには、もっと質の良い電子ビームを使う必要がある。つまり、より小さいエミッタンスが必要とわかった。そこで目標をエミッタンス $1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以下、ピーク電流 3 kA 以上と設定。これは必須条件であり、両方が満たされないと波長 1 \AA にて、全長 80 m のアンジュレータで増幅が飽和せず、XFEL として機能しない。これは、極めて高いレベルの目標である。

そして SCSS の最初の技術開発目標を、熱電子銃を用いた低エミッタンス電子源と定め、電子銃の開発に着手した。図 7 が当初の概念図。ヒーター技術、高電圧電源、エミッタンス測定技術などを開発。2003 年に、電子銃単体でのエミッタンス測定により、バンチ圧縮前のエミッタンス値として、 $1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ を

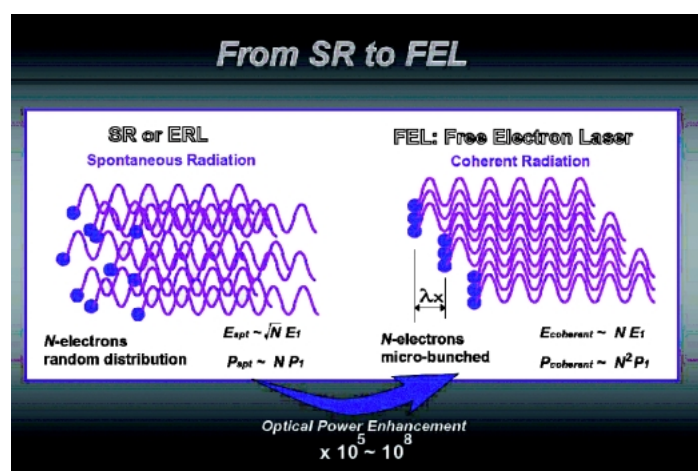


図 6 SR から FEL へ。マイクロバンチング。電子が X 線の波長で整列すると、干渉効果によって前方へ放射電力が集中する。

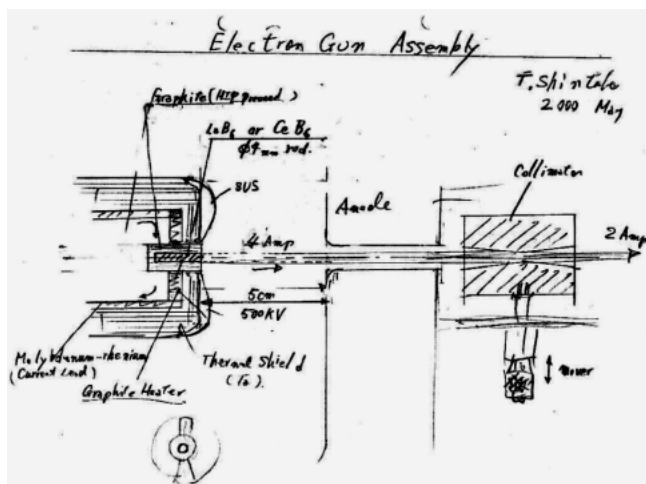


図7 熱電子銃の最初のスケッチ。CeB₆またはLaB₆の単結晶カソードから出た電子を、500 kV 加速し、コリメータにて外周のエミッタンスの崩れた部分を取り去り、おいしい「餡子」だけを使おうというアイデア。これが現在の試験加速器の電子銃の原案になっている。

観測した³⁾。

これと平行して、アンジュレータ部の電子ビームアライメントに高い精度が要求されることがわかり、高精度位置モニター、レーザーアライメント技術、低熱膨張セラミックを用いた安定架台、そして、コンクリート床を研削するロボット「ゆかとけんさく」を開発した。今回はこれらの詳細は割愛するの。参考論文を参照ねがいたい^{4,5)}。

4. 電子入射器の技術詳細

入射器は単結晶 CeB₆ の熱カソードを採用し、サブハーモニックバンチャー、バンチャーの古典的な入射器の構成をとっている。この方針を採ったのは、古典的な構成の入射器を丁寧に見直せば、必ずや最適解が存在するだろうという予感があったためである。また、あえて言うならば研究所または研究グループのアイデンティティということを考えてのことであった。諸外国の XFEL 計画、そして国内外の各種の電子加速器プロジェクトが RF 電子銃をその電子源としていたし、だれ一人として古典的な電子入射器を見直して RF 電子銃にまさる性能をだしてやろうと考える者が見当たらなかった。

もし熱電子銃に必要な電流とエミッタンスが得られたとしたら、熱電子銃を用いる場合の最大のメリットの一つが、メンテナンスフリーという事である。これは「仕事が減るからいい」という意味ではなく、メンテナンスしなくても一定の性能が確保できるとい

う電子源が実現されるという意味。これによって日々の運転において同じ特性の電子ビームが加速器に供給されるので、運転パラメータの再現性が良いということになる。X線 FEL では、これが特に重要であって、アンジュレータ区間のビーム軌道のチューニングにミクロンメートルの精度が要求され、また長さ 100 m にも及ぶアンジュレータ区間をすべてチューニングする必要があるために、上流のビームパラメータに変動や変更があっては調整が全く成り立たないのである。

さて具体的な設計を振り返ると

(1) 必要なビーム電流を供給するカソードとして LaB₆ または CeB₆ のカソードがあり、電子顕微鏡の電子源としてマーケットが確立しており、高純度の単結晶が入手可能であった⁸⁾。ただし、ニードル型ではなく結晶をフラットにカットし、面源として 1 A 以上の電流を取り出している。CeB₆ の方が LaB₆ より、約 2 倍寿命が長いとの報告があり、CeB₆ を採用した。ただし、1600 度 C を超える運転では、LaB₆ の方が、寿命が長くなるので注意が必要。

(2) カソードの温度と面積から算出される理論熱エミッタンスが $0.4 \pi \text{ mm.mrad}$ であり十分に低い値とわかった。ただし面密度は 30 A/cm^2 以上となる。

(3) LaB₆ または CeB₆ のランタニド系カソードを使用する場合に最も困難を極めるのが、加熱ヒーター、断熱機構の技術である。1500 度という温度では、熱輻射が非常に大きい。高温の物体が表面から輻射する熱量は、ステファンボルツマンの法則により次式のように与えられる。

$$P = \epsilon \sigma T^4 \cdot S$$

この式は目的の温度 T を得るに必要となるヒーター電力が P であると読み替えができる。小さな電力で効率よく加熱するには、高温部を出来る限り小さく設計することである。従来の電子顕微鏡用のカソードは先端をニードル形状とした直径 0.5 mm 以下の LaB₆ ロッドを、2 個のパイログラファイトで左右から挟んで、ここに直接電流を流すことで加熱する方式がとられており、Vogel 型という名称で呼ばれ長年の実績がある。2001 年の 5 月のこと、着任したばかりの、渡川和晃君と、米国オレゴン州、Hillsboro (シアトルの南 200 km) にある FEI Beam Technology Inc. を訪問し、CeB₆ (セリウムボライド) カソードの問題点、寿命、ヒーター技術などを議論した。FEI 社⁸⁾ は小さな会社であって、電子顕微鏡の電子銃の製造販売からスタートして、現在はイオンビームの注入装置を主力

製品にしている。さて、当方が必要としている直径 3 mm のカソードについて議論すると、「カソードは製作できる。それ自身の寿命も超高真空では何年も OK。しかし、パイログラファイトが長持ちしないだろう。それでもよければ Vogel 型に 3 mm の CeB_6 を入れて差し上げましょう」ということになった。それから数ヶ月後、送られてきたパッケージを開けると、電子銃のカソードは、グラファイトの支えからもう落ちそうになっていた。もともと Vogel 型は 2 本のモリブデンロッドのバネによってグラファイトとカソードを圧縮して支える構造であり、直径の大きなカソードを支えるには無理があった。このトラブルがあって、自前でカソードヒーターを開発することを決意したわけである。

(4) もう今から 30 年も前のことになるが、まだ私が九州大学の修士 1 年のころ。的場教授のもとでイオン源用の電子銃を開発したことがあった。そのころは何でも手作り。カソードだけは電気化学工業にお願いして、直径 25 mm の凹面カソードを LaB_6 の複結晶にて焼結していただいた。さて問題は、これを 1500 度に加熱するヒーターであった。タングステン線、モリブデン、タンタル帯などなど本当にたくさんのヒーターを作り、期待に胸膨らませて連日のように真空ベルジャーに仕込んで加熱試験するが、実際には「燃えてなくなり」、また仕込んで「飛ばし」、そのたびに黒く蒸着されたベルジャーのガラスを磨き粉でこすり、また実験、失敗、こうやって、半年間もヒーター開発だけに集中した。指先が黒くぼろぼろになった。

金属ヒーターは、高温で軟化する。また条件によっては再結晶によって脆化し断線する。そして悲しいことに、ヒーターだけが自動車のヘッドライトのように輝くのに、カソードはいっこうに熱くならなかった。逃げた熱は、ベルジャーのガラスと底板をチンチンに加熱した。

その当時の最終的な解決策は、BN（窒化ホウ素）にヒーターを埋め込んで、熱伝達によってカソードを加熱する方法。開発したカソードはイオン源の中で何年も安定に動作した。ただし、窒化ホウ素が熱分解して真空を悪化させるのが問題だった。

(5) 10 年ほど前になるが、C バンド開発をやっていたころ、KEK の松本浩氏と、マイクロ波吸収体用の SiC の調達に榊イビデンを訪問した時のこと。工場の廊下に直径 30 cm もある黒い円筒がほこりがかぶって置いてあった。聞くとシリコン引き上げ炉用のグラファイト・ヒーターの試作品という。最近グラ

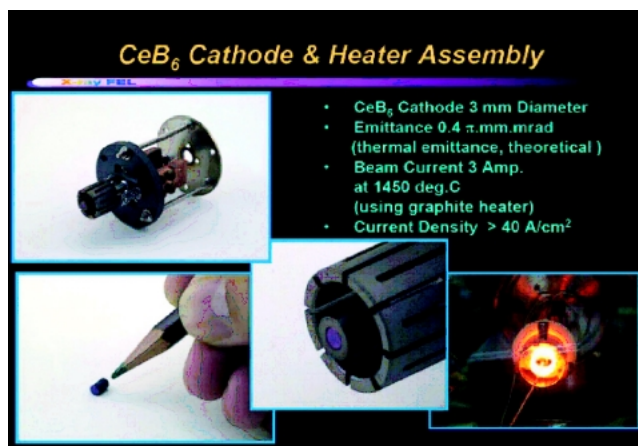


図 8 CeB_6 カソードとグラファイト・ヒーター

ファイトの純度が良くなり、半導体産業向けのヒーターやベース板として使用されるようになったとのこと。グラファイトは、熱的に安定、温度が上がっても軟化せず、抵抗率も変化しない。高温ヒーターとして最適の材料。これがあれば、あの時あれほど苦労はしなかったものかと悔しかった。

(6) そして今、電子銃のカソードを加熱しているヒーターは、榊イビデンの高純度グラファイトである。極めて安定に動作している (図 8)。

(7) 面密度 $30 A/cm^2$ の電流を温度制限領域とするには約 $400 kV/5 cm$ 以上の電圧が必要と判明。

(8) 一方、サブハーモニックバンチャーからバンチャー空胴へのビーム輸送において、空間電荷効果によってビームが受ける発散力は次式によっており、明らかに初期エネルギーが高い方が良い。

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \frac{E_r}{m_0 c^2 (\beta\gamma)^3}$$

(9) 電子銃に印加できる電圧は、クライストロンの最高電圧 500 kV から決定した。これに用いる絶縁セラミックは、リニアコライダー計画向けに開発された X-band クライストロンのものを使用している (図 9)。電子銃の絶縁セラミックは現在までの運転で、幸い 1 回も放電パンクしていない、素晴らしい。

(10) 500 kV はパルスでなければ、実用にならない。直流では放電の危険性が大。我々の電子銃はなぜか「DC 熱電子銃」と誤解されているが、実際は数マイクロ秒のパルス高電圧による「pulse 熱電子銃」である。高電圧パルスは、クライストロン・モジュレータ電源から昇圧トランスを通して供給している。またインピーダンスのマッチングには、ダイオード電子管

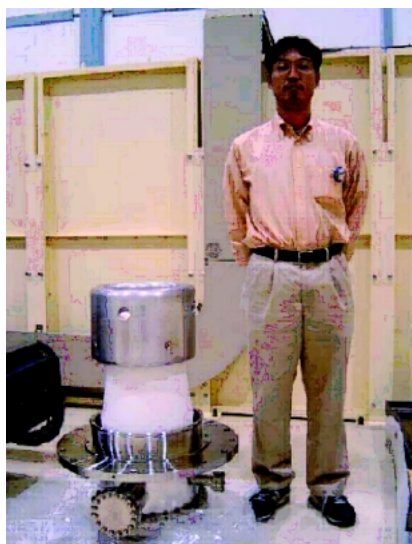


図9 500 kV 絶縁セラミックと電子銃担当の渡川和晃君.

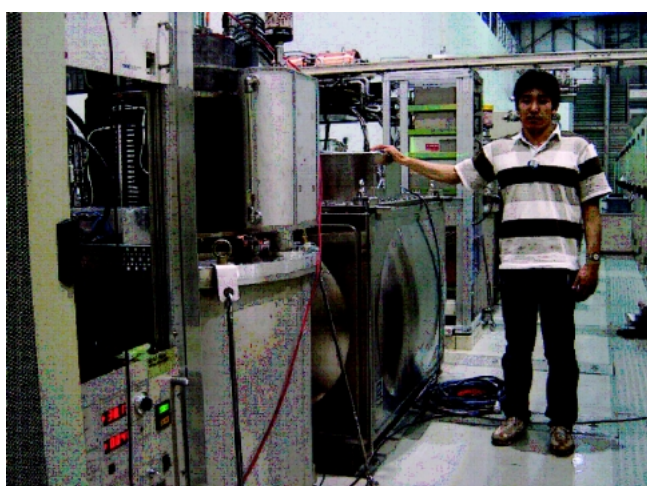


図10 モジュレータ電源と稲垣隆宏君.

を用いている⁹⁾.

(1) 500 kV 電子銃を支える技術として、パルス電源 (モジュレータ電源) を忘れることは出来ない. 図10がSCSS向けに松本浩氏と馬場齊氏の指導のもと、稲垣隆宏君が担当して、重電メーカーと共同開発したものである. 絶縁油を充填し極めて小型になっている. このモジュレータ電源は、電子銃、Sバンド、Cバンド共に共通に使用している.

(2) 短パルスの切り出しのため、通常の熱電子銃では、グリッドを使用しているが、グリッドは明らかにエミッタンスを悪化させるので排除した.

(3) 1 nsec のビームパルスの切り出しはパルスデフレクターによって実現している. 幸い、JASRI の

小林氏が電子銃のグリッドから出る暗電流をカットするためのビームデフレクターを開発中しており、1 nsec 程度の切り出しに成功していたのでこれを参考とした¹⁰⁾. パルサーはイギリスの Kentech 社製. バイアスコイルによってビームを曲げ、下流のモリブデンターゲットにて止める. 1 nsec のパルスを 50 オームの平行平板に送り、ビームを曲げもどし、下流に送る. エミッタンスを壊さないような電極の設計を渡川君が詳細に行った¹¹⁾.

(4) サブハーモニック・バンチャー空洞によって、電子ビームをバンチに形成する. その周波数を S バンドの 12 分の 1 に選定. 固体素子の増幅器が入手できること、空洞の直径が極端に大きくならない範囲で選定した. この空洞とすぐ下流の 476 MHz ブースターが電子バンチのタイミングを決定するため、熱安定性、機械的安定性を重視した設計となっている. 詳細は柱野氏の報告を参照¹²⁾.

(5) 収束系. 従来の入射器は、あの大きな多数のソレノイドコイルに取り囲まれていて、メンテナンスがやりにくかった. また調整が容易ではなかった. そこで電子顕微鏡等で使われている磁気レンズ (小さなソレノイドコイルと磁気ヨーク) を用い、レンズ→ドリフト→レンズ→空洞→レンズというように、要素を空間的に分離し、パラメータを個別に調整できるようにした. これはいわゆるリング加速器の combined function から separated function への進化に相当する. 図11を参照.

(6) S-band APS 空洞. 476 MHz 空洞のあとドリフト走行する間に Velocity bunching によって電子バンチはさらに短くなり、いよいよ高電界加速器空洞によって高エネルギー領域に持ち込まれ、電子分布が相対論的效果によって固定される (電子の見かけの質量が大きくなり外乱に対して強くなること). ここは出来るだけ周波数が低いほうが良い. しかし大電力マイクロ波が得られるのは、Lバンド周波数以上. 試験加速器の建設当初に 20 MW 程度の Lバンドのクライストロンが入手できなかったので、試験加速器では Sバンドで代用することとした. 空洞は APS 型の定在波. 入力カプラ空洞を加速管の中央にもってこることで、低エネルギーの電子が入射する最上流の空洞では、対称性の良い電界が得られ、非対称電磁場によるエミッタンス破壊がない. APS 空洞の製作の詳細は、稲垣君の報告を参照のこと¹⁴⁾.

(7) Sバンド進行波管, 2 m の KEK-B 向けの進行波管を使用している. これによって、電子ビームエネルギーは 50 MeV まで加速され、シュケイン磁場の

バンチコンプレッサーに送られる。

(18) シュケイン磁場型バンチコンプレッサー. 上流の2 m 進行波管での電子ビームの位相を, バンチング側, すなわち, バンチの頭が低エネルギー, テールが高エネルギーとなるように調節し, シュケイン磁場を通してバンチ圧縮する. 基本設計では圧縮率2倍であるが, 実際の運転では大きく変動させて最適値を適宜選定した. この詳細は, 原徹の報告を参照¹⁵⁾. 興味深いのは, 現在まで CSR-instability らしき現象

が観測されていないことである. 熱電子銃からの電子ビームが時間的に滑らかで, 振動源となる密度変動が混在していないのかもしれない.

(19) RF 制御系は各クライストロン別に独立に固体増幅器を有し, デジタル IQ 変調, 復調器によって高度な制御を可能としている. また C-band の RF をタイミング同期に用いて, 高精度のタイミングシステムが構築されている¹⁶⁾. またこれには, Cavity-BPM の検出回路も含まれており, システムを簡素化している.

その他, 試験加速器には数多くの新しい取り組みがなされており, 2006 年加速器学会年会に関係の報告を行ったので参照願いたい. とくに, この記事では詳しく報告できなかったが, 大竹雄次氏が中心となって高周波のデジタル制御に力をいれて開発を推進しており, 数々の優れた成果が得られている. また, 冷却水システムにも先進の技術を投入しており, 加速器の急激な運転モードの変更に機敏に追従できるシステムとなっている.

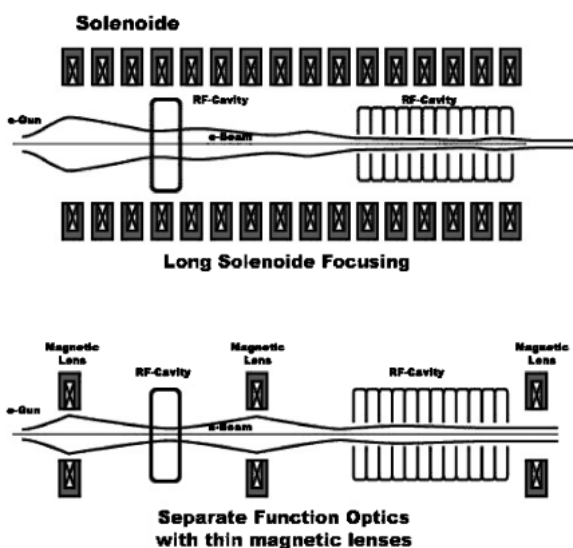


図11 (上) 従来型の入射器には収束ソレノイドが使用されていた。(下) SCSS では, 磁気レンズに置き換え, 空洞部分からソレノイドを取り去って, エレメントを分離した.

5. 試験加速器の構成

図12 に試験加速器のシステム図を示す. エミッタンス等の実験を行う場合の最大の問題は, その測定方法である. SASE-FEL の増幅ゲインを決定するスライスエミッタンスは $1\pi\text{.mm.mrad}$ 以下, エネルギー分散は 1×10^{-4} 以下が要求されており, 両者を正確に測定することは, 事実上不可能に近い.

そこで, 電子ビームをアンジュレータに通してレーザー増幅を行い, 増幅率の測定等から逆に電子ビーム

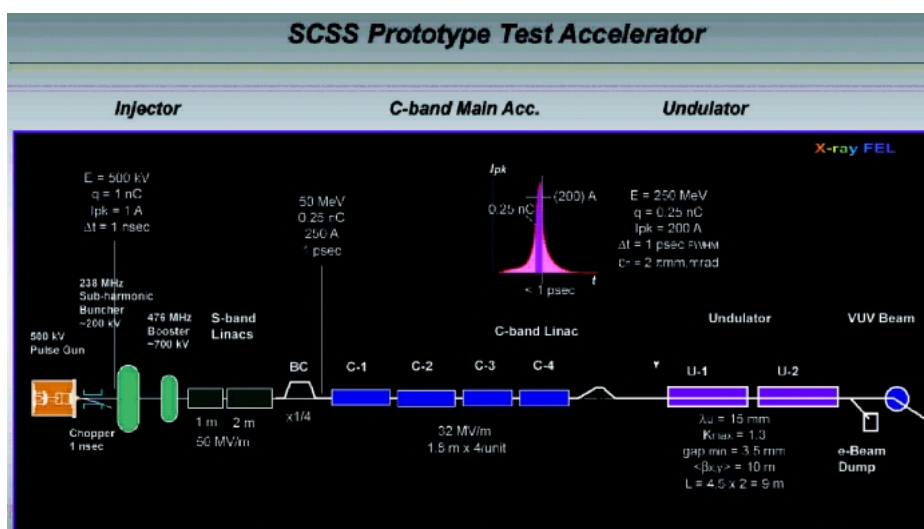


図12 試験加速器の構成. 電子銃から入射器までは, 基本構成が実機 XFEL と同じ. ただし, 入射器最終段は実機では, 波長の長い L バンドとして, 電子ビームの捕捉効率を高める. また実機では, バンチコンプレッサーが2段階となる.

のパラメータを評価する方が、総合評価となり、はるかに安全性が高くなる。レーザー増幅そのものが電子ビームの測定実験なのである。

試験加速器の構成は次のように決定した。

- (1) 電子入射器は出来るだけ、実機 XFEL と同一の構成とした。ただし、L-band のバンチャー加速部は、必要な 20 MW クラスのパルスクライストロンが建設期間内に入手不可とわかり、Sバンドにて実施したため、位相空間のアクセプタンスが8分の1となっており、予想されるビーム輝度はそれに比例して低い。実機ではLバンドとする。
- (2) ビームエネルギーが高い方が、発振波長が短く利用研究の幅が広がる。しかし建屋の長さ、建設コスト等の検討により、250 MeV、波長 60 nm とした。
- (3) アンジュレータの台数は、数値計算による電子ビームエミッタンスとピーク電流から飽和に届く2台とした。
- (4) 制御システムは、SPring-8にて構築され運転実績のある MADOCA を採用し、出来るだけ現存する資産を活用した。

具体的な建設にあたり、少ない人員の中で、この複雑な加速器を短期間に建設するために、組織を「横割り」とした。すなわち、クライストロンのパルス電源を担当するスタッフは、電子銃、Sバンドバンチャー、Cバンド加速器のすべての電源を担当する、電力、真空、冷却水、制御、設置、アライメントも出来るだけ横並びとした。理研の3研究室とJASRIが加わったグループの中でこれを実施した。アンジュレータ以外のすべての決定権を筆者に与えていただき、この組織

編制はすばらしい成果をあげた。試験加速器の建設決定時点2004年7月に、完成目標を1年半後の2005年10月末とした。そして予定通り10月末に完成し、そして11月末には、アンジュレータ下流まで電子ビームを運び、自然放射を確認した。

最初の立ち上げ試験で不具合のあった部分の手直しと、不足分の設置を2006年3月末までに完了。加速管のエージング、運転に必要なソフトの拡充を経て、連休明けの5月8日よりレーザー増幅に向けて本格的にビーム調整を開始した。

このビーム調整の詳しい解説は田中均が2006年8月の第3回加速器学会年會に報告しているの、そちらを参照していただきたい。

6. 電子ビームのプロファイルと、エミッタンス測定

図14に電子銃からアンジュレータまでの電子ビームプロファイルを示す。電子銃からアンジュレータまで、Adiabatic dampingによってビームの実エミッタンスが減少し、ビームサイズが小さくなる。電子銃でのプロファイル、これはビームデフレクターによって1 nsecに切り出された後である。右下にわずかに見えるハローが切り出しパルスの立ち上がり、立下り部分のテールである。アンジュレータの中を走る電子ビームの太さは100 μm程度となっており、いかにエミッタンスが小さいかを物語っている。バンチ長1 psec以下、ピーク電流数百アンペアの高密度電子が、このように小さい断面積となってアンジュレータの中を走る、これがSASE-FELの電子ビームである。この針のように小さい電子ビームの中に、マイクロバンチが形成され、干渉効果によって前方方向に収

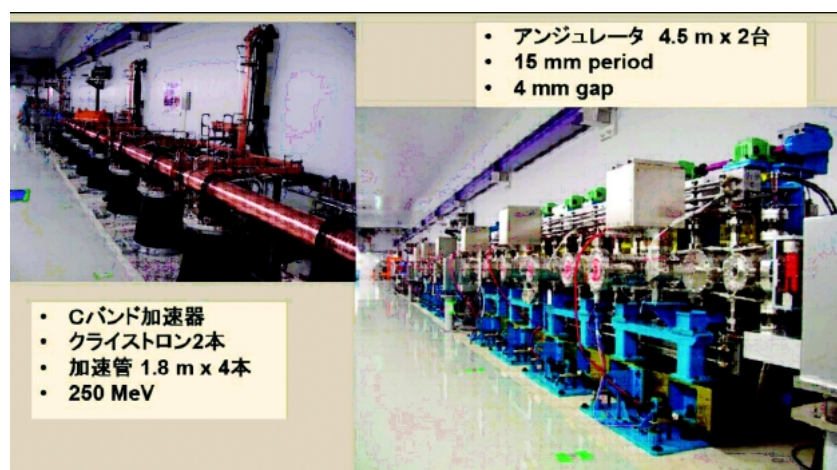


図13 試験加速器，Cバンドとアンジュレータ。

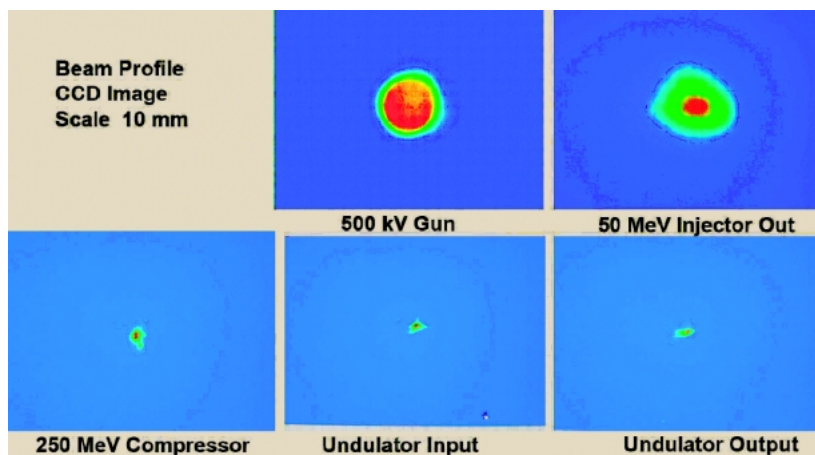


図14 電子ビームのプロファイル.

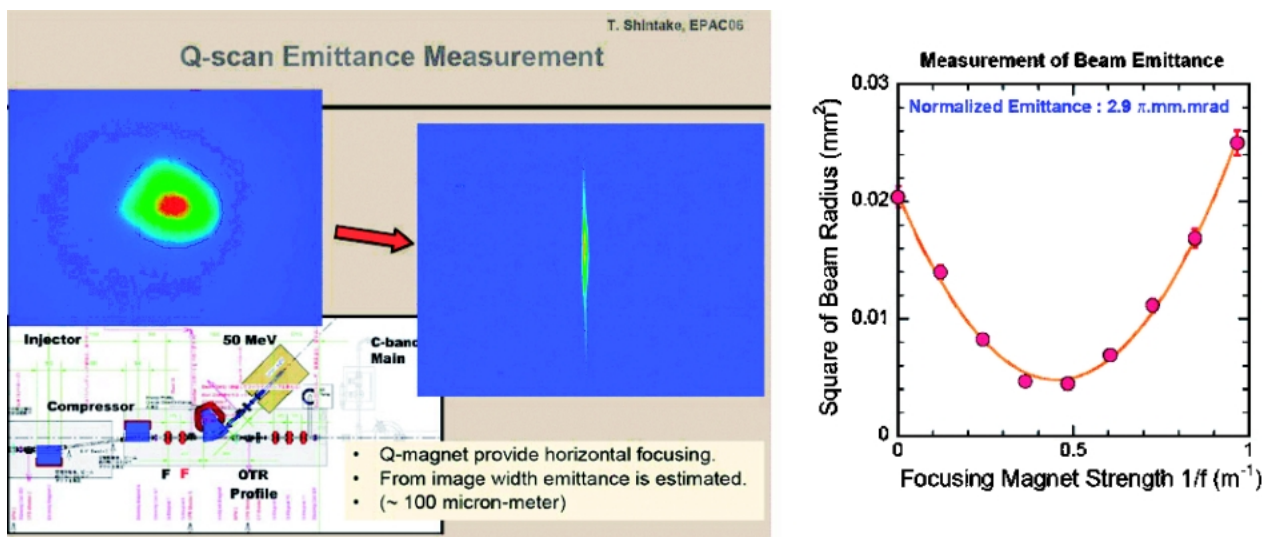


図15 Q スキャン法によって入射器出口でのエミッタンスを測定. $2.9 \pi \text{ mm.mrad}$ が得られた.

束された VUV, 将来は X 線が発生する. 電子ビームの軌道に揺らぎがあっては, 使い物にならないことが理解できよう. いかに X 線 FEL において, 電子ビームの安定性が重要か理解できることと思う.

さて, 入射器出口において, バンチ圧縮後のエミッタンス測定を行った (図 15). 50 MeV ビームダンプ直前の Q 磁石の 1 台の配線を逆転して FF 配置とし, 水平に強収束し, 下流の OTR モニターにて幅を観測. Q 磁石の強度を変化させてエミッタンスを測定し, $2.9 \pi \text{ mm.mrad}$ という値を得た. ビーム電荷 0.25 nC , パルス幅 1 psec . 数値シミュレーションとも良い一致を見た. Q スキャンデータで注目すべきは, プロットのエラーバーである. 測定のばらつきは最も右側の 1 点のエラーバーが見えている程度しかないことである. このように試験加速器の電子ビーム

は安定となっている.

スライスエミッタンスの測定を 50 MeV ダンプへビームを曲げて行い, y 方向, $2 \pi \text{ mm.mrad}$ という数値を得ているが, プロファイルモニターの分解能に制限されている. 実際の値は, $1 \pi \text{ mm.mrad}$ 以下と思われるが測定, 数値計算ともに困難が多い.

7. レーザー増幅実験

下流のアンジュレータのギャップを閉め, 軌道エラーを Cavity-BPM にて修正し, 下流においたスペクトロメータによって, 発光のスペクトルを観測すると, SASE-FEL 増幅によって, スペクトルは非常に狭くなっていることが観測された (図 4). また電流量を変化させると図 16 のように非線形の変化を示し, 0.2 nC 付近から SASE 増幅が開始していることがわ

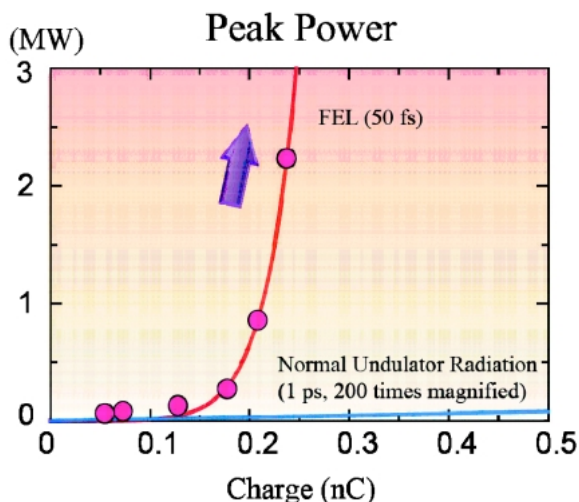


図16 電荷量に対する放射光のピークパワー変化. 自然放射であれば, 下の直線(青線, 200倍に拡大)のようにパワーが電荷量に比例するはずであるが, 明らかに0.2 nC付近から2次曲線に近いレーザー増幅現象が見られる. 2006年7月末までの調整で, 飽和に近いデータが得られている.

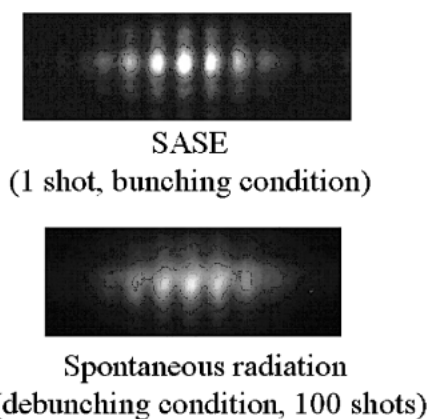


図17 2重スリットによる干渉試験. (スリット幅 100 μm , 間隔 400 μm), SASE 増幅では, 干渉性の高い波が得られている¹²⁾.

かった. この種のデータから SASE ゲインを決定し, ピーク電流とエミッタンスの比(すなわちビーム輝度)を推定するという評価を行っており, $200 \text{ A}/(\pi \text{ mm.mrad})^2$ という値が得られている⁷⁾. 実機 XFEL では入射器の S-バンドバンチャーを L-バンドに変更することにより, 位相空間で約 8 倍の体積を電子バンチに集中でき, 原理的に同じエミッタンスで約 8 倍の電荷を確保できるため, 波長 1 \AA 領域の SASE-FEL に必要なビームを発生できると予想される.

発生した FEL 光の特性測定を矢橋君が行ってお

り, 図 17 のように visibility の高い干渉縞が得られており, 時間空間的に干渉性の高い放射光となっていることが確認された¹²⁾.

8. 実機建設

試験加速器にてレーザー増幅に成功し, そのデータ解析により電子ビーム輝度が目標内であることを確認し, 低エミッタンス電子ビームの発生技術が完成したことを意味しており, XFEL の実現が原理的に可能であることを示している.

しかし, 試験加速器での運転によって, ハードウェアにいくつかの不具合が発見されており, これらについて設計変更, デバック, 運転試験を実施しながら, 実機の建設を行う必要がある.

特に大きな問題とその対策は,

- (1) 空調の温度変動が, レーザー増幅に大きく影響する. 特に, クライスロトンギャラリーの温度が日照による影響と思われるが, 数度の範囲で日変動しており, これがレーザー増幅の最適パラメータを変動させている. 実機の XFEL では, 加速器建屋の中に, もう一つの「クリーントンネル」を作り独自に温度制御し, 建屋内の数度の温度変動を緩和して, クリーントンネル内の温度変動を 1 度以内に抑える計画である. また, 制御ラックなどは水冷密閉型とし, 空気への排熱ゼロを目指す.
- (2) モジュレータ電源の安定性が不足. 現状電圧変動 0.1% 程度まで達成されているが, 実機の XFEL, またあとで述べる seeding 用のバンチ圧縮率を考慮すると, ジッタを 0.01% 以下に抑える事が必要. 現在インバータ電源の高精度化, 高電圧モニターの安定化の開発を行っている.

9. XFEL の将来と Seeding 技術

SASE: Self Amplified Spontaneous Emission の文字があらわすように, SASE-FEL はアンジュレータの自然放射光を種として増幅している. 問題は図 6 (左)に示したように, ランダムな電子位置が“信号源”となっているため, パルスごとに発生する SASE のパワーが変動すること, コヒーレント長がバンチ長よりも短いことが挙げられ, 時間干渉性を用いた応用が制限されることとなる. たとえば, X 線領域のホログラフィーはコヒーレント長が短いために実現できない.

そこで, コヒーレント長を長くする各種の手法が提案されている. まず Euro-XFEL では, アンジュレー

タの途中にバイパスを設けて、いったん SASE 光を引き出し、モノクロメータにて線幅を狭くし、これを再びアンジュレータに戻す方法が提案されている。うまく動作すると Fourier limit が与えるだけコヒーレント長が長くなり理想的であるが、アンジュレータの全長が長くなるという問題がある。

HGHG: High Gain Higher Harmonic Generation が BNL の Li-Hua Yu によって提案され、Soft-X-ray FEL at BESSY Berlin, Fermi Project at ELETTRA Trieste, SPARK Project at Frascati Rome などで検討されている。これは TiSa などの可視光のパルスレーザーをアンジュレータに入れて電子ビームを変調し高調波を発生するというアイデアであり、コヒーレント長は導入した TiSa レーザーに等しくなる。ただし発生できる高調波の次数に制限があり、最短波長は軟 X 線領域であり X 線に届かない。

我々の XFEL では、可視光のレーザーを用いて電子ビームにエネルギー変調を加えた直後にバンチ圧縮して、電子上の変調波長も同様に圧縮することにより、短い波長の Seeding を行うことを検討している。ちなみに 200 nm のレーザー光を導入してバンチを 1000 分の 1 に圧縮すると原理的には 1 Å が得られる。このように極めて高い圧縮率を実現するには、クライストロン電源や RF 位相の安定化が必須であり、その開発を急いでいる。なお、SASE のように大きな増幅を必要としないために、0.1 nC 程度の電荷で運転することとなり、Wakefield, CSR, space charge 等からくる困難性を回避できるものと思われる。現在、理論的な検討を行っている。

さて、XFEL はクライストロンの数で 80 本近い加速器を新規に建設するという、大型プロジェクトです。加速器建設だけでも、大仕事です。皆様方のご理解とご協力をいただけますよう、よろしく願いいたします。

謝辞

これまで SCSS の技術開発、試験加速器の建設に協力いただきましたメーカーの方々に感謝いたします。また昨年、春から秋にかけて不眠不休の闘いで建設に係わっていただいた方々、そして、この方々を背後から支えていただいたご家族の方々にも、ここに深く感謝いたします。

また論文のリストにない事務方、秘書そしてアルバイトの方々の見えない努力に深く感謝いたします。

皆さん、ほんとうにお疲れ様、そして、ありがとうございました。

参考文献

- 1) T. Shintake, "Status of the SCSS Test Accelerator and XFEL Project in Japan", Proc. EPAC '06, Edinburgh, UK 26-30 June 2006.
- 2) H. Kitamura, T. Shintake and T. Ishikawa, "Angstrom FEL Development at SPring-8", JSR16, No. 2, 2003.
- 3) T. Togawa *et al.*, "Emittance Measurement on the CeB₆ Electron Gun for the SPring-8 Compact SASE Source FEL Project", The 3rd Asian Particle Accelerator Conference (APAC2004), March 22-26, 2004, Gyeongju, Korea.
- 4) T. Tanaka, H. Kitamura and T. Shintake, "Misalignment effects of segmented undulator in self-amplified spontaneous emission", Physical Review Special Topics, Accelerator and Beams, Vol. 5, 040701 (2002).
- 5) T. Shintake, *et al.*, "Development of Concrete Floor Grinding Machine", Proc. 2nd Particle Accelerator Society of Japan, July 20-22, 2005, Saga, Japan.
- 6) T. Hara, *et al.*, "Electron Beam Simulations on the SCSS Accelerator", FEL2004, Trieste, Italy.
- 7) H. Tanaka, *et al.*, "Beam Performance of the SCSS Prototype Accelerator", Proc. 3rd Particle Accelerator Society of Japan, Aug 2-4, 2006, Sendai, Japan.
- 8) FEI Beam Technology.
<http://www.feibeamtech.com/>
- 9) Diode tube matching method was suggested by H. Matsumoto.
- 10) T. Kobayashi, *et al.*, "Development of the beam deflector", Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 12-14, 2000, Himeji, Japan.
- 11) K. Togawa, *et al.*, "Beam deflector system to generate a low-emittance short electron bunch", Proc. 3rd Particle Accelerator Society of Japan, Aug 2-4, 2006, Sendai, Japan.
- 12) T. Hashirano, *et al.*, "Development of the 238 MHz Cavity for SASE-FEL", Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan (2005), pp340-342.
- 13) T. Hashirano, *et al.*, "Development of 476 MHz Cavity for SASE-FEL", Proc. 3rd Particle Accelerator Society of Japan, Aug 2-4, 2006, Sendai, Japan.
- 14) T. Inagaki, *et al.*, "Construction and operation of S-band APS-type accelerating structure for SCSS injector", Proc. 3rd Particle Accelerator Society of Japan, Aug 2-4, 2006, Sendai, Japan.
- 15) T. Hara, *et al.*, "Comparison of PARMELA simulation and measured parameters on SCSS prototype accelerator", Proc. 3rd Particle Accelerator Society of Japan, Aug 2-4, 2006, Sendai, Japan.
- 16) Y. Otake, *et al.*, "Sub-pico-second Trigger and Phase Control for SCSS", Proc. 3rd Particle Accelerator Society of Japan, Aug 2-4, 2006, Sendai, Japan.
- 17) M. Yabashi, *et al.*, "VUV diagnostic system for SCSS Prototype Accelerator", Proc. 3rd Particle Accelerator Society of Japan, Aug 2-4, 2006, Sendai, Japan.