

大型加速器と小型加速器

京都大学小型量子放射発生装置 KU-FEL

山寄 鉄夫*

KUFEL—Compact System for Generation of Quantum Radiation

Tetsuo YAMAZAKI*

1. はじめに

小型加速器施設に関して書くようにとの編集委員長から依頼を受けたのは久しく以前だったが、何を書けばよいのか見当がつかないままいたずらに時が過ぎ、締切が間近になってしまった。参考のためにバックナンバーを読んでみると、実に幅広いバリエーションがあることを知った。何しろ源氏物語に匹敵する程長大になる（と予想される）作品もあれば、現状報告のみの記事もある。加速器業界には、幅広いスペクトルを持った方々が多いという、当たり前なことに今更気付いた。一方では、そのような勝手な？ 書き方を許すのは、この学会が、設立されたばかりで、若々しいからであるとも考えられ、この気風が長続きすることを望む次第である。他のカテゴリーの作品を見ると、連載が多いように見受けられるが、近く定年を迎えようとしている私としては、とてもそのようなエネルギーは持ち合わせていない。仕方がないので、施設紹介とエッセイの中間のようなものでごまかすことにする。（もう読む気を失った人が多いであろう。）末尾の参考文献は、代表的なもののみを掲載する。

2. 予算規模のスケーリング

この節では、私の持論である、予算のスケーリングに関して論じてみよう。

私は1998年に電総研（電子技術総合研究所，現産総研，産業技術研究所）から京大に出向した。電総研時代は、つくば移転以来、富増多喜夫氏（現佐賀県地域産業支援センター）を中心に建設した500 MeV電子リニアックと中型・小型蓄積リング群に関与して研究を行っていたが、当時は、高エネルギー加速器研究

機構，理化学研究所，SPring-8等大型加速器を所有している研究所の予算が膨大であることに羨望の眼を向けていた。しかしながら，大学に異動してみると，電総研ではそれでも予算が潤沢であったと思うようになった。これを「貧すれば鈍する」と言うのであろうか。ついでながら，給与も大幅に縮小した。但し，私は1992年頃から京大に併任していたので，その事情を知ったのは，正式に異動するより随分前のことであった。

いずれにせよ，上記の事情は，総括すると図1のようなスキームになるであろう。この図は，これまで口頭発表では数回使用したが，論文発表としては今回が最初である。図を見ると，大型研究所とデパート，中型研究所とスーパーマーケット，大学の研究所と小売商店の対応が，予算規模も含めて見事に表現されているではないか。大学の研究室は，実に小売商店に似て

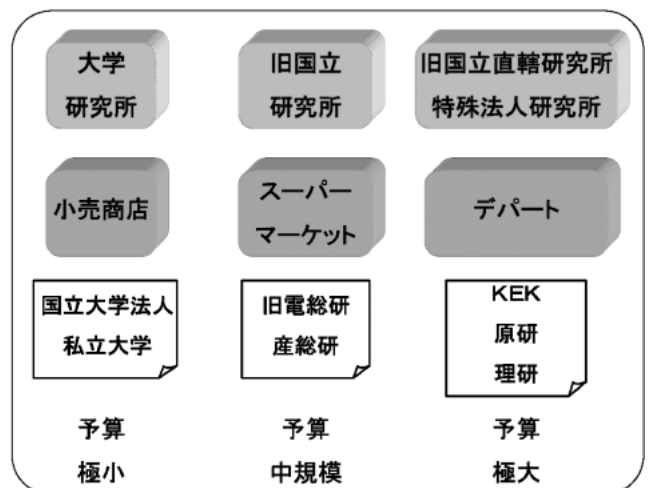


図1 予算規模のスケーリング

* 京都大学エネルギー理工学研究所
Institute of Advanced Energy, Kyoto University
(E-mail: yamazaki@iae.kyoto-u.ac.jp)

いて、多品種を薄利多売で売っていて、各々の小売商店は、ある店では魚を、別の店では野菜を、細々と、しかし精一杯の工夫を凝らしながら商っているのである。私の所属する研究所は、それでも大型施設が多いと、小さな池の中で威張っている。但し、全国大学共同利用研究所等、スーパーマーケット・クラスのものも多いことを付記しておく。なお、**図1**の研究組織名に関しては、最近複雑になっていて、不正確であるが、御容赦願いたい。

最近の国内外の研究予算事情は、3T時代と言うようで、NT, BT, IT と、いわゆる軽小短薄なものが花盛りである。AT (Accelerator Technology) を入れて4Tにしてもよいと思うが、世の中はそうは行かないようである。それでも、お役人は、大型デパートははやらなくてはならないと考えているようである。一方、世の中では、研究分野においても実社会においても、小売商店は消失する傾向にあるようで、国はそれを放置しているとしか思えない。特に、小売商店にしては比較的大物である加速器を扱っている所は、絶えず破産の危機に迫られている。この傾向に危機感を感じながらも、どうしようもなく、もどかしく思う今日此の頃である。

3. KU-FEL 構想

京都大学エネルギー理工学研究所は、旧来は原子エネルギー研究所であったが、1996年に、高品位エネルギーの研究を目標にして改組が行われた。私は前述の併任時代から、吉川潔氏の依頼で自由電子レーザー (free-electron laser, FEL) のシミュレーション等の研究に協力しており、当時から、リニアックを使用したFEL装置の設計にも関与していた。電総研では、TERAS, NIJI-IV といった蓄積リングを使用して、主として自由電子レーザーFELの短波長化に関する研究を行っていたが、比較的小型のリングとはいえ、入射器まで含めると、結構大型の施設であった。FELが簡便に利用されるためには更に小型化を図る必要があり、また、大学では前節に述べたような事情もあり、その場合は高周波電子銃を使用したリニアックFELであろうと考えていた。京大では、前述の吉川氏を中心に、4.5空胴のSバンド熱陰極型高周波電子銃を試作した。

我々は、ここで大まかな構想を練った¹⁾。(1)FELの波長は、現在既存の通常のレーザーがあまり存在しない赤外～遠赤外領域をターゲットにする。小型装置であることを考えると、大幅な短波長化は狙えないし、多少短波長化ができて、出力等を考えると利用

研究に至るまでは遠い。(2)FELで使用した電子を加速管に戻して、経路長を調整することによってエネルギー回収を行う。FEL相互作用では、電子のエネルギーの高々数%しか使用されない。但し、常伝導リニアックでは、壁での熱損失があるため、それ程のエネルギー効率期待できない。ここでは、むしろ、減速された電子をビームダンプに捨てることによって、放射線遮蔽の負担を軽減することを主目的にする。(3)高周波電子銃は、当面熱陰極型にする。光陰極型は、長所が多いが、モードロック・レーザーが必要で、装置が複雑になり、また陰極材料の量子効率と寿命は相容れない。(4)しかし、光陰極型も考慮に入れておき、熱陰極型と高周波を切替えることによって、並列して使用可能にする。これは、短パルスFELを要求するユーザに対応するためであるが、特に大出力化を狙うものではない。(5)将来的には、円偏光、あるいは偏光可変FELを発生する。現時点では、これを必要とするユーザは少ないようであるが、将来は非常に重要になると考えている。(6)2段階FELも考慮する。例えばFEL MOPA (master oscillator power amplifier)方式によって、高出力でありながらバンド幅の狭いFELを発生する。(7)FELコンプトン散乱による高強度準単色軟X線の発生も考慮する。我々のグループには、この分野のエキスパートが多い。(8)当面は、当研究所のエネルギー関係のユーザを想定して建設するが、将来的には、学内外のユーザにも使用してもらえるようにする。

以上を考慮した絵に描いた餅が**図2**である。小売商店にしては欲が深いと、口の悪い人が多いAT業界ではたたかれそうであるが、夢は大きい方が良く、ということで、お許し願いたい。なお、装置名称は暫定的にKU-FELという非常に単純なものにした。説明は不要であろう。

4. KU-FELの過去と現在

ここまでは、非常に楽しく書いてきたが、ここではと夢から覚めて、現実に戻る。最近の状況を**図3**に示す。当面は、ここまでの準備によって、FELの発振を目指す。

高周波電子銃で数MeVまで加速された電子は、dog-legと呼ばれる輸送系を通して加速管に入射される。熱陰極高周波電子銃の場合、電子ビームのエネルギー幅もパルス幅も広いので、通常はアルファ電磁石を使用するが、我々の場合加速エネルギーが高く、非常に大きくなってしまっているので、dog-legの中央部に設置したスリットで低エネルギー電子を切ることにし

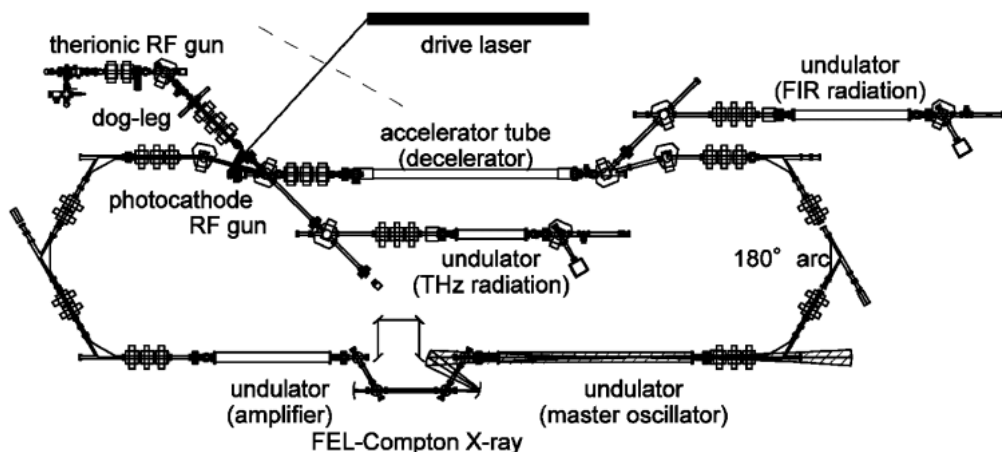


図2 KU-FELの概念図

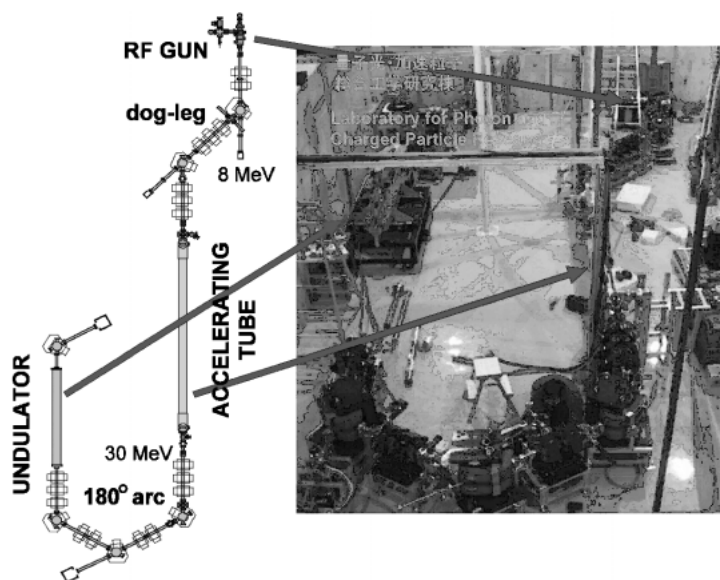


図3 KU-FELの現状

た。

加速器を出た電子ビームは、3台の60°偏向磁石と四重極電磁石によるアクロマティックな輸送系(180°アーク)を通してアンジュレータに入射される。当面はエネルギー回収を行わず、アンジュレータの直後にビームダンプを置く。

我々のグループは、1995年頃から前述の4.5空胴の高周波電子銃の設計・試作を開始した²⁾。これは全長240mm程度であり、高周波源の条件にもよるが、約10MeVまでの電子加速が可能である。この設計は、もしその後の予算が全くつかなかった場合は、この電子銃のみを使用して、長波長のFELを共振させることも可能にする、という作戦によるものであった。10MWのクライストロンとそのためのコン

パクトなモジュレータを購入して、京大化学研究所の井上信氏、野田章氏等の御好意により、同研究所附属原子核科学研究所(現先端ビームナノ化学センター)の加速器施設に設置して、加速実験を開始した。所定のエネルギーと電流の電子ビーム加速には成功したが、クライストロンのマクロパルス幅を6μs程度にしても、4μs以上の幅のビームは得られない。勿論これは熱陰極高周波電子銃につきものの電子逆流現象のためである。そのために陰極が過剰に温められ、電子放出がマクロパルス間に増大して、暴走するような状態になる現象であるが、適当な日本語が無いので、backbombardment現象と呼ばれている。これは、熱陰極高周波電子銃の、最大で恐らく唯一の短所である。これを抑制するために、色々な対策が立てら

れているが、根本的な解決策は見つかっていない。

我々は、この困難な問題を解決する第一段階として、逆流電子を定量的に評価するために、赤外放射温度計で陰極表面の温度を測定することにした。最初の電子銃設計段階で、光陰極にする場合も考慮して、レーザーポートを用意してあったので、それを通して温度を測定して、1 pps の場合のマクロパルス間隔 1 s の間の温度変化を測定することに成功した³⁾。マクロパルス幅の数 μs の中での温度変化を直接測定することは、さすがに不可能であり、それは計算機による粒子ビームシミュレーションと、熱計算から推測している⁴⁾。しかる後、色々な解決策を試みているが、残念ながら我々も根本的解決には至らず、現在も模索中である。但し、クライストロン・モジュレータを制御することによって、多少の改善と見通しが得られている。この方法は、口の悪い AT 業界の面々には邪道と言われるかも知れない。

いずれにせよ、その後段の装置を導入して、更なる加速を進める必要があった。加速管は、産総研に 3 m 加速管の予備が 1 本あったので、それを借用した。加速管用クライストロンは、上記化学研究所の野田氏が、KEK がリニアックを更新した折に不要となった 20 MW のクライストロンを「有効活用」するとのことで、運搬してきたものが 10 本程度あったので、それを更に有効利用させていただくことにした。クライストロン・モジュレータに関しては、多少私の思い入れもあり、少々細工もしたかったので、高周波電子銃用と同じく日新電機㈱に発注した。結果的には、最初に 1 台の大電力高周波源にする方が、費用、使い勝手の両面から考えて、よかったかも知れないが、小売商店としては、予算に関する将来展望が無いので、仕方なかったと考えている。なお、この小売商店では、殆ど全て部品発注をして、組立等の作業は全て職員と学生が手作業で行っている。見学にいらっした方々には、手作りの面白さを味わっていただきたい。

こうして、2003 年に、約 30 MeV までの電子加速を行い、図 3 の最後のビームダンプまでビームを輸送することに成功した。

我々は、偏光可変 FEL を目標にしてはいるが、当面は旧自由電子レーザー研究所 (FELI, 現大阪大学工学研究科自由電子レーザー研究施設 iFEL) と東大のグループの東大原子力施設のリニアックにおける発振実験の折に使用したアンジュレータを借用して使用する予定である。このアンジュレータは Nd-Fe 系のもので、横型である。ただし、これはギャップ間隔が固定であったので、可変になるように改造した。また、

光共振器も、上記 iFEL のものを借用している。

本文中に記した「有効利用」や借用は、AT 業界の多くの方々の御好意によって可能になった。この業界には、物や部品で苦勞して、真の意味での有効利用の重要性を認識している方々が多く、非常に有難く思っている。当方は、その恩恵を受ける方が多いが、共同研究や人材の面で、恩返しをする必要があると考えている。

こうして、図 3 に示した FEL 用部品は、とりあえず揃えた。それらの仕様と、実験的に得られた電子ビーム・パラメータを基に、計算機シミュレーションによって、システムを FEL 発生のために最適化する研究が進行中である⁵⁾。

5. 量子光・加速粒子総合工学実験棟

電子加速までは、前述のように、化学研究所の施設を借用して進めてきたが、化学研究所側にも数台の加速器があり、同時に複数の加速器を運転しない、という申請になっているので、お互いに実験時間が不足するという不便があった。また、化学研究所では新しく小型シンクロトロンを建設する予定があり、その場所がないという大きな問題が生じた。

そこで、我々の装置を移転することを考えて、建物の物色を開始した。計算によれば、約 2 m の厚さの遮蔽壁が必要であるが、そのような物を備えた建物が都合よくあるわけは無い。但し、宇治キャンパスには、古い歴史的な建物で、最近では殆ど有効利用されていない建物が数多くある。その中に、我々が北 2 号棟と呼んでいた、旧「ヘリオトロン核融合研究センター」があり、日本における核融合研究の記念碑的な存在である旧ヘリオトロン核融合研究センターであった。ここでは、ヘリオトロン D, E で先駆的な研究が行われたが、その後別の建物にヘリオトロン J が建設され、北 2 号棟は、そのまま放置されていた。数年前から、我々の研究所の香山晃氏を中心とするグループが、その一部を改装して、2 台の静電加速器 (DuET) を設置して材料関係の実験を開始していた。その付近にヘリオトロン E がまだ安置されている広い部屋が空いていた。クレーンのレールも残っていて、そこに遮蔽壁を追加すれば、我々の装置を置くことは可能であると考えられた。しかしながら、遮蔽壁等の工事費用は、小売商店としては如何ともし難く、大学当局に頼み込んで、何とか営繕費用をつけていただき、何とか工事を完成させることができた。商店会の会長にお願いしたようなものである。我々はこの建物に FEL 装置を移転して、その再構築を進め、現在

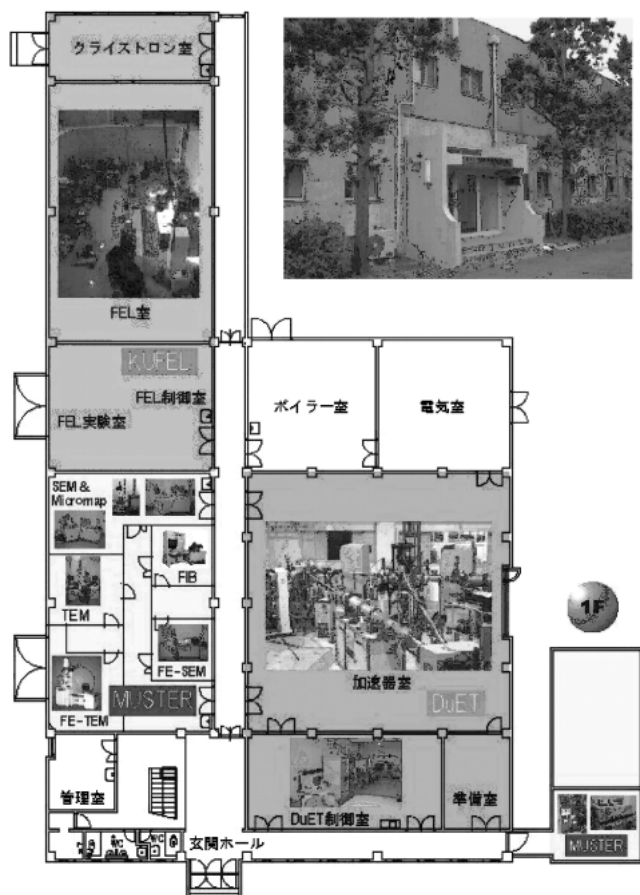


図4 量子光・加速粒子総合工学実験棟

ほぼ完了しようとしている。

一方、上記香山氏のグループは、残りのスペースを更に整備して電子顕微鏡群 (MUSTER) を設置して、FEL 用遮蔽施設とほぼ同時期に完成した。我々はこの建物を「量子光・加速粒子総合工学実験棟」と改称して、2004年12月に開所式を開いた。図4に、同実験棟の1階部分の平面図と玄関付近の写真を示す。

図3に示した写真は、その頃撮影したもので、現在はほぼ設置が完了して、これまで半開であった遮蔽壁ブロックを積上げてある。DuETとMUSTERは、既にスーパーマーケットに位置しており、購入製品が主であることもあって、御殿のように素晴らしい施設になっている。隣にあるKU-FEL施設の方は、前述のように殆ど手作りであり、比較するとスラム街の様相を呈しているが、手作りの楽しさもある。

以上、KU-FELの現状と、新しい建屋に関して述べた。この移転で装置建設の進展は一時ストップしたが、これから加速を再開して、FEL関係の実験を進める予定である。

将来計画に関しては既に2.で述べたが、将来に向

けた研究も進めている。ここでは、ごく簡単に触れるに止める。当面の、現有装置によるFEL発振に向けては、現在の装置パラメータと実験結果から、加速条件やビーム輸送系の最適化のための計算機シミュレーションを行い、FELゲインや出力の計算機シミュレーションも既にある程度の結果が出ている⁵⁾。アンジュレータに関しては、小型で安価な staggered array アンジュレータの研究⁶⁾や、偏光可変アンジュレータも視野に入れて概念設計を行っている。エネルギー回収に関しても、計算機シミュレーションにより、常伝導リニアックの場合に適した方式を探っている⁷⁾。光陰極高周波電子銃に関しては、モデル電子銃を使用した場合のFEL発振までのシミュレーションを進めている。一方、利用研究に関しては、主として研究所内の化学、生体関係の研究グループと協力して、検討を進めている。

6. おわりに

以上、我ながら相当勝手なことを書かせていただいた。FELには、一般に、相対論的電子ビーム、アンジュレータ、そしてSASE (self amplified spontaneous emission) 等以外の多くの場合、光共振器が重要な要素であり、総合的なノウハウが必要である。高品質FELを発生するためには、高品質電子ビームが必須であり、大電流でありながら低エミッタンス、かつエネルギー幅が狭くなくてはいけない、という相反する要求がある。また、加速器は、通常高価であるため、非常に重要な要素である。FELがAT業界で人気があるのは、このような事情にもよる。

FELの種類は、ハード面から見ると、加速器で分類するだけでも、静電加速器、常伝導リニアック、超伝導リニアック、蓄積リング等非常に多く、またSASEのような方式もある。各々の種類には、波長範囲、強度、パルス特性等、それなりの特徴があり、ユーザは各々の目的に照らして最適なものを使用することになる。従って、今後のFELの進展を考える時、一極集中型はなかなか困難であると思われ、主として用途に応じた分散拠点方式をとる必要があるのではなかろうか。デパートの発展も勿論重要であるが、ある程度単能指向の小売商店もまた必要であり、面白いと考えている。

個人的には、これまで蓄積リングと常伝導リニアックによるFELの研究を行い、その間数多くの先輩諸氏から実に多くのものを教えていただいた。また、多数の若い方々からも教わることが多く、とても指導と言えるものをするには無いが、共同研究者として素

晴らしい結果を出していただいている。これらの優秀な若手研究者が、今後ますます活躍して、FEL、加速器の研究・開発を発展させることを期待して、この稿を閉じる。

謝辞

本稿は単名で書かせて頂いたが、京都大学エネルギー理工学研究所におけるリニアック FEL の研究は、主として、大垣英明氏、紀井俊輝氏、増田開氏、吉川潔氏、吉田紘二氏、及び大学院生、学生諸氏との協力によって進めている。また、京大化学研究所、産業技術研究所、日本原子力研究所、大阪大学大学院工学研究科自由電子レーザー研究施設 (iFEL)、日新電機を始めたとする多くの方々の御協力を頂いている。

参考文献

1) 山崎鉄夫, 大垣英明, 紀井俊輝, 増田 開, 留高

- 烈, 山根功士朗, 松村慎也, 高松輝久, 督 寿之, 吉川 潔, Proc. 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto Univ. (2002) 12.
- 2) Y. Yamamoto, T. Inamasu, K. Masuda, M. Sobajima, M. Ohnishi, K. Yoshikawa, H. Toku and E. Tanabe, Nucl. Instr. & Meth., A393 (1997) 443.
- 3) T. Kii, T. Yamaguchi, R. Ikeda, Z. Dong, K. Masuda, H. Toku, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, Nucl. Instr. & Meth., A475 (2001) 588.
- 4) T. Kii, K. Masuda, S. Amazaki, T. Horii, H. Toku, K. Yoshikawa, H. Ohgaki and T. Yamazaki, Nucl. Instr. & Meth., A483 (2002) 310.
- 5) H. Ohgaki, I. Tometaka, K. Yamane, T. Kii, K. Masuda, K. Yoshikawa and T. Yamazaki, Nucl. Instr. & Meth., A507 (2003) 150.
- 6) J. Kitagaki, K. Masuda, Z. Dong, T. Kii, T. Yamazaki and K. Yoshikawa, Nucl. Instr. & Meth., A475 (2001) 613.
- 7) K. Masuda, S. Matsumura, T. Kii, Ohgaki, T. Yamazaki, K. Nagasaki and K. Yoshikawa, Nucl. Instr. & Meth., A507 (2004) 133.