

EUにおける大型計画・大規模研究計画

(大型レーザーによる科学の場合)

高部英明 (大阪大学)

(本文章はブダペストで開催されたレーザー関連の国際会議 31st ECLIM[Web-6]で得た情報を基にしている)

(欧州の通貨単位はユーロであり、記事の中では1億ユーロを約100億円として書いた)

1. はじめに

冷戦の終結後は「米国の一人勝ち」と言われた。しかし、ちょうど9年前の今日、2001年の9.11以来、イラク戦争、アフガン派兵と世界的な威信を失いつつある。リーマンズ・ショックは米国経済がいかに脆弱かを如実に示した。そんな中、米国中心を許さないと言うかのごとく、欧州は「大欧州連合」を目指し、旧共産圏の東欧の国々をEUのメンバーに迎え、EU全体として世界でのヘゲモニー確立を目指している。私は今回、ECLIM国際会議の特別セッションなど通し、自分の研究分野である大型レーザーによる大型研究の世界を目の当たりにした。欧州連合の実情を詳細に報告したい。欧州に学ぶべき事はたくさんある。それは技術でも科学でもなく、100年先の世界の覇権を目指した政治戦略である。その信念にも思える理念を今回の報告や会話を通してヒシヒシと感じた。今日・明日をどう生きるか「コップの中の権力争い」とも思える日本のありように、大変な不安を改めて感じた次第。

EUの科学推進はEU単位のもの、各国が独自に予算化するものとの2つに大別できる。大型レーザーの場合、予算額は100億円単位になる。従って、もし貴方が核物理や宇宙物理などの大型研究と関係しているなら、今後の欧州の大型研究の予算化や推進は、今回のEUレーザー・プロジェクトのあり方がモデルケースになると思う。

レーザーが誕生して今年が50年の節目である。90年ころ広まったCPA(Chirped Pulse Amplification)の方式は当時、米国在住のGerald Mourou(図1左)により発

案され、院生が実験し論文化した。この CPA 法はレーザーの強度を従来の 1 万倍以上にすることを可能とし、小さい研究室でも先端研究が行えることから、CPA を用いた応用研究の分野が大きく広がった。Mourou は、その後、母国フランスに帰り、現在、パリを拠点に欧州連合に大型の超高強度レーザーを複数建設するリーダーとなっている。

このレーザー建設とそれを用いた特色ある科学研究のプロジェクト名は「ELI」(Extreme Light Infrastructure の略 ; 「イーライ」と発音)[Web-1]。5 年ほど前、EU へ 400 億円規模で予算要求した (図 1 右が建屋のイメージ)。研究分野は材料科学でエネルギーではない。その後、欧州連合で議論が繰り返され、計画はまず東欧の 3 カ国に ELI の 1/20 スケールの装置を建設する方針に変わった。3 カ所で技術的な課題などもテストしながら 2012 年かその先に 200PW の ELI 本体(建設費約 400 億円) の建設を判断することとなった。3 カ国の装置が 1/20 の出力、10PW (現在の世界記録は 10PW 以下) だからとって、安くはならない。3 カ国はそれぞれ 250 億円規模で合計 800 億円のプロジェクトである。

これとは別に、豊かな国は国内のプロジェクトとして 10PW 装置建設、改造を行っている。英国、仏国である。欧州全体に広がる大型レーザー建設計画を見ていくと、欧州のしたたかな長期戦略が見えてくる。

2. 東欧 3 カ国の ELI

EU では豊かな国が国力に応じて EU の活動の基金を供出し、EU がその用途を決定する。現在の方針は「東欧のハード、ソフトのインフラの整備による、欧州全体の長期的な力の向上」である。そのやり方が、「さすが欧州」と感心するユニークさである。先走ると、日本で議論されている「道州制」の理念に近い。ドイツは豊かだから多額の金を EU に出す。しかし、EU からはドイツにはあまり戻らない。おもに東欧のインフラ整備に使われている。しかし、これが EU の「ひも付き」ではない。「金は出すが、口は出さない」が EU のやり方のようだ。

今回、3 カ国 (図 2) が決まるまで、たくさんの国が手を上げた。結果としてチェコ、ハンガリー、ルーマニアに決まった。主な研究目的は、チェコ (図-3) はレーザー加速などを主な研究とする。ハンガリーはアト秒 (10^{-18} 秒) という超超短パルスの光源 (レーザー) をキロヘルツの繰り返しで発生させる (図-4)。ルーマニアはレーザーを核物理の研究に応用する (図-5)。ルーマニアの場合、

このレーザー獲得のため核物理研究者を多数含む 100 人近い研究者が議論を重ね、100 ページに及ぶ立派な学術提案書を作成している[Web-2]。それぞれの装置開発や研究は、200PW の ELI 建設への準備も兼ね、4 つが図-6 の様に連携する。ELI 本体の建設地は 2012 年に決定する。学術的には図-7 の様に、幅広い分野を全体でカバーすることを計画している。

EU の予算の出し方がおもしろい。先に書いたように「金は出すが口は出さない」。東欧はインフラ整備が遅れているので、EU から東欧各国へインフラ整備の予算が出る。しかし、そのお金を、道路の整備に使うのか、教育の向上に使うのか、科学のレベル向上のインフラ整備に使うのかは、受け取る東欧の国の判断に任せる。この 3 カ国は科学レベル向上を土建事業より優先して、最先端の大型研究施設を建設しようとしている。日本でも「地方分権」と叫ばれるが、分権がなかなか進まない中、国をまたいで分権がここまで欧州では進んでいる。

3 カ国への予算化は昨年 10 月に EU で決定した。今どうしているか、ハンガリーの場合を紹介しよう。今回の会議の前に、主催者の一人からメールをいただいた。7 名の外国研究者に「木曜日の 4 時からパネルを開催するので出席してほしい」と。私は喜んで返事をした。予定通り、そのパネル（というより、私達はハンガリーの ELI 救済のための知恵袋と呼ばれていることがわかった）に出席した。5 名のハンガリー研究者と、招聘された米国、イタリア、スウェーデン、フランス、イギリス、ドイツ、日本（私）から 1 名ずつのパネリストで議論した。円卓を囲み、まず、ルーマニア ELI の責任者から、現在の建設計画の現状報告と応用研究として考えている案などの説明があった。

ハンガリー ELI はアト秒が特徴なので ELI-Atto と略される。ハンガリーは核物理(Nuclear Physics)から ELI-np。ELI-Atto は希ガスまたは固体表面を用いた、高次高調波発生から X 線領域の高調波を利用する。0.3keV の X 線の波長は $3 \times 10^{-8} \text{cm}$ 。これを光速 $c = 3 \times 10^{10} \text{cm/s}$ で割ると 1 アト秒となる。この光は一波長分の長さしかなく、位相が揃うのでレーザーともいえる。計画ではガスを使った場合は 10kHz で 10mJ の出力。固体表面の場合、1-100Hz で 0.1-1J 出力。10kHz というのはすばらしい高繰り返しであり、統計的にデータ取得ができる。装置の最終案はまだだが、3 つほど案があった。

さて、私を含む 7 人がパネルに招かれたのは、「ELI-Atto を利用して色々な応用分野を呼び込みたいので知恵を貸してほしい」という事である。何故かというところ、これがおもしろい。建設費 250 億円は EU からいただける。ただし、維持費・運転費は自分たちで稼がなければいけない取り決めなのだ。彼らの評価で

はそれは、年額 20-25 億円になりそうである。チェコなども同じ数値を出しているから正しいだろう。もちろん、ハンガリー政府も国内予算で一部支援はするが、全部とは行かない。そこで、ビジネスが求められている。

企業がアト秒の X 線源に興味を示せばありがたい。車産業は X 線源を利用する。しかし、私は「アト秒という短い光源はまだ車産業は必要としない。むしろ、基礎科学で世界的に装置利用費を取るべきだ」と主張。「アト秒は原子の電子の回転時間程度。高温超伝導への相転移などはアト秒の時間で起こるはず。だから、相転移のダイナミックスをアト秒 X 線源で計測すると良い。超伝導は基礎だけでなく送電など企業も喉から手が出るほどほしい。お金を出すはずだ」と。

また、私は「X 線レーザーはいわゆる水の窓(Water window)という波長領域で増幅させ、細胞などを生きたままで観察する道具と言われていた。しかし、実用化されていない。アト秒の X 線源ができればバイオの連中が世界中から利用に来るはずだ。彼らから運転費を取ればいい」など、アドバイスした。フランスとして参加した田島さんは放射光や加速器のコミュニティーを抱き込むことをしきりと薦めていた。

この状況を聞いて感じたことがある。日本も近い将来、大型施設は予算化しても維持費・運転費なしで、それらは競争的資金で利用する研究者が獲得して維持運転していくという形態になるのではないかと思った。現在、菅内閣は一時的とはせよ、「維持費や運転費のような継続予算は削減しろ。3年で30%まで削減する」という方針である。かつて、総合科学技術会議の方針は「すべて科学技術予算は競争的資金にせよ」と政府に勧告した。たぶん、今回の大型計画[Web-3]も本当の意味で仲間（ソサイエティー）に支援していただける状態にしないと、「装置はできたが運転費はない」となりかねない。この意味で、9/2に文科省が発表した大型計画のロードマップ作成候補18件は[Web-3]、利用のための競争的資金を獲得してくれる研究者を国内に多数抱えていないと、装置はあっても実験できず、計画は失敗、となりかねない。

阪大レーザー研の次期計画「エクサ」の話にリンクさせよう。18件には選ばれたが、まさに上のコミュニティー形成がなされていない。同時に、何ができるか、どの分野の人たちが競争的資金で利用したいと潜在的に思っているかの分析と那些人達との話し合いができていない。同時に、ELI-Attoですら、高繰り返しとはいえ10PWで250億円である（ただし、これは建屋も含む）。そして運転維持費が20-25億円（所員の給料も含むが、割合は低いとのこと）。大型計画

では 100 億円以上が大型研究計画、以下が大規模研究計画と分類され、レーザー研は 90 億円で「エクサ」という 1000PW 装置建設を提案している。高繰り返しでない単発レーザーだから安くなる、とはにわかに信じがたい。コスト計算を厳密にやり直して、やはり 100 億を超えるなら、採択へのハードルは高くなっても正直に大型研究に申請し直すべきである。それがロードマップ作成に伴う「成熟度の向上」[Web-4]ということだ。

3. 英国、仏国、ドイツの大型装置

英国には私達も利用している VULCAN レーザーがラザフォード研究所にある。現在、超高強度部は 1PW で成果を出している。これを 10PW に改良する計画が報告された (図-8)。すでに予算化もされている。これは英国の装置だが、私達も共同利用の審査で採択されれば利用できる。現在の建屋を拡張し、モダンな建屋に改良、増力のための装置のスペースを確保する。10PW は 300J/30fs で 15 分ごとに繰り返し可能。2014~15 年完成を目指す (図-9)。

仏国の国内プログラムはきわめてユニークだ。私達はパリ郊外のエコール・ポリテクニックの Michel Konig のグループと共同研究している。彼の研究所は LULI という。ところが、数年前、仏国の中で CNRS という巨大研究所群の中の 10 ほどのレーザー関連の研究所が連携して Institut de Lumière Extrême (ILE)、CNRS – Ecole Polytechnique –ENSTA-Paris という阪大と同じ略称の ILE という研究機関を作った。

その中の LULI, Institute of Optics, LOA という有名な 3 つの研究所がそれぞれの既存の装置も持ち寄り 150J/15fs の 10PW レーザー装置を建設する (図-10)。装置の名前は APPLON。繰り返しは 1 分に 1 ショット。2012~13 年に完成予定。EU という国の間の連携だけでなく、国内の競争相手でもある研究所が協力し合って自前の 10PW 装置を建設する。すばらしい発想だと感心した。日本も J-PARC のように異なる機関が協力して大型装置を建設した例はあるが、今後、この傾向は我が国でも特に大型計画に関しては確実に求められると思う。

この ILE という略称。阪大レーザー研は 30 年以上使っている。が、商標登録はしていないし、できないだろう。人から教えていただいたが、紛らわしいが ILE は「Ile-de-France」の ILE で「島」を意味し、「仏の島 (シテ島)」つまり、世界の中心を意味する。何ともにくい盗作だ。昨年、12 月に「台湾も ELI-Taiwan の 10PW 装置を獲得したい」と友人の国立台湾大学 Pisin Chen に会ったとき聞いた。

て、大変喜んだ。私は別件で台北にいたのだが、Pisin が Gerald Mourou を招待して Workshop をしている、と聞き、参加した（講演も急遽、依頼された）。その時、Gerald が ILE といっていたので「えー、ILE。同じ名前じゃん。何それ」と聞いたのが知った始まり。この勢いだと、ILE は国際的には仏のレーザー研究所になりそうだ。

台北では、私も一緒に科学大臣詣でに参加した。Pisin が予算化のために Mourou をつれて台湾の NSC(National Science Council:科学省に相当)の大臣との面談のアポを取っていた。図-11 はそのときの写真。左から Mourou, 大臣、Pisin。大臣は宇宙空間プラズマ物理の研究者で前国立中央大学学長。松本紘・京大総長はじめ私と共通の知り合いがたくさんいた。同時に、NSC 側の担当部長が国立台湾大学から出向している旧知の Ching-Ray Chang であった。彼には、とても魅力的なレーザー装置だから是非、何とかしてくれと何度も頼んでおいた。3月に筑波で彼に再会した時「どうだ、ELI-Taiwan、予算化できそうか？」と顔を見るなり聞いたら「なかなか。高額だから議論があまり進んでいない」とのこと。これができたら、Pisin と協定結んで利用したいという下心もあり、何とか Pisin と Ching-Ray にがんばってもらおう。

ドイツはミュンヘンの MPQ で 5J/5fs, 10Hz の装置を 2010~11 完成を目指して建設中である。同じく、ミュンヘンの LMU (ルートビッヒ・マクシミリアン大学：通称、ミュンヘン大学) には DPSSL のレーザーがある (図-11)。イタリアにも独自のレーザーがあるが割愛する。

4. ELI、そして、まとめ

ELI 本体は 400 億円。3 カ国のレーザーで技術課題など克服して建設するので、3 カ国が 10PW で ELI はその 20 本分の 200PW だが、400 億円で建設できると試算しているようだ。G. Mourou のカリスマ性は健在で、田島さん（本拠はミュンヘン大学）をブレインにして学術的なシナリオを用意しながら計画を着実に推進しているように見える。レーザー科学には図-13 に示したように 2 つの方向がある。その右の極限を追求するのが ELI であり、阪大の EXA である。私達はレーザー技術の発展により、光子という boson を超高密度に真空中に集めることにより、素粒子の集団現象など新しい基礎科学を開拓できる可能性がある。これは、fermion を加速器で高エネルギーにして素粒子を研究する素過程の世界と異なり相補的な研究手段である。互いに鼓舞しながら推進すべ研究領域である。

Mourou は講演で図-14 を示しながら「ELI のミッションは原子から真空の物理

まで研究することである」と主張している。図-15には、横軸にレーザーの強度(Watt)を取り (Peta: 10^{15} , Exa: 10^{18})、縦軸のレーザーのパルス幅(秒)(fs= 10^{-15} , as= 10^{-18})を取ったユニークな図を示す。図-16には ELI が目指そうとしているレーザーのパルス波形を、現在実現している 1PW のそれと比較した様子を示す。いかに大胆な飛躍を目指しているかが視覚的にわかる。

ELIによる超高強度場の物理研究は緒に就いたところである。田島さんを筆頭に、非線型 QED や真空の破壊による素粒子物理などが提案されている。これをさらに定量化し、超高強度レーザーの可能性を広く知ってもらうには、原子核・素粒子の分野の研究者の知恵を借りながら、加速器と相補的な新研究分野が開けないか、レーザーでしか実験できないような素粒子の集団現象の研究は何を解明してくれるのかなど、分野横断のかまびすしい議論が必要である。特に、頭脳が柔軟な若手がこの分野を切り開いていける環境を整備する必要がある。

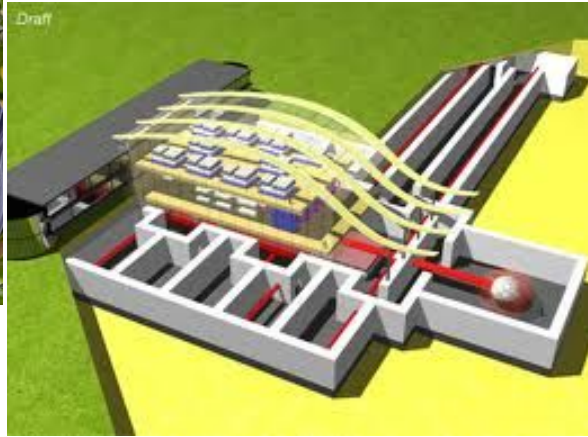
この会議に参加して思ったことがある。レーザーが Maiman により実現されたのはちょうど 50 年前である。そのときのレーザーは図-18にあるように鉛筆ほどのものであった。それが、半世紀を経て、大出力では米国リバモア研の National Ignition Facility(NIF)[web-5]や超高強度レーザーでは ELI という、巨大で強いレーザーによる研究が開始している。だれが 50 年前に今日のレーザー技術の発展とそれによる斬新な科学研究を想像することができたであろうか。ブダペストで感じていることは「私達は人類のすさまじいまでの技術力の進歩とそれを支える新しいアイデアや科学の出現を期待して良いのではないか」という信念にも近い確信である。己の頭脳を停滞させることなく夢と希望を持って、未開の分野に挑戦しようと思った次第である。50 年先にはレーザー技術は確実に想像を絶する基礎科学の牽引車になっている。私達は 50 年先の孫達のための研究環境整備を行う使命を帯びている。

Web-site

- [1] ELI HP: <http://www.extreme-light-infrastructure.eu/>
- [2] ELI-Np 提案書 http://www.eli-np.ro/documents/Scientific_Case.pdf
- [3] 文科省大型計画 http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/22/09/1297382.htm
- [4] 大型計画とロードマップ <http://rdecw.nifs.ac.jp/frontier/2010/2010files/itoh.ppt>
- [5] NIF HP: <https://lasers.llnl.gov/>
- [6] ECLIM HP: <http://top-congress.hu/2010/eclim/>



G. Mourou



200PW ELI facility

☒-1

2010/9/11

1

Site selection: decision on Oct. 1, 2009



☒-2
2010/9/11

2

图-3

ELI Beamlines Facility – Prague, CZ



图-4

ELI Hungary



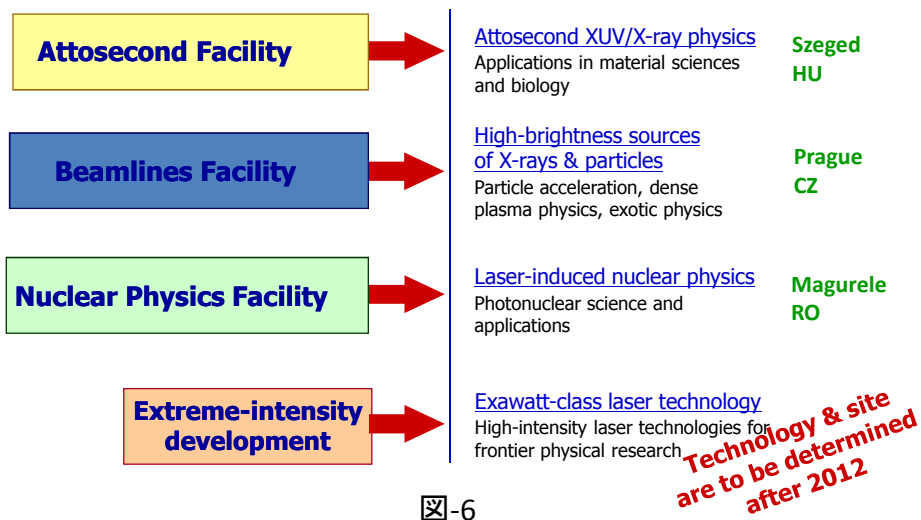
Hungary ELI Facility is Constructed in a high-tech city in Hungary

☒-5

ELI Nuclear Physics Romania



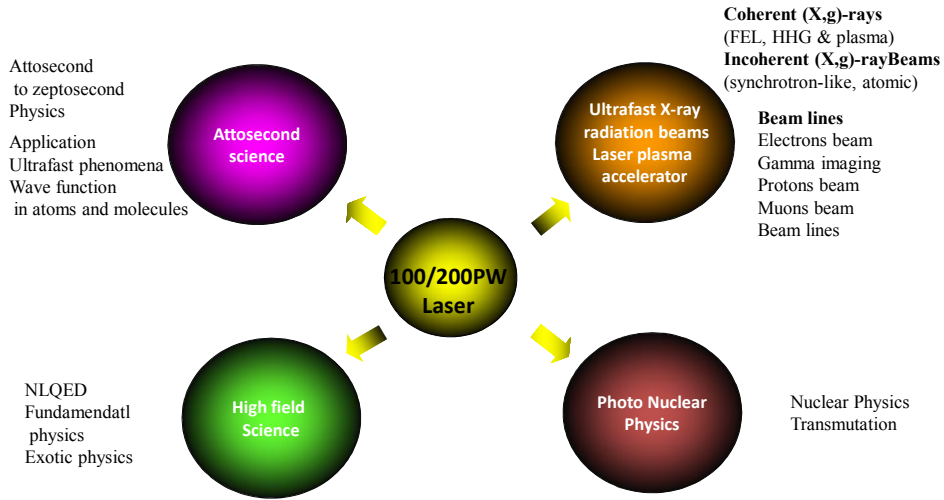
Research Facilities of ELI



☒-6

Scientific "pillars" of ELI

☒-7



2010/9/11

Takabe-Report on Lasers in EU

7

Vulcan 10 PW Facility

VULCAN 10PW project, CLF, Chilton, UK
10PW: 300J, 30fs, 1 shot/15min



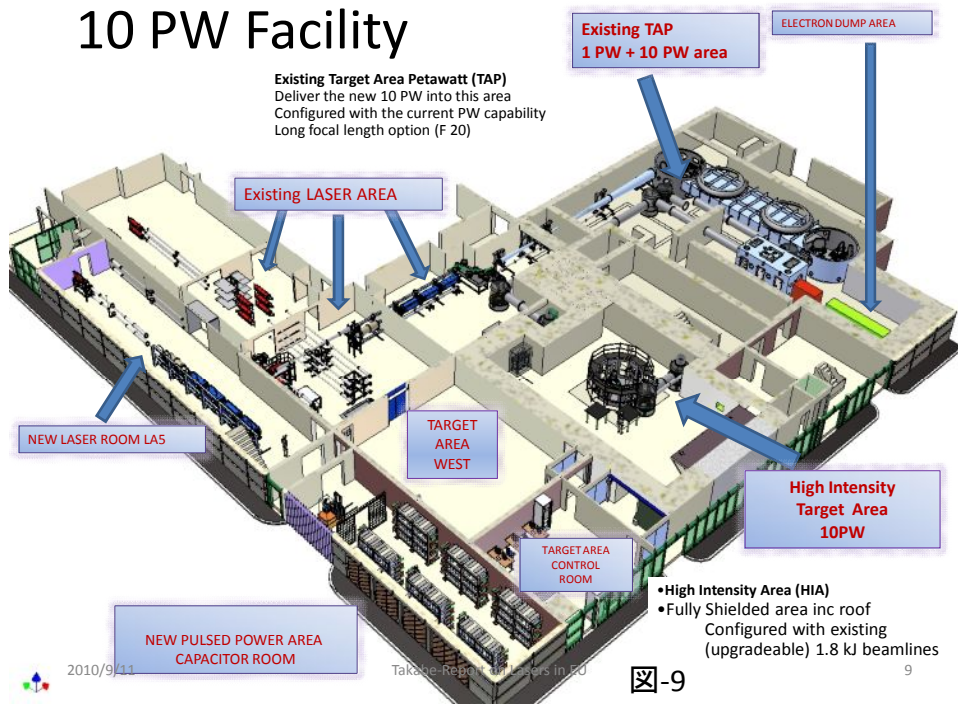
2010/9/11

Takabe-Report on Lasers in EU

☒-8

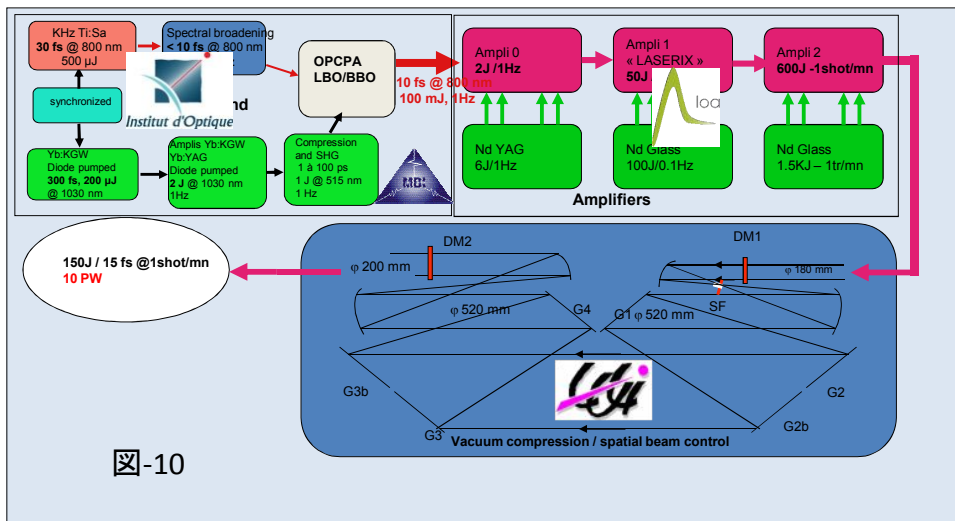
8

10 PW Facility



APOLLON, a single beamline 10 PW laser

APOLLON, as a(n) (inter)national collaboration





**APOLLON – Possible (final)
location**

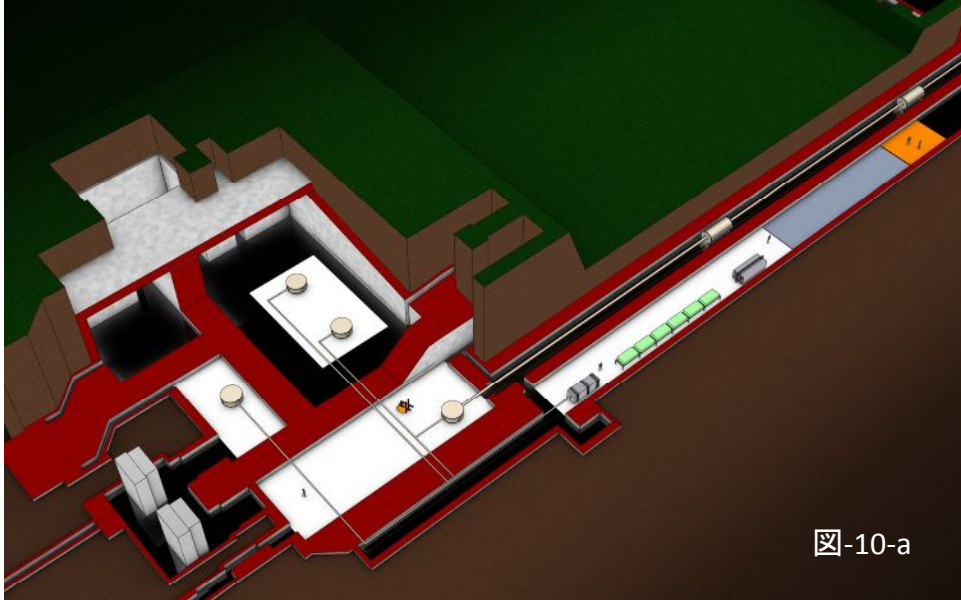
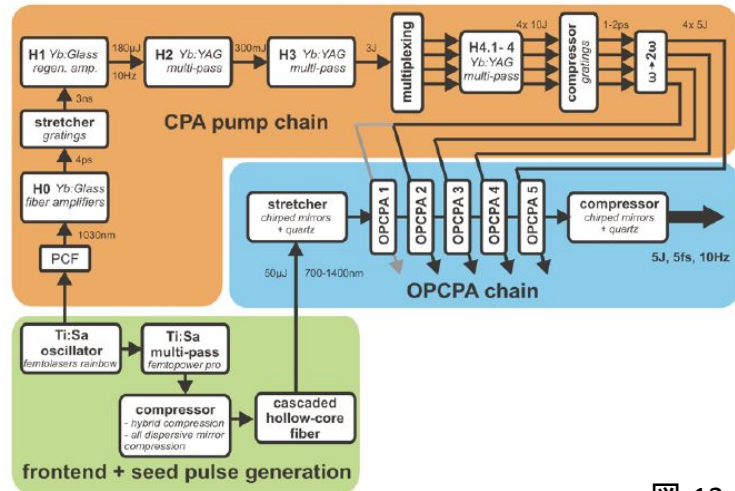


图-10-a



2010/9/11

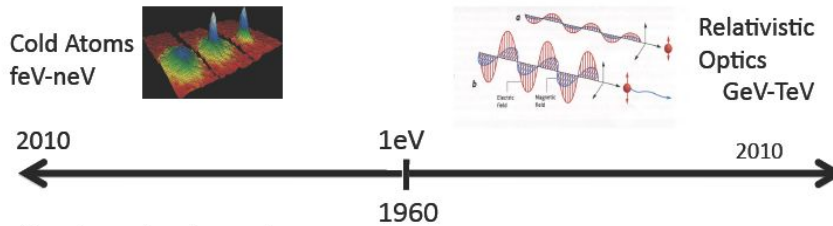
图-11 12



☒-12



Laser Physics



- Atomic, molecular and optical (AMO) Physics**
- Atom Optics
 - Quantum Optics
 - Metrology
 - Condensed-Matter Physics
 - Quantum Information Science (Quantum Computer)
 - Chemistry

- Relativistic/ultraRelativistic Optics**
- Plasma physics
- Accelerator physics
 - Nuclear Physics
 - Cosmology
 - NL QED
 - General Relativity
 - Extradimension physics

☒-13

Mission

“Study matter from atom to vacuum”

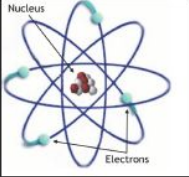
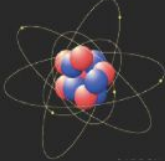
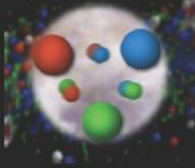






図-14

2010/9/11

15

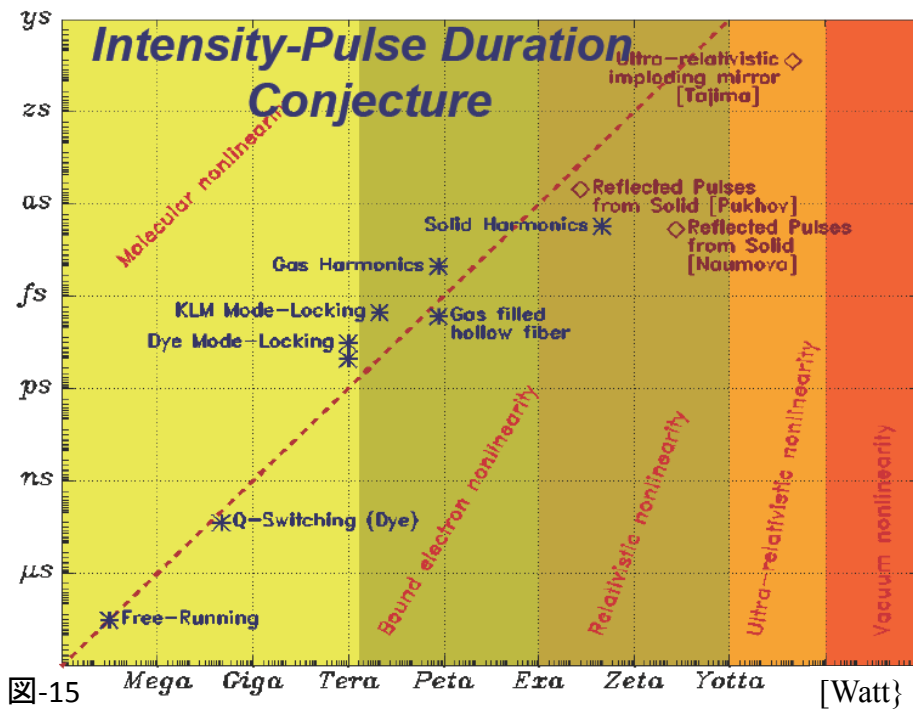
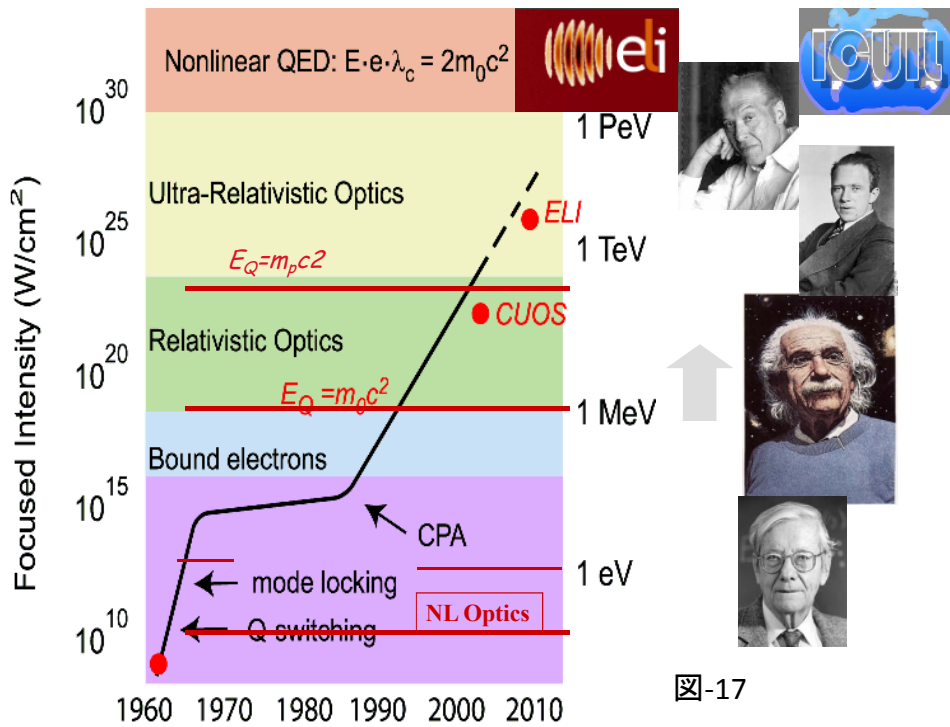
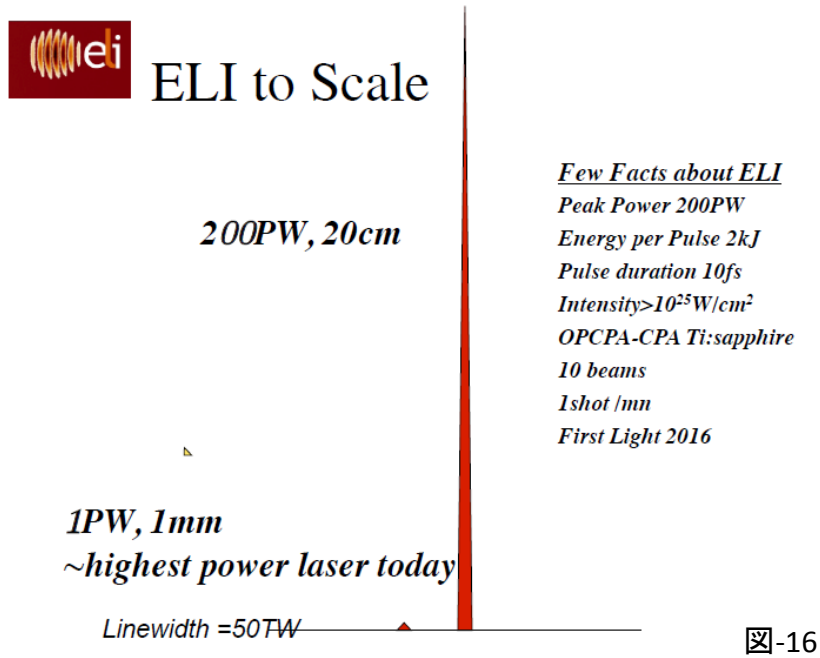


図-15



Fifty Years from the Birth of Laser

Maiman (1960)



☒-18

Ruby Laser

