

ERL 計画で SAD を
生かすために

放射光源の歴史

1944～1945 年くらいから、ちらほらと放射光に関する論文が登場する。当初の関心は、ビーム周回中のエネルギーロス。(の観測も、その証明が目的と思われる。)

1948 年、最初の放射光観測。アメリカ GM 社 70MeV シンクロトロン。

1963 年、最初の放射光利用実験。アメリカ規格標準局 180MeV シンクロトロン。

1970 年代 : 第1世代 : 素粒子実験用のリングで合間を縫って実験。

1975 年、最初の放射光専用リング。旧田無市、旧東大核研の SOR-RING。

1980 年代 : 第2世代 : 放射光専用リング。大電流の長時間安定蓄積。

1983 年、PFリング運転開始。

1990 年代 : 第3世代 : 挿入光源の利用の本格化

1993 年、最初の第3世代放射光源運転開始。アメリカ ALS。

2000 年代 : 第4世代 : 放射光の短パルス化、コヒーレンス化

2000 年代、ERL、FEL 計画、試験器の稼働など

第1世代放射光源の特徴

- ・ 試行錯誤で加速器自体を研究対象としていた時代。長時間、大電流の安定運転は技術的に無理。ビームを蓄積、加速して、衝突させるまで(数秒～数分?)の運転がやっとであった。
- ・ ラティスは FODO セル。衝突点、入射、RF の為に直線部、隙間が必要。Missing Bend (Bを抜いて直線部とする)が一般的。

第2世代放射光源(実は数はそれほど多くない!)の特徴

- ・ FODO セル。DBA や TBA である場合もある。
- ・ 大電流、長時間安定性に気をつけて作ってある。(真空系や診断系など、一見すると本質的でないとわれがちな要素にちゃんとお金をかけている。)
- ・ 直線部、隙間に挿入光源を入れてある。ただし、必ずしも挿入光源が主体ではなかった。
- ・ エミッタンスがそれほど小さくない。

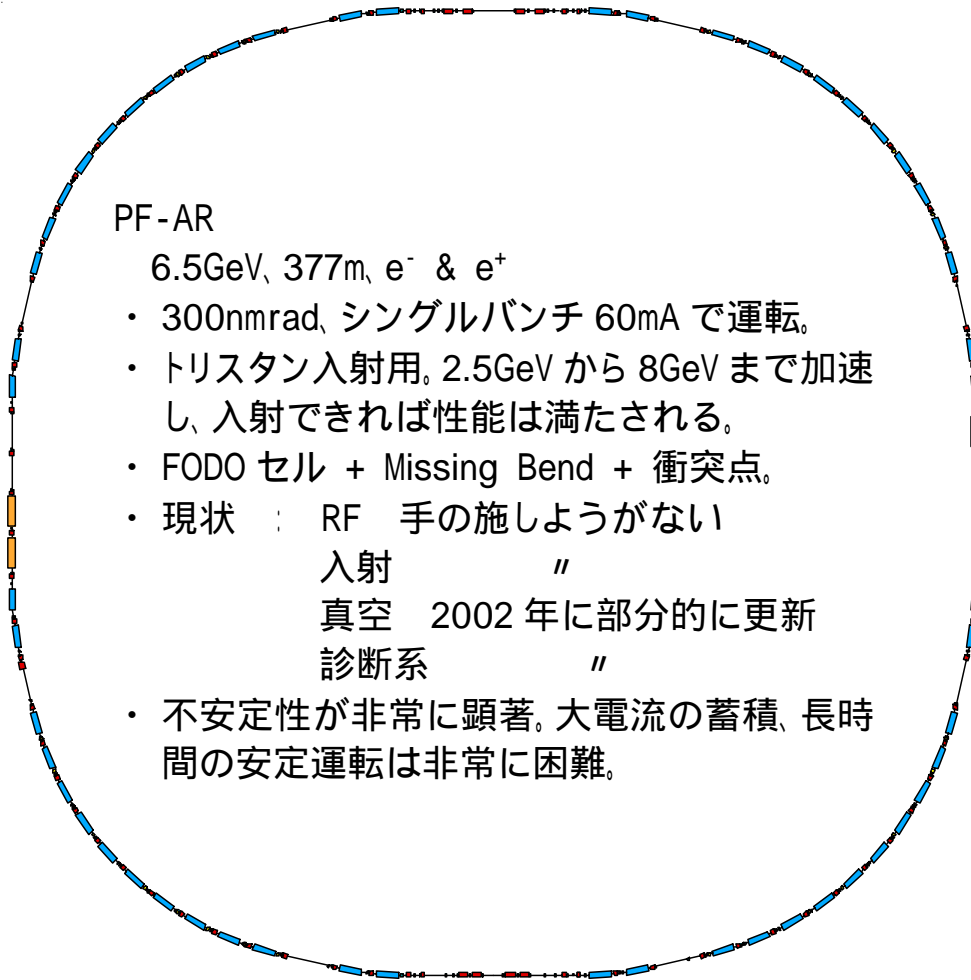
第3世代放射光源の特徴(この時代に最も多くの放射光源が作られた。ある意味、完成型?)

- ・ DBA、TBA(チャスマングリーン)のセル構造。
- ・ 低エミッタンス。ちょっとの誤差が大きな影響力を持つので、全ての要素がきちんと作られていることが必要。
- ・ 挿入光源が一般的かつ主体。

余談 : 過去と現代で、特に改善された技術(PF-AR と PF の違い.....?)

- ・ **RF** が劇的に改善。高次モード減衰型の採用で、不安定性が抑えられる。
- ・ 不安定性抑制に伴い、**入射**も劇的に改善。セプトムやキッカーの製造技術も向上。ちゃんと安定な(毎回再現する)バンプが作れるようになる。(不安定性でビームがでかくならないので、)中心軌道をセプトムに近づけられる。入射効率が上がり、大電流の蓄積が可能になる。
- ・ ダクト製造、排気などの**真空技術**の向上。良い真空度で運転ができる様になり、真空悪いことによる(原因不明な?)不安定性が駆逐された。ダクト凹凸による不安定性、発熱、ビーム品質の悪化の抑制。
- ・ **ビーム診断系**の向上。そもそも「何が起きているか」分かるようになったことが進歩に大きく貢献している。非常に大事。最初の頃はモニタがなくて、COD すら測れなかった。最近では、既存の放射光源では測れないものはないというくらい色々測れる。
- ・ そもそも最初はなかった**挿入光源**の発展。磁石配列がちゃんと作れるようになり、安定性を損ねなくなった。ビームが安定かつサイズも小さくなることで、ギャップ(ビームが通る隙間)を狭めることができた。超伝導アンジュレータ(連続スペクトル)を使わずに、低エネルギーの加速器で高エネルギーのアンジュレータ光(線スペクトルの強い光)が出せるようになった。
- ・ 建物や水配管などインフラ技術。建物がしっかり作っていないと加速器全体が振動したり歪んだりする。(PFの唯一の弱点か。)
- ・ **電磁石**だけは根本的に何も進歩してない気がする.....電源リップルが減った? 鉄芯製作精度が上がった??

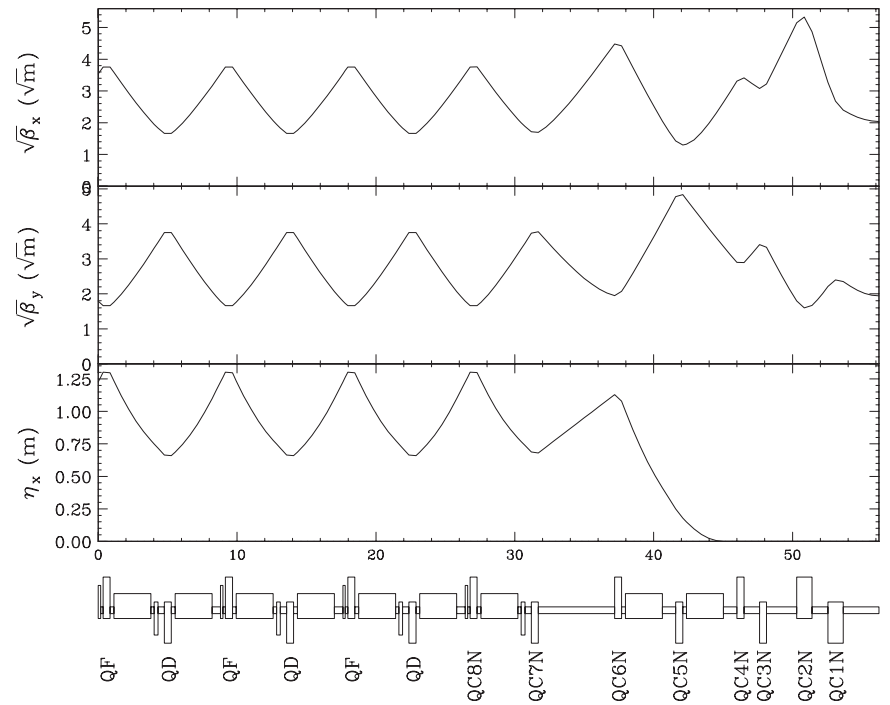
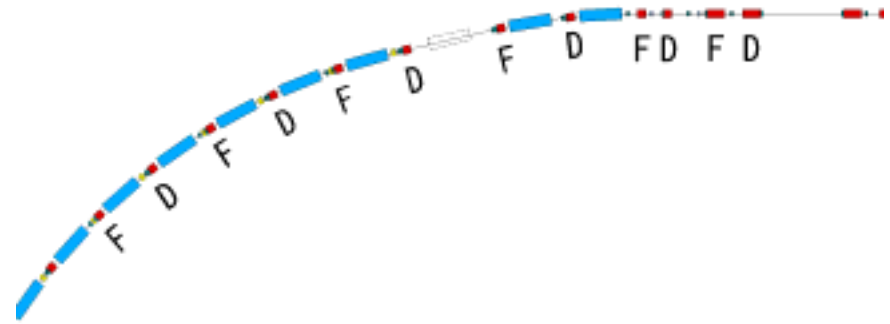
例：第1世代



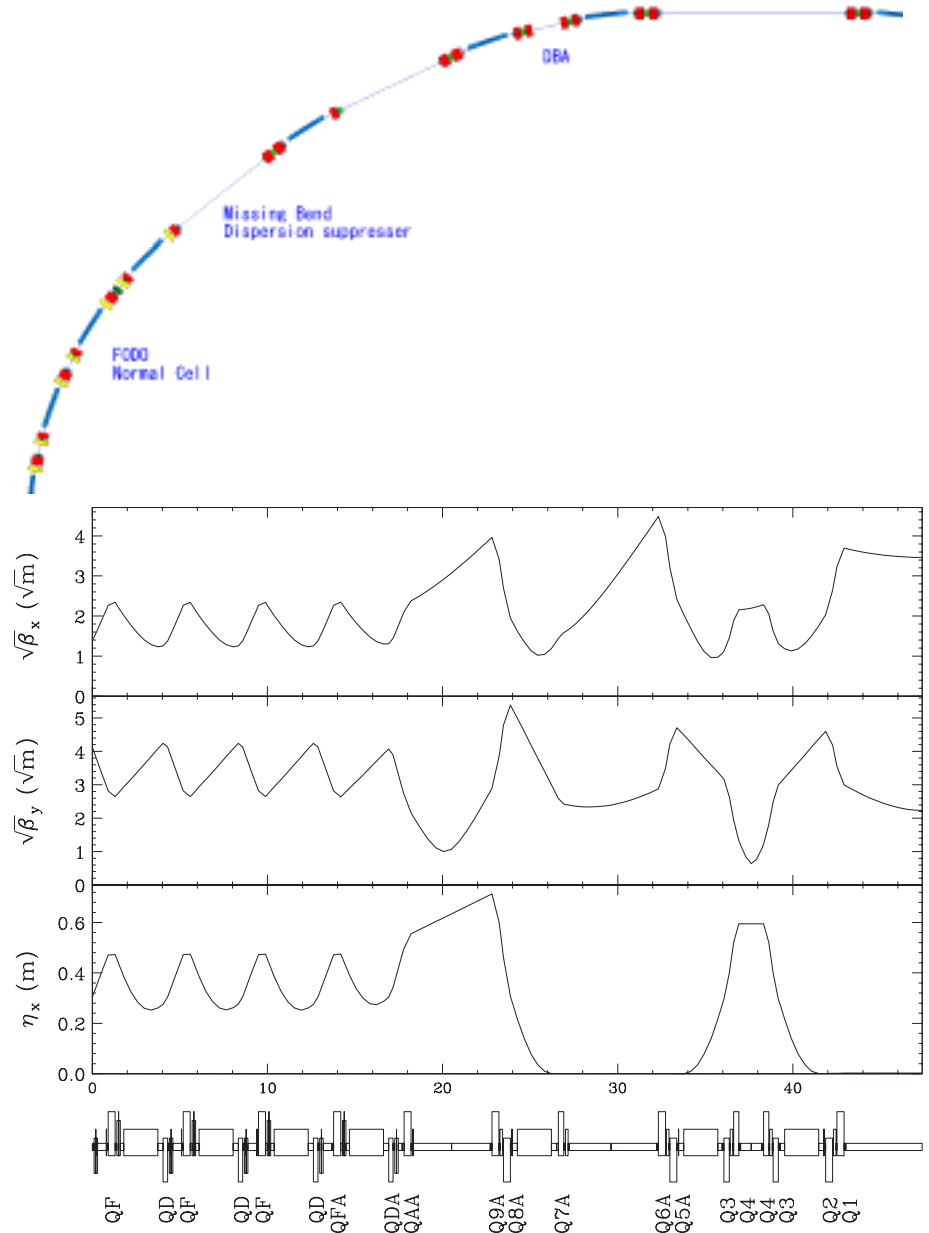
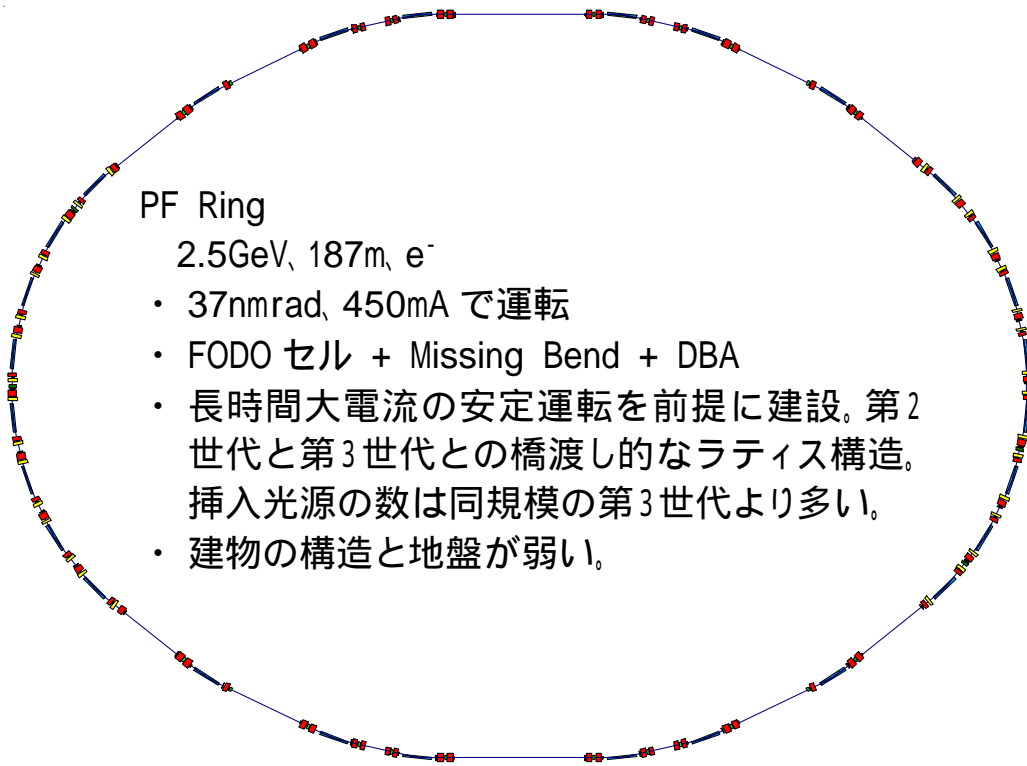
PF-AR

6.5GeV, 377m, e^- & e^+

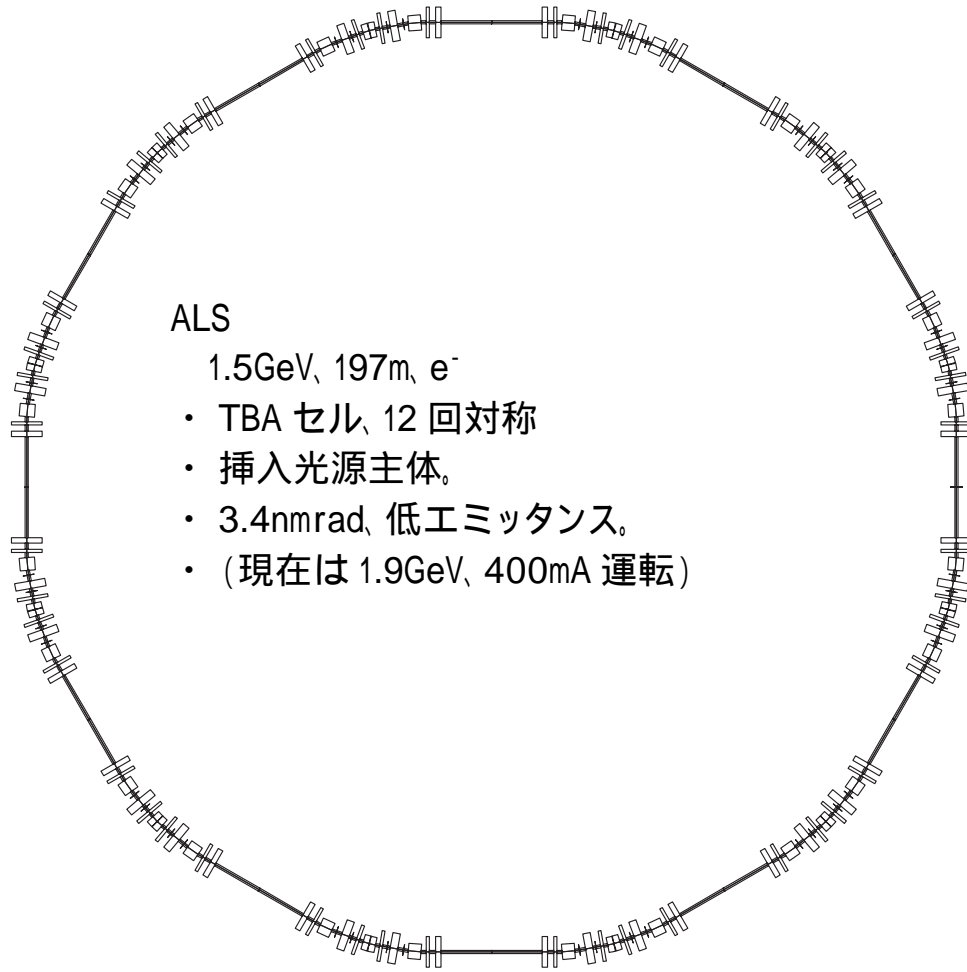
- 300nmrad, シングルバンチ 60mA で運転。
- トリスタン入射用。2.5GeV から 8GeV まで加速し、入射できれば性能は満たされる。
- FODO セル + Missing Bend + 衝突点。
- 現状：RF 手の施しようがない
 入射 "
 真空 2002 年に部分的に更新
 診断系 "
 • 不安定性が非常に顕著。大電流の蓄積、長時間の安定運転は非常に困難。



例：第2世代

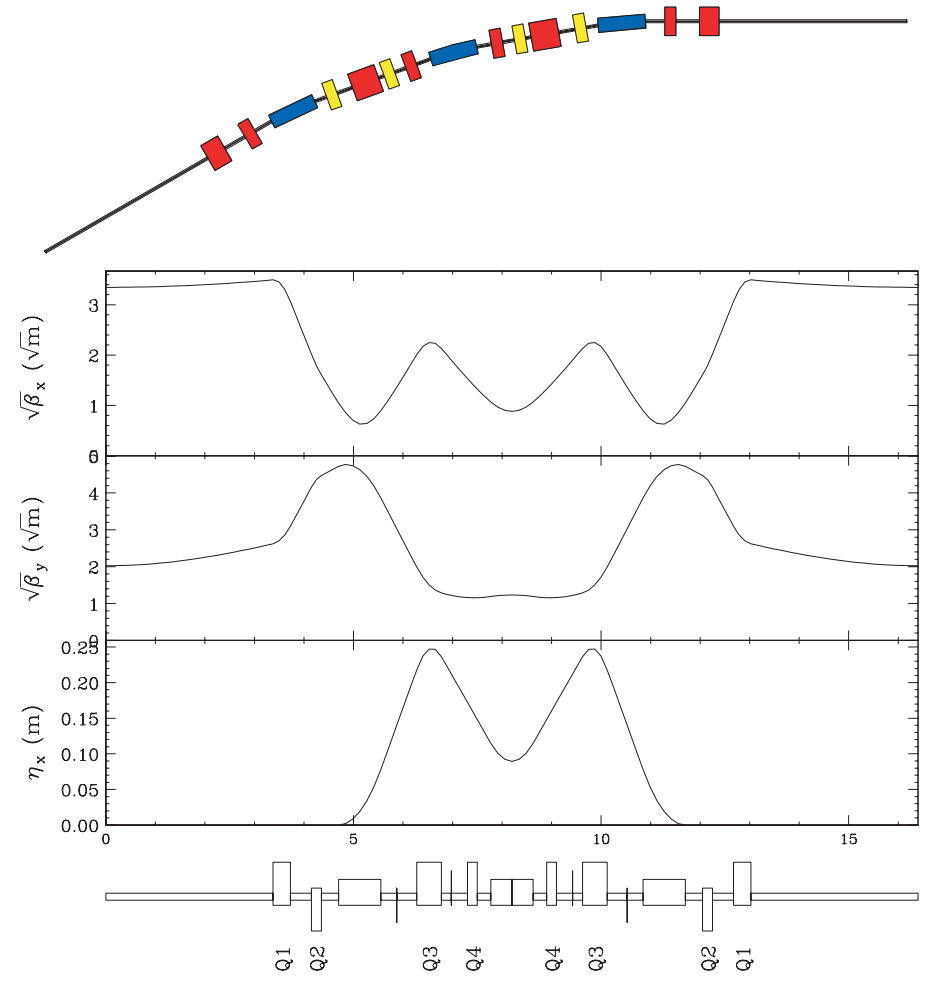


例：第3世代

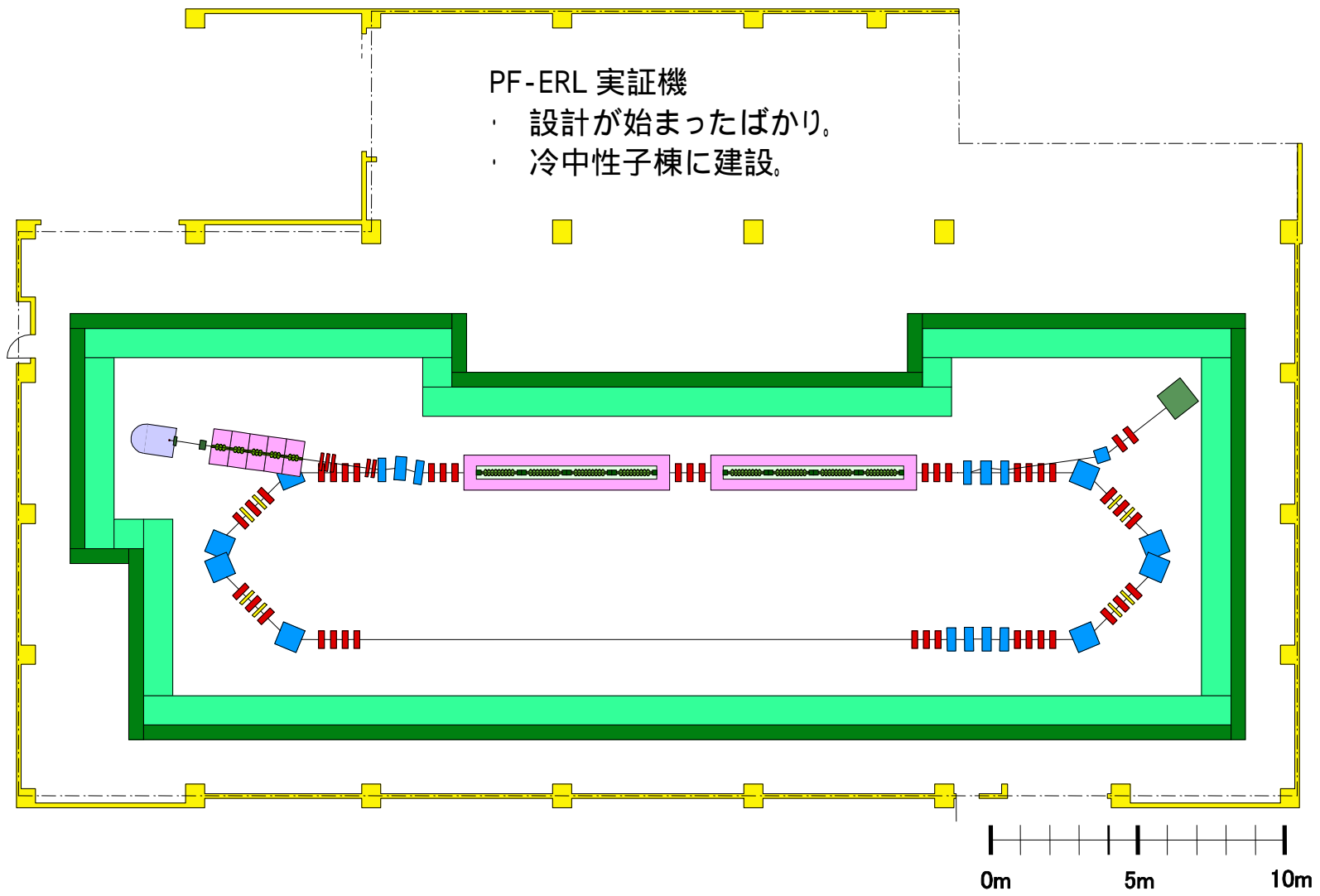


ALS

- 1.5GeV, 197m, e⁻
- TBA セル、12 回対称
- 挿入光源主体。
- 3.4nmrad、低エミッタンス。
- (現在は 1.9GeV、400mA 運転)



例：第4世代.



リング設計にどんな計算が必要か？

第1世代

- ・ 手計算の時代？
- ・ 線形オプティクスと、ダイナミックアパーチャ。大抵の場合、ダイナミックアパーチャが狭いということはほとんどない。本当に初期は色収差補正すらしていなかった時代もある。
- ・ 誤差もでかい(mmに達する)が、影響が弱いので大丈夫。大船に乗った気持ちでよい？
- ・ 構造共鳴だけ避ければ、凝った計算はいらない？

第2世代

- ・ 大型計算機(冷蔵庫より大きい)が、今のパソコンに劣る)の時代？ 家を買える値段。ちょっと変えては何度も気軽に計算、というわけにはいかない。
- ・ 線形オプティクス、ダイナミックアパーチャ、仕上げに非線形要素の影響。
- ・ チューンサーベイが必要。どこでも回るといわけにはいかず、ダイナミックアパーチャの広い点を探すことが必要。解析的な予測と最適化が可能(な範囲で設計することになる)。
- ・ 誤差はそこそこ(~100 ミクロン)。影響もそこそこ。大きく失敗すると危ういが、ちゃんとやれば大丈夫。
- ・ 事前計算よりは現場調整の時代？

第3世代

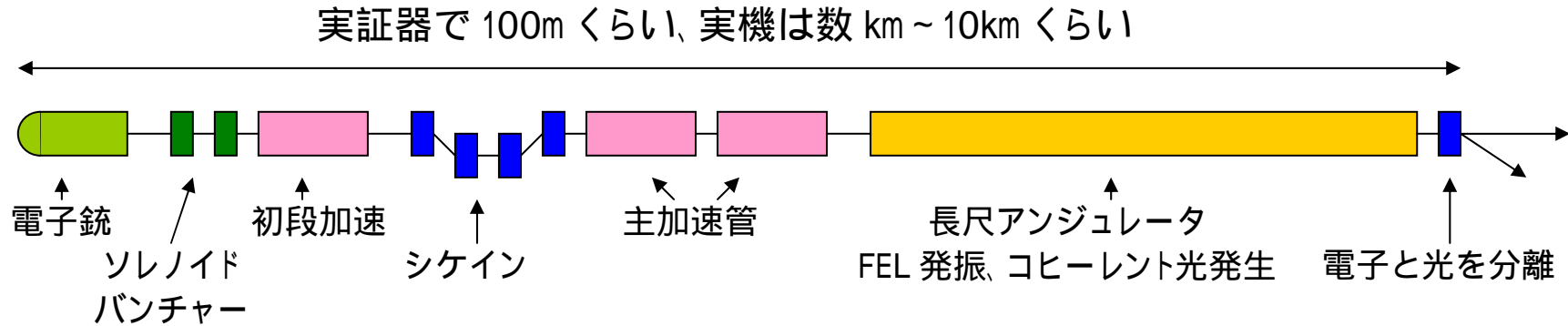
- ・ ワークステーションの時代。ちょっと古いパソコン並みで、車の値段。現在は、4～5万のパソコンが1台あれば、第3世代光源のオプティクスは設計できる。
- ・ 線形オプティクス、ダイナミックアパーチャ、非線形要素の最適化。
- ・ ただチューンサーベイしても回るところは見つからない場合が多い。6極など、非線形要素を含む最適化が必要。解析的にはいかない。最適化にはトラッキングが必要。
- ・ 最先端技術を駆使して、誤差は小さく。小さい誤差でも影響は大きい。かなりちゃんとやらないと危うい。
- ・ 周到的な事前計算、現場はその再現の時代(にかなり近づいたと言えよう。逆に、そうでないと周囲から責められる?)
- ・ SAD を駆使してシミュレーション可能。ビームダイナミクスに関しては SAD が最高の環境。

第4世代へ

第4世代放射光源

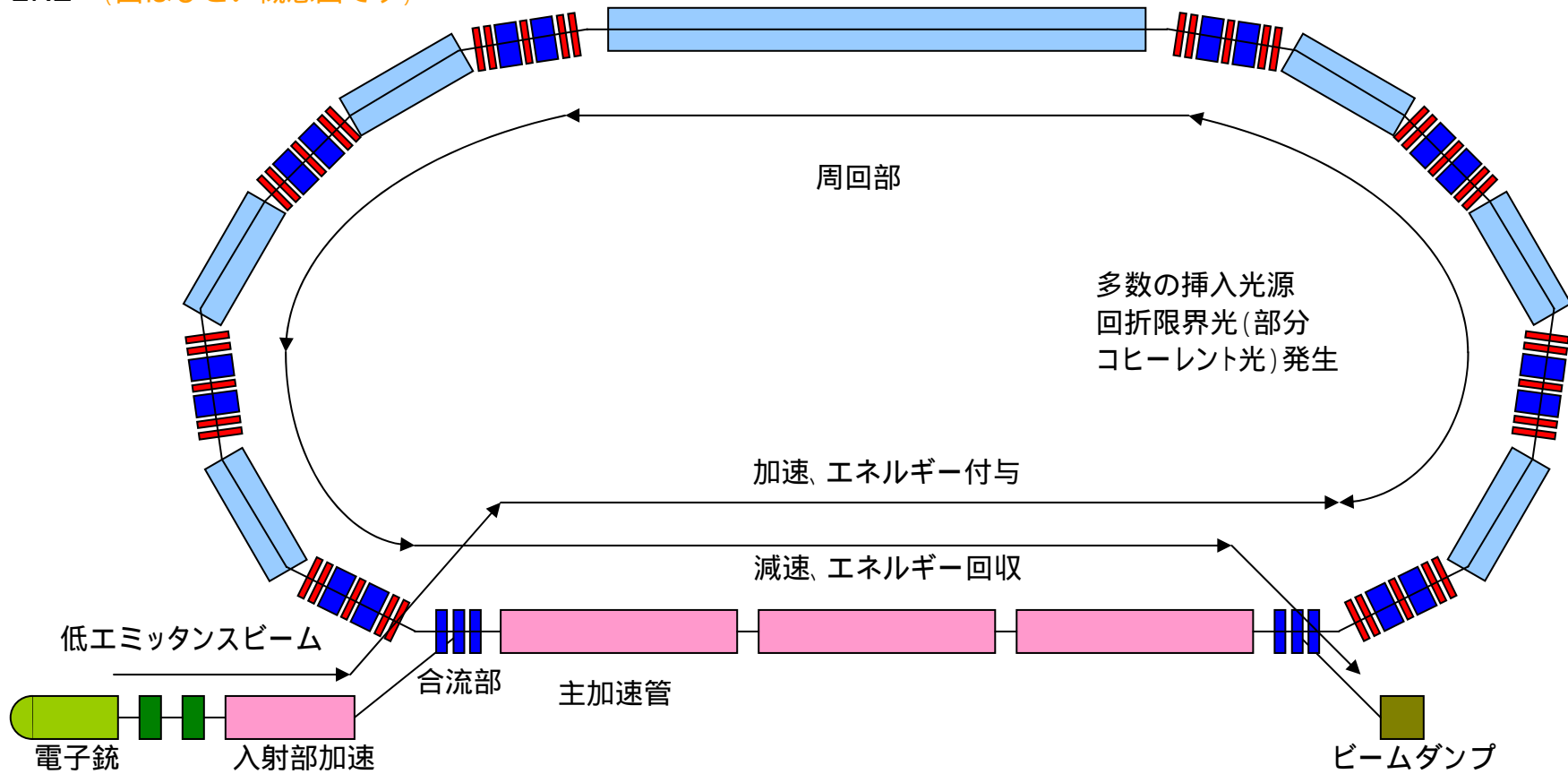
- ・ ERL、SASE-FEL。
- ・ 両者とも、LINAC ベースの放射光源。放射励起と放射減衰の「平衡状態」ではない。
- ・ 昔は放射減衰で到達するビーム性能が、最高の性能だった。
- ・ 電子銃、LINAC では質の悪いちよろちよろビームしか作れず、それを集めて蓄積することでビームの質を上げた。
- ・ 現在(目指すところ)は逆の傾向。電子銃、LINAC で既存の蓄積リングの到達性能よりも良い品質のビームを作る。そのビームを使えるだけ使って、捨てる。
- ・ 1回通しておしまい。同じところを周回しない。
- ・ ベータトロン振動の共鳴はない！ 非線形要素による共鳴もない！
- ・ チューンダイアグラムは必要ない。
- ・ ビームは平衡状態にない。エンベロープ関数(Twiss パラメータ)で話が終わらない。
- ・ 単粒子力学ではない。バンチ内電子の相互作用が効く。空間電荷、CSR、IBS など。
- ・ 今までの蓄積リングは(ほとんど)CSR も空間電荷も効かないレベルのビーム集積度であった。
- ・ ビーム自身は1回しか通らずとも、航跡場は蓄積されてゆく。BBU、真空ダクトのインピーダンスなど。ただしこれは既存の LINAC、BT、リングでも存在し、問題になる効果。

FEL (図はひどい概念図です)



- ・ 光と電子を一緒に走らせると、光にあわせて電子が集まり、より強い光を出す。
- ・ アンジュレータ上流では適当な分布のバンチが、アンジュレータ内で光を出し、その光と相互作用することで、徐々に光にあわせた濃淡がついてきて、その結果、光ももっと強くなって、を繰り返す(レーザー発振)、結局、普通の放射光の何桁も強い100%コヒーレントな光が出せる。
- ・ 電荷密度を非常に大きくする必要がある。電子銃で大電荷のバンチを作り、その長さを圧縮し、必要な密度を得る。
- ・ 通常の蓄積リング、LINAC のバンチ長は 10ps かそれ以上。FEL ではだいたい 100fs くらいにする。(1~2桁短い！)
- ・ エミッタンスも小さい必要がある。リングの(規格化)エミッタンスは普通、50mmrad くらい(2.5GeV で 10nmrad の時)。FEL では 1mmrad とか。(1~2桁小さい！)

ERL (図はひどい概念図です)



- ・ 100mA、1GeV のビームを使い捨てで作るには、100MW の電力が必要。(現在、PF 全体で 3MW、LINAC も 3MW。LINAC は繰り返しが低く、電流が小さい、PF は放射光で失われた分だけエネルギーを足し、同じビームを使い続ける。)
- ・ エネルギー回収しない限り、やってられない。

- ・ 1 回まわして捨てないと、放射励起でビームが膨らむ(エミッタンス、エネルギー広がりが増大)。
- ・ 電子銃で現在の蓄積リング、LINAC よりずっと良いビームを作る。丸ビームで、エミッタンス 0.1mmrad(5GeV で 10pmrad)を目指す。10keV で回折限界(光のエミッタンスと電子のエミッタンスがほぼ等しく、光の中で空間コヒーレントな部分が非常に多くなる)。
- ・ 短パルスビームによる実験も可能。

FEL と ERL の違い

- ・ 単発の光としては、FEL の方が遙かに強力。ただし、1 ユーザーにしか届かない、間隔の長いパルス光。ERL は既存の放射光リングの延長上にあり、FEL はパルスレーザーの延長上にある。
- ・ FEL の繰り返しは 10Hz ~ 1kHz 程度。ERL は 1.3GHz の RF に乗った連続ビーム。
- ・ FEL の電流値は 1nC、1kHz で 1 μ A。ERL は 77pC、1.3GHz で 100mA。
- ・ FEL は「充電して光る」を繰り返すカメラのフラッシュ、ERL はハロゲンランプ。実際、FEL では電子銃のレーザーの充電周期が繰り返し限界。(常伝導空洞の場合は、発熱の限界もある。)
- ・ FEL は完全コヒーレント光。光った瞬間の輝度は、ERL に比べて 3 桁以上高い。ERL は連続の光で、既存の放射光源に比べて 2 ~ 3 桁高い輝度。
- ・ FEL は 1 ユーザーしか使えない。ERL は同時に 20 ~ 30 ユーザーが利用。

第4世代放射光源に必要な数値計算で、SAD がないもの

- ・ 電子銃、空洞などの電磁場分布を考慮したトラッキング。
- ・ 空間電荷、CSR、平衡状態でないIBS、BBU。

CSR = coherent synchrotron radiation. バンチ長と同程度の波長の光はコヒーレントになる。(既存のリングでも、赤外などの光はコヒーレントになる。ただ、ダクトのカットオフなどで出てこない場合も多い。) バンチの後ろ側から出たコヒーレントな光が、バンチが曲がっているところ(偏向磁石の中)でバンチ前側に追いつく。バンチ後ろ側が減速、前側が加速される。

IBS = intra-beam scattering. バンチ内で電子が散乱(Touscheck 散乱)。粒子同士が直接衝突し、散乱。中低エネルギー(3GeV以下くらい)の蓄積リングでは電子の寿命を決める。低エミッタンスで効く。

空間電荷 = space charge. バンチ内の電子が作る電場による散乱。相対論の効果(電子の座標系では電子はまばらに散っている)で普通は効かないが、エネルギーの低い電子銃直後から初段の主加速にかけてと、バンチの電荷密度が大きい時(短パルス、FEL)は効く。

BBU = beam breakup. 空洞中心軸から外れたところをビームが通ると、高次モードを励起する。次のバンチや戻ってきたバンチの軌道によっては、それがどんどん増幅されて、やがて蹴り飛ばされてビームがなくなる。

SAD でできること

- ・ Twiss Parameter の計算。(これがないと見通しが立たない。)
- ・ 大電荷密度の効果を考えないトラッキング。(これがないと見通しが立たない。)
- ・ 幾何学の計算。据付などで座標を出すには非常に便利。
- ・ 解析的な最適化。R₅₆、T₅₆₆ など、含め、オプティクスをどうしたいか決まっている場合は、その最適化が出来る。ただし、方針決定と最適化後の検証には、大電荷密度の効果を考えたトラッキングをする必要がある。

SAD でものすごく不便なこと

- ・ 別のエネルギーの粒子を同じ軌道を通す。
- ・ 加減速。SAD の目的は平衡状態の蓄積リングであり、LINAC や BT にそれほど力が入れているとは限らない。

他のソフトでできないこと

- ・ 最適化。既存のほとんどのソフトは、入れて計算するだけ。スクリプト言語ではない。繰り返し計算、パラメータのある範囲を計算して結果を見る様なサーベイ計算はできない。なので、入力ファイルを作って、繰り返し走らせ、結果を見る、というようなインターフェース部分は自分で何とかしないといけない。
- ・ 軌道計算も便利ではない。電子銃の計算の為に作られたコードを、加速器全体で使おうとしている感じ。
- ・ 電磁石等の要素のシンプレクティックな扱い。(1 回通すだけなので、要らない。MAD 準拠であれば、シンプレクティックになっている。)

まとめ

- ・ 第3世代放射光源は放射光源の完成型と言ってもよく、クローンの如く同じ様なリングが世界中に存在する。設計手法も運転も、確立されている。
- ・ 第3世代放射光源の軌道設計において、SADは理想的なコードである。軌道計算及びコミショニングはSADだけで完結、全て事足りる。(RFや真空、不安定性などについては別のコードが必要。)
- ・ 放射光はこれから既存の数桁上の低エミッタンス、短パルスという方向に向かう。周回部では大電荷密度の効果を取り入れることが必須。
- ・ 電磁場計算コードと連携し、電磁場分布を考慮に入れたトラッキングも必須。
- ・ せめて、トラッキングに解析的なCSR、空間電荷だけでも入らないか。10万粒子や100万粒子の超精密な計算はともかく、設計に必要な定性的な議論ができる程度の解析式でも入れられまいか。
- ・ ある意味、よく分かってない効果なので、使える解析式を作るために色々実証実験をしているとも言えるわけで、逆に、そんな式が出来る頃には手法が確立されて研究課題ではなくなっているか。
- ・ 理想的かつ健全なループ
適当に入れて計算、設計 実証機で実験 結果をFBし、計算を見直し 実証機で検証
- ・ 現状では、SADは脇役。主役は他研究所で開発されたコード。
- ・ それを専門にやらないと、できない仕事だと思う。SAD専門の数値計算、理論専門家にいて欲しい。