

加速器の歴史と利用研究

1. はじめに

1.1. 講義・テキストについて

本テキストは、加速器の歴史と利用について、網羅的に俯瞰することを目指す。分野や目的ごとにそれぞれの専門家によるテキストは数多くあるが、素核分野と物質生命科学の両方を並べたものは少ない。また、今回の主題の光源加速器の目的は物質生命科学だが、各専門家によるオムニバス形式のテキストは多くあるが、全体を俯瞰できる導入はあまり見かけない。そこで、ここでは、それぞれを深く掘り下げない代わりに、できる限り広い領域を見落としなく網羅的に俯瞰することを目指した。（専門家によるテキストへの導入になれば幸いである。）

図表については、原理や理論の説明図であれば自分で作って載せられるが、本講義で扱いたいのは歴史や一般論である。商用出版でないので、出典明記で OK の範囲でと考えると、第一候補は公的機関の資料やオープンソースメディア（Wikipedia.....）ということになる。やはり人名を出したら顔が見たい、装置を紹介したら写真が見たい、と思うだろうから、ここでは瞬間的興味を満たすことを優先し、（誰でも見られる資料であっても紙面の無駄と思わず）引用掲載させて頂くこととした。

筆者は 2016 年より中央大学で高エネルギー加速器科学という講義の最初の 3 コマを担当し、加速器の歴史を説明している。また、KEK 内部の諸事情により、放射光科学から講義担当者を出せなくなった後の 2023 年からは、完全に専門外ながら、放射光ビームラインと利用研究の紹介を 1 コマ分追加して行っている。また、それとは別に、2021 年より総研大の加速器概論で日本語と英語でそれぞれ 2 コマずつ、放射光源加速器について講義を行っている。本講義はそれらの講義資料をもとに、全体を再構成したものである。

最初に、主に素粒子原子核分野の研究のために発展してきた加速器の歴史を述べ、次に放射光源

とその利用研究について述べる。利用研究は PF の実験課題の分類に従ってそれぞれを紹介する。ビームラインについては全体の概略ではなく、実例として PF の真空封止短周期挿入光源の BL15 について詳しく紹介する。最後に、今回の OHO でコマ数の都合で触れられていない電磁石について概略を述べる。

なお、重要と思われる項目については、テキスト全体の流れとしては唐突な印象となるが、初出の箇所でそれぞれ少し詳しい説明を挟むように構成した。また、参考文献や出典に関しても、電子版の便利を考え、URL を埋め込むように構成した。

1.2. 加速器とは？

1.2.1. 電場による加速、エネルギーの単位

加速器とは、荷電粒子を電場で加速する装置である。世の中に力は 4 種類知られているが、核力（強い相互作用、弱い相互作用）、重力は自由自在に制御できるものではなく、磁場は進行方向と垂直に力を及ぼすので加速はできない。また、電荷がなければ電場に反応しないので、加速もできない。従って、現実的には、電子、陽電子、陽子、重イオンを電場で加速するもの、ということになる。（ちなみに、J-PARC ではミュオンを加速する実験が始まっている。また、電荷を持たない中性子ビームの制御には独自の技術があり、それはそれでなかなか面白い。）

加速したビームのエネルギーを表すのに、一般に電子ボルト（eV、electron volt）を使う。電子を乾電池の 1.5 V で加速したら、（運動エネルギー）1.5 eV となる。eV には接頭辞（ 10^3 が k（キロ）、 10^6 が M（メガ）、 10^9 が G（ギガ）、世界最大の加速器で 10^{12} が T（テラ））を付け、それぞれ、keV をケブ、MeV をメブ、GeV をジェブ、TeV をテブ、と読むことが多い。

装置全体の大きさや絶縁、放電の限界を考えると、DC 電圧すなわち電位差（静電場）を使う場合、現実的にはおよそ 5 MV（電荷反転させて往復で 10 MeV）程度が最大エネルギーで、それより大きいエネルギーの加速器、粒子源は時間的に

変動する電場を利用している。時間的に変動する電場を使う利点は、加速器全体を絶縁して電氣的に浮かせる必要がなくなること、同じ場所を繰り返し通して加速できること、同じ距離で高い電圧を印加できることである。

1.2.2. 加速器とそのサイズ感

加速器、粒子源の典型例を挙げつつ、大きさを考えてみる。靴に収まるサイズ、机くらいのサイズのものとしては、レントゲンや非破壊検査に使われる X 線管がある。X 線管では電子をターゲットにぶつけて X 線を発生させるが、電圧は数 10 ～100 kV 程度で、管自体はジュースの缶程度の大きさである。少し大きくなると、例えば電子顕微鏡は電子ビームを使うが、走査型 (SEM) で数 ～10 kV、透過型 (TEM) で 100～200 kV であり、冷蔵庫くらいのサイズから存在する。次に、学校の教室くらいの部屋に置けるサイズを考えると、例えば工業用の電子線照射装置が 100 keV ～10 MeV、病院に設置される医療用の RI 製造用サイクロトロンが 7～20 MeV という感じである。(実際には床の耐荷重や放射線遮蔽が必要なので、適当な小部屋に設置することはできない。また、電源や照射部など周辺機器も要る。) 電子の場合、4 MeV 以下だとほぼ全く放射化無しで、10 MeV 程度までは放射化の影響を無視できる。医療

器具の滅菌、工業用のフィルム、ゴムやビニル加工、宝石加工などの為の電子線照射装置はこのくらいのエネルギーまでの大電流電子源、電子加速器である。一方、陽子線の場合、エネルギー数 MeV で核反応が起きるので、裏を返せばそのくらいの小型装置で RI が製造可能ということになる。

さらに大規模な加速器としては、タンデム型の静電重粒子加速器が年代測定や微量元素検出に使われるが、長さ 10m くらいでエネルギー 10 MeV 程度である。光源用、素粒子原子核実験用、重粒子線治療用の巨大加速器は周長数 10 m～数 km である。PF リングが 187 m、SPRING-8 が 1.4km、KEKB が 3.3 km である。世界最大の加速器はスイスのジュネーブ郊外、フランスとの国境にある CERN (欧州原子核研究機構) の LHC (Large Hadron Collider) で、周長 27 km、田園地帯の市街地の地下 100 m に建設されている。

日本の法律では、エネルギー 1 MeV 以上の放射線発生装置が放射線障害防止法の対象となっている。2019 年の [日本アイソトープ協会の放射線利用統計](#)によると、日本で最も台数の多い加速器は医療用の LINAC で、日本全国で 1130 台存在する。次が医療用 RI 製造用のサイクロトロンで、162 台ある。KEK にある PF、PF-AR、

Table 1.1 日本の加速器の台数と利用目的
(日本アイソトープ協会 放射線利用統計 2019 に基づく)

	総数	医療 機関	教育 機関	研究 機関	民間 企業	その 他
サイクロトロン	246	162	4	24	54	2
シンクロトロン	49	16	3	26	4	
シンクロサイクロトロン	2	2				
LINAC	1309	1130	27	67	54	31
ベータトロン	2		1	1		
ヴァン・デ・グラフ型	31		12	18	1	
コッククロフト・ウォルトン型	89		16	29	44	
変圧器型加速装置	12			5	7	
マイクロトロン	5		2	2	1	
プラズマ発生装置	2			2		
合計	1747	1310	65	174	165	33

SuperKEKBのLER、HER、DR、J-PARCのRCS、MRなどは研究機関のシンクロトロンに入る。(Table 1.1 参照。)

1.2.3. 加速器は加速するのか？

加速器は電場で粒子を加速する装置だが、加速=運転ビームエネルギー上昇とは限らない。円形の軌道を電子、陽電子が周回すると放射光が出るが、その分、エネルギーが減る。素粒子原子核実験では無駄なエネルギーロス、放射光源ではその放射光を生成するのが目的となっている。エネルギーがどんどん減ると粒子の軌道が内側にずれていってそのうちダクトにあたって失われるので、周回の度にエネルギーを一定に保つために加速が行われる。すなわち、電子と陽電子をエネルギー一定で安定に蓄積するためには、常時加速し続けることが必要なのである。そのような意味で「加速」を行っている。(もちろん、より高エネルギーの粒子線を作る為の加速器もあり、一般にブースターと呼ばれている。)

一方、重粒子(陽子、重イオン)は放射光をごく僅かしか出さないで、ただ蓄積するだけならば加速の必要はほとんどない。重粒子加速器の場合は、ビームのエネルギーを上げるのが目的であることがほとんどで、その目的で加速空洞が設置される。周回ビームを繰り返し加速するのは同じだが、放射損失が無視できるほど小さいので、ビームに与えたエネルギーは失われることなく積み重なっていく。加速パワーとしては電子陽電子用の一桁下でよい一方で、重粒子はなかなか超相対論的にならず、速度変化、周回周波数の変化の影響を常に考慮しなくてはならない。電子、陽電子、重粒子ともブースター(シンクロトロン)という名前と呼ばれ、共通して電磁場共振空洞で粒子を加速するのだが、技術的には大きく異なる。

1.3. KEKの加速器の概要(つくば)

KEKは大学共同利用機関法人で、そのつくばキャンパスと東海キャンパスに加速器がある。個々の大学や研究機関にとっては大規模すぎる装置(加速器)をKEKが設置し、国内外の大学



Fig. 1.1 つくばキャンパスの加速器
(画像は google map)

や研究所、民間の研究者に共同で利用してもらうことがKEKの役目である。

つくばキャンパスの加速器の配置を Fig. 1.1 に示す。つくばで共同利用に供されている加速器は素粒子原子核分野の研究用の SuperKEKB、物質生命科学分野の放射光源である PF、PF-AR である。それらの加速器にビームを供給する入射器として、電子陽電子 LINAC (KEK e-/e+ LINAC) がある。その他に、ILC の為の超伝導線形加速器試験施設 STF (Superconducting RF Test Facility)、ILC のダンピングリング及び衝突点の試験施設 ATF (Accelerator Test Facility)、超伝導加速器の産業、医療応用を目指し、現在は EUV リソグラフィのための FEL 試験施設となっている cERL (compact Energy Recovery LINAC)、インターンシップや実習のための教育用加速器 KETA (KEK Education and Training Accelerator) がある。

1.3.1. SuperKEKB

SuperKEKB は 7 GeV の電子リング (High Energy Ring, HER) と 4 GeV の陽電子リング (Low Energy Ring, LER) からなり、地下 10m にあるトンネル内に 2 台の円形加速器が設置されている。電子ビームと陽電子ビームは入射器 (図の e-/e+ LINAC) で作られ、主リング (HER/LER) まで輸送路で輸送される。高速道路のインターチェンジのような感じで、それぞれの加速器はビーム輸送路でつながっている。地下 4m に設置されている LINAC から出たビームは、Super KEKB

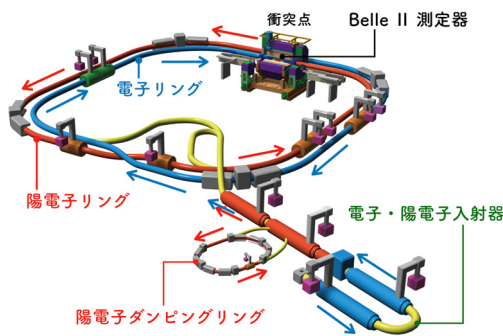


Fig. 1.2 SuperKEKB 加速器の模式図

トンネルの上を通過してリング内側に入り、エネルギーの高い電子はより少ない曲げ角でスムーズに、陽電子ビームはくるっと円を描いて逆回りに繋がる、というイメージで地下 4m から 10m まで坂を下りながら主リングに輸送され、入射される。上空から見て、HER は時計回り、LER は反時計回りである。(Fig. 1.2)

LER と HER は筑波実験室と富士実験室で交差しており、そのうち、筑波実験室ではビームが Belle II 検出器内で衝突し、大量の B、反 B 中間子が作られる (Fig. 1.3)。B 中間子と反 B 中間子とを区別するために、崩壊の時間差を利用するので、電子と陽電子のエネルギーを変え、Belle II 検出器内で HER の進行方向に飛ばしながら測定する設計になっている。

Super KEKB 加速器の目的は、CP 対称性の破れをさらに詳しく調べることに、新しい素粒子理論の探索である。精密測定や間接測定には大量の衝突データが必要で、極めて高いルミノシティ (B 中間子生成のための電子・陽電子の衝突頻度) であることが設計の特徴である。

1.3.2. PF/PF-AR

つくばキャンパスには本講義の主題である放射光源加速器が 2 台ある。PF リング (Fig. 1.4) は 2.5 GeV の電子蓄積リング型放射光源で、電子ビームを曲げた時に出る紫外線から X 線までの放射光を使って、物質・生命科学の実験が行われている。PF-AR は 6.5 GeV、5 GeV の単バンチ放射光源で、リングに蓄積する電子の塊を 1 つだけ



Fig. 1.3 SuperKEKB 加速器



Fig. 1.4 PF リング

にすることで、連続光ではない、パルス的な光を発生させて、様々な反応の時間変化を測定するような実験が行われている。

1.3.3. 電子・陽電子入射器 (と KEK の歴史)

SuperKEKB、PF、PF-AR のビームは共通する入射用の電子・陽電子線形加速器 (e^-/e^+ LINAC) から供給されている。直線型の加速器 (Linear Accelerator) を LINAC といい、リナック、ライナックとよぶ。LINAC 先端から各リングへの輸送路を BT (beam transport, Fig. 1.5) という。

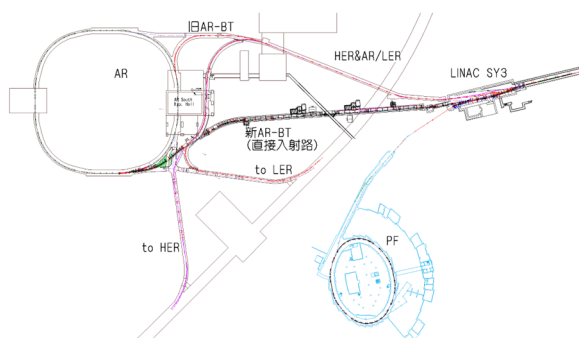


Fig. 1.5 BT (ビーム輸送路)

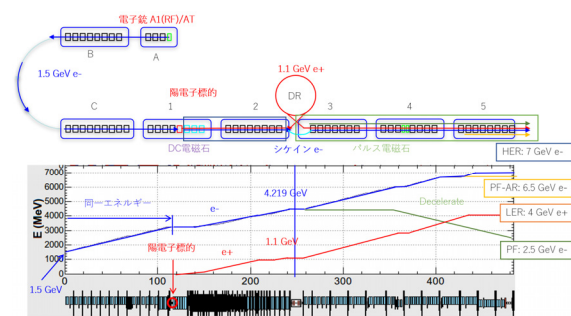


Fig. 1.8 LINAC ビームエネルギー

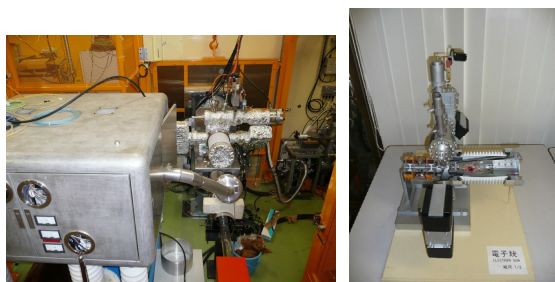


Fig. 1.6 熱電子銃 (PF、AR、LER 用に使われている。HER は RF 電子銃である。)



Fig. 1.7 LINAC

LINAC で最初に作られるのは電子ビームであり、最上流の電子銃 (Fig. 1.6) から、まずは KEK キャンパスの外側に向けて逆向きに打ち出される。それを敷地境界で 180 度折り返す。LINAC 全体が J 型になるので、ここを J-arc と呼んでいる。LINAC トンネル内に加速管が並んでいる様子を Fig. 1.7 に示す。下の大きな筒は据え付け位置調整用のレーザーチェンバーで、上側の細い方が加速管である。

歴史的には、SuperKEKB の前には KEKB (1998 年～2010 年、当時は HER 8 GeV、LER 3.5 GeV) があり、その前は TRISTAN (1986 年～1995 年) があつた。TRISTAN 当時、入射 LINAC は

文字通り一直線 (Fig. 1.2 の橙色の部分だけ) で、2.5 GeV の電子と 2.5 GeV の陽電子を生成、出射していた。それを AR (Accumulation Ring) で 8 GeV まで加速、取り出して TRISTAN MR (Main Ring) に入射、MR で 30 GeV まで加速して衝突実験を行っていた。AR、MR とも 1 台の加速器内に電子と陽電子を逆回りに同時に蓄積、同時に加速する運転を行っていた。LINAC はその後、KEKB 建設にあわせ、J-arc より上流部分 (Fig. 1.2 の青色の部分と黄色の J-arc) を追加、大幅にエネルギーが増強され、8 GeV の電子と 3.5 GeV の陽電子を直接作って AR を経由せずに HER と LER に入射するようになった。KEKB に必要なくなった AR は、放射光専用リングとして運用が開始された。(ちなみに、KEKB 建設のための長期シャットダウンに合わせて、PF では高輝度化改造 (リング半周部分の大改造) が行われた。さらにその後、SuperKEKB 建設時に陽電子用にダンピングリングが追加されると共に、HER 用に光陰極 RF 電子銃が追加設置され、今に至っている。

1.3.4. 陽電子ダンピングリング

現在の LINAC に話を戻す。HER 用の電子は超高品質の光陰極 RF 電子銃からの電子ビームをそのまま加速して出射するが、LER 用の陽電子は従来型の熱電子銃からの大電流電子ビームを約 3.3 GeV まで加速し、途中に設置したタングステンターゲットにぶつけて作っている。LINAC の各リング用のビームの加減速の様子を Fig. 1.8 に示

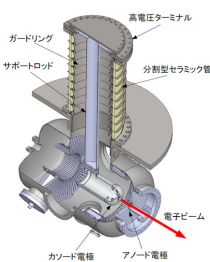
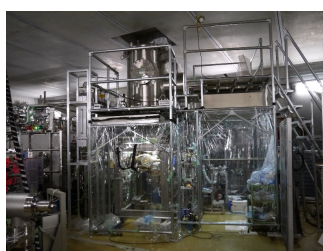


Fig. 1.9 cERL の光陰極電子銃
(右は KEK プレスリリース「次世代光源用の直流電子銃で世界最高の 500kV の電圧を達成」より。)

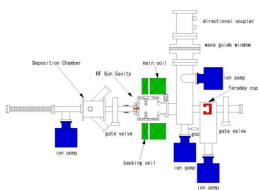
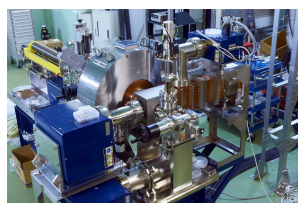


Fig. 1.10 STF-RF 電子銃 ([1.1]より)

す。電子を金属にぶつけて作った陽電子ビームは、特に向きとエネルギーのばらつきが非常に大きい。そこで、ばらつきを減らす為に、DR (Damping Ring) が利用される。電子陽電子を曲げると放射光が出る（放射光源ではそれを利用している）が、放射光には、蓄積ビームの位置、向き、エネルギーのばらつきを増やす（放射励起）効果と減らす（放射減衰）効果の両方があり、ビームを円形加速器に蓄積すると、それらのばらつきは円形加速器の設計で決まる値になる（入射時の状態に依らない）。ターゲットにぶつけて作った陽電子ビームを、フラックスコンセントレータを使って向きを揃えて平行ビーム化（サイズは大きくなる）し、とにかくできる限り捕獲し、1.1 GeV まで加速、DR に入射する。陽電子ビームを DR にしばらく蓄積すると、向きと位置、エネルギーのばらつきを同時に小さくすることができる。DR から取り出され高品質の陽電子ビームは、再度加速され、輸送路を通じて最終的に LER に入射される。

1.3.5. 電子銃についての補足

熱陰極電子銃 (SKB-AT 電子銃、Fig. 1.6)はガ
イスラー管、陰極線管と同じで、カソードを加熱

して仕事関数を超えた熱エネルギーで電子を取り出す方式である。長寿命、高安定で、DC 的である。パルス運転するためには、真空管同様にグリッドを下流に設置し、それで ON/OFF を制御するが、やはり暗電流は多めになる。熱電子なので熱による揺らぎが大きく、電子ビームのばらつき（エミッタンス）は大きい。SACLA（SPring-8 キャンパスにある X-FEL）では、エミッタンスの問題を解決した革新的な熱電子銃を使っている。

光陰極電子銃(cERL、Fig. 1.9)は陰極にセシウムを蒸着し、NEA 状態の表面を作る。加熱せずにレーザーを当てて、電子を取り出す。パルスレーザーを使えばパルスビームになる。照射したレーザーのエネルギーに対する電子量(電流)を量子効率というが、かなり小さいので大パワーのレーザーが必要となる。陰極を加熱しないのでばらつきが小さく、高品質なビームが出せる一方、陰極は劣化していくので、時々、再活性化(熱処理とセシウム再蒸着)が必要で、劣化がさらに進むと交換する必要がある。超相対論的でないエネルギー領域の電子はクーロン斥力で散りやすい。空間電荷効果(クーロン斥力)抑制のためには高電圧化して電子のエネルギーを高くすることが必要である。

光陰極 RF 電子銃 (SKB-A1(HER 用)、ATF、STF、Fig. 1.10)は光陰極を空洞中央に設置し、電子銃で初段の加速も行ってしまうという究極の電子銃である。電子を相対論的領域まで加速すれば、ビームに乗った座標系ではローレンツ変換で粒子間の距離が広がり、クーロン力は弱くなる。例えば電子銃出口まで、空洞 1.5 セル分で 4MeV まで加速される、というイメージになる。

1.3.6. 放射励起、放射減衰についての補足

加速器中のビームのパラメータには、断面方向のビームのばらつき（位置と向きの両方を考慮した、解析力学でいう位相空間の面積）を表すエミッタンス、エネルギーのばらつきを表すエネルギー拡がり、時間的な長さであるバンチ長がある。これらのパラメータは電子陽電子蓄積リングで

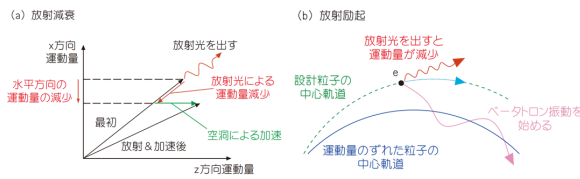


Fig. 1.11 放射励起と放射減衰

は放射光の効果で決まる平衡パラメータであり、一方、LINAC（電子陽電子、陽子すべて）と放射光の効果が無視できるほど小さい陽子、重粒子リングでは最上流の電子銃、イオン源で決まるパラメータとなる。

放射励起と放射減衰の概念を Fig. 1.11 に示す。

- 放射減衰：放射光はビーム進行方向に出るので、斜め向きの電子が光を出すと斜め向きの運動量も減る。一方、RF 空洞による加速は常に設計軌道に平行なので、光を出してエネルギーが減り、その分を加速する、を繰り返すと、ずれた方向の運動量がどんどん減り、設計軌道向きの正しい運動量だけになる。それによって振動が減衰する効果を放射減衰という。エネルギー高めの粒子はエネルギー高めの放射光を出し、低めは低めになる、ということ縦方向にも働く。
- 放射励起：放射光の発生には量子力学的なばらつきがあるので、放射光を出すと粒子にエネルギーのばらつきが生じる。放射光を出した場所に分散があると、粒子の中心軌道がずれたことになり、振動を始める。ビーム全体にばらばらな振動を引き起こす放射光の効果を放射励起という。分かりにくいので、例えば、バネに吊り下げた重りを考える。静止状態の場合、重力とバネの弾性力とが釣り合っていて、バネは少し伸びた状態で止まっている。そこで、突然（何かの魔法で……）重りを軽くしたとする。重力と弾性力の釣り合いがこわれ、重りは振動を始める。それが放射励起である。加速器の場合はバネと重力ではなく、偏向電磁石磁場によるローレンツ力と円弧軌道の遠心力との釣り合いになり、釣り合いの位置（のエネルギー依存性）を分散と呼んでいる。

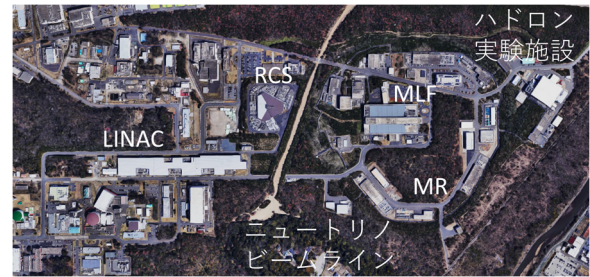


Fig. 1.12 東海キャンパスの J-PARC 加速器
(画像は google map)

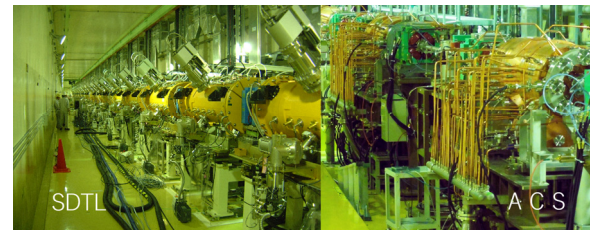


Fig. 1.13 SDTL と ACS
(J-PARC 紹介スライド (小関さん))



Fig. 1.14 RCS (左) と MR (右)
(J-PARC 紹介スライド (小関さん))

1.4. 東海キャンパス：J-PARC

東海キャンパスには、JAEA（日本原子力研究開発機構）と共同で大強度陽子加速器 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) が存在する。東海キャンパスの J-PARC 加速器部分を Fig. 1.12 に示す。

J-PARC では、イオン源からの H^- （負水素イオン）を線形加速器で 400 MeV まで加速する。速度がどんどん変わるので、線形加速器の方式も段階的に変えてあって、説明は省くが、RFQ、DTL、SDTL (Fig. 1.13)、ACL と 4 段ある

LINAC から出た後、RCS (Rapid Cycle Synchrotron) 入射点に電子剥ぎ取り薄膜があり、負水素イオンはここで H^+ すなわち陽子になって入射され、3 GeV まで加速される。RCS は 25 Hz

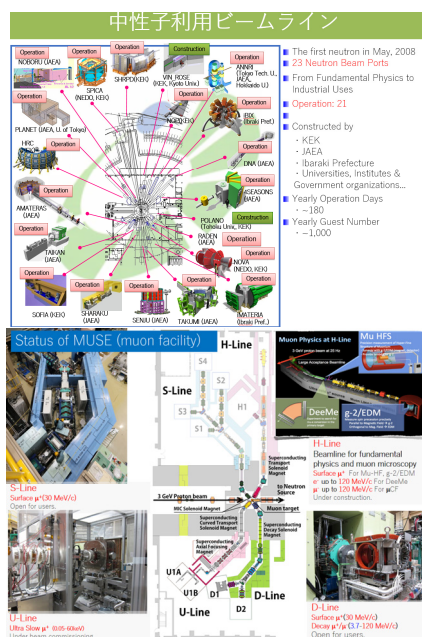


Fig. 1.15 中性子（上）とミュオン（下）利用
(J-PARC 紹介スライド (小関さん))

運転で、RCS (Fig. 1.14 左) からのビームは MLF (Material and Life Science Experimental Facility、物質生命科学研究施設) と MR (Main Ring, Fig. 1.14 右) に供給されている。MLF では陽子ビームをターゲットに当てて発生させた中性子とミュオンを使って実験 (Fig. 1.15) が行われている。

MR では陽子ビームをさらに 30 GeV まで加速し、ビームを少しずつ取り出し (SX、Slow Extraction) てハドロン実験が、一気に全部を取り出し (FX、Fast Extraction) てターゲットにぶつけ、神岡に向けてのニュートリノ供給が行われている。ハドロン実験施設を Fig.1.16 に、ニュートリノ実験施設を Fig.1.17 に示す。ニュートリノ実験のパワーアップ (ハイパーカミオカンデ) 計画に向け、MR も繰り返しを上げて大出力化が進んでいる。

2025 年現在、北米最大規模の素核研究はニュートリノで、Long Baseline Neutrino Facility で行われている DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) である。シカゴ近郊のフェルミ研究所の PIP II 超伝導陽子加速器 (800 MeV、1.2 MW) から、ほぼ大陸中央に位置する、800 km 離

6ビームラインが稼働中: K1.8, K1.8BR, K1.1, KL, 高運動量, COMET

K中間子, ミュオン, π 中間子

→ 原子核, 素粒子

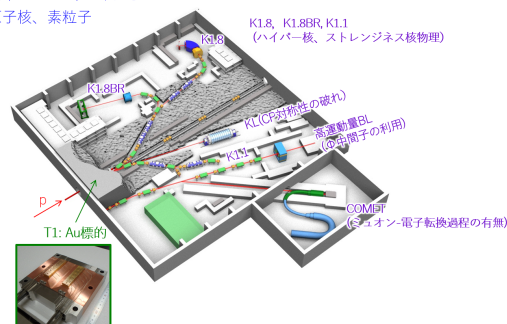


Fig. 1.16 ハドロン実験
(J-PARC 紹介スライド (小関さん))

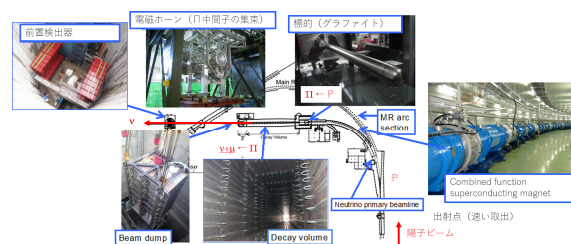


Fig. 1.17 ニュートリノ実験
(J-PARC 紹介スライド (小関さん))

れた Stanford Underground Research Facility に向けてニュートリノを打ち出している。

1.5. パンフレット

KEK のパンフレットの中に、[もっと知りたい SuperKEKB](#) というパンフレットがあり、加速器を構成する様々な部品 (電磁石、空洞、補正診断系など) の説明から、蓄積衝突するビームの力学的な解説まで、一通り掲載されている。加速器入門として、是非読んでほしいと思う。同様に Belle II 実験についても [パンフレット](#) がある。実験目的、検出器、データ収集系など一通りの説明がある。

PF、PF-AR に関しては [Photon Factory](#) というパンフレットがある。

J-PARC に関しては、KEK の刊行物サイトの他に、[J-PARC センターのパンフレット](#) サイトの方が分かり易く並んでいる。

2. 加速器に至る道

2.1. 粒子線はガラス管から

筆者が子供の頃、繁華街には光る細いガラス管で一筆書きの文字やイラストを描いた、ネオンサイン (Fig. 2.1) が所々にあった。家のテレビやパソコンのディスプレイはブラウン管 (Fig. 2.2、2.3) という分厚いガラス管で、重さ数十キロ、電子レンジのような奥行きのある箱形だった。天井からは丸い蛍光灯 (Fig. 2.4) 照明が吊り下げられていて、ひもを引っ張ると点いた。ネオンサイン、



Fig. 2.1 「ネオンサイン」の例。(株式会社サンケイディライト「[製作販売事例 \(湘南ベルマーレ\)](#)」より。) ネオンガスを単体で用いると 600～700 nm に強いスペクトルをもつ赤色になる。様々な種類の気体元素を組み合わせ



Fig. 2.2 ブラウン管ディスプレイの例。制御室に保管されていた古い PC98。動作した。

ブラウン管、蛍光灯とも、電子真空管、放電管で、歴史的に最初期の電子加速器の系譜といえるものである。

低圧のガスを封入したガラス管に電極をつけ、高電圧をかけると放電し、ガス特有の色で光る、それをガイスラー管 (1857 年) という。研究は放電現象自体から、管の中で飛んでいるもの、すなわち陰極線へと移り、陰極線管 (CRT、Cathode Ray Tube) と呼ばれるようになる。(Fig. 2.5、2.6) ガイスラーとクルックスの肖像を Fig. 2.7 に示す。ガイスラーはガラス職人でもあり、自身で発

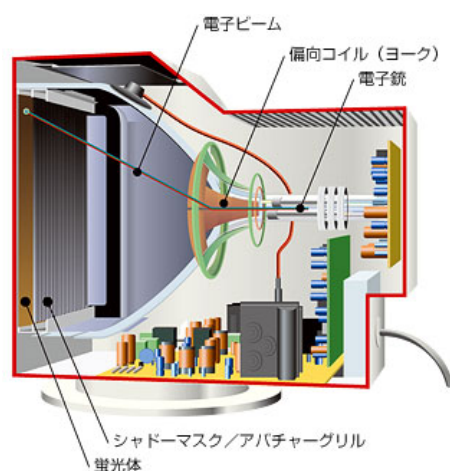


Fig. 2.3 ブラウン管テレビの原理。(株式会社 TDK「[ブラウン管の仕組みとテレビの進化の歴史](#)」より。) 電子銃が一番奥にあって、見ている人に向けて電子を打ち出すという仕組み。画面全体を走査 (1 点ずつ順に光らせていく) する。

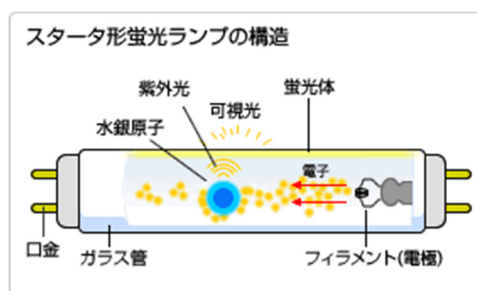


Fig. 2.4 蛍光灯の仕組み。(株式会社プリンス電気「[蛍光灯の基礎知識](#)」より。) フィラメントに電流を流して発熱させ、熱電子を利用している。使用しているうちにスパッタされてガラス管が黒ずんでいって、やがて球切れとなる。



Fig. 2.5 光源系でインターン実習等で利用している陰極線管

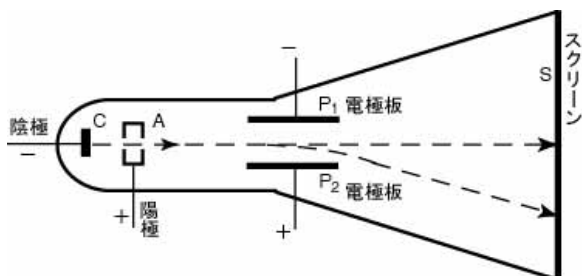


Fig. 2.6 陰極線管の原理。(九州大学インターネットセミナー「[電子の発見](#)」より。)

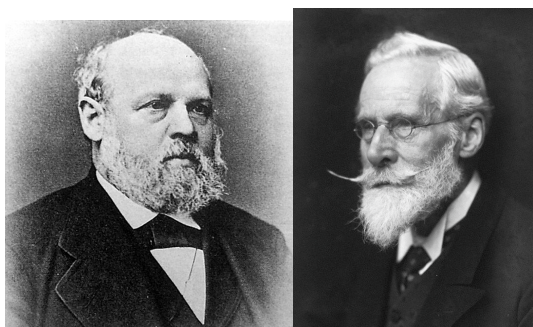


Fig. 2.7 ハインリッヒ・ガイスラー (1814-79、左)、と、ウィリアム・クルックス (1832-1919、右)。(Wikipedia より)

明した水銀真空ポンプで当時最高の 10 Pa 程度の真空のガラス管を自作した。クルックスは真空をさらによくし、陰極から何かが飛び出していることを発見し、陰極線と名付けた。

陰極線管では、加熱した陰極から熱電子が出て、陽極へ向かって静電圧で加速される。電子は途中、電場や磁場で曲げることもできるし、羽根車を回したりもできる (クルックスの実験)。また、蛍光板にあてれば光るし、金属ターゲットに当てれば X 線を出せる。さらに、ガスが封入されている場合、ガスがイオン化、プラズマ化して陰極側に向かって加速、陰極に穴 (カナル) を開けると取り出すことができる (1886 年、ゴルトシュ

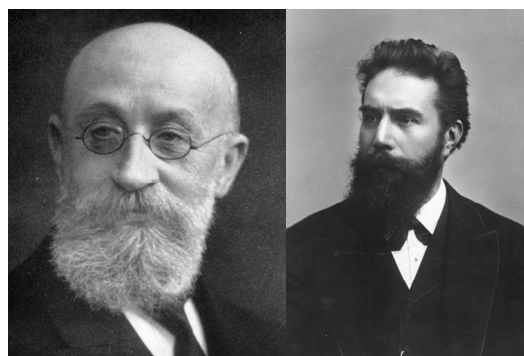


Fig. 2.8 オイゲン・ゴルトシュタイン (1850-1930、左)、と、ウィルヘルム・レントゲン (1845-1923、右)。(AIP Emilio Segrè Visual Archives, Lande Collection より。)

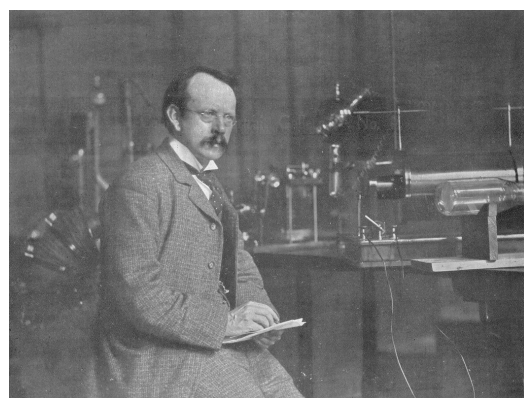


Fig. 2.9 ジョセフ・ジョン・トムソン (1856-1940)。(ケンブリッジ大学トリニティカレッジ図書館ブログ「[J.J.トムソンを偲んで](#)」より。)

タイン)。カナル線 (陽極線) は陽子源、イオン源として使われた。陰極線管による X 線の発見が 1895 年 (レントゲン)、電子の発見が 1897 年 (J.J. トムソン) である。放電管、真空管は電子源、X 線源、イオン源、ダイオード、アンプ、RF 源、照明、装飾と様々な用途で利用されている。陽極線の発見者ゴルトシュタインと X 線の発見者レントゲンの肖像を Fig. 2.8 に、電子の発見者 J.J. トムソンの肖像を Fig. 2.9 に示す。

2.2. 真空管

ガイスラー管、クルックス管といった放電管では、管に低圧ガスを封入し、高電圧をかけることで放電させる。一方、陰極線管、信号増幅用の真

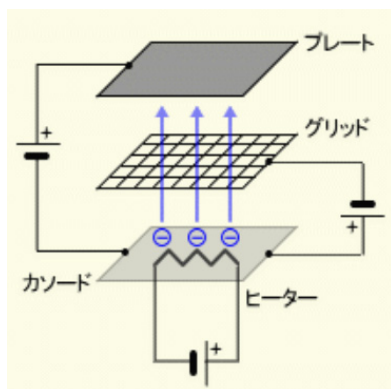


Fig. 2.10 3 極真空管の原理。(わたっちわーど「[真空管ってなあに](#)」より。)

空管などでは、陰極を加熱し、熱電子を放出させ、それを陽極に向かって飛ばす。陽極を管の途中に置き、穴を開けておけば、そこをすり抜けた電子は慣性でそのまま飛んで行く。信号増幅用の真空管では、グリッドという網状の電極を陰極と陽極の間に追加し、その電圧で陰極-陽極間の電流量を制御する。(Fig. 2.10) 信号としてはグリッドに対する入力信号が、陰極-陽極間の大電流として出力される。真空管は 1947 年にトランジスタが発明されるまで、ラジオやオーディオ、初期の計算機などで幅広く使われていたし、それ以降も大電力の増幅器としては長らく使われてきた。なお、トランジスタの 3 端子をエミッタ、コレクタ、ゲートというが、それぞれ真空管の陰極の電子放出 (Emitter)、陽極の電子回収 (Collector) からきている。トランジスタのゲート端子は、真空管のグリッドに相当し、電子が通る、幅の変わる門 (Gate) のような働きをする。

2.3. X 線管

X 線管は、工業用、医療用の X 線源として今でも幅広く使われているが、数十～100 keV 程度まで加速された電子をタングステンや銅などの金属標的にぶつけて X 線を発生させる (Fig. 2.11)。制動放射のブロードなスペクトルに、標的的特性 X 線の鋭いピークが載ったスペクトルになり、光子数は一般的に毎秒数千～1 万個程度 (Fig. 2.12) である。強度の強い光子は特性 X 線なので、波長可変性はない。

放射線 医療で使われるエックス線と発生装置

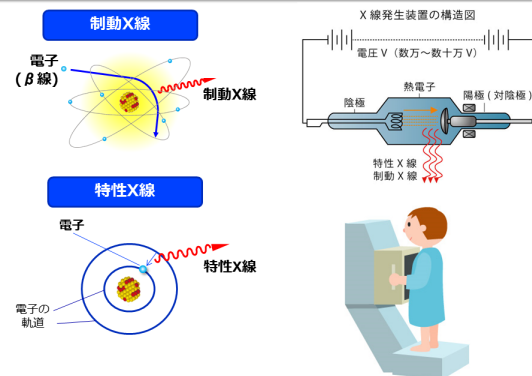


Fig. 2.11 X線管の X 線発生原理。(環境省「[放射線の基礎知識 1.3](#)」より。)

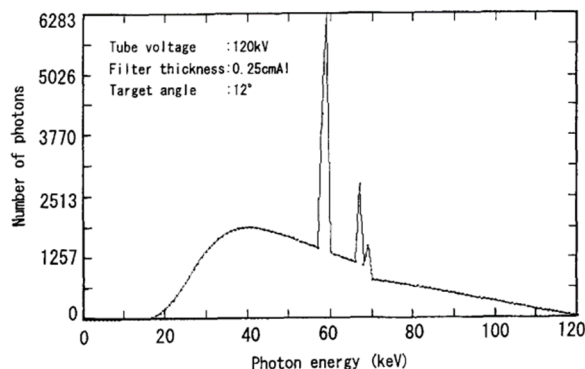


Fig. 2.12 X線管のスペクトル例[2.1]。

2.4. ラジオ波 (RF) 源：クライストロン

第 2 次世界大戦のレーダーの技術開発から、ラジオ波 (Radio Frequency, RF) 領域の電磁波の研究開発が進み、巨大な真空管が RF 源として使われるようになる。波長サイズの金属の空洞を作ると、電磁波を共振、蓄積できる。空洞に電子ビームを通すと、電子のもつ電磁場を通じて RF を発生させることもできるし、逆に、RF で電子を加速、減速することもできる。RF 技術で使われる装置は金属の空洞や中空のパイプ (導波管)、ペアや同軸のケーブルなどであり、そのような装置で RF は共振したり伝搬したり、負荷と整合が取れていなければ反射したりする。「伝送線回路」と呼ばれる回路は、豆電球に乾電池を組み合わせた DC 的な閉回路とは根本的にイメージが異なる。

クライストロン (Fig. 2.13) は、RF 源や増幅器として使われる巨大な電子管で、上流側の空洞に



Fig. 2.13 PF (左)、PF-AR (右) のクライストロン

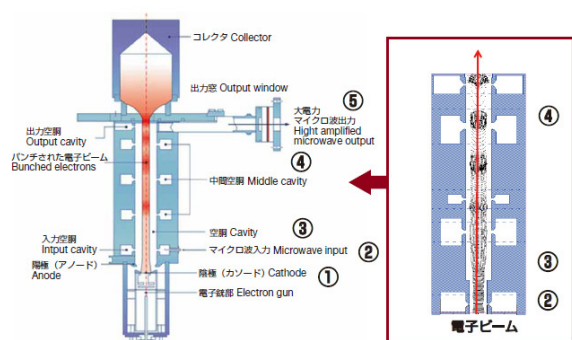


Fig. 2.14 クライストロンの動作原理。(キャノン電子管デバイス株式会社「[クライストロン \(技術情報\)](#)」より。)

小パワーの RF を供給して電子ビームに速度変調をかける。電子ビームが飛んでいる間に、速度変調は密度変調となり、下流側にもう 1 つの空洞をつければ、上流の入力を増幅した大パワーの RF を取り出すことができる (Fig. 2.14)。クライストロンは加速器用の RF 源として幅広く使われている他、テレビやラジオの放送用としても使われていた。(東京タワーにはあったが、スカイツリーは半導体アンプである。)

2.5. 電子加速器に至る道

X 線や電子は原子核よりもその周囲の電子と相互作用する。また、相対論的な荷電粒子からは放射光が出る (エネルギー的には損失となる) ため、高エネルギー目的とすると電子加速器は損である。1800 年代のガラス管から始まった電子加速器であるが、新粒子探索用としては、まずは重粒子加速器が主流で、放射光用の大規模電子加速器

も、1980 年代まで登場しない。次の章では、重粒子加速器の歴史から、簡単に述べていきたい。

コラム：加速器の学校

KEK では毎年夏～秋頃に OHO セミナーを開催している。何かの要素 (RF とか航跡場とか FEL とか.....) を勉強するときはここから始めるし、スタディ前や講演の資料作りなどの際、昔のテキストを参照する事もある。

放射光分野では SPring-8 夏の学校というのがあり、第 5 回までは講義資料が掲載されている。ビームラインや利用実験についても述べられている。

http://www.spring8.or.jp/ja/science/meetings/seminar/sp8summer_school/

世界的には、CERN Accelerator School (CAS)

<https://cas.web.cern.ch/>

と、US Particle Accelerator School (USPAS)

<https://uspas.fnal.gov/>

が有名である。CAS は特に要素の特集年があって、電磁石特集、超伝導特集など、非常に詳細な専門的内容も講義されていて、OHO で導入が済んだら、次は CAS の専門コースを、という風に進む。(最近の CAS は初級コースと応用、専門コースに別れている。)

他に、イギリスの大学、研究所横断型の加速器研究組織である John Adams Institute 主宰の大学院向けの加速器講義も公開されている。

<https://adams-institute.ac.uk/graduate-lectures>

会議資料共有システム (CERN の indico) 上に講義録がある。手引きもあって、学生気分を味わえる。

3. 加速器の発展

3.1. ハドロン実験は RI から

重粒子の研究は放射性同位元素 (RI) から始まった。ウランの放射能の発見が 1896 年 (ベクレル)、それがウランに限ったことではないと分かったのが 1898 年 (キュリー)、同じ年に放射線自体も発見 (ラザフォード) された。その後、原子核の発見 (1911 年)、陽子の発見 (1918 年、共にラザフォード)、中性子の発見 (1932 年、チャドウィック) と続く。観測機器としては 1897 年に霧箱が発明 (ウィルソン) され、宇宙線の発見 (1912 年、ヘス)、その観測から陽電子 (1932 年、アンダーソン)、ミュオン (1936 年、アンダーソン、ネッダーマイヤー) が発見された。霧箱は 1952 年に泡箱が発明 (グレーザー) されるまでは素粒子観測の主要な検出器であった。泡箱、霧箱とも粒子の飛跡を可視化するもので、それを目視するか、写真に撮って現像するかして調べていた。(それぞれの肖像写真を Fig. 3.1~5 に示す。)

3.2. 静電加速器

電子に比べて重粒子は重く、加速しにくい。原子に束縛された電子の準位が内殻で数十 keV、価電子帯で数 eV なので 100 keV 程度の卓上ガラス管で電子や X 線に関する実験が色々できた一方、原子核実験は MeV 領域のビームエネルギーが必

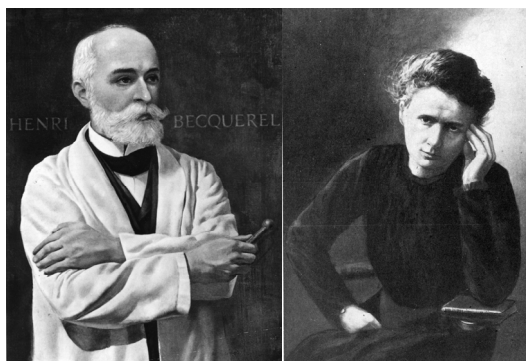


Fig. 3.1 アンリ・ベクレル (1852-1908、左)、マリー・キュリー (1867-1934、右)。(AIP Emilio Segrè Visual Archives, William G. Myers Collection (ベクレル)、同 E. Scott Barr Collection (キュリー) より。)

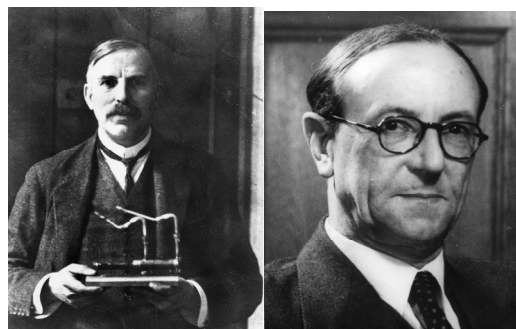


Fig. 3.2 アーネスト・ラザフォード (1871-1937、左)、ジェームズ・チャドウィック (1891-1974、右)。(Cambridge University Library, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Rutherford Collection (ラザフォード)、AIP Emilio Segrè Visual Archives, Numeroff Collection (チャドウィック) より。)



Fig. 3.3 チャールズ・ウィルソン (1871-1937、左)、ヴィクトール・ヘス (1883-1964、右)。(Photograph by A. B. Lagrelius and Westphal, Stockholm, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Weber Collection (ウィルソン)、同 E. Scott Barr Collection (ヘス) より。)

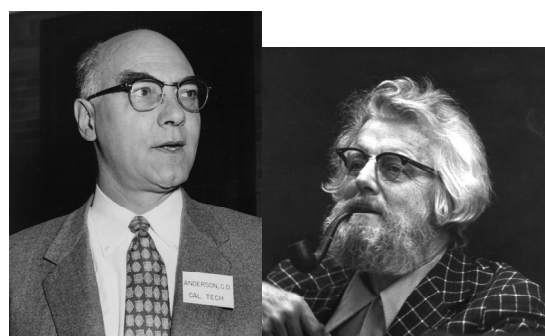


Fig. 3.4 カール・アンダーソン (1905-91、左)、セス・ネッダーマイヤー (1907-88、右)。(AIP Emilio Segrè Visual Archives (ウィルソン)、Photograph by David Azose, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection (ネッダーマイヤー) より。)



Fig. 3.5 ドナルド・グレーザー (1926-2013、左)、ロバート・ヴァン・デ・グラフ (1901-67、右)。(AIP Emilio Segrè Visual Archives, W. F. Meggers Gallery of Nobel Laureates Collection (グレーザー)、同, Physics Today Collection (ヴァンデグラフ) より。)



Fig. 3.8 ジョン・コッククロフト (1897-1967、左)、アーネスト・ウォルトン (1903-95、右)。(AIP Emilio Segrè Visual Archives, Fermi Film Collection (コッククロフト)、同 Segrè Collection (ウォルトン) より。)

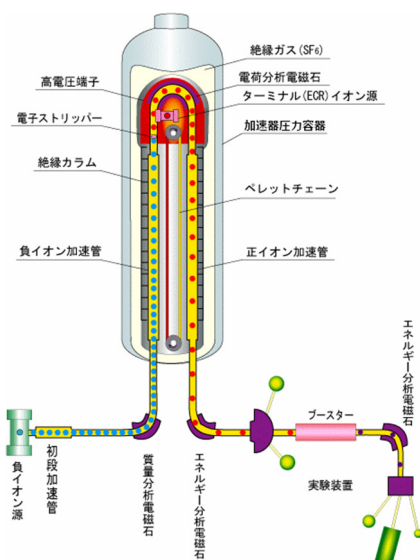


Fig. 3.6 タンデム (ヴァンデグラフ) 式加速器。(JAEA タンデム加速器「[タンデム加速器のしくみ](#)」より。)



Fig. 3.7 KEK のコッククロフト・ウォルトン型加速器 (イオン源)

要になる。静電場で加速といっても規模が違い、一部屋から体育館、建物全体が加速器といったサイズ感になる。重粒子用の静電加速器は MV (メガボルト) 領域の高電圧発生器であり、ヴァンデグラフ式 (1931 年、Fig. 3.6、[3.1, 3.2])、コッククロフト・ウォルトン式 (1932 年、Fig. 3.7、[3.3, 3.4, 3.5]) と続く。ダイオードブリッジでコンデンサを共振充電するというコッククロフト・ウォルトン式は世界初の人工的核変換 (1932 年) が行われた加速器だが、高電圧電源として今でも主流の方式である。静電加速器では DC 的にビームを出せるが、エネルギーが放電限界の 10 MeV 程度に留まる。ヴァンデグラフ式の高電圧発生器を用い、途中で電荷変換 (電子剥ぎ取り膜) を入れて往復で加速するので、ヴァンデグラフ式加速器はタンデム (2 頭立ての馬車) という名前と呼ばれている。タンデムは現在でも質量分析、 ^{14}C による年代測定などで多くの施設で使われている。(それぞれの肖像写真を Fig. 3.5、3.8 に示す。)

静電場は静的ポテンシャルなので、同じところを繰り返し通して加速できない (減速なしに入り口に戻れない)。時間的に変動する電磁場を使えば、同じ隙間や空洞を繰り返し通してどんどんエネルギーを上げていくことができる。また、AC や RF の方が高い電圧、高い加速勾配にできることも時間的に変動する電磁場を使う利点となる。

3.3. AC 電圧、RF を利用した LINAC

粒子の加速において、時間的に変動する電磁場を利用する最初の提案 (1924 年) はイジング[3.6, 3.7]によるもので、その後、ヴィデレー[3.8]によって実証 (1928 年) された。それをヴィデレー型 LINAC という。

その後、第 2 次大戦による RF の発展を経て、1947 年にアルヴァレ[3.9]が RF を使ったアルヴァレ型 (ドリフトチューブ型) 陽子 LINAC を発明、ハンセンらがクライストロン技術を元に進行波型電子 LINAC[3.10]を開発した。

3 種類の LINAC のそれぞれの特徴を Fig. 3.9 に、発明者、開発者達の肖像を Fig.3.10、3.11 に示す。

3.4. サイクロトロン

世界で最初の円形重粒子加速器は、手乗りサイズ (11 インチ……iPad くらい?) の 1.1 MeV 陽子サイクロトロン (1931 年、ローレンス、[3.11, 3.12, 3.13]) である (Fig. 3.12)。(ちなみにウランの崩壊で出るアルファ線 (陽子線) は約 4.2 MeV である。) サイクロトロンは丸い平たいハンドクリーム型の金属ケースを縦に真っ二つに切って、真空、一様磁場内に置いた様な加速器である。中空半月形の電極 (D 電極と呼ぶ) に高周波電圧を

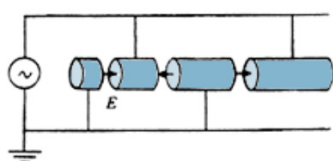


図1 ヴィデレー型リニアック

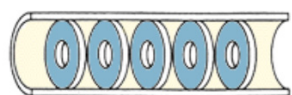


図2 円盤装荷導波管

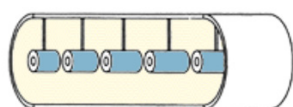


図3 アルバレ型リニアック

Fig. 3.9 LINAC の分類。(KEK キッズサイエンティスト「[線形加速器](#)」より。)

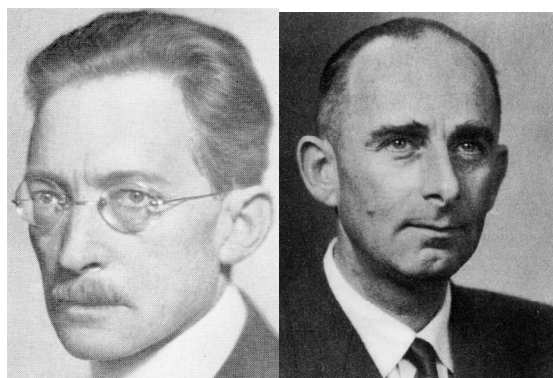


Fig. 3.10 グスタフ・イジング (1883-1960、左)、ロルフ・ヴィデレー (1902-96、右)。
(Wikipedia (イジング)、AIP Emilio Segrè Visual Archives (ヴィデレー) より。)

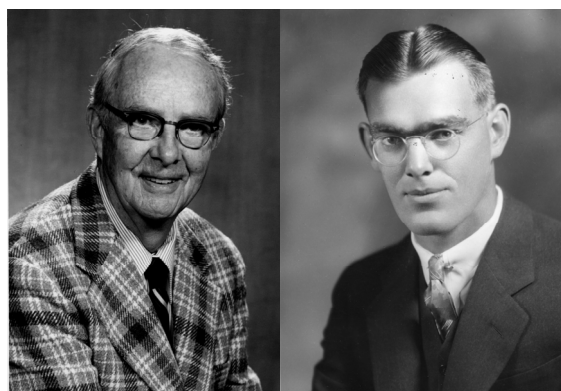


Fig. 3.11 ルイス・アルヴァレ (1911-88、左)、ウィリアム・ハンセン (1909-49、右)。
(Lawrence Berkeley National Laboratory, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection, gift of Peter Trower (アルヴァレ)、AIP Emilio Segrè Visual Archives (ハンセン) より。)

かけると、一様磁場中で円運動する陽子が電極の隙間を通る度に電場 (電位差) で加速され、円運動の軌道半径が大きくなってゆく。中心に置いたイオン源、すなわち水素を封入した電子真空管から陽極線として供給された陽子は、中心から外に向かって、渦巻きの様な軌道を描くことになる。(Fig. 3.13)

サイクロトロンの特徴は、一様磁場を作るために巨大な鉄の塊 (電磁石の鉄芯) が必要なことで、高エネルギー化するにはそれを巨大化させるしかない。手乗りサイズから始まり、最終的には大きな体育館サイズの鉄塊まで進化する。ビーム

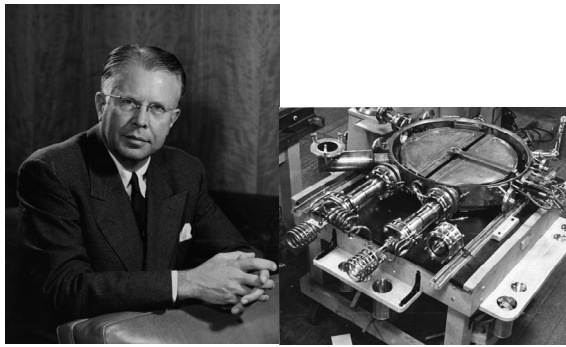


Fig. 3.12 アーネスト・ローレンス (1901-58、左) とサイクロトロン (1936 年頃、右)。(Lawrence Berkeley National Laboratory, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives (ローレンス)、同 Physics Today Collection (サイクロトロン) より。)

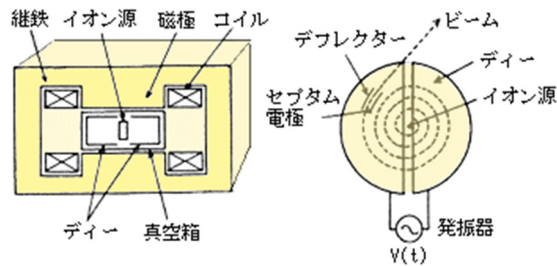


Fig. 3.13 サイクロトロンの構成。(KEK キップサイエンティスト「[サイクロトロン](#)」より。)

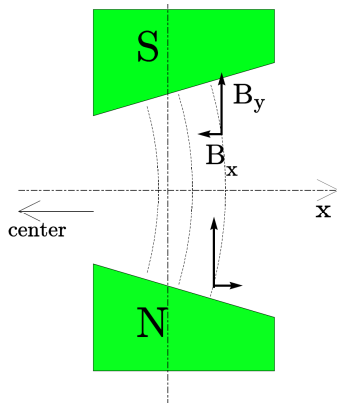


Fig. 3.14 外開きの電磁石磁場。紙面を手前から奥に貫く向きの電子（電流は逆向き）を考えると、フレミングの左手の法則から、電子に働く力は軌道中心を向く。

は RF に同期した塊で出力されるが、1 発毎に間隔が空くわけではなく、マシンガンのように連続的に出力される。大電流出力が可能で、今でも工



Fig. 3.15 ドナルド・カースト (1911-93、左) とロバート・サーバー (1909-97、右)。(AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection (ローレンス)、同 Bainbridge Collection (サーバー) より。)

業用や医療用など、低エネルギー領域の小型大電流重粒子源としては主力の方式である。

3.5. ベータトロン、軌道理論と復元力

サイクロトロンでそれなりに安定に粒子が加速できたのは、電極の端の誤差が復元力になったからである。設計軌道、中心軌道からずれた粒子を元の軌道に戻そうとする力を復元力という。加速器では、復元力なしに粒子を通過、加速、輸送することは不可能である。

重粒子は安定性をさほど気にしなくても最初からそれなりに加速できたが、軽い電子はそうはいかなかった。最初の円形の電子加速器はベータトロン (1941 年、カースト、[3.14、3.15]) である。磁場を変化させて誘導電場で加速を行う方式で、意図的に復元力を作るため、軌道に対して外開きの偏向電磁石を使う。(カボチャの様な、外に膨らんだ形の磁力線で、上下にずれた電子を中心面に戻す力が生じる。Fig. 3.14) 電磁場を含む相対論的ハミルトニアンを軌道に沿って展開し、運動方程式を解く [3.16] という、加速器軌道理論 (ビーム力学) がここで誕生する (カースト、サーバー、Fig. 3.15)。復元力があると、設計軌道からずれた粒子は設計軌道に戻されるように力を受けるので、そのまわりを振動することになる。加速器内でおこる、中心軌道まわりの粒子の振動を今でもベータトロン振動と呼んでおり、最も重要な運動である。

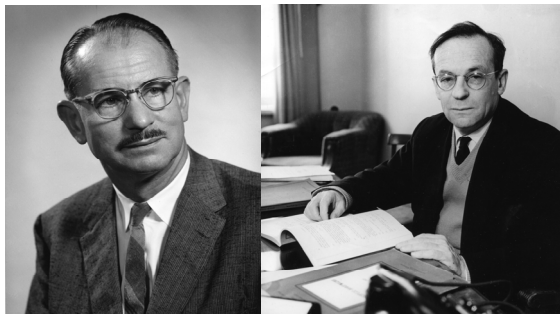


Fig. 3.16 エドウィン・マクミラン (1907-91、左) とウラジミール・ヴェクスラー (1907-66、右)。 (AIP Emilio Segrè Visual Archives (マクミラン)、同 Photograph by D. Shobmovich (ヴェクスラー) より。)

サイクロトロン、ベータトロンは今でも時々大学入試問題に登場する。

3.6. シンクロトロン

サイクロトロンでどんどん巨大化する鉄塊にはやはり限界があって、シンクロトロン(と位相安定性)が1945年、マクミラン[3.17]、ヴェクスラー[3.18、3.19] (Fig. 3.16) によって発明(発見)され、建設される。サイクロトロンと異なり、シンクロトロンでは、磁石を分割した上で、加速のためには独立したRF空洞共振器を設置した。粒子を加速するにつれ、磁場を強くしていき、軌道は一定のままに保った。共振空洞内では特定の周波数の電磁波が蓄積され、電場が粒子を加速する向きになったタイミングで通過した粒子だけが加速される。サイクロトロンでもそうだが、粒子はRFの加速タイミングにあわせてまとまっていて、それをバンチと呼ぶ。加速器の軌道上では、バンチが並んで回っている、というイメージになる。RFを使った加速器では、ビームはマシンガンのようなバンチ連続発射型になるが、それを通常、連続ビーム(Continuous Wave beam, CWビーム)と呼んでいる。静電加速器のような本当の連続ビームは一様ビーム(コースティングビーム)である。ちなみに、連続でないのは1秒に10発とか、間欠的にしかバンチを撃たない加速器で、それらはパルス運転、バースト運転と呼んでいる。

電子は100MeVくらいで既に超相対論的になるので、シンクロトロンを使うようなエネルギー領

域では速度は光速とみなせる。周回周波数はエネルギーに依らず一定で、必要なRF周波数も一定である。一方、陽子の場合、J-PARC MRの30GeVでも、まだ加速による速度変化の影響が消えない。エネルギーによって周回周波数が変わるため、RF周波数も変化させる必要がある。共振の品質係数Q値を低く、周波数スペクトルのピークをブロードに広げておく必要がある。電子用の空洞と陽子用の空洞は、技術的には全く異なるものとなる。

3.7. シンクロトロンの位相安定性

一定の軌道を周回させるRF円形加速器では、エネルギーの安定性が自然に確保できる。初期(低エネルギー)の重粒子シンクロトロンでは、エネルギーが高い粒子は速く周回するのでRF空洞に早いタイミングで到着、エネルギーの低いものは遅く来る。そこで、RFとして電圧が高くなるようなタイミングで加速を行うと、早く来た高エネルギーの粒子を少なく、遅く来た低エネルギーの粒子を多めに加速できる。RFの位相と、エネルギーによる速度差、到着時間差を利用したエネルギー方向の安定性を、位相安定性の原理(1945年、ヴェクスラー、マクミラン)と呼ぶ。ちなみに、相対論的な電子加速器の場合、速さはみな光速、エネルギーの違いは重さの違いで、軌道半径、軌道長の違いになる。高エネルギー粒子は外回りで軌道長が長くなってRFに遅く到着、低エネルギーは内回りで早くなる。位相安定なRF勾配は逆向き(時間的に電場が減る方向)になるが、位相安定性は成立する。なお、重粒子を低エネルギーから加速すると、速度差の効果と相対論的質量差の効果がどこかで逆転し、安定位相が跳ぶ。実際の運転でもRF位相を跳ばしている。(なお、線形加速器を含め、RFを使った加速器では、現実的には、どのタイミングで粒子を加速器(加速管)内に放り込んでも、加減速を繰り返しつつ、勝手に位相が揃って加速器内にビームが捕獲されるというイメージになる。計算機もない、緻密なシミュレーションもできない時代に加速器が成り立ったのは、この強力な安定性、捕獲性能のおかげであろう。)

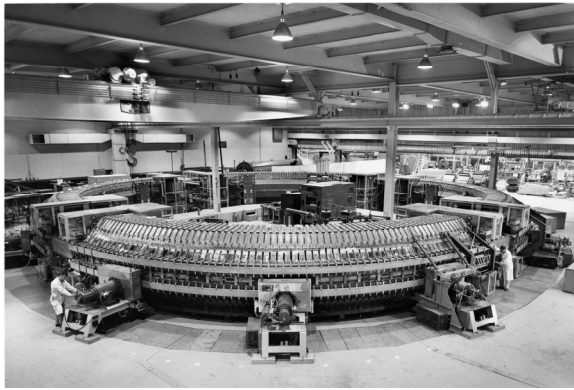


Fig. 3.17 Cosmotron (Photo courtesy Brookhaven National Laboratory, AIP Emilio Segrè Visual Archives)

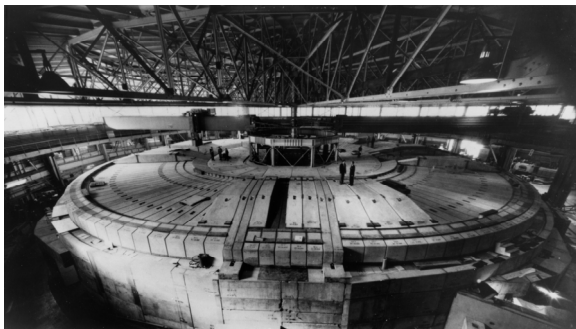


Fig. 3.18 Bevatron (Lawrence Berkeley National Laboratory, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection)

3.8. 最初期の大型加速器

この時期の特徴的な加速器としては、3 GeV の陽子シンクロトロン、Cosmotron (1953 年、ブルックヘブン研究所、USA、Fig. 3.17) があり、宇宙線に含まれる粒子を作ることができた。直径 23 m で、世界で最初に、加速した粒子を加速器外に取り出した加速器である。(それまでは加速器内に固定ターゲットが置かれていた。) 6.2 GeV の Bevatron (1954 年、ローレンスバークレー研究所、USA、Fig. 3.18) は粒子の周回軌道長約 800 m、ターゲットは加速器内にあったが、衝突で発生させた粒子は外に取り出して測定が行われた。Bevatron は反陽子の発見 (1955 年、セグレ、チェンバレン) 後も、医学利用の開拓などで利用されていたが、2009 年にリーマンショックのあおりで廃止された。



Fig. 3.19 AdA (Anello Di Accumulazione、左) とブルーノ・タウシェック(1921-78)。
(左：イタリア フラスカッティ研究所「[AdA](#)」、右：Wikipedia より)

3.9. 加速粒子同士の衝突

固定ターゲット実験では重心エネルギーは加速エネルギーのルートにしかならないが、厚いターゲットを使えば全粒子を実験で消費できる。一方、加速粒子同士を衝突させると、重心エネルギーは加速粒子のエネルギーの和になって高エネルギー化できる一方、衝突させること自体が難しくなる。世界初の加速粒子同士の加速器内衝突型加速器はイタリア AdA (1961 年、フラスカッティ研究所、Fig. 3.19) で、直径 1.3 m、250 MeV の電子-陽電子衝突型シンクロトロンである。1 台の加速器内に電子と陽電子を逆向きに回してぶつけた。なお、最初に電子用の入射部から電子を入射、蓄積した後、そのまま加速器全体が移動して、逆側にある陽電子用の入射部に再接続、陽電子を入射したという、空前絶後の全体移動式加速器であった。AdA を提案、建設したのはタウシェックであって、後年、バンチ内散乱の効果「タウシェック効果」で名を残している。

3.10. 強集束の原理

偏向磁石を外開きにして得られる集束力は、水平 (内外方向) と垂直 (上下方向) を足して一定である。それを弱集束といい、Bevatron や AdA はその方式だった。もっと強い集束力を両方向に得るために、傾きをさらに増やし、逆傾き (内開き) の磁石も導入して交互に配置するという方式が発明 (1950 年、クリストフィロス[3.20]、1952 年、クーラン、シュナイダー、リヴィングストン[3.21]、

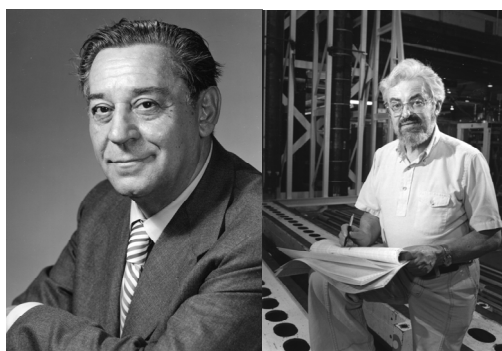


Fig. 3.20 ニコラス・クリストフィロス (1916-72、左) とアーネスト・クーラン (1920-2020、右)。(AIP Emilio Segrè Visual Archives (クリストフィロス)、同 Photo courtesy Brookhaven National Laboratory, Physics Today Collection (クーラン) より。)



Fig. 3.21 ハートランド・シュナイダー (1913-62、左) とミルトン・リヴィングストン (1905-86、右)。(AIP Emilio Segrè Visual Archives (リヴィングストン)、同 photo courtesy Brookhaven National Laboratory (シュナイダー) より。)

Fig. 3.20、3.21) された。磁場をレンズとして使う場合、内外方向に集束 (凸レンズ、Focus) なら、上下方向には発散 (凹レンズ、Defocus) となる。凸レンズと凹レンズを連続で設置し、水平垂直両方向に対して交互に「縮めて広げて」を繰り返すこの方式 (Fig. 3.22) を強集束の原理という。強集束と位相安定性が、近代加速器の2大原理である。

最初の強集束シンクロトロン (alternating gradient synchrotron) はそのままの英語名 AGS で1960年に建設 (ブルックヘブン研究所、USA、Fig. 3.23) された。周長 800 m、33 GeV でミュオンニュートリノ (1962年、レーダーマン、シュワーツ、シュタインバーガー)、K 中間子の CP 対称性破れ

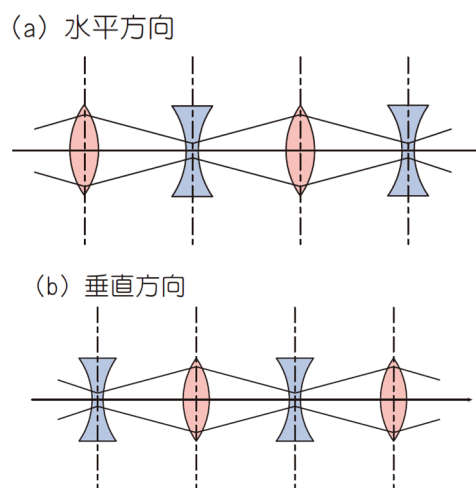


Fig. 3.22 強集束の原理

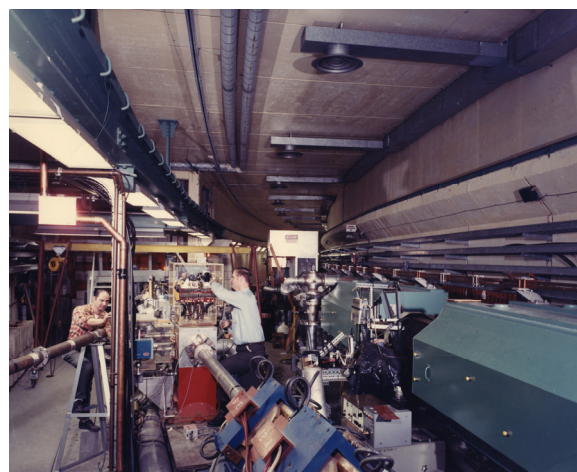


Fig. 3.23 AGS (Alternating Gradient Synchrotron) (AIP Emilio Segrè Visual Archives, photo courtesy Brookhaven National Laboratory)

(1964年、クロニン、フィッチ)、チャームクォーク (J/ψ 、1974年、ティン、後述する SLC と同時) の発見などの業績を上げて、なんと今でも RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) の入射器として現役稼働中である。

3.11. 機能分離

集束力はその後、偏向電磁石から分離され、4極電磁石というレンズ専用電磁石が導入される。その際、偏向電磁石の標準は水平方向には磁場一定の純2極成分電磁石となる。製作精度や磁場調整を考えると、集束と偏向は機能分離した方が簡単である。近代的な蓄積リング型加速器のビームパ

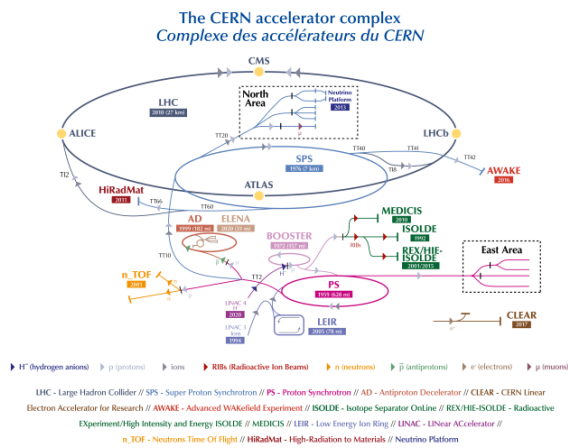


Fig. 3.24 CERN LHC までの多段加速の例。
LHC に入射される陽子ビームはイオン源から LINAC4 で 160 MeV、BOOSTER で 2.0 GeV、PS で 25 GeV、SPS で 450GeV、最終的に LHC で 7 TeV まで加速され、衝突実験が行われる。（“[CERN Accelerator Complex](#)” より。）

ラメータは 2 極、4 極電磁石の配置と強さで決定され、それを線形光学という。線形光学（ベータトロン振動）理論は現代でもビーム力学で最も基本的かつ重要な内容である。なお、加速器で使われている電磁石の種類としては、2 極、4 極に加え、4 極による集束力のエネルギー収差を補正するための 6 極電磁石を加えた 3 種類が主な電磁石である。現代的な加速器は、ビーム力学的には、衝突点回りの細かな補正部分などを除き、何もない真空ダクト（ドリフトスペース）、2、4、6 極電磁石、RF 空洞から構成されている。

3.12. 多段加速

初期の加速器では、真空管からの陽極線や陰極線をサイクロトロンやベータトロンに直接入射していた。（医療用、工業用の小型加速器は今でもそうである。） 高エネルギーになるにつれて、複数の加速器をつなげて使う方式になり、粒子源の次の初段部分が線形加速器、次に円形加速器、さらに別の円形加速器、という風に多段で加速する方式が採用されていく。CERN LHC の例を Fig.3.24 に示す。

3.13. 衝突点と検出器

衝突型加速器の場合、衝突点の設計が最も重要なポイントになる。加速器設計で、目的とする素粒子反応の頻度を表すパラメータをルミノシティという。ルミノシティが高ければ高いほど、目的となる物理データを短時間で多く得ることができる。ルミノシティを高めるには、電流を上げる、衝突点のビームサイズと発散角を小さくする、衝突粒子同士の相互作用を抑制すること、が重要となる。素粒子実験用の加速器の場合、加速器の設計目標は衝突点に必要なパラメータを実現することである。

初期の検出器は霧箱や泡箱だったが、現代でも、ビームがイオン化したガスを、ワイヤーで検出する手法が使われている。勿論、半導体や光検出器も用いられており、現代の検出器はそれ自体が 2 階建て家屋よりも大きいサイズである。検出器がすることは、作られた粒子が何かを判別する（タグ付けする）ことで、荷電粒子の場合はソレノイドで曲げて軌道半径を測る。ただし、ソレノイド磁場は加速器のビームにとってよくないので、加速器の真空ダクトには打ち消し用に逆ソレノイドが巻かれる。衝突点とそのまわりのハードウェア設計が、衝突型加速器設計で最も難しく、最も重要な課題である。

3.14. 放射光の発生

相対論的荷電粒子を曲げると光が出て、エネルギーが失われる。それを放射光という。「放射」の計算の最初は[3.22]によると、リエナールによる 1898 年の論文で、「点電荷が任意の方向に移動することによって生じる電界と磁界[3.23]」という論文で、電子の発見（1897 年）前後で相対論（1905）よりはだいぶ前になる。放射光の計算はリエナール・ヴィーヘルトのポテンシャルから始まるが、その出発点であろう。その後、ショットが 1912 年に様々な拡張を行い、放射パワーを相対論を使った形式で導出した[3.24]。肖像を Fig. 3.25 に示す。

放射光によるエネルギー損失の詳細は 1945 年に計算（シュウィングー[3.25]、Fig. 3.26）され、1948 年に GE 社の 70 MeV シンクロトロンで最初

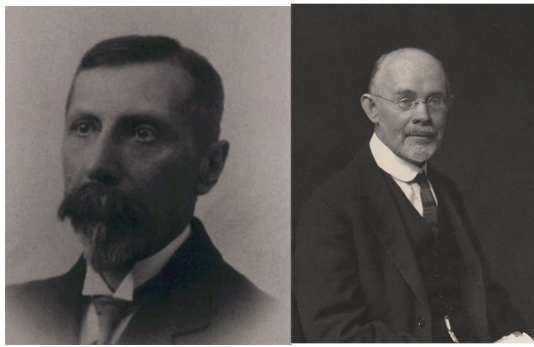


Fig. 3.25 アルフレド・マリー・リエナール (1869-1958、左) とジョージ・アドルファス・ショット (1868-1937、右)。(sur Annales des Mines (consulté le 23 mai 2014) (リエナール)、英国肖像画博物館 (ショット) より。)

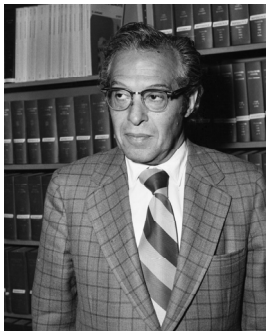


Fig. 3.26 ジュリアン・シュウィンガー (1918-94)。(AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection より。)

に観測 (Fig. 3.27) された。(この「シンクロトロン」はベータトロンの部品を再利用して制作した、世界最初のシンクロトロンとのことである。) 初期の高エネルギー加速器は新しい同位元素や新重粒子発見のために建設されたが、放射光の効果によるエネルギー損失もあり、巨大円形加速器は専ら重粒子加速器であった。

ビーム力学的にみると、放射光には、加速器内で復元力の効果で設計軌道周りを振動しながら周回する粒子に対して、その振動の励起と減衰の両方の効果がある (1.3.6 参照)。放射光を出す電子、陽電子蓄積リングの蓄積ビームのパラメータは、放射励起と放射減衰の平衡値で、それはベータトロン振動理論 (線形光学) で決まるパラメータである。これらは入射ビームには依存せず、蓄積されてしまえばビーム状態がリセットされるのである。一方、重粒子 (J-PARC) では、入射し

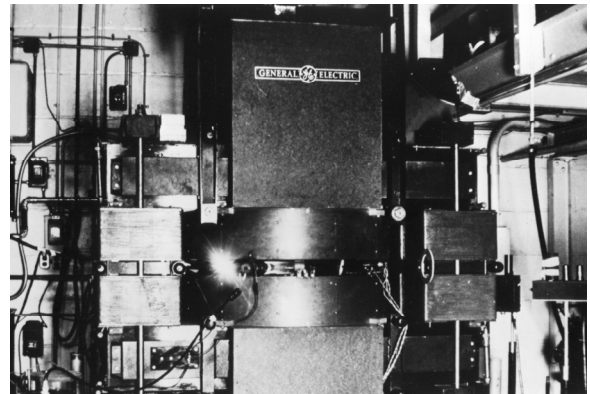


Fig. 3.27 最初の放射光観測、GE 社。(AIP Emilio Segrè Visual Archives, John P. Blewett Collection より。)

たときの状態を加速取り出し後までずっと引きずることになる。

3.15. SLAC

大規模な電子、陽電子加速器は線形加速器として建設され、初期の最も有名なものは SLAC (スタンフォード線形加速器センター、USA、Fig. 3.28) にあった、長さ 3.2 km の SLC (1967 年) である。建設当時は、電子は 20 GeV、加速した電子ビームをターゲットにぶつけて陽電子ビームを生成、加速器上流にそれを戻して再度加速、陽電子は 13 GeV まで加速できた。実はこれが世界初の衝突実験用線形加速器で、LINAC 下流には輸送路と衝突実験施設があり、LINAC からの電子ビームを水素にぶつけてクォーク (陽子の内部構造) が発見 (1969 年) されている。また、この LINAC を入射器として、周長約 230m の電子-陽電子衝突実験用の蓄積リング SPEAR が建設 (1972 年) され、1.5 GeV で入射、4 GeV まで加速して衝突実験が行われ、チャームクォーク (1974 年、AGS と同時)、タウ粒子 (1975 年) が相次いで発見された。リングに電流を蓄積して衝突実験を行うと、1 度しか衝突チャンスのない線形加速器に比べ、毎週回ごとに同じビームを衝突に使うことができてルミノシティが飛躍的に向上する。

その後、SLC では電子、陽電子ともエネルギーが 50 GeV までアップグレードされた (1980 年)。その際の RF 高勾配化技術 (SLAC Energy Doubler, SLED) を導入して KEK の LINAC が建設されて

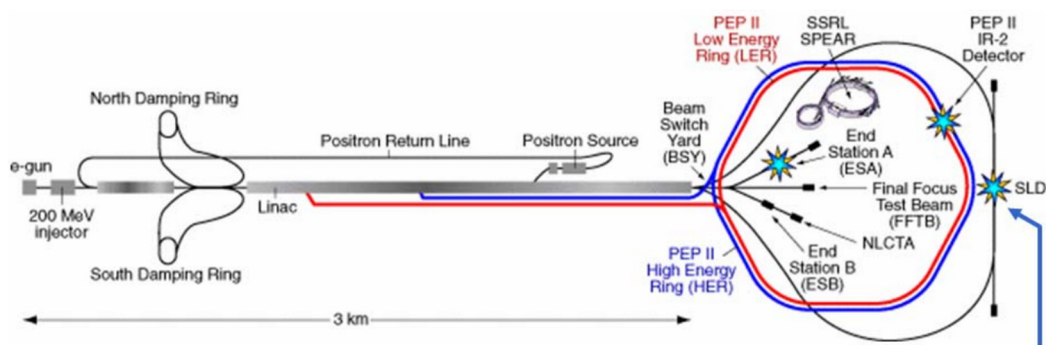


Fig. 3.28 PEP II 時代の SLAC 加速器構成。現在は SLC、PEP II とも廃止され、世界最初の X 線 FEL である LCLS と、超伝導 CW XFEL である LCLS II が稼働中である。(SLAC-PUB-10689, Aug, 2004 より。)

いる。50 GeV の衝突実験用に、蓄積リング PEP が建設され、その際、SPEAR は衝突実験からは完全に切り離され、放射光専用リングとなった (1990 年)。PEP はその後、B ファクトリー PEP II となり、ババール検出器で B 中間子の CP 対称性の破れを実証した。(KEKB の Bell 検出器と同時。) PEP II は 1998 年に廃止され、大規模素粒子実験は終了、SLC 跡地には 2009 年に世界最初の (常伝導) X 線自由電子レーザー LCLS が建設された。現在、SLAC では放射光源 SPEAR III (2004 年に SPEAR を大規模改造) と LCLS が稼働中、超伝導 CW XFEL である LCLS II が建設完了し、調整運転中である。

3.16. 現代の巨大加速器

最初期の加速器では専ら新粒子探索が行われていたが、1960 年代に標準理論がまとまり始めると、次第に理論検証のための精密測定的重要性が高まっていく。加速器や検出器は大きくなり、個人の研究から 100 人、1000 人の国際研究プロジェクトへと変わっていく。現在、素粒子原子核実験用の高エネルギー加速器は世界に 3 台あり、SuperKEKB の他に、CERN (スイス、フランス) の LHC (Large Hadron Collider)、北米ブルックヘブン研究所の RHIC である。LHC は周長 27 km、7 TeV の陽子-陽子衝突型加速器で、2013 年にヒッグス粒子を見つけたことで話題になった。(2025 年末から高ルミノシティ化改造に入る予定。)

3.17. 素粒子実験：フレーバー物理

クォーク、レプトンの種類をフレーバーという。クォークやレプトンに働く相互作用や崩壊過程の測定、新しい粒子発見などを通じて既存の理論の有効性を確かめたり新理論の構築を目指したりする分野をフレーバー物理と呼んでいる。研究は、直接的に粒子生成数を測定する手法と、ラグランジアンなどを通じて間接的に測定する手法の両方を組み合わせて進められている。

SuperKEKB は、KEKB、PEP II で存在が証明された CP 対称性の破れをさらに精密に測定し、標準理論と比較することで新理論を探索している。また、間接測定という観点からは、ボトムクォーク (質量約 4 GeV) を含む中間子が B 中間子であるが、非常に重いトップ (約 170 GeV) クォークを除けば一番重いクォークであり、超高エネルギー「ではない」加速器を利用して、不確定性の範囲で非常に重い粒子を含むレアイベントから超高エネルギー領域の理論を探索するという目的には最も適している。

LHC は現在世界最高エネルギーの加速器であり、トップクォークやヒッグス粒子の直接観測が可能で、ヒッグス粒子を発見した後、次の段階としてその精密測定のための高ルミノシティ化が予定されており、2025 年末から High Luminosity LHC (HL-LHC) の大改造が始まることになっている。

3.18. SuperKEKB に至る道

1 章でも述べたが、KEK には、SuperKEKB の前には KEKB があり、さらにその前には TRISTAN という加速器があった。

TRISTAN (1986 年～1995 年) は 30GeV の電子陽電子衝突型加速器で、トンネル内に加速器は 1 台、電子と陽電子を同時に逆回りに蓄積し、加速、4 箇所衝突させていた。衝突点検出器は VENUS、AMY、TOPAZ、SHIP という 4 台である。繰り返しになるが、当時は LINAC から 2.5 GeV の電子と陽電子を出射、AR で 8 GeV まで加速し、MR に電子、陽電子あわせて 20 mA を蓄積、30 GeV まで加速して、1 時間程度衝突実験を行う、というのが典型的な運転であった。トップクォーク探索が主目的だったが、後にトップクォークは 170 GeV と分かり、また、いくつかの発見はあったが、すぐに CERN LEP (LHC の前にあった、209 GeV の電子陽電子衝突型加速器、1989 年～2000 年) によって「強烈に」上書きされていったそうである(「日本のコライダーの系譜と将来展望」研究会、2024 年 3 月)。最大ルミノシティは $4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$ 、9 年間の運転で積分ルミノシティ 400 pb^{-1} であった。

KEKB (1998 年～2010 年) は 3.5 GeV 陽電子リング (LER) と 8GeV 電子リング (HER) というエネルギーの違う 2 台の加速器を設置(電磁石は TRISTAN の再利用を含む)、LINAC もアップグレードし、直接常時入射(電流減少分を注ぎ足して電流値一定に保つので、トップアップ入射と呼ぶ)で、衝突実験を行った。衝突点は筑波実験室の 1 箇所のみで、そこに Belle という名の検出器が設置されていた。蓄積電流値は LER 1.64A、HER 1.19A (mA ではなく、A) で、最大到達ルミノシティは $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$ (2100×10^{31})、積分ルミノシティ 1040 fb^{-1} (1040000 pb^{-1}) であった。TRISTAN と比べると、時間当たりの衝突数は 500 倍以上、運転期間中の全目的衝突数は約 2600 倍となっている。SLAC の PEP II + BaBar 検出器と同時に CP 対称性の破れ(小林・益川理論)を実証し、ノーベル賞となった。

SuperKEKB (2019 年～) は KEKB のアップグレードで、現時点の最大到達ルミノシティは $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$ で現在も世界記録を更新中である。

3.19. 原子核実験：量子色力学 (QCD)

素粒子実験が理論そのものの検証や構築を目指しているのに対し、原子核物理分野は物質科学や生命科学同様、物理法則が現実世界でどう働いているかを検証しているという面がある。基本法則だけでは多体系や複雑系は解明できず、結局は実測とモデル化が必要である。

原子核物理では、強い相互作用を扱う量子色力学 (Quantum Color Dynamics, QCD) が基本となる。低エネルギー側では原子核自体の性質、例えばマジック数や原子核内部の様子の解明や、新しい重い原子核の生成などが研究テーマである。高～超高エネルギー側では、中性子星の物理の解明やビックバン直後の状態(クォーク・グルーオンプラズマ)の解明などが課題となっている。

通常の核子内部のアップ、ダウングレードをストレンジクォークで置き換えたハイパー粒子(ハイペロン)を使うと、フェルミオンである陽子や中性子に働く排他律にかからないので、原子核内部の様子が観測できる。ハイパー粒子を含む原子核をハイパー核というが、ハイパー核自体の研究、ハイパー粒子を原子核に衝突させて内部を探る研究など、ストレンジネス核物理と呼ばれる研究が J-PARC では行われている。

一方、KEK の支部もある、理研和光キャンパスには多段のリングサイクロトロンなどから構成される RI ビームファクトリーがあり、重元素の研究などが行われている。最近ではニホニウム(2015 年発見認定、2016 年命名)が話題となった。

3.20. 「トウイス」パラメータの由来

この章の最後として、加速器で最もよく使う人名由来の単語、「トウイス」パラメータの由来となったトウイスを Fig. 3.29 に示す。トウイスは量子光学におけるハンプリーブラウン・トウイス効果



Fig. 3.29 リチャード・クエンティン・トゥイス (1920-2005、左)。(右はハンフリー・ブラウン。 [3.26]より。)

で知られた天文学者で、干渉計の開発で知られている。Wikipedia (英語版) によると、トゥイス本人もどうして、加速器の基礎パラメータをトゥイスパラメータと呼ぶか分からないとのことだそうである。(Wiki はクーラン・シュナイダーパラメータと呼んだ方が正確だと示唆している。)

コラム：加速器の授業・講座

筆者は中央大学で (2024 年より隔年) 高エネルギー加速器科学という講義を 4 人分担で行っていて、最初の 3 回を担当している。初年度は本当に加速器ビーム力学入門という感じで、運動方程式から横方向の運動、縦方向の運動までやってみたのだが、どう見ても受けが良くなかった。(皆さん真面目に受けて下さるが、時に爆睡させてしまった……) そこで、加速器とは何か、から始まる市民講座の感じにした方が良く、と思って参考にしたのが、先人の講義録である。

総研大加速器概論 (現在、筆者も放射光源について担当している) の講義録が、2022 年度まで公開されている。(2023 年度からは所内限定。)

<https://www2.kek.jp/accl/sokendai/corecurriculum/>

この講義は 2010 年から始められ、年が進むと資料の整備が進み、ダウンロードできるようになっていく様子が見られるが、歴史や基礎について非常にきちんと準備されていて参考になった。

他にも、KEK の indico で公開されているスクールの資料も多くある。

<https://conference-indico.kek.jp/category/42/>

それぞれ公開の有無は開いてみなければ分からないが、参考になる資料も多い。

所内限定ではあるが、サクラサイエンスプロジェクトの講義資料も indico にあり、(演者の先生の許可を頂き) 歴史部分の講義を作るのに使わせて頂いた。

中央大の講義が筆者にとって生まれて初めて行った正規の課程の一環としての講義だったのだが、3 コマ分を準備するのに、2 ヶ月以上かかった。大学の先生達は 15 コマの講義を複数担当していたりするのがすごいなと本当に思う。講義をまとめて教科書になるのも納得である。また、所内の職員相手の気軽さ? に比べて、外部のちゃんとした大学生相手に非常に緊張したのも思い出である。総研大もそうだが、年 1 回や隔年ということもあり、どうしても慣れないで毎度、かなり緊張している……

4. 放射光と放射光源の発展

4.1. 真空紫外線と X 線

光を使った物質、生命科学に話題を移す。可視光のエネルギーは 1.5 (赤) ~ 3 (青) eV である。約 10 eV (波長 120 nm) 程度を真空紫外線 (Vacuum Ultraviolet, VUV)、100 eV ~ 1 keV (12 ~ 1.2 nm) を軟 X 線 (Soft X-ray, SX)、10 keV (0.12 nm) 以上を硬 X 線 (Hard X-ray, HX) と呼ぶ。それぞれの名前の由来は、真空紫外は、空気中では主に酸素に吸収され、光路を超高真空に保つ必要があるから、HX は物質に照射したときに硬い玉が散乱される様なイメージになるから、SX は吸収や発光、光電効果など様々な反応が起こるからである。HX は透過率が高く、物質の内部、バルク部分の平均値が測定可能で、結晶の構造解析などに使われる。一方、VUV ~ SX (VSX とまとめることもある) は内部まで到達せず、表面や薄膜の研究、外殻、価電子帯の電子状態の研究などに用いられている。(Fig. 4.1)

入射光と散乱光の波長が同じ散乱を弾性散乱 (トムソン散乱) と呼ぶ。(空が青い理由は青い光が大気中の微粒子とより多く弾性散乱 (レイリー散乱) するためである。) それに対し、散乱光の波長が変わる散乱を非弾性散乱 (コンプトン散乱、

ラマン散乱) と呼ぶ。(例えば空港の X 線荷物検査では後方コンプトン散乱が利用されている。) 光と物質の相互作用としては、VUV ~ 10 keV 程度までは光電効果と弾性散乱が主となる一方、HX 領域では非弾性散乱が主となる。また、蛍光 (内殻電子が跳ばされ、外殻から電子が落ちてくる時の発光)、オージェ効果 (蛍光の分のエネルギーを受け取った別の電子の放出)、ラマン散乱 (原子分子の振動によるエネルギー変化を伴う散乱) など起こる。いずれも物質科学の実験に利用されている。

プローブの種類 (光、中性子、ミュオン、陽電子など) とエネルギー (波長、運動量) によって、試料のどこまで届くかが大きく違う。また、反射法、光電子、発光などを利用する場合は、当然、深いところからは出てこない。見たい部分と使いたい手法によって、適した試料の大きさや準備方法が大きく違うことになる。表面なのか、バルクなのか、薄膜なのか、単結晶なのか、純物質なのか、液体や混合物弾性体なのか、分野や手法の常識としての大前提は記述が省かれることも多いので注意が必要である。

4.2. 加速器と放射光のエネルギー

X 線管では、極端なことをいえば、卓上で 100 kV あれば 100 keV の X 線が出せる。一方で、加速器からの放射光の場合、10 GeV クラス (かなり巨大な部類の加速器) でぎりぎり 100 keV という感じになる。それでも放射光を使う利点は、特性 X 線に比べて波長や偏光が可変であり、光子数が多く、光子ビームの指向性が高いためである。(X 線管の 10^6 倍以上の光子数が出る。)

相対論的荷電粒子を曲げると、軌道の接線方向に集中した電磁波を出す。例えば 2.5 GeV の電子蓄積リングである PF リング (周長 187 m) の場合、磁場約 1 T の偏向電磁石からは、およそ 4 keV の X 線をピークに、赤外から HX まで連続スペクトルの放射光が出る。全光子数 (光束) はおよそ毎秒 10^{13} 個 (0.1% エネルギー幅) で、分光、集光後に試料上に照射されるのはおよそ 10^{11} 個程度に

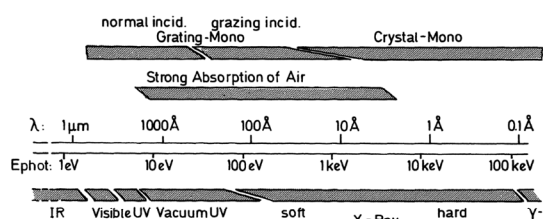


Fig. 4.1 Nomenclature and basic facts about electromagnetic radiation from 1 - 10⁵ eV

Fig. 4.1 電磁波の性質 10 eV 付近の低エネルギー領域の分光は直入射回折格子、100 eV 付近になると斜入射回折格子、1 keV 付近 (現在は 2 keV) を境に結晶分光器が利用されている。「真空紫外」領域を中心に大気や薄膜に吸収されるため、超高真空及び仕切り (Be 薄膜による真空ダクトの切り分け) のない輸送路が必要となる。([4.1]より)

なる。X線管からの特性X線の毎秒 $10^3 \sim 10^6$ 個に比べると、格段に強いことが分かる。

4.3. 分光

放射光は白色のままでも使われることもあるが、必要なエネルギーの光だけを取り出すために分光して使われる。實際上、2 keV 程度を境に分光方式が異なり、低エネルギー（長波長）側は回折格子、高エネルギー（短波長）側はシリコンの結晶分光器が使われる。結晶2個を組み合わせた2結晶分光器を使えば、入射位置と出射位置を固定して分光することが可能であり、Si(111)面を使うと、回折角70度で2 keV、7.5度で15keVが取り出せる。それより高いエネルギーの光に対しては、（例えば高圧実験 BLなどで）Si(311)面やSi(533)面などが使われている。PF/ARでは、2 keVを挟んで上下のエネルギーを連続で分光できる分光器は利用されていない。（それほどSi2結晶分光器の性能は抜群である。）最近、PFのBL12Aに回折格子とSi結晶分光器の両方式を並列で使い

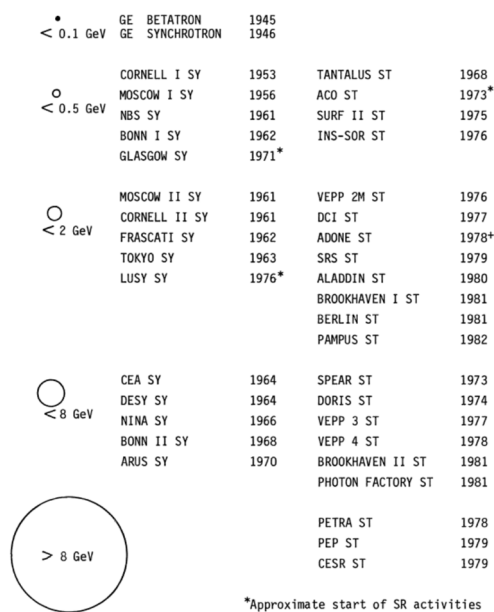


Fig. 1.2 Growth of sources for SR since 1945. The circles drawn are approximately on scale

Fig. 4.2 歴史的な放射光源リスト（1945年～1979年）SYはシンクロトロン（ブースターリング）、STはエネルギー一定運転の蓄積リング。Tokyo SYは核研ES、INS-SORは核研SOR-Ringである。（[4.1]より）

第1表 SOR 利用施設をもつ主なストレーン・リング

装置名	所在地	完成年	λ_p (Å)	E(GeV)	I(mA)	R(m)	B(kG)	SORチャネル
ACO	仏, Orsay	1966(1973)	30	0.54	100	1.11	16	1
Tantalus-I	米, Wisconsin	1968(1968)	180	0.24	120	0.64	12	9(専用)
☆SPEAR	米, Stanford	1972(1974)	3.5(0.73)	2.5(4.2)	60	12.7	7(11)	1
☆DORIS	独, Hamburg	1974(1974)	1.9	3.0	e^+800 e^-200	12.12	8	2
SORRING	日, 東京	1974(1975)	170	0.3	10~100	1.1	9	4(専用)
☆DCI	仏, Orsay	1975	2.7	1.8	(400)	3.82	16	2
☆P-F	日	1980?	$\frac{2.3}{0.38}$	2.5	1000	$\frac{8.33}{1.39}$	$\frac{10}{60}$	10(専用)

比較のために、フォトン・ファクトリー計画のマシンも含めた。☆印はX線を放射するマシンを示す。完成年の欄のカッコは、SOR施設が活動を開始した年である。SPEARは、1974年にエネルギーを上げている。

Fig. 4.3 世界のSOR施設の例（1976年）PF（計画）が参考に掲載されている。（[4.4]より。）

分けられる広波長域対応ビームラインが建設され、ユーザー運転に供されている。（BL11も同様に整備中である。）

4.4. 初期の歴史

放射光の初期の歴史は[4.1, 4.2, 4.3]などが詳しい。英文の文献をあたると、「シンクロトロン」という言葉は素粒子原子核実験用にエネルギーを上げる運転を行うリングに使い、エネルギー一定の運転を行うリングは「蓄積リング」と区別している様である。Fig. 4.2に、初期の放射光リングのリストを引用しておく。日本語の文献を探し尽くしたわけではないが、例えば[4.4]、[4.5]を挙げておく。[4.4]より、当時の放射光実験施設リストを引用する。（Fig. 4.3）

放射光を使った最初期の研究は気体の分光研究であり、ランプの輝線スペクトルの波長の標準化の為の実験が1963年にNBS (National Bureau of Standard, 米国規格標準局) の180 MeVシンクロトロン SURF (Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility)で進められた[4.6]。（NBSはその後、NIST (National Institute of Standards and Technology)と名を変え、SURF IIIが今でも活躍中である。）なお、放射光自体の観測や研究という意味では、低エネルギーのベータトロンを使った研究があった後、現代の放射光利用の波長域同様のEUV (数百 MeV のエネルギーの加速器と、高真空ビームラインが必要となる) 領域の研究として、コーネル大学の300 MeVシンクロトロンを利用した[4.7]が最初の研究としてよく

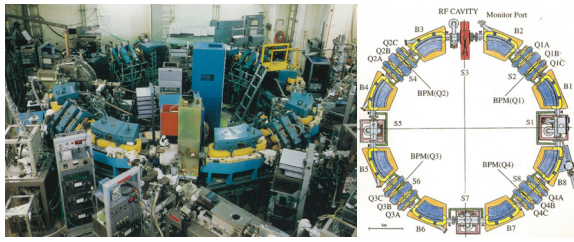


Fig. 4.4 INS-SOR (SOR-RING 20 周年記念絵 はがきより。)

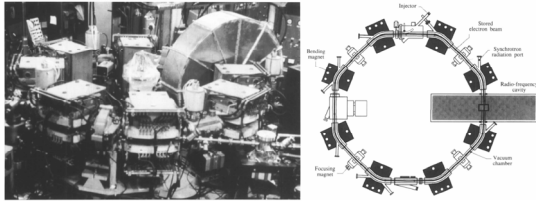


Fig. 4.5 Tantalus ([4.8]より。)

挙げられている。1960 年代、素粒子原子核実験用加速器からの放射光利用を第 1 世代と呼ぶ。

第 1 世代で研究が進み、放射光の利点が広く知られるようになると、世界各地に放射光研究部門（施設）が作られることになり、やがて、専用の加速器が建設されることになる。1970～80 年代の放射光利用専用に建設された加速器を第 2 世代と呼んでいる。

世界最初の第 2 世代リングは東京都西東京市（当時田無市）にあった東京大学原子核研究所（INS、Institute of Nuclear Study）の INS-SOR（1975～1997 年、Fig. 4.4）である。

規模の大きい加速器としては、イギリス、ダラスベリ研究所の SRS（1981～2008 年）があり、ビーム力学的な設計は AGS と同じ（ただし機能分離）で、凹レンズ凸レンズ（発散 4 極と集束 4 極）が偏向電磁石の間に交互に密に並んだ設計の加速器である。PF の弧部の電磁石配列も SRS と同じである。（高輝度化アップグレードの仕方も同じ。）

実は、世界最初の放射光専用リングというと、INS-SOR でも SRS でもなく、それは Tantalus（Fig. 4.5）である。[4.8] MURA (Midwestern Universities Research Association、1953-1967) という研究組織の作ったリングで、多目的電子加速器として作られたものの、MURA が廃止となっ

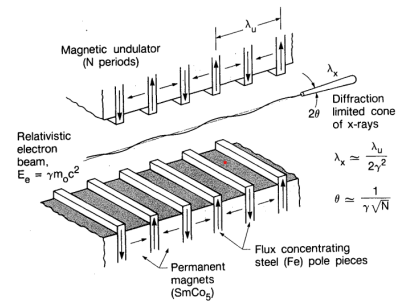


Figure 2 Pencil like beams of relativistic electrons produce spatially coherent x-rays, of relatively narrow spectral width, $\lambda/\Delta\lambda = N$, when traversing a periodic magnetic undulator.

Fig. 4.6 挿入光源の磁極列 現代的な挿入光源では、鉄は利用せず、全て希土類永久磁石を並べて利用している。([4.10]より。)

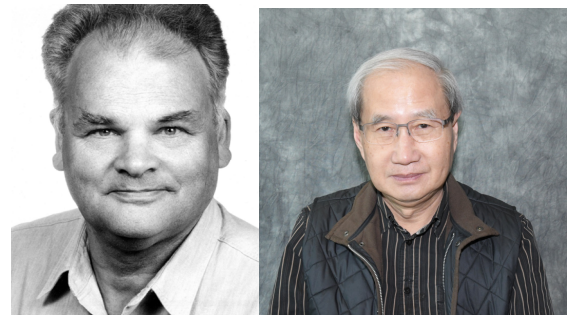


Fig. 4.7 クラウス・ハルバッハ（1925-2000、左）、クンチェ・キム（1944-、右）（Physics Today 54 (4), 89-90 (2001)（ハルバック）、シカゴ大学 WEB（キム）より。）

ため、使い途がなくなり、放射光専用リングとして運用されることになったそうである。（ベータトロンを発明した Kerst が MURA のディレクターを務めていた。）

4.5. 挿入光源の導入

1980 年代後半になると、偏向電磁石からの光よりさらに強い、さらに指向性の高い光を求め、挿入光源が実用化（Fig. 4.6）される。なお、最初の理論は 1947 年（ギンツブルグ）、赤外光での実証が 1952 年（モッツ）になされている。最初の実用化は、1981 年、LBL のハルバッハ、キム（Fig.4.7）、アトウッドらによって、SSRL で行われた[4.9, 4.10]。挿入光源の磁石配列は、片側（ビーム通過側）に強く磁力線を集中させる「ハルバッハ配列 [4.11]」となっている。

挿入光源では、沢山並べた薄い永久磁石の列で電子の軌道を挟み、電子を蛇行させる。1 回小さくうねる毎に光を出すので、光は重ね合わされ、干渉効果で特定の波長だけが強くなる。光の波長は電子のエネルギー、磁場の強さ、蛇行軌道の周期長で決まり、磁極列の隙間を開け閉めすることで波長を変えることができる。周期長を短くすると短波長（高いエネルギー）の光が出せるが、永久磁石の厚さ程度まで隙間を閉じないと、磁束がビーム軸を挟んだ上下の磁極間ではなく、同じ列に並んだ磁極間を渡ってしまい、ビーム軸上の磁場が弱くなって光が出なくなる。上下の磁極列間の隙間を最小の状態から広げていくと、光は弱くなっていくが、蛇行の振幅が小さくなるにつれて出てくる光の波長は短くなる。挿入光源を設置するためには、加速器に電磁石のない長い隙間が必要であり、それを直線部と呼ぶ。衝突型加速器では検出器が設置される部分だけに長い直線部があればよいが、挿入光源を利用する第3世代以降の光源加速器では、挿入光源用の数 m の直線部が加速器に多数用意されている。

4.6. 光束と輝度、エミッタンス

光のパラメータとして、放出される全光子数を光束といい、光の強さを表す。一方、光子の位置と発散角の両方を考慮した上での光軸上の光子密度を輝度といい、光の指向性、密集度を表す。（輝度は光源点での、主に角度発散を表すパラメ



Fig. 4.8 レナーテ・チャスマン (1932-77、左)、ジョージ・グリーン (1911-77、右)

(Brookhaven National Laboratory, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives (グリーン)、同 Physics Today Collection (チャスマン) より。)

ータであるが、電子も光子も位相空間での粒子分布の面積保存の法則（リウビルの定理）があるので、コリメートして削ることを別にすれば、光源点のパラメータが結像照射点にそのまま保存、輸送される。）光子を削ることなく輝度を高くするには、電子を強く集束し、光源となる電子ビームのサイズを小さく、密度を高くすればよい。加速器における電子の位置と進行方向のばらつきをエミッタンスという。位置と向きの両方を考慮した位相空間での粒子分布を、二乗平均平方根（RMS）サイズで表したのがエミッタンス、発光点、照射点の位相空間の光軸上密度で表したのが輝度ということになり、実は似たような内容を示している。

光は波でもあり、回折現象（量子力学的には不確定性）があるため、例えば焦点での光のサイズには限界がある。回折限界の光のエミッタンスを、光の固有エミッタンスと呼んでいる。光の固有エミッタンスに対する電子のエミッタンスの大きさが、光源性能を決める指標となる。高輝度光なら、（向きを揃えた上でさらに）小さく絞ることができ、また、コヒーレンスも（ある程度）利用することができる。

4.7. 高輝度、低エミッタンス光源

加速器を低エミッタンスにするためには、4 極の集束力を強くする必要がある。また、電子ビームのエネルギーのばらつきがサイズの拡がりに繋がらないように、直線部で軌道のエネルギー分散を消しておく必要がある。第3世代光源では、低エミッタンスかつ直線部で色消しになる電磁石配列が採用されている。そのようなラティスをチャスマン・グリーン (Fig. 4.8) 型という[4.12, 4.13]。2 台の偏向電磁石をセットにし、分散を消すようにしたラティスを、DBA (Double Bend Achromat, 例は Fig. 4.9) と呼ぶ。(3 台毎に色消しにしたら TBA (Triple BA)、複数台を MBA (Multi BA, Fig. 4.10 左) と呼んでいる。) 世界最初の色消し直線部のあるセル構造の円形蓄積リングは NSLS で建設され、VUV リング (1982-2014 年、750 MeV、周長 51 m、DBA 4 セル、エミッタンス

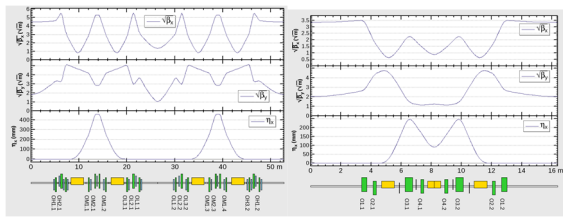


Fig. 4.9 DBA (NSLS II、左) と TBA (ALS、右) のオプティクス。(黄色が偏向電磁石で、黄色 2 個おき、3 個おきに分散 (グラフの一番下) がゼロになっている。)

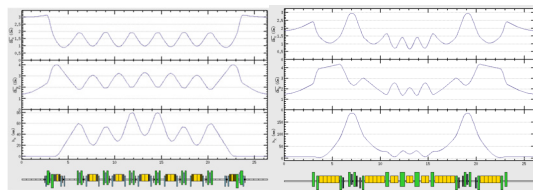


Fig. 4.10 MBA (MAX IV、左) と HMBA (ESRF-EBS 型、右) のオプティクス。



Fig. 4.11 ALS (左) と SLS (右) (Wikipedia より。)

160 nmrad) と X リング (1984-2014 年、2.8 GeV、周長 170 m、DBA 8 セル、エミッタンス 65 nmrad) であった。なお、現在は両方とも廃止済みで、全く新しい先端光源 NSLS II が稼働中である。なお、1982 年運転開始の PF (現在も稼働中) は、SRS (FODO) と NSLS (DBA) の両方のラティスを足して 2 で割った構造になっている。

最初の第 3 世代「高輝度」光源は ALS (1993 年、ローレンスバークレー研究所、USA、1.9 GeV、周長 197 m、TBA 12 セル、エミッタンス 2 nmrad、Fig. 4.11 左) である。その後、世界各地に第 3 世代光源が建設され、様々な利用が行われることとなる。

第 2 世代光源、初期の第 3 世代光源の運転は、入射器からビームを入射、蓄積 (場合によっては加速してエネルギーアップ) し、準備を整えてユーザー運転を開始した。ユーザー運転時間中に電流は徐々に減ってゆく。電流がある程度減ると、

ユーザー運転を中断し、(場合によっては入射エネルギーまで減速してから) 再度入射を行って電流値を回復していた。ユーザーランを中断しての入射は、通常、1 日 2~3 回行われるのが普通であった。

4.8. 新第 3 世代光源の特徴と普及

HX を低エネルギーの加速器から発生させるためには、挿入光源の永久磁石を薄くし、蛇行の周期を短くすればよい。ところが、薄い磁石からの磁束をビーム軸上に通すためには、ビームの通る隙間を狭くする必要がある。それを実現したのが 2000 年代に実用化された真空封止短周期アンジュレータで、例えば、磁石 1 枚の厚さ 3 mm、蛇行の周期長 12 mm、ビームの通る隙間 4 mm という感じで、その上下の磁極列全体が真空ダクトの中に封入されている。挿入光源は奇数次の光が強くなるが、周期長が 1~2 cm であれば、3 GeV 程度の加速器で 7 次光や 9 次光を使って、十分な強さで 10 keV 程度の HX が利用可能になる。隙間 4 mm に電子ビームを安定に通過させ続けるには、建物の設計や運転中のビーム制御の観点からも、極めて高い安定性が要求される。

電子ビームや放射光の熱負荷に対する加速器やビームラインの安定性を向上させるためには、熱負荷自体、すなわち電流値を一定に保てば良い。ビーム電流すなわち放射光量が変化することによる加速器や実験ビームラインの温度変化を防ぐため、ビームを断続的に入射し続け、電流を一定に保ったまま実験を継続するという、トップアップ入射が導入された。

リングへのビーム入射の際は、通常、蓄積ビームを一瞬だけ大きく入射点側に向けて移動させる必要がある。設計上は入射点付近の軌道だけに限定したパルスの局所操作になるが、実際は誤差や性能限界があり、リング全周でビームが揺れ、実験の邪魔になっている。トップアップ入射のためには、精密な入射関連装置設計と運用が必須である。

SLS (Swiss Light Source、スイス PSI、2.4 GeV、周長 288m、TBA 12 セル、エミッタンス 5.6 nmrad、



Fig. 4.12 MAX IV (左) と ESRF (右)
(Wikipedia より。)

Fig. 4.11 右) から始まった、3 GeV 程度の電子エネルギーで 10 keV の挿入光源からの高輝度 X 線を利用可能にした光源を、新第 3 世代光源と呼ぶ。トップアップ入射だけでなく、全般的なビーム測定の高性能化、高速化、建物の構造自体の安定化など、パラメータ表には現れにくい、数々な新技術、高性能化が集結されたのが特徴で、現在、世界で最も多く存在する光源加速器がこのタイプとなっている。

4.9. 第 3 世代、新第 3 世代光源の利用

高輝度光になるとスポットサイズを小さくできるので、全体の平均ではない、試料の部分毎の測定が可能になる。そうすると、物質の状態だけではなく、機能の解明にも繋がる。短パルス光を用いれば、ストップモーションのようなコマ撮りで時間変化も測定できる。輝度、コヒーレンスというパラメータが X 線領域で初めて幅広く活用され始めたのが新第 3 世代光源といえる。

第 3 世代、新第 3 世代蓄積リング型光源はおおよそ 10 eV の光の固有エミッタンスに相当する電子のエミッタンス (約 1 nmrad) であり、その波長程度まで極小スポットサイズや光のコヒーレンスが利用できた。現在、それをさらに高いエネルギーの X 線領域まで拡大する、第 4 世代光源が世界に登場し始めている。

4.10. 回折限界光源

2024 年現在、世界最先端の蓄積リング型光源は MAX IV (2019 年、スウェーデン、3 GeV、周長 528 m、7BA 20 セル、エミッタンス 330 pmrad、Fig. 4.12 (左))、ESRF-EBS (2020 年、フランス、6 GeV、周長 844 m、HMBA 32 セル、エミッタンス 134 pmrad、Fig. 4.12 (右))、Sirius (2020 年、ブラジ

ル、3 GeV、周長 518m、5BA 20 セル、エミッタンス 250 pmrad) である。約 1 keV の SX 光で回折限界に達する、電子のエミッタンス約 100 pmrad 程度の設計となっている。電子の極低エミッタンスのためには偏向電磁石を細かく分割し、それぞれで強くビームを絞った状態にする必要がある。そのような電磁石配列が MBA である。強く絞るとエネルギー収差が大きくなり、大きな収差を強い 6 極で補正すると、大振幅でのベータatron振動が不安定になってしまう。加速器における大振幅ビームの安定領域の広さをダイナミックアパーチャといい、広いダイナミックアパーチャはビーム入射とビーム寿命確保のためには必須となる。ほぼ真っ向勝負の MBA で運転可能な広いアパーチャを確保したのが MAX IV である。一方、ESRF-EBS では、MBA に第 3 世代の DBA 部分をうまく改善して組み合わせ、安定化を実現しており、その方式を HMBA (Hybrid MBA) と呼んでいる。Sirius も ESRF 型 HMBA を採用している。

4.11. 光のコヒーレンス

蓄積リング型光源では、ビーム進行方向に対して断面に相当する、上下左右方向のビームサイズを小さくすることで輝度やコヒーレンスを高めたが、ビーム進行方向、パルス長の方向に電子を密集させると、電子同士の協調効果で光を強く、コヒーレントにできる。通常の軌道放射光は粒子数 (電流) に比例した強さ (光束) になるが、電子のバンチ長が波長と同じ程度になると、電子全体が協調して光を出すようになり、コヒーレント放射光のパワーは粒子数の二乗になる。

通常の蓄積リングの電子バンチ長は 3 mm (10 ps) 程度なので、ミリ波から長波長側は全てコヒーレントになり、大強度になるが、この領域は真空ダクトの大きさがカットオフになり、放射、伝搬しないのが普通である。バンチ全体を VSX~X 線の波長まで圧縮することは不可能だが、光と電子の相互作用で密度変調を作って 2 乗の効果を使うことはできる。それが自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) である。

4.12. リング FEL

蓄積リングの挿入光源のある直線部の延長線上の両端に鏡を置き、光を反射、往復させながら共振蓄積する。そこを電子が繰り返し通過する間に、光との相互作用が進み、波長の周期で密度変調がかかる。密度変調があると、粒子数二乗の効果で、光の強さが例えば 6~7 桁向上し、光がコヒーレントになる。これを共振器型 FEL (1977 年、メイデイ[4.14]) という。共振器型 FEL は主に赤外領域で実用化されたが、幅広く普及、利用されはしなかった。なお、半導体レーザー、ガスレーザーは量子力学的な誘導放射によるものだが、FEL はレーザーという名前はあっても自発放射である。(量子力学的観点からの定式化もできるが、結果にプランク定数は残らない。)

4.13. SASE-FEL

赤外や可視では鏡があったが、X 線など、鏡のない領域では、密度変調がかかるのに必要な長さの分だけ長い挿入光源を用意し、直線的に電子と光を一緒に走らせることになる。VSX~HX 領域ではこの手法しか使えず、これを SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) -FEL (1979 年、サルディン) という[4.15, 4.16, 4.17]。最初の X 線領域の SASE-FEL は LCLS (2009 年、SLAC、USA) で、真空封止短周期挿入光源を活用した SACLA (2011 年、兵庫県)、長パルスの超伝導 LINAC を利用した European XFEL (2015 年、DESY、ドイツ) と続く。

電子と光を相互作用させるためには、挿入光源からの光は 1 次光でなくてはならず、10 keV の光を 1 次光で得るために必要な線形加速器のエネルギーは、通常の挿入光源で 14 GeV 程度、真空封止挿入光源を利用しても 8 GeV 程度となる。蓄積リング型光源は同時に数十本のビームラインで実験が可能だが、線形加速器による FEL では 1 本のビームラインにしか光が出せない。また、リングの典型的なパルス長は 10 ps であったが、FEL では光と相互作用させるために電子密度を高める必要があり、約 50 fs (コアは数 fs) までバンチ長が圧縮されている。圧縮しないと増幅できない

のだが、この極短パルス性を活かして、極めて速い反応を時間的に追う様な実験も可能になる。フルコヒーレンスの利用、極短パルスの利用が FEL 利用実験の特徴となる。

4.14. 超伝導 FEL

常伝導の線形加速器は銅で作られることが多いが、抵抗による発熱の問題から、RF は例えば約 1 μ s 間しか ON できず、それを 50 Hz で繰り返している。RF の 1 パルスで 1 バンチしか加速できず、平均電流は電荷 1 nC で繰り返し 50 Hz の場合、50 nA となる。蓄積リング型光源の平均電流が約 500 mA であることを考えると、7 乗の差があるが、FEL では粒子数二乗の効果でだいたいその分を増幅できるので、全光子数という観点からは蓄積リング光源と常伝導 XFEL とではほぼ同じになる。リングではパルス長の長いカオス光がほぼ連続的 (CW 500 MHz) に出るのに対し、SACLA の FEL では完全コヒーレントで極短パルス長の光が、強烈なフラッシュ光のように 10 Hz (100 ms 間隔) でまとまって一気に出る。

加速管をニオブで作って液体ヘリウムに漬けて超伝導にすると、液体ヘリウム冷凍機が必要になるが、発熱の問題は回避でき、RF を常時 ON にしてリングの様に連続パルスビームでの運転が可能になる。ただし、その場合、RF による発熱がそのまま冷凍機の負荷となり、巨大な冷凍機設備と電気代が必要になる。そこで、常伝導加速器同様にパルス運転にすると、RF 起源の熱負荷は CW に比べれば無視できるほど小さくなり、必要な冷凍機容量、電気代は、真空ダクトや RF 結合器などからの熱流入分が大きい要素となる。

超伝導空洞は常伝導に比べ、壁抵抗が極端に小さく、共振の Q 値が非常に大きい。RF の応答速度は遅くなり、パルス運転といってもパルス幅は 1 ms 程度まで長くなる。そうすると、1 つの RF パルスあたりに加速できる電子のバンチ数を数千個まで増やすことができる。実際、European XFEL では RF の 1 マクロパルスあたり 2700 バンチ、それが 10 Hz で平均電流 27 μ A の運転になっている。電子 1 バンチあたりに発生する光子数は常伝導と

超伝導でほとんど変わらないので、バンチ数が 2700 倍になると光の強さも 2700 倍になる。現時点でこれが世界最強、究極の光といえる。

ILC/European XFEL 型の超伝導線形加速器は、CW でなく、長パルス運転を採用することで、建設費や運転経費を常伝導加速器とそれほど変わらない程度まで抑えつつも、桁の違う大電流出力を可能としている。一方、現在調整運転中の LCLS II は完全 CW の超伝導加速器で、常時 RF が ON である。膨大な冷凍機が必要となる一方、10 Hz のパルストレインではなく、真に等間隔な kHz、MHz の電子ビーム、光を利用することが可能となっている。

4.15. 世界の FEL 施設

常伝導の FEL としては、世界最初の X-FEL である SLAC の LCLS、日本の SCSS、SACLA、イタリアのトリエステにある FERMI（シーディングによるカスケード高調波化を実用化）、スイス PSI で、SACLA の技術を多く導入して建設された SwissFEL、韓国浦項の PAL-XFEL、中国にも上海と大連に SX-FEL が存在する。

超伝導としては、ILC 型の長パルスとして、テスラ型空洞の発祥のドイツ DESY に FLASH、European XFEL があり、CW 型として SLAC に LCLS II がある。中国でも上海の SX-FEL を超伝導化する SHINE が建設中である。

コラム：理系の勉強

加速器物理を含め、理系の勉強は、最初の発見者の辿った道筋を再発見するという面がある。高校の教科書や大学の教科書に載っている、基本法則の理解を深めるための「実例」が、実は歴史に名を残す数物学者の業績であることも多く、初学者が基本法則だけから導出できるはずが無いと思う。（それができたら歴史上の偉人レベルということだろう。）道筋を自分で辿るので、途中で、自分で再発見の瞬間、解けたという納得の瞬間を味わうということが、その法則や実例にとって何が本質なのかを理解することなのだろうと思う。

時々、「現代の物理学シリーズ」のように大学院レベルの教科書シリーズが出版されるが、そのうちの 1 冊を書くような先生の講義に学部時代に出たことがあったが、自分が書いた以外の他の本を読んでも、さっぱり分からん、と楽しそうに仰っていたのが印象に残っている。専門家でもそうなのか、とちょっと安心した。

こんなことを書くととても怒られそうだが、やはり人は「忘れてゆく」ものである。基礎物理であっても、ストーリーや目次は覚えているが、出発点がそもそも自分の専門分野向けに専門化された方程式だったりする場合、基礎概念を忘れても進められる。（例えば、 $x'' = K(s)x$ からビーム力学を始めるので、特殊相対論も電磁気学も解析力学も原理部分は忘れていい（よくはない）。）Maxwell 方程式を書け、ローレンツ変換を書け、ラグランジアンのために電磁場の一般化ポテンシャルを書け、といわれて（理論の人は書けると思う）が、実験系でハード寄りの人達は一体何人できるか……（講義の前に一生懸命復習して、資料を作るとまた忘れて……とか……）。すごく怒られる気がするが、そんなものである。歴史に残る天才ではなくて、一般人が職業としてやっている物理学者……本当に、そんなものである。

遠慮せずに、興味があったらどんどん目指してもらいたい！！ きっとできる。

5. PF のビームラインと事例

5.1. PF・PF-AR のビームライン

この章では PF/PF-AR の放射光実験ビームラインについて全体の概略を延べ、事例として BL15 番について詳細を示す。実験ビームラインとは、2 次ビームとしての放射光を電子のビームラインから分離、取り出し、利用実験で使うまでの装置である。光学系やビームライン技術の教科書として、放射光学会から「放射光ビームライン光学技術入門[5.1]」が出版されている。

PF、PF-AR のビームライン配置を Fig. 5.1 に示す。PF は入射点付近を除いてリング全体にビームラインが建設されており、PF-AR は KEKB の BT があるために、北側にのみビームラインが建設さ

れている。Table 5.1、5.2 にビームラインの一覧を示す。

光の性能につながる加速器としてのパラメータは、ビームエネルギー、エミッタンス、エネルギー拡がり、バンチ長などで、各ビームラインの光源点におけるビームサイズから光束と輝度とが計算できる。Table 5.3 に PF/AR の主要パラメータを示す。なお、AR は従来のオプティクスかつ 6.5 GeV の場合を示すが、現在は 5 GeV 運転も導入されており、オプティクスも middle-low エミッタンスとなって表の値よりも性能向上している。

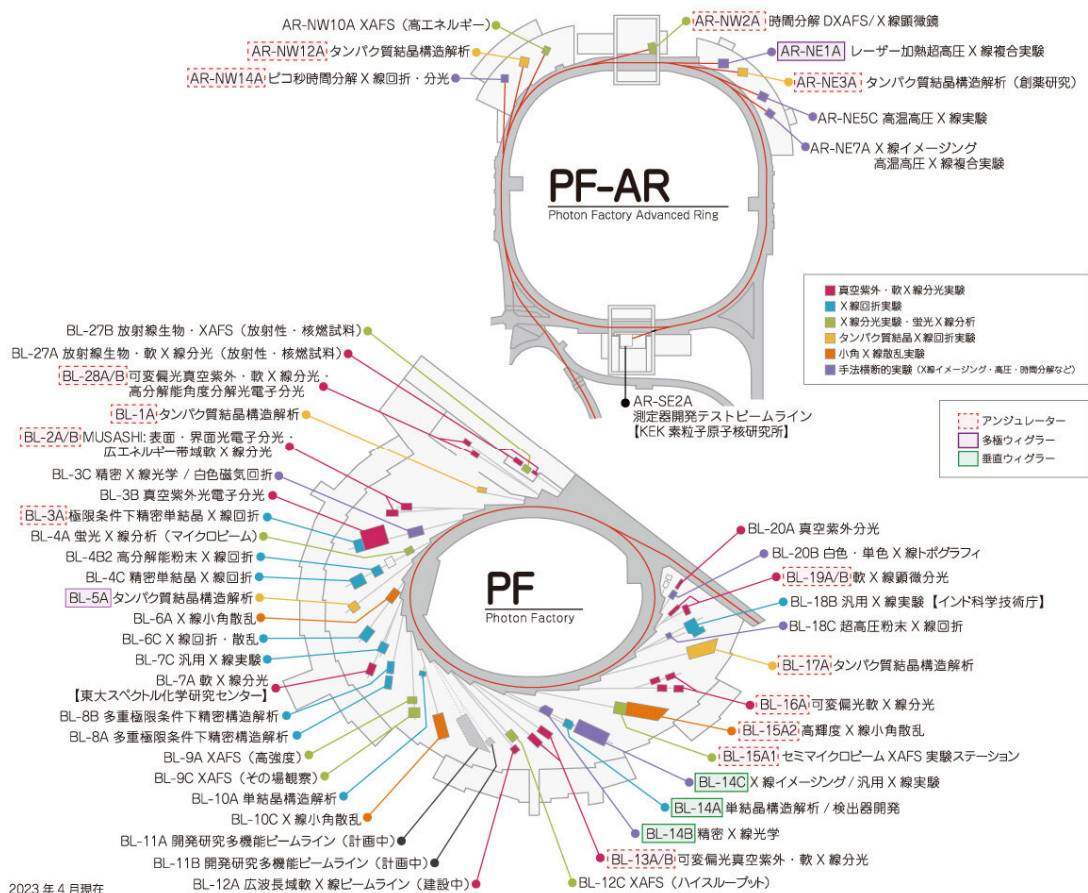


Fig. 5.1 PF/PF-AR のビームライン (PF WEB「[ビームライン・実験ステーション](#)」より。)

Table 5.1 PF/PF-AR のビームライン一覧 (1/2)

BL番号	主な利用実験	光源	分光器	鏡	光のエネルギー (keV)	ビームサイズ H x V (mm)	毎秒あたりの光子数
BL-1A	タンパク質 結晶構造解析	ID01 真空封止 短周期アンジュレータ	チャンネルカットSi(111) 平面2結晶分光器 液体窒素冷却	RhコートSi バイモーフ曲面鏡 x 2	3.7 ~ 4.5 11.2~12.9 4~14	0.013 x 0.013	5 × 10 ¹⁰ @11.6 keV 1.1 × 10 ¹¹ @4.6 keV
BL-2A/B	表面界面 軟X分光	ID02(SX) K _{max} =2.3, λ ₀ =6 cm ID022(VUV) K _{max} =5.0, λ ₀ =16 cm	可変偏角不等間隔平面回折格子分光器	トロイダル集光鏡 他	0.25~2 0.035~0.3	0.1 x 0.5	10 ¹¹ ~10 ¹²
BL-3A	極限環境下 X線回折	ID03 真空封止 短周期アンジュレータ	平面2結晶分光器 Si(111)	曲面鏡	5~14	0.6 x 0.4	10 × 10 ¹²
BL-3B	真空紫外光電子分光	B03 偏向電磁石	球面回折格子による 定偏角型分光器	曲面鏡	0.02~0.3	2 x 2	3 ~ 9 x 10 ¹²
BL-3C	X線光学素子評価 白色磁気X線回折	B03 偏向電磁石	定位置出射型二結晶分光器 Si(111)	なし	4~20 分光無 (白色)	20 x 6 0.1 x 0.1	~10 ¹³
BL-4A	蛍光X線分析 マイクロビーム分析	B04 偏向電磁石	定位置出射型二結晶分光器 Si(111)	KBミラー (マイクロビーム) ポリキャビラリレンズ (セミマイク ロ)	6~15 6~17	0.005 x 0.005 Φ0.03~0.1	10 ⁸ @10 keV 10 ¹⁰ @10 keV
BL-4B2	粉末X線回折 大気下高温回折	B04 偏向電磁石	定位置出射型二結晶分光器 Si(111)	RhコートSi 単結晶疑似トロイダルミラー	6 ~ 20	13 × 2	
BL-4C	X線回折	B04 偏向電磁石	定位置出射型二結晶分光器 Si(111)	曲面鏡	5 ~ 18	0.8 x 0.6	~10 ¹¹
BL-5A	タンパク質 結晶構造解析	MPW05 多極ウィグラー	定位置出射型二結晶分光器 Si(111)	RhコートSi 曲面鏡 x 2	6.5 ~ 16.5	0.2 x 0.2	2 × 10 ¹¹
BL-6A	X線小角散乱	B06 偏向電磁石	Ge(111)湾曲モノクロメータ	垂直集光湾曲ミラー	8.26 (fixed)	0.5 x 0.25	1.0 × 10 ¹² 3.6 × 10 ¹² (スリット閉)
BL-6C	X線回折・散乱	B06 偏向電磁石	定位置出射型二結晶分光器 Si(111)	シリンドリカル・ベントミラー	6 ~ 20		
BL-7A	軟X分光 / SX MCD	B07 偏向電磁石	不等刻線間隔平面回折格子分光器	後置集光鏡(トロイダルミラー)	0.05~1.3	3 x 0.5	10 ¹⁰ ~10 ¹¹
BL-7C	X線回折・散乱	B07 偏向電磁石	定位置出射型サジタル集光 二結晶分光器 Si(111)	全反射ダブルミラー	4 ~ 20	1 x 1 ~ 80 x 8	~10 ¹²
BL-8A	多目的極限条件下 ワイセンベルグカメラ	B08 偏向電磁石	定位置出射型二結晶分光器 Si(111)	シリンドリカル・ベントミラー	5 ~ 21	0.7 x 0.3	~10 ¹¹
BL-8B	多目的極限条件下 ワイセンベルグカメラ	B08 偏向電磁石	定位置出射型二結晶分光器 Si(111)	シリンドリカル・ベントミラー	5 ~ 21	0.7 x 0.3	~10 ¹¹
BL-9A	高強度XAFS	B09 偏向電磁石	カム駆動型水冷二結晶分光器 Si(111)	RhコートSi 曲面鏡 x 2 高調波抑制用Niコートダブル平板鏡	2.1 ~ 15	0.5 × 0.3	6 × 10 ¹¹ @7 keV 6 × 10 ¹⁰ @2.5 keV
BL-9C	その場観察XAFS	B09 偏向電磁石	カム駆動型水冷二結晶分光器 Si(111)	RhコートSi 集光用湾曲円筒ミラー	4 ~ 23	0.8 × 0.6	1 × 10 ¹¹ (8keV, 450 mA)
BL-10A	単結晶構造解析	B10 偏向電磁石	水平横振 一結晶分光器 [Si(111),Si(311),Qx(100)等]	平面鏡	5 ~ 25	Φ0.05~1	10 ¹⁰ ~10 ¹¹
BL-10C	X線小角散乱	B10 偏向電磁石	間接水冷式定位置出射型二結晶分光器 Si(111)	シリンドリカル・ベントミラー RhコートSi	7~14	0.63 × 0.18	1.1 × 10 ¹¹ (スリット開、8 keV) 3.8 × 10 ¹¹ (スリット1.4mm x 1.6mm、8 keV)
BL-11A/B	広波長域軟X線BL	B11 偏向電磁石	S path: 回折格子分光器 T path: 二結晶分光器 Si(111)				
BL-12A	広波長域軟X線BL	B12 偏向電磁石	S path: 不等間隔平面回折格子分光器 T path: 二結晶分光器 (Si(111) or InSb(111))		S path: 0.07~2 T path: 1.7~5	S path: 0.5 x 0.7 T path: 0.5 x 2	
BL-12C	ハイスルーブットXAFS	B12 偏向電磁石	カム駆動型水冷二結晶分光器 Si(111)	Rhコート集光用湾曲円筒鏡 Niコート高調波除去用ダブル平板鏡	4 ~ 23	0.6 × 0.6	9 × 10 ¹⁰
BL-13A/B	UVU分光表面化学	ID13 K _{max} =8 λ ₀ =18 cm	可変偏角不等刻線間隔平面回折格子分光器	後置集光鏡(トロイダルミラー)	LH:0.048~2 LV:0.102~2 CL/R:0.074~0.7 EL/R:0.059~2	B1:0.08 x 0.015 B2:0.63 x 0.12 A1:0.42 x 0.08	10 ⁹ ~10 ¹³

Table 5.2 PF/PF-AR のビームライン一覧 (2/2)

BL番号	主な利用実験	光源	分光器	鏡	光のエネルギー (keV)	ビームサイズ H x V (mm)	毎秒あたりの光子数
BL-14A	単結晶構造解析 検出器開発	超伝導垂直ウィグラー	二結晶モノクロメータ Si(111), Si(311), Si(553)切替	Rhコート円筒湾曲鏡	Si111: 5.1~18.5 Si311: 9.9~35.4 Si533: 23~82.7	2×1 (ミラー使用) 5×35 (最大)	~10 ¹¹
BL-14B	精密X線光学ステーション	超伝導垂直ウィグラー	定位置射出型二結晶分光器 Si(111)	None	1次光: 9~20 3次光: 27~60	10×15	~10 ¹⁴ (輝度)
BL-14C	X線位相イメージング	超伝導垂直ウィグラー	定位置射出型二結晶分光器 Si(220)	None	22~66 / 白色	8×40	~10 ¹⁴ (輝度)
BL-15A1*	セミマイクロビームXAFS	ID15	計算結合駆動型液体室素冷却 二結晶分光器 Si(111)	Rhコート曲面鏡、バイモーフ鏡 Niコート高調波除去用ダブル平板鏡	2.1 ~ 23	0.02×0.02	3.5×10 ¹¹ (7.5keV)
BL-15A2*	高輝度SAXS	ID15		Ni-Coated	2.1~15	0.55×0.09 (HX) 0.29×0.04 (テンダー)	2×10 ¹¹ (10.2keV)
BL-16A	可変偏光軟X線分光	ID161、ID162 $\lambda_u = 5.6$ cm 円偏光 $K_{max}=2.37$ 水平偏光 $K_{max} = 3.12$ 垂直偏光 $K_{max} = 1.98$ 45° 直線偏光 $K_{max} = 1.73$	可変偏角不等刻線間隔平面回折格子分光器	後置集光鏡(トロイダルミラー)	0.4~1.5	(0.2~0.5)×(0.05~0.1)	~10 ¹¹
BL-17A	タンパク質結晶構造解析	ID17	計算結合駆動型液体室素冷却 二結晶分光器 Si(111)	Rhコート曲面鏡、バイモーフ鏡	5.6~13.8	0.04×0.016	1.5×10 ¹¹ (12.7keV)
BL-18B インド	多目的単色硬X線BL	B18 偏向電磁石	定位置射出型二結晶分光器 Si(111)	円筒湾曲鏡、平面鏡			
BL-18C	超高压粉末X線回折	B18 偏向電磁石	二結晶モノクロメーター Si(111)	K-B型集光ミラー	6 ~ 25	0.04×0.085	~10 ¹¹ (15keV)
BL19A/B	A: STXM B: 軟X線吸収分光	ID19	Monk-Gillieson型不等刻線間隔 平面回折格子分光器(600, 1200本/mm)	曲面鏡	A: 0.16~1.9 B: 0.09~2	B: 0.2×0.05	B: 2.4×10 ¹¹ (0.4keV)
BL-20A	軟X線吸収分光	B20 偏向電磁石	3m直入射型回折格子分光器 (1200, 2400本/mm)	曲面鏡	1200本: 0.006~0.04 2400本: 0.01~0.04	3×1	~10 ¹²
BL-20B	白色・単色X線トポグラフィ	B20 偏向電磁石	定位置射出型二結晶分光器 Si(111)	曲面鏡	4 ~ 25	25×5	~10 ¹²
BL-27A	放射性試料用 軟X線実験BL	B27 偏向電磁石	二結晶分光器 InSb(111)	白金コートSiC 前置集光鏡	細胞照射: 2~4 XPS, XAFS: 1.8~5	真空: 20×4 大気: 6×3	~10 ¹¹ (真空中)
BL-27B	放射性試料用 X線実験BL	B27 偏向電磁石	二結晶分光器 Si(111)	後置集光鏡	5~20	40×6 2×0.9	~10 ¹¹
BL-28A/B	可変偏光高分解能 角度分解光電子分光	ID28	可変偏角不等間隔平面回折格子分光器	A: K-B集光鏡 B: トロイダル集光鏡	0.03~0.3	A: 0.012×0.01 B: 0.04×0.1	10 ¹¹ ~10 ¹²
AR-NE1A	レーザー加熱超高压 X線回折	NE1多極ウィグラー	二結晶分光器 Si(111) 高分解能分光器 Si(422), Si(1222) 14.4keV	K-B多層膜ミラー	7~50	0.2×0.2	~10 ¹²
AR-NE3A	タンパク質結晶構造解析	ID-NE3	計算結合駆動型液体室素冷却 二結晶分光器 Si(111)	Rhコート前置平面鏡 Rhコートトロイダル集光鏡	6.5 ~ 16.5	Φ0.1	2.5×10 ¹¹
AR-NE5C	高温高压X線回折	NE05 偏向電磁石	二結晶分光器 Si(111), Si(311)	None	20~140 (白色) 10~60 (単色)	30×3	~10 ⁹ (光束密度)
AR-NE7A	X線イメージング 高温高压X線回折	NE07 偏向電磁石	二結晶分光器 Si(111)		20~140 (白色) 10~60 (単色)	30×3	~10 ^{8~9} (30keV, 光束密度)
AR-NW2A	時間分解DXAFS X線顕微鏡	ID-NW2	計算結合駆動型液体室素冷却 二結晶分光器 Si(111)	Rhコート集光用湾曲円筒ミラー Ni/Rhコート高調波除去用 ダブル湾曲ミラー	5 ~ 25	円筒鏡: 0.6×0.2 平面鏡: 10×0.06 非集光: 8×3	6×10 ¹² (12keV)
AR-NW10A	高エネルギーXAFS	NW10 偏向電磁石	カム駆動型水冷二結晶分光器 Si(311)	Ptコート集光用湾曲円筒ミラー Rhコート高調波除去用 ダブル平面ミラー	8 ~ 42	1.7×0.8	6×10 ¹⁰ (25keV)
AR-NW12A	タンパク質結晶構造解析	ID-NW12	計算結合駆動型液体室素冷却 二結晶分光器 Si(111)	Rhコート前置平面鏡 Rhコートトロイダル集光鏡	6.5 ~ 16.5	0.2×0.13	1.3×10 ¹¹ (12.4keV)
AR-NW14A	ピコ秒時間分解X線測定 回折、散乱、分光	ID-NW141、ID-NW142	液体室素冷却二結晶分光器 Si(111)	Rhコート集光用トロイダルミラー Rhコート高調波除去用 ダブル平面ミラー	4 ~ 23	0.5×0.2	1×10 ¹² (15keV) ~10 ¹⁵ (狭域白色 (広エネルギー幅))

Table 5.4 PF の光源点でのビームサイズ

Name	Point (deg)	β_x (m)	α_x	β_y (m)	α_y	η_x (m)	η'_x	σ_x (μm)	σ'_x (μrad)	σ_y (μm)	σ'_y (μrad)	$\varepsilon_{x\text{ eff}}$ (nmrad)
B04、18	2.5	1.42	0.89	9.97	-3.16	0.01	0.04	224.6	213.7	59.4	19.7	35.8
B06-11、20	2.5	3.19	1.01	9.93	-1.80	0.33	-0.13	412.4	177.3	59.3	12.3	51.4
B12	2.5	3.37	0.96	9.53	-1.58	0.34	-0.12	424.8	166.9	58.1	11.4	51.1
B17	0	0.95	0.25	11.41	-2.02	0.22	-0.23	241.9	258.4	63.6	12.6	60.6
B27	1.2	2.23	1.06	23.07	4.97	0.18	-0.20	309.6	235.6	90.4	19.9	50.0
U02、16	0	12.00	0	5.00	0	0	0	651.7	54.3	42.1	8.4	35.4
U01、03、15、17	0	4.83	0.20	0.41	-0.10	0.60	0	599.6	87.3	12.1	29.4	51.3
U05、U19	0	8.72	0.54	5.78	0.48	0.59	-0.04	703.8	77.7	45.2	8.7	48.1
U13	0	9.45	-1.09	1.16	-0.40	0.64	0.03	740.7	93.7	20.2	18.9	47.0
SCW14、U28	0	7.96	-1.62	5.72	-0.23	0	0	530.9	127.1	45.0	8.1	35.4

Table 5.6 PF 挿入光源のパラメータ

	Type	周期長 cm	周期数	全長 m	最小 gap mm	By (Bx) T
ID01 (SGU)	ブラナー	1.2	39	0.468	4	0.7
ID02-1 (SX)	ヘリカル	6	60	3.6	28	0.4
ID02-2 (VUV)	ブラナー	16	17	2.72	26	0.33 (0.33)
ID03 (SGU)	ブラナー	1.8	26	0.468	4	1
ID05 (MPW)	ブラナー	12	21	2.52	26.4	1.4
ID13	APPLE II	7.6	47	3.572	23	0.74 (0.51)
ID14 (SCW)	Vertical		1		50	4.8
ID15 (SGU)	ブラナー	1.76	27	0.4752	4	0.97
ID16-1, 2	APPLE II	5.6	44	2.464	21	0.6 (0.38)
ID17 (SGU)	ブラナー	1.6	29	0.464	4	0.92
ID19	APPLE II	6.8	55	3.74	24	0.53 (0.27)
ID28	ヘリカル	16	22	3.52	27	0.33 (0.33)

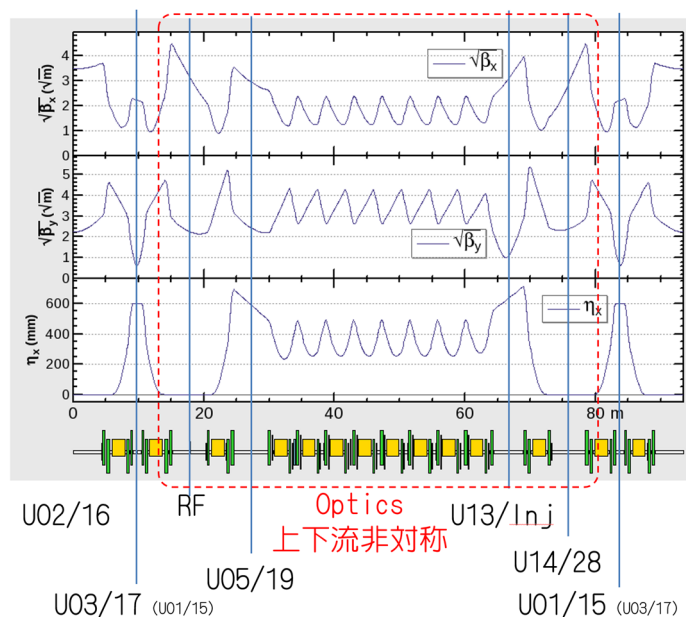


Fig. 5.2 PF リング半周のオプティクス

(対称点 (2 番と 16 番) で同じ。黄色は偏向電磁石で、右から、
#2(#16)、#3、RF 下流が#4、弧部入り口が#5 という順。)

Table 5.5 PF 偏向電磁石ラインの光取り込み角 [mrad]

	全体		A			B			C/D		
	水平	垂直	中央位置	水平	垂直	中央位置	水平	垂直	中央位置	水平	垂直
BL6	-15.5~+15.5	1.3	-14.5	2	1.3				14.5	2	1.3
BL7	-16.25~+17.0	1.5	-14.5	3.5	1.5				15	4	0.81
BL8	-16.6~+16.6	0.72	-15.5	2.22	0.72	15.5	2.21	0.72			
BL9	-14.33~+7.34	1.8	-14	3	0.66				7	3.7	0.68
BL10	-12.65~+12.1	1.2	-11	3.3	1.2				10	6.8	1.2
BL11	-15.0~+11.0	3	-12.5	5	3	-5	4	3	9	4	3
BL12	+7.17~+9.83	0.66							8.5	2.66	0.66
BL20	-19.0~+16.0	5	-5	28	5	15	2	2			

Table 5.3 PF/AR の（光の性能に関わる）主要パラメータ

		AR	PF
エネルギー	E [GeV]	6.5	2.5
周長	C [m]	377.26	187.07
エミッタンス	ϵ_0 [nm·rad]	295.17	35.58
エネルギー拡がり	σ_E/E	1.14586E-03	7.28470E-04
モーメントムコンパクション	α	1.27625E-02	6.70960E-03
周回周波数	f_{rev} [MHz]	0.79466	1.60253
RF周波数	f_{RF} [MHz]	500.100	500.100
ハーモニック数	h	640	312
バンチ長	σ_z [mm]	15.40534	9.80463

PF のリング半周分のオブティクスを Fig. 5.2 に、光源点のパラメータを Table 5.4 に、偏向電磁石ラインの光の取り込み角を Table 5.5 [5.2] に示す。PF の場合、ビームライン、直線部の番号は直下流の偏向電磁石番号で、直線部の延長を 0 度ラインと呼ぶ。偏向電磁石は全 28 台なので 1 台あたり 12.86 度 (224.4mrad) である。偏向電磁石ビームラインはだいたい 2.5 度 (43.6mrad) 曲がった軌道上の点を光源点としていて、例えば BL8B の場合、(43.6 + 15.5) mrad 地点からの光を 2.21 mrad 分切り出して使う、ということになる。PF の挿入光源のパラメータを Table 5.6 に示す。

5.2. 分光器と対応エネルギー域

2 keV を境に、高エネルギー（短波長）側は結晶分光器、低エネルギー（長波長）側は回折格子分光器が使われている。回折格子分光器は非常に低エネルギーの場合は直入射、エネルギーが高くなると斜入射で面積が増えるため、不等間隔刻線となる。

回折格子分光器 (XSX 領域: 6 eV ~ 2 keV) の BL: BL2A/B, BL3B, BL7A, BL12A-S ライン, BL13A/B, BL16A, BL19A/B, BL20A, BL28A/B

それ以外は X 線ビームラインとなる。X 線ビームラインには遮蔽のハッチが設置されている。分光器で分類すると、下記の様になる。

Si(111)二結晶分光器 (2 ~ 20 keV 程度): BL1A, BL3A, BL3C, BL4A, BL4B2, BL4C, BL5A, BL6C, BL7C, BL8A, BL8B, BL9A, BL9C, BL10C, BL12C, BL14B, BL15A1/2, BL17A, BL18B, BL18C, BL20B, BL27B, AR-NE3A, AR-NE7A, AR-NW2A, AR-NW12A, AR-NW14A

Si(111)以外の結晶 (も使える) 二結晶分光器 (10 ~ 100 keV、高圧実験用の 20 keV を超える高エネルギー X 線の為に、Si(311)面、Si(533) 面の利用、1.7 keV ~ 連続で HX まで使う場合に InSb(111)面): BL12A-T, BL14A, BL14C, BL27A, AR-NE1A, AR-NE5C, AR-NW10A

特殊 BL

昔の 1 結晶分光器の固定利用 (Ga(111)湾曲分光器): BL6A

水平横振り 1 結晶分光器 (Qz(100), Si(111), Si(311)): BL10A (以前は高圧実験 BL)

5.3. 検出器、光学素子、挿入光源

光電子分光に使われる半球型の電子エネルギー分析器はウプサラ大学 (Max Lab) 発祥のガンマデータシエンタ社 (現在はシエンタオミクロン社) がよく使われている。X 線領域の光子カウンタ検出器は結晶構造解析でも小角散乱でも色々な用途に使われているが、PSI (SLS) 発祥のデクトリス社のピラタス、アイガーといった検出器がよく



Fig. 5.3 ID15 真空封止短周期挿入光源

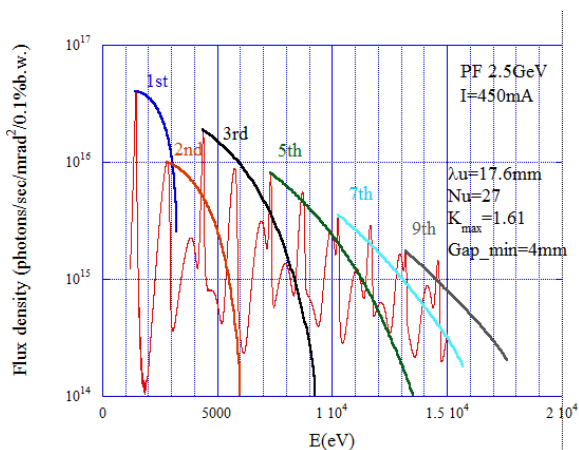


Fig. 5.4 ID15 のスペクトル

使われている。先端的な光源を建設し、検出器を開発して世界的に普及させた例と言えるのではないだろうか。

光学素子と挿入光源については日本企業製が使われていて、あえて名前は挙げないが、例えば[放射光学会の賛助企業](#)等を参照すると出てくると思う。

5.4. PF BL15 の紹介

筆者は BL15 の設計、建設に携わった PF の五十嵐さん、仁谷さん、チャンネルの宮内さんらに BL15 の詳細について教えて頂き、それを講義に使わせて頂いている。特定の BL を上流から下流

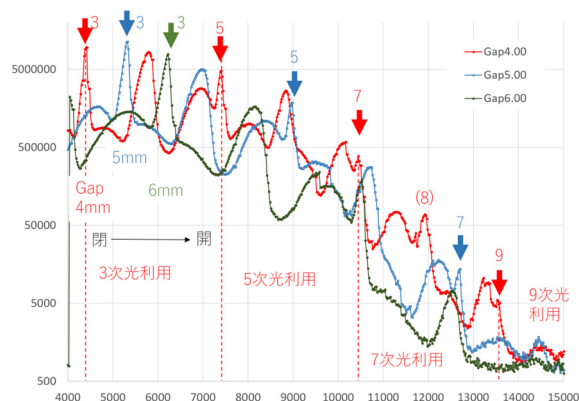


Fig. 5.5 ギャップを変えた時のスペクトル例

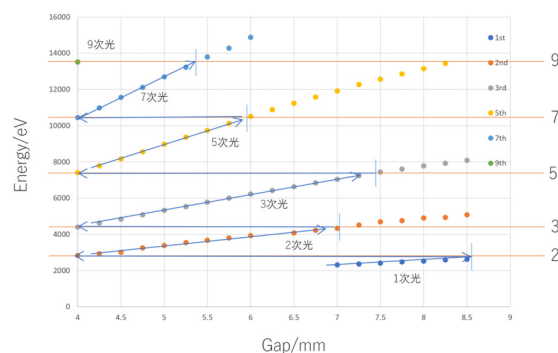


Fig. 5.6 光のエネルギー、ギャップと次数の関係

まで説明した記事はあまりないと思われるので、典型的な例としてここで示したい。

5.4.1. BL15、ID15 の概略

PF の BL15 は真空封止挿入光源 ID15 を光源とし、BL15A1 (XAFS) と BL15A2 (SAXS) という排他利用の 2 つの実験ステーションがついたビームラインである。挿入光源 ID15 を Fig. 5.3 に、スペクトルを Fig. 5.4 に示す。(挿入光源を表すのに、Undulator で U15、Insertion Device で ID15、Short Gap Undulator で SGU15 など、色々な言い方がある。文中では統一すべきではある……)

ID15 は周期長 1.76 cm、周期数 27、最小ギャップ 4 mm、最大 K 値 1.61 で設計されており、ビームライン取り込み角は 0.2 mrad である。XAFS からの要請はエネルギーが連続に利用できることで、SAXS からの要請はピーク強度が高いことである。その両方を満たせるように周期長や K 値といったパラメータが決められている。(PF の SGU

は4台とも同じよう微妙に違って、周期長はID01が1.2 cm、ID03が1.8cm、ID17が1.6 cmである。それぞれ用途に従って最適化した結果である。) なお、挿入光源の偶数次光はピークが光軸上にないが、PFの場合はエミッタンスが大きい為に軸上でもそれなりの強さがあり、利用することができている。(普通は奇数次しか使わない。)

光のエネルギーを変えるためには挿入光源のギャップを変えるが、エネルギーと次数、ギャップの例をFig.5.5に、全体の関係をFig. 5.6に示す。ユーザー実験中は必要な光のエネルギーに応じてユーザー側でギャップを開閉することができる。

5.4.2. ビームラインフロントエンド

光のビームラインの内、加速器トンネル内にある上流部分をフロントエンド、基幹チャンネルなど呼んでいる。基幹チャンネルの役割は主に3つある。

1. 人的安全の確保：ビームラインに対する光のON/OFFの切り替えを行ったり、不具合時の緊急OFFの為に、インターロック対応の放射線安全用光シャッターなどがある。
2. 機械的安全の確保：不要な光と熱負荷を予め取り除く為の水冷マスク。真空リークなどの際に、真空悪化範囲を広げない為の差動排気システム。差動排気とは、真空パッファとなる大きなチェンバーの上下流に小コンダクタンスの狭いダクトを組み合わせたもので、リークなどが発生した際、突入大気がここで一旦止められるので、その間に高速動作する圧空ゲートバルブを閉めることができる。また、リングは超高真空が必要だが、ビームライン下流は頻繁に試料を入れ替えるための低真空にしたい場合、上下流で圧力を変えることが必要で、それが差動排気ということになる。真空を切り離す為に、ベリリウム薄膜(ベリ窓という)を設置することもある。ただし、例えば厚さ20 μm のベリ窓だと、2 keVは80%以上通るが、1 keVだと数%の透過率しかない。

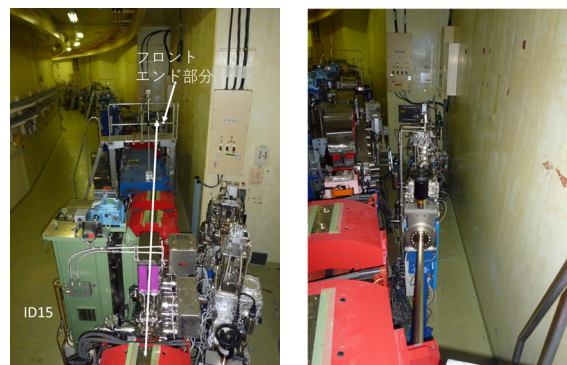


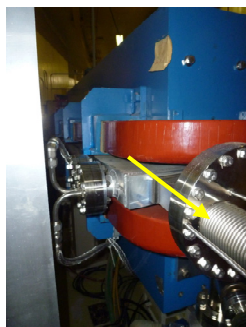
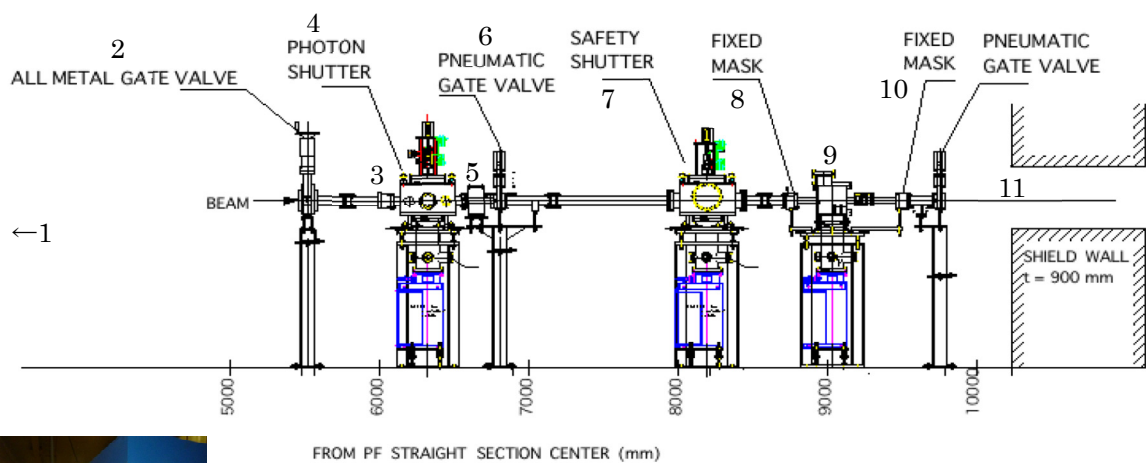
Fig. 5.7 BL15のフロントエンド

低エネルギー側の光を使う場合、真真空的には繋げるしかない。

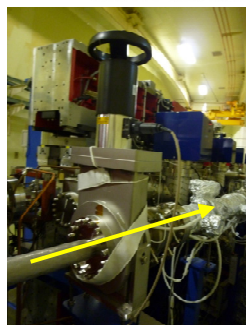
3. 光の成形：下流の光学系に合わせて、光の中心部分を切り出す。水冷アブソーバ、シャッター、マスクなど。

BL15のビームラインフロントエンド (Fig. 5.7、[5.3]、[5.4]) のそれぞれの要素を Fig. 5.8 に示す。簡単に説明を加えていく。(番号は写真の番号に対応。)

1. 偏向電磁石出口：電子ビームは曲げられ、光は直進するので、直線部下流の偏向電磁石をまっすぐ貫通するダクトが光の取り出し口となる。リング外側のダクト全体に光が当たるので、光脱離でガスが出る。偏向電磁石ダクト全体に渡って(リング内側部分に) DIP (distributed ion pump) が設置されている。
2. マニュアルバルブ(オールメタルバルブ)：長期シャットダウン中などに安全確保の為に手で閉めておくバルブ。運転開始日の朝に開けて回る。
3. 水冷マスク：光がどんどん広がっていく部分にフランジやベローを設置する場合、手前に保護マスクが必要である。真真空的に弱い部分を保護するためのマスク。
4. 光シャッター：光をON/OFFできるシャッター。受光面を斜面にすることで、受光面積を稼ぐ。



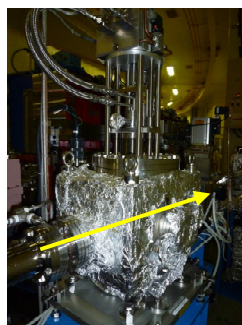
1. 偏向電磁石出口



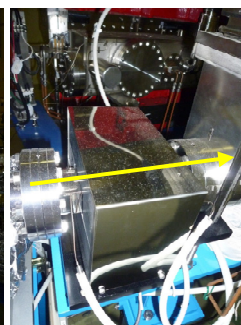
2. マニュアルバルブ



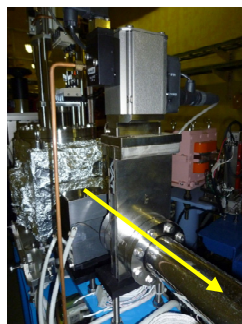
3. 保護マスク



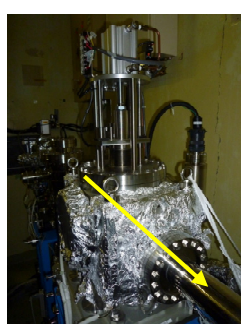
4. シャッター



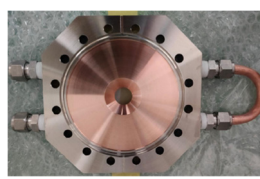
5. コリメータ



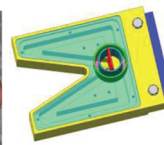
6. 圧空式高速バルブ



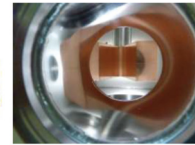
7. 安全シャッター



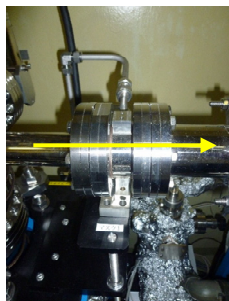
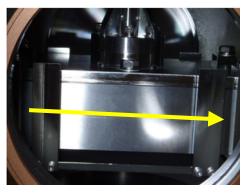
マスクの例 (別の BL のもの)



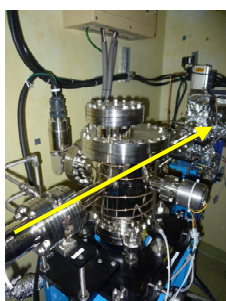
シャッターの内部



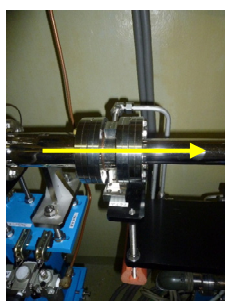
安全シャッターの内部



8. 固定マスク



9. 真空バッファ



10. 固定マスク

差動排気



11. リングシールド
出口貫通孔

Fig. 5.8 BL15 のフロントエンド

5. コリメータ：細い矩形のダクトの周りを鉛で囲ったコリメータで、高速バルブ(6)を保護する為に設置されている。
6. 圧空制御高速バルブ：真空インターロック等で閉まるバルブ。(リーク事故で大気が入ってくるなど) 何かあった場合に、差動排気部分のバフファで時間を稼ぎつつ、高速バルブで大気を遮断する。高速で動くために、パイプの O リングを使っているので、コリメータ(5)で放射線から保護している。
7. 放射線安全のためのシャッター：「入れたら絶対に下流に光が行かない」シャッター。高さ 5cm、幅 10cm、ビーム進行方向 25cm のタンダステンブロック。
8. (8～10) 差動排気システム：無酸素銅の固定マスク、コンダクタンスの小さい細いダクト、大きめの真空チェンバー、コンダクタンスの小さい細いダクト、無酸素銅の固定マスク、という組み合わせで、真空保護と上下流の真空圧力で差を付ける役割がある。ビームラインで低エネルギー側の SX を利用したいので、ベリリウム薄膜で真空を切ることができない。頻繁に大気にして開け閉めする前提の試料照射チェンバーまで、差動排気を多段に挟みつつ、真空的にはつながっている。
11. リングシールド出口

以上が加速器トンネル内のフロントエンド部分である。

5.4.3. ビームライン（実験ホール側）

続いて実験ホール側の部分 (Fig.5.9、[5.5、5.6、5.7]) について紹介を続ける。

ビームラインの役割を下記に示す。

1. 分光する：利用目的にあわせたエネルギーの光を切り出す。
2. 光を成形する：利用目的に合わせて光のサイズと発散角を調整する。
3. 試料をセット、光を照射し、データを取る。

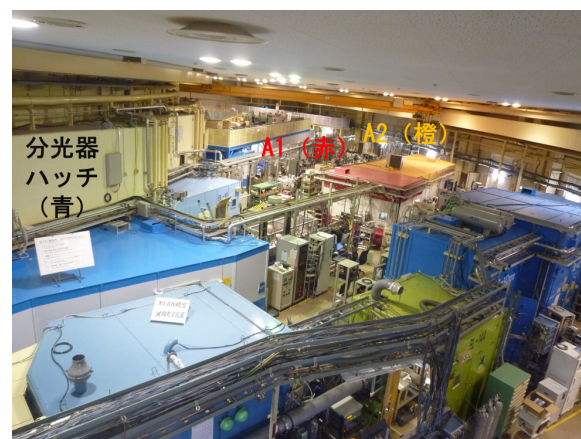


Fig. 5.9 BL15

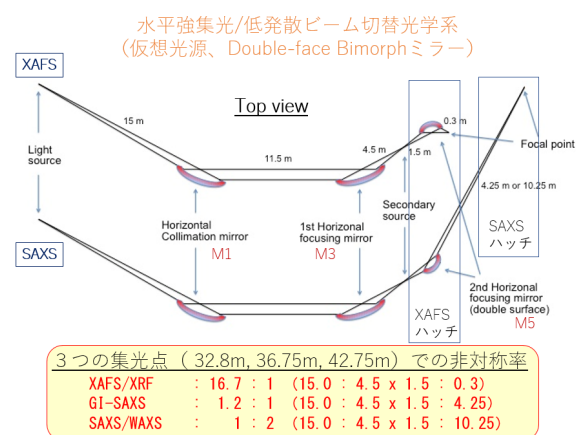


Fig. 5.10 (水平) 強集光と低発散の切り替え

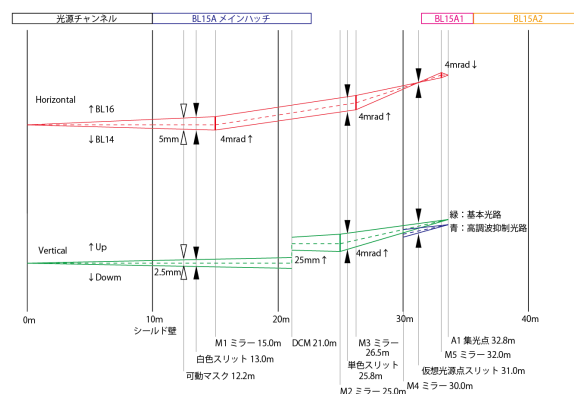


Fig. 5.11 光学 (A1 利用時)

BL15 の A1/A2 の切り替えの様子 (M5 以降が違う) を Fig. 5.10 に示す。A1 利用時の光路を Fig. 5.11 に示す。BL15 には分光器が 1 台、ミラーが 5 枚設置されている。スリットは 3 枚あり、最上流のアーチャーとしてのスリット、単色化後の垂直方向の切り出しスリット、仮想光源点スリットで

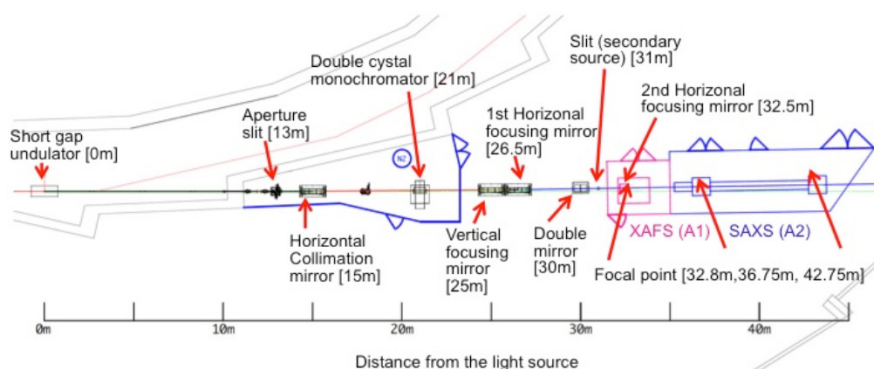


Fig. 5.12 BL15 ([5.5]より)

ある。水平方向の受け範囲はスリットではなくM1 ミラーで決められている。ビームライン分光器及びミラーの詳細を下記に示す。

- ・ 計算結合駆動型液体窒素冷却二結晶分光器 [Si(111)] QXAFS 対応
- ・ M1：水平平行化用平面湾曲ミラー (Si 基板、Rh コーティング)
- ・ M2：鉛直集光用平面湾曲ミラー (ULE (熔融石英) 基板、Rh コーティング)
- ・ M3：水平集光用 16 素子平面湾曲バイモルフミラー (Si 基板、Rh コーティング)
- ・ M4：高調波抑制用ダブル平板ミラー (Si 基板、Ni コーティング)：テンダー利用時のみ挿入 (仮想光源点までは A1/A2 共通)
- ・ M5：水平集光用両面バイモルフミラー (Si 基板、Rh コーティング)、A1、A2 切替&試料上集光

利用目的及び実験装置における光のパラメータは下記の通りである。

15A1

- ・ XAFS (X 線吸収微細構造)：マイクロビーム (短距離集光)
- ・ エネルギー範囲：2.1 ~ 23 keV
- ・ エネルギー分解能 ($\Delta E/E$)： $\sim 2 \times 10^{-4}$
- ・ ビームサイズ：0.02 mm (H) x 0.02 mm (V)
- ・ ビーム強度： 3.5×10^{11} photons/s (7.5 keV)

15A2

- ・ SAXS (X 線小角散乱)：低発散 (長距離集光)
- ・ エネルギー範囲：2.1 - 15 keV (0.93 - 5.9 Å)
- ・ エネルギー分解能 ($\Delta E/E$)： 2×10^{-4}
- ・ ビームサイズ：H 0.55 x V 0.09 mm²
(カメラ長 1.5m 時の試料位置)
H 0.29 x V 0.04 mm²
(テンダー SAXS の試料位置)
- ・ ビーム強度： 2×10^{11} photons/s (10.2 keV)

BL 全体の概略を Fig. 5.12 に示す。それぞれの要素を上流から順に示しつつ、説明していく。写真を Fig. 5.13、Fig5.14、Fig.5.15 に示す。

1. 壁貫通管出口
2. 真空ステーション#1：大きめの真空チェンバーに、粗排気、ターボポンプ (上部)、ノーズポンプ (下部) を組み合わせたセット。マスクや BPM の脱ガス吸収、真空リーク時などのバフファ、差動排気用。
3. BPM (beam position monitor)：4 ブレードで光の位置を測定する。光軸調整の際の電子ビーム軌道 (位置、角度) 調整にも使っている。ポンプの振動の影響を受けないように、両脇はベローで接続されている。
4. 可動マスク：下流を保護するためのマスク。光軸に応じて可動。
5. 真空ステーション#2
6. スリット#1：ビームライン下流に通す光の大きさを決める「絞り」。水平 2.4 mm x 垂直 0.8 mm。
7. バルブ

8. 固定マスク：電子ビームの変動、光軸変動などに対する下流の機器の保護用。
9. γ ストップパー：矩形の細いダクトの周りに鉛ブロックを置いてある。
10. 真空ステーション#3
11. M1 ミラー：16 番側（上から見た図では上側、写真では紙面手前側）に 4 mrad 光を曲げる。シリコン結晶上にロジウムを蒸着させたミラーで、端を湾曲させてある。（水平に曲げるので、鏡自体は立てて設置。） 長さ 800 mm、高さ 40 mm、厚さ 40 mm。小さいミラーは曲げに弱く、薄いミラーはたわむので、大きく厚くすることで剛性を確保している。光で焼けたり汚れたりした場合は縦に受光面をずらす。このミラーの受光面の長さ（800 mm）で、ビームライン取り込み角が決められている。ミラーからこぼれた直進光は下流で止める。
12. 長いダクト：ミラーで切り出した光と、ミラーをすり抜けた光とを分けるために必要な飛距離を稼ぐ。
13. 真空ステーション#4
14. ワイヤモニター：可動ワイヤを光の中に入れて、動かしながら光の形状を測定する。
BPM は光の芯がどこにいるかパワーを測定する目的で、常時非破壊で測定している一方、ワイヤモニターは光をワイヤで切るので、立上げ時など、調整時のみ利用される。
15. ビームストッパー
16. Si(111)二結晶分光器（計算結合駆動型液体窒素冷却）：二結晶を組み合わせると、エネルギー（回転角）に依らずに出射位置と角度を固定できる。Fig. 5.16 にエネルギーを変えたときの様子を示す。70.3° で 2.1 keV から、7.57° で 15 keV まで利用可能で、毎秒 0.6° の高速掃引が可能となっている。また、モーションコントローラによる 6 軸リアルタイムフィードバック制御で、挿入光源のギャップと連動するだけでなく、特に垂直方向の光の位置補正を分光器が担っている。（水平は仮想光源点もある。）
17. BBS (branch beam shutter)：下流実験ハッチに対する光の ON/OFF 制御用シャッター
18. ガンマ線シールド：ミラーをすり抜けた光を受けるストッパー。M1 無しとした直線延長線上に設置。
19. ハッチ出口
20. 蛍光板
（ビニルハット（21-23））
21. M2 ミラー：縦方向に 4 mrad 蹴る。溶融石英（ULE）上にロジウム蒸着。石英に添加物を加えて、熱膨張しない材質になっている。
22. スリット#2：縦方向の取り込み角を決めるスリット。
23. M3 ミラー：BL16 側に 4 mrad 蹴る。シリコン基板にロジウム蒸着。仮想光源点に向けての集光用のバイモルフ曲面鏡。2 枚のピエゾ（圧電セラミック）を貼り合わせて電圧をかけると、伸縮を曲げに変換することができる。それをバイモルフピエゾ素子と呼ぶ。鏡に多数のバイモルフピエゾ素子を貼り付け、局所変形補正を可能にした鏡がバイモルフ鏡である。
24. 真空ステーション#5
25. M4 ミラー：シリコン基板にニッケル蒸着の 2 枚鏡。低エネルギー側（テンダー側）利用の場合に、高エネルギーの高次光をカットするのに使う。例えば、5 keV 利用する際に、15 keV を切る。
26. スリット#3：M3 ミラーの集光点。横方向の仮想光源点として働く。このスリットで光を切り出すことで、小さな電子ビーム変動に対して光は安定になる。なお、縦方向には仮想光源点が無いので、代わりに、分光器の第 2 結晶上の光の位置を一定に保つように、第 1 結晶に対してピエゾで約 1kHz のフィードバック補正をかけている。
27. ゲートバルブ
（A1 ハッチ）
28. M5 ミラー：ダブルフェイスバイモルフミラー。A1/A2 切替のために 2 枚のミラーが背中合わせに設置されている。鏡の位置を変えて、表面と裏面で A1/A2 を切り替える。鏡の長さは 180 mm。A1 用の面は仮想光源点からの光を短距離で試料上に集光する強集光非対称鏡で



Fig. 5.17 ID15 制御ラック (左)、BL15 チャンネル制御ラック (右)

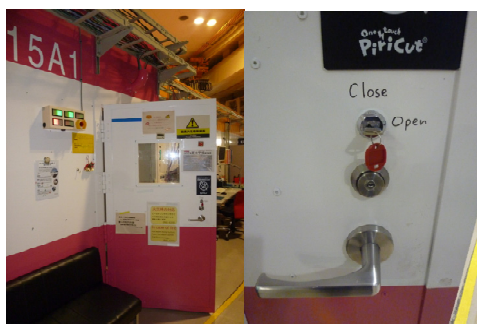


Fig. 5.18 BL15A1 ステーションのハッチ扉と、そのカギ。

あり、一方で A2 用の面を使うと、試料までの距離が長いので、低発散光となる。

29. XAFS 実験装置

30. A2 用ダクト: A2 利用時に、XAFS 装置をバイパスして A2 ハッチに光を輸送するための真空ダクト。

31. 単色 BPM

32. X 線シャッター

33. SAXS 実験装置

以上が実験ホールの BL15 の構成となる。

5.4.4. BL15、ID15 制御機器など

ビームラインやチャンネルに必要なのはビームライン上のハードウェアだけではない。最後に、インターロックや制御機器を写真で紹介する。Fig.5.17 に ID15 及び BL15 チャンネルの制御ラックを示す。ID 制御ラックにはギャップ開閉のためのステッピングモータ制御系（ドライバ、コントローラ）、軌道フィードフォワード補正用のステ

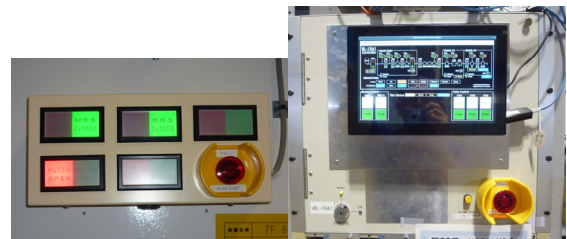


Fig. 5.19 BL15A1 ステーションのインターロック表示と制御ラック

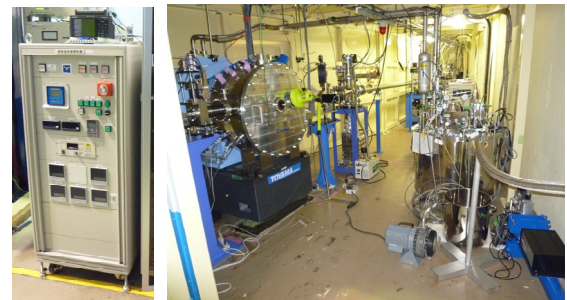
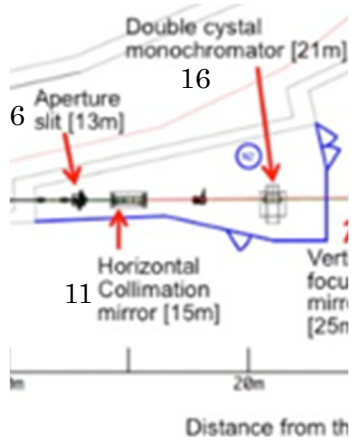


Fig. 5.20 液体窒素循環装置制御ラック (左)、分光器と液体窒素循環装置 (右)

アリング電源などが設置されている。チャンネルラックには、バルブ開閉やそれをインターロックとして制御するためのコントローラなどが設置されている。

ビームライン BL15A1 ハッチ扉とそのカギを Fig.5.18 に示す。ビームラインのインターロック表示とコントローラの写真を Fig. 5.19 に示す。ハッチ扉をカギで閉め、インターロック条件が満たされると、コントローラ側にカギを挿し直し、シャッターオープン、光を出して実験を行うことができるようになる。

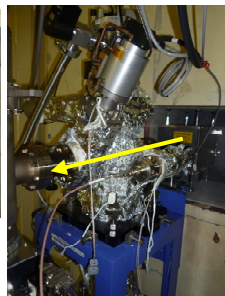
周辺機器の例として、Fig. 5.20 に分光器冷却用の液体窒素循環装置とそのコントローラの様子を示す。他にもミラーや分光器制御のためのステッピングモータコントローラや、真空ポンプの電源など様々な機器が設置されている。



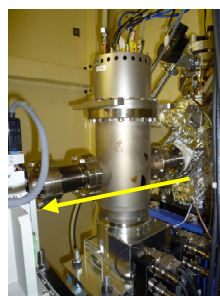
(リング壁側 (16 番側) が作業スペースのため、写真の順と光の方向が悉く逆.....)



1. 貫通孔出口 (ホール側)



2. 真空ステーション#1



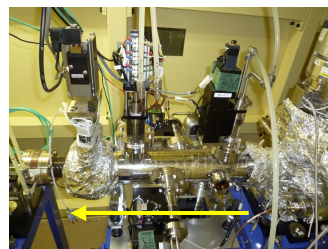
3. BPM



4. 可動マスク



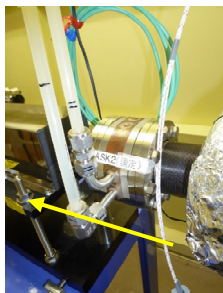
5. 真空ステーション#2



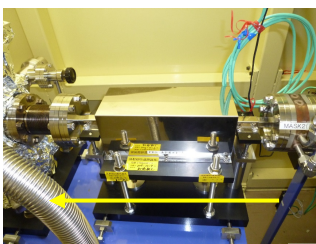
6. スリット#1



7. バルブ



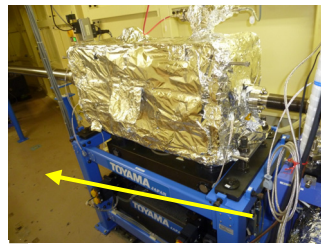
8. 固定マスク



9. ガンマ線ストッパー



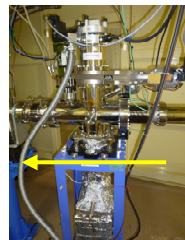
10. 真空ステーション#3



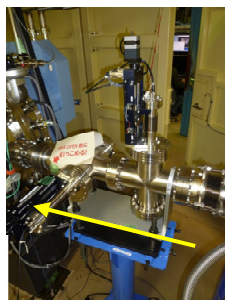
11. M1 ミラー槽



12. 長いダクト

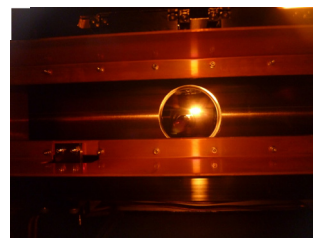


13. 真空ステーション#4

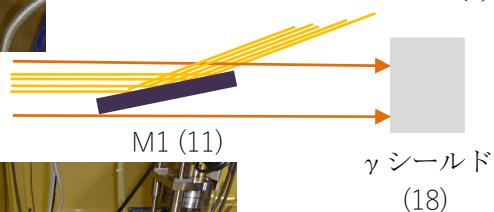


14. ワイヤーモニタ

15. ビームストッパー

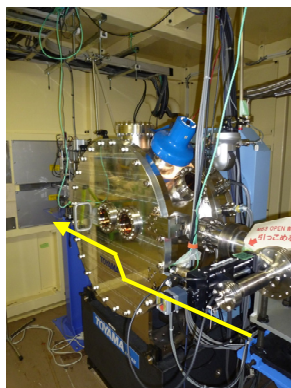


M1 ミラー

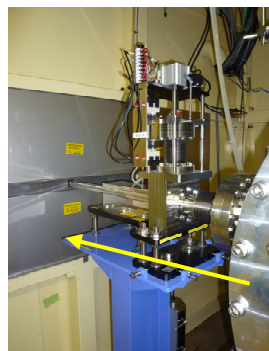


M1 (11)

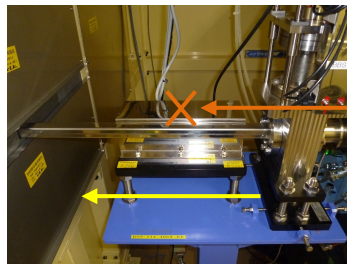
γ シールド (18)



16. 二結晶分光器

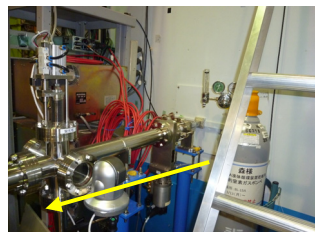
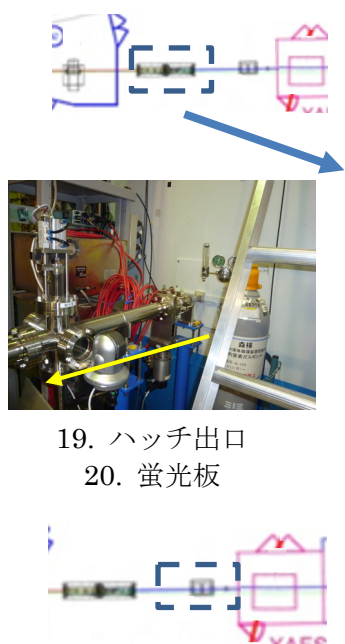


17. BBS



18. γ 線シールド

Fig. 5.13 BL15 光学ハッチ



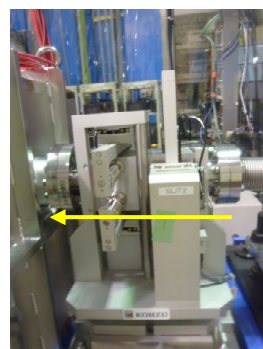
19. ハッチ出口
20. 蛍光板



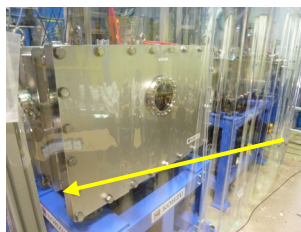
ビニルハット



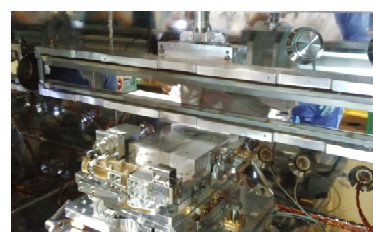
21. M2 ミラー槽



22. スリット#2



23. M3 ミラー槽



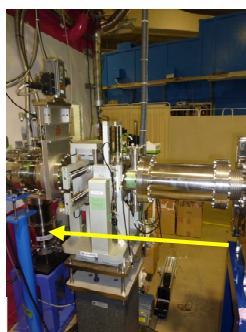
M3 ミラー



24. 真空ステーション#5



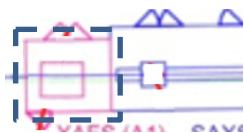
25. M4 ミラー槽



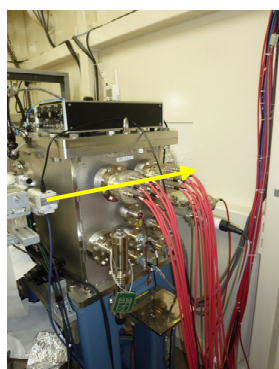
26. スリット#3
(仮想光源点)



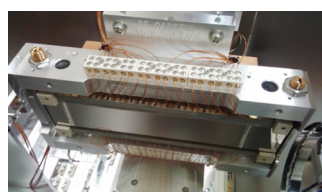
27. ゲートバルブ x 2



A1 ハッチ



28. M5 ミラー

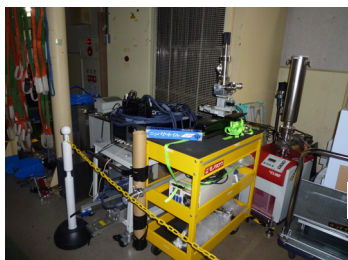
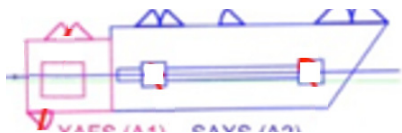


M5 ミラー

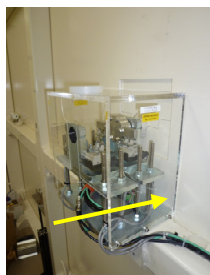


29. XAFS 実験装置

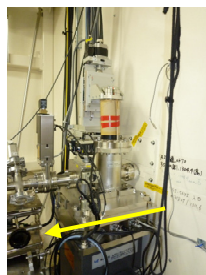
Fig. 5.14 BL15 ビニルハット～A1 ステーション



30. A2 用ダクトと
真空ポンプ一式



A1 ハッチ出口

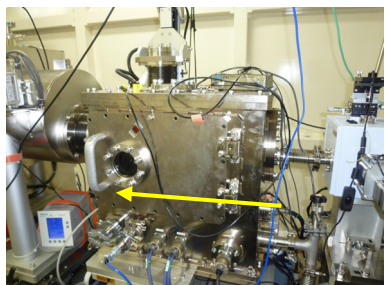


31. 単色 BPM

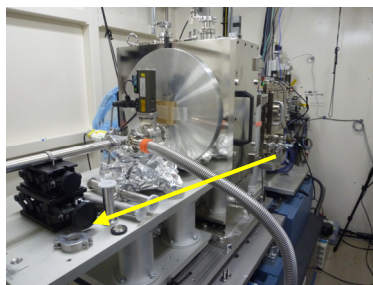


32. X 線シャッター

33. SAXS 実験装置



テンダー時の試料用真空槽



検出器取り付けチェンバー



未使用時は架台内に格納

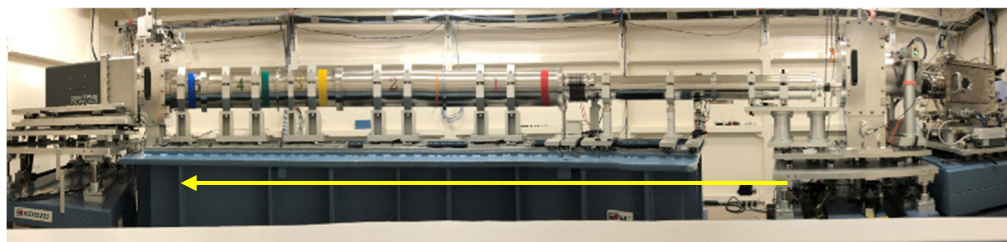
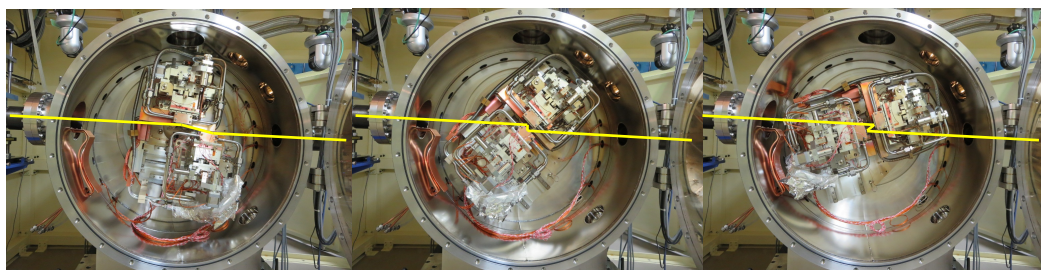


Fig. 5.15 BL15 A2 ステーション



7°

45°

75°

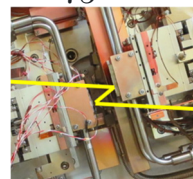
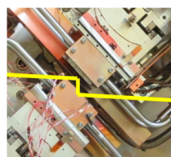
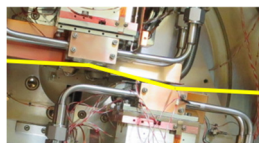


Fig. 5.16 二結晶分光器と回転角

5.5. 他の特徴的なビームライン

BL15 以外のいくつかの特徴的 (PF を代表するという意味ではなく、単に他と違って面白いという意味で……) なビームラインを紹介する。

5.5.1. BL20A

BL20A (Fig. 5.21) は PF の中で最もエネルギーが低いビームラインである。パラメータを下記に示す。

- VUV 発光分光、VSX 分光
- 偏向電磁石光源
- 3m 直入射型分光器、6~40 eV
 - 回折格子 (刻線密度: 1200 本/mm)
 - 回折格子 (刻線密度: 2400 本/mm)
- 分解能 ($E/\Delta E$): 3×10^{-4} @ 100 nm
- ビームサイズ: 3 mm (H) x 1 mm (V)
- ビーム強度: 10^{12} photons/s

低エネルギーなので、直入射の回折格子分光器が用いられており、分光器が中 2 階に、測定器は実験ホール内側に向かって設置されている。

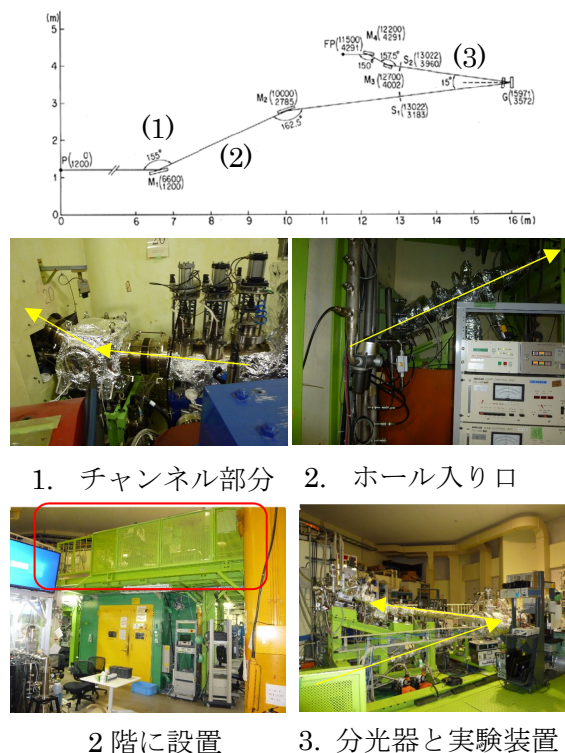


Fig. 5.21 BL20A

5.5.2. BL6A

BL6A (Fig. 5.22) は 2 結晶分光器が使われていない 2 本の X 線ビームラインの内の 1 本で、三角の旗のような Ga(111) 結晶を分光に用いている。パラメータを下記に示す。

- 多目的 SAXS ステーション
- 偏向電磁石光源
- エネルギー固定: 8.26 keV ($1.5 \text{ \AA}$)
- 分解能 ($E/\Delta E$): 3×10^{-3}
- ビームサイズ: 0.50 mm (H) x 0.25 mm (V)
- ビーム強度:
 - 1.0×10^{12} photons/s (第 1 スリット全開)
 - 3.6×10^{10} photons/s (第 1 スリット: $0.6 \times 0.6 \text{ mm}^2$)

1 結晶分光器の場合、エネルギーによって回折角が変わるので、測定器全体を回す必要がある。このビームラインも回せるように作られたが、現在は 1 箇所固定して、固定エネルギーで使われている。

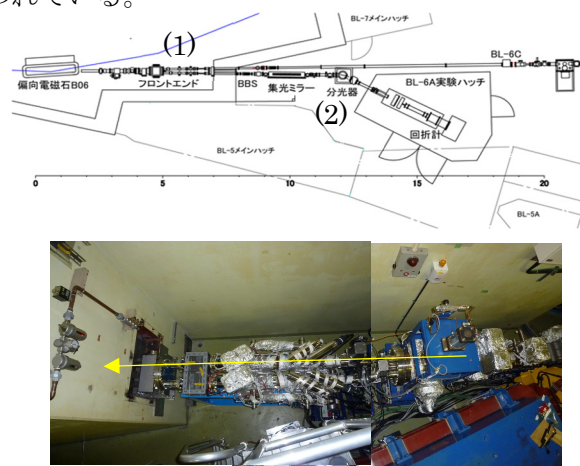


Fig. 5.22 BL6A

6. 放射光利用研究

6.1. PF の利用グループ

PF の共同利用で実験課題を審査する委員会を PF-PAC (program advisory committee) と呼んでおり、手法毎に 6 つに分けられている。

1. 光電子分光、軟 X 線吸収分光、軟 X 線顕微鏡 (STXM)
2. 回折、散乱
3. X 線吸収分光 (XAFS)
4. タンパク質結晶構造解析
5. 小角散乱 (SAXS)
6. 高圧、超高速時間分解、X 線光学、X 線イメージング

それぞれについて簡単に説明をしていく。

6.2. 光電子分光

物質に X 線を当てると光電子が出る (1887 年)。光電子のエネルギースペクトル (Photo Emission Spectroscopy, PES)、その角度分解 (Angle-resolved PES, ARPES) の測定で、物質の電子状態、バンド構造そのものが分かる。量子力学 (1920 年代) やバンド理論 (1920 年代後半) をもとにした光電子分光は、1960 年代の超高真空技術の発展により実験室で幅広く行われる様になり、放射光利用によって分解能が飛躍的に向上した。主に強相間電子系やペロブスカイト構造の高温超伝導物質、モット絶縁体などの研究に使われ、基礎研究のみならず、半導体集積回路 (金属酸化皮膜半導体電界効果トランジスタ) や触媒、薄膜表面のバンド構造、化学的結合状態の解明など、工業的技術の発展にも大きく貢献している。放射光実験ビームラインを見ると、電子のエネルギー分析のための半球型の分析器があるのですぐ分かる。

光電子分光の原理を Fig. 6.1 に、PF 実験ホールのビームラインにあった半球型の電子エネルギー分析器を Fig. 6.2 に示す。

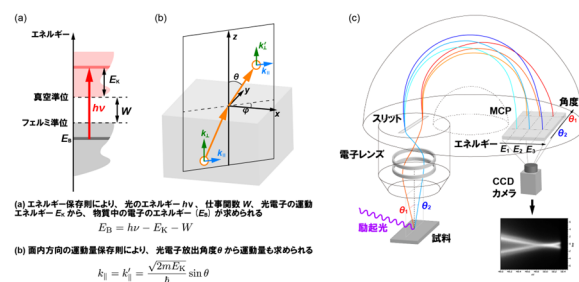


Fig. 6.1 角度分解光電子分光(ARPES) (東大物性研松田研究室 WEB より)



Fig. 6.2 電子エネルギー分析器

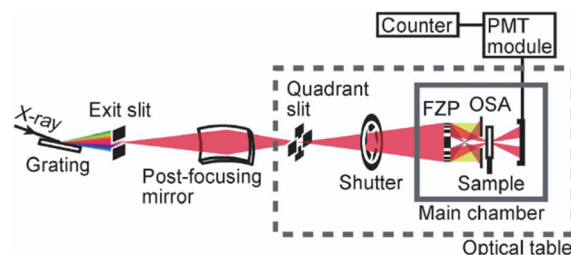


Fig. 6.3 STXM 全体の概略 [6.2]

6.3. STXM

スティックサム (STXM, scanning transmission X-ray microscopy) はゾーンプレートで軟 X 線を数十 nm サイズに集光し、透過光を検出しながら試料を走査し、画像を得る手法である。XANES スペクトルの画像化といえる手法で、XANES 同様、価数や化学形態の違いを画像化することができる。(例えば炭素の吸収端を使って、官能基の分布を調べたりできる。)

PF では PL19A (以前は BL13A) で実施されていて [6.1, 6.2]、大きな定盤の上に仮想光源点から試料チェンバーまで一式を載せて安定性を確保しているのが特徴である。全体の概略を Fig. 6.3 に、メインチェンバーの写真を Fig. 6.4 に示す。

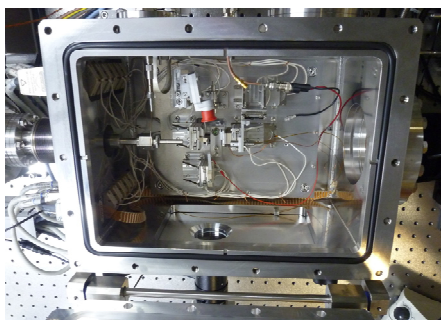


Fig. 6.4 STXM メインチェンバー



Fig. 6.5 回折、散乱実験装置：4 軸回折計 (BL10A、左上)、極限環境下单結晶構造解析 (ガス吹き付け装置付き、BL8A、右上)、極限環境下測定 4 軸回折計 (BL3C、左下)、超伝導電磁石磁場下单結晶構造解析 (BL3C、右下)

6.4. 回折・散乱

机上の X 線管を使った学生実験同様に、放射光でも回折、散乱実験を行うことができる。放射光の指向性や強度を活かせば、超高分解能、超精密測定が可能であり、極限環境下（高圧力、高電磁場、高温、低温）での測定も広く行われている。

波長可変性を活かし、波長を元素の吸収端に合わせた「共鳴」X 線散乱実験も可能である。X 線の入射から散乱までの間に、電子の励起と基底状態への遷移を経た過程が共鳴散乱である。始状態

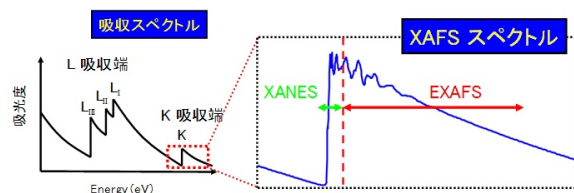


Fig. 6.6 XAFS スペクトル（太田充恒（産総研）「[X 線吸収微細構造\(XAFS\)とは](#)」より。）

と終状態が同じであれば弾性共鳴散乱、違えば非弾性となる。電荷・軌道秩序構造、磁気構造やスピンと軌道角運動量の分離測定などが可能である。

Fig. 6.5 に PF の X 線回折・散乱実験装置を示す。

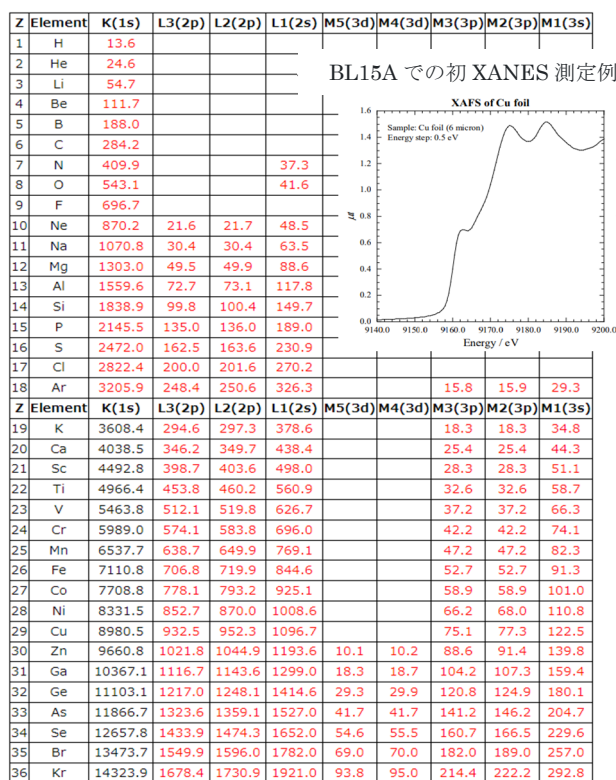
6.5. X 線結晶構造解析

X 線利用で一番有名なのは、医学を除けば結晶構造解析であろう。そもそも回折パターン撮影から X 線が電磁波であることが証明（1912 年、ラウエ法）され、その解析から結晶のもつ周期構造が証明（1913 年、ブラッグの法則）された。結晶や化学結合の特徴的な長さは約 $1 \text{ \AA}$ (0.1 nm) であり、対応する X 線のエネルギーは 12.4 keV となる。結晶構造解析のための HX 領域の高輝度 X 線の発生には、真空封止短周期挿入光源が 2000 年代に導入されるまでは高エネルギーの加速器が必須であった。そのような高エネルギーの放射光源が世界に 3 カ所 ESRF（1994 年、フランス）、APS（1995 年、USA）、SPring-8（1997 年、兵庫県）存在する。

6.6. XAFS

光電効果は X 線吸収で起こる現象のひとつだが、内殻まで含めた微細な X 線吸収スペクトルを X 線吸収微細構造(X-ray Absorption Fine Structure, XAFS)という。(Fig. 6.6)

吸収端直近の構造を XANES（X-ray Absorption Near Edge Structure）または、NEXAFS（Near Edge XAFS）という。電子の遷移スペクトルの重ね合わせで、元素の価数、化学形態、すなわち官能基、錯体や分子の軌道状態がわかる。



Z	Element	K(1s)	L3(2p)	L2(2p)	L1(2s)	M5(3d)	M4(3d)	M3(3p)	M2(3p)	M1(3s)
37	Rb	15199.7	1804.4	1863.9	2065.1	112.0	113.0	239.1	248.7	326.7
	Sr	16104.6	1939.6	2006.8	2216.3	134.2	136.0	270.0	280.3	358.7
	Y	17036.6	2080.0	2155.5	2372.5	155.8	157.7	298.8	310.6	392.0
40	Zr	17995.9	2222.3	2306.7	2531.6	178.8	181.1	329.8	343.5	430.3
41	Nb	18983.0	2370.5	2464.7	2697.7	202.3	205.0	360.6	376.1	466.6
42	Mo	20000.4	2520.2	2625.1	2865.5	227.9	231.1	394.0	411.6	506.3
43	Tc	21044.0	2676.9	2793.2	3042.5	253.0	257.0	425.0	445.0	544.0
44	Ru	22117.2	2837.9	2966.9	3224.0	280.0	284.2	461.4	483.5	586.2
45	Rh	23220.0	3003.8	3146.1	3411.9	307.2	311.9	496.5	521.3	628.1
46	Pd	24352.6	3173.3	3330.3	3604.3	335.2	340.5	532.3	559.9	671.6
47	Ag	25515.6	3351.1	3523.7	3805.8	368.0	374.0	573.0	603.8	719.0
48	Cd	26713.3	3537.5	3727.0	4018.0	405.2	411.9	618.4	652.6	772.0
49	In	27940.4	3730.1	3938.0	4237.5	443.9	451.4	665.3	703.2	827.2
50	Sn	29200.4	3928.8	4156.1	4464.7	484.9	493.2	714.6	756.5	884.7
51	Sb	30490.5	4132.2	4380.4	4698.3	528.2	537.5	766.4	812.7	946.0
52	Te	31813.8	4341.4	4612.0	4939.2	573.0	583.4	820.0	870.8	1006.0
53	I	33169.4	4557.1	4852.1	5188.1	620.0	631.0	875.0	931.0	1072.0
54	Xe	34561.6	4782.2	5103.7	5452.8	676.4	689.0	940.6	1002.1	1148.7
55	Cs	35984.6	5011.9	5359.4	5714.3	726.6	740.5	1003.0	1071.0	1211.0
56	Ba	37440.6	5247.0	5623.6	5988.8	780.2	795.5	1063.0	1137.0	1293.0
57	La	38924.6	5482.7	5890.6	6266.3	836.0	853.0	1128.0	1209.0	1362.0
58	Ce	40443.0	5723.4	6164.2	6548.8	883.8	902.4	1187.0	1274.0	1436.0
59	Pr	41990.6	5964.3	6440.4	6834.8	928.8	948.3	1242.2	1337.4	1511.0
60	Nd	43568.9	6207.9	6721.5	7126.0	980.4	1003.3	1297.4	1402.8	1575.0
61	Pm	45184.0	6459.3	7012.8	7427.9	1026.9	1051.5	1356.9	1471.4	
62	Sm	46834.2	6716.2	7311.8	7736.8	1083.4	1110.9	1419.8	1540.7	1722.8
63	Eu	48519.0	6976.9	7617.1	8052.0	1127.5	1158.6	1480.6	1613.9	1800.0
64	Gd	50239.1	7242.8	7930.3	8375.6	1189.6	1221.9	1544.0	1688.3	1880.8
65	Tb	51995.7	7514.0	8251.6	8708.0	1241.1	1276.9	1611.3	1767.7	1967.5
66	Dy	53788.5	7790.1	8580.6	9045.8	1292.6	1332.5	1675.6	1841.8	2046.8
67	Ho	55617.7	8071.1	8917.8	9394.2	1351.4	1391.5	1741.2	1922.8	2128.3
68	Er	57485.5	8357.9	9264.3	9751.3	1409.3	1453.3	1811.8	2005.8	2206.5
69	Tm	59389.6	8648.0	9616.9	10115.7	1467.7	1514.6	1884.5	2089.8	2306.8
70	Yb	61332.3	8943.6	9978.2	10486.4	1527.8	1576.3	1949.8	2173.0	2398.1
71	Lu	63313.8	9244.1	10348.6	10870.4	1588.5	1639.4	2023.6	2263.5	2491.2

Fig. 6.7 吸収端のエネルギー

(PF WEB 放射光軟X線分光及び軟X線吸収スペクトル測定「[吸収端一覧表](#)」の一部)

もう少し広い、高エネルギー側のスペクトルの裾を EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) という。光電子散乱スペクトルの重ね合わせで、その元素の周辺の原子の様子（どんな元素がどのくらいの距離にどれだけあるか）が分かる。

吸収端のエネルギーは軽元素では VSX 領域、重元素では HX 領域となり、幅広い波長の放射光が利用されている。試料を結晶にする必要が無いため、考古学的分析から触媒、電池の反応の解明まで、色々なことに応用されている。精密に薄い試料が作成できれば吸収を直接測定する透過法ができる他、蛍光を用いた蛍光法や、光電子を使った電子収量法による表面や薄膜試料の研究（光電子は内面からは出てこられない）が行われている。

吸収端の例を Fig. 6.7 に示す。

6.7. 蛋白質結晶構造解析

新第3世代光源は蛋白質の結晶構造解析のために建設されたといっても過言ではない。最初の新

第3世代光源である SLS (2001 年、スイス) には製薬会社が出資した産業利用専用ビームラインも多数存在している。

生命物質の構造解析で最も有名なのは DNA で、DNA が遺伝子であることの証明 (1944 年、エイブリー、1952 年、ハーシーとチェイス) の後、X 線回折による 2 重らせん構造 (1953 年、ワトソン、クリック) の解明があげられる。

蛋白質の結晶構造解析は、そもそも蛋白質が結晶にできること (1926 年)、空気中にさらすと結晶が壊れるので、乾燥させずに照射するテクニックの開発 (1934 年、バナールとホジキン、Fig. 6.8) へと進む。最初の蛋白質結晶構造解析は人のヘモグロビン (1959 年、ペルツ、Fig. 6.9 左) で、重原子同位置換法 (1954 年、ペルツ) によるものであった。それは、水銀、白金、金、などの試薬を蛋白質と混ぜ、蛋白質と結合させた状態で結晶化させると、重元素からの回折で位相情報が推定できるという手法で、X 線管を使った実験室の蛋白質構造解析で可能なほぼ唯一の手法である。ただし、手法は開発されても、そもそも実験室系では蛋白



Fig. 6.8 ジョン・バナール (1901-71、左)、ドロシー・ホジキン (1910-94、右)。(Wikipedia より。)

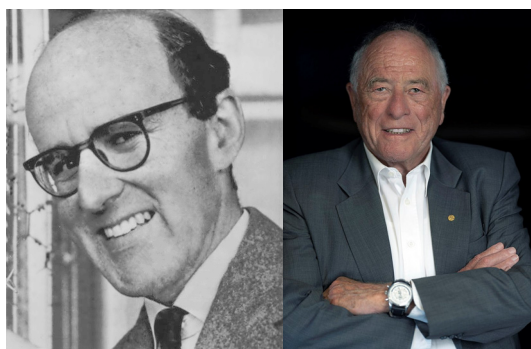


Fig. 6.9 マックス・ペルーツ (1914-2002、左)、クルト・ビュートリッヒ (1938-、右)。(Wikipedia より。)

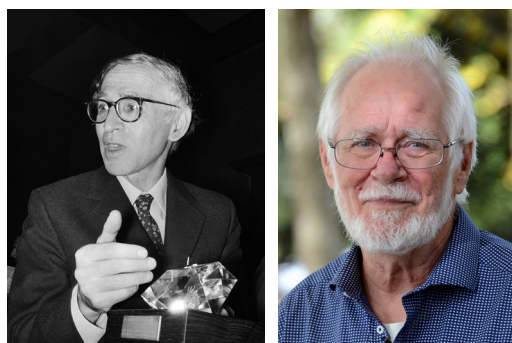


Fig. 6.10 アーロン・クルーグ (1926-2018、左)、ジャック・ドウボシエ (1938-、右)。(Wikipedia より。)

質構造解析は非常に困難であり、全世界で年間 10～20 個が解けるという時代が長く続いた。

ところで、蛋白質の結晶構造解析は放射光以外に NMR (1984 年、ビュートリッヒ (Fig. 6.9 右)、BUSI IIA 蛋白質で 2002 年ノーベル賞) と電子顕微鏡 (タバコモザイクウイルス、1966 年、クルーグ (Fig. 6.10 左)、1985 年ノーベル賞)、低温電子

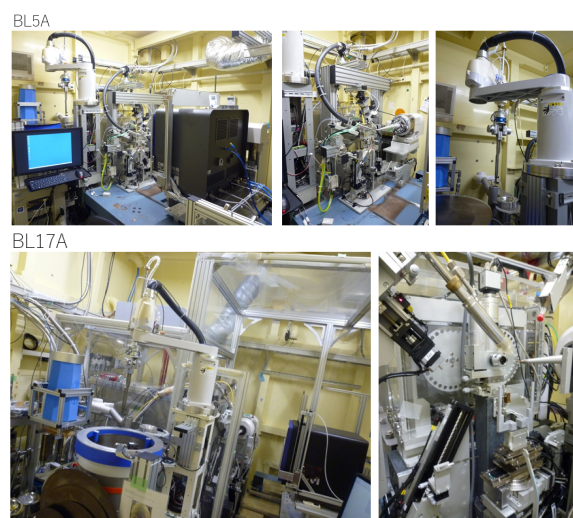


Fig. 6.12 PF の構造生物実験ステーション (上は BL5A、下が BL17A。いずれもロボットが液体窒素デューワーから試料を順に取り出して測定、デューワーに戻す、という自動測定を行っている。)

顕微鏡法 (1984 年、ドウボシエ (Fig. 6.10 右)、2017 年ノーベル賞) でも行われている。2025 年 7 月現在、PDB (構造生物データベース、1971 年～) への蛋白質の登録数は、X 線構造解析 19.6 万件、NMR 1.46 万件、電顕 2.7 万件となっている。(近年は電顕法の登録数の伸びが大きい。) 1992 年には全部合わせて 1000 件に満たなかったものが、放射光利用の拡大でここまで解かれたのである。

(Fig. 6.11) X 線結晶構造解析法はその名の通り結晶化が必要であるが、大きな分子量の蛋白質でも測定可能である。NMR は溶液状態でも測定可能だが、小さな分子量 (およそ 40 kDa (ドルトン) まで) に限る。クライオ電顕は生体内に近い環境下での測定も可能で、近年はどんどん大きな分子量の蛋白質にも対応してきている。

蛋白質結晶構造解析のために必要な光は、結晶サイズにあわせてミクロンオーダーまで集光できる 10 keV 程度の高輝度 HX 光で、かつては複数波長での測定が必須であった。アミノ酸であるメチオニンの硫黄をセレン化 (大腸菌に作ってもらう……) し、その X 線異常分散を利用して、複数の波長での回折像から位相回復を行うという、多波長異常分散 (MAD、(Se) Multi-wavelength

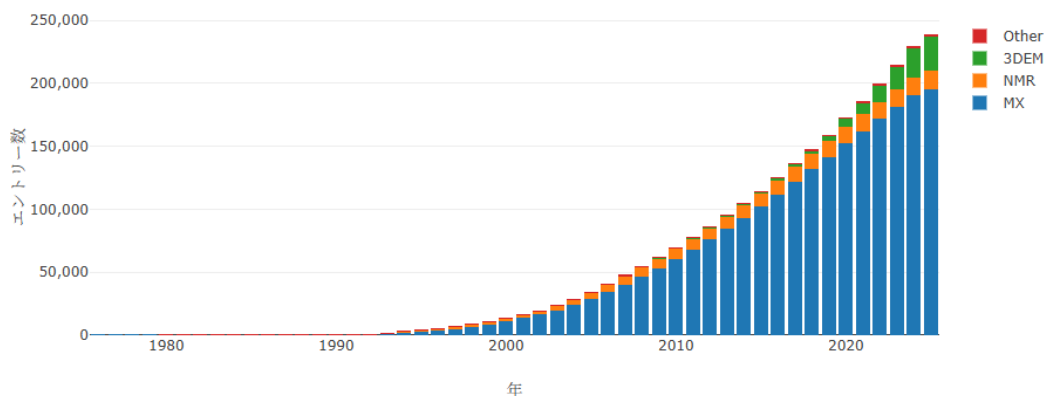


Fig. 6.11 実験手法別蛋白質データバンクのエントリー数統計。(3DEM が電子顕微鏡法、MX は X 線構造解析法。PDBj「[統計情報](#)」より。)

Anomalous Diffraction Method) 法という。最近では、硫黄そのものなど、タンパク質に元々ある軽元素を活かし、元素置換も試薬の混合もなしに、そのまま測れる単波長異常分散 (SAD、Single-wavelength AD) 法が主となっている。(2006 年に SAD 法が MAD 法より多くなった。)

PF の構造生物 BL を Fig. 6.12 に示す。液体窒素温度で試料を宅配する専用の箱も開発されていて、運転期間中の PF 宅配室で到着、返送で毎日のようにやりとりされている。

6.8. 小角散乱

可視光や赤外線は物質を一般に物質を透過しないため、内部構造の測定には X 線や中性子を使わざるを得ない。回折においては、試料の周期構造が細かいと回折角が大きくなるが、波長よりかなり大きな構造を測定したい場合、それは極めて小さな散乱角の領域となる。それを小角散乱 (Small Angle X-ray Scattering, SAXS) と呼ぶ。小角散乱の概略を Fig. 6.13 に、BL6C (5 章で触れた三角の旗型の 1 結晶分光器の固定エネルギーライン) の実験ステーションを Fig. 6.14 に示す。ちなみに 5 章の BL15A2 も SAXS であった。

例えばゴムや樹脂といったソフトマターや高分子化合物は、分子が球を作り、球が鎖になり、鎖がネットになり、という感じで段階的な構造をもつ。SAXS により、そのような階層構造の特徴的な長さを測定することができる。何でも測れる

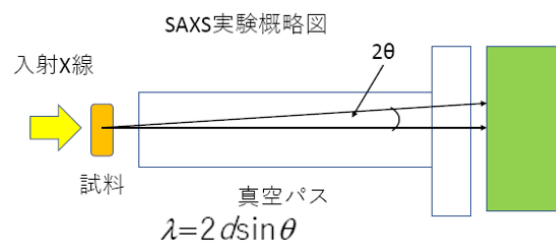


Fig. 6.13 SAXS 実験の概要 (高木秀彰氏による説明資料より。)

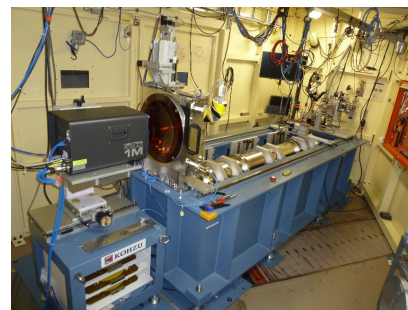


Fig. 6.14 BL6C 実験ステーション

のが特徴だが、具体的な構造決定には別の手法や計算モデルと組み合わせることが必要とのことである。ゴムの例を Fig. 6.15 に示す。

6.9. X 線イメージング

レントゲンが手の骨の画像を撮ってから、X 線イメージングは最もよく知られた研究の手法である。レントゲンのスケールの人体などのイメージングは CT (1963 年、コーマック) の実用化 (1973 年、ハウズフィールド)、ヘリカル CT

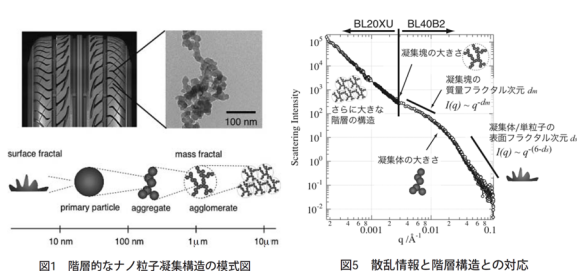


Fig. 6.15 ゴムの小角散乱の例（雨宮慶幸他, 「[2次元極小角・小角X線散乱法を用いたゴム中ナノ粒子凝集構造の観察](#)」より[6.3])

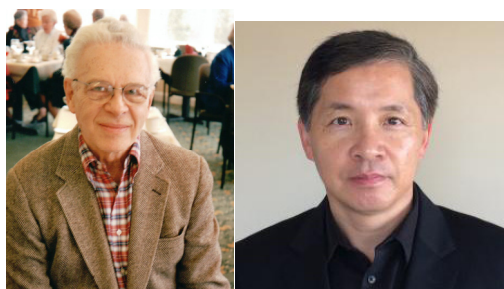


Fig. 6.16 デビッド・セイヤー(1924-2012、左)、Jianwei Miao (1969-、右)。(米国結晶学会WEB(セイヤー)、UCLA WEB(ミャオ)より。)

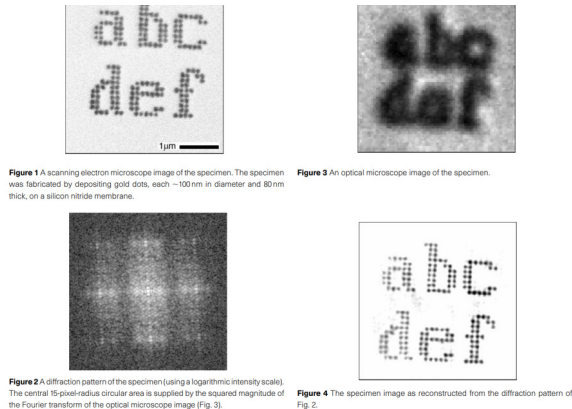


Fig. 6.17 オーバーサンプリング法の例（左上：SEM像、左下：NSLS BL-X1Aで撮影された回折像、右上：光学顕微鏡増、右下：オーバーサンプリング法による実像[6.5].）

(1985年)へと進化していく。放射光でも、それらと同じ様な大きい試料に対する直接的なイメージングや医学利用も行われている。

X線領域では屈折率を利用したレンズは存在しないため、回折現象を利用してレンズと同じ働きをするゾーンプレートが使われる。ゾーンプレー



Fig. 6.18 PFの超伝導垂直ウィグラー

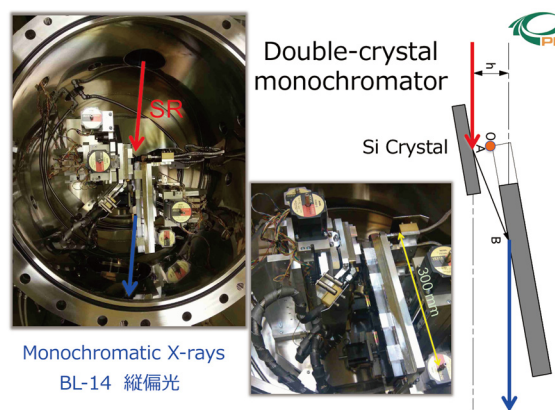


Fig. 6.19 水平に設置された二結晶分光器（兵藤一行 総研大高エネルギー加速器セミナー2022より）

トを利用した顕微イメージングには、STXMの他に、X線を当てて出てきた光電子でイメージングを行うXPEEM(X-ray Photoemission Electron Microscopy)、白色X線で透過像を撮影するTXM(Transmission X-ray Microscopy)などがある。

さらにミクロな試料の場合、蛋白質構造解析同様、位相回復して回折像から実空間像を再構成する手法も可能である。オーバーサンプリング法の利用(1952年、セイヤー[6.4]、Fig. 6.16)と実用化(1999年、ミャオ[6.5]、Fig. 6.17)とタイコグラフィ法とがある。

6.10.X線位相差イメージング(BL14C)

PF BL14Cは世界で唯一の垂直超伝導ウィグラー(Fig. 6.18)を利用した位相差イメージングのビ

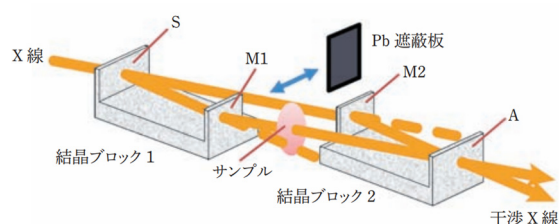


図 3 結晶分離型 X 線干渉計の模式図。入射 X 線は各ハーフミラー（結晶歯）においてラウエケースの X 線回折により分割され、最終的に 2 本の干渉 X 線を形成する。

Fig. 6.20 結晶分離型 X 線干渉計 ([6.6]より)



Fig. 6.21 BL14C 実験ステーション

ームラインである。垂直超伝導ウィグラーは 4.8 T の 3 極の超伝導磁石で電子軌道に下向きに約 6mm のバンプを作る。それによって発生する X 線は垂直方向に連続に広がった光となる。水平に曲げた電子からの光を使う通常のビームラインでは、二結晶分光器の結晶は縦に設置され、吊られた状態で回転し、試料も中空に設置されることが多い。垂直に広がった光を使うと、全てを 90° 回転させて、水平に展開、安定な除震台・定盤の上に一式を並べることができる。

位相差イメージングは X 線を結晶ハーフミラーで 2 分割し、片方の光路に試料を設置、その後再度重ね合わせて生じた干渉縞を観測する、という手法である。Fig. 6.20 に概略を、Fig. 6.21 に実験ステーションの写真を示す。現時点で世界最大の試料を世界最高の分解能で測定することが可能なビームラインとなっている。

6.11. 高圧実験

試料にダイヤモンドアンビル（ブリッジマン、Fig. 6.22、1946 年ノーベル賞）で圧力をかけつつ、



Fig. 6.22 パーシー・ブリッジマン（1882-1961）（AIP Emilio Segrè Visual Archives, W. F. Meggers Gallery of Nobel Laureates Collection より。）

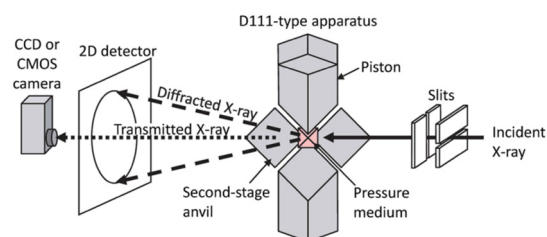


Figure 3 A schematic illustration of experimental system at a beamline NE7A, PF-AR, KEK (modified after ref. [4]).

Fig. 6.23 高圧実験の概念図 ([6.7]より。)

構造解析を行い、例えば地球内部の高温高圧下での物性を調べる実験が高圧実験 BL で行われている。極限環境下の X 線回折、吸収実験ということになる。エネルギーの高い X 線が必要で、主に PF-AR で行われている。実験の概念図を Fig. 6.23 に示す。AR-NE5C、AR-NE7A のパラメータを下記に示す。

AR-NE5C

- ・ 高温高圧 X 線回折、XAFS
- ・ エネルギー範囲：
 - 20～140 keV（白色）
 - 10～60 keV（単色）
- ・ 分解能 ($\Delta E/E$) : 5×10^{-4}
- ・ ビームサイズ : 30 mm (幅) x 3 mm (高さ)
- ・ ビーム強度 : 10^9 photons/s/mm²
- ・ MAX80 : 500 トン DIA 型高圧力発生装置

AR-NE7A

- ・ X 線回折 (& 光学開発、イメージング)



Fig. 6.24 MAX80 (左)、MAX-III (右)

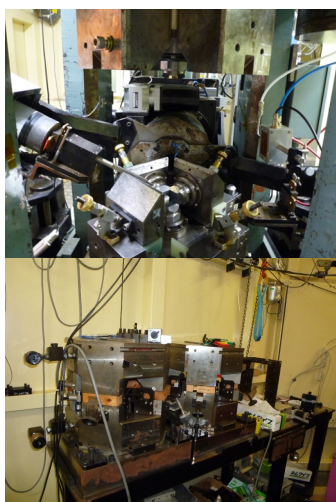


Fig. 6.25 MAX80 のアンビル部分 (上)、MAX-III 用の交換用アンビル (下)

- エネルギー範囲 :
20~140 keV (白色)
10~60 keV (単色)
- 分解能 ($\Delta E/E$) : 1×10^{-3}
- ビームサイズ : 30 mm (幅) x 3 mm (高さ)
- ビーム強度 : 10^{8-9} photons/s/mm² (30keV)
- MAX-III : 700 トン

DIA / D-DIA / D111 型アンビル

ビームラインハッチ内に高圧ステーションが設置されているが、機械油の臭いが漂い、そこだけ工作センターや町工場を思わせる別世界が広がっている。(Fig. 6.24、Fig. 6.25)

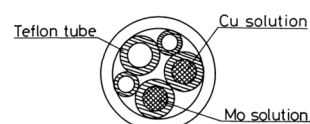


Fig. 4. Cross-sectional drawing of a test sample.

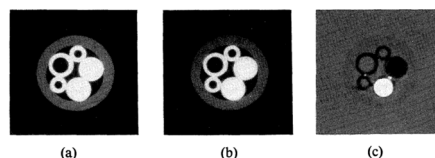


Fig. 5. Monochromatic X-ray CT images of test sample at X-ray energies below and above the Mo K-absorption edge (20.0 keV). (a) Below the absorption edge. X-ray energy is 19.6 keV (0.633 Å). (b) Above the absorption edge. X-ray energy is 20.6 keV (0.602 Å). (c) The differential CT image by subtracting the low-energy CT image (a) from the high-energy CT image (b). Subtraction was performed after image reconstruction.

Fig. 6.26 X 線差分 CT の例 ([6.8]より)

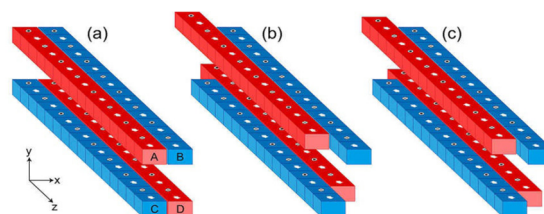


図2.10: APPLE型挿入光源磁気回路と偏光モード。
(a)水平偏光モード, (b)垂直偏光モード, (c)円(楕円)偏光モード。

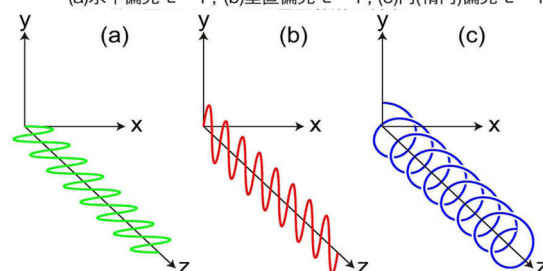


図2.9: 挿入光源における様々な電子軌道と偏光特性。
(a)水平偏光型, (b)垂直偏光型, (c)円偏光型。

Fig. 6.27 可変偏光挿入光源 ([5.1]より)

6.12. 差の利用

波長可変性を利用という面からは、例えばイメージングにおいて、特定の元素の吸収端を挟んだ2通りのエネルギーで測定を行えば、その元素の分布情報が得られる。勿論、顕微イメージングでも同じ手法が可能で、実験としては吸光実験となる。事例[6.8]を Fig. 6.26 に示す。テフロンチューブに入れたCu溶液とMo溶液のX線差分CTで、MoのK吸収端20 keVを挟んで、20.6 keVと19.6

keVとで撮影し、差分を取るとMoが強調される、という実験である。

偏光の利用という観点では、HX 領域では偏光子が利用可能で、実験ビームライン側で偏光を制御することができる。一方、VSX 領域では光源の段階で偏光を変える必要がある。挿入光源内で電子を右回り螺旋運動させれば右回り円偏光、左回りにすれば左円偏光となる。そのような挿入光源を偏光可変型挿入光源 (Fig. 6.27 [5.1]) と呼ぶ。例えば、物質にキラリティ (鏡に映すと元の物質と重ならない構造) がある時、右回り円偏光と左回り円偏光とで吸収率に差が出て、それを円偏光二色性 (Circular Dichroism、CD) という。例えば X 線磁気円二色性 (X-ray Magnetic CD、XMCD) を使えば、アミノ酸の D 体と L 体とを区別 (Fig. 6.28) できたり、原子のスピンや軌道磁気モーメントの研究を行ったりすることができる。

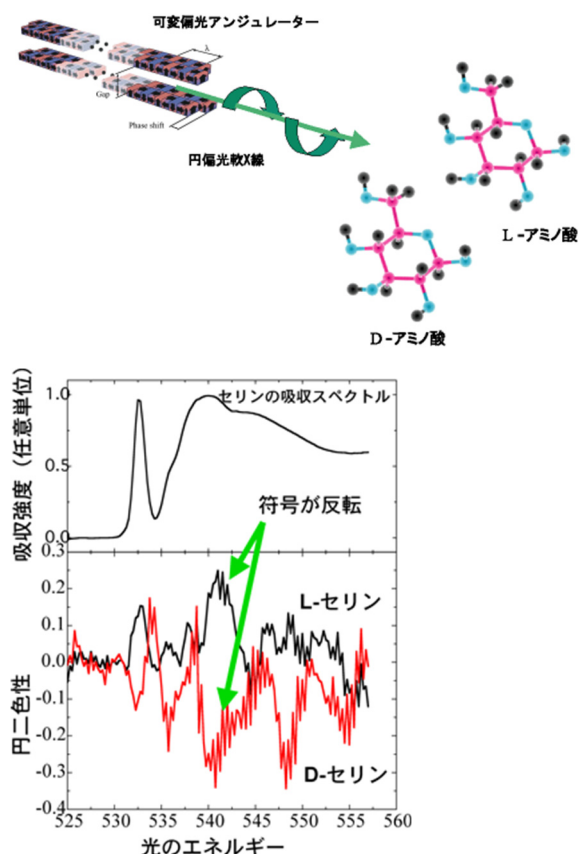


Fig. 6.28 アミノ酸の XMCD の例 (SPRING-8 プレスリリース「[右アミノ酸、左アミノ酸を放射光\(軟 X 線\)で初めて識別](#)」より)

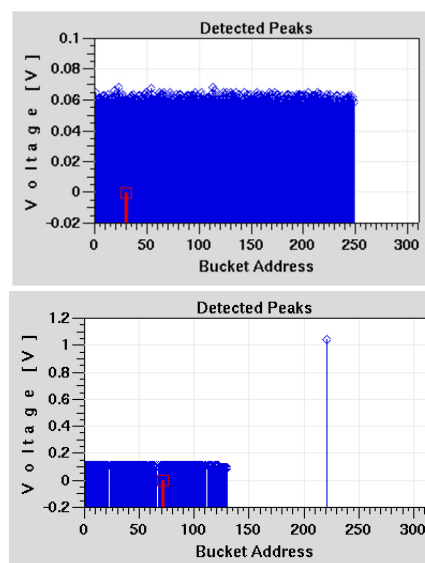


Fig. 6.29 PF のマルチバンチモード (上) とハイブリッドモード (下) のフィルパターン

6.13. 時間分解実験

6.13.1. 時間分解実験とは

マルチバンチ (リングの中を多数の電子の塊が周回している状態) の場合、放射光はリング RF 周波数の周期で発生する。PF の場合、RF は 500 MHz なので、隙間のないマルチバンチトレインでは放射光は 2 ns 間隔でビームラインに届く。時間分解実験の為に、光にもっと時間間隔が必要である。レーザーやマイクロ波を試料にあて、化学変化や現象の励起を行い、その後、ディレイを変えながら反応の時間変化を測定する。通常、1 ショットで連続撮影は不可能で、励起して 1 ms 後を撮影、次に、また励起して、2 ms 後を撮影、のように順に撮影していく。FEL が最適解となるが、蓄積リング型光源でも古くからこの様な手法が行われている。

6.13.2. シングلبバンチと孤立バンチ

リング型光源の場合、蓄積するバンチを 1 つだけ (シングلبバンチ運転という) にして、光がリング周回周期の間隔にする方法がある。PF-AR では (本当は多セル空洞の不安定性が深刻なので実質シングلبバンチ運転しかできないという理由もあるが) 昔からシングلبバンチ運転だけを行っ

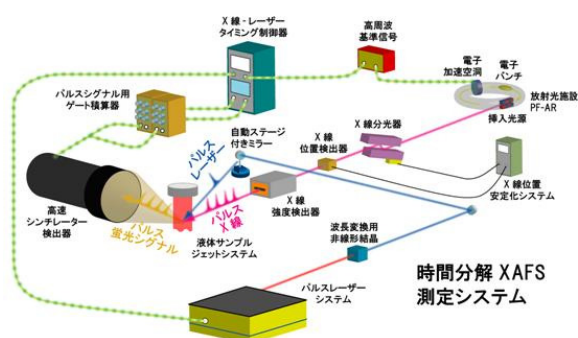


Fig. 6.30 時間分解 XAFS の概念 (KEK プレスリリース「[光が一瞬の磁石を作り出す](#)」より。)

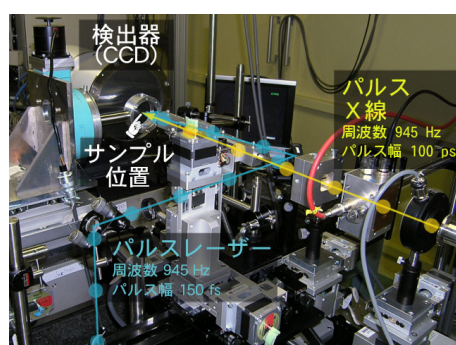


Fig. 6.31 レーザーと放射光の同期システム (KEK プレスリリース「[ビームライン NW14A、実験開始](#)」より。)

てきている。なお、AR はエネルギーが高いので、シングルバンチでも光束（光の強さ）は PF とほぼ同じになり、通常の平均測定も十分に可能である。AR のバンチ長はおよそ 50 ps、周回周期は 1.26 μ s である。一方、PF では、シングルバンチ運転をやっていた時代もあるが、蓄積電流が小さくなり、平均測定に支障が出るということで、最近はマルチバンチ部分と孤立バンチ部分の両方を設けたハイブリッドモードで各期最後の数週間を運転している。(Fig. 6.29) マルチバンチモードの場合、例えば 1.12 nC のバンチが 312 バケット中、250 バケットに連続に蓄積されていて、合計で 450 mA となる。124 ns のバンチギャップは不安定性対策の為である。一方、ハイブリッドモードの場合、マルチ部分は 1.9 nC x 131 バケットで 400 mA、孤立バンチ 31.2 nC で 50mA の前後に 90 バケット分、180 ns ずつのギャップを開けている。このギャップは、マルチバンチ部分からの光をビームラインで切り分けるのに必要な時間から決まって

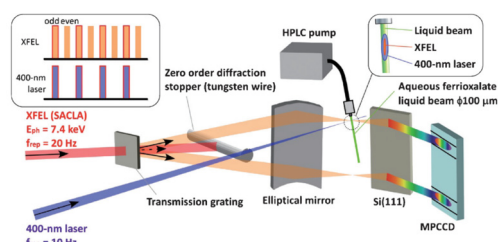


Fig. 1 (Color online) Schematic diagram of time-resolved direct X-ray absorption spectroscopy using SACLA.²⁶⁾

Fig. 6.32 SACLA の時間分解実験の例 ([6.10] より)

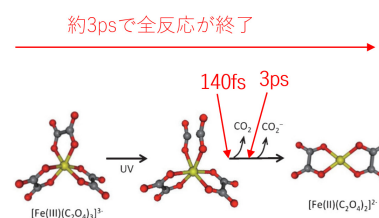


Fig. 6 (Color online) Molecular structures of $[\text{Fe}(\text{III})(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ and $[\text{Fe}(\text{II})(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ and the reaction mechanism. The structure shown in the middle is not a stable species but a transient structure with one of the C-C bonds dissociated by the ligand-to-metal charge transfer. Fe, C, and O atoms are shown in yellow, grey and red, respectively.

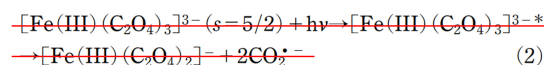
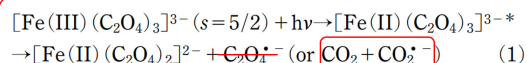


Fig. 6.33 解明された反応経路 ([6.9]に説明追加)

いる。また、孤立バンチ、シングルバンチはその周りに電荷がないことが重要で、要らない電荷を蹴り落とす作業を「バンチ純化」と呼んでいる。タウシェック効果や入射ビームのノイズ等の為、意図しないバケットに電子が蓄積されることが必ずあり、バンチ純度測定とバンチ純化作業は時間分解実験において必須の作業となる。

6.13.3. 時間分解実験ステーションの例

AR-NW14A のパラメータを下記に示す。

AR-NW14A

- ・ ピコ秒時間分解 X 線回折・散乱・分光
- ・ エネルギー範囲：4～23 keV
- ・ 分解能 ($\Delta E/E$)： 2×10^{-4}
- ・ ビームサイズ：0.5 mm (幅) x 0.2 mm (高さ)
- ・ ビーム強度： 10^{12} photons/s (15 keV)

- 同じ直線部に挿入光源 2 台設置。
U36 (周期長 36mm、5~25 keV)
U20 (周期長 20mm、1 次光のみを使い、準単色 (バンド幅の狭い白色光、 $\Delta E/E=10^{-1\sim 2}$) の時、 10^{15} photons/s のフラックスが利用可能。

設置されている実験ステーションの概念を Fig. 6.30 に、写真を Fig. 6.31 に示す。バンチ長が 50 ps 程度なので、時間分解能は 100 ps 程度となる。

6.13.4. FEL の例

最後に SACLA の実験例を紹介する。FEL はバンチ長が 50 fs、コアだけ取ると数 fs と極短パルスのため、fs オーダーの分解能が得られる。紫外線の錯体の反応経路の解明の例[6.9]で、実験全体の概要を Fig. 6.32 に、結果を Fig. 6.33 に示す。

コラム：やる気

毎日が、興味とやる気に溢れ、新しい出版物や実験準備に目を輝かせている……などということは決してない。(若い頃はなくてはなかった……かも知れない……) では、やる気が無い時に業務をどうこなすか？ 人生を遡ると、それが大学受験勉強というものであった、と思う。興味ややる気など関係なく、定常的に義務として？ 勉強をし続けなくてはならない。修行僧のようなものだ。内容として重要な部分もあるが、それよりも、やる気が無い時のスイッチの入れ方、エンジンのかけ方を確立することが、受験勉強から始まる一連の専門に向けての基礎教育過程で最も重要なことだと思う。仕事は好きなことだけやっていれば良いというものではない。また、理論が苦手な人間にとっては、理論から始めなければいけないことは取っ掛かりにかなりのエネルギーを要する。どうするか？ 若い頃にやったのは、映画とかドラマを見ながら始める、お菓子を食べながら始める、新しいノートや筆記具を買って、それを使う目的で始める、図書室やハンバーガー屋さんなど、場所を変える、である。今でも似たようなものだ。ただし、最初は嫌々でも、誰でもできる単純作業に見えても、やっていくうちに、思ってもみなかった側面に出会えたり、何らかの独自性、自分なり、を追加できる余地を見いだせたりすることも多い。そうなると、楽しくなってくる。そうで無かった場合は、お菓子や夜のハンバーガー屋さんは単純に、太る……筆者を見れば、今までどれだけ努力してきたかが分かるだろう……

7. 医学応用

7.1. 医学利用

加速器の医学利用には、直接的に治療に使われる加速器と、核医学製剤としての放射性同位体を製造するものがある。それぞれを順に紹介していきたい。

特に Mo-99 については今は海外原子炉でウラン核分裂によるものの輸入に 100%頼っているが、長年にわたって加速器での製造を目指した R&D が続けられているので、詳しく解説を行う。

7.2. 直接的に治療に使われる加速器

がん細胞に陽子、重粒子を照射し、直接治療を行う加速器は日本に26箇所存在する (Table 7.1)。施設の例を Fig. 7.1 に示す。

ホウ素中性子捕獲療法 (BNCT、Boron Neutron Capture Therapy) が現在実用化されつつあり、日本各地で治験が実施中である。薬剤にホウ素を組

Table 7.1 日本の重粒子線治療施設 (医用原子力技術研究振興財団「日本の粒子線治療施設の紹介」より)

重粒子線	陽子線	都道府県	施設名称
	●	北海道	北海道大学病院陽子線治療センター
	●	北海道	札幌医科大学病院陽子線治療センター
	●	北海道	札幌医科大学記念病院 札幌高機能放射線治療センター
●		山形県	山形大学医学部東日本重粒子センター
	●	福島県	南東北がん陽子線治療センター
●		群馬県	群馬大学医学部附属病院 重粒子線医学研究センター
	●	茨城県	筑波大学附属病院 陽子線治療センター
	●	千葉県	国立がん研究センター東病院
●		千葉県	量子科学技術研究開発機構QST病院
●		神奈川県	神奈川県立がんセンター 重粒子線治療施設
	●	神奈川県	湘南鎌倉総合病院先端医療センター陽子線治療室
	●	長野県	相澤病院 陽子線治療センター
	●	岐阜県	中部国際医療センター 陽子線がん治療センター
	●	静岡県	静岡県立静岡がんセンター
	●	愛知県	社会医療法人明陽会 成田記念陽子線センター
	●	愛知県	名古屋市立大学医学部附属西部医療センター 名古屋陽子線治療センター
	●	京都府	京都府立医科大学附属病院 永守記念最先端がん治療研究センター
●		大阪府	大阪重粒子線センター
	●	大阪府	大阪陽子線クリニック
	●	奈良県	社会医療法人 高清水 陽子線治療センター
	●	福井県	福井県立病院 陽子線がん治療センター
●	●	兵庫県	兵庫県立粒子線医療センター
	●	兵庫県	兵庫県立粒子線医療センター付属神戸陽子線センター
	●	岡山県	岡山大学・津山中央病院共同運用 がん陽子線治療センター
●		佐賀県	九州国際重粒子線がん治療センター
	●	鹿児島県	メディボリス国際陽子線治療センター

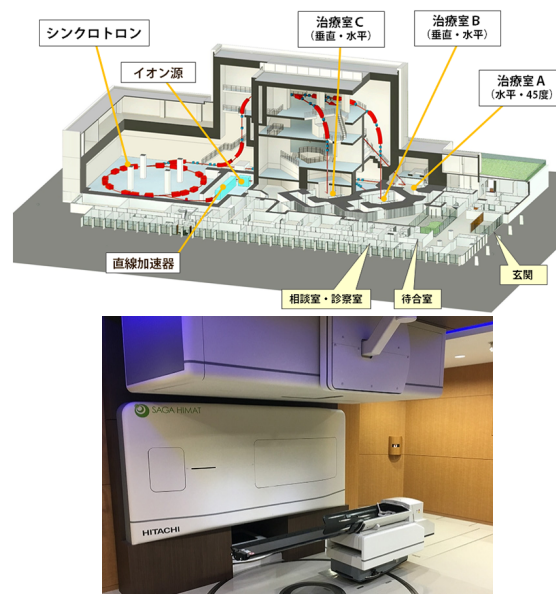


Fig. 7.1 重粒子線治療施設の例 (粒子線治療推進研究会「[九州国際重粒子線がん治療センター](#)」紹介より。)



Fig. 7.2 リニアックナイフ (板橋中央総合病院 放射線治療センター「[リニアックナイフ](#)」より。)

み込み、それを体内のがん細胞に集める。ホウ素に中性子をぶつけると、核分裂して放出されたアルファ線が腫瘍を焼く、というのが BNCT の原理である。現在、南東北 BNCT 研究センターと関西 BNCT 共同医療センターの2箇所が保険診療運用中、国立がん研究センター中央病院、江戸川病院、筑波大学陽子線医学利用研究センター (KEK と共

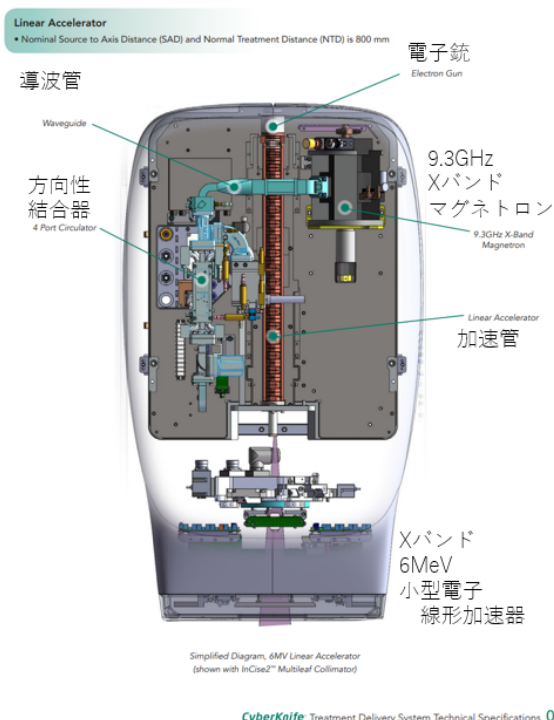


Fig. 7.3 加速器ヘッドの中身（アキュレイ社「サイバーナイフ」より。）

同で東海村に BNCT 施設運用) の 3 箇所が治験中である。中性子発生のための 2~3 MeV の大電流陽子線形加速器が必要である。

Co-60 からの γ 線で腫瘍を治療する手法をガンマナイフと呼ぶが、線形電子加速器を使って X 線を発生させ、腫瘍を治療する方式が開発され、リニアックナイフと呼ばれている。Fig. 7.2 にリニアックナイフの例を、具体的な加速器ヘッドの中身を Fig. 7.3 に示す。

7.3. RI とは？

原子核の中には不安定で崩壊する元素があり、それを放射性同位元素 (RI, Radio Isotope) と呼んでいる。RI が崩壊する際に放出する放射線を利用して、医学的な診断、治療を行う分野を核医学という。核医学で利用される RI は、医薬品原料として原子炉や加速器によって人工的に製造されたものである。

RI には半減期があり、半減期内に、確率的に半数が崩壊する。1 秒間に 1 個の原子核が崩壊する時、それを 1 Bq (ベクレル) という。また、歴史

的には 1 g のラジウムからの平衡放射線量を基準に、1 Ci (キュリー) = 3.7×10^{10} Bq という単位も使われている。薬剤という側面からは、半減期が長ければ、工場で製造して輸送可能になる一方、連続検査が難しく、2 回目までに時間をおく必要がある、ということになる。

RI の崩壊には、下記の 5 通りがある。

- α 壊変: α 線 (He 原子核に相当) を出す。
- β 壊変: β 線 (電子) を出す。(反電子ニュートリノも出す。)
- β^+ 壊変: β^+ 線 (陽電子) を出す。(電子ニュートリノも出す)
- EC 壊変 (軌道電子捕獲): 特性 X 線、オーグェ電子を出す。(軌道電子が核内陽子に捕獲、電子ニュートリノを放出。)
- 核異性体転移: γ 線を出す。

それぞれの崩壊で放出される放射線には、下記のような特徴がある。

- α 線: 短距離内に多くのエネルギーを落とす。腫瘍を破壊できる。大気中飛程数 cm、体内飛程数十 μ m。
- 電子: 短~中距離内に多くのエネルギーを落とす。腫瘍を破壊できる。エネルギーによるが典型的には大気中飛程数 m、体内飛程数 mm である。
- 陽電子: 短距離で電子と対消滅し、対角に 2 本の光子 (X 線) を同時に放出する。2 光子同時検出を画像化することで診断に利用できる。
- ガンマ線: 原子核反応で作られた光子で、透過力が高い。画像診断に利用できる。(X 線と γ 線の区別は、エネルギーではなく発生源で、核反応由来を γ 線と定義している。)

治療という観点からは体内飛程が標的とする腫瘍の大きさの目安となり、診断という観点からは、身体の外に出てこなければ使えないので、飛程の長いものが必要となる。

7.4. 核医学製剤としての RI

治療に用いる RI で最も広く使われているものは、原子炉で作られた Co-60 である。医薬品としての RI には、I-131、Lu-177、Ra-223 の 3 核種があり、現在も保険診療で利用されている。(Sr-89、Y-90、In-111 については認可されているが販売、供給停止中である。) 医薬品ではなく、身体に埋め込んで治療に使うという医療機器として認可されている RI もあり、Au-198、Ir-192 の 2 核種である。

核医学的診断には、PET (Positron Emission Tomography) と SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) とがある。RI の供給には 4 通りのやり方があり、下記の通りである。

- ・ 海外の原子炉で製造した RI を輸入して利用している SPECT の為の Mo-99 (→Tc-99m)。
- ・ 病院内の加速器で製造した RI をその場で薬剤に加工して利用する PET の為の F-18、O-15、N-13、C-11。
- ・ 工場の加速器で製造した RI を病院向けに出荷している PET 用の F-18、SPECT 用の I-123、Tl-201、Ga-67、Rb-81 (→Kr-81m)。
- ・ 母核を出荷、病院内で娘核 RI を抽出、薬剤に加工して利用するというジェネレータ方式の、Mo-99、Rb-81。

このうち、海外からの輸入に 100%頼っている Mo-99 を加速器を使って製造、供給しようという提案があり、多くの案が検討されているが、実用化に至ったものはない。

7.5. PET と SPECT

核医学で最も幅広く行われているのは PET と SPECT である。いずれも、RI を組み込んだ薬剤を患者に投与し、RI が崩壊した際に出すガンマ線を検出することで、患者体内の薬剤分布を画像化するという手法である。利用するガンマ線のエネルギーは、PET の場合は陽電子の対消滅で発生する対角 2 光子同時放出で、511 keV、SPECT は Tc-99m の核異性体転移の場合、単光子放出で 141 keV である。

PET の内で最も幅広く行われているのは、FDG-PET で、F-18 を組み込んだフルオロデオキシグルコース (糖の類似体) を使い、腫瘍の有無、転移の有無を調べる手法である。糖類似体はがん細胞に吸収されるが消費されないのであればその場に留まる性質がある。PET に使われる核種と半減期は、F-18 (110 分) を除き、O-15 (122 秒)、N-13 (9.97 分)、C-11 (20.4 分) と短く、院内の小型加速器での製造が必須となる。これらは生命物質としてもともと存在する元素なので、組み込める生体物質が多く、分解能も優れている。半減期が短いので、繰り返し検査が可能という特徴がある。2005 年に工場製造の F-18 製剤の出荷が開始されたことで、PET 実施件数が大幅に増加した。

SPECT に使われる核種は Tc-99m (6.01 時間) が代表的で、Mo-99 (66 時間) の娘核として抽出される。Mo-99 は海外の原子炉でウランの核分裂で製造されたものの輸入に 100%依存している。半減期が長いので、長距離長時間の輸送が可能である。

通常のレントゲン、造影 CT などでは構造や形状が分かる。RI を利用すると、さらに機能や動的状态が分かるという特徴がある。例えば心臓や脳の血管などに対する場合、CT/MRI などを使えば、血管が狭くなっている、詰まっていることは分かるが、その先の心筋細胞や脳細胞が機能しているかどうかまでは分からない。また、例えば、脳の萎縮が、病気なのか単なる老化なのかの区別はできない。一方、RI を使えば、心臓や脳で特定の物質が代謝されている＝正常に機能している、かどうかを区別することができる。例えば SPECT はアルツハイマー病の診断にも使われているが、他にも心筋、甲状腺 (ホルモン代謝)、骨などに対してよく使われている。

PET、SPECT 単独では分解能が悪いので、CT と一緒に組み込まれることが多く、PET-CT、SPECT-CT メーカーには例えば GE、シーメンス、フィリップス、キヤノン、島津製作所などがあり、幅広く病院に設置、利用されている。SPECT-CT、PET-CT の導入例を Fig. 7.4 に示す。



Fig. 7.4 SPECT-CT、PET-CT の例（左：岐阜市民病院「[核医学診断装置](#)」、右：東邦大学大森病院中央放射線部「[核医学検査](#)」より。）



Fig. 7.5 PET 用サイクロトロン（住友重機「[製品ラインナップ](#)」より。）

7.6. 加速器による RI 製造と出荷

PET の為の院内サイクロトロンは住友重機、IBA（ベルギー）、ヴァリアン（USA）が有名である。住重の例を Fig. 7.5 に示す。

核医学製剤の工場製造については、日本メジフィジックス、PDR ファーマの 2 社が存在する。RI 工場製造の例を Fig.7.6 に示す。

7.7. ジェネレータとその利点

ジェネレータとして出荷されている製品の例を Fig. 7.7 に示す。PDR ファーマ社ウルトラテクネカウ（Fig. 7.7 右）の添付文書より、ミルクキングの例を Fig.7.8 に示す。Tc-99m ジェネレータの場合、Mo-99 封入容器を出荷すると、約 1 週間程度、毎日 Tc-99m を抽出できる。工場製造の Tc-99m の場合は前日までに注文が必要（加速器による製造



Fig. 7.6 医療用 RI の工場製造の例（上：日本メジフィジックス「[放射性医薬品製造フロー](#)」、下：PDR ファーマ「[生産体制](#)」より。）



Fig. 7.7 ジェネレータの例（左：Kr-81m ジェネレータ（日本メジフィジックス）、右：Tc-99m ジェネレータ（PDR ファーマ、ウルトラテクネカウ）より。）

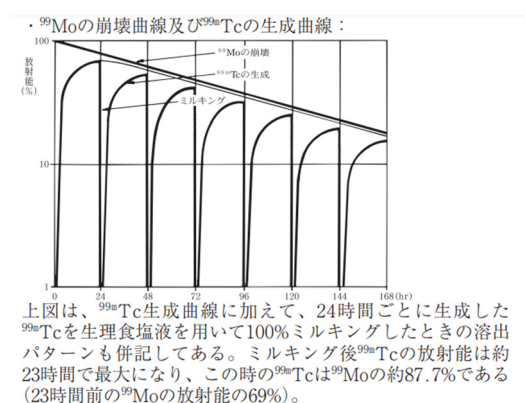


Fig. 7.8 ミルキングの例（ウルトラテクネカウ [添付文書](#) より。）

過程を考えると前日注文対応でも非常に迅速だと思う）だし、院内サイクロによる製造では、製剤化、品質検査で時間がかかる。その点、ジェネ

Table 7.1 Mo-99 製造原子炉と照射後処理業者
(IAEA 「[The supply of medical isotopes](#)」 より)

The Supply of Medical Isotopes, OECD, IAEA, 2019年 (新版準備中)
 “An Economic Diagnosis and Possible Solutions”
 “2019 Medical Isotope Demand and Capacity Projection for the 2019-2024 Period” 訳、改変
 HEU ウラン(>20%)高濃縮
 LEU ウラン(<20%)低濃縮
 CRR
 Conventional Research Reactor

Mo-99 製造 原子炉	社名 (原子炉名)	核燃料	照射ターゲット	国	平均稼働週/年	週間最大製造量 6d Ci	世界シェア	運営	稼働
	NRG (HFR)	LEU	HEU/LEU	オランダ	39	6200	26%	半政府/商業	1961
	ANSTO (OPAL)	LEU	LEU	オーストラリア	43	3500	16%	政府	2007
	SCK-CEN (BR-2)	HEU	HEU/LEU	ベルギー	21	6500	15%	半政府	1961
	NECSA (SAFARI-1)	LEU	LEU	南アフリカ	44	3000	14%	半政府	1965
	RC Rez (LVR-15)	LEU	HEU/LEU	チェコ	30	3000	10%	半政府/商業	1957
	NCBJ (MARIA)	LEU	LEU	ポーランド	36	2200	9%	半政府	1974
	Rosatom RIAR, KARPOV	HEU, HEU	HEU, HEU	ロシア	50	890	5%	半政府	(1956-)
	Missouri大学 (MURR)	HEU	天然Mo in CRR	USA	52	750	4%	非営利団体	1966
	CNEA (RA-3)	LEU	LEU	アルゼンチン	46	400	2%	政府	1967
照射後 処理 Mo-99 出荷	社名	Country	平均稼働週/年	週間最大製造量 6d Ci	世界シェア	運営	稼働年は初臨界年、組織設立年など、まちまち。 複数の炉を所有する機関もある (およそ1960年代が多い、という 程度の参考)		
	Curium	オランダ	52	5000	32%	商業			
	IRE	ベルギー	52	3500	22%	半政府/商業			
	ANM	オーストラリア	43	3500	18%	政府			
	NTP	南アフリカ	44	3000	16%	半政府			
	NorthStar	USA	52	750	5%	商業			
	Rosatom	ロシア	50	890	5%	半政府			
	CNEA	アルゼンチン	46	400	2%	政府			

レータを院内に常備しておけば、緊急検査に即座に対応できるという利点がある。

7.8. PET、SPECT の被曝量の目安

人が受ける被ばく線量の単位として、シーベルト [Sv]が使われる。放射線の発生量はベクレル [Bq] = [個/秒]、吸収された量がグレイ [Gy] = [J/kg]、最終的に人体に対する影響の大きさがシーベルト [Sv] = 影響の大きさを表す係数 x [Gy]、ということである。

日本人が普通に地上で生活する内に受ける一般的な被ばく量は、地域で多少増減があるが、約 2.1 mSv である。内訳は、食べ物に含まれる RI (例えば魚介類の Po-210、動植物の K-40 など) が 0.99 mSv、大気中の RI (Ra-222, 220) によるものが 0.48 mSv、大地放射線 (例えば RI を多く含む花崗岩などから) が 0.33 mSv、宇宙線 (RI ではない) からのものが 0.30 mSv である。

ちなみに、我々、放射線作業従事者の被ばく量の上限は 5 年間で 100 mSv かつ年間 50 mSv (細かい規定あり)、東京-ニューヨーク往復航空機で 0.11~0.16 mSv である。

医学検査による被曝量の目安は、胸部レントゲンで 0.06 mSv、胃のバリウム検査で 3 mSv である。

CT については部位で差があり、胸部で 1~2 mSv、腹部で 5~16 mSv、骨盤で 8~22 mSv である。F-18 FDG-PET では、成人で 0.019 mSv/MBq (投与量が 70~370 MBq で 1.3~7 mSv)、Tc-99m の SPECT の場合、成人で 0.007 mSv/MBq (投与量が 74~740 MBq で 0.5~5 mSv) である。

7.9. 現在の Mo-99 の供給体制

現在の Mo-99 製造の原子炉と処理業者の一覧を Table 7.1 に示す。高濃縮ウランの取引が禁止され、低濃縮ウランへと移行しているが、原子炉はオーストラリアを除いてみな非常に古いことが分かる。

過去には装置の故障によって供給自体が滞ったこともあれば、火山の噴火などで空港が閉鎖され、輸送が滞ったこともある。その度に、国内製造の必要性がクローズアップされるのだが、どうしても進まないという現状がある。理由は一つではないが、考えられる原因の候補を下記に挙げておく。

- なんだかんだですぐに供給が再開される。
- 原子炉で製造される RI と、照射炉、加速器で製造される RI とでは比放射能が全く異なり、

現状の製薬、流通手法が使えない。新しい原料処理（抽出、濃縮）法、薬事承認、使い方のモデル確立が必要である。

- 国の機関の場合、R&D として行うので、実験照射炉、研究用加速器とも、安定的に毎日 RI を作り続けるわけではない。年間の運転時間 1～2 ヶ月内でやる研究 10 課題の内の 1 つが RI 製造とか、そういうイメージになる。照射炉、加速器製造品の安定供給がないので、後処理、薬剤化の R&D がほぼ不可能となる。

7.10. Mo-99 の製造方法

Mo-99 には下記の 4 種類の製造方法がある。

1. 高濃縮ウランターゲットを使い、原子炉内中性子照射でウラン核分裂により製造。
2. 低濃縮ウランターゲットを使い、同様に製造。

ウランの核分裂 ($U-235(n,f)Mo-99$) の場合、 $U-235$ に中性子を照射、核分裂させ、核分裂生成物 (Fission Product, FP) から、イオン交換などにより Mo-99 を抽出する。プルトニウムや核廃棄物が同時に生成されるのが問題点である。核セキュリティ (高濃縮ウランの扱いの難しさ) の観点から、商用製造は低濃縮ウランターゲットへ移行しつつある。低濃縮ターゲットにすることで、Mo-99 製造量に対しプルトニウムや核廃棄物が増加する問題などもあるが、移行はほぼ完了している。

3. 天然 Mo 中の Mo-98 をターゲットとして、研究用原子炉で中性子捕獲反応で製造

中性子捕獲反応 ($Mo-98(n,g)Mo-99$) は、Mo-98 に中性子を捕獲させ、Mo-99 に変換する方法である。

4. 加速器による製造 (陽子加速器、電子加速器)

陽子加速器の場合、研究炉同様、Mo-98 に中性子を捕獲させて Mo-99 にすることができる。また、Mo-100 に陽子を当て、Tc-99m を直接生成する

($Mo-100(p,2n)Tc-99m$) こともできる。同様に Mo-100 に陽子や中性子を当て、中性子を放出させることで Mo-99 を作る ($Mo-100(n,2n)$ or $(p,np)Mo-99$) こともできる。

電子加速器の場合、Mo-100 にガンマ線を当て、中性子を放出させて Mo-99 にする ($Mo-100(\gamma,n)Mo-99$) ことができる。

原料としての Mo の安定同位体比は、Mo-98 は天然 Mo 中に約 24.2%、Mo-100 は約 9.7% 存在している。天然 Mo (全ての混合物) をそのまま照射ターゲットとして使う場合と、反応に寄与する同位体(98、100)のみを分離した高濃縮したターゲットを利用する場合とがある。高濃縮すると、収量が向上し、不要な核も生成されず、純度が向上する。ただし高濃縮ターゲットは非常に高価な為、後処理して Mo-99 や Tc-99m を抽出した後のターゲット残渣の再利用を前提にすることがコスト的に必要となる。再利用可能な後処理、抽出方法でなければならないという制約がつくことになる。

日本では現在、Mo-98 をターゲットとした研究炉による中性子捕獲での Mo-99 製造が JAEA 東海の研究炉 JRR-3 で行われている。

加速器による RI 製造 (Mo、Tc 以外も幅広く) としては、阪大 RCNP、QST 高崎研究所、理研仁科加速器センター、東北大学先端量子ビーム科学研究センター、QST 放医研、J-PARC など長年 R&D が行われている。KEK の cERL でも、過去に数回、Mo-99 製造、Tc-99m 抽出試験を行ったことがある。

7.11. 比放射能の問題

試料全量内にどれだけ放射能があるかを比放射能という。例えば、1 kBq 必要だとして、それが耳かき 1 杯になるのか、レンガサイズから抽出することになるのか、という問題で、RI の濃縮され具合を表す。比放射能が高い順に、原子炉 (核分裂製造) >> 研究炉による中性子捕獲 >> 加速器、ということになる。原子炉だと生成物全部が RI という試料ができるが、実験炉や加速器では、

ターゲット中にごく僅かに RI が含まれるだけ、という状態にしかならない。必要な放射エネルギーは確保できても、それをどう濃縮して取り出すかが課題となる。

具体的には、高濃縮ウラン標的の核分裂で作った場合、Mo-99 の比放射能は、病院到着時で、10000 Ci/g-Mo (370 TBq/g-Mo) となる。この比放射能を前提に、製薬手順と製品の薬事承認がなされている。現行のジェネレータ方式にもこの比放射能が必要ということになる。

実験炉による天然 Mo への中性子捕獲の場合、製造直後でさえ 1~2 Ci/g-Mo (37~74 GBq/g-Mo)、加速器の場合、さらに低く、0.001 Ci/g-Mo (kBq~MBq のオーダー) となる。大電流の超伝導加速器を利用した場合の目標は実験炉程度で、1 Ci/g-Mo だが、ビーム出力として問題はなくとも、熱に耐えられる標的設計が簡単ではない。

7.12. Mo-99 から Tc-99m の抽出法

Mo-99 から Tc-99m を抽出する為には、そもそも Mo を酸化物にする必要がある。酸化物はセラミックのような感じで、もろく、熱伝導も悪いので大出力加速器の場合の照射ターゲットにはしづらい。酸化 Mo から Tc を抽出する方法には、2 種類ある。

昇華法：テクネチウムとモリブデンの昇華点の違い (Tc_2O_7 (約 310°C)、 MoO_3 (約 800°C)) を使い、モリブデン酸化物を電気炉で加熱、テクネチウム酸化物のみを昇華させて分離する方法。その後、アルカリで TcO_4^- にする。

溶媒抽出法 (MEK 法) : MoO_4^{2-} と TcO_4^- とが含まれる溶液に、MEK (メチル-エチル-ケトン) を触れさせると、 TcO_4^- だけが MEK 側に移動する。その後、MEK から TcO_4^- を取り出す。

JAEA、QST、東北大、千代田テクノル、化研などが長らく R&D を実施してきており、どちらの抽出法とも、実用化可能といえる段階まで確立されている。

繰り返すが、原料となる低濃縮 Mo-99 が長期間安定に手に入らないこと、研究炉や試験加速器の運転に合わせて年に数回 Mo-99 を製造、Tc-99m を抽出したとして、それ以降の製薬側の受け手がないことなどが、研究が進みにくい理由であろう。

謝 辞

本章で述べた内容は、cERL における Mo-99 製造研究を行った時の基礎となったもので、それは株式会社アクセルレータによる委託研究で、千代田テクノル、PDR ファーマ (旧 富士フイルム富山化学の核医学製剤部門) の方々との共同研究でした。KEK の cERL チームの方々を含め、皆様に感謝いたします。

8. 産業応用

8.1. 電子線、粒子線の産業利用

工業、商業的には、電子源、イオン源とも、様々な用途で利用されている。世界的な商用加速器の内訳について、Fig. 8.1 に示す[8.1, 8.2]。多い順にイオン注入、医療用 LINAC、電子線加工（電子溶接等を含む）、電子線照射（EBP、滅菌など）、非破壊検査、中性子源（BNCT、非破壊検査、材料開発用など）、RI 製造、と続く。

電子加速器はビーム溶接や微細加工、電子線照射によるポリマーの重合、ゴムの架橋、宝石の加工、医療品の滅菌、世界的には保存用食品の滅菌

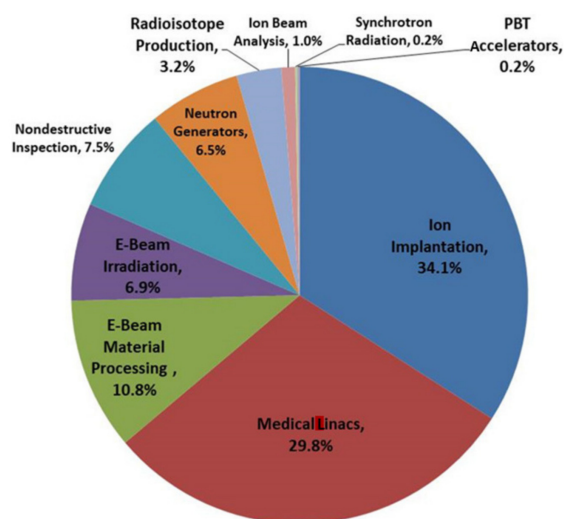


Fig. 8.1 世界の約 46000 台の商用加速器の利用内訳（2018 年）（[8.1]より。）



Fig. 8.2 微細加工装置の例（ワイエシイビー株式会社「[イオンビームミリング装置](#)」より。）

などで幅広く利用されている。陽子、重粒子加速器もイオン注入、微細加工、非破壊検査などで幅広く利用されている。放射線や粒子線は表だって宣伝されることは少ないが、様々な分野で既に当たり前のように利用されていることも多い。

8.2. 陽子、イオン加速器の例

イオンビームでは、加速電圧数百～1 kV 程度で、成膜、スパッタ、注入などのための微細加工装置（Fig.8.2）や、電圧 30 kV 程度で、電顕のイオン版という感じの走査撮像や、エッチングやデポジ



Fig. 8.3 FIB 装置の観察、加工例（日立ハイテク「[FIB データギャラリー](#)」より。）



Fig. 8.4 電子ビーム加工機（三菱電気「[EBM 製品特徴](#)」より。）



Fig. 8.5 電子ビームマスク描画装置の例（ニューフレアテクノロジー「製品一覧」より。）



Fig. 8.6 電子線照射装置とプラントの例（上：EPS-5000（5 MeV、20 mA）、下：EPS-1000（1 MeV、100mA）NHV 株式会社「スキャン型電子線照射装置」より。）

ション（化合物を分解、固体成分を表面に堆積させ、立体構造を形成すること）ができる集束イオンビーム装置（Fig.8.3）などが市販されている。

8.3. 電子ビーム加工

電子ビーム溶接装置の例を Fig. 8.4 に、半導体製造の為にフォトレジスト作成などに使う電子ビーム描画装置の例を Fig. 8.5 に示す。

8.4. 電子線照射

電子線照射は EBP（Electron beam processing）と呼ばれ、様々な分野で幅広く利用されている。代表的にはケーブルの被覆の硬化、耐熱化、タイヤなどゴム製品の架橋、フィルムの加工（電子線収

The 2nd Generation Rhodotron®



New TT50	TT100	TT200/TT300	TT1000	New High Energy
1 to 10MeV 10 passes 2mA 10 to 20kW 352MHz - 1.3m Pulsed	2.5 to 10MeV 12 passes 4mA 20 to 40kW 215MHz - 1.6m Continuous wave	1 to 10MeV 10 passes 10mA/35mA+ 20 to 480kW 107.5MHz - 3.0m CW or pulsed	1 to 7MeV 6 passes 80mA 560kW 107.5MHz - 3.0m CW or Pulsed	Up to 40MeV 12 passes 3.1mA 125kW 107.5MHz - 3.0m Pulsed

Rhodotron® principle

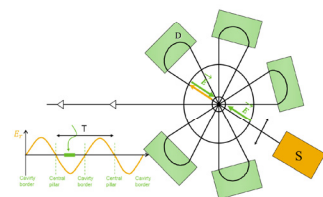
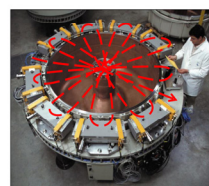


Fig. 8.7 ロードトロン（IBA TT300HE カタログより。）



Fig. 8.8 電子線照射会社の例（関西電子ビーム株式会社「事業内容」より。）

縮）、医療用のメスや術衣などの滅菌、電子線硬化インクによる印刷の仕上げなどが行われている。

加速器としては電子の場合、10 MeV 程度に放射化の境界があり、10 MeV 以下では大気や冷却

水などに対する放射化の影響がほぼなく、4 MeV 以下では照射物に対する放射化もほぼゼロと言える。放射化の影響を完全に無視できる、実際は数百 keV～1 MeV 程度の大電流電子源が、電子ビーム照射装置として利用されている。電子線照射装置の実例を Fig. 8.6 に示す。また、前章の RI 製造を含めて幅広く利用されているロードトロンを Fig. 8.7 に示す。加速器、粒子源製造メーカーではない、電子線照射専門の会社の例を Fig. 8.8 に示す。

9. 他のプローブ、将来加速器

9.1. 中性子

電子顕微鏡や中性子などでは、粒子を物質波として使っている。結晶構造に特徴的な 1 Å は物質波としての中性子では 82 meV になる。もともと原子炉からの中性子を利用して実験が行われていたが、そこでは、大強度で連続的な中性子ビームを減速、分光（エネルギー選択）してから物質に照射していた。一方、加速器の場合、陽子ビームをターゲットにぶつけて核破砕反応で中性子ビームを発生させるが、加速器の運転にあわせたパルスビームになること、強度としては弱い、ビームサイズが小さく、指向性があること、エネルギー（速度）の異なる中性子をそのまま実験に用いることなどが原子炉との違いになる。現在でも両者それぞれの特長を活かした利用が続けられている。

X 線が電子と相互作用するのに対し、中性子と相互作用するのは原子核である。従って、もやっとした電子雲の構造因子がかぶらず、原子核の位置がクリアに見える。また、物質に対して透過性が高く、大きなサイズの試料を長時間かけて非破壊測定できる。放射光では不可能な、金属内部の応力や歪みの測定、格子振動（フォノン）の励起と測定なども可能である。

また、中性子は陽子と同じ質量なので、水素に対して非常に感度が高い。重水素と水素が区別できるので、試料を重水素置換すれば水溶液中でも測定可能だし、複雑な化合物、混合物の一部原料を重水素置換しておけば、それを追跡することもできる。また、中性子やミュオンはスピンがあるので、偏極ビームを使えば、磁性の計測も可能になる。反射法を使えば薄膜の研究も可能である。

9.2. 大強度陽子加速器

中性子源のためには大強度陽子加速器が必要である。重粒子は加速してもなかなか相対論的にならないので、粒子同士のクーロン斥力（空間電荷効果）を抑制することが課題となる。また、中性子を発生させるターゲットでは、ビームの熱処

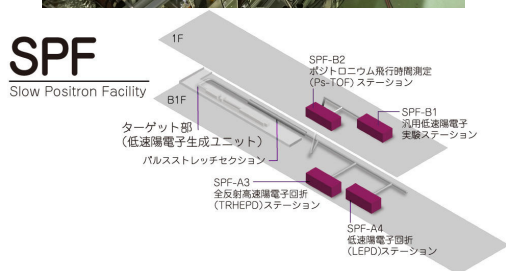


Fig. 9.1 低速陽電子研究施設

理の他に、それがパルスの的に来ることによる熱衝撃対策も必要になる。中性子、ミュオン実験が行われている J-PARC では、現在ビームパワー 800 kW 超での運転が行われており、定常的な 1 MW 運転も間近である。加速器を使った核破砕中性子源は、世界的には J-PARC (2007 年) の他、ISIS (1984 年、イギリス)、SNS (2006 年、USA)、CSNS (2018 年、中国) が稼働中で、ESS (スウェーデン) が建設中である。

9.3. ミュオン

宇宙線の (高エネルギー) ミュオンから始まったミュオンビーム利用は、山やピラミッドの内部の調査に使われたこともある。加速器からの (低速) ミュオンビームはその発生原理から自動的にスピン偏極したミュオンビームとなり、ミュオンは物質中で電磁相互作用しつつ、最終的にその時のスピンの方向に陽電子を出して崩壊する。陽電子の向きを検出することで、物質の磁性が分かる。それをミュオンスピン回転 (μ SR) と呼ぶ。

陽電子の検出は、電子との対消滅による、互いに逆向き の 2 光子同時放出を検出する方法が用いられるが、それは低速陽電子ビームの直接利用、医学の PET 検査と同じ手法になる。

9.4. 陽電子利用と PET

物質科学では陽電子は表面、界面、格子欠陥などに留まりやすいのでそれらの研究で使われている。KEK では小さな LINAC を陽電子源として使った陽電子の物質、生命科学共同利用が行われている。(Fig. 9.1)

電子線散乱と同じ手法が陽電子でも可能で、LEPD (low-energy positron diffraction)、TRHEPD (total-reflection high-energy positron diffraction) が行われている。それぞれ電子線の場合の低速電子線回折 (REED)、反射高速電子線回折 (RHEED) に対応する手法である。陽電子の場合、すれすれ入射で本当の表面 (深さ 0.1 nm 以下) で全反射するという性質があり、それで「全」反射高速用電子線回折となるが、電子線に比べてより表面だけが見られるという特徴がある。RHEED、TRHEPD ともに日本発祥の手法である。

9.5. 将来加速器

9.5.1. P5

素粒子原子核分野の研究課題とそのための大規模計画の展望については、世界的なロードマップが作られていて、例えば [ヨーロッパアンストラテジー](#)[9.1]や北米 [P5](#)[9.2]などがある。

P5 レポートによると、2023 年現在、素粒子原子核分野の課題は 6 つあり、下記の通りである。

- ・ニュートリノ → DUNE / J-PARC T2K
- ・ヒッグス粒子
 - HL-LHC ATLAS・CMS / ILC
- ・ダークマター探索 → HL-LHC / ILC
- ・宇宙の進化 → 天体観測による背景輻射、ダークマター観測
- ・新粒子直接観測 → HL-LHC / ILC
- ・新現象の量子的痕跡
 - HL-LHC / ILC / SuperKEKB

ここでは、ILC とそこで期待される成果について簡単に述べる。

9.5.2. ILC

ILC で説明が期待される現代の素粒子物理の 3 大トピックは、ヒッグス粒子、ダークマター、そしてトップクォークである。

ヒッグス粒子については、そもそもそれが素粒子か（もっと分解できないか）、別の種類がないか、質量を与える（他の粒子との相互作用の）メカニズムなどが分かっていない。トップクォークについては、クォークの中でずば抜けて重い理由が謎で、その質量自体の精密測定も宇宙の安定性に関わる重要な課題である。標準理論を発展させた理論がいろいろあるが、何が正しいのか検証することも重要な課題となっており、それがダークマターの正体解明に繋がることが期待されている。

それらの未解決の問題の解決のために、ILC が計画されている。ILC は 125 GeV の超伝導の電子-陽電子衝突型の線形加速器 (Fig. 9.2) である。直接的にヒッグス粒子を生成して検証するためには衝突エネルギー 500 GeV 以上が必要とされていたが、LHC によってヒッグス粒子の質量が約 125 GeV であることが分かり、また、Effective Field Theory でラグランジアンを調べるという間接的な手法（ペスキン）を使えば、重心エネルギー 250 GeV でかなり色々な理論の検証を進めることができそうだとすることが示されたので、今は 125

GeV の電子と陽電子で、衝突エネルギー 250 GeV とされている。

LHC などのハドロン衝突実験に対する、電子-陽電子衝突実験の利点は、全エネルギーが粒子の生成に使われるので、生成粒子のタグ付けに運動量、エネルギー保存則が使えること、いらない現象（背景事象）が少ないこと、電子と陽電子の偏極が制御できるのでスピン依存性のある理論も検証できること、などである。例えば、標準理論の粒子セットの他に、別にもう 1 セットあって、それがダークマターなのかも知れないという理論があるが、標準粒子とその超対称性粒子の質量が近い場合、ハドロン衝突実験ではそれらを区別することができない一方、ILC では観測可能になると期待される。トップクォークの精密測定も、ハドロン加速器では難しい。

長パルスの超伝導線形加速器は、XFEL の項でも述べたが、性能、コストの両面で大強度加速器として極めて優秀である。ヨーロッパや北米では既に実用化済みである。ILC を含め、超伝導加速器と大強度ビームの活用、利用拡大が日本でも望まれている。

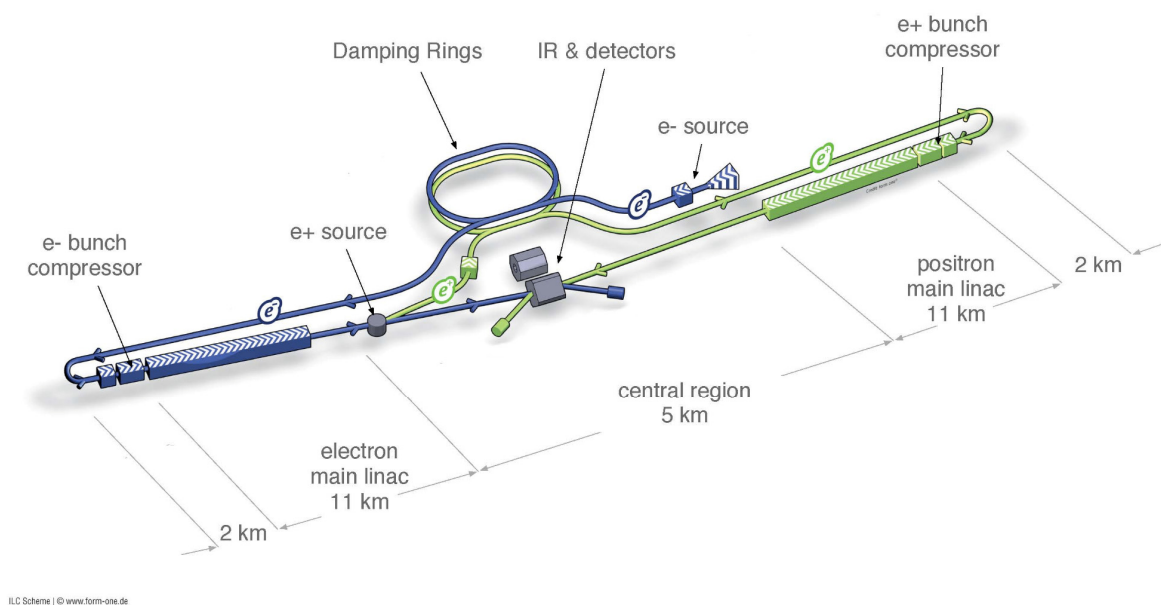


Fig. 9.2 ILC [9.3]

9.5.3. ILC 以外の衝突型加速器計画

ILC以外にもヒッグスファクトリー計画は存在し、FCC (Fig. 9.3, [9.4])、CLIC (Fig. 9.4, [9.5])、CEPC (Fig. 9.5, [9.6]) がある。FCC は 100 TeV を目指す衝突型加速器で、電子-陽電子(ee, max 350 GeV)、陽子-陽子(hh, max 100 TeV)、電子-陽子(eh) など様々なケースを検討中で、周長 100 km である。CLIC は電子-陽電子衝突 LINAC で、380 GeV、1.5 TeV、3 TeV を段階的に目指しており、全長は 11~50 km である。CEPC は電子-陽電子衝突型で 240 GeV、周長 100 km である。



Fig. 9.3 FCC

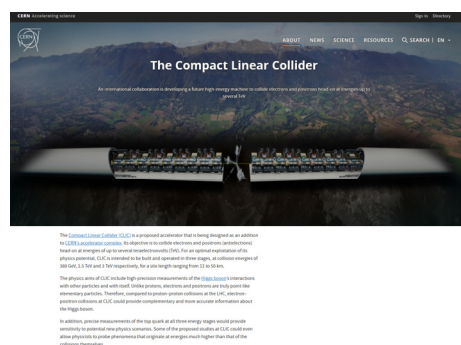


Fig. 9.4 CLIC



Fig. 9.5 CEPC

10. 電磁石

10.1. はじめに

唐突であるが、今回の OHO の全体の講義の内容とコマ割りを決めるにあたり、電磁石本体に関する内容が、コマ数的に独立には入れられそうにないということになった。そこで、ここで補足として電磁石本体に関する簡単な解説を行う。

10.2. 電流と磁場、蹴り

電磁石の鉄の部分の断面形状とコイルの場所を決めたとき、磁場（磁力線）がどうなっているかを推測する為に、定性的な電流と磁場の関係を考える。

- ・ 右回りの円電流があると、右ネジの進む向きに磁場が貫く。(Fig.10.1)
- ・ 直線電流の周りには、右ネジの方向に周回する磁場が生じる。
- ・ 磁場は磁力線で表される。
- ・ 磁力線は N 極から S 極に向けて引かれる。
- ・ 磁力線はどこでも滑らかな曲線であり、途切ず、交差もしない。
- ・ 磁力線同士は互いに離れようとする。
- ・ 鉄があるとその内部に密に磁力線が集まる。

この法則に従って、いくつかの磁石の断面図に磁力線を書き加えていってみる。

PF の垂直高速軌道フィードバック用ステアリング電磁石の写真を Fig. 10.2 に、磁力線の様子を Fig. 10.3 に示す。上下のコイルで同じ向きの電流、同じ向きの磁束を発生させ、鉄に沿って流し、磁石中央でぶつけ、大気中に溢れさせる、というイメージになる。窓枠のように四角い鉄芯を持つので、ウィンドウフレーム型という。ちなみに、コイルの片方の電流の向きを変えると、(AC 電圧を変換する) トランスのような状態になり、磁束は鉄芯内を回るだけになる。

同様に、PF の遅い COD 補正用の垂直ステアリング電磁石の写真を Fig. 10.4 に、磁力線の様子を Fig. 10.5 に示す。コイルの電流の向きは互いに逆で、磁束の向きも逆、鉄芯がない側で磁力線

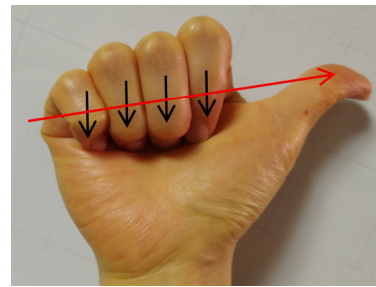


Fig. 10.1 右ねじの法則（指の付け根から爪に向かって電流（黒矢印）が流れているコイルを貫くの磁場（赤矢印）は、親指の向き。電流と磁場を入れ替えても成立する。）

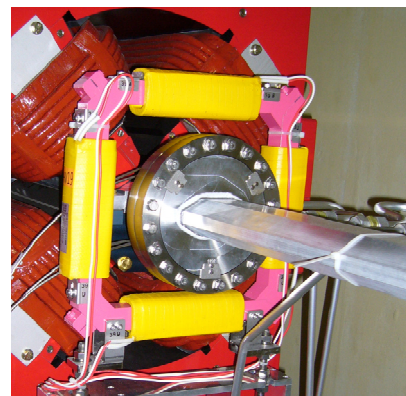


Fig. 10.2 PV 電磁石。（上下のコイルしか使っていない。磁場は水平方向、蹴りは垂直方向。）

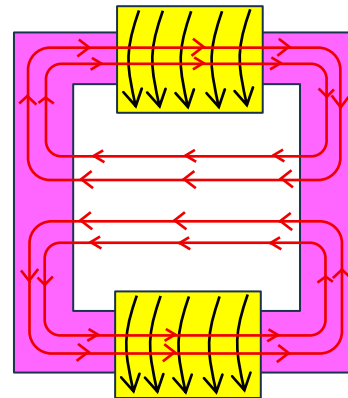


Fig. 10.3 PV の電流と磁力線の様子。（電流を黒矢印、磁力線を赤矢印で示した。）

は大気に向かって出て行き、そこにダクトを設置する。立てられているが、90° 回転するとアルファベットの C の形であり、C 型の電磁石と呼ぶ。

「線電流の周りの磁場」は「パルス電磁石」に対して適用される。リングを周回するビームを 1 周回だけ蹴りたい場合、PF の場合、磁場のパルス



Fig. 10.4 VD 電磁石。

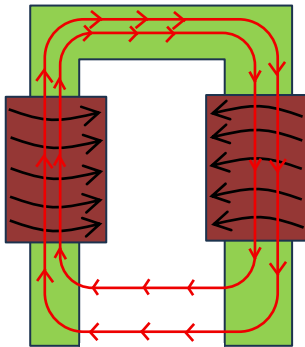


Fig. 10.5 VD の電流と磁力線の様子。

幅を $1.2\ \mu\text{s}$ にする必要がある。そのようなパルス電磁石では、インダクタンスを小さくするために、コイルは使わず、ブスバーという棒を1本渡してそこに大電流を流す。パルス4極電磁石の写真を Fig. 10.6 に、磁場の様子を Fig. 10.7 に示す。

磁場による電子の蹴りは、フレミングの左手の法則 (Fig. 10.8、Fig. 10.9) によって求められる。電子の電荷は負なので、電流と電子の向きは逆向きになる。

10.3. 加速器で使われる電磁石

無限に広い一様磁場中では電子は円運動を行う。一様磁場をもつ磁石内を通過する電子の軌道は円弧になる。水平に曲げるための上下方向の一様磁場を作る電磁石を、2極電磁石、偏向電磁石と呼ぶ。磁極、コイルが上下に2個あるので2極という。(Fig. 10.10) リング主偏向電磁石はC型の電磁石で、リング外側が開いている向きで設置されている。曲げると光が出るので、弧部は偏

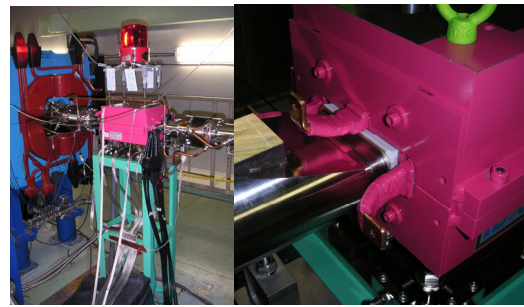


Fig. 10.6 AR のパルス4極電磁石

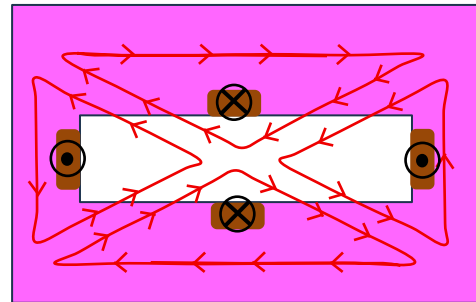


Fig. 10.7 パルス4極電磁石の電流と磁場の様子。(○の中心に小さな黒丸は、矢が飛んでくる様子で、紙面奥から手前向きの電流を、○に×は飛んでいく矢尻を表し、紙面手前から奥に向く電流を表す。磁力線は4極であることを強調してあるが、本当はもっと滑らかで丸っこい三角形になる。図はとても下手くそである。)

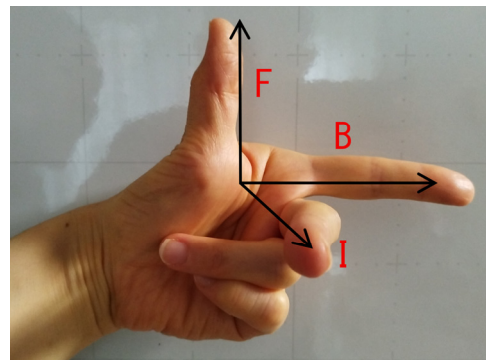


Fig. 10.8 フレミングの左手の法則 (FBI (連邦捜査局) と覚える。)

向電磁石毎に BL がある。光のダクトは大抵の場合、下流で2分岐していて、1台の偏向電磁石から2本の同時利用可能ビームライン (ブランチ A と C という感じで呼ぶ、例えば BL6A、BL6C とか) が伸びている。



Fig. 10.9 磁場チェック用「フレミングの左手君」 (PF 用に 1 個、cERL 用に 1 個作って置いてある。)

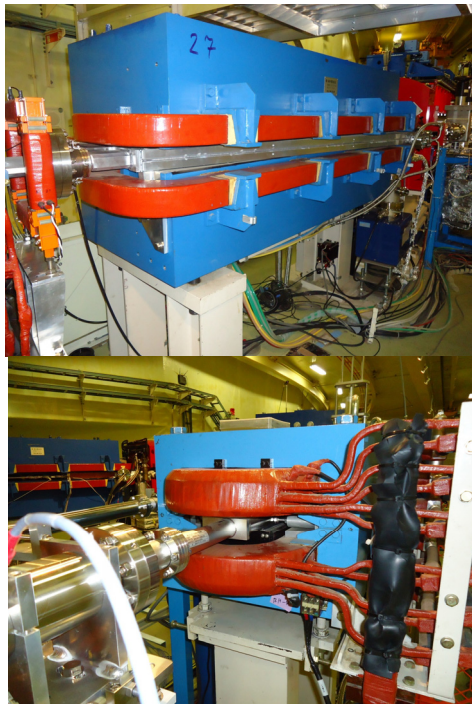


Fig. 10.10 PF の偏向電磁石 (上：リング主偏向電磁石、C 型、下：ビーム輸送路偏向電磁石、H 型 (鉄芯が H 型にくりぬかれている)。)

軸上 (設計軌道) から外れた電子を中心に戻すためには、外側の電子を内向き、内側の電子を外向きに蹴ればよい。リング内外で磁場が逆になる様な、水平の位置に比例した磁場 (軸上を原点とし、リング内側は負の座標、外側は正の座標) を発生させる電磁石を 4 極電磁石という。(Fig.



Fig. 10.11 PF の 4 極電磁石。(左：リング主 4 極電磁石、右：ビーム輸送路 4 極電磁石。)

10.11) 磁極とコイルが 4 個あるので、4 極という。4 極電磁石は光学でいう凹凸レンズで、電磁気学の法則から、水平が凸なら垂直は凹になる。両方の極性を並べて、電子ビームを「広げて、縮めて、広げて、縮めて」を繰り返してダクトの中を輸送する。力学的には線形の復元力で、バネに付けた重りや振り子と同じ、単振動となるが、電磁石が断続的に設置されているので、振動の振幅と位相は「変調」される。加速器内を周回するビームにとって変調単振動の「振動数」が重要で、整数や半整数だとビーム周回毎の振動周波数と誤差磁場の周波数が一致することになり、共鳴強制振動となってビームが失われる。加速器を周回するビームの振動数 (ベータトロン振動数) は「半端な」値でなければならない。(半端な値なら、ホワイトノイズ的になって誤差磁場は問題なくなる。) なお、PF のリング主 4 極電磁石は、すぐ脇を光のダクトが通るため、上下にのみ鉄芯があり、左右は SUS の薄い支持板が取り付けられているのみである。縦長の電磁石になっている。

6 極電磁石の写真を Fig. 10.12 に示す。6 極電磁石はエネルギー収差 (色収差) を補正する役割があり、運動量が変わったときのベータトロンチューンを一定に保つために用いられる。(運動量が変わったときにチューンが変わって共鳴に引かかると粒子の損失につながる。) 6 極の非線形磁場は、2 次の振幅依存チューンシフトを引き起こすので、運動量方向に安定領域は広がるが、振幅方向は狭くなるというジレンマがある。それらを両立させるための光学設計がラティス設計

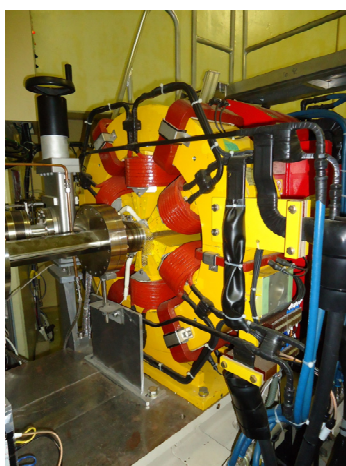


Fig. 10.12 PF の 6 極電磁石。

研究の主題である。6 極までは必ず加速器の主ラティス電磁石として用いられている。なお、PF リングの 6 極電磁石は 4 極同様、すぐ脇を光のダクトが通るため、リング外側部分に鉄芯がない、文字通りの C 型となっている。(リング内側は鉄芯でつながっているの、非対称な断面形状である。重さによるたわみを考えたときの機械的精度という面からも、磁力線の非対称による磁場の不均一という面からも、不利な設計になっている。)

8 極電磁石については、全部のリングに入っているわけではないが、時々使われることがある。8 極電磁石は 1 次の振幅依存チューンシフトを引き起こす。要は、塊として回っている電子の振動数をバラバラにする (チューンスプレッドとも呼ぶ) のである。ビーム不安定性というのはベータトロン、シンクロトロンチューンと航跡場の振動数が一致したときに起きるので、不安定性で振幅が増えるとチューンがずれて共鳴から外れる、という効果で、不安定性を抑えることができる。PF リングでは昔、イオントラップ不安定性抑制の為に使っていたが、入射の為に安定領域が狭くなるので、トップアップ入射の導入と共に、廃止し、代わりにパンチバイフィードバックを導入したという経緯がある。AR の 8 極は以前は入射エネルギー (2.5 GeV、3.0 GeV) での不安定性抑制には必須だったが、直接入射路の建設で現在は 6.5 GeV、5.0 GeV のフルエネルギー入射になったので、必須ではなくなった。(PF、AR とも 8 極は

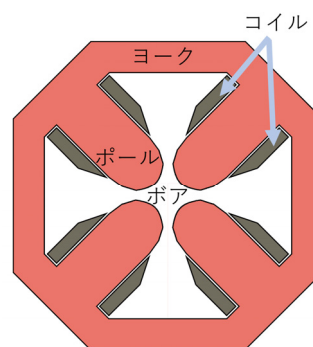


Fig. 10.13 磁石各部の名称

以前使われていたが、どちらも現在は必須ではなくなっている。)

数学的には、粒子の軌道の断面 (進行方向に垂直な面内) で多極展開し、

$$B = B_0 + B'x + \frac{1}{2}B''x^2 + \frac{1}{3!}B^{(3)}x^3 + \dots$$

とする。これは後述するように、磁場の方程式を円筒座標で解き、 $y=0$ とした場合に相当する。実際の磁石も多極展開の純粋な各次数に相当する磁場のみを発生するように製作する。定数項が 2 極 (dipole) 磁石、偏向 (bending) 磁石であり、1 次が 4 極、2 次が 6 極、3 次が 8 極電磁石となる。

10.4. 磁石の各部分の名称と性質

磁石の各部分の名称を Fig. 10.13 に示す。

10.4.1. コイル

コイル：電流を流す部分。日本語では「電線」と「ケーブル」は若干ニュアンスが異なり、導体と被覆からなる線を「電線」、導体、保護材、被覆で耐久性を高めたものを「ケーブル (電力線)」と呼んでいる。銅線で電磁石コイルに使われるのは通常、電線で、「ケーブル」は電源から電磁石本体までの配線に使われる。発熱と冷却方法は電流密度で決まるが、だいたい空冷の場合、最大電流値 5 A 程度 (x 数百巻き) で使われることが多く、10~20 A の場合は間接水冷、それ以上はホロコンとなる。

ストロー状の中空導体 (ホローコンダクター) で水を流して冷やしながら使うものをホロコンという。1cm 角で 1000A で 50 巻きとか、そうい

うイメージである。通電するので、冷却水は当然、電気を通さない純水である必要があり、建物の純水配管と電磁石本体の間はゴムホースで接続することが多いが、ゴムホースにも絶縁性能と耐放射線性能とが要求される。銅線でもホロコンでも、コイルは通常、樹脂漬けで成形され、それをモールドと呼ぶ。モールドの耐熱温度の 80℃が、コイルの温度インターロック設定温度になるが、実際に 80℃になると変色して戻らないので、大丈夫ではない。冷却水配管に流量計を付けてインターロックとするが、磁極の数だけ水路があり、全部には付けられないので、例えば 4 極のコイル 4 本の内の 1 本が詰まっても水インターロックでは落ちない。コイル温度インターロック（バイメタル温度センサによる接点）と冷却水の両方が必須である。

10.4.2. 鉄芯

鉄の部分鉄芯と呼ぶ。磁極をポール、周囲をヨーク（継鉄）という。鉄芯には様々な種類の鉄、合金が使われる。

鉄骨や鉄筋に使われる建築用の鉄は炭素数%と多く含まれており、また、素材の一様性も乏しく、磁場がきれいにならない。それでも安価なため、建築用の鉄塊から作った電磁石が昔は一部で使われた事があり、AR がそれである。鉄塊で作った電磁石をソリッド型という。

精密さが求められる場合、通常は炭素を含めて不純物が 0.01%などと少ない電磁軟鉄が使われる。硬さが柔らかいのではなく、磁性体として外場や電流に素直に大きく反応するものをソフト磁性体というが、その「軟」である。（外場があっても性能が変わらない棒磁石は「ハード」な磁性体である。）ホロコンも電磁軟鉄も特注品であり、どんどん手に入りにくくなってきている。電磁軟鉄であっても、製鉄会社の段階でのロットの違いや、切削加工時の歪みや着磁などの影響で個体差はある程度存在するので、全数の磁場測定やシム（小さな補正金属板を磁極に取り付ける）による磁場補正などは必須となる。PF リングには、電磁軟鉄素材のソリッド磁石が使われている。

個体差をなくし、磁場変化の時定数を短くしたい場合、硅素鋼板を金型で打抜き加工し、積層して電磁石にする。ラミナ（層状構造）型という。硅素鋼板はロールで出荷されるが、何千枚と打ち抜き、場所や表裏、ロットをシャッフルして使うことで、多数の電磁石の個体差を無くし、均一にすることができる。鋼板の両面には絶縁性の接着剤が塗ってあり、重ねた後でぎゅっと押さえながら真空炉で加熱して接着する。1 枚 1 枚は絶縁された状態となり、渦電流の効果が抑制されるので、加減速など、時間的に変化する磁場を出すことができる。（なお、磁場の高速変化には、電磁石だけではなく、真空ダクトの渦電流対策も必要である。セラミックにするとか、薄い SUS にするとか。）通常、断面に対称性がある磁石を分割して金型を作るが、金型のサイズには制限があり、巨大な電磁石は無理である。

特殊電磁石のためには、飽和磁場は低いが高速度応答するフェライト、履歴が小さく、線形性に優れるミューメタル、飽和磁場が若干高いが、セラミック状で加工が難しいパーメンジュールなどが使われることもある。PF の場合、入射キッカー電磁石はフェライトコア、挿入光源の磁場（軌道）補正用ステアリングがミューメタルコアである。

10.4.3. ボア

真空ダクトを設置する中心の隙間をボアと呼ぶ。直径を ϕ 、半径（ギャップ）を r と書く。総電流（コイルの電流値と巻き数の積）とボア径から、線形領域の磁場を計算することができる。（後述。）

10.5. 飽和と履歴

鉄は強磁性体である。強磁性体には孤立スピンの山あり、外から磁場をかけるとスピンの揃い、磁場を強くすることができる。孤立スピンの山ありの外場の向きに揃いきってしまうとそれ以上にはならず、その状態を飽和したという。

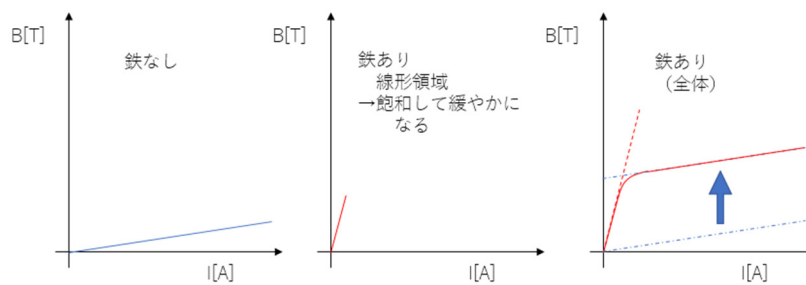


Fig. 10.14 定性的な励磁曲線

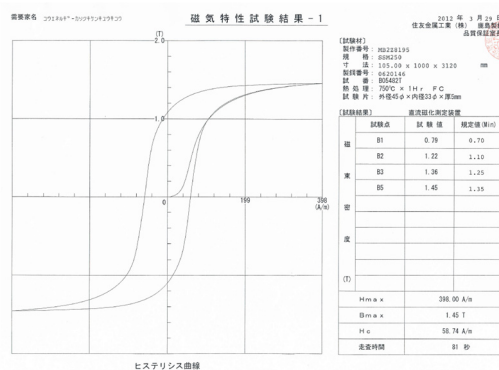


Fig. 10.15 ヒステリシスカーブの例

Fig. 10.14 に、定性的な鉄の励磁曲線を示す。鉄芯がある場合、スピニングが揃いきるまでは電流に比例した強力な磁場が発生する。その領域を線形領域という。磁場はやがて飽和していき、飽和しきると後は鉄が無い空芯コイルと同じ傾きで磁場が増加してゆく。

ミクロなメカニズムとしては、鉄塊は細かい磁区に別れていることが知られている。そこに磁場をかけると、磁区毎に磁化の向きが揃い、磁場を強くしていくと、磁区の境界である磁壁が広がってゆき、全体としての磁化が増えていく。磁化が安定するまでの時間は、ラミナの場合は早い、ソリッドの磁石の場合は数分かかる。磁石の磁場測定時、電源電流を変化させて複数回測定するが、電流変化直後の初回測定は必ず僅かに（1%程度）小さめに出る。電流を変える度に測定開始まで2~3分待てば安定するが、測定時間が長大になるので、多くの電磁石を設置スケジュール的な締切までに測定を終わらせなければならない、誤差として処理したこともある。（ビームバーストでチューンやオプティクスは補正できるので、最初の

入射さえできる範囲で合っていれば、絶対値は超高精度でなくとも良かった。）

鉄には履歴もある。cERL 用に電磁軟鉄のブロックを購入した際の材質データを Fig. 10.15 に示す。電流を増やしていき磁化を増やしてゆくと、電流を減らしても磁化が残るというのが履歴（ヒステリシス）効果である。

実際の運転や磁場測定の場合、例えば電源電流値の最大値が 800 A、運転に使う電流値が 500 A という時、使う前に 0 A → 800 A → 0 A → 800 A → 0 A と電源の最小と最大の間で何度かループを回して磁場を初期化する。（ソリッドなので、磁区や磁壁が安定する時間を考慮し、最大最小時の待ち時間がある程度取ると、再現性がとても良くなる。）運転に使う電流設定は、上げ（0 A から始めて、500 A にして使う）か、下げ（800 A から始めて、500 A に下げて使う）か、を予め決めて、事前の磁場測定もそれに従って行うことになる。初期化によって電磁石の励磁曲線は同一の軌跡を描き、運転時の磁場は毎回常に磁場測定データの磁場を再現することができるようになる。

電流ゼロで残っている磁場を残留磁場というが、本当の意味で履歴をリセットして残留磁場を消すためには、正負の電流値で「飽和領域」からゼロまで、だんだん電流を減らしていくような消磁が必要である。（例えば 1000 A で十分飽和するなら、+1000 A → 1000 A → +900 A → 900 A → … → +50 A → -50 A → 0 A という感じ。）一旦飽和領域に達した鉄材に残った残留磁場は、飽和領域まで達するループでしか消すことはできないので、履歴の違う電磁石を混ぜ合わせて直列つなぎで

ノーマルおよびスキュー磁場成分とスカラーポテンシャル。

次数	ノーマル磁場成分		スキュー磁場成分	
n	B_{nx} (水平磁場成分)	B_{ny} (垂直磁場成分)	B_{nx} (水平磁場成分)	B_{ny} (垂直磁場成分)
1	0	b_1	a_1	0
2	$b_2 y$	$b_2 x$	$a_2 x$	$a_2 y$
3	$b_3 xy$	$(1/2)b_3(x^2 - y^2)$	$(1/2)a_3(x^2 - y^2)$	$a_3 xy$
4	$(1/6)b_4(3x^2 y - y^3)$	$(1/6)b_4(x^3 - 3xy^2)$	$(1/6)a_4(x^3 - 3xy^2)$	$(1/6)a_4(3x^2 y - y^3)$
5	$(1/6)b_5(x^3 y - xy^3)$	$(1/24)b_5(x^4 - 6x^2 y^2 + y^4)$	$(1/24)a_5(x^4 - 6x^2 y^2 + y^4)$	$(1/6)a_5(x^3 y - xy^3)$
	スカラーポテンシャルのノーマル成分		スカラーポテンシャルのスキュー成分	
1	$b_1 y$		$a_1 x$	
2	$b_2 xy$		$(1/2)a_2(x^2 - y^2)$	
3	$(1/6)b_3(3x^2 y - y^3)$		$(1/6)a_3(x^3 - 3xy^2)$	
4	$(1/6)b_4(x^3 y - xy^3)$		$(1/24)a_4(x^4 - 6x^2 y^2 + y^4)$	
5	$(1/120)b_5(5x^4 y - 10x^2 y^3 + y^5)$		$(1/120)a_5(x^5 - 10x^3 y^2 + 5xy^4)$	
6	$(1/720)b_6(6x^5 y - 20x^3 y^3 + 6xy^5)$		$(1/720)a_6(x^6 - 15x^4 y^2 + 15x^2 y^4 - y^6)$	

Fig. 10.16 磁場成分

再利用する場合、飽和に達する大電流電源に接続して消磁しないと系統誤差が発生する。

10.6. 磁場の方程式

加速器のビーム軸を中心に、円筒座標で磁場を展開する。電流が無い場合、磁場はスカラーポテンシャル φ で書ける。

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \rightarrow \vec{B} = \nabla \varphi$$

従って、ラプラス方程式

$$\nabla \times \vec{B} = \nabla \times \nabla \varphi = \Delta \varphi = 0$$

を解く。 $\varphi = R(r)\Theta(\theta)$ とおいて変数分離する。

$$\frac{d^2}{d\theta^2}\Theta = -m^2\Theta$$

$$\left(\frac{1}{r}\left(\frac{d}{dr}r\frac{r}{dr}\right) - \frac{m^2}{r^2}\right)R = 0$$

上式より $\Theta = e^{-im\theta}$ だが、 $\theta \rightarrow \theta + 2\pi$ で不変なので、 m は整数になる。整数ということで $m \rightarrow n$ に文字を変えると、下式より、 $R = ar^n + br^{-n}$ 、 $n = 0$ の時は $R = A \log(r) + B$ だが、原点で正則でなければいけないので、これと r^{-n} の項は不適。結局、

$$\varphi = \sum_{n=1} r^n (A_n \sin(n\theta) + B_n \cos(n\theta))$$

となる。 A_n をノーマル成分、 B_n をスキュー成分という。加速器の主電磁石は通常、ノーマル成分のみである。(スキュー2極は垂直ステアリング、スキュー4極はX-Yカップリングや6極の誤差の補

正に使われる。) ポテンシャルから磁場に直す。

$\vec{B} = \nabla \varphi$ より、

$$B_r = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \sum_{n=1} nr^{n-1} (A_n \sin(n\theta) + B_n \cos(n\theta))$$

$$B_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \sum_{n=1} nr^{n-1} (A_n \cos(n\theta) - B_n \sin(n\theta))$$

円筒座標から普通の座標に直す。

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \end{pmatrix}$$

$x = r \sin\theta$ 、 $y = r \cos\theta$ より、

$$n = 1$$

$$\begin{cases} B_x = B_1 \\ B_y = A_1 \end{cases}$$

$$n = 2$$

$$\begin{cases} B_x = 2r(A_2 \sin\theta + B_2 \cos\theta) = 2A_2 y + 2B_2 x \\ B_y = 2r(A_2 \cos\theta - B_2 \sin\theta) = 2A_2 x - 2B_2 y \end{cases}$$

$$n = 3$$

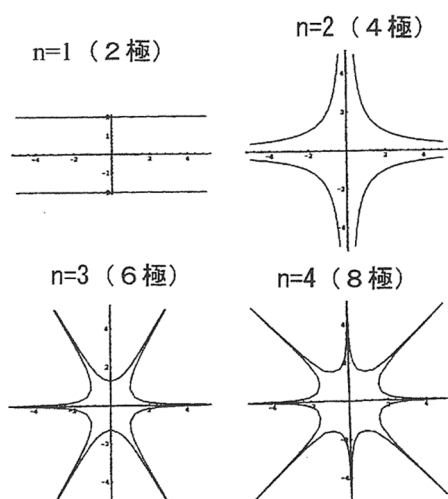
$$\begin{cases} B_x = 3r^2(A_3 \sin 2\theta + B_3 \cos 2\theta) \\ \quad = 6A_3 xy + 3B_3(x^2 - y^2) \\ B_y = 3r^2(A_3 \cos 2\theta - B_3 \sin 2\theta) \\ \quad = 3A_3(x^2 - y^2) - 6B_3 xy \end{cases}$$

係数と磁場の関係は、

$$A_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial^{n-1}}{\partial r^{n-1}} B_\theta \right) \Big|_{\theta=0}$$

$$B_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial^{n-1}}{\partial r^{n-1}} B_\theta \right) \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}}$$

である。



次数 1 ～ 4 のノーマル電磁石
の理想的磁極形状。

Fig. 10.17 等ポテンシャル面

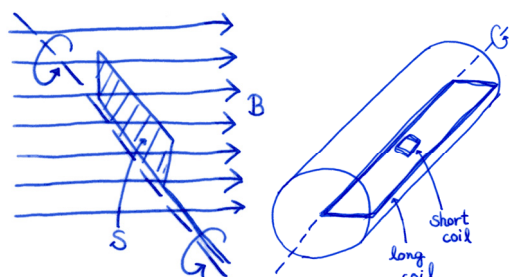


Fig. 10.18 磁場測定原理 (左) と測定に使うハーモニックコイル (右)

磁場成分とポテンシャルのまとめを 2003 年 OHO セミナー (遠藤有馨) より Fig. 10.16 に示す。同様に等ポテンシャル面を Fig.10.17 に示す。

純粋な n 極磁場を出すためには、磁極を等ポテンシャル面の形状にあわせる必要がある。ボア (円) を決めて、それに接する等ポテンシャル面の陰関数の方程式を解いて、磁極面の座標を求めることになる。(その後、コイルを入れる隙間を作って、端部補正をして、という手順で断面を決める。)

10.7. 磁場測定

磁場測定の原理は、大学入試にも時々出てくる、磁場中でコイルを回転させて誘導起電力を測る、ということである。きれいな作図が難しすぎ

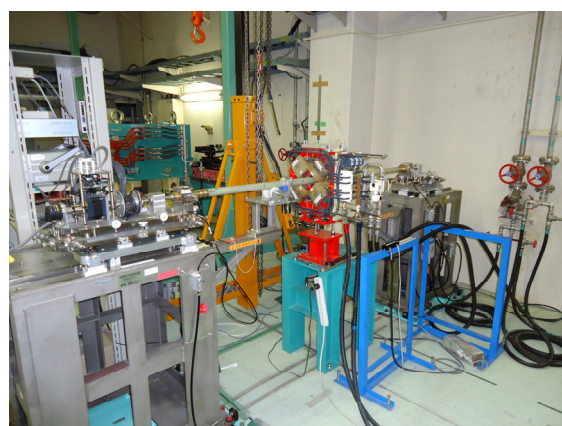


Fig. 10.19 ダンピングリング用磁場測定器



Fig. 10.20 PF 直線部増強用
ハーモニックコイル

て、長年、手書きメモを使っているのです、ここでもそれを示す。(Fig.10.18) 実際の磁場測定器を Fig. 10.19 に、ハーモニックコイルを Fig. 10.20 に示す。

ハーモニックコイルは、剛性を確保するためのエポキシの筒の中の、断面の半径に相当する場所にボビンを設置し、そこにコイルを巻いたものである。電磁石にコイルを通した時に、磁石の鉄芯 (コア) の中心になる位置に短コイルがあり、両脇の磁場の裾まで含んだ十分な長さで長コイルが巻かれている。それぞれ中心磁場と積分磁場の測定に利用する。測定架台には、回転コイルを支えながら安定に回転させるベアリング、コイルを回転させる (ステッピング) モータ、回転角を正確精密に測定する原点信号付きのエンコーダが取り付けられる。最初に電磁石をコイル (測定架台) に対して精密に据え付け、測定を開始する。(据え付けターゲットや据え付け方法も工夫のしどころである。)

回転させてコイルの電圧を測定する原理は同じだが、PF には 3 通りの装置がある。

- DC モータでひたすら高速回転させ、電圧波形を直接 FFT（ダイナミックシグナルアナライザ）に入力して周波数分解する。長時間平均で精度を出す。
- DC モータでゆっくり連続回転（1 回転 1 分とか）させながら、エンコーダで回転角を計測、同期させて積分器で電圧を積分する。コイルは一方方向に回転し続けるので、回転接点が必要で、PF 高輝度化用の磁場測定器ではコイル支持はボールベアリング、水銀を使った流体接点を利用している。
- ステッピングモータでコイルを回転、1 回転させて測定した後は、逆向きに回転させて元に戻す。ケーブルはゼンマイのようにグルグルと緩く巻いた部分を作り、そこが締まったり緩んだりを繰り返して回転を吸収する。エアベアリングを用い、中心軸がぶれないようになっている。（Fig.10.19 の測定器。）

コイルを横切る磁束が変化するとき、コイルに発生する電圧はコイルを貫く磁束の時間微分で、

$$V = -\frac{\partial}{\partial t} \Phi = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B_\theta dr$$

と書ける。コイルは動径方向に張っており、ボビンの内側位置を r_{in} （回転軸上には張れないので、回転軸から僅かに外側にずれた位置）、外位置を r_{ex} （保護筒の内側にあるので、外套寸法よりは小さい値）とする。コイルの長さを L とすれば、コイルを貫く磁束は動径に沿って B_θ を r_{in} から r_{ex} まで積分した値に長さをかけたものになる。

$$\begin{aligned} \Phi &= L \int_{r_{in}}^{r_{ex}} B_\theta dr \\ &= L \sum_{n=1} (r_{ex}^n - r_{in}^n) (A_n \cos(n\theta) - B_n \sin(n\theta)) \end{aligned}$$

電圧は

$$V = NL \sum_{n=1} n (r_{ex}^n - r_{in}^n) (A_n \sin(n\theta) + B_n \cos(n\theta)) \dot{\theta}$$

となる。N はコイルの巻き数である。 $\dot{\theta}$ が一定でないので、エンコーダと同期させて積分することになる。

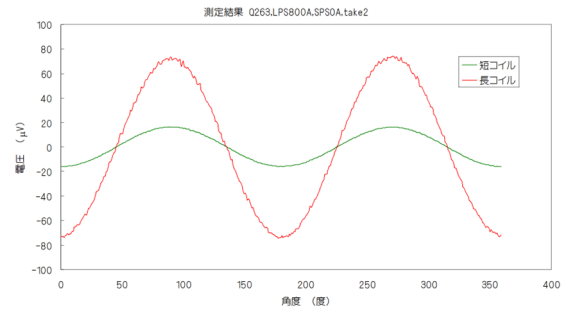


Fig. 10.21 磁場測定の波形例

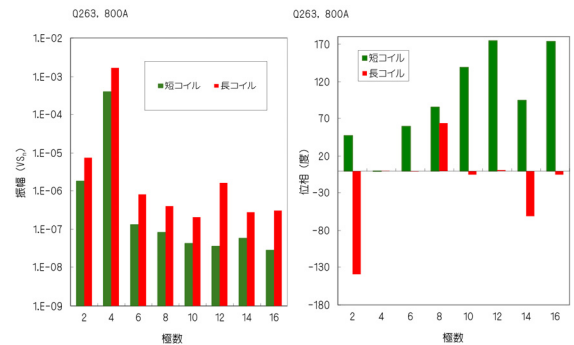


Fig. 10.22 FFT 結果例（左が振幅（縦軸は対数）、右が位相。）

エンコーダは例えば 1 周で 24000 点パルスを出す。積分器では 60 パルス毎に 1 点、1 周分の波形のデータ点数は 400 点、という感じに測定を行う。1 周のデータ点数を T とすると、相当する角度変化は $\Delta\theta = 2\pi/T$ となる。

$$\int \sin n\theta \cdot \dot{\theta} dt = \int \sin n\theta d\theta$$

などと積分変数を時間から θ にすることができて、コイル角度が θ の時に発生する電圧積分値を求めることができる。

$$\begin{aligned} VS(\theta) &= \int_{\theta - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta + \frac{\Delta\theta}{2}} V(\theta) d\theta \\ &= -2LN \sin n \frac{\Delta\theta}{2} \sum_{n=1} (r_{ex}^n - r_{in}^n) (A_n \sin(n\theta) - B_n \cos(n\theta)) \\ &= \sum_{n=1} (VS_{n,\sin} \sin(n\theta) - VS_{n,\cos} \cos(n\theta)) \end{aligned}$$

となる。測定では、電圧波形を FFT（正確には DFT、離散フーリエ変換）することで $VS_{n,\sin}$ 、 $VS_{n,\cos}$ を求めることができる。磁場に直すためには、

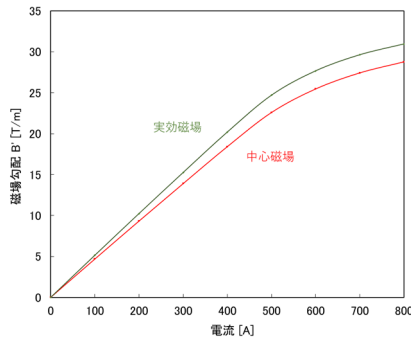


Fig. 10.23 励磁曲線の例

$$B_{norm/skew}^{(n-1)} = \frac{n!}{2LN \sin n \frac{\Delta\theta}{2} (r_{ex}^n - r_{in}^n)} VS_{n,\sin/cos}$$

とすれば良い。

結果の例として、PFの4極電磁石 Q263 を電源 800A で測定した波形を Fig. 10.21 に示す。PFの場合、ハーモニックコイルの外径は直径 6cm、中心の短コイルは $L = 19.58 \text{ mm}$ 、 $r_{in} = 0.61 \text{ mm}$ 、 $r_{ex} = 29.39 \text{ mm}$ 、 $N = 50$ 巻、長コイルは $L = 1 \text{ m}$ 、 $r_{in} = 0.44 \text{ mm}$ 、 $r_{ex} = 29.56 \text{ mm}$ 、 $N = 10$ 巻である。絶対値としての位相を較正しないので、4 極成分に skew が無いと仮定し、その平均を基準にしている。

$$VS_{n,\sin} \sin(n\theta) - VS_{n,\cos} \cos(n\theta) \\ = |VS_n| \sin(n\theta + \delta)$$

という形で、振幅と位相をプロットしたものを Fig. 10.22 に示す。複数の電流値で順に測り、励磁曲線としたものを Fig. 10.23 に示す。中心磁場は短コイルの結果をそのまま磁場に直したものの、実効磁場は長コイルで測定した裾を含んだ積分磁場を鉄芯長で割ったものである。なお、積分磁場を中心磁場で割った長さを実効長という。シミュレーションに電磁石を 1 台の磁石として入れる際、実効磁場と鉄芯長で入れるやり方と、中心磁場と実効長で入れるやり方とがある。(勿論、ホール素子等で磁場分布を測り、進行方向に細かく分割して入れて、現実の強さの分布を反映させるというやり方もある。)

10.8. 磁場の強さの解析式

飽和しない線形領域の磁場の強さは、解析式で求めることができる。ボア、コイル巻き数、電源

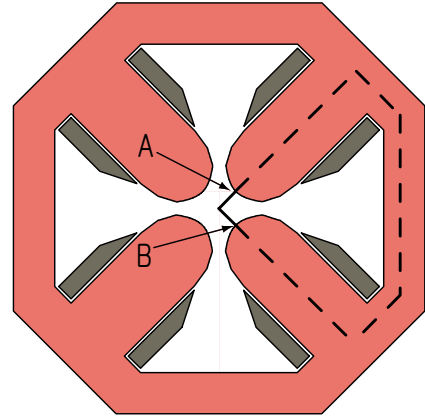


Fig. 10.24 積分路

容量 (最大電流値) の目安として便利な式である。ノーマル成分だけしか考えない場合、スカラーポテンシャルは

$$\varphi = r^n A_n \sin(n\theta)$$

と書ける。コイルの電流を $\vec{j}$ とする。

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

4 極を例にとって、線積分の積分路を Fig. 10.24 に示す。真空 (大気) 中の透磁率を μ_0 、鉄の透磁率を μ とする。線積分を大気中と鉄芯内とで分ける。(ちなみに $B = \mu H$ 、 $H = \gamma B$ で γ を磁気抵抗率という。 B の単位は通常、 $[T \text{ (テスラ)}]$ で、古いものでは $[G \text{ (ガウス)}]$ も残っている。 $1 T = 10000 G$ である。 H の単位は $[A/m]$ で、一部で $[Oe \text{ (エルステッド)}]$ も残っている。 $1 A/m = 4\pi/1000 Oe$ である。 $\mu_r = \mu/\mu_0 = 1 + \chi_m$ を比透磁率といい、 χ_m を磁化率という。)

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\mu_0} \int_A^B \vec{B} \cdot d\vec{l} + \frac{1}{\mu} \int_B^A \vec{B} \cdot d\vec{l}$$

鉄芯内の積分は透磁率が大いのでほぼゼロ、大気中の成分はスカラーポテンシャルで書ける。

$$\frac{1}{\mu_0} \int_A^B \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_A^B \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\mu_0} (\varphi(A) - \varphi(B))$$

A 点では $\theta = \pi/2n$ 、B 点では $\theta = -\pi/2n$ であり、スカラーポテンシャルに代入すれば、

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \frac{2AR^n}{\mu_0}$$

となる。コイル巻き数を N 、電流値を I とすると、図の点線内にコイルは 2 巻きあるので、

$$\int \vec{j} \cdot d\vec{S} = 2NI$$

となる。従って、

$$A = \frac{\mu_0 NI}{R^n}$$

$$\varphi = \frac{\mu_0 NI}{R^n} r^n \sin(n\theta)$$

$$\left(\frac{\partial^{n-1}}{\partial r^{n-1}} B_\theta \right) \Big|_{\theta=0} = \frac{n! \mu_0 NI}{R^n}$$

となる。B、Q、SXについて書き下す。

偏向電磁石は

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI}{h}$$

4 極が

$$B' = \frac{2\mu_0 NI}{R^2}$$

6 極が

$$B'' = \frac{6\mu_0 NI}{R^3}$$

となる。PFの場合、主偏向電磁石はギャップ全幅 $h = 7 \text{ cm}$ 、コイル上下合わせて $N = 48$ 巻、大気（真空）の透磁率は $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ で、電源最大電流は $I = 1500 \text{ A}$ 、従って、 $B_0 = 1.29 \text{ T}$ となる。ほぼ、実際に出せる。4 極の場合、コイルは磁極毎に $N = 23$ 巻、ボア半径は $R = 35 \text{ mm}$ 、電源電流値は $I = 800 \text{ A}$ 、計算上は $B' = 37.8 \text{ T/m}$ となる。実際は電流 500 A 付近から飽和の影響が出始め、 800 A では 30 T/m 程度となる。（Fig. 10.22 の磁石。） 6 極の場合、コイルは磁極毎に $N = 17$ 巻、ボア半径は $R = 45 \text{ mm}$ 、電源電流値は $I = 450 \text{ A}$ 、計算上は $B'' = 633 \text{ T/m}^2$ となる。実際は 300 A 付近から飽和の影響が出始め、 450 A では 600 T/m^2 程度となる。

鉄は約 2 T で飽和するが、磁石の角や磁極先端など、磁力線の集中する部分から飽和の影響が出始める。鉄が飽和すると、磁力線は鉄から漏れ出てゆく。実際、偏向電磁石を線形領域で使うと、コアの外側に磁場が漏れ出ないが、飽和領域まで通電すると磁場が漏れ出すようになり、例えば上面の吊り具が磁化して勝手に起き上がった様子が見られる。

どの電流値、どのくらいの磁場から飽和の影響が出るかを簡単に見積もるには、2 次元磁場計算を行えば良い。2 次元磁場計算の動機は、断面形状の最適化と飽和の影響の見積である。

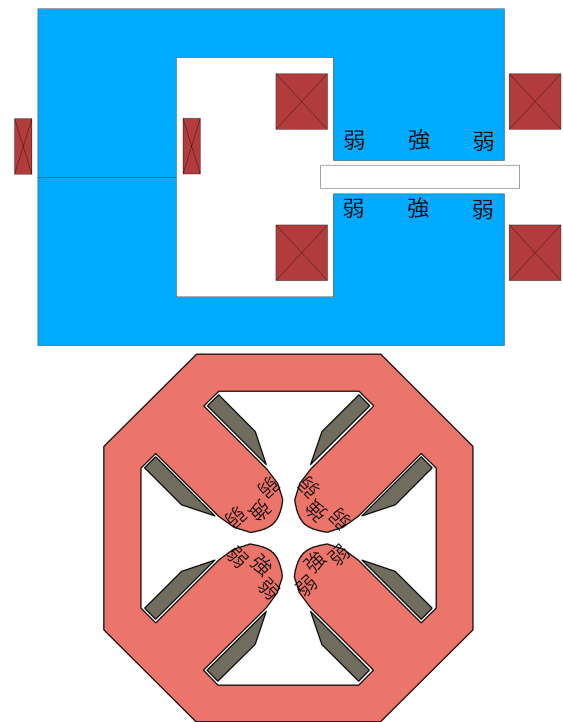


Fig. 10.25 高次磁場



Fig. 10.26 シム（左がタンジェンシャルシム、右がエンドシム。）

10.9. 電磁石本体断面形状の最適化

磁極が無限に広い等ポテンシャル面そのものなら、純粋にその次数の磁場のみがきれいに発生する。実際には、コイルを設置するために磁極はどこかで切り落とす必要がある。従って、磁極の両脇の磁場は必ず弱くなる。偏向磁石の場合と 4 極磁石の場合を、Fig. 10.25 に示す。

偏向磁石の場合、「強」と「弱」が 6 個並ぶので、要は 6 極成分が発生するということになる。4 極の場合は 12 個で 12 極となる。これを補正するためには、「弱」の部分の磁場を補強してやれば良い。磁極をビーム進行方向にそって出っ張らせる（断面形状としてそこだけボアを狭くする）方法（に使う出っ張り）をタンジェンシャルシム、

磁極端に鉄板を取り付け、コア長を長くする方式（に使う鉄板）をエンドシムと呼ぶ。タンジェンシャルシム、エンドシムを Fig. 10.26 に示す。磁場測定では 6 極や 12 極成分も出てくるが、実際にエンドシムの大きさや厚さを調整し、運転電流値付近で最もそれら（4 極なら 12 極）が小さくなるように調整を行っている。

10.10. 設置、据え付け

電磁石はリングに精密に据え付ける必要がある。精密に、とは、座標や傾き、回転をきちんと制御して正確に置かなければいけないということである。電磁石には「測量ターゲット座」が作られていてそこにターゲットを設置して、望遠鏡やレーザートラッカーで位置を測定する。また、平らで広いターゲット座に水準器を載せ、進行方向 (longitudinal) の傾きと、進行方向に垂直な方向の傾き (X-Y (transverse) 面内の回転) を補正する。

磁石と床との間には架台が存在するが、最近の加速器では機械精度と鉄材の品質向上で、置いただけで機械加工精度（全体で $10\mu\text{m}$ 程度）で設置据え付けが完了する方式もある。鉄材や加工時の歪みがあると、機械中心と磁場中心が一致しない場合もある（測定自体精度的に簡単ではないし、磁場測定時に電磁石を定量的に一方向にずらす、ことも簡単ではない）が、PF ではその効果は無視している。（KEKB ではきちんと個体ごとに補正している。）一般に、架台には複数台の電磁石が載せられるが、電磁石毎の傾きの調整は電磁石の下に薄板を挟むことで行い、位置の調整は押しボルトで押せるように架台を作っておいて行うことが多い。最終的にはボルトを締めて固定するが、電磁石重量による架台のたわみや、固定の為にボルトを締めつけたことによるたわみなど、変化量を見越して調整する熟練の技的な面もある。

測量ターゲット座を Fig. 10.27 に示す。ターゲットを載せるアームやホルダを Fig. 10.28 に示す。高さは同心円状のターゲットを N3 (Fig. 10.29) という望遠鏡で見えて調整する。N3 は最早製造されていないので、最近はデジタルレベルも



Fig. 10.27 電磁石本体のターゲット座
(上は 4 極電磁石、下は偏向電磁石、左は側面、右は上面。)



Fig. 10.28 ターゲットを載せるアーム (左) とホルダ (右) (アームは 4 極側面用で 10 cm 球面ターゲット用、ホルダはトラッカーのキャッツアイ用のサイズ。)



Fig. 10.29 同心円ターゲット (左) と N3 (右)



Fig. 10.30 レーザートラッカー (左) とキャッツアイ (右)

導入されてきている。水平垂直の位置の測量はレーザートラッカー (Fig.10.30) を使う。キャッツアイという、入射レーザーを来た方向に反射するターゲットを電磁石の測量座に載せると、その 3 次元的な位置が精度 $20\mu\text{m}$ 程度で測量できる。測量に欠かせない 3 脚 (Fig.10.31) も、重要な道具



Fig. 10.31 測量用三脚



Fig. 10.32 PF モニュメント

である。置いたらすぐ安定し、調整も容易、というものでないと、測量準備が無駄に長くなる。

実際の電磁石据え付け時には、建物に設置したターゲットを基準に、ラティス全体の座標を算出する。cERL ではシールド壁にキャッツアイ用のホルダを貼り付け、測量メッシュを構築し、PF では直線部と偏向電磁石毎に設置されている黄色い柱（モニュメントと呼んでいる、Fig. 10.32）を基準にメッシュを作っている。cERL シールド、PF 加速器トンネルとも、外気温変化でかなり変形するため、誤差は小さくはない。

既存のラティス電磁石を測量する場合、トラックによる測量では、リングを見通せる範囲毎に分割し、測量する。あるセクションから隣のセクションに移動する時には、前のセクションで測った点を再び測量し、座標を繋げるのに使う。1 周



Fig. 10.34 cERL の電磁石設置の流れ
(床にアンカーを打ち (左上)、ベースプレートを設置 (右上)、架台を設置 (左下)、電磁石を設置 (右下) という手順である。)

回って座標を繋げた際に生じた誤差を閉合差といい、それを全セクションの接続に分散させてうまくリングを閉じる計算を昔は手動でやっていたが、最近はトラックー付属ソフトがやってくれるようになった。Fig. 10.33 に、PF リングの測量の例を示す。A セクション、B セクションの 2 つの測量データがあり、そのうち 10 点を両方で測っている。重複する 10 点を使い、重心位置を重ねる平行移動と、近似曲線の傾きを揃える回転変換を求めれば、座標を繋げることができる。重複点は閉合差補正の後で平均を取ればよい。

最後に、cERL における電磁石設置の様子を Fig. 10.34 に示す。

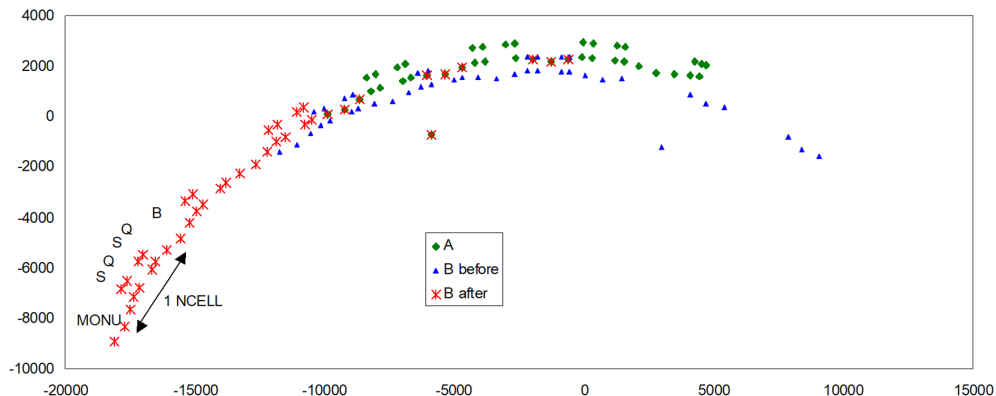


Fig. 10.33 トラッカー測量の座標繋ぎの例

図表クレジット

Fig. 1.1 google map に文字追加

Fig. 1.2 KEK プレスリリース, “SuperKEKB が改良を終え再始動しました”, 2024.01.30 より
<https://www.kek.jp/ja/topics/202401301800>

Fig. 1.8 佐藤政則氏、放射光合同打合せ資料 (2018.7) より

Fig. 1.9 右は KEK プレスリリース, “次世代光源用の直流電子銃で世界最高の 500kV の電圧を達成”, 2010.3.10 より。
<https://www2.kek.jp/ja/news/press/2010/jisedaikougen.html>

Fig. 1.10 [1.1] より

Fig. 1.12 google map に文字追加

Fig. 1.13-17 J-PARC 紹介スライド (小関さん) より

Fig. 2.1 [株式会社サンケイディライト](https://densyoku.sankei-delight.com/)
<https://densyoku.sankei-delight.com/>

Fig. 2.3 株式会社 TDK 「[ブラウン管の仕組みとテレビの進化の歴史](https://www.tdk.com/ja/tech-mag/device/001)」
<https://www.tdk.com/ja/tech-mag/device/001>

Fig. 2.4 株式会社プリンス電気 「[蛍光灯の基礎知識](https://www.prince-d.co.jp/feature/helpful/)」
<https://www.prince-d.co.jp/feature/helpful/>

Fig. 2.6 九州大学インターネットセミナー 「[電子の発見](https://nc.phys.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld/Part1/P17/electron.htm)」
<https://nc.phys.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld/Part1/P17/electron.htm>

Fig. 2.7 Wikipedia より

Fig. 2.8 AIP Emilio Segrè Visual Archives, Lande Collection

Fig. 2.9 ケンブリッジ大学トリニティカレッジ図書館ブログ 「[J.J. トムソンを偲んで](https://trinitycollegelibrarycambridge.wordpress.com/2020/08/19/j-j-thomson-remembered/)」
<https://trinitycollegelibrarycambridge.wordpress.com/2020/08/19/j-j-thomson-remembered/>

Fig. 2.10 わたちちわーど 「[真空管ってなあに](http://www.watacchi.com/denpa/vol-18.html)」
<http://www.watacchi.com/denpa/vol-18.html>

Fig. 2.11 環境省 「[放射線の基礎知識 1.3](https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h29kisoshiryo/h29kiso-01-03-04.html)」
<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h29kisoshiryo/h29kiso-01-03-04.html>

Fig. 2.12 [2.1] より

Fig. 2.14 キヤノン電子管デバイス株式会社 「[クライストロン \(技術情報\)](https://etd.canon/ja/tech/klystron.html)」
<https://etd.canon/ja/tech/klystron.html>

Fig. 3.1 AIP Emilio Segrè Visual Archives, William G. Myers Collection (ベクレル)、同 E. Scott Barr Collection (キューリー)

Fig. 3.2 Cambridge University Library, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Rutherford Collection (ラザフォード)、AIP Emilio Segrè Visual Archives, Numeroff Collection (チャドウィック)

Fig. 3.3 Photograph by A. B. Lagrelius and Westphal, Stockholm, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Weber Collection (ウィルソン)、同 E. Scott Barr Collection (ヘス)

Fig. 3.4. AIP Emilio Segrè Visual Archives (ウィルソン)、Photograph by David Azose, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection (ネッダーマイヤー)

Fig. 3.5 AIP Emilio Segrè Visual Archives, W. F. Meggers Gallery of Nobel Laureates Collection (グレーザー)、同, Physics Today Collection (ヴァンデグラフ)

Fig. 3.6 JAEA タンデム加速器 「[タンデム加速器のしくみ](https://ttandem.jaea.go.jp/koumoku-02/kasokuki.html)」 <https://ttandem.jaea.go.jp/koumoku-02/kasokuki.html>

Fig. 3.7 KEK WEB

Fig. 3.8 AIP Emilio Segrè Visual Archives, Fermi Film Collection (コッククロフト)、同 Segrè Collection (ウォルトン)

Fig. 3.9 KEK キッズサイエンティスト 「[線形加速器](https://www2.kek.jp/kids/accelerator/accelerator04.html)」
<https://www2.kek.jp/kids/accelerator/accelerator04.html>

Fig. 3.10 Wikipedia (イジング)、AIP Emilio Segrè Visual Archives (ヴィデレー)

Fig. 3.11 Lawrence Berkeley National Laboratory, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection, gift of Peter Trower (アルヴァレ)、AIP Emilio Segrè Visual Archives (ハンセン)

Fig. 3.12 Lawrence Berkeley National Laboratory, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives (ローレンス)、同 Physics Today Collection (サイクロトロン)

Fig. 3.13 KEK キッズサイエンティスト 「[サイクロトロン](https://www2.kek.jp/kids/accelerator/accelerator02.html)」
<https://www2.kek.jp/kids/accelerator/accelerator02.html>

Fig. 3.15 AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection (ローレンス)、同 Bainbridge Collection (サーバー)

Fig. 3.16 AIP Emilio Segrè Visual Archives (マクミラン)、同 Photograph by D. Shobmovich (ヴェクスラー)

Fig. 3.17 Photo courtesy Brookhaven National Laboratory, AIP Emilio Segrè Visual Archives

Fig. 3.18 Lawrence Berkeley National Laboratory, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection

Fig. 3.19 イタリア フラスカッティ研究所「AdA」
<https://www.lnf.infn.it/acceleratori/ada/>
Wikipedia (タウシェック)

Fig. 3.20 AIP Emilio Segrè Visual Archives (クリストフイロス)、同 Photo courtesy Brookhaven National Laboratory, Physics Today Collection (クーラン)

Fig. 3.21 AIP Emilio Segrè Visual Archives (リヴィングストン)、同 photo courtesy Brookhaven National Laboratory (シュナイダー)

Fig. 3.23 AIP Emilio Segrè Visual Archives, photo courtesy Brookhaven National Laboratory

Fig. 3.24 CERN Accelerator Complex
<https://home.cern/science/accelerators/accelerator-complex>

Fig. 3.35 Annales des Mines (2014.5.23) (リエナール)、英国肖像画博物館 (ショット)

Fig. 3.26 AIP Emilio Segrè Visual Archives, Physics Today Collection

Fig. 3.27 AIP Emilio Segrè Visual Archives, John P. Blewett Collection

Fig. 3.28 SLAC-PUB-10689, Aug, 2004

Fig. 3.29 [3.26]より

Fig. 4.1 文献[4.1]より

Fig. 4.2 文献[4.1]より

Fig. 4.3 文献[4.4]より

Fig. 4.4 SOR RING 20 周年絵はがき

Fig. 4.5 文献[4.8]より

Fig. 4.6 文献[4.10]より

Fig. 4.7 Physics Today 54 (4), 89-90 (2001) (ハルバック)、シカゴ大学 WEB (キム)

Fig. 4.8 Brookhaven National Laboratory, courtesy AIP Emilio Segrè Visual Archives (グリーン)、同 Physics Today Collection (チャスマン) より。

Fig. 4.11 Wikipedia より。

Fig. 4.12 Wikipedia より。

Fig. 5.1 PF WEB「ビームライン・実験ステーション」より。

<https://www2.kek.jp/imss/pf/apparatus/bl/>

Fig. 5.4～5.6, 5.10～12 [5.3]、[5.4]に加えて、BL15A1 グループの発表資料、例えば、仁谷浩明、武市泰男、丹羽尉博、阿部仁、木村正雄、松岡亜衣、小山篤、清水伸隆、五十嵐教之、“PF BL-15A1でのセミマイクロビームによる XAFS/XRF/XRD 複合分析システムの現状”, PF 研究会 X 線顕微分析の新展開、など。

Fig. 5.21 PF BL20A 説明 WEB

<https://www2.kek.jp/imss/pf/apparatus/bl/bl20a.html>

Fig. 5.22 PF BL6A 説明 WEB

<https://www2.kek.jp/imss/pf/apparatus/bl/bl6a.html>

Fig. 6.1 東大物性研松田研究室 WEB より

Fig. 6.3 [6.2]より

Fig. 6.6 太田充恒 (産総研)「X 線吸収微細構造 (XAFS)とは」より。

<https://staff.aist.go.jp/a.ohta/japanese/study/XAFS-ex2.htm>

Fig. 6.7 PF WEB 放射光軟 X 線分光及び軟 X 線吸収スペクトル測定「吸収端一覧表」の一部

<https://pfwww.kek.jp/sxspec/sx/edgetable.html>

データは LBL-CXRO "X-Ray Interactions With Matter" Eric Gullikson より、とのこと。

Fig. 6.8～10 Wikipedia より。

Fig. 6.11 PDBj「統計情報」より

<https://pdj.org/info/statistics>

Fig. 6.13 高木秀彰氏による説明資料より。

Fig. 6.15 雨宮慶幸他,「2 次元極小角・小角 X 線散乱法を用いたゴム中ナノ粒子凝集構造の観察 [6.3]」より

<https://user.SPring8.or.jp/sp8info/?p=3048>

Fig. 6.16 米国結晶学会 WEB(セイヤー)、UCLA WEB (ミャオ) より。

Fig. 6.17 [6.5]より

Fig. 6.19 兵藤一行 総研大高エネルギー加速器セミナー2022 より

Fig. 6.20 [6.6]より

Fig. 6.22 AIP Emilio Segrè Visual Archives, W. F. Meggers Gallery of Nobel Laureates Collection

Fig. 6.23 [6.7]より

Fig. 6.26 [6.8]より

Fig. 6.27 [6.9]より

Fig. 6.28 SPring-8 プレスリリース「右アミノ酸、左アミノ酸を放射光(軟 X 線)で初めて識別」より
http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2005/050511/

Fig. 6.30 KEK プレスリリース「光が一瞬の磁石を作り出す」より。
https://www2.kek.jp/ja/news/press/2009/Fephenant_hroline.html

Fig. 6.31 KEK プレスリリース「ビームライン NW14A、実験開始」より。
<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2007/novdec/NW14A.html>

Fig. 6.32～33 [6.10]より。

Fig. 7.1 粒子線治療推進研究会「九州国際重粒子線がん治療センター」紹介
<https://www.particle.or.jp/hirtjapan/facility/saga.html>

Fig. 7.2 板橋中央総合病院 放射線治療センター「リニアックナイフ」より。
<https://ims-itabashi.jp/radiotherapy/cyberknife.html>

Fig. 7.3 アクキュレイ社「サイバーナイフ」より。
<https://www accuray.com/wp-content/uploads/cyberknife-treatment-delivery-system-technical-specifications.pdf>

Fig. 7.4 岐阜市民病院「核医学診断装置」
<https://gmhosp.jp/shinryoubu/tyuuouhousyasan/kakuiigaku-souti.html>
東邦大学大森病院中央放射線部「核医学検査」
https://www.lab.tohoku.ac.jp/med/omori/radio_section/inspection/ri.html

Fig. 7.5 住友重機「製品ラインナップ」
<https://www.shi.co.jp/products/machinery/cyclotron/index.html>

Fig. 7.6 日本メジフィジックス「放射性医薬品製造フロー」
https://www.nmp.co.jp/corpo/business/production_supply/production/flow.html
PDR ファーマ「生産体制」
<https://www.pdradiopharma.com/about/salesSystem/productionSystem/>

Fig. 7.7 日本メジフィジックス
PDR ファーマ (ウルトラテクネカウ)

Fig. 7.8 ウルトラテクネカウ添付文書
<https://www.pdradiopharma.com/wpeptip/wp-content/uploads/2022/04/diagnostic03.pdf>

Fig. 8.1 [8.1]より

Fig.8.2 ワイエイシイビーム株式会社「イオンビームミリング装置」
https://www.yac.co.jp/ja/beam/product/beam/detail_01.html

Fig. 8.3 日立ハイテク「FIB データギャラリー」
<https://www.hitachi-hightech.com/jp/ja/knowledge/microscopes/fib-sem/gallery/>

Fig. 8.4 三菱電気「EBM 製品特徴」
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/mecha/ebm/pmerit/>

Fig. 8.5 ニューフレアテクノロジー「製品一覧」
<https://www.nuflare.co.jp/products/beam/>

Fig. 8.6 NHV 株式会社「スキャン型電子線照射装置」
<https://www.nhv.jp/products/scan.html>

Fig. 8.7 IBA TT300HE カタログ

Fig. 8.8 関西電子ビーム株式会社「事業内容」
<https://www.kbeam.co.jp/service/index.html>

Fig. 10.15 住友金属工業「磁気特性試験結果」

Fig. 10.16～17 遠藤有聲 2003 年 OHO セミナー

参考文献

- [1.1] 高橋義知他、” KEK-STF における L-band Photocathode RF 電子銃”，第 7 回日本加速器学会，WEPS052 (2010)
- [2.1] 小原春雄他，“理論的 X 線スペクトルの計算法”，東北大学医療技術短期大学部紀要，8(1)，pp17-22，1999
- [3.1] R. J. Van de Graaff, “A 1500000 Volt Electrostatic Generator”, Phys. Rev. 38, 1919 (1931)
- [3.2] R. J. Van de Graaff et al., “The Electrostatic Production of High Voltage for Nuclear Investigations”, Phys. Rev. 43, pp149-157 (1933)
- [3.3] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, “Experiments with high velocity positive ions. - (I) Further developments in the method of obtaining high velocity positive ions”, Proc. R. Soc. London, A136 pp619-630, (1932)
- [3.4] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, “Experiments with high velocity positive ions. - (II) Disintegration of Light Elements by Fast Protons”, Proc. R. Soc. London, A137 pp229-242, (1932)
- [3.5] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, “Experiments with high velocity positive ions. - (III) The Disintegration of Lithium, Boron, and Carbon by

Heavy Hydrogen Ions”, Proc. R. Soc. London, A144 pp704–720, (1934)

- [3.6] G. Ising, “Prinzip Einer Methode Zur Herstellung Von Kanalstrahlen Hoher Voltzahl”, Arkiv För Matematik, Astronomi Och Fysik 18 (1), 1928
- [3.7] Suzie Sheehy, “History of Accelerators”, CERN Accelerator School 2021
- [3.8] R. Wideröe, “Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen”, PhD Thesis, Aachen, Tech. Hochsch. (1927) Published in Arch. Elektrotech. 21, pp387–406 (1928)
- [3.9] L. W. Alvarez et al., “BERKELEY PROTON LINEAR ACCELERATOR”, UCRL (University of California, Radiation Laboratory)-236, (1953) or Rev. Sci. Instrum. 26, 111–133 (1955)
- [3.10] E. L. Ginzton, W. W. Hansen, W. R. Kennedy, “A Linear Electron Accelerator”, Rev. Sci. Instrum. 19, 89–108 (1948)
- [3.11] E. O. Lawrence and N. E. Edlefsen, from “September meeting of the National Academy of Sciences”, Science 72, 376 (1930)
- [3.12] E. O. Lawrence and M. S. Livingston, “A method for producing high speed hydrogen ions without the use of high voltages”, from “Minutes of the Washington Meeting, April”, Phys. Rev. 37, 1707 (1931)
- [3.13] E. O. Lawrence and M. S. Livingston, “The Production of High Speed Light Ions Without the Use of High Voltages”, Phys. Rev. 40, 19 (1932)
- [3.14] D. W. Kerst, “Acceleration of Electrons by Magnetic Induction”, Phys. Rev. 58, 841 (1940)
- [3.15] D. W. Kerst, “Acceleration of Electrons by Magnetic Induction”, Phys. Rev. 60, 47 (1941) (上はレター、こちらは論文。)
- [3.16] D. W. Kerst and R. Serber, “Electronic Orbits in the Induction Accelerator”, Phys. Rev. 60, 53 (1941) (上の論文の次の論文。)
- [3.17] E. M. McMillan, “The Synchrotron-A Proposed High Energy Particle Accelerator”, Phys. Rev. 68, 143 (1945) (レター)
- [3.18] V. I. Veksler, “A New Method of the Acceleration of Relativistic Particles”, Journal of Physics of the USSR, 9, 153 (1945)
- [3.19] V. I. Veksler, “Concerning Some New Methods of Acceleration of Relativistic Particles”, Phys. Rev. 69, 244 (1946) (レター)
- [3.20] N. Christofilos, “Focussing system for ions and electrons”, US patent No. 2736799 (1950)
<https://patentimages.storage.googleapis.com/fa/bb/52/0ce28e28b492a6/US2736799.pdf>

- [3.21] E. D. Courant, M. S. Livingston and H. S. Snyder, “The Strong-Focusing Synchrotron—A New High Energy Accelerator”, Phys. Rev. 88, 1190 (1952)
- [3.22] J. P. Blewett, “Synchrotron Radiation – Early History”, J. Synchrotron Rad. 5, pp.135–139 (1998)
- [3.23] A. Lienard, “Champ électrique et magnétique produit par une charge électrique concentrée en un point et animée d’un mouvement quelconque”, L’Eclairage Elec. 16, 5 (1898)
- [3.24] G. A. Schott, “Electromagnetic Radiation”, Cambridge University Press, (1912)
- [3.25] J. Schwinger, “On the Classical Radiation of Accelerated Electrons”, Phys. Rev. 75, 1912 (1949)
- [3.26] R. W. Boyd et al. ed., “Quantum Photonics: Pioneering Advances and Emerging Applications”, Springer (2019)

加速器の発展、将来など、全体を通して下記の資料を参考にさせて頂いた。

- ・ さくらプロジェクト、総研大コアカリキュラム、加速器セミナーなど、横谷馨、高田耕治、中村典雄、宮島司、阪井寛志、梅森健成、小関忠 各氏の講義、講演資料。特に筆者は最初の講義資料を作るにあたり、加速器の歴史と発展に関する横谷馨氏による講義資料を参考にさせて頂いた。
- ・ 加藤龍好「自由電子レーザーについて」(KEK 内部検討会資料)
- ・ 倉田正和、“ILC の物理・ILC250GeV” (FPWS2017 講演資料、KEK 内部講習会資料)
- ・ 奥木敏行、“ILC の現状” (KEK 内部検討会資料)
- ・ 森田昭夫、“SuperKEKB 加速器” (KEK 内部の講演資料集)
- ・ 高田耕治, “シンクロトロンと蓄積リングの基礎”, OHO2009
研究者の手記や歴史書も含めて、とても丁寧に調べて書かれており、最初期の歴史について、いきさつがよく分かる文献となっている。

- [4.1] C. Kunz, “Introduction – Properties of Synchrotron Radiation” from “Synchrotron Radiation - Techniques and Applications –“の第 1 章, C. Kunz 編, Springer Berlin (1979)
- [4.2] G. Margaritondo, “Who were the founders of synchrotron radiation? Historical facts and misconceptions”, J. Vac. Sci. Technol., A 40, 033204 (2022)

- [4.3] G. Margaritondo, "Synchrotron light: A success story over six decades", Riv. Nuovo Cim. 40, pp.411-471 (2017)
- [4.4] 菊田惺志, "シンクロトロン放射光の発生とその特徴", 日本結晶学会誌, 18, pp.65-83 (1976)
- [4.5] 中村正年, "SOR を利用した気体分光学", 分光研究, 17, pp.187-198 (1969)
- [4.6] K. Codling, R. P. Madden, "Characteristics of the "Synchrotron Light" from the NBS 180-MeV Machine", J. Appl. Phys. 36, 380-387 (1965)
- [4.7] D. H. Tomboulia and P. L. Hartman, "Spectral and Angular Distribution of Ultraviolet Radiation from the 300-MeV Cornell Synchrotron", Phys. Rev. 102, 1423 (1956)
- [4.8] D. W. Lynch, "Tantalus, a 240 MeV Dedicated Source of Synchrotron Radiation, 1968-1986", J. Synchrotron Rad. (1997). 4, pp.334-343
 なお、JSR の 4 巻 6 号は放射光 50 周年特集で、この他にも初期の歴史や各国の歴史が掲載されている。(佐々木泰三氏による日本の放射光の歴史も掲載されている。)
<https://journals.iucr.org/s/issues/1997/06/00/>
 ちなみに、翌年の SRI'97 も 50 周年特集で、プロシーディング (JSR 5 巻 3 号) にも歴史や各国の歴史が掲載されている。
<https://journals.iucr.org/s/issues/1998/03/00/>
- [4.9] D. Attwood, K. Halbach, and Kwang-Je Kim, "Tunable Coherent X-rays", Science, 228, pp. 1265-1272 (1985)
- [4.10] D. Attwood, K. Halbach, and Kwang-Je Kim, "PARTIALLY COHERENT X-RAYS FROM MODERN STORAGE RINGS", LBL-19354 (1984)
- [4.11] 物質・材料研究機構 Youtube 未来の科学者たちへ「ハルバツハ配列」
<https://www.youtube.com/watch?v=86QKOEYu53Q>
- [4.12] R. Chasman, G. K. Green and E. M. Rowe, "Preliminary Design of a Dedicated Synchrotron Radiation Facility", IEEE Transactions on Nuclear Science, 22, pp.1765-1767 (1975)
- [4.13] S. Krinsky et al., "Storage ring development at the National Synchrotron Light Source", AIP Conf. Proc. 249, 762-858 (1992)
- [4.14] D. A. G. Deacon et al., "First Operation of a Free-Electron Laser", Phys. Rev. Lett. 38, 892 (1977)
- [4.15] A. M. Kondratenko and E. L. Saldin, Sov. Phys. Dokl. 24, no. 12, 986 (1979)
- [4.16] R. Bonifacio et al., "Collective instabilities and high-gain regime in a free electron laser", Opt. Commun. 50, 373 (1984)
- [4.17] Kwang-Je Kim, "Three-Dimensional Analysis of Coherent Amplification and Self-Amplified Spontaneous Emission in Free-Electron Lasers", Phys. Rev. Lett. 57, 1871 (1986).
- [5.1] 日本放射光学会, "改訂版 放射光ビームライン光学技術入門～はじめて放射光を使う利用者のために～"



輝度や光束についての正確な説明を始め、発光原理、光学素子、測定解析手法などがきちんと説明されている。

Amazon kindle で 715 円。紙版は 4400 円。(特に電子版は内容的にも圧倒的にお得なので是非！)

- [5.2] 豊島章雄, 宮内洋司, private communications
- [5.3] H. Miyauchi, S. Asaoka, T. Tahara, "Beamline Fromt Ends at the 2.5GeV Photon Factory Storage Ring", Proc. of MEDSI2016, Barcelona, Spain (2016)
- [5.4] H. Miyauchi, T. Tahara, S. Asaoka, "Beamline front end for in-vacuum short period undulator at the photon factory storage ring", AIP Conference Proceedings 1741, 020032 (2016)
- [5.5] N. Igarashi, et al., "New high-brilliance beamline BL-15A of the Photon Factory", 2013 J. Phys.: Conf. Ser. 425 072016 (BL 建設, A1)
- [5.6] H. Takagi, et al., "New high-brilliance small angle x-ray scattering beamline, BL-15A2 at the photon factory", AIP Conf. Proc., 2054, 060038 (2019) (HX SAXS)
- [5.7] H. Takagi, et al., "Structural analysis of polymer thin films using GISAXS in the tender X-ray region: Concept and design of GISAXS experiments using the tender X-ray energy at BL-15A2 at the Photon Factory", J. Appl. Phys., 120, 142119 (2016) (Tender X SAXS)
- [6.1] Y. Takeichi, et al., "Design and performance of a compact scanning transmission X-ray microscope at the Photon Factory", Rev. of Sci. Instr. 87, 013704 (2016)
- [6.2] 武市泰男, "PF における走査型透過 X 線顕微鏡の開発", 放射光 29 (2016) 282-286
- [6.3] 雨宮慶幸 他, "2 次元極小角・小角 X 線散乱法を用いたゴム中ナノ粒子凝集構造の観察", SPring-8 利用者情報, 14, 149-153 (2009)

- [6.4] D. Sayre, “Some implications of a theorem due to Shannon”, *Acta Cryst.*, 5, 843 (1952)
- [6.5] J. Miao et al., “Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometre-sized non-crystalline specimens”, *Nature*, 400, pp342–344 (1999)
- [6.6] 米山明夫 他, “結晶 X 線干渉計を用いた Zeff イメージング法の開発”, *応用物理*, 83, 737 (2014)
- [6.7] 西原遊 他, “D111 型装置を用いた高温高压変形実験：固体地球深部の流動変形の理解を目指して”, *FF News*, 38, p11, (2020)
- [6.8] Y. Suzuki et al., “X-Ray Computerized Tomography Using Monochromated Synchrotron Radiation”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 27 L461 (1988)
- [6.9] 鈴木俊法, “SACLA を用いた溶液化学反応のフェムト秒時間分解 X 線吸収分光”, *放射光*, 29, pp23-31 (2016)
- 山形豊, “中性子と精密工学”, *精密工学会誌*, Vol.79, No.9, 2013, pp.805-808
- 日野友明他, “真空技術とその応用”, *ターボ機械*, Vol.20, No.11, 1992, pp.8-13
- 岡田修, “真空技術”, 講義資料 (東京理科大)
- 佐藤繁、渡辺誠「放射光科学入門」(東北大学出版会)
- [8.1] B. Doyle et al., “The Future of Industrial Accelerators and Applications”, *Rev. of Accel. Sci. and Tech.*, 10, pp. 93-116 (2019)
- [8.2] Suzie Sheehy, “Applications of Accelerators”, CERN Accelerator School 2024
<https://indico.cern.ch/event/1356988/contributions/5713268/>

放射光利用研究 (6 章) 全体として、下記の資料を参考にしました。

- ・ 白井剛、構造生物学講義資料 (長浜バイオ大学)
- ・ 山縣ゆり子, “構造生物学の歴史と進展”, *ファルマシア*, Vol.50, No.5, 2014, 393
- ・ 芦田玉一, “タンパク質結晶構造解析入門”, *日本結晶学会誌*, 38, 1996, 378-388
- ・ 柴田直樹, “応用講座 蛋白質結晶構造解析”, *SPring-8 夏の学校 2004*
- ・ 平井光博, “中性子・放射光 X 線を相補的に用いた生体膜の構造、タンパク質との相互作用の解析”, *オレオサイエンス*, Vol.16, No.10, 2016, pp.13-26
- ・ 坂田誠, “X 線自由電子レーザーの利用が期待される分野の展望”, *真空*, Vol.49, No.11, 2006, 683-688
- ・ 高橋美和子, “結晶構造から調べる物性”
- ・ 安藤正海他, “X 線回折 100 年 歴史・展望”, *Isotope News*, 698 (2012 年 6 月号)
- ・ 横山利彦, “XAFS の発展と将来展望”, *XAFS 夏の学校 2017* (2017/8/23~25)
- ・ 木下豊彦, “光電子分光法についての概論”, 高輝度放射光を利用した光電子分光技術講習会, 2009/3/4
- ・ 羽石秀昭, “X 線イメージング技術”, *画像電子学会誌*, Vol.37, No.5, 2008, 748-754
- ・ 磯矢彰, “加速器用イオン源”, *応用物理*, Vol.51, No.9, 1982, pp.1006-1012

- [9.1] ユーロピアンストラテジー
<https://europeanstrategy.cern/>
- [9.2] P5 レポート
<https://www.usparticlephysics.org/2023-p5-report/>
- [9.3] B. Barish, et al., “The International Linear Collider”, *Int. J. Mod. Phys. A*28 (2013)
- [9.4] FCC
<https://home.cern/science/accelerators/future-circular-collider>
- [9.5] CLIC
<https://home.cern/science/accelerators/compact-linear-collider>
- [9.6] CEPC
<http://cepc.ihep.ac.cn>

