

加速器の歴史と利用研究 1

1コマ目の内容

- はじめに
- KEKの加速器を利用した物質生命科学研究
- 電子源と（電子）線形加速器：真空管とRF源
- 放射光と（電子）円形加速器
- 世界の光源、日本の光源
- J-PARC RCSとMLF
- 低速陽電子とその利用
 - ビームダイナミクスは後に続く講義に任せて省く。
 - 素粒子原子核に関する内容も省く。

はじめに

加速器とは？

- 荷電粒子を電場で加速する装置。
 - 重力は操作できないし、強い相互作用、弱い相互作用は短距離力で操作できない。
 - 電磁気力だけが自由になる。磁場の力は進行方向と垂直。曲げるには都合がよいが加速はできない。
 - 電子、陽電子、陽子、重イオンが加速対象。（J-PARCではRCSで作ったミュオンをRFQ LINACで加速する実験、加速後の利用実験も行われている。）
 - 中性子ビームには電磁場を使わない独自の技術がある。（是非、パンフレットやWEBで調べてみて！）
- 大規模加速器
 - 素粒子原子核実験
 - 放射光利用
 - 医療用（重粒子線治療）
- 粒子源、小型加速器、粒子線利用
 - 真空管、ネオン管、ブラウン管、蛍光灯
 - X線管
 - 電子顕微鏡、クライオ電子顕微鏡
 - 工業、医療用
 - RI製造
 - イオンビーム加工
 - 電子線照射
 - 非破壊検査

加速器の台数と目的

1.2.3 発生装置の使用許可台数(種類別, 機関別)

Number of Radiation Generators in Use (as of March 31, 2019)

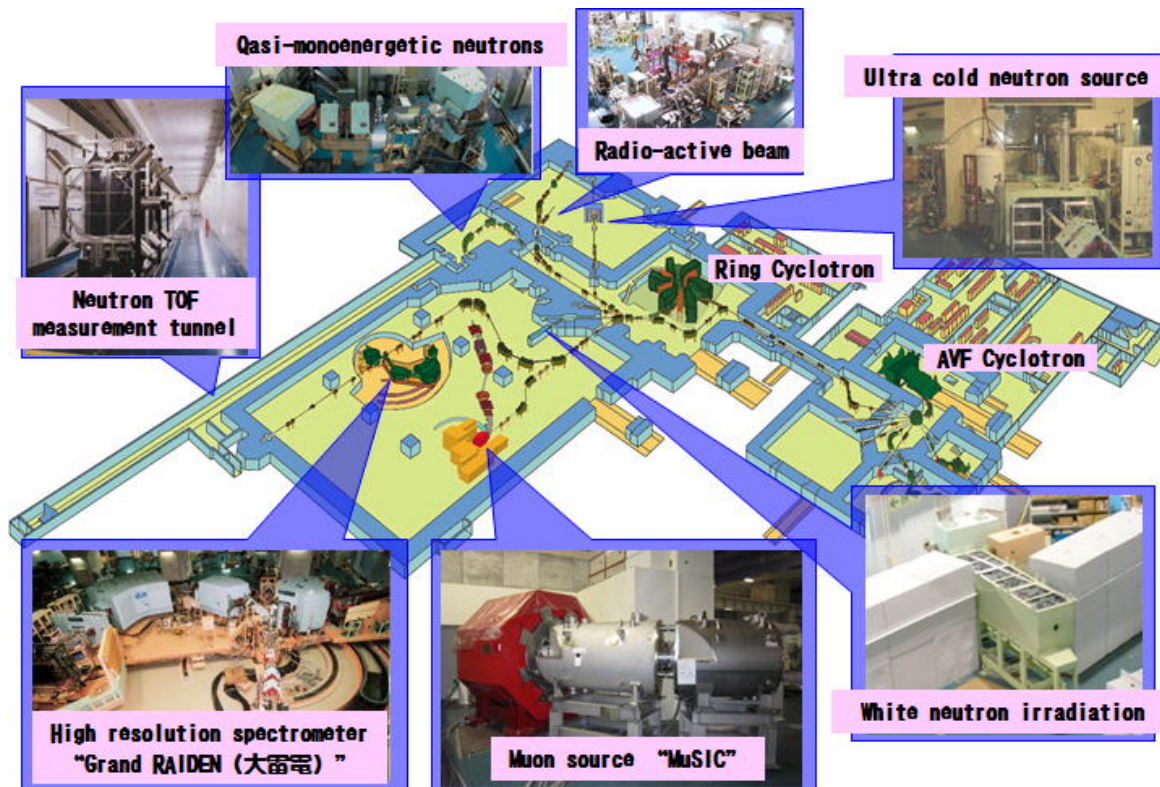
発生装置 Radiation Generators	機関 Category	総数 Total 構成比 Ratio(%)	医療機関 Hospitals & Clinics	教育機関 Educational Institutions	研究機関 Research Institutions	民間企業 Private Companies	その他の機関 Other Organizations
総 数 Total		1,747	1,310	65	174	165	33
構 成 比 Ratio %		100%	75.0	3.7	10.0	9.4	1.9
サイクロトロン Cyclotrons		246 14.1	162	4	24	54	2
シンクロトロン Synchrotrons		49 2.8	16	3	26	4	—
シンクロサイクロトロン Synchrocyclotrons		2 0.1	2	—	—	—	—
直線加速装置 Linear Accelerators		1,309 74.9	1,130	27	67	54	31
ベータトロン Betatrons		2 0.1	—	1	1	—	—
ファン・デ・グラーフ加速装置 Van de Graaff Accelerators		31 1.8	—	12	18	1	—
コッククロフト・ワルトン加速装置 Cockcroft-Walton Accelerators		89 5.1	—	16	29	44	—
変圧器型加速装置 Transformer-type Accelerators		12 0.7	—	—	5	7	—
マイクロトロン Microtrons		5 0.3	—	2	2	1	—
プラズマ発生装置 Plasma Generators		2 0.1	—	—	2	—	—

- 日本アイソトープ協会 放射線利用統計 (2019)
 - 放射線障害防止法の管轄、1MeV以上の装置。

エネルギーの単位、エネルギーとサイズ感

- eV（電子ボルト）を使う。
- 1Vの電位差で加速したら1 eV。
- 静電電圧の限界は10MeV程度。
- 一部の静電加速器を除き、時間的に変動する電磁場（AC電圧もしくはRF電磁波共振空洞）を使って加速する。
- 机上～1部屋におけるサイズ（10cm）
 - X線管（静電） 数10～100keV
 - 電子顕微鏡（静電） SEM：数～10keV、TEM：100～200keV
- 大きな部屋におけるサイズ（1m）
 - 工業用電子線照射 数百～10MeV：タイヤなどのゴム、ケーブルの被覆など、幅広く使われている。
 - 医療用RI製造 7～20MeV
 - 1MeV以上が放射線発生装置。（1MeV未満は法律、扱いが別。）
 - 電子だと6MeV以下なら全く放射化なし、10MeV以下ならほぼ放射化なし。
 - 重粒子（陽子など）の場合は数MeVで核反応が起きる。RI製造可能。
- 専用の建物、それが目的の専用の施設になるサイズ（10～100m）
 - 静電重粒子加速器 ～10MeV
 - 光源用、素粒子実験用、医療用加速器 数百MeV～数GeV
 - PF 2.5GeV、周長187m
 - 大学設置の加速器（東北大、京都大、大阪大、広島大……）
 - SPring-8 放射光源 電子、8GeV、1.4km
 - SACLA X線自由電子レーザー 電子、8GeV、光源とBL含め700m
- 素粒子原子核実験用大規模加速器（km、国全体、地域全体で一つ）
 - SuperKEKB LER（陽電子、4GeV） + HER（電子、7GeV）、3km
 - J-PARC MR 陽子、30GeV、1.6km
 - CERN LHC 陽子、7TeV + 陽子、7TeV、26.7km

加速器のイメージ（サイクロトロン）



- 大阪大学核物理センター(RCNP)
 - サイクロトロン：一様磁場中で加速、加速に伴って軌道半径は増大。一様磁場を作るために大きな磁石（鉄芯）が必要。（分割鉄芯利用のリングサイクロトロン）
 - 中低エネルギー領域の陽子、重粒子加速器の標準。
 - 連続運転可能で大電流にできる。
 - 核子によるが、最大1GeV程度まで加速可能。

PET用サイクロトロン（医療用RI製造重粒子加速器）

当院について

診療部のご案内

一般の方へ

医療関係者の方へ

採用・研修

診療部のご案内

診療部の一覧に戻る

中央放射線部TOP

中央放射線部の紹介

画像診断

一般撮影・ポータブル撮影・マンモグラフィ・骨密度測定

L X線テレビ検査

L 血管撮影・IVR

L CT検査

L MRI検査

L 超音波検査

L RI検査・PET-CT検査

L 体外衝撃波結石破砕装置 (ESWL)

L FibroScan

放射線治療

診療部のご案内

トップページ > 診療部のご案内 > 中央放射線部 PET-CT検査

中央放射線部 PET-CT検査



GE社製Discovery IQ.x

※PET-CT検査のご案内はこちらをご覧ください

※PET-CT検査 予約のご案内

岐阜市民病院では医療機関からのPET-CT検査を実施しています

診療受付時間のご案内

受付 8:00~11:00

診療医は診療担当表をご覧ください。

お見舞いのご案内

面会 面会制限実施中

フロアマップはこちらへ。

休診日のご案内

PET用サイクロトロンシステム

住友重機械はPET検査における
標識RI製剤システム
をリードし続けます



腫瘍・脳梗塞・心疾患などの画像診断に大きな効果を発揮するPET検査。数多くの医療機関に採用されているPET検査には、がん病巣に集積し位置を特定する ^{18}F -FDGなどの標識RIが欠かせません。

住友重機械のPET用サイクロトロンシステムは、この標識RIの製造に必要な放射性同位元素を安全かつ安定的に供給します。

製品ラインアップ

> CYPRIS HM-20



用途：臨床、研究、大規模施設用
加速エネルギー：陽子 20MeV/重陽子 10MeV
自己シールド：オプション

> CYPRIS HM-12



用途：臨床（腫瘍、脳、循環器）用
加速エネルギー：陽子 12MeV/重陽子 6MeV
自己シールド：オプション

> CYPRIS HM-10



用途：臨床（腫瘍）用
加速エネルギー：陽子 10MeV
自己シールド：標準装備

- サイクロトロン（7MeV~20MeV）で ^{18}F （半減期2時間弱）を製造し、その場でガンで特徴的に代謝されるブドウ糖類似体に組み込む。
- ^{18}F は崩壊時に陽電子を出し、陽電子は対消滅する時、2光子を互いに逆向き（180度方向）に同時に放出。それを検出してX線CTに重ねて画像生成。
- 腫瘍の転移の有無や認知症の早期発見などに利用。（1日約3000件（2019年）行われている。）
- IBA、ヴァリアン、住友重機などがサイクロトロンを製造、PET-CT装置はGE、シーメンス、フィリップス、キヤノン（旧 東芝）などが製造。
- 日本にはサイクロトロンのあるPET施設が153カ所、RI薬剤を購入して利用する施設が255カ所存在する。

引用：岐阜市民病院WEB、住友重機械工業WEB（google検索による、例示に意図はありません。）

参考：日本核医学会PET核医学分科会WEB（2019年の統計）

医療用線形加速器

[HOME](#)[診療科・部門のご紹介 ▾](#)[当院について ▾](#)[交通アクセス](#)

[山口県立総合医療センター](#) > [当院について](#) > [病院のご紹介](#) > [高度医療機器](#) > [線形加速器システム](#)



線形加速器システム（ライナック）



放射線治療用の高エネルギーX線や電子線を身体内部の病巣に照射する装置で、脳から四肢まで全身のあらゆる領域の病変の治療が可能です。放射線をより患部に集中させ、周囲の正常組織への被ばくを減少させることが可能です。一回の治療時間は短く、治療そのものによる痛みもなく、多くの場合外来通院での治療も可能です。

- がん治療に使われる電子LINAC。写真はキャノンメディカルシステムズの線形加速器（商品名：プライマス）とヘリカルCT（商品名：アステオン）を組み合わせたシステム。
- Co-60を使ったガンマナイフもある。

引用：山口県立総合医療センターWEB、キャノンメディカルシステムズ（2016年以前は東芝メディカルシステムズ）
google検索によるもので、例示に意図はありません。

リニアックナイフ（医療用電子加速器）

医療法人社団 明芳会 板橋中央総合病院
放射線治療センター

ごあいさつ

照射実績

治療を受ける方へ

Linear Accelerator

• Nominal Source to Axis Distance (SAD) and Normal Treatment Distance (NTD) is 800 mm

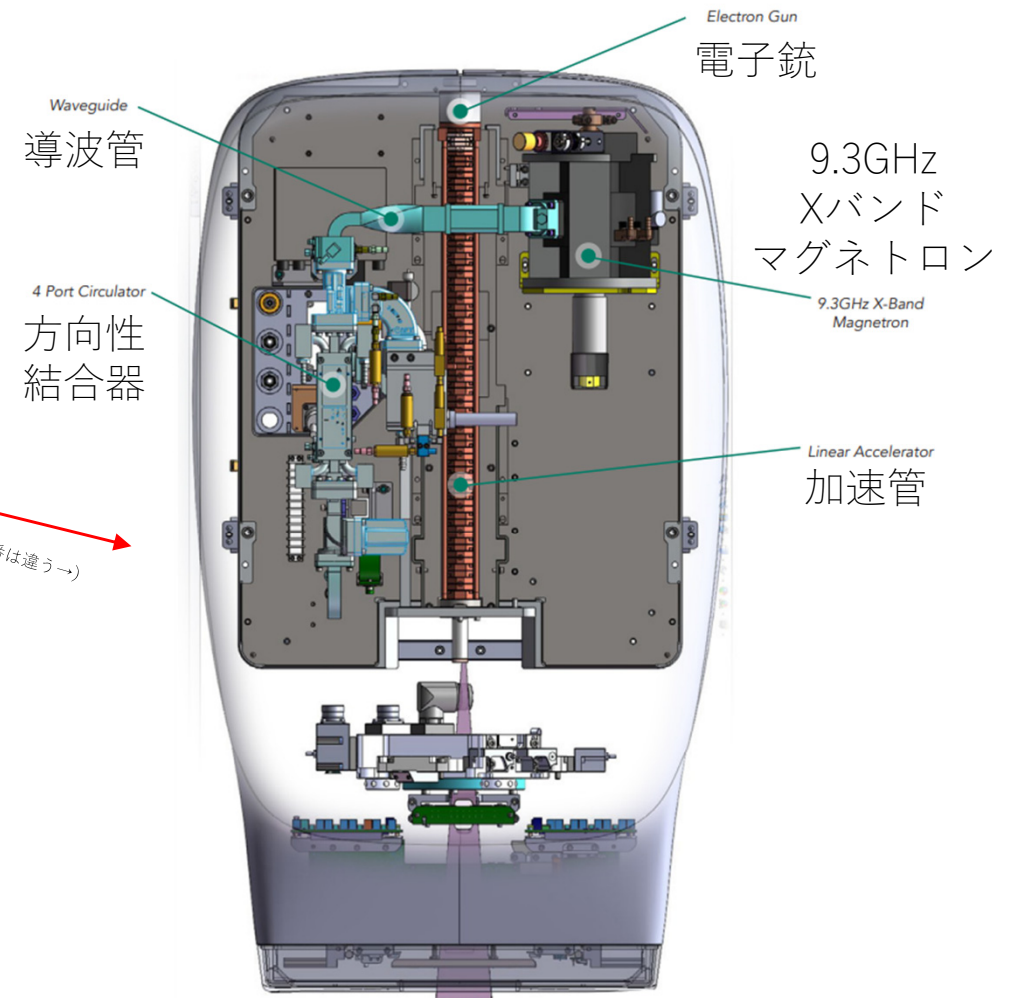
サイバーナイフ

サイバーナイフ『G4』とは



リニアックナイフ（小型電子線形加速器利用） CyberKnife : accuray社製
IMSグループ 医療法人社団明芳会 板橋中央総合病院 放射線治療センター
<https://ims-itabashi.jp/radiotherapy/cyberknife.html>

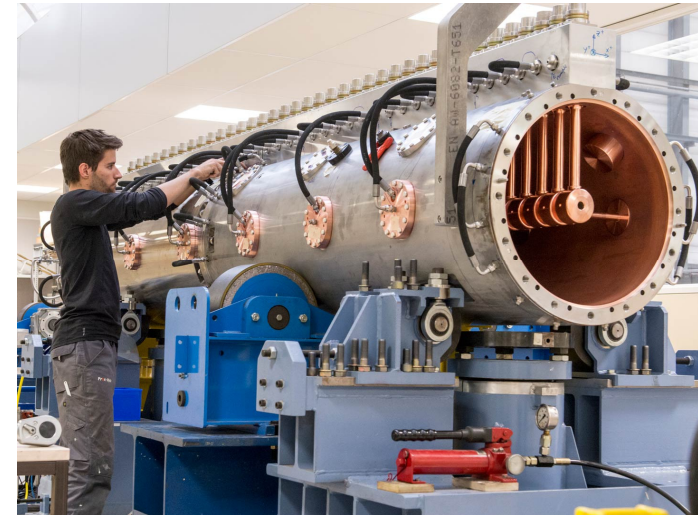
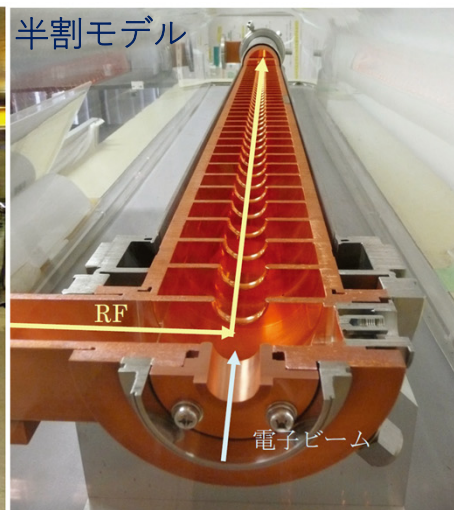
- がん治療に使われる電子LINAC。
- このような小型電子線、X線照射治療システムは多くの病院に導入されている。



Simplified Diagram, 6MV Linear Accelerator
(shown with InCise2™ Multileaf Collimator) Xバンド 6MeV
小型電子線形加速器

アキュレイ社 サイバーナイフ リニアックヘッド部分
https://www.accuray.com/wp-content/uploads/cyberknife-treatment-delivery-system_technical-specifications.pdf

加速器のイメージ（常伝導線形加速器(LINAC)）



KEK電子陽電子入射器 (2856MHz~10.5cm、
Disk Loaded Traveling-wave LINAC)

CERN LINAC4 DTL
352.2MHz~85cm

- まっすぐ（線形）。Linear AcceleratorでLINACという。
- 電子：金属製の小さな箱（空洞）が沢山連結されている。箱の中でラジオ波領域の電磁波が共振蓄積される。加速される方向の電場が立つタイミングで粒子を通過させ、加速する。
- 陽子：金属製の大きな箱にラジオ波を蓄積、逆位相の時はチューブで遮蔽、チューブ間を通るタイミングで加速。
- KEKの電子陽電子入射器は全長600m、最大で電子7GeV、陽電子4GeVを生成。HER、LER、PF、ARの4リングに対し、50Hzでパルス毎の打ち分け入射を実現。
- 粒子源出てすぐの初段の加速としてLINACを使うのが一般的。
- 常伝導はパルス運転のみ。（RF ON→粒子加速→RF OFFを繰り返す。KEK入射器の場合、ON時間は1 μ 秒で50Hz。）

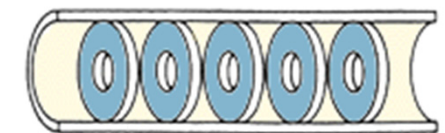


図2 円盤装荷導波管

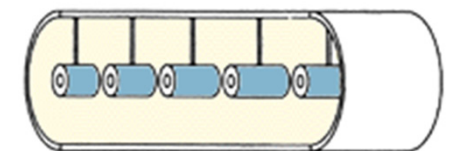
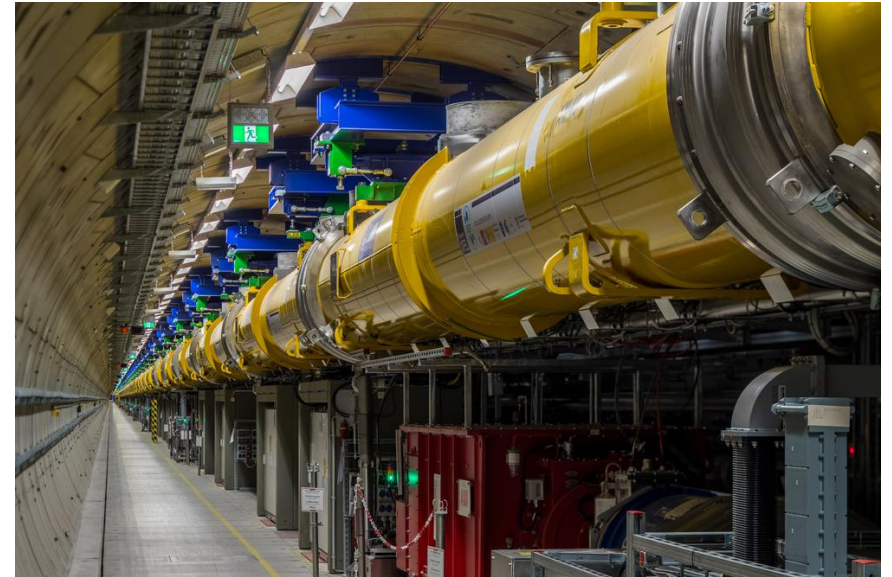
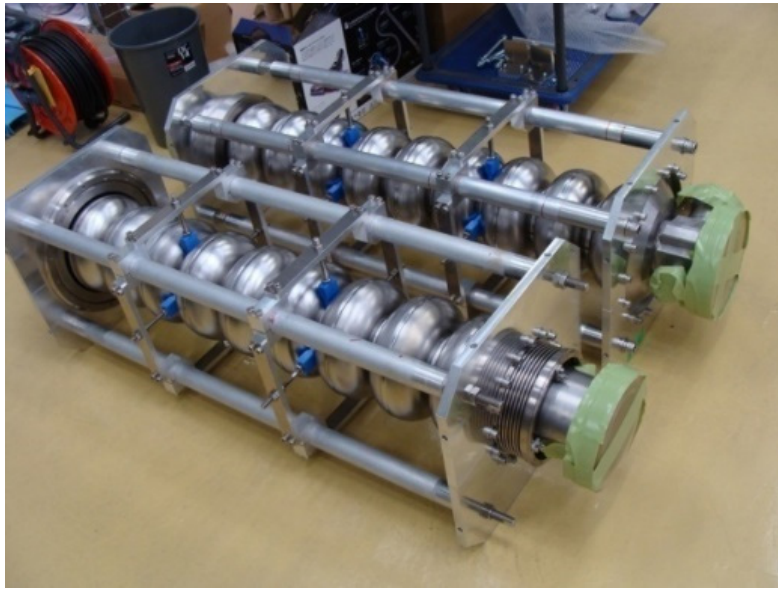
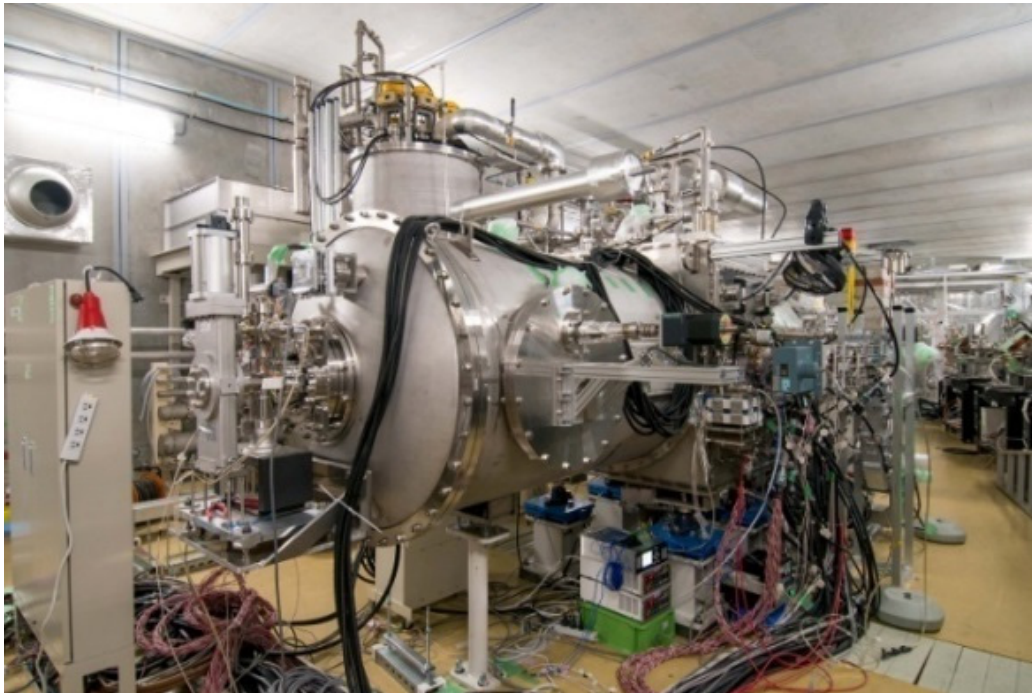


図3 アルバレ型リニアック
(DTL: Drift Tube LINAC)

加速器のイメージ（超伝導線形加速器(LINAC)）



Euro XFEL



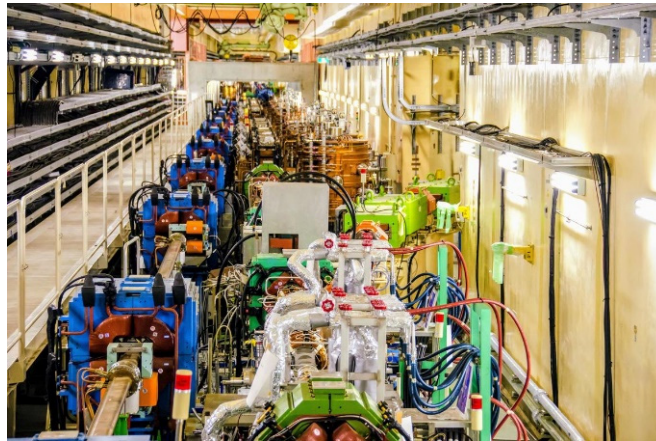
cERL

- LINAC用超伝導空洞は「TESLA型」1.3GHzが主流。
- ILC用に開発、日本ではcERL、STFで利用。海外ではドイツのEuro XFEL、アメリカのLCLS IIで実用化されている。
- クライオスタット内で、減圧して2Kにした液体ヘリウムに浸けて利用する。
- 長パルス運転とRF連続ON運転（CW運転）とがある。

加速器のイメージ（シンクロトロン）



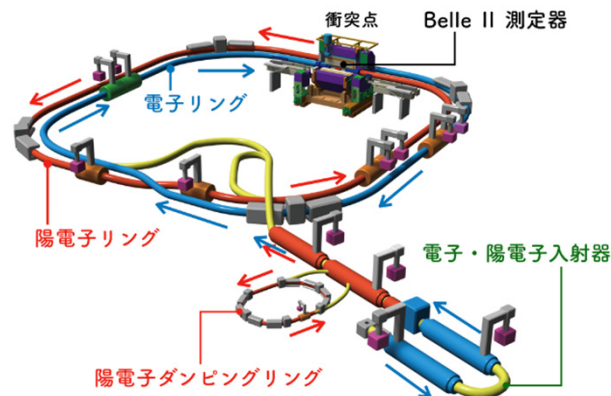
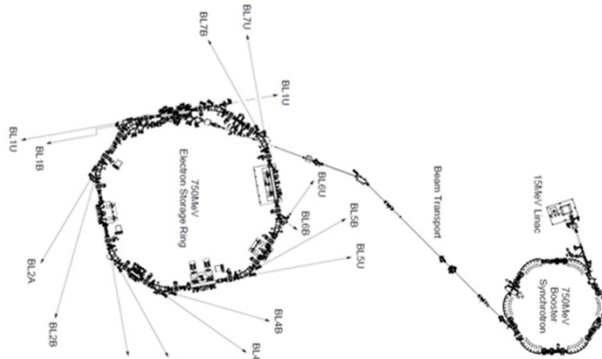
UVSOR（周長50m）
750MeV電子シンクロトロン



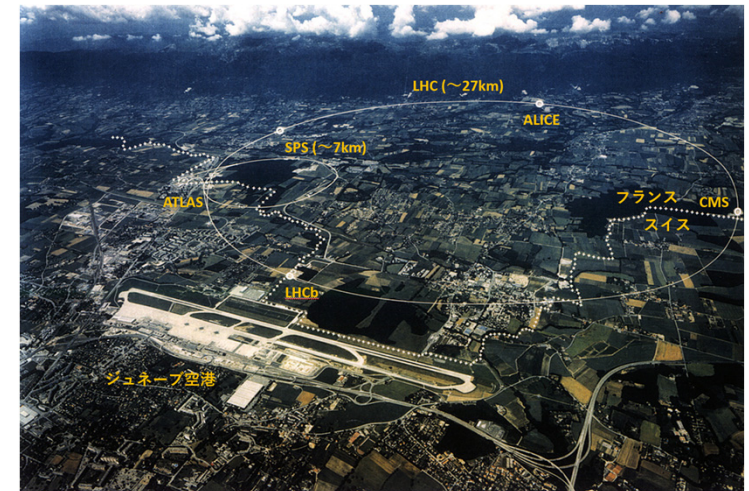
SuperKEKB（周長3km）
7GeV電子 4GeV陽電子



LHC（周長27km）
7TeV陽子 x 2リング



- 電磁石、RF空洞、衝突検出器などが並び、円周状に繋がった真空ダクト内を粒子が周回。
- 軌道は一定。（サイクロトロンは渦巻だった。）
- LHCの場合、超伝導なので液体ヘリウムのクライオスタットの中にダクトが2本。

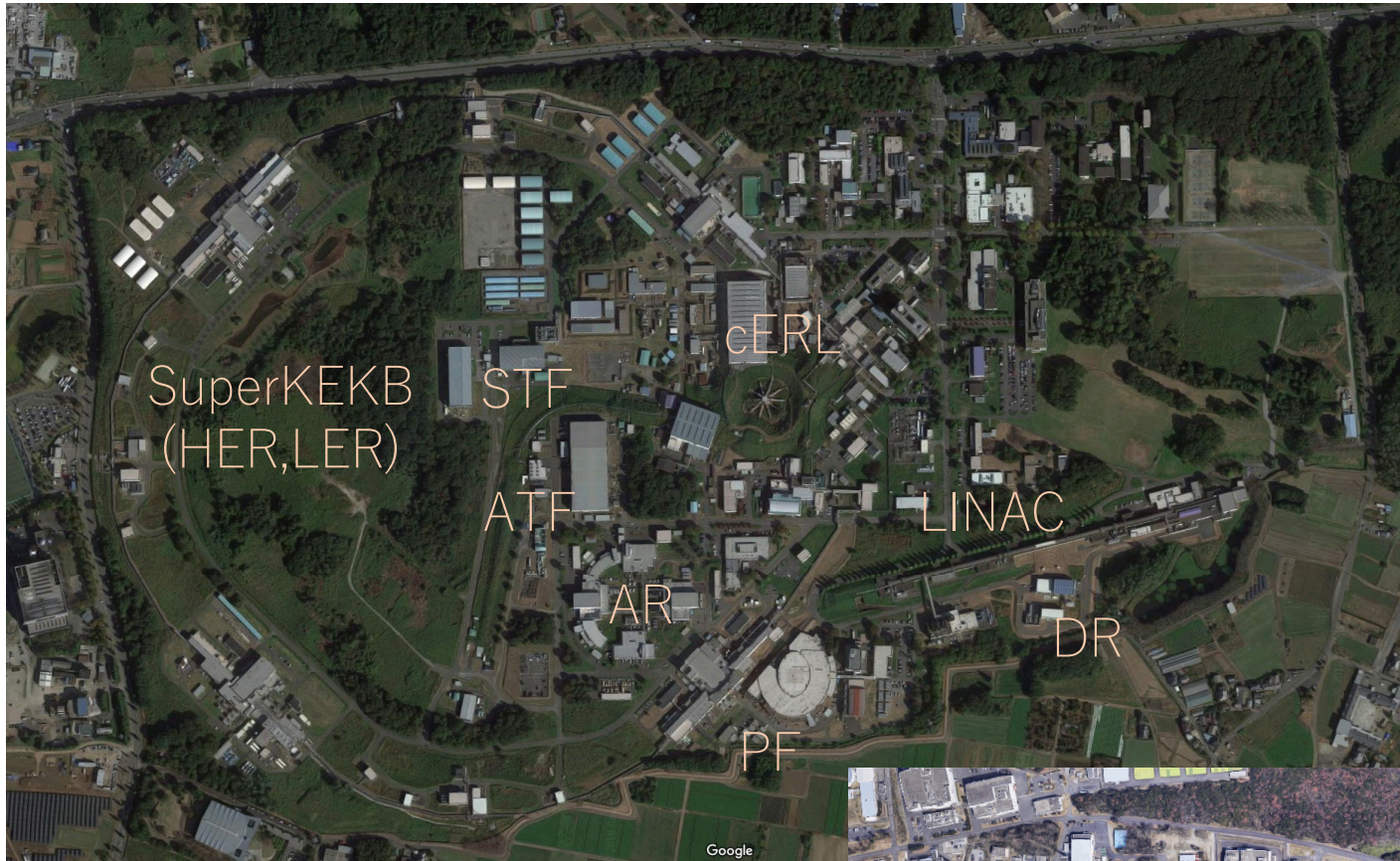


加速器は加速するのか？

- 電子陽電子の円形加速器の場合、粒子のエネルギーを変えない為に加速が必要。
 - 電子シンクロトロンからは放射光が出る。その分、毎周回エネルギーが減るので、加速して継ぎ足す必要がある。
 - 放射光を出す蓄積リングのビームパラメータは、放射光で決まる値になる。リングに蓄積するとパラメータがリセットされて整う。
 - ダンピングリング（SuperKEKB LER用、ILCなど）による高品質化が可能。
 - LINAC、放射光の効果がほぼ無視できる重粒子リングは初期状態の転送となる。

KEKの加速器を利用した 物質生命科学研究

KEKの加速器



つくば

東海(J-PARC)



ニュートリノ

KEKの加速器を利用した物質科学研究

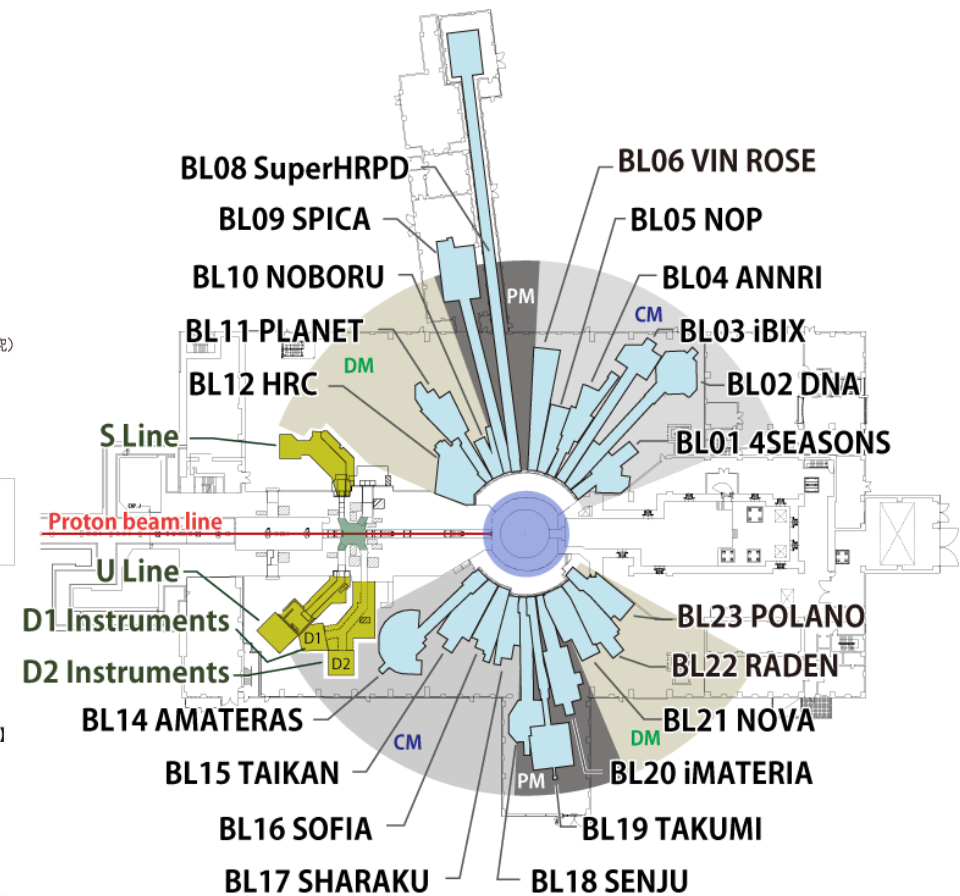
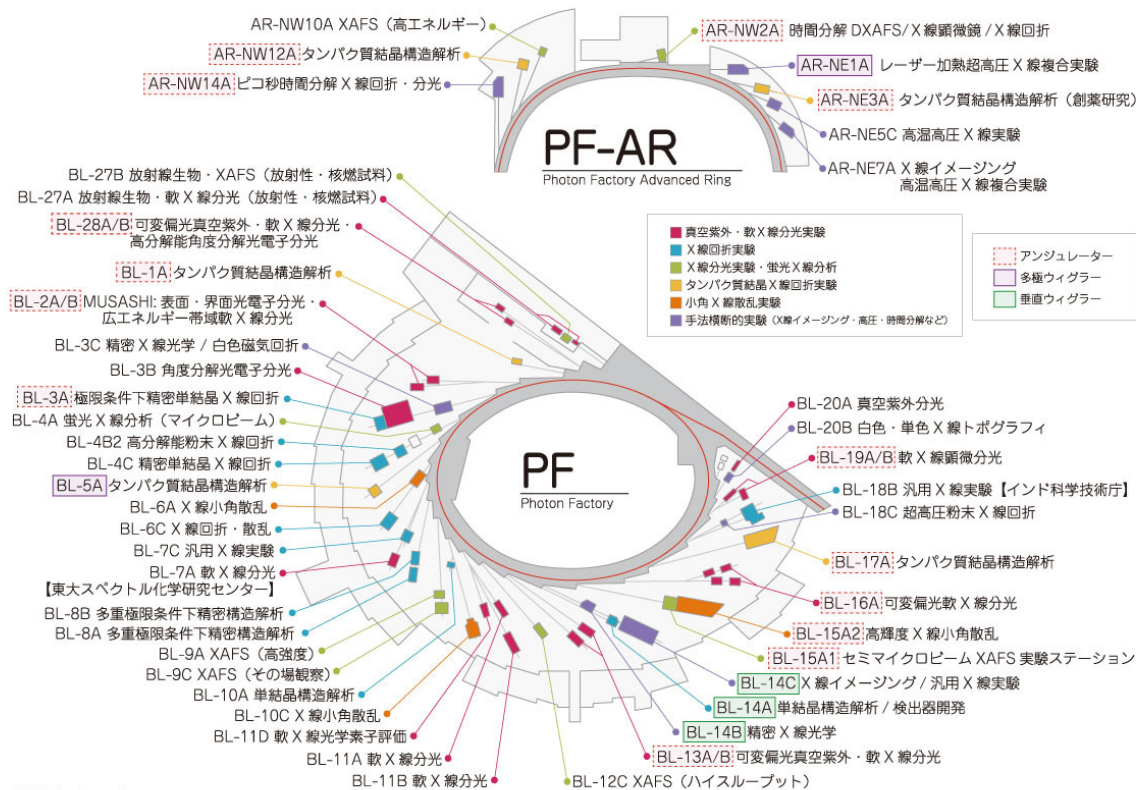
- つくば

- PF、PF-AR：電子蓄積リングから放射光（赤外～X線）を発生、物質科学、生命科学の研究を行う。

- 東海

- RCS+MLF：3GeVの陽子をターゲットに当て、中性子、ミュオンを発生、物質、生命科学の研究を行う。

つくば：放射光



東海：ミュオン、中性子

電子源と電子（線形）加速器 真空管とRF源

加速器前夜～加速器の利用へ

- ガイスター管、放電管（真空ガラス管に電極を付け、低圧力のガスを封入し、高電圧をかけると放電して光る） 1857年
 - 放電管内部では何かが飛んでる？
 - X線の発見 1895年 レントゲン
 - 電子の発見 1897年 リットムソン
 - 電子は加速された電子線（正体不明）が先に存在。
↓
 - 最初の放射光観測 1947年
 - 最初の加速器放射光利用 1963年
 - 放射光のため、円形では高エネルギーに向かず。
- 特徴的な大規模電子加速器（電子陽電子衝突型）
- SLC（1966年 SLACの線形加速器）今はLCLS
 - CERN LEP（1989年、27km、加速器104GeV、今はLHCになっている）
- 放射性元素を使った実験
 - ウラン放射能の発見 1896年 ベクレル
 - ポロニウム、ラジウムの発見 1898年 キュリー夫人
 - アルファ線、ベータ線の発見 1898年 ラザフォード
 - 原子核の発見 1911年 ラザフォード
 - 中性子の発見 1932年 チャドウィック
 - （重）粒子加速器の発明：
サイクロトロン 1932年 ローレンス
 - 宇宙線
 - 陽電子の発見 1932年 アンダーソン
 - ミュー粒子の発見 1937年
アンダーソン、ネッダーマイヤー
 - パイ中間子 1947年 パウエル

重粒子は加速器が後だが、次々に建設、大型化。
加速器の歴史は衝突型加速器の歴史。

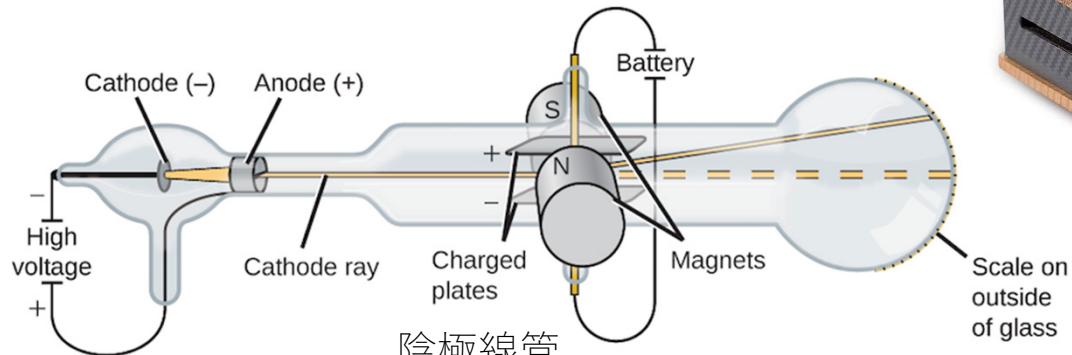
- （大規模）加速器の利用目的
 - X線、紫外線等の「光源」
 - 素粒子原子核の研究「粒子線利用実験」

ガイスラー管、陰極線管、真空管



ヘリウムの発光 ネオンの発光 アルゴンの発光 クリプトンの発光 キセノンの発光

ガイスラー管 (1857年)

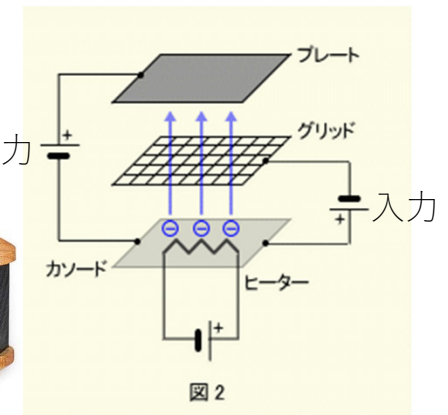


陰極線管

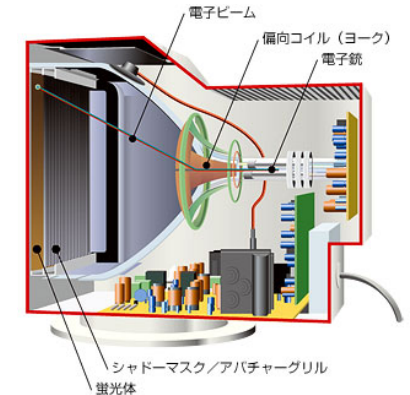
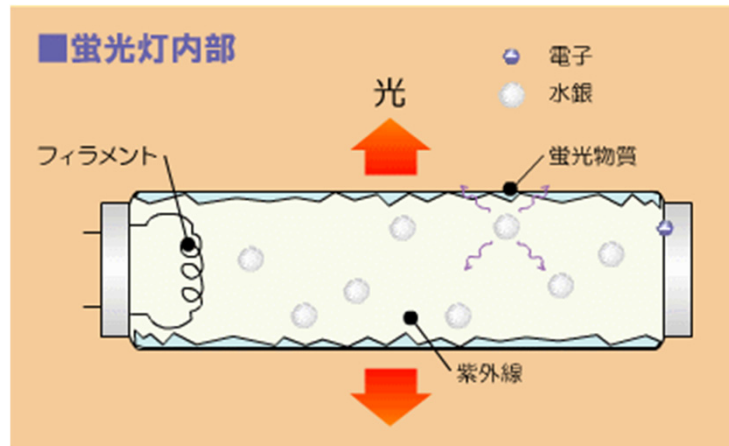
ガスを入れてプラズマ化、陽極線として使う (イオン源)



真空管アンプ



真空管の原理



ブラウン管 (1897年)

ブラウンは無線技術でノーベル賞 (1909年)

引用：ガイスラー管：Wikipedia、陰極線管：Khan academy、蛍光灯：中国電力WEB

真空管アンプ：Amazon、真空管の原理：わたっちわーど (<http://www.watacchi.com/denpa/vol-18.html>)

ブラウン管テレビ (Panasonic生産終了品ページ <https://panasonic.jp/viera/p-db/TH-21FA8.html>)

ブラウン管テレビの仕組み (TDK <https://www.tdk.com/ja/tech-mag/device/001>)

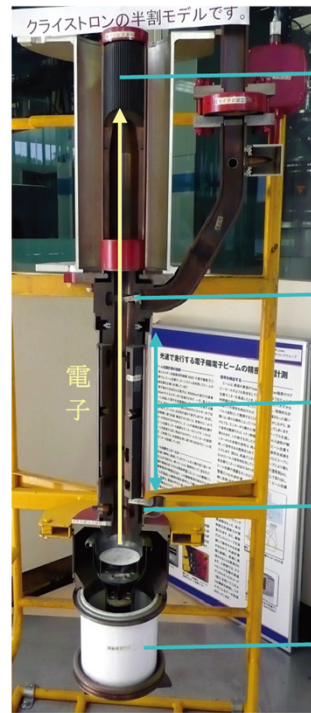
加速器の歴史と発展

- (電子) ガイスター管(1857)、陰極線管、真空管 → 高電圧、静電的。
- (電子) 線形加速器のアイディア(イジング、1924)、
RFを利用した加速のアイディアと実証(ヴィデレー、1928)
- (重粒子) タンデム (ヴァン・デ・グラフ) 式(1931) 、コッククロフト・ウォルトン式 (1932)
DC電圧で加速、ビームは真に連続
- (重粒子) サイクロトロン(1931) → 巨大鉄芯が必要、AC電圧で加速、軌道は渦巻き、
磁場一定、ビームは連続パルス。(低エネルギー領域の大出力用途では今でも多用。)
- (電子) ベータトロン(1935, 1941) → 誘導電場で加速、電子(ベータ線)は軽いので集束力が必要。
鉄芯を斜めに開く(弱集束)。
 - 設計値からずれた粒子を設計値に戻す力：集束力が必要。
 - 放射光研究の始まり、ビームダイナミクスの始まり。
- (電子) ベータトロンを改造して電子シンクロトロンを開発。所期の目的は巨大X線管としてのX線源。
- サイクロトロン・ベータトロンの鉄芯の巨大化が高エネルギー化を阻む → 磁石を並べる形式に
- (重粒子) 弱集束シンクロトロン(1945) → RFの利用、共振電磁場で加速、軌道は一定、
加速は磁場を変える、弱集束の適用、加速してから1周分のビームを使う。
 - RFによって位相安定性(1945、エネルギー、タイミングの安定性)が得られた。
- 強集束の原理の発見(1950)：鉄芯の開きを大きくして、逆開きと交互に並べる。
- (重粒子) 強集束シンクロトロン(1960)：なんと今でも現役！
- (電子) 最初の放射光利用(1963)
- (電子) 大規模線形加速器(1967)
- 機能分離型電磁石の利用：曲げる、と、集束、を分ける。4極電磁石の導入。
- 集束力のエネルギー収差(色収差)の補正：6極電磁石の導入。

静電加速器の難点から、AC電圧、RF電磁場の利用へ

- 電位差なので一方通行。
- 放電限界があり、SF₆（絶縁に優れたガス）封入しても5～10MVが放電限界。
- もっと高エネルギーのビームを得たい。
- 軌道に沿って電位が変わっていくのは使いにくい。（線形加速器）
- 繰り返し同じ場所を通して加速したい。（円形加速器）
- 時間的に変動する電磁場の利用
 - アイディアと実証（1928年）：ロルフ・ヴィデレー
 - 「AC電圧」的な加速器の誕生
 - 電磁波技術の発展と拡大
 - 第2次大戦のレーダー、無線技術でRF源、RF理論が確立
 - 加速器でもラジオ波領域の共振加速空洞を利用するようになる。
- RF利用の利点
 - 軌道に沿った電位差が要らないので、全体を電氣的に絶縁、浮かせる必要がない。
 - 静電より高い電圧が得られ、繰り返し加速も可能。
 - 時間的に変動しているので、時間によって加速電圧が変わる。例えば電圧上昇タイミングで加速する場合、早く来ると低め電圧、遅く来ると高め電圧になる。高速粒子を低め、低速粒子を高め電圧で加速すれば、エネルギーが揃ってくる。
 - **位相安定性**が得られ、エネルギー、時間的に粒子が自然にまとまり、バンチ（かたまり）となって出力される。RFで加速するとエネルギーやタイミングが自然に揃ってくる。
 - 「加速の向きの電場のタイミングで通過した粒子が加速される」というよりも「タイミングが外れた粒子も、加減速を経て（位相スリップ）自然によいタイミングに乗せられる」という感じのイメージになる。最初がひどいと最終的なエネルギーのばらつきは大きくなるが、ともあれ大半の粒子は加速されて出射される。こういう、かき集めてまとめる力が必要で、それを復元力、安定性と呼ぶ。RFと速度差、軌道長差の相関で得られる、時間・エネルギーの安定性を位相安定性と呼ぶ。

電子RF源：クライストロン（速度変調管）



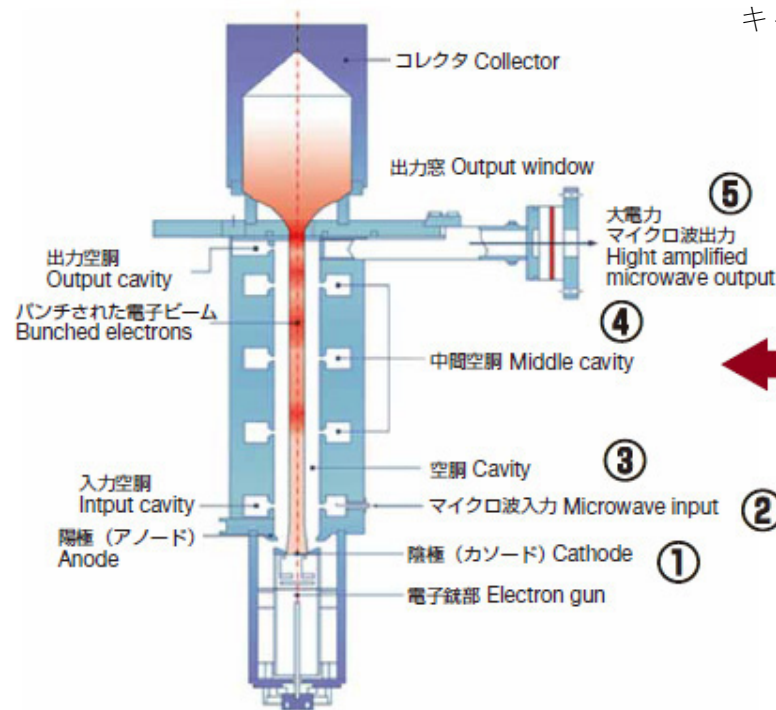
コレクタ

出力空洞

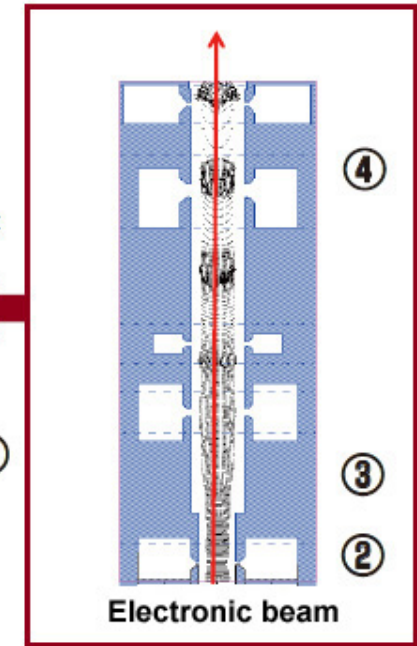
空洞、自由空間

入力空洞

電子源



キャノン電子管デバイスWEB



RF源：レーダー、テレビ、ラジオ放送などで利用（半導体アンプに置き換わりつつある。）

1921年 アルバート・ハル（GE社）によるマグネトロンの発明（→食品加熱効果（1946年）→現在でも電子レンジ、レーダーで幅広く使われている。）

1935年 アグネッサ & オスカー・ハイル（ハイル夫妻、ドイツ）が速度変調の概念を考案。

1935年 ウィリアム・ハンセン（スタンフォード大）がRF共振空洞を発明 rumbatrons（論文1938年）

続けてRF工学の基礎を確立。ディスク負荷型進行波LINAC、SLAC SLCへとつながる。

1937年 ラッセル & シグルド・バリアン（バリアン兄弟、同）がハンセンと共に2空洞組み合わせでクライストロンを発明。（レーダー用の高出力化研究が進み、第二次大戦を迎える。）

電子線形加速器

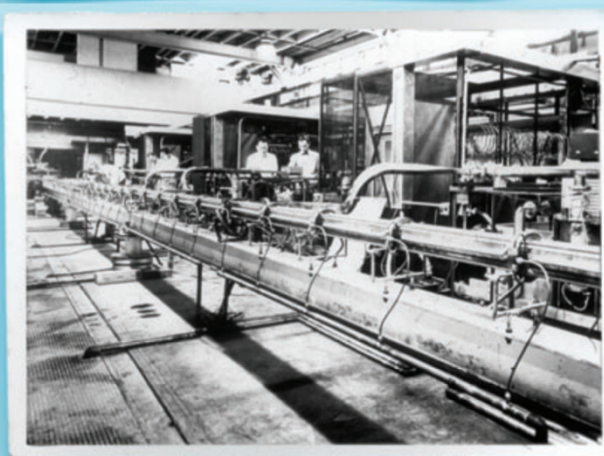
1947年 SLAC Mark I (RF源はマグネトロン) 6MeV → Mark II (RF源はクライストロン)
→ Mark III (1950) 75MeV → Mark IV (1954) → SLC (1966) 3.2km 50GeV

Mark I accelerator section:
Professor William W. Hansen (right) of the Stanford Physics Department and three of his graduate students: (left to right) Stanley Kasei, Clarence Carlson, and William Kennedy. They are holding one of the first sections of the first Stanford traveling wave electron linear accelerator. Eventually 3.6 m long, the Stanford Mark I could accelerate electrons to an energy of 6 MeV. The Mark I was followed in 1949 by the Mark II, which was a prototype of one of the sections of a planned, much larger machine, the Mark III. Built under the direction of R. F. Post, the Mark II was first successfully operated in October 1949. Source: SLAC Archives, ARC127, Slide 2; Stanford photo

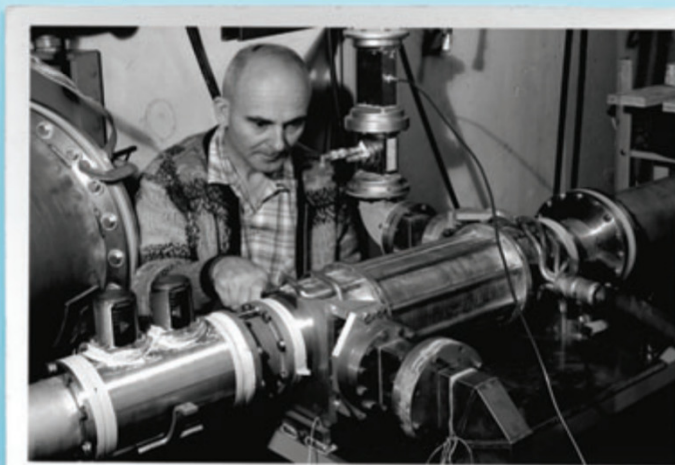


Mark II accelerator control room:
Karl Brown at the klystron controls for the Mark II accelerator at Stanford University. Source: SLAC Archives, ARC490; Vera Lüth photo

“Early linacs”, Symmetry Magazine, 2005/8/1



Mark III accelerator: First sections of the Mark III accelerator at Stanford, as seen looking toward the injector. After construction, the accelerator and I-beams were surrounded by concrete shielding. Source: SLAC Archives, Slide 5; Stanford photo



Close-up look at the Mark IV accelerator: Source: SLAC Archives, M408

1953年 世界最初のLINAC治療：ハマスミス病院（イギリス）、8MeV電子LINAC
(C.W.Miller, “An 8-MeV linear accelerator for X-ray therapy”, Proc. of IEE, 101, pp 207–221 (1954))

放射光と電子（円形）加速器

放射に関する計算

Tome XVI. Samedi 2 Juillet 1898 5^e Année. — N° 27.

L'Éclairage Électrique

REVUE HEBDOMADAIRE D'ÉLECTRICITÉ

DIRECTION SCIENTIFIQUE

A. CORNU, Professeur à l'École Polytechnique, Membre de l'Institut. — A. D'ARSONVAL, Professeur au Collège de France, Membre de l'Institut. — G. LIPPMANN, Professeur à la Sorbonne, Membre de l'Institut. — D. MONNIER, Professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures. — H. POINCARÉ, Professeur à la Sorbonne, Membre de l'Institut. — A. POTIER, Professeur à l'École des Mines, Membre de l'Institut. — J. BLONDIN, Professeur agrégé de l'Université.

CHAMP ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE

PRODUIT PAR UNE CHARGE ÉLECTRIQUE CONCENTRÉE EN UN POINT ET ANIMÉE D'UN MOUVEMENT QUELCONQUE

Admettons qu'une masse électrique en mouvement de densité ρ et de vitesse u en chaque point produit le même champ qu'un courant de conduction d'intensité $u\rho$. En conservant les notations d'un précédent article⁽¹⁾ nous obtiendrons pour déterminer le champ, les équations

$$\frac{1}{4\pi} \left(\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{d^2y}{dt^2} \right) = \rho u_x + \frac{d\rho}{dt} \quad (1)$$

$$V^2 \left(\frac{dh}{dt} - \frac{dg}{dt} \right) = -\frac{1}{4\pi} \frac{d\rho}{dt} \quad (2)$$

avec les analogues déduites par permutation tournante et en outre les suivantes

$$\rho = \left(\frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} \right) \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} + \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{d^2y}{dt^2} = 0. \quad (4)$$

De ce système d'équations on déduit facilement les relations

$$\left(V^2 \Delta - \frac{d^2}{dt^2} \right) f = V^2 \frac{d\rho}{dx} + \frac{d}{dt} \left(\rho u_x \right) \quad (5)$$

$$\left(V^2 \Delta - \frac{d^2}{dt^2} \right) z = 4\pi V^2 \left[\frac{d}{dt} (\rho u_z) - \frac{d}{dy} (\rho u_y) \right] \quad (6)$$

⁽¹⁾ La théorie de Lorentz, *L'Éclairage Électrique*, t. XIV, p. 417. α, β, γ , sont les composantes de la force magnétique et f, g, h , celles du déplacement dans l'éther.

Soient maintenant quatre fonctions ψ, F, G, H définies par les conditions

$$\left(V^2 \Delta - \frac{d^2}{dt^2} \right) \psi = -4\pi V^2 \rho. \quad (7)$$

$$\left(V^2 \Delta - \frac{d^2}{dt^2} \right) F = -4\pi V^2 \rho u_x \quad (8)$$

$$\left(V^2 \Delta - \frac{d^2}{dt^2} \right) G = -4\pi V^2 \rho u_y$$

$$\left(V^2 \Delta - \frac{d^2}{dt^2} \right) H = -4\pi V^2 \rho u_z$$

On satisfera aux conditions (5) et (6) en prenant

$$4\pi f = -\frac{d^2\psi}{dx^2} - \frac{1}{V^2} \frac{dF}{dt} \quad (9)$$

$$z = \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dt}. \quad (10)$$

Quant aux équations (1) à (4), pour qu'elles soient satisfaites, il faudra que, en plus de (7) et (8), on ait la condition

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{dF}{dx} + \frac{dG}{dy} + \frac{dH}{dz} = 0. \quad (11)$$

Occupons-nous d'abord de l'équation (7). On sait que la solution la plus générale est la suivante :

$$\psi = \int \frac{\rho \left[x', y', z', t - \frac{r}{V} \right]}{r} d\omega \quad (12)$$

A. Liénard, "Champ électrique et magnétique produit par une charge électrique concentrée en un point et animée d'un mouvement quelconque", *L'éclairage électrique*, Vol. 16, No. 27-29, pp. 5-14, 53-59, 106-112, (1898).

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 (→ 遅延ポテンシャル)

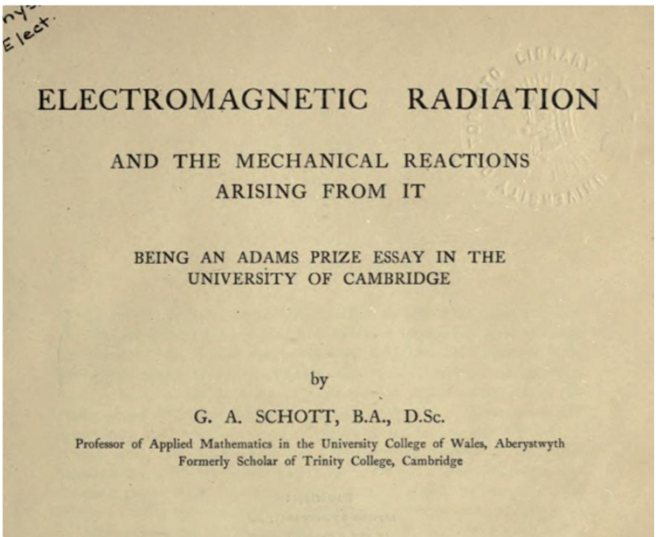
THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[SIXTH SERIES.]

FEBRUARY 1907.

XI. On the Electron Theory of Matter and on Radiation.
By G. A. SCHOTT, B.A., B.Sc., University College of Wales, Aberystwyth*.

§ 1. ONE of the most important problems of the Electron Theory of Matter is to account for the spectra emitted by the several elements; the solution of this problem, rather than of any other, seems likely to lead to the construction of a working model of the atom. By Electron Theory of Matter I mean any theory which assumes matter to consist of electrical charges, acting upon each other with electromagnetic forces only. For stability it is necessary to have both positive and negative charges, and one or both must be in more or less rapid motion. Since the atom is permanent, or very nearly so, the orbits of all the charges must be closed and of atomic dimensions; since it is electrically neutral, except when ionized, positive and negative charges must be present in equal amount. There is no need at present to distinguish between the two possible alternatives: (1) the positive electricity constitutes a sphere of



G. A. Schott,
Philos. Mag. 13, 189 (1907),
"Electromagnetic Radiation", Cambridge
University, Cambridge, (1912)

LBNL-39088
CBP Note-179
UC-414

On Radiation by Electrons in a Betatron

J. Schwinger

1945

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 75, NUMBER 12

JUNE 15, 1949

On the Classical Radiation of Accelerated Electrons

JULIAN SCHWINGER
Harvard University, Cambridge, Massachusetts
(Received March 8, 1949)

This paper is concerned with the properties of the radiation from a high energy accelerated electron, as recently observed in the General Electric synchrotron. An elementary derivation of the total rate of radiation is first presented, based on Larmor's formula for a slowly moving electron, and arguments of relativistic invariance. We then construct an expression for the instantaneous power radiated by an electron moving

in a plane, and show that the radiation is strongly preferred in the direction of motion at high energies. The spectral distribution of the radiation depends upon the detailed motion over a time interval large compared to the period of the radiation. However, the narrow cone of radiation generated by an energetic electron indicates that only a small part of the trajectory is effective in producing radiation observed in a given direction, which also implies

J. Schwinger,
"On Radiation by Electron in a Betatron", (1945)
"On the Classical Radiation of Accelerated Electrons",
Phys. Rev. 75, p.1912 (1949)

ベータトロンとビームダイナミクス

JULY 1, 1941

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 60

The Acceleration of Electrons by Magnetic Induction

D. W. KERST*

University of Illinois, Urbana, Illinois

(Received April 18, 1941)

and the roughly circular central pole pieces were

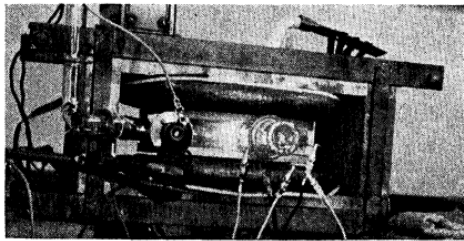
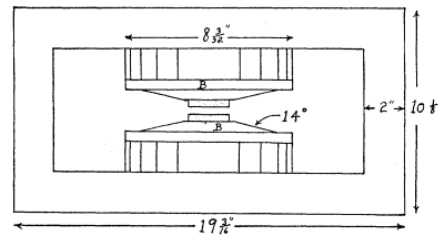


FIG. 1. The induction accelerator. The glass doughnut is between pole faces which are held apart by eccentric wedges.

formed by stacking with different widths of laminations as shown in Fig. 2. Each pole piece was capped by a disk of radially arranged laminations so that perfect circular symmetry was achieved at the pole surfaces (B , Fig. 2). The whole pole face was held together by a thick Transite or asbestos board ring about its perimeter, with cement of water glass and flint dust filling the cracks between the laminations and

were made into a cable approximately 10 yards long which was twisted about ten times and which had its inside wires interchanged with its outside wires several times. This was formed into a 10-turn coil with about $\frac{1}{32}$ inch of insulation between turns. Two such 10-turn coils were made and fitted with large lugs of 1-inch copper tubing. The coils were wrapped with cotton tape, dipped in Bakelite varnish and baked. Figure 3 shows the circuit with the coils connected to a total of eighty 5-microfarad Pyranol condensers which were rated at 660 volts a.c. Energy was supplied to this resonating circuit by a 2-turn primary of stranded enameled wire around the pole pieces. The r.m.s. electromotive force in this primary



JULY 1, 1941

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 60

Electronic Orbits in the Induction Accelerator

D. W. KERST* AND R. SERBER

University of Illinois, Urbana, Illinois

(Received April 18, 1941)

The first section gives a general account of the principles of operation of the electron induction accelerator. The second section gives the more detailed analysis of the orbits of the electrons which was undertaken to serve as a guide in the design of the accelerator.

I. INTRODUCTION

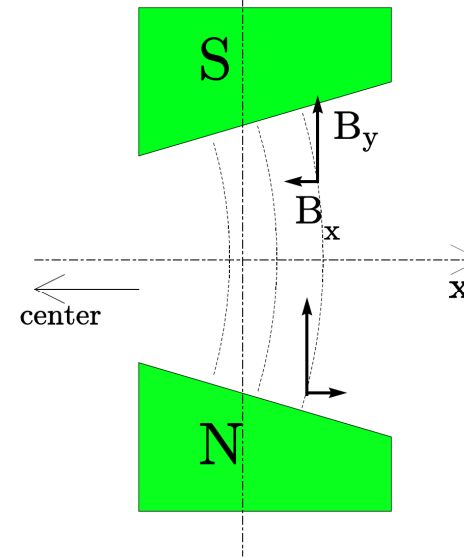
THE construction and operation of an induction accelerator for electrons has been discussed in the preceding paper.¹ The idea of using the principle of electromagnetic induction

carry out a more careful analysis of the orbits of electrons in changing magnetic fields for the double purpose of determining whether such a device was practicable, and to serve as a guide in its design.

The basic idea of the accelerator is a simple

線形集束力

放物線形状の雨樋にビー玉を転がすイメージ。



ベータトロン

- ベータ線を加速するのでベータトロン。
- 誘導電場で加速する。電圧でなく、電磁場利用の最初期の形。
- 電子は軽いので、すぐに飛散して損失する。
- 誤差やずれを元に戻す力、復元力が重要となる。
- 復元力による安定性の理論が加速器の粒子の力学となり、そのベータトロン理論は現代の加速器でも設計の基礎となっている。（磁場のある相対論的ハミルトニアンから軌道近軸で線形近似で運動方程式を求め、解く。）
- 最初の「放射光の研究」もここから。

ベータトロン放射と放射ロス

- ベータトロン放射からシンクロトロン放射へ
- 低エネルギー領域では放射の影響は無視できるレベルなので観測が難しい。
- ベータトロン建設の動機は、大出力X線管（電子をターゲットにぶつけてX線発生）としての動作。



Fig. 3. Donald Kerst and the 20-MeV betatron.

20MeV ベータトロン (GE、イリノイ)
D.W.Kerst,
"A 20 - Million Electron - Volt Betatron or Induction
Accelerator", Rev. Sci. Instrum. 13, 387–394 (1942)

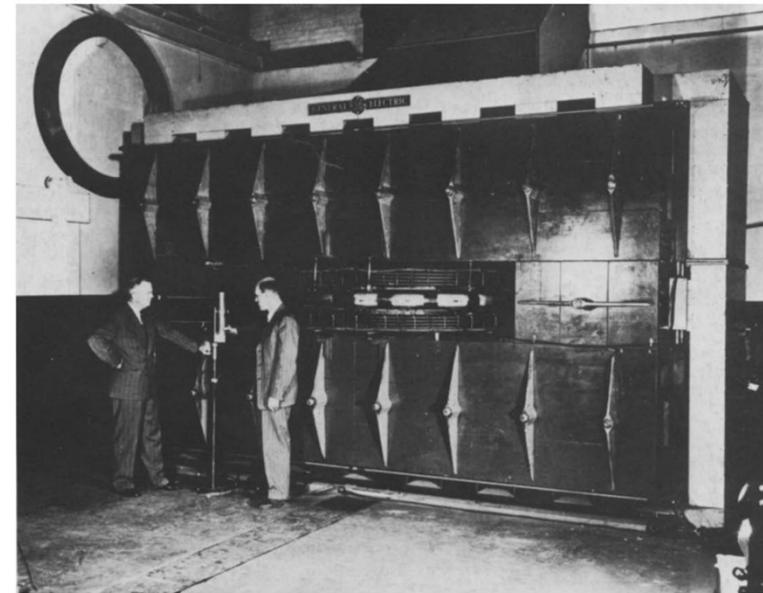
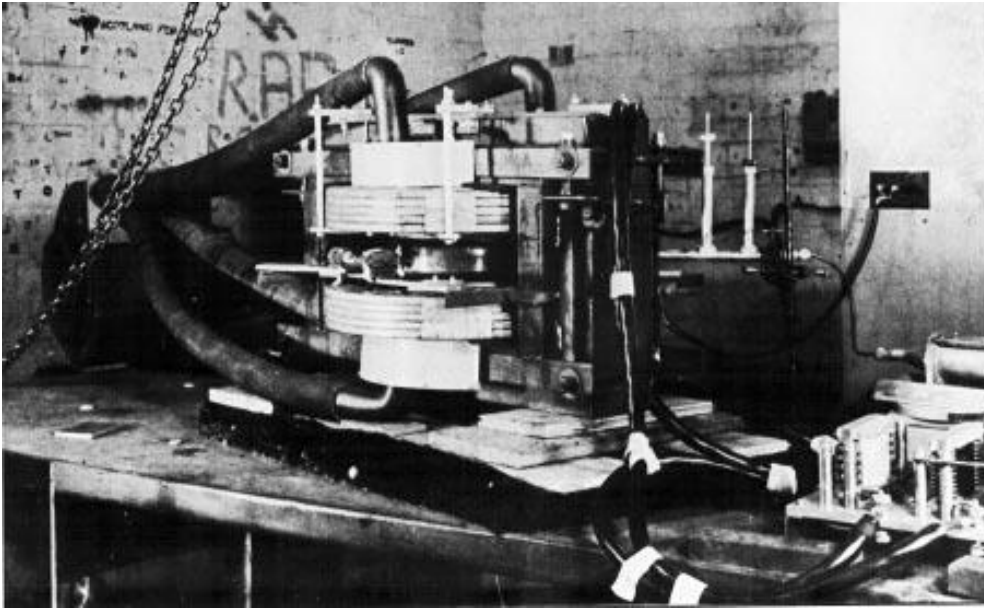


Fig. 4. The 100-MeV betatron with E.E. Charlton and W.F. Westendorp.

100 MeV GE ベータトロン
W. F. Westendorp and E. E. Charlton,
"A 100 - Million Volt Induction Electron Accelerator",
J. Appl. Phys. 16, 581–593 (1945)

- 放射ロスがエネルギーの4乗に比例するという計算：I. Pomeranchuk, J. Phys. USSR, 2, 65 (1940)
- 放射ロスによるベータトロンの（大きさ、エネルギーの）限界の指摘
D. Iwanenko and I. Pomeranchuk, "On the Maximal Energy Attainable in a Betatron", Phys. Rev. 65, 343 (1944)
- 軌道偏差を通じて4乗に比例する観測結果（間接的な放射光観測、100MeV GE ベータトロン）
J.P. Blewett, "Radiation Losses in the Induction Electron Accelerator", Phys. Rev. 69, 87 (1946)

電子シンクロトロンと放射光の観測



世界最初の電子シンクロトロン
(イギリス、ウールウィッチ王立兵器廠)

F.K.Goward and D.E.Barnes,
“Experimental 8 MeV Synchrotron for Electron Acceleration”,
Nature, 158, 413 (1946)
(Richard Walker, MOAL1, IBIC2013)

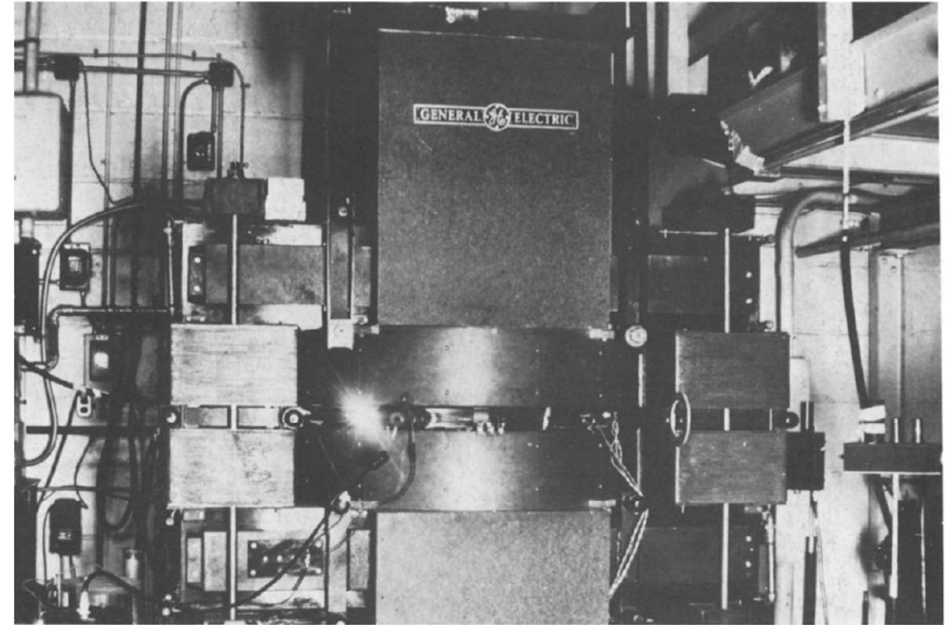


Fig. 5. The 70-MeV synchrotron emitting synchrotron radiation.

世界で2番目（2ヶ月遅れとのこと）に稼働したGE
70MeV電子シンクロトロンで放射光を世界で初観測
F. R. Elder, A. M. Gurewitsch, R. V. Langmuir, and H. C. Pollock,
“Radiation from Electrons in a Synchrotron”,
Phys. Rev. 71, 829, 1947

DC電流は何も放射しない……ことはなかった！

VSX領域の放射光観測

- 軟X線領域までのスペクトル観測：Cornell 300MeV シンクロトロン：
D.R.Corson et.al., "The Cornell 300-MeV Synchrotron" (1953)
D. H. Tombouliau and P. L. Hartman, "Spectral and Angular Distribution of Ultraviolet Radiation from the 300-Mev Cornell Synchrotron", Phys. Rev. 102, 1423 (1956)

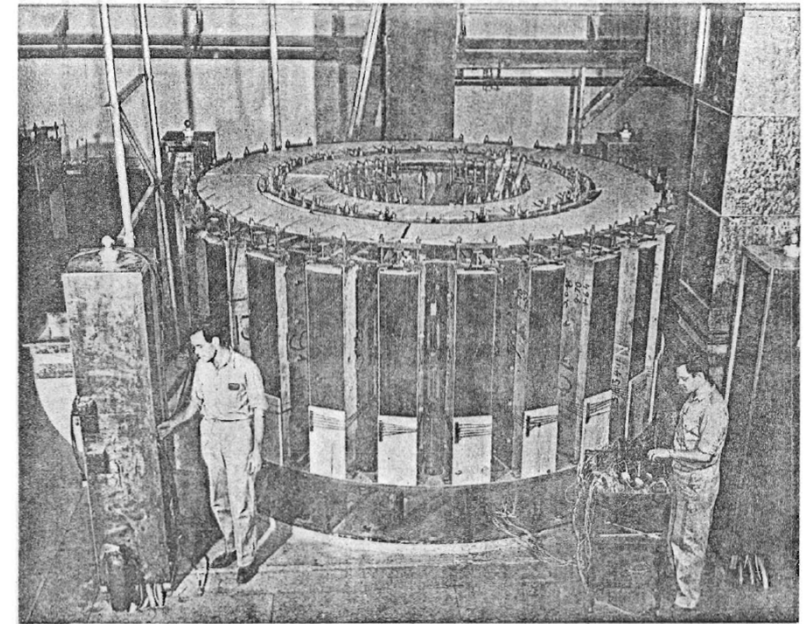
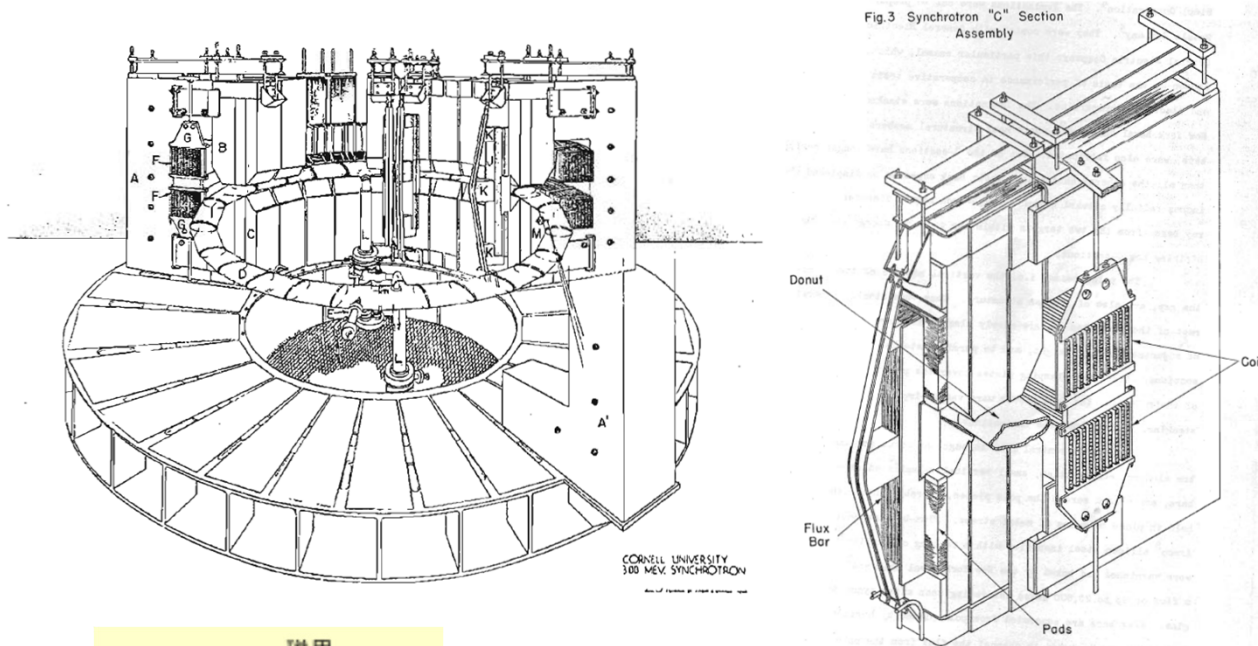
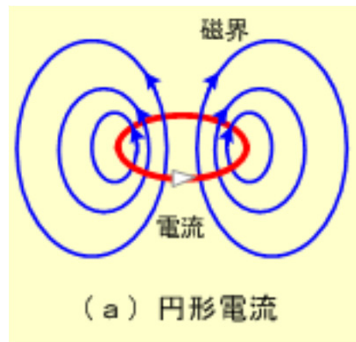
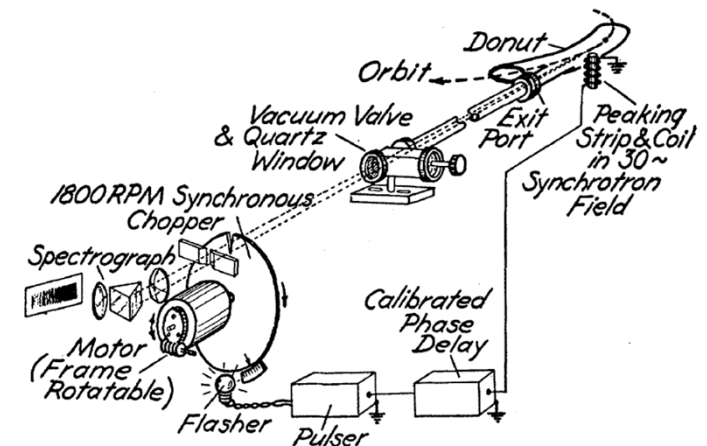
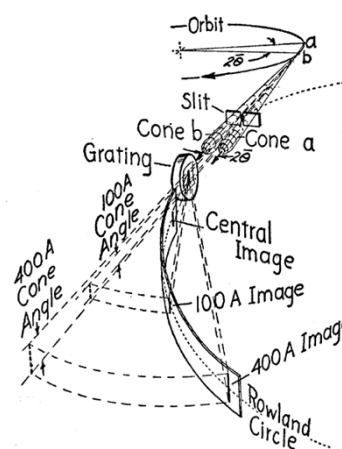
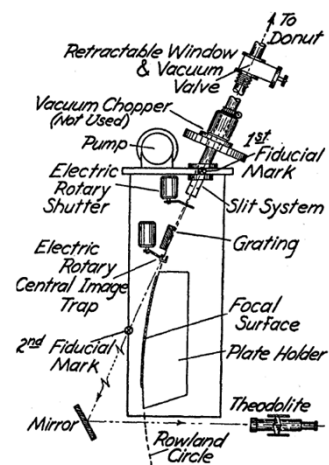


Fig.2 Synchrotron During Assembly



(日本電気技術者協会WEB)



シンクロトロン放射光の利用

- 世界最初の放射光利用実験（米国NBS SURF (Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility)）：
K.Codling and R.P.Madden, "Characteristics of the "Synchrotron Light" from the NBS 180-MeV Machine", J. Appl. Phys. 36, 380–387 (1965)
R. P. Madden and K. Codling, "New Autoionizing Atomic Energy Levels in He, Ne, and Ar", Phys. Rev. Lett. 10, 516 (1963)
K. Codling et.al., "Pioneering Use of Synchrotron Radiation Research as a Spectroscopic and Metrological Tool at NBS", SRN, 28, 13, (2015)
<https://www.nist.gov/history/radiation-physics-building/facilities/synchrotron-ultraviolet-radiation-facility>

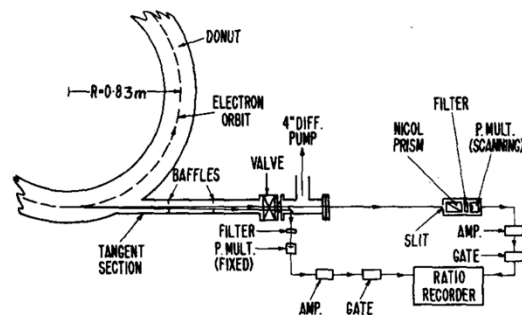
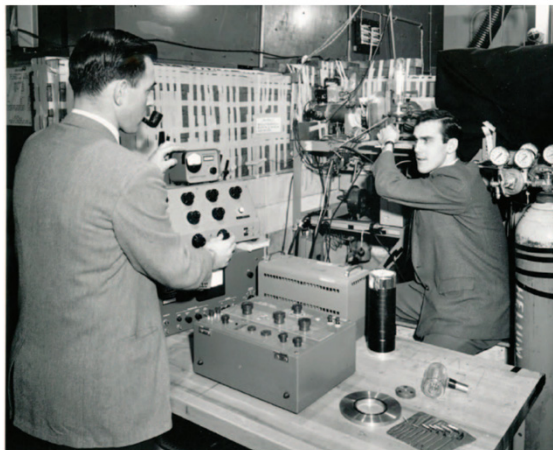
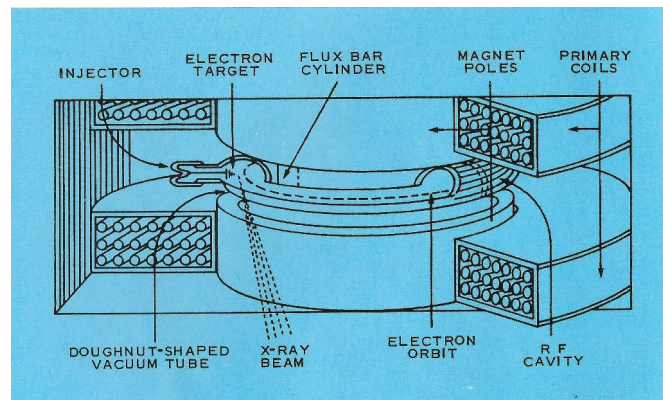
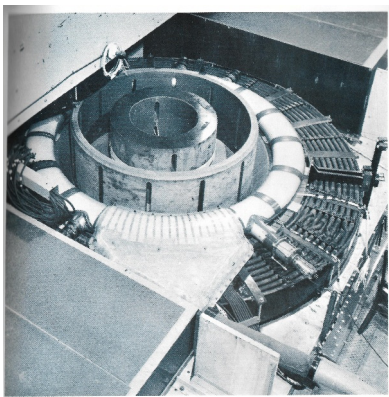


FIG. 7. Schematic diagram showing the experimental arrangement utilized for the study of the characteristics of the radiation emitted by the NBS 180-MeV electron synchrotron.

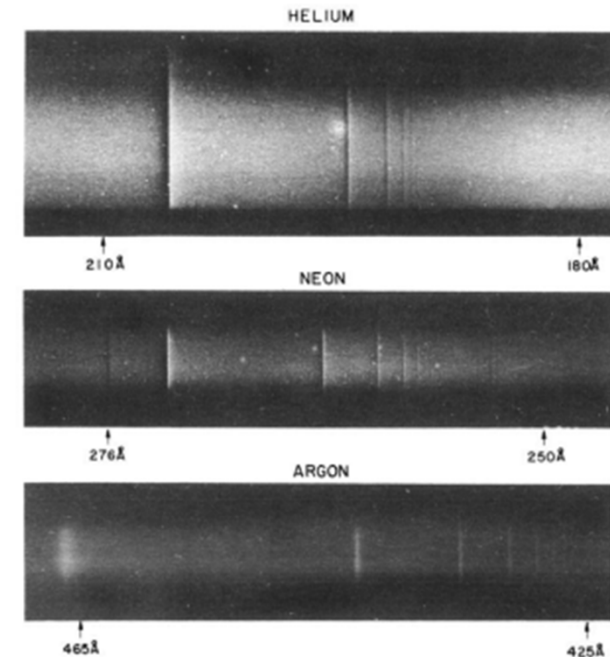
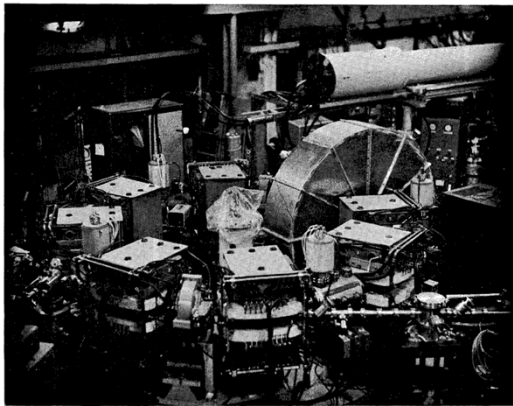


FIG. 1. Extreme ultraviolet spectra showing discrete anomalies in the photoionization continuum absorption of He, Ne, and Ar (increased blackness indicates increased absorption). The anomalies in the He absorption spectrum (top) are due to the mixing of two-electron excitation states with the continuum. In Ar (bottom) this mixing results in discrete windows in the absorption continuum.

専用光源シンクロトロン建設

- 世界最初に放射光専用運転になったリング：TANTALUS
E.M.Rowe and F.E.Mills, "TANTALUS I: A Dedicated Storage Ring Synchrotron Radiation Source", Particle Accelerators, 4, 211-227 (1973)
- 世界最初に放射光専用として設計されて運転開始したリング：INS(ISSP)-SOR、東大核研、田無
- 世界最初の、GeVクラスの放射光専用リング：SRS、イギリスダラスベリー研究所



TANTALUS

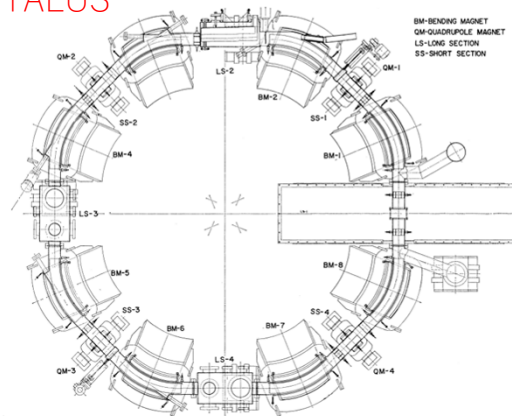
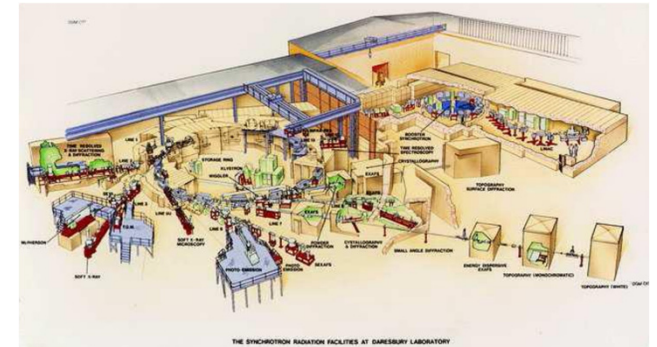


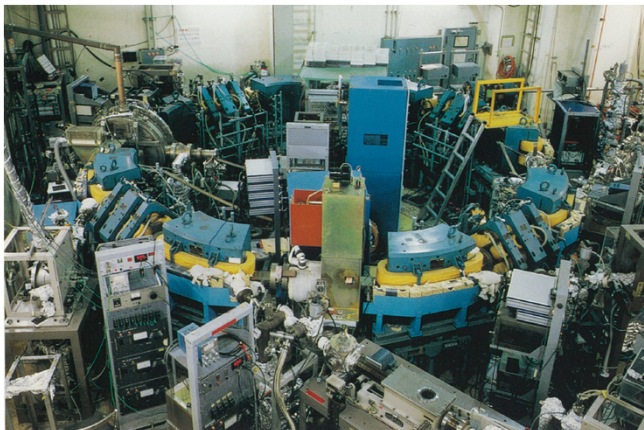
FIG. 1. Storage ring. Photon beam lines and separation chambers appear at lower right and left. Cylindrical object at top is the injector spark gap energy storage line enclosure.

FIG. 2. Storage ring plan view. Injection straight section is at top, radiofrequency accelerating cavity is at right.

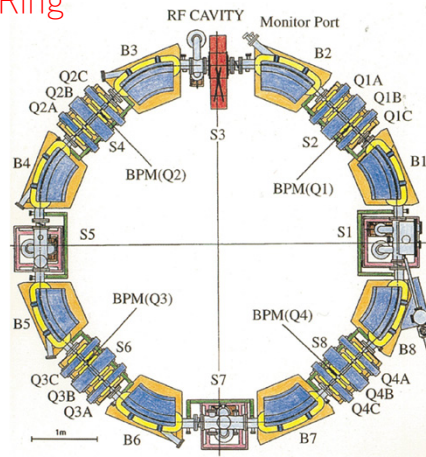
SRS



THE SYNCHROTRON RADIATION FACILITIES AT DARESBUURY LABORATORY



SOR Ring

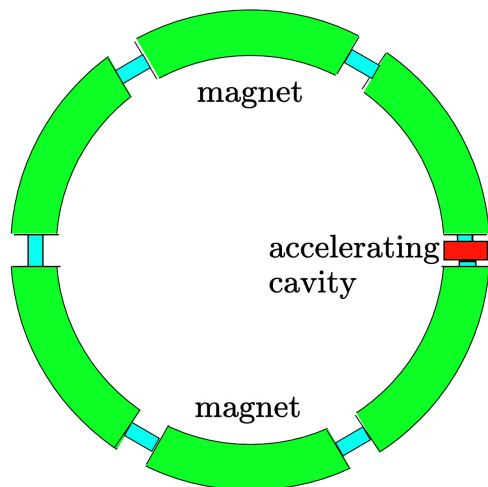


SOR Ring 20周年絵はがき

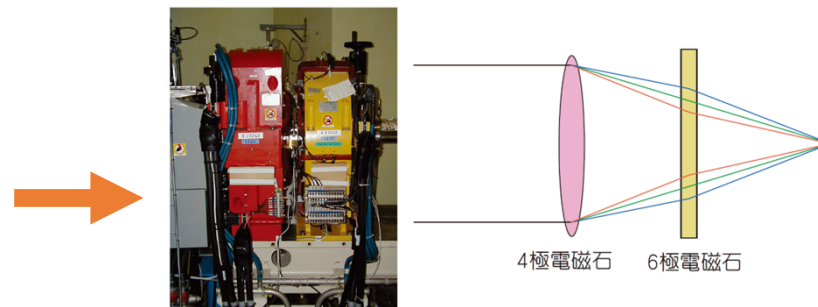
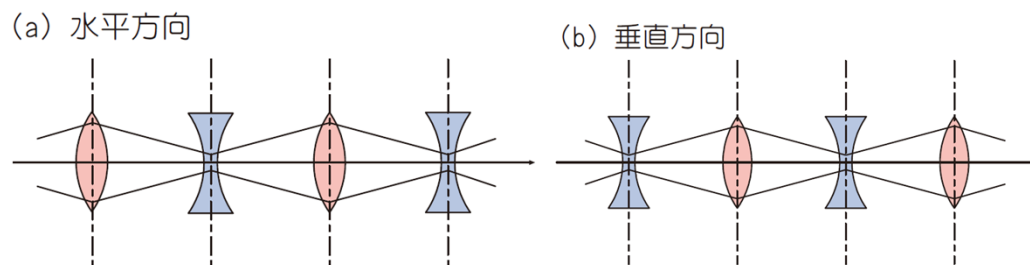
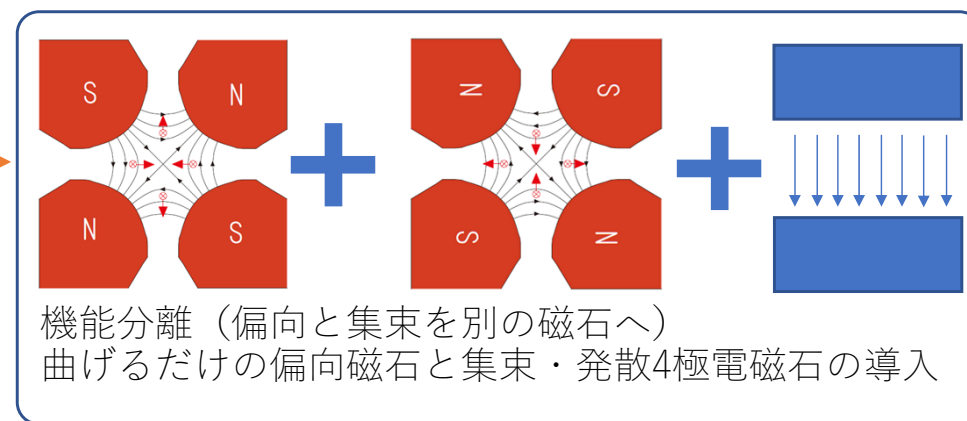
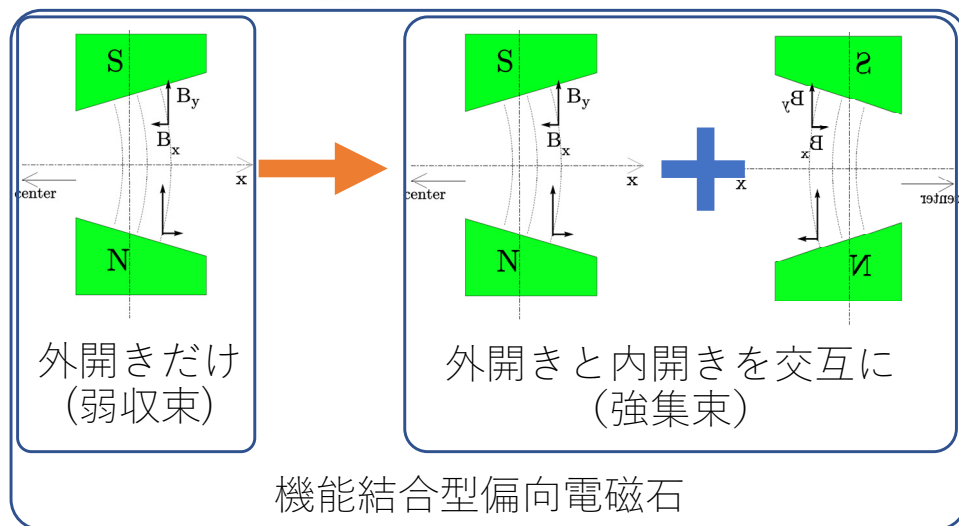
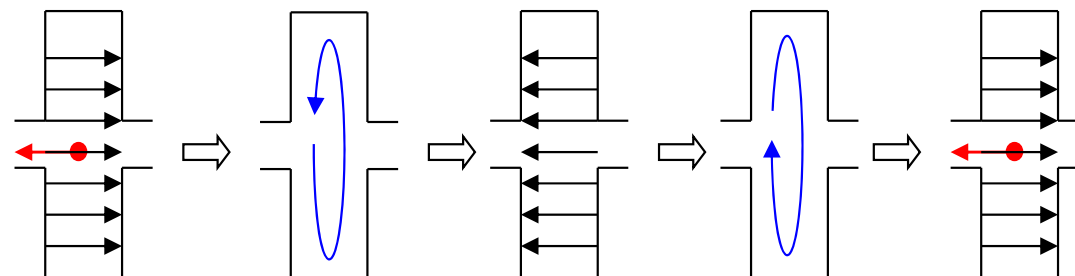


Richard Walker. MOAL1, IBIC2013
STFC Daresbury Lab Twitter 32

加速器としてのシンクロトロンの発展



- 近代的な加速器では2、4、6極電磁石の3種類が使われる。
- 放射光源には実際に（ほぼ）それしかない。



集束力のエネルギー収差（色収差）の補正
～6極電磁石の導入

世界の光源・日本の光源

蓄積リング型放射光の変遷・世代

- 1944年、放射光のエネルギー、スペクトルの計算（シュウィンガー）。
 - ビームのパラメータを変える邪魔者。
- 1948年、最初の放射光観測。アメリカGE社70MeVシンクロトロン。
- 1963年、最初の放射光利用実験。アメリカ規格標準局180MeVシンクロトロン、EUV領域。
 - 1970年代 : 第1世代 : 素粒子実験用のリングで合間を縫って実験。AR(1984-)
- 1975年、最初の放射光専用リング。旧東大核研のSOR-RING（廃止済）、イギリスSRS（廃止済）。
 - 1980年代 : 第2世代 : 放射光専用リング建設。挿入光源開発。PF(1983-)
- 1993年、最初の第3世代放射光源運転開始。アメリカALS。
 - 1990年代 : 第3世代 : 挿入光源(VSX)の利用の本格化
 - 挿入光源の利用で光束が約6桁程度改善。
- 2001年、最初の「新」第3世代放射光源運転開始。スイスSLS。
 - 2000年代 : 新第3世代、低エネルギーリング（～3GeV）でアンジュレータから硬X線、安定性を考慮した設計、常時入射(top-up)し、電流一定運転。熱的にも安定。
 - インフラを含めた安定性の大幅改善。VSX領域でのコヒーレンス利用の開始。
- 2016年、最初の第4世代放射光源運転開始。スウェーデンMAX IV。
 - 2010年代 : X線領域で回折限界化。ESRF-EBS（フランス）、Sirius（ブラジル）が運転中。
 - 電子のビームサイズを極小にし、X線領域でもある程度のコヒーレンスが利用可能に。

特徴的な第3世代放射光源加速器



ALS(アメリカ)



APS (アメリカ)



SLS(スイス)

ALS：世界最初の第3世代光源、1.9GeV周長200m

SLS：世界最初の新第3世代光源、2.4GeV周長240m

APS(6GeV)：

高エネルギー（大規模）光源(1995)、周長1.1km

他にESRF(6GeV、1994)、SPring 8(8GeV、1997)

特徴的な第4世代（極低エミッタンス）放射光源加速器

MAX IV(スウェーデン)



SIRIUS(ブラジル)



ESRF-EBS(フランス)



MAX IV：世界初の第4世代

3.0GeV、528m、300pmrad

ESRF-EBS：世界初のX線領域第4世代

6.0GeV、844m、150pmrad

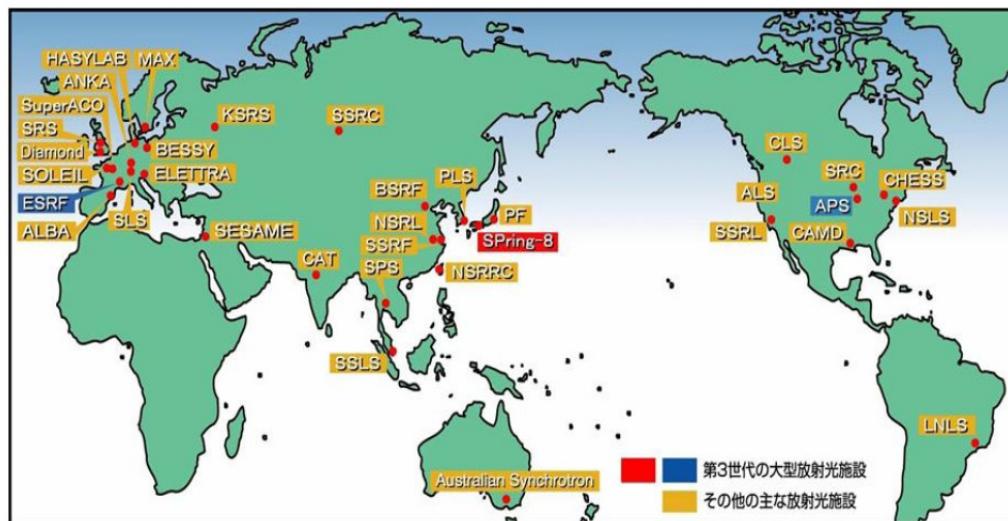
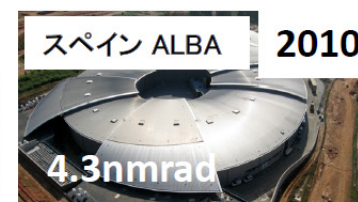
SIRIUS：ESRF型ラティス採用

3.0GeV、518m、250pmrad

世界の放射光源蓄積リング

世界の放射光施設

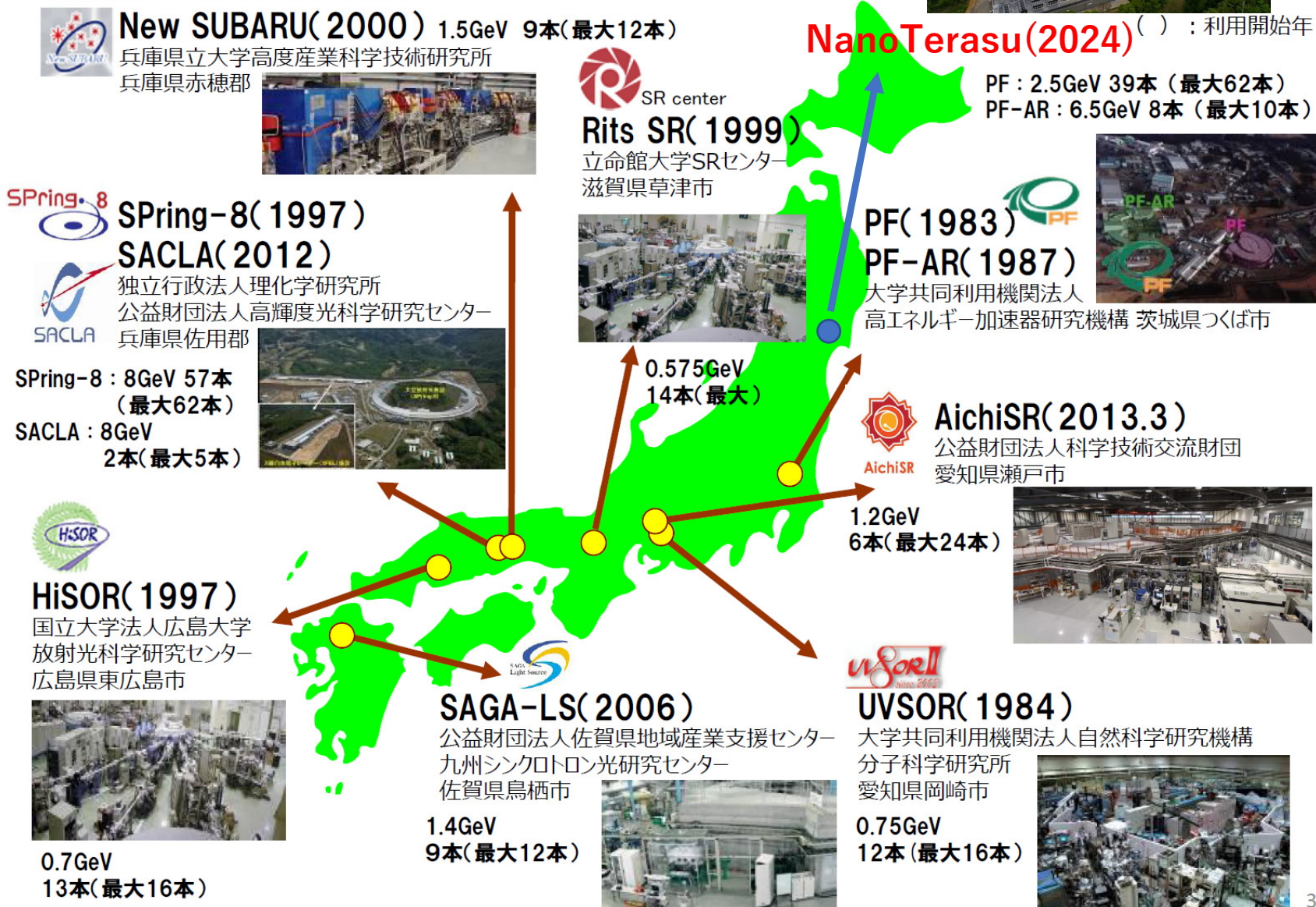
2000年以降、世界3大拠点の他に中型の施設が欧米、アジアの各国で建設され、放射光施設の利用が拡大している。



X線領域での次世代リング型回折限界光源の熾烈な開発競争が日米欧において展開

日本の放射光源蓄積リング、FEL

我が国の主な放射光施設



大型放射光施設 SPring-8

兵庫県 西播磨（岡山県境近く）

現在は理化学研究所が運営

年間運転時間 ～7000時間

年間利用者数 ～のべ16,000人

SPring-8 (Super Photon Ring 8 GeV)
放射光リング (1997年～)

SACLA X線自由電子レーザー (2011年～)

New SUBARU 1.5 GeV放射光リング
(兵庫県立大、1998年～)



2027年度から約1年間で改造、2029年度より供用開始予定。輝度100倍以上、再び世界最高へ。

J-PARC : RCSとMLF

中性子、 ミュオンによる物質生命科学

RCS (Rapid Cycling Synchrotron)

RCSの2つの役割:

- 物質生命科学研究施設の中性子、ミュオン生成のための陽子ビーム
- ビームを加速し、メインリングへ入射

周長: 348.3 m

対称性: 3回

Harmonic number: 2

入射エネルギー: 400 MeV

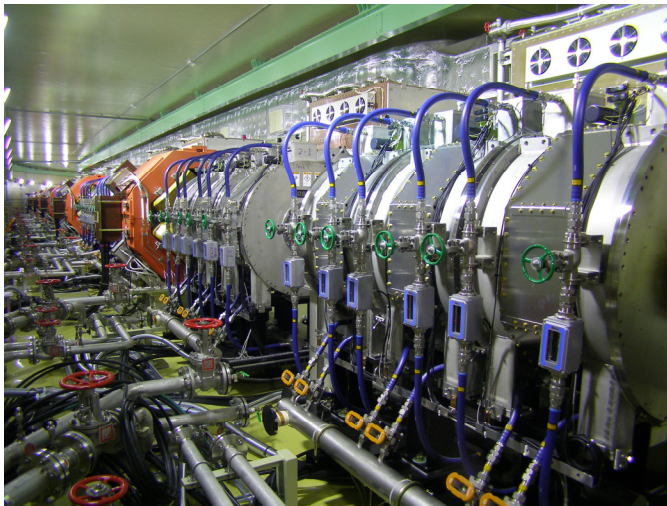
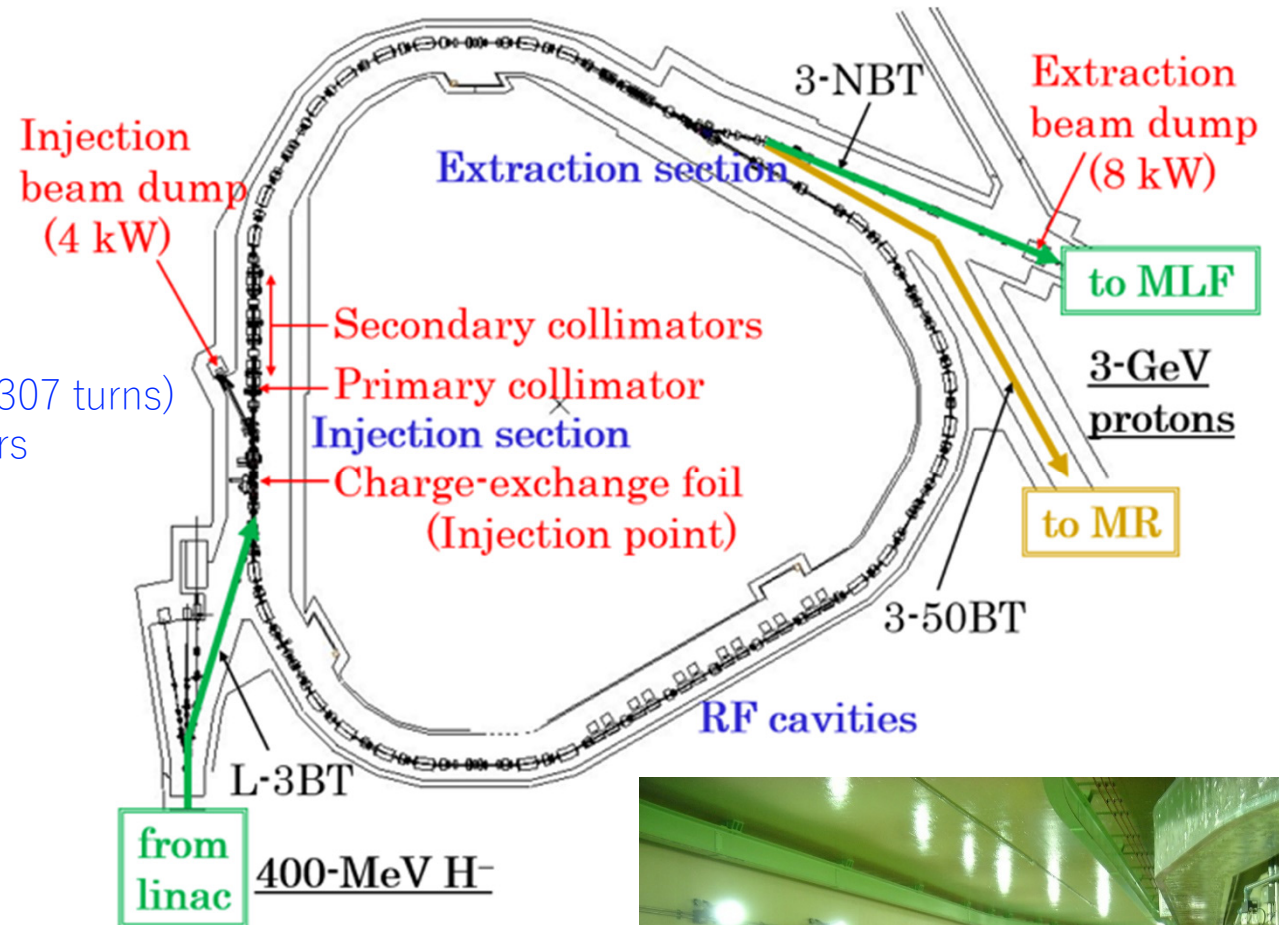
取出しエネルギー: 3 GeV

設計ビームパワー: 1 MW

- Large aperture: 486π mm.mrad
 - Painting injection during 0.5 ms (307 turns)
- Beam loss localization with collimators
- Lattice for high transition γ : 9.14

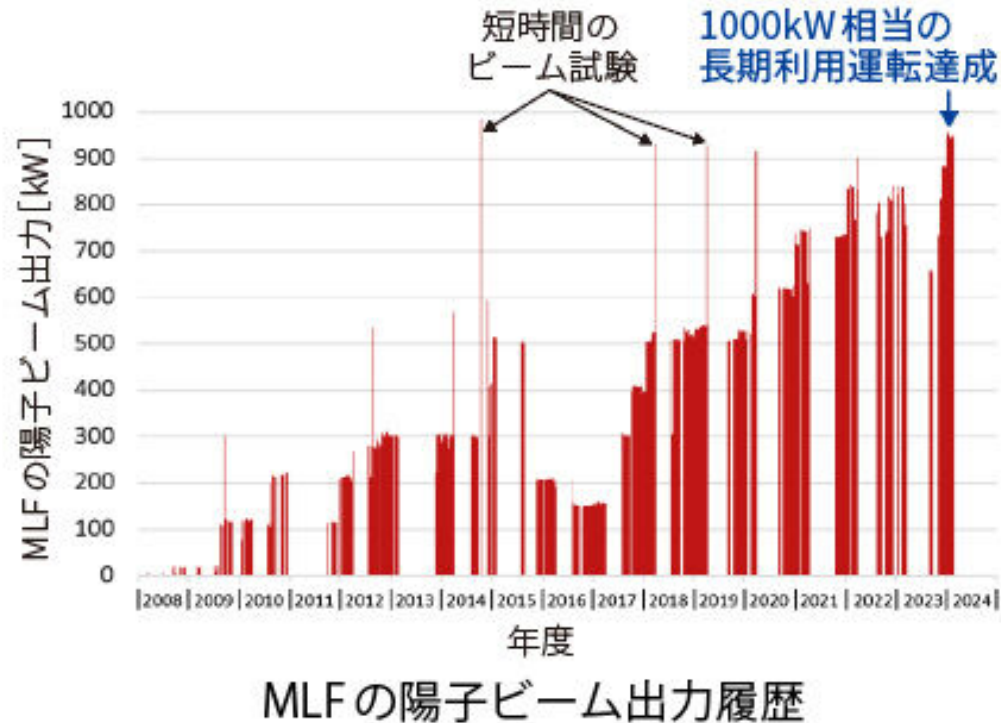
繰返し周波数: 25 Hz

加速パターン: 正弦的



J-PARC加速器の進展：パワー増強

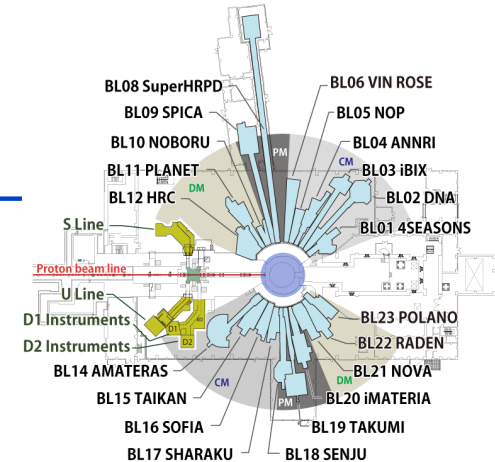
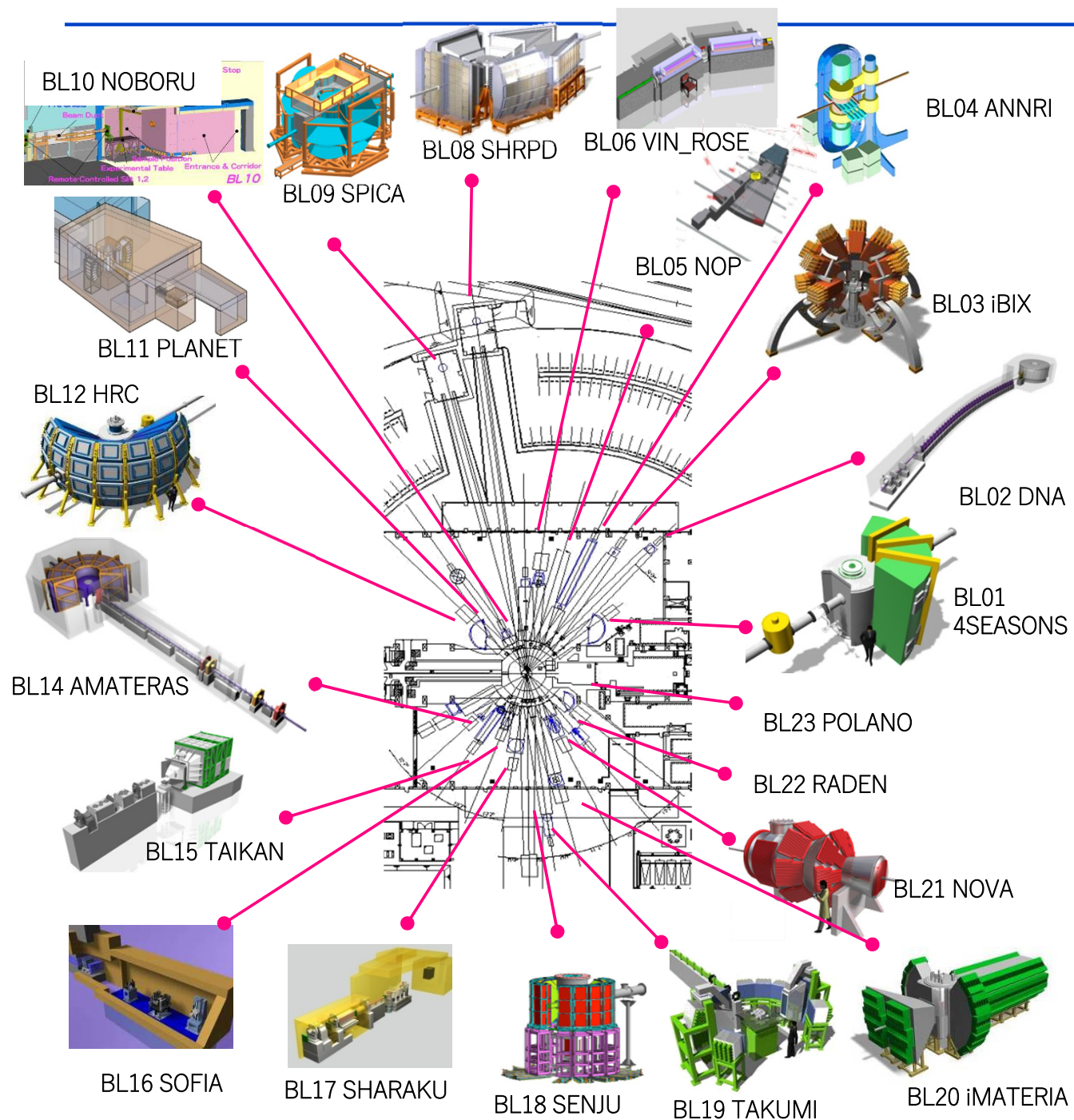
- 電源の増強、コンデンサバンクの増強による高繰り返し化（2.48sec → 1.36sec）。
- 加速中の各種補正の高度化によるビームロスの低減



中央制御棟での記念撮影

- RCS-MLF：950kWで通常ユーザー運転
- MR：ニュートリノに800kW出力、ハドロンに80kW出力で安定運転。
- 現在までの最高記録はFX 900kW超、SX 90kW超で、遅い取り出しで 8.94×10^{13} 個/パルスで世界記録を更新中（2025年5月）。なお、更新前の世界記録は 7.6×10^{13} 個/パルスでAGS……
- FXはハイパーカミオカンデに向けて2028年までに1.3MWが目標。

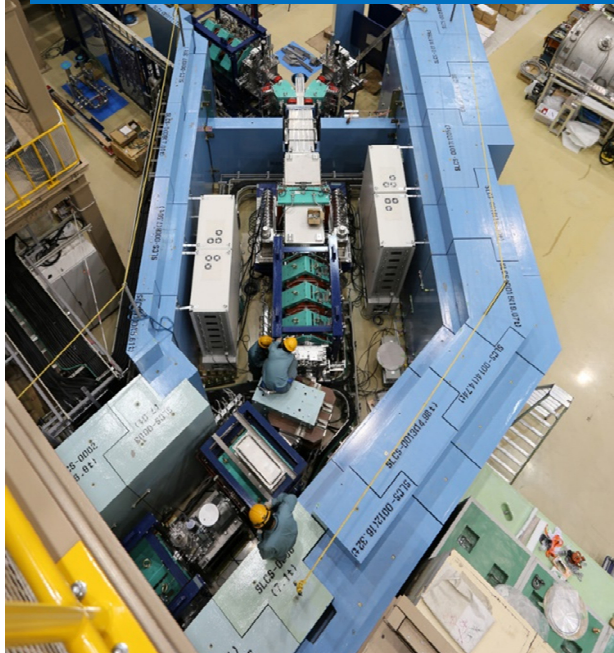
中性子利用ビームライン



- KEK、JAEA、茨城県を主とし、他にNEDO、東大など、色々な機関が参加している。
- 21ビームラインが稼働中。

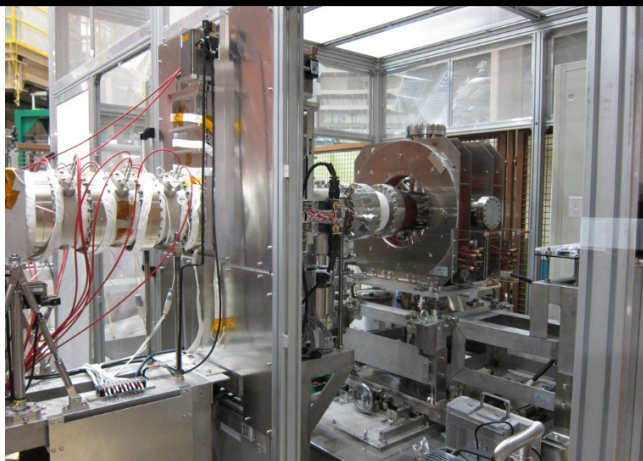
- 非弾性散乱
BL01, 02, 06, 12, 14, 23
- 回折
BL03, 08, 09, 11, 18, 19, 20, 21
- SAXS、反射率
BL15, 16, 17
- イメージング
BL22
- 核反応測定
BL04
- 基礎物理、光学系開発
BL05、BL10

ミュオン利用ビームライン



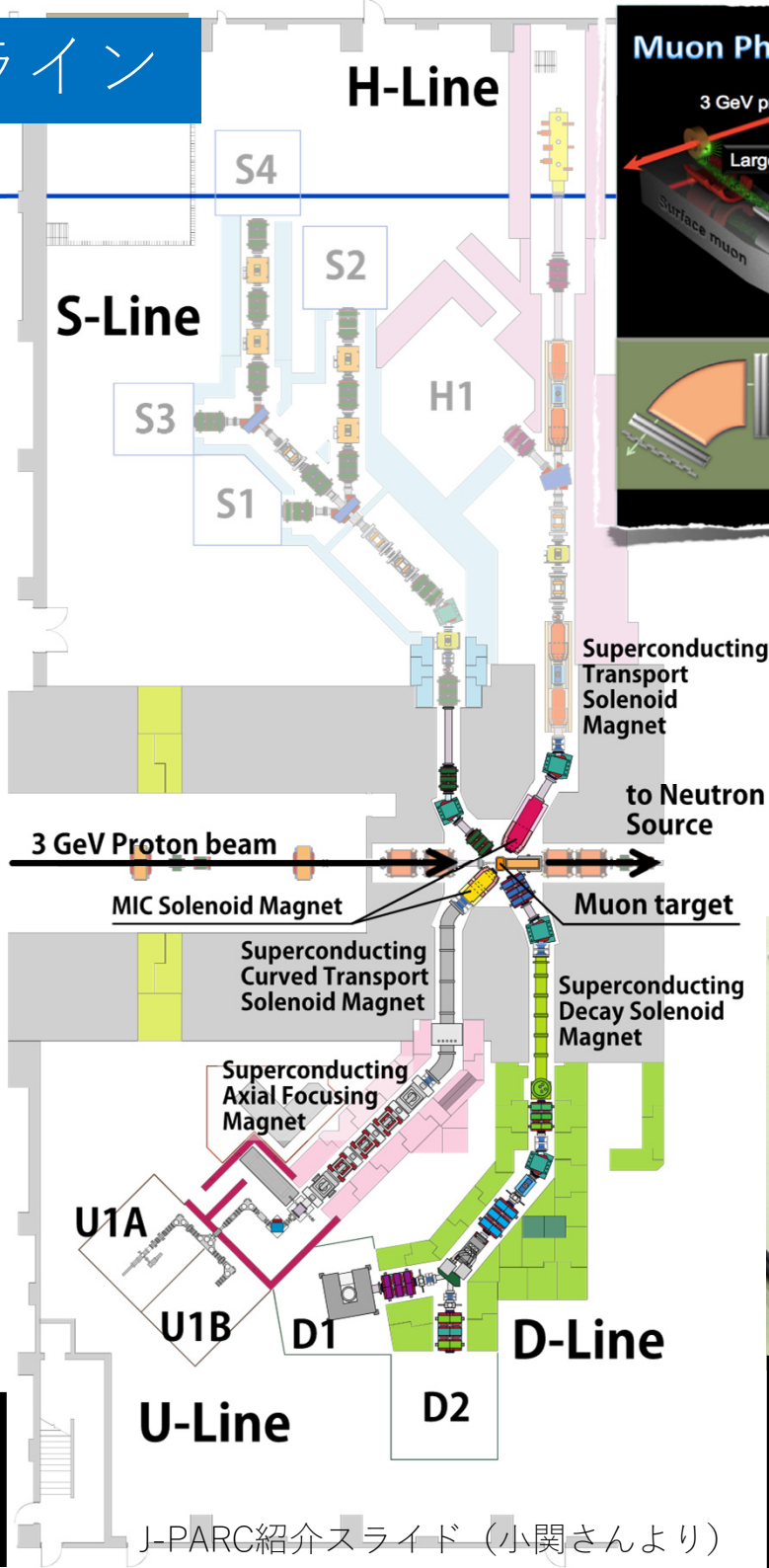
S-Line

Surface μ^+ (30 MeV/c)
 μ SR 磁性測定.



U-Line

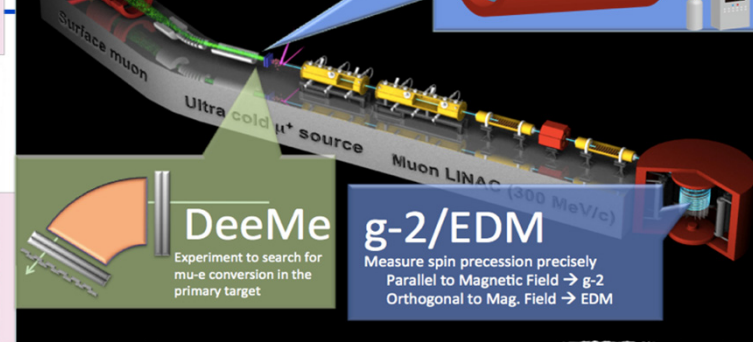
Ultra Slow μ^+ (0.05-60 keV)
薄膜・微小試料 μ SR 測定.



Muon Physics at H-Line

3 GeV proton beam at 25 Hz

Large Acceptance Beamline



DeeMe

Experiment to search for μ -e conversion in the primary target

g-2/EDM

Measure spin precession precisely
Parallel to Magnetic Field $\rightarrow$ g-2
Orthogonal to Mag. Field $\rightarrow$ EDM

H-Line

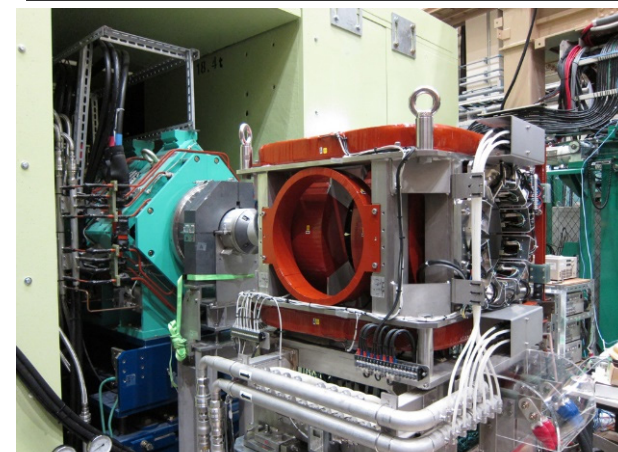
Beamline for fundamental physics and muon microscopy

Surface μ^+ For Mu-HF, g-2/EDM

e^- up to 120 MeV/c For DeeMe

μ^- up to 120 MeV/c For μ CF

素核実験ライン



D-Line

Surface μ^+ (30 MeV/c)

Decay μ^+/μ^- (3.7-120 MeV/c) 45

μ SR、非破壊検査

J-PARC紹介スライド (小関さんより)

世界の最先端MW級陽子加速器



Spallation Neutron Source, ORNL(USA)
1-GeV AR, 1.4 MW



HIPA, PSI (スイス)
590 MeV/u cyclotron, 1.4 MW

中性子・ミュオン源、素核実験両用



Main Injector, FNAL (Tevatronだった、USA)
120-GeV Synchrotron, 700 kW



J-PARC, KEK&JAEA
3-GeV RCS, 500 kW / 30-GeV MR, 500 kW

他に、イギリスISIS、スウェーデンESSなど

(MLF) 中性子とミュオンの利用

- 3GeV RCSからのビームで、中性子、ミュオンを作り、物質・生命科学に利用している。
- 中性子
 - もともと原子炉からの中性子で実験が行われていた。
 - 原子炉：大強度、連続ビーム
 - 陽子加速器：パルスの、原子炉に比べると弱い、ビームサイズが小さく、指向性あり。
 - 現在でも原子炉、加速器の両方とも中性子源として利用されている。
 - 水素が見える。重水素と軽水素が区別できる。（液体試料も可能。ただし、水中試料の場合は重水素置換しないと溶媒の水素に埋もれて何も見えない。）混合物や化合物で、原料段階で一部を重水素置換しておくと、追跡できる。X線は電子との相互作用なので、電子の多い重元素が得意。中性子は原子核との相互作用。軽元素にも強い。
 - （重水素置換など事前準備で）手間がかかる。でかい試料をそのまま見られる。でかくないといけない。（ミクロンサイズの結晶とかは無理。）
- ミュオン
 - もともと宇宙からのミュオンで実験が行われていた。
 - ミュオン自体の研究、ミュオンを使った研究の両者がある。
 - 宇宙線ミュオンでは、山や地球、ピラミッドや原子炉の内部を観測。
 - 小さい試料に対しては、（低速）偏極ミュオンで、スピンを利用して磁気を見ることに使われる。
 - μ SR（ミュオンスピン分光、ミュオンスピン回転/緩和/共鳴法）：ミュオンが崩壊する際、スピンの向きに陽電子を出す。その陽電子が電子と対消滅して出す、対角2方向同時ガンマ線を観測すると、物質の磁気分かる。低速陽電子、医療用PETと陽電子観測の原理は同じ。
- 同じ試料をX線、中性子、ミュオン、陽電子、と、色々なプローブで測れる時代。
- それぞれ得手不得手があるので、目的によって使い分けられている。

低速陽電子とその利用

低速陽電子の物質科学利用

- 陽電子を物質、生命科学試料に照射して実験を行う手法。
 - 陽電子とミュオンは宇宙線から発見された。中性子は放射性同位元素の崩壊。陽電子、中性子の利用は、放射性同位元素からの放出が最初。
 - 実験原子炉に付属の中性子、陽電子施設が多数建設された。現在では加速器からの中性子、陽電子利用も広く行われている。
 - 「低速」化して物質、生命科学実験に用いる。主に、**電子線散乱の陽電子版**が行われている。
- 陽電子は格子欠陥、界面、表面に留まりやすいので、それらの研究で使われることが多い。
- 電子線で行われてきた回折、散乱実験を陽電子で行うと、電子よりも浅い、真の「表面」を調べられる。
- ミュオンは陽電子とニュートリノに崩壊するので、陽電子を検出する手法も利用されている。
 - 医療用PET、低速用電子、ミュオン由来陽電子ともに180度2光子同時検出で原理は同じ。



SPF

Slow Positron Facility

