

高エネルギー加速器セミナー OHO'05

ハドロン加速器の歴史と展望

高山健(KEK)

1. はじめに

この講義は正味1時間の講義である。従って、加速器の歴史全般を網羅することは現実不可能である。ここでは、今回のスクールの主題であるハドロン加速器に絞った内容にする。又、講師のこれまでの経験が円形加速器に比重が置かれてきたという事情もあり、線形加速器に関するトピックは限定される。

加速器の歴史は、我々の先輩が、荷電粒子の加速エネルギーとビーム強度を上げたいという熱意の下、この約80年に渡って積み重ねた研究の証そのものである。

2. 歴史

現代円形高エネルギー加速器の依って立つ原理は以下の3つである。

同期加速
強収束
位相安定性

加速器の歴史を概観するに当って、この3原理の認識の過程、それを具体化した個々の加速器、それらを総合してどう今に至ったかと言った視点から述べてみる。

2.1. 加速原理、閉じ込め原理の進化

2.1.1. 静電加速器

荷電粒子の電場による加速によって得られるエネルギーは単純に作り出された高電圧に比例する事から、本格的原子核実験が開始されると、如何に高電圧を得るかに実験家の努力は払われた。その成果の代表的な物は、Rutherford 研究室の Cockcroft と Walton が変圧器の2次側に整流器とコンデンサーを積み上げて多段化し、1MV程度の高圧を実現した Cockcroft・Walton 加速器(1932) [1]である。回路自身は Greinacher 回路として 1920 年に提案されていた。近年まで大型のハドロン加速器複合体の入射器として広く使用されて来た。発生した高圧でイオンソースか

らのイオンを加速する。しかし、1970年に旧ソ連の Kapchinskii と Teplyakov[2]によって発明され、1980年に Stokes 等(LANL)が実現した高周波を使った加速と横方向の閉じこめを同時に行う RFQ が世の中に登場するや、現代ハドロン加速器複合体の初段加速器としてはこれが採用されるようになって来たので、Cockcroft・Walton 高圧加速器の初段加速器としての新規な登場は無くなった。現在では単体で動作させる負イオンの低エネルギー加速器として、高電圧域で電子を剥ぎ取り、発生した高圧を2倍にして使うタンデム化した商品が普及している。

一方、他の代表的な静電加速器にバンデグラフがある。米国の Van de Graff が 1930 年に実用化に成功した[3]。球構造を取る極めて大規模の容量の帯電部にベルトにて直流電源から供給される電荷を送り込み、静電容量一杯の電荷を集め、他端との間に $V=Q/C$ の電圧を発生させる。装置全体が高圧の絶縁ガスに封じ込められている。20MV がこれまで実現した最大の電圧である。電圧の安定度が高く原子核の精密実験、イオン注入、微量分析などに利用されている。BNLの重イオン衝突型加速器の RHIC[4]では、その前段に当たる AGS 加速器への入射器として 17MV のタンデムタイプ(負イオンの電子を高圧部で剥ぎ取り電圧を倍加して利用) [5]が活躍している。

静電加速器の発達は、結局人類が DC 的に得る高電圧の極限に挑戦した結果と言える。以降、この分野の高電圧へのさらなる挑戦があるようには見えない。この高電圧下でどれだけの電流が取り出せるかに最近の関心は集まっているのではなかろうか。

2.1.2. 線形高周波加速器

静電圧に代わって、高周波を使った荷電粒子の加速のアイデアは 1924 年に Ising (Stockholm) によってドリフトチューブのアイデアを使って理論的な可能性が示唆されていたが、1928 年に Wideroe[6]が K イオンを 1MHz, $V=25kV$ の高周波で 50keV まで加速する事に成功した。以降、Lawrence, Sloan[7]によるバークレーでの研究を経て、1945-1947 年にかけて、やはりバークレーで Alvarez と Panofsky によって現在の Alvarez 型線形加速器の基礎が出来た。彼らが建設した

のは、直前に Varian 兄弟によって実現されたクライストロン ($f=200\text{MHz}$) を用いた 32MeV の陽子線形加速器であった。1952年に Blewett(BNL) によってドリフトチューブの中に交番4極磁石が持ち込まれ、後述する強収束機構を持った現代の線形ハドロン高周波加速器は確立した。現在までに建設された陽子線形加速器の最大の物としては Nagle, Knapp (LANL)が 1972年に完成させた 800MeV の Linac (最終段 $f=800\text{MHz}$) LAMF がある[8]。SLAC の 2 マイル Linac 完成の1年後であった。

超伝導線形加速器を高ベータ域のハドロンの加速器としての利用が本格化して来たので言及しておくが、1966年に Wilson と Schwettman (Stanford, HEPL)[9]が鉛コーティングの超伝導加速空洞を用いて電子を 500keV まで加速した事にそのルーツを持つ。現在 SNS の 1.3GeV 超伝導 Linac[10]がコミッションングを迎えようとしている。この加速器からスケールして FNAL が現在の 8GeV Booster に代わる入射器として 8GeV の超伝導 Linac の設計と R&D[11]を行っている。

この高周波加速器が実現した尤も重要な概念は「同期加速」である。即ち、粒子の進行に同期して尤も効率的に加速電圧を粒子に加える事が出来れば時間的に変動する高周波でも加速に使えるというわけである。この概念が現代高エネルギー加速器の3大重要原理の一つになっている。

2.1.3. サイクロトロン

同期加速の概念を円形バージョンとして展開したのがサイクロトロンである。発想の進化の観点からすれば、極めて自然な流れである。高さの低いドロップス缶状の金属容器を二つ割りにして離し、交流の電極とする発想はさすがと思わせる。Lawrence 等の 4.5 インチサイクロトロンによる実証試験 [12]が 1931年の1月に行われて以降の、その進化の早さには驚くべきものがある。1932年に直径 50cm の物を作り、陽子

を 1MeV まで加速、Cockcroft・Walton の原子核の人工変換実験を追試した。1933年には直径 137cm の物を完成させた。この設計図が日本の理化学研究所に導入されて日本の実験原子核実験が開始された事が知られている。1939年に直径 472cm の物が完成、陽子を 16MeV まで加速した。この設計図も理化学研究所に渡り、1944年に同じ物が完成している。1945年までに世界で 60 台以上のサイクロトロンが建設されている。

エネルギーが増加し、速度が相対論的になると非相対論域で成り立っていた同期加速条件から外れて来る。これを克服して相対論的域まで加速出来る Cyclotron が提案された。高周波の周波数を加速と共に下げて、相対論的になっても同期加速条件を維持出来るので高いエネルギーまでの加速を可能にした Synchrocyclotron は McMillan のアイデアである[13]。しかし、高周波の周波数が時間的に変わってしまうので、荷電粒子ビームの時間的連続加速は不可能になり、Cyclotron が本来持っていた最大の特徴が失われる事になった。しかし、このアイデアがシンクロトロンに直結したと言って良いだろう。終戦の前に設計されていて、建設がストップしていた $184''$ Cyclotron は結局このアイデアを取り入れて戦後 $184''$ Synchrocyclotron として完成し陽子を 340MeV に加速する事に成功した。一方、Tohmas はエネルギーが増大し、回転半径が増すのに比例して磁場強度を大きくし、回転周期が一定を保つ様な磁石配位を提案した[14]。しかし、これでは後述する軌道の垂直方向の安定性が保つ事ができなくなるという問題点を抱えることになる。そこで、進行軸とは垂直方向断面での収束を確保する目的で磁石を分割した磁場配位に工夫を凝らした Isochronous cyclotron へと進化していった。サイクロトロンは磁場のランプを必要としない基本的に DC マシンであるので、供給するビームの平均電流を稼ぐには適した加速器と言えるが、得られるビームエネル

ギーは磁石の現実的制約から核子当たり 1GeV 以下に止まっている。

2.1.4. ベータートロン

Betatron は 1928 年に前述の Wideroe が思い付いたが、上司に建設を拒否されたといういわくのある加速器である。名称はベーター線から来ているものと考えられる。1940 年イリノイ州立大にいた Kerst がテーブルトップサイズの物を作り、実証試験を行っている[15]。旧ソ連でもアイデアは Kerst の前に出ていて、さる研究所のコロキウムで発表され、議論されたという記録もある由。その原理は極めて単純で、軸対象の円形ポールの磁石間隙にガラスで出来た真空容器を置く。真空容器内に仕込んだカソードからの電子を加速するわけだが、磁石を時間的にランプさせると、電子の円形軌道に Faraday の誘導法則に従って誘導電場が発生する。この電場が加速電場となる。加速されてエネルギーが増大しても一定軌道を維持するようポールの形状に工夫を加えた加速器を標準的 Betatron と呼ぶ。実証試験後直ぐに、25MeV の Betatron が x 線リソグラフィ用として発売されている。戦後も暫くは低エネルギーの電子を使った原子核実験用として大学研究室レベルで使用された。又、医療用、工業用 x 線源としてずっと実用に供して来た。1970 年代に旧ソ連で空芯のベータートロンが作られ 300A の電子ビームを 100MeV まで加速された事が知られている。

この Betatron が以降の高エネルギー加速器と加速器物理に与えた影響は非常に大きかった。荷電粒子の加速方向に対して垂直な方向の運動が詳細に研究された。特に磁極の形で決まる field index $n = -(r/B)(dB/dr)$ が $0 < n < 1$ を満足すれば、2 軸方向について運動は安定になる事が証明された。そして Betatron における軌道運動は線形近似の範囲で調和振動運動である事が認識された。この運動をベータートロン運動と呼ぶ習わしが生まれ、Betatron や Sychrotron の中だけに止まらず、全ての電場や磁場でガイドされた荷

電粒子の進行軸方向に対して垂直方向の運動をベータートロン運動（振動）と呼ぶ。閉じた系（円形加速器）であろうが開放系（線形加速器やビームトランスポートシステム）であろうが同じ呼び方をする。

1980 年代になって、kA の電子ビームを 100MeV オーダーまで加速する必要性が生じ、Betatron に 40 年振りに脚光が当たる事になる。後述する空間電荷効果を乗り越えるためにトロイダル磁場を導入し、悪戦苦闘の結果、1kA、20MeV の加速に米国の Naval Research Laboratory が成功した（1991）。一方、カリフォルニア大のアーバイン校でも石塚のグループが 1kA、10MeV の加速に成功している（1988）[16]。しかし、加速されたビームを満足に引き出す術が確立される前にプロジェクトは終了してしまった。

2.1.5. 線形誘導加速器

線形誘導加速器は一言でいうと、Betatron の構造をトポロジカルに変形させて作った誘導加速セルを多段に積み上げただけの物である。これは Christofilos のオリジナルなアイデアである。1957 年 BNL から LLNL に移籍した Christofilos は 1959 年から kA の電子ビームを加速出来る線形誘導加速器の建設にとりかかり、1963 年に 0.35kA、4MeV の加速を報告している。加速器は Astron と呼ばれ、その後現代に至るまで、LLNL、LBNL は勿論として、世界の電子線形誘導加速器の記念すべき一号機になった[17]。これまでに建設された電子の線形加速器としては 1983 年に LLNL で完成した 10kA、50MeV の Advanced Test Accelerator[18]が最大である。ローレンスリバモア研究所のメインキャンパスから車で禿げ山を走る事 30 分、山間の中腹に隠れる様に建った実験室にそれは在る。全長約 100m に同一の 250kV/セルの加速セルが 200 段並んだ様は壮観である。

1970 年代中頃から、レーザー駆動の慣性核融合の限界が認識されるに至って、俄に重イオン

ビームを使った慣性核融合が議論される様になって来た。LBNL と LLNL では線形誘導加速器を基盤にしたシナリオ[19]が立てられ、キーデバイスたる高勾配を持った加速セルの開発が続けられた。慣性核融合ペレット標的物理の要請から、繰り返しは 10Hz 程度、局所電流は 10kA といったイオンビームの加速には線形誘導加速の特徴が活かせると考えられている。1990 年中頃からは米国内の Princeton Plasma Laboratory, LLNL, LBNL の関連部署を形式上統合し、Virtual National Laboratory と銘打って、国内指揮系統を一本化し、ITER に対抗すべく、米国独自の核融合プログラムを推進している。但し、予算規模では ITER には遠く及ばない。

2.1.6. 弱収束シンクロトロン

サイクロトロンで荷電粒子を高エネルギーに加速する際の限界はサイクロトロン発祥の地では当初から認識されていたとみえ、加速中も粒子軌道を一定に、粒子の存在する場所にのみ磁場を用意し、リングの一か所においた高周波加速装置で「同期加速」する加速器のアイデアが急速に広まった。粒子軌道を安定に維持するため、偏向磁石の磁極に field index の満足すべき条件 ($0 < n < 1$) を課したこの種の加速器を弱収束シンクロトロンと呼ぶ。1945 年の McMillan[13] と Veksler[20] の「位相安定性」の証明と、実証試験の後、直ちに各地で計画され建設が開始された。この Synchrotron の最初のアイデア (1943) はイギリスの Oliphant だと言われている[21]。しかし、彼の論文出版は 1947 年だった[22]。実際、バーミング大で彼の論文に従って、0.9GeV の Synchrotron が建設され 1953 年に完成している。米国では原子力委員会の強いサポートの下に建設が着手された。1952 年 BNL に 3GeV の Cosmotron が、1954 年バークレーに 5GeV の Bevatron が完成した。この加速器は反陽子が初めて人工的に作られた事で良く知られている。Dubna では 1957 年に 10GeV の Synchrophasotron が完成した。その後も、1958 年に Saturne(3GeV, Saclay), 1963 年に Nimrod

(7GeV, Rutherford)と ZGS(12.5GeV, ANL)が建設を開始、同年 3GeV の PPA(Princeton-Pennsylvania Accelerator) が稼働を開始した。しかし、後述する強収束シンクロトロンの実力の前に早々に店じまいをして行った。現在稼働中の物はない。

2.1.7. 強収束シンクロトロン

Cosmotron が完成した 1952 年に BNL で Livingston, Courant, Snyder によって「シンクロトロンの偏向磁石の磁場勾配を動径方向に大きく開いた物と狭くなる物を交互に並べた方式で軌道の安定性が確保出来る」という数学的証明が成された。これは「強収束の原理」と呼ばれる物である[23]。同じエミッタンスを持ったビームが入射した場合、加速器の真空容器内のビームの拡がり著しく小さくおさえる事が可能となる事が分った。このため、使用する偏向磁石の磁極間隔を弱収束シンクロトロンのそれに比較して、小さく出来るので磁石全体のサイズを大幅に小さく出来る様になった。しかし、この原理に基づいた荷電粒子の収束法は 1950 年に先述のギリシャ人のエレベーター技師 Christofilos によって特許が提出されていた[24]。1952 年の Livingston 等の論文が Physical Review 誌上で発表されると、Christofilos は名乗り出た。そして、彼は、ただちに BNL へ招聘された。しかし、既に開始されていた強収束シンクロトロンの設計ではなく、線形加速器の収束法の設計に従事させられたと伝えられている。

当初の強収束シンクロトロンは単に磁場勾配を持った偏向磁石だけで構成されていた。この磁場勾配分を四極磁石に置き換え、偏向磁石から分離し、偏向磁石は平坦な磁場分布を持つだけの磁石で構成される、機能分離型の強収束シンクロトロンが 1953 年に北垣 (東北大) から提案された [25]。因みに、前者を機能結合型と呼ぶ。機能分離型の方が加速器の運転の都合上、遥かに融通性があり、この後建設された大型の

強収束シンクロトロンはこのタイプで設計され、建設された。

機能結合型の強収束シンクロトロンは 1960 年に CPS (28GeV, CERN)、1959 年に AGS (28GeV, BNL)が完成した。何れも現役である。運転開始から 70 年代前半までの固定標的素粒子実験の華々しい成果はこの二つの加速器を用いて成された。現在は前者が後段 SPS (400GeV, 1976 年完成, CERN) の入射器として、後者は衝突型加速器 RHIC の入射器の役割を担っている。他の代表的機能結合型としては FNAL の 8GeV Booster Synchrotron がある。今も現役である。加速器ではなく蓄積リングであるが、同じく FNAL の永久磁石で出来た反陽子の 8GeV Recycler Ring も機能結合型である。又、身近では KEK 500MeV Booster もある。

機能分離型としては SPS や RHIC は勿論そうだが、1968 年に Soviet Synchrotron (76GeV, Serpukhov)が完成し、ビーム供給を開始した。1972 年に FNAL に 500GeV の強収束シンクロトロンが完成した。後にこれは超伝導陽子・反陽子衝突器 Tevatron (1TeV, 1984 年完成)の入射器として使用されたが、現在は新たな Main Injector (120GeV, 1998 年完成)に取って代わられたので解体された。おそまきながら、1975 年にここ KEK で 12GeV PS が完成した。小ぶりながら最近でも大きな物理の成果を上げている。加速器で生成したニュートリノを用いたニュートリノ振動実験に寄与した。現在も稼働している。

強収束の原理が発見されて直ぐの 1954 年、固定磁場で動径方向に磁極間隙を狭めた偏向磁石の極性を変えた組み合わせを交互に並べ、水平・垂直方向に収束作用を持たせた配位で、リングの一部に高周波空洞を置いた Fixed Field Alternating Gradient Synchrotron (FFAG)が大河(東大) [26]と Symon 等[27]によって独立に発明された。磁場が固定である事、平衡軌道が加速と共に動径方向に動いていく特徴を考慮すると

Synchrotron というより、広義の Isochronous Cyclotron の一種に分類すべき様に見える。当時 Symon の属した米国の MURA (Midwestern University Research Association)で 1956-1959 年の間電子加速器として開発が成された。この間 400keV の Radial-sector type, 120keV の Spiral-sector type, 51MeV の Radial-sector type two-way FFAG が作られた。しかしこの時期は、強収束シンクロトロンの磁石構成の単純さ、大型加速器へのスケールアップの容易さが高エネルギー加速器社会に急速に浸透し、支配的になっていったものと思われる。それ故か、MURA の解散後 FFAG 加速器のアクティビティーは実質無くなった。大河は核融合・プラズマ閉じこめの分野へ転身した。少なくとも Symon と Kerst を除いた主だった研究者は全米各地に散り、強収束シンクロトロンとそれに関係する研究に携わって行く事になる。それから約 20 年後、世界的にその実現が期待された Neutron Spallation Source の駆動用加速器として注目を集め始め、KFA (独)、ANL (米)、KEK で検討が始められた。勿論固定磁場という特徴から、この加速器の運転サイクルを大幅に上げられるので平均ビーム電流が増し、平均ビームパワーが通常の強収束シンクロトロンに勝ると考えられた故である。実際には建設に至らなかった。それ以降の歴史についてはこの 4.2 節に言及される。

2.2. 基盤技術の発展

2.2.1. 超伝導

加速器にとって磁石とは人で例えるなら背骨である。電磁石は動いて当然と思っているから、常伝導電磁石を使った加速器では担当者以外余り関心が払われない様だが、駆動電源を含め「加速器の要」である。磁場の空間的一様性、時間的安定度、複数磁石の個性のバラツキの範囲、据え付け精度、その長時間変動等の要素が全て加速ビームの軌道に影響するので、そのシステムティックな把握は不可欠である。その時代の技術の粋を結集して理想に近づける努力は当然

なのだが、コストを勘案、折り合いをつけているのが実情である。計算機シミュレーションによって、事前に予想出来る事は全て、その影響をオーダーの範囲で見当をつけるのが常道である。製造メーカーへの無茶な精度要求は馬鹿げているし、自分の無能を晒す様なものだ。

常伝導電磁石の限界は磁極間隙の大きさに関係なく（横方向の大きさに制限が無いと云う仮定では）、使用する磁性体の飽和で決まる。加速器の磁石に広く使用されているケイ素鋼板等の鉄材では **1.8T** 程度が限界である。この限界のため加速ビームのエネルギーと共に、加速器の平均半径は大きくなる。これを避ける唯一の方法は磁性体よりもビオサバールの法則に依拠して電流で磁場を発生する磁石の導入であった。当然大電流を必要とするが、常伝導状態の導体にこの大電流を流すとジュール熱でたちどころに導体は熔融する。そこで登場するのが超伝導線材である。高エネルギー物理分野では、加速器本体ではなく定磁場を発生する水素泡箱実験用のソレイノイドとして先ず開発導入が行われた。同時にハドロン加速器本体用磁石の開発は **1970** 年代始めから世界の主だった研究所で始まっている。磁石単体のテストベンチに止まらず巨大超伝導電磁石システムとして実用になったのは **NbTi** 線材、**4.2K He** 冷却で **4.5Tesla** の **Tevatron** 用、**5.5 Tesla** の **HERA** 用、**3.45 Tesla** の **RHIC** 用である。超流動 **He** 冷却 **8.5Tesla** の **LHC** 用は動いてみないとわからない。何れの超伝導電磁石もマस्पロを前提に開発された。又、要求性能は基本的に常伝導電磁石と変わる事はないが超伝導電磁石特有の問題（電磁力によるクエンチ、熱侵入、**persistent current** 等）を克服しながらの険しい道程であった。特に、最初の完全超伝導加速器である **Tevatron** を建設した **FNAL** では、当時の産業界の水準をはるかに越える技術であったので、所内に自前の電磁石工場を作り、超伝導線のみを購入するだけで、残りは全て自作であった。数十台の **R&D** を作って、実用機に到達し、マस्पロに入った。又、液体ヘリ

ウムの冷凍システムもそれまで世界に存在しない規模の物であった [28]。

超伝導電磁石の開発の成功は単に、高い磁場が得られて加速器本体をコンパクトに出来るだけではなく、省エネルギーの側面も大いに強調されねばならない。レプトン加速器の消費エネルギーの大部分が加速とシンクロトロン輻射の相殺のため、高周波やマイクロ波に費やされるが、ハドロン加速器の消費エネルギーの大半は電磁石に費やされる。超伝導には冷凍機の電力消費と言う問題があり単純には比較できないが、常伝導電磁石構成と比較して **1/10** とすることも可能である。

尚、よりコンパクトなサイクロトロンを求めて超伝導電磁石を採用した物が **1970** 年代の中頃から建設され、**1980** 年代に完成し現在では相当数の物が稼働している。**5Tesla** の超伝導電磁石を使用した物もある [29]。

2.2.2. 高真空

真空容器内を周回するハドロン粒子と残留ガスとの衝突は残留ガスを正イオンに変える。ハドロンビームの空間電荷が作る電場でこの正イオンは加速され、真空容器の壁面を叩く。その結果壁面からガスが放出し真空度は悪化し、ハドロン粒子との衝突頻度は大きくなり、ビームロスが大きくなる。特に、後述する **31GeV** 陽子ビームの蓄積リングでもある **ISR[30]** のビーム電流は **30A** のオーダーであった事、それまでの加速器の様に数秒のサイクルで運転するのではなく、数時間を越えてビームを蓄積する都合から、高真空度の要求は **ISR** の成否を決める事になった。設計時 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ Torr 程度を目安にしていた。しかし、残留ガスとの衝突による散乱で壁を叩く陽子が真空容器壁からのさらなるガス放出を招き、リング内に局所的に真空度の悪い箇所 (**pressure bump** 称する) が生じる事がつきとめられた。この **pressure bump** に起因するビーム不安定からビーム電流を増やす事が出来なかつ

た。これを解決するため、真空排気ポンプ数を増し、排気能力を大幅に上げると共に、金属表面の **gas discharge cleaning** 法などの新しい真空技術を段階的に確立して行き、この問題の解決を図っている。

最近のバンチビームを加速するハドロン加速器[31]では残留ガスとの衝突、壁面でのガス発生の問題は **ISR** の時とは違った側面が重要になっている。残留ガスとの衝突の結果、同時に生成される電子も加速される。これが壁面を叩き、2次電子が放出される。この2次電子も空間電荷の作る電場で加速される。しかしながら、ビームが **ISR** の様な **DC** 電流が作るポテンシャルの壁境界で発生した電子は壁の他端に到達した時は運動エネルギーを失うので、そこでの2次電子生成は無視できる。しかし、バンチビームの場合は様子が異なる。バンチの切れ目ではこのポテンシャルは消える。バンチテールの通過に伴う誘導電場も合わさって加速される。これら持ち越した運動エネルギーで壁面を叩く結果、大量の2次電子が生成され、電子雲を作る。これとハドロンバンチとのコヒーレントな相互作用による振動が大きな問題となっている。バンチの存在は不可避であるので、2次電子放出係数を小さくした真空容器の壁面の開発が主要課題である。**Rapid cycle synchrotron** の様に早い磁束変化を伴う場合は、金属容器の壁面を流れる渦電流による発熱やそれが作る磁場の高次成分（例えば六極）が又大きな問題なので、前述の2次電子放出の問題とも併せて考えられている。

2.3. 加速器技術上の発明

2.3.1. 衝突型加速器 [32]

1973年の **CERN ISR** で陽子・陽子衝突器 [30] が実現して以来、エネルギーフロンティアのハドロン加速器は全てこの衝突器である。衝突器のアイデアは 1956年の **CERN** で開催された第1回国際加速器会議で電子の蓄積リング2台

の1か所を共有する様に配置して正面衝突させる案として **Symon** が発表した。静止した固定標的の実験に比較して相互作用する粒子同士の正面衝突は重心系エネルギーを全部有効に素粒子反応に利用する究極の形態と言える。1950年代後半から小型の電子の蓄積リングを作って、実証試験が各地で開始されたが、先ず、1台の蓄積リングに電子、陽電子を蓄積して、衝突させる衝突器が実用化された。**GeV** クラス以上の高エネルギーの物が世界各地に建設され、2002年にシャットダウンした **LEP**[33]まで四分の一世紀に渡って活躍した。勿論2台のリングの数カ所を交差させる電子・陽子衝突器 **HERA (DESY)** や、異なるエネルギーの電子・陽電子衝突器である **B-factory** もこの延長線上にある。**Linear Collider** も例外ではない。

ISR は2台の陽子蓄積リングをそのビームラインが8か所で交差する様に設計された。前記 **CPS** からの **28GeV** の陽子ビームを夫々に入射し、一旦 **coasting beam** にして、効率は悪いが **coasting beam** を加速出来る唯一の加速法である **phase displacement acceleration** という手法（空の **RF-bucket** をビームエネルギーより少し高いエネルギー位置に断熱的に作り、**moving bucket** にして低いエネルギー域に向けて移動させ、**beam energy** の下で断熱的に消滅させる。これを何度も繰り返す事によって **coasting beam** はリウビルの定理に従ってエミッタンスを余り増やす事なく位相空間の中で上部方向に移動する。即ち **coasting beam** が加速される事になる）を用いて運動量空間にビームをスタックし、**coasting** 状態のまま衝突させる衝突器であった。物理実験の成果としては余り華々しいものはないが、**collider beam physics** の観点からは多くの普遍的研究課題を提示した。最も特筆されるのは **beam-beam** 相互作用の深刻さとその解明であった。**coasting beam** の同士の相互作用であったが、その後もずっと続くことになる非線形共鳴、多重非線形共鳴が引き起こす **chaos** 等の研究テーマはほぼここで出揃っている。

1970年代の半ば過ぎ、後述する反陽子ビームを蓄積する技術に目処が立ったという事情と、2台の蓄積リングを建設するコストを鑑みて、1台の蓄積リングで可能になる陽子・反陽子の衝突器が検討された。これらはヨーロッパと米国にそれぞれ、SPPS (400GeVx400GeV, 1982, CERN)、Tevatron (900GeVx900GeV, 1984, FNAL)として出現した。それぞれ、CERNとFNALの使い慣れた既設加速器群を入射器として使用する極めて合理的な計画であった。後者は現在でも稼働中である。エネルギーフロンティアにあるハドロン加速器の寿命は長いという事を証明している。これらの成功例から学ぶ事なく、入射器から全てを新調しようとしたSuperconducting Super Collider (SSC)は悲惨な運命を辿った。6年間の超伝導電磁石のR&Dと加速器設計のための準備期間を費やし、1989年に20TeV/20TeV陽子・陽子衝突器[34]としてSSCはテキサス州ダラスの郊外に建設が開始されたが、政権の交代といった政治環境の変化もあり1993年に米国上院議会で政府提案の建設予算を否決された。建設中止、既に2000人以上の研究者・技術者を抱えていたSSC研究所の解散が決まった。この計画には日本からも実験グループを中心に100人以上の研究者が建設に参加していたが、計画の中止により国内的にも大きな影響を残した。このSSC計画が消えるのを待つかの様に、すでに提案はされていたが、CERNのLarge Hadron Collider (LHC)計画[35]が俄然脚光を浴びる事になった。稼働していたLarge Electron Positron Collider (LEP)の一周27kmのトンネルを再利用し、入射器も既設SPSまでの加速器群をそのまま利用する7TeV/7TeVの陽子・陽子衝突器である。SSCの超伝導電磁石開発のknow-howの上に磁場強度を更に上げ、最高磁場8.5Teslaで動作する超伝導電磁石の製作が90年代の中頃から開始され、現在着々とトンネルにインストールされつつある。2007年にビームコミッショニングが予定されている。何はさておき、Higgs粒子の発見が期待されている。

恐らくこの衝突器は我々が高周波シンクロトロン技術を基盤として作る最後の物になるだろう。

BNLでは1970年代の半ば、ISRから刺激を受けたのか陽子・陽子衝突器の計画が立ち上がった。曲折はあったが、超伝導電磁石を用いたISABELL計画(700GeV/700GeV)[36]として建設が開始された。BNLのキャンパスの北側に加速器トンネルは完成したが、途中、超伝導電磁石の開発がスケジュール通り進まなかったのが原因だったのか結局頓挫した。トンネルはそのまま放置されたが、1990年初頭にこのトンネルをそのまま利用した重イオン衝突器計画RHIC[4]が認知された。2000年に完成し、20-100GeV/核子のエネルギーの金、銅のイオンを衝突させ、QCD核物理研究専用の衝突器として稼働している。

SSC計画破棄の後、1990年代終わり頃からFNALを中心にしてLHCの後継機としてVery Large Hadron Collider (VLHC)と呼ばれる一周233km, 175TeVx175TeVの衝突器が議論され始めた。SSCの轍を踏まないため、FNALの既存加速器群を入射器として使用する計画である。2001年Snowmassのワークショップでは米国を中心に世界から多くの加速器研究者が集まってそのフィジビリティを検討した。しかし、VLHC計画を膨らます風は吹いていなかった。ハドロン加速器を使って物理実験を遂行する世界の主力部隊は完成間近のLHCに忙殺されていたし、将来計画としてLinear Colliderを後押しする高エネルギー物理社会の圧力の方が遥かに大きかった。結局、Snowmass2001の直前にVLHCのデザインブック[37]を出版し、超高磁場超伝導電磁石のR&Dを一部残すだけで、実質、アクティビティは途絶えている。

2.3.2. ビームクーリング

前述した陽子・反陽子衝突器が可能になったのは1968年にCERNのエンジニアVan der Meer

によって発明された **Stochastic cooling**[38]と呼ばれるビームクーリング技術が実用に供したからに他ならない。有限な (10^{10} のオーダー) 数の粒子の重心の真空容器の中心からの統計的な変動を **pick-up** モニターで検出し、その信号を増幅し、この信号の大きさに比例した電圧を適切なベータトロン波長だけ離れた下流位置の **kicker** 電極に発生し、有限な粒子から構成されるビームを中心方向に蹴るプロセスを長時間繰り返すと、ビームのエミッタンスが時間と共に小さくなる事を簡単なモデルと数学で証明した。実際に **ISR** を用いて実験的にもその手法の正しさを証明した。**Rubia** がさっそくこのアイデアに飛びつき、陽子・反陽子衝突器のプランを持って世界中で宣伝行脚を行った。**FNAL** の **Wilson** 所長に断られた彼は、**CERN** を説得し、**SPS** を衝突器に変更させる事に成功した。**FNAL** も直ぐに **Tevatron** を始めから陽子・反陽子衝突器として稼働させる事に決定した。素粒子の統一理論で存在が予言されていたが、それまで質量の分からないゲージボゾン、**W** 粒子と **Z** 粒子が陽子・反陽子衝突実験で見つかった。中心的役割を担った **Rubia** と **Van der Meer** がノーベル賞を受賞した事は周知の通りである。著者が在職していた **FNAL** の居室の隣室を客員で時々滞在していた **Van der Meer** が使っていた。実にもの静かな男で、在室中も部屋のドアを閉めたままで、居るのか居ないのか判らないくらいであった。同じく頻繁に訪れていた **Rubia** の発する傍若無人の騒音とは余りの好対象であった。

先ず、**FNAL** はビームクーリングの **R&D** として **Budker** の発明になる電子クーリング[39]に着手した。電子クーリングは **Stochastic cooling** に比較すると物理的イメージが簡単なので理解し易い。冷やしたいハドロンビームと冷却媒体の電子ビームをハドロンビームの重心速度と同じ速度でビーム断面がオーバーラップした状態で限られた距離であるが直進並走させる。並走している間、電子とハドロン粒子はクーロン散乱を繰り返す。電子質量はハドロン粒子の質量よ

り三桁以上小さいので、ハドロン粒子の持つ運動量が電子の運動量に移行する。ボーリングのイメージが判り易い。「軽いピンを沢山並べたステージに重いボールがある速度を持って転がっている。沢山のピンを跳ねてボールの速度は減じるだろう。」運動量を得た電子は捨てるが、運動量を与えたハドロン粒子はちゃんと収束電磁石で捕捉されたまま周回して来る。連続的にフレッシュな冷たい電子ビームを供給してやれば、周回するハドロン粒子は重心の速度に近づく。空間的広がりはどんどん小さくなる。これが電子クーリングである。

1970 年代後半、**FNAL** では掘っ立て小屋の様な建家に **200MeV** の陽子蓄積リングを作り、電子ビームクーリングの実験を行った。**Tevatron** 用反陽子の蓄積に向けて、冷却技術の確立を目指したのだ。この段階で最大の問題は電子ビームのエネルギーと **DC** 電流の大きさであった。**8GeV** の反陽子の速度と同じであるためには **4.9MeV** の電子ビームが必要であり、期待する **cooling rate** を確保するには **DC10A** 程度が必要になる。エネルギー広がり小さいビームを確保するにはバンデグラーフしかない。電流の回収法、電源の問題など未知な部分が多いという理由から、2年間に渡る侃々諤々（決して喧々囂々ではなかった）の大議論の末、電子 **cooling** は採用されなかった。既に **CERN** の反陽子蓄積リングで実証がなされていた **Stochastic cooling** 実験[40]からの外挿で確実に使えるという判断から、この技術の採用が決定された。電子 **cooling** の物理的面白さから見ると、加速器物理屋には **Stochastic cooling** はどうしてもエレクトロニクスだけに見えてしまい、**FNAL** では最後まで電子 **cooling** の支持者の方が多かった。それから 20 年が経過した今、**Tevatron** のルミノシティを上げるために反陽子蓄積効率を改善させる最後の切り札として **Recycler Ring** で電子クーリングを導入して実験が開始されている。

2.4. ビーム物理の発展：ビームと周辺環境の相互作用の理解

荷電粒子と外界との電磁的相互作用の結果として粒子の運動エネルギーの一部が転化し、粒子が通過した後に電磁波として外界に残される。この電磁場を総称して **wake 場** と呼ぶ。個々の粒子が残す **wake 場** の位相がランダムであれば、残された **wake 場** が後続の粒子に与える影響は問題にならない。しかしながら位相が揃えば **wake 場** の正味の影響が増大して、後続粒子全体にはコヒーレントな外力となる。そして、このコヒーレントな外力でビーム全体にコヒーレント運動成分が成長する。かくして、コヒーレント運動成分が位相の揃ったコヒーレントな **wake 場** を残す事になる。周回ビームの特性から、このコヒーレント相互作用が一気に成長していく構図を集団運動の不安定と云う。古典電磁気学に見る限り、電荷密度、電流密度としての空間電荷成分が異なる比抵抗、透磁率、誘電率と異なる幾何学的形状の物質境界に囲まれた環境の中をほぼ光速で一方向に動く系である。電磁石が作る磁場と加速電場の外場と自分自身が境界条件を満足する様に自己完結的に作る電磁場から受ける外力で密度変調を受け、**transient** にその分布が変動するので、極めて取り扱いの面倒な多粒子の力学系である。1960 年代の初頭、解散した MURA から LBL に移った Sessler 等のグループの研究[41,42]を皮切りに、この複雑な系の体系的理解が進められ、複数の異なる加速器で起こる特別な振る舞いをする不安定性が、ある一定の相互作用の結果である事など良く理解されるにいたった。詳細は講義「大強度陽子ビームの不安定性」に与えられる。

しかしながら、この特定の集団運動を加速器の中でのビーム力学的理解に先立って、積極的に利用したのが、マグネトロンやクライストロン等のマイクロ波の発振器、増幅器であったと言えるのも面白い。これらは全て電子の運動エネルギーを効率的に特定の電磁波のエネルギーに変換する、実に効率的減速器と言えるだろう。

3. 原理的問題

3.1. 加速器自身の限界

シンクロトロンでハドロン加速器を構成する場合を考えよう。一周当たり加速装置が与える電圧を V 、加速器の周長を C_0 、用いる偏向電磁石の曲率半径を ρ 、磁速密度勾配を dB/dt とすれば、これらの間には以下の簡単な関係が成り立つ。

$$V = \rho C_0 (dB/dt)$$

この関係は、シンクロトロンの大きさ、エネルギー、必要な磁場のランプパターン、加速電圧を幾つかの技術的限界から、どう決めたら良いかの指針を与える最も重要な関係式である。

3.1.1. 磁石

Rapid cycle synchrotron の運転サイクルは 20Hz から 50Hz 程度であるから磁場ランプは早い。超伝導電磁石では追従できない。このタイプの加速器用の磁石は鉄しかない。今後も鉄に代わる材料が出て来るとは思えない。磁石のサイズはサイクロトロンや弱収束シンクロトンの例があるので、ISIS、SNS、J-PARC の電磁石の大きさを見ても特に驚くには当たらない。一方、今後とも、大強度、コンパクトな slow cycle synchrotron の要求はあるだろう。その場合、超伝導電磁石が使用されるだろうが、どこまで大口径、高磁場の物が出来るかにかかる。これまでのこの種の技術進化の例に倣って、先ず要求仕様があってそれを満足させるために、既存のものからスケール出来るものそうするし、ブレークスルーが無ければ突破出来ない場合は、それまで待つか、達成出来る範囲で加速器の設計を合わせる。達成したブレークスルーは次の段階に反映させる。結局これの繰り返しである。

3.1.2. 加速勾配と高周波源

円形のハドロン加速器では、これまで加速勾配が特別に大きな問題だったわけではない。元来、円形加速器にする理由が「加速したい粒子

に電荷を持たせ、低電圧の加速装置を多数回通過させる事によって高エネルギーまで加速する」であった事を考えれば当然である。Lawrence等のサイクロトロン最初の論文の主題が「低電圧で高エネルギーを得る方法」であった事は如実にそれを物語っている。

前述の式の中で加速電圧が高周波空洞一段で賄えない時は、段数を単に増やせば良い。周長の極端に小さい加速器では複数の加速空洞を置くための物理的スペースが問題になるが、少し周長に余裕のある加速器では特に問題にならない。それでも一定の大きさの加速器を仮定し、電磁石とその電源に余裕があり、高勾配の加速装置があれば繰り返しを上げる事は可能になる。高い平均ビーム電流の要求に応えるべき、従来のフェライトに代わる超微細結晶合金の磁性体を用いた高周波加速空洞の利用が増加中である。高周波源は MHz-100MHz 程度では戦前からラジオ放送用にあった3極管等の真空管増幅器が用いられて来た。現在、放送局や通信分野のこの部分は半導体増幅器に置き換えられつつあるので、民生用としては、新たな大強度の物が作られる可能性は最早なからう。

高周波空洞は MHz オーダーの交流で励振されるわけであるが、加速しているバンチビームの周回周波数が必ず高周波の周波数の整数分の一である事から、バンチビーム自身が高周波空洞を励起する。ビーム電流値が大きくなると、これによる実効的に加速電場が理想的な形から大きく歪む。これはビームローディングと呼ばれている。加速器の大電流化の流れの中でこれをどう克服するかが大きな研究開発テーマであった。

3.1.3. 残留放射能

ここで問題にするのは加速器を構成する機器の残留放射線の事である。当然、ビームロスの多い箇所において機器の残留放射線量が多くなる。通常の加速器の場合では、入射、取り出し

部近傍と運動量分散関数の大きな処が残留放射能は高くなる。他所に比べて、相対的にアパチャーに余裕が無いので、何らかの原因でエミッタンスが大きくなった粒子がこれらの場所でロスするからである。加速器のハンズオンメンテナンスを許すビームロスの限界は $1W/m$ とされている。これまで稼働した多くのハドロン加速での実情に即している。しかし、これは実際それ程意味のある数値ではない。何故ならロスの大きい所は限定される。そしてロスの大きい、残留放射線の高い所にある機器程良く壊れて、保守、置換の作業が多いのが実情である。KEK-PS は取り出し時でのビームパワーは最大で $6kW$ 程度であるが、取り出し部にあるセプタム磁石の故障時の予備機との交換作業は至難であった。元来、入射機器、取り出し機器はぎりぎりの位置に設置せざるを得ないので、クレーン操作で行うにしても人の目で周到に監視しながらの作業になる。従って、残留放射線が著しく高い箇所には人を配置しなくてはならない。この作業では許される被爆線量 $0.3mSv/day$ からの制約から一人 3 分程度の作業になった。従って、人海戦術は不可避であった。この様な作業の作業員を担当者・担当グループメンバーだけに限定すると、グループに属する個人の被爆線量が突出する事になるので、管理職、地位、所属グループに関係なく平等に被爆分散化を図った。因みに、この作業箇所一帯でのビームロスは $6kW$ の 5%程度 $300W$ である事は分っている。尚、前述した $1W/m$ の KEK-PS における根拠はこの $300W$ と他所でのロスを加えた値を KEK-PS の周長 $340m$ で割った値に他ならない。

KEK の K2K 実験開始直後の 2000 年 5 月に起こったパイ中間子発生用 AI 標的の一部でもあるホーンアンテナ故障の際、その復旧作業は難航を極めていた。上記 $6kW$ のビームを 24 時間連続で、ここで全部ロスさせるわけだから取り出しセプタム電磁石の交換作業の比ではない。この際も人海戦術で対処した。この種のトラブルは初期不良や何等かのアクシデントが原因で起

こるとすれば、稀な筈であるから、対処法として人海戦術は想定範囲において良いのかもしれない。

加速器を周回している荷電粒子のビームパワーだけを比較すると大型の衝突器のビームパワーの方がさすがに大きい。しかし、ビームハンドリングの難づかしさや残留放射線量レベルの脅威を言う時は、このビームパワーの単純比較ではなく、(A) 加速器周長単位長さ当りのビームパワー、(B) 正味加速器から取り出されビーム利用に供給する平均ビームパワーの二つが重要と思われる。このパラメーターで比較すると2次粒子である中性子が実験の主役である **Neutron Spallation Source** の陽子駆動加速器が俄然筆頭に躍り出る。ISIS (Appleton-Rutherford)、SNS、J-PARC[43]の様な大強度加速器がそうだ。

ロスのみならず、横方向、縦方向エミッタンスが加速器の許容限界を超えた時に起きる。通常では、ビームのコアサイズは加速に従い断熱的に小さくなる。従ってロスはこのビームコアから直接起きるとは考えられない。ビームコアを取り巻く雲の様な薄い粒子の層がロスに到る粒子の予備軍ではないかと云う描像が有力で自然である。例えばガウス分布のテールに位置する粒子群がその有力候補といえる。このテールに位置する粒子の規格化エミッタンスは入射時点のそれより遥かに大きい。本来保存量である筈のこの規格化エミッタンスが加速器入射後増加する原因はどの様な加速器にも存在する。先ず横方向については、真空チャンバー内の残留分子による散乱、先に述べたガイド磁場の捻れ成分や非線形成分に由来するカップリングや非線形共鳴、電磁石電源のドリフトやリップルによる **tune** の変動、加速空洞位置に於ける **non-zero** 運動量分散関数に起因するベータートロン運動とシンクロトロン運動のカップリング、コヒーレントな不安定の影響等がある。縦方向については、空洞電圧や位相に乗ったノイズ/ジッターに起因す

る **bucket shaking**、加速空洞の動作条件が常にビーム自身の情報をフィードバックして設定される故に起こるフィードバック系でのエラー/発振がある。どれが主要因かは加速器によって異なる。しかし、後述する空間電荷効果 (**tune spread**、非線形共鳴、ビームコアの振動) はビーム自身に起因するので高強度ビームの加速器ではハロー形成の普遍的な要因となり得る。

実際ハローがどの程度広がっているのか実験的に検出する手だてがないので、可能な要因を仮定した粒子トラッキング法によって粒子分布の時間発展を追う計算機実験に頼るしかない[31]。 10^4 のオーダーのロスとハロー形成のメカニズムを信頼出来る形で捉えるためには、少なくとも 10^6 のオーダーのマクロ粒子数を必要とする。又、ハロー形成時間に見合う周回数を確保しなければならない。KEK-12GeV-PS では **1msec** で 10^3 ターンとなる。1 ターン中に粒子軌道を決定するエレメント数が 2×10^2 、空間電荷効果の不連続モデルに必要な **bin** サイズは概ね **1cm** であるので、1 ターン当たりの **bin** 数は 3.4×10^4 となり、膨大な計算時間を必要とする。

シミュレーションコード自身の正当性の検証をやった上で、実際の加速器パラメーターを使ってランさせるのであるが、強収束加速器が必然的に持つビームエンベロープの振動に伴って駆動される偶数次オーダーの非線形共鳴に従ってハローが生成され、且つ粒子が継続的にフィードされる様子なども知られる。ビームコア部に位置する粒子が **resonance islands** の外周に沿って移動し、**islands** エッジ部まで至り、ハローの有力な生成機構の一つとも考えられている[44]。この様なハロー生成機構が知られたとして、どのような手を打つかはなかなか難しい。原因は一つではないからである。しかしながら、**betatron tune** の可変域を大きく取っておく手立ては王道である。それでもロスが多い様ならビーム強度を下げるしかない。

又、大強度の加速器ではビームロスの原因となるハローの存在を前提に、加速器リングの限られた場所でこのハローを意図的に除去するハローコレクターが加速器設計の段階から考慮されて、設けられている。その部分での残留放射線量が大きくなるのは承知で設けるわけだから、可能な限り、メンテナンスが必要な機器の設置を避けるのは当然である。このハローコレクターは「加速器リングの中に持ち込んだ固定標的」であると云うのが良い例えだろう。

ロスが多くてもたちどころに加速器機器が壊れるわけではないので、ビーム強度を下げる決断は加速器運転の責任を担っている側がしなければ、どこからも要請は来ない。ユーザーは高いビーム強度が欲しいに決まっている。ロスの結果残留放射能が高くなって加速器本体のメンテナンスに支障が出る事などは、理解はしても余り配慮はされない。実験に配分された時間内に可能な限りのビームが供給され、統計精度の良い実験結果を得たいというのが人情である。この圧力に抗して、ビーム強度を下げるには、「機械的に行使される規則」を設けるのが一番楽である。さもなくば、ロスの原因を徹底的に把握した上で、理詰めでユーザーを説得するしかない。

しかし、一旦ロスの原因が取り払われると、その段階で、許容ぎりぎりの運転を余儀なくされるわけだから、高強度運転を行う加速器ではそのシャットダウンまで気を緩める間はないであろう。これが高強度を標榜した加速器の性である。又、そこが加速器専門家の腕の見せ所でもあるわけだから頑張り甲斐はあるだろう。

3.2. ビーム自身の限界：空間電荷効果

ビーム自身の電荷と電流密度が作り出す自己場である電磁場がベータートロン振動とシンクロトロン振動（純粋な外場に閉じ込められた粒子の平衡粒子の回りでの微小運動）に影響を及ぼす事はよく知られている。これを空間電荷効果と呼ぶ。高エネルギー加速器に於けるこの空間電荷効果は低エネルギー域にある粒子ビームのそれと趣を異にする。粒子集群は光速に近い速さで一方向に運動しているので、電場 E による

発散力がローレンツ力 ($v \times B$) に相殺される。結果、実効的発散力は E/β^2 に比例し、超相対論的極限では完全に無視し得る。一方、GeV クラス以下の大強度ハドロン加速器の場合は深刻である。ビーム断面での粒子分布は一般にガウス分布なりパラボリック分布に近いものである、その様な分布によって生じる発散力は収束磁石の強さから決まる粒子のベータートロン振動数を減らす。そして、その量は個々の粒子のベータートロン振動の振幅の関数である。従って、周回するビームはベータートロン振動数に広がり (tune spread) を持つ事になる。

強収束シンクロトロンでは粒子を安定に閉じ込め得るか否かは粒子のベータートロン振動数の値による。現実の加速器では、全ての点で完成時において既に設計通りではない。又、長期間の運転中に電磁石、RF 空洞、入射／取り出し機器、モニター等の加速器を構成する各ハード自身が加速器が乗った地盤の経日、経年変化によって当初のアライメントからずれる。この結果、closed orbit distortion (COD) が生じる。この COD の大きさが $1/\sin(\theta)$ に比例するので、整数に近いベータートロン振動数 ν を持った粒子の平衡軌道は真空容器の壁面に達し、金属壁に衝突して失われる事になる。一般に平衡粒子 (on-momentum 粒子) であっても、そのベータ関数は四極磁石一台一台わずかに違う磁場勾配差がある故、理想的ベータ関数からずれている。このずれのサイズが $1/\sin(2\theta)$ に比例する。各粒子のベータートロン振動の振幅が粒子自身のエミッタンスとベータ関数の積の平方で決まる故、半整数に近いベータートロン振動数を持った粒子の振動の振幅が真空容器の壁面に達し、やはりこの場合も金属壁に衝突して失われる事になる。この様に空間電荷効果として現われる平衡軌道やベータ関数への摂動から、許される tune spread ($\Delta\nu$) が自ずから決まる。即ち、 $0.0 < \Delta\nu < 0.5$ でなくてはならない。

この外に現実の加速器に用いられる電磁石は必ず多極磁場成分を持つ。この多極磁場成分がベータートロン運動の非線形共鳴のソースになる。高次成分まで考慮すると **tune space** に共鳴線は密に分布する。しかし、その強さは加速器、つまるところ電磁石の出来如何によるが、一般に低次オーダーの共鳴が強い。粒子ビームが **tune spread** を持つと、ビーム中の或粒子は必然的にこの共鳴線の上に位置する事になり、加速器への入射後その様な粒子のエミッタンス（振動の振幅）が大きくなる。条件次第ではビームロスに繋がる。ビーム強度が大きい加速器では、電磁石の非線形磁場に加えてビーム自身を作る空間電荷に起因する非線形電磁場が重要になる。一般に加速器内での粒子は **x**、**y** 方向ではビーム中心に対して対称に分布する。従って、分布関数は **x**、**y** の偶数のべき関数となり、対応する空間電荷ポテンシャルも必然的に **x**、**y** の偶数のべき関数である。その様な状況では 2 次と 4 次の共鳴が潜在的に危険な共鳴となる。特に、4 次の共鳴は **tune** の端数が 0.25 近傍で重要になる。

斯くして強収束シンクロトロンに於ける非線形ベータートロン運動の特性より、空間電荷効果として許される **tune spread** は $0.0 < \Delta < 0.25$ でなくてはならない。4 極磁場による収束力に関係なく、加速し得るビーム電流値がこの制限から決まる事が特筆される。円形の加速器では自身自身の空間電荷効果を相殺する手段は無い。究極の限界である。

一方、衝突器ではどんなに高エネルギーになると、相手側ビームの作る空間電荷力が問題となる。電場による収束力にローレンツ力が重畳されて衝突点のみで加わる周期的な外力となる。これをビーム・ビーム相互作用と呼ばれ先に言及した。

4. 新しい動向

4.1. 既存概念のスケールアップ

今回のサマースクールのテーマで議論される加速器は前述 **Neutron Spallation Source** の陽子駆動加速器が供給する陽子のビームパワーを遥かに凌ぐビームパワーを要求する。しかし、ターゲットデイトは 20 年先を想定しておけば良いだろう。その様な加速器でも問題になるのは 3 節で述べた様な点であるのは間違いない。それ等が本当にどの程度深刻なのかは **SNS** と **J-PARC** が稼働して、設計仕様に達するまでを見てみたいとわからないように思われる。これには概ね 5-10 年間は要するだろう。

1970 年代には既に加速器からの粒子ビームを用いた核廃棄物の消滅処理のアイデアが存在していた[45]。80 年代前半には上記の陽子破碎中性子ビームを未臨界炉に導入する原子炉の構想もあった。その後、第 2 世代破碎中性子散乱施設での実績と十分な中性子ビーム強度を得る為に必要な陽子加速器の具体的仕様が明らかになるにつれ、この方面への関心が世界の原子力分野とハドロン加速器プロパーの人々の間に大きく育っていった[46,47]。80 年代後半ノーベル賞受賞後 **CERN** の所長でもあった **Rubia** による積極的プロパガンダも手伝って、21 世紀前半におけるエネルギー研究の主題と目されるに至った。当初長寿命核種の消滅処理が議論の対象であったのだが、ドライバーとしての陽子加速器の電気代相当の発電は欠くべからざる条件となり、90 年代からはトリウム熔融塩炉等と組み合わせたトータルな核エネルギープラントと云ったスタンスで議論がなされている。長寿命核種の消滅処理、核燃料増殖、核分裂によるエネルギー生成共に十分な中性子数を外部から供給出来るか否かに事の成否は掛かっている訳であるから、計画自身が前記破碎中性子源開発の完全な延長線上にある。

核エネルギーシステムの構想をドライバーの詳細設計を含めて提示するのは世界に3つあった。米国エネルギー省のバックアップの下に、40年近く前に熔融塩炉の開発実績を有するオークリッジ国立研究所が炉心と化学処理を、ロスアラモス国立研究所がドライバーに当たる線形高周波陽子加速器の設計と要素技術の R&D を担当して準備研究が行われていた。開発グループは前述の様な理由で破碎中性子源開発の担当グループと概ねオーバーラップしていた。しかしながら加速器は遥かに大強度仕様になる。ビームエネルギー1GeV オーダー、CW モード、平均ビーム電流 200mA、ビームパワーは 100-200MW クラスのフィジビリティ研究を行っていた。ヨーロッパでは、提案者の Rubia を中心に CERN でも実証実験の検討が進んでいた。そこでは高い平均陽子ビーム強度を期待して大型サイクロトロンと未臨界炉との組み合わせを提案していた。1GeV リングサイクロトロンからの 10mA の CW 陽子ビーム（ビームパワー10MW）をトリウム燃料炉に導き 400MW の熱出力そして 130MW の発電を予測した。日本では原子力研究所と動力炉核燃料開発事業団が□計画としてプロジェクトを 80 年代末に発足させた。原研が超ウラン元素の消滅処理のために中性子による分裂反応を利用する米と同じスキームを取った。他の計画と大きく異なる特徴は、ドライバー加速器の 150MeV から最終 1.5GeV までのエネルギー領域に亘って超伝導加速空洞の採用を始めから指向する事であった。動燃は中性子断面積の小さい核分裂生成物の処理に光核反応を利用するスキームを取った。この目的の為、高強度電子 RF 加速器の開発を急いでいた。しかし、原研の計画は J-PARC の発足により、その中に取り込まれ、段階的計画の2期目以降での実現を目標にしている。尚、動燃（現核燃料サイクル機構）の計画は消滅している。今回の講義「超伝導陽子リアック」、「陽子ビームの原子核変換応用」に詳しい。

仏、米国では前記放射性廃棄物の消滅処理用以外分野でも大強度陽子ドライバーの利用が検討された。一つは International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF) と呼ばれる計画だ。30-40MeV に加速された陽子ビームによる破碎中性子を使って、将来の核融合装置で D-T 反応によって生じる 14MeV 中性子による壁面材料のダメージをシミュレートするのが目的である。その他ではトリチウム生産用加速器が計画された。仏で TRItium Spallation (TRISPAL) 計画と呼び線形陽子加速器 (600MeV-40mA) を想定した。米でこれ用の加速器を Accelerator for Production of Tritium (APT、1.3GeV-100mA) と呼び、ロスアラモス国立研究所で検討を進めていた。核融合炉の燃料であるトリチウムを年間 3kg の割合で生産出来ると予想していた。残念ながら筆者はこれらの技術検討の結果並びに同時に走った筈の R&D の結果を承知していない。前者は ITER 計画がいいよいよ本格化する事態になったので、必要欠くべからざる研究テーマになった。今回の講義には正にこれらのプロジェクトについての日本版がテーマとして選ばれているので、日本国内でのこれまでの R&D そして他国の R&D をどの様に咀嚼され、計画が進捗しているのかを見ると良いだろう。講義「IFMIF 計画・核融合炉材料開発のための大強度重陽子加速器」に詳細が与えられる。

何はさておきビーム強度が求められる IFMIF や核変換消滅処理用ドライバーの様な加速器ではシンクロトロンの出番は無い様に思える。ビームロス観点から考えると、ブルートフォースであるが兎に角、ビーム断面を広げた上で、加速管アパーチャーは大口径、早い繰り返しあるいは CW 運転可能な加速器しか勝負にならない。ビームローディングの問題さえ解決すれば、残りはアクシデントで起こりえるだろう超伝導状態の空洞壁へのフルビーム直撃による被害をどう最小化するかだろう。ハローの発生やビームロスは不可避だろうが、Neutron Spallation

Source 用第2世代加速器で多くの知見を得る筈である。

上に紹介したのはエネルギー基盤技術に貢献する加速器という位置づけにあるが、それ以外に衝突加速器で行う様な基礎科学への貢献を第一目的として建設、計画されている計画がある。これらでは所謂、陽子、電子、通常のイオンではなく、中間子、反陽子、一旦核反応を起こさせて生成される中性子過多な稀原子核などの **exotic beam** を作るためのドライバーと生成されたビームをハンドリングする複雑な加速器群からなる。現在建設中なのがシンクロトロンベースの GSI (独) Facility for Antiproton and Ion Research Project[48]と多段構成サイクロトロンをベースにする理研の RI Beam Factory[49]である。超伝導 Linac で rare isotope を加速する計画も米国で R&D は進んでいる[50]。一方、R&D 以外はまだ何も認知されて動いているわけではないが、米、欧州、日本が独自の案を構想する **Neutrino Factory** がある。大強度のミューオンを生成するためのドライバーとして線形、円形の陽子加速器が検討されている。今回の講義「ニュートリノファクトリー」で詳しく解説されるだろう。

参考のために、既存の加速器や SNS, J-PARC と今回のセミナーのテーマである先進的エネルギー基盤技術の求める加速器のパラメーター（ビームエネルギー/パワー）がどのような位置関係にあるかを見ておく事は重要だろう。図1から分る様に、必要とするビームエネルギーは、既存加速器と比較して特に大きいわけではないが、平均ビーム電流が著しく大きいので、必然的にビームパワーは SNS と J-PARC の値より一桁から二桁大きくなる。しかし SNS, J-PARC はまだ建設中であるので確実な事は言えない。稼働する加速器の中で最大の AGS と比較すると、更に三桁違う。この事実から絶対ロス量を既存加速器のそれと同じにする事の重要性が認識されるだろう。

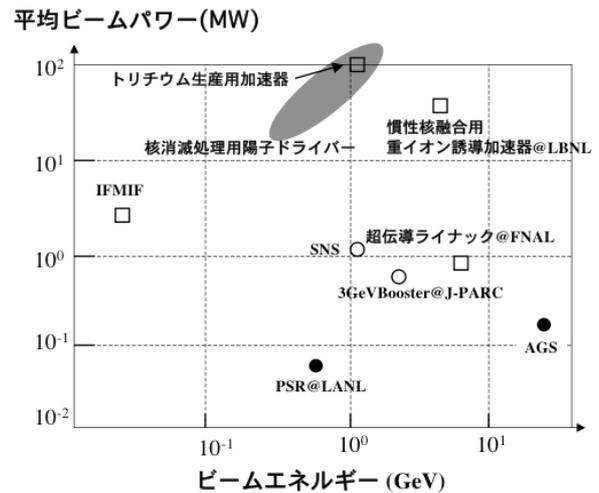


図1 加速器平均ビームパワートビームエネルギー 黒丸：稼働中、白丸：建設中、白角：R&D 進行中、灰：R&D 機から実用機まで（プラン）

4.2. 既存概念の再登場（温故知新）

加速器の繰り返しという点ではシンクロトロンはサイクロトロンには遠く及ばない。GeV クラス以下のエネルギーでビーム電流のみ稼ぐのには固定磁場の加速器が適切な選択である。この観点からはサイクロトロンの亜種である **FFAG** 加速器は考慮に値する加速器である。80年代の再検討後、暫く放置されていた感のあるこの加速器を KEK の森グループが新しい設計コンセプトの下に、3D 磁場計算コードを駆使した **FFAG** 用電磁石を製作、90年代当初市場に現れた微細結晶合金 (**Finemet**) を磁性体に使用した **MA** 空洞と称する高周波空洞の導入によって、2000年にハドロン **FFAG** 加速器としては初の **2.5MeV** の加速実証に成功した[51]。これをきっかけとして、国内に止まらず海外でも大強度ハドロンや中間子の加速器として検討が開始されるに至った。このグループは上記 **POP** 実験に続いて **150MeV FFAG** を建設し、現在そのコミッションングを行っている。詳細は一昨年サマースクール講義「**FFAG** 加速器」[52]に与えられている。

4.3. 新しい概念の実証

次世代の大強度高エネルギー加速器として誘導加速シンクロトロン概念が 5 年前に筆者と木代によって提案された[53,54]。そこで、従来の高周波シンクロトロンに代わる新しい荷電粒子ビームの閉じ込めと加速方式を提示した。誘導加速シンクロトロンの特徴は以下の 2 点である。(1) 誘導加速セルに発生させる正負対の誘導電圧パルスで縦方向(進行軸方向)にビームを捕捉し、マイクロ秒オーダーの長大な粒子群(スーパーバンチと呼ばれる)を作る。(2) 別種の誘導加速セルに発生させる長パルスの誘導電圧で捕捉されたスーパーバンチを加速する。従来の高周波シンクロトロンが進行方向について粒子の閉じ込めと加速を共通の高周波で行う機能結合型であるのに比して、誘導加速シンクロトロンは閉じ込めと加速を分離した機能分離型と言える。

高周波シンクロトロンの進行軸方向の閉じ込めとその加速方式では、粒子を捕捉できる位相空間領域の、特に進行軸方向が原理的に制限されることが知られている。高周波が負の電圧になる時間領域では減速になり、電圧勾配の極性が異なる時間領域では閉じ込められない。一方、加速し得るビーム電流の最大値は横軸方向にビーム自身が作る電磁場に起因する発散力である空間電荷力の大きさによって決まる事は先に述べた。空間電荷制限電流までしか入射は出来ない。厳密には局所電流値すなわち線電流密度の最大値によって制限される。特別な工夫をしない限り高周波シンクロトロンではバンチ中心が密度最大になる。バンチ中心の電流密度がこの制限値以下でなければならない。誘導加速シンクロトロンにおける閉じ込め・加速方式ではこれら二つの高周波シンクロトロンの欠点が原理的に回避出来ることが理論的に示されている。制限電流値以下で線密度を一定に保ったまま進行軸方向に大幅にビームを詰め込むことが可能になると考えられている。

この概念の応用は次世代ニュートリノ物理に使う陽子駆動用の加速器である。発生させるパイ中間子の強度が標的に入射する陽子数に比例するので、これらの加速器ではとりわけ高いビーム強度が求められる。誘導加速シンクロトロン閉じ込め・加速方式はこの要求に合致している。誘導加速シンクロトロン提案後直ちに、その応用としてエネルギーフロンティアの衝突器の提案もなされている。これを **Super-bunch Hadron Collider [55]** と言う。スーパーバンチ閉じ込め・加速できる誘導加速シンクロトロンの特徴を最大限活かした **Super-bunch Hadron Collider** では従来の高周波技術を基礎にした同サイズの衝突器より一桁大きなルミノシティー(コライダーの性能を表す量: この量に散乱断面積を乗じれば着目する反応の単位時間(秒)当たりのイベント数が求まる。)が期待し得る。ハドロンコライダーを稼働中あるいは建設中である **BNL** と **CERN** がこのスーパーバンチに注目し始めた。

誘導加速シンクロトロン概念を実証するべく、稼働中の高エネルギー加速器研究機構(**KEK**)の **12GeV** 陽子シンクロトロン(**12GeV-PS**)に必要な誘導加速装置の導入が行われ、実証試験がおこなわれつつある。誘導加速装置の心臓部は磁性体を装荷した 1 対 1 のトランスである誘導加速セルとこれを駆動する高圧のスイッチング電源である。加速セルには加速粒子の周回周波数に同期してパルス電圧を発生させねばならない。ほぼ相対論的な速さを持った粒子を加速するわけだから、たとえば **KEK-PS** のように周長 **300m** クラスの加速器であれば **CW 1MHz** の繰り返しが要求される。この繰り返しで動作するスイッチング電源が開発された。2004 年の秋から 2005 年 4 月にかけて、高周波で閉じ込めた陽子バンチを誘導加速装置によって **500MeV** の入射エネルギーから **8GeV** まで加速する事に成功している[56]。又、同じ誘導加速装置で発生するステップ電圧でビームを閉じ込

め、600nsec の長大な陽子バンチの生成が報告されている。

高周波加速装置をスイッチング電源で駆動する誘導加速セルに置き換えるだけであるから、既存の全てのシンクロトロンをこの誘導加速シンクロトロンに模様替えすることは容易である。粒子バンチの到来をモニターし、そのモニター信号を基にスイッチング電源のゲート信号を作れば、陽子から極端に周回速度の遅いウランまでのどんなイオンであろうとも一台の誘導加速シンクロトロンで加速出来る。入射器には出力電圧可変の静電加速器などのイオン種を選ばない加速器が使用される。入射器と誘導加速シンクロトロンを合わせたシステムを全種イオン加速器と称し特許申請がされている[57]。身近な例として KEK の 500MeV Booster と 12GeV PS をこれに模様替えする場合を考えよう。完全電離ウランを例にとると、500MeV Booster で 80MeV/核子、12GeV PS で 4GeV/核子が得られると試算されている[58]。近い将来、多種イオン加速用のサイクロトロンに取って換わるかもしれない。

5. エピローグ

この 80 年間の加速器の進化の後を眺めてみると、最も大きな要素は

動機

コンセプトの提案

コンセプトを具体化するアイデア

アイデアを実現するための基盤技術の成熟

実現した結果の厳密なる解析

研究の継続

である。これらが時に重層的、概ねこの順番で循環を繰り返す事で大きな進捗を見て来たと言える。何れかが欠落すると、そこで進化が滞る。しかし、具体的な例を持ってこれを証明するのは中々難しい。ある特定の加速器に関して、もともと提案されたコンセプトが持つ原理的な限

界から、一つの側面だけを見ると進化が最早期待出来ないが、他の側面を更に伸ばす事で活路を見出すケースは例証出来る。得られるエネルギーの限界の中で、多種イオンの加速、平均ビーム電流への挑戦を行って来たサイクロトロンは良い例である。

ビーム診断に用いるモニターとその信号処理系を含む加速器制御系の進化は計算機とエレクトロニクスの進歩と一体であったと言えるだろう。制御対象の要素数は加速器の大型化に比例して大きくなった。リアルタイムでのビーム制御の要求も加わり、必要とするメモリー数は増大し、演算速度への要請も加速器の世代交代と共に急激に上昇した。しかしながら、加速器からの要請だけがこの基盤技術の進歩を突き動かして来たという認識が筆者には無かったので特別に一節を設ける事はしなかった。この部分は人間で言えば神経系統とそれを統括する脳に当る。50 年近い歴史を持つ現役の加速器でも、骨格と心臓部はそのままに、脳と神経系は適時更新されている事を付け加えておこう。

現代の加速器科学は総合科学であり、世に云うところの巨大・巨費科学である。グランドデザインが決まり一旦走り始めると、中々計画の修正は効きにくい。プロジェクト自身が慣性を持っている。仮に欠陥が見出されても、建設途中で更に良いアイデアが出て来ても修正したり取り入れる事が出来ない場合も往々にして起こり得る。巨費プロジェクトであるから、全面的に行政と政治が絡む。純粋にサイエンスだけからの判断では動かない。

それにしても 1970 年以降の CERN の加速器計画を眺めると、その標的設定の「見通しの確かさ」、用いる技術の「連続性」、新規技術開発の「堅実性」、コンセプトを含めバランスの良い「独創性」と「合理性」、競争相手たる米国との駆け引きの中で発揮される「したたかさ」には感心する。勿論、敵失という幸運もあったが、

これらの戦略が 30 年以上長きに渡って一人の知将によって策定されて来たとは思われない。異なる民族母集団から最高の知性を持って集まっているという環境の下、様々な発想と視点が旨く活かされた結果だと思われる。けっして日常の研究の場だけでなく、グランドデザインの様な重大局面でも機能しているのだろう。

狭量なる民族主義、一政府のみで済む承認、限られ人間だけによるグランドデザインといった Domestic project に有りがちな傾向と対比して見るのは面白い。常に Continental project (or Regional project) として考える様習慣付けられている CERN の戦略は際立つ。しかし、International project になれば又違ったスタンスで見なければならぬだろう。その意味では CERN の参加しない International Linear Collider Project (ILC) はどんな性格になるのだろうか？これは実質的には Intercontinental project である。将来 CERN の Regional project (CLIC) と結局競合することになるのだろうか？

この講義が「歴史と展望」というタイトルでもあるので、参照文献は出来るだけオリジナルな論文を示した。筆者は科学史家ではないので筆者の主観が入っているかもしれない。読者にはその積もりで読んでもらいたい。将来、読者がもし加速器の専門家になるのであれば、「自分の研究・成果が加速器の歴史の何処に位置づけられるのか」という視点にも時には思いを馳せるようお願いながらペンを置く。

参考文献

- [1] J.D.Cockroft and E.T.S. Walton, "Experiments with High Voltage Positive Ions (1) - Further Developments in the method of obtaining High Velocity Positive Ions", *Proc. Roy. Soc.* **136**, 619-630 (1932).
- [2] I.M.Kapchinskii and V.A.Tepliyakov, "Linear Ion Accelerator with Spatially Homogeneous Strong Focusing", *Prib. Tekh. Eksp.* **19**, 19-22 (1970).
- [3] R.J.Van de Graff, K.T.Compton, and L.C.Van Atta, "The Electrostatic Production of High Voltage for Nuclear Investigations", *Phys. Rev.* **43**, 149 (1933).
- [4] M.Harrison, S.Peggs, and T.Roser, "The RHIC Accelerator", *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **52**, 425-69 (2002).
- [5] <http://tvdg10.phy.bnl.gov/>
- [6] R.Wideroe, "Uber ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen", *Arch. f. Elektrot.* **21**, 387 (1928). (Wideroe's dissertation in Aachen)
- [7] P.H.Sloan and E.O.Lawrence, "The Production of Heavy High Speed Ions without the Use of High Voltages", *Phys. Rev.* **38**, 2021-2032 (1931).
- [8] E.AKnapp, "Status Report on LAMPH", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-18**, 508-512 (1971).
- [9] H.A.Schwettman, P.B.Wilson, and C.Y.Churilov, "Measurements at High Electric Field Strengths on Superconducting Accelerator Cavities", *Proc. of V Int. Conf. on High Energy Accelerators* (CNEN, Rome, 1966) p.699.
- [10] <http://www.sns.gov/documentation/pubs.htm>
- [11] <http://protondriver.fnal.gov/>
- [12] E.O.Lawrence and M.S.Livingston, "The Production of High Speed Protons without the Use of High Voltages", *Phys. Rev.* **38**, 834 (1931).
- [13] E.M.McMillan, "The Synchrotron - A Proposed High Energy Particle Accelerator", *Phys. Rev.* **68**, 143 (1945).
- [14] L.H.Thomas, "The Paths of Ions in the Cyclotron", *Phys. Rev.* **54**, 580 (1938).
- [15] D.W.Kerst, "Acceleration of Electrons by Magnetic Induction", *Phys. Rev.* **58**, 841 (1940).
- [16] 石塚浩 「円形誘導加速器」OHO'96 サマースクール (1996).
- [17] N.C.Christofilos, R.Hester, W.A.S.Lamb, D.D.Regan, W.A.Sherwood, and R.E.Wright, "High Current Linear Induction Accelerator for Electrons", *Rev. Sci. Inst.* **35**, 886-890 (1964).
- [18] L.Reginato, "The Advanced Test Accelerator (ATA), A 50MeV 10-kA Induction Linac", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-30**, 2970 (1983).
- [19] D.Keefe, "Linear Induction Accelerator for Heavy Ions", LBL Report 5388 (1976).

- [20] V.Veksler, "A New Method of Acceleration of Relativistic Particles", *J. Phys. U.S.S.R.* **9**, 153-158 (1945).
- [21] M.L.Oliphant, Classified Memo submitted to the British Directorate of Atomic Energy (University of Birmingham Archive, UK, 1943).
- [22] K.L.Oliphant, L.S.Gooden, and G.S.Hide, *Proc. Phys. Soc. London* **59**, 666 (1947).
- [23] E.D.Courant, M.S.Livingston, and H.S.Snyder, "The Strong-Focusing Synchrotron – A New High Energy Accelerator", *Phys. Rev.* **88**, 1190 (1952).
- [24] N.C.Christofilos, "Focusing System for Ions and Electrons", US Patent No. 2-736-799 (1950).
- [25] T.Kitagaki, "A Focusing Method for Large Accelerators", *Phys. Rev.* **89**, 1161 (1953).
- [26] 大河千広、日本物理学会年会 (1953).
- [27] K.R.Symon, D.W.Kerst, L.W.Jones, L.J.Laslett, and K.M.Terwilliger, "Fixed-Field Alternating-Gradient Accelerators", *Phys. Rev.* **103**, 1837-1859 (1956).
- [28] A.V.Tollestrup, "Progress in Superconducting Magnet Technology", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-28**, 3309-3311 (1971).
- [29] C.R.Hoffmann, "The Chalk River Heavy-ion Superconducting Cyclotron", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-22**, 1647-1650 (1975).
- [30] K.Johnsen, "CERN Intersecting Storage Rings", *Nucl. Inst. Methods* **108**, 205-223 (1973).
- [31] Jie Wei, "Synchrotron and Accumulators for High-intensity Proton Beams", *Rev. of Mod. Phys.* **75**, 1383-1432 (2003).
- [32] G.K.O'Neil, "Storage Rings", *SCIENCE* **141**, 679 (1963).
- [33] E.Keil, "The Large European $e^+ e^-$ Collider Project LEP", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-28**, 3656-3659 (1981).
- [34] <http://www.hep.net/ssc/>
- [35] H.Hahn, M.Month, and R.R.Rau, "Proton-proton Intersecting Storage Accelerator Facility ISABELLE at the Brookhaven National Laboratory", *Rev. of Mod. Phys.* **49**, 625-679 (1977).
- [36] "The Large Hadron Collider, Conceptual Design", edited by P. Lefevre and T. Petterson, CERN Report No. CERN/AC/95-05 (LHC), 1995.
- [37] "Design Study for a Staged Very Large Hadron Collider", Fermilab-TM-2149, June 4, 2001.
- [38] S. van der Meer, "Stochastic Damping of Betatron Oscillations", CERN/ISR-PO/72-31 (1972).
- [39] G.I.Budker et al., "Experimental Studies of Electron Cooling", *Particle Accelerators* **7**, 197-211 (1976).
- [40] D.Mohl et al., "Physics and Technique of Stochastic Cooling", *Phys. Reports* **58**, 75-119 (1980).
- [41] V.K.Neil and A.M.Sessler, "Longitudinal Resistive Instabilities of Intens Coasting Beams in Particle Accelerators", *Rev. Sci. Inst.* **36**, 429 (1965).
- [42] L.J.Laslett, V.K.Neil, and A.M.Sessler, "Transverse Resistive Instabilities of Intens Coasting Beams in Particle Accelerators", *Rev. Sci. Inst.* **36**, 436 (1965).
- [43] 永宮正治「大強度陽子加速器プロジェクト」日本物理学会誌 **56**, 727(2001).
- [44] Y.Shimosaki and K.Takayama, "Halo Formation at Early Stage of Injection in High-intensity Hadron Rings", *Phys. Rev. E* **68**, 036503 (2003).
- [45] P.Grand et al., "The Accelerator-breeder, an Application of High Energy Accelerators to Solving Our Energy Problems", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-24**, 1043-1047 (1977).
- [46] J.S.Fraser, "High Power Accelerators for Spallation Breeders of Fissile Material", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-24**, 1611-1614 (1977).
- [47] P.Grand, "The Use of High Energy Accelerators in the Nuclear Fuel Cycle", *Nature* **278**, 693-696 (1979).
- [48] P.Spiller, "Challenges and Progress in the FAIR Accelerator Project", *Proceedings of PAC2005*, POA003 (2005).
- [49] Y.Yano, "RI beam factory project at RIKEN", *Proceedings of Cyclotrons 2004*, Tokyo, 18A12 (2004).
- [50] C.W.Leemann, "The Rare-isotope Accelerator (RIA) Facility Project", *Proceedings of XX Int. Linac Conf.*, Monteley, Cal., 331-335 (2000).

- [51] M.Yoshimoto *et al.*, “Recent Beam Studies of the POP FFAG Proton Synchrotron”, *Proc. of PAC2001*, MOPA012 (2001).
- [52] 横井武一郎、「FFAG 加速器」OHO’03 サマースクール (2003).
- [53] K.Takayama and J.Kishiro, “Induction Synchrotron”, *Nucl. Inst. and Meth.* **A451**, 304-317 (2000).
- [54] 高山健、下崎義人、木代純逸「誘導加速シンクロトロンの実証とその応用」日本物理学会誌 **59**, 601-610 (2004).
- [55] K.Takayama, J.Kishiro, M.Sakuda, Y.Shimosaki, and M.Wake, “Superbunch Hadron Colliders”, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 144801-144804 (2002).
- [56] K.Takayama *et al.*, “Observation of the Acceleration of a Single Bunch by Using the Induction Device in the KEK Proton Synchrotron”, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 144801-144804 (2005).
- [57] 高山健、鳥飼幸太、荒木田是夫、下崎義人 特願 2005-129387 「全種イオン加速器及びその制御法」
- [58] K.Takayama, K.Torikai, Y.Shimosaki, and Y.Arakida, “All-Ion Accelerators: A New Turn of the Induction Synchrotron”, in *Proceedings of 2005 加速器学会*, 22C04 (2005).