

卷 頭 言

加速器は物理学が検証できる場である



佐藤 健次*
Kenji SATO*

学会誌『加速器』には、十編近くの「解説」を掲載して頂いた。最近では、「加速器の現場で実践に取り組む青年は荒野を目指せ!!!」と檄を飛ばしているが、この場を借りて、その趣旨を述べたい。

筆者は、幸運なことに、サイクロトロンとシンクロトロン¹の建設や性能向上に取り組む機会に恵まれ、阪大 RCNP では「サイクロトロンでは鉄芯温度が安定すれば全て良し」や、放医研 HIMAC では「シンクロトロンでは電源良ければ全て良し」等の事実を明らかにし、世界屈指の高品質ビームの長時間安定供給に貢献できた。

しかし、筆者は「紙と鉛筆」で加速器物理学に取り組みたくなる性分であり、「全ての技術は物理学に通ず」と思い、成果の背景にある物理学の解明にも取り組んで来た。それで気付いたことは、こうした事実と反する論理や理論が、その昔から、跋扈していたことである。サイクロトロンでは等時性原理を満たすべきであると学ぶ。位相の変化率をエネルギーのずれの線形一次式で与えたとき、等時性は、エネルギーのずれの係数をゼロにすることである。しかし、ローレンツ因子の構造からして、荷電粒子の加速運動は非線形であり、等時性原理は度を越した近似である。元々、非線形であるから、縦方向運動の位相空間ではセパトリクスが生成されるが、等時性は不安定不動点のみで実現される運動である。そのため、粒子を安定に加速するためには、磁場の時間的な変動を 1 ppm 以下とぎわめて安定にする必要があった。そんな物理を露知らず、安定な磁場を実現するため、サイクロトロンでは鉄芯温度を 0.02°C（推定値）以下に安定化すれば良いことに気付き、それに成功した。

シンクロトロンでは、位相の変化率をエネルギーのずれの線形一次式で近似して良いが、加速電圧が正弦関数であるため、縦方向運動は非線形方程式に従う。その位相空間の安定不動点の周りのシンクロトロン振動を利用するので、加速時には、磁場の時間的な変動率は 100 ppm 程度で良い。しかし、遅いビーム取り出しでは、横方向運動に非線形力を付与してセパトリクスを生成し、不安定不動点を通して、外部へと粒子を導く。そのため、磁場を 1 ppm 以下に安定化する必要があった。これを実現するため、電磁石電源である、交直変換器（コンバータ）の直流出力を「対称 3 線回路」にする新しい回路方式を思い付き、コモンモードノイズの低減に成功した。

この成果に導かれて、「対称 3 線回路」の原理を説明できる新しい回路理論を研究したが、はじめに物理ありきであった。その理論では、遅延ポテンシャルを取り扱うので、電位係数が適切な物理量であり、電気容量は不適切であることが判明した。こうなると、電気回路だけでなく、電磁気学でもまた、従来の、電気容量を主役としてきた、解釈や近似を正す必要が生じる。

加速器，電気回路，さらには電磁気学を振り返ってみると，技術や測定は，マクスウェル方程式とローレンツ力の厳密な解であるべきところ，先達の直感と美意識に負うところが大きく，度を越したモデルや近似が見られる．そうは言っても，非線形運動方程式や新しい回路理論の厳密な解を得ることは容易ではなく，筆者の一連の「解説」は中途半端にならざるを得なかった．今後，これらの基礎方程式の厳密な解を知るためには，従来の技術や測定を超える，新しい実践を示す必要がある．加速器は物理学が検証できる場であるので，頭書の檄文は，青年に向けての応援のエールでもある．

* 放射線医学総合研究所