

誘導加速シンクロトロンへの進化と応用



高山 健

高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設

takayama@post.kek.jp

誘導加速器は古くて新しい粒子加速器である。加速器の父である Widerøe の博士論文でその概念が議論された。静電加速器はガウスの法則に基づくが、誘導加速器はガウスの法則とファラデーの電磁誘導法則を動作原理の根幹に置く。現在広く普及している高周波加速器（線形加速器、マイクロトロン、サイクロトロン、シンクロトロン）がマックスウェル方程式全部に依拠するのに対比できる。原理が単純であれば加速器自身は汎用である。静電加速器は電子から帯電金属微粒子まで加速可能である。進化の観点からは静電、誘導、高周波加速器の順番で進化するのが順当であったろうが、実際には、静電加速器で最初の人工的核反応が実証された後、高周波加速器の発明があり、第二次世界大戦を挟みその展開は著しかった。

それでも誘導加速器はベータートロンという電子用加速器として 1941 年に Kerst によって実証された後、低エネルギー原子核物理実験や、リソグラフィ用硬 X 線発生装置として一定の普及を見た。戦後、シンクロトロンへの発明で知られる旧ソ連の Veksler と強収束の最初の発明者である Christofilos によって、1 対 1 のパルストランスを直線に並べた線形誘導加速器の開発が進められた。これら誘導加速器はトランスの駆動電源とトランスコア自身の発熱の制約から、最大でも 100 Hz 以下の低い線

り返しの運転に限られた。

2000 年に KEK からシンクロトロンの高周波空洞を 1 対 1 のパルストランスに置き換えた誘導加速シンクロトロンへの概念が提案された。この提案時に 700 V、20 A 程度の電力を 1 MHz でスイッチング可能なパワー半導体素子 Si-MOSFET と高速励磁に伴う渦電流ロスやコアロスが極めて小さいトランス用磁性体が市場に出回り始めた頃であった。2004 年に KEK 12 GeV PS を用い、高周波閉じ込め・誘導加速というハイブリッドシンクロトロンが実証され、2006 年には完全な形での誘導加速シンクロトロンが実現した。

以降、KEK では円形誘導加速器でしか不可能な実験やスーパーバンチ生成などのビームハンドリングを念頭に、速い繰り返し誘導加速シンクロトロン、誘導加速マイクロトロン等の加速器本体の基礎研究が推進されている。一方、速い繰り返し誘導加速シンクロトロンへの典型的応用である移動標的への連続追尾照射可能な次世代ハドロンセラピードライバーや物質・生体細胞深部へ圧倒的なエネルギー密度付与が可能になる高エネルギー巨大クラスターイオン加速器システムの詳細な設計研究が進んだ。今、円形誘導加速器をフルに活用した日本独自の巨大クラスターイオン慣性核融合システムなどの広範な応用研究が国内外の研究者との連携で進んでいる。

用語解説

粒子線セラピー：

1946 年に R. R. Wilson が陽子のブラッグピークが生体の深いところで最大になることを利用した粒子線によるがん治療を提案した。1954 年に Lawrence Berkeley Laboratory で最初の患者に試行されて研究は開始した。当初は核物理研究用サイクロトロンやシンクロトロンを利用していた。現在では 5 社以上の製造メーカーから加速器本体、照射・診断系、医療プロトコルを含むシステムの供給が行われ、病院の医療機器になっている。

巨大クラスターイオン：

同種の原子や分子がファンデルワールス力、水素結合、金属結合、共有結合等の結合力で複数個結合した状態をクラスターと言う。電子をはぎ取られたものがクラスターイオンである。1970 年代より多くのクラスターが発見されてきた。代表的なものにフルーレン C_{60} がある。クラスター自身の物性研究と共に数 MeV に加速されたクラスターイオンを使った材料表面改質などの応用研究が盛んである。この記事では、安定且つ質量スペクトルが比較的揃った Si クラスターに注目している。

円形誘導加速器：

1927 年に R. Widerøe によって考案され、1941 年に米国の D. Kerst がベータートロンとして実現した。荷電粒子の閉じ込め磁場を時間的に変化させ、ファラデーの誘導法則に従って発生する電場を加速に利用した。1 対 1 のパルストランスの二次側に同じ原理で誘導電場が発生する。これを加速装置としてシンクロトロンに導入した誘導加速シンクロトロンが 2000 年に KEK で提案され、現代的円形誘導加速器として稼働した。

本記事の長さは通常の「解説」欄記事の規定を超過しておりますが、編集委員会の判断によりこのまま掲載しています。