●●● 小特集 重イオン慣性核融合のためのエネルギードライバー開発の進展

4. 誘導加速器

高山 健^{1,2)} ¹⁾高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設,²⁾東京工業大学 (原稿受付:2013年1月18日)

1928年の提案から85年が経過した誘導加速器の進化の後を追う.その粋を結集して実現しようという重イオン慣性核融合用の線形重イオンドライバーを紹介する.KEKにおいて,その原理実証が slow/fast cycling synchrotronの形で2006年と2012年になされた円形誘導加速器(誘導加速シンクロトロン)が詳細に照会される.その重イオン慣性核融合実現へ向けた役割も述べられる.

Keywords:

induction accelerator, liniar induction accelerator, induction synchrotron, barrier bucket, switching power supply, storage ring

4.1 原理と進化

Wideroe の論文から Kerst の実験的検証へ

電子誘導加速器の論文として初めて世に出たのは1928年 のWideroeのそれに遡る[1].以降,この論文に基づく実験 研究がヨーロッパで盛んに実施された.この中には Rutherford や Walton の仕事も含まれる.米国でも Breit and Tuve, Lawrence and Livingston の関連研究を経て, Kerst による完全な実験的検証で Betatron の技術と軌道安定の 基礎理論は確立したといえる[2].Betatron と呼ばれるこ とになった円形誘導加速器のベータートロン条件,軌道安 定のための field index の条件が明確になるとともに,ビー ム取り出し技術などの進歩があり,15-200 MeV までの高 エネルギー Betatron が建設され,医療現場でのX線源,核 物理への利用を含む各種応用に使用されるにいたった.初 期開発の時期が第二次世界大戦と重なり,研究者間の情報 の共有の程度が現在とは違い,Betatron の技術はヨーロッ パ,旧ソ連,米国で独立に確立された側面もある.

Linear Betatron

1950年代の中ごろより Betatron の加速機能のみを活か す加速器形態への進化が図られた.米国と旧ソ連で独自に 考案された Linear betatron (線形誘導加速器)である.加 速装置は正に1対1のパルストランスに他ならない.複数 のパルストランスをビーム進行軸に直線に並べたきわめて 単純な構成である.負荷である個々のトランスと駆動する 1次側パルス電源が1対で構成され,2次側に発生する誘 導電圧が上手く荷電粒子ビームに付与される仕組みであ る.この形態への進化の動機はシンクロトロンにおける強 収束原理を最初に発明したことでも知られている Christofilosの核融合装置 Astron のアイデア[3]にある. Astron はミラー磁場内に作るプラズマ閉じ込め用の反転 磁場の形成が鍵であった.反転磁場を生む E-layer 電子が 不可欠となる.この目的のため、大電流電子ビームを加速 する装置を必要とした.数百アンペアの電子ビームは RF 線形加速器で加速できない状況下、Astronへの入射器とし て電子線形誘導加速器が開発された.1963年に350 A,300 nsecの電子ビームを 3.7 MeV までの加速に成功している [4].1968年には800 A 電子ビームを 6 MeV まで加速した [5].以後の線形誘導加速器で重要となる高圧パルス生成 技術、パルストランス内絶縁技術等の基盤技術が一連の開 発研究の中で確立するとともに、大電流加速器の抱える ビーム不安定性などのビーム力学の課題が認識された. Astronプロジェクト自身は1972年の Christofilos の突然の 病死もあって終結した.

既存シンクロトロンや FFAG での誘導加速

強収束シンクロトロンの発明とほぼ同じくして提案され た Fixed Field Alternative Gradient Synchrotron (FFAG) の初期加速に、上記加速用の1対1パルストランスが導入 された.これが円形加速器に誘導加速装置としてパルスト ランスが使用された最初のケースである[6]. RF 加速が 可能になるエネルギーまでをこの加速装置で、加速周期の 初期段階のみ長いパルス長の矩形の誘導電圧を発生し、補 助的に加速するものであった. そこでは、1加速周期の間 に1回だけパルストランスは駆動される.誘導電圧が発生 している間に、リング内電子は多数回周回して加速され る. 初期 FFAG は1964年に研究を終了し、研究者は各地に 散った.国内で最初に建設された東京大学宮本研究室の強 収束シンクロトロンでの初期加速は誘導加速に頼った [7]. 一方, ビームハンドリングの補助手段として誘導加 速を使用した例が少数だがある[8]. 最近リバイバルされ た陽子FFAG加速器複合体の入射用小型FFAGでの加速を Betatron 加速で行う手法が提案されていたが、テーブル トップの1MeVの小型電子加速器で田中等によって実証

author's e-mail: takayama@post.kek.jp

された[9].ガイド磁場全体の磁束を変化させて発生させる電場での加速であるので、従来のBetatronの延長といえるだろう.

電子線形誘導加速器の進化

LLNLではAstron入射器としての電子線形加速器技術を 基礎に,より大電流の高エネルギーの線形加速器の開発が スタートするとともに,旧ソ連のVekslerのアイデアに始 まるイオンの電子リング加速器の開発が1970年代にLBL と旧ソ連で精力的に行われた.後者(LBL)は電子リング の加速に伴う原理的不安定性の数学的証明が出て直ぐに活 動を停止したが,前者(LLNL)はStrategic Defence Initiative (SDI)との関係で大きな研究開発予算がつぎ込まれ た.1983年にAdvanced Test Accelerator (ATA)として 75 nsec, 10 kAの電子ビームを45MeVまで加速することに 成功した後[10],下に記述した有為な応用が展開されるに 及び,世界的に類似加速器の建設がブームとなった.

Modified Betatron

線形誘導加速器より円形加速器の方が加速効率がよく, 加速器システム全体の施設占有面積が少なくてすむのは容 易に理解できる.上記線形加速器の開発動機と同じくし て,ビーム仕様も類似の,kAオーダーの電子ビームを20-50MeV に加速する Betatron の開発が70年代後半からス タートし,90年代初頭まで実施された.旧来の Betatron と大幅に異なるのはビーム電流であった.低エネルギー域 の空間電荷効果を抑制する目的でトロイダル磁場を導入し たり,コンパクトにする目的で空芯の超伝導コイルを導入 した.このような磁場配位を持った Betatron を Modified Betatron と 呼 び,Naval Research Lab. で Kapetanakos 等[11]により,Univ.of California Irvine 校では石塚等[12] によって建設された.しかし,電子ビームの取り出しの困 難さもありすべての活動は終了している.

マイクロ波自由電子レーザーとフラッシュX線ドライバー

LLNL で ATF に遡って開発されていた Electron Test Accelerator (ETA) からの電子ビーム (4.5 MeV, 10 kA, 30 nsec) で 35 GHz のマイクロ波自由電子レーザーを駆動 した[13].結果は尖頭出力1GWという圧倒的なもので あった.この成果を受け、マイクロ波増幅装置の駆動用加 速器として大きな関心を集めるに到った.しかし,電子線 形誘導加速器では200 GHz以上の自由電子レーザーを駆動 するに足るビームクオリティを持った電子ビームを供給す ることは難しいことがわかった. 少なくとも1-200 GHz の 周波数帯域のGW出力を可能にする自由電子レーザーの駆 動加速器としてのステータスは確立したようにみえるが, この周波数の応用はパルスレーダー程度に限定されるの で、今のところ大きな展開はないのが実情である. 国内で も低エネルギーの電子ビームドライバーであったがプラズ マ加熱を目的に旧原研那珂研究所で45 GHz[14], Linear Collider 用の多段マイクロ波源として高エネルギー加速器 研究機構(KEK)では 9.4 GHz の 100 MW クラスのマイク ロ自由電子レーザー[15]が実証された.

1990年代になり, 0.5-10 MeV の光子エネルギーを持った X線を発生させる電子ビームのドライバーとしての誘導加 速器が DARHT-I, II(LANL), AIRIX(フランス CESTA), Dragon (中国) として建設された. X 線の利用は大きな質 量を持った爆発現象のリアルタイム X線写真観察を目的に している.15-20 MeV, 1-4 kA,<200 nsec の電子ビームを 標的に供給している.

近年の動向

開発の歴史は古いが、現在までそのアクティヴィティが 継続しているものにイオン線形誘導加速器がある.2章で 記述したように70年代中頃に提案されたイオン慣性核融合 のドライバーとして加速デバイス自身の低インピーダンス の特性に着目し、当初から候補として米国ではLBLと LLNLの研究者が継続的に開発に携わってきた[16].これ に呼応し、国内でも川崎等により小規模であるがイオン線 形誘導加速器の研究が開始された[17].しかし,30年以上 経過しても R&D レベルを脱しないのは重イオン慣性核融 合システムの実現可能な完全シナリオが書けていないこと に加え、先行するレーザー慣性核融合と磁場閉じ込めシナ リオである ITER からの結果がまだ得られていないという 現状が大きな要因になっている.次節ではまだ R&D 段階 にあるとはいえ,重イオン慣性核融合システムに想定され ているイオン線形加速器のアウトラインについて言及す る.これ等とは別に、長岡技科大の八井等が完成させた重 イオン用の線形誘導加速装置は当初からその実用的な応用 を志向した[18].

2000年にKEKで従来のシンクロトロンのRF空洞をパル ストランス(誘導加速セル)に置き換えた誘導加速シンク ロトロンの概念が提案された[19].それまでの円形加速器 に誘導加速装置を導入したケースとは大きく異なり,イオ ンの周回周波数に同期してこの誘導加速セルを駆動させる ものであった.2006年にKEK12GeV 陽子シンクロトロン (Slow Cycling Synchrotron)を用いて誘導加速シンクロト ロンの完全実証がなされた[20].後で詳述するが,2012年 にはテスト実験ながら,KEKの旧500 MeV Booster (Rapid Cycling Synchrotron)を誘導加速シンクロトロン(デジタ ル加速器)に改装し,10Hz 運転の1加速器周期加速最終段 (50msec)まで重イオンの加速を実証している.

4.2 イオン線形誘導加速器[21]

重イオン慣性核融合用の線形誘導加速器は高エネルギー 物理実験と同ように標的パラメータが明確に定まっている ので、それを満足するような加速器設計を行えば足りる. 要素技術のポテンシャルが仕様を満足するレベルに達して おれば、最小コストになるように、その組み合わせを考え て実現をすればよい.しかし、要素技術が仕様を満たして いない場合でも、特段のブレークスルーを必要としない場 合は、そのゴールへ向けて、いくつかの段階を設け、お金 とマンパワーを効率的に動員すればよい.しかし、それで も全体計画が承認されていない場合は、小さなゴールを決 めて地道なステップを踏むしかない.現状のように、要素 技術を段階的に実証していくようなプロセスを踏まざるを 得ない.時々、全体シナリオに立ちかえって、物ごとを見



図1 イオン線形誘導加速器多重ビーム用加速セルユニット.

なおす時期もある.

現在実現の課題となっている重イオンドライバーの異な るアプローチを整理する.最終段階で必要とするビーム強 度とパルス幅の要求から二つのアプローチが考えられてい る.何れも線形誘導加速器を前提にしている.

- (1) 多重ビームを同時加速する Single driver approach
 [22]
- (2) 複数ドライバーを動員する Modular driver approach[23]

前者は図1にみられるように、上流で生成した複数の低 電価数のイオンビームを平行に誘導加速セルに入射する. PFNに充電した電圧を下流のスイッチで回路を閉じ、複数 ビーム加速に共通の磁性体コアに印加することによって励 磁される.結果、2次側に発生する誘導電圧で加速する. 多重ビームは加速セル間に置いた収束デバイスでガイドす る.低エネルギー域はソレノイド磁石、高エネルギー域は 超伝導四極電磁石が想定されている.

図に示す加速セルユニットは1-2 MV/mの加速勾配を持 ち、横方向収束の視点からは half-lattice period (hlp) に対 応する.数百台から 1,000 台の hlp を直線に並べて,必要な 10 GeVクラスのエネルギーを得ることを想定している.こ の多重ビーム線形誘導加速器の R&D が20年以上 LLNL と LBLの協力で推進されてきたが,Multi-beam linac (MBE-4) で4本のビームを2 MeV に加速し,それを合流させる実験 結果までにしか到っていない.今後,本格的な Multi-beam linac を実現する上で検討しなくてはならない課題として は以下が列挙される[21].

- 1. 多重ビームの制御とアライメント
- 2. 速度勾配を持ったバンチの伝搬
- 加速ギャップを経由するビームバンチ内相互作用 (Wake-field 効果)
- 4. 多重ビームのマージングに伴うエミッタンス増大
- 電子雲の影響
- 6. コスト

図2に示す Modulator Driver アプローチでは,加速セル で加速するビームは上流からの一本のみである.中段で多



図 3 Modular multiple-linac アプローチ.

価イオンに変換し,加速効率を稼ぐことが可能であり,加 速電圧は最終的に百 MeV に留まるも,イオンエネルギー ではGeV レベルを得る.加速モジュール構成は多重ビーム ライナックのそれと比較すると単純な構成となる.このモ ジュールを必要数だけ動員したものが,重イオン慣性核融 合システムの重イオンドライバーとなる.その概念が図3 に示される.実証用のドライバーのコストが概ね1千億円 と予想されているので,その予算化への道のりはきわめて 遠いといわざるを得ないだろう.

4.3 誘導加速シンクロトロンの原理と特徴[21]

1931年のサイクロトロン発明以来, 1945年に発明された 従来型シンクロトロンを含め、すべての円形加速器では荷 電粒子の加速のため、加速空洞に定在波として励起する高 周波電圧を利用してきた. 高周波電圧は時間の三角関数で 変動するが、時間軸上で傾きを持った電圧は粒子を集群 (バンチ)として進行方向に「閉じ込める」機能を持つ.バ ンチの中心を高周波ゼロ位相からずらした位置に確保する ことによって、1兆個もの粒子集団であるバンチ全体が一 緒に「加速」されるという特徴があった.この事実から高 周波加速器は進行軸方向に「閉じ込め」と「加速」を同時 に行う「機能結合型」といえる.既存高周波円形加速器で は高周波空洞と高周波アンプ自身の「共振周波数の有限な 可変幅」の制限から,実際に加速されるイオンの質量数と 電価数比が限定された。また、一定速度以上での入射が必 要であった.このためLinacやBoosterなどの入射器を必要 とした.一方,図4上段に示す誘導加速シンクロトロンで は高周波電圧に代わって、1対1のパルストランスである 誘導加速セルに発生する高圧誘導パルスを使用し,2種類



図4 誘導加速シンクロトロンの原理を従来の高周波シンクロトロンとの対比で示す.



図5 誘導加速システムの等価回路と各キーデバイス.

の加速セルを「加速」と「閉じ込め」用に使い分けるので, ビームハンドリングの自由度を大幅に改善する.誘導加速 シンクロトロンは「機能分離型」といえる(図中段参照). 誘導加速セルを駆動する電源はコンデンサと高速スイッチ ング素子からなるスイッチング電源である.このスイッチン グ素子のトリガ信号は加速器リングの軌道上に置いたバン チモニタによって得られるバンチの通過信号をデジタル処 理することによって作り,スイッチを動作させ,イオンの周 回に合わせて毎回パルス電圧を誘導加速セル上に発生させ る.これによって加速途上の非相対論的速度から相対論的 速度までの粒子速度の変動に対応できる自動同期加速を保 証した.この結果,陽子から従来の円形加速器ではまった く不可能であったクラスターイオンを含むすべてのイオンの 繰り返し加速が可能になると考えられている.これは、図4 下段にみられるような原理的には大型の入射器なしの円形 加速器1台で相対論的速度までイオンを加速できることを 示唆している.図5に誘導加速システムの全容を示す.こ の中ではスイチング電源が鍵となるハードデバイスであ る.閉じ込めと加速用の誘導加速セルに一対一で対応して いるこの電源をイオンビームの周回に同期してトリガする.

4.4 デジタル加速器[24]

誘導加速シンクロトロンは加速周波数のバンド幅制限が 1 MHz 以下にはないという特性から,原理的には主加速器 リングに入射するイオンの速度に下限は存在しない. そこ で,KEKデジタル加速器ではイオン源からのイオンを直線 加速器等を使わずに直接主加速器リングに入射している. 全体のアウトラインを図6に示すとともに,個々のデバイ スの役割を簡単に記述し,デジタル加速器における特有な ビームハンドリングと誘導加速について記述する.

イオン源と入射ビーム生成

イオン源として、サイクロトロン等のイオン源として一 般的な Electron Cyclotron Resonance Ion Source (ECRIS) が使用されている.主加速器のガイド磁石の入射磁場域に おける残留磁場に最大4 Gauss 程度のバラつきがある.こ れらのバラつきに起因する平衡軌道の歪みが補正できる程 度の入射磁場強度を必要とする.その結果,200 kV 程度の 入射電圧は必要になる.このため,このイオン源は200 kV の高電圧プラットフォームの中に収められている.プラッ トフォーム内の電力負荷を最小化し、冷却水の使用を不要 にするため、永久磁石 X-バンドの ECRIS は主加速器の運 転サイクルに同期して10Hz のパルスモード運転を行って いる.尖頭出力 700 W,9.35 GHz のマイクロ波が約5 msec 幅,10 Hz で TWT から供給される.

生成された5 msecのプラズマから10 kVの引き出し電圧 で取り出されたイオンは、直後に置かれた Einzel Lens Chopper で横方向の収束力を受けるとともに、リングへの 入射に合わせた5 msecの幅にチョップされる.このチョッ パー機能は Einzel Lens の中間電極電圧をチョッピング時 間幅のみ5 kV の負のパルス電圧で変化させることで実現 している[25].このパルス電圧は半導体スイッチで駆動す る Marx Generator で生成されている.チョップされたイオ ンパルスは後段の190 kV 加速部で加速され入射イオンパ ルスとなる.図6に示すBM1分析磁石でイオン価数が選択 された後、Low Energy Beam Transport Line を経て、主加 速器リングへ伝送される.

入射・出射

ビーム入射には静電入射キッカーが用いられる.0.8 m 長の平行なアルミ電極板の一方をアース電位,他方を20 kVの電位になるよう,入射タイミング前に高電圧が印加 される.5 msec 長の入射パルスのテールが入射して直 ぐ,電極に保持された電荷をアースに流し,この電位をゼ ロに落とす.イオンパルスのヘッドが1周して入射位置に 達する時にはもはや電極板間に電場は存在しない.即ち1 ターン入射法が採用されている.

加速終了後のビームの取り出しは、フェライトキッカー 電磁石とセプタム電磁石の組み合わせで行われる.加速終 了後、ベータートロン位相で90度だけセプタム電磁石の上 流に置かれたキッカー電磁石で蹴られたイオンバンチはリ ング周回軌道から分離され、セプタム電磁石のアパチャー に飛び込み、セプタム電磁石の磁場でさらに偏向され、取 り出しラインにガイドされる.

加速器リング

加速器リングは8台の機能結合型電磁石8台(M1-M8) で構成される.完全に8階対称性を持つ.電磁石は両端部 が所謂Fセクター,中心部がDセクターになっている.電 磁石の間の直線部(S1-S8)には入射キッカー,取り出し キッカー,取り出しセプタム電磁石,誘導加速セル,位置 モニタ,電流モニタ等が並ぶ.主電磁石は自身のインダク

表1 マシン・ビームパラメータ.

加速器周長	37.7 m
最大磁束密度	0.84 Tesla
最大加速電圧	3.24 kV
繰り返し数	10 Hz
ベータートロン周波数, n _x /n _y	2.17/2.30
加速イオン数/パルス	<109
イオンエネルギー	∼70 MeV/au



図 6 KEK デジタル加速器のアウトライン.

タンスと抵抗成分,外部に置かれたコンデンサ,チョーク コイル等の組み合わせで共振電源回路を構成している.10 Hz 共振周波数を実現するように,パラメータは設定され ている.他,加速器パラメータとビームパラメータを表1 に示す.電磁石本体は中心磁束密度最大1.1 T までの励磁 は可能であるが,現在の電源の制約から0.84 T が最大磁束 密度である.

軌道補正[26]

低エネルギー入射がデジタル加速器の特徴であるので, 必然的に入射磁場は低い.200-300 Gauss程度である.先述 したように,8個の電磁石の残留磁束密度は最大4 Gauss の間でバラつきを持つ.これが平衡軌道の歪みの原因とな る.軌道の歪みは最大20mmにもなる.これを補正するた めに,M1-M3,M2-M4,M5-M7,M6-SM8の組み合わせで 所謂Back-leg coilを主電磁石のリターンコア部に8字型に 巻き,独立の電源を配置し補正する.主コイルによる励磁 に伴う誘導電圧を相殺するためにこの8字巻線は不可欠で ある.入射したビームの位置情報を5台の位置モニタで取 得し,それを元に,平衡軌道のフーリエ解析を行い,2次 までの低次項を最小化するように励磁電流の組み合わせを 求め,通電する.

誘導加速とビーム閉じ込め

誘導加速と閉じ込めは複数の加速セルを使い分けること で行う.ただし、加速セルに発生させるパルス電圧には以 下の技術的制約がある.

- 出力パルス電圧値は最大2kV/cell, その振幅は加速サイクル内では固定
- パルス長は最大5msec,これ以下は加速サイクル内で自由に可変
- パルス繰り返し数は最大1MHz,これ以下は加速サイクル内で自由に可変





閉じ込め用のパルス電圧 V_{bb} は毎周回発生する.一方,加 速電圧は磁場の励磁パターンを決めると,V_{req} = rC(dB/dt) (r:主電磁石の曲率半径,C:リング周長,B:主電磁石 の磁束密度)にしたがって周回に伴う必要な電圧パターン V_{req}は一意に決まる(図7を参照).連続的に変化するこの 必要な加速電圧には,異なる加速セルを複数台運転にエン トリーさせ,固定の誘導加速セルのパルス密度を制御し, 加速電圧パルスを重畳することで対応する.また,V_{req}が 固定のV_{acc}を越えると複数の加速セルを同時にトリガして 対応する.加速が進むに伴い,イオンの周回周波数が上記 繰り返し数を越えると、複数の加速セルを運転に動員し, 間歇運転をする.これらの加速セル運転モードは事前に FPGA コードにプログラムしておき,スイッチング電源の ゲートトリガ信号を生成して実現している[27].

ビームコミッショニング

ビームハンドリング:誘導加速シンクロトロンは加速と閉 じ込めの機能を分離しているので高周波加速器では不可能 であったビームハンドリングが可能になる.バリアー電圧 パルスの断熱的・非断熱的操作によって種々のビームハン ドリングが試みられた.図8にBunch squeezingと呼ばれ る断熱操作の典型例を示す.そこでは一旦バリアー電圧間 に捕捉されたビームバンチが,下流側のバリアー電圧パル スを時間軸上徐々に上流側に移動させることによってバン チ幅が縮小していく様子がみられる.この過程を計算機シ ミュレーションでも追った.理論的予想に寸分違わない Bunch squeezing が行われた[28].

加速:前節で解説された手法で加速されるのであるが,加速電圧パルスVaccはそのflat-top幅がVbbで捕捉したビームパルスを十分にカバーするように生成される.磁場のランプパターンからユニークに決まる理想的粒子の周回周波数からパルス長,生成のタイミングがすべて計算されるので,これらを事前にFPGAコードにプログラムしておくFully Programmed Control Method が暫定的に取られている.図9に加速サイクル最終点(50 msec)に達したイオンパルスを示す[29].



図 8 Beam squeezing 実験,左:模式図,右:ビームパルスと V_{bb} 波形.



 図 9 加速終了時点で周回するイオンパルス(中心が加速終了時 50 msec に対応する).

ビーム寿命:低エネルギー重イオンビームの寿命は2つの 要因によって決まると考えられている.入射して直ぐの低 エネルギー域ではイオンが電子を捕獲したり、残留分子や 原子による電子の剥ぎ取り現象が起こる、イオン電価数の 変化によって遠心力とローレンツ力のバランスが突然崩れ るので、瞬時にしてイオンは失われる.一方、残留イオン との多重クーロン散乱によって徐々にエミッタンスが大き くなり、真空容器のアパーチャー限界で失われる.いずれ の原因で決まる寿命も、真空度の逆数の関数である。 デジ タル加速器はもともと 40 MeV 陽子用の Booster リングで あったので、その時には真空度は問題にならなかった. リ ング真空容器内には、キッカー電磁石、等の多くのアウト ガスソースになる機器が設置されている.また、これらを 内蔵するために直線部の真空容器は巨大で、表面積が大き い. これらの遺産のいくつかがデジタル加速器に今も残る ので, 平均真空度は 5×10⁻⁸ Torr 程度に留まっている. こ のため、入射して5msecでビーム強度は1割程度に落ちる [29].

アップグレード:デジタル加速器は今後の予算獲得にも拠 るが、性能アップが図られる予定である.まず、現在の ECR イオン源では生成が難しい完全電離炭素イオンや高 電離金属イオンの生成のために Laser Ablation Ion Source の開発を行っている[30].また、真空度の改善はビーム強 度を確保する上で不可欠なので,直線部真空容器サイズの 最小化と真空排気系の増強を行う計画である.前節で示し た誘導加速システムの心臓部であるスイッチング電源のス イッチング素子として Power MOSFET を使用してい る.7個直列で1スイッチングアームを構成し、4アーム でフルブリッジを形成する. 直列構成はこの素子本体の耐 圧限界に由来する. この素子の代わりに高耐圧特性を有す る SiC-JFET を用いたスイッチング電源の自主開発を行っ てきた[31]. 既存のスイッチングアームは SiC-IFET 1 個 または2個直列構成に置き換わるので、電源自身はコンパ クトになり、また、ゲート信号数の圧倒的減員により電源 本体の制御性が格段に増すと期待されている. 順次, 新型 電源に置き換えられていくであろう.

4.5 重イオン慣性核融合へ向けた誘導加速シン クロトロンの役割(展望)

デジタル加速器開発自身には元来、重イオン慣性核融合 用のドライバーとして応用する動機はなかった. したがっ て,重イオン慣性核融合用のドライバー線形誘導加速器と ここに議論された誘導加速シンクロトロンまたはデジタル 加速器との間には直接的に共有する・共通する技術要素は 思いの他少ない.動作の繰り返し数,加速セルあたりの出 力電圧,パルス幅等を比較すると明白である.しかしなが ら,誘導加速システムの制御システムに注目するなら,大 いに貢献できるであろう. デジタル加速器で開発された加 速器全体の動作をオーヴァーオールに把握した上で、加速 セルのゲートトリガ生成を司る FPGA を用いた制御システ ムと同じコンセプトで線形誘導加速器は稼働させ得る. 一 方, 早い高圧誘導電圧パルスの立ち上がりの時間要請は半 導体スイッチの利用が不可欠と思えるが、デジタル加速器 の継続的進化の中で,最新鋭のスイッチ素子をカスタム メードでパッケージ化し, 高圧スイッチング電源に搭載す る. 完成次第, ビーム加速に導入し, その性能を明らかに していく.一連の研究開発で得られる知見は重イオン慣性 核融合用のドライバー線形誘導加速器終段の駆動電源製作 には大いに役立つ筈である.

慣性核融合システムの基幹部であるイオンドライバー (イオン加速器)としての誘導加速シンクロトロンは、ヨー ロッパの高周波シンクロトロンをベースにしたシナリオの R&D を進める上で有用な要素を持つ.加速と閉じ込め機 能を分離する特徴を活かし、平坦部の局所電流を空間電荷 制限電流以下に抑えた状態で、リングあたりのイオン数を 稼ぎ,加速終了時に多彩なビームハンドリングを駆使し て,期待される形状のビームを供給できるだろう.誘導加 速シンクロトロンでは運動量分散関数がゼロの位置に加速 セルを置かねばならないという制約条件があるが、これは 想定されている蓄積リングの前提条件に合致する.一方. シナリオ A での高周波線形加速器を小規模にし、蓄積リン グ自身を誘導加速シンクロトロンに置き換え、その入射段 階で,バリアーバケットでビームを蓄積し,それを誘導加 速で最終エネルギーまで加速するシナリオはあり得る. こ の場合早いサイクルで動作するパターン電源駆動の電磁石 で構成された誘導加速シンクロトロンは不可欠である.

4.6 KEK デジタル加速器の応用

まだ改装中の数年前から,得られる重イオンの利用が議 論されてきた.もともと小さいシンクロトロンなので,原 子核・素粒子実験に用いるにはエネルギー不足である.そ こで,当初から物質材料,生物,医療に焦点を絞って検討 された.元来この分野は,サイクロトロンの一人舞台で あった研究領域である.理化学研究所,日本原子力研究開 発機構高崎量子応用研究所,大阪大学核物理研究セン ター,東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセン ターの活躍をみればわかる.いずれも組織のミッションと して多目的利用が長年に渡って実施されてきた.高エネル ギー加速器研究機構デジタル加速器はまだミッション加速 器の位置づけになっていないので,公募研究の予定は現状 ではない.しかし,学術的にきわめて意味が大きいと看做 される研究に軸足を置いて応用研究はスタートする.これ まで既存の施設ではマシーンタイムが取り難いという事情 もあった.研究グループが専用の照射ベンチを持ち込み, 照射ラインの運用展開を図る予定である.現在,公式な応 用研究は総合研究大学院大学・学融合研究「模擬宇宙線を 用いた宇宙物理の展開」が採択され,着々と照射準備が進 んでいる.

一方,高エネルギー温密度科学の実験にデジタル加速器 からの重イオンビームの利用の可能性が検討された.加速 されるビーム電流が小さいというハンディを Half Minibeta収束レンズを用いて標的材料中の局所ビーム電流値を 大幅に上げて補う方法が実現できれば,国内では唯一の重 イオンビーム駆動の高温密度科学専用ラインとなり得るだ ろう[32].

参考文献

- [1] R. Wideroe, Dissertation, Tech. Hochschule Aachen, 29 Oct. 1927.
- [2] D. Kerst, Phys. Rev. 60, 47 (1941).
- [3] N. Christofilos, "Astron Thermonuclear Reactor", In 2nd UN Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, **32**, 279 (1958).
- [4] N.Christofilos et al., Rev. Sci. Instrum. 35, 886 (1964).
- [5] J. Beal *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. 16, 294 (1969).
- [6] F.L. Peterson and C.A. Radmer, Rev. Sci. Instrum. 35, 1467 (1964).
- [7] 浅見 明, 川崎 温: 日本物理学会誌 67,874 (2012).
- [8] J.C. Ciret, "Extraction du Faisceau de Saturne II par Acceleration Betatronique. Le Gephyrotron", GERMA 76.02 /IE-117 (1976).

- [9] H. Tanaka *et al., Proc. Particle Accelerator Society Meeting* 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan, 1152 (2009).
- [10] L. Reginato, IEEE Trans. Nucl. Sci. 30, 2970 (1983).
- [11] C.A. Kapetanakos et al., NRL/MR/6793-92-7161 (1992).
- [12] H. Ishizuka, Phys. Fluids B2, 3149 (1990).
- [13] T. Orzechowski et al., Phys. Rev. Lett. 57, 2172 (1986).
- [14] K. Sakamoto et al., J. Appl. Phys. 75, 36 (1994).
- [15] K. Takayama et al., J. Appl. Phys. 77, 5467 (1995).
- [16] ERDA Summer Study of Heavy Ions for Inertial Fusion, LBL, LBL-5543 (1976).
- [17] S. Kawasaki et al., Rev. Sci. Instrum. 54, 1300 (1983).
- [18] T. Tanabe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **56**, 831 (1986).
- [19] K. Takayama and J. Kishiro, Nucl. Instum. Methods A 451, 304 (2000).
- [20] K. Takayama et al., Phys. Rev. Lett. 98, 054801-4 (2007).
- [21] K. Takayama and R.J. Briggs (Eds), *Induction Accelerators* (Springer, 2010), Chapter 10 by JJ.Barnard and R.J.Briggs.
- [22] S. Yu *et al.*, Fusion Sci. Technol. 44, 266 (2003).
- [23] B. Logan, Technical Report HIFAN, LBL (2008).
- [24] T. Iwashita et al., Phys. Rev. ST-AB, 14, 071301 (2011).
- [25] T. Adachi et al., Rev. Sci. Instum. 82, 083305 (2011).
- [26] K. Takayama *et al.*, 19th Int. Symp. on Heavy Ion Inertial Fusion (HIF2012), Berkeley, California, USA (2012).
- [27] Y. Barata *et al.*, *Proc.Particle Accelerator Society Meeting* 2012, Osaka, Japan, 226 (2012).
- [28] Liu Xingguang *et al.*, 3rd Int. Workshop on Recent Progress of Induction Accelerators, Chendu in China, October 2011.
- [29] K. Takayama et al., submitted to Phys. Rev. Lett. (2013).
- [30] M. Okamura, 19th Int. Symp. on Heavy Ion Inertial Fusion (HIF2012), Berkeley, California, USA (2012).
- [31] K. Okamura et al., IEEE Trans. Plasma Sci. 40, 2205 (2012).
- [32] 堀岡一彦 他: プラズマ・核融合学会誌 86,269 (2010).