

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

2. 重イオン慣性核融合システムの全体像

川田 重夫, 堀岡 一彦¹⁾, 高山 健^{1,2)}, 小栗 慶之³⁾, 長谷川 純¹⁾, 菊池 崇志⁴⁾

(宇都宮大学, ¹⁾東京工業大学, ²⁾高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設,

³⁾東京工業大学原子炉工学研究所, ⁴⁾長岡技術科学大学)

(原稿受付: 2013年1月24日)

重イオンビームには, 以下のような核融合にとって望ましい性質がある: ビーム生成エネルギー効率が30-40%と高いこと, イオンの物質へのエネルギー付与の物理がよくわかっておりおおむね古典的でよく定義されていること, そのエネルギー付与分布が広く物質内部に体積的にエネルギーを付与すること, ビームの軸などのビームパラメータが正確に制御できることなどである. 本章ではまず燃料標的の物理に触れ, 加速器システムとそのコンポーネント, ビーム物理などについてまとめ, 重イオン慣性核融合の全体像を紹介する.

Keywords:

heavy ion beam inertial fusion, heavy ion beam reactor system, target physics, accelerator system,

heavy ion beam physics

2.1 はじめに

慣性核融合における重イオンビームドライバーの可能性は20年以上前に米, 欧, 日などで検討され, 当時の報告書では「ビームの高出力化を筆頭に様々な課題が検討事項として残されているが, 致命的な欠点はみつからない」と結論されている. 現在に至るまで加速器の高出力化技術は絶えず進歩しており, その成果は欧州の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) や日本の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 等に現れている. その一方で, 重イオンビームドライバーの検討はその後遅々として進んでおらず, エネルギーシステムとしての重イオン慣性核融合の全体像はいまだ明確ではない.

前章で述べたように, 重イオン慣性核融合の最も顕著な特徴は, ドライバーのエネルギー付与過程にある. 重イオンビームは標的の固体密度領域まで侵入し, レーザーと比較すると幅広い領域にエネルギーを付与する. また, イオン種と運動エネルギーにより比較的容易にエネルギー付与分布を調整することができる. このことは, 様々な爆縮ス

キームを可能にすると同時にイオンビームドライバーへの要求パラメータを多様化している.

表1にこれまでに提案されている重イオンビームによる燃料爆縮のスキームを示す. 直接駆動[1,2]や間接駆動[3]の特徴はレーザーをドライバーとする慣性核融合と相似である. すなわち, 間接駆動方式と比較すると直接照射方式は効率的に燃料を駆動できるが, 均一な爆縮が成立するためにはビームの照射一様性への要求が厳しくなる. 円筒標的[4]やX標的[5]は飛程の大きい重イオンビームドライバーの特徴を生かした方式である. 標的のスケールを大きくすることによってビームの収束性への要求を緩和できる. しかし, どちらも高速点火方式を前提とするため, エネルギー付与密度を極端に大きくできるビーム収束法の実現が鍵を握っている.

2.2 燃料標的の概要と爆縮の物理

前節で述べたように, 燃料標的の爆縮と点火において, 様々なスキームが提案されている (表1). 直接駆動と間

表1 重イオン慣性核融合標的の各種爆縮スキームとビームパラメータの目安.

爆縮スキーム	全ビームエネルギー	標的利得	ビームエネルギー	全ビーム電流	ビーム本数	ピーク照射パワー	課題
直接駆動[1,2]	～数 MJ	～50	～10 GeV	～10 kA	≥32	≥ 数 100 TW	照射均一化
間接駆動[3]	～3 MJ	～100	2～4 GeV	～10-80 kA	～48	～470 TW	爆縮効率
円筒標的[4]	7.5 MJ	～100	100 GeV	～1 kA (20 kA)	1 (1)	～100 TW (2 PW)	標的利得, 超高出力ビーム
X 標的[5]	5 MJ	～300	90 GeV	～12 kA (～160 kA)	2 (1)	1000 TW (15 PW)	超高出力ビーム

*括弧内は高速点火用ビーム

2. Overview of Heavy Ion Beam Inertial Fusion System

KAWATA Shigeo, HORIOKA Kazuhiko, TAKAYAMA Ken, OGURI Yoshiyuki, HASEGAWA Jun and KIKUCHI Takashi

corresponding author's e-mail: kwt@cc.utsunomiya-u.ac.jp

接駆動は爆縮と点火を1つのドライバーで行う従来からのスキームであり、円筒標的とX標的は爆縮と点火の役割を分けた高速点火方式を採用したスキームである。このような多様な爆縮スキームが検討可能なのは、重イオンビームによる標的へのエネルギー付与分布を比較的容易に制御できることによる。重イオン慣性核融合では間接駆動スキームが優先的に考えられた時期もある。その一方で、重イオン加速器のパルスあたりのビームエネルギーはドライバー加速器の建設コストに直接影響するため、爆縮効率の高い直接駆動スキームを見直すべきであるという意見もある。システムの全体像を把握するために、最初に燃料標的の物理を概観してみよう。

重イオンをドライバーとして想定した場合、エネルギー収支を考えると、核融合燃料標的の利得 G は数10程度で十分である。これは重イオンビームエネルギードライバーの効率が、一般に30%程度と高いことが幸いしている。100万kWの核融合炉を想定すると、1秒間に3GJの核融合熱出力が必要である。パルスあたり数MJの重イオンビーム入力エネルギー E_i に対して、1回の爆縮燃焼による核融合出力は $G \times E_i$ である。1秒あたりの繰り返し回数を R_{ep} とすると、おおよそ $G \times E_i \times R_{ep} = 3 \text{ GJ}$ である。したがって、 $E_i \sim$ 数MJ程度で、おおよそ $R_{ep} \sim 10 \sim 30 \text{ Hz}$ である。

次に、重イオンビームと燃料標的との相互作用における特徴をまとめておく。重イオンビームと標的の相互作用は、5章で議論するようにプラズマによる集団的な相互作用もある程度寄与するが、おおむね荷電粒子どおしのクーロン相互作用が中心である。数値的な検討によく用いられるビームは、10 GeV程度のCsやPbビームである。したがって、重イオンビームのエネルギーは、その飛程内、つまり数100 μm から1 mm程度の厚みの物質にエネルギーを付与する。

図1に典型的な直接照射型の標的の例を示す。レーザー核融合の場合と比べると、かなりの分厚い物質に分布してエネルギーを付与する。この点とその相互作用が古典的で良く定義されている点が、重イオンビームと物質との相互作用における大きな特徴である。そのため、加熱される物質の温度は、数100 eV程度である。直接駆動で爆縮と点火を行うことを考えた場合、炉内における燃料標的のアライ

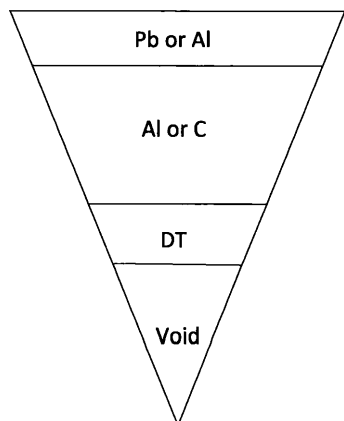


図1 重イオン慣性核融合における直接照射型の燃料標的の例。

メント精度（標的の位置ずれ）を考慮すると、標的構造はできるだけ球対称であることが望ましい。

イオンビームによる燃料標的の爆縮と点火の長年にわたる研究によると、入力ドライバーの照射不均一は数%程度以下に抑える必要があること[6]、入力ビームエネルギーとして数MJ $\sim$ 8MJ程度あれば、要求されるエネルギーゲインは得られることが予想されている[1, 2]。残る問題は、燃料が十分に圧縮されるために、いかに均一に爆縮するかである。特に燃料標的のミスアラインメントがあると、ビーム照射不均一が大きくなり、爆縮不均一が大きくなる傾向がある（図2参照）[7]。

実際の核融合炉の安定な運転のためには、ミスショットにより、エネルギーがうまく解放されなかったということは許されない。燃料標的のミスアラインメントに関する研究はこれから必要である。この点を補強するために、最近、重イオンビーム加速器に特有なビーム軸を振動させたビーム（wobbling ビーム）を用いてビーム照射不均一を緩和する手法が提案されている。Wobbling ビームとは、重イオンビーム加速器最終段近傍で、100 MHz-1 GHz 程度の高周波数で振動する電場磁場によりイオンビームの軸を振動させたビームである[8]。Wobbling ビームを生成することは、重イオンビーム加速器において技術的に可能である。ビーム照射不均一はいくつかの源から導入されるが、最も危険なものがビーム自身の照射不均一である。ビーム照射不均一は、爆縮加速度や速度そして圧縮コアの形状の不均一と圧縮密度の低下を招く。

ビームによって持ち込まれる不均一が時間的および空間的に振動するとどうであろうか。図3には、爆縮に伴う不安定性（例えばレーリー・テラー不安定性）を模式的に描いている。ある時刻 $t=0$ にビームにより不均一が導入され、不安定状態にあるとする。 $t=\Delta t$ 後には図3(a)のように成長するであろう。しかし $t=\Delta t$ に図3(b)のような位相のずれた不均一が新たに印加されたとすると、それらの重ね合わせで、不均一は決まる。この手法では、成長率は

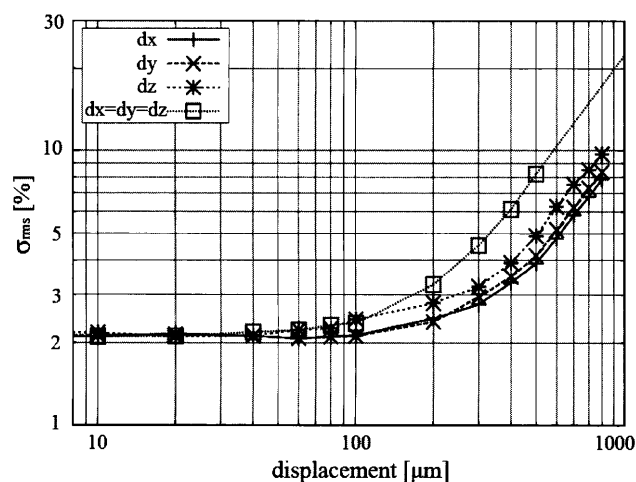


図2 核融合炉中における燃料標的のミスアラインメント、すなわちターゲットの炉中心からのずれ（displacement）とターゲット上への32ビームの照射不均一の関係。詳細は文献[7]を参照のこと。

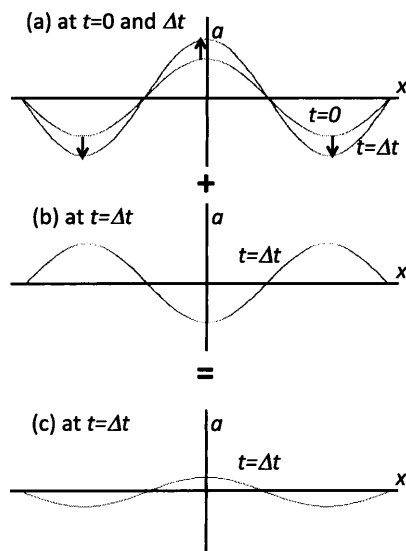


図3 不安定性の成長の源となる不均一が時間空間的に振動する場合、不安定性の成長を緩和できる。重イオンビーム軸を振動させる等で不均一の源を振動させられる[10]。

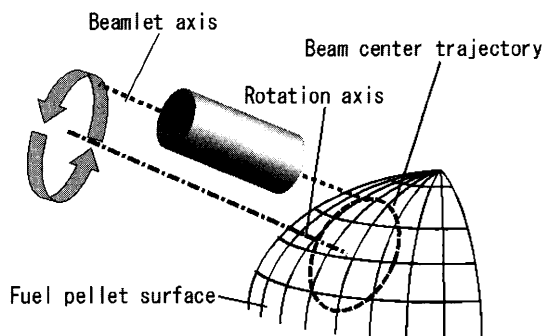


図4 Wobblingする重イオンビームがターゲットに照射される様子。

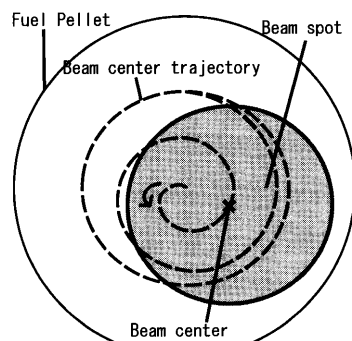


図5 スパイラル状の軌道に沿ってwobblingする重イオンビーム。

変えることはできないが、振幅は抑えうることがわかる。非常に単純で簡単な手法であるが、不均一の成長緩和には有効である[9]。

図4、図5のようなWobblingビームによりこのことを実現して、ビームによって導入される不均一性を緩和しようとする提案がなされている。重イオンビームの独特な特徴を有効に利用した手法で、核融合燃料の爆縮不均一の緩和を実現できる[10]。

核融合炉内での燃料標的のミスアラインメントをなくす

手法が実現できれば、wobblingビームを用いなくても核融合エネルギーを解放できる。様々な課題がお互いに影響しており、今後の研究の進展が必要である。ビーム照射スキームについても、標的の全方向からビームを照射できれば、より均一な照射が期待できるが、炉構成から考えると、Polar drive（核融合炉の限られた立体角からビームを入射ししかも対称性を確保しようとする照射方式）のように炉の上方と下方等のように制限された空間からのビーム入射で均一な照射が可能であれば、さらに炉構成が楽になる。この点についても今後の研究の進展が望まれる。

2.3 重イオン加速器システムの概要

重イオンビーム慣性核融合燃料標的の爆縮と点火の物理の点から考えると、ロバストなターゲット爆縮と点火を実現するために、重イオンビームの総エネルギーとして数MJ程度は必要である。重イオン慣性核融合のシステムは、ドライバー（加速器）のパラメータと燃料標的の構造および爆縮のスキームが強い相関をもつことが特徴である。すなわち、燃料標的の構造と爆縮対称性の要請から必要なビームエネルギー、ビーム電流、そして本数が決まる。均一性から考えると、直接照射スキームの場合、ビーム本数は32本程度以上が必要となる[7]。

加速器最終段のビーム本数は加速器システムの構造と構成とを決めるキーパラメータでもある。最終段加速部や炉内でのビーム輸送を考えると、1本あたりのビーム電流量は小さくしたい。一方、加速器システムの構造や炉構成から考えるとビーム本数は少なくしたい。また、ビーム本数を増やすと加速器システムが複雑になりコストが増える。ビーム本数を減らすとバンチあたりのビーム電流が大きくなり、マーキングやバンチングなどのビーム操作が必要になりビーム物理の課題が多くなる。供給可能なビームの本数とパラメータは、加速器の基本的な構造そのものに加えて、ビーム伝送の制限や加速・伝送やパルス幅の圧縮などのビーム操作に伴うエミッタンスの増加などの検討から明らかにされねばならない。したがって、前章でも述べたように重イオンドライバーのシステムを検討し全体像を明らかにすることは、合理的な爆縮スキームと実現可能な加速器システムとの整合をとる作業に帰着される。

重イオン慣性核融合システムに必要な基本的なパラメータを表2に示す。どのような爆縮スキームを採用するにしても、点火条件を実現するためには100-1000 TWのビームパワーを燃料標的の適切な領域に付与する必要がある。10-100 GeVのエネルギーを持つイオンの照射によって数MJのエネルギーを付与しようとする、必要なイオンの総数は 10^{14} - 10^{15} 個と見積もられる。途中のロスを見れば、

表2 重イオン慣性核融合に必要なビームパラメータ。

ビーム電圧	10-100 GeV
ビーム電流	1-10 kA
パルス幅	10 ns
ビーム本数	1-32
パルスあたりの重イオンの総数	10^{14} - 10^{15} 個

加速器のインジェクタ（イオンの導入部）から最終段収束部まで基本的にはイオンの総数は保存されるので、重イオンドライバーの課題は多数のイオンによって生成される空間電荷による電場（自己電場）の影響を加速器の輸送限界以下に維持しながらエネルギーを増大させることである。

重イオンドライバーはハイパワー化に向けたビームの操作が不可欠である。インジェクタ（イオン源と初期加速部）を含む低エネルギー領域では特に空間電荷の影響が大きい。ため、多数のビームパンチで A（アンペア）級の低電流のイオンを μ 秒級のパルス幅で加速し、加速に伴って電流値を増大させる。ビームを横方向に束ねる操作をマーキング、縦方向に圧縮する操作をパンチングと呼ぶが、どちらも大電流イオンビームに関してはまだ確立されていない技術課題である。

まずこれまでに検討されてきた重イオンの加速器システムを概観してみよう。現在重イオン慣性核融合のドライバーの叩き台としてしばしば参照され、そこからの展開が図られているのは1998年の I. Hofmann の "Heavy Ion Inertial Fusion in Europe" [11, 12] と2003年の S.S. Yu の "An Updated Point Design for Heavy Ion Fusion" [13-15] である。前者は高エネルギー物理の基盤技術として実績のある高周波加速器をベースにしたヨーロッパ連合のシナリオ A（図6、図7a参照）であり、後者は長い経験とパイオニアとしての自負を持つ米国の線形誘導加速器技術をベースにしたシナリオ B（図6、図7b参照）である。何れも前述した大電流とエネルギーを実現する加速器システムのシナリオである。しかし、そこで想定されている加速器本体も従来の加速器がもつ空間電荷効果制限、ビームローディング、ビームを取り巻く環境との間の相互作用の結果引き起こされる不安定性を与えるビーム電流限界は越えられない。特にイオン源から取り出されてすぐの低エネルギー域では空間電荷効果の影響が大きいので、イオン源から低エネルギー加速領域はビーム本数を揃えるブルートフォースしかない。それ以降も、各エネルギー段階における限界の範囲内で、複数の並列あるいは長パルス幅のビーム加速を行い、電流値を稼ぐシナリオにならざるを得ない。そして、最終段におけるアクロバティックなビームハンドリング（最終段圧縮）の導入で、パルス長を圧縮する。どちらのシナリオもこれらの基本的な特徴は同じである。しかし、低インピーダンス誘導加速器と高周波加速器では加速し得るピーク電流に大きな差がある。

図6は横軸がビームエネルギー、縦軸がビーム電流、右上にいくほどビームパワーが増大することに対応し、破線は空間電荷制限条件である。到達ビーム強度を得るプロセス（図6参照）に、シナリオ B は線形の誘導加速器で構成されるのに対してシナリオ A では円形の蓄積リングを導入する処が一番大きな違いである。

シナリオ A では周長 70.5 m の 3 階対称、Dispersion-free region を持つ Lattice のリングで 10 GeV リニアックからのビームを蓄積する。詳細をここでは議論しないが、蓄積方法はこれまで加速器社会ではまだ経験がない複雑な手法の合わせ技のビーム操作（入射前の線形加速器内での RF

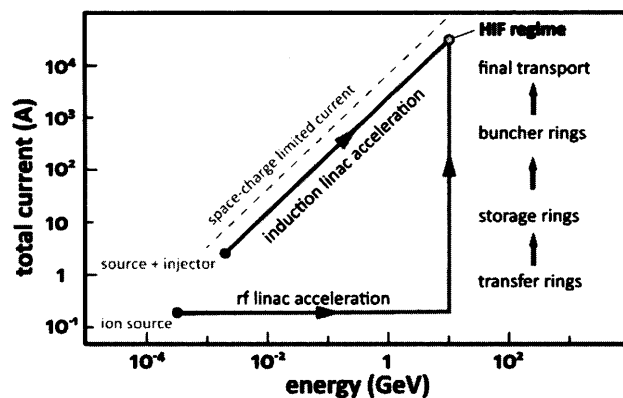


図6 シナリオ A, B におけるビーム電流とエネルギーの関係 [13].

ローテーション、横方向位相空間での painting を行いながらの多重入射、RF バリアー電圧による閉じ込めと圧縮 (250 ns $\rightarrow$ 120 ns) を仮定している。この複雑なビーム操作の過程でどの程度のビームエミッタンスの増加とロスが発生するのがこの方式の課題の一つである。

一方、シナリオ B の加速器システムの最大の懸案はマルチビーム誘導加速セルを用いた低エネルギーから高エネルギーまで 10 Hz での加速である。まず、このようなマルチビーム用誘導加速セルの稼働の経験がない。ハードとしてマルチビーム対応の複雑構造のセル内の絶縁や電場分布の一様性などの電気的特性から、ビーム間相互作用の非一様性の影響がどうなのか等ビーム物理上解明しておくべき課題がある。シナリオ A, B の全体構成を下表と図 7 a, 図 7 b に示す。

シナリオ A:

イオン源 $\rightarrow$ 低エネルギー入射器 (RFQ) + Funneling システム $\rightarrow$ 高エネルギー RF 線形加速器 (10 GeV, 400 mA, 3 km 長) $\rightarrow$ Bunch Synchronization Stage (遅延ビームパス) $\rightarrow$ 蓄積リング (250 ns) $\rightarrow$ 線形誘導加速器 (バンチャー) $\rightarrow$ ビーム集合システム $\rightarrow$ 最終ドリフト (6 ns) $\rightarrow$ 最終収束 $\rightarrow$ 標的

シナリオ B:

イオン源 $\rightarrow$ 低エネルギー入射器 (静電 Q, 1-3 MeV, 1 A / beam $\times$ 100, 20 μ s) + Funneling システム $\rightarrow$ 高エネルギー線形誘導加速器 (1-10 GeV, 200 A/beam, 100 ns, 3 km 長) $\rightarrow$ ドリフトコンプレッサー (2 kA/beam, 10 ns) $\rightarrow$ 最終収束 $\rightarrow$ 空間電荷フリードリフト $\rightarrow$ 標的

一方で、誘導加速器をベースにするという観点から、図 8 に示すように Barnard らによって重イオンドライバーの検討が行われている [16]。この議論では、図 7 b で示されたような線形誘導加速器（図 8 a）、多段の誘導加速モジュールを組み込んだ循環型加速器（図 8 b）、輸送が難しい低エネルギー領域をソレノイド電磁石で補う線形誘導加速器（図 8 c）、さらに重イオン慣性核融合ではほとんど検討されていない高価数のイオン (Xe^{8+}) ビームを用いるアイデア（図 8 d）が比較検討された。前述のシナリオ A, B で述べられていることと同様に、この場合もいずれの構成でも一長一短があり、ビーム物理とコスト比較の観点から

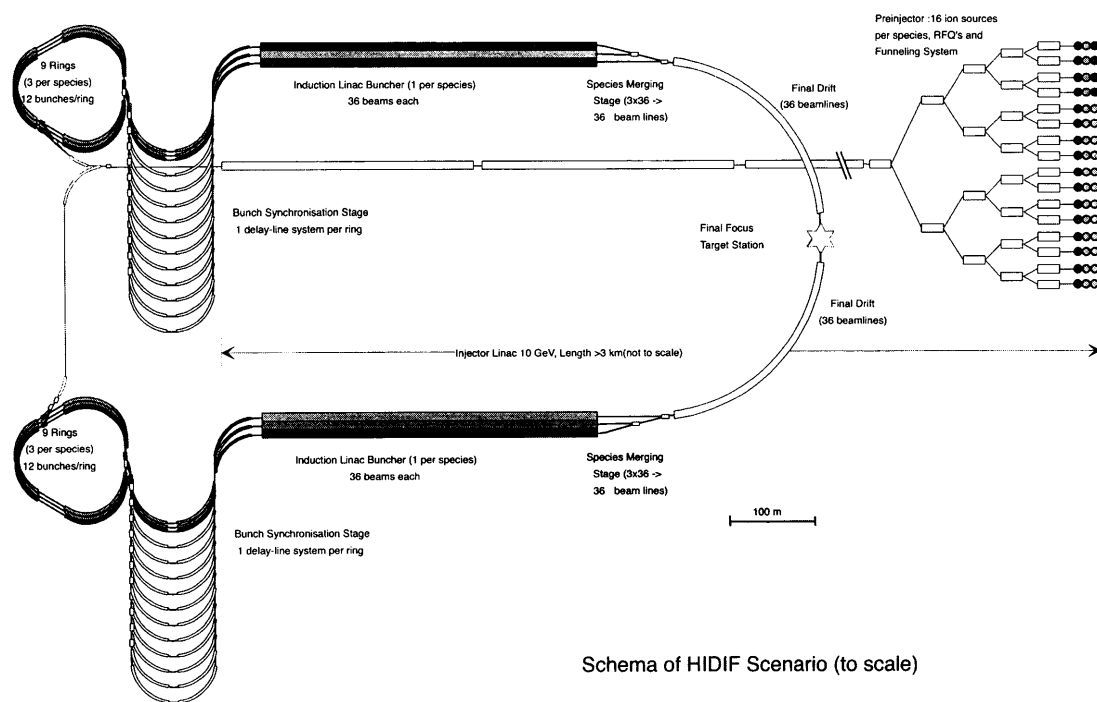


図 7 a シナリオ A[12].

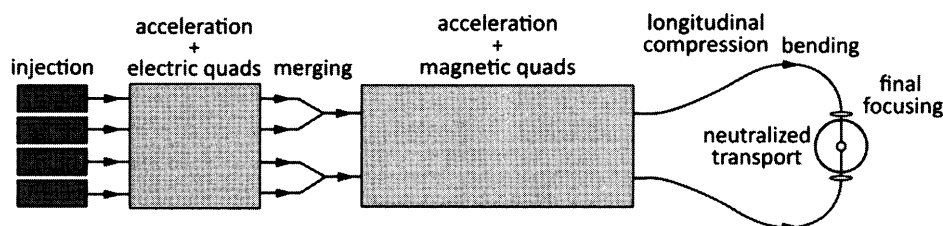


図 7 b シナリオ B[15].

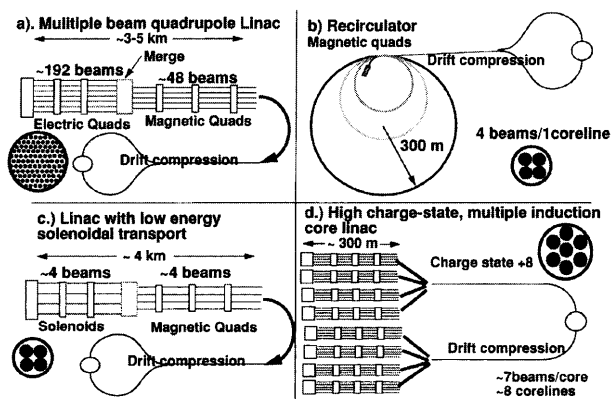


図 8 誘導加速器をベースとした重イオン慣性核融合のドライバーシステム案[16].

合理的な加速器システムを検討しなければならない。

例として、マルチビームの線形誘導加速器によるシステムについてコスト評価が行われている[17]。論文にも断りが書かれているとおり、もちろんこのコスト評価は材料や技術的な課題によって価格変動が起こることが予想されるが、試算によると電磁石によるビーム輸送ラインが全体(～\$1.4 B)のほぼ半分の予算を占めると考えられている。モジュール化された機器についてはマスプロダクシ

ンの効果が期待できるであろうが、過去の大型線形加速器建設の相場から外挿すると概ね1億円/MeVになるだろう。パワープラントに到る前段階として、ITERやレーザー慣性核融合のNational Ignition Facility(NIF)と同レベルの重イオン慣性核融合の実験施設を建設するにしても国家プロジェクトとしての位置づけと合意がなければ事は進まないと思える。

2.4 加速器要素技術とビーム物理の課題

この節ではシナリオ A, B のドライバーシステムの中で重要な要素技術と研究課題について論じる。

いずれのシステム要素についても、ハード面では技術的にブレイクスルーが必要な物はないと思える。一方、放置すればビーム物理上 fatal な問題であっても、各種エラーによるビームへの影響が定量的に評価可能なものについては、エラーの数を減らして、影響の抑制を図った上に、ビームへの影響の対処療法を駆使することで克服は可能である。即ち、これまでの加速器建設と同じ手法が取り得る。それでも回避できない原理的困難(例えば、空間電荷効果制限電流を超えたビームの加速、リウビルの定理は成立していても位相空間内の不可避免的なフィラメンテーション等

によるエミッタンス増大、残留原子や分子との散乱によるエミッタンスの増大、電子捕捉・剥ぎ取りによる突然のロス）等については、事前の評価を行った上で供給し得るビーム電流とエミッタンスを把握することになる。また、加速器の入・出射でのビームロスもまた不可避である。その絶対値は実際に稼働させてみないとなかなかわからない。表3は、これらの中でいままでの加速器と幾分趣を異にするが、カテゴリーとしてはfatal/non-fatalな課題を併せて列記した。そのいくつかは後の章の中でさらに議論される。

2.5 重イオン慣性核融合のドライバーと標的爆縮スキームの全体像

この章の最後に、重イオンビーム慣性核融合システムの全体像の捉え方についてまとめておく。これまでに述べたように、慣性核融合のエネルギードライバーへの基本的な要求事項は、1ショットあたり数MJ程度以上のエネルギーを燃料標的の均一な爆縮に必要な領域に付与することである。重イオンビームの制御性とエネルギー付与特性の多様性は、円筒状、球状標的の直接照射、間接照射、高速点火など、様々な燃料標的の形状を用いた核融合システムの検討を可能にしている。一方、このことは加速器設計を複雑にするとともにイオンビーム核融合の統一的なシステム評価を一つに絞ることを困難にしている。すなわち、重イオン核融合システムのドライバー（イオン加速器）の条件と標的構造や爆縮条件とは密接に関係しており、標的の形状によって必要とするビーム本数（ビーム電流値）が異なる。一方、ビーム電流の違いは加速器設計に大きな影響を及ぼす。また、イオン加速領域の伝送条件や炉内の伝送条件によって達成可能なビームパワーが制限される。そして加速器システム最終段階でのビームパワー密度の限界は、標的の形状や燃料爆縮のスキームを選択するマージンを小さくする。

このように、様々なキーとなるパラメータがお互いに相関していることは、全体像の検討を複雑にしている一方、システム設計にフレキシビリティを与えているとも考えることもできる。高出力加速器システムの構成と標的構造の組み合わせを様々な影響因子を考慮して再検討し、いくつかの選択肢の中から連続的かつ安定にエネルギーを生み出す

手段として重イオン慣性核融合システムの最も合理的な全体像を示す必要がある[18]。

加速器システムとしての成立条件と核融合標的爆縮からの要求が互いに関連する複雑な状況を整理して問題点を議論するには、統一的な指標が必要である。幸いなことに、加速器科学にはエミッタンスという概念が導入されている。イオン源から慣性核融合の燃料標的の照射部まで、加速器システム内を長距離に亘って加速・変調・輸送され、標的に照射される多数のイオンの複雑な挙動を、6次元位相空間上の粒子分布（エミッタンス）の時間発展として統一的に捉えることができる。

規格化したエミッタンスでビームの質を評価することによって、加速器システム内のビームの制御性と同時に、標的へのエネルギー付与密度の評価が可能である。標的へ必要なエネルギー密度を付与できるビームの性能は標的構造に依存しており、エミッタンス ϵ_f で与えられる。一方、イオン源が供給できるビームの初期エミッタンスを ϵ_i 、各加速器内のビーム操作に伴うエミッタンスの増大率を g_i 、最終段圧縮と炉内伝送に伴うエミッタンス増大率を g_j とすると、加速器システムの最終段階でのエミッタンス ϵ_f は、

$$\epsilon_f = \epsilon_i \times \prod_j g_j \times g_l$$

と表現できる。

重イオン慣性核融合ドライバーは、インジェクタ部分で非常に大きなフラックスを必要とすること、加速・電流増幅・変調を受けながらビーム輸送されること、最終段部で縦方向の急激なパルス圧縮を行う必要があること、加速器が供給可能な条件と標的からの要請条件との整合性を取る必要があることなどが特色である。従来の加速器科学の枠組みを大きく超えるビームパワーを発生するために複雑なビーム操作を必要とするが、規格化した指標を導入して統一的に論じることが可能である。すなわち、このような規格化した指標を基にすると、標的を必要なエネルギー密度まで標的爆縮する条件は $\epsilon_i < \epsilon_f$ と明快に表現でき、重イオン核融合システム全体像の評価は、標的構造に応じて要求されるビームエネルギー付与密度と要求できるビームの質との整合をとることに帰着される。

重イオン加速器のビームパワーを慣性核融合のドライ

表3 重イオン慣性核融合ドライバーのハードとビーム物理の課題。

段階	シナリオ A	シナリオ B	
イオン源	イオン供給能力		
低エネルギー部	ビームマーキング時でのエミッタンス増大		
中間、高エネルギー部	フルエネルギー RF 線形加速器のコスト低減	多重ビーム誘導加速に伴う諸課題： BBU と収束系、インピーダンス管理 収束系ミスアライメントと Beam 中心の位置管理	
ビーム蓄積	ペインティングで得られる最終エミッタンスの評価、RF バリアーバケットハンドリングに伴う縦方向エミッタンス増大、ビームロス評価 ロスビームによる真空度への影響		
パルス圧縮	専用誘導加速セルと駆動電源システム、理想的電圧勾配の実現		
最終収束	大口径、超伝導 4 極磁石の実現、熱負荷評価		
中和伝送			プラズマチャンネルに許されるジッターの評価

バーのレベル（～100 TW）まで高めるのに重要な要素は、

- 1 大量の低速イオンを発生させ方向性を付与するイオン源部
- 2 空間電荷効果を避けながら加速とビーム操作を行う中間加速部
- 3 標的照射に必要なレベルにビームパワーを増幅させる最終段圧縮部

である。また、標的爆縮に必要なエネルギー密度は、

- 4 標的構造の検討とイオンビームと標的との相互作用によって決定される。

研究開発の重要なポイントとなる高フラックス・インジェクタ、マルチビーム伝送、最終段圧縮のビーム物理について、スケール実験を行いながら定量的に検討を行う必要がある。日本の重イオン慣性核融合の研究グループでは、これらの課題について重点的に研究がすすめられている。レーザーアブレーションプラズマを利用したイオン源は、高フラックスと低エミッタンスを両立させ、重イオンドライバーの要求を満たせる可能性がある。また、中間加速部のビーム操作とパワー増大に関しては、新しく提案された誘導加速シンクロトロンが新しい構成の重イオンドライバーのシナリオを提供できるかもしれない。新しいアイデアが各方面から出された現在、炉の概念設計を行う等して、将来の重イオンビーム慣性核融合炉への道筋を再構成しておく必要がありそうである。この小特集の以下の章では、これらの重要課題に焦点を絞って論じている。

参考文献

- [1] S. Kawata *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **606**, 152 (2009).
- [2] B. G. Logan *et al.*, Phys. Plasmas **15**, 072701 (2008).
- [3] D.A. Callahan-Miller and M. Tabak, Phys. Plasmas **7**, 2083 (2000).
- [4] M. M. Basko *et al.*, Phys. Plasmas **11**, 1577 (2004).
- [5] E. Henestroza and B.G. Logan, Phys. Plasmas **19**, 072706 (2012).
- [6] S. Kawata *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **53**, 3416 (1984).
- [7] S. Miyazawa *et al.*, Phys. Plasmas **12**, 122702 (2005).
- [8] H. Qin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 254801 (2010).
- [9] S. Kawata, Phys. Plasmas **19**, 024503 (2012).
- [10] S. Kawata *et al.*, Plasma Fusion Res. *accepted* (2013).
- [11] I. Hofmann, Nucl. Instrum. Methods A **464**, 24-32 (2001).
- [12] S.S. Yu *et al.*, Fusion Science Tech. **44**, 266 (2003).
- [13] <http://hif.lbl.gov/tutorial/assets/fallback/index.html>
- [14] C.R. Prior, "Status of the HIDIF Study", *Proc. EPAC1998*, 323 (1998).
- [15] R.O. Bangerter, "The Induction Approach to Heavy-Ion Inertial Fusion: Accelerator and Target Considerations", *Il Nuovo Cimento* **106A**, 1445 (1993).
- [16] J.J. Barnard *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **415**, 218 (1998).
- [17] W.R. Meier, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **415**, 249 (1998).
- [18] P.A. Seidl and J.J. Barnard ed., <http://ahif.lbl.gov>, Workshop on Accelerators for Heavy Ion Fusion, (2011).