

# 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<sup>1)</sup>, 高山 健<sup>1,2)</sup>, 小栗慶之<sup>3)</sup>, 長谷川純<sup>1)</sup>, 菊池崇志<sup>4)</sup> (字都宮大学, <sup>1)</sup>東京工業大学, <sup>2)</sup>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にしている.

**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

全ビーム	標的	ビーム	全ビーム	ビーム	ピーク照射	雪田 耳屈
エネルギー	利得	エネルギー	電流	本数	パワー	「林思
~数 MJ	$\sim 50$	$\sim 10 \text{ GeV}$	$\sim 10 \text{ kA}$	≥32	≥数100 TW	照射均一化
$\sim 3 \text{ MJ}$	$\sim 100$	2~4 GeV	~10-80 kA	~48	$\sim 470 \text{ TW}$	爆縮効率
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
5 MJ	$\sim 300$	90 GeV	~12 kA (~160 kA)	2 (1)	1000 TW (15 PW)	超高出力ビーム
	全ビーム エネルギー ~数 MJ ~3 MJ 7.5 MJ 5 MJ	全ビーム 標的   エネルギー 利得   ~数 MJ ~50   ~3 MJ ~100   7.5 MJ ~100   5 MJ ~300	全ビーム標的 利得ビーム エネルギー~数 MJ~50~10 GeV~3 MJ~1002~4 GeV7.5 MJ~100100 GeV5 MJ~30090 GeV	全ビーム     標的     ビーム     全ビーム       エネルギー     和得     エネルギー     電流       ~数 MJ     ~50     ~10 GeV     ~10 kA       ~3 MJ     ~100     2~4 GeV     ~10-80 kA       7.5 MJ     ~100     100 GeV     ~1 kA       5 MJ     ~300     90 GeV     ~12 kA	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~数 MJ~50~10 GeV~10 kA $\geq 32$ ~3 MJ~1002~4 GeV~10 sA $\geq 32$ ~3 MJ~100100 GeV~10 kA $\geq 48$ 7.5 MJ~100100 GeV~1 kA (20 kA)1 (1)5 MJ~30090 GeV~12 kA 2 (1)	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~数 MJ~50~10 GeV~10 kA $\geq 32$ $\geq 3100 \text{ TW}$ ~3 MJ~1002~4 GeV~10 80 kA~48~470 TW7.5 MJ~100100 GeV~1 kA (20 kA)1 (1)~100 TW (2 PW)5 MJ~30090 GeV~12 kA 

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.

\*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 $G \times E_i \times R_{ep} = 3$ GJである.したがって, $E_i$ ~数 MJ 程度で,おおむね $R_{ep} \sim 10 \sim 30$  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.

ンメント精度(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~8 MJ 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 ー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・テーラー不安定性)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 あっており、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、マージ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と,必要なイオンの総数 は10<sup>14</sup>-10<sup>15</sup>個と見積もられる.途中のロスを無視すれば,

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、多数のビームバンチで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ジン グ、縦方向に圧縮する操作をバンチングと呼ぶが、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は線型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 らの多重回入射, RF バリアー電圧による閉じ込めと圧縮 250 ns→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 生するのか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→低エネルギー入射器(RFQ) + Funneling システ ム→高エネルギー RF 線形加速器 (10 GeV, 400 mA, 3 km 長)→Bunch Synchronization Stage(遅延ビームパス)→蓄 積リング(250 ns)→線形誘導加速器(バンチャー)→ビーム 集合システム→最終ドリフト(6 ns)→最終収束→標的 シナリオ B:

イオン源→低エネルギー入射器(静電 Q, 1-3 MeV, 1 A /beam×100, 20 µs) + Funneling システム→高エネルギー 線形誘導加速器(1-10 GeV, 200 A/beam, 100 ns, 3 km 長)→ドリフトコンプレッサー(2 kA/beam, 10 ns)→最終 収束→空間電荷フリードリフト→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7bで示さ れたような線形誘導加速器(図8a)、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8b)、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8c)、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<sup>8+</sup>)ビームを用いるア イデア(図8d)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7a シナリオA[12].







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].論文中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ョ

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 にブレー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 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<sub>f</sub>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<sub>i</sub>、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<sub>i</sub>、最 終段圧縮と炉内伝送に伴うエミッタンス増大率を g<sub>j</sub>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<sub>f</sub> は、

$$\varepsilon_{\rm f} = \varepsilon_{\rm i} \times \prod_{\rm i} g_{\rm j} \times g_{\rm f}$$

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

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	ビームマージン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			

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.

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).