

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

Progress of High-Power-Accelerator Research for Heavy Ion Fusion

1. はじめに

堀岡一彦

東京工業大学

(原稿受付：2013年1月18日)

1. はじめに

数年前に慣性核融合を目的とした MJ 級のレーザー施設 (NIF: National Ignition Facility, 国立点火施設) が米国で完成し、点火実証に向けた研究が進められている。また、フランスでも同様の大型レーザー施設 (LMJ: Laser Mega Joule) 計画) が完成しつつある。NIF が点火実証に成功すれば、慣性核融合の研究はいよいよ発電炉を展望できるエネルギードライバーを検討する段階になると予想される。“レーザー核融合”は慣性核融合の代名詞でもあり、40年以上に亘ってエネルギーの集中性と制御性とに優れた高出力レーザーが高エネルギー密度プラズマや爆縮物理を解明するためのドライバーとして用いられてきた。NIF の稼働によりレーザー核融合は点火実証を展望できる段階に到達したが、MJ 級のパルスを高効率・高繰返しで発生できる核融合炉用のレーザーシステムの開発には難しい課題が残っている。

慣性核融合のエネルギードライバーの役割は、時間的・空間的に制御されたパルスエネルギーを燃料標的に付与し、均一な爆縮を駆動して点火条件を達成させることである。イオンビームはレーザーと比較すると発生効率が高いうえに標的へのエネルギー付与過程は古典的ではほぼ正確に予測と制御が可能という利点がある。レーザーで均一な爆縮と核融合点火に必要な標的へのエネルギー付与の条件が明らかになれば、効率が高く必要なパワーを標的の適切な領域に付与できるパラメータを持つイオンビームで代替できる。したがって、イオンビームはレーザーで慣性核融合の点火実証実現後の発電炉システムのドライバーの有力な候補であると位置づけられてきた。

荷電粒子ビームのパワーは加速電圧 (加速エネルギー)

×電流 (粒子フラックス) で表される。また、燃料標的の爆縮を駆動する時間は 10 nsec 程度である。加速電圧とともにイオンの質量を増加させれば、爆縮に必要なエネルギーを標的の適切な領域に付与できる。したがって、粒子ビーム慣性核融合はパラメータマージンが大きく、100 TW × 10 nsec (1 MJ) のビームパワー (エネルギー) を得るために必要な 10 MeV × 10 MA × 10 nsec (プロトンやリチウムなどの軽イオン) から 100 GeV × 1 kA × 10 nsec (重イオン) のパラメータ領域がイオンビームドライバーの目安となる。1980年代の粒子ビーム駆動核融合の黎明期には、コストの面から軽イオンビームがドライバーとして検討されたが、MA 級の大電流のイオンビームは発生も制御も困難であることがわかり、粒子ビーム核融合のドライバーはイオンの加速エネルギーを大きく (イオンの比電荷を小さく) してビーム電流を抑制する方向に推移してきた。

重イオン加速器は発電炉の有力なエネルギードライバーであるが、100 TW 級のビームパワー付与が可能な加速器システムの全体像を確定するには解決すべき重要な検討課題が残っている。すなわち、U や Pb などの一価の重イオンを用いて比電荷を小さくしても、必要なビーム電流は 10 kA 程度と大きいため制御と収束が難しい。重イオンドライバーの課題は、自己電場の影響をどのようにして克服しながら必要な数の粒子を発生・加速・制御し、ビームパワーの増大とビームの質の維持を両立させて燃料標的への照射エネルギー密度を上げるかである。これらのことについては 2 章でも包括的に議論されるが、基本的な位置づけと研究課題はここ 10 年間にさほど変化していない。

ドイツの重イオン科学研究所 (GSI) では、パルスあたり kJ 級のビームエネルギーを生成できる加速器設備 (SIS-18)

を用いて高エネルギー密度状態の物質科学の研究が進められるとともに、MJ級(100 GeV×1 kA)の重イオンビームを発生できる加速器(SIS-100)建設に向けた設備増強の検討が開始された[1]。また、GSIでは、ロシアやフランスの加速器研究者と共同研究が積極的に進められており、このビームパラメータの条件下で円筒標的を2次元的に爆縮するスキームで重イオン慣性核融合炉のシステム設計が検討されている。

誘導型加速器をベースにした慣性核融合システムは米国ローレンスバークレー研究所(LBL)で提案された。その後も30年以上に亘ってLBLは重イオン慣性核融合の中心グループとして誘導型加速器を中心とする高出力加速器や関連要素技術開発を粘り強く続けている。ハイパワーイオンビーム照射を用いた標的実験やkA級のビーム物理の研究が可能な誘導加速システムの試作には莫大な建設コストがかかるため、これまでの実験的な研究は加速器技術の開発や標的へのエネルギー付与過程の解明などの要素研究が中心である。大電流ビームの伝送や収束などのビーム物理の課題は、“Scaled Experiments”と呼ばれるスケールダウンした装置によって行われ、マルチビームの加速やバンチング(ビームの縦方向圧縮)に伴うビーム物理の解明が進んでいる。

日本ではGSIやLBLのようなイオン加速器技術の開発やビーム物理の研究の中心になるような大型の施設は存在しないが、イオン源から標的爆縮スキームの検討まで幅広く研究が行われている。プラズマ・核融合学会誌で「重イオン慣性核融合の新しい展開」と題した小特集が出版されてから10年が経過した[2]。レーザーアブレーション型イオン源の開発、インダクションシンクロトロン of 発明、ビームに空間的な変調をかけることによる標的照射の均一化を行う提案など、その間に日本の重イオン核融合関連の研究グループから発信された成果は数多くある。日本で関連研究を行っている主な研究者が協力して、重イオン核融合のこの10年間の研究活動を概観するとともに日本での研究成果を中心にその後の新しい展開について総括し、今後を展望しようというのがこの小特集が企画された動機である。

最初に、慣性核融合のエネルギードライバーとしての重イオンビームの利点と特徴を再確認しておきたい。重イオンドライバーの利点は以下のとおりである。

- ・基本的に高繰返し能力を持ち長寿命であること
- ・エネルギー付与領域の標的密度が高く飛程が大きい(付与領域が広い)こと
- ・エネルギー付与過程が高精度で予測・制御可能であること
- ・したがって種々の爆縮スキームが検討可能であること
- ・基本的な発生効率が高いので、標的利得が低くてもシ

ステム設計が可能であること

- ・エネルギープラントとしての現実的な可能性を持つこと
- 一方、重イオンドライバーは、核物理や高エネルギー物理学のために生成されるビームと比較すると、イオンの運動エネルギーは低くビーム電流が極端に大きいため、空間電場に大きな影響を受けることが特徴である。したがって、ビームパワーを増大させるのに特殊なビーム操作が必要である。その際に生ずるビームの質の劣化(エミッタンスの増加)を予測するためのビーム物理はそのすべてが明らかになっているとはいえない。

エネルギードライバーのパラメータと標的爆縮のスキームが相関を持つことも重イオン慣性核融合システムの全体像を捉えがたくする要因である。すなわち、球状標的の直接照射には比較的低加速電圧(～10 GeV)の多数のビームが必要であり、円筒状の標的を爆縮するには高い加速電圧(～100 GeV)とドーナツ状のエネルギー付与を行うためのビーム操作が必要になる。一方、最終段部での加速電圧とビーム電流値によって加速器システムの構成や炉内のビーム伝送の形態が異なる。

この小特集では関連トピックを個別に紹介することは避け、最初に重イオン核融合システムの全体像について検討した後、重要な課題を体系的に紹介することをめざした。

小特集は以下のように構成されている。

- 1 はじめに
- 2 重イオン慣性核融合システムの全体像
- 3 イオン源
- 4 誘導加速器
- 5 最終集束系
- 6 おわりに

2章では執筆者全員が参加して加速器システムと重イオン核融合の爆縮スキームを統一的に検討し、重イオンをエネルギードライバーとする核融合システムの全体像を明確にするための課題と個々のトピックとの関連を明らかにしている。また、2章の議論が重イオン慣性核融合の燃料標的の物理から始まっていることは、これまでの小特集にはない特徴であり、これに続く章では2章で明確にされた全体像と課題とを基に、関連するトピックを重点的に紹介することをめざした。

参考文献

- [1] *Proc. 19th Int. Symp. Heavy Ion Fusion*, Berkeley (2012) (to be published).
- [2] 小特集「重イオン慣性核融合の新しい展開」: プラズマ・核融合学会誌 77, 15 (2001).
- [3] *Proc. 17th Int. Symposium Heavy Ion Fusion*, 東京工業大学・原子炉工学研究所 (2008).

小特集執筆者紹介



ほりおか かず ひこ
堀岡 一彦

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・創造エネルギー専攻教授。専門は、高エネルギー密度プラズマ、パルスパワー、大電流ビームの物理、原子力発電所の事故以来、除染技術の研究にも取り組んでいます。科学や技術よりも我々自身が飛躍的に成長しない限り、アーサー・C・クラークの世界はともかくとして、フリーマン・ダイソンが描く未来も実現は難しいかもしれないと考えています。



かわ た しげ お
川田 重夫

宇都宮大学工学研究科教授。核融合でエネルギー問題の解決に貢献し、人類を救おうと、大学院生からイオンビーム慣性核融合の研究に従事。他にレーザー粒子加速やシミュレーション支援環境などの研究も行っている。なかなか核融合エネルギーが解放できなくて手強いと感じながらも頑張っている（つもり）。



たか やま けん
高山 健

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設、教授。主な研究分野：ビーム物理・加速器物理、非線形力学、高速重イオンの応用研究。趣味はKayak、仕事以外の興味は文明の崩壊パターン、過去における孤立系の崩壊パターンは社会人類学でかなり良く分類されているが、重層構造のglobal文明の崩壊パターンは如何に？



お ぐり よし ゆき
小栗 慶之

所属は東京工業大学原子炉工学研究所物質工学部門。研究分野はイオンビーム応用工学（荷電粒子励起X線放出などを用いた環境・材料科学、医用工学、重イオン慣性核融合に関連したビーム・高エネルギー密度標的相互作用、加速器工学など）。学内の1.6メガボルト静電重イオンタンデム加速器の維持管理、運用も担当。



は せ がわ じゅん
長谷川 純

東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻、准教授。神奈川県藤沢市出身。研究分野はプラズマ・イオンビーム理工学、慣性核融合。プラズマとイオンビームの狭間で、高エネルギー密度をキーワードに新機軸を打ち出すべく模索中。最近の趣味はトレッキングや登山、写真など。



きく ち たか し
菊池 崇志

釧路工業高等専門学校卒業、長岡技術科学大学卒業、東京工業大学総合理工学研究科博士後期課程修了。現在、長岡技術科学大学・原子力安全系・准教授。学内の産学連携関連の副センター長を兼務しているため、専門分野外の方とお会いする機会がよくあり、「ご専門は？」と聞かれるが「核融合」「粒子ビーム」などと答えると（°皿°）ポカーンとされるので、最近は「プラズマです」と回答している。内心とても残念に思っている。