

## 高速電子ビームの磁場ガイドによるコア加熱の高効率化 Fast Electron Beam Guiding by Magnetic Fields for Efficient Core Heating

城崎知至<sup>1</sup>, 砂原淳<sup>2</sup>, 藤岡慎介<sup>3</sup>, 長友英夫<sup>3</sup>, Javier Honrubia<sup>4</sup>,  
白神宏之<sup>3</sup>, 坂上仁志<sup>5</sup>, 三間国興<sup>3,6</sup>, 疇地宏<sup>3</sup>, FIREX project  
T. Johzaki<sup>1</sup>, A. Sunahara<sup>2</sup>, S. Fujioka<sup>3</sup>, H. Nagatomo<sup>3</sup>, J. Honrubia<sup>4</sup>,  
H. Shiraga<sup>3</sup>, H. Sakagami<sup>5</sup>, K. Mima<sup>3,6</sup>, H. Azechi<sup>3</sup>, FIREX project

広大院工<sup>1</sup>, レーザー総研<sup>2</sup>, 阪大レーザー研<sup>3</sup>, マドリッド工科大<sup>4</sup>, 核融合研<sup>5</sup>, 光産創大<sup>6</sup>  
Hiroshima Univ.<sup>1</sup>, ILT<sup>2</sup>, ILE Osaka Univ.<sup>3</sup>, UPM<sup>4</sup>, NIFS<sup>5</sup>, GPI<sup>6</sup>

### はじめに

高速点火レーザー核融合[1]では予め高密度に爆縮した燃料コアに超高強度短パルスレーザーを照射し、発生する高速電子によるエネルギー輸送によってコア端をごく短時間内に点火温度まで加熱し、核融合点火・燃焼を実現する方式で、コンパクトで高効率なレーザー核融合炉が可能となる。この方式の最も重要な物理課題は、超高強度レーザーによる爆縮コアの高効率加熱である。

超高強度レーザー照射で発生する高速電子ビームは半角 50 度程度の非常に大きな発散角を持ち、これが加熱率低減の主要因となっていることがシミュレーションにより示された[2]。加熱効率向上には高速電子発生時のビーム広がりを小さく抑え、且つコアまで効率よくガイドすることが要求される。しかし、非線形相互作用である相対論レーザープラズマ相互作用を制御することは困難である。そこで、我々は大きな発散角を有する高速電子ビームを自発並びに外部印加磁場を用いてコアまでガイドする方法を提案し、理論シミュレーションによる評価・並びに実験による実証を進めている。

### 数値シミュレーション

#### (a) 抵抗性自発磁場によるビームガイド

抵抗率の異なる物質間を高速電子が伝搬すると、抵抗率の空間勾配に起因して強磁場が発生する[3]。我々は、この磁場を利用して高速電子をコアまでガイドする Tongari tip cone(図 1)を提案した。チップ部の材料として周辺の爆縮プラズマよりも高 Z の物質を用いると、高速電子をチップ内に閉じ込める磁場が物質境界に誘起される。抵抗率勾配が大きいほど、つまりチップ材の Z が大きいほど磁場強度は大きくなるが、一方で、高速電子がチップ内を伝搬する際の衝突によるエネルギー損失や散乱が大きくなる負の影響も懸念される。

本研究では、さまざまな材質のチップ材(Au, Cu, Al, DLC)を仮定し、Fokker-Planck シミュレーション

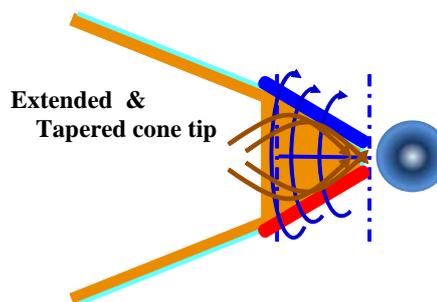


図 1 Tongari tip cone の概念図. コーンチップをコア方向に拡張し、先細にする。コーン材と爆縮プラズマ間に磁場が形成され、この磁場により高速電子がコアへとガイドされることが期待される。

によりガイディング効果並びに加熱効率について、従来の先端部がフラットな Au コーン(標準コーン)の結果と比較することにより評価を行った[4]。コーン側壁に生成する磁場強度は $\sim 1\text{kT}$  が得られた。コーン材の Z が大きいほど磁場強度は強くなるが、チップ内での衝突効果(エネルギー損失と散乱)も高 Z 材ほど大きくなる。結果として、Au や Cu では、ガイド効果以上にチップでの衝突効果が大きくなり、コア加熱率は標準コーンに比べ低下した。これに対して、中 Z の DLC や Al では、ガイド効果の方が上回り、加熱効率が向上することを示された。

#### (b) 外部印加磁場によるビームガイド

高速電子伝播方向に磁場を印加すると、高速電子は磁力線に捕捉され、その周りをらせん運動しながら進む。電子の旋回半径(ラーマ半径)が加熱領域と同程度、もしくはそれ以下となる強磁場をかけた場合、高速電子は磁力線に捕捉されコアまで効率よくガイドされることが期待される[5]。また、らせん運動していることから、直線行路に比べ飛行距離が長くなるため、実効的な飛行距離が短くなることも加熱効率向上につながると期待される。

我々は、電子ビーム伝播方向に平行磁場を印

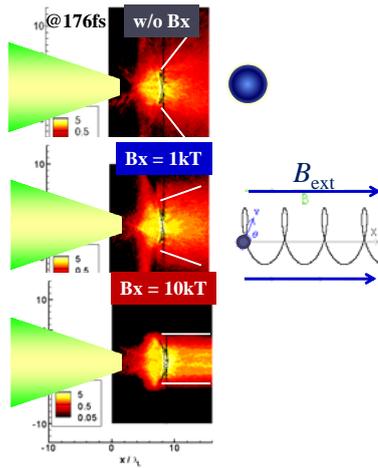


図 2 外部磁場による電子ビームガイドの概念図 (右)と 2次元粒子シミュレーション結果(左);発生高速電子密度の空間分布。

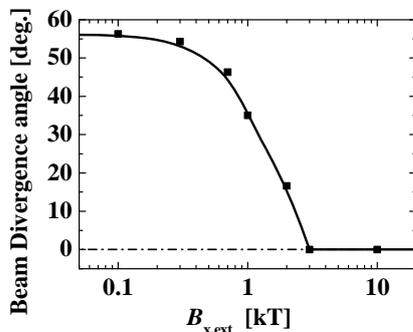


図 3 印加磁場強度  $B_{x,ext}$  とビーム発散角の関係。

加した2次元粒子シミュレーション並びにハイブリッドシミュレーションを行い、外部印加磁場によるビームガイド効果を評価した。図 2 に異なる印加磁場強度下で発生高速電子のエネルギー密度分布を示す。磁場がない場合(上図)にくらべ、磁場強度を強くしていくと(中図、下図)、高速電子の伝播に伴う伝播垂直方向の空間広がり小さくなっていることがわかる。図 3 には、高速電子ビームの伝播に伴う発散角の印加磁場強度( $B_{x,ext}$ )依存性を示す。 $B_{x,ext} > 0.1\text{kT}$  において、印加磁場による発散角低減効果が生じ、 $B_{x,ext} > 3\text{kT}$  では発散角がゼロとなることが示された。以上のシミュレーションより 1kT 程度の磁場を印加することで、電子ビームをコアまでガイドできる可能性が示された[4]。

### 実証実験

以上のシミュレーションに基づき、阪大レーザー研の高速点火原理実証実験 FIREX-I において、自発ならびに外部印加磁場による高速電子ガイド実験が進行中である。自発磁場については図 4 に示すような DLC Tongari Tip cone を用いたガイド実験が進行中である。外部磁場

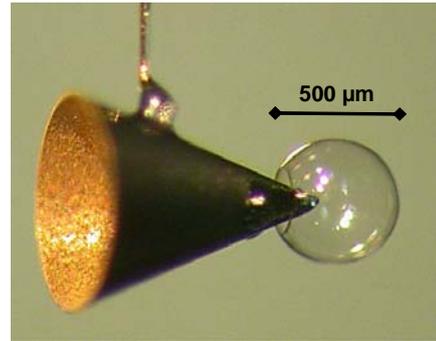


図 4 DLC Tongari tip cone 付 CD シェルターターゲット。

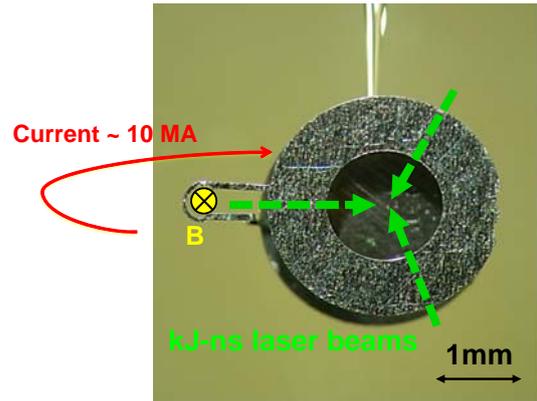


図 5 強磁場発生用キャパシタ・コイルターゲット。

については図 5 に示すキャパシタ-コイルターゲットに ns-kJ レーザーを照射することで kT クラスの磁場を生成することに成功した[6]。この磁場をコーンシェルターターゲットに印加したガイド実験が進行中である。

講演では、理論シミュレーションによる評価を中心に、最新の実験結果も織り交ぜて報告する。

### 参考文献

- [1] M. Tabak, et al., *Phys Plasmas* **1**, 1626 (1994).
- [2] T. Johzaki, et al., *Nucl. Fusion* **51**, 073022 (2011).
- [3] A. P. L. Robinson and M. Sherlock, *Phys. Plasmas* **14**, 083105 (2007); B. Ramakrishna, et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 135001 (2010).
- [4] T. Johzaki, et al., “Fast Electron Beam Guiding for Effective Core Heating”, to be published in EPJ web of conf.
- [5] D. J. Strozzi, et al., *Phys. Plasmas* **19**, 072711 (2012).
- [6] S. Fujioka, et al., “High energy density plasmas generation on GEKKO-LFEX laser facility for fast-ignition laser fusion studies and laboratory astrophysics” to be published in *Plasma Phys. Cont. Fusion*.