

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560765

研究課題名 (和文) 液体壁レーザー核融合炉における蒸発ガス澱み現象の研究

研究課題名 (英文) Researches on stagnation of ablated material from liquid wall of laser fusion reactor

研究代表者

乗松 孝好 (NORIMATSU TAKAYOSHI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：50135753

研究成果の概要 (和文)：

液体壁レーザー核融合炉内で核融合燃焼後、蒸発した金属がどのように振る舞うか、実験と、シミュレーションで検証した。実験では鉛箔を放電で加熱し直径 30nm 程度のアεροゾルが多数検出され、この大きさはシミュレーションによる評価とほぼ一致した。シミュレーションによる爆縮後、最初の衝突が起こる 6ms までの計算では、対向壁から蒸発したガスにより、炉内に直径 60cm 程度のコアが形成される。その中のアεροゾルの密度は 10^{11} 個/cm³ のオーダーで、対向壁から飛んできたアεροゾルと衝突し、運動量を失い、対流している可能性が高いことが分かった。

研究成果の概要 (英文)：

Behavior of ablated metal vapor after a fusion burn in a laser fusion reactor with a liquid wall was studied experimentally and numerically. In the experiment, thin Pb membrane was heated with electric discharge and evaporated metal was corrected on a witness plate. The diameter of aerosols was about 30nm which agreed with numerical results. The numerical simulation showed that a 60cm-diameter-core was formed 6ms after the fusion burn at the stagnation point due to collision with counter plume from the other side of the chamber. The number density of aerosols in the core was about 10^{11} n/cm³. Aerosols also collide with those from the other side and stagnate in the core.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：慣性核融合、液体壁

1. 研究開始当初の背景

高速点火方式は従来の中心点火に比べて 1/10 の出力のレーザーで実現できる可能性がある。高速点火方式に基づくレーザー核融合炉 KOYO-F は、液体壁を第一壁とし、モジュラー炉方式を採用することにより、現存

する材料で建設可能と考えられている。液体壁の場合、蒸発した金属が炉心で対向蒸発物と衝突し、析出して多量の液滴を形成すると、次のレーザーショットができなくなる可能性がある。レーザー隔夕郎炉実現のための信頼性の高いシナリオを構築するため、この課

題を解明する必要がある。

2. 研究の目的

液体金属が核融合で発生した α 粒子で加熱され、蒸発し、膨張し、エアロゾルを形成しながら炉心で対向壁からの蒸発物と衝突した場合、どのようなことが起こるか、実験とシミュレーションで検証する。

3. 研究の方法

核融合の α 粒子による加熱を実験的に完全に再現する方法がないので、ほぼ同じエネルギー密度でガラス基盤上に蒸着した鉛薄膜を放電電流で加熱し、蒸発させる。薄膜の厚さは α 粒子の否定と同じ $10\mu\text{m}$ とする。コンデンサーに 300J のエネルギーを充電し、短時間に放電させ、鉛薄膜を加熱する。温度は輻射強度で評価する。2波長のバンドパスフィルターを用い、透過してくる光の強度日より温度を決定する。投入されるエネルギー密度は α 粒子加熱と同じで有るが、パルス幅は 1000 倍程度放電法が長いので、形成されるプラズマの温度は低いので留意が必要である。

発生したエアロゾルをガラス基盤上に補足し、その大きさをシミュレーションと比較し、シミュレーションの精度を検証する。また、蒸発物の方向分布を測定し、KOYO-Fで提案されている傾斜パネルの効果を検証する。また、同一のシミュレーションコードで炉内の蒸発ガスの挙動を計算し、何が起こるか検証する。

4. 研究成果

(1) 蒸気源の特性

① 温度分布

300J のエネルギーを充電したときの放電電流と鉛薄膜を加熱するのに利用された電力を図1に示す。

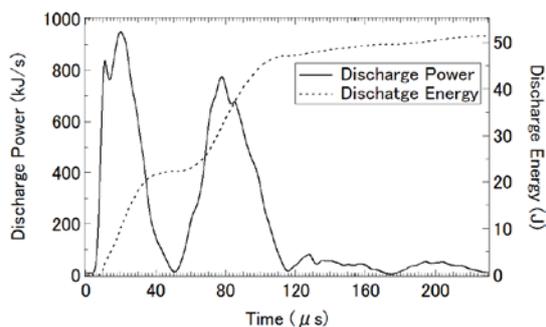


図1 鉛薄膜を加熱するのに用いられた電力の時間経緯

LCR回路の特性で、2パルス構成になっていて、合計 50J のエネルギーが鉛薄膜で加熱に消費された。

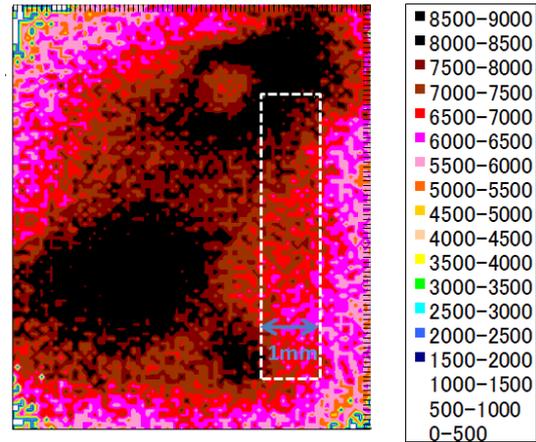


図2 側方から観測した蒸発源での温度分布

図2は側方から観測した温度分布である。点線の部分が、多少斜めから観測しているため、点線の部分が鉛薄膜に相当する。最も温度の高い部分は本来の位置より、左に膨張したところに見られる。これは加熱電流の第一パルスで膨張が始まり、第二パルスの流路は膨張ガスの先端部、そこでは密度が低く、電子の移動度が高く、結果として 8000 度の高温になるためと思われる。

② 蒸発物の角度分布

捕捉板の位置を変えながら、捕捉板の上に堆積した蒸発物の角度分布を測定した結果を図3に示す。

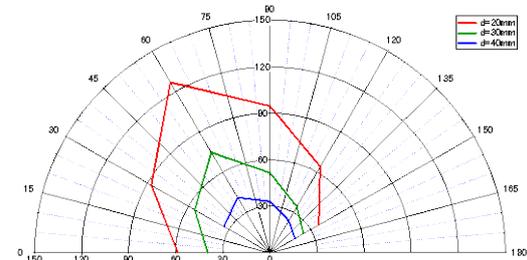


図3 蒸発物の方向分布。

蒸発物は垂直に出るのではなく、上から見て左に 30 度傾いた方向に飛んでいる。この図では右側に帰還電流用の電極がある。この右に傾く傾向は電流の流れる方向を変えても同じで有った。

この結果は図4のモデルのローレンツで説明できる。即ち、帰還電流が形成する磁場によりプラズマ中を流れる電荷はで円流ループの外側に押し広げられる様な力を受ける。膨張速度とローレンツ力で加速された成分で構成される方向に偏向を受ける。このことは自分自身の電流による磁界により、膨張速度自体も多少抑えられている可能性があることを暗示している。

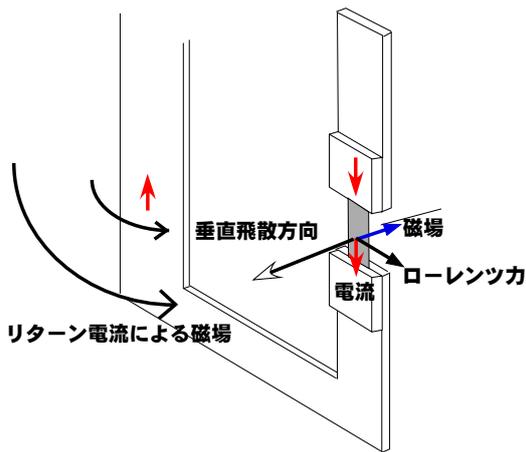


図4 ローレンツ力による飛散方向の偏向

(2) シミュレーションと実験の比較

補足版上に堆積した蒸発物とその断面の電子顕微鏡写真を図5に示す。断面から連続した金属薄膜上に直径30nm程度のアεροゾルが補足されている。この結果は実験で求めた温度と形状で行ったシミュレーションと一致する。膨張するガスの先端部は温度が低く、急速に膨張するのでアεροゾルはほとんど形成されない。

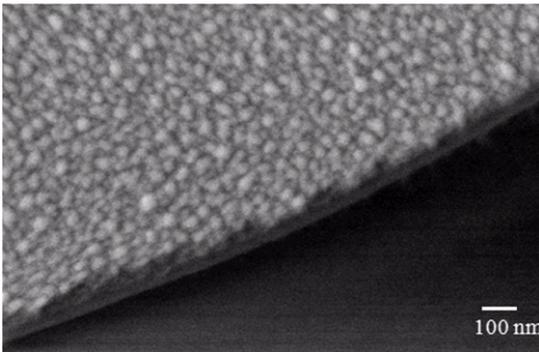


図5 堆積したアεροゾル

(3) シミュレーションによる激み点の評価

① シミュレーションコード

DECORE (DEsign CODE for REactor) の概要を図6に示す。DECOREは、原子モデルコード、状態方程式コード、放射輸送係数コード、阻止能コード、アブレーション解析コードを統合した統合コードであり、ACONPLはアブレーション解析コード部を指す。本論文のACONPLは、文献1のACOREを大幅に改良したものである。主な改良点を下に記す。

*アブレーションして飛散しているプルームが、膨張冷却過程において気体から液体への相変化(凝縮)を起こし、プルーム中にナノ粒子が生成されることが考えられるが、その効果を取り入れて粒子サイズ等の評価ができるようになった。

*阻止能に関して、大幅に改良を行った。

プルームの凝縮(気体と液体の混合領域の取り扱い)について詳述する[4]。文献3中のモデルでは、プルームが完全断熱球対称膨張をすることが仮定されていた。本研究において、それを任意の流体運動の場合に適用できるように改良を行った。まず、沸点の密度依存性を導入した。

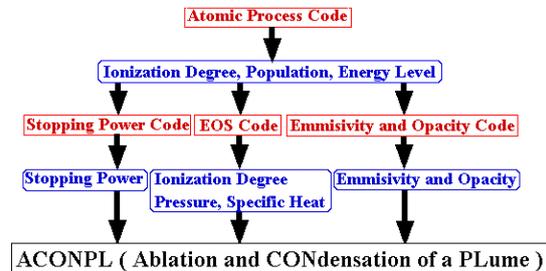


図6 シミュレーションコードの階層

② 激み点の評価

図7は蒸発した金属蒸気が炉心で衝突する直前の密度、温度、クラスターの直径、クラスターの数密度である。計算自体は平面モデルで行われている。クラスターが大きく成長しているのは壁に近い密度の高い部分だけである。蒸発したプルームの先端部は数密度他低く、中心部分で最大になり、壁の部分では衝突等により、大きく成長して逆に数は減っている。

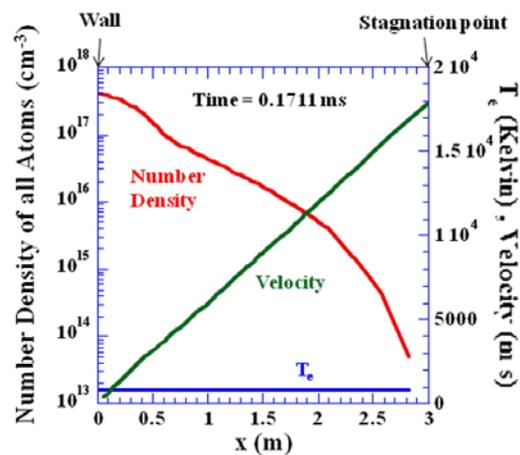


図7 蒸発したガスが炉心で衝突する直前の密度と速度の分布

図8は同じく衝突直前のクラスターの数密度と直径である。壁の周辺ではクラスター同士の衝突で粒子数は減少し、逆に直径は大きくなっている。それ以外の部分ではクラスターの直径はほぼ同じの50nmである。

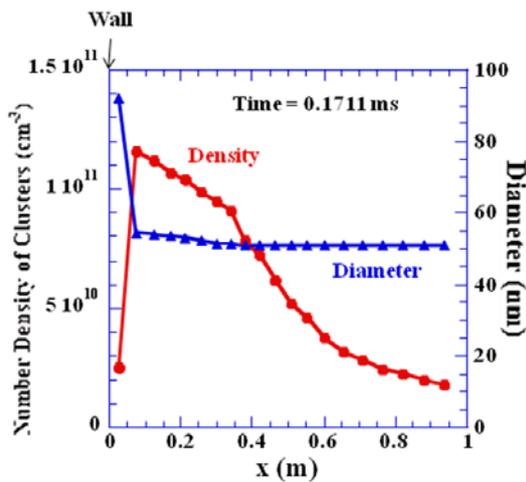


図8 蒸発したガスが炉心で衝突する直前のクラスター密度と直径

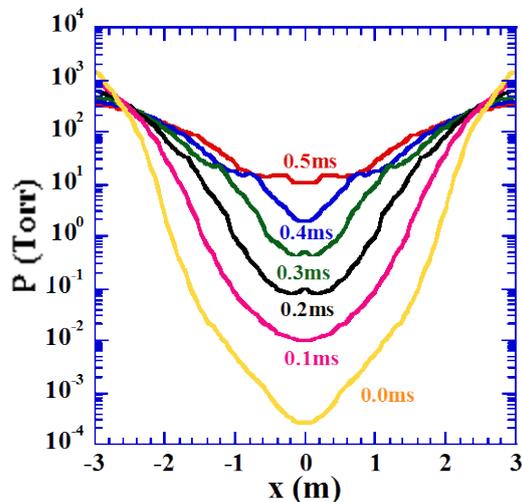


図9 炉心で衝突後の圧力分布

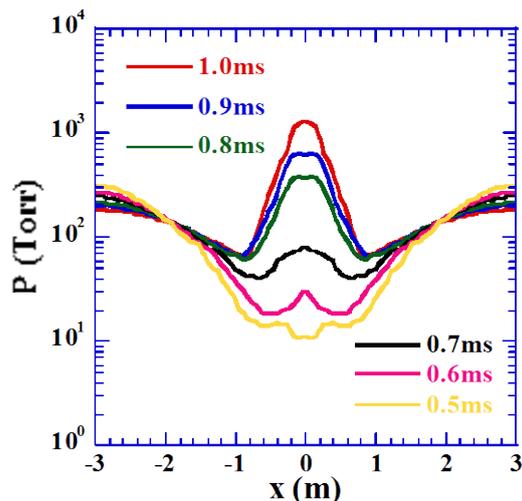


図10 炉心で衝突後の圧力分布 (続き)

図9, 10 は蒸発したガスが炉心で衝突した後

の圧力分布である。先に述べたように膨張ガスの先端部は密度が低く、分子の平均自由行程は数十 cm あり、この部分では対向壁から出てきたガスと混じり合う。モデルは平面であるが、円筒モデルでも同様で、向心流の衝突により温度も上昇するので、この大きさよりも半径の小さいコアは形成されない。図10では1m程度の大きさであることが分かる。

図8から衝突前で最もクラスター密度の高い領域は、 $t=0.2\text{ms}$ において、壁より30cm離れた点で、クラスター密度 $4 \times 10^{11} (\text{n/cm}^3)$ であり、クラスターの直径は50nmである。衝突断面積を σ とし、クラスター同士の衝突確率は進行する1個のクラスターに注目した場合、同じ密度を維持している部分の厚さを L として、

$$P = \sigma \times n \times L$$

で与えられる。 $\sigma = 8 \times 10^{-11} \text{cm}^2$, $L = 10 \text{cm}$ として計算すると、 $P = 300$ となる。これは必ず衝突することを意味し、単純に言えば、クラスター体積は倍増し、クラスター密度は半減する。単純モデルであるので、運動量はゼロとなり、滞留することになる。実際はこれほど単純ではなく、中には運動場がゼロにならずに衝突を繰り返す粒子も存在するであろう。実験事実に基づいたモデルが必要になる。

(4)まとめ

以下に本論文の結言をまとめる。

- ①アブレーションにより生成されたプルーム中で生じる、微細なクラスターの生成やプルームの凝縮（気体から液体への相変化）等の複合複雑現象を解析するため、統合シミュレーションコード DECORE (DESIGN CODE FOR REACTOR) を開発した。
- ②DECORE を用いて長時間のシミュレーションを行い、プルームが炉チェンバーの中心付近に到達した際の、プルームのプロファイル、プルーム中のクラスター粒子の直径分布とクラスターの数密度分布等を求めた。
- ③プルームの長さが3m程度になった際の、プルーム中のクラスターの半径と凝縮率を求めた。クラスターの直径は、3ナノメートルから30ナノメートル程度である。直径としては、14ナノメートルから16ナノメートル程度の所に、比較的多く集中している。凝縮率は $x < 0.6 \text{m}$ 以下の殆どの領域で1程度になっている。 $x > 0.7 \text{m}$ の範囲では、凝縮率は0であった。
- ④激み点でクラスター同士が衝突する確率は高く、オーダー的には同じ大きさ、密度のクラスター群の「雲」を形成する可能性がある。
- ⑤シミュレーションは2次元で取り扱われ、炉心での収束現象は議論できていない。蒸発

物の方向分布の実験ではローレンツ力により、30度方向に傾いているが、その分を差し引いて、最も多い角度から30度傾いたところはピークの80%程度の飛散量となっている。これが炉の中で起こるとした場合、第一壁パネルを30度傾けても、中心方向に飛散する成分は20%程度しか下がらないことになる。一方、発散角が大きいことを意味し、中心部に向かうガスが1点で収束することはなく、それなりに大きなコア(直径1m)を形成することを意味する。その中のエアロゾルの密度は $10^{11}/\text{cm}^3$ のオーダーである。詳細は引き続き検討される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① 古河裕之、乗松孝好、「レーザー核融合炉液体壁チェンバー内のアブレーション生成プラズマのシミュレーション」Journal of Plasma and Fusion Research、査読有り、87、p51~55 (2011)
- ② 古河裕之、功刀資彰、「今、核融合炉の壁が熱い！—数値モデリングでチャレンジ—壁は熱でどうなるか」、日本原子力学会誌、査読有り、51 p56-59 (2009)
- ③ H. Furukawa, “Dynamics of ablation plumes produced by fusion products in laser fusion liquid wall chamber”, J. Plasma Fusion Res. SERIES, 査読有り、Vol. 8 1256-1260 (2009)
- ④ 相良明男、乗松孝好、畑山明聖、滝塚知典、「今、核融合炉の壁が熱い！—数値モデリングでチャレンジ—」、日本原子力学会誌、査読有り、50 p36~41 (2008)
- ⑤ H. Furukawa, “Study on dynamics of ablation plumes produced by fusion products in laser fusion liquid wall chamber”, IFSA2007 Proceeding, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series、査読有り 112 (2008)032041
- ⑥ T. Oshige, T. Norimatsu, H. Furukawa, M. Nakai, K. Nagai, and K. Mima, “Experimental Investigation of aerosol formation in laser fusion reactor chamber by discharge method”, IFSA2007 Proceeding, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series、査読有り、112 (2008) 032040

[学会発表] (計8件)

- ① T. Norimatsu, “Critical issue of KOYO-F Final optics, aerosols and tritium barrier” IAEA-Technical Meeting on

Physics and Technology of IFE targets and Chambers, Oct. 15th(2010), Daejon, Korea

- ② T. Norimatsu, “Stagnation of Ablated Metal Vapor in Laser Fusion Reactor with Liquid Wall”, IAEA Fusion Energy Conference 2010, Oct. 14th(2010), Daejon, Korea.
- ③ 古河裕之、「レーザー核融合炉液体壁チェンバー内の蒸発ガスの挙動に関する研究」、2010年9月23日、大阪府立大学
- ④ 古河裕之、乗松孝好、「レーザー核融合炉液体壁炉チェンバー内環境に関する考察」プラズマ核融合学会、2009年12月1日、京都国際会館
- ⑤ アブドールライス、古河裕之、乗松孝好、「レーザー核融合炉液体壁炉チェンバー内の鉛蒸気の壁への再付着、エアロゾル化などについての解析的評価」プラズマ核融合学会、2009年12月1日、京都国際会館
- ⑥ 山路晃宏、乗松孝好「液体壁慣性核融合炉におけるエアロゾルの形成に関する実験的研究」プラズマ核融合学会、2009年12月1日、京都国際会館
- ⑦ 古河裕之、「レーザー核融合炉液体壁炉チェンバー内のアブレーションプラズマの衝突に関する考察」、物理学会、2009年3月27日、立教大学
- ⑧ 古河裕之、乗松孝好、「レーザー核融合炉チェンバー液体壁のアブレーションプラズマの衝突に関する考察」プラズマ核融合学会、2008年12月4日、栃木県総合文化センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

乗松 孝好 (NORIMATSU TAKAYOSHI)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授
研究者番号：50135753

(2) 研究分担者

古河 裕之 (FURUKAWA HIROYUKI)
レーザー技術総合研究所・理論・副主任研究員
研究者番号：70222271