



レーザー核融合炉チェンバー液体第一壁の 核融合エネルギーによるアブレーション量と温度変化の評価

山本敬治^{1,*}, 古河裕之², 城崎知至¹, 神前康次¹,
廣岡慶彦³, 上田良夫⁴, 西川雅弘⁴, 田中和夫^{1,4}

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ²レーザー技術総合研究所,

³核融合科学研究所, ⁴大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻,

*現在の所属: 財団法人大阪産業振興機構 TLO 事業部 (NEDO フェロー)

(Received 10 December 2004/Accepted 15 May 2006)

One of the important key issues is to evaluate the details of the energy deposition of fusion products on the first wall for the laser fusion reactors. Liquid wall is considered as the first wall. In order to estimate the ablation depth, the ablation mass, and the temperature profiles in the wall, we have carried out the simulation studies including the energy deposition of x rays and the charged particles, the thermal conduction of the first wall materials and the energy absorption of charged particles in the ablated vapor. In the case of chamber radii 2 m, 4 m, 8 m with a fusion output 400 MJ we have evaluated the ablation of Pb liquid first wall. It is pointed out that the alpha particles on the first wall have a strong effect on the wall ablation.

Keywords:

laser fusion, reactor chamber, ablation, first wall, liquid wall

1. はじめに

レーザー核融合炉チェンバー第一壁は、ターゲットの核融合反応により放出される X 線、アルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオン、中性子のパルス照射を受ける。レーザー核融合炉は繰返しパルス動作であり、X 線のパルス幅は 0.1 ns 程度、アルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンのパルス幅は数 100 ns 程度である。これらのパルスエネルギーが第一壁に付与され、第一壁のエネルギー密度があるしきい値以上まで上昇すると、第一壁がアブレーションする。炉チェンバー内部で第一壁がアブレーションすると、炉チェンバー内部の圧力が急激に上昇する。次のレーザー照射が可能な真空度まで炉チェンバー内部の圧力を十分に低下させる必要があるが、この時間は、アブレーション量、第一壁温度に大きく依存する[1]。これらの理由により、炉チェンバー第一壁のアブレーションの評価は、炉概念の構築において重要な要素となっている。数 100 MJ の核融合エネルギーを想定した場合、経済性、発電効率等の観点から炉チェンバー半径は数 m 程度が最適とされている。しかし、このサイズの炉チェンバーでは、1 レーザーショットごとに第一壁が数 μm 程度アブレーションすることが予想されている[2]。このサイズで第一壁に固体を用いた場合は、材料損傷により炉概念の成立が難しい。しかし第一壁

に液体金属を用いた場合は、損傷した分を補う炉設計が可能である。よって本研究では、液体壁炉チェンバーを対象とし、第一壁材料として液体の鉛を想定し評価を行った。

第一壁のアブレーション現象の模式図を Fig. 1 に示す。短時間に高強度のアルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオン等の核融合エネルギーの照射を受けた第一壁は、表面付近でエネルギー密度が急激に上昇しアブレーションする可能性がある。本研究では物理的な本質を損なわない第一壁アブレーションの簡易モデルを開発し、第一壁のエネルギー密度、アブレーション深さ、温度プロファイルおよびアブレーション量の炉チェンバー半径依存性等の評価を行った。X 線やアルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンによるアブレーションは非常に複雑な現象であり、実験やシミュレーション研究は多くない。その中の一つに古河らによるシミュレーション研究[2]がある。古河らによるシミュレーション研究では、X 線やアルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンによるアブレーションに関して、相変化やプラズマの流体運動等を詳細に取り入れている。相変化は、Anisimov のモデル[3]により記述している。アブレーションに用いたコードは、古河らのより詳細なコードによるシミュレーション結果とアブレーション量については良い一致を示しており、ここ

Study of Liquid Wall Ablation and Temperature in Laser Fusion Reactor Chamber

YAMAMOTO Keiji, FURUKAWA Hiroyuki, JOHZAKI Tomoyuki, KOZAKI Yasuji, HIROOKA Yoshihiko, UEDA Yoshio,

NISHIKAWA Masahiro and TANAKA Kazuo, A.

corresponding author's e-mail: kyamamoto1111@yahoo.co.jp

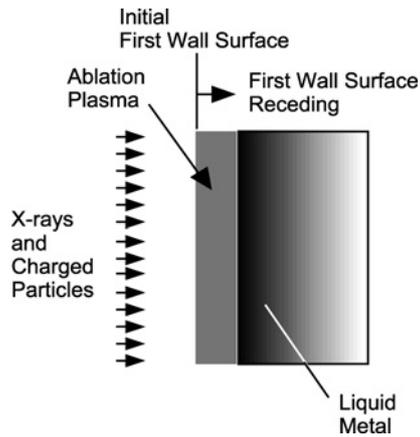


Fig. 1 Concept of an ablation phenomenon.

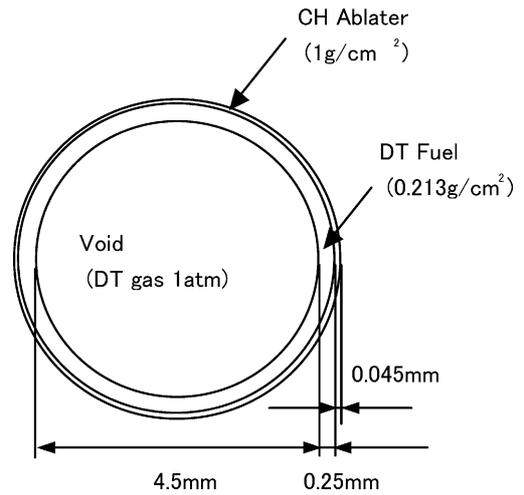


Fig. 2 Direct drive target.

ではこれを用いた。

核融合エネルギーについては、アルファ粒子の詳細な輸送計算、爆縮流体計算および核燃焼計算を含んだレーザー核融合爆縮コード ILESTA-1D[4]と核燃焼計算コード MEDUSA-Q[5-8]により計算された、直接照射型ターゲットから放出されるエネルギースペクトルの結果を用いた。本論文では2章で直接照射ターゲットの核融合エネルギー、3章で第一壁アブレーションの簡易モデル、4章で炉チェンバー第一壁のアブレーション、5章で結論について述べる。

2. 直接照射ターゲットの核融合エネルギー

本研究で想定した直接照射ターゲットの構成を Fig. 2 に示す。このターゲットは、厚さ 45 μm のプラスチック (CH) アブレーター層、厚さ 250 μm の DT 燃料層、DT ガスで満たされた直径 4.5 mm の中空の領域より構成されている。ターゲットの爆縮計算コード ILESTA-1D と核燃焼計算コード MEDUSA-Q を用いた計算結果によると、このターゲットにレーザーフットパルス (20 ns, 10¹³ W/cm²程度) と、断熱圧縮のためのレーザーメインパルス (14 ns 程度, 10¹⁵ W/cm²程度) を照射した場合、レーザー照射開始から約 35 ns 後に点火、核燃焼に達する。レーザーの波長は 0.35 μm、フットパルスのエネルギーは 80 kJ、メインパルスのエネルギーは 3 MJ である。X 線は、レーザー照射後 35 ns に起こる点火時に放出される。この時のターゲットの密度は 800 g/cc、イオンの温度は 7 keV である。

Fig. 3 に、レーザー直接照射方式のターゲットから放出される X 線エネルギースペクトルと、比較のための間接照射ターゲットから放出される X 線エネルギースペクトル [9] および本研究で液体金属第一壁材料として想定した鉛の X 線質量吸収係数 [10] の関係を示す。間接照射方式とは、レーザーエネルギーをターゲットの外部にて別の軟 X 線に変換し、その幾何学的配置ならびに輸送特性を利用してターゲットの一樣爆縮を達成する方式である。HIBALL の場合、外部の媒体として金を使用している。図の左側の縦軸は X 線質量吸収係数、横軸は放出される X 線エネルギー、右の縦軸は X 線エネルギー量のスペクトルを示している。図の直接照射、間接照射ターゲットとも同じ 400 MJ

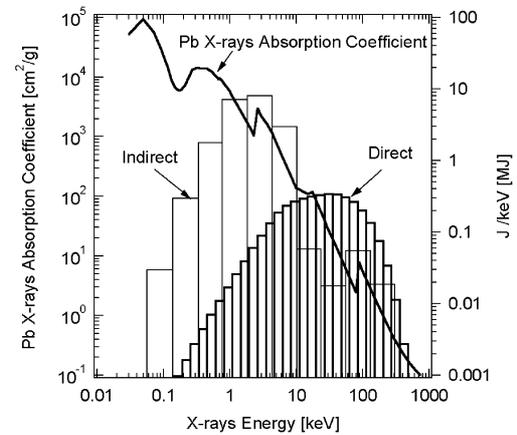


Fig. 3 Comparison of the X ray energy spectrum emitted from a direct irradiation target and an indirect irradiation targets. X-ray absorption coefficient of Pb is also plotted.

の核融合エネルギーを想定しているが、直接照射の X 線放射エネルギー量は 3.8 MJ であり、間接照射の 20.6 MJ と比べると 1/5 以下である。また、直接照射の X 線スペクトルピークは 20 keV 程度であり、間接照射と比較すると 10 倍程度エネルギーが大きいところにピークがある。鉛の X 線吸収係数は、X 線エネルギーが 10 倍になると 1/100 程度に減少するため、直接照射の場合、第一壁表面付近への X 線によるエネルギー付与は、間接照射の 1/500 程度となる。

次に、本研究で想定した直接照射ターゲットの核融合反応により発生するアルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンのエネルギースペクトルの分布を Fig. 4 に示す。図の縦軸は粒子数、横軸は各粒子が持つエネルギーを表している。なお、アルファ粒子は流体運動をしているプラズマ中で生成されるため、0.5~7 MeV 程度のエネルギーの分布を持っている。また、炭素イオンの持つエネルギーは 1~2 MeV 程度、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンの持つエネルギーは、炭素イオンより一桁小さい 0.1~0.3 MeV 程度である。

Table 1 に直接照射ターゲットの核融合反応から放出されるエネルギーの詳細を示す。X 線のエネルギーは核融合

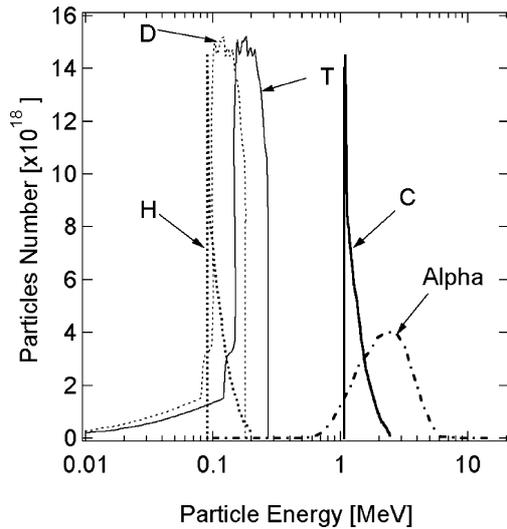


Fig. 4 A distribution of the charged particle energy spectra of the alpha particle, carbon, a hydrogen, heavy hydrogen, and tritium ions generated by the nuclear fusion reaction of a direct irradiation target.

Table 1 Energy emitted from the nuclear fusion reaction of a direct irradiation target.

	Particle Number $\times 10^{20}$	Energy Peak MJ	Sum Energy MeV	Rate %
X-rays	—	0.02	3.8	1.0
Alpha	0.29	2.7	10.6	2.7
C	1.66	1.1	37.0	9.3
H	1.66	0.09	3.1	0.8
D	2.93	0.12	8.1	2.0
T	2.93	0.18	12.1	3.0
Neutron	—	—	320	80

エネルギーの約1%の3.8 MJ, アルファ粒子のエネルギーは核融合エネルギーの約2.7%の10.6 MJ, CHアブレーター層の材料である炭素イオンは核融合エネルギーの約9.3%の37.0 MJ, 水素イオンは核融合エネルギーの約0.8%の3.1 MJである。核融合反応を起こさずに燃え残った重水素イオンは核融合エネルギーの約2.0%の8.1 MJ, 同じく燃え残った三重水素イオンは核融合エネルギーの約3.0%の12.1 MJである。中性子の持つエネルギーは核融合エネルギーの8割程度を占めているが、飛程が長く炉チェンバー第一壁の表面付近にはほとんどエネルギーを付与しないため、本研究では考慮対象から省いている。

3. 第一壁アブレーションの簡易モデル

パルス状のエネルギー付与による第一壁のエネルギー密度変化、温度変化およびアブレーション深さは、各時刻に第一壁に照射されるX線、アルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンのエネルギー強度とスペクトルを用いて計算することができる。本研究では物理的考察に基づき、3章1節から4節に述べる第一壁アブレーションの簡易モデルを構築した。本研究で用いた

簡易モデルは、球形の炉チェンバーを想定し、第一壁材料のX線吸収係数とアルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンの阻止能、熱伝導、潜熱、アブレーション面の移動、アブレーションした物質によるアルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンのエネルギーの吸収を考慮している。アブレーションは複雑な現象であるが、本研究で用いた簡易モデルでは、ある一定のエネルギー密度のしきい値を越えた深さまでがアブレーションするとした。簡易モデルの妥当性については、3章5節で詳述する。

3.1 第一壁のエネルギー付与の計算

ある時刻 t において、第一壁表面から深さ x におけるX線の強度 $I(x, t)$ は、ある周波数 ν_i を持つX線の第一壁表面における強度を $I(\nu_i, 0, t)$ 、X線質量吸収係数を $\mu(\nu_i)$ とすれば、

$$I(x, t) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} I(\nu_i, 0, t) \exp[-\mu(\nu_i)x] \quad (1)$$

で表わされる。ここで i_{\max} は、核燃焼計算中のX線の輸送計算に用いたX線の群の数である。

X線により壁に付与される、単位体積・単位時間あたりのエネルギー $Q_x(x, t)$ は、以下のように表される。

$$Q_x(x, t) = -\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \mu(\nu_i) I(\nu_i, 0, t) \exp[-\mu(\nu_i)x] \quad (2)$$

同様にアルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンについて考察する。第一壁材料中のある深さ x の位置での粒子のエネルギーを $E(x)$ 、その粒子が dx 進んだ時に持つエネルギーを $E(x+dx)$ とする時、阻止能 $S(E)$ は以下のように表される。

$$S(E(x)) = -\frac{dE(x)}{dx} \quad (3)$$

と表わされる。本研究では、液体鉛の阻止能として、実験により測定された阻止能の文献値[11]を用いた。

(3)式は1粒子あたりの式であるが、ある時刻 t において壁表面でエネルギー $E(0, t)$ を持つ粒子が単位面積・単位時間あたり $N(t)$ 個、壁に照射されるとすると、アルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンにより壁に付与される、単位体積・単位時間あたりのエネルギー $Q_p(x, t)$ は、以下のように表される。

$$Q_p(x, t) = N(t)S(E(x, t)) = -N(t)\frac{\partial E(x, t)}{\partial x} \quad (4)$$

3.2 第一壁のエネルギー密度と熱伝導の計算

爆縮レーザー照射からの時間が t 、第一壁表面から深さが x の場合、第一壁のエネルギー密度 $U(x, t)$ は核融合出力エネルギーの付与と熱伝導を考慮すると、

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T(x, t) + Q_x(x, t) + Q_p(x, t) \quad (5)$$

と表わされる。ここで κ は熱伝導率である。

3.3 第一壁のアブレーションの判定

対象にしている第一壁材料の体積を ΔV 、密度を ρ 、初期温度を T_0 、比熱を C_1 、気化熱を H_v とする。ここで、アブレーションする温度のしきい値を T_v と仮定すると、エネルギー密度のしきい値 U_{TH} は、

$$U_{TH} = \rho \Delta V \{ C_1 (T_v - T_0) + H_v \} \quad (6)$$

となる。本簡易モデルでは、体積 ΔV の第一壁材料中に付与されるエネルギーが上式で計算された値を越えた場合、アブレーションするとして評価を行った。5節のモデルの妥当性でも述べるが、このモデルにより得られた結果は、Anisimov モデルによるそれと良い一致を示している。鉛の物性値は $\rho = 11.34 \text{ g/cm}^3$ 、 $C_1 = 0.1591 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ 、 $H_v = 858.1 \text{ J/g}$ である。また、 $\Delta V = 1 \text{ cm}^3$ 、 $T_0 = 823 \text{ K}$ を代入し、 T_v を鉛の沸点である $2,023 \text{ K}$ と仮定する(理由は5節で詳述する)と、液体鉛第一壁のアブレーションするエネルギー密度のしきい値は $E_{TH} = 1.2 \times 10^5 \text{ J/cm}^3$ となる。この場合、気化熱に相当するエネルギーは $E_v = 9.7 \times 10^4 \text{ J/cm}^3$ であり、本簡易モデルでアブレーションすると仮定したエネルギー密度のしきい値の約8割を占めている。

レーザー核融合炉と磁場核融合炉との大きな違いは、レーザー方式では、エネルギー負荷が短時間 ($1 \mu\text{s}$ 程度) にパルス状に第一壁に照射される点にある。したがって、典型的なレーザー核融合炉のパラメーター領域で炉壁のアブレーションをモデル化する場合、アブレーションしきい値を超えるエネルギーが投入されてアブレーションが瞬時に起きるとモデル化しても、より詳細なモデルによる結果 [2] と大きな違いは生じない [3]。5節で詳述する。

3.4 アブレーションしたプラズマのエネルギー吸収, 熱伝導, 輻射

アブレーションにより生成されたプラズマ中にアルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンが入射されると、プラズマはアルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンのエネルギーを吸収する。しかし、文献 [2] によると、アブレーションにより生成されたプラズマの温度は数 eV [2] 程度であり、プラズマはほとんど電離していないと考えられる。そのため、本簡易モデルではプラズマの阻止能は液体鉛で使用した阻止能と同じ値を用いた。また、温度が数 eV 程度のプラズマでは、プラズマの熱伝導係数も十分に小さく、輻射の影響も十分小さい。よって本簡易モデルでは、プラズマの熱伝導、プラズマから第一壁への輻射は考慮していない。

3.5 モデルの妥当性

本研究では、液体金属が真空中にアブレーションすることを想定している。液体が真空中にアブレーションする現象を定量的に詳細に評価できるモデルとして、Anisimov のモデル [3] がある。Anisimov モデルは、パルス幅が ns 程度以上のレーザーアブレーションの解析に用いられ、実験結果を定量的に良く説明できるモデルとして知られている。Anisimov モデルによると、液体と気体の境界面(アブレーション面)の移動速度を $V(T_v)$ とすると、 $V(T_v)$ は次の式で記述される。

$$V(T_v) = \sqrt{\frac{k_B T_v}{m}} \exp\left(-\frac{m H_v}{k_B T_v}\right)$$

ここで、 T_v はアブレーション面の温度、 m は鉛原子 1 個の重量である。

1 気圧下の鉛の沸点である $2,023 \text{ K}$ をアブレーションの判定に用いたことに対する妥当性を示す。Fig. 5 は、(5) 式で記述されるアブレーション面の移動速度をアブレーション面の温度の関数として表している。図からわかるように、アブレーション面の温度が $2,000 \text{ K}$ 付近を超えたところから、急激にアブレーション面の移動速度が大きくなっている。液体鉛の温度が $2,000 \text{ K}$ 以下であっても蒸発現象は起こっているが、その量は無視できるほど小さい。例えば、温度が $1,000 \text{ K}$ の場合、アブレーション面の移動速度は $1.9 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ であるが、本研究でアブレーションするしきい値と想定した $2,023 \text{ K}$ の場合は 0.2 m/s となり、4桁の差がある。次に、定常的な蒸発、凝縮の効果について議論する。アブレーション面の温度が $1,000 \text{ K}$ の場合、 $1 \mu\text{s}$ でアブレーション面が移動する距離は、Anisimov モデルによると $1.9 \times 10^{-11} \text{ m}$ である。これはボーア半径の $1/3$ 程度であり、物理的な意味ではアブレーションしないといってもよい。このことから、アブレーション面の温度が $2,023 \text{ K}$ より十分低い場合、ほとんどアブレーションしないことがわかる。

また、Anisimov モデルによると、気化により表面の温度が低下する効果は、次式で与えられる。

$$\frac{\kappa}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X_v(t)} = H_v \frac{dX_v(t)}{dt} \quad (8)$$

ここで、 κ は熱伝導率であり、鉛の場合 35.3 W/(m K) である。アブレーション面から $1 \mu\text{m}$ 深さの温度とアブレーション面の温度差 ΔT を上式から評価する。パルス状入力エネルギーによりアブレーション面の温度が $1,000 \text{ K}$ に

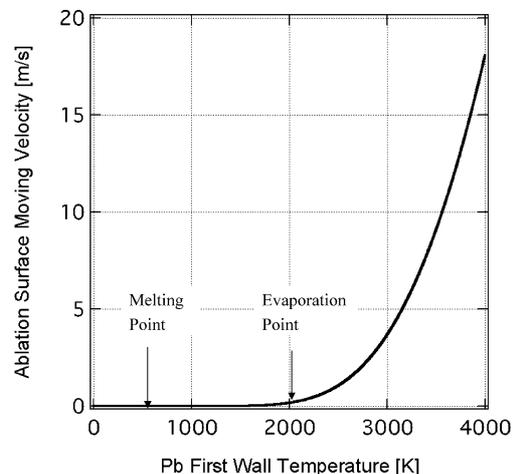


Fig. 5 Velocity of ablation surface as a function of surface temperature.

なった場合、 $\Delta T \sim 5.4 \times 10^3$ K であり、ほとんど無視できる。アブレーション面の温度が 2,023 K になった場合でも、 $\Delta T \sim 50$ K であり、温度降下の影響は大きくないと考えられる。

以上のことから、1 気圧下の沸点である 2,023 K をアブレーションの判定条件に用いることは、炉設計の観点から必要とされる物理的な妥当性は保たれていると思われる。結論として、本論文で提示した第一壁アブレーションの簡易モデルは、本研究の目的には十分であると考えられる。

4. 炉チェンバー第一壁のアブレーション

4.1 核融合エネルギー 400 MJ, 炉チェンバー半径 4 m の場合の第一壁アブレーションの評価

4.1.1 第一壁表面に照射する核融合エネルギー強度

ターゲットの核融合反応が発生後、炉チェンバー第一壁へはまず X 線が到達する。次に、重水素と三重水素の核融合反応により発生したアルファ粒子が第一壁に到達する。その後、炭素イオン、水素イオンが第一壁に到達し、最後に核融合反応を起こさずに燃え残った重水素イオン、三重水素イオンが第一壁に到達する。核融合エネルギー 400 MJ, 炉チェンバー半径 4 m の場合の第一壁表面における単位面積あたりのエネルギー強度の時間推移を Fig. 6 に示す。図の縦軸は単位面積あたりの強度、図の横軸は爆縮レーザー照射後からの時間である。まず、爆縮レーザー照射後 0.051 μ s (51 ns) 時に、急峻な X 線パルスエネルギーが第一壁表面に到達する。X 線のピーク強度は 4×10^{10} W/cm², パルス幅 0.05 ns 程度である。爆縮レーザー照射から約 0.2 μ s 後には、アルファ粒子が第一壁表面に到達する。アルファ粒子のピーク強度は 3×10^7 W/cm², パルス幅は 0.4 μ s 程度である。爆縮レーザー照射から約 0.7 μ s 後には、炭素イオン、水素イオンが第一壁表面に到達する。爆縮レーザー照射後約 1 μ s まで、炭素イオン、水素イオンは強度を増大しながら第一壁に照射する。ピーク強度は 2×10^8 W/cm² 程度である。爆縮レーザー照射から 1 μ s 以後は、重水素イオン、三重水素イオンが第一壁表面に到達する。第一壁に照射する重水素イオン、三重水素イオンのエネルギー強度は徐々に低下し、爆縮レーザー照射後 1.6 μ s にはピーク時の 1/50 程度までエネルギー強度が低下する。

4.1.2 核融合エネルギーによる第一壁へのエネルギー付与

X 線、アルファ粒子、アルファ粒子、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンの照射による第一壁エネルギー密度変化の計算結果を Fig. 7 に示す。図の縦軸は第一壁エネルギー密度、横軸は第一壁表面からの深さである。エネルギー密度が 1.2×10^4 J/cm³ にある二点鎖線は、本研究で液体鉛がアブレーションすると想定したエネルギー密度のしきい値である。簡易モデルでは、第一壁のエネルギー密度がこのしきい値より高い領域の深さまでがアブレーションすると判定した。

まず、爆縮レーザー照射後 0.051 μ s (51 ns) に第一壁に到達する X 線のエネルギー付与により、第一壁表面付近はエネルギー密度が 50 J/cm³ 程度上昇する。X 線は第一壁の奥深くまで侵入するため、エネルギー密度の上昇はアブレーション

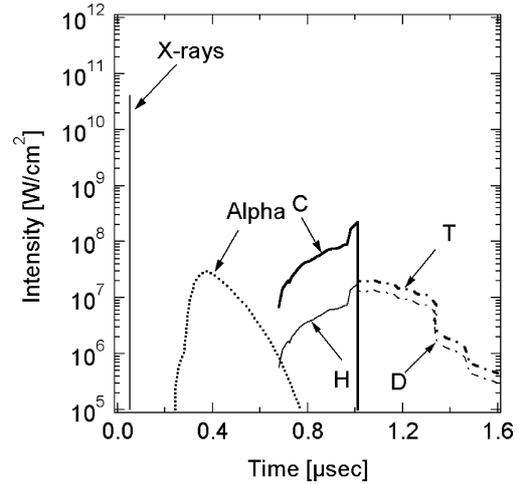


Fig. 6 Irradiation intensity of the X-rays, alpha particle, carbon, a hydrogen, heavy hydrogen, and tritium ions in the first wall surface in conditions with a nuclear fusion output 400MJ and a chamber radius of 4 m.

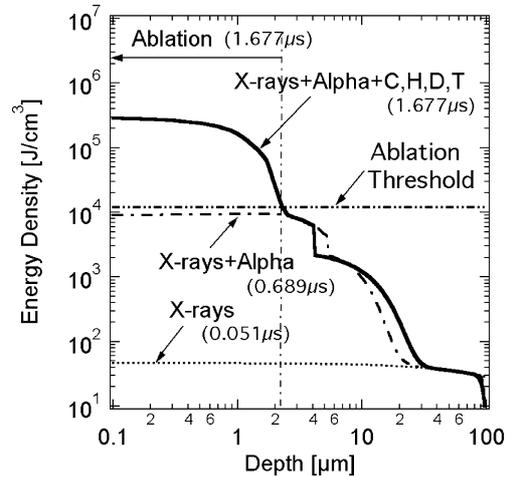


Fig. 7 The calculation result of energy deposited on the first wall by the X-rays and charged particles.

シオンしきい値の 1/200 以下であり、X 線は第一壁のアブレーションにほとんど影響を及ぼさない。炭素イオン、水素イオンの照射が始まる直前の爆縮レーザー照射後 0.689 μ s には、アルファ粒子のエネルギー付与により、第一壁のエネルギー密度は深さ 6 μ m 程度の領域で $2 \times 10^3 \sim 9 \times 10^3$ J/cm³ 程度まで上昇する。しかし、本簡易モデルで想定したアブレーションしきい値を超えていないため、この時刻ではアブレーションしない。重水素、三重水素の照射がほぼ終了する爆縮レーザーの照射後 1.677 μ s には、飛程が 1~3 μ m 程度の炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンのエネルギー付与により、第一壁のエネルギー密度は表面から深さ 2.2 μ m までの領域までがアブレーションしきい値である 1.2×10^4 J/cm³ 以上まで上昇する。また、ピークのエネルギー密度はアブレーションするとしたしきい値の 20 倍以上であり、アブレーションした鉛は数 eV [2] のプラズマになると考えられる。

なお、第一壁に照射する X 線、アルファ粒子、炭素イオ

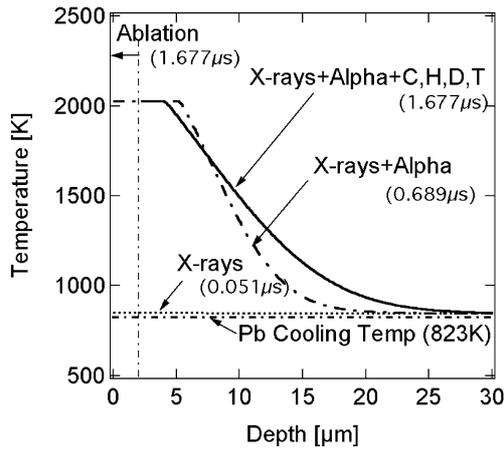


Fig. 8 Temperature profile of the first wall, X-rays(0.051 μ s), X-rays+Alpha(0.689 μ s), and X-rays+Alpha+C,H,D,T(1.677 μ s) are shown.

ン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンの合計フルエンスは 37 J/cm²程度である。

4.1.3 液体壁の温度プロファイルと時間変化

Fig. 8 に核融合エネルギーの照射による液体鉛第一壁の温度変化を示す。図の縦軸は第一壁の温度、横軸は第一壁表面からの深さを示している。ここで、第一壁の初期温度(冷却温度)は 823 K (550 $^{\circ}$ C)と想定した[1]。爆縮レーザー照射後約 0.051 μ s (51 ns) の X 線照射直後には、第一壁の表面温度は初期温度より 25 K 上昇し、848 K 程度となる。炭素イオン、水素イオンの照射が始まる直前の爆縮レーザー照射後 0.689 μ s には、アルファ粒子のエネルギー付与により、表面から 5.5 μ m 程度の領域までが 2,000 K 程度まで温度上昇する。また、この時刻では、表面から 20 μ m 程度の領域までが温度上昇する。重水素イオン、三重水素イオンの照射がほぼ終了する爆縮レーザー照射後約 1.677 μ s には、初期の第一壁表面位置から 2.2 μ m までがアブレーションを起こし、初期の表面位置から 4.5 μ m までの 2.3 μ m 程度の領域が 2,000 K 程度まで温度上昇している。

4.2 核融合エネルギー 400 MJ, 炉チェンバー半径 2 m, 4 m, 8 m の場合の第一壁アブレーションの評価

この節では、核融合エネルギーが 400 MJ, 炉チェンバー半径が 2 m, 4 m, 8 m の場合におけるアブレーション深さとアブレーション質量の比較を行う。炭素イオン、水素イオンの照射が始まる直前の第一壁のエネルギー密度の分布を Fig. 9 に示す。図の縦軸は第一壁のエネルギー密度、横軸は第一壁表面からの深さである。また、図の 1.2×10^4 J/cm² 付近にある二点鎖線は、本研究で液体鉛第一壁がアブレーションすると仮定したエネルギー密度のしきい値である。炉チェンバー半径が 2 m の場合、炭素イオン、水素イオンの照射が始まる直前のアルファ粒子エネルギーの付与により第一壁は表面から 6.3 μ m までのエネルギー密度がしきい値である 1.2×10^4 J/cm² を超えており、この深さまでがアブレーションすることがわかる。炉チェンバー半径 4 m と 8 m の場合は、アルファ粒子エネルギーの付与による

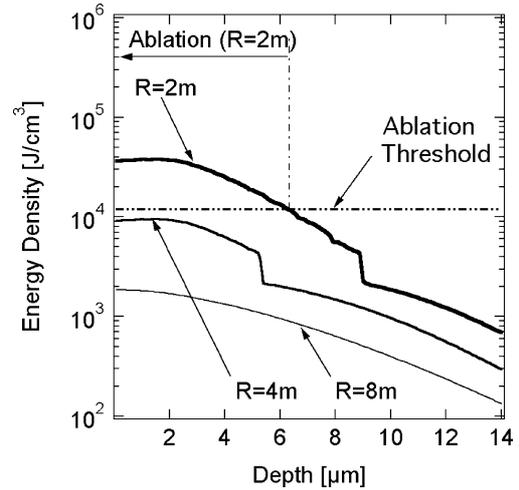


Fig. 9 Energy deposition calculated immediately after the alpha particle irradiation in the case of radii 2 m, 4 m, and 8 m.

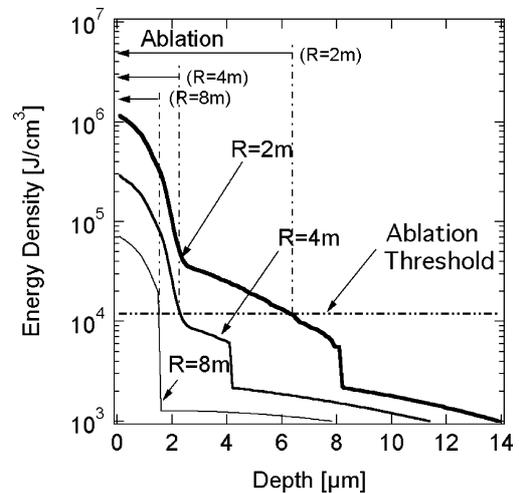


Fig. 10 Energy deposition calculated immediately after the charged particle irradiation in the case of radii 2 m, 4 m, and 8 m.

第一壁へのエネルギー密度の上昇は本簡易モデルで想定したアブレーションするしきい値以下であり、第一壁はアブレーションしないことがわかる。

次に、重水素イオン、三重水素イオンの照射がほぼ終了する時刻の第一壁のエネルギー密度の分布を Fig. 10 に示す。炉チェンバー半径が 2 m の場合、炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンエネルギーの付与によりエネルギー密度が上昇するが、これらのイオンの飛程は 1~3 μ m 程度であり、すでにアブレートしてプラズマとなっている部分にのみエネルギーを付与するため、アブレーション深さは増加しない。炉チェンバー半径 4 m と 8 m の場合、炭素イオン、水素イオンの照射が始まる直前の時刻まではアブレーションしないが、飛程が 1~3 μ m 程度の炭素イオン、水素イオン、重水素イオン、三重水素イオンエネルギーの付与により、炉チェンバー半径 4 m で 2.2 μ m, 炉チェンバー半径 8 m で 1.5 μ m の深さまでがアブレーションする。

Table 2 Ablation depth and ablation mass of a liquid lead first wall.

Chamber Radius	Fluence	Ablation Depth	Ablation Mass
2 m	148 J/cm ²	6.3 μm	3.6 kg
4 m	37 J/cm ²	2.2 μm	5.0 kg
8 m	9.3 J/cm ²	1.5 μm	13.7 kg

核融合エネルギーが400 MJ, 炉チェンバー半径が2 m, 4 m, 8 mの場合に第一壁に照射するX線, アルファ粒子, 炭素イオン, 水素イオン, 重水素イオン, 三重水素イオンの合計フルエンス, 液体鉛第一壁のアブレーション深さ, アブレーション質量の関係を Table 2 に示す. 第一壁の単位面積あたりに照射するエネルギー量であるフルエンスは, 炉チェンバー半径が2倍になると炉の表面積は4倍となるため, 炉チェンバー半径が2 mで148 J/cm², 炉チェンバー半径が4 mで37 J/cm², 炉チェンバー半径が8 mで9.3 J/cm²と炉チェンバー半径の2乗に反比例している. アブレーション深さは, 炉チェンバー半径が2 mで6.3 μm, 炉チェンバー半径が4 mで2.2 μm, 炉チェンバー半径が8 mで1.5 μmと炉チェンバー半径が大きくなるにつれて減少しているが, 炉の表面積は炉チェンバー半径の2乗で大きくなり, アブレーション質量は炉チェンバー半径が2 mで3.6 kg, 炉チェンバー半径が4 mで5.0 kg, 炉チェンバー半径が8 mで13.7 kgとなる.

5. 結論

本研究のまとめとして, 直接照射方式で核融合エネルギーが400 MJの場合のレーザー核融合炉チェンバー液体鉛第一壁 (Liquid wall) において,

1. 直接照射方式のターゲットを用いたレーザー核融合炉では, 核融合反応で発生するX線の第一壁表面付近へのエネルギー付与の影響はほとんど無視できる.
2. 核融合エネルギー400 MJ, 炉チェンバー半径2 mの設計条件では, アルファ粒子のエネルギー付与により, 6.3 μmの第一壁がアブレーションする.
3. 核融合エネルギー400 MJ, 炉チェンバー半径4 mと8 mの設計条件では, 炭素イオン, 水素イオンの照射が始まる直前の時刻まではアブレーションしないが, そ

の後の炭素イオン, 水素イオン, 重水素イオン, 三重水素イオンのイオンのエネルギー付与により第一壁がアブレーションする. アブレーション深さは, 炉チェンバー半径4 mの場合で2.2 μm, 炉チェンバー半径8 mの場合は1.5 μmである.

4. 炭素イオン, 水素イオン, 重水素イオン, 三重水素イオンの飛程は比較的短いため, これらのイオンが持つエネルギーの大部分はアブレーションした鉛プラズマに吸収される.
5. 核融合エネルギーが400 MJ, 炉チェンバー半径が2, 4, 8 mの場合, 第一壁のアブレーション深さは6.3 μm, 2.2 μm, 1.5 μmと炉チェンバー半径が大きくなる程減少するが, 炉チェンバーの表面積は半径の2乗に比例して大きくなるため, アブレーション量は3.6 kg, 5.0 kg, 13.7 kgとなる.

謝 辞

大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻, 先進電磁エネルギー工学コース, 高橋亮人先生, 近藤公伯先生には, 貴重な助言をいただいたことを深く感謝します.

参考文献

- [1] Y. Kozaki, Issues and New Concepts of IFE Liquid Wall Chamber, *IFSA 2001*, edited by K.A. Tanaka *et al.* (ELSEVIER, Paris, 2001) p. 696.
- [2] H. Furukawa, Y. Kozaki, K. Yamamoto, T. Johzaki and K. Mima, *Fusion Eng. Des.* (2005), *in press*.
- [3] S.I. Anisimov and B.S. Luk'yanchuk, *Physics-Uspekhi* **45**, 293-324 (2002).
- [4] H. Takabe *et al.*, *Phys. Fluids* **31**, 2884 (1988).
- [5] Y. Nakao *et al.*, *Nucl. Fusion* **30**, 143 (1990).
- [6] Y. Nakao *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.* **30**, 18 (1993)
- [7] Y. Nakao, T. Honda, M. Fujita, K. Kudo and H. Nakashima, *J. Nucl. Sci. Technol.* **30**, 1207-1213 (1993).
- [8] J.P. Christiansen *et al.*, *Comp. Phys. Commun.* **7**, 271 (1974).
- [9] W.J. Hogan, *ENERGY FROM INERTIAL FUSION* p. 188, (1995).
- [10] Angela Li-Scholz, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **54**, 294 (1993).
- [11] J.F. Ziegler, *Stopping Cross-Sections for Energetic Ions in All Elements* **5**, 391 (1980).