

連載
講座今、核融合炉の壁が熱い！
—数値モデリングでチャレンジ

第10回 IX. 壁は熱でどうなるか

レーザー技術総合研究所 古河 裕之, 京都大学 刃刀 資彰

I. はじめに

磁場核融合および慣性核融合において核融合炉が担う重要な役割の一つは、核融合反応により生じた中性子、 α 粒子、X線等、および炉心プラズマを外部に漏らさないことである。核融合炉容器(以降、チェンバと呼ぶ)の最も内側の壁(以降、第一壁と呼ぶ)は、 α 粒子やX線等および炉心プラズマからの粒子等が照射されるため、非常に高温環境下にさらされる。したがって、高熱粒子環境下で第一壁の健全性(例えば、壁温度の上昇等)を評価することは、トカマク型磁場閉じ込め核融合炉設計および慣性核融合炉設計における大きな課題の一つである。本稿では、主に慣性核融合の代表例であるレーザー核融合炉設計における第一壁の熱問題について述べるが、それは定性的には磁場核融合炉設計と共通したものである。

II. アブレーションと熱流体運動

最新のレーザー核融合概念設計炉 KOYO-F¹⁾については、本連載の第1回で紹介したように、厚さ3~5mmの液体リチウム鉛が第一壁に沿って滝状に流下する構造、つまり「液体壁」を形成して第一壁を保護している。この液体壁概念については、水を用いた模擬実験により第一壁面上に流下液膜を形成可能であることが原理実証

The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling (10): Chap. IX How does the wall behave by the high energy particle irradiation?: Hiroyuki FURUKAWA, Tomoaki KUNUGI.

(2009年 1月5日 受理)

各回タイトル

第1回 I. はじめに

II-1 壁の前で何が起きているか?(物理モデル)

第2回 II-2 壁の前で何が起きているか?(プラズマの攻撃)

第3回 III. 壁の表面で何が起きているか

第4回 IV. 壁の中で何が起きているか

第5回 V. 壁はどのくらい熱くなるか

第6回 VI-1 壁の中は傷まないか(放射線の照射によって受ける壁材料のダメージ)

第7回 VI-2 壁の中は傷まないか(放射線の照射によって受ける壁材料のダメージをいかに予測するか)

第8回 VII. 核融合材料のメソスケールシミュレーション

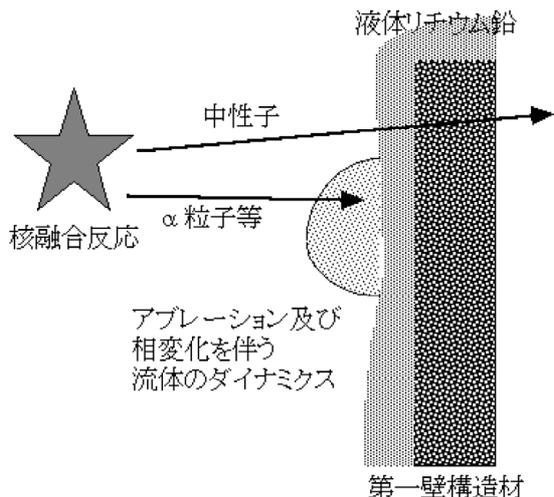
第9回 VIII. 壁が作る燃料をどうするか

されている²⁾。1ショット当たり発生する核融合エネルギーは200 MJ、燃料球(以降、ターゲットと呼ぶ)とチェンバ第一壁の最短距離は3mとなっている。このような条件下では、液体壁は液体から中性気体、部分電離プラズマへと相変化を伴いながらアブレーションする。アブレーションとは、急激な蒸発現象または急激な沸騰現象のことである。このアブレーションにより生成されたブルーム(気体、液体、固体などの塊)中では微細なクラスタの生成やブルームの凝縮(気体から液体への相変化)を生ずることが予想される。

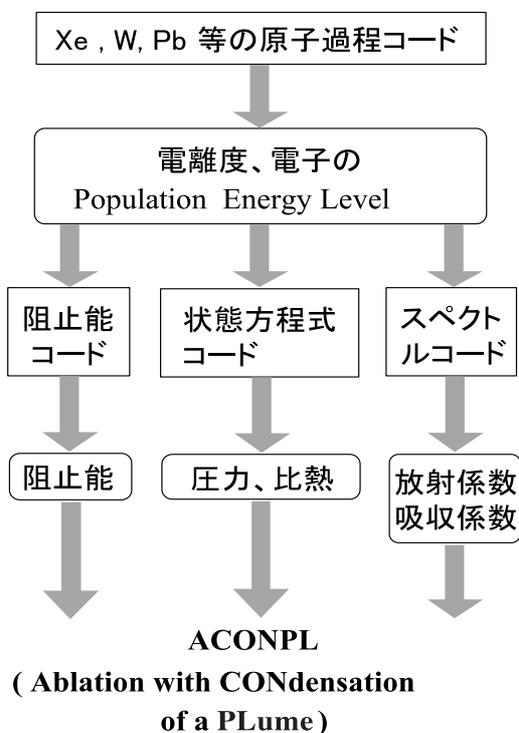
本連載の第1回でも述べられたが、 α 粒子等の荷電粒子は、液体金属中に入ると衝突を繰り返し、エネルギーを失い停止する。停止するまでの距離を飛程と呼ぶ。 α 粒子のエネルギー吸収は、表面から内部に7.5 μm 程度進んだ位置で最大になり、飛程も同程度となる。そのため、液体表面は内部から押される形ではげ落ちるようにアブレーションされる³⁾。このエネルギー吸収過程を決定づけている物理量として、金属(部分電離プラズマ)における荷電粒子に対する阻止能が挙げられる。第一壁のアブレーションを議論する場合、先行して入射した α 粒子からのエネルギー付与によりアブレートした物質(部分電離プラズマ)が、後に入射される粒子のエネルギーを吸収する効果が重要である³⁾。したがって、幅広い温度・密度領域の部分電離プラズマに対応した阻止能を求める必要がある。エネルギーを吸収した液体金属は相変化しながら流体運動を行う、つまり、アブレートした液体金属は断熱膨張によって急速に冷却され、クラスタを生成しながら飛散する。

第1図は、レーザー核融合炉液体壁チェンバ第一壁近傍で起こっている現象の概念図を示したものである。高強度X線、 α 粒子および高エネルギー荷電粒子等によるアブレーション過程は、液体、気体、部分電離プラズマが混在する複合複雑現象であり、数値シミュレーションによる研究はあまり行われていない。これらの複合複雑現象を解析するため、筆者らはアブレーションにより生成されたブルームの凝縮⁴⁾についても取扱い可能な統合シミュレーションコード DECORE(Design Code for Reactor)を開発した³⁾。

第2図は DECORE の解析フローの概念を示しており、様々なコードを統合したものである。まず、原子過



第1図 レーザ核融合炉液体壁チェンバ第一壁近傍で起こっている現象の概念図



第2図 DECOREの解析フロー概念図

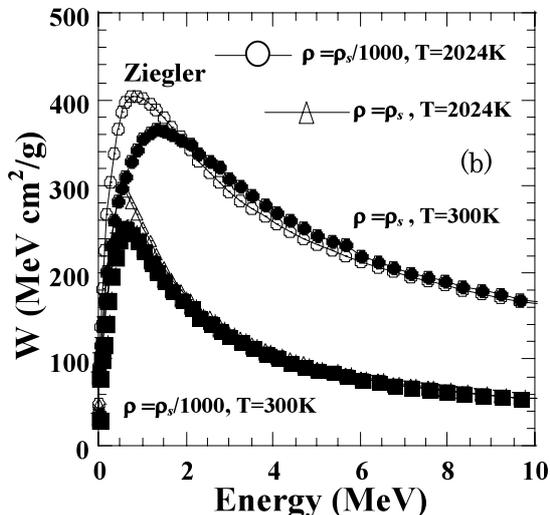
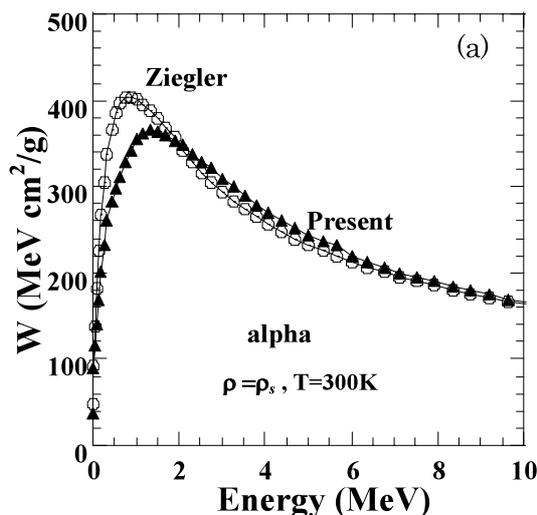
程コードを用いて、鉛などの多数の電子を有する高Z原子に対して、様々な価数のイオンの基底状態、励起状態における電子のエネルギー準位、全電子エネルギー等を求め、これらのデータを基に、ある温度密度における電離度、基底状態や励起状態のPopulation等を決定する。得られた電離度、Population等と、阻止能コード、状態方程式コード、スペクトルコードを用いて、金属および部分電離プラズマの阻止能、圧力、比熱、X線の放射係数、吸収係数等を求める。それらをアブレーションコード(ACONPL: Ablation with CONDensation of a PLume)に取り込み、液体、気体、部分電離プラズマが混在する複合複雑現象をシミュレートすることができ

る。

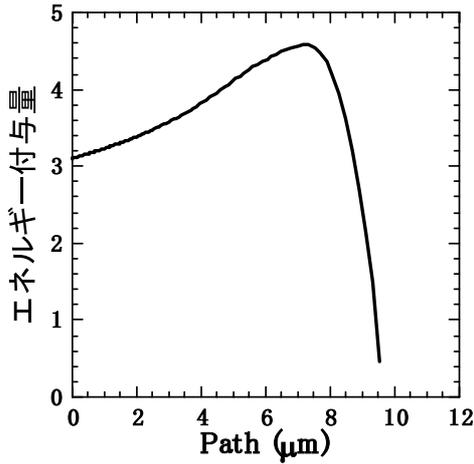
高Z固体金属の荷電粒子に対する阻止能の理論モデルとしては、実験値をよく再現するモデルとして、Zieglerのモデル³⁾がよく知られている。筆者らは、アブレーションコードに取り込むプラズマの阻止能のモデルとして、広い温度・密度範囲でより正確なモデルを開発した。

第3図は鉛中のα粒子に対する阻止能の計算結果であり、横軸はα粒子のエネルギー、縦軸は阻止能の値である。第3図(a)は固体金属の鉛に対する阻止能、第3図(b)は鉛の温度密度を変えた時の阻止能を示している。阻止能に関しては、常温の固体金属中に荷電粒子を照射した場合にしか信頼できる実験結果が存在しない。第3図(b)のラインは、すべて計算値である。今後、常温の固体金属以外の実験結果が待たれるところである。

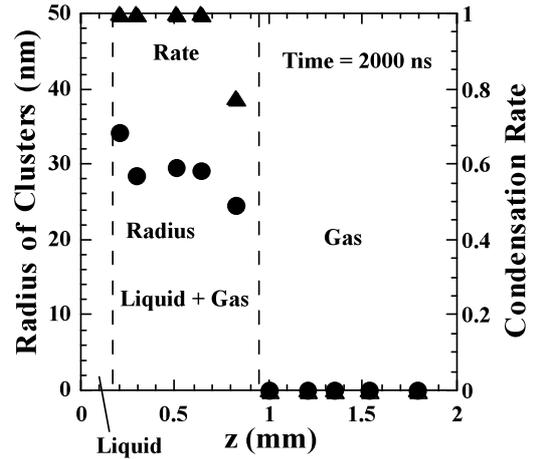
第4図は固体金属鉛に初期エネルギー3.52 MeVのα粒子が入射した際の、α粒子から固体金属鉛へのエネルギー付与量をα粒子の飛行距離の関数として表したものである。図からわかるように、7.5 μm 辺りでエネルギー付与量が最大となり、その後、急激に0に近づく。



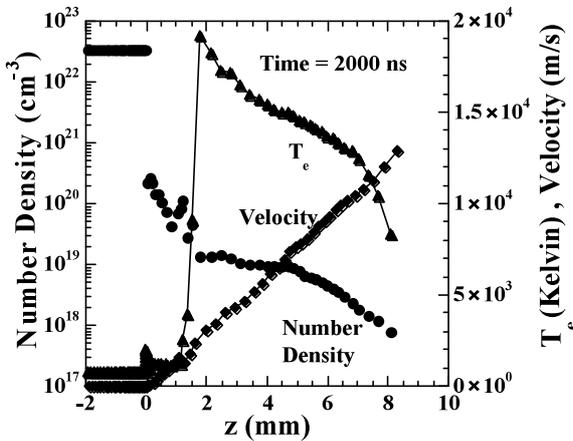
第3図 鉛中のα粒子に対する阻止能



第4図 固体金属鉛に初期エネルギー3.52 MeVの α 粒子が入射した際の α 粒子から固体金属鉛へのエネルギー付与量



第6図 DECOREにより求めたブルーム中のクラスタ粒子の半径分布と凝縮率



第5図 DECOREにより求めた液体金属およびアブレートした物質のプロファイル

このため、液体壁に α 粒子が入射されると、表面から7.5 μm 程度内部から押される形ではげ落ちるようにアブレーションされる³⁾。

第5図は、DECOREにより求めた、最新のレーザー核融合概念設計炉 KOYO-Fの第一壁近傍の液体金属およびアブレートした物質のプロファイルである。上述したように、液体壁がはがれ落ちて飛散する様子が見取れる。典型的なブルームの温度は15,000 K程度であり、物理的に様々な状態が混在しうる非常に解析が難しい領域である。

第6図は、DECOREにより求めたブルーム中のクラスタ粒子の半径分布と凝縮率である。クラスタ粒子の半径は30 nm程度であり、ブルームは液体部分、液体と気体の混合部分、気体部分から構成されていることがわかる。

Ⅲ. 逃走電子による第一壁の熱損耗

トカマク型核融合炉の磁場に閉じ込められたプラズマ

中の荷電粒子は2つの力によって駆動されている。その一つは、電場による加速力であり、他方は荷電粒子間での衝突による摩擦(減速)力である。仮に、加速力が摩擦力に打ち勝った場合には、トロイダル方向(トーラス状のプラズマの対称軸をまわる方向)の電場によって電子群が高エネルギー状態へ加速され、実質的に摩擦力の低減化をもたらし、やがて電子群がプラズマ領域外へ飛び出す事態となる⁶⁾。このような高エネルギー電子群を逃走電子(Runaway Electrons)と呼び、トカマク型核融合炉ではプラズマ崩壊(ディスラプション)の際に発生する。与えられたプラズマ閉じ込め容器の定ループ電圧に対する電子の持つ最大エネルギーは、シンクロトロン放射または加速時間のいずれかで決まる。

現実のトカマク装置においても数多くの逃走電子によるとみられる損傷あるいは痕跡が観察されており、その最大のものが第一壁の局所損傷として報告されている⁷⁾。また、逃走電子が第一壁へ衝突した際の最も定量的情報は、制動放射(Bremsstrahlung)による (γ, n) 反応で生成される中性子発生量の測定から得られている。これら逃走電子を捕捉するための測定は、中性子の直接測定や、第一壁材料の放射化生成物の検査により行うことができる。後者は、多くの放射化生成物が30 MeV以上の電子エネルギーを必要とするしきい値反応で生成されているため、衝突した逃走電子の空間分布が放射化生成物の第一壁内での分布から決定できることを利用している。この他の逃走電子の捕捉方法として、逃走電子と第一壁との相互作用の際に発生する強X線放射を測定する方法がある⁸⁾。

例えば、ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)のEDA(Engineering Design Activity)設計に基づく核融合実験炉については、どの程度の頻度で逃走電子が発生するかは全く不明であり、プラズマ運転制御や第一壁設計に依存している。JET(Joint European Torus)における実験では、ベリリウム被覆し

た第一壁でダイバータ配位(プラズマ粒子を集中させることで対向壁の損耗とそれに伴う不純物の混入を低減させる磁場配位)のプラズマ運転を行った場合は、第一壁に炭素材料を用いてリミター配位(プラズマと金属容器壁との相互作用を防ぐために、固体リミターでプラズマ境界を規定する磁場配位)の運転を行った場合に比べて逃走電子の発生頻度が著しく減少したと報告されている⁹⁾。ITER-CDA(Conceptual Design Activity)の概念設計では、最も可能性の高いパラメータ域として、逃走電子エネルギーは300 MeV 程度および表面熱負荷は30 MJ/m²と考えられている。また、逃走電子と第一壁の相互作用の時間スケールは1 ms のオーダーであるとされている。

プラズマ対向機器への逃走電子による熱負荷は、逃走電子が厚い被覆層を貫通して冷却管を加熱するため、ディスラプション時の高熱流束による表面熱負荷と大きく異なっている。この逃走電子による冷却管加熱によって管壁内部に急峻な温度勾配がついて冷却管の熔融や構造材の損傷が生じ、真空容器内に冷却材が浸入する事故事象の引き金となり得る可能性がある¹⁰⁾。このように核融合炉の健全性のみならず、安全性を検討する上でも逃走電子の第一壁に及ぼす影響を定量的に評価することは重要である¹¹⁾。

IV. まとめ

上記に述べたように、核融合炉壁の熱負荷に関する問題は、多くの物理現象が極めて複雑に関連しており、非常に複雑な問題であるが、核融合炉の健全性や安全性に大きな影響を及ぼすため、その研究が急がれている。特に、アブレーション研究分野はまだ歴史が浅く、今後、若い研究者が大いに活躍できるチャレンジングな研究課題であると同時に、様々な分野の研究者の連携協力による研究推進が望まれる課題である。

—参考文献—

- 1) 神前康次, 他, プラズマ核融合学会誌, **82**, 819-822 (2007).
- 2) T. Kunugi, *et al.*, *Fusion Eng. Des.*, **83**, 1888-1892 (2008).
- 3) 古河裕之, 他, プラズマ核融合学会誌, **82**, 617-627 (2006).
- 4) B. S. Luk'yanchuk, *et al.*, SPIE 3618, 434-452(1999).
- 5) J. F. Ziegler, *Stopping Cross-Sections for Energetic Ions in All Elements*, Pergamon, 5, 391-394(1980).
- 6) H. Knoepfel, *et al.*, *Nucl. Fusion*, **19**(6), 785(1979).
- 7) K. J. Dietz, *J. Nucl. Mater.*, **8**, 155-157(1988).
- 8) R. D. Gill, JET-P 28, (1993).
- 9) G. R. Harris, JET-R 07, (1990).
- 10) T. Kunugi, *et al.*, *Fusion Eng. Des.*, **42**, 67-72(1998).
- 11) H.-W. Bartels, *et al.*, *Suppl. J. Nucl. Fusion Eng.*, **5**, 225-244(1994).

著者紹介

古河裕之(ふるかわ・ひろゆき)



レーザー技術総合研究所
(専門分野/関心分野)シミュレーション物理学/アブレーション物理学, プラズマ物理学, 原子物理学

切刀資彰(くぬぎ・ともあき)



京都大学
(専門分野/関心分野)混相流工学/伝熱工学/数値流体力学/核融合炉工学(ダイバータ, ブランケット, 安全性)