

材料中の損傷と燃料粒子の相互作用とダイナミクス Interactions of lattice defects and fuel particles in fusion reactor materials

波多野 雄治
HATANO Yuji

富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センター
Hydrogen Isotope Research Center, Organization for Promotion of Research, University of Toyama

1. はじめに

本シンポジウム「先進核融合炉における材料・炉工学研究」の主旨説明 (S2-1) でも述べられているように、先進核融合炉には (1) 現在設計が進められている原型炉と同様に重水素 (D) とトリチウム (T) を燃料としつつ建設コストや廃棄物量の低減を目指して小型化を図るものと、(2) D-D、D-³He、陽子(p)-¹¹Bなどの先進燃料を用いるものとに大別される。小型の装置で原型炉と同程度の核融合出力を得ようとする場合には、当然のことながらプラズマ対向壁へ入射する燃料粒子のフラックスは増大する。また、先進燃料を用いる核融合炉については詳細設計に至っている例は少ないが、より高温のプラズマを閉じ込める必要があるため、プラズマ対向壁への燃料粒子入射フラックスは増大する可能性が高い。

以上のような観点から本講演では、高い粒子負荷にさらされる先進核融合炉プラズマ対向材料 (PFM) 中における水素同位体と格子欠陥の相互作用について議論する。PFMに要求される特性を整理したのち、特に高濃度に水素同位体が溶解した際に起こり得る現象を論じる。

2. プラズマ対向材料に要求される事項

定常D-T放電を行う原型炉のPFMには、以下のような特性が求められる。

- ① プラズマからの高い熱負荷に耐えられる
- ② 水素同位体プラズマによる損耗が小さい
- ③ プラズマ中に混入した場合の影響が小さい
- ④ Tの取り込み量が小さい
- ⑤ 中性子照射に耐えられる
- ⑥ 中性子による放射化で長半減期放射性核種が大量に発生しない

主にHやDを用いてプラズマ性能の向上を目指す実験が行われた時代には、黒鉛や炭素繊維強化炭素複合材などの炭素材料が用いられた。これは、炭素材料が優れた耐熱性を有し、かつ低原子番号であるためプラズマに混入した場

合の放射損失が小さいためである。放電時間が短かったため、損耗も問題とならなかった。しかし定常D-T放電を行う段階では、物理・化学スパッタリングによる損耗が大きいことと、プラズマ中に混入した炭素がプラズマから陰になる部分に再堆積するとき高濃度にTを取り込むことが問題となった。また、中性子照射による寸法変化と熱伝導度の低下も懸念された[1]。

以上のことから原型炉では、タングステン (W) あるいはWを母材とする合金や複合材料をPFMとして使用することが想定されている。Wにも高熱負荷下での溶解や再結晶による脆化、照射欠陥や核変換生成物の蓄積による脆化、照射欠陥の捕獲効果によるT蓄積量の増大などの懸念はあるが、致命的な欠点はなく、合金や複合材を含めたより信頼性の高いW材料の開発が進められている[2]。

小型D-T炉においては、先述のように燃料粒子や中性子の入射フラックスには変化があるが、上記①～⑥の基本的要求事項は変わらない。従って、原型炉と同様に固体ではWがPFMの最有力候補となるであろう。

先進燃料を用いる場合には、当然のことながらTを主燃料として供給する必要はないため、上記④の要件は緩和される。核融合炉での燃焼率は数%程度であると想定されるので、D-T炉では実際に核融合反応するTの数十倍の量を供給する必要があり、たとえD-D反応でTが生成するといえども[3]、先進燃料の利用により真空容器内に存在するT量は大きく減少する。一方で、中性子に関してはそう単純ではない。D-D反応では中性子も生じるし、同反応で発生したTがプラズマ中に閉じ込められればD-T反応を生じる。また、D-³He炉では並行してD-D反応も起こる。イオン温度100～200 keV程度で運転できればD-D反応をかなり抑制できるが、より低いイオン温度ではD-D反応の割合が大きくなる[3]。以上のことから、D-D炉およびD-³He炉では上記⑤、⑥の条件が多少緩和はされるで

あろうが、必ずしも楽観視はできない。炭素は上述のような寸法変化や熱伝導度の低下という問題があり、モリブデンなどの高融点金属も放射化の観点から使いづらい。そうであれば、炉設計が確定していない現状では、先進燃料炉においてもWをPFM第一候補と考えて差し支えないであろう。P- ^{11}B においても核融合反応で生成する α 粒子と ^{11}B の反応等で中性子が発生するが[4]、ここでは深入りしない。

3. 高フラックス水素同位体プラズマ曝露下で生じ得る現象

プラズマからPFMへ水素が高濃度に注入された際に問題となり得るのは、(1) 水素自身が欠陥を生じさせること、(2) 水素が中性子照射により生成された欠陥を安定させること、である。水素は金属原子間にある隙間（格子間位置）に入り込み、格子膨張を引き起こす[5]。この歪エネルギーが、欠陥との相互作用の主因となる。一方で、Wを含む体心立方構造の金属中では、水素は格子間位置をジャンプすることで比較的速やかに拡散する。

高濃度に水素が注入されると周囲に塑性変形が起こり、転位が導入される。また、水素は広い空間を好むため、結晶粒界等を集積する。水素の集積により結晶粒界等が開裂に至り、その空隙に水素ガスが蓄積し高圧状態となると、上部表面が隆起し（ブリストリング）、表面剥離等の原因となる[5]。これまでのフラックスが $10^{22} \text{ H m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度の実験では、およそ500 Kでブリスタの密度は最大となり、700 K以上ではほとんど観察されない[6]。先進炉開発に向けて入射フラックスが大きく増大した場合にこの温度依存性がどう変化するかを明らかにする必要はあるが、Wの表面温度が上昇するとすれば、それほど問題とならないかもしれない。

同様に歪エネルギーを駆動力として、水素は原子空孔と強く結合する。このとき、空孔の実効的な生成エネルギーは水素との結合エネルギーの分だけ実質的に小さくなる。実際に、高圧水素ガス環境下では高濃度に水素が固溶することで、熱平衡状態で（！）多量の空孔が形成されることが種々の金属について確認されている[6,7]。また、金属原子は空孔を媒介として拡散するため、高濃度水素存在下では界面反応が促進されることも報告されている[7]。W中の空孔は一つあたり最大12個の水素原子を捕獲し、水素と空孔の結合エネルギーは捕獲水素原子数の増大と共に減少するものの、最初の

4個までは水素原子1個あたり1.4~1 eV程度である[8]。水素がない場合のW中の空孔の生成エネルギーは3.6 eV程度であるが[9]、水素原子を2~3個捕獲すると実質的にはゼロになる。このような原理で、Wについても水素存在下では熱的に多量空孔が形成されると予測されている[7]。特に重要なのは、水素が高濃度に存在しさえすれば、かなり高温でもこの効果により空孔が導入され得る、ということである。また、水素が存在することで、重イオン照射によって形成される空孔型欠陥が安定化されることもわかっている[10]。水素は空孔型欠陥のクラスタ形成にも影響するであろう。

以上のように、空孔型欠陥と水素の相互作用は、高フラックス燃料粒子入射下での照射損傷組織の発達に大きな影響を及ぼし、ひいては機械的強度や熱伝導度も変化させる可能性がある。著者らは日米協力のもと、図のように水素源（水素化バナジウム）を内蔵するキャプセルを用いた水素環境下での中性子照射研究に着手しており[11,12]、成果を先進炉設計に役立たせたいと考えている。

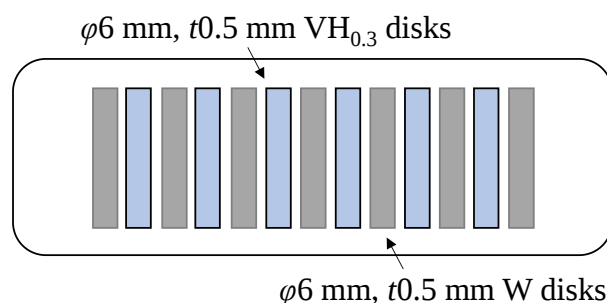


図 水素化バナジウムを水素源とする中性子照射キャプセルの模式図 [11,12]

参考文献

- [1] 「核融合炉用黒鉛材料の総合的評価」研究専門委員会, 日本原子力学会誌 35 (1993) 1066.
- [2] 上田良夫ら, プラズマ・核融合学会誌 93 (2017) 127.
- [3] 百田 弘, 核融合研究, 61 (1989) 5.
- [4] B. M. Hegelich et al., Laser and Particle Beams 2023 (2023) 6924841.
- [5] J. Roth, K. Schmid, Phys. Scr. T145 (2011) 014031.
- [6] 深井有, まてりあ 50 (2011) 465.
- [7] 深井有, まてりあ 50 (2011) 521.
- [8] K. Ohsawa et al., J. Nucl. Mater. 458 (2015) 187.
- [9] J. Gripshover et al., Philos. Mag. 22 (1970) 757.
- [10] S. Markelj et al., Nucl. Mater. Energy 12 (2017) 169.
- [11] 波多野雄治, 外山 健, 富山大学水素同位体科学研究センター研究報告 39 (2019) 25.
- [12] N. O. Cetiner et al., Fusion Eng. Desing 178 (2022) 113089.