

プラズマに負けない強い壁を作るために ～超高熱負荷試験装置で加速する炉壁研究開発～

浜地志憲

現在の核融合研究は核融合発電を実現するため、学術研究と並行して技術の研究開発を進める段階に入っており、核融合科学研究所でも核融合発電炉を目指した研究や技術開発を展開しています。超高熱負荷試験装置 ACT2 は大強度の電子のビームを使って核融合炉の壁への熱を再現する装置で、プラズマに面した炉壁の研究開発のために設置されました（図 1）。今回は炉壁の研究開発についての背景と、その中で ACT2 が果たす役割についてご説明します。

なぜ壁の研究開発が重要なのか

磁場閉じ込め型の核融合炉では磁力を使ってプラズマ状態になった重水素と三重水素を閉じ込めます。しかし一部の粒子は壁に当たって壁を少しずつ削ったり、壁に入り込んだりすると同時に、壁に熱を与えます。特にダイバータと呼ばれる部分では、プラズマを壁材料に直接当てているため、発電炉では $10\text{MW}/\text{m}^2$ ($\text{MW} = 100\text{万W}$) を超える熱負荷が与えられると考えられています。これは、宇宙ロケットのエンジンスカート（火を吹いているところ）の内壁への熱負荷と同程度で、核融合発電炉ではこれが年単位でずっと壁に与えられ続けま

す。もちろん冷却材（水など）を流して冷却するのですが、それでもこれはとても厳しい条件です。ダイバータ以外の部分での熱負荷はこの数分の一かそれ以下になるため既存技術の組み合わせも有効だとも言われていますが、ダイバータはそうはいきません。しかしダイバータはプラズマを壁材料に当てて普通のガスに戻し、真空ポンプで外に出せるようにするという大事な役割があるので外せません。もしダイバータがなくなると、プラズマに削られて放出された壁の粒子や核融合反応で生成されたヘリウムがプラズマ中でたまってしまい、プラズマが冷えて最後には消えてしまいます。

現在、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）のダイバータ部には熱に強い炭素系材料が、その他の部分にはステンレス系材料が使われています。LHD では発電炉に比べて熱負荷が小さいのですが、それでも実験中は熱負荷によって炭素表面が赤熱するほど温度が上がってしまいます（ 1000 度を超えると肉眼で分かるほど光ります）。ACT2 での模擬実験の写真を図 2 に示しました。今の構造では将来の発電炉で見込まれる熱には耐えられません。現在日本も参画する国際協力の下で建設が進む国際熱核融合実験炉（ITER）では、タンクス



図1 ACT2の装置写真。上部に電子銃があり、下部に試験体が入った真空容器があります。写真には入っていませんが、他にも各種計測機器や冷却水配管がつながっています。



図2 ACT2を使ってLHDでの熱負荷を模擬した実験の際の写真。中央の手前から奥に伸びるのが炭素のタイルで、熱負荷の当たっている部分が赤熱しています。上部から電子ビームによって加熱していますが、電子は目に見えないので、実験中は材料がひとりてに光りだすように見えます。

テンという金属（融点が約 3420 度と金属で最も高い温度まで溶けないうえ、プラズマが当たっても削れにくい）に銅合金で作った冷却配管を通したダイバータを採用しています。これは短い期間なら発電炉に近い熱負荷にも耐えると見込まれますが、年単位の長期間の運転では使われる銅合金の健全性に不安があるなど、このままでは発電炉への採用は難しいとされています。実験炉から発電炉へのステップアップには新しい壁材料や機器の開発が必要とされているのです。

超高熱負荷試験装置 ACT2 の役割

プラズマ対向機器をめぐる難しい現状を踏まえ、様々な革新的技術やアイデアの研究開発が進められています。それらは新材料や新接手法、新設計など様々で、固体金属ではなく、液体金属（溶かしたスズなど）を流すアイデアのような挑戦的なものもあります。しかし、どんなアイデアもまずはそれが「使える」ことを示さなければいけません。このとき、熱負荷が与えられた際の表面から冷却部分への温度変化（温度勾配）が重要な要素になります。設計にもよりますが、ダイバータ機器は表面から冷却部まで、数 mm の間に数百度の温度勾配があり、特に接合面では大きくなります。この温度勾配によって生まれる力が材料を歪め、場合によっては材料や接合部を破壊してしまうのです。新しい技術やアイデアはこれを克服できることを示さなくてはなりません。また、炉壁材料や機器の研究開発には実験と分析に加えて改良を繰り返す試行錯誤が必要ですが、実際の規模の熱負荷を冷却と同時に与える試験装置がなければ不可能です。超高熱負荷試験装置 ACT2（正式名称：Active Cooling Teststand 2）はそのために新設された装置です。

ACT2 は電子ビームを使った熱負荷試験装置で、冷却水を流して冷却しながら発電炉規模の熱負荷を与えられます。ACT2 は LHD のダイバータの開発のために作られた初代の ACT の電子銃やシステムを更新して、将来の発電炉に向けた研究開発のための装置として生

まれ変わらせた装置です。図 1 に示した ACT2 の心臓部である電子銃は最大出力 300kW の電子ビームを直径 2cm に収束させることができます。実際の試験ではそのビームを高速でスキャン（ジグザグに走らせる）して、試験したい面を塗りつぶして加熱します（図 3 に塗りつぶしのイメージを示しています）。一般家庭のガスコンロは出力が 3kW 程度ですから、「ガスコンロ 100 台分の熱を直径 2cm に集中させることができる」と思うとすごさが伝わるのではないのでしょうか？ この電子銃ならダイバータの実物の一区画を切り出して 10MW/m²以上の実規模の熱負荷を与えることが可能です。また、電子を使うためにプラズマよりも制御性が高くなっており、熱負荷の ON-OFF を繰り返して材料疲労を調べる試験のような、長期間の運転を見込んだ信頼性を調べる研究も可能となりました。

ACT2 は 2014 年に設置されて以後、全国の大学や研究機関と連携して新しい接合方法を使ったダイバータの試験や、熱負荷による材料の変化の基礎研究を進めています。さらに、この ACT2 の性能は核融合分野以外の分野でも有効です。現在は、加速した水素原子をリチウムを含むターゲットにぶつけて反応させ、生成した中性子をがん細胞に照射することで治療するホウ素中性子捕捉療法と呼ばれる手法の研究開発チームとの共同研究を行っています。この手法では加速させた陽子によるターゲット部分の加熱が、核融合炉ダイバータに近いレベル（6MW/m²以上）になっており、ACT2 だからこそ可能な熱負荷試験を通じて、機器の信頼性や除熱効率の向上を目指した研究をしています。

（核融合システム研究系 助教）

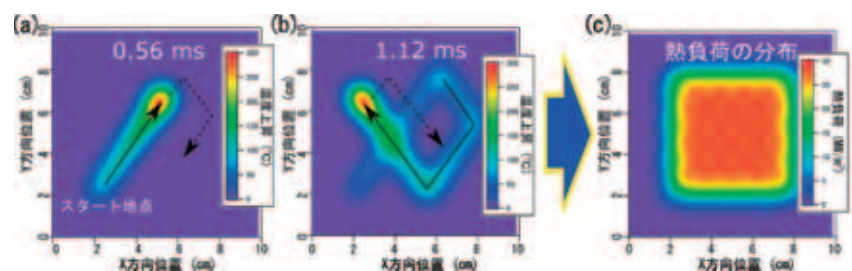


図3 (a)と(b):左下のスタート地点から0.56, 1.12ms (1msは1000分の1秒)後の温度分布の例。ビームのある場所やその通り道が赤や黄色になり、温度が上がっているのが分かります。(c):最終的に与えられる熱負荷の分布。赤い部分には30MW/m²程度の熱負荷が与えられていますが、赤い部分のムラは2%ほどです。