

## 談話室

核融合炉中性子照射損傷研究の  
現状と展望

白石 春 樹\*

1月から2月にかけて、日米核融合交流計画に基づいて、3週間ほど Wisconsin 大学、Oak Ridge 国立研究所等7か所を歴訪する機会を得た。新材料開発のための照射損傷に関する基礎的知見及び微小試験片技術等について、第一線の研究者と意見を交換、討議を行った。研究上興味を覚えたいくつかのアイデアを紹介させていただくとともに、当該分野の今後の開発についていささか私見を述べてみたい。

アメリカではレーガン大統領になつてから、原子力関係の研究予算が削減されてきており、核融合関係も例外ではない。核融合は、当初、資源（重水素）が實際上無限であり、人類のエネルギー問題を量の面から事実上解決できる点が開発の推進力とされた。しかし、現在では、その安全性が強調されている。核融合炉は核分裂炉と比較して、核的臨界のおそれがないこと、死の灰を生じないことが有利な点である。また、化石エネルギーの使用は炭酸ガスによる温室効果、酸性雨等の環境汚染問題を生ずることは周知のとおりである。核融合がこの点に関して有利なことは多くの研究者が認識しており、研究者レベルでの研究への熱意は感じられた。しかし、多くの研究者が非原子力分野の研究といわば掛け持ち的に仕事をしていることが残念に感じられた。核融合が安全性の観点から進められているということで、低放射化材料開発が強調されている。Fe-Ni-Cr オーステナイト系合金では、Ni を Mn に代替、フェライト・マルテンサイト鋼では Mo, Nb を W, V に置き換える研究が進められている。V 基金合金もこの観点から研究が継続されている。また、核融合炉中性子照射効果を調べるために開発が進められてきたが、現在中止になつている FMIT (Fusion Material Irradiation Test Facility) も低放射化材の照射試験の観点から復活しようとの動きが一部にあるとのことであつた。

構造材料の中性子照射効果に関しては、やはりアメリカが最も進んでいるように思われる。従来から、多くの仕事が行われてきたスエリングや引張試験に加えて、弾塑性破壊靱性試験、炉内クリープ破断試験等のデータが蓄積されてきている。 $K_{IC}$  や  $J_{IC}$  は低レベル ( $\sim 1 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup>,  $E > 0.1$  MeV) の照射量で劣化するが、高照射量レベル ( $\sim 1 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup>,  $E > 0.1$  MeV) では変

化が飽和し、それ以上の低落を生じないというある程度希望のもてる結果が得られている。ある程度というのは、このレベルでも非照射材の 1/2-1/3 程度に減少しているため、このレベルで実用材料として使用可能かどうかわからないからである。より心配な点はテアリングモジュラスが照射量とともに低下することで、数十分の一以下までに劣化することが知られている。炉内クリープ破断強度については、炉内の方が炉外に比べて破断寿命が長いこともあり得ると一時考えられてきたが、316 鋼や D9 合金の最近の結果によると、それは誤りであつて、破断時間の短いときは、炉内、炉外で差はなく、破断時間が長い場合に炉内クリープの方が寿命が短くなるとのことであつた。照射クリープに関して、ちよつと衝撃的なことは、60°C においても有限なクリープ速度が観測されているということであつた。もつとも、これが設計上どういう意味をもつかはその絶対値によるわけで、今後の定量的なデータの把握を待たねばならない。核融合炉では、(n,  $\alpha$ ) 反応により、多量のヘリウムが材料中に生成し、高温ではこのヘリウムが結晶粒界に気泡として析出して粒界脆化を引き起こす。数百 appm の He をトリチウムトリックの技術によつて材料中に導入し、その後溶接を行つてみたところ、予想どおりというべきか、大きな気泡が形成され、きびしい脆化を示したということであつた。核融合炉では、解体修理ということが言われているが、この結果は一度照射された構造物の修理には溶接技術の適用が困難であることを示している。

商用炉クラスの核融合炉では数百 dpa にも及ぶ中性子フルエンスが予想されており、これに耐え得る材料開発は容易でないとされている。多くの研究者がそれぞれのアイデアでもつてこの野心的な課題に挑戦しているわけである。新材料開発はいわば正攻法であるが、からめてから攻める方法もある。(D, <sup>3</sup>He) 反応がそれである<sup>1)</sup>。現在最も近いと考えられているのは (D, T) 反応であり、この場合は、14 MeV 中性子が発生し、困難な照射損傷を引き起こす。(D, <sup>3</sup>He) 反応では主反応において中性子は発生しない。副反応から中性子の発生があるが、He と D の比を調整することにより、Fig. 1 に示すように中性子発生量を2桁程度低減させることができる。すなわち、(D, T) 反応では核融合エネルギーの80%が中性子によつてもたらされるが、(D, <sup>3</sup>He) 反応ではこれを1%程度にまで下げることが可能である。この意味で材料の照射損傷や放射化は問題にならなくなる。さらに材料の観点からみて興味を引くのは、14 MeV 中性子のかわりに 14 MeV のプロトンが発生することである。このため、発電方式も中性子を熱化して、タービンを回すのではなく、荷電粒子を利用する直接発電を考えている。このため発電効率も80%程度が期待できるとしている。この方式の問題点として (D, T) 反応に比較して、核融合反応の条件がより厳しいことがあ

\* 金属材料技術研究所筑波支所第二研究グループ総合研究官 工博

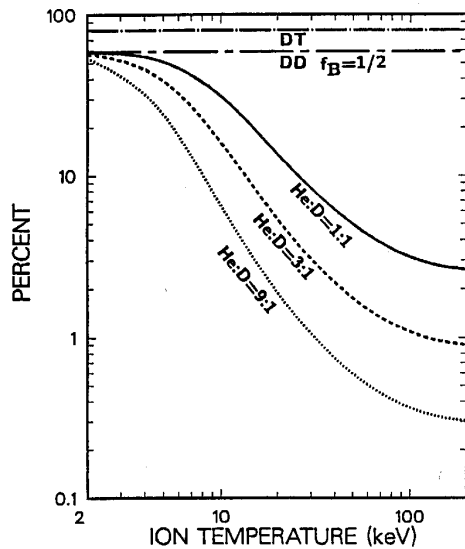


Fig 1. Percent of fusion power in neutrons (50% Tritium Burnup).

げられるが、最大の問題点は、地球上に  ${}^3\text{He}$  の資源が存在しないことである。提案者は  ${}^3\text{He}$  を月から運ぶことを考えている。これらの問題点が簡単に解決できるとは当面考えられないので、(D,  ${}^3\text{He}$ ) 反応が (D, T) 反応に直ちにとつて変わることはありえないであろう。しかし、14 MeV 中性子照射損傷の厳しさを思うと、今後十分検討するに値する方向であると思われる。

現在、日本、アメリカ、EC、ソ連で ITER (International Thermonuclear Experiment Reactor) の共同設計作業が進められている。照射損傷のレベルとしては、初期の物理段階で 10 dpa、後期の工学段階で 30 dpa とされている ( $5 \text{ dpa} \sim 1 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ )。ここで指摘したいのは、核融合炉のような大型構造物 (第一壁、真空容器、ブランケット構造物) が、このレベルの中性子フルエンスにさらされることは人類にとりいまだかつて経験の無いことである。軽水炉圧力容器のそれは  $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$  以下であり、一方、高速増殖炉の燃料集合体のそれは中性子フルエンスでこそ、100 dpa レベルであるが、大型構造物とはいえない。ITER 設計作業では当面 ASME 等の既存の設計コードを準用することである。しかし、これらは中性子照射効果を十分考慮しているとはいえない。スエリングはよく知られているが、

その他にもスエリング勾配による応力の発生、照射クリープとスエリングの相関等新しい問題点が多い。1990 年までに核融合炉設計技術基準を暫定的に定めるとの方針が建てられているが、これはさらに長期的に取り組まなければならない大きな仕事である。14 MeV 中性子照射損傷については、学問的にもいまだ十分解明されているとはいえず、データベースの整備も不十分である。設計上の問題点の洗いだしと、これに基づく材料開発及びデータベースの整備計画とを策定すべきである。当面は、ITER が中心になると思われるが、商用炉までを見通した長期の計画が必要である。現時点では、プラズマ物理面からは、(D, T) 反応によるトカマク方式が最も進んでいるが、これを商用炉としてトータルシステムとしてみた場合、トカマク炉がベストかどうか、また実現できるかどうかは明らかでない。商用炉としてみた場合、工学的側面からの検討が必要であり、そのためにはプラズマ物理とは別の独自の開発プログラムが必要である。核分裂炉では、十分実機に近い材料照射炉での照射試験が可能であったが、核融合炉では材料試験炉が存在しない。材料試験炉の必要性については、現在、種々の考え方があるが、設計コードの妥当性の検証、大型試験片によるデータベース構築、大型構造部材試験等を考えると材料試験炉という段階を経ざるを得ないように感じられる。もし、そうならば核融合炉開発の長期シナリオに大きな影響を与えることになる。

核融合炉の実現は 21 世紀の半ばと予想されるにいたっている。このような長期の開発計画はこれまでになかったものであり、多くの困難も予想される。この計画を成功に導くためには多くの優秀な若い研究者をこの分野に集め、第一線の研究者の志気を高め、維持していく必要がある。アメリカでは研究プログラムの見直し、中止がドラスチックな形で行われているが、核融合開発には、長期の視点が必要とされることを考慮すると、好ましいこととはいえないであろう。我が国においてはこの計画が着実に進められるよう希望したい。

## 文 献

- 1) G. L. KULCINSKI and H. H. SCHMITT: The Moon, An Abundant Source of Clean and Safe Fusion Fuel for the 21st Century, UWFD-730 (1987)