☆

核融合炉における高熱流束実験の現状

(東京大学工学部) 宮 健 三,

(日本原子力研究所) 関 昌 弘, 荒木政則

核融合炉における第1壁, ダイバータ/リミタ, ビームダンプ等の高熱流束機器開発に関連した多くの研究開発が進められている。ディスラプション時の非定常熱負荷が機器に与える影響を明らかにする目的で、電子ビームやイオンビームを熱源とした模擬実験が行われている。高熱流束除熱に関しては、ビームダンプについての実験が多い。高熱流束機器用材料としては、接合材料の使用が有望であり第1壁・リミタ用として黒鉛・金属接合材, ダイバータ壁用として W-Cu 接合材等の研究開発が進められている。本稿では、これら研究開発の現状について概観する。

☆

I. 序

炉心プラズマ閉じ込め技術は、近年の核融合研究開発の中で著しい発展を遂げてきており、大型トカマク試験装置による臨界プラズマの達成を目前に控えて、さらに一層の飛躍が期待されている。それらの成果を踏まえて、次期装置のあるべき姿について、すでにいくつかの具体的検討がなされている。具体的には、我が国における Fusion Experimental Reactor (FER)⁽¹⁾, EC における Next European Torus (NET)⁽²⁾, 米国における Tokamak Ignition/Burn Experimental Reactor (TIBER)⁽³⁾, ソ連における OTR といった実験炉であるが、その主たる使命は D-T プラズマを使った自己点火と long burning を達成することにある。国際原子力機関 (IAEA) において、International Tokamak Reactor (INTOR)⁽⁴⁾ と呼ばれる核融合炉設計作業が実施されてきたが、本年でそれが終了することになっており、その後の国際協力として International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) が引き続き検討されることになっている。また米国では、Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) と TIBER との間を埋める大型装置として、数秒間の D-T 燃焼を目指す Compact Ignition Tokamak (CIT)⁽⁵⁾ の設計が、1988会計年度にスタートすることになっている。

これらの装置は、CIT を除いては従来の核融合実験装置に比べて飛躍的に大型化され、プラズマ周辺機器やブランケットにおけるトリチウム増殖性能に関連した炉工学技術の研究開発が一段と重要となる。プラズマ周辺機器としては、第1壁やダイバータ/リミタ等の高熱流束機器があるが、これらの機器は従来の構造物

に見られないほど過酷な環境下で使用される。その信頼性と健全性に関連する諸問題は既に解決されているわけではなく、今後の研究開発が要求されているのが現状である^{(6)~(8)}。本稿が、研究の現状、問題点と研究の方向を明らかにする上で、いささかなりとも参考になれば幸甚である。

II. プラズマ周辺機器の負荷条件と問題点

核融合反応で発生した α 粒子はプラズマを加熱した後不純物となり、エネルギー損失を増加させるので排気する必要がある。その役割を果たす機器がダイバータあるいはポンプリミタと呼ばれるものである。これらの機器は、核融合反応で発生したエネルギーの20%を担う α 粒子エネルギーの一部を表面熱負荷として受ける。ダイバータ/リミタが受ける α 粒子エネルギーの割合はプラズマ設計に依存するが、実験炉で約50%、商用炉で約20%に設計されている。その残りが第1壁に入射する。具体的には、実験炉級での熱負荷は第1壁で平均的に、0.2~0.3 MW/m², ダイバータ/リミタで3~4 MW/m², 商用炉では第1壁に1 MW/m², ダイバータ/リミタに3 MW/m² 程度である。

また、これらは定常熱負荷であるが、プラズマのゆらぎ、あるいはプラズマディスラプションによって、過渡的また局所的な熱負荷が生ずる。特にディスラプション時の熱負荷が大きいため問題となり、設計では0.1~50 ms の時定数で100~1,000 MW/m² の熱負荷を

Present Status of High Heat Flux Experiments in Relation to Fusion Reactors: Kenzo MIYA, Masahiro SEKI, Masanori ARAKI.

(1987年 7月27日 受理)

想定しているが、入射エネルギーの空間分布の不均一性を考えると、この値よりさらに大きくなることも予想される。高熱流束機器(著者らの定義では、第1壁、ダイバータ/リミタ、ビームダンプ等の総称)に関連した問題点は以下のように整理される。

(1) 短期的課題

- ・除熱能力の向上
- ・熱応力に対する高温強度の向上と構造設計

基準の確立

- ・高機能 duplex 材の開発
- ・ディスラプションに対する健全性の確保
- ・異種金属の接合技術と強度評価

(2) 長期的課題

- ・熱応力フリー第1壁の開発
- ・中性子照射による材質劣化と材料開発
- ・スパッタリングによる損耗と再付着の評価
- ・寿命評価手法の確立
- ・トリチウム燃料ダイナミックスの評価

短期的課題の中の除熱能力、高温強度、異種金属については後述するので、ここでは耐ディスラプション性能について記述する。

ディスラプションによって、第1壁構造物には過大な熱負荷と渦電流が発生する。渦電流は磁場と相互作用して電磁力を発生させる。第1壁構造物の電気抵抗が大きければ、電磁力は大きくなるが、設計時に考慮しなければならない要因の1つである⁹⁾。過大な熱負荷の帰結としては、熔融・蒸発・凝固といった現象が見られ、過大な熱応力が生ずる結果、微小亀裂が発生したりする。また溶接残留応力と同様な応力が残ることが考えられるが、これについては解析による評価が行われている¹⁰⁾。近年、熔融・蒸発・凝固に関するモデルの作成と、それに対する解析ならびに実験が精力的に実施されてきた。それについて次章で紹介する。

Ⅱ. ディスラプション時の第1壁の挙動

プラズマディスラプション時に第1壁が電磁熱構造的に過大な負荷を受けること、その結果第1壁が深刻な損傷を受ける恐れがあることに最初に着目して、いち早く系統的な研究計画を立案し、実験を実施したのは米国アルゴンヌ国立研究所(ANL)であった⁽¹¹⁾。このプロジェクトは、First Wall/Blanket/Shield (FW/B/S)と呼ばれ、その中で第1壁の加熱実験、電磁構造現象、ブランケットでの伝熱流動および増殖材の形状安定性、分解修理技術やアーク放電特性、液体金属の伝熱流動特性に関する研究が実施されてきた。

ディスラプション時の第1壁の挙動に関する研究はANLにおけるプロジェクト研究が引き金になってそれ以降盛んになった。

ウィスコンシン大学の Hassanein ら⁽¹²⁾は、プラズマディスラプションによって第1壁に引き起こされる事象を系統的にとらえ、高熱の入射によってまず固体の熔融が起こり、ついで並行して蒸発が進行するとし、熱流束の停止とともに凝固が開始するといった一連の事象としてとらえた。ディスラプションによる熱放出は2期に分けられ、最初に熱クエンチが生じ、次いで電流クエンチが起こる。各クエンチの時定数は装置の寸法等に依存するが、次期装置クラスでは熱クエンチで数 ms 以下、電流クエンチは10~50 ms 程度と予想されている。放出されるエネルギー密度等を第1表に整理する。

第1表 ディスラプションパラメータ

	FER	INTOR
プラズマの熱エネルギー (MJ)	108	230
電磁エネルギー (MJ)	55	60
全エネルギー (MJ)	163	290
熱クエンチ時間 (ms)	5	20/5
エネルギー密度 (MJ/m ²)	2.07 (ダイバータ)	2.3~5.35 (ダイバータ/ リミタ)
電流クエンチ時間 (ms)	15/50	20
エネルギー密度 (MJ/m ²)	0.16~1.15 第1壁	0.35~1.7 第1壁

Hino らは、実験装置でどの程度の熱量がディスラプション時に第1壁構造物に入射するかを DOUBL ET-Ⅲを使用して実測し⁽¹³⁾、リミタ放電の場合、プラズマの運動エネルギーの20%がリミタに入射されることを報告している。中性粒子入射(NBI)で加熱を行っている時、リミタは一樣には加熱されないことが計測されたが、これはイオンと電子のドリフトの違いによるとされている。さらに彼らはNBI加熱の場合、ビームパワーの35%がリミタに入射されることを計測している。

ディスラプション時の高熱負荷を模擬する実験を行う場合、熱流束には空間的時間的に一樣で絶対値が大きく、立ち上がりの速いことが要求される。このため、大容量の電子ビームやイオンビームが熱源として良く利用されている。これらを用いて、これまでに行われた主な実験を第2表に整理する^{(14)~(34)}。実験は、固体の熔融・蒸発・亀裂の発生進展、破壊、組織変化等を明らかにする目的で行われている。

ステンレス鋼の熔融蒸発特性について研究者間の実

第2表 ディスラプション熱負荷模擬試験の現状

研究機関	熱源	熱源の特性	供試材料・寸法	熱流束/時間/面積	主要成果	文献
原研/川重	電子ビーム	60 kV, 100 kW 高速ラスタリ ングビーム (up to 1 MHz)	304SS, 316SS, Al, Ni, Zn, W, Mo, 黒鉛, CC φ 5mm × 50mm 50mm × 50mm × 5mm t その他	170 MW/m ² 20~1,000 ms φ 5mm 13mm × 13mm	・実験の高精度化, 2次元溶融・ 蒸発解析コード開発 ・溶融・蒸発量は低熱流束領域で は実験値と解析値とは良く一 致, 高熱流束領域では差が大 ・差の主因は, 蒸気遮蔽効果では なく溶融層内での熱輸送の増 大を解析で考慮していないこ とにある。 ・ステンレス鋼では再凝固層に 0.1mm 程度の亀裂発生 ・亀裂は繰返し加熱で進展せず	(15)~(18)
名大	水素イオン ビーム	10 MW 25~120 kV up to 1 s	黒鉛, SiC, TiC, AlN, W, CC 50mm × 50mm × 30mm t 30mm × 30mm × 6 ~11mm t	15~120 MW/m ² 57ms, 69~315ms 50~950ms 50mm × 50mm 30mm × 30mm	・黒鉛の耐熱衝撃性は非常に優れ ている (19)~(22) ・AlN, SiC, Ti等のセラミックス は脆性破壊した ・ステンレス鋼, Alの再凝固層 内には亀裂発生 ・黒鉛の損耗は分子蒸発より粒子 の飛散によって支配される ・黒鉛を使用する場合, 応力集中 を避ける設計が必要	(19)~(22)
名大/東大	水素イオン ビーム	10 MW 25~120 kV up to 1 s	304SS, 316SS, PCA, Al, Cu, 黒鉛 50mm × 20mm × 2 ~4mm t	15~120 MW/m ² 30~300 ms φ 50mm	・溶融・蒸発量は実験値と解析値 とが比較的良く一致 (23, 24) ・使用した PCA は再凝固層に亀 裂多く, 表面層に Ti析出 ・ステンレス鋼は再凝固表面に凹 凸を生じるものがある	(23, 24)
東大	プラズマ アーク	4.5 kW 10~100 ms	304SS, 316SS 20mm × 20mm × 4 ~8mm t	4~380 MW/m ² 10~100 ms φ 3mm	・溶融解析および弾塑性応力解析 コード開発 (10, 25) ・温度解析は実験結果と良く一 致。歪分布は実験値と解析値 との傾向が一致	(10, 25)
三菱	電子ビーム	100 kW, 100 kV ラスタリ ング ビーム (20~1,000 Hz)	黒鉛, リミタ	2~10 MW/m ² 3~20 s	・実物大リミタの耐熱衝撃健全性 を実証 (26)	(26)
SNL (USA)	電子ビーム (EBTS)	30 kW, 30 kV ラスタリ ング ビーム (400 kV)	304SS, Al, V, Fe, Ni, Cu, Nb, Ta, Mo, W, 黒鉛 φ 6.35~9.52mm × 12.7mm	100~700 ms φ 6.35~9.52mm	・溶融・蒸発に関する実験結果と 解析結果はおおむね一致 (27)~(29) ・蒸気遮蔽効果がある ・加熱の繰返しにより Mn が選択 的に蒸発	(27)~(29)
ANL/ WH社 (USA)	電子ビーム (ESURF)	50 kW, 150 kV	ステンレス鋼, Cu, Ta, 黒鉛	1~50 ms	・溶融・蒸発の実験値と解析値と はオーダが一致する程度 (30, 31) ・実験データから判断すると蒸気 遮蔽効果がある	(30, 31)
JRC-Ispra (EC)	電子ビーム	10 kW, 60 kV 強度: ガウス 分布	Mo, ステンレス鋼, Cu, Al, Inconel, など φ 15mm × 1.5, 2, 8mm	600 MW/m ² 1~50 ms φ 3.5mm	・電子ビームはディスラプション 模擬試験用熱源として有用 (32, 33) ・ステンレス鋼では Cr と Mn が 選択的に蒸発し組成が変化 ・ステンレス鋼は熱衝撃により再 凝固層にクラックが発生し, 非溶融層にまで進展	(32, 33)
JULICH (W. Germany)	電子ビーム	4.5 kW, 150 kV	黒鉛, SiC, AlN, Si ₃ N ₄ , BN, Inconel	60 MW/m ² 0.1~10 s	・微粒黒鉛が最も耐熱衝撃特性に優 れている (34) ・許容熱負荷の制限 BN: 昇華/分解, SiC: 亀裂, Inconel: 溶融/蒸発	(34)

(注) EBTS: Electron Beam Test Stand, ESURF: Electron Beam Surface Heating Facility, PCA: Primary Candidate Alloy, CC: Carbon Fiber/Carbon Composite

験データ・解析値を比較すると、熔融層に関する実験値は相互に比較的よく一致し、解析値相互の一致も良好である。解析値と実験値とはエネルギー密度の低い領域では良く一致するが、エネルギー密度が高くなると実験値は解析値よりはるかに大きくなる。

蒸発量については、実験値相互間で大きな相違がみられる。米国サンディア国立研究所 (SNL) および ANL/ウェスチングハウス社 (WH) の実験結果は蒸気遮蔽効果、すなわち固体壁表面近傍に形成される蒸発分子の層によって壁面への入熱が遮られる効果、を考慮にいった解析値と良く一致した。しかし、ステンレス鋼以外の材料については、異なる実験条件下では実験値と解析値とが大きく異なる場合もあり、蒸気遮蔽効果の存在は必ずしも明確ではない。最近、山崎ら⁽⁴⁷⁾は熔融状態における高速度ビデオ観察により、蒸発が激しくなると熔融層がくぼむように動くことを見出した。この運動の結果、熔融層内の実効的熱輸送が促進されると考え、解析において熔融層の熱伝導率を増加させ、高エネルギー領域における熔融層厚さおよび蒸発量に関する実験値と良好な一致を示す解析結果を得た。

一方、熔融層は電磁力や重力の作用を受け、固体壁から失われる恐れがある。熔融層の厚さは蒸発損失量に比べて遙かに大きいため、熔融層がすべて固体壁から失われるとすれば固体壁の損耗は非常に大きく、寿命は著しく短くなる。関ら⁽¹⁸⁾は重力下での熔融実験を行い、熔融層がある程度厚くなると下方に流れること、熔融層の下方への動きは再凝固時に生じていることを明らかにした。このような熔融層の運動は固体壁の寿命評価という観点から極めて重要であり、今後さらに定量的なデータを蓄積する必要がある。

10 MW のイオンビームを用いた高熱負荷実験が名古屋大学で精力的に進められている^{(19)~(22)}。Boltらの実験の結果、ステンレス鋼や Al では再凝固層に亀裂が発生すること、Mo やステンレス鋼の再凝固表面は熔融層の運動によって凹凸になること、黒鉛材料では損耗は分子蒸発ではなく粒子の飛散により支配されること、実際の機器での使用に当たっては応力集中を避ける設計が必要である等々、重要な知見が得られている。橋爪らの解析によれば²⁰⁾、凝固後高い残留応力が発生することが示されており、亀裂が発生することの妥当性を与えている。

同じイオンビームを使用した助川らの熔融実験によれば^{(23) (24)}、熔融後の表面状態がステンレス鋼の微妙な成分の相違によって顕著に異なっている。ある鋼種

については、繰り返し熔融することによって、表面の凹凸が進行していくが、これは第1壁板厚の減少につながり、設計上好ましくない。凹凸の進行しない鋼種も見られる。冶金的な原因については現在検討中であるが、興味ある現象である。

プラズマディスラプションが繰り返して発生することを想定すれば、第1壁のある箇所は繰り返して熔融・凝固を経験することになる。繰返し加熱の効果に関する SNL⁽²⁸⁾ や Joint Research Center-Ispra (JRC-Ispra)^{(32) (33)} の研究によれば、ステンレス鋼では Mn や Cr といった蒸気圧の高い成分が選択的に蒸発するとされている。

以上述べたように、ディスラプション時の高熱負荷が材料に与える影響については多くの研究が進められている。しかしながら、熔融・蒸発についてさえ、現状は各実験者の実験条件、手法が一致せず、相互に比較のできるデータが少ない。今後、実験条件をそろえる等により、精度の高いデータを多く蓄積することが急務である。また、実験値と解析値とは特に高エネルギー領域で一致しない。この原因として、蒸気遮蔽効果や熔融層内熱輸送促進効果が提唱されているが、これらの効果についてもより多くのデータにより実験的に裏付ける必要がある。

また、熔融層の運動、粒子や液体の飛散を伴う爆発的蒸発については、定量的なデータの蓄積が少なく、現象の理論的検討も進んでいない。これらの現象は、固体壁の損傷に重大な影響を及ぼすため、今後一層の研究が期待されるところである。ディスラプションによって損傷を受けた材料の残存寿命評価や、ディスラプションによる負荷に耐える材料の開発とか、耐ディスラプション設計については、これまではほとんどなされていない。これらは、損傷を受けた材料の回復技術とともに今後の重要な課題である。

IV. 高熱負荷受熱機器の開発 (高熱負荷除熱)

現在稼働中の核融合装置におけるダイバータ・リミタやビームダンプ等への熱流束は、正常放電時においても、 $10\sim 100\text{ MW/m}^2$ とかなり高い。しかし、受熱時間は、 $0.1\sim$ 数 s と機器壁内部への熱拡散を期待できる程度には長く、また全熱量は機器の熱容量によって吸収できる程度である。したがって、既存装置のダイバータ/リミタ等の高熱流束機器は構造を単純化するため、積極的な冷却システムを備えていない。放電時間がさらに長くなると受熱時間が長くなり、全受熱量が増大して強制冷却が不可欠となる。したがって、次

第3表 高熱流束受熱機器の開発現状

受熱機器	装置	最大熱流束 (MW/m ²)	材料	幅 寸法 高さ (mm) 長さ	入口 出口 圧力 差 (MPa)	流量 (l/min/tube)	圧力損失 (MPa)	加熱時間 (s)	形状	寿命 (cycles)	備考	文献
ビームガンブ	JET NBI	12 - 16	1x Cr + Cu	113 30 940 (540)	- 0.7 -	166	0.05	>10		10 ⁶	付添: 75 keV, 10 MW, D-BEAM	35
ビームガンブ	NBIET NBI (LBL)	16	0.2x Zr + Cu	215 - 200	1.65 0.85 -	220	0.72	30		25,000	付添: 120 keV 50 A, D-BEAM	36
ビームガンブ	TFR NBI (PPPL)	10 - 20	Zr+ OFHC Cu Inconel	19.1 OD 1.6 t Int. finned	- - 2.20	29 av. 60 max	-	>30			付添: 120 keV D-BEAM 設計段階	37
ビームガンブ	MEFT NBI (ORNL)	54	OFHC Cu Tape: Inconel	9.5 OD 1.6 t Swirl Tape	1.6 0.4 -	20	1.1	30		30,000	付添: 75 keV, 40 A	38
ビームガンブ	MFSTF NBI (LLNL)	13.3	Mo	5.0 OD 0.25 t Int. finned	- - 5.4	5.4		0.4		3x10 ⁶		39
ビームガンブ	JT-60 NBI	5	0.2xAg + Cu	14.0 OD 2.0 t Ext. finned	1.0 0.9 1.15	22.6	0.05-0.1	10			付添: 100 keV, 70 A II-BEAM	40
水冷ガンブ	JT-60 NBI	4-5	0.2xAg + Cu	16 - 16	0.9 0.5 -	16.1	0.05-0.1	10
カロリメータ	JT-60 NBI	10	0.2xAg + Cu	30 36 30	0.9 0.5 -	9.3	0.05-0.2	0.5-1.0		5x10 ⁶		
ビームガンブ	JT-60 能動粒子線	75	W/OFHC Cu	49 50 49	0.8 - -	4.5 - 11.0		0.1			付添: 200keV, 3.5A IIe-BEAM	41
カロリメータ	JT-60 能動粒子線	37	0.2xAg + Cu	140 260 20	0.8 - -	1.6 - 2.0		0.1
ビームガンブ	FER NBI	50	0.2xAg + Cu Tape: Ni	10.0 OD 1.6 t Swirl tape Ext. finned	2.0 - -	20 - 30	1.0-1.5	200			付添: 500keV, 100A, 200s D-BEAM	42

期装置の開発を進めるに当たっては、強制冷却機器の研究がますます重要になってくる。

強制対流熱伝達については長い研究の歴史があり、一般には、単相流、サブクール沸騰流いずれについても、熱伝達率、圧力損失、バーンアウト熱流束等に関する豊富なデータベースが存在する。しかし、核融合装置では、熱流束が 10 MW/m^2 以上と従来の工業機器に比べて遙かに高い機器もあり、また加熱が著しく不均一である等、新たな研究開発を必要とする面も多い。第1壁においては、除熱能力を改善することももちろん重要であるが、壁内での熱応力を低減化することや耐ディスラプション特性を向上させることがより重要である。現在、除熱能力がクリティカルパスとなっており、強制冷却特性に関する研究開発が精力的に進められているのは中性粒子入射装置 (NBI) 用のビームダンプを含む受熱機器である。本章では主として、この受熱機器の研究開発の現状について述べる。

第3表に最近の核融合実験装置用粒子入射装置に用いられている受熱機器の諸特性を整理する^{(35)~(42)}。強制冷却系を備えた機器の冷却材はすべて水である。受熱機器としては、熱伝達特性に優れ、熱応力が小さく、所要冷却材流量や圧力損失の小さいことが必要である。このため、受熱面や冷却面の形状を様々な工夫しているが、機器の構造としては2種類に大別できる。1つはパネル構造であり^{(35)~(36)}、その冷却流路形状は長方形である。他の1つはチューブ構造で^{(37)~(40)~(42)}、円形冷却流路形状である。

熱伝達を促進する方法として、パネル構造では内部フィンを設ける方法が取られ^{(35)~(36)}、チューブ構造では流路内にスワールテープを挿入する方法が採用されている^{(38)~(42)}。現在のところ、スワールテープ挿入による旋回流とサブクール沸騰の組合せが最も熱伝達特性に優れ、オークリッジ国立研究所 (ORNL) では、平均熱流束 30 MW/m^2 、最大 54 MW/m^2 の除熱能力を持った除熱機器が開発されている⁽³⁸⁾。

チューブ形状を用いる他の利点は、熱応力の緩和やチューブの製作等が容易にできることにある。熱応力の緩和方法として、例えば JT-60 の NBI ビームダンプでは外部フィンを取り付け、受熱面側と非受熱面側との温度差を下げるにより熱応力を低減している。チューブ構造では一般に、所要冷却水流量が多く、圧力損失が大きくなるという欠点があるが、現在のポンプ能力等からみて本質的な問題とはなり得ない。

パネル構造の除熱機器は、パネル1枚当りの処理熱

量が多い、除熱する単位熱量当りの冷却水量が少ない等の利点を有するが、除去可能な最大熱流束が比較的 low、約 20 MW/m^2 である。これは、①熱伝達率を大きくすることが難しい、②熱応力の緩和が困難である、等の理由による。

SNL においては、Tore-Supra 用リミタの冷却に関する実験が行われている。熱流束が $30 \sim 50 \text{ MW/m}^2$ と高いため、電子ビームを熱源として、熱伝達率、臨界熱流束、スワールテープ挿入の効果を調べる実験が行われた⁽⁴³⁾。

今後、次期装置クラスでの受熱機器の熱流束は、およそ 50 MW/m^2 程度に上昇するため、一層の研究開発が必要である。例えば、原研においては、受熱機器性能向上を目指し、外部フィン付きスワールチューブおよび内部ねじりフィン付きチューブを用いた実験を開始した。

V. 高熱流束機器用接合材料の開発

第1壁やダイバータ/リミタ等高熱流束機器は、プラズマからの強い熱負荷、粒子負荷、中性子負荷を受け、特に、ディスラプション時には著しく高い非定常熱負荷にさらされる。このような厳しい荷環境に耐え、またプラズマからの厳しい要請を満たすため、材料には種々の特性が要求される。単一の材料でこれらすべての条件を満たすことは難しく、異種材料の組合せによる接合材料の使用は避けられない。接合技術の開発は従来から様々な分野で行われているが、おのおのの使用条件に適した特殊な材料の組合せについて行われており、これまでの経験が必ずしも核融合炉用に直接役立つわけではない。

そこで現在、高熱流束機器用の接合材料として、W-Cu 接合材料、黒鉛-金属接合材料、等の開発が進められている。第4表^{(44)~(53)}に現在進められている核融合炉用の接合材料研究開発状況をわが国を中心として整理した。

ダイバータ板は不純物粒子が直接衝突するため、表面にはスパッタリング損耗の少ない材料を使用する必要がある。現在最も有望な組合せと考えられているのは、W と Cu との接合材料である。

W と Cu とは熱膨張率が約4倍も異なるため、接合部の残留応力が高く、僅かの熱サイクルで破損する懸念があった。原研/東芝^{(44)~(46)}や JRC-Ispra⁽⁴⁷⁾では、W-Cu を種々の方法で接合し、熱サイクル試験を実施した。両者の試験結果によれば、接合法の違いはあるものの、ダイバータ環境を模擬した熱負荷条件で少な

第4表 高熱流束機器用接合材料の開発現状

番号	接合材料種類	研究機関	用途	接合方法	接合材寸法	開発現状	文献
1	W・Cu W+OFHC Cu W+Be-Cu	原研/東芝	ダイバータ板	真空ロウ付 直接鋳込み プラズマ・スプレ イ ロウ材: BNi-6, MBF-60 (アモル ファス Ni ロウ)	接合面: 直径 50mm W板厚さ: 5~ 20mm W溶射厚さ: 2mm	機械強度特性: ・BNi-6 ロウ付材 せん断強度: ~60 MPa at 室温 引張強度: ~40 MPa at 室温 機械疲労特性 ・BNi-6 ロウ付材 ねじり疲労寿命 亀裂発生寿命 ・MBF-60 ロウ付材 亀裂進展速度 亀裂発生寿命 熱疲労特性 ・BNi-6 ロウ付材 3,700回 ロウ材部に微小亀裂 ・直接鋳込み材 2,200回 W部に亀裂, 破損に至 らず ・プラズマスプレー材 OFHC Cu: 5,000回 W部に微 小亀裂 Be-Cu: 5,000回 W部に亀裂, 破損	(44)~(46)
2	W・Cu W+OFHC Cu	EC, JRC Ispra	ダイバータ板	拡散接合 真空ロウ付 直接鋳込み ロウ材: Ni-Cr-P 合金	直径: 40mm W厚さ: 20mm	拡散接合で大型ピースを作るのは 困難 熱疲労特性: ・Ni/Au/Niを中間層とした拡散接 合材は10 ⁴ 回で破損せず ・ロウ付材は, ロウ層での熱抵抗が 大きい。7,800回で破損 ・直接鋳込み材は, 10 ⁴ 回で問題なし 機械強度 ・直接鋳込み材: 引張強度~100 MPa (5mm) 直径破壊は接合面 近傍Wの部分	(47)
3	黒鉛・金属 IG-11, POCO AXF-5Q, PD- 11+W, Mo	金材技研	第1壁	固相反応接合 中間層: Mo, V, Mo-V, V-Ti	接合面: 14mm角 黒鉛・金属厚さ: 0.1~1mm	耐熱衝撃特性 ・黒鉛/Mo 15 MW/m ² , 1 s の熱照射で問題 なし ・黒鉛/W 熱流束リミット: 25 MW/m ² , 1.5 s	(48)
4	黒鉛・ステンレ ス鋼 IG-11+316SS	原研/三菱	第1壁 ガードリミタ	真空ロウ付 ロウ材: Cu ロウ, Cu-Tiロ ウ 緩衝材: Mo, Cu	接合面: 直径20mm 黒鉛厚さ: 10mm 316SS厚さ: 10mm	緩衝材なしでは接合できず 機械強度特性 ・Cu ロウ/Mo 緩衝材 引張強度: 5~7 MPa 破壊は接合面近傍 剪断強度: 0.7~5 MPa の黒鉛中で発生 耐熱負荷特性 ・Cu ロウ/Mo 緩衝材 20 MJ/m ² 以上で黒鉛中に亀裂 60 MJ/m ² まで黒鉛の脱落なし ・Cu-Tiロウ/Cu 緩衝材 10 MJ/m ² 以上で黒鉛の破損脱 落	(49)
5	黒鉛・ステンレ ス鋼 EG-NPLH +316SS	川 重	第1壁	拡散接合 活性化材: Ti, Ti 合金 緩衝材: Inbar 合金	接合面: 直径10mm	黒鉛+Ti+Inbar+316SS の組合せ で接合 機械強度特性 ・黒鉛+Ti-6Al-4V 接合材で実施 ・引張強度: 25 MPa 黒鉛の値と ほぼ同じ 破壊は接合部近傍の黒鉛で発生	(50)
6	黒鉛・Mo IG-11+Mo	原研/三菱	第1壁	真空ロウ付	接合面: 100mm角 黒鉛厚さ: 10mm Mo 板厚さ: 10mm	機械強度特性 引張強度: 22 MPa 剪断強度: 7~8 MPa 耐熱負荷試験 ・試験片付法 直径 20mm, 黒鉛/ Mo 厚さ10/10mm ・最大 60 MJ/m ² まで試験 ・ロウ材溶融まで黒鉛中に亀裂なし	(51)

番号	接合材料種類	研究機関	用途	接合方法	接合材寸法	開発現状	文献
7	黒鉛・SiC・ステ ンレス鋼 (Cu) IG-11+SiC +316SS/Cu	日 立	第1壁	Hot Pressing: 黒鉛+SiC 真空ロウ付け: SiC+316SS/ Cu 緩衝材: Cu-35%C	接合面: 直径20mm	耐熱負荷試験 4.2 MW/m ² まで使用可能	(52)
8	黒鉛・金属 POCO AXF-5Q +OFHC Cu 316SS Inconel 625	米国, MDAC	第1壁	真空ロウ付 ロウ材: Ticusil 4.5%Ti+ 26.7%Cu+ 68.8%Ag 緩衝材: H-875 Brunsbond (Wire mesh)	接合面: 63.5mm 角 黒鉛厚さ: 19.1mm 金属厚さ: 6.35mm	接合可能 すべての接合材の黒鉛中に 10~30 μ m の亀裂発生	(53)

(注) MDAC: McDounell Douglas Astronautics 社

くとも5,000~10,000回の熱サイクルに耐えることが明らかになった。

W・Cu 接合材の常温における機械的疲労寿命は、 5×10^4 回以上の低歪領域では Cu 材の強度に依存し、 5×10^4 回以下の高歪領域では、W および接合部の強度に依存することが明らかにされている⁽⁴⁵⁾。また、MBF-60 ロウ付け材に対する亀裂進展速度は、応力拡大係数幅 ΔK が小さいときは Cu の方が速く、逆に ΔK が大きくなると接合部の方が速くなることが示された⁽⁴⁶⁾。

以上のように、W・Cu 接合材については、原研/東芝を中心にかなりのデータが蓄積されてきた。しかしながら、ディスラプション熱負荷の影響、実機運転温度領域での強度データ、疲労寿命評価法の検討、大型機器の製作性等、今後の検討・開発を必要とする項目もまだ多く残されている。W・Cu 接合材料の最大の問題は、プラズマの運転シナリオによっては、ダイバータ壁といえども高Z材の使用が不可能になる可能性があるという点にある。しかし、ダイバータ条件に耐えうる有力な代替材料がなく、プラズマ運転シナリオも確定しているわけではないので、今後さらに残された課題についての研究開発を進めておく必要がある。

第1壁ヤリミタの表面材料としてはプラズマへの不純物混入の影響を低減するため、低Z材料の使用が望まれる。表面材料としては黒鉛が有望視されているが、金属構造材との接合が難しいため、第4表に示すように、多くの研究開発が進められている。

黒鉛を金属に接合する場合、熱膨張差による残留応力を軽減するため緩衝材を使用する。この目的で、Mo が良く用いられる。黒鉛と Mo とは、両者の熱膨張率が近いので接合が比較的容易で、Mo 自身を母材とした接合材料はすでに市販されている。Mo 以外の

金属材料と黒鉛との接合経験も比較的豊富ではあるが、これまでに試作された接合材料はいずれも直径20 mm 程度と小さい。米国 McDonnell Douglas Astronautics (MDAC) 社で試作されたものは比較的大きいが、接合された黒鉛中に微小亀裂が発生している⁽⁵⁴⁾。

接合された黒鉛の機械的な強度は、黒鉛母材とほぼ同程度⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾、母材の1/3~1/4程度⁽⁴⁸⁾とバラついており、より詳細な多数のデータを取得する必要がある。黒鉛の強度劣化を招かない、残留応力の少ない接合方法(緩衝材厚さの最適化等を含めて)の開発が必要であることはいうまでもない。耐熱衝撃特性についても、予備的な目安⁽⁴⁸⁾⁽⁵⁰⁾が得られている程度であり、疲労強度特性も含め、今後の研究開発に待つところが大きい。

Ⅶ. む す び

以上、核融合炉における高熱流束機器の開発に関連した実験の現状について概観し、本格的な研究を早期に着手することの必要性を力説した。

第1壁を含む高熱流束機器の設計にとって、最終的には寿命評価手法を確立することが必要になる。これまでに、いくつかの研究がなされてきたが⁽⁵⁴⁾⁽⁵⁷⁾、データベースの不十分さのため予備寿命の精度は必ずしも良くない。

今後さらに研究開発を進め、データベースの確立を図ることが時期大型装置開発に向けて重要な課題である。

— 参 考 文 献 —

- (1) 臨界プラズマ研究部: JAERI-M 86-134, (1986).
- (2) The NET Team: NET Rep. 51, (1985).
- (3) HENNING, C.D., et al.: TIBER I, UCID-20863, (1986).

- (4) IAEA: INTOR, (1986).
- (5) SCHMIDT, J.A.: CIT, PPPL A-860606-P-01, (1986).
- (6) ABDON, M.A., et al.: UCLA/PPG-815, (1984).
- (7) 秋山 守他: 原子力誌, 27(5), 395 (1985).
- (8) 班目春樹: プラズマ核融合誌, 56, 389 (1986).
- (9) MIYA, K., et al.: Nucl. Eng. Des./Fusion, 3, 85 (1985).
- (10) HASHIZUME, H., et al.: Fusion Eng. Des., 5, 141 (1987).
- (11) NYGREN, R.E., et al.: Nucl. Technol./Fusion, 4, 1203 (1983).
- (12) HASSANEIN, A.M., et al.: J. Nucl. Mat., 103 & 104, 321 (1981).
- (13) HINO, T., et al.: ibid., 121, 337 (1984).
- (14) 東稔達三, 他: JAERI-M 86-176, (1986).
- (15) 関 昌弘, 他: 機械学会論文集(B), 474, 934 (1986).
- (16) SEKI, M., et al.: Fusion Eng. Des., 5, 141 (1987).
- (17) 山崎誠一郎, 他: 第24回伝熱シンポジウム 論文集, p 600 ~602 (1987).
- (18) 関 昌弘, 他: 原子力学会「昭61分科会」予稿集, A13, (1986).
- (19) 黒田 勉, 他: 核融合研究, 54, 371 (1985).
- (20) SHIBUI, M., et al.: Fusion Eng. Des., 5, 197 (1987).
- (21) BOLT, H., et al.: IPPJ-AM-51, (1987).
- (22) BOLT, H., et al.: To be published in IPPJ-AM.
- (23) 助川敏男, 他: 原子力学会「昭62年会」要旨集, C17, (1987).
- (24) 助川敏男, 他: プラズマ・核融合学会「秋季講演会」, 10PD4, (1986).
- (25) 助川敏男, 他: 原子力学会「昭60分科会」予稿集, C35, (1985).
- (26) IOKI, K., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 22(7), 529 (1985).
- (27) CROESSMANN, C.D., et al.: J. Nucl. Mat., 128 & 129, 816 (1984).
- (28) PICRAUX, S.T., et al.: ibid., 120, 278 (1984).
- (29) CROESSMANN, C.D.: UWFD-674, (1986).
- (30) EASOZ, J.R., et al.: Nucl. Technol./Fusion, 4, 780 (1983).
- (31) EASOZ, J.R., et al.: J. Vac. Sci. Technol., A3, 1119 (1985).
- (32) QUATAERT, D., et al.: Proc. 13th Symp. on Fusion Technol., 401 (1984).
- (33) BROSSA, F.: J. Nucl. Mat., 141 & 143, 210 (1986).
- (34) GOTOH, Y., et al.: ibid., 133 & 134, 257 (1985).
- (35) HAANGE, R.: Proc. 9th Symp. Eng. Problem. Fusion Res., 1356 (1981).
- (36) PATERSON, J.A.: LBL-16177, (1983).
- (37) DAHLGREN, F.: Proc. 10th IEEE Symp. on Fusion Eng., 1480 (1983).
- (38) MILORA, S.L., et al.: ORNL-TM 9183, (1984).
- (39) MCFARLIN, D.J., et al.: 文献97, 526.
- (40) AKIBA, M., et al.: 同上, 2021.
- (41) ITOH, T., et al.: JAERI-M 86-114, (1986).
- (42) ARAKI, M., et al.: To be published in JAERI-M.
- (43) MIYAHARA, A., et al.: IPPJ-AM-50, (1987).
- (44) 小川益郎, 他: 原子力誌, 28(1), 1038~1044 (1986).
- (45) HORIE, T., et al.: Proc. 11th IEEE Symp. on Fusion Eng., 937 (1985).
- (46) 関 昌弘, 他: 原子力学会「昭62秋大会」予稿集, H25, (1987).
- (47) BROSSA, F., et al.: Proc. 12th Symp. on Fusion Technol., 1532 (1982).
- (48) FUKUTOMI, M., et al.: J. Nucl. Mat., 133 & 134, 769~772 (1985).
- (49) 伊尾木公裕, 他: 原子力学会「昭62秋大会」予稿集, H23, (1987).
- (50) KOBAYASHI, T., et al.: Japanese Contribution to IAEA INTOR Workshop Phase 2A, Part 3, Session XV, (1986).
- (51) 石山新太郎, 他: 原子力学会「昭61年会」要旨集, G34 (1986).
- (52) GOTOH, Y.: IPPJ-AM-50, (1987).
- (53) SUITER, D.J., et al.: J. Nucl. Mat., 122 & 123, 1286 (1984).
- (54) OOMURA, H., et al.: ibid., 133 & 134, 845 (1985).
- (55) HORIE, T., et al.: Fusion Eng. Des., 5, 221 (1987).
- (56) WATSON, R.D., et al.: ASME J. Pressure Vessel Technol., 105, 144 (1984).
- (57) DAENNER, W.: J. Nucl. Mat., 103 & 104, 121 (1981).

第3回「核融合炉夏期セミナー」テキスト

実費頒布中!!

B 5判オフセット印刷, 56p. (1987).

会員 1,000円 (定価 1,500円), 〒240円

- 内容 ① わが国における核融合炉開発研究の動向,
 ② 第1壁工学の課題, ③ プランケット工学の課題,
 ④ 超伝導工学の課題, ⑤ 中性子工学の課題,
 ⑥ 材料工学の課題と照射設備

◎ご希望の方は前金で本会事務局へ。

第19回「炉物理・夏期セミナー」テキスト

実費頒布中!!

B 5判オフセット印刷, 130p. (1987).

会員 2,000円 (定価 2,500円), 〒300円

内容

- I. チェルノブイリ発電所事故
 (1) 事故の概要・解析・評価, (2) チェルノブイリ事故と
 ソースターム評価
- II. 知識工学
 (1) 知識工学の基礎, (2) 知識工学の応用 (①設計への
 応用, ②運転支援への応用, ③運転員モデルを用いた
 知的マンマシンシステム

◎ご希望の方は前金で本会事務局へ。