



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	大型ヘリカル装置用ダイバータ試験体の電子ビーム熱負荷試験
Author(s)	藤田, 一郎; Hujita, I; 広畑, 優子 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 174, 17-23
Issue Date	1995-07-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42450
Type	departmental bulletin paper
File Information	174_17-24.pdf



大型ヘリカル装置用ダイバータ試験体の電子ビーム熱負荷試験

藤田 一郎¹ 広畑 優子¹
日野 友明^{1,2} 山科 俊郎¹
久保田 雄輔² 野田 信明²
相良 明男² 本島 修²

Dennis L. YOUCHISON³ Robert D. WATSON³

(平成7年3月31日受理)

Electron beam irradiation experiments of LHD divertor mock-up

(Received March 31, 1995)

Abstract

It is necessary for the divertor plates of fusion reactor to be equipped with actively cooled structures since it's subjected to an extremely high heat load from the fusion plasma. Thermal response tests were performed on a flat-type of divertor mock-up consisting of bonded CFC tiles on an OFHC-Cu block. The CFC tile of this mock-up was exposed to one-side heat loads by using the electron beam up to 10 MW/m². The temperatures at the surface and the inside of this mock-up were measured under various coolant water conditions. The temperature of this mock-up was found to be independent of the pressure of the coolant water by ranging from 0.2 to 4 MPa. The mock-up temperature decreased with increase in coolant velocity and with decrease in inlet temperature. The critical heat load at 1200°C was about 6 MW/m² at the coolant temperature of 20°C. This critical heat load was decreased by 1.5 MW/m² at a coolant temperature of 50°C compared to that of 20°C. In the case of the inlet coolant temperature at RT, the surface temperature was kept below 1200°C at 6 MW/m². This mock-up can be applied for LHD divertor plates in the operational condition of 5 MW/m² for 10s.

1. はじめに

現在、岐阜県土岐市に建設中の大型ヘリカル装置 (Large Helical Device; LHD 以下 LHD と略記)⁽¹⁾をはじめとする次期核融合装置では長パルス、高出力運転を予定している。プラズマと直接接するダイバータ板は、長時間、高熱流束および高粒子束にさらされ、蒸発や溶融、スパッタリングなどにより、著しく損耗することが予測される。LHD では、熱流束が最大10MW/m²に達

1 原子工学科 高真空工学講座

2 核融合科学研究所

3 米国サンディア国立研究所

すると予想されており、ダイバータ板を背面から強制冷却する必要がある。

LHDのダイバータ板として、様々なタイプの冷却機構が考えられているが⁽¹⁾、候補の一つとして、冷却管の付いた銅製のヒートシンク材の上に炭素系材料を冶金的に接合した構造がある。この冷却管内に水を流して、ダイバータに入射した熱を除熱することが考えられている。黒鉛などの炭素系材料をダイバータタイルとして使用する場合、炭素の照射促進昇華(Radiation Enhanced Sublimation ; RES)⁽²⁾⁽³⁾を防ぐために、タイルの表面温度を1200°C以下に押さえることが必要である⁽⁴⁾。したがって、流速、水圧などの冷却水の条件を適切に設定して、ダイバータを効率よく冷却しなければならない。熱負荷に対するダイバータの表面温度と冷却条件の関係は、ダイバータ板の適用条件を予測する上で極めて重要である。しかし、強制冷却機構付きダイバータ板の熱負荷に対する温度特性はまだ十分に評価されていない。

本研究では、ダイバータ模擬試験体の適切な冷却条件を見いだす基礎データを得ることを目的とし、冷却水の条件を変えLHD用に開発されたダイバータ模擬試験体の熱負荷に対する温度特性を調べた。とくに冷却水の流速、水圧および水温を広範囲に変化させ、電子ビームによる熱負荷に対する温度特性を系統的に測定した。

2. 実 験

2. 1 ダイバータ模擬試験体の概要

図1に本実験に供試されたダイバータ模擬試験体の外観および断面図を示す。これは、フラットタイプと呼ばれるもので、内径10mmの冷却管がついている無酸素銅(Oxygen Free High Conductivity Copper ; OFHC-Cu)のブロック上に、3枚の炭素繊維複合材(Carbon / Carbon Fiber Composite ; CFC 以下CFCと略記)製タイルを、ロウ剤を用いて冶金的に接合している。CFCタイルは日立化成(株)製の2次元のCFC材PCC-2S⁽⁴⁾で、30×23×10mmの大きさである。CFC材は繊維の方向で熱伝導率が大きく異なる。本試験体では、銅に垂直な方向と、冷却管に垂直な長さ30mmの方向に熱伝導率が大きくなるように接合した。接合層の厚さは約50μmで、約64%の銀と約35%の銅および少量のチタンからなるロウ剤を用いて、約800°Cにおいて銅とCFCタイルを接合した。

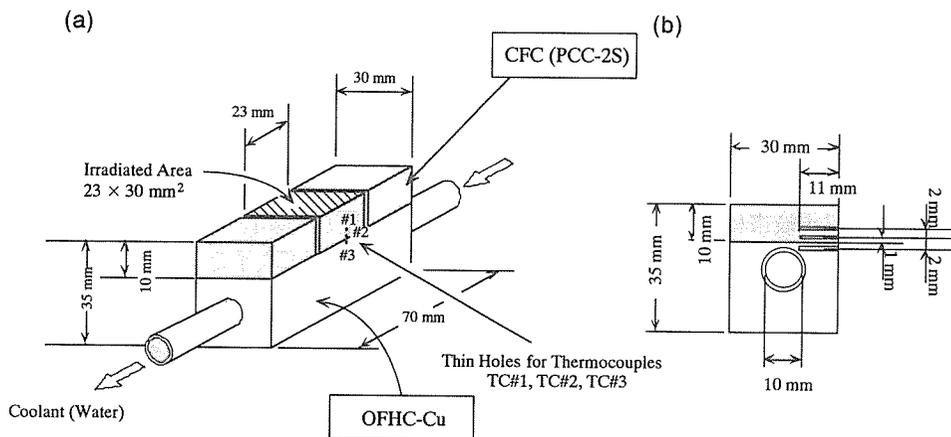


図1 ダイバータ模擬試験体の(a)外観図と、(b)断面図。

三つのタイルのうち中心のタイルにのみ熱負荷を与えた。このときの表面温度を赤外放射温度計で測定した。試験体内部の温度を測定する熱電対を挿入するため、直径1mm、深さ11mmの穴を側面に3カ所開けた。穴は図1(b)に示すように、接合面からCFCタイル方向に1mm、3mm、無酸素銅方向に1mmの位置である。これらの穴にシース型熱電対を挿入し、試験体中央の接合面付近の温度を測定した。照射面に近い方から順に、TC #1, TC #2, TC #3と呼ぶことにする。

2.2 電子ビーム熱負荷試験装置(EBTS)の概要

熱負荷源として、米国アルバカーキ市サンディア国立研究所(Sandia National Laboratories, Albuquerque NM)の電子ビーム熱負荷試験装置(Electron Beam Test System ; EBTS 以下EBTS と略記)⁽⁶⁾⁽⁷⁾を利用した。図2にEBTSの外観図を示す。EBTSは加速電圧30kV、最大パワー30kWの電子ビーム照射装置である。ダイバータ模擬試験体に流す冷却水の流速、水圧および温度を変化させることのできる循環システムを有し、広い範囲で各々独立に冷却条件を設定することができる。電子ビーム照射中の試料の状態を観察するビデオカメラと、表面温度を測定する低温域(300~1300°C)と高温域(1000~3000°C)の赤外放射温度計が取り付けられている。また、試料表面の2次元温度分布を測定するIRカメラも取り付けられている。

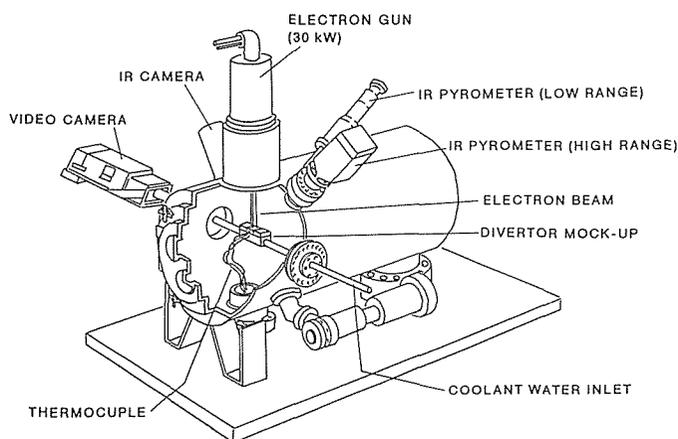


図2 電子ビーム熱負荷試験装置EBTSの外観図。

本実験では、照射を行わない両端のCFCタイルの上に冷却機構付きビームリミターを取り付け、中心のCFCタイルにのみ電子ビームが均一に照射されるようにした。冷却管の入り口側と出口側に取り付けた差温度検出器を用いて、冷却水の温度変化を測定した。試験体に入射した熱流束を、この冷却水の温度上昇から求めた。CFC材の表面温度を赤外放射温度計により、内部の温度を試験体に挿入したシース型熱電対により測定した。

2.3 熱負荷条件

種々の冷却条件において、電子ビームによる熱負荷と試験体の温度との関係について調べた。EBTSと同様の目的で製作された核融合科学研究所の強制冷却試験装置(Active Cooling Test-stand; ACT 以下ACTと略記)⁽⁷⁾では、冷却水の流速は最大8m/s、水圧は0.8MPa程度である。本実験ではACTで行えない冷却条件で実験を行った。すなわち、冷却水の流速が速く、水圧が高

い条件である。また入口の水温が室温よりも高い条件においても実験した。表1に本実験の冷却条件を示す。Run #1と Run #2は冷却水の流速のみを変化させた場合(5m/s, 10m/s)の試験体の温度を, Run #2と Run #3は水圧を変化させた場合(1.0MPa, 4.0MPa)の温度を比較するための実験である。Run #4, Run #5および Run #6は, 水圧, 流速および水温を同時に変化させた。流速を次第に遅く, 水圧を低く, 水温を高くし, Run #1~Run #3に比べて除熱効果が弱くなるものとして予測される条件に設定した。

表1 本実験で設定した冷却条件

Run Number	Heat Flux Area (mm ²)	Shot Duration (s)	Flow Velocity (m/s)	Pressure (MPa)	Inlet Temp. (°C)
1	23×30	60	5.0	1.0	20
2	23×30	60	10.0	1.0	20
3	23×30	60	10.0	4.0	20
4	23×30	60	9.0	3.0	50
5	23×30	60	7.5	2.5	85
6	23×30	60	6.0	2.0	120

3. 結果と考察

3.1 試験体温度の時間変化

電子ビームを照射したときの, 試験体の表面および内部温度と冷却水の温度上昇の代表例を図3に示す。冷却水の流速を10m/s, 水圧を1.0MPa, 入口側での水温を20°C(Run #2)に設定して, 9.3 MW/m²の熱流束を試験体に照射した場合である。電子ビーム照射を開始すると同時に, 試験体の表面, 内部温度および冷却水の温度は上昇し, 20秒程度でいずれの温度もほぼ一定となった。本実験では, 試験体の温度および冷却水の温度が一定となった時点の冷却水の温度上昇から, 入射熱流束を求めた。また, このときの値をもって試験体の表面および内部温度とし, 冷却条件を様々に変化させて比較した。

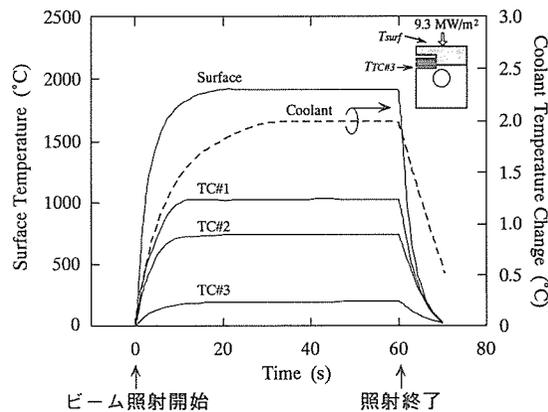


図3 ダイバーク模擬試験体の温度変化の代表例。
(入射熱流束9.3MW/m², 流速10m/s, 水圧1.0MPa, 水温20°C)

3.2 流速依存性

図4は、試験体に入射する熱流束を変化させたときのCFCタイルの表面温度と、最も冷却管に近い部分の熱電対TC #3の温度を示したものである。冷却水の水圧を1.0MPa、入口温度を20°Cとして、流速のみを5m/s(Run #1)と10m/s(Run #2)に変化させた。流速の遅い5m/sの方の表面および内部温度が高くなっていた。冷却水の流量が少なく、除熱能力が10m/sの場合に比べて小さかったためである。

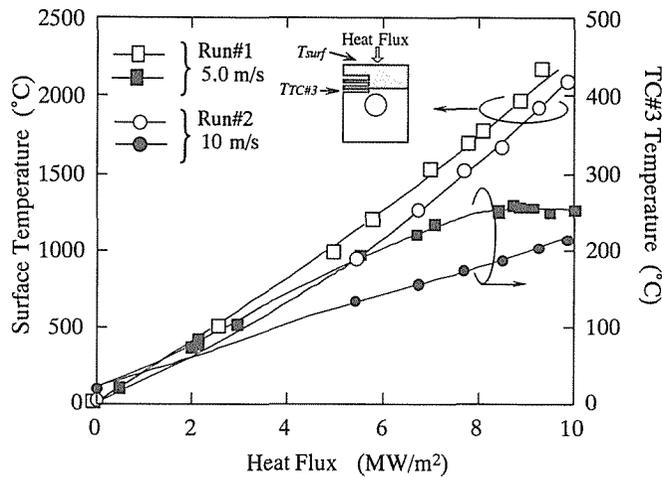


図4 冷却水の流速を変化させた場合の試験体の表面および内部温度と入射熱流束。(水圧1.0MPa, 水温20°C)

炭素系材料の使用限界である表面温度が1200°Cに達するときの入射熱流束は、流速が5m/sの場合には約5.5MW/m²であるのに対し、流速が2倍になった場合、0.5MW/m²程度上昇し6MW/m²となった。流速が2倍速くなくても、許容できる熱流束はあまり大きくならなかった。

流速が5m/sの場合、8MW/m²以上の熱負荷を加えても、内部温度TC #3の値はほぼ同じであった。この領域で、電子ビームの照射中に冷却水が沸騰することを示す特殊な音が冷却管から聞こえており、局所的に冷却水が沸騰し気泡が発生する核沸騰が生じていたものと予測される。発生した気泡が冷却水を攪拌し、熱伝達を向上させたために冷却管近傍のTC #3の温度が変化しなくなったと考えられる。

3.3 水圧依存性

冷却水の流速を10m/s、入口温度を20°Cとして、水圧のみを1.0MPa(Run #2)と4.0MPa(Run #3)に変化させた。このときの試験体の表面温度およびTC #3の温度と入射熱流束の関係を図5に示す。10MW/m²までの熱負荷で、水圧1.0MPaと4.0MPaの場合、表面および内部温度はほとんど差がなかった。核融合研のACTにおいて、同じ試験体に対して、流速が5m/sで水圧が0.20~0.68MPaの領域で同様の結果を確認している。EBTSにおける実験およびACTでの実験より、0.2~4MPaの圧力範囲では、LHDの最大熱負荷条件である10 MW/m²まで、除熱能力は水圧に依存しないことが分かった。

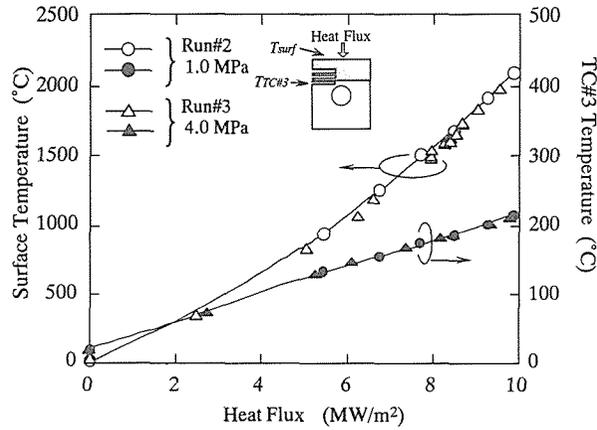


図5 冷却水の水压を変化させた場合の試験体の表面および内部温度と入射熱流束。(流速10m/s, 水温20°C)

3. 3 水温依存性

前節で述べたように、本実験で行った圧力範囲(1~4MPa)では除熱能力が冷却水の水压に依存しないことから、流速が大きく変らなければ、冷却水の水温の効果を比較することができる。図6は、Run #2 (流速10m/s, 水压1.0MPa, 水温20°C) と Run #4 (流速9m/s, 水压3.0MPa, 水温50°C)の冷却条件で熱負荷を変化させた場合の表面温度を示している。流速は9m/sと10m/sで、あまり差がないが、入口側の水温が30°C異なっている。入口側の水温が高い50°Cの場合の方が、表面温度が高くなっており、入射熱流束が大きくなるにしたがい、水温が20°Cの場合の表面温度との温度差も大きくなっていることが分かった。6MW/m²では約500°Cもの差が生じた。したがって、表面温度を低く押さえるためには、冷却水の入口温度を低くしておくことが必要である。

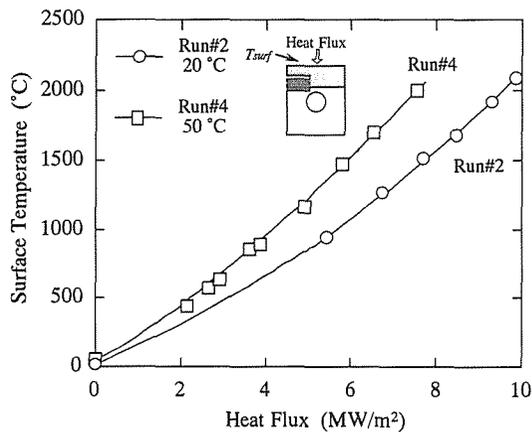


図6 冷却水の水温を変化させた場合の試験体の表面温度と入射熱流束。
(Run #2 ; 流速10m/s, 水压1.0MPa, 水温20 °C, Run #4 ; 流速9m/s, 水压3.0MPa, 水温50 °C)

表面温度が許容できる限界の1200°Cに達する熱流束は、冷却水の入口温度が20°Cの場合、6MW/m²であるのに対し、50°Cの場合は4.5MW/m²で、1.5MW/m²も低くなった。3. 2 節で述べた

流速の効果と比較すると、流速を10m/sから半分の5m/sにした場合よりも、水温を30°C高くして50°Cにした場合の方が許容できる熱流束が小さく、本実験の条件では水温の効果の方がはるかに大きいことが分かった。

本実験で得られたデータより、冷却水の入口温度を20°Cに設定した場合、表面温度が1200°Cに達する熱流束は約6MW/m²であった。したがって、5MW/m²、10秒というLHDの放電の熱負荷条件においても、表面温度を1200°C以下できるということが分かった。しかし、LHDで予測される最大熱負荷10 MW/m²では、表面温度が2000°C以上になり、本実験で使用した試験体の適用は難しいことが分かった。

4. ま と め

米国サンディア国立研究所の電子ビーム熱負荷試験装置EBTSを用い、LHD用のダイバータ模擬試験体の熱負荷実験を行った。とくに冷却水の条件を変え、模擬試験体の内部の温度および表面温度を測定し、以下の結論を得た。

冷却水の流速が5~10m/sで水温が20°Cの場合、4MPa以下の水圧では熱流束10MW/m²まで水圧による試験体の温度特性に差はなかった。しかし、冷却水の流速を速くすると、あるいは冷却水の入口温度を低くすると、試験体の表面および内部温度を低くすることができた。本実験で行った冷却水の条件では、流速の効果よりも水温の効果の方が除熱能力に大きく影響することが分かった。

冷却水の入口温度を室温に設定するならば、約6MW/m²の熱負荷条件において、表面温度が1200°Cに達することが分かった。したがって、本実験で使用した試験体は5MW/m²、10秒というLHDの運転条件においてダイバータ板として十分使用できるといえる。

謝 辞

本研究は日本学術振興協会日米科学協力事業核融合分野の一貫として行われた。実験において、米国サンディア国立研究所の核融合部の室長であるDr. M. UrlicksonならびにEBTSのスタッフに協力していただいた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 高杉裕司, 福田伸, 広畑優子, 日野友明, 山科俊郎, 炭素 147 (1991) 80-88.
- 2) N. Noda, Y. Kubota, A. Sagara, N. Ohyabu, K. Akaishi, Hantao.Ji, O. Motojima, M. Hashiba, I. Fujita, T. Hino, T. Yamashina, T. Matsuda, T. Sogabe, T. Matsumoto, K. Kuroda, S. Yamazaki, H. Ise, J. Adachi and T. Suzuki, Fusion Technology 1992 (1993) 325-328.
- 3) T. Hino, T. Yamashina, S. Fukuda, & Y. Takasugi, Journal of Nuclear Materials 186 (1991) 54-60.
- 4) 山本正弘, 安東俊郎, 高津英幸, 清水正亜, 荒井貴, 児玉幸三, 堀池寛, 照山量弘, 木内照男, 後藤純孝, JAERI-M 90-119 (1990).
- 5) J. A. Koski and J. B. Whitly, Fusion Technology 10 (1986) 789-794.
- 6) R. D. Watson, C. D. Crossmann, J. G. Watkins and J. F. Dempsey, Sand87-2452 (1988).
- 7) 久保田雄輔, 野田信明, 相良明男, 井上徳之, 赤石憲也, 本島修, NIFS-MEMO-13 (1994).