

# 核融合実験炉 ITER 用ダイバータ受熱機器における非破壊検査技術の開発

## Development of Non-destructive technique for ITER divertor high heat flux component

原子力機構 江里 幸一郎 Koichiro Ezato, 鈴木 哲 Satoshi Suzuki  
那珂研究所 大楽 正幸 Masayuki Dairaku, 横山 堅二 Kenji Yokoyama  
秋場 真人 Masato Akiba

Non-destructive examination (NDE) methods for joint interfaces between different materials in high heat flux components of ITER divertor should be urgently developed to assure quality and reliability of joining techniques. This paper reports the present R&Ds status of NDE for ITER divertor and its outlook. The detection ability of joint defect by using ultrasonic wave and thermography NDE are examined in the joint interface between armor tiles and a cooling tubes of divertor mock-ups. The results of both NDEs are benchmarked with high heat flux experiments and cross-sectional observation of the mock-up to correlate the joint defect size detected with NDEs to the thermal response of the mock-up with initial joint defects.

**Keywords:** ITER, divertor, Non-destructive examination, thermography, ultrasonic,

### 1. 緒言

2007年10月、日本を含む参加7極の承認を得てITER機構が発足し、仏カダラッシュにおいて国際熱核融合実験炉 ITER の建設が進められている[1]。原子力機構では ITER 建設へ向けて炉内機器の一つであるダイバータを製作する予定である。ITER ダイバータは図1に示すように真空容器下部にプラズマを閉じ込める磁力線と交差するように設置されるため、炉内機器中で最も高い熱負荷を受ける機器である。そのため、図2に示すように銅合金(CuCrZr)製冷却管へ表面保護材としてアーマタイル(炭素系複合材 CFC やタングステン(W)製)を異種材料間で冶金的に接合した構造となって

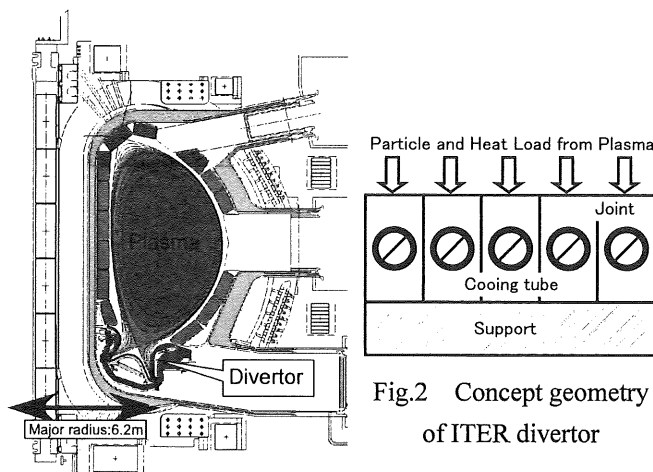


Fig.1 Crosssection of ITER

いる。表1に設計条件や使用材料を示す。これまでダイバータ開発は冷却管の性能や接合部の繰り返し加熱条件における耐久性実証に重点をおいて進めてきた。建設が進められようとしている現在、品質保証の観点からダイバータ製作上最も困難なアーマタイルと冷却管接合部に対して2種類(赤外熱画像法と超音波探傷法)の非破壊検査技術を開発し、実機ダイバータを炉内に装填する前に接合部の健全性を調べる必要がある。本報では、ITER ダイバータ用の非破壊検査技術の開発成果を報告するとともに今後の展開を紹介する。

### 2. 接合不良の検出試験およびその検証

CFC アーマタイルを有する試験に対して、2種類の検査手法、すなわち、赤外熱画像法と超音波探傷法を適用し、接合欠陥サイズを評価するとともに、加熱試験および断面観察を行うことにより、検査の妥当性を検証した。

#### 2.1 ダイバータ試験体

図2に本試験で使用したダイバータ試験体(TP-1,

Surface heat flux	5-20 MW/m <sup>2</sup>
Armor material	Carbon-fiber composite(CFC) Tungsten(W)
Structural material	Cu-alloy(CuCrZr) for cooling tube, SUS316L(N)
Coolant conditions	Water, 100°C, 4MPa

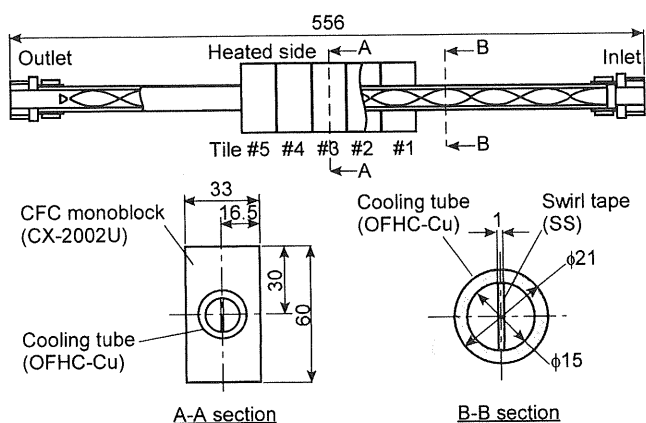


Fig.2 Details of divertor mock-up

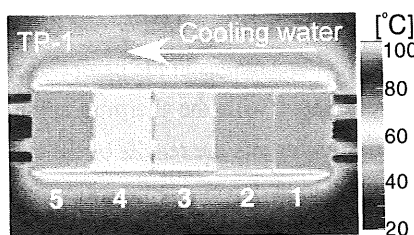


Fig.3 IR image of TP-1 at 4 s after start of cooling.

TP-2)を示す。試験体には5個のCFCアーマタイル(東洋炭素製CX2002-U)を無酸素銅冷却管にロウ付けしたものである。アーマタイル接合表面の受熱側には接合欠陥が生じやすいように、窪み加工や剥離剤塗布を施している。また、冷却管には取り外し可能なねじりテープを挿入している。このねじりテープは加熱試験時に冷却管の除熱性能を高めるために使用する。本試験体を使用し、下記に説明する赤外熱画像法と超音波探傷法による接合欠陥の検出試験および加熱試験を実施した。

## 2.2 赤外熱画像法による接合欠陥の検出

本手法ではダイバータの高い除熱特性に着目し、高温から冷却する際に生じる温度過渡状況をタイル表面温度を赤外カメラで測定することにより、接合部やタイルの欠陥を検出するものである。図2の試験体を90度の温水を用いて加熱し、定常状態に到達したのち、約30度の冷却水で冷却する。赤外熱画像は30フレーム/秒で保存され、解析に使用される。図3に冷却開始

Tab. 2: Joint defect size [%] estimated with thermographic NDE.

Mock-up	Tile #1	Tile #2	Tile #3	Tile #4	Tile #5
TP1	0.0	14.7	26.4	29.2	0.4
TP2	19.0	22.5	22.5	25.5	4.6

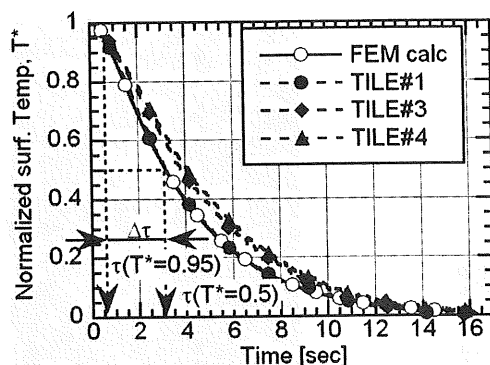


Fig. 4 Non-dimensional surface temperature of tiles #1, #3 and #4 of TP-1 compared with FE analyses and definition of thermal time constant,  $\Delta\tau$

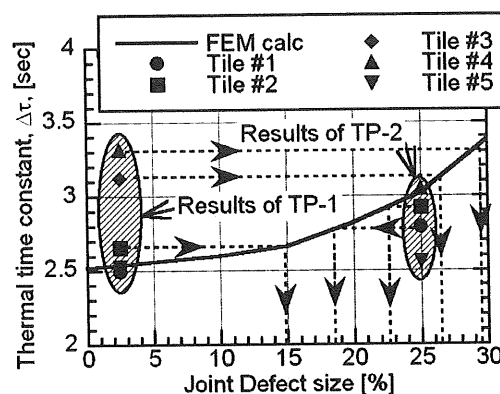


Fig.5 Estimation of joint defect size of the monoblock armor tiles of TP-1 and TP-2. Dotted lines in this figure are examples of estimation of joint defect size in each tile of TP-1 and TP-2 with interpolation of FE calculations.

後4秒における赤外熱画像を示す。冷却水の流れ方向から各タイル(1-5)を明確に識別できる。このようにして測定した表面温度変化を用いて接合欠陥を評価するため、冷却時の熱時定数と接合部の欠陥を仮定した数値解析との比較を行う。ここで熱時定数 $\Delta\tau$ は無次元温度  $T^*=(T-T_{min})/(T_{max}-T_{min})$ ( $T$ :各時刻の表面温度、 $T_{max}$ 、 $T_{min}$ :冷却時の最高と最低温度)を用いて定義した。CFCの熱伝導率は室温で銅以上の非常に高い値であるため、 $T^*$ はタイル中心のみで評価した。 $T^*$ の時間変化と2次元熱伝導解析との比較を図4に示す。熱時定数 $\Delta\tau$ の定義は $\Delta\tau=\tau(T^*=0.95)-\tau(T^*=0.5)$ とした。ここで $\tau(T^*)$ は $T^*$ が0.95から0.5まで冷却される時間である。この $\Delta\tau$ を各タイル毎に測定し、図5に示すように接合欠陥を仮定した数値解析結果と比較することにより接合欠陥を評価した。表2に本方法を用いて各タイルの接合欠陥を評価した結果を示す。

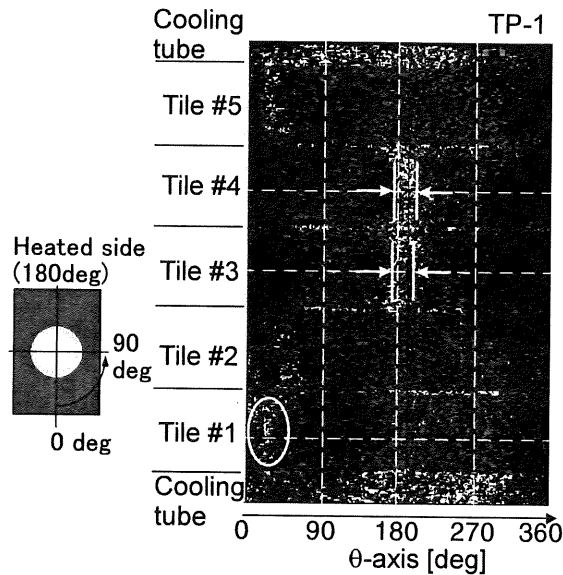


Figure 6: Mapping of the intensity of the ultrasonic signal after reflection at the joint interface of the monoblocks and the copper cooling tube of TP-1. White region represents high-reflected signal region.

### 2.3 超音波探針法による接合欠陥の検出

本方法では超音波探針子を冷却管内部に挿入し、軸高方向に移動させるとともに周方向に回転させ、接合面における超音波の反射波強度を測定するものである。探針子の共鳴周波数は20MHzであり、探針子からの超音波ビームが接合面よりCFC側で焦点を結ぶように探針子形状を設計した。超音波パルスの繰り返し周波数は1kHzであり、データ収集速度と同期させている。接合面が冶金的に接合されている場合、超音波パルスの反射強度はほとんど生じないものの、接合面に空隙などがある場合、反射波強度が大きくなる。TP-1を用いた測定結果を図6に示す。軸方向への探針子の移動ステップは0.5mmおよび回転方向は加熱面を180度として0.5°刻みで回転させ反射波強度測定したものである。図中白色の箇所が反射波強度が高い領域で、黒色の部分は低強度の領域である。タイル#3と#4において180度付近において接合欠陥が生じていることが分かる。その大きさとして、約15%(54°)から20%(72°)であり、赤外熱画像法で評価した欠陥サイズより小さいという結果となった。

### 2.4 加熱試験

上記の非破壊検査により接合欠陥を評価した試験体を原子力機構にあるイオンビーム照射装置によるITERダイバータ条件を模擬した高熱流束加熱試験を

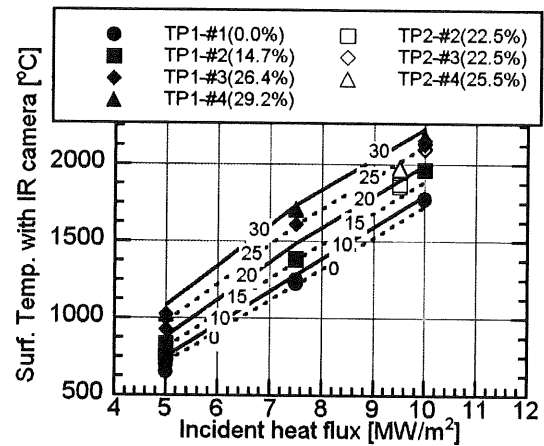


Fig.7: Figure 6: Results of screening test on the mock-ups, TP-1 and TP-2. Percentages in the parentheses indicate the joint defect estimated with the thermographic NDE. Solid and dotted lines represents the results of FE calculation with assumption of the joint defect. Numerical values on the lines are joint defect size used in analyses.

行った。アーマタイルへの入射熱流束は5、7.5、10MW/m<sup>2</sup>(ピーク値)とし、加熱時間はほぼ試験体がほぼ定常となる30秒とした。図7にタイル表面の最高温度の測定値(各マーク)と接合欠陥を仮定した2次元熱伝導解析結果との比較(実線および破線)を示す。たとえば、試験体TP-1のタイル#1は接合欠陥のないものであり、数値解析の値とよく一致している。また、赤外熱画像法により接合欠陥サイズが26-29%と評価されたタイル#3、#4の表面温度は25-30%の欠陥を仮定した熱解析結果と良い一致を示している。このように赤外熱画像法による接合欠陥サイズと加熱試験と数値解析の結果と整合性が取れていることを確認することができた。また、加熱試験は1000サイクル繰り返し、接合欠陥の有無にかかわらず、表面温度の上昇など接合部の劣化がサイクル中生じないことを確認した。

### 2.5 断面観察結果

図8に実際の接合欠陥サイズを測定するため、試験体(TP-1)アーマタイル(#1、#3および#4)中央部(図6中の横破線)で切断した断面の観察結果を示す。超音波探傷ではタイル#3、#4は180°付近に欠陥が存在し、反対側の0°では欠陥がなく良好な接合状態であるという結果であり、断面観察でも同様な結果となった。一方、タイル#1では断面観察により0°付近に空隙が生じていることがわかった。図6に示す超音波探傷の結果においてもタイル#1の0°(白枠の中)に反射強度の高い領域

が見られ、断面観察結果と一致している。しかし、加熱面側からの赤外熱画像法では、このような欠陥を検出することができないものの、加熱試験の結果から分かるようにダイバータの除熱特性に大きな影響を与えるものではない。断面観察から得られる欠陥サイズを赤外画像法および超音波探傷法による結果と比較すると、赤外画像法では約 1.3 倍、超音波探傷法では約 0.8 から 0.9 倍、それぞれ、過大評価と過小評価していることがわかった。

### 3. まとめと今後の計画

同一のダイバータ試験体に 2 種類の非破壊検査方法(赤外熱画像法および超音波探傷法)を適用し、アーマタイルと冷却管の冶金接合部の欠陥の検出試験を行い、それぞれの検出性を評価した。

ITER ダイバータの熱負荷条件に相当する  $10\text{MW}/\text{m}^2$  までの加熱試験を実施し、欠陥がある場合の表面温度上昇が非破壊検査で得られた欠陥サイズを元にした熱解析結果と良い一致を示し、検査方法の妥当性を示した。

アーマタイルの断面観察を行い、超音波探傷では

実際のサイズより小さめに、赤外熱画像法では大きめに評価する可能性があることを示した。

現在、ITER ダイバータの調達に向けて本報で試行した赤外熱画像法を改良・発展させた装置の整備を原子力機構内に進めている[3]。本装置では、温水および冷水の温度差を大きくとり、より詳細なデータを取得することが可能であり、実機サイズダイバータを 3 本同時に検査することが可能である。また、鏡を用いて表面および側面(二面)も同時に計測することにより本報で試行した赤外熱画像法では検知できなかった受熱面以外の接合欠陥を検出することが可能である。

### 参考文献

- [1] <http://www.iter.org/index.htm>
- [2] R. Tivey, M. Akiba, D. Driemeyer, I. Mazul, M. Merola and M. Ulrickson, "ITER R&D: Vacuum Vessel and In-Vessel Components: Divertor Cassette," Fusion Engineering Eng. and Des.ign, 55 (2001) 219-229.
- [3] 横山堅二、他 5 名、赤外熱画像を用いた核融合実験炉ダイバータ用非破壊検査装置の開発、日本保全学会 第 5 回学術講演会、2008 年 7 月、水戸