

# 原研炉を用いた $\alpha$ 線トラックエッチング法による 鋼中ボロンの状態分布観察システムの確立

朝倉 健太郎\*・柴田 浩司\*・澤幡 浩之\*<sup>2</sup>・川手 稔\*<sup>2</sup>・原澤 進\*<sup>3</sup>

Establishment of the Observing System for Boron in Steels by Alpha-particle Track Etching Method Using JAERI Reactor  
Kentaro ASAKURA, Koji SHIBATA, Hiroyuki SAWAHATA, Minoru KAWATE and Susumu HARASAWA

**Synopsis :** Alpha-particle track etching (ATE) method is most effective in observing boron distribution in steels. Previously, in Japan, neutron irradiation for this method was carried out in the reactor at the Institute of Atomic Energy, Rikkyo University. This reactor, however, was shut down in 1999. Therefore, the establishment of a new system for ATE method has been required and experimental research was performed using the reactor at the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). It was clarified that the irradiation equipment for medical treatment of the reactor JRR-4 was most suitable for ATE method. The specimen trestle for low radioactive exposure was newly-developed. ATE image obtained by 12 h irradiation using this trestle showed a good quality similar to that obtained using Rikkyo's reactor and that obtained using the trestle of the old model. Using this new trestle, the amount of neutron which the worker suffers during the operation at the irradiation equipment decreases from  $4 \mu\text{Sv/h}$  to  $0\text{--}1 \mu\text{Sv/h}$  compared with the trestle of the old model. The total amount of thermal neutron after 12 h irradiation was almost same as that under the recommended condition of the reactor at Rikkyo University,  $6.5 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$ .

**Key words :** boron distribution; ATE method; thermal neutron; specimen trestle; low radioactivity.

## 1. 緒言

ボロンは極微量でも鉄鋼の性質を向上させることが知られており、非常に多くの鋼で利用されてきたが<sup>1)</sup>、今後ますます重要となる環境問題、資源・エネルギー問題に対処できる鋼としてボロン添加鋼の重要性が高まっている<sup>2)</sup>。しかし、鋼中のボロンの挙動については不明な点が多く、さらに高性能な鋼を開発するためには、ボロンの挙動の詳細を明らかにする必要がある<sup>2)</sup>。そのため、日本鉄鋼協会において、平成11年度より鋼中ボロンの挙動解明と利用促進研究会（主査：柴田浩司，7大学，2国研，鉄鋼企業を含む12民間企業）が発足した。

他方、熱中性子とボロン10（ボロンの同位体）の反応を利用した $\alpha$ 線トラックエッチング(ATE)法は、ボロンの検出感度に優れるとともに、鋼の性質を決定する鋼のミクロ構造（組織）との関わりにおけるボロンの分布状態の観察が容易である<sup>3)</sup>。そのため、鋼中ボロンの挙動を観察するもっとも有力な手法として、多くの鉄鋼研究者に利用されてきた。しかし我が国において、ATE法のための中性子照射ができる唯一の原子炉であった立教大学原子炉（以下、立教炉と略）が平成11年度をもって閉鎖された。今後ATE法が利用できないと、我が国における材料とりわけ鉄鋼材料の基礎研究、開発研究に重要な支障をきたすことは

明らかである。この問題に対応できる機関は、我が国では日本原子力研究所(JAERI)しかない。そこで著者らはJAERIにおいて、これまで立教炉で行われてきたような便利さで、ATE法が利用できるシステムを立ち上げることを目指して実験を行った。その結果、作業従事者の被爆量が少ない試料架台を開発し、従来とくらべて遜色のない鋼中ボロンのATE像が得られる照射条件を明らかにしたので報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 ATE法によるボロン分布の観察

一般にATE法を用いるには、核反応により $\alpha$ 線をつくり出す必要がある。(n,  $\alpha$ )反応は、中性子照射によって熱中性子と対象とする元素との間で核反応を起こさせ、 $\alpha$ 線の放射を生じさせる反応である。この反応が生じる頻度は放射化断面積によって表される。放射化断面積の大きい元素はB (4017 barn)であり、Li (945 barn), O (0.4 barn)がこれに続く。天然に存在するボロンの中におよそ20%含まれる<sup>10</sup>Bが(n,  $\alpha$ )反応を生じ、残りの<sup>11</sup>Bはこの反応に関与しない。Li, Oは鋼中の含有率が少ないため、(n,  $\alpha$ )反応を生じる同位体の量も少ない。したがって、他元素の影響を無視して、<sup>10</sup>Bのみが、(1)式の反応によって $\alpha$ 線を放射

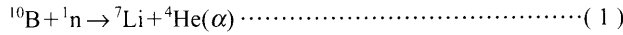
平成14年7月1日受付 平成14年8月23日受理 (Received on July 1, 2002; Accepted on Aug. 23, 2002)

\* 東京大学大学院工学系研究科 (Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

\*<sup>2</sup> 東京大学原子力総合センター東海分室 (Research Center for Nuclear Science and Technology, The University of Tokyo)

\*<sup>3</sup> 立教大学原子力研究所 (Institute for Atomic Energy, Rikkyo University)

すると考えて良い。



(1)式の反応中に放射される $\alpha$ 線の鋼中の飛程は数 $\mu\text{m}$ である。試料中で上記反応によって生じた $\alpha$ 線は試料を通過し、試料表面に貼付した硝酸セルロースフィルムに損傷を与えてエネルギーを失う。これらからフィルム上の $\alpha$ 線痕跡( $\alpha$ 線トラック像)は、試料表面から数 $\mu\text{m}$ 以内に存在したボロンといえる。ATE法はボロン含有量が1ppm以下の試料でも、状態分布の観察が可能である長所を有する。

ATE像の撮影までの手順をFig. 1に示す。観察しようとする試料をファインカッターを用いて0.5~1mm厚に切り出し、片面のみをエメリー紙研磨(#80~#1200)にて粗研磨を行い、その後、バフ研磨(アルミナ粒子:1 $\mu\text{m}\phi$ )にて鏡面に仕上げる。

鏡面仕上げした面に酢酸メチルを滴下した後、酢酸セルロースフィルムを1~2回貼り(ブランクレプリカ)、表面の汚れを除去する。最終的に硝酸セルロースフィルム(CN85)を試料に貼り付けるが、フィルムと試料表面の間に気泡が入らないようにする。次に、立教炉の照射量( $6.5 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$ )に合わせるように中性子照射を行う。試料の残留放射能が減衰するのを待ち、試料からCN85フィルムをはく離する。30°Cの2.5N水酸化ナトリウム溶液中で約1~2hエッチング処理を行う。CN85フィルムを水洗後乾燥し、光学顕微鏡像を撮影する。

2.2 中性子照射装置

ATE法のための照射条件を原研炉で見いだすには、少な

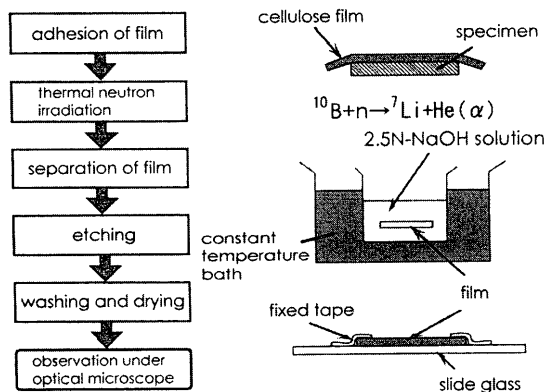


Fig. 1. Procedure of ATE method.

Table 1. Irradiation equipment, neutron flux and cadmium ratio of JRR-4.

Irradiation equipment	Irradiation time	Irradiation system	Thermal neutron flux (max. $\text{ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Fast neutron flux (max. $\text{ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Cadmium ratio
T pipe	10s-6h	Water power	A: $5.3 \times 10^{13}$ B: $4.3 \times 10^{13}$	A: $1.3 \times 10^{13}$ B: $5.6 \times 10^{12}$	3.8 4.6
S pipe	10s-6h	Holder	$4.0 \times 10^{13}$	$5.9 \times 10^{12}$	4.5
D pipe	10s-6h	Holder	$4.3 \times 10^{13}$	$5.2 \times 10^{12}$	4.8
N pipe	10s-6h	Holder	$1.5 \times 10^{13}$	$9.6 \times 10^{11}$	8.1
Pneumatic tube	1s-20min	Pneumatic	$3.2 \times 10^{13}$	$7.8 \times 10^{12}$	3.6

くとも全中性子束およびカドミ比によって決まる全熱中性子束が立教炉に近い照射設備を用いなければならない。カドミ比とは全中性子に対する熱中性子の割合を示す指標である。原研で使える共同利用の原研炉はJRR-4(出力3.5MW)とJRR-3W(出力20MW)である。立教炉と原研炉の照射条件を比較すると以下ようになる。

2.2.1 立教大学における照射条件

これまでATEのための中性子照射に用いてきた立教炉TRIGA Mark II(出力100kW)の熱中性子束は、 $1.5 \times 10^{10} \text{ n cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (カドミ比2.5)である。通常12h照射(1日6hの照射を2日繰り返す)を行っていたので、全熱中性子束は $6.5 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$ になる。したがって原研炉での照射においても、この立教炉の全熱中性子束を基準に照射計画を立てた。

2.2.2 原研炉JRR-4における照射条件

JRR-4は20%濃縮ウラン板状燃料を用いた軽水炉減速冷却のスィミングプール型熱中性子炉である。原子炉の最大熱出力は3.5MWで、最大熱中性子束は $7.0 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。燃料の低濃縮化のための改造を機に、医療照射用の中性子設備が整備され、1999(平成10)年1月より共同利用運転が実施されている。JRR-4を用いた場合の照射方法として、簡易型照射筒設備、気送管および医療用中性子ビーム設備の利用が考えられる。ATE法に簡易型照射筒設備、気送管を用いることが可能ならば、照射が短時間で済むので便利である。簡易型照射筒設備と気送管の中性子束をTable 1に示す。

(1) 簡易照射筒設備による照射

簡易照射筒設備にはT, S, DパイプおよびNパイプがある。Tパイプはプール水の循環により照射物を移送する水力照射設備で、S, D, Nパイプは昇降回転装置に専用キャプセルを収納した照射ホルダーを接続し、炉内への挿入、照射および取り出しを行う設備である。照射中は均一照射ができるように照射ホルダーを回転させることもできる。

(2) 気送管による照射

気送管による照射は、試料をキャプセル(内径20 $\phi$ ×50mm)内に入れて窒素ガスで炉内に送り、任意の時間照射した後、再び窒素ガスを流して試料取出し口にキャプセルを送る。特徴は照射終了後、試料をすぐに取り出せることができるが、試料は放射化されているので注意が必要である。

Table 2. Beam mode, neutron flux and cadmium ratio of JRR-4.

Beam mode	Thermal neutron flux ( $<0.53\text{eV}$ ) ( $\text{ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Thermal neutron flux (Surface of Bismuth) (Center) ( $\text{ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Fast neutron flux ( $0.53\text{-}10\text{keV}$ ) ( $\text{ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Cadmium ratio
Fast neutron mode	$3.6 \times 10^8$	$7.44 \times 10^8$	$2.2 \times 10^9$	1.15
Thermal neutron mode I	$2.0 \times 10^9$	$9.07 \times 10^9$	$9.0 \times 10^8$	2.5
Thermal neutron mode II	$6.5 \times 10^8$	$2.87 \times 10^9$	$3.2 \times 10^7$	13.5

Table 3. Chemical composition of the specimen (Steel B10) used (mass%).

C	Si	Mn	P	S	B	Ti	T.N
0.004	0.21	1.7	0.01	0.0045	0.0019	0.009	0.043

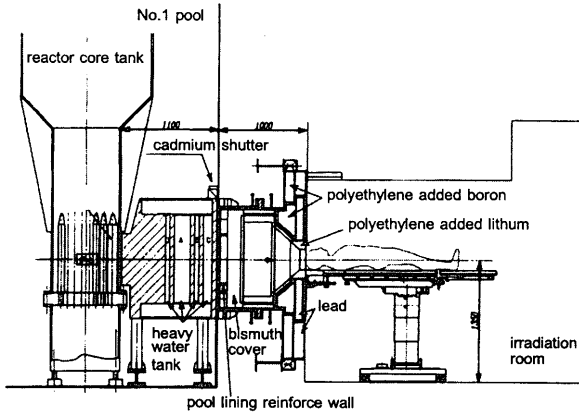


Fig. 2. Cross sectional side view of irradiation equipment of JRR-4 for medical treatment.

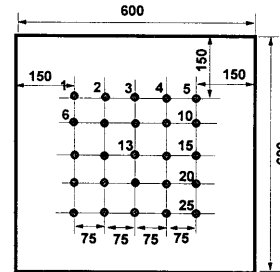


Fig. 3. Size of specimen trestle and specimen position.

(3) 医療用中性子ビーム設備による照射

医療用中性子ビーム設備（以下、医療用照射設備と略）の熱中性子束およびカドミ比などの特性を Table 2 に示す。熱外中性子と熱中性子モード I, II の3つのモードから利用条件に合わせてビームを選択できる。とくに、この設備では悪性脳腫瘍の治療に期待されている。

JRR-4 医療用照射設備の横断面図を Fig. 2 に示す。医療用照射設備の照射口の寸法は600×700 mm（横×縦）である。ATE法の実験においては、試料を固定する架台を照射面積の広いこの照射口（ビスマス製遮へい体）付近に配置した。

2.3 中性子照射の準備

2.3.1 化学成分と熱処理条件

供試鋼（B10鋼と呼ぶ）の化学成分を Table 3 に示す。熱間圧延したB10鋼を約12 mm角に切り出し、その後、950°C, 1000°C, 1100°C, 1200°Cの各温度で1h溶体化処理し、空冷した。

2.3.2 試料架台の作製

本来、医療用照射設備はホウ素中性子補療法に用いる。これは、腫瘍細胞に選択的にホウ素化合物をとり込ませた後、低エネルギー中性子を照射し、ホウ素の核反応で発生する短飛程のα線で腫瘍細胞を選択的に破壊する治療法である。ATE法のための照射を行うためには、専用試料架台を作製して設置する必要がある。それには放射化しない材料（再利用可能な材料）を探し出さなければならない。そこでアクリル板、段ボール板、炭素（カーボン）板について検討した。

アクリル製試料架台の寸法と試料位置の関係を Fig. 3 に示す。熱中性子束のばらつきを避けるため周辺部150 mm

を除外し、中心部300 mm<sup>2</sup>を照射領域とした。●点位置に試料を75 mm間隔で1列5個(150, 225, 300, 375, 450 mm)をセットし、5列25個の試料を準備した。試料番号は左上から右下の順に1~25とした。

2.4 試料架台の放射化分析

試料架台の残留放射能は小さくなければならない。そのため、各架台の残留放射能を放射化分析法により測定した。放射化分析は、励起する物質に対して透過しやすい熱中性子を使うために、均一に放射化できる。また検出する物質に対して透過しやすいγ線を使うため、検出の損失が小さいなどの利点が報告されている。試料から放射されるγ線はGe(Li)半導体検出器によって検出した。

放射化分析した試料としてアクリル板（三菱レイヨン（株）製4種類）、段ボール板、カーボン板（新日本炭素（株）製2種類）の7種類を用意した。中性子照射条件は熱中性子束 $3.2 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、照射時間90 s、冷却時間24 hである。

3. 実験結果と考察

3.1 試料の熱処理条件

立教炉において中性子照射を行った後のB10鋼のATE像を Fig. 4 に示す。950~1000°Cでは未固溶ほう化物が認められたが、1100°Cではすべての未固溶ほう化物が母相中に固溶した。このため原研炉の照射に用いた熱処理条件は、1100°C, 1h加熱した後、空冷とした。

3.2 試料架台の放射化分析

放射化分析結果を Fig. 5 に示す。カーボン1の残留放射能は、バックグラウンドとほぼ等しい程度に低い。次いでカーボン2とアクリル（メタクリル樹脂）の順に残留放射能が高くなるが、その程度は小さく問題となるような同位元素も認められない。これらの結果からカーボン板およびアクリル（メタクリル樹脂）板については、再使用が可能

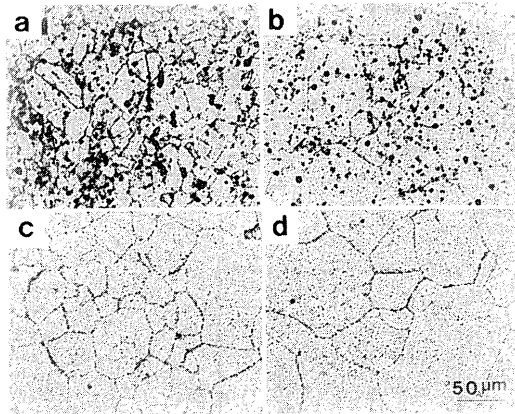


Fig. 4. ATE image of B10 steel (heated at each temperature for 1h and air-cooled) irradiated in Rikkyo's reactor. (a) 950°C, (b) 1000°C, (c) 1100°C, (d) 1200°C.

であることが判明した。また、アクリルライト(E), アクリルライト(クリア)には、半減期の長い同位元素<sup>214</sup>Biの存在が認められたが、メタクリル樹脂(MF), 耐熱メタクリル樹脂(VH)については問題がなかった。

他方、段ボール板からはAlなどの核種が検出され、汚染が著しく再使用が不可能であった。当初、段ボール板については燃焼廃棄処理による「使い捨て」を考えたが、段ボール板の継続的な購入によるランニングコストの負担、試料架台製作の煩わしさ、照射後の裁断処理による被爆を避けられない。以上より、カーボン板を使用することに決定した。

### 3.3 照射設備の確定

#### 3.3.1 JRR-4簡易照射設備の検討

前述したように、これまでATE法を実施してきた立教炉の全熱中性子束を基準にし、原研炉での照射条件を見いだすことを検討した。立教炉における全熱中性子束は $6.5 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$ であった。原研炉において、同じような照射条件を検討した結果、Table 1から、Tパイプ-B(熱中性子束 $4.3 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), Nパイプ(熱中性子束 $1.5 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )の利用が考えられる。Tパイプ-Bであれば15s照射によって、Nパイプならば43s照射によって、全熱中性子束が立教炉とほぼ同じ $6.45 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$ になる。しかし、実験を遂行する過程で、秒単位で照射束をコントロールすることはできないことが分かった。

#### 3.3.2 気送管による照射

Table 1から気送管(熱中性子束 $4.5 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )を用いても、照射が可能であると判断される。すなわちTable 4に示すように10~20sの照射時間であれば全熱中性子束は $4.5 \sim 9.0 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$ になる。立教炉における全熱中性子束 $6.5 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$ と比較すると、15s照射がもっとも近い値である。

B10鋼を用いて、気送管によって照射したATE像の結果をFig. 6に示す。比較のために立教炉で照射したATE像も

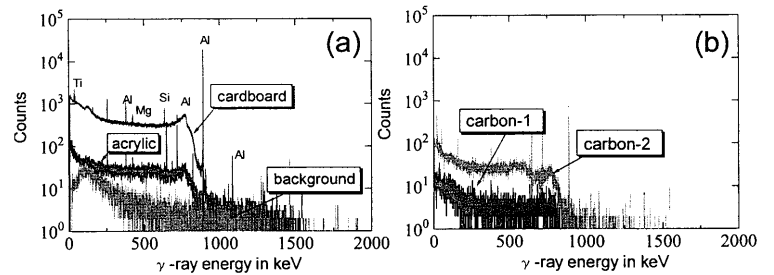


Fig. 5. Results of activation analyses of acrylic, corrugated cardboard (a) and carbon (b).

Table 4. Relation between irradiation time and thermal neutron flux in pneumatic tube of JRR-4.

Irradiation time	Thermal neutron flux	Cadmium ratio
10s	$4.5 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$	3.6
15s	$6.7 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$	3.6
20s	$9.0 \times 10^{14} \text{ n cm}^{-2}$	3.6

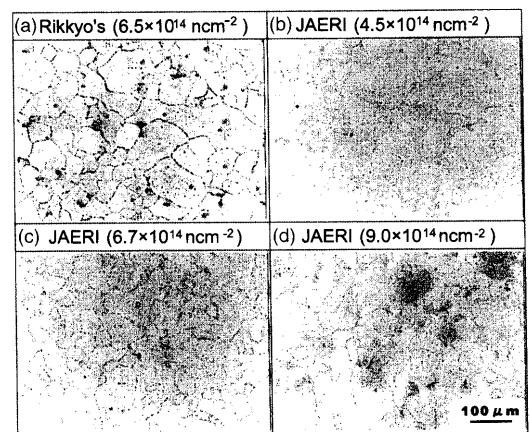


Fig. 6. ATE image of specimen irradiated in pneumatic tube. (a) Rikkyo's reactor, (b) 10 sec irradiated, (c) 15 sec irradiated, (d) 20 sec irradiated.

Fig. 6(a)に示す。試料の大きさを $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}$ (横×縦×厚)にし、10s, 15s, 20sそれぞれ2個照射したが、各照射時間で1個の試料は観察可能であったが、他の1個の試料はATE像を観察できなかった。

Fig. 6の結果をみると、気送管による10s照射はATE像のコントラストが薄い。15s照射の場合は比較的良好であるが、立教炉を用いた場合に比べてATE像が薄い。20s照射の場合にはもっともコントラストが薄く、しみ状のパターンが認められた。さらにCN85フィルムのはく離が認められた。これについては以下のことが考えられる。

① CN85フィルムのはく離は、輸送時の振動(衝撃)が原因と考えられる。

② 試料が中性子照射源に対して、平行/垂直であるという偶然の確率を支配できない。気送管での照射の際、たとえば板材などの場合は、照射線源に対して平行もしくは垂直であるかは、偶然の確率を制御できないため、照射線源に対して平行であった場合、α線の放射化確率が低下することが考えられる。

③ 炉心までの時間を推定して照射時間を決めていた

Table 5. Relation between irradiation time and thermal neutron flux in thermal neutron mode I of JRR-4.

Irradiation time	Thermal neutron flux	Cadmium ratio
12h	$3.92 \times 10^{14} \text{ ncm}^{-2}$	2.5
18h	$5.88 \times 10^{14} \text{ ncm}^{-2}$	2.5
24h	$7.84 \times 10^{14} \text{ ncm}^{-2}$	2.5

め、炉心に試料が入ったときの時間を正確に検出できない。したがって、照射時間が不正確となる。放射化分析では正確な照射量は必要ないため気送管が多用されているが、ATE法でボロン像を観察するには、非常に正確な照射時間が必要である。

④ 炉心では速中性子束やガンマ線量が高いことが考えられ、そのことがATE像に影響を及ぼす可能性も考えられる。

①は、緩衝材を入れるなどの工夫をすれば解決できると考えられるが、②～④は、ボロンの状態分析（ATE法）のように照射量が敏感な実験には、問題である。したがって気送管による照射を断念し、医療用照射設備における実験を遂行した。

### 3.3.3 医療用照射設備（熱中性子モードI）による照射（1） 18h照射におけるATE像

JRR-4の運転サイクルは週4日であり、1日あたりの稼働時間は6hであることを考慮しなければならない。熱中性子束がもっとも高い熱中性子モードI ( $9.07 \times 10^9 \text{ ncm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )の場合、Table 5に示すように、全熱中性子束は、3日(18h)照射では $5.88 \times 10^{14} \text{ ncm}^{-2}$ となり、立教炉における全熱中性子束 $6.5 \times 10^{14} \text{ ncm}^{-2}$ と比較するとやや不足する。4日(24h)照射では $7.84 \times 10^{14} \text{ ncm}^{-2}$ となり過多となる。

試料架台に試料B10鋼を貼り付けて18h中性子照射したATE像の結果をFig. 7に示す。医療用照射設備による照射は気送管による照射に比べて、はるかに鮮明なATE像が得られることが分かる。しかし試料架台の端部に相当する試料番号1, 5, 10, 15, 20, 21, 22, 24および25については焦点のぼやけ、ないしは二重像などの不具合が観察される。これらの原因を正確に特定できていないが、以下のことが可能性として考えられる。ぼやけに関しては、中性子束は均一ではなく、中性子束の小さな箇所が存在することが考えられる。二重像に関しては、中性子ビームの不規則な散乱が存在することが考えられる。試料架台の中央部付近（試料番号：7～9, 12～14, 17～19）では、立教炉と比較して遜色のないATE像が得られる。

### （2） 24h照射におけるATE像

実験を遂行するうちに作業従事者の被爆が問題になった。そのため、作業従事者の被爆防止という立場から4d(24h)照射について検討した。照射開始の前日である月曜日に試料をセットし、3d照射して照射終了日の金曜日から次週の月曜日まで冷却時間にあてると、被爆量をきわめて少量に押さえることが可能になる。すなわち、炉が稼働

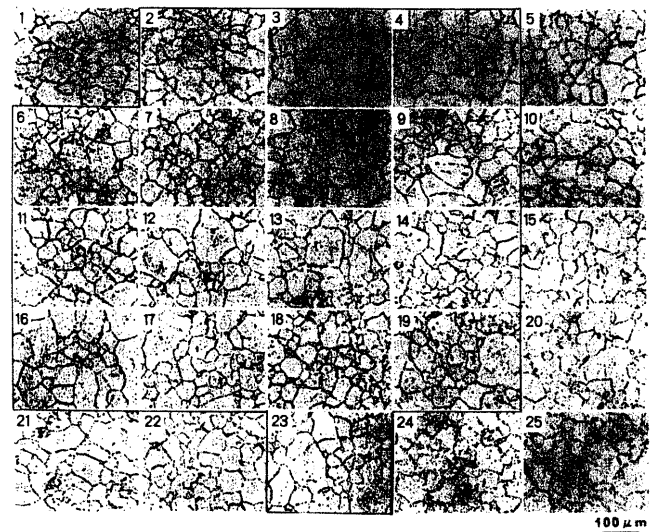


Fig. 7. ATE image of specimen irradiated for 18h using acrylic trestle.

していない月曜日に試料の出し入れができれば最良である。しかし24hの全熱中性子束は $7.8 \times 10^{14} \text{ ncm}^{-2}$ にもなり、ATE像にフラックス量が多いときに観察される“しみ”状の像が多数みられた。そのため、24h照射はATE観察にとって好ましくないことが分かった。

### 3.4 低被爆量を考慮した試料架台

医療用照射設備の照射口付近に試料を保持するには、鉛製の簡易遮へい体をそのつど開閉し、残留放射能の拡散を防止するためのポリシート養生などが必要である。したがって作業従事者は、1回の作業（約20分）につき $4 \mu\text{Sv/h}$ 被曝する。そのため試料架台のさらなる改善が必要となった。

#### 3.4.1 低被爆型試料架台の作製

新たに作製した試料架台をFig. 8に示す。この試料架台は長さ710mm×縦170mm×横170mmの角柱の構造であり、Fig. 2の医療用使用時の被照射者の頭部にあたる部分に挿入し、4本のビスで取り付けることができる。鉛扉を開けずに作業ができるので、作業従事者の受ける残留放射能の被曝量は、1回の作業（最大5分）につき $0 \sim 1 \mu\text{Sv/h}$ まで低減した。この架台の照射領域は170mm角である。ビスマス製遮へい体前面から約20mm離れた位置から33mm間隔で5枚の隔壁板を作製し、各隔壁板に150×20×33mm（横×高さ×奥行）の試料用ポケットを3段設けた。

#### 3.4.2 低被爆型試料架台によるATE像

ここまで実験を遂行した後、「JRR-4医療用照射設備」については重水を使っていないことが判明した。重水を用いない理由は、①重水がトリチウム汚染する、②汚染した重水の処理費がかかるなどである。重水を使用しない場合、原理的にはカドミ比は下がり、総フラックス量が上がるため、これまでは最強モードで照射を行っていたことになる。そこで照射時間を12hに短縮することにした。

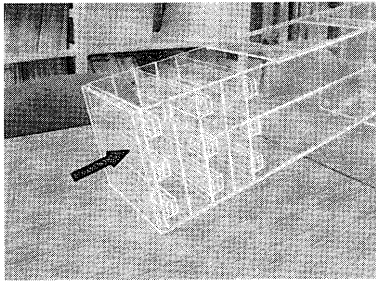


Fig. 8. Specimen holders in the tresle for low radioactive exposure (arrowmark: injection direction of neutron flux).

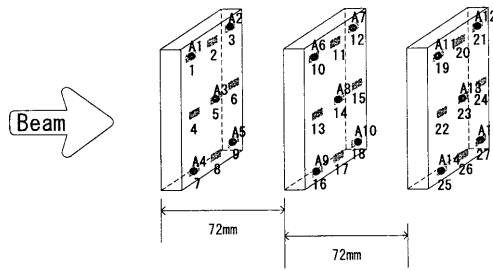


Fig. 9. Position of specimen (No. 1-27) and Au monitor (symbol ●: No. A1-A15) for thermal neutron flux measurement in the specimen trestle of low radioactive exposure.

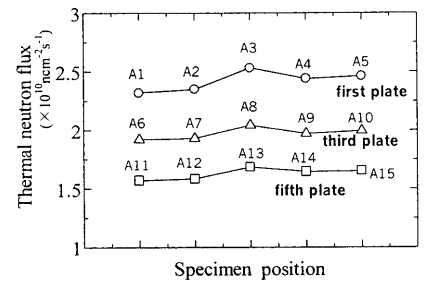


Fig. 11. Distribution of thermal neutron flux in the specimen trestle of low radioactive exposure.

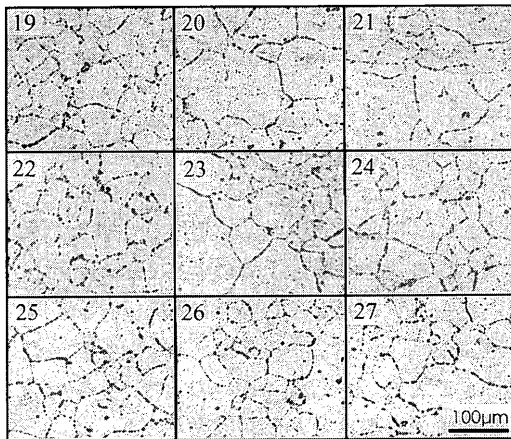


Fig. 10. ATE image observed using the specimen trestle of low radioactive exposure.

B10鋼を Fig. 9 に示す低被爆型試料架台の5枚の隔壁板のうち、1枚目、3枚目、5枚目の3枚の隔壁板に取り付けた。1枚の隔壁板あたりの試料数は9個である。同時に、重水なしの場合の照射束を調べるため、Auモニターによる照射フラックス量の測定も行った。Fig. 9にはAuモニターの設置位置も示してある。

得られたATE像を Fig. 10 に示す。このATE像は Fig. 9 の5枚目の隔壁板におけるATE像である。Fig. 10の写真番号と Fig. 9の番号が対応している。Fig. 4と7に比べて、遜色のないATE像が得られている。

Auモニターによる照射フラックス量の測定結果を Fig. 11 に示す。ビーム側からみて1枚目の隔壁板の熱中性子束が約  $2.4 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、3枚目が約  $2.0 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 、5枚目が約  $1.6 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}^{-1}$  である。すなわち、この低被爆型試料架台を用いた際の熱中性子束は、 $1.6 \sim 2.4 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}^{-1}$  の範囲内にあり、立教炉の熱中性子束  $1.5 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}^{-1}$  より大きい、その違いはわずかであることが分かった。12h照射の場合、全熱中性子束は Table 6 に示すように1枚目の隔壁板が  $10.4 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 、3枚目が  $8.6 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 、5枚目が  $6.9 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  となる。立教炉での全熱中性子束は  $6.5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  であったので、5枚目の隔壁板のポケットを用い12h照射を行えば、立教炉の照射条件とほぼ同じ全熱中性子束となることが明らかになった。

Table 6. Thermal neutron flux after 12 h irradiation using the specimen trestle of low radioactive exposure.

Irradiation position	Thermal neutron flux
1st plate	$2.4 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}^{-1}$
3rd plate	$2.0 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}^{-1}$
5th plate	$1.6 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}^{-1}$

#### 4. 結言

日本原子力研究所において、これまで立教大学原子炉で行われてきた便利さで、ATE法が利用できるシステムを立ち上げるための実験を行った。いくつかの変遷を経て、最終的に低被爆型試料架台を開発し、ほぼ目的を達成することができた。結果をまとめると以下ようになる。

(1) ATE用照射設備としては医療用照射設備が適していることが分かった。

(2) 新しく開発した低被爆型試料架台を用い12h照射を行うと、立教炉を用いた場合ないしピスマス遮へい体部に設置した試料架台を用いた場合に比べて、遜色のないATE像を得ることができた。また作業従事者が設定中に受ける中性子被爆量は、ピスマス遮へい体部に設置する試料架台を用いた場合に比べて、 $4 \mu\text{Sv/h}$  から  $0 \sim 1 \mu\text{Sv/h}$  に低減することができた。

(3) 低被爆型試料架台を用い12h照射した後の全熱中性子束を測定した結果、立教炉とほぼ同じ  $6.9 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  を得られることが分かった。

この研究の費用の一部は、日本鉄鋼協会「鋼中微量ボロンの挙動解明と利用促進研究会」における研究費によります。また、原研における中性子照射は、「原研施設利用総合共同研究」により行いました。研究当初、日本原子力研究所の衛藤基邦博士、鈴木富男氏から原研炉の利用に関する貴重なご意見を頂きました。

#### 文 献

- 1) K. Shibata: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, 6 (2001), 589.
- 2) K. Shibata: *Research Review on Boron in Steels and Targets for Next Century*, ISIJ, Tokyo, (1999), 187.
- 3) K. Asakura and K. Shibata: *Research Review on Boron in Steels and Targets for Next Century*, ISIJ, Tokyo, (1999), 175.