PNC TN941 80－55

高速炉燃料被覆管(316SS)の高温ナトリウム中での腐食挙動(Ⅳ)

ヒートの異なる管材の引張性質に及ぼす温度勾配下での5000時間浸漬の影響

１９８０年４月

動力炉・核燃料開発事業団

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

PNC TN941 80－55
1980年 4 月

高速炉燃料被覆管(316SS)の高温ナトリウム中での腐食挙動 (Ⅳ)

ヒートの異なる管材の引張性質に及ぼす温度勾配下での5000時間浸漬の影響

柚原俊一*，加納茂機*
中筋孝*

要旨

316SS燃料被覆管のナトリウム浸漬後の引張性質データを求めることが，燃料集合体の設計・製作及び健全性評価のための基礎資料として要請されている。

本報告では，連続的な温度勾配を有する材料試験ループ1のM－2試験部に外国製316SS 被覆管4種を含む13種のヒートの「もんじゅ」及び「常陽」用の316SS 試作燃料被覆管を約5000時間浸漬し，これらの被覆管の引張性質に及ぼす浸漬温度の影響を調べた。

得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 未浸漬の受け入れ被覆管とナトリウム浸漬後の被覆管の引張特性を比較すると，400℃から650℃での温度範囲でのナトリウム浸漬により，耐力及び引張強さは低下し，伸びは増加した。浸漬前後の引張性質の変化の度合は，浸漬温度により異り，500℃で最も大きかった。

(2) 結晶粒度及び冷間加工度が引張性質の引張試験温度依存性に及ぼす影響は，受け入れ被覆管の場合と比較して，ナトリウム浸漬によっても傾向的には変らない。また微量ホウ素成分はナトリウム浸漬前後の引張性質の変化量を少なくすること，すなわち安定性に寄与していることが考えられる。

(3) 「もんじゅ」製作準備設計(Ⅱ)で燃料集合体の設計にさいして適用されたSy(耐力)，Su(引張強さ)値とナトリウム浸漬後の「もんじゅ」用試作被覆管の引張強度データを比較すると，浸漬後の被覆管の耐力及び引張強さはSUS316焼鈍材のSy，Su値よりは上まわるが，SUS316 20％冷間加工材のSy，Su値よりは下まわる。従って時間に依存しない設計応力強さSmについても同様なことが云える。

(4) 500℃以上の温度でナトリウムに浸漬された被覆管は，浸漬後の引張により浸漬表層部で浅い粒界割れが生ずるが，この表層粒界割れは粒界腐食変質層を越えては進展しないものと考えられる。

大洗工学センター・ナトリウム技術部・ナトリウム技術開発室

PNC TN941 80－55
Apr., 1980

Corrosion Behavior of the Cladding Tubes (316SS) for FBR in High Temperature Sodium (IV)

Effect of Sodium Exposure for 5000 Hours under a Temperature Gradient on Tensile Properties of Various Heats of Fuel Cladding Tubes

Shunichi Yuhara*, Shigeki Kano*,
and Takashi Nakasuji*

Abstract

As the basis for designing and manufacturing the fuel assembly for MONJU, and for confirming its integrity, it has been required to get the data concerning tensile properties of various heats of fuel cladding tubes exposed to different sodium environments.

In this report, thirteen heats of fuel cladding tubes containing four kinds of ones manufactured in a few foreign countries were examined. These tubes were exposed to sodium at the linear temperature gradient test section of the Material Test Sodium Loop 1 for about 5000 hours. After that, tension tests of these tubes were made to clarity effects of sodium exposure on these tensile properties. Furthermore, additional tests related to these tensile properties were done.

The results obtained are as follows.

(1) From comparison of tensile properties before and after sodium exposure of these tubes, yield strength and tensile strength decreased after exposure, and fracture elongation increased. The variation amount of the values on tensile properties depended on exposure temperatures, and it was largest in the case of 500°C.

* Sodium Technology Section, Sodium Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.

(2) The effects of cold-working and grain size on tensile test temperature dependence of tensile properties after exposure to flowing sodium up to 650°C were similar to those before exposure in tendency. In respect to the effect of chemical composition, it is considered that minor boron content contributes to enhance the stability of tensile properties for sodium exposure.

(3) From comparison of the tensile strength values (yield strength Sy, tensile strength Su) applied for designing the Monju fuel assembly with the present test results after sodium exposure, the experimental values were higher than those of Sy and Su of annealed SUS316, but lower than those of Sy and Su of 20% cold-worked SUS316.

(4) After tension test of sodium exposed tubes within the temperatures of 500°C to 650°C, many grain boundary cracks in slight depth were found out in the sodium exposed surface layer. It is considered that these cracks do not propagate toward the tube inside over the surface layer degraded in the vicinity of grain boundary.

目　　次

Figure List

Table List

1　緒　　言

高速実験炉「常陽」では，316ステンレス鋼燃料被覆管（以下，被覆管或いは管と略称）が実用下[1),2)]にあり，高速原型炉「もんじゅ」においても同鋼種の被覆管の使用が予定され，燃料集合体の設計が進められている[例えば3)]。「常陽」，「もんじゅ」用被覆管の試作，開発は，それぞれ昭和43年，45年から開始され，それ以後各年度毎の試作が継続されてきた。

試作された被覆管の一部は，種々のナトリウム中挙動試験に供されてきた[例えば4)~7)]。これらのナトリウム中試験研究の一環として実機条件と近接した連続的な温度勾配を有する流動ナトリウム試験部での腐食挙動の温度依存性が前報[8)]で明らかにされている。さらに，この連続的な温度勾配下で浸漬された被覆管の引張特性データを求め，引張特性に及ぼすナトリウム腐食の影響を明らかにすることが次の観点から要請されている。まづ(1)，燃料集合体の設計の基礎資料，ナトリウム環境の影響を考慮した設計応力強さ（Smt）を決定するためには，実機条件と近接した，ナトリウム環境中での引張特性データとナトリウム環境中内圧クリープデータの収集が必要とされる。しかしながら，海外でも被覆管の腐食挙動の温度勾配依存性が実験的に明らかにされてきている[9),10)]が，温度勾配を有する試験部での浸漬による影響を調べた被覆管引張特性データは，殆んどみられない。次に(2)被覆管の化学成分，最終冷間加工度，結晶粒度等の製造因子を決定するにさいしてナトリウム環境との適合性の立場からこれらの因子の有効性の評価も必要とされる。現在まで，「常陽」及び「もんじゅ」用として，約20種類のヒートの燃料被覆管が，それぞれ，高温強度の改善，耐スエリング性の向上等を目指して，改良が加えられ試作が継続されてきている。これらの被覆管の化学成分，金属組織，冷間加工等の製造因子とナトリウム環境下での適合性の関係を調べ，そのデータを今後の被覆管開発にフィード・バックさせる必要がある。そのため，ナトリウムとの適合性を代表する機械的性質としては引張性質をまづ第一に挙げ，ナトリウム浸漬した被覆管の引張性質の材質依存性を評価の対象とすることは妥当であろう。

以上の観点から，本研究では，実機温度条件範囲に近い400℃から650℃までの連続的温度勾配を有する流動ナトリウム試験部に，これまで試作された「もんじゅ」用被覆管9種を主とする材質調整の異なる16種類の被覆管（ヒートとして異なるものは13種類である）を5401時間浸漬し，浸漬後空気中において引張試験を種々の試験温度で実施し，引張性質データを得ると共に引張性質の変化に及ぼす材質，浸漬温度，腐食の影響について実験的検討を行なった。

2　供試被覆管，試験装置及び試験方法

2.1　供試被覆管

ナトリウム中試験に使用した被覆管の材質はSUS316或いはAISI－Type 316SS成分規格内のオーステナイト・ステンレス鋼である。今回の試験に選ばれた被覆管は，それぞれ材質調整の異なる16種類である。これらの16種類の被覆管のうちでヒートとして異なるものは13種類である。用途別には，「もんじゅ」R＆D試作被覆管（以下「もんじゅ」被覆管と略称）が9種類の外国製被覆管が含まれる[註2.1]，「常陽」MK－1炉心用R＆D試作被覆管（外国製被覆管，以下「常陽」MK－I 被覆管と略称[註2.2]）が1種類，「常陽」MK－I炉心用実用被覆管（「常陽」MK－I実用被覆管と略称）が3種類，「常陽」MK－II炉心用R＆D試作被覆管（「常陽」MK－II 被覆管と略称）が3種類である。ナトリウム浸漬後の被覆管材と比較するための熱履歴被覆管材も，同種類のものが用いられた[註2.3]。その他に，熱履歴のみを与えるために，「常陽」MK－I炉心用R＆D試作被覆管が2種類付加[註2.4]されている。

Table 1に供試被覆管の種類，製造条件及び材料特質などが記されている。Table 2, 3に供試被覆管の化学成分を示す。以下に材料特質及び化学成分特徴を示す。

(i)　冷間加工度「もんじゅ」被覆管及び「常陽」MK－II被覆管では，すべて～20％であり，「常陽」MK－I被覆管及び同実用被覆管では～10％である。

(ii)　結晶粒度　ASTM No. 7.0から9.9迄の大きさのものが含まれる。「もんじゅ」被覆管では7種類迄がASTM No. 7.0～7.5である。

(iii)　寸法　「もんじゅ」被覆管で外径6.50㎜，内径5.60㎜（肉厚0.45㎜），「常陽」MK－I被覆管及び同実用被覆管で外径6.30㎜，内径5.60㎜（肉厚0.35㎜），「常陽」MK－II被覆管で外径5.50㎜，内径4.80㎜（肉厚0.35㎜）である。

(iv)　溶体化熱処理　水素雰囲気中で光輝焼鈍がなされ，熱処理後，炭化物の生成が認められない温度条件に設定されている。「もんじゅ」被覆管の場合では49－GSL及び49－GSM[註2.5]管を除いてほぼ1000℃で溶体化処理がなされている。

(v)　規定化学成分

「常陽」MK－I被覆管迄の仕様では，JIS及びAISIの規格成分の他に，プラントとし

註2.1）これらの外国製被覆管とは，米国Carpenter Technology社，英国Fine Tubes社及び仏国Vallourec社で製作された3種である。

註2.2）米国カーペンター社製の被覆管である。

註2.3）本報告では，熱履歴被覆管材の試験結果は含まれていない。

註2.4）この2種類の被覆管は前報[8]での供試被覆管の1部である。

註2.5）供試燃料被覆管それぞれの略称についてはTable 1に示す。

ての放射能レベルを抑えると云う観点からCo量，材料の放射線損傷による劣化を抑えると云う観点からはB，Nの量を製作仕様で規定した。さらに「もんじゅ」48年度試作被覆管では，Co，B，Nに加えて不純物として量を抑えると云う観点からCu量を，「もんじゅ」49年度試作被覆管及び「常陽」MK－Ⅱ被覆管では，Al，As，Nb＋Ta，Ti，Vを規制成分として追加した。Al，Asは不純物としての量を低減するためであり，Nb＋Ta，Ti，Vは，316規格成分内で，耐スエリング性及び高温強度を高めるため，不純物としての上限量を規定したものである。また，Si及びPについて，従来規格にはない下限量を規定し，Ni成分の下限量を高くしているのも，耐スエリング性及び高温強度の保持と云う観点からなされたものである。

(V) 化学成分量の比較

(イ) 炭素成分

「もんじゅ」被覆管の中では仏国Vallourec社のもの（以下48Vと略称）が0.035～0.036％と低いが，K社の49GSL（結晶粒度がASTM№8.0～8.3）及び49GSM(結晶粒度がASTM№9.0）管では0.054～0.058％でやや高い。残りの被覆管では0.04～0.05w/oの範囲内にある。「常陽」MK－I被覆管では成分仕様上限が0.08w/o(「もんじゅ」及び「常陽」MK－Ⅱ被覆管では0.064w/o）とやや高かったため，被覆管の実成分値も，平均して高目である。

(ロ) Si，Mn

殆んど成分量の差はない。

(ハ) P，S，Ni，Cr，Mo

P量については，米国Carpenter Technology社の48CT管（以下48CTと略称）とK社の49GSM管が0.004～0.005w/oと比較的低い値となっており，Mo量については，48V管が2.09～2.12w/oと低い。S，Ni，Cr量については，著しい差はみられないが，Ni量については，規格上限の13～14w/oの範囲内に15種類の管が入っている。

(ニ) N，B

Bについては，S社の49HB（High Boronの略称）管が0.0010w/o，英国Fine Tubes社の48FT管（以下48FTと略称）0.0016w/oと比較的高い成分量に調整されており，S社の49LB(Low Boronの略称）管，同じくS社の48HN(High Nitrogenの略称）管及び48LN（Low Nitrogenの略称）等では0.0001w/oと低く抑えられている。Nについては，48HN管が0.012w/o，48FT管が0.027w/o，48V管が0.021w/o，JI44S管が0.027w/o，JI48S管が0.012w/o，JI46S管が0.027w/oと比較的高い成分量となっており，49GSM管，48CT管では0.005w/o以下の低い値である。

(ホ) Co

48V管が0.24w/oと成分量としては，最も高い。

(ヘ) Al，As，Cu

これらの不純物の総量としての値が，比較的高い0.1w/o以上のものが48HN管，48LN管，JI46S管，JI48S管で，比較的低い 0.05w/o以下のものが48FT管，49GSL管，49GSM管，49HB管，JⅡ49GSL管，JⅡ49GSM管，JI46CT管，JI46K管である。

(ト) Nb+Ta，Ti，V

Ti量を比較的多く0.02w/o以上含んでいるのは，48V管，49GSM管，JⅡ49GSM管，JI44K管である。

また，Nb+Ta，Ti，Vを総量として比較的多く0.03％以上含んでいるのが，48V管，49GSL管及び49GSM管である。

2.2 試験片形状

ナトリウム浸漬に用いた試験片形状をFig.1～3に示す。Fig.1のタイプA試験片は質量移行及び腐食試験用で，Fig.2のタイプB試験片は材料強度試験用，Fig.3のタイプC試験片は熱履歴効果試験用である。B，C両タイプの試験片には，Heガスが封入され，両端部はプラグ溶接構造である。タイプA試験片では50㎜毎に輪切りにされた短管試験片が36個Support用の中子に組み込まれている。これらの試験片は，すべて縦置きの状態でナトリウム履歴あるいは熱履歴試験がなされた。Fig.4に試験部の縦方向断面図を示す。

Fig.1～3の形状の長尺被覆管はすべてFig.4に示す浸漬試験部に組み込まれた。この円筒型試験部の外壁にシーズ型ヒータが長手方向に密着固定され，試験部に一定の温度勾配を与えることができる。熱履歴試験片はHeガスを密封した試験部内筒（Inner Tube）内にセットされた。試験部の径方向断面形状と試験片配置をFig.5に示す。

2.3 試験装置（ナトリウム・ループ）

使用した試験装置は，材料試験ループ1に付設された燃料被覆管質量移行試験用のM－2ドータループである。材料ループ1はFig.6のフローシート[註2.6]に示すように，コールド・トラップ及びプラグ計ラインを含む純化系ライン，質量移行試験部（M1～M4），引張クリープ試験部（TC1～TC3），内圧クリープ試験部（IC1～IC3）の各試験部等から構成されている。Fig.7に示すよ

註2.6） 質量移行試験部M1は，長時間使用（31800hr）後の材料特性を調べるため，昭和54年1月に徹去され，材料試験等に供された。

うに質量移行試験用ドータ・ループM2は，ACファラディ・タイプの電磁ポンプ，電磁流量計，縦置円筒型加熱の温度勾配試験部，等温試験部，空冷ファン冷却器等から構成されている。このドータ・ループの仕様最高温度は650℃で，ナトリウム流量は，5ℓ/min，ナトリウムが接触する機器・配管類はすべてSUS316材で構成されているモノメタリック・ループである。

2.4 ナトリウム浸漬試験条件

Table4にナトリウム浸漬試験条件を示す。試験部のナトリウム純度は，マザーループのコールド・トラップ温度を190℃[註2.7]に保持し，純化されたナトリウムを0.5ℓ/minの割合でマザーループからM2ドータ・ループに供給することによって一定に保たれた。試験部での平均入口温度は401℃平均出口温度は647℃であった。Fig.8に試験部の温度プロファイルと試験片装荷位置（図中のタイプBのTest piece中の番号は浸漬試験後に採取された引張試験片番号に対応する）との関係を示す。試験片装荷位置に対する温度勾配は，ナトリウムの流れ方向に直線的に増加する。浸漬時間は5401時間である。運転経過は参考資料としてAppendixに示す。

2.5 浸漬後試験方法

ナトリウム中での腐食（質量移行）が機械的性質に及ぼす影響を明らかにするために行なった引張試験と関連の解析試験の方法を以下に示す。なお，ナトリウム浸漬後試験片の洗浄は前報と同様に，最終的にはエチル・アルコール中で超音波洗浄後，熱風乾燥し，真空中に保管した。

(i) 引張試験

被覆管引張試験片はFig.2に示すタイプB試験片から，全長100mmの長さに切断したものを用いた。Fig.9に示すように，試験片の両端にSUS304の中子を差し込み，スエージ・ロックで中子と被覆管両端部を固定した後，スエージ・ロック部分を把み部として引張試験チャックにセットし，引張試験を行なった。スエージ・ロック取付後の拘束されない試験片平行部の長さは70mmである。この試験片平行部の中央部50mmを標点間間隔としてマーキングを行なった。標点間距離の測定はかたさ計付属のマイクロ・メータで行なった。また試験片の原断面積は，試験片平行部3箇所の2方向での外径をマイクロ・メータで測定し，その平均値と管の公称肉厚より算出した。

引張試験にはインストロン・フローア型TT試験機（最高荷重容量10トン）を用いて電気炉中で行なった。試験片の荷重－伸びの関係は，記録計に荷重－伸び線図として記録させた。引張速度は0.2％オフセット耐力を求めるための低速域では，0.29％/min（歪み速度）で行ない，

註2.7）ナトリウム中酸素濃度はコールド・トラップ温度によって定まるが，コールド・トラップ温度190℃での酸素溶解度はEichelberger（AI－AEC－12685, 1968）によると9ppmである。

それ以後の高速域では，7.14％／minに設定した。試験片温度は，所定温度に到達してから約15分保持し，そのあと引張試験がなされた。試験方法及び引張性質のデータの求め方はJIS G 0567，JIS Z 2241に準拠している。

(ii) 関連解析試験

(イ) C，N，B，O分析

C分析：JIS G 1211の鉄及び鋼中の炭素定量方法に準じ，クーロマチックC，VK－IC型（国際電気製）を用いた。

N分析：燃焼法により，LECO社製のTC－30型，或いはTN14型を用いて行なった。

O分析：燃焼法により，LECO社製のTC－30型を用いて行なった。

B分析：メチレン青抽出吸光光度法により，浸漬前後の被覆管試験片から1試料として0.5gづつ採取し，鋼中のほう素成分の定量を行なった。定量分析方法はJIS G 1227－1969に準拠して行なった。分析精度は±1ppm以下である。

(ロ) 引張破断後の走査型電顕観察

破断後試験片の観察にはJSM2型走査電子顕微鏡を用いた。観察個所は，引張破断面及び破断部から約15mm離れた一様伸び変形部で，撮影倍率は300倍と1000倍に設定した。

(ハ) 金相試験

引張破断後の試験片の長手断面方向について，破断部及び一様伸び変形部を，ナトリウム浸漬表面に注目して100倍と400倍とで観察した。観察には，BHM－313型システム金属顕微鏡（オリンパス光学製）を使用した。

3 試験結果

3.1 受け入れ被覆管の引張性質

浸漬前の受入れ被覆管（以下，未浸漬被覆管とも称する）の代表的な荷重－伸び曲線をFig. 10に示す。これから，高温になるにつれて，引張強さのレベルは低下するが，破断伸びは500℃以上の高温では温度と共に増加する。一様伸びについては，500℃から650℃の温度範囲における破断伸び程の顕著な変化の傾向はみられない。また，温度が高くなるにつれて，みかけ上の最大引張強さに到達してから破断に至る迄の伸びが増加し，600℃での荷重－伸び曲線には，断続的な伸び変化によるserrationがみられる。これらの荷重－伸び曲線を整理して得られた引張性質データ[註3.1)]を浸漬後のデータと共にFig. 11～12に示す。これらの各管材の共通の結果を以下に要約する。

(1) 引張強さ。温度と共に低下し，且つ温度に対する低下の割合（温度の増分△Tに対する引張強さの減少分を△σとしたときのそれらの比△σ/△T）は高温ほど著しくなる。

(2) 0.2％オフセット耐力（以下，耐力とする）。温度依存性の傾向は引張強さと同様であるが，500℃ないしは600℃までの低下の傾向は比較的ゆるやかであるが，600℃以上で低下の割合が顕著になる。

(3) 伸び。破断伸びは実施した温度範囲では下に凸になり，最小の破断伸びは400℃ないしは500℃で得られ，さらに高い温度領域では，温度の増加と共に増加する。一様伸びは特に低い値を示したFine Tubes社の48FT管を除いては，約5％以上の値が得られた。400℃～500℃の温度範囲では，破断伸びと一様伸びの差は，平均して約1％であり僅かであるが，500℃以上の温度ではその差は温度と共に著しく増加する。

(4) 破断試験片外観。Fig. 13に引張破断後の代表的試験片外観を示す。(3)の破断伸びに対応する伸び変形がみられ，また高温での試験片では破断部近傍でのくびれが観察される。

3.2 浸漬後の被覆管の引張性質

浸漬後の被覆管（以下浸漬被覆管とも称する）の代表的な荷重－伸び曲線をFig. 14に示す。この図から，受け入れ管の場合と同様に，引張り強さレベルは，温度の増加と共に低下する。耐力の温度依存性をみると，400℃から500℃にかけての低下が顕著である。耐力点からの加工硬化量は温度の増加と共に少なくなる。破断伸びは500℃で，極大もしくは最大の値を示す。一様伸びもその傾向は同様である。Fig. 11～12に示す引張性質の温度依存性曲線から得られる各管材の共通の結果を以下に示す。

(1) 引張強さ。温度上昇に対する引張強さの低下の割合は400℃から500℃にかけて著しく，

註3.1） Appendix（参考資料）に得られた引張性質の値を一覧表にして示す。

500℃以上の温度では，ゆるやかである。

(2) 0.2%オフセット耐力。

引張強さと同様な温度依存性の傾向を示すが，500℃での低下量は顕著であり，「もんじゅ」用の49HB管及び同49GSL管を除いて，極小もしくは最小の値を示す。

(3) 伸び。破断伸びは，大部分が耐力とは逆の温度依存性の傾向を示す。一様伸びは，600℃までの温度範囲では，破断伸びと同様な傾向を示すが，650℃では逆の温度依存性の傾向を示す。すなわち，破断伸びは温度の増加と共に増加する傾向にあるが一様伸びでは逆に低下の傾向にあり，破断伸びと一様伸びとの差は最も大きくなる。

(4) 破断試験片外観。Fig. 15に引張破断後の代表的試験片外観を示す。受け入れ管の場合と同様な所見が得られる。

3.3 被覆管の引張試験後の金属組織

浸漬前の受け入れ被覆管の引張試験後の金属組織をFig. 16～Fig. 18に，浸漬した被覆管の引張試験後の金属組織をFig. 19～Fig. 23に示す，これらの図から以下のことがわかる。(1)引張破断部を観察すると，受け入れ及び浸漬管とも，カップ・アンド・コーン型の延性破壊形態を示し，粒内破壊である。(2)500℃以上の温度でのナトリウム浸漬管は，引張りにより浅い粒界割れが生じ，この粒界割れの深さは，浸漬温度が高くなるにつれて深くなる。ナトリウムに接触しない面では，このような粒界割れはみられない。(3)ナトリウム浸漬管では，600℃以上或いは650℃での浸漬によりシグマ相が析出し，その分布量，大きさは管により異なる。このシグマ相と浸漬表層部での浅い粒界割れとの関連は特にみとめられない。

3.4 被覆管の引張試験後の浸漬表面

ナトリウム浸漬した被覆管の引張試験後の浸漬表面の代表的形態をFig. 24及びFig. 25に示す。これらの図に示すように，高温で浸漬された被覆管では，表層粒界き裂が，管長手方向（引張方向）に直角に，浸漬表面全面にわたって観察された。これらの，粒界き裂の浸漬温度依存性の傾向は，Fig. 19～Fig. 23の浸漬被覆管長手断面の金属組織写真の結果と対応している。なお，引張試験前の浸漬後の被覆管の浸漬表面では高温側では暗緑色を呈し，低温側では薄い灰黒色であった。目視及び光学顕微鏡による観察では浸漬表面での顕著な腐食はみとめられず健全な表面状態であった。

3.5 浸漬被覆管の化学成分

「もんじゅ」用の代表的被覆管について，材料の機械的性質に対して寄与度が高い考えられる炭素，窒素，ホウ素の侵入型元素，ナトリウム中で比較的溶出しやすいと考えられているP及びMnの置換型元素について化学分析を実施した。また，Pは高温での冷間加工材のクリープ破断強度に

対する効果が著しいと云われている。分析結果をTable 5及び6に示す。

炭素及びホウ素については，バルク化学分析の結果からは明確な傾向は把握できなかった。窒素については，500℃から600℃の浸漬温度で，窒化による極大が生じている。P及びMn成分はほぼ600℃以上の浸漬温度で僅かに成分量が低下する傾向が観察される。

4　検　　討

4.1　被覆管の引張性質に及ぼす種々の材料因子の影響

冷間加工度，結晶粒度及び化学成分の影響について，検討する。

(1)　冷間加工度

Fig. 26～Fig. 28 に供試被覆管の引張性質の冷間加工度依存性を示す。冷間加工度～10％のデータは「常陽」MK－I 被覆管（4種）であり，冷間加工度～20％のデータは「もんじゅ」被覆管9種である。

ナトリウム浸漬前の受け入れ被覆管及びナトリウム浸漬後の被覆管に共通して云えることは，冷間加工度が高くなると耐力及び引張強さが増加し，破断伸びは低下することである。これは太田[11]らの室温及び650℃での引張特性の冷間加工度依存性と一致している。さらに，耐力及び引張強さの冷間加工度依存性については，650℃と400℃の試験条件で比較すると，高温側よりも低温側でより強く表われている。

これらのナトリウム浸漬被覆管と未浸漬被覆管の耐力及び引張強さの冷間加工度依存性を比較すると，未浸漬被覆管においてより強く表われており，云い替えると浸漬被覆管では冷間加工度の増加に対して，耐力及び引張り強さの増加量は比較的少ない。このことは，ナトリウム浸漬履歴を付加することによって，未浸漬被覆管に対する相対的な強度低下が，20％冷間加工被覆管でより顕著に表われていることを意味する。

(2)　結晶粒度

Fig. 29～Fig. 31 に「もんじゅ」用の供試被覆管9種の引張性質の結晶粒度依存性を示す。引張り強さ及び耐力は，未浸漬，浸漬の両者の被覆管とも，結晶粒度番号が大きくなるにつれて，即ち結晶粒径が小さくなるにつれて増加する傾向を示す。しかし，500℃浸漬の被覆管の場合は，データの変化巾が大きいため，耐力及び引張強さの結晶粒度依存性の傾向は明りょうではない。破断伸びの結晶粒度依存性については，未浸漬被覆管の場合，耐力及び引張強さの傾向とは逆に結晶粒度番号と共に低下する傾向にあるが，浸漬被覆管の傾向は明確ではない。

未浸漬被覆管についての結晶粒度依存性の傾向は従来データ[12]の傾向と類似なものである。

(3)　化学成分の影響

窒素　Fig. 32 に主として窒素成分のみが118wppm，76wppmと異なる2種の「もんじゅ」用被覆管（48HN及び48LN）の浸漬前後の引張性質データを窒素成分の関数として表わす。未浸漬被覆管では，窒素成分量が多い方で，1～2kg/mm²の耐力及び引張強さが高く，破断伸びは1～2％低い[註4.1]。B. Eremias[13]らの溶体化処理した316タイプ・ステンレス鋼の引

註4.1）ミルシートによると受入被覆管の室温での引張性質は窒素成分量が多い方で1～3kg/mm²の耐力及び引張強さが高く，破断伸びは1～3％低い。

張性質に及ぼす窒素成分依存性の研究では，100wppm（0.01w/o）あたりの窒素成分の減少に対して700℃での0.2％耐力は約1kg/mm²低下し，破断伸びは約2％の割合で低下している。窒素の固溶強化は粒界よりも素地をより強化していると考えられることから，窒素の固溶強化は粒界すべり抵抗の寄与の度合が低く粒内強度が支配的である低温側ではより著しく表われると考えられる。また，溶体化処理材よりも20％冷間加工材に於て，窒素の固溶強化は，転位等の格子欠陥と窒素との相互作用を考慮するとより著しく表われるものと考えられることから，この2種の窒素成分の異る未浸漬被覆管での高温強度及び伸びの差は，窒素成分の差に起因していることが推定される。

ナトリウム浸漬によりこの2種の被覆管は浸窒し，ことに500℃及び600℃の浸漬では，HN管で浸漬前の窒素成分量118wppmからそれぞれ～400wppm，～300wppmに増加している。しかし，600℃及び650℃の引張性質データから，浸漬後の48HN管の引張性質の値は窒素成分量の増加が僅かである浸漬後の48LN管の引張性質値と比較して殆んど差がみられないと判断される。これは浸窒の影響が素地の固溶強化として表われてこないことと熱履歴による鋼中での格子欠陥等の減少による軟化，窒化物の析出による固溶窒素の減少が考えられる。浸窒による窒素成分増加は主として浸漬表面での結晶粒界近傍に限られている可能性も推定される。

ホウ素　Fig. 33に主としてホウ素成分のみが1，10，16wppmと異る3種の「もんじゅ」用被覆管（49LB，49HB，48FT）の引張性質データをホウ素成分の関数として示す。みかけ上，浸漬前の被覆管では，耐力及び引張強さとも，ホウ素成分が増加するにつれて低下する傾向にあるが，阿部ら[14]の研究と比較してほう素成分量の差は僅かであるため，これは他の原因によるものと思われる。阿部らは，0.047w/oのホウ素添加により溶体化処理18Cr-12CNi-3Mo-0.2C系材では高温引張強さを高めるためのホウ素添加の効果は全くみとめられず，逆に低下することを観察している。

Fig. 34に上記3種の被覆管のナトリウム浸漬後の引張性質の変化分をホウ素成分量の関数として示す。この図から，高温側ではホウ素成分量が高くなるにつれて，耐力，引張強さ，破断伸びの変化分が小さくなる傾向を示す。これは，ホウ素成分の増加と共に組織変化が抑制されることや結晶粒界強度が保持されることによるものと考えられる。

その他の化学成分　本試験の結果からは引張性質に及ぼす影響は明確ではない。

4.2　被覆管のナトリウム腐食に及ぼす温度勾配の影響

Fig. 35にナトリウム浸漬温度の関数としての代表的な「もんじゅ」用被覆管の窒素成分量の変化を示す。500℃から600℃の温度範囲の所に浸窒量のピークがある。また650℃から700℃の温度範囲の所に浸窒から脱窒へ変る境界温度が存在することがうかがえる。この窒素の挙動に関する境界温度については前報で知見を得ている[8]。これらの浸窒量の温度依存性曲線はナトリウム中と供試被覆管鋼中の窒素の活動度の差及び鋼中での窒素の拡散係数等に依存するものと考えられ，

温度勾配下のナトリウムに浸漬される燃料被覆管の化学成分変化の典型的なパターンを示すものとみられる。

Fig. 36 にナトリウム浸漬温度の関数としての，高温引張試験後に被覆管試験片浸漬表面で観察される粒界き裂の最大深さをアレニウス・プロットしたものである。プロット点の変化巾は，「もんじゅ」用5種の被覆管の最大き裂深さのデータのひろがり範囲を示す。650℃及び600℃では他の4種の「もんじゅ」被覆管についても，最大き裂深さは図のデータ範囲内にあった。この図から，ナトリウム浸漬により，生じた粒界強度劣化層の深さと浸漬温度の関係はアレニウス・プロットするとほぼ直線関係にあることがわかる。「もんじゅ」被覆管の設計条件である被覆管最高温度675℃，炉内滞留時間17760時間での粒界強度劣化層の深さを，この劣化層の生成は単純な拡散過程にのみ律速されるものとして試算[註4.2)]すると62μmとなる。これは「もんじゅ」被覆管厚さの14％に相当する。今後，より長時間の試験により，この生成される粒界劣化層の深さについては確認する必要がある。

ナトリウム中酸素濃度約10ppmの650℃での浸漬により，浸漬表層部での結晶粒界ではNiとCrの選択的溶出により，粒界近傍でのNiとCrのDepletionとFeのLeachingが生じることが知られている[4)]。前報での生成された粒界変質層の厚さは約20～30μm（ナトリウム中酸素濃度約10ppmの650℃での1000時間浸漬）であったことから，今回の5000時間浸漬により生成された粒界変質層の厚さはより大きいことが考えられるが，粒界割れの最大深さは，「もんじゅ」9種管の平均値で25μmである。このことから浸漬表層での粒界割れは粒界腐食変質層を越えては進展しないものと判断される。素地の結合力よりも粒界の結合力が弱化しているのは，粒界近傍におけるこれらのNiとCrのDepletionとFeのLeachingの度合に依存するものと考えられる。また，この選択的溶出挙動はナトリウム中酸素濃度の影響を受け，酸素濃度が低い場合は，Ni成分に対してのCr成分の相対的な溶出量は低下する傾向にあると考えられる。これらの粒界部でのNiとCrの選択的溶質挙動と粒界結合との関係は，今後明らかにされるべき課題の一つである。

金属組織の安定性の浸漬温度依存性について，特にシグマ相生成量の程度，析出物の状況及び上記の粒界劣化層生成深さから判断すると以下の通りである。「もんじゅ」用9種の被覆管のうちで，高温での金属組織安定性がすぐれているのは，49GSL管，48FT管であり，比較的劣っていたのは49LB管，49GSM管，48CT管である。Na中での腐食の金属組織に及ぼす影響，ことにシグマ相の生成及び析出物挙動に及ぼす影響については1部の供試管浸漬表層部でσ相の生成が多

註4.2） Fig. 36 と粒界劣化層の生成は単純な拡散過程にのみ律速されると云う仮定から，この劣化層厚さをLとすると次式で表わされる。ここで，Ao，Bは被覆管鋼中の元素の拡散係

$$L = Ao\ e^{-\frac{B}{RT}}$$

数，初期元素濃度などによって定まる定数，Rはガス定数，Tは絶対温度，tは時間である。

いと見受けられるものもあるが，今回結果からは明確ではない。

4.3　被覆管の引張性質に関する設計値と試験データとの比較

「もんじゅ」燃料集合体設計にさいして適用されたSy（耐力），Su（引張強さ），Sm（時間に依存しない設計応力強さ）値[3)]と得られた引張強度データをFig. 37に示す。9種の「もんじゅ」受け入れ被覆管で，20％冷間加工材のSy値を下まわる耐力を示したのはVallourec社の48V管1種で，同Su値を下まわる引張強さを示したのはこの48V管及びFine Tubes社の48FT管の2種で，国産被覆管6種は20％冷間加工材のSy，Su値よりもそれぞれ高い値を示した。9種の「もんじゅ」浸漬被覆管で，耐力及び引張強さの両者のデータとも，20％冷間加工材のSy，Su値をそれぞれ上まわったのは，650℃温度条件でのH管のみであり，残りの8種の被覆管の引張強度値は図に示すように，焼鈍材のSy，Su値と20％冷間加工材のSy，Su値との中間の値を示した。

得られた引張強度データから次式により「もんじゅ」用の浸漬前の受け入れ被覆管と浸漬被覆管のSm値を次式により求めた。

$$Sm = Min\left\{\frac{1}{2.5}\sigma_u(T),\ 0.9\sigma_y(T)\right\}$$ 註4.3）

ここで

$\sigma_u(T)$：温度T（℃）における9種の「もんじゅ」被覆管の引張強さの最小値

$\sigma_y(T)$：温度T（℃）における9種の「もんじゅ」被覆管の耐力の最小値

Sm値をきめる支配的なクライテリオンは，$1/2.5\ \sigma_u(T)$であったが，浸漬被覆管の500℃温度条件でのみ$0.9\ \sigma_y(T)$が支配的なクライテリオンとなった。本試験での引張データから得られたSm曲線と20％冷間加工材の設計Sm曲線とを比較すると，Fig37に示すように，受け入れ被覆管では，設計Sm曲線を僅かに下まわり，ナトリウム浸漬被覆管では，受け入れ被覆管のSm曲線の下側にきており，特に500℃での低下が著しい。一方，焼鈍材の設計Sm曲線と比較

註4.3）　Sm値を通常求める場合，以下の式が採用されている。

$$Sm = Min\left\{\frac{1}{2.5}\sigma_u(T),\ 0.9\sigma_y(T),\ \frac{2}{3}\cdot S_y(R.T)\right\}$$

ここで，

$\frac{2}{3}\ S_y(R,T)$は室温における耐力の最小値

最小値としては，$\sigma_u(T)$及び$\sigma_y(T)$の場合も，統計処理により，95％信頼下限値が採られる。本試験の場合では浸漬前の受け入れ被覆管について，ミルシートからの耐力データにより，検討した限りでは，$\frac{2}{3}S_y(R.T)$は支配的なクライテリオンとはならなかった。

すると，本試験での引張データから得られた浸漬被覆管のＳｍ値は，設計Ｓｍ曲線を上まわり，２０％冷間加工材と焼鈍材の両者の設計Ｓｍ曲線の中間の領域を占める。

4.4 被覆管の引張特性の比較と総括

(1) 浸漬前後の被覆管の引張性質の比較

９種の「もんじゅ」被覆管及び４種の「常陽」ＭＫ－１被覆管のナトリウム浸漬前後の引張性質の変化量を浸漬温度（引張試験温度）の関数としてFig. 38. 39に示す。

(i) 引張強さ

「もんじゅ」被覆管（９種）及び「常陽」ＭＫＩ被覆管（４種）とも浸漬により引張強さは低下した。５００℃で最も大きく低下し，平均の低下量は「もんじゅ」被覆管17.1 kg/mm²「常陽」ＭＫＩ被覆管で9.7kg/mm²，６５０℃では最も小さくその平均の低下量はこれらの「もんじゅ」被覆管で6.4kg/mm²，「常陽」ＭＫ－Ｉ被覆管で4.6kg/mm²である。「もんじゅ」被覆管の中では，浸漬前後とも４９GMS管が最も高い引張強さを示したが，浸漬による低下量も４００℃～６５０℃の浸漬温度範囲で最も大きい。「常陽」ＭＫ－Ｉ被覆管では冷間加工度が約１０％と「もんじゅ」被覆管の冷間加工度２０％よりも低いため，未浸漬「常陽」ＭＫ－Ｉ被覆管の引張強さは未浸漬「もんじゅ」被覆管のそれよりも低い。しかし，「もんじゅ」被覆管の場合と比較して，「常陽」ＭＫ－Ｉ被覆管の浸漬による引張強さの低下量は，浸漬温度範囲を通して少ない。外国製被覆管と国産被覆管を比較すると傾向としての特徴的な差はみあたらないが，４８FT管及び４８Ｖ管の低下量は最も少なく安定した引張強さを示す。

(ii) 耐　　力

引張強さと同様に，「もんじゅ」被覆管（９種）及び「常陽」ＭＫ－Ｉ被覆管（４種）とも浸漬により耐力は低下した。低下の温度依存性の傾向は引張強さと同様であるが，５００℃～６００℃での平均の低下量は引張強さのそれよりも大きい。５００℃での平均低下量は「もんじゅ」被覆管で２8.2 kg/mm²，「常陽」ＭＫ－Ｉ　被覆管で２6.8kg/mm²，６５０℃では「もんじゅ」被覆管の場合 6.7 kg/mm²，「常陽」ＭＫ－Ｉ被覆管の場合 6.3 kg/mm²である。「もんじゅ」被覆管の場合の外国管と国産管の温度依存性の傾向は引張強さの場合と同様である。９種の「もんじゅ」被覆管の中で４８FT管が耐力の低下量が最も少なく，結晶粒径の最も小さい４９GSM管が引張強さの場合と同様に低下量が最も大きい。

(iii) 伸　　び

浸漬被覆管の破断伸びは未浸漬被覆管の値よりも６５０℃から４００℃の浸漬温度範囲を通して増加した。１部の管では６５０℃においてのみ減少するものもみられた。未浸漬被覆管と浸漬被覆管との破断伸びの差は一，二の供試管を除いては引張強さ及び耐力とは逆の温度

依存性の傾向を示した。すなわち「もんじゅ」被覆管では48FT管を除いて500℃で極大値を示し，500℃以上の温度では49GSM管を除いては温度が高くなるにつれて，減少した。500℃における「もんじゅ」被覆管の平均の破断伸び増加量は14％，「常陽」MK－I被覆管で10％であった。650℃では「もんじゅ」被覆管で約1％の増加，「常陽」MK－I被覆管で約±5％の範囲内で増加するものと減少するものがみられた。「もんじゅ」被覆管及び「常陽」MK－1被覆管の破断伸びの温度依存性の傾向は，浸漬前後ともおおむね同様であった。「もんじゅ」被覆管の浸漬前後の一様伸びの差の温度依存性の傾向も破断伸びのそれと同様な傾向であった。この傾向は常陽MK－I被覆管についても同じである。

(2) 引張特性の優劣及び化学成分等に対するコメント

9種の「もんじゅ」被覆管についての引張特性は以下のように比較に基ずいて順位ずけられる。

(i) 浸漬前の受入れ被覆管について

○引張強さ。49GSM＞49 GSL＞48CT＞48HN＞49LB，49HB，48LN＞48FT＞48－V。

○耐　　力。49GSM＞49GSL＞48CT，49LB＞49HB，48LN，48HN＞48FT，＞48－V。

○破断伸び。48LN，48V，48HB＞48HN，48CT，48LB，49GSM＞48GSL＞48FT。

浸漬前の受け入れ被覆管の場合，650℃から400℃迄の温度領域を通して引張強さ及び耐力の強度順位はほぼ同様であり，引張強さと耐力は比例している。破断伸びについては，48FT管が最も低く，400℃及び500℃では1～2％の値を示した。2～3種の供試被覆管以外では比較的に強度の低いものが，破断伸び値のレベルが高い傾向にある。これらの浸漬前の受け入れ管から，引張強さ，耐力及び破断伸びの総合的引張特性として優れているものを3種類選択すると49GSM管，48GSL管，48CT管があげられる。

(ii) 浸漬被覆管について

○引張強さ。48GSL＞48HB，49GSM＞48CT＞48LB＞48FT＞48HN＞48LN＞48V

○耐　　力。48GSL＞48HB＞49GSM，48CT＞48LN，48FT＞48LB＞48HN＞48V

○破断伸び。48V＞48HN＞48LB＞48HB，48LN＞48CT，49GMS＞48GSL，48FT

浸漬被覆管の場合も，浸漬前の受け入れ被覆管と同様な傾向，すなわち，引張強さと耐力は同様な順位，破断伸びと強度との関係についても同じことがいえる。しかし，浸漬前の受け入れ被覆管の順位と浸漬被覆管の順位を比較すると，入れ替りが見られる。これらの浸漬被覆管から，引張強さ，耐力及び破断伸びの総合的引張特性として優れているものを3種類選択すると49GSM管，48GSL管，48HB管があげられる。

(iii) 浸漬前後の引張特性の変化量からみた安定性

ナトリウム浸漬に対する引張特性の安定性を浸漬前後の引張特性の変化量から判断するため，変化量の少ないものから順位づける。

○引張強さ　48FT＜48V＜48HB＜48LB＜48GSL，48LN＜48HN＜48CT＜49GSM。

○耐　　力　48FT＜48V＜48HB，48LN＜48GSL＜48LB＜48HN＜48CT＜49GSM。

○破断伸び　48LN，48CT，48HB＜48FT＜48V，48LB，48GSL＜48HN＜49GSM

浸漬前後の引張特性の変化量の少ない被覆管を安定性の優れたものとして3種類選択すると48FT管，48LN管，48－V管の順位で選ばれる。

(iv) 金属組織の安定性

金属組織の安定性を光学顕微鏡写真により，シグマ相の析出量の温度依存性及び析出物挙動から判断すると以下のようになる。

48FT，48－V，48GSL
＞48HN，48LN，48HB，48LB，49GSM＞48CT。

金属組織安定性のすぐれるものは，引張特性の安定性も比較的すぐれている。

以上の結果，すなわち浸漬前の受け入れ被覆管及び浸漬被覆管の引張特性，浸漬前後の引張特性の変化量及び金属組織の安定性から，2種類の被覆管を選択すると48HB管と48GSL管があげられる。また供試被覆管のうちで外国製の被覆管は48CT管を除いては，48FT管，48V管とも金属組織的安定性，引張特性の安定性に優れるが，引張強さ及び耐力の強度レベルとしては，国産製の被覆管のそれよりは低く，また48FT管は低温側での伸び値がかなり低いという難点がある。48V管のCo含有量が0.23～0.24w/oと高いことも，炉心放射能レベルを低く抑えると云う観点からは，実用燃料被覆管として好ましくない。

このように49GSL管及び49HB管が，受け入れ管としての引張特性に優れ，かつ，浸漬による引張特性の劣化量が比較的少ない理由としては，以下のような材料因子の影響が考えられる。

受け入れ時の49GSL管の引張特性への正の寄与因子としては，比較的結晶粒径が小[註4.4]（ASTM No.8.0～8.3）であり，Mo量[註4.5]（2.49w/o）も多いことがあげられ，浸漬後の引張特性に対しては，MoとB（0.0008w/o）量の正の寄与[註4.6]が考えられる。HB管に対しても，Mo（2.47w/o）とB（0.001w/o）の同様な寄与が考えられる。引張特性が比較的劣っている48FT管と48V管に寄与している負の因子としては，以下の理由があげられる。48FT管の場合，受け入れ時の引張強度特性に対しては，Mo量[註4.7]（2.25～2.26w/o）と冷間加工度（18.8%）がやや低いことが影響していると考えられる。48V管の場合の受け入れ時の引張強度特性に対しては，Mo量（2.09～2.12w/o）と炭素量（0.035～0.036w/o）が低いことが影響していると考えられる。48FT管の引張特性及び金属組織の安定性に対してはB量（0.0016w/o）の寄与が考えられる。

註4.4）Hall－Petch[15]によれば，降伏応力σ_y結晶粒径依存性は次式で表わされる。

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-\frac{1}{2}}$$

ここで，σ_iは摩擦応力，k_yは定数，dは結晶粒の直径である。太田ら[12]は，SUS316溶体化処理材，10%及び20%冷間加工材の室温及び650℃での引張強さ並びに耐力についてもHall－Petchの関係が成立することを確認している。

註4.5）受け入れ管の引張特性に耐するMoの影響としては，固溶強化，他の侵入型元素とのIS効果が考えられ，また延性を高めることに寄与しているものと[14]みられる。

註4.6）[14),16),17]Bは熱時効時の粒界での拡散を遅くし，粒界での炭化物の析出，粗大化を遅らせ，粒界強度を保持もしくは高めることに寄与している。Moは熱時効時の炭化物の析出速度を高め，比較的均一微細に析出せしめ，析出炭化物を安定にする効果を有する。さらにMoは熱時効後もかなりの量が素地に固溶しているため固溶強化の機能は保持される傾向にある。この二つの理由によりMoは熱時効材の高温強度を高めることに寄与している。またMoとBの交互作用としては，粒界拡散を著しく低めることがあげられる。

註4.7）Fine Tube社及びVallourec社がMo量を低くおさえた理由としては，650℃以上の高温でのσ相析出をさけたことが考えられる。

これまでに得られた１６種の「もんじゅ」及び「常陽」被覆管の結果に基き，それらの注目される化学成分及び結晶粒度について，ナトリウム中での材料としての適合性を考慮しながら言及すると以下の通りである。

化学成分	供試被覆管の成分含有量範囲 (w/o)	コ　メ　ン　ト
C	0.035～0.058	「もんじゅ」管仕様の上限の0.06w/o迄含むことが望ましい。
N	0.004～0.027	受け入れ時の引張強度を高めることに寄与していると考えられるが，高温保持後の引張強度の安定性への寄与の度合について確認する必要がある。
B	0.0001～0.0016	高温保持後の引張特性の安定性に寄与している。0.003w/o 程度まで高めても問題ないと思われる。
Mo	2.09～2.52	受け入れ時の引張強度を高め，高温保持後の引張強度の低下を改善することに寄与していると考えられる。高温でのσ相析出を考慮して，上限として2.5％迄含むことが望ましいが，炭化物の析出を抑制するBとの交互作用を考慮すると同時にBを0.003 w/o 程度含むことが望ましい。
P	0.004～0.022	高温での引張特性の安定性の改善に寄与するものと考えられるが700℃のナトリウム中では溶出が著しくなると云うデータもあるので，ナトリウムとの適合性の観点からは，さらに実験的に検討する必要がある。
Ti	0.03～0.002	この程度の範囲では明確な寄与の傾向はわからないが，著しくは影響していないとみられる。
Nb+Ta	0.015～0.002	この成分量の比較的多いものでは，受け入れ被覆管の引張性質が結果的に優れているが，この程度の成分範囲では，寄与の傾向について明確な判断はできない。

結晶粒度：供試被覆管の結晶粒度範囲はASTM №6 ～ 9.0であるが，ASTM №7.5 ～ 8.0の範囲が妥当と考えられる。

5　結　　論

「もんじゅ」炉心用として昭和４９年度迄に試作された９種類の燃料被覆管を主体として，さらに「常陽」MK－Ⅰ及びMK－Ⅱ炉心用の７種類の被覆管を含めてのナトリウム浸漬試験及び浸漬前後の引張試験等から得られた結果を要約すると以下の通りである。

「もんじゅ」被覆管について

1. 未浸漬の受け入れ被覆管とナトリウム浸漬後の被覆管の引張特性を比較すると，４００℃～６５０℃での温度範囲でのナトリウム浸漬により，耐力及び引張強さは低下し，伸びは増加した。浸漬前後の引張性質の変化の度合は，浸漬温度により異なり，５００℃で最も大きかった。
2. 引張性質の温度依存性に及ぼす結晶粒度及び冷間加工度の影響は，未浸漬の受け入れ被覆管の場合と比較してナトリウム浸漬によっても傾向的には変らない。また，微量ホウ素成分はナトリウム浸漬前後の引張性質の変化量を少なくすること，すなわち材料の安定性を高めることに寄与していることが考えられる。
3. 「もんじゅ」製作準備設計(Ⅲ)で燃料集合体の設計にさいして適用されたＳｙ（耐力），Ｓｕ（引張強さ）値とナトリウム浸漬後の「もんじゅ」被覆管の引張強度データを比較すると，浸漬被覆管の耐力及び引張強さはSUS３１６焼鈍材のＳｙ，Ｓｕ値よりは上まわるが，SUS３１６２０％冷間加工材のＳｙ，Ｓｕ値よりは下まわる。
4. ５００℃以上の温度でナトリウムに浸漬された被覆管は，浸漬後の引張により浸漬表層部の浅い粒界割れが生じ，その粒界割れの深さは高温になるにつれて深くなる。しかし，この表層粒界割れは粒界腐食変質層を越えては進展しないと考えられる。
5. 高温での浸漬前後の引張性質及び金属組織の安定性の立場から，外国製の被覆管３種を含む９種類の「もんじゅ」用に試作された供試被覆管を比較し，２種類の優れた管を選択するとＳ社４９HB管とＫ社４９GSL管（何れも４９年度試作被覆管）があげられる。

「常陽」被覆管について

４種の「常陽」MK－Ⅱ被覆管の浸漬前後の引張性質の傾向は，「もんじゅ」被覆管の傾向と概略一致する。しかし，「常陽」MK－Ⅰ被覆管の浸漬前後の引張強さの変化の度合は，「もんじゅ」被覆管の場合よりも平均して少なく，その差は，特に５００℃浸漬後の５００℃引張強さデータにおいて明らかである。

6 あとがき

得られた引張特性の差は，結晶粒度，冷間加工度，微量化学成分の相違及び最終溶体化熱処理条件の僅かな相違等による総合的な結果としてもたらされたものであるが，これらの個々の材料因子の影響度を使用温度条件での高温クリープ強度，耐スエリング性等を含めて評価究明して行くことにより，最終的にバランスのとれた被覆管製造条件を求める必要があろう。本試験の結果からのみでは，化学成分の影響を評価するためには，相違量が極めて微量であったため，定量的な寄与の度合の評価はできず，また明確な傾向の把握も充分でなかったと思われる。今後，引張特性に及ぼす化学成分の影響についての評価を深めて行くためには，成分量の変化巾を拡げた被覆管材の試験と，より長時間[註6.1)]の浸漬試験が望まれる。浸漬被覆管の解析にさいしては浸漬表面近傍の結晶粒界での元素挙動と粒界強度の関係に注目する必要がある。

終わりに，本研究を総括された三本ナトリウム技術部部長，推進を図っていただいたＦＢＲ本部山本ナトリウム・グループ・リーダ，石田燃料グループ・リーダに感謝の意を表します。また，浸漬試験に協力されたナトリウム技術開発室小坏享氏他の方々にも併せて感謝します。

註6.1）「もんじゅ」管１１種を主体とする約10000時間浸漬被覆管の解析が現在（昭和５５年4月）進行中である。

7 参考文献

1) 市野市郎，阿部康宏，「常陽」のナトリウム機器構造設計指針，日本原子力学会誌 Vol.14. №12 (1972).

2) 坂田肇，高速実験炉「常陽」の建設と機能試験，日本原子力学会誌，Vol.19，№10 (1977).

3) 高速増殖原型炉もんじゅ製作準備設計(II)，燃料設計説明書，ZJ278－79－15－(I) (1979).

4) 柚原俊一，加納茂機，大和田哲郎，厚母栄夫，高速炉燃料被覆管（AISI Type－316 SS）の高温ナトリウム中での腐食挙動（その1），SN941，73--24(1973).

5) 柚原俊一，吉田英一，舟田敏雄，中筋孝，高温ナトリウム中における高速炉用燃料被覆管のクリープ特性，N941 77--196(1977).

6) 舟田敏雄，二瓶勲，柚原俊一，中筋孝，高温ナトリウムに浸漬した高速炉用燃料被覆管の高温引張強度，SN941 79-88(1979).

7) 富永康夫，小坪享，柚原俊一，大和田哲郎，厚母栄夫，"高速炉用燃料被覆管のフレッテング腐食試験" SN941 73-20(1973).

8) 加納茂機，柚原俊一，滑川優，中筋孝，厚母栄夫，高速炉燃料被覆管（AISI Type－316SS）の高温ナトリウム中での腐食挙動(II)，SN941 76-17(1976).

9) S.A. Shiels, C. Bagnall, S.L. Schrock, S.J. Orbon, "The Influence of LMFBR Fuel Pin Temperature Profiles on Corrosion Rate," International Conf. on Liquid Metal Technology in Energy Pruduction, Champion, Pennsylvania, (May3--6, 1976).

10) J. Hopenfeld, "Corrosion of Type316 Stainless Steel with Surface Heat Flux in 1200°F Flowing Sodium", Nuclear Energy and Design, 12(1970) p167.

11) 太田定雄，藤原優行，内田博行，"18--8Mo 鋼燃料被覆管の高温特性に及ぼす冷間加工の影響"，学振123委員会研究報告，Vol.14，№1，287．昭和48年12月．

12) 太田定雄，藤原優行，内田博幸，"18－8Moステンレス鋼燃料被覆材の高温特性に及ぼす結晶粒度の影響"，学振123委員会研究報告，Vol.15，№3，332，昭和49年12月。

13) B. Eremias and M. Fresl, "Influence of nitrogen on the corrosion resistence and degradition of mechanical properties of austenitic steels in liquid sodium at 700℃," Journal of Nuclear Materials 87(1979) 345～352.

14） 河部義邦，中川龍一，向山保，"18Cr－12Ni－0.2C系オーステナイト耐熱鋼の高温強度に対するB，NおよびMoの強化作用"，鉄と鋼，Vol. 54，№4（1968）.

15） N. T. Petch，J. Iron and Steed Inst.，173（1953），25.

16） 吉田平太郎，小池喜三郎，依田連平，"20％Cr－10％Mn－6％Ni－0.6％系鋼の高温特性に及ぼすボロンの影響"，鉄と鋼，Vol. 56，№1（1970）.

17） 藤原優行，内田博幸，太田定雄，石山勇，"18－8Mo鋼燃料被覆管の高温強度に及ぼす化学成分の影響"，鉄と鋼，Vol. 60，S249（1974）.

Table 1. Characteristics※1 of 316 stainless steel fuel cladding tubes tested.

Service Classification	Tube symbol	Tube no: Sodium exposed thermal aged Type A	Tube no: Sodium exposed thermal aged Type B	Tube no: Sodium exposed thermal aged Type C	Manufacturing process: Molting	Manufacturing process: Finel Cold work (%)	Dimension (mm): Outer diameter	Dimension (mm): Inner diameter	Dimension (mm): Thickness	Material properties: Grain size (ASTM №)	Material properties: Surface roughness	Material properties: Hardness Hv	Permissible defect	Solution: Final heat treatment	Abbreviation
R & D tubes for MONJU core	48-S-1 H.N	S 3005	S 3013	S 3016	Vaccum Melting	21	6.50±0.030	5.60±0.025	0.45±0.030	7.5		274		1020℃×0.2hr	48HN
	48-S-2 L.N	S 3259	S 3260	S 3312	〃	20	〃	〃	〃	7.5		265		1020℃×0.2hr	48LN
	48-Car-Tec	CT 016	CT 017	CT 018	〃	21	6.50±0.03	5.60±0.025	0.45±0.030	6～7					48CT
	48-Fine Tubes	F 013	F 014	F 015	〃	188	6.50±0.03	5.60±0.025	0.45±0.030	7	0.4～0.35μm	269	＜0.038		48FT
	48-Vallourec	L 014	L 015	L 016	〃	19～20	6.50±0.03	5.60±0.025	0.45±0.030	7～7.5		279		1050℃	48V
	49-S-1 L.B	S 5015	S 5021	S 5022	〃	20	6.50±0.03	5.60±0.025	0.45±0.030	7.5		280		1020℃×20hr	49LB
	49-S-3 H.B	S 5221	S 5222	S 5224	〃	20	〃	〃	〃	7.5		267		1020℃×1.5hr	49HB
	49-K-1 G.S.L	K 4001	K 4016	K 4018	〃	20	6.50±0.03	5.60±0.025	0.45±0.030	8.0～8.3		278		1125℃×0.3hr	49GSL
	49-K-3 G.S.M	K 4118	K 4119	K 4120	〃	20	6.50±0.03	5.60±0.025	0.45±0.030	9.0		279		1085℃×0.3hr	49GSM
R & D tubes for JOYO MKII core	49-S-1 L.B	S 1024	S 1026	S 1027	〃	21	6.30±0.03	5.60±0.025	0.35±0.030	7.5		280		1020℃×15hr	※2 JII49LB
		S 1025				〃	〃	〃	〃	〃		〃		〃	
	49-K-2 G.S.L	K 1116	K 1119	K 1121	〃	〃	〃	〃	〃	7.5～8.0		277		1120℃×0.3hr	※3 JII49GSL
		K 1117				〃	〃	〃	〃	〃		〃		〃	
	49-K-3 G.S.M	K 1202	K 1204	K 1218	〃	20	〃	〃	〃	9.0		281		1090℃×0.3hr	※4 JII49GSM
		K 1203					〃	〃	〃	〃		〃		〃	
R & D tubes for JOYO MKI core	46-Car-Tec-1	R 1207	R 1221	R 1225	Vacuum remelting	12.7 (14.9～11.2)	6.30±	5.60±	0.35±0.03	7.0		DPH 222			JI46CT
		R 1219													
	44-S-8			S 3800	Vacuum Melting	～10%	6.3±0.030	5.6±0.025	0.35±0.03	7.0		259	25μ		※5 JI44S
	44-K-1			K 3222	〃	～10%	〃	〃	〃	9.0		266	〃		※5 JI44K
Practical tubes for JOYO MKI core	46-S-19	S 4864	S 4956	S 4958	〃	～12%	6.3±0.030	〃	〃	8.0～8.5		246	〃	980℃×0.4hr	JI46S
		S 4868			〃	〃	〃	〃	〃	〃		〃	〃	〃	
	48-S-32	S1-2783	S1-2785	S1-2786	〃	12%	〃	〃	〃	7.5～8.0		258	〃	1000℃×0.2hr	JI48S
		S1-2784			〃	〃	〃	〃	〃	〃		〃	〃	〃	
	46-K-18	K 7223	K 7225	K 7226	〃	10%	〃	〃	〃	9.9		246	〃	1010℃×0.2hr	JI46K
		K 7224			〃	〃	〃	〃	〃	〃		〃	〃		

※1 The heat of each kind of tube is different except for L B, GSL and GSM tubes.
※2 The heat of JII49LB tube is the same as that of 49LB tube.
※3 The heat of JII49GSL tube is the same as that of 49GSL tube.
※4 The heat of JII49GSM tube is the same as that of 49GSM tube.
※5 These two kinds of tubes (JI44S, JI44K) were used for only thermal aging test.

Table2. Chemical composition of R & D fuel cladding tubes (316 stainless steel) for MONJU core.

(w/o)

Tube symbol	Analysis classification \ Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Aℓ	As	Cu	Nb	Ti	V	O
48－S－1 HN	Spec	0.035～0.064	≦0.75	1.50～2.00	≦0.03	≦0.02	12.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	≦0.10	≦0.0005	0.010～0.015	－	－	≦0.20	－	－	－	
	Ladle	0.052	0.52	1.79	0.021	0.008	12.81	17.20	2.50	0.01	0.0001	0.0102	0.0040	0.002	0.1300	0.002	0.002	0.001	0.0053
		0.053	0.50	1.79	0.022	0.009	12.80	17.05	2.50	0.01	0.0001	0.0105	0.0020	0.002	0.1300	0.002	0.002	0.001	0.0055
	Check	0.050	0.50	1.86	0.022	0.008	12.82	16.75	2.50	0.01	0.0001	0.0118	0.0010	0.002	0.1300	0.002	0.002	0.001	0.0043
		0.047	0.51	1.84	0.022	0.008	12.79	16.75	2.52	0.01	0.0001	0.0118	0.0010	0.002	0.1300	0.002	0.002	0.001	0.0072
48－S－2 LN	Spec	0.035～0.064	≦0.75	1.50～2.00	≦0.03	≦0.02	12.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	≦0.10	≦0.0005	≦0.050	－	－	≦0.20	－			－
	Ladle	0.045	0.51	1.75	0.022	0.005	12.86	16.80	2.44	0.02	0.0001	0.0070	0.0020	0.002	0.1000	0.002	0.002	0.002	0.0080
		0.046	0.51	1.75	0.022	0.006	12.93	16.80	2.46	0.02	0.0001	0.0072	0.0010	0.002	0.1000	0.002	0.002	0.002	0.0078
	Check	0.044	0.51	1.82	0.021	0.006	13.04	16.90	2.51	0.01	0.0001	0.0076	0.0010	0.002	0.1000	0.002	0.002	0.001	0.0069
		0.043	0.52	1.82	0.022	0.006	12.96	17.05	2.52	0.01	0.0001	0.0076	0.0010	0.002	0.1000	0.002	0.002	0.001	0.0072
48－Car－Tec	Spec																		
	Ladle	0.053	0.57～0.58	1.51～1.68	0.005	0.007～0.008	13.73～13.77	17.59～17.63	2.53～2.58	0.01	0.0005～0.0009	0.003～0.004	<0.005	<0.005	<0.01	<0.02		<0.01	
	Check	0.051～0.052	0.50	1.53～1.57	0.004～0.005	0.004～0.005	13.76～13.85	17.40～17.47	2.50～2.51	0.01	<0.0005	0.004	<0.01	<0.005	<0.01	<0.02	<0.01		0.0023～0.0038
48－Fine－Tubes	Spec	0.035～0.064	≦0.75	1.50～2.00	≦0.03	≦0.02	12.00～14.00	16.00～18.00	2.00～3.00	≦0.01	≦0.0005	≦0.06	－	－	≦0.20	－	－	－	－
	Ladle	0.29	0.30	1.66～1.74	0.011～0.012	0.007～0.008	13.23～13.38	17.18～17.25	2.25～2.26	－	0.003	0.022～0.023	－	－	－	－	－	－	－
	Check	0.041	0.31	1.63	0.012	0.009	13.2	17.0	2.25～2.26	0.01	0.0016	0.027	0.0015	0.0001	0.04	<0.01	<0.01	－	0.003
48－Vallourec	Spec	0.035～0.064	≦0.75	1.00～2.00	≦0.03	≦0.02	12.00～14.00	16.00～18.00	1.8～2.2	≦0.30	≦0.0005	≦0.020	－	－	≦0.50	－	－	－	－
	Ladle	－	－	－	－	－	－				－	－	－	－	－	－	－	－	－
	Check	0.035～0.036	0.37～0.38	1.55～1.58	0.02	0.003	13.37～13.49	17.35～17.70	2.09～2.12	0.238～0.242	<0.0005	0.0206～0.0210	<0.01	－	0.045	<0.03	0.03	－	
49－S－1 LB	Spec		≦0.75	1.50～2.00	≦0.03	≦0.01	12.00～14.00	17.00～18.00	2.00～3.00	≦0.10	≦0.001	≦0.010	≦0.05	≦0.003	≦0.20	≦0.05	≦0.1	≦0.2	
	Ladle	0.046	0.50	1.52	0.019	0.007	13.15	17.45	2.50	0.01	0.0001	0.0058	0.0120	0.002	0.0800	0.002	0.002	0.002	0.0012
		0.042	0.50	1.52	0.018	0.005	13.01	17.30	2.54	0.01	0.0001	0.0054	0.0120	0.002	0.0800	0.002	0.002	0.002	0.0014
	Check	0.046	0.50	1.52	0.019	0.008	13.07	17.55	2.48	0.01	0.0001	0.0080	0.0110	0.002	0.0800	0.002	0.002	0.002	0.0015
49－S－3 HB	Spec	0.035～0.064	≦0.75	1.50～2.00	≦0.03	≦0.01	12.00～14.00	17.00～18.00	2.00～3.00	≦0.10	0.0005～0.0015	≦0.010	≦0.05	≦0.003	≦0.20	≦0.05	≦0.1	≦0.2	
	Ladle	0.047	0.59	1.59	0.019	0.007	13.20	17.50	2.52	0.03	0.0014	0.0046	0.0100	0.002	0.0900	0.002	0.002	0.006	0.0010
		0.043	0.59	1.59	0.019	0.007	13.10	17.60	2.53	0.03	0.0013	0.0046	0.0190	0.002	0.0900	0.002	0.002	0.005	0.0011
	Check	0.046	0.56	1.57	0.018	0.008	13.07	17.55	2.47	0.01	0.0010	0.0074	0.0180	0.002	0.0800	0.002	0.002	0.005	0.0011
49－K－2GSL	Spec	0.035～0.064	≦0.75	1.50～2.00	≦0.03	≦0.01	12.00～14.00	17.00～18.00	2.00～3.00	≦0.10	≦00010	≦0.010	≦0.05	≦0.003	≦0.20	≦0.05	≦0.1	≦0.2	－
	Ladle	0.058	0.46	1.50	0.010	0.005	13.49	16.91	2.54	0.05	0.0004	0.0047	0.005	0.004	0.02	0.010	0.006	0.04	0.0014
	Check	0.054	0.47	1.63	0.009	0.005	13.49	16.84	2.46	0.05	0.0004	0.0046	0.008	0.005	0.02	0.010	0.007	0.04	0.0014
		0.056	0.49	1.56	0.010	0.006	13.68	16.78	2.49	0.08	0.0008	0.0064	0.005	0.002	0.028	0.01	0.005	0.027	0.0019
49－K－3GSM	Spec	0.035～0.064	≦0.75	1.50～2.00	≦0.03	≦0.01	12.00～14.00	17.00～18.00	2.00～3.00	≦0.10	≦0.0010	≦0.010	≦0.05	≦0.03	≦0.20	≦0.05	≦0.1	≦0.2	－
	Ladle	0.057	0.51	1.84	0.007	0.006	13.90	16.78	2.32	0.01	0.0004	0.0066	0.016	0.002	0.02	0.015	0.030	Tr	0.0009
	Check	0.058	0.51	1.87	0.006	0.005	13.85	16.68	2.30	0.01	0.0005	0.0057	0.016	0.002	0.02	0.015	0.030	Tr	0.0008
		0.058	0.48	1.79	0.004	0.005	13.81	16.88	2.41	0.02	0.0007	0.0047	0.015	0.002	0.022	0.01	0.024	0.005	0.0016

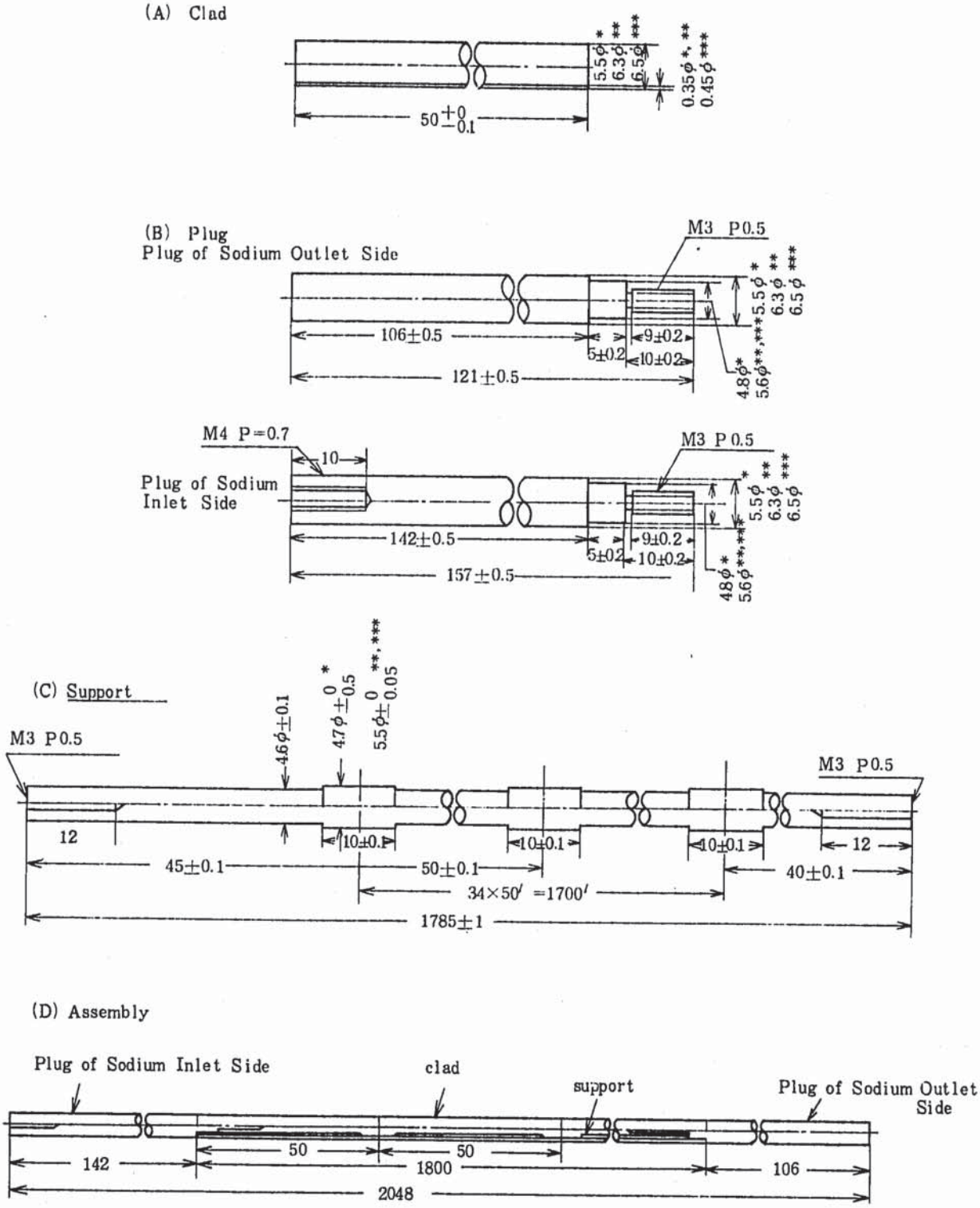
Table 3. Chemical composition of R & D and practical fuel cladding tubes (316 stainless steel) for JOYO core.

(w/o)

Service classification	tube symbol	Analysis classification	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Aℓ	As	Cu	Nb	Ti	V	O
R & D tubes for JOYO MK II core	49－S－1 LB	Spec	0.035~0.064	≦0.75	1.50~2.00	≦0.03	≦0.01	12.00~14.00	17.00~18.00	2.00~3.00	≦0.10	≦0.001	≦0.010	≦0.05	≦0.03	≦0.20	≦0.05	≦0.1	≦0.2	
		Ladle	0.046	0.50	1.52	0.019	0.007	13.15	17.45	2.50	0.01	0.0001	0.0058	0.0120	0.002	0.0800	0.002	0.002	0.002	0.0012
			0.042	0.50	1.52	0.018	0.005	13.01	17.30	2.54	0.01	0.0001	0.0054	0.0120	0.002	0.0800	0.002	0.002	0.002	0.0014
		Chech	0.050	0.49	1.53	0.019	0.007	13.08	17.60	2.42	0.01	0.0001	0.0080	0.0100	0.002	0.0800	0.002	0.002	0.002	0.0020
	49－K－2 G.S.L	Spec	0.035~0.019	≦0.75	1.50~2.00	≦0.03	≦0.01	12.00~14.00	17.00~18.00	2.00~3.00	≦0.10	≦0.001	≦0.010	≦0.05	≦0.03	≦0.20	≦0.05	≦0.1	≦0.2	－
		Ladle	0.058	0.46	1.50	0.010	0.005	13.49	16.91	2.54	0.05	0.0004	0.0047	0.005	0.004	0.02	0.010	0.006	0.04	0.0014
			0.054	0.47	1.63	0.009	0.005	13.49	16.84	2.46	0.05	0.0004	0.0046	0.008	0.005	0.02	0.010	0.007	0.04	0.0014
		Chech	0.062	0.48	1.51	0.011	0.006	13.55	16.85	2.48	0.07	0.0004	0.0074	0.004	0.002	0.027	0.010	0.005	0.026	0.0017
	49－K－3 G.S.M	Spec	0.035~0.069	≦0.75	1.50~2.00	≦0.03	≦0.01	12.00~14.00	17.00~18.00	2.00~3.00	≦0.10	≦0.001	≦0.010	≦0.05	≦0.03	≦0.20	≦0.05	≦0.1	≦0.2	－
		Ladle	0.057	0.51	1.84	0.007	0.006	13.90	16.78	2.32	0.01	0.0004	0.0066	0.016	0.002	0.02	0.015	0.030	Tr	0.0009
			0.058	0.51	1.87	0.006	0.005	13.85	16.68	2.30	0.01	0.0005	0.0057	0.016	0.002	0.02	0.015	0.030	Tr	0.0008
		Chech	0.057	0.47	1.73	0.005	0.006	13.88	16.75	2.35	0.01	0.0007	0.0051	0.020	0.002	0.020	0.005	0.026	0.006	0.0013
R & D tubes for JOYO MK I core	46－Car－Tec－1	Spec																		
		Ladle	0.056	0.50~0.52	1.70~1.74	0.003~0.004	0.003	13.66~13.69	17.26~17.35	2.27~2.29	0.01	0.0008~0.0009	0.003~0.004	<0.005	<0.005	<0.01	<0.02	－	0.02	－
		Check	0.058~0.059	0.50~0.51	1.68~1.69	0.005	0.003~0.004	13.65~13.71	17.36~17.38	2.32	0.01	0.0009~0.0010	0.004	<0.005	<0.005	<0.01	<0.02	－	－	－
	44－S－8	Spec	0.04~0.08	≦0.75	≦2.00	≦0.03	≦0.03	11.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	≦0.10	≦0.001	0.035	－	－	－	－	－	－	－
		Ladle	0.07	0.58	1.53	0.003	0.016	13.18	16.85	2.47	0.02	0.0004	0.0270	－	－	0.24	－	－	－	－
		Check	0.07	0.57	1.51	0.003	0.012	13.21	16.95	2.27	0.02	0.0002	0.0260	－	－	0.22	－	－	－	－
			0.07	0.56	1.52	0.003	0.012	13.22	16.96	2.30	0.02	0.0002	0.0260	－	－	0.23	－	－	－	－
	44－K－1	Spec	0.04~0.08	≦0.75	≦2.00	≦0.03	≦0.03	11.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	≦0.10	≦0.001	≦0.035	－	－	－	－	－	－	－
		Ladle	0.072	0.58	1.67	0.014	0.013	12.47	17.13	2.54	0.04	－	－	－	－	－	－	－	－	－
		Check	0.066	0.62	1.65	0.017	0.013	12.43	16.70	2.48	0.043	0.001	0.034	－	－	－	0.007	0.020	0.020	－
			0.067	0.62	1.69	0.020	0.015	12.40	16.72	2.45	0.043	0.001	0.035	－	－	－	0.007	0.020	0.018	－
Practical tubes for JOYO MK I core	46－S－19	Spec	0.04~0.08	≦0.75	1.50~2.00	≦0.03	≦0.03	11.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	≦0.10	≦0.001	≦0.035	－	－	－	－	－	－	－
		Ladle	0.06	0.53	1.75	0.020	0.007	13.08	16.85	2.48	0.01	0.0001	0.0258	－	－	0.2300	－	－	－	－
		Check	0.06	0.53	1.73	0.020	0.007	13.13	17.00	2.50	0.01	0.0001	0.0270	0.0010	0.002	0.2200	0.002	－	0.0020	－
			0.06	0.53	1.74	0.020	0.007	13.15	17.00	2.46	0.01	0.0001	0.0262	0.0010	0.002	0.2500	0.002	－	0.0020	－
	46－S－32	Spec	0.04~0.08	≦0.75	1.50~2.00	≦0.03	≦0.03	11.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	≦0.10	≦0.001	≦0.035	－	－		－	－	－	－
		Ladle	0.05	0.50	1.83	0.022	0.008	12.65	17.10	2.40	0.01	0.0001	0.0112	－	－	0.1300	－	－	－	－
		Check	0.05	0.52	1.81	0.021	0.008	12.72	17.15	2.40	0.01	0.0001	0.0122	0.0010	0.002	0.1300	0.002	－	0.0010	－
			0.05	0.52	1.81	0.021	0.007	12.68	17.05	2.35	0.01	0.0001	0.0114	0.0010	0.002	0.1300	0.002	－	0.0010	－
	46－K－18	Spec	0.04~0.08	≦0.75	1.50~2.00	≦0.03	≦0.03	11.00~14.00	16.00~18.00	2.00~3.00	≦0.10	≦0.001	≦0.035	－	－		－	－	－	－
		Ladle	0.05	0.67	1.98	0.010	0.008	13.75	17.48	2.28	0.01	0.0003	0.006	－	－		－	－	－	－
		Check	0.05	0.67	1.70	0.011	0.006	13.83	17.45	2.22	0.04	0.0003	0.0076	0.005	0.002	0.01	0.015	－	0.033	－
			0.05	0.68	1.71	0.011	0.006	13.80	17.42	2.22	0.04	0.0004	0.0057	0.005	0.002	0.01	0.015	－	0.033	－

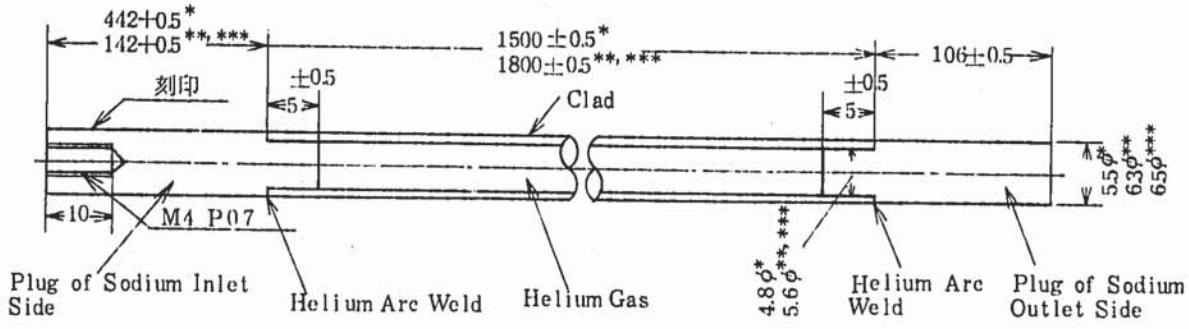
Table 4 Test conditions in flowing sodium

Sodium loop used for exposure test	M2 Loop attached to the Material Test Sodium Loop 1
Test conditions of the Material Test Sodium Loop 1	Cold trap temp. (℃) …… 190 Oxygen concentration(ppm)…… ~10 Cold trap flow rate (ℓ/min)…… 9 Sodium inventroy(kg)…… 1000
Test conditions of M2 Loop	Temp of test piece(℃) …… 400~650 Total test time (hr) …… 5401
Test section	Sodium flow rate (ℓ/min) Ave. 1.9 (Min. 1.2~Max. 2.85) Sodium velocity (mm/sec) Ave. 7.85 (Min. 4.96~Max. 11.8) Re number Ave 270 at 400℃ Ave 314 at 525℃ Ave 368 at 650℃ Wetted perimeter (mm) 1419 Equivalent diameter (mm) 11.4 Sectional area of Sodium flow path (mm²) 4032



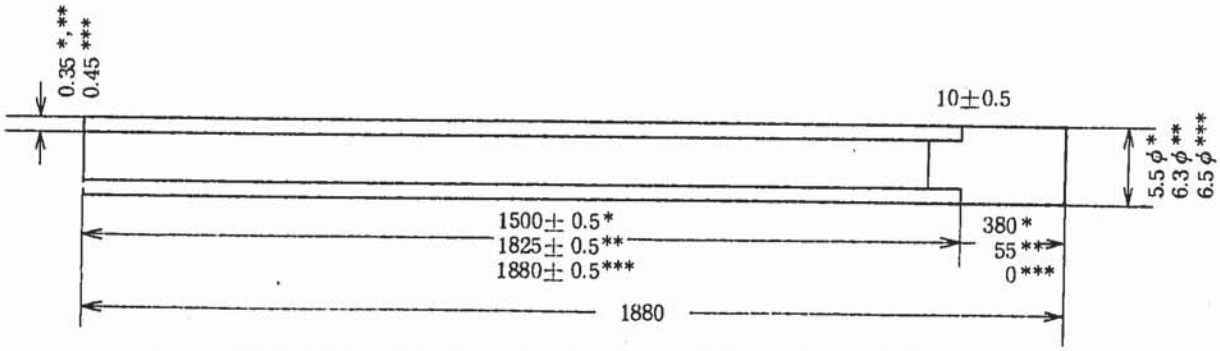
*,**,*** ; Each mark shows dimension of JOYO MK−II, JOYO MK−I and MONJU tubes.

Fig. 1 Type A test piece for mass transfer and corrosion



*,**,*** ; Each mark shows dimension for JOYO MK－II, JOYO MK－I and MONJU tubes.

Fig. 2 Type B test piece for material strength.



*,**,*** ; Each mark shows dimension for JOYO MK－II, JOYO MK－I and MONJU tubes

Fig. 3 Type C test piece for thermal aging.

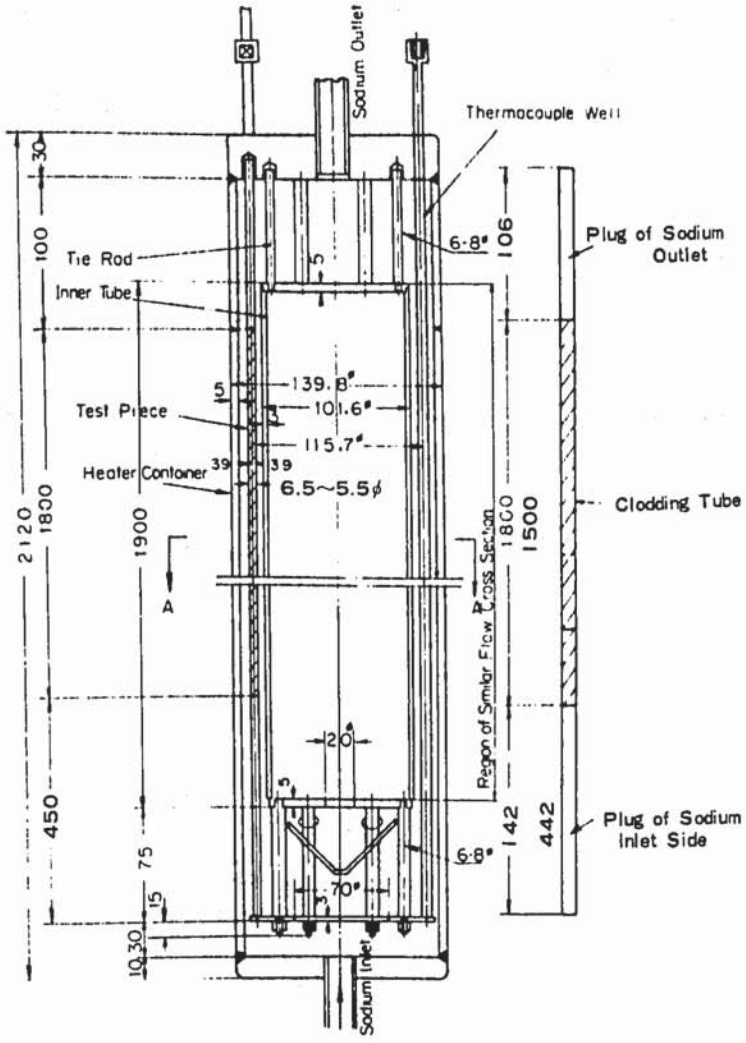


Fig. 4 Vertical cross sectional view of sodium exposure test section

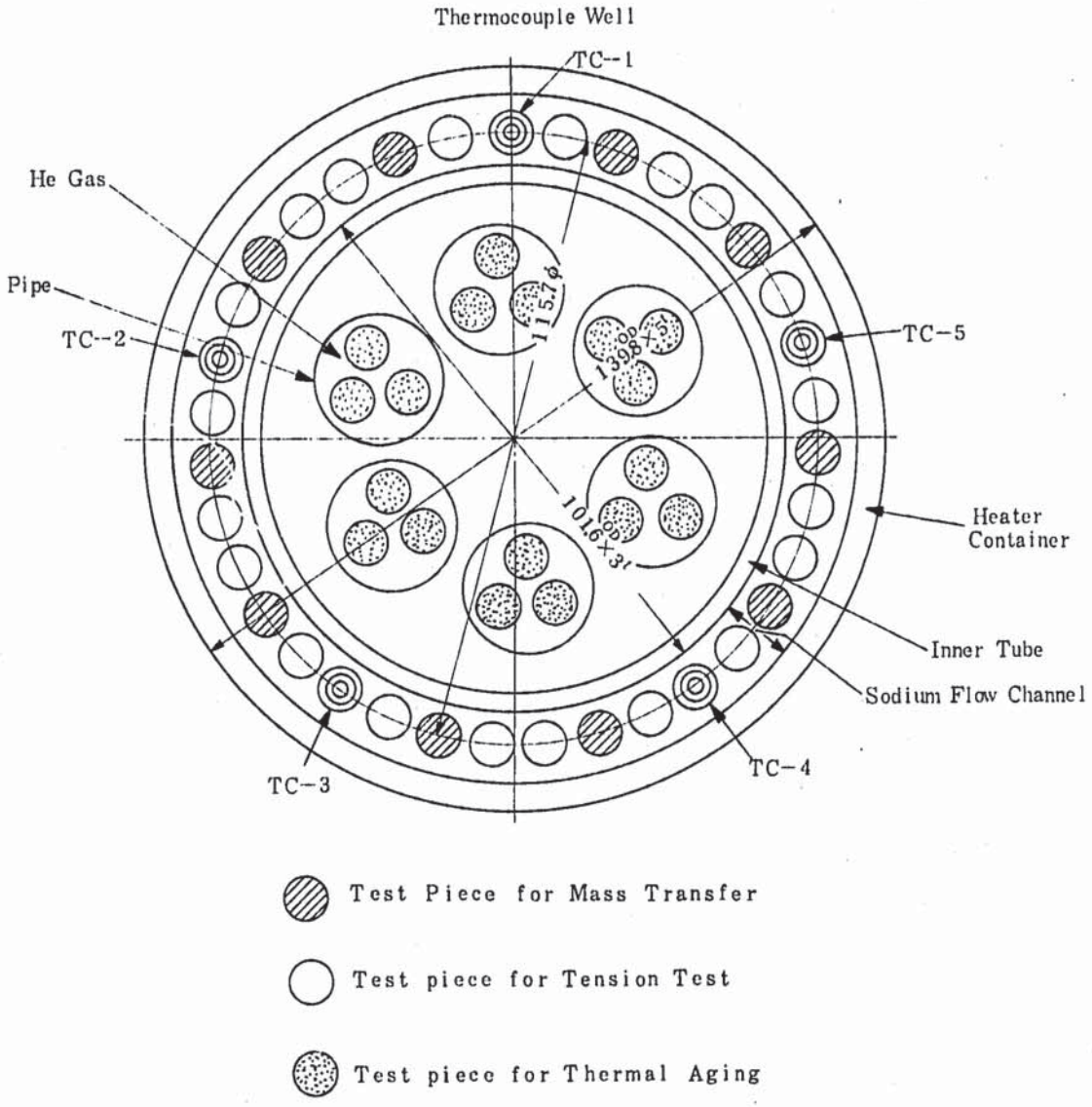


Fig. 5 Horizontal cross－sectional view of sodium exposure test section

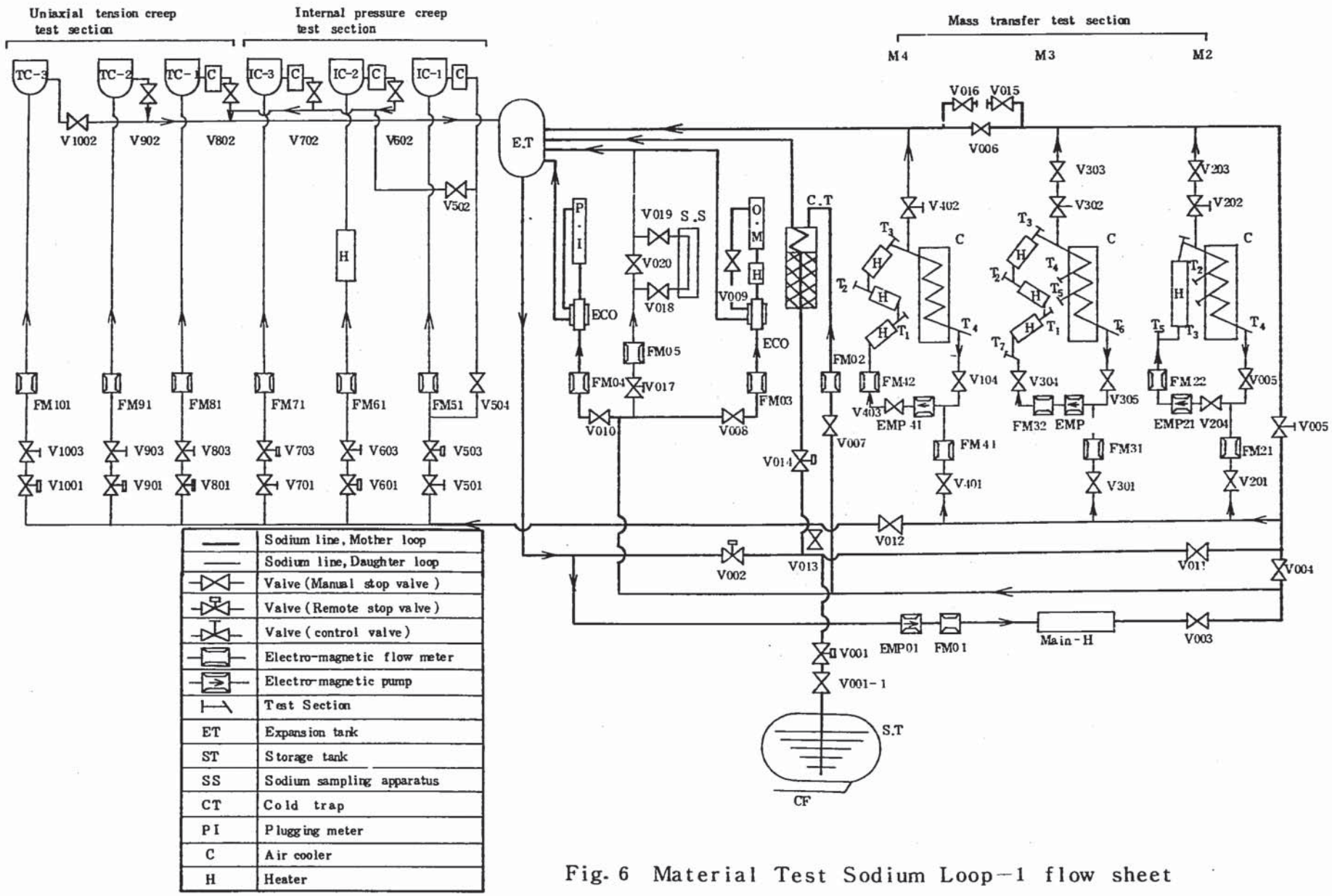


Fig. 6 Material Test Sodium Loop－1 flow sheet

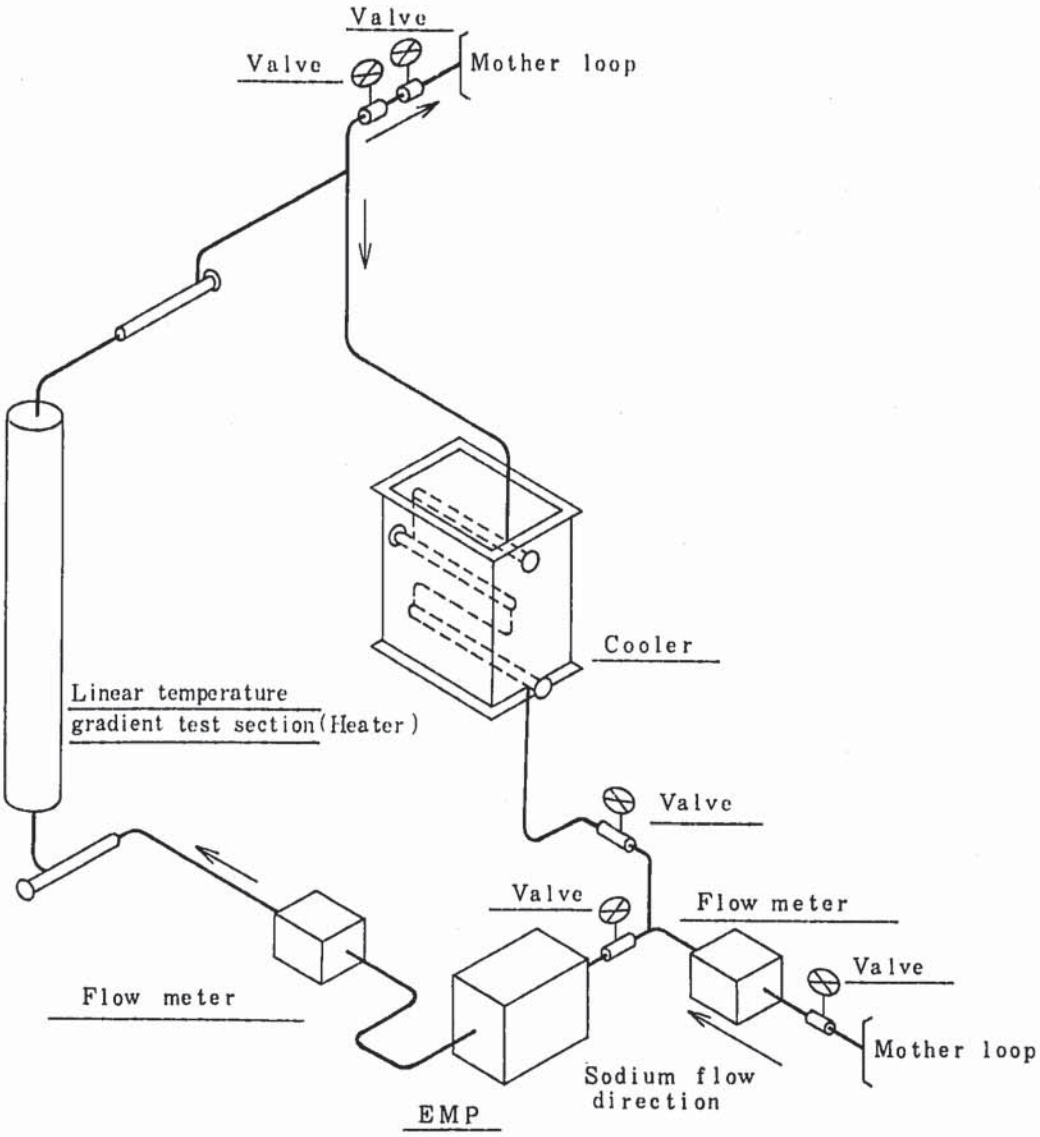


Fig. 7 Flow sheet of the daughter loop (M－2).

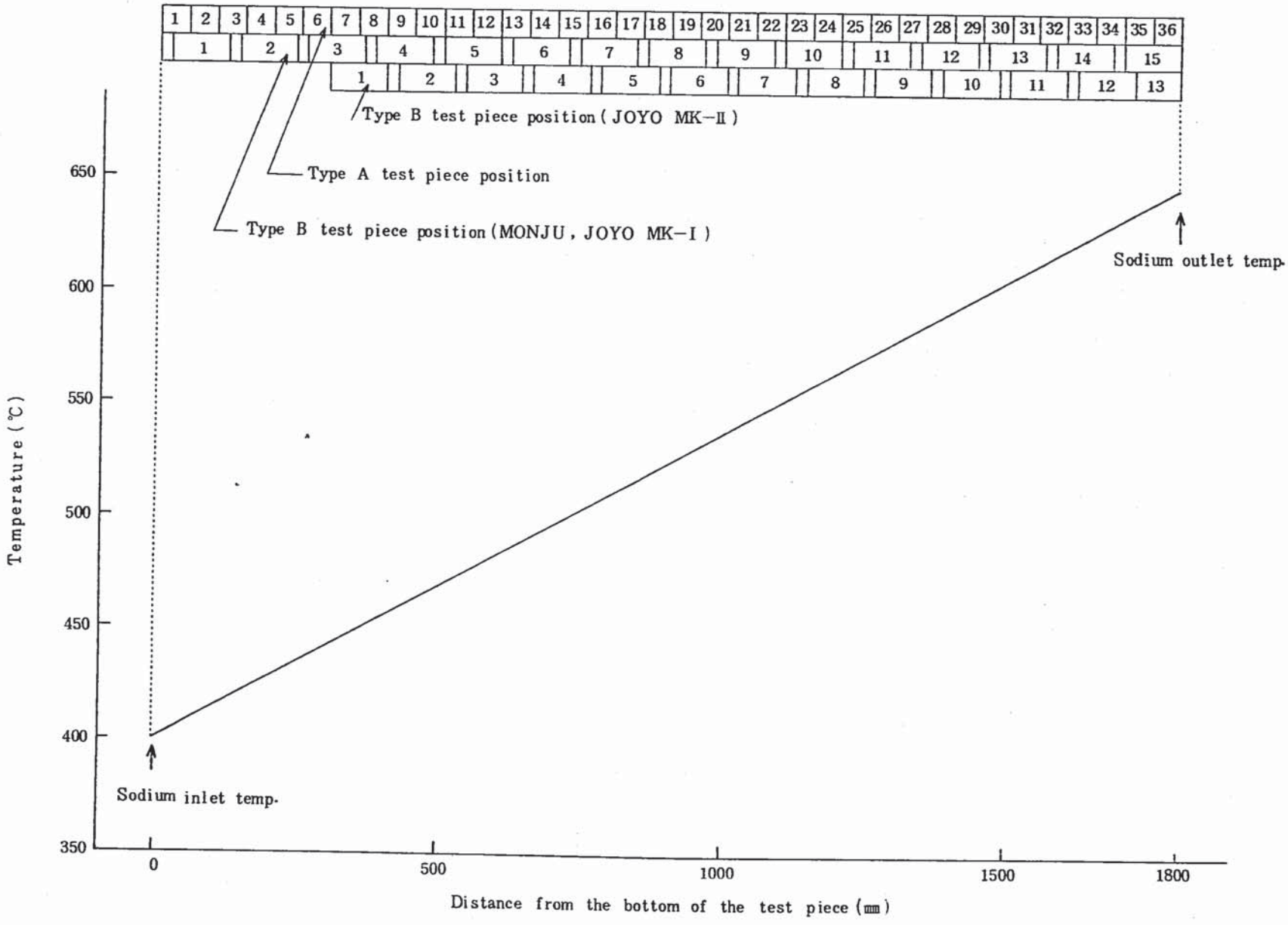


Fig. 8 Temperature profile of the test section

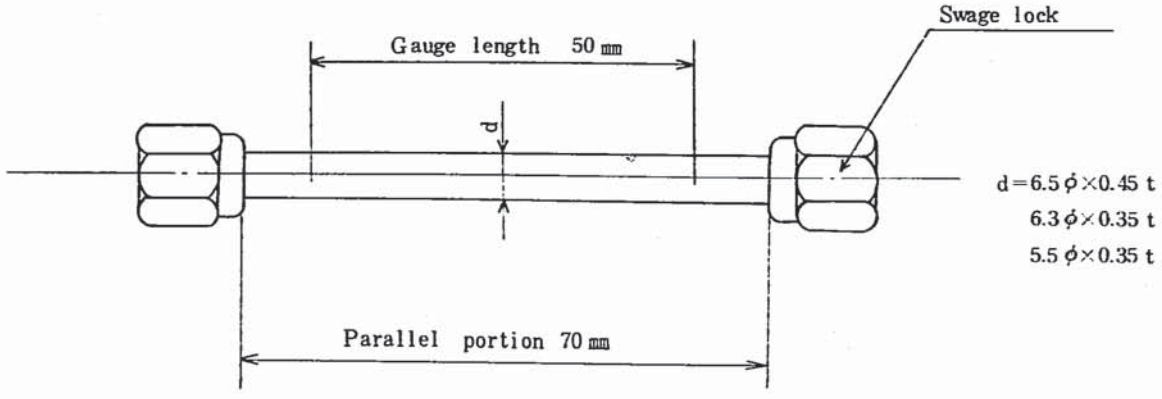


Fig. 9 Dimension of fuel cladding tube test piece for tension test.

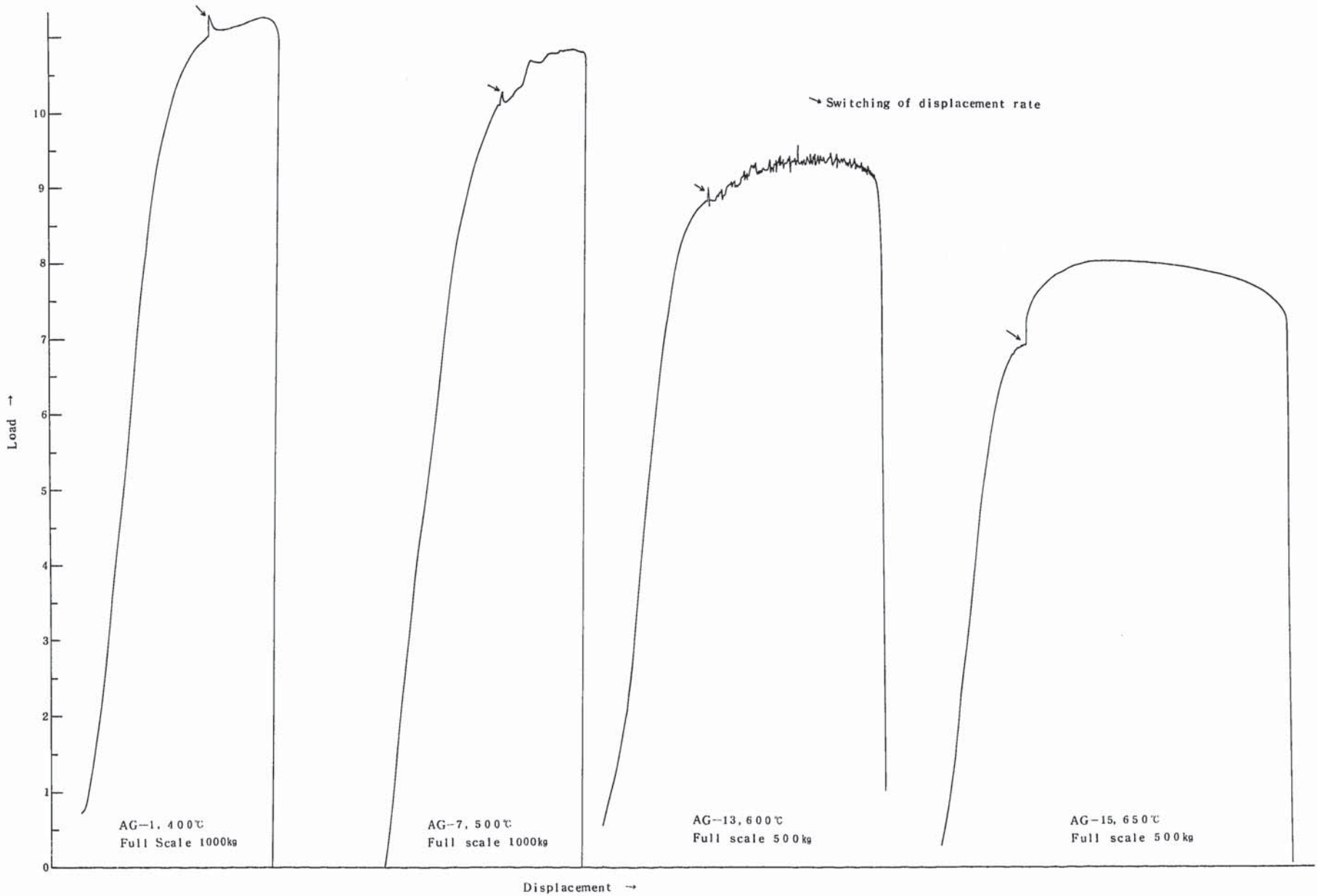


Fig. 10 Typical load—elongation eurves of as—received fuel cladding tubes at several temperatures (400℃, 500℃, 600℃ and 650℃)

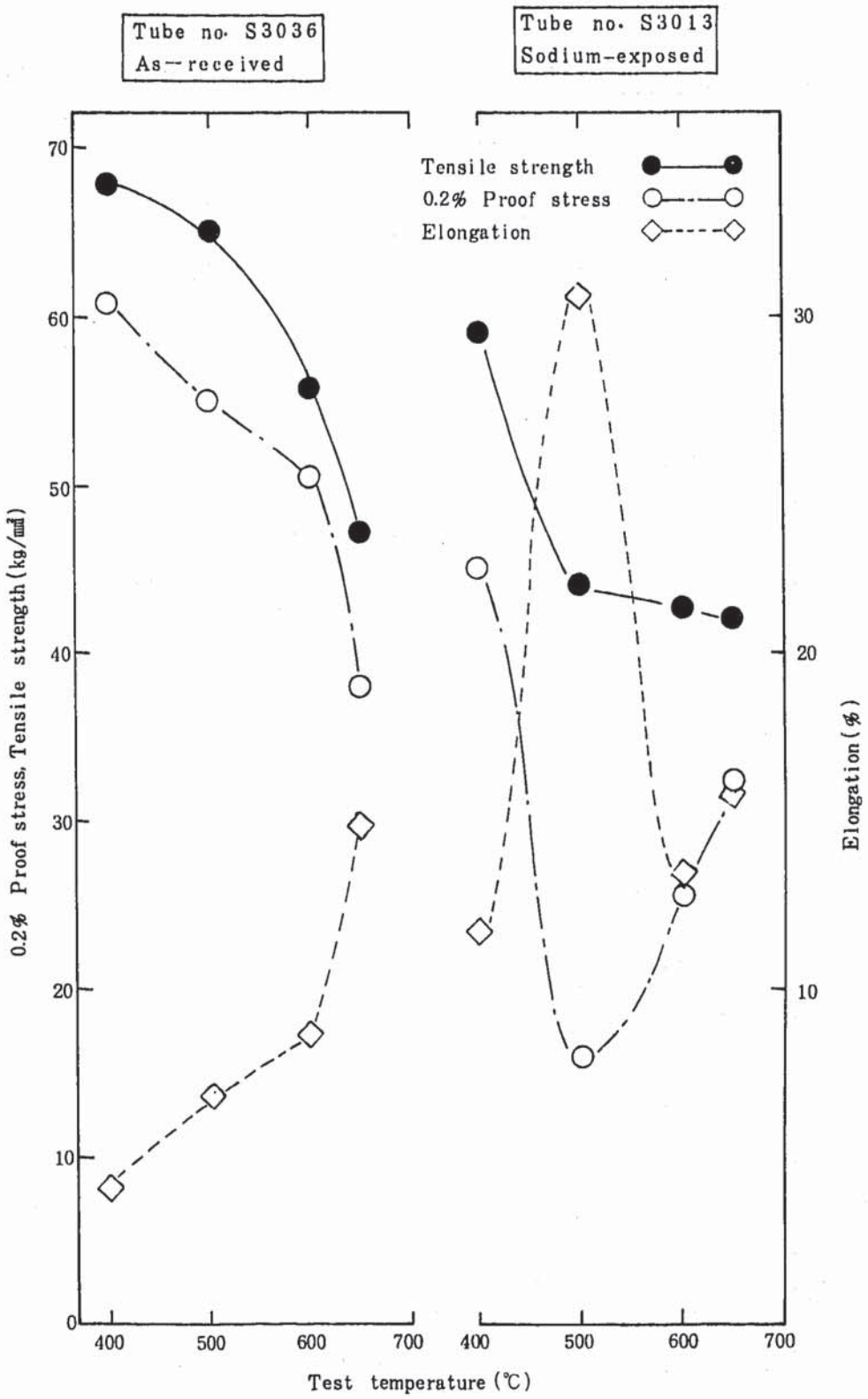


Fig. 11a Comparison of tensile properties of as－received and sodium－exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research and development) for MONJU core.

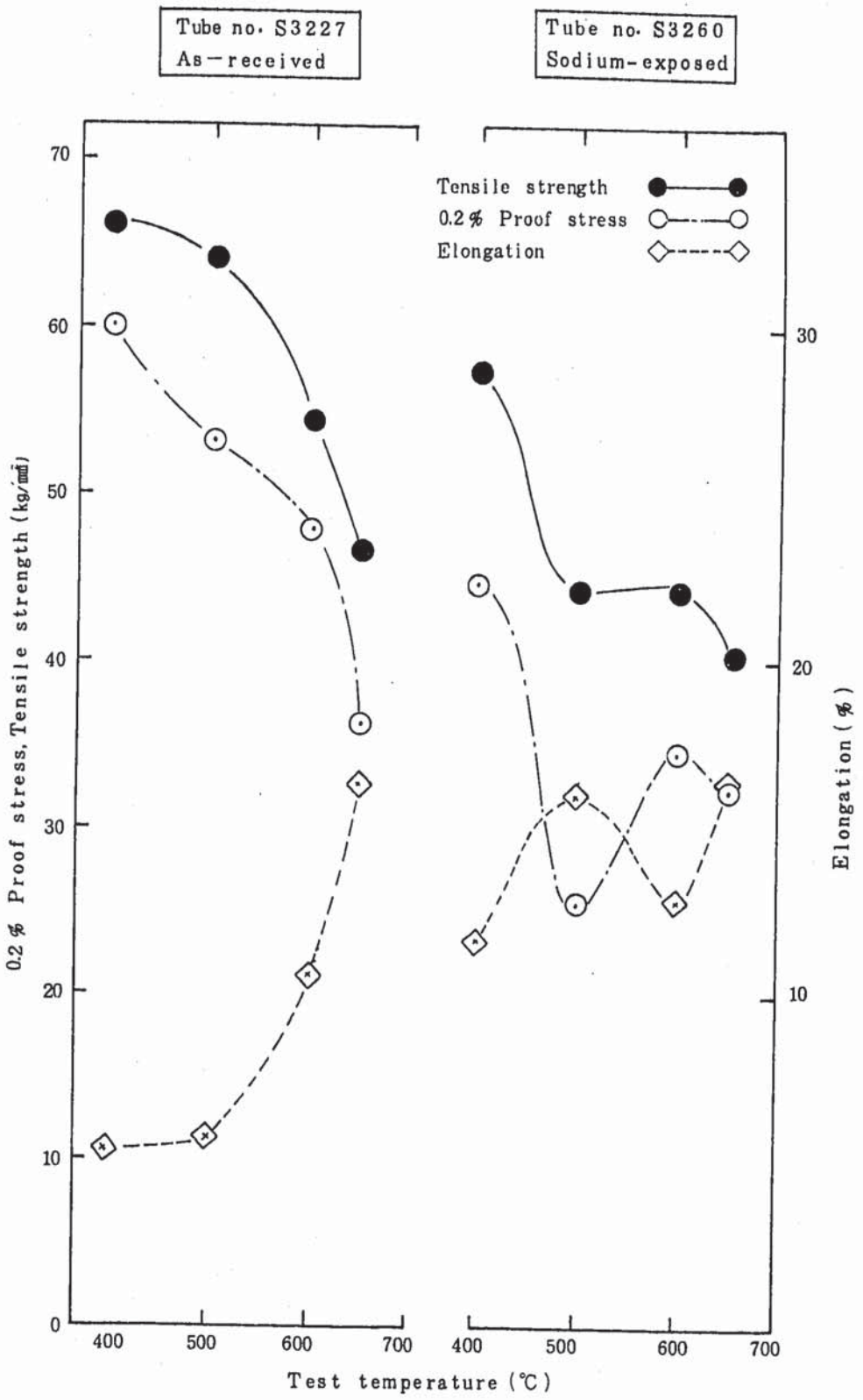


Fig. 11b Comparison of tensile properties of as－received and sodium-exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research and development) for MONJU core.

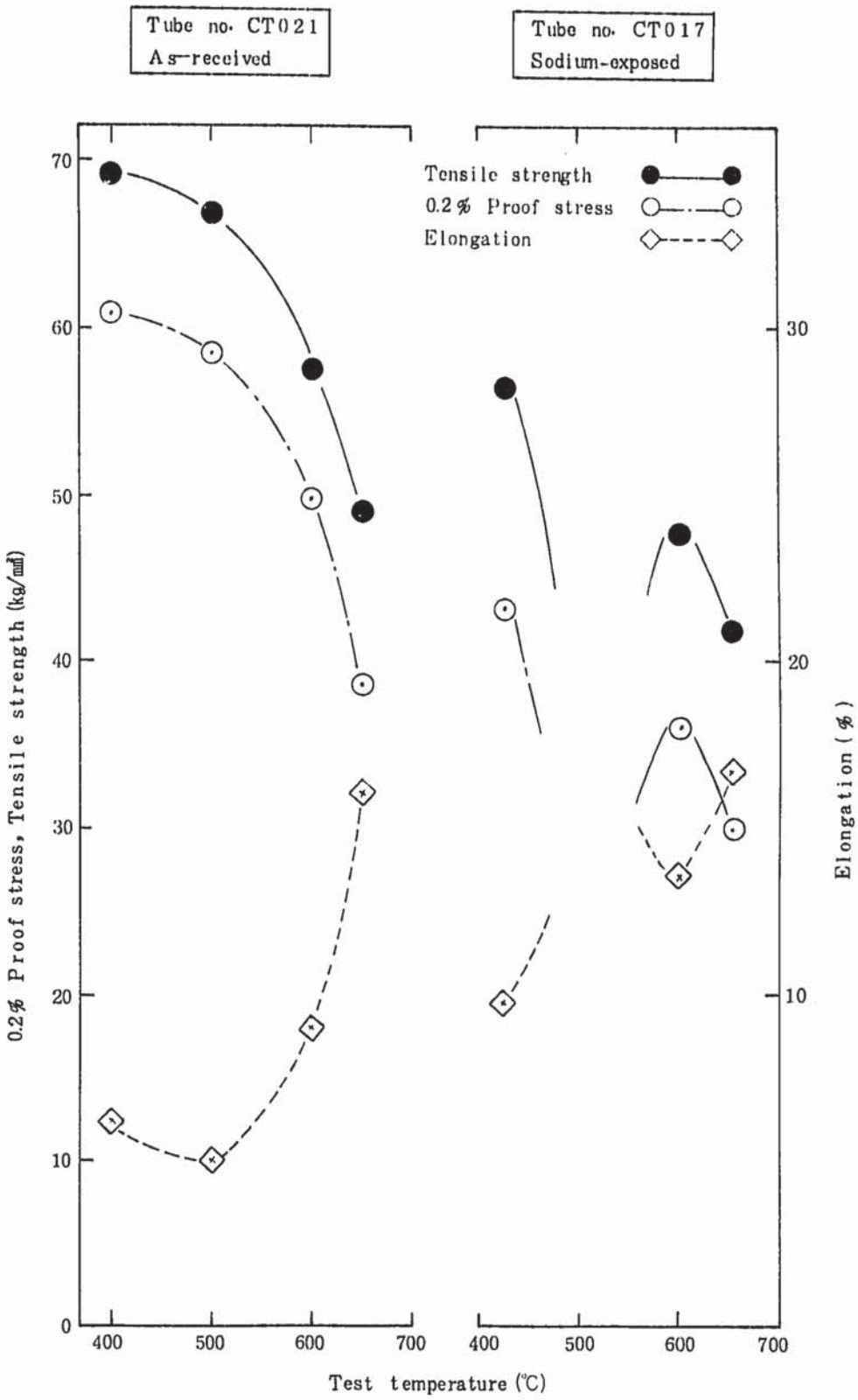


Fig. 11c Comparison of tensile properties of as－received and sodium－exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research and development) for MONJU core.

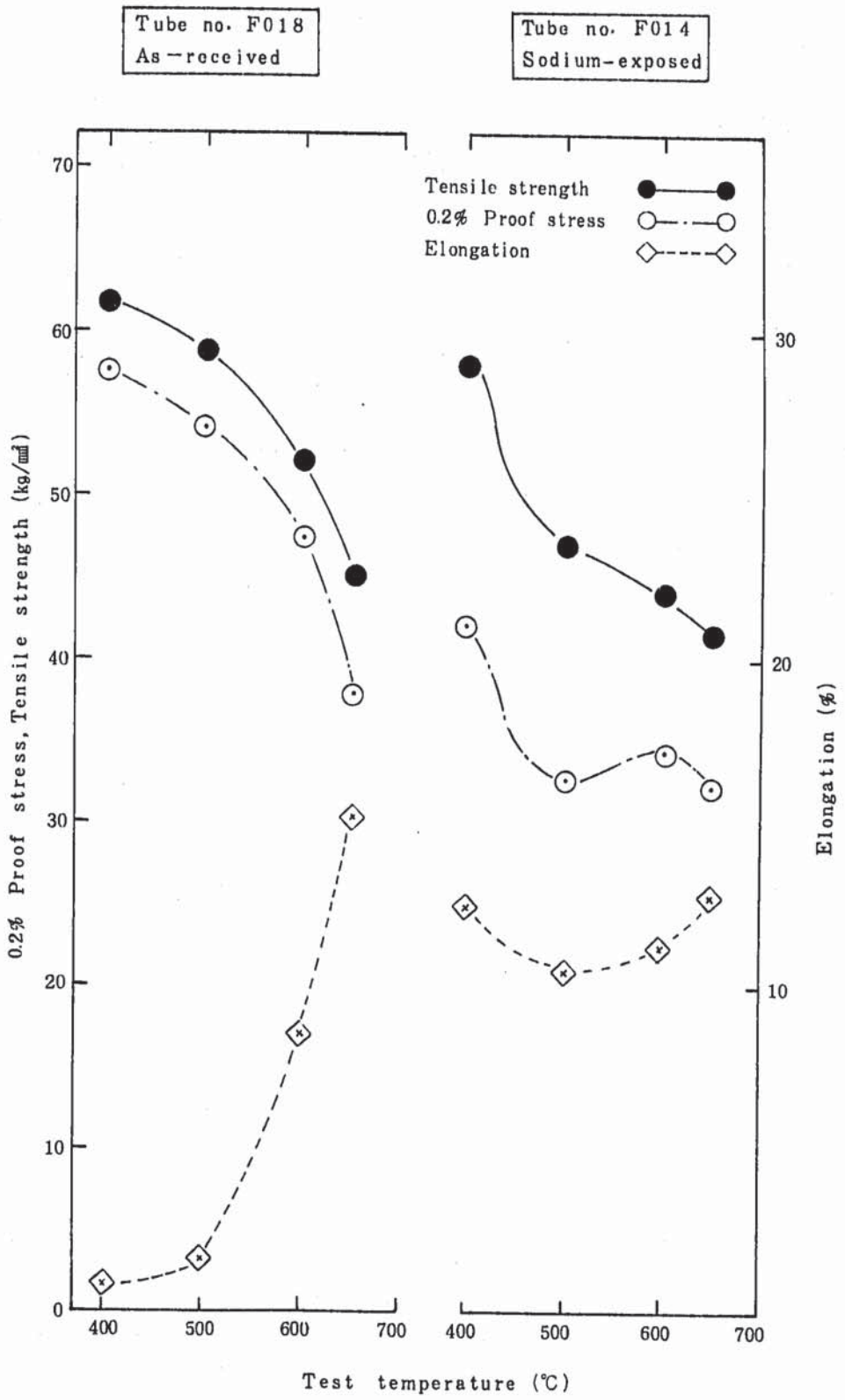


Fig. 11d Comparison of tensile properties of as－received and sodium-exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research and development) for MONJU core.

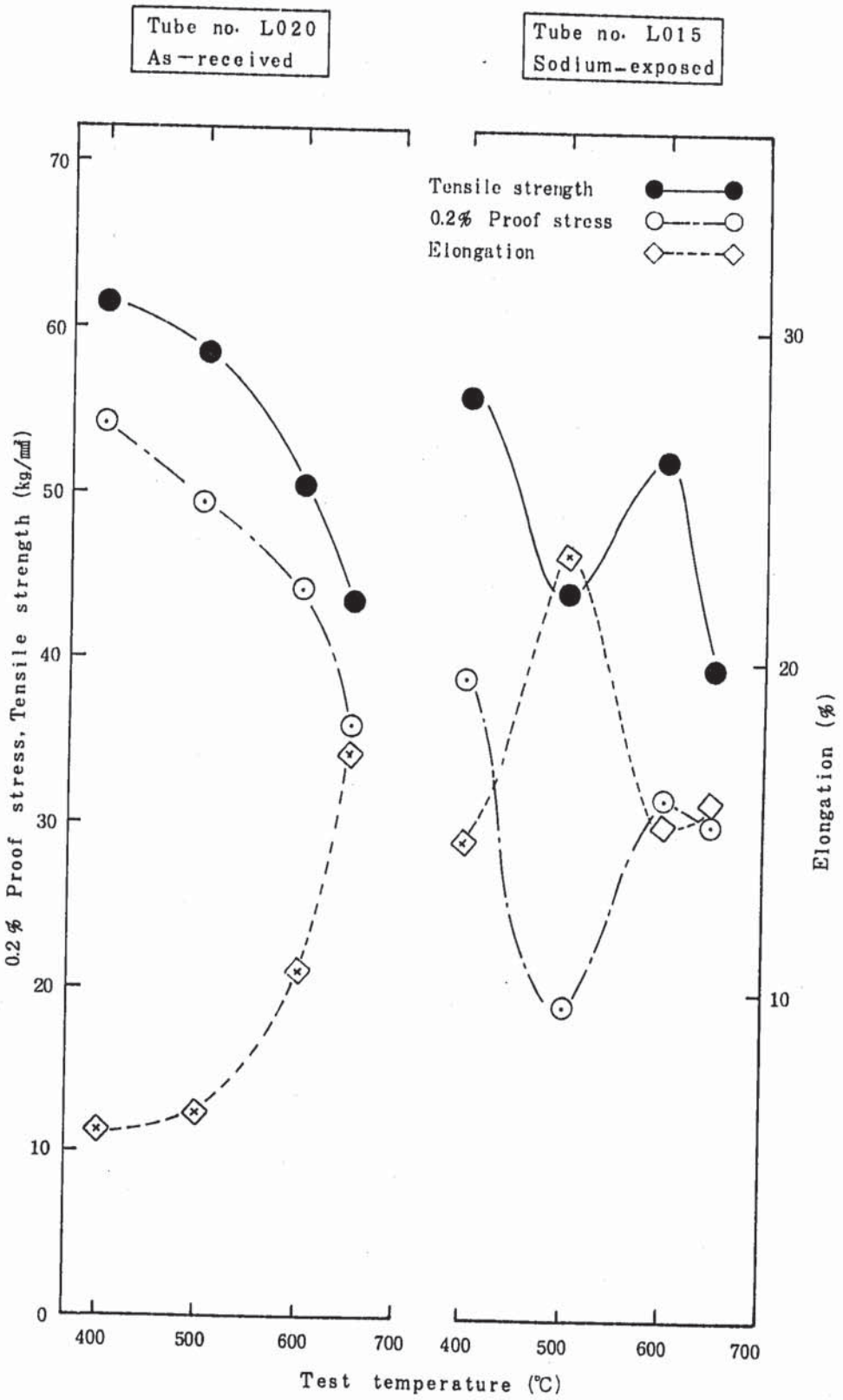


Fig. 11 e Comparison of tensile properties of as－received and sodium－exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research development) for MONJU core.

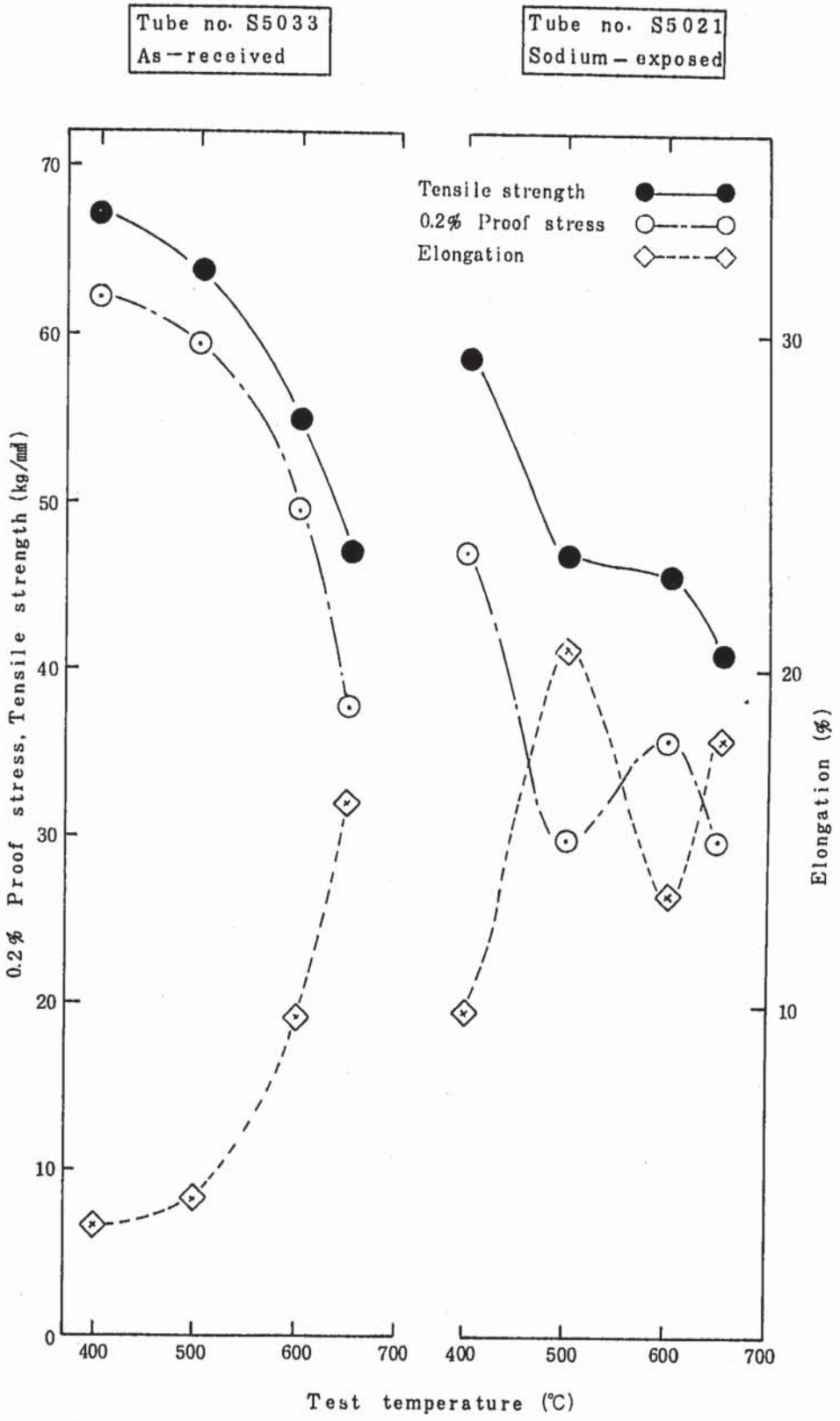


Fig. 11f Comparison of tensile properties of as－received and sodium－exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research and development) for MONJU core.

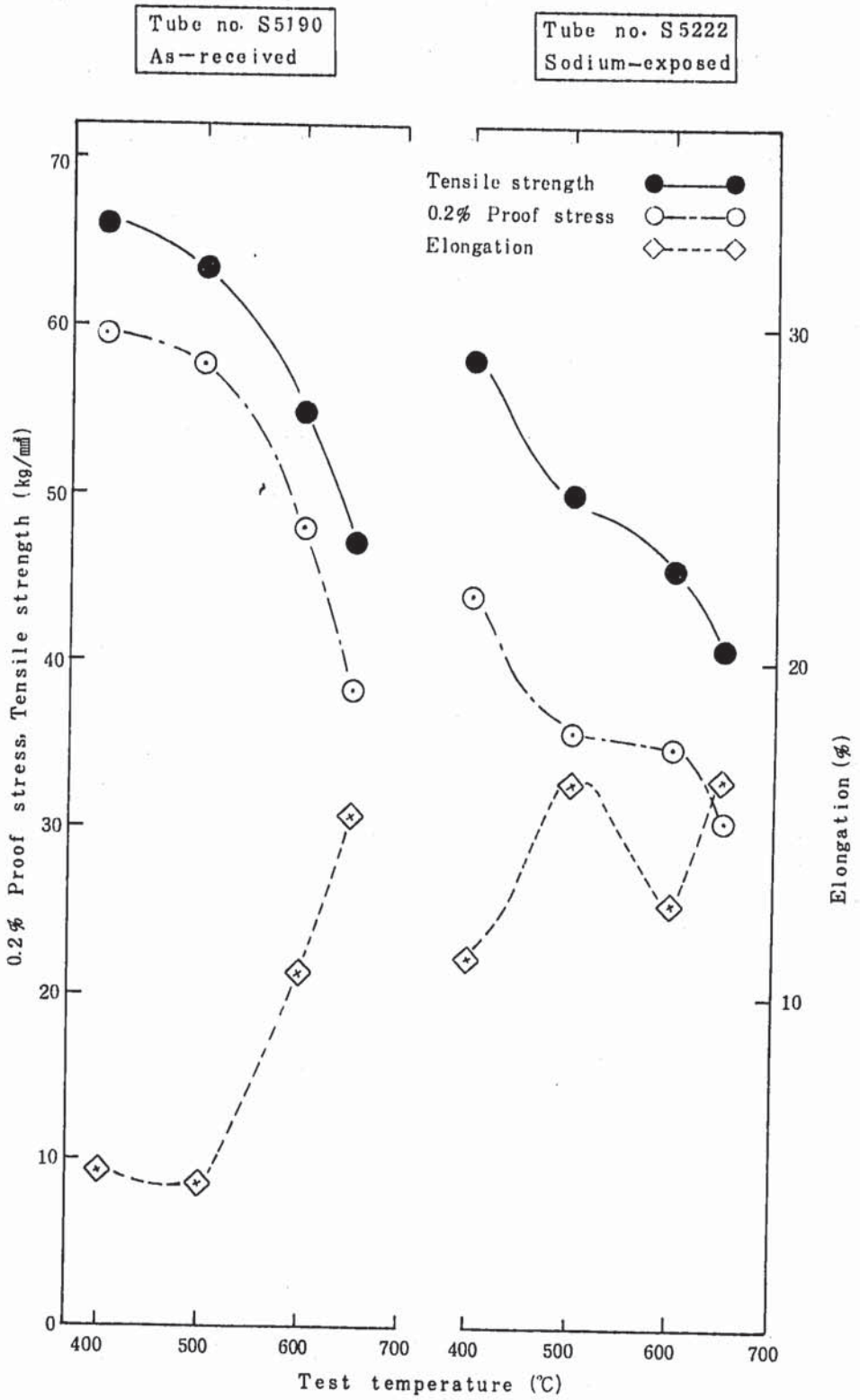


Fig. 11g Comparison of tensile properties of as－received and sodium－exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research and development) for MONJU core.

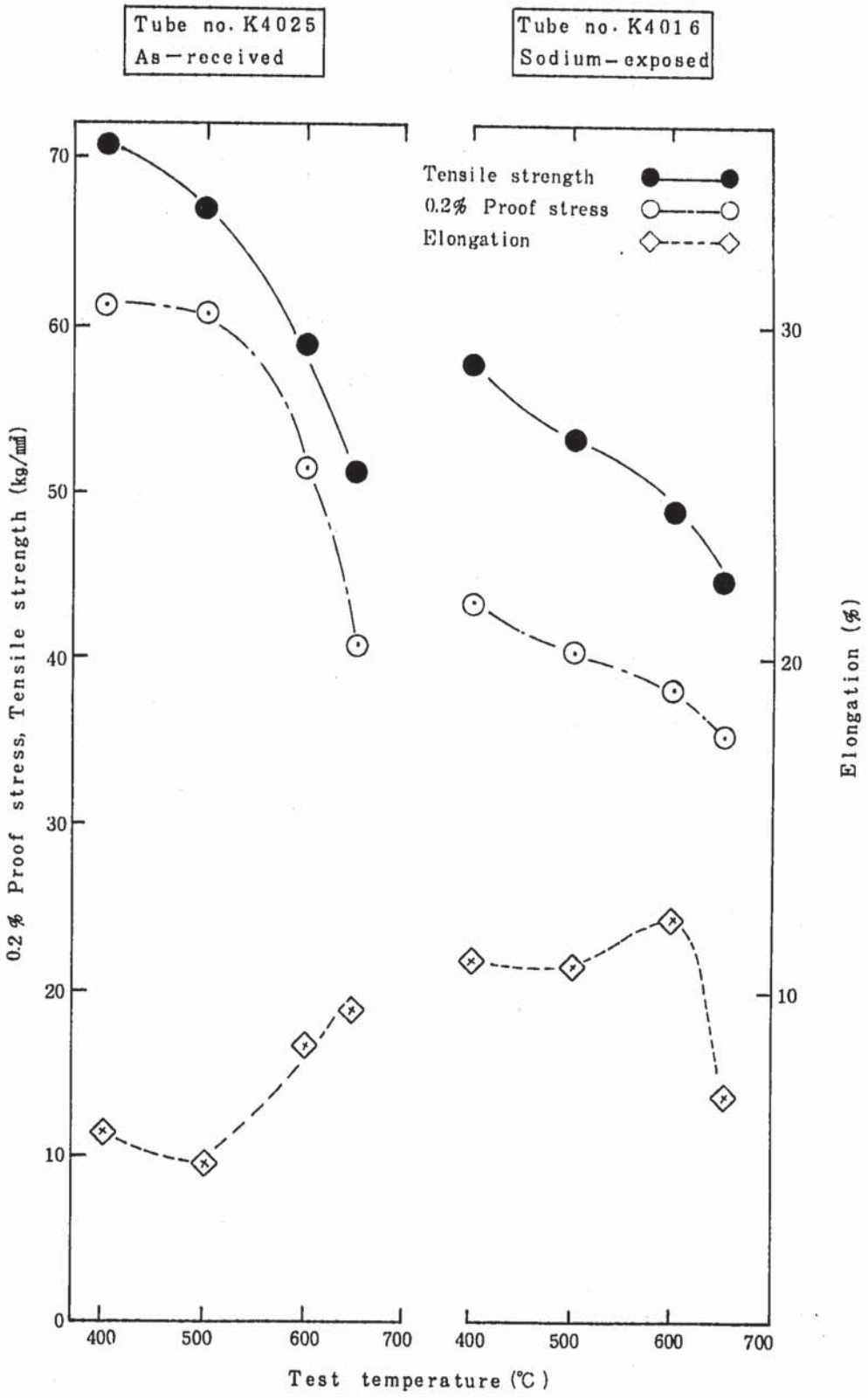


Fig. 11h Comparison of tensile properties of as－received and sodium－exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research and develpment) for MONJU core.

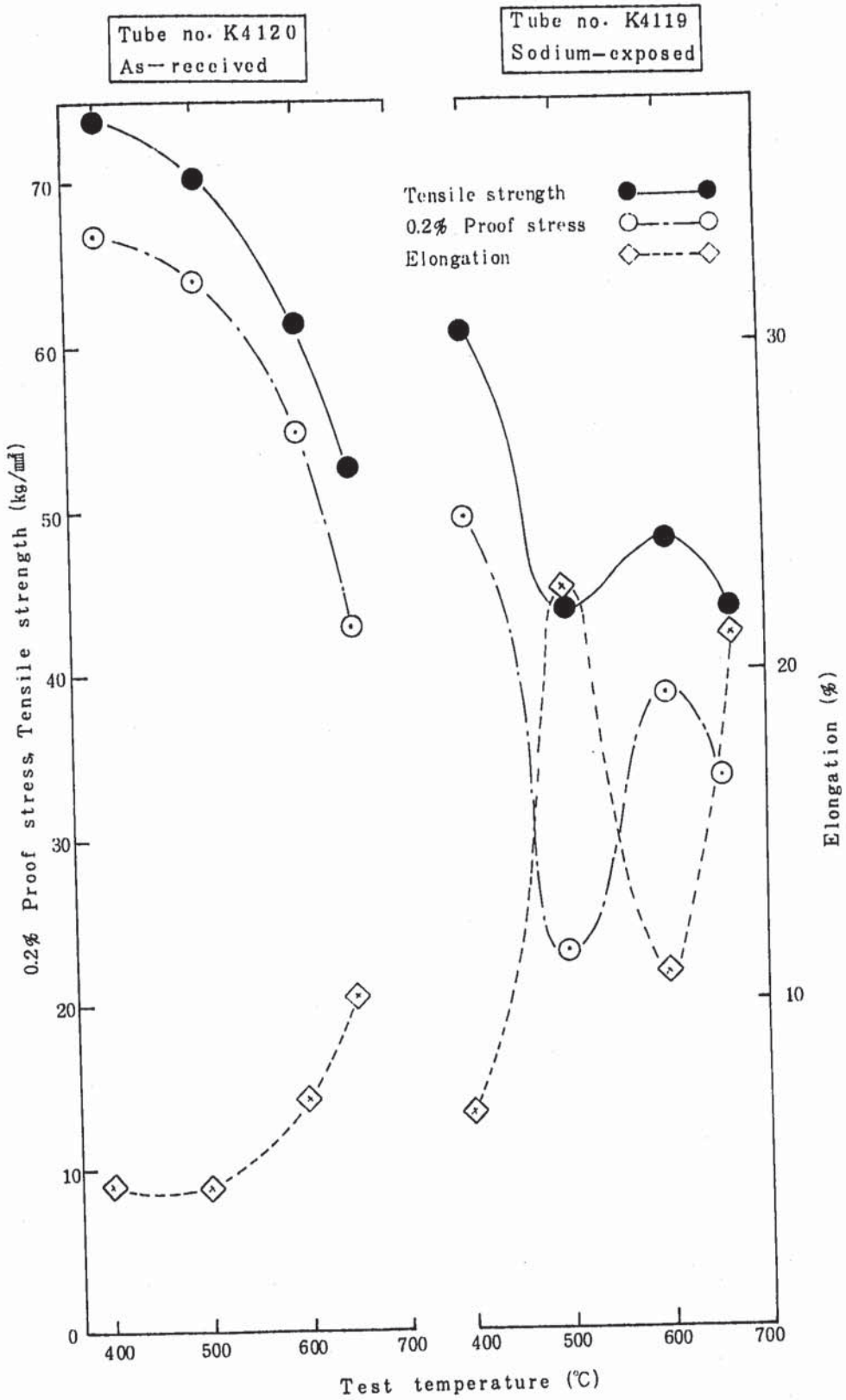


Fig. 11 i Comparison of tensile properties of as－received and sodium－exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research and development) for MONJU core.

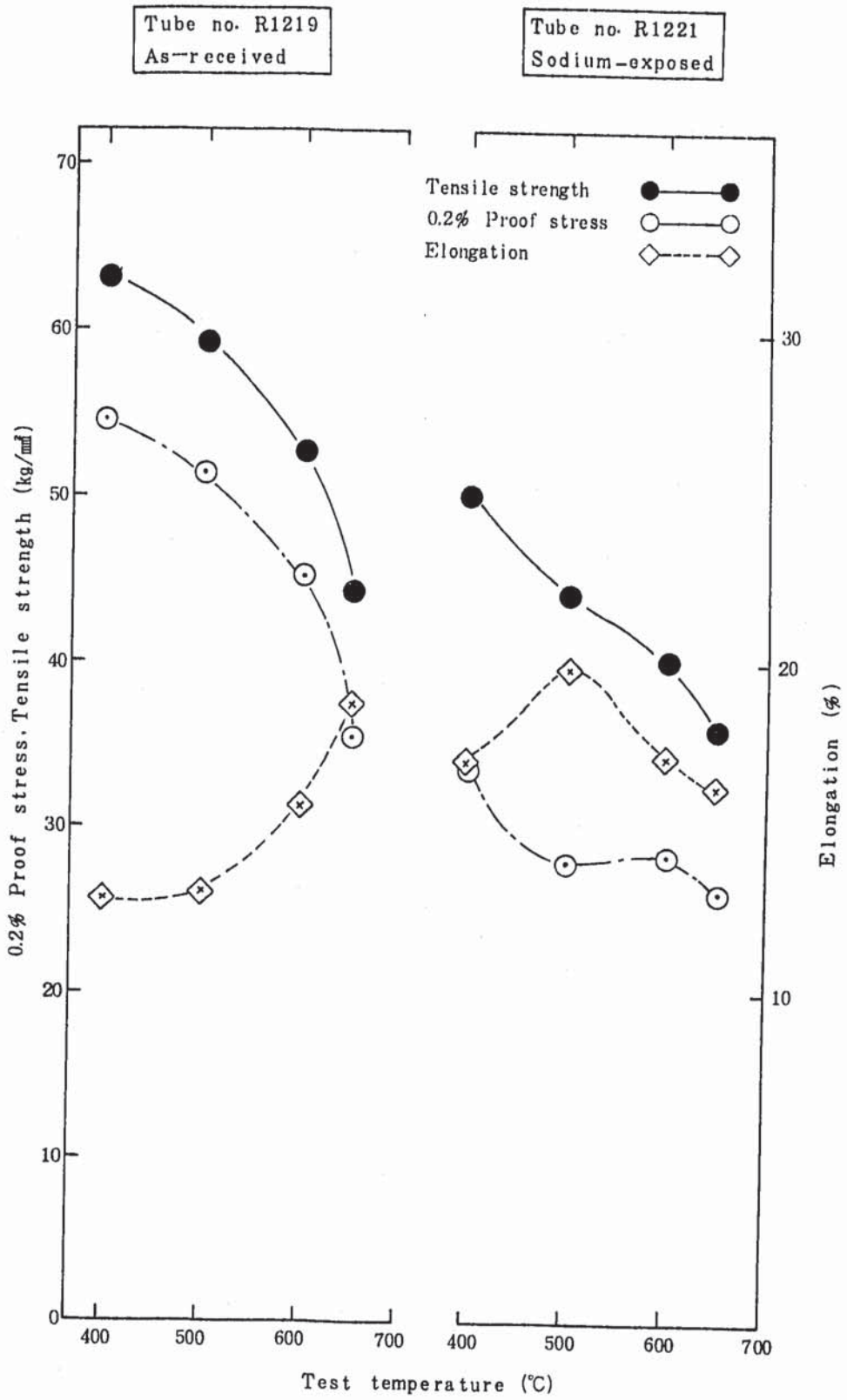


Fig. 12a Comparison of tensile properties of as－received and sodium－exposed R & D fuel cladding tubes (manufactured for research and development) for JOYO MK－I core.

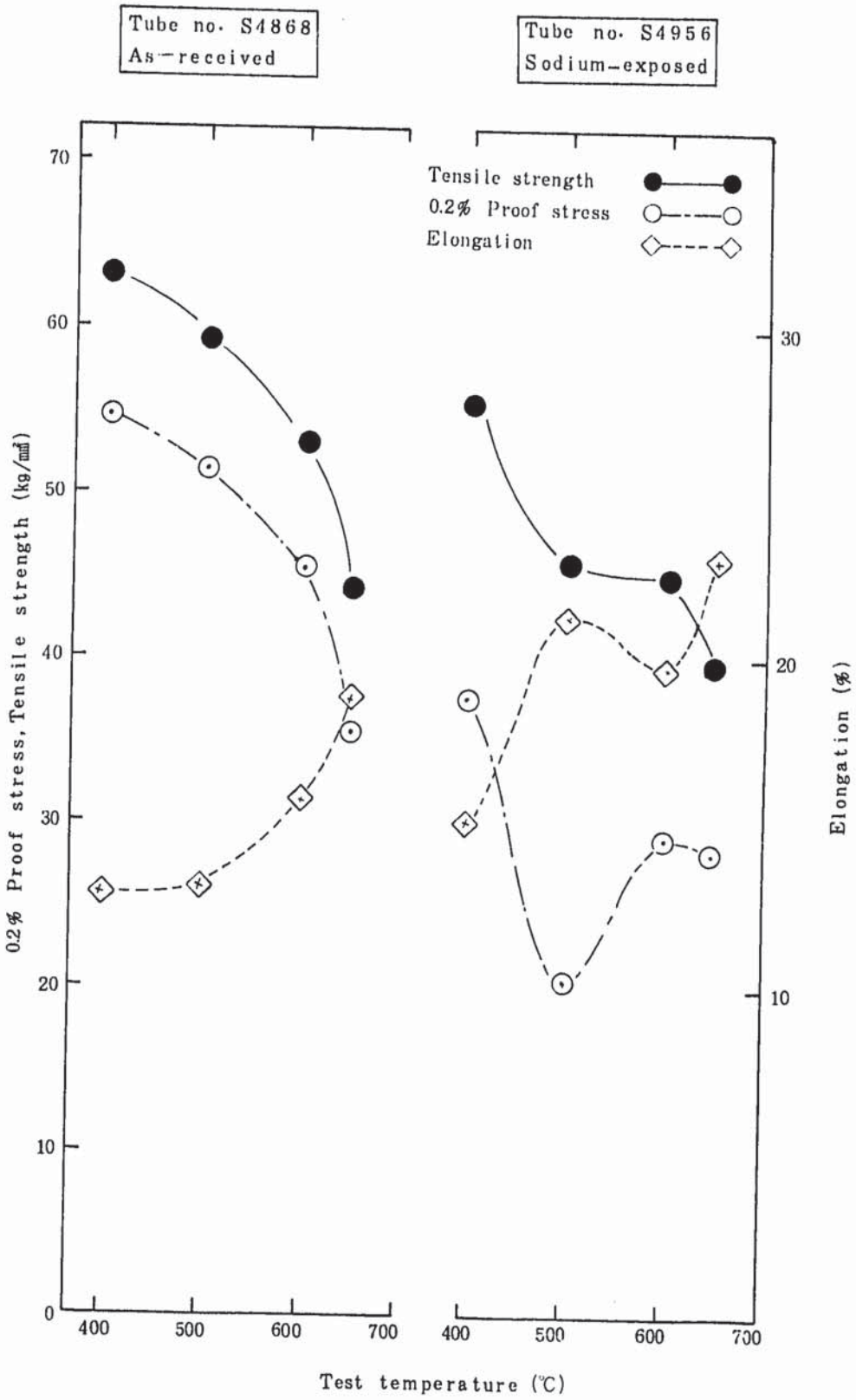


Fig. 12b Comparison of tensile properties of as－received and sodium-exposed practical fuel cladding tubes for JOYO MK－I core.

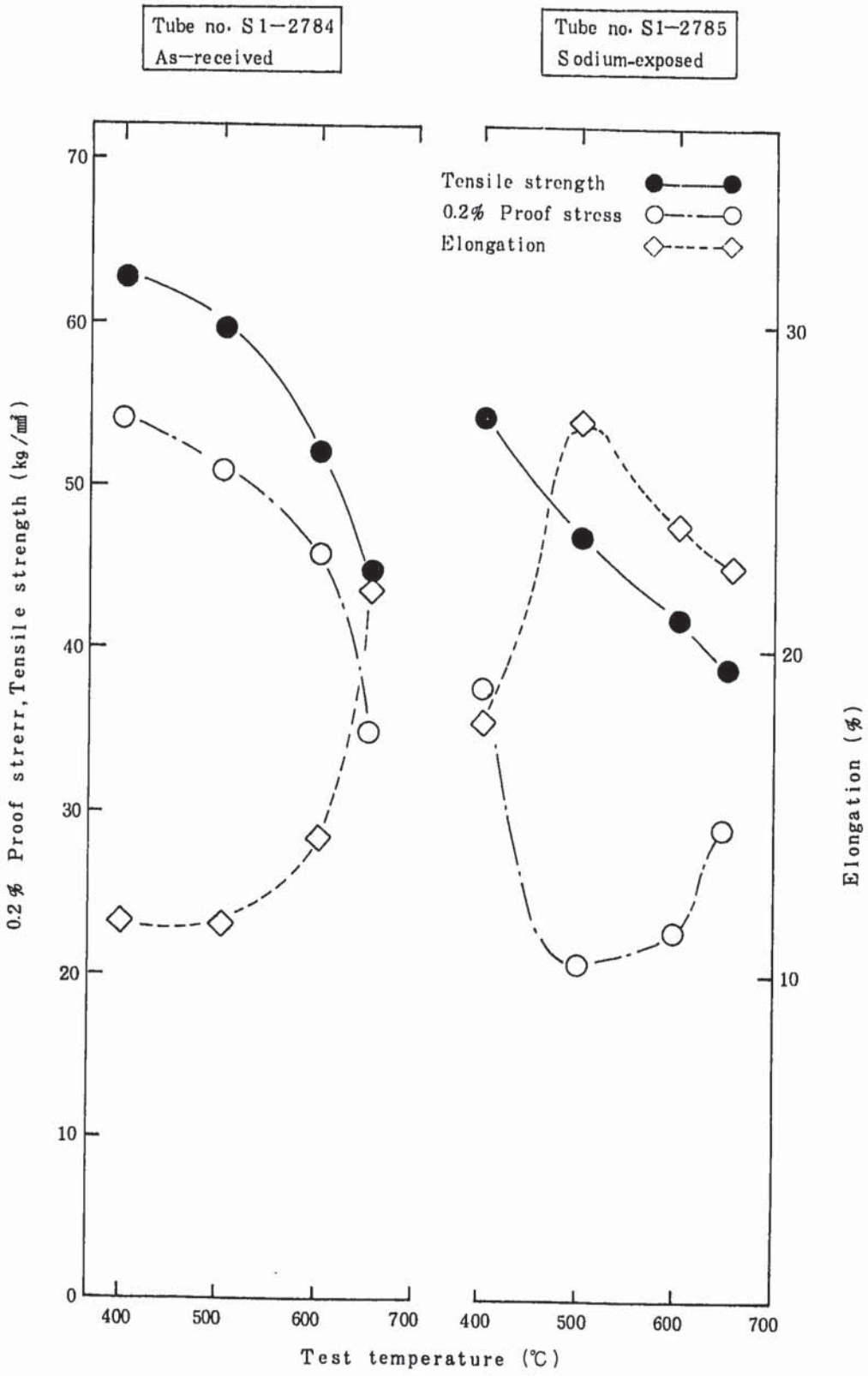


Fig. 12c Conparison of tensile properties of as－received and sodium-exposed practical fuel cladding tubes for JOYO MK I core.

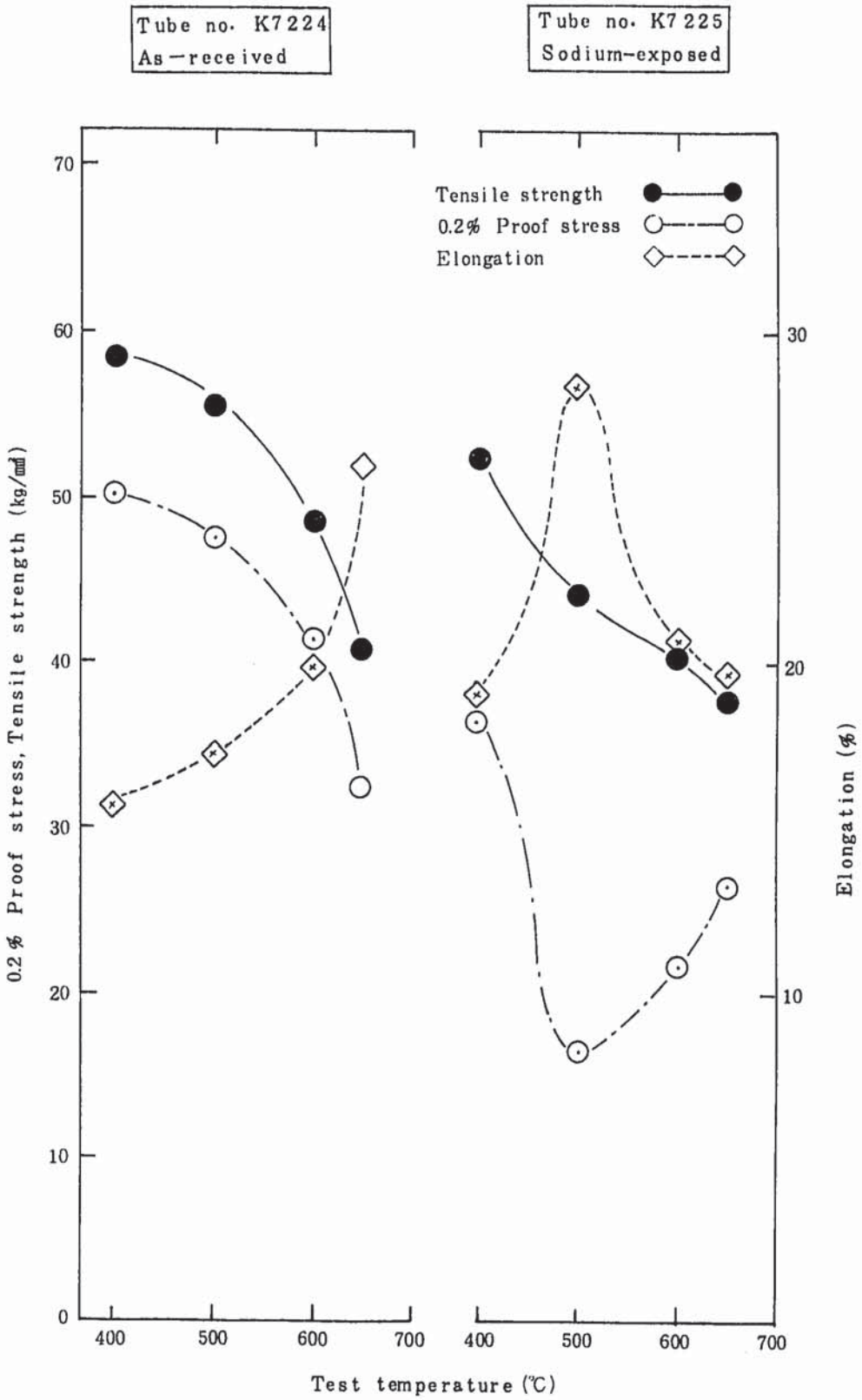


Fig. 12d Comparison of tensile properties of as－received and sodium-exposed practical fuel cladding tubes for JOYO MKI core.

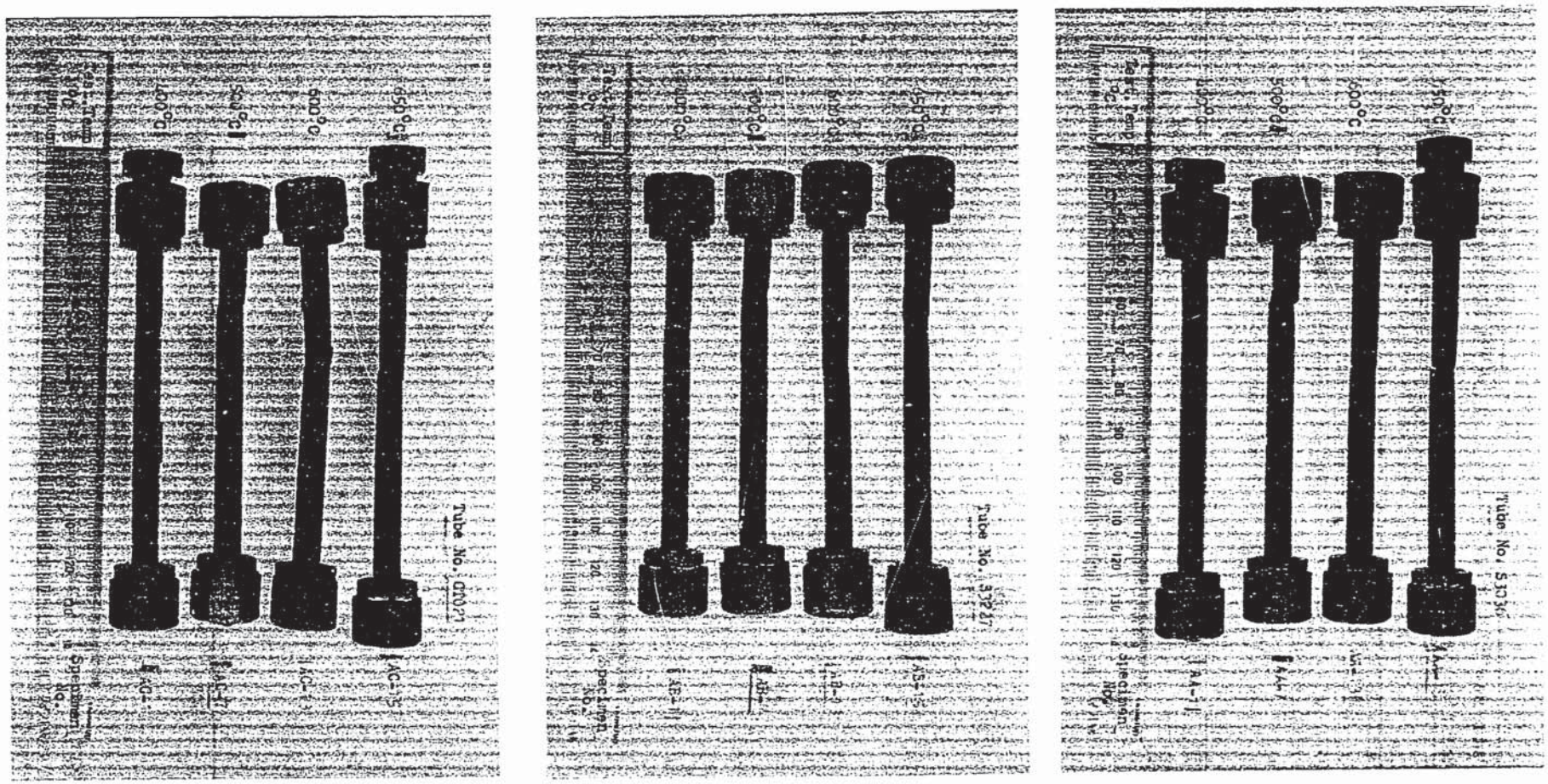


Fig. 13　Appearance after tension fracture of typical as－received test pieces

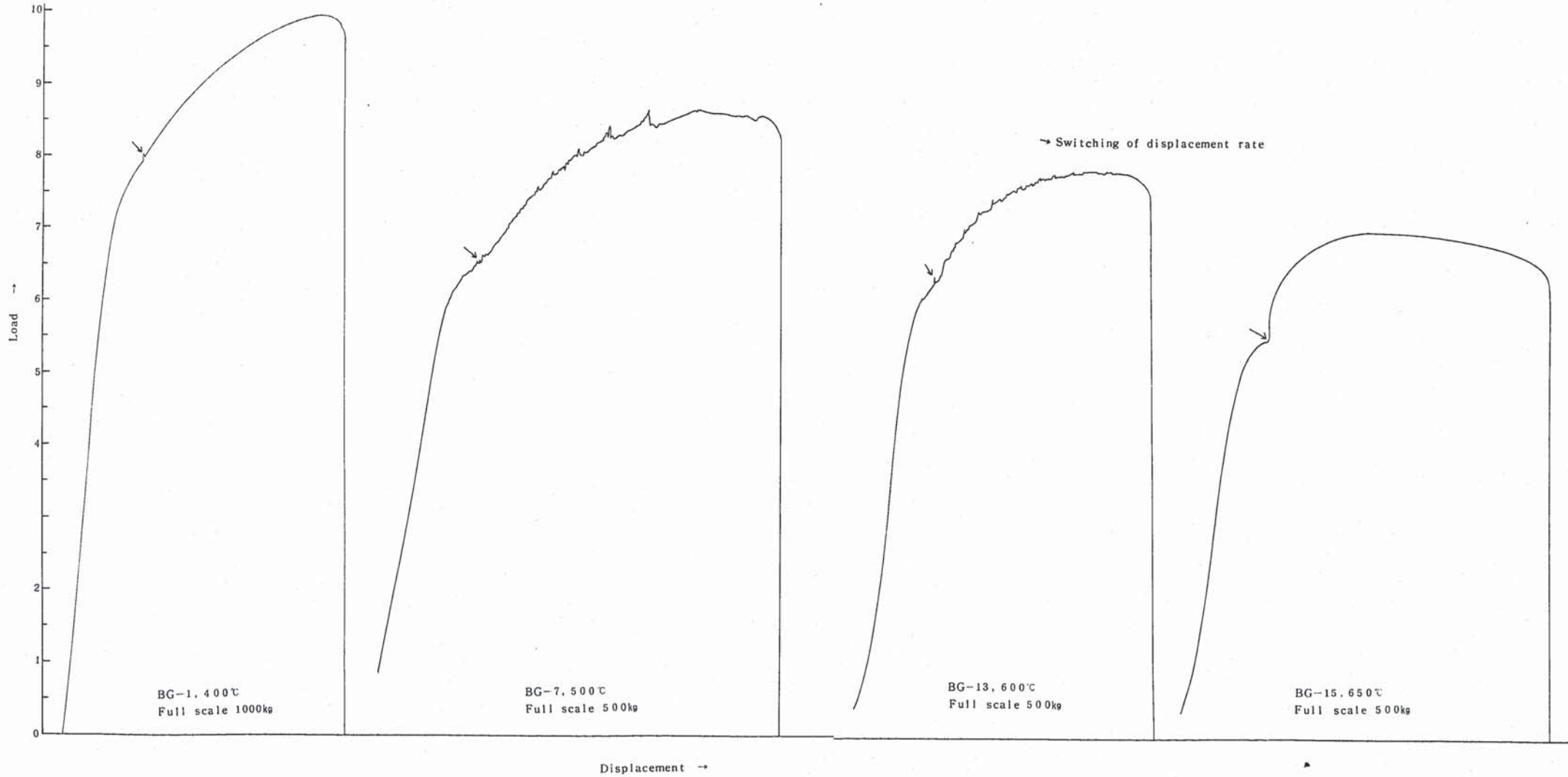


Fig. 14 Typical load—elongation curves of sodium exposed fuel cladding tubes at seneral temperatures (400℃, 500℃, 600℃ and 650℃)

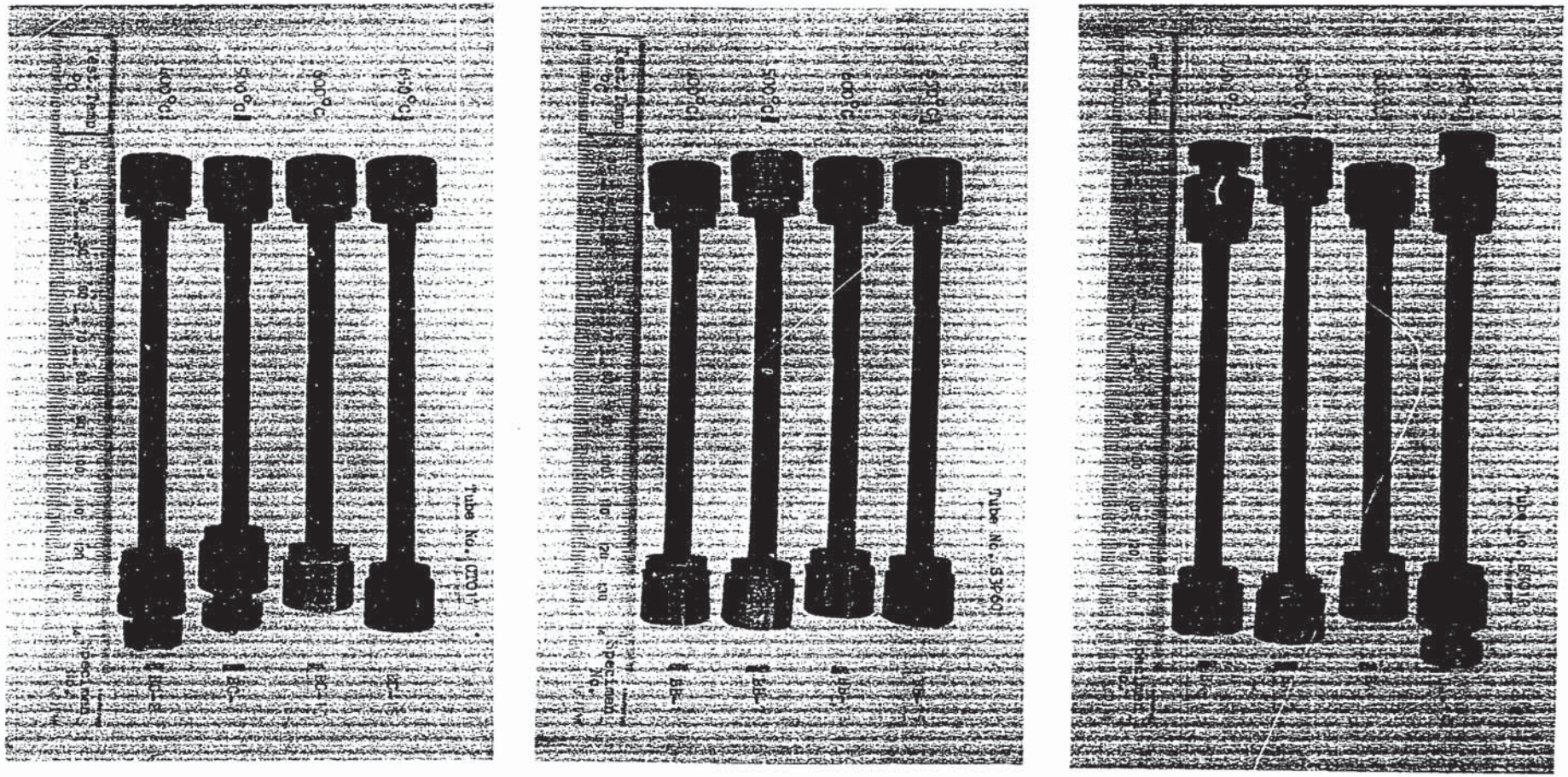
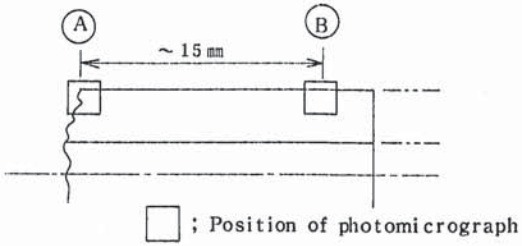
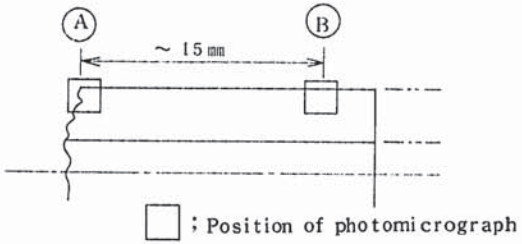


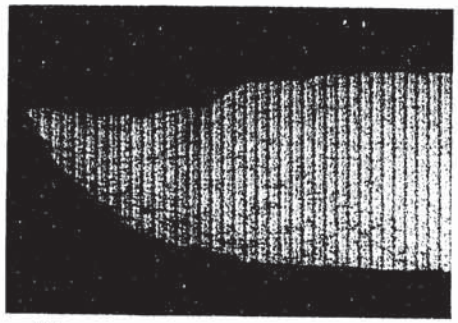
Fig. 15 Appearance after tension fracture of typical test pieces exposed to sodium

Tube No. : S3036
Specimen No. : AA－15
Test Temp. : 650℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

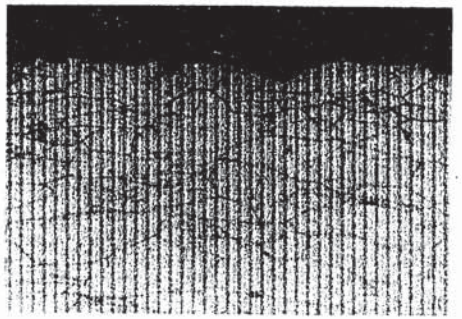


Tube No. : S3036
Specimen No. : AA－13
Test Temp. : 600℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

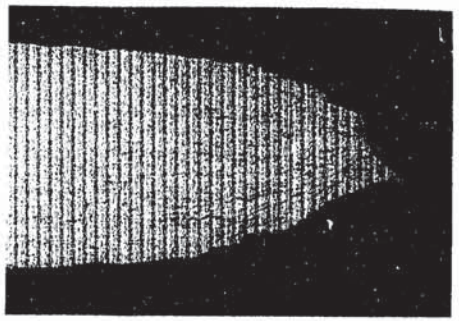




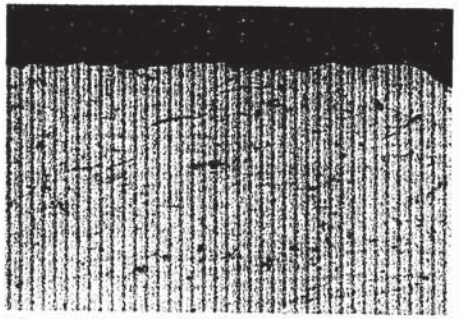
Ⓐ ×100



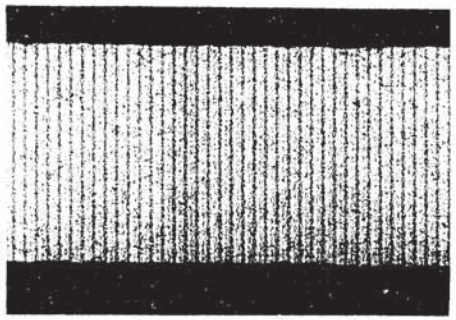
Ⓐ ×400



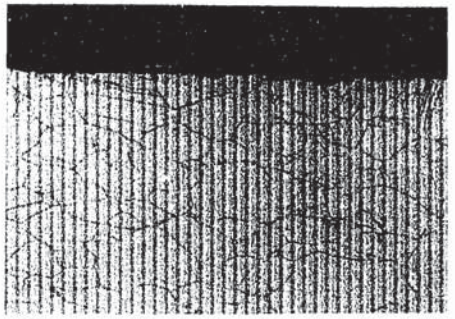
Ⓐ ×100



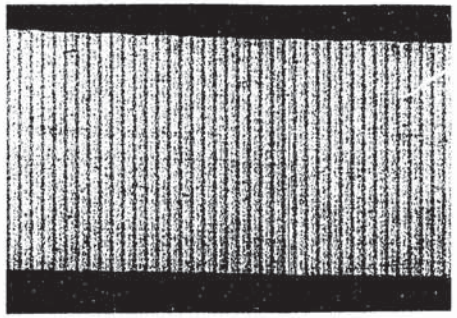
Ⓐ ×400



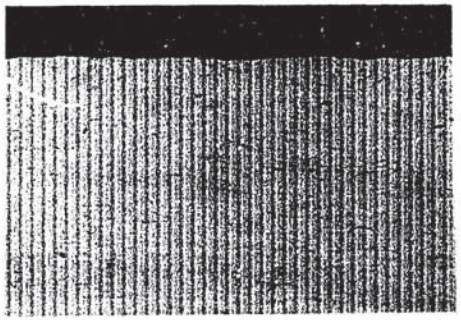
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



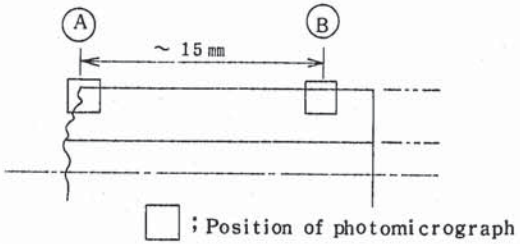
Ⓑ ×100



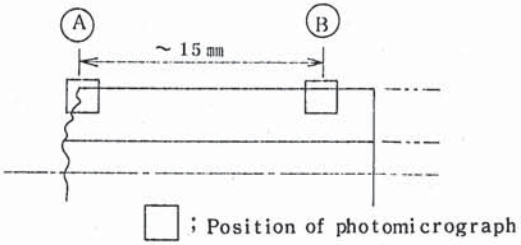
Ⓑ ×400

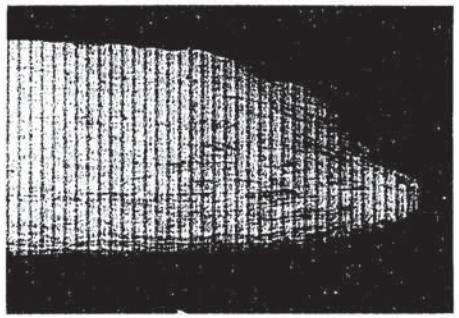
Fig. 16a Photomicrographs after tension fracture of as－received fuel, cladding tube for MONJU (48HN)

Tube No. : S3036
Specimen No. : AA－7
Test Temp. : 500℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

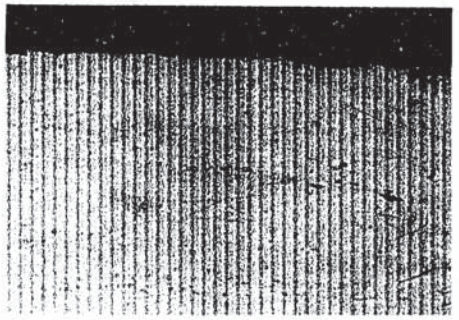


Tube No. : S3036
Specimen No. : AA－1
Test Temp. : 400℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

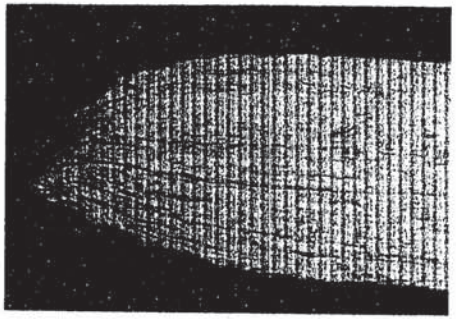




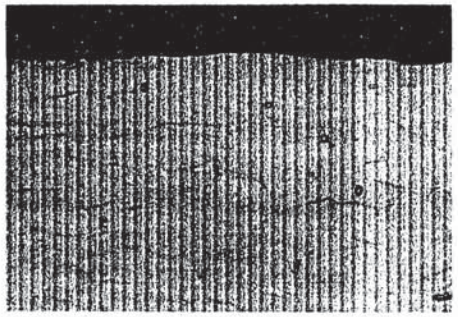
Ⓐ ×100



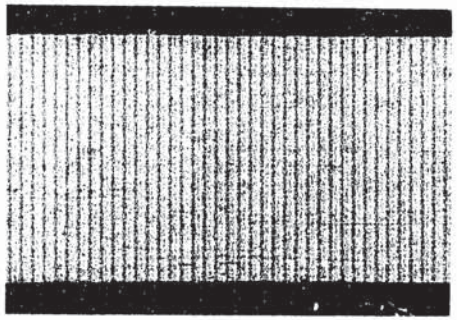
Ⓐ ×400



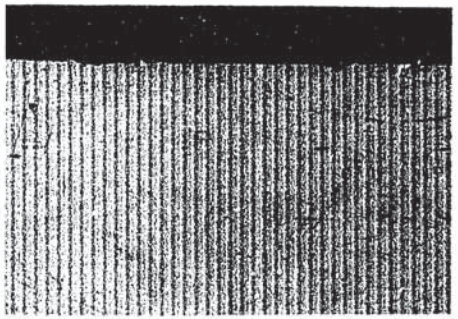
Ⓐ ×100



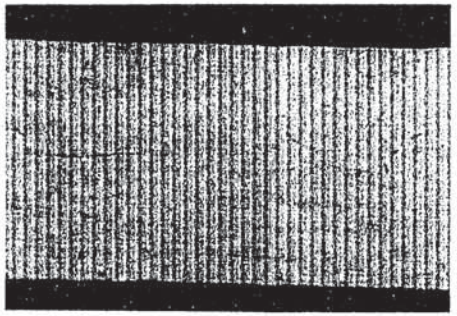
Ⓐ ×400



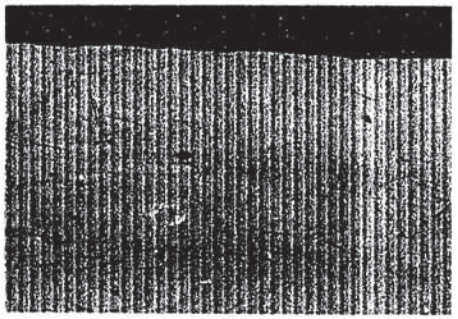
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



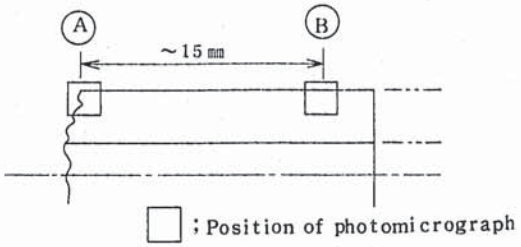
Ⓑ ×100



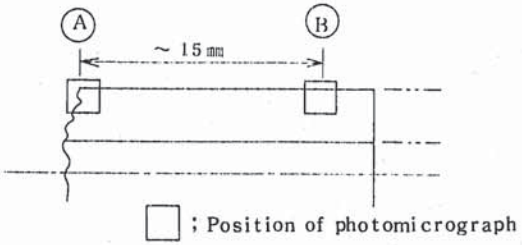
Ⓑ ×400

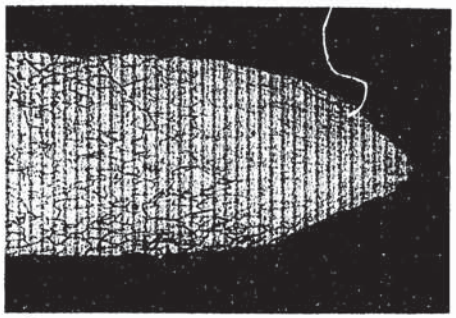
Fig. 16b Photomicrographs after tension fracture of as－received fuel, cladding tube for MONJU(48HN)

Tube No. : F018
Specimen No. : AD－15
Test Temp. : 650℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

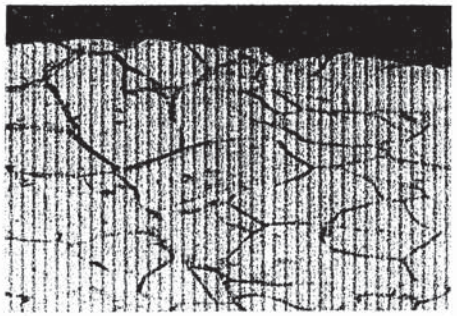


Tube No. : F018
Specimen No. : AD－13
Test Temp. : 600℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

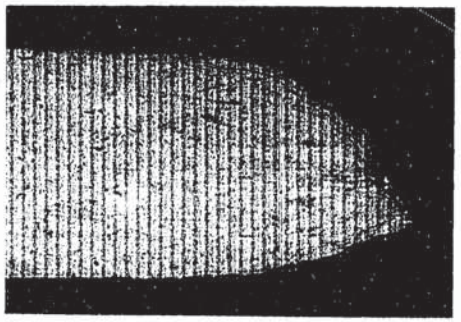




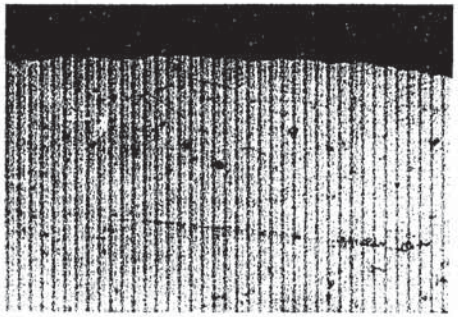
Ⓐ ×100



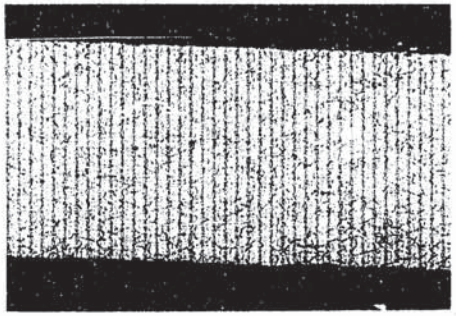
Ⓐ ×400



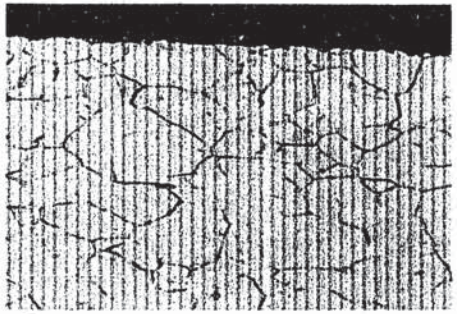
Ⓐ ×100



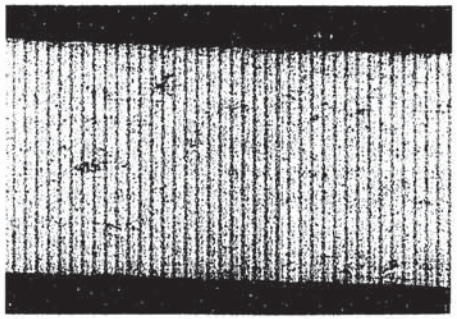
Ⓐ ×400



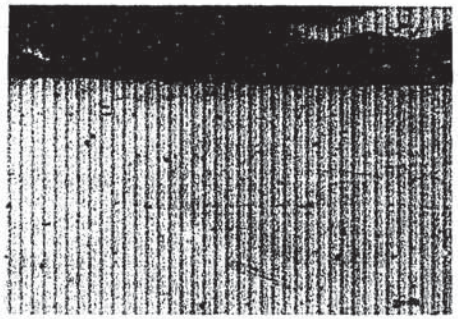
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



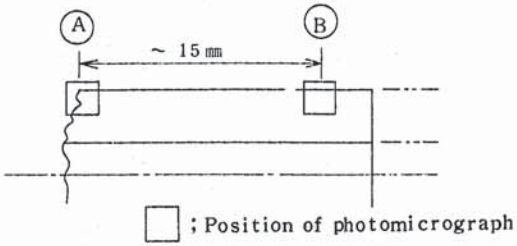
Ⓑ ×100



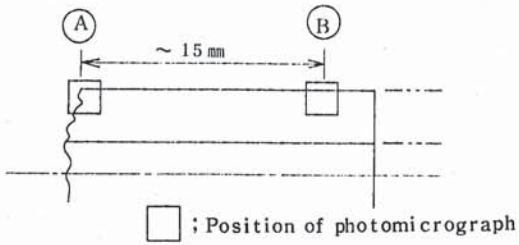
Ⓑ ×400

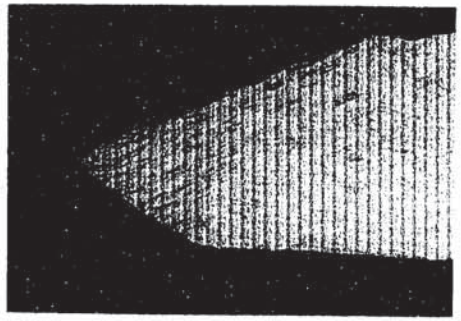
Fig. 17a Photomicrographs after tension fracture of as－received fuel, cladding tube for MONJU(48－FT)

Tube No. : F018
Specimen No. : AD－7
Test Temp. : 500℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

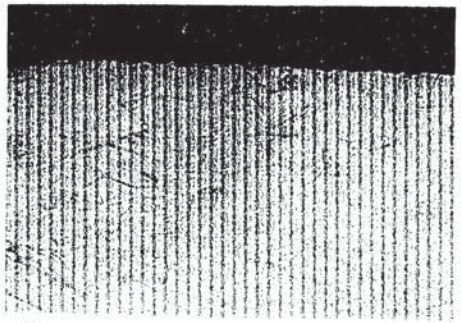


Tube No. : F018
Specimen No. : AD－1
Test Temp. : 400℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

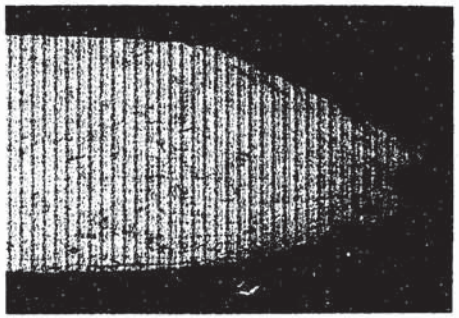




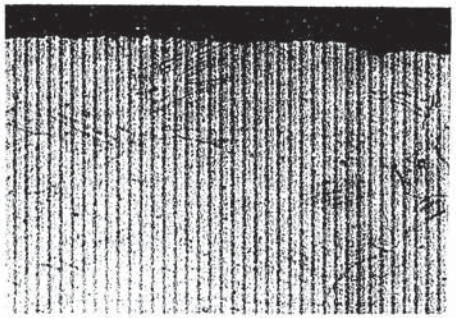
Ⓐ ×100



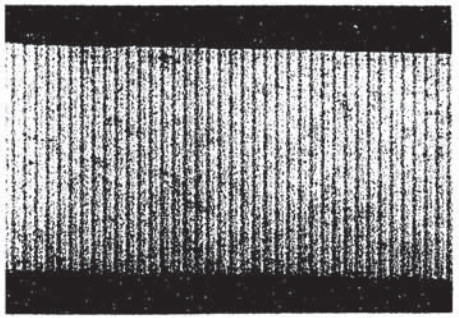
Ⓐ ×400



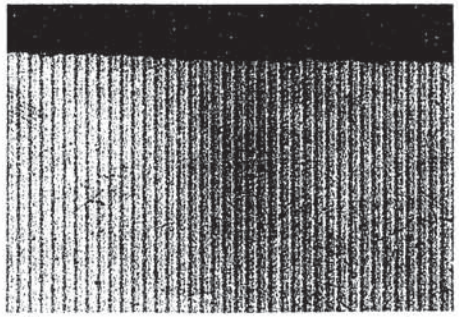
Ⓐ ×100



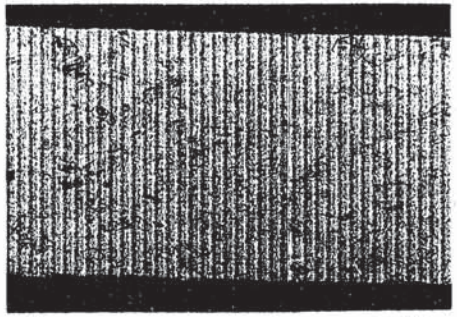
Ⓐ ×400



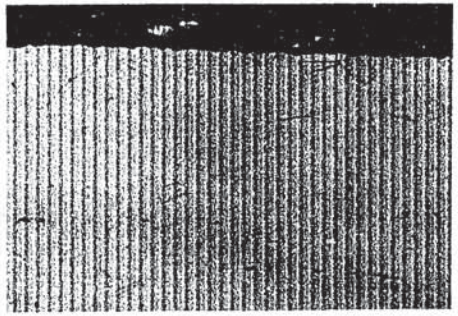
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



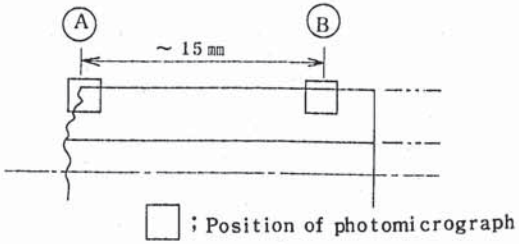
Ⓑ ×100



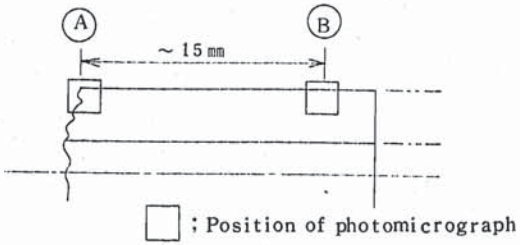
Ⓑ ×400

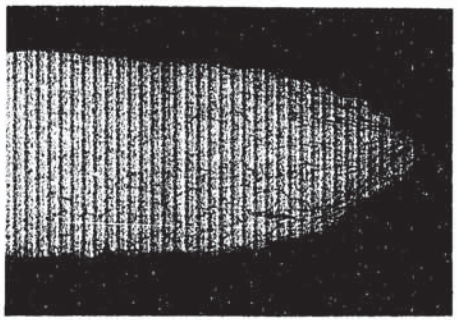
Fig. 17b Photomicrographs after tension fracture of as－received fuel, cladding tube for MONJU (48－FT)

Tube No. : L020
Specimen No. : AE－15
Test Temp. : 650℃
Tube Size. : 6.5$^{\phi}$×0.45^{t}

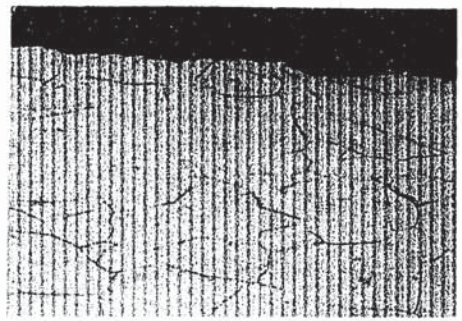


Tube No. : L020
Specimen No. : AE－13
Test Temp. : 600℃
Tube Size. : 6.5$^{\phi}$×0.45^{t}

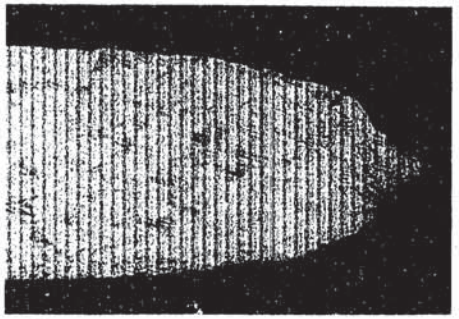




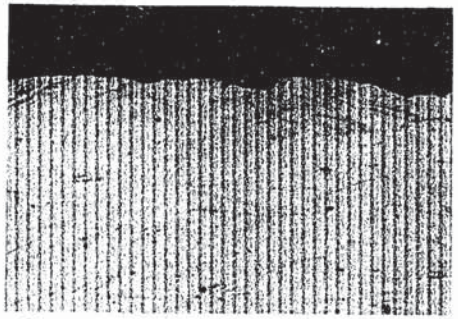
Ⓐ ×100



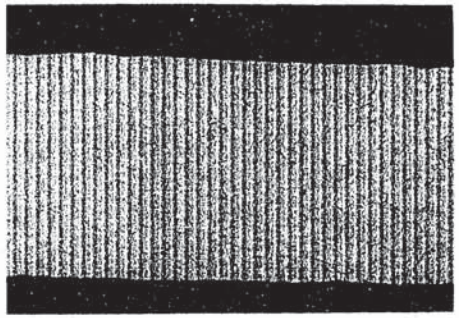
Ⓐ ×400



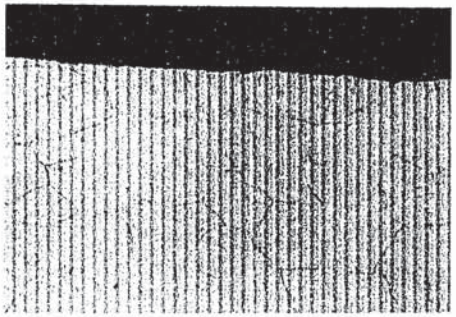
Ⓐ ×100



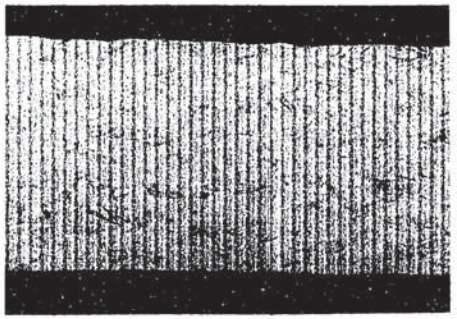
Ⓐ ×400



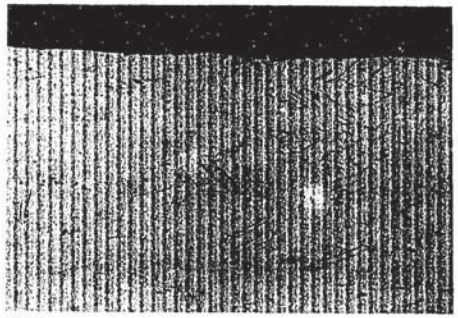
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



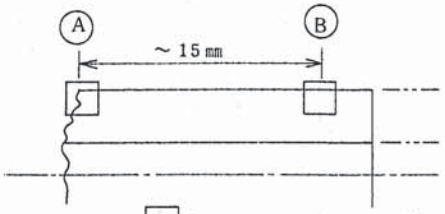
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400

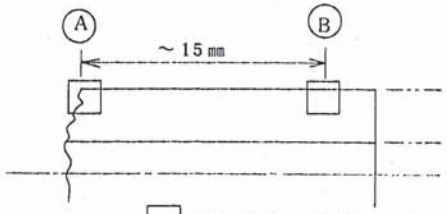
Fig. 18 a Photomicrographs after tension fracture of as－received fuel, cladding tube for MONJU (48－V)

Tube No. : L020
Specimen No. : AE－7
Test Temp. : 500℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

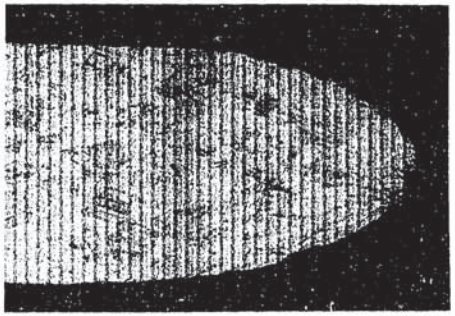


□ ; Position of photomicrograph

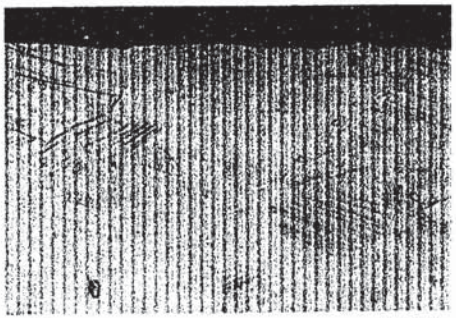
Tube No. : L020
Specimen No. : AE－1
Test Temp. : 400℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}



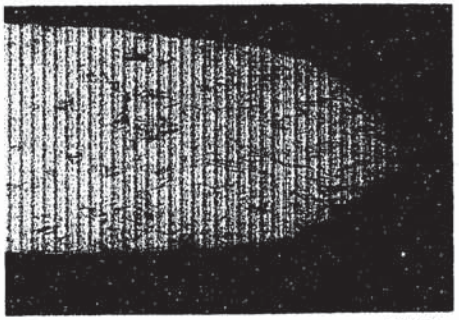
□ ; Position of photomicrograph



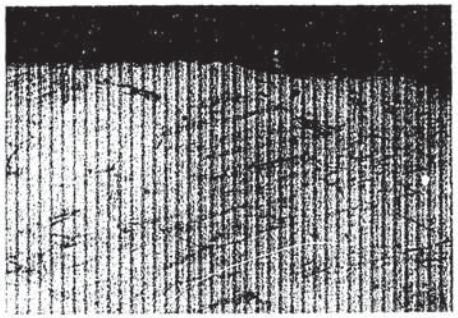
Ⓐ ×100



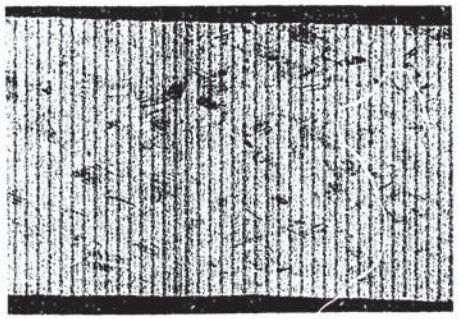
Ⓐ ×400



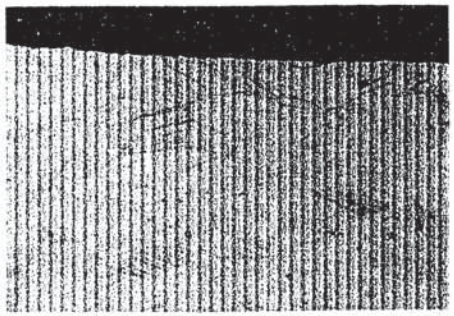
Ⓐ ×100



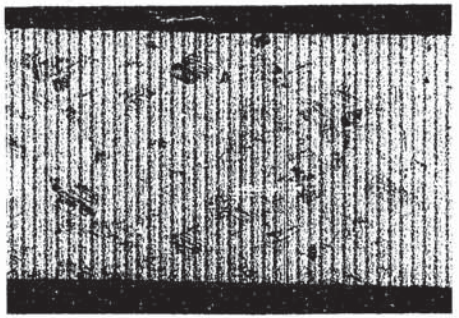
Ⓐ ×400



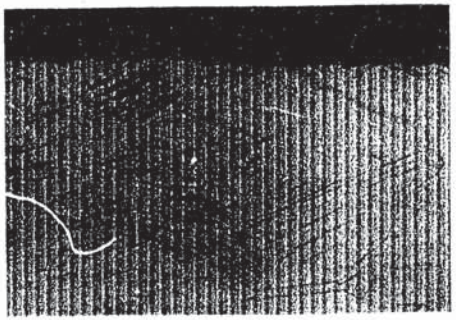
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



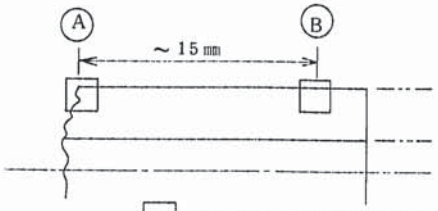
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400

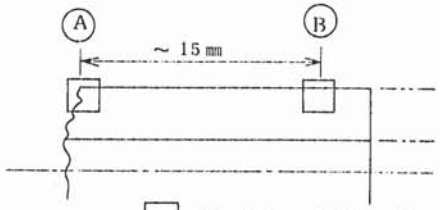
Fig. 18b Photomicrographs after tension fracture of as－received fuel, cladding tube for MONJU (48－V)

Tube No. : S3013
Specimen No. : BA--15
Test Temp. : 650℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

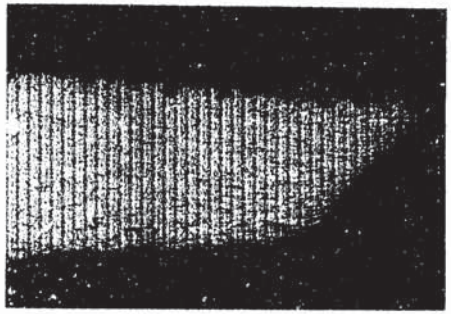


□ ; Position of photomicrograph

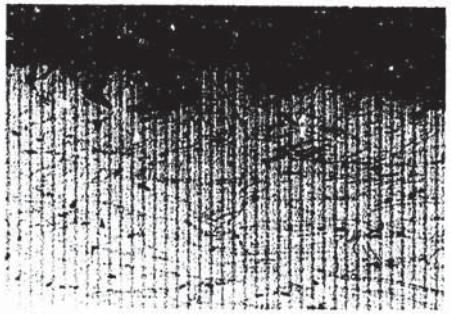
Tube No. : S3013
Specimen No. : BA－13
Test Temp. : 600℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}



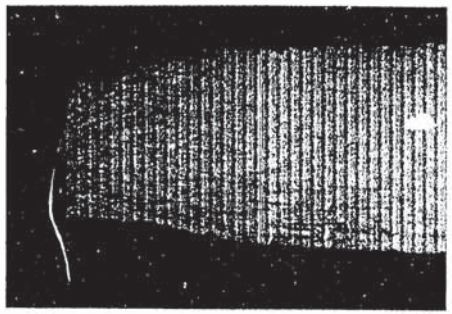
□ ; Position of photomicrograph



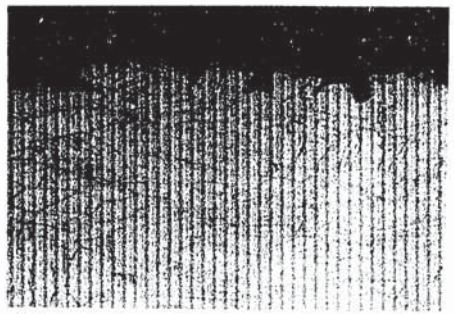
Ⓐ ×100



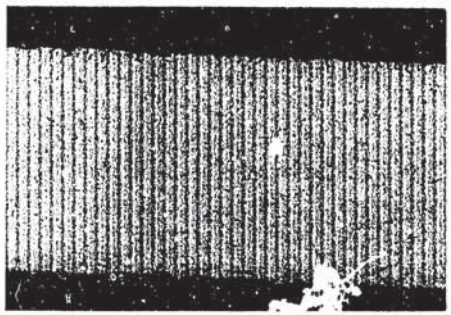
Ⓐ ×400



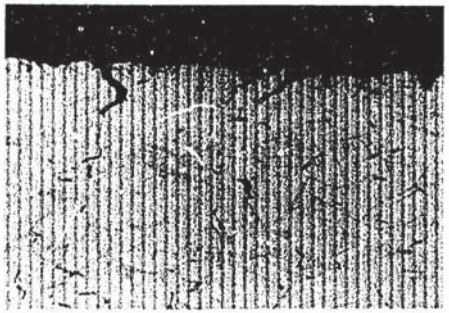
Ⓐ ×100



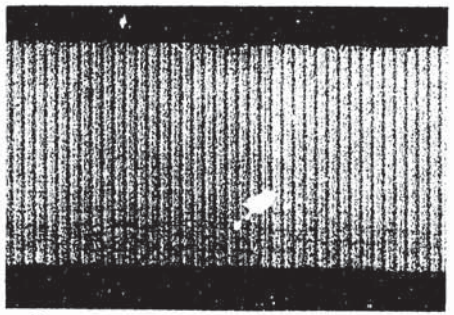
Ⓐ ×400



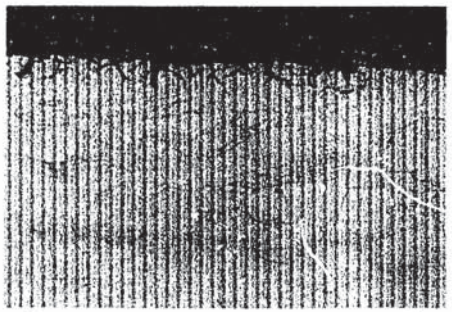
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



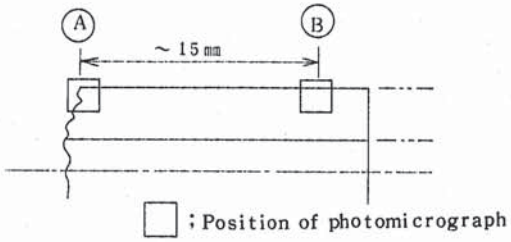
Ⓑ ×100



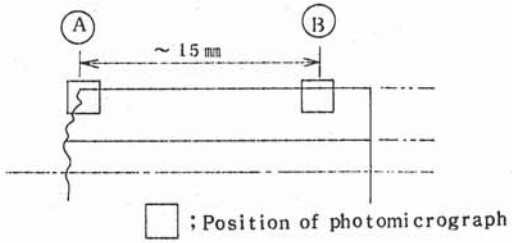
Ⓑ ×400

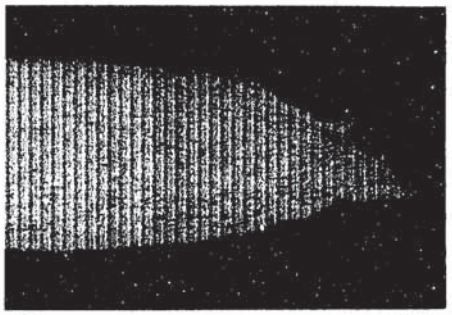
Fig. 19a Photomicrographs after tension fracture of sodium－exposed fuel cladding tube for MONJU (48HN)

Tube No. : S3013
Specimen No. : BA－7
Test Temp. : 500℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

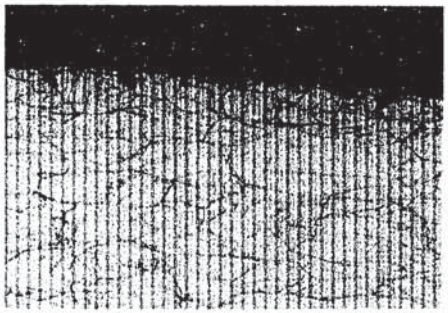


Tube No. : S3013
Specimen No. : BA－1
Test Temp. : 400℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

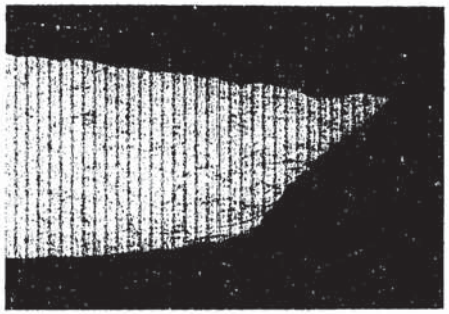




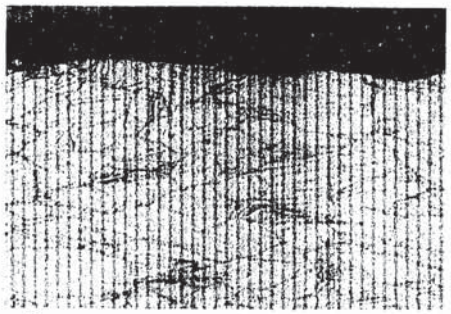
Ⓐ ×100



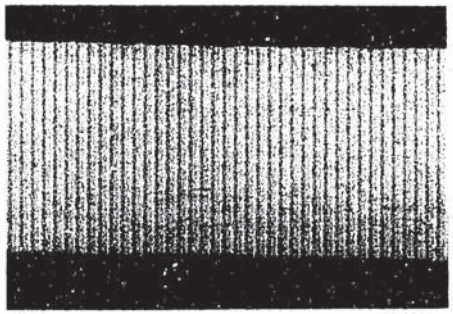
Ⓐ ×400



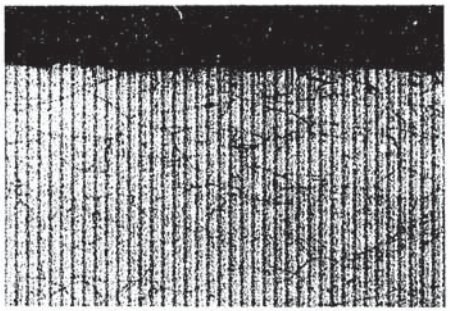
Ⓐ ×100



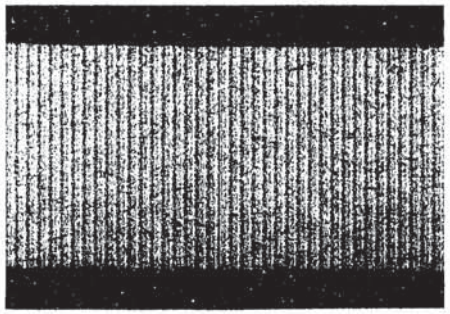
Ⓐ ×400



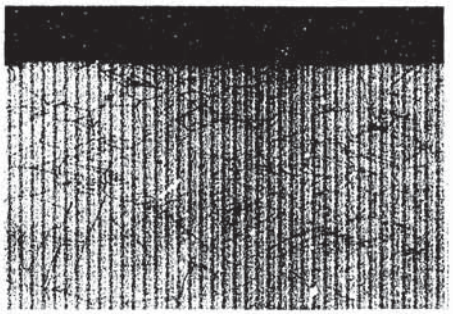
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



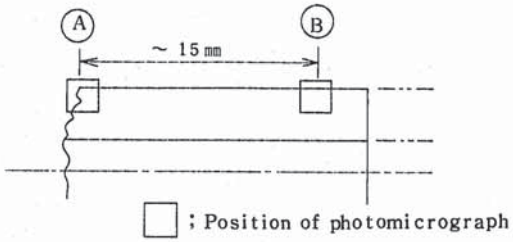
Ⓑ ×100



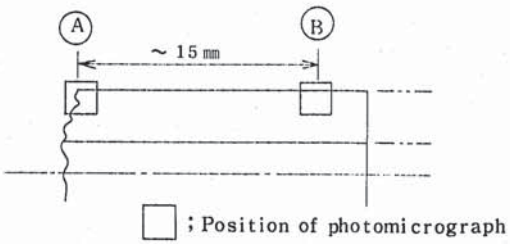
Ⓑ ×400

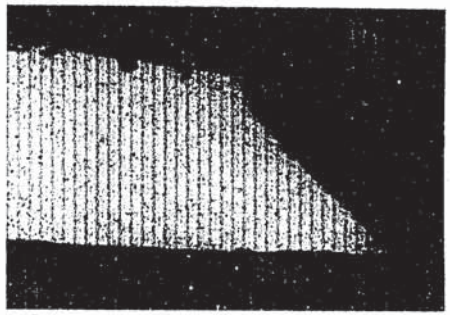
Fig. 19 b Photomicrographs after tension fracture of sodium－exposed fuel cladding tube for MONJU (48HN)

Tube No. : CT017
Specimen No. : BC−15
Test Temp. : 650℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

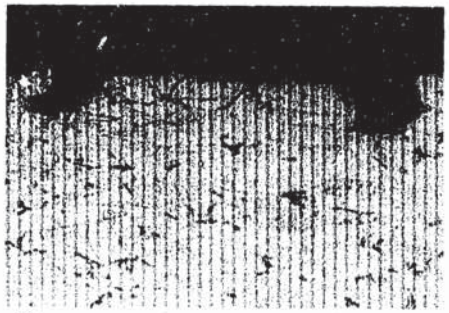


Tube No. : CT017
Specimen No. : BC−13
Test Temp. : 600℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

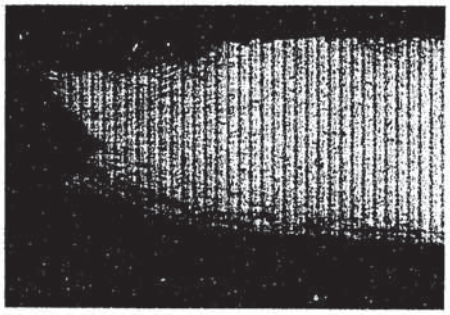




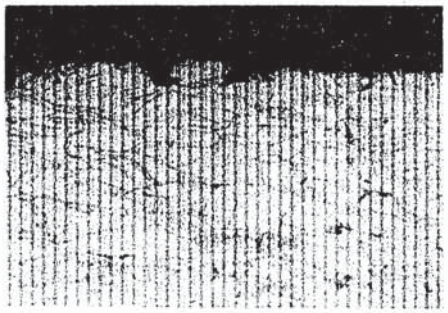
Ⓐ ×100



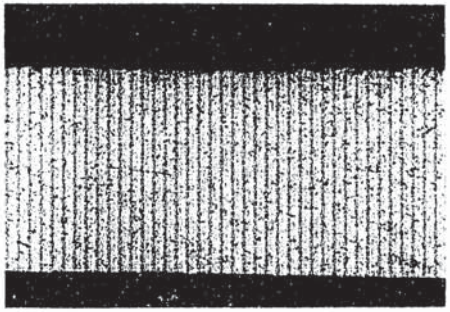
Ⓐ ×400



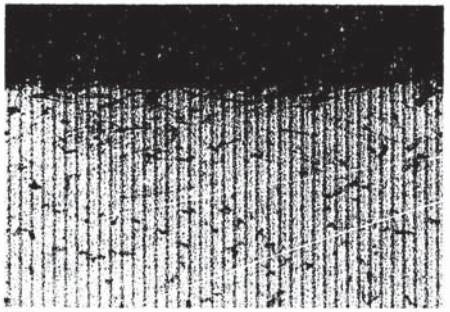
Ⓐ ×100



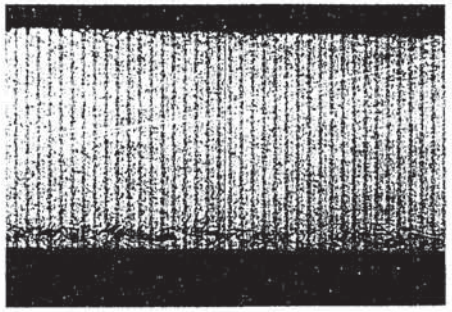
Ⓐ ×400



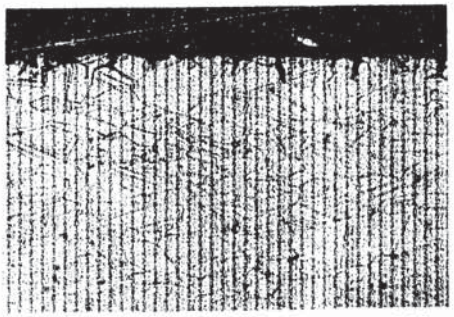
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



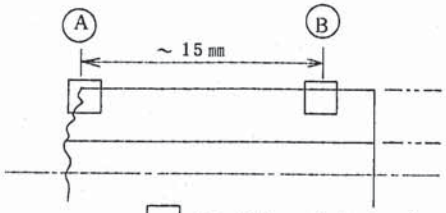
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400

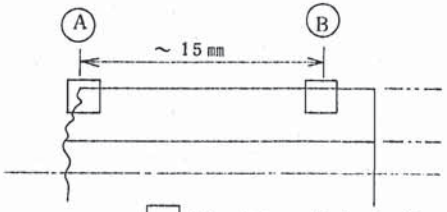
Fig. 20a Photomicrographs after tension fracture of sodium−exposed fuel cladding tube for MONJU (48CT)

Tube No. : CT017
Specimen No. : BC－7
Test Temp. : 500℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

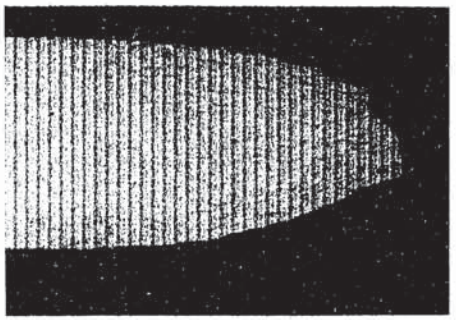


□ ; Position of photomicrograph

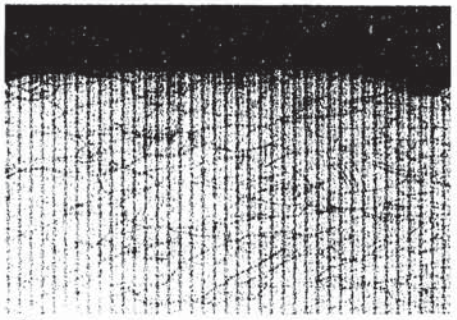
Tube No. : CT017
Specimen No. : BC－2
Test Temp. : 400℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}



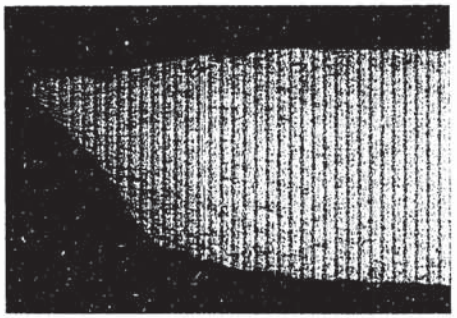
□ ; Position of photomicrograph



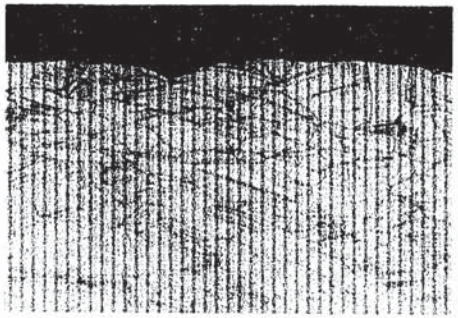
Ⓐ ×100



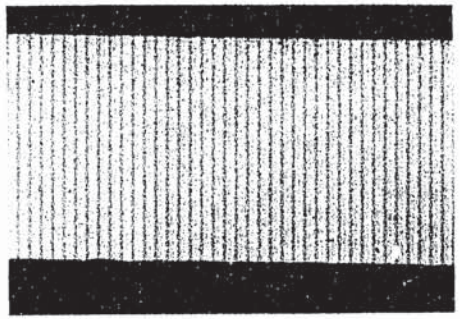
Ⓐ ×400



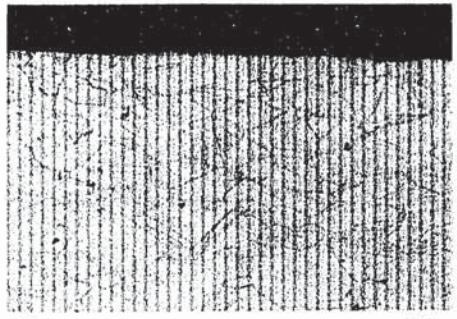
Ⓐ ×100



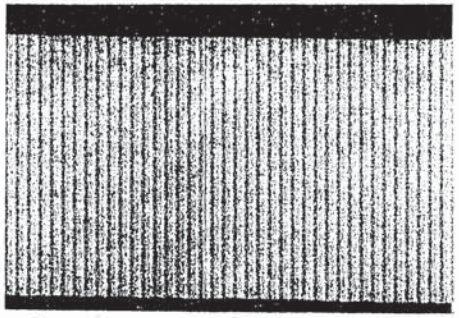
Ⓐ ×400



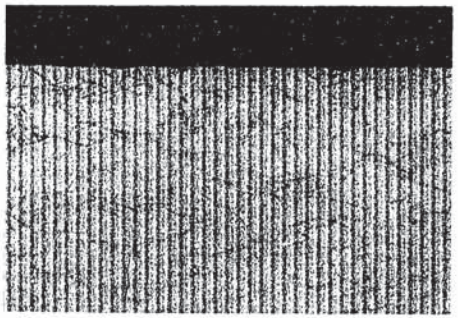
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



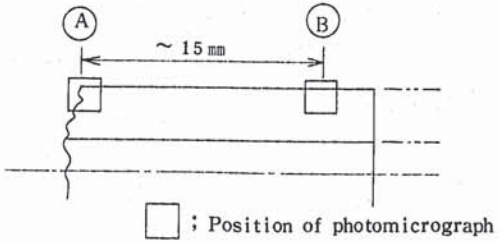
Ⓑ ×100



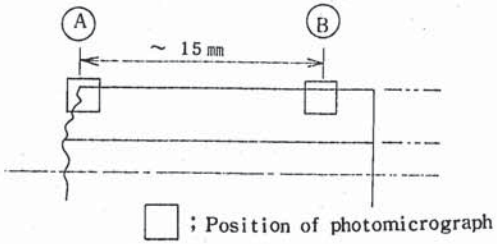
Ⓑ ×400

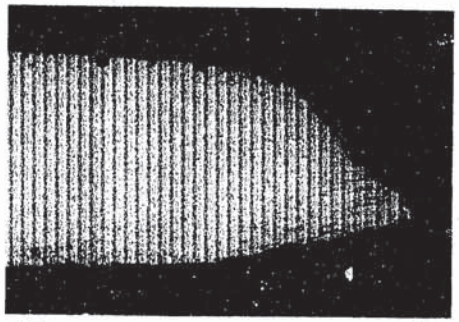
Fig. 20 b Photomicrographs after tension fracture of sodium－exposed fuel cladding tube for MONJU (48－CT)

Tube No. : F014
Specimen No. : BD－15
Test Temp. : 650℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

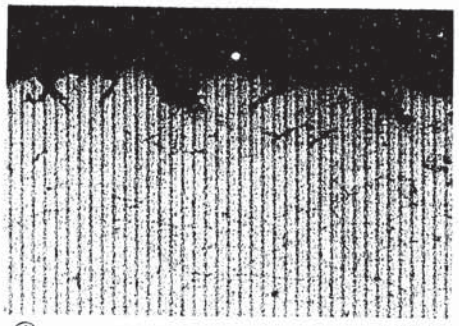


Tube No. : F014
Specimen No. : BD－13
Test Temp. : 600℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

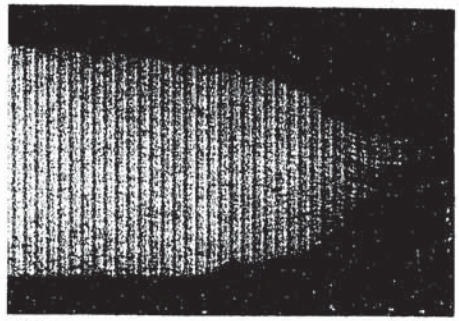




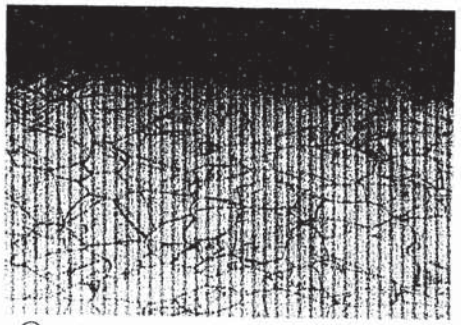
Ⓐ ×100



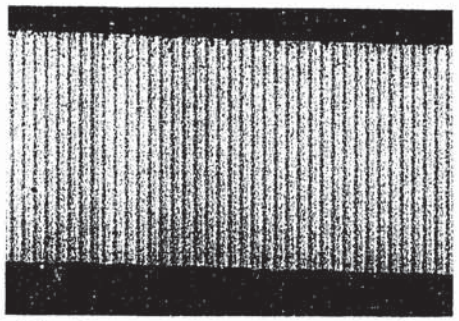
Ⓐ ×400



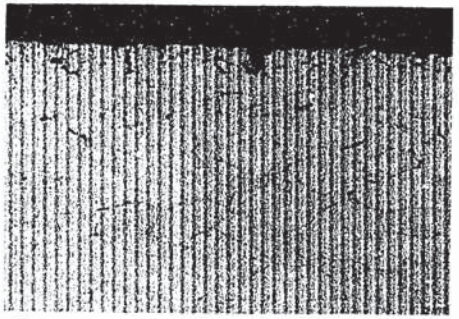
Ⓐ ×100



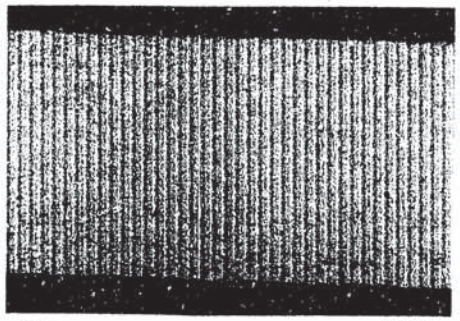
Ⓐ ×400



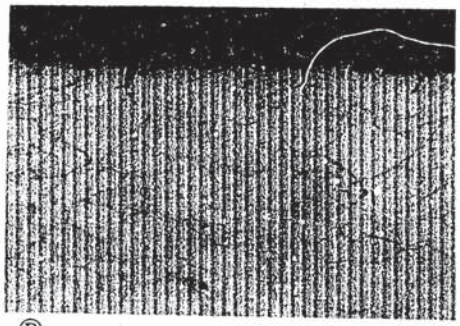
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



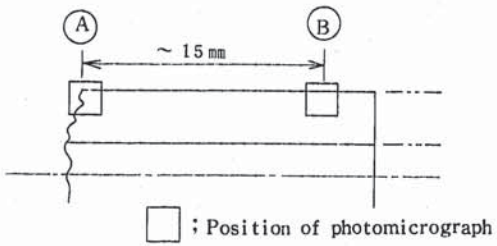
Ⓑ ×100



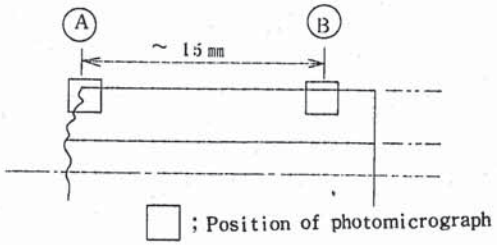
Ⓑ ×400

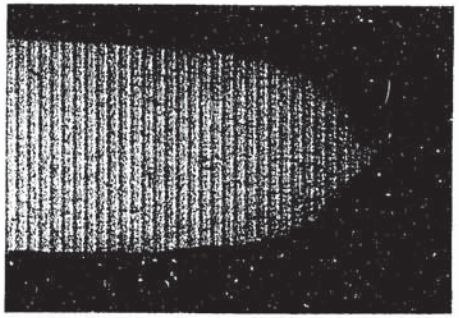
Fig. 21 a Photomicrographs after tension fracture of sodium-exposed fuel cladding tube for MONJU (48－FT)

Tube No. : F014
Specimen No. : BD−7
Test Temp. : 500℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

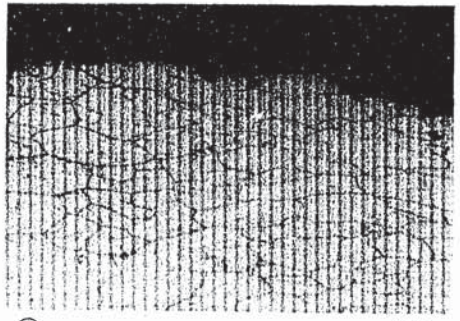


Tube No. : F014
Specimen No. : BD−1
Test Temp. : 400℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

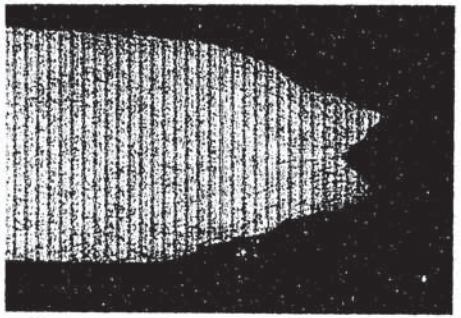




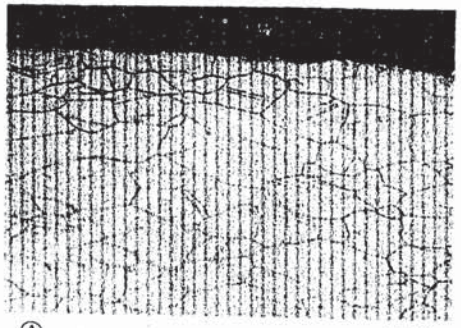
Ⓐ ×100



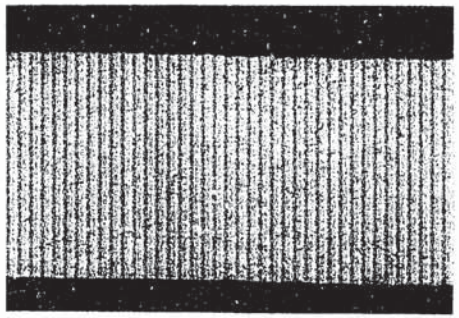
Ⓐ ×400



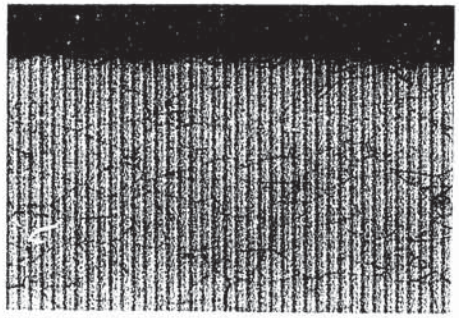
Ⓐ ×100



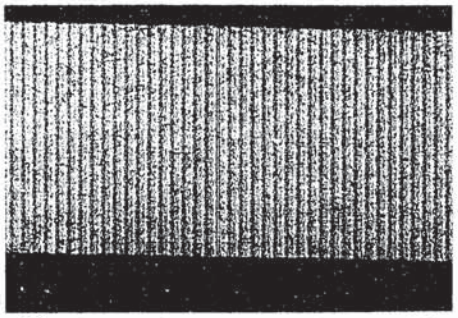
Ⓐ ×400



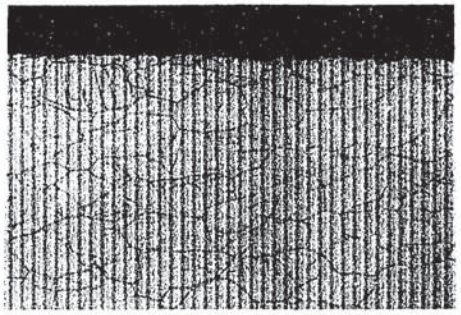
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



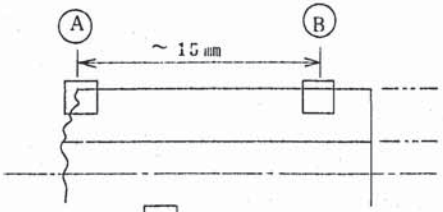
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400

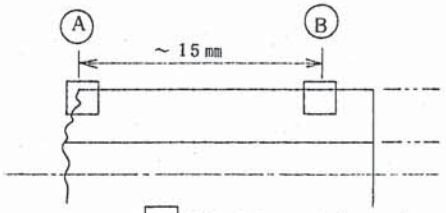
Fig. 21b Photomicrographs after tension fracture of sodium−exposed fuel cladding tube for MONJU(48−FT)

Tube No. : L015
Specimen No. : BE－15
Test Temp. : 650℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

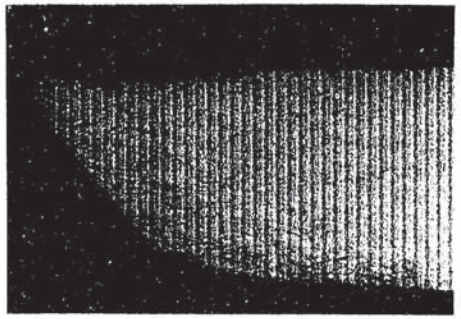


□ ; Position of photomicrograph

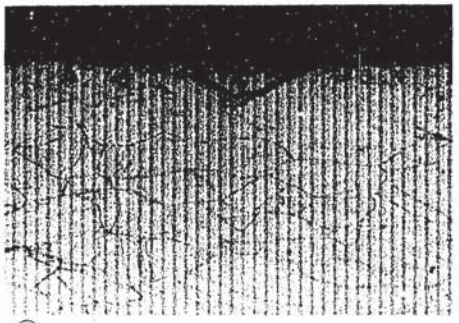
Tube No. : L015
Specimen No. : BE－13
Test Temp. : 600℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}



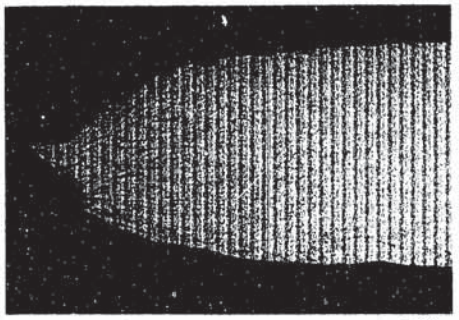
□ ; Position of photomicrograph



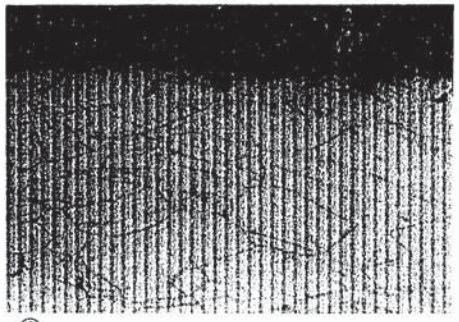
Ⓐ ×100



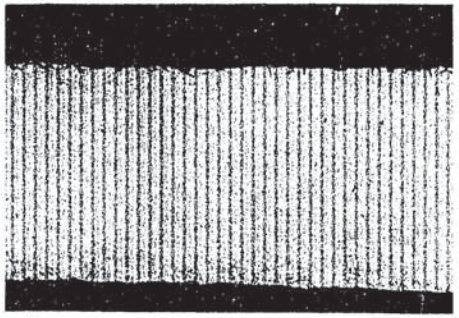
Ⓐ ×400



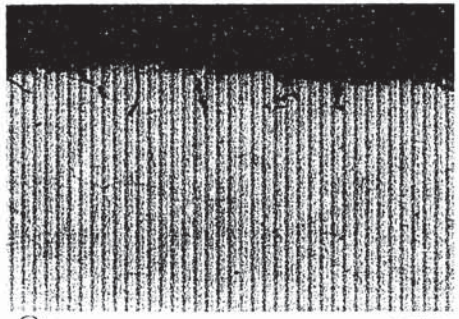
Ⓐ ×100



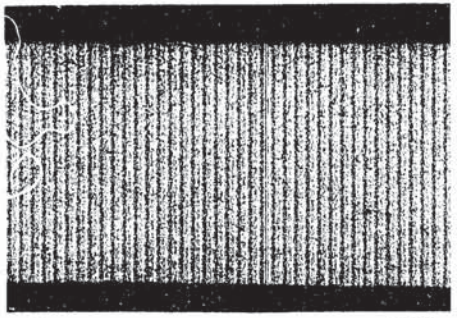
Ⓐ ×400



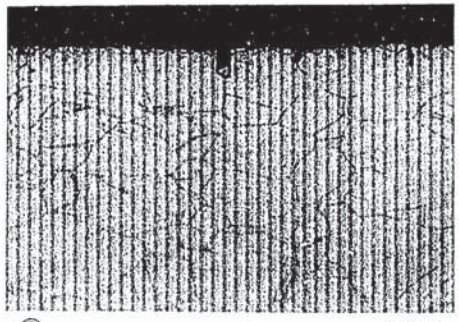
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



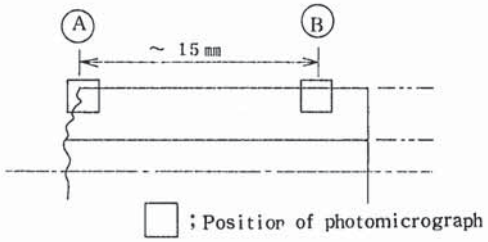
Ⓑ ×100



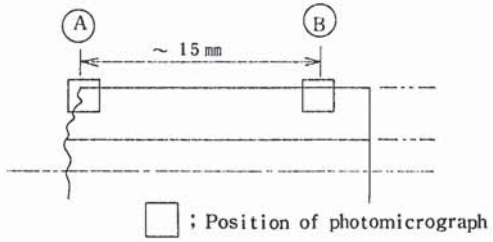
Ⓑ ×400

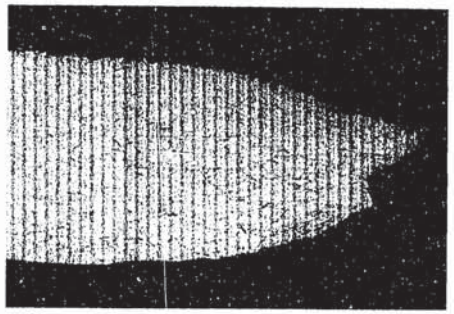
Fig. 22a Photomicrographs after tension fracture of sodium－exposed fuel cladding tube for MONJU (48－V)

Tube No. : L015
Specimen No. : BE-7
Test Temp. : 500℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

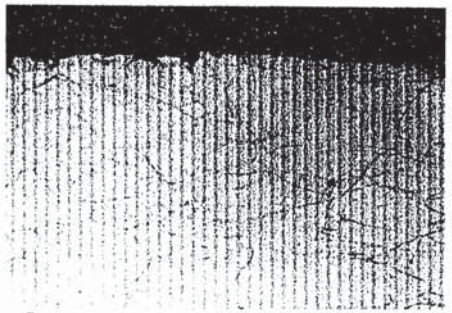


Tube No. : L015
Specimen No. : BE－1
Test Temp. : 400℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

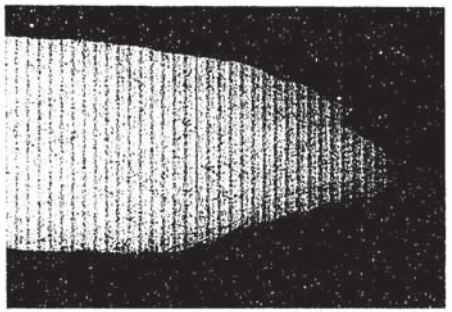




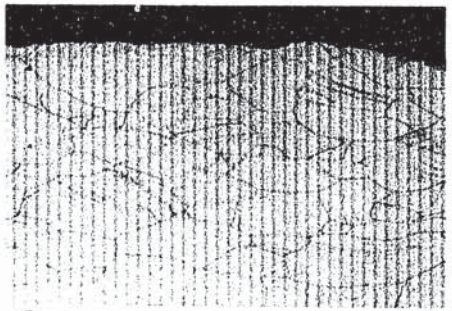
Ⓐ ×100



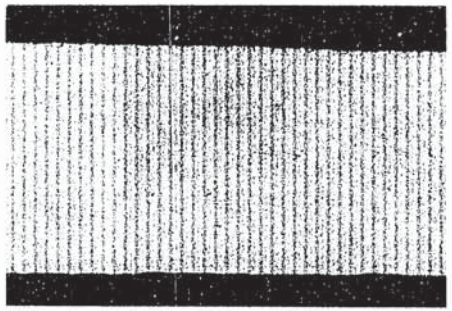
Ⓐ ×400



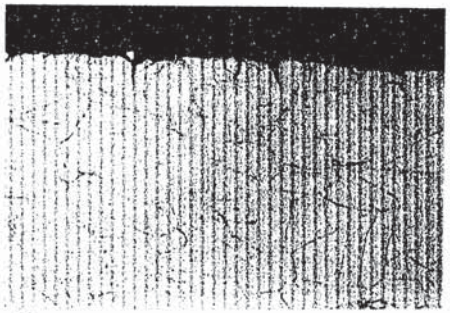
Ⓐ ×100



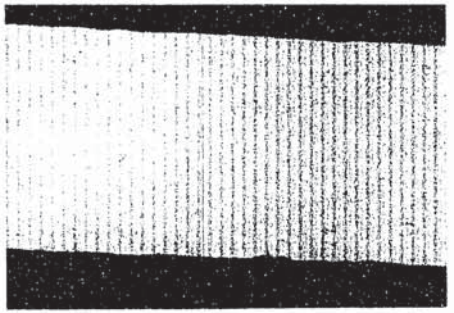
Ⓐ ×400



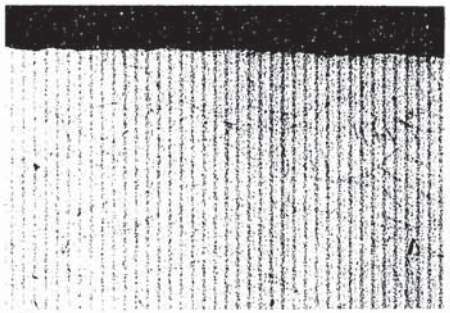
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



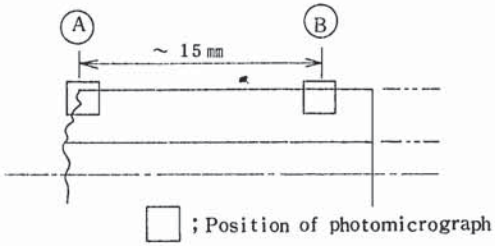
Ⓑ ×100



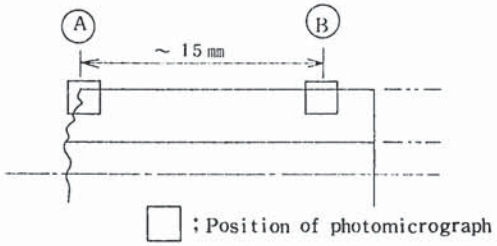
Ⓑ ×400

Fig. 22b Photomicrographs after tension fracture of sodium-exposed fuel cladding tube for MONJU (48-V)

Tube No. : S5222
Specimen No. : BG－15
Test Temp. : 650℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}



Tube No. : S5222
Specimen No. : BG－13
Test Temp. : 600℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}



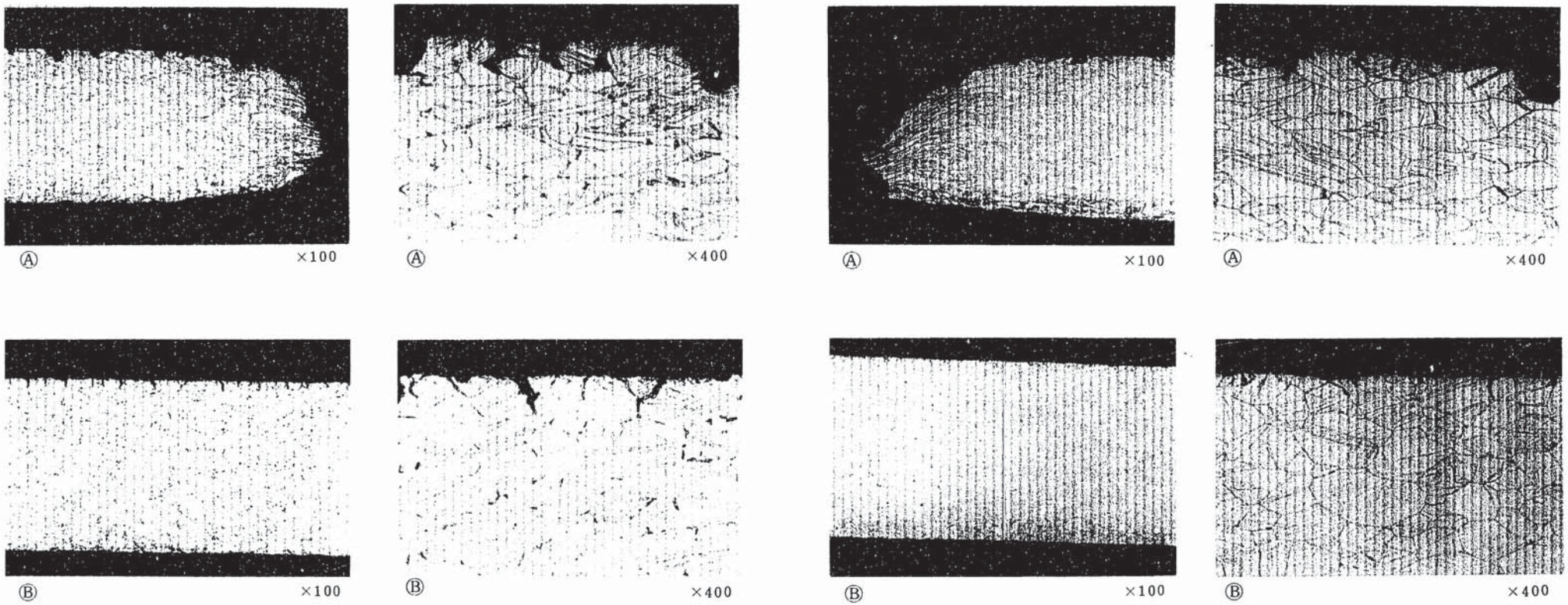
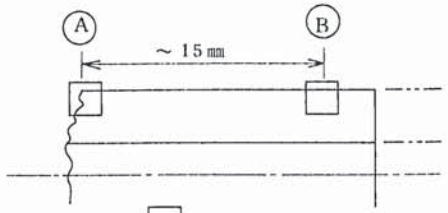


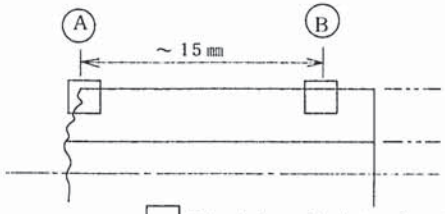
Fig. 23 a Photomicrographs after tension rupture of sodium－exposed fuel cladding tube for MONJU (49HB)

Tube No. : S5222
Specimen No. : BG－7
Test Temp. : 500℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}

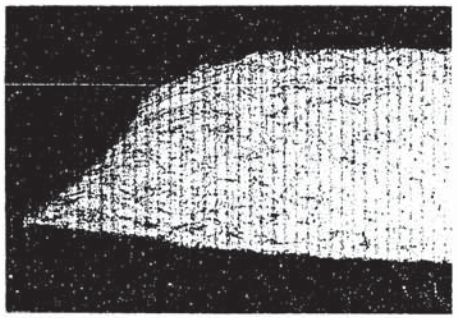


□ ; Position of photomicrograph

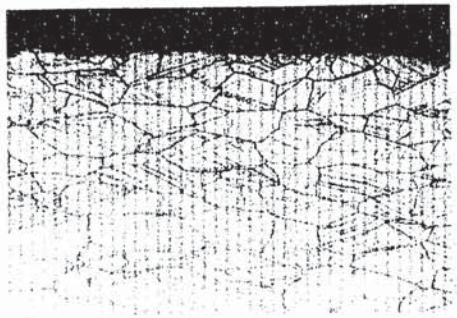
Tube No. : S5222
Specimen No. : BG－1
Test Temp. : 400℃
Tube Size. : 6.5 $^{\phi}$ × 0.45 ^{t}



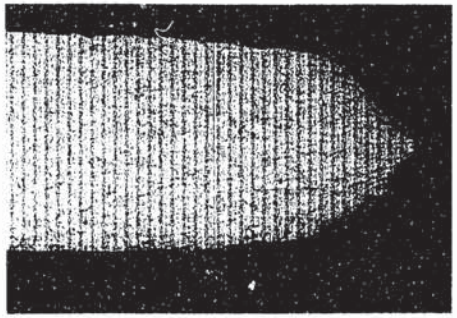
□ ; Position of photomicrograph



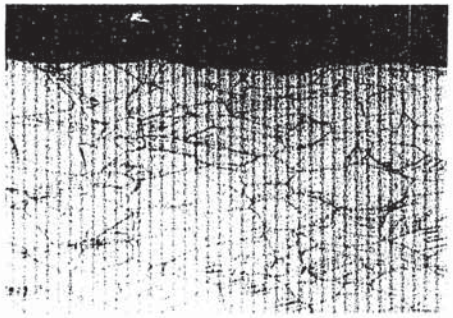
Ⓐ ×100



Ⓐ ×400

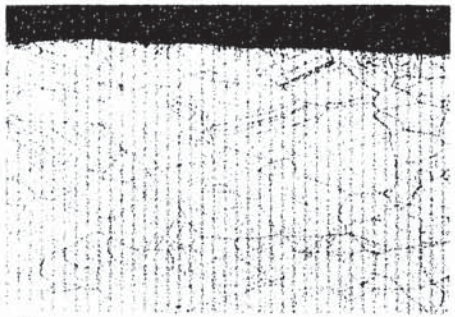


Ⓐ ×100

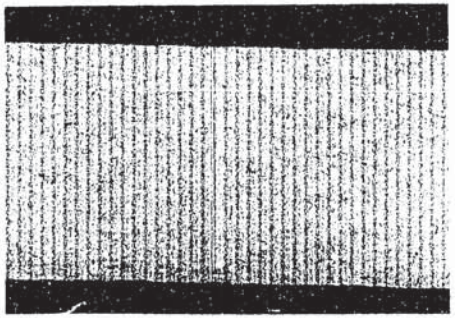


Ⓐ ×400

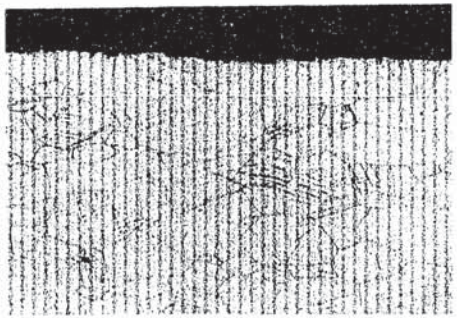
Ⓑ ×100



Ⓑ ×400



Ⓑ ×100



Ⓑ ×400

Fig. 23b Photomicrographs after tension fracture of sodium－exposed fuel cladding tube for MONJU (49HB)

Tube No, : L015	Tube No, : L015	Tube No, : L015	Tube No, : L015
Specimen No, : BE−15	Specimen No, : BE−13	Specimen No, : BE−7	Specimen No, : BE−1
Test Temp, : 650℃	Test Temp, : 600℃	Test Temp, : 500℃	Test Temp, : 400℃
Tube Size : 6.5φ×0.45t	Tube Size : 6.5×0.45t	Tube Size : 6.5φ×0.45t	Tube Size : 6.5φ×0.45t

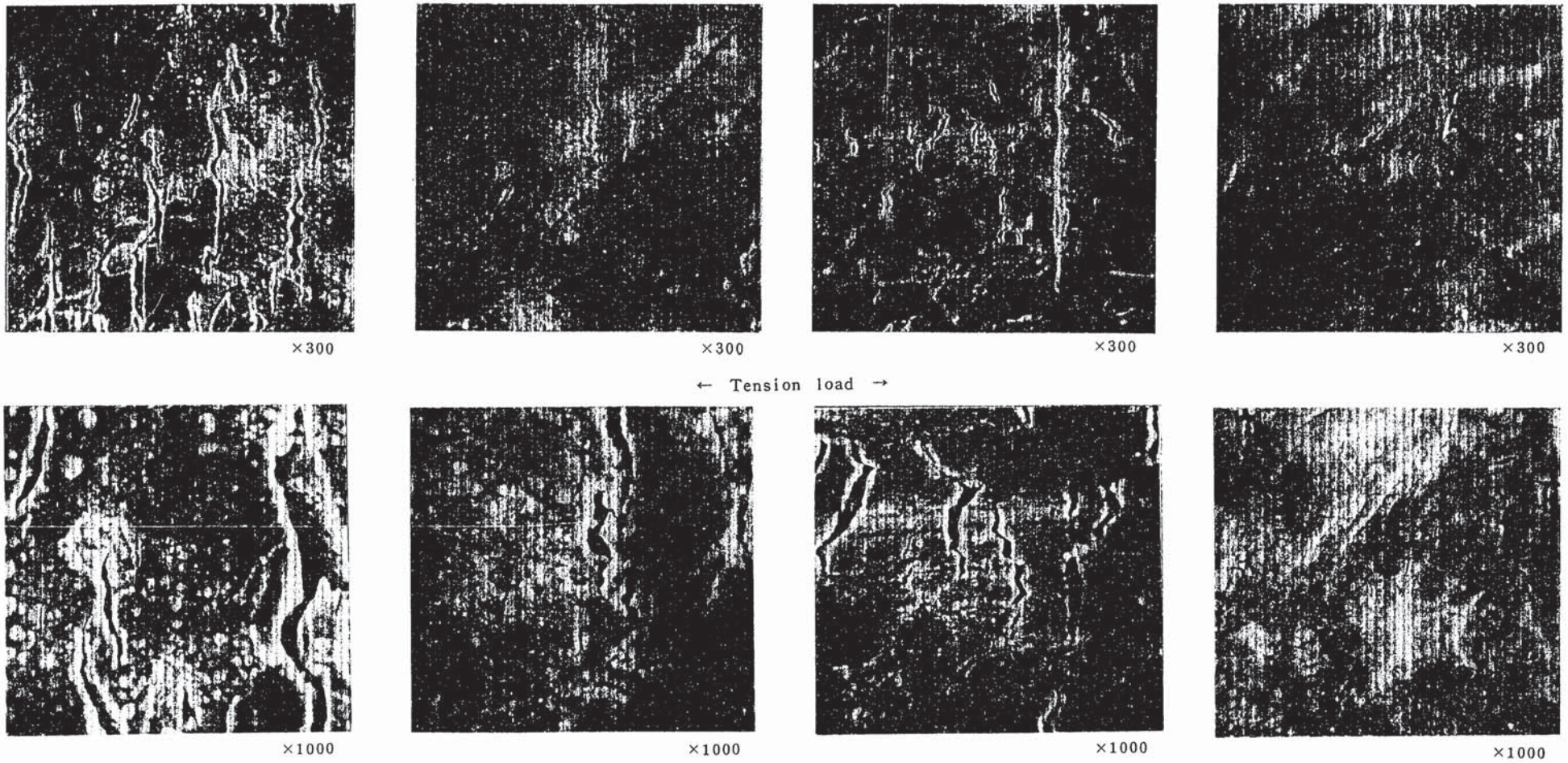


Fig. 24 Surface morphology after tension fracture of sodium−exposed fuel cladding tube for MONJU(48−V)

Tube No, : S5222
Specimen No, : BG－15
Test Temp, : 650℃
Tube Size : 6.5φ×0.45t

Tube No, : S5222
Specimen No, : BG－13
Test Temp, : 600℃
Tube Size : 6.5φ×0.45t

Tube No, : S5222
Specimen No, : BG－7
Test Temp, : 500℃
Tube Size : 6.5φ×0.45t

Tube No, : S5222
Specimen No, : BG－1
Test Temp, : 400℃
Tube Size : 6.5φ×0.45t

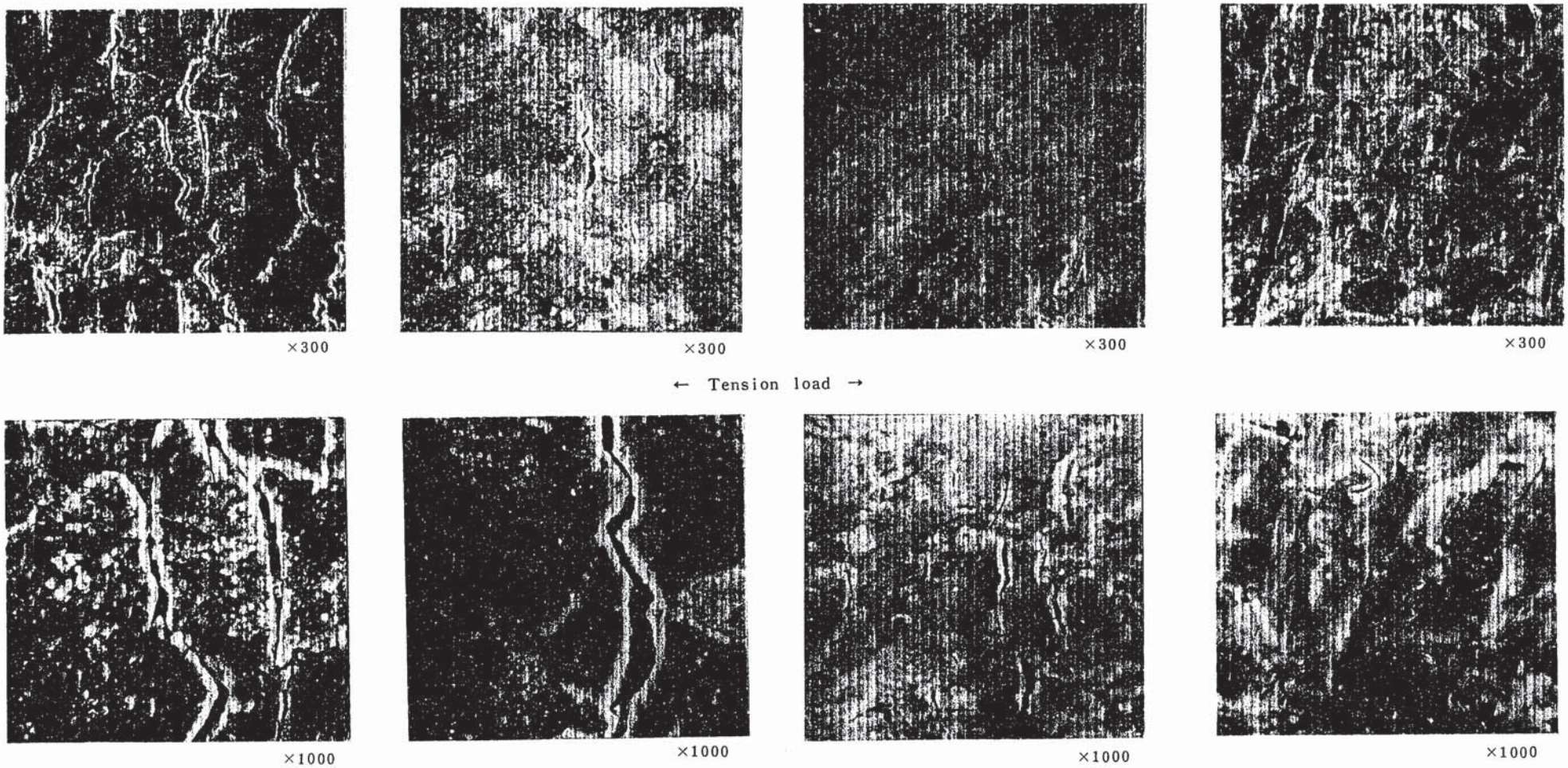


Fig. 25 Surface morphology after tension fracture of sodium－exposed fuel cladding tube for MONJU(49HB)

Table 5 Bulk contents of carbon and nitrogen of fuel cladding tubes for Monju after sodium exposure

Temp.(℃) \ Tube No. / Element	S 3 0 1 3				S 3 2 6 0				C T 0 1 7			
	TP No.	N	C	O	TP No.	N	C	O	TP No.	N	C	O
640 ± 5	BA－15	178	520	－	BB－15	79	530	－	BC－15	59	540	－
618 ± 1.5	－	－	－	－	－	－	－	－	BC－14	60	580	540
606 ± 5	BA－13	306	520	－	BB－13	96	530	－	BC－13	187	540	－
507 ± 5	BA－ 7	387	580	－	－	－	－	－	BC－ 7	218	570	－
425 ± 5	－	－	－	－	－	－	－	－	BC－ 2	97	570	－
408 ± 5	BA－ 1	146	530	－	－	－	－	－	BC－ 1	90	520	40

Temp.(℃) \ Tube No. / Element	F 0 1 4				L 0 1 5				S 5 2 2 2			
	TP No.	N	C	O	TP No.	N	C	O	TP No.	N	C	O
640 ± 5	BD－15	260		－	BE－15	174	300	－	BG－15	113	460	－
618 ± 1.5	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
606 ± 5	13	282		－	13	194	340	－	13	265	460	－
507 ± 5	7	291		－	7	211	420	－	7	324	470	－
425 ± 5	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
408 ± 5	1	261		－	1	193	370	－	1	80	460	－

Temp.(℃) \ Tube No. / Element	K 4 0 1 6				K 4 1 1 9				R 1 2 2 1			
	TP No.	N	C	O	TP No.	N	C	O	TP No.	N	C	O
640 ± 5	－	－	－	－	BI－15	58	620	－	BM－15	55	570	－
618 ± 1.5	BH－14	40	580	630	－	－	－	－	－	－	－	－
606 ± 5	－	－	－	－	BI－13	133	590	－	－	－	－	－
507 ± 5	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
425 ± 5	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
408 ± 5	BH－ 1	10	580	80	－	－	－	－	－	－	－	－

Table 6 Bulk contents of boron, phosphorous and manganese of fuel cladding tubes for MONJU after sodium exposure

Tube No. / Element / Temp.(C°)	S−3013				S−3260				CT−017				F−014			
	No.	B ppm	P %	Mn %	No.	B ppm	P %	Mn %	No.	B ppm	P %	Mn %	No.	B ppm	P %	Mn %
402	A− 1	−	0.022	1.73	B− 1	−	0.021	1.65	C− 1	−	−	−	D− 1	−	−	−
418	− 2	2	0.021	1.73	− 2	2	0.020	1.62	− 2	2	0.002	1.54	− 2	15	0.011	1.54
434	− 3	1	0.022	1.74	− 3	2	0.020	1.65	− 3	2	0.002	1.48	− 3	−	−	−
452	− 4	2	0.021	1.71	− 4	2	0.021	1.67	− 4	2	0.002	1.51	− 4	16	0.010	1.53
468	− 5	1	0.021	1.71	− 5	2	0.021	1.66	− 5	2	0.002	1.50	− 5	16	0.011	1.59
485	− 6	2	0.022	1.69	− 6	2	0.021	1.63	− 6	3	0.002	1.52	− 6	16	0.008	1.59
498	− 7	−	0.022	1.70	− 7	−	0.020	1.65	− 7	−	−	−	− 7	−	−	−
520	− 8	2	0.021	1.70	− 8	1	0.020	1.62	− 8	3	0.002	1.50	− 8	16	0.010	1.60
533	− 9	2	0.021	1.70	− 9	1	0.020	1.63	− 9	2	0.002	1.52	− 9	15	0.010	1.57
550	−10	2	0.021	1.70	−10	1	0.020	1.66	−10	3	0.002	1.54	−10	14	0.010	1.56
565	−11	2	0.021	1.69	−11	2	0.023	1.65	−11	−	−	−	−11	−	−	−
585	−12	1	0.021	1.68	−12	1	0.020	1.67	−12	3	0.001	1.51	−12	14	0.010	1.55
600	−13	1	0.020	1.67	−13	2	0.020	1.67	−13	−	−	−	−13	14	0.009	1.54
618	−14	−	0.020	1.66	−14	2	−	−	−14	−	−	−	−14	−	−	−
633	−15	1	0.019	1.68	−15	1	0.019	1.65	−15	−	−	−	−15	−	−	−

Tube No. / Element / Temp.(C°)	L−015				S−5021				S−5222				K−4016			
	No.	B ppm	P %	Mn %	No.	B ppm	P %	Mn %	No.	B ppm	P %	Mn %	No.	B ppm	P %	Mn %
402	E− 1	−	0.028	1.44	F− 1	1			G− 1	8	0.018	1.53	H− 1	−	−	−
418	− 2	4	0.025	1.46	− 2	1	0.017	1.44	− 2	6	−	−	− 2	3	0.010	1.46
434	− 3	−	−	−	− 3	1	0.017	1.44	− 3	7	0.018	1.53	− 3	−	−	−
452	− 4	2	0.025	1.44	− 4	1	0.018	1.43	− 4	8	0.018	1.52	− 4	3	0.010	1.43
468	− 5	2	0.028	1.46	− 5	1	0.017	1.44	− 5	6	0.018	1.53	− 5	3	0.010	1.44
485	− 6	2	0.023	1.45	− 6	1	0.018	1.45	− 6	7	0.017	1.50	− 6	2	0.010	1.44
498	− 7	−	−	−	− 7	−	0.018	1.45	− 7	6	−	−	− 7	−	−	−
520	− 8	1	0.025	1.42	− 8	1	0.020	1.46	− 8	7	0.017	1.52	− 8	3	0.009	1.46
533	− 9	1	0.027	1.44	− 9	2	0.018	1.44	− 9	5	0.017	1.51	− 9	4	0.010	1.43
550	−10	1	0.025	1.43	−10	1	0.017	1.46	−10	6	0.018	1.50	−10	5	0.009	1.44
565	−11	−	−	−	−11	1	0.019	1.46	−11	7	0.017	1.49	−11	−	−	−
585	−12	1	0.025	1.46	−12	1	0.016	1.45	−12	6	0.017	1.48	−12	2	0.010	1.42
600	−13	1	0.022	1.44	−13	1	0.016	1.43	−13	7	0.017	1.48	−13	4	0.009	1.41
618	−14	1	−	−	−14	1	−	−	−14	6	−	−	−14	−	−	−
633	−15	−	−	−	−15	2	0.015	1.42	−15	7	0.012	1.48	−15	−	−	−

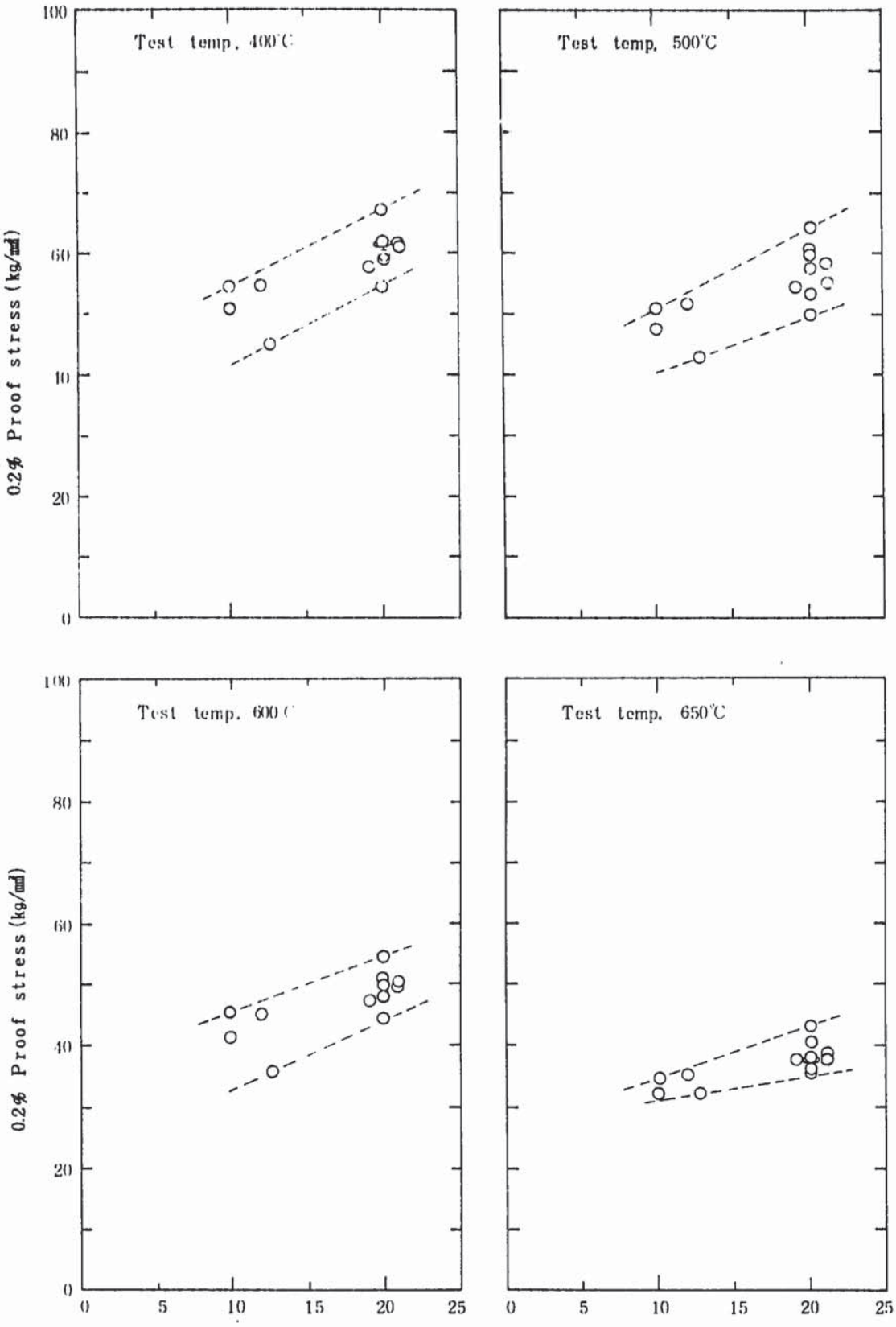


Fig. 26a Effect of cold work on tensile properties (0.2% Proof stress) of as－received fuel cladding tubes (MONJU & JOYO).

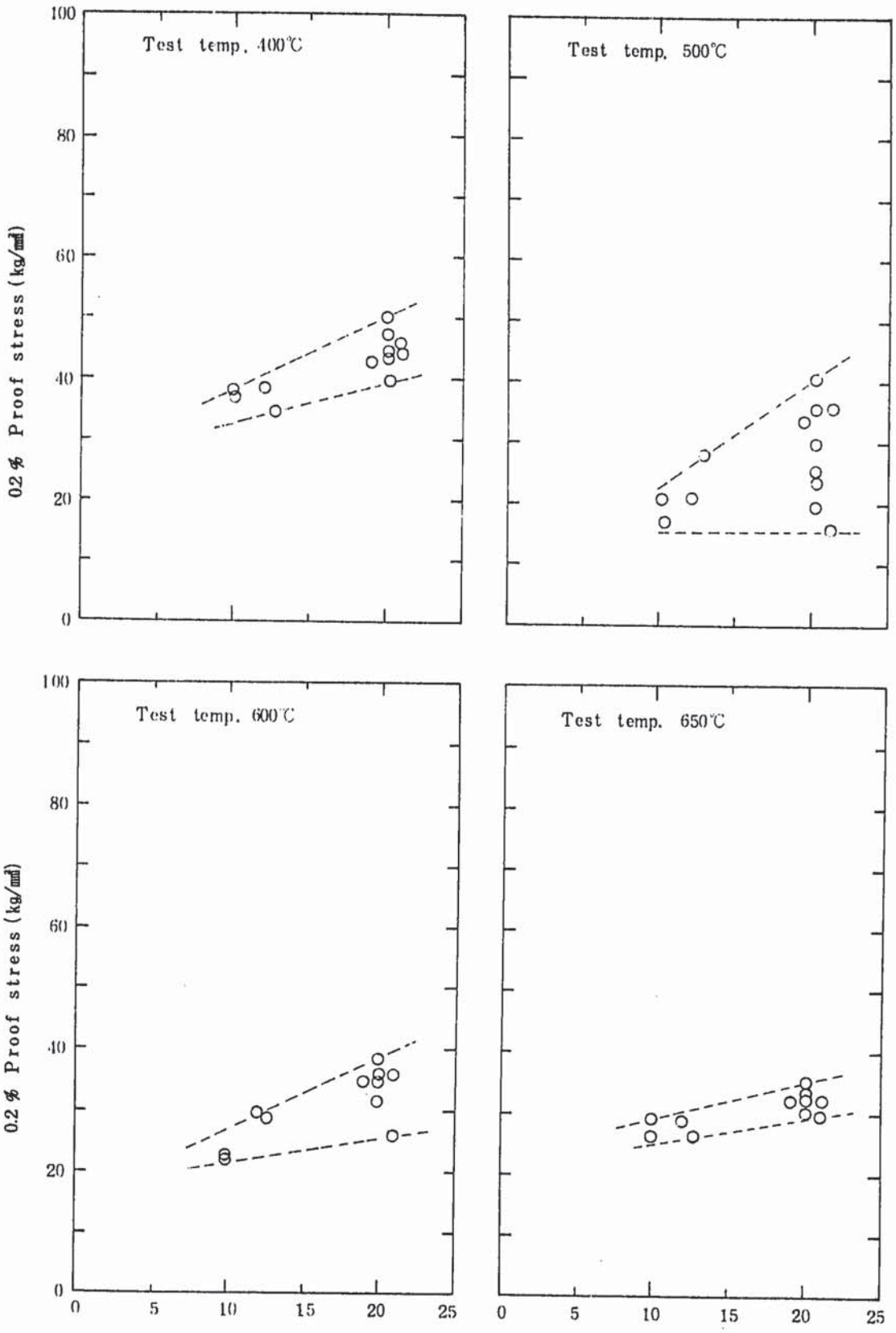


Fig. 26b Effect of cold work on tensile properties (0.2% Proof stress) of sodium-exposed fuel cladding tubes (MONJU & JOYO).

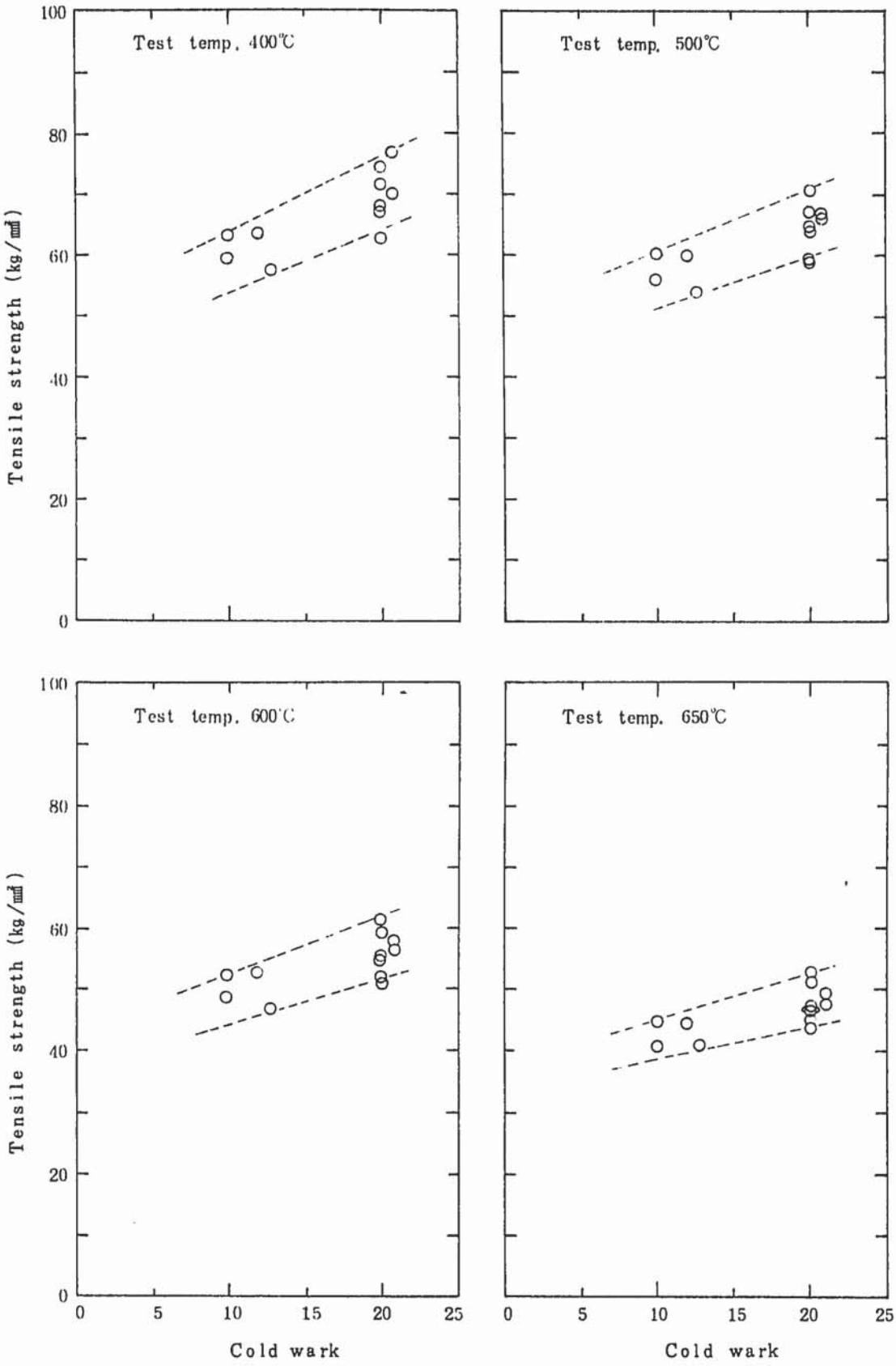


Fig. 27a Effect of cold work on tensile properties (Tensile strength) of as－received fuel cladding tubes (MONJU & JOYO).

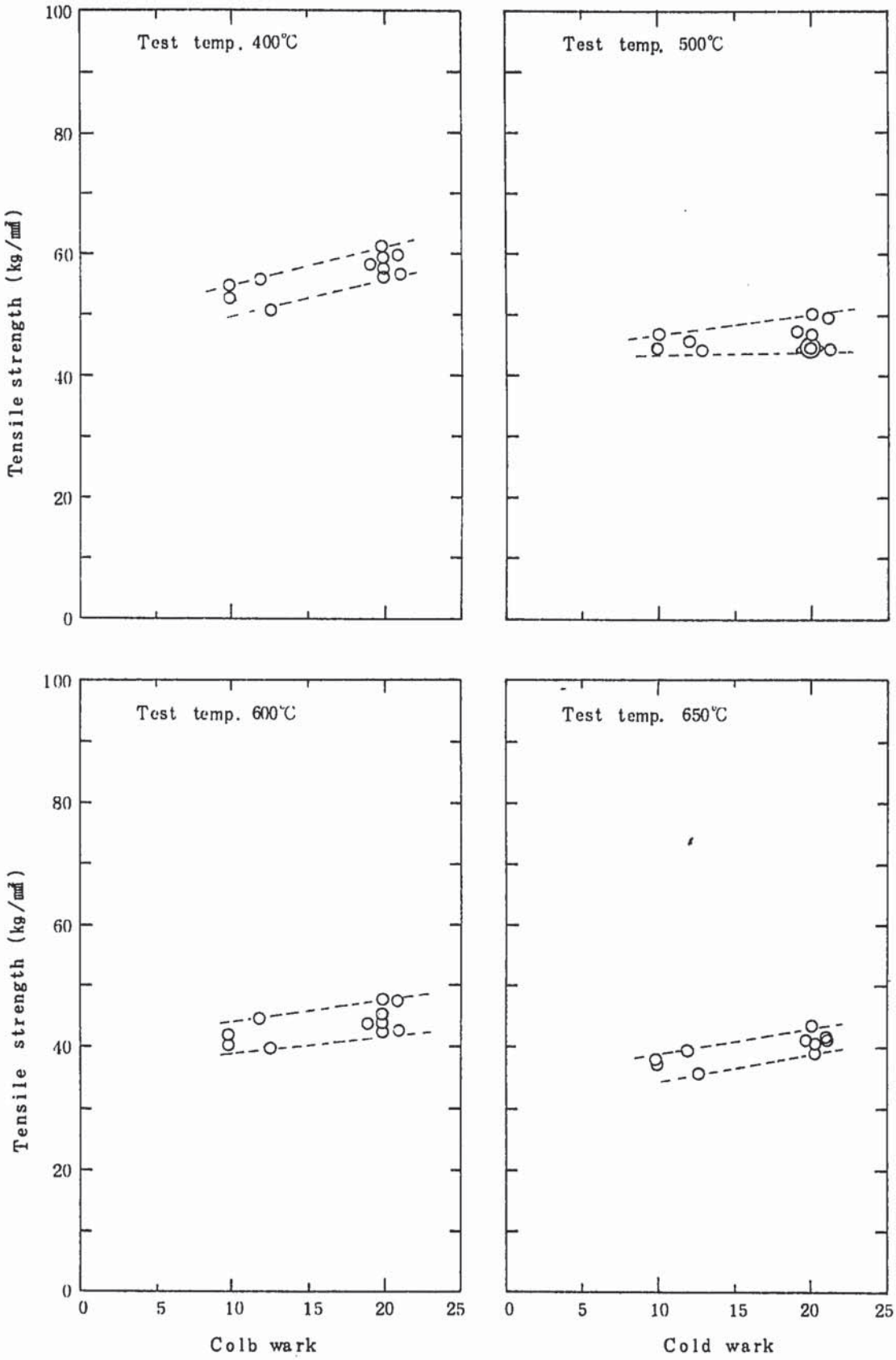


Fig. 27b Effect of cold work on tensile properties (Tensile strength) of sodium-exposed fuel cladding tubes (MONJU & JOYO).

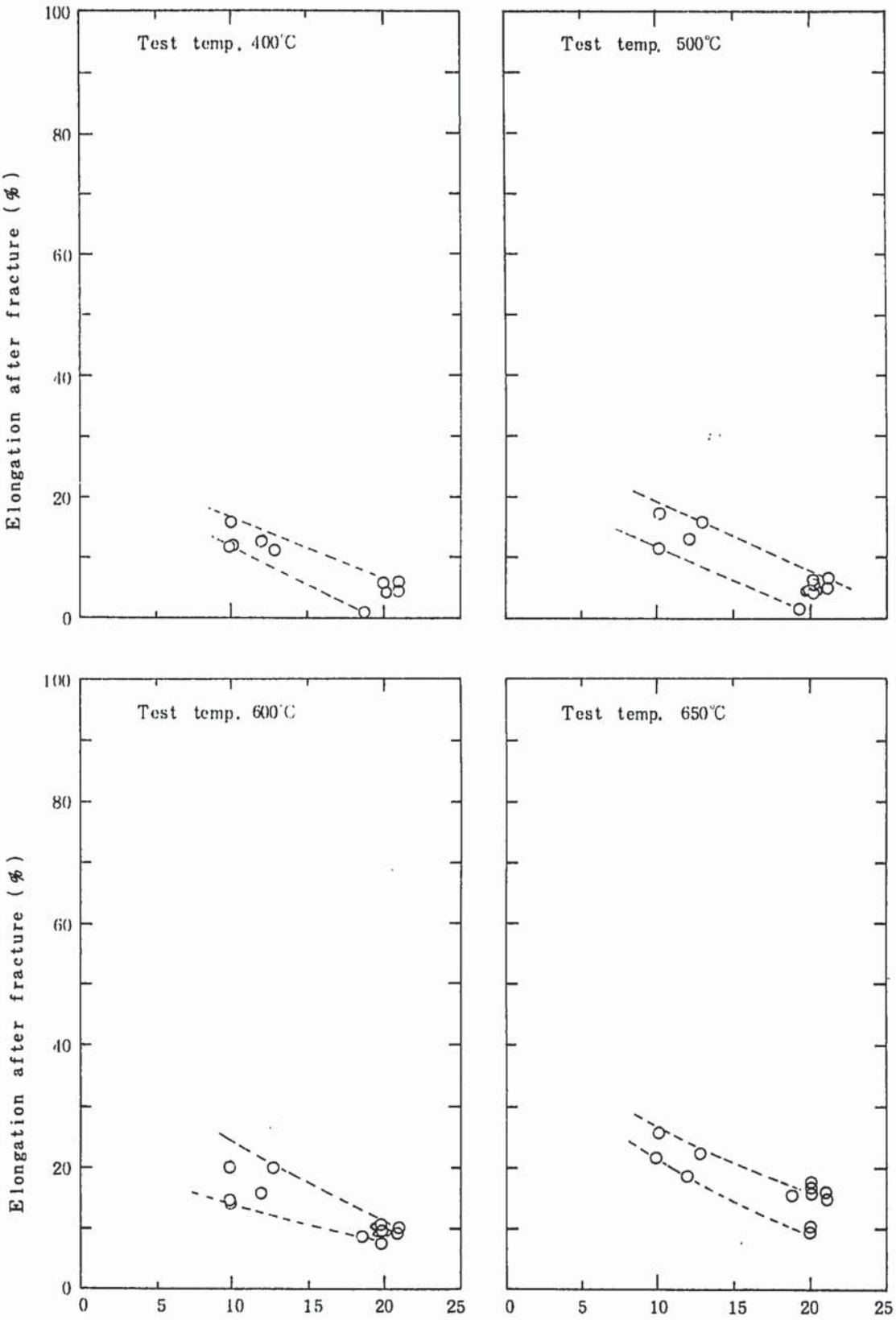


Fig. 28a Effect of cold work on tensile properties (Elongation) of as－received fuel cladding tubes (MONJU & JOYO).

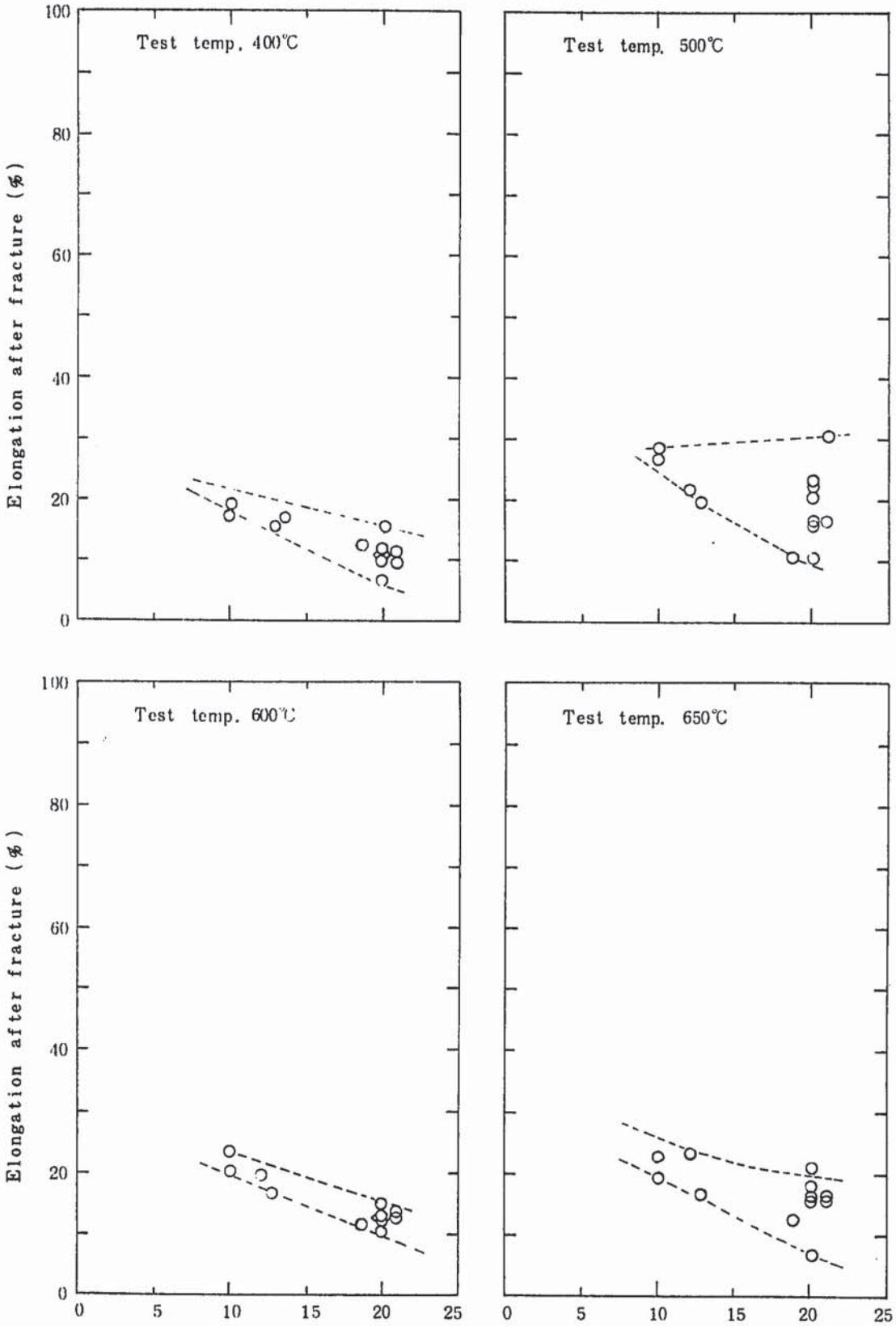


Fig. 28b Effect of cold work on tensile properties (Elongation) of sodium-exposed fuel cladding tubes (MONJU & JOYO)

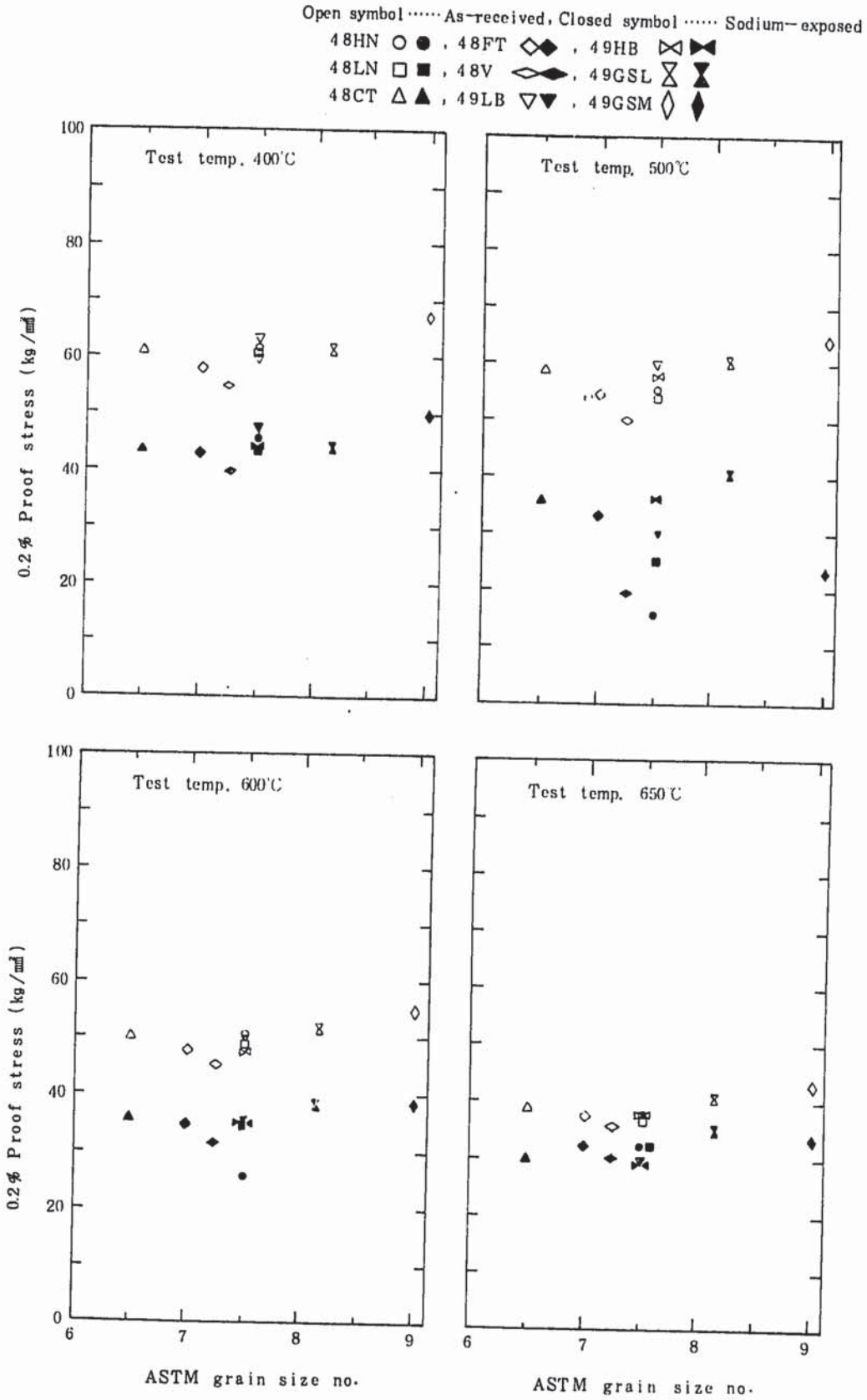


Fig. 29 Effect of ASTM grain size numer on tensile properties (0.2% Proof stress) of as－received fuel cladding tubes and sodium-exposed ones (MONJU).

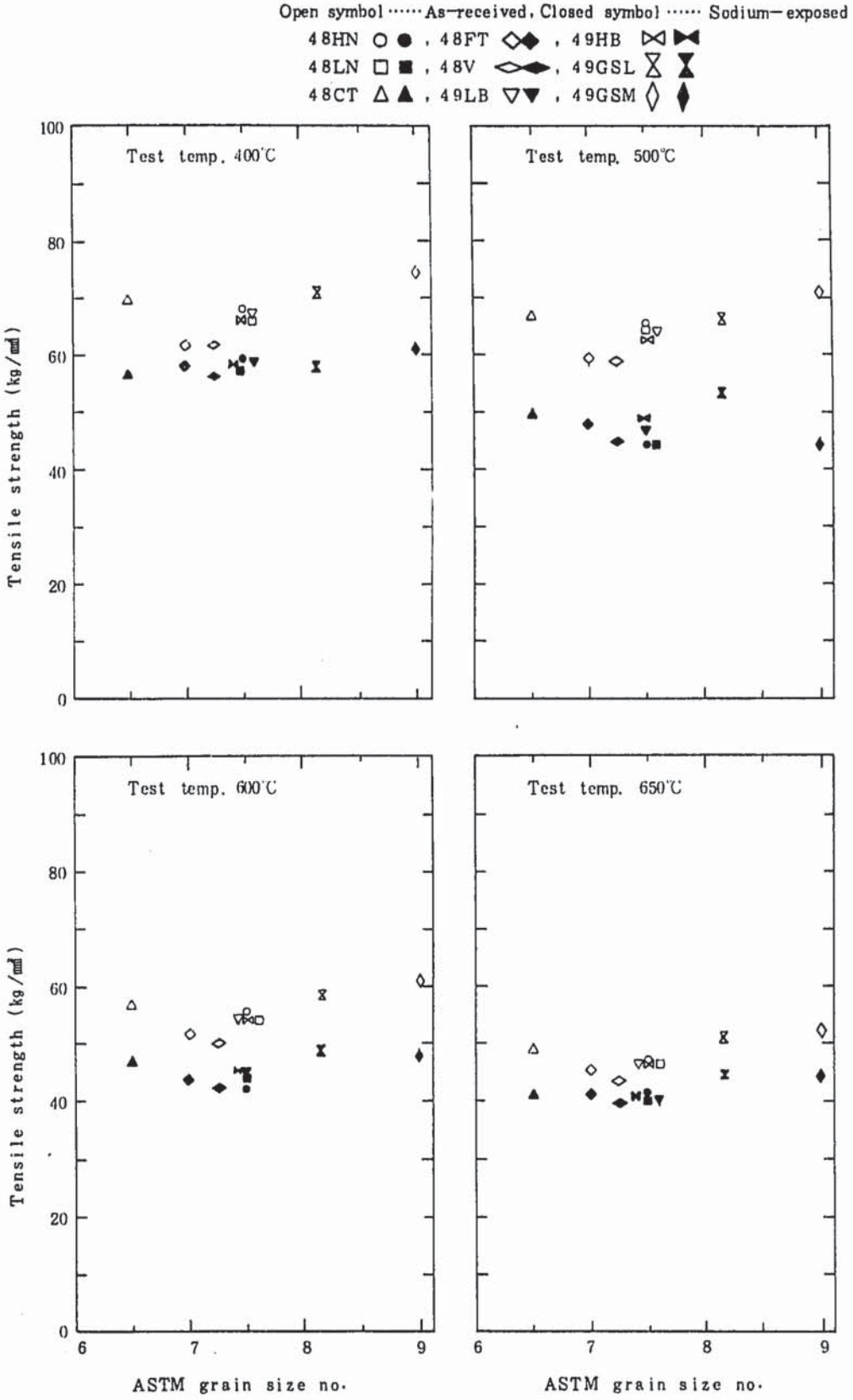


Fig. 30 Effect of ASTM grain size number on tensile properties (Tensile strength) of as-received fuel cladding tubes and sodium exposed ones (MONJU).

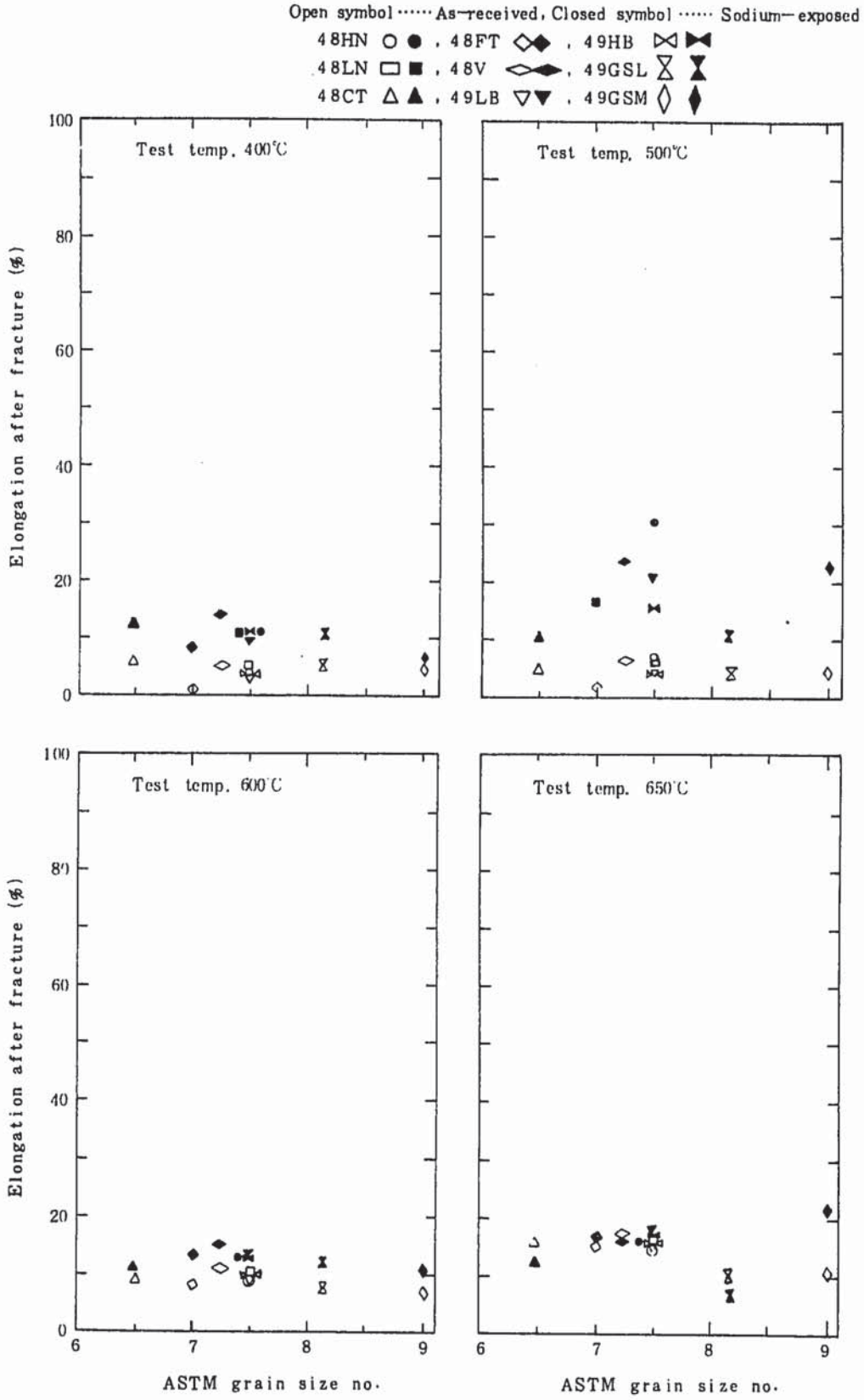


Fig. 31 Effect of ASTM grain size number on tensile properties (Elongation) of as－received fuel cladding tubes and sodium-exposed ones (MONJU).

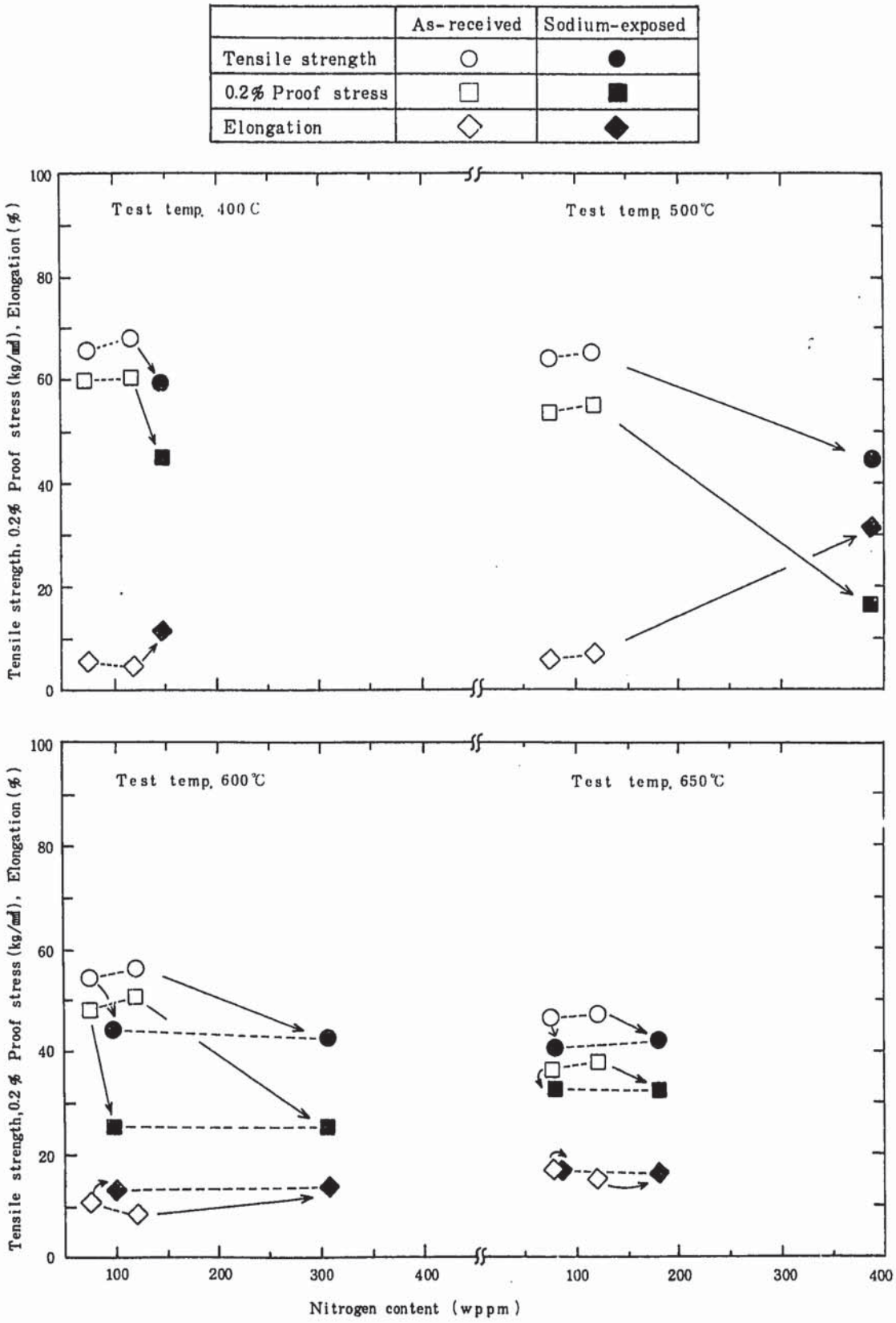


Fig. 32 Effect of nitrogen content on tensile properties of as－received and sodium-exposed fuel cladding tubes (MONJU)

[Each arrow indicates varietion of an as－received value to the sodium－exposed one.]

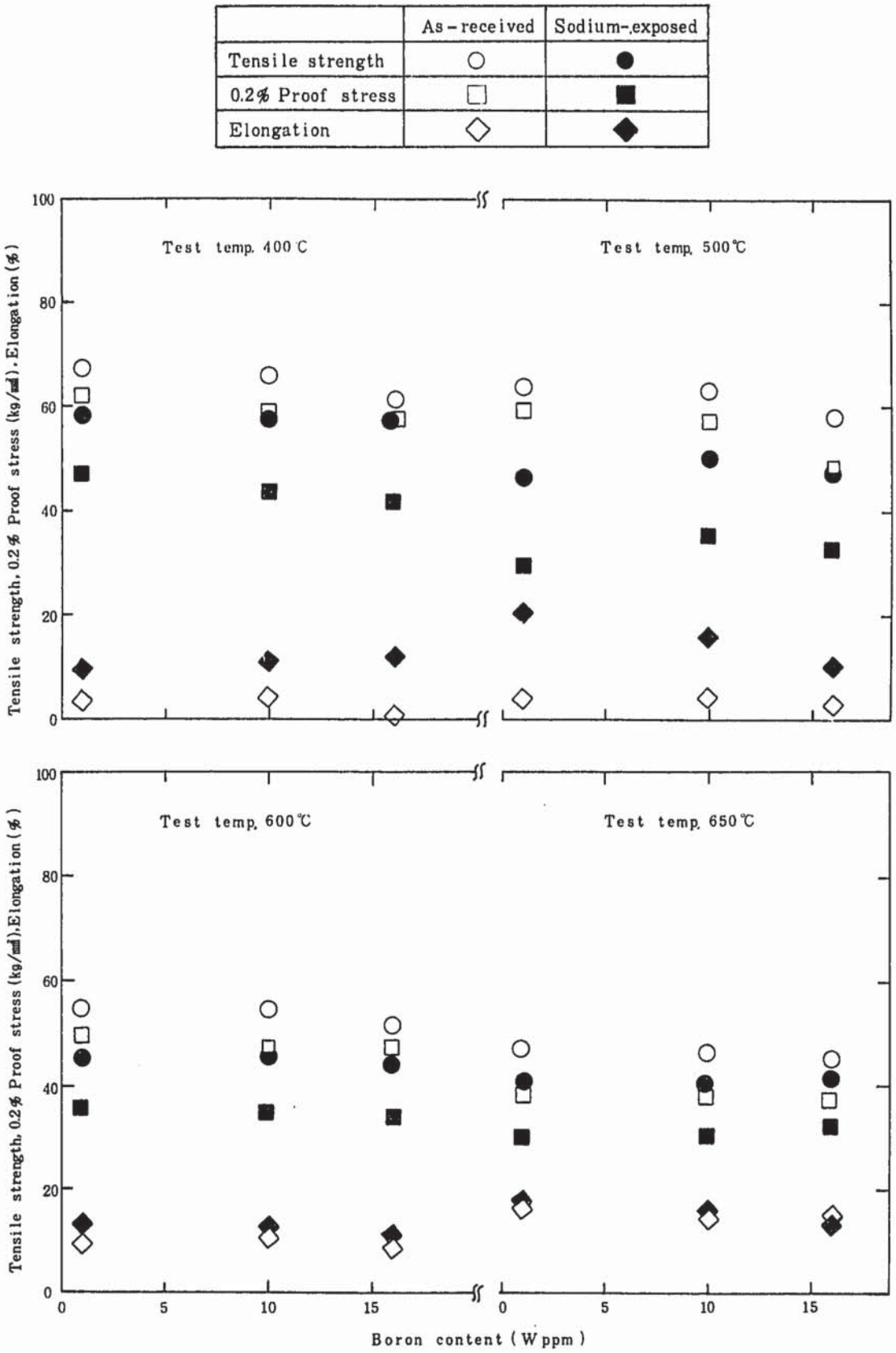


Fig. 33 Effect of boron content on tensile properties of as－received and sodium-exposed fuel cladding tubes (MONJU).

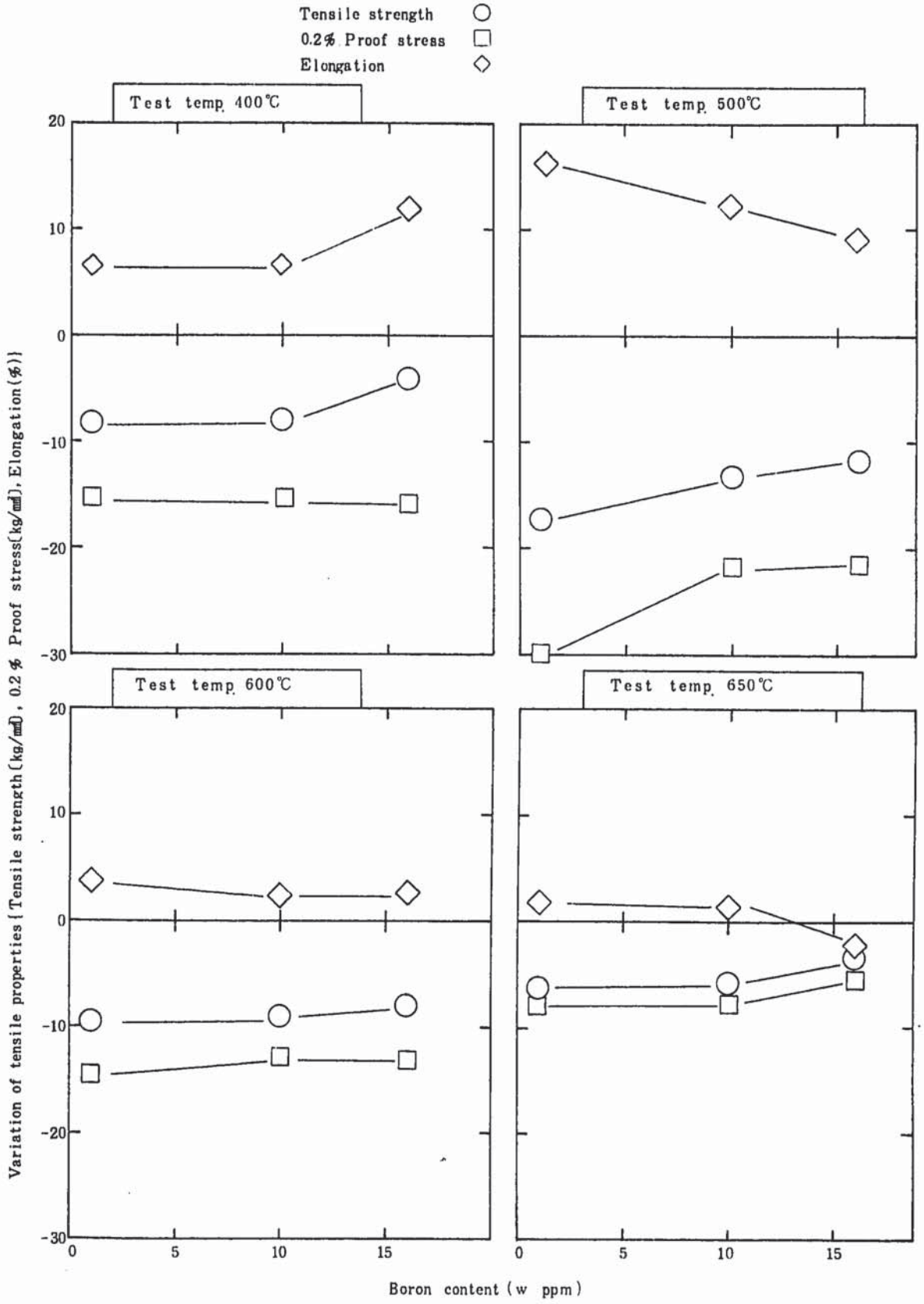


Fig. 34 Effect of boron content on variations of tensile properties between as－received and sodium-exposed fuel cladding tubes (MONJU).

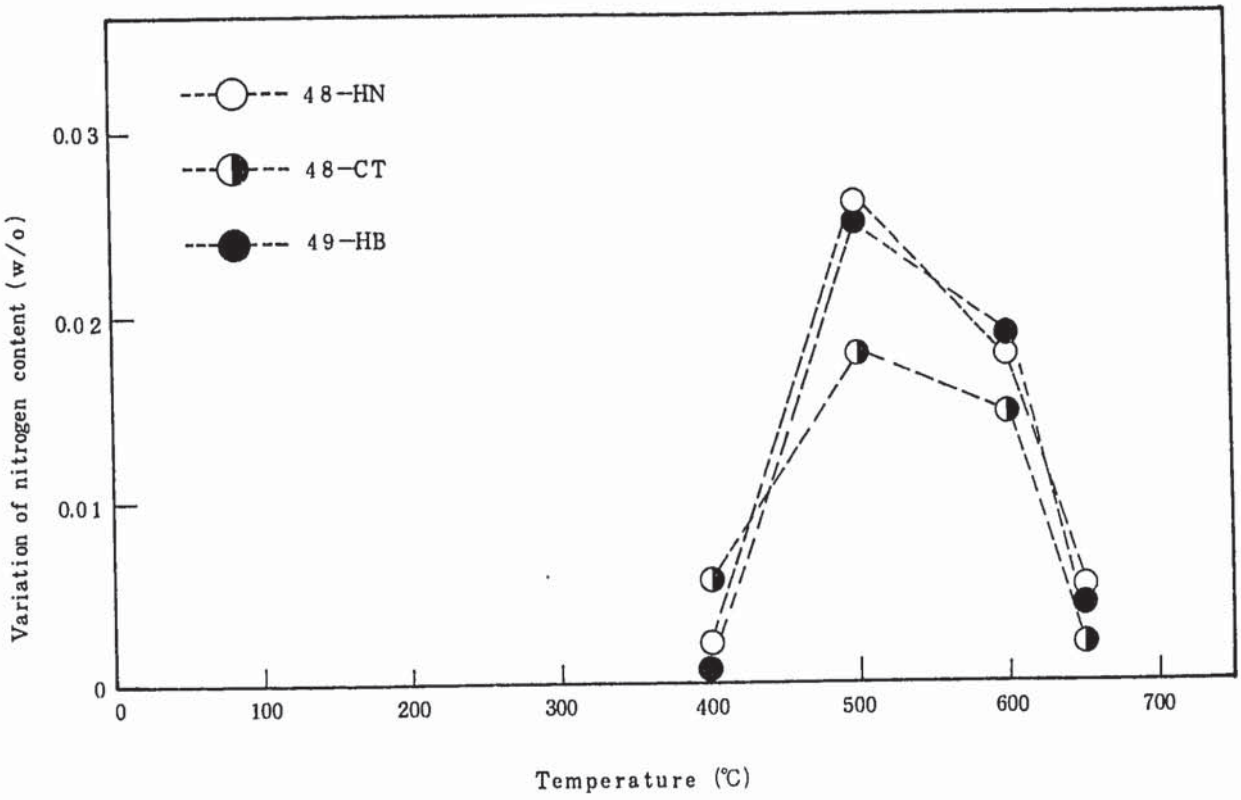


Fig. 35 Variation of nitrogen content of MONJU fuel cladding tubes before and after sodium exposure.

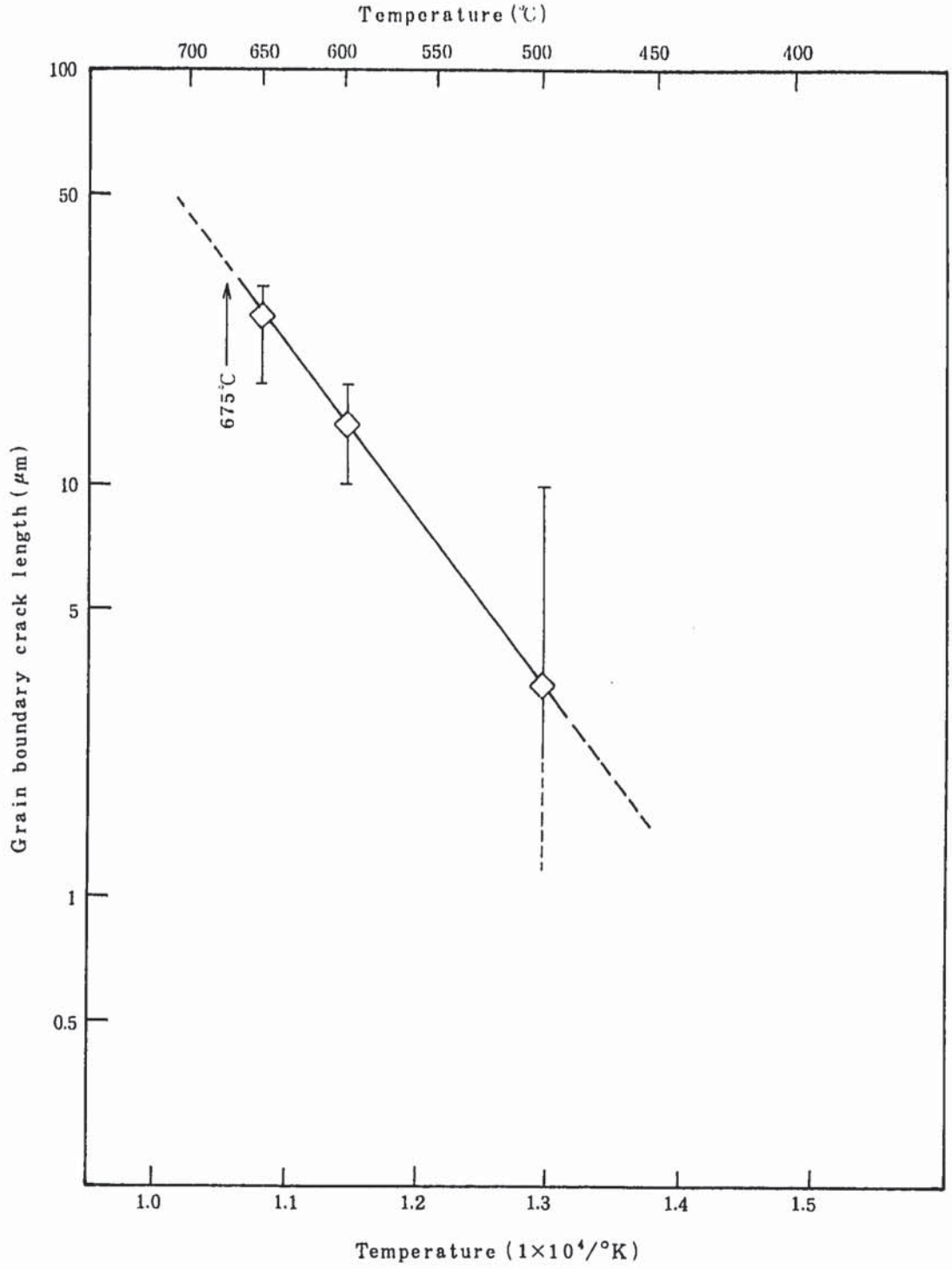


Fig. 36 Grain boundary crack length of the surface layer of fuel cladding tubes (MONJU) exposed to sodium as a function of reciprocal temperature.

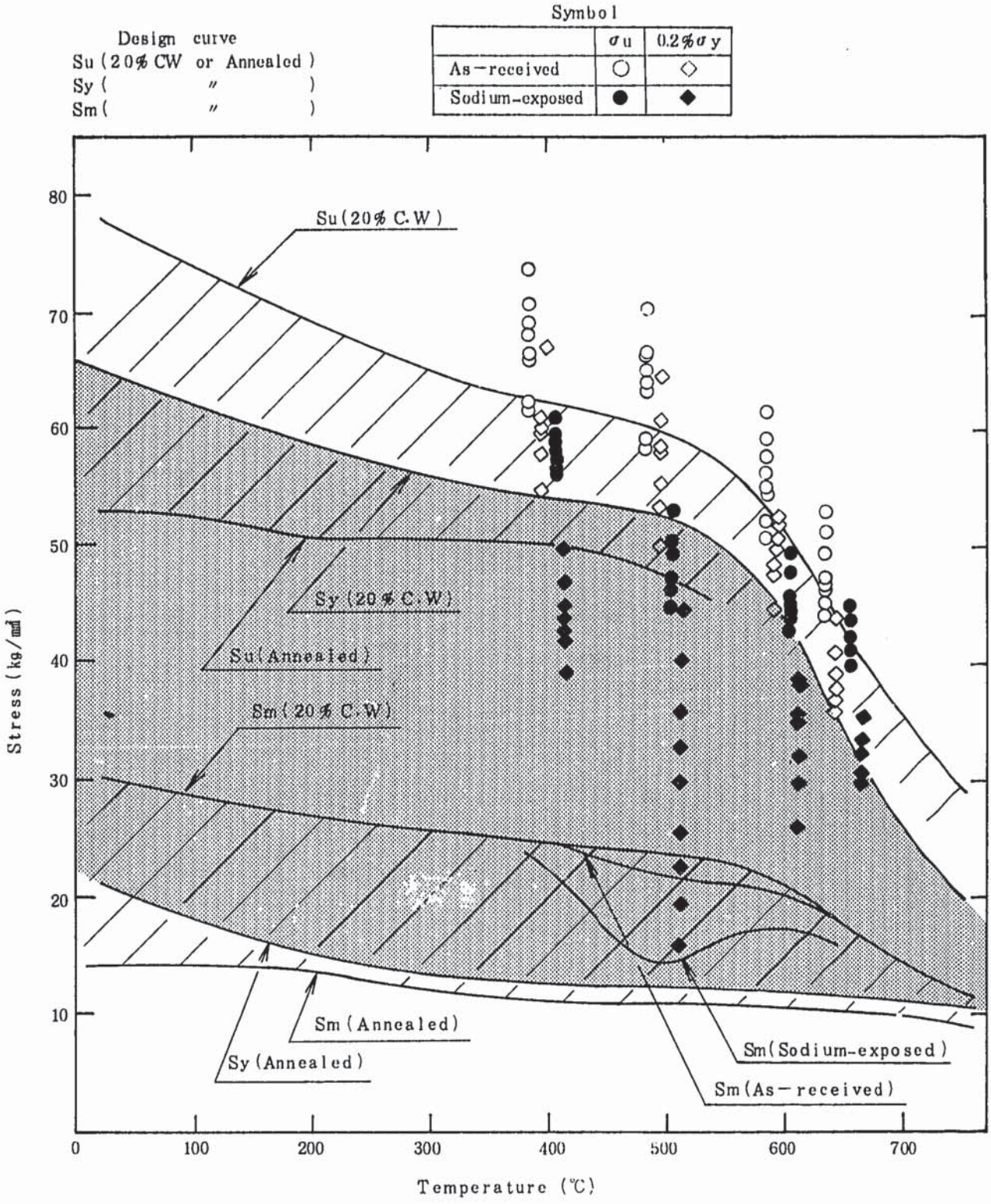


Fig. 37 Comparison of design values and tensile strength values of fuel cladding tubes for MONJU

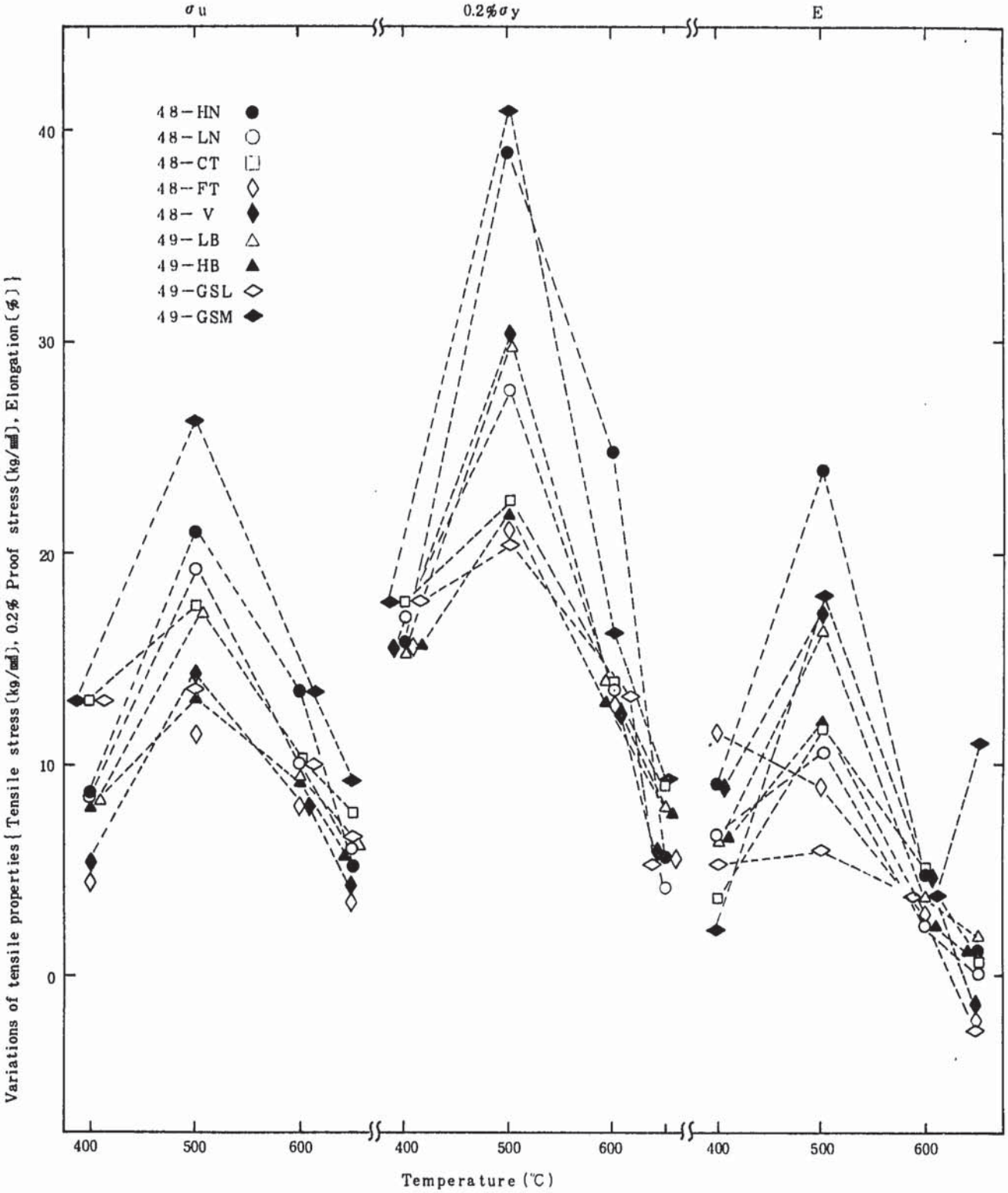


Fig. 38 Variations of tensile properties between as－received and sodium－exposed fuel cladding tubes as a function of exposure temperature (MONJU).

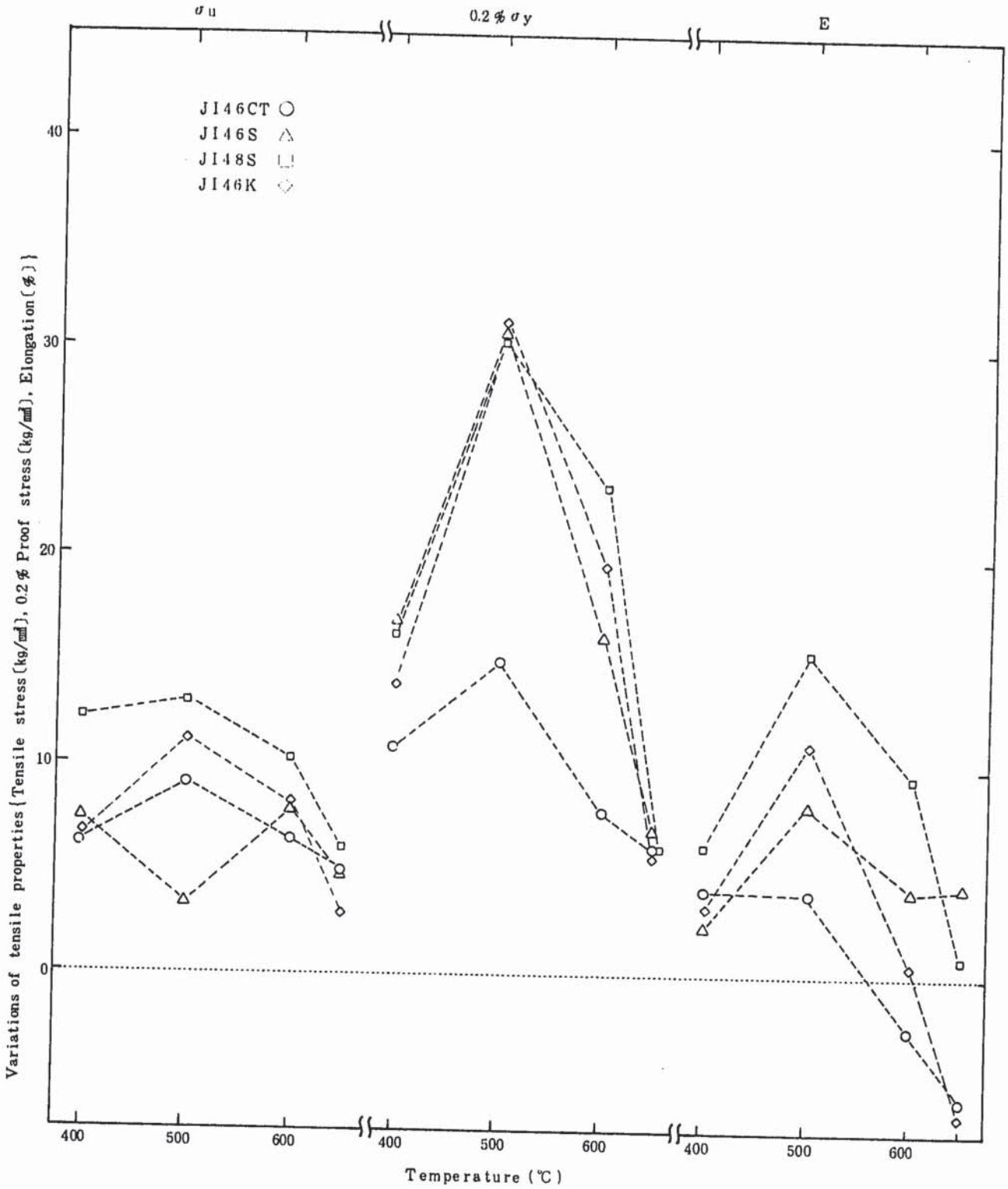


Fig. 39 Variation of tensile properties between as－received and sodium-exposed fuel cladding tubes as a function of exposure temperature (JOYO).

Appendix　（参　考　資　料）

Ｍ２ループ運転経過

引張試験データシート

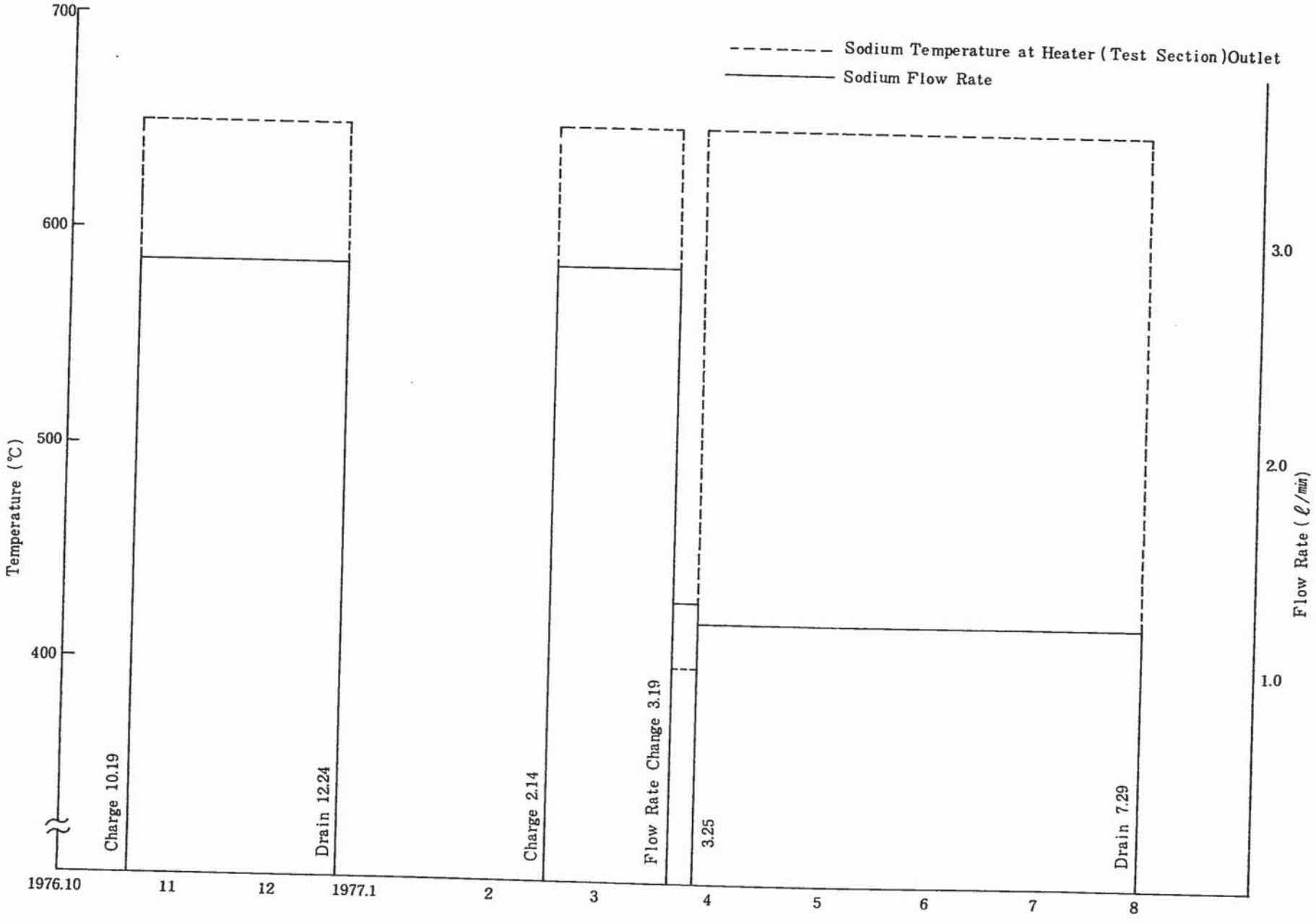


Fig. Progress of M-2 Loop Operation

FBR 金属材料試験データシート

FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 1

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No. E	記入責任者名 Prepared by	
	記入年月日 Date of Issue: 年 Year 月 Month 日 Day	所属会社名 Affiliation	

試験材料 Material	Material Name: ( ) □Base Metal □Plate (t) □Weld Joint □Forged (t) □Depo Metal ☒Tube (6.5φ×0.45t) □HAZ □Others ( )	試験雰囲気 Test · Environment	☒In Air □In Stagnant Na □In Flowing Na □In Ar
試験片履歴 Specimen History	☒受け入れ As-received □ナトリウム浸漬 Sodium Exposed □熱履歴 Thermal Aged	試験場所（識別記号） Test Laboratory (Identification Label)	( )

試験片番号 Specimen No.	E S3036 AA−15	E AA−13	E AA−7	E AA−1	E S3227 AB−15	E AB−13	E AB−7	E AB−1
試験条件 Test Conditions: 試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400	650	600	500	400
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.5	0.5	0.9	0.7	0.4	0.5	0.8	0.7
低速部 Low Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
高速部 High Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties: 0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	37.9	50.6	55.0	60.7	36.7	48.1	53.2	60.0
引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	47.3	56.2	65.2	68.0	46.3	54.5	63.8	65.9
一様伸び E_u (%) Uniform Elongation	4.6	5.5	6.1	3.6	5.4	8.3	4.5	4.4
破断伸び E_f (%) Fracture Elongation	14.9	8.7	6.9	4.1	16.5	10.6	5.7	5.3
絞り ϕ (%) Reduction of Area								
破断位置 (%) Fracture Location	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ
$\sigma_y \times 0.9$	34.11	45.54	49.50	54.63	33.03	43.92	47.88	54.00
$\sigma_u \times 0.4$	18.92	22.48	26.08	27.20	18.52	21.80	25.52	26.36

試験片番号 Specimen No.	E CT021 AC−15	E AC−13	E AC−7	E AC−1	E F018 AD−15	E AD−13	E AD−7	E AD−1
試験条件 Test Conditions: 試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400	650	600	500	400
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.5	0.5	0.6	0.8	0.4	0.5	0.5	0.8
低速部 Low Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
高速部 High Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties: 0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	38.9	49.8	58.3	60.9	37.8	47.4	54.2	57.7
引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	49.2	57.7	66.6	69.2	45.1	51.9	58.8	61.9
一様伸び E_u (%) Uniform Elongation	4.8	5.8	4.3	5.3	5.9	6.6	1.4	0.8
破断伸び E_f (%) Fracture Elongation	16.2	9.1	5.0	6.1	15.2	8.5	1.6	0.9
絞り ϕ (%) Reduction of Area								
破断位置 (%) Fracture Location	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ
$\sigma_y \times 0.9$	35.01	44.82	52.47	54.81	34.02	42.66	48.78	51.93
$\sigma_u \times 0.4$	19.68	23.08	26.64	27.68	18.04	20.76	23.52	24.76

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks	(参考文献 References) (1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977) FBR Metallic Materials Test Manual (1977) (2) JIS G 0567−1976 (□ Sodium Exposure / □ Thermal Aged Condition) Environment : Temperature : Impurity Content : Flow Velocity (Re No.) : Duration : Sodium Loop :
マスターシート番号 Master Sheet No.	

Power Reactor & Nuclea Fuel Development Corp.

FBR 金属材料試験データシート
FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 2

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No.	E		記入責任者名 Prepared by	
	記入年月日 Date of Issue	年 Year　月 Month　日 Day		所属会社名 Affiliation	

試験材料 Material	Material Name: ( ) ☐Base Metal ☐Weld Joint ☐Depo Metal ☐HAZ	☐Plate (t) ☐Forged (t) ☒Tube (6.5φ×0.45t) ☐Others ( )	試験雰囲気 Test Environment	☒In Air ☐In Stagnant Na ☐In Flowing Na ☐In Ar	試験片履歴 Specimen History	☒受け入れ As-received ☐ナトリウム浸漬 Sodium Exposed ☐熱履歴 Thermal Aged	試験場所（識別記号） Test Laboratory (Identification Label) ( )

				E L020 AE-15	E AF-13	E AF-7	E AE-1	E S5033 AF-15	E AF-13	E AF-7	E AF-1
試験片番号 Specimen No.				E L020 AE-15	E AF-13	E AF-7	E AE-1	E S5033 AF-15	E AF-13	E AF-7	E AF-1
試験条件 Test Conditions	試験温度 Test Temperature (℃)			650	600	500	400	650	600	500	400
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate	低速部 Low Strain Rate	ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.4	0.5	0.7	0.8	0.5	0.5	0.4	0.6
			ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
		高速部 High Strain Rate	ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties	0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength			36.0	44.4	49.6	54.4	38.0	49.7	59.7	62.5
	引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength			43.8	50.6	58.6	61.4	47.2	54.9	63.9	67.2
	一様伸び E_u (%) Uniform Elongation			6.4	7.1	5.7	5.0	5.3	4.4	2.6	2.7
	破断伸び E_f (%) Fracture Elongation			17.3	10.6	6.3	5.7	16.2	9.6	4.3	3.5
	絞り φ (%) Reduction of Area										
	破断位置 (%) Fracture Location			☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ
	$\sigma_y \times 0.9$			32.40	39.96	44.65	48.96	34.20	44.73	53.73	56.25
	$\sigma_u \times 0.4$			17.52	20.24	23.44	24.56	18.88	19.88	23.88	26.88
試験片番号 Specimen No.				E S5190 AG-15	E AG-13	E AG-7	E AG-1	E K4025 AH-15	E AH-13	E AH-7	E AH-1
試験条件 Test Conditions	試験温度 Test Temperature (℃)			650	600	500	400	650	600	500	400
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate	低速部 Low Strain Rate	ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.5	0.6	0.4	0.7	0.5	0.8	0.5	0.6
			ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
		高速部 High Strain Rate	ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties	0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength			38.2	47.9	57.8	59.5	40.9	51.6	60.7	61.3
	引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength			46.7	54.7	63.3	66.1	51.2	59.0	66.8	70.7
	一様伸び E_u (%) Uniform Elongation			4.9	5.9	3.6	3.9	4.3	5.5	3.6	4.9
	破断伸び E_f (%) Fracture Elongation			15.4	10.6	4.3	4.7	9.5	8.4	4.7	5.7
	絞り φ (%) Reduction of Area										
	破断位置 (%) Fracture Location			☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ
	$\sigma_y \times 0.9$			34.38	43.11	52.02	53.55	36.81	46.44	54.63	55.17
	$\sigma_u \times 0.4$			19.04	21.88	25.32	26.44	20.48	23.60	26.72	28.28

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks	(参考文献 References) (1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977) FBR Metallic Materials Test Manual (1977) (2) JIS G 0567－1976	(☐ Sodium Exposure ☐ Thermal Aged Condition) Environment : Temperature : Impurity Content : Flow Velocity (Re No.) : Duration : Sodium Loop :
マスターシート番号 Master Sheet No.		

Power Reactor & Nuclea Fuel Development Corp.

FBR 金属材料試験データシート
FBR Metallic Materials Test Data Sheet
No. 3

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No.	E	記入責任者名 Prepared by	
	記入年月日 Date of Issue	年 Year　月 Month　日 Day	所属会社名 Affiliation	

試験材料 Material	Material Name: ( ) ☐Base Metal ☐Weld Joint ☐Depo Metal ☐HAZ ☐Plate (t) ☐Forged ( ) ☒Tube (6.5ϕ×0.45t) ☐Others ( )	試験雰囲気 Test Environment	☒In Air ☐In Stagnant Na ☐In Flowing Na ☐In Ar
試験片履歴 Specimen History	☒受け入れ As-received ☐ナトリウム浸漬 Sodium Exposed ☐熱履歴 Thermal Aged	試験場所（識別記号） Test Laboratory (Identification Label)	( )

試験片番号 Specimen No.	E K4120 AI-15	E AI-13	E AI-7	E AI-1	E	E	E	E
試験条件 Test Conditions: 試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400				
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.5	0.5	0.6	0.4				
低速部 Low Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29				
高速部 High Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14				
工学的特性 Engineering Properties: 0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	43.0	54.9	64.2	67.0				
引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	52.8	61.5	70.3	73.8				
一様伸び E_u (%) Uniform Elongation	3.1	5.9	2.3	3.9				
破断伸び E_f (%) Fracture Elongation	10.3	7.1	4.5	4.6				
絞り ϕ (%) Reduction of Area								
破断位置 (%) Fracture Location	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ
$\sigma_y \times 0.9$	38.70	49.41	57.78	60.30				
$\sigma_u \times 0.4$	21.12	24.60	28.12	29.52				
試験片番号 Specimen No.	E	E	E	E	E	E	E	E
試験条件 Test Conditions: 試験温度 Test Temperature (℃)								
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで								
低速部 Low Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)								
高速部 High Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)								
工学的特性 Engineering Properties: 0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength								
引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength								
一様伸び E_u (%) Uniform Elongation								
破断伸び E_f (%) Fracture Elongation								
絞り ϕ (%) Reduction of Area								
破断位置 (%) Fracture Location	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ
$\sigma_y \times 0.9$								
$\sigma_u \times 0.4$								

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考
Remarks

(参考文献 References)
(1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567－1976

(☐Sodium Exposure ☐Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature ;
Impurity Content :
Flow Velocity (Re No.) :
Duration
Sodium Loop :

マスターシート番号
Master Sheet No.

FBR 金属材料試験データシート
FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 4

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No. E		記入責任者名 Prepared by
	記入年月日 Date of Issue	年 Year 月 Month 日 Day	所属会社名 Affiliation

試験材料 Material	Material Name: ( ) □Base Metal □Weld Joint □Depo Metal □HAZ □Plate (t) □Forged (t) ☑Tube (5.5φ×0.35t) □Others ( )	試験雰囲気 Test Environment	☑In Air □In Stagnant Na □In Flowing Na □In Ar
試験片履歴 Specimen History	☑受け入れ As-received □ナトリウム浸漬 Sodium Exposed □熱履歴 Thermal Aged	試験場所（識別記号）Test Laboratory (Identification Label)	( )

		E S1011 AJ-15	E AJ-13	E AJ-7	E AJ-1	E K1117 AK-15	E AK-13	E AK-7	E AK-1
	試験片番号 Specimen No.	E S1011 AJ-15	E AJ-13	E AJ-7	E AJ-1	E K1117 AK-15	E AK-13	E AK-7	E AK-1
試験条件 Test Conditions	試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400	650	600	500	400
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate — 低速部 Low Strain Rate — ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.5	0.5	0.5	0.8	0.9	0.5	0.7	0.5
	低速部 Low Strain Rate — ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	高速部 High Strain Rate — ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties	0.2%耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	37.7	50.1	61.1	63.7	40.2	49.7	58.4	60.8
	引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	48.0	57.9	66.9	70.6	48.5	57.7	66.3	69.2
	一様伸び Eu (%) Uniform Elongation	4.8	4.1	3.1	3.1	5.4	4.5	3.6	4.7
	破断伸び Ef (%) Fracture Elongation	15.1	6.8	3.5	3.4	12.3	8.2	4.8	5.2
	絞り φ (%) Reduction of Area								
	破断位置 (%) Fracture Location	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ
	$\sigma_y \times 0.9$	33.93	45.09	54.99	57.33	36.18	44.73	52.56	54.72
	$\sigma_u \times 0.4$	19.20	23.16	26.76	28.24	19.40	23.08	26.52	27.68
	試験片番号 Specimen No.	E K1203 AL-15	E AL-13	E AL-7	E AL-1	E	E	E	E
試験条件 Test Conditions	試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400				
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate — 低速部 Low Strain Rate — ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.8	0.7	0.6	0.5				
	低速部 Low Strain Rate — ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29				
	高速部 High Strain Rate — ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14				
工学的特性 Engineering Properties	0.2%耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	41.2	53.5	65.1	66.4				
	引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	51.0	61.4	71.3	73.9				
	一様伸び Eu (%) Uniform Elongation	4.4	6.7	2.7	5.2				
	破断伸び Ef (%) Fracture Elongation	11.7	9.9	4.9	6.1				
	絞り φ (%) Reduction of Area								
	破断位置 (%) Fracture Location	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ
	$\sigma_y \times 0.9$	37.08	48.15	58.59	59.76				
	$\sigma_u \times 0.4$	20.40	24.56	28.52	29.56				

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks

(参考文献 References)
(1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567－1976

(□ Sodium Exposure □ Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature :
Impurity Content :
Flow Velocity (Re No.) :
Duration :
Sodium Loop :

マスターシート番号 Master Sheet No.

Power Reactor & Nuclea Fuel Development Corp.

FBR 金属材料試験データシート

FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 5

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No.	E	記入責任者名 Prepared by
	記入年月日 Date of Issue	年 Year　月 Month　日 Day	所属会社名 Affiliation

試験材料 Material	Material Name: ( ) □Base Metal □Weld Joint □Depo Metal □HAZ □Plate (t) □Forged (t) ☒Tube (6.3φ×0.35t) □Others ( )	試験雰囲気 Test Environment	☒In Air □In Stagnant Na □In Flowing Na □In Ar
試験片履歴 Specimen History	☒受け入れ As-received □ナトリウム浸漬 Sodium Exposed □熱履歴 Thermal Aged	試験場所（識別記号） Test Laboratory (Identification Label)	( )

試験片番号 Specimen No.	E R1219 AM-15	E AM-13	E AM-7	E AM-1	E S4868 AN-15	E AN-13	E AN-7	E AN-1
試験条件 Test Conditions: 試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400	650	600	500	400
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.7	0.9	0.8	0.8	0.7	1.0	1.1	0.5
低速部 Low Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
高速部 High Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties: 0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	32.5	36.1	42.9	44.8	35.6	45.3	51.5	54.7
引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	41.0	46.6	53.1	56.7	44.3	52.8	59.3	63.0
一様伸び E_u (%) Uniform Elongation	10.6	14.0	14.6	11.4	8.5	8.6	11.1	11.8
破断伸び E_f (%) Fracture Elongation	22.2	19.7	15.9	12.9	18.8	15.7	13.1	12.9
絞り ϕ (%) Reduction of Area								
破断位置 (%) Fracture Location	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ
σ_y × 0.9	29.25	32.49	38.61	40.32	32.04	40.77	46.35	49.23
σ_u × 0.4	16.40	18.64	21.24	22.68	17.72	21.12	23.72	25.20
試験片番号 Specimen No.	E S1-2784 AO-15	E AO-13	E AO-7	E AO-1	E K7224 AP-15	E AP-13	E AP-7	E AP-1
試験条件 Test Conditions: 試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400	650	600	500	400
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.9	1.0	0.7	0.7	0.9	1.0	0.5	0.6
低速部 Low Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
高速部 High Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties: 0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	35.1	45.9	51.0	54.1	32.4	41.4	47.7	50.3
引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	44.6	52.1	59.7	62.6	40.7	48.6	55.5	58.6
一様伸び E_u (%) Uniform Elongation	8.7	10.3	7.8	8.5	9.3	13.2	15.7	13.7
破断伸び E_f (%) Fracture Elongation	21.8	14.2	11.6	11.6	25.9	19.9	17.2	15.7
絞り ϕ (%) Reduction of Area								
破断位置 (%) Fracture Location	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ
σ_y × 0.9	31.59	41.31	45.90	48.69	29.16	37.26	42.93	45.27
σ_u × 0.4	17.84	20.84	23.88	25.04	16.28	19.44	22.20	23.44

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks	(参考文献 References) (1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977) FBR Metallic Materials Test Manual (1977) (2) JIS G 0567－1976	(□ Sodium Exposure □ Thermal Aged Condition) Environment : Temperature : Impurity Content : Flow Velocity (Re No.) : Duration : Sodium Loop :
マスターシート番号 Master Sheet No.		

Power Reactor & Nuclea Fuel Development Corp.

FBR 金属材料試験データシート

FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 6

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No.	E	記入責任者名 Prepared by	
	記入年月日 Date of Issue	年 Year 月 Month 日 Day	所属会社名 Affiliation	

試験材料 Material	Material Name: ( ) ☐Base Metal ☐Weld Joint ☐Depo Metal ☐HAZ	☐Plate (t) ☐Forged (t) ☒Tube (6.5φ×0.45t) ☐Others ( )	試験雰囲気 Test Environment	☒In Air ☐In Stagnant Na ☐In Flowing Na ☐In Ar	試験片履歴 Specimen History	☐受け入れ As-received ☒ナトリウム浸漬 Sodium Exposed ☐熱履歴 Thermal Aged	試験場所（識別記号） Test Laboratory (Identification Label) ( )

試験片番号 Specimen No.			ES3013 BA-15	E BA-13	E BA-7	E BA-1	ES3260 BB-15	E BB-13	E BB-7	E BB-1
試験条件 Test Conditions	試験温度 Test Temperature (℃)		650	600	500	400	650	600	500	400
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate	ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.7	0.7	2.5	0.4	0.6	0.6	0.6	0.5
		ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	高速部 High Strain Rate	ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties	0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength		32.4	25.7	16.0	45.0	32.6	34.6	25.6	43.0
	引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength		42.1	42.7	44.2	59.3	40.3	44.4	44.5	57.4
	一様伸び E_u (%) Uniform Elongation		6.5	11.4	25.9	11.0	7.2	9.3	12.9	11.1
	破断伸び E_f (%) Fracture Elongation		15.9	13.4	30.7	11.8	16.5	12.9	16.2	11.9
	絞り ϕ (%) Reduction of Area									
	破断位置 (%) Fracture Location		☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ
	$\sigma_y \times 0.9$		29.16	23.13	14.40	40.50	29.34	31.14	23.04	38.70
	$\sigma_u \times 0.4$		16.84	17.08	17.68	23.72	16.12	17.76	17.80	22.96
	受け入れ材引張性質との差 Variation from As-received value	$\sigma_y - \sigma_{ya}$	−5.4	−24.9	−39.0	−15.7	−4.1	−13.5	−27.6	−17.0
		$\sigma_u - \sigma_{ua}$	−5.2	−13.5	−21.0	− 8.7	−6.0	−10.1	−20.3	− 8.5
		$E_u - E_{ua}$	1.9	5.9	19.8	7.4	1.8	1.0	8.0	6.7
		$E_f - E_{fa}$	1.0	4.7	23.8	7.7	0	2.3	10.5	6.6
		−								
		−								

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks

(参考文献 References)
(1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567－1976

(☒ Sodium Exposure
☐ Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature : ~400~650℃
Impurity Content : ~10ppm
Flow Velocity (Re No.) : Ave.7.86m/sec(Ave.270 at 400℃, Ave.368 at 650℃)
Duration : 5401 hrs
Sodium Loop : Material Test Sodium Loop 1 ~M2

マスターシート番号 Master Sheet No.

Power Reactor & Nuclea Fuel Development Corp.

FBR 金属材料試験データシート
FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 7

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No.	E	記入責任者名 Prepared by
	記入年月日 Date of Issue	年 Year　月 Month　日 Day	所属会社名 Affiliation

試験材料 Material	Material Name: ( ) ☐Base Metal ☐Weld·Joint ☐Depo Metal ☐HAZ	☐Plate (t) ☐Forged (t) ☒Tube (6.5φ×0.45t) ☐Others ( )	試験雰囲気 Test Environment	☒In Air ☐In Stagnant Na ☐In Flowing Na ☐In Ar	試験片履歴 Specimen History: ☐受け入れ As-received ☒ナトリウム浸漬 Sodium Exposed ☐熱履歴 Thermal Aged 試験場所（識別記号）Test Laboratory (Identification Label) ( )

試験片番号 Specimen No.			E CT017 BC−15	E BC−13	E BC−7	E BC−2	E F014 BD−15	E BD−13	E BD−7	E BD−1
試験条件 Test Conditions	試験温度 Test Temperature (℃)		650	600	500	425	650	600	500	400
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate — 低速部 Low Strain Rate	ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.5	0.7	0.5
		ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	高速部 High Strain Rate	ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties	0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength		29.9	36.0	35.8	43.2	32.3	34.3	33.0	42.1
	引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength		41.5	47.6	49.2	56.7	41.5	43.9	47.3	57.9
	一様伸び E_u (%) Uniform Elongation		6.5	10.3	12.5	9.1	7.9	9.0	9.3	11.9
	破断伸び E_f (%) Fracture Elongation		16.7	13.6	16.7	9.8	12.9	11.3	10.6	12.5
	絞り ϕ (%) Reduction of Area									
	破断位置 (%) Fracture Location		☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ
	$\sigma_y \times 0.9$		26.91	32.40	32.22	38.88	29.07	30.87	29.70	37.89
	$\sigma_u \times 0.4$		16.60	19.04	19.68	22.68	16.60	17.56	18.92	23.16
	受け入れ材引張性質との差 Variation from As-received value	$\sigma_y - \sigma_{ya}$	−9.0	−13.8	−22.5	−17.7	−5.5	−13.1	−21.2	−15.6
		$\sigma_u - \sigma_{ua}$	−7.7	−10.1	−17.4	−12.5	−3.6	−8.0	−11.5	− 4.0
		$E_u - E_{ua}$	1.8	4.5	8.2	3.8	2.0	2.4	7.8	11.1
		$E_f - E_{fa}$	0.5	4.5	11.7	3.7	−2.3	2.8	9.0	11.6
		—								
		—								

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks

(参考文献 References)
(1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567－1976

(☒ Sodium Exposure / ☐ Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature : −400−650℃
Impurity Content : −10ppmO
Fluw Velocity (Re No.) : Ave.7.85m/sec(Ave.270 at 400℃, Ave.388 at 650℃)
Duration : 5401 hrs
Sodium Loop : Material Test Sodium Loop 1 −M2

マスターシート番号 Master Sheet No.

Power Reactor & Nuclea Fuel Development Corp.

FBR 金属材料試験データシート

FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 8

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No.	E	記入責任者名 Prepared by	
	記入年月日 Date of Issue	年 Year 月 Month 日 Day	所属会社名 Affiliation	

試験材料 Material	Material Name: ( ) ☐Base Metal ☐Plate (t) ☐Weld Joint ☐Forged (t) ☐Depo Metal ☒Tube (6.5φ×0.45t) ☐HAZ ☐Others ( )	試験雰囲気 Test Environment	☒In Air ☐In Stagnant Na ☐In Flowing Na ☐In Ar
試験片履歴 Specimen History	☐受け入れ As-received ☒ナトリウム浸漬 Sodium Exposed ☐熱履歴 Thermal Aged	試験場所（識別記号） Test Laboratory (Identification Label)	( )

試験片番号 Specimen No.		E L015 BE−15	E BE−13	E BE−7	E BE−1	E S5021 BF−15	E BF−13	E BF−7	E BF−1
試験条件 Test Conditions	試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400	650	600	500	400
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate / 低速部 Low Strain Rate / ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.6	0.4	0.6	0.6	0.5	0.4	0.6	0.6
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate / 低速部 Low Strain Rate / ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate / 高速部 High Strain Rate / ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties	0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	30.3	31.8	19.3	39.0	30.0	35.8	29.9	47.2
	引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	39.6	42.6	44.4	56.1	41.0	45.5	46.7	58.9
	一様伸び E_u (%) Uniform Elongation	9.2	12.1	18.6	14.1	7.8	9.9	16.7	9.4
	破断伸び E_f (%) Fracture Elongation	15.9	15.2	23.4	14.6	18.0	13.3	20.6	9.9
	絞り ϕ (%) Reduction of Area								
	破断位置 (%) Fracture Location	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ
	$\sigma_y \times 0.9$	27.27	28.62	17.37	35.10	27.00	32.22	26.28	42.48
	$\sigma_u \times 0.4$	15.84	20.96	17.76	22.44	16.40	18.20	18.68	23.96
	受け入れ材引張性質との差 Variation from As-received value: $\sigma_y - \sigma_{ya}$	−5.7	−12.6	−30.3	−15.4	−8.0	−13.9	−29.8	−15.3
	$\sigma_u - \sigma_{ua}$	−4.2	−10.0	−14.2	−5.3	−6.2	−9.4	−17.2	−8.3
	$E_u - E_{ua}$	2.9	5.1	12.9	9.1	2.6	3.7	14.1	6.7
	$E_f - E_{fa}$	−1.4	4.6	17.1	8.9	1.8	5.5	16.3	6.4
	—								
	—								

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks

(参考文献 References)
(1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567−1976

(☒ Sodium Exposure ☐ Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature : −400−650℃
Impurity Content : −10ppmO
Flow Velocity (Re No.) : Ave.7.88m/sec(Ave.270 at 400℃, Ave.368 at 650℃)
Duration : 5401 hrs
Sodium Loop : Material Test Sodium Loop 1 ···M2

マスターシート番号 Master Sheet No.

Power Reactor & Nuclea Fuel Development Corp.

FBR金属材料試験データシート
FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 9

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No.	E	記入責任者名 Prepared by
	記入年月日 Date of Issue	年 Year 月 Month 日 Day	所属会社名 Affiliation

試験材料 Material	Material Name: ( ) ☐Base Metal ☐Weld Joint ☐Depo Metal ☐HAZ	☐Plate (t) ☐Forged (t) ☒Tube (6.3φ×0.35t) ☐Others ( )	
試験雰囲気 Test Environment	☒In Air ☐In Stagnant Na ☐In Flowing Na ☐In Ar		
試験片履歴 Specimen History	☐受け入れ As-received ☒ナトリウム浸漬 Sodium Exposed ☐熱時効 Thermal Aged		
試験場所（識別記号） Test Laboratory (Identification Label)	( )		

試験片番号 Specimen No.	E S5222 BG−15	E BG−13	E BG−7	E BG−1	E K4016 BH−15	E BH−13	E BH−7	E BH−2
試験条件 Test Conditions: 試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400	650	600	500	425
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.5	0.4	0.6	0.5	0.6	0.7	0.6	0.4
低速部 Low Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
高速部 High Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties: 0.2%耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	30.6	35.0	36.0	43.9	35.5	38.3	40.3	43.6
引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	40.9	45.7	50.2	58.1	44.7	49.0	53.2	57.8
一様伸び E_u (%) Uniform Elongation	7.4	9.1	12.4	10.6	3.2	8.6	9.3	10.5
破断伸び E_f (%) Fracture Elongation	16.6	12.8	16.5	11.2	6.9	12.2	10.7	11.0
絞り φ (%) Reduction of Area								
破断位置 (%) Fracture Location	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ
$\sigma_y \times 0.9$	27.54	31.50	32.40	39.51	31.95	34.47	36.27	39.24
$\sigma_u \times 0.4$	16.36	18.28	20.08	23.24	17.88	19.60	21.28	23.12
受け入れ材引張性質との差 Variation from As-received value: $\sigma_y - \sigma_{ya}$	−7.6	−12.9	−21.8	−15.6	−5.4	−13.3	−20.4	−17.7
$\sigma_u - \sigma_{ua}$	−5.8	−9.0	−13.1	− 8.0	−6.5	−10.0	−13.6	−12.9
$E_u - E_{ua}$	2.4	3.2	8.8	6.7	−1.1	3.1	5.7	5.5
$E_f - E_{fa}$	1.2	2.2	12.2	6.5	−2.6	3.8	6.0	5.3
−								
−								

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks

(参考文献 References)
(1) FBR金属材料試験実施要領書(1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567−1976

(☒Sodium Exposure / ☐Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature : ~400~650℃
Impurity Content : ~10ppmO
Flow Velocity (Re No.) : Ave.7.66m/sec(Ave.270 at 400℃, Ave.308 at 650℃)
Duration : 5401 hrs
Sodium Loop : Material Test Sodium Loop 1 ··M2

マスターシート番号 Master Sheet No.

FBR 金属材料試験データシート

FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 10

E 引張試験成績 Tensile Properties

データシート番号 Data Sheet No.: E

記入年月日 Date of Issue: 年 Year 月 Month 日 Day

記入責任者名 Prepared by:

所属会社名 Affiliation:

試験材料 Material: Material Name: ( ) □Base Metal □Weld Joint □Depo Metal □HAZ □Plate (t) □Forged (t) ■Tube (6.5φ×0.45t) □Others ( )

試験雰囲気 Test Environment: ■In Air □In Stagnant Na □In Flowing Na □In Ar

試験片履歴 Specimen History: □受け入れ As-received ■ナトリウム浸漬 Sodium Exposed □熱履歴 Thermal Aged

試験場所 (識別記号) Test Laboratory (Identification Label): ( )

試験片番号 Specimen No.	E K4119 BI-115	E BI-13	E BI-7	E BI-1	E	E	E	E
試験条件 Test Conditions: 試験温度 Test Temperature (℃)	650	600	500	400				
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.6	0.5	0.6	0.6				
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29				
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 高速部 High Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14				
工学的特性 Engineering Properties: 0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength	33.8	38.6	23.1	49.6				
引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength	43.6	48.0	44.0	60.9				
一様伸び E_u (%) Uniform Elongation	5.2	7.6	18.4	6.1				
破断伸び E_f (%) Fracture Elongation	21.3	10.8	22.6	6.7				
絞り ϕ (%) Reduction of Area								
破断位置 (%) Fracture Location	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ
$\sigma_y \times 0.9$	30.42	34.74	20.79	44.64				
$\sigma_u \times 0.4$	17.44	19.20	17.60	24.36				
受け入れ材引張性質との差 Variation from As-received value: $\sigma_y - \sigma_{ya}$	−9.2	−16.3	−41.1	−17.4				
$\sigma_u - \sigma_{ua}$	−9.2	−13.5	−26.3	−12.9				
$E_u - E_{ua}$	2.1	1.6	16.0	2.2				
$E_f - E_{fa}$	11.0	3.7	18.1	2.1				
—								
—								

材料データシート番号 Material Data Sheet No.: B

溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.: C

試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.: D

試験機番号 Test Machine No.: E

備考 Remarks:

(参考文献 References)
(1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567－1976

(■ Sodium Exposure □ Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature : ～400～650℃
Impurity Content : ～10ppm0
Flow Velocity (Re No.) : Ave.7.85mm/sec(Ave.270 at 400℃, Ave.368 at 650℃)
Duration : 5403 hrs
Sodium Loop : Material Test Sodium Loop 1 ～M2

マスターシート番号 Master Sheet No.:

Power Reactor & Nuclea Fuel Development Corp.

FBR 金属材料試験データシート

FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 11

E 引張試験成績 Tensile Properties

データシート番号 Data Sheet No.: E

記入年月日 Date of Issue: 年 Year 月 Month 日 Day

記入責任者名 Prepared by:

所属会社名 Affiliation:

試験材料 Material: Material Name: ( ) □Base Metal □Weld Joint □Depo Metal □HAZ □Plate □Forged ☒Tube □Others (5.5φ×0.35t)

試験雰囲気 Test Environment: ☒In Air □In Stagnant Na □In Flowing Na □In Ar

試験片履歴 Specimen History: □受け入れ As-received ☒ナトリウム浸漬 Sodium Exposed □熱履歴 Thermal Aged

試験場所 (識別記号) Test Laboratory (Identification Label): ( )

試験片番号 Specimen No.	E SB J 10 2 6 1 2	E	E KB K 11 9 1 2	E	E KB L 12 0 4 1 2	E	E	E
試験条件 Test Conditions: 試験温度 Test Temperature (℃)	650		650		650			
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.5							
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 低速部 Low Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29							
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate: 高速部 High Strain Rate: ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14		7.14		7.14			
工学的特性 Engineering Properties: 0.2% 耐力 0.2% Offset Yield Strength (kg/mm²)	31.6							
引張強さ σ_u Ultimate Tensile Strength (kg/mm²)	43.6		42.3		42.8			
一様伸び E_u Uniform Elongation (%)	7.8		—		—			
破断伸び E_f Fracture Elongation (%)	8.7		12.4		17.5			
絞り ϕ Reduction of Area (%)								
破断位置 Fracture Location (%)	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ
$\sigma_y \times 0.9$	28.44		—		—			
$\sigma_u \times 0.4$	17.44		20.92		17.12			
受け入れ材引張性質との差 Variation from As-received value: $\sigma_y - \sigma_{ya}$	−6.1		—		—			
$\sigma_u - \sigma_{ua}$	−4.4		−6.2		−8.2			
$E_u - E_{ua}$	3.0		—		—			
$E_a - E_{fa}$	−6.4		0.1		5.8			
—								
—								

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks:

(参考文献 References)
(1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567－1976

(☒ Sodium Exposure □ Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature : ～400～650℃
Impurity Content : ～10ppm0
Flow Velocity (Re No.) : Ave.7.85cm/sec(Ave.270 at 400℃, Ave.308 at 650℃)
Duration : 5401 hrs
Sodium Loop : Material Test Sodium Loop 1 ～M2

マスターシート番号 Master Sheet No.:

FBR 金属材料試験データシート
FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 12

E 引張試験成績 Tensile Properties	データシート番号 Data Sheet No.	E	記入責任者名 Prepared by
	記入年月日 Date of Issue	年 Year 月 Month 日 Day	所属会社名 Affiliation

試験材料 Material — Material Name: ( )
☐Base Metal ☐Weld Joint ☐Depo Metal ☐HAZ
☐Plate (t) ☐Forged (t) ☒Tube (6.3φ×0.35t) ☐Others ( )

試験雰囲気 Test Environment — ☒In Air ☐In Stagnant Na ☐In Flowing Na ☐In Ar

試験片履歴 Specimen History — ☐受け入れ As-received ☒ナトリウム浸漬 Sodium Exposed ☐熱履歴 Thermal Aged

試験場所（識別記号） Test Laboratory (Identification Label) ( )

試験片番号 Specimen No.			E R1221 BM-15	E BM-13	E BM-7	E BM-1	E S4956 BN-15	E BN-13	E BN-7	E BN-1
試験条件 Test Conditions	試験温度 Test Temperature (℃)		650	600	500	400	650	600	500	400
	公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate — 低速部 Low Strain Rate	ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで	0.6	0.5	0.4	0.5	0.6	0.5	0.6	0.5
		ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	高速部 High Strain Rate	ひずみ速度 Strain Rate (%/min)	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties	0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength		26.3	28.3	27.9	34.0	28.7	29.1	20.8	37.8
	引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength		36.0	40.1	44.1	50.4	39.8	45.0	45.9	55.5
	一様伸び E_u (%) Uniform Elongation		10.4	13.6	18.3	15.5	8.2	15.1	20.1	14.2
	破断伸び E_f (%) Fracture Elongation		16.4	17.2	19.9	17.1	23.2	19.8	21.4	15.2
	絞り ϕ (%) Reduction of Area									
	破断位置 (%) Fracture Location		☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ	☐A ☐B ☐C ☐BASE ☐DEPO ☐BOND ☐HAZ
	$\sigma_y \times 0.9$		23.67	25.47	25.11	30.60	25.83	26.19	18.72	34.02
	$\sigma_u \times 0.4$		14.40	16.04	11.16	20.16	15.92	18.00	18.36	22.20
	受け入れ材引張性質との差 Variation from As-received value	$\sigma_y - \sigma_{ya}$	−6.2	−7.8	−15.0	−10.8	−6.9	−16.2	−30.7	−16.9
		$\sigma_u - \sigma_{ua}$	−5.0	−6.5	−9.0	−6.3	−4.5	−7.8	−5.4	−7.5
		$E_u - E_{ua}$	−0.2	−0.4	3.7	4.2	−0.2	6.4	9.0	2.4
		$E_f - E_{fa}$	−5.8	−2.5	4.0	4.2	4.4	4.1	8.3	2.3

材料データシート番号 Material Data Sheet No.	B	溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.	C	試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.	D	試験機番号 Test Machine No.	E

備考 Remarks

(参考文献 References)
(1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567－1976

(☒ Sodium Exposure / ☐ Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature : －400～650℃
Impurity Content : ～10ppmO
Flow Velocity (Re No.) : Ave.7.85m/sec (Ave.270 at 400℃, Ave.368 at 650℃)
Duration : 5401 hrs
Sodium Loop : Material Test Sodium Loop 1 …M2

マスターシート番号 Master Sheet No.

Power Reactor & Nuclea Fuel Development Corp.

FBR 金属材料試験データシート

FBR Metallic Materials Test Data Sheet

No. 13

E 引張試験成績 Tensile Properties

データシート番号 Data Sheet No.: E

記入年月日 Date of Issue: 年 Year 月 Month 日 Day

記入責任者名 Prepared by:

所属会社名 Affiliation:

試験材料 Material: Material Name: ( ) □Base Metal □Weld Joint □Depo Metal □HAZ □Plate □Forged □Tube (6.3φ×0.35t) □Others

試験雰囲気 Test Environment: ■In Air □In Stagnant Na □In Flowing Na □In Ar

試験片履歴 Specimen History: □受け入れ As-received ■ナトリウム浸漬 Sodium Exposed □熱履歴 Thermal Aged

試験場所 (識別記号) Test Laboratory (Identification Label): ( )

試験条件 Test Conditions													
試験片番号 Specimen No.				E SI－2785 BO－15	E BO－13	E BO－7	E BO－1	E K7725 BP－15	E BP－13	E BP－7	E BP－1
試験温度 Test Temperature (℃)				650	600	500	400	650	600	500	400
公称ひずみ速度 Nominal Strain Rate	低速部 Low Strain Rate	ひずみ範囲 Strain Range ( )%まで		0.4	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4
		ひずみ速度 Strain Rate (%/min)		0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
	高速部 High Strain Rate	ひずみ速度 Strain Rate (%/min)		7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14	7.14
工学的特性 Engineering Properties	0.2% 耐力 σ_y (kg/mm²) 0.2% Offset Yield Strength			28.9	22.5	20.7	37.8	26.6	21.7	16.5	36.4
	引張強さ σ_u (kg/mm²) Ultimate Tensile Strength			38.6	41.8	46.7	54.4	37.8	40.5	44.3	52.3
	一様伸び E_u (%) Uniform Elongation			10.4	19.7	25.1	15.5	9.6	16.7	27.1	16.7
	破断伸び E_f (%) Fracture Elongation			22.8	23.8	27.0	17.8	19.7	20.6	28.4	19.0
	絞り ϕ (%) Reduction of Area										
	破断位置 Fracture Location (%)			□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ	□A □B □C □BASE □DEPO □BOND □HAZ
	$\sigma_y \times 0.9$			26.01	20.25	18.63	34.02	23.94	19.53	14.85	3.276
	$\sigma_u \times 0.4$			15.44	16.72	18.68	21.76	15.12	16.20	17.72	20.92
	受け入れ材引張性質との差 Variation from As-received value	$\sigma_y - \sigma_{ya}$		−6.2	−23.4	−30.3	−16.3	−5.8	−19.7	−31.2	−13.9
		$\sigma_u - \sigma_{ua}$		−6.0	−10.3	−13.0	−8.2	−2.9	−8.1	−11.2	−6.3
		$E_u - E_{ua}$		1.7	9.4	17.1	7.1	0.3	3.5	11.4	3.1
		$E_f - E_{fa}$		1.0	9.6	15.4	6.2	−6.2	+0.7	11.2	3.3
		—									
		—									

材料データシート番号 Material Data Sheet No.: B

溶接データシート番号 Welding Data Sheet No.: C

試験片データシート番号 Test Specimens Data Sheet No.: D

試験機番号 Test Machine No.: E

備考 Remarks:

(参考文献 References)
(1) FBR 金属材料試験実施要領書 (1977)
FBR Metallic Materials Test Manual (1977)
(2) JIS G 0567－1976

(■ Sodium Exposure □ Thermal Aged Condition)
Environment :
Temperature : ～400～650℃
Impurity Content : ～10ppm0
Flow Velocity (Re No.) : Ave.7.85m/sec(Ave.270 at 400℃, Ave.308 at 650℃)
Duration : 5401 hrs
Sodium Loop : Material Test Sodium Loop 1 …M2

マスターシート番号 Master Sheet No.: