



JP0150261

JAERI-Tech

2000-087



東海ホットラボにおける高温工学試験 研究炉用材料の照射後試験

2001年2月

木崎 實・本田 順一・宇佐美 浩二
大内 朝男・大枝 悅郎・松本 征一郎

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

東海ホットラボにおける高温工学試験研究炉用材料の照射後試験

日本原子力研究所東海研究所ホット試験室

木崎 實・本田 順一・宇佐美 浩二・大内 朝男・大枝 悅郎・松本 征一郎

(2000年12月8日受理)

高温工学試験研究炉（HTTR）は、原研の四半世紀以上にも亘る研究開発活動の成果として1998年11月に初臨界に到達し、運転を開始した。原子炉出口温度1000°Cを初期目標とした、この高温ガス炉（HTGR）開発においては、原子炉自体が従来炉に比べて飛躍的に高い運転温度とそこでの長期耐久性を要求され、燃料は元より制御棒被覆管や原子炉圧力容器の材料開発が課題であった。東海ホットラボは、このプログラムの初期段階からHTTR用燃料・材料の研究開発を支援してきており、被覆粒子燃料、アロイ800H、圧力容器鋼材等の開発や選定、安全審査・設計工事認可対応に有用な照射後試験データを提供してきた。

本報は、HTGRからスタートして最終的にHTTRに至る開発に伴って東海ホットラボが実施してきた材料関連照射後試験の技術的変遷と試験成果をまとめたものであり、高温引張試験、クリープ試験、シャルピー衝撃試験（計装化試験含む）、弾塑性破壊靱性（J_{IC}）試験、動的破壊靱性（K_{ID}）試験、スマールパンチ（SP）試験、電気化学腐食試験等について開発整備してきた試験装置、遠隔操作技術、評価技術、及び、耐熱・耐圧材料の高温照射脆化の特徴、更には、これら材料の研究開発やホットラボ技術進展への寄与等を概説する。

PIE Technology on Mechanical Tests for HTTR Core Component and Structural Materials
Developed at Research Hot Laboratory

Minoru KIZAKI, Junichi HONDA, Kouji USAMI, Asao OUCHI, Etsuro OEDA
and Seiichiro MATSUMOTO

Department of Hot Laboratories
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 8,2000)

The high temperature engineering test reactor (HTTR) with the target operation temperature of 950°C established the first criticality on November, 1998 based on a large amount of R & D results on fuel and materials. In such R & D works, the development of reactor materials are one of the key issues from the view point of reactor environments such as extremely high temperature, neutron irradiation and so on for the HTTR. The Research Hot Laboratory (RHL) had carried out much kind of post irradiation examinations (PIEs) on core component and pressure vessel materials for during more than a quarter century. And obtained data played an important role in development, characterization and licensing of those materials for the HTTR.

This paper describes the PIE technology developed at RHL and typical results on mechanical tests such as elevated temperature tensile and creep rupture tests for Hasteloy-X, Incolloy 800H and so on, and Charpy impact, J_{IC} fracture toughness, K_{Id} fracture toughness and small punch tests for normalized and tempered 2½Cr-1Mo steel from historical view.

In addition, an electrochemical test technique established for investigating the irradiation embrittlement mechanism on 2½Cr-1Mo steel is also mentioned.

Keywords: Post Irradiation Examination, Mechanical Tests, Remote System Technology, High Temperature Engineering Test Reactor, Irradiation Embrittlement
Heat-resistant Alloy, 2½Cr-1Mo Steel

目 次

1. はじめに	1
2. 耐熱材料の照射後試験	1
2.1 高温引張試験	2
2.2 高温クリープ試験	4
3. 耐圧材料の照射後試験	6
3.1 引張試験	7
3.2 シャルピー衝撃試験	8
3.3 弹塑性破壊革性 (J_{IC}) 試験	10
3.4 動的破壊革性 (K_{Id}) 試験	12
3.5 スモールパンチ (SP) 試験	14
3.6 電気化学的腐食試験	15
4. まとめ	17
謝辞	18
参考文献	18

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Post Irradiation Examinations for Heat Resistant Alloys	1
2.1 Elevated Temperature Tension Test	2
2.2 Creep Test	4
3. Post Irradiation Examinations for Reactor Pressure Vessel Materials	6
3.1 Tension Test	7
3.2 Charpy Impact Test	8
3.3 J _{IC} Fracture Toughness Test	10
3.4 K _{Id} Fracture Toughness Test	12
3.5 Small Punch Test	14
3.6 Electrochemical Test (Anodic Polarization Measurement)	15
4. Summary	17
Acknowledgement	18
Reference	18

1. はじめに

原子炉出口温度 1000°C を目標とした高温ガス炉（以下 HTGR；高温工学試験研究炉（HTTR）の前身計画）開発においては、同炉を構成する各種原子炉材料に対して、それまでの軽水炉や高速炉等の設計に比べて飛躍的に高い設計温度とそこでの長期耐久性が要求され、とりわけ、中性子照射場の金属材料については、耐熱部材である制御棒被覆材等の炉心構成材料及び耐圧部材である原子炉圧力容器鋼材等の研究開発が課題であった。

東海ホットラボにおける HTGR 関連金属材料の照射後機械強度試験は、1971 年から耐熱材料の研究開発を、また、1978 年からは耐圧材料の研究開発を支援してきており、その時に応じて、予備試験、研究対象合金の絞込み研究（以下スクリーニング）、適合材料の研究開発、安全審査及び設計工事認可対応、あるいは、OGL-1 仕切管の寿命評価等々に有用なデータを提供してきた。このプログラムで実施してきた照射後試験（以下 PIE）は、JIS 規格、ASTM 規格等に準拠した標準試験法と利用研究室と当施設が連携して開発した特殊試験法に大別され、前者としては、短時間機械特性解明のための高温引張試験、高温クリープ特性評価のための大気中クリープ試験、延性・脆性遷移温度（DBTT）評価のためのシャルピー衝撃試験、破壊靭性値評価のための平面歪破壊靭性試験、硬さ試験、後者としては、衝撃試験データを補完するための計装化シャルピー衝撃試験、直流電位差法を適用した弾塑性破壊靭性（ J_{IC} ）試験、微小試験片による脆化評価技術としてのスマールパンチ試験等がある。また、これら材料試験データを補完するための手段として、熱処理試験、金相試験、破面観察試験（走査型電子顕微鏡（SEM）観察）、電気化学的腐食試験等を実施してきた。

本報においては、HTGR からスタートして最終的に HTTR に至る開発に伴って当施設が実施してきた材料関連 PIE について、ホットラボ技術の変遷とその成果を報告する。

なお、これら PIE の主たるものは、規格化された標準試験法(Ref.1~8)に基づき実施したものである。また、ここでの成果に関する記述は、日本原子力研究所が年次発刊してきた研究開発活動報告書、即ち、1972~1985 年の「多目的高温ガス炉研究開発の現状」、1986 年の「高温ガス炉研究開発の現状」、1987~1993 年の「高温工学試験研究の現状」に基づいたものである。^{*}

2. 耐熱材料の照射後試験

HTGR の設計要求から、制御棒被覆材等に使用する炉心構成用耐熱材料には、使用温度 1000°C、累積高速中性子照射量 $\phi_f \approx 10^{18} \text{ n/cm}^2$ 、同熱中性子量 $\phi_{th} \approx 10^{21} \text{ n/cm}^2$ に耐え得る材料特性が課せられ、ニッケル基（以下 Ni 基）及び鉄基（以下 Fe 基）の、いわゆる、耐熱合金が研究開発のベース材として決定された。これを受けて、当施設の PIE には HTGR の運転温度範囲 400~1000°C における各種合金の短時間機械特性とクリープ特性の解明評価が要求され、そのための機械強度試験として、高温引張試験及び高温クリープ試験を実施してきた。

^{*}これら報告書等から引用した図表については、整合を図るために表記の一部を加筆修正して掲載した。

2.1 高温引張試験

(1) 目的

本試験は、JRR-2 及び JMTR においてキャプセル照射された、Ni 基のハステロイ系及びインコネル系、並びに Fe 基のインコロイ系各種候補合金についての中性子照射脆化挙動の評価、即ち、高温照射に伴う引張特性変化の測定を通して、研究対象合金のスクリーニング、適合材料の研究開発、あるいは、安全審査・設計工事認可対応等に資するために実施した。

(2) 試験内容

研究開発に伴う一連の高温引張試験は、3 世代の引張試験機によって実施した。

第 1 世代の試験機は、本プログラムの開始以前に高速炉用材料の研究開発を睨んで整備したもので、負荷容量 50kN (5.0tonf) を有し、900°Cまでの大気中引張試験が可能である。この試験機は、本格的な高温照射に先立つ予備試験段階（1971 年）から 4 年間、研究初期の基礎データ採取のために使用した。試験片は、全長 90mm、掴み部幅 13mm、平行部 30^L×4^W mm、厚さ 1mm の板状型で照射後試験用としてホットラボの運転初期から使用されてきたものである。引張試験は、中性子照射による、いわゆる、ヘリウム脆化効果は低歪速度ほど顕著に現出することを考慮して、ピン穴引掛け方式の試験治具により、それまで実施してきた当時の標準引張速度 (5mm/min, 2.5×10⁻³ sec⁻¹相当) よりも 1 衍低いクロスヘッド変位速度 0.2mm/min (歪速度 ; 1×10⁻⁴ sec⁻¹) で実施した。なお、歪速度は以後の試験においてもこのオーダーを踏襲した。

第 2 世代の試験機は、1000°Cの試験を可能にすること及び高温引張特性に及ぼす酸化の影響を排除することを目的に真空高温引張試験装置として 1975 年に整備した。負荷容量は、当時の照射後高温引張試験が前述の板状試験片を主流としていたこと、また、本研究においては、今後、平行部径 φ3 mm の丸棒試験片が主体となる見通しにあったこと等の研究室情報を前提に、数 10MPa オーダーの高温引張特性値の高精度な測定を考慮して 5kN (500kgf) を選定した。一般用のこの種の市販機はコンクリートセル用としては小型過ぎたため、試験機フレームは、セルの遮蔽窓高さやマニプレータ操作範囲に合わせた 5kN 用特注大型機とした。1000°Cまでの試験を可能にする真空加熱試験槽は、モリブデン管状ヒータを持つ内熱型で、油拡散ポンプによって 10⁻³Pa (10⁻⁵Torr) オーダーの雰囲気が確保できる。なお、φ3 丸棒試験片は、全長 60mm、掴み部 φ7mm、平行部 30^L×φ3mm の 2 段肩付き型で、外側肩部を肩部チャック型試験治具（以下 引掛け型試験治具）のソケットに引掛け、保持させることにより試験された。

1989 年に整備した第 3 世代の試験機は、それまでの試験機開発の経験と原研における引張試験片の標準化対応から、フレーム容量 100kN (10tonf)、アクチュエータ容量 50kN、ストローク ±50mm の負荷機構（メーカー標準品）とし、これに常用 10kN (Max.15kN) のロードセルと真空加熱試験槽を装備して、~10⁻⁵Pa 下で 100~1200°Cまでの試験が行えるものとした。原研が照射後試験用として標準化した試験片には、標準型と微小型の 2 種があり、原子炉材料全般に適用される前者は JIS 14 号丸棒試験片の修正型で、全長 55mm、掴み部 φ8mm、平行部 22^L×φ4mm、肩部半径 R5mm である。また、後者は、核融合炉用材料の研究開発のために実用化された、いわゆる、微小試験片で、全長 25.4mm、平行部 1.524^W×7.62^L mm、厚さ 0.762^t mm の板状で SS-3 型と呼ばれるものである。ロードセル容量の選定は、これらの試験片形状から推定

される最大荷重が、種々の材料、試験温度を想定しても概ね 0.50~10kN にあることに基づいており、1kN フルスケールレンジを使用することで低荷重域試験に対しても十分な精度 ($\pm 2\text{N}$) が確保できた。なお、本プログラム用試験片としては、第 2 世代機からの継続使用である $\phi 3$ 丸棒試験片及び上述の標準型試験片と同寸法のネジ付き型 $\phi 4$ 丸棒試験片 (JMTR ホットラボのクリープ試験用試験片と同一設計) の 2 種が適用されてきた。真空加熱試験槽は、将来の高温材料研究までも視野に入れた設計で、タンタルメッシュヒータにより Max.1500°Cまで加熱でき、ターボ分子ポンプによって 30~60 分で 10^{-5}Pa オーダーが得られる。試験温度精度は、丸棒試験片については平行部の両端に、また、SS-3 型微小試験片では平行部中央にワイヤで固定したシース熱電対 (400°C以上では R 型、600°C以下では K 型を使用) を用いる予備実験を通して、400°C以上の試験に対しては $\pm 2^\circ\text{C}$ 、300°C以下に対しては $\pm 1^\circ\text{C}$ を確保した。引張試験は、モリブデン、TZM、Ta - 10%W、MORE-2 等をチャック材とした引掛け型試験治具を使用して実施した。但し、ネジ付き型 $\phi 4$ 丸棒試験片については、ネジ部に円柱状アダプターを装着し、これに適合する専用の引掛け型試験治具を用いた。

試験片の伸び評価は、終始一貫して荷重一変位線図から求めてきた。この方法の妥当性は、必要に応じて実施するリファレンス試験片によるモックアップ実験で適宜に調べられてきた。因みに、試験機剛性が十分に大きく、プルロッド間の軸芯調整が 0.02mm でチャックとの接続に球面座締手を配した第 3 世代機の場合には、いわゆる、チャート伸びは破断後の試験片突合せ伸び測定値と再現良く一定の関係にあり、 $\phi 4$ 試験片 7.5kN 負荷の場合には標点間(GL)伸びに対して 1.037 ± 0.010 倍である (試験片 GL 突合せ伸び、即ち、JIS Z2241 で規定される破断伸び=チャート伸び $\times 0.964$ の関係にある)。リファレンス試験片を用いたモックアップ実験は、試験装置の正常状態の確認のみならず、コールド試験用試験機 (利用者所有の試験機) との機差を評価する上で極めて重要であり、PIE データの信頼度維持に寄与してきた。伸び測定に関しては、剛性の観点から見掛け上、第 2 世代機が最も適用性に劣る状況にあったが、この場合でも、高温試験における試験荷重は定格の高々 10%程度であり、十分信頼に足るデータが提供できた。

(3) 成果

3 世代の試験機によった照射後高温引張試験では、利用研究室が進める試験マトリックスに沿った PIE を実施し、その都度、研究対象合金のスクリーニング、適合材料の研究開発等に対して有用なデータを提供してきた。各世代機の代表的成果は、以下の如くである。

① 第 1 世代機では、高温照射された各種耐熱合金について他に先駆けて 900°Cまでの大気中高温引張特性を明らかにした。この世界的にも類稀なデータは、「800°C以上における延性低下 (ヘリウム脆化) は極めて顕著ですさまじい (Fig.1 参照)」との重要な情報をもたらし、その後の炉心構成用耐熱材料の研究課題を明確にした。また、ヘリウム脆化のより顕著な現出を念頭に設定した $0.2\text{mm}/\text{min}$ の引張速度は、Fig.2 から分かるように、実際的な歪速度 ($1 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$) として妥当なことを実証した。これらのこととは、より低い歪速度、即ち、クリープ挙動解明の重要性を再認識させた。

② 第 2 世代機では、1000°Cまでの真空雰囲気中試験を可能にし、この種の試験データの信頼性を向上させるとともに、重要な挙動を明らかにした。即ち、ヘリウム脆化の軽減を目指んで開発

したハステロイ XR（低ボロン含有量）では、熱中性子照射量が高照射域 ($\phi_{th} \sim 10^{20} n/cm^2$) に達するとその改善効果がなくなること (Fig.3 参照) から、脆化挙動は $Ni^{58}(n, \gamma)Ni^{59} \Rightarrow Ni^{59}$ (n, α) Fe^{56} の 2 段核反応によるものであるとして、制御棒被覆材料としては Ni 基よりも Fe 基耐熱合金の方が望ましいと思える見解を引き出した。これに関連した、ニッケル含有率をパラメータとした各種耐熱合金の照射脆化率の研究では、高照射域における伸びの低下はニッケル量と比例関係にあることを見出し (Fig.4 参照), Fe 基合金の優位性を明らかにした。これらの有益情報は、熱中性子照射量が $10^{18} n/cm^2$ 程度の構造材料には Ni 基合金を、 $10^{21} n/cm^2$ 台までを視野に入れる制御棒被覆材には Fe 基合金を適用する道筋を立てるとともに、以後のインコロイ 800 系合金についての高温高照射適合材料研究に弾みをつけた。

③ 第 3 世代機では、制御棒被覆材用耐熱材料として決定されたインコロイ 800H 合金（以下アロイ 800H）について、HTTR の実機照射を模擬した近似条件照射（例えば、照射温度; 500, 700, 900°C, ϕ_{th} ; $2.3 \times 10^{20} n/cm^2$, ϕ_f ; $1.8 \times 10^{20} n/cm^2$ ）における照射後高温引張特性を測定し、HTTR の設計工事認可に寄与するデータを提供した。なお、この短時間引張特性は、JMTR ホットラボにおいて平成元年から 8 年間に亘って集中的に採取された同合金のクリープ破断・変形特性と対を成すものである。得られたデータの一例を Fig.5 に示す。

2.2 高温クリープ試験

(1) 目的

本試験は、1000°Cの中性子照射場で使用される制御棒被覆材の耐久性支配因子とされるクリープ挙動を他に先駆けて照射後特性として測定評価することを目的に PIE に定着化され、核変換生成ヘリウムに起因する高温型脆化、いわゆる、ヘリウム脆化の解析を可能にすることで、JMTR-OGL-1 仕切管の寿命評価、Ni 基及び Fe 基候補材料のスクリーニング、クリープ特性改良研究、あるいは、安全審査等に資するデータを提供するために実施した。

(2) 試験内容

照射後高温クリープ試験装置は、以下の事由から直荷重式大気中単軸引張型試験機 3 基とした。

- ① キャプセル照射に対する有利性への対応と小型試験装置（負荷機構）でのクリープ試験を可能とするため、通常よりも小型の丸棒 $\phi 3 mm$ 試験片（以下、 $\phi 3$ 丸棒試験片）を選定したこと。
- ② 摩擦等の関与しない理想的な死荷重（直荷重）が負荷でき、精度の高い付加応力が懸けられること。
- ③ 1 バッチの照射試験片について可能な限り短期間にクリープ（破断）特性を評価し、速やかに次のステップに反映させる必要があったこと。
- ④ $2.4 m^W \times 2.0 m^D$ のコンクリートセル内に全試験機を設置でき、M-8 型マニピレータにより負荷・除荷が行えること。

選定された $\phi 3$ 丸棒試験片（全長 56mm, 接み部 $\phi 7 mm$, 平行部 $30L \times \phi 3 mm$ の 2 段肩付き型）は、JIS 規格の標準推奨型に準拠したものではなく高温酸化等の影響が懸念されたが、それ

までの研究室側の非照射材先行実験で評価に耐え得るデータが採取されており、照射後クリープ寿命の支配因子はヘリウム脆化にあって大気中加熱に起因する表面酸化は大きな問題とはならないと判断されたこと、直荷重付加試験を優先した場合には $\phi 3\text{mm}$ がマニプレータによる重錐負荷操作にとって実質的な限界と考えられたこと、より精度の高い相対比較を以って照射効果を評価したいこと等から、敢えて使用が決定された。なお、この試験片は、伸び測定のための鍔、溝等は有しておらず、いわゆる、クリープ破断試験片に類するものである。

試験機は、50g, 100g, 500g, 1kg 及び 2kg の 5 種類の重錐を持ち、カンタル A-1 を発熱体とする電気炉により 1000°C までの大気中条件で、最小 30N (3kgf) ~ 最大 700N (70kgf) までのクリープ負荷が懸けられる。重錐の精度は 500g 以下に対しては $\pm 0.2\%$, 1kg 及び 2kg については $\pm 0.1\%$ である。試験片のチャッキングには、 $\phi 3$ 丸棒引張試験用と同じフェースを持つ引掛け型試験治具を採用した。クリープ伸びの評価は、いわゆる、チャック間伸び測定に依った。即ち、試験片伸びに伴って変化するプルロッド変位量を下部チャックに装着した検出金具を介してダイヤルゲージに表示 (1/100mm 目盛) し、セルの遮蔽窓越しに読み取る方式である。この方法には、暖冷房の運転・停止、昼夜間の外気温差等に伴うセル内温度変化で、 $25\sim30 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ の見掛け変化が計測されること、及び、連続測定でないため主に短時間寿命試験に対しては対応できないなどの欠点があったが、前者についてはデータとセル内温度変化との相関を睨んで経験的に実伸びと分離すること、また、後者については、①歪ゲージ式ダイヤルゲージを採用して電気出力を連続記録する方法、②高周波励磁渦電流差動トランス法により連続記録する方法、③高解像度 ITV でダイヤルゲージ指示値を撮影し、30hr 用長時間 VTR によって連続記録する方法、④任意設定の時間間隔で撮影可能な自動カメラによってダイヤルゲージ指示値を間欠的に連続記録する方法等の技術を採用し、単独に、あるいは、組合せによって対処してきた。

クリープ(破断)試験は、1976 年に開始した OGL-1 仕切管用ハステロイ X (鍛造割り抜き管、溶体化処理材) 加速照射試験片 (照射温度 ; $670\sim880^\circ\text{C}$, $\phi_{th} = 6.6 \times 10^{20}$, $\phi_f = 1.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$) の PIE を皮切りに、1991 年のプログラム終了まで 15 年間に亘り (試験機セル内設置期間 ; 約 9 年間) 断続的に実施した。また、この間、1982 年には、供用期間 3 年 4 カ月 (6040hr, 但し、高温運転時間 5040hr) で交換された実機 OGL-1 仕切管の健全性評価試験を実施した。この試験は、外径 88mm, 肉厚 2mm の OGL-1 仕切管から、輪切り切断、縦割り切断、プレス打抜き加工によって採取した割管型試験片 (全長 62.2mm, 平行部 $15^L \times 3^W \times 2^t$ mm, R17mm) を用いてピン穴式治具 ($\phi 6\text{mm}$) により、 900°C において 24, 32, 49MPa の応力で実施した。

(3) 成果

① 初期の試験 (OGL-1 仕切管材の加速照射試験片試験) において、 $\phi 3\text{mm}$ の小径試験片による大気中試験では、全体的に短めの破断時間を与え、更に、実機レベルの低い応力 ($\sigma < 10 \text{ MPa}$) に対しては高温酸化の影響から寿命評価データの採取には不適切であり、より HTTR を近似した酸化ポテンシャルの低い環境条件下でのクリープ特性評価が必要であるとの方向付けを明らかにした。このため、当試験機からの PIE データは完全な相対比較評価あるいは特別な評価指標を見出す (後述) などの手法によって照射脆化の解析がなされた。また、この情報は、後年の JMTR ホットラボの真空・ガス中高温クリープ試験機開発に繋げる重要なものとなった。

- ② JMTR の OGL-1 仕切管関係では、Fig.6 に示す加速照射試験片 900°C 試験の結果は、付加応力 $\sigma < 22 \text{ MPa}$ の低応力域における破断時間は Fig.7 に示す特異な 3 次クリープ挙動に起因する見掛け上の値であって、その原因が試験片平行部全域に生じた粒界亀裂の寄与であること (Fig.8 参照)、他方、 $\sigma > 22 \text{ MPa}$ の高応力域では、3 次クリープは見受けられること等を明らかにした。更に、これらの PIE データを 3 次クリープ開始点、即ち、定常クリープ終了点時間 t_2 で整理すると非照射材の応力—破断時間線図との関係に納得のゆく相関が得られることを見出すことで、適当な安全余裕を考慮して OGL-1 仕切管の暫定寿命を 6900hr と定めた (Fig.9 参照)。また、14 サイクル 6040hr 運転 (高温運転 5040hr) 後に交換された使用済実機仕切管の健全性評価検査では、Fig.10 から分かるように、相当な高応力試験にも拘わらず、明瞭な 3 次クリープ後に破断に至っており、金相試験との総合評価から材料としての健全性は十分保たれていることを確認した。使用済 OGL-1 仕切管から得られたクリープ破断曲線を Fig.11 に示す。
- ③ 候補材料のスクリーニングとこれに伴うクリープ特性の改良研究では、担当研究室が進める試験マトリックスに沿った試験を実施し、その時々に応じた照射後クリープ (破断) 特性結果を提供してきた。最終的な成果は、Fig.12 で代表されるように、HTGR 近似使用条件下での照射後クリープに対しては、研究初期に最有望視された Ni 基ハステロイ X 系合金よりも Fe 基インコロイ 800 系合金が優れた特性にあることを見出したことがある。一連の PIE を通して、制御棒被覆材の最終候補材としてアロイ 800H を選定した。
- ④ 安全審査・設計工事認可関連では、1988 年から、主担当が JMTR ホットラボへ移行したため、これに直接的に関与するデータは提供していないが、上述の如くにアロイ 800H の選定と 1991 年までの同合金についての補完データの取得を以って貢献した。

3. 耐圧材料の照射後試験

HTGR の原子炉圧力容器 (以下 RPV) には、400°C, 4MPa (40kg/cm²G) の運転条件と累積中性子照射量 $\phi_f = 10^{17} \text{n/cm}^2$ ($E > 0.18 \text{ MeV}$, 想定運転期間 20 年間) の使用環境が見込まれたため、450°C, 4.5MPa, $\phi_f = 1 \times 10^{18} \text{n/cm}^2$ の設計指標が設定され、当初から、2 ¼Cr-1 Mo 鋼の使用が予定されてきた。この材料は、クリープ温度領域においての高温強度に優れた特性を有しており、一般用耐圧材料として化学工業等に比較的多くの使用実績を持つが、これまで RPV 鋼としての使用経験は無く、更に、400°C 照射の研究報告も皆無であったため、HTGR 条件における照射後機械特性の解明評価、即ち、現行の構造設計指針から、第 1 種容器である RPV としての構造安全性を評価するためのデータ取得が重要な課題であった。そのための主要な PIE として、引張試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験を実施してきた。また、これら機械試験結果を補完する目的で、衝撃試験の計装化技術、破壊靱性試験への電位差法適用技術、スマールパンチ試験技術、電気化学的腐食試験技術を開発した。

3.1 引張試験

(1) 目的

本試験は、JRR-2 及び JMTR でキャップセル照射された熱処理、微量元素含有量等の異なる各種 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼（溶接金属を含む）について短時間引張特性を測定し、同材料の基本特性に及ぼす中性子照射脆化の影響を解明・評価することにより、予定材料の照射健全性の確認、最適材料の選定、安全審査、設計工事認可等の対応に資するデータを提供するために実施した。

(2) 試験内容

耐圧材料の引張試験は、2 世代の引張圧縮万能試験機により大気中加熱条件で実施した。1982 年まで供用された第 1 世代機は、クロスヘッド移動式の、いわゆる、インストロン型引張試験機（TT CM 型、負荷容量 50kN）で、縦割型電気炉を装備しており、内側に割り抜き加工されたチャック雌型を持つ 2 分割のスプリットフランジと固定用リングからなる試験治具により、肩部保持引っ張りで 900°Cまでの試験が行える。第 2 世代機は、電気機械式サーボアクチュエータを有する静的容量 $\pm 100\text{kN}$ （動的 $\pm 50\text{kN}$ ）の試験機（Instron 1361 型）で、初期には第 1 世代機と同型の電気炉を、後年には 600°Cまで昇温可能な恒温槽を装備したものとした。引張試験治具は、初期においては第 1 世代機と同型のもの、1992 年以降には前述の真空高温引張試験機第 3 世代機用引掛け型試験治具と同設計のものを使用した。

試験は、平行部 22mm の $\phi 4\text{ mm}$ 標準型丸棒引張試験片を用いて、 0.5 mm/min の引張速度（歪速度； $3.8 \times 10^{-4}\text{ sec}^{-1}$ ）で実施し、降伏強さ、引張強さ、伸び等の引張特性値は前述の高温引張試験（2.1 項）と同様に総て荷重一変位線図から測定した。また、試験の機械精度や試験温度精度の確認、あるいは、破断伸び（標点間伸び）の評価等に対しても、高温引張試験と同等な細心の注意が払われてきた。

(3) 成果

①予定材 ASTM A387Gr.22 cl.2 鋼（JIS SCMV4-2 相当材）の実機相当 160mm 厚肉鋼板の照射特性評価実験（1982 年実施、照射温度 320～380°C、高速中性子照射量 $\phi_f = 3 \times 10^{18}\text{n/cm}^2$ ($E > 1\text{MeV}$)) では、室温引張試験により、同材料の母材、溶接金属部材、熱影響部材、更には、参考用比較材である A387Gr.22 cl.1 鋼及び A542cl.1 鋼においても、強度の上昇と伸びの低下は極僅かであり、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の優れた特性を明らかにした（Table 1 参照）。このことは、シャルピー衝撃試験で予定材母材に延性・脆性遷移温度（以下 DBTT）の上昇が認められていないことと合わせて、累積照射量が 1 衍低く、更に、中性子スペクトルも柔らかい実機使用条件においては、母材の照射脆化は軽微であることを十分に示唆しており、注目に値する情報であった。

②後述のシャルピー衝撃試験や破壊靭性試験を補完するデータを提供し、HTTR の RPV 鋼として最終決定された高純度低 Si 系 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼(NT 材)の選定に寄与した。

③原子炉の起動停止等の温度変化を加味した照射温度変動に伴う損傷挙動の研究（1994 実施）では、照射中にキャップセル制御温度を 290°Cから 400°Cに変化させ、低温側照射で生成された照射欠陥が 400°Cの脆化にどのように関与するかを調べ、Fig.13 から理解されるように、低温側の照射硬化の殆どが回復・消滅してしまうことを見出した。

3.2 シャルピー衝撃試験

(1) 目的

本試験は、JRR-2 及び JMTR で照射された各種の RPV 予定材 2 1/4Cr-1 Mo 鋼について延性・脆性遷移特性を取得し、リファレンス試験片等との相対比較で得られる DBTT シフト量の測定・解析を通して、非延性破壊防止の観点から予定材の中性子照射脆化感受性、即ち、照射脆化量を評価し、HTTR 用 RPV 鋼材の選定、照射健全性評価、及び、安全審査等に資するために実施した。

(2) 試験内容

シャルピー衝撃試験は、1979 年に取得した計装化シャルピー衝撃試験装置によって 1994 年まで実施した。この試験機は、市販の自動シャルピー衝撃試験機（容量 300J）に試験片打撃時の衝撃挙動を電気信号として捕らえるための計装化装置、及び、試験片をアンビルへ装着するための試験片自動設置機構を付加した半自動式の装置である。加熱・冷却槽からの試験片取出しから試験片自動設置機構へのセッティングまでのマニピレータ操作と、これ以降のフットスイッチで開始する自動操作、即ち、エアーシリンダによるアンビルへの試験片搬送と自動位置決め、これに連動したハンマ落下と振上げ角度の自動表示によって、液槽取り出しから 3.5～4.5sec での打撃を可能にするものである。試験片は JIS 4 号試験片（10×10×55mm, V ノッチ付き）、試験温度範囲は、公称 -140～+240°C である。この自動化された一連動作は、総ての運転をマニピレータ操作や操作盤からの独立したスイッチ操作によらなければならなかった前世代の試験機（第 1 世代機）に比べて試験の遠隔操作性を格段に向上させ、それまでの打撃所要時間 9 ± 3 秒を規格に準拠した 5 秒以内に短縮する画期的なものであった。所定温度に調節された試験片をステンレス鋼製のガイド溝に沿ってスライドさせる自動設置機構では、打撃までの試験片温度変化を余儀なくされるが、 ΔT は初期には数%，後期には低温側試験において概ね 10% 前後、高温側試験では数% と見積られ、校正データが準備された。また、計装化装置の付加は、打撃時の衝撃力と試験片変位の関係を荷重 - 変位線図として捕らえる先駆的な技術革新で、当時、脚光を浴び始めた先端技術をいち早く取り入れたことにより、衝撃特性のより精緻な比較解析や動的破壊靭性 (K_{Id}) 試験等を可能にした。

PIE は、冷媒質にはアルコール（使用範囲；+15～-80°C）とメチルシクロヘンタン（-80～-140°C）を、温熱媒質にはシリコンオイル（30～240°C）を用いて、-120～+120°C の公称試験温度範囲で実施した。打撃後の延性破面率測定には 1993 年までは ASTM E23 に基づく目視測定法（直読及び写真判読）を適用し、それ以降は破面写真（×10 倍）を用いた画像解析法を併用した。他方、横膨出量測定については、当初から ASTM E23 に推奨される「破断部をダイヤルゲージに直角に押付ける測定法」をマニピレータ操作に適用して、細心の注意を払って実施してきたが、1993 年からは、独自に考案した専用測定器（精度 1/100mm）により、測定者の技量に依存することなく、より高精度で高信頼度のデータを提供した。

エネルギー遷移温度 Tr50 (Tr68J), Tr30 (Tr41J) や破面遷移温度 TrS を求めるためのシャルピー遷移曲線の作成には、前半期においては目視感覚によるフィッティングを適用し、後半期にはパーソナルコンピュータによる関数フィッティングを併用した。最小自乗法処理による関数フィ

ッティングでは、双曲線関数(hyperbolic tangent), 多項式関数(polynomial expression), ガウス誤差関数(Gaussian error function)を使用して、最も誤差バンドの狭い曲線を以ってシャルピー遷移曲線とした。

(3) 成果

- ① $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼 NT 材の高温照射脆化に対する銅(以下 Cu) 及びリン(以下 P) の効果の研究(1980 年実施)では、実用規模材レベル($P:0.01\text{wt\%}$, $\text{Cu}:0.1\text{wt\%}$ を含有、高 P 高 Cu 材と呼ぶ)とその 1/2 含有率(低 P 低 Cu 材)、及び両者を組合せた 4 材料についての受入材、コントロール材(時効材)、照射材の DBTT 比較から、低 Cu 材の照射脆化感受性が極めて小さいことを見出し、照射脆化軽減のためには Cu の低減化が有効であることを明らかにした。即ち、Fig.14 ~Fig.16 で理解されるように、低 Cu 材では、高 Cu 材に比べて 6 倍あるいは 3 倍の照射量にも拘わらず、有意な中性子照射脆化は認められなかった(低 P 低 Cu 材に見られる約 8°C の DBTT 上昇は、コントロール材と同等であり、熱時効に起因するものである)。また、熱時効による DBTT 上昇は、400°C 以上 × 約 800hr 以上で認められ、340°C では認められなかった。
- ② 予定材 A387Gr.22 cl.2 鋼の実機相当 160mm 厚肉鋼板の照射特性評価実験(1982 年実施、照射温度 320~380°C、高速中性子照射量 $\phi_f = 1.2 \times 10^{18}\text{n/cm}^2$ ($E > 1\text{MeV}$))では、DBTT の上昇は、ベーナイト組織を持つ cl.2 鋼母材の場合にはフェライト・パーライト組織の cl.1 鋼に比べて極めて小さいこと(前者では DBTT の上昇は認められなかった)、及び、サブマージアーク溶接の溶接金属部で最も大きかったこと(10°C 上昇)を明らかにした(Fig.17 参照)。この情報は、累積照射量が 1 衍低く、更に、中性子スペクトルも柔らかい実機使用条件においては、母材の照射脆化は軽微であることを十分に示唆しており、注目に値する情報であった。
- ③ A387Gr.22 cl.2 鋼(NT 材)における中性子照射脆化と焼戻し脆化の相互作用の研究(1984 年実施)では、照射($\sim 400^\circ\text{C}$, $\phi_f = 2.3 \sim 2.7 \times 10^{18}\text{n/cm}^2$ ($E > 1\text{MeV}$))による DBTT の上昇は、Fig.18 に示す如く、受入材では殆ど認められないのに対して、照射前に 475°C × 1000hr の焼戻し脆化処理を施した材料において顕著であることを明らかにし、焼戻し脆化によって結晶粒界強度が低下している場合には中性子照射は粒界脆化に対する感受性を高めるとの解釈を導いた。
- ④ 照射中にキャップセル制御温度を 290°C から 400°C に変化させて、低温側照射で生成された照射欠陥が 400°C の脆化にどのように関与するかを調べる研究(1994 実施)では、低温側照射に起因する、いわゆる、照射硬化は、その照射量に関係無く、400°C での照射によって殆ど回復・消滅することが示唆される挙動を確認した。
- ⑤ 一連の PIE を通しての HTTR の運転に伴う RPV(A387Gr.22 cl.2 鋼)の脆化評価は、中性子照射の寄与は極めて軽微であり、その主要な因子が熱時効にあることを明らかにし、実機用材料、即ち、P 等の不純物元素を一定値以下に抑えた高純度低 Si 系 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼 NT 材の選定に貢献した。
- ⑥ 20 年間に亘る PIE(照射キャップセル数；総計 13 体)で採取した高温照射 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼についての衝撃特性データは、この種材料のデータベースとして十分な量に達しており、HTTR-RPV の健全性評価はもとより、核融合炉用フェライト鋼の基礎データとしても利用されよう。

3.3 弹塑性破壊靶性 (J_{IC}) 試験

(1) 目的

本試験は、構造物の安全性を非延性破壊防止の観点から評価するための静的試験法の1つで、遷移温度域に着目した前述のシャルピー衝撃試験（動的試験）とともに重要な位置付けにあり、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼 NT 圧延鋼板材 (A387Gr.22 cl.2) 及び同鍛造材 (A182 F22) の靶性を評価することで、HTTR-RPV の照射健全性を破壊力学的に保証するために実施した。

(2) 試験内容

本試験は、ASTM-E813-1981 (J_{IC} 標準試験法) に規定の複数試験片法、及び、直流電位差法(Ref.9)による単一試験片法の2方法により、1984年から5年間、7体の照射キャップセルについて実施した。外径 $\phi 50\text{ mm}$ 以下の小型 DCT (Disk-shaped Compact Tension) 試験片を用いる照射後 J_{IC} 試験技術は、1980年に研究室との協力体制の下に開発・確立したものである。特に、直流電位差法試験は、単一試験片試験法である利点から静的破壊靶性試験の PIE への適用に際して除荷コンプライアンス試験法とともに注目されたものの1つで、コールド試験で確立された基本技術に後述のホットラボ遠隔操作技術を適用することによって、当施設の PIE 技術として定着させた。この試験法の PIE への適用は、測定のための前処理作業を遠隔操作化することでコールド試験技術を最も容易、確実に移転できると判断されたことがある。また、直流法の選定は、交流法よりも安定した電流が得られ、亀裂長さとの相関が比較的安定で動的亀裂の追従性にも優れているとの文献情報に基づくものである。

試験装置は、恒温槽（初期においては液相式、後期においては気相式）を装備した前述のインストロン 1361 型引張圧縮万能試験機に ASTM-E813 準拠の所定試験治具（3 点曲げ試験片用治具あるいは円板型コンパクトテンション (DCT) 試験片用治具）を組み込んだ負荷系、及び、試験片変位と電位差法測定のための計測機器系からなる。試験治具の主材質は SK3 鋼 (HRC58) である。但し、DCT 試験の負荷用ピンにはマルエージング鋼 (HRC55) を使用した。また、電位差法試験のための負荷系の絶縁には、 ZrO_2 のプラズマ溶射コーティング ($20\sim30\mu\text{m}$) を採用了。例えば、DCT 試験治具では、クレビスと荷重軸を一体化するための連結部分（ピン及びスペーサ）を ZrO_2 コーティングすることにより絶縁を確保した。Fig.19 に計測系のブロックダイヤグラムを示す。

試験片は、A387Gr.22 cl.2 圧延鋼板材と A182 F22 鍛造材から採取された、サイドグルーブ(側溝)付き 0.4T ($\phi 27\times10\text{t mm}$)、 0.63T ($\phi 43\times16\text{t mm}$)、及び、 0.75T ($\phi 50\times19\text{t mm}$) DCT 試験片である。圧延鋼板材からは母材、熱影響部材、溶接金属材試験片、また、鍛造材からは母材試験片が試験に供された。高速中性子照射量 ϕ_f は約 $1\sim3\times10^{19}\text{n/cm}^2$ 、照射温度は 400°C (1 キャップセルのみ 290°C) である。

複数試験片法試験では、 0.5mm/min のアクチュエータ変位制御で引張負荷 P を懸け、これに伴う荷重線変位 δ (試験片開口変位) をクリップゲージで検出して、予め定める変位量までの荷重一変位線図 ($P-\delta$ 線図) を採取するとともに、これに対応する電位差一変位線図 ($\Delta V-\delta$ 線図) を取得した。試験温度はいずれも室温（上部棚温度）である。また、試験片破面から得られる初期亀裂長さ a_0 と亀裂進展量 Δa については、 $1/1000\text{mm}$ 目盛の投影機式寸法測定器を使用して規

格に則った方法で測定した。亀裂長さの測定に際しては、亀裂境界を明瞭にするための加熱着色処理 ($300^{\circ}\text{C} \times 10$ 分以上、大気中) 及び、破面を現出させるための試験片分断処理（最大荷重を除荷時荷重の 90%以内とする疲労負荷によっての破断）を必須の前処理とした。1 バッチの試験片数は 6 本で、各試験片についての J 値の算出とそれに基づく次試験の変位量決定は研究室が担当した。また、電位差法（単一試験法）を適用しての亀裂開始点の決定は、電位の急増した点(Ref.9)を以ってそれと見做した。なお、電位差法に基づく P - δ 線図からの破壊開始点全エネルギー U_T ($\text{N}\cdot\text{mm}$) の測定や E813 規格に準拠した一連のデータ解析、即ち、破壊抵抗曲線であるところの J - Δa 線図（以下 J - R カーブ）の作成、 J_{IC} 値の決定、延性破壊抵抗 T_{mat} の読み取り、あるいは、ASTM-E813 標準試験法と電位差法適用法との解析結果比較等々については、利用者との協議により PIE の守備範囲外としたため、総て、研究室（利用者）において行われた。荷重一変位線図からのエネルギー測定には、コントロン社製 IBAS 画像解析装置を使用した。

以下に本試験のための前処理作業を実施手順に沿って概説する。

直流四端子測定のための電極取付には、遠隔操作の容易性と再現性を考慮して $\phi 1 \text{ mm}$ の銅製金メッキピンの打ち込み（圧入）法を採用した。試験片へのピン打ち込みの穴加工は、スイス・ツサ社製精密ソリッド超硬ドリル刃を用いて小型高速ドリリング装置により、Fig.20 に示す所定位置へ、0.4T, 0.63T, 及び, 0.75TDCT に対して、それぞれ、3 mm, 5 mm, 及び, 5 mm の深さとした。穿孔位置の寸法割出しには、ガイド治具を使用し、再現の良い一定精度を確保した。加工深さの管理は、装置に装備されるスケールの読み取りによった。電極取付けとなるピン打ち込み作業には、円弧運動のハンマリング治具を使用した。また、電極ピンへのリード線の繋ぎ込みは、打ち込みピンに、予め、ピンコネクタ付きのテフロン被覆リード線（電流用 1.25mm^2 、電圧用 0.75mm^2 ）を半田付けしておき、マニプレータ操作により固定側配線ソケットと接続することにより、一定条件を確保した。なお、回路の装置側抵抗を極力一定に保つため、ピンコネクタとソケットには計測機器接続用の金メッキ品を使用し、リード線は規格、長さとも同一なものとした。試験に際しては、負荷系及び計測系を試験開始状態に保持して、直流定電源装置から DC10A を印加し、初期電圧 V_0 の読み取りによって測定回路の安定を確認し、次いで、マルボルトメータによりゼロ調整を行うことで初期条件を確保した。

(3) 成果

① 0.63TDCT 試験で得られた J - R カーブでは、圧延鋼板材の場合には母材の韌性低下量が熱影響部材、溶接金属部材に比べて大きいこと、熱影響部の韌性は非照射時には最も低いが照射により殆ど変化しないこと、しかし、総じて、 400°C , $\sim 10^{19}\text{n/cm}^2$ の照射後には 3 者ともほぼ同等な韌性を有することを明らかにした (Fig.21 参照)。他方、鍛造材においては、殆ど韌性低下が認められず、照射後でも非照射圧延鋼板よりも高い韌性を持つことが、0.4T 及び 0.75TDCT 試験から分かった (Fig.22 参照)。

② J_{IC} と T_{mat} に着目した脆化評価では、圧延鋼板母材についての受入材と受入後熱処理材（熱時効材； $450^{\circ}\text{C} \times 10000\text{h}$ ）の照射脆化比較から、熱的要因に基づく脆化と中性子照射脆化との関連を明らかにした。Fig.23 から分かるように、熱時効材は、上部棚域において明らかな韌性低下を示し、その後の照射では受入材に比べて J_{IC} と T_{mat} の低下量が小さい。つまり、本鋼は、上部棚

域においては、熱時効を受けることにより照射脆化感受性が鈍くなる傾向にあることが分かった。また、「 J_{IC} 低下率と照射温度の関係」や「中性子照射、熱時効による引張特性の変化」を加味した総合評価により、照射温度 400°C 、高速中性子照射量 $1 \times 10^{19}\text{n/cm}^2$ 以上 ($E > 1\text{MeV}$) における A387Gr.22 cl.2 壓延鋼板材の J_{IC} 値の低下は、中性子照射によって加速された熱時効脆化によるものであると結論付けた。

③ $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼 NT 材は、実機照射量の数 10 倍の加速照射においても、 $150\text{ (kJ/m}^2)$ 以上の J_{IC} 値にあること (Fig.23 参照)、また、これまでの低照射側の実験で上部棚破壊靭性の低下は僅かであることから、HTTR の寿命末期においても圧力容器鋼の延性破壊に対する裕度は保持されるとの結論を得た。

④ 外径 $\phi 50\text{ mm}$ 以下の小型 DCT 試験片を用いる照射後 J_{IC} 試験技術を開発・確立してホットラボ技術に定着させたことで、圧力容器鋼材等の中性子照射脆化研究に対して、破壊力学的な解析評価を可能にした。

3.4 動的破壊靭性 (K_{Id}) 試験

(1) 目的

本試験は、圧力容器など原子炉構造の安全性を非延性破壊防止の観点から動的に評価する試験法で、計装化シャルピー衝撃試験技術の適用によって測定される動的負荷条件下の破壊靭性値 (K_{Id} 値) を通して、A387Gr.22 cl.2 鋼の照射後靭性をより厳しい条件で破壊力学的に評価し、HTTR-RPV の照射健全性保証の補完データを提供するために実施した。

(2) 試験内容

この試験法は、計装化シャルピー衝撃試験技術（シャルピー衝撃試験の試験片打撃挙動を衝撃力一変位線図として捕らえ、波形解析によって降伏衝撃力等の衝撃特性値や各種のエネルギー情報を得る技術を言う）に破壊力学的解析手法を導入したもので、1980 年に ASTM-E24 委員会により「計装化シャルピー衝撃試験法による動的破壊測定方法についての標準化案（草案）」が出されて以来、20 年を経た現在でも技術進展はあるものの未だ規格化されるに至っていない背景にあり、亀裂開始点の決定等、コールド試験においてさえも十分確立された技術ではなかったが動的負荷条件下での靭性評価の重要性から、1986 年に PIE に適用された。なお、当時の試験技術は以下に記載の如くであるが、当施設が持つ現有の解析技術は、1995 年の計装化シャルピー衝撃試験装置の改造を受けて再整備されており、延性材料及び脆性材料について小林らによって開発された CAI システム(Ref.10) (Computer Aided Instrumented Impact Testing System) が使用でき、彼らの手法に基づく解析により、1 本の試験片から K_{Id} , J_{Id} , J-R カーブ, T_{mat} が測定できるものとなっている。

試験装置は、3.2 項に記述の計装化シャルピー衝撃試験装置である。衝撃力一変位線図を得るために計装化装置は、衝撃力測定系、試験片変位測定系、データ収集・記録装置からなる。衝撃力は、ハンマ刃先 (tup) に貼り付けられた半導体歪ゲージ (Si 単結晶 N 型、アクティブ用 2 枚) と試験機周辺に配したダミーゲージからなる 4 ゲージ法により検出され、プリアンプ、メインア

ンプを介して波形記憶装置（分解能 8bit, 記憶容量 4096words×2ch, 現有装置では 12bit, 32kwords×2ch）に荷重一時間データとして収集される。また、変位は、ハンマ軸に装備される精密級ポテンシオメータで検出され、同様に変位一時間波形として記憶される。荷重一変位線図は、これらデータの合成出力としてアナログ出力され、同時に磁気テープに記録される。

試験片は、A387Gr.22 Cl.2 壓延鋼板から採取された ASTM-E399 準拠の 3 点曲げ破壊非性試験片（JIS 4 号シャルピー衝撃試験片と同外形で所定の疲労予亀裂を持つ、ASTM-E813 にも準拠）8 本である。

試験は、衝撃力一変位線図への弾性振動波の重畠を極力抑えるため、ハンマ持上げ角度を低く設定して打撃初速度を変えた条件で実施した。E399^(Ref.11)に基づく K_{Id} 測定のための遷移領域における打撃試験では、試験温度 -60°C, -40°C, -20°C, 0°C に対してそれぞれ、35°, 50°, 50°, 70° の持上げ角度を選定した。同様に、E813^(Ref.8)に基づく J_{Id} 測定のための上部棚領域の打撃では、10°C 試験に対して 50°, 30°C (室温), 50°C, 70°C 試験に対しては 70° の持上げ角度とした。試験片の打撃は、各持上げ角度について、計算から求めた打撃初速度が変位一時間線図（空振り条件で採取）から求まる振上げ角度までの平均速度と妥当な関係にあることを確認した後、前述のシャルピー衝撃試験と同じ手法で行った。試験で分断されなかった試験片については、専用治具を用いて下部棚温度で脆性分離した。全試験片の破断破面から、JIC 試験と全く同方法で a 及び Δa の亀裂長さを測定した。なお、採取された荷重一変位線図からの、 K_{Ia} 算出のための最大衝撃力 F_{MAX} の決定や J_{Ia} 計算のための破壊開始エネルギー E_I の測定、あるいは、降伏衝撃力点 F_{GY} に達するまでの平均打撃速度 v の決定は利用研究室が担当した。破壊開始エネルギーについては、当時の解釈から、衝撃力一変位線図の最高荷重点を亀裂開始点と見做して測定された。また、 K_{Id} , J_{Id} の算出あるいは、 $K_{Id(J)}$ への変換は、ASTM-E24 草案の推奨式に従った。

(3) 成果

① 約 $2 \times 10^{19} n/cm^2$ ($E > 1 MeV$, 400°C) の照射を受けた A387Gr.22 cl.2 鋼の動的破壊非性 K_{Id} 及び $K_{Id(J)}$ 値は、JEAC4206^(Ref.12) や ASME Code Section III^(Ref.13) に規定のフェライト系低合金鋼 RPV に対する非延性破壊防止基準である K_{IR} (参照破壊非性) 曲線を余裕を持って上回ることを確認した。この知見と JIC 試験からの $K_{IC(J)}$ 値から、A533B 鋼等に適用されている現行規定の非延性破壊防止基準 (現行 K_{IR} 曲線) は、 $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼への適用に問題の無いことが裏付けられ、HTTR-RPV 鋼の安全審査基準として妥当であることを確認した。

② 約 $4 \times 10^{19} n/cm^2$ まで 360°C 照射された $2\frac{1}{4}Cr-1Mo$ 鋼 (SFVA-22B 鋼) の K_{Id} ($K_{Id(J)}$) 遷移温度曲線における下部棚から上部棚への立ち上がり温度のシフト量は、10°C (Fig.24 参照) で、シャルピー衝撃試験からの DBTT シフト量 (ΔTrS 値; 13°C) との良い一致を確認した。この裏付けから、本測定系は相対比較測定においては十分な性能にあることが分かった。

③ K_{Id} 値測定の信頼度向上には計装化装置の衝撃力 (荷重) 測定系の校正技術が、また、 $K_{Id(J)}$ 値の測定精度向上には亀裂開始点の妥当な決定法を見出すことが重要な課題であることを明らかにし、1995 年の計装化装置の更新と共に伴う試験・解析ソフトの開発に反映させ得る貴重な情報を提供した。

3.5 スモールパンチ (SP) 試験

(1) 目的

本試験は、微小試験片試験を必須とする核融合炉用材料の研究開発のために提案されている材料試験法の1つで、標準試験法としての規格化は成されていないが、これまでの広範な非照射材実験により、微小試験片の深絞り挙動における破壊等価歪み $\bar{\epsilon}_{qf}$ から弾塑性破壊靱性 J_{IC} 値が、また、下部棚・上部棚 SP エネルギから求まる延性・脆性遷移温度 (SPDBTT) によってシャルピー衝撃試験からの DBTT (本項では以下 CVDBTT と呼ぶ) が経験則に従って推定できることが分かっており、その有用性から将来の監視試験への適用も考えられている。本 PIE は、他に先駆け、照射材 (A387Gr.22 cl.2 鋼) への適用を試みたもので、照射後靱性評価手法としての妥当性を評価するとともに、HTTR-RPV の照射健全性保証の一助とすべく実施した。

(2) 試験内容

この試験は、薄板の深絞り性評価法として知られるエリクセン試験法に類する技術を基本としており、上下ダイスで固定された $10\text{ 角} \times 0.5^t \text{ mm}^3$ (クーポン) あるいは $\phi 3 \times 0.25^t \text{ mm}^3$ (ディスク) の試験片をそれぞれ、 $\phi 2.4 \text{ mm}$, $\phi 1.0 \text{ mm}$ の硬鋼球 (HRC; 62~67) で打抜くもので、絞り打抜き過程を捕らえた荷重一変位線図から降伏強さ、引張強さに関連する特性値 (P_y , P_{MAX}) とその変位量、主亀裂の貫通を意味する破断点 (破断荷重 P_f , 破断変位 δ^*)、更には、破断までに要したエネルギーであるところの SP エネルギー、等々が測定できる。 J_{IC} 値との相関性で注目される破壊等価歪みは、 δ^* と試験片厚さ t_0 の関数として $\bar{\epsilon}_{qf} = \beta (\delta^*/t_0)^2$ で与えられる。また、延性・脆性遷移温度の相関については、 $SPDBTT = \alpha CVDBTT$ で定義される。なお、前者の β は、フェライト鋼に対しては 0.09、オーステナイト鋼では 0.043 が提唱されており (Ref.14~16)，後者の α については、0.35~0.41 の報告がある (Ref.17~19)。

試験装置は、気相式恒温槽を装備した前述のインストロン 1361 型引張圧縮万能試験機に Fig.25 に示す試験治具を組み込んだ負荷系及び、その治具の台座部に装着されたクリップゲージと下部ダイスを通して同ゲージのレバー上に置かれる変位伝達棒から成る変位検出系とで構成される。荷重の測定には、試験機の定格ロードセル (100kN) にタンデムに連結した低荷重用ロードセル (2kN) を使用した。試験治具の主要部、即ち、上下ダイス、パンチャ、台座等は SK3 鋼製である。クリップゲージは、A387Gr.22 cl.2 鋼の SPDBTT の測定を考慮して低温仕様 (-196 ~ 40°C) とした。

試験片及び試験治具の取扱操作には、以下の工夫を凝らした。

- ① ダイスの芯出しは、上部ダイス下面の角型ボスと下部ダイス面のガイド穴 (試験片の芯出しも兼ねる) との嵌め合いにより決まるものとした。
- ② 下部ダイスには、試験済み試験片の取外しを容易にするため、ピンセット操作用の十字溝を設けた。
- ③ 上部ロッドの先端中心には $\phi 10 \text{ mm}$ 硬鋼球を埋め込み、パンチャとの接触を点当たりとした。
- ④ M-7 型マニプレータを用いての上下ダイスのネジ固定、即ち、試験片のクランプ作業は、トルクドライバを用いてクーポンに対して 1.0 Nm (= 10kg-cm)、ディスクに対しては 0.5 Nm (= 5kg-cm) の締付トルク管理を行い、順次、対角に締め付けた。

⑤ 試験片及び硬鋼球の取扱には、エアピンセット(vacuum tweezers)を用いた。

試験片は、中性子照射量 $2 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) の A387Gr.22 cl.2 鋼で、1987 年実施の J_{IC} 推定の評価試験では、下部棚温度で打撃されたシャルピー試験片から切断・研磨によって採取したクーポンが使用された。この遠隔操作で調製されたクーポン 20 枚の厚さ（測定点 5 点の平均値）は、最低 0.31mm、最高 0.52mm で、個々の厚さバラツキは $\pm 20 \mu\text{m}$ （一部 $\pm 40 \mu\text{m}$ ）であった。他方、1990 年実施の CVDBTT の推定を主とする試験では、高橋、古平らの推奨試験法(Ref.20)に準拠した所定寸法のクーポン及びディスクが使用された。

SP 試験は、 J_{IC} 推定の評価試験に対しては A387Gr.22 cl.2 鋼の上部棚温度である室温で、また、CVDBTT の推定評価試験では室温から -160°C の範囲で、負荷速度 0.5mm/min で実施した。なお、室温以外の試験は、推奨試験法に従って、目標試験温度に到達後 30 分間保持してから開始した。試験中の恒温槽内温度は公称試験温度 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内である。荷重一変位記録については、試験片の絞り変形量（クリップゲージ出力）はもとより、見掛けのパンチャ変位量を示すところの試験機のアクチュエータ変位（LVDT 出力）からの線図も取得した。典型的な荷重一変位線図の一例を Fig.26 に示す。

(3) 成果

① J_{IC} の推定に対する評価試験では、本試験で求めた $\bar{\varepsilon}_{qf}$ と一連の 0.4T~0.75TDCT 試験により求めた J_{IC} 値から、絶対値は異なるが高橋らと同じ勾配の相関が得られたことから、推奨される「破壊等価歪み $\bar{\varepsilon}_{qf}$ - J_{IC} 値相関図」による J_{IC} 値の推定法は、少なくとも、中性子照射による J_{IC} 値の減少傾向を知るための手段として有効である見通しを得た(Ref.21)。

② CVDBTT 推定の評価試験では、A387Gr.22 cl.2 鋼の熱時効材や Fe-0.15C 合金の照射材を含めた相当数の PIE から、相関係数 α がほぼ 0.4 でこれまでに非照射実験で報告されている文献値(Ref.15~17)と一致する結果を得た(Ref.22)。

③ 一連の PIE 結果から、SP 試験で求まる降伏荷重 P_y 、最大荷重 P_{MAX} 等の特性値が同履歴の引張試験特性値と再現性のあるほぼ一定の関係にあることを確認した(Ref.21)。

④ 以上の解析結果から、本試験法は、圧力容器鋼等への SPDBTT シフト量の測定に適用することによって、CVDBTT はもとより、 J_{IC} 値の減少傾向、更には、0.2%耐力($\sigma_{0.2}$)、引張強さ(σ_{UTS})、破断伸び等が推定でき、スクリーニングテストとして極めて有用であることを立証した。

3.6 電気化学的腐食試験

(1) 目的

本試験は、材料耐食性検査法として知られる電気化学的腐食試験法の 1 つで、HTTR-RPV の研究においてはアノード分極曲線測定法(Ref.23)の適用によって、粒界に偏析する P 濃度を捕らえることで、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の主要な脆化機構と考えられる中性子照射によって加速された熱時効脆化（焼戻し脆化）の診断技術を開発し、将来の実機用監視試験技術の確立に資するために実施した。

(2) 試験内容

電気化学的腐食試験法は、化学腐食試験法に比べて、データの連続測定が可能であって、基本的に非破壊試験で、且つ、比較的短時間の測定で電気出力データが得られため照射試験片が有効に使用でき、解析等の取扱も容易である等々の利点があることから材料の耐食性を測定する PIE 技術として有用である。当施設では、1990 年に軽水炉の IASCC（照射誘起応力腐食割れ； Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking）研究の一環として電気化学的腐食試験法の PIE 技術を確立した。ここに報告する「 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼照射材に対する熱時効脆化診断技術の開発」に係る PIE としてのアノード分極曲線測定は、この遠隔操作試験技術(Ref.24)に基づき実施したものである。

試験装置は、電解槽、ポテンショスタット、電位スイープ装置（Function generator）及び、これらの制御とデータ収集・解析のためのパソコンコンピュータで構成される（Fig.27 参照）。電解槽は、参照電極（飽和甘こう電極）、作用電極（試験片）、対極（白金）を持つ容量約 1000cc の透明アクリル製で、槽の外側に配したウォータージャケットへ恒温水を循環させる温度調節機構により、試験中の電解液温を $30 \pm 1^\circ\text{C}$ に維持できる。試験片であるところの作用電極は、遠隔操作用に考案した透明アクリル製特殊ホルダに調製済みクーポン（10 角 \times 5t mm^3 ）をセットしてマニプレータでネジ固定するだけで、極めて容易に装置側リードプレート（SUS304 鋼製）と一体化され、常時、再現の良い導通状態が確保できる。固定用ネジはマニプレータのハンドリングの容易性を考慮して、四角型頭部（16 \times 16 \times 12t mm^3 ）を持つテフロン製専用品とした。また、ホルダの各部にはシリコンゴム製パッキンを設け、クーポン以外の金属部が電解液と接しないよう配慮した。更に、電解液の自然腐食電位を一定に保つため、液相及び気相の脱気用として窒素ガスが流せる構造である。

試験片の調製には、金相試験技術として既に確立されている電解研磨用前処理技術を適用した。試験片は、下部棚温度で打撃されたシャルピ一衝撃試験片から採取した 10 角 \times 5t mm^3 のクーポンで、その片面に端子となる黄銅棒（ $\phi 5\text{mm}$ ）を導電性接着剤で取付け、エポキシ樹脂により研磨用ホルダに埋め込むことで本試験用に作製され、最終的に $1\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストを用いて鏡面仕上げとした。更に、測定に際しては、隙間腐食や表面汚れの影響を回避するために、換言すれば、対象試料面のみが均一に腐食環境に曝されるようにするために、クーポン端部（樹脂との境界部）への絶縁塗料の塗布を励行した。

アノード分極曲線の測定は、電解液に $55\%\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ を使用して、自然腐食電位から貴方向（アノード側） $\sim 0.5\text{ mV/sec}$ の速度で掃引することにより実施した。なお、電解槽は測定開始前約 1 時間に亘って窒素ガスで脱気した。また、電解液は 1 回の測定ごとに交換した。典型的なアノード分極曲線の一例を Fig.28 に示す。

(3) 成果

焼戻し脆化処理（400～550°C で最長 50,000hrs）された $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼についてのこれまでの実験で、アノード分極曲線に見られる 2 次ピークは、P の粒界偏析と密接な関係(Ref. 25)（オージェ分析により粒界の不純物元素は P のみであることを確認済み）にあって、その増加量が DBTT シフト量と関連することが見出されている（Fig.29 参照）。

PIE の結果から以下のことが分かった(Ref.26)。

- ① 2 次ピーク電流密度値は、照射量の増加に伴って増加する (Fig.30 参照)。
- ② 10^{20}n/cm^2 ($E > 1 \text{MeV}$) を超える照射で見られた比較的大きな 2 次ピーク増加は同じ照射量における大幅な DBTT シフトと対応しており、そのシャルピー衝撃破面は粒界型破壊であった。
- ③ これまでの非照射材実験との総合的評価から、大幅な DBTT シフトや粒界破壊は粒界偏析した P の寄与と判断される。従って、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の 400°C 照射における粒界脆化は、照射誘起偏析等によって生じた P を主とする粒界不純物元素によるものと判断できる。
- ④ 本試験から導かれた上述の結論は、 J_{IC} 破壊靭性試験等の機械試験で得られた 400°C 照射に対する脆化機構解釈、即ち、中性子照射によって加速された熱時効脆化であるとの傍証を裏付けるものであり、HTTR・PRV への低不純物仕様材の適用が正しい選定であったことを立証した。

4. まとめ

HTGR からスタートした HTTR 開発のための機械強度試験は、PIE の技術面では、試験機更新や試験治具設計に伴って、その都度、ホット試験技術を確実に向上させてきており、JIS 等の材料試験規格を十分凌駕する域にまで発展させた。因みに、引張試験機関係では、いずれの現有機も、JIS B7721 に規定される一般の金属材料用引張試験機に比べて卓越したアライメントを有しており、セラミックス級の脆性材料にも適用できる性能にある。また、最も一般的な照射脆化評価手法であるシャルピー衝撃試験では、ロボット技術を導入した第 3 世代機 (1995 年整備) で全自動化を確立し、全試験温度範囲において設定値 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内 ($\Delta T < \pm 1^\circ\text{C}$) の打撃を可能にした。更に、パーソナルコンピュータと最新計測技術を駆使した計装化技術を開発し、PIE に極めて精度の高い精緻な衝撃特性解析を定着させた。シャルピー試験機としての性能は、JIS 衝撃基準片の 3 レベル打撃で $+3\sim+6\%$ 範囲 (規格推奨値: $-5\sim+10\%$) にあり、信頼度の高いデータが取得できる。これら試験機は、近年では、核融合炉用将来材料の引張・衝撃特性評価に、あるいは、軽水炉高経年化に係る RPV の静的・動的破壊靭性評価に有用なデータ ($J_{\text{IC}}, K_{\text{IC}}, \Delta T_{\text{R30}}$ 等) を提供している。他方、低合金鋼の脆化機構解明にその有用性が確認された電気化学腐食試験技術も、近い将来、軽水炉 RPV の高経年化研究への適用の展開にあり、新たな成果が期待される。また、他に先駆けて実施した高温クリープ (破断) 試験、SP 試験、 K_{Id} 破壊靭性試験等の PIE では、それぞれの状況に応じた遠隔操作技術を確立し、所期の目的を果たす貴重なデータを提供した。なお、PIE データの高精度な維持管理には、定期的な点検調整と第 3 者機関等による試験機検定 (1 年毎)、PIE に先立つ 1 シリーズ毎のリファレンス試験片試験、試験毎の日常点検の励行と取得データの比較評価等が肝要である。

PIE の成果面では、当施設が 24 年間に亘って実施してきた耐熱・耐圧材料の機械強度試験は、類稀な高温使用条件における耐熱材料候補材と耐圧材料予定材の中性子照射脆化の解明・評価に有用なデータを提供し、HTTR 用制御棒被覆管や RPV のための適性材料の選定及び、安全審査・設計工事認可の取得に大きく貢献した。また、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼について十分蓄積された高温照射後の衝撃特性データは、今後加速するであろう核融合炉用材料研究、とりわけ、フェライト鋼の

データベースとして有用である。

謝辞

ここに報告したホット試験技術は、HTTR用材料の研究開発に携わってきた関連各部の研究室情報に基づいて密なる連携の下に開発・確立されたものであり、隨時に有益なご助言、ご協力を戴いた当時の動力炉開発・安全性研究管理部、材料研究部、高温工学部、研究炉部、材料試験炉部等の関係各位に深く感謝いたします。また、本報告をまとめるにあたり、ご指導戴いたホット試験室長 古平恒夫氏、同次長 新藤雅美氏（現保安管理室）、現エネルギーシステム研究部複合環境材料研究グループリーダー 辻 宏和氏、同原子炉安全工学部機器信頼性研究室長 鈴木雅秀氏、同研究室副主任研究員 西山裕孝氏、並びに、照射後試験の実施に尽力戴いた歴代のホットラボ関係者の方々に謝意を表します。

参考文献

1. JIS Z 2241 ; 金属材料引張試験方法
2. ASTM E8 ; Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials
3. ASTM E21 ; Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials
4. JIS Z 2272 ; 金属材料の引張クリープ破断試験方法
5. JIS Z 2242 ; 金属材料衝撃試験方法
6. ASTM E23 ; Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials
7. JSME (日本機械学会基準) S 001-1981,1992 ; 弹塑性破壊靭性 J_{IC} 試験方法
8. ASTM E813 ; Standard test Method for J_{IC} , A MEASURE OF FRACTURE TOUGHNESS
9. 古平恒夫 他 ; 鉄と鋼 第68巻 第8号(1982) pp1040-1045
单一試験片による J-R カーブ測定への直流電位差法の適用
10. 小林俊郎 ; 機械設計 第32巻 第1号(1988) pp91-97
機械材料の靭性評価と CAI システム
11. ASTM E 399 ; Standard test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials
12. JEACJ4206-1980 「原子力発電所用機器の最低使用温度の確認方法」, 付録1
13. ASME Code, Section III, Appendix G (1980)
14. X.Mao, T.Shoji, H.Takahashi ; J. of Testing Eval. 15 (1987) 30
15. X.Mao & H.Takahashi ; J. of Nucl. Mater. 150 (1987) 42
16. T.Misawa, S.Nagata, N.Aoki, et al. ; J. of Nucl. Mater. 169 (1989) 225

17. T.Misawa, T.Adachi, S.Saito, et al. ; J. of Nucl. Mater. 150 (1987) 194
18. J.Kameda; Acta Metall. 34 (1986) 2391
19. T.Matushita, M.I.Saucedo, et al.; Trans. Japan Soc. Mech. Engineers. 55 (1989) 1619
20. T.Takahashi, T.Kodaira, M.Suzuki, et al.; JAERI-M 88-172
Recommended practice for small punch testing of metallic materials (DRAFT)
21. M.Suzuki, M.Eto, T.Kodaira, et al.; J. of Nucl. Mater. 179-181 (1991) pp441-444
Evaluation of toughness degradation by small punch(SP) tests for neutron-irradiated
2 1/4Cr-1 Mo steel
22. M.Suzuki, M.Eto, Y.Nishiyama, et al. ; ASTM STP 1204 (1993) pp217-227
Estimation of Toughness Degradation by Microhardness and Small Punch Tests
23. JIS G 0579; ステンレス鋼のアノード分極曲線測定方法
24. 芝 清之, 塚田 隆, 松島秀夫 他 ; JAERI-M 91-024 (1991)
遠隔操作による電気化学的腐食測定技術の開発
25. Y.Nishiyama, K.Hukaya, M.Suzuki, et al. ; ASTM STP 1204 (1993) pp16-26
Electrochemical Evaluation of Thermal Aging Embrittlement of 2 1/4Cr-1 Mo
Steel for Nuclear Pressure Vessel
26. Y.Nishiyama, K.Hukaya, M.Suzuki, et al.; J. of Nucl. Mater. 258-263(1998) 1187-1192
Irradiation embrittlement of 2 1/4Cr-1 Mo steel at 400°C and its electrochemical
Evaluation
27. 奥 達雄, 古平恒夫, 深谷 清, 鈴木雅秀 他 ; 私信 (1989)
高温ガス炉圧力容器用 2 1/4Cr-1 Mo 鍛鋼 (中空鋼塊法) の特性評価

Table 1 2 1/4Cr-1Mo鋼の中性子照射による引張特性的変化
 (「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1982)」より引用)

鋼種・材歴等		引張特性 強さ (MPa)	降伏強さ (MPa)	引張率 (%)	全伸び (%)	断面 収縮率 (%)
H T G R A387 予定材	母材 受入のま 照 射	500	620	19.7	82	
	熱影 受入のま 照 射	514	624	18.5	78	
	熱影 受入のま 響部 照 射	495	610	18.1	83	
	溶接 金属 受入のま 照 射	508	619	14.2	79	
	溶接 金属 受入のま 照 射	569	644	14.6	72	
		585	662	13.1	70	
A387 Gr.22 c1.1	母材 受入のま 照 射	260	481	29.0	79	
A542 c1.1	母材 受入のま 照 射	650	754	18.7	81	
		667	761	15.4	77	

(照射温度：320～380°C
 (高速中性子照射量(E>1MeV)：3×10¹⁸n/cm²)

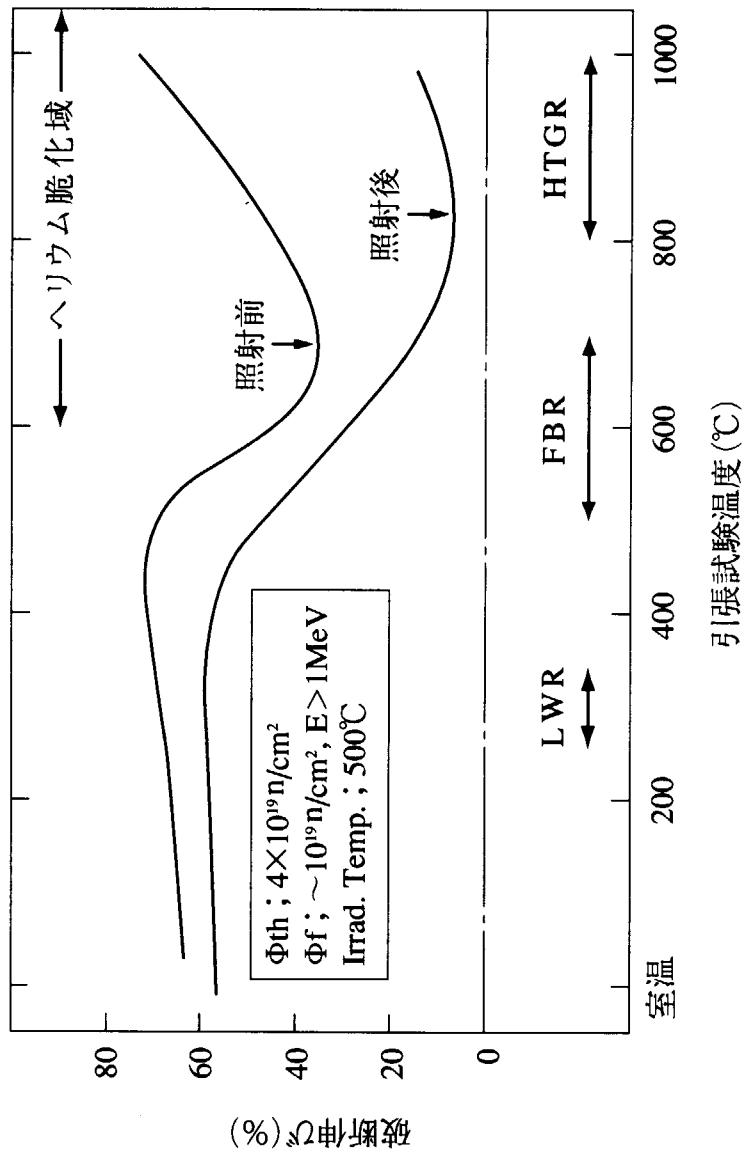


Fig.1 鉄基耐熱合金インコロイ800の照射後延性低下の状況
 (「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1973)」より引用)

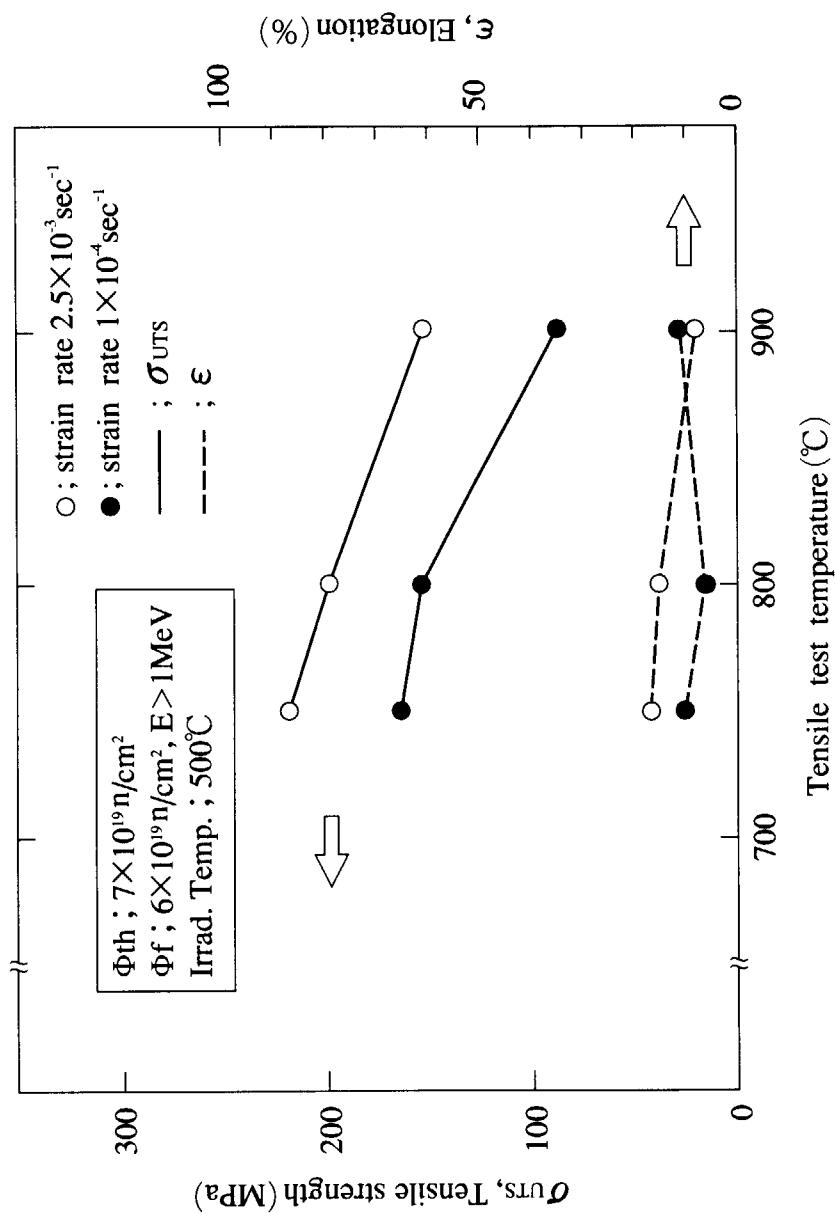


Fig.2 インコロイ800照射材の引張特性に及ぼす歪み速度の効果
 (「多目的高温ガス炉ポート第4号(1972)」(私信)より引用)

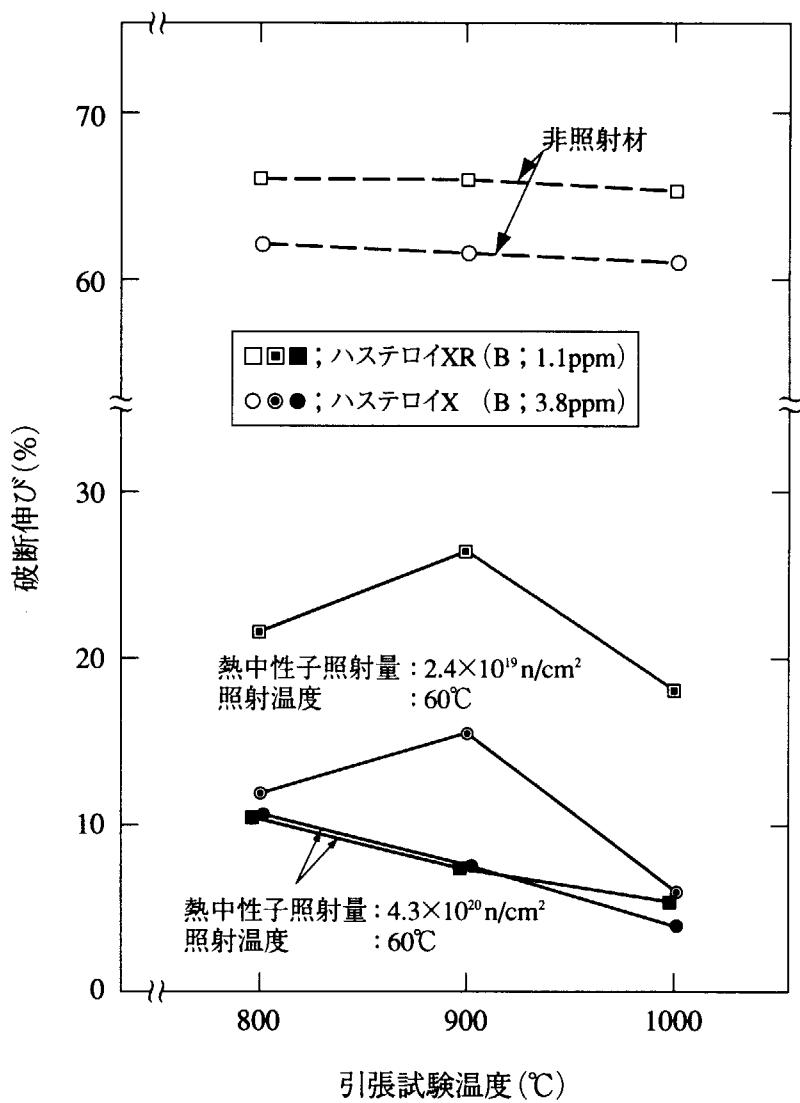


Fig.3 ハスティロイXとハスティロイXRの照射後破断延性の比較
（「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1979)」より引用）

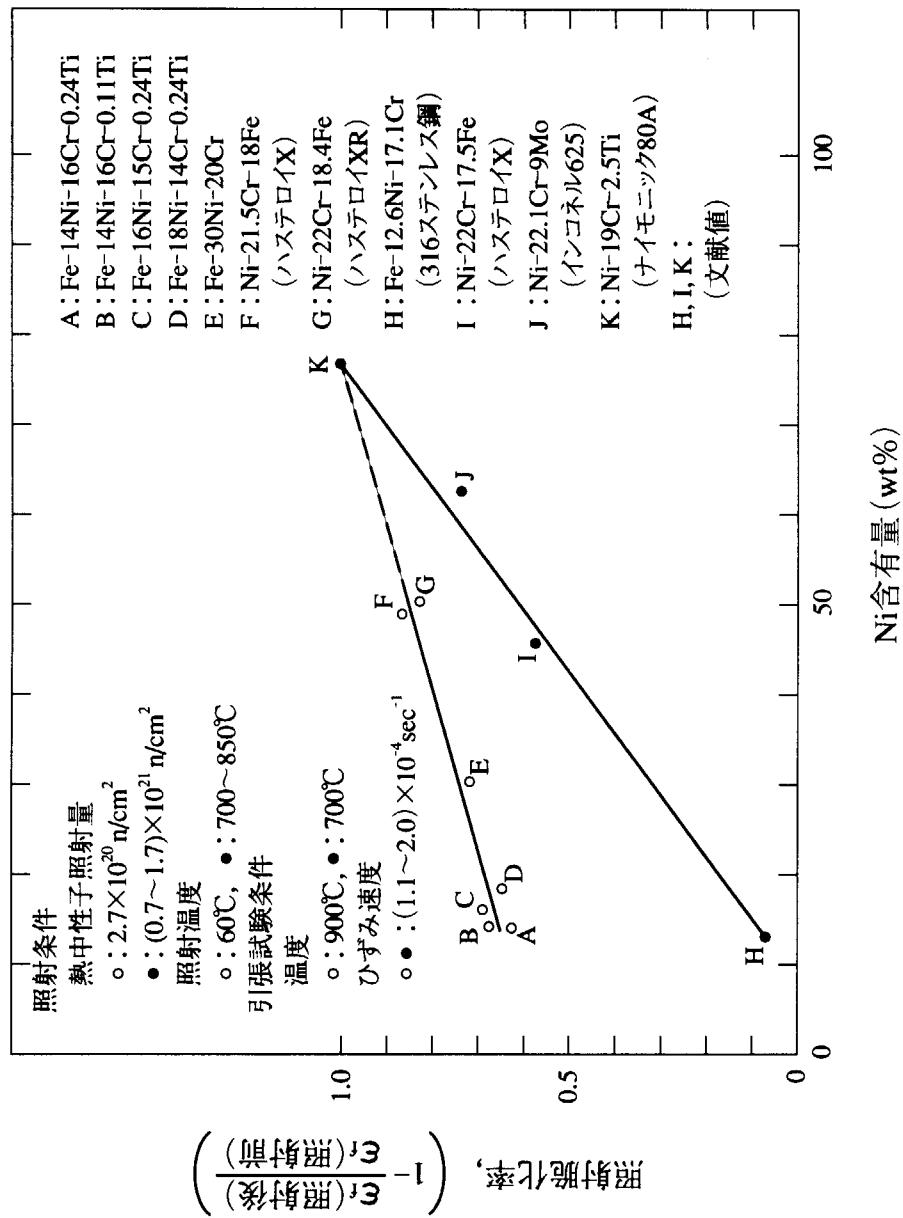


Fig.4 热中性子照射された材料の高温延性とNi含有量の関係
(「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1981)」より引用)

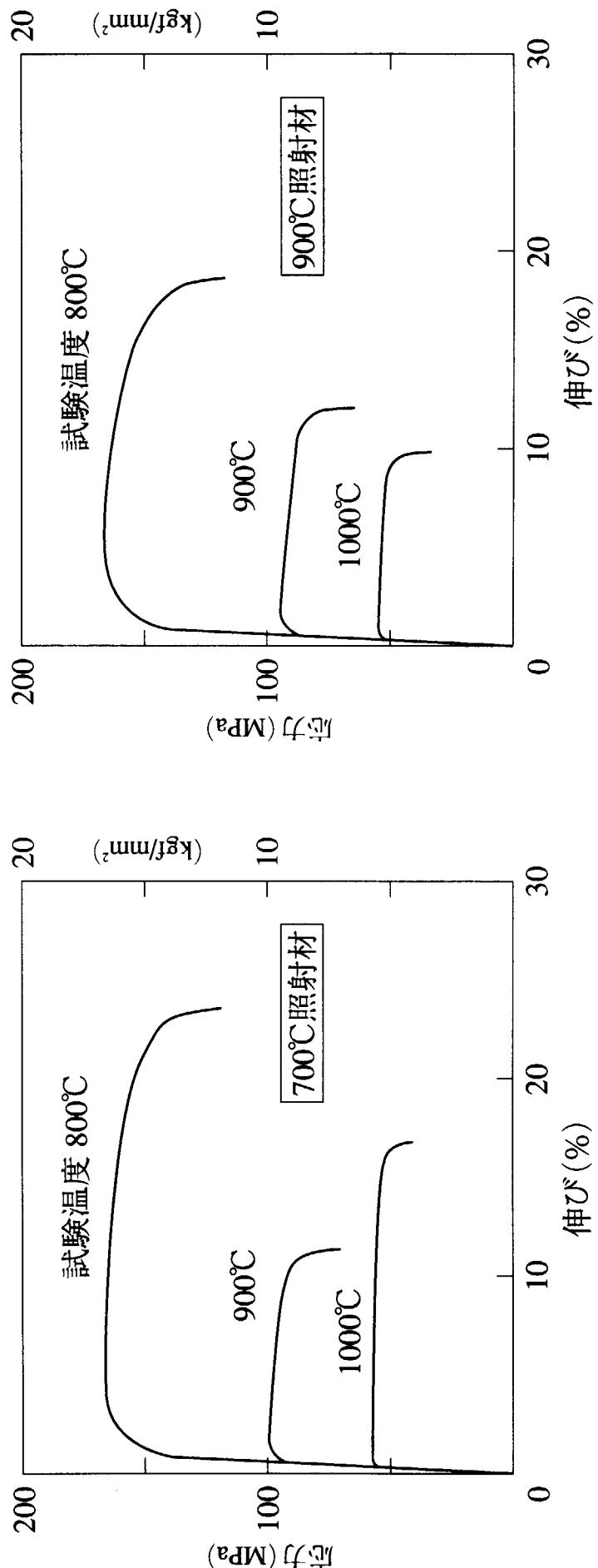


Fig.5 アルミ800Hの照射後引張特性の照射温度依存性
 (熱中性子照射量 $\Phi_{\text{th}} : 2.3 \times 10^{20} \text{n/cm}^2$
 高速中性子照射量 $\Phi_f : 1.8 \times 10^{20} \text{n/cm}^2, E > 1 \text{MeV}$)

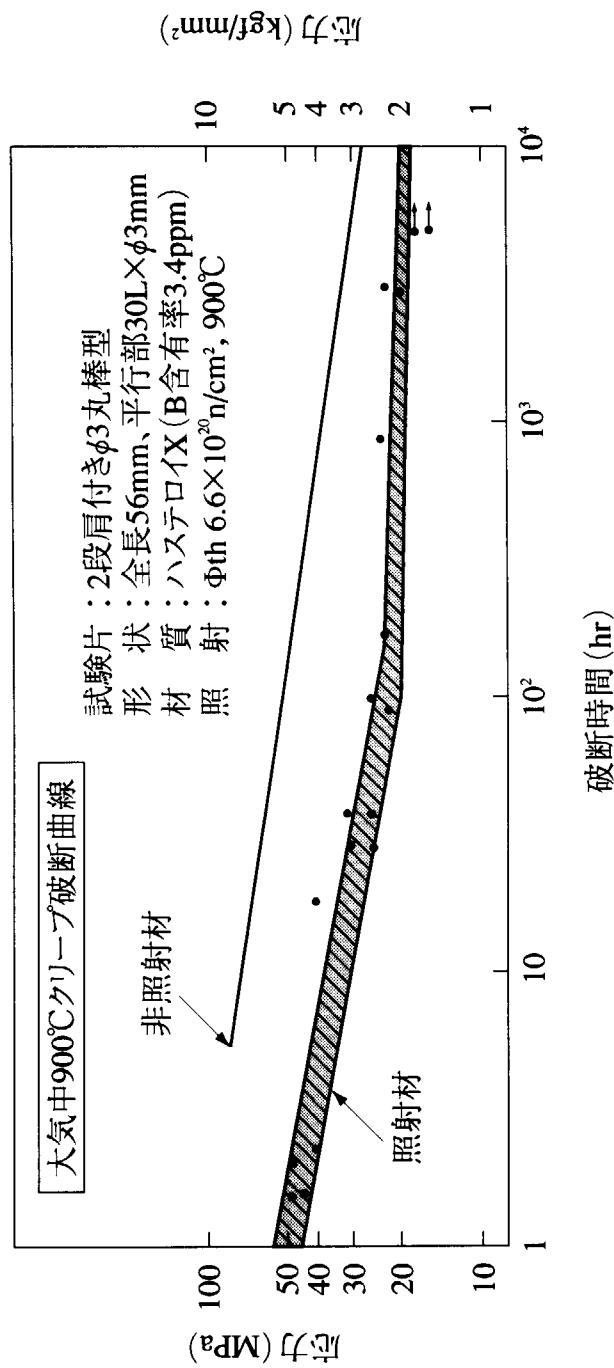


Fig.6 加速照射されたOGL-1仕切管用ハイテロイXの
 照射後900°Cクリープ破断曲線
 (「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1978)」より引用)

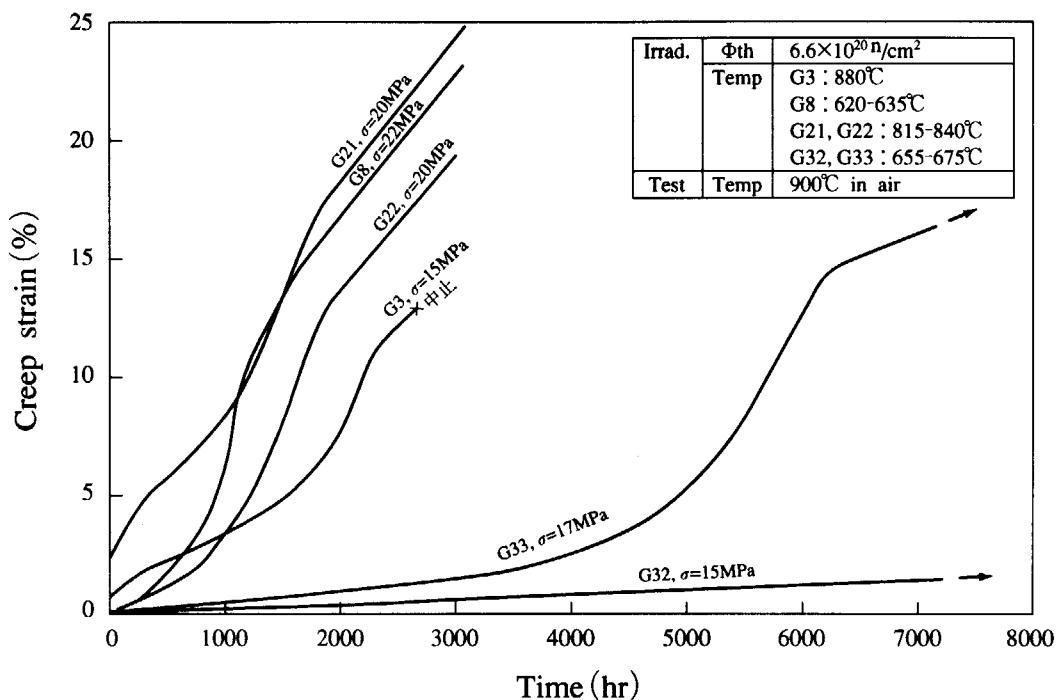


Fig.7 加速照射されたOGL-1仕切管用ハステロイXの $\phi 3\text{mm}$ 丸棒試験片による照射後900°Cクリープ破断特性
(「多目的高温ガス炉プログレスレポート第14号(1978)」(私信)より引用)

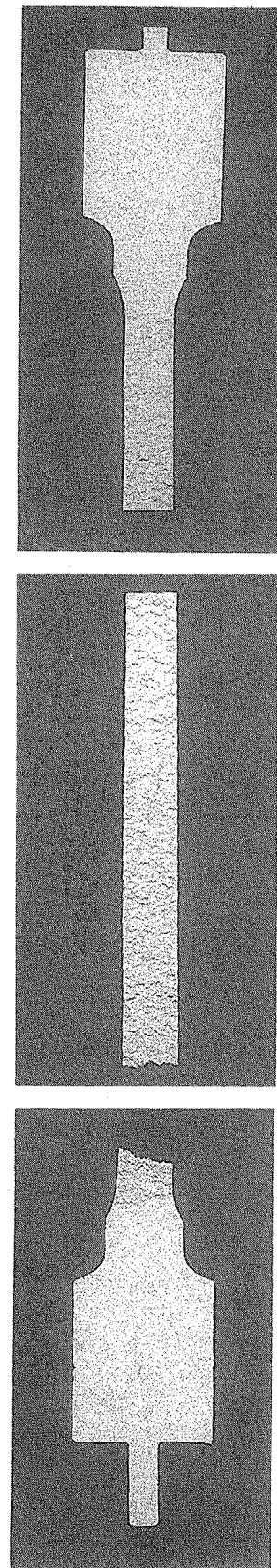


Fig.8 OGL-1仕切管用ハスティロIXの照射後大気中900°Cクリープ破断試験で
平行部全域($\phi \times 30^L$ mm)に確認された微小クラック(試験片G3)

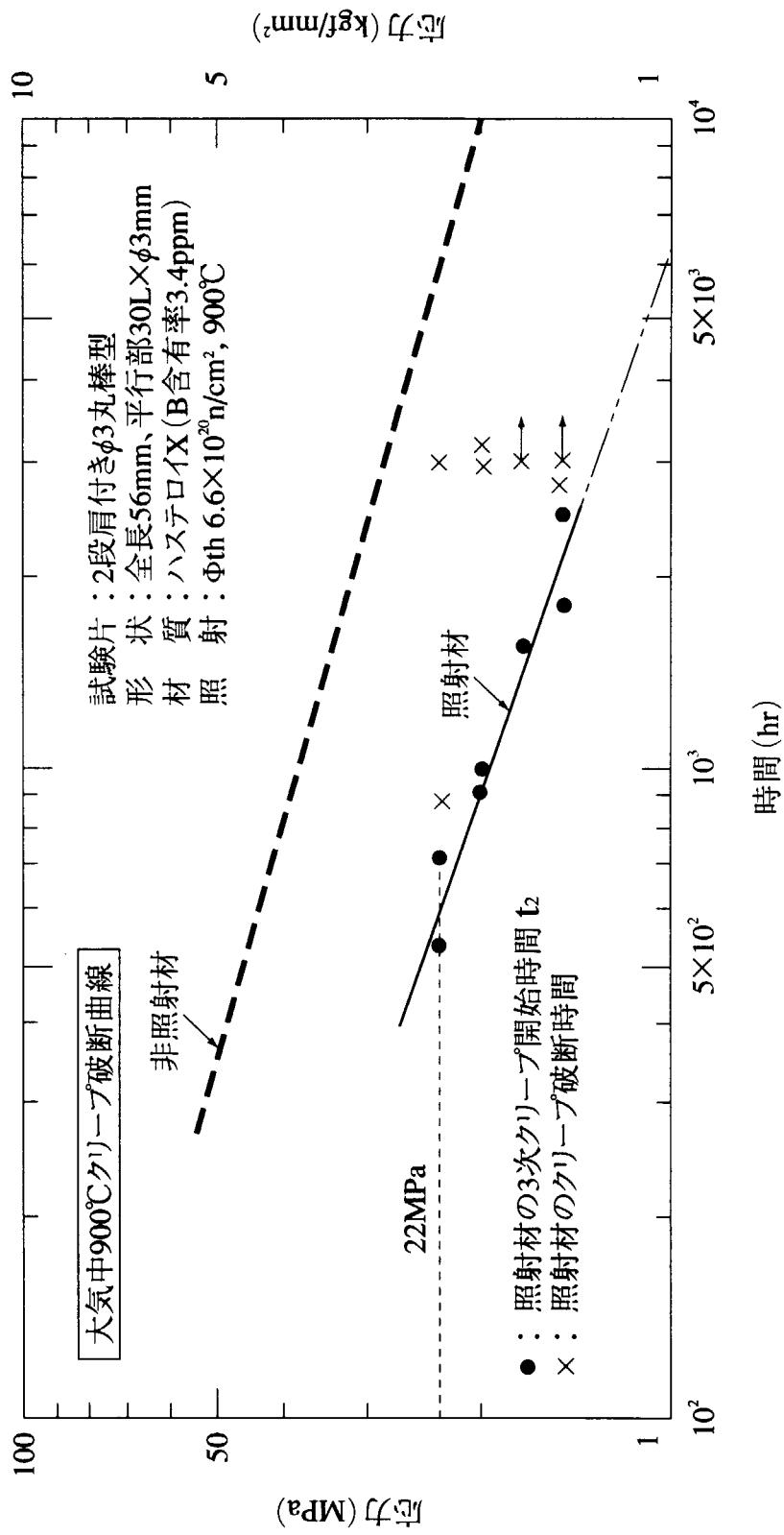


Fig.9 加速照射されたOGL-1仕切管用ハイテロイXの照射後
900°Cクリープ破断試験結果(低応力域試験)
(「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1979)」より引用)

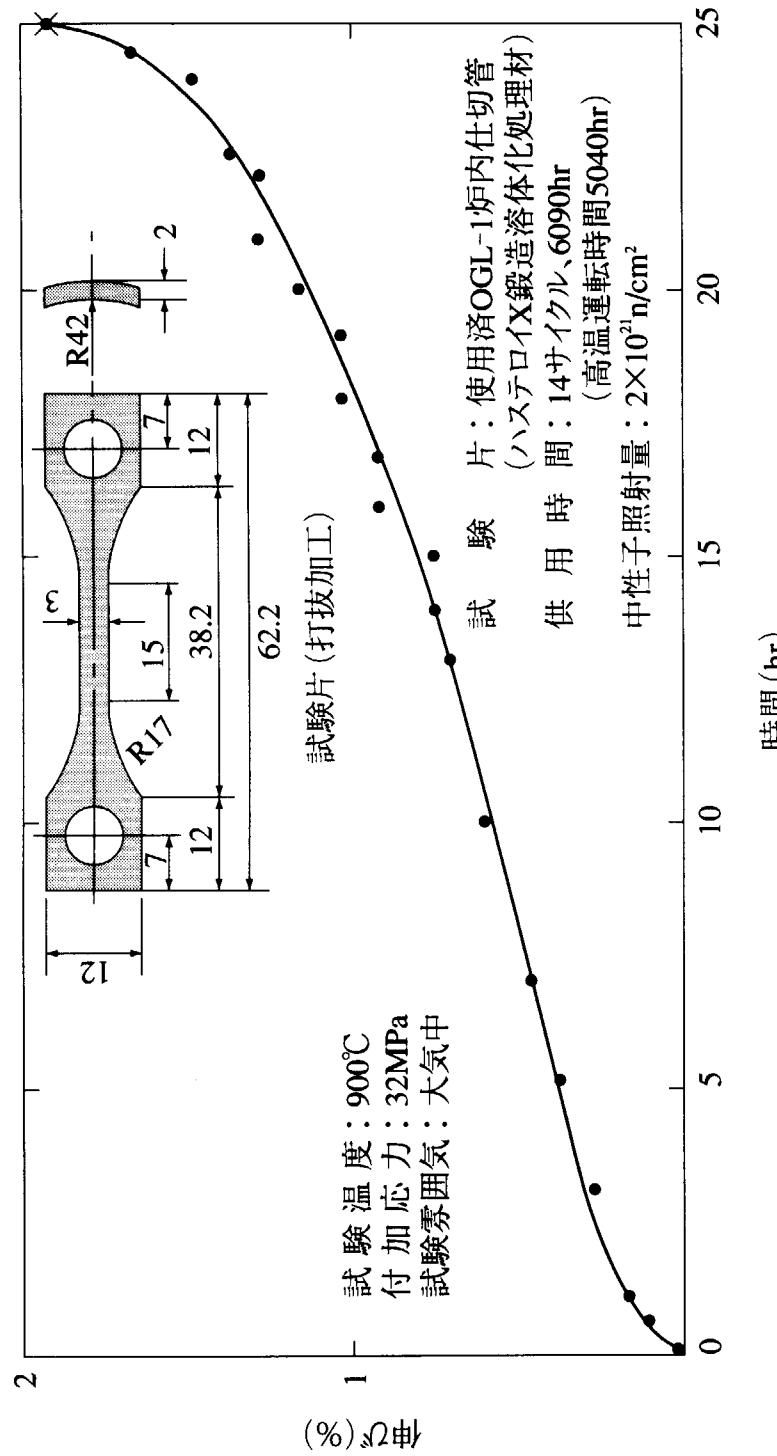


Fig.10 使用済OGL-1炉内仕切管ハステロイXのクリープ特性曲線の一例
(「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1982)」より引用)

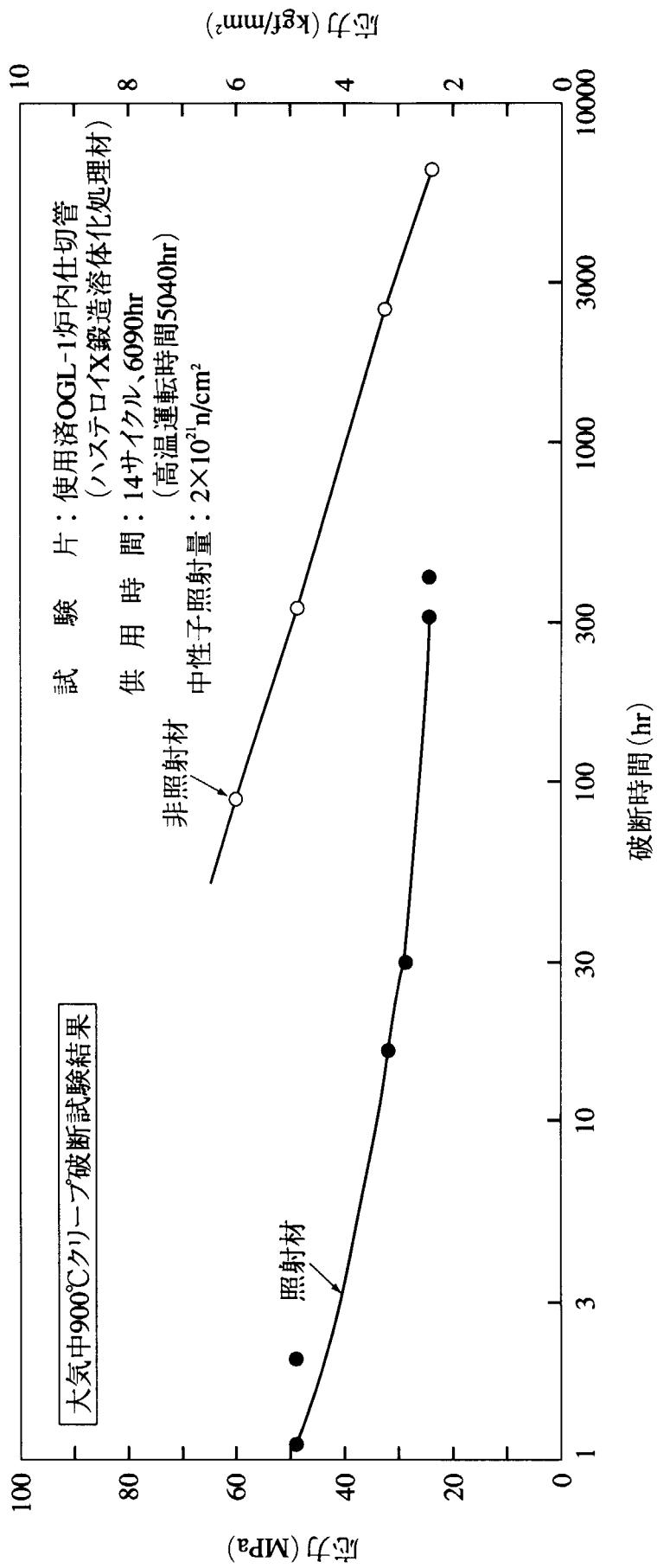


Fig.11 使用済OGL-1炉内仕切管の900°Cクリープ破断曲線
 (「多目的高温ガス炉プログレスレポート第21号(1984)」(私信)より引用)

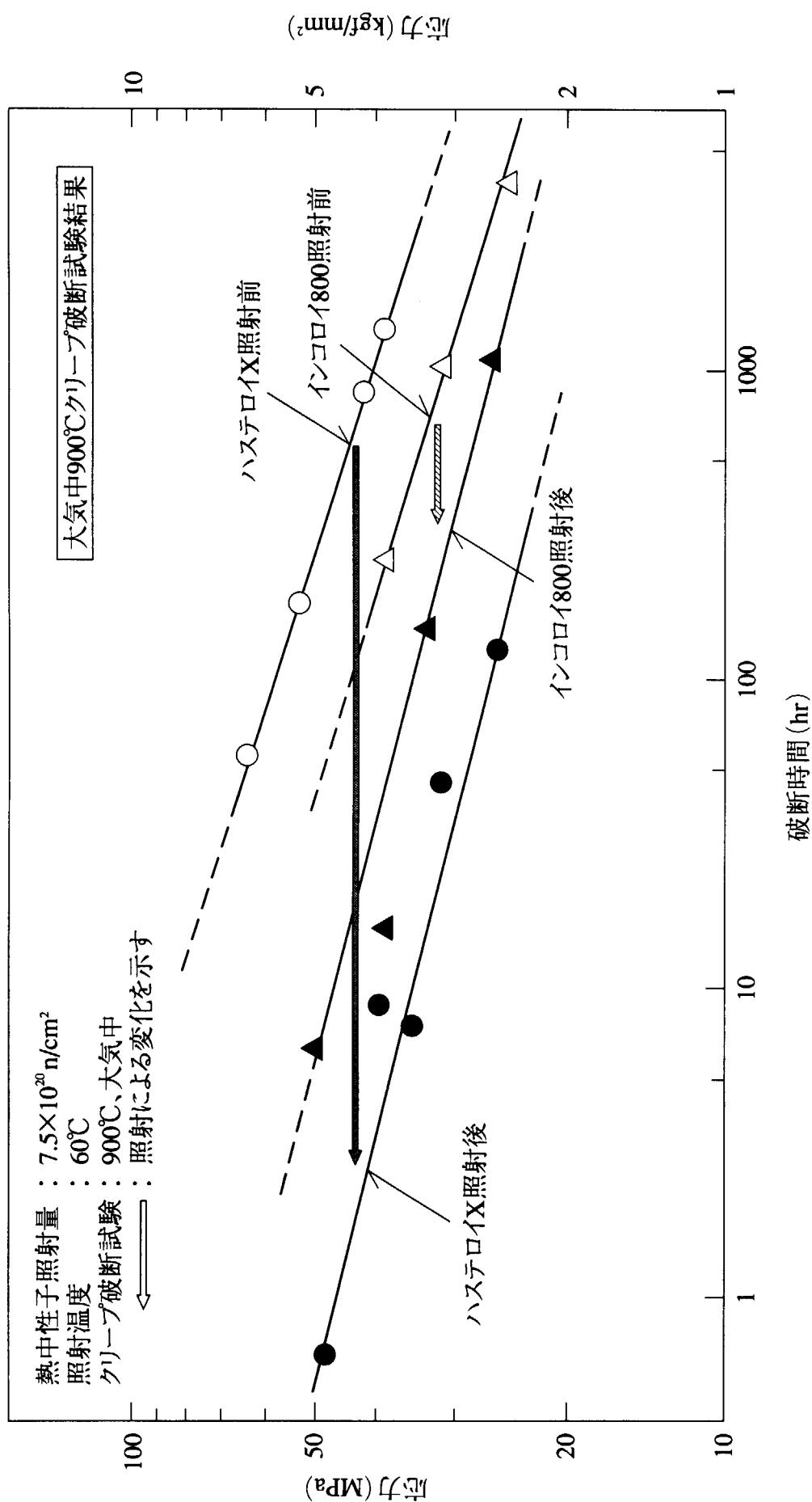


Fig.12 中性子照射したハスティルX (Ni基合金)とインコロイ1800 (Fe基合金)のクリープ破断曲線の比較
 (「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1983)」より引用)

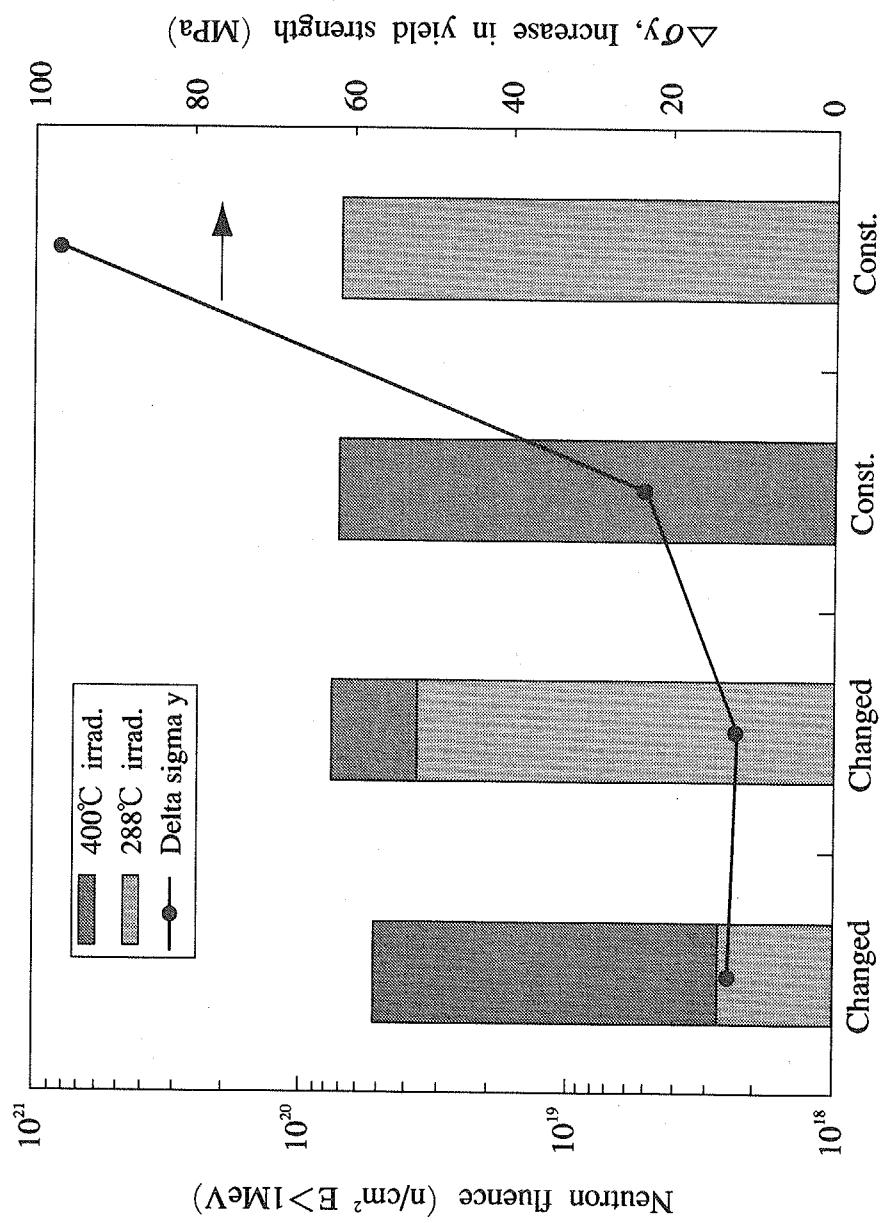


Fig.13 照射温度を290°Cから400°Cに変化させた場合の
2 1/4 Cr-1 Mo鋼の照射硬化量
(Ref.26より引用)

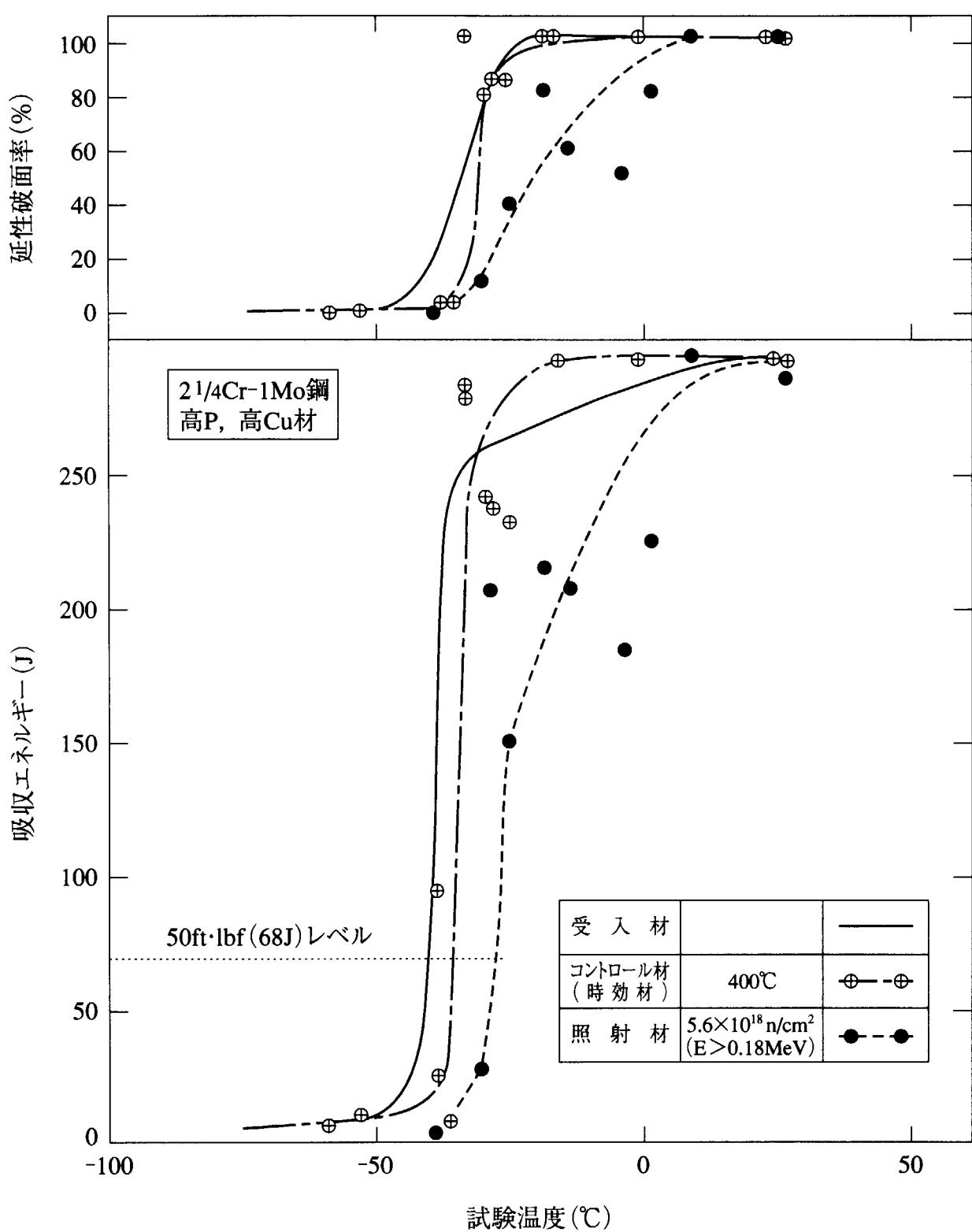


Fig.14 高P(0.01wt%),高Cu(0.1wt%)2 1/4Cr-1Mo鋼における時効及び照射によるシャルピー遷移曲線の変化
(「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1980)」より引用)

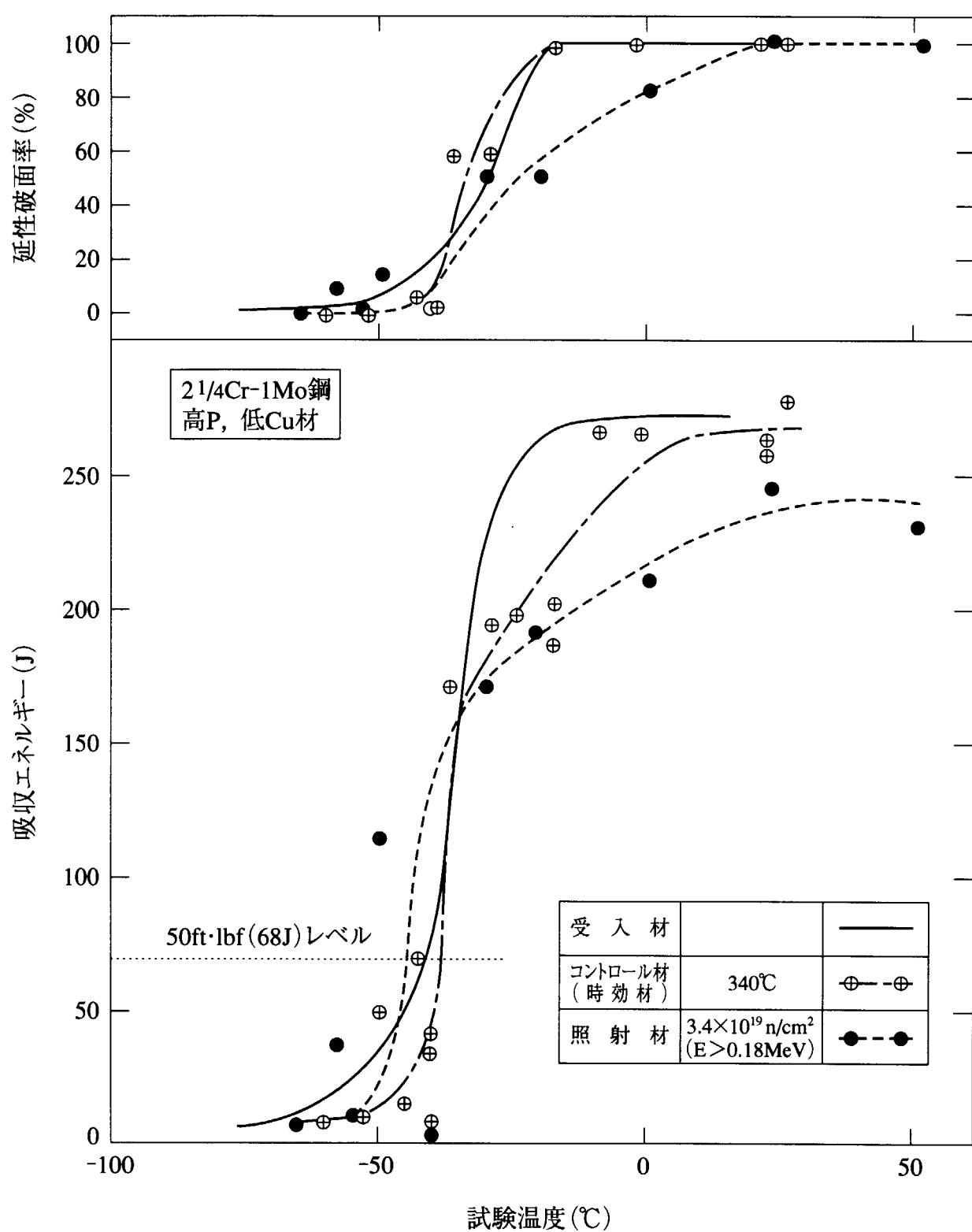


Fig.15 高P(0.01wt%), 低Cu(0.05wt%) 2 1/4Cr-1Mo鋼における時効及び照射によるシャルピー遷移曲線の変化
(「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1980)」より引用)

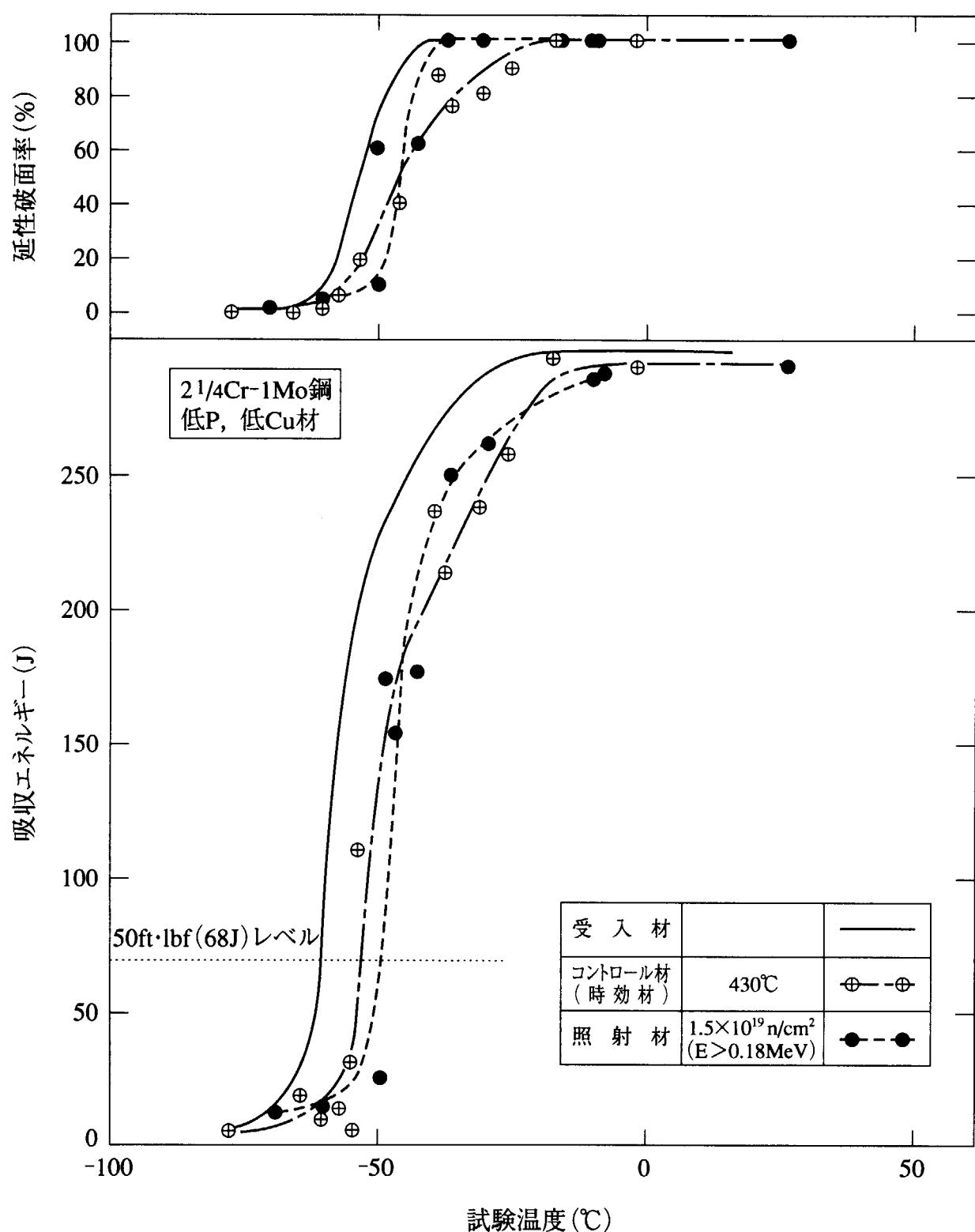


Fig.16 低P (0.005wt%), 低Cu (0.05wt%) 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼における時効及び照射によるシャルピー遷移曲線の変化
(「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1980)」より引用)

○：非照射材, ●：照射材 ($\sim 360^{\circ}\text{C}$, $1.2 \times 10^{18} \text{n/cm}^2$ ($E > 1\text{MeV}$))
 Tr30：吸収エネルギー-30ft·lbf (41J)における温度

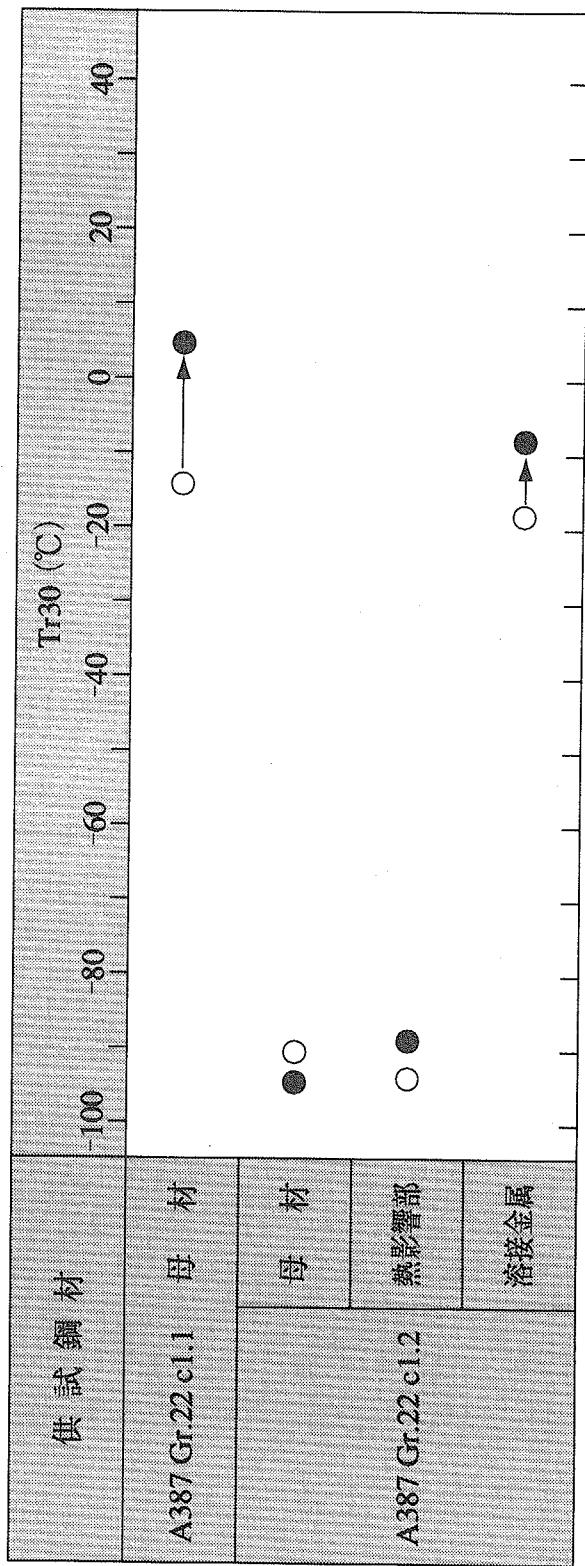


Fig.17 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼の中性子照射によるエネルギー遷移温度(Tr30)の変化
 (「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1983)」より引用)

○：照射前、受入材
 ⊕：照射前、 $475^{\circ}\text{C} \times 100\text{h}$ 加熱材（時効材）
 ●：照射後
 受入材： $411^{\circ}\text{C}, 2.3 \times 10^{18} \text{n/cm}^2 (\text{E} > 160\text{fJ} = 1\text{MeV})$
 加熱材： $393^{\circ}\text{C}, 2.7 \times 10^{18} \text{n/cm}^2 (\text{E} > 160\text{fJ} = 1\text{MeV})$

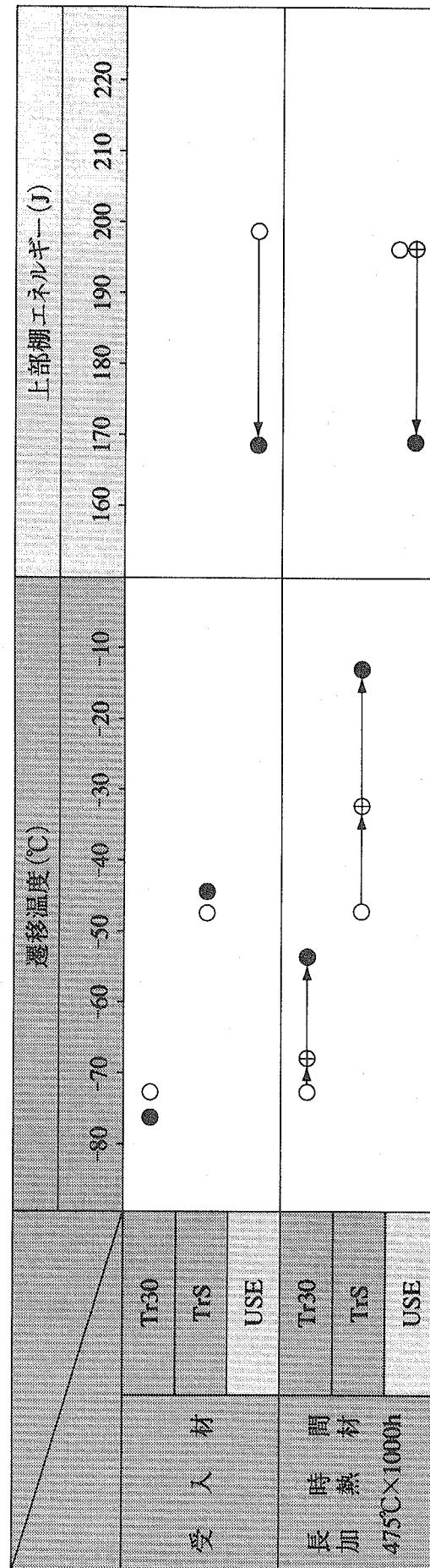


Fig.18 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼 (A387 Gr.22 c1.2)における中性子照射脆化挙動
(「多目的高温ガス炉研究開発の現状(1984)」より引用)

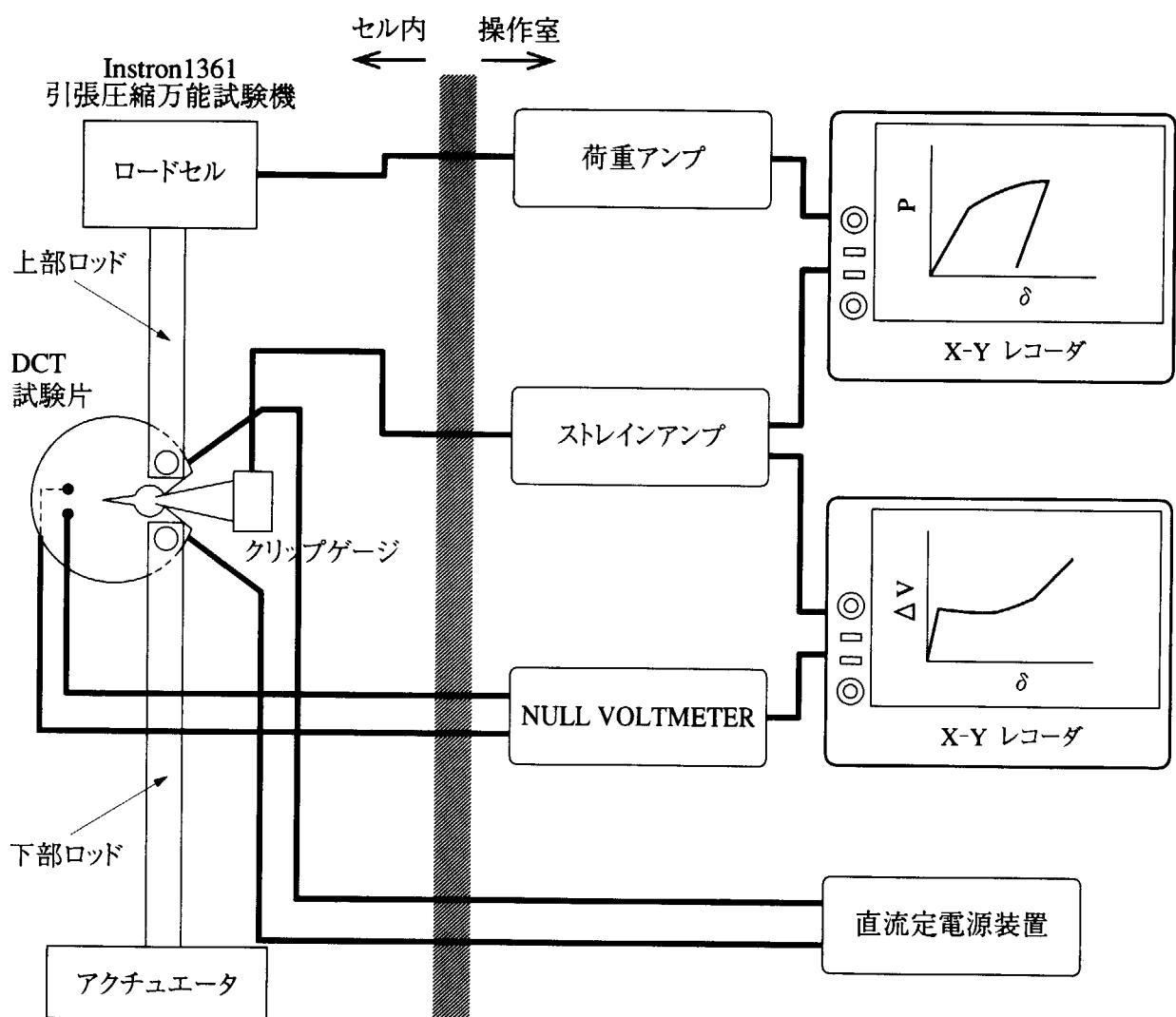
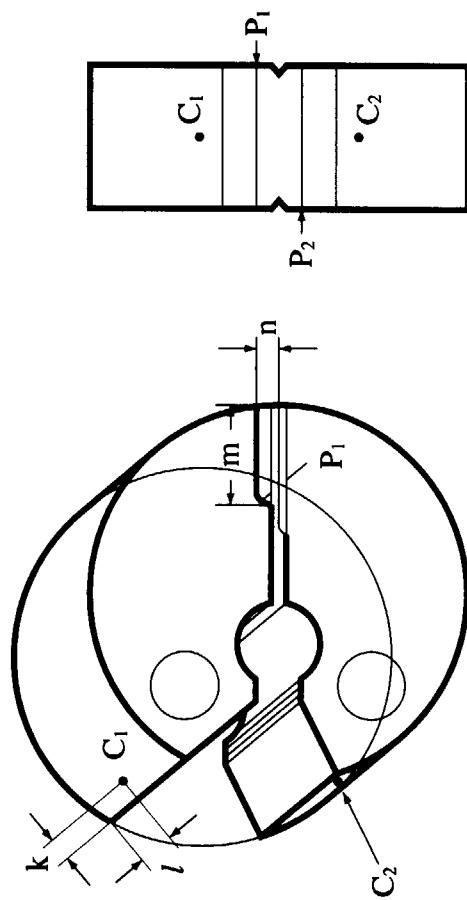


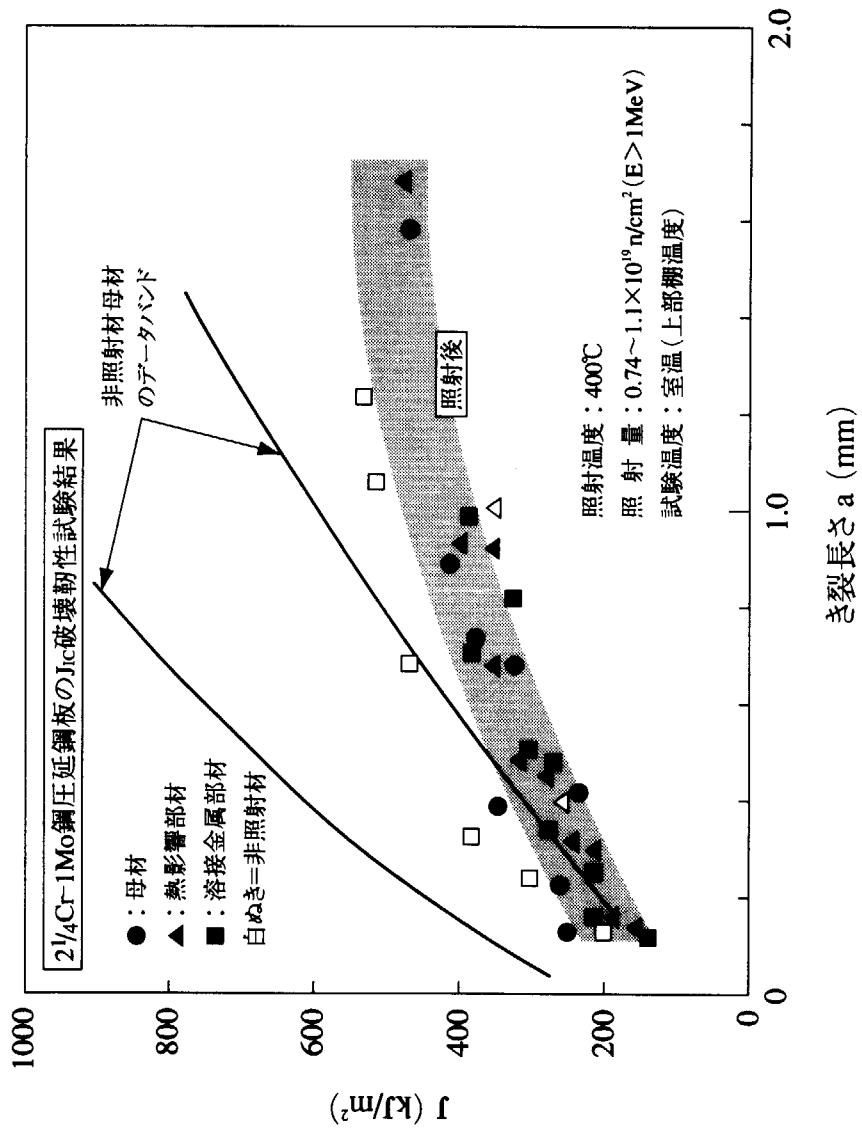
Fig.19 Jic電位差法試験のための計測系ブロックダイヤグラム

C_1, C_2 : 電流端子穿孔位置
 P_1, P_2 : 電圧端子穿孔位置



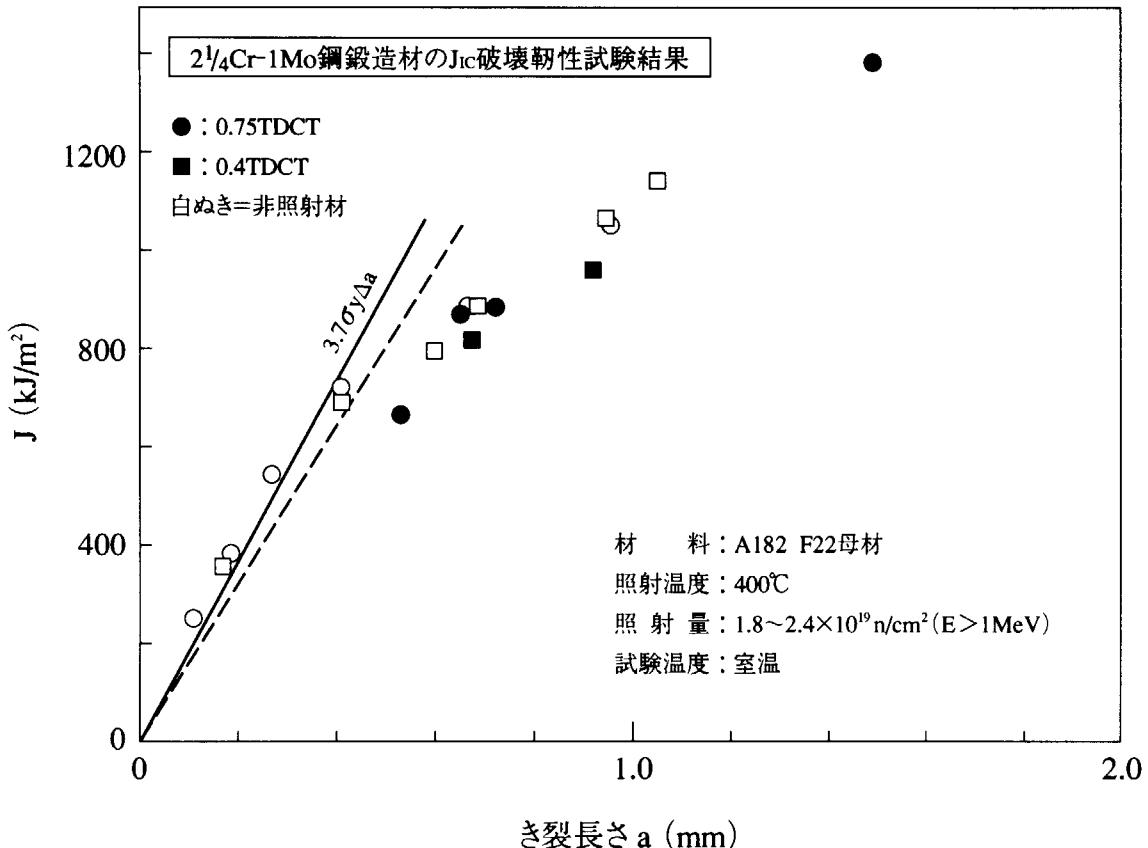
ASTM-E813	k	l	m	n
0.75TDCT	3.0	9.4	17.0	3.8
0.63TDCT	2.5	8.0	14.2	3.2
0.4TDCT	1.5	5.0	9.0	2.0

Fig.20 直流電位差法測定のためのDCT試験片の4端子穿孔位置



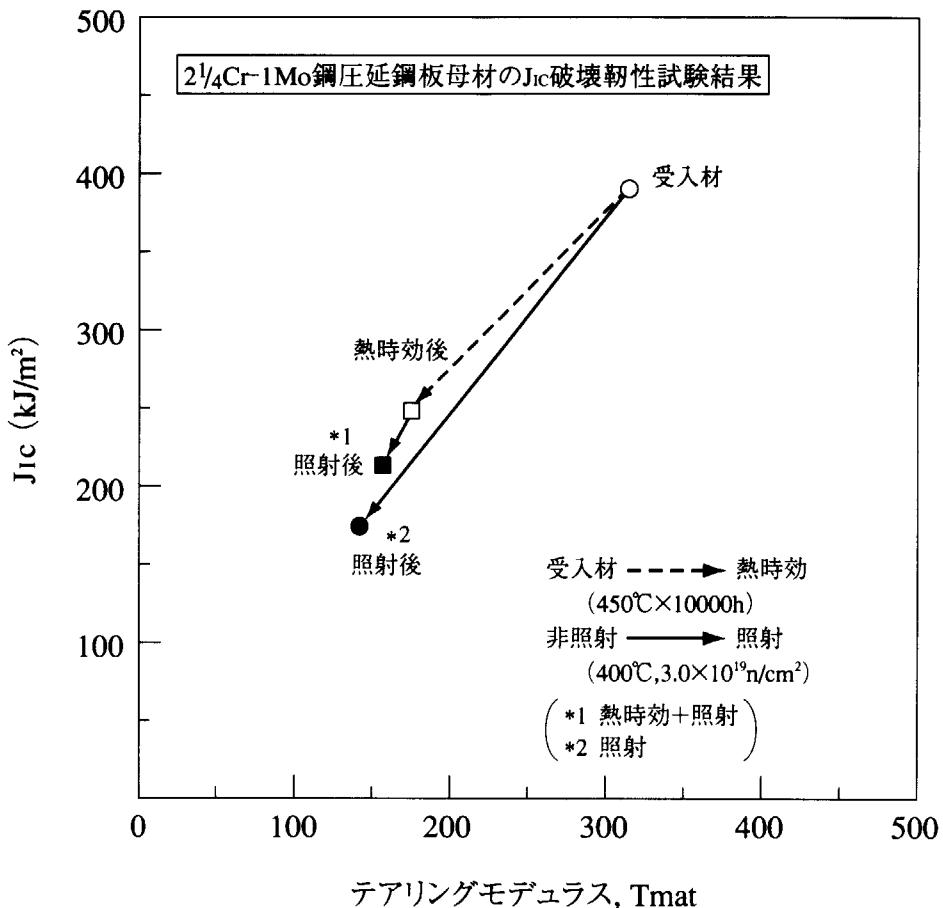
2 1/4 Cr-1 Mo鋼(圧延鋼板)母材、熱影響部、溶接金属について、中性子照射前後における弾塑性破壊じん性試験を行った結果を、J積分値とき裂長さの関係である、いわゆるJ-Rカーブで示したもの。照射前は熱影響部の韌性が一番低いが、照射後では各部材殆ど同じ程度となる。

Fig.21 圧延鋼板母材、熱影響部及び溶接金属部のJ-Rカーブに及ぼす中性子照射の影響
(「高温工学試験研究の現状(1990)」より引用)



2 1/4Cr-1Mo鋼の鍛造材母材のJ-Rカーブ。Fig.21の圧延鋼板に比べ、照射前後ともに高い靶性値を有している。

Fig.22 鍛造材母材のJ-Rカーブにおける中性子照射の影響
(「高温工学試験研究の現状(1990)」より引用)



2 1/4Cr-1Mo鋼(圧延鋼板)の母材について、450°Cで10000時間の熱時効、およびそれに引き続く中性子照射によるJ_c、テアリングモデュラスTmatの変化を示す。熱時効後照射したもののは、受入材の場合に比べてこれらの変化が小さい。これは、受入材の400°C照射による靄性低下には熱的要因に基づく変化が含まれていることを反映する。

Fig.23 热时効、中性子照射によるJ_c、テアリングモデュラスの変化
(「高温工学試験研究の現状(1990)」より引用)

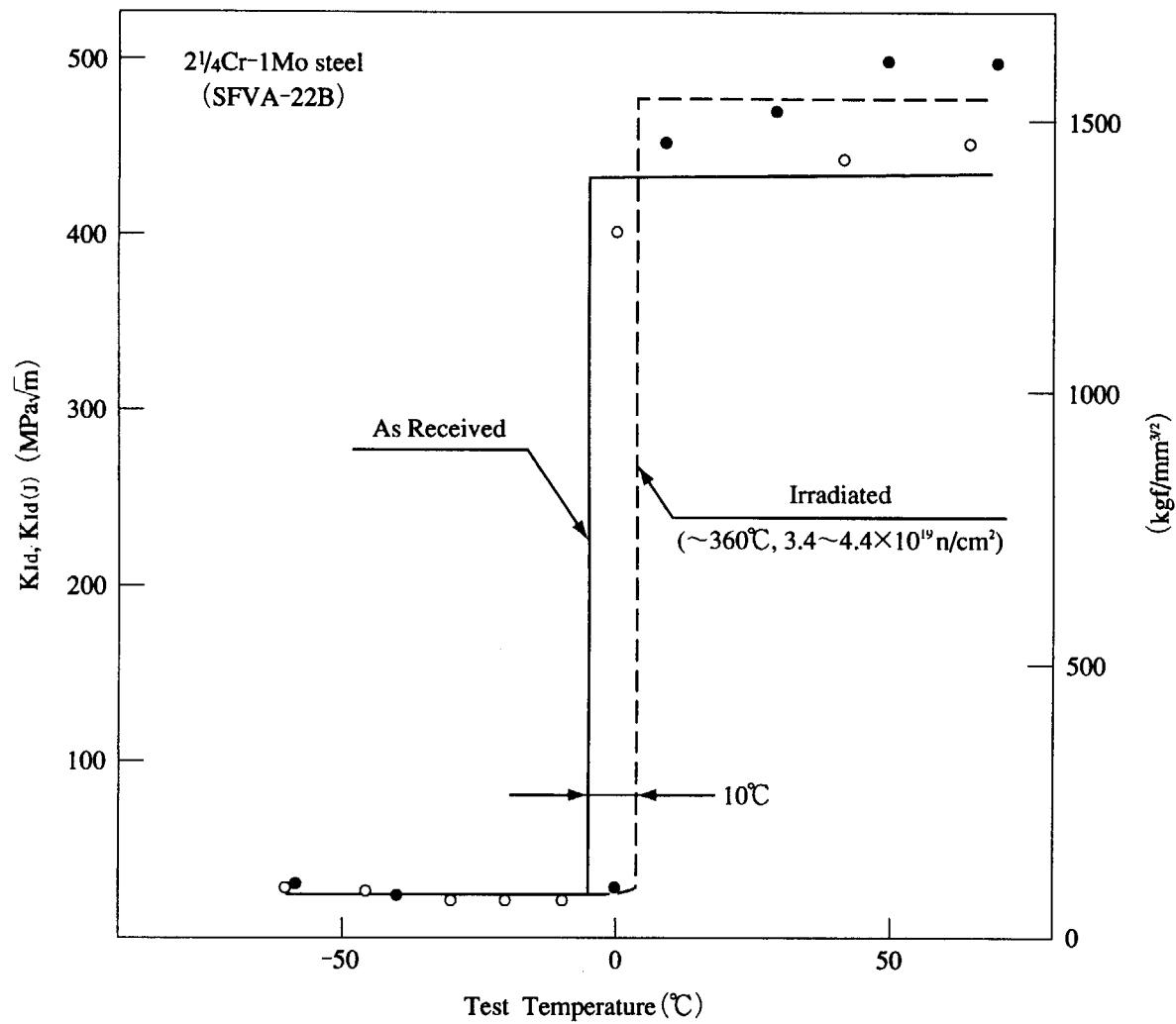


Fig.24 2 1/4 Cr-1 Mo鋼 (SFVA-22B) における K_{Id} , $K_{Id(J)}$ 遷移温度曲線の
照射効果
(Ref.27より引用)

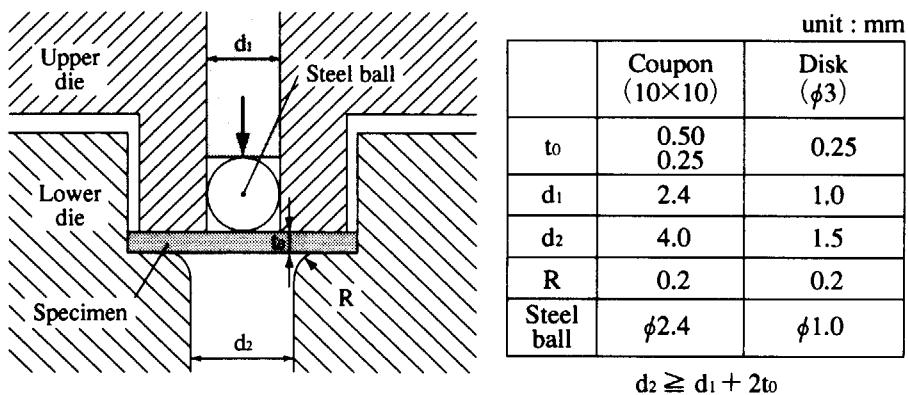


Illustration of small punch test

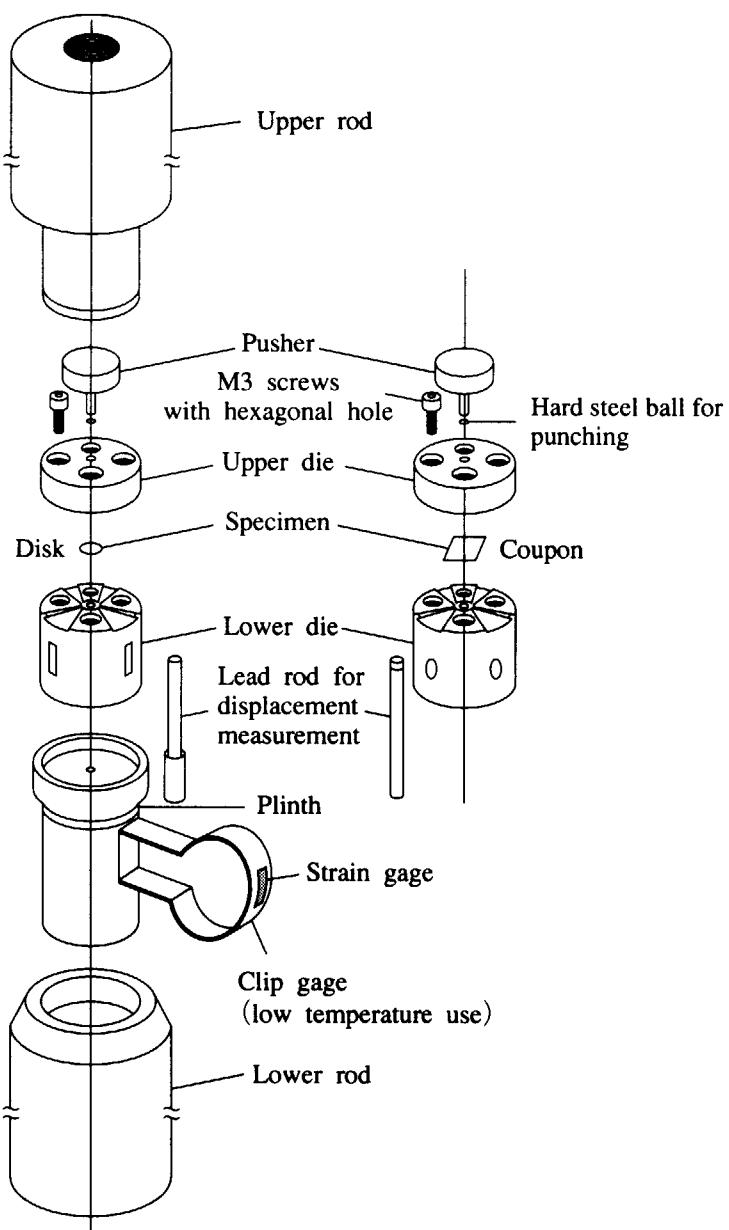


Fig.25 スモールパンチ試験用試験治具概要図
(Ref.22より引用)

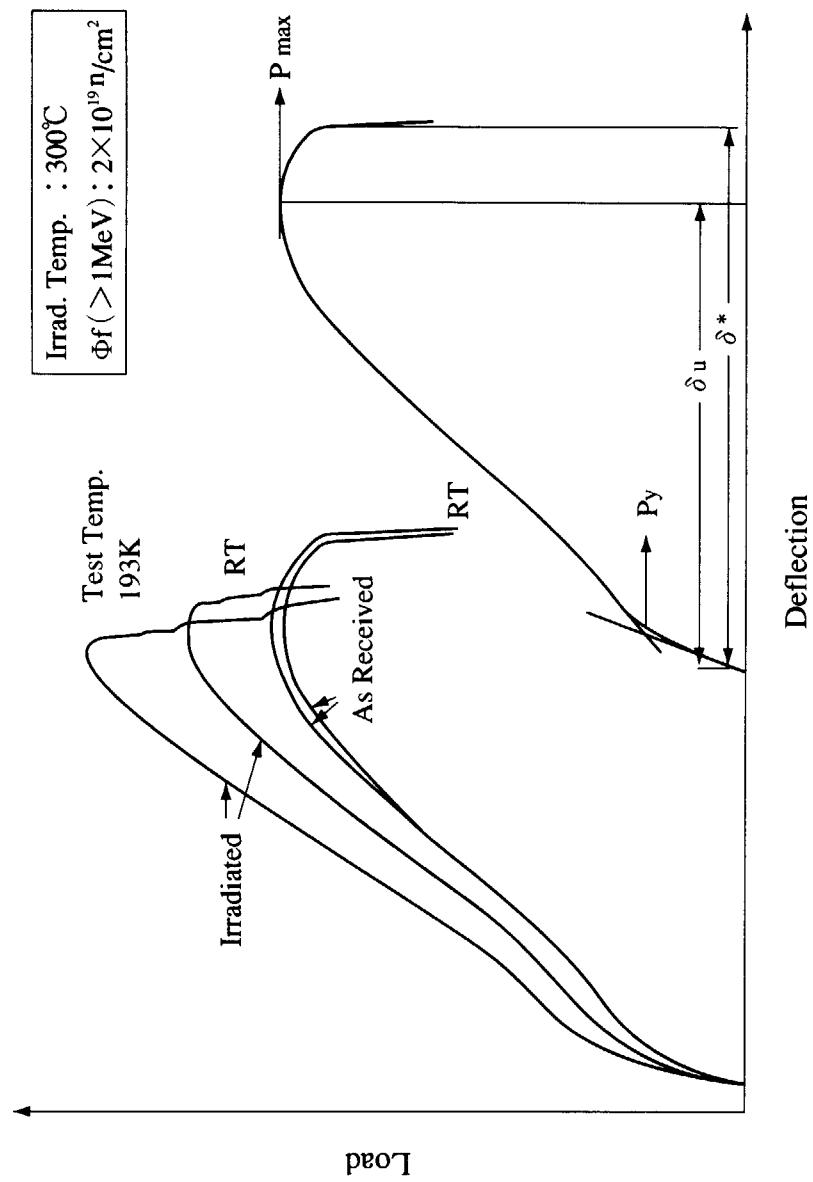


Fig.26 SP試験で得られた2 1/4Cr-1Mo鋼の荷重-変位線図の一例と
 関連特性値模式図
 (Ref.21より引用)

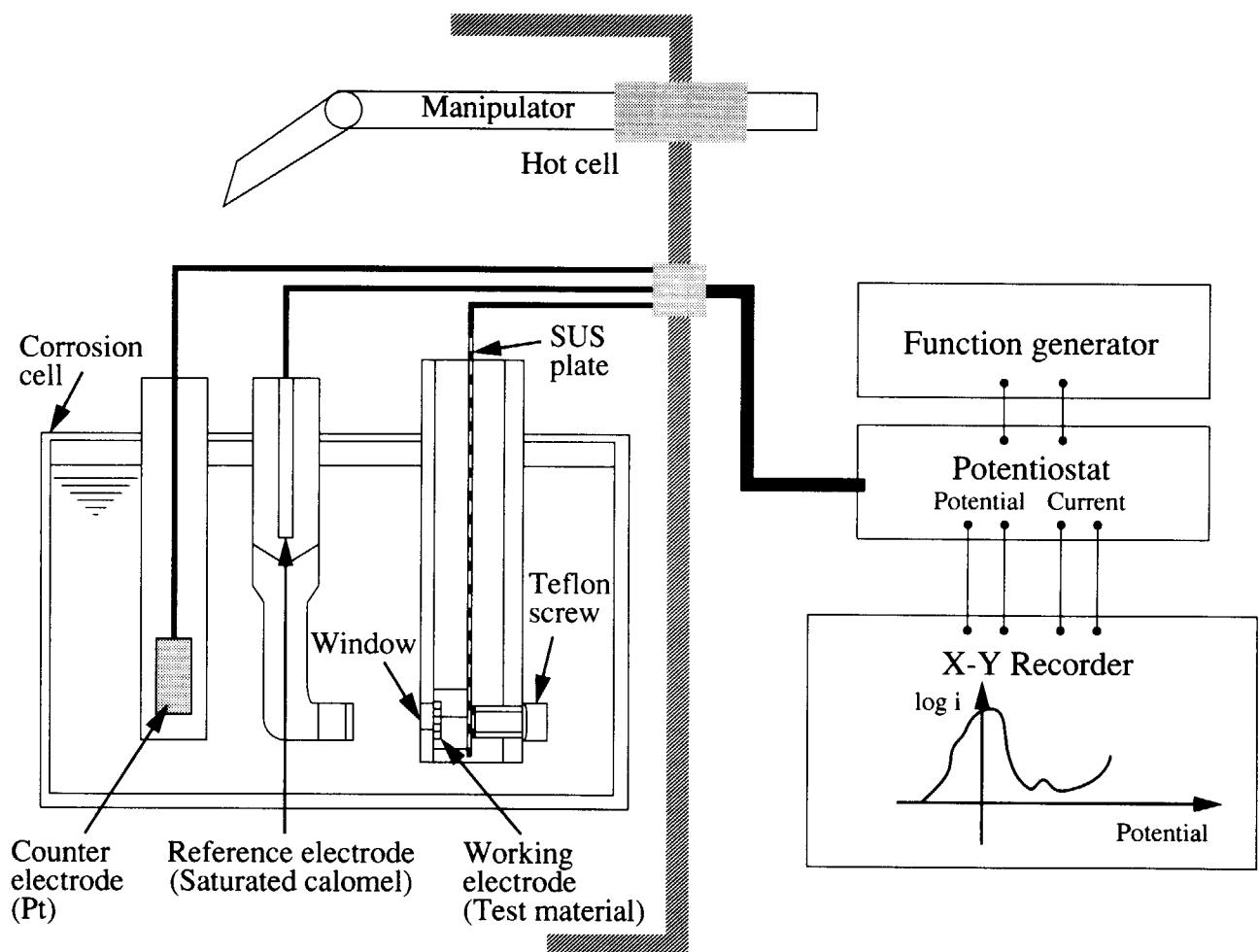


Fig.27 照射後試験用電気化学腐食試験装置の概要図

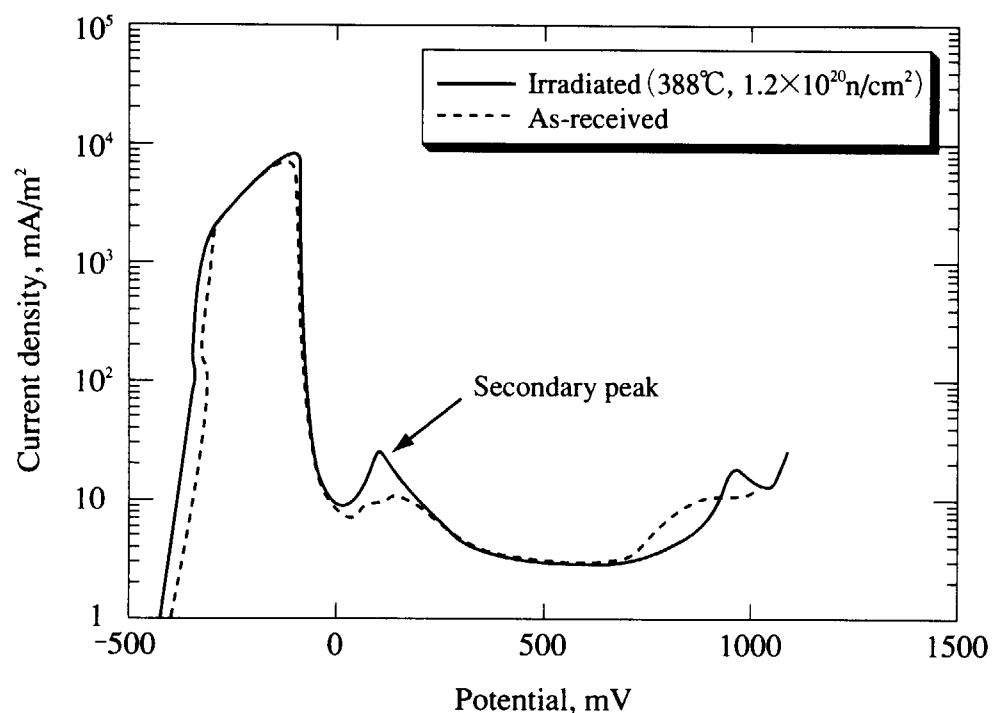
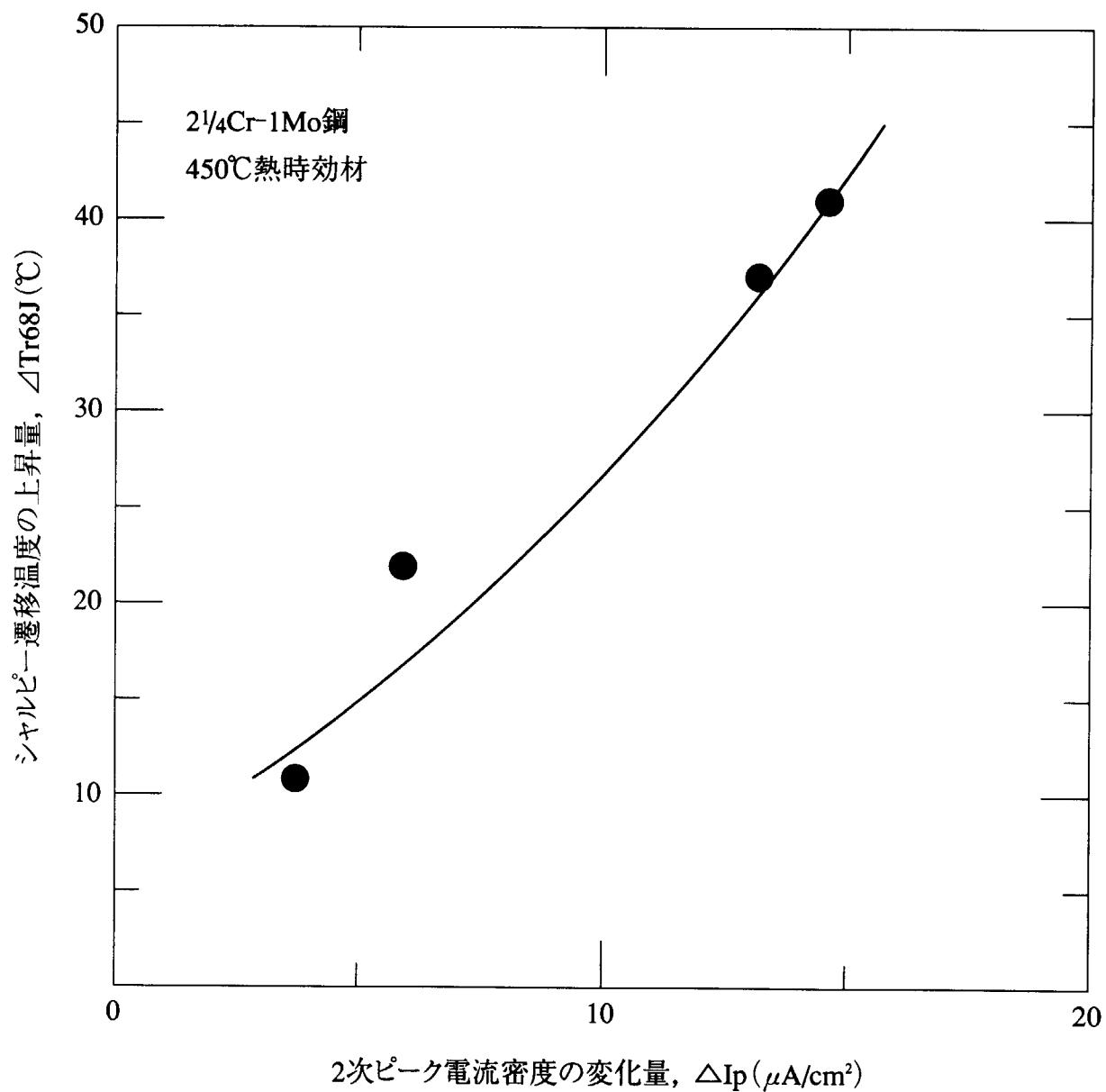


Fig.28 照射及び非照射 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼のアノード分極曲線
(Ref.26より引用)



熱時効材と受入材の140mV付近での2次ピーク電流密度値の差(ΔIp)と延性脆性遷移温度の上昇量は良好な相関関係を有している。すなわち, ΔIp の測定により、非破壊的に供用期間中の粒界脆化度が推定できることを意味している。

Fig.29 シャルピー遷移温度の上昇量とアノード分極曲線2次ピークの電流密度変化量の関係
 (「高温工学試験研究の現状(1991)」より引用)

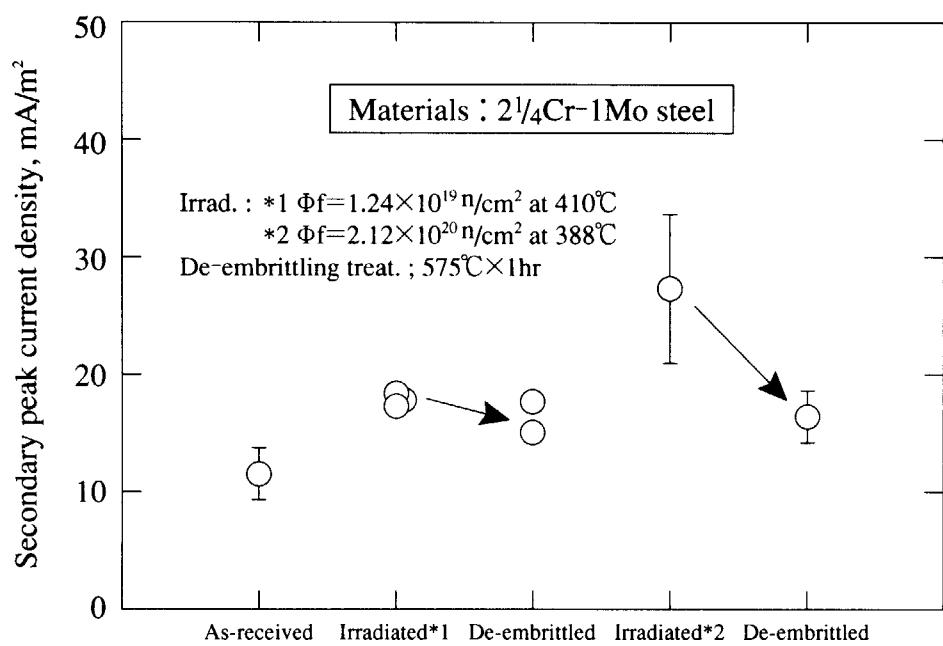


Fig.30 2^{1/4}Cr-1Mo鋼における中性子照射及び脱脆化熱処理によるアノード分極曲線2次ピークの変化
(Ref.26より引用)

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC開発理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665		1	2.20462
4.44822		0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal= 4.18605J(計量法)	
								= 4.184J(熱化学)	
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸		
9.80665		1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁸		
3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵			
4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁸			
1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹			
1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸			
1.60218×10 ¹⁹	1.63377×10 ²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ¹⁹	1			

放射能	Bq	Ci	Gy	rad		
					1	100
	1	2.70270×10 ⁻¹¹				
	3.7×10 ¹⁰	1	0.01	1		

照射線量	C/kg	R		
			1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1		

線量率	Sv	rem		
			1	100
	0.01	1		

(86年12月26日現在)

