

CMIR-5 及びMARICO-1 で照射した  
PNC-FMS鋼及びODSマルテンサイト鋼の  
照射後シャルピー衝撃特性評価  
(研究報告)

2002年12月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122 (代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2002

CMIR-5 及び MARICO-1 で照射した PNC-FMS 鋼及び ODS マルテンサイト鋼の  
照射後シャルピー衝撃特性評価  
(研究報告)

矢野康英<sup>1</sup>、吉武庸光<sup>1</sup>、阿部康弘<sup>1</sup>

要旨

実用化段階の高速炉炉心材料としては、耐スエリング性能の観点からフェライト系ステンレス鋼が有望である。そのためサイクル機構では、被覆管材として酸化物分散強化型鋼(Oxide Dispersion Strengthened; ODS) (12Cr フェライト系と 9Cr マルテンサイト系の 2 鋼種を開発)を、ラップ管材としては高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-Ferritic/Martensitic Steel; PNC-FMS)をそれぞれ候補材料として開発を進めている。

フェライト系ステンレス鋼を高速炉炉心材料として適用するうえでは、中性子照射に伴う材料の脆化が課題であり、その挙動評価が重要な評価項目となる。そこで、フェライト鋼の照射脆化の評価に資するために、「常陽」MK-II 炉心材料照射用反射体 CMIR-5 及び温度制御型材料照射装置 MARICO-1 で照射した PNC-FMS 鋼(2WFK)と ODS マルテンサイト鋼 (H35)のミニチュアサイズ及びハーフサイズシャルピー衝撃試験を行い、両鋼の照射後衝撃特性を評価した。本試験を通して得られた主な結果は以下の通りである。

1. 本照射条件範囲 (最大照射量:  $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ , 温度範囲: 376~659°C) において、すべての 2WFK 照射材は、照射量より照射温度に依存して衝撃特性が変化した。すなわち、照射温度が 400~500°C では、顕著な衝撃特性の変化が見られなかったのに対し 659°C の照射材では明らかな衝撃特性の低下が観察された。
2. 熱時効材の結果を考慮すると、照射温度 495°C の 2WFK 照射材の衝撃特性に顕著な変化が見られなかったのは、熱時効による改善と照射による低下が相殺されたためと考えられる。また、照射温度 659°C の 2WFK 照射材では、650°C 熱時効材の衝撃特性と比較して、顕著な低下が見られた。これは、熱時効効果に加えて照射誘起析出や照射促進拡散等の照射による組織変化に起因するものと推察される。このような 2WFK 衝撃特性変化は、熱時効及び照射に伴う組織変化挙動、特に析出挙動から解釈できると考えられる。
3. H35 では、シャルピー衝撃特性に著しい異方性が見られなかった。これは、 $\alpha/\gamma$  変態を利用した組織改善を図った効果であると考えられる。また、非照射材と比較して、本試験条件範囲では照射に伴う衝撃特性の低下と動的降伏応力の変化が非常に小さかったことから、本 ODS 鋼は照射硬化が小さく、照射後衝撃特性に優れていることが分かった。

---

<sup>1</sup>核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部  
照射材料試験室

The Evaluation of Irradiation Effect on Charpy Impact Properties of the PNC-FMS and the ODS  
Martensitic Steel Irradiated in JOYO/CMIR-5 and MARICO-1

Yasuhide Yano<sup>1</sup>, Tsunemitsu Yoshitake<sup>1</sup>, Yasuhiro Abe<sup>1</sup>

Abstract

The effect of fast neutron irradiation on impact properties of the PNC-FMS (2WFK) and ODS martensitic steel (H35), which were irradiated in the JOYO/CMIR-5 and MARICO-1, were investigated, because it was well known that irradiation-embrittlement was one of the most important issue to apply these ferritic steels to FBR core materials. The post irradiation half-sized and miniaturized Charpy impact tests were carried out to understand the impact properties of these ferritic steels.

The results obtained in this study are as follows:

1. In all irradiated 2WFK specimens, the impact properties depended on irradiation temperature rather than neutron fluence under these irradiation conditions. The impact properties of 2WFK specimens irradiated at the temperature range of 400 to 500°C almost scarcely change, however, those of 2WFK specimens irradiated at 659°C obviously decreased.
2. The impact properties of 2WFK specimens irradiated at 495°C were similar to those of as-received 2WFK specimen. This indicates that the effects of thermal aging improvement and irradiation degradation canceled each other. Moreover, the impact properties of 2WFK specimens irradiated at 659°C decreased more remarkably than those of thermal aged specimens at 650°C. It is suggested that these 2WFK impact properties seemed to be understood by microstructure behaviors, especially precipitation behaviors, by means of irradiation and thermal aging.
3. It is suggested that the anisotropy of H35 ODS steel was considerably improved by the  $\alpha/\gamma$  phase transformation, and H35 specimens had superior impact properties even after irradiation because no radiation hardening and no change of impact properties under these irradiation conditions were observed.

---

<sup>1</sup>Materials Monitoring Section, Fuels and Materials Division, Irradiation Center, Oarai Engineering Center, JNC.

CMIR-5 及び MARICO-1 で照射した PNC-FMS 鋼及び ODS マルテンサイト鋼の  
照射後シャルピー衝撃特性評価  
(研究報告)

目次

1. 緒言	1
2. 供試材	2
2.1 PNC-FMS 鋼(2WFK)	2
2.2 ODS マルテンサイト鋼(H35)	2
3. 照射試験	3
3.1 CMIR-5	3
3.2 MARICO-1	3
4. 試験方法 (シャルピー衝撃試験)	3
4.1 衝撃試験片	3
4.2 ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験	4
4.3 ハーフサイズシャルピー衝撃試験	4
5. 試験結果	4
5.1 2WFK シャルピー衝撃試験結果	4
5.1.1 CMIR-5 照射材ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験結果	4
5.1.2 MARICO-1 照射材ハーフサイズシャルピー衝撃試験結果	5
5.1.3 熱時効材ハーフサイズシャルピー衝撃試験結果	5
5.2 H35 シャルピー衝撃試験結果	6
5.2.1 CMIR-5 照射材ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験結果	6
6. 考察	6
6.1 PNC-FMS 鋼(2WFK)の衝撃特性	6
6.1.1 2WFK の寸法効果	6
6.1.2 2WFK の衝撃特性と組織相関	7
6.2 ODS マルテンサイト鋼(H35)の衝撃特性に及ぼす照射の影響	9
6.3 ODS 鋼の衝撃特性と組織改善の効果	9
7. 結言	10
謝辞	11
参考文献	11

表目次	
表 2.1.1	2WFK の化学成分(wt%)-----14
表 2.1.2	61FS の化学組成(wt%)-----14
表 2.2.2	H35 の化学成分(wt%)-----14
表 4.1.1	2WFK シャルピー衝撃試験片の照射条件-----14
表 4.1.2	H35 シャルピー衝撃試験片の照射条件-----14
表 5.1.1	CMIR-5 照射 2WFK のミニチュアシャルピー衝撃試験結果 (照射温度 378°C,照射量 $0.57 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )-----15
表 5.1.2	CMIR-5 照射 2WFK のミニチュアシャルピー衝撃試験結果 (照射温度 566°C,照射量 $0.53 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )-----16
表 5.1.3	CMIR-5 照射 2WFK の USE と DBTT の結果-----17
表 5.1.4	MARICO-1 照射 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験結果 (照射温度 495°C,照射量 $0.87 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )-----17
表 5.1.5	MARICO-1 照射 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験結果 (照射温度 659°C,照射量 $0.55 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )-----18
表 5.1.6	MARICO-1 照射 2WFK の USE と DBTT の結果-----18
表 5.1.7	400°C熱時効 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験結果-----19
表 5.1.8	500°C熱時効 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験結果-----20
表 5.1.9	650°C熱時効 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験結果-----21
表 5.1.10	熱時効 2WFK の USE と DBTT の結果-----22
表 5.2.1	CMIR-5 照射 H35-L 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験結果 (照射温度 376°C,照射量 $1.3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )-----23
表 5.2.2	CMIR-5 照射 H35-L 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験結果 (照射温度 521°C,照射量 $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )-----24
表 5.2.3	CMIR-5 照射 H35-T 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験結果 (照射温度 376°C,照射量 $1.3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )-----25
表 5.2.4	CMIR-5 照射 H35-L 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験結果 (照射温度 521°C,照射量 $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )-----26
表 5.2.5	CMIR-5 照射 H35 の USE と DBTT の結果-----27
図目次	
図 4.1.1	シャルピー衝撃試験片模式図-----28
図 4.1.2	ODS マルテンサイト鋼シャルピー衝撃試験片採取方向の模式図-----28
図 5.1.1	CMIR-5 照射 2WFK のミニチュアシャルピー衝撃試験の 吸収エネルギーと試験温度の関係-----29
図 5.1.2	MARICO-1 照射 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験の 吸収エネルギーと試験温度の関係-----29
図 5.1.3	熱時効 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと 試験温度の関係 (保持時間 519h)-----30
図 5.1.4	熱時効 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと 試験温度の関係 (保持時間 3000h)-----30

図 5.2.1	H35 受入材のミニチュアシャルピー衝撃試験の 吸収エネルギーと試験温度の関係	31
図 5.2.2	CMIR-5 照射 H35-L 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験の 吸収エネルギーと試験温度の関係	31
図 5.2.3	CMIR-5 照射 H35-T 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験の 吸収エネルギーと試験温度の関係	32
図 6.1.1	USE と Bb の関係(2WFK 受入材)	32
図 6.1.2	DBTT と BKt の関係(2WFK 受入材)	33
図 6.1.3	(Bb) <sup>1.43</sup> により規格化した USE (2WFK)	33
図 6.1.4	BKt により規格化した DBTT (2WFK)	34
図 6.1.5	500℃近傍の照射と時効 2WFK ハーフサイズシャルピー衝撃試験の 吸収エネルギーと試験温度の関係の比較	34
図 6.1.6	650℃近傍の照射と時効 2WFK ハーフサイズシャルピー衝撃試験の 吸収エネルギーと試験温度の関係の比較	35
図 6.2.1	H35-L 方向の試験温度と降伏応力の関係	35
図 6.2.2	H35-T 方向の試験温度と降伏応力の関係	36
図 6.3.1	H35 と 1DS 受入材の試験温度と吸収エネルギーの関係	36
図 6.3.2	H35 照射材(376℃, 1.3×10 <sup>26</sup> n/m <sup>2</sup> )の L 方向と T 方向の衝撃特性比較	37
図 6.3.3	H35 照射材(521℃, 1.8×10 <sup>26</sup> n/m <sup>2</sup> )の L 方向と T 方向の衝撃特性比較	37

## 1. 緒言

サイクル機構では、高速炉炉心材料としてこれまで以下の鋼種の開発に取り組んできた。

- ・ PNC316、改良オーステナイト鋼(PNC-1520、14Cr-Ni 鋼)、高 Ni 鋼
- ・ 高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-Ferrite/Martensite; PNC-FMS)
- ・ 酸化物分散強化型 (Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steel; ODS) 鋼

炉心材料については当初、原型炉「もんじゅ」(取出平均燃焼度 8 万 MWd/t) を対象として、加工条件や微量添加元素を調整した改良 SUS316 鋼(PNC316 鋼)を開発した。さらに次のステップとして、実証炉から実用化段階を見通した材料開発を進めている。

高速炉の実用化に向けては、経済性向上の観点からより高い燃焼度を達成することが必要となっている。そのため、FBR サイクル実用化戦略調査研究(以下、FS)では、取出平均燃焼度を 15 万 MWd/t に設定している。

この場合の高速中性子照射量は、約 250dpa( $\sim 5.0 \times 10^{27} \text{n/m}^2$ )となる。そのため、これまでに開発した PNC316 鋼等のオーステナイト系ステンレス鋼では、耐スエリング性能の限界から、FS で設定した高燃焼度を達成することが極めて困難である。

実用化段階の高燃焼度を実現する炉心材料としては、耐スエリング性能の観点からフェライト系ステンレス鋼が有望である。そのためサイクル機構では、PNC-FMS 鋼さらには ODS 鋼 (12Cr フェライト系と 9Cr 系マルテンサイト系の 2 鋼種) の研究開発を進めている。

PNC-FMS 鋼に加えて ODS 鋼の開発に取り組んだのは、前者の高温強度が実用化段階の被覆管で想定されている使用条件 ( $\sim 700^\circ\text{C}$ ) を満足しないためである。そのため、PNC-FMS 鋼については現在、実用化段階のラップ管 ( $\sim 550^\circ\text{C}$ ) として適用することが考えられている。

ODS 鋼は、耐スエリング性に優れたフェライトの母材鋼に酸化物 ( $\text{Y}_2\text{O}_3$  等) を微細分散させて高温強度の改善を図ったものである。そのため PNC-FMS 鋼では適用が困難である被覆管への適用材料として期待されている。

一方、これらのフェライト系ステンレス鋼を高速炉炉心材料として適用した場合、中性子照射に伴う材料の脆化の生じることが知られている。そのため、フェライト系ステンレス鋼の照射脆化の挙動評価が重要な研究課題となる。

そこで、本研究では、フェライト系ステンレス鋼炉心材料の照射脆化の挙動評価に資することを目的として、「常陽」MK-II 炉心材料照射用反射体 CMIR-5 及び温度制御型材料照射装置 MARICO-1 で照射した PNC-FMS 鋼と ODS マルテンサイト鋼のミニチュアサイズ及びハーフサイズ試験片を用いて、照射後シャルピー衝撃試験を行った。



## 2. 供試材

### 2.1 PNC-FMS 鋼(2WFK)

PNC-FMS 鋼は、フェライト/マルテンサイト鋼であるため、オーステナイト鋼に比べて耐スエリング性が非常に優れている。それに加え、Mo, W の固溶強化型元素及び Nb, V の析出強化元素を添加することにより、高温強度を向上させている点が特徴である。

2WFK は、平成 3 年度に(株)神戸製鋼所にて製造された PNC-FMS 鋼で、基本目標成分は、11Cr-0.5Mo-2W-0.05Nb-0.2V である。また、本供試材は、サイクル機構が開発した PNC-FMS 鋼の最新鋼種で、実用化ラップ管の最有力候補材料である。表 2.1.1 にその化学組成を示す。

本材料については、まず真空高周波炉溶解してインゴットを作製し、鍛造加工後 1100℃に加熱、熱間圧延を施した後、さらに最終処理として焼ならし処理(1050℃×1.5h, AC)と焼戻し処理(700℃×1h, AC)を施し、機械加工により試験片とした。

今まで開発した PNC-FMS 鋼は、被覆管への適用も検討されていた。そのため、化学成分は同じであるが、最終熱処理条件の異なる鋼種が存在する。6.1 節で示した 61FS は、FFTF/MOTA(Fast Flux Test Facility, Material Open Test Assembly)で照射した被覆管であり、クリープ強度が重要であるため「高温焼ならし(1100℃×10min)と高温焼戻し(780℃×1.0h)」の最終熱処理を行った。なお、61FS の組成を基本とするものについて、PNC-FMS 鋼としている。61FS の化学組成を表 2.1.2 に示す。

### 2.2 ODS マルテンサイト鋼(H35)

ODS 鋼の特徴は、スエリング抵抗性に優れたフェライト鋼あるいはマルテンサイト鋼中に酸化物粒子( $Y_2O_3$  等)を微細分散して、高温強度の飛躍的改善を図っている点である。

H35 は、平成 4 年度に(株)神戸製鋼所にて製造された ODS マルテンサイト鋼で、基本目標成分は Fe-0.18C-11Cr-1.5W-1Ni-0.5Ti-1.0 $Y_2O_3$  である。その特徴としては、ODS フェライト鋼被覆管初期試作材(1DS と 1DK)で課題となった強度異方性、強い集合組織を改善するために、 $\alpha/\gamma$  変態を利用して共析温度(約 910℃)以上でオーステナイト化することにより、圧延方向に伸長した結晶粒組織の等軸化を狙ったことがあげられる。

本材料については、まず化学成分 Fe-0.18C-11Cr-1.5W-1Ni の母合金粉末を真空溶解及び Ar ガスアトマイズにより作製した。この粉末に  $Y_2O_3$  粉末と Ti 粉末を所定量混合して、アトライターを用いてメカニカルアロイング(MA)を施し、合金粉末を作製した。この粉末を軟鋼製のカプセルに充填し脱気・密封処理した後、温度 1200℃で熱間押出を行い固形化し、組織調整のため焼ならし処理(1050℃×1h, AC)と焼戻し処理(760℃×1h, AC)を施し、機械加工により試験片とした。表 2.2.1 に H35 の化学組成を示す。

### 3. 照射試験

材料照射試験は、「常陽」MK-II 炉心に装荷された CMIR-5 と MARICO-1 にて行った。2WFK と H35 のミニチュアサイズ試験片は CMIR-5 を、2WFK のハーフサイズ試験片は MARICO-1 を用いて照射した。

#### 3.1 CMIR-5

CMIR-5 は、「常陽」MK-II 炉心第 29,31,33 及び 34 サイクルで照射された(炉心装荷日:平成6年7月27日、取り出し日:平成12年7月3日)。装荷位置はそれぞれ 3D2(29cy), 3A2(31cy), 3A1(33cy), 3E3(34cy)であった。CMIR-5 の最大高速中性子照射量は  $4.19 \times 10^{26} \text{n/m}^2 (E>0.1\text{MeV})$ 、EFPD(全出力換算日)は 216.004 であった<sup>1)</sup>。

なお、照射温度については、TED 温度から再評価を行った数値としている。TED による再評価温度と設計温度の誤差範囲は  $-24 \sim 26^\circ\text{C}$  であった。

#### 3.2 MARICO-1

MARICO-1 は、「常陽」MK-II 炉心第 29~32 サイクルで照射され、装荷位置は全て 3E3 であった(炉心装荷日:平成6年6月16日、取り出し日:平成10年7月15日)。MARICO-1 の最大高速中性子照射量は  $2.38 \times 10^{26} \text{n/m}^2 (E>0.1\text{MeV})$ 、EFPD は 209.577 であった<sup>2)</sup>。

### 4. 試験方法 (シャルピー衝撃試験)

#### 4.1 衝撃試験片

シャルピー衝撃試験には、ハーフサイズ及びミニチュアサイズ試験片を用いた。ハーフサイズ試験片は、JIS 規格準拠である。それぞれの寸法及びその形状の模式図を図 4.1.1 に示す。表 4.1.1~4.1.2 に各シャルピー衝撃試験片の照射条件を示した。

なお、ODS マルテンサイト鋼では、衝撃特性に及ぼす強度異方性の影響を評価するために、次の 2 つの採取方向で試験片を作製した。

##### ①L 方向(Longitudinal direction)

板材圧延方向に対して試験片長手方向が平行、つまりノッチが圧延方向に対して垂直に入る。

##### ②T 方向(Transverse direction)

板材圧延方向に対して試験片長手方向が垂直、つまりノッチが圧延方向に対して平行に入る。

図 4.1.2 に試験片採取方向の模式図を示す。

#### 4.2 ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験

本衝撃試験は、東北大学金属材料試験研究所附属材料試験炉利用施設の計装化ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験機を用いて実施した。同衝撃試験機は、電気油圧式の高速度引張疲労試験機（ハイドロパルス試験機、(株)東京衡機製造所製）の一部を衝撃試験用に改造し<sup>3)</sup>、タップの先端に荷重検出用の圧電素子（ロードワッシャー、KISTLER 社製）を取付けたものである。試験に際しては、アンビル間のスパンは 12.5mm、試験温度は-130℃～100℃とした。熱媒体と使用温度範囲は、次の通りである。

①-130℃～室温：液体窒素とイソペンタンの混合溶液

②室温～100℃：シリコンオイル

試験実施にあたっては、試験片の周囲に熱媒体が注がれてから衝撃荷重を負荷するまでの時間は 10 分程度とし、その間熱電対を接触させ、試験片温度を常時モニターした。

なお、本ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験は、東北大学への平成 12 年度の委託研究及び平成 13 年度～15 年度の先行基礎工学研究として実施したものである。

#### 4.3 ハーフサイズシャルピー衝撃試験

MARICO-1 で照射したハーフサイズ試験片については、大洗工学センター照射材料試験施設試験セルの計装化自動シャルピー試験機(JT トーシ(株)製,AHCIEM-30-01 型,容量 300J)を用いて、シャルピー衝撃試験を実施した。試験方法は、JIS Z2242「金属材料衝撃試験方法」に準拠した。試験温度は、-100℃～200℃とした。熱媒体と使用温度範囲は次の通りである。

①-100℃～0℃：エチレンと液体窒素の混合溶液

②室温～200℃：シリコンオイル

なお、2WFK ハーフサイズシャルピー試験については、MARICO-1 照射材との比較として熱時効材についても衝撃試験を実施した。

### 5. 試験結果

#### 5.1 2WFK シャルピー衝撃試験結果

##### 5.1.1 CMIR-5 照射材ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験結果

ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験の結果を表 5.1.1 と表 5.1.2 に、試験温度と吸収エネルギーの関係を図 5.1.1 に示す。本報告で、延性—脆性遷移温度 (Ductile-Brittle Transition Temperature; 以下、DBTT) は、吸収エネルギーが上部棚エネルギー (Upper Shelf Energy; 以下、USE) の 1/2 となるときの温度とした。図 5.1.1 より求めた USE と DBTT の結果を表 5.1.3 に示す。

USE は、照射によっていずれの場合も約 9%の低下を示した。DBTT の変化量( $\Delta$ DBTT)は、“照射温度 378℃,照射量  $0.57 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ”では 36℃、“照射温度 566℃,照

射量  $0.53 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” では  $20^\circ\text{C}$  あった。

全体として、本照射条件範囲では受入材と比較して顕著な衝撃特性の低下は確認されなかった。

### 5.1.2 MARICO-1 照射材ハーフサイズシャルピー衝撃試験結果

ハーフサイズシャルピー衝撃試験結果を表 5.1.4 と表 5.1.5 に、試験温度と吸収エネルギーの関係を図 5.1.2 に示す。図 5.1.2 より求めた USE と DBTT の結果を表 5.1.6 に示す。

USE は、“照射温度  $659^\circ\text{C}$ , 照射量  $0.55 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” では約 43% と大幅に低下し、“照射温度  $495^\circ\text{C}$ , 照射量  $0.87 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” では約 5% 程度の低下を示した。また、 $\Delta$ DBTT は、“照射温度  $659^\circ\text{C}$ , 照射量  $0.55 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” において  $62.5^\circ\text{C}$  と大幅な高温側へのシフトをし、“照射温度  $495^\circ\text{C}$ , 照射量  $0.87 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” では、 $-11.5^\circ\text{C}$  と低温側にシフトした。

全体として、照射温度  $659^\circ\text{C}$  では受入材と比較して衝撃特性の低下が確認されたが、照射温度  $495^\circ\text{C}$  ではむしろ衝撃特性が向上する傾向を示した。

### 5.1.3 熱時効材ハーフサイズシャルピー衝撃試験結果

照射材のデータには、熱時効による影響と照射そのものの影響が含まれる。そのため、照射材の熱時効による影響評価を目的として、熱時効材についてもハーフサイズシャルピー衝撃試験を行った。

熱時効温度は  $500^\circ\text{C}$  及び  $650^\circ\text{C}$  とした。この温度は、MARICO-1 で照射したハーフサイズシャルピー衝撃試験片との比較のために照射温度と対応させて決定した。

また、これまでの PNC-FMS 鋼の熱時効試験では、低温側の衝撃試験結果が無い<sup>4)</sup>ことから、 $400^\circ\text{C}$  でも熱時効を行った。

また、熱時効時間については、 $3000\text{h}$  と  $519\text{h}$  とした。 $3000\text{h}$  というのは、過去の試験結果<sup>4)</sup>から、温度  $650^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$  において、その時間で時効効果が飽和するという知見が得られているからである。また、熱時効時間  $519\text{h}$  については、過去の試験結果<sup>4)</sup>より、USE は  $1000\text{h}$  までが顕著に変化することから決定した。

各時効温度におけるハーフサイズシャルピー衝撃試験結果を表 5.1.7～5.1.9 に、試験温度と吸収エネルギーの関係を時効時間ごとに図 5.1.3 と 5.1.4 に示す。両図より求めた USE と DBTT の結果を表 5.1.10 に示す。参考のために、破面観察の脆性破面率から DBTT を求め、その結果を同表に示した。

USE は、全ての熱時効条件で、受入材と比較して大きな変化は見られなかった。一方、 $\Delta$ DBTT は、熱時効温度  $400^\circ\text{C}$  ではほとんど変化せず、 $500^\circ\text{C}$  においてはむしろ低温側へシフトするという結果を示した。しかしながら、 $650^\circ\text{C}$  においては顕著な高温側へのシフトを示した。

受入材の衝撃特性と比較して、熱時効温度 400℃では衝撃特性の変化が確認されなかった。しかしながら、500℃では衝撃特性の向上、650℃では衝撃特性の低下が確認された。

## 5.2 H35 シャルピー衝撃試験結果

### 5.2.1 CMIR-5 照射材ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験結果

はじめに、H35 受入材のミニチュアサイズシャルピー衝撃試験による吸収エネルギーと試験温度の関係を図 5.2.1 に示す。H35 では、試験片の採取方向によって USE に違いが見られ、T 方向のほうが L 方向よりも高かった。また、DBTT は、T 方向が L 方向より低かった。

次に、H35 照射材の L 方向と T 方向それぞれのミニチュアサイズシャルピー衝撃試験結果を表 5.2.1~5.2.4 に、試験温度と吸収エネルギーの関係を図 5.2.2 と 5.2.3 に示す。また、図 5.2.1~5.2.3 より求めた USE と DBTT の結果を表 5.2.5 に示す。

L 方向における USE は、“照射温度 376℃,照射量  $1.3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” で、約 10%程度低下し、“照射温度 521℃,照射量  $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” で約 12%程度の上昇した。T 方向の USE は、“照射温度 376℃,照射量  $1.3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” で約 25%程度低下し、“照射温度 521℃,照射量  $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” で約 5%程度の上昇した。

また、L 方向の  $\Delta$ DBTT は、“照射温度 376℃,照射量  $1.3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” で 21℃、“照射温度 521℃,照射量  $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” で 36℃上昇した。一方、T 方向の  $\Delta$ DBTT は、“照射温度 376℃,照射量  $1.3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” で 16℃、“照射温度 521℃,照射量  $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” で 15℃上昇した。

照射温度で比較すると、521℃では衝撃特性の低下がほとんど確認されなかったのに対して、376℃では衝撃特性の低下が見られた。

## 6. 考察

### 6.1 PNC-FMS 鋼(2WFK)の衝撃特性

#### 6.1.1 2WFK の寸法効果

シャルピー衝撃試験では、試験片サイズがミニチュアサイズやハーフサイズ等多々あることから、各試験片の USE と DBTT の直接的な比較は非常に困難である。これまでシャルピー衝撃試験片の寸法効果に関する研究が数多くなされてきており<sup>5)~22)</sup>、今回供試材として用いた PNC-FMS 鋼についても、栗下や上平らにより受入材と熱時効材の寸法効果の評価が進められている。

今回は、CMIR-5 と MARICO-1 で照射したミニチュアサイズとハーフサイズ試験片の衝撃特性、特に USE と DBTT を同一規格で比較するために、上平らの求めた 2WFK の規格化方法<sup>4)</sup>を踏襲して評価した。なお、USE と DBTT の両方について、これまで

の 2WFK 受入材試験結果に今回の非照射材試験結果を加え、最小二乗法によりデータの再評価を行った。

USE と DBTT の規格化因子算出の再評価をそれぞれ図 6.1.1 と図 6.1.2 にそれぞれ示す。この再評価より求めた規格化因子は、DBTT と USE のそれぞれで「 $(Bb)^{1.43}$ 」と「 $DBTT-116\log_{10}(BKt)$ 」であった。規格化因子の B 及び b は、図 4.1.1 に示した試験片の寸法であり、Kt は、弾性応力集中係数を示している。USE と DBTT の規格化を行った結果を図 6.1.3 と図 6.1.4 に示す。両図の規格した値には、若干のばらつきがある。しかし、受入材の規格化した値のばらつき範囲を考慮に入れると、寸法依存性によらず評価できると推察される。

図 6.1.3 と図 6.1.4 より、2WFK の USE と DBTT については、照射材と熱時効材とともに概ね 600°C 未満では顕著な変化は確認されなかった。しかしながら、600°C 以上では照射材、熱時効材ともに顕著な変化が確認された。USE と DBTT は、600°C 近傍から顕著な変化が生ずると推察される。また、参照のために示した熱時効材のミニチュアサイズの結果<sup>23)</sup>は、概ねハーフサイズの熱時効材と同様の傾向を示している。

このことから、ミニチュアサイズの照射材もハーフサイズの照射材と同様に 600°C 近傍で顕著な変化が生ずると考えられる。今回の CMIR-5 及び MARICO-1 の照射範囲においては、2WFK 照射材の衝撃特性変化は照射量よりむしろ照射温度に依存して変化を示すことが分かった。

### 6.1.2 2WFK の衝撃特性と組織変化

2WFK の衝撃特性変化は、微細組織変化挙動と関連があると考えられる。照射材では、照射効果だけでなく熱時効効果も生じている。そこで、2WFK ハーフサイズ試験片では、照射温度近傍の熱時効を行うことにより熱時効効果を示し、照射材の熱時効効果と照射効果を明確にした。以下、2WFK ハーフサイズシャルピー衝撃試験の熱時効材と照射材の結果を用いて考察を行った。

MARICO-1 による“照射温度 659°C, 照射量  $0.55 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ”の照射条件では顕著な衝撃特性の低下が確認された。一方、“照射温度 495°C, 照射量  $0.87 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ”では受入材と比較してほとんど変化がないものの僅かな DBTT の低下、つまり僅かな衝撃特性の向上が認められた。さらに、熱時効材の衝撃特性においても、400°C では低下が認められなかったのに対して、500°C では向上、650°C では顕著な低下が確認された。これらの照射材と熱時効材の同一温度における衝撃特性の違いを明確にするため、変化が確認された 500°C 近傍及び 650°C 近傍の試験温度と吸収エネルギーの関係をそれぞれ図 6.1.5 と図 6.1.6 に示す。

図 6.1.5 より、受入材と比較して 500°C 近傍の熱時効材の DBTT は低温側へシフトしていることが分かった。また、照射材の DBTT も僅かに低温側へシフトしている。熱時効材の DBTT が変化したことから、2WFK の受入材の組織は、熱時効に伴い完全な

調質状態に近づくように変化したと推察される。

一般的に、熱時効及び照射により衝撃特性の低下、つまり DBTT の高温側へのシフトの生じることが知られている。しかしながら、“照射温度 495°C, 照射量  $0.87 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” の照射材では DBTT の低温側へのシフトが確認された。この照射材の結果は、熱時効での改善効果が、照射に起因した衝撃特性の低下と相殺したことにより現れていると推察される。このような照射温度 500°C 近傍での DBTT の低温側へのシフトは、核融合炉の構造材料の候補材として開発されたフェライト鋼である JLM 鋼でも析出物の形成に起因して生じていることが報告されている<sup>24)</sup>。

図 6.1.6 から分かるように、650°C の熱時効材では受入材と比較して DBTT が高温側へシフトした。“照射温度 659°C, 照射量  $0.55 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ” の照射材では、熱時効材と比較して、さらに顕著な DBTT シフトと USE の低下が確認された。このような衝撃特性の低下は、熱時効に加え照射による微細組織の変化によるものと推察される。

同じ PNC-FMS 鋼である 61FS において、温度 670°C の長時間熱時効(12000, 24000h) で  $M_{23}C_6$  析出物の粗大化と  $Fe_2W$  型 Laves 相の析出が確認されると同時に、ラス境界の消失が観察されている<sup>25)</sup>。したがって、2WFK 熱時効材でも同様の組織変化が生じ、衝撃特性が低下していると示唆される。

また、照射後の衝撃特性の低下は、 $Fe_2W$  型の Laves 相や  $M_{23}C_6$  析出物等が、照射促進拡散により加速度的に粗大化あるいは凝集することにより生じていると推察される。他鋼種の析出物の挙動において、0.3wt% 以上の Ni を含むマルテンサイト鋼 (HT9, CRM12, FV448 等) を照射した際、 $M_{23}C_6$  粒が照射中に一部溶解することにより  $M_6C$  相に変化するという報告がある<sup>26)~28)</sup>。PNC-FMS 鋼でも、同様の析出物が生じていると推察される。

さらに、61FS の高温領域照射において、照射促進拡散等の影響で  $\delta$  フェライト相の析出粗大化が観察されている。また、605°C 以上の高温照射では 12000h 以内でラスマルテンサイト組織の回復と結晶粒の粗大化が生じ、670°C では同組織が完全に消失することが観察されている<sup>25)</sup>。2WFK においても、61FS と同様の析出物の粗大化及びラスマルテンサイト組織の消失が示唆される。

以上の 61FS や JLM 鋼等に関する評価結果を考慮すると、本 2WFK 照射材(照射温度 659°C, 照射量  $0.55 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )で確認された顕著な衝撃特性の低下は、照射促進拡散による析出物の粗大化あるいは凝集と照射誘起析出及びラスマルテンサイト組織の消失に起因しているものと推察される。

現状は、2WFK の熱時効材及び照射材の微細組織データがほとんどないことから、今後は、熱時効及び照射下での析出挙動変化を微細組織観察と破面観察からとらえることにより、衝撃特性と組織との相関性を明確にしていく必要がある。

## 6.2 ODS マルテンサイト鋼(H35)の衝撃特性に及ぼす照射の影響

H35 では、“照射温度 521°C,照射量  $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ”において衝撃特性の顕著な低下は確認されなかったのに対して、“照射温度 376°C,照射量  $1.3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ ”では、受入材と比較して衝撃特性の低下が見られた。このことは、この照射範囲では照射量よりむしろ照射温度に依存して衝撃特性が変化することを意味している。この照射温度依存性は、2WFK と同様の傾向であり、照射量に大差がないことから、今回の照射では照射効果より熟時効効果の作用が大きく、500°C近傍では受入材の調質と比較して完全な調質に近づいたことから衝撃特性変化が小さかったと考えられる。

今回の衝撃試験では、計装化シャルピー衝撃試験を用いていることより、降伏応力による強度上昇（照射硬化）を評価した。図 6.2.1 と図 6.2.2 にそれぞれ H35 の L 方向と T 方向の降伏応力と試験温度の関係を示す。

図 6.2.1 と図 6.2.2 より H35 では、L 方向と T 方向の両方向において、照射材と非照射材で降伏応力に差は確認されなかった。このことから、H35 中の微細な酸化粒子が安定に照射下でも存在するため、点欠陥消滅場所としての有効なシンクとして働き、ODS 鋼の照射硬化は小さいと推察された。

H35 は、照射前後で顕著な衝撃特性の変化はなく、本照射条件範囲では衝撃特性に優れていると言える。

## 6.3 ODS 鋼の衝撃特性と組織改善の効果

図 6.3.1 に、H35 と初期試作 ODS 鋼である 1DS 受入材の試験温度と吸収エネルギーの関係を示す<sup>29),30)</sup>。初期試作 ODS 鋼(1DS)では、全体として管軸方向に長く伸長したサブグレインから成る竹状組織を有することから、図 6.3.1 に示されるような試験片採取方向に起因したシャルピー衝撃特性の USE に関して強度異方性を有している。しかしながら、H35 では、1DS で見られた USE の顕著な強度異方性は確認されなかった。これは、2.2 節で述べたように、 $\alpha/\gamma$  変態を利用し結晶粒の等軸化を図った効果によると推察される。また、1DS では L と T 方向で DBTT に差が生じていないのに対して、H35 では顕著な差が生じていた。H35 の試験片採取方向によって DBTT の差が生じている理由については、今回明らかにすることができなかった。

図 6.3.2 と図 6.3.3 に、各試験温度における H35 の L 及び T 方向の照射後シャルピー衝撃試験の試験温度と吸収エネルギーの関係を示す<sup>29),30)</sup>。

H35 では、照射後においても強度の異方性は、確認されなかった。 $\alpha/\gamma$  変態を利用した組織改善の効果は、照射前後の衝撃特性の改善にも有効であると考えられる。



## 7. 結言

CMIR-5 及び、MARICO-1 で照射した 2WFK と H35 試験片について、ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験及びハーフサイズシャルピー衝撃試験を実施し以下の結論を得た。

1. 本照射条件範囲において、すべての 2WFK 照射材は、照射量より照射温度に依存して衝撃特性が変化した。すなわち、照射温度が 400~500℃では、顕著な衝撃特性の変化が見られなかったのに対し 659℃の照射材では明らかな衝撃特性の低下が観察された。
2. 熱時効材の結果を考慮すると、照射温度 495℃の 2WFK 照射材の衝撃特性に顕著な変化が見られなかったのは、熱時効による改善と照射による低下が相殺されたためだと考えられる。また、照射温度 659℃の 2WFK 照射材では、650℃熱時効材の衝撃特性と比較して、顕著な低下が見られた。これは、熱時効効果に加えて照射誘起析出や照射促進拡散等の照射による組織変化に起因するものと推察される。このような 2WFK 衝撃特性変化は、熱時効及び照射に伴う組織変化挙動、特に析出挙動から解釈できると考えられる。
3. H35 では、初期試作 ODS 鋼被覆管である 1DS で見られた試験片採取方向による衝撃特性の強度異方性は見られなかった。これは、H35 では $\alpha/\gamma$ 変態を利用し結晶粒組織の等軸化を図った効果によると考えられる。
4. 非照射材と比較して、本照射条件範囲では、照射に伴う衝撃特性の低下と動的降伏応力の変化が非常に小さかったことから、本 ODS 鋼は照射硬化が小さく、衝撃特性に優れていることが分かった。

以上のように、2WFK の衝撃特性の変化は、熱時効及び照射に伴う組織変化挙動、特に析出挙動から解釈できると推察される。今後は、析出挙動変化に着目し衝撃特性変化と組織相関性を明らかにしていく予定である。

## 謝辞

本件に関する 2WFK 照射材のハーフサイズシャルピー試験の実施に多大なるご尽力をいただきました検査開発株式会社 佐藤茂氏に深く感謝します。

また、TEM による微細組織構造解析に関する貴重なご助言を頂きました大洗工学センター 燃料材料試験部 照射材料試験室 赤坂尚昭副主任研究員、山下真一郎博士研究員、北海道大学研究生 岡桂一朗氏に深く感謝します。

ミニチュアサイズシャルピー衝撃試験は、東北大学金属材料研究所 栗下裕明助教授への平成 12 年度委託研究及び平成 13,14 年度先行基礎工学研究として実施されました。この場を借りて謝意を表します。

2WFK 熱時効材のハーフサイズシャルピーは、住友金属テクノロジー株式会社への委託試験として実施されました。この場を借りて謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 「常陽」照射試験サイクル報 (第 35 サイクル), 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター, JNC TN9440 2000-008, 2000 年 8 月
- 2) 「常陽」照射試験サイクル報 (第 32 サイクル), 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター, JNC TN9440 98-010, 1998 年 9 月
- 3) H. KAYANO, et al., "Study of Irradiation Embrittlement of Ferritic Steels by means of Impact Testing with Miniaturized Charpy V-Notch Specimens", Proc.2<sup>nd</sup> Japan-France Materials Science Seminar on Fundamental Aspects of Energy Materials, p23-32, (1991)
- 4) 上平明弘, 鵜飼重治, "高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS)の衝撃特性の評価", JNC TN9400 2000-035, 2000 年 3 月
- 5) 栗下裕明, "フェライト鋼照射材料のシャルピー衝撃特性と破壊靱性の評価(4)", JNC TJ9400 2000-016, 2000 年 3 月
- 6) 茅野秀夫, "衝撃試験の試験片形状効果に関する研究", PNC ZJ9601 90-001, 1990 年 2 月
- 7) 茅野秀夫, "衝撃試験の試験片形状効果に関する研究(2)", PNC ZJ9601 92-004, 1992

年 2 月

- 8) H. Kurishita et al., "Evaluation of the upper shelf energy for ferritic steels from miniaturized charpy specimen data", ASTM STP 1270, p775-789, (1996)
- 9) A. S. Kumar et al., "Recent improvements in size effects correlations for DBTT and upper shelf energy of ferritic steels", ASTM STP 1204, p47-61, (1993)
- 10) B. S. Loudon et al., "The influence of specimen size on charpy impact testing of unirradiated HT9", Journal of Nuclear Materials, vol155-157, p662-667, (1988)
- 11) W. L. Hu and D. S. Gelles, "Miniature charpy impact test results for the irradiated ferritic alloys HT9 and modified 9Cr-1Mo", Proceedings of topical conference on ferritic alloys for use in nuclear energy technologies, p631-645, (1983)
- 12) W. L. Hu and D. S. Gelles, "The ductile-to-brittle transition behavior of Martensitic steels neutron irradiated to 26 dpa", ASTM STP956, p83-97, (1987)
- 13) H. Kurishita et al. "Effects of v-notch dimensions on charpy impact test results for differently sized miniature specimens of ferritic steel", Materials Transactions, JIM, vol.34, p1042-1052, (1993)
- 14) H. Kurishita et al., "Charpy impact testing using miniature specimens and its application to the study of irradiation behavior of low-activation ferritic steels", Journal of nuclear materials, vol.179-181, p.425-428, (1991)
- 15) D. J. Alexander and R. L. Klueh, "Specimen size effects in charpy impact testing", ASTM STP 1072, p179-191, (1990)
- 16) W. R. Corwin and A. M. Hougland, "Effect of specimen size and material condition on the charpy impact properties of 9Cr-1Mo-V-Nb steel", ASTM STP 888, p.325-338, (1986)
- 17) F. Abe et al, "Effect of specimen size on the ductile-brittle transition behavior and the fracture sequence of 9Cr-W steels", Journal of nuclear materials, vol.150, p292-301, (1987)
- 18) M. A. Solomon and R. K. Nanstad, "On impact testing of subsize charpy v-notch type specimens", ASTM STP 1270, p.384-414, (1996)
- 19) M. A. Sokolov and D. J. Alexander, "An improved correlation procedure for subsize and full-size charpy impact specimen data." NUREG/CR-6379 ORNL-6888, (1997)
- 20) H. Kurishita et al. "Effect of specimen geometry on charpy impact test results for ferritic steel irradiated in JMTR", Sci. Rep. RITU, A40, p95-98, (1994)
- 21) 小林俊郎, "材料強靱学—材料の強度と靱性—",初版, アグネ技術センター
- 22) 小林俊郎, "計装化シャルピー衝撃試験における進歩", 材料, Vol.51, No.7,

pp771-779, July 2002

- 23) 茅野秀夫, 栗下裕明, “フェライト鋼照射材料試験 照射材料の評価試験(3)”, PNC ZJ9601 93-003, 1993年3月
- 24) Akihiko Kimura, et al., “Dependence of impact properties on irradiation temperature in reduced-activation Martensitic steels”, *Journal of Nuclear Materials*, vol.258-263, p1340-1344, (1998)
- 25) Keiichiro Oka et al., “Precipitation in Commercial Ferritic Steels under Neutron Irradiation and Long-Term Thermal Aging Conditions”, *21st Int. Symp. on Effect of Radiation on Materials* paper submitting
- 26) E. A. Little and L. P. Stoter, et al., *Effects of Irradiation on Materials: Eleventh Conference*, ASTM STP 782, Eds. H. R. Brager and J. S. Perrin (American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1982) 207.
- 27) P. J. Maziasz, et al., “Helium effects on void formation in 9Cr-1MoVNb and 12Cr-1MoVW irradiation in HFIR”, *Journal of Nuclear Materials*, vol.141-143, p929~937, (1986)
- 28) P. J. Maziasz and R. L. Klueh, in: *Effects of Irradiation on Materials: 14th International Symposium*, ASTM STP 1046, Vol. II, Eds. N. Packan, R. E. Stoller, and A. S. Kumar (American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990) 35.
- 29) 吉武庸光他, “CMIR-4、5で照射した酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼被覆管(中間加工材)の照射後強度特性評価”, 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター, JNC TN9400 2001-105, 2001年7月
- 30) T. Kuwabara et al., “Superior Charpy impact properties of ODS Ferritic steel irradiated in JOYO”, *Journal of Nuclear Materials*, vol.258-263, p1236~1241, (1998)

表 2.1.1 2WFK の化学成分(wt%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N	Fe
2WFK	0.12	0.05	0.60	0.003	0.001	0.39	11.09	0.49	2.08	0.21	0.047	0.049	bal.

表 2.2.2 61FS の化学成分(wt%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N	Fe
61FS	0.043	0.05	0.62	0.009	0.002	0.46	11.11	1.91	-	0.24	0.050	0.056	bal.

表 2.2.2 H35 の化学成分(wt%)

鋼種	C	Si	Mn	P	Cr	Ti	S	W	ExcessO*	N	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> **	Fe
H35	0.18	0.027	0.022	0.002	10.51	0.45	0.001	1.44	0.30	0.013	0.97	bal.

試験分析値

\*) (Excess O) = O - Y × 0.27

\*\*) (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = Y × 1.27

表 4.1.1 2WFK シャルピー衝撃試験片の照射条件

材料	鋼種	サイズ*	照射リグ	照射温度(°C)	照射量**	試験片本数
PNC-FMS 鋼	2WFK	ミニチュア	CMIR-5	378	0.57	10
				566	0.53	10
		ハーフサイズ	MARICO-1	495	0.87	6
				659	0.55	5

\*) ミニチュア(1.5mmH×1.5mmW×20mmL), ハーフサイズ(10mmH×5mm×55mmL)

\*\*) ×10<sup>26</sup>n/m<sup>2</sup>, E>0.1MeV

表 4.1.2 H35 シャルピー衝撃試験片の照射条件

材料	鋼種	サイズ*	照射リグ	照射温度(°C)	照射量**	試験片本数***
ODS マルテン サイト鋼	H35	ミニチュア	CMIR-5	376	1.3	20
				521	1.8	20

\*) ミニチュア(1.5mmH×1.5mmW×20mmL)

\*\*) ×10<sup>26</sup>n/m<sup>2</sup>, E>0.1MeV

\*\*\*) L方向とT方向でそれぞれ10個ずつ

表 5.1.1 CMIR-5 照射 2WFK のミニチュアシャルピー衝撃試験結果(照射温度 378°C, 照射量  $0.57 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )

鋼種	装荷位置	試験片 No.	照射量* $\times 10^{26} \text{n/m}^2$	照射温度 °C	試験温度 °C	降伏点荷重 N	降伏強度 GPa	最大荷重 N	脆性破壊 破壊開始 時の荷重 N	脆性破壊 破壊開始 時のたわみ 量 mm	全たわみ 量 mm	全吸収エ ネルギー J
2WFK	軸-2	L9NG1-10	0.57	378	-103	250.1	2.169	270.7	250.1	0.56	0.79	0.123
		L9NG1-9			-61	233.4	2.025	253.0	228.5	1.18	1.43	0.265
		L9NG1-8			-62	233.4	2.025	255.0	233.4	1.07	1.31	0.242
		L9NG1-7			-21	220.6	1.914	247.1	212.8	1.43	6.33	0.431
		L9NG1-6			-22	215.7	1.872	246.1	209.9	1.43	4.45	0.372
		L9NG1-5			20	209.9	1.820	237.3	-	-	8.73	0.608
		L9NG1-4			20	210.8	1.829	233.4	-	-	8.56	0.559
		L9NG1-3			60	198.1	1.718	227.5	-	-	8.60	0.598
		L9NG1-2			61	198.1	1.720	226.5	-	-	8.62	0.627
		L9NG1-1			101	190.2	1.650	220.6	-	-	8.69	0.647

\*) E>0.1MeV

表 5.1.1.2 CMIR-5 照射 2WFK のミニチュアシャルピー衝撃試験結果(照射温度 566°C, 照射量  $0.53 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )

鋼種	装荷位置	試験片 No.	照射量*	照射温度	試験温度	降伏点荷重	降伏強度	最大荷重	脆性破壊 破壊開始 時のたわみ量	全たわみ量	全吸収エネルギー
			$\times 10^{26} \text{n/m}^2$	°C	°C	N	GPa	N	mm	mm	J
2WFK	軸-13	L9NG2-10	0.53	566	-130	281.7	2.446	281.7	0.31	0.44	0.069
		L9NG2-9			-97	255.5	2.065	259.1	0.54	4.42	0.129
		L9NG2-8			-80	241.0	2.092	241.0	0.36	4.98	0.086
		L9NG2-7			-74	237.9	2.065	245.2	0.52	5.69	0.131
		L9NG2-6			-60	222.9	1.935	248.9	1.24	8.19	0.314
		L9NG2-5			-48	218.2	1.894	235.0	1.59	8.55	0.412
		L9NG2-4			-23	216.0	1.875	229.1	1.70	8.50	0.470
		L9NG2-3			11	197.3	1.713	221.8	-	8.81	0.529
		L9NG2-2			60	192.2	1.668	216.0	-	8.78	0.617
		L9NG2-1			100	180.1	1.563	203.5	-	8.71	0.627

\*) E>0.1MeV

表 5.1.3 CMIR-5 照射 2WFK の USE と DBTT の結果

鋼種	サイズ*	照射リグ	照射位置	試験片 No.	照射温度 °C	照射量** ×10 <sup>26</sup> n/m <sup>2</sup>	USE J	DBTT °C	△USE J	△DBTT °C
		CMIR-5	軸-13	L9NG2	378	0.57	0.62	-46	-0.06	36
			軸-2	L9NG1	566	0.53	0.62	-62	-0.06	20

\*) ミニチュア(1.5mmH×1.5mmW×20mmL) , \*\*) E>0.1MeV

表 5.1.4 MARICO-1 照射 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験結果 (照射温度 495°C, 照射量 0.87×10<sup>26</sup>n/m<sup>2</sup>)

鋼種	キャップセル No.	試験片	照射量* ×10 <sup>26</sup> n/m <sup>2</sup>	照射温度 TED 評価 °C	試験温度 °C	最大荷重 N	振り上がり角度 度	吸収エネルギー J	脆性破面率 %	横膨出量 mm	横膨張率 %
	1-A	L2WFO2	499	-50	11523	126.6	19.610	82	0.63	12.6	
	1-C	L2WFO6	496	-20	11278	124.6	24.320	76	0.91	18.2	
	1-B	L2WFO3	491	19.5	10885	117.1	43.050	40	1.46	29.2	
	1-C	L2WFO5	496	50	10395	110.3	61.190	0	1.71	34.2	
	1-A	L2WFO1	499	100	10297	110.0	62.080	0	2.20	44.0	

\*) E>0.1MeV



表 5.1.5 MARICO-1 照射 2WFK のハーフサイズシヤルピロー衝撃試験結果 (照射温度 659°C, 照射量  $0.55 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )

鋼種	キャプセル No.	試験片	照射量 $\times 10^{26} \text{n/m}^2$	照射温度	最大荷重	振り上がり角度	吸収エネルギー	脆性破面率	横膨出量	横膨張率
				TED 評価 °C						
2WFK	5-C	L2WF11	0.55	614	9561	134.0	3.24	95	0.13	2.6
	5-B	L2WF09		654	10199	129.8	12.26	85	0.54	10.8
	5-B	L2WF10		654	9414	129.3	13.44	79	0.99	19.8
	5-A	L2WF07		663	9120	121.9	30.89	0	0.89	17.8
	5-A	L2WF08		663	8630	119.3	37.36	0	1.64	32.8

\*) E>0.1MeV

表 5.1.6 MARICO-1 照射 2WFK の USE と DBTT の結果

鋼種	サイズ*	照射リグ	照射温度	照射量** $\times 10^{26} \text{n/m}^2$	USE	DBTT	△USE	△DBTT
			°C					
2WFK	ハーフサイズ	受入材 MARICO-1	495	0.87	61.6	-4	-3.4	-11.5
			659	0.55	37	70	-28	62.5
					65	7.5	-	-

\*) ハーフサイズ(10mmH×5mm×55mmL)

\*\*) E>0.1MeV

表 5.1.7 400°C熱時効 2WFK のハーブサイズシャルピー衝撃試験結果

鋼種	サイズ	時効温度 °C	時効時間 h	試験温度 °C	最大荷重 N	最大荷重点変位 mm	破壊発生エネルギー J	破壊伝播エネルギー J	無効エネルギー J	総エネルギー J	吸収エネルギー J	脆性破面率 %
2WFK ハーブ		400	519	-80	8767.15	0.43	2.9	2.0	0.0	4.9	3.9	100
				-30	11385.5	0.72	4.9	2.0	0.0	6.9	6.9	100
				0	12248.5	1.79	16.7	10.8	0.0	27.5	26.5	85
				24	12189.7	2.11	20.6	33.3	4.9	58.8	53.9	10
				50	11679.7	1.76	16.7	35.3	15.7	67.7	61.8	0
				100	11797.4	2.05	19.6	32.4	14.7	66.7	59.8	0
				150	11336.5	2.06	19.6	42.2	9.8	71.6	65.7	0
			3000	-80	9110.38	0.43	2.9	2.0	0.0	4.9	3.9	100
				-30	12062.2	0.82	6.9	2.9	1.0	10.8	8.8	100
				0	12797.7	1.19	11.8	9.8	0.0	21.6	22.6	80
				20	12366.2	2.09	20.6	27.5	5.9	53.9	49.0	15
				50	11905.3	2.02	19.6	28.4	19.6	67.7	62.8	0
				100	11522.8	1.95	17.7	28.4	12.7	58.8	57.9	0
				150	11218.8	2.00	18.6	26.5	15.7	60.8	59.8	0

表 5.1.8 500℃熱時効 2WFK のハーブサイズシャルピ一衝撃試験結果

鋼種	サイズ	時効温度	時効時間	試験温度	最大荷重	最大荷重点変位	破壊発生エネルギー	破壊伝播エネルギー	無効エネルギー	総エネルギー	吸収エネルギー	脆性破面率	
		℃	h	℃	N	mm	J	J	J	J	J	%	
2WFK	ハーブ	500	519	-80	9150	0.43	2.9	2.0	0.0	4.9	3.9	100	
				-50	10483	0.64	3.9	2.0	0.0	5.9	5.9	100	
				-20	12837	1.76	17.7	4.9	1.0	23.5	20.6	90	
				0	12092	1.76	16.7	10.8	1.0	28.4	28.4	70	
				24	12454	2.08	20.6	37.3	6.9	64.7	59.8	10	
				50	11866	2.07	20.6	32.4	16.7	69.6	65.7	0	
					100	11866	2.12	19.6	19.6	67.7	63.7	0	
					-80	8689	0.44	2.9	0.0	4.9	2.9	100	
					-50	9512	0.37	2.0	1.0	4.9	3.9	100	
					-20	12847	1.65	16.7	6.9	0.0	23.5	23.5	95
					0	12896	1.49	14.7	23.5	2.9	41.2	42.2	40
					20	12464	2.07	20.6	36.3	7.8	64.7	59.8	10
				50	12288	2.07	20.6	30.4	15.7	66.7	61.8	0	
				100	11523	1.80	16.7	26.5	15.7	58.8	60.8	0	

表 5.1.9 650°C熱時効 2WFK のハーブサイズシャルピロ衝撃試験結果

鋼種	サイズ	時効温度 °C	時効時間 h	試験温度 °C	最大荷重 N	最大荷重点変位 mm	破壊発生エネルギー J	破壊伝播エネルギー J	無効エネルギー J	総エネルギー J	吸収エネルギー J	脆性破面率 %
2WFK	ハーブ	650	519	-80	8826	0.40	3.9	2.0	0.0	5.9	3.9	100
				0	11307	1.49	12.7	2.0	1.0	15.7	14.7	90
				24	11258	1.47	11.8	6.9	2.9	21.6	19.6	70
				50	11562	1.78	16.7	17.7	14.7	49.0	44.1	15
				100	10787	1.64	13.7	26.5	15.7	55.9	48.1	0
				150	10258	2.10	17.7	24.5	16.7	58.8	55.9	0
		200	10277	2.08	17.7	27.5	13.7	58.8	54.9	0		
		650	3000	-80	9081	0.42	2.9	2.0	0.0	4.9	3.9	100
				0	11062	1.25	9.8	3.9	0.0	13.7	15.7	95
				20	10787	1.76	14.7	2.0	3.9	20.6	19.6	80
				50	10532	1.78	14.7	8.8	1.0	33.3	33.3	40
				100	10326	1.92	16.7	23.5	12.7	53.0	50.0	0
150	9895			2.02	15.7	26.5	17.7	59.8	55.9	0		
		200	9522	2.07	15.7	38.2	9.8	63.7	59.8	0		

表 5.1.10 熱時効 2WFK の USE と DBTT の結果

鋼種	サイズ*	時効温度	時効時間	USE	DBTT	ΔUSE	ΔDBTT	DBTT**
		°C						
2WFK	ハーフサイズ	受入材		65	7.5	-	-	8.8
			400	519	66.1	8	1.1	0.5
			3000	60	8	-5	0.5	8.8
		500	519	66	6	1	-1.5	8
			3000	62	-10	-3	-17.5	-4
		650	519	56	35	-9	27.5	35
			3000	60	40	-5	32.5	43

\*) ハーフサイズ(10mmH×5mm×55mmL)

\*\* ) 破面観察結果より脆性破面率から求めた DBTT

表 5.2.1 CMIR-5 照射 H35-L 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験結果(照射温度 376°C, 照射量  $1.3 \times 10^{26}n/m^2$ )

鋼種	装荷位置	試験片 No.	照射量* $\times 10^{26}n/m^2$	照射温度 °C	試験温度 °C	降伏点荷重 N	降伏強度 GPa	最大荷重 N	脆性破壊 破壊開始 時の荷重 N	脆性破壊 破壊開始 時のたわみ量 mm	全たわみ 量 mm	全吸収エ ネルギー J
H35	軸-4	L9PH-A-5	1.3	376	-101	317.7	2.756	339.3	335.4	0.52	0.76	0.1363
		L9PH-B-4			-61	304.0	2.637	314.8	303.0	0.56	2.31	0.1573
		L9PH-A-5			-60	302.0	2.620	310.9	296.2	0.61	0.84	0.1578
		L9PH-B-3			-21	280.5	2.433	299.1	278.5	0.79	3.19	0.2320
		L9PH-A-4			-21	286.4	2.484	304.0	289.3	0.67	3.20	0.2352
		L9PH-B-2			20	277.5	2.407	293.2	262.8	0.76	4.26	0.2927
		L9PH-A-3			20	278.5	2.416	298.1	269.7	0.77	3.65	0.2849
		L9PH-B-1			61	270.7	2.348	283.4	-	-	5.33	0.3519
		L9PH-A-2			61	268.7	2.331	285.4	-	-	5.14	0.3422
		L9PH-A-1			100	253.0	2.195	271.6	-	-	4.67	0.3409

\*) E>0.1MeV

表 5.2.2 CMIR-5 照射 H35-L 方向のミニチュアシヤルピ一衝撃試験結果(照射温度 521°C, 照射量  $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )

鋼種	装荷位置	試験片 No.	照射量 $\times 10^{26} \text{n/m}^2$	照射温度 °C	試験温度 °C	降伏点荷重 N	降伏強度 GPa	最大荷重 N	脆性破壊 破壊開始時のたわみ量 mm	全たわみ量 mm	全吸収エネルギー J
H35	軸-11	L9PHC-5	1.8	521	-130	342.3	2.972	343.6	0.71	2.42	0.181
		L9PHE-5			-98	318.7	2.767	318.7	0.62	4.78	0.182
		L9PHE-4			-79	312.6	2.714	322.8	0.60	3.91	0.187
		L9PHC-4			-60	240.4	2.087	2.5	1.01	4.70	0.245
		L9PHC-3			-45	296.8	2.576	307.0	0.81	6.10	0.314
		L9PHE-3			-23	301.4	2.616	310.9	0.90	5.42	0.323
		L9PHE-2			9	271.0	2.353	278.3	-	5.93	0.392
		L9PHC-2			11	276.1	2.397	285.3	-	6.60	0.428
		L9PHC-1			60	258.6	2.245	271.1	-	7.60	0.440
		L9PHE-1			100	256.2	2.224	267.0	-	6.61	0.441

\*) E>0.1MeV

表 5.2.3 CMIR-5 照射 H35-T 方向のミニチュアシャルピート衝撃試験結果(照射温度 376°C, 照射量  $1.3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )

鋼種	装荷位置	試験片 No.	照射量 $\times 10^{26} \text{n/m}^2$	照射温度 °C	試験温度 °C	降伏点荷重 N	降伏強度 GPa	最大荷重 N	脆性破壊 破壊開始時の荷重 N	脆性破壊 破壊開始時のたわみ量 mm	全たわみ量 mm	全吸収エネルギー J
H35	軸-4	L9PH-2-5	1.3	376	-101	308.9	2.680	326.6	320.7	0.51	0.73	0.1225
		L9PH-2-4			-60	294.2	2.552	312.8	294.2	0.61	3.01	0.2785
		L9PH-1-5			-59	293.2	2.544	311.9	298.1	0.59	3.21	0.2575
		L9PH-2-3			-22	285.4	2.476	303.0	276.5	0.75	3.34	0.3553
		L9PH-1-4			-21	284.4	2.467	291.3	281.5	0.61	3.72	0.3274
		L9PH-2-2			20	266.7	2.314	290.3	265.8	0.69	5.32	0.3427
		L9PH-1-3			20	263.8	2.288	280.5	-	-	4.40	0.3234
		L9PH-1-2			60	259.9	2.254	274.6	-	-	4.05	0.3209
		L9PH-2-1			61	260.9	2.263	282.4	-	-	4.14	0.3429
		L9PH-1-1			100	239.3	2.076	261.8	-	-	5.35	0.3493

\*) E>0.1MeV



表 5.2.4 CMIR-5 照射 H35-T 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験結果(照射温度 521°C, 照射量  $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )

鋼種	装荷位置	試験片 No.	照射量 $\times 10^{26} \text{n/m}^2$	照射温度 °C	試験温度 °C	降伏点荷 重 N	降伏強度 GPa	最大荷重 N	脆性破壊 破壊開始 時のたわ み量 mm	全たわみ 量 mm	全吸収エ ネルギー J
H35	軸-11	L9PH3-5	1.8	521	-130	324.0	2.812	332.0	0.60	3.44	0.169
		L9PH4-5			-102	313.7	2.723	321.1	0.60	4.01	0.162
		L9PH4-4			-79	304.3	2.641	313.6	0.82	5.66	0.265
		L9PH3-4			-60	293.3	2.546	300.5	0.85	5.86	0.294
		L9PH3-3			-47	282.5	2.452	294.9	1.12	6.72	0.343
		L9PH4-3			-23	276.4	2.399	288.6	-	6.94	0.380
		L9PH4-2			9	271.5	2.356	278.4	0.86	8.17	0.388
		L9PH3-2			11	265.6	2.306	277.8	-	7.12	0.480
		L9PH3-1			60	259.1	2.249	270.7	-	8.28	0.490
		L9PH4-1			100	252.5	2.192	260.6	-	8.38	0.449

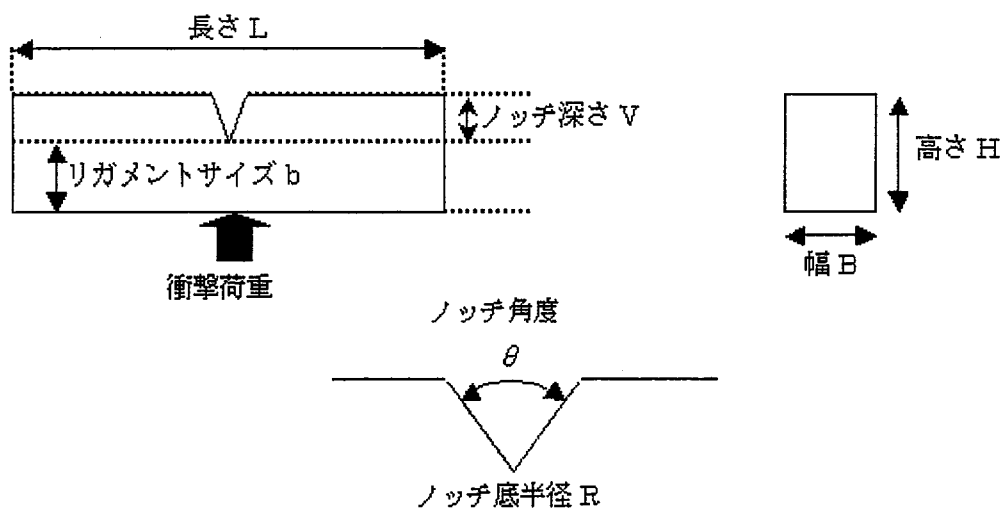
\*) E&gt;0.1MeV

表 5.2.5 CMIR-5 照射 H35 の USE と DBTT の結果

鋼種	サイズ*	照射リグ	装荷位置	試験片 No.	照射温度		照射量**	USE	DBTT	ΔUSE	ΔDBTT
					°C	°C					
H35-L		受入材	軸-4	L9PHA,B	376	/	1.3	0.39	-91	-	-
								0.35	-55	-0.04	36
	ミニチュア	CMIR-5	軸-11	L9PHC,E	521	/	1.8	0.44	-70	0.05	21
								0.45	-102	-	-
H35-T		CMIR-5	軸-4	L9PH1,2	376	/	1.3	0.34	-86	-0.11	16
								0.47	-87	0.02	15

\*) ミニチュア(1.5mmH×1.5mmW×20mmL)

\*\* ) E>0.1MeV



試験片	幅(B)	リガメント サイズ(b)	高さ(H)	長さ(L)	ノッチ角度 ( $\theta$ )	ノッチ底半 径(R)
	mm	mm	mm	mm	度	mm
ミニチュア	1.5±0.01	1.2±0.01	1.5±0.01	20	30±2	0.08
ハーフサイズ	5	8±0.01	10±0.01	55	45±2	0.25

図 4.1.1 シャルピー衝撃試験片模式図

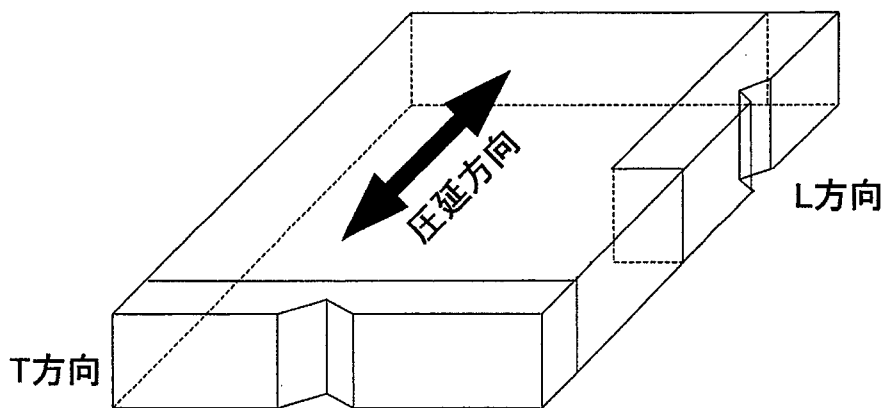


図 4.1.2 ODS マルテンサイト鋼シャルピー衝撃試験片採取方向の模式図

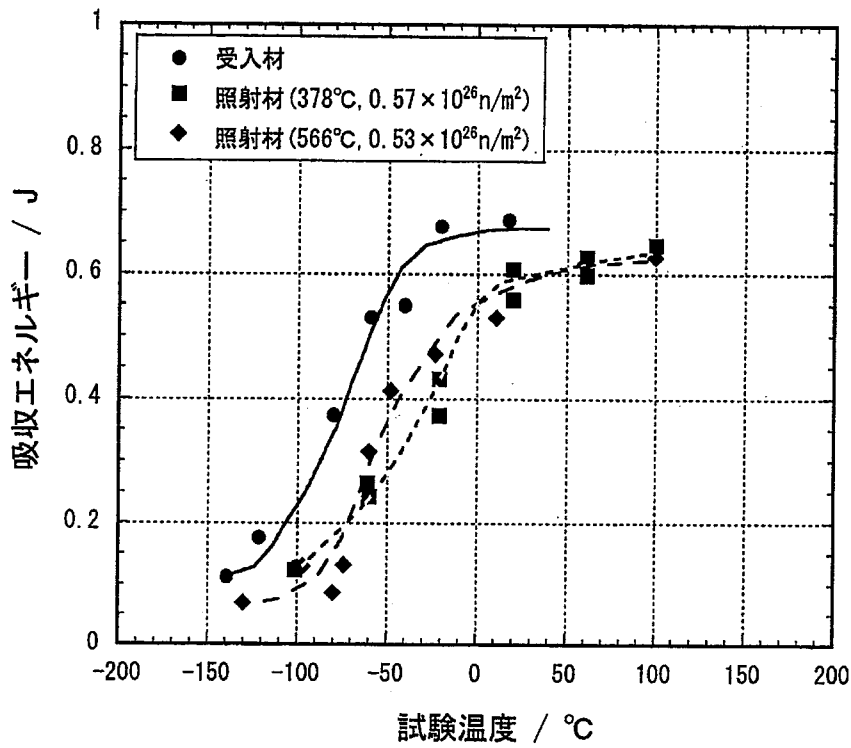


図 5.1.1 CMIR-5 照射材 2WFK ミニチュアシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと試験温度の関係

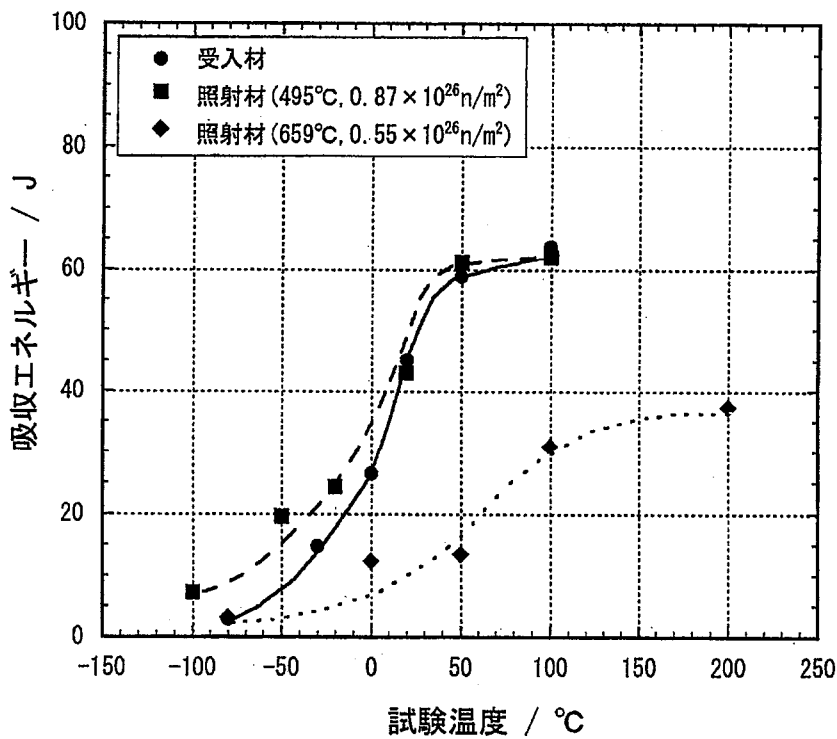


図 5.1.2 MARICO-1 照射 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと試験温度の関係

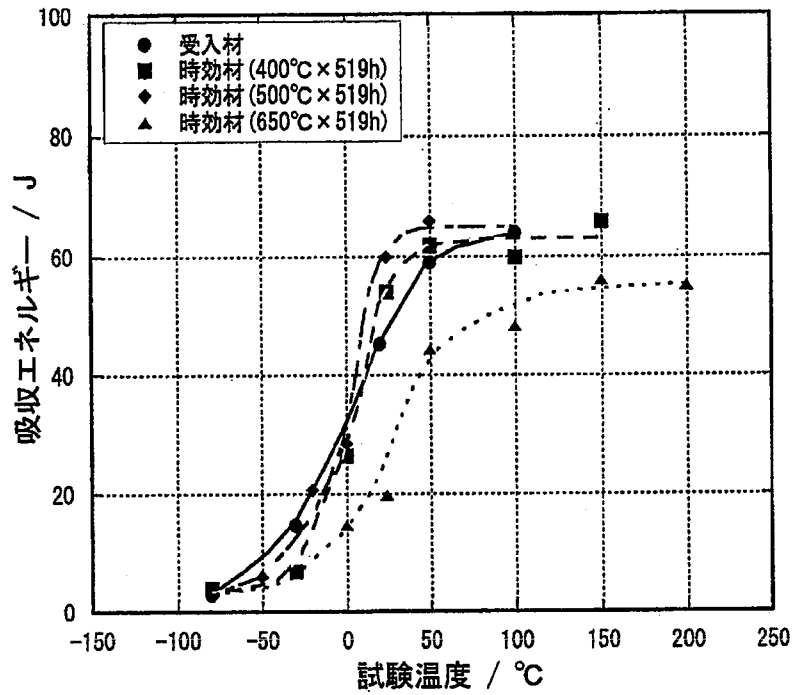


図 5.1.3 熱時効 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと試験温度の関係 (保持時間 519h)

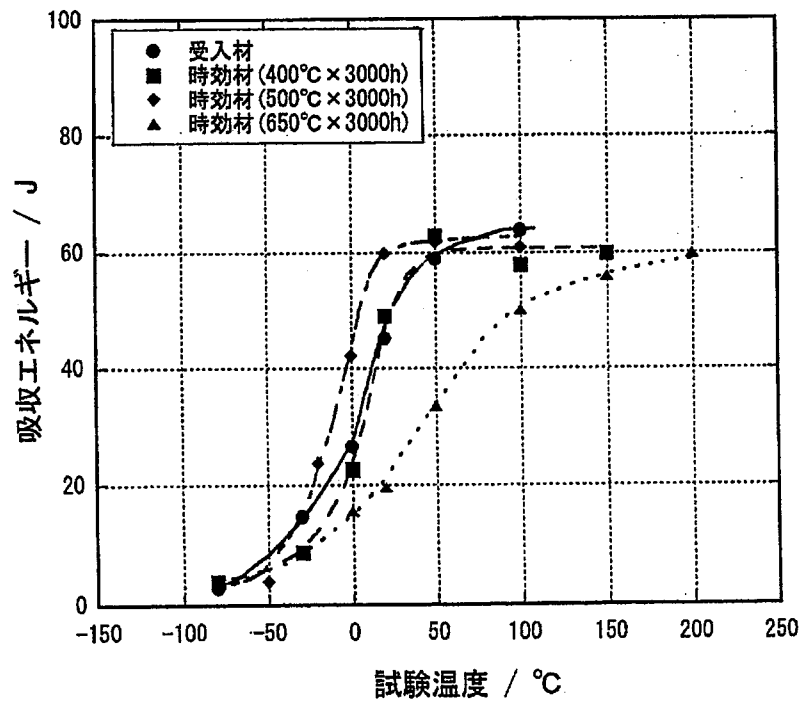


図 5.1.4 熱時効 2WFK のハーフサイズシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと試験温度の関係 (保持時間 3000h)

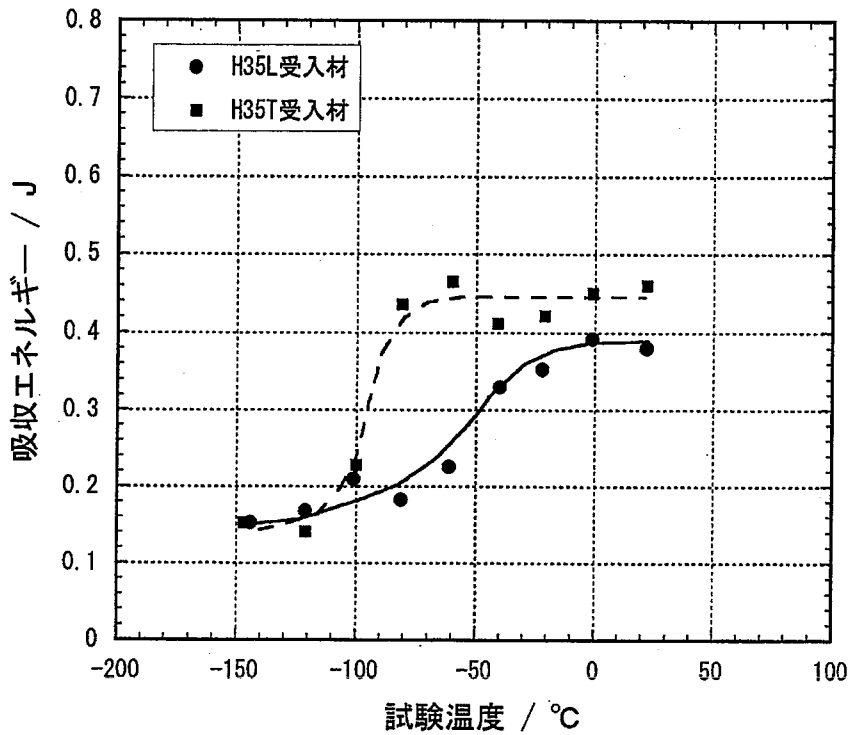


図 5.2.1 H35 受入材のミニチュアシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと試験温度の関係

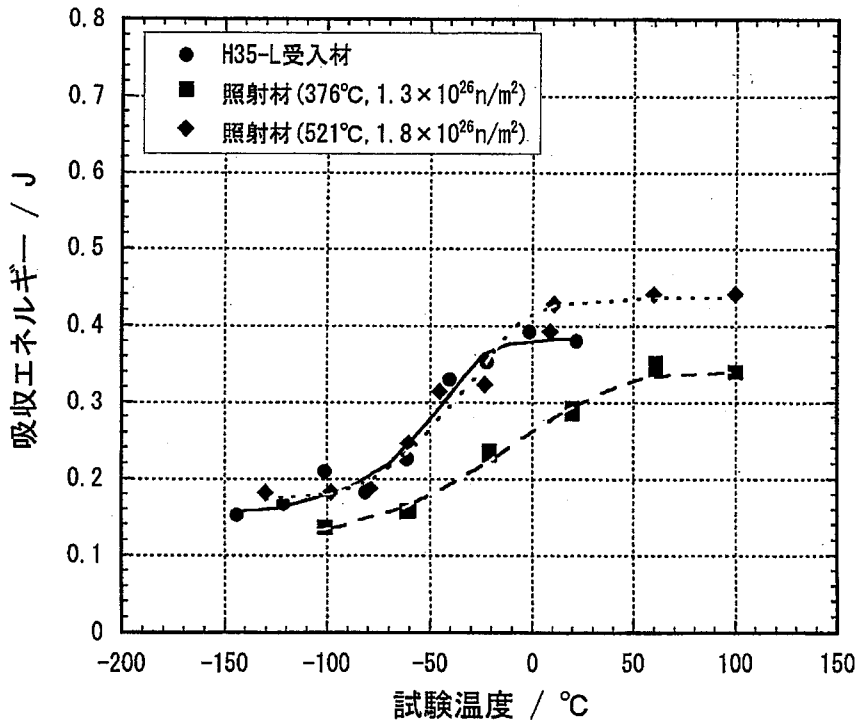


図 5.2.2 CMIR-5 照射 H35-L 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと試験温度の関係

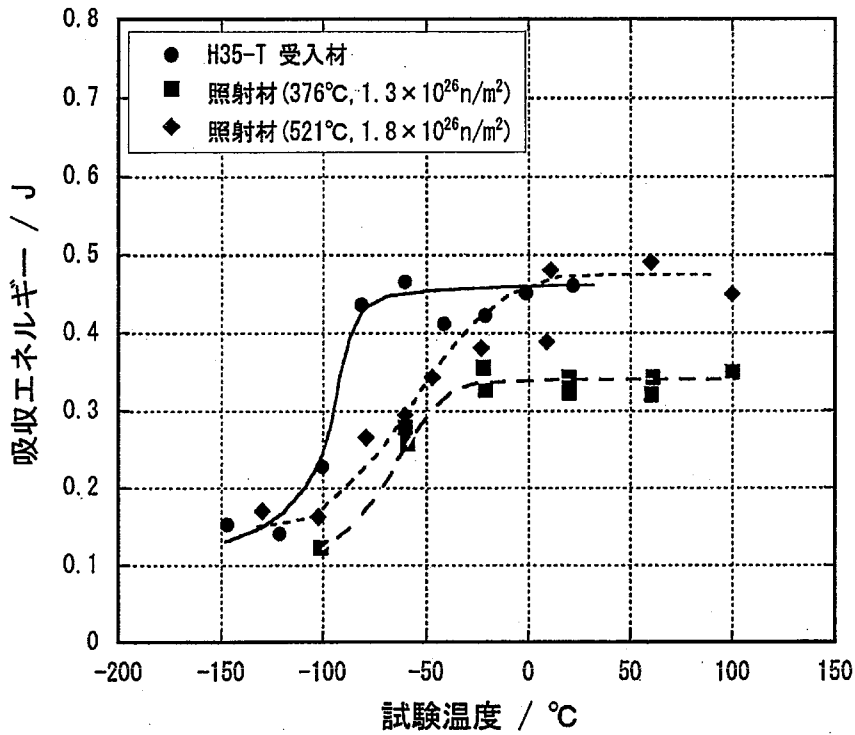


図 5.2.3 CMIR-5 照射 H35-T 方向のミニチュアシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと試験温度の関係

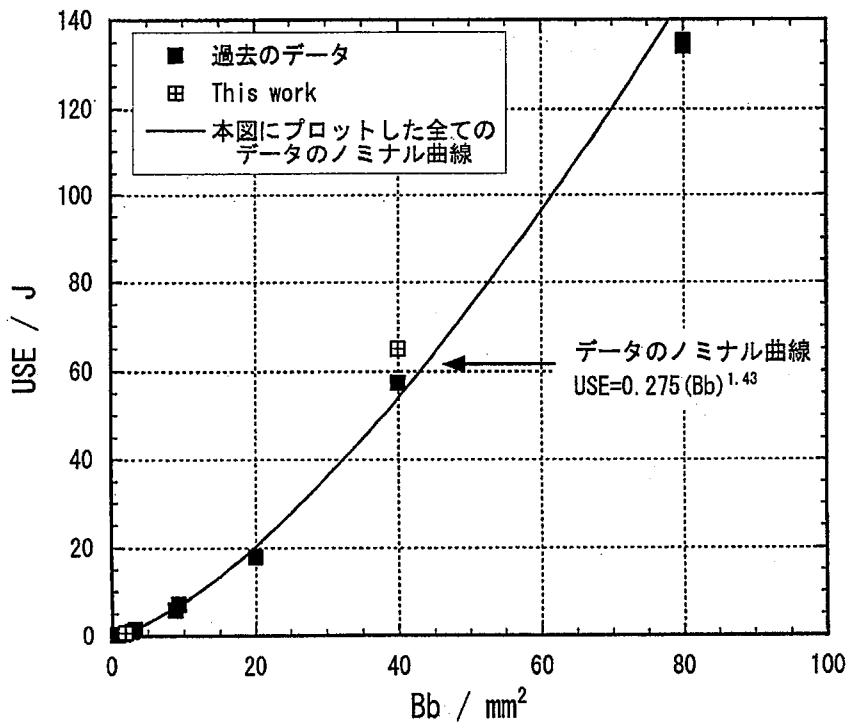


図 6.1.1 USE と Bb の関係(2WFK 受入材)

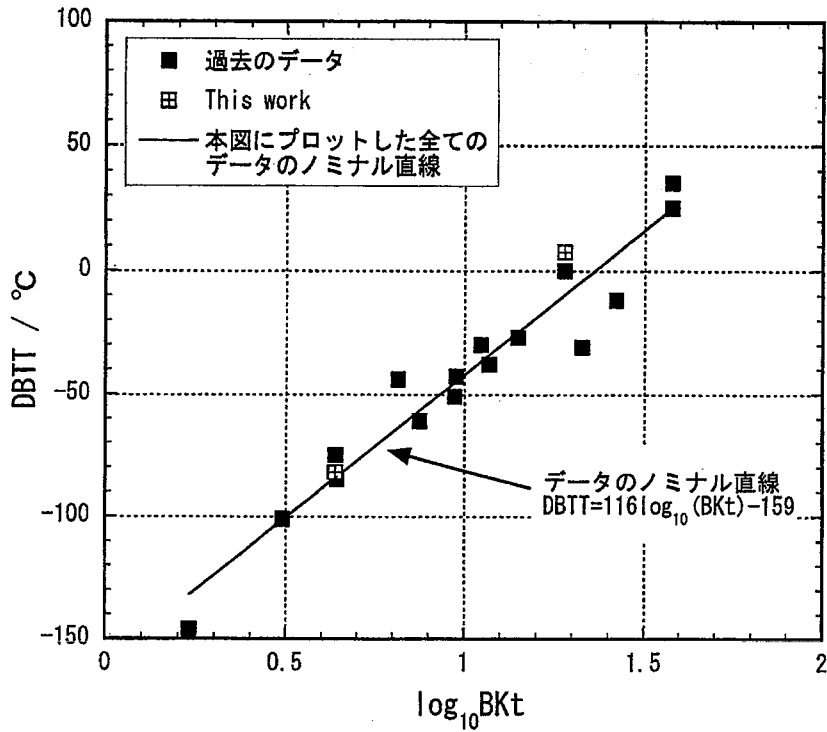


図 6.1.2 DBTT と BKt の関係(2WFK 受入材)

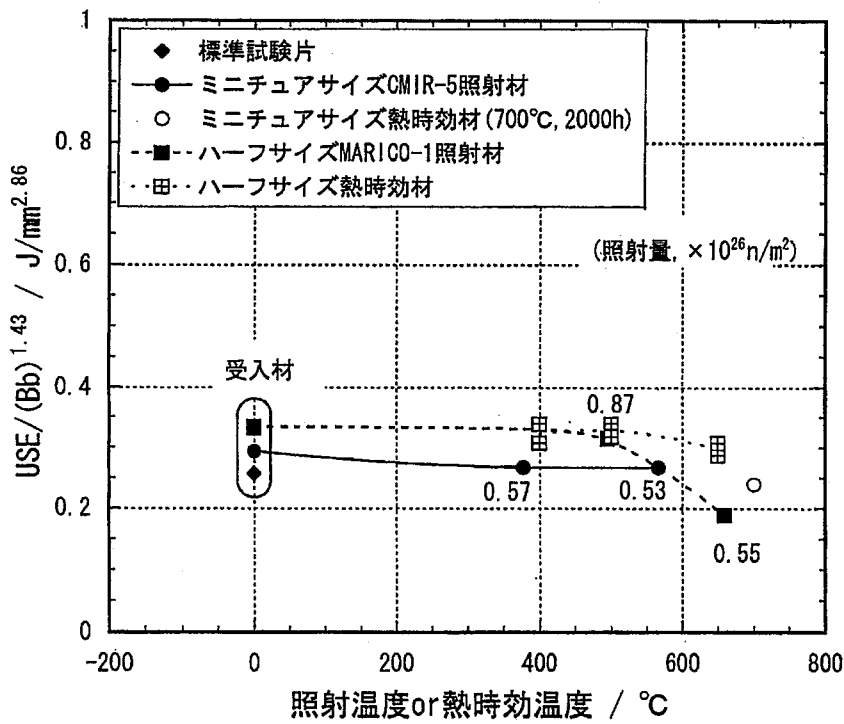


図 6.1.3  $(Bb)^{1.43}$  により規格化した USE (2WFK)



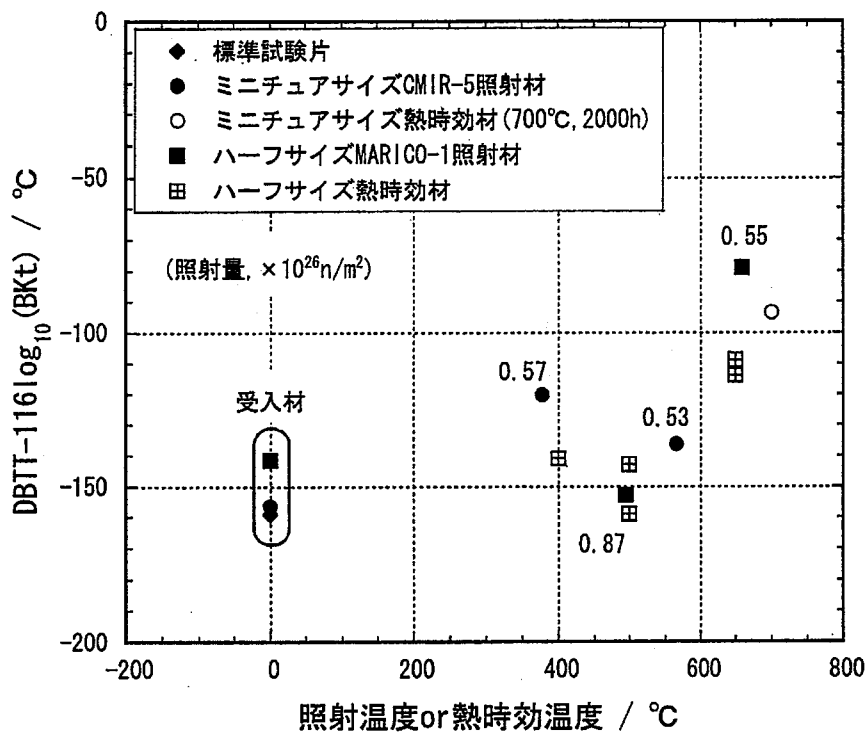


図 6.1.4 BKt により規格化した DBTT (2WFK)

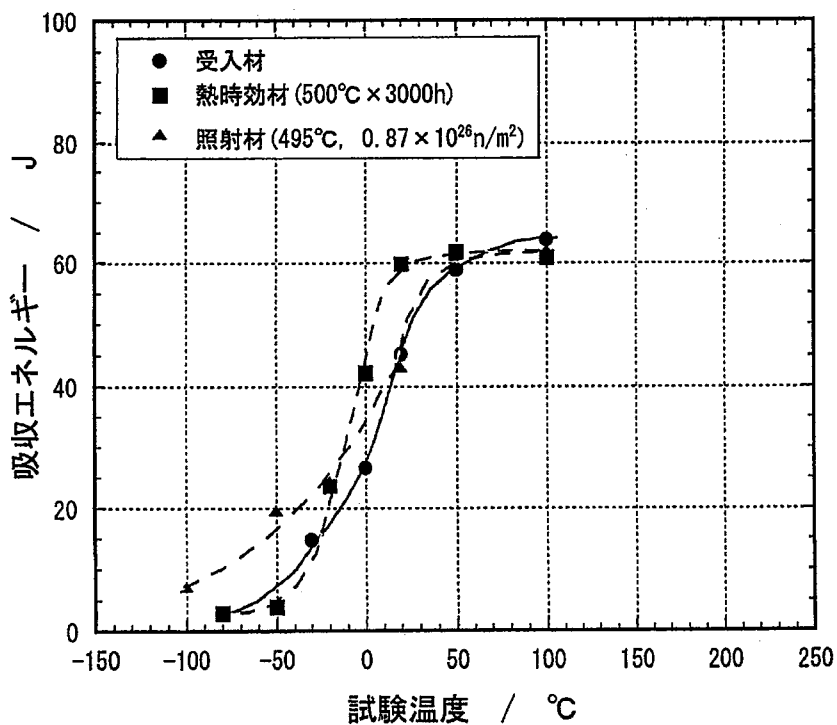


図 6.1.5 500°C近傍の照射と時効 2WFK ハーフサイズシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと試験温度の関係の比較

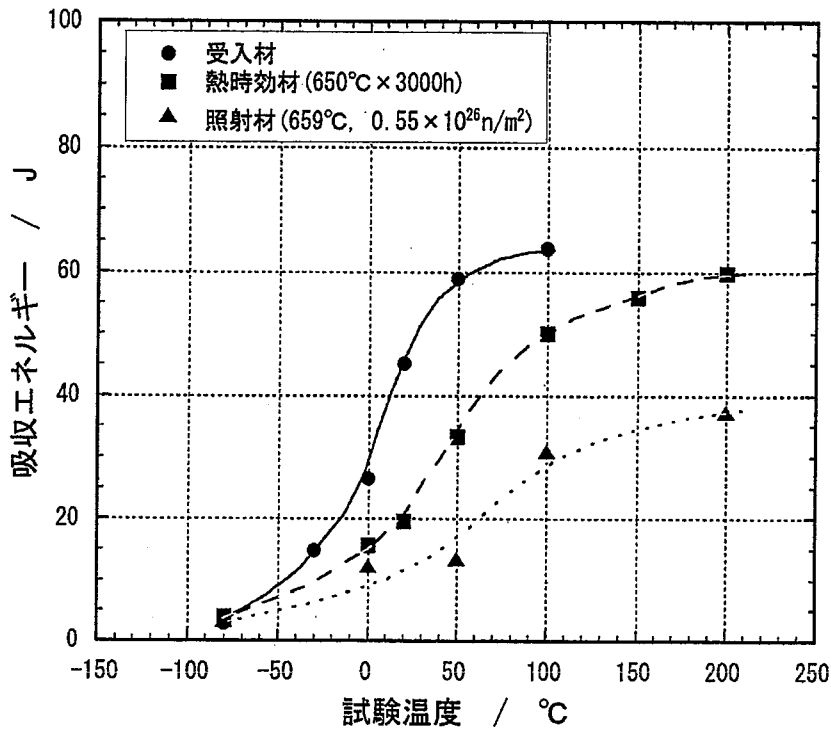


図 6.1.6 650°C近傍の照射と時効 2WFK ハーフサイズシャルピー衝撃試験の吸収エネルギーと試験温度の関係の比較

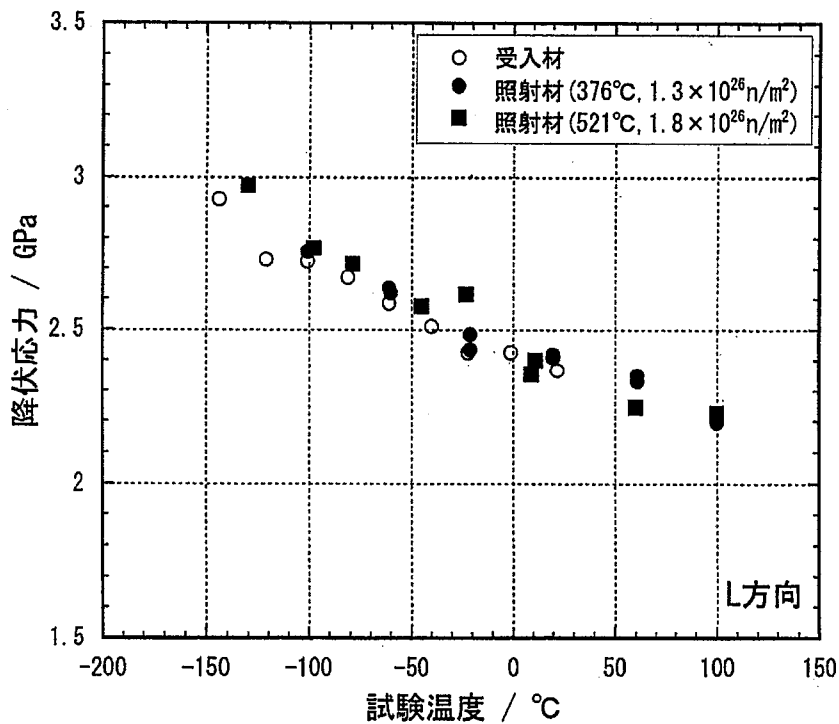


図 6.2.1 H35-L 方向の試験温度と降伏応力の関係

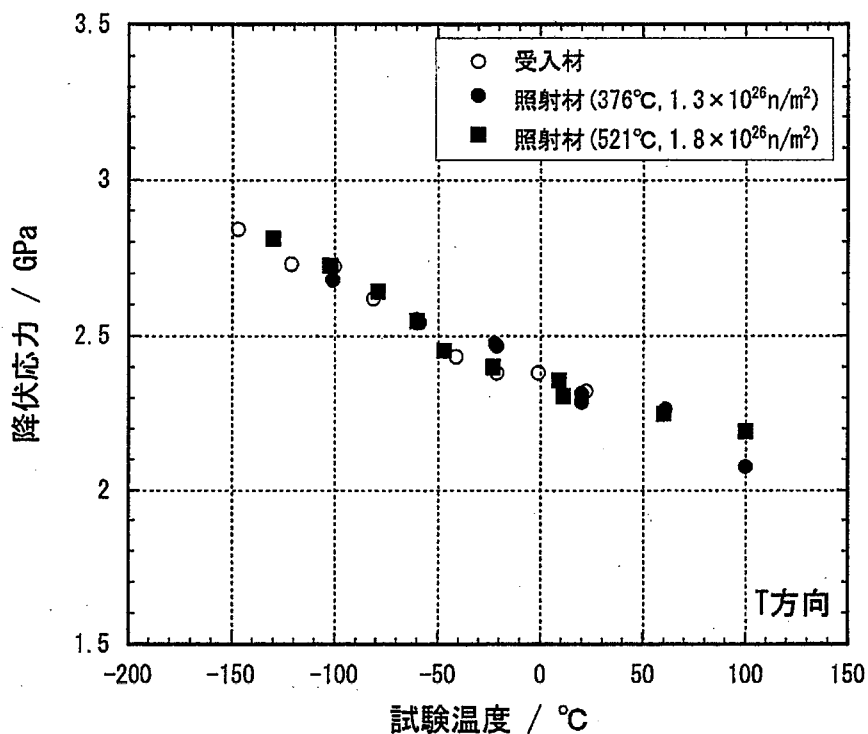


図 6.2.2 H35-T 方向の試験温度と降伏応力の関係関係

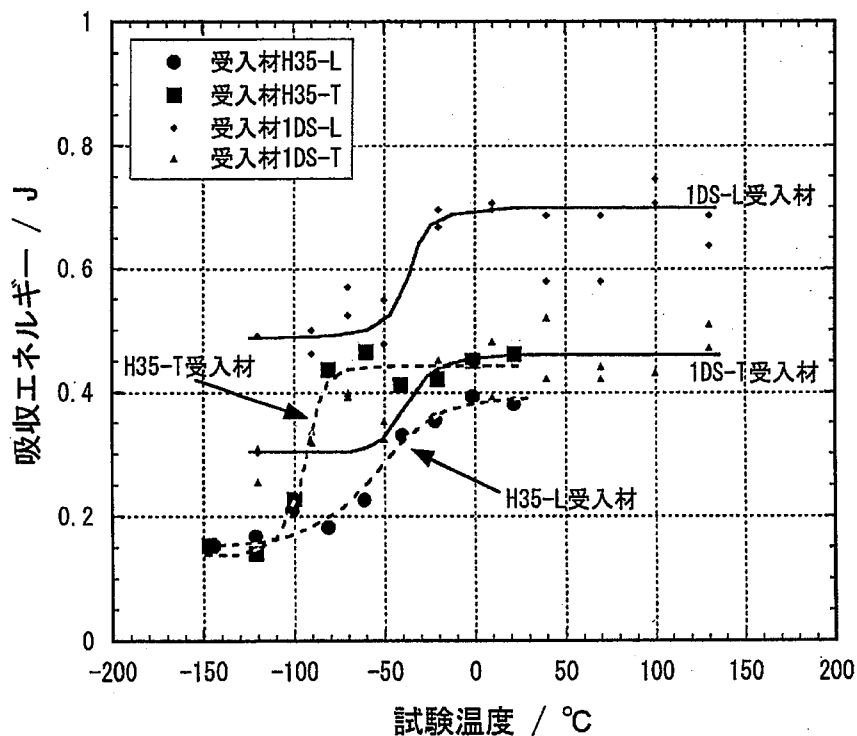


図 6.3.1 H35 と 1DS 受入材の試験温度と吸収エネルギーの関係

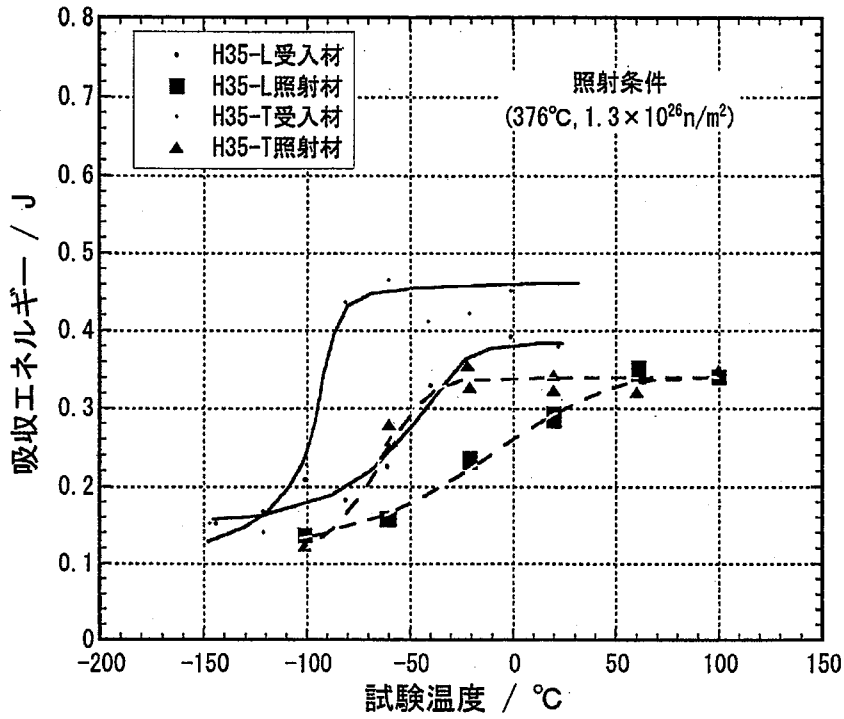


図 6.3.2 H35 照射材(376°C,  $1.3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )の L 方向と T 方向の衝撃特性比較

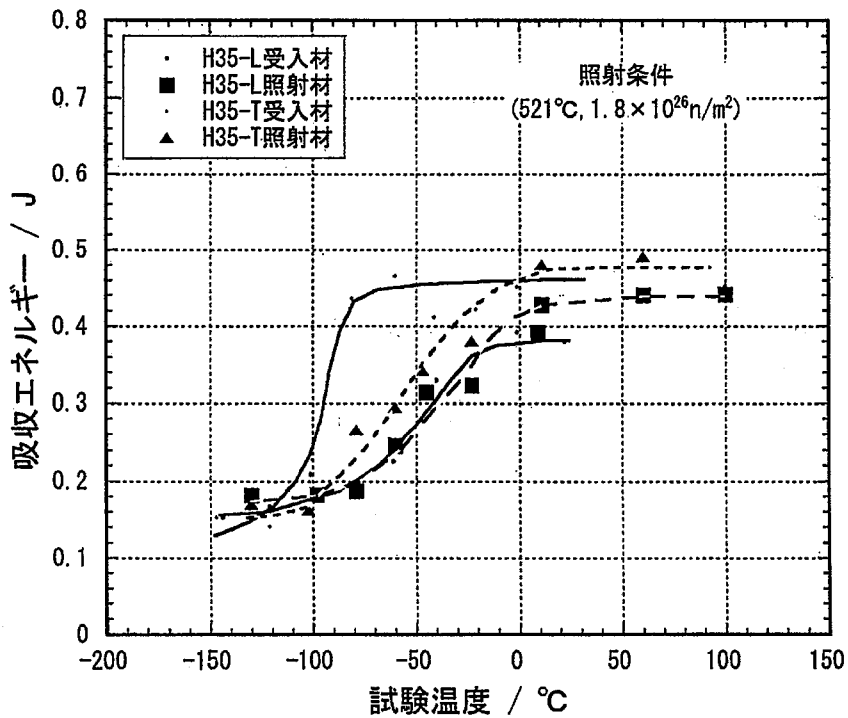


図 6.3.3 H35 照射材(521°C,  $1.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ )の L 方向と T 方向の衝撃特性比較