

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
(研究報告書)

2000年3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大字村松4-49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires 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)
2000

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

（研究報告書）

上平 明弘* 鵜飼 重治*

要旨

高強度フェライト／マルテンサイト鋼（PNC-FMS鋼：0.12C-11Cr-0.5Mo-2W-0.2V-0.05Nb）は、サイクル機構が高速炉の次期炉心材料候補として開発した鋼種であり、1992年の材料強度基準（暫定案）の策定時に延性脆性遷移温度（DBTT）が評価されているが、衝撃特性において重要な特性の一つである寸法依存性、および上部棚吸収エネルギー（USE）の評価が行われていないといった課題がある。本報告では、PNC-FMS鋼および海外材のデータを用いて、USE, DBTTそれぞれにおける寸法依存性、熱時効効果、照射効果などを評価し、PNC-FMS鋼における製造時のUSEとDBTTの設計値、および熱時効効果と照射効果それぞれの設計式を策定した。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) USEの寸法依存性は「 $(Bb)^n$ 」(B: 試験片の幅、b: 試験片のリガメントサイズ)を用いて「 $USE = m(Bb)^n$ 」(m, nは定数)の関係として適切に評価可能であること、およびPNC-FMS鋼の場合「n=1.4」となることを明らかにした。「 $(Bb)^n$ 」における乗数「n」は、フルサイズ試験片のUSE(J)と関連付けられ、「 $n = 1.38 \times 10^{-3} USE + 1.20$ 」の関係式が得られた。
- (2) DBTTの寸法依存性は「 BKt 」(Kt: 弾性応力集中係数)を用いて適切に評価可能であり、「 $DBTT = p(\log_{10} BKt) + q$ 」(p, qは定数)の関係にあることを明らかにした。PNC-FMS鋼の場合、 $DBTT = 119 (\log_{10} BKt) - 160$ であった。
- (3) 製造時DBTTの設計値、および熱時効効果と照射効果それぞれの設計式を用いて、照射後のDBTTを推定した結果、350～650°Cの照射温度範囲でサブサイズ試験片(幅3mm x 高さ10mm)のDBTTは180°C以下であった。

*) 大洗工学センター システム技術開発部 燃料材料技術開発Gr

March, 2000

Evaluation of Charpy Impact Property in High Strength Ferritic/Martensitic Steel (PNC-FMS)

Akihiro UEHIRA* Shigeharu UKAI*

Abstract

High Strength Ferritic/Martensitic Steel (PNC-FMS : 0.12C-11Cr-0.5Mo-2W-0.2V-0.05Nb), developed by JNC, is one of the candidate materials for the long-life core of large-scale fast breeder reactor. Ductile brittle transition temperature (DBTT) was tentatively determined in 1992 in material design base standard of PNC-FMS. However, specimen size effect on impact property and upper shelf energy (USE) have not been evaluated.

In this study, effects of specimen size, thermal aging and neutron irradiation on the charpy impact property of PNC-FMS were evaluated, using together with recently obtained data. The design value of USE and DBTT as fabricated and each correlation of aging and irradiation effects were determined.

The results are summarized as follows.

- (1) It was found that USE is related to (Bb) as $USE = m(Bb)^n$, where B is specimen width, b is ligament size and both m and n are constant. For PNC-FMS, n value is equal to 1.4. It's possible to determine n value from USE (J) for full size specimen using the correlation:
$$n = 1.38 \times 10^{-3} \text{ USE} + 1.20.$$
- (2) It was clarified that DBTT is correlated with (BKt) as $DBTT = p(\log_{10} BKt) + q$, where Kt is elastic stress concentration factor and both p and q are constant. For PNC-FMS, the correlation is as follows: $DBTT = 119 (\log_{10} BKt) - 160$.
- (3) DBTT estimated at the irradiation temperature from 350 to 650 °C for sub size specimen (width and height are 3 and 10 mm, respectively), was below 180 °C, based on the design value of DBTT as fabricated and each correlation of aging and irradiation effects.

*) Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

目 次

1. はじめに	1
2. PNC-FMS鋼および他鋼種のシャルピー衝撃試験データ	
2.1 シャルピー衝撃試験	2
2.2 PNC-FMS鋼のシャルピー衝撃試験データ	2
2.3 他鋼種のシャルピー衝撃試験データ	4
3. 製造まま材の衝撃特性の評価	
3.1 衝撃特性における寸法効果	
3.1.1 USEの寸法依存性	5
3.1.2 DBTTの寸法依存性	8
3.2 材料の熱処理条件の影響	
3.2.1 焼きならし条件の影響	10
3.2.2 焼き戻し条件の影響	11
3.3 材料の化学成分の影響	13
3.4 製造時におけるUSEおよびDBTTの設計基準の策定	15
4. 熱時効効果の評価	
4.1 時効効果における寸法の影響	18
4.2 材料の熱処理条件の影響	
4.2.1 焼きならし条件の影響	19
4.2.2 焼き戻し条件の影響	20
4.3 時効温度および時効時間の影響	21
4.4 時効による衝撃特性の変化と引張特性、硬さ、析出挙動との関係	22
4.5 他鋼種データにおける衝撃特性に対する時効効果	24
4.6 時効効果の設計基準の策定	27

5. 照射効果の評価

5.1 照射効果のメカニズム	29
5.2 照射温度の影響	29
5.3 中性子照射量の影響	31
5.4 照射効果の設計基準の策定	31

6. PNC-FMS鋼の衝撃特性に関する設計基準	34
--------------------------	----

7. まとめ	36
--------	----

8. 謝辞	37
-------	----

参考文献	38
------	----

表 目 次

表 1 PNC-FMS鋼および開発途中材の化学成分 (wt.%)	40
表 2 他鋼種の化学成分 (wt.%) と最終熱処理条件	41
表 3 PNC-FMS鋼のnor. USEおよびDBTTの設計基準	42

図 目 次

図 2-1 シャルピー衝撃試験片の寸法表記	43
図 2-2 吸収エネルギーとシャルピー衝撃試験温度との関係の例	43
図 2-3 シエフラ (Schaeffler) の組織図	44
図 3-1.1 USEと Bb^2 との関係	45
図 3-1.2 USEと $(Bb)^{3/2}$ との関係	45
図 3-2.1 Bb^2 により規格化を試みたUSEの寸法依存性	46
図 3-2.2 $(Bb)^{3/2}$ により規格化を試みたUSEの寸法依存性	46
図 3-3.1 USEとBbの関係の定式化 (2WFK相当板材 製造まま材の場合)	47
図 3-3.2 $(Bb)^{1.42}$ により規格化を試みたUSEの寸法依存性 (2WFK相当板材 製造まま材の場合)	47
図 3-4.1 USEとBbの関係の定式化 (2WFK相当板材 時効材の場合)	48
図 3-4.2 $(Bb)^{1.45}$ により規格化を試みたUSEの寸法依存性 (2WFK相当板材 時効材の場合)	48
図 3-5 フルサイズ試験片と1/3サイズ試験片のUSE/ $(Bb)^{3/2}$ の比「 α 」とフルサイズ試験片のUSEとの関係	49
図 3-6.1 USEとBbとの関係 (HT9鋼 製造まま材の場合)	50
図 3-6.2 USEとBbとの関係 (12Cr1MoVW鋼 製造まま材の場合)	50
図 3-6.3 USEとBbとの関係 (JFMS鋼 製造まま材の場合)	51
図 3-6.4 USEとBbとの関係 (JFMS鋼 照射材の場合)	51
図 3-6.5 USEとBbとの関係 (9Cr1MoVNb鋼 製造まま材の場合)	52
図 3-6.6 USEとBbとの関係 (9Cr2W鋼 製造まま材の場合)	52
図 3-6.7 USEとBbとの関係 (A533鋼 製造まま材の場合)	53
図 3-6.8 USEとBbとの関係 (A508鋼 製造まま材の場合)	53
図 3-7 フルサイズ試験片のUSEと (Bb) の乗数との関係	54
図 3-8 DBTTにおける寸法効果の概念図	54
図 3-9 弾性応力集中係数「 K_t 」とノッチ寸法との関係	55

図 3-10.1 DBTTとBとの関係	56
図 3-10.2 DBTTとK _t との関係	56
図 3-10.3 DBTTとBK _t との関係	56
図 3-11.1 DBTTとBK _t との関係 (2WFK相当板材 製造まま材の場合)	57
図 3-11.2 DBTTとBK _t との関係 (2WFK相当板材 時効材の場合)	57
図 3-11.3 DBTTとBK _t との関係 (HT9鋼 製造まま材の場合)	58
図 3-11.4 DBTTとBK _t との関係 (12Cr1MoVW鋼 製造まま材の場合)	58
図 3-11.5 DBTTとBK _t との関係 (JFMS鋼 製造まま材の場合)	59
図 3-11.6 DBTTとBK _t との関係 (JFMS鋼 照射材の場合)	59
図 3-11.7 DBTTとBK _t との関係 (9Cr1MoVNb鋼 製造まま材の場合)	60
図 3-11.8 DBTTとBK _t との関係 (9Cr2W鋼 製造まま材の場合)	60
図 3-11.9 DBTTとBK _t との関係 (A533鋼 製造まま材の場合)	61
図 3-11.10 DBTTとBK _t との関係 (A508鋼 製造まま材の場合)	61
図 3-12.1 DBTTとlog ₁₀ BK _t とのノミナル直線における傾きとフルサイズ試験片のDBTTとの関係	62
図 3-12.2 DBTTとlog ₁₀ BK _t とのノミナル直線における切片とフルサイズ試験片のDBTTとの関係	62
図 3-13.1 DBTTとlog ₁₀ BK _t とのノミナル直線における傾きとフルサイズ試験片のUSEとの関係	63
図 3-13.2 DBTTとlog ₁₀ BK _t とのノミナル直線における切片とフルサイズ試験片のUSEとの関係	63
図 3-14 DBTTを「DBTT - 115log ₁₀ BK _t 」として規格化した場合 (2WFK相当板材 製造まま材)	64
図 3-15.1 USEの焼きならし条件依存性	65
図 3-15.2 DBTTの焼きならし条件依存性	65
図 3-16.1 USEの焼きならし条件依存性 (61FK板材の場合)	66
図 3-16.2 USEの焼きならし条件依存性 (61FS板材の場合)	66
図 3-16.3 USEの焼きならし条件依存性 (61FSF板材の場合)	66
図 3-16.4 USEの焼きならし条件依存性 (S63年度試作板材IIB(A)の場合)	67
図 3-16.5 USEの焼きならし条件依存性 (S63年度試作板材IIB(B)の場合)	67
図 3-17.1 DBTTの焼きならし条件依存性 (61FK板材の場合)	68

図 3-17.2 DBTTの焼きならし条件依存性 (61FS板材の場合)	68
図 3-17.3 DBTTの焼きならし条件依存性 (61FSF板材の場合)	68
図 3-17.4 DBTTの焼きならし条件依存性 (S63年度試作板材IIB(A)の場合)	69
図 3-17.5 DBTTの焼きならし条件依存性 (S63年度試作板材IIB(B)の場合)	69
図 3-18.1 USEの焼き戻し条件依存性	70
図 3-18.2 DBTTの焼き戻し条件依存性	70
図 3-19.1 USEの焼き戻し条件依存性 (S62年度試作板材IA(B)の場合)	71
図 3-19.2 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIA(A)の場合)	71
図 3-19.3 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIA(B)の場合)	71
図 3-19.4 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIA(C)の場合)	72
図 3-19.5 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIB(A)の場合)	72
図 3-19.6 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIB(B)の場合)	72
図 3-20.1 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S62年度試作板材IA(B)の場合)	73
図 3-20.2 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIA(A)の場合)	73
図 3-20.3 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIA(B)の場合)	73
図 3-20.4 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIA(C)の場合)	74
図 3-20.5 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIB(A)の場合)	74
図 3-20.6 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIB(B)の場合)	74
図 3-21.1 ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材のUSE推定値の比較 (S63年度試作板材IIB(A)データを用いた場合)	75
図 3-21.2 ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材のUSE推定値の比較 (S63年度試作板材IIB(B)データを用いた場合)	75
図 3-22.1 ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材のDBTT推定値の比較 (S63年度試作板材IIB(A)データを用いた場合)	76
図 3-22.2 ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材のDBTT推定値の比較 (S63年度試作板材IIB(B)データを用いた場合)	76
図 3-23.1 鋼種によるUSEの比較 (61FK, 61FS, 61FSF, S62年度試作板材IA(B), S63年度試作板材IIA(A)の場合)	77
図 3-23.2 鋼種によるDBTTの比較 (61FK, 61FS, 61FSF, S62年度試作板材IA(B), S63年度試作板材IIA(A)の場合)	77
図 3-24.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材IIAの(A)と(B)の場合)	78

図 3-24.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材IIAの(A)と(B)の場合)	78
図 3-25.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材IIAの(A)と(C)の場合)	79
図 3-25.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材IIAの(A)と(C)の場合)	79
図 3-26.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材IIAの(B)と(C)の場合)	80
図 3-26.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材IIAの(B)と(C)の場合)	80
図 3-27.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材IIBの(A)と(B)の場合)	81
図 3-27.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材IIBの(A)と(B)の場合)	81
図 3-28.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材のIIA(A)とIIB(A)の場合)	82
図 3-28.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材のIIA(A)とIIB(A)の場合)	82
図 3-29 PNC-FMS鋼ラッパ管およびラッパ管熱処理材のUSEデータ	83
図 3-30 PNC-FMS鋼ラッパ管およびラッパ管熱処理材のUSEデータのノミナル値と99.9%信頼下限値	83
図 3-31 PNC-FMS鋼ラッパ管の設計用USE [製造時] ノミナル値および下限値 (95%信頼下限) の策定	84
図 3-32.1 PNC-FMS鋼ラッパ管およびラッパ管熱処理材のDBTTデータ	85
図 3-32.2 PNC-FMS鋼ラッパ管の設計用DBTT [製造時] ノミナル値および上限値 (95%信頼上限) の策定	85
図 4-1.1 热時効材のUSEと製造まま材のUSEとの比較	86
図 4-1.2 热時効による△USEの寸法依存性	86
図 4-2.1 热時効材のUSE/(Bb) ^{1.4} と製造まま材のUSE/(Bb) ^{1.4} との比較	87
図 4-2.2 热時効による△nor.USEの寸法依存性	87
図 4-3.1 热時効材のDBTTと製造まま材のDBTTとの比較	88
図 4-3.2 热時効による△DBTTの寸法依存性	88
図 4-4.1 USEに対する热時効効果の焼きならし温度依存性 (61FK板材の場合)	89
図 4-4.2 USEに対する热時効効果の焼きならし温度依存性 (61FS板材の場合)	89
図 4-4.3 USEに対する热時効効果の焼きならし温度依存性 (61FSF板材の場合)	89
図 4-5.1 热時効による△USEの焼きならし温度依存性 (61FK板材の場合)	90
図 4-5.2 热時効による△USEの焼きならし温度依存性 (61FS板材の場合)	90
図 4-5.3 热時効による△USEの焼きならし温度依存性 (61FSF板材の場合)	90
図 4-6.1 DBTTに対する热時効効果の焼きならし温度依存性 (61FK板材の場合)	91

図 4-6.2 DBTTに対する熱時効効果の焼きならし温度依存性 (61FS板材の場合)	91
図 4-6.3 DBTTに対する熱時効効果の焼きならし温度依存性 (61FSF板材の場合)	91
図 4-7.1 热時効による Δ DBTTの焼きならし温度依存性 (61FK板材の場合)	92
図 4-7.2 热時効による Δ DBTTの焼きならし温度依存性 (61FS板材の場合)	92
図 4-7.3 热時効による Δ DBTTの焼きならし温度依存性 (61FSF板材の場合)	92
図 4-8.1 USEに対する熱時効効果の焼き戻し条件依存性	93
図 4-8.2 热時効による Δ USEの焼き戻し条件依存性	93
図 4-9.1 DBTTに対する熱時効効果の焼き戻し条件依存性	94
図 4-9.2 热時効による Δ DBTTの焼き戻し条件依存性	94
図 4-10.1 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1000°C × 30min + 760°C × 30min)	95
図 4-10.2 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1000°C × 30min + 800°C × 30min)	95
図 4-10.3 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1050°C × 30min + 760°C × 30min)	95
図 4-10.4 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1050°C × 30min + 800°C × 30min)	96
図 4-10.5 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1100°C × 30min + 800°C × 30min)	96
図 4-10.6 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1000°C × 30min + 760°C × 30min)	97
図 4-10.7 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1000°C × 30min + 800°C × 30min)	97
図 4-10.8 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1050°C × 30min + 760°C × 30min)	97
図 4-10.9 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1050°C × 30min + 800°C × 30min)	98
図 4-10.10 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FK板材 : 1100°C × 30min + 800°C × 30min)	98
図 4-11.1 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1000°C × 1hr + 800°C × 1hr)	99
図 4-11.2 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 1hr)	99
図 4-11.3 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)	99
図 4-11.4 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1080°C × 1hr + 800°C × 1hr)	100
図 4-11.5 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1120°C × 1hr + 800°C × 1hr)	100
図 4-11.6 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1000°C × 1hr + 800°C × 1hr)	101
図 4-11.7 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 1hr)	101
図 4-11.8 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)	101
図 4-11.9 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1080°C × 1hr + 800°C × 1hr)	102
図 4-11.10 Δ DBTTの熱時効条件依存性 (61FS板材 : 1120°C × 1hr + 800°C × 1hr)	102
図 4-12.1 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FSF板材 : 1000°C × 1hr + 750°C × 10hr)	103
図 4-12.2 Δ USEの熱時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 1hr)	103

図 4-12.3	△ USEの熱時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 10hr)	104
図 4-12.4	△ USEの熱時効条件依存性 (61FSF板材 : 1080°C × 1hr+750°C × 10hr)	104
図 4-12.5	△ DBTTの熱時効条件依存性 (61FSF板材 : 1000°C × 1hr+750°C × 10hr)	105
図 4-12.6	△ DBTTの熱時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 1hr)	105
図 4-12.7	△ DBTTの熱時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 10hr)	106
図 4-12.8	△ DBTTの熱時効条件依存性 (61FSF板材 : 1080°C × 1hr+750°C × 10hr)	106
図 4-13.1	△ USEの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1000°C × 1hr+800°C × 1hr)	107
図 4-13.2	△ USEの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 1hr)	107
図 4-13.3	△ USEの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr+800°C × 1hr)	107
図 4-13.4	△ USEの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1080°C × 1hr+800°C × 1hr)	108
図 4-13.5	△ USEの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1120°C × 1hr+800°C × 1hr)	108
図 4-14.1	△ DBTTの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1000°C × 1hr+800°C × 1hr)	109
図 4-14.2	△ DBTTの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 1hr)	109
図 4-14.3	△ DBTTの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr+800°C × 1hr)	109
図 4-14.4	△ DBTTの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1080°C × 1hr+800°C × 1hr)	110
図 4-14.5	△ DBTTの熱時効時間依存性 (61FS板材 : 1120°C × 1hr+800°C × 1hr)	110
図 4-15.1	△ USEの熱時効時間依存性 (61FSF板材 : 1000°C × 1hr+750°C × 10hr)	111
図 4-15.2	△ USEの熱時効時間依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 1hr)	111
図 4-15.3	△ USEの熱時効時間依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 10hr)	112
図 4-15.4	△ USEの熱時効時間依存性 (61FSF板材 : 1080°C × 1hr+750°C × 10hr)	112
図 4-16.1	△ DBTTの熱時効時間依存性 (61FSF板材 : 1000°C × 1hr+750°C × 10hr)	113
図 4-16.2	△ DBTTの熱時効時間依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 1hr)	113
図 4-16.3	△ DBTTの熱時効時間依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 10hr)	114
図 4-16.4	△ DBTTの熱時効時間依存性 (61FSF板材 : 1080°C × 1hr+750°C × 10hr)	114
図 4-17.1	0.2%耐力に対する熱時効効果 (61FS板材 : 1050°C × 1hr+800°C × 1hr)	115
図 4-17.2	引張強さに対する熱時効効果 (61FS板材 : 1050°C × 1hr+800°C × 1hr)	115
図 4-17.3	破断伸びに対する熱時効効果 (61FS板材 : 1050°C × 1hr+800°C × 1hr)	115
図 4-17.4	0.2%耐力に対する熱時効効果 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 10hr)	116
図 4-17.5	引張強さに対する熱時効効果 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 10hr)	116
図 4-17.6	破断伸びに対する熱時効効果 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr+750°C × 10hr)	116
図 4-18.1	硬さに対する熱時効効果 (61FS板材 : 1050°C × 1hr+800°C × 1hr)	117

図 4-18.2 硬さに対する熱時効効果 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)	117
図 4-19.1 時効により析出するFe量の時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)	118
図 4-19.2 時効により析出するCr量の時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)	118
図 4-19.3 時効により析出するW量の時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)	118
図 4-19.4 時効により析出するMo量の時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)	119
図 4-19.5 時効により析出するV量の時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)	119
図 4-19.6 時効により析出するNb量の時効条件依存性 (61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)	119
図 4-20.1 時効により析出するFe量の時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)	120
図 4-20.2 時効により析出するCr量の時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)	120
図 4-20.3 時効により析出するW量の時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)	120
図 4-20.4 時効により析出するMo量の時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)	121
図 4-20.5 時効により析出するV量の時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)	121
図 4-20.6 時効により析出するNb量の時効条件依存性 (61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)	121
図 4-21.1 热時効による析出元素量の比較 (300hr時効材の場合)	122
図 4-21.2 热時効による析出元素量の比較 (1000hr時効材の場合)	122
図 4-21.3 热時効による析出元素量の比較 (3000hr時効材の場合)	122
図 4-22.1 PNC-FMS鋼以外の鋼種における熱時効による△nor.USE	123
図 4-22.2 PNC-FMS鋼以外の鋼種における熱時効による△DBTT	123
図 4-23.1 他鋼種における熱時効による△nor.USEの時効温度依存性	124

図 4-23.2 他鋼種における熱時効による Δ DBTTの時効温度依存性	124
図 4-24.1 热時効による Δ nor.USEの時効時間依存性 (HT9相当材)	125
図 4-24.2 热時効による Δ nor.USEの時効時間依存性 (9Cr1MoVNb)	125
図 4-24.3 热時効による Δ nor.USEの時効時間依存性 (12Cr1MoVW)	125
図 4-24.4 热時効による Δ DBTTの時効時間依存性 (HT9相当材)	126
図 4-24.5 热時効による Δ DBTTの時効時間依存性 (9Cr1MoVNb)	126
図 4-24.6 热時効による Δ DBTTの時効時間依存性 (12Cr1MoVW)	126
図 4-25.1 PNC-FMS鋼と他鋼種における熱時効による Δ nor.USEの時効温度依存性	127
図 4-25.2 PNC-FMS鋼と他鋼種における熱時効による Δ DBTTの時効温度依存性	127
図 4-26.1 61FS板材および61FSF板材の時効による Δ nor.USE	128
図 4-26.2 61FS板材および61FSF板材の時効による Δ DBTT	128
図 4-27.1 PNC-FMS鋼と他鋼種の長時間時効材における時効による Δ nor.USEの時効温度依存性	129
図 4-27.2 PNC-FMS鋼と他鋼種の長時間時効材における時効による Δ DBTTの時効温度依存性	129
図 4-28.1 時効による Δ nor.USEの定式化 (ノミナル式の場合)	130
図 4-28.2 時効による Δ DBTTの定式化 (ノミナル式の場合)	130
図 4-29.1 時効による Δ nor.USEの定式化 (下限式1の場合)	131
図 4-29.2 時効による Δ DBTTの定式化 (上限式の場合)	131
図 4-30.1 热時効による Δ nor.USEのノミナル式と下限式1	132
図 4-30.2 热時効による Δ nor.USEのノミナル式と下限式2	132
図 4-31 热時効による Δ DBTTのノミナル式と上限式	133
図 5-1 照射による降伏応力の増加に伴うDBTTの上昇	134
図 5-2 FFTFにて照射されたHT9鋼における降伏応力の増加の照射温度依存性	134
図 5-3 EBR-IIにて照射されたAISI316鋼における降伏応力の変化の照射量依存性および照射温度依存性	135
図 5-4 FFTFにて照射されたHT9鋼におけるDBTTの増加の照射量依存性および照射温度依存性	135
図 5-5.1 照射および時効による Δ nor.USEの照射温度依存性 (PNC-FMS鋼および他鋼種のデータ)	136

図 5-5.2 照射および時効による Δ DBTT の照射温度依存性 (PNC-FMS 鋼および他鋼種のデータ) ····· 136図 5-6.1 照射による Δ nor.USE の照射温度依存性 (時効効果ノミナル式を用いて時効の寄与を除いた場合) ····· 137図 5-6.2 照射による Δ DBTT の照射温度依存性 (時効効果ノミナル式を用いて時効の寄与を除いた場合) ····· 137図 5-7.1 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (60FS-X 板材の場合) ····· 138図 5-7.2 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (60FS-Y 板材の場合) ····· 138図 5-7.3 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (61FK 板材の場合) ····· 138図 5-7.4 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (61FS 板材の場合) ····· 139図 5-7.5 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (63WFS ラッパ管の場合) ····· 139図 5-7.6 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (EM10 鋼の場合) ····· 140図 5-7.7 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (HT9 鋼の場合) ····· 140図 5-7.8 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (9Cr1MoVNb 鋼の場合) ····· 141図 5-7.9 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (12Cr1MoVW 鋼の場合) ····· 141図 5-7.10 照射のみによる Δ nor.USE の照射温度依存性 (9Cr1Mo 鋼の場合) ····· 141図 5-8.1 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (60FS-X 板材の場合) ····· 142図 5-8.2 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (60FS-Y 板材の場合) ····· 142図 5-8.3 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (61FK 板材の場合) ····· 142図 5-8.4 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (61FS 板材の場合) ····· 143図 5-8.5 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (63WFS ラッパ管の場合) ····· 143図 5-8.6 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (EM10 鋼の場合) ····· 144図 5-8.7 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (HT9 鋼の場合) ····· 144図 5-8.8 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (1.4914 鋼の場合) ····· 144図 5-8.9 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (9Cr1MoVNb 鋼の場合) ····· 145図 5-8.10 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (12Cr1MoVW 鋼の場合) ····· 145図 5-8.11 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (mod.9Cr1Mo 鋼の場合) ····· 146図 5-8.12 照射のみによる Δ DBTT の照射温度依存性 (9Cr1Mo 鋼の場合) ····· 146図 5-9.1 照射のみによる Δ nor.USE の照射量依存性 ····· 147図 5-9.2 照射のみによる Δ DBTT の照射量依存性 ····· 147図 5-10.1 照射のみによる Δ nor.USE の照射量依存性 (60FS-X 板材の場合) ····· 148

図 5-10.2 照射のみによる Δ nor.USEの照射量依存性 (60FS-Y板材の場合)	148
図 5-10.3 照射のみによる Δ nor.USEの照射量依存性 (61FK板材の場合)	148
図 5-10.4 照射のみによる Δ nor.USEの照射量依存性 (61FS板材の場合)	149
図 5-10.5 照射のみによる Δ nor.USEの照射量依存性 (63WFSラッパ管の場合)	149
図 5-10.6 照射のみによる Δ nor.USEの照射量依存性 (EM10鋼の場合)	150
図 5-10.7 照射のみによる Δ nor.USEの照射量依存性 (HT9鋼の場合)	150
図 5-10.8 照射のみによる Δ nor.USEの照射量依存性 (9Cr1MoVNb鋼の場合)	151
図 5-10.9 照射のみによる Δ nor.USEの照射量依存性 (12Cr1MoVW鋼の場合)	151
図 5-10.10 照射のみによる Δ nor.USEの照射量依存性 (9Cr1Mo鋼の場合)	151
図 5-11.1 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (60FS-X板材の場合)	152
図 5-11.2 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (60FS-Y板材の場合)	152
図 5-11.3 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (61FK板材の場合)	152
図 5-11.4 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (61FS板材の場合)	153
図 5-11.5 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (63WFSラッパ管の場合)	153
図 5-11.6 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (EM10鋼の場合)	154
図 5-11.7 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (HT9鋼の場合)	154
図 5-11.8 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (1.4914鋼の場合)	154
図 5-11.9 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (9Cr1MoVNb鋼の場合)	155
図 5-11.10 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (12Cr1MoVW鋼の場合)	155
図 5-11.11 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (mod.9Cr1Mo鋼の場合)	156
図 5-11.12 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (9Cr1Mo鋼の場合)	156
図 5-12.1 PNC-FMS鋼および他鋼種の照射による Δ nor.USEの照射温度依存性 (照射量 $\geq 3 \times 10^{26} n/m^2$, E > 0.1 MeV のデータをプロット)	157
図 5-12.2 PNC-FMS鋼および他鋼種の照射による Δ DBTTの照射温度依存性 (照射量 $\geq 3 \times 10^{26} n/m^2$, E > 0.1 MeV のデータをプロット)	157
図 5-13.1 照射による Δ nor.USEの定式化 (ノミナル式の場合)	158
図 5-13.2 照射による Δ DBTTの定式化 (ノミナル式の場合)	158
図 5-14.1 照射による Δ nor.USEの定式化 (下限式の場合)	159
図 5-14.2 照射による Δ DBTTの定式化 (上限式の場合)	159
図 5-15.1 照射による Δ nor.USEのノミナル式と下限式	160
図 5-15.2 照射による Δ DBTTのノミナル式と上限式	160

図 6-1.1 炉内使用時のnor.USEの推定（製造時USEとしてノミナル値を用いた場合）	161
図 6-1.2 炉内使用時のnor.USEの推定（製造時USEとして下限値を用いた場合）	161
図 6-2 「製造時下限値+時効効果下限式+照射効果下限式」として推定した炉内nor.USE (炉内nor.USE ≥ 0 としない場合)	162
図 6-3.1 炉内使用時のDBTTの推定（サブサイズ試験片における製造時DBTTとしてノミナル値を 用いた場合）	163
図 6-3.2 炉内使用時のDBTTの推定（サブサイズ試験片における製造時DBTTとして上限値を 用いた場合）	163
図 6-4.1 炉内使用時のDBTTの推定（フルサイズ試験片における製造時DBTTとしてノミナル値を 用いた場合）	164
図 6-4.2 炉内使用時のDBTTの推定（フルサイズ試験片における製造時DBTTとして上限値を 用いた場合）	164

1. はじめに

高強度フェライト／マルテンサイト鋼¹⁾（PNC-FMS鋼：0.12C-11Cr-0.5Mo-2W-0.2V-0.05Nb）は、サイクル機構が高速炉の次期炉心材料候補として開発した鋼種であり、特徴としては、フェライト鋼であるため、オーステナイト鋼に比べて耐スエーリング性が非常に優れていることと、Mo, Wの固溶強化型元素およびNb, Vの析出強化型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である。また化学成分は被覆管用・ラッパ管用共通であるが、最終熱処理条件については、クリープ強度が重要となる被覆管では高温焼きならし(1100°C)高温焼き戻し(780°C)を、短時間強度が重要となるラッパ管では低温焼きならし(1050°C)低温焼き戻し(700°C)を設定している。

PNC-FMS鋼の衝撃特性については、1992年に材料強度基準（暫定案）²⁾として、PNC-FMS鋼データおよび海外材データに基づき、延性脆性遷移温度（DBTT：Ductile Brittle Transition Temperature）が設定されており、それ以降、見直しは行われず、現在に至っている。材料強度基準（暫定案）においては、策定当時に取得されていたPNC-FMS鋼データの数が十分でなかったため、衝撲特性において重要な特性の1つである寸法依存性の評価が行われておらず、また軽水炉構造材を対象とする電気技術規定³⁾において衝撲特性の評価指標としてDBTTとともに用いられている上部棚吸収エネルギー（USE：Upper Shelf Energy）の評価が行われていないといった課題がある。

そこで、本報告では、材料強度基準（暫定案）策定以後に取得されたPNC-FMS鋼データと従来データ、および海外材料などの他鋼種のデータを用いて、PNC-FMS鋼の衝撲特性の評価を行った。まず製造まま材のデータに基づきUSE, DBTTそれぞれにおける寸法依存性、材料の熱処理条件の影響などを評価し、さらに熱時効材および照射材のデータを用いて熱時効効果と照射効果それぞれの評価を実施した。これらの評価結果に基づき、PNC-FMS鋼における製造時のUSEとDBTTの設計値、および熱時効効果と照射効果それぞれの設計式の策定を行った。

2. PNC-FMS鋼および他鋼種のシャルピー衝撃試験データ

2.1 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験は、図2-1のように片側にノッチを有する試験片に、ノッチの反対側から衝撃荷重を加え、試験片が破断する際に吸収したエネルギーを測定するものである。試験片における各寸法の表記方法について、本報告ではJIS⁴⁾に従い図2-1に示すような表記方法を用いることとする。「3.1」で述べるように、USEの寸法効果については「幅：B」、および高さからノッチ深さを差し引いた「リガメントサイズ：b」が重要であり、DBTTの寸法効果においては「幅：B」とノッチの寸法および形状（ノッチ深さ、ノッチ底半径、ノッチ角度）が重要となる。

図2-2のようにシャルピー衝撃試験温度を横軸に、吸収エネルギーを縦軸にとると、高温側での吸収エネルギーは概ね一定値となり、このエネルギーは上部棚エネルギー（以降、USE）と呼ばれる。また、ある温度を境に低温側では脆性を、高温側では延性を示し、この温度は延性脆性遷移温度（以降、DBTT）と呼ばれる。「4」および「5」で示すように、多くのデータでは、時効あるいは照射により、製造時に比べて、USEが減少し、DBTTが増加する、すなわち耐衝撃性が悪化する。本報告では、時効材または照射材のUSEおよびDBTTと製造まま材のUSEおよびDBTTとの差（△USEおよび△DBTT）を算出し、それぞれの時効条件（時効温度、時効時間）または照射条件（照射温度、照射量）との関係を評価している。

2.2 PNC-FMS鋼のシャルピー衝撃試験データ

PNC-FMS鋼および開発途中材について、製造時、熱時効後、照射後のシャルピー衝撃試験が行われている。これらの鋼種の化学成分を表1に示す。一部の鋼種は開発途中材であるため、化学成分の一部が材料仕様から外れている。成分が仕様から外れている鋼種のデータについては、「3.3」で示すように、各々の化学成分が衝撃特性に及ぼす影響を評価するためのデータとして用いた。参考として、各鋼種について、成分量からNi当量とCr当量を算出し、図2-3のSchaefflerの状態図⁵⁾に基づき、δフェライト量を推定した。一部の鋼種についてはδフェライト量が測定されており、δフェライトが多量に生成する61FK鋼以外では、推定値と実測値は概ね一致している。

製造時シャルピーデータにおいて、開発途中材の鋼種については様々な熱処理条件でのシャルピー試験データが取得されている。「3.2」で述べるように、材料の熱処理条件は衝撃特性に対して大きな影響を及ぼすため、衝撃特性を評価する上で重要な因子の1つである。焼きならしの効果については温度の影響が支配的であるが、焼き戻しの効果については温度と時間の両方の影響を考慮する必要があると考えられるため、焼き

戻しパラメータとして次の式で表されるLMPを用いて焼き戻し条件を整理することとした。

$$LMP = (T + 273)(C + \log_{10}t) / 1000 \quad \dots \dots \quad (1)$$

T : 焼き戻し温度 (°C)

t : 焼き戻し時間 (hr)

LMPにおける定数「C」としては、PNC-FMS鋼のクリープ強度評価⁶⁾において得られた値「C=35」を用いた。

材料の組織に関しては、フェライト鋼では、δフェライト量および旧オーステナイト粒度が衝撃特性に影響を及ぼすことが報告されている^{7, 8)}。PNC-FMS鋼製造時データにおいて、δフェライト量は数%または0%であり、また旧オーステナイト粒度はほとんど測定されていないため、PNC-FMS鋼データを用いてδフェライト量または旧オーステナイト粒度の衝撃特性に対する影響を評価することは困難である。ただし、PNC-FMS鋼ラッパ管とSUS316上下部部材との異材溶接技術開発の一環として、様々なδフェライト量および旧オーステナイト粒度を有する材料のシャルピー試験データを取得する試験を現在実施しており、δフェライト量および旧オーステナイト粒度が衝撃特性に与える影響を評価する予定である。

試験片採取方向については、ノッチの向きと試験片を採取する材料に施された圧延方向が同じである場合、ノッチ方向と圧延方向が垂直である場合に比べて耐衝撃性が低いことが、EM10鋼について報告されている⁹⁾。本報告では、試験片採取方向の表記方法として、試験片の長手方向が圧延方向と同じである場合（ノッチの向きが圧延方向に対して垂直）には「L」とし、試験片の長手方向が圧延方向に対して垂直である場合（ノッチの向きが圧延方向と同じ）には「T」としている。PNC-FMS鋼データについて、試験片採取方向が明らかであるデータの方向は全て「L」であり、試験片採取方向を区別して衝撃特性を評価することは困難であることから、本報告では、試験片採取方向について考慮することなしに、PNC-FMS鋼の衝撃特性の評価を行うこととした。

溶接部の衝撃特性についてはPNC-FMS鋼ラッパ管とSUS316上下部部材との異材溶接技術開発において評価を行うこととし、本報告では母材部のみを評価対象とした。

時効後シャルピーデータについては、時効温度600~700°Cの高温側でのみ時効試験が行われており、ラッパ管の使用温度範囲と考えられる低温側（約400~550°C程度）のデータは取得されていない。そのため、「4」の時効効果の評価で示すように、現段階では、海外材データに基づき、低温側での時効効果を評価せざるを得なく、今後、ラッパ管の使用温度範囲を考慮してPNC-FMS鋼の低温側での時効データを取得し、時効効果を評価する必要がある。また時効条件については、製造時データにおいて焼き戻し条件の整理を行った場合と同様に、「C=35」のLMPを用いて整理することとした。

照射後シャルピーデータについては、照射温度373～727°C、最大中性子照射量14.7 ($\times 10^{26} \text{n}/\text{m}^2$, E>0.1 MeV) のデータが取得されているが、ある一定の照射量に対して照射温度を変化させたデータ、またはある一定の照射温度に対して照射量を変化させたデータがほとんど取得されておらず、現段階では、衝撃特性に対する照射温度の効果、あるいは照射量の効果を評価することは困難である。そのため、「5」の照射効果の評価で示すように、本報告では、主に海外材データに基づき照射効果を評価することとした。照射効果は特に低温側で顕著となると考えられることから、今後、PNC-FMS鋼の低温側での照射データをさらに取得し、照射効果を評価する必要がある。

2.3 他鋼種のシャルピー衝撃試験データ

海外においてラッパ管としての豊富な照射実績を有するEM10およびHT9鋼、また国内で核融合炉用材料候補として開発されたJFMS鋼などの鋼種について、公開文献^{8, 9, 11～28)}に報告されている製造まま材、熱時効材、照射材のシャルピー衝撃試験データを調査した。これらの鋼種の化学成分を表2に示す。

EM10鋼は0.1C-9Cr-1Mo鋼をベースとした100%マルテンサイト鋼、HT9鋼は0.2C-12Cr-1Mo-0.5W,Vの100%マルテンサイト鋼、JFMS鋼は0.05C-10Cr-2.3Mo,V,Nbのフェライト-マルテンサイト2相鋼である。PNC-FMS鋼について、主要な化学成分は0.12C-11Cr-0.5Mo-2W,V,Nbであり、組織は数%のフェライトを含むマルテンサイト鋼であることから、化学成分に関してはEM10, JFMS鋼に比べてHT9鋼に近く、組織上はJFMS鋼に比べてEM10, HT9鋼に近い。PNC-FMS鋼については現在取得されているデータ数が限られていることから、PNC-FMS鋼データに基づく評価を補うために、本報告では、寸法効果の評価では様々な試験片寸法でシャルピー試験が行われているHT9, JFMS鋼などのデータも評価対象データとして用い、時効効果および照射効果の評価ではEM10, HT9鋼などのデータを用いることとした。

3. 製造まま材の衝撃特性の評価

3.1 衝撃特性における寸法効果

3.1.1 USEの寸法依存性

USEにおける寸法効果については、これまで、試験片の寸法に関する様々な規格化因子を用いて、USEの寸法依存性を整理する試みがなされている^{10, 12~22, 27)}が、汎用性のある規格化因子は未だ得られていない。その中で、試験片の幅「B」と、試験片の高さからノッチ深さを差し引いたリガメントサイズ「b」を組み合わせて得られる「Bb²」または「(Bb)^{3/2}」を規格化因子として用いた場合、比較的良好な結果が得られている。ここで「Bb²」または「(Bb)^{3/2}」は、試験片のノッチ底から破壊が進展し、試験片が完全に破断する間に、塑性変形を生じる領域を含めた破壊の影響を受ける試験片の領域（破壊体積と呼ばれる）に相当すると考えられているものである。本報告では、まず「Bb²」または「(Bb)^{3/2}」を用いてPNC-FMS鋼のUSEデータを整理することとした。

様々な試験片寸法のデータが得られている2WFK相当板材（1050°Cx10min+700°Cx1hr）製造まま材のデータについて、USEと「Bb²」または「(Bb)^{3/2}」との関係を図3-1.1, 3-1.2に示す。いずれの図においても、寸法が小さい範囲については、USEの値が小さいため、それらのデータの差は明確ではないが、全体的には、「Bb²」または「(Bb)^{3/2}」が増加するにつれてUSEは指数関数的に増加する傾向が認められる。また幅と高さが同じ試験片と、幅と高さが異なる試験片については有意な差は見られない。次に、USEを「Bb²」または「(Bb)^{3/2}」で除することにより規格化を試みた場合を図3-2.1, 3-2.2に示す。「Bb²」を用いた場合には、幅と高さが同じ試験片と、幅と高さが異なる試験片では異なる挙動を示す傾向が見られる。「Bb²」または「(Bb)^{3/2}」のいずれの場合でも、寸法が増加するにつれて、規格化を試みたUSEは減少する傾向を示しており、その傾きは「Bb²」の方が「(Bb)^{3/2}」に比べて大きくなっている。よって、「(Bb)^{3/2}」を用いて規格化を試みたUSEの方が寸法依存性は小さいものの、「Bb²」または「(Bb)^{3/2}」いずれの場合でも規格化を試みたUSEは寸法依存性を有しており、「Bb²」または「(Bb)^{3/2}」では全く寸法依存性がないようにUSEを規格化することはできないと考えられる。

次に、2WFK相当板材（1050°Cx10min+700°Cx1hr）製造まま材のUSEデータについて、最小二乗法により「Bb」とのノミナル曲線を求めた結果を図3-3.1に示す。ノミナル式は、次式のようになる。

$$\text{USE} = 0.277 (\text{Bb})^{1.42} \quad \dots \dots \quad (2)$$

USEを「(Bb)^{1.42}」で除することにより規格化を試みた場合を図3-3.2に示す。規格化を試みたUSEには寸法依

存性は見られず、これらのデータについては「 $(Bb)^{1.42}$ 」を用いてUSEを寸法依存性のないように規格化することが可能であると考えられる。

2WFK相当板材（1050°C×10min+700°C×1hr）時効材についても同様にUSEデータと「Bb」の関係について、データのノミナル曲線を求めた結果、図3-4.1のように、次のノミナル式が得られた。

$$\text{USE} = 0.224 (Bb)^{1.45} \quad \dots \dots \quad (3)$$

「 $(Bb)^{1.45}$ 」を用いてUSEの規格化を試みた結果を図3-4.2に示す。規格化を試みたUSEには寸法依存性は見られず、これらのデータについては「 $(Bb)^{1.45}$ 」を用いてUSEを寸法依存性のないように規格化することが可能であると考えられる。

従来の研究では破壊体積に相当すると考えられる「Bb」の3/2乗すなわち1.5乗によるUSEの規格化が試みられてきたが、上記のように2WFK相当板材データについては「Bb」の1.5乗より若干小さい「Bb」の1.42乗または1.45乗がUSEの規格化因子となり得ることが明らかとなった。そこで、「Bb」の1.42乗あるいは1.45乗の規格化因子としての意味について以下のように検討を行った。

栗下ら²⁷⁾は、様々なフェライト鋼について、フルサイズ試験片（幅10mm×高さ10mm）および1/3サイズ試験片（幅3.33mm×高さ3.33mm）それぞれのUSEを「 $(Bb)^{3/2}$ 」で除することにより規格化した上で、それらの比「 α 」を次式のように算出し、図3-5のような「 α 」とフルサイズ試験片のUSEとの関係を報告している。

$$\alpha = (\text{フルサイズ試験片のUSE}/(Bb)^{3/2}) / (1/3\text{サイズ試験片のUSE}/(Bb)^{3/2}) \quad \dots \dots \quad (4)$$

全体的に、フルサイズ試験片のUSEが減少するにつれて「 α 」は減少しており、USEが約250 (J) で「 $\alpha = 1$ 」となっている。フルサイズ試験片のUSEが約250 (J) より小さい範囲では、「 α 」は1より小さくなっている。これは破壊体積として用いている「 $(Bb)^{3/2}$ 」が過大になっているためであると考えられている。2WFK相当板材の製造まま材および時効材のフルサイズ試験片のUSEはそれぞれ135, 119 (J) であり、図3-5の「 α 」とフルサイズ試験片のUSEとの関係において、「 α 」は約0.75程度である。これは、2WFK相当板材の製造まま材および時効材では、USEの規格化因子として、「Bb」の1.5乗より若干小さい1.42乗または1.45乗が得られたことと対応している。

さらに、様々な試験片寸法でのシャルピーデータが取得されている他の鋼種（HT9鋼 製造まま材、12Cr1MoVW鋼 製造まま材、JFMS鋼の製造まま材と照射材、9Cr1MoVNb鋼 製造まま材、9Cr2W鋼 製造まま材、A533鋼 製造まま材、A508鋼 製造まま材）についても、図3-6.1～3-6.8のように、最小二乗法によりデータのノミナル曲線を求ることにより、USEの規格化因子となりうる「Bb」の乗数を求めた。その結果、

「(Bb)ⁿ」における乗数「n」の値として「n=1.22~1.71」が得られた。

以上のようにして求めた「(Bb)ⁿ」における乗数「n」とフルサイズ試験片のUSEとの関係を図3-7に示す。データのはらつきはあるものの、全体的にUSEが減少するにつれて乗数「n」は減少する傾向を示しており、また乗数「n=1.5」となるのはUSEが約250 (J) の場合であり、これらは図3-5で示される関係と対応している。このようなUSEと「(Bb)ⁿ」における乗数「n」との関係は、以下に述べることに起因していると考えられる。USEが測定される試験温度では材料が延性状態であることから、まずノッチの底において塑性変形が生じた後、亀裂が発生し、亀裂先端の近傍は塑性変形を生じながら、破壊が進展する。よって、ノッチ底から破壊が進展し、試験片が完全に破断するまでの間で塑性変形が生じる領域に吸収エネルギーの大きさは対応していると考えられる。すなわち、USEの大きさに応じて、塑性変形が生じる領域も異なる。塑性変形が生じる領域は破断面近傍の領域であり、破断面の面積は「Bb」に近いことから、「(Bb)ⁿ」により塑性変形が生じる領域の体積を表すことができ、USEの大きさに応じて「(Bb)ⁿ」における乗数「n」が決まると考えられる。

図3-7における全てのデータに対してノミナル直線を求めた結果、次式が得られた。

$$n = 1.38 \times 10^{-3} USE + 1.20 \quad \dots \dots \quad (5)$$

n：「(Bb)ⁿ」における乗数「n」 (-)

USE：フルサイズ試験片のUSE (J)

図3-7において、データのはらつきはあるものの、ノミナル直線はほとんどのデータに対して良好な関係にあることから、フルサイズ試験片のUSEが約50~350 (J) である材料については、式(5)から得られる「(Bb)ⁿ」を用いることによりUSEの寸法依存性を適切に評価することができると考えられる。

2WFK相当板材の製造まま材および時効材のフルサイズ試験片のUSEはそれぞれ135, 119 (J) であり、式(5)の関係を用いると、「n」の値としてそれぞれ1.39, 1.36が得られる。一方、図3-3.1, 3-4.1のようにデータのノミナル曲線を求めるこにより得られた「n」の値は1.42, 1.45であり、式(5)から求めた「n」の値に比べて若干大きいが、その差はわずかである。製造まま材と時効材とで「n」の値に有意な違いはない。また2WFK相当板材について、その化学成分はPNC-FMS鋼の仕様範囲内であり、その熱処理条件 (1050°Cx10min + 700°Cx1hr) はPNC-FMS鋼ラッパ管の熱処理条件と同じであり、製作工程はラッパ管の製造工程を極力模擬したものであることから、2WFK相当板材はPNC-FMS鋼ラッパ管と同等の衝撃特性を有していると考えられる。

よって、本報告では、2WFK相当板材データの評価結果に基づき、「(Bb)ⁿ」における乗数「n」の値として「n=1.4」を用いてPNC-FMS鋼データのUSEを規格化することとする。

また「4」の時効効果、および「5」の照射効果の評価で用いる海外材データについては、フルサイズ試験片でのUSEが明らかではないこと、およびそれらの衝撃特性はPNC-FMS鋼と大きく異なるものではないとは考えられることから、「(Bb)¹⁴⁾」を用いてUSEを規格化し、評価用データとして用いることとする。

3.1.2 DBTTの寸法依存性

USEの場合と同様に、DBTTにおける寸法効果についても、これまで様々な規格化因子を用いた研究が行われている^{10), 12~22, 27)}が、未だ汎用性のある規格化因子は得られていない。そこで、本報告では、以下に述べるように、まずDBTTにおける寸法効果のメカニズムについて調査および検討を行い、試験片寸法の中でDBTTに影響を及ぼす可能性のある寸法を規格化因子の候補として選定した上で、その選定した寸法を用いてPNC-FMS鋼および他鋼種のデータを評価し、その結果に基づきDBTTの寸法依存性を適切に評価可能な規格化因子を決定することとした。

DBTTにおける寸法効果は次のようなメカニズムに起因していると考えられている^{29), 30)}。図3-8に示すように、材料の降伏応力の温度依存性は破断応力の温度依存性に比べて大きいため、ある温度で降伏応力は破断応力と等しくなり、この温度がDBTTとして定義される。試験片の幅が小さい場合、力学的拘束が小さいために降伏応力が小さいのに対し、試験片の幅が大きくなると力学的拘束が大きくなり降伏応力が大きくなるため、DBTTが増加すると考えられている。

また試験片の幅がノッチ底の応力状態に対して次のような影響を及ぼすことが示されている²⁹⁾。試験片の幅が小さい場合平面応力状態であり、試験片の幅が大きくなるにつれて平面歪み状態、すなわち3軸応力状態に移行する。平面応力状態では材料は塑性変形を伴いせん断分離的に破壊する性質（延性）を示すのに対し、平面歪み状態では材料は塑性変形を伴わず引張分離的にへき開破壊する性質（脆性）を示す。応力状態とDBTTとの関係については現段階では報告されていないが、次のような可能性が考えられる。応力状態は試験片の幅方向の位置によって異なり、幅方向の中心部（試験片内部）では平面歪み状態、幅方向の両端部（試験片表面）では平面応力状態となり、両者の応力状態が混在している。試験片の幅が小さい場合には平面応力状態の割合が多く、破壊の際における塑性変形領域が多いのに対し、試験片の幅が増加するに従い、平面歪み状態の割合が増加し、塑性変形領域は減少する。ある温度において衝撃試験を行った場合、幅の小さい試験片では破壊の際における塑性変形領域が多いことから延性を示す傾向が大きくなり、幅の大きい試験片では塑性変形領域が少ないと脆性を示す傾向が大きくなる。このように、試験片の幅に応じて、ノッチ底の応力状態が異なり、塑性変形領域が増減し、延性または脆性を示す割合が異なることに起因して、DBTTが異なるものとなる可能性が考えられる。

一方、栗下らの研究¹⁶⁾では、ノッチ寸法から決定される弾性応力集中係数「Kt」を用いてDBTTの寸法依

存性を整理する試みが行われ、比較的良好な結果が得られている。弾性応力集中係数「Kt」は図3-9のようにノッチ深さ、ノッチ底半径、ノッチ角度、試験片高さから求められるものであり、ノッチが鋭いほど「Kt」は大きくなる。ノッチ寸法がDBTTに及ぼす影響のメカニズムについては明らかとなっていないが、次のような可能性が考えられる。一般に、材料の一部にノッチがある場合に、材料全体にかかる応力に比べて、ノッチ底にかかる応力は大きくなり、次式のように弾性応力集中係数が定義されている³⁾¹⁾。

$$(\text{弾性応力集中係数}) = (\text{ノッチ底にかかる応力}) / (\text{材料全体にかかる応力}) \quad \dots \dots \quad (6)$$

試験片に対してある衝撃荷重が与えられた場合、弾性応力集中係数が大きなノッチをもつ試験片では、弾性応力集中係数が小さなノッチをもつ試験片に比べて、より大きな応力がノッチ底に加わる。このように、ノッチ寸法が異なる試験片においては、試験片全体にかかる応力は同じでも、ノッチ底にかかる応力が異なる。DBTTは破断応力と降伏応力の関係から決まることから、弾性応力集中係数が異なる試験片においてノッチ底にかかる応力が異なることがノッチ底における破断応力と降伏応力の関係に何らかの影響を及ぼすことにより起因してDBTTが異なったものとなる可能性が考えられる。

以上のことから、本報告では、DBTTの寸法依存性を適切に整理可能な試験片寸法の候補として、試験片の幅、およびノッチ寸法から決定される弾性応力集中係数を選定し、これらを用いてPNC-FMS鋼および他鋼種のデータを整理することを試み、その適用性を検討することとする。

2WFK相当板材 製造まま材のデータについて、DBTTを「幅：B」、「弾性応力集中係数：Kt」および「B」と「Kt」の積「BKt」を用いて整理した結果を図3-10.1～3-10.3に示す。「B」を用いて整理した場合、全体的には「B」が増加するにつれてDBTTも増加する傾向が見られる。「B」が大きい範囲では、データのばらつきは少なく、良好な結果となっているが、「B」が小さい範囲では、データのばらつきが大きくなっている。「B」が小さい範囲のデータについては、「B」が同じデータでもノッチの寸法が異なっており、ノッチ寸法の影響のためデータのばらつきが大きくなっていると考えられる。「Kt」を用いて整理した場合には、全体的にデータのばらつきが非常に大きくなっている。このように、「B」または「Kt」ではDBTTの寸法依存性を適切に評価することはできないと考えられる。一方、「BKt」を用いて整理した場合、「BKt」が増加するにつれてDBTTも増加する傾向が見られ、全体的に、データのばらつきも少なく、「BKt」とDBTTは良好な対応関係を示している。「log₁₀BKt」とDBTTデータは概ね直線の関係にあるため、次のような「log₁₀BKt」とDBTTの一次式として、データのノミナル式を求めると図3-11.1のようになる。

$$\text{DBTT} = p \times \log_{10} \text{BKt} + q \quad \dots \dots \quad (7)$$

2WFK相当板材 製造まま材データの評価結果から、「BKt」によりDBTTの寸法依存性を適切に評価できる

可能性があると考えられるため、2WFK相当板材 時効材および他鋼種（HT9鋼 製造まま材、12Cr1MoVW鋼 製造まま材、JFMS鋼の製造まま材と照射材、9Cr1MoVNb鋼 製造まま材、9Cr2W鋼 製造まま材、A533鋼 製造まま材、A508鋼 製造まま材）のデータについても、「BK_t」を用いてDBTTの整理を行い、「log₁₀BK_t」とDBTTの一次式として、データのノミナル式を求めた結果を図 3-11.2～3-11.10 に示す。いずれの鋼種においても、ノミナル直線に対してデータのばらつきは小さく、「BK_t」とDBTTは良好な対応関係を示しており、「BK_t」によりDBTTの寸法依存性を適切に評価できていると考えられる。

ただし、ノミナル直線における傾き「p」および切片「q」は、鋼種によって全く異なったものとなっている。そこで、「3.1.1」においてUSEについて評価した場合を参考にして、ノミナル直線における傾き「p」および切片「q」をフルサイズ試験片のDBTTにより整理した結果を図 3-12.1, 3-12.2 に、フルサイズ試験片のUSEにより整理した結果を図 3-13.1, 3-13.2 に示す。いずれの場合も、データのばらつきが大きく、何らかの傾向は見られないことから、ノミナル直線における傾き「p」および切片「q」をフルサイズ試験片のDBTT、またはUSEと関連付けることは困難である。

DBTTは式(7)から「DBTT - (p x log₁₀BK_t)」として寸法依存性のないように規格化することができるため、2WFK相当板材 製造まま材データについて、「log₁₀BK_t」とDBTTのノミナル直線の傾き「p=115」を用いて、「DBTT - (115 log₁₀BK_t)」としてDBTTを規格化した結果を図 3-14 に示す。データのばらつきは約50°C程度あるものの、寸法依存性は見られない。

以上のように、DBTTの寸法依存性については、「BK_t」を用いることにより適切に評価できると考えられることから、本報告では、DBTTの規格化因子として「BK_t」を適用することとする。

3.2 材料の熱処理条件の影響

PNS-FMS鋼についてはラッパ管と被覆管とで熱処理条件が異なっており、短時間強度が重要となるラッパ管では被覆管に比べて低温の熱処理（焼きならし1050°C x 10min + 焼き戻し700°C x 1hr）を、クリープ強度が重要となる被覆管ではラッパ管に比べて高温の熱処理（焼きならし1100°C x 10min + 焼き戻し780°C x 1hr）を実施している。そこで、材料の熱処理条件が衝撃特性に及ぼす影響を以下のように評価した。

3.2.1 焼きならし条件の影響

PNS-FMS鋼製造まま材データの中で、ある鋼種において焼き戻し条件が同一で焼きならし条件をパラメータにとって試験が行われているデータを選定し、焼きならし条件が衝撃特性に及ぼす影響を以下のように評

価した。焼きならしの場合には高温であるため、温度に比べて時間の影響が小さいと考え、本報告では焼きならし温度が衝撃特性に及ぼす影響を評価することとした。USEおよびDBTTと焼きならし温度との関係を図3-15.1, 3-15.2に示す。焼きならし温度が増加するにつれて、USEは減少し、DBTTは増加する、すなわち耐衝撃性が悪化する傾向が認められる。なお試験片の寸法は全て同じであるため、USEおよびDBTTを規格化することなく、そのままの数値データをプロットしている。鋼種別にデータをプロットした場合を、USEについて図3-16.1～3-16.5に、DBTTについて図3-17.1～3-17.5に示す。USE, DBTTいずれの場合でも、鋼種によって焼きならし温度依存性の程度には差があるものの、ほとんどの鋼種において、焼きならし温度が高くなるにつれて、USEは減少し、DBTTは増加する傾向が認められる。このような衝撃特性の焼きならし温度依存性は、次の理由によると考えられる。一般に³²⁾、材料の結晶粒度は衝撃特性に影響を及ぼし、細粒である場合に比べて粗粒である場合の方が耐衝撃性に劣る。焼きならし温度が高温側であるほど粗粒となるため、耐衝撃性が悪化する。

図3-15.1, 3-15.2におけるUSE, DBTTデータの焼きならし温度の範囲には、PNC-FMS鋼ラッパ管と被覆管それぞれの焼きならし温度が含まれていることから、PNC-FMS鋼ラッパ管と被覆管の衝撃特性には焼きならし温度の違いの影響があると考えられる。焼きならし温度のみに着目すれば、被覆管に比べて低温側で焼きならしが行われているラッパ管の方が耐衝撃性に優れていることになる。しかし、「3.2.2」で述べるように焼き戻し条件の影響については、焼き戻し条件がより高温側である方が耐衝撃性は良好となり、高温焼き戻し材である被覆管の方が耐衝撃性に優れることになる。このように、焼きならし温度の違いのみでPNC-FMS鋼ラッパ管と被覆管それぞれの衝撃特性が決まるわけではなく、焼きならしと焼き戻しそれぞれが衝撃特性に及ぼす影響の割合に応じて、PNC-FMS鋼ラッパ管と被覆管それぞれの衝撃特性が決まると考えられる。

3.2.2 焼き戻し条件の影響

PNS-FMS鋼製造まま材データの中で、ある鋼種において焼きならし条件が同一で焼き戻し条件をパラメータにとって試験が行われているデータを選定し、焼き戻し条件が衝撃特性に及ぼす影響を以下のように評価した。焼き戻しの効果については温度と時間の両方を考慮する必要があると考えられるため、焼き戻し温度と焼き戻し時間をLMPで整理した焼き戻しパラメータを用いて、衝撃特性に対する焼き戻し条件の影響を評価することとした。LMPにおける定数「C」としては、「2.2」で述べたように、PNC-FMS鋼のクリープ強度の評価において得られた「C=35」を用いた。USEおよびDBTTと焼き戻しパラメータとの関係を図3-18.1, 3-18.2に示す。焼き戻しパラメータが増加するにつれて、USEは増加し、DBTTは減少する、すなわち耐衝撃性が向上する傾向が認められる。鋼種別にデータをプロットした場合を、USEについて図3-19.1～3-19.6に、DBTTについて図3-20.1～3-20.6に示す。USE, DBTTいずれの場合でも、ほとんどの鋼種において、焼き戻し

パラメータが増加する、すなわち高温長時間側になるにつれて、USEは増加し、DBTTは減少する傾向が認められる。これは、焼き戻しパラメータが大きいほど、すなわち焼き戻し条件が高温長時間側であるほど、材料が軟化されるためであると考えられる。

図 3-18.1, 3-18.2 におけるUSE, DBTTデータの焼き戻しパラメータの範囲には、PNC-FMS鋼ラッパ管と被覆管それぞれの焼き戻しパラメータが含まれていることから、PNC-FMS鋼ラッパ管と被覆管の衝撃特性には焼き戻しパラメータの違いの影響があると考えられる。焼き戻しパラメータのみに着目すれば、焼き戻しパラメータがラッパ管に比べて大きな被覆管の方が耐衝撃性に優れていることになる。しかし、「3.2.1」で述べたように、焼きならし条件の影響に関しては、低温焼きならし材であるラッパ管の方が耐衝撃性に優れることになる。このように、ラッパ管は焼きならし温度が低いことにより被覆管より耐衝撃性に優れる可能性があり、また被覆管は焼き戻しパラメータが大きいことによりラッパ管に比べて耐衝撃性が良好である可能性が考えられ、焼きならしと焼き戻しそれぞれが衝撃特性に及ぼす影響の程度に応じて、PNC-FMS鋼ラッパ管と被覆管それぞれの衝撃特性が決まると考えられる。

同一鋼種でラッパ管熱処理と被覆管熱処理それぞれを施したシャルピー試験データは取得されていないため、次のようにラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材それぞれのUSE、DBTTを推定し、ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材の耐衝撃性の比較を行った。

ラッパ管用焼きならし、または被覆管用焼きならしを施したS63年度試作板材IIB(A)のデータを用いて、ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材それぞれのUSEを推定した結果を図 3-21.1 に示す。ラッパ管熱処理材については、ラッパ管焼きならし温度である1050°Cで焼きならしを行ったデータのノミナル直線を求め、そのノミナル直線において焼き戻しパラメータがラッパ管焼き戻しパラメータと一致する場合のUSEをラッパ管熱処理材のUSE推定値とした。被覆管熱処理材のUSEについても同様にして推定した。その結果、被覆管熱処理材のUSE推定値の方がラッパ管熱処理材のUSE推定値より大きいレベルであった。

同様に、ラッパ管用焼きならし、または被覆管用焼きならしを施したS63年度試作板材IIB(B)のデータを用いてラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材それぞれのUSEを推定した結果を図 3-21.2 に示す。この場合も、被覆管熱処理材のUSE推定値の方がラッパ管熱処理材のUSE推定値より大きくなった。DBTTについても、USEの場合と同様の方法で、ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材それぞれのDBTTを推定した結果を図 3-22.1, 3-22.2 に示す。S63年度試作板材IIB(A)のデータおよびS63年度試作板材IIB(B)のデータいずれの場合でも被覆管熱処理材のDBTT推定値の方がラッパ管熱処理材のDBTT推定値より低いレベルとなった。このように、ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材それぞれのUSE, DBTTを推定・比較した結果、被覆管熱処理材の方が若干耐衝撃性に優れていると考えられる。

以上のように、材料の熱処理条件（焼きならし、焼き戻し）は衝撃特性に影響を及ぼすため、熱処理条件が異なるPNC-FMS鋼ラッパ管と被覆管では衝撃特性が異なり、ラッパ管に比べて高温焼き戻しを行った被覆管の方が、耐衝撃特性に優れていると考えられる。炉内使用時に耐衝撃性が重要となるのはラッパ管であり、被覆管の耐衝撃性は特に問題とはならないと考えられ、またラッパ管およびラッパ管熱処理板材のシャルピー試験データに比べて、被覆管熱処理材のデータは非常に少ない。そこで、本報告では、今後もし被覆管のUSEおよびDBTTの設計値が必要となる場合には安全側にラッパ管の設計値を適用することとし、「3.4」で述べるPNC-FMS鋼製造まま材のUSEおよびDBTTの設計値の策定においては、PNC-FMS鋼ラッパ管のみを対象として行うこととする。

3.3 材料の化学成分の影響

PNC-FMS鋼および開発途中材については多くのシャルピー試験データが取得されているが、開発途中材については一部の化学成分がPNC-FMS鋼の材料仕様範囲から外れているものがある。これらのデータの中で、異なる鋼種間で焼きならし温度および試験片寸法が同じであるデータを選定して、以下のように化学成分が衝撃特性に及ぼす影響を評価した。

61FK板材、61FS板材、61FSF板材、S62年度試作板材IA(B)、S63年度試作板材IIA(A)の各データの比較を図3-23.1、3-23.2に示す。USEについて焼き戻しパラメータ：LMP=約35.5～36のデータを比較すると、USEが高い順に、61FS、61FKと61FSF、S62年度試作板材IA(B)とS63年度試作板材IIA(A)となっている。DBTTにおいてもLMP=約35.5～36のデータについては、DBTTが低い順に、61FS、61FSFとS62年度試作板材IA(B)、S63年度試作板材IIA(A)、61FKとなっている。ただし、61FSのデータについてはデータ数が2点（LMP=約36, 37.5）と非常に少ないものの、「3.2」の熱処理条件の影響の評価結果とは逆の傾向が見られ、焼き戻しパラメータが大きいデータの方がUSEが小さく、DBTTが大きくなっている。DBTTについては、焼き戻しパラメータ：LMP=約37.5の61FSデータは他の鋼種に比べて、DBTTが最も高くなっている。化学成分については、61FKは「C」が非常に少ない一方、「Mo」が多く、「W」は入っていない。61FSとS63年度試作板材IIA(A)は全ての成分がPNC-FMS鋼の仕様範囲内である。61FSFは「Ni」が若干多く、「Mo」が少ない。S62年度試作板材IA(B)は「C」と「W」が多いのに対し、「Mo」と「N」が少ない。「C」と「N」は侵入型固溶強化型元素であり、また「Nb」および「V」と炭窒化物を形成することにより材料の強度を向上させる元素であり、「Mo」と「W」は置換型固溶強化型元素である。材料の強度が高く、硬くなると、耐衝撃性は悪化することから、強度の向上に寄与しているこれらの元素が衝撃特性に影響を及ぼしている可能性が考えられる。61FKについては「C」は少ないので、「Mo」が他鋼種に比べて非常に多いためDBTTが高くなってしまい、61FS

については「C」が61FK以外の他の鋼種に比べて少ないとことから、焼き戻しパラメータ：LMP=約36においてUSEが高くDBTTが低くなっている、S62年度試作板材IA(B)については「C」と「W」が多いためにUSEが最も低くなっている可能性が考えられる。

S63年度試作板材IIA(A)データとS63年度試作板材IIA(B)データの比較を図3-24.1, 3-24.2に示す。USEについては鋼種間の差はほとんど見られないが、DBTTについてはS63年度試作板材IIA(A)の方が全体的に低い傾向が認められる。ただし、その差は約10°C程度であり、小さなものである。S63年度試作板材IIA(A)は全ての成分がPNC-FMS鋼の仕様範囲内であるのに対し、S63年度試作板材IIA(B)は「N」が仕様上限を超えており、S63年度試作板材IIA(B)は「N」が多いため、S63年度試作板材IIA(A)に比べて硬く、DBTTが高くなっている可能性が考えられる。S63年度試作板材IIA(A)とS63年度試作板材IIA(B)の「N量」の差は「0.023 (wt.%)」であり、その場合のDBTTの差は約10°C程度である。

S63年度試作板材IIA(A)データとS63年度試作板材IIA(C)データの比較を図3-25.1, 3-25.2に示す。USEについてはS63年度試作板材IIA(A)の方が全体的に高く、DBTTについてはS63年度試作板材IIA(A)の方が全体的に低い傾向が認められる。S63年度試作板材IIA(A)は全ての成分がPNC-FMS鋼の仕様範囲であるのに対し、S63年度試作板材IIA(C)は「Nb」と「V」が仕様上限を超えており、S63年度試作板材IIA(C)は「Nb」および「V」が多いため、S63年度試作板材IIA(A)に比べて硬く、USEが低く、DBTTが高くなっている可能性が考えられる。S63年度試作板材IIA(A)とS63年度試作板材IIA(C)の「Nb量」の差は「0.04 (wt.%)」、「V量」の差は「0.10 (wt.%)」であり、その場合のDBTTの差は約15°C程度である。

S63年度試作板材IIA(B)データとS63年度試作板材IIA(C)データの比較を図3-26.1, 3-26.2に示す。USEについてはS63年度試作板材IIA(B)の方が全体的に高く、DBTTについてはS63年度試作板材IIA(B)の方が全体的に低い傾向にあるが、それぞれの差は小さなものである。既に述べたように、S63年度試作板材IIA(B)は「N」が、S63年度試作板材IIA(C)は「Nb」と「V」が仕様上限を超えており、これらの元素はいずれも材料の強度向上させる元素であり、S63年度試作板材IIA(B)とS63年度試作板材IIA(C)の「N量」の差は「0.021 (wt.%)」、「Nb量」の差は「0.04 (wt.%)」、「V量」の差は「0.01 (wt.%)」である。S63年度試作板材IIA(B)では「N」が、S63年度試作板材IIA(C)では「Nb」と「V」が、強度および硬さの向上、すなわち耐衝撃性の悪化に寄与しており、結果的に両鋼種の耐衝撃特性がほとんど同じ程度となっている可能性が考えられる。また、「N」と同様に強度向上に寄与する「C」については、S63年度試作板材IIA(B)の「C量」はS63年度試作板材IIA(C)より「0.02 (wt.%)」少なく、両鋼種の衝撃特性の関係にはその影響も含まれている可能性も考えられる。

S63年度試作板材IIB(A)データとS63年度試作板材IIB(B)データの比較を図 3-27.1, 3-27.2 に示す。ほとんどのデータについては、S63年度試作板材IIB(A)の方が、USEが高く、DBTTが低い傾向にあるが、全体的に鋼種間の差は小さなものである。S63年度試作板材IIB(A)およびS63年度試作板材IIB(B)の化学成分は全て材料仕様範囲内であるが、S63年度試作板材IIB(B)については強度向上のために「B=0.0022 (wt.%)」が添加されている。「B」が若干添加されているために、S63年度試作板材IIB(B)はS63年度試作板材IIB(A)に比べて硬くなり、一部のデータについて耐衝撃性が劣っている可能性が考えられる。

S63年度試作板材IIA(A)データとS63年度試作板材IIB(A)データの比較を図 3-28.1, 3-28.2 に示す。全体的に、S63年度試作板材IIB(A)の方が、USEが高く、DBTTが低い傾向にある。S63年度試作板材IIA(A)およびS63年度試作板材IIB(A)の化学成分は全て材料仕様範囲内であるが、強度向上に寄与する元素である「C」、「W」、「V」については、S63年度試作板材IIA(A)の方がS63年度試作板材IIB(A)に比べて多くなっている。そのために、S63年度試作板材IIA(A)の方が硬くなり、耐衝撃性が劣っている可能性が考えられる。S63年度試作板材IIA(A)とS63年度試作板材IIB(A)の「C量」の差は「0.02 (wt.%)」、「W量」の差は「0.26 (wt.%)」、「V量」の差は「0.05 (wt.%)」であり、その場合のDBTTの差は約 15 °C である。

以上のように、PNC-FMS鋼を構成している化学成分の中で衝撃特性に影響を及ぼす化学成分として、強度の向上に寄与している「C」、「N」、「Mo」、「W」、「Nb」、「V」の可能性が考えられるもの、それらが衝撃特性に及ぼす定量的な効果を明確にすることは現段階では困難である。ただし、上記の評価結果、および「3.4」で示すようなPNC-FMS鋼材料仕様範囲内の鋼種におけるデータのばらつきから、化学成分がPNC-FMS鋼の材料仕様範囲内であれば、DBTTの変動幅は約±20°C程度になると考えられる。

3.4 製造時におけるUSEおよびDBTTの設計基準の策定

以上のように、化学成分および熱処理条件は衝撃特性に影響を及ぼすため、化学成分がPNC-FMS鋼の材料仕様範囲内であり、かつ熱処理条件がラッパ管熱処理条件と概ね同じであるデータを選定し、以下のように、PNC-FMS鋼の製造時におけるUSE, DBTTの設計値を策定した。

USEの設計値の策定に用いるPNC-FMS鋼ラッパ管およびラッパ管熱処理材のデータを図 3-29 に示す。USEの寸法依存性を考慮して、USEを「(Bb)^{1.4}」で除することにより寸法依存性のないように規格化した値を算出し、プロットしている。プロットした全てのデータのノミナル値を求めた結果を図 3-30 に示す。ノミナル値は0.289となったが、データの中で1つのデータ「USE/(Bb)^{1.4}=0.119」が他のデータに比べてノミナル値を大きく下回っており、99.9%信頼下限からも外れている。このデータについて棄却検定³⁻³⁾を行った

結果、有意水準1%で棄却可能と判定されることから、本報告では評価対象データからこのデータを除くこととした。

棄却検定によりデータを除いた場合のノミナル値および95%信頼下限値を求めた結果を図3-31に示す。全てのデータは95%信頼下限に含まれていることから、95%信頼下限値を設計用の下限値とする。よって、USEを寸法依存性のないように「 $\text{nor.USE} = \text{USE}/(\text{B}\text{b})^{1.4}$ 」として規格化した「 nor.USE 」の設計値を次の通りとする。

(製造時 nor.USE の設計用ノミナル値)

$$\text{nor.USE} = 0.297 \quad \dots \dots \quad (8)$$

(製造時 nor.USE の設計用下限値)

$$\text{nor.USE} = 0.228 \quad \dots \dots \quad (9)$$

$$(*) \text{ nor.USE} = \text{USE}/(\text{B}\text{b})^{1.4}$$

USE：上部棚吸収エネルギー (J)

B：試験片の幅 (mm)

b：試験片のリガメントサイズ (mm) (試験片高さからノッチ深さを差し引いた寸法)

DBTTの設計値の策定に用いるPNC-FMS鋼ラッパ管およびラッパ管熱処理材のデータを図3-32.1に示す。DBTTの寸法依存性を考慮して、DBTTを「 $\log_{10}\text{BKt}$ 」で整理してプロットしている。プロットした全てのデータのノミナル直線と95%信頼上限直線を求めた結果を図3-32.2に示す。1点のみ95%信頼上限からわずかに外れているが、その差は非常に小さく、それ以外のデータは95%信頼上限に含まれていることから、95%信頼上限直線を設計用の上限直線とする。またDBTTを寸法依存性のないように規格化した場合、ノミナル値は「 $\text{DBTT} - 119 (\log_{10}\text{BKt}) = -160$ 」となる。DBTTの値は試験片の寸法に応じて異なるが、原型炉における燃料集合体の構造設計方針^{3,4)}では衝撃特性に関する設計基準は定められておらず、試験片寸法の規定は存在しないため、現段階では、DBTTと「 $\log_{10}\text{BKt}$ 」の関係式として、次のようにDBTTの設計値を策定することとする。

(製造時DBTTの設計用ノミナル値)

$$\text{DBTT} = 119 (\log_{10}\text{BKt}) - 160 \quad \dots \dots \quad (10)$$

(製造時DBTTの設計用上限値)

$$\text{DBTT} = 119 (\log_{10}\text{BKt}) - 137 \quad \dots \dots \quad (11)$$

DBTT：延性脆性遷移温度 (°C)

B：試験片の幅 (mm)

Kt：弾性応力集中係数 (-)

軽水炉構造材に関する電気技術規定³⁾ではシャルピー衝撃試験片としてフルサイズ試験片（幅と高さがそれぞれ10mm）を用いることが規定されており、式(10), (11)からフルサイズ試験片の場合には設計用ノミナル値は28°C、設計用上限値は51°Cとなる。また原型炉「もんじゅ」サイズのラッパ管の肉厚3mmを考慮して、幅と高さがそれぞれ3mmと10mmのサブサイズ試験片の場合には設計用ノミナル値は-34°C、設計用上限値は-12°Cとなる。今後、フェライト鋼ラッパ管を用いた燃料集合体の構造設計方針を検討・策定する際には、耐衝撃性を評価する場合の試験片サイズについても検討を行う必要がある。

4. 热时効効果の評価

4.1 時効効果における寸法の影響

2WFK相当板材（1050°Cx10min+700°Cx1hr）について、热时効材（700°Cx2000hrの時効を実施）のUSEと製造まま材のUSEとの比較を図4-1.1に示す。「 $\log_{10}Bb$ 」が小さい範囲ではUSEの値が小さいために热时効材と製造まま材との差はほとんど見られないが、「 $\log_{10}Bb$ 」が大きい範囲では热时効材のUSEは製造まま材より小さくなっている。热时効によりUSEは減少する傾向が見られる。USEに対する热时効効果として、△USEを次式のように算出する。

$$\Delta \text{USE} = (\text{热时効材のUSE}) - (\text{製造まま材のUSE}) \quad \dots \dots \quad (12)$$

試験片寸法が同じ热时効材データと製造まま材データについて、式(12)のように算出した△USEの寸法依存性を図4-1.2に示す。ほとんどのデータについて△USEの絶対値は小さいものの、一部のデータについては「 $\log_{10}Bb$ 」が大きくなるにつれて△USEの絶対値は増加する傾向が見られ、「 $\log_{10}Bb=約1.9$ 」であるデータの1つは他のデータに比べて△USEの絶対値が非常に大きくなっている。

USEを「 $(Bb)^{1.4}$ 」で除することによりUSEを寸法依存性のないように規格化した場合の热时効材と製造まま材との比較を図4-2.1に示す。また△nor.USEを次式のように算出する。

$$\Delta \text{nor.USE} = (\text{热时効材のUSE}/(Bb)^{1.4}) - (\text{製造まま材のUSE}/(Bb)^{1.4}) \quad \dots \dots \quad (13)$$

試験片寸法が同じ热时効材データと製造まま材データについて、式(13)のように算出した△nor.USEを図4-2.2に示す。△nor.USEの寸法依存性は見られないことから、本報告では、異なる試験片寸法データを用いてUSEに対する热时効効果を評価する際には△nor.USEを用いることとする。

DBTTについても同様に、2WFK相当板材（1050°Cx10min+700°Cx1hr）の热时効材（700°Cx2000hrの時効を実施）と製造まま材との比較を図4-3.1に示す。ここでは、DBTTの寸法依存性を適切に評価できると考えられる「 $\log_{10}Bkt$ 」を用いてデータを整理している。全体的に热时効材のDBTTは製造まま材に比べて大きく、热时効によりDBTTが増加する傾向が見られる。DBTTに対する热时効効果として、△DBTTを次式のように算出する。

$$\Delta \text{DBTT} = (\text{热时効材のDBTT}) - (\text{製造まま材のDBTT}) \quad \dots \dots \quad (14)$$

試験片寸法が同じ热时効材データと製造まま材データについて、式(14)のように算出した△DBTTの寸法依存

性を図4-3.2に示す。 Δ DBTTの寸法依存性は見られないことから、本報告では、評価対象データの試験片寸法に関わらず、熱時効がDBTTに及ぼす影響の評価では Δ DBTTを用いることとする。

4.2 材料の熱処理条件の影響

材料の製造時における熱処理条件（焼きならし、焼き戻し）が熱時効効果に及ぼす影響を以下のように評価した。

4.2.1 焼きならし条件の影響

61FK板材、61FS板材、61FSF板材について、試験片寸法が同じ熱時効材と製造まま材それぞれのUSEの焼きならし温度依存性を図4-4.1～4-4.3に示す。いずれの鋼種においても、熱時効材のUSEは製造まま材のUSEに比べて小さく、時効により耐衝撃性が悪化している傾向が見られる。また異なる焼きならし温度においても熱時効材のUSEはほとんど同じレベルとなっている。61FS板材、61FSF板材については、時効温度が600, 650, 700°Cでほとんど同じレベルのUSEの値となっており、600～700°Cの時効温度範囲では時効効果の温度依存性は小さい可能性が考えられる。

同じ焼きならし温度での熱時効材のUSEと製造まま材のUSEとの差である Δ USEを式(12)のように算出した結果を図4-5.1～4-5.3に示す。61FK板材では焼きならし温度が増加するにつれて Δ USEの絶対値は減少し、時効効果が減少する傾向が見られるのに対し、61FS板材、61FSF板材では Δ USEの焼きならし温度依存性は明確には見られない。

このような61FK板材と61FS板材、61FSF板材データの挙動の違いは化学成分および組織の違いに起因していると考えられる。61FK板材は「C」「Mo」「W」がPNC-FMS鋼の仕様範囲から大きく外れており、 δ フェライトを多量に含む組織となっているのに対し、61FS板材の化学成分は全てPNC-FMS鋼の仕様範囲内であり、若干の δ フェライトを含むマルテンサイト組織である。61FSF板材についてもほとんどの成分はPNC-FMS鋼の仕様範囲内であり、その組織は100%マルテンサイト組織であることから、61FSF板材の化学成分および材料組織は61FS板材に近いため、61FS板材と61FSF板材は同じような挙動を示していると考えられる。

DBTTについても同様に、61FK板材、61FS板材、61FSF板材について、試験片寸法が同じ熱時効材と製造まま材それぞれのDBTTの焼きならし温度依存性を図4-6.1～4-6.3に示す。いずれの鋼種においても、熱時効材のDBTTは製造まま材のDBTTから増加している傾向が見られ、また時効温度が高いほどDBTTは高くなっている。61FSについては、異なる焼きならし温度でも時効材のDBTTはほとんど同じレベルとなっている。

同じ焼きならし温度での熱時効材のDBTTと製造まま材のDBTTとの差である Δ DBTTを式(14)のように算出した結果を図 4-7.1～4-7.3 に示す。61FK板材、61FSF板材については焼きならし温度が高くなるにつれて Δ DBTTは低下し、熱時効効果が減少する傾向が見られる。61FS板材ではデータのはらつきが大きく、 Δ DBTTの焼きならし温度依存性は明確には見られない。

以上のように、熱時効効果に対する材料の焼きならしの影響については、一部のデータでは焼きならし温度が高くなるにつれて時効効果が減少する傾向が見られるものの、鋼種によっては焼きならし温度依存性が見られない場合がある。現段階では、焼きならしの時効効果に対する影響の有無を明確に判断することはできないため、「4.6」の時効効果の設計基準の策定においては、時効効果に対する焼きならし温度の影響を考慮せずに、全ての焼きならし温度でのデータを用いることとする。

4.2.2 焼き戻し条件の影響

S63年度試作板材IIB(A)について、熱時効材と製造まま材それぞれのUSEの焼き戻し条件依存性を図 4-8.1 に示す。全てのデータの試験片寸法は同じである。製造時の焼きならし温度が1050°Cである材料、および焼きならし温度が1100°Cである材料いずれにおいても、熱時効材のUSEは製造まま材のUSEに比べて増加しており、耐衝撃性が改善する傾向にある。衝撃特性に対する熱時効の影響としては、材料の軟化により耐衝撃性が向上する一方、Laves相などの金属間化合物および炭化物が析出することにより耐衝撃性が悪化すると考えられている³⁵⁾。図 4-8.1 のように時効により耐衝撃性が向上しているのは、熱時効条件が700°C×200hrと短時間側であるため、時効効果において材料の軟化が金属間化合物の析出に比べて支配的となっていることに起因している可能性が考えられる。

同じ焼き戻しパラメータでの熱時効材のUSEと製造まま材のUSEとの差である Δ USEを式(12)のように算出した結果を図 4-8.2 に示す。1050°C焼きならし材では焼き戻しパラメータが増加するにつれて Δ USEが減少する傾向が見られるが、1100°C焼きならし材では Δ USEに対する焼き戻し条件の影響は明確には見られない。

DBTTについても同様に、S63年度試作板材IIB(A)について熱時効材と製造まま材それぞれのDBTTの焼き戻し条件依存性を図 4-9.1 に示す。1050°C焼きならし材、1100°C焼きならし材いずれにおいても、熱時効材のDBTTは製造まま材のDBTTに比べて低く、耐衝撃性が向上しており、USEの場合と同じ傾向を示している。

同じ焼き戻しパラメータでの熱時効材のDBTTと製造まま材のDBTTとの差である Δ DBTTを式(14)のように算出した結果を図 4-9.2 に示す。1050°C焼きならし材、1100°C焼きならし材いずれにおいても、焼き戻しパラメータが増加するにつれて、 Δ DBTTの絶対値は減少している。

以上のように、今回評価に用いたデータの範囲においては、熱時効により耐衝撃性が向上する時効効果が見られ、また焼き戻しパラメータが増加するにつれて時効効果が減少する傾向が認められた。ただし、今回の評価に用いたデータの時効時間は短時間であり、長時間の時効においては耐衝撃性が悪化する可能性が考えられる。このように、現段階では、焼き戻しの時効効果に対する影響を明確に評価することは困難であるため、「4.6」の時効効果の設計基準の策定においては、時効効果に対する焼き戻し条件の影響を考慮せずに、全ての焼き戻し条件でのデータを用いることとする。

4.3 時効温度および時効時間の影響

様々な熱時効条件でのデータが取得されている61FK板材、61FS板材、61FSF板材について、時効による Δ USEおよび Δ DBTTの時効条件依存性を以下のように評価した。熱処理条件（焼きならし、焼き戻し）および試験片寸法が同じである熱時効材および製造まま材について、 Δ USEを式(12)のように、また Δ DBTTを式(14)のように算出した。時効による Δ USEおよび Δ DBTTの時効条件依存性について、61FK板材の場合を図4-10.1～4-10.10に、61FS板材の場合を図4-11.1～4-11.10に、61FSF板材の場合を図4-12.1～4-12.8に示す。

61FK板材の場合、いずれの熱処理条件を施した材料についても、データのはらつきは大きいものの、LMPが増加するにつれて Δ USEの絶対値は減少する傾向が見られ、時効効果はLMPが大きくなると減少する傾向を示している。 Δ DBTTについては、いずれのLMPにおいても大きな差は見られない。

61FS板材の場合、いずれの熱処理条件を施した材料についても、時効温度別でのデータの傾向としては、LMPが増加するにつれて、すなわち長時間側であるほど Δ USEの絶対値が増加しており、耐衝撃性が悪化している。しかし、時効温度の違いによる Δ USEの値のレベルにはほとんど差がなく、 Δ USEに対する時効温度の影響はほとんど見られない。 Δ DBTTについても、時効温度別のデータはLMPが増加、すなわち時効時間が長時間側になるにつれて Δ DBTTが増加しており、耐衝撃性が悪化する傾向を示している。また一部のデータについては時効温度が高くなるにつれて Δ DBTTが増加する傾向が見られる。

61FSF板材における時効効果は、61FS板材の場合と概ね同じ傾向を示している。これは、61FSF板材の化学成分および材料組織が61FS板材に近いためであると考えられる。一方、上述のように61FK板材における時効効果の挙動が61FS板材と異なるのは、61FK板材では「C」「Mo」「W」の化学成分がPNC-FMS鋼の材料仕様から大きく外れており、また δ フェライトを多量に含む組織であるのに対し、61FS板材の化学成分はすべてPNC-FMS鋼の仕様範囲内であり、組織については若干のフェライトを含むマルテンサイト組織であることに起因していると考えられる。このように、61FK板材の時効効果はPNC-FMS鋼と異なったものであると考えられるため、以降の時効効果の評価では、61FK板材データを評価対象データから除くこととする。

61FS板材および61FSF板材データについて、時効による Δ USEおよび Δ DBTTの時効時間依存性を以下のように評価した。61FS板材について Δ USEの場合を図4-13.1～4-13.5に、 Δ DBTTの場合を図4-14.1～4-14.5に示し、61FSF板材について Δ USEの場合を図4-15.1～4-15.4に、 Δ DBTTの場合を図4-16.1～4-16.4に示す。

61FS板材の Δ USEについては、いずれの熱処理条件を施した材料についても、時効時間が約1000hrまでは Δ USEの変化が大きいのに対し、1000hrより長時間側では Δ USEの変化は小さくなっている。とくに650, 700°C時効材については、3000, 6000hr時効での Δ USEにはほとんど変化が見られず、650～700°Cの時効温度の範囲では時効効果は約3000hrの時効時間で飽和している。600°C時効材については、(1000°Cx1hr+800°Cx1hr)材および(1120°Cx1hr+800°Cx1hr)材では3000, 6000hr時効での Δ USEにはほとんど変化が見られず、時効効果が飽和している傾向を示している。一方、600°C時効材の他の熱処理材については、6000hr時効時間の範囲では時効効果が飽和する傾向は明確には見られないが、 Δ USEの変化量は長時間側になるほど減少している。

61FS板材の Δ DBTTについても、 Δ USEの場合と同様、いずれの熱処理条件材においても、約3000hrを超えると時効効果の時効時間依存性は飽和する傾向が見られる。 Δ DBTTの値のレベルについては、時効温度が高くなるにつれて Δ DBTTの値が大きくなっている。

61FSF板材の Δ USEについて、61FS板材の場合と同様、650, 700°C時効材については約3000hr以降では Δ USEの変化はほとんど見られない。600°C時効材については、(1000°Cx1hr+750°Cx10hr)材の場合、約3000hr時効時間で Δ USEが飽和している。一方、その他の熱処理材については6000hr時効時間の範囲では Δ USEが飽和する傾向は明確には認められないが、 Δ USEの絶対値の増加割合は長時間側で減少している。 Δ DBTTについては、いずれの時効温度でも約3000hrでは Δ DBTTはほとんど変化しておらず、時効効果は飽和する傾向が見られる。

以上のように、61FS板材および61FSF板材の時効材データについて、全体的に、時効による Δ USEおよび Δ DBTTは次のような傾向を示していると考えられる。

- ・ 650～700°Cの時効温度では、約3000hrの時効時間で時効効果は飽和する。
- ・ 600°Cの時効温度の場合、 Δ USEは約6000hrの時効時間の範囲では飽和するレベルには至らないが、 Δ DBTTについては約3000hrの時効時間で飽和する。
- ・ 600～700°Cの時効温度範囲において、 Δ USEの時効温度依存性は見られないが、 Δ DBTTについては時効温度が高いほど大きくなる。

4.4 時効による衝撃特性の変化と引張特性、硬さ、析出挙動との関係

61FS板材(1050°Cx1hr+800°Cx1hr)および61FSF板材(1050°Cx1hr+750°Cx10hr)の時効材については、シャルピー衝撃試験以外に、引張試験、硬さ測定、抽出残渣試験が行われているため、以下のように、これらの

試験データを評価し、衝撃特性との相関性について検討した。

0.2%耐力、引張強さ、破断伸びそれぞれについて、時効材データと製造まま材データの比を算出し、それぞれの時効条件依存性を評価した結果を図4-17.1～4-17.6に示す。なお引張試験温度は時効温度と同じである。

0.2%耐力について、61FS板材では短時間側でのデータのはらつきが大きく、強度比の時効時間依存性は明確には見られない。一方、61FSF板材の0.2%耐力については時効時間が長時間になるほど強度比は減少しており、これは時効による軟化が生じているためと考えられる。強度比の減少の割合は長時間側ほど大きくなっている。「4.3」の衝撃特性の評価で認められたように長時間側で飽和する傾向は見られない。また時効温度が高いほど、強度比が減少する割合は大きくなっている。

引張強さについて、61FS板材および61FSF板材とともに、時効時間が長時間側ほど強度比は低下するが、飽和する傾向は見られない。また強度比の時効温度依存性は明確には見られない。

破断伸びについて、61FS板材の600, 700°C時効材では伸びの比が300hrから1000hrでは減少し、1000hrから3000hrでは増加する傾向が見られ、61FSF板材の600, 650°C時効材においてもこのような傾向を示している。このように600°C時効材の挙動は、両鋼種で同じ傾向であるが、650, 700°Cでは異なり、これらのデータについては破断伸びに対する時効効果は明確ではない。

以上のように、引張特性に対する時効効果については、衝撃特性における時効効果で見られたように、時効時間が長時間側になるにつれて飽和する傾向は見られず、両者の間に相関性は認められなかった。

硬さについて、時効材データと製造まま材データの比を算出し、時効条件依存性を評価した結果を図4-18.1, 4-18.2に示す。硬さの比の時効時間依存性は、鋼種によって若干異なる傾向を示しているが、硬さの比の時効温度依存性は両鋼種とも時効温度が高いほど硬さの比は小さくなっている傾向が見られる。とくに700°C時効材では、いずれの鋼種も硬さの比は1以下となっており、時効による軟化が生じていることを示しており、また3000hr以上の長時間側で飽和する傾向を示している。このように長時間側で硬さに対する時効効果が飽和する傾向は、衝撃特性における時効効果の場合と同じである。しかし、時効によって硬さは減少、すなわち軟化しており、時効による軟化は時効により耐衝撃性が悪化する要因とはならないことから、今回評価に用いたデータについては、硬さに対する時効効果と衝撃特性に対する時効効果との間に相関性はないと考えられる。

次に、時効材の抽出残渣量から製造まま材の抽出残渣量を差し引くことにより、時効により析出した元素量を算出し、それらの時効条件依存性について、61FS板材の場合を図4-19.1～4-19.6に、61FSF板材の場合

を図 4-20.1~4-20.6 に示す。61FS板材、61FSF板材とともに、Fe, Cr, W, Moの析出が顕著であり、これらの元素の析出量は時効時間が短時間側では顕著な増加が認められるが、長時間側では増加割合は減少し、飽和する傾向が見られる。このような傾向は、時効による衝撃特性の変化が長時間側で飽和する傾向と同様である。フェライト鋼において、時効により生成し、耐衝撃性を悪化させる析出物として、 Fe_2W または Fe_2Mo のLaves相の金属間化合物および M_6C , M_{23}C_6 などの炭化物が報告されており^{7, 35, 36)}、これらの析出物の構成元素は61FS板材、61FSF板材で析出が顕著であった元素と対応している。

Fe, Cr, W, Moについて、析出元素量の比較を図 4-21.1~4-21.3 に示す。とくに、Moに比べてWの析出が顕著であり、これは61FS板材、61FSF板材の製造時のW量がそれぞれ 1.89, 2.11 (wt.%) であり、Mo量の 0.45, 0.09 (wt.%) に比べて、多いためであると考えられる。よって、61FS板材、61FSF板材データについては、おもに Fe_2W のLaves相が析出することにより、耐衝撃性が悪化していると考えられる。Wに着目すると、300hr 時効材では 650°C 時効材で最も多く析出している。1000hr でも 650°C 時効材の析出量が最も多いが、600°C 時効材の析出量の増加が著しい。3000hr では 600, 650°C 時効材の析出量が概ね同じレベルとなっており、また 650, 700°C 時効材の析出量は飽和する傾向となっている。一方、3000hr での 600°C 時効材の析出量は、1000hr から増加しており、飽和するレベルには至っていないが、その増加量は 300hr から 1000hr での増加量に比べると減少している。このように長時間側で時効による析出が飽和する傾向は、衝撃特性における時効効果が長時間の時効では飽和する傾向と同じである。

以上の評価結果から、61FS板材および61FSF板材については、600~700°C の時効温度範囲では主にLaves相が析出することにより耐衝撃性が悪化すると考えられ、そのような時効効果は 650, 700°C の時効温度では約 3000hr の時効時間範囲内で飽和する傾向がある。61FS板材の成分はPNC-FMS鋼の材料仕様範囲内であることから、600~700°C の高温側の時効条件下ではPNC-FMS鋼において同様の時効効果が表れると考えられる。

4.5 他鋼種データにおける衝撃特性に対する時効効果

600°C 以下の時効条件ではPNC-FMS鋼の時効材データが取得されていないため、海外材などのデータを用いて、以下のように、時効温度 600°C 以下の衝撃特性に対する時効効果を評価した。

EM10鋼, HT9相当材, 9Cr1MoVNb鋼, 12Cr1MoVW鋼の時効材データについて、時効条件として LMP(C=35) を用いて、時効による $\Delta \text{nor.USE}$ および ΔDBTT を整理した結果を図 4-22.1, 4-22.2 に示す。なお、 $\Delta \text{nor.USE}$ を算出する際の規格化因子について、これらの鋼種についてはフルサイズ試験片でのデータが取得されておらず、式(5)により「Bb」の乗数「n」を求めることができないこと、およびこれらの鋼種のUSEはPNC-FMS

鋼と大きく異なるものではないと考えられることから、PNC-FMS鋼データの場合と同様に、「(Bb)^{1.4}」を規格化因子として用いることとし、式(13)を用いて $\Delta_{nor. USE}$ を算出した。

$\Delta_{nor. USE}$ については、EM10鋼、HT9相当材において、全体的に、LMPが増加するにつれて $\Delta_{nor. USE}$ の絶対値は増加しており、耐衝撃性が悪化する傾向が見られる。とくにHT9相当材では、LMP=約24～26で $\Delta_{nor. USE}$ の絶対値は増加しており、他の鋼種に比べて低LMP側から時効効果が見られ、また全てのLMPの範囲で他の鋼種より $\Delta_{nor. USE}$ の絶対値が大きくなっている。HT9相当材の $\Delta_{nor. USE}$ の絶対値はLMP=約29～32でほとんど変化しておらず、時効効果が飽和している可能性がある一方、LMP=約33のデータについては $\Delta_{nor. USE}$ の絶対値が他のデータに比べて大きく増加している。

Δ_{DBTT} についても、 $\Delta_{nor. USE}$ の場合と同様、EM10鋼、HT9相当材において、全体的に、LMPが増加するにつれて Δ_{DBTT} は増加しており、耐衝撃性が悪化する傾向が見られる。LMPが約29以上では、EM10鋼の Δ_{DBTT} が他の鋼種に比べて大きく、またLMPの増加に対する Δ_{DBTT} の増加割合も最も大きくなっている。

次に時効による $\Delta_{nor. USE}$ および Δ_{DBTT} の時効温度依存性を図 4-23.1, 4-23.2 に示す。 $\Delta_{nor. USE}$ については、全体的に、時効温度が高温側ほど $\Delta_{nor. USE}$ の絶対値が増加しており、耐衝撃性が悪化する傾向が見られる。 Δ_{DBTT} についても、 $\Delta_{nor. USE}$ の場合に比べてデータのばらつきは大きいものの、全体的に、時効温度が増加するにつれて Δ_{DBTT} は増加しており、耐衝撃性が悪化する傾向が見られる。

HT9相当材、9Cr1MoVNb鋼、12Cr1MoVW鋼については、ある時効温度で時効時間をパラメータとしたデータが取得されているため、これらのデータにおける時効による $\Delta_{nor. USE}$ および Δ_{DBTT} の時効時間依存性を図 4-24.1～4-24.6 に示す。

$\Delta_{nor. USE}$ について、HT9相当材の500, 550°C時効材では時効時間が1000hrまでで、 $\Delta_{nor. USE}$ の減少は飽和している傾向が見られるが、600°C時効材では飽和する傾向は認められない。9Cr1MoVNb鋼の $\Delta_{nor. USE}$ は、全て正の値を示しており、時効により耐衝撃性が向上している。12Cr1MoVW鋼については、いずれの時効時間でも $\Delta_{nor. USE}$ に顕著な変化は見られない。

Δ_{DBTT} について、HT9相当材では、いずれの時効温度でも長時間側で Δ_{DBTT} が増加する傾向が見られる。9Cr1MoVNb鋼では、1100°Cx1hr+760x1hr材の Δ_{DBTT} は負の値となっており、時効により耐衝撃性が向上しており、10000hrで Δ_{DBTT} の減少は飽和する傾向が見られる。12Cr1MoVW鋼の Δ_{DBTT} については、いずれの時効時間でも大きな変化は認められない。

上記の鋼種のデータに、PNC-FMS鋼データとして61FS板材、61FSF板材データを加えて、時効による $\Delta_{nor. USE}$ または Δ_{DBTT} の時効温度との関係をプロットした結果を図 4-25.1, 4-25.2 に示す。

$\Delta_{nor,USE}$ の場合、時効温度が約600°C以下の他鋼種データにおいて時効温度が高くなるにつれて $\Delta_{nor,USE}$ は減少する傾向を示し、時効温度と $\Delta_{nor,USE}$ との関係は、時効温度600°CのPNC-FMS鋼データの中で $\Delta_{nor,USE}$ が最も小さいデータと概ね一致している。他鋼種データにおける時効温度と $\Delta_{nor,USE}$ との関係を概ね代表するEM10データについては、15000hrまでの非常に長い時効時間でのデータであり、時効効果は飽和している可能性が高いと考えられる。時効温度600°CのPNC-FMS鋼データの中で $\Delta_{nor,USE}$ が最も小さいデータは、図4-26.1のように61FS板材(1050°Cx1hr+750°Cx1hr)の6000hr時効時間でのデータであり、図4-13.2のように600°C時効温度では6000hr時効時間の範囲で時効効果は飽和していない。よって、600°Cの時効温度では、PNC-FMS鋼の $\Delta_{nor,USE}$ は、6000hrより長時間の時効によってさらに減少し、他のデータに比べて $\Delta_{nor,USE}$ が小さいHT9相当材のデータに近づく可能性がある。一方、時効温度450~550°Cでの他鋼種における時効温度と $\Delta_{nor,USE}$ との関係をさらに高温側まで外挿した場合、時効温度600°CのPNC-FMS鋼データの中で $\Delta_{nor,USE}$ が最も小さいデータと概ね一致していることから、PNC-FMS鋼の $\Delta_{nor,USE}$ はほとんど飽和に近いレベルに達している可能性も考えられる。

Δ_{DBTT} の場合、時効温度が約600°C以下において他鋼種データは時効温度が高くなるにつれて Δ_{DBTT} が増加する傾向を示し、また時効温度と Δ_{DBTT} との関係を高温側に外挿した場合、時効温度600°CのPNC-FMS鋼データの中で Δ_{DBTT} が最も大きいデータと概ね一致している。他鋼種データにおける時効温度と Δ_{DBTT} との関係を概ね代表するEM10データについては、15000hrまでの非常に長い時効時間でのデータであり、時効効果は飽和している可能性が高いと考えられる。時効温度600°CのPNC-FMS鋼データの中で Δ_{DBTT} が最も大きいデータは、図4-26.2のように61FS板材(1050°Cx1hr+750°Cx1hr)の6000hr時効時間でのデータであり、図4-14.2のように600°C、6000hr時効条件において時効効果は飽和している。

PNC-FMS鋼および他鋼種それぞれについて、時効時間が最長であるデータを選定し、時効による $\Delta_{nor,USE}$ または Δ_{DBTT} の時効温度との関係をプロットした結果を図4-27.1, 4-27.2に示す。

$\Delta_{nor,USE}$ について、全体的には約400~450°Cより高温側で時効による $\Delta_{nor,USE}$ は負の値となっており、時効温度が高くなるにつれて $\Delta_{nor,USE}$ は減少し、約600°Cで $\Delta_{nor,USE}$ は飽和する傾向が見られる。特にEM10, 9Cr1MoVNb, 12Cr1MoVW鋼データについては、時効時間がそれぞれ15000, 20000, 20000hrと非常に長時間であり、時効効果は飽和していると考えられることから、 $\Delta_{nor,USE}$ の定式化の際には時効時間依存性を考慮する必要ないと判断できる。

Δ_{DBTT} について、データのはらつきはあるものの、全体的には約400~450°Cより高温側で時効による Δ_{DBTT} は正の値となっており、時効温度が高くなるにつれて Δ_{DBTT} は増加する傾向が見られる。

以上より、本報告では、時効効果の時効時間依存性が飽和していると考えられる長時間側のデータである

EM10, 9Cr1MoVNb, 12Cr1MoVW鋼データに基づき、時効温度依存性のみを考慮して時効による $\Delta_{nor. USE}$ および Δ_{DBTT} を定式化することとする。なお、600°Cより高温側については、「4.3」で述べたように、 $\Delta_{nor. USE}$ の時効温度依存性は見られないことから、600°Cでの $\Delta_{nor. USE}$ の値を適用することとする。

4.6 時効効果の設計基準の策定

「4.5」での評価結果に基づき、以下のように、PNC-FMS鋼の設計基準として時効による $\Delta_{nor. USE}$ のノミナル式と下限式、時効による Δ_{DBTT} のノミナル式と上限式を策定した。

長時間時効データであるEM10, 9Cr1MoVNb, 12Cr1MoVW鋼データについて、 $\Delta_{nor. USE}$ または Δ_{DBTT} と時効温度との関係を1次式として、最小二乗法によりノミナル直線を求めた結果を図4-28.1, 4-28.2に示す。

$\Delta_{nor. USE}$ についてノミナル直線に対するデータの包絡式として下限直線を求めた結果を図4-29.1に示す。後で示すように、この下限式では全てのPNC-FMS鋼データを包絡できないため、別に下限式を作成していることから、この下限式を「下限式1」として区別している。 Δ_{DBTT} についてノミナル直線に対するデータの包絡式として上限直線を求めた結果を図4-29.2に示す。

なお $\Delta_{nor. USE}$ および Δ_{DBTT} と時効温度との関係を1次式として定式化を行ったため、低温側では $\Delta_{nor. USE}$ のノミナル式と下限式は正の値、 Δ_{DBTT} のノミナル式と上限式は負の値となり、耐衝撃性は向上することになる。しかし、低温側での時効により耐衝撃性が向上することは考えられないことから、 $\Delta_{nor. USE}$ のノミナル式と下限式については、 $\Delta_{nor. USE} \leq 0$ とし、 Δ_{DBTT} のノミナル式と上限式については、 $\Delta_{DBTT} \geq 0$ とする。

このようにして作成した時効による $\Delta_{nor. USE}$ のノミナル式と下限式1、およびPNC-FMS鋼と他鋼種のデータをプロットした結果を図4-30.1に示す。 $\Delta_{nor. USE}$ の下限式1については、61FS板材データの1点、およびHT9相当材、9Cr1MoVNb, 12Cr1MoVW鋼データの数点を包絡できていない。そこで、これらのデータを包絡するような下限式を「下限式2」として作成した結果を図4-30.2に示す。なお、HT9相当材の600°Cデータが1点包絡できていないが、本データは他のデータに比べて非常に小さく、特異なデータである。「下限式2」はPNC-FMS鋼データを十分な裕度をもって包絡していることから、本報告では「下限式2」を時効による $\Delta_{nor. USE}$ の下限式とする。

また時効による Δ_{DBTT} のノミナル式と上限式、およびPNC-FMS鋼と他鋼種のデータをプロットした結果を図4-31に示す。上限式は全てのデータを包絡している。

以上のように策定した時効による $\Delta_{nor. USE}$ のノミナル式と下限式、時効による Δ_{DBTT} のノミナル式と上限式は次式のように表される。

(時効による $\Delta_{nor. USE}$ の設計用ノミナル式)

$$\Delta_{nor. USE} = 0.540 - 0.00123 \times T \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

(ただし、 $\Delta_{nor. USE} \leq 0$ であり、 $T > 600$ のとき $\Delta_{nor. USE} = -0.200$)

(時効による $\Delta_{nor. USE}$ の設計用下限式)

$$\Delta_{nor. USE} = 0.444 - 0.00123 \times T \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

(ただし、 $\Delta_{nor. USE} \leq 0$ であり、 $T > 600$ のとき $\Delta_{nor. USE} = -0.296$)

(時効による Δ_{DBTT} の設計用ノミナル式)

$$\Delta_{DBTT} = -144 + 0.357 \times T \quad (\text{ただし、 } \Delta_{DBTT} \geq 0) \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

(時効による Δ_{DBTT} の設計用上限式)

$$\Delta_{DBTT} = -132 + 0.357 \times T \quad (\text{ただし、 } \Delta_{DBTT} \geq 0) \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

$\Delta_{nor. USE}$ ：寸法依存性のないように規格化した上部棚吸収エネルギーの時効による減少量 ($J/mm^{2.8}$)

Δ_{DBTT} ：延性脆性遷移温度の時効による増加量 ($^{\circ}\text{C}$)

T：時効温度 ($^{\circ}\text{C}$)

5. 照射効果の評価

5.1 照射効果のメカニズム

衝撃特性に対する照射効果は、一般に次のようなメカニズムによって生じると考えられている^{35, 37-39)}。照射温度が約500°C以下の低温側では、照射によってDBTTが上昇し、耐衝撃性が悪化する。これは、図5-1のように照射によって降伏応力が増加する一方、破断応力は照射による影響をほとんど受けないことに起因している。照射による降伏応力の増加は、図5-2のHT9鋼の場合³⁸⁾のように約500°C以下の低温側で生じ、また図5-3のAISI316鋼の場合³⁸⁾、約4($\times 10^{26} \text{n/m}^2$, E>0.1MeV)以降では降伏応力の増加はほとんど一定となり、照射効果の照射量依存性は飽和する。よって、DBTTに対する照射効果の照射量依存性も飽和する傾向を示し、図5-4のHT9の場合⁴⁰⁾、約3($\times 10^{26} \text{n/m}^2$, E>0.1MeV)でDBTTの増加は飽和している。照射によって降伏応力が増加するのは、照射に伴って、転位の発達、金属間化合物の析出、特定原子の偏析などが生じるためと考えられている。

以上のように、一般的に、約500°C以下の低温側では照射によりDBTTは増加し、約3($\times 10^{26} \text{n/m}^2$, E>0.1MeV)でDBTTの増加量は飽和する。PNC-FMS鋼については、現段階で取得されているPNC-FMS鋼の照射データが不足していることから、PNC-FMS鋼データのみを用いて衝撃特性に対する照射効果（照射量依存性、照射温度依存性）を明らかにすることは困難であるため、PNC-FMS鋼に類似していると考えられる他鋼種のデータを用いて、以下のように、照射効果を評価し、設計基準の策定を行った。

5.2 照射温度の影響

PNC-FMS鋼と開発途中材、および他の鋼種について、次式のようにして算出した△nor.USEと△DBTTの照射温度依存性を図5-5.1, 5-5.2に示す。

$$\Delta \text{nor.USE} = (\text{照射材のUSE}/(Bb)^{1.4}) - (\text{製造まま材のUSE}/(Bb)^{1.4}) \quad \dots \quad (19)$$

$$\Delta \text{DBTT} = (\text{照射材のDBTT}) - (\text{製造まま材のDBTT}) \quad \dots \quad (20)$$

このようにして算出した△nor.USEと△DBTTには、照射効果に加えて時効効果も含まれているため、「4.6」で作成した時効効果のノミナル式を用いて、次式のように、照射のみによる△nor.USEおよび△DBTTを求めた。

$$\begin{aligned} (\text{照射による } \Delta \text{nor.USE}) &= (\text{照射材のUSE}/(Bb)^{1.4}) - (\text{製造まま材のUSE}/(Bb)^{1.4}) \\ &\quad - (\text{時効による } \Delta \text{nor.USEノミナル値}) \quad \dots \quad (21) \end{aligned}$$

$$(\text{照射による } \Delta \text{DBTT}) = (\text{照射材のDBTT}) - (\text{製造まま材のDBTT})$$

式(21), (22)を用いて算出した照射のみによる Δ nor.USE および Δ DBTT の照射温度依存性を図 5-6.1, 5-6.2 に示す。 Δ nor.USE について、PNC-FMS 鋼データ（図中で、白抜きのシンボル）は、ばらつきが大きく、明確な照射温度依存性は見られないが、他鋼種データにおいては約 500°C 以下で照射温度が低いほど Δ nor.USE は減少しており、照射効果の照射温度依存性が見られる。 Δ DBTT についても、 Δ nor.USE の場合と同様に、他鋼種データにおいて照射効果は約 500°C 以下で見られ、照射温度が低いほど照射効果は増加する傾向を示している。

照射による Δ nor.USE の照射温度依存性について、鋼種別にデータをプロットした結果を図 5-7.1～5-7.10 に示す。PNC-FMS 鋼および開発途中材については、鋼種によって Δ nor.USE の値のレベルが大きく異なっている。63WFS ラッパ管については、化学成分は PNC-FMS 鋼の材料仕様範囲内であり、熱処理条件も PNC-FMS 鋼ラッパ管熱処理条件と一致していることから、63WFS ラッパ管データが PNC-FMS 鋼の挙動そのものを表していると考えられる。63WFS ラッパ管の Δ nor.USE は、約 350～700°C の範囲で全て正の値となっており、照射温度が低くなるにつれて Δ nor.USE が減少する傾向を示している。とくに約 450°C 以下の低温側について、EM10 鋼などの Δ nor.USE は負の値であり、63WFS ラッパ管の Δ nor.USE の値のレベルは EM10 鋼などとは異なるものとなっている。約 350～400°C で照射された 63WFS ラッパ管データの照射量は、0.3～1.4 ($\times 10^{26} \text{n/m}^2, E > 0.1 \text{MeV}$) であり、照射効果の照射量依存性が飽和していないと考えられ、一方 EM10 鋼データの照射量は 5.5～20.5 ($\times 10^{26} \text{n/m}^2, E > 0.1 \text{MeV}$) であることから照射効果の照射量依存性は飽和していると考えられる。よって、約 450°C 以下の低温側での 63WFS ラッパ管の Δ nor.USE は、照射効果の照射量依存性が飽和するような高照射量側では、EM10 鋼などの Δ nor.USE の値のレベルに近づく可能性がある。

照射による Δ DBTT の照射温度依存性について、鋼種別にデータをプロットした結果を図 5-8.1～5-8.12 に示す。PNC-FMS 鋼および開発途中材については、鋼種によって Δ DBTT の値のレベル、および照射温度依存性が異なっている。63WFS ラッパ管については、約 450°C 以下の低温側では照射温度が低くなるにつれて Δ DBTT が増加する傾向が見られ、この傾向は EM10 鋼などの場合と同様である。また EM10, HT9 鋼いずれにおいても照射温度が低いほど Δ DBTT が大きくなる傾向は同じであるが、照射温度の低下に対する Δ DBTT の増加割合は HT9 鋼の方が大きくなっている。9Cr1MoVNb 鋼と 12Cr1MoVW 鋼を比較すると、12Cr1MoVW 鋼の方が、 Δ DBTT の値が大きく、その増加割合も大きい。EM10 鋼の主要成分は 9Cr1Mo、HT9 鋼は 12Cr1MoVW であることから、EM10 鋼と HT9 鋼における Δ DBTT の違い、および 9Cr1MoVNb 鋼と 12Cr1MoVW 鋼における Δ DBTT の違いは、主に Cr 量の差に起因している可能性が考えられる。

衝撃特性に対する照射効果の照射温度依存性と照射による析出物の生成との関係について、次のように検

討した。PNC-FMS鋼および開発途中材の照射材についてはTEM観察による析出物の調査は実施されておらず、今後析出物の調査が重要である。他鋼種における照射による析出物の挙動については次のような報告が行われている。EM10鋼⁹⁾では高温側においてLaves相 (Fe_2Mo) が観察されるのみであり、低温側では転位の発達のみが見られる。HT9鋼²⁵⁾については、425°Cで α' 相 (Crリッチ) 、427°CでG相 (Ni, Si) 、450°Cで χ 相 (Cr, Fe, Ni, Si) 、650°Cで $M_{23}C_6$ の粗大化が観察されている。Laves相の生成および $M_{23}C_6$ の粗大化は熱時効によるものであり、他の金属間化合物の析出は照射によるものであると考えられる。HT9鋼とEM10鋼について、材料組織はともに100%マルテンサイトであるが、化学成分は異なっており、HT9鋼の主要成分は12Cr1MoVW、EM10鋼は9Cr1Moである。HT9鋼では照射によって数種の金属間化合物が析出するのに対し、EM10鋼では金属間化合物が析出しないのは、HT9鋼とEM10鋼の化学成分の違いに起因していると考えられる。

5.3 中性子照射量の影響

PNC-FMS鋼と開発途中材、および他の鋼種について、式(21), (22)を用いて算出した照射のみによる $\Delta nor.USE$ および $\Delta DBTT$ の照射量依存性を図 5-9.1, 5-9.2 に示す。 $\Delta nor.USE$ および $\Delta DBTT$ とともにデータのはらつきが大きく、明確な照射量依存性は見られない。

照射による $\Delta nor.USE$ の照射量依存性について、鋼種別にデータをプロットした結果を図 5-10.1～5-10.10 に示す。とくに63WFS ラッパ管の $\Delta nor.USE$ については、照射量が増加するにつれて $\Delta nor.USE$ が増加する傾向が見られるが、照射条件については照射量の増加に従い照射温度も増加する関係となっていることから、 $\Delta nor.USE$ の照射温度依存性によって、このような傾向を示している可能性が考えられる。

照射による $\Delta DBTT$ の照射温度依存性について、鋼種別にデータをプロットした結果を図 5-11.1～5-11.12 に示す。63WFS ラッパ管について明確な照射量依存性は見られない。EM10鋼では照射量が約22 ($x10^{26} n/m^2$, E>0.1MeV) において $\Delta DBTT$ の最大値は約50°Cであるのに対し、HT9鋼では約7 ($x10^{26} n/m^2$, E>0.1MeV) において $\Delta DBTT$ の最大値は約150°Cであり、照射によるDBTTの増加はEM10鋼の方がHT9鋼に比べて小さい。

5.4 照射効果の設計基準の策定

「5.1」～「5.3」の評価結果に基づき、以下のように、PNC-FMS鋼の設計基準として照射による $\Delta nor.USE$ のノミナル式と下限式、照射による $\Delta DBTT$ のノミナル式と上限式を策定した。設計式の作成に用いるデータとして、化学成分がPNC-FMS鋼の材料仕様範囲内であり、ラッパ管熱処理材である63WFS ラッパ管データと、約500°C以下の低温側データを含む他鋼種データを選定した。

「5.1」で述べたように、衝撃特性に対する照射効果の照射量依存性は、図 5-4 の HT9 鋼の場合のように、約 $3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$ で飽和する可能性があるため、照射量が $3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$ 以上であるデータをさらに選定し、それらのデータを用いて照射効果の照射温度依存性のみを考慮して $\Delta \text{nor.USE}$ および ΔDBTT の設計式を策定することとする。照射量が $3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$ 以上であるデータの $\Delta \text{nor.USE}$ または ΔDBTT を図 5-12.1, 5-12.2 に示す。

63WFS ラッパ管と他鋼種データについて、 $\Delta \text{nor.USE}$ と照射温度との 1 次式として、最小二乗法により照射による $\Delta \text{nor.USE}$ のノミナル直線を求めた結果を図 5-13.1 に示す。また 63WFS ラッパ管データおよび他鋼種データについて、 ΔDBTT と照射温度との 2 次式として、最小二乗法により照射による ΔDBTT のノミナル曲線を求めた結果を図 5-13.2 に示す。

$\Delta \text{nor.USE}$ についてノミナル直線に対するデータの包絡式として下限直線を求めた結果を図 5-14.1 に、 ΔDBTT についてノミナル曲線に対するデータの包絡式として上限曲線を求めた結果を図 5-14.2 に示す。

なお $\Delta \text{nor.USE}$ 時効温度との関係を 1 次式として定式化を行ったため、高温側では $\Delta \text{nor.USE}$ のノミナル式と下限式は正の値となり、耐衝撃性は向上することになる。しかし、高温側において照射により耐衝撃性が向上する要因は現状では考えられないことから、 $\Delta \text{nor.USE}$ のノミナル式と下限式については、安全側に、照射によって耐衝撃性が向上することはないと考え、 $\Delta \text{nor.USE} \leq 0$ とする。 ΔDBTT のノミナル式についても約 500~700°C で負の値となるが、安全側に、 $\Delta \text{DBTT} \geq 0$ とする。また ΔDBTT と照射温度との関係を 2 次式として定式化を行ったため、597°C で ΔDBTT は最小となり、さらに高温側では ΔDBTT が増加することになるが、約 620, 720°C の 63WFS ラッパ管データでは ΔDBTT はほとんど変化していないことから、 ΔDBTT が最小となる照射温度 (597°C) 以上の高温側では、 ΔDBTT のノミナル式については $\Delta \text{DBTT} = 0$ とし、 ΔDBTT の下限式については 597°C での ΔDBTT の値 (43°C) を適用することとする。

このようにして作成した照射による $\Delta \text{nor.USE}$ のノミナル式と下限式、および PNC-FMS 鋼と他鋼種のデータを合わせてプロットした結果を図 5-15.1 に、照射による ΔDBTT のノミナル式と上限式を図 5-15.2 に示す。

以上より、照射による $\Delta \text{nor.USE}$ のノミナル式と下限式、照射による ΔDBTT のノミナル式と上限式は次式のように表される。

(照射による $\Delta \text{nor.USE}$ の設計用ノミナル式)

$$\Delta \text{nor.USE} = -0.650 + 0.00138 \times T \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

(ただし、 $\Delta \text{nor.USE} \leq 0$)

(照射による Δ nor.USE の設計用下限式)

$$\Delta \text{nor.USE} = -0.785 + 0.00138 \times T \quad \dots \dots \dots \quad (24)$$

(ただし、 Δ nor.USE ≤ 0)

(照射による Δ DBTT の設計用ノミナル式)

$$\Delta \text{DBTT} = 833 - 2.90 \times T + 0.00243 \times T^2 \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

(ただし、 Δ DBTT ≥ 0 であり、 $T > 597$ のとき Δ DBTT = 0)

(照射による Δ DBTT の設計用上限式)

$$\Delta \text{DBTT} = 908 - 2.90 \times T + 0.00243 \times T^2 \quad \dots \dots \dots \quad (26)$$

(ただし、 Δ DBTT ≥ 0 であり、 $T > 597$ のとき Δ DBTT = 43)

Δ nor.USE : 寸法依存性のないように規格化した上部棚吸収エネルギーの照射による変化量 ($\text{J/mm}^{2.8}$)

Δ DBTT : 延性脆性遷移温度の照射による変化量 (°C)

T : 照射温度 (°C)

6. PNC-FMS鋼の衝撃特性に関する設計基準

以上のようにして作成したPNC-FMS鋼の製造時のnor.USEとDBTT、および時効による Δ nor.USEと Δ DBTT、照射による Δ nor.USEと Δ DBTTを用いて、炉内使用時のPNC-FMS鋼のnor.USEとDBTTを次式のようにして求めることとする。

$$(炉内でのnor.USE) = (製造まま材のnor.USE) - (時効による\Delta nor.USE) - (照射による\Delta nor.USE) \quad \dots \dots \quad (27)$$

$$(炉内でのDBTT) = (製造まま材のDBTT) - (時効による\Delta DBTT) - (照射による\Delta DBTT) \quad \dots \dots \quad (28)$$

PNC-FMS鋼のnor.USEおよびDBTTの設計基準を整理して、表3に示す。なお、次に示すように、「製造時下限値+時効効果下限式+照射効果下限式」として炉内でのnor.USEを推定すると、炉内でのnor.USEは負の値となるため、(炉内でのnor.USE) ≥ 0 とする。また適用範囲についてはラッパ管の使用温度範囲および評価データの温度範囲を考慮して、350~650°Cとする。

製造時のnor.USEとDBTT、および時効による Δ nor.USEと Δ DBTT、照射による Δ nor.USEと Δ DBTTそれについて、ノミナルおよび下限(nor.USEの場合)または上限(DBTTの場合)があり、それらを次のように組み合せて炉内でのnor.USEとDBTTの推定を行った。

(no.1) 製造時ノミナル値+時効効果ノミナル式+照射効果ノミナル式

(no.2) 製造時ノミナル値+時効効果下限式または上限式+照射効果下限式または上限式

(no.3) 製造時下限値または上限値+時効効果ノミナル式+照射効果ノミナル式

(no.4) 製造時下限値または上限値+時効効果下限式または上限式+照射効果下限式または上限式

なお製造時のDBTTについては、サブサイズ試験片(幅3mm x 高さ10mm)およびフルサイズ試験片(幅10mm x 高さ10mm)それぞれの場合を考慮して、炉内でのDBTTの推定を行った。

推定した炉内でのnor.USEについて、「no.1」および「no.2」の組み合せの場合を図6-1.1に、「no.3」および「no.4」の組み合せの場合を図6-1.2に示す。とくに、「no.4」の組み合せの場合、炉内でのnor.USEは全ての照射温度範囲で「0」となっている。(炉内でのnor.USE) ≥ 0 とすることなしに、「no.4」の組み合せを用いて炉内でのnor.USEを推定した結果を図6-2に示す。約350~570°Cの範囲の炉内nor.USEには、時効

効果と照射効果の両方が寄与しており、このような温度範囲における時効効果および照射効果それぞれの下限式は、PNC-FMS鋼以外の鋼種のデータによって決まっている。とくに、時効効果については、今後、600°Cより低温側のPNC-FMS鋼データを取得し、下限式の妥当性について確認する必要があると考えられる。

サブサイズ試験片の製造時DBTTを用いて炉内でのDBTTを推定した場合について、「no.1」および「no.2」の組み合せでの結果を図 6-3.1 に、「no.3」および「no.4」の組み合せでの結果を図 6-3.2 に示す。いずれの組み合せの場合でも、全ての照射温度範囲で、炉内でのDBTTは180°C以下となっている。

フルサイズ試験片の製造時DBTTを用いて炉内でのDBTTを推定した場合について、「no.1」および「no.2」の組み合せでの結果を図 6-4.1 に、「no.3」および「no.4」の組み合せでの結果を図 6-4.2 に示す。とくに、「no.4」の組み合せの場合、約400°C以上の照射温度範囲では、炉内でのDBTTは200°C以下となっている。

なお、以上のようにして策定したPNC-FMS鋼の衝撃特性に関する設計基準については、今後、フェライト鋼ラッパ管の構造設計方針の検討の一環として、設計評価における適用方法（炉内でのnor.USEおよびDBTTの制限値、DBTTを求める際の試験片寸法など）を検討する必要がある。

7. まとめ

PNC-FMS鋼の衝撃特性について、材料強度基準（暫定案）策定以後に取得されたPNC-FMS鋼データと従来データ、および海外材料などの他鋼種のデータを用いて、PNC-FMS鋼のUSEおよびDBTTの評価を行った。まず製造まま材のデータに基づき USE, DBTTそれぞれにおける寸法依存性などを評価し、さらに熱時効材および照射材のデータを用いて熱時効効果と照射効果それぞれの評価を実施した。これらの評価結果に基づき、PNC-FMS鋼における製造時のUSEとDBTTの設計値、および熱時効効果と照射効果それぞれの設計式の策定を行った。主な評価結果は以下の通りである。

- (1) USEの寸法依存性は「 $(Bb)^n$ 」を用いて「 $USE = m(Bb)^n$ 」（m, nは定数）の関係として適切に評価することが可能であり、PNC-FMS鋼の場合「n=1.4」となることを明らかにした。「 $(Bb)^n$ 」における乗数「n」は、フルサイズ試験片のUSE (J) と関連付けられ、「 $n = 1.38 \times 10^{-3} USE + 1.20$ 」の関係式が得られた。
- (2) DBTTの寸法依存性は「 BKt 」を用いて適切に評価することが可能であり、「 $DBTT = p(\log_{10} BKt) + q$ 」（p, qは定数）の関係にあることを明らかにした。PNC-FMS鋼の場合、「 $DBTT = 119(\log_{10} BKt) - 160$ 」の関係式が得られた。
- (3) 製造時DBTTの設計値、および熱時効効果と照射効果それぞれの設計式を用いて、照射後のDBTTを推定した結果、350～650°Cの照射温度範囲でサブサイズ試験片（幅3mm x 高さ10mm）のDBTTは180°C以下であった。

8. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、適切な御指導・御意見を賜った東北大学の栗下 裕明 助教授、数多くの時効材データを取得していただいた住友金属工業および神戸製鋼所の方々、膨大な数値計算を実施していただいた原子力システム(株)の伊藤 昌弘 氏、貴重な照射データの取得に御尽力いただいた大洗工学センターの水田俊治 氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鹿倉 栄 他：高速炉炉心材料としての高強度フェライト／マルテンサイト鋼の開発，
日本原子力学会誌, vol.33 , No.12 , pp.1157-1170 (1991)
- 2) 野村 茂雄 他：高速炉炉心構成要素用高強度フェライト／マルテンサイト鋼 (PNC-FMS)
材料強度基準（暫定案）, PNC ZN9410 92-110 (1992)
- 3) 日本電気協会：原子炉構造材の監視試験方法, 電気技術規定 原子力編 JEAC 4201 (1991)
- 4) JIS Z 2202 : 金属材料衝撃試験片
- 5) 長谷川 正義 監修：ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社 (1972)
- 6) 上平 明弘 他：高強度フェライト／マルテンサイト鋼 (PNC-FMS鋼) のクリープ強度特性の評価,
JNC TN9400 99-045 (1999)
- 7) 朝倉 健太郎 and 藤田 利夫：フェライト鋼の高温強度と韌性, 日本原子力学会誌, v.28, pp.222-231 (1986)
- 8) R.L.Klueh and D.J.Alexander : Charpy impact toughness of martensitic steels irradiated in FFTF :
effect of heat treatment, CONF-920673-22 , (1993)
- 9) J.L.Selan et al. : Behavior under neutron irradiation of the 15-15Ti and EM10 steels used as standard materials of
the Phenix fuel subassembly , ASTM STP 1125 , pp.1209-1233 (1992)
- 10) H.Kurishita et al. : Evaluation of the upper shelf energy for ferritic steels from miniaturized charpy specimen data ,
ASTM STP 1270 , pp.775-789 (1996)
- 11) A.Alamo et al. : Irradiation effects on base metal and welds of 9Cr-1Mo (EM10) martensitic steel ,
ASTM STP 1270 , pp.761-774 (1996)
- 12) A.S.Kumar et al. : Recent improvements in size effects correlations for DBTT and upper shelf energy of
ferritic steels , ASTM STP 1204 , pp.47-61 (1993)
- 13) B.S.Louden et al. : The influence of specimen size on charpy impact testing of unirradiated HT9 ,
Journal of nuclear materials 155-157 , pp.662-667 (1988)
- 14) W.L.Hu and D.S.Gelles : Miniature charpy impact test results for the irradiated ferritic alloys HT-9 and
modified 9Cr-1Mo , Proceedings of topical conference on ferritic alloys for use in
nuclear energy technologies , pp.631-645 (1983)
- 15) W.L.Hu and D.S.Gelles : The ductile-to-brittle transition behavior of martensitic steels neutron irradiated to 26 dpa ,
ASTM STP 956 , pp.83-97 (1987)
- 16) 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, v.34 , pp.1042-1052 (1993)
- 17) H.Kayano 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 179-181 , pp.425-428 (1991)
- 18) D.J.Alexander and R.L.Klueh : Specimen size effects in charpy impact testing ,
ASTM STP 1072 , pp.179-191 (1990)
- 19) 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 , pp.325-338 (1986)
- 20) 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 150 , pp.292-301 (1987)
- 21) M.A.Sokolov and R.K.Nanstad : On impact testing of subsize charpy v-notch type specimens ,
ASTM STP 1270 , pp.384-414 (1996)
- 22) M.A.Sokolov and D.J.Alexander : An improved corelation procedure for subsize and full-size charpy impact
specimen data , NUREG/CR-6379 ORNL-6888 (1997)
- 23) Y.Hosoi et al. : Change in microstructure and toughness of ferritic-martensitic stainless steels
during long-term aging , Journal of nuclear materials 133&134 , pp.337-342 (1984)
- 24) J.L.Selan et al. : Pre- and post-irradiation mechanical properties of ferritic-martensitic steels for fusion applications :

- EM10 base metal and EM10/EM10 welds , Journal of nuclear materials 212-215 , pp.588-593 (1994)
- 25) F.H.Huang and D.S.Gelles : Impact fracture behavior of HT9 duct , WHC-SA-2512-FP , (1994)
- 26) K.Q.Bagley et al. : European development of ferritic-martensitic steels for fast reactor wrapper applications , Nuclear energy 27 , pp.295-303 (1988)
- 27) H.Kurishita et al. : Effect of specimen geometry on charpy impact test results for ferritic steel irradiated in JMTR , Sci. Rep. RITU, A40 , pp.95-98 (1994)
- 28) P.Dubuisson et al. : Microstructural evolution of ferritic-martensitic steels irradiated in the fast breeder reactor Phenix , Journal of nuclear materials 205 , pp.178-189 (1993)
- 29) 小林 英男 : 破壊力学入門 5. 線形弾性破壊じん性 , 材料 32 , pp.1410-1415 (1983)
- 30) 大塚 昭夫 他 : 破壊力学入門 6. 弾塑性破壊じん性 , J_{IC} , 材料 33 , pp.97-103 (1984)
- 31) 西田 正孝 : 応力集中 増補版 , 森北出版 (1967)
- 32) 日本金属学会, 日本鉄鋼協会 : 鉄鋼材料便覧 , 丸善 (1967)
- 33) 近藤 良夫 他 : 技術者のための統計的方法 , 共立出版 (1967)
- 34) 設工認調整会議・燃料分科会設計基準第1W/G : 高速原型炉燃料集合体の構造設計方針 (案) 解説書 , PNC ZN241 85-21(2) (1985)
- 35) エネルギー特別研究 (核融合) 総合統括班 : 核融合炉材料としてのフェライト系ステンレス鋼の適性 , 昭和60年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書 (1986)
- 36) 白石 健介 : 中性子照射による鉄鋼材料の損傷 , 热処理 27 , pp.156-161 (1987)
- 37) 日本金属学会 : 原子力材料 , 丸善 (1989)
- 38) F.A.Garner : Irradiation performance of cladding and structural steels in liquid metal reactors , Materials Science and Technology , vol.10 A , pp.420-543 (1994)
- 39) 鈴木 哲也 and 木村 晃彦 : 軽水炉圧力容器鋼溶接部の照射脆化挙動評価技術 , 日本原子力学会誌 41 , pp.1173-1179 (1999)
- 40) J.L.Straalsund and D.S.Gelles : Assessment of the performance potential of the martensitic alloy HT-9 for liquid-metal fast-breeder-reactor applications , HEDL-SA-2771-FP (1983)

表1 PNC-FMS鋼および開発途中材の化学成分 (wt.%)

鋼種(*1)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	N	Nb	V	Ni当量(*3)	Cr当量(*4)	δ フェライト推定量(%)(*5)	
仕様(*2)	上限値	0.15	0.1	0.80	0.030	0.030	0.60	12.0	0.70	2.30	0.070	0.080	0.25	5.5	12.9	30(*6)
	目標値	0.12	0.05	0.60	—	—	0.40	11.0	0.50	2.00	0.050	0.050	0.20	4.3	11.6	<5
	下限値	0.09	—	0.40	—	—	0.20	10.0	0.30	1.70	0.030	0.020	0.15	3.1	10.3	0(*6)
60FS-X	0.11	0.18	0.48	0.015	0.004	0.33	11.05	0.47	1.38	0.0511	0.066	0.20	3.9	11.8	5	
60FS-Y	0.10	0.18	0.49	0.014	0.004	0.33	11.04	0.48	1.88	0.0506	0.066	0.21	3.6	11.8	5	
61FK	0.043	0.05	0.62	0.009	0.002	0.46	11.11	1.91	—	0.056	0.050	0.24	2.1	13.1	80	
61FS	0.10	0.07	0.54	0.002	0.002	0.32	11.05	0.45	1.89	0.044	0.055	0.21	3.6	11.6	5	
61FSF	0.12	0.06	0.69	0.002	0.002	0.32	11.00	0.09	2.11	0.043	0.056	0.20	4.8	11.2	0	
62WFK	0.18	<0.01	0.51	0.002	0.002	0.43	11.30	0.12	2.76	0.016	0.05	0.18	6.1	11.5	0	
62WFS	0.13	0.04	0.60	0.002	0.001	0.41	10.95	0.37	1.70	0.043	0.08	0.20	4.6	11.4	0	
S62年度試作材IA(A)	0.13	0.035	0.49	0.0020	0.0015	0.39	11.18	0.21	2.67	0.051	0.056	0.20	4.5	11.5	0	
S62年度試作材IA(B)	0.18	0.043	0.49	0.0019	0.0017	0.39	11.14	0.15	2.69	0.021	0.057	0.21	6.0	11.4	0	
63WFK	0.14	0.05	0.49	0.002	0.003	0.50	11.30	0.45	2.07	0.060	0.060	0.22	4.9	11.9	0	
63WFS	0.13	0.03	0.64	0.002	0.002	0.45	10.95	0.44	1.82	0.050	0.070	0.18	4.7	11.5	0	
S63年度試作材IIA(A)	0.13	0.060	0.62	0.0016	0.0018	0.52	11.60	0.56	2.01	0.048	0.07	0.25	4.7	12.3	<5	
S63年度試作材IIA(B)	0.12	0.018	0.64	0.0013	0.0017	0.50	11.54	0.55	2.02	0.071	0.07	0.25	4.4	12.2	<5	
S63年度試作材IIA(C)	0.14	0.024	0.63	0.0016	0.0020	0.50	11.54	0.55	2.03	0.050	0.11	0.35	5.0	12.2	<5	
S63年度試作材IIB(A)	0.11	0.07	0.60	0.002	0.003	0.43	11.22	0.42	1.75	0.066	0.070	0.20	4.0	11.8	<5	
S63年度試作材IIB(B)(*7)	0.12	0.06	0.60	0.001	0.003	0.42	11.06	0.43	1.73	0.065	0.064	0.19	4.3	11.6	<5	
2WFK	0.14	0.05	0.49	0.002	0.004	0.50	11.20	0.45	2.07	0.060	0.060	0.23	4.9	11.8	0	
2WFK相当	0.12	0.05	0.60	0.003	0.001	0.39	11.09	0.49	2.08	0.049	0.047	0.21	4.3	11.7	<5	

(*1) 上記鋼種の一部は、PNC-FMS鋼の開発段階で製作されたものであり、一部の化学成分量が仕様範囲から外れている。(■を付けた成分量)

(*2) 材料仕様は、材料強度基準（暫定案）において策定されたものである。

(*3) Ni当量=Ni+30C+0.5Mn

(*4) Cr当量=Cr+Mo+1.5Si+0.5Nb

(*5) Schaefflerの状態図に基づき、成分組成から推定したものであり、熱処理条件に応じて δ フェライト生成量は変化する。(*6) 仕様における δ フェライト下限値はNi当量上限値+Cr当量下限値の組合せから推定し、 δ フェライト上限値はNi当量下限値+Cr当量上限値から推定した。

(*7) S63年度試作材IIB(B)は、機械的性質の向上を目的として、「B (=0.0022%)」を添加している。

表2 他鋼種の化学成分 (wt.%) と最終熱処理条件

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	N	Nb	V	最終熱処理条件	組織	
EM10(1)	0.105	0.37	0.48	0.016	—	0.18	8.76	1.05	—	0.024	<0.05	0.03	焼きならし+760°Cx0.5hr	100%マテリアイト	
EM10(2)	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	1000°Cx0.5hr+750°Cx0.5hr	†	
EM10(3)	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	980°Cx0.5hr+760°Cx0.5hr	†	
HT9(4)	0.190	0.42	0.6	—	—	0.56	12.0	0.96	0.54	—	—	0.3	1050°Cx0.5hr+780°Cx2.5hr	100%マテリアイト	
HT9相当材	0.21	0.31	0.51	0.0009	0.0007	0.49	12.16	1.02	0.47	—	—	0.29	1050°Cx0.5hr+775°Cx1hr	100%マテリアイト	
JFMS	0.05	0.67	0.58	0.009	0.006	0.94	9.85	2.31	—	0.01	0.06	0.12	1050°Cx1hr+750°Cx2hr	フェライト-マテリアイト2相	
9Cr-2W	0.100	0.28	0.48	<0.002	0.003	—	8.92	—	1.92	0.002	—	—	焼き入れ950°C+焼き戻し750°C	100%マテリアイト	
9Cr1MoVNb	0.092	0.15	0.48	0.012	0.004	0.09	8.32	0.86	<0.01	0.054	0.06	0.20	4種類	100%マテリアイト	
12Cr1MoVW	0.20	0.17	0.57	0.016	0.003	0.51	12.1	1.04	0.61	0.027	<0.001	0.29	4種類	100%マテリアイト	
(参考)	上限値	0.15	0.1	0.80	0.030	0.030	0.60	12.0	0.70	2.30	0.070	0.080	0.25	ラッパ管: 1000°Cx10min+700°Cx1hr 被覆管: 1050°Cx10min+780°Cx1hr	数%のフェライトを含むマテリアイト
PNC-FMS	目標値	0.12	0.05	0.60	—	—	0.40	11.0	0.50	2.00	0.050	0.050	0.20		
材料仕様	下限値	0.09	—	0.40	—	—	0.20	10.0	0.30	1.70	0.030	0.020	0.15		

表3 PNC-FMS鋼のnor.USEおよびDBTTの設計基準

(炉内でのnor.USE)=(製造時nor.USE)-(時効による Δ nor.USE)-(照射による Δ nor.USE)
 (ただし、(炉内でのnor.USE) ≥ 0)

(炉内でのDBTT)=(製造時DBTT)-(時効による Δ DBTT)-(照射による Δ DBTT)

(製造時nor.USEおよびDBTT)

ノミナル値：nor.USE=0.297 (nor.USE=USE/(Bb)^{1.4}である)

$$\text{DBTT}=119(\log_{10}BKt)-160$$

下限値：nor.USE=0.228

$$\text{上限値：DBTT}=119(\log_{10}BKt)-137$$

(時効による Δ nor.USEおよび Δ DBTT)

ノミナル式： Δ nor.USE=0.540-0.00123 x T

(ただし、 Δ nor.USE ≤ 0 であり、T>600のとき Δ nor.USE=-0.200)

$$\Delta \text{DBTT}=-144+0.357 \times T \quad (\text{ただし、} \Delta \text{DBTT} \geq 0)$$

下限式： Δ nor.USE=0.444-0.00123 x T

(ただし、 Δ nor.USE ≤ 0 であり、T>600のとき Δ nor.USE=-0.296)

上限式： Δ DBTT=-132+0.357 x T (ただし、 Δ DBTT ≥ 0)

(照射による Δ nor.USEおよび Δ DBTT)

ノミナル式： Δ nor.USE=-0.650+0.00138 x T (ただし、 Δ nor.USE ≤ 0)

$$\Delta \text{DBTT}=833-2.90 \times T+0.00243 \times T^2$$

(ただし、 Δ DBTT ≥ 0 であり、T>597のとき Δ DBTT=0)

下限式： Δ nor.USE=-0.785+0.00138 x T (ただし、 Δ nor.USE ≤ 0)

上限式： Δ DBTT=908-2.90 x T+0.00243 x T²

(ただし、 Δ DBTT ≥ 0 であり、T>597のとき Δ DBTT=43)

nor.USE：寸法依存性のないように規格化した上部棚吸収エネルギー (J/mm^{2.8})

USE：上部棚吸収エネルギー (J)

B：試験片の幅 (mm)

b：試験片のリガメントサイズ (mm) (試験片高さからノッチ深さを差し引いた寸法)

DBTT：延性脆性遷移温度 (°C)

Kt：弾性応力集中係数 (-)

T：照射温度 (°C)

・適用範囲

照射温度：350~650 (°C)

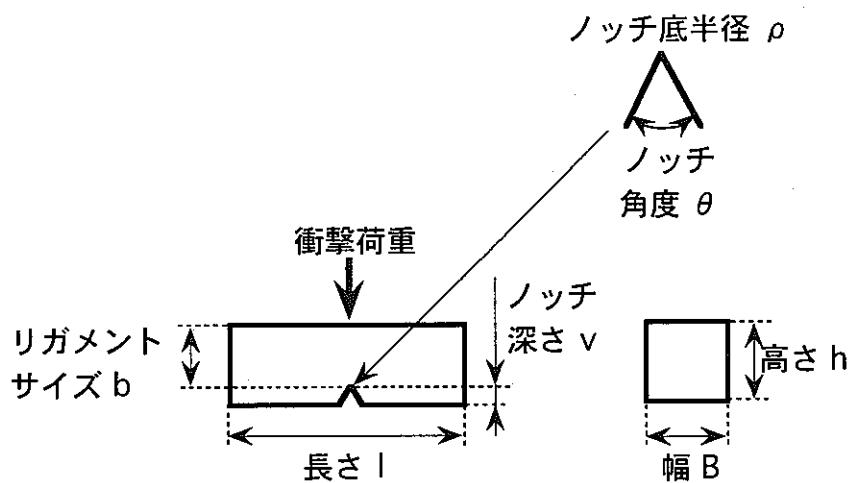


図 2-1 シャルピー衝撃試験片の寸法表記

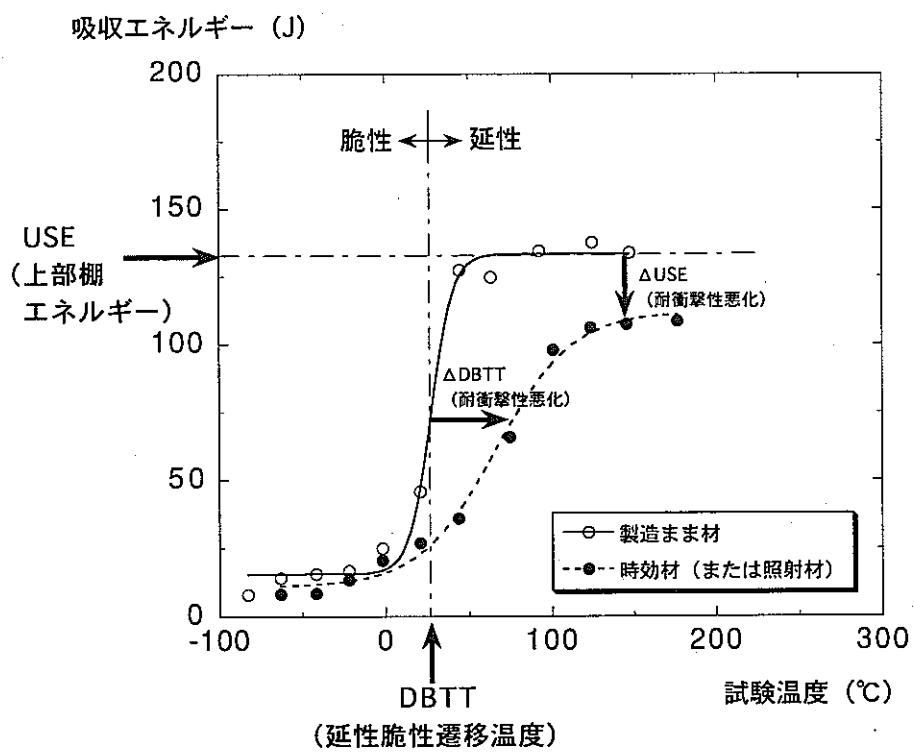


図 2-2 吸収エネルギーとシャルピー衝撃試験温度との関係の例

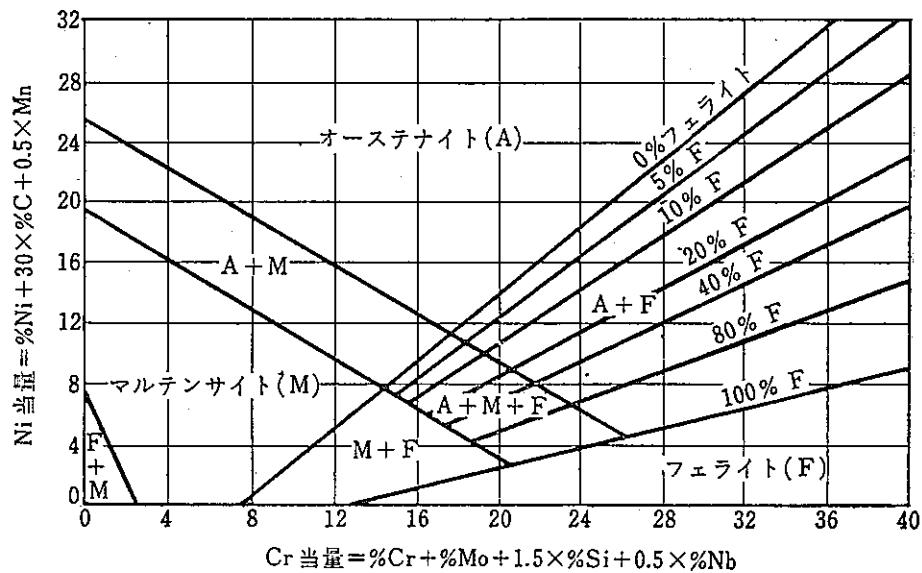


図2-3 シューフラー (Schaeffler) の組織図

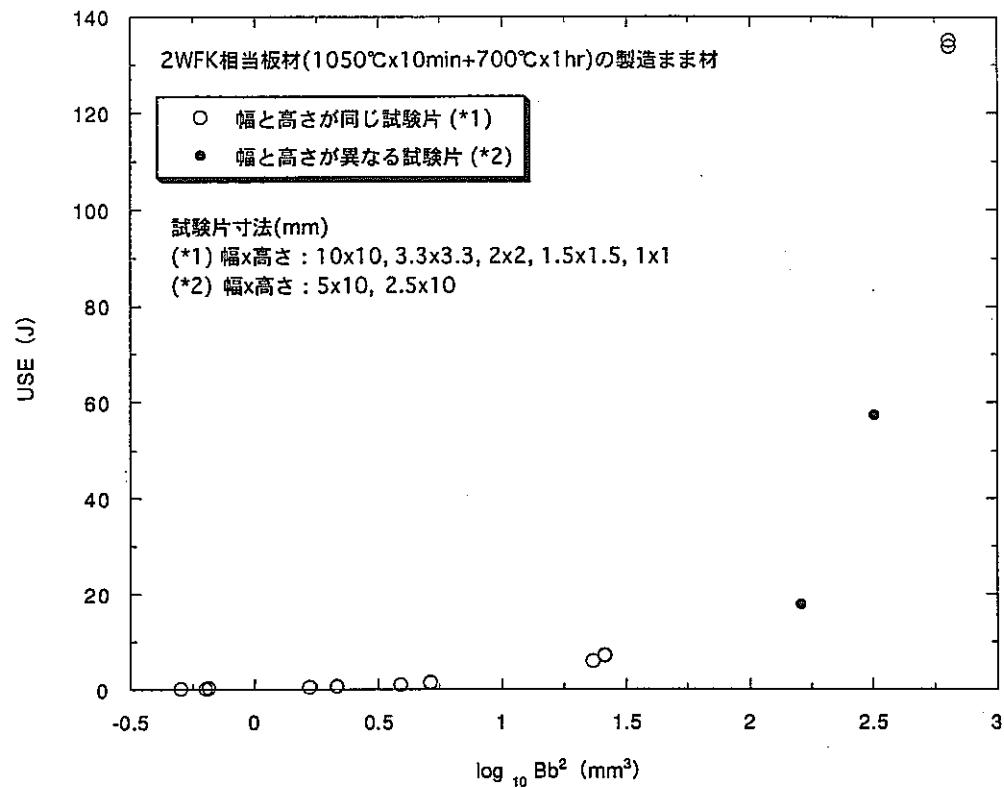


図 3-1.1 USE と Bb^2 との関係

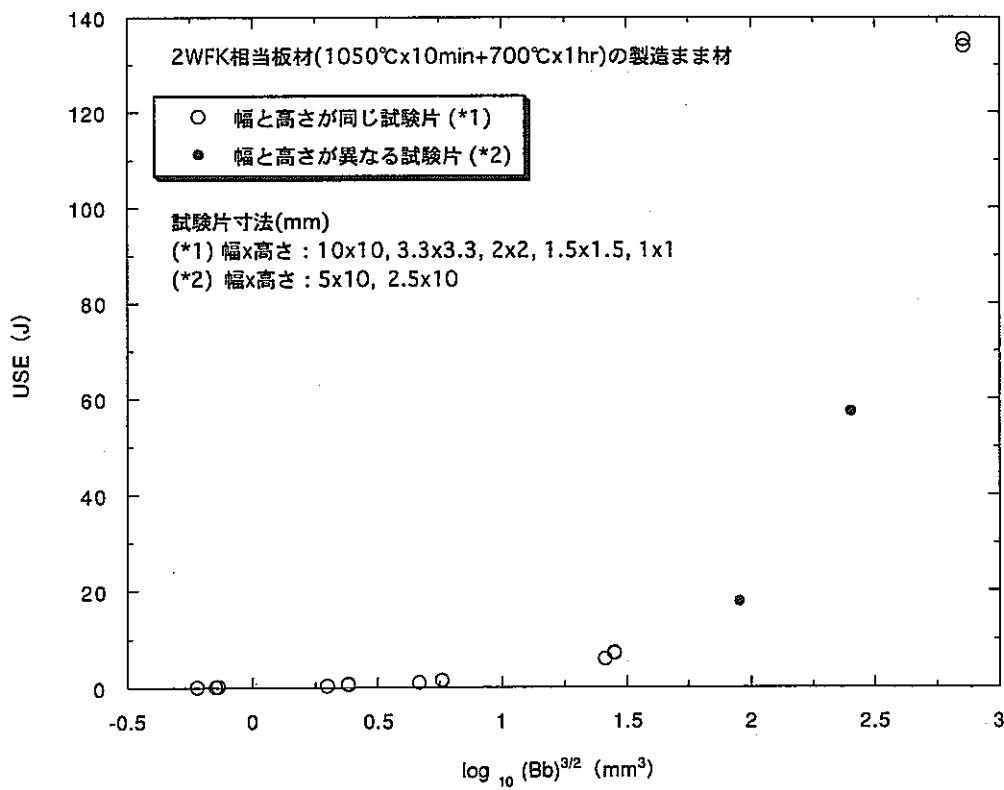
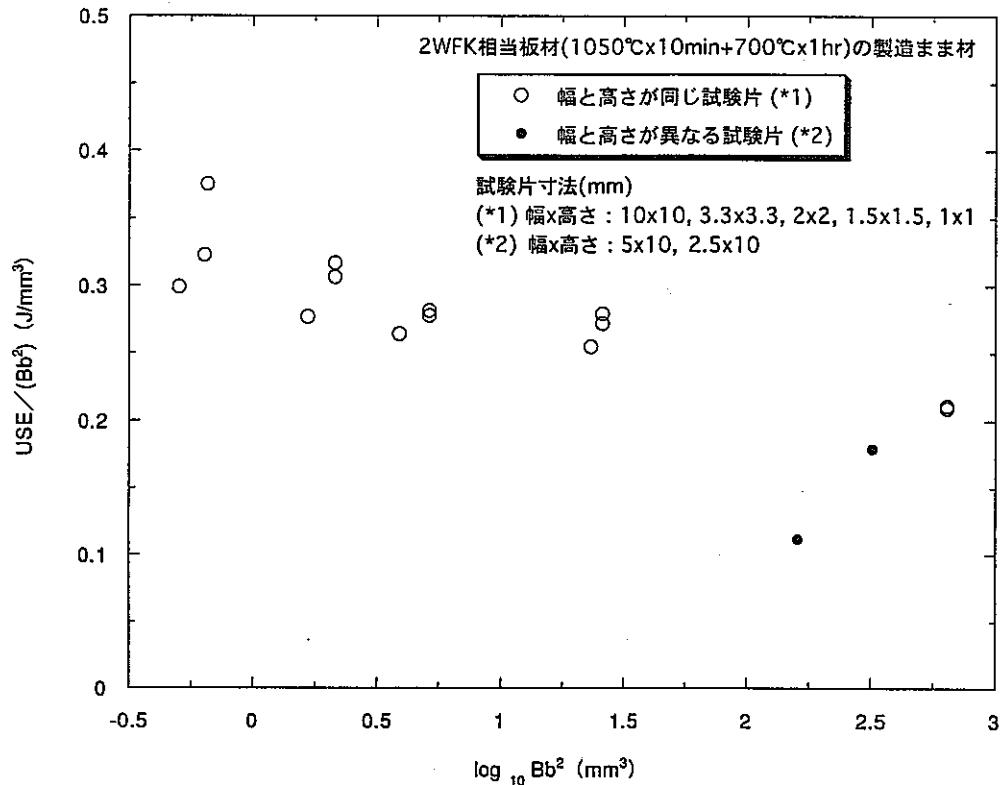
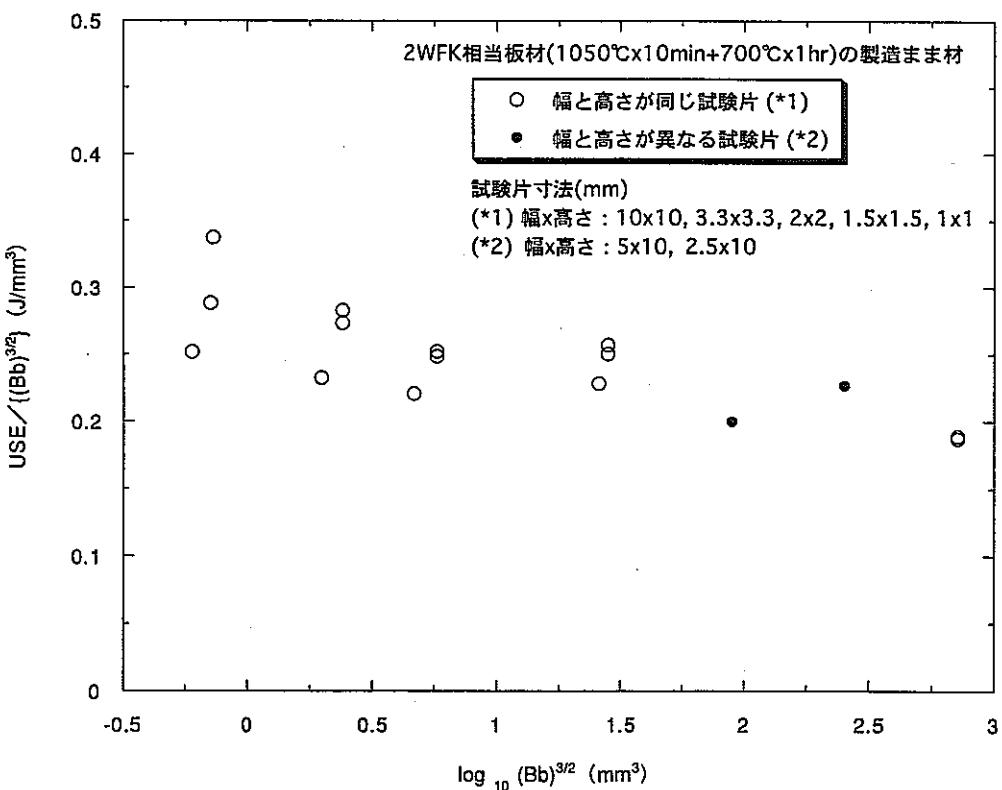


図 3-1.2 USE と $(Bb)^{3/2}$ との関係

図 3-2.1 Bb^2 により規格化を試みたUSEの寸法依存性図 3-2.2 $(Bb)^{3/2}$ により規格化を試みたUSEの寸法依存性

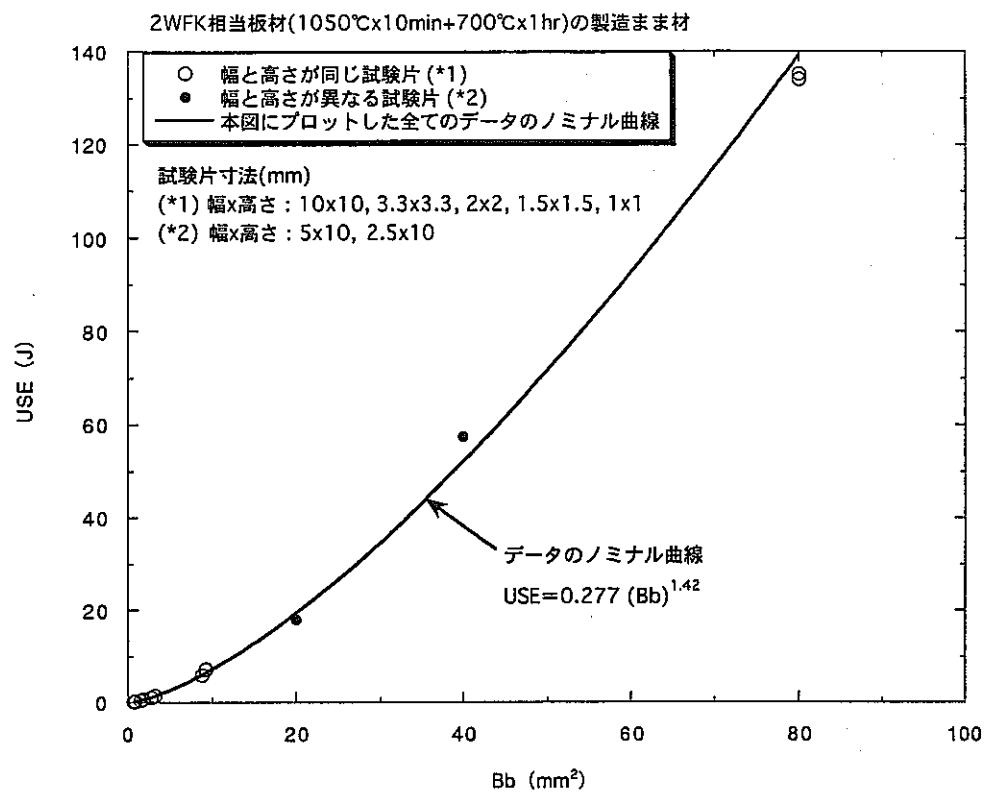
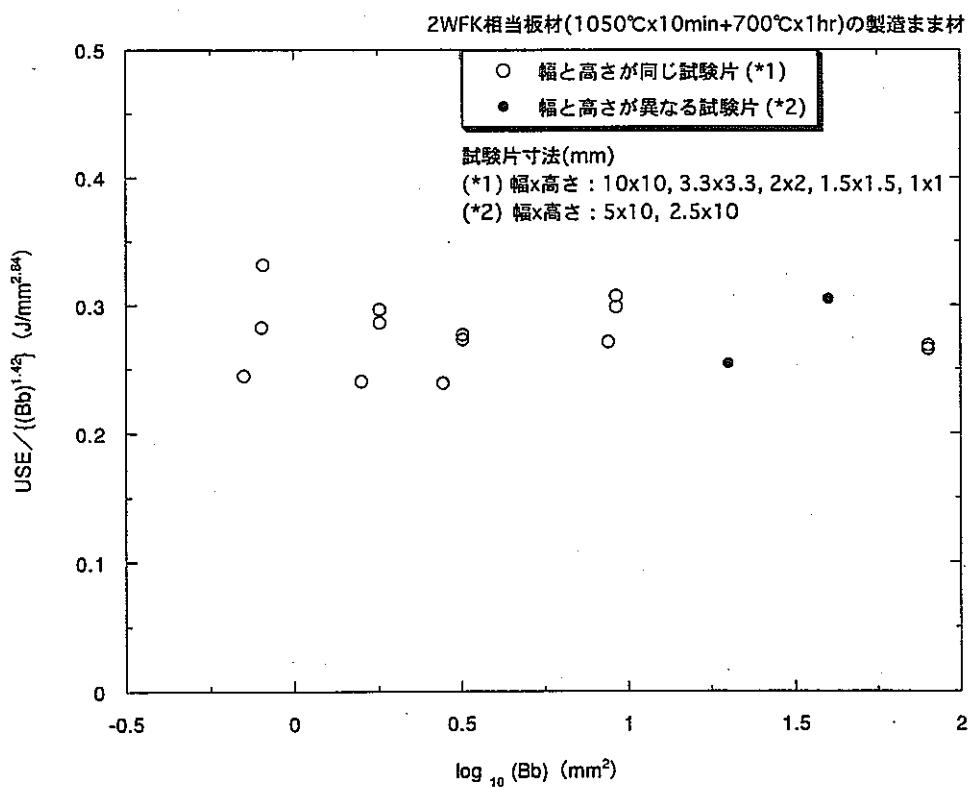


図 3-3.1 USEとBbの関係の定式化 (2WFK相当板材 製造まま材の場合)

図 3-3.2 $(Bb)^{1.42}$ により規格化を試みたUSEの寸法依存性 (2WFK相当板材 製造まま材の場合)

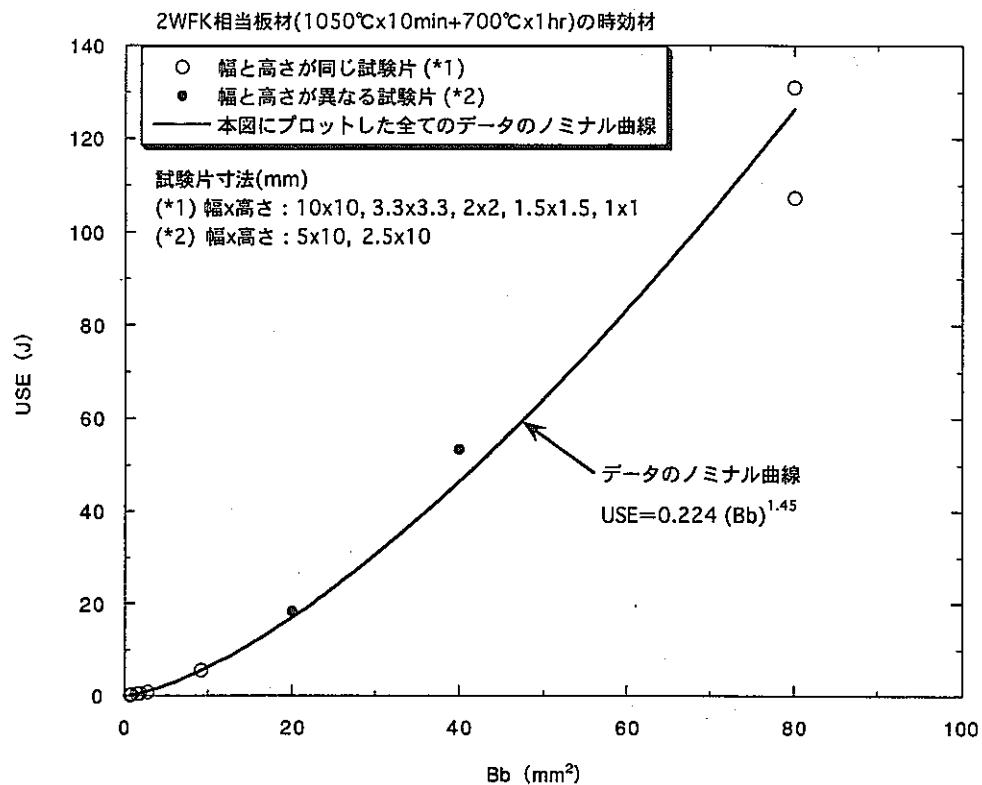


図 3-4.1 USEとBbの関係 (2WFK相当板材 時効材の場合)

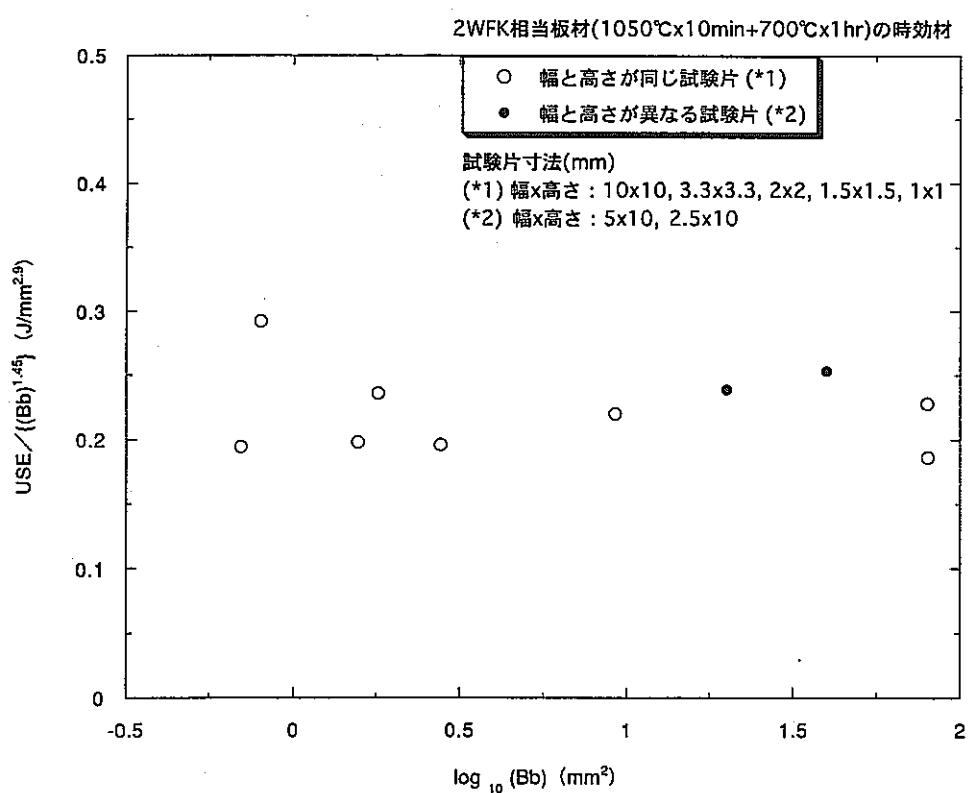


図 3-4.2 $(Bb)^{1.45}$ により規格化を試みたUSEの寸法依存性 (2WFK相当板材 時効材の場合)

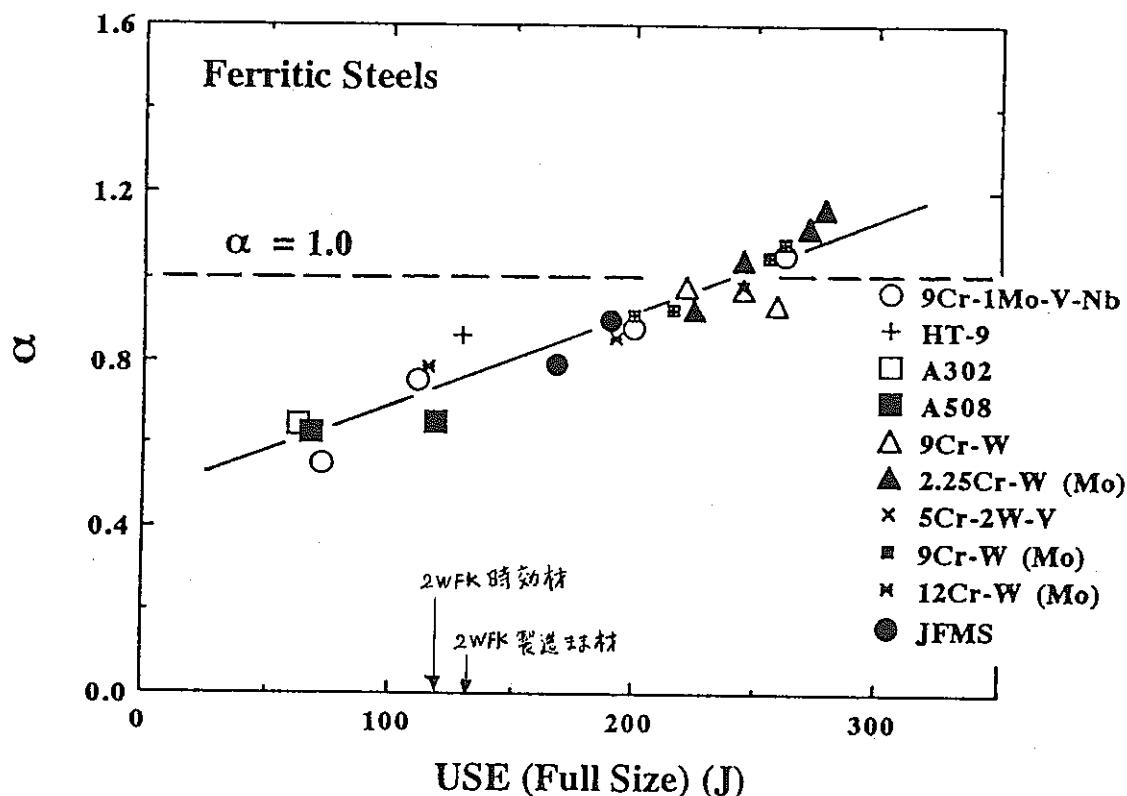


図3-5 フルサイズ試験片と1/3サイズ試験片のUSE/(Bb)^{3/2}の比「 α 」と
フルサイズ試験片のUSEとの関係

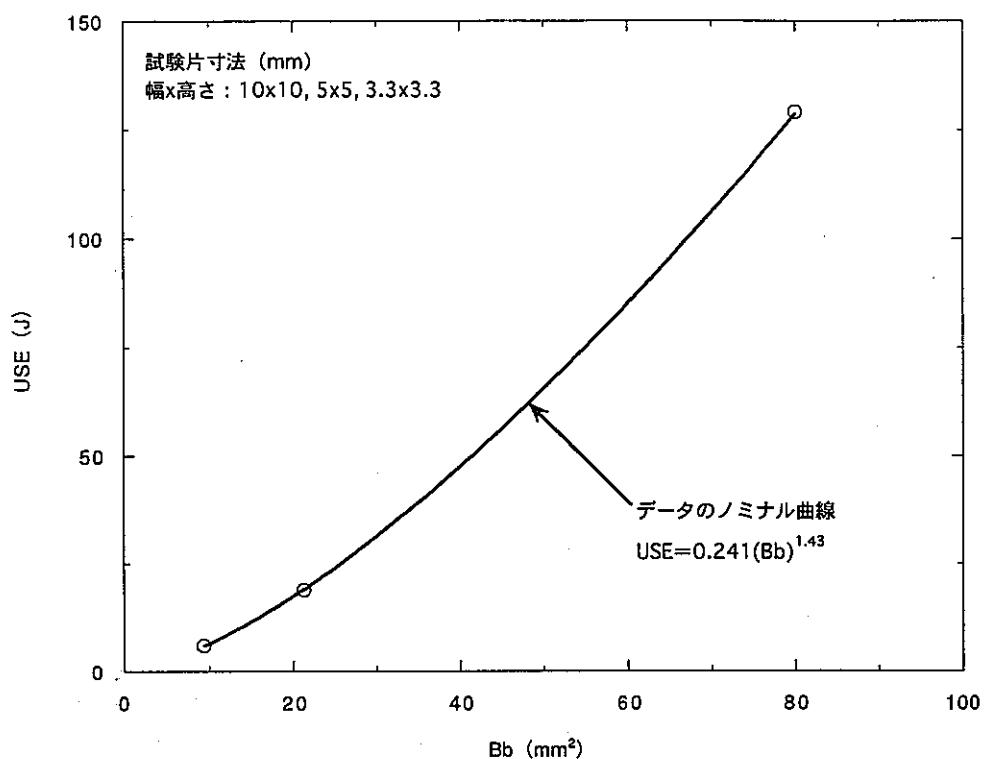


図 3-6.1 USEとBbの関係 (HT9鋼 製造まま材の場合)

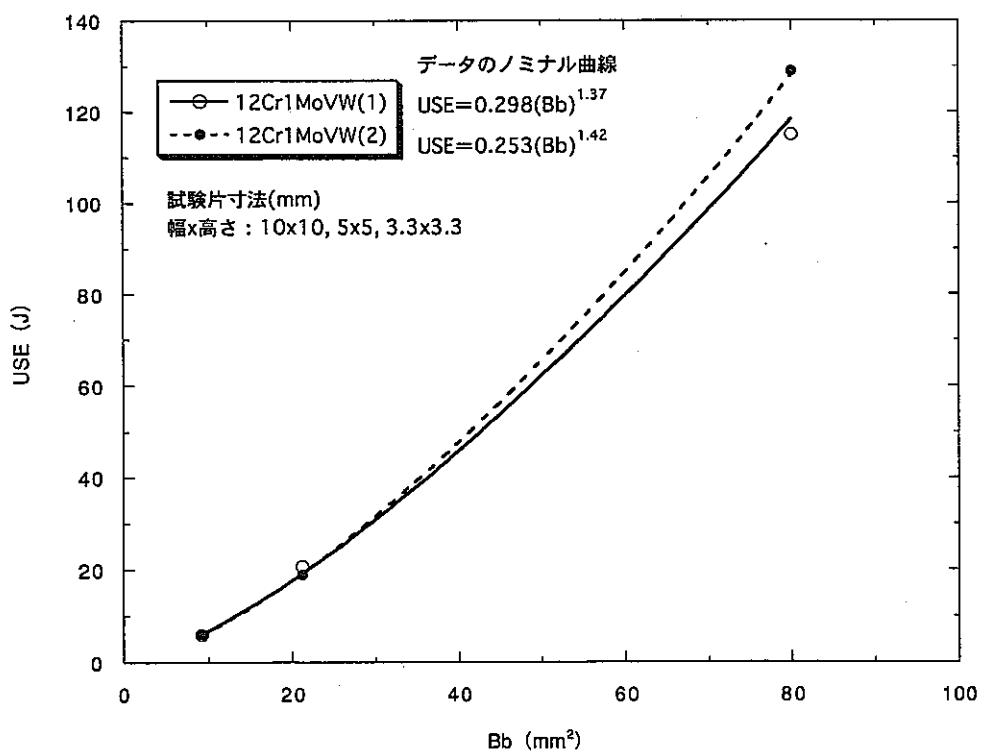


図 3-6.2 USEとBbの関係 (12Cr1MoVW鋼 製造まま材の場合)

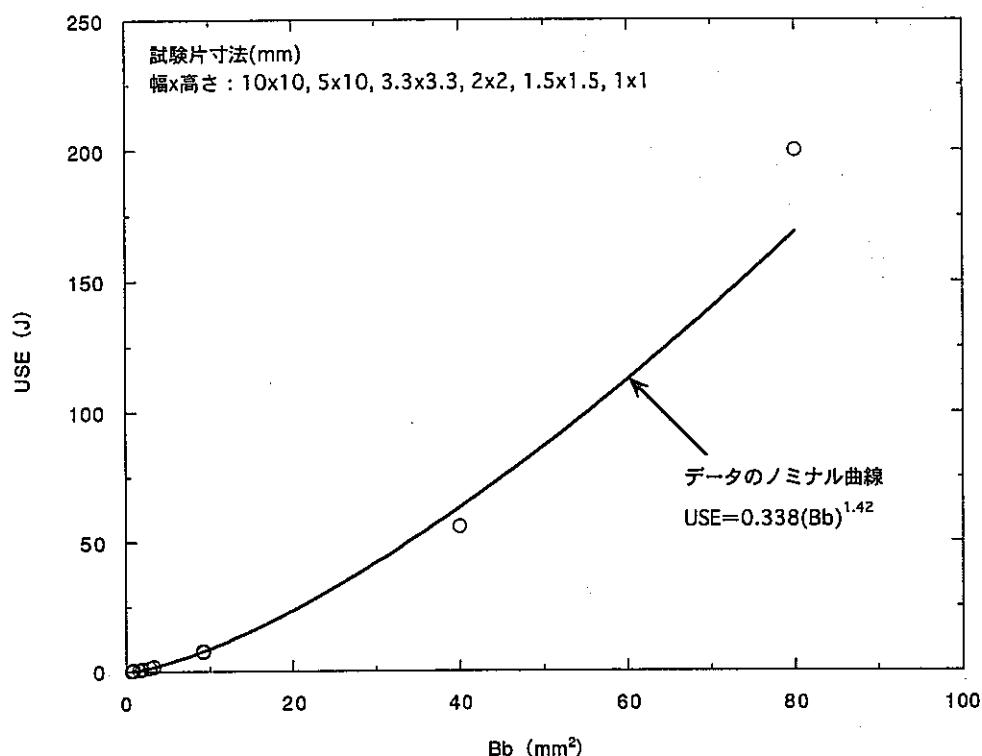


図 3-6.3 USEとBbの関係 (JFMS鋼 製造まま材の場合)

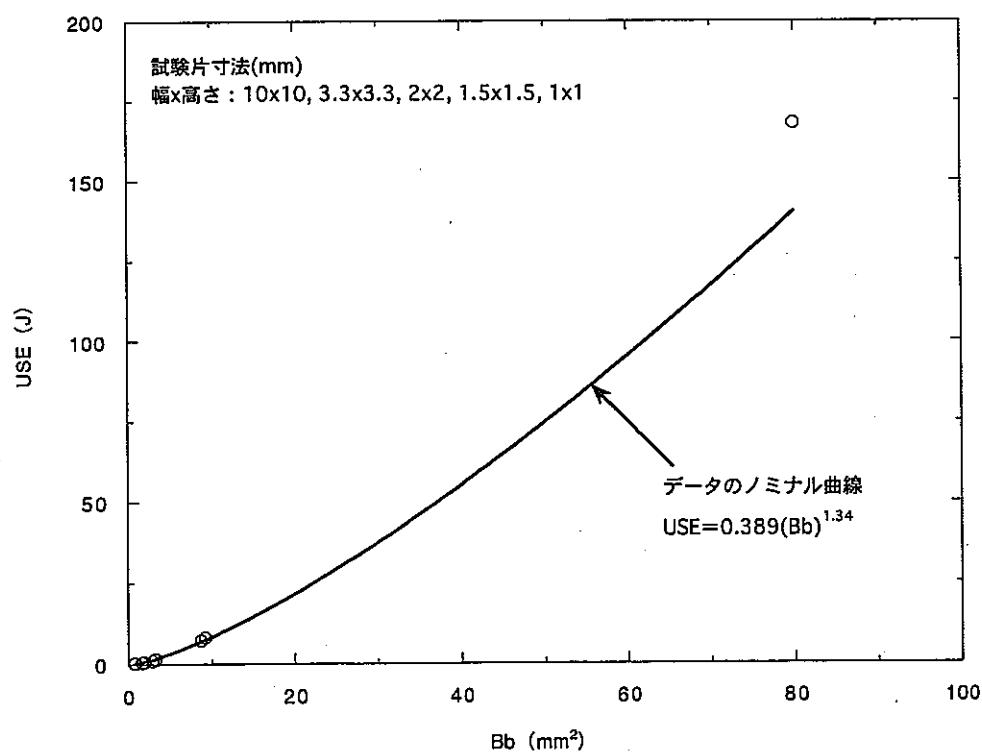


図 3-6.4 USEとBbの関係 (JFMS鋼 照射材の場合)

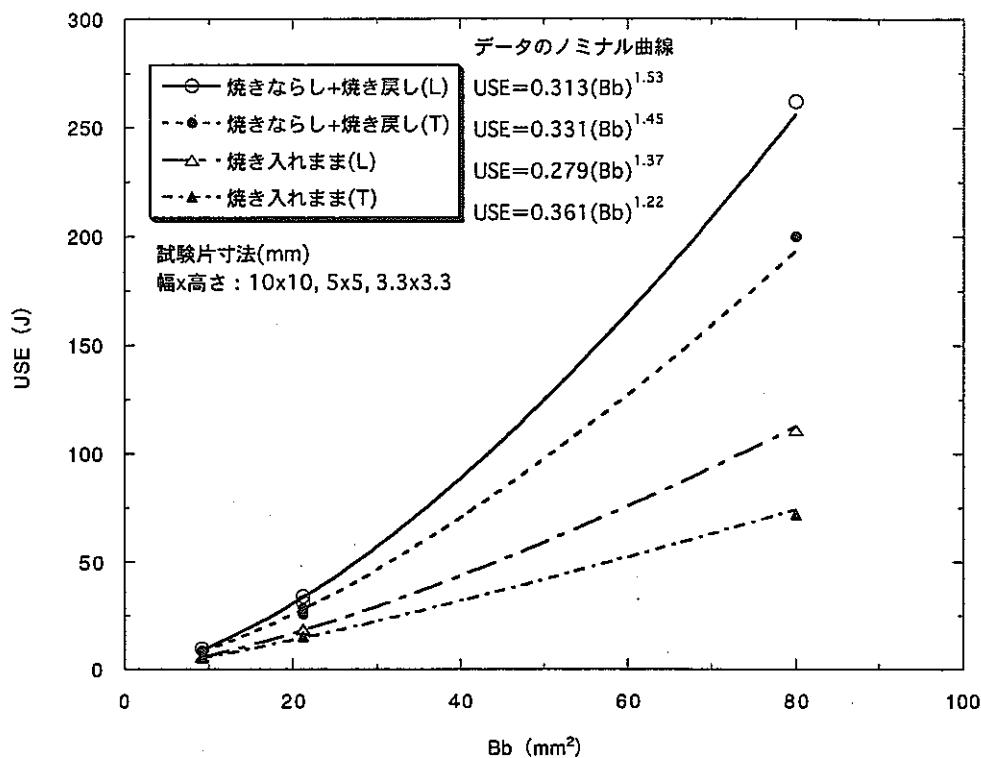


図 3-6.5 USEとBbの関係 (9Cr1MoVNb鋼 製造まま材の場合)

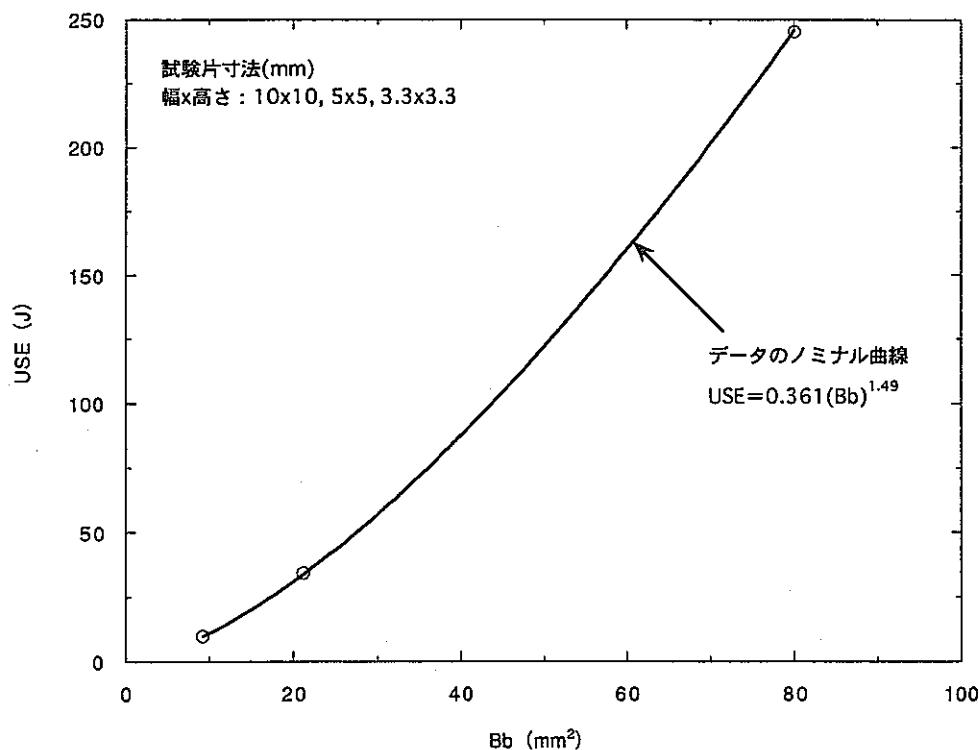


図 3-6.6 USEとBbの関係 (9Cr2W鋼 製造まま材の場合)

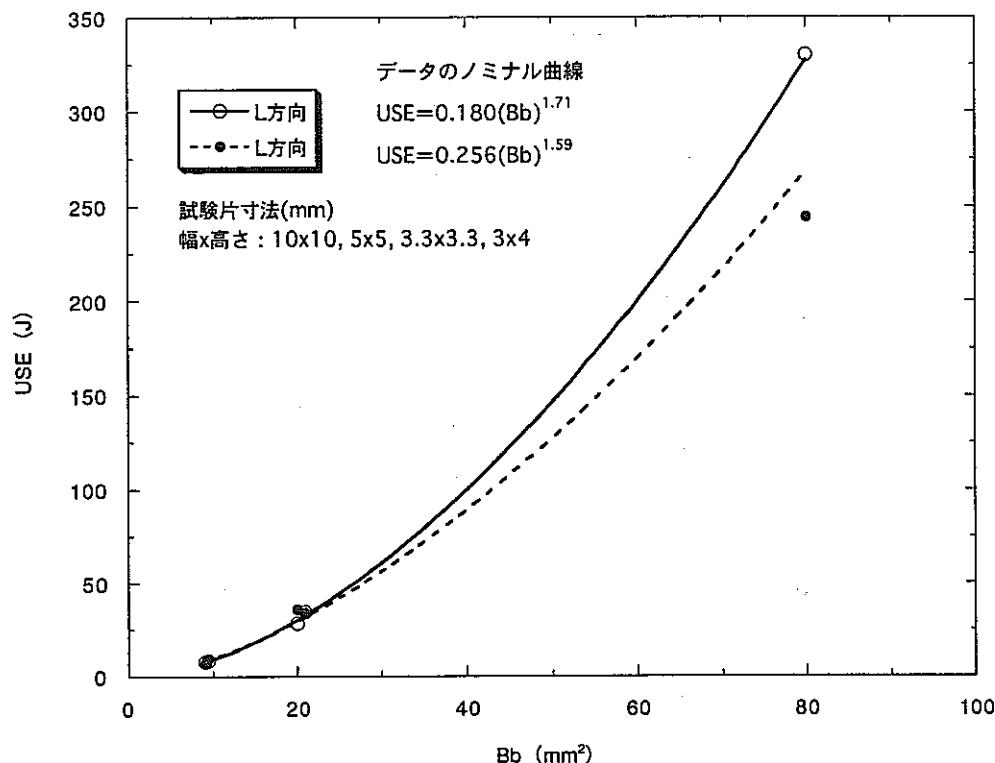


図 3-6.7 USEとBbの関係 (A533鋼 製造まま材の場合)

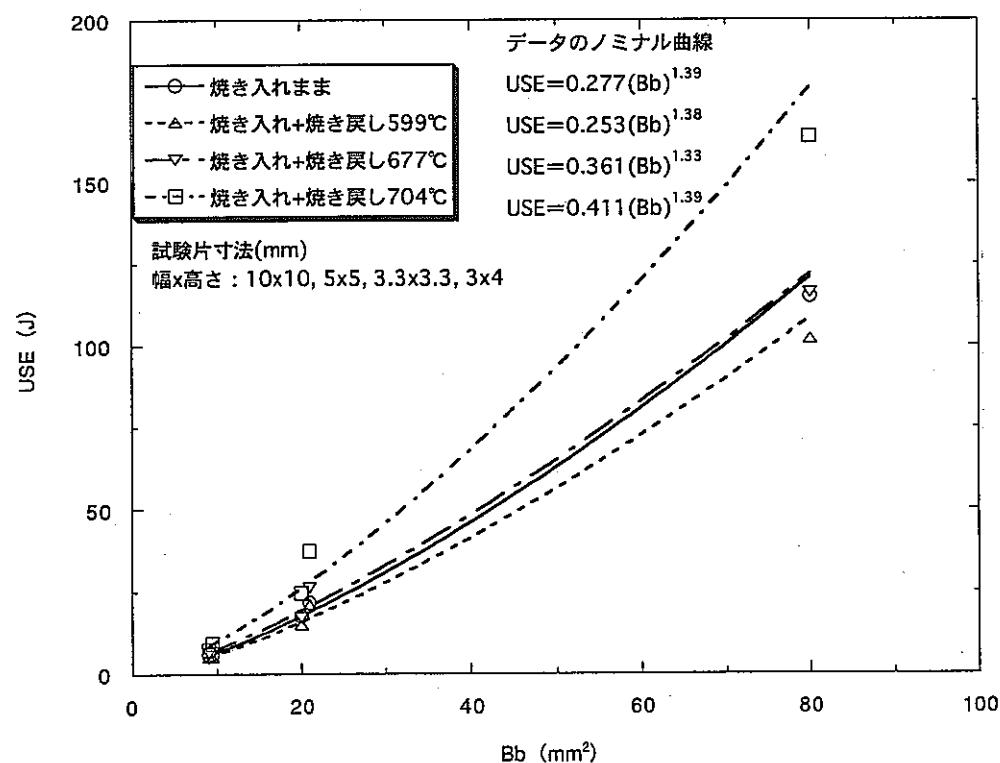


図 3-6.8 USEとBbの関係 (A508鋼 製造まま材の場合)

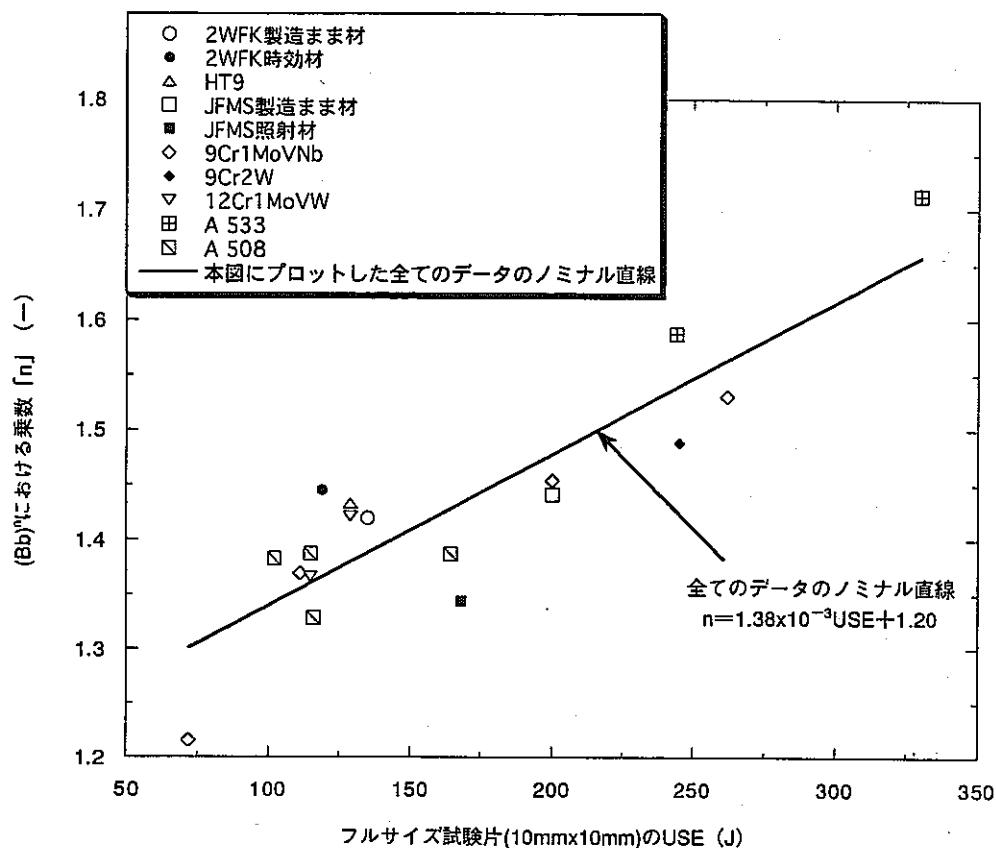


図 3-7 フルサイズ試験片のUSEと(Bb)の乗数との関係

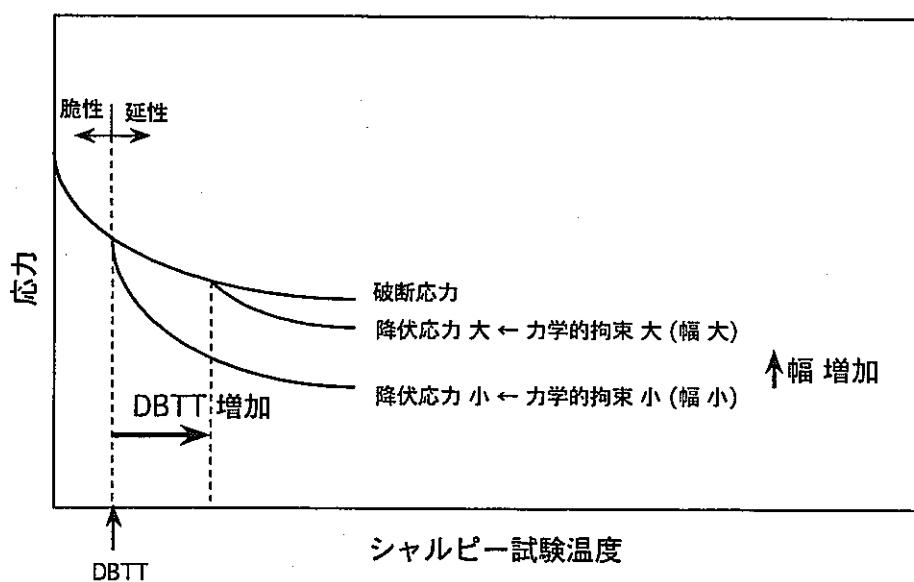
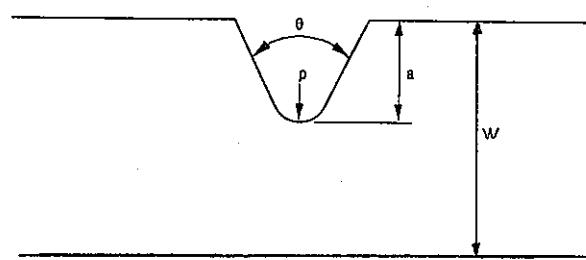


図 3-8 DBTTにおける寸法効果の概念図



a, W, ρ, θ : ノッチ深さ, 試験片高さ, ノッチ底半径, ノッチ角度

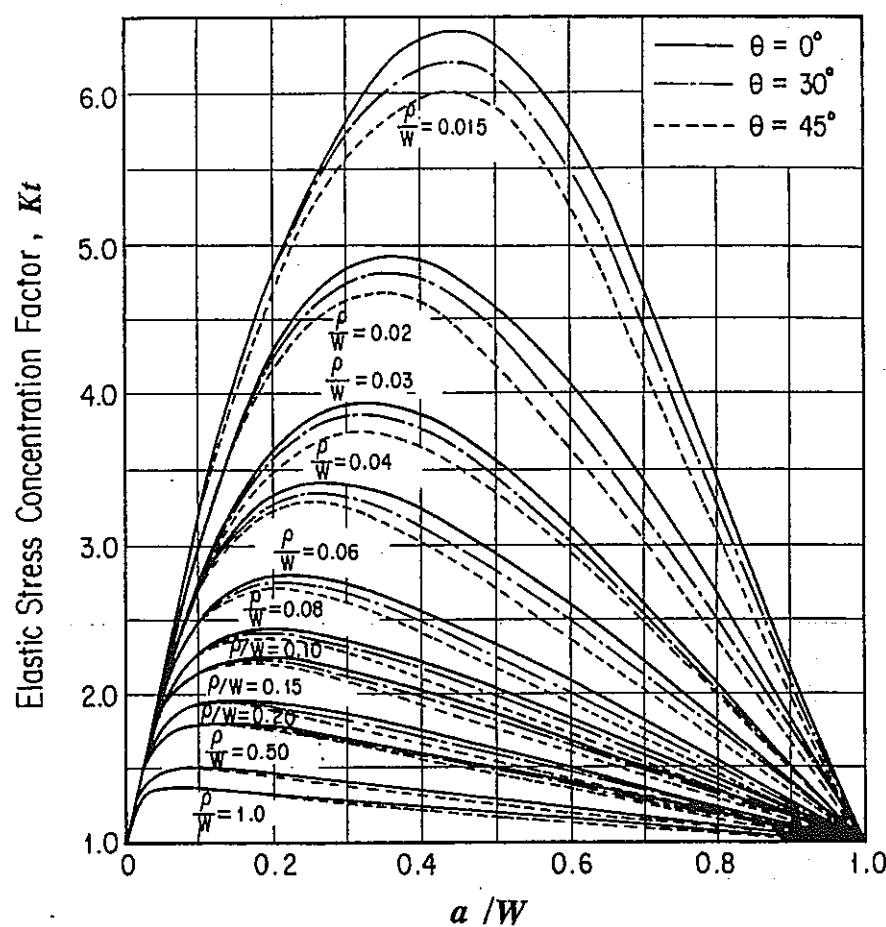


図 3-9 弾性応力集中係数「Kt」とノッチ寸法との関係

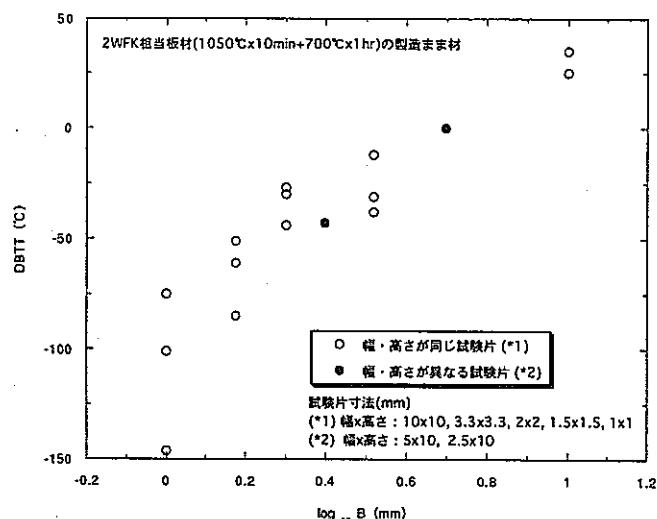


図 3-10.1 DBTTとBとの関係

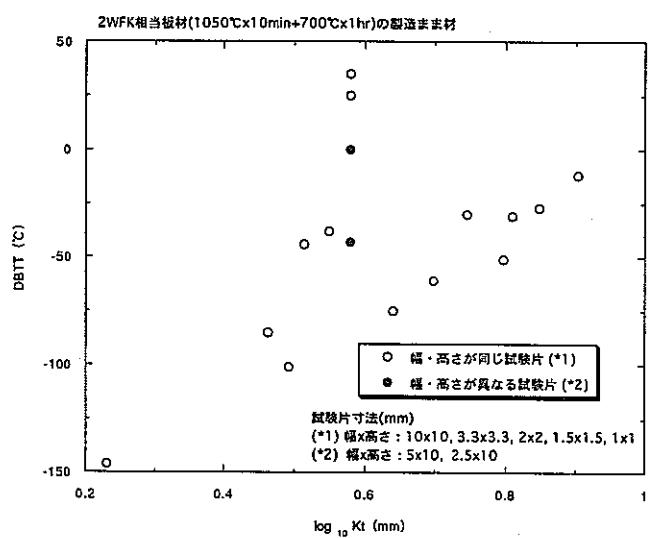


図 3-10.2 DBTTとKtとの関係

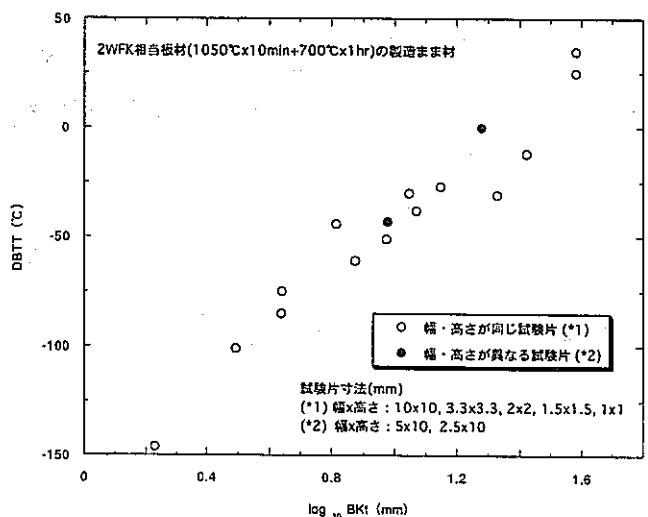


図 3-10.3 DBTTとBKtとの関係

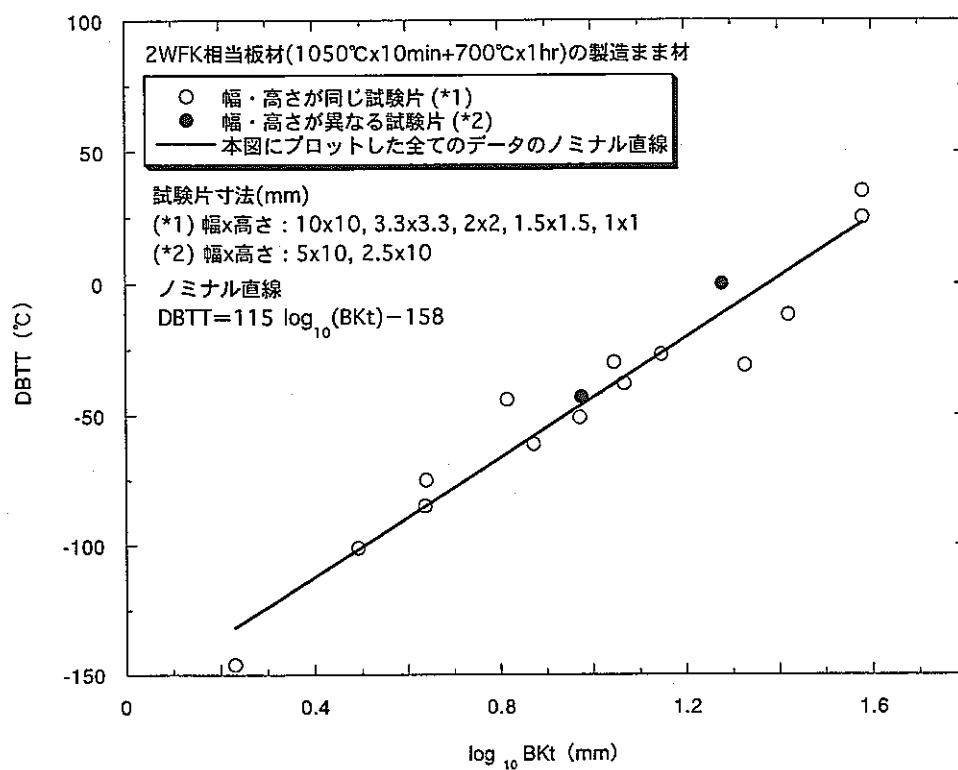


図 3-11.1 DBTT と BKt との関係 (2WFK相当板材 製造まま材の場合)

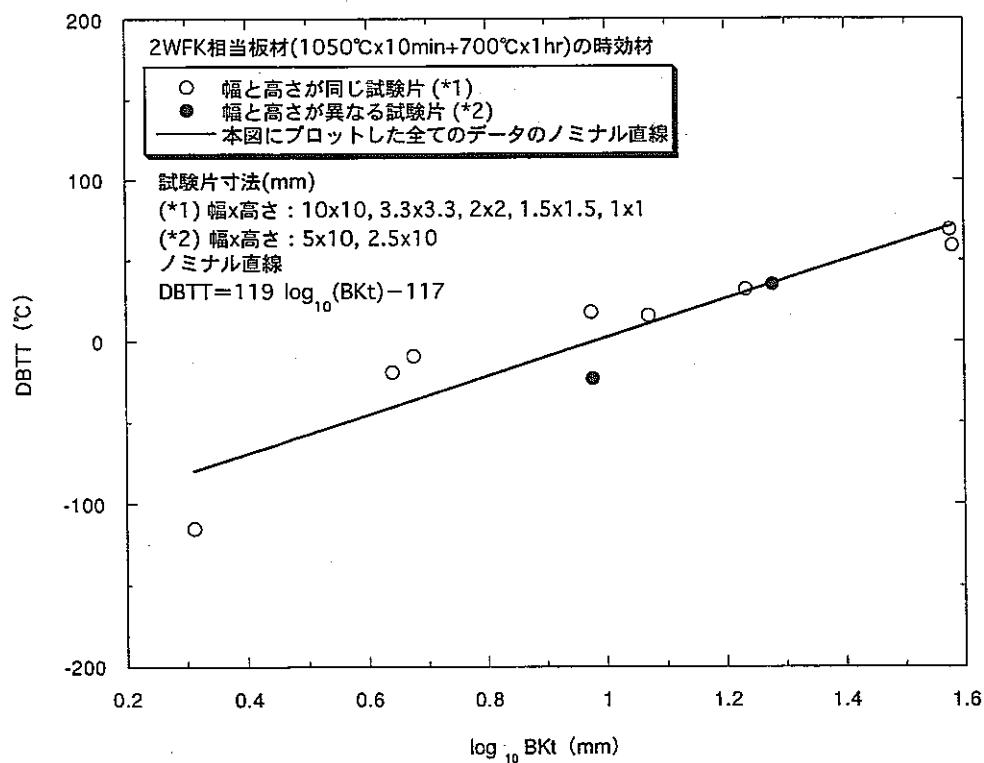


図 3-11.2 DBTT と BKt との関係 (2WFK相当板材 時効材の場合)

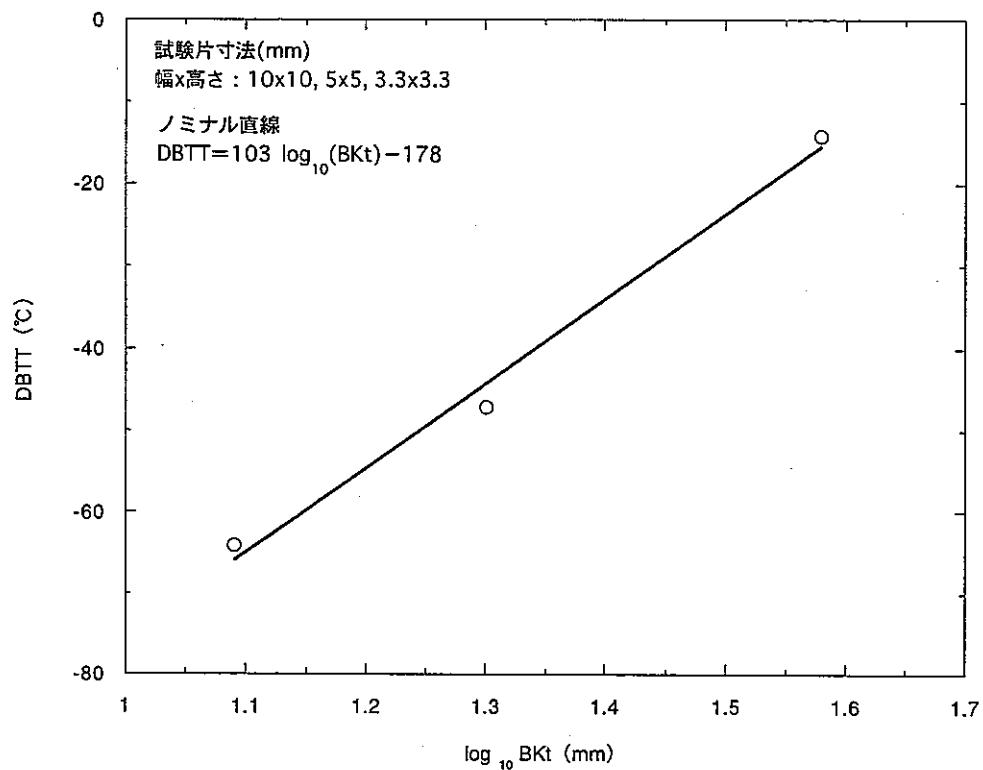


図 3-11.3 DBTTとBKtとの関係 (HT9鋼 製造まま材の場合)

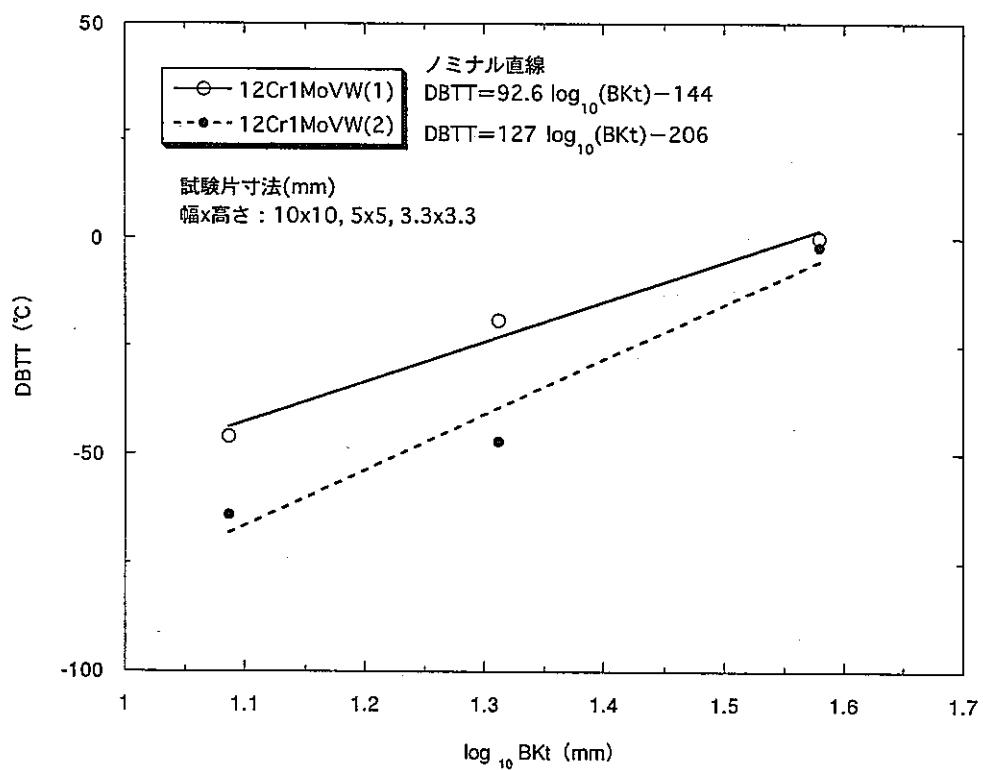


図 3-11.4 DBTTとBKtとの関係 (12Cr1MoVW鋼 製造まま材の場合)

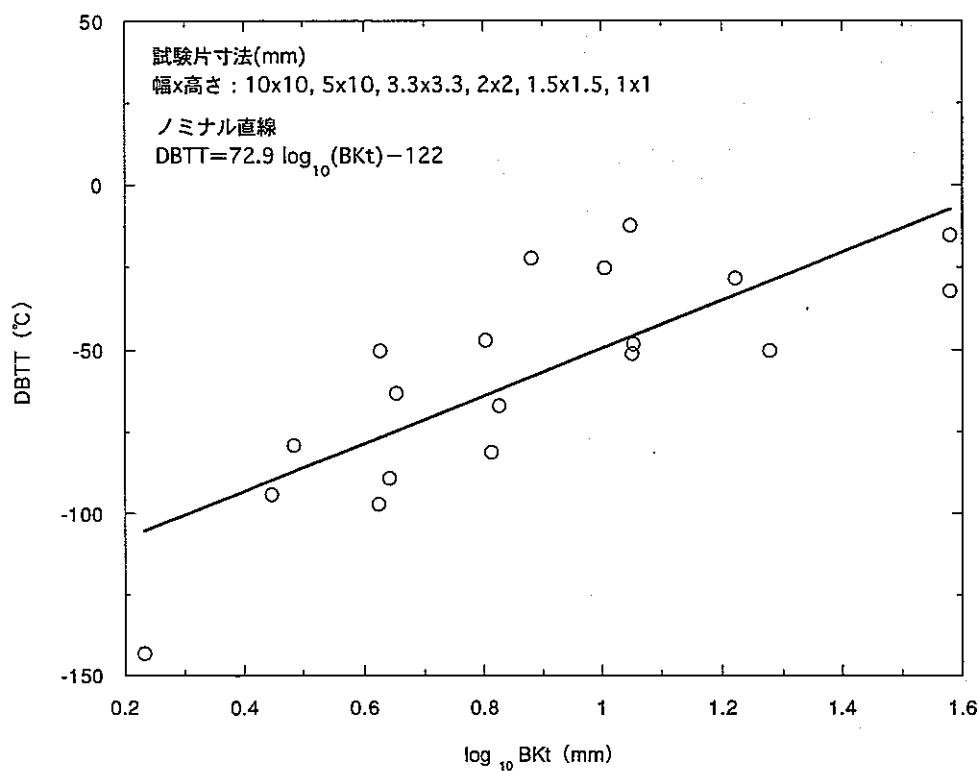


図 3-11.5 DBTT と BKt との関係 (JFMS 鋼 製造まま材の場合)

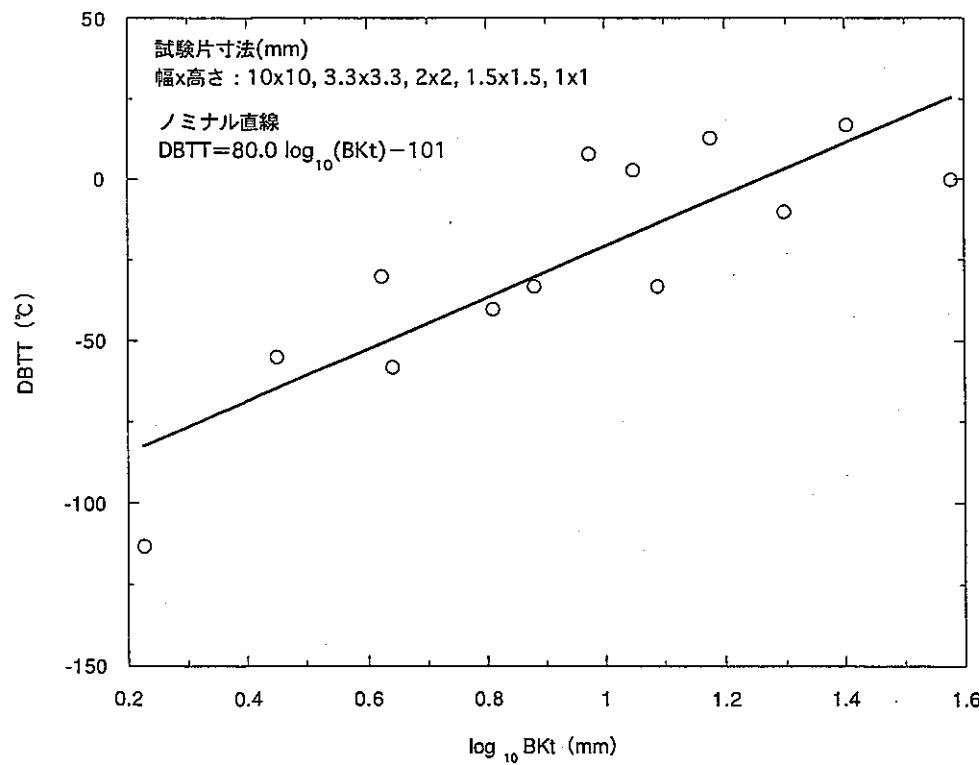


図 3-11.6 DBTT と BKt との関係 (JFMS 鋼 照射材の場合)

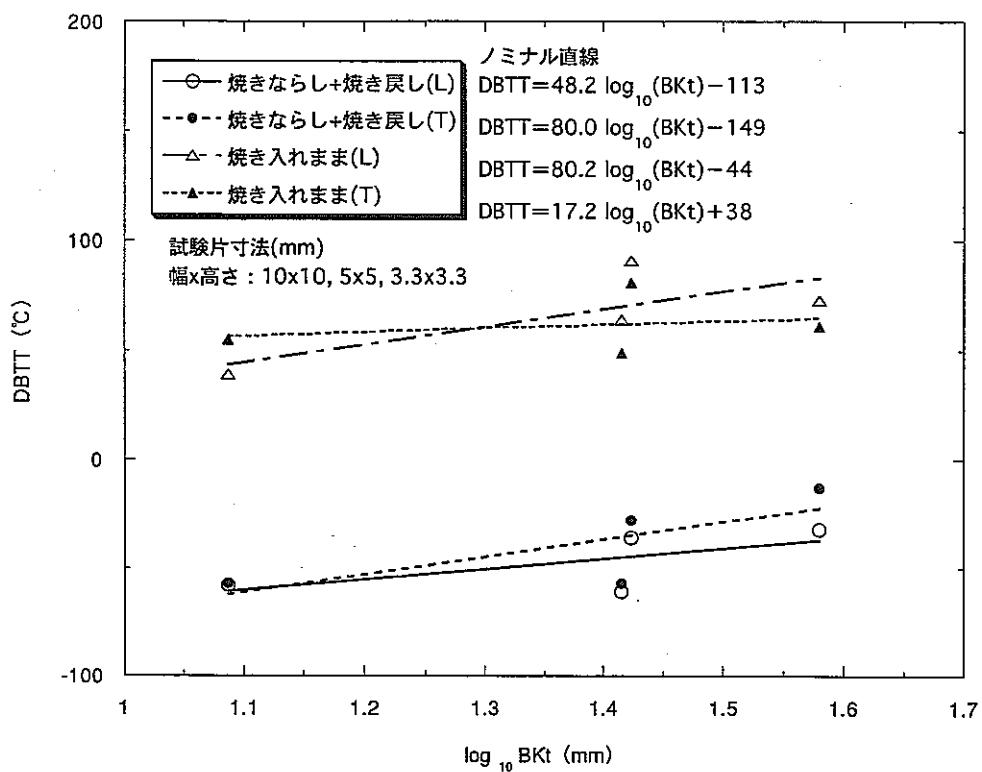


図 3-11.7 DBTT と BKt との関係 (9Cr1MoVNb 鋼 製造まま材の場合)

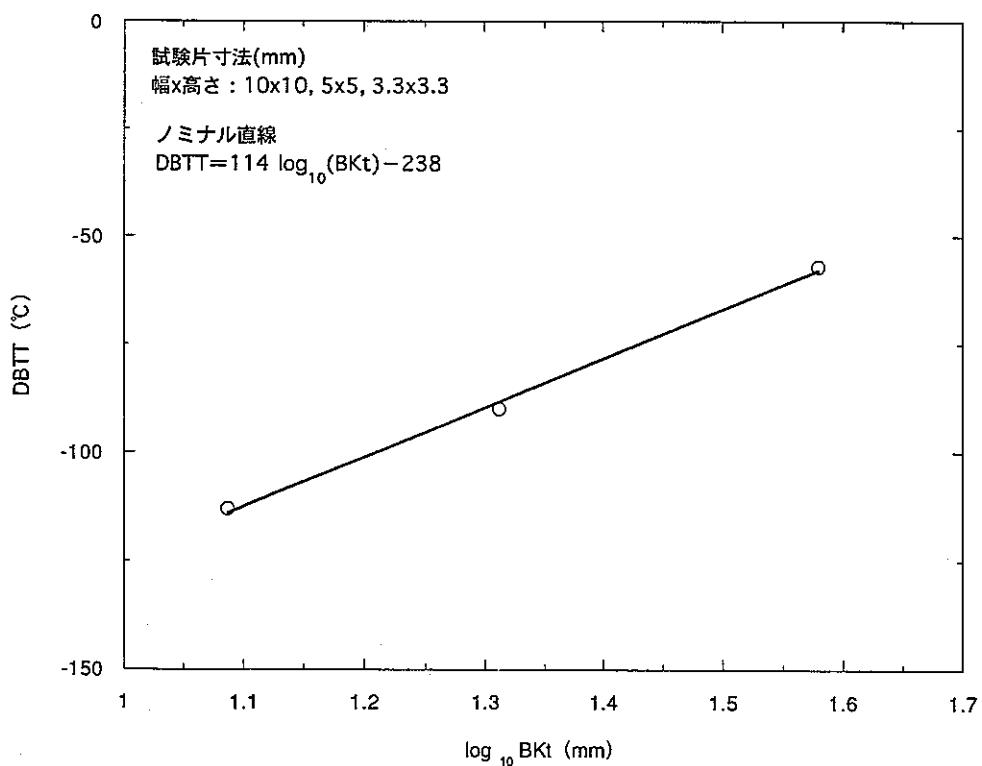


図 3-11.8 DBTT と BKt との関係 (9Cr2W 鋼 製造まま材の場合)

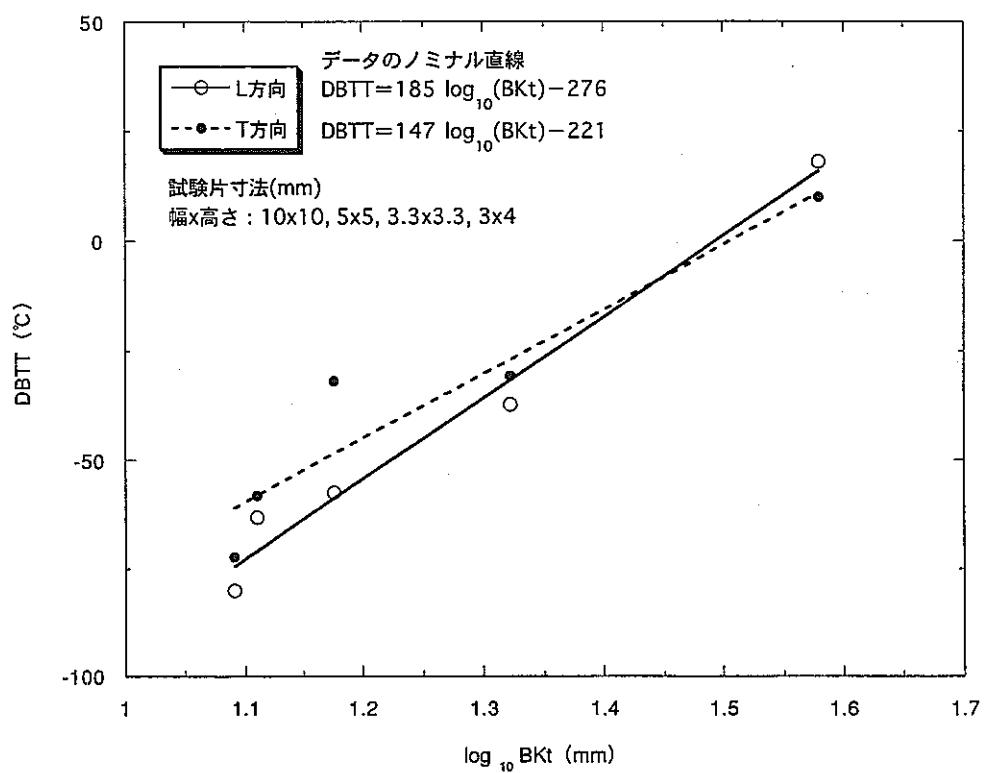


図 3-11.9 DBTTとBKtとの関係 (A533鋼 製造まま材の場合)

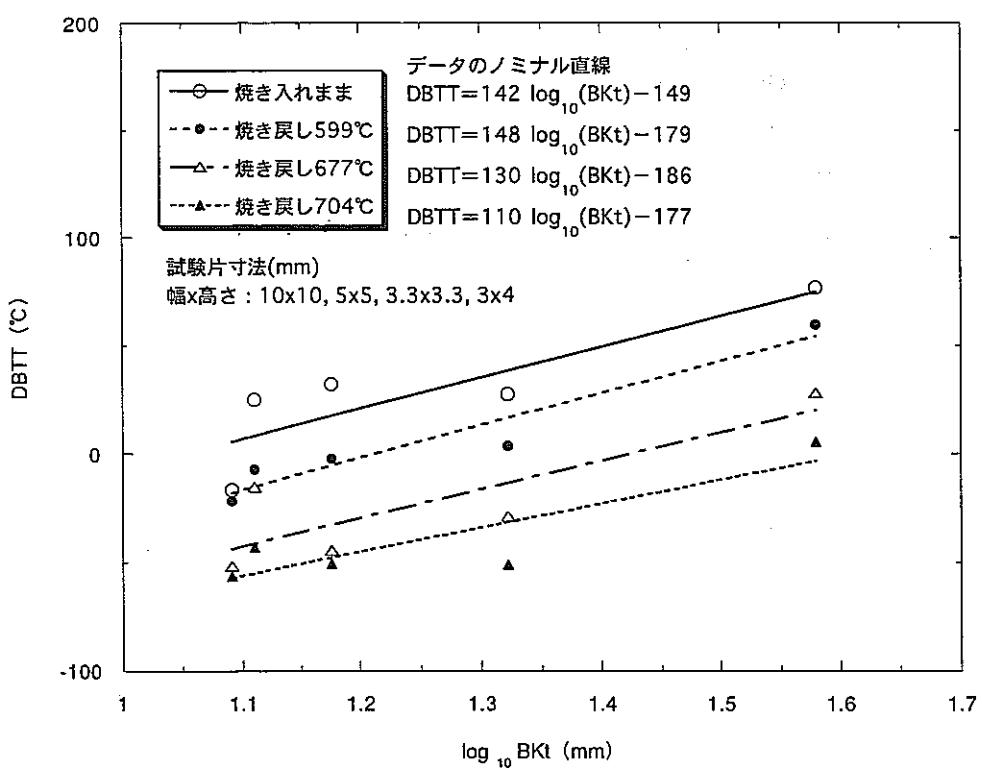


図 3-11.10 DBTTとBKtとの関係 (A508鋼 製造まま材の場合)

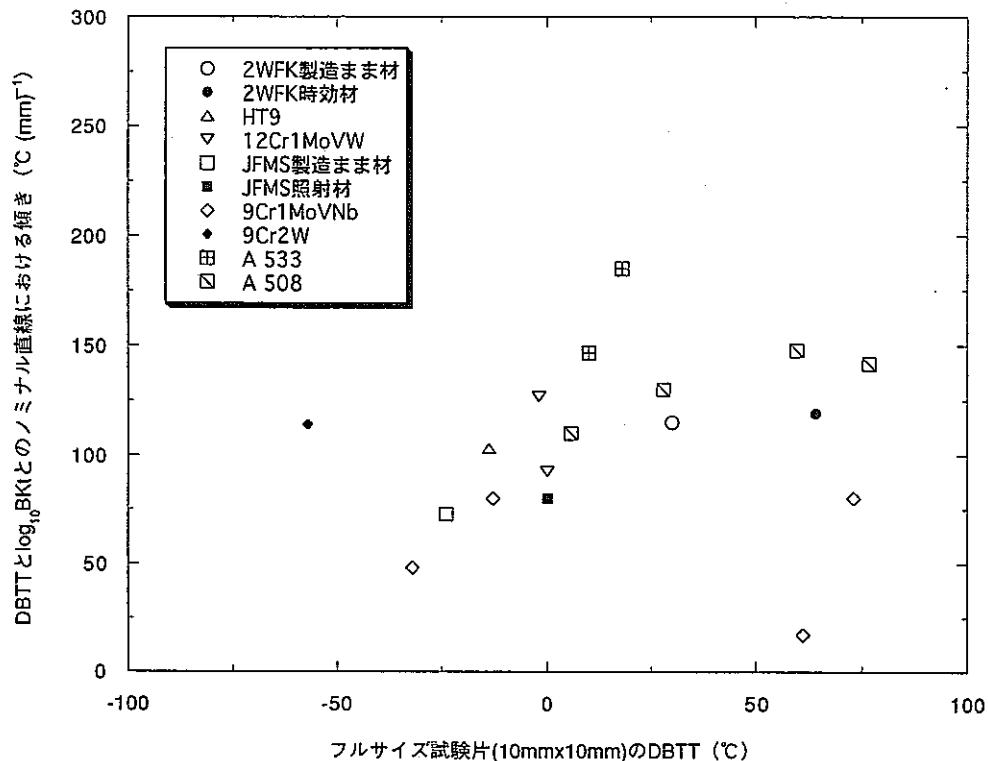


図 3-12.1 DBTTと $\log_{10} BK_t$ とのノミナル直線における傾きと
フルサイズ試験片のDBTTとの関係

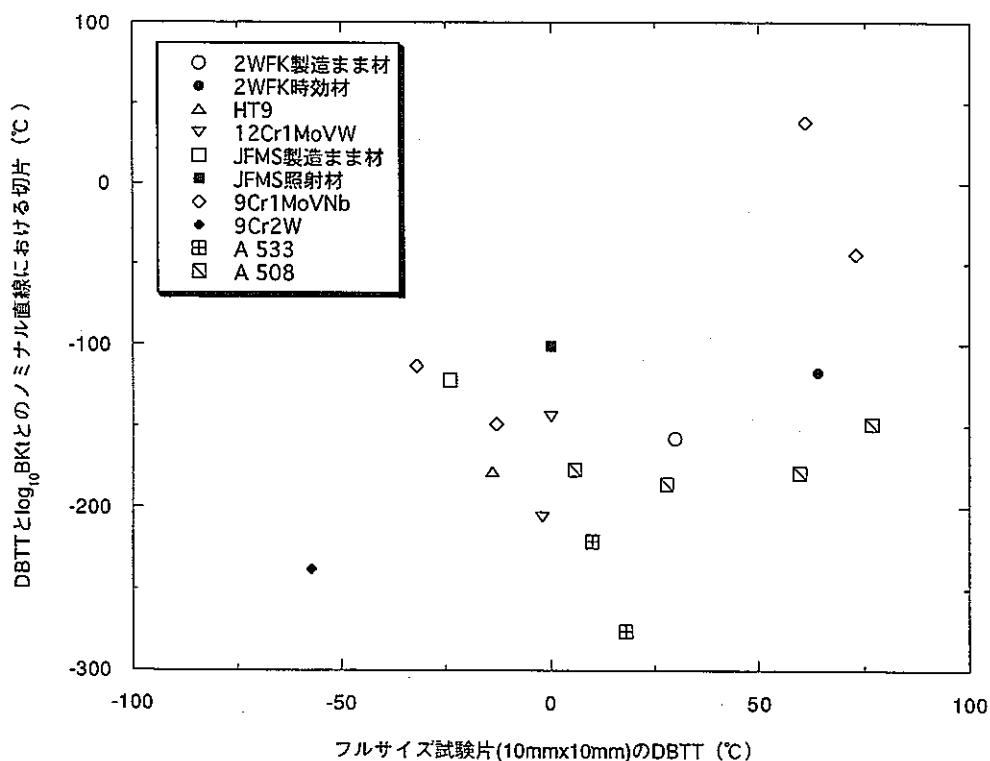


図 3-12.2 DBTTと $\log_{10} BK_t$ とのノミナル直線における切片と
フルサイズ試験片のDBTTとの関係

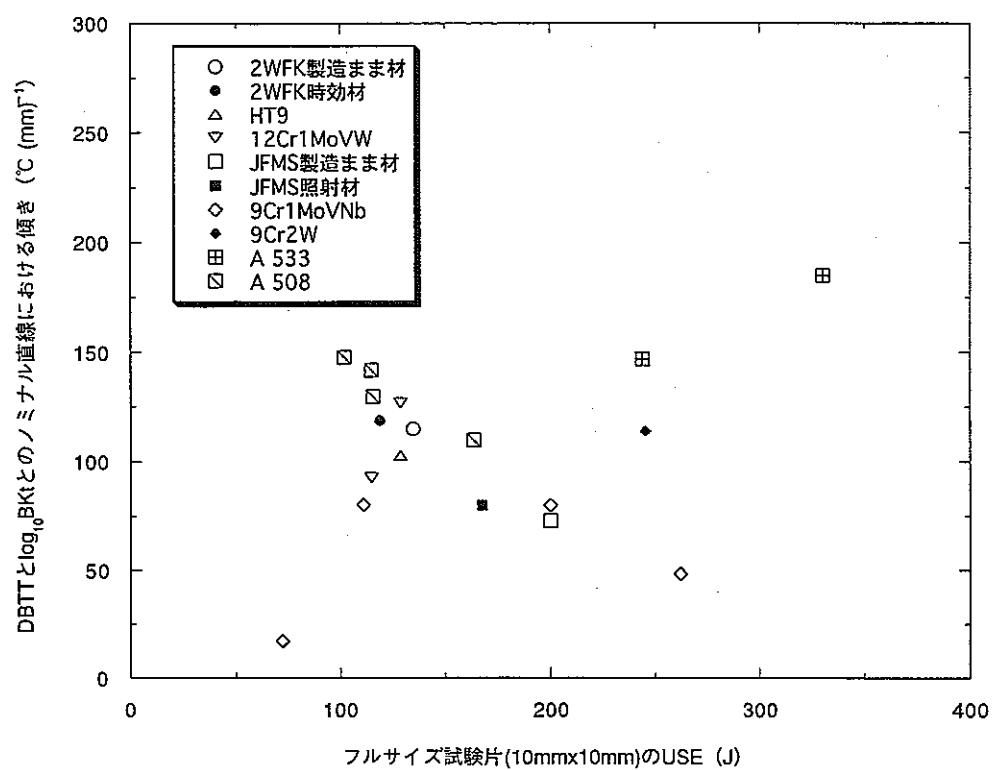


図 3-13.1 DBTTと $\log_{10} B K_t$ とのノミナル直線における傾きと
フルサイズ試験片のUSEとの関係

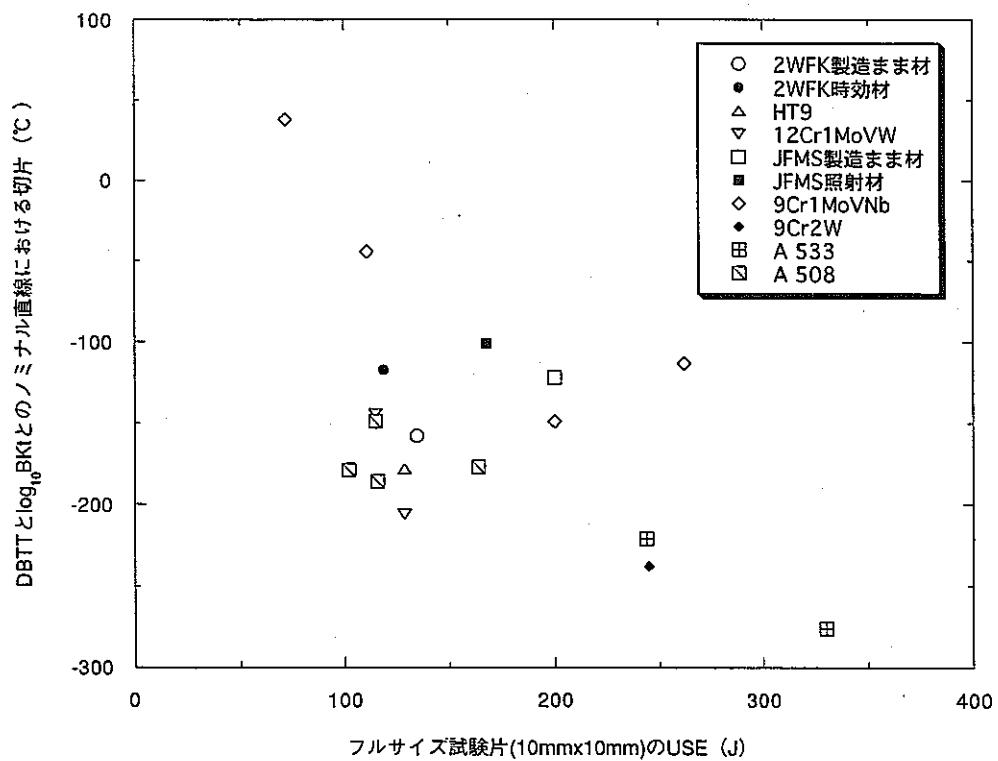


図 3-13.2 DBTTと $\log_{10} B K_t$ とのノミナル直線における切片と
フルサイズ試験片のUSEとの関係

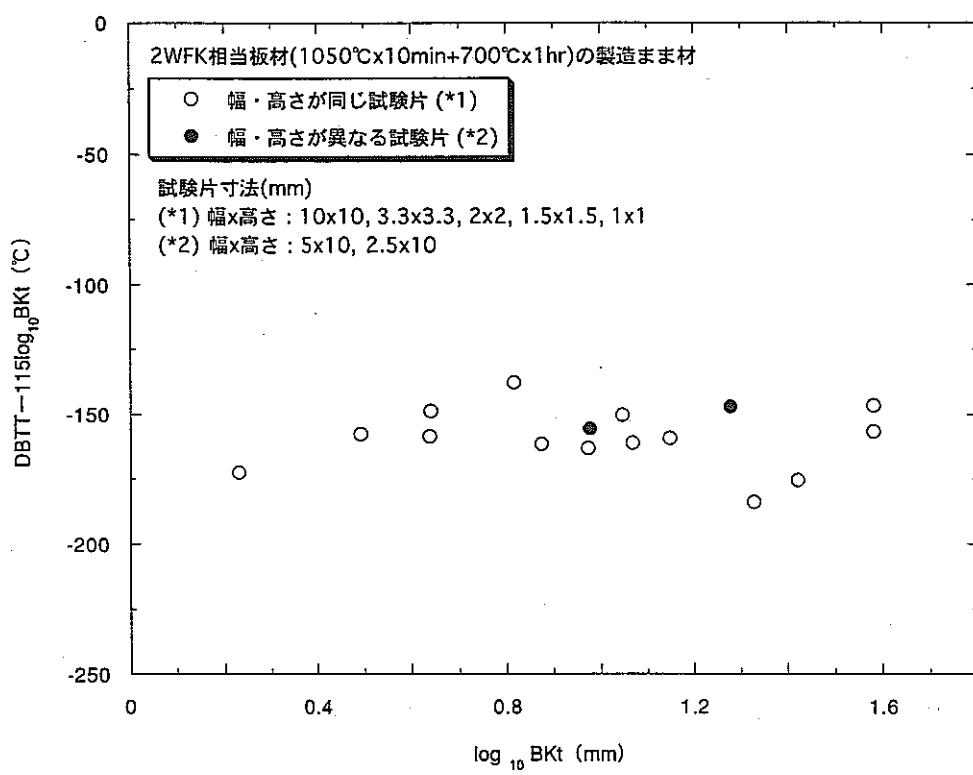


図 3-14 DBTTを「DBTT-115log₁₀BKt」として規格化した場合
(2WFK相当板材 製造まま材)

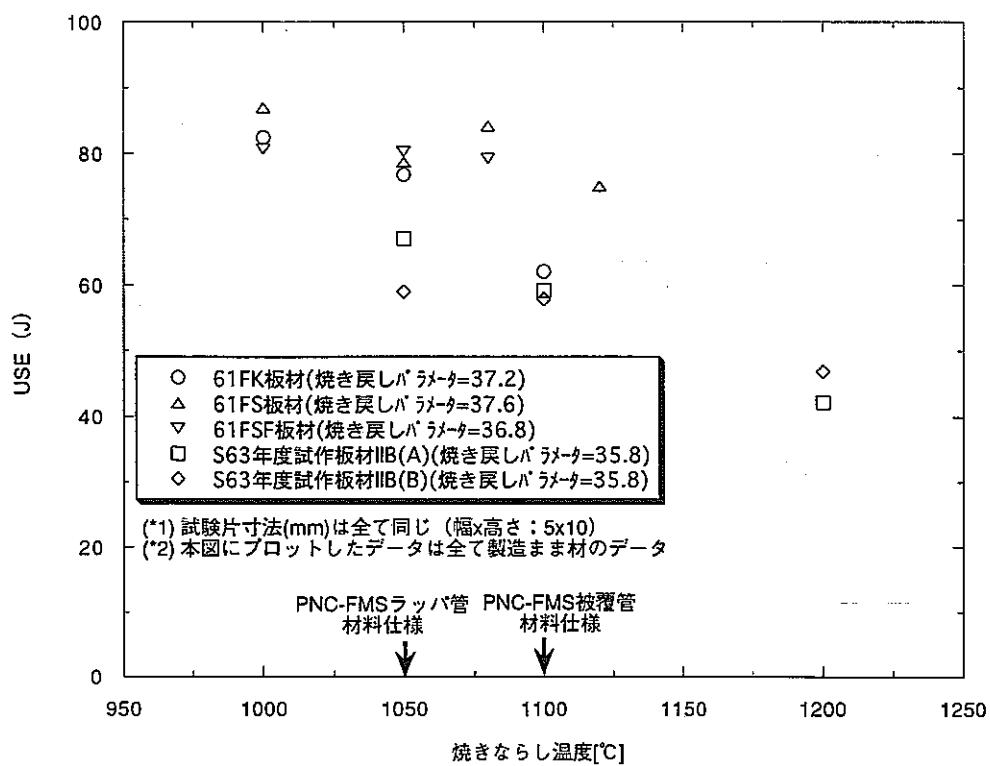


図 3-15.1 USEの焼きならし条件依存性

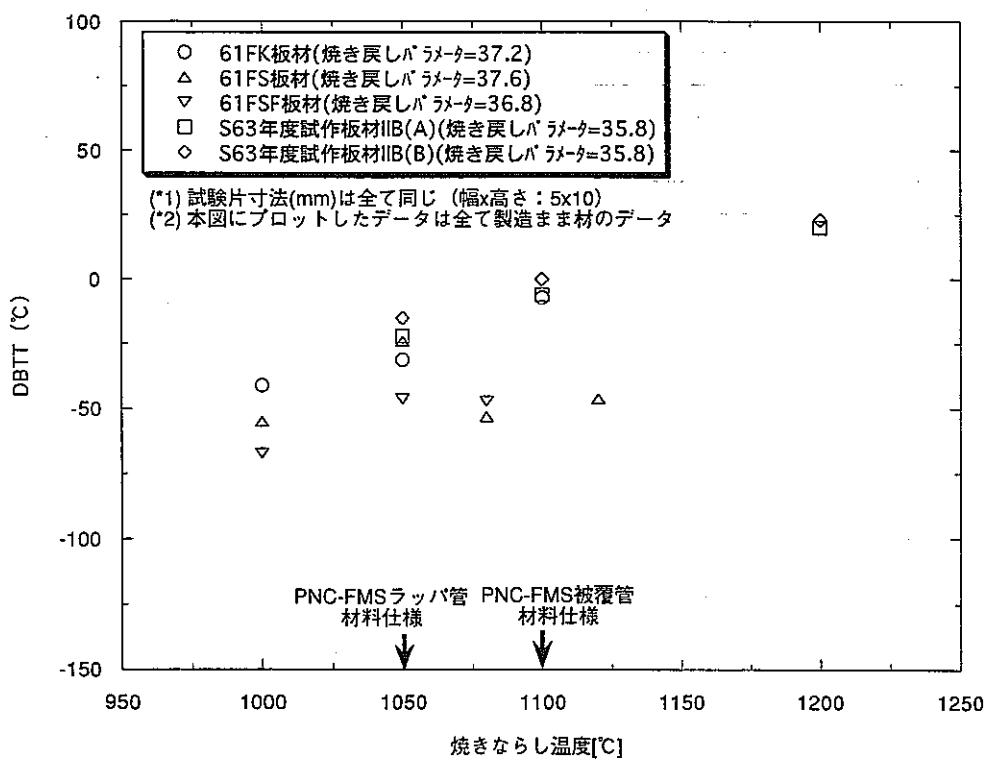


図 3-15.2 DBTTの焼きならし条件依存性

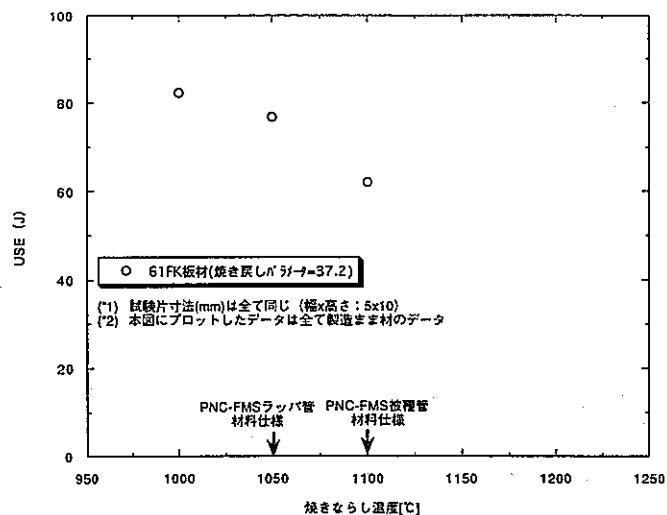


図 3-16.1 USEの焼きならし条件依存性 (61FK板材の場合)

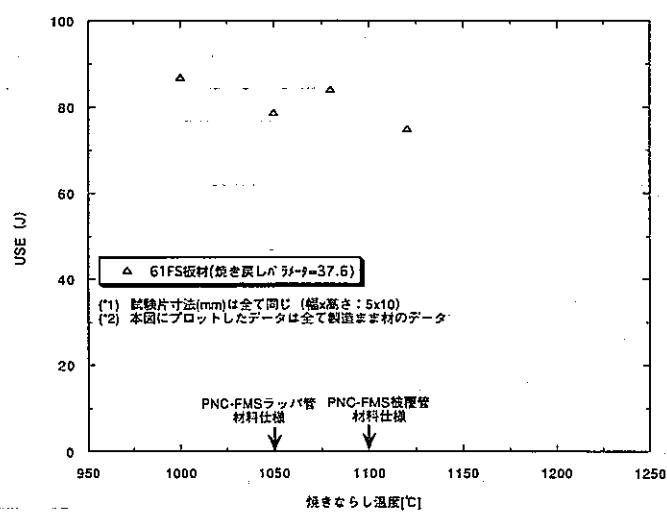


図 3-16.2 USEの焼きならし条件依存性 (61FS板材の場合)

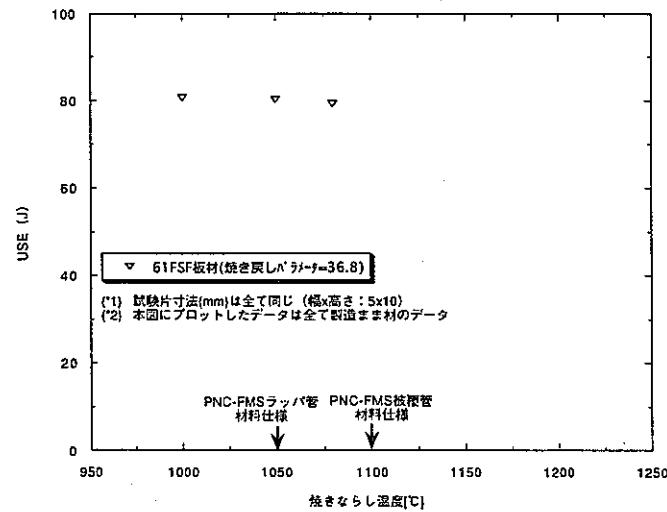


図 3-16.3 USEの焼きならし条件依存性 (61FSF板材の場合)

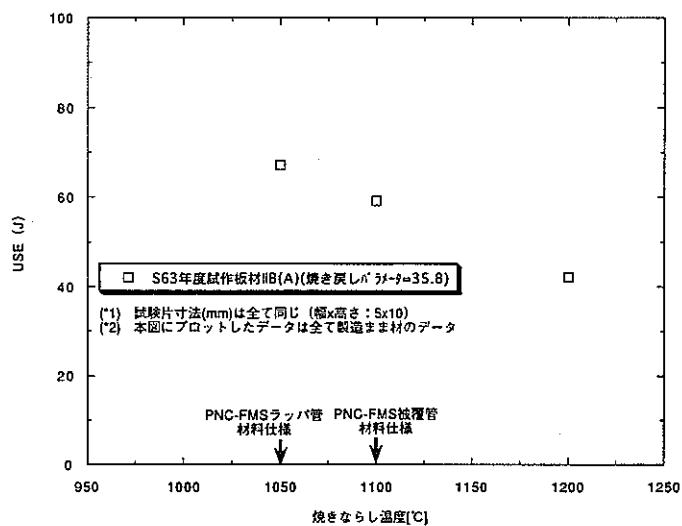


図 3-16.4 USEの焼きならし条件依存性 (S63年度試作板材IIB(A)の場合)

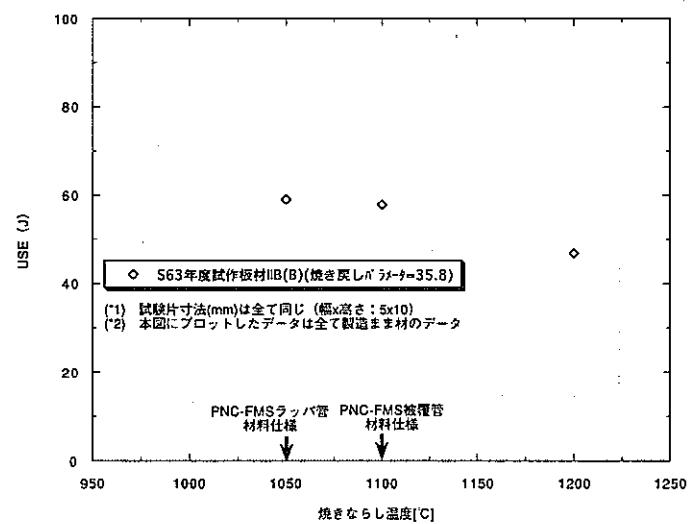


図 3-16.5 USEの焼きならし条件依存性 (S63年度試作板材IIB(B)の場合)

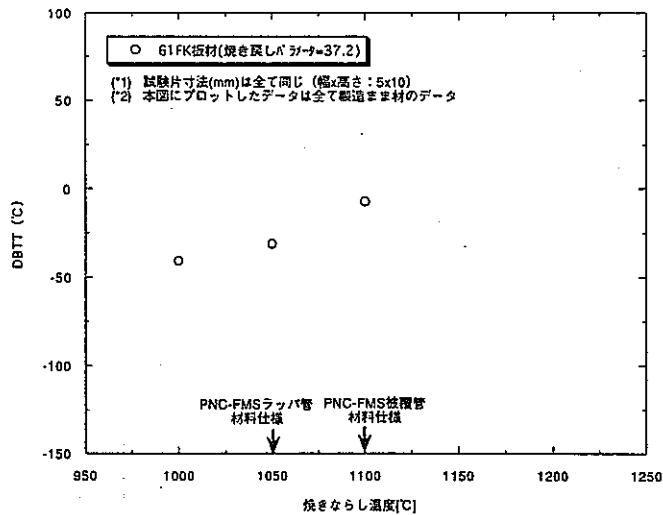


図 3-17.1 DBTTの焼きならし条件依存性 (61FK板材の場合)

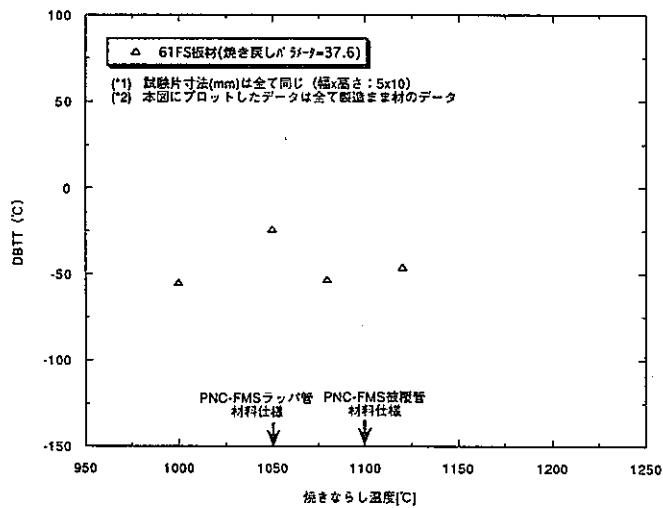


図 3-17.2 DBTTの焼きならし条件依存性 (61FS板材の場合)

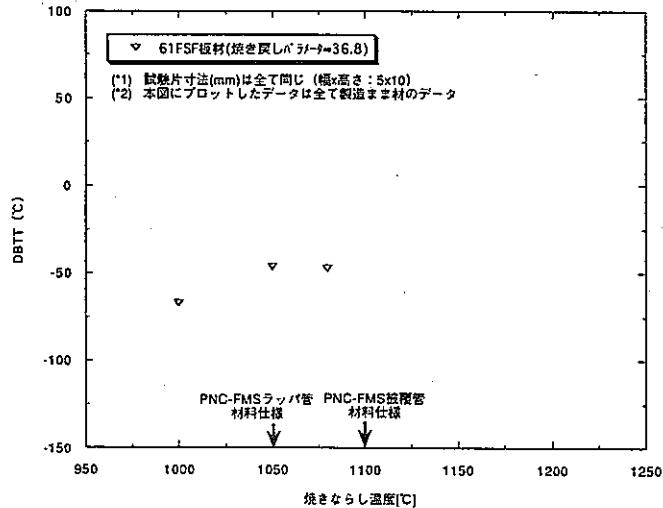


図 3-17.3 DBTTの焼きならし条件依存性 (61FSF板材の場合)

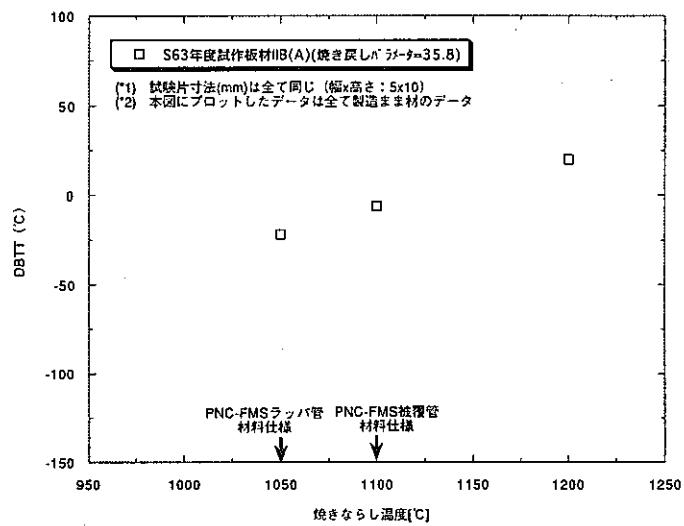


図 3-17.4 DBTTの焼きならし条件依存性 (S63年度試作板材IIB(A)の場合)

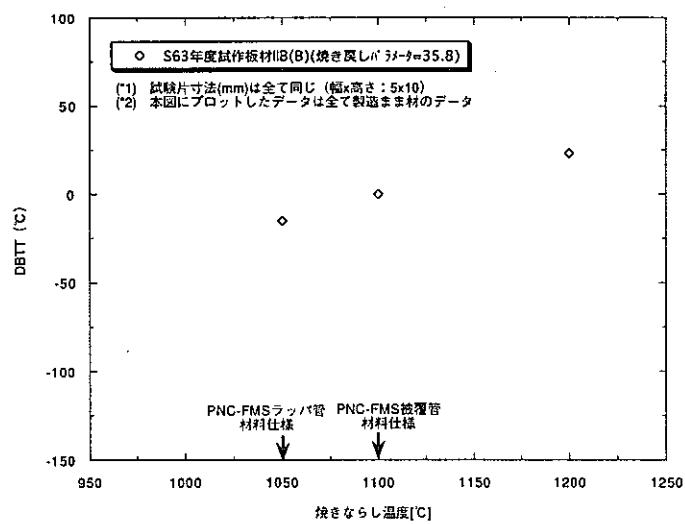


図 3-17.5 DBTTの焼きならし条件依存性 (S63年度試作板材IIB(B)の場合)

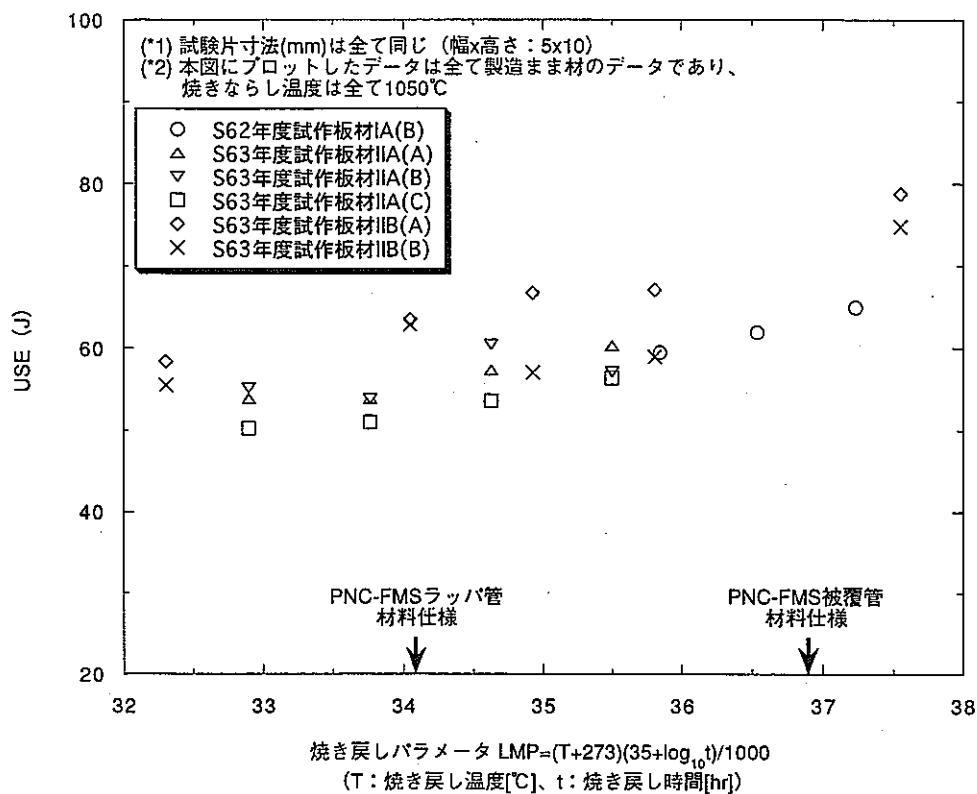


図 3-18.1 USEの焼き戻し条件依存性

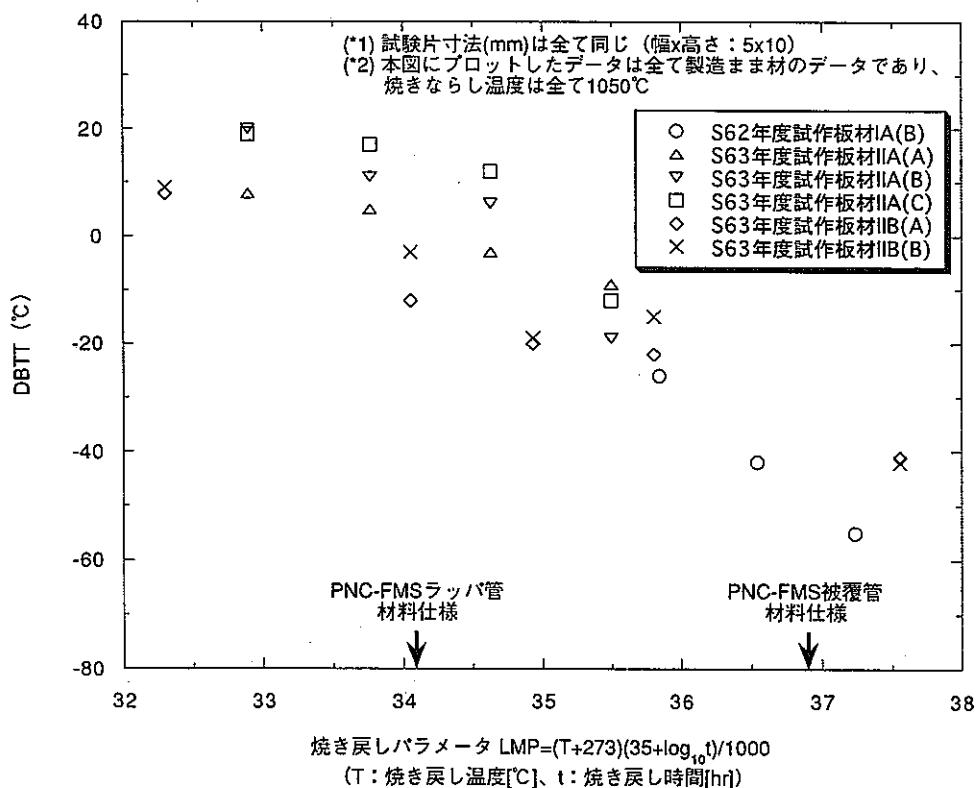


図 3-18.2 DBTTの焼き戻し条件依存性

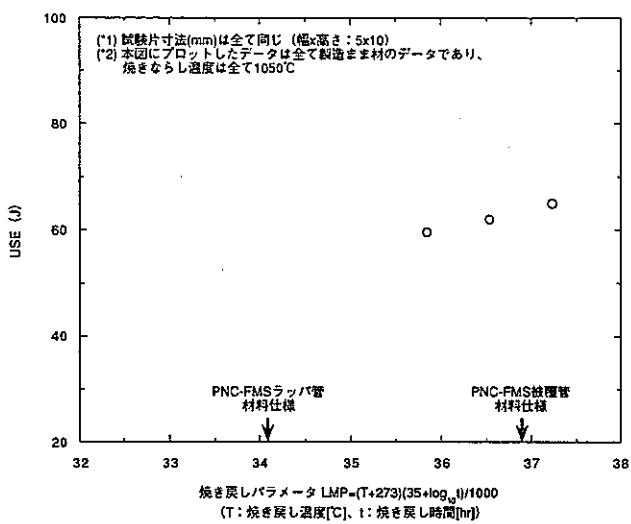


図 3-19.1 USEの焼き戻し条件依存性 (S62年度試作板材I(A)の場合)

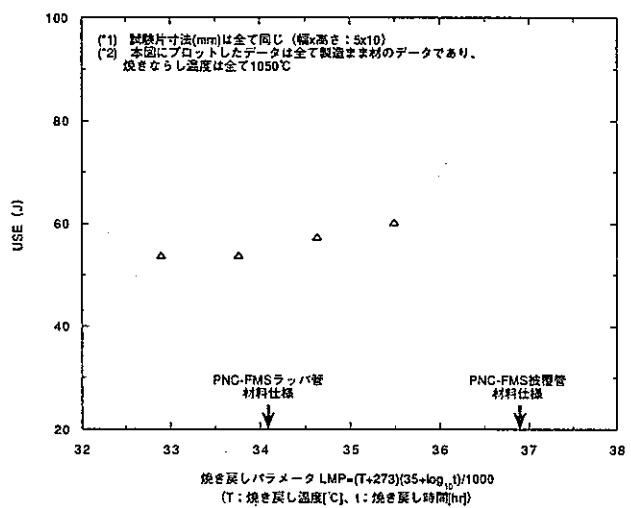


図 3-19.2 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材II(A)の場合)

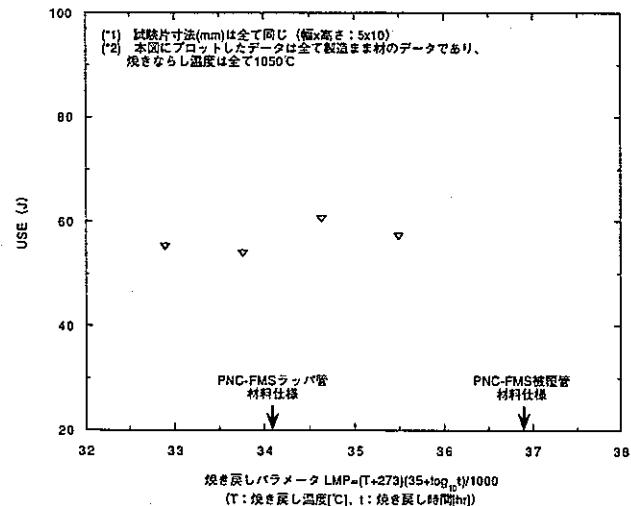


図 3-19.3 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材II(B)の場合)

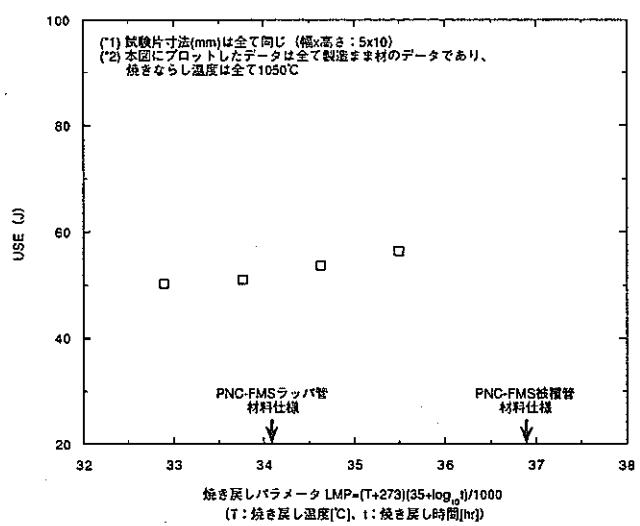


図 3-19.4 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIA(C)の場合)

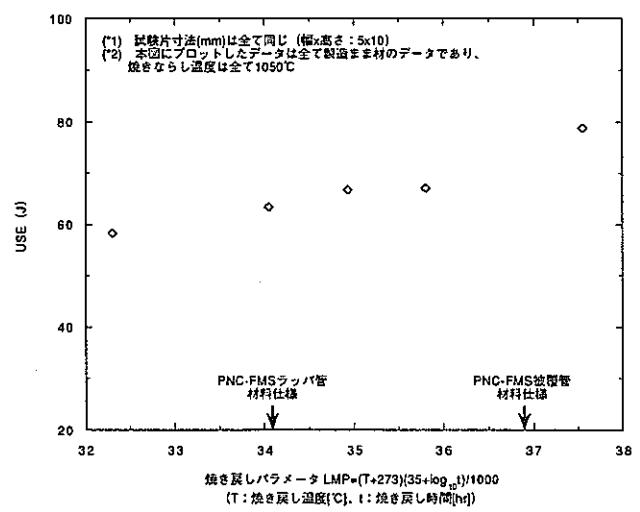


図 3-19.5 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIB(A)の場合)

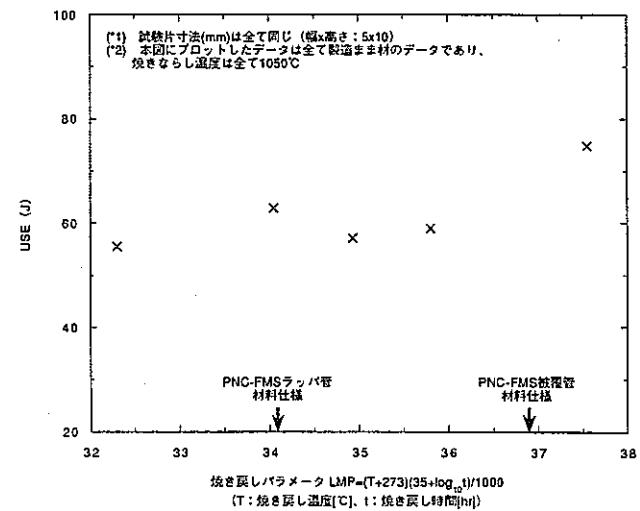


図 3-19.6 USEの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIB(B)の場合)

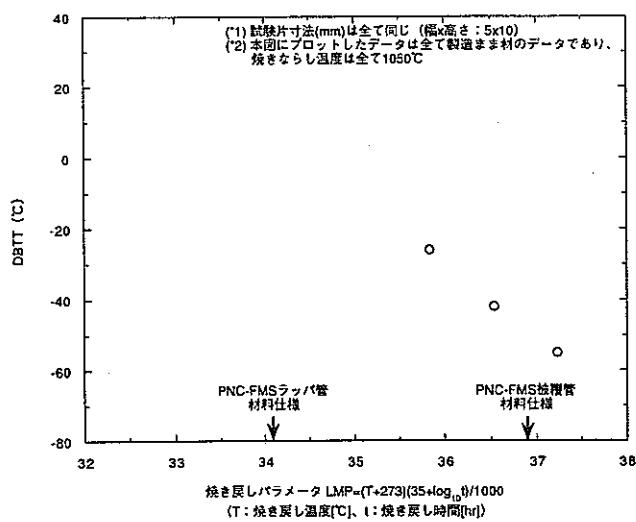


図 3-20.1 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S62年度試作板材IA(B)の場合)

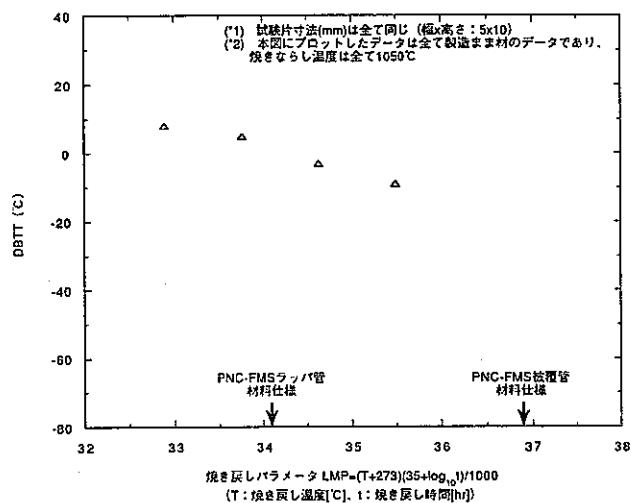


図 3-20.2 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材II(A)の場合)

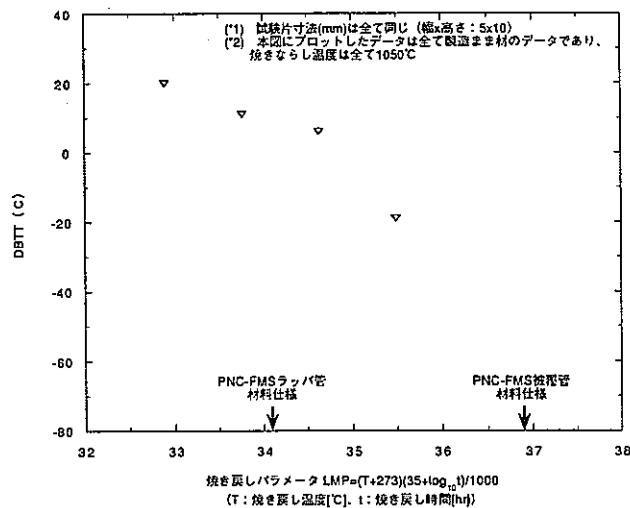


図 3-20.3 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材II(B)の場合)

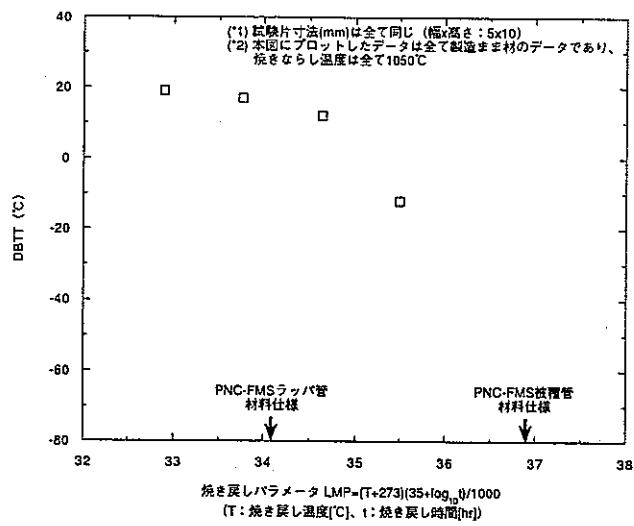


図 3-20.4 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIA(C)の場合)

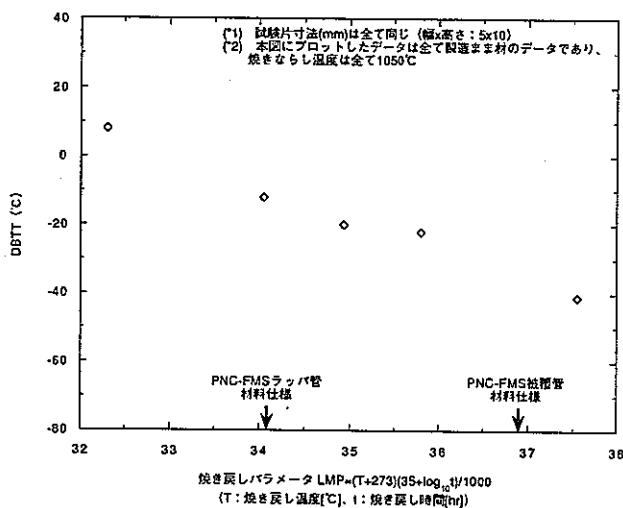


図 3-20.5 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIB(A)の場合)

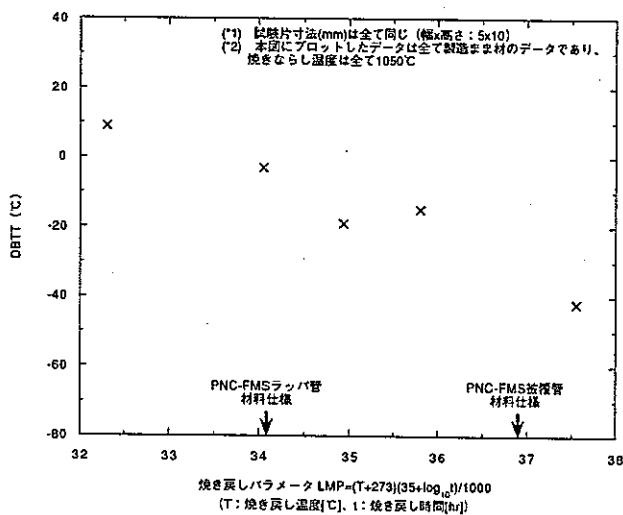


図 3-20.6 DBTTの焼き戻し条件依存性 (S63年度試作板材IIB(B)の場合)

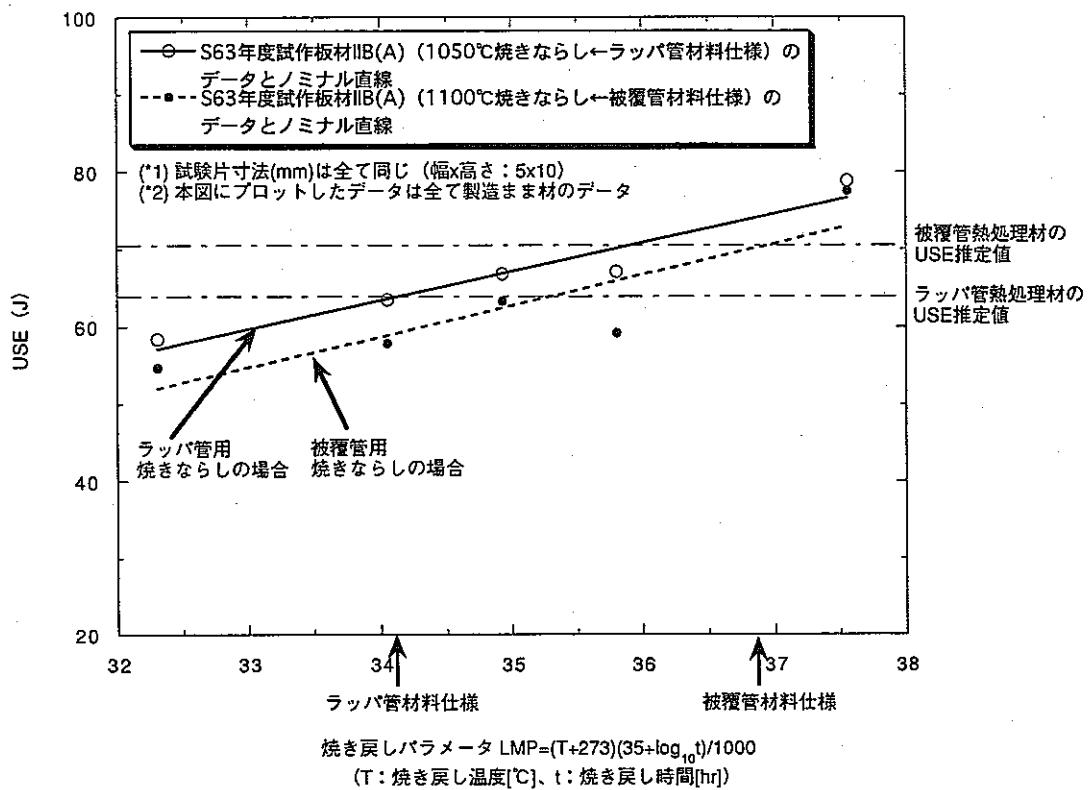


図 3-21.1 ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材のUSE推定値の比較
 (S63年度試作板材IIB(A)データを用いた場合)

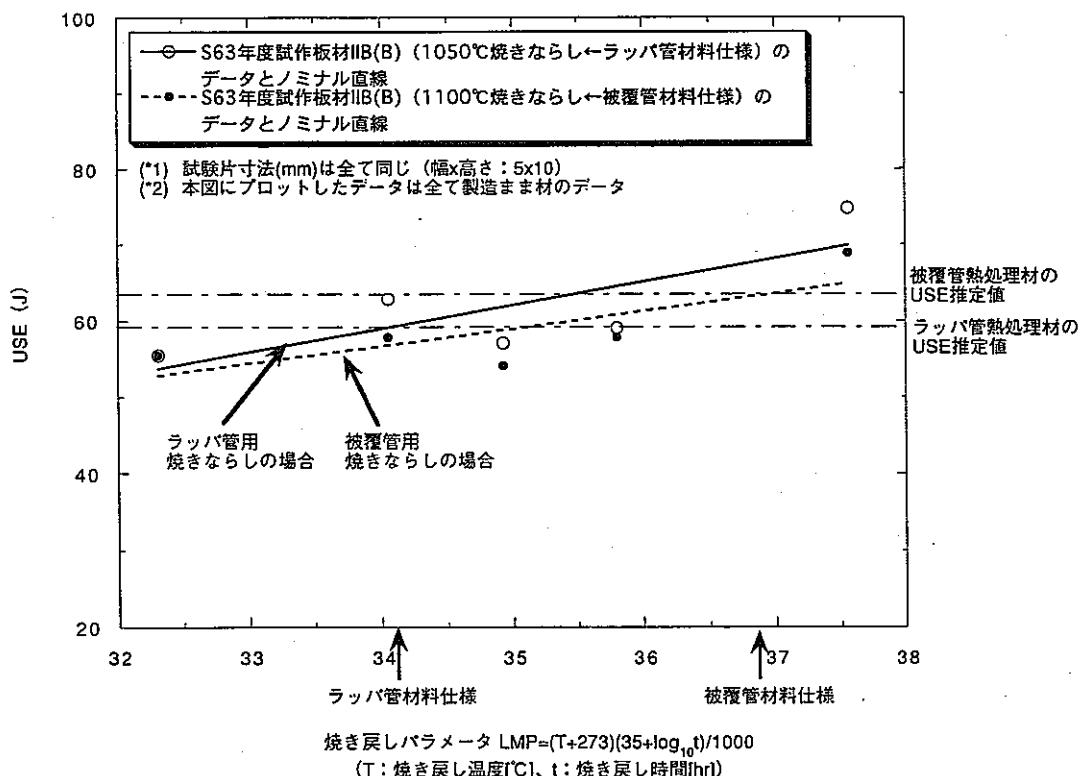


図 3-21.2 ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材のUSE推定値の比較
 (S63年度試作板材IIB(B)データを用いた場合)

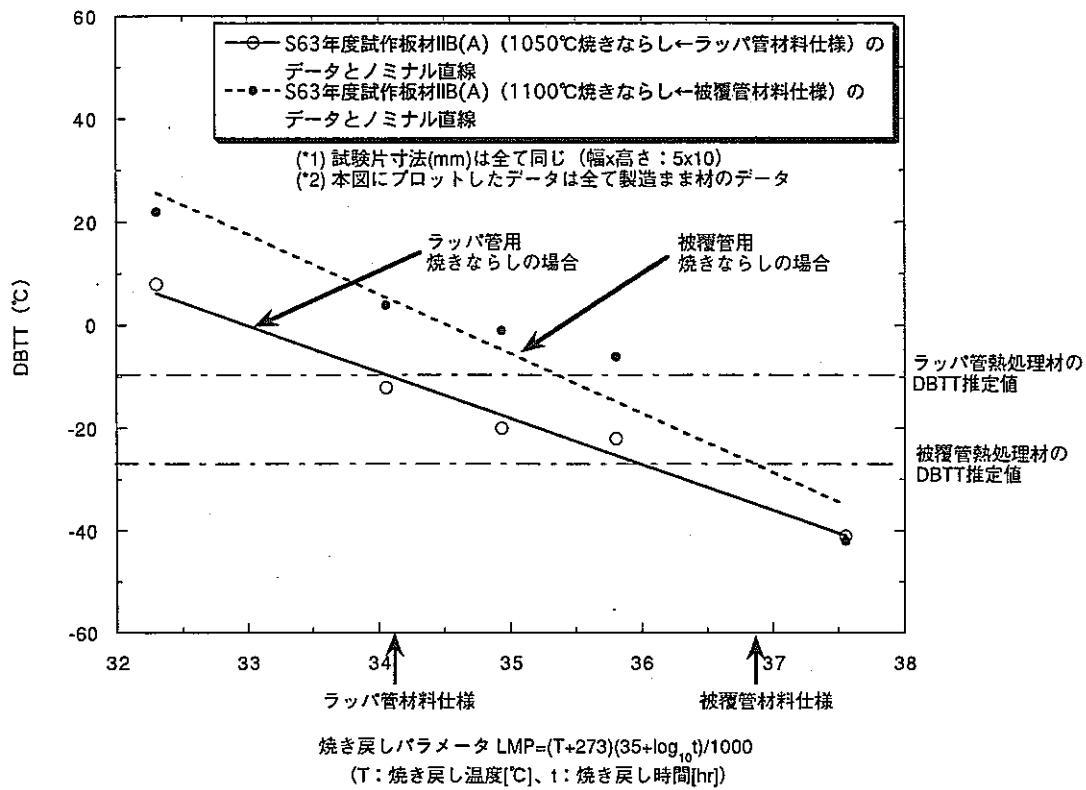


図 3-22.1 ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材のDBTT推定値の比較
(S63年度試作板材IIB(A)データを用いた場合)

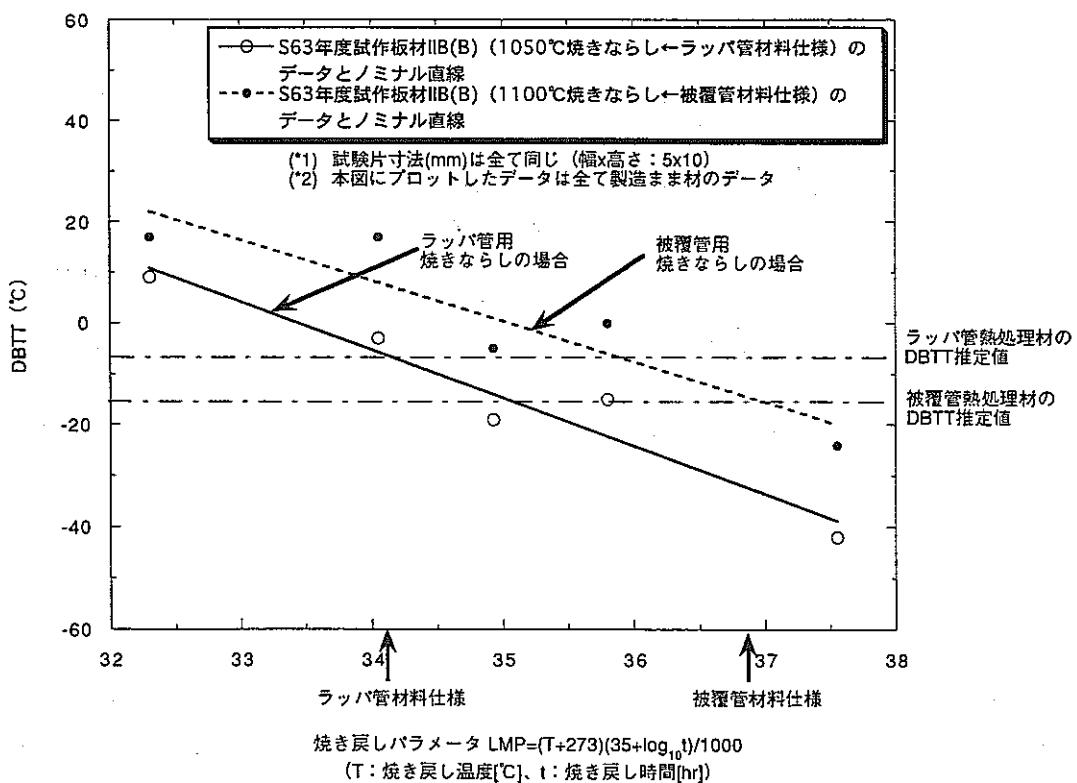


図 3-22.2 ラッパ管熱処理材と被覆管熱処理材のDBTT推定値の比較
(S63年度試作板材IIB(B)データを用いた場合)

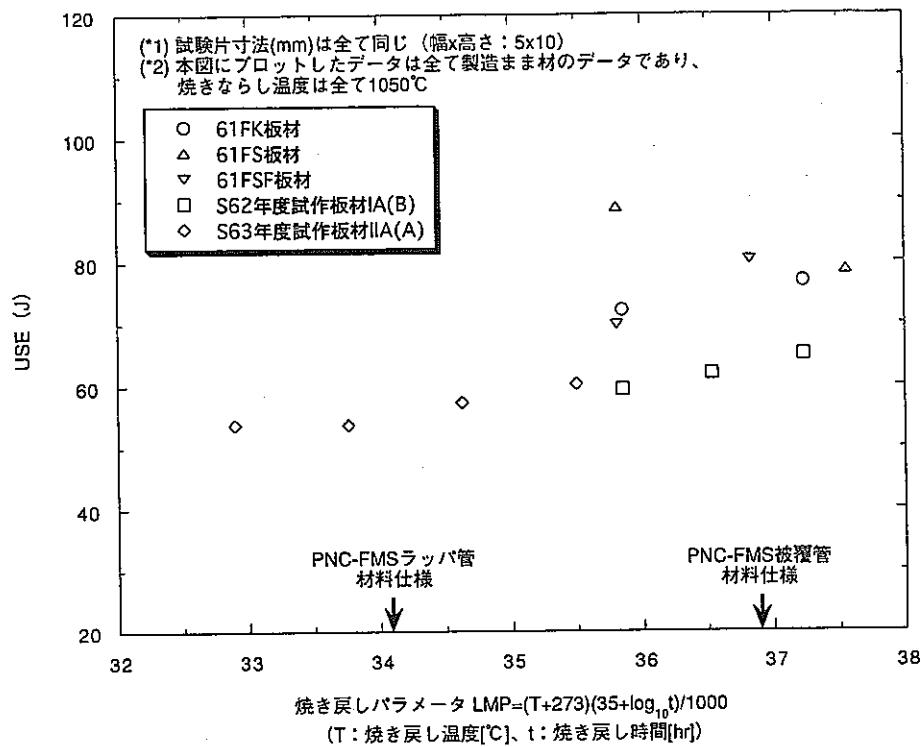


図 3-23.1 鋼種によるUSEの比較 (61FK, 61FS, 61FSF, S62年度試作板材IA(B), S63年度試作板材IIA(A)の場合)

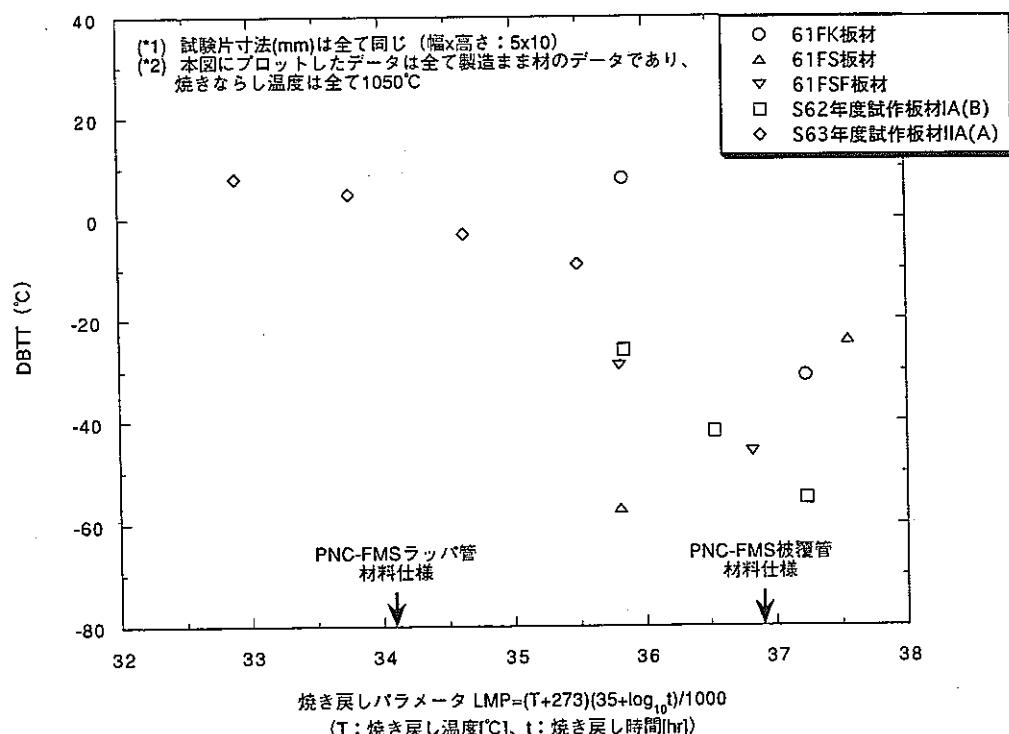


図 3-23.2 鋼種によるDBTTの比較 (61FK, 61FS, 61FSF, S62年度試作板材IA(B), S63年度試作板材IIA(A)の場合)

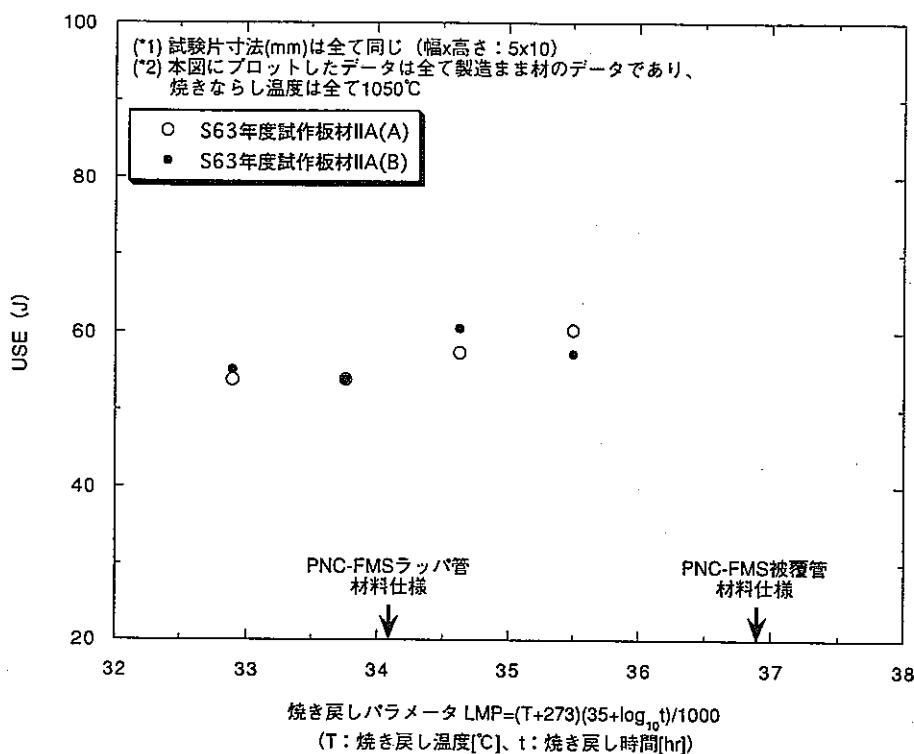


図 3-24.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材IIAの(A)と(B)の場合)

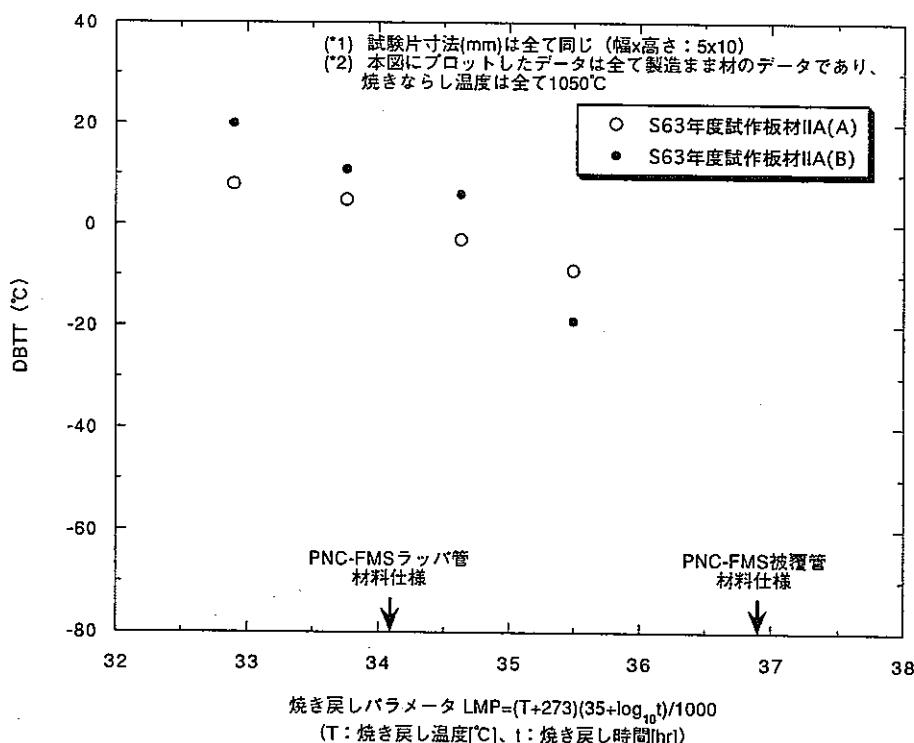


図 3-24.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材IIAの(A)と(B)の場合)

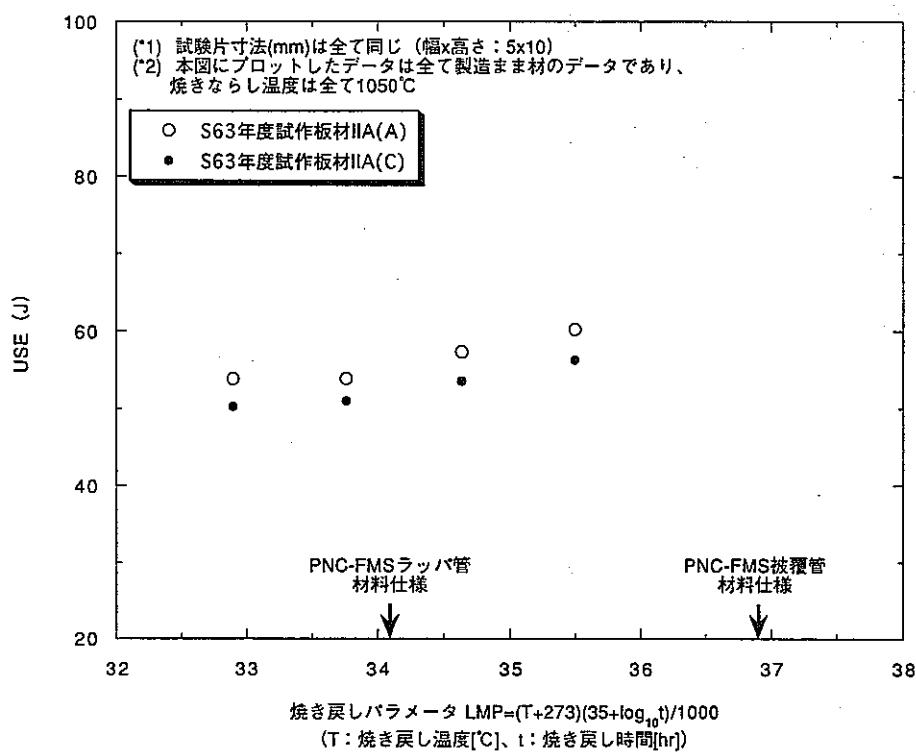


図 3-25.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材IIAの(A)と(C)の場合)

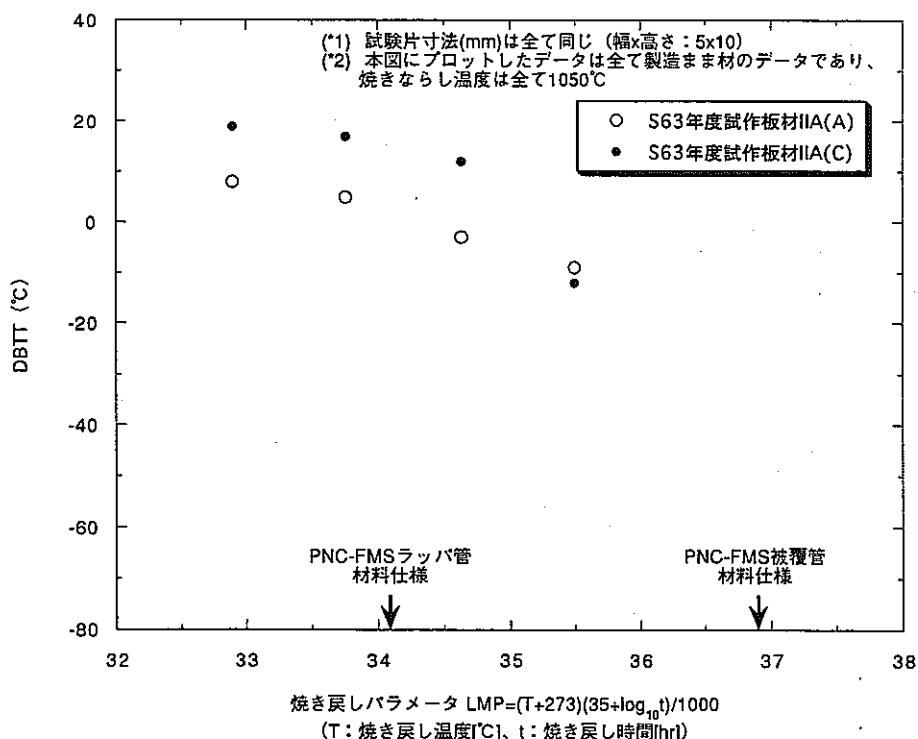


図 3-25.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材IIAの(A)と(C)の場合)

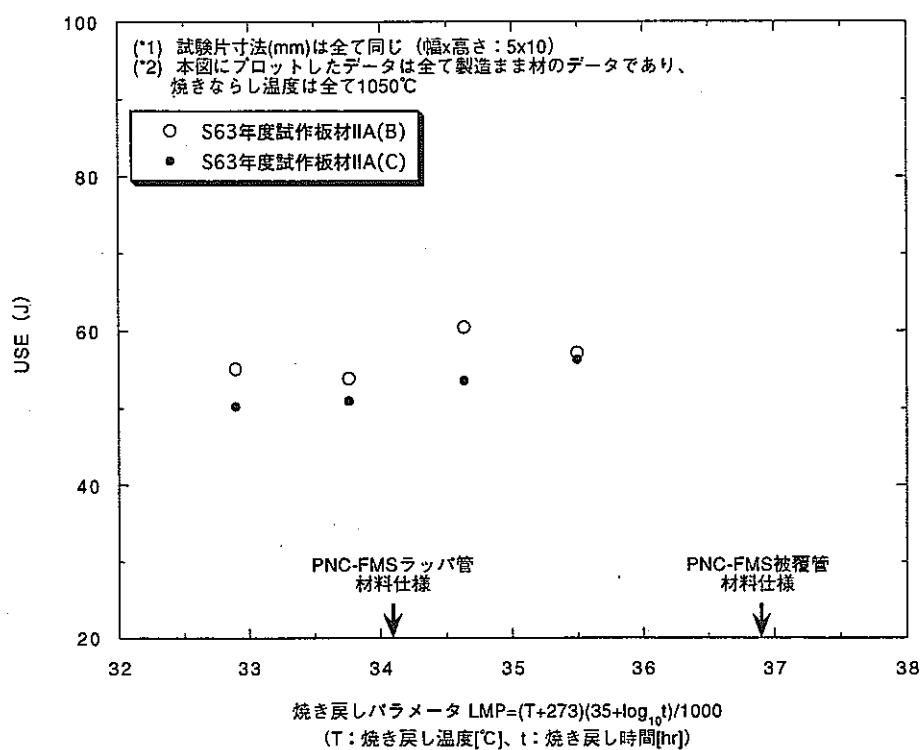


図 3-26.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材IIAの(B)と(C)の場合)

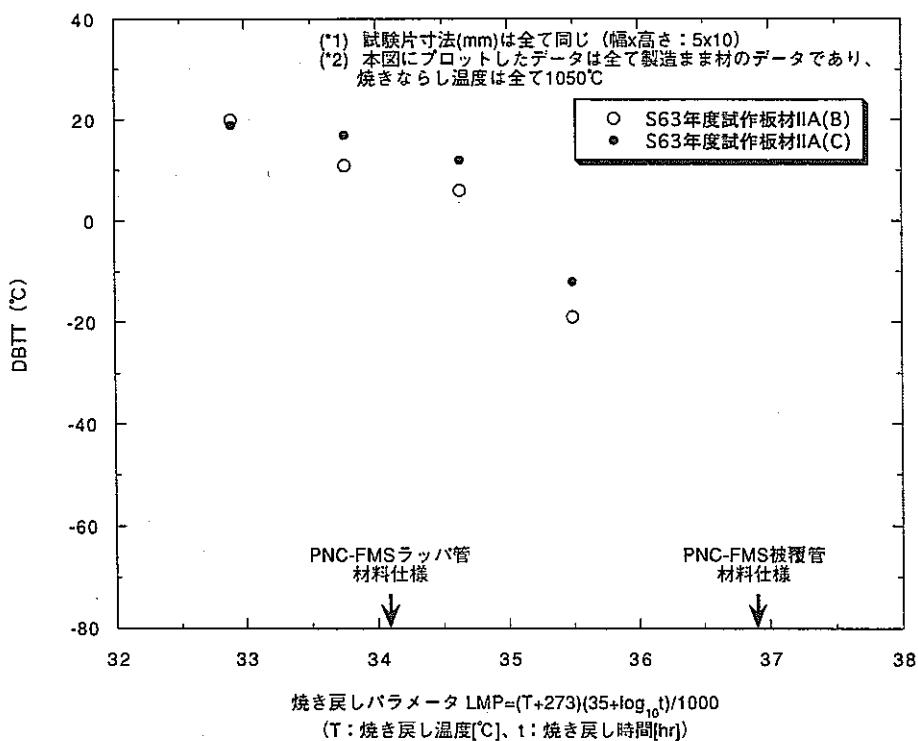


図 3-26.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材IIAの(B)と(C)の場合)

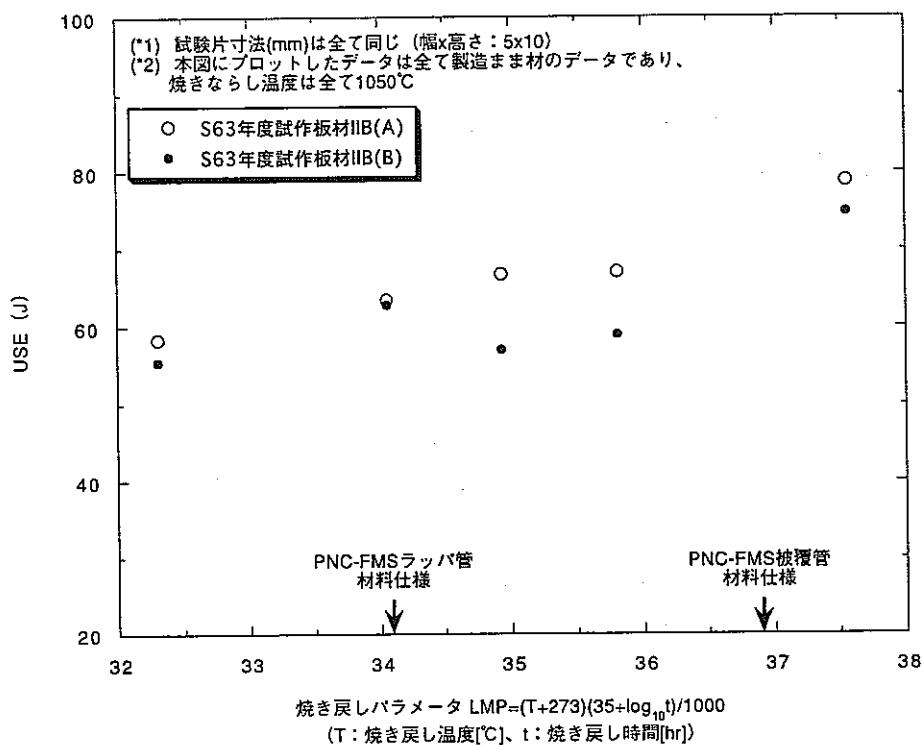


図 3-27.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材IIBの(A)と(B)の場合)

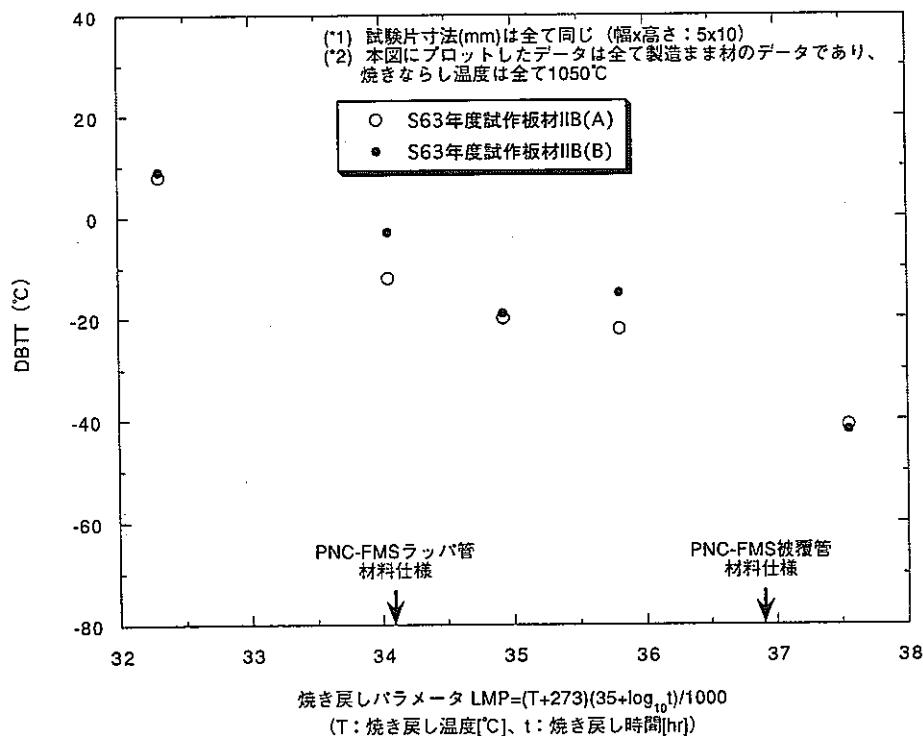


図 3-27.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材IIBの(A)と(B)の場合)

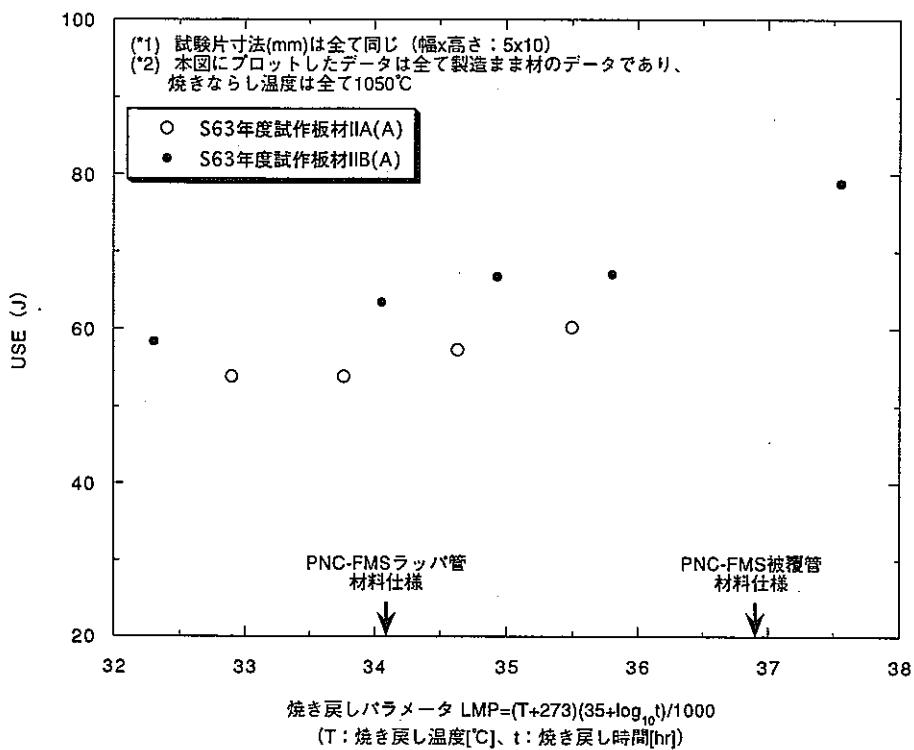


図 3-28.1 鋼種によるUSEの比較 (S63年度試作板材のIIA(A)とIIB(A)の場合)

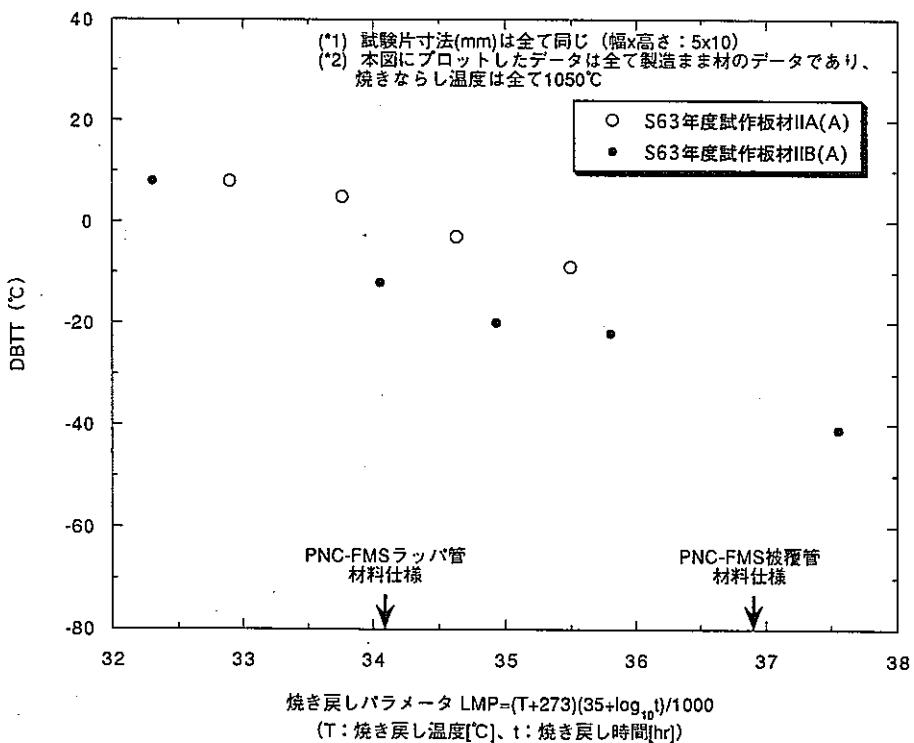


図 3-28.2 鋼種によるDBTTの比較 (S63年度試作板材IIA(A)とIIB(A)の場合)

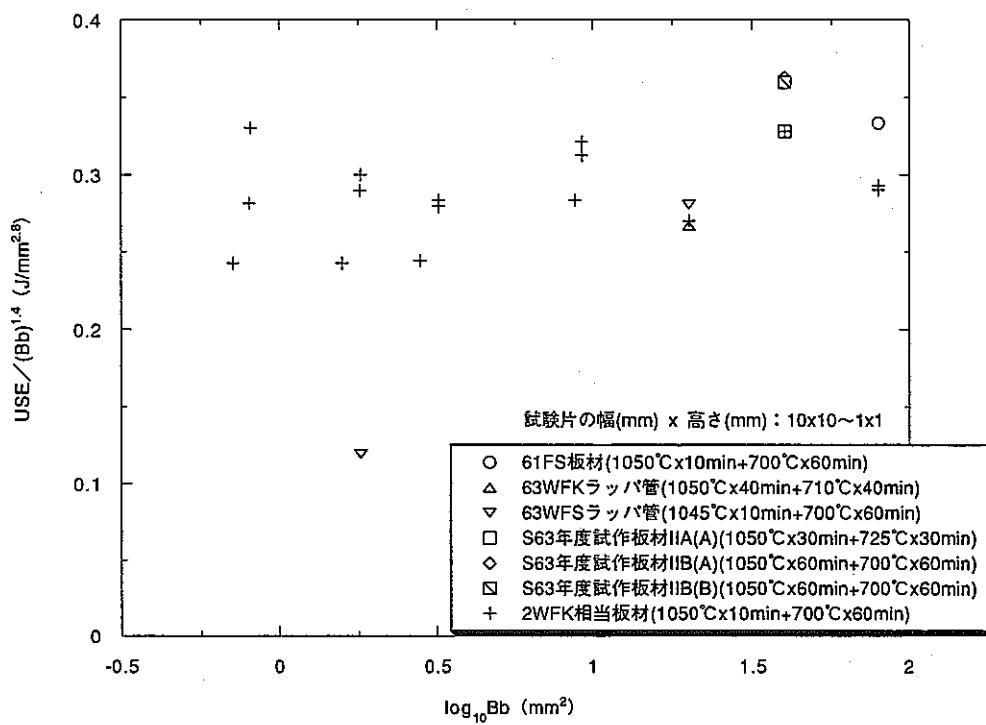


図 3-29 PNC-FMS鋼ラッパ管およびラッパ管熱処理材のUSEデータ

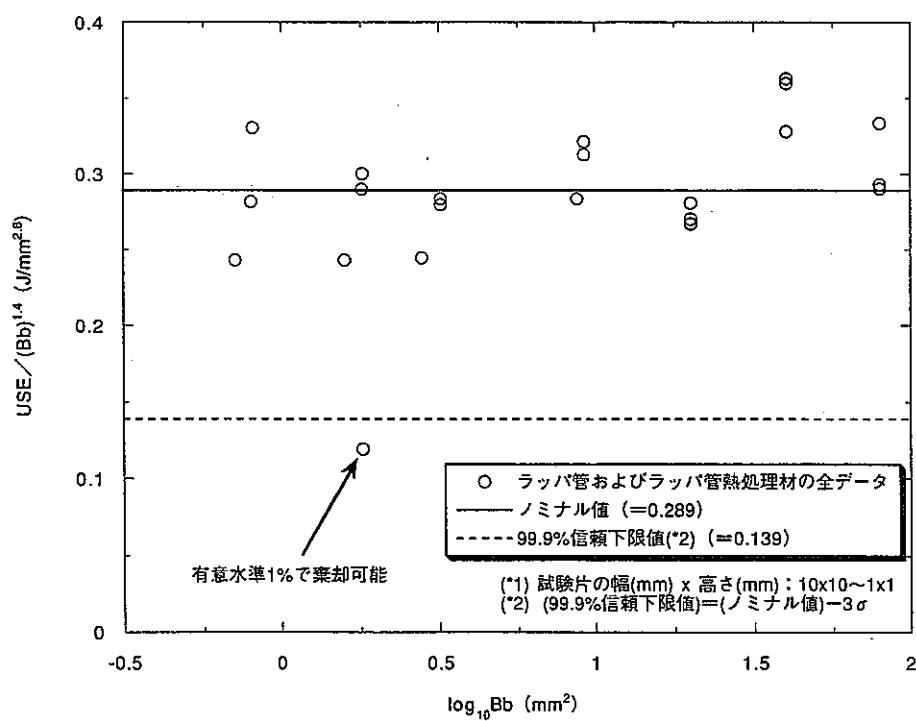


図 3-30 PNC-FMS鋼ラッパ管およびラッパ管熱処理材のUSEデータのノミナル値と99.9%信頼下限値

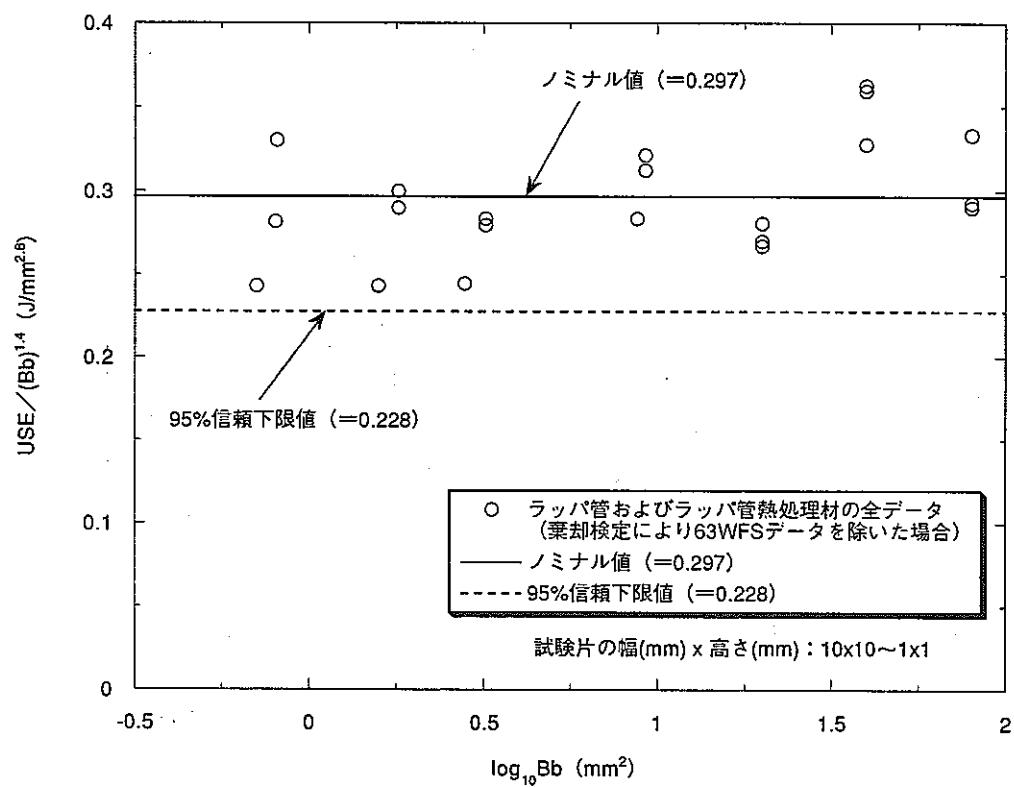


図 3-31 PNC-FMS鋼ラッパ管の設計用USE [製造時]
ノミナル値および下限値 (95%信頼下限) の策定

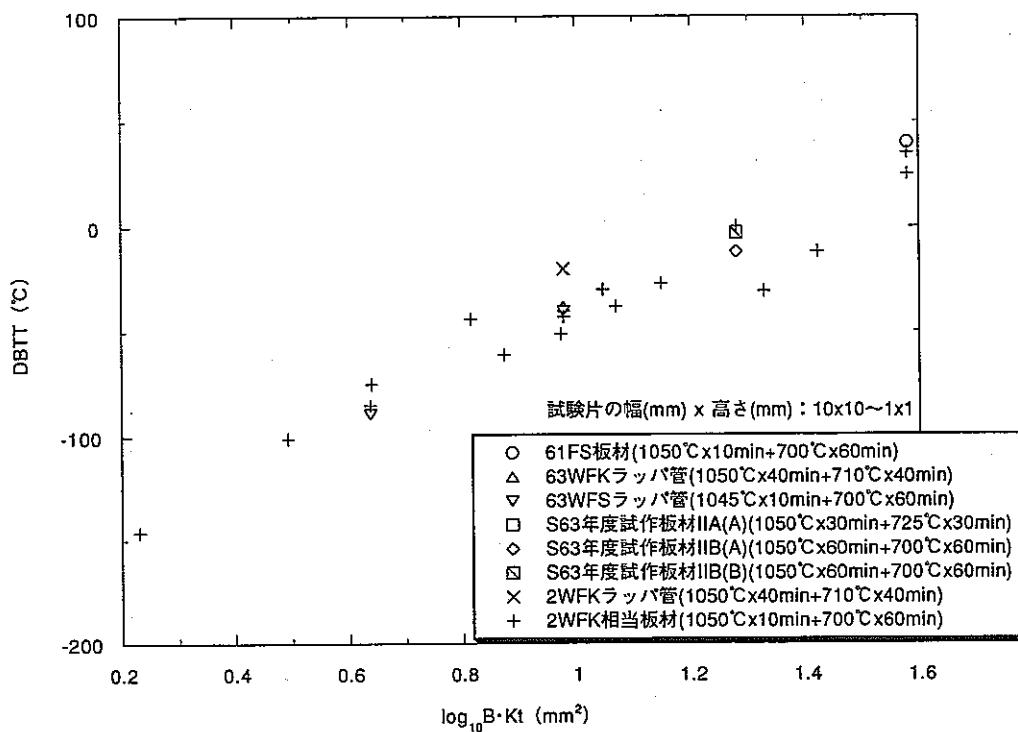
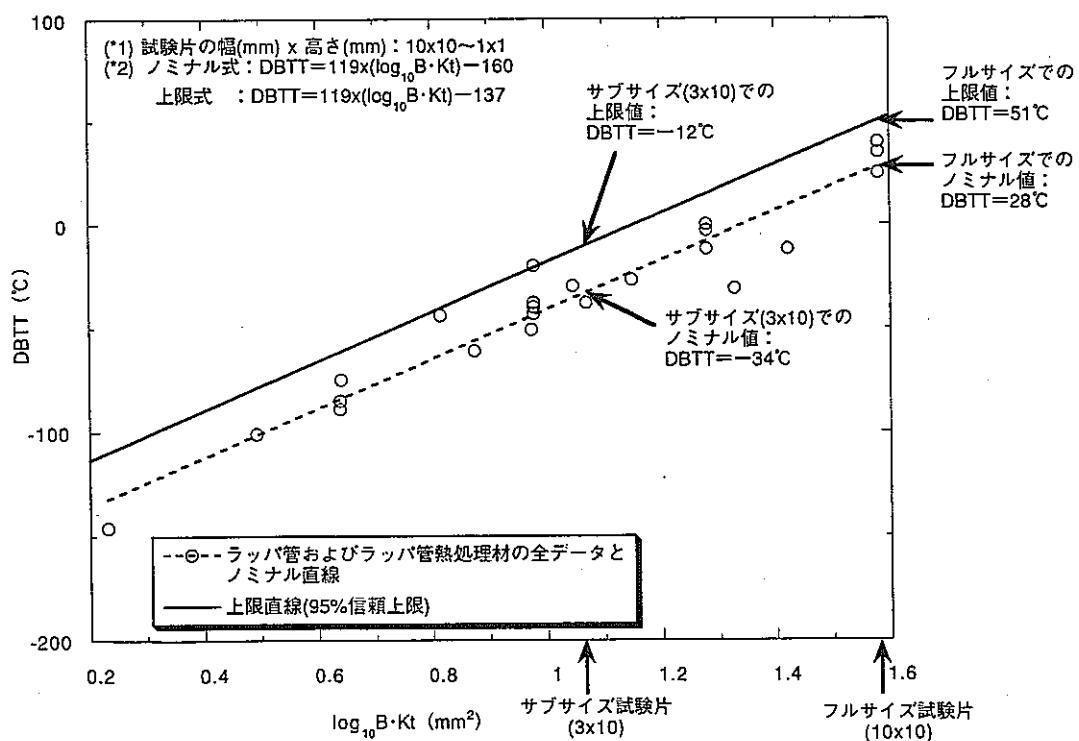


図 3-32.1 PNC-FMS鋼ラッパ管およびラッパ管熱処理材のDBTTデータ

図 3-32.2 PNC-FMS鋼ラッパ管の設計用DBTT [製造時]
ノミナル値および上限値 (95%信頼上限) の策定

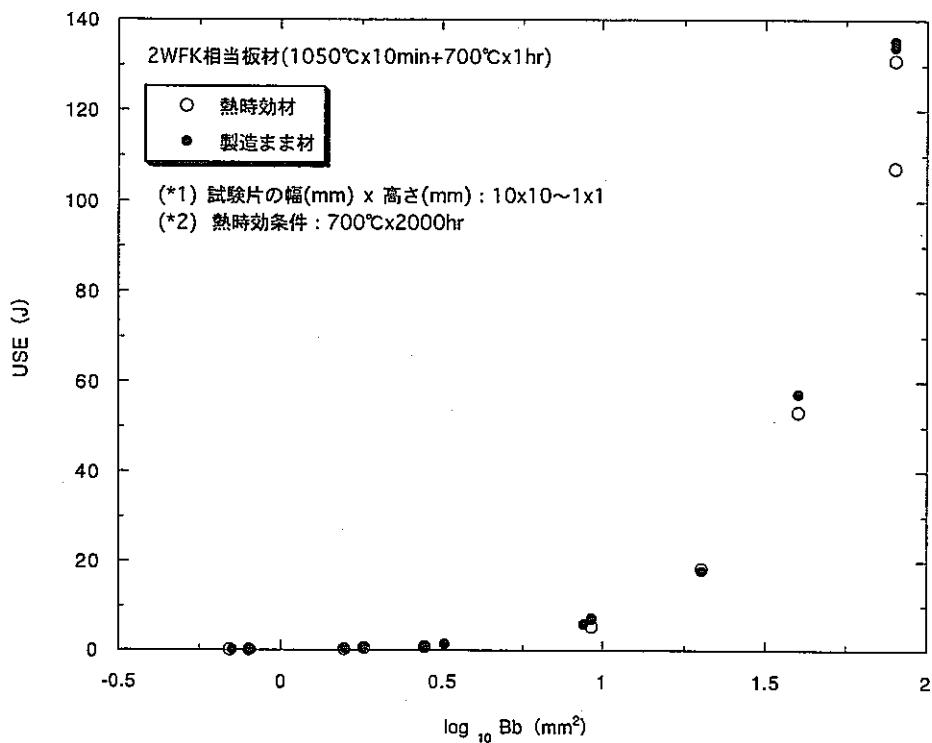


図 4-1.1 热时効材のUSEと製造まま材のUSEとの比較

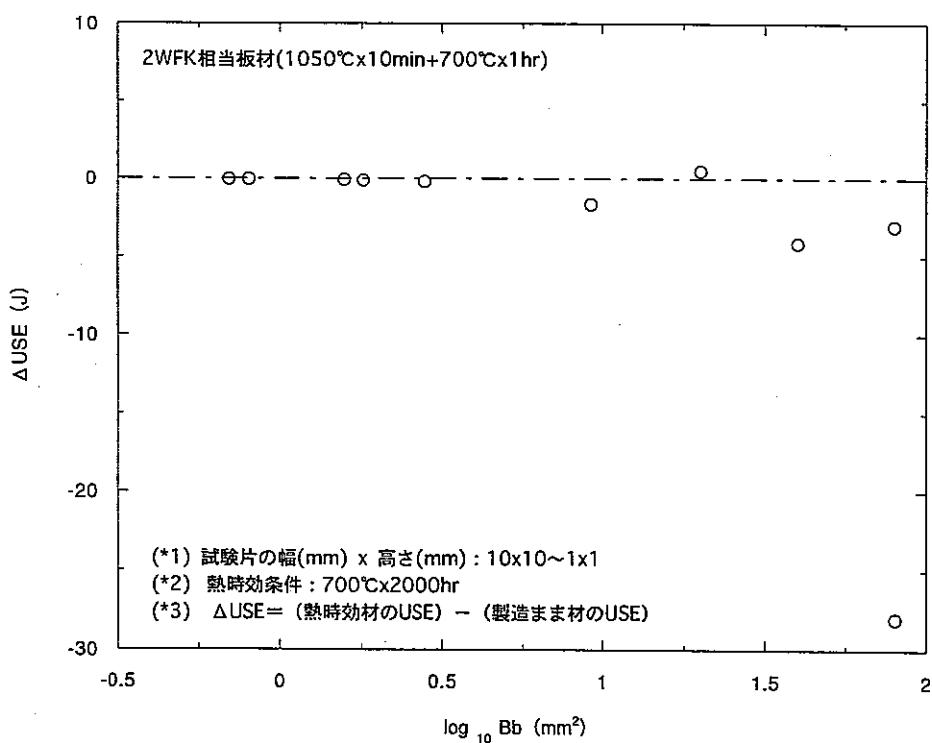


図 4-1.2 热时効による ΔUSE の寸法依存性

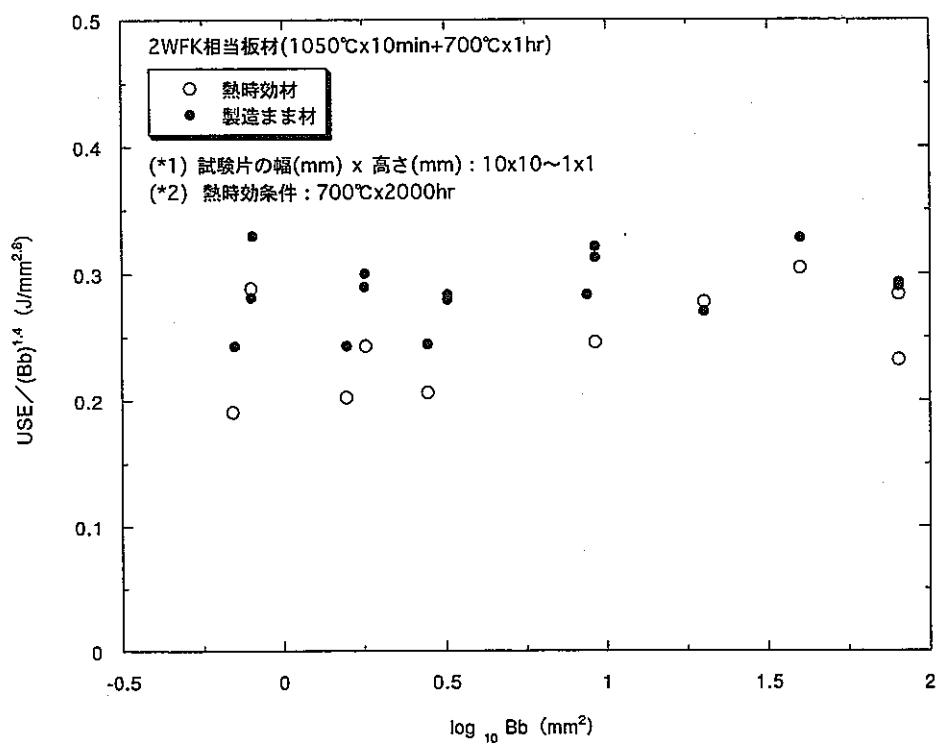


図 4-2.1 熱時効材のUSE／(Bb)^{1.4}と製造まま材のUSE／(Bb)^{1.4}との比較

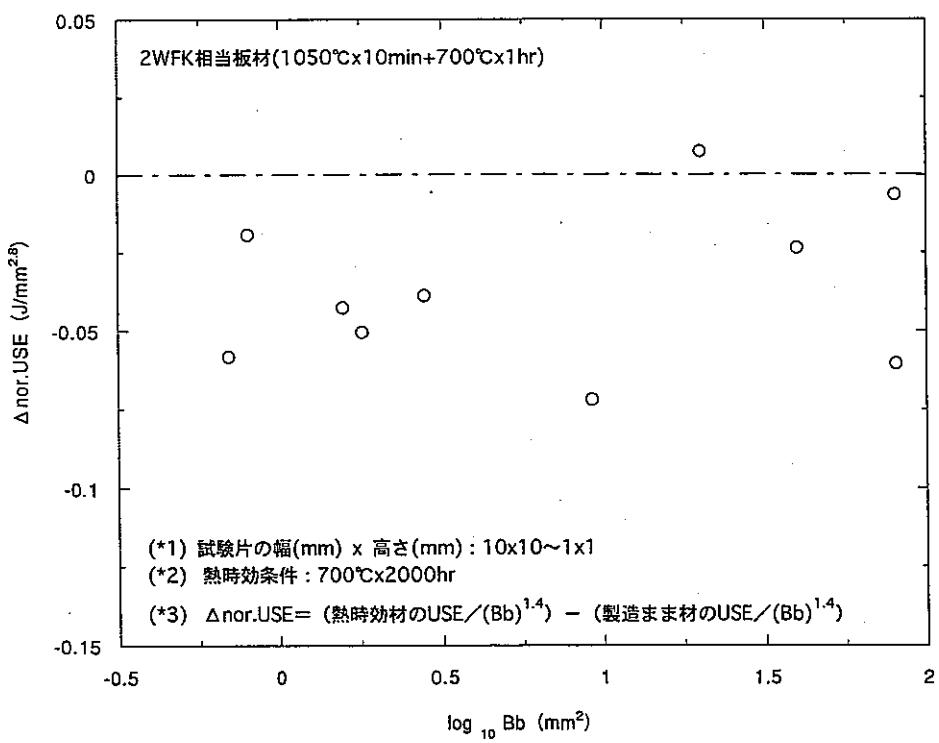


図 4-2.2 熱時効による $\Delta\text{nor.USE}$ の寸法依存性

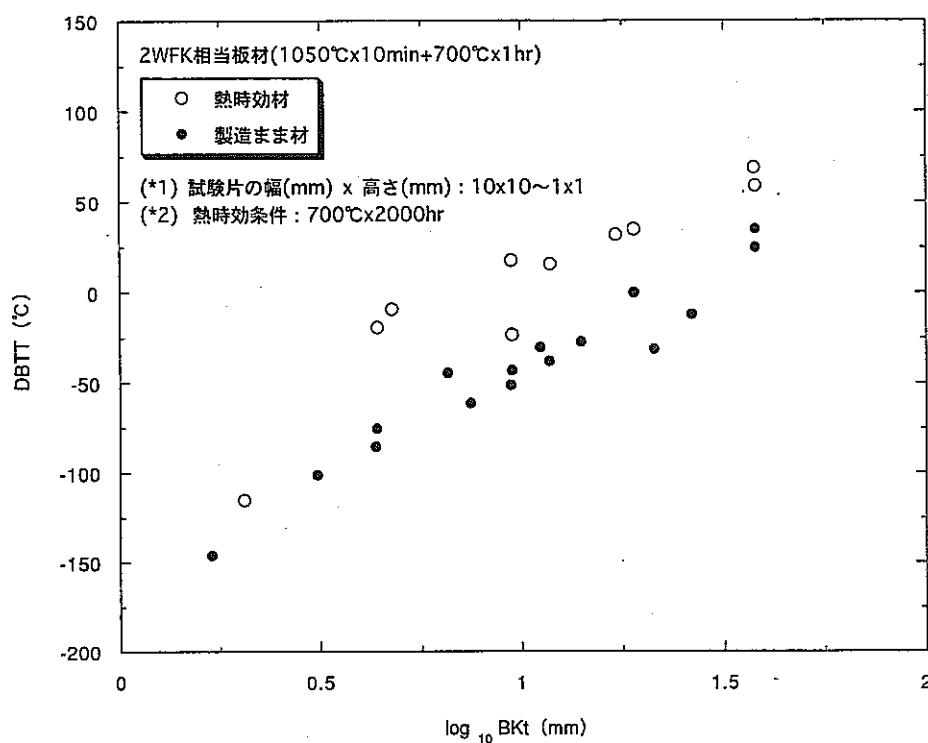


図 4-3.1 熱時効材のDBTTと製造まま材のDBTTとの比較

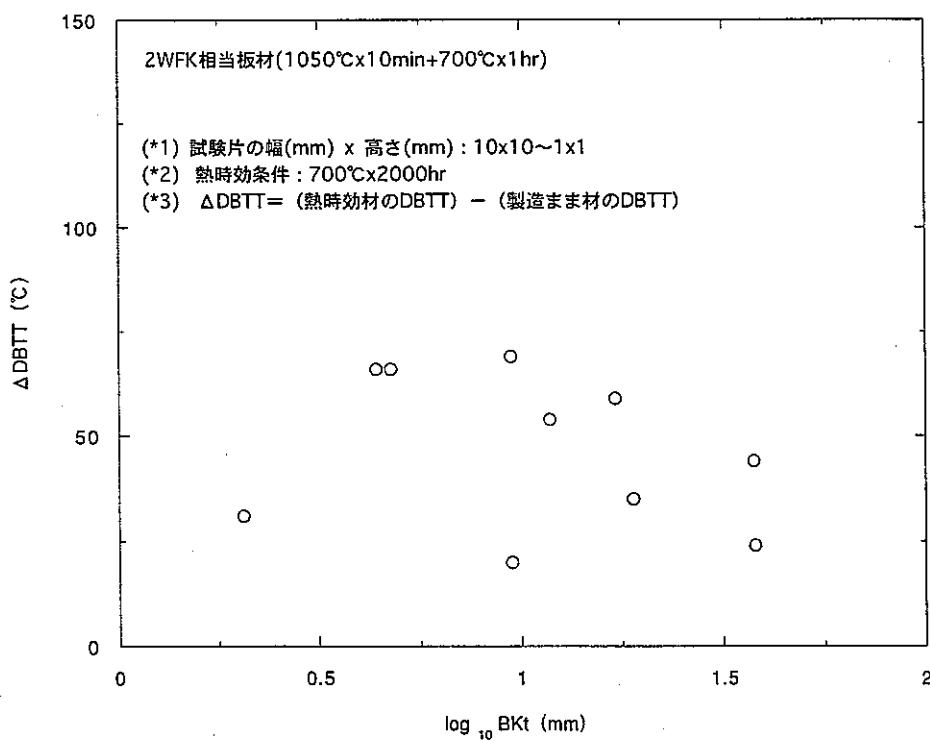


図 4-3.2 熱時効による $\Delta DBTT$ の寸法依存性

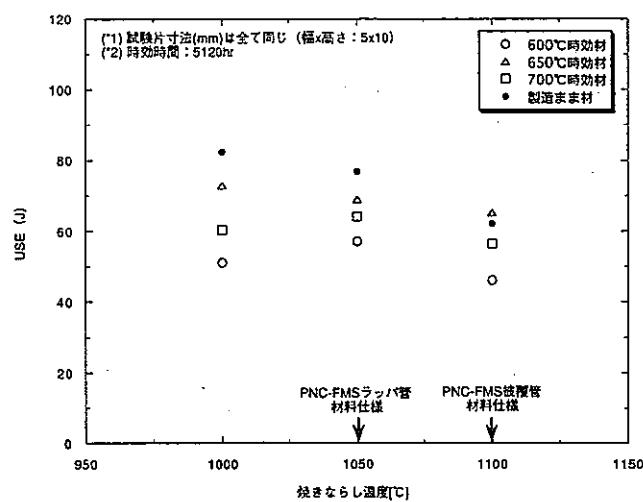


図 4-4.1 USEに対する熱時効効果の焼きならし温度依存性
(61FK板材の場合)

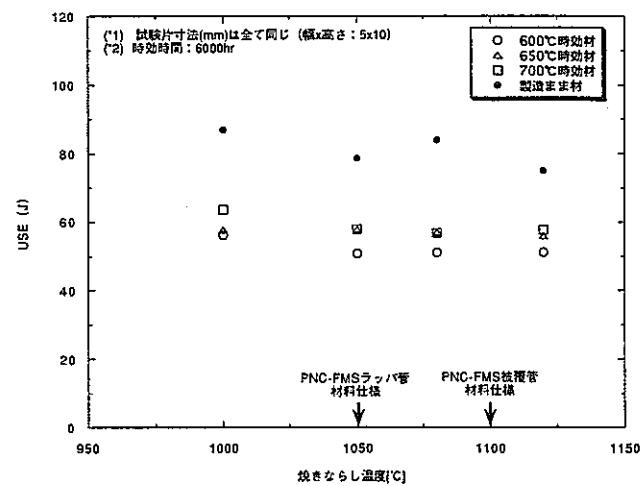


図 4-4.2 USEに対する熱時効効果の焼きならし温度依存性
(61FS板材の場合)

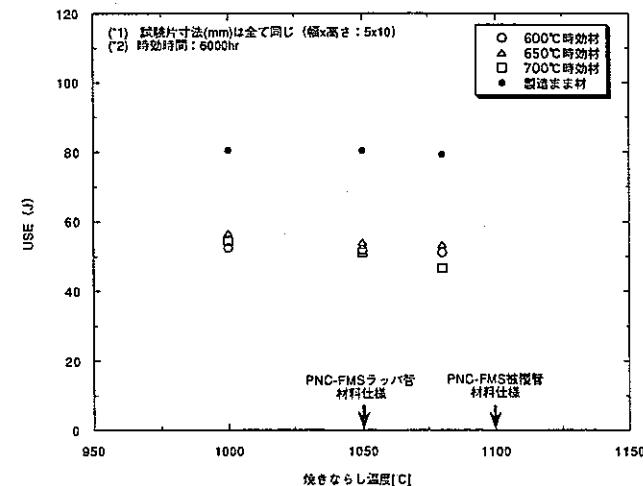


図 4-4.3 USEに対する熱時効効果の焼きならし温度依存性
(61FSF板材の場合)

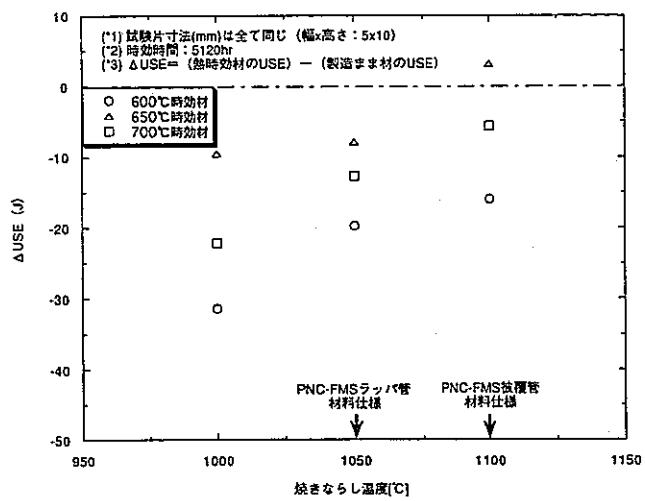


図 4-5.1 热時効による ΔUSE の焼きならし温度依存性
(61FK板材の場合)

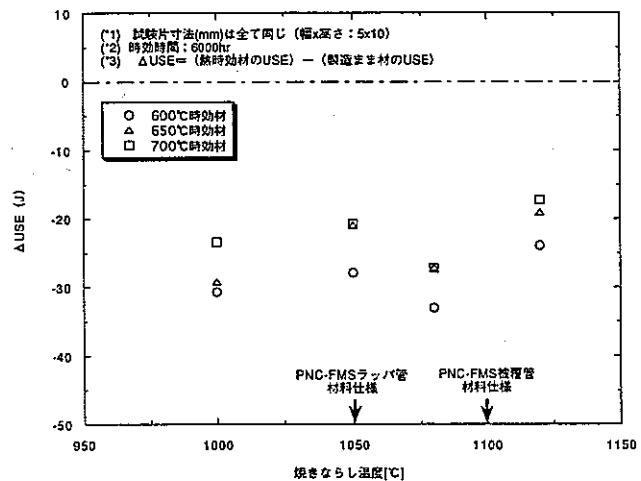


図 4-5.2 热時効による ΔUSE の焼きならし温度依存性
(61FS板材の場合)

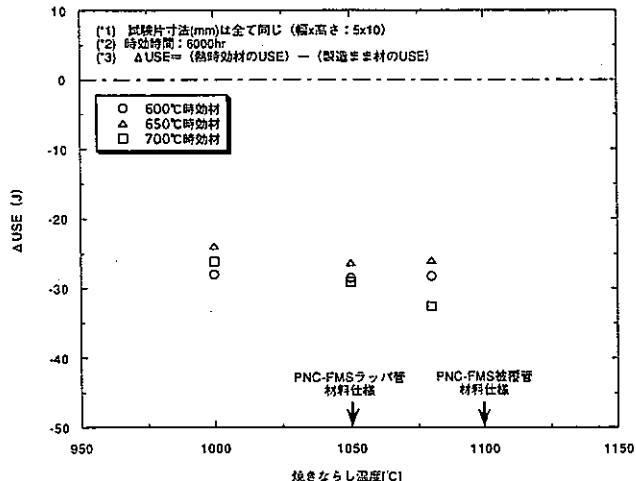


図 4-5.3 热時効による ΔUSE の焼きならし温度依存性
(61FSF板材の場合)

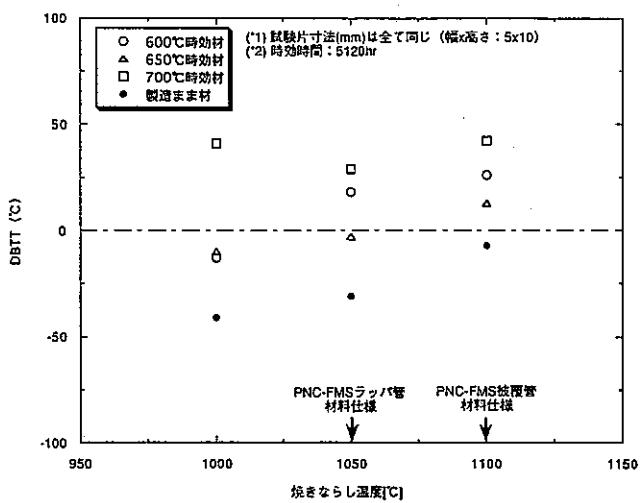


図 4-6.1 DBTTに対する熱時効効果の焼きならし温度依存性
(61FK板材の場合)

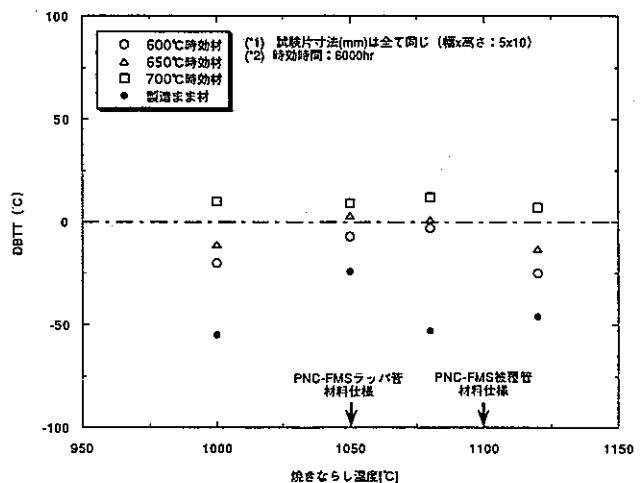


図 4-6.2 DBTTに対する熱時効効果の焼きならし温度依存性
(61FS板材の場合)

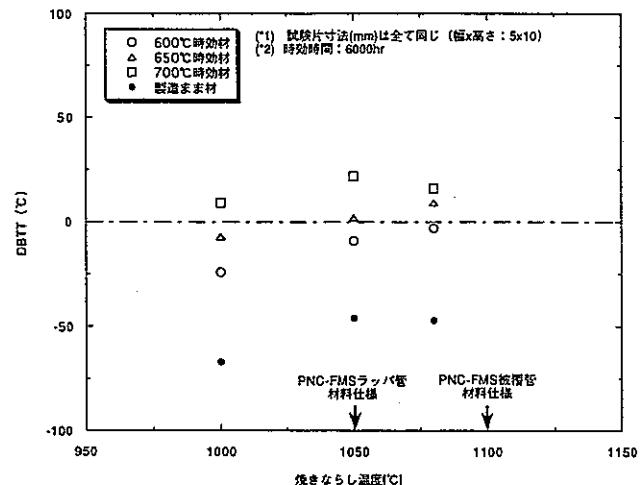


図 4-6.3 DBTTに対する熱時効効果の焼きならし温度依存性
(61FSF板材の場合)

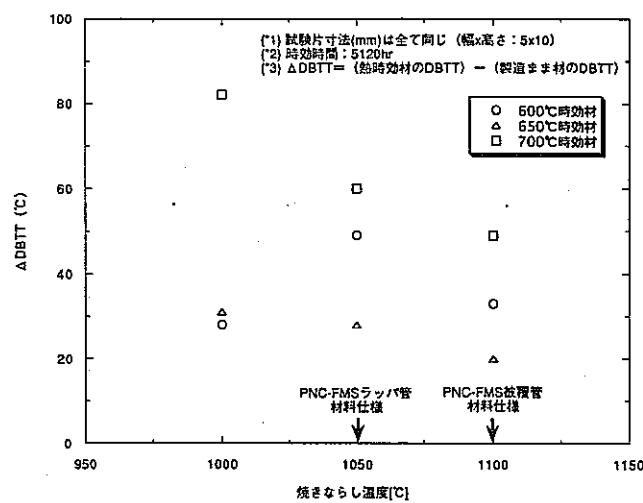


図 4-7.1 热時効による Δ DBTTの焼きならし温度依存性
(61FK板材の場合)

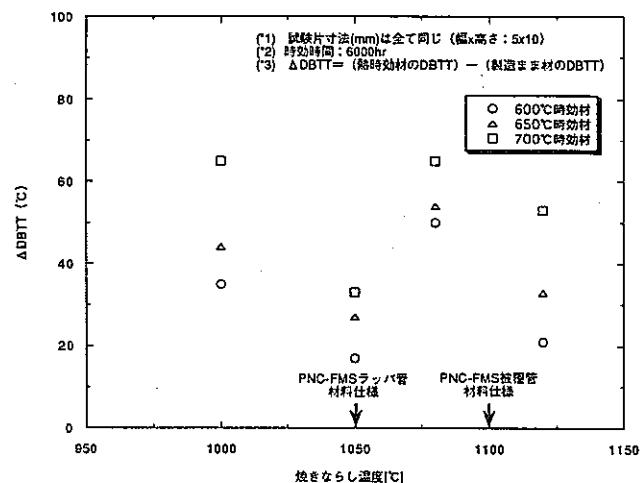


図 4-7.2 热時効による Δ DBTTの焼きならし温度依存性
(61FS板材の場合)

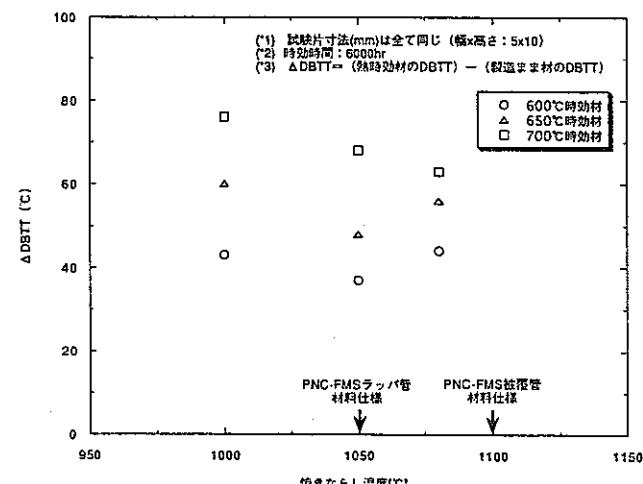


図 4-7.3 热時効による Δ DBTTの焼きならし温度依存性
(61FSF板材の場合)

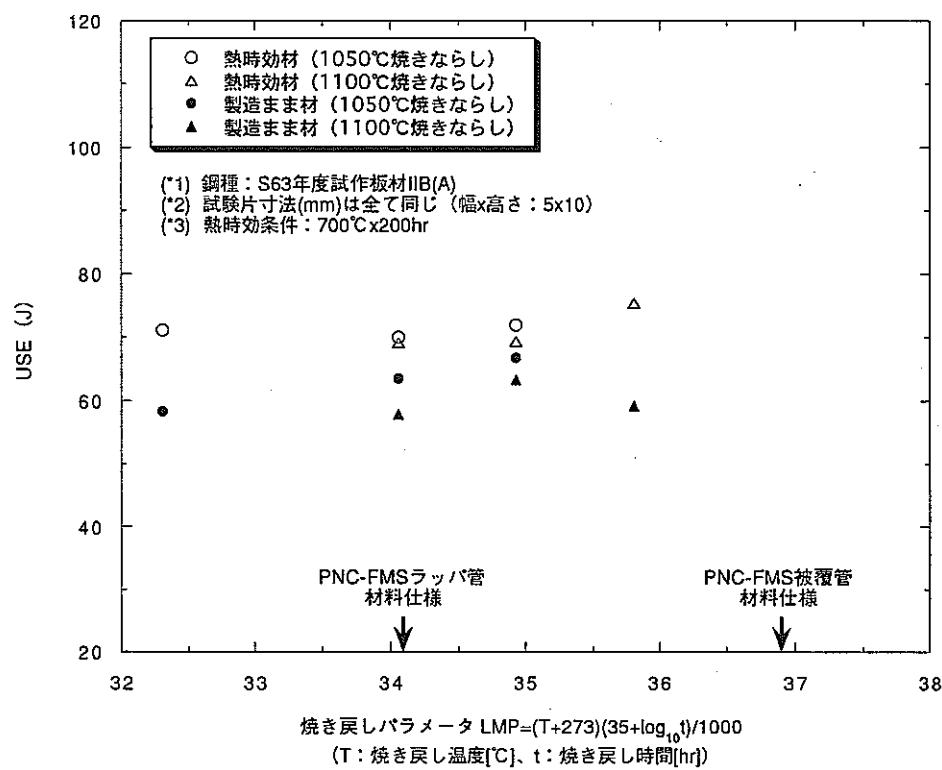


図 4-8.1 USEに対する热时効効果の焼き戻し条件依存性

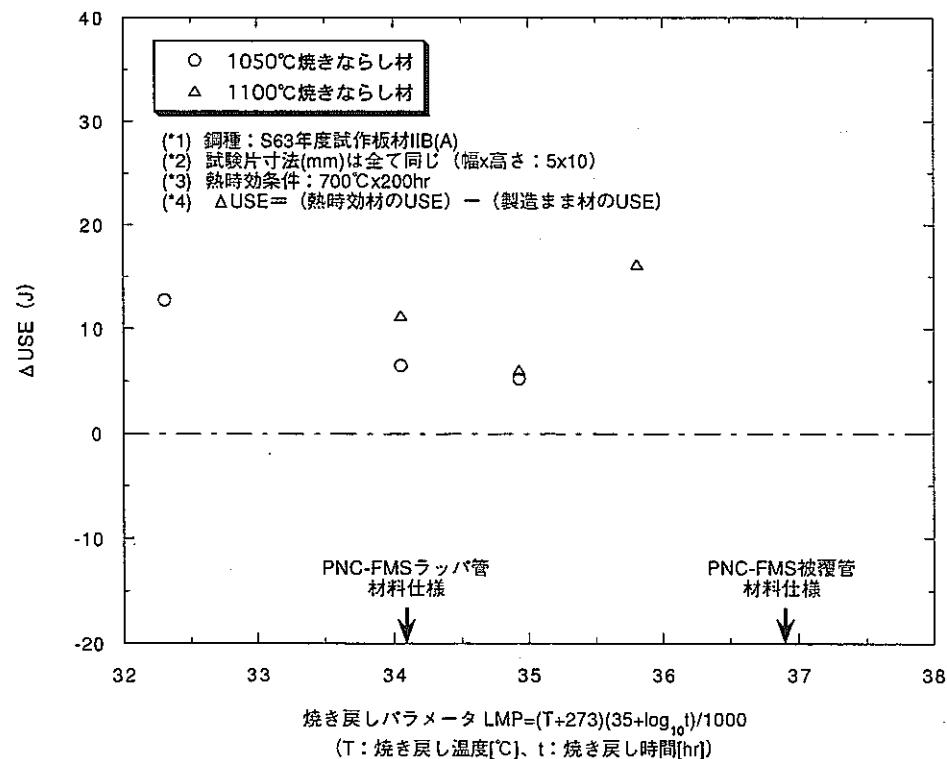


図 4-8.2 热时効による ΔUSE の焼き戻し条件依存性

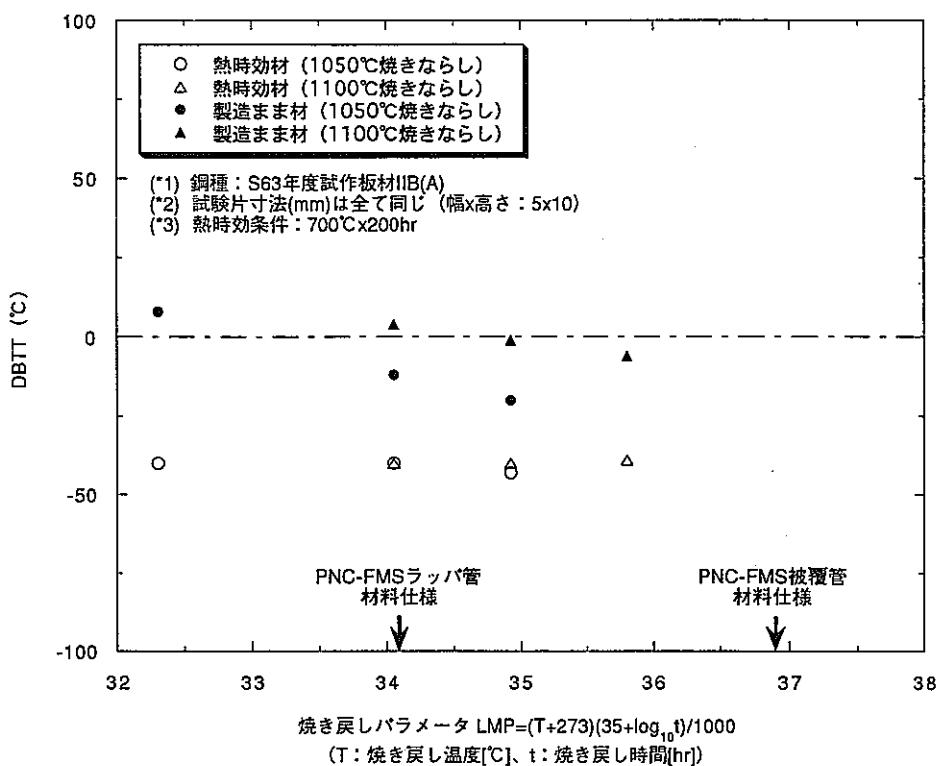


図 4-9.1 DBTTに対する熱時効効果の焼き戻し条件依存性

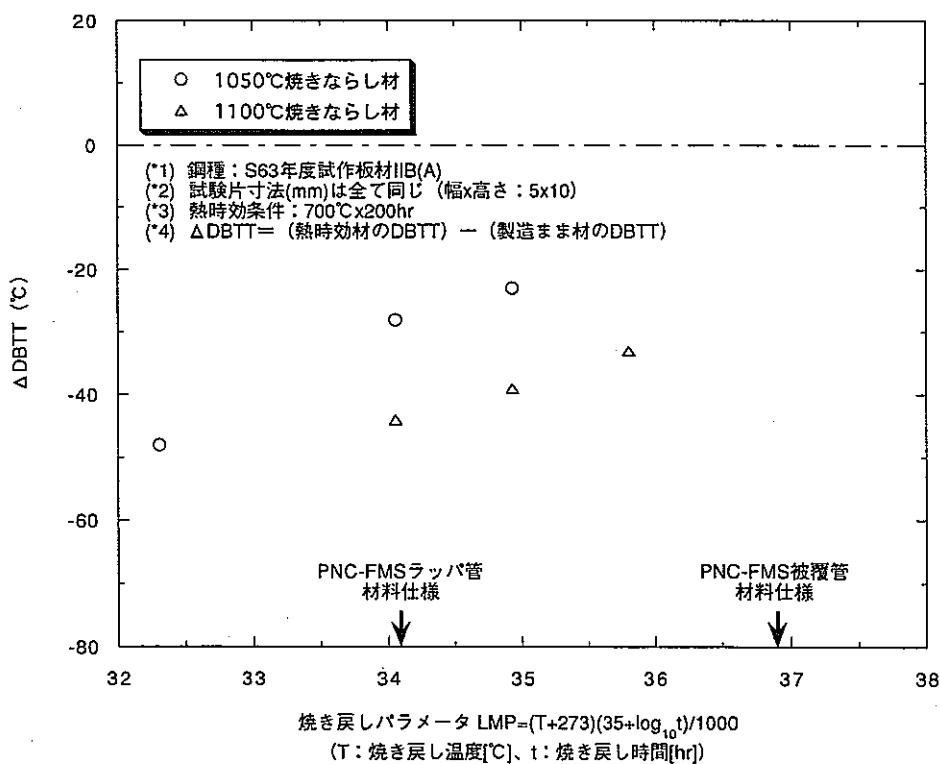


図 4-9.2 热时効による $\Delta DBTT$ の焼き戻し条件依存性

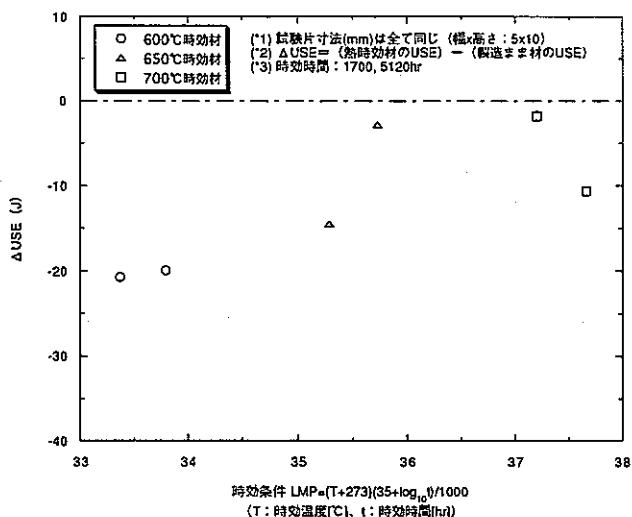


図 4-10.1 Δ USEの熱時効条件依存性
(61FK板材 : 1000°C × 30min + 760°C × 30min)

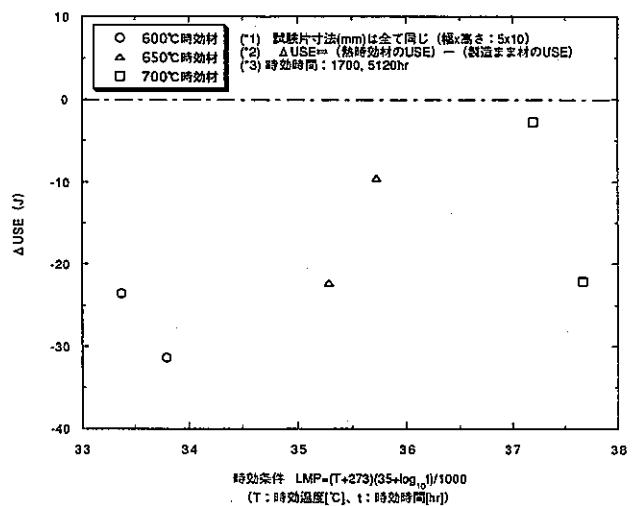


図 4-10.2 Δ USEの熱時効条件依存性
(61FK板材 : 1000°C × 30min + 800°C × 30min)

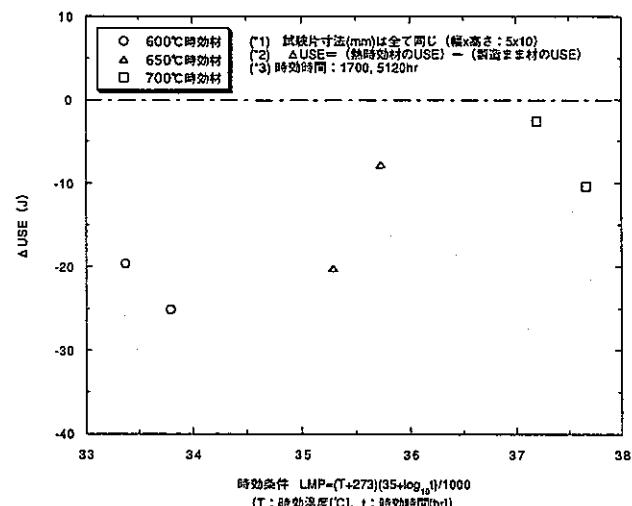


図 4-10.3 Δ USEの熱時効条件依存性
(61FK板材 : 1050°C × 30min + 760°C × 30min)

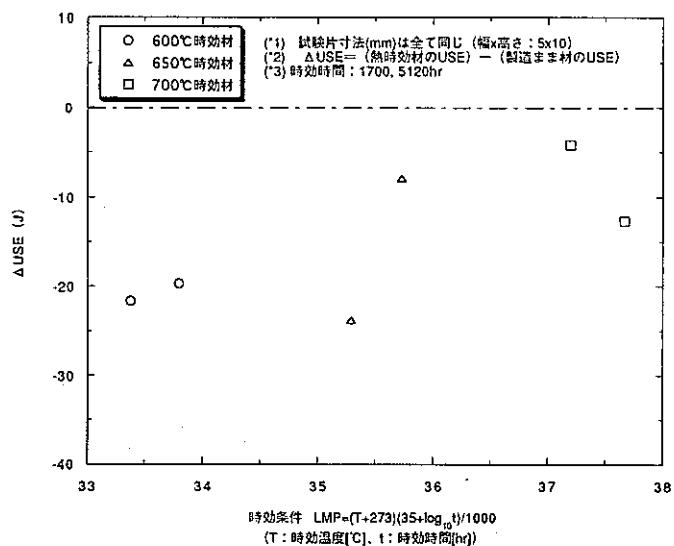


図 4-10.4 ΔUSE の熱時効条件依存性
(61FK板材 : 1050°C × 30min + 800°C × 30min)

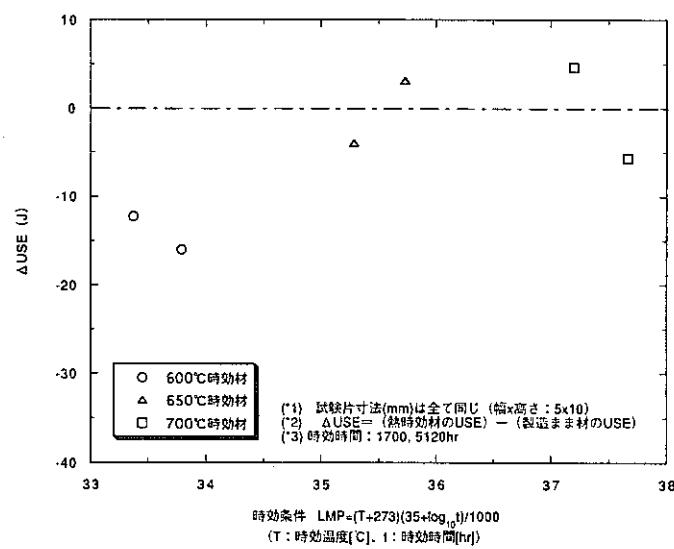
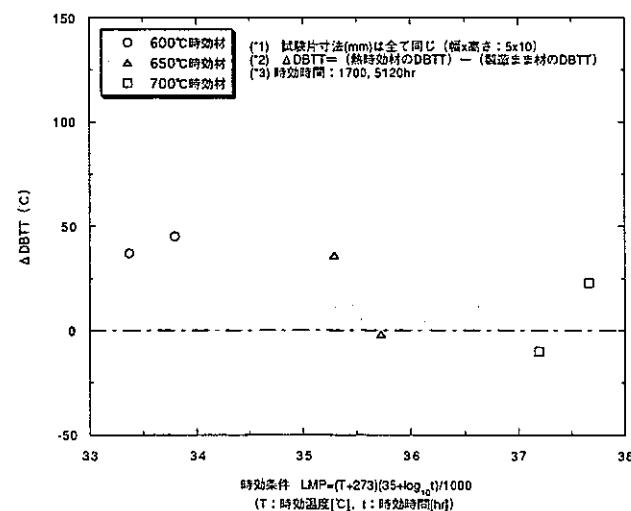
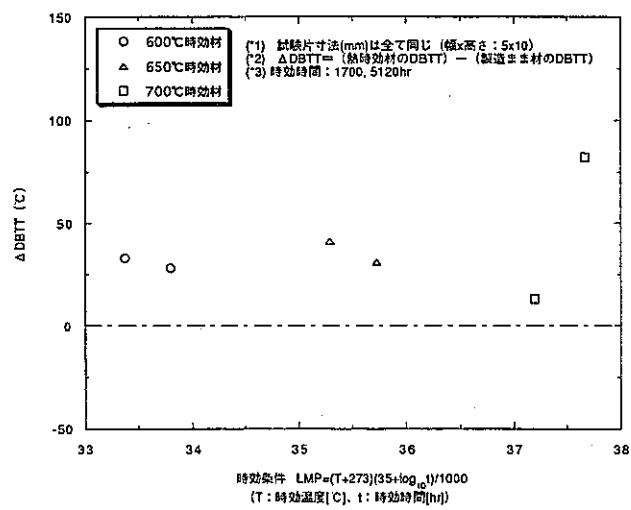
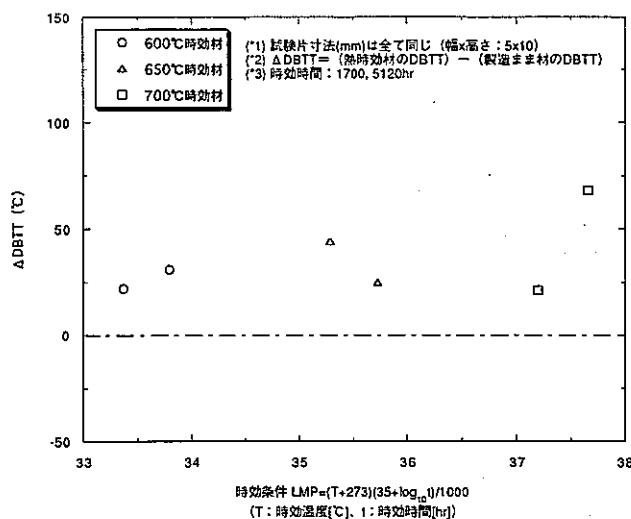
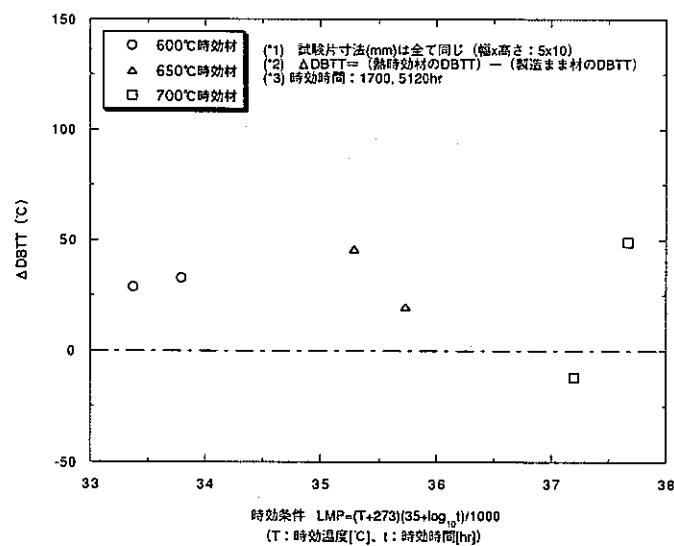
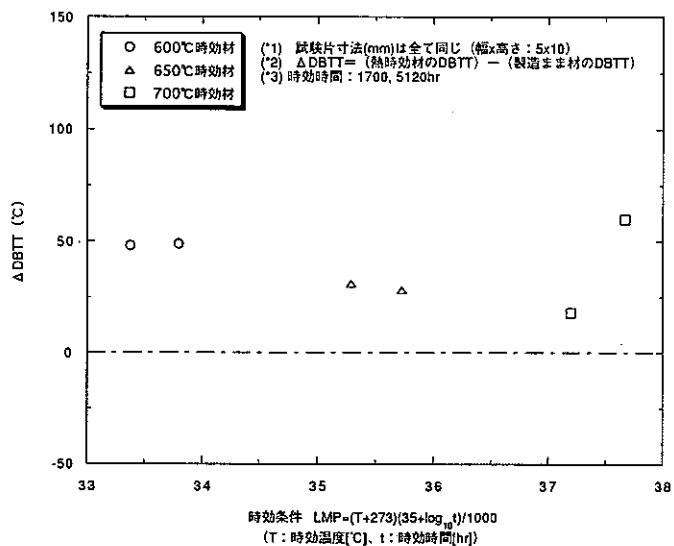


図 4-10.5 ΔUSE の熱時効条件依存性
(61FK板材 : 1100°C × 30min + 800°C × 30min)





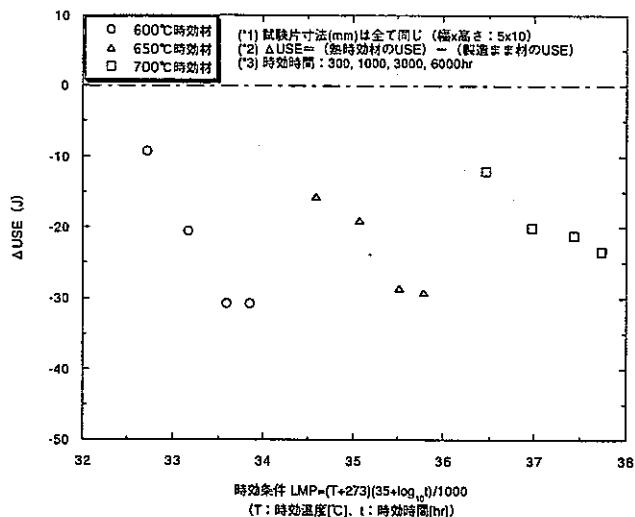


図 4-11.1 ΔUSE の熱時効条件依存性
(61FS板材: 1000°C×1hr+800°C×1hr)

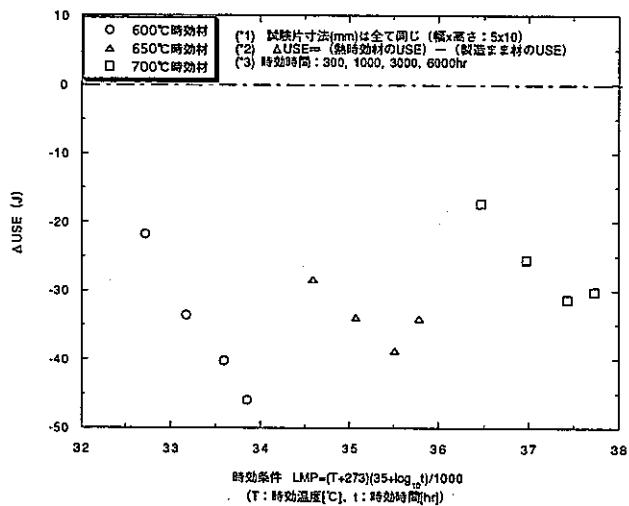


図 4-11.2 ΔUSE の熱時効条件依存性
(61FS板材: 1050°C×1hr+750°C×1hr)

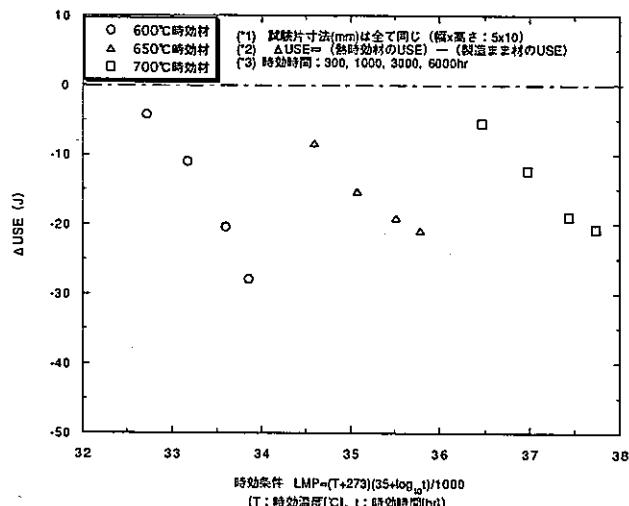


図 4-11.3 ΔUSE の熱時効条件依存性
(61FS板材: 1050°C×1hr+800°C×1hr)

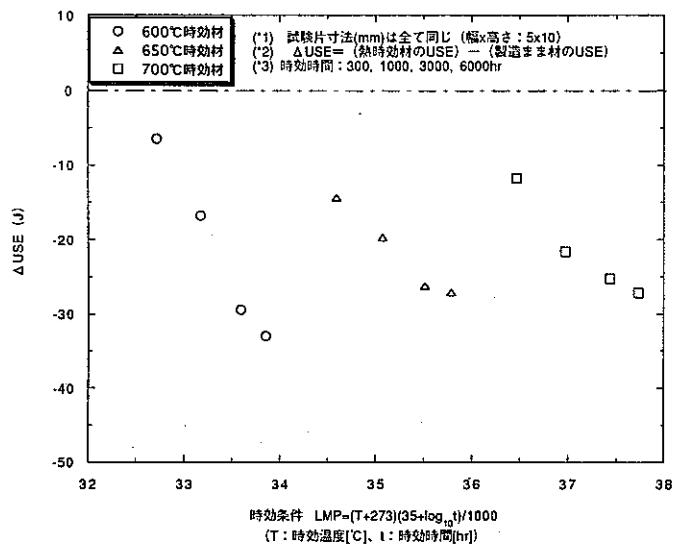


図 4-11.4 Δ USEの熱時効条件依存性
(61FS板材: 1080°C × 1hr + 800°C × 1hr)

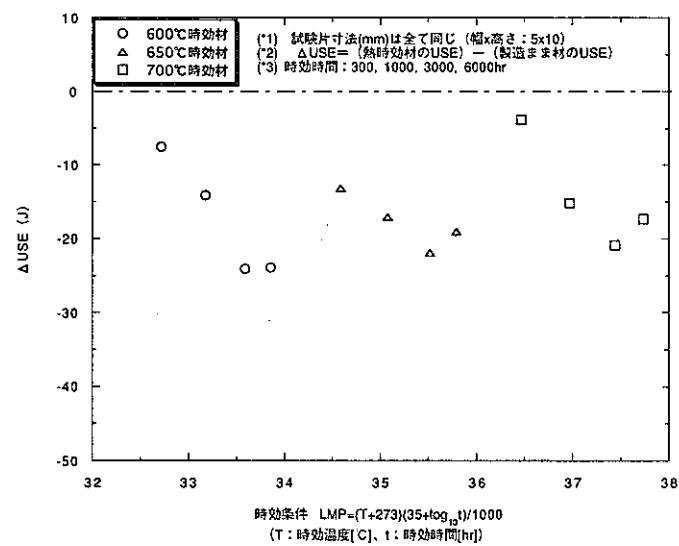
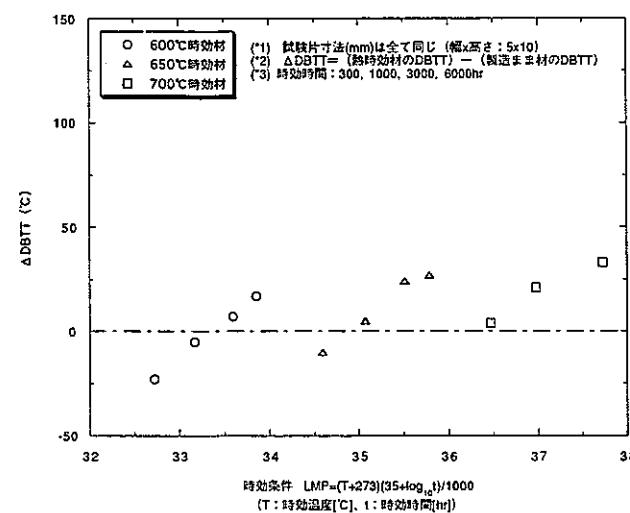
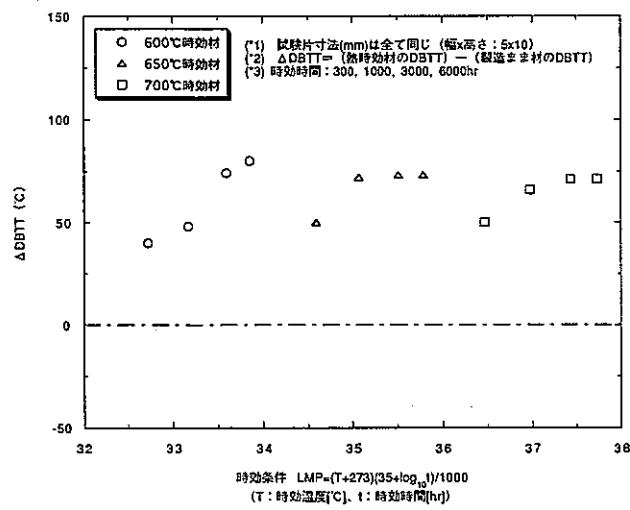
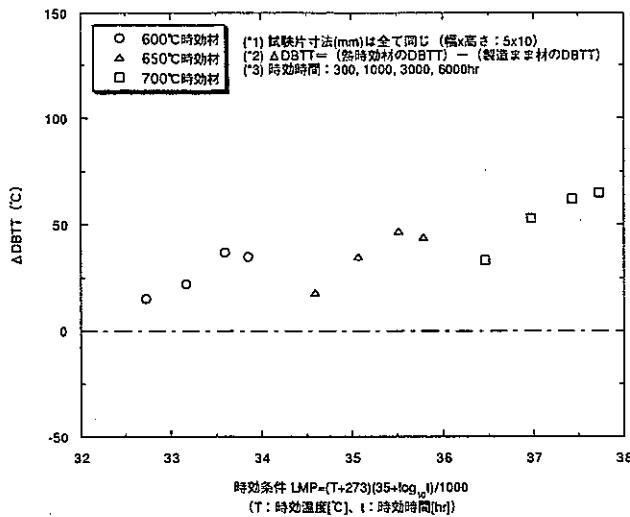


図 4-11.5 Δ USEの熱時効条件依存性
(61FS板材: 1120°C × 1hr + 800°C × 1hr)



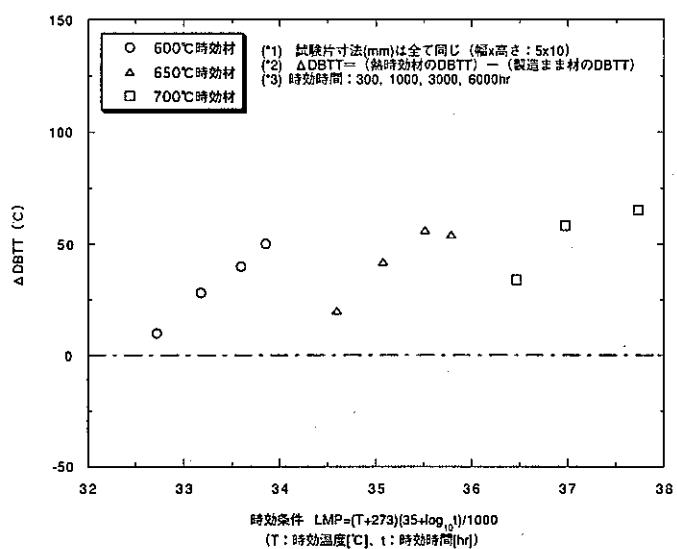


図 4-11.9 $\Delta DBTT$ の熱時効条件依存性
(61FS板材: 1080°C × 1hr + 800°C × 1hr)

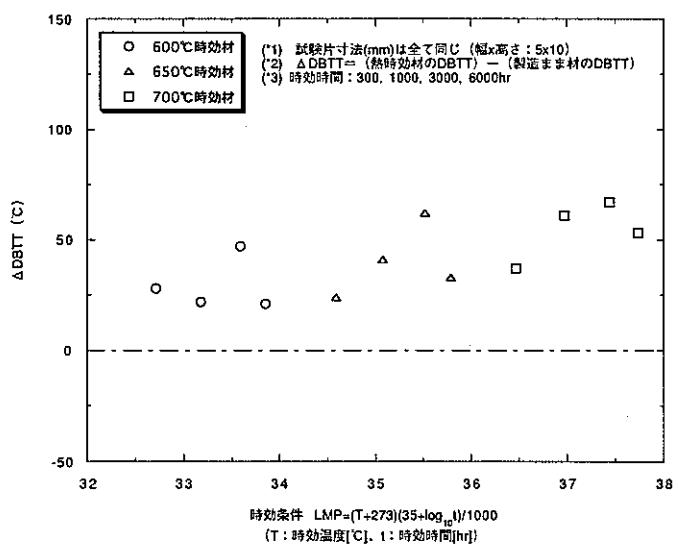


図 4-11.10 $\Delta DBTT$ の熱時効条件依存性
(61FS板材: 1120°C × 1hr + 800°C × 1hr)

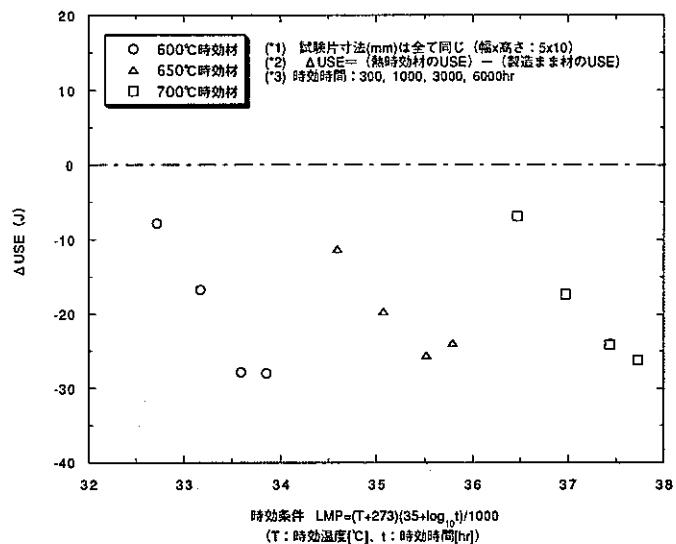


図 4-12.1 ΔUSEの熱時効条件依存性
 (61FSF板材: 1000°C×1hr+750°C×10hr)

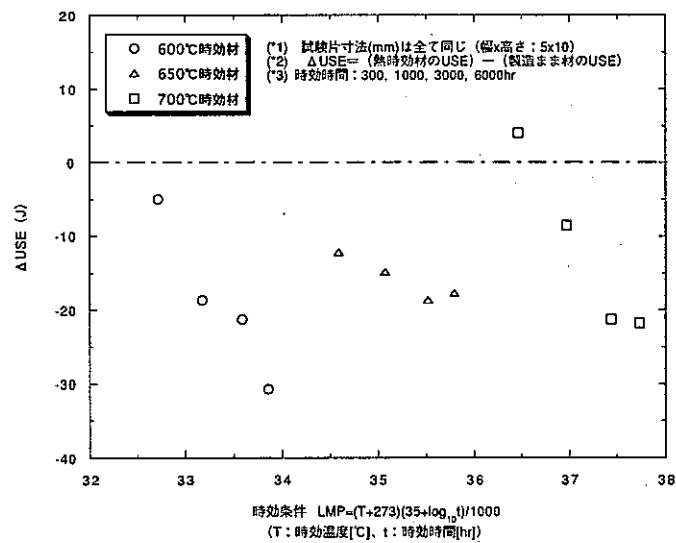


図 4-12.2 ΔUSEの熱時効条件依存性
 (61FSF板材: 1050°C×1hr+750°C×1hr)

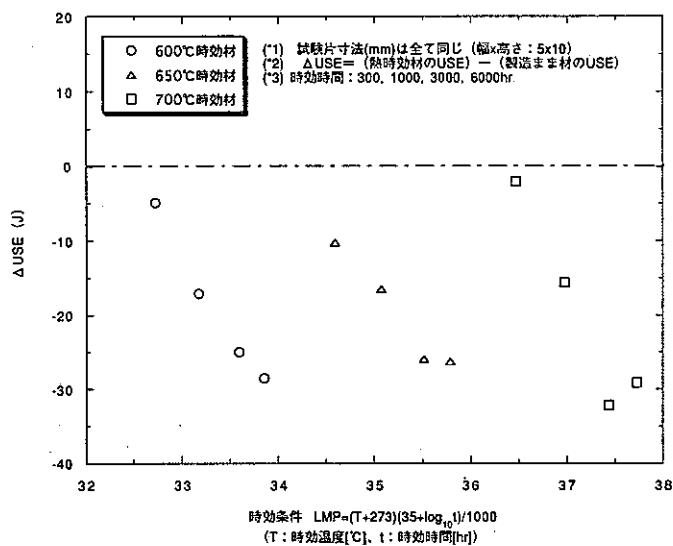


図 4-12.3 Δ USEの熱時効条件依存性
(61FSF板材: 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)

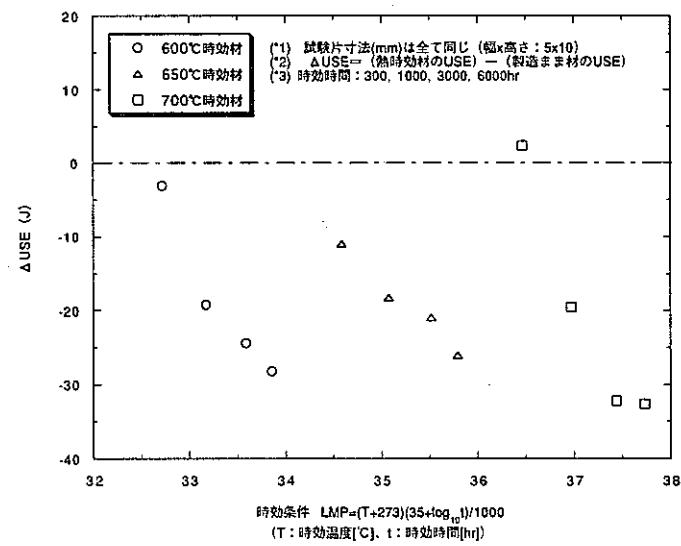


図 4-12.4 Δ USEの熱時効条件依存性
(61FSF板材: 1080°C × 1hr + 750°C × 10hr)

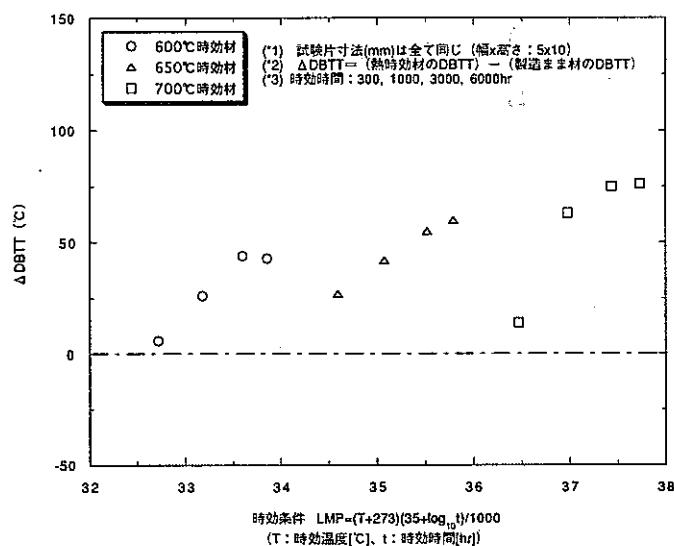


図 4-12.5 Δ DBTTの熱時効条件依存性
(61FSF板材 : 1000°C × 1hr + 750°C × 10hr)

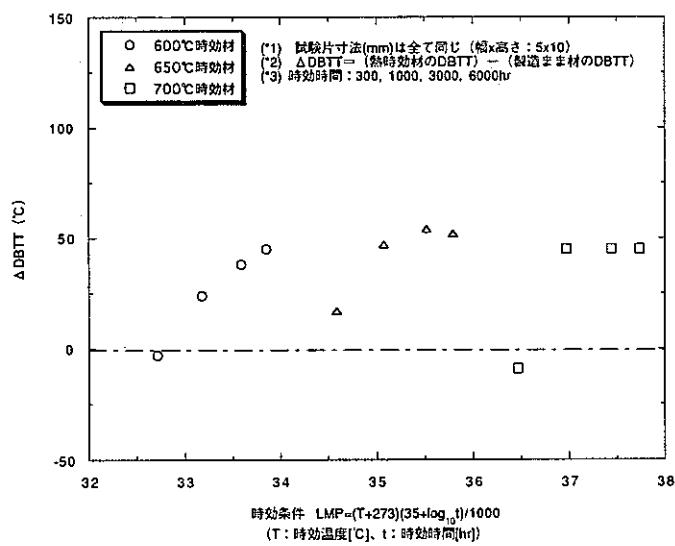


図 4-12.6 Δ DBTTの熱時効条件依存性
(61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 1hr)

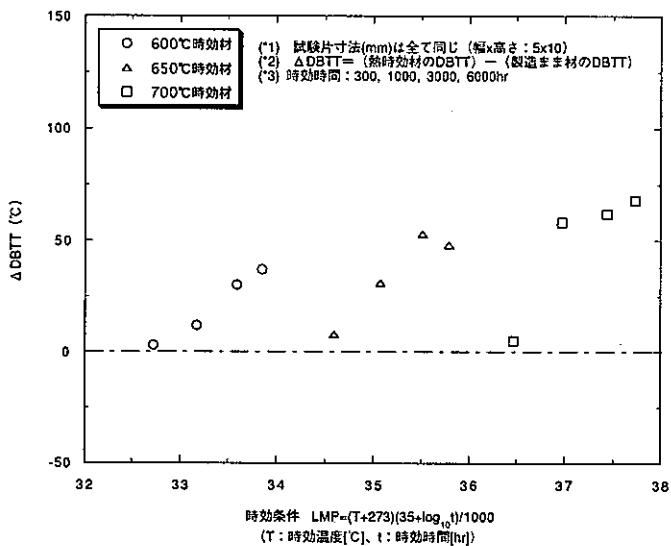


図 4-12.7 $\Delta DBTT$ の熱時効条件依存性
(61FSF板材: 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)

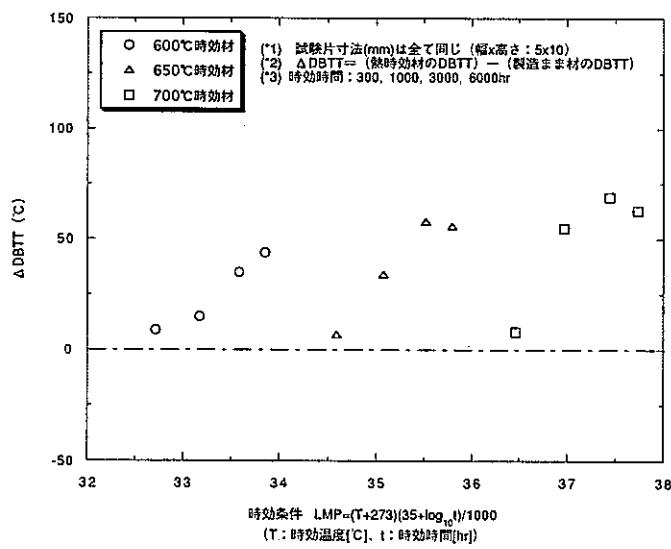


図 4-12.8 $\Delta DBTT$ の熱時効条件依存性
(61FSF板材: 1080°C × 1hr + 750°C × 10hr)

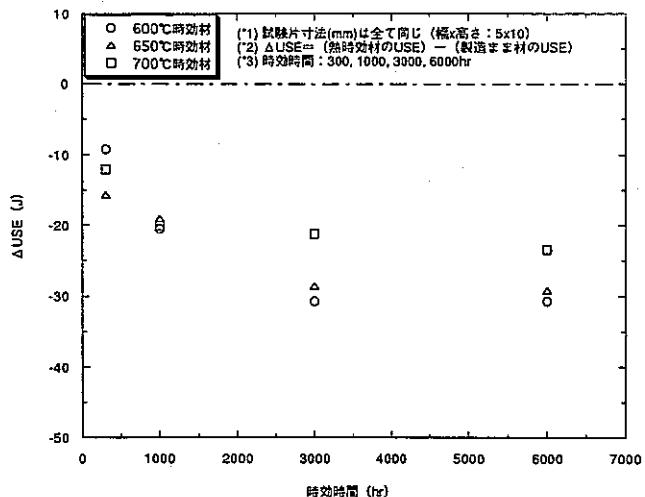


図 4-13.1 ΔUSE の熱時効時間依存性
(61FS板材 : 1000°C × 1hr + 800°C × 1hr)

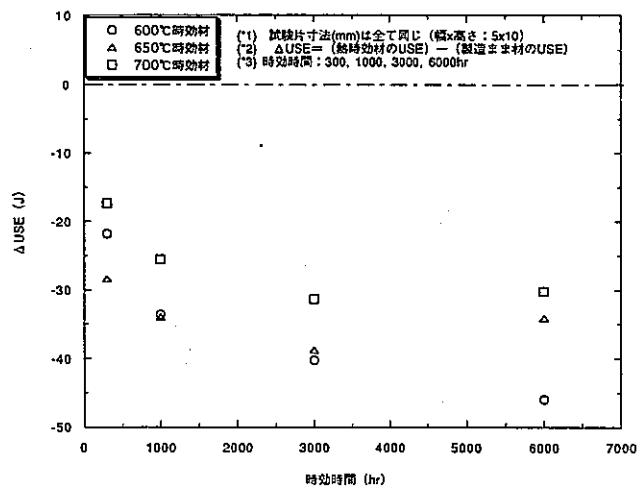


図 4-13.2 ΔUSE の熱時効時間依存性
(61FS板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 1hr)

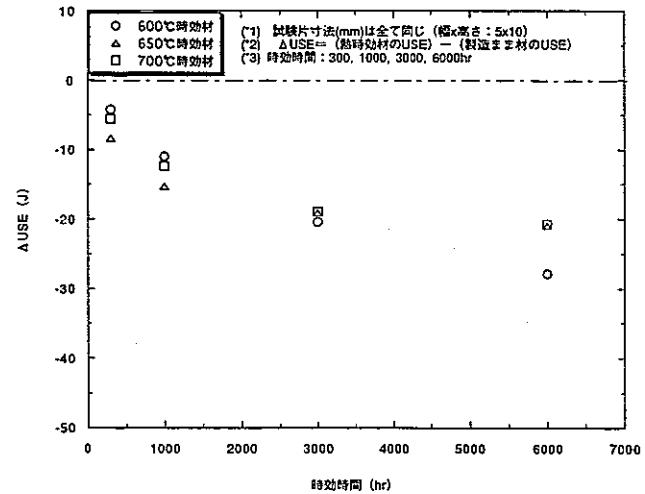


図 4-13.3 ΔUSE の熱時効時間依存性
(61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)

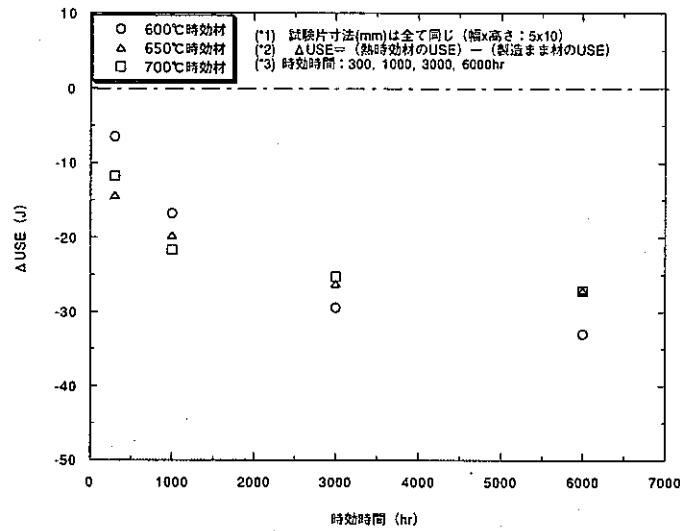


図 4-13.4 ΔUSE の熱時効時間依存性
(61FS板材: 1080°C × 1hr + 800°C × 1hr)

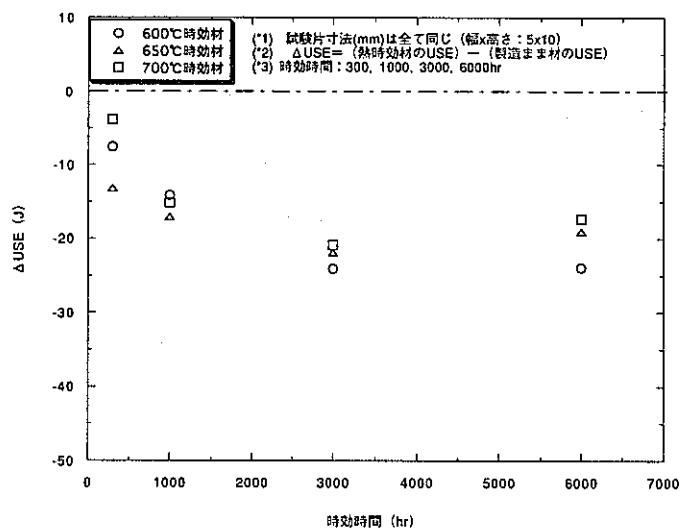


図 4-13.5 ΔUSE の熱時効時間依存性
(61FS板材: 1120°C × 1hr + 800°C × 1hr)

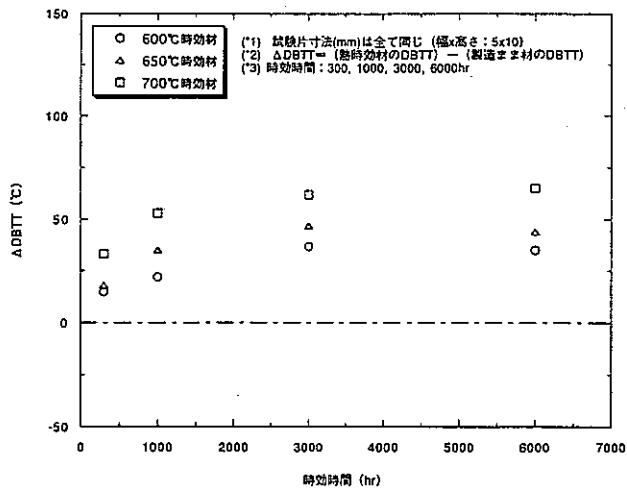


図 4-14.1 $\Delta DBTT$ の熱時効時間依存性
(61FS板材 : 1000°C × 1hr + 800°C × 1hr)

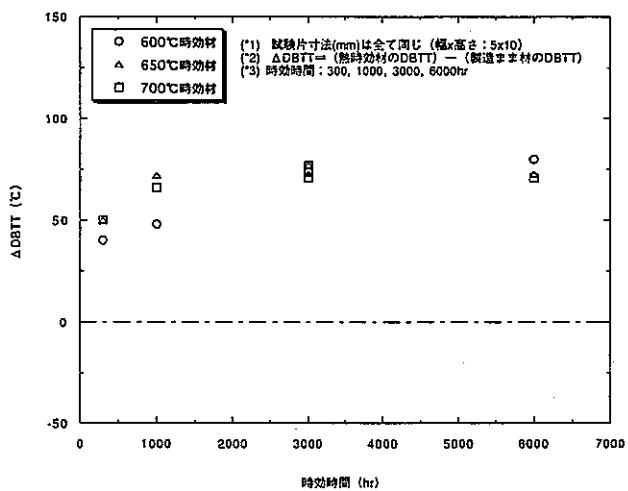


図 4-14.2 $\Delta DBTT$ の熱時効時間依存性
(61FS板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 1hr)

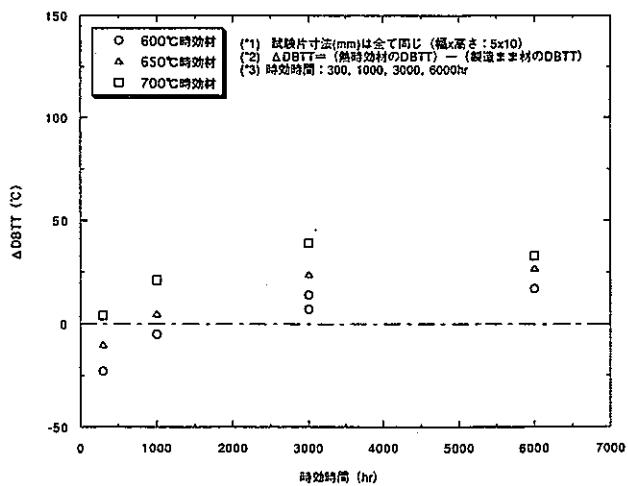
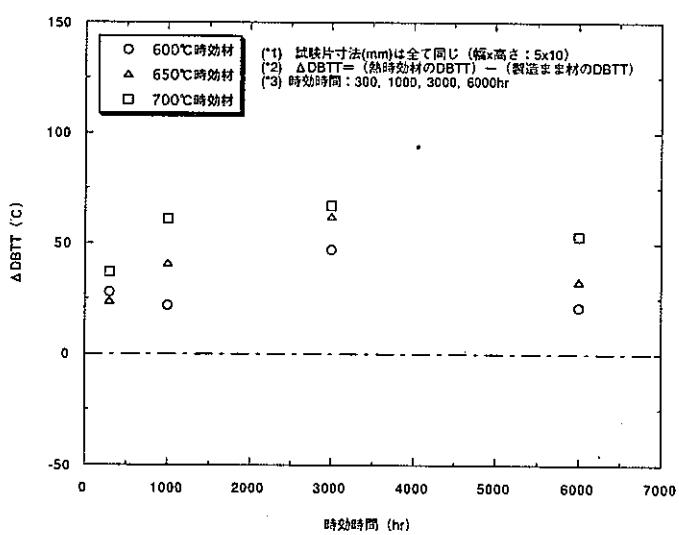
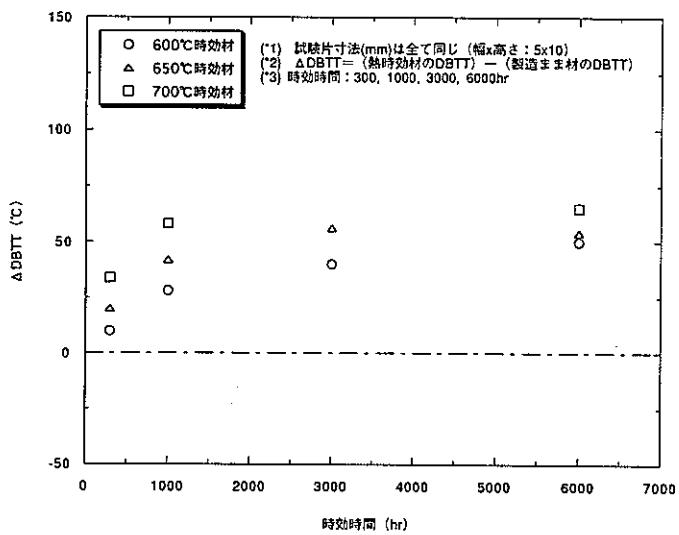


図 4-14.3 $\Delta DBTT$ の熱時効時間依存性
(61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)



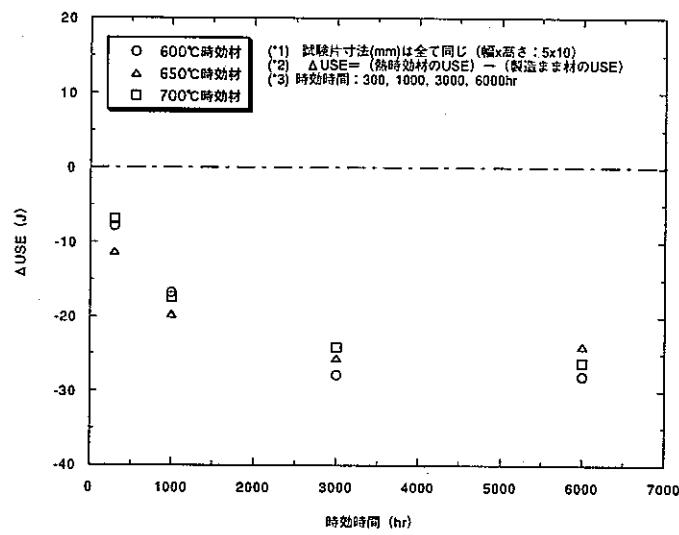


図 4-15.1 Δ USEの熱時効時間依存性
(61FSF板材 : 1000°C × 1hr + 750°C × 10hr)

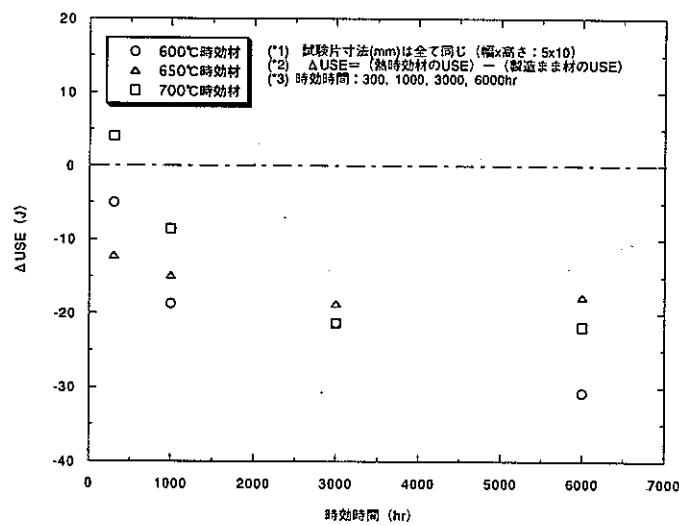


図 4-15.2 Δ USEの熱時効時間依存性
(61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 1hr)

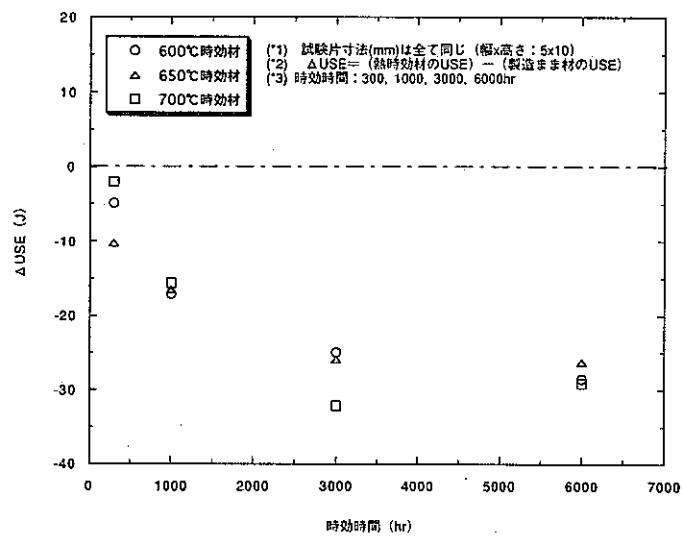


図 4-15.3 ΔUSE の熱時効時間依存性
(61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)

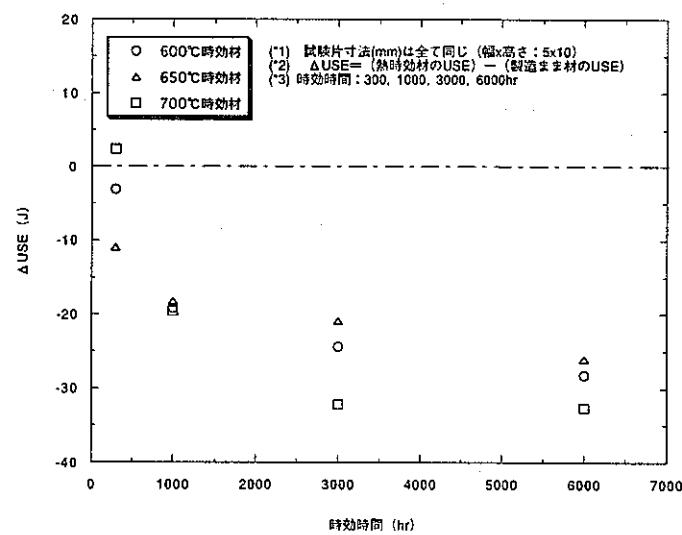
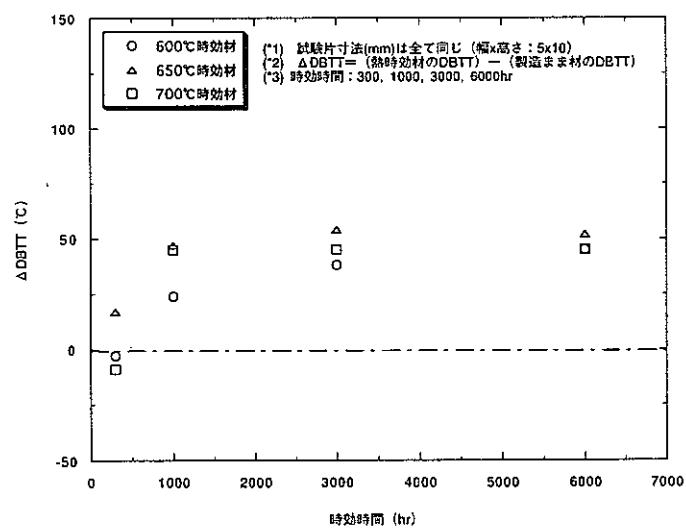
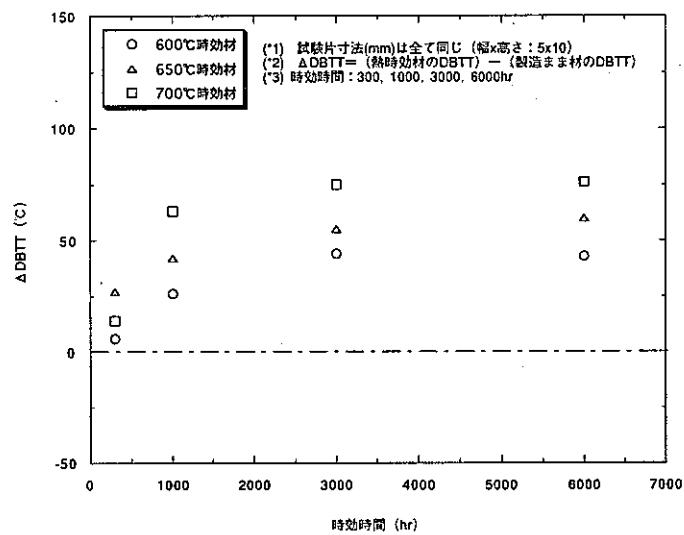
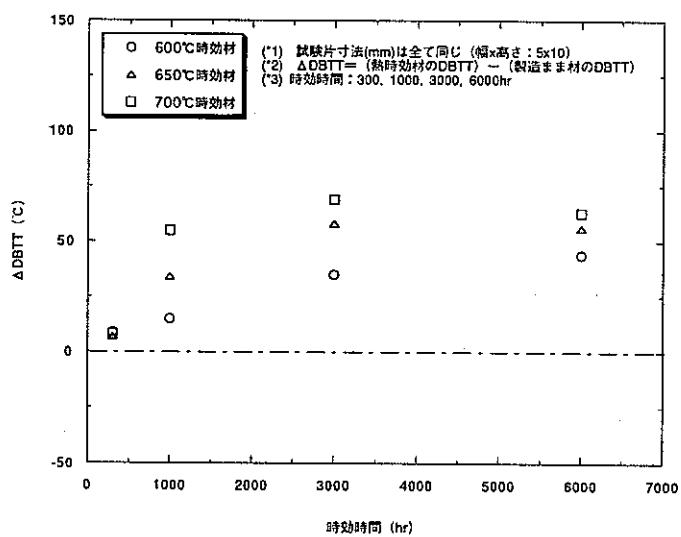
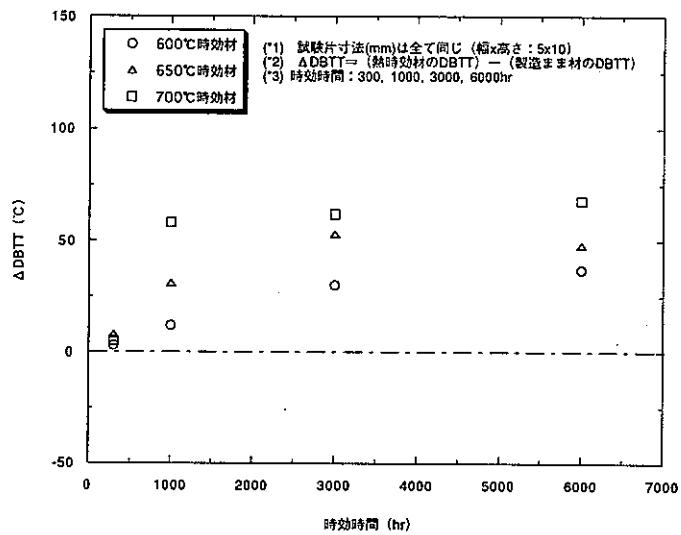


図 4-15.4 ΔUSE の熱時効時間依存性
(61FSF板材 : 1080°C × 1hr + 750°C × 10hr)





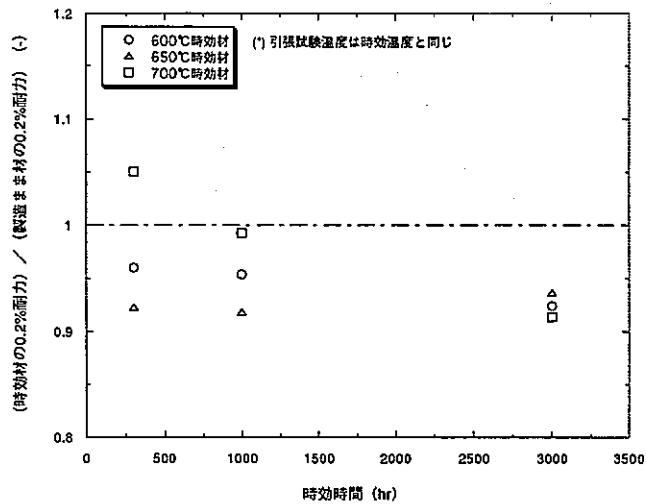


図 4-17.1 0.2%耐力に対する熱時効効果
(61FS板材 : 1050°C×1hr+800°C×1hr)

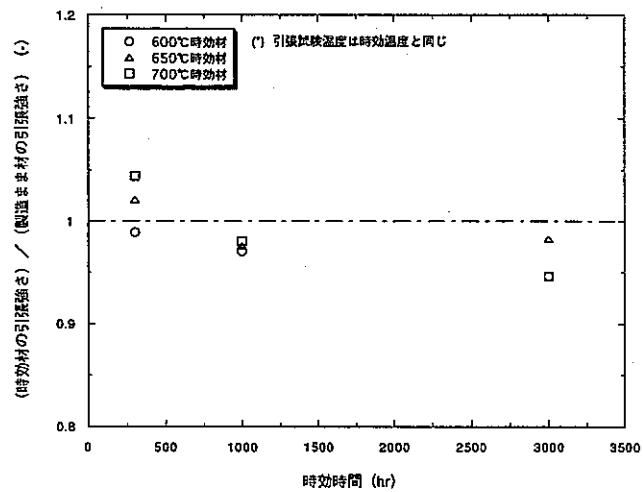


図 4-17.2 引張強さに対する熱時効効果
(61FS板材 : 1050°C×1hr+800°C×1hr)

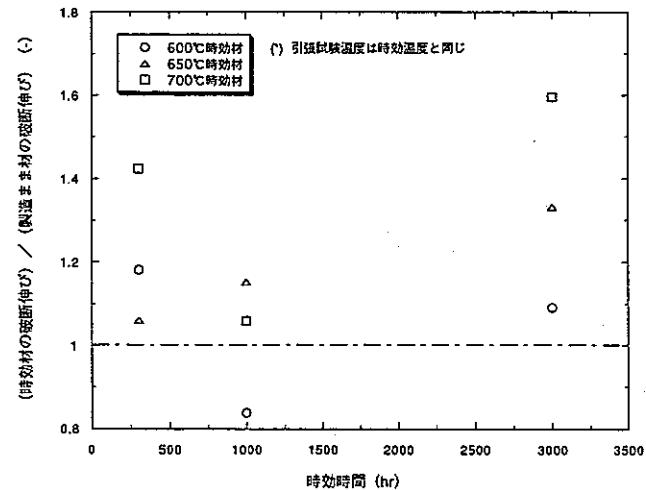


図 4-17.3 破断伸びに対する熱時効効果
(61FS板材 : 1050°C×1hr+800°C×1hr)

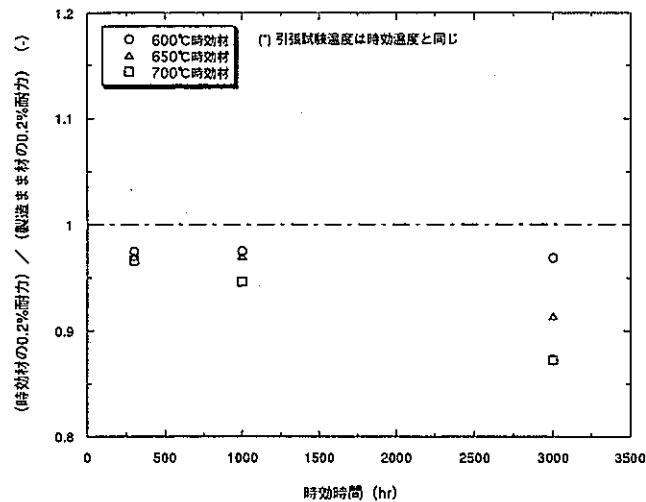


図 4-17.4 0.2%耐力に対する熱時効効果
(引張試験温度は時効温度と同じ)
(61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)

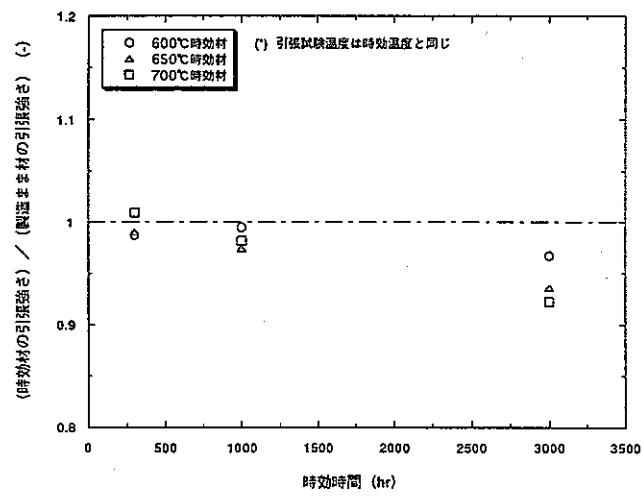


図 4-17.5 引張強さに対する熱時効効果
(61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)

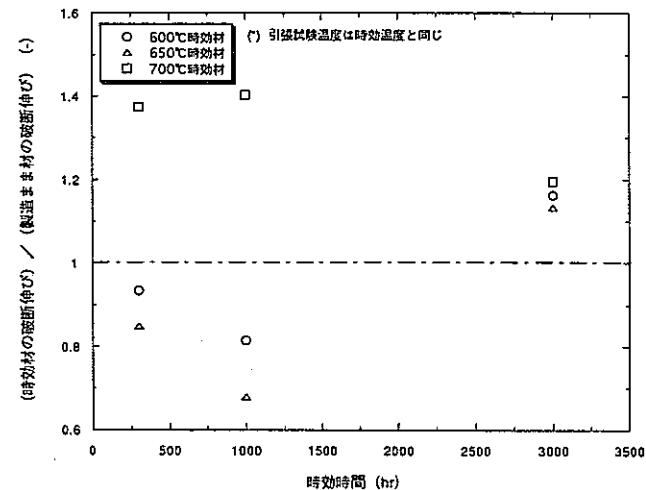


図 4-17.6 破断伸びに対する熱時効効果
(61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)

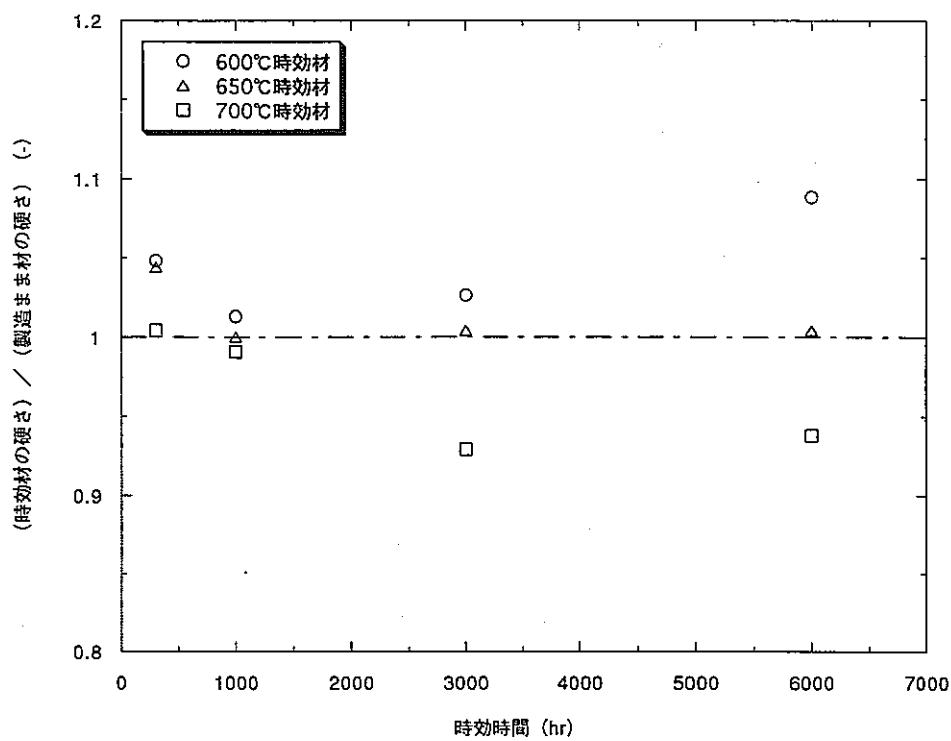


図 4-18.1 硬さに対する熱時効効果
(61FS板材 : $1050^{\circ}\text{C} \times 1\text{hr} + 800^{\circ}\text{C} \times 1\text{hr}$)

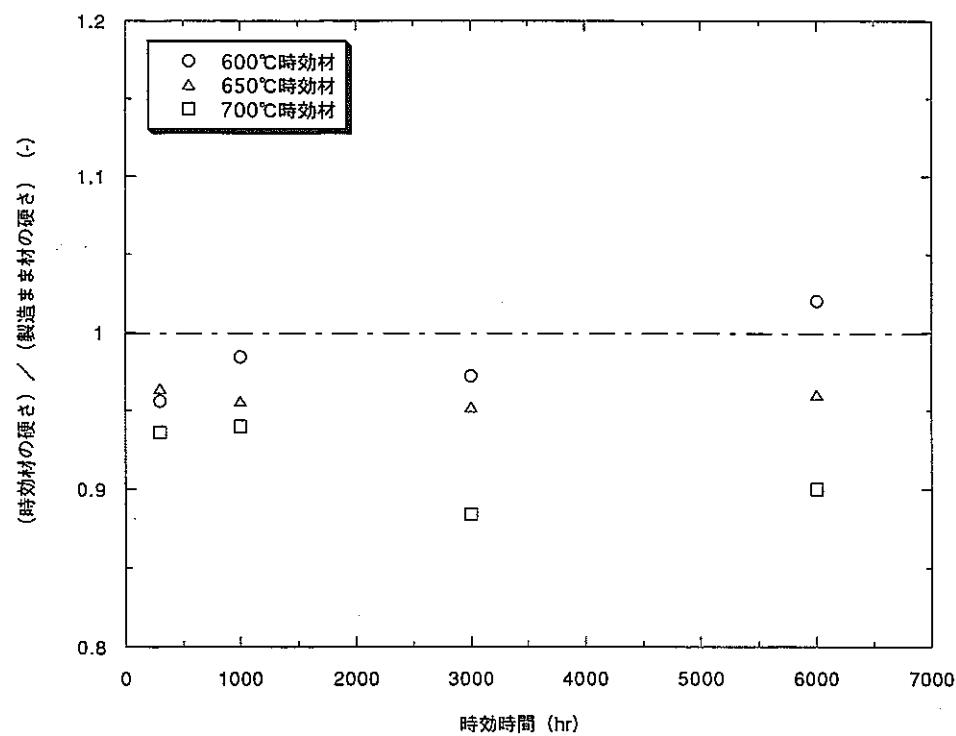


図 4-18.2 硬さに対する熱時効効果
(61FSF板材 : $1050^{\circ}\text{C} \times 1\text{hr} + 750^{\circ}\text{C} \times 10\text{hr}$)

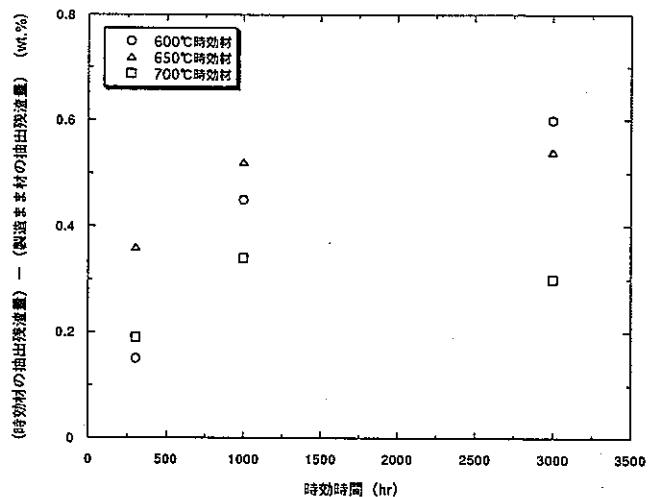


図 4-19.1 時効により析出するFe量の時効条件依存性
(61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)

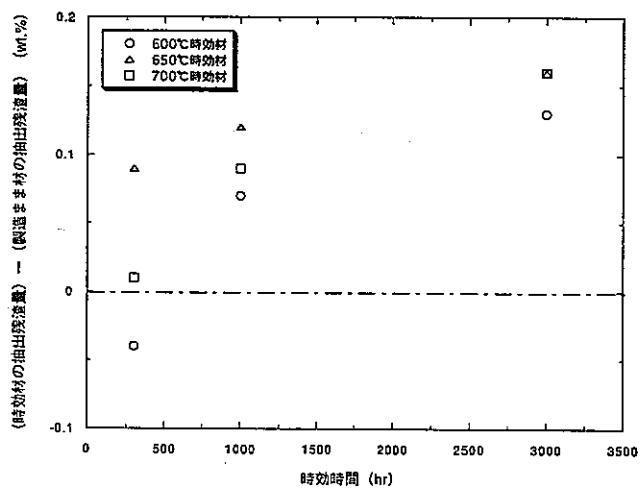


図 4-19.2 時効により析出するCr量の時効条件依存性
(61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)

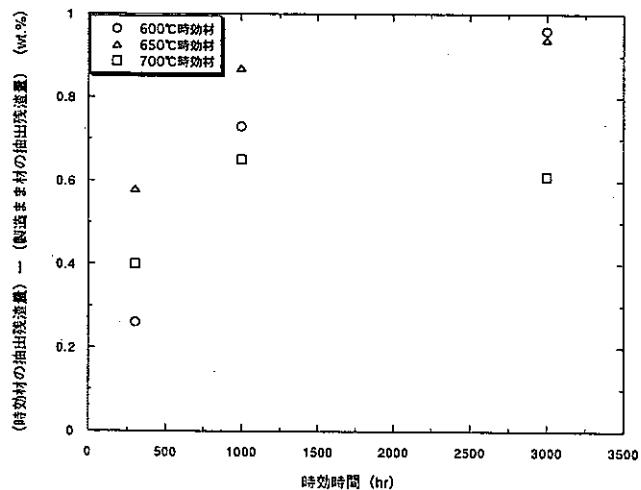


図 4-19.3 時効により析出するW量の時効条件依存性
(61FS板材 : 1050°C × 1hr + 800°C × 1hr)

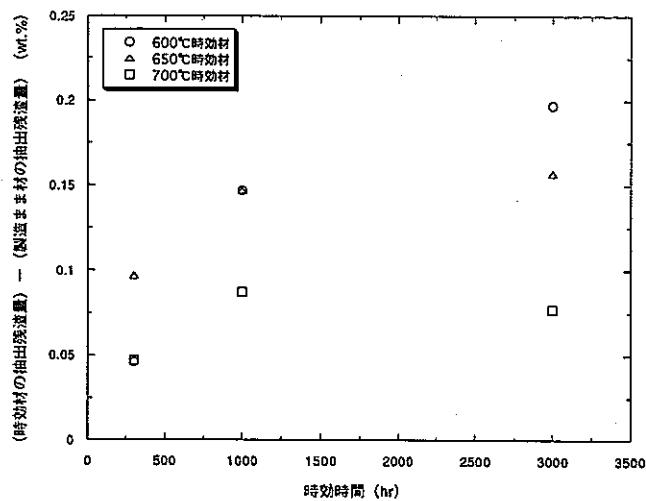


図 4-19.4 時効により析出するMo量の時効条件依存性
(61FS板材 : 1050°C×1hr+800°C×1hr)

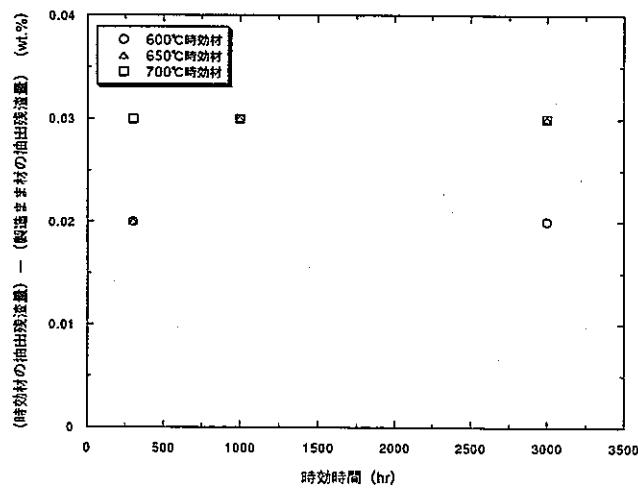


図 4-19.5 時効により析出するV量の時効条件依存性
(61FS板材 : 1050°C×1hr+800°C×1hr)

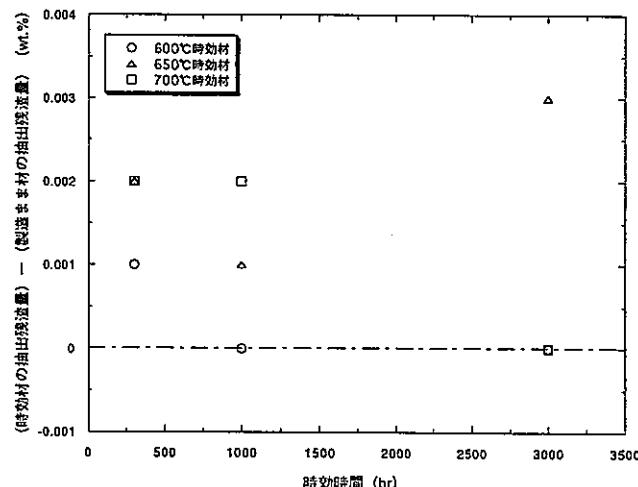


図 4-19.6 時効により析出するNb量の時効条件依存性
(61FS板材 : 1050°C×1hr+800°C×1hr)

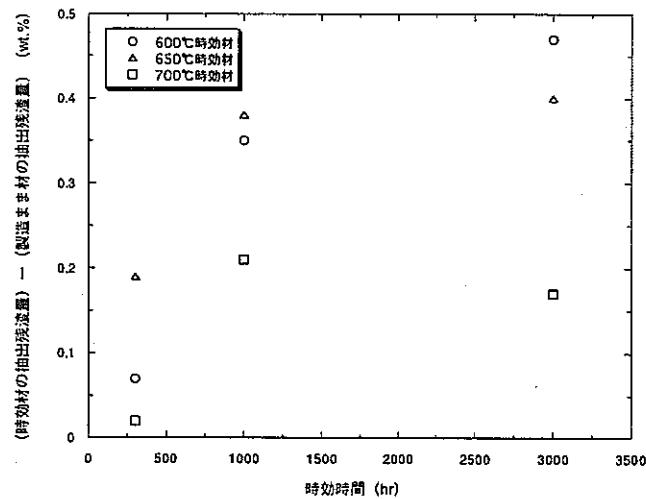


図 4-20.1 時効により析出するFe量の時効条件依存性
(61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)

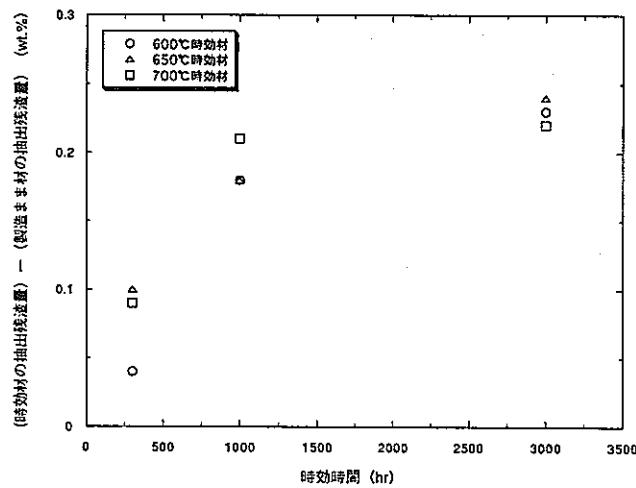


図 4-20.2 時効により析出するCr量の時効条件依存性
(61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)

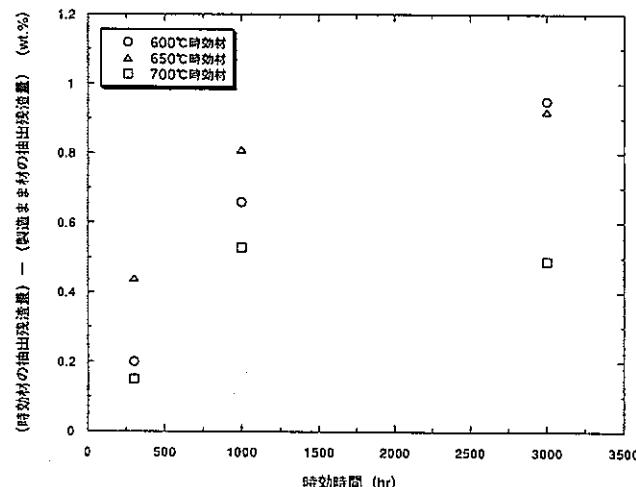


図 4-20.3 時効により析出するW量の時効条件依存性
(61FSF板材 : 1050°C × 1hr + 750°C × 10hr)

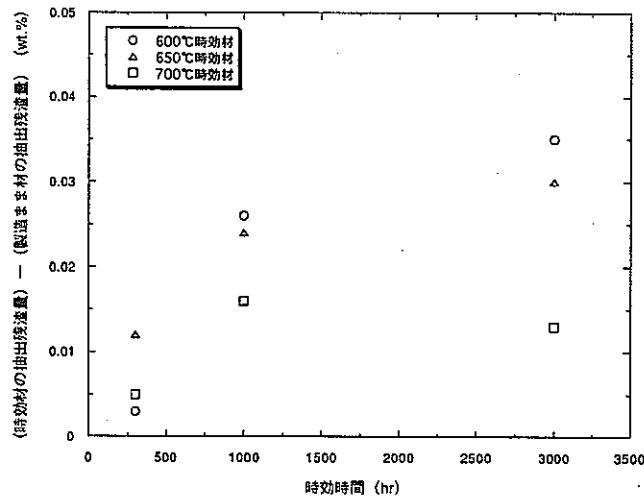


図 4-20.4 時効により析出するMo量の時効条件依存性
(61FSF板材 : 1050°C×1hr+750°C×10hr)

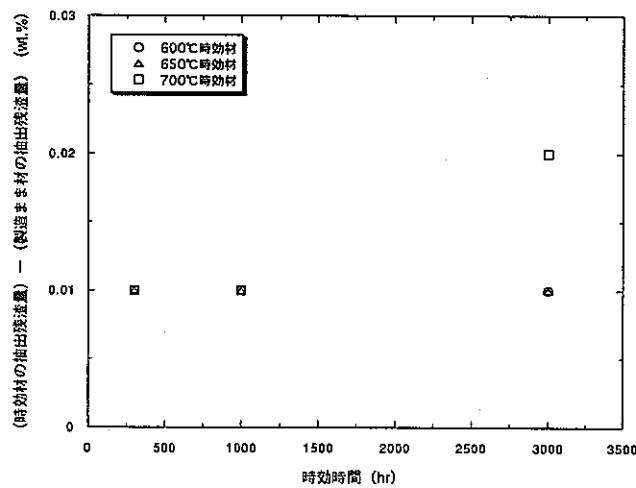


図 4-20.5 時効により析出するV量の時効条件依存性
(61FSF板材 : 1050°C×1hr+750°C×10hr)

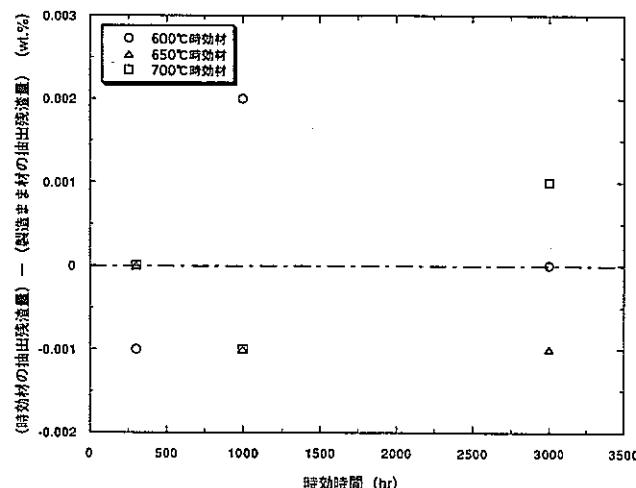


図 4-20.6 時効により析出するNb量の時効条件依存性
(61FSF板材 : 1050°C×1hr+750°C×10hr)

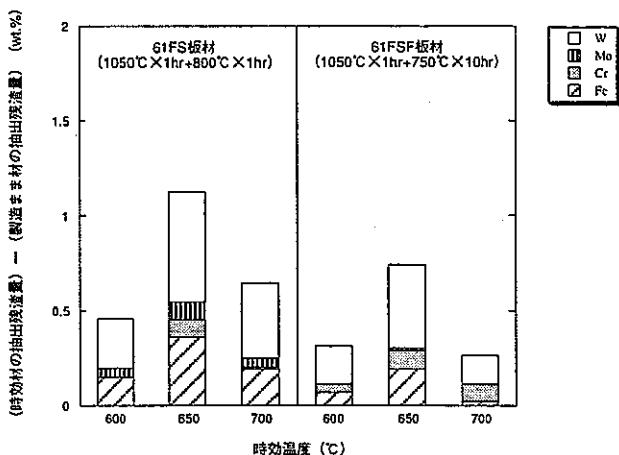


図 4-21.1 熱時効による析出元素量の比較 (300hr時効材の場合)

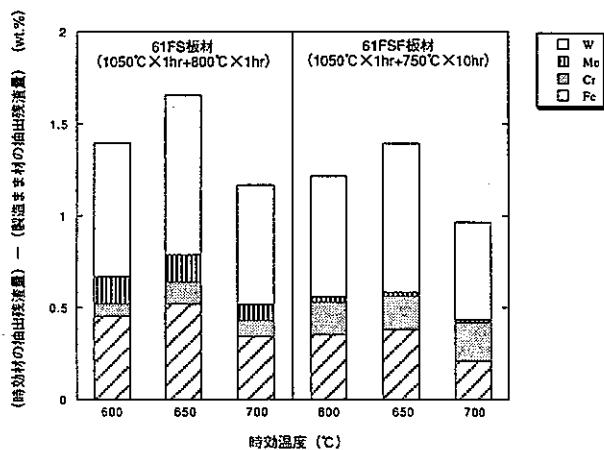


図 4-21.2 热時効による析出元素量の比較 (1000hr時効材の場合)

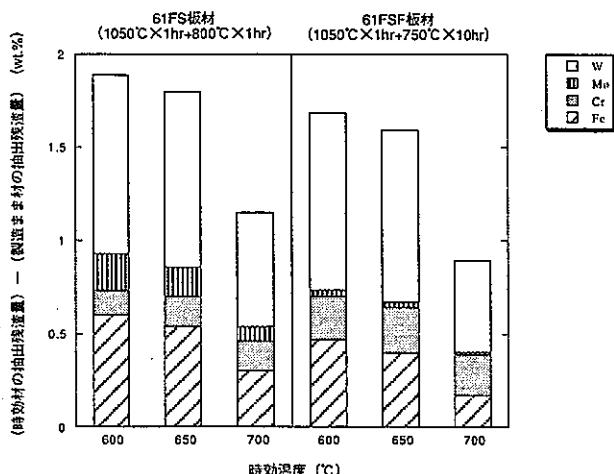
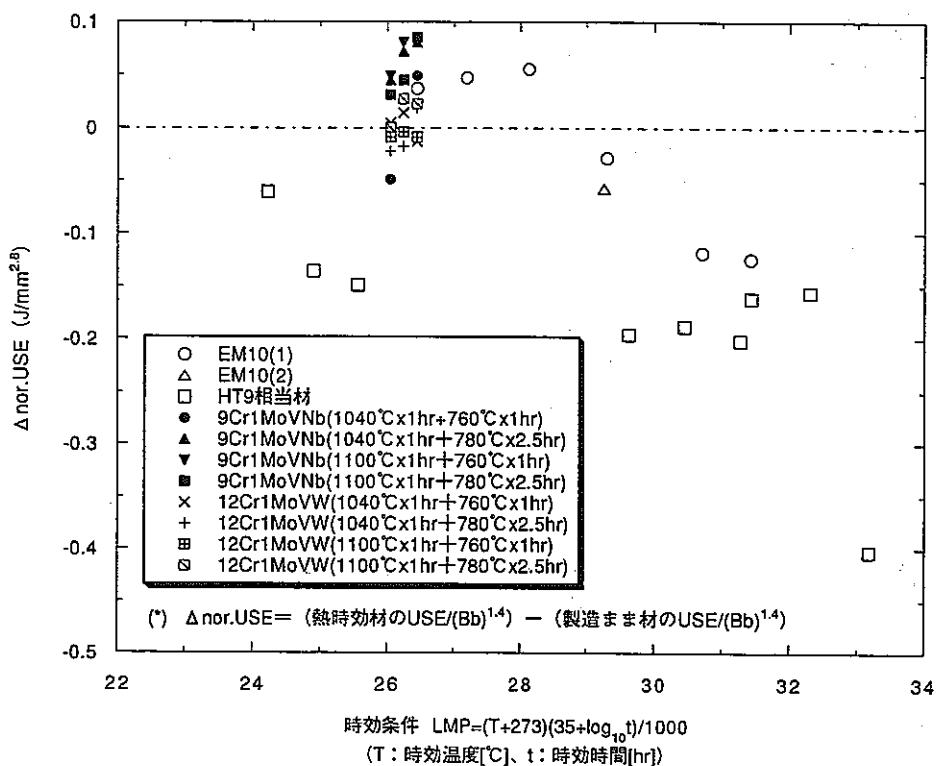
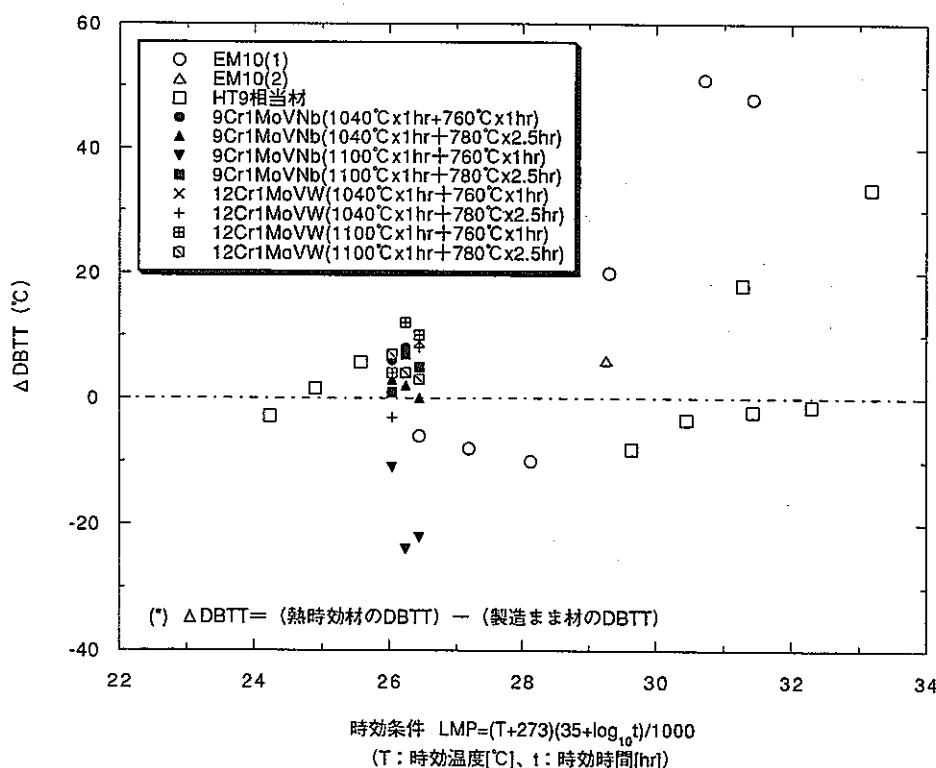


図 4-21.3 热時効による析出元素量の比較 (3000hr時効材の場合)

図 4-22.1 PNC-FMS鋼以外の鋼種における熱時効による $\Delta \text{nor.USE}$ 図 4-22.2 PNC-FMS鋼以外の鋼種における熱時効による ΔDBTT

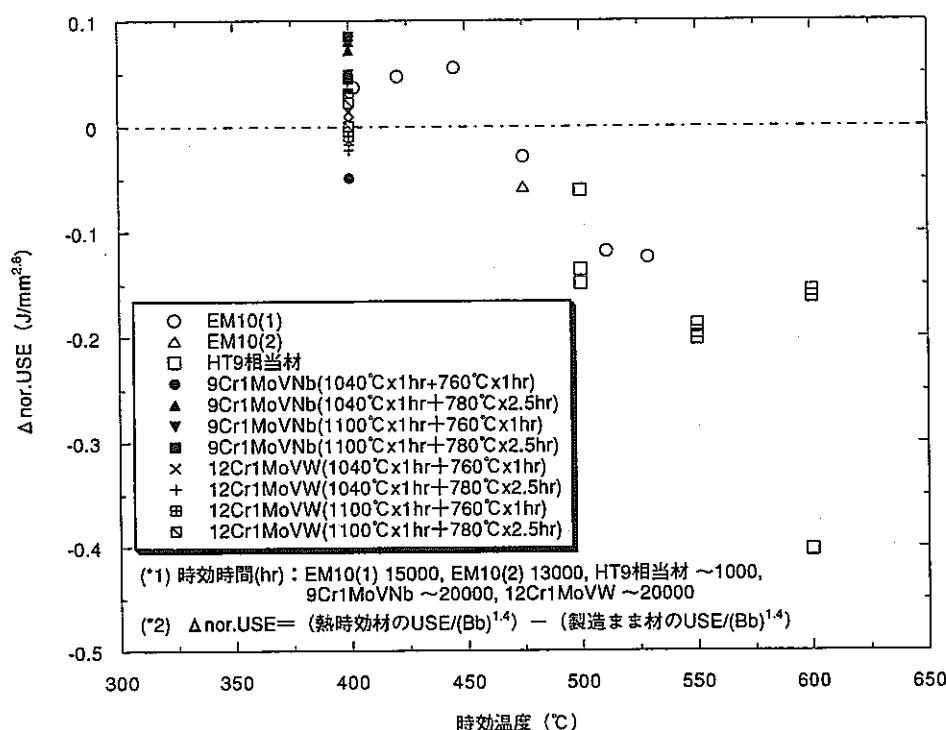


図 4-23.1 他鋼種における熱時効による $\Delta \text{nor.US}$ の時効温度依存性

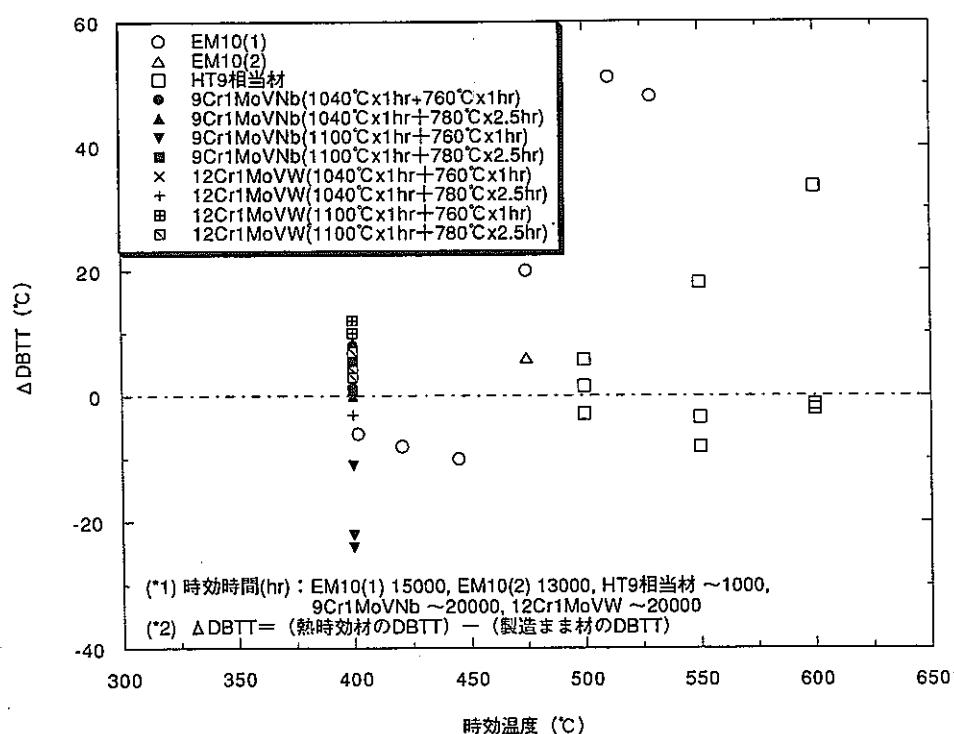


図 4-23.2 他鋼種における熱時効による ΔDBTT の時効温度依存性

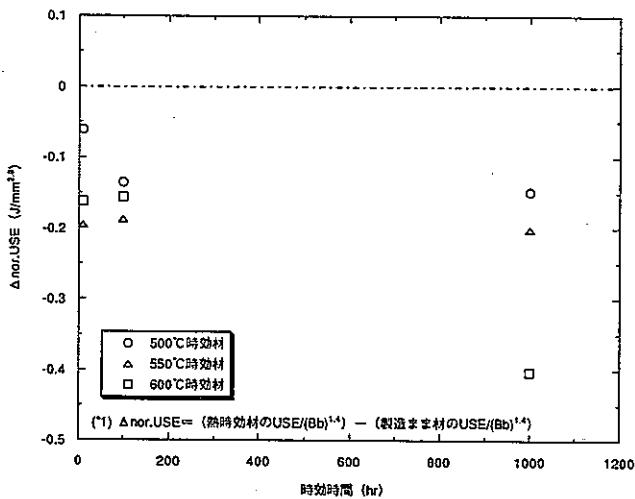


図 4-24.1 热时効による $\Delta\text{nor. USE}$ の时効时间依存性 (HT9相当材)

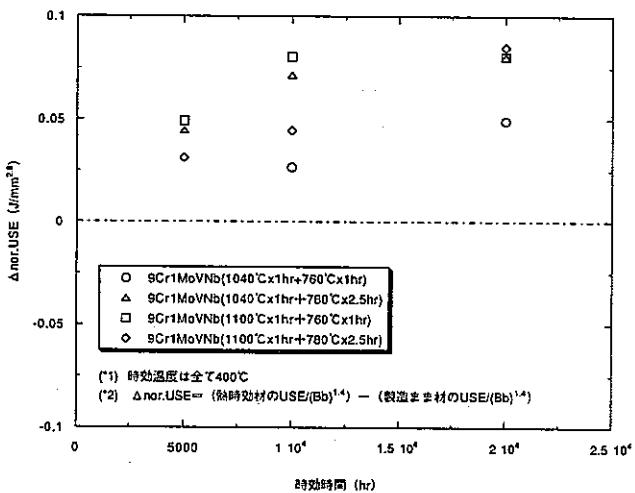


図 4-24.2 热时効による $\Delta\text{nor. USE}$ の时効时间依存性 (9Cr1MoVNb)

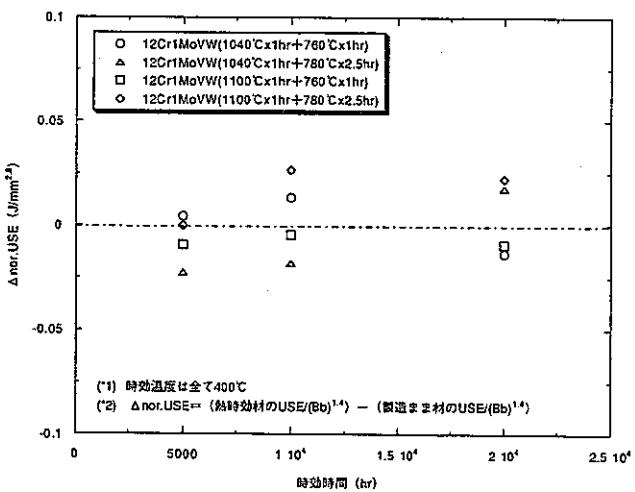


図 4-24.3 热时効による $\Delta\text{nor. USE}$ の时効时间依存性 (12Cr1MoVW)

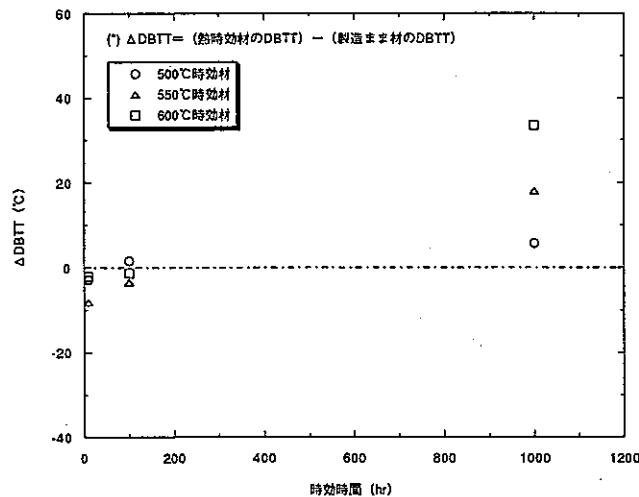


図 4-24.4 热时効による Δ DBTT の时効时间依存性 (HT9相当材)

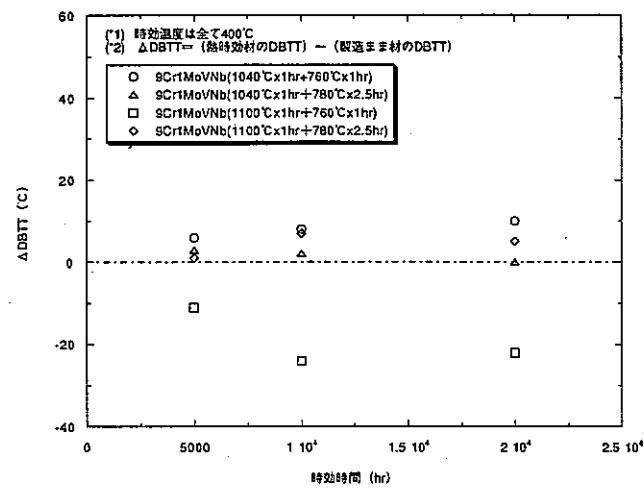


図 4-24.5 热时効による Δ DBTT の时効时间依存性 (9Cr1MoVNb)

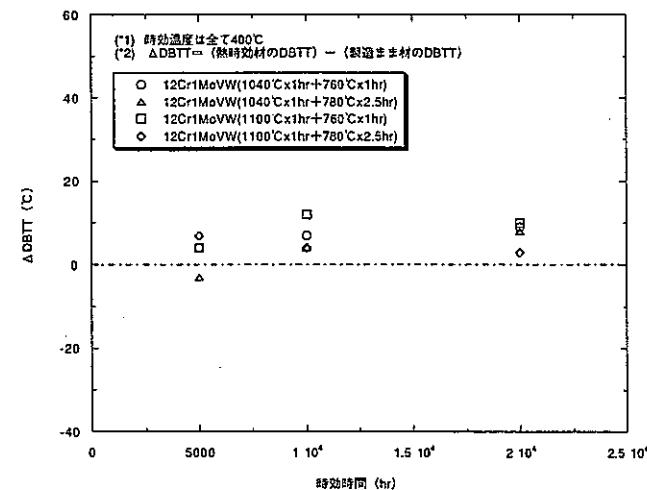


図 4-24.6 热时効による Δ DBTT の时効时间依存性 (12Cr1MoVW)

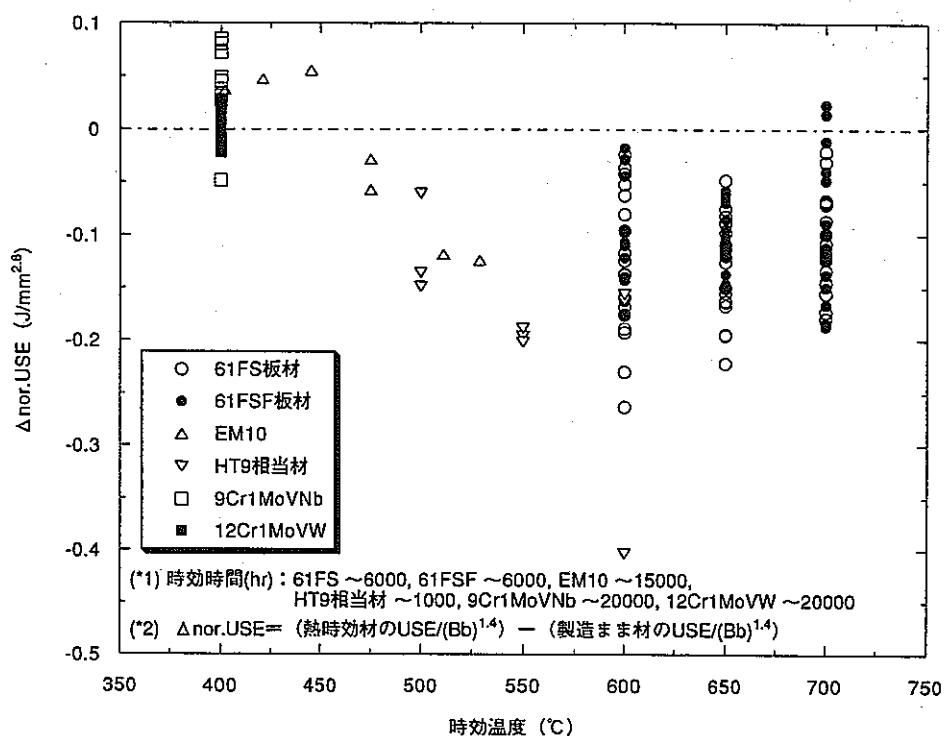


図 4-25.1 PNC-FMS鋼と他鋼種における熱時効による $\Delta\text{nor.USE}$ の時効温度依存性

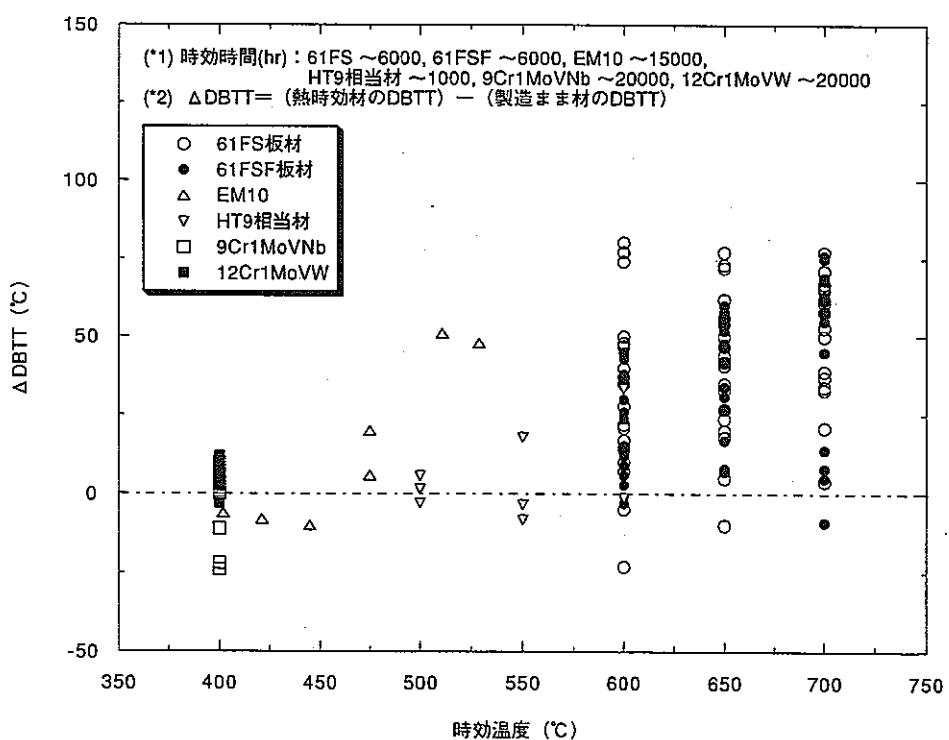


図 4-25.2 PNC-FMS鋼と他鋼種における熱時効による ΔDBTT の時効温度依存性

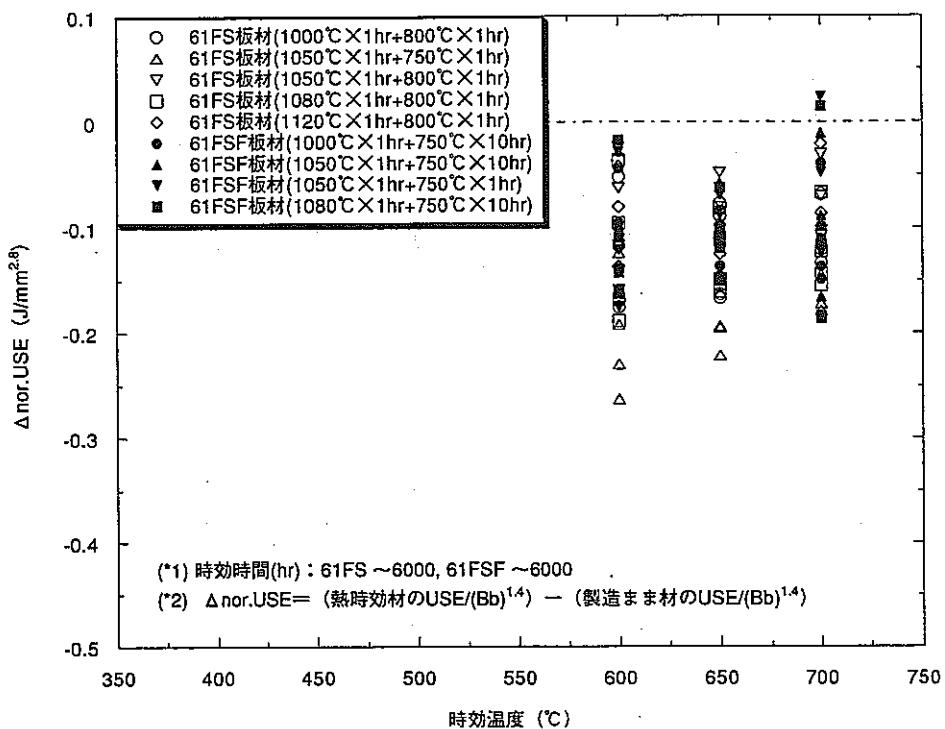


図 4-26.1 61FS板材および61FSF板材の時効による $\Delta \text{nor. USE}$

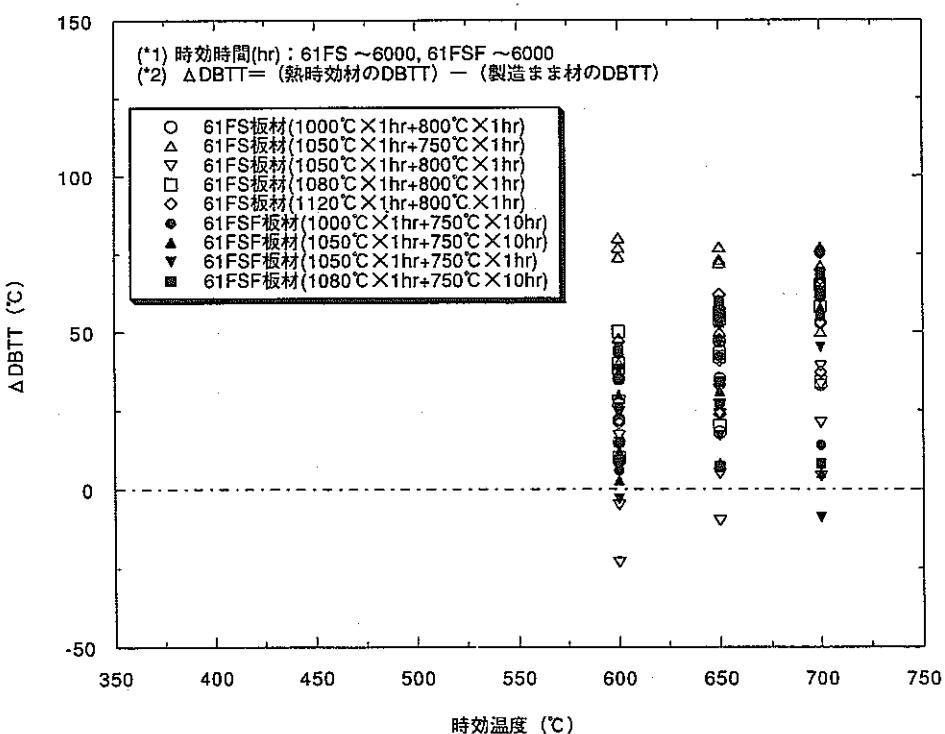


図 4-26.2 61FS板材および61FSF板材の時効による ΔDBTT

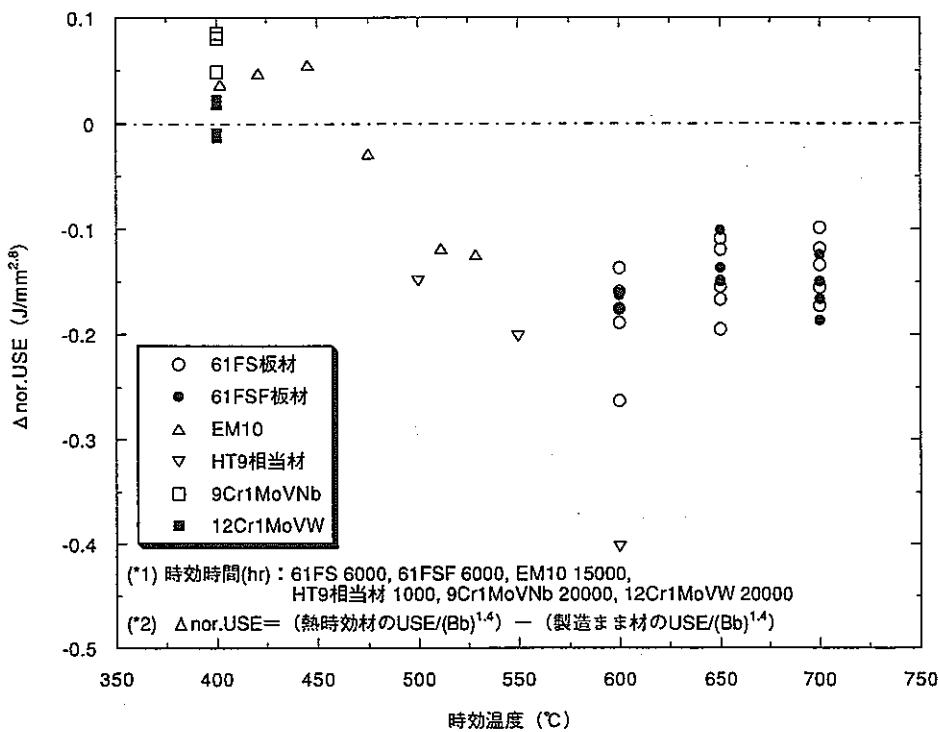


図 4-27.1 PNC-FMS鋼と他鋼種の長時間時効材における時効による $\Delta \text{nor. USE}$ の時効温度依存性

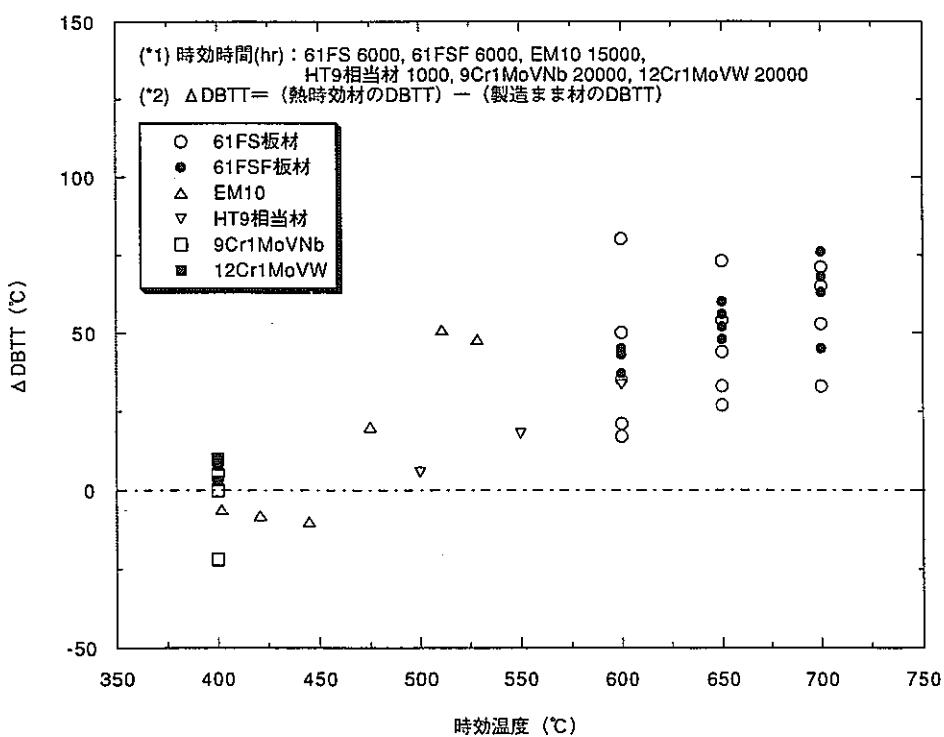
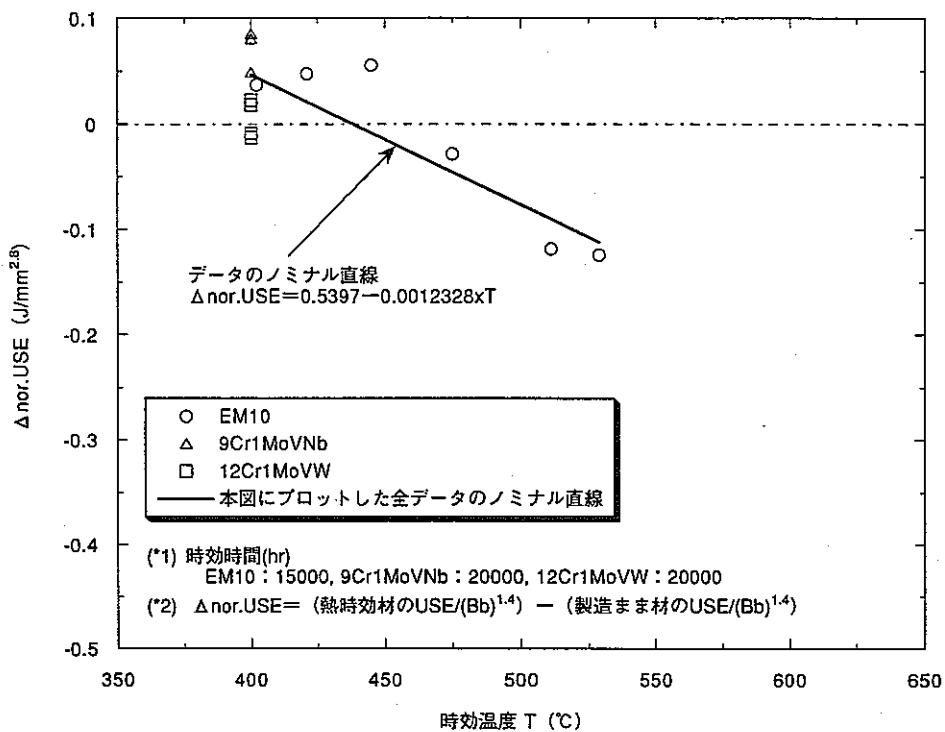
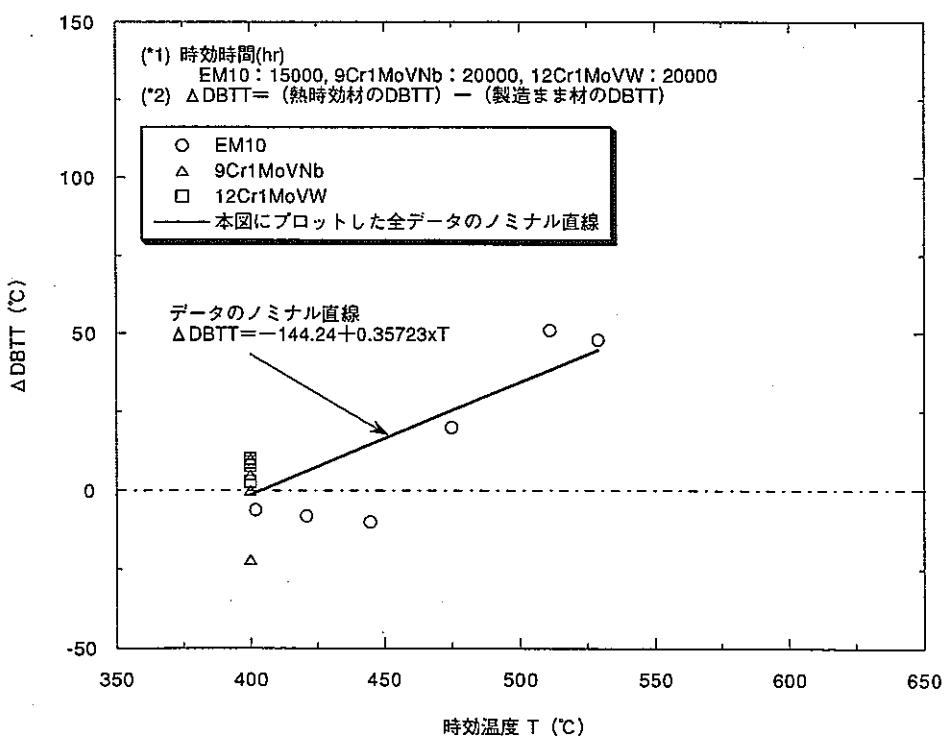


図 4-27.2 PNC-FMS鋼と他鋼種の長時間時効材における時効による ΔDBTT の時効温度依存性

図 4-28.1 時効による $\Delta\text{nor.USE}$ の定式化（ノミナル式の場合）図 4-28.2 時効による ΔDBTT の定式化（ノミナル式の場合）

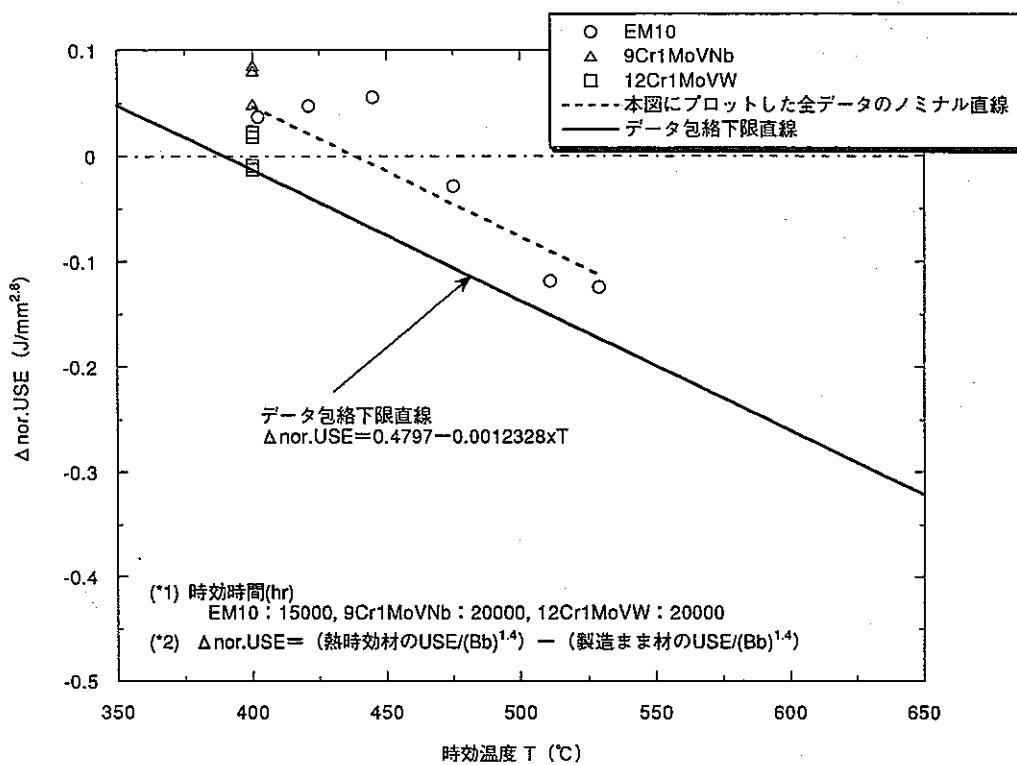


図 4-29.1 時効による Δ nor. USE の定式化（下限式1の場合）

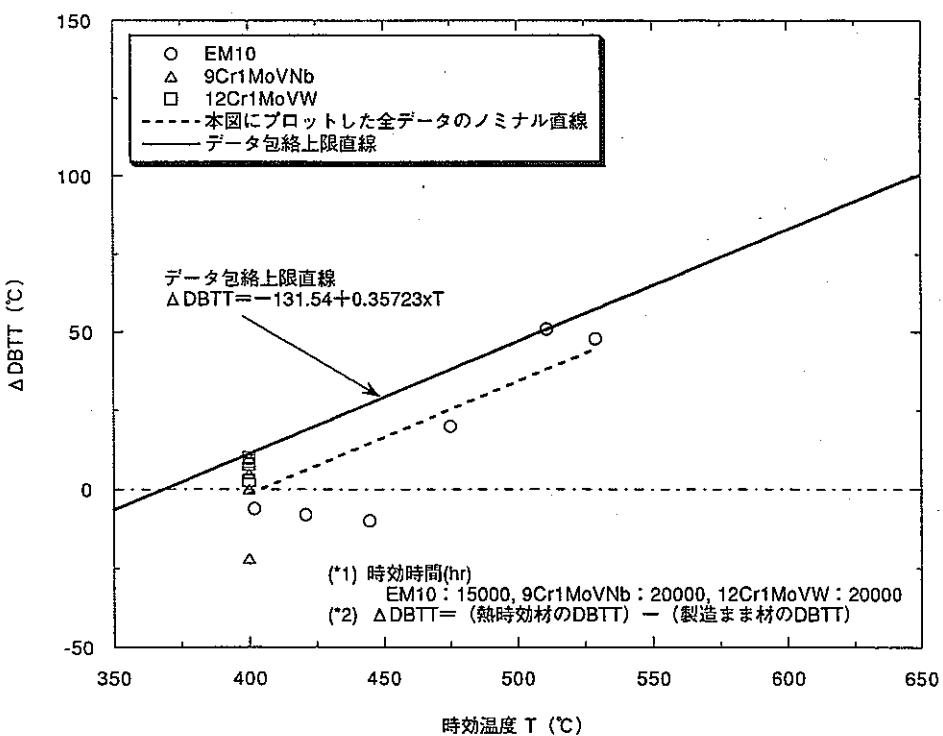


図 4-29.2 時効による Δ DBTT の定式化（上限式の場合）

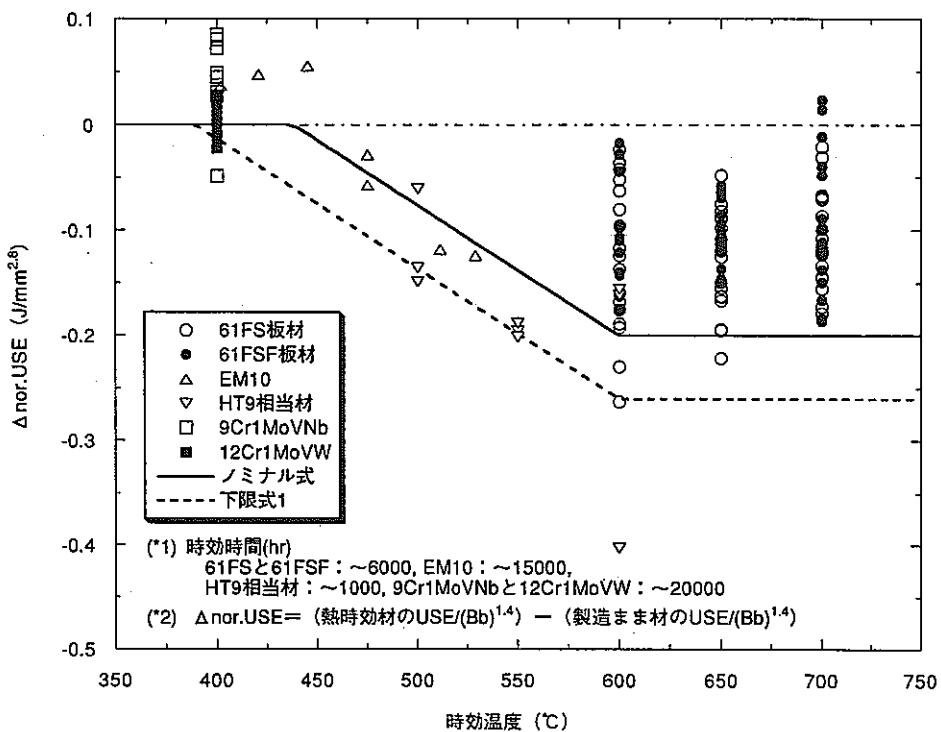


図 4-30.1 热時効による $\Delta\text{nor.USE}$ のノミナル式と下限式1

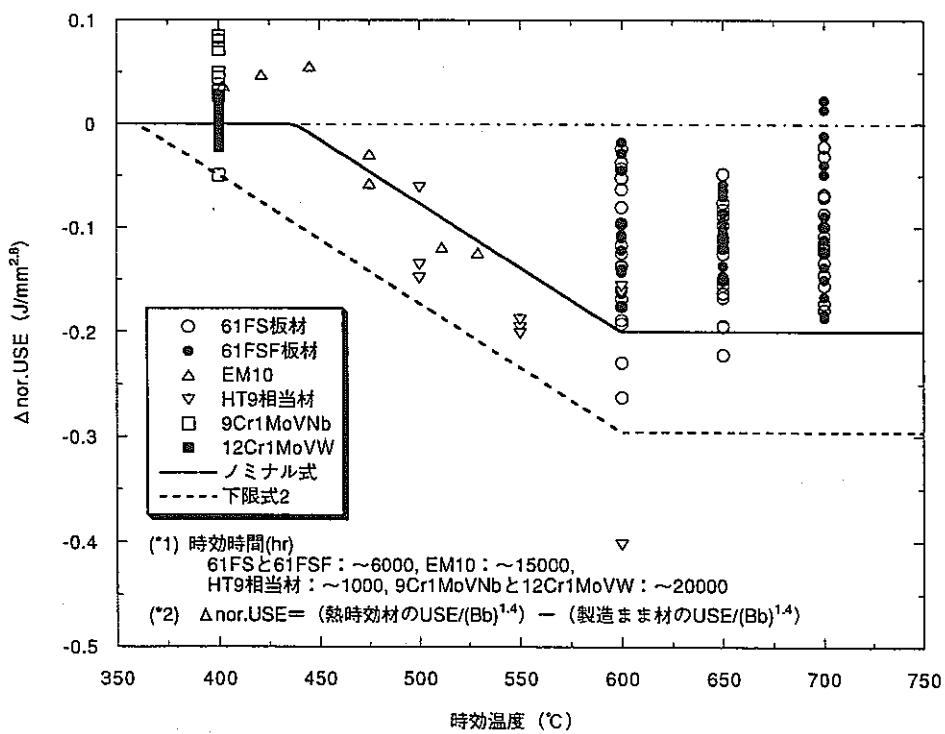


図 4-30.2 热時効による $\Delta\text{nor.USE}$ のノミナル式と下限式2

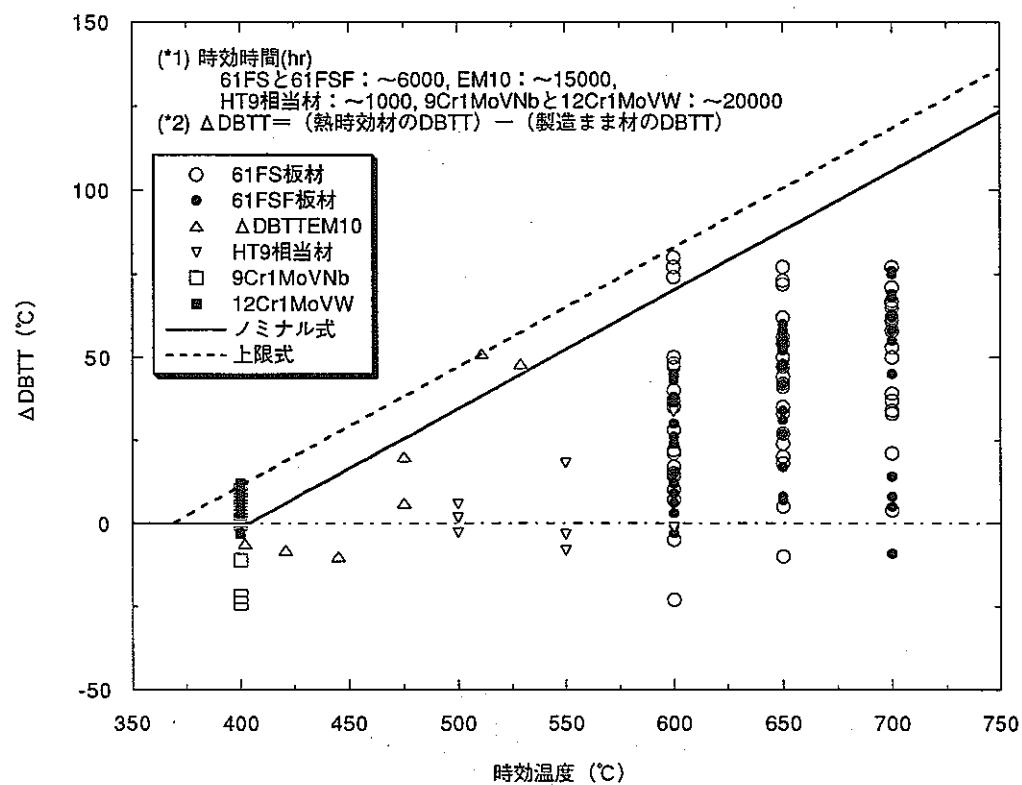


図 4-31 热時効による ΔDBTT のノミナル式と上限式

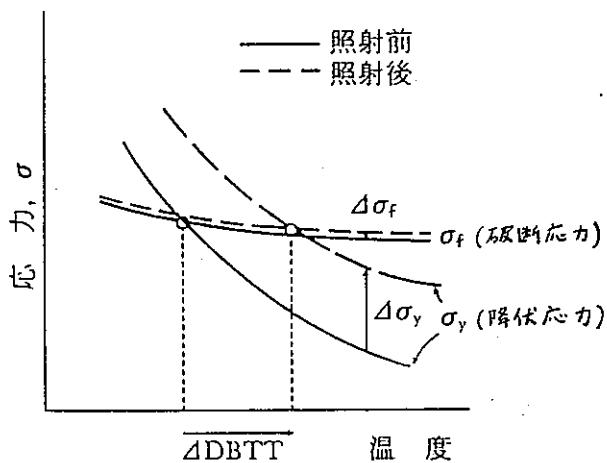


図 5-1 照射による降伏応力の増加に伴う DBTT の上昇

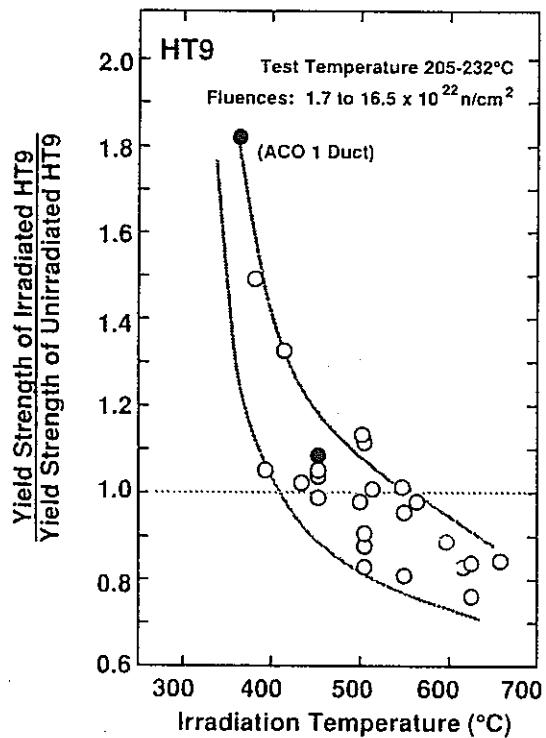


図 5-2 FFTF にて照射された HT9 鋼における
降伏応力の増加の照射温度依存性

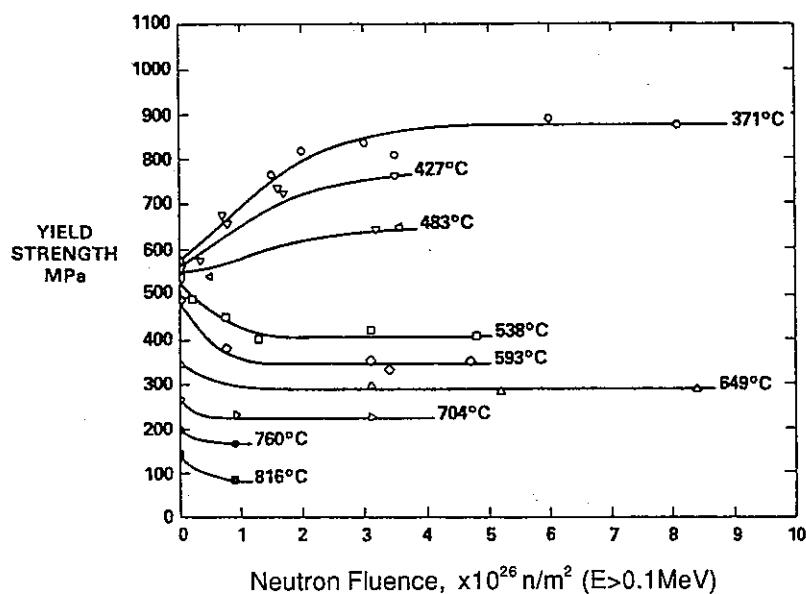


図 5-3 EBR-II にて照射された AISI316 鋼における
降伏応力の変化の照射量依存性および照射温度依存性

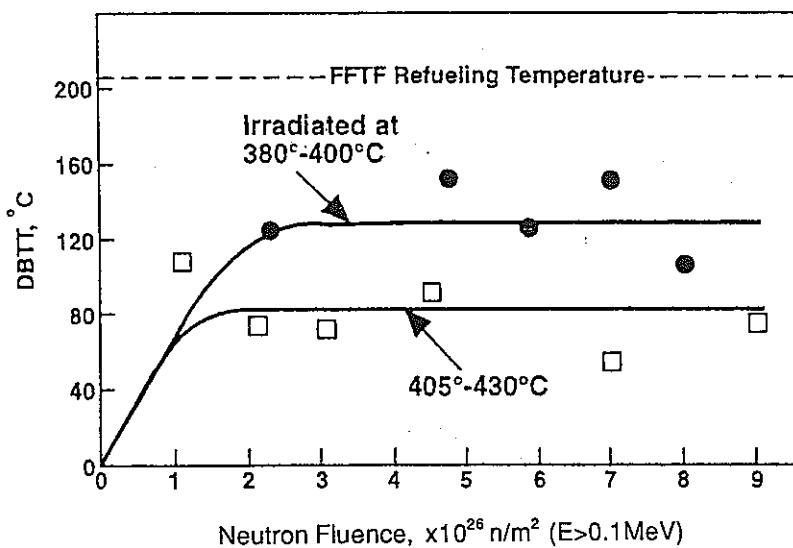
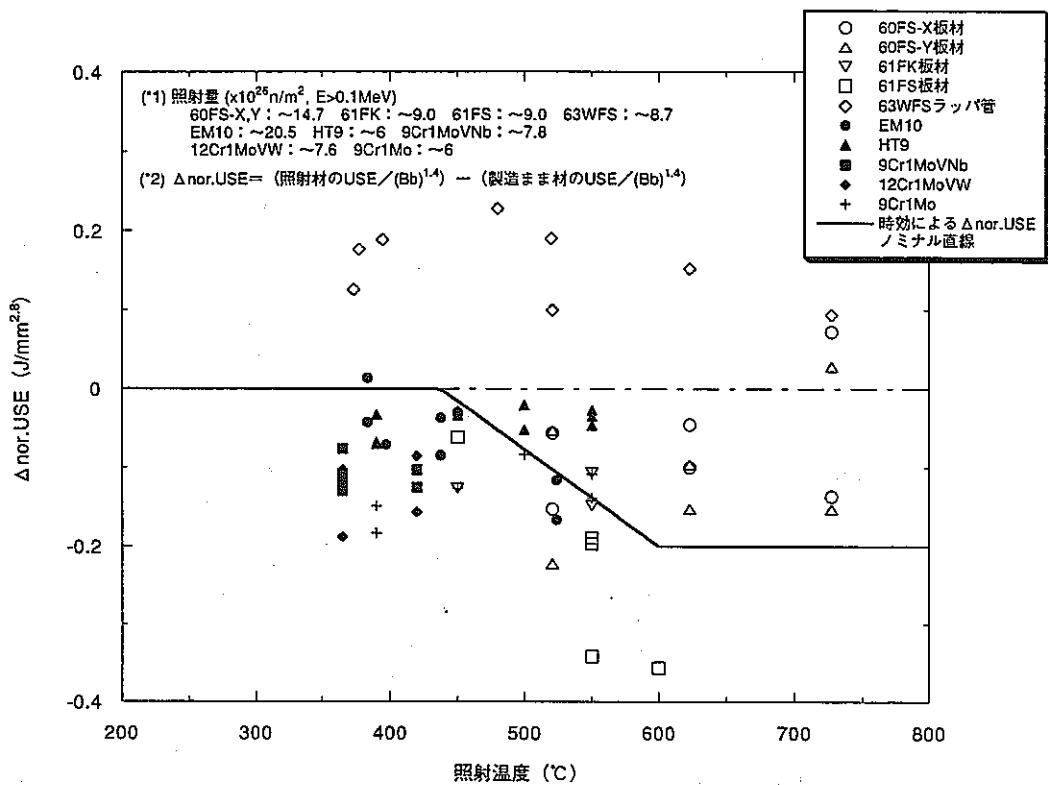
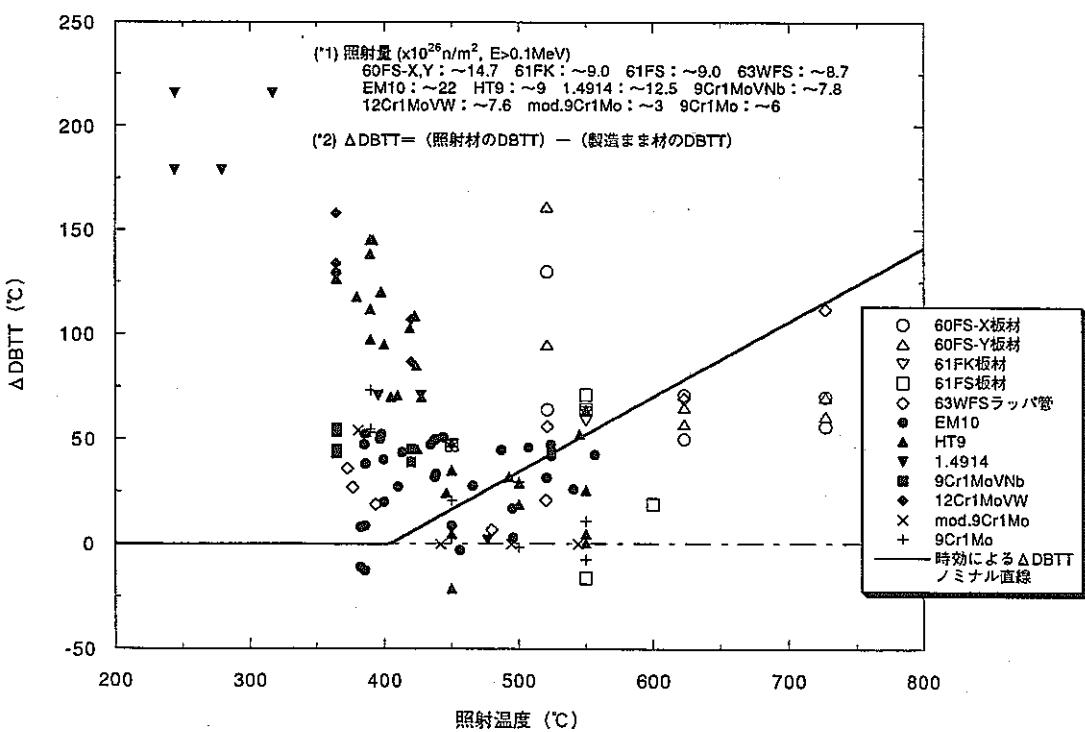


図 5-4 FFTF にて照射された HT9 鋼における
DBTT の増加の照射量依存性および照射温度依存性

図 5-5.1 照射および時效による $\Delta \text{nor.USE}$ の照射温度依存性
(PNC-FMS鋼および他鋼種のデータ)図 5-5.2 照射および時效による ΔDBTT の照射温度依存性
(PNC-FMS鋼および他鋼種のデータ)

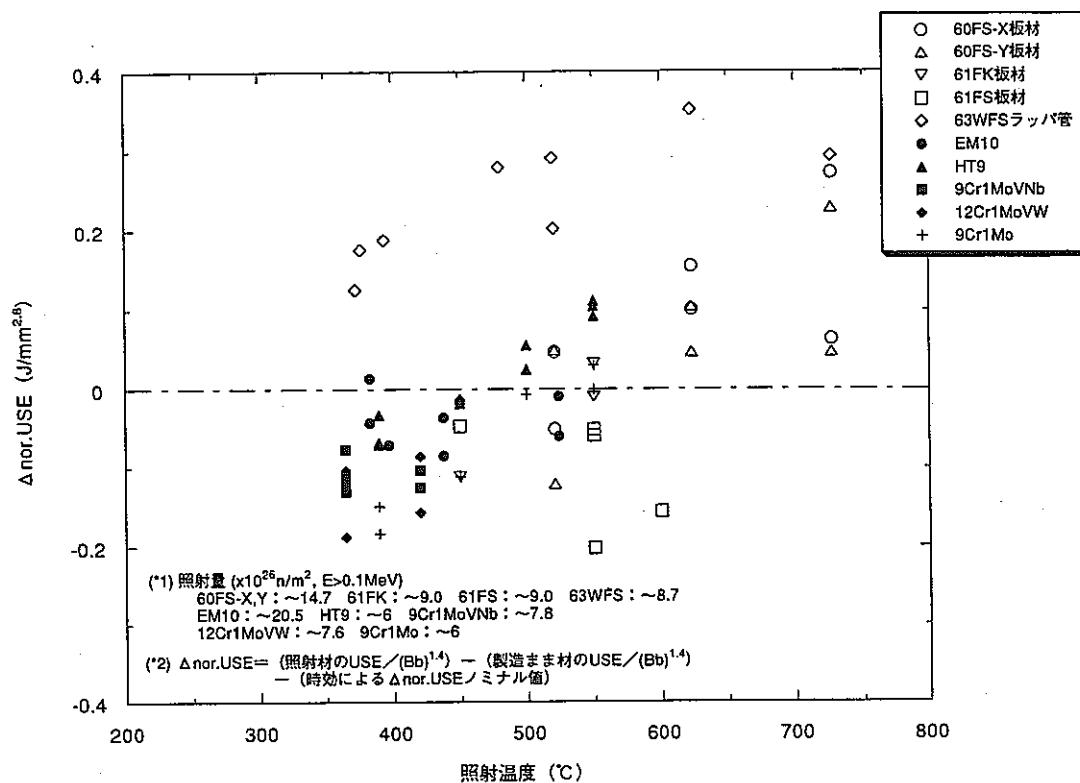


図 5-6.1 照射による $\Delta_{\text{nor}}\text{USE}$ の照射温度依存性
(時効効果ノミナル式を用いて時効の寄与を除いた場合)

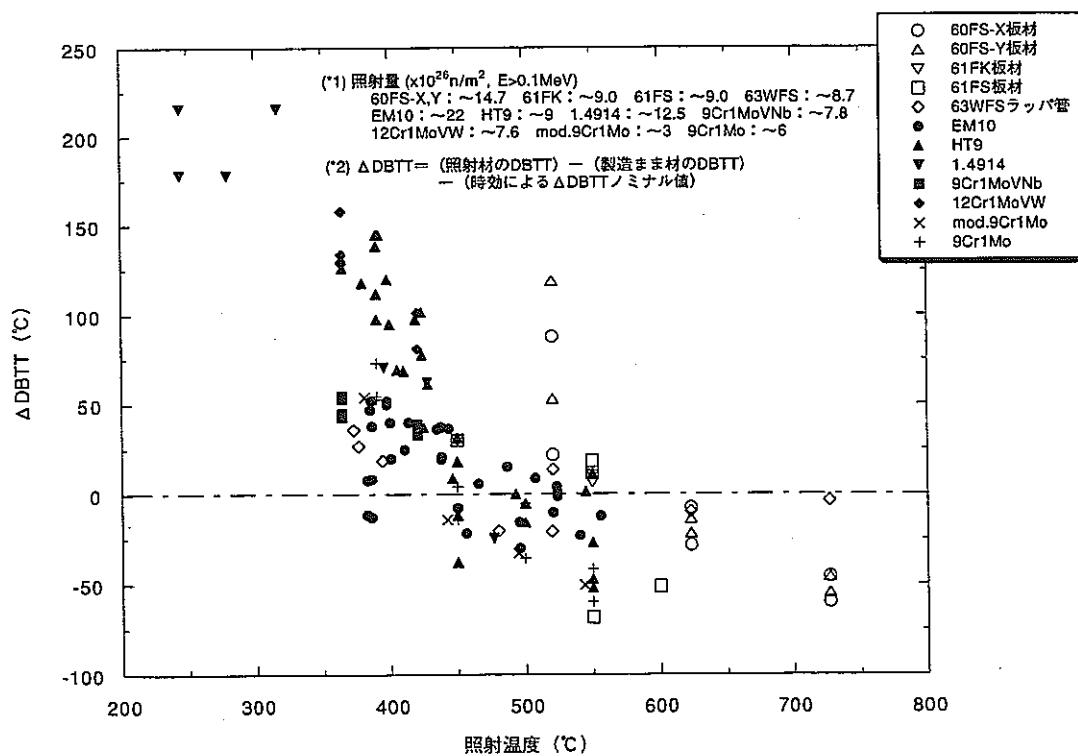


図 5-6.2 照射による Δ_{DBTT} の照射温度依存性
(時効効果ノミナル式を用いて時効の寄与を除いた場合)

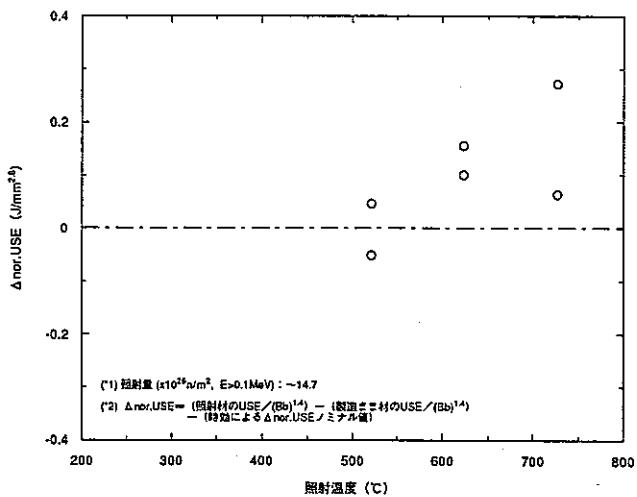


図 5-7.1 照射のみによる $\Delta_{\text{nor}}\text{USE}$ の照射温度依存性 (60FS-X板材の場合)

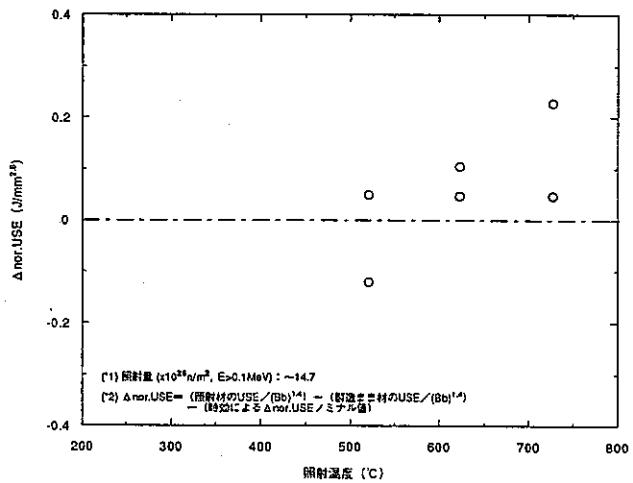


図 5-7.2 照射のみによる $\Delta_{\text{nor}}\text{USE}$ の照射温度依存性 (60FS-Y板材の場合)

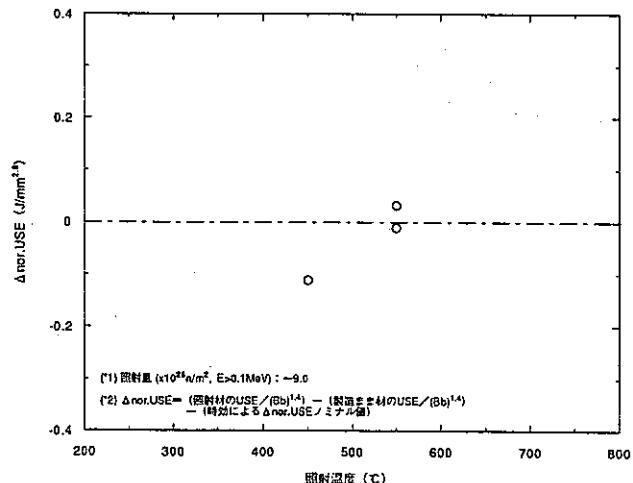


図 5-7.3 照射のみによる $\Delta_{\text{nor}}\text{USE}$ の照射温度依存性 (61FK板材の場合)

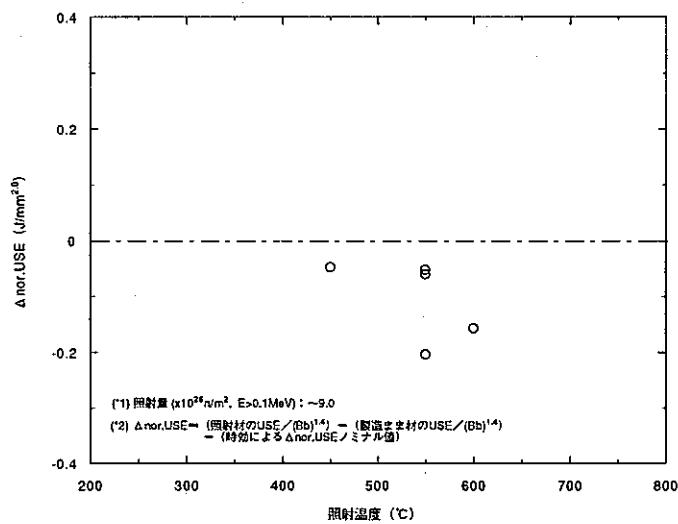


図 5-7.4 照射のみによる $\Delta\text{nor.USE}$ の照射温度依存性 (61FS板材の場合)

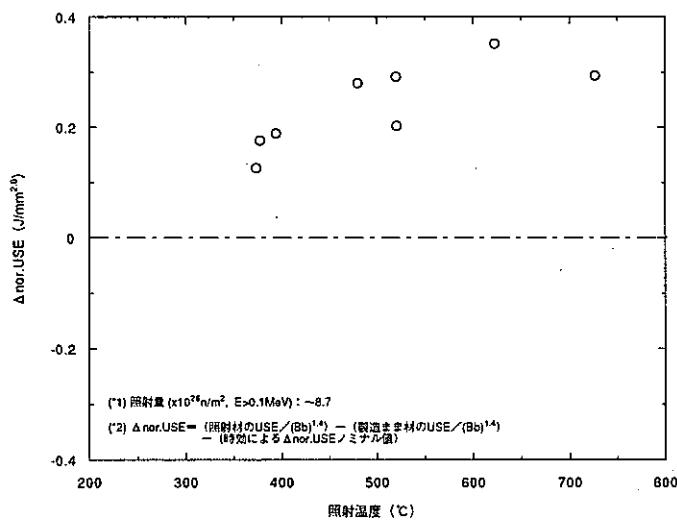


図 5-7.5 照射のみによる $\Delta\text{nor.USE}$ の照射温度依存性 (63WFSラッパ管の場合)

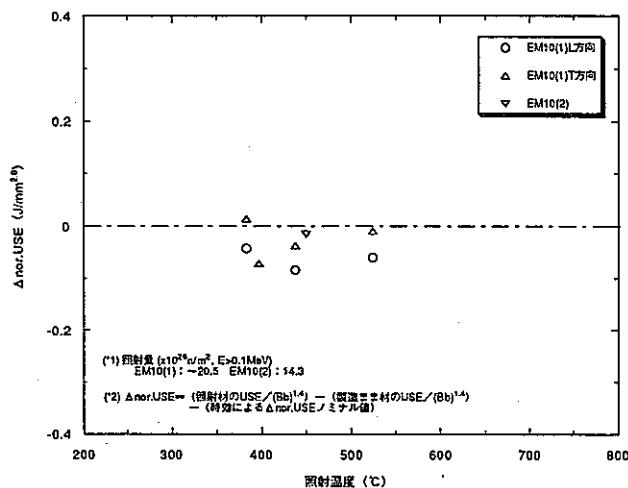


図 5-7.6 照射のみによる $\Delta \text{nor. USE}$ の照射温度依存性 (EM10鋼の場合)

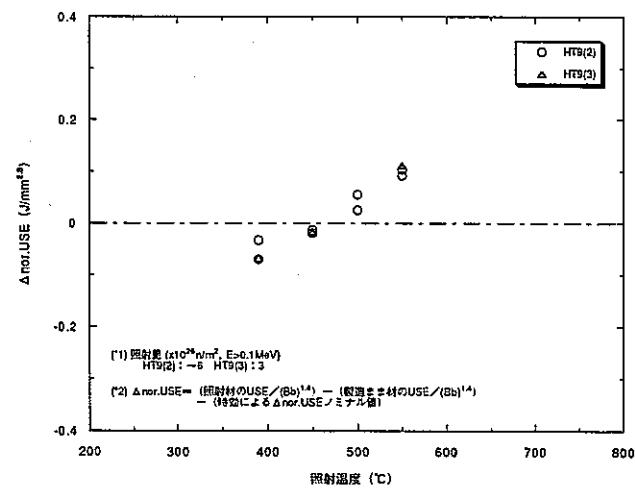
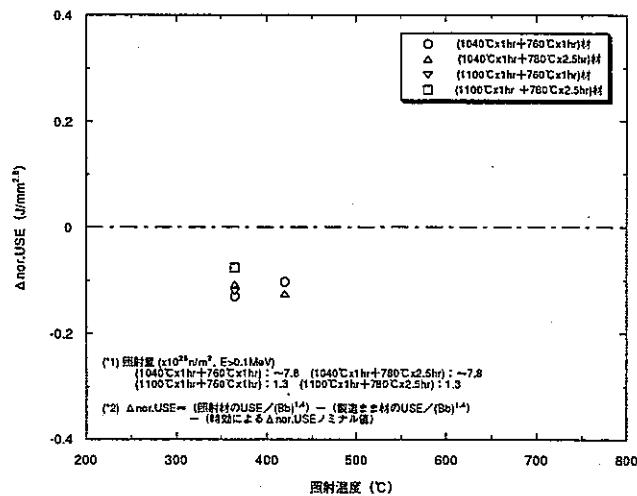
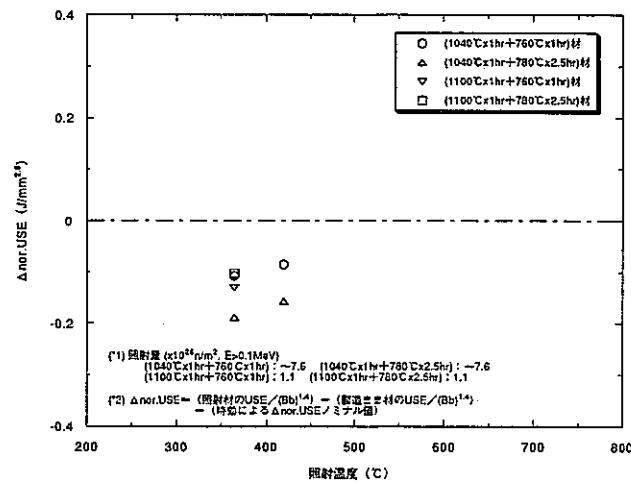
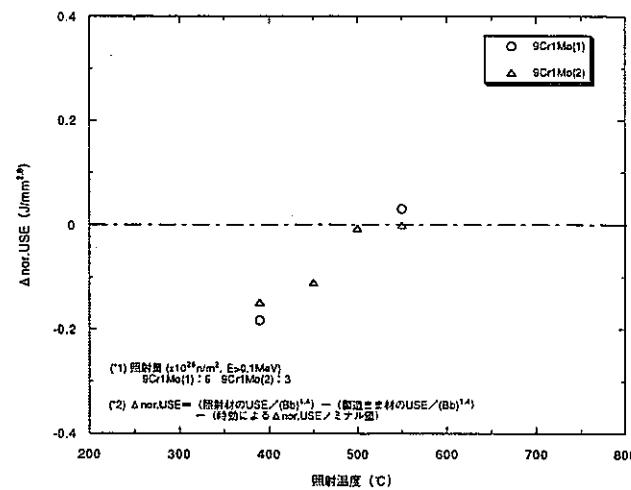


図 5-7.7 照射のみによる $\Delta \text{nor. USE}$ の照射温度依存性 (HT9鋼の場合)

図 5-7.8 照射のみによる $\Delta \text{nor. USE}$ の照射温度依存性 (9Cr1MoVNb鋼の場合)図 5-7.9 照射のみによる $\Delta \text{nor. USE}$ の照射温度依存性 (12Cr1MoVW鋼の場合)図 5-7.10 照射のみによる $\Delta \text{nor. USE}$ の照射温度依存性 (9Cr1Mo鋼の場合)

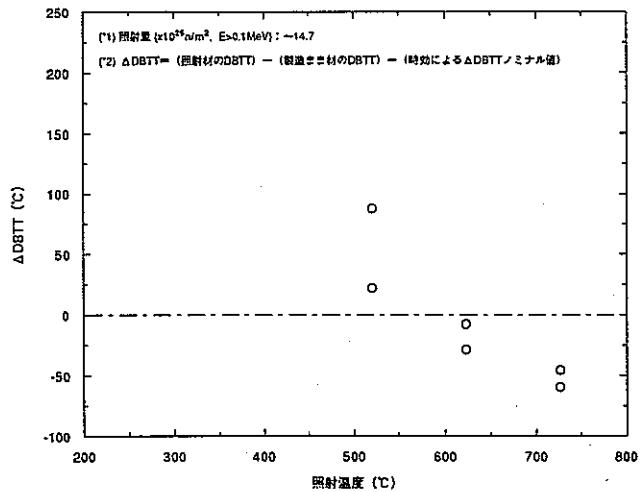


図 5-8.1 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (60FS-X板材の場合)

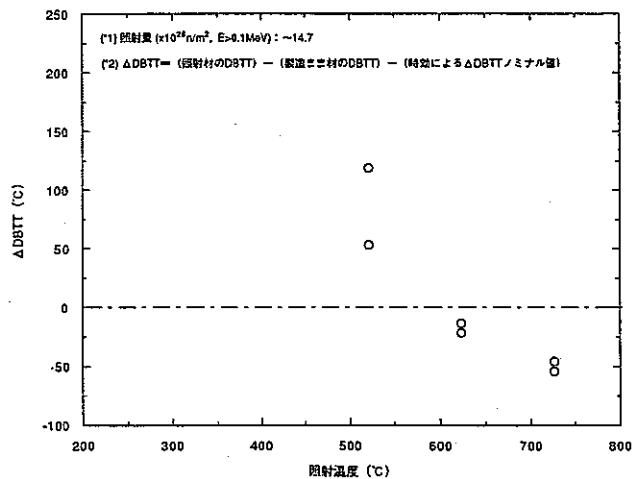


図 5-8.2 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (60FS-Y板材の場合)

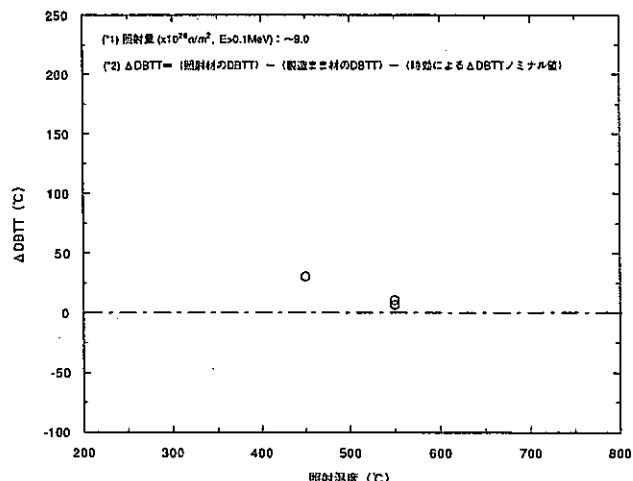


図 5-8.3 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (61FK板材の場合)

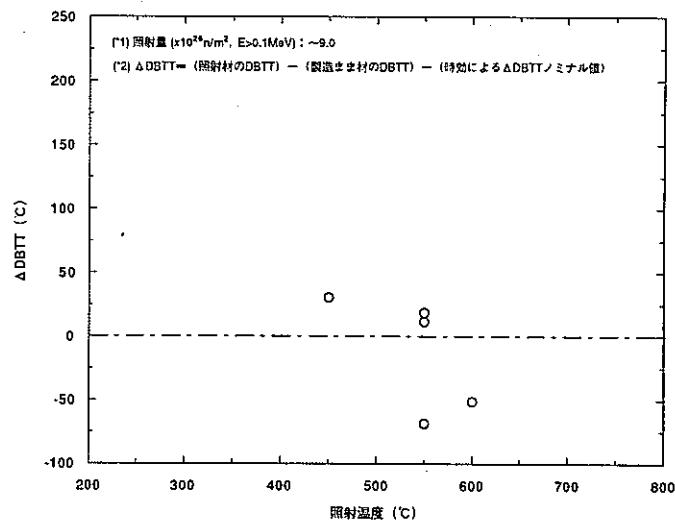


図 5-8.4 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (61FS板材の場合)

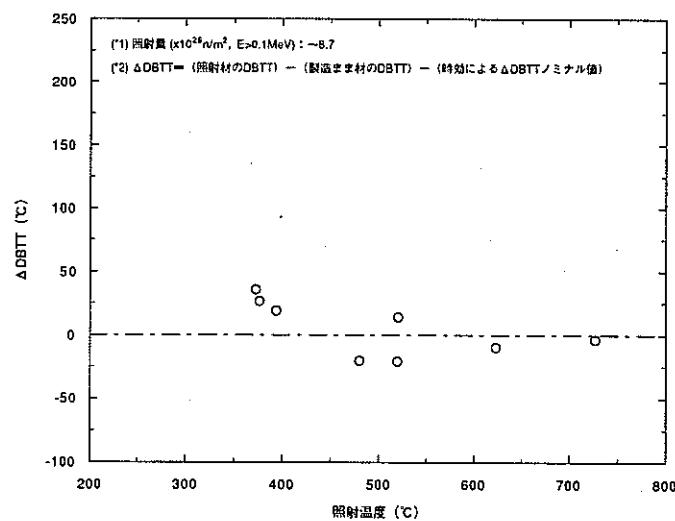


図 5-8.5 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (63WFSラッパ管の場合)

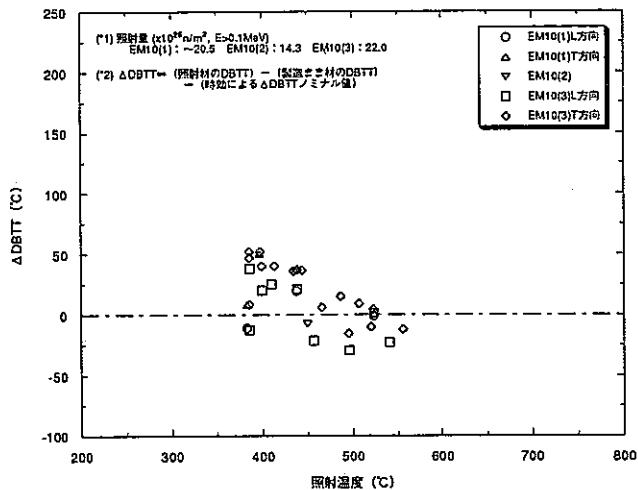


図 5-8.6 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (EM10鋼の場合)

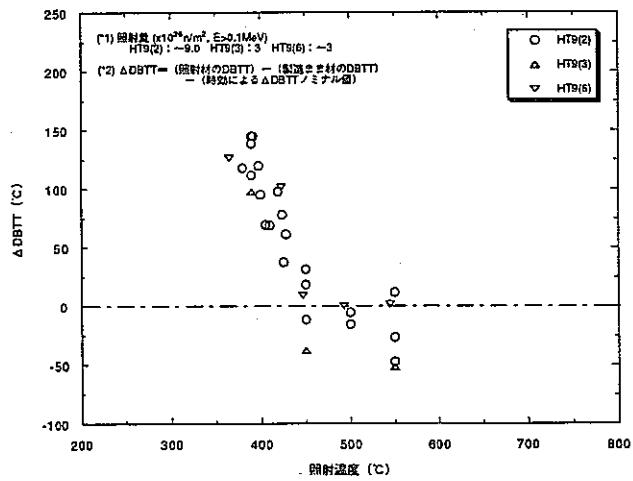


図 5-8.7 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (HT9鋼の場合)

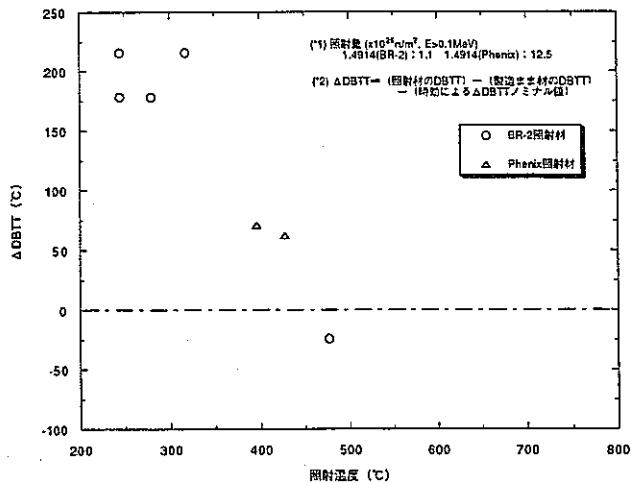


図 5-8.8 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (1.4914鋼の場合)

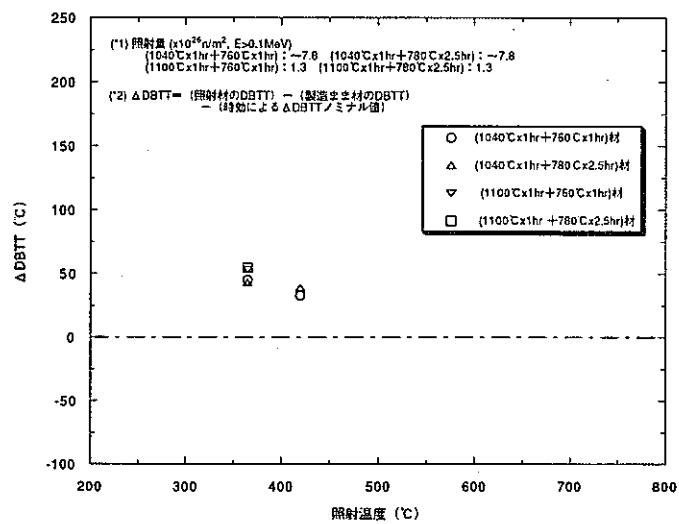


図 5-8.9 照射のみによる Δ DBTTの照射温度依存性 (9Cr1MoVNb鋼の場合)

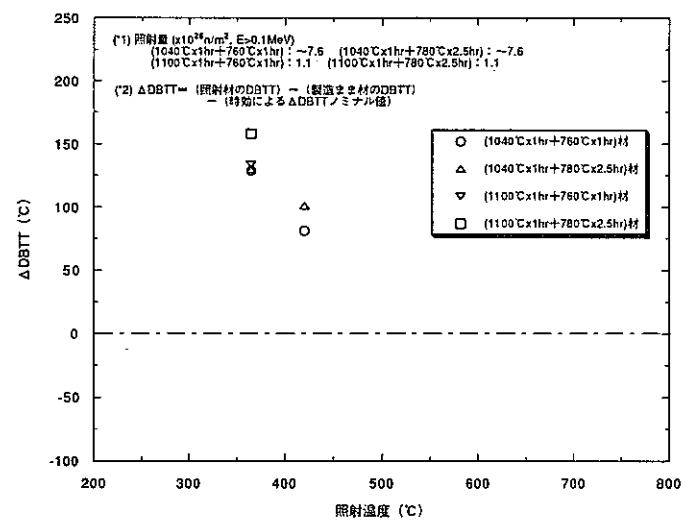


図 5-8.10 照射のみによる Δ DBTTの照射温度依存性 (12Cr1MoVW鋼の場合)

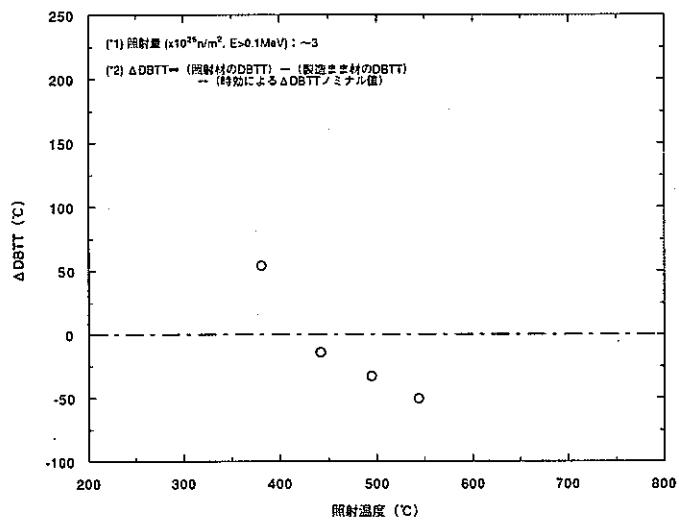


図 5-8.11 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (mod.9Cr1Mo鋼の場合)

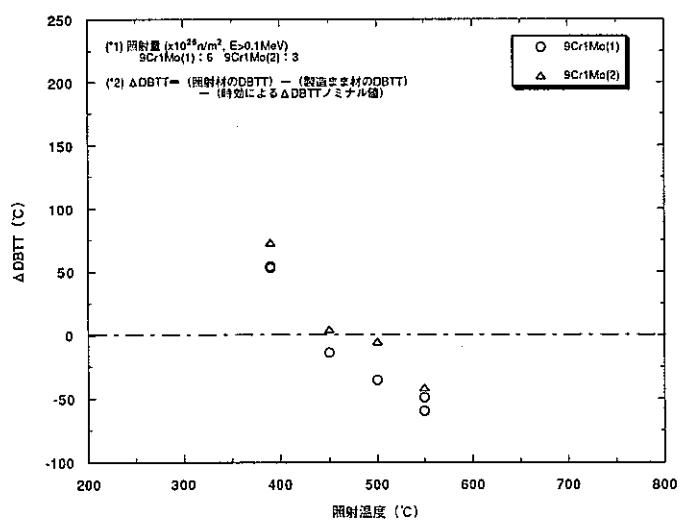
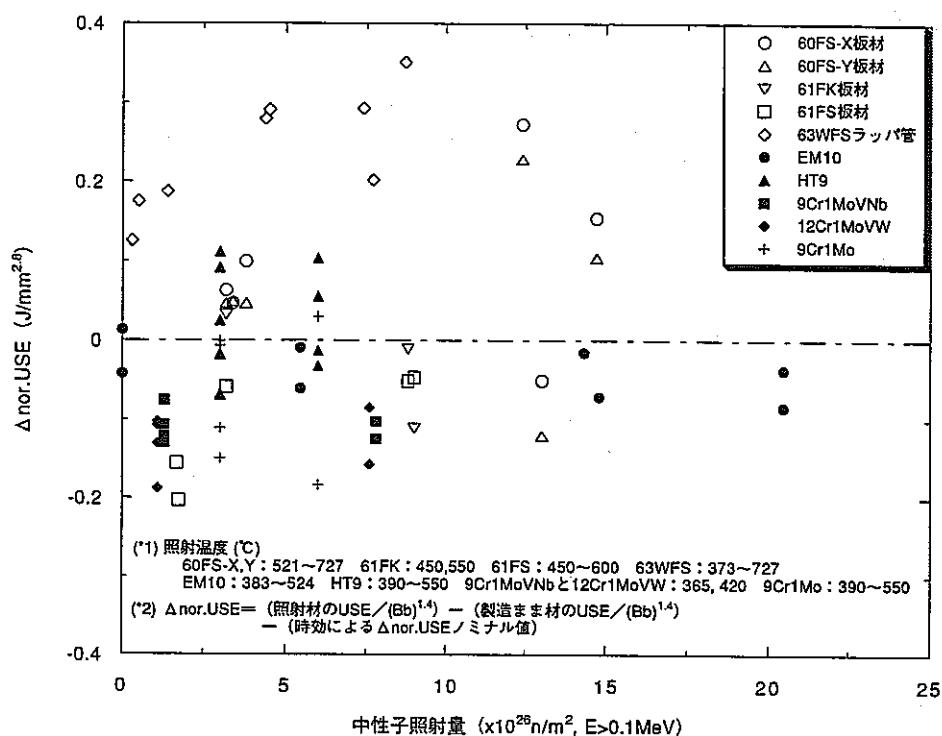
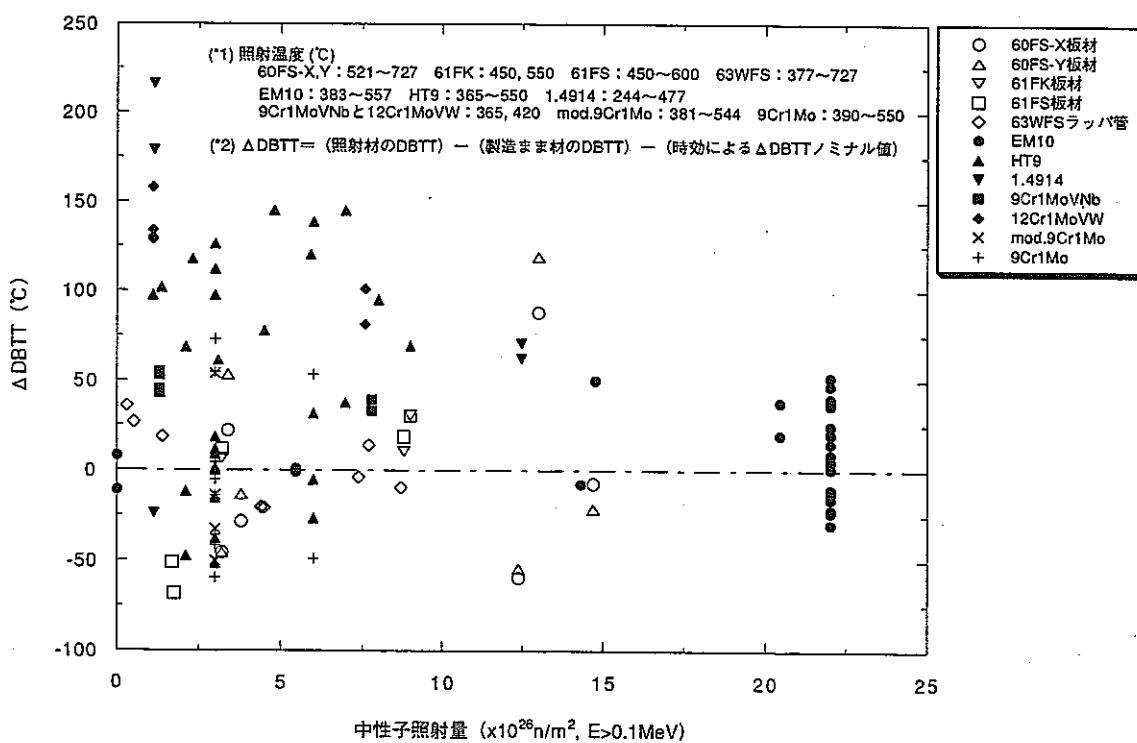


図 5-8.12 照射のみによる ΔDBTT の照射温度依存性 (9Cr1Mo鋼の場合)

図 5-9.1 照射のみによる $\Delta \text{nor.US}$ の照射量依存性図 5-9.2 照射のみによる ΔDBTT の照射量依存性

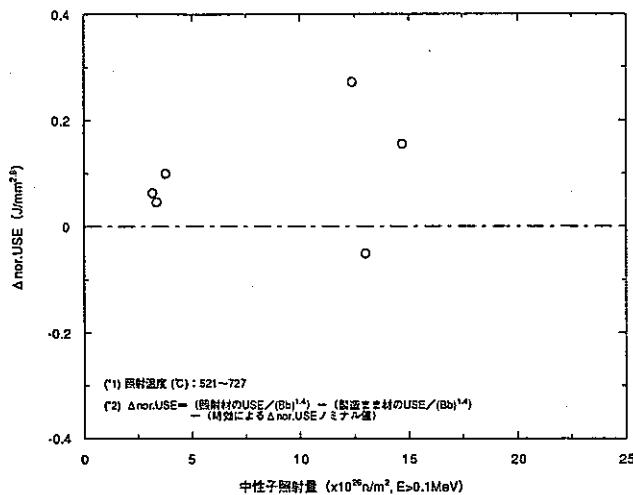


図 5-10.1 照射のみによる $\Delta\text{nor.USE}$ の照射量依存性 (60FS-X板材の場合)

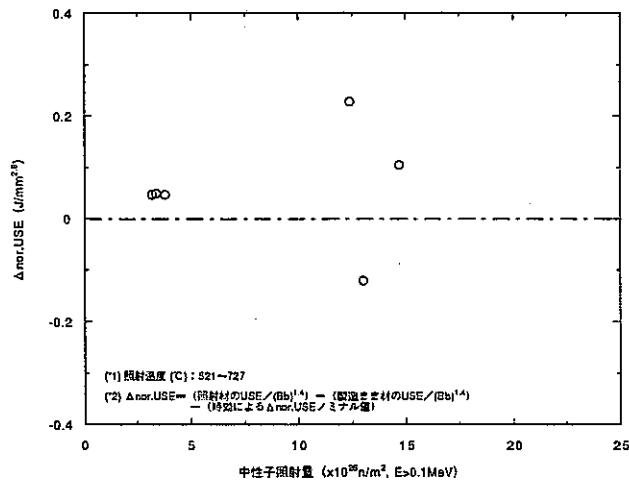


図 5-10.2 照射のみによる $\Delta\text{nor.USE}$ の照射量依存性 (60FS-Y板材の場合)

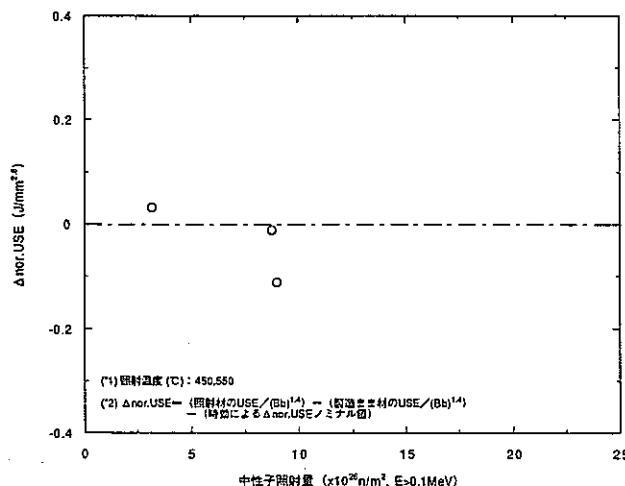


図 5-10.3 照射のみによる $\Delta\text{nor.USE}$ の照射量依存性 (61FK板材の場合)

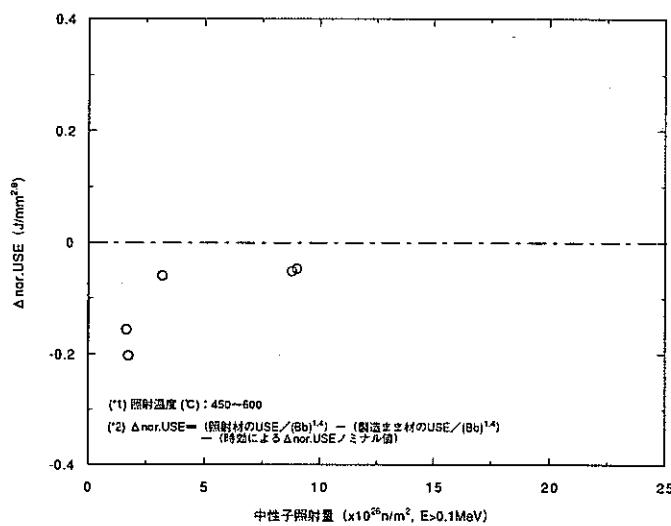


図 5-10.4 照射のみによる $\Delta \text{nor. USE}$ の照射量依存性 (61FS板材の場合)

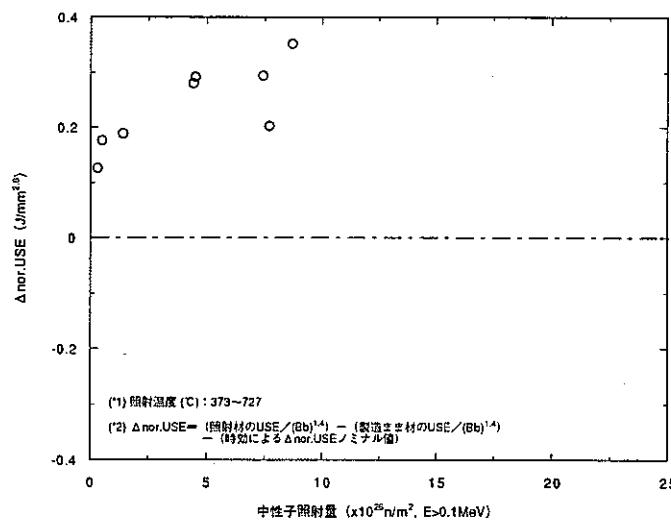


図 5-10.5 照射のみによる $\Delta \text{nor. USE}$ の照射量依存性 (63WFSラッパ管の場合)

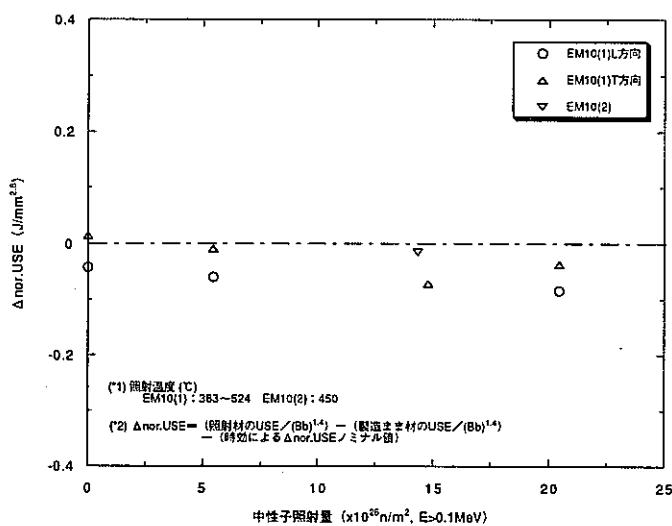


図 5-10.6 照射のみによる $\Delta\text{nor. USE}$ の照射量依存性 (EM10鋼の場合)

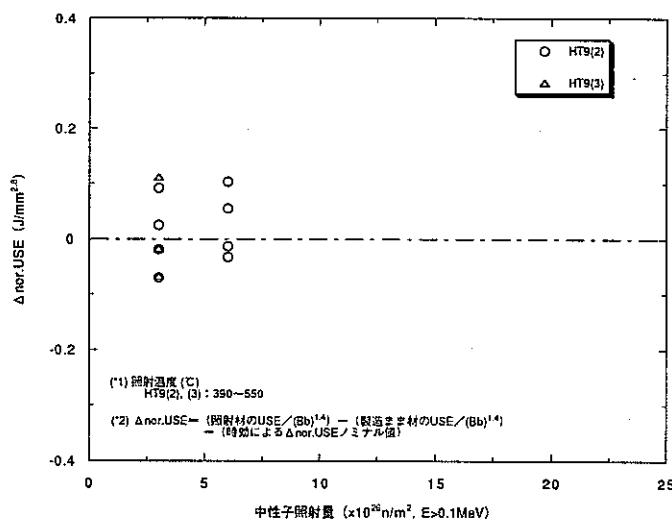


図 5-10.7 照射のみによる $\Delta\text{nor. USE}$ の照射量依存性 (HT9鋼の場合)

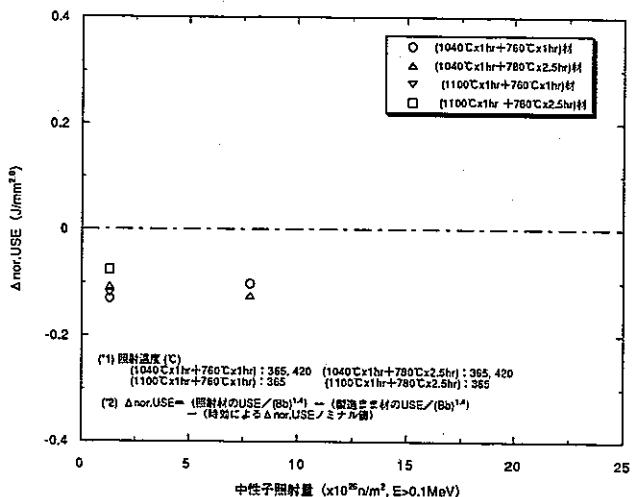


図 5-10.8 照射のみによる $\Delta\text{nor.US}$ の照射量依存性 (9Cr1MoVNb鋼の場合)

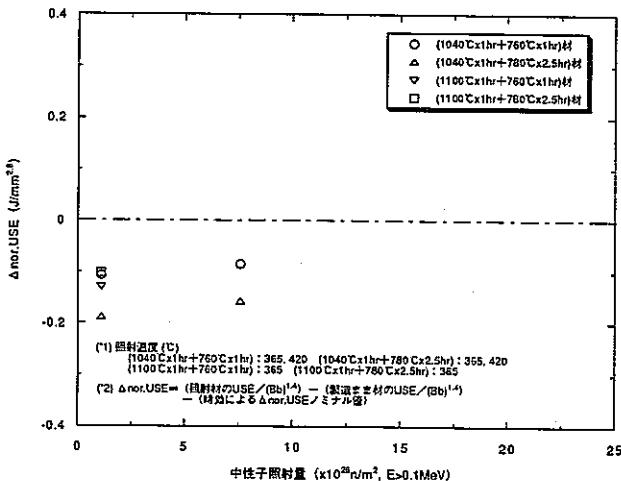


図 5-10.9 照射のみによる $\Delta\text{nor.US}$ の照射量依存性 (12Cr1MoVW鋼の場合)

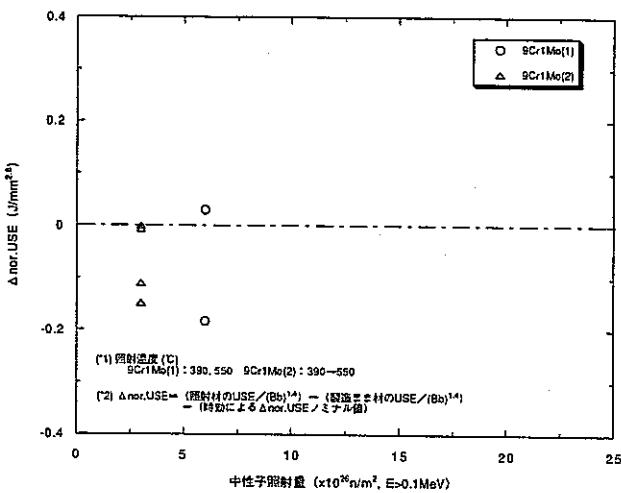


図 5-10.10 照射のみによる $\Delta\text{nor.US}$ の照射量依存性 (9Cr1Mo鋼の場合)

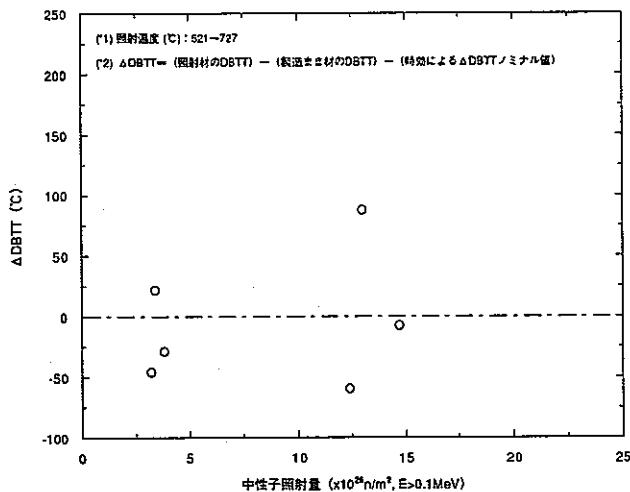


図 5-11.1 照射のみによる $\Delta DBTT$ の照射量依存性 (60FS-X板材の場合)

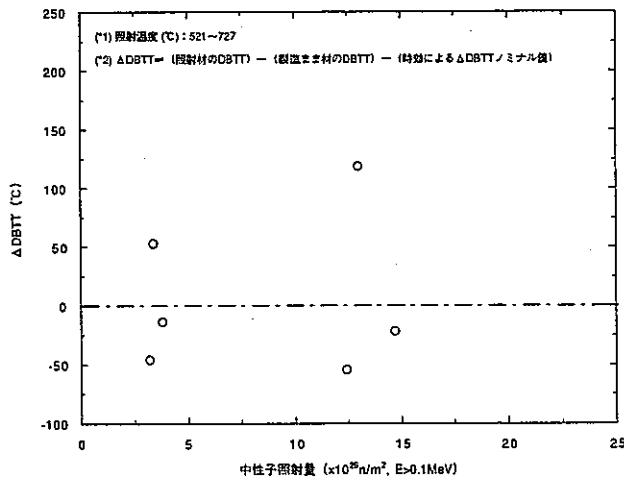


図 5-11.2 照射のみによる $\Delta DBTT$ の照射量依存性 (60FS-Y板材の場合)

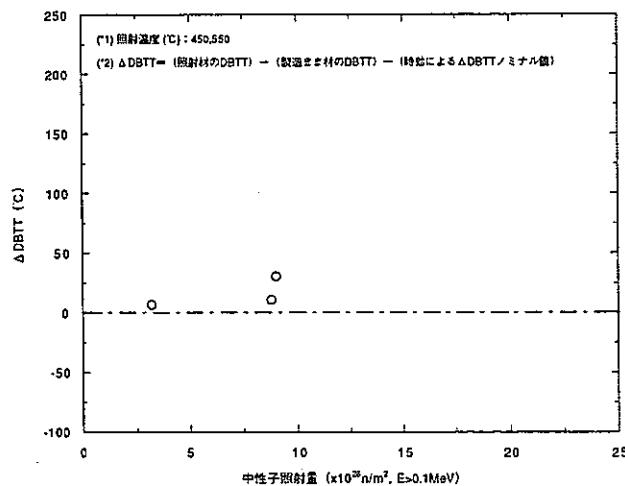


図 5-11.3 照射のみによる $\Delta DBTT$ の照射量依存性 (61FK板材の場合)

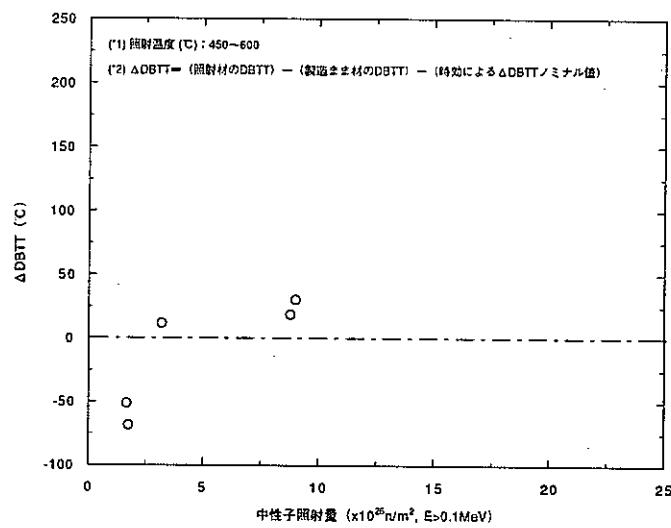


図 5-11.4 照射のみによる ΔDBTT の照射量依存性 (61FS板材の場合)

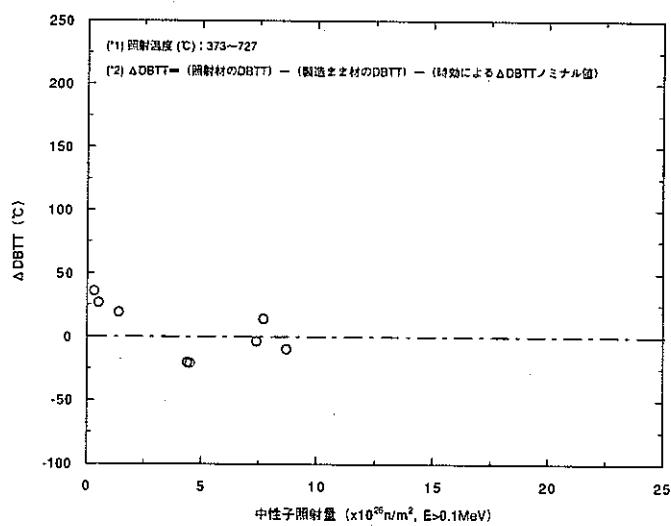


図 5-11.5 照射のみによる ΔDBTT の照射量依存性 (63WFSラッパ管の場合)

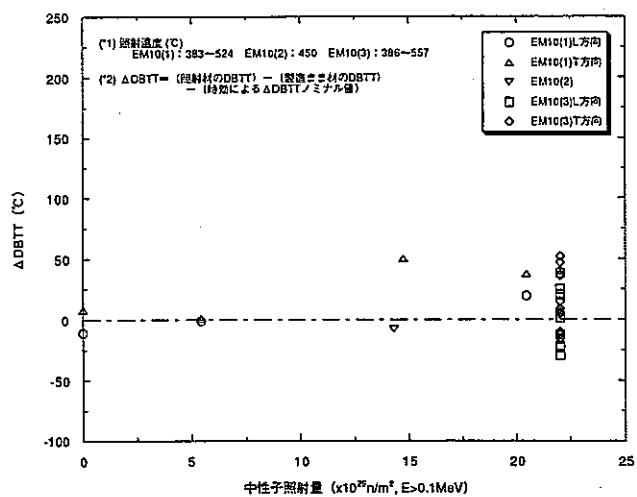


図 5-11.6 照射のみによる Δ DBTT の照射量依存性 (EM10 鋼の場合)

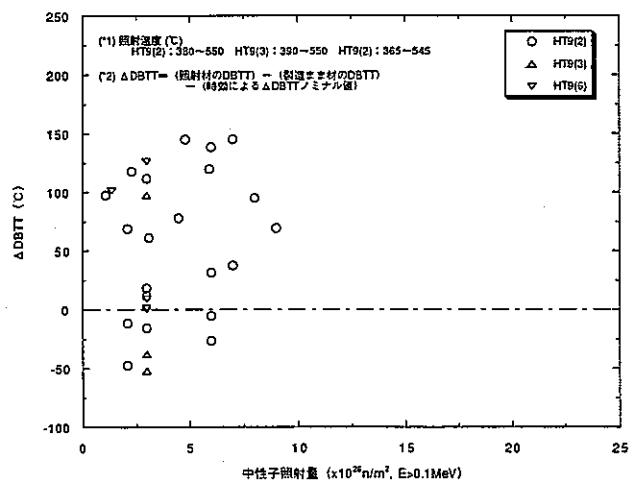


図 5-11.7 照射のみによる Δ DBTT の照射量依存性 (HT9 鋼の場合)

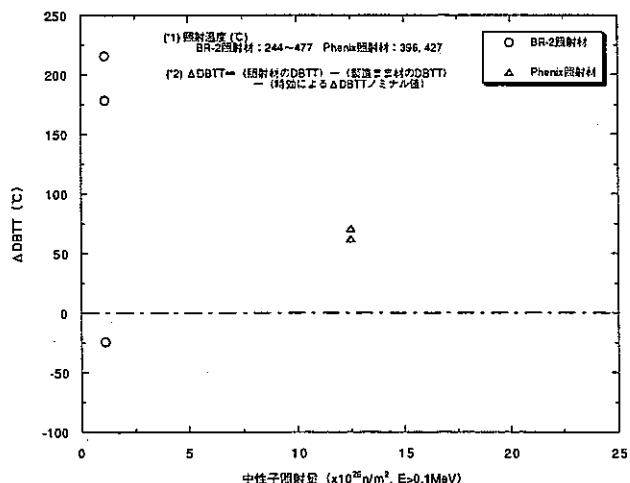


図 5-11.8 照射のみによる Δ DBTT の照射量依存性 (1.4914 鋼の場合)

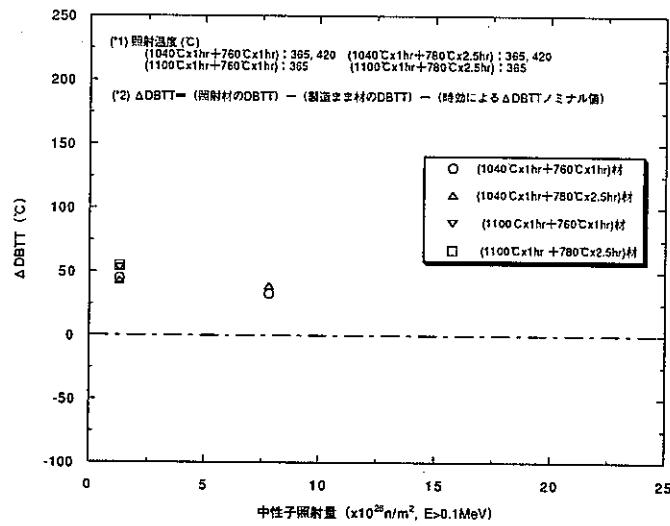


図 5-11.9 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (9Cr1MoVNb鋼の場合)

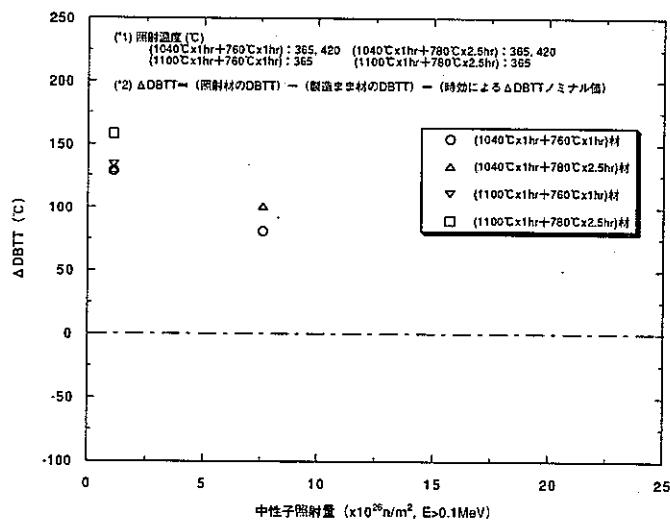


図 5-11.10 照射のみによる Δ DBTTの照射量依存性 (12Cr1MoVW鋼の場合)

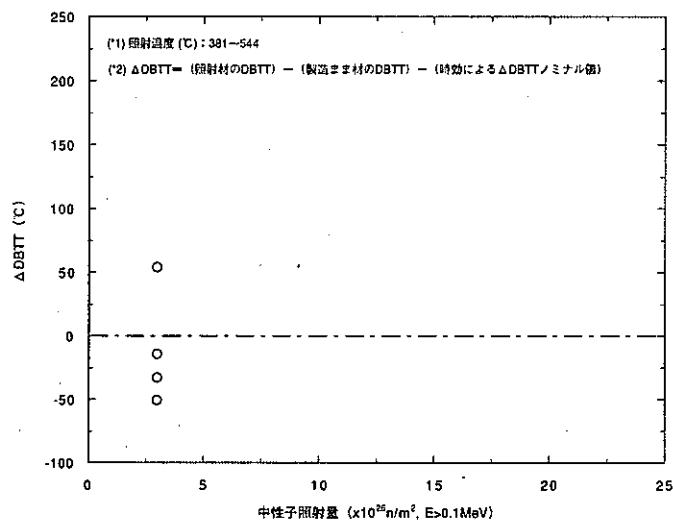


図 5-11.11 照射のみによる $\Delta DBTT$ の照射量依存性 (mod.9Cr1Mo鋼の場合)

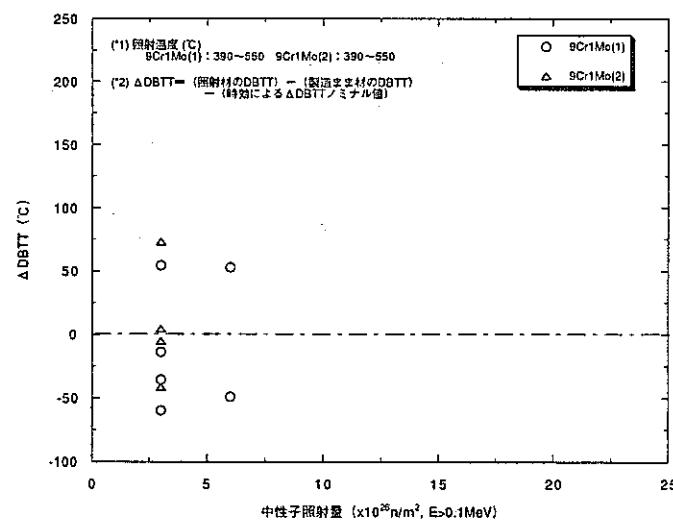


図 5-11.12 照射のみによる $\Delta DBTT$ の照射量依存性 (9Cr1Mo鋼の場合)

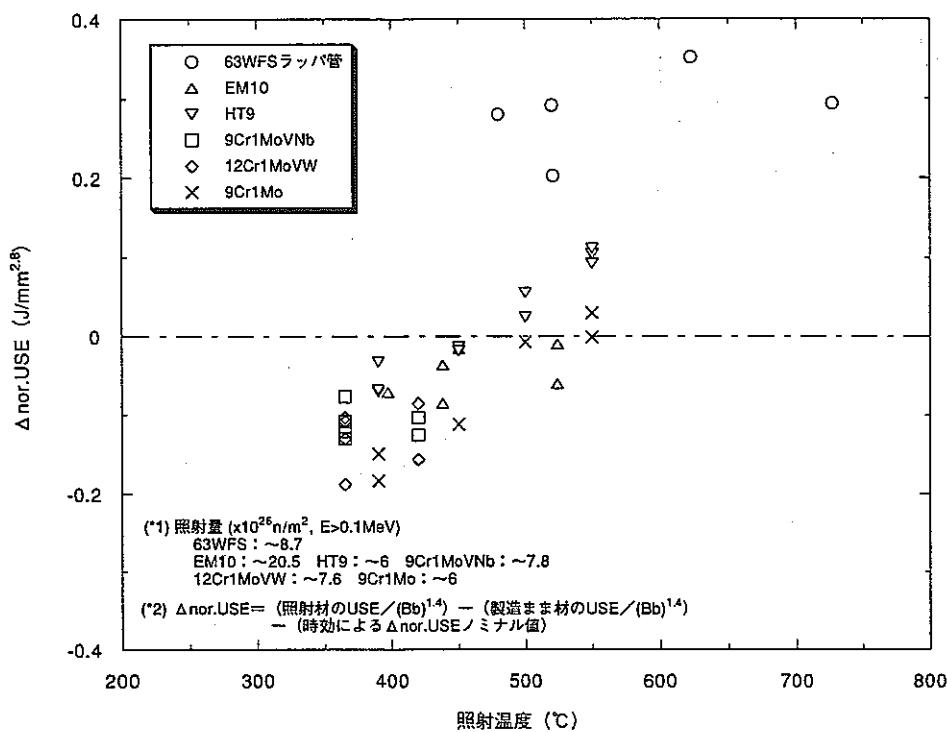


図 5-12.1 PNC-FMS鋼および他鋼種の照射による $\Delta \text{nor. USE}$ の照射温度依存性
(照射量 $\geq 3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$ のデータをプロット)

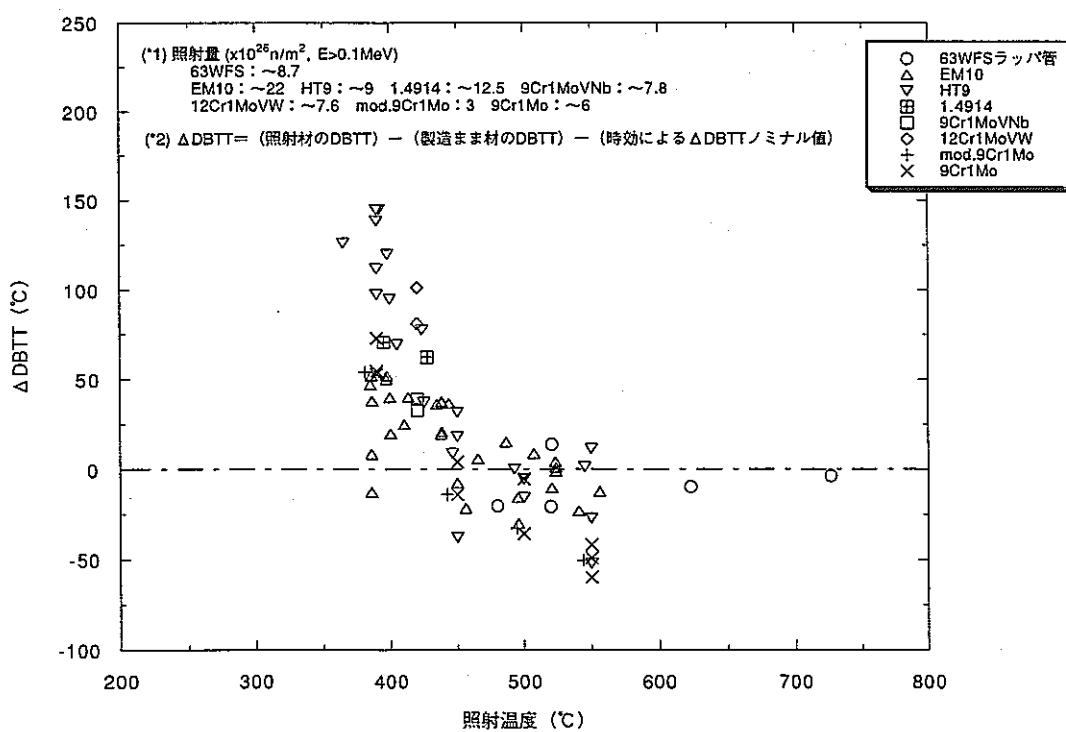
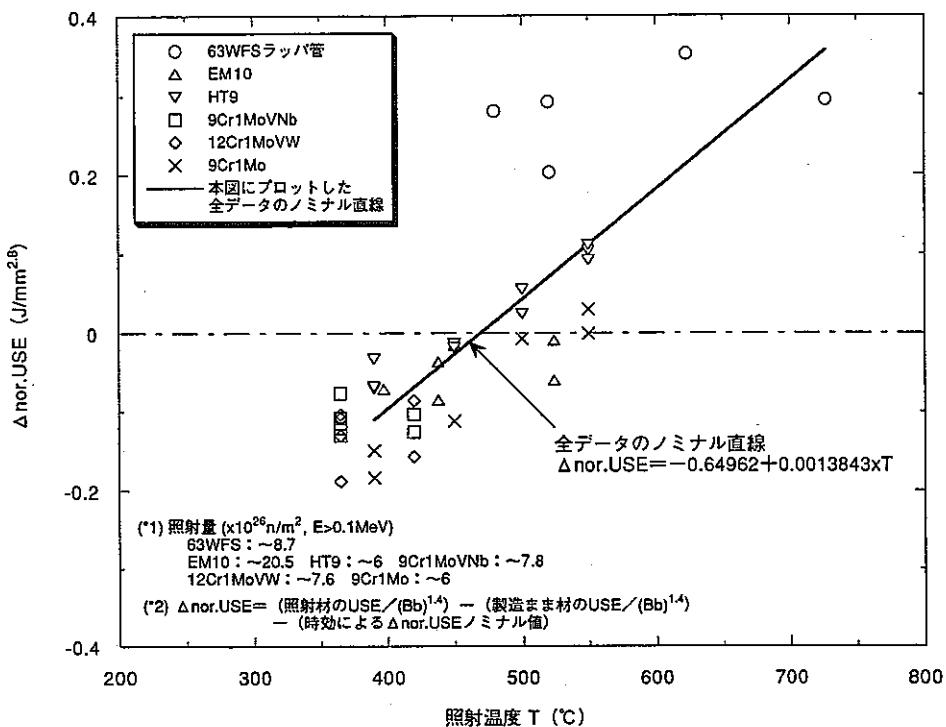
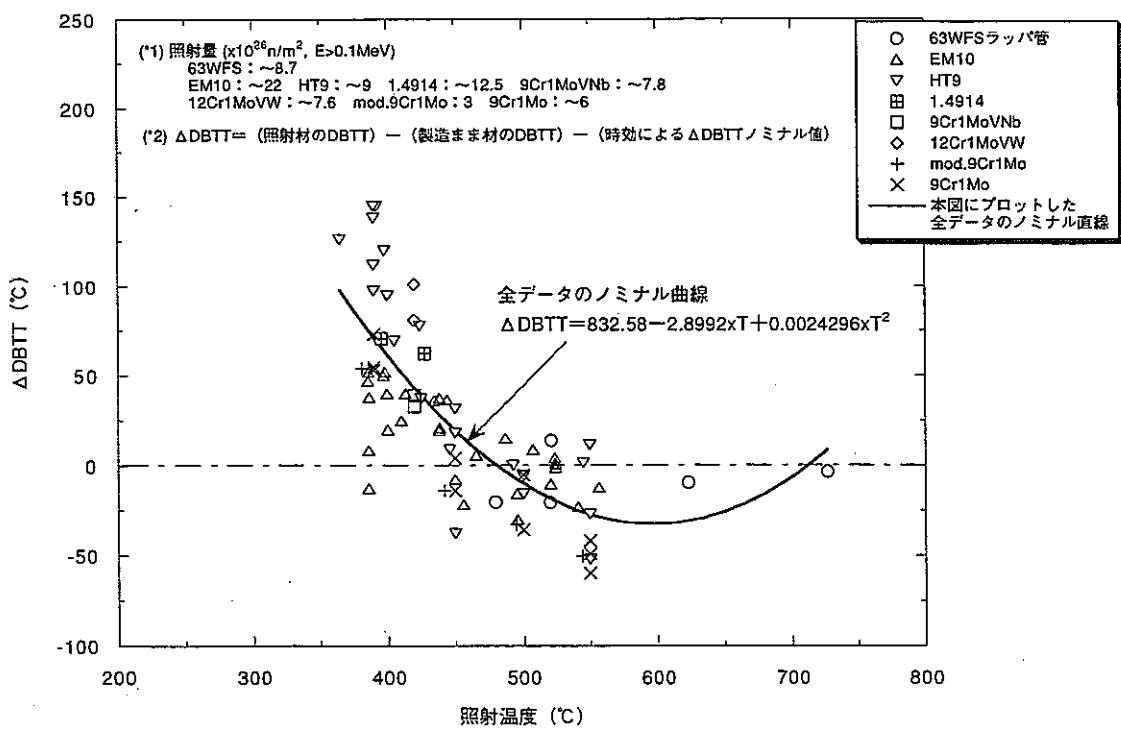
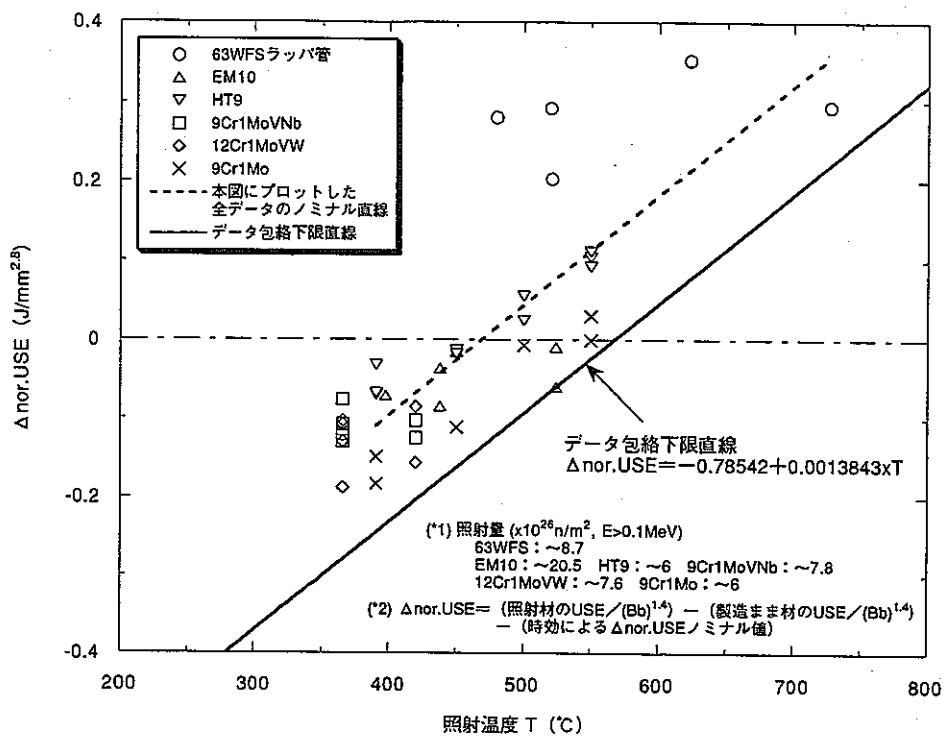
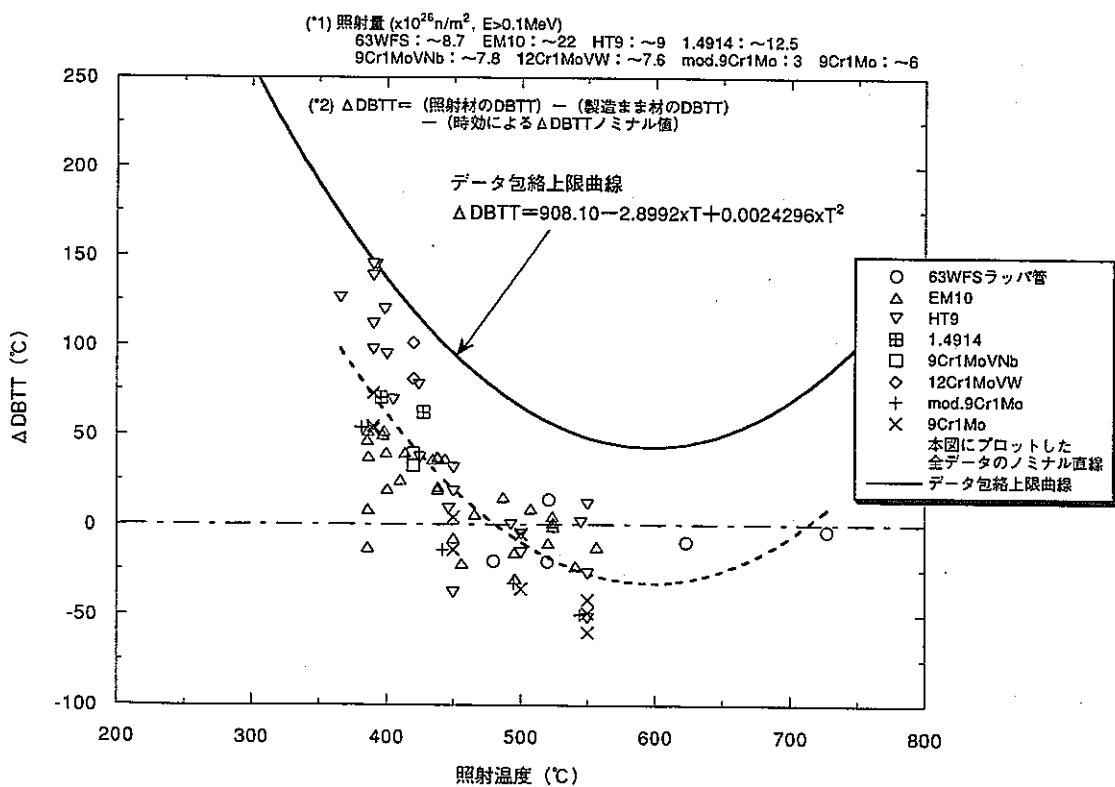
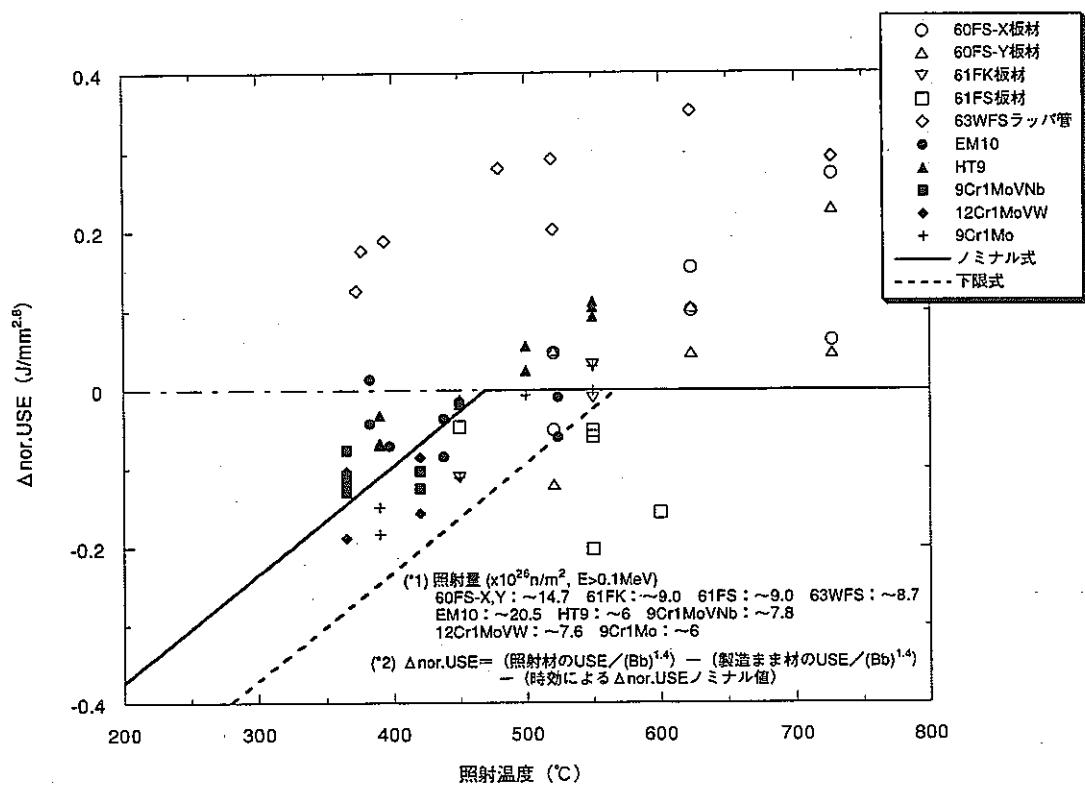
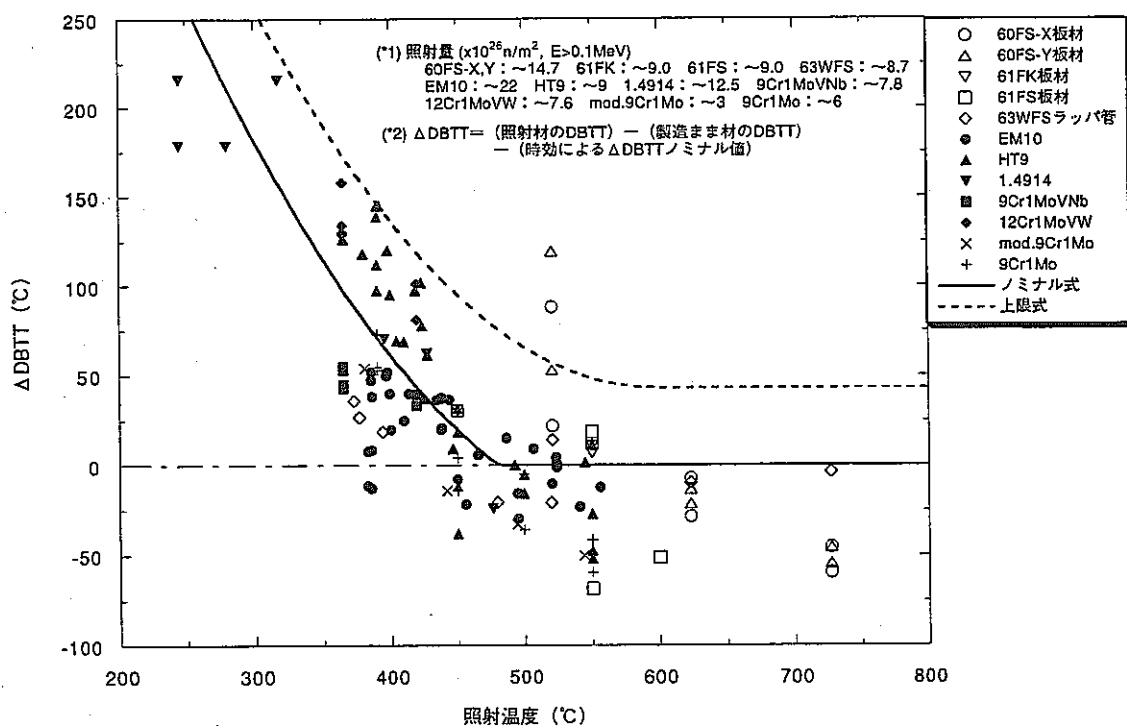


図 5-12.2 PNC-FMS鋼および他鋼種の照射による ΔDBTT の照射温度依存性
(照射量 $\geq 3 \times 10^{26} \text{n/m}^2$, $E > 0.1 \text{MeV}$ のデータをプロット)

図 5-13.1 照射による $\Delta_{\text{nor}}.\text{USE}$ の定式化（ノミナル式の場合）図 5-13.2 照射による Δ_{DBTT} の定式化（ノミナル式の場合）

図 5-14.1 照射による $\Delta\text{nor.USE}$ の定式化（下限式の場合）図 5-14.2 照射による ΔDBTT の定式化（上限式の場合）

図 5-15.1 照射による $\Delta \text{nor.USE}$ のノミナル式と下限式図 5-15.2 照射による ΔDBTT のノミナル式と上限式

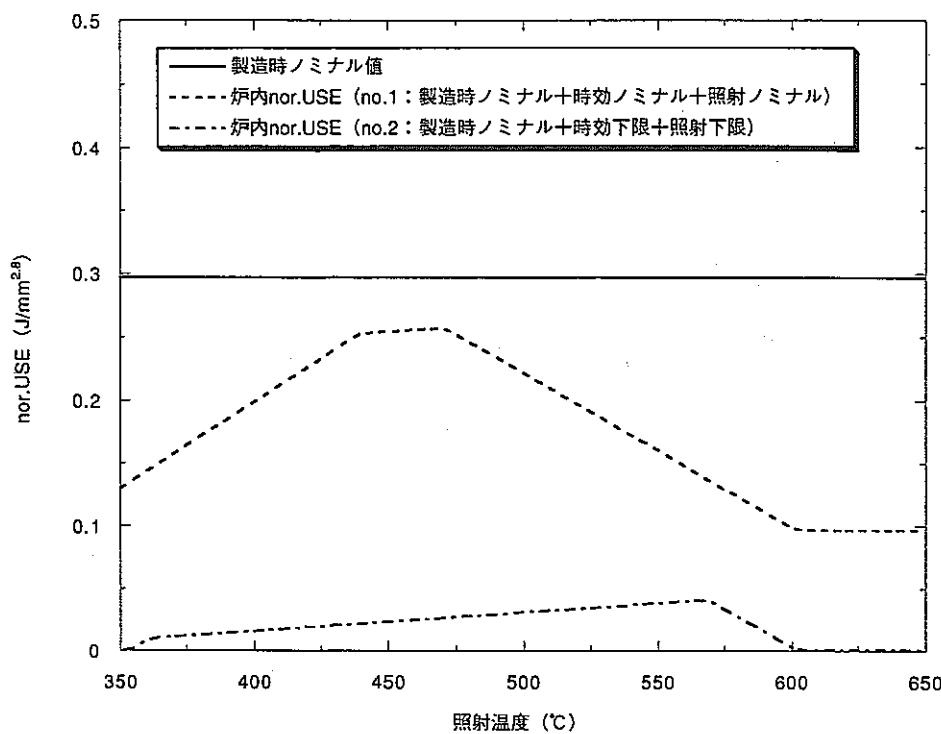


図 6-1.1 炉内使用時のnor. USEの推定
(製造時USEとしてノミナル値を用いた場合)

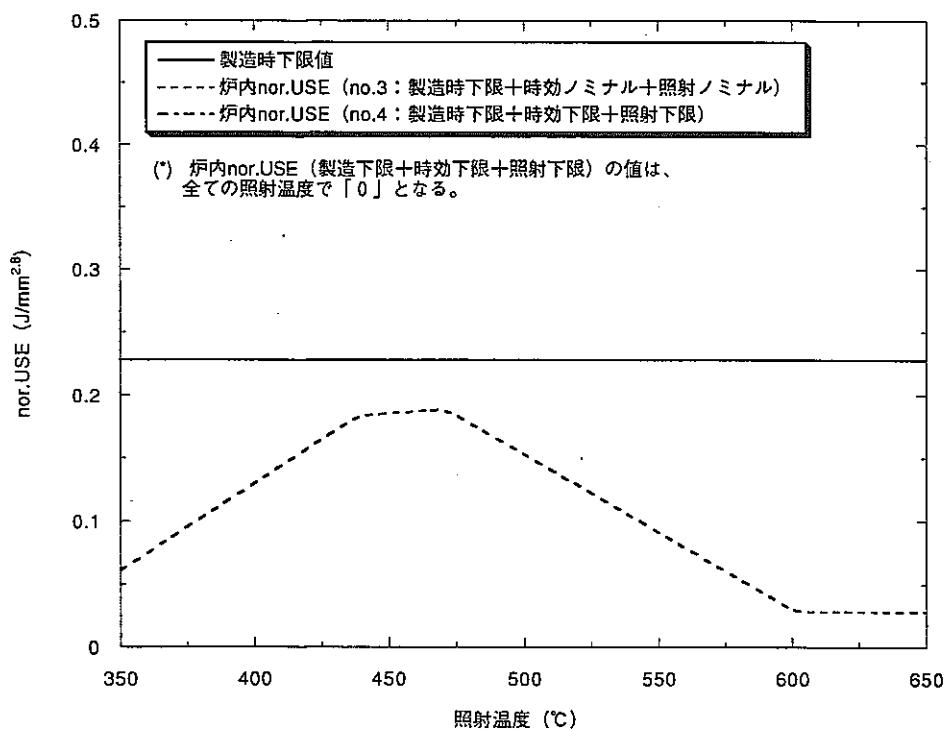


図 6-1.2 炉内使用時のnor. USEの推定
(製造時USEとして下限値を用いた場合)

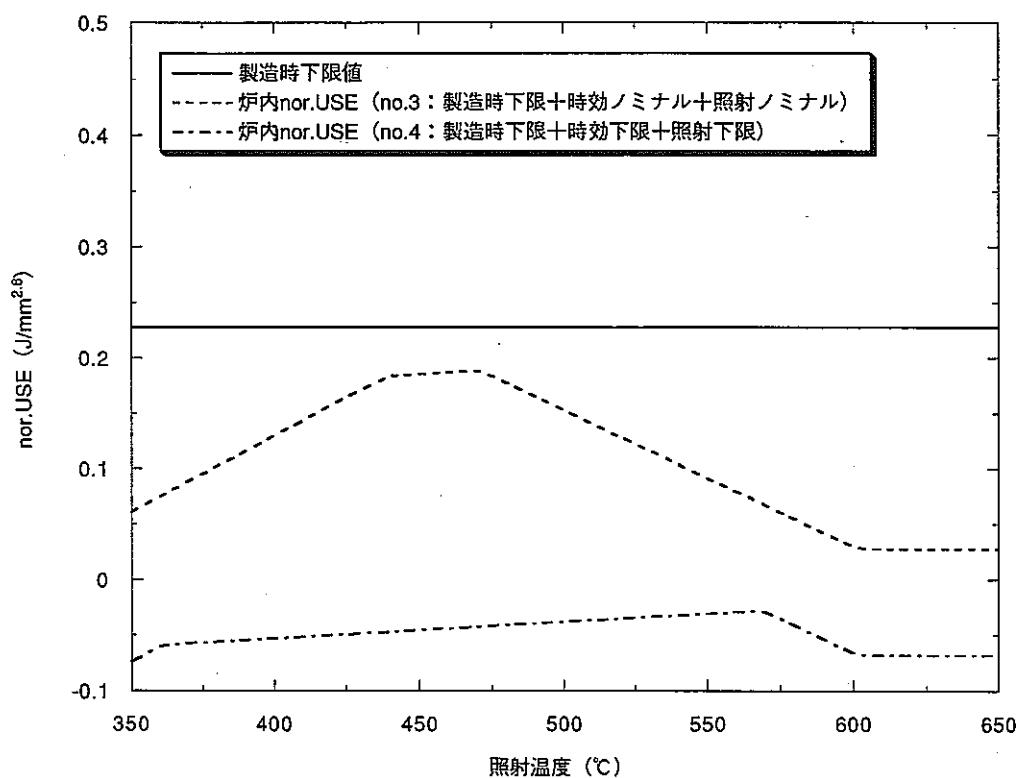


図 6-2 「製造時下限値十時効効果下限式十照射効果下限式」として
推定した炉内nor.USE（炉内nor.USE ≥ 0 としない場合）

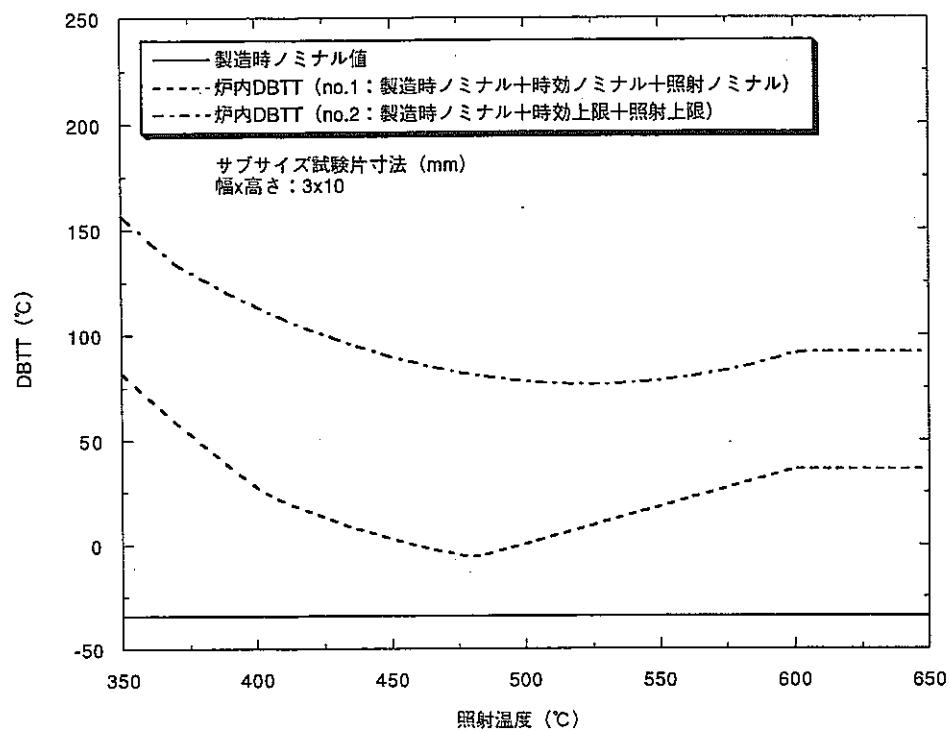


図 6-3.1 炉内使用時のDBTTの推定（サブサイズ試験片における
製造時DBTTとしてノミナル値を用いた場合）

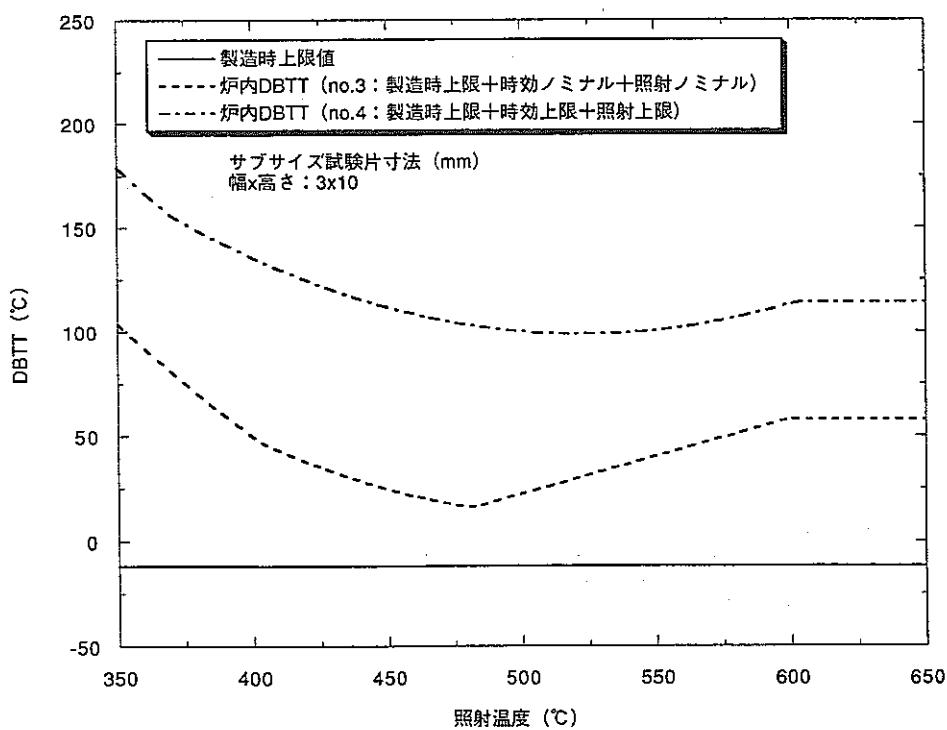


図 6-3.2 炉内使用時のDBTTの推定（サブサイズ試験片における
製造時DBTTとして上限値を用いた場合）

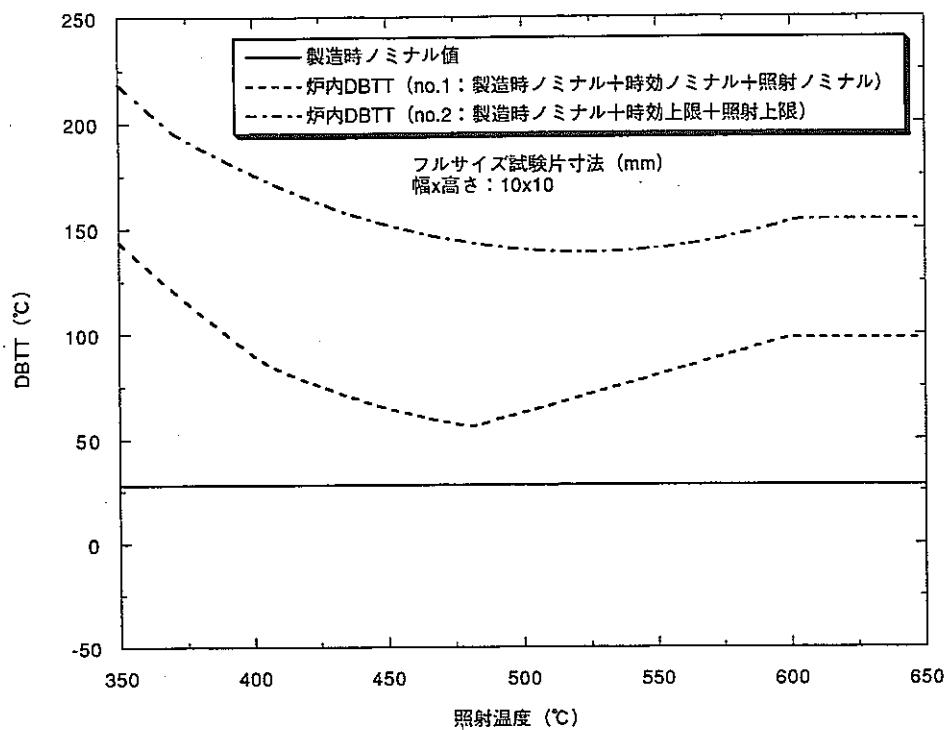


図 6-4-1 炉内使用時のDBTTの推定（フルサイズ試験片における
製造時DBTTとしてノミナル値を用いた場合）

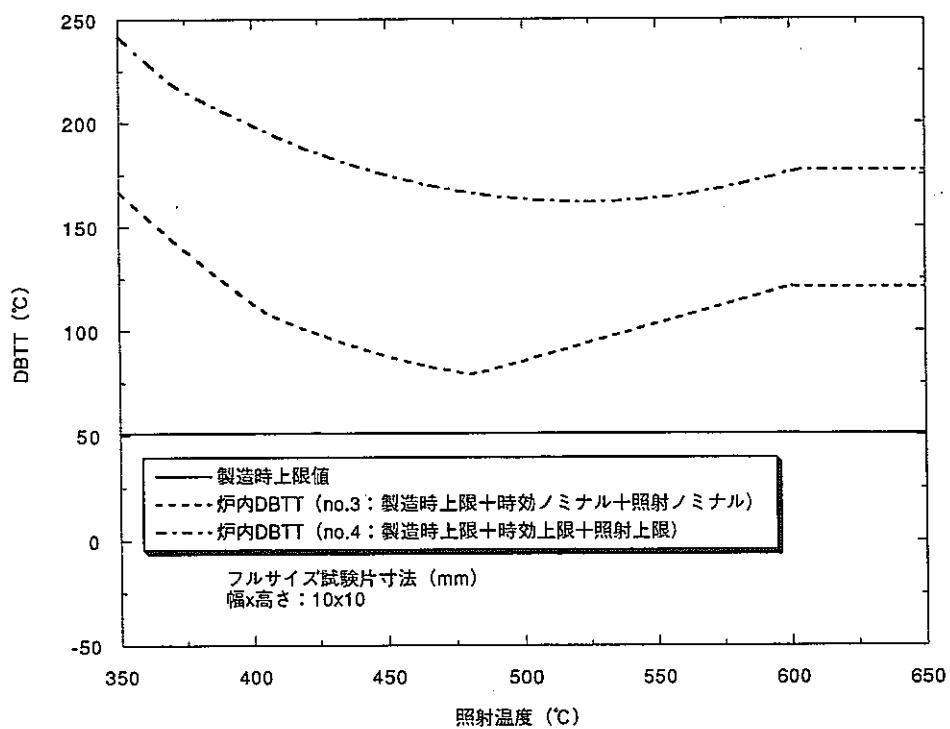


図 6-4-2 炉内使用時のDBTTの推定（フルサイズ試験片における
製造時DBTTとして上限値を用いた場合）