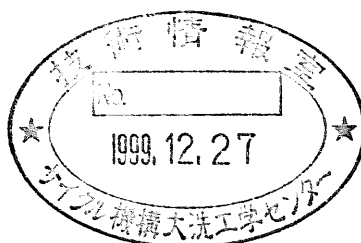


フェライト鋼照射材料のシャルピー 衝撃特性と破壊靱性の評価(3)

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

1999年3月



東北大学金属材料研究所

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。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Sections,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49, Muramatsu, Tokai-Mura, Naka-Gun, Ibaraki-Ken, 319-1194,

Japan

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

1999

フェライト鋼照射材料のシャルピー衝撃特性と破壊靱性の評価(3)
(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

栗下裕明*

要 旨

SMIR-10において照射温度823K, 高速中性子照射量 $(3.2\sim 9.0)\times 10^{26}\text{ n/m}^2$ ($E>0.1\text{ MeV}$)の照射を受けた4種類のフェライト鋼, すなわちサイクル機構で開発されたPNC-FMS鋼の61FKと61FS, 及びボイラー用材料として使用実績の豊富なASTM A213T9 (F9S)材とフェライトマルテンサイト鋼のNSCR9材について, 計装化シャルピー衝撃試験を行って全吸収エネルギー, 動的降伏荷重, 動的最大荷重及び脆性破壊開始時における荷重と変位を測定し, それらの結果から延性脆性遷移温度(DBTT)と上部棚エネルギー(USE)を求めた。用いた試験片はJIS-4号シャルピー試験片で, 外形寸法 $2\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$, Vノッチの深さ 2 mm , 開き角 45° , ノッチ底半径 0.25 mm である。得られた主な結果を以下に記す。

1) DBTTは, いずれの鋼種においても, 本照射量の範囲では照射量にあまり依存しなかった。また, 高照射量 $(8.8\sim 9.0)\times 10^{26}\text{ n/m}^2$ におけるDBTTは, 高い方から61FK, NSCR9, 61FS, F9Sの順位であった。

2) USEの照射量依存性は, 61FKでは照射量の増加と共に低下し, 61FSでは変化せず, F9Sでは逆に増加する傾向がみられた。また, 高照射量におけるUSEは, 低い方から61FK, NSCR9, 61FS, F9Sの順位であり, DBTTの高い方からの順位と一致した。

3) 高照射量におけるDBTTの増加量(ΔDBTT)は, 非照射材のデータが得られていないF9Sを除くと, 大きな方から, 61FS, 61FK, NSCR9の順位であったが, それらの差は小さかった。

4) 高照射量におけるUSEの低下量(ΔUSE)は, 非照射材のデータが得られていないF9Sを除くと, 大きな方から61FS, 61FK, NSCR9の順位であった。

5) 既報の照射温度723Kの結果と比較すると, 823K照射による脆化の方が大きく, 特にF9Sと61FSで顕著であった。

本報告書は, 東北大学が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究成果に関するものである。

契約番号: 100D0259

機構担当部課室: 大洗工学センター 燃料材料試験部 照射材料試験室

※: 東北大学金属材料研究所

Evaluation of Charpy impact properties and fracture toughness
for irradiated ferritic steels (3)

Hiroaki Kurishita*

Abstract

Four kinds of ferritic steels, 61FK, 61FS, ASTM A213T9 (F9S) and NSCR9, were irradiated in SMIR-10 at 823 K to $(3.2-9.0) \times 10^{26}$ n/m² ($E > 0.1$ MeV) and subjected to instrumented Charpy impact tests. The absorbed energy, dynamic yield and maximum loads, brittle fracture load and the deflection to brittle fracture were measured as a function of test temperature and the ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) and the upper shelf energy (USE) were evaluated. For the test, Charpy V-notch specimens, JIS-4, were used which had the dimensions of $10 \times 2 \times 55$ mm and the V-notch geometry of notch root radius of 0.25 mm, notch depth of 2 mm and notch angle of 45 degrees. Main results obtained are as follows.

- 1) The DBTT was less dependent on neutron dose. The DBTT for the higher dose of $(8.8-9.0) \times 10^{26}$ n/m² increased in the order of 61FK, NSCR9, 61FS and F9S.
- 2) As the neutron dose increased, the USE decreased for 61FK, while it stayed almost constant for 61FS and increased for F9S. The USE for the higher dose decreased in the order of 61FK, NSCR9, 61FS and F9S, which was the same as the increasing order of DBTT.
- 3) The DBTT shifts, Δ DBTT, due to irradiation with the higher dose level increased in the order of 61FK, 61FS and NSCR9, except for F9S, where the DBTT in the unirradiated state is not available.
- 4) The change in USE, Δ USE, due to irradiation with the higher dose increased in the order of 61FS, 61FK and NSCR9, except for F9S.
- 5) Comparison of the present results with the previous ones irradiated at 723K in SMIR-10 showed that 823K irradiation caused considerably larger embrittlement than 723K irradiation, especially for F9S and 61FK.

Work performed by the Oarai Branch, Institute for Materials Research, Tohoku University under contact with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC : Materials Monitoring Section, Fuels and Materials Division

目 次

1. 緒 言	1
2. 方 法	1
2.1 試験片	1
2.2 計装化シャルピー衝撃試験	3
3. 結 果	5
3.1 61FK照射材の衝撃特性	5
3.2 61FS照射材の衝撃特性	11
3.3 F9S照射材の衝撃特性	17
3.4 NSCR9照射材の衝撃特性	17
3.5 4鋼種の照射材の衝撃特性の比較	27
4. 結 言	27
5. 謝 辞	39
6. 参考文献	39

表 図 写 真 一 覧

- 表-1 試験片の材質と寸法
 表-2 照射条件
 表-3 61FK照射材 ($823\text{K}/3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) のシャルピー衝撃試験結果
 表-4 61FK照射材 ($823\text{K}/8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) のシャルピー衝撃試験結果
 表-5 61FS照射材 ($823\text{K}/3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) のシャルピー衝撃試験結果
 表-6 61FS照射材 ($823\text{K}/8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) のシャルピー衝撃試験結果
 表-7 F9S照射材 ($823\text{K}/3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) のシャルピー衝撃試験結果
 表-8 F9S照射材 ($823\text{K}/8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) のシャルピー衝撃試験結果
 表-9 NSCR9照射材 ($823\text{K}/9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) のシャルピー衝撃試験結果
 表-10 試験した4鋼種の USE, DBTT¹, DBTT², DBTT³, P_g,*
 表-11 試験した4鋼種の USE, ΔUSE, DBTT¹, ΔDBTT¹
 図-1 計装化シャルピー衝撃試験機
 図-2 61FK照射材 (SMIR-10) の全吸収エネルギーの試験温度依存性
 図-3 61FK照射材 ($823\text{K}/3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) の降伏・最大荷重の試験温度依存性
 図-4 61FK照射材 ($823\text{K}/8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) の降伏・最大荷重の試験温度依存性
 図-5 61FK照射材の USE, DBTT¹, DBTT², DBTT³, P_g,*
 図-6 61FS照射材 (SMIR-10) の吸収エネルギーの試験温度依存性
 図-7 61FS照射材 ($823\text{K}/3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) の降伏・最大荷重の試験温度依存性
 図-8 61FS照射材 ($823\text{K}/8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) の降伏・最大荷重の試験温度依存性
 図-9 61FS照射材の USE, DBTT¹, DBTT², DBTT³, P_g,*
 図-10 F9S照射材 (SMIR-10) の吸収エネルギーの試験温度依存性
 図-11 F9S照射材 ($823\text{K}/3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) の降伏・最大荷重の試験温度依存性
 図-12 F9S照射材 ($823\text{K}/8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) の降伏・最大荷重の試験温度依存性
 図-13 F9S照射材の USE, DBTT¹, DBTT², DBTT³, P_g,*
 図-14 NSCR9照射材 (SMIR-10) の吸収エネルギーの試験温度依存性
 図-15 NSCR9照射材 ($823\text{K}/9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) の降伏・最大荷重の試験温度依存性
 図-16 NSCR9照射材の USE, DBTT¹, DBTT², DBTT³, P_g,*
 図-17 鋼種間の吸収エネルギーの比較 ($823\text{K}/3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$)
 図-18 鋼種間の吸収エネルギーの比較 ($823\text{K}/(8.8 \sim 9.0) \times 10^{26} \text{ n/m}^2$)
 図-19 鋼種間の動的降伏荷重の比較 ($823\text{K}/(3.2 \sim 3.6) \times 10^{26} \text{ n/m}^2$)
 図-20 鋼種間の動的降伏荷重の比較 ($823\text{K}/(8.8 \sim 9.0) \times 10^{26} \text{ n/m}^2$)
 図-21 鋼種間の動的最大荷重の比較 ($823\text{K}/(3.2 \sim 3.6) \times 10^{26} \text{ n/m}^2$)
 図-22 鋼種間の動的最大荷重の比較 ($823\text{K}/(8.8 \sim 9.0) \times 10^{26} \text{ n/m}^2$)
 図-23 鋼種間の USE の比較
 図-24 鋼種間の DBTT¹ の比較
 図-25 鋼種間の DBTT³ の比較

1. 緒 言

高速炉炉心用材料としてのフェライト鋼は、高速中性子の照射によって延性-脆性遷移温度 (ductile-to-brittle transition temperature, DBTT) の上昇及び上部棚エネルギー (upper shelf energy, USE) の減少にみられるような、いわゆる照射脆化が生ずることが知られており、その評価が重要である。そのため、高速炉炉心用材料として有望な4種類のフェライト鋼、すなわち、サイクル機構で開発されたPNC-FMS鋼の61FKと61FS、及びボイラー用材料として使用実績の豊富なASTM A213T9 (F9S) 材とフェライトマルテンサイト鋼のNSCR9材の照射材料について、シャルピー衝撃試験を行い、破壊靱性の評価を行うとともに、燃料被覆管の破壊靱性を評価するための試験手法を開発し、試験片の形状効果等を含めて検討することが、本研究課題「フェライト鋼照射材料のシャルピー衝撃特性と破壊靱性の評価」の目的である。

前年度は、SMIR-10 (構造材料照射用反射体) において照射温度723K (450℃)、最大高速中性子照射量 $9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$) まで照射されたフェライト鋼4鋼種について計装化シャルピー衝撃試験を実施し、照射材の衝撃特性を評価するとともに、一部の鋼種については非照射材の衝撃特性も調査し、照射脆化の評価を行った [1]。

今年度は、SMIR-10において照射温度823K (550℃)、2種類の高速中性子線量 ($3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ 及び $(8.8 \sim 9.0) \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)) を照射されたフェライト鋼4鋼種について計装化シャルピー衝撃試験を実施し、照射材の衝撃特性を評価するとともに、前年度の結果と併せ、フェライト鋼4鋼種の耐照射脆化特性についての総合的評価を行った。

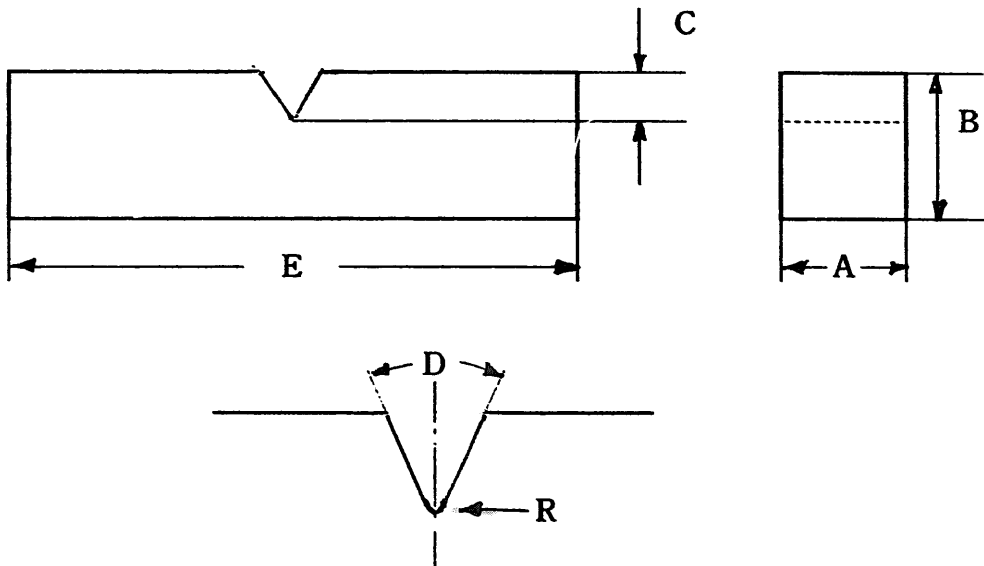
2. 方 法

2.1 試験片

計装化シャルピー衝撃試験に用いたフェライト鋼は、サイクル機構で開発されたPNC-FMS鋼の61FKと61FS、及びボイラー用材料として使用実績の豊富なASTM A213T9材 (F9S) とフェライト・マルテンサイト鋼のNSCR9材の4種類である。試験片は、いずれの鋼種も幅10mm、厚さ2mm、長さ55mmの寸法とVノッチ (ノッチの深さ2mm、ノッチ底半径0.25mm、ノッチ開き角度45度) をもつJIS-4号試験片である。4鋼種の名称、材質及び寸法を表1に、また今年度のPIEの対象としたSMIR-10の照射条件を表2に示す。照射温度は823K (550℃)、照射量は異なる2つの条件である。但し、NSCR9は特に放射能レベルが高く、本施設のホットラボでの照射後試験は問題視されたので、NSCR9については照射データとしてより有用と思われる高照射量 ($9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) の試験片について、以下に述べる計装化シャルピー衝撃試験を行った。

Table 1 Chemical compositions and specimen geometry for ferritic steels.

名 称	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N	Co
6 1 F K	0.04	≤0.1	0.60	0.60	11.0	1.80	—	0.20	0.050	0.060	—
6 1 F S	0.10	0.05	0.5	≤0.80	11.0	0.5	2.0	0.2	0.05	0.05	—
F 9 S	0.09	0.33	0.39	0.12	8.26	0.93	—	0.21	0.08	0.036	—
N S C R 9	0.068	0.15	0.95	—	8.81	1.94	—	0.15	0.05	—	0.01



単位 (mm)

	A	B	C	D	E	R
6 1 F K	2 ± 0.05	10 ± 0.05	2 ± 0.05	45° ± 2°	55 ± 0.6	0.25 ± 0.03
6 1 F S	2 ± 0.05	10 ± 0.05	2 ± 0.05	45° ± 2°	55 ± 0.6	0.25 ± 0.03
F 9 S	2 ± 0.05	10 ± 0.05	2 ± 0.05	45° ± 2°	55 ± 0.6	0.25 ± 0.03
N S C R 9	2 ± 0.05	10 ± 0.05	2 ± 0.05	45° ± 2°	55 ± 0.6	0.25 ± 0.03

Table 2 Irradiation conditions in SMIR-10 for 61FK, 61FS, F9S and NSCR9.

鋼種 (Lot No.)	刻印No.	PIE No.	照射温度*	高速中性子照射量 ($E > 0.1\text{MeV}$)
61FK	041 K01~K08	J8DS1	823K (550℃)	$3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$
	007 K09~K16	J8DS3		$8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$
61FS	009 S01~S08	J8K21	823K (550℃)	$3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$
	014 S09~S16	J8K23		$8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$
F9S	018 T09~T16	J8K31	823K (550℃)	$3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$
	019 T17~T24	J8K33		$8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$
NSCR9	021 N17~N24	J8K37	823K (550℃)	$3.6 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$
	133 N09~N16	J8K35		$9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$

*計画値

2. 2 計装化シャルピー衝撃試験

用いた計装化シャルピー衝撃試験機は電気油圧式の高速度引張疲労試験機（ハイドロパルス試験機，（株）東京衝機製造所製）の一部を衝撃試験用に改造し [2]，タップの先端に荷重検出用の圧電素子（ロードワッシャー，KISTLER社製）を取りつけたものである。東北大学金属材料研究所附属材料試験炉利用施設のホットセル内に設置されている計装化シャルピー衝撃試験機を図1に示す。Vノッチの付いた面を下にして試験片をアンビル上に置き，油圧によりタップを速度約5 m/sで上部から高速降下させる動的3点曲げ試験

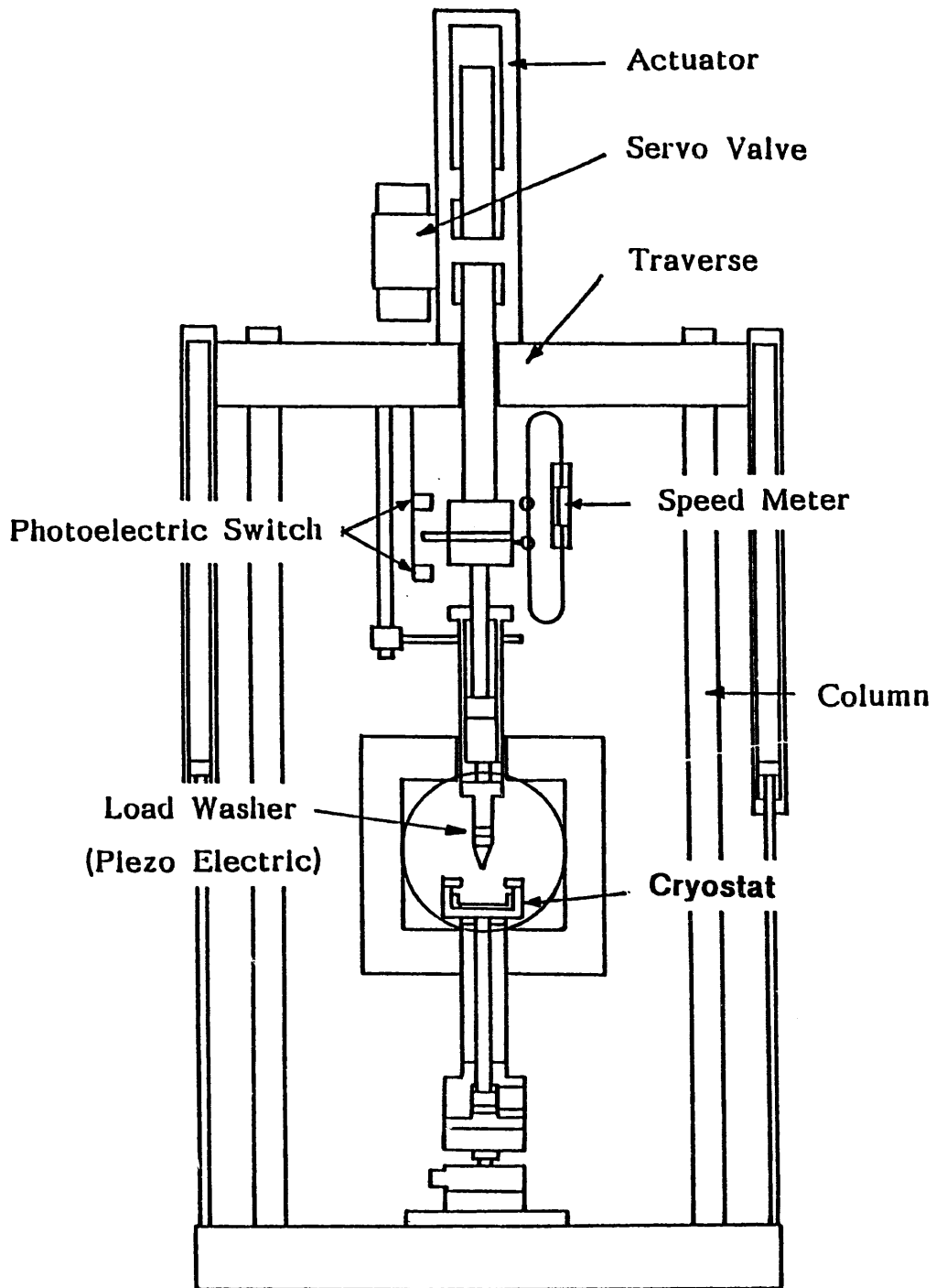


Fig. 1 Schematic of the machine used for instrumented Charpy impact testing.

である。本研究では、3点曲げ試験時のスパンがフルサイズ試験片（厚さが10mmである以外は、ノッチ寸法も含めJIS-4号試験片と同じ寸法である）と同じ40mmであるので、アンビルはフルサイズ試験片用のものを用いた。但し、JIS-4号試験片は底面の幅が2mmしかなく重心が高く不安定であるので、コの字型の鉄製の治具を特別に作製し、それをアンビルの上面両端に置き、その治具の中に試験片をセットして試験片の安定を図った。その際、試験片の変形を拘束しないように、治具は固定せずにアンビル上に置くだけにした。また、試験温度は138～356Kの範囲としたが、この冷却と加熱は以下の熱媒体を試験片の周囲に注入することにより行った。

- 138K～室温：液体窒素とイソペンタンの混合溶液
- 室温～356K：加熱したシリコンオイル

試験片の周囲に熱媒体が注がれてから試験片に衝撃荷重を負荷するまでの時間は10分程度とし、その間熱電対を試験片に接触させ、試験片温度を常時モニターした。

3. 結 果

3.1 61FK照射材の衝撃特性

61FKの照射材について得られたシャルピー衝撃試験の結果を表3と4に示す。ここで、 E_t は全吸収エネルギー、 P_y は動的降伏荷重、 P_m は動的最大荷重、 P_r は脆性破壊開始荷重、 D_r は脆性破壊開始時の試験片の変位量（たわみ量）である。

全吸収エネルギーの試験温度依存性を図2に、 P_y と P_m の試験温度依存性を図3と図4に示す。これらの結果から求めたUSEとDBTTの値を表10と図5に示す。図2、図5及び表10には、比較のために前報[1]の723K照射材の結果も示してある。また、表11に、非照射材の結果[1]との比較から求めた照射によるUSEとDBTT¹の変化量（ ΔUSE 、 $\Delta DBTT^1$ ）を示す。ここで、DBTT¹、DBTT²及びDBTT³は延性脆性遷移温度で、DBTT¹は全吸収エネルギーがUSEの1/2になる温度として求めた値、DBTT²は動的降伏荷重と動的最大荷重が一致するときの温度として求めた値で、無延性遷移温度に相当する。DBTT³は、標準サイズ試験片の吸収エネルギーが10Jになるときの温度に相当し、破壊が塑性拘束のみによって、加工硬化の助けなしに起るときの遷移温度とされている[3]。標準サイズ試験片の吸収エネルギー E_{t*} からそれより寸法の小さな試験片の吸収エネルギー E_t への換算は次式により行える[4、5]ので、これを用いると10Jの吸収エネルギーはJIS-4号試験片の2Jに相当する。

$$E_t = E_{t*} \times [B b^2 (\text{ミニサイズ}) / B b^2 (\text{標準サイズ})]$$

ただし、 b はリガメントサイズである。表10または図5から明らかなように、DBTT¹

Table 3 Charpy impact test results on 61FK irradiated to $3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ at 823K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	P _{max} (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
K05	292	10.17	229	289	---	---
K03	261	5.71	251	329	324	2.00
K07	229	4.94	278	348	341	1.61
K02	200	0.39	---	69	69	0.26
K01	174	0.42	---	71	71	0.49
K04	322	11.21	227	320	---	---
K06	356	12.25	221	305	---	---

Table 4 Charpy impact test results on 61FK irradiated to $8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ at 823K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	P _{max} (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
K12	292		失		敗	
K10	292	9.40	221	287	---	---
K09	260	3.88	233	292	292	1.22
K14	231	0.73	---	132	125	0.49
K16	203	0.51	---	95	95	0.29
K15	173	0.45	---	78	78	0.24
K13	323	9.83	212	290	---	---
K11	356	9.75	187	262	---	---

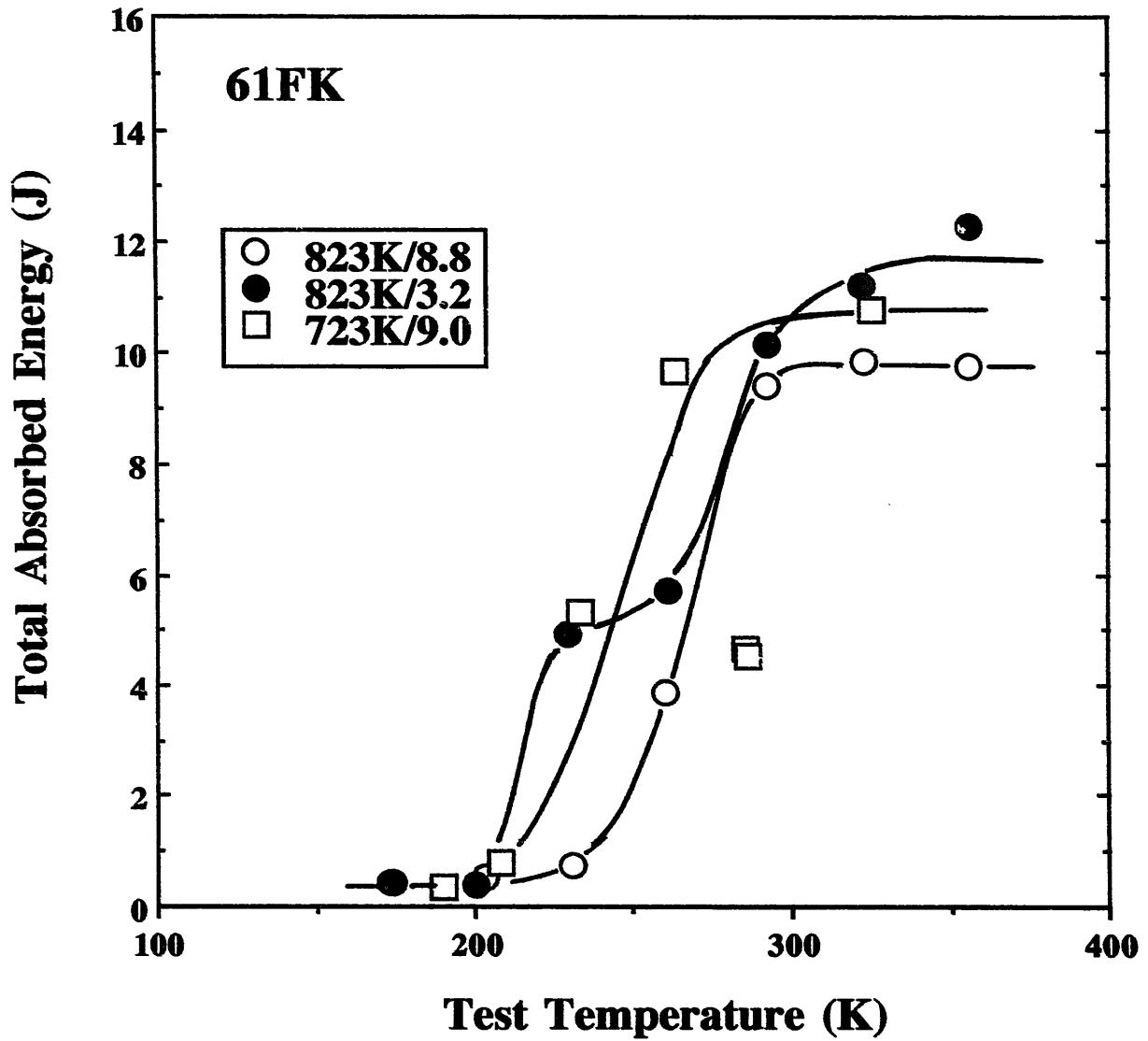


Fig. 2 Test temperature dependence of total absorbed energy for 61FK irradiated at 823 K with two different fast neutron doses in SMIR-10, together with the previous result irradiated at 723 K [1].

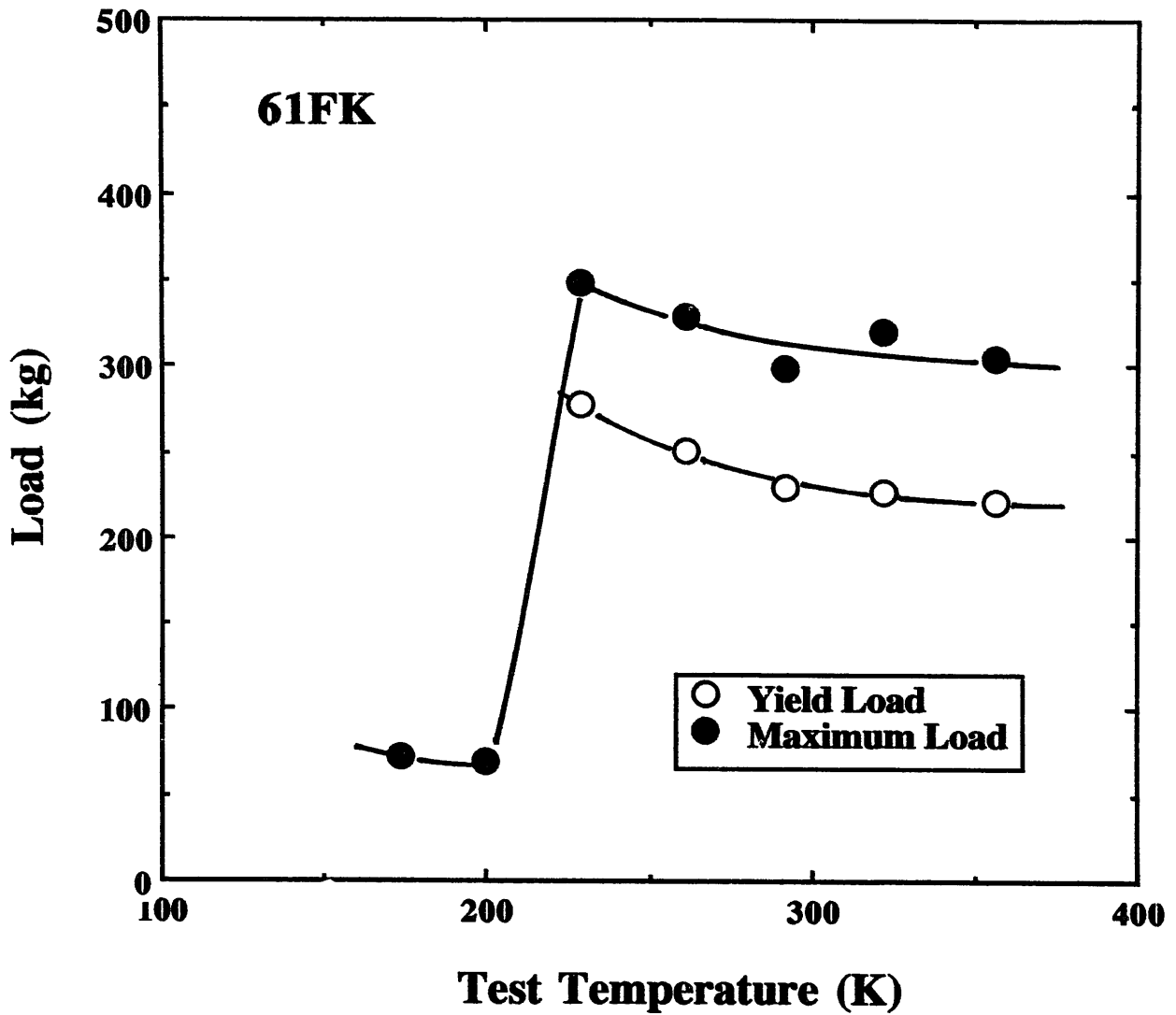


Fig. 3 Test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , and dynamic maximum load, P_m , for 61FK irradiated at 823 K with 3.2×10^{26} n/m² in SMIR-10,

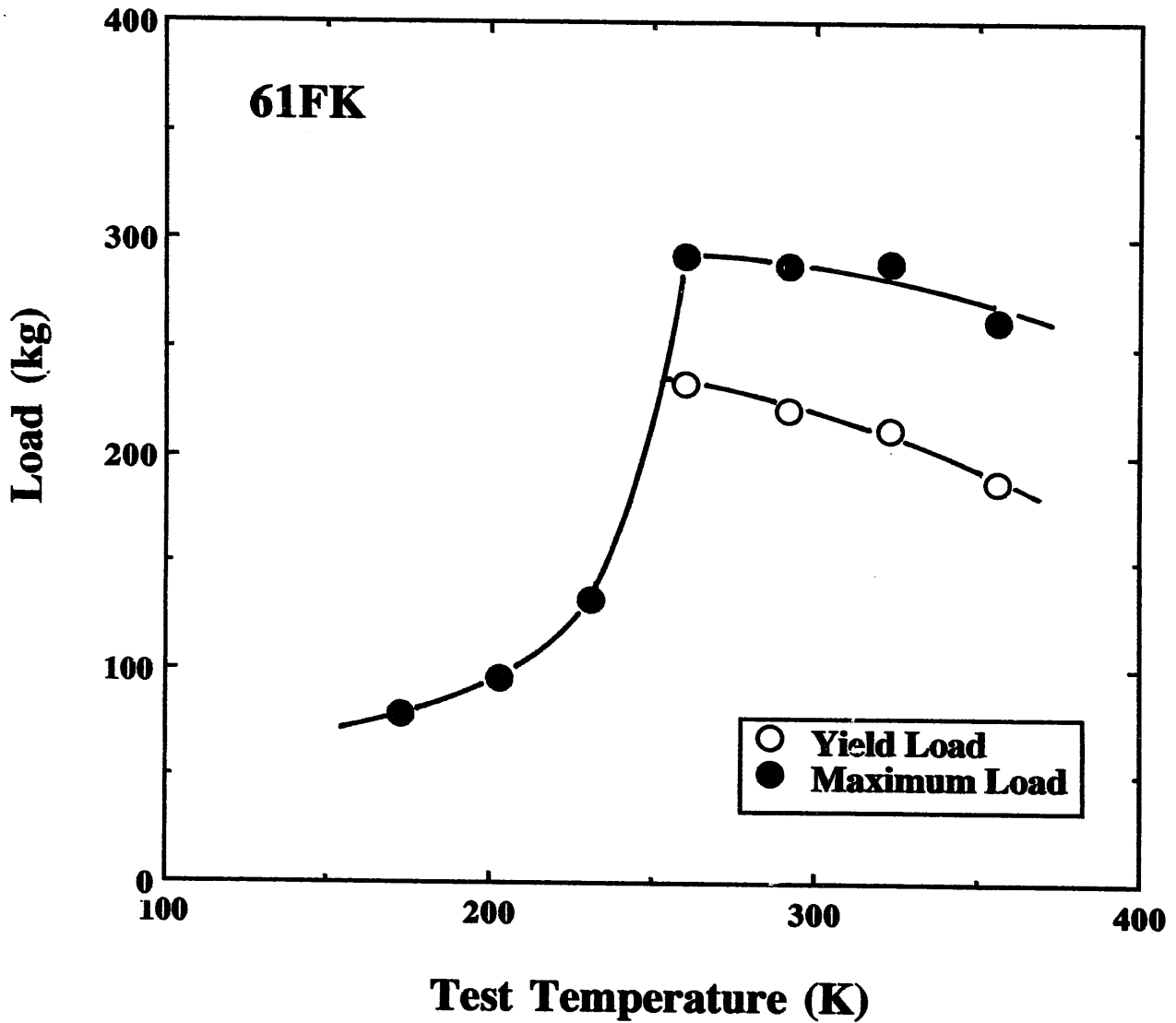


Fig. 4 Test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , and dynamic maximum load, P_m , for 61FK irradiated at 823 K with $8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10.

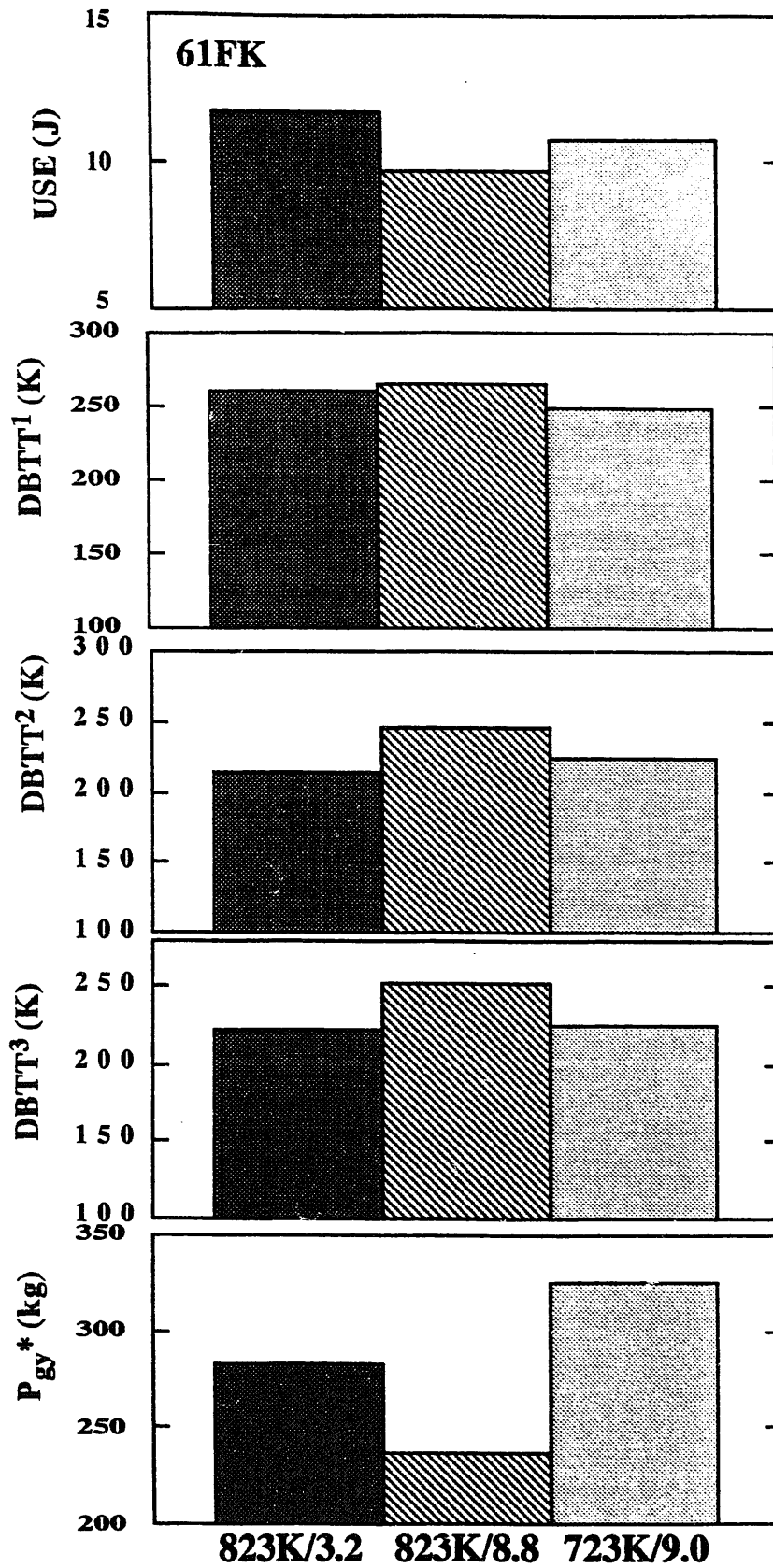


Fig. 5 Histogram of USE, DBTT¹, DBTT², DBTT³ and P_{gy}* for 61FK irradiated at 823K with two different neutron doses, together with the previous result irradiated at 723K [1].

$>DBTT^2 > DBTT^3$ である。また、本研究で得られた、照射量が $3.2 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ の場合（以後、低照射材とよぶ）と $8.8 \times 10^{26} \text{n/m}^2$ （高照射材とよぶ）を比較すると、いずれのDBTTも高照射材の方が高くなっているが、高照射材と低照射材間のDBTTの差は、4 K (DBTT¹)、29 K (DBTT²)、33 K (DBTT³) のようにDBTTの定義によってかなりの差がみられる。これは、図2において、低照射材の吸収エネルギーが試験温度の低下とともに単調に減少するのではなくて、250 K付近に棚を作ること起因している。一方、USEは、高照射材の方が低い値を示している。

表10と図5に $P_{s,*}$ の値を示したが、これは、例えば図3や図4の P_c と P_m が一致するときの荷重であり、材料固有の値と考えられるマイクロへき開破壊強度 ($\sigma_{r,*}$) と比例関係にある。すなわち、

$$\sigma_{r,*} \propto P_{s,*}$$

したがって、試験片寸法が同じであれば、 $P_{s,*}$ を比較することにより $\sigma_{r,*}$ の比較を行うことが可能となる。表10または図5から明らかなように、 $P_{s,*}$ 、したがって $\sigma_{r,*}$ は、照射条件に強く依存し、高照射材ではかなりの低下が認められる。

次に、前報の723 Kの結果を、照射量がそれとほぼ同じ823 K高照射材の結果と比較すると、823 Kの方がUSEや $P_{s,*}$ が低く、DBTT¹、DBTT²及びDBTT³が高い。この結果、 ΔUSE や $\Delta DBTT^1$ は823 Kの方が大きい。したがって、照射脆化は、照射温度823 Kの方が723 Kよりも大きいことがわかる。

3.2 61FS照射材の衝撃特性

61FS照射材について得られたシャルピー衝撃試験結果を表5と6に示す。また、全吸収エネルギーの試験温度依存性を図6に、 P_c と P_m の試験温度依存性を図7と図8に示す。これらの結果から求めたUSE、DBTT¹、DBTT²、DBTT³及び $P_{s,*}$ の値を表10と図9に示す。図6、図9及び表10には、比較のために前報[1]の723 K照射材の結果も示した。また、非照射材の結果[1]との比較から求めた照射によるUSEとDBTT¹の変化量 (ΔUSE 、 $\Delta DBTT^1$) を表11に示す。

これらの結果から明らかなように、この場合でも、 $DBTT^1 > DBTT^2 > DBTT^3$ である。但し、61FSでは、高照射材と低照射材の間におけるUSEとDBTT¹のそれぞれの差は非常に小さく、したがって照射量依存性はほとんど認められないのに対し、DBTT²、DBTT³及び $P_{s,*}$ にはかなりの差が認められる。これは、図6において、低照射材の吸収エネルギーが試験温度の低下とともに単調に減少するのではなくて、200 K付近に棚を作ること起因している。

次に、前報の723 Kの結果を、照射量がそれとほぼ同じ823 K高照射材の結果と比較すると、823 Kでは、USEと $P_{s,*}$ が大きく低下し、DBTT¹、DBTT²、DBTT³がかなり増加している。その結果、 ΔUSE や $\Delta DBTT^1$ も823 Kが大きい。したがって、61FSでは、照射温度823 Kの方が723 Kよりも照射脆化がかなり大き

Table 5 Charpy impact test results on 61FS irradiated to 3.2×10^{26} n/m² at 823 K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	Pmax (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
S02	292	9.20	292.6	368.9	---	---
S03	262	8.80	289.6	377.0	---	---
S05	233	5.15	310.1	375.8	328.8	1.62
S06	203	3.26	332.2	381.7	375.0	0.99
S07	172	3.43	---	409.2	409.2	0.93
S04	138	1.11	---	130.8	130.8	0.62
S08	326	10.48	265.8	338.2	---	---
S01	356	10.35	273.4	350.1	---	---

Table 6 Charpy impact test results on 61FS irradiated to 8.8×10^{26} n/m² at 823 K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	Pmax (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
S16	292	10.62	265.5	337.5	---	---
S15	261	8.81	280.3	352.6	---	---
S11	233	5.90	303.7	374.3	294.2	1.86
S13	203	3.19	320.8	369.1	367.2	0.99
S14	172	1.13	---	180.5	180.5	0.46
S09	141	0.75	---	139.9	139.9	0.46
S10	326	11.10	252.3	326.3	---	---
S12	356	10.72	264.8	344.8	---	---

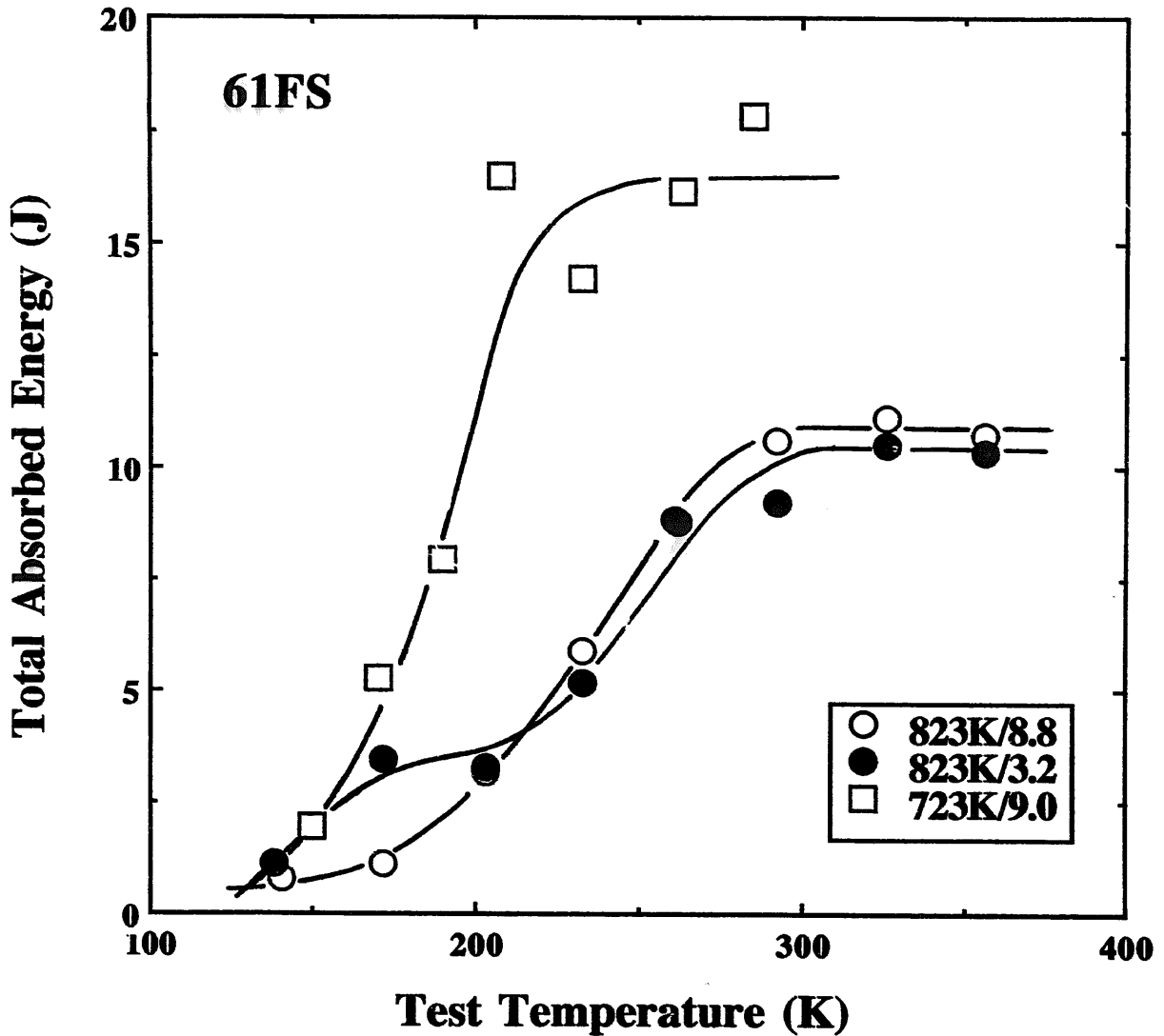


Fig. 6 Test temperature dependence of total absorbed energy for 61FS irradiated at 823 K with two different fast neutron doses in SMIR-10, together with the previous result irradiated at 723 K [1].

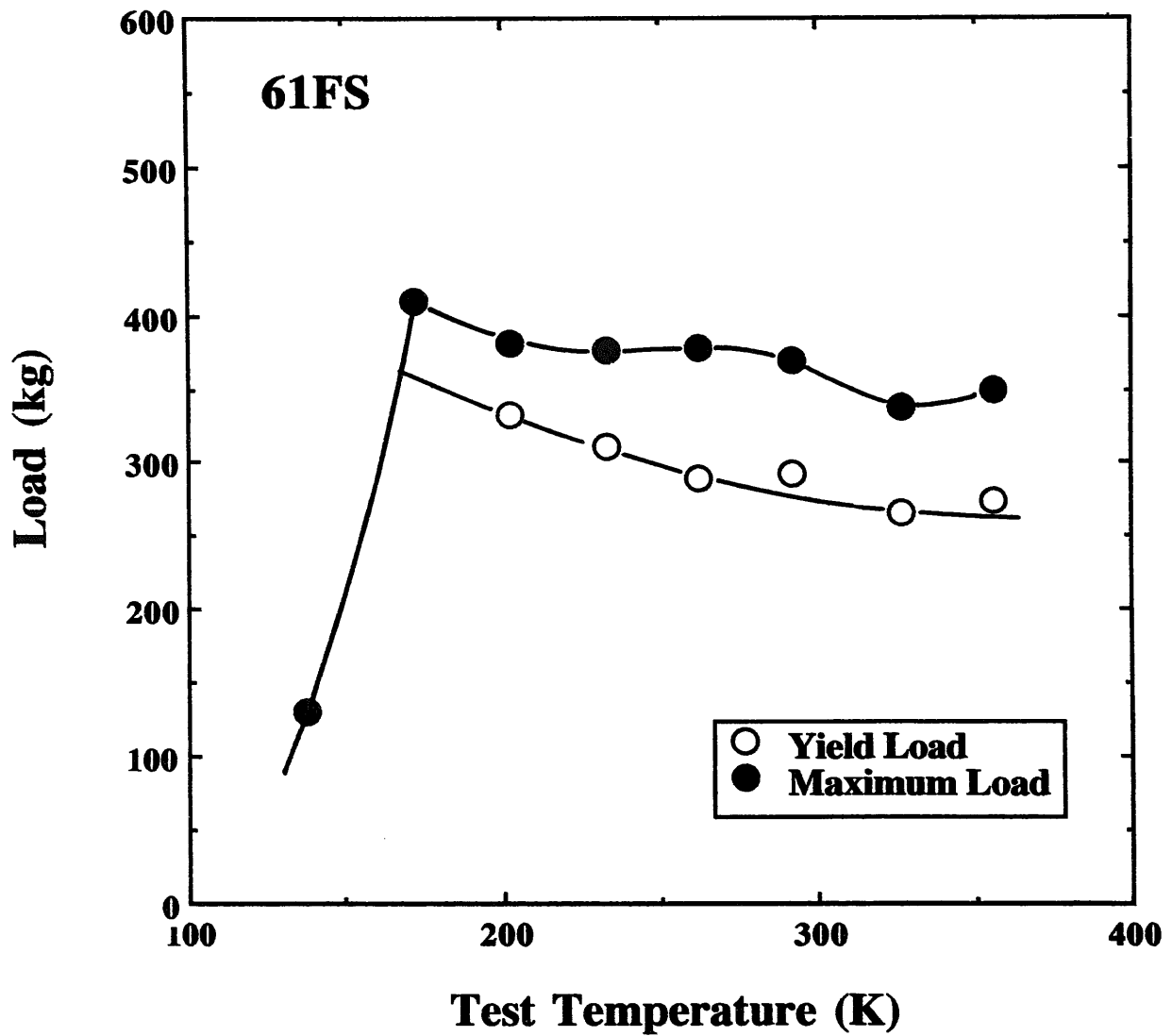


Fig. 7 Test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , and dynamic maximum load, P_m , for 61FS irradiated at 823 K with $3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10,

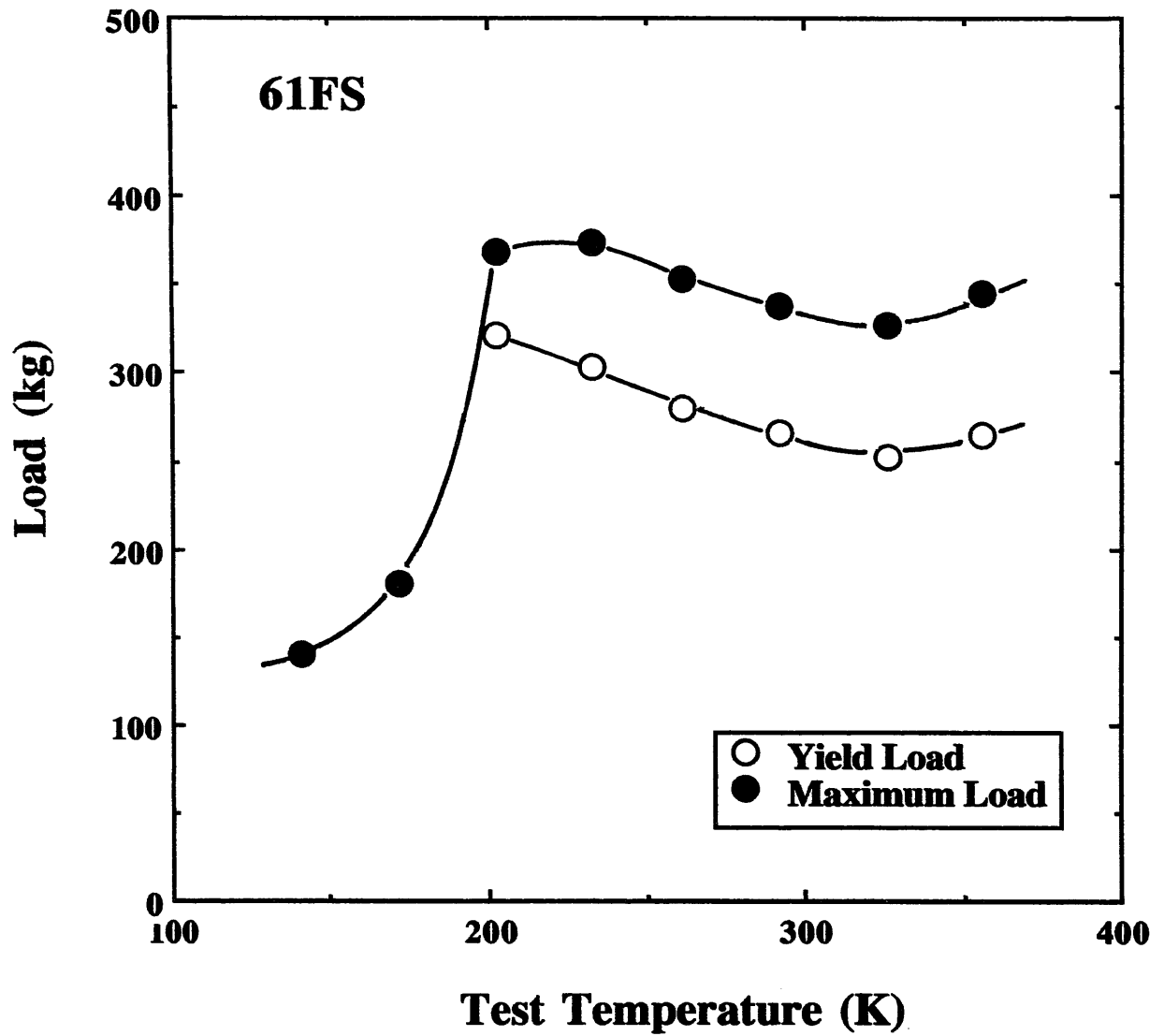


Fig. 8 Test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , and dynamic maximum load, P_m , for 61FS irradiated at 823 K with $8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10.

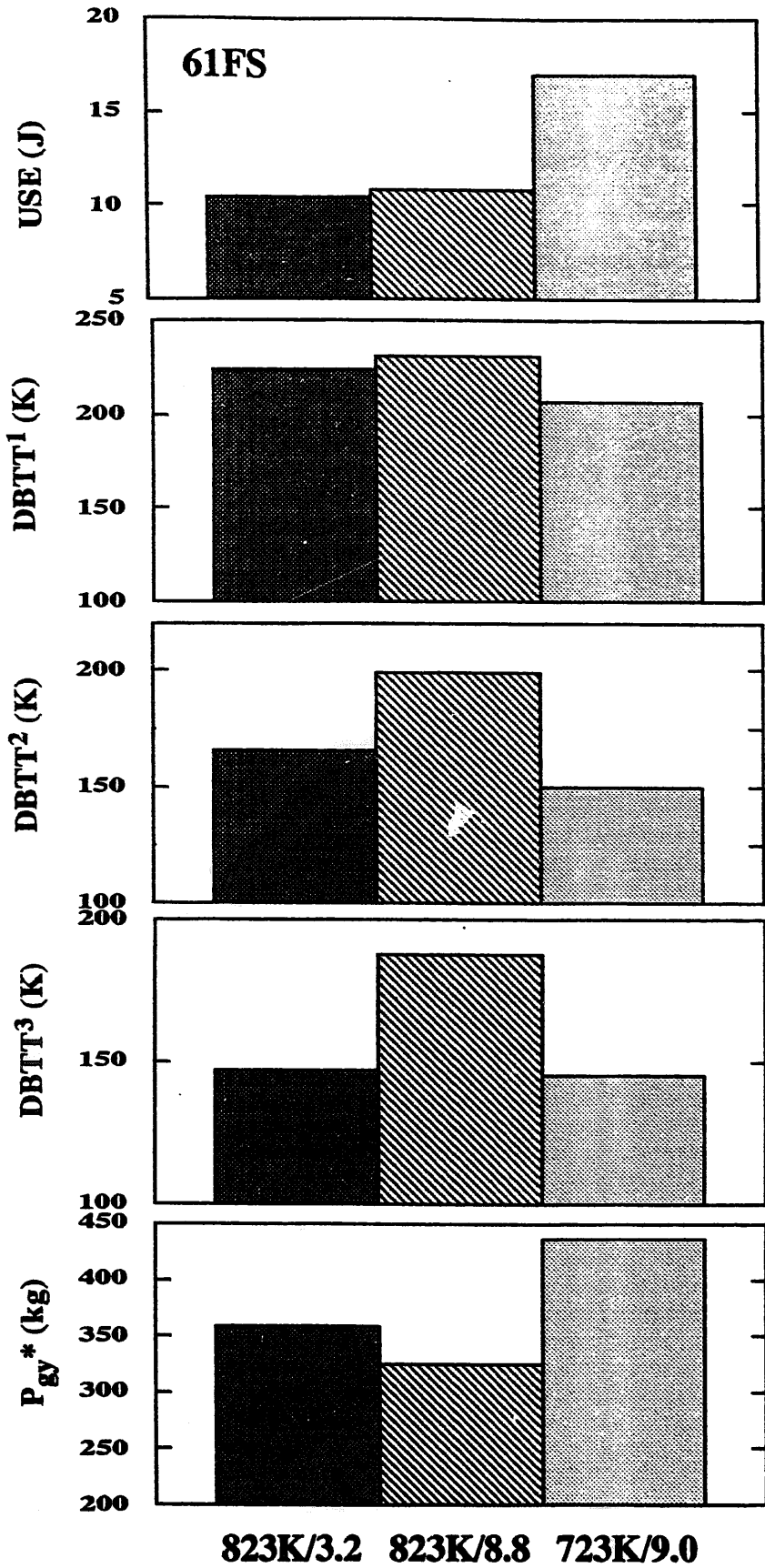


Fig. 9 Histogram of USE, DBTT¹, DBTT², DBTT³ and P_{gy}* for 61FS irradiated at 823K with two different neutron doses, together with the previous result irradiated at 723K [1].

いことになる。

3. 3 F9S照射材の衝撃特性

F9S照射材について得られたシャルピー衝撃試験の結果を表7と8に示す。また、全吸収エネルギーの試験温度依存性を図10に、 P_y と P_m の試験温度依存性を図11と12に示す。これらの結果から求めた USE 、 $DBTT^1$ 、 $DBTT^2$ 、 $DBTT^3$ 及び P_{gy}^* の値を表10と図13に示す。図10、13及び表10には、比較のために前報 [1] の723K照射材の結果も示してある。

F9Sでは、最低試験温度の142Kでも動的最大荷重レベルが400kg程度と非常に高く、この温度まで P_y と P_m の曲線が変わらないため、 $DBTT^2$ 及び P_{gy}^* を評価することができなかった。そこで、表10には USE 、 $DBTT^1$ 及び $DBTT^3$ を示した。これらの図あるいは表から、F9Sでは高照射材の方が低照射材よりも USE がやや高く、 $DBTT^1$ や $DBTT^3$ がわずかに低くなっているが、これは通常の照射量依存性とは逆の結果である。とくに、両者の差は、図10の230K付近における全吸収エネルギーに最も明瞭に現れている。照射脆化は、一般に降伏強度が高いほど（すなわち、照射硬化が大きいほど）、また最大強度が低いほど大きい。図11と12の比較では、降伏強度も最大強度も照射量による系統的な差は認められない。したがって、照射温度が比較的高い823Kでは、照射量が $3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ の段階で照射脆化がほぼ飽和し、その後の照射量では照射による組織の変化を熱的な組織の回復が打ち消すように働き、本研究のような結果をもたらしたものと推定される。しかし、図10や13から明らかのように、823Kでの照射脆化は、前報の723Kの結果に比較するとはるかに顕著である点に注意する必要がある。このことは、F9Sが耐照射性に優れているわけではないことを示している。

3. 4 NSCR9照射材の衝撃特性

NSCR9照射材について得られたシャルピー衝撃試験結果を表9に示す。また、全吸収エネルギーの試験温度依存性を図14に、 P_y と P_m の試験温度依存性を図15に示す。これらの結果から求めた USE 、 $DBTT^1$ 、 $DBTT^2$ 、 $DBTT^3$ 及び P_{gy}^* の値を表10と図16に示す。図14、図16及び表10には、比較のために前報 [1] の723K照射材の結果も示した。また、表11に、非照射材の結果 [1] との比較から求めた照射による USE と $DBTT^1$ の変化量 (ΔUSE 、 $\Delta DBTT^1$) を示す。

この場合も $DBTT^1 > DBTT^2 > DBTT^3$ である。また、前報の723Kの結果を照射量は異なるが823K高照射材の結果と比較すると、823Kでは723Kよりも、 USE がかなり低く、 $DBTT^1$ がかなり高いのに対して、 $DBTT^2$ と $DBTT^3$ は、逆に低下している。これは、図14において、試験温度の200K付近を境にし、それより低温域と高温域では吸収エネルギーが逆転していることに対応している。したがって、NSCR9では、 $DBTT$ の定義によって照射脆化の評価が逆転することになる。この結果、及び上に述べた61FKや61FSにおいて $DBTT$ の定義の違いにより脆化量がかなり異なった結果は、照射脆化の評価には、本研究のように、複数の $DBTT$ を用いることが

Table 7 Charpy impact test results on F9S irradiated to 3.2×10^{26} n/m² at 823 K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	P _{max} (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
T10	292	15.23	269.1	347.0	---	---
T09	262	12.85	284.4	365.6	---	---
T11	233	8.51	293.7	365.8	---	---
T12	200	6.94	313.0	379.9	248.5	2.20
T14	170	5.79	333.0	422.2	403.8	1.57
T15	143	2.84	---	400.6	400.6	0.86
T13	327	13.40	249.1	316.1	---	---

Table 8 Charpy impact test results on F9S irradiated to 8.8×10^{26} n/m² at 823 K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	P _{max} (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
T22	292	15.82	271.9	354.9	---	---
T18	263	15.06	274.8	349.9	---	---
T24	231	14.00	299.8	369.2	---	---
T20	201	7.11	305.8	379.7	255.1	2.23
T17	171	5.24	318.8	403.2	379.0	1.53
T21	142	3.19	---	406.1	406.1	0.86
T23	327	15.83	256.8	328.3	---	---

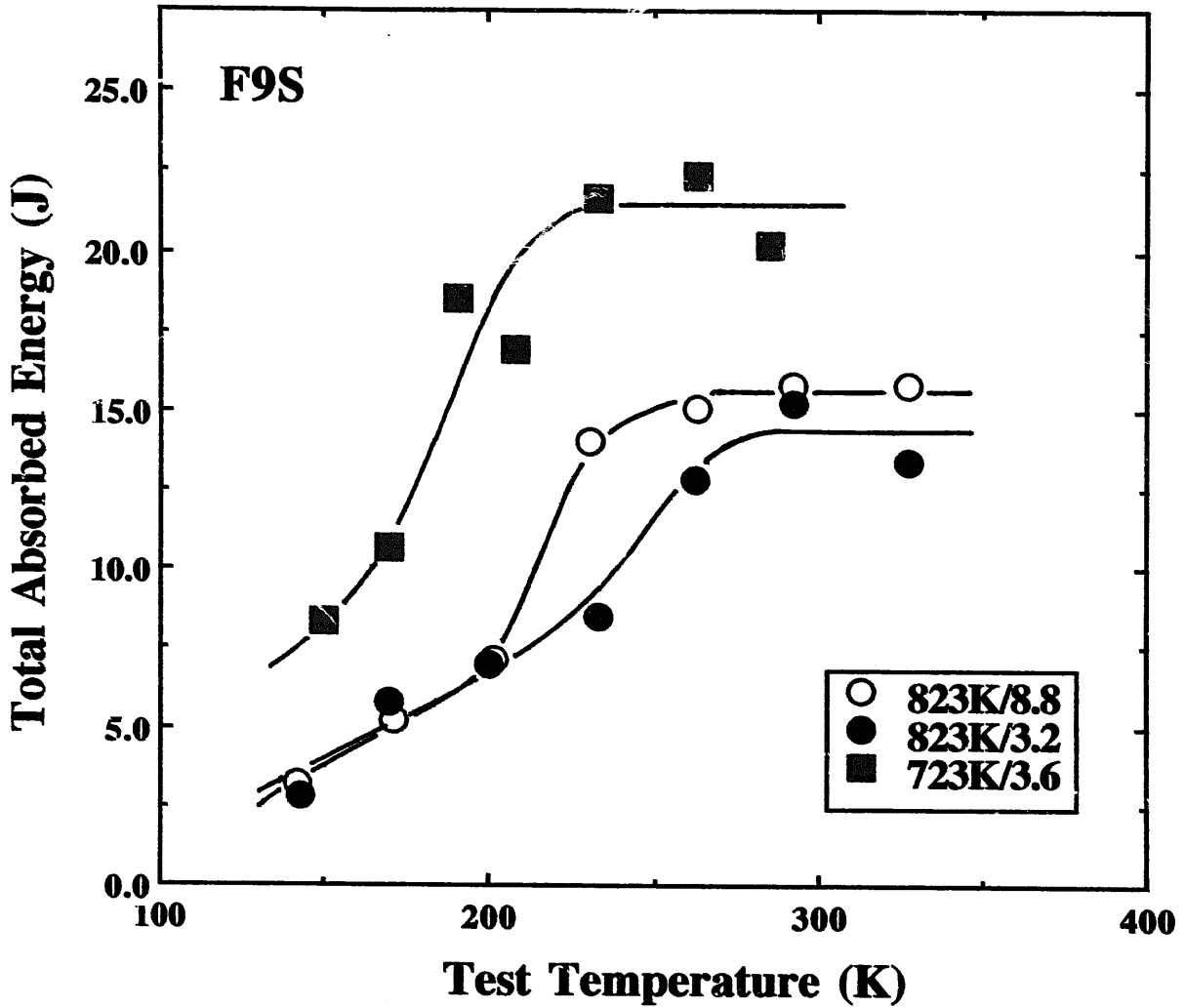


Fig. 10 Test temperature dependence of total absorbed energy for F9S irradiated at 823 K with two different fast neutron doses in SMIR-10, together with the previous result irradiated at 723 K [1].

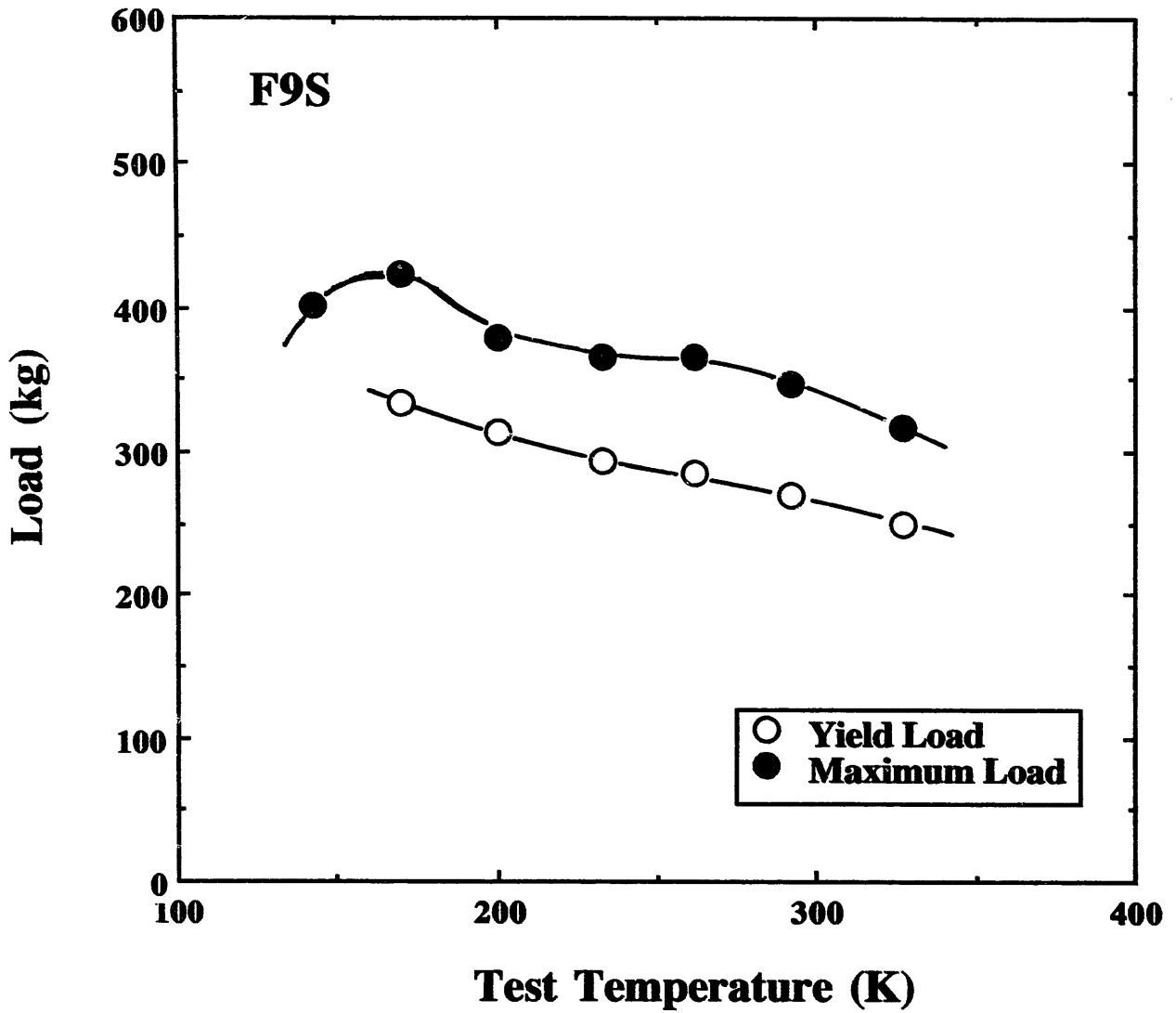


Fig. 11 Test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , and dynamic maximum load, P_m , for F9S irradiated at F9S with $3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10,

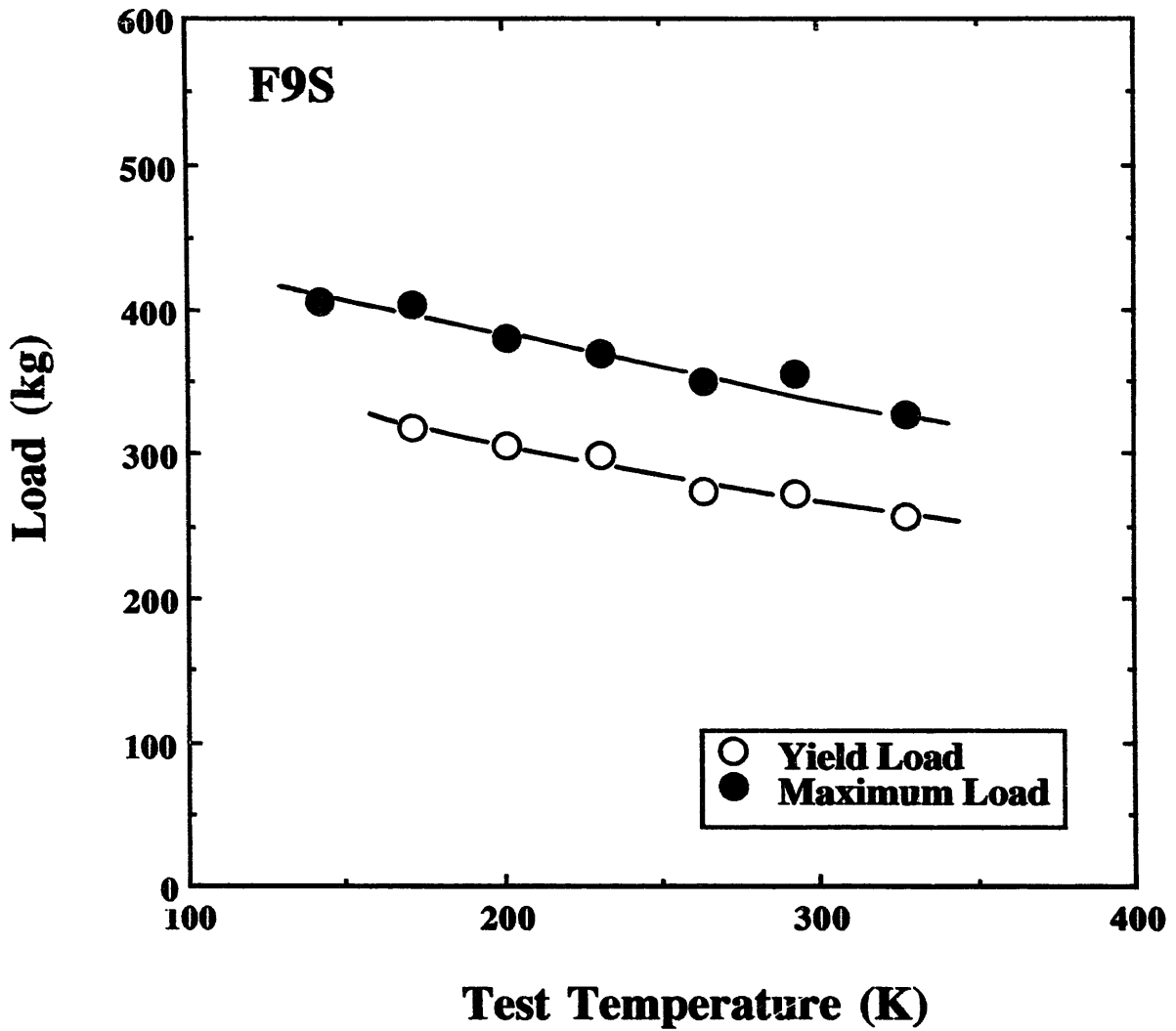


Fig. 12 Test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , and dynamic maximum load, P_m , for F9S irradiated at 823 K with $8.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10.

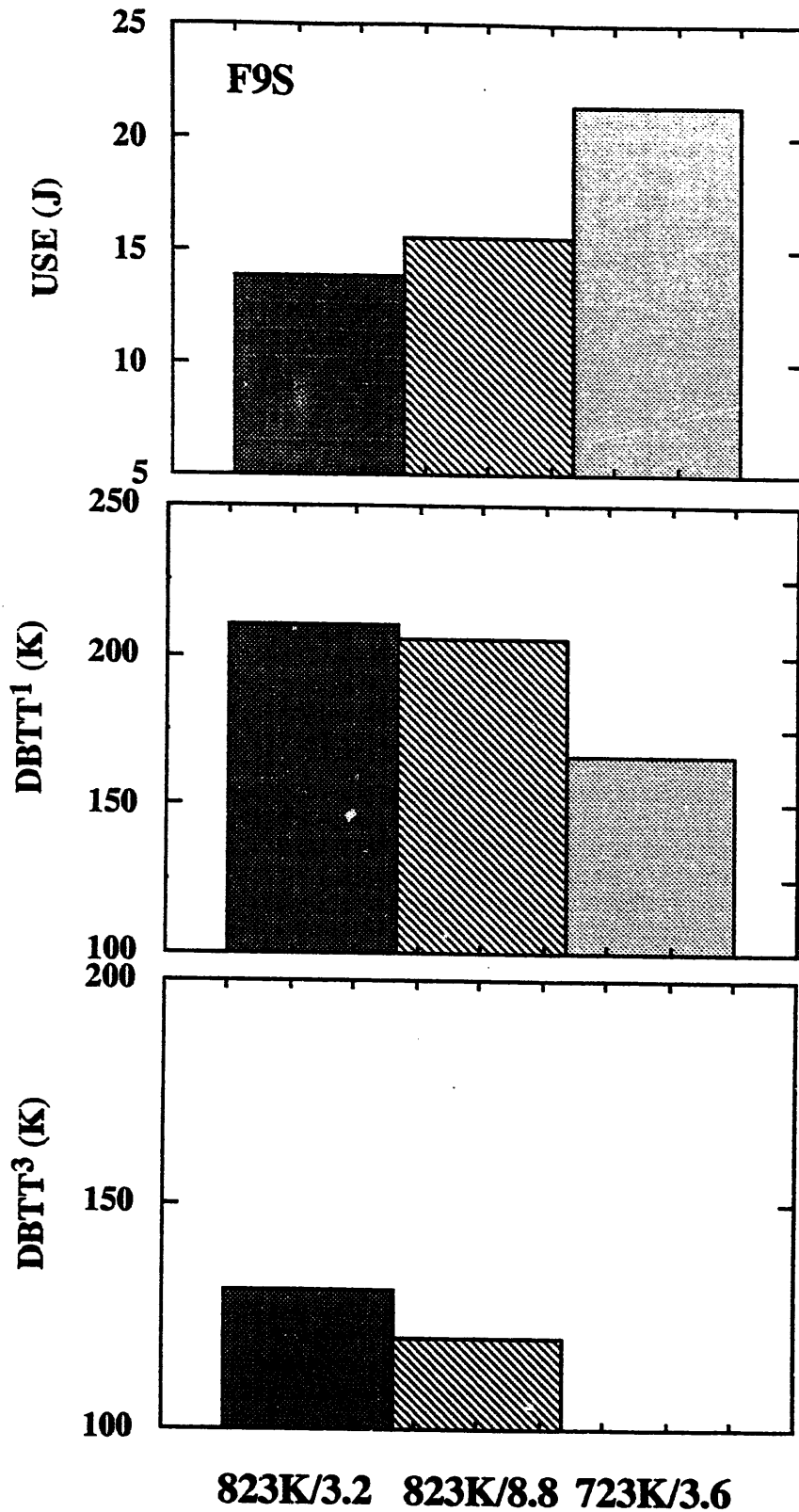


Fig. 13 Histogram of USE, DBTT¹, DBTT², DBTT³ and P_{gy}* for F9S irradiated at 823K with two different neutron doses, together with the previous result irradiated at 723K [1].

Table 9 Charpy impact test results on NSCR9 irradiated to $9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ at 823K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	Pmax (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
N16	292	8.15	284.0	369.7	---	---
N12	261	6.05	287.5	369.0	229.1	2.03
N013	233	4.27	311.9	400.8	400.8	1.22
N15	203	3.56	314.3	384.9	384.9	0.98
N14	174	2.96	---	391.0	391.0	0.84
N11	140	0.86	---	146.3	146.3	0.35
N10	327	10.68	274.9	343.6	---	---
N09	356	9.00	262.5	343.3	---	---

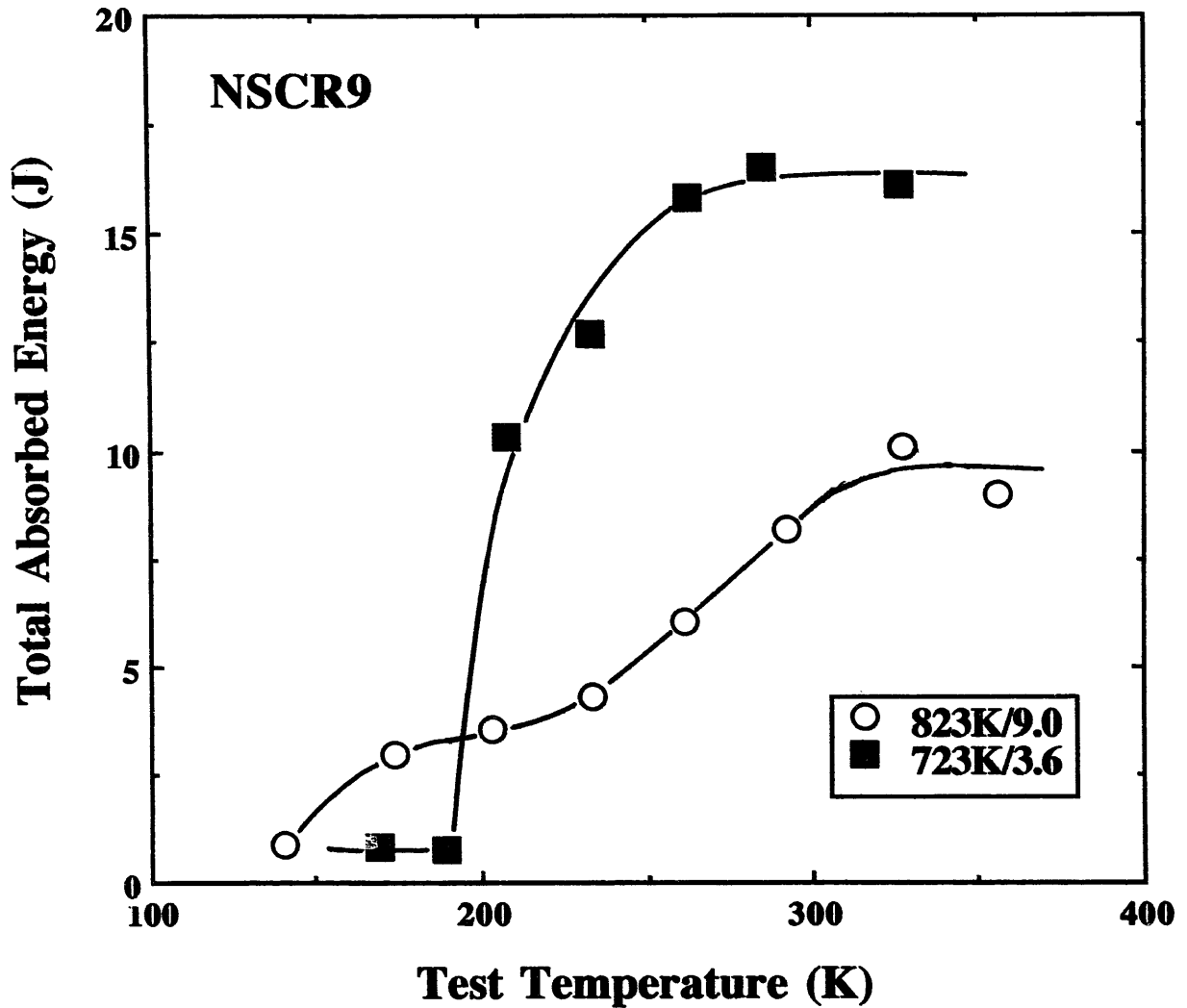


Fig. 14 Test temperature dependence of total absorbed energy for NSCR9 irradiated at 823 K with $9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10, together with the previous result irradiated at 723 K [1].

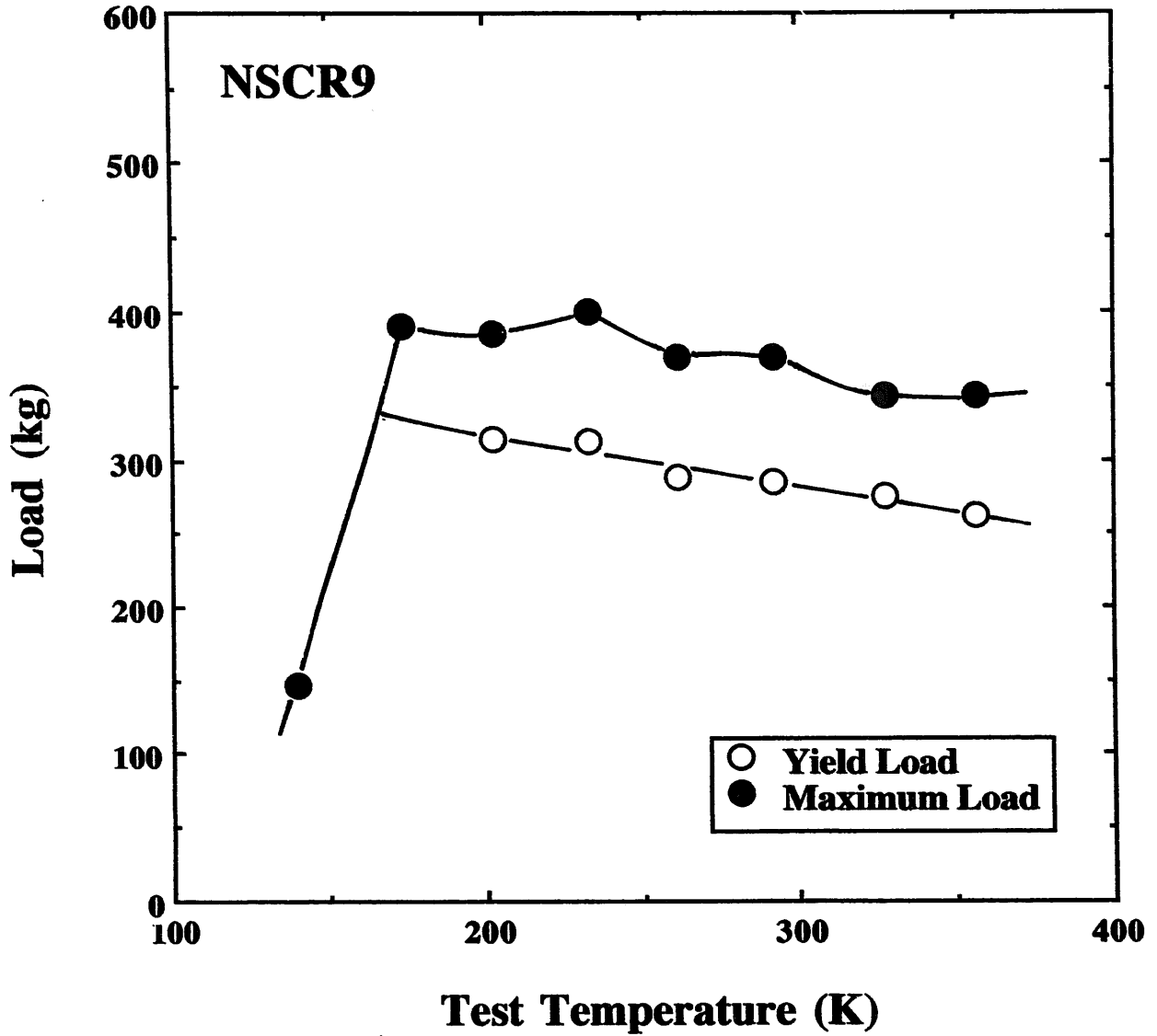


Fig. 15 Test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , and dynamic maximum load, P_m , for NSCR9 irradiated at 823 K with $9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10,

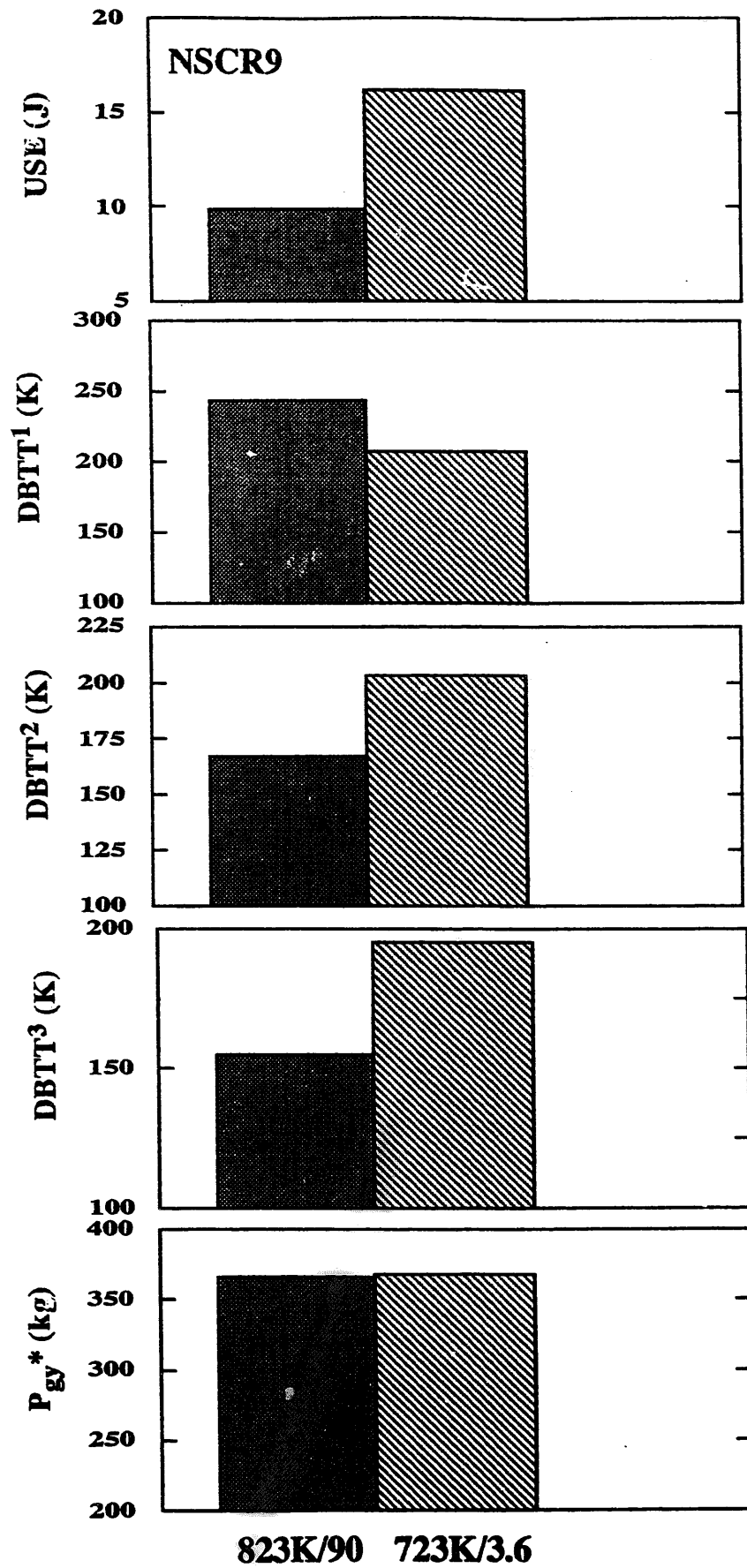


Fig. 16 Histogram of USE, DBTT¹, DBTT², DBTT³ and P_{gy}^{*} for NSCR9 irradiated at 823K with two different neutron doses, together with the previous result irradiated at 723K [1].

必要であることを示している。

3. 5 4鋼種の照射材の衝撃特性の比較

4鋼種の照射材の衝撃特性を比較した結果を表10と表11, 及び図17~25に示す。

低照射材(但し, NSCR9を除く)では, USEは, F9S, 61FK, 61FSの順に高く, DBTT¹とDBTT³は, F9S, 61FS, 61FKの順に低くなっている。また, P_yとP_mは, いずれも, 61FS, F9S, 61FKの順に高い。一方, 高照射材では, USEはF9S, 61FS, NSCR9, 61FKの順に高く, DBTT¹は, それと同じ順に低くなっている。但し, DBTT³は, NSCR9と61FSの順位が入れかわり, F9S, NSCR9, 61FS, 61FKの順に低い。また, P_y^{*}は, NSCR9, 61FS, 61FKの順に高いが, これはDBTT³の低い方からの順位と対応している。さらに, P_yとP_mは, 61FKで低いが, 他の3鋼種はほぼ同じ値を示している。

4. 結 言

SMIR-10において照射温度823Kで高速中性子照射量(3.2~9.0)×10²⁶n/m²(E>0.1MeV)の照射を受けた4種類のフェライト鋼, すなわち61FK, 61FS, ASTM A213T9材(F9S)及びNSCR9材について, 計装化シャルピー衝撃試験を行って全吸収エネルギー(E_t), 動的降伏荷重(P_y), 動的最大荷重(P_m), 脆性破壊開始荷重(P_t)等を測定し, それらの値から延性脆性遷移温度(DBTT), 上部棚エネルギー(USE), 及びマイクロへき開破壊強度(σ_t^{*})と比例関係にあるP_y^{*}を求めた。ここで, P_y^{*}はP_yとP_mの交点における荷重として求め, またDBTTは3つの方法で求めた。すなわち, 吸収エネルギーがUSEの1/2になる温度(DBTT¹), 動的降伏荷重と動的最大荷重が等しくなる温度(DBTT²), 及び吸収エネルギーが2Jになる温度(フルサイズ試験片の10Jに対応する, DBTT³)である。用いた試験片はいずれの鋼種の場合もJIS4号シャルピー試験片(寸法: 2mm×10mm×55mm, Vノッチ: 深さ2mm, 開き角度45度, ノッチ底半径0.25mm)である。得られた主な結果を以下に記す。

1) 得られたDBTTは, DBTT²が低すぎて求められなかったF9Sを除く3鋼種で, DBTT¹>DBTT²>DBTT³であった。また, F9SでもDBTT¹>DBTT³であった。

2) DBTT¹は, いずれの鋼種においても, 本照射量の範囲では照射量にあまり依存しなかった。しかし, 61FKと61FSでは, DBTT²やDBTT³は明瞭な照射量依存性を示した。これは, 吸収エネルギーの低下する低温域で, 吸収エネルギー-温度曲線の示す挙動に起因した。

3) 低照射量(3.2×10²⁶n/m²)におけるDBTT¹は, 低いほうからF9S,

Table 10 The values of DBTT¹, DBTT², DBTT³, USE and P_{gy}* for 61FK, 61FS, F9S and NSCR9 tested in this work, together with those in the previous work irradiated at 723K.

鋼種	USE (J)	DBTT ¹ (K)	DBTT ² (K)	DBTT ³ (K)	P _{gy} * (kg)
61FK (823K/3.2 x 10 ²⁶ n/m ²)	11.73	261	223	214	283
61FK (823K/8.8 x 10 ²⁶ n/m ²)	9.66	265	252	247	237
61FK (723K/9.0 x 10 ²⁶ n/m ²)	10.76	249	225	225	325
61FS (823K/3.2 x 10 ²⁶ n/m ²)	10.42	224	166	147	358
61FS (823K/8.8 x 10 ²⁶ n/m ²)	10.81	231	199	188	325
61FS (723K/9.0 x 10 ²⁶ n/m ²)	17.01	207	150	145	437
F9S (823K/3.2 x 10 ²⁶ n/m ²)	13.83	210	---	131	---
F9S (823K/8.8 x 10 ²⁶ n/m ²)	15.57	205	---	120	---
F9S (723K/3.6 x 10 ²⁶ n/m ²)	21.41	166	---	---	---
NSCR9 (823K/9.0 x 10 ²⁶ n/m ²)	9.84	244	167	155	336
NSCR9 (723K/3.6 x 10 ²⁶ n/m ²)	16.16	208	203	195	368

Table 11 The values of Δ USE and Δ DBTT¹ for 61FK, 61FS, F9S and NSCR9 tested so far.

鋼種	USE (J)	Δ USE (J)	DBTT ¹ (K)	Δ DBTT ¹ (K)
61FK (Unirradiated)	16.9	---	202	---
61FK (823K/3.2 x 10 ²⁶ n/m ²)	11.73	- 5.17	261	+ 59
61FK (823K/8.8 x 10 ²⁶ n/m ²)	9.66	- 7.24	265	+ 63
61FK (723K/9.0 x 10 ²⁶ n/m ²)	10.76	- 6.14	249	+ 47
61FS (Unirradiated)	20.0	---	160	---
61FS (823K/3.2 x 10 ²⁶ n/m ²)	10.42	- 9.58	224	+ 64
61FS (823K/8.8 x 10 ²⁶ n/m ²)	10.81	- 9.19	231	+ 71
61FS (723K/9.0 x 10 ²⁶ n/m ²)	17.01	- 2.99	207	+ 47
F9S (Unirradiated)	---	---	---	---
F9S (823K/3.2 x 10 ²⁶ n/m ²)	13.83	---	210	---
F9S (823K/8.8 x 10 ²⁶ n/m ²)	15.57	---	205	---
F9S (723K/3.8 x 10 ²⁶ n/m ²)	21.41	---	166	---
NSCR9 (Unirradiated)	16.1	---	185	---
NSCR9 (823K/9.0 x 10 ²⁶ n/m ²)	9.84	- 6.16	244	+ 59
NSCR9 (723K/3.6 x 10 ²⁶ n/m ²)	16.16	+ 0.06	208	+ 23

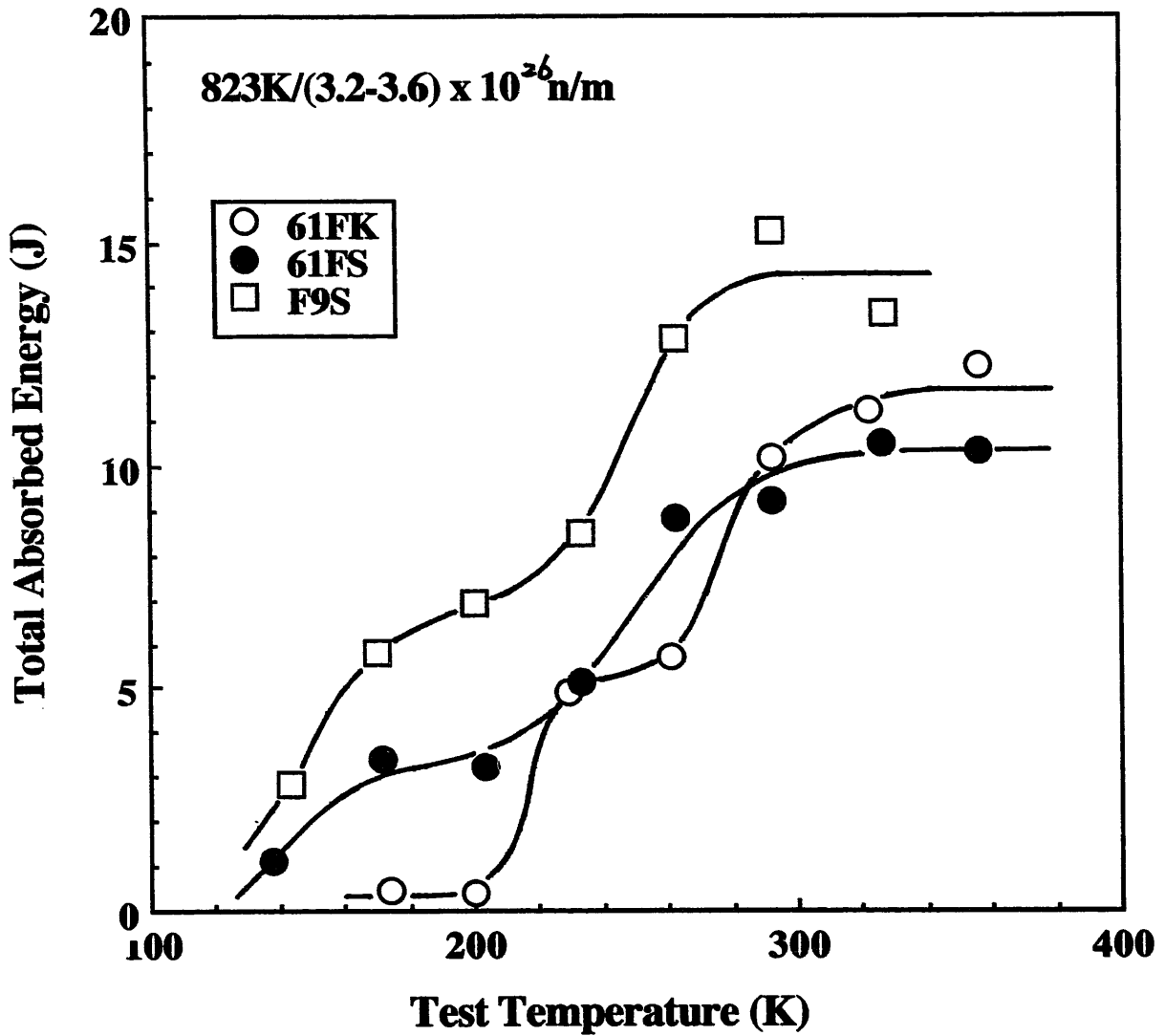


Fig. 17 Comparison of test temperature dependence of total absorbed energy between three kinds of ferritic steels irradiated at 823 K with $3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10,

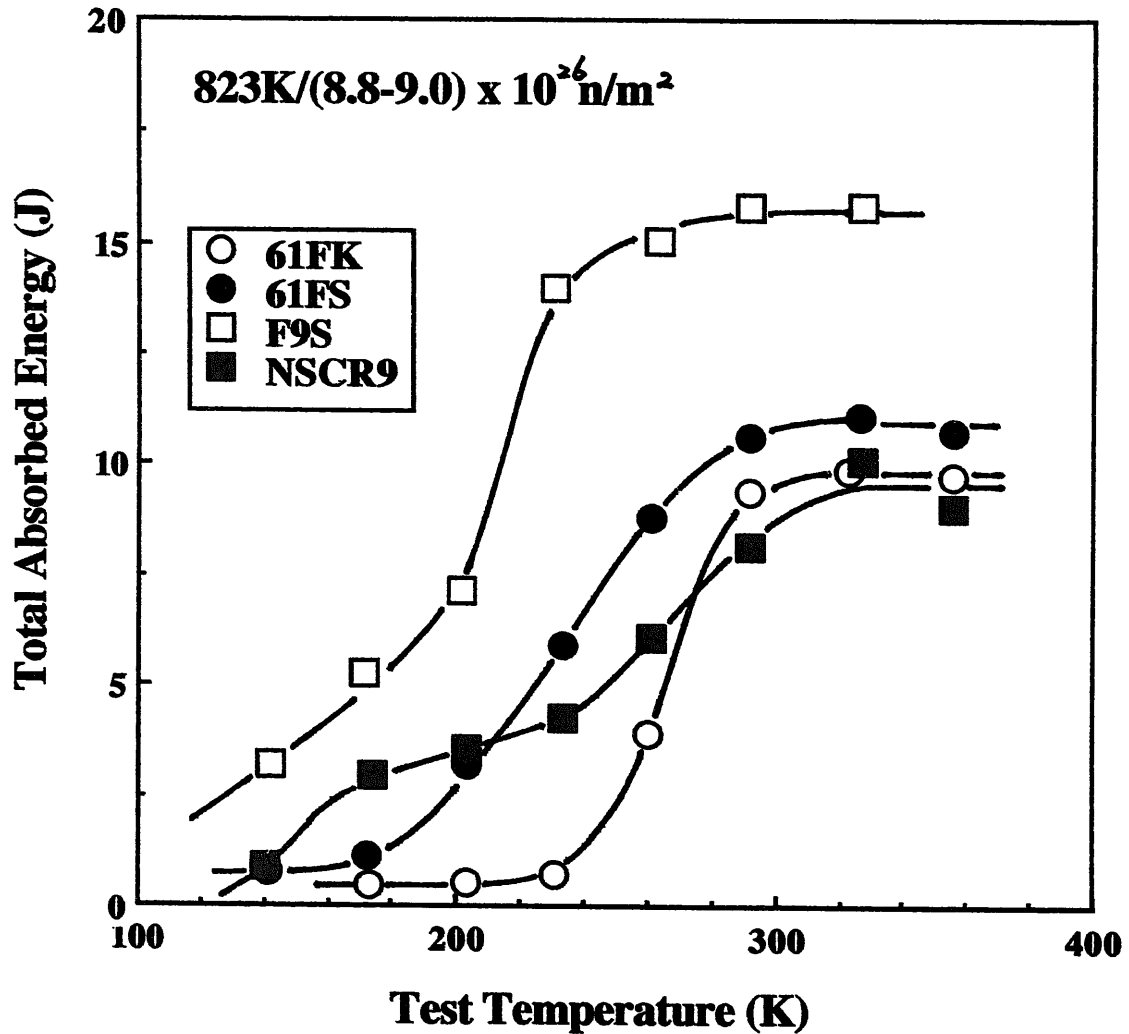


Fig. 18 Comparison of test temperature dependence of total absorbed energy between four kinds of ferritic steels irradiated at 823 K with $(8.8-9.0) \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10,

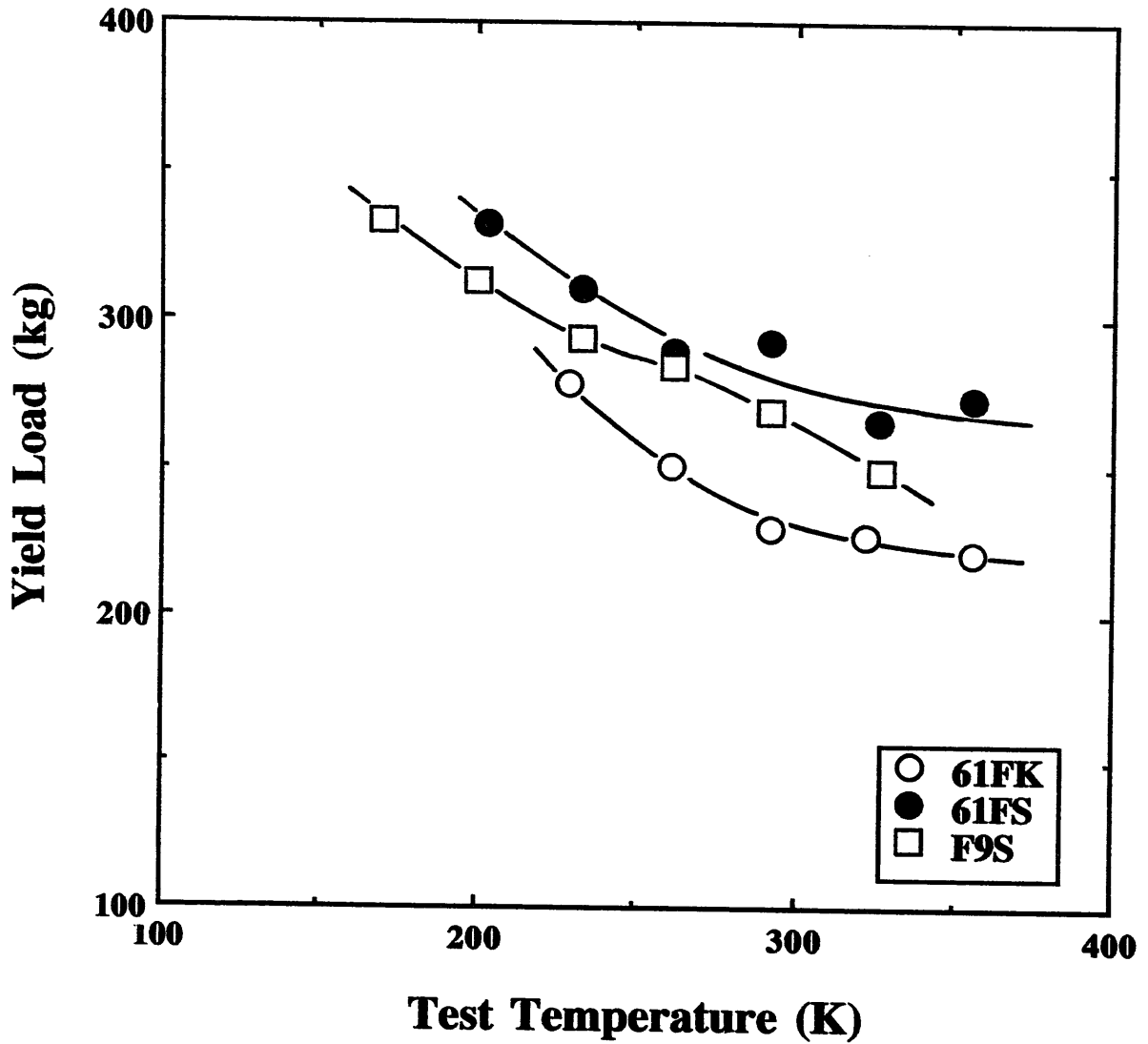


Fig. 19 Comparison of test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , between three kinds of ferritic steels irradiated at 823 K with $3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10,

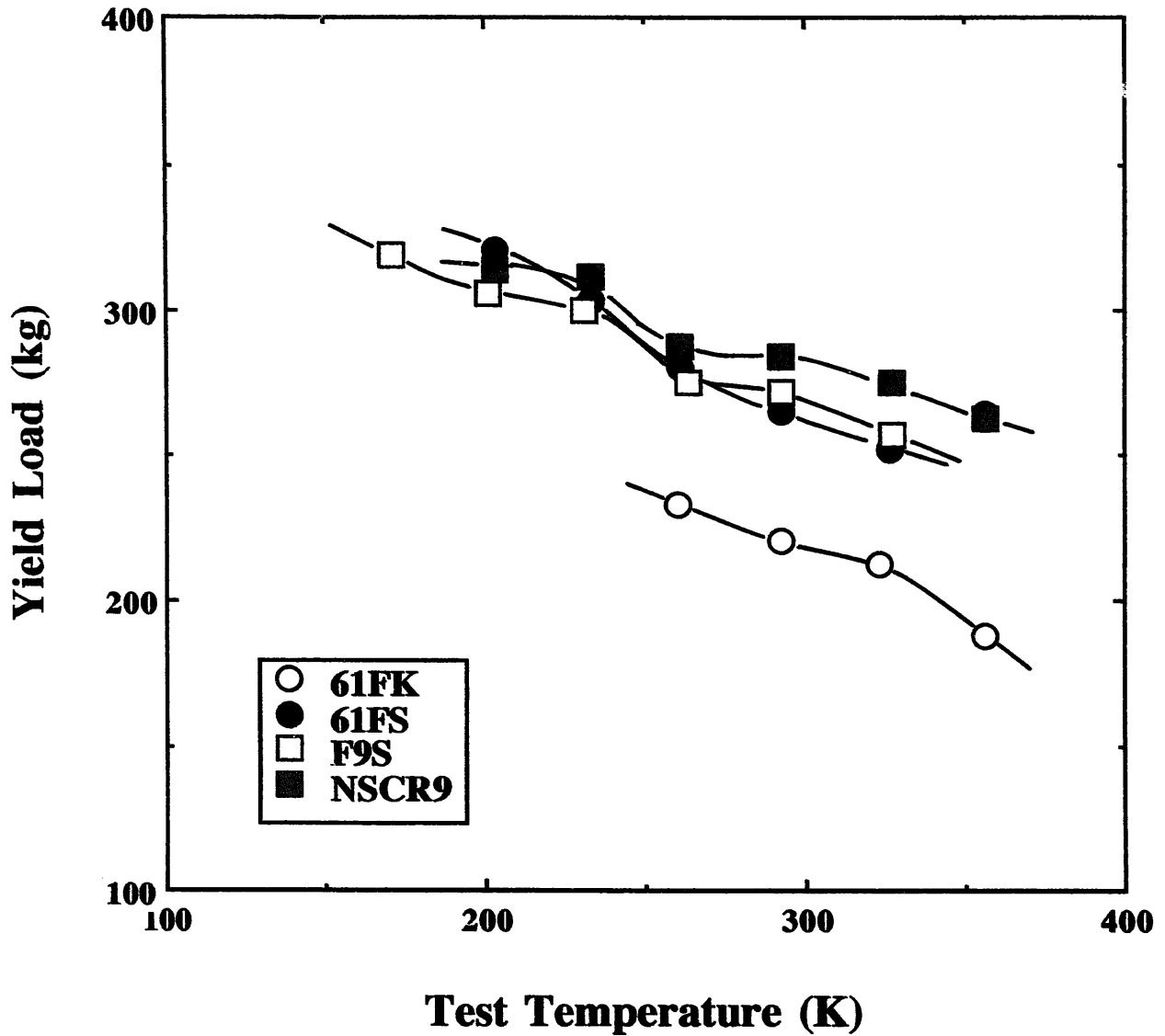


Fig. 20 Comparison of test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , between four kinds of ferritic steels irradiated at 823 K with $(8.8-9.0) \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10,

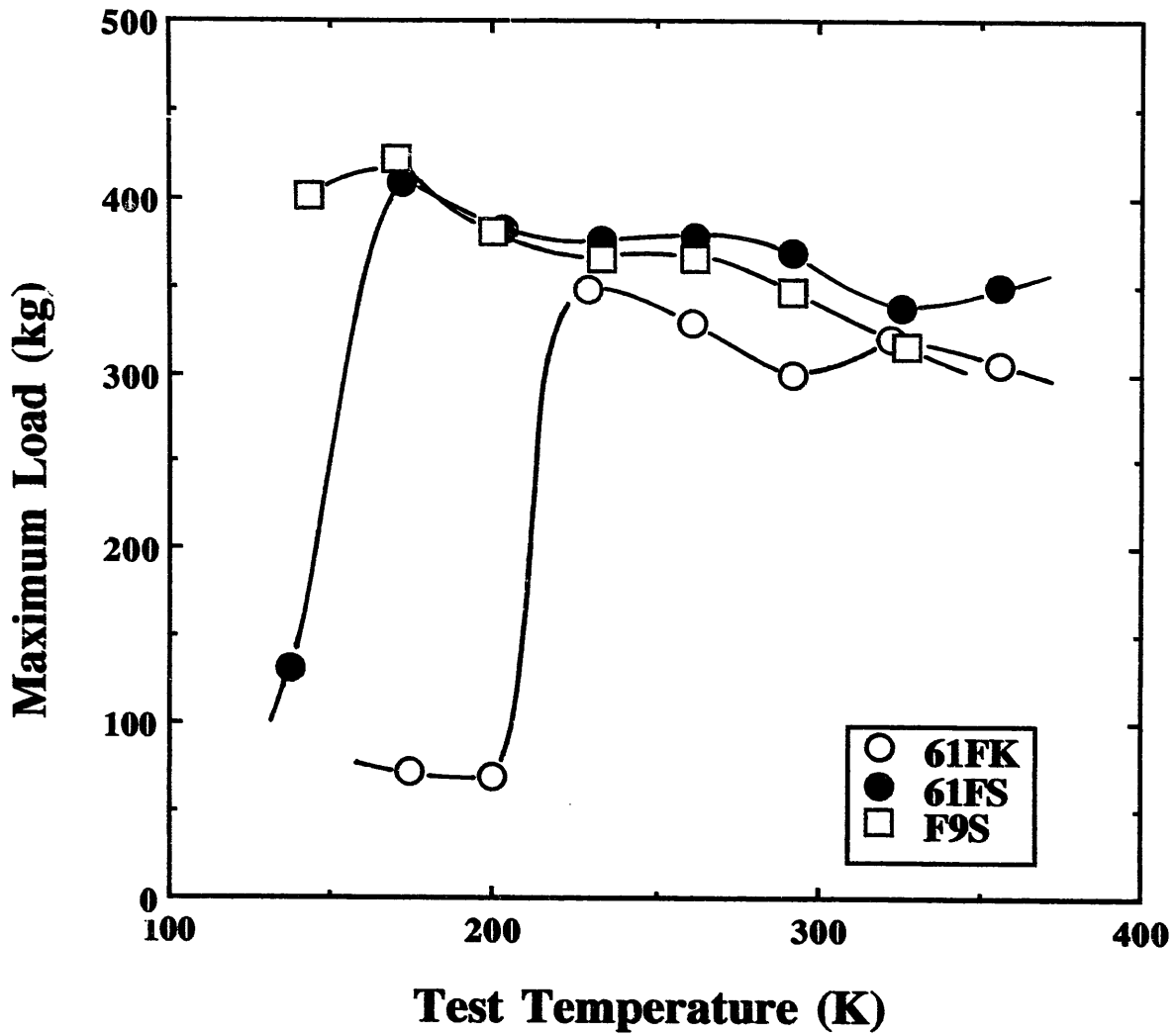


Fig. 21 Comparison of test temperature dependence of dynamic maximum load, P_m , between three kinds of ferritic steels irradiated at 823 K with $3.2 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10,

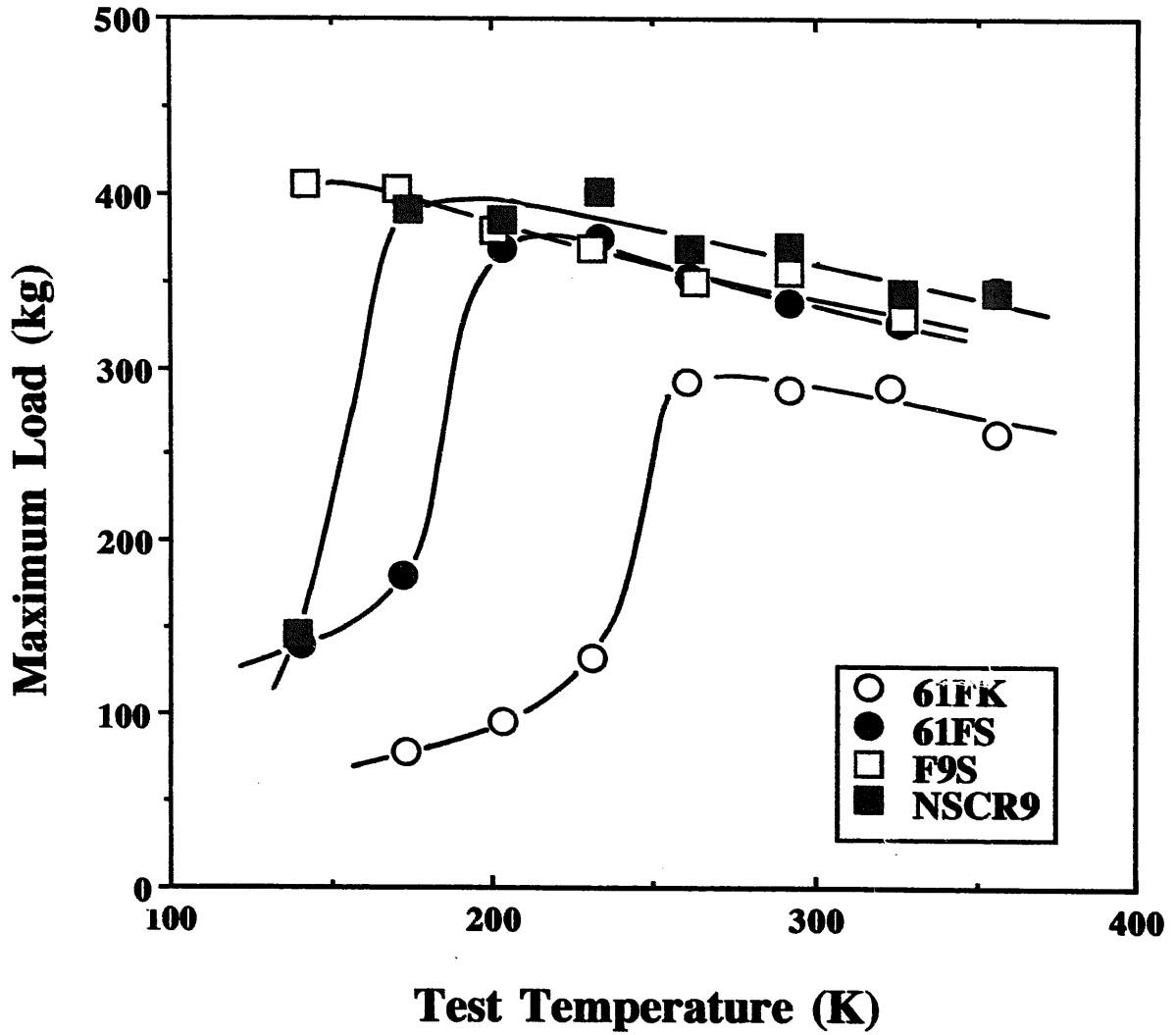


Fig. 22 Comparison of test temperature dependence of dynamic maximum load, P_m , between four kinds of ferritic steels irradiated at 823 K with $(8.8-9.0) \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10,

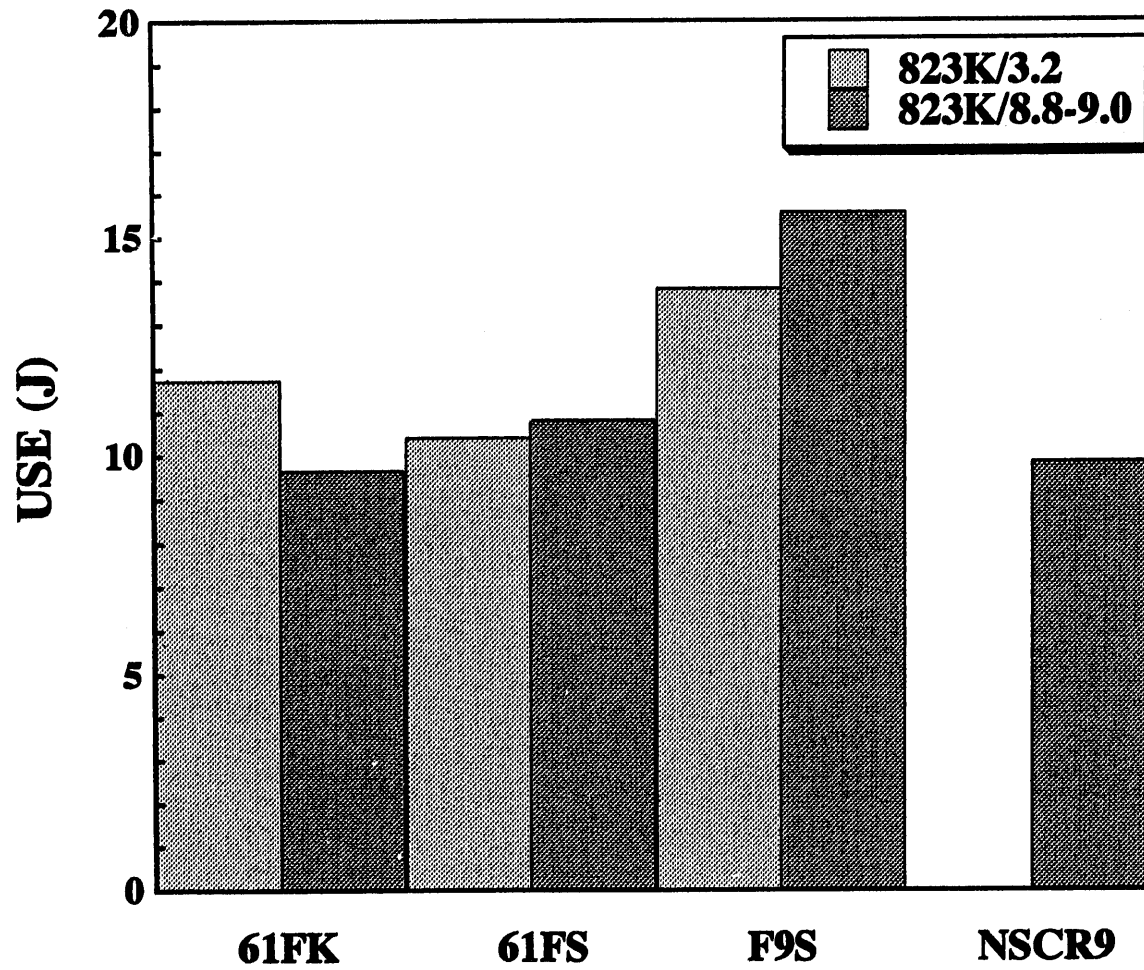


Fig. 23 Comparison of USE between four kinds of ferritic steels irradiated in SMIR-10.

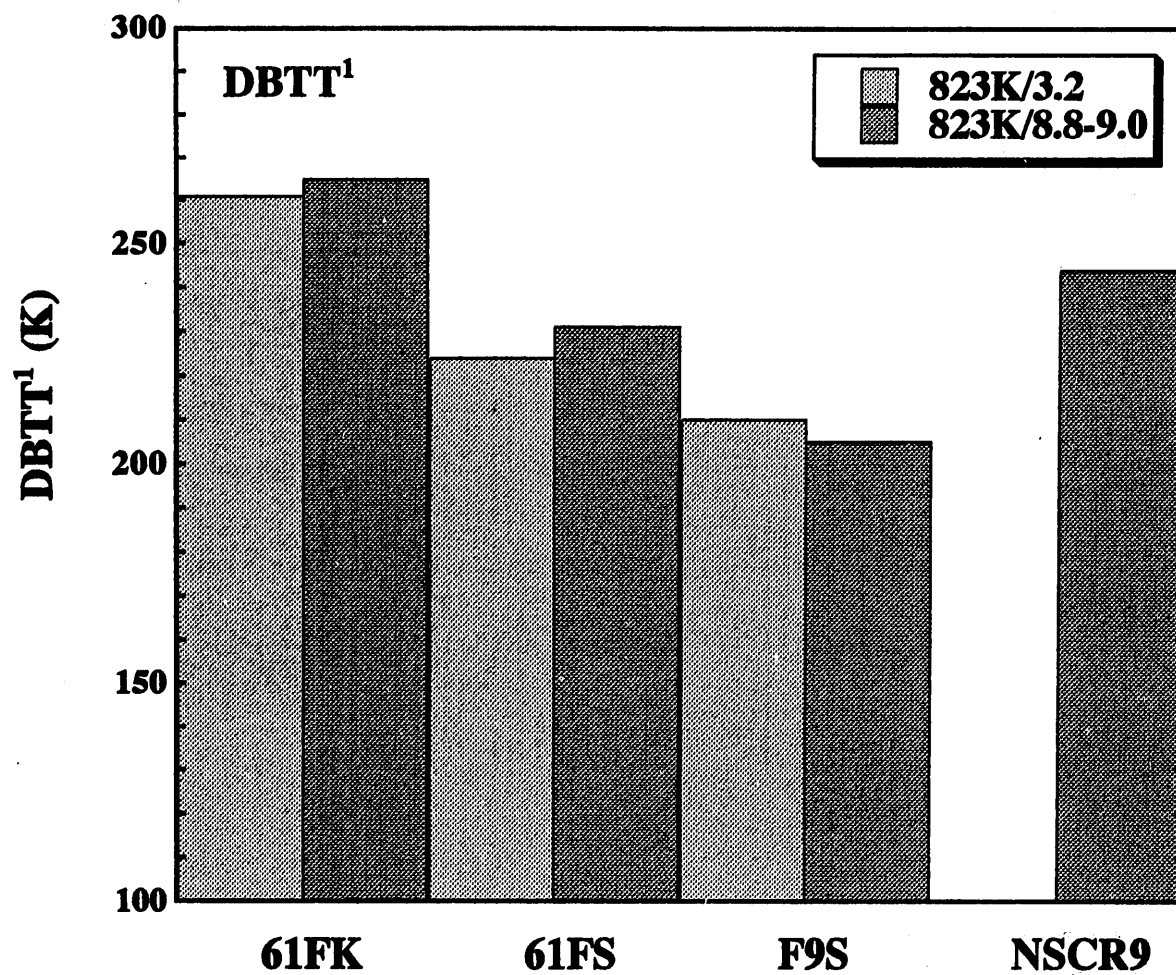


Fig. 24 Comparison of DBTT¹ between four kinds of ferritic steels irradiated in SMIR-10.

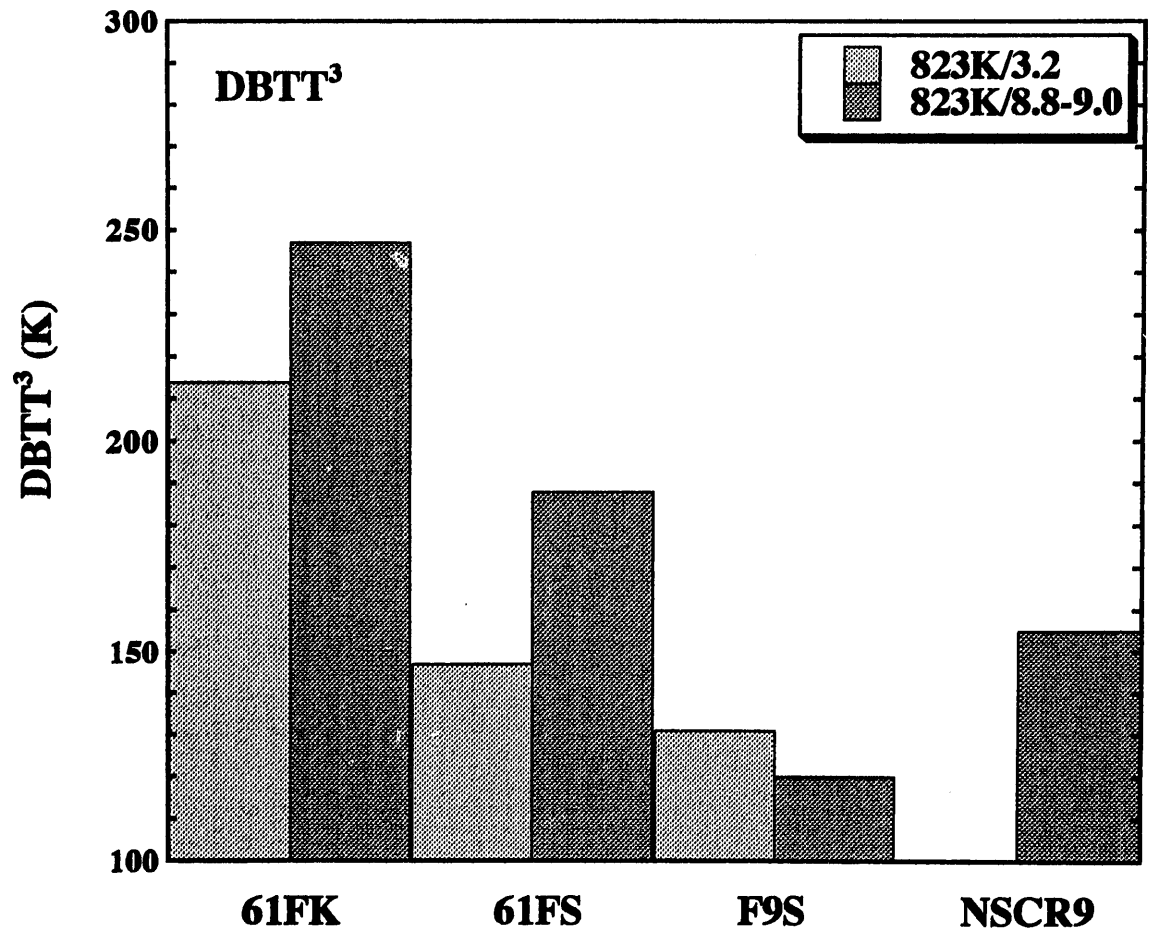


Fig. 25 Comparison of DBTT³ between four kinds of ferritic steels irradiated in SMIR-10.

61FS, 61FK であり, また, 高照射量 ($8.8 \sim 9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$) における DBTT' は, F9S, 61FS, NSCR9, 61FK の順に低かった。

4) USE は, 照射量の増加とともに低下する場合 (61FK) もあったが, ほとんど変化しない場合 (61FS) や, 逆に増加する場合 (F9S) もみられた。

5) USE は, 低照射量では (NSCR9 を除く), 高い方から, F9S, 61FK, 61FS であり, また高照射量では, 高いほうから, F9S, 61FS, NSCR9, 61FK であった。後者の順位は, DBTT' の低い方からの順位と一致した。

6) P_{σ} , P_{σ}^* は, DBTT² や DBTT³ と同じ照射量依存性を示し, 高照射量では, NSCR9, 61FS, 61FK の順に高かった。

7) P_{σ} と P_{σ}^* は, 低照射量では 61FS, F9S, 61FK の順に高かった。一方, 高照射量では, 61FK が低かったが, 他の 3 鋼種はほぼ同じ値を示した。

8) 高照射量における DBTT の増加量 (ΔDBTT) は, 非照射材のデータが得られていない F9S を除くと, 大きな方から, 61FS, 61FK, NSCR9 の順位であったが, それらの差は小さかった。

9) 高照射量における USE の低下量 (ΔUSE) は, 非照射材のデータが得られていない F9S を除くと, 大きな方から 61FS, 61FK, NSCR9 の順位であった。

10) 既報の照射温度 723 K (450°C) の結果と比較すると, 823 K 照射による脆化の方が大きく, 特に F9S と 61FS で顕著であった。

11) 61FS と 61FK では, DBTT の定義によって照射脆化量 (ΔDBTT) が異なり, また NSCR9 では, DBTT の定義によって照射脆化の評価が逆転した。したがって, 照射脆化の評価には本研究のように複数の DBTT を用いることが必要である。

5. 謝 辞

本研究に対し, シャルピー衝撃試験に協力された, 東北大学金属材料研究所附属材料試験炉利用施設の鳴井実助手と山崎正徳技官に感謝する。

6. 参 考 文 献

- [1] 栗下裕明, 東北大学金属材料研究所, 核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書, フェライト鋼照射材料のシャルピー衝撃特性と破壊靱性の評価 (2) PNC TJ9601 98-003 (1998).
- [2] H. Kayano, H. Kurishita, M. Narui and M. Yamazaki, Ann. Chim. Fr., 16 (1991), 309.
- [3] G. R. Odette, P. M. Lombrozoard and R. A. Wullaert, ASTM-STP-870 (1985) 841.

- [4] H. Kurishita, H. Kayano, M. Narui, M. Yamazaki, Y. Yano and I. Shibahara
Mater. Trans. JIM, 34 (1993), 1042.
- [5] H. Kurishita, I. Shibahara, M. Narui, S. Mizuta and H. Kayano, ASTM-STP-
1270, 1996, P.775.