

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)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1998年 3月

東北大学金属材料研究所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-1393, Japan.

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

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)

栗下裕明*

要 旨

SMIR-10において照射温度723K(450℃)、高速中性子照射量 9.0×10^{26} n/m²(E>0.1MeV)の照射を受けた2種類のフェライト鋼、すなわち動燃で開発されたPNC-FMS鋼の61FKと61FS、及び高速中性子照射量 3.6×10^{26} n/m²(E>0.1MeV)の照射を受けた2種類のフェライト鋼、すなわちボイラー用材料として使用実績の豊富なASTM A213T9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、脆性破壊開始荷重等を測定し、それらの値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。ここで、DBTTは、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、DBTT³)として求めた。61FKについては非照射材の測定も行った。用いた試験片はJIS-4号シャルピー試験片で、寸法が2mm×10mm×55mm、Vノッチが深さ2mm、開き角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) DBTTは、DBTT¹>DBTT²>DBTT³であった。但し、F9SではDBTTが低いため、DBTT²とDBTT³を求めることができなかった。

2) 61FKの非照射材では、DBTT¹が202K、USEが16.9Jであった。一方、この照射材では、DBTTが249K、USEが10.8Jであった。したがって、61FKでは照射によりDBTTが47K上昇し、USEが6.1J低下したことになる。

3) 61FSの照射材では、DBTTが207K、USEが17.0Jであった。61FSの非照射材のDBTTは160K、USEは20Jであったので、照射によりDBTTが47K上昇し、USEが3J低下したことになる。

4) F9S照射材のDBTTは166K、USEは21.4Jであった。なお、この鋼種については非照射材のデータが入手できなかったため、照射脆化の評価は行っていない。

5) NSCR9の照射材では、DBTTが208K、USEが16.2Jであった。この非照射材のDBTTは185K、USEは16Jであったので、照射によりDBTTは23K上昇したが、USEは全く低下しなかったことになる。

6) 以上の結果から、照射による脆化は、非照射材のデータの得られていないF9Sを除くと、61FSが最も少なく、61FKが最も大きかった。

本報告書は、栗下裕明が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。
契約番号：

事業団担当者：燃料材料開発部 照射材料試験室(水田俊治)

※：東北大学金属材料研究所

Evaluation of Charpy impact properties and fracture toughness
for irradiated ferritic steels (2)

Hiroaki Kurishita*

Abstract

The instrumented Charpy impact test was performed for two PMC-FM steels, 61FK and 61FS, irradiated at 723 K to 9.0×10^{20} n/m² ($E > 0.1$ MeV) in SMIR-10, and the other two steels, ASTM A213T9 and NSCR9, irradiated at 723 K to 3.6×10^{26} n/m² in SMIR-10. The test was also conducted for unirradiated 61FK. The absorbed energy, dynamic yield load, dynamic maximum load and brittle fracture load were measured as a function of test temperature and the ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) and the upper shelf energy (USE) were evaluated. The DBTT was determined in three different ways; the temperature at which the total absorbed energy was one half of USE (DBTT¹), the temperature at which the dynamic yield and maximum loads were equal (DBTT²), and the temperature at which the total absorbed energy was equal to 2 J which corresponds to 10 J for full size specimens (DBTT³). For the test, Charpy V-notch specimens, JIS-4, were used which had the dimensions of 10 × 2 × 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 showed that DBTT¹ > DBTT² > DBTT³ for 61FK, 61FS and NSCR9. For F9S the DBTT² and DBTT³ were too low to be evaluated.

2) For unirradiated 61FK the DBTT¹ was 202 K and the USE was 16.9 J, while for irradiated 61FK the DBTT¹ was 249 K and the USE was 10.8 J. Therefore, the irradiation caused the DBTT¹ to increase by 47 K and the USE to decrease by 6.1 J.

3) For irradiated 61FS the DBTT¹ was 207 K and the USE was 17.0 J. Since the DBTT¹ and USE of unirradiated 61FS were 160 K and 20 J, respectively, it followed that the irradiation caused the DBTT¹ to increase by 47 K and the USE to decrease by 3 J.

4) For irradiated F9S the DBTT¹ was 166 K and the USE was 21.4 J. Since the DBTT¹ and USE of unirradiated F9S were not available, the irradiation embrittlement of F9S was not estimated.

5) For irradiated NSCR9 the DBTT¹ was 208 K and the USE was 16.2 J. Since the DBTT¹ and USE of unirradiated NSCR9 were 185 K and 16 J, respectively, it followed that the irradiation caused the DBTT¹ to increase by 23 K but no decrease in USE.

6) The irradiation embrittlement was significant in the order of 61FK, NSCR9 and 61FS, except for F9S where no unirradiated data were available.

Work performed by the Oarai Branch, Institute for Materials Research, Tohoku University under contact with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation PNC Liaison : Materials Monitoring Section, Fuels and Materials Division, (S. Mizuta)

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 6 1 F K非照射材の衝撃特性	5
3.2 6 1 F K照射材の衝撃特性	5
3.3 6 1 F S照射材の衝撃特性	12
3.4 F 9 S照射材の衝撃特性	12
3.5 N S C R 9照射材の衝撃特性	12
3.6 4鋼種の照射材の衝撃特性の比較	27
4. 結 言	27
5. 謝 辞	32
6. 参考文献	32

表図写真一覧

表-1	試験片の材質と寸法	2
表-2	照射条件	3
表-3	61FK非照射材のシャルピー衝撃試験結果	6
表-4	61FK照射材(723K, SMIR-10)のシャルピー衝撃試験結果	9
表-5	61FS照射材(723K, SMIR-10)のシャルピー衝撃試験結果	16
表-6	F9S照射材(723K, SMIR-10)のシャルピー衝撃試験結果	20
表-7	NSCR9照射材(723K, SMIR-10)のシャルピー衝撃試験結果	23
表-8	試験した4鋼種のUSE, DBTT ¹ , DBTT ² , DBTT ³ , P _{gy} *	28
図-1	計装化シャルピー衝撃試験機	4
図-2	61FK非照射材の吸収エネルギーの試験温度依存性	7
図-3	61FK非照射材の降伏荷重と最大荷重の試験温度依存性	8
図-4	61FK照射材(723K, SMIR-10)の吸収エネルギーの試験温度依存性	10
図-5	61FK照射材(723K, SMIR-10)の降伏荷重と最大荷重の試験温度依存性	11
図-6	61FKの非照射と照射材(723K, SMIR-10)の比較(吸収エネルギー)	13
図-7	61FKの非照射と照射材(723K, SMIR-10)の比較(動的降伏荷重)	14
図-8	61FKの非照射と照射材(723K, SMIR-10)の比較(動的最大荷重)	15
図-9	61FS照射材(723K, SMIR-10)の吸収エネルギーの試験温度依存性	17
図-10	61FS照射材(723K, SMIR-10)の降伏荷重と最大荷重の試験温度依存性	18
図-11	61FSの非照射と照射材(723K, SMIR-10)の比較(吸収エネルギー)	19
図-12	F9S照射材(723K, SMIR-10)の吸収エネルギーの試験温度依存性	21
図-13	F9S照射材(723K, SMIR-10)の降伏荷重と最大荷重の試験温度依存性	22
図-14	NSCR9照射材(723K, SMIR-10)の吸収エネルギーの試験温度依存性	24
図-15	NSCR9照射材(723K, SMIR-10)の降伏荷重と最大荷重の試験温度依存性	25
図-16	NSCR9の非照射と照射材(723K, SMIR-10)の比較(吸収エネルギー)	26
図-17	4鋼種の照射材(723K, SMIR-10)の比較(吸収エネルギー)	29
図-18	4鋼種の照射材(723K, SMIR-10)の比較(動的降伏荷重)	30
図-19	4鋼種の照射材(723K, SMIR-10)の比較(動的最大荷重)	31

1 . 結 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) の減少を伴う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フェライト鋼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、ミニチュアシャルピー試験片について試験片形状効果を十分に記述し得るパラメーターを見出すために、ノッチの塑性拘束の程度を定量的に評価するための試験を行った。また、燃料被覆管から直接にその破壊靱性値を求める薄肉細管破壊靱性試験については、同一材料で作製されたCT試験片を用いて破壊靱性試験を行い、薄肉細管で得られた結果と比較することによって両者の相関を調査した。さらに、実際の燃料被覆管の管径を変えた場合の寸法効果を評価し、試験手法の標準化を目指した。

今年度は、高速実験炉「常陽」のSMIR-10において723K (450℃) の温度で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。

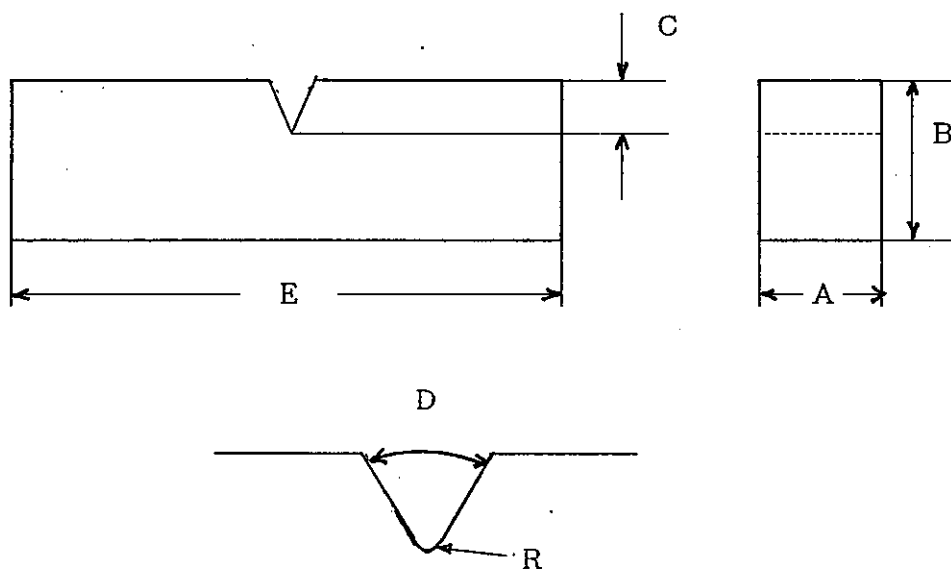
2 . 方 法

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、動燃で開発された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、いずれの鋼種の場合も幅10mm、厚さ2mm長さ55mmの寸法とVノッチ (深さ2mm、ノッチ底半径0.25mm、ノッチ角度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、また高速実験炉「常陽」のSMIR-10の照射条件を表2に示す。今年度は723K (450℃) で照射された試験片について計装化シャルピー衝撃試験を行ったが、61FKについては非照射材についても同じく衝撃試験を行った。

表 1. 試験片の材質と寸法

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	照 射 温 度	照 射 量 ($E > 0.1\text{MeV}$)
61FK	723 K (450°C)	$9.0 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$
61FS	723 K (450°C)	$9.0 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$
F9S	723 K (450°C)	$3.6 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$
NSCR9	723 K (450°C)	$3.6 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$

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）東京衡機製造所製）の一部を衝撃試験用に改造し [1]，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。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で上部から降下させる所謂動的3点曲げ試験である。本研究では，スパンがフルサイズ試験片と同じ40 mm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が，JIS-4号試験片は底面の幅が2 mmしかなく重心が高く不安定であるので，コの字型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からシャルピー衝撃試験を行った。但し，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145～373 K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。

- 145 K～ 室温：液体窒素とイソペンタンの混合溶液
- 室温～ 373 K：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。

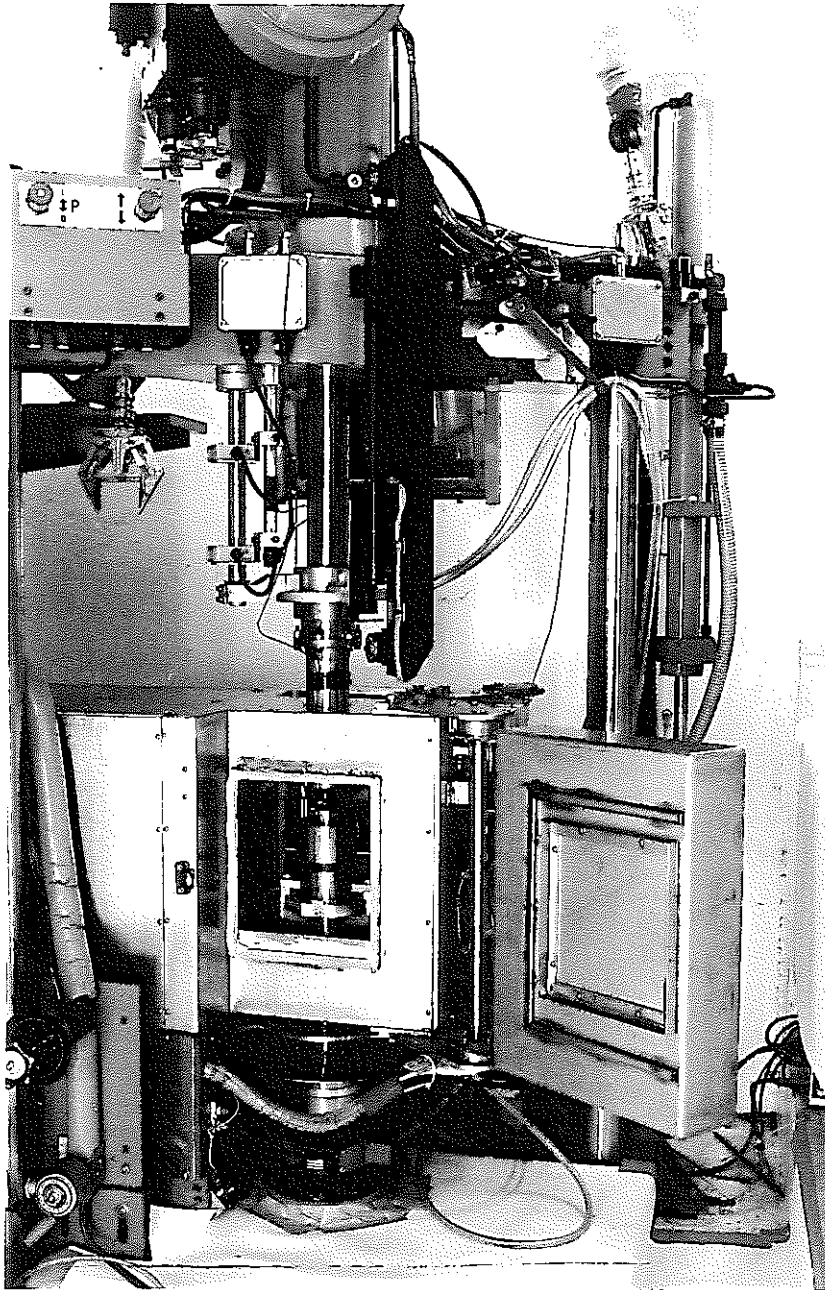


Fig. 1 Photograph of the instrumented Charpy impact testing machine.

3. 結 果

3. 1 61FK非照射材の衝撃特性

61FK非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_i は脆性破壊開始荷重、 D_i 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、動的降伏荷重（ P_y ）と動的最大荷重（ P_m ）の試験温度依存性を図3に示す。これらの結果から求めたUSEとDBTTの値を表8にまとめて示す。ここで、 $DBTT^1 \sim DBTT^3$ は延性脆性遷移温度で、 $DBTT^1$ は全吸収エネルギーが上部棚エネルギー（USE）の1/2になる温度として求めた値、 $DBTT^2$ 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。 $DBTT^3$ は、標準サイズ試験片の吸収エネルギーが10Jになるときの温度であり、破壊が塑性拘束のみにより、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[2]。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[3, 4]ので、これを用いると10Jの吸収エネルギーは本JIS-4号試験片の2Jに相当する。

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

但し、 b はリガメントサイズである。表8から明らかなように、この鋼種では $DBTT^1 > DBTT^2 > DBTT^3$ である。また、表8には P_{yy}^* の値を示しているが、これは、例えば図3の動的降伏荷重が動的最大荷重と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（ σ_i^* ）と比例関係にある。すなわち、

$$\sigma_i^* \propto P_{yy}^*$$

したがって、試験片寸法が同じであれば、 P_{yy}^* を比較することにより σ_i^* の比較を行うことができる。

3. 2 61FK照射材の衝撃特性

61FK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4に示す。また、全吸収エネルギーの試験温度依存性を図4に、動的降伏荷重（ P_y ）と動的最大荷重（ P_m ）の試験温度依存性を図5に示す。これらの結果から求めたUSE、 $DBTT^1 \sim DBTT^3$ 、及び P_{yy}^* の値を表8に示す。この場合でも $DBTT^1 > DBTT^2 > DBTT^3$ である。また、上述の61FK非照射材との比較から、照射によるUSEの低下は6.1J、DBTTの上昇は、 $DBTT^1$ で47K、 $DBTT^2$ で38K、 $DBTT^3$ で52Kであった。

Table 3 Charpy impact test results on unirradiated 61FK.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	P _{max} (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
K07	284		失		敗	
K01	284	17.25	252.4	326.8	---	---
K02	261	15.93	265.6	322.6	---	---
K03	232	12.85	284.4	342.8	---	---
K05	207	8.03	299.9	343.5	326.2	2.30
K06	205	10.37	300.6	337.5	153.2	3.96
K08	191	6.85	314.2	355.7	339.8	1.90
K09	170	0.745	---	229.6	229.6	0.34
K04	150	0.510	---	179.4	179.6	0.31
K10	323	16.37	237.5	300.6	---	---
K11	373	16.95	210.9	277.3	---	---

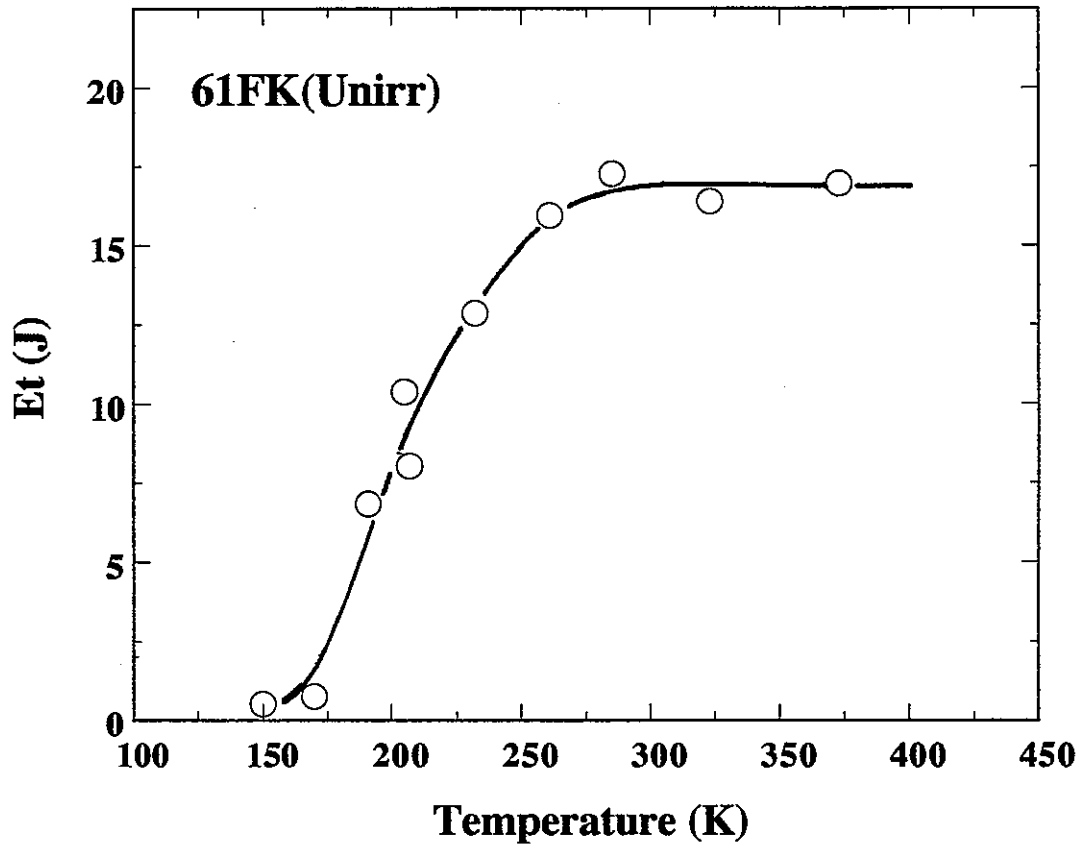


Fig. 2 Total absorbed energy, Et, vs test temperature for unirradiated 61FK.

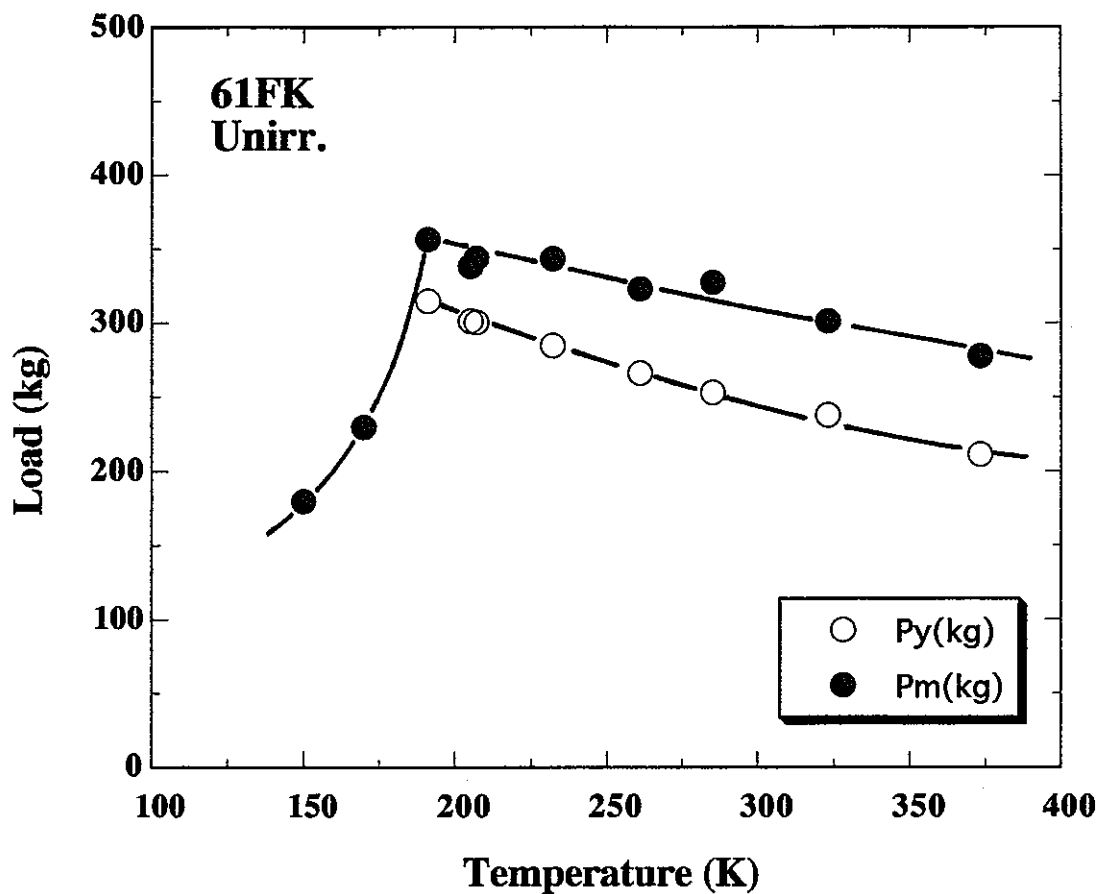


Fig. 3 Dynamic yield load, P_y , and maximum load, P_m , vs test temperature for unirradiated 61FK.

Table 4 Charpy impact test results on 61FK irradiated in SMIR-10 at 723 K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	P _{max} (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
K18	284	4.635	290.0	373.5	369.0	1.53
K23	260	9.692	293.1	352.3	223.1	3.17
K17	233	5.331	314.2	374.8	365.6	1.69
K04	212	0.813	---	247.8	247.8	0.37
K24	190	0.375	---	137.2	137.2	0.29
K20	286	4.54	296.8	378.9	373.1	1.49
K19	325	10.76	263.6	330.9	---	---

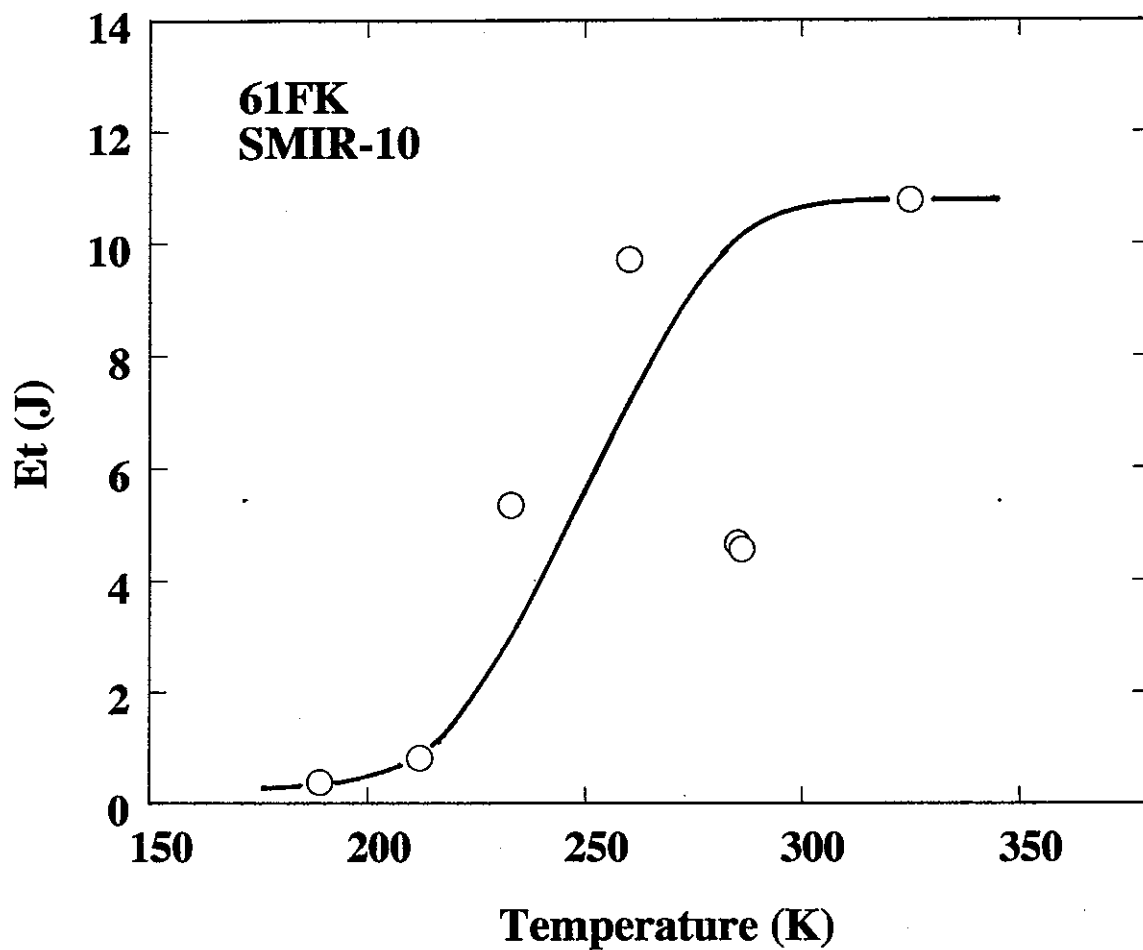


Fig. 4 Total absorbed energy, Et, vs test temperature for 61FK irradiated at 723 K to 9.0×10^{26} n/m² in SMIR-10.

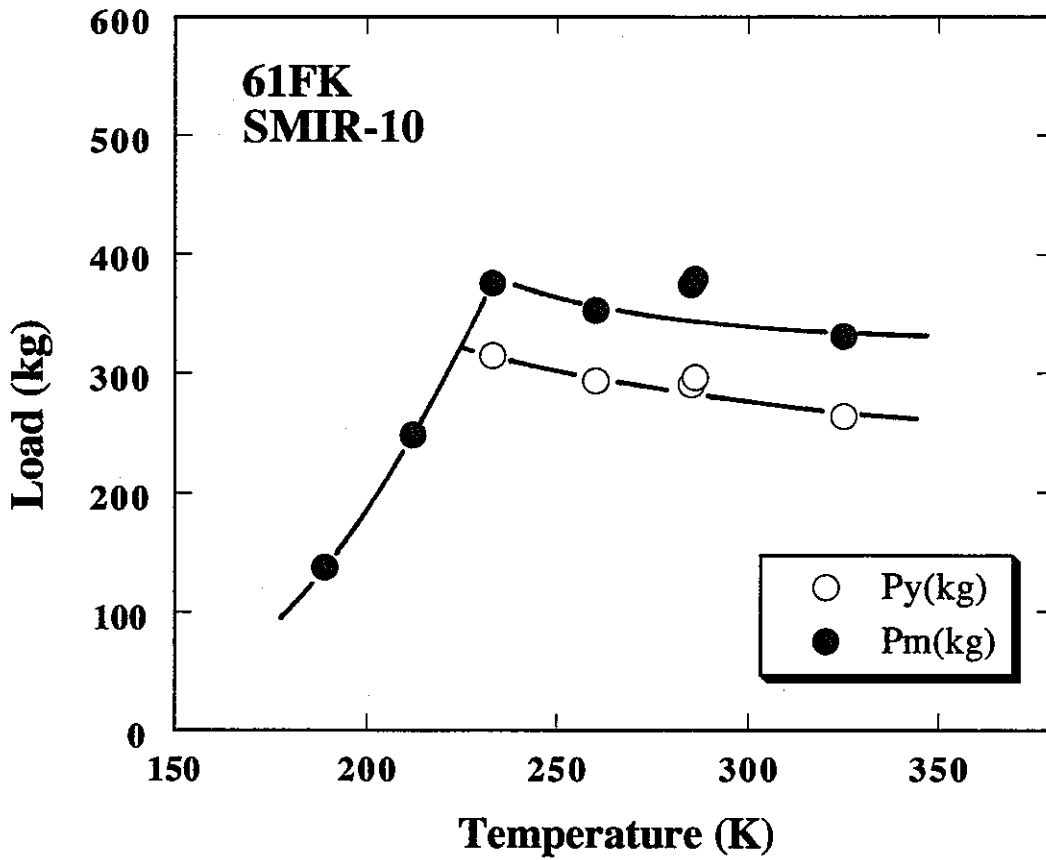


Fig. 5 Dynamic yield load, P_y , and maximum load, P_m , vs test temperature for 61FK irradiated at 723 K to $9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10.

また、 $P_{0.2}$ の照射による変化はほとんど認められない。

図6～8は、61FK非照射材と照射材について E_t 、 P_y 及び P_m の試験温度依存性を比較したものである。図から、61FKでは照射によるDBTTの上昇とUSEの低下が顕著であること、照射により P_y と P_m の両者が増加していることがわかる。後述するが、この鋼種は照射による脆化が最も大きかった。

3.3 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の結果を表5に示す。また、全吸収エネルギーの試験温度依存性を図9に、動的降伏荷重(P_y)と動的最大荷重(P_m)の試験温度依存性を図10に示す。これらの結果から求めたUSE、DBTT¹～DBTT³、及び $P_{0.2}$ の値を表8に示す。この場合でもDBTT¹>DBTT²>DBTT³である。一方、61FSの非照射材においてもJIS4号試験片を用いてUSEとDBTT¹が測定されており、それによると、USEが20J、DBTT¹が160Kであった。したがって、61FSでは照射によるUSEの低下は3J、DBTT¹の上昇は47Kとなる。図11は、61FS非照射材と照射材における全吸収エネルギーの試験温度依存性を比較したものである。照射による脆化は61FKより少ないことがわかる。

3.4 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6に示す。また、全吸収エネルギーの試験温度依存性を図12に、動的降伏荷重(P_y)と動的最大荷重(P_m)の試験温度依存性を図13に示す。これらの図から明らかなように、この鋼種は最低の試験温度の145Kでもかなり大きな吸収エネルギー値を示し、またこの温度まで P_y と P_m は交わらないことから、DBTT²、DBTT³及び $P_{0.2}$ を評価できなかった。そこで、表8にはUSEとDBTT¹のみを示した。なお、また、この鋼種の非照射材についてはフルサイズ試験片のUSEとDBTT¹は得られているが、JIS4号試験片のデータを入手できなかったため、照射脆化の評価は行っていない。

3.5 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7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、動的降伏荷重(P_y)と動的最大荷重(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、DBTT¹～DBTT³、及び $P_{0.2}$ の値を表8に示す。この場合もDBTT¹>DBTT²>DBTT³であった。一方、NSCR9の非照射材においてもJIS4号試験片を用いてUSEとDBTT¹が測定されており、それによれば、USEが1.6J、DBTT¹が185Kである。したがって、61FSでは照射によるDBTT¹の上昇は23Kであるが、照射によるUSEの低下は全く見られなかったことになる。図16に、61FS非照射材と照射材における全吸収エネルギーの試験温度依存性を比較して示す。

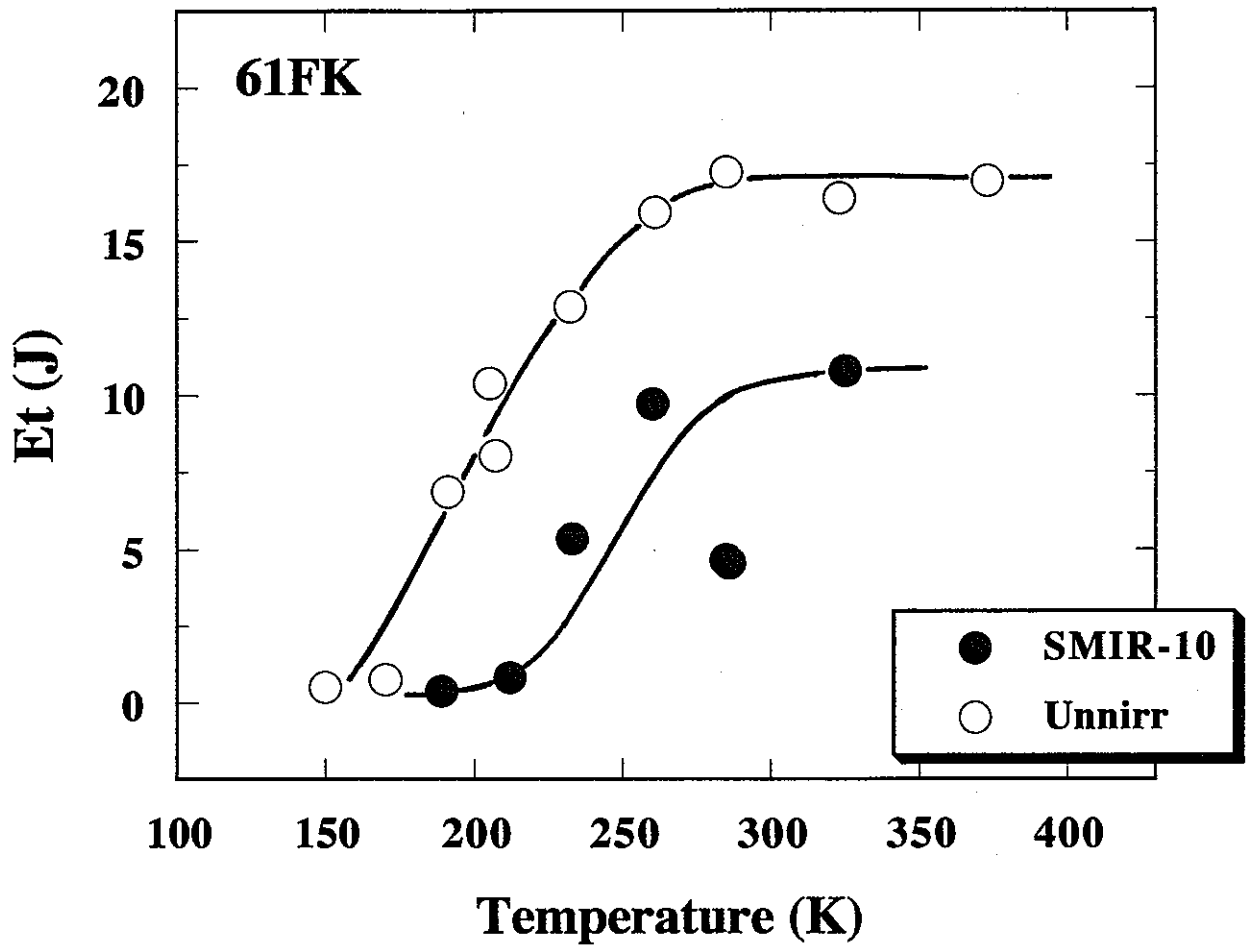


Fig. 6 Comparison of temperature dependence of total absorbed energy, E_t , between unirradiated and irradiated 61FK.

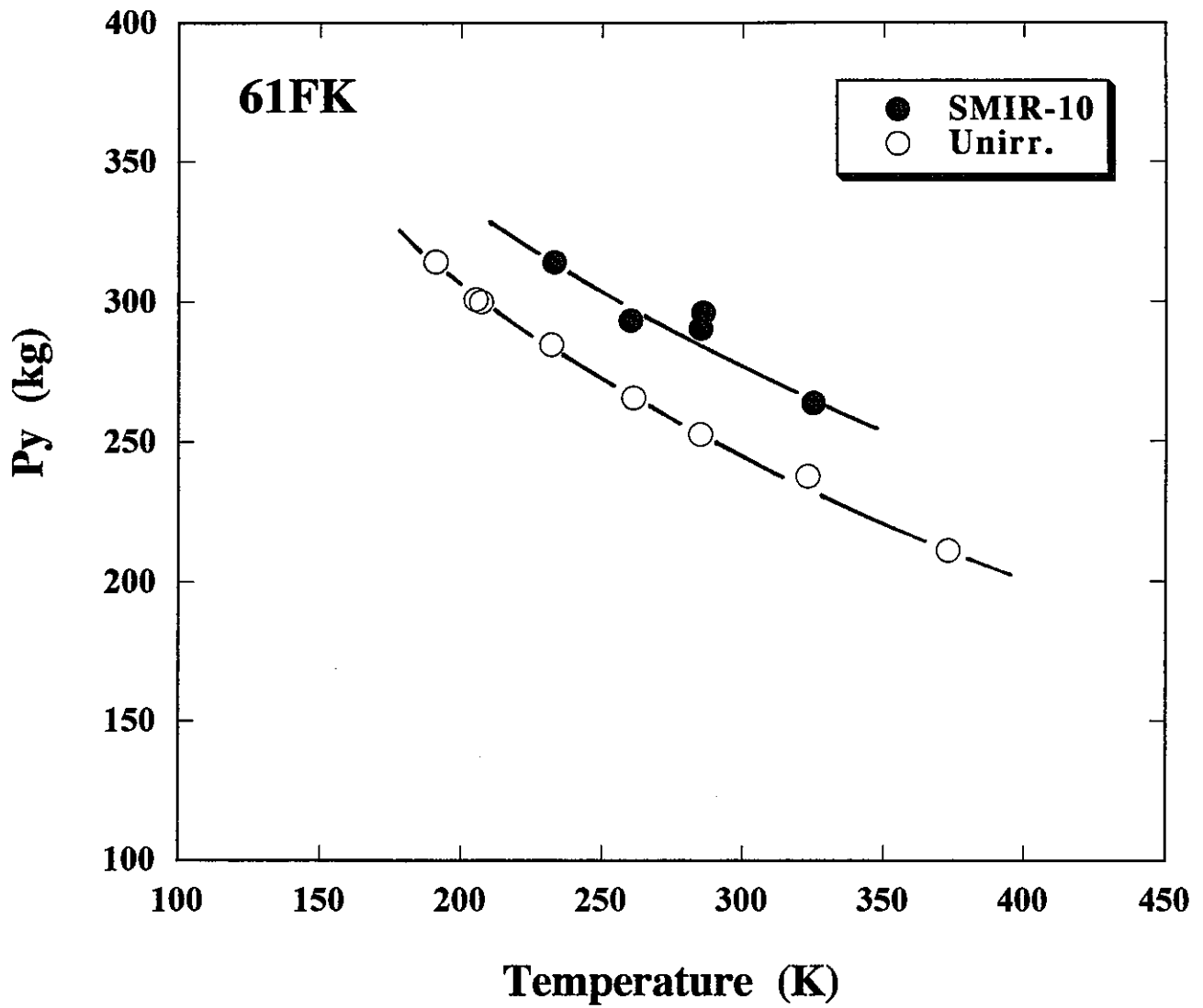


Fig. 7 Comparison of test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , between unirradiated and irradiated 61FK.

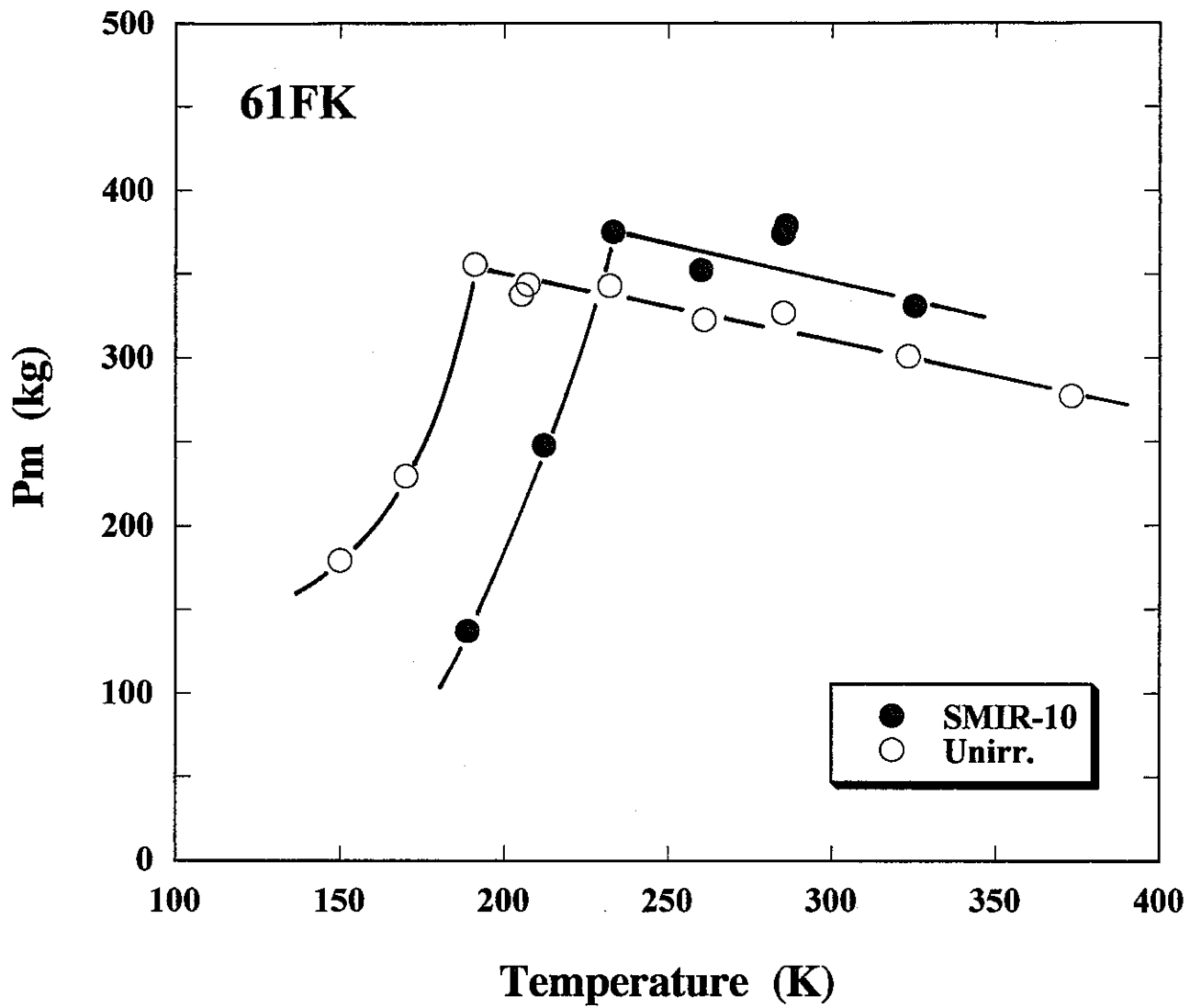


Fig. 8 Comparison of test temperature dependence of dynamic maximum load, Pm, between unirradiated and irradiated 61FK.

Table 5 Charpy impact test results on 61FS irradiated in SMIR-10 at 723 K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	P _{max} (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
S24	284	17.82	322.6	376.5	---	---
S17	259	16.19	345.0	412.4	---	---
S20	230	14.20	340.4	395.5	---	---
S21	213	16.51	355.7	411.8	---	---
S23	191	7.97	367.1	429.9	280.4	2.26
S18	171	5.28	402.0	462.3	459.4	1.39
S19	145	1.97	---	426.7	426.7	0.61

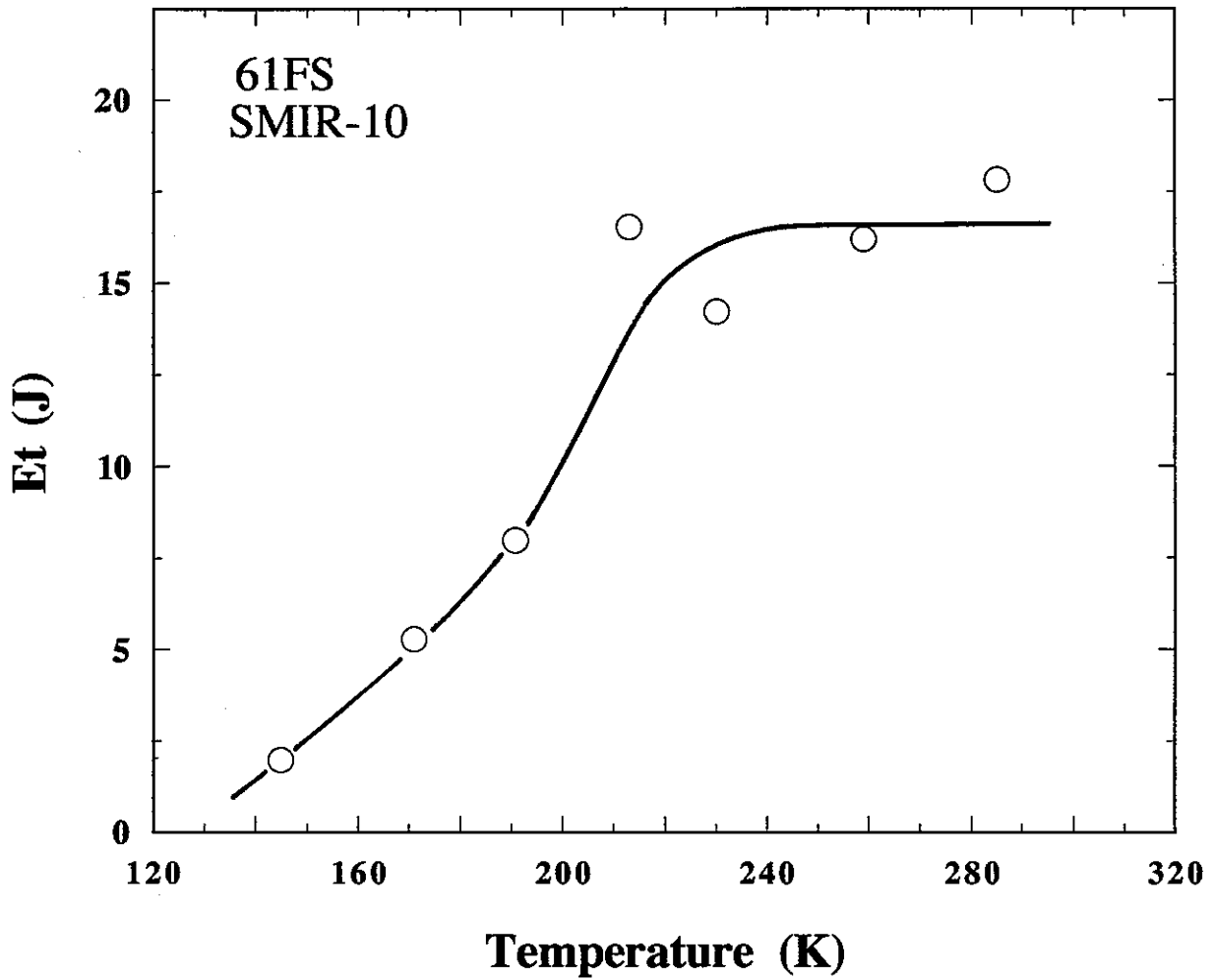


Fig. 9 Total absorbed energy, E_t , vs test temperature for 61FS irradiated at 723 K to 9.0×10^{26} n/m² in SMIR-10.

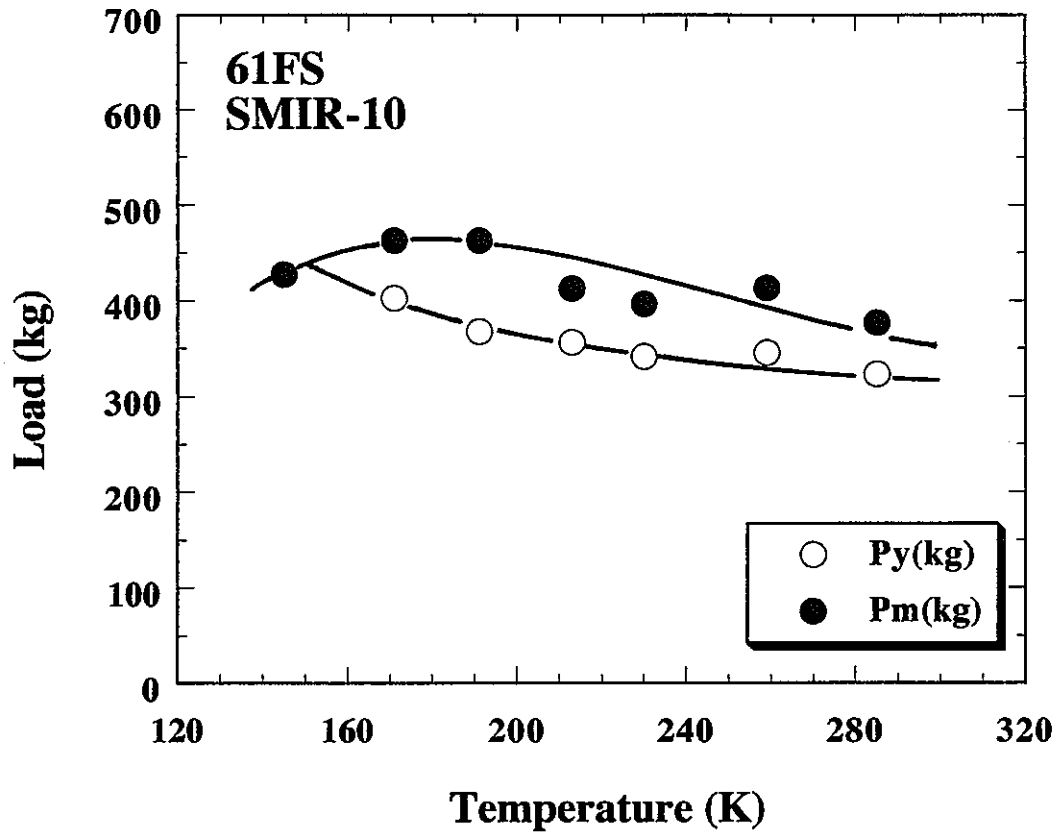


Fig. 10 Dynamic yield load, P_y , and maximum load, P_m , vs test temperature for 61FS irradiated at 723 K to $9.0 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10.

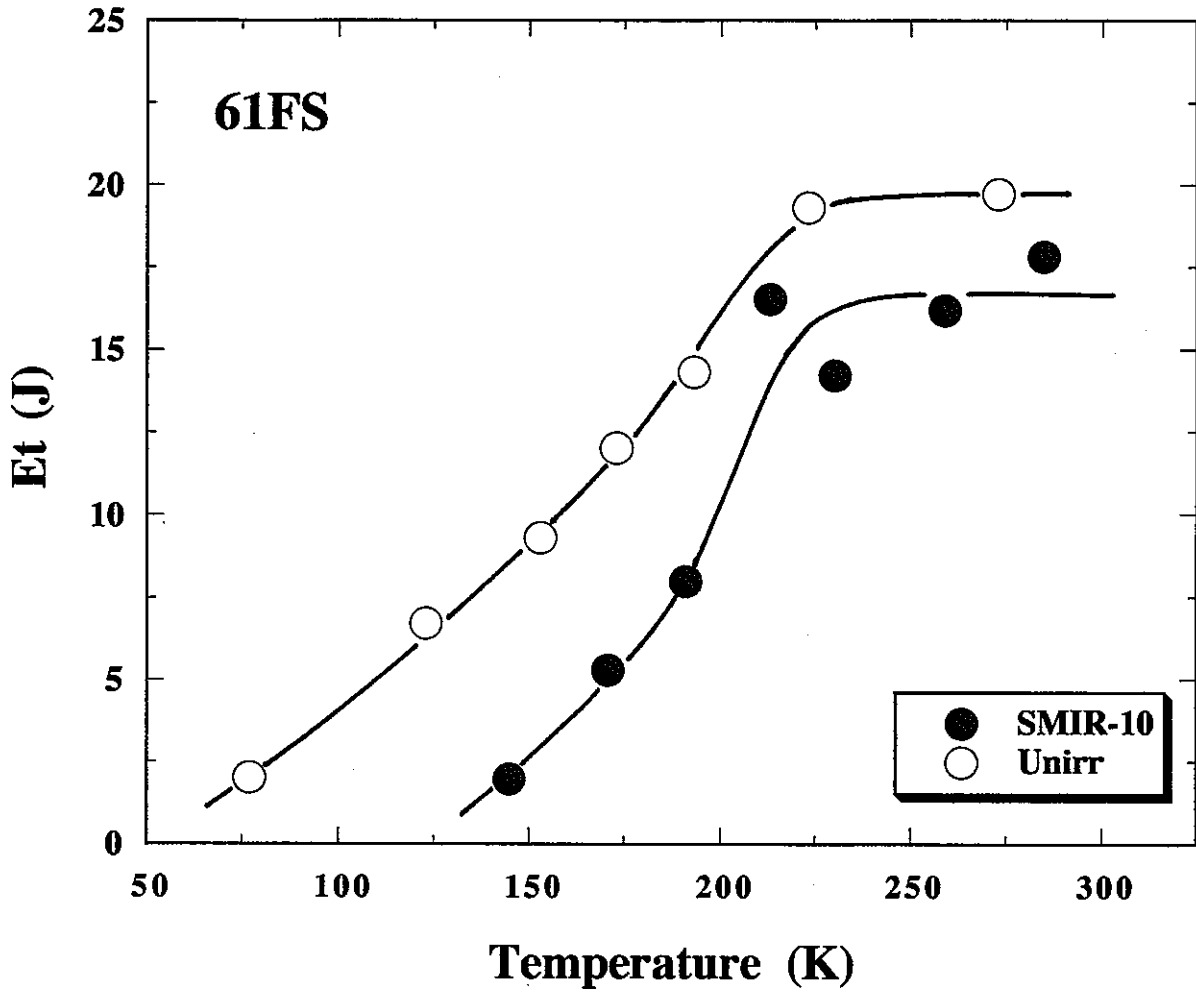


Fig. // Comparison of temperature dependence of total absorbed energy, E_t , between unirradiated and irradiated 61FS.

Table 6 Charpy impact test results on F9S irradiated in SMIR-10 at 723 K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	P _{max} (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
T01	284	20.23	307.8	359.1	---	---
T04	259	22.40	341.0	414.2	---	---
T03	231	21.61	362.7	416.3	---	---
T05	211	16.94	354.1	395.7	---	---
T08	190	18.52	368.9	410.5	---	---
T02	166	10.66	408.5	460.6	258.3	2.89
T07	146	8.36	413.2	455.2	355.0	2.17

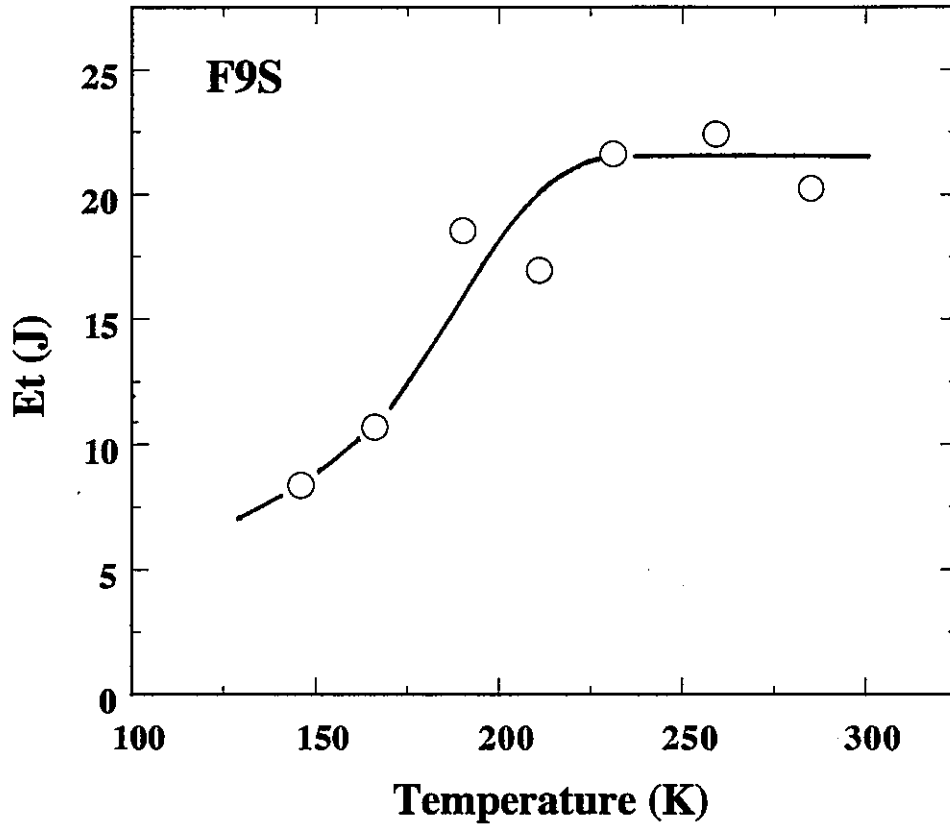


Fig. /2 Total absorbed energy, Et, vs test temperature for F9S irradiated at 723 K to 3.5×10^{26} n/m² in SMIR-10.

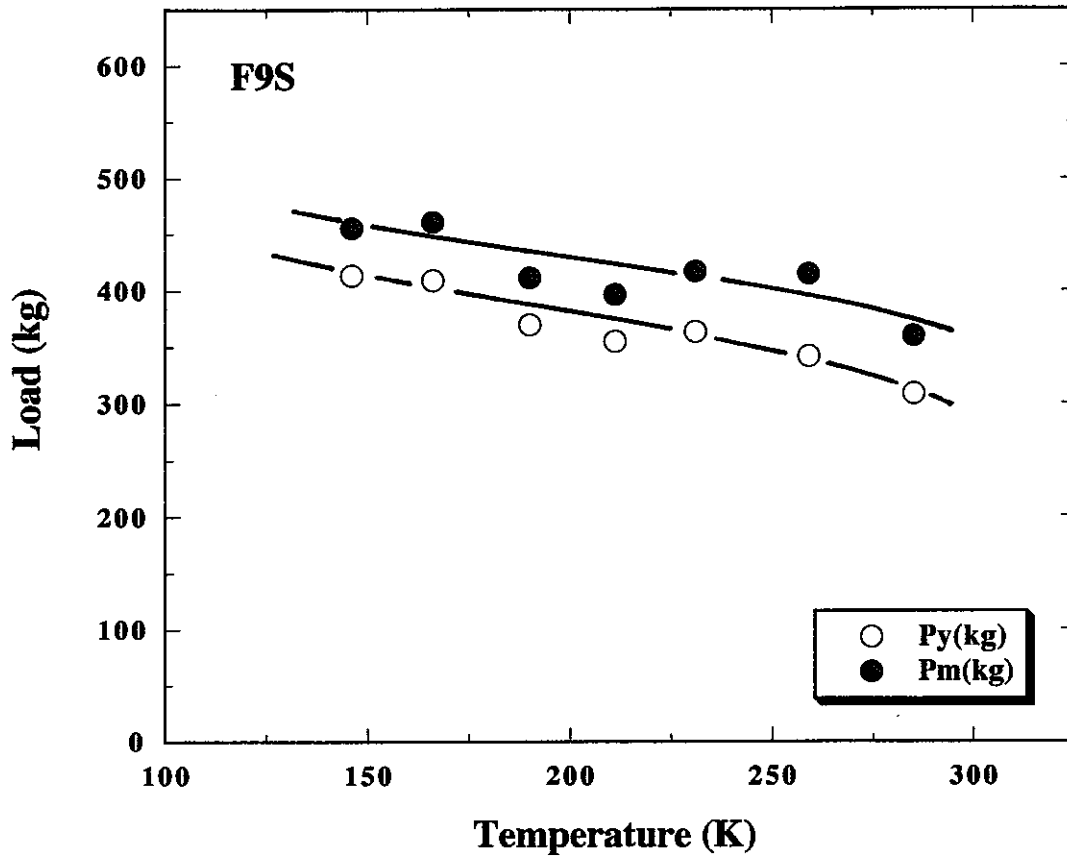


Fig. 3 Dynamic yield load, P_y , and maximum load, P_m , vs test temperature for F9S irradiated at 723 K to $3.5 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10.

Table 7 Charpy impact test results on NSCR9 irradiated in SMIR-10 at 723 K.

試験片 No.	温度 (K)	Et (J)	Py (kg)	P _{max} (kg)	Pf (kg)	Df (mm)
N08	284	16.51	353.6	406.0	---	---
N05	258	15.85	347.8	417.4	---	---
N07	233	12.69	354.6	419.6	---	---
N03	213	10.32	362.1	427.7	---	---
N02	189	0.755	---	243.8	243.5	3.19
N01	169	0.813	---	248.9	248.9	0.33
N06	326	16.11	309.5	384.7	384.7	0.36

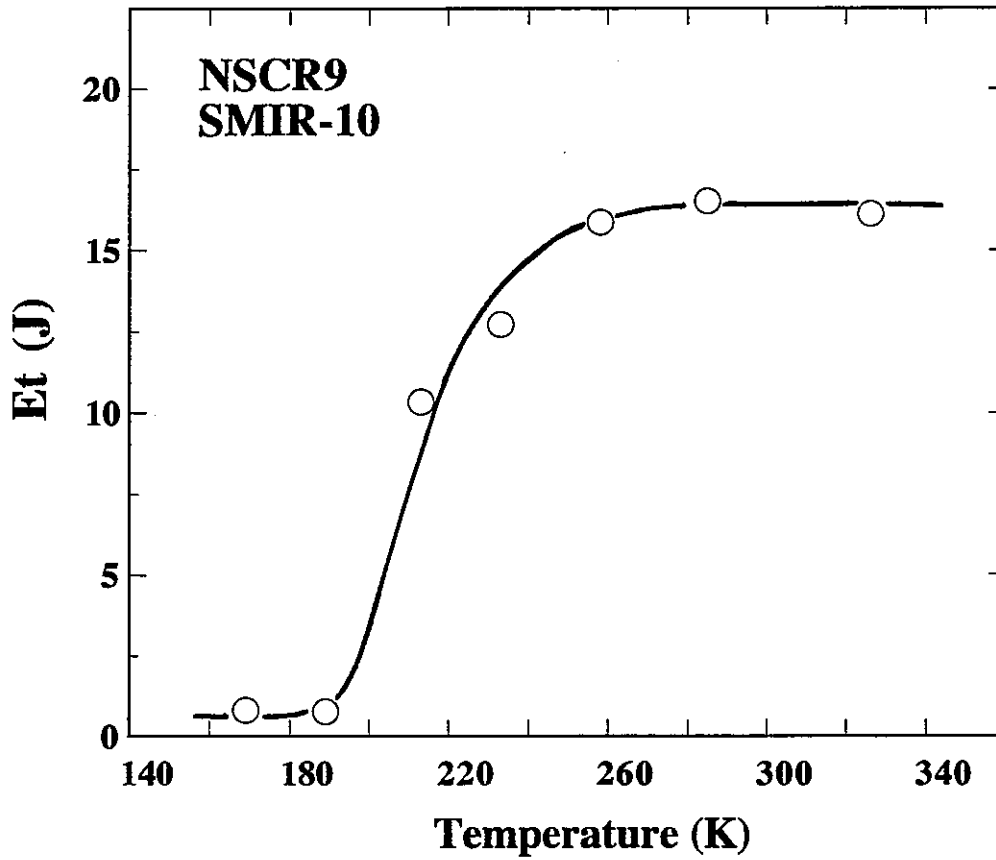


Fig. 4 Total absorbed energy, E_t , vs test temperature for NSCR9 irradiated at 723 K to 3.5×10^{26} n/m² in SMIR-10

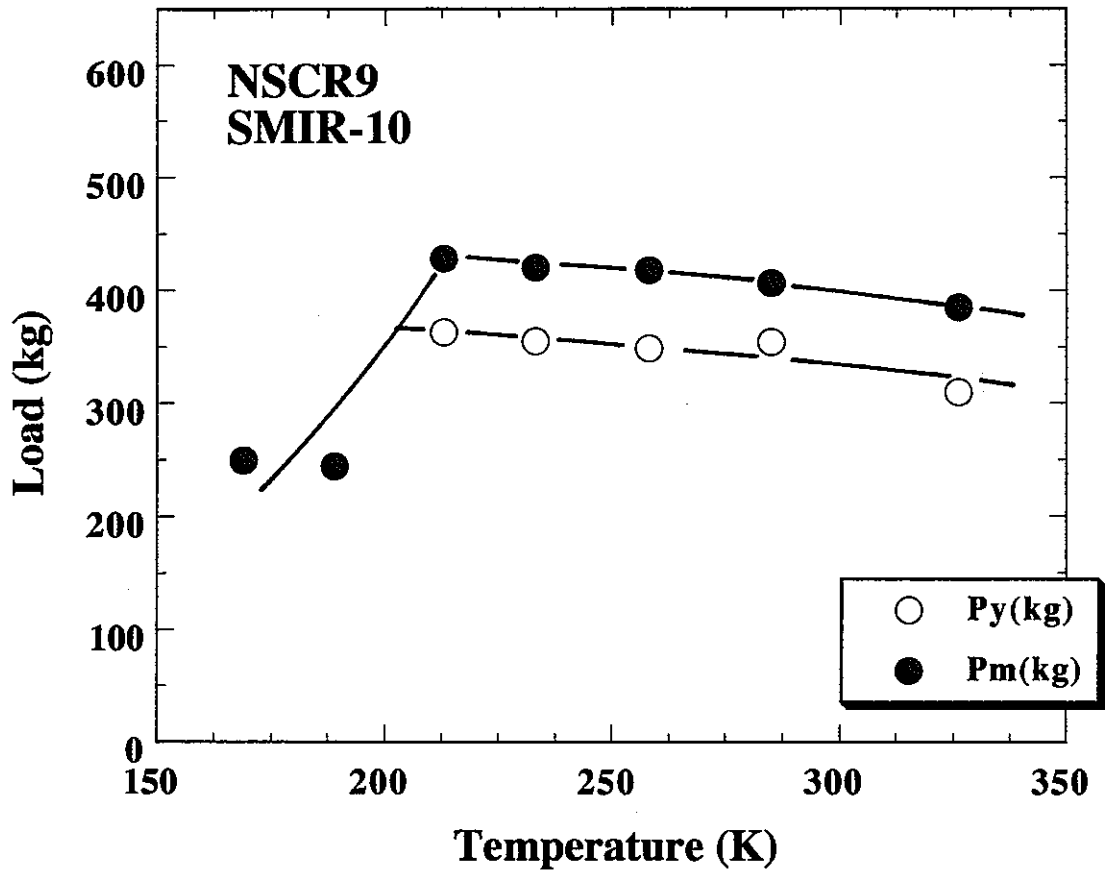


Fig. 15 Dynamic yield load, P_y , and maximum load, P_m , vs test temperature for NSCR9 irradiated at 723 K to $3.5 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$ in SMIR-10.

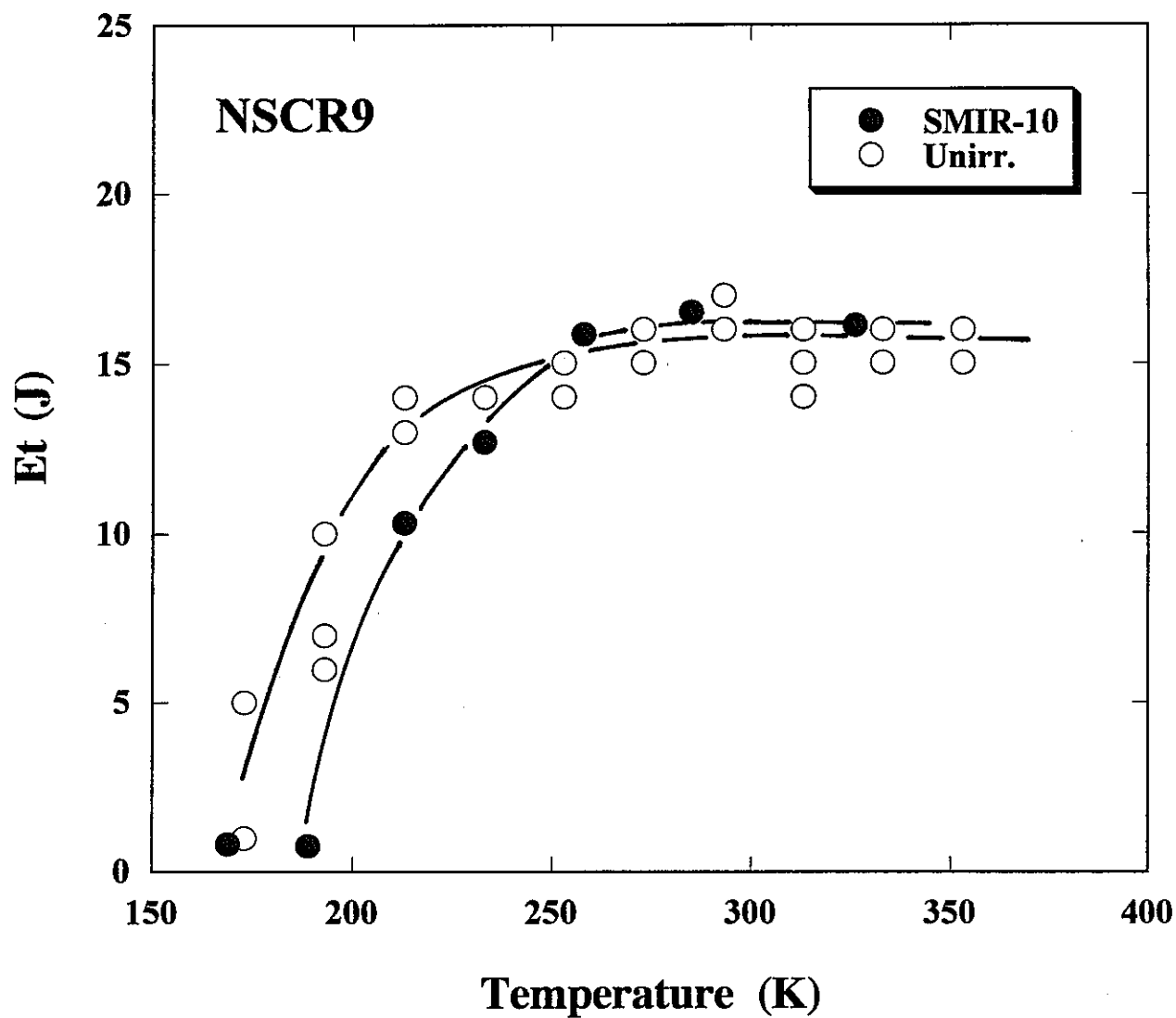


Fig. 16 Comparison of test temperature dependence of total absorbed energy, E_t , between unirradiated and irradiated NSCR9.

3. 6 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図17~19に示す。図17から、USEはF9Sが最も高く、またDBTT¹とDBTT³はF9Sが最も低いこと、したがってF9Sが照射後の衝撃特性に最も優れていることがわかる。また、61FSとNSCR9の間にはUSEとDBTT¹に明瞭な差は見られないが、DBTT³に差が見られ、61FSのほうがNSCR9よりかなり低い。これらの3鋼種と比較すると、61FKのDBTTはさらに高く、USEはさらに低い。一方、図18の動的降伏荷重は、F9S、61FS、NSCR9の間に明瞭な差は見られないが、61FKはそれらよりもやや低い値を示している。図19の動的最大荷重についても同様である。

4 . 結 言

SMIR-10において照射温度723Kで最大高速中性子照射量 $9.0 \times 10^{20} \text{ n/m}^2$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$)の照射を受けた4種類のフェライト鋼、すなわち動燃で開発された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 (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_f)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_r^*)と比例関係にある P_{yy}^* を求めた。ここで、 P_{yy}^* 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。なお、61FKについては非照射材の衝撃試験も行った。用いた試験片はいずれの鋼種の場合もJIS 4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) DBTTは、F9Sを除く3鋼種において、 $DBTT^1 > DBTT^2 > DBTT^3$ であった。F9Sでは、DBTTが低いため、 $DBTT^2$ と $DBTT^3$ を求めることができなかった。

2) 61FKの非照射材では、DBTT¹が202K、USEが16.9J、また P_{yy}^* が320kgであった。一方、この照射材では、DBTTが249K、USEが10.8J、 P_{yy}^* が325kgであった。したがって、61FKでは照射によりDBTTが47K上昇し、USEが6.1J低下したことになる。照射による P_{yy}^* の変化はほとんど認め

Table 8 The values of DBTT¹, DBTT², DBTT³, USE and P_{gy}* for 61FK, 61FS, F9S and NSCR9 tested in this work.

鋼種	USE (J)	DBTT ¹ (K)	DBTT ² (K)	DBTT ³ (K)	P _{gy} * (kg)
61FK (Unirr)	16.86	202	187	173	320
61FK (SMIR-10)	10.76	249	225	225	325
61FS (SMIR-10)	17.01	207	150	145	437
F9S (SMIR-10)	21.41	166	---	---	---
NSCR9 (SMIR-10)	16.16	208	203	195	368

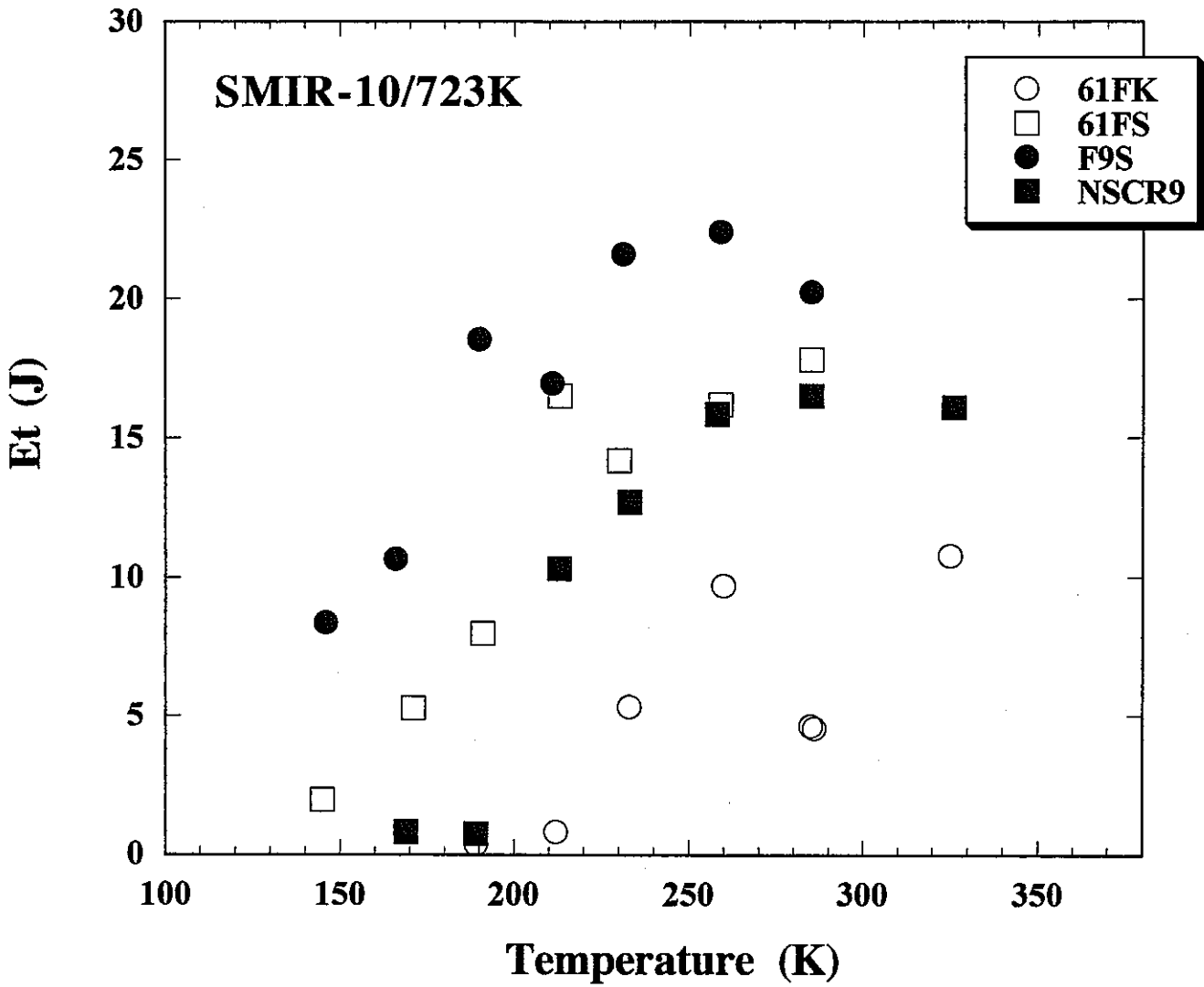


Fig. 17 Comparison of test temperature dependence of total absorbed energy, E_t , between 61FK, 61FS, F9S and NSCR9 irradiated at 723 K in SMIR10.

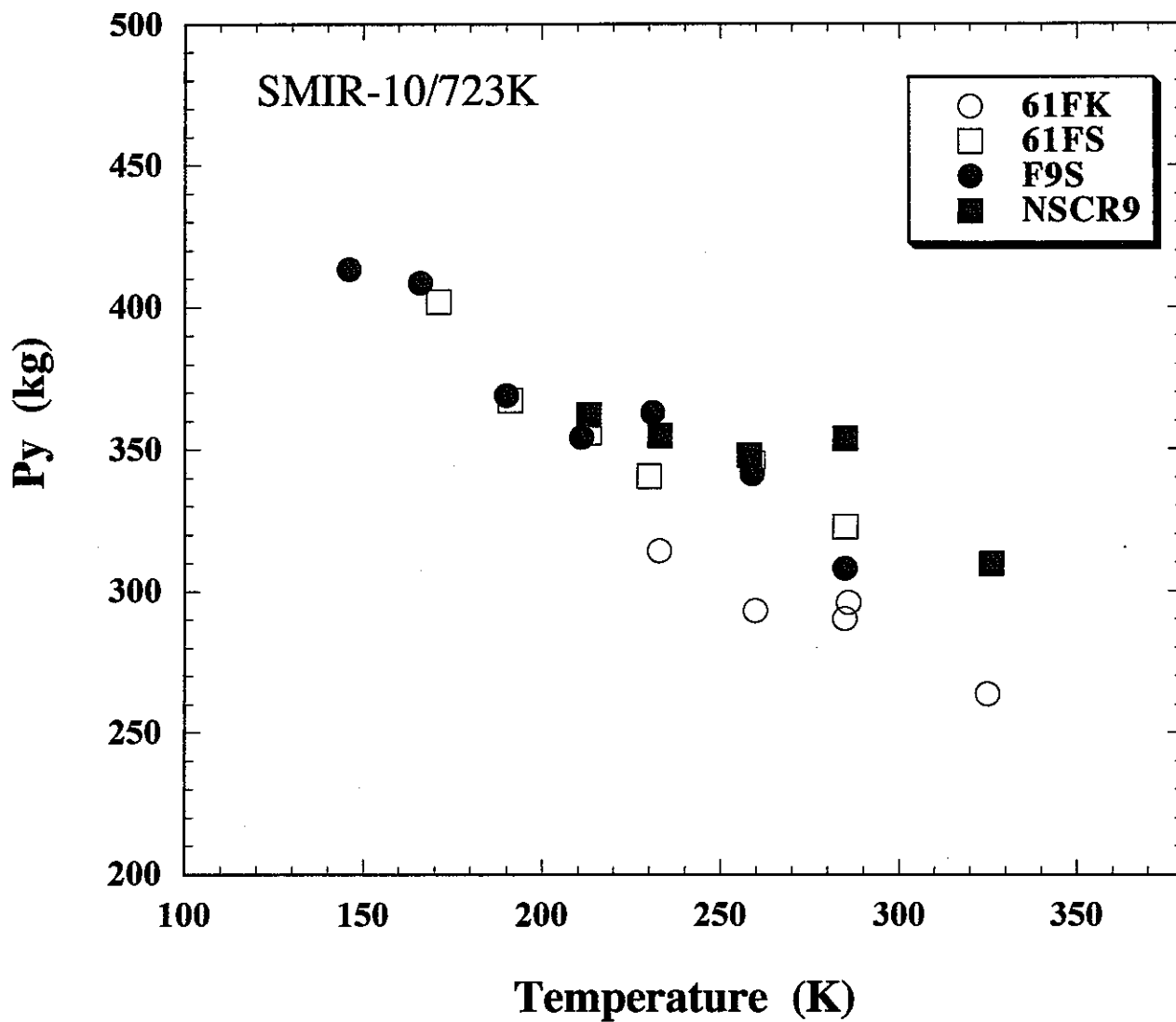


Fig. 18 Comparison of test temperature dependence of dynamic yield load, P_y , between 61FK, 61FS, F9S and NSCR9 irradiated at 723 K in SMIR-10.

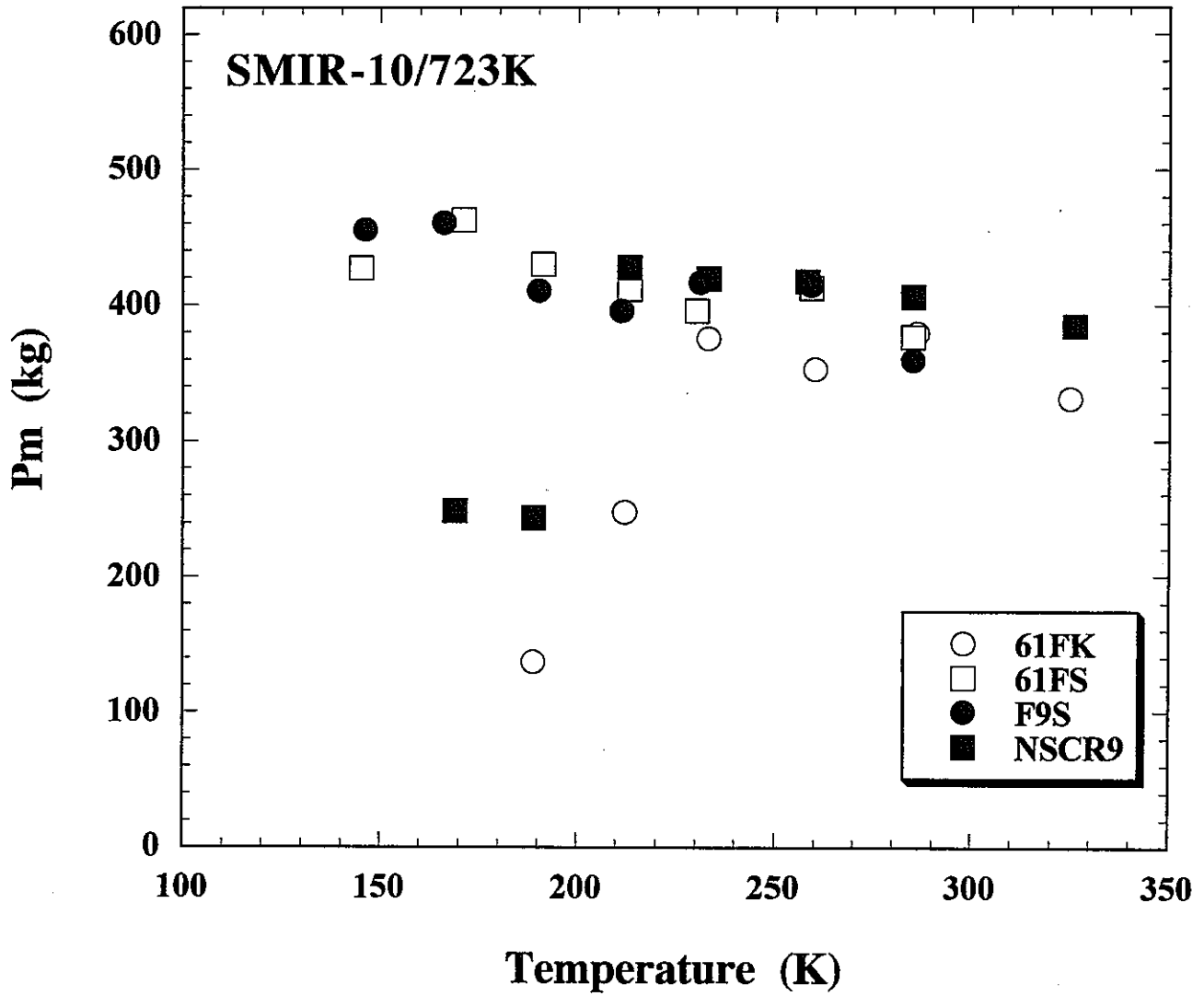


Fig.19 Comparison of test temperature dependence of dynamic maximum load, P_m , between 61FK, 61FS, F9S and NSCR9 irradiated at 723K in SMIR10.

られなかった。また、Py と Pm はいずれも照射により増加した。

3) 61FSの照射材では、DBTTが207K、USEが17.0Jであった。61FSの非照射材のDBTTは160K、UESは20Jであったので、照射によりDBTTが47K上昇し、USEが3J低下したことになる。

4) F9S照射材のDBTTは166K、USEは21.4Jであった。なお、この鋼種については非照射材のデータが入手できなかったため、照射脆化の評価は行っていない。

5) NSCR9の照射材では、DBTTが208K、USEが16.2Jであった。NSCR9の非照射材のDBTTは185K、UESは16Jであったので、照射によりDBTTは23K上昇したが、USEは全く低下しなかったことになる。

6) P_{0.2}*は、評価できなかったF9Sを除くと、61FSが437kgで最も高く、次にNSCR9の368kg、61FKの325kgの順であった。

7) 動的降伏荷重は、F9S、61FS、NSCR9の間に明瞭な差は見られなかったが、61FKではそれらよりもやや低い値を示した。動的最大荷重についても同様であった。

8) 以上の結果から、照射後の衝撃特性はF9Sが最も優れ、61FS、NSCR9、61FKの順に低下した。また、照射による脆化も、非照射材のデータのないF9Sを除く3鋼種では61FSが最も少なく、61FKが最も大きかった。

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] H. Kayano, H. Kurishita, M. Narui and M. Yamazaki, Ann. Chim. Fr., 16 (1991), 309.
- [2] G. R. Odette, P. M. Lombrozoard and R. A. Wullaert, ASTM-STP-870 (1985) 841.
- [3] H. Kurishita, H. Kayano, M. Narui, M. Yamazaki, Y. Yano and I. Shibahara Mater. Trans. JIM, 34 (1993), 1042.
- [4] H. Kurishita, I. Shibahara, M. Narui, S. Mizuta and H. Kayano, ASTM-STP-1270, 1996, P.