

Fig. 5. Effect of the stress-relief annealing on the charpy V-notch impact test results of submerged arc weld metals.

基性溶融型フラックスとを組合せることにより、多数回 S. R. 後においても十分母材規格を満足する引張強さと衝撃値を有する溶着金属の得られることを確かめた。

文 献

- 1) 守田, 西, 藤森, 斎田: 溶接学会誌, 32 (1963) 9, p. 860
- 2) 伊藤, 熊谷, 藤森, 小島: 溶接学会誌, 33 (1964) 9, p. 813

(127) 中性子照射試験結果について
— 機械的性質 —

(原子炉用 A STM A-302 B 鋼の研究—IV)

八幡製鉄所, 技術研究所

○下川 敬治・工博 長島 晋一
UNC

G. STERN, R. KNOPF, J. CIHI
Neutron Irradiation Effects on Mechanical Properties.

(Studies on a reactor vessel steel, ASTM A-302 B—IV)

Keiji SHIMOKAWA, Dr. Shin'ichi NAGASHIMA
G. STERN, R. KNOPF and J. CIHI.

1. 緒 言

原子炉用鋼に対する中性子照射の影響が研究されてい

るが^{1)~3)}, 前報に述べたような^{4)~6)}, 八幡で製造した ASTM A-302 鋼の厚さ 100mm の厚板より採取した試験片を, 米国 United Nuclear Corporation に送付し, 同社に中性子照射試験を依頼した。

中性子照射は GETR で行ない, 照射後各種の試験は UNC 社 Pawling の Hot Cell で行なわれた。供試材は八幡製 302B 鋼の他に比較材として米国製 302B 鋼, さらに八幡製 302B 溶着鋼を選び 10^{19} および 10^{20} nvt (何れも >1 MeV) の中性子照射したものにつき硬さ試験引張試験およびシャルピー衝撃試験を行なった。

2. 試料および実験方法

2.1 供試材料および試験片

八幡製 および 米国製の A-302B 鋼の化学成分を, Table 1 に示す。なおチェック分析は照射試片採取位置に近い板厚みの 1/4 の位置から採取したサンプルによる。八幡製 A-302B 鋼 (以下八幡母材と略記する) の熱処理条件は焼入 $930^{\circ}\text{C} \times 4\text{hr} \rightarrow$ プレスクエンチ, 焼戻 $640^{\circ}\text{C} \times 4\text{hr} \rightarrow$ 空冷であり, 米国製 A-302B 鋼 (以下米国母材と略記する) は焼入 $954^{\circ}\text{C} \times 4\text{hr} \rightarrow$ 水焼入, 焼戻 $630^{\circ}\text{C} \times 4\text{hr} \rightarrow$ 空冷である。八幡製溶着鋼 (以下八幡溶着鋼と略記する) の溶接法は潜弧溶接であり, その条件を Table 2 に示す。なお成分は C 0.15%, Mo 0.45~0.65%, Mn 1.80~2.0% である。溶接後の歪取焼戻は $650^{\circ}\text{C} \times 4\text{hr} \rightarrow$ 空冷である。

試料は各素材の厚みの 1/4 (溶着鋼は表面から 1/4) から採取し, 母材については引張および衝撃試験片ともに板の圧延方向を長手方向とした。溶着鋼については引張試験片は溶接線に平行に, 衝撃試験片は垂直に採つた。

引張試験片の形状, 寸法を Fig. 1 に示す。

2.2 照 射

中性子照射には GETR (General Electric Testing Reactor) を利用した。照射はそれぞれ 18 本のシャルピー試験片と, 6 本の引張試験片を入れた 2 つのカプセルにわけ, 1 つをコア部に, 1 つをプール部に挿入して 5 週間照射し, それぞれ 1×10^{20} nvt および 1×10^{19} nvt (>1 MeV) の積分中性子束を与えた。コア部とプール部とでは γ 線による発熱量が異なるため, 熱の伝導体として NaK をカプセル内に封入し, さらに照射中の温度を $93^{\circ} \sim 149^{\circ}\text{C}$ の範囲に保持するために電熱用ヒーターで温度制御を行なった。なお炉用試験で試料と NaK との反応が起こらないことはあらかじめ確めた。

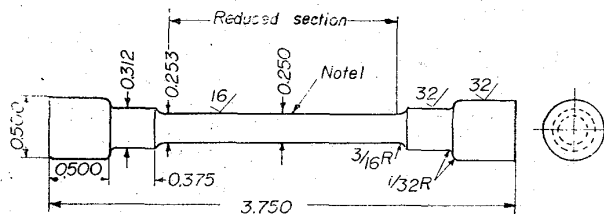
低エネルギー中性子は試料を放射化するので, カプセル表面にカドミウムメッキをほどこして熱中性子を遮蔽した。さらに照射量を測定するために, それぞれのカプセルに Ni-Co 合金と鉄のモニターワイヤーを挿入した。

Table 1. Chemical compositions of test plates. (%)

		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	Co	sol Al	insol Al	total Al
Yawata steel	Ladle	0.18	0.21	1.28	0.009	0.006	0.09	0.04	0.55	0.03				
	Check	0.19	0.21	1.23	0.010	0.006	0.072	0.041	0.56	0.027	0.009	0.032	0.007	0.039
U. S. A. steel	Ladle	0.19	0.21	1.17	0.015	0.027			0.48					
	Check	0.19	0.22	1.30	0.034	0.027	0.25	0.16	0.58	0.21	0.01	0.031	0.004	0.035

Table 2. Conditions of sub-merged arc welding.

Step	Pass number	Filler metal flux	Welding conditions	Pre-heating temperature
1	1 ~ 6	Y-DM 4.0φ Y F-15	400 A, 27 V Welding speed 50cm/min	150°C
2	7 ~ 42	Y-DM 4.8φ Y F-15	800 A, 36 V Welding speed 50cm/min	150°C



Notes:

1. The reduced section shall have a gradual taper from the ends toward the center with the ends larger, but not more than 0.003 in. larger in diameter than the center.
2. Tolerances: Decimals— ± 0.003
Fractions— $\pm 1/64$.

Fig. 1. Modified tensile test specimen.

2.3 照射後試験

照射後試験はすべてホットラボ中で遠隔操作によつて行なつた。なお比較のため非照射試験片についても同様の試験を行なつた。引張試験は0.02/minの歪速度で行なつた。衝撃試験は試験温度に $\pm 1^\circ\text{C}$ に保持した浴中に15min浸漬したのち、取り出して10sec後に試験した。なお衝撃時の温度は校正曲線を用いて補正した。破断後、ペリスコープ(4倍)を用いて破面を観察し、延性破面率を求めた。硬さ試験は試験前のシャルピー試験片ノッチの反対側を用いて、ロックウェルB単位で4点の測定を行なつた。組織観察は引張試験片の破断面から十分離れた平行部から切り出した試片について行なつた。

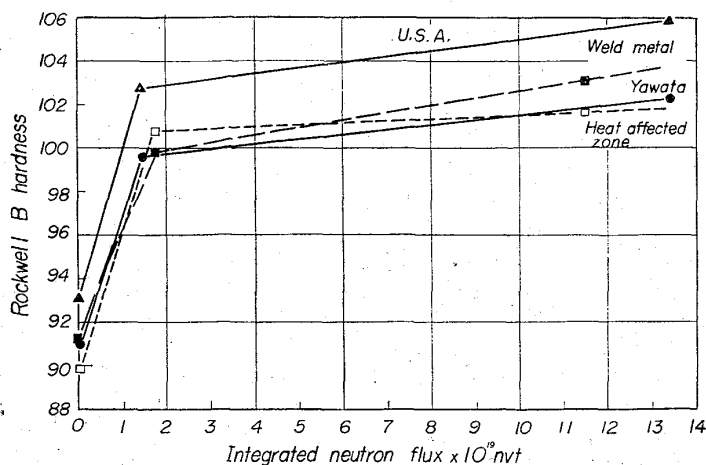


Fig. 2. Effect of irradiation on the hardness of Yawata, U. S. A., and weld metals.

3. 試験結果および考察

3.1 硬さ試験

照射によつて八幡材および米国材とも硬化するが、硬さの絶対値およびその照射による硬化率は八幡材の方が幾分小さかつた。硬さと照射量との関係を Fig. 2 に示した。熱影響部の硬化率は 10^{19}nvt では最も大きい、 10^{20}nvt になると一番小さくなつた。溶着鋼は 10^{19}nvt では八幡材および米国材とはほぼ同じ割合で硬化するが、 10^{20}nvt では溶着鋼の硬化率は、両板材より幾分大きくなつた。

3.2 引張試験

照射によつて降伏強度および抗張力はかなり増加し、伸びは減少したが、絞りの減少は比較的小さかつた。破断強さは八幡材、米国材ともわずかに数%減少したのみで、抗張力および降伏強度に比較して照射に対して敏感でなく、 10^{19}nvt と 10^{20}nvt 照射したものの差もあまりなかつた。一方溶着鋼の破断強さは 10^{19}nvt 照射では変化せず、 10^{20}nvt の照射量の急激に15%減少し、特異な挙動を示した。

八幡材と米国材の引張性質を比較すると、照射前の性質には大して差がないが、照射による影響は八幡材の方が小さかつた。 10^{19}nvt の照射量では抗張力および降伏強度の増加は八幡材の場合24%および53%であつたが、米国材の場合はそれぞれ31%および63%であつた。 10^{20}nvt 照射の場合八幡材はそれぞれ39%および71%、米国材はそれぞれ50%および80%であつた。絞り伸びから測定した 10^{19} 、 10^{20}nvt 照射後の延性は八幡材の方がかなり優れていた。しかし両材とも均一伸びは見られなかつた。

一方、八幡溶着鋼は 10^{19}nvt 照射の場合(破断強さおよび絞りが八幡母材に比べてかなり劣る外は母材とはほぼ同じような性質の変化を示した。 10^{20}nvt 照射後においても降伏点および抗張力については八幡母材と同様な傾向を示したが、破断強さの減少は幾分大きかつた。

3.3 衝撃試験

衝撃試験は次のプログラムにしたがつて行なつた。

(1) 照射前の八幡材、米国材および八幡溶着鋼について吸収エネルギーおよび剪断破面率曲線を温度の関数として求める。

(2) 10^{19} および 10^{20}nvt 照射した八幡材試験片につき吸収エネルギー および 剪断破面率を求めた。

(3) 10^{19}nvt 照射した米国材試験片の試験温度は、同じく 10^{19}nvt 照射した八幡材の吸収エネルギーが 30ft-lb を示す温度で行なう。

(4) 10^{20}nvt 照射した米国材試験片は、同条件の八幡材の吸収エネルギーが 30ft-lb の温度で行なう。

(5) 溶着鋼については、母材の照射後の vT_{R30} の上昇を参考にして、溶着鋼照射後の vT_{R30} を推定し、その温度で衝撃試験を行なう。

以上のプログラムにしたがつて試験した結果は次の通りである。

照射前の八幡材の衝撃特性は、照射前の米国材および八幡溶着鋼より優れていた。すなわち、 vT_{R30}

についてみると八幡材は -83°C 、米国材は -77°C 、溶着鋼は -37°C であり、 vT_{rs} はそれぞれ -32° 、 -18° 、 -17°C であった。

照射後のデータは、吸収エネルギーを、Fig. 3 に剪断破面率を Fig. 4 に示した。なお比較のために照射前のデータもあわせて示した。 10^{19} nvt 照射後、八幡材の vT_{rs} は 56°C になり、 10^{20} nvt 照射後には 85°C となった。

したがって八幡材の vT_{rs} の照射による上昇は 10^{19} および 10^{20} nvt でそれぞれ 121°C および 177°C となったが、これらの値は比較的小さく、米国における圧力容

器用鋼材の照射試験データの中最も優れたものに匹敵する。一方、米国材の衝撃値は照射後 (10^{19} および 10^{20} nvt) においても吸収エネルギー、破面率ともに八幡材より劣っていた。

また、Fig. 3 から照射は単に遷移温度曲線を高温側に移行させるのみならず、延性域での最大吸収エネルギーをも減少させることがわかる。また照射により、八幡材は吸収エネルギーおよび剪断破面率曲線の両者はともに急激な遷移を示した。

3.4 組織検査

母材は圧延方向に垂直な面、溶着金属は溶接ビード軸に垂直な面の微細組織を光学顕微鏡で観察した。この面を選んだ理由は引張試験片から圧延方向が正確に決定できるからである。

しかし照射材と非照射材の組織を比較すると、倍率 500 倍でもほとんど差が認められなかった。組織におよぼす照射の影響を見出すためには、後報に述べるように高倍率の電子顕微鏡による薄膜の透過観察が必要である。

4. 結 言

八幡製 A-302B 鋼と米国製 A-302B 鋼および八幡製 A-302B 溶着鋼の中性子照射前後の比較試験を行なった。照射条件は 10^{19} 、 10^{20} nvt ($<1\text{MeV}$) の 2 水準の照射量、照射温度は $93^{\circ}\sim 149^{\circ}\text{C}$ である。比較は硬さ、引張および衝撃性質、および組織について行なった。

この結果、次のことが明らかになった。

八幡材の遷移温度は両照射量につき米国材より低く、30 ft-lb 遷移温度の照射による変化は少なく、米国における圧力容器用鋼材についての照射試験データのうち最も優れたものに匹敵する。

引張性質については、伸びおよび絞りともに八幡材が米国材より両照射量で優れていた。降伏強度および引張強さは照射により増加するが、八幡材の方が増加率は小さかった。八幡溶着鋼は照射により最も延性が減少した。

組織は照射によりほとんど変化しなかった。

文 献

- 1) ASTM, Spec. Tech. Rep., 208 (1956)
- 2) ASTM, Spec. Tech. Rep.,

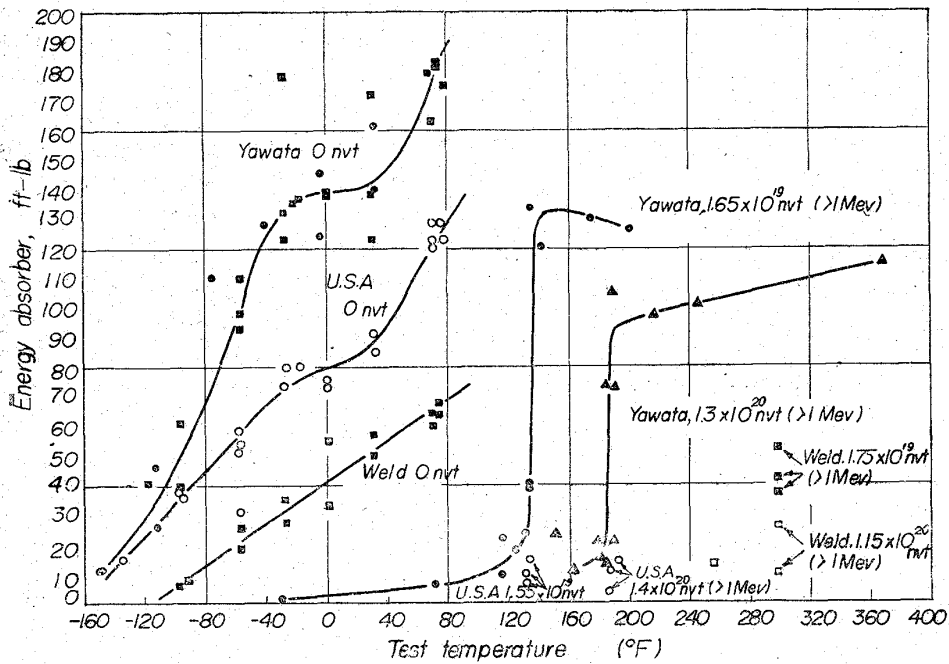


Fig. 3. Effect of irradiation on fracture strength of Yawata, U. S. A., and weld metals.

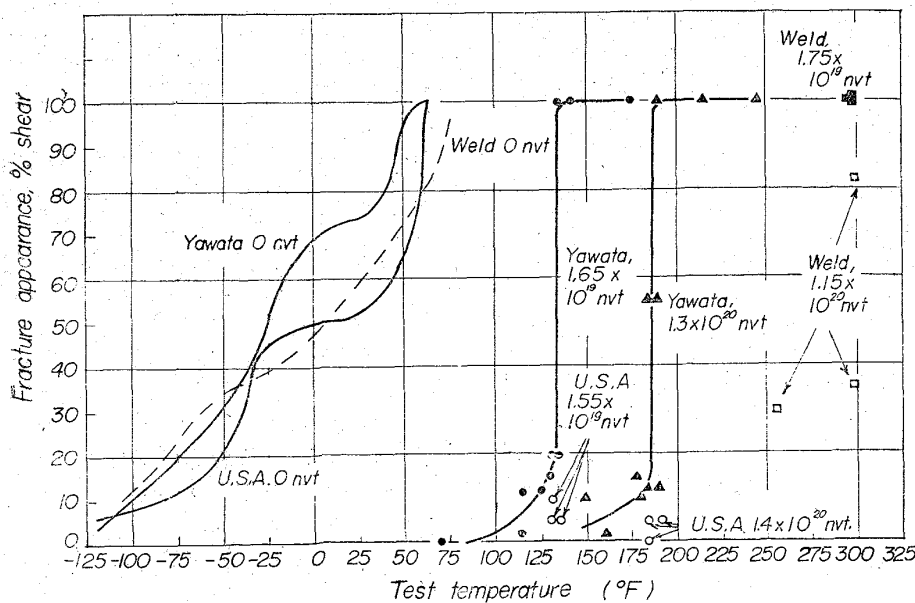


Fig. 4. Effect of irradiation on the fracture mode of Yawata, U. S. A., and well metals.

669.14.018.29: 621.039.53: 620.187.3: 539.125.504

276 (1959)

3) ASTM, Spec. Tech. Rep., 341(1963)

4) ~6) 原子炉用 A302 鋼の研究 I~III 報.

(128) 照射済 A-302 B 鋼の電子顕微鏡観察

(原子炉用 ASTM A-302 B 鋼の研究—V)

日本原子力研究所 工博 長崎隆吉
八幡製鉄所, 技術研究所

工博○長島 晋一・土生 隆一
八幡製鉄, 技術開発部長 谷 泰治

Transmission Electron Microscopy of the Neutron Irradiated A-302 B Steel.

(Studies on a reactor vessel steel ASTM A-302 B—V)

Dr. Ryukichi NAGASAKI, Dr. Shin'ichi NAGASHIMA
Ryuichi HABU and Taiji NAGATANI.

1. 結 言

前報に述べたように^{1)~4)}, 鉄鋼材料に対する中性子照射の影響に関しては, すでに多くの照射実験がおこなわれているが^{5)~7)}, 中性子照射が与える影響を物理冶金的立場から解析した研究はあまり多くない。^{8)~11)}

高速中性子を照射すると, 鋼材の種々の性質が変化し, 一般に強度が増加し, 同時に脆化する。

このような機械的性質の変化は, 高速中性子が格子原子と衝突してできる点欠陥によつて引き起こされるものである。実用鋼では, 照射によつてできた欠陥と相互作用の強い溶質原子が含まれているので, 中性照射の影響は, 複雑である。

面心立方格子を持つ金属, 特に銅では, 焼入れや中性子照射によつてできた点欠陥の集合体や転位ループが電子顕微鏡によつて直接観察され, 確認されている。

一方, 体心立方格子の金属では, 従来このような研究は少なく, 鉄では, 転位ループが中性子照射によつてできるとする説と¹²⁾¹⁴⁾, 観察されないとする説があり¹³⁾, 確定的でない。中性子照射後の電子顕微鏡観察の結果も研究者によつて相反する結論がなされており, 鉄鋼材料では, 中性子照射によつて生じる機械的性質の変化に対応する欠陥の確認は, まだなされていないとすることができる。それで本実験では中性子照射による機械的性質の変化と, それに対応した照射欠陥の直接観察および炭化物の析出過程に対する中性子照射の影響を明らかにするために, ASTM-A-302 B 鋼を中性子照射し, 電子顕

微鏡による薄膜の透過観察と引張試験を並行させておこなった。

2. 実験および結果

実験に使用した鋼材は ASTM-A302 B 鋼にニッケルを添加し, 低温特性の向上をねらつたもので, その成分は Table 1 に示した。この鋼材を Table 2 に示すような熱処理条件および照射条件で中性子照射した。中性子照射には原子力研究所の JRR-2 を利用した。中性子照射後, 鉄は高い放射能をおびるので, 照射後の取り扱いがなるべく容易になるように, 試験片はできるだけ小さくした。特に電子顕微鏡の薄膜試料は作業の性質上, 遠隔操作による作業が困難なため, できるだけ小さい試料を用いる必要がある。中性子照射後の機械試験の結果は, Table 3 に示した。よく焼鈍し, 1×10^{19} nvt 照射した場合には, 照射による強度の上昇が著しく, 照射効果が, はつきり認められる。しかし焼入れ後, 1×10^{17} nvt 照射した場合には, 機械的性質の変化は認められなかつた。電子顕微鏡観察によれば, 中性子照射前の, 焼入れたままの組織は典型的マルテンサイト組織で, 微細なマルテンサイト晶から成り, 転位密度が非常に高い。これを 1×10^{17} nvt 照射し, 電子顕微鏡観察すると, 中性子照射後も転位密度が高く, 中性子照射中に焼鈍されて, 転位密度が低下することはない。さらに析出の起きたことが認められたが, この場合には析出物が小さく, 不規則に, 点状に分布している。一方, 焼入れ後, 中性

Table 1. Chemical Composition (w/o) of A-302 B.

Element	C	Si	Mn	P	S
A302 B	0.14	0.22	1.40	0.011	0.010

Element	Cr	Ni	Mo	Al
A302 B	0.06	0.76	0.55	0.014

Table 2. Heat treatments and irradiation condition.

Heat treatment	Irradiation condition	
	Temperature	total dose (>1 MeV)
Quenched from 930°C	150°C	1×10^{17} nvt
Annealed at 700°C for 4 hrs	50°C	1×10^{19} nvt

Table 3. Effect of neutron irradiation on mechanical properties of A-302 B.

Heat treatment	Total dose nvt (>1 MeV)	Vickers hardness (20 kg)		0.2% yield stress (kg/mm ²)	
		pre-irrad	post-irrad	pre-irrad	post-irrad
Quenched from 330°C	1×10^{17}	429	435	108	107
Annealed at 700°C for 4 hr	1×10^{19}	286	306	54	84