

表 3.14 348 および 349 の規格

C	0.08% >
Mn	2.00 >
Si	1.00 >
Cr	17~19
Ni	9~13 347 および 348 に対して 9~12 349 に対して
Cb+Ta	10×C <
Ta	0.10 > 348 に対して Cbの10% 349 に対して
Co	0.2 > 349 に対して

表 3.15 原子炉用として適当なステンレス鋼

元 素	分析値%	元 素	分析値%
C	0.05~0.10	S	0.03
Cr	18.00~20.00	Cb	8×C <
Ni	10.00~13.00		1.10 >
Mo	0.50~1.00	Ta	0.10
Mn	1.50 >	Cu	0.30 >
Si	1.00 >	Co	0.10
P	0.04	B	0.005 >

あると想定している。

これに対して FLEISCHMANN は炉心以外のステンレス鋼では 0.05% まで、また 中性子密度の高い炉心に使用されるものでは最低の Co 量のものにするというように使用場所によつて規格をわけることを考えている。

炭素鋼については Calder Hall 炉に関連して発表された Co 0.005% 以下という例しかないが、これについてもなんらかの規格化が必要ではないかと思われる。

8. 低 Co 鋼の製造価格

アメリカにおいては 304 のような鋼種で Co の低いものの需要がある場合は、大体 10% を少し越える程度のプレミアム価格がつく²²⁾といわれている。

BOUNDS によれば 0.01% はおろか真空溶解によつて 0.002% のステンレス鋼まで作り得るが、通常のものに比し 5~7 倍の価格になると述べている。

Universal Cyclops Steel Corp.²³⁾で製造している原子炉用の 304L は Co 0.002% 以下、B 0.0005% 以下であるが、価格は普通の 304L の 7 倍となっている。

9. 結 言

原子炉構造材料中に含まれる Co は、いかなる場合でも常に有害であるから、可能な限り除去すべきことは明らかであるが、他の有害元素との関係や価格の点からしてある値以下に下げることには無意味であることは明らかであるが、値そのものを決めるにはなお慎重な考慮が必要である。しかしながら国産の鋼は原子炉用として用いるには含有量が高すぎる傾向があり、なんらかの措置が必

要であると思われる。

文 献

- 1) British Nuclear Energy Conference: Symposium on Calder Hall Nuclear Power Plant (1956)
- 2) 長谷川正義: 金属, 25 (1956) 5, p. 401~408
- 3) 橋口, 長谷川: 原子炉材料 (I) 鉄と鋼, 43 (1957); (II) 43 (1957) 5
- 4) 中村 素: 鉄と鋼, 45 (1959) 6, p. 627~639
- 5) 長谷川正義編: ステンレス鋼便覧
- 6) G. FRIEDLANDER, J. W. KENREDDY: Nuclear and Radiochemistry, John Wiley & Sons, Inc., Newyork (1955)
- 7) J. M. HOLLANDER, I. Perlman, G. T. SEABORG: Table of Isotopes, Rev. Modern Phys. 25 (1953) 499
- 8) K. WAY, R. W. KING, D. N. KUNDN, C. L. MCGINNIS, R. VAN LIESHORT: New Nuclear Data, Nuclear Science Abstracts, 9 No. 24 B (1956)
- 9) C. L. MCGINNIS, D. N. KUNDU, G. H. FULLER, K. WAY, M. YAMADA: New Nuclear Data, ibid., 10 (1956) No. 18B, No. 24B
- 10) J. M. CORK, M. K. BRICE, L. C. SCHMID: Phys. Rev., 99, 703 (1955)
- 11) R. C. GEIGER: Nucleonics, 14 (1959) 2
- 12) C. D. BOPP, O. SISMAN: Nucleonics, 14 (1956) 1
- 13) Reactor Handbook Materials
- 14) 志田 守: 特殊鋼, 7 (1958) 6
- 15) Finkk, Riehl, Seligs: H14 Nukleonik, 3 (1961) 1
- 16) W. J. SMALL, J. L. ZEGGER, A. L. MEDIN: 4th NESC, Chicago, 1958 Session, Reprint 92
- 17) R. J. CLARK, A. L. MEDIN: Corrosion 14 (1958) 9
- 18) W. L. FLEISCHMAN: Iron Age, 183 (1959) 7
- 19) C. R. SUTTON: INCO 社内資料 (1957)
- 20) 細田 薫: 住友金属, 11 (1959) 2
- 21) A. M. BOUNDS: Iron Age, 183 (1959) 25
- 22) J. R. LANE: Met. Progress, 72 (1957) 6
- 23) Steel, 144 (1959) 15

IV. オーステナイト系ステンレス鋼の照射効果

江波戸 和 男*

1. 結 言

オーステナイト系ステンレス鋼はかなり大きい熱中性

* 日本冶金工業株式会社

子吸収断面積を持つにもかかわらず高温強度，耐食性，価格などの点で他の材料に優るので原子炉用構造材料として現在広く使用されている。すなわち燃料棒被覆材，制御棒およびその被覆材，原子炉容器，重水タンク，液体燃料容器，冷却材導管，熱遮蔽体，更に出力系統の導管，熱交換器，ポンプおよびバルブ計装材料，あるいは原子炉の付帯装置として重要な燃料処理系等広範囲にわたっている。

原子炉用構造材料として，特に高中性子束領域で使用される構造材料に対して考慮すべきことは第1に中性子吸収特性と材料の放射化であるが，一方放射線照射損傷による材料の性質変化も重要な事項と云えよう。上記原子炉容器あるいは熱遮蔽体などを長年月一例えば20年使用一した場合には中性子照射量が $10^{20} \sim 10^{23}$ nvt になることが予想されており，原子炉運転中に設計時の性質と異つた性質を持つ材料に変つてしまう。オーステナイト系ステンレス鋼に対する放射線（主に速中性子）照射の影響については一般に耐力を著しく増大し，引張強さはやや増加し，伸び，絞りなどの延性はかなり減少すると云われこれについての解説も多い^{1)~10)}。ここではオーステナイト系ステンレス鋼に対する中性子照射の効果について従来発表されている資料で，各種性質に対する問題点をのべる。

2. 物理的性質に対する照射の影響

1. 密度

M. H. BARTZ¹¹⁾ および D. O. LEESER¹²⁾ の報告

によると表 4.1 に示すように $10^{20} \sim 10^{21}$ nvt の照射で AISI 347 鋼あるいは 316 鋼は密度が 0.04~0.09% 減少している。この変化は他の金属に比べて特別大きい値ではなく例えば Monel では -0.05%，Stellite 3 では +0.06%，炭素鋼 (SA 212) では ±0% と報告されている。しかし M. H. BARTZ によれば 10^{21} nvt で 0.4% の減少をみることもあると云うからより正確な密度変化は低温で高密度の中性子束を照射した場合について調べなければならない。ここで密度の変化は中性子照射による欠陥の生成機構との関係で興味があるもので実用的には大きな意味を持たないものと考えられる。

2. 電気抵抗

電気抵抗の変化についての実験は C. A. BRUCH¹³⁾ および D. O. LEESER¹²⁾ によつて行われている。前者によると 282°C で 4×10^{19} nvt の中性子照射により AISI 304, 347, 316, 309 の順に増加率が大きくなつていく。特に 309 は +3.75% とかなりの増加を示している。後者が 347 鋼について行つた実験結果では焼鈍材で約 2%，冷間圧延材で約 1.5% の増加を示している。これらの結果を表 4.2 に示す。また前者による面心立方金属 (Cu, Ni, ステンレス鋼) および体心立方金属 (Ti, Fe, Zr) についての結果によると面心，体心ともに電気抵抗は増加しており，面心立方金属よりも体心立方金属の方が増加量が多い。この関係を図 4.1 に示す。なお F. E. BOWMAN¹⁴⁾ による重陽子照射では増加は飽和するようである。

3. 磁氣的性質

表 4.1 中性子照射による密度の変化

合金	照射温度	照射量 (nvt)	照射前密度	照射後密度	増減 (%)	備考	文献
347	<93°C	2.1×10^{21}	7899	7896	-0.038		11
〃	〃	7.2×10^{21}	7899	7892	-0.079		〃
316	21.1~60°C	2×10^{20} slow 3.5×10^{19} fast	7995	-0.005 ± 0.002	-0.06		12
347	〃	〃	7938	-0.007 ± 0.002	-0.09		〃
347+Ta	〃	〃	7942	-0.003 ± 0.001	-0.04		〃

表 4.2 中性子照射による電気抵抗の変化

合金	照射温度	照射量 (nvt)	照射前電気抵抗	照射後電気抵抗	増減 (%)	備考	文献
			micro-ohm-cm				
304	282°C	5×10^{20} fast 4×10^{19} slow	80.2 (28.0°C)	80.4 (27.8°C)	+0.25		12
316	〃	〃	77.0 (28.4°C)	78.01 (28.4°C)	+1.3		〃
347	〃	〃	75.5 (26.2°C)	75.94 (27.3°C)	+0.58		〃
309	〃	〃	79.9 (27.5°C)	82.01 (27.0°C)	+3.75		〃
347	90°C	$2.3 \sim 6.9 \times 10^{20}$	—	—	+1.5	58%冷間圧延材12コノ平均 焼鈍材12コノ平均	13
〃	〃	$2.2 \sim 6.6 \times 10^{20}$	—	—	+1.9		〃

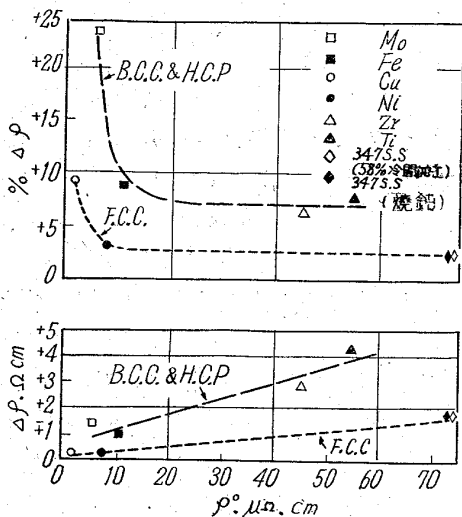


図 4.1 各種金属の中性子照射による電気抵抗の変化¹³⁾

オーステナイト系ステンレス鋼の場合には磁氣的性質の変化の大部分は組織のオーステナイト→フェライト変態によるものと考えられ D. O. LEESER¹²⁾および M. B. REYNOLDS¹⁵⁾の研究はいづれも組織変化と結びつけて考えている。従つてここでは変化の程度を表 4.3 に示すだけにし個々の事項については後述する組織の変化との関係で述べることにする。

4. その他

弾性係数は実験誤差に入る位しか変化しないが傾向としてはわづか増加する。また熱伝導度に対する資料はないが一般に常温あるいはそれ以上の温度での照射ではほとんど影響を受けないと云う。

3. 機械的性質に対する照射の影響

1. 硬 度

オーステナイト系ステンレス鋼の硬度におよぼす中性子照射の影響については多くの資料が発表されている。一般に焼鈍材の硬度増加は照射が常温で行われた場合

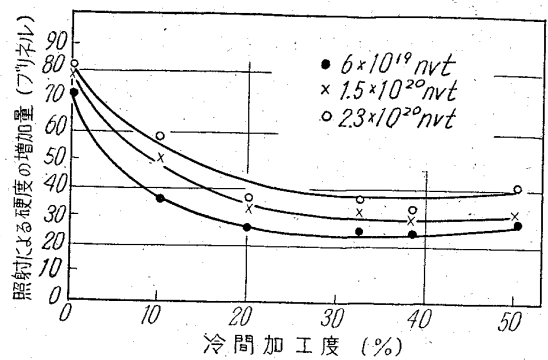


図 4.2 Type 347鋼冷間加工度と照射による硬度増加量との関係¹⁷⁾

には 20~40% である。しかし照射温度が高い場合あるいは冷間圧延などで始めに硬化してある材料では硬度の増加はそれほど大きくなく 0~10% 程度である。C. MANNAL¹⁷⁾によると図 4.2 にみるように冷間加工が 20%以上になると照射による硬度増加量はほとんど変化しない。M. H. BARTZ¹⁸⁾の報告によれば照射量が $10^{22} \sim 3.75 \times 10^{22}$ nvt では硬度増加はほとんど飽和しているようにみえる。各種 data を表 4.4 に示すが、鋼種別にみても鋼種による差は特別認められずむしろ照射前の硬度により決つてくる。なお析出硬化型のステンレス鋼でも焼鈍状態では 50% 前後硬化するが硬化の状態では 10% 以下の硬度増加を示すにすぎない。またソ連の data によると 20Cr-14Ni-2.5Si 鋼の硬化が顕著である。全般に照射量と硬度増加率との関係は $10^{19} \sim 10^{22}$ nvt の範囲で照射量の増加につれて硬度増加率もいくぶん増加している。W. F. MARPHY¹⁹⁾は照射後の硬度の軟化について実験し表 4.5 にみるように 600°C に 8 日間加熱しても照射前の硬度にすることが出来なかつたとしている。これを 10% 冷間加工した材料の低温焼鈍による軟化と比べると軟化の機構が異なることが知られ前者の場合には再結晶なしに軟化していることがわかる。ま

表 4.3 中性子照射による磁氣的性質の変化

合 金	照 射 温 度	照 射 量 (nvt)	照 射 前	照 射 後	備 考	文 献
304		1×10^{19} slow	$31.98 \cdot 10^{-6}$ cgs	$202.47 \cdot 10^{-6}$ cgs	Guoy 法による	12
309		//	31.65 //	88.30 //	//	//
316		//	29.17 //	228.74 //	//	//
347		//	31.74 //	210.28 //	//	//
347	282°C	3×10^{19} slow	2	4	Magne Gageによる (焼鈍材)	//
//	//	//	2	9	(ショットピーニング)	//
17-4 PH	//	//	110	114	(硬 化)	//
Stainless W	//	//	110	121	//	//
347	90°C	1.8 kWh/cm^2	22.9	+0.91	フラックス・メーター の振れの読み	15
347	//	6.5 //	22.9	+2.81	//	//
347	//	110 //	22.9	+7	//	//

表 4.4 放射線照射による硬度の変化

合金	照射温度 (°C)	照射量 (nvt)	照射前硬度	照射後硬度	増(%)	備 考	文 献
301	<93°C	3.9×10 ¹⁹	R _B 80	94	17.5		20
302	"	"	" 74	94	27.0		"
302B	"	"	" 78	97	24.3		"
305	"	"	" 67	92	37.4		"
304L	"	7.8×10 ¹⁹	" 60	86	43.3		"
304	200°C	1.3×10 ¹⁹ slow	& 10 ¹⁸ fast	—	0		22
304	204~260	(1)	H _B 131	131	0	焼 鈍	23
"	"	(2)	" 654	810	23.9	マルコマイズ	"
316	25°C	5×10 ¹⁹ fast	R _B 83	98	18.1		22
"	21.1~26.7	(2)	H _B 154	228	48.0	焼 鈍	23
"	204~260	(1)	" 143	143	0	"	"
"	21~27	(2)	" 226	283	8.4	冷間加工	"
321	<93°C	7.8×10 ¹⁹	R _B 74	94	27.0		20
347	160°C	6×10 ¹⁹ fast	" 75	93	24.0		22
"	-70°C	1.1×10 ¹⁷	DPH 190	230	21.0	36MeVα粒子	"
"	"	6.7×10 ¹⁷	" 190	260	36.8	"	"
"	<93°C	3.9×10 ¹⁹	R _B 81	99	22.2		20
"	"	2.4×10 ²¹	R _c 14.4	20.5	42.3		11
"	"	7.2×10 ²¹	" 14.4	20.6	43.0		"
"	"	2.6×10 ²²	" 14.4	21.8	51.4		"
"	"	3.76×10 ²²	" 14.4	23.3	61.8		"
"	90°C	2.2~6.6×10 ²⁰	H _B 136	176	31.6	12 コ 平均	13
"	"	2.3~6.9×10 ²⁰	" 165	196	18.8	"	"
"	282	(3)	" 183	183	0	焼 鈍	23
"	204~260	(4)	" 656	656	0	マルコマイズ	"
"	—	(1)	" 152	152	0	焼 鈍	"
"	282	(3)	" 153	175	10	"	"
"	282	(3)	" 153	168	10	ショット・ビーニング	"
309	204~260	(1)	" 152	158	4	焼 鈍	"
329	282	(3)	" 158	158	0	"	"
U.S.S. "W"	204~260	(2)	" 461	461	0	硬 化	"
"	282	(3)	" 415	440	6	"	"
17-4PH	282	(6)	" 315	477	51.5	焼 鈍	"
"	"	(3)	" 415	440	6	硬 化	"
"	"	(6)	" 403	432	7.6	"	"
17-4PH	282	(3)	" 415	460	10.9	硬 化	"
"	"	(6)	" 477	477	0	"	"
"	"	(3)	" 470	820	10.8	マルコマイズ	"
X18H9T	80°C	2.43×10 ²⁰	Ha 163	250	53	18Cr-9Ni-Ti	24
"	"	3.2×10 ²⁰	" 184	306	66	850°C 安定化	"
853	"	2.43×10 ²⁰	" 161	263	66		"
211	"	3.2×10 ²⁰	" 183	330	80		"

(1) 1.2×10¹⁹ slow

(2) 3.7×10²⁰ slow and 5.1×10²⁰ fast

(3) 3×10¹⁹ slow

(4) 10¹⁹ slow

(5) 5×10¹⁹ slow and 4×10¹⁹ fast

(6) 4.4×10¹⁹ slow

た F. E. BOWMAN¹⁴⁾は重陽子照射後の 304 鋼を 100, 200, 300 および 400°C で各 1 時間加熱したところ 300 °C 迄はほとんど変化しないが 400°C で照射前の硬度に近づいたという。

2. 引張強さおよび耐力

表 4.6 にみるように引張強さおよび耐力も硬度と同様に中性子照射により増大する。一般に焼鈍材を常温あるいは比較的低い温度で照射した場合には引張強さは 2% 前後、耐力は 100~150% 程度上昇する。J. C. WILSON²⁰⁾は各種オーステナイト系ステンレス鋼について試験を行なっているが鋼種による大きな差は認められない。

(図 4.3 参照) C. A. BRUCH¹⁸⁾によると冷間加工により硬化した 347 鋼では引張強さおよび耐力ともに増加率は少なく、5×10²⁰ nvt の照射では両者とも 20~30% である。W. F. MURPHY¹⁹⁾が EBR で冷間加工した 347 鋼についての結果(228~316°C, 2.9×10¹⁸ nvt fast)では引張強さが 23.5% 増加しており焼鈍材(228~316°C, 3.0×10¹⁸ nvt fast)では 7.5% 増加しているにすぎない。しかしこの場合のように照射温度が高いと別の問題、すなわち冷間加工したオーステナイトステンレス鋼を 200~250°C で焼鈍すると強度増加があるのでこの影響を無視することが出来ない。PRAUDYUK^らの報

表 4.5 冷間圧延および照射した 347 鋼の低温焼鈍による軟化

条 件	硬度 (HB)	
焼 照 射 鈍 後	75	
1.2×10 ²⁰ nvt 照射後焼鈍	200°C { 1 日	98
	{ 8 日	97
	400°C { 1 日	97
	{ 8 日	94
	600°C { 1 日	86
	{ 8 日	79
10% 冷 間 圧 延	400°C { 1 日	79
	{ 11 日	100
	600°C { 1 日	98
	{ 8 日	98
	{ 1 日	94
	{ 8 日	93

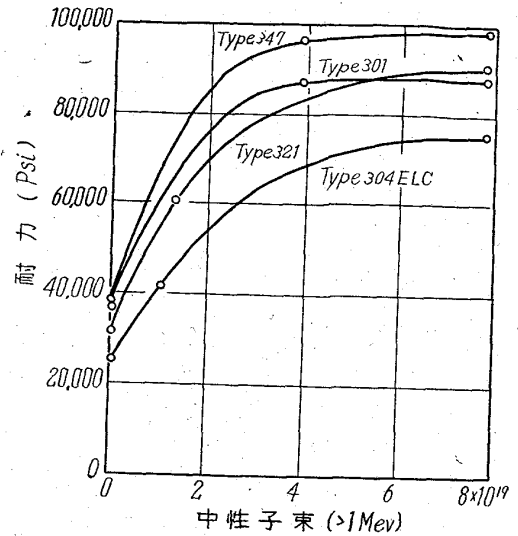


図 4.3 Type 301, 304L, 321 および 347 鋼の耐力におよぼす中性子照射の影響²⁰⁾

告²¹⁾によれば照射温度の影響は大きく、100°C 以下で照射した場合には照射量の増加とともに引張強さ、耐力共に増加するが、照射温度が 300°C 以上になると増加量は半分以下となり 600°C で 4.4×10¹⁸ nvt 照射した場合には引張強さに変化はなく耐力が 12.5% 増加したにすぎない。また 18Cr-12Ni-2Mo-Ti 鋼の安定化処理した材料ではむしろ減少する傾向さえ示している。これら照射温度上昇に伴う機械的性質の変化は照射により生じた欠陥の可動性の増加によるものと考えられている。また 14Cr-14Ni-3Mo-Ti 鋼に 80°C で照射したときの引張強さ、耐力、伸びと照射量との関係は図 4.4 に示す通りで引張強さと伸びは 2×10¹⁹ nvt で実際には飽和値に達しているが耐力はなお上昇して引張強さに近づく傾

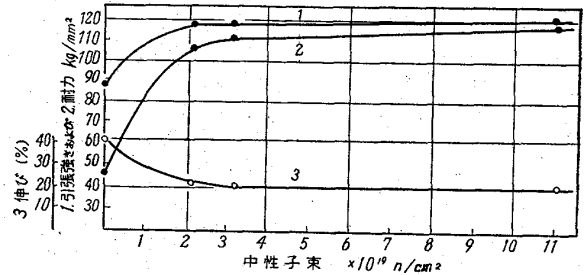


図 4.4 14Cr-14Ni-3Mo-Ti 鋼の中性子照射による機械的性質の変化
向を示している。このような照射量による機械的性質の

表 4.6 放射線照射による引張強さおよび耐力の変化

合 金	照射温度	照 射 量 (nvt)	引張強さ (kg/mm ² / psi)			耐 力 (kg/mm ² / psi)			備 考	文 献
			前	後	増量 (%)	前	後	増量 (%)		
347	160°C	6×10 ¹⁹ fast	60.0	73.0	21.7	23.0	54.0	103		22
304L	<93°C	3.9×10 ¹⁹	86,300	103,800	20.3	24,350	75,500	210		20
321	〃	7.8×10 ¹⁹	84,800	105,800	24.8	31,200	90,600	191		〃
302	〃	3.9×10 ¹⁹	95,500	111,300	16.5	33,850	84,000	148		〃
347	38°C	2.4×10 ²¹	95,800	109,000	13.8	56,900	98,000	70.6	照射前は 3 コの平均	11
〃	〃	2.6×10 ²²	〃	107,250	11.9	〃	100,800	77.5		〃
〃	〃	3.76×10 ²²	〃	115,340	20.4	〃	106,939	88.0		〃
〃	90°C	6.6×10 ²⁰	97,700	113,500	16.2	48,800	101,800	108	58%冷圧材	13
〃	〃	6.9×10 ²⁰	164,700	199,500	21.0	150,000	194,000	29.4		〃
304	204~260°C	1×10 ¹⁹ slow	92,500	95,500	3.3	44,000	48,500	10.2		23
347	〃	〃	99,000	103,000	4.0	37,500	42,500	13.5		〃
Stainless W	21~27	{ 3.7×10 ²⁹ slow 5.1×10 ²⁰ fast	11,000	134,500	19.0	—	—	—		〃
18Cr-9Ni-Ti	80°C	1×10 ²⁰	65	100	54	24	92	283		21
〃	300°C	2.4×10 ¹⁸	71	73	2.8	26	42	61.5		〃
〃	380	5.2×10 ¹⁸	—	67	—	—	31	—		〃
〃	600	4.4×10 ¹⁸	76	76	0	32	27	-12.5		〃
〃	80	3.2×10 ²⁰	64	70.5	10	27	58.5	116	850°C Sensitize	24
㊟N583	80	2.43×10 ²⁰	65.8	66.5	1.5	20.7	51.3	148		〃
㊟N211	80	3.2×10 ²⁰	60.0	72.2	21	28.2	55.2	96	〃	

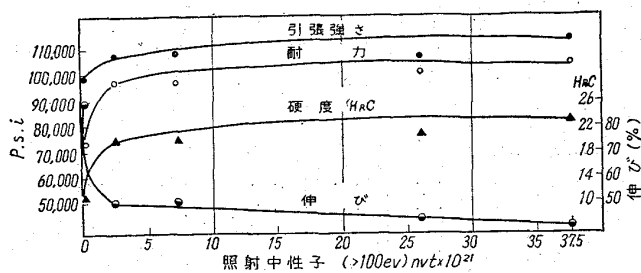


図 4.5 Type 347 鋼の照射損傷¹⁸⁾

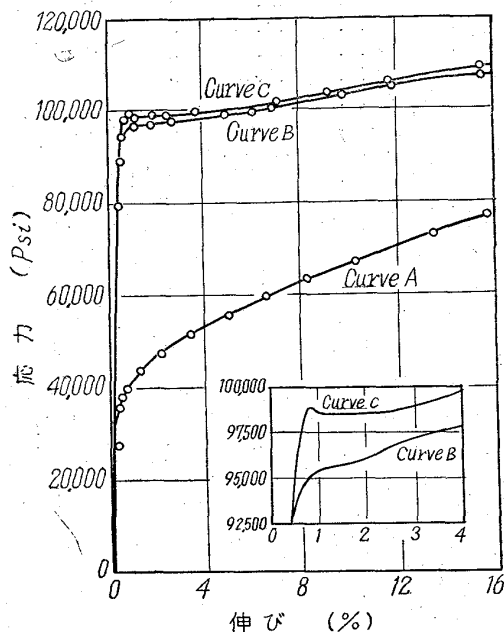


図 4.6 照射後の 347 鋼の応力-歪線図²⁰⁾

変化を示す曲線の形状は多くのオーステナイト・ステンレス鋼の特徴であると云われる。MTR 炉で 6 年間照射した結果¹⁸⁾もほとんど同じような傾向を示している。すなわち図 4.5 にみるように短期間の実験では中性子照射による材料の性質変化はかなり顕著に現われるがこの変化は照射の初期に急速に起るものでその後はゆつくりと変化が進行するということが確認されている。

次にオーステナイト系ステンレス鋼にみられる特異な現象は照射後の応力-歪線図で歪速度に対応して炭素鋼に現われる降伏点に似た降伏点が現われることである。WILSON が 347 鋼について行なった実験結果によると図 4.6 にみるように照射後の曲線 (curve B, curve C) に降伏点が認められる。しかも照射前の曲線 (curve A) は 0.01~0.05 in/in/mn の歪速度ではほとんど変化しないのに対し照射後の曲線では 0.01 in/in/mn の歪速度のときは curve B, 0.05 in/in/mn の歪速度では curve C と曲線の型が変わってくる。この歪速度と降伏点の関係を 304 L 鋼について実験した結果が図 4.7 で照射後の降伏点が歪速度に依存し、歪速度が 5 倍になると

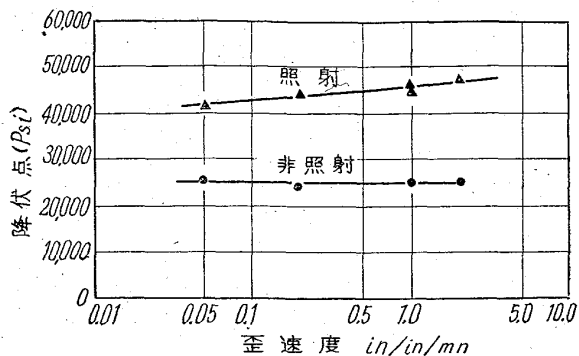


図 4.7 1×10^{19} nvt 照射した 304L 鋼の降伏点におよぼす歪速度の影響²⁰⁾

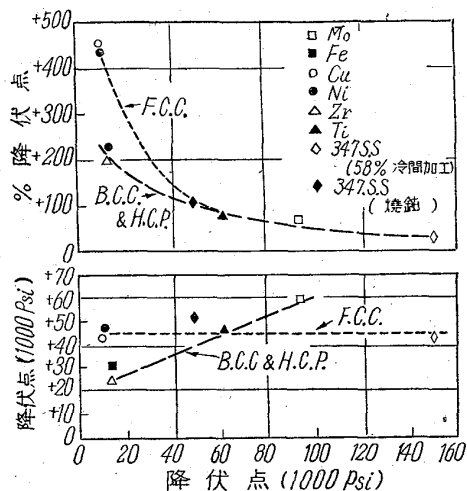


図 4.8 各種金属の照射による降伏点の増加¹⁸⁾

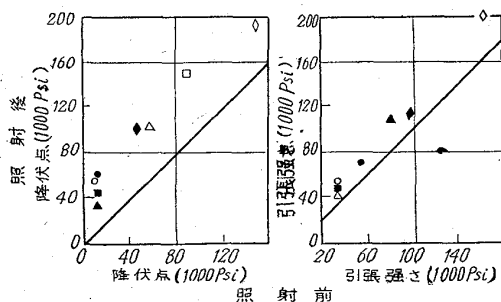


図 4.9 各種金属の照射前後の強度の関係¹⁸⁾

降伏点は 5% 程度上つていることが知られる。この現象は一般に照射後の面心立方金属に観察されているが炭素鋼の降伏点と違う点は上降伏点に達する前に塑性変形が起り、上降伏点に続いて起る荷重の低下はそれほど急ではないという点である

BRUCH によると引張強さおよび降伏点の変化も面心立方金属と体心立方金属との間には相違があり、前述と同じ試料の試験結果によると図 4.8 にみるように面心立方金属では降伏点は最初の強度に関係なく同量の増加をするが体心立方金属では強い材料の方が増加量が多い。いずれも照射により強化することは同じで図 4.9 の

表 4.7 中性子照射による伸びおよび絞りの変化

合 金	照射温度 °C	照 射 量 (nvt)	伸 び (%)			絞 り (%)			備 考	文 献
			前	後	減 量 (%)	前	後	減 量 (%)		
347	160	6×10^{19} fast	57	34	40.4	—	—	—	58%冷圧材	22
〃	280	7×10^{18} 〃	—	—	Negligible	—	—	—		〃
304 L	<93°	7.8×10^{19}	63	58	8.0	74	73	1.4		20
347	〃	2.6×10^{22}	〃	44.0	30.2	78	65.0	16.7		11
〃	〃	3.76×10^{22}	〃	32.0	49.3	—	—	—		18
〃	90	$2.2 \sim 6.6 \times 10^{20}$	17.5	11.4	35.2	60.6	56.0	7.8		13
304	204~260	1×10^{19} slow	70.8	58.5	17.4	—	—	—		23
347	〃	〃	56.6	54.5	3.7	—	—	—		〃
18Cr-9Ni-Ti	80	1×10^{20}	66	43	35	—	—	—		21
〃	600	4.4×10^{18}	62	70	+12.9	—	—	—		〃
14Cr-14Ni	80	5×10^{19}	50	29	62	—	—	—	〃	
-3Mo-Nb	300	3.7×10^{18}	56	52	7.1	—	—	—	〃	
≧N583	80	2.43×10^{20}	76.0	56.0	26	—	—	—	24	

ように整理されている。またこれら増加は融点とも関係があり降伏点の増加量は融点の低い金属の方が大きくなっている。

3. 伸びおよび絞り

照射が 100°C 以下の低い温度で行なわれた場合には伸びは約 30~40%、絞りは 10% 前後減少する。照射温度が 300°C になると伸びの減少は 10% 以下となり 600°C の場合にはむしろ増加している。前に述べたように伸びの減少は照射量とともに増すが 10^{18} nvt 程度で飽和する。(図 4.3) 冷間加工した 347 鋼についての結果では伸びの減少は焼鈍材と同程度であるが絞りの減少がいくぶん大きい。表 4.7 に伸びおよび絞りの変化を総括したが鋼種による差は認められない。なお照射後の伸びが ASTM A-240 に満たないものがあるがこれについては別に述べる。

4. 衝撃値

遷移温度を持つ炭素鋼あるいは低合金鋼と異なつてオーステナイト系ステンレス鋼の場合には遷移温度の上昇ということは大きな問題とはならない。しかし照射による衝撃値の低下は認められている。WILSONによると -196°C で試験した場合に非照射材は曲つただけでノッチの底にも割れが認められなかつたが照射材では同じ試験

で完全な破壊はしなかつたがノッチ部に割れが入つた。

また LEESER²⁵⁾ によると 304, 316, 347 鋼について 6×10^{18} nvt fast, 4×10^{19} nvt slow (282°C) および 2×10^{20} nvt slow, 3.5×10^{19} nvt fast (21~60°C) 照射し -184, -73, 24, 100 および 149°C の各温度で試験したが試験片が少なくはつきりした曲線が得られていない。KONOBERSKY²⁴⁾ の data によると 18Cr-9Ni-Ti の焼鈍材を 2.43×10^{20} nvt 照射したときに 24.1 kg-m/cm² が 8.2 kg-m/cm² に、18Cr-9Ni 鋼で 18.6 kg-m/cm² が 3.4 kg-m/cm² に減少している。

5. 疲労強度

疲労強度に関する Data は少ないが C. R. SUTTON によると 304 鋼について 10^{20} nvt slow, 10^{19} nvt fast の照射を 60°C および 282°C で行なつた後試験したがほとんど影響を受けていない。Leeser も同様の報告をしている。すなわち表 4.8 にみるように平滑試験片の疲労限は影響を受けておらず、ノッチをつけた試験片が疲労限で 5% 増大している。また同じ 304 鋼について 3×10^{20} nvt slow, 6×10^{19} nvt fast (282°C) をループ内で照射したものと同じ条件で照射しないものについての試験結果は図 4.10 のようで工学的に意味を持つような差は認められていない。しかし低い温度で照射し

表 4.8 中性子照射による疲労限の変化

合 金	疲 勞 限 ²⁾ (psi)				変 化 量 (%) 切欠効果 ³⁾			
	非 照 射		照 射 ¹⁾		照 射 (切欠なし)	非照射 (切 欠)	非照射	照 射
	切欠なし	切 欠	切欠なし	切 欠				
AISI 304	50,000	20,500	50,000	21,500	0	+5	2.4	2.3

1) 8×10^{19} nvt slow, 1×10^{19} nvt fast, 21~60°C

2) 10^7 回転において試験片が破断しない応力

3) 切欠なしの疲労限/切欠ありの疲労限

表 4.9 中性子照射によるクリープ強度の変化²⁵⁾

合金	実験者	In-Pile 試験条件		応力 (psi)	結果
		中性子束 (nv)	温度 (°C)		
AISI 347	WILSON DAVIS ZUKAO	3×10^{11} fast	>760 (1400 F)	6670	わずか減少
		〃	<760	6670	わずか増加
	COFFIN	9×10^{12} fast	600 (1112 F)	28500	影響なし

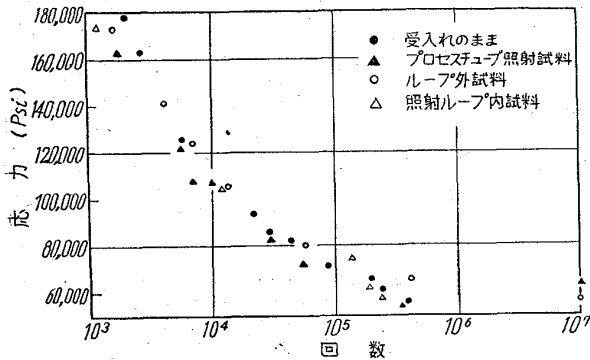


図 4.10 照射前後の Type 304 鋼平滑試験片の S-N 曲線

た場合にはいくぶん時間強度が下つているようである。

6. クリープ

材料のクリープのような長時間応力のかかる状態で生ずる現象に対しては In-pile 試験が望まれる。ORNL で行なっている一連の実験では照射効果は試験温度によつて変つてくる。すなわち表 4.9 にみるように 760°C 以上ではクリープ強度はわずか減少するが 760°C 以下では逆に増加する。最近のラプチャー強度に対する報告²⁶⁾²⁷⁾によると 1500°F および 1600°F で破断強さが照射を受けないものに比して夫々 25 および 15% 低下している。しかしこのような低下は 1300°F では認められていない。しかし破断伸びの低下は全ての試験温度で認められている。また COFFIN らが tube について行なつた結果では 600°C で影響を受けなかつたとしている。実際にはクリープに影響する因子は多く、与えられた因子の効果に対する現われが各条件のもとで異なるのでクリープに対する効果を一般化することは困難であるが今のところ有害な効果はみられていないようである。

4. 組織変化

組織の中に不安定な相が存在するとすれば中性子照射によつて与えられたエネルギーの一部で実際に原子炉が操業しているような比較的低い温度でも安定な相に変態することが考えられる。SUTTON & LEESER²⁸⁾ は中性子

照射がオーステナイト→フェライト変態の原因となるであろうとの考えから数種のステンレス鋼について照射前後の磁氣的性質変化を測定している。この結果によると前述の表 4.9 にみるように照射後に磁気感受性の増すことが知られた。304, 316, 347 鋼は 30×10^{-6} cgs が平均 500% 増の 200×10^{-6} cgs となつているが 309 鋼は 179% 増で一番変化が少なく安定であるとしている。また 347 鋼の焼鈍材とシットピーニング材とを比較するとショットピーニング材の方が増加量が大きく、析出硬化型の高 Cr-低 Ni 鋼では照射前後で変化がみられない。REYNOLD¹⁵⁾ が Hanford Reactor および MTR を用いて 347 鋼 (C 0.041, Mn 1.49, Ni 10.9, Cr 20.5, Nb 0.52, Ta 0.045, Co 0.091) の 0.787" dia \times 0.125 in 厚の試験片について初期条件を冷間加工によりフェライト量を変化させ、これに $1.8 \text{ kWh/cm}^2 \sim 110 \text{ kWh/cm}^2$ の照射後の磁氣的性質の変化を測定している。これによると図 4.11 にみるように照射量が多い程度磁気量も多くなり、最初のフェライト量の多い方が増加率も大きくなつている。これは中性子照射が新しいフェライトの核を作るといふよりもむしろ出来ているフェライト核の成長を促進すると考えている。なお先の LEESER の結果で 309 が 18-8 系よりも安定であると云つているがこれは必ずしも正しいとは考えられない。

5. 原子炉用ボロン・ステンレス鋼の照射損傷

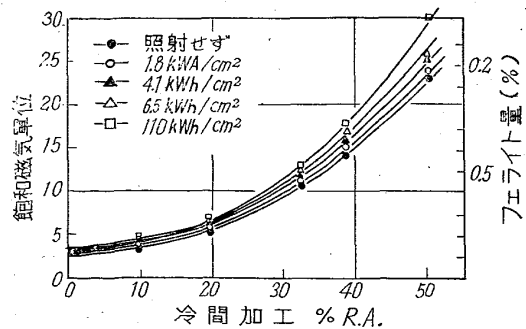
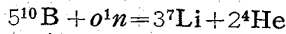


図 4.11 Type 347 鋼のフェライト量におよぼす照射の影響¹⁵⁾

制御棒あるいは熱遮蔽用として使用されている B ステンレス鋼では ^{10}B の (n, α) 反応による別の損傷がある。すなわち ^{10}B は中性子により



の反応で ^7Li に変る。実際 J. J. LOMBARDO²⁸⁾ は天然 B を 1.18~2.04% 含むステンレス鋼で衝撃値は約 1/2 あるいはそれ以下になると報告している。また W. O. SCHAFFNIT²⁹⁾³⁰⁾ の報告によれば 93% 濃縮 ^{10}B を 1% 含むステンレス鋼の冷間加工後の 0.050 in 板について MTR および ETR を使用して 2.6, 4.4, 7.8, 30.5 × 10²⁰ nvt (それぞれ ^{10}B の Burnup にして 15, 25, 40, 90%) の照射を行なった結果図 4.12 にみるような機械的性質の変化を認めている。

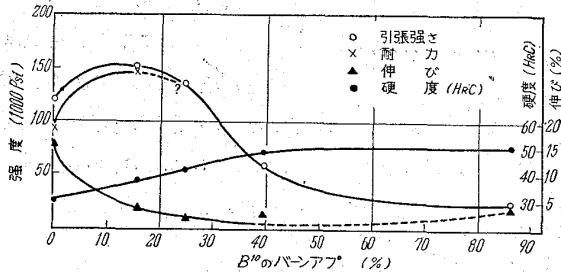


図 4.12 B ステンレス鋼(1%B)の照射損傷³⁰⁾

B ステンレス鋼の組織はオーステナイト基質の中に炭化物相が点在しているが照射後の組織を顕微鏡でみるとこの炭化物の周囲に void が認められている。この void は照射量が多くなる程多くなっており、これは上記 (n, α) 反応により生じた ^7Li が腐食の際に優先的に溶解したためであると云われている。また 7.83×10^{20} nvt 照射した材料では原因不明の割れを組織中に認めている。また RAY³¹⁾ は B を含む鋼および合金と制御材として使用した場合の放射線照射損傷について紹介しているが、B ステンレス鋼の場合の使用し得る最大の Burnup は 2.0~2.5% でありその際の最高体積膨張は 2.0~2.5% である。

6. 照射後の性質と ASTM 規格

照射後の性質についての資料が少なく、しかも大部分は標準試験片よりも小さい試験片で行なわれているが、以上述べた data と現在の設計の基礎となっている ASTM 規格とを比べてみるとこれを満足しないものがある。表 4.10 にみるように ASTM-A240-54 (Standard Specification for Corrosion-Resisting Chromium and Chromium Nickel Steel Plate, Sheet, and Strip for Fusion Welded Unfired Pressure Vessels, 1955) と比べてみると 10²⁰ nvt 照射後では

表 4.10 照射後の性質と ASTM 規格との比較

規格および実験値	硬度 (HB)	伸び (%)	絞り (%)
ASTM-A240-54	347	30mn	—
	346	95 //	—
	304	88 //	—
	321	88 //	—
347: 3.9×10^{19} nvt (<93°C)	99(81)*	25(49)	62(71)
316: 5×10^{19} nvt (25°C)	98(83)	—	—
304L: 7.8×10^{19} nvt (<93°C)	86(60)	58(63)	73(74)
321: 7.8×10^{19} nvt (//)	94(74)	—	—

* () 内は照射前

304 ELC を除いて規格の Rockwell B 88 を超している。また伸びも照射によつて減少するが変化はあまり大きくない。絞りは A-240 にはないが変化を併記した。

7. 実 例

実際の原子炉炉心部の構造材料とした材料の放射線照射による性質の変化については公表されている資料がほとんどないが、ここでは R.E. BAILEY³²⁾ によつて発表された結果を紹介する。これは EBR-1 (Experimental Breeder Reactor 1) の炉心に使用した 347 鋼についての結果で熱間圧延で作った 0.088 インチ厚の板を 6 角の tube (高さ 24 インチ × 平行部距離 7^{1/2} インチ) とし燃料棒とブランケットの境に置いた flow separator である。この材料の組成は次のようである。

EBR-1 の Mark II

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.063	0.58	1.72	0.022	0.009	12.79	17.28
Cb	Cu	Mo				
0.82	0.19	0.14				

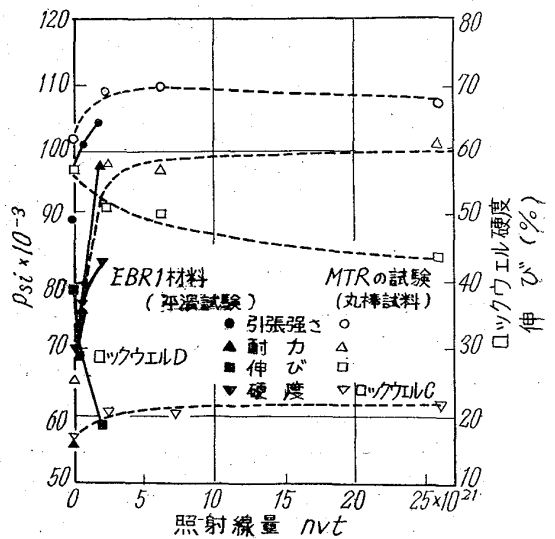


図 4.13 Type 347 鋼の照射損傷³²⁾

表 4.11 EBR-1 で照射した 347 ステンレス鋼の強度におよぼす焼鈍の影響³²⁾

照射条件*	焼 鈍		耐力 (psi) (0.2% offset)	引張強さ (psi)	伸び (%)	絞り (%)
	温度 (°C)	勝 間 (h)				
H	400	89	88.9×10 ³	105.8×10 ³	27	42
L			91.1	110.3	31	43
			63.9	95.5	32	46
			64.2	95.6	30	45
C			56.6	95.6	46	55
			55.6	90.1	39	54
H	500	78.7	59.0	90.5	39	45
L			59.0	94.6	37	53
			58.7	92.6	37	55
			57.8	93.2	31	59
C			58.8	93.2	37	45
			57.5	89.9	37	50
H	500	7	70.7	97.4	37	48
L			64.5	95.8	32	49
			56.8	91.2	36	55
			58.1	91.7	38	60
H	600	48	55.9	93.1	42	55
L			54.9	93.1	35	52
			56.6	92.2	36	52
			56.4	92.6	37	45
H	600	7	53.9	91.8	38	51
L			56.4	93.1	37	52
			57.2	93.1	42	57
H	740	3	49.5	89.9	43	49
C			49.5	88.5	42	50
			49.1	88.4	39	48
			48.2	88.4	40	47
L			49.3	89.3	36	58
			95.5	88.9	39	45
H	740	1.3	49.5	88.5	37	50
			51.4	89.8	37	52
H	740	0.5	49.5	88.5	39	55
L			50.4	90.6	45	49
			50.0	90.2	41	51
H	なし	なし	102.7	103.4	19	—
C			95.0	104.7	19	37
			75.6	101.6	30	52
			76.8	101.2	28	49
L			50.6	86.8	37	54
			61.8	92.7	42	53

* H=2×10²¹nvt, L=6.2×10²⁰nvt, C=標準 (非照射)

Core が一部融解した際に取り出されたもので、中心部で最大 2×10²¹ nvt を、上部で 6.2×10²⁰ nvt の中性子照射を受けている。実際の冷却材 Nak の温度は入口で 228°C、出口で 316°C である。上記 2 段階での照射領域から試験片を切削し、機械試験を行なった結果が表 4.11 である。これらの結果を BARTZ が MTR で試験した結果と比較すると図 4.13 にみるように両者とも引張強さ、伸び、硬度ともに照射量の増加とともに増

大している。BARTZ の結果では引張強さ、耐力ともに飽和する傾向にあるが BAILEY の場合は引張強さだけが飽和する傾向を示している。照射によって変化した性質は表 4.11 か明らかなように 740°C で焼鈍すれば急速に回復し、560°C でもかなりの回復がみられる。また WILSON が認めた上あるいは下降伏点と云うようなものは認められていないが、これは歪速度の遅いことと照射温度が高かつたためとみられる。照射後の組織は特に

変つた様子はなかつたが、これを 740°C で 30 分焼鈍したところ結晶粒界に析出物が認められこれは球状である。非照射材でも 840°C で焼鈍すると粒界に析出物が現れるがこれは球状というよりむしろ直線的に現われている。照射前後の試片の電気抵抗には変化が認められずいづれも 76.86 Microhm-cm である。これは原子炉の操業温度で欠陥が取除かれたためと考えられている。磁氣的性質はフェライト生成のために照射前に比して 6.2×10^2 nvt で 1.004 倍, 2×10^{21} nvt で 1.007 倍となつているが顕微鏡的にはフェライトは認められていない。結論として、照射によりもたらされた機械的性質の変化は 500°C 位の比較的低い温度で回復するがその際に生ずる粒界での析出物が合金の衝撃抵抗を減ずることに注意しなければならないと云つている。

8. 結 言

以上発表されている多くの資料について問題になる点を見てきたが原子炉でステンレス鋼をより安全な状態で安心して使用するためにはもつと多くの試験結果とそれに対する考察がなされなければならない。特にこれからの試験は原子炉の運転状態での温度、応力の変動範囲、歪の状態、温度および応力の変化速度などを考慮して行われなければならない。幸いわが国でも JRR-2 の運転により 2×10^{12} n/cm²/s の熱中性子束が得られ $10^{18} \sim 10^{19}$ nvt の照射が可能となりすでにステンレス鋼についての実験も行われている。しかし従来の data を実際の運転状態に対する基礎とするためには中性子密度、照射時間、全照射量、照射温度など各国因子の影響を確認する必要があり、そのためにも MTR (材料試験炉) の建設が待たれるわけである。

文 献

- 1) 橋口, 長谷川: 鉄と鋼, 43 (1957) 4
- 2) 長谷川: 原子力発電, 2 (1958) 3
- 3) 中村: 鉄と鋼, 45 (1959) 6
- 4) O. RUDIGER: Stahl u. Eisen, 76 (1956) 18
- 5) S. SIEGEL and D. S. BILLINGTON: Metal Progress, 58 (1950)
- 6) D. S. BILLINGTON: A/Conf. 8/p/744 (Aug. 1955)
- 7) M. JR. FERENC: SAE Journal, 65 (1957) 3
- 8) J. J. HARWOOD: Metal Progress, 65 (1957) June
- 9) W. D. BIGGS: Iron & Steel, 30 (1957) 14
- 10) J. C. WILSON: A/Conf. 15/p/1978 (1958)
- 11) M. H. BARTZ: USAEC Report TID-7515, Part I, (Aug, 1956)
- 12) C. R. SUTTON and D. O. LEESER: The Iron Age, 174 (1954) 9

- 13) C. A. BRUCH, W. E. McHUGE, and R. W. HOCKENKURG: J. Metals. Trans. 8 (1956) 10
- 14) F. E. BOWMAN: NAA-SR-287 (1954)
- 15) M. B. REYNOLDS, J. R. LOW and L. O. SULLIVAN: J. Metals, 7 (1955) 4
- 16) C. MANNAL, C. A. BRUCH and R. F. KOENIG: Power 99 (1955) 6
- 17) W. L. FLEISCHMANN: Symposium on Radiation Effects on Metals, 2 (ASTM, STP No. 220, 1957)
- 18) M. H. BARTZ: A/Conf. 15/p/1878 (1958)
- 19) W. F. MURPHY and S. H. PAINE: Symposium on Radition Effects on metals. 1 (ASTM, STP No. 208, 1956)
- 20) J. C. WILSON and R. G. BERGGGRAM: Proc. ASTM, 55 (1955)
- 21) N. F. PRAVDYUK, S. T. KONOBEEVSKY, A. D. AMAYEV and Jn. I. POKROVSKY: A/Conf. 15/p/2052 (1958)
- 22) H. ETHBRINGTON: Nuclear Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York (1958)
- 23) C. R. SUTTON and D. O. LEESER: The Iron Age, 174 (1954) 8
also Nucleonics 12 (1954) 9
- 24) S. T. KONOBEEVSKY, N. F. PRAVDYUK and V. I. KUTAITSEV: A/Conf. 8/p/680 (1955)
- 25) D. O. LEESER: ASTM STP No. 208 (1956)
: Reactor Materials., 5 (1962) 1
: USAEC Report ORNL-3144
July 7, (1961)
- 26) J. J. LOMBURDS: USAEC Report WAPD-SEP-Fe-192 (June, 1955)
- 27) H. T. WATANABE and W. O. SHAFFNIT: USAEC Report IDO-16483
- 28) W. O. SHAFFNIT: USAEC Report IDO-16502
- 29) W. E. REY, W. K. ANDERSON and D. N. DUNNING: ASTM, STP-No. 233 (1958)
- 30) R. E. BAILER and M. A. SILLIMAN: ASTM, STP No. 233 (1958)

V. 原子炉用ステンレス鋼管

篠 田 暲*

1. 緒 言

オーステナイト・ステンレス鋼の熱中性子吸収断面積はかなり大きい、高温強度、耐食性、価格などが他の構造材料に比してすぐれているので、原子炉用構造材料として広く使用されている。ステンレス鋼管はウラン鉱の製錬所、金属精製工場、原子炉、燃料処理工場、廃棄

* 八幡鋼管株式会社, 工博