U.D.C. 621.039.586: 669.14/.15

# 鋼の中性子照射損傷に関する研究

―原子炉圧力容器用炭素鋼および低合金鋼の放射線損傷――

Radiation Effects in Ferritic Steels

田野崎和夫\* Kazuo Tanosaki

## 内 容 梗 概

原子炉用圧力容器材としての炭素鋼 ASTM A-212 B, A-285 A, 低合金鋼 A 301 B(Cr-Mo 鋼), A-200 T-22 (2+Cr-1 Mo 鋼), T-1 および真空熔解した高純 Fe-C 合金の機械的性質に及ぼす中性子照射量および照射 温度の影響を求めた。また炭素鋼について,照射後 500°C まで焼鈍して機械的性質の回復についても調べた。 その結果,一般に遷移温度は高速中性子量が 2×10<sup>18</sup>nvt 以上では照射量に比例して上昇し, 10<sup>20</sup>nvt で温度上 昇 200~250°C に達する。例外として T-1 は変化が大きく, 真空熔解した Fe-C 合金は変化が少ない。次に照 射温度の影響として一般に照射温度が高くなると照射によって生ずる遷移温度の上昇および引張強さの増加が 少なくなる。ただし A-212 B 鋼は 220~260°C の照射温度においてわずかに硬化の傾向を示す。また照射鋼の 焼鈍機構や過程は複雑であり,しかも鋼種によって異なるので低い温度で照射した鋼の回復結果から高温で照 射した鋼の回復挙動を単純に類推することはできない。完全な回復が生ずるには約 480°C の焼鈍温度が必要で あるが,適当な性質はもっと低い温度における部分的回復によって得られるものと思われる。

## 2. 試料および実験方法

鉄鋼は原子炉用構造材料として広く使用されるが,特に重要な役 割を果すのは圧力容器用としてである。耐圧原子炉容器材としては 他の一般用途の圧力容器の場合と同様に強度およびじん性が大き く,さらに熔接性の良いことが必要であるが,そのほかに原子炉特 有の問題として放射線損傷の少ないことが特に要望される。したが って放射線損傷の少ないことは材質選定上の一つの重要な要素であ るが,材料の照射実験は技術的に困難であり,しかも長い時間と膨 大な経費とを要するために,その研究はアメリカ,イギリス,ソ連, カナダなどの諸国に限られてきたが,最近になってわが国において もその必要性が認められ材料試験炉の設置が急がれている現状であ る。

1. 緒

T

一般に中性子照射により鋼の引張強さ,降伏点およびかたさは増 し,伸び,絞りは減じ,特に衝撃遷移温度が著しく上昇してぜい化 することは周知のとおりである。しかしその度合は材料,熱処理, 中性子照射量,照射速度,照射温度などによって異なり,それらの 因子が機械的性質に及ぼす影響については,その概要が知られてい るにすぎない。

本報においては原子炉圧力容器用各種炭素鋼および低合金鋼の機 械的性質に及ぼす高速中性子照射量および照射温度の影響ならびに 照射後の焼鈍によるその回復についてアメリカ・オークリッジ国立 研究所において行なった実験結果について報告する。 第1表は試料の化学成分である。<br/>
第1図に引張および衝撃試験片の寸法を示す。引張試験片は小形



(c) アイゾット小形衝撃試験片 (単位 mm)

第1図 引張および衝撃試験片

記号	素材	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	V	Cui	その他
A-212B	5% in 厚板	0.20	0.82	0.018	0.030	0.22						
A-285A	3/4 in 厚板	0.11	0.32	0.018	0.020							
A-301B (Cr-Mo 鋼)	3/4 in 厚板	0.11	0.36	0.020	0.026	0.22	0.98	0.47				
A-200T-22 1/4Cr-1Mo 鋼)	½ in 肉厚, 6 in OD	管 0.10	0.45	0.018	0.019	0.031	2.18	1.00				
i純 Fe−C 合金 (真空熔解)	¾ in×3¾ in 角材	0.18	0.002	<0.003	0.003	0.03						0.0039O, 0.0003H 0.0001N, 他元素∠0.0
Carilloy T–1	焼入,焼もどし材	0.16	0.93	0.014	0.023	0.25	0.50	0.45	0.87	0.06	0.33	0.003B
HY-80		0.18	0.25				1.34	0.22	2.38			
21 • Y Y		0.13	1.66	0.011	0.033	0.34	0.07		0.05		0.55	0.025 A1

\* 日立製作所日立研究所

— 70 —





であるが,衝撃試験にはシャルピー標準試験片と多連式アイゾット 小形試験片の両者が用いられた。

中性子束測定用モニタとして熱中性子束には Co が, 高速中性子 束にはSが用いられた。

衝撃試験片および引張試験片の集合体をアメリカの材料試験炉 MTR, LITR および ORR (Oak Ridge Research Reactor)中に そう入して中性子照射を行なったのち,オークリッジ国立研究所 Solid State Division のホット・ラボラトリーにおいて機械試験お よび焼鈍実験を行なった。

主として照射に使用した原子炉は ORR である。第2図にその外 観を示す。

第3図は中性子照射量の影響および照射温度の影響を求めるためのORR用試料集合体である。図のようにAlの骨組み上に3列に試

# 第5図 照射実験試料の ORR プール側 実験設備における設置要領



第6図 ORR 実験試料温度制御室

2 列に並べ、その中間に板バネを入れて上下試験片間の間げきに、 試験片3個に1個の割合で前述の中性子束測定用 Co および Sのモ ニタを交互にそう入する。またアルメル・クロメルの熱電材を3個 に1本ずつ試験片に点熔接し、そのリード・ワイヤを左方の Al 管 を通して箱外に導く。モニタおよび熱電対については第3図の場合 も同様であるが、そのほかに電気炉用の電線がある。両方の Al 箱 はふたをして熔接後、ORR にそう入照射される。

第5図は照射実験試料(Al箱)のORR プール側実験設備における設置要領を示す。すなわちプール側の原子炉タンク下部が内側に

験片を取り付ける。両側の2列は常温照射用引張およびシャルピー	くぼんでおり、そこに Al 箱を取り付けることができる。また箱外
衝撃試験片で Al わくの両側に取り付け、 その上下を板バネで押え	に導かれた冷却水、熱電対用リード・ワイヤおよび電気炉用電線は
る。また Al 管中に冷却水を通す。 中央の 1 列は高温照射用引張,	一束にして図のように Al 管内に納めてプール水外に導き, その先
シャルピーおよびアイゾット小形衝撃試験片を炉の回りに取り付	端はさらにビニール管に接続して記録計および制御用パネルに導か
け、スプリングを巻き付けて押えたものである。この集合体を	れる。第6図に温度制御室の内部を示す。
610×280×76 mmの Al 箱中に入れる。第4図は, ORR 焼鈍実験用	第3図の試料箱は側面から中性子照射を受け,第4図の箱は上面
試料集合体を示す。シャルピー衝撃試験片および引張試験片を上下	(または下面)から照射を受ける。

— 71 —

原 子 力 論 文 集

また第7図にホット・セルの外観を示す。右手に見える装置は Instron 引張試験機である。引張試験用グリップおよび衝撃試験機 はホット・セル内にあり、遠隔操作によって実験が行なわれる。



第7図 Solid State Division のホット・セルの外観

-		THE PLANE AND ADDRESS	
83	目式	出 財 温 居	

### 3. 実験結果およびその検討

#### 3.1 機械的性質に及ぼす高速中性子照射量の影響

#### 3.1.1 衝擊試驗結果

照射鋼の機械的性質のうちで最もよく研究されているのはおそ らく衝撃値であろう。鋼のシャルピー(Vノッチ)衝撃吸収エネル ギーに及ぼす 175°C 以下の温度における高速中性子照射の影響の 代表例を第8~13 図に示す。第8~11 図はそれぞれ炭素鋼A-212 Bおよび A-285A の圧延材および焼準材の結果である。第12 図 は A-301 B (Cr-Mo) 鋼圧延材,また第13 図 は A-200 T-22 (2  $\Gamma$  Cr-1 Mo) 鋼管材の結果である。破断が延性,高エネルギー,せん 断破壊からぜい性,低エネルギー,へき開破壊に変わる遷移温度 Tr 15 (=2.0 kg·m)が高速中性子照射量の増加とともに連続的に 上昇し,10<sup>20</sup>nvt照射後には150~200°Cの温度でぜい性破壊が認 められる。また遷移温度以上の吸収エネルギーは照射しない場合









第11図 照射 ASTM・A-285 鋼のシャルピー 衝撃試験結果 (930°C 焼準材)

72 —



第12図 照射 ASTM・A-301 B (Cr-Mo) 鋼の シャルピー衝撃試験結果





第14図 数種の鋼のシャルピー衝撃遷移温度の 上昇と中性子照射量との関係

温度の高い鋼は照射後も高いことを意味する。scatter band内の

第13図 照射 ASTM・A-200-55 T・T-22(2‡Cr-1 Mo) 鋼のシャルピー衝撃試験結果

の約1/3に減ずる。図に照射温度が記入してあるが、これは常温で 照射を開始したのに、照射によってこれらの温度に上昇したこと を意味している。

多くの圧力容器が実際に受ける中性子照射量はもっと少なく, また照射温度ももっと高い。したがって変化もこれより少なくな るものと考えられる。これら4種の鋼の遷移温度の変位には、か なりの類似性が認められる。第14図は遷移温度(10ft-lb レベル) 点のばらつきはおそらく中性子束測定や遷移温度決定時の誤差に よるところが大であろう。第8~13図からわかるように各曲線を 決定するのに比較的少ない試料が使われているので、15℃くらい の遷移温度の誤差は容易に生ずるものと考えられる。もちろん十 分な試験片を用いて遷移温度をもっと正確に決定することは望ま しいが、原子炉の中性子束分布の均一度に限度があるので試料が 多いと同一の中性子束が得られなくなる。

2種の鋼が scatter band からはずれている。そのうち、 Carilloy "T-1"は構造用焼入焼もどし鋼であり,照射によって 他の鋼よりも著しく遷移温度が上昇している。これは照射前には 熱処理の影響によって他の鋼よりも遷移温度が低くなっているの が,照射によって熱処理の効果がなくなり遷移温度が他の照射鋼 と同程度の温度になるためである。T-1 鋼の延性破壊の吸収エネ ルギーは照射前後とも他の鋼に比べて低いが、このことが圧力容 器に使用する場合に重大な問題になるかどうかはまだ知られてい ない。今後検討の必要があろう。もう一つの鋼は、真空熔解高 純 Fe-C 合金 (0.18% C) である。900°C および 1,095°C 空冷と熱 処理を変えて試験したが、いずれも 7×10<sup>18</sup> nvt の照射による遷 移温度の上昇は他の鋼よりも少ない。**第15、16** 図 はこれらの結 果である。照射による延性破壊吸収エネルギーの減少は認められ ない。

これより鋼の照射損傷に対する感受性は不純物や合金成分の調 整によって改善できるものと考えられる。

照射設備において中性子束の均一度から試験片をそう入する空 間が限られるために,過去に得られた照射鋼の衝撃試験結果の多 くはアイゾット小形試験片について得られたものである。そこで アイゾット小形試験片とシャルピー標準試験片とによって測定し

の上昇と中性子照射量との関係である。横軸は照射量の対数であ	た両遷移温度間の関係を求める必要がある。 第17図にアイゾッ
る。これによれば遷移温度の上昇は鋼の種類や熱処理が異なって	ト小形試験片による遷移温度の上昇と中性子照射量との関係を実
も2, 3の例外を除いては scatter band の中に含まれることが	測点で示し, また比較のためにシャルピー衝撃試験結果から得ら
わかる。照射量 10 <sup>18</sup> nvt までは遷移温度はほとんど変化しないが	れた scatter band の上下限界線をも併記した。これによればア
2×10 <sup>18</sup> nvt 以上でほぼ直線的に上昇し, 10 <sup>20</sup> nvt で遷移温度の上	イゾット小形試験片による測定点はシャルピー標準試験片による
昇は200~250°Cに達する。縦軸は絶対値ではなく温度上昇を示	よりも遷移温度の上昇が少ない。しかし両者の一致は良好であ
すから照射前に遷移温度の低い鋼は照射後も低く, 照射前に遷移	る。この場合にもT-1鋼は変化が大きく高純度の鉄は変化が少な

原 子

論

力

集

文





第17図 数種の鋼のアイゾット小形衝撃試験片による 遷移温度の上昇と中性子照射量との関係



材 料	中性子照射量 (10 <sup>18</sup> nvt)	降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引 張 強 さ (kg/mm <sup>2</sup> )	全伸び(%)	均一伸び* (%)
	0	29.6	52.8	36	27
A-212B鋼板母材	17	64.1	68.9	11.6	5.8
	100	76.0	81.4	7	4
	0	40.7	51.5	25.5	15.5
	0	41.5	50.4	24	15
	0	46.7	52.0	20.5	12.5
E-7016 熔着金属	5	48.7	54.5	18.5	10.5
	17	76.4	**	8	0
	17	74.9	**	8.5	0
	100	80.9	**	7.5	0



衝撃試験結果 (1,095°C 空冷)

い。鉄の測定点が大きくばらついているのは照射前の熱処理の変化によるものと考えられる。

# 3.1.2 引張試験結果

一般に鋼の降伏点と引張強さは中性子照射量とともに増加する が、増加の割合は遷移温度の上昇と大体同じ傾向を示す。すなわ ち降伏点の増加は中性子照射量にほぼ比例する。したがって室温 の照射による降伏点の増加から中性子照射量を予想することがで きる。第2表は照射した炭素鋼熔接部の引張試験結果を示す。降 伏点と引張強さが照射量の増加に伴って増しているが、特に降伏 点の変化が著しい。また局部収縮前の均一伸びが著しく減じて0 になっている。第18,19 図はそれらの応力-ひずみ曲線の変化を 示す。第18 図 より A-212B 鋼の母材は照射量の増加に従って伸 び特に均一伸びを減じ、また降伏点が上昇してぜい化することが わかる。1.7×10<sup>19</sup> nvt 以上の高い中性子照射によって下部降伏点 が消失する。しかし高い照射量に対しても曲線の大体の形状は照

----- 74

\* 均一伸びとは局部収縮開始までの伸びをいう。

ひずみ速度: 0.05 in/min

\*\* 降伏後荷重が連続的に減じた。











-

4

++-



第21図 照射 ASTM・A-212B 鋼のシャルビー 衝撃試験結果(高温圧延材)

射しない場合に類似し,降伏後局部収縮開始までに塑性変形による加工硬化の範囲が存在する。また断面収縮すなわち局部収縮による伸びもかなりある。 第19 図 は E-7016 低炭素熔着鋼の結果であるが,母材とはまったく違った挙動を示している。照射しないものは母材と類似しているが,降伏点が明確に現われない。 5×10<sup>18</sup>nvt 照射によって均一伸びは減ずるが断面収縮率はほとんど変わらない。1×10<sup>20</sup>nvt の高い照射を受けたものは均一伸びは認められず,降伏後ただちに局部収縮が始まり,断面収縮はかなりある。

第20図は種々な炭素鋼または熱処理に対する荷重-伸び曲線の 代表的変化を示す。左の曲線は照射しない鋼に対するもので、右 の5本の曲線は照射鋼の種々な形の荷重-伸び曲線である。これ らは照射しない鋼に類似した曲線や炭素鋼としてはまったく異常



## 第23 図 照射ASTM・A-212B 鋼のシャルピー衝撃試験結果 (6 in 厚板, 焼準および応力除去焼鈍)

し 260~290℃ 照射の場合には大差なく、150~205℃ における照射 では 95℃ 照射よりも大きな変化を生ずる。

#### 3.2.1 衝擊試験結果

第21~26 図は80℃および300℃で照射した3種の鋼について 行なわれた一連のシャルピー試験結果を示す。第21~23 図 は炭 素鋼 A-212 B の圧延材, 焼準材および焼準−応力除去焼鈍材の結 果である。第24,25 図 は炭素鋼 A-285 A の圧延材および焼準材

な曲線など種々であるが、最も重要な特徴は降伏点の著しい増加	の結果である。また <b>第26</b> 図は A-301 B (Cr-Mo 鋼)の熱処理材
と均一伸びの減少とである。	の結果である。同じ照射量 5×10 <sup>18</sup> nvt の場合に照射温度 80℃ と
3.2 機械的性質に及ぼす高速中性子照射温度の影響	300°Cとを比較すると、照射温度の高いほうが遷移温度の変化が少
照射温度の影響に関する実験は比較的少ないが、その結果によれ	なく照射しない場合に近づいており回復が生ずることを示してい
ば照射温度が高いと照射によって生じた機械的性質の変化が照射中	る。回復の程度は鋼種および熱処理によって異なり 第22図の場
に一部回復して少なくなる傾向が認められる。一般に 315℃ 照射に	合には約76%の大きな回復率を示している。一方第23図の場合
よって生ずる変化は95℃以下の照射による変化よりも少ない。しか	にはほとんど回復は起こっていない。このように変化がまちまち

----- 75 -----

原

子

言為

力

集

文





第27 図 照射ASTM・A-212B 鋼の衝撃遷移温度 (102 mm 厚高温圧延板, アイゾット小形試験片)



衝擊試驗結果 (925°C 焼準)





なのは、300°Cという温度が変化に対して非常に敏感な範囲にあ るためである。このことは次の図によって理解できる。第27,28 図はそれぞれ A-212B 鋼および熔接棒 E-7016 熔着鋼のアイゾッ ト小形試験片による遷移温度に及ぼす照射量および照射温度の影 響を示す。第27 図において 80°C 照射の場合には照射量の増加に 伴って遷移温度は急激に上昇し、約3×10<sup>19</sup>nvt 以上の照射量でほ ぼ一定となる。260°C照射は 80°C 照射と大差ないが、260~315°C と照射温度の上昇につれて遷移温度は図に示したように回復して おり、わずか10°Cの温度差に対してかなりの変化が生ずることが わかる。第28 図の低炭素熔着鋼の場合には第27 図の A-212B 鋼 よりも低い照射温度で回復が起こっている。これらの結果から有 効な回復を生ずる照射温度は材料の種類のみでなく中性子照射量

によっても異なることが知られる。

----- 76 -----

ここで注目すべきことは,照射温度 225℃の場合には80℃照射 の場合よりも遷移温度が上昇している点である。これは 225℃で 照射する場合にはかえってぜい化することを意味している。イギ リスの研究者も 260℃ 以下の温度において同様な大きな変化を認 めている。 Harries<sup>(1)</sup> は若干の鋼のノッチ曲げ試験を行なった結 果,95℃以下の照射よりも約 150℃ で照射したほうが大きな遷移

第26図 照射ASTM・A-301B(Cr-Mo)鋼の シャルピー衝撃試験結果(熱処理材)



第29図 照射 HY-80 鋼の衝撃試験結果 (アイゾット小形試験片)

中性子照射量 (10 <sup>18</sup> nvt)	照射温度 (C)	降伏点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	均一伸び (%)
0		28	53	. 25
20	80	65	69	6
20	290	53	72	9
20	360	43	63	12
20	405	39	59	14
60	370	58	74*	6
60	415	41	57	13
100	80	77	82	4



第 30 図 照射 ASTM・A-212B 鋼の焼鈍による かたさの変化



第 31 図 ASTM・A-212B 鋼の遷移温度と 照射量との関係



- and

\* 局部収縮を起こさないで破断

温度の変化が生ずることを報告している。

ある鋼はかなり低い回復温度をもつことは 第29 図 によって示 される。第29 図は HY-80 鋼のアイゾット小形試験片についての 結果であり、この鋼の回復温度は 280℃ 以下で、前の図の炭素鋼 よりも低いことを示している。

#### 3.2.2 引張試験結果

第3表は種々な温度で照射した A-212B 鋼の引張試験の結果を 示す。これは多くの点において照射鋼に見られる性質変化の代表 例である。まず照射温度 80°C における照射量の影響をみると、  $2 \times 10^{19}$  および  $1 \times 10^{20}$  nvt と照射量が増すと、降伏点は照射前の  $28 \text{ kg/mm}^2$  からそれぞれ 65 および 77 kg/mm<sup>2</sup> (2.8 倍) に増し、 引張強さも 53 kg/mm<sup>2</sup> から 69 および 82 kg/mm<sup>2</sup> (1.5 倍) に増 す。均一伸びは 25% から 6 および 4% (約 %) に減じぜい化の傾 向を示す。次に照射温度の影響をみると、 290°C 以上の温度で照 射すると、80°C照射の場合に比較して降伏点は減じ、均一伸びは 増すが、引張強さは 290°C で 72 kg/m<sup>2</sup> の極大をなしている。 こ の 290°C 付近で照射した場合に常温照射よりもかえって引張強さ が増す傾向は他の鋼においても認められた。

高温で照射した2~3の試料にぜい性破壊が認められた。その 1例が第3表の6行目にみられる。この試料は数%塑性変形を行 なったのち,局部収縮を起さないで突然破断した。また照射しな い場合に比較して加工硬化速度が著しく大であった。破断構断面

#### 3.3 照射鋼の焼鈍による機械的性質の回復

照射によってぜい化した原子炉部品を焼鈍することによってぜい 性を除去し、少なくとも最初の性質の一部を回復する可能性がある かどうかを調べるために本実験を行なった。

#### 3.3.1 焼鈍によるかたさの回復

---- 77 -----

第30図は照射試料のロックウェルかたさ(RA)の焼鈍温度に よる回復を示す。各温度に1.5h くり返し焼鈍を行なったものであ る。これには比較のため照射せずに5%冷間加工を行なった試料 の結果をも示してある。図より照射試料は、加工試料よりも回復 が速く 320℃ 付近より徐々に軟化し, 480℃ でだいぶ分回復する。 その際 300°C 付近でわずかに硬化の傾向が認められるが、このこ とは前述のように80°C照射試料に比し300°C付近で照射した試料 の引張強さが大きいことからもうなずかれる。60°C で1×10<sup>18</sup> お よび5×10<sup>18</sup>nvt 照射の曲線にみられるように照射量の大きいほう が焼鈍による軟化がすみやかである。また同じ照射量5×10<sup>18</sup> nvt の場合には照射温度の高い300°Cのほうが回復がゆるやかであり, 0°C以上の焼鈍温度では逆転して60°Cの照射試料よりもかたい。 3.2 焼鈍による遷移温度の回復 第31図は室温付近の照射量と、シャルピー衝撃遷移温度との 係を示す。横軸を対数目盛にとれば、ほぼ直線となる。直線か 離れている1点はLITR で照射したものであり, ORR の場合 条件(中性子のエネルギー分布)が異なるためである。実際に 試料によって照射量が一定せずに変動するので、回復率を求め

	い物日に見ているして人であった。 威勇便可回	• ).
	の顕微鏡組織は、約50%が粒界破壊、約50%がへき開破壊を示し、	350
	せん断破壊は非常に少なかった。このようにぜい性破壊を示すこ	3. 3
	とはむしろ稀(まれ)で,この温度付近で照射した他の鋼について	- es 19
	は認められなかった。以上のように、照射温度の影響として一般	関
	に照射温度が高くなると焼鈍効果のため照射によって生ずる遷移	5
0	温度の上昇および引張強さの増加が少なくなる。しかしこれには	と
	二、三の例外があり、次の実験において重要になってくる。	は



が最大になっている点である。これらの点は次の図によっていっそう明らかとなろう。

第34 図は 0, 1.5×10<sup>19</sup> nvt および 3×10<sup>19</sup> nvt 照射した試料の 引張強さならびに上下降伏点と焼鈍温度との関係を示す。 120℃ 焼鈍による回復は非常に少なく,また 1.5×10<sup>19</sup> nvt 照射試料では 降伏点の上昇さえ認められる。120~205℃ではわずかに回復が進 行する。240℃に焼鈍温度を上げてもほとんど変化しない。240~ 260℃において降伏点は下降するが,引張強さは増加する。また上 下降伏点の差がほとんどない。260~290℃では回復はほとんど変 化がない。315℃以上の温度では一様に回復が進行し,普通の形 の降伏点を示す。このように焼鈍による回復過程は複雑である が,少なくとも次の三つの過程より成るものと考えられる。すな わち第一は120℃付近で降伏点がわずかに上昇するが,引張強さ がほとんど変化しない段階,第二は260~315℃で引張強さは増す が降伏点がほとんど変化しない段階ならびに 315℃以上の温度に おける回復の最終段階の三つの段階が考えられる。

以上三つの過程について考察すると、315℃以上の一様に回復 が進行する過程は、照射によって比較的大なる距離に生じた Frenkel 形格子欠陥(格子間原子と原子空孔)や格子欠陥の集合 体(2)(3)の移動消滅あるいはさらに変位スパイクの消滅などによる ものであろうと考えられるが、他の二つの過程は、この鋼に特有 の現象である。120°C付近の第一の過程は、主として降伏点にき くところから、Cottrell 効果(4)によるものと考えられる。すなわ ち鋼中に侵入形に固溶している C や N 原子が,転位線のところ に偏析して転位線の運動を妨げ、降伏強度の増加をきたすのであ る。第二の260~315℃で引張強さの増加する過程は、前述のよう にかたさにおけるわずかな硬化および衝撃遷移温度の回復休止と 同じ機構によるものである。第30図の照射を行なわない冷間加 工試料の場合にも、この温度範囲において同様な焼鈍硬化現象が 認められるところから、この現象は冷間加工試料のひずみ時効硬 化に相当するものと考えられる。その機構は今のところ明らかで はないが、鋼のひずみ時効において、300℃付近の焼鈍硬化が炭 素量の増加につれて増すという実験結果<sup>(5)</sup>があるので、CやNな どの溶質原子の格子欠陥部への析出(すなわち炭化物や窒化物の 析出)が原因でないかと思われる。格子欠陥として、照射試料の 場合には原子空孔が、また冷間加工試料の場合には転位が主とし て考えられる。



# 第34図 照射ASTM・A-212B 鋼の引張強さ および降伏点の焼鈍による変化

る場合にこの曲線によって補正を行なう。第32図は焼鈍温度と 遷移温度の回復率との関係を示す。図より照射鋼の遷移温度は 200°Cの焼鈍によって約25%も回復し、焼鈍温度の上昇に伴って 回復は徐々に進行し、455°Cで約90%の回復に達する。この場合 にも300°C付近で回復休止の傾向が認められるが、これはかたさ 試験においてわずかに硬化が認められたと同じ温度範囲である。

# 3.3.3 焼鈍による引張強さの回復

第33図はA-212B鋼の圧延材を1.5×10<sup>19</sup>nvt照射後,種々な 温度で焼鈍して常温で引張試験を行なった際の応力一ひずみ曲線 である。照射しない試料に比較して照射のままの試料は,降伏点 が著しく高く,上部降伏点と下部降伏点の差が大きい。焼鈍温度 の上昇に伴って降伏点は漸次低下し,また降伏点の差が少なくな り290℃ではほとんど0になる。照射のままでは加工硬化が生じ ないが焼鈍温度が高くなるにつれて漸次大となる。また焼鈍温度 が低いと,均一伸びも非常に少ないが,温度の上昇とともに回復 する。400℃焼鈍は,照射によって生じた変化の約80%を回復 する。 しかしこのように複雑な回復過程はむしろこの鋼に特有な現象 とみるべきであって一般にはもっと簡単である。たとえば A-212 B 鋼とほぼ同様で Mn 量の高い 21 YY と呼ばれるスエーデン鋼



の焼鈍による回復過程はそれほど複雑ではない。第35図は21YY 鋼の応力-ひずみ曲線である。この鋼は比較的低い焼鈍温度にお いて回復が生じている。また特に注目されるのは照射後および照 鈍後の降伏挙動が照射しない場合と著しく異なる点である。すな わち照射前には加工硬化速度の低い範囲がほとんどないが、照射 後400°Cで焼鈍したものは加工硬化が起こるまでに数%の降伏点 ひずみを生ずる。このように焼鈍によって照射前とまったく同じ 状態ではないが、比較的低い温度で回復するので、この鋼は原子 炉の圧力容器または他の要素に使用することができる。

焼鈍の機構や過程は複雑であり、しかも鋼種によって異なるの で、低い温度で照射した鋼の回復結果から高温で照射した鋼の回 復状態を単純に類推することはできない。焼鈍によって照射前の 性質にほぼ完全に回復させるためには約480℃の温度で焼鈍する 必要があるが、適当な性質はもっと低い焼鈍温度における部分的 な回復によって得られるかもしれない。本実験においては焼鈍時 間を 1.5h としたが実際の原子炉圧力容器に対してはもっと長時 間が必要であろう。

#### 言 4. 結

以上原子炉圧力容器用炭素鋼および低合金鋼の機械的性質に及ぼ す高速中性子照射量および照射温度の影響ならびに照射後の焼鈍に よるその回復について調べた。その結果は次のとおりである。

徐々に回復する。その程度は鋼種によって異なり、A-212 B 鋼は 約480°Cでほぼ完全に回復するが、回復過程は複雑で300°C付近 に遷移温度の回復休止および引張強さの増加が認められる。

本実験に用いた中性子照射量は実際の原子炉において予期される 照射量と同程度である。中性子照射量すなわち全中性子束は同じで も、低中性子束で長期間照射した場合と高い中性子束で短期間照射 した場合とでは、その影響は違ってくるものと思われる。実際の原 子炉においては本実験に用いた中性子束よりもかなり低いので、今 後は低中性子束で長期間照射した場合の性質変化を求める必要があ る。

本実験における照射温度は常温から実際の原子炉の運転温度付近 にまで及んでいるので、本実験の結果は安全側を示すものであり、 材料選択や原子炉の運転に対して一応の指針を与えるものと考えら れる。

終わりに本研究の遂行にあたり、ご指導を賜わった日立製作所日 立研究所三浦所長,小野部長および根本主任研究員の方々にお礼を 申しあげる。また実験遂行にあたり種々ご援助を与えられた Oak Ridge National Lab., Solid State Division O R. G. Berggren, J. C. Wilson 両氏そのほかの方々に感謝する。なお本報は ORNL の承認を得たもので、その際多大のご尽力を賜わり、かつ貴重な文 献<sup>(6)(7)</sup>を送っていただいた Berggren 氏の好意に感謝する次第であ 30

(1) 一般に遷移温度は高速中性子照射量が 2×10<sup>18</sup> nvt 以上で 照射量に比例して上昇し、10<sup>20</sup> nvt では温度上昇は 200~250°Cに 達する。例外としてT-1鋼は変化が大きく,真空熔解した Fe-C 合金は変化が少ない。したがって成分の調整や熱処理によって放 射線損傷を制御することは可能である。また降伏点と引張強さは 遷移温度と同様に増加し、均一伸びが著しく減ずる。

(2) 照射温度の影響として、一般に照射温度が高くなると焼鈍 効果のため照射によって生ずる遷移温度の上昇および引張強さの 増加が少なくなる。その度合は鋼種によって異なるが、例外とし てA-212B 鋼の場合には220~260°Cの照射温度においてわずかに 硬化の傾向が認められる。

照射鋼の遷移温度,引張強さおよび降伏点は焼鈍によって (3)

#### 插 文 洘

- (1) D. R. Harries: AEC Conference on the Status of Radiation Effects Research on Structural Materials and the Implications to Reactor Design, Chicago, 15-16 (October 1959)
- F. W. Kunz, A. H. Holden: Acta Metall., 2, 816 (1954) (2)
- G. H. Kinchin, R. S. Pease: Rep. Prog. in Phys., 18, 1 (3)(1955)
- 幸田, 鈴木: 転位論の金属学への応用 109 (昭 32-12, 丸善) (4)
- 西野, 高橋: 日本金属学会誌 24, 514 (1960) (5)
- R. G. Berggren: USAEC Report TID-7588, p. 91 (Oct. (6) 1959)
- R. G. Berggren: Iron and Steel Inst., Special Report No. (7)69 (1961)



松 本 政 吉•佐々木 正 祥

原 子 炉 燃 料 要

原子炉燃料要素は、燃料体をアルミニウム、ジルコニウムなどで 被覆したものが一般的であるが,この燃料要素はその燃料体,つま りウラニウムの熱膨脹係数が被覆材より大きいために, 密着させて おくと高温時に熱応力を生じ被覆を破損するようなことが生じる, したがって被覆は燃料体に多少間げきを持たせる形で行なわなけれ ばならないが,間げきがあると伝熱が著しく悪くなるので,この間 げきには NaK や He ガスを充満させ、 伝熱の低下を押える提案が なされている。



素

と燃料体1の間に形成される空げき4に、NaK. He ガスたどの進休

を充満させておくものである。
この発明によると高熱時における熱応力は屈曲部3により回避さ
れまた伝熱作用も悪化することがない,しかも150~200 ata のよう
な,高圧の炉心に配置されても、その形状を変化させるようなこと
はなく, 高圧に耐え熱応力を回避し, 伝熱作用を不変ならしめる作
用を変えない効果がある。 (丸山)

— 79 —