

材料試験原子炉利用委員会報告

早稲田大学工学部

工博

○長谷川正義

日本原子力研究所 J M T R 部

大内信平

日本原子力研究所 ホットラボ管理室

本間俊二

早稲田大学工学部

中島伸也

1. 経過

周知のごとく現在、我国においても発電用原子炉の稼働・計画が多数進められている。しかし原子炉構成材料の多くを占める鉄鋼材料の中性子照射脆化に関しての我国のデータはきわめて少ない。そこで核燃料や材料の開発にとって必要な材料試験原子炉 (J M T R) の建設が望まれていた。我国でもようやく 1969 年に日本原子力研究所大洗研究所に J M T R が建設された。J M T R の利用に当って、その試用期間における鉄鋼材料の照射試験を行う目的から 1967 年に日本鉄鋼協会の中に材料試験原子炉利用委員会が設立された。本利用委員会は 20 社に及ぶ中立機関、民間会社により構成され各種の炭素鋼、高張力鋼、低温用鋼、強靱鋼、ステンレス鋼、あるいは溶接材、クラッド材などを用いて、熱処理、組成などを变化させ供試材とし、多数 (12 キヤプセルを使用した) の照射試験を行うことができた。照射後試験に伴う各種の試験は日本原子力研究所東海研究所ホットラボで行われ、一部は大洗研究所ホットラボにおいても行われた。

現在はなお完全に照射後試験を終了している段階ではないが、日本鉄鋼協会材料試験原子炉利用委員会は 1972 年 3 月末をもってその任務を終了した。

2. 委員会の構成

日本鉄鋼協会材料試験原子炉利用委員会は下記のメンバーで構成された。

早稲田大学、日本原子力研究所、東京大学、大阪大学、東北大学、新日本製鉄 (旧、八幡製鉄、富士製鉄)、三菱原子力工業、日本製鋼所、鈴木金属工業、日本金属工業、日本冶金工業、日立製作所、神戸製鋼所、川崎製鉄、石川島播磨重工業、三菱重工、神鋼鋼線鋼索、住友金属工業、日本鋼管、日本ステンレス。

3. 供試材

照射試験に供試した材料を以下に示すとともに、照射試験の目的と意義および目標の照射条件について記す。

表 1. 照射試験の供試材一覧表

鋼種	試験の目的と意義	目標照射条件 $\gamma_{6m^2}(511eV)$
アルミキルド鋼	1) 炭素鋼の照射脆化にかよぼす金属組織の基本的影響	$2 \sim 4 \times 10^{19}$, $< 100^\circ\text{C}$
炭素鋼	2) 照射脆化した実用鋼の置換型固溶元素と焼きなましの関係	$1 \sim 4 \times 10^{19}$, $< 100^\circ\text{C}$
SM41B	1) 固溶炭素、窒素の影響と Ti, Nb による炭化物安定化の効果	$2 \sim 4 \times 10^{19}$, $< 100^\circ\text{C}$
ASTM A302B 鋼	1) 耐照射性にかよぼす試料純度の影響	$2 \sim 4 \times 10^{19}$, $< 100^\circ\text{C}$
ASTM A533B 鋼	1) L D 転炉製鋼の耐照射性の確認。照射量の影響 2) 電気炉製鋼の確性試験	$2.9 \sim 3.5 \times 10^{19}$, $< 100^\circ\text{C}$
	1) 圧力容器製造過程における熱履歴の照射脆化の影響	$2.5 \sim 3.5 \times 10^{19}$, $< 100^\circ\text{C}$
	2) 板厚 170, 250 mm についての溶接条件の影響	$3 \sim 3.5 \times 10^{19}$, 260°C
	3) SM 溶接金属の組成を变化させ、その溶接部の耐照射性	$0.7 \sim 5 \times 10^{19}$, $< 100^\circ\text{C}$
	4) 超厚板に対する狭間先溶接法の確性試験	$2 \sim 5 \times 10^{19}$, $< 150^\circ\text{C}$
ASTM A543 Q1 鋼	1) 確性試験と焼入冷却速度および応力除去焼熱の影響	$2.5 \sim 3.5 \times 10^{19}$, $< 100^\circ\text{C}$

表2. 照射試験の供試材一覧表 (表1のつづき)

鋼種	試験の目的と意義	目標照射条件: %Dp (>1MeV)
ASTM A542 鋼	2) 照射脆化した実用鋼の置換型固溶元素と焼きなましの関係	1~4 x 10 ¹⁹ , <100°C
	3) 米国製の材料で国外における照射試験結果との比較	3 x 10 ¹⁹ , <100°C
	1) AlN処理 (IN処理) の耐照射脆化におよぼす影響	2.5~3.5 x 10 ¹⁹ , <150°C
ASTM A350 LF3	2) 真空溶解材の溶解およびUM溶接部の比較	2.5~3.5 x 10 ¹⁹ , <100°C
	3) 照射脆化した実用鋼の置換型固溶元素と焼きなましの関係	1~4 x 10 ¹⁹ , <100°C
	1) 低温用鋼の照射脆化感受性について	2~4 x 10 ¹⁹ , <100°C
ASTM A353-64	1) 低温用鋼の照射脆化感受性について	2~4 x 10 ¹⁹ , <100°C
マレージング鋼	1) 強靱鋼の照射脆化感受性について	2~4 x 10 ¹⁹ , <100°C
DMS60A, ホンパイ鋼, HI-Z	1) 国産高張力鋼の予備的な確率試験	1~5 x 10 ¹⁹ , <100°C
SUS 304, 347 鋼	1) 炉心および燃料アセンブリ構造部材の予備的照射効果	10 ²⁰ ~10 ²¹ , <100°C, 500~600°C
AISI 316 鋼	1) 高温照射下における鋼中の微量ボロン量と結晶粒度の影響	~10 ²¹ , 600°C
	2) 高速炉圧力容器用鋼材の確率試験および照射温度の影響	5x10 ²⁰ ~10 ²¹ , <100°C, 500~600°C
	3) 高速炉用燃料被覆管の予備的な確率試験	10 ²⁰ ~10 ²¹ , 600°C
Inconel 600	1) 炉構造, 計測部材としての特殊ステンレスの予備的試験	3x10 ²⁰ , <100°C
17-4PH 鋼	1) 炉構造, 計測部材としての特殊ステンレスの予備的試験	3x10 ²⁰ , <100°C
ボルト鋼, HST140	1) 高速炉 blast shield 用鋼材のエネルギー吸収能を知る	1x10 ¹⁹ , 1x10 ²⁰ , <100°C
PC鋼線	1) 原子炉格納容器としてのPC鋼線の予備的研究	1x10 ¹⁸ ~3x10 ¹⁹ , <100°C
クラッド材	1) ステンレスクラッド部分の照射による機械的, 組織的变化	2~5x10 ¹⁹ , <150°C

4. 照射方法

鉄鋼の試用期間における照射試験については JMT-R の原子炉運転が 2 サイクルより開始し 11 サイクルまでの 10 サイクルの間で行われた。各試験片は目標の照射条件を満足するように 12 個のアルミニウム製あるいはステンレス製のキャプセルに分割されている。12 個のキャプセルは同一ではなく、温度計測キャプセル、無計測リーキキャプセル、真空断熱方式および混合ガス方式温度制御キャプセルを用いた。一部のキャプセルは炉心方向での照射量の差をなくすために照射中にキャプセルを回転させる回転制御方式も行った。高温照射の 260°C あるいは 500°C は断熱キャプセル中で真空断熱あるいは混合ガス方式によって温度制御を行った。

中性子照射量は各キャプセルに入れたフラックスモニタワイヤによって測定した。モニタワイヤは、Co-Al, Fe を用い、2mmφ のアルミニウム製のパイプに封じて衝撃試験片のノッチ部などに入れた。本報告では主に Fe によって高速中性子量を決定した。個々の試験片の照射量 (高速中性子) はキャプセル各所から求められた照射量のグラフから決定した。シャルピ試験片で 6~7 本の試験片のグループ内に差が生じた時は最高と最低の照射量をもってグループの照射量とした (表3 参照)

表3 照射キャプセル一覧表

No	キャプセル番号	キャプセル型式	照射孔	原子炉運転サイクル
1	67M-2G	反射体型 温度計測キャプセル	H-4 (77°)	2~4 サイクル
2	67M-3G	反射体型 温度計測キャプセル	L-11 (77°)	5~6 サイクル
3	67M-4G	真空断熱方式 温度制御, 回転 制御キャプセル	D-9 (42°)	4~6 サイクル
4	67M-8G	リーキ Al バセット	H-9-4 (32°)	2~6 サイクル
5	67M-9G	リーキ Al バセット	H-9-4 (32°)	6~9 サイクル
6	67M-11G	無計測	D-9 (42°)	3 サイクル
7	67M-25G	混合ガス方式 温度制御キャプセル	M-7 (42°)	4~5 サイクル
8	67M-26G	リーキ Al バセット	M-7 (42°)	2~3 サイクル
9	67M-29G	無計測	H-4 (77°)	5~7 サイクル
10	67M-30G	無計測	H-4 (77°)	8~11 サイクル
11	67M-32G	温度計測キャプセル	D-9 (42°)	7~9 サイクル
12	67M-34G	リーキ Al バセット	M-12 (42°)	6 サイクル

* No.3 は温度 260°C, No.7 は温度 500°C に制御

5. 試験結果

現在までに得られた代表的な2,3の結果について報告すれば次の通りである。

1). 炭素量の15%を含むアルミキルド鋼について、完全焼鈍、空冷、水洗入水-焼戻の3種類の熱処理を施した。この時のフェライト結晶粒度は各々4.1, 6.7, 8.3の順に微細化している。この3種類の試料に $2\sim3\times 10^{19}n/cm^2 (>1MeV)$ の照射を行った衝撃試験結果を図1に示した。非照射材についての遷移温度は微細粒程度低温側であった。照射によりこの傾向は変化していないが、照射脆化感受性について焼鈍、空冷、水洗入水-焼戻、の順に $161^\circ, 130^\circ, 92^\circ C$ の遷移温度の上昇が認められた。この結果について、フェライト結晶粒径の平方根の逆数で整理すると図2に示すような直線関係が得られ、照射脆化感受性とフェライト結晶粒度とはよく知られているように相関性が認められた。

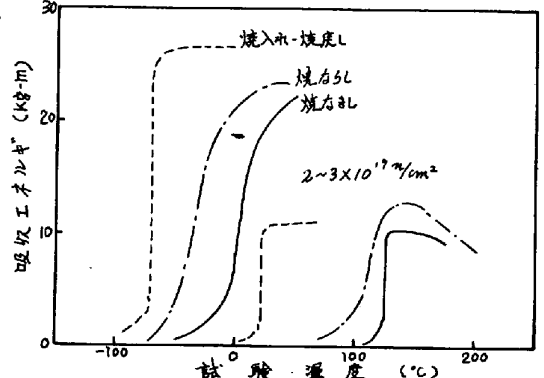


図1. アルミキルド鋼の熱処理の照射におよぼす影響

2). A302B鋼について電気炉製鋼材とLロ転炉製鋼材について比較すると(図3参照)、電気炉鋼材の方が遷移温度は低温側にある。この2種の照射による遷移温度の上昇量は前者が $113^\circ C$ 、後者は $133^\circ C$ となったが、両鋼種の照射量が前者は $2.3\times 10^{19}n/cm^2 (>1MeV)$ 、後者は $5.5\times 10^{19}n/cm^2 (>1MeV)$ でありかなり照射量に差がある。NRLのTrend Bandにこの結果をプロットすると、前者は $5^\circ C$ 、後者は $50^\circ C$ ほどBandから低い方に位置した。この結果、Lロ転炉製鋼材は電気炉製鋼材よりも照射脆化感受性の低いことが認められた。

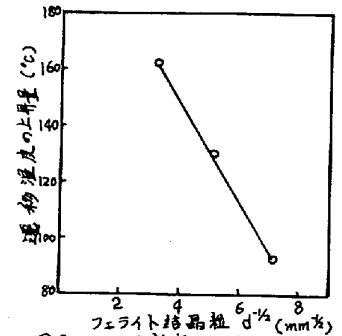


図2. フェライト粒度と遷移温度の上昇

3). SM50A鋼にSUS304Lステンレス鋼を熱間圧延クラッド処理したものおよび同一組成の内盛クラッド処理したものについて比較した。圧延クラッドは2mmと3mmのクラッドを行い、衝撃試験片の1/4はクラッド側につけてある。一方、内盛クラッドは3mmのみ内盛した。これらの照射前、照射後の結果を図4に示した。照射前において3種類のクラッド材のTr30をみると低温側から2mm圧延、3mm圧延、3mm内盛クラッドの順であったが、照射後においては低温側から3mm圧延、3mm内盛、2mm圧延クラッドの順となった。照射による $\Delta Tr30$ は2mm圧延材は $275^\circ C$ 、3mm内盛材は $165^\circ C$ 、3mm圧延材は $105^\circ C$ であり、照射脆化感受性に大きな差異が認められた。この結果、同一厚さのクラッドを行った場合には圧延クラッド材の方が内盛クラッド材より $60^\circ C$ ほど ΔTr が低く、照射脆化感受性は圧延クラッド材の方が低いことが知られた。この際の照射量は $0.9\times 10^{19}n/cm^2 (>1MeV)$ であり照射温度は $80^\circ C$ であった。

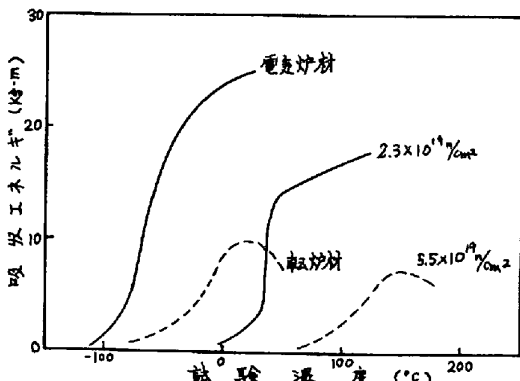


図3. A302B鋼の照射におよぼす製鋼法の影響

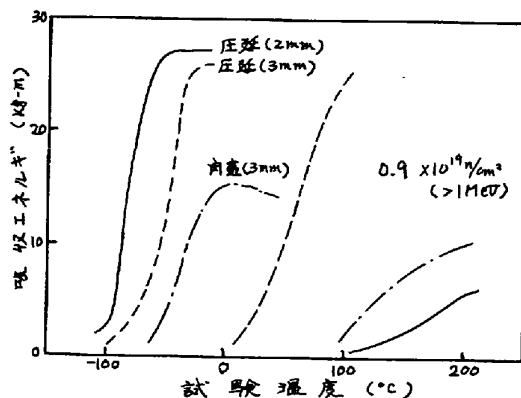


図4. 各種ステンレスクラッド材の照射におよぼす影響

4). 板厚 170mm と 250mm の A533B 鋼にエレクトロスラッグ溶接を施した鋼材から溶接各部についての照射脆化感受性を検討した。板厚 170mm の場合には非照射で熱影響部の遷移温度 (T_{r30}) は溶接金属部のそれより 10°C 程度低かった。照射後の T_{r30} はほぼ同じ温度を示し、照射による遷移温度の上昇は ΔT_{r30} で熱影響部は 214°C 、溶接金属部は 204°C となり、照射脆化感受性は熱影響部の方がやや優れていることが知られた。また、板厚 250mm の場合には、表面部と $t/4$ 部の比較も行った。非照射では T_{r30} を比較すると、熱影響部の方が溶接金属部より表面部、 $t/4$ 部ともに低かった。表面と $t/4$ の T_{r30} での比較では熱影響部では 20°C 程度認められたが、溶接金属では 10°C 程度であった。照射による遷移温度の上昇量を比較すると熱影響部の表面部、 $t/4$ 、溶接金属部の表面部、 $t/4$ の ΔT_{r30} は各々、 218° 、 169° 、 272° 、 267°C となった。この結果、熱影響部については表面部の方が照射脆化感受性が大きい。また、溶接金属部はやや表面部の方が感受性は高かった。熱影響部と溶接金属部を比較すると、表面部、 $t/4$ 部ともに後者の方が感受性が大きく、板厚 170mm の場合と同様の結果が得られたが板厚が厚いほどこの傾向は著しい (図 5, 6 参照)。

なお、不純物の影響などについては現在解析中であり、全試験が終了し個々のデータの解析が終了は実験報告として発表の予定である。

文 献

- 1) 鉄鋼の照射試験研究合同委員会; 原子炉圧力容器用 ASTM A302B 鋼の中性子照射に関する試験研究, (1968).
- 2) 鉄鋼の照射試験研究合同委員会; 原子炉用 ASTM A302B 鋼溶接部の中性子照射に関する試験研究, (1968).
- 3) 鉄鋼の照射試験研究合同委員会; 原子炉圧力容器用高張力鋼の中性子照射に関する試験研究, (1968).

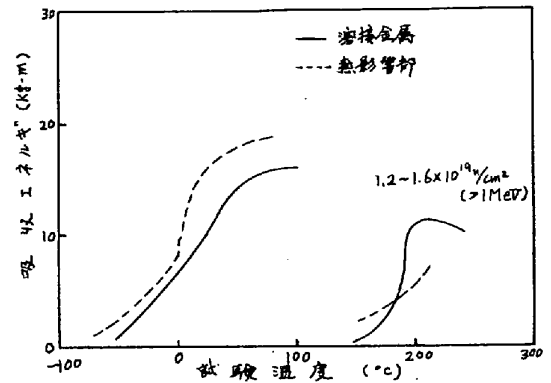


図5. 板厚 170mm A533B 鋼の溶接部の照射結果

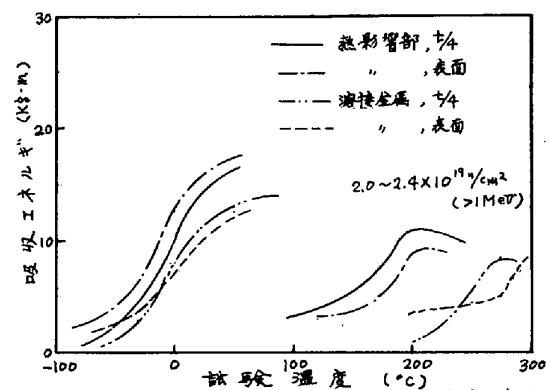


図6. 板厚 250mm A533B 鋼の溶接部の照射結果