

## 委員会報告

UDC 669.14.018.295 : 539.125.5.043

## PC 鋼線の照射試験\*

下川 敬 治\*\*

On Neutron Irradiation Tests for Steel Wires for  
Prestressed Concrete Reactor Pressure Vessel

Keiji SHIMOKAWA

## 1. はじめに

昭和 38 年わが国の材料試験炉の建設計画が産業界の強い要望もあつて決定され、昭和 40 年 4 月に茨城県大洗町に日本原子力研究所大洗研究所として着工された。この材料試験炉（以後 JMTR と称す）は原子炉特性試験、試用期間を経て現在は実用試験に供されているが、この試用期間を有効に活用するために、日本原子力研究所の材料試験炉運営委員会の要請により日本鉄鋼協会に JMTR 利用委員会が設置された。JMTR 利用委員会は各種鉄鋼材料の材料試験炉による中性子照射試験および照射後の諸特性試験を目的としたもので長谷川委員長（早大）、日本原子力研究所の指導を得て研究を進めたものである。一方わが国の土木学会においても原子炉用プレストレストコンクリート圧力容器に関する研究小委員会が設置され、いくつかの研究項目が上げられているが、その一つである“PC 鋼材の物性”に関する研究項目については、日本鉄鋼協会に依頼すべく両者で懇談の場を持つたこともある。

このような背景もあつて照射鉄鋼材料の一つに PC 鋼線を加えることになつた。

## 2. 目的

PC 鋼線は鉄鋼材料における構造用鋼の中でも特殊な使用方法であるため、取扱いを別にし JMTR 利用委員会に PC 鋼線小委員会が設置された。

当小委員会は日本原子力研究所と PC 鋼線および PC 鋼材メーカー 7 社すなわち川崎製鉄、神戸製鋼、新日本製鉄（発足当時は富士製鉄および八幡製鉄）、神鋼鋼線、住友電工、鈴木金属、東京製鋼が参加し、PC 鋼線の中性子照射による特性試験、とくにレラクセーションに対する照射効果を試験することを目的としたものである。

PC 鋼線の中性子照射試験は近い将来に予測されるわが国原子力発電の大型化あるいは多目的高温ガス炉の建設において、安全性、施工技術および価格面など総合的にみて有利な点があるといわれるプレストレストコンクリート構造、とくに圧力容器（一次容器）の採用を考慮した

場合に、鋼材として使用される PC 鋼線の中性子照射による特性変化、とくに直接的な問題としてプレストレス導入応力への影響を知っておく必要があるためである。

コンクリート構造物への PC 鋼線の利用は、その構造物に与えるプレストレスを最大限に活用するものであり、とくに安全性に絶対の保証を必要とする圧力容器においては十分な安全設計が基本となる。PC 鋼線についても設計上当然このような配慮がなされるわけであり、中性子の遮蔽および温度上昇の防止対策面から安全性を確保すべく技術的に研究が進められている。しかしながら PC 鋼線と中性子照射とは無視しえない関係にあるため、イギリスおよびアメリカでの実験データが公表されているが数も少なく、この分野では初期段階にあると思われる。このような背景から PC 鋼線の中性子照射後のレラクセーション挙動を取上げることになつたのであるが、この試験が中性子照射という特異な環境条件下になり、特殊な試験機をホットラボ室で操作するという条件があるため、中性子照射および照射後試験がどの程度効率よく実施できるかが目標の一つでもあるわけである。

当小委員会としては照射に至るまでの過程として PC 鋼線への中性子照射文献、中性子照射後の試験項目、照射使用孔とキャプセル、試験片の形状寸法、中性子照射に必要な諸条件の調査および実験、中性子照射後の試験機の製作などについて検討を進めながら PC 鋼線の照射試験を実施した。

## 3. 試験開始までの経緯

## 3.1 PC 鋼線の照射文献

3.1.1 英国における照射試験報告<sup>1)</sup>

1967 年ロンドンでの PC 圧力容器に関する国際会議における D グループの論文 (No 20) に、A. COWAN および R. W. NICHOLS の“Effect of irradiation on steels used in pressure vessels”に PC 鋼線の照射によるレラクセーションに関する実験報告がなされている。両氏の実験要旨は試験片となる径 2.5 mm の PC 鋼線を 2 社

\* 昭和 47 年 8 月 3 日受付

\*\* 新日本製鉄(株)

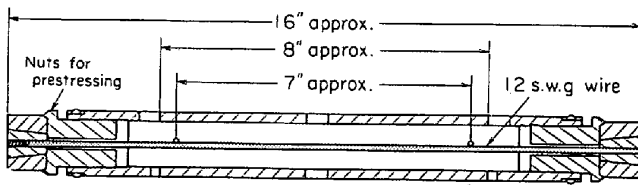


図 1. 試片組込図

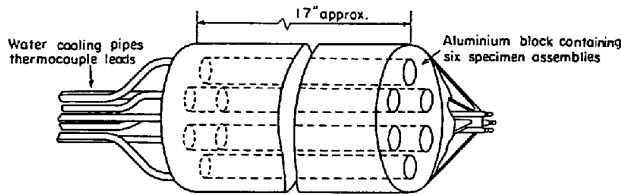
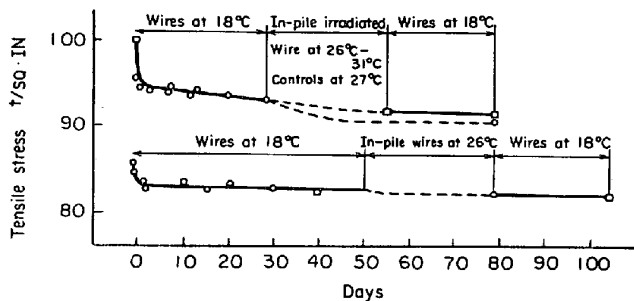


図 2. 照射装置



○ Irradiated specimens (flux~ $10^{10}$ n/sq.in.>1MeV)  
 □ Control specimens

図 3. 照射した試片と温度制御した試片のリラクセーション

から名々 6 本ずつ入手し、各試片を図 1 に示す肉厚軟鋼チューブに通し、緊張は両端のナットを利用して固定する。初荷重は試片引張り強さの 70% に設定し、リラクセーションの検出はチューブ中央部のワイヤー近傍に取付けたコイルからの磁気衝撃により、正確に測定された標点距離における振動を標準値と比較する振動法を採用している。照射は 6 本のチューブを図 2 のようなアルミニウムブロックに入れ全体を水冷すると同時にチューブとブロック間をヘリウムにて満し、ワイヤーの温度制御を行なうと同時に温度測定を実施している。

照射は Dounreay の材料試験炉の 4V2 孔を使用し、積算速中性子照射量 (以後照射量と称す) は  $4 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup> であった。リラクセーションの測定は負荷 1 min 後から照射開始まで行ない、さらに照射装置の解体後に行なっており、照射時のリラクセーションは照射前後の値から内挿している。測定結果は図 3 に示すように最初の試片は 26°C で照射されたが、第二グループの試片は 31°C に昇温していた。各測定点は 6 本の平均値であり、強度の低い試片は照射の影響がほとんどないが、第二グループの試片はリラクセーションが約 1 t/in<sup>2</sup> (1.57 kg/mm<sup>2</sup>) 増加している。しかし照射なしの 31°C の測定値と同様な結果を示しており、両試片ともこの程度の照射量では

照射の影響はなく、その上照射試片の顕微鏡組織および引張り強さにも変化がないと説明している。

3.1.2 GGA の報告<sup>2)</sup>

Materials Protection の 1970 年 3 月号に Gulf General Atomic Inc. (以下 GGA と称す) より照射実験として Irradiation of Stressed Prestressing Wire Coated for Corrosion Protection なる報告がなされている。これによれば GGA における Fort St Vrain Nuclear Generating Station でのワイヤーおよび PC 鋼線を適当な強度本数だけ束にまとめた tendon は防食処置を予定している。このことは Prestressed Concrete Reactor Vessel における tendon は検査および交換を考慮して腐食に対する特別な保護を必要とするためである。このため実験は照射による腐食抑制剤と水素脆性の影響を検討すべく計画されたもので、試片は 0.25" (6.35 mm) の ASTM A 421-65 BA タイプの冷間伸線後、鋼の A<sub>1</sub> 変態点以下の適当な温度 (たとえば 300~400°C) に加熱して加工歪の除去により、機械的性質の改善を施した応力除去ワイヤー、および破断荷重の約 50% 程度の緊張力を与えながら同様に加熱してリラクセーションロスを少なくした英国のサーマライズドワイヤーとなつている。

実験に供された腐食抑制剤は次のタイプのものである。

- タイプ A: パラフィンワックス
- タイプ B: 非水性磷酸塩系耐食液
- タイプ C: 自動車用グリース
- タイプ D: 微結晶磷酸亜鉛に水エマルジョン防錆油を塗布したもの
- タイプ E: 石油系オイルをベースにして微結晶ワックス、界面活性剤および腐食抑制剤を混合したもの (No-Ox-1d CM)

試片は長さ 6.5" で両端をボタンヘッディングし、中央部に 60°V ノッチ加工を施したものである。

キャプセルは 6061 アルミニウム合金体に孔をあけた

表 1 応力除去ワイヤーのコーティング

Specimen	Coating	Capsule environment
1	Control, bare wire	Dry nitrogen
2	No-Ox-1d CM (Type E)	Air (59% RH)
3	No-Ox-1d CM (Type E)	Dry nitrogen
4	Automobil grease (Type C)	Air (59% RH)
5	Paraffin wax (Type A)	Air (59% RH)
6	Paraffin wax (Type A)	Dry nitrogen

表 2 サーマライズドワイヤーのコーティング

Specimen	Coating
1	Control, bare wire
2	No-Ox-1d CM (Type E)
3	Type D
4	Type B + (No-Ox-1d CM)
5	Type D + (No-Ox-1d CM)
6	Type D + (No-Ox-1d CM)

表3 メッキの種類と方法

メッキの種類	前処理	メッキ	後処理
溶融亜鉛メッキ	ペーパー研磨 ↓ 塩酸処理 ↓ 水洗 ↓ 湯洗	フラックス塗布 ↓ 溶融亜鉛浴に浸漬 (440°C×1 min)	湯洗 ↓ 水洗 ↓ 乾燥
電気亜鉛メッキ	ペーパー研磨 ↓ 脱脂 ↓ 水洗 ↓ 濃HCl処理 ↓ 水洗 ↓ 錆止め ↓ 水洗	電流密度 2 A/dm <sup>2</sup> 時間 40 min 浴組成 ( $2n(\text{CN})_2$ 60 g/l KCN 25 g/l NaOH 80 g/l 添加剤 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Zincluster))	水洗 ↓ 錆止め ↓ 水洗 ↓ ユニクロ処理① ↓ 水洗 ↓ 乾燥
電気ニッケルメッキ	ペーパー研磨 ↓ 脱脂 ↓ 水洗 ↓ 10% HCl 処理(1 min) ↓ クリーニング ↓ 水洗 ↓ 10% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 処理(30 sec) ↓ ストライク② ↓ 水洗	電流密度 1.5 A/dm <sup>2</sup> 時間 40 min×2 温度 45°C 高 pH watts 浴 浴 空気攪拌 浴組成 ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 240 g/l $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 40 g/l H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub> 30 g/l)	水洗 ↓ 乾燥
電気クロムメッキ	バフ研磨 ↓ 脱脂 ↓ 水洗 ↓ エッチング③ ↓ ストライク④	電流密度 20 A/dm <sup>2</sup> 時間 1 hr×2 温度 48°C 浴組成 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 220 g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2.5 g/l)	水洗 ↓ 乾燥
電気ニッケル+クロムメッキ	酸浸漬⑤ ↓ 水洗 ↓ 電解洗滌⑥ ↓ 水洗	ニッケルメッキ 電流密度 4 A/dm <sup>2</sup> 時間 30 min 温度 40~45°C 浴組成 ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 240 g/l $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 45 g/l H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub> 30 g/l)  クロムメッキ 電流密度 20 A/dm <sup>2</sup> 時間 4 min 温度 40~45°C 浴組成 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 250 g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2.5 g/l)	水洗 ↓ 乾燥

メッキの種類	前処理	メッキ	後処理
アルミ・メタリコン	ショット・ブラスト	金属線溶融(酸素アセチレンガス) 吹付圧力: 5 気圧	—
ニッケル・メタリコン	ショット・ブラスト	金属線溶融(酸素アセチレンガス) 吹付圧力: 5 気圧	—
アルミ真空蒸着	酸洗 ↓ ペーパー研磨 ↓ 脱脂 (アルコール+エーテル)	加熱方法: 電子線衝撃加熱⑦ 真空度: $10^{-5}$ mmHg メッキ時間: 1~2 min を 2~3 回 回転しながら蒸着	—

(注)

## ① ユニクロ処理

時間 5~10 sec  
温度 室温  
浴組成  
( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  250 g/l  
 $\text{H}_2\text{SO}_4$  2.5 g/l)

## ② ストライク

電流密度 6 A/dm<sup>2</sup>  
時間 1 min  
温度 室温  
浴組成  
( $\text{NiCl}_2$  150 g/l  
 $\text{HCl}$  150 g/l)

## ③ (陽極) エッチング

電流密度 10 A/dm<sup>2</sup>  
時間 2 min  
温度 48°C  
浴組成  
( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  220 g/l  
 $\text{H}_2\text{SO}_4$  2.5 g/l)

## ④ ストライク

電流密度 40 A/dm<sup>2</sup>  
時間 1 min  
温度, 浴組成③に同じ

## ⑤ 酸浸漬

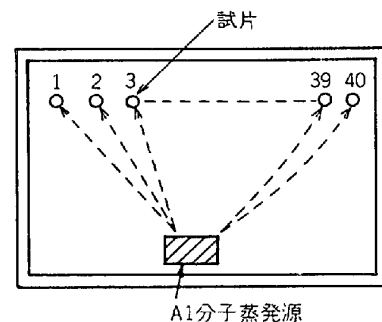
温度 60°C  
時間 30 sec  
浴組成  
 $\text{HCl}$  20%

## ⑥ 電解洗滌

電流密度 55~65 A/dm<sup>2</sup>  
温度 室温×30 sec  
浴組成  
 $\text{H}_2\text{SO}_4$  40%

以上の条件にて陽極処理

## ⑦



図のごとく1個の Al 分子蒸発源にて 40 本の鋼線の蒸着を行なう。蒸発源よりみて裏側にあたる鋼線表面は Al が付着しないため鋼線を 1/4 回転ずつ回転させ、蒸着をくり返した。

ものを用い、割治具とナットにて張力を与えており、試片にストレンゲージを取り付けて測定した結果、72 hr でレラクセーションは 3% 以下であり、照射におけるレラクセーションは無視できるとしている。キャプセル全体は温度影響を考慮してアルミニウムシリンダーにてシールしてあり、リアクターコア (reactor core) は水中に浸漬されていて試片温度は 150°F (66°C) 以下におさえている。応力除去ワイヤーおよびサーマライズドワイヤー試片へのコーティングは表 1, 2 のとおりであり、照射は 320 hr, 照射量は  $1.3 \times 10^{17}$  n/cm<sup>2</sup> ( $E > 1$  MeV) となっている。試片の張力はノッチを付けたワイヤーの破断強さの 75% を負荷しているが、これは水素脆性および応力集中などの文献を参考としている。そして照射

時のキャプセル内圧を測定するとともに内部のガスを時間に応じ 3 回の分析を行なっている。この結果水素および窒素その他が発生しており、高応力時の脆性には十分な水素量であるとしている。しかし本テスト結果では試験に使用した腐食抑制剤に照射することにより発生した水素がテンドンに脆性を生ずることはなく、かつワイヤーの性能を低下するような事実もみられなかつた。これらから PCRV の腐食抑制剤として No-Ox-1d CM のコーティングを採用したいと結んでいる。

## 3.2 レラクセーション試験方法についての検討

本 PC 小委員会において PC 鋼線に中性子照射をおこない、その影響を試験するために試験項目を何にすべきかが第一に決定すべき事項であつたが、PC 鋼線の用途

表 4 メッキ試験後の機械的性質 (平均値)

試片記号	メッキの種類	線径 mm	破断荷重 kg	伸び %	絞り %	くり返し 曲げ R=10 mm	試片数
A	素線	5.0	3360	5.3	46.5	13	—
	アルミメタリコン	5.23	3460	4.3	47.0	11	—
	ニッケルメタリコン	5.20	3360	4.5	49.5	10	—
C	素線	5.0	3700	5.5	50	10	—
	電気ニッケルメッキ	5.0	3750	6.0	44	6	—
	電気ニッケル+クロムメッキ	5.0	3700	5.5	44	6	—
D	素線	5.01	3389	5.7	42.6	—	7
	溶融亜鉛メッキ	5.08	3185	7.1	36.0	—	7
	電気亜鉛メッキ	5.06	3362	6.0	45.3	—	7
	電気ニッケルメッキ	5.04	3423	5.8	43.2	—	7
	電気クロムメッキ	5.04	3410	5.0	41.4	—	7
E	素線	4.99	3476	5.5	42.9	—	5
	溶融亜鉛メッキ	5.08	3370	5.9	41.5	—	5
	電気亜鉛メッキ	5.11	3462	5.4	42.4	—	5
	電気ニッケルメッキ	5.07	3478	5.0	43.5	—	5
	電気クロムメッキ	5.07	3470	5.2	42.6	—	5
E' *	素線	4.98	3270	6.4	45.2	—	2
	アルミ蒸着	5.01	3300	5.9	48.4	—	4
F	素線	5.0	3550	6.5	48	8.5	—
	電気ニッケルメッキ	5.0	3550	6.5	48	8.5	—
	電気ニッケル+クロムメッキ	5.0	3530	6.0	47	9.0	—

\* 同一メーカーの製品だが材料が異なる

表 5 メッキ後の腐食試験方法

腐食液	試験槽	試験条件
○人工海水試験 液組成 NaCl 25 g/l CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O 1.5 g/l Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O 9 g/l KCl 0.6 g/l MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O 12 g/l pH 6.19~6.22(*) (*) 調合直後 温度 室温	木製塩化ビニールシート内 張した中にメッキ種別毎に槽 内を区分した。 槽内液量 14 l 槽内の大きさ 83×400×500 mm (高さ)	昼間 1 hr ごとに浸漬, 60°C 乾 燥のくり返しを行ない, 夜間 (13 hr) 浸漬のまま。 試料数は各 4 本 (250 mm 長さ)。
○過酸化水素水試験 液組成 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 2 vol % 水はイオン交換蒸留水 温度 室温	木製塩化ビニールシート内 張した中にメッキ種別ごとに 槽内を区分した。 各槽内液量 14 l 槽内の大きさ 70×300×400 mm (高さ) 液深さ 340 mm	毎日 1 回 60°C, 1 hr の乾燥以 外は浸漬状態
○塩水噴霧試験 液組成 NaCl 4.8% (*) (*) 分析結果 pH 7.08	JIS-Z-2391 による	噴霧量 0.63~0.89 cc/hr·80 cm <sup>2</sup> 温度 34.8°C

表 6 腐 食 試 験 結 果

メッキ方法	試験条件	人 工 海 水	過 酸 化 水 素 水	塩 水 噴 霧
溶融亜鉛メッキ		90 hr 後白錆鮮明	2 hr 後に白錆発生	—
電気亜鉛メッキ		90 hr 後白錆鮮明	70 hr 後に白錆発生	17 hr 後に白錆発生
電気ニッケルメッキ		45 hr 後に赤錆発生	100 hr まで発錆認められず	17 hr 後に赤錆発生
電気クロムメッキ		60 hr 後に赤錆発生	100 hr まで発錆認められず	17 hr まで発錆認められず
アルミメタリコン		—	—	3 hr 後に白錆発生
ニッケルメタリコン		—	—	3 hr 後に赤錆発生
アルミ蒸着		630 hr まで発錆せず	—	24 hr 後に赤錆多少認められる
電気ニッケル+クロムメッキ		60 hr 発錆認められず	100 hr まで発錆認められず	17 hr まで発錆認められず

から判断して照射によるレラクセーションの影響を試験の第一目的として検討を進めることに決定した。PC 鋼線への照射試験を実施するにあたっては次の事柄を前もって調査しておく必要があった。ここに試験に至るまでの概要を述べておく。

### 3.2.1 レラクセーション測定について

レラクセーションを測定する場合にはまず照射中のレラクセーションを測定するのが最も望ましく、その可能性の強い振動法と圧電素子法を検討してみた。しかし照射孔という限られたスペースにおいて PC 鋼線に緊張力を与え、一定温度に保持しながら信頼できる計測を行なうことは困難も大きく、照射中にレラクセーションを測定することを止めて照射後にレラクセーションを測定することにし、その試験方法および試験機について検討がなされた。ホットラボ室の広さの制約上通常のレラクセーション試験機が持ち込めないため小型で取り扱いの容易な試験機を開発する必要が生じた。

### 3.2.2 照射について

使用する照射孔は他の試験材との関係上位置および数が規定されてくるため照射量は  $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19} n/cm^2$  ( $E > 1 MeV$ ) 程度になることが推測された。

使用照射孔は内径 42 mm、長さ 750 mm のものを予定しているが照射孔長手方向の中性子フラックスの分布より、照射に利用できる試片長さが限定される。密封型キャプセルを使用すると試片の温度は計算上 100°C 前後となることが予測されたので、キャプセルは無計測リキーキャプセルとし、これを 2 段重ねてアルミバスケットに収納することとした。

### 3.2.3 冷却および試片のメッキ

試片の昇温を極力おさえるため試片を炉内冷却水中に浸漬する方法を採用した。この場合の試片温度は 50°C 程度になる予定である。試片の錆が冷却水を汚染するのを防止するために試片にメッキを行なう必要がありメ

ッキすべき金属、メッキ方法および材質へ及ぼす影響を検討した。

### 3.2.4 試験機および試片

以上のほかに試片および試験機に関する検討が平行して進められてきたが、試片については試験すべき材料の種類、試片の数、寸法および形状などが使用照射孔数、キャプセルの製作、照射フラックスの均一性および試験機の仕様などから決定された。また試験機は測定を実施するホットラボ室の大きさから持込可能なものであること、測定操作上からマンユプレーターで容易に取扱い測定可能なものという条件にて検討された。

## 3.3 メッキに関する試験

### 3.3.1 メッキの種類と方法

メッキ試験の種類と方法は表 3 に示すとおりである。日本原子力研究所の要望はメッキ付着量が十分であればニッケル+クロムメッキであった。

### 3.3.2 メッキ試験後の機械的性質

表 4 にメッキ後試片の機械的性質の平均値を示す。

### 3.3.3 メッキ後の腐食試験

表 5 にメッキ試験後の腐食試験方法を示し、表 6 に腐食試験結果を示す。図 4 に腐食試験装置の 1 例を示す。照射用試片へのメッキは試片冷却水の汚染を防止するためニッケル+クロムメッキとすることにした。

### 3.3.4 メッキ付着厚さ

電気ニッケル+クロムメッキ後のメッキ厚さを測定した結果を図 5 に示す。これによるとヘッディング頭部に多くの付着量が認められ直線部には比較的薄いメッキとなつている。懸念されたコーナー部にもよく付着していた。

### 3.3.5 ピンホール試験

JMTR における水条件は ① pH 5.5~6.5, ② 水温約 50°C ③ [Cl] 0.2 ppm 以下 ④ [O] 常圧で飽和状態となつており、試験は試験液を交換しない静水法が望

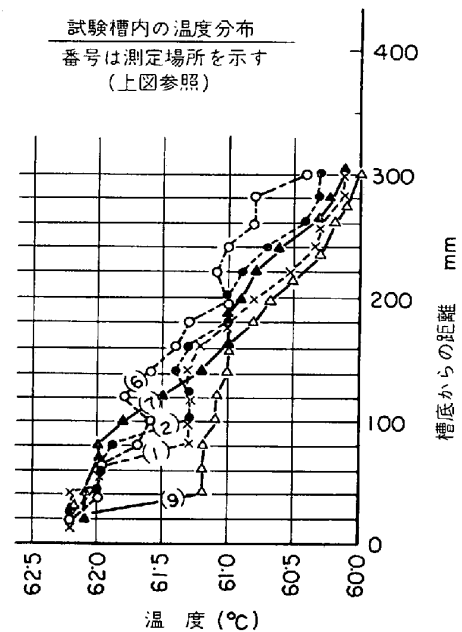
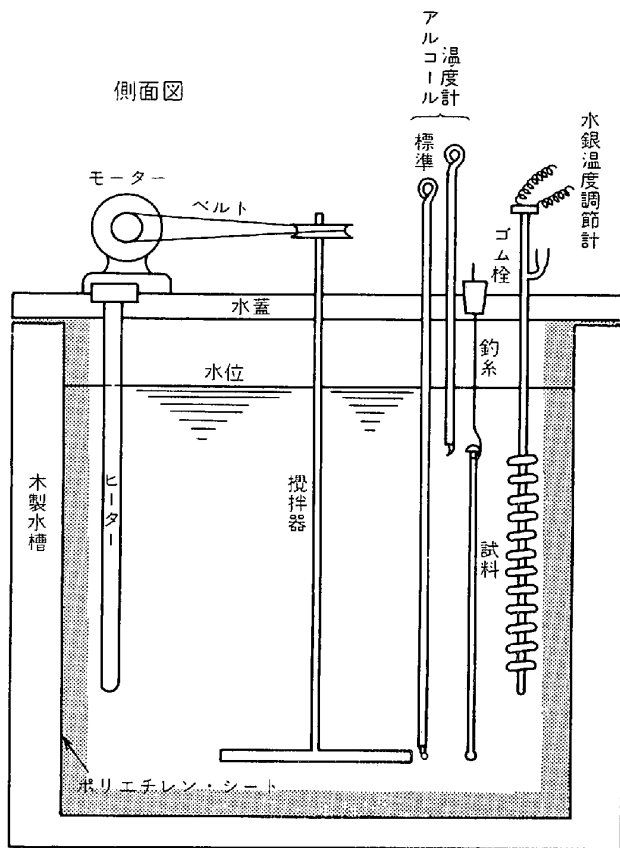
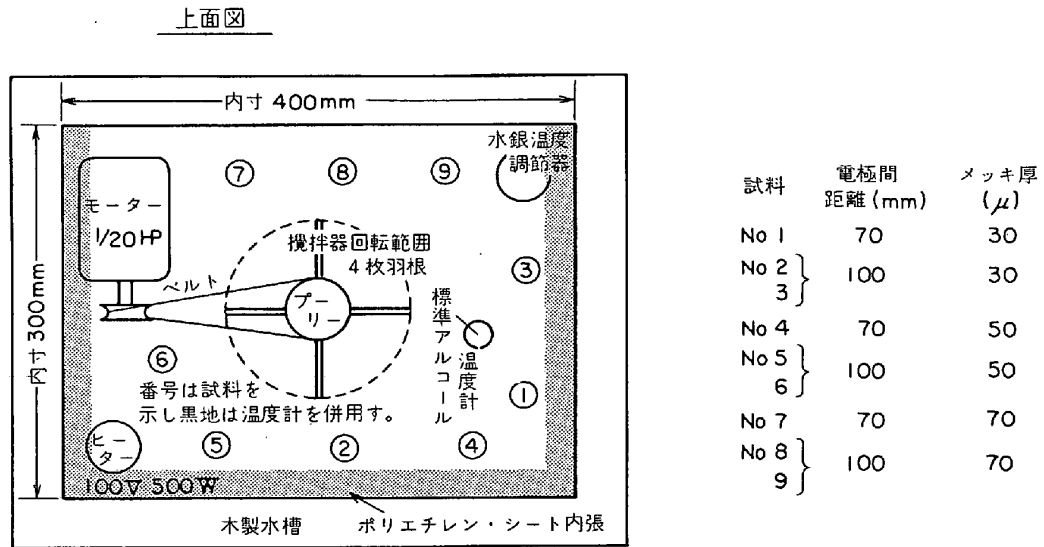


図 4. 腐食試験装置

ましいとのことであり、以上の条件で電気ニッケル+クロムメッキ試片の試験を行なった。試験は JIS H 8612 (フェロキシル試験法)によりプルシアンブルー溶出点数によるものである。試験液組成は  $K_3Fe(CN)_6$  10 g/l,  $K_4Fe(CN)_6$  10 g/l, NaCl 60 g/l である。ニッケル付着量は 30 $\mu$ , 50 $\mu$ , 70 $\mu$  でクロムはすべて 0.5 $\mu$  で

ある。測定時間はすべて 1, 3, 5, 10 min である。これらの条件で実験した結果、直線部で若干プルシアンブルーの溶出が認められたが全般に微少なもので問題のないものであった。さらに 45 日間の浸漬でもほとんど問題は無い。

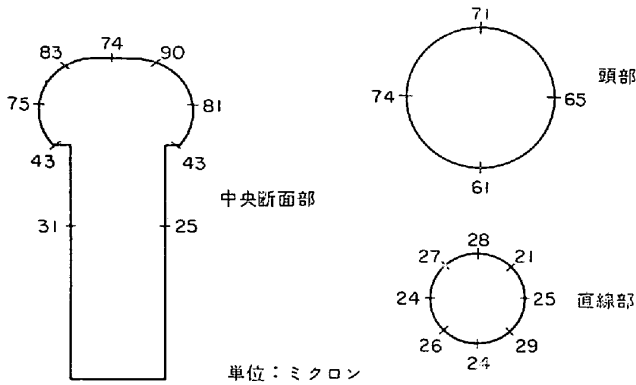


図 5. 電気ニッケル+クロムメッキの付着厚さ

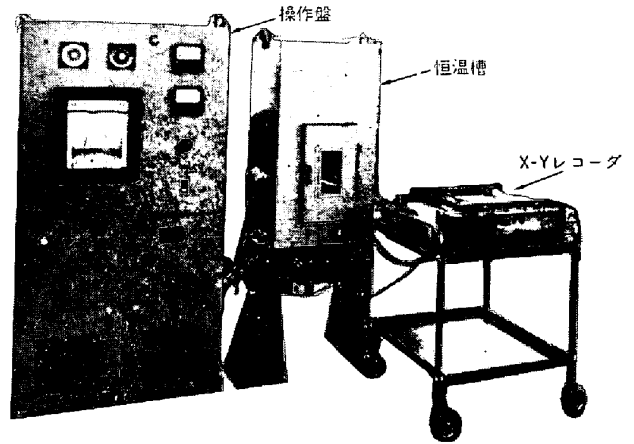


写真 1. レラクセーション試験機全体図

3.4 レラクセーション試験機の決定

当初 PC 鋼線の照射中レラクセーションの測定を目標に試験方法の検討がなされた。そして試験方法として取り上げられたものが一つは振動法によるものであり、一方は圧電素子を利用する方法であつた。

振動法による測定概要は 3.1.1 に紹介した方法によるもので試片をパイプに通し両端を固定して (チャッキングあるいはヘディング) 緊張力を与え、その状態における固有振動数の変化を検出し測定するものであり、試片に機械的または電氣的に振動を与える装置を組込んでおくことが必要である。一方圧電素子は試片をパイプ状のものに通し、片端に圧電素子を組込み固定し、一方の端部をチャッキングなどにて固定し緊張力に応じた伸び相当の厚みの板などを狭み込んで緊張力を与えておき、圧電素子に掛る圧力の変化 (緊張力に比例する) を検出してレラクセーション値に換算する方法で、一例を図 6 に示す。この両方法は通常環境のもとでは容易に利用されているものであるが、照射中のレラクセーション測定としてはゲージ類の温度保証、検出部品の冷却水中への浸漬、レラクセーション値に対する温度 (水冷で約 50°C) と照射による影響の判別などが早急には保証しえな

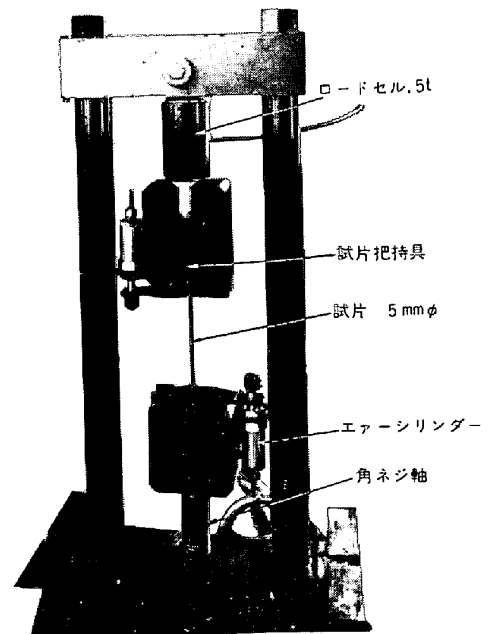


写真 2. 試片取付部

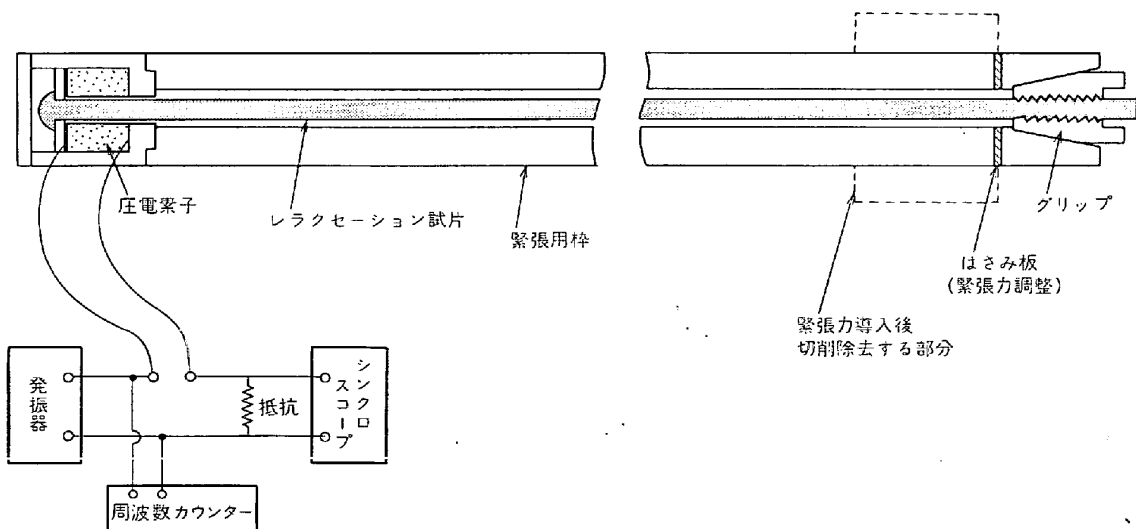


図 6. 圧電素子利用のレラクセーション測定方法



め照射中の測定を断念し、照射後測定に変更しそのための試験機製作に着手した。照射後試片のレラクセーション測定装置（以下試験機と称す）はマンニプレーター操作にて緊張、取外しのできることを、ホットラボ室のスペースに設置できることを、恒温槽を取付けることを条件としてロードセルタイプの試験機を製作することになった。試験機はホットラボ室の入口寸法が幅約1000mm、高さ約2000mmであるのと、マンニプレーター操作位置が約1000mm高さであるので、これらに合せて堅型方式とした。試験機の装置全体および試片取付部を写真1, 2に、概略寸法を図7に示す。

試験機の概要は写真に示すごとく、主柱上部にロード

セルを固定し、その端部と下側からの緊張用角ネジ軸先端に試片取付用の二つ割V溝チャックを上下に配した。チャックの開閉は小型エアシリンダーを介して空気作動させるもので、試片の固定はチャック端面を利用して試片のヘッディング部を引掛ける方法とした。試片の緊張および解放は装置下部に取付けたモーターによりウォームホイールを駆動させ、これに連動する角ネジ軸を上下することによって操作する機構とした。また試片の温度を一定に保つため試片取付部全体に恒温槽を設置し、循環水冷およびヒーターにより常時  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  以内に温度制御を行なった。恒温槽前面はガラス板付の片開き扉として、操作上扉位置を試片正面でかつマンニプレーター

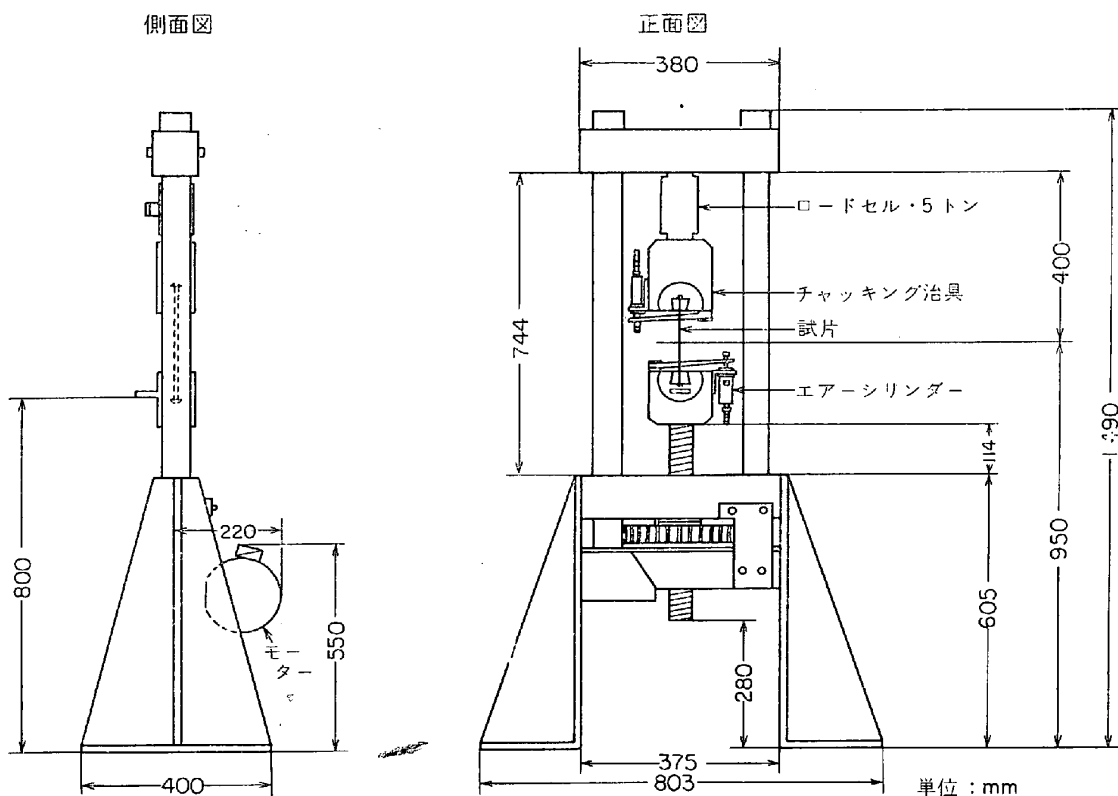


図7. 概略寸法図

線径 5.0 mm  
 初期荷重  $\sigma_0 \times 0.7 = 2640 \text{ kg}$   
 保持時間 ナシ  
 送り速度: 25mm/hr (記録紙)

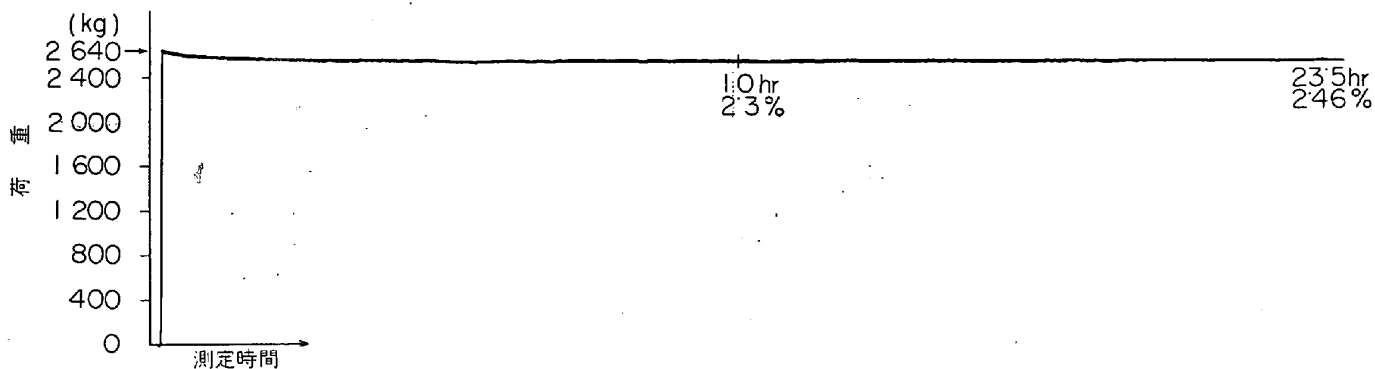


図8. レラクセーション測定例

表 7 化 学 成 分

試片 記号	鋼 種	化 学 成 分 (%)							
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
A	SWRS-72B	0.73	0.21	0.67	0.011	0.007	0.01	—	—
B	SWRS-75B	0.75	0.26	0.75	0.011	0.011	0.104	0.146	—
C	SWRS-77B	0.77	0.24	0.83	0.014	0.015	0.04	—	—
D	SWRS-80A	0.80	0.24	0.50	0.009	0.013	0.07	—	—
E	SWRS-80A	0.81	0.20	0.50	0.008	0.012	0.01	0.01	0.03
F	SWRS-80B	0.80	0.26	0.84	0.012	0.028	0.06	—	—
G	SAE 9254	0.53	1.45	0.71	0.016	0.010	0.06	0.65	—
H	SUP-9	0.50	0.26	0.78	0.015	0.011	0.013	0.79	—

とほぼ水平部に配した。荷重検出用ロードセルは容量 5 トンで精度は ±0.5% のものを使用した。試片の送り速度は毎分 3 mm で測定値の記録は X-Y レコーダーを使用した。本試験機によるレラクセーション試験の一例を図 8 に示すが十分に使用できることがわかった。

4. 試 験

4.1 試験材料

4.1.1 試験材料の化学成分

中性子照射用試片は線径 5.0 mm の鋼線を両端冷間ヘッディングした後ニッケル+クロムメッキを施したものである。供試材料の化学成分を表 7 に示す。

4.1.2 試験材料の概要履歴

照射用試片の製造工程は次のとおりである。

- 線材—パテンチング—酸洗—減摩剤塗布—冷間伸線
- ヘッディング加工—歪取り焼鈍—研磨—メッキ
- ベーキング

表 8 に試片の伸線加工度および歪取り焼鈍条件（一部焼入焼戻し条件）を示す。

レラクセーション用試片は表 8 に示した A~H までの鋼種を各 1 本、計 8 本測定することにした。試片の形状は図 9 に示すもので有効長さ 250 mm、ヘッディング首下部の R を 0.2 mm 目標に加工した。

4.1.3 試験材料の機械的性質

ニッケル+クロムメッキ後ベーキング処理したレラクセーション測定用試片につき機械的性質を表 9 に示す。

4.1.4 試験材料のメッキ厚さおよび硬度分布

ニッケル+クロムメッキ処理したもののメッキ厚さおよび硬度分布

試片 記号	原線径 mm	最終径 mm	加工度 %	歪取り焼鈍条件 °C × sec
A	9.5	5.0	72.3	370 × 10
B	9.0	5.0	69.2	350 × 6(鉛)
C	9.5	5.0	72.3	380 × 100(熱風)
D	8.3	5.0	63.8	350 × 16(ソルト)
E	9.5	5.0	72.3	370 × 30
F	9.5	5.0	72.3	360 × 20
G	11.0	5.0	79.3	420 × 240(熱風)
H*	5.5	5.0	17.2	900 × 240—620 × 210

\* 焼入、焼戻し処理

および内部硬度分布を表 10 に示す。メッキ厚さの測定は光学顕微鏡により行ない、その平均値または範囲を算出したものである。硬度はマイクロピッカース硬度計によ

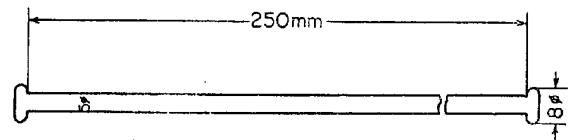


図 9. レラクセーション試片形状

表 9 機 械 的 性 質

試片 記号	線径 mm	引張強さ kg/mm <sup>2</sup> (kg)	0.2% 耐力 kg/mm <sup>2</sup>	伸 び % l=100 mm	絞り %
A	5.00	174.0 (3 420)	153.5	6.5	48.5
B	5.01	172.7 (3 405)	158.1	6.3	38.3
C	5.00	179.0 (3 513)	160.0	6.0	—
D	5.02	174.5 (3 450)	157.0	5.3	44.7
E	5.00	178.0 (3 497)	156.1	7.3	45.6
F	4.98	183.6 (3 575)	161.7	7.3	37.5
G	5.01	177.2 (3 491)	174.2	4.5	—
H	5.02	122.5 (2 423)	110.9	8.4	48.5

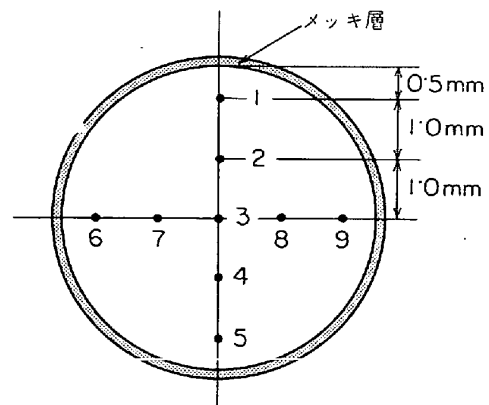


図 10. 硬度測定位置

表 10 断面硬度分布表

	メッキ厚さ(μ)		硬 度 分 布 (Hv)										荷 重 g
	Ni	Cr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均値	
A	110	0.5	470	453	473	457	450	473	473	476	476	466.7	200
B	100	0.6	455	463	484	480	460	461	479	475	461	468.7	500
C	25~30	0.5~1.0	497	481	479	488	499	506	483	479	502	490.4	500
D	56	0.5~1.0	488	466	453	472	494	485	469	466	480	475.0	300
E	60	1.0	490	487	459	473	476	468	465	457	473	472.0	200
F	25~30	1.0~1.5	465	467	433	448	447	446	442	455	435	448.7	500
G	25~30	0.5~1.0	502	492	420	488	502	499	466	497	502	485.3	500
H	25	5	373	373	370	373	370	370	373	376	373	372.0	10 000*

\* ビッカース硬度計使用

り図 10 のごとく 9 カ所の点を測定した。

4.2 キャプセル

当初照射用試片を直接水にふれさせず、しかもできるだけ低い温度で照射する方法として密封型キャプセルを検討した。この場合試片はアルミニウムの熱媒体で囲みガスギャップに He を封入するとしても、0.6 W/g のガンマ発熱があると試片温度が 100°C を越えるものと推定された。試片の温度が 100°C を越えるとレラクセーション特性に影響を及ぼすので、密封キャプセルはやめ、リーキーキャプセル型を採用することとした。

中性子照射用試片を固定保持し、かつ中性子照射にさらされるキャプセルは Al 棒 3 種 (AIB 3) を用いた長さ 260 mm の円筒状のものに同材質のフランジを両端に取り付け、外径 34.8 mm、長さ 290 mm に仕上げたものである。キャプセル内部はレラクセーション測定用試片 4

本を内壁面に等分に固定し、支柱として SUS 304 を内壁面対称位置に 2 本、中性子照射量測定用フラックスモニターワイヤーを同様に 2 本、および中央部に引張り試片を配置したものからなるリーキーキャプセルである。キャプセルの形状、試片およびフラックスモニターワイヤーの配置を図 11 に示す。この照射用キャプセルはさらに円筒状の Al 製バスケットに二段重ねとし装入される。ただしバスケット下部はキャプセル位置と炉心位置との関係から照射フラックスの分布状態を考慮してスペーサーをもうけてある。バスケットの概略 (キャプセル装荷図) を図 12 に示す。これら全体は炉内冷却水に浸漬され循環冷却されるが、フラックスモニターワイヤーは Al 管にてシールされている。フラックスモニターワイヤーは Ni と Co-Al 合金と Fe とから構成されている。

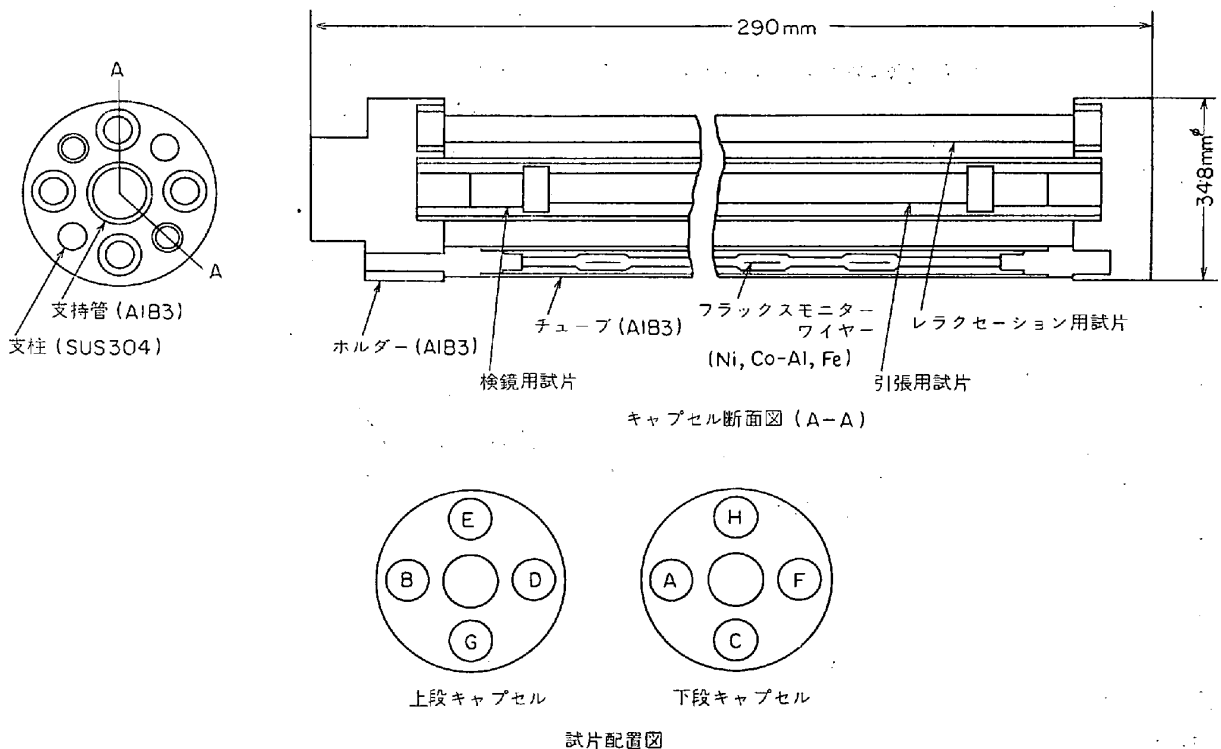


図 11. キャプセル断面図

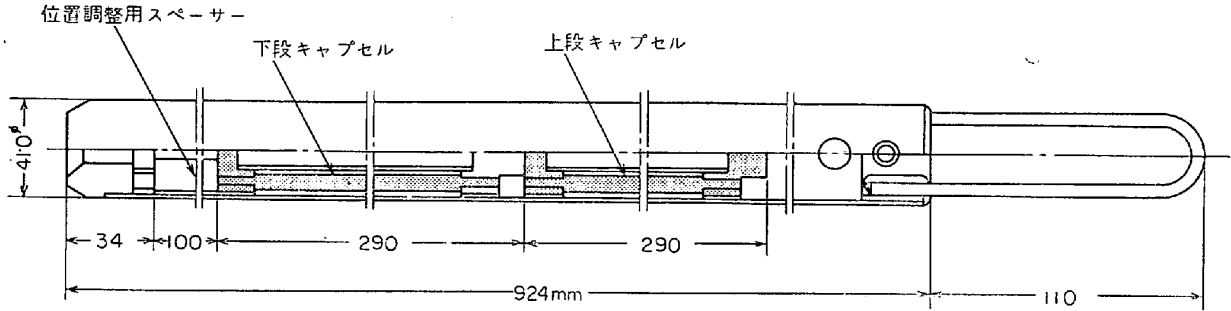


図 12. キャプセル装荷図

4.3 照射条件

試片への中性子照射量は本試験での重要な要素の一つである。PC 小委員会では PC 構造物における使用環境および文献などから検討を加えた結果、照射希望量として  $4 \times 10^{18} n/cm^2$  とすることにした。一方 JMTR 側での見解として、照射量については  $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19} n/cm^2$  の範囲に入ることと、照射孔長手方向の中性子フラックスの分布状況が炉心位置附近をピークとしてやや勾配を有することが報告された。また中性子照射による  $\gamma$  ヒーティングの影響と対策については別項に述べたとおりである。試片への照射時間は 509 時間 (21.2 日) であり、実際の照射量測定値は図 13 に示すとおり  $6.9 \times 10^{18} n/cm^2$  であり、キャプセルの端部 (長手方向) では  $3 \times 10^{18} n/cm^2$  程度になつてゐる。ただし試片長さにして中心から端部までの長さは約 300 mm である。測定は図左側のフラックスモニターから検出したものであるが、炉中心側に面した試片とキャプセル内の反対側の試片では照射量にやや差のあるのが普通である。本照射試

原子炉	JMTR
照射孔	M-12
照射サイクル	6
中性子エネルギー	$> 1 \text{ MeV}$
モニター反応断面積	$\sigma_0(n, p) = 77 \text{ mb}$
照射温度	38°C

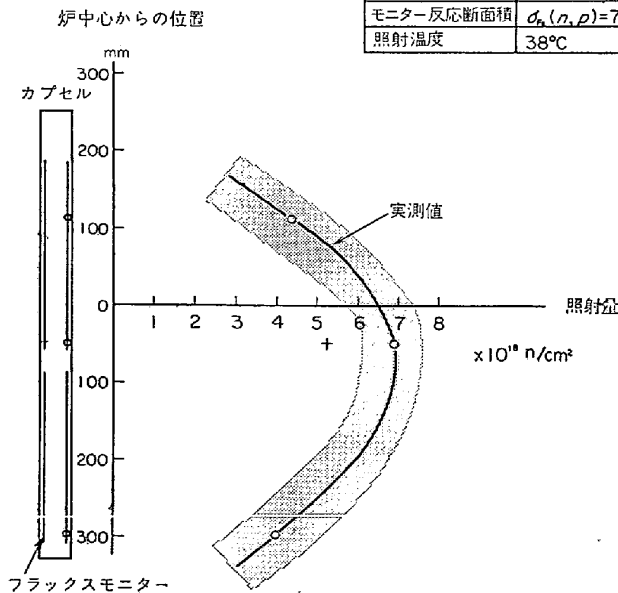


図 13. 照射量分布

験ではフラックスモニターの位置を照射量の多い炉心側に固定できなかつたため図 13 の実測値が照射量の最大値であるとは限らない。キャプセル全体の照射量は図 13 のような範囲にあるものと推測される。

4.4 照射後試験

4.4.1 レラクセーション試験

照射試片は日本原子力研究所東海研究所のホットラボ管理室に運送され、原研側の担当者が測定にあつた。試験は照射影響をみるためメッキ後試片の照射前後について各 25hr 測定を行なつた。初荷重は破断荷重の 70% または降伏点荷重の 80% を目標にしたが、各鋼種について個々の値を採用した関係上一定比率とはなつていない。試験機は鈴木金属工業株式会社で開発した容量 5 t のロードセルタイプレラクセーション測定機である。測

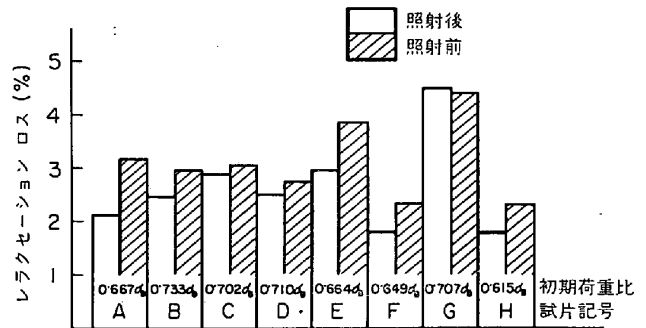


図 14. レラクセーション測定結果 (25hr)

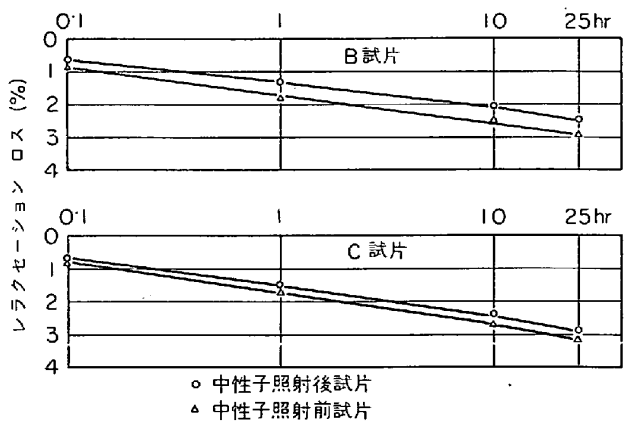


図 15. レラクセーションカーブ

定は初荷重負荷後 1 min 間保持後測定を開始した。記録は X-Y レコーダー (PRO-12) およびストレインアンブ (タイプ 3126) を使用した。試験中の温度変化は大部分  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$  内であり、 $\pm 1 \sim 2^\circ\text{C}$  に変化した部分はおくわずかに記録されただけであった。なお試験は各試片測定前には必ず計測類のチェックを行ない、測定開始後全試片が完了するまで連続して測定を実施した。図 14 に照射前後の試片について破断荷重と初期荷重の比率および 25hr 後のレラクセーション測定値を示し、図 15 に測定カーブの一例を示す。初期荷重の比率は照射前のメッキ試片強度についての値である。図中の記号は試験材料の項に記した鋼種別のものであり、H は低合金鋼線を焼入、焼戻ししたもの、G は低合金鋼を冷間加工したもの、そして A~F は JIS 規定の炭素鋼による PC 鋼線に相当するものである。図 14 にみられるように試片記号 G を除いて照射後のレラクセーションロス値は照射前に比して低下していることが傾向として認められるが、その定量的な把握はこの試料数では困難である。G は他の試片とは異なつた結果を得たが、これが成分系 (G は低合金鋼) の影響か他の因子によるものか、また測定上の誤差なのかはこの段階では判然とはしない。しかしこの試験方法を用いて中性子照射のレラクセーションにおよぼす影響を調査することが可能であることの確信を得た。

#### 4.4.2 引張試験

照射前後試片のうち照射後試片はレラクセーション測定後のものを使用した。試験機は容量 5 t のインストロン引張試験機 (TT-CM 型) を使用し、クロスヘッド速度は毎分 5 mm で行なつた。試験は試片記号 A, B の PC 鋼線として広く使用されている最も一般的なものを選んだ。引張試験結果を表 11 に示す。

この結果照射後の引張り強さ、0.2% 耐力および伸びは A 試片がおのおの  $5 \text{ kg/mm}^2$ ,  $10 \text{ kg/mm}^2$  上昇し、伸びは 1.4% 減少、B 試片は  $16 \text{ kg/mm}^2$ ,  $8 \text{ kg/mm}^2$  上昇し、伸びは 0.5% 減少しており両試片とも引張り強さと 0.2% 耐力が上昇し伸びが減少するという中性子照射による同一傾向を示した。照射後の引張り強さ、0.2% 耐力の増加、伸びの減少は主として照射脆化によるものと考えられるが照射中の時効の影響とさらに照射後にレ

表 11 引張試験結果

試片記号	引張強さ $\text{kg/mm}^2$	0.2% 耐力 $\text{kg/mm}^2$	破断強さ $\text{kg/mm}^2$	伸び %	標点距離 mm	
照射前	A	210.5	168.4	155.6	5.7	155
	B	197.8	168.4	163.3	4.2	155
照射後	A	215.3	178.6	158.2	4.3	155
	B	214.3	176.0	183.7	3.7	165

ラクセーション測定を行なつた試片を供試材としたことによる加工硬化の影響も考慮に入れる必要があり、今後の検討事項の一つである。なお試片製作時に行なつた引張試験 (表 9) と照射前試験の間に若干の差異が認められるがこの点については現在検討中である。

## 5. 考 察

中性子照射後の測定結果を分析すると照射前に比べて、照射後の試片はやや硬化現象を示していると解釈できる。これはレラクセーション値が低合金鋼を冷間加工した G 試片を除き、いずれの試片も照射後試片のレラクセーション値の方が少なくなつていること、および引張り試片では特性が増加し伸び値が減少しているためである。今回のレラクセーション値そのものについては通常の場合 25hr で 2% 前後の値であるが、本試験結果は 3% 前後の値と 1% ほど多くなつている。これは試片のヘッディング部のメッキ厚さが厚くなつていることと、チャックとヘッディングの R 仕上部の微量のズレが緊張力を受けることによつて影響したものと推測され、今後の改善すべき点である。

本実験を照射中のレラクセーション測定として考えてみると、文献に示したロンドン会議資料においては  $4 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$  の中性子照射量ではレラクセーションには影響ないとしているが、本条件の場合  $6.9 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$  の照射量であり、照射後の測定値でも平均して 0.5% ほどのレラクセーション減少値を示している。したがつて照射中は当然その影響を受けているものと推測されるが、ものの一つの要因として試片の温度を考慮せねばならない。本条件は冷却水の温度から試片は  $50^\circ\text{C}$  近いものである。したがつて照射後の  $20^\circ\text{C}$  におけるレラクセーション値が 0.5% 程度減少したとしても、照射前の試片を  $50^\circ\text{C}$  にて測定した場合との関連をつかまねばならない。

一般に  $50^\circ\text{C}$  の温度におけるレラクセーション値は  $20^\circ\text{C}$  の場合に比較して 25hr で約 2% 多くなる。このことから照射中は中性子の影響でレラクセーション値が減少する傾向と  $50^\circ\text{C}$  という温度の及ぼす増加傾向が相殺する現象を示すはずである。本条件の場合はこれらの値からみてむしろ温度影響が強く照射中はレラクセーション値が増加していると推測するが、照射中の組織挙動に関しては学問的説明が待たれるところである。またこのような現象があるとすれば一面からは耐熱材料が望ましいといえる。

レラクセーション測定結果を金属組織学的に分析し関係づけることは今回の目的や条件面での照射フラックス、初期荷重の違いなどから困難であるが、一般的には中性子照射による影響はその種類や強さ、照射時の温度などにより一様ではないが照射により材料は脆くなる。とくに炭素鋼では遷移温度の上昇となつて現われる<sup>3)</sup>。

日米セミナー報告における“鉄鋼における照射効果”<sup>4)</sup>では次のようなことが述べられている。

鉄鋼の照射脆化は主として照射効果を通じて影響を受けるが、金属組織的にみれば構造に敏感な性質として次の因子が上げられる。

組織	}	粒度
		炭化物の形状および分布
		フェライト平均自由行程 介在物、带状組織
化学組成	}	合金元素
		微量不純物元素

組織に関しては粒度が細かく、炭化物の分布が細かいほど照射脆化が少なく、介在物や带状組織は成分元素の影響があるが、それらが偏析するため影響を受けるとされている。成分的には個々の成分および組織的な影響度が検討されており、例えばフェライト中で固溶Cと固溶Nとは同様な挙動を示すが固溶限の大きい固溶Nの方が問題であるし、粒界脆化を生ずるMn、Siなどのオーステナイト粒界への偏析はMoを添加することにより、これら元素の拡散を防止するのに効果的であることや、Crなどは粒界偏析元素の固溶限を下げるので悪い影響を有するとされている。その他の成分についても種々述べられているが、われわれが目的とするPC鋼線についても一部検討を要する部分がある。しかしPC鋼線そのものについての影響はこれらを参考に別途に究明を進めていかねばならない問題である。

この試験はJMTRの試用期間にくり入れられた膨大な試験のごく一部を構成するものであり、諸般の事情で数多くのPC鋼線試片をJMTRに装入することができず、わずか8本の試片が照射試験に供されたにすぎない。本試験はPC鋼線の照射後レラクセーション試験の可能性を見きわめることが目的の一つに考えられていたが、その点については試験方法を確立したものと考える。また中性子照射がレラクセーションに影響を与えることが明らかとなったが、その定量的な把握、成分系の影響、製造条件の影響などについてはこの試験方法を活用した今後の研究に待たねばならない。

## 6. 結 言

5.0 mm の PC 鋼線に  $6.9 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$  の中性子照射を行なった結果、照射後の材料は照射前材料に比較して以下のような現象を示した。

1) 中性子照射後のレラクセーション測定値は炭素鋼 PC 鋼線 6 本と低合金鋼オイルテンパー線 1 本 (SUP-9) は 25hr 後の値ですべて照射後の方が減少している。減少量は 0.16 ~ 1.06% の範囲であり、平均値で 0.57% となる。

2) 同じく炭素鋼 PC 鋼線 2 本の引張り特性は照射後のものが引張り強さ、0.2% 耐力が照射前に比較して増加し、伸びがわずかながら減少している。

3)  $6.9 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$  の中性子照射量はこれらの結果でみる限り、多くはないが試験材料に脆化影響をおよぼしたといえる。

鉄鋼材料の中の PC 鋼線をあつかうわれわれが、中性子照射という全く新しい分野での特性調査に関与しうる機会を得たことは将来に対して大変意義のある経験であると同時に、この新しい分野での調査を長い期間にわたって指導、助言、協力をいただいた JMTR 利用委員長谷川委員長、日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部大内氏、東海研究所ホットラボ管理室本間氏、同じく測定を担当していただいた大塚氏をはじめとする関係者および川崎製鉄、神戸製鋼、新日本製鉄、神鋼鋼線、住友電工、東京製綱、とくに試験機の開発に努力された鈴木金属の委員の方々に深く感謝の意を表します。またこの発表をご許可いただいた日本原子力研究所に感謝いたします。

## 文 献

- 1) A. COWAN and R. W. NICHOLS: Report No 20, London Conference on PCPV held March, 1967
- 2) J. F. MILDOHRAND(G.G.A.): Materials Protection (1970) March, p. 19
- 3) 益田: 原子力工業, (1971) 3, p.24 [日刊工業新聞社]
- 4) 井形: 原子力工業, (1972) 1, p.44 [日刊工業新聞社]