

# 原子炉構造物に用いられるPC鋼材

田 中 義 人\*

## 1. はじめに

発電用原子炉の構造物として、プレストレストコンクリート製圧力容器 (PCPV) や 格納容器 (PCCV) が本格的に採用されてから約 15 年を経過し、その数も PC-PV が約 20 基、PCCV は約 80 基にのぼっている。これらはすべて外国の実績であり、日本では現在までのところプレストレストコンクリート構造物が採用されたものはない。しかし PC 鋼材の側から見れば、日本で製造される PC 鋼材は米国を主体に従来から海外に多くのものが輸出されており、それらが原子炉構造物に用いられたものも少なくなく、あるメーカー 1 社の製品だけでも過去 10 年余りの間に約 15000 t の PC 鋼線あるいは PC 鋼より線が PCCV 用の tendon に用いられている。これら原子炉構造物に用いられる PC 鋼材は、その種類や特性において従来から広く使用されている一般の土木、建築分野での PC 鋼材と基本的には大きく変わるものではない。しかしその用途の重要性、特殊性からくる特別な品質やより緻密な品質管理が要求されるものである。以下それらについて概要をまとめる。

## 2. 原子炉構造物用 PC 鋼材の種類と規格

PC 鋼材の種類は大別して、PC 鋼線、PC 鋼より線および PC 鋼棒の 3 種類があり、それらの中にそれぞれ寸法、強度レベル、製造方法などによって細かく分類される。図-1、図-2 は製造方法を主体にした分類を示したものである。

これらの主なものは日本ではそれぞれの JIS 規格<sup>1)2)</sup>に基本的事項が規定されており、また、諸外国でも同様に公共規格として標準化されている所が多い。原子炉構

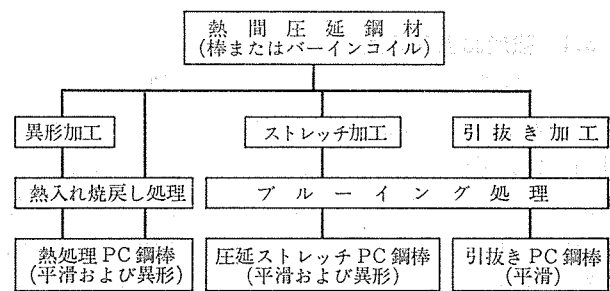


図-2 PC 鋼棒の分類

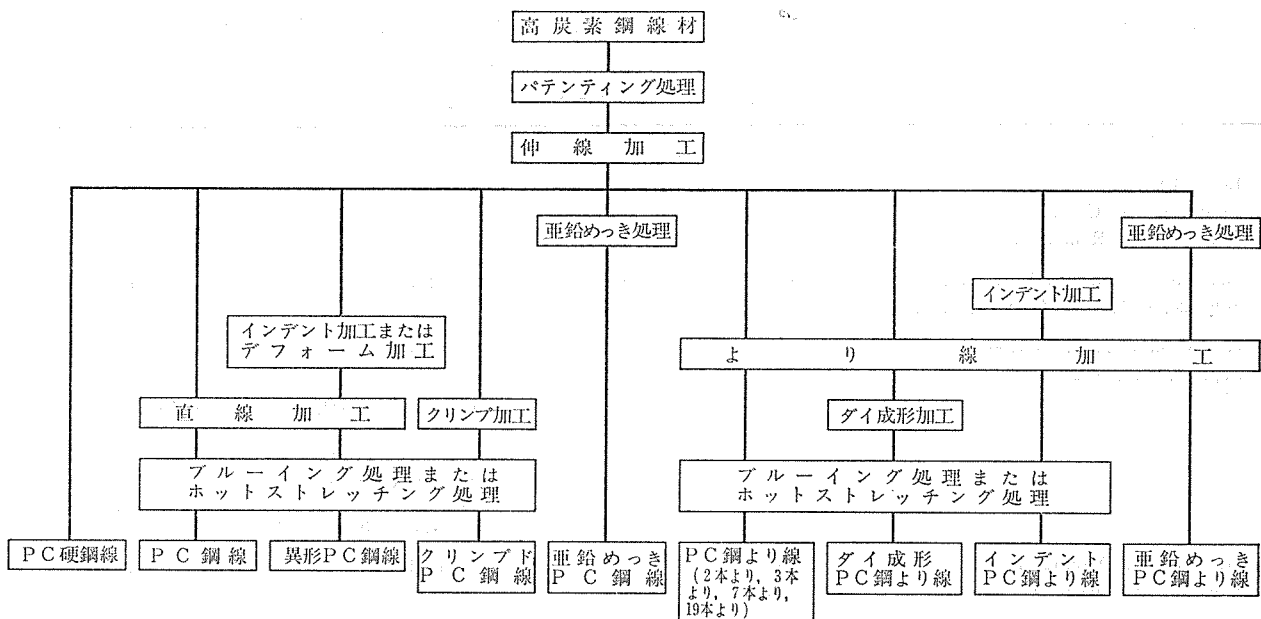


図-1 PC 鋼線および PC 鋼より線の分類

\* 神鋼鋼線工業 (株) 研究開発部第 2 研究室室長

造物に用いられる PC 鋼材も基本的にはこれら既存の規格に合致するものであれば差し支えないというのが一般的である。例えば米国の ASME Code for Concrete Reactor Vessels and Containments<sup>3)</sup> では、プレストレストコンクリート構造物に用いる PC 鋼材はそれぞれ該当する ASTM 規格<sup>4), 5), 6)</sup> に規定されるものであることが原則として定められている。また日本でも日本建築学会で作成された原子力用コンクリート格納容器設計指針案・同解説<sup>7)</sup> では、原則として JIS G 3536 および JIS G 3109 に定められた PC 鋼材を使用することになっている。ただし ASME では PC 鋼材の焼入れ焼戻し処理を禁じており、建築学会の指針案では PC 鋼棒の寸法を、ネジ部の強度低下の関係から 17 mm 以上を原則とするなど、若干の制限が加えられている。また後述するような特別な要求に対応するためには、品質特性、製造方法などの面での通常の PC 鋼材の場合と違った配慮が必要である。

### 3. 原子炉用 PC 鋼材の諸物性

#### 3.1 強度および靱性

強度や靱性の面では、原子炉構造物用 PC 鋼材として特別に要求されることは少なくない。したがって JIS や外国の公共規格に規定された特性のもの、あるいはそれらに準ずる特性をもち、すでに一般的な土木、建築の分野で広く使用されているものは原則的に使用できる。図-3 は JIS およびそれに準ずる各種 PC 鋼材の主なものについて寸法と引張強度の関係を示したものである。

#### 3.2 リラクゼーション物性<sup>7)</sup>

リラクゼーション特性は PC 鋼材にとって基本的に重

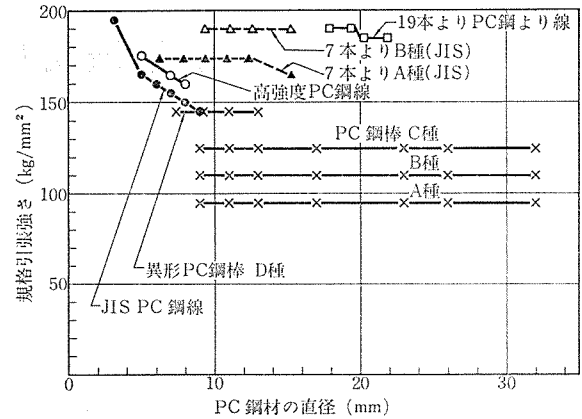


図-3 PC 鋼材の種類別規格強度

要な特性の一つである。すなわちプレストレストコンクリート構造物において初期に与えたプレストレスが長期間にわたって減少せずに保持されるために、PC 鋼材のリラクゼーション（応力緩和とも言い、初期引張応力を与えた後、ひずみを常時一定に保持したとき時間の経過とともに応力が減少する現象）が極力小さいことが必要である。特に原子炉構造物においてはその安全性に対する要求が高いことから、PC 鋼材のリラクゼーションについて特別に規定されることがある。表-1 は米国の原子炉構造物に対する規定例を示すものである。

このようにリラクゼーションについての要求が厳しいことに対して、近年特にリラクゼーション特性の優れた低リラクゼーション PC 鋼線あるいは PC 鋼より線を用いることが一般的になっている。これは PC 鋼線、PC 鋼より線製造の最終工程においてスタビライジング処理（ホットストレッチングあるいはサーモメカニカル処理

表-1 米国におけるリラクゼーション試験規定例

規 格 名	PC 鋼材	初 荷 重	温 度	時 間	リラクゼーション (%)
Bechtel Corp Invitation No. C 12. 1 Jan. 14, 1969 (Rancho Seco 用)	PC 鋼より線 1/2"	—	—	1000 hr の試験により 40 年後の値を保証。 テストの精度証明要。	
General Dynamics 11-R-1, Proj. No. 90 July. 20, 1967, Issue C (Fort. St. Vrain 用)	PC 鋼線 6.35 mm	0.7 P <sub>u</sub> *	120F (48.9°C)	30 年	max. 8.0
Gulf General Atomics R0047 Sep. 24, 1974, Issue B (一般規定)	"	"	150F (66°C)	40 年	max. 8.0
			<ul style="list-style-type: none"> <li>68F (20°C) 1000 hr テストの log-log グラフより 40 年 (350 000 hr) 値を規定する。</li> <li>68F (20°C) 1000 hr では max. 1.8%</li> <li>150F (66°C) 1000 hr テストを 3 heats 以上行う。</li> <li>68F (20°C) と 150F (66°C) あるいは 150F (66°C) とその前後の 8000 時間以上のデータ要。</li> </ul>		
Gulf General Atomics R0056 Nov. 13, 1973, Issue A (一般規定)	PC 鋼より線 270K 1/2"	"	130F (54°C)	40 年	max. 7.5
			<ul style="list-style-type: none"> <li>68F (20°C) 1000 hr テストを行う。</li> <li>68F (20°C) および 120F (49°C) 以上の 8000 時間以上のデータ要。</li> </ul>		

\* P<sub>u</sub>: 規格引張荷重

とも言われる), すなわち引張応力下でのブルーイング(低温焼鈍し)を行ってリラクゼーション特性を改善したものである。PC 鋼材のリラクゼーション特性は初期応力や温度の影響が大きい。図-4, 図-5 はそれらの影響について調査した試験結果の一例であるが, 低リラクゼーション材(スタビライジング材)が普通リラクセ

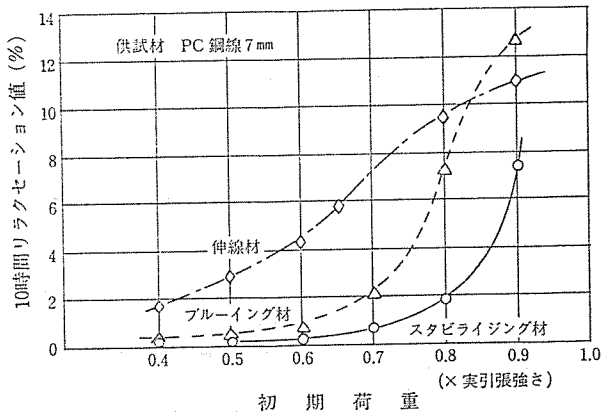


図-4 初期荷重とリラクゼーション値の関係

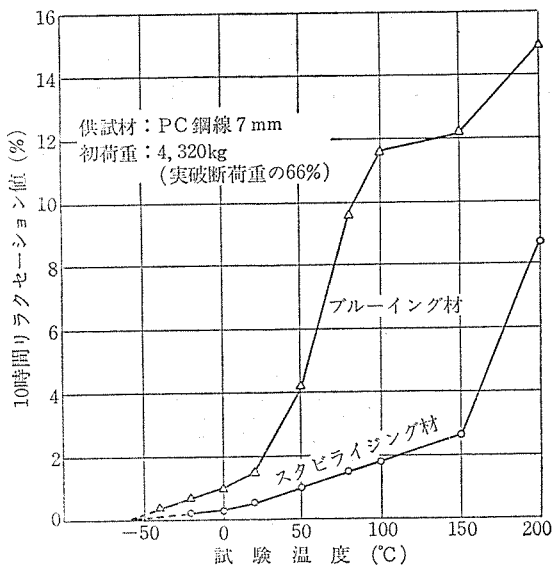


図-5 温度によるリラクゼーション値の変化

ーション材(ブルーイング材)に比べてリラクゼーションが小さく優れていることがわかる。特に温度が上昇してもリラクゼーションの増加が小さいことは, 表-1 に示されるように常温より高い温度での特性が要求される原子炉構造物用の PC 鋼材としてはより有効な材料であるといえる。

一般に PC 鋼材の規格で規定されているリラクゼーション値は短時間の測定値に対するもので, 例えば JIS<sup>2)</sup>では 10 時間値であり, 諸外国の規格では大部分は 1000 時間値で規定している。これらはいずれも鋼材の品質を確認するためだけのものであり, より実用的な長期間のリラクゼーションを検討する場合には, さらに長

期間の試験を実施するが, 何らかの推定によって行われなければならない。構造物の実用期間としては 40 年程度が一般に与えられており, 試験で確認することは実際上は不可能に近い。したがって原子炉用 PC 鋼材の場合, 設計上の長時間リラクゼーション値を必要とする場合は推定により求めることが多い。現在まで提案されているリラクゼーションの推定法の主なものはつぎのようなものがある<sup>3)</sup>。

- 1) 両対数直線近似法: 時間とリラクゼーション値の関係が両対数グラフの上で直線関係になるとして約 1000 時間程度の実測値から直線を延長することによって長時間の値を推定する。
- 2) 1000 時間リラクゼーション値の 3 倍を終局値とする。
- 3) 対数 2 次曲線近似法: リラクゼーション曲線を,  $R_e(t) = A(\log t)^2 + B(\log t) + C$  ( $t$  は時間,  $R_e(t)$  は時間  $t$  におけるリラクゼーション値,  $A, B, C$  は実測値より定まる定数) という関数で近似して, 任意の  $t$  における  $R_e(t)$  を求める。
- 4) Larson-Miller Parameter 法: 高温での短時間のリラクゼーション試験の結果を利用し,  $P = T(C + \log t)$  ( $T$  絶対温度,  $t$  は時間,  $C$  は定数) の形のパラメータから長時間値を求める。
- 5) 多項 e 関数近似: 実測リラクゼーション曲線が,  $R_e(t) = K - \sum_{n=1}^n a_n e^{-\frac{t}{\tau_n}}$  の形の関数で近似できることを利用して, リラクゼーションの進行速度が 0 になる時点を終局状態として, リラクゼーション終局値を求める。

表-2 は PC 鋼線の 8 万時間までの実測値をもとに上記各推定方法による推定値を求めて比較したものである。推定方法により異なる値にはなるが, スタビライジング材とブルーイング材それぞれの概略の水準は判断できると考えられる。また当然のことながら推定法を利用するにしてもできるだけ長時間の実測値に基づく方が精度は上がるものである。

以上はいずれも PC 鋼材単独のリラクゼーションについて考えたものであるが, 実際の構造物中ではコンクリートの乾燥収縮やクリープの影響により, リラクゼーションによるプレストレスの減少率は鋼材単独で考えた場合より小さくなる傾向にある。

### 3.3 温度特性

PC 鋼材はいずれの種類のものも高温にさらされると強度や弾性係数は低下し, 伸びは増加する傾向にある。しかし一般には 200°C 程度までの高温ではその程度はわずかであり, 実用上は大きな問題はないとされている。

表-2 長時間リラクゼーション推定法の比較

供試材 初期荷重 リラクゼーション値 推定法	スタビライジング材				ブルーイング材			
	4 320 kg		(0.655 $P_u$ *)		4 320 kg		(0.663 $P_u$ *)	
	実 測 値		推 定 値		実 測 値		推 定 値	
	1 000 時間値	8 万時間値	1 000 時間より 8 万時間値	8 万時間より 40 年後の値	1 000 時間値	8 万時間値	1 000 時間より 8 万時間値	8 万時間より 40 年後の値
1) 両対数直線近似法 $\log R_e - \log t$	1.15%	2.30%	2.38%	2.91%	3.80	9.80	10.63%	13.31%
2) 1 000 時間リラクゼーション値の 3 倍 $3 \times R_e(1 000)$			—	(3.45%)*2			—	(11.4%)*2
3) 対数 2 次曲線近似法 $R_e(t) = A(\log t)^2 + B(\log t) + C$			2.31%	2.79%			8.57%	12.45%
4) Larson-Miller 法			2.0%	2.3%			8.5%	11.0%
5) 多項 e 関数による推定法			2.30%	2.48% (2.56%)*2			9.80%	13.18% (17.47%)*2

\*1  $P_u$ : 実破断荷重 \*2 終局値

したがって原子炉構造物に用いられる場合も特別な検討はされていないようである。図-6 は PC 鋼線の高温による機械的性質の変化についての試験結果の例を示したものである。また低温における PC 鋼材の特性についてもこれまでに検討された結果によれば  $-100^\circ\text{C}$  程度までは大きな問題はないと考えられている。

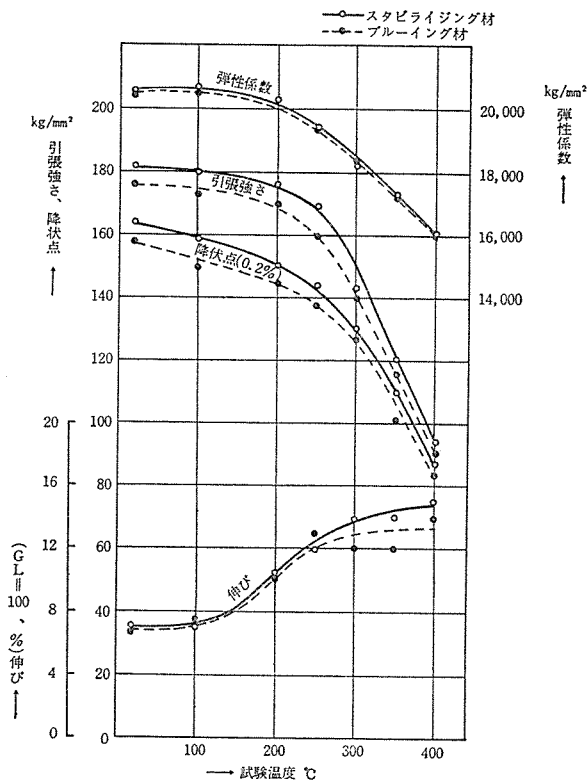


図-6 PC 鋼線 5.0 mm の高温引張特性

### 3.4 応力腐食特性

PC 鋼材は常時その引張強度の 70% 近くの応力が作用した状態で使用されるので、腐食環境がともなうと応力腐食破断や水素脆性破断を生じることがある。一般には冷間加工材である PC 鋼線や PC 鋼より線が焼入れ焼

戻しによる材料（日本では高強度の PC 鋼棒に適用されているが、米国ではすべての PC 鋼材について焼入れ焼戻し方法は禁止されている）が応力腐食感受性が高いとされている。図-7 はそのような傾向を示す応力腐食加速試験の一例を示したものである。しかしいずれにしても PC 鋼材は腐食に対して保護された状態で使用されることが肝要であり、原子炉構造物に使用される場合は特に PC 鋼材の取扱いには注意が払われ、また部材中のテ

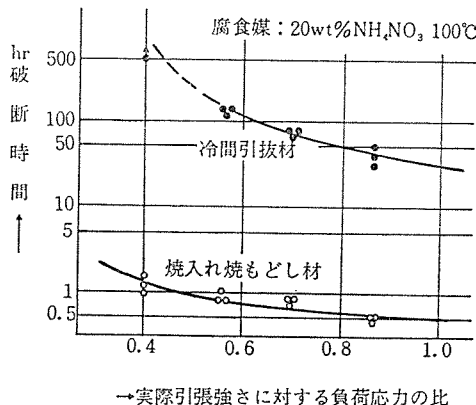


図-7 応力腐食加速試験の一例

ンドンの防せいも一次、二次に分け、使用状態は勿論のこと、施工中も腐食に対する十分な配慮が行われている。例えば米国ではアンボンド方式のテンドンに用いられる防せいグリースに対して  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{S}^-$  など有害成分の許容値を 10 ppm 以下と規定している<sup>3)</sup>。

### 3.5 中性子の影響

原子炉構造物に用いられる鋼材に対する特殊な影響として中性子の影響が考えられる。PC 鋼材が中性子照射を受けた場合の特性については、内外で若干の試験結果が報告されており、特に顕著な変化はないとされている<sup>3)</sup>。

### 3.6 疲労物性

従来の一般的なプレストレストコンクリート構造物で

は PC 鋼材の疲労特性が特別に検討されることは少なかったが、原子炉構造物については PC 鋼材と定着具を一体にしたテンドンシステムとしての疲労特性を検証することが要求される。米国の ASME 基準ではテンドンの疲労試験としてつぎの 2 種類の試験が規定されている。

- 1) High Cycle Dynamic Tensile Test : テンドンの規格強度の 60%~66% の応力範囲での 50 万回の繰返しで破断しないこと
- 2) Low Cycle Dynamic Tensile Test : 同じく 40%~80% の応力範囲での 50 回の繰返し載荷で破断しないこと。

これらの疲労試験に対して PC 鋼材自体が耐えることは当然必要なことであるが、現在一般に使用されている PC 鋼材では特に問題になるようなことはない。上記米国の規定はヨーロッパでも原子炉構造物用 PC テンドンの疲労試験の基準として適用されているようであり、PC 鋼材の疲労特性に対しても一つの目安と考えられる。

#### 4. 品質保証

原子炉本体やそれに付帯する設備、構造物については、その安全性を確保するために使用材料や施工全般を含めて厳しい品質管理による品質保証が要求される。し

たがって PC 鋼材についてもその製造工程や副資材を含めた材料の品質管理は勿論のこと、製造者の品質保証体制が組織的にも整備されていることが要求される。一般のプレストレストコンクリートに用いられる PC 鋼材についても従来から十分な品質管理のもとに製造された製品が出荷されており、またそれらが海外の原子炉構造物でも多くの使用実績があるので、本質的には一般の PC 鋼材に対するものと変わることはないが、製品履歴の記録や追跡性など細かい点では綿密な品質保証体制が要求されるものといえよう。

#### 参 考 文 献

- 1) JIS G 3536, PC 鋼線及び PC 鋼より線
- 2) JIS G 3109, PC 鋼棒
- 3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Division 2, 1980 Edition
- 4) ASTM A 416
- 5) ASTM A 421
- 6) ASTM A 722
- 7) 原子力用コンクリート格納容器設計指針案・同解説, pp. 26~29, 日本建築学会, 昭 53
- 8) プレストレスト コンクリート, Vol. 20, No. 6, Dec. 1978, pp. 7~51
- 9) Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels pp. 229~235, The Institution of Civil Engineers, London 1968

---

#### ◀刊行物案内▶

### プレストレスト コンクリート橋の設計・施工上の最近の諸問題

体 裁 : A 4 判 116 ページ  
 定 価 : 1500 円 送 料 : 450 円  
 内 容 : (1) PC 橋の施工開始前の諸問題, (2) PC 橋の工事ならびに施工管理について,  
 (3) 新しい PC 設計方法について, (4) 最近の話題の橋梁  
 お申込みは代金を添えて, (社) プレストレストコンクリート技術協会へ

---