

「ふげん」第2回圧力管監視試験の健全性評価

1992年10月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

「ふげん」第2回圧力管監視試験の健全性評価

小池 通崇¹，秋山 隆²
石川 敬二²，永松 健次³
新沢 達也⁴，柴原 格²

要 旨

「ふげん」第2回取り出し圧力管材料監視試験片（照射期間8年，高速中性子照射量 5.6×10^{21} n/cm² (E > 1 MeV))の結果について健全性評価を行った。試験項目は，引張，曲げ，腐食及び水素分析である。照射後試験データにより圧力管材料の延性及び脆性上の評価を行った結果，健全であることがわかった。また，腐食による材料の減肉量及び材料への水素吸収量も設計値よりも小さく，良好な結果が得られている。

-
- 1 大洗工学センター，技術開発部，新型転換炉実証炉技術評価グループ
 - 2 大洗工学センター，燃料材料開発部，照射材料試験室
 - 3 ふげん発電所，技術課
 - 4 動力炉開発推進本部

Integrity Evaluations for the 2nd Fugen Pressure Tube Surveillance Test

Mitsutaka Koike¹, Takashi Akiyama²

Keiji Isikawa², Kenji Nagamatsu³

Tatsuya Niizawa⁴, Itaru Shibahara²

Abstract

Integrity evaluations have been performed for the 2nd Fugen pressure tube test (8 years irradiation, $5.6 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)). Test items mainly consist of tensile test, bending test, corrosion test and hydrogen analysis. It has become clear using these data that the pressure tube material has maintained its integrity during the irradiation by the integrity assessment on both tensile and fracture toughness properties. Besides, both thickness loss by corrosion and absorbed hydrogen content were lower than those of design values.

-
- 1 ATR Demonstration Reactor Technology Review Group, Oarai Engineering Center.
 - 2 Material Monitoring Section, Oarai Engineering Center.
 - 3 Technical Section, Fugen Nuclear Power Station.
 - 4 Reactor Development Project.

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験概要	2
3. 試験結果	3
4. 考 察	5
5. 結 言	11
参考文献	12
図・表	13

List of Figures

Fig. 2. 1	Structure of Special Fuel Assembly and Capsule	13
	特殊燃料集合体とキャプセル	
Fig. 2. 2	Core Configuration of the Fugen	14
	「ふげん」炉心配置図	
Fig. 2. 3	Fugen Surveillance Specimen	15
	「ふげん」監視試験片	
Fig. 3. 1	Tensile Test Results (300°C)	16
	引張試験結果 (300°C)	
Fig. 3. 2	Bending Test Results	17
	曲げ試験結果	
Fig. 3. 3	Corrosion Test Results	18
	腐食試験結果	
Fig. 3. 4	Results of Hydrogen Concentration Analysis	19
	水素濃度分析結果	
Fig. 4. 1	Tensile Test Results and S_m Values	20
	引張試験結果と S_m 値の比較評価	
Fig. 4. 2	Predicted Values of Tensile Strength for Fugen Pressure Tube during 30 Years	21
	「ふげん」圧力管の寿命中の引張強さの変化予測	
Fig. 4. 3	Fracture Toughness Values for Pressure Tube with Through Wall Crack	22
	貫通欠陥を有する管の破壊靱性値	
Fig. 4. 4	Estimation of Crack Depth of Infinite Length Surface Crack for Unstable Fracture	23
	無限長の表面欠陥があると仮定した場合に、不安定破壊を起こす欠陥深さの 求め方	

Fig. 4.5	Estimation Curve of Inner Pressure Fracture Toughness for Pressure Tube with Surface Crack	24
	表面欠陥を有する内圧破裂強さの評価線図	
Fig. 4.6	Predicted Values of Fracture Toughness for Fugen Pressure Tube during 30 Years	25
	「ふげん」圧力管の寿命中の破壊靱性の変化予測	
Fig. 4.7	Fracture Toughness for Unirradiated Pressure Tube As a Function of Hydrogen Concentration	26
	未照射材、室温における破壊靱性値（水素含有量の影響）	
Fig. 4.8	Predicted Values of Thickness Loss for Fugen Pressure Tube during 30 Years	27
	「ふげん」圧力管の寿命中の腐食減肉量の変化予測	
Fig. 4.9	Predicted Values of Hydrogen Concentration for Fugen Pressure Tube during 30 Years	28
	「ふげん」圧力管の寿命中の水素濃度の変化予測	

List of Tables

Table 2.1	Number of Specimens for Each Surveillance Test	29
	1回あたりの取り出し監視試験片数	
Table 2.2	Post Irradiation Examination Schedule for Surveillance Specimens	29
	監視試験片取り出し計画	
Table 2.3	Post Irradiation Examination Items for Surveillance Specimens...	30
	監視試験片の照射後試験項目	

1. 緒 言

新型転換炉「ふげん」の圧力管集合体を構成しているジルコニウム合金（Zr-2.5%Nb 合金，熱処理材）製の圧力管については，通商産業省令第62号及び通産省告示 501号に基づいて監視試験を行うことになっている。通商産業省令第62号第12条は次の通りである。「原子炉施設に属する容器であって，1 MeV 以上の中性子の照射を受け，その材料が著しく劣化するおそれのあるものの内部には，別に告示する監視試験片を備えなければならない。新型転換炉「ふげん」では，圧力管と圧力管延長部がこの省令に該当すると考えて，監視試験片を「ふげん」の特殊燃料集合体内部に装荷し，追跡的に順次取り出して試験を行い，健全性を確認していくことになっている。

ここでは，「ふげん」圧力管材料監視試験計画に基づき，照射した圧力管材料についての照射後試験結果を評価したので報告する。今回の圧力管材料監視試験片は1978年3月に「ふげん」の炉心に装荷され，1989年7月（第8回定期検査時）に取り出されたもので，第2回目取り出しの圧力管材料監視試験片である。本報告では，これらの照射された圧力管材料について引張試験，曲げ試験（衝撃試験の代替），腐食試験及び水素分析を行い，「ふげん」の圧力管の設計に用いた設計基準値と得られた結果との比較・評価を行った。

2. 試験概要

監視試験片は、キャプセルに入れられて特殊燃料集合体に組み込まれて、原子炉内で照射されている。Fig. 2.1 に特殊燃料集合体構成図及びキャプセルを示す。又、Fig. 2.2 に「ふげん」炉心配置図を示す。キャプセル内には監視試験片の他に、高速中性子照射量を測定するためのCuとFeのフラックスモニタも収納されている。特殊燃料集合体は、燃料体バンドル中心にキャプセルが入るような構造となっており、周囲に燃料要素が2層に配列されている。この特殊燃料集合体には、1体当たり9個のキャプセルが組み込まれ、原子炉の中間部に回転対称に4体装荷され、監視試験片の累積高速中性子照射量が実際の圧力管と同等以上に、特に中央部のキャプセルについては、照射加速係数を1.1以上として設計している。

Fig. 2.3 にキャプセルに入れられて照射される監視試験片を示す。監視試験片の照射後試験項目は、技術基準上からは引張試験片と衝撃試験片によるものとなっているが、圧力管材料の特殊性を考慮し、靱性特性を評価する方法として、衝撃試験片に代えて曲げ試験片を用いている。この曲げ試験片は、圧力管材料には水素を吸収する性質があり、水素を吸収した状態では常温で脆化する恐れがあるという材料の特殊性を考慮して、圧力管の不安定破壊に対する設計基準として線型破壊力学の概念を取り入れた結果定められたものであり、この試験片による照射後試験で圧力管材料の破壊靱性値を測定し、脆性破壊に対する健全性を評価している。さらに、水素吸収量等の評価のために、腐食試験片を追加するとともに、監視試験片の取り出し回数についても基準上3回以上になっているが8回と多くしている。

Table. 2.1 に1回あたりの取り出し監視試験片数を、Table. 2.2 に監視試験片取り出し計画を示す。また、Table. 2.3 に監視試験片の照射後試験項目を示す。

3. 試験結果

(1) 監視試験片の照射履歴

照射履歴と積算照射量を以下に示す。

①履歴

1978年3月「ふげん」に装荷

1989年7月「ふげん」より取り出し

②積算照射量

約 $5.4 \sim 5.7 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$

(設計照射量 最大 $3 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$)

(2) 照射後試験結果

第2回取り出し監視試験片の実績値は、次表のとおりであり、予測（JMTR, SGHWRで照射した先行照射試験及び第1回監視試験片取り出し結果^{1) 2)}からの予測）とほぼ一致した。試験方法の詳細は、文献1)及び2)に記したものと同一である。

項目		設計値*1	初期値	実測値**2	
				max又はmin	平均
引張強さ (kg/mm ²)	室温	> 54.9	86	104.4 (min)	107.7
	300℃	> 54.9	60	78.0 (min)	82.2
破壊靱性 (kg/mm ^{3/2})	室温	> 39.3	197	123 (min)	148
	300℃	> 45.6	239	198 (min)	204
腐食減肉量 (mm)		< 0.31	0	0.0115 (max)	0.0111
水素濃度 (ppm)		< 211	< 25 約10	35 (max)	30.6

注) *1 : 設計照射量 $3 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$, 照射期間30年

*2 : 累積照射量約 $5.6 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$, 照射期間8年

今回の取り出し圧力管監視試験片は、照射による経年変化後も設計条件を満たしており、「ふげん」圧力管の健全性が確認された。詳細は4章参照とする。

また、今回の試験を採り入れた推定では、寿命30年にわたって圧力管の設計基準を満足すると考えられる。詳細は4章参照とする。

①引張試験

引張試験により、引張強さ、降伏応力(0.2%耐力)、絞り及び伸びを求めた。Fig. 3.1に前回までの結果もあわせて示す。引張強さは照射初期に約20~30%増加し、伸びはやや低下しているが、その後変化はない。

②曲げ試験

治具を用い、曲げ破壊試験によって破壊靱性値を求めた。破壊靱性値は照射初期に漸減しているが、照射が進むにつれて低下割合は小さくなる。また、「ふげん」の運転温度約300℃では照射による靱性の低下は少ない。Fig. 3.2に結果を示す。

③腐食試験

重量法により腐食増量を求め、それから減肉量(腐食代)を計算した。腐食による減肉量は、設計式を下回った。Fig. 3.3に結果を示す。

④水素濃度

Fig. 3.4に結果を示す。水素吸収量は約10ppm/8年であり、設計予測値7ppm/年(最大211ppm)に比べて小さく良好であった。

4. 考 察

(1) 引張試験

Fig. 4.1 に健全性評価のための図を示す。今回のデータの0.2%耐力及び引張強さの最小値について、0.2%耐力についてはその2/3、引張強さについてはその1/3を室温及び300℃でプロットしたものである。これらの値が圧力管の許容応力強さ $S_m = 18.3 \text{ kg/mm}^2$ を上回っているので、引張特性に関して圧力管は健全であると評価できる³⁾。

引張強さは照射によって初期に大きくなる (Irradiation Hardening, 照射硬化) が、その後一定となっている⁴⁾。この考えを用いて、「ふげん」圧力管の寿命中の引張強さの変化予測をして、Fig. 4.2 にそれを示す。評価式は以下に示す (300℃)。

$$\sigma_B = \frac{-30.4}{t_Y + 1.17} + 86 \quad (1)$$

ここで、引張強さを σ_B (kg/mm^2)、稼働率を75%とした1年を t_Y とする。

(2) 曲げ試験

破壊靱性値 K_c の平均及び最小値については3章に示されている。このうち室温と300℃について考察を行っていく。

①安全率の計算

(イ) 貫通欠陥を仮定したときの限界欠陥長さ (CCL)

貫通欠陥があると仮定したときの限界欠陥長さは、これまでの研究データを用いて作ったFig. 4.3³⁾を利用すると求まる。圧力管の設計応力が 18.3 kg/mm^2 であるから、この図に室温と300℃の平均、最小の破壊靱性値を内挿によって示すと、CCLが求まる。以下にその結果を示す。安全率は、「ふげん」の設計に用いた仮定初期欠陥³⁾ (ケースII, 長さ5.0 mm, 深さ0.4 mm) の30年後の進展を計算して得られた欠陥長さ (ケースII, 長さ5.0 mm → 6.3 mm) に対する比をもって求めた。

貫通欠陥のときのCCL (mm)		
温 度	平均 K _c	最小 K _c
300℃	32mm (安全率 5.1)	30mm (安全率 4.8)
室 温	21mm (安全率 3.3)	16mm (安全率 2.5)

(ロ) 無限長の表面欠陥があると仮定した場合に不安定破壊を起こす欠陥深さ

上記欠陥深さはFig. 4.4³⁾を用いて求めた。この図は小林⁵⁾らにより有限要素法によって得られたものである。(2), (3)式から得られる(4)式のグラフと有限要素法のグラフの交点のa(深さ)を求めた。

$$K = F \cdot \delta \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$\sigma = p R / t = 18.3 \text{ kg/mm}^2 \quad (3)$$

$$F = \frac{K_c}{67.26 \sqrt{\frac{a}{t}}} \quad (4)$$

以下に無限長の表面欠陥があると仮定した場合の不安定破壊を起こす欠陥深さをK_cの平均及び最小についてまとめた。安全率は、仮定初期欠陥(ケースII, 長さ5.0mm 深さ0.4mm)の30年後の進展を計算して得られた欠陥深さ(ケースII, 長さ0.4mm → 1.05mm)に対する比で示した。

無限長表面欠陥のときに不安定破壊する欠陥深さ (mm)		
温 度	平均K _c	最小K _c
300℃	2.84mm (安全率2.7)	2.8mm (安全率2.7)
室 温	2.5mm (安全率2.4)	2.3mm (安全率2.2)

②評価

(イ) 破壊靱性値の評価

ケースⅡの仮定欠陥寸法（30年後，長さ6.3 mm，深さ1.05 mm）に対する運転時の応力拡大係数は $22.8 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 。水圧試験時の応力拡大係数は $26.2 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ である³⁾。このとき，以下の条件が満たされていることが必要である。

(i) 運転時の応力拡大係数 $\times 2 < K_c$

(ii) 水圧試験時の応力拡大係数 $\times 1.5 < K_c$

結果は次の通りである。

(i) については，	$22.8 \times 2 = 45.6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$	$< 204 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ (平均)
	〃	$< 198 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ (最小)
(ii) については，	$26.2 \times 1.5 = 39.3 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$	$< 148 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ (平均)
	〃	$< 123 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ (最小)

となり，十分な余裕をもって条件を満足している。

(ロ) CCLの評価

ケースⅡの仮定欠陥長さ6.3 mm（30年後）が，貫通欠陥に対するCCL及び仮定欠陥深さ（ケースⅡの1.05 mm）に対するCCLに対して次の安全率を有することが必要である³⁾。

(i) CCLの最小値に対し，安全率が1以上。

(ii) CCLの平均値に対し，安全率が2以上。

Fig. 4.5より，仮定欠陥深さ（1.05 mm）と $\sigma = 18.3 \text{ kg/mm}^2$ （許容応力強さ）の値を用いて $K_c = 80 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ のときの交点を求めると，交わず従ってCCLは無有限大となる。これより大きい K_c である今回のデータでは，CCLは無有限大となる。貫通欠陥に対するCCLは①を参照とする。以下に安全率を示す。(i) (ii)とも満たしている。貫通欠陥に対する評価は運転温度についてのみであるので，室温のは参考としておく。

C C L の 安 全 率				
温 度	深さ1.05mmの欠陥に対するCCLの安全率		貫通欠陥に対するCCLの安全率	
	平均K _c	最小K _c	平均K _c	最小K _c
300℃	∞	∞	5.1 (32mm/6.3mm)	4.8 (30mm/6.3mm)
室温 (参考)	∞	∞	3.3 (21mm/6.3mm)	2.5 (16mm/6.3mm)

(ハ) 無限長欠陥の評価

無限長の表面欠陥があると仮定した場合に不安定破壊を起こす深さが、30年後の仮定欠陥深さ1.05mmに比して以下の安全率を有していることが必要である³⁾。

- (i) 不安定破壊を起こす欠陥深さの最小値に対し安全率1以上
- (ii) 不安定破壊を起こす欠陥深さの平均値に対し安全率2以上

②の結果を用いると安全率は以下の様になる。判定結果は300℃で、室温は参考とする。(i) (ii)とも満たしている。

無限長欠陥の安全率		
温 度	平均K _c	最小K _c
300℃	2.7 (2.84mm/1.05mm)	2.7 (2.8mm/1.05mm)
室温 (参考)	2.4 (2.5mm/1.05mm)	2.2 (2.3mm/1.05mm)

③「ふげん」圧力管の寿命中の破壊靱性の変化予測

「ふげん」圧力管の寿命中の破壊靱性の変化予測をFig. 4.6に示す。照射初期の破壊靱性値の低下は照射脆化によるもので、その後は水素吸収に伴う水素脆化と考えられる。300℃での水素脆化はほとんどないので⁶⁾、第1回監視試験後はほぼ一定と考えられる。室温での破壊靱性値は水素吸収に伴う水素脆化を考慮した。

後述するFig. 4.9に示す圧力管寿命中の水素濃度の変化予測値を用いて、Fig. 4.7からその水素濃度での靱性値を求めて、プロットしたものがFig. 4.6である。Fig. 4.7には圧

力管バースト試験のデータを示してある。曲げ試験はこれより小さい値を示すものと保守的に考えて⁶⁾、第1回監視試験片(曲げ試験)での靱性値とバースト試験の靱性値の比を求めた。この比に従って、曲げ試験片の靱性値は水素濃度に対して減少していくとして、Fig. 4.7にその評価直線を引いた。この直線を用いて、「ふげん」圧力管の寿命中の破壊靱性値の変化予測をし、Fig. 4.6を得た。

以下に評価式を示す。

$$K_{IC}(\text{室温}) = \frac{170}{t_Y + 1.39} + 100 \quad (5)$$

$$K_{IC}(300^\circ\text{C}) = \frac{65.4}{t_Y + 1.27} + 190 \quad (6)$$

ここで、 K_{IC} の単位は $\text{kg}/\text{mm}^{3/2}$ である。

(3)腐食試験

腐食試験の結果から、圧力管の減肉に関する安全裕度を見積る。腐食は照射日数(75%出力換算)の関数と考えられるので以下の様に考えていく。

設計腐食量 : 310 μm (30年寿命末期)

30年日数 : 30 \times 365 日 \times 0.75

上記値を用いると今回の設計腐食量は次の様になる。

$$\text{照射日数} : \frac{2493}{30 \times 365 \times 0.75} = 94 \mu\text{m}$$

重量法によると浸食深さは最大11.5 μm と求まった。従って、安全係数は、

$$\frac{94}{11.5} = 8.2 \quad (7)$$

となり、8.2倍の裕度があるといえる。

「ふげん」圧力管の寿命中の腐食減肉量の変化予測をFig. 4.8に示す。時間に対して \sqrt{t} に載っている⁷⁾ので、安全側に全データの包絡線を考えると、評価式は次の様になる。

$$C = 0.05 \sqrt{t_Y} \quad (8)$$

ここで、 C は腐食減肉量(μm)、 t_Y は75%稼働率での時間(年)である。

(4)水素濃度

製造時圧力管の水素濃度が ≤ 25 ppmで30年後の設計値が211 ppmであるので、第2回監視試験時（稼働率75%で9.1年）での設計水素濃度は、81 ppmとなる。今回データの最大値が35 ppmなので、安全率は次の通りとなる。

$$\frac{81}{35} = 2.3 \quad (9)$$

「ふげん」圧力管の寿命中の水素濃度の変化予測をFig. 4.9に示した。水素吸収は腐食と関連がある⁸⁾ので、 $\sqrt{t_Y}$ に従うとして、以下の評価式を得た。

$$H = 5.2 \sqrt{t_Y} + 15 \quad (10)$$

ここでHは水素濃度（ppm）， t_Y は稼働率75%での時間（年）である。

5. 結 言

「ふげん」第2回取り出し（照射期間8年，高速中性子照射量 $5.6 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ （ $E > 1 \text{ MeV}$ ））圧力管材料監視試験片の照射後試験を行った結果，以下に示すように材料の健全性を示す結論が得られた。

(1) 引張試験

室温及び300°Cともに，引張強さ σ_{ut} ，0.2%耐力 σ_y が設計応力強さ S_m に対して， $\sigma_{ut} > 3 S_m$ ， $\sigma_y > 3/2 S_m$ を満たした。健全である。

(2) 曲げ試験

K_c 値は運転時及び水圧試験時に対し十分大きな値を有している。また，計算での限界欠陥長さ（CCL）評価等によると十分大きな安全率を有している。

(3) 腐食試験

浸食深さは最大11.5 μ で，設計値よりかなり低い。良好である。

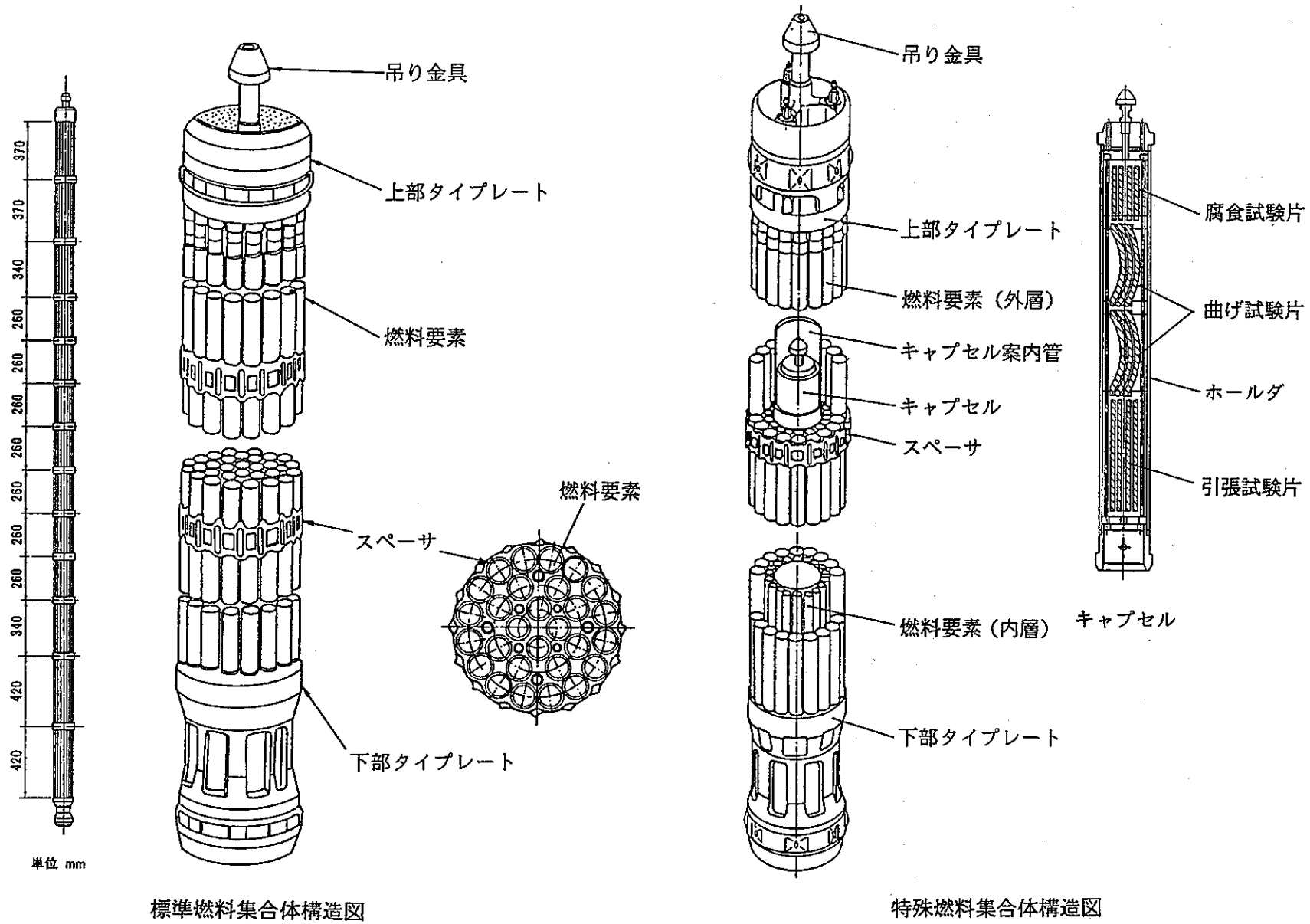
(4) 水素分析

水素濃度は28～35ppmの範囲内ではばらつきは小さかった。設計値よりも水素吸収量は少なく良好である。

(5) 今回の試験結果をとり入れて，寿命30年間の各特性値の推定を行ったところ，寿命30年にわたって，圧力管は設計基準を満足するものと考えられる。

参 考 文 献

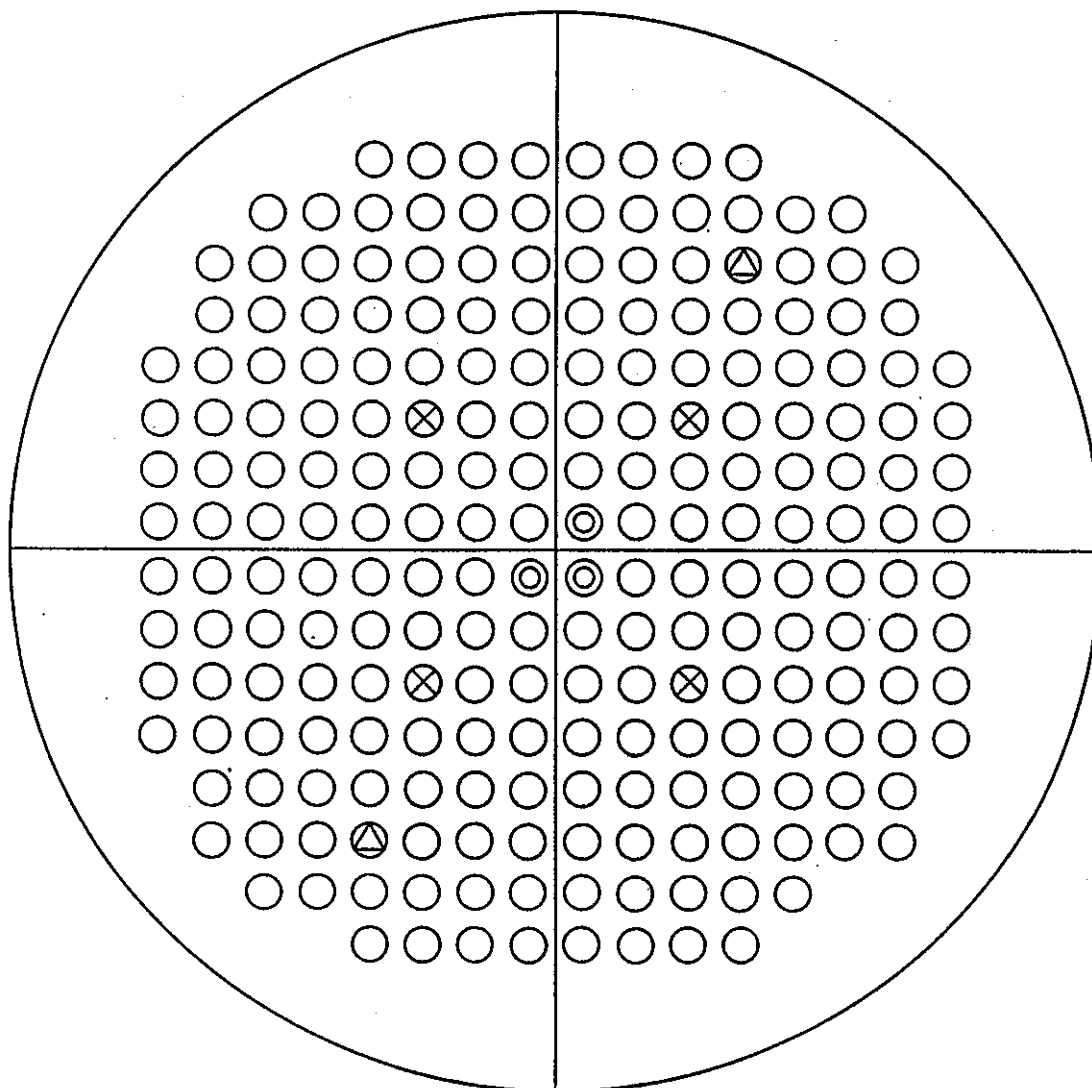
- 1) 小池, 谷山, 小峰 ほか, 「ふげん」圧力管材料の監視試験, PNC ZN9410 86-078 (1986) .
- 2) 小池, 浅田, 宮本, 谷山, 小峰, 新型転換炉「ふげん」圧力管材料の照射及び照射後試験, 動燃技報No.66, 資料番号66-1 (1988) , P.20.
- 3) 新型転換炉開発本部, 「ふげん」圧力管監視試験の試験法及び評価法, PNC ZN341 83-12 (1983) .
- 4) 軽水炉燃料のふるまい (原子力安全研究協会) , 平成2年7月, P.83.
- 5) A. S. Kobayashi, D. E. Maiden, B. J. Simon, S. Iida, Application of Finite Element Analysis Method to Two-Dimensional Problems in Fracture Mechanics, ASME Paper 69-WA/PVP-12 (1969).
- 6) 柴藤, 小口, 岸, 北川, 日立評論, 26巻No.8 (1977); P.245.
- 7) E. Hillner, Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP633 (1977), P.211.
- 8) H. Stehle, W. Kaden, R. Manzel, Nuclear Engineering and Design, Vol.33 (1965), P.155.



標準燃料集合体構造図

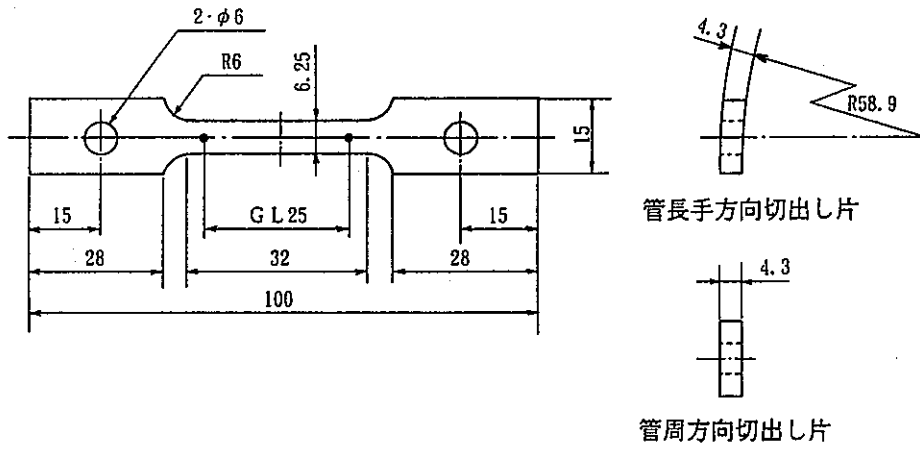
特殊燃料集合体構造図

Fig. 2.1 Structure of Special Fuel Assembly and Capsule
特殊燃料集合体とキャプセル

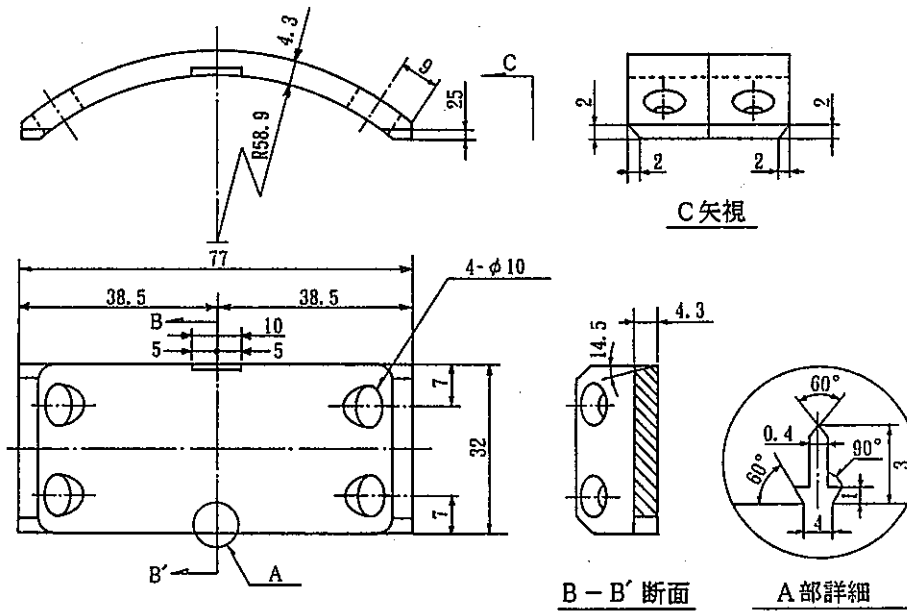


記号	名称	数(体)
○	標準燃料集合体	215
⊗	特殊燃料集合体	4
◎	照射用36本燃料集合体	3
△	照射用セグメント燃料集合体	2

Fig. 2.2 Core Configuration of the Fugen
「ふげん」炉心配置図



圧力管材料引張試験片 (単位: mm)



圧力管材料曲げ試験片 (単位: mm)

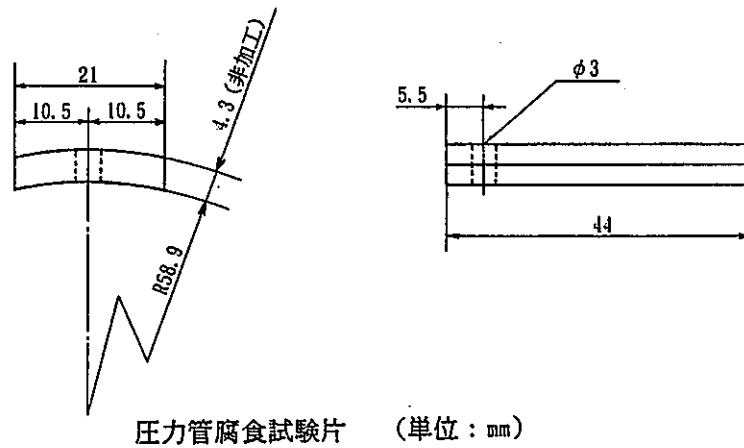


Fig. 2.3 Fugen Surveillance Specimen
「ふげん」監視試験片

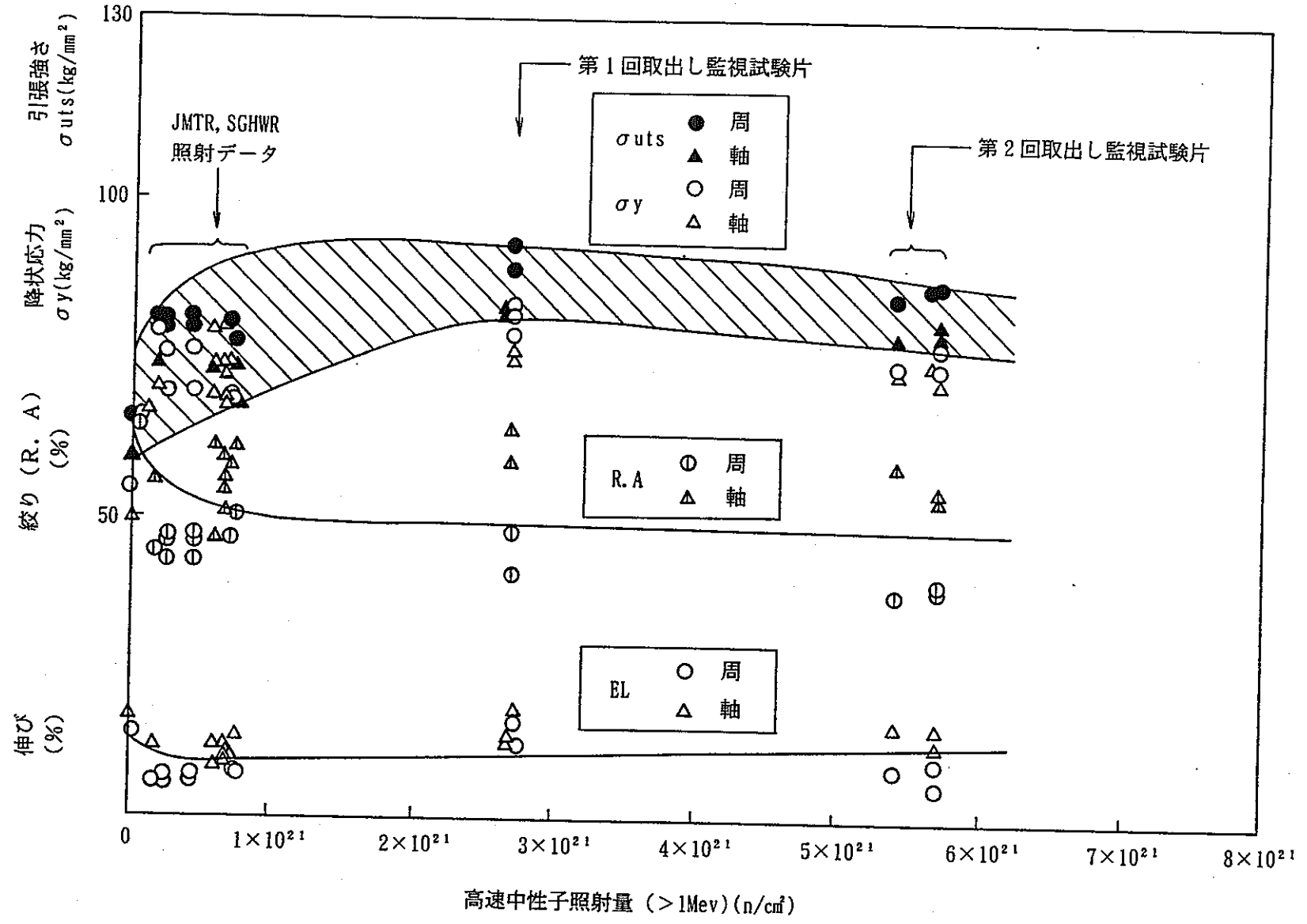


Fig. 3.1 Tensile Test Results (300°C)
引張試験結果 (300°C)

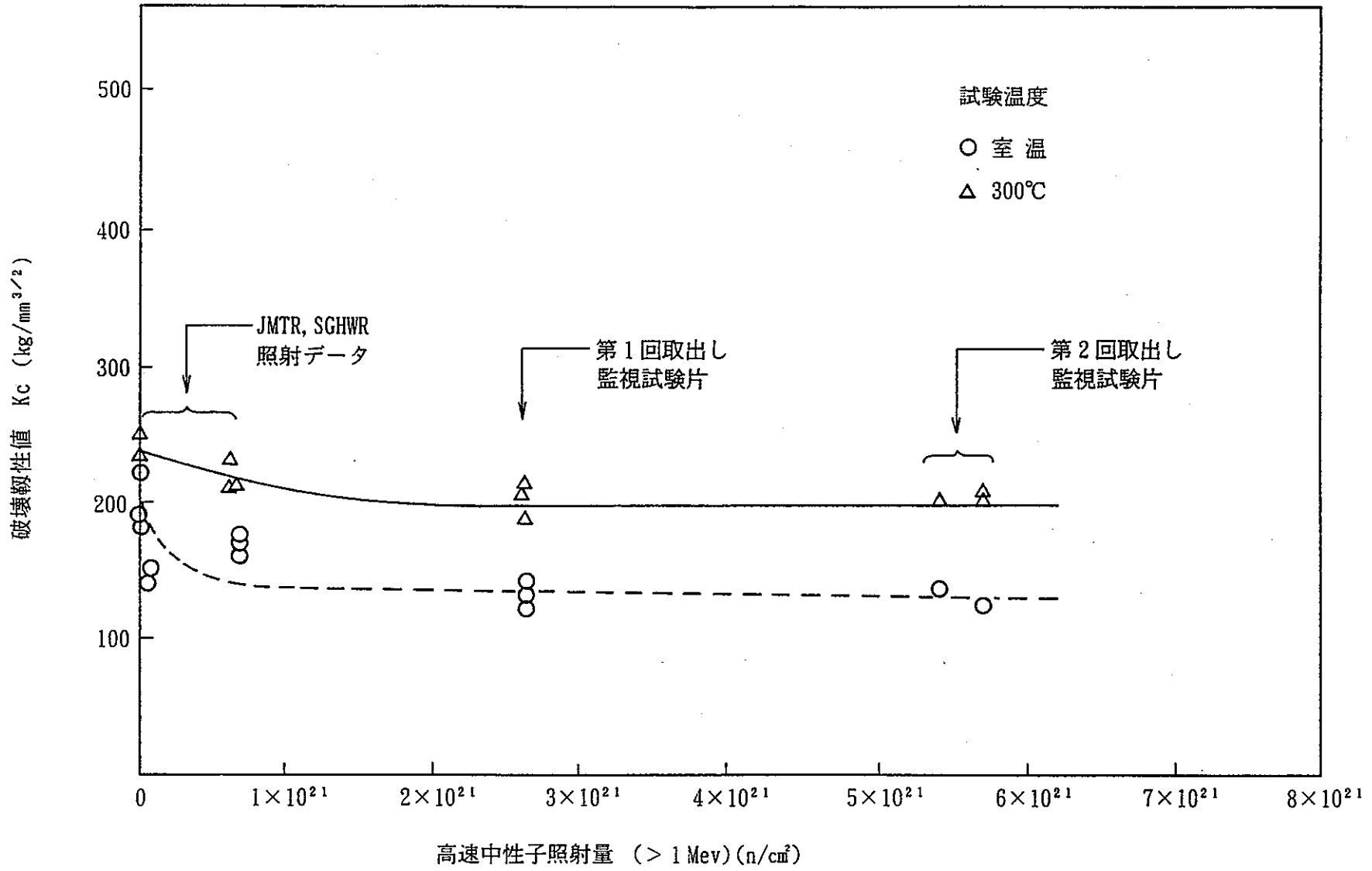


Fig. 3.2 Bending Test Results
 曲げ試験結果

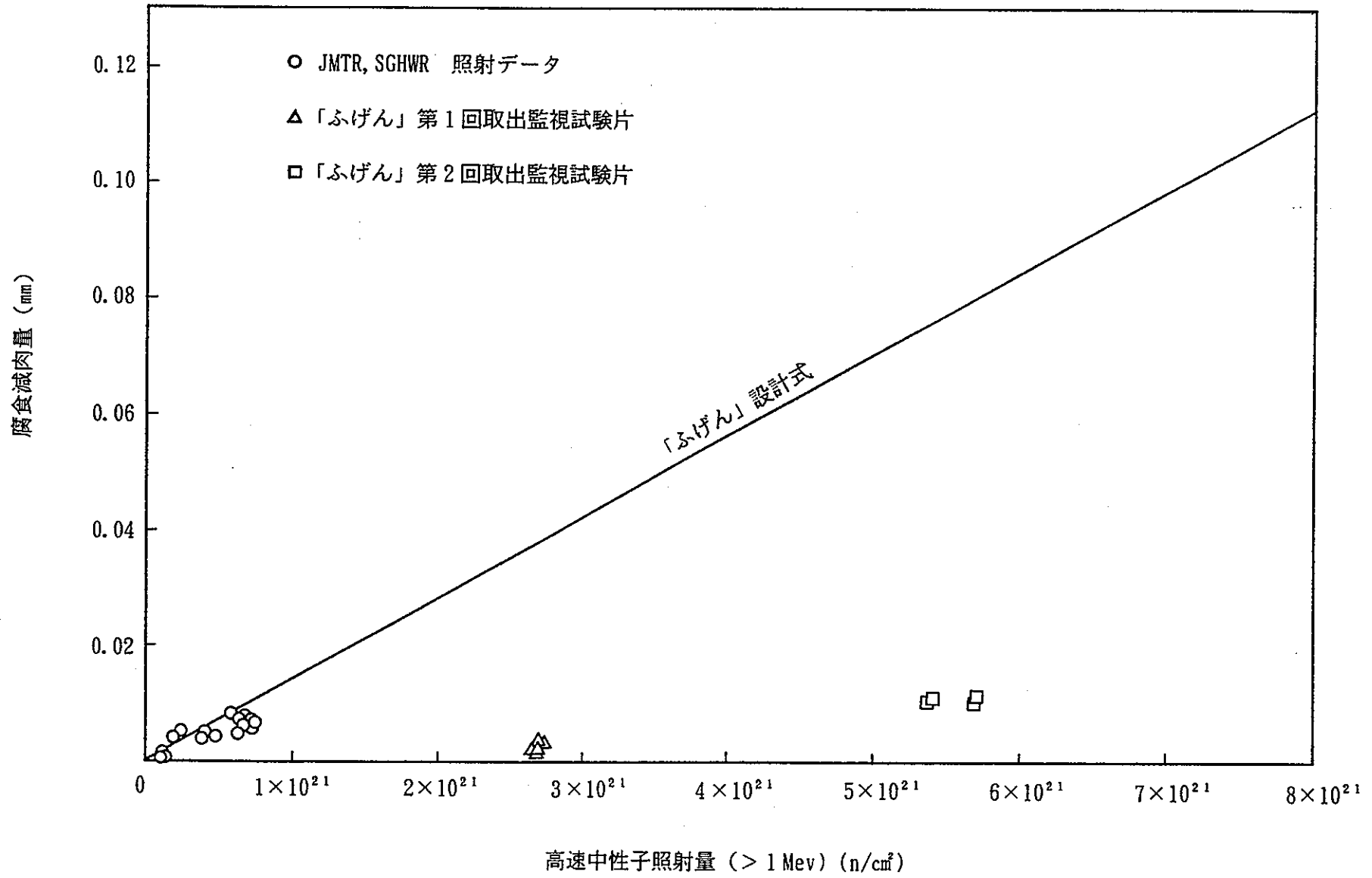


Fig. 3.3 Corrosion Test Results
腐食試験結果

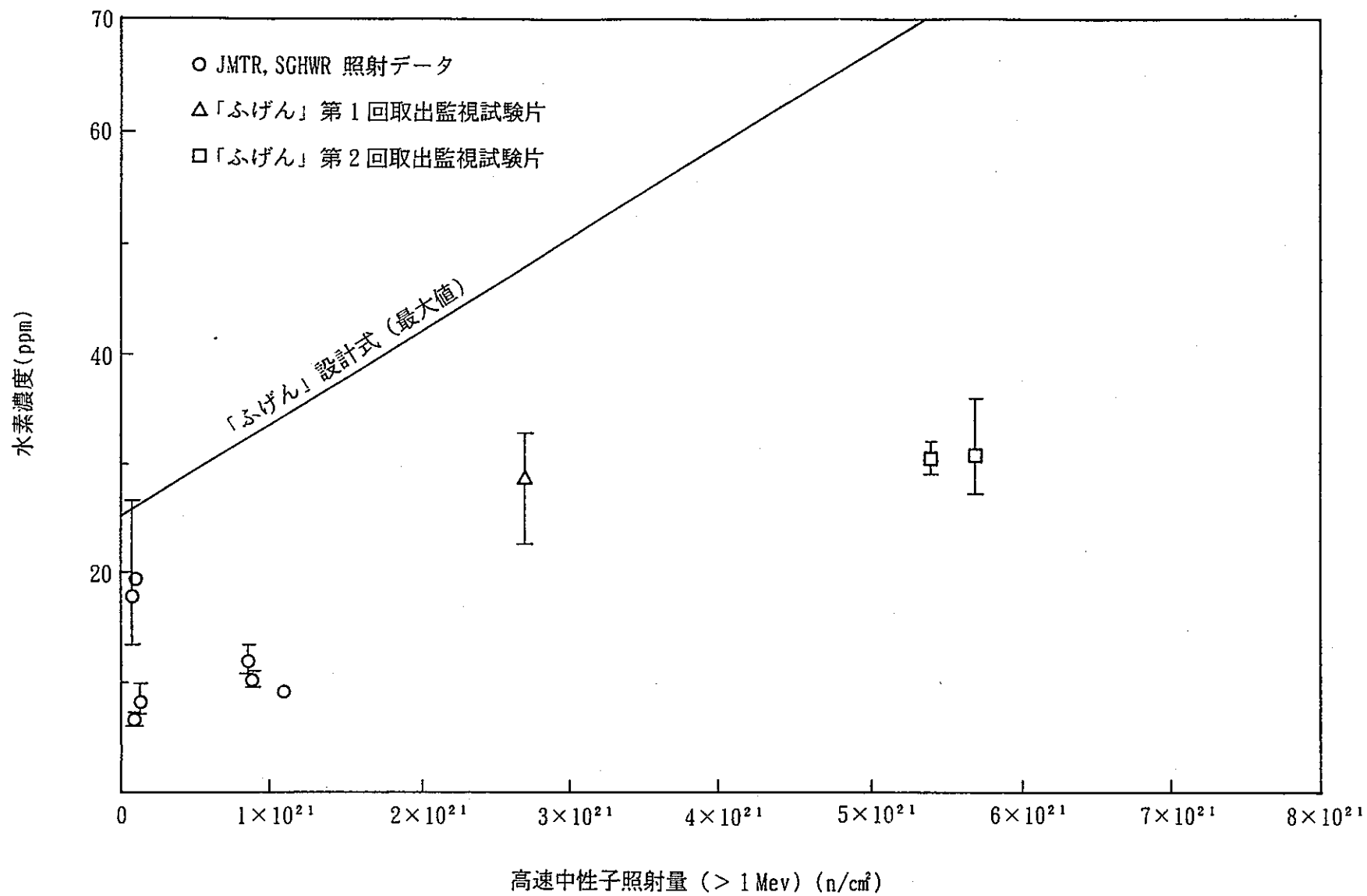


Fig. 3.4 Results of Hydrogen Concentration Analysis
 水素濃度分析結果

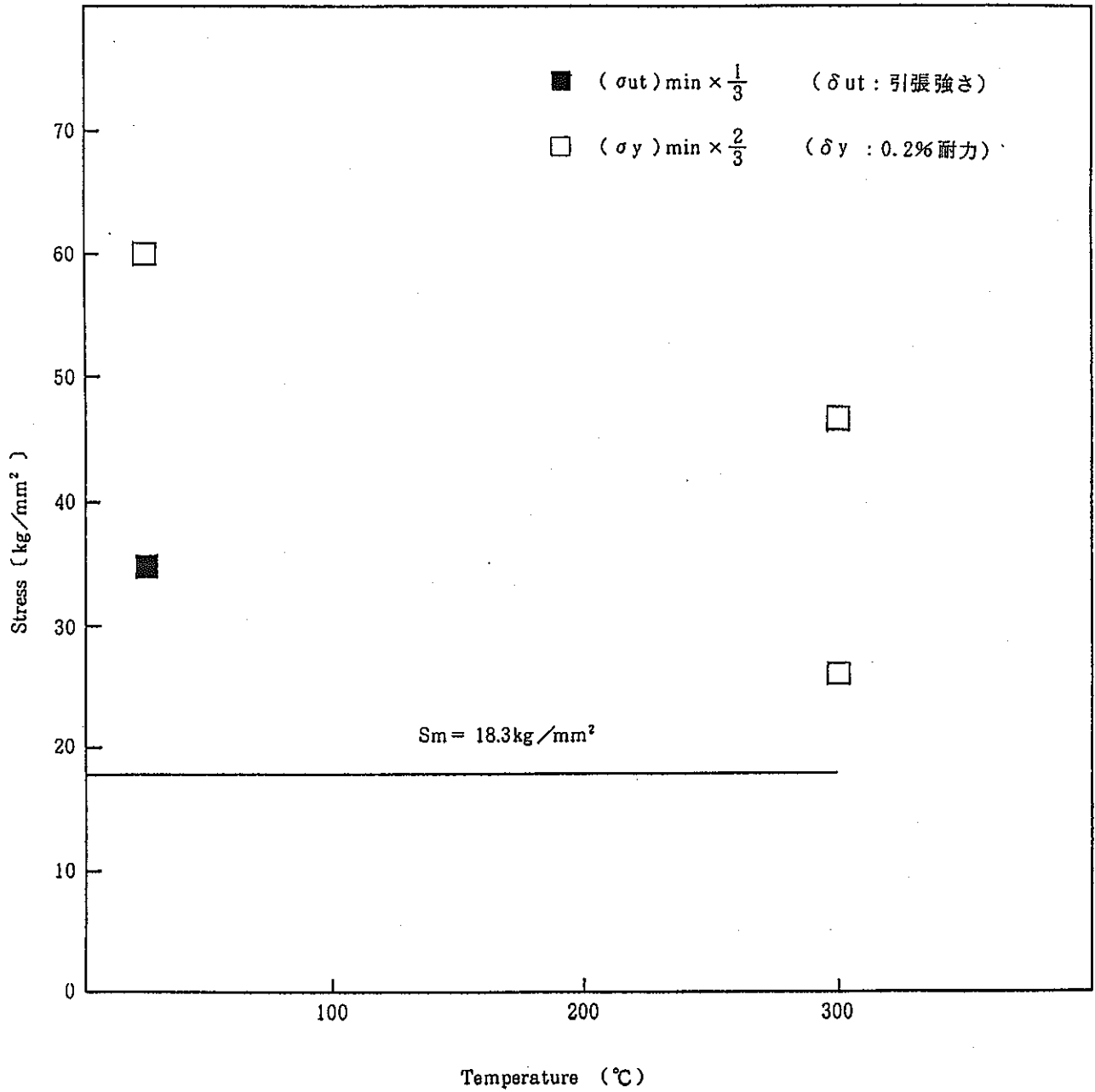


Fig. 4.1 Tensile Test Results and S_m Values
 引張試験結果と S_m 値の比較評価

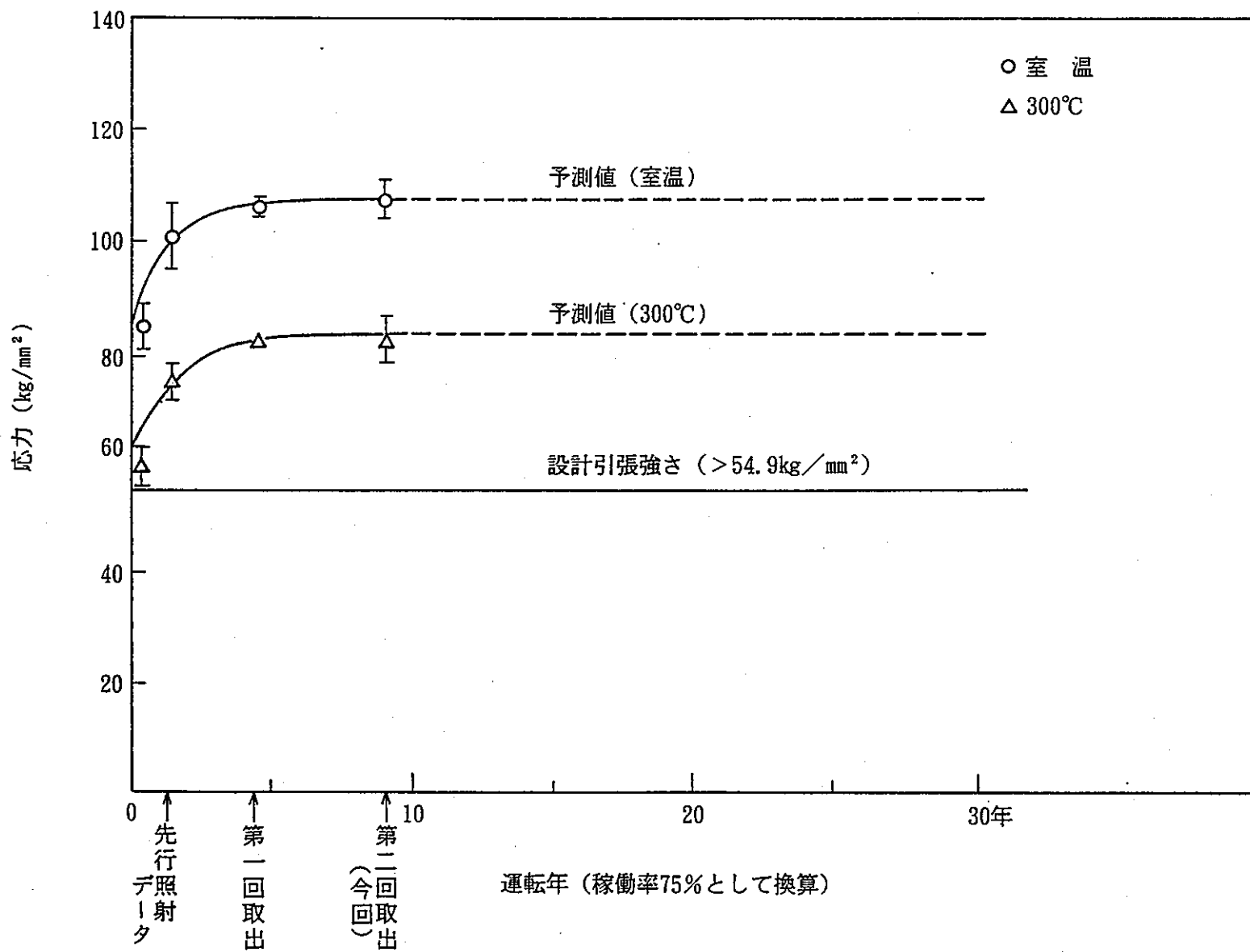


Fig. 4.2 Predicted Values of Tensile Strength for Fugen Pressure Tube during 30 Years

「ふげん」圧力管の寿命中の引張強さの変化予測

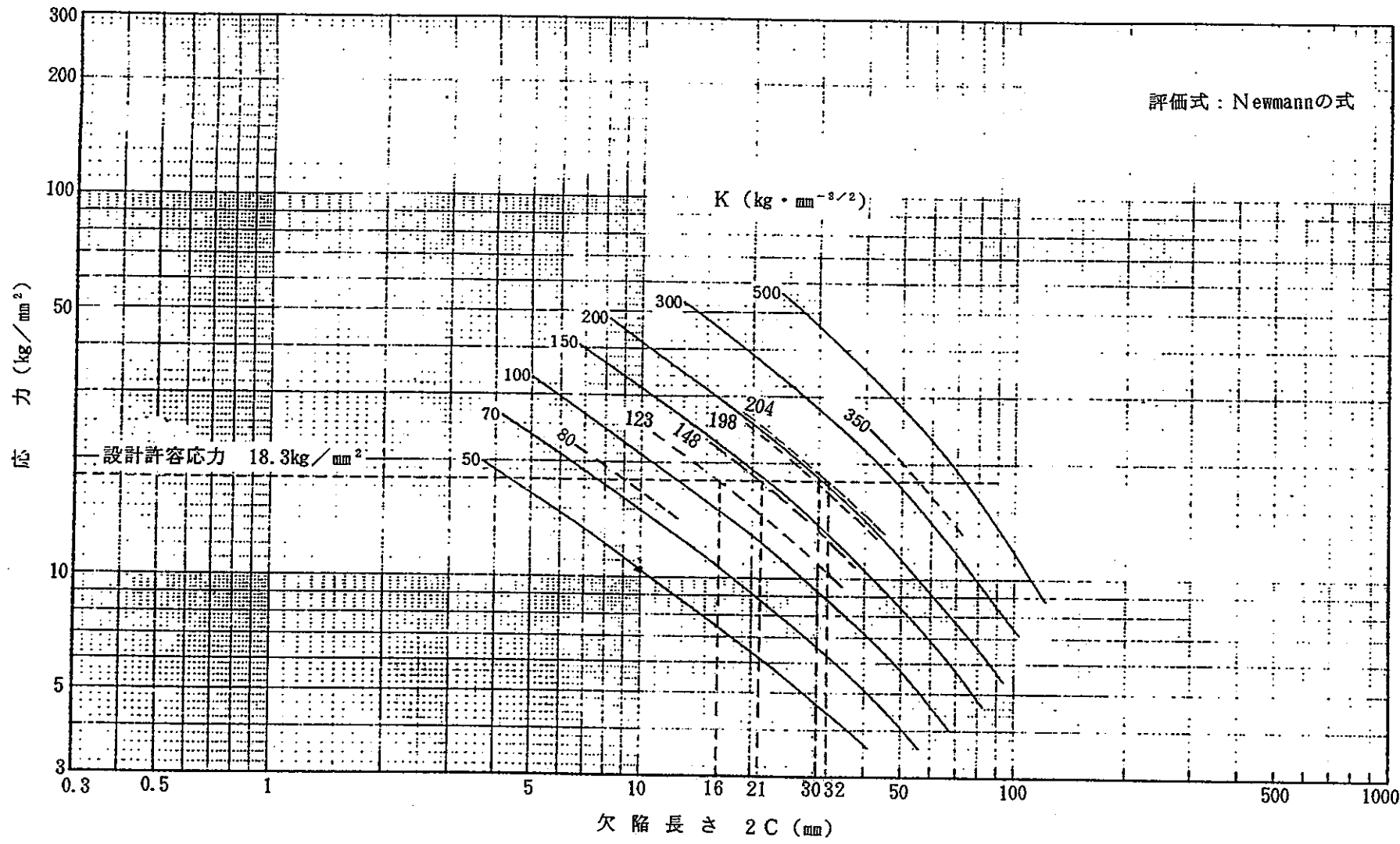
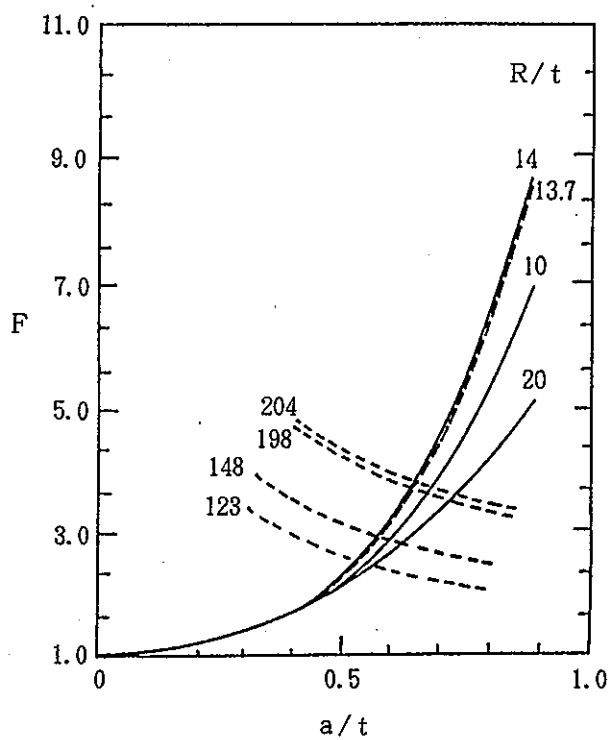
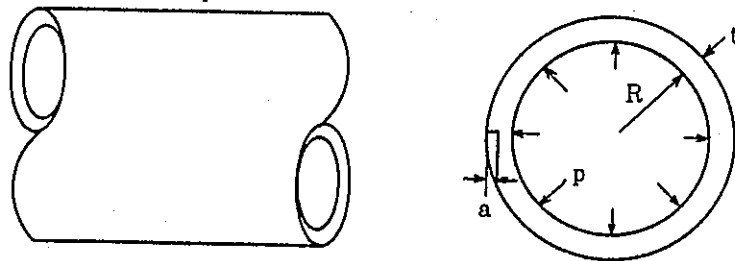


Fig. 4.3 Fracture Toughness Values for Pressure Tube with Through Wall Crack
貫通欠陥を有する管の破壊靱性値



$$K = F \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$\sigma = \frac{p R}{t} = 18.3 \text{ kg/mm}^2$$

$$R/t = 13.7$$

$$F = \frac{K_c}{67.26 \sqrt{\frac{a}{t}}}$$

300°C : $K_c = 204, 198 \text{ kg/mm}^{3/2}$

$a = 2.84, 2.80 \text{ mm}$

R. T. : $K_c = 148, 123 \text{ kg/mm}^{3/2}$

$a = 2.49, 2.28 \text{ mm}$

Fig. 4.4 Estimation of Crack Depth of Infinite Length Surface Crack for Unstable Fracture
 無限長の表面欠陥があると仮定した場合に、不安定破壊を起こす欠陥深さの求め方

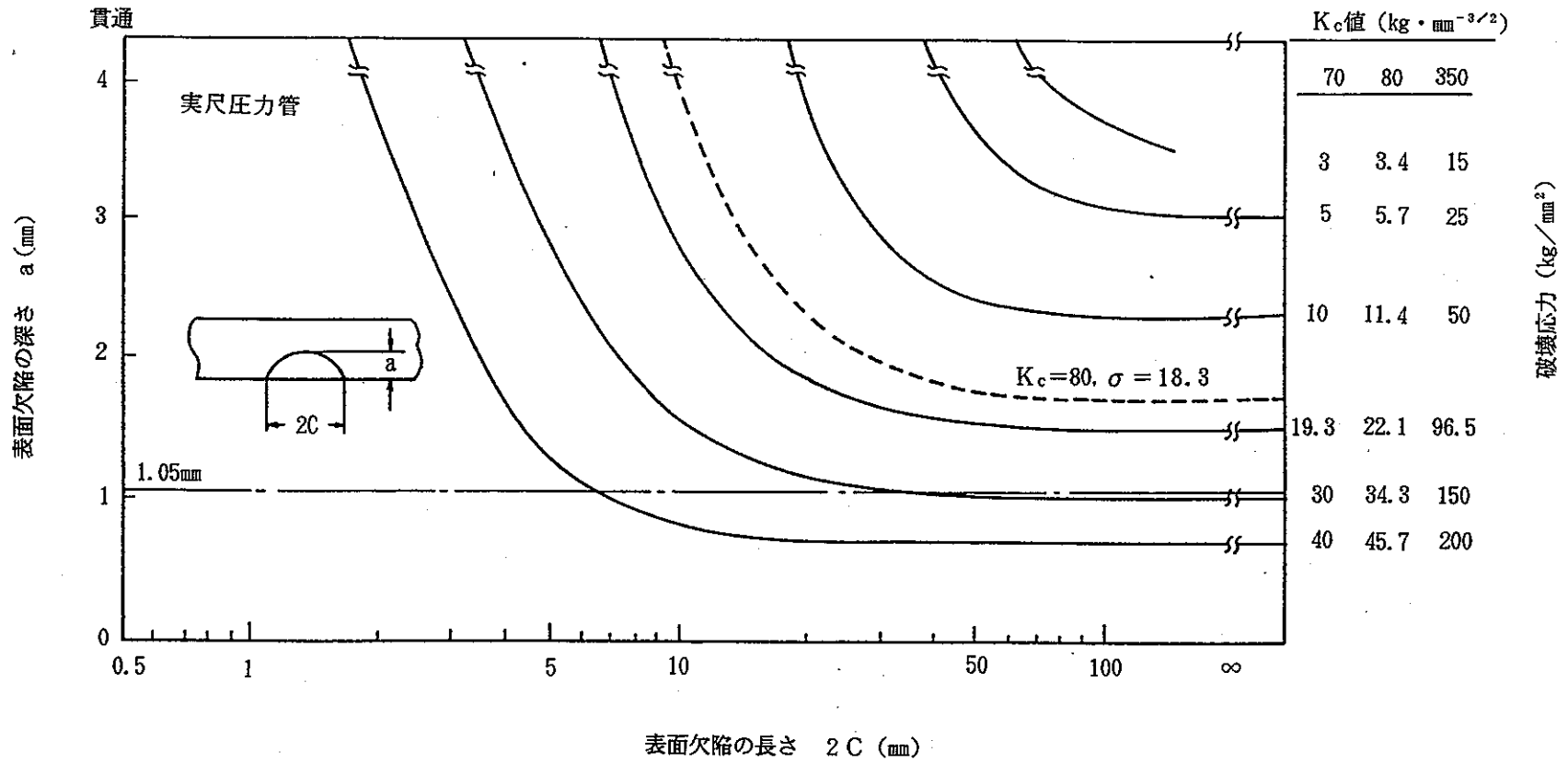


Fig. 4.5 Estimation Curve of Inner Pressure Fracture Toughness for Pressure Tube with Surface Crack
 表面欠陥を有する内圧破裂強さの評価線図

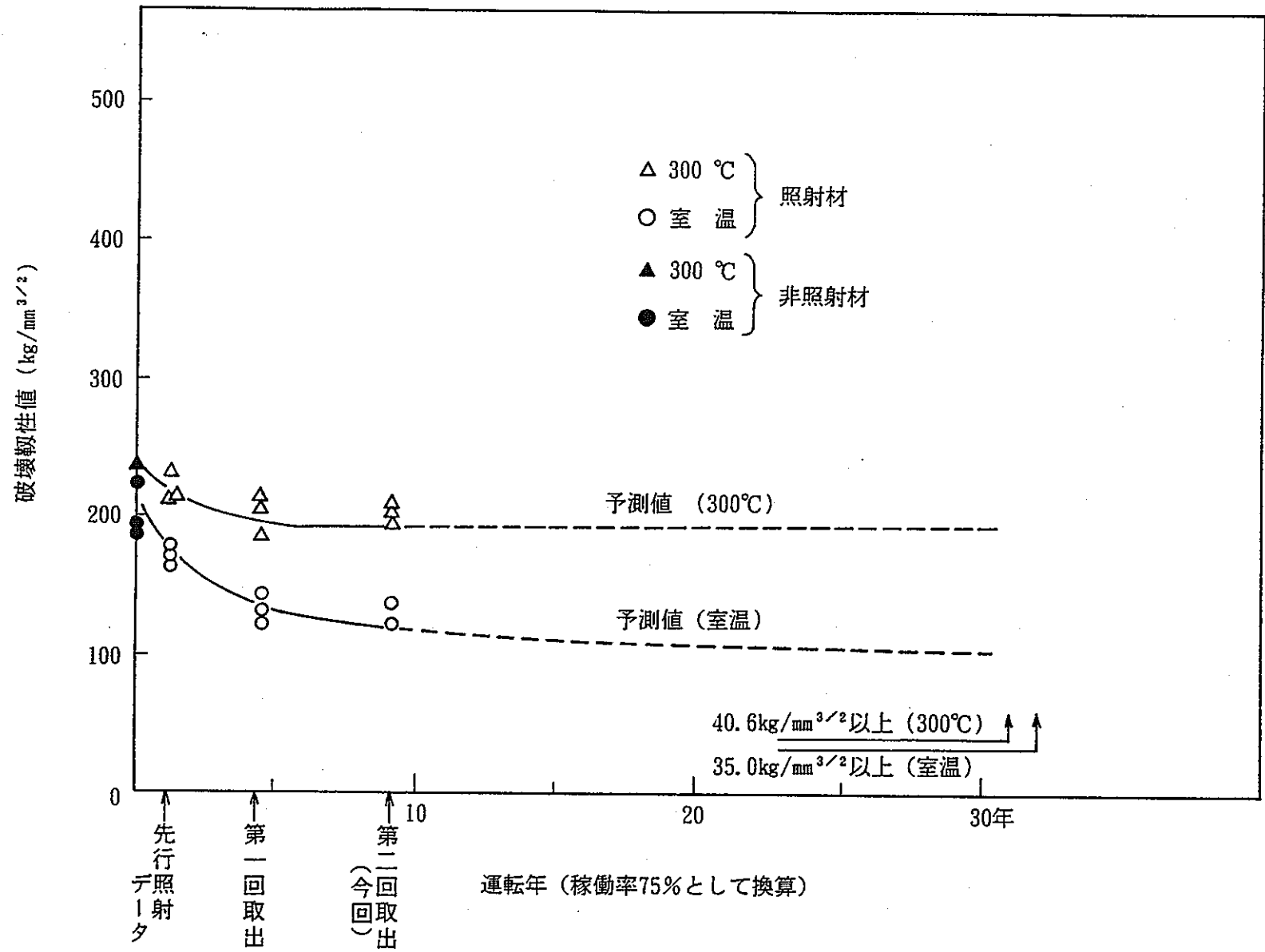


Fig. 4.6 Predicted Values of Fracture Toughness for Fugen Pressure Tube during 30 Years
「ふげん」圧力管の寿命中の破壊靱性の変化予測

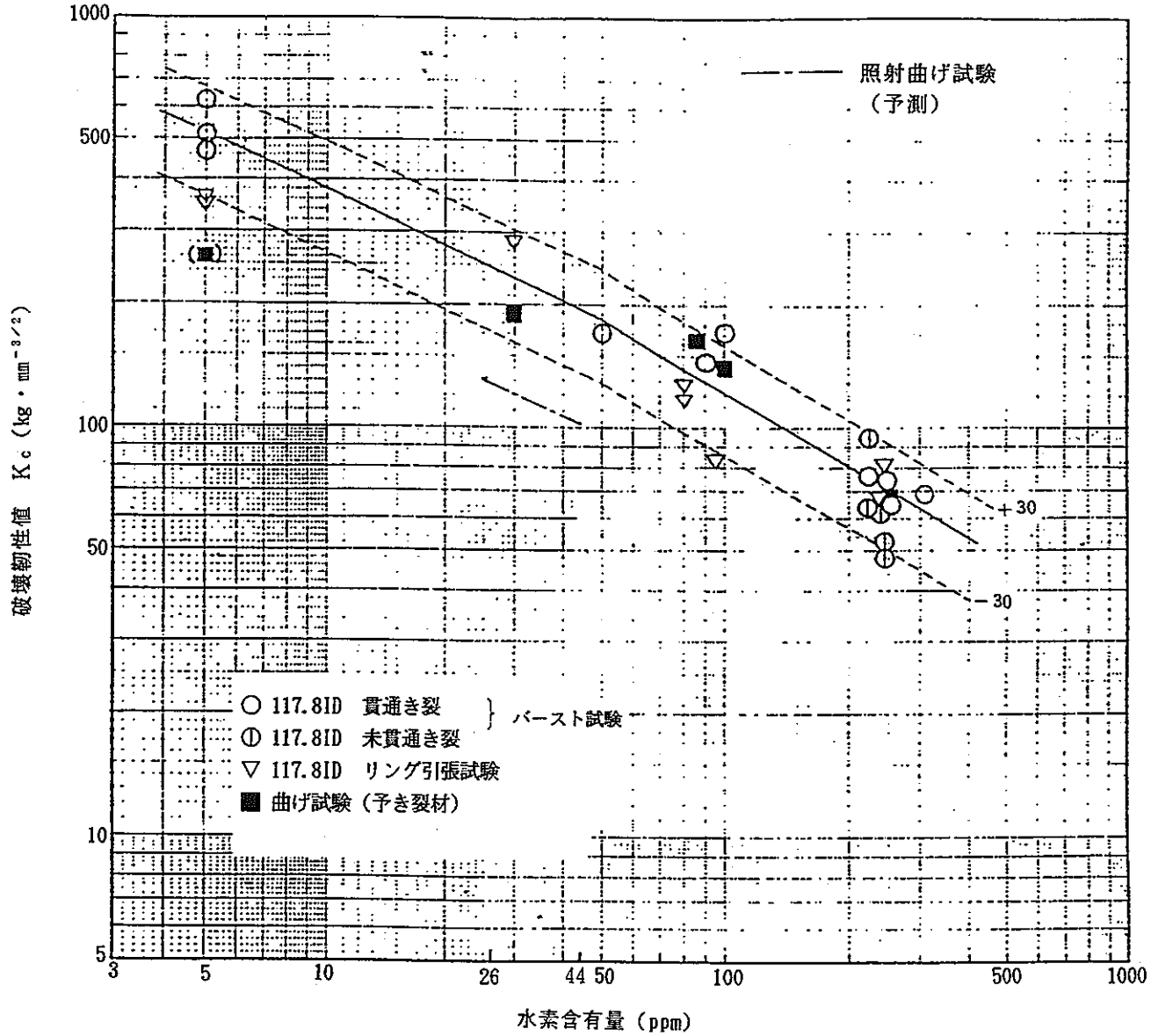


Fig. 4.7 Fracture Toughness for Unirradiated Pressure Tube As a Function of Hydrogen Concentration
 未照射材, 室温における破壊靱性値 (水素含有量の影響)

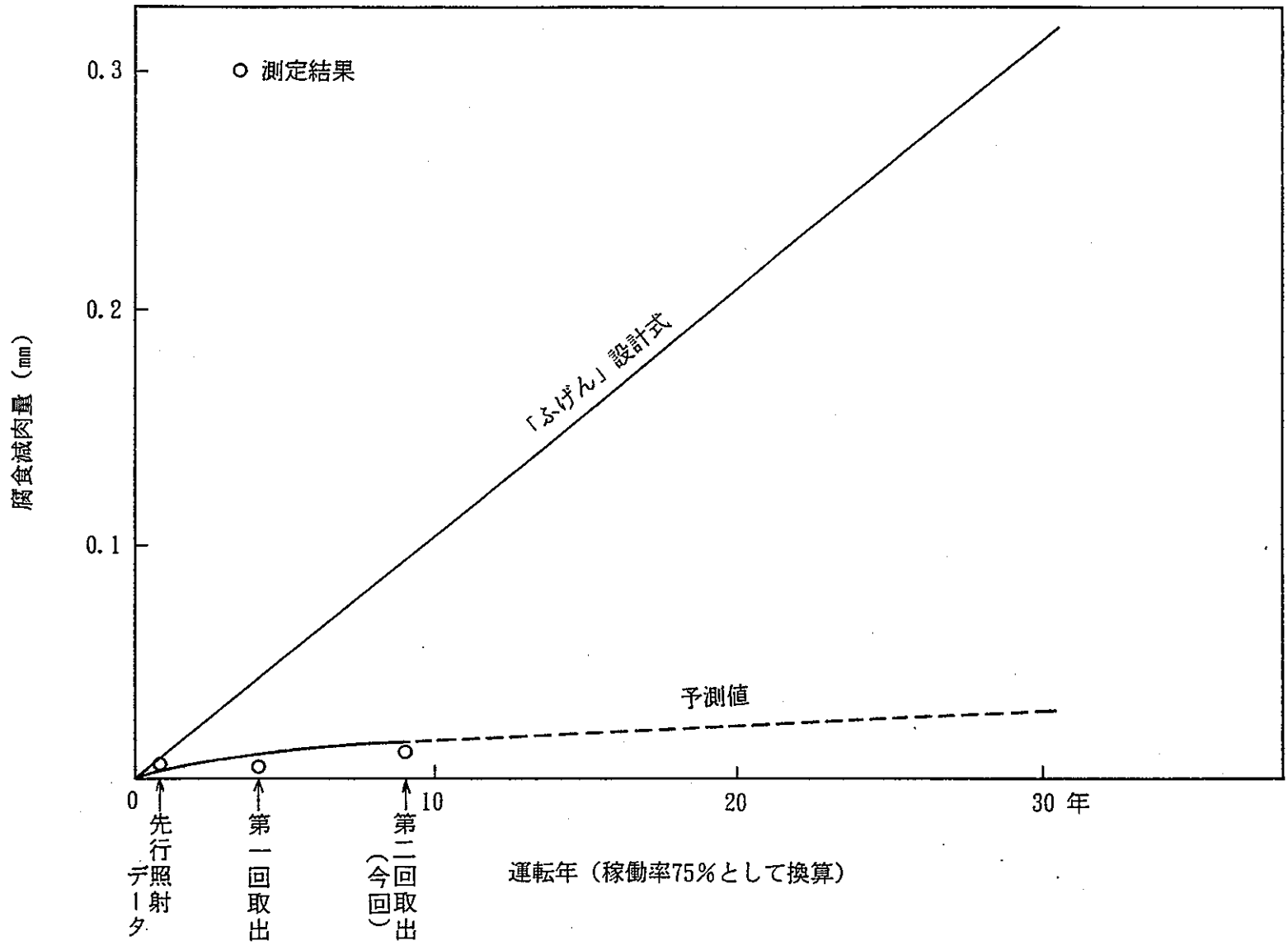


Fig. 4. 8 Predicted Values of Thickness Loss for Fugen Pressure Tube during 30 Years
「ふげん」圧力管の寿命中の腐食減肉量の変化予測

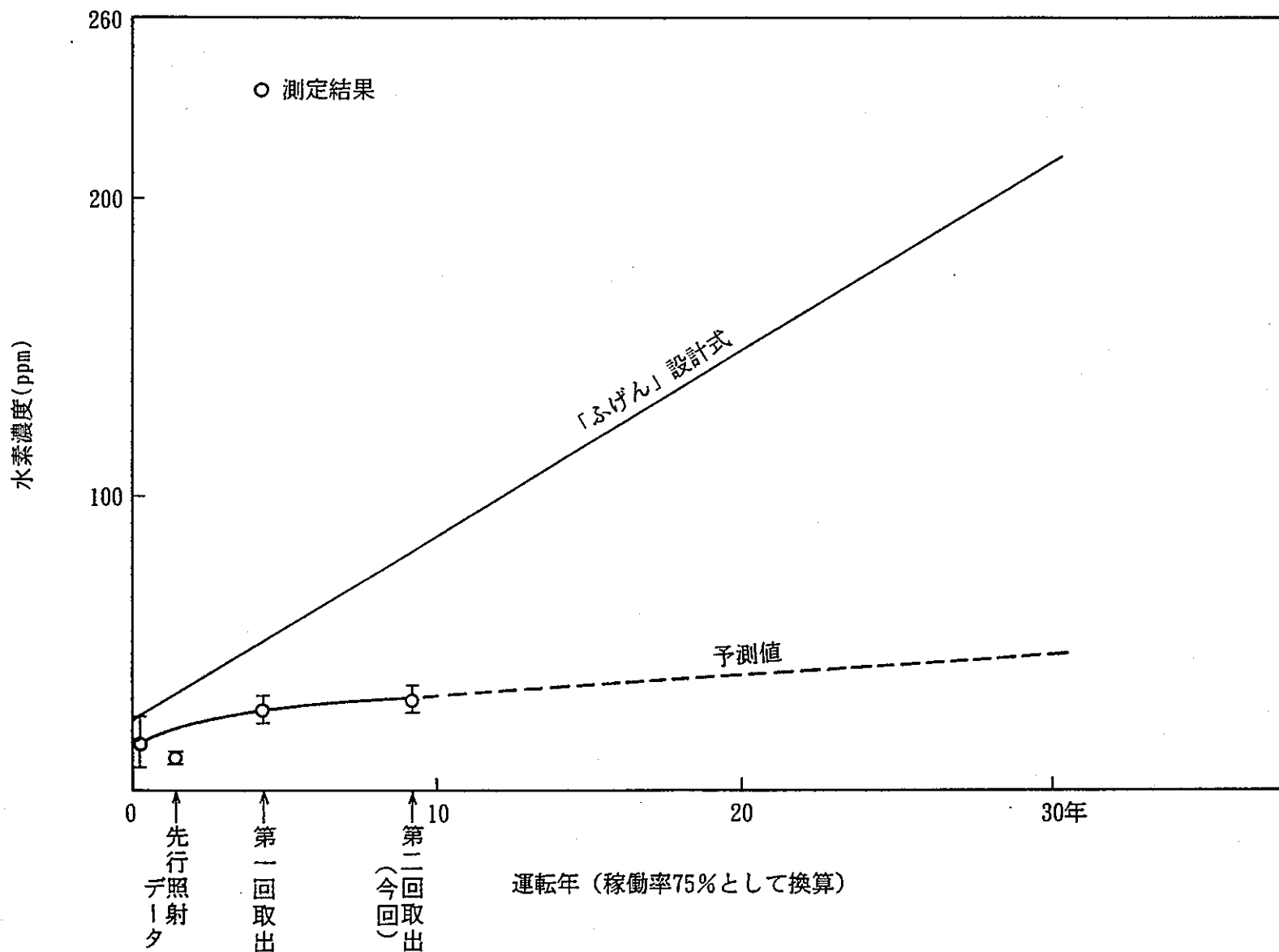


Fig. 4.9 Predicted Values of Hydrogen Concentraion for Fugen Pressure Tube during 30 Years
「ふげん」圧力管の寿命中の水素濃度の変化予測

Table 2.1 Number of Specimens for Each Surveillance Test

1回あたりの取り出し監視試験片数

試験片の種類		数	量
監視試験片 (2キャプセル分)	引張試験片	周方向	8
		軸方向	8
	曲げ試験片	12	
	腐食試験片	8	

Table 2.2 Post Irradiation Examination Schedule for Surveillance Specimens

監視試験片取り出し計画

取り出し回数	1	2	3	4	5	6	7	8
取り出し時期 (定期検査回数)	4	8	10	12	14	17	21	25
取り出しキャプセル数	2	2	2	2	2	2	2	2

Table 2.3 Post Irradiation Examination Items for Surveillance Specimens
監視試験片の照射後試験項目

試験項目	試験装置	試験片(単位mm)	試験内容	評価項目
引張試験	破壊力学試験装置	板状 6L25×6.25W×4.3t	室温～300℃	引張強さ, 0.2%耐力 伸び, 絞り
曲げ破壊試験	破壊力学試験装置	円弧板状 77×32×4.3t	室温～300℃	破壊靱性
曲げ疲労き裂 進展試験	破壊力学試験装置	円弧板状 77×32×4.3t	室温～300℃	低サイクル疲労き裂 進展速度
腐食試験	電子天秤 水素・重水素分析装置	円弧板状 44×21×4.3t	重量法 重水ウォッシング	腐食減肉量
水素・重水素 分析	水素・重水素分析装置	10W×4.3φ×0.5t, 約60mg	吸収水素・重水素量 を測定	吸収水素量
金相試験	遠隔操作型光学顕微鏡	32φ樹脂に埋め込み	ミクロ組織, 初析α相, 水素化物	金属組織