

**BOR-60照射試験用  
ODS 鋼被覆管の設計評価暫定式の策定**

2002年10月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2002

**BOR-60照射試験用ODS鋼被覆管の設計評価暫定式の策定**皆藤 威二<sup>\*</sup>、 大塚 智史<sup>\*</sup>、 鵜飼 重治<sup>\*</sup>**要 旨**

実用化被覆管材料としてのODSフェライト鋼の実用化見通しを早期に判断することを目的に、日露FBRサイクル協力の下にRIAR (Research Institute of Atomic Reactors) の高速実験炉BOR-60を用いたODSフェライト鋼被覆管燃料ピンの先行照射試験を実施する計画である。本照射試験に関する契約は平成14年1月に締結され、平成14年度内にRIARにおいて燃料ピンの設計、製造を完了する計画である。

本報告書は、RIARにおける燃料ピンの設計に供するため、BOR-60での照射試験に限定したODSフェライト鋼被覆管の設計評価式についてまとめたものである。

今回策定した設計評価式は以下のとおり。

- (1) 熱伝導率
- (2) 平均熱膨張率
- (3) ヤング率 / 剛性率 / ポアソン比
- (4) 降伏点 / 引張強さ
- (5) クリープ破断応力強さ
- (6) 熱クリープ歪み
- (7) 照射クリープ歪み
- (8) スエリング

---

<sup>\*</sup>) 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター システム技術開発部 核燃料工学グループ

## **Provisional Material Properties Equation of ODS Ferritic Steels for BOR-60 Irradiation Test**

Takeji KAITO\*), Satoshi OTSUKA\*), Shigeharu UKAI\*)

### **Abstract**

For evaluating the applicability of ODS ferritic steel as the commercialized FBR fuel cladding, the irradiation test of ODS ferritic cladding fuel pins will be conducted in BOR-60 from May, 2003 under JNC-Russian RIAR international cooperation.

Material properties equation of ODS ferritic steels for BOR-60 irradiation test were proposed to apply to the fuel pin design at RIAR.

The items of equations are as follows.

- (1) Thermal conductivity
- (2) Thermal expansion coefficient
- (3) Young's modulus / Shear modulus / Poisson's ratio
- (4) Yield strength / Ultimate tensile strength
- (5) Creep rupture strength
- (6) Thermal creep strain
- (7) Irradiation creep strain
- (8) Swelling

---

\*) Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC

## 目 次

1. はじめに	1
2. 設計評価式の策定	2
2.1 熱伝導度	2
2.2 平均熱膨張率	3
2.3 ヤング率 / ポアソン比 / 剛性率	4
2.4 降伏点 / 引張強さ	6
2.5 クリープ破断強さ	9
2.6 熱クリープ歪み	12
2.7 照射クリープ歪み	16
2.8 スエリング	18
3. まとめ	20
4. 参考文献	21

## 表リスト

- 表1 ODS鋼の熱伝導率測定結果
- 表2 ODS鋼の熱膨張率測定結果
- 表3 ODS鋼のヤング率、剛性率およびポアソン比測定結果
- 表4 マルテンサイト系ODS鋼被覆管のリング引張試験結果
- 表5 フェライト系ODS鋼被覆管のリング引張試験結果
- 表6 マルテンサイト系ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果 (クリープ破断応力強さ評価用)
- 表7 フェライト系ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果 (クリープ破断応力強さ評価用)
- 表8 マルテンサイト系ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果 (熱クリープ歪み評価用)
- 表9 フェライト系ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果 (熱クリープ歪み評価用)
- 表10 MA957中性子照射材の相当歪み (オープンチューブ、内圧封入管)
- 表11 MA957中性子照射材の照射クリープ歪み
- 表12 FFTF/MOTA照射MA957の  $\varepsilon_{irr}/\sigma$  ( $\varepsilon_{irr}$ : 照射クリープ相当歪み、 $\sigma$ : 相当応力)

## 図リスト

- 図1 ODS鋼の熱伝導率
- 図2 ODS鋼の平均熱膨張率
- 図3 ODS鋼のヤング率
- 図4 ODS鋼の剛性率
- 図5 ODS鋼のポアソン比
- 図6 マルテンサイト系ODS鋼被覆管の降伏点
- 図7 フェライト系ODS鋼被覆管の降伏点
- 図8 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管の降伏点の比較
- 図9 マルテンサイト系ODS鋼被覆管の引張強さ
- 図10 フェライト系ODS鋼被覆管の引張強さ
- 図11 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管の引張強さの比較
- 図12 マルテンサイト系ODS鋼被覆管(Mm13)のクリープ破断応力強さ
- 図13 マルテンサイト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(650°C)
- 図14 マルテンサイト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(700°C)
- 図15 マルテンサイト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(750°C)
- 図16 フェライト系ODS鋼被覆管(F13)のクリープ破断応力強さ

- 図17 フェライト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(650℃)
- 図18 フェライト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(700℃)
- 図19 フェライト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(750℃)
- 図20 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管のクリープ破断応力強さの比較(650℃)
- 図21 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管のクリープ破断強さの比較(700℃)
- 図22 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管のクリープ破断強さの比較(750℃)
- 図23 M11熱クリープ歪みの時間依存係数の算出
- 図24 (1)マルテンサイト系ODS鋼または(2)フェライト系ODS鋼の応力指数の策定
- 図25 (1)マルテンサイト系ODS鋼または(2)フェライト系ODS鋼の温度係数の策定
- 図26 マルテンサイト系ODS鋼の熱クリープ歪み評価式の計算結果とクリープ破断データ
- 図27 フェライト系ODS鋼の熱クリープ歪み評価式の計算結果とクリープ破断データ
- 図28 MA957の照射クリープ歪みの中性子照射量依存性(~400℃)
- 図29 MA957の照射クリープ歪みの中性子照射量依存性(~500℃)
- 図30 MA957の照射クリープ歪みの中性子照射量依存性(~550℃)
- 図31 MA957の照射クリープ歪みの中性子照射量依存性(~605℃)
- 図32 照射クリープ係数( $B_0$ )の照射温度依存性
- 図33 照射クリープ歪み評価式と実測値の比較 ( $\sigma = 26\text{MPa}$ )
- 図34 照射クリープ歪み評価式と実測値の比較 ( $\sigma = 52\text{MPa}$ )
- 図35 照射クリープ歪み評価式と実測値の比較 ( $\sigma = 87\text{MPa}$ )
- 図36 照射クリープ歪み評価式と実測値の比較 ( $\sigma = 121\text{MPa}$ )
- 図37 スエリング式の計算結果
- 図38 スエリング計算値と実測値の比較

## 1. はじめに

ODS(Oxide Dispersion Strengthened)フェライト鋼被覆管は実用化燃料被覆管の有力候補材として目標取出平均燃焼度150GWd/t(~250dpa)を達成するために不可欠な被覆管材料であり、実用化戦略調査研究(FS)では2015年までにODSフェライト鋼被覆管の技術的確認を得る計画としている。

このため、「常陽」での確性照射試験が開始するまでの先行的な位置付けとして、FSフェーズⅡ~フェーズⅢ初期でのODSフェライト鋼被覆管の実用化見通し判断に反映することを目的に、日露FBRサイクル協力の下にRIAR (Research Institute of Atomic Reactors)の高速実験炉BOR-60を用いたODSフェライト鋼被覆管燃料ピンの照射試験を実施する計画である。本照射試験に関する契約は平成14年1月に締結され、平成14年度内にRIARにおいて燃料ピンの設計、製造を完了する計画である。

本報告書は、RIARにおける燃料ピンの設計に供するため、BOR-60での照射試験に限定したODSフェライト鋼被覆管の設計評価式についてまとめたものである。



## 2. 設計評価式の策定

### 2.1 熱伝導率<sup>[1]</sup>

#### (1) データベース

##### ①供試材

##### - マルテンサイト系ODS鋼

平成12年度試作端栓棒材(PM12) : 0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

##### - フェライト系ODS鋼

平成12年度試作端栓棒材(PF12) : 0.03C-12Cr-2W-0.3Ti-0.23Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(\* いずれもBOR-60照射試験用被覆管と同一組成の端栓棒材

##### ②データ範囲

- 測定温度 : 室温~900°C

#### (2) 測定方法

上記供試材より10mmφ×1.5mmtの円盤状試料を採取し、理学電気(株)製LF/TCM-FA8510B型熱定数測定装置を使用して、レーザーフラッシュ法により熱伝導率を測定した。

#### (3) 結果

各供試材の測定データを表1および図1に示す。マルテンサイト系ODS鋼(PM12)の熱伝導率は温度とともに減少し、850°Cで再び上昇する傾向がみられた。一方、フェライト系ODS鋼(PF12)の熱伝導率は、温度とともに緩やかに上昇する傾向がみられ、マルテンサイト系と比べると温度依存性が小さい結果となった。

熱伝導率の式は、マルテンサイト系ODS鋼、フェライト系ODS鋼ともに、室温から850°Cまでの測定データを温度の4次式で回帰して求めた。これらの結果を以下に示すとともに、図1に実線で示す。また、参考までにPNC-FMSの材料強度基準(暫定案)<sup>[2]</sup>を破線で示す。

##### - マルテンサイト系ODS鋼 (室温≤T≤850°C)

$$K=28.47-1.244 \times 10^{-2}T+8.483 \times 10^{-5}T^2-1.911 \times 10^{-7}T^3+1.216 \times 10^{-10}T^4$$

##### - フェライト系ODS鋼 (室温≤T≤850°C)

$$K=24.81+1.213 \times 10^{-2}T-3.554 \times 10^{-5}T^2+5.137 \times 10^{-8}T^3-2.567 \times 10^{-11}T^4$$

K : 熱伝導率(W/m・°C) , T : 温度(°C)

## 2.2 平均熱膨張率<sup>[1]</sup>

### (1) データベース

#### ① 供試材

##### - マルテンサイト系ODS鋼

平成12年度試作端栓棒材(PM12) : 0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

##### - フェライト系ODS鋼

平成12年度試作端栓棒材(PF12) : 0.03C-12Cr-2W-0.3Ti-0.23Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(\* いずれもBOR-60照射試験用被覆管と同一組成の端栓棒材

#### ② データ範囲

- 測定温度 : 室温~1,000°C

### (2) 測定方法

上記供試材より3.5mmφ×20mmの円柱状試料を採取し、理学電気株製 TMA8140型(示差膨張方式)を使用して、熱機械分析(TMA)により昇温速度5°C/minで室温から各温度間の平均線膨張係数を測定した。

### (3) 結果

各供試材の測定データを表2および図2に示す。マルテンサイト系ODS鋼(PM12)、フェライト系ODS鋼(PF12)ともに平均熱膨張率は温度とともに緩やかに上昇するが、マルテンサイト系ODS鋼では900°C付近でα/γ変態によるものと考えられる熱膨張率の低下がみられた。

平均熱膨張率の式は、マルテンサイト系ODS鋼については室温から850°Cまでの測定データを温度の4次式で回帰して求めた。フェライト系ODS鋼は相変態が起こらないことから、室温から1,000°Cまでの測定データを温度の4次式で回帰して求めた。これらの結果を以下に示すとともに、図2に実線で示す。また、参考までにPNC-FMSの材料強度基準(暫定案)<sup>[2]</sup>を破線で示す。

##### - マルテンサイト系ODS鋼 (室温≤T≤850°C)

$$\alpha_m = 9.843 + 1.030 \times 10^{-2}T - 2.036 \times 10^{-5}T^2 + 2.508 \times 10^{-8}T^3 - 1.191 \times 10^{-11}T^4$$

##### - フェライト系ODS鋼 (室温≤T≤850°C)

$$\alpha_m = 9.571 + 7.926 \times 10^{-3}T - 8.886 \times 10^{-6}T^2 + 3.948 \times 10^{-9}T^3 + 6.975 \times 10^{-13}T^4$$

$\alpha_m$  : 平均熱膨張率(×10<sup>-6</sup>/°C) , T : 温度(°C)

## 2.3 ヤング率 / 剛性率 / ポアソン比<sup>[1]</sup>

### (1) データベース

#### ① 供試材

##### - マルテンサイト系ODS鋼

平成12年度試作端栓棒材(PM12) : 0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

##### - フェライト系ODS鋼

平成12年度試作端栓棒材(PF12) : 0.03C-12Cr-2W-0.3Ti-0.23Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(\* ) いずれもBOR-60照射試験用被覆管と同一組成の端栓棒材

#### ② データ範囲

- 測定温度 : 室温~950°C

### (2) 測定方法

上記供試材より60mm×10mm×1.5mmの短冊状試料を採取し、日本テクノプラス(株)製 EG-HT型高温弾性率測定装置を使用して、固有振動共振法によりヤング率と剛性率を測定した。固有振動共振法とは、片端を固定した試料に電磁コイルによる曲げおよびねり変形を与え、駆動周波数が試料の固有周波数と一致したときに振幅が最大となり、このときの周波数からヤング率や剛性率を求める方法である。

### (3) 結果

#### a) ヤング率

各供試材の測定データを表3および図3に示す。マルテンサイト系ODS鋼(PM12)、フェライト系ODS鋼(PF12)ともにヤング率は温度とともに低下するが、マルテンサイト系ODS鋼では850°C以上で上昇がみられた。このヤング率の極小は磁気変態によるものと考えられる。

ヤング率の式は、マルテンサイト系ODS鋼については室温から800°Cまでの測定データを温度の4次式で回帰して求めた。フェライト系ODS鋼は相変態が起こらないことから、室温から950°Cまでの測定データを温度の4次式で回帰して求めた。これらの結果を以下に示すとともに、図3に実線で示す。また、参考までにPNC-FMSの材料強度基準(暫定案)<sup>[2]</sup>を破線で示す。

##### - マルテンサイト系ODS鋼 (室温≤T≤800°C)

$$E=212.4-0.1482T+6.628 \times 10^{-4}T^2-1.412 \times 10^{-6}T^3+7.324 \times 10^{-10}T^4$$

##### - フェライト系ODS鋼 (室温≤T≤950°C)

$$E=225.4-0.1380T+5.701 \times 10^{-4}T^2-1.245 \times 10^{-6}T^3+6.954 \times 10^{-10}T^4$$

E: ヤング率(GPa), T: 温度(°C)

## b) 剛性率

マルテンサイト系ODS鋼(PM12)の測定データを表3および図4に示す。マルテンサイト系ODS鋼の剛性率は温度とともに低下し、ヤング率と同様に850°C以上で上昇がみられた。この剛性率の極小についても磁気変態によるものと考えられる。

剛性率の式は、マルテンサイト系ODS鋼についてのみ室温から800°Cまでの測定データを温度の4次式で回帰して求めた。この結果を以下に示すとともに、図4に実線で示す。また、参考までにPNC-FMSの材料強度基準(暫定案)<sup>[2]</sup>を破線で示す。

なお、フェライト系ODS鋼については、暫定的にマルテンサイト系ODS鋼の剛性率を用いることとする。

- マルテンサイト系 / フェライト系ODS鋼共通 (室温 $\leq T \leq 800^\circ\text{C}$ )

$$G = 82.78 - 5.879 \times 10^{-2}T + 2.595 \times 10^{-4}T^2 - 5.535 \times 10^{-7}T^3 + 2.798 \times 10^{-10}T^4$$

G: 剛性率(GPa), T: 温度(°C)

## c) ポアソン比

二次元弾性等方体を仮定してヤング率(E)と剛性率(G)から計算により求めた結果を表3および図5に示す。マルテンサイト系ODS鋼(PM12)のポアソン比は、室温から600°C程度までは温度とともに緩やかに上昇し、600°Cを超えて800°Cまでは直線的に上昇する傾向がみられた。また、800°C付近では磁気変態によるものと考えられる極大がみられた。

ポアソン比の式は、マルテンサイト系ODS鋼についてのみ室温から600°Cの測定データを温度の4次式で回帰し、600°Cから800°Cまでを温度の1次式で回帰して求めた。この結果を以下に示すとともに、図5に実線で示す。また、参考までにPNC-FMSの材料強度基準(暫定案)<sup>[2]</sup>を破線で示す。

なお、フェライト系ODS鋼については、暫定的にマルテンサイト系ODS鋼のポアソン比を用いることとする。

## - マルテンサイト系 / フェライト系ODS鋼共通

(室温 $\leq T \leq 600^\circ\text{C}$ )

$$\nu = 0.2814 + 8.593 \times 10^{-5}T - 6.800 \times 10^{-7}T^2 + 2.090 \times 10^{-9}T^3 - 1.786 \times 10^{-12}T^4$$

(600°C $< T \leq 800^\circ\text{C}$ )

$$\nu = -0.0526 + 5.98 \times 10^{-4}T$$

$\nu$ : ポアソン比(-), T: 温度(°C)

## 2.4 降伏点 / 引張強さ

### (1) データベース

#### ①供試材

##### - マルテンサイト系ODS鋼

平成11年度試作被覆管(M11)	}	0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
平成13年度試作被覆管(Mm13)		

##### - フェライト系ODS鋼

平成11年度試作被覆管(F11)	}	0.03C-12Cr-2W-0.3Ti-0.23Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
平成13年度試作被覆管(F13)		

(\* ) BOR-60照射試験にはMm13, F13を使用

#### ②データ範囲

- 試験温度 : M11, F11 室温~900°C  
Mm13, F13 室温~800°C

### (2) 試験方法

上記供試材よりリング状の試料(平行部2mmL)を採取し、JIS 2241に準拠して引張速度5%/min(耐力までは0.5%/min)でリング引張試験を行った。

### (3) 結果

#### a) 降伏点

マルテンサイト系ODS鋼(M11, Mm13)の試験結果を表4および図6に示す。この図から、M11とMm13は基本組成は同じであるにもかかわらず、降伏点に大きな差が生じていることがわかる。この原因については、これまでの調査で鋼中に含まれる過剰酸素(Ex.O)量の影響であることが明らかになっており、このEx.O量を抑制することにより強度を改善できる(M11相当の強度を有する被覆管を再現性良く製造できる)見通しが得られている。このことから、マルテンサイト系ODS鋼の降伏点についてはM11を基準とし、BOR-60での照射試験に限定した設計評価式としては暫定的にMm13のデータに基づき策定することとした。

マルテンサイト系ODS鋼の降伏点のノミナル式はM11のデータのみを温度の4次式で回帰して求めた。

##### - マルテンサイト系ODS鋼の降伏点 (室温≤T≤900°C)

$$\sigma_y = 1071 - 1.788T + 8.225 \times 10^{-3}T^2 - 1.743 \times 10^{-5}T^3 + 1.024 \times 10^{-8}T^4$$

$\sigma_y$ : 降伏点(MPa), T: 温度(°C)

BOR-60照射試験用設計降伏点( $S_y$ )としては、Mm13のデータを温度の4次式で回帰し、

照射温度以上となる600~800°CのMm13の全データを包絡するように策定した。

- マルテンサイト系ODS鋼のBOR-60照射試験用設計降伏点 (室温 $\leq T \leq 800^\circ\text{C}$ )

$$S_y = 739.7 - 1.771T + 9.670 \times 10^{-3}T^2 - 2.105 \times 10^{-5}T^3 + 1.305 \times 10^{-8}T^4$$

$S_y$  : BOR-60照射試験用設計降伏点(MPa) ,  $T$  : 温度( $^\circ\text{C}$ )

フェライト系ODS鋼(F11, F13)の試験結果を表5および図7に示す。この図から、F11とF13の降伏点は同等であることがわかる。しかしながら、F13は再結晶が不十分な材料であり、F11と同等に扱うのは適切ではないと考えられる。このことから、フェライト系ODS鋼の降伏点についてはF11を基準とし、BOR-60での照射試験に限定した設計評価式としては暫定的にF13のデータも含めて策定することとした。

フェライト系ODS鋼の降伏点のノミナル式はF11のデータを温度の4次式で回帰して求めた。

- フェライト系ODS鋼の降伏点 (室温 $\leq T \leq 900^\circ\text{C}$ )

$$\sigma_y = 918.8 - 1.497T + 6.325 \times 10^{-3}T^2 - 1.366 \times 10^{-5}T^3 + 8.218 \times 10^{-9}T^4$$

$\sigma_y$  : 降伏点(MPa) ,  $T$  : 温度( $^\circ\text{C}$ )

BOR-60照射試験用設計降伏点( $S_y$ )としては、F11のノミナル式をベースに、照射温度以上となる600~800°CのF11およびF13の全データを包絡するようにして策定した。

- フェライト系ODS鋼のBOR-60照射試験用設計降伏点 (室温 $\leq T \leq 800^\circ\text{C}$ )

$$S_y = 882.9 - 1.497T + 6.325 \times 10^{-3}T^2 - 1.366 \times 10^{-5}T^3 + 8.218 \times 10^{-9}T^4$$

$S_y$  : BOR-60照射試験用設計降伏点(MPa) ,  $T$  : 温度( $^\circ\text{C}$ )

このようにして求めたマルテンサイト系およびフェライト系ODS鋼のBOR-60照射試験用の設計降伏点と高強度フェライト-マルテンサイト鋼(PNC-FMS)被覆管の設計降伏点<sup>2)</sup>との比較を図8に示す。マルテンサイト系ODS鋼の設計降伏点は強度の低いMm13のデータを包絡するように作成しているためにフェライト系ODS鋼よりも低くなる結果となったが、いずれもPNC-FMS被覆管の設計降伏点よりは高いことが確認できた。

## b) 引張強さ

マルテンサイト系ODS鋼(M11, Mm13)の試験結果を表4および図9に示す。降伏点と同様にM11とMm13とでは強度に大きな差が生じている。これを踏まえ、マルテンサイト系ODS鋼の引張強さの式は、降伏点と同じ考え方に基づき策定した。これらの結果を以下に示す。

- マルテンサイト系ODS鋼の引張強さ (室温 $\leq T \leq 900^{\circ}\text{C}$ )

$$\sigma_u = 1223 - 1.493T + 5.238 \times 10^{-3}T^2 - 1.141 \times 10^{-5}T^3 + 6.649 \times 10^{-9}T^4$$

$\sigma_u$ : 引張強さ(MPa),  $T$ : 温度( $^{\circ}\text{C}$ )

- マルテンサイト系ODS鋼のBOR-60照射試験用設計引張強さ (室温 $\leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$ )

$$S_u = 940.3 - 1.554T + 6.988 \times 10^{-3}T^2 - 1.509 \times 10^{-5}T^3 + 8.858 \times 10^{-9}T^4$$

$S_u$ : BOR-60照射試験用設計引張強さ(MPa),  $T$ : 温度( $^{\circ}\text{C}$ )

フェライト系ODS鋼(F11, F13)の試験結果を表5および図10に示す。降伏点と同様にF11とF13との強度はほぼ同等である。ただし、温度 $600^{\circ}\text{C}$ 以上になるとF13の強度低下が大きくなる傾向がみられる。これを踏まえ、フェライト系ODS鋼の引張強さの式は、降伏点と同じ考え方にに基づき策定した。これらの結果を以下に示す。

- フェライト系ODS鋼の引張強さ (室温 $\leq T \leq 900^{\circ}\text{C}$ )

$$\sigma_u = 1033 - 1.053T + 3.990 \times 10^{-3}T^2 - 1.012 \times 10^{-5}T^3 + 6.437 \times 10^{-9}T^4$$

$\sigma_u$ : 引張強さ(MPa),  $T$ : 温度( $^{\circ}\text{C}$ )

- フェライト系ODS鋼のBOR-60照射試験用設計引張強さ (室温 $\leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$ )

$$S_u = 968.2 - 1.053T + 3.990 \times 10^{-3}T^2 - 1.012 \times 10^{-5}T^3 + 6.437 \times 10^{-9}T^4$$

$S_u$ : 引張強さ(MPa),  $T$ : 温度( $^{\circ}\text{C}$ )

このようにして求めたマルテンサイト系およびフェライト系ODS鋼のBOR-60照射試験用設計引張強さとPNC-FMS被覆管の設計引張強さ<sup>[2]</sup>との比較を図11に示す。マルテンサイト系ODS鋼の設計引張強さは強度の低いMm13のデータを包絡するように作成しているためにフェライト系ODS鋼よりも若干低くなる結果となったが、いずれもPNC-FMS被覆管の設計引張強さよりは高いことが確認できた。

## 2.5 クリープ破断応力強さ

### (1) データベース

#### ① 供試材

##### - マルテンサイト系ODS鋼

平成11年度試作被覆管(M11)	}	0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
平成13年度試作被覆管(Mm13)		

##### - フェライト系ODS鋼

平成11年度試作被覆管(F11)	}	0.03C-12Cr-2W-0.3Ti-0.23Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
平成13年度試作被覆管(F13)		

(\* ) BOR-60照射試験にはMm13, F13を使用

#### ② データ範囲 (未破断データを含む)

- 試験温度 : 650, 700, 750°C

- 応力範囲 : M11 75~270MPa, Mm13 60~220MPa

F11 90~290MPa, F13 100~170MPa

- 破断時間 : M11 ~10,677hr, Mm13 ~3,164hr

F11 ~5,783hr, F13 ~2,043hr

### (2) 試験方法

上記供試材より管状の試料を採取し、所定の試験温度および応力で内圧クリープ破断試験(圧力導入型)を行った。

### (3) 結果

マルテンサイト系ODS鋼(M11, Mm13(2回圧延材を含む))の試験結果を表6に示す。マルテンサイト系ODS鋼のクリープ破断応力強さの式については、降伏点や引張強さと同様に、M11を基準として作成を試みたが、Mm13の強度低下が予想以上に大きいため、Mm13(4回圧延材)の試験データのみを用いて作成することとした。Mm13の試験データをLMP(Larson -Miller parameter)を用いて応力の1次式で整理した結果を以下に示すとともに、試験データとあわせて図12に示す。

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T+273.15)(26.48+\log t_R) / 1000 \\ &= 41.84 - 6.811 \log \sigma_H \end{aligned}$$

T: 温度(°C),  $t_R$ : 破断時間(hr),  $\sigma_H$ : 被覆管フープ応力(MPa),

この式から各温度における応力と破断時間との関係に整理した結果を図13~15に示す。参考までにM11の試験データおよびノミナル式もあわせて示す。これらの図から、降伏点や引張強さと同様に、Mm13のクリープ破断強度はM11に比べて低いことが明らかで



あり、長時間側、高温側になるほどM11との強度差は大きくなるのがわかる。

また、Mm13のノミナル式と下限値との差を破断時間比でみると3分の1程度になることから、マルテンサイト系ODS鋼のBOR-60照射試験用設計クリープ破断応力強さ( $S_R$ )としては、Mm13のノミナル式に時間係数「3」を考慮した式とする。

$$\begin{aligned} LMP &= (T+273.15)\{26.48+\log(3 \cdot t_R)\} / 1000 \\ &= 41.84 - 6.811 \log S_R \end{aligned}$$

T: 温度(°C),  $t_R$ : 破断時間(hr),

$S_R$ : BOR-60照射試験用設計クリープ破断応力強さ(MPa),

フェライト系ODS鋼(F11, F13)の試験結果を表7に示す。フェライト系ODS鋼のクリープ破断応力強さの式については、マルテンサイト系ODS鋼と同様に、F13の試験データのみを用いて作成することとした。F13の試験データをLMP(Larson -Miller parameter)を用いて応力の1次式で整理した結果を以下に示すとともに、試験データとあわせて図16に示す。

$$\begin{aligned} LMP &= (T+273.15)(37.65+\log t_R) / 1000 \\ &= 67.15 - 12.76 \log \sigma_H \end{aligned}$$

T: 温度(°C),  $t_R$ : 破断時間(hr),  $\sigma_H$ : 被覆管フープ応力(MPa),

この式から各温度における応力と破断時間との関係に整理した結果を図17~19に示す。参考までにF11の試験データおよびノミナル式もあわせて示す。図17をみると、マルテンサイト系と同様に、650°CではF13のクリープ破断強度はF11に比べて低いことがわかる。しかしながら、図18, 19をみると、温度が高くなるにしたがってF11とF13の強度差は小さくなり、750°Cではほぼ同等のクリープ破断強度を有している。

また、F13のノミナル式と下限値との差を破断時間比でみると3分の1程度になることから、フェライト系ODS鋼のBOR-60照射試験用設計クリープ破断応力強さ( $S_R$ )としては、F13のノミナル式に時間係数「3」を考慮した式とする。

$$\begin{aligned} LMP &= (T+273.15)\{37.65+\log(3 \cdot t_R)\} / 1000 \\ &= 67.15 - 12.76 \log S_R \end{aligned}$$

T: 温度(°C),  $t_R$ : 破断時間(hr),

$S_R$ : BOR-60照射試験用設計クリープ破断応力強さ(MPa),

このようにして求めたマルテンサイト系およびフェライト系ODS鋼のBOR-60照射試験用設計クリープ破断応力強さとPNC-FMS被覆管の設計クリープ破断応力強さ<sup>[2]</sup>との

比較を温度ごとに図20~22に示す。これらの図から、各温度において、フェライト系ODS鋼のクリープ破断強度が最も優れていることがわかり、高温・長時間側になるほどその特徴は顕著に表れる。つぎに、マルテンサイト系ODS鋼については、フェライト系ODS鋼よりも強度は低いものの、PNC-FMS以上の強度を有していることがわかる。図20に示す650°Cでの比較ではマルテンサイト系ODS鋼とPNC-FMSの強度はほぼ同程度であるが、図21, 22からわかるように、高温、長時間側になるほどPNC-FMSの強度低下は大きくなり、マルテンサイト系ODS鋼の方が優れた強度特性を示す。前述のとおり、マルテンサイト系ODS鋼は、過剰酸素(Ex.O)量の影響により目標とした強度が得られなかったが、とくに高温、長時間側ではPNC-FMSよりも優れたクリープ破断強度を有していることがわかった。

## 2.6 熱クリープ歪み

### (1) データベース

#### ① 供試材

##### - マルテンサイト系ODS鋼

平成11年度試作被覆管(M11)	}	0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
平成13年度試作被覆管(Mm13)		

##### - フェライト系ODS鋼

平成11年度試作被覆管(F11)	}	0.03C-12Cr-2W-0.3Ti-0.23Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
平成13年度試作被覆管(F13)		

平成7年度試作被覆管(7A) : 0.02C-12Cr-1.5W-0.25Ti-0.23Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(\* ) BOR-60照射試験にはMm13, F13を使用

#### ② データ範囲

- 試験温度 : 650, 700, 750°C
- 応力範囲 : マルテンサイト系 90~220 MPa  
                  フェライト系 120~290MPa
- 破断時間 : マルテンサイト系 500~10,000hr  
                  フェライト系 5 ~ 2,200hr

### (2) 試験方法

内圧クリープ破断試験および単軸クリープ破断試験を行った。内圧クリープ破断試験は、圧力導入型で行い、破断後試験片の外径をレーザー寸法測定器またはマイクロメータで測定した。単軸クリープ破断試験は、被覆管材にゲージ部加工(長さ13mm×幅3mm)を施し、掴み部の変位をオンラインで計測することにより、クリープ歪み-時間曲線を求めた。

### (3) 結果

マルテンサイト系ODS鋼およびフェライト系ODS鋼の内圧クリープ試験結果を表8, 9に示す。熱クリープ歪み式の定式化は以下に示すBailey-Nortonの法則(Bailey-Norton law)<sup>[3]</sup>の式に基づき、表8, 9に示す内圧クリープ破断試験結果と後述するM11の単軸クリープ破断試験結果を用いて行った。

$$\varepsilon = K(T) \cdot \sigma^n \cdot t^m$$

$\varepsilon$  : 熱クリープ歪み(-),

$\sigma$  : 応力(MPa, 相当応力),

$E$  : ヤング率(MPa),

- T : 温度(°C),  
 t : 時間(hr),  
 K(T) : 温度依存係数  
 n : 応力指数  
 n<sub>t</sub> : 時間指数

定式化は次の手順で行った。

- (a) 時間指数(n<sub>t</sub>)の算出  
 (b) 応力指数(n)の算出  
 (c) 温度依存係数K(T)の定式化

時間指数(n<sub>t</sub>)と応力指数(n)についてはノミナル値、温度依存係数についてはノミナル値およびデータを包絡する上下限式を策定することにより、熱クリープ歪みの上下限式を策定した。

(a) 時間指数(n<sub>t</sub>)の算出

上述の熱クリープ式の両辺の対数をとると、

$$\log(\varepsilon) = \log(K(T) \cdot \sigma^n) + n_t \cdot \log(t)$$

となる。これより、時間指数(n<sub>t</sub>)はlog(ε)のlog(t)に対する傾きである。時間指数(n<sub>t</sub>)を求めるため、M11の単軸クリープ試験結果についてlog(ε)のlog(t)依存性を図23にまとめるとともに、各条件でのデータを線形でフィッティングして傾きを求めた。各条件での傾きはそれぞれ0.20, 0.27, 0.38であり、時間指数(n<sub>t</sub>)としてはこれらの平均値を取って0.28と設定する。

$$n_t = 0.28$$

以降、時間指数(n<sub>t</sub>)は0.28として計算する。

(b) 応力指数(n)の算出

上述の熱クリープ式の両辺の対数をとることにより、以下のように変形可能である。

$$\log((\varepsilon) / t^{n_t}) = \log(K(T)) + n \cdot \log(\sigma)$$

上式より、応力指数(n)はlog((ε) / t<sup>n<sub>t</sub></sup>)のlog(σ)に対する傾きである。応力指数(n)を求めるために、log((ε) / t<sup>n<sub>t</sub></sup>) (n<sub>t</sub>=0.28)のlog(σ)依存性を図24にまとめるとともに、各条件でのデータを線形でフィッティングして傾きを求めた。ここで、データとして表8, 9の内圧クリープ破断歪みデータを用いている。各条件での傾きは、マルテンサイト系ODS鋼の場合には6.61, 2.48, 4.87, 2.35、フェライト系ODS鋼の場合には6.25,

3.91である。フェライト系とマルテンサイト系で傾きに大きな差はなく、共にばらつき範囲に入っているため、全体の平均値4.4をフェライト系およびマルテンサイト系共通の応力指数(n)とした。

$$n=4.4$$

### (c) 温度依存係数K(T)の決定

本検討では、温度依存係数K(T)のノミナル、上下限式を策定する。K(T)は一般に次式で表される。

$$K(T)=A \times \exp(-Q/R(T+273.15))$$

ここで、Rは気体定数である(R=8.31J/K/mol)。上述の温度依存係数K(T)の式の両辺の自然対数をとると、

$$\ln(K(T))=\ln(A)-Q/R(T+273.15)$$

となる。よって、定数A, Qは $\ln(K(T))$ の $1/(T+273.15)$ に対する傾きと切片より求められる。

(a), (b)で求めた $n(=4.4)$ と $n_f(=0.28)$ の値を用いて $K(T)=\epsilon/(\sigma^n \cdot t^{n_f})$ を算出し、 $\ln(K(T))$ の $1/(T+273.15)$ 依存性を図25(1)にまとめた。ここで、MM13以外の鋼種のデータはほぼ一次曲線上に乗っているが、MM13のみ他の鋼種に比べて強度が低いため、異なる挙動を示している。MM13以外の鋼種のデータを一次式でフィッティングして $\ln(A)$ とQの値を求めるとそれぞれ-7.3,  $1.7 \times 10^5$ となる。これより、 $\ln(A)$ のノミナル値を-7.3とする。また、 $Q=1.7 \times 10^5$ として図25(1)のデータの上下限を包絡するように $\ln(A)$ の値を算出し、 $\ln(A)$ の上限値として-4.5、下限値として-8.0を得た。

以上より、マルテンサイト系ODS鋼の場合には、 $\ln(A)$ とQは、

$$Q=1.7 \times 10^5$$

$$\ln(A)=\begin{cases} -4.5 & \text{(上限値)} \\ -7.3 & \text{(ノミナル値)} \\ -8.0 & \text{(下限値)} \end{cases}$$

とする。

フェライト系ODS鋼の場合にも、マルテンサイト系と同じ方法でQと $\ln(A)$ を求めた。ただし、フェライト系の場合には、F13とその他の鋼種で強度に差がないため、F13とその他の鋼種で区別せず定数を求めた。図25(2)はフェライト系ODS鋼の場合の、 $\ln(K)$ の $1/T$ 依存性のデータとノミナル、上下限式を示している。求めたフェライト系ODS

鋼の $\ln(A)$ と $Q$ をまとめると以下のようになる。

$$Q=2.5 \times 10^5$$

$$\ln(A) = \begin{cases} 3.4 & \text{(上限値)} \\ 2.6 & \text{(ノミナル値)} \\ 1.6 & \text{(下限値)} \end{cases}$$

以上で求めた $\ln(A)$ と $Q$ の値を用いて $\ln(K(T))$ を $K(T)$ に変換すると、 $K(T)$ は次式のようにになる。

- マルテンサイト系ODS鋼

$$K(T) = \begin{cases} 1.1 \times 10^{-2} \exp(-1.7 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(上限式)} \\ 6.8 \times 10^{-4} \exp(-1.7 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(ノミナル式)} \\ 3.4 \times 10^{-4} \exp(-1.7 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(下限式)} \end{cases}$$

- フェライト系ODS鋼

$$K(T) = \begin{cases} 30 \exp(-2.5 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(上限式)} \\ 13 \exp(-2.5 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(ノミナル式)} \\ 5.0 \exp(-2.5 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(下限式)} \end{cases}$$

以上の検討より、熱クリープ歪み式を以下のように設定した。

$$\varepsilon = K(T) \cdot \sigma^{4.4} \cdot t^{0.28}$$

- マルテンサイト系ODS鋼

$$K(T) = \begin{cases} 1.1 \times 10^{-2} \exp(-1.7 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(上限式)} \\ 6.8 \times 10^{-4} \exp(-1.7 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(ノミナル式)} \\ 3.4 \times 10^{-4} \exp(-1.7 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(下限式)} \end{cases}$$

- フェライト系ODS鋼

$$K(T) = \begin{cases} 30 \exp(-2.5 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(上限式)} \\ 13 \exp(-2.5 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(ノミナル式)} \\ 5.0 \exp(-2.5 \times 10^5 / R(T+273.15)) & \text{(下限式)} \end{cases}$$

図26, 27に今回策定した熱クリープ評価式とクリープ破断歪みの実測値との比較を示す。上下限式は破断歪みの実測値を包絡しており、評価式は妥当である。

## 2.7 照射クリープ歪み

### (1) データベース<sup>[4, 5]</sup>

#### ① 供試材

- MA957 : 0.014C-14Cr-0.3Mo-0.9Ti-0.25Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### ② データ範囲

- 照射温度 : 400~605°C
- 応力範囲 : 30~140 MPa
- 中性子照射量 : 23~112 dpa

### (2) 試験方法<sup>[5,6]</sup>

炉内内圧クリープ破断試験のデータを用いた。試験は、FFTF/MOTA (1E)を用いて、9Aサイクルから9Cサイクルで行われた。試験片の寸法は、0.23インチ外径×0.20インチ内径×1インチ長さである。

### (3) 結果

照射クリープ歪み式として、一般に次式が用いられる。

$$\varepsilon_{irr}/\sigma = (B_0 \cdot \phi t + D \cdot \varepsilon_s)$$

$\varepsilon_{irr}$  : 照射クリープ歪み(一、相当歪み)

$\sigma$  : 応力(MPa、相当応力)

$\phi t$  : 中性子照射量(dpa)

$\varepsilon_s$  : スエリング歪み(一、相当歪み)

$B_0$  : 照射クリープ係数(dpa<sup>-1</sup>・(MPa)<sup>-1</sup>)

$D$  : 照射クリープ-スエリング相互作用係数(MPa<sup>-1</sup>)

上述の照射クリープ歪み一般式の右辺第1項はスエリングに独立な項であり、第2項はスエリングに関係する項である。フェライト系ステンレス鋼は耐スエリング特性に優れており、スエリング歪み( $\varepsilon_s$ )はほぼゼロであるので第2項については無視して、以下の手順に従い照射クリープ歪み式の定式化を行なった。

(a)  $\varepsilon_{irr}/\sigma$ の算出

(b) 照射クリープ係数( $B_0$ )の算出

(a)  $\varepsilon_{irr}/\sigma$ の算出

内圧試験片の炉内歪みには、照射クリープだけでなくスエリング、焼きしまりおよび熱クリープによる歪みが寄与しているため、照射クリープ歪みを求めるためには炉内歪みからスエリングおよび焼きしまりによる歪みを差し引く必要がある。

表10にFFTF/MOTAで照射した内圧試験片およびオープンチューブの相当歪みをま

とめた。ここで、相当歪みは管状試験片の外径歪みに $2/\sqrt{3}$ を乗じることにより求めている。オープンチューブの歪みはスエリングおよび焼きしまりによるものであるので、照射クリープ相当歪み( $\varepsilon_{irr}$ )を下式に従い、内圧試験片の相当歪み( $\varepsilon_e$ )からオープンチューブの相当歪み( $\varepsilon_s$ )を差し引くことにより算出した。

$$\varepsilon_{irr} = \varepsilon_e - \varepsilon_s$$

なお、ここでは熱クリープを無視できる605°C以下での炉内クリープ歪みのデータを用いているため、熱クリープ歪みは無視している。算出した照射クリープ相当歪み( $\varepsilon_{irr}$ )を表11に、 $\varepsilon_{irr}/\sigma$ の値を表12に、各照射温度での $\varepsilon_{irr}/\sigma$ の照射量依存性を図28~図31にまとめた。

#### (b) 照射クリープ係数( $B_0$ )の算出

照射クリープ係数( $B_0$ )は照射クリープ歪み一般式において $\varepsilon_s=0$ として、以下のよう  
に表される。

$$B_0 = (\varepsilon_{irr}/\sigma) / \phi t$$

$\varepsilon_{irr}/\sigma$ は照射量と線形関係にありその傾きが $B_0$ となるので、図28~図31において、原点を通る一次式で最小自乗法によるフィッティングを行って $B_0$ を算出した。算出した $B_0$ の値は図中に示す通りである。

図32は算出した $B_0$ の照射温度依存性である。照射クリープ係数と温度の間には明瞭な関係がないため、 $B_0$ のノミナル値としてはこれらの平均値をとり、 $8.67 \times 10^{-7}$ に設定した。また、上限値、下限値としては、それぞれ $B_0$ のばらつきの上下限である $1.62 \times 10^{-6}$ 、 $5.18 \times 10^{-7}$ をとった。

以上の検討よりODS鋼の照射クリープ評価式を次式のように設定する。

#### - マルテンサイト系 / フェライト系ODS鋼共通

(ノミナル式)  $\varepsilon_{irr} = 8.67 \times 10^{-7} \cdot \sigma \cdot \phi t$

(上限式)  $\varepsilon_{irr} = 1.62 \times 10^{-6} \cdot \sigma \cdot \phi t$

(下限式)  $\varepsilon_{irr} = 5.18 \times 10^{-7} \cdot \sigma \cdot \phi t$

図33~図36に評価式と実測値の比較を示す。上下限式は実測値をほぼ包絡しており、評価式は妥当であると考えられる。



## 2.8 スエリング

### (1) データベース<sup>[4, 6, 7]</sup>

#### ① 供試材

- PNC-FMS : 0.12C-11Cr-0.40Mo-2.0W-0.20V
- 1DK : 0.05C-13Cr-3W-0.5Ti-0.3Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- MA957 : 0.014C-14Cr-0.3Mo-0.9Ti-0.25Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- MA956 : 0.02C-20Cr-4Al-0.5Ti-0.5Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

#### ② データ範囲

- 照射温度 : 405~670°C
- 中性子照射量 : 20~40 × 10<sup>26</sup> n/m<sup>2</sup> (E>0.1MeV)

### (2) 試験方法

以下の方法に従い、スエリング値を求めた。

- (a) 照射材の密度測定値から算出した。
- (b) 照射材の外径をレーザー寸法測定器で測定し、外径変化率を3倍することにより求めた。

### (3) 結果

ODS鋼はフェライトもしくはマルテンサイト相の母材に微細なY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粒子を分散させたものであり、そのスエリング特性はフェライト鋼やマルテンサイト鋼と同様であると考えられる。よって、すでに策定されている下記のPNC-FMSのスエリング式<sup>[4]</sup>を適用する。

$$\Delta V/V = S_0 + D'$$

$$S_0 = R \phi t = [R_0 \exp\{A(T - T_p)^2\}] \phi t$$

定 数	ノミナル	上 限	下 限
R <sub>0</sub>	2.44 × 10 <sup>-2</sup>	5.13 × 10 <sup>-2</sup>	1.40 × 10 <sup>-2</sup>
D'	-0.17	0	-0.48
A	-1.74 × 10 <sup>-4</sup>	-1.74 × 10 <sup>-4</sup>	-1.74 × 10 <sup>-4</sup>
T <sub>p</sub>	414	414	414

$\Delta V/V$  : スエリング(Vol%)

S<sub>0</sub> : ボイドスエリング(Vol%)

D' : 焼きしまり(Vol%)

R : 定常スエリング速度(Vol%/10<sup>26</sup>n/m<sup>2</sup> (E>0.1MeV))

$\phi t$  : 中性子照射量(10<sup>26</sup>n/m<sup>2</sup> (E>0.1MeV))

- A : 定常スエリング速度での温度依存性に関する定数( $^{\circ}\text{C}^{-2}$ )
- T : 照射温度( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_p$  : ピークスエリング温度( $^{\circ}\text{C}$ )

スエリング評価式の照射量依存性と照射温度依存性を図37に示す。また、評価式の計算値と実測値の比較を図38にまとめた。ここで、実測地には、PNC-FMS鋼およびその開発途中材、海外のフェライト／マルテンサイト鋼だけでなくODS鋼(MA957, MA956, 1DK)も含まれている。上下限式は実測値を概ね包絡するとともに、ノミナル式は実測値とよく一致しており、評価式は妥当である。

### 3. まとめ

BOR-60での照射試験に限定したODSフェライト鋼被覆管の設計評価式を策定した。

これらの設計評価式を用い、RIARにおいてBOR-60で照射するODSフェライト鋼被覆管燃料ピンの設計を行い、平成14年度中には燃料ピン製造を完了する予定である。

BOR-60で照射する平成13年度試作ODS鋼被覆管(マルテンサイト系Mm13、フェライト系F13)は、目標とする平成11年度試作ODS鋼被覆管(マルテンサイト系M11、フェライト系F11)相当の強度レベルを達成することができなかった。このため、これまで蓄積してきたM11、F11の強度データをそのまま適用できず、今回はBOR-60での照射試験に限定した暫定的な設計評価式とした。また、Mm13、F13の強度データは限られており、特にクリープ破断応力強さについてはデータが不十分であるため、適切なデータを拡充し、今回作成した評価式の妥当性を確認していく予定である。

また、Mm13、F13で目標強度を達成できなかった原因については、これまでの調査により究明できており、その対策もほぼ確立している。今後は、目標強度を満足するM11、F11相当の被覆管を再現性良く製造することが可能と考えられることから、これまで蓄積されてきたM11、F11の強度データを基準として「常陽」照射試験用許認可データを取得し、材料強度基準(案)を整備していく計画である。

#### 4. 参考文献

- [1] 畠山耕一 他、「ODS フェライト鋼の設計評価用物性式の策定」、JNC TN9400 2001-108 (2001年12月)
- [2] 野村茂雄 他、「高速炉炉心構成要素用高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS)材料強度基準(暫定案)」、PNC ZN9410 92-110 (1992年4月)
- [3] 村上澄男, "環境・高温強度学", 駒井兼治朗, 大谷隆一編, p.286(1984)オーム社
- [4] M. L. Hamilton et al, "Fabrication Technological Development of Oxide Dispersion Strengthened Alloy MA957 for Fast Reactor Applications", PNNL-13168
- [6] M. B. Toloczko et al, J. Nucl. Mater., Vol. 258-263, (1998), 1163
- [6] 上平ほか, "高強度フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS鋼)のスエリングおよび照射クリープ歪み特性の評価", JNC TN9400 99-022
- [7] D. S. Gelles, "Microstructural Examination of Commercial Ferritic Alloys at 200 dpa", DOE/ER-0313/16, pp.146, 1994

表1 熱伝導率測定結果

温度(°C)	熱伝導率(W/m·°C)	
	マルテンサイト系(PM12)	フェライト系(PF12)
20	28.2	24.9
100	28.0	26.0
200	28.1	26.0
300	28.1	26.6
400	27.7	26.4
500	27.5	26.5
600	26.2	27.4
700	24.8	28.0
750	24.6	27.0
800	24.6	27.3
850	25.9	27.4
900	26.3	27.8

表2 熱膨張率測定結果

温度(°C)	熱膨張係数(×10 <sup>-6</sup> /°C)	
	マルテンサイト系(PM12)	フェライト系(PF12)
50	10.3	9.9
100	10.7	10.3
150	11.0	10.6
200	11.3	10.9
250	11.5	11.1
300	11.7	11.2
350	11.8	11.4
400	12.0	11.5
450	12.1	11.7
500	12.3	11.9
550	12.5	12.0
600	12.6	12.1
650	12.7	12.2
700	12.8	12.3
750	12.9	12.4
800	13.0	12.5
850	13.1	12.7
900	12.7	12.8
950	12.5	13.0
1000	13.0	13.3

表3 ヤング率、剛性率およびポアソン比測定結果

温度(°C)	マルチサイト系(PM12)			フェライト系(PF12)
	ヤング率(GPa)	剛性率(GPa)	ポアソン比	ヤング率(GPa)
29	207.4	80.8	0.284	220.7
50	206.2	80.3	0.284	219.4
100	204.5	79.6	0.284	217.6
150	202.4	78.7	0.285	215.2
200	199.9	77.7	0.286	212.5
250	197.1	76.6	0.287	209.6
300	193.8	75.2	0.289	206.3
350	190.0	73.7	0.289	202.2
400	186.1	72.0	0.293	197.9
450	181.4	69.6	0.302	192.8
500	174.5	66.9	0.304	186.8
550	167.1	63.9	0.307	180.7
600	154.0	58.9	0.308	172.0
650	139.2	52.2	0.334	161.9
700	121.1	44.3	0.367	144.8
750	107.3	38.5	0.393	134.0
800	98.0	34.3	0.428	125.9
850	109.8	39.5	0.389	118.9
900	112.2	40.1	0.398	113.2
950	109.6	38.8	0.414	106.7

表4 マルテンサイト系ODS鋼被覆管のリング引張試験結果

温度(°C)	降伏応力(MPa)		引張強さ(MPa)	
	M11	Mm13	M11	Mm13
25	1012.0	729.0	1168.0	946.9
	1034.0	740.5	1199.0	939.5
100	984.8	—	1132.8	—
	986.5	—	1133.5	—
200	928.6	—	991.8	—
	841.3	—	1063.1	—
300	892.0	648.7	995.0	807.0
	896.0	648.7	1005.0	775.3
400	820.0	685.3	918.0	737.1
	852.0	672.5	900.0	735.8
500	700.0	426.9	786.0	624.5
	680.0	557.3	782.0	634.8
600	522.0	346.0	596.0	461.7
	530.0	321.6	619.0	454.9
650	420.0	257.7	509.0	366.4
	415.0	260.1	505.0	370.4
700	309.0	178.4	416.0	227.6
	313.0	151.5	413.0	263.2
750	253.0	178.4	334.0	227.6
	251.0	126.1	340.0	146.6
800	209.0	88.5	294.0	98.0
	166.0	117.8	288.0	137.2
850	137.7	—	193.3	—
	139.3	—	196.4	—
900	126.7	—	163.5	—
	133.9	—	159.4	—



表5 フェライト系ODS鋼被覆管のリング引張試験結果

温度(°C)	降伏応力(MPa)		引張強さ(MPa)	
	F11	F13	F11	F13
25	881.1	931.8	1017.9	1121.0
	888.5	966.1	1004.9	1127.2
100	789.1	—	949.9	—
	855.0	—	956.2	—
200	718.4	—	908.9	—
	832.3	—	919.4	—
300	730.4	914.1	838.1	915.7
	722.3	915.7	852.2	928.6
400	678.2	804.2	776.8	840.6
	668.1	778.1	770.1	844.3
500	567.2	630.4	656.6	673.5
	590.4	624.2	670.4	685.3
600	376.2	469.6	486.6	490.6
	437.3	443.5	480.8	487.4
650	320.0	321.8	383.7	344.3
	328.4	324.9	386.0	368.9
700	240.2	252.4	299.4	260.6
	260.9	251.0	301.5	268.8
750	165.9	221.6	288.0	225.0
	194.7	221.9	291.5	226.7
800	152.5	138.6	204.5	145.0
	176.4	151.0	213.5	156.0
850	143.1	—	182.5	—
	132.5	—	177.1	—
900	108.9	—	156.6	—
	125.2	—	158.9	—

表6 マルテンサイト系ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果  
(クリープ破断応力強さ評価用)

	温度(°C)	周応力(MPa)	破断時間(hr)	備考
M11	650	270	24.7	
		220	590.5	
		200	888.0	
		170	4135.4	
	700	180	222.2	
		170	414.5	
		170	284.4	
		150	1097.2	
		150	684.9	
		150	1544.9	
		130	9123.9	
		110	9223.0	(継続中)
	750	120	521.7	
		100	1738.1	
90		9788.0		
75		10677.0	(継続中)	
Mm13 (2回圧延材)	700	160	47.9	
		110	1367.5	
		90	3163.7	
Mm13 (4回圧延材)	650	220	23.0	
		180	203.8	
		140	1051.4	
	700	160	13.2	
		120	44.8	
		110	209.3	
		90	1704.0	(継続中)
	750	100	26.5	
		80	39.9	
		60	211.1	

表7 フェライト系ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果  
(クリープ破断応力強さ評価用)

	温度(°C)	周応力(MPa)	破断時間(hr)	備考
F11	650	290	509.7	
		270	467.1	
		240	5783.3	
	700	200	16.2	
		190	323.4	
		165	241.1	
	750	150	9.2	
		95	5105.1	
		90	5752.3	(継続中)
F13	650	245	364.6	
		225	—	(未実施)
		210	792.5	
	700	170	39.6	
		140	2042.5	
		130	1756.4	
	750	120	39.2	
		110	1180.2	
		100	2016.5	(継続中)

表8 マルテンサイト系ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果(熱くリープ歪み評価用)

鋼種	試験片 No.	試験温度 (°C)	フープ応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	外径破断歪 み (-)	相当破断歪 み (-)	破断形態	
M11	M11-5	650	220	191	591	1.15E-02	1.32E-02	フィッシャー型	
	M11-6		200	173	888	1.02E-02	1.18E-02	↑	
	M11-7		170	147	4135	3.84E-03	4.43E-03	↑	
	MM-4	700	130	113	1436	6.04E-03	6.97E-03	ピンホール型	
	MM-5		110	95	7850	4.31E-03	4.98E-03	フィッシャー型	
	M11-14		150	130	1097	3.84E-03	4.43E-03	↑	
	M11-15		130	113	9124	4.00E-03	4.62E-03	↑	
	M11C03BM		130	113	1590	4.10E-03	4.73E-03	ピンホール型	
	M11C02BM	150	130	685	5.00E-03	5.77E-03	フィッシャー型		
	M11C02FMS	150	130	1545	3.40E-03	3.93E-03	↑		
	M11-9	750	120	104	522	2.80E-03	3.23E-03	↑	
	M11-10		90	78	9788	4.90E-03	5.66E-03	↑	
	M11C05BM		100	87	1738	6.40E-03	7.39E-03	↑	
	Mm13	2	700	110	95	1368	1.90E-02	2.19E-02	↑
		3		90	78	3164	1.50E-02	1.73E-02	↑

表9 フェライト系ODS鋼被覆管の内圧クリープ破断試験結果(熱クリープ歪み評価用)

鋼種	試験片 No.	試験温度 (°C)	フープ応力 (MPa)	相当応力 (MPa)	破断時間 (hr)	外径破断歪 み (-)	相当破断歪 み (-)	破断形態
F13	F136	750	120	104	39	6.0E-03	6.93E-03	フイッパ-型
	18-6		190	165	323	1.3E-02	1.50E-02	↑
	19-1		200	173	16	1.3E-02	1.50E-02	↑
F11	19-2	700	165	143	241	1.1E-02	1.27E-02	↑
	A2		170	147	101	6.0E-03	6.93E-03	↑
	A3		150	130	492	3.0E-03	3.46E-03	↑
7A	7A-2	700	150	130	45	3.0E-03	3.46E-03	↑
	12		150	130	327	7.0E-03	8.08E-03	↑
	31		200	173	6	1.9E-02	2.19E-02	↑
	32		150	130	113	9.0E-03	1.04E-02	↑
	41		200	173	16	1.9E-02	2.19E-02	↑
	42		150	130	2162	9.0E-03	1.04E-02	↑
	43		130	113	1206	7.0E-03	8.08E-03	↑

表10 MA957中性子照射材の相当歪み (オープンチューブ、内圧封入管)

温度 T (°C)	中性子照射量 $\phi t$ (dpa)	$\epsilon_s$ (%)				$\epsilon_e$ (%)		
		相当応力=0MPa	相当応力=26MPa	相当応力=52MPa	相当応力=87MPa	相当応力=121MPa		
400	40	-5.05E-02	-	1.06E-01	1.93E-01	2.46E-01		
	77	-7.30E-02	-	2.04E-01	3.61E-01	4.55E-01		
	112	-1.05E-01	-	2.52E-01	4.20E-01	5.55E-01		
490~495	23.5	2.31E-02	-	1.04E-01	-	-		
	40.5	1.15E-02	-	1.39E-01	2.54E-01	-		
	41.5	4.62E-02	-	5.20E-01	-	-		
550	82.5	8.08E-02	-	5.89E-01	-	-		
	41.5	1.04E-01	3.46E-01	-	-	-		
605	82	1.27E-01	4.39E-01	-	-	-		

(\*) オープンチューブの相当歪み( $\epsilon_s$ )および内圧封入管の相当歪み( $\epsilon_e$ )は、オープンチューブおよび内圧封入管の外径変化率に $2/\sqrt{3}$ を乗じることにより求めた。

表11 MA957中性子照射材の照射クリーブ歪み

温度 T (°C)	中性子照射量 $\phi t$ (dpa)	$\epsilon_{irr} = \epsilon_e - \epsilon_s$ (%)			
		相当応力=26MPa	相当応力=52MPa	相当応力=87MPa	相当応力=121MPa
400	40	-	1.56E-01	2.43E-01	2.97E-01
	77	-	2.77E-01	4.34E-01	5.28E-01
	112	-	3.57E-01	5.25E-01	6.59E-01
490~495	23.5	-	8.08E-02	-	-
	40.5	-	1.27E-01	2.42E-01	-
550	41.5	-	4.73E-01	-	-
	82.5	-	5.08E-01	-	-
605	41.5	2.42E-01	-	-	-
	82	3.12E-01	-	-	-

(\*) 照射クリーブ歪み( $\epsilon_{irr}$ )は、内圧封入管の相当歪みからオープンチューブの相当歪みを差引くことにより求めた。

表12 FFTF/MOTA照射MA957の  $\epsilon_{irr}/\sigma$  ( $\epsilon_{irr}$ : 照射クリープ相当歪み、 $\sigma$ : 相当応力)

温度 T (°C)	中性子照射量 $\phi t$ (dpa)	$\epsilon_{irr}/\sigma$ (%/MPa)		
		相当応力=26MPa	相当応力=52MPa	相当応力=87MPa
400	40	—	3.00E-03	2.81E-03
	77	—	5.34E-03	5.02E-03
	112	—	6.86E-03	6.06E-03
490~495	23.5	—	1.56E-03	—
	40.5	—	2.44E-03	2.80E-03
	41.5	—	9.11E-03	—
550	82.5	—	9.78E-03	—
	41.5	9.33E-03	—	—
605	82	1.20E-02	—	—
				相当応力=121MPa
				2.45E-03
				4.36E-03
				5.44E-03



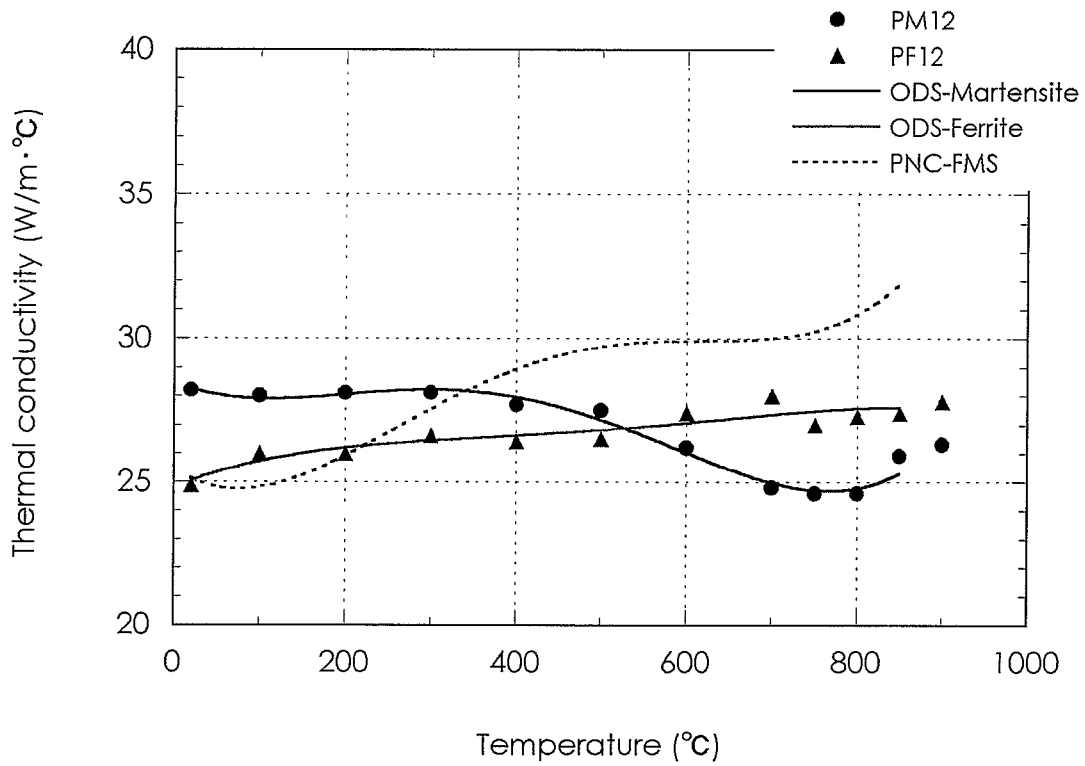


図1 ODS鋼の熱伝導率

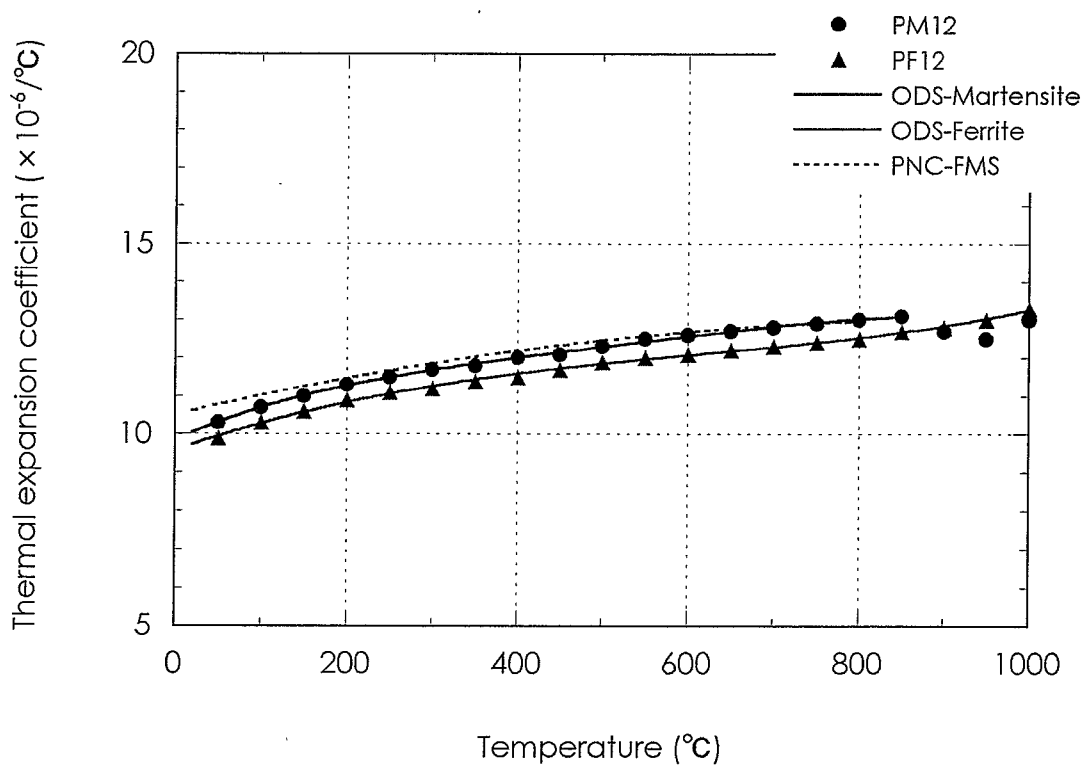


図2 ODS鋼の平均熱膨張率

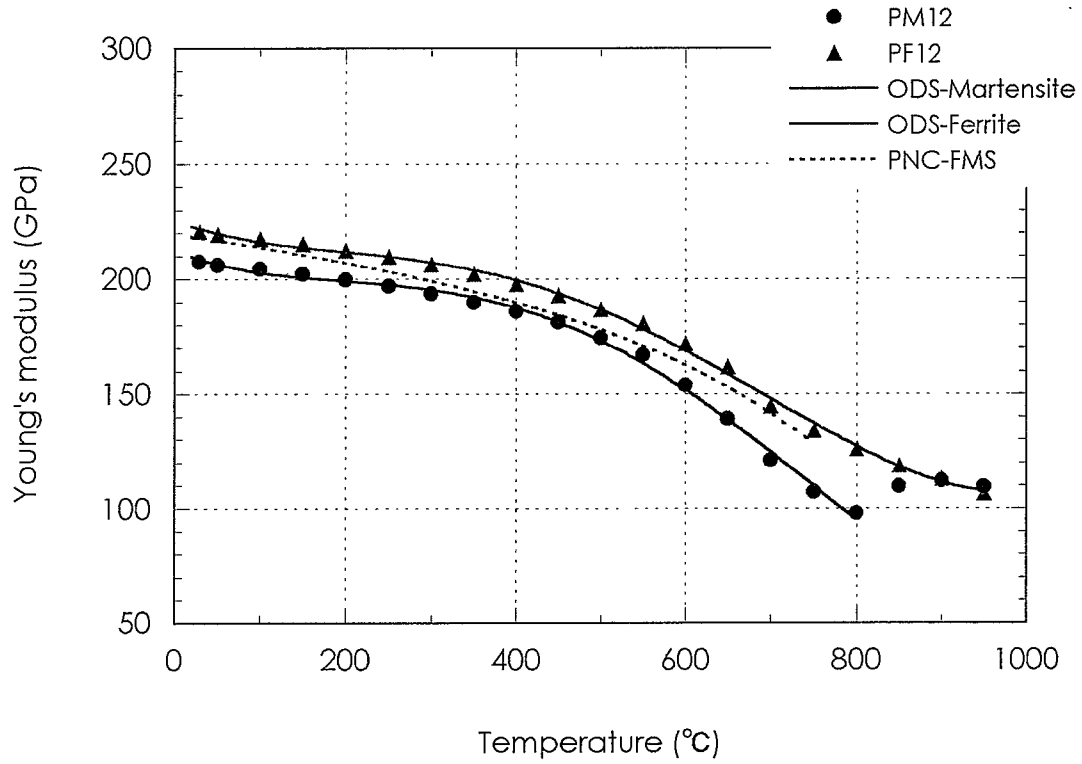


図3 ODS鋼のヤング率

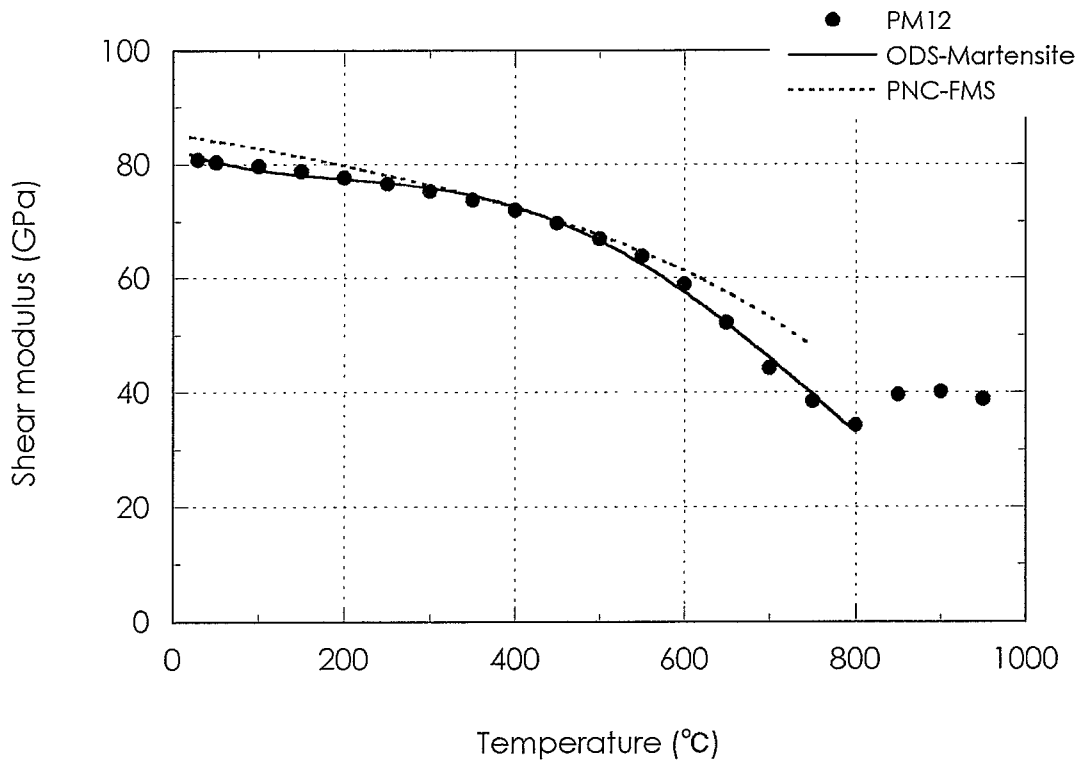


図4 ODS鋼の剛性率

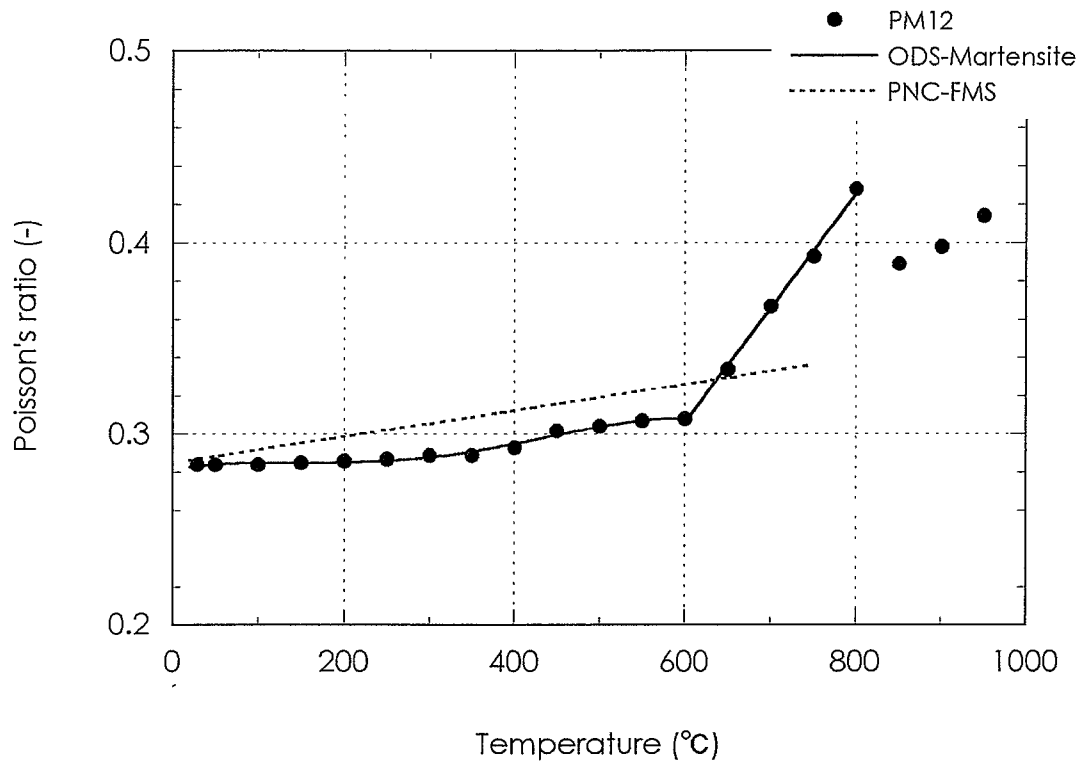


図5 ODS鋼のポアソン比

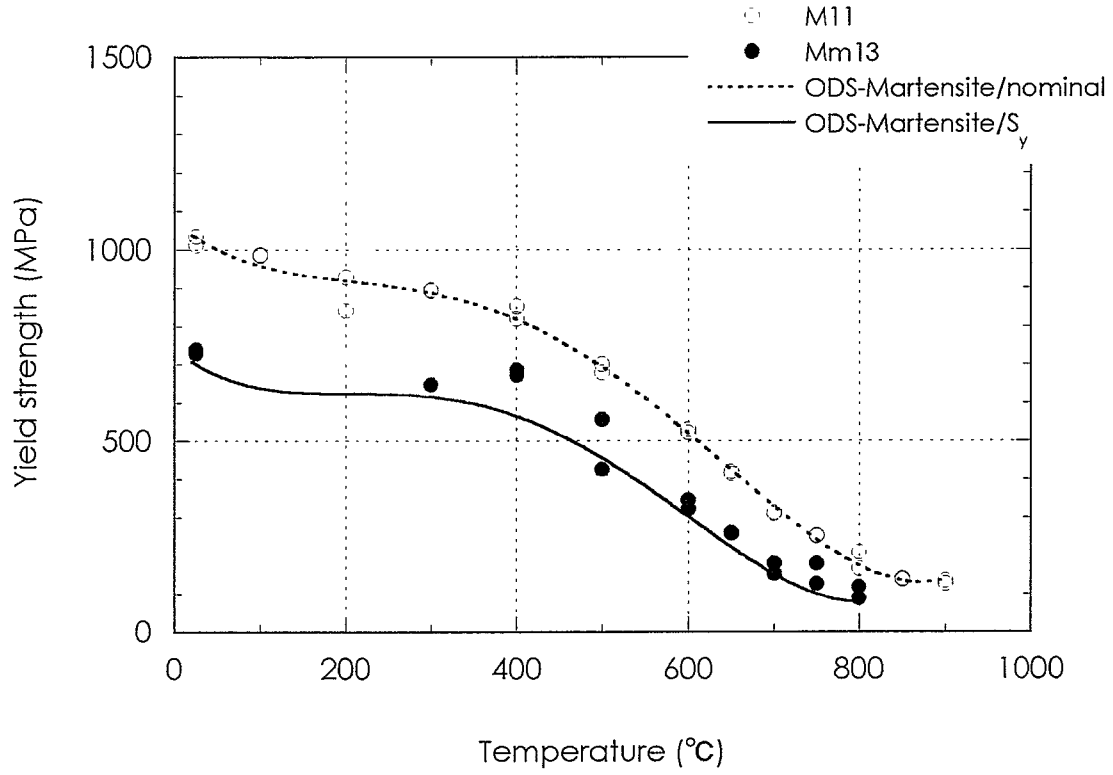


図6 マルテンサイト系ODS鋼被覆管の降伏点

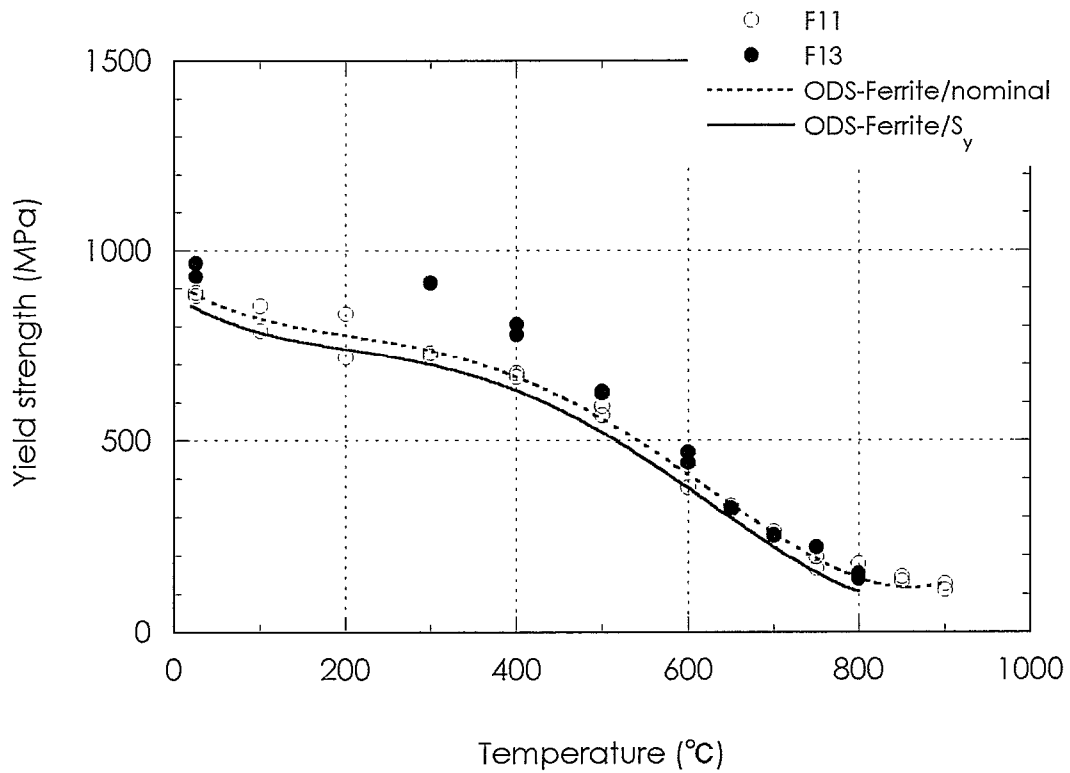


図7 フェライト系ODS鋼被覆管の降伏点

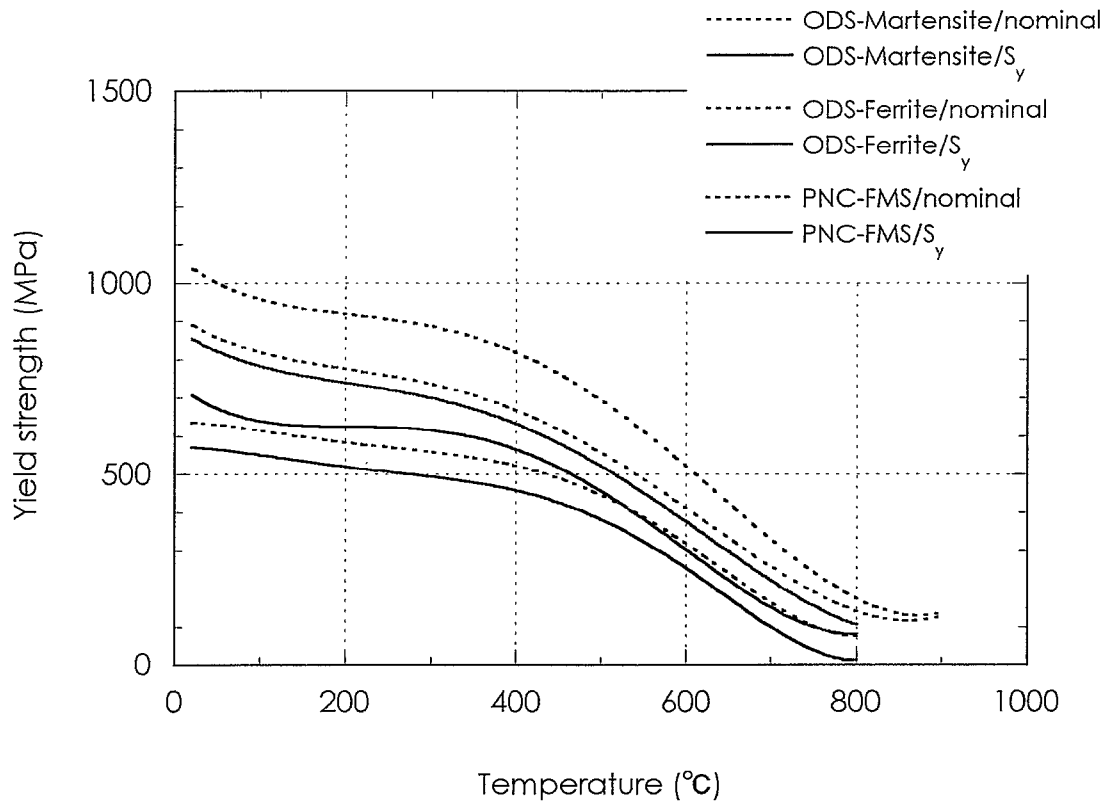


図8 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管の降伏点の比較

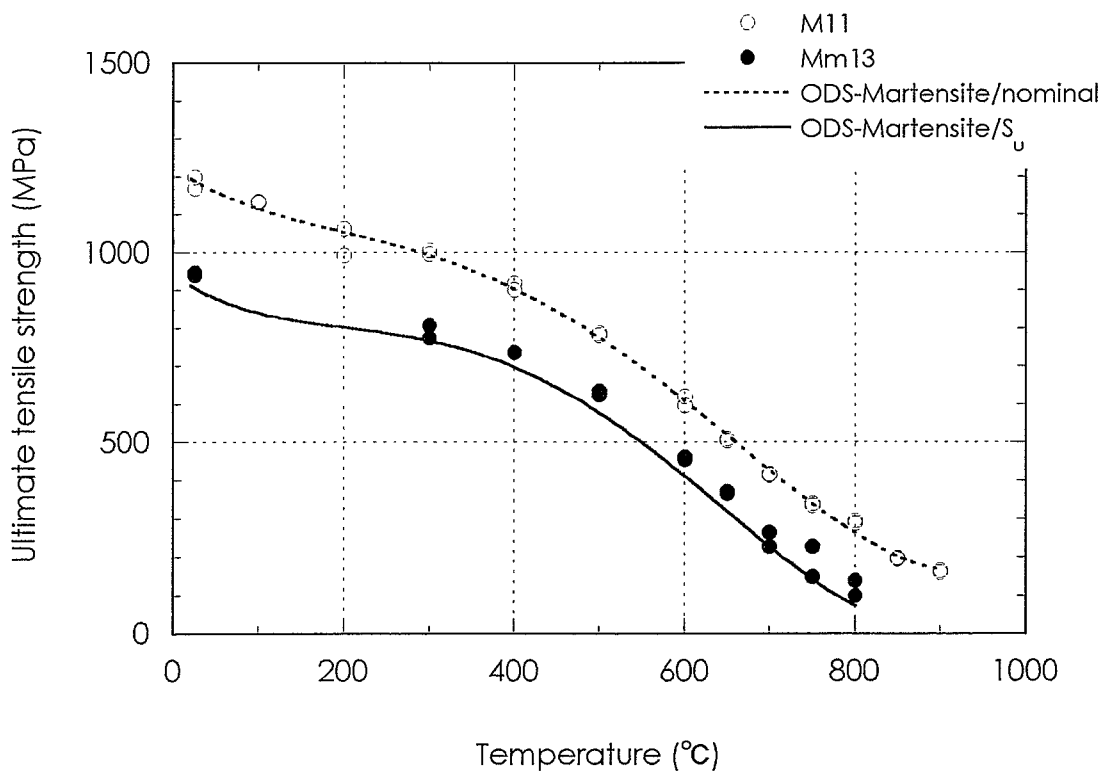


図9 マルテンサイト系ODS鋼被覆管の引張強さ

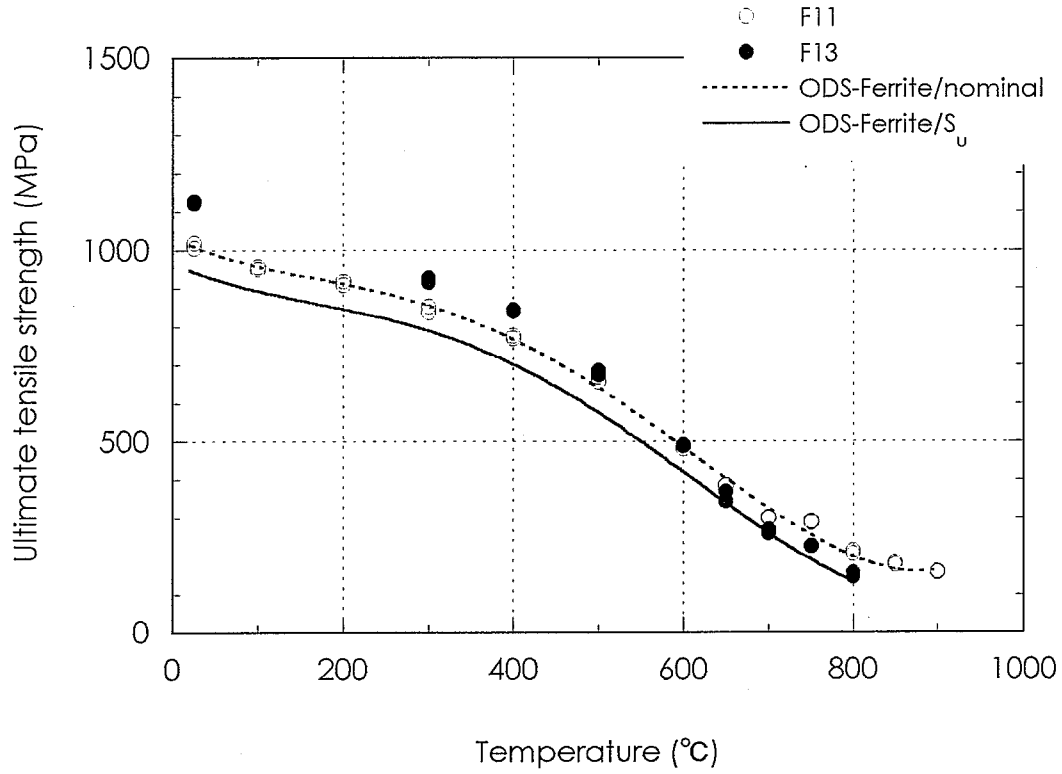


図10 フェライト系ODS鋼被覆管の引張強さ

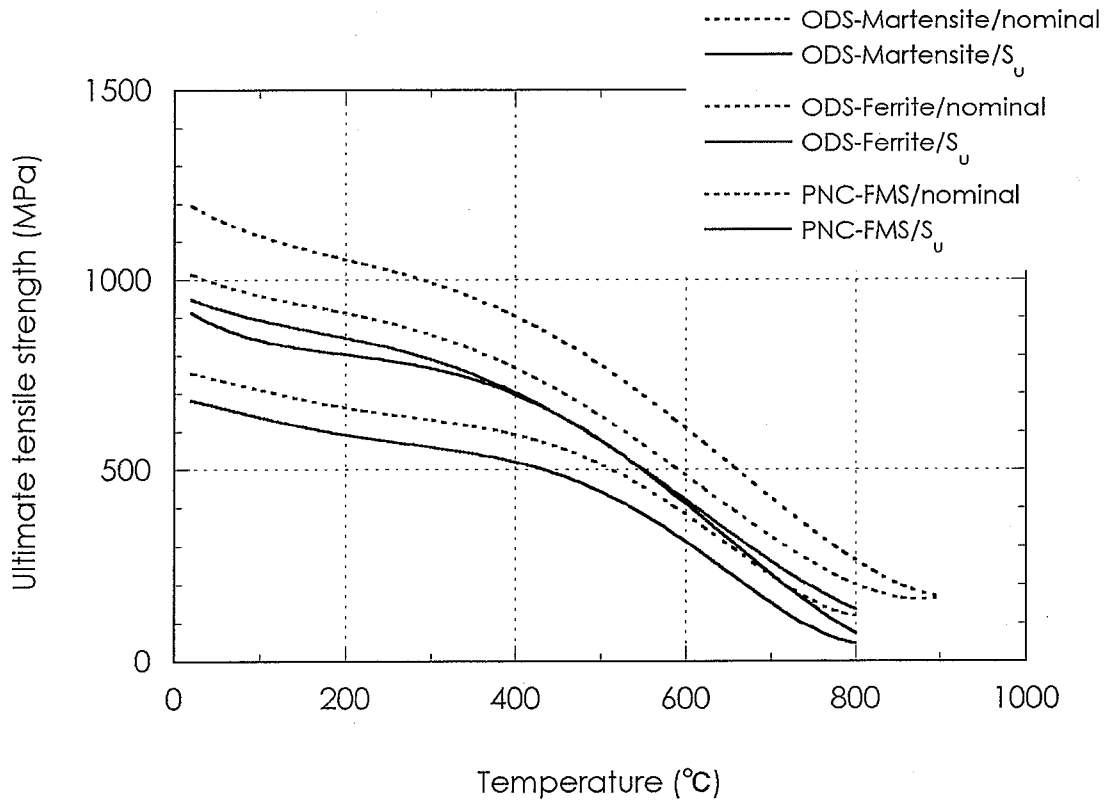


図11 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管の引張強さの比較

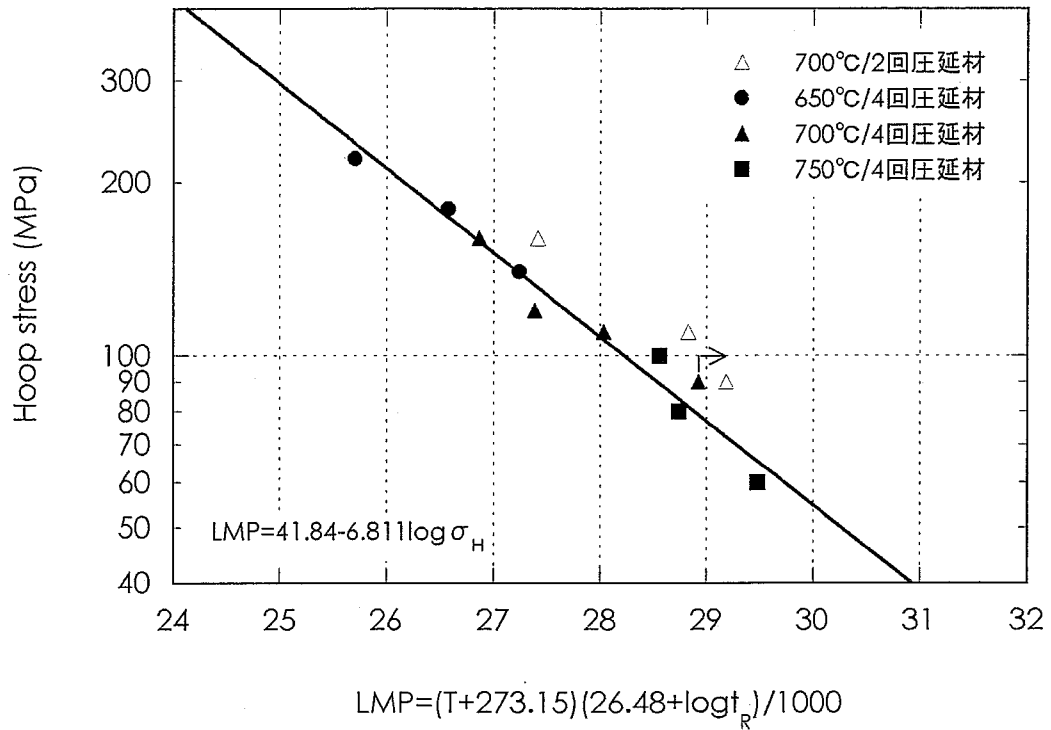


図12 マルテンサイト系ODS鋼被覆管(Mm13)のクリープ破断応力強さ

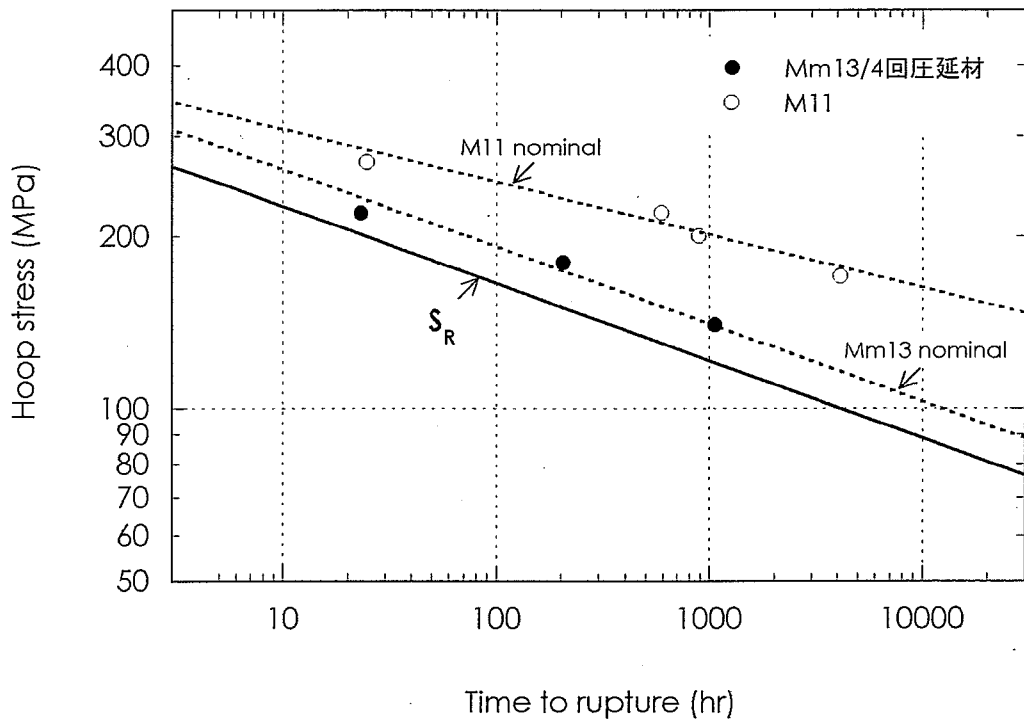


図13 マルテンサイト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(650°C)

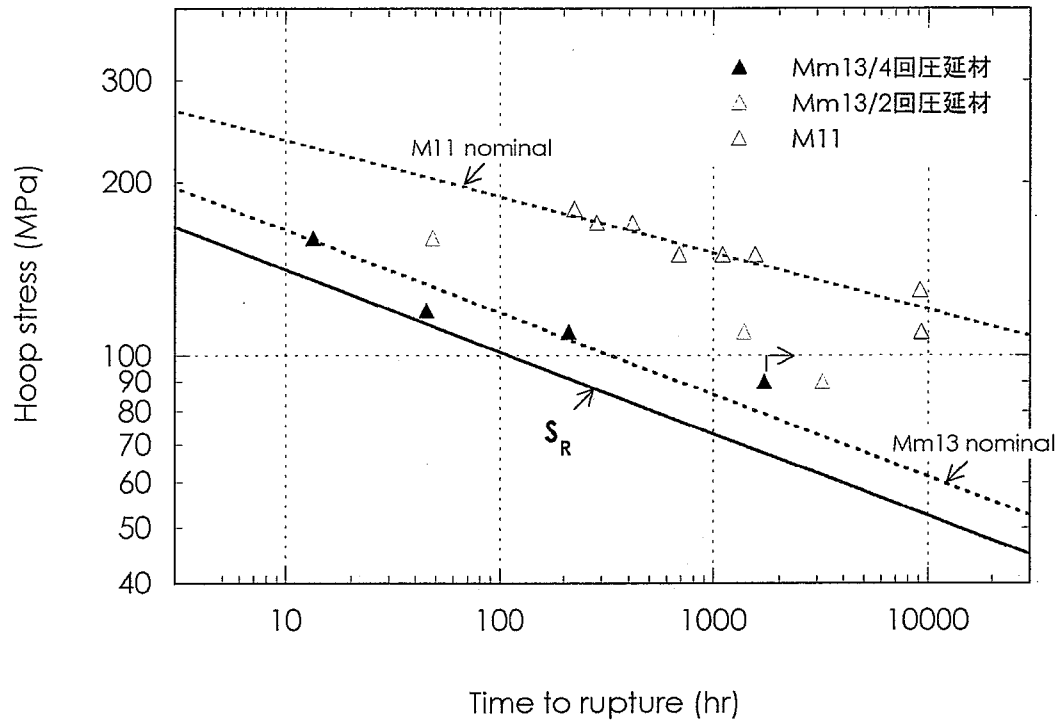


図14 マルテンサイト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(700°C)

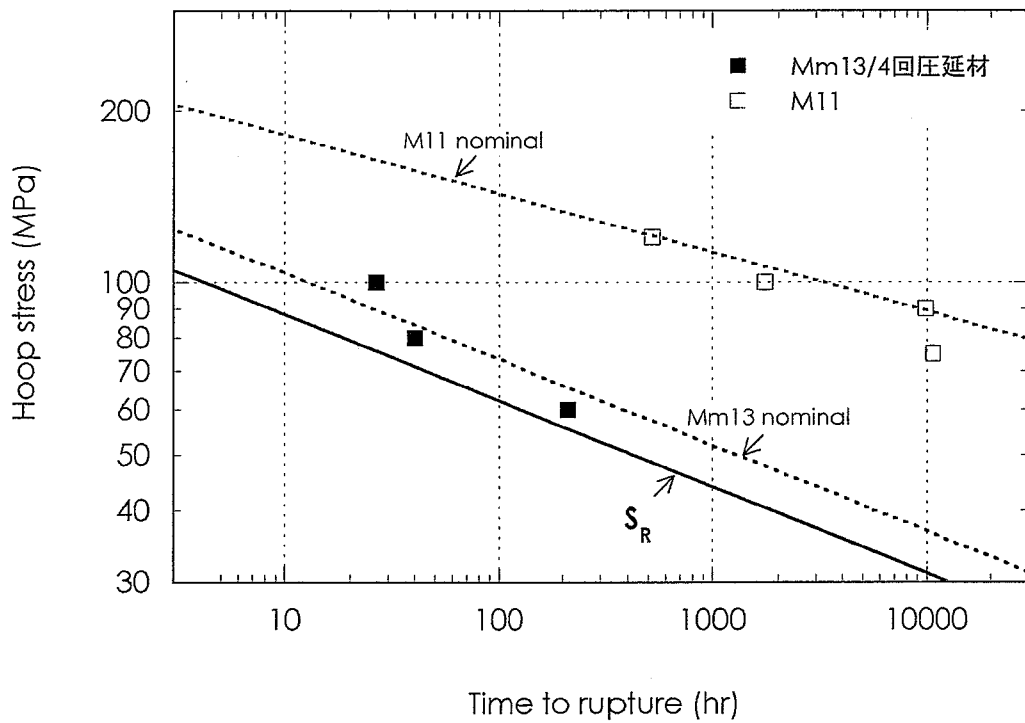


図15 マルテンサイト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(750°C)



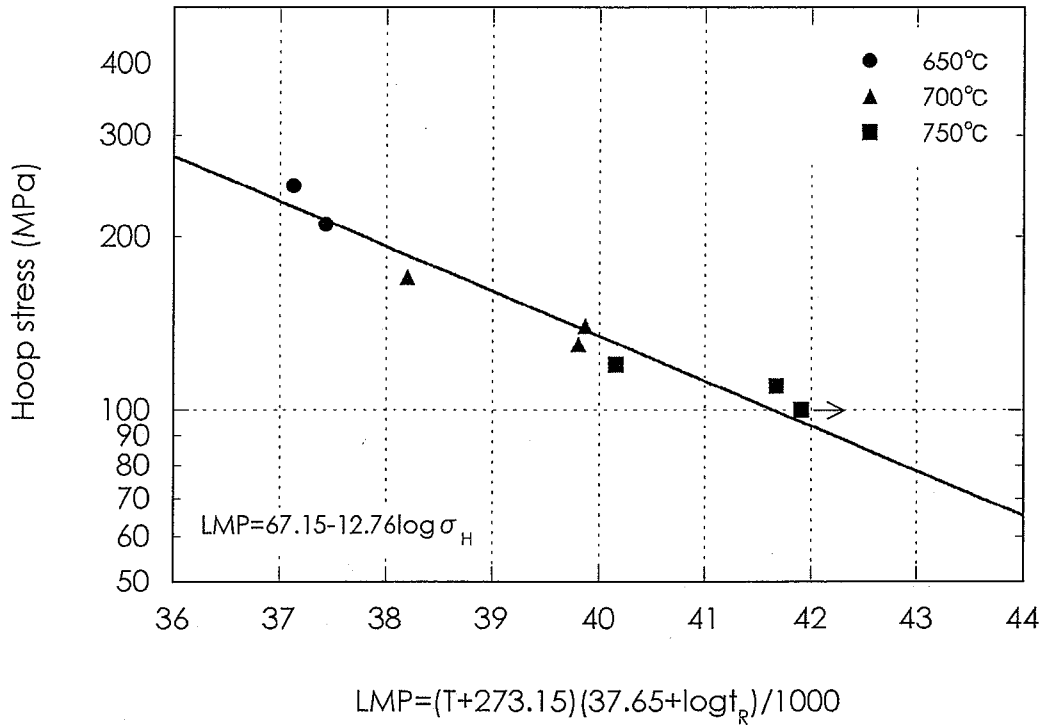


図16 フェライト系ODS鋼被覆管(F13)のクリープ破断応力強さ

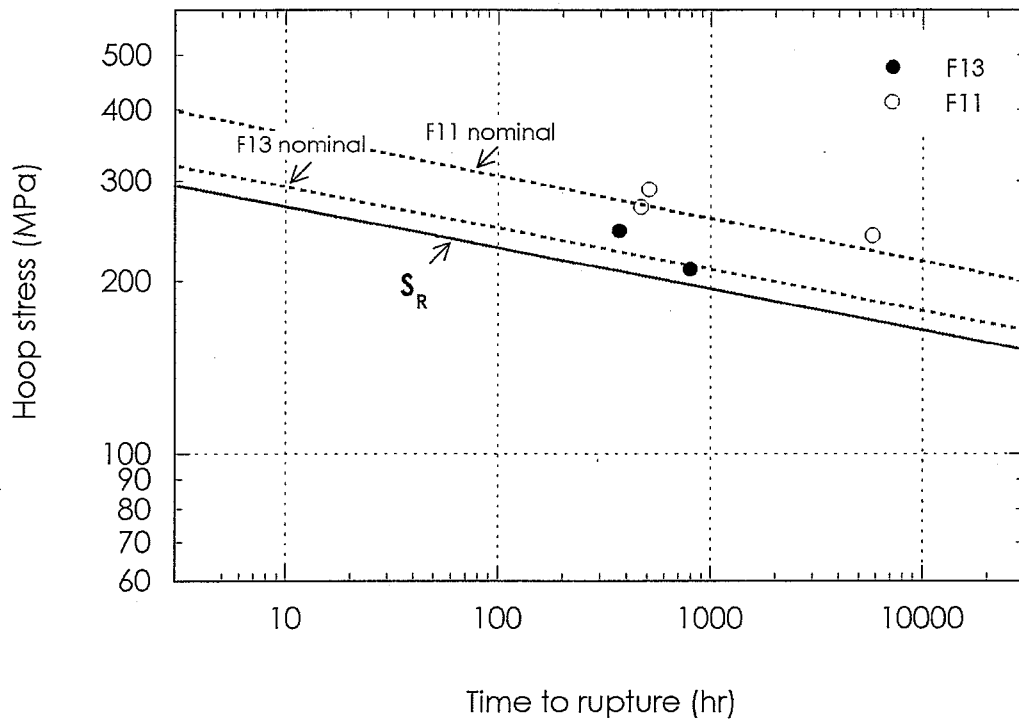


図17 フェライト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(650°C)

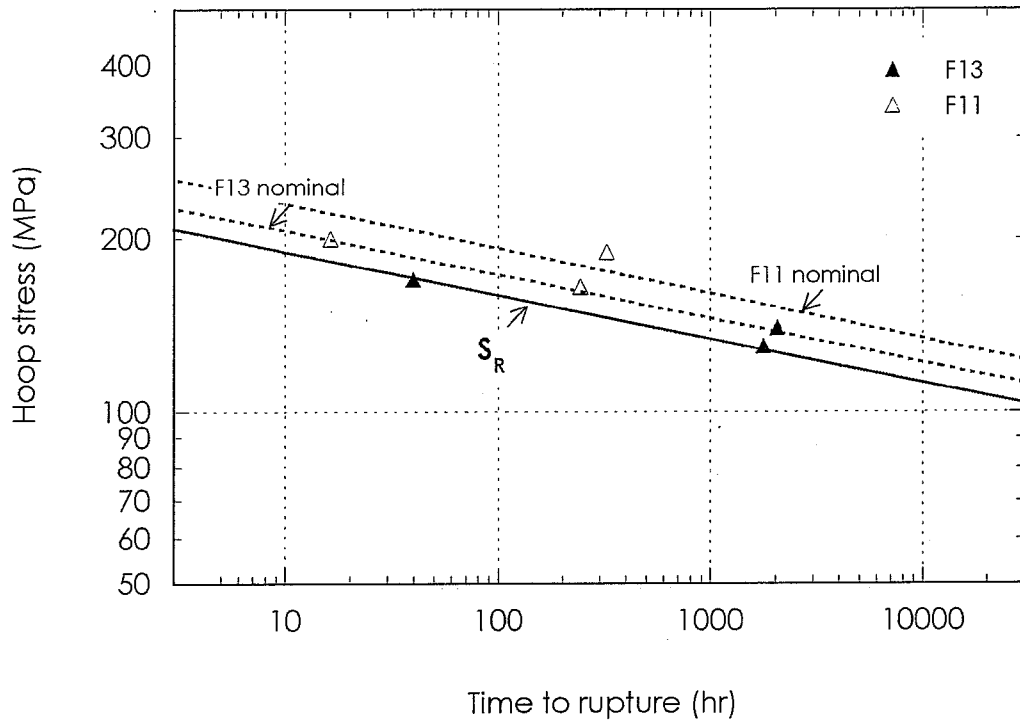


図18 フェライト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(700°C)

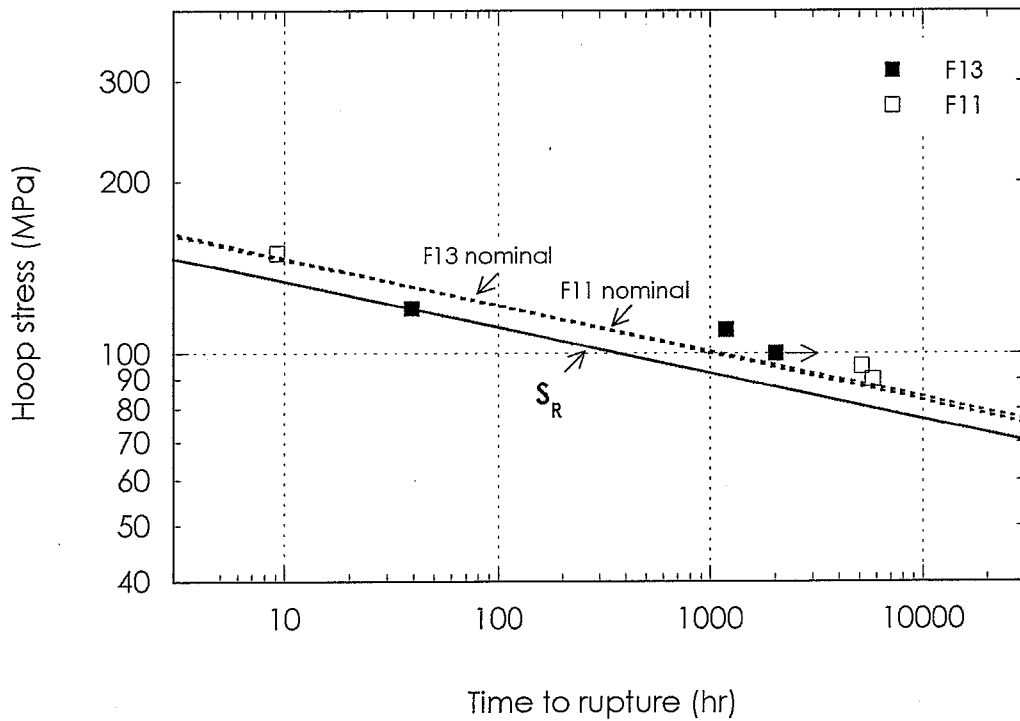


図19 フェライト系ODS鋼被覆管のクリープ破断応力強さ(750°C)

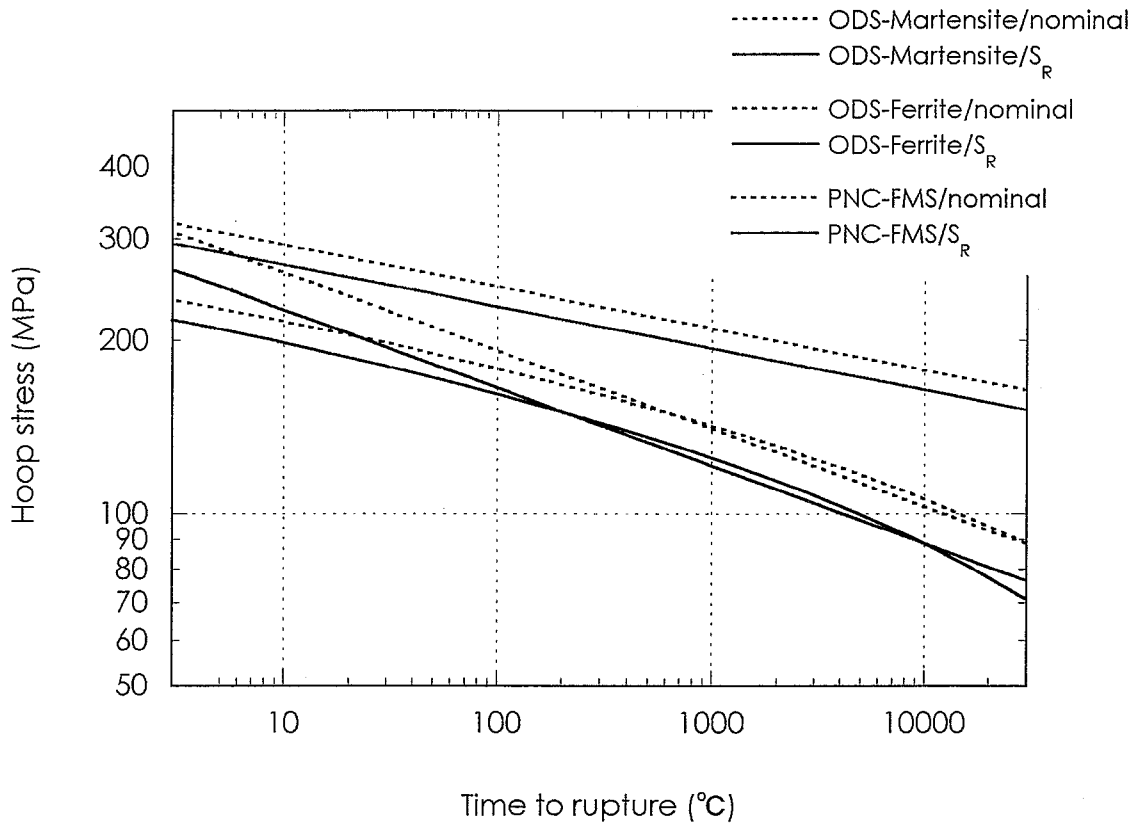


図20 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管のクリープ破断応力強さの比較(650°C)

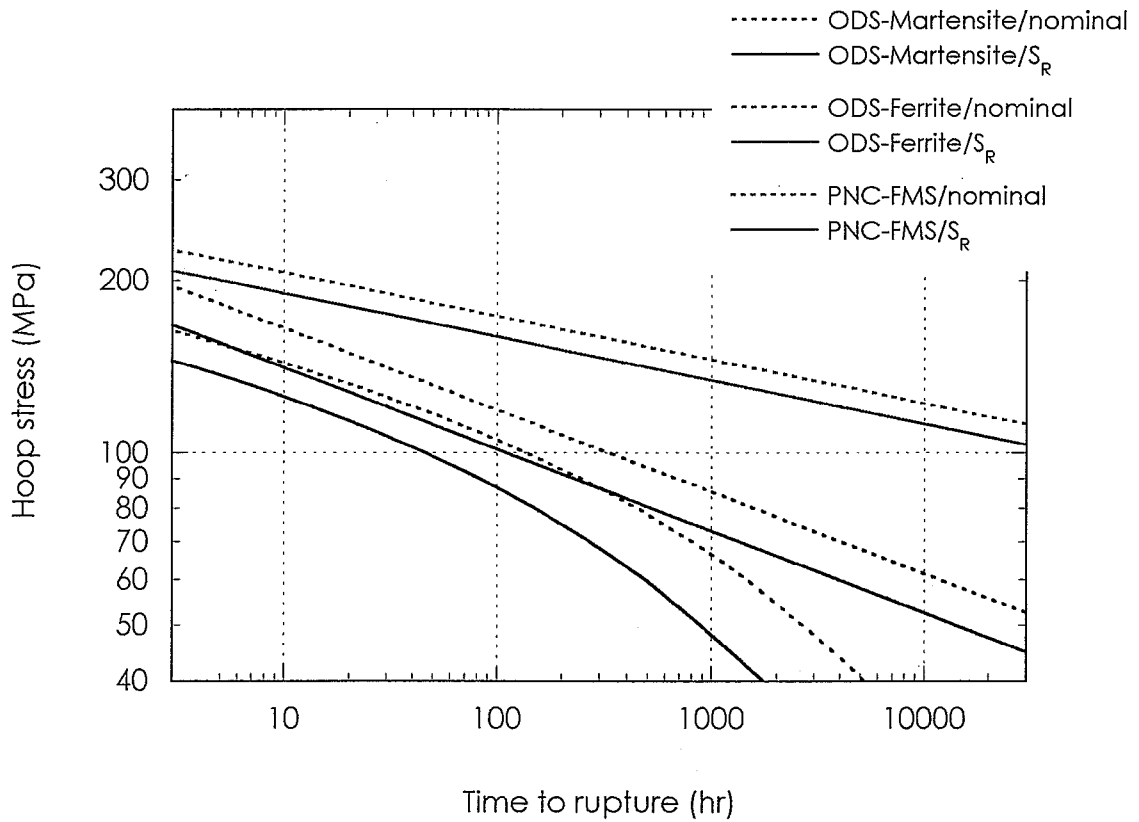


図21 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管のクリープ破断応力強さの比較(700°C)

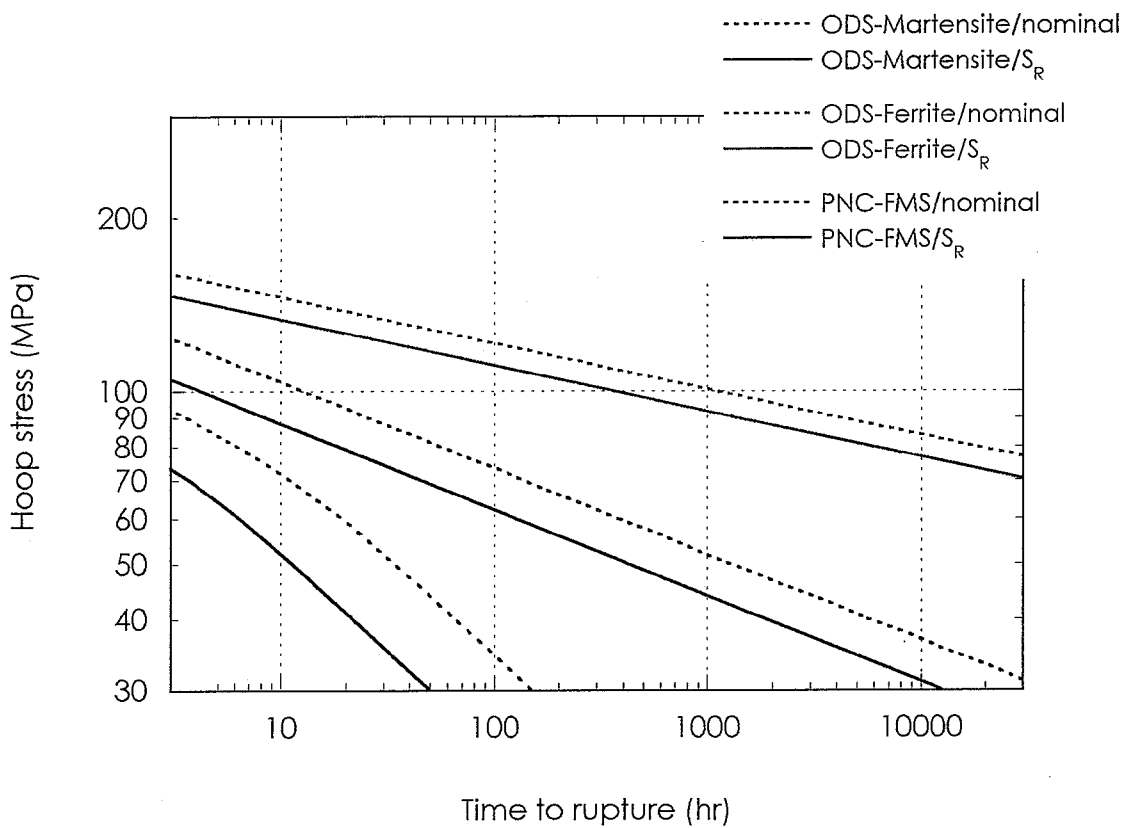


図22 ODS鋼被覆管とPNC-FMS被覆管のクリープ破断応力強さの比較(750°C)

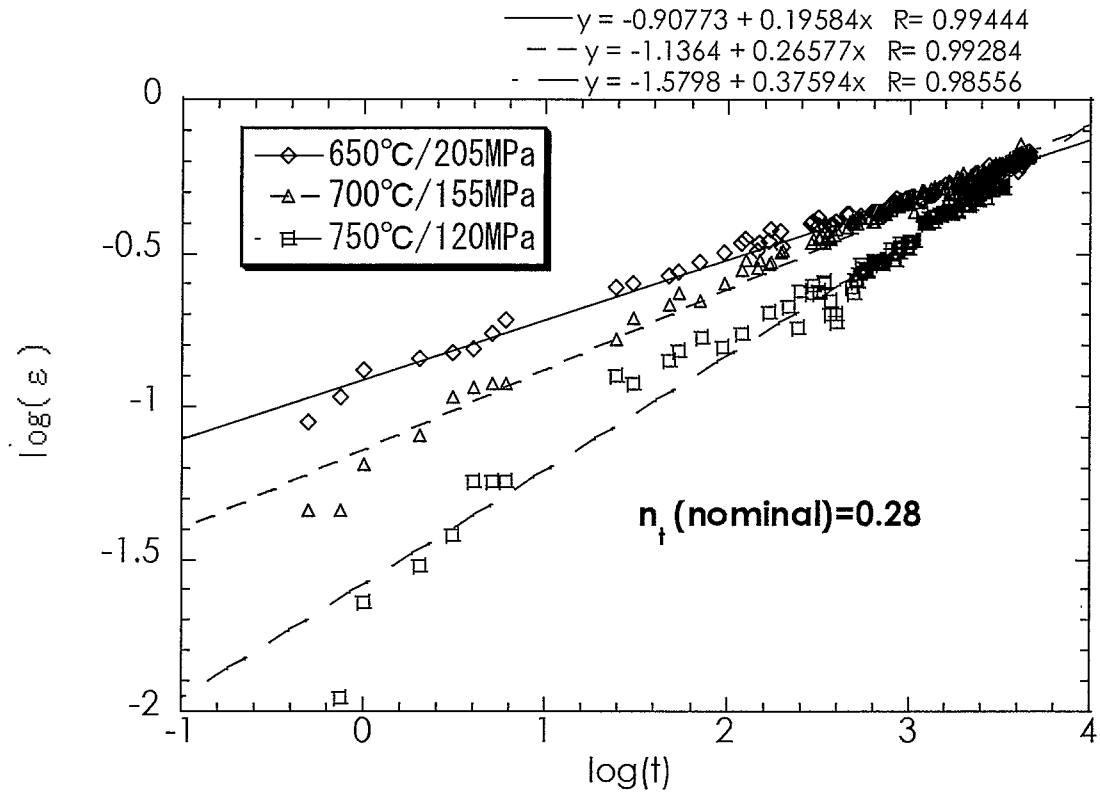
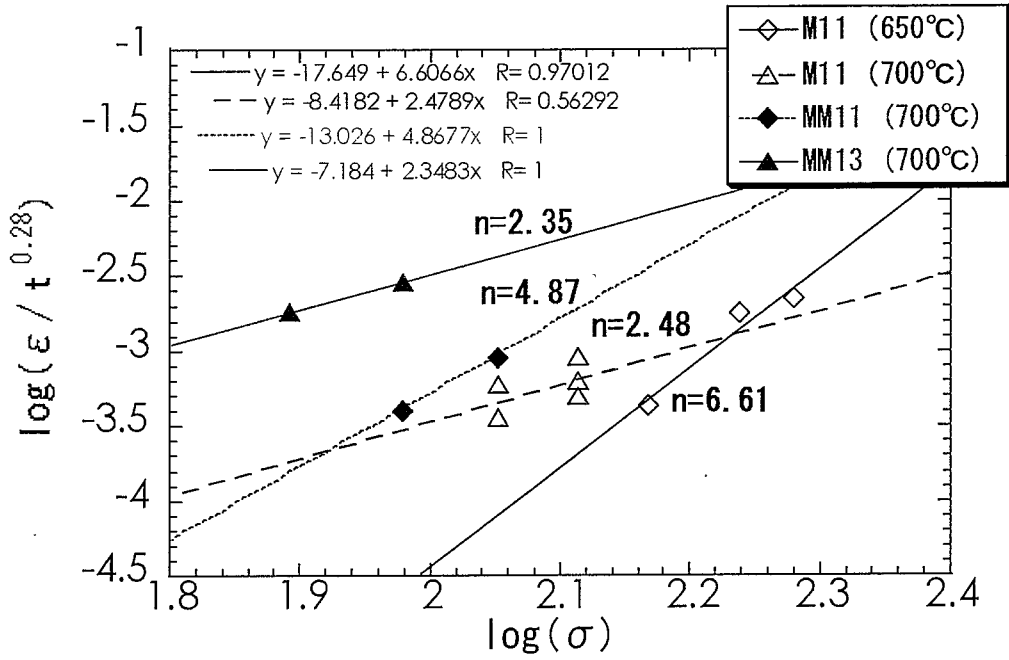
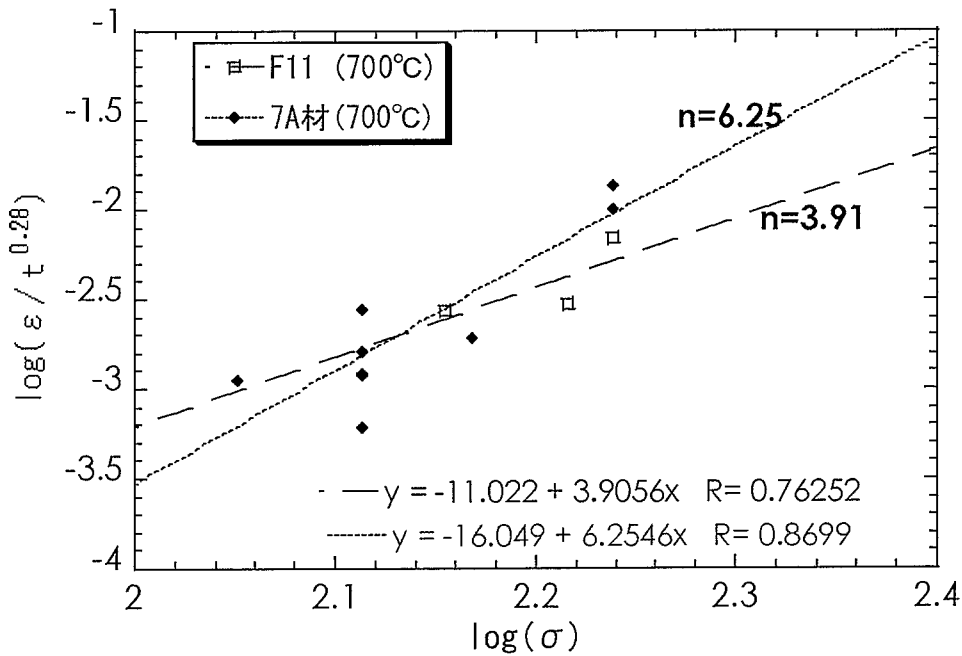


図23 M11熱クリープ歪みの時間依存係数の算出

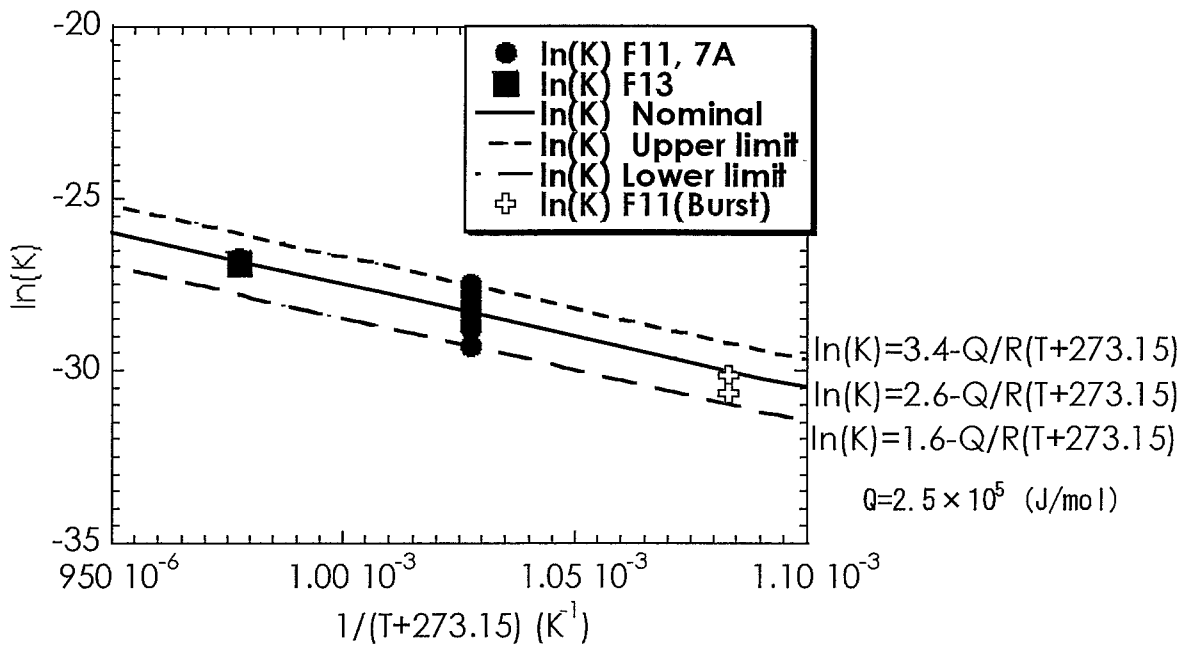
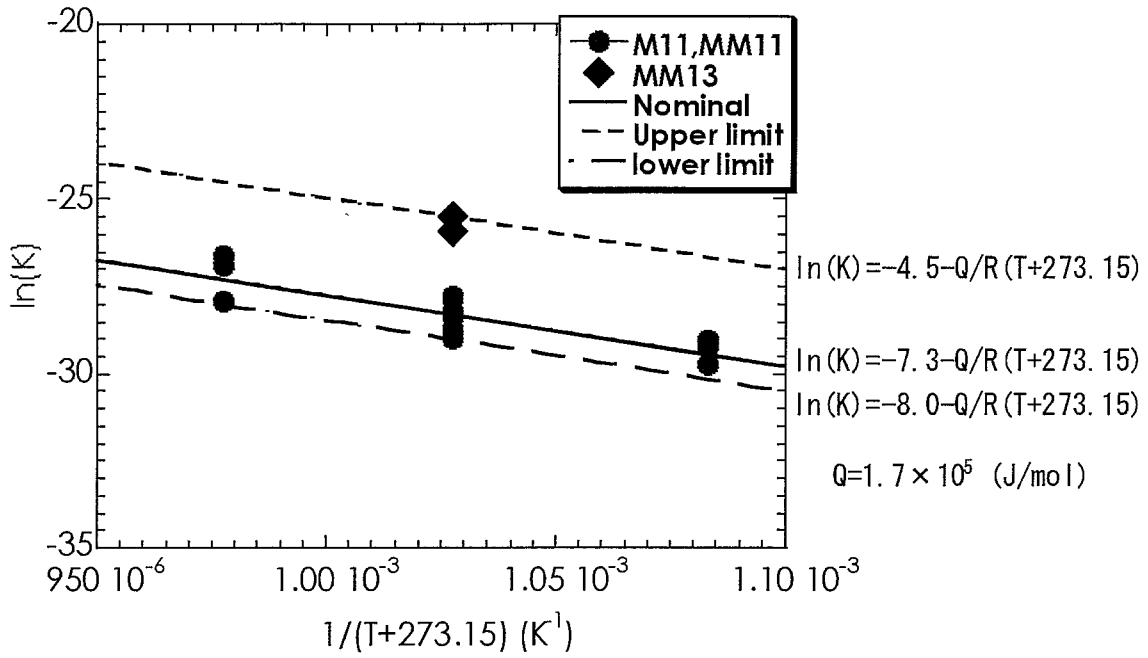


(1) マルテンサイト系ODS鋼



(2) フェライト系ODS鋼

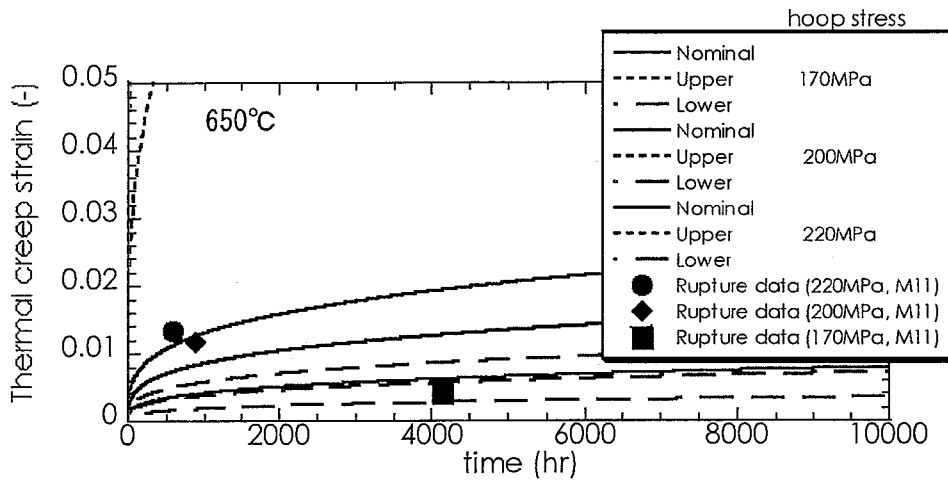
図24 (1)マルテンサイト系ODS鋼または(2)フェライト系ODS鋼の応力指数の策定



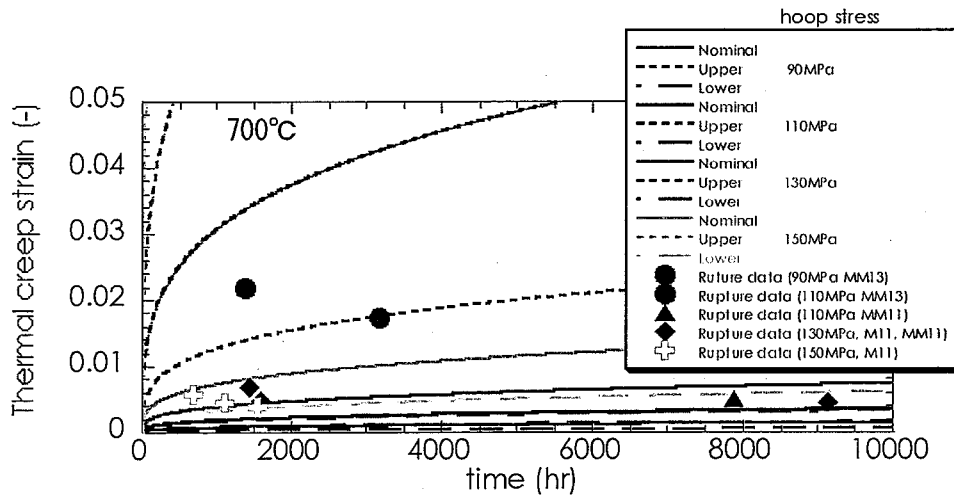
(1) マルテンサイト系ODS鋼

(2) フェライト系ODS鋼

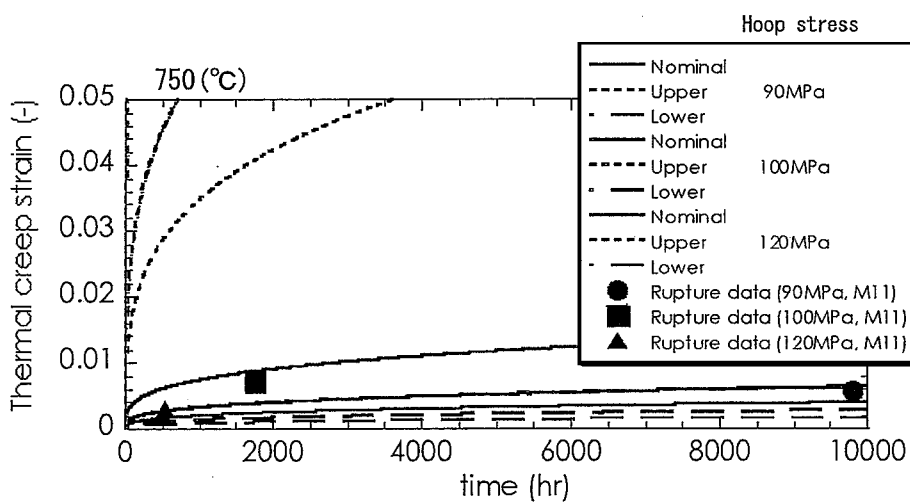
図25 (1)マルテンサイト系ODS鋼または(2)フェライト系ODS鋼の温度係数の策定



(1) 650°Cの場合



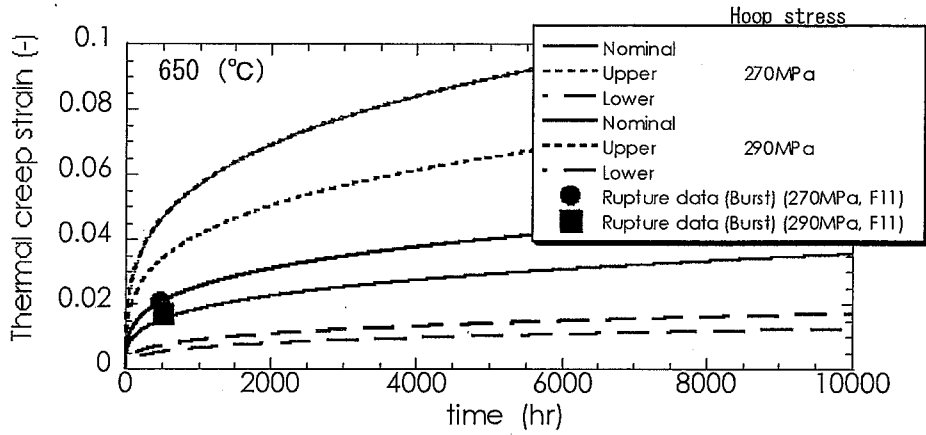
(2) 700°Cの場合



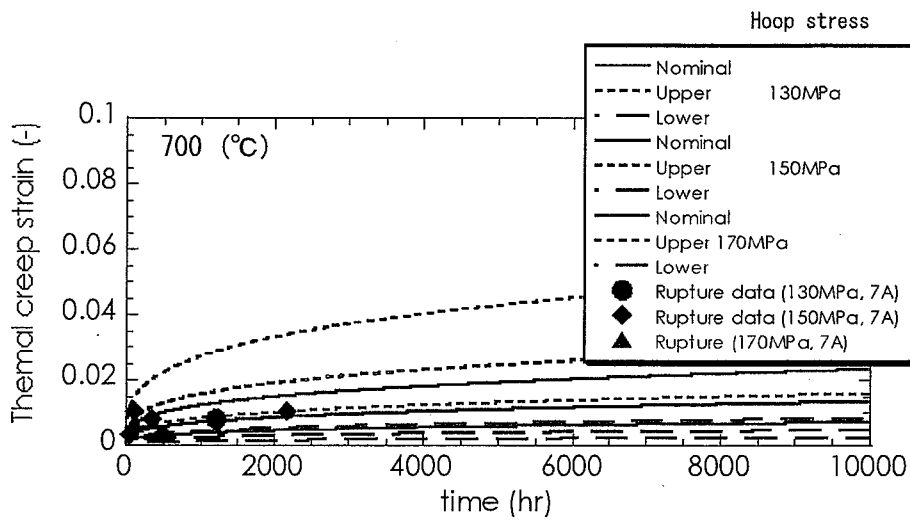
(3) 750°Cの場合

図26 マルテンサイト系ODS鋼の熱クリープ歪み評価式の  
計算結果とクリープ破断データ

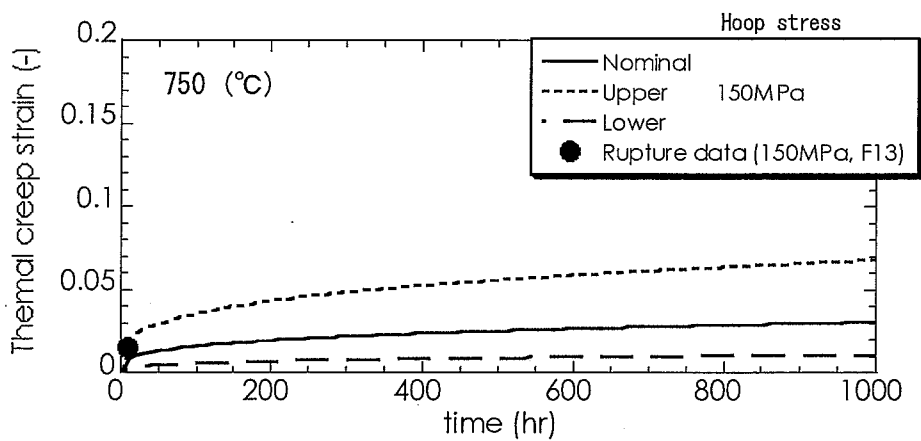




(1) 650°Cの場合



(2) 700°Cの場合



(3) 750°Cの場合

図27 フェライト系ODS鋼の熱クリープ歪み評価式の計算結果とクリープ破断データ

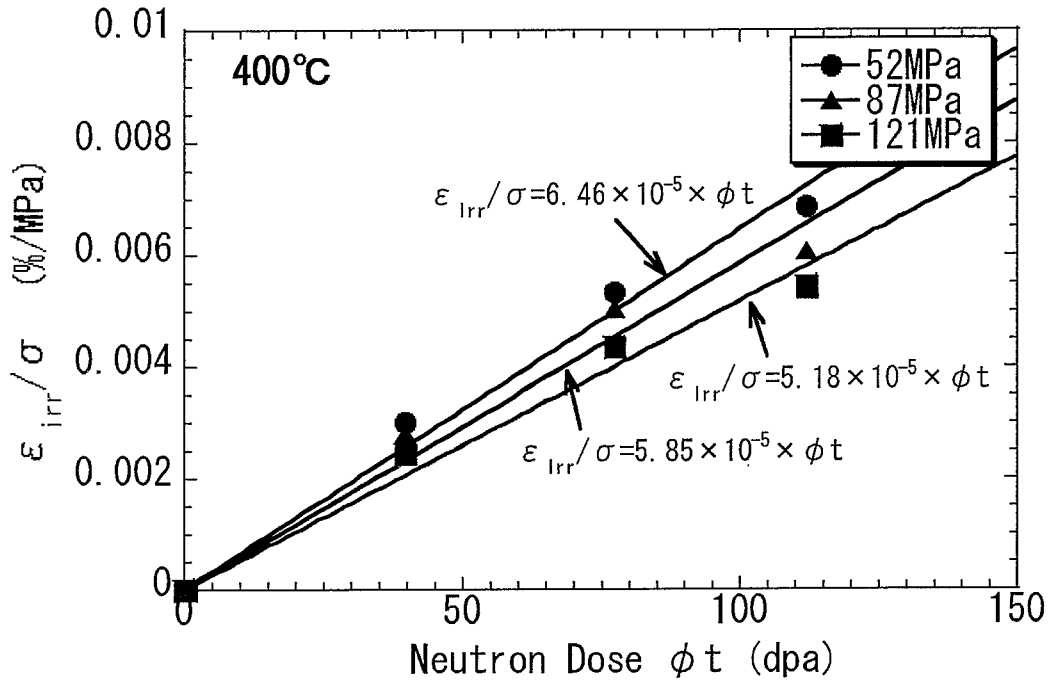


図28 MA957の照射クリープ歪みの中性子照射量依存性 (～400°C) [3]

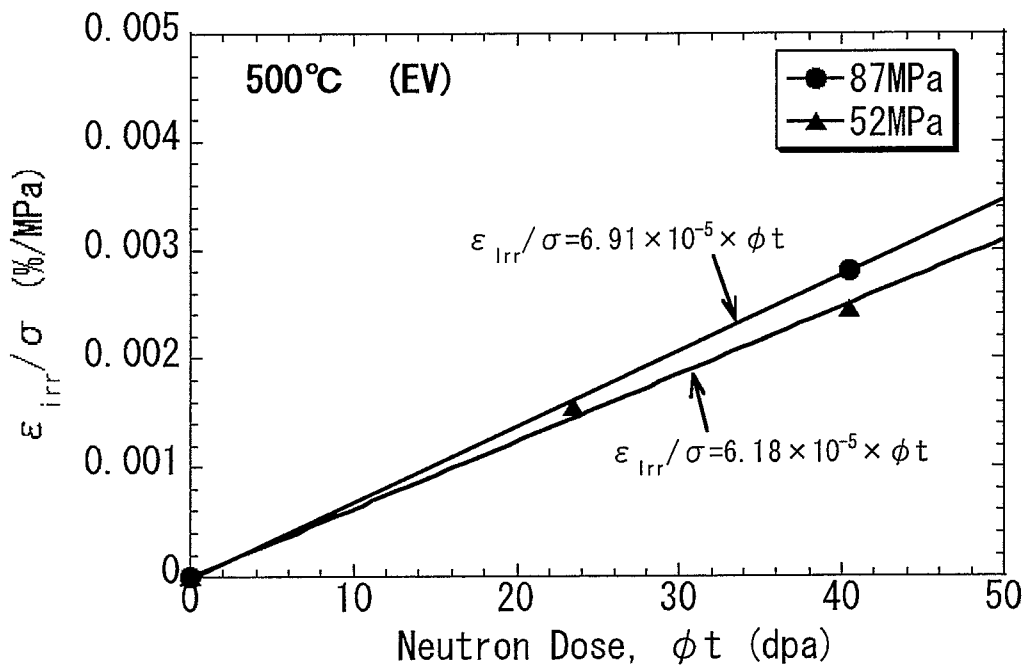


図29 MA957の照射クリープ歪みの中性子照射量依存性 (～500°C) [2]

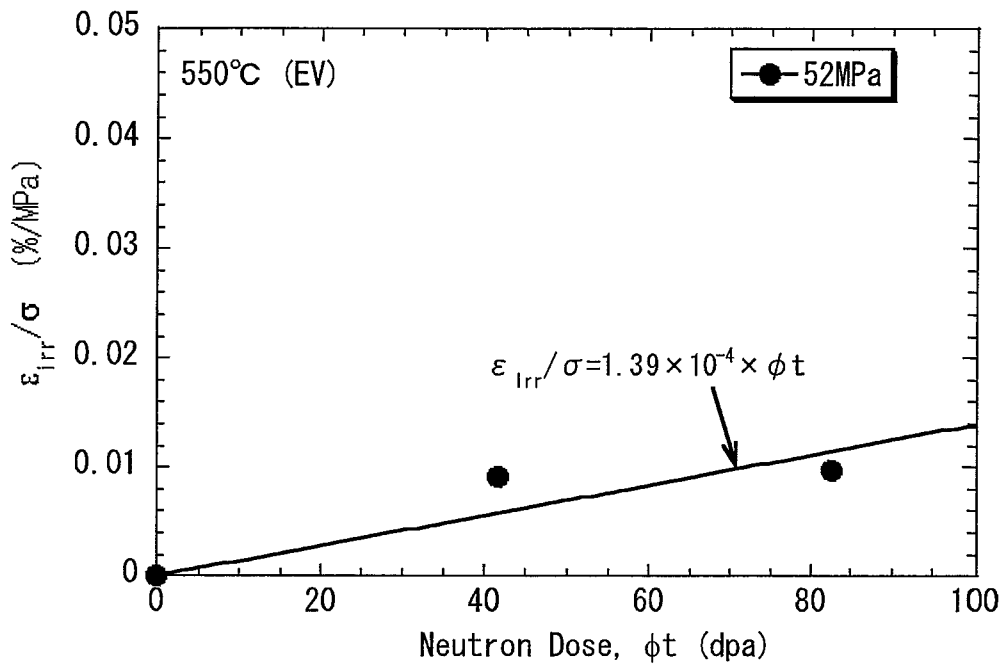


図30 MA957の照射クリープ歪みの中性子照射量依存性 (～550°C) [2]

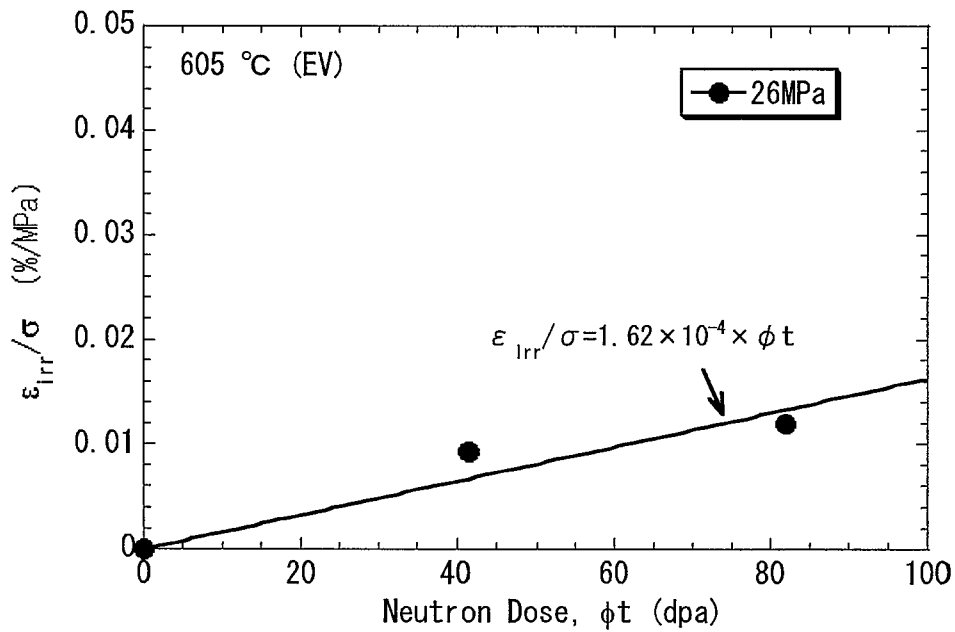


図31 MA957の照射クリープ歪みの中性子照射量依存性 (～605°C) [2]

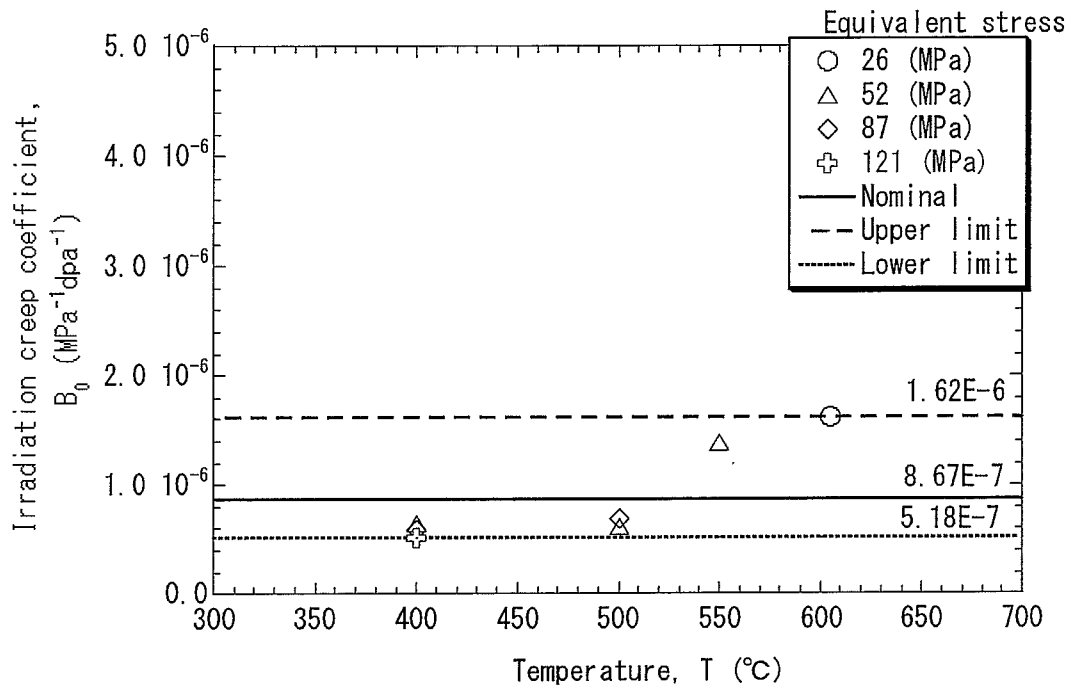


図32 照射クリープ係数 ( $B_0$ )の照射温度依存性

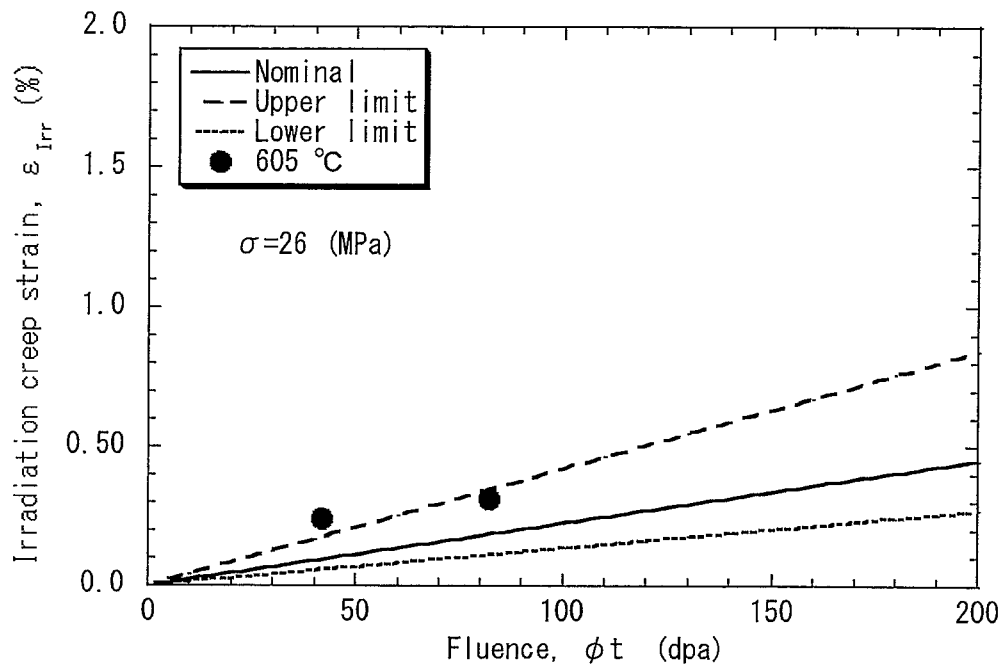


図33 照射クリープ歪み評価式と実測値の比較 ( $\sigma=26$  MPa)

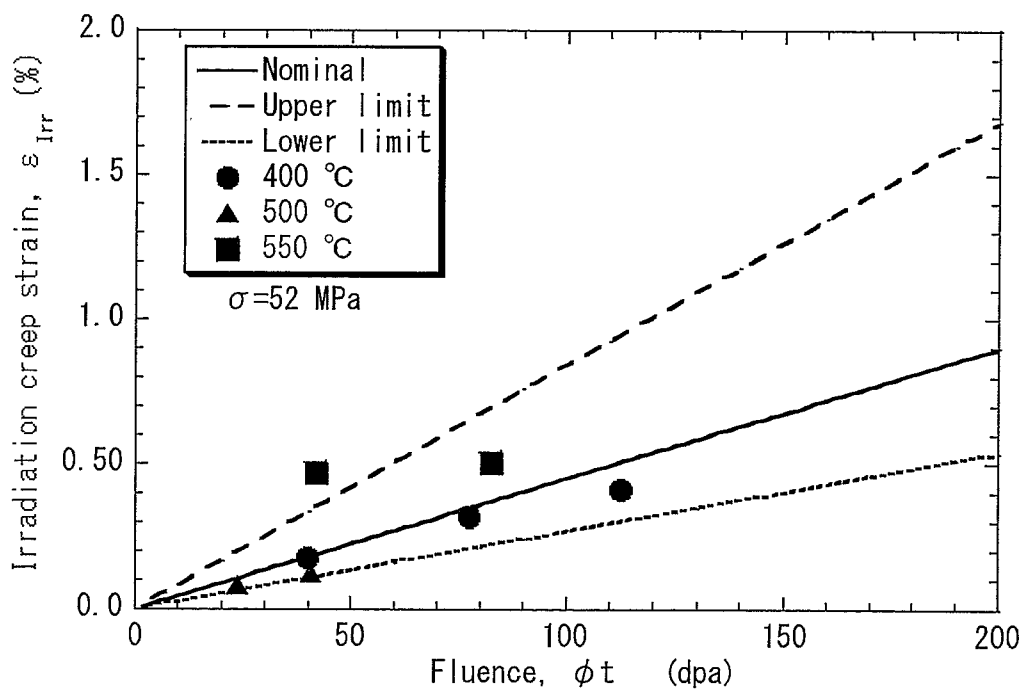


図34 照射クリープ歪み評価式と実測値の比較 ( $\sigma=52$ MPa)

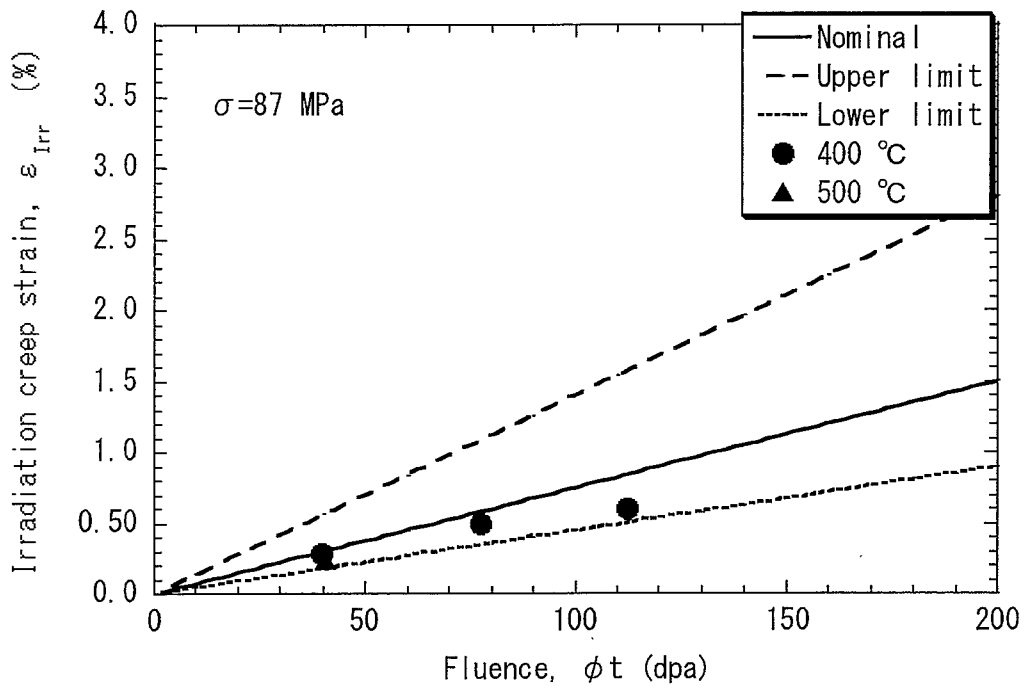


図35 照射クリープ歪み評価式と実測値の比較 ( $\sigma=87\text{MPa}$ )

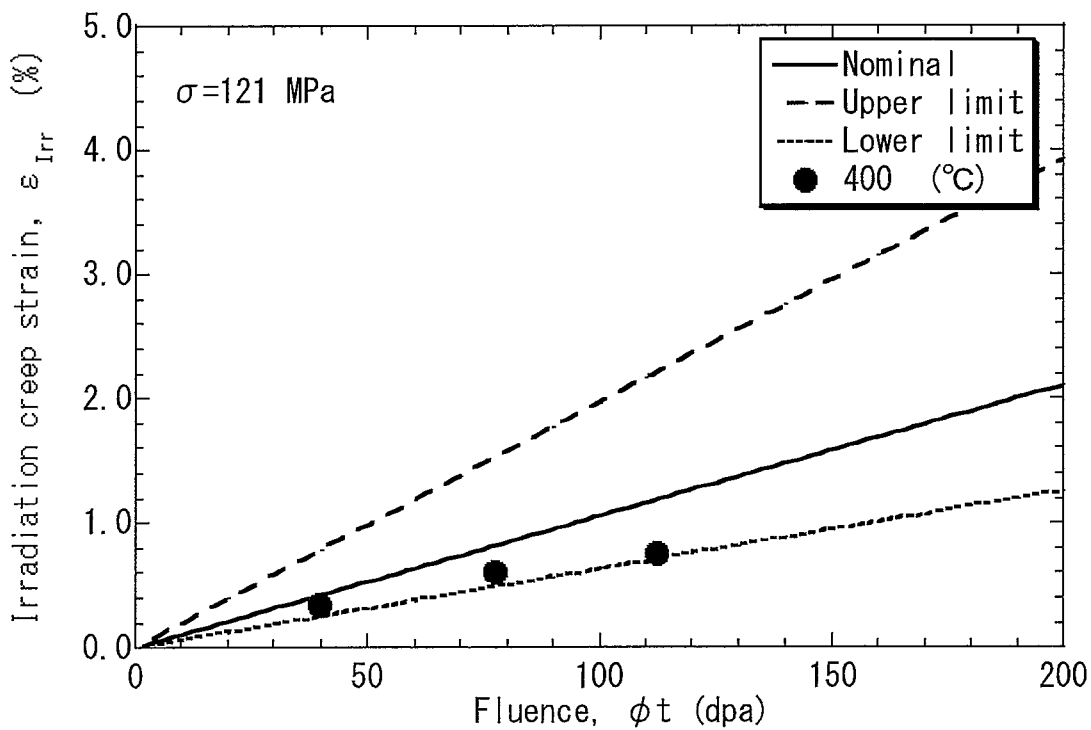
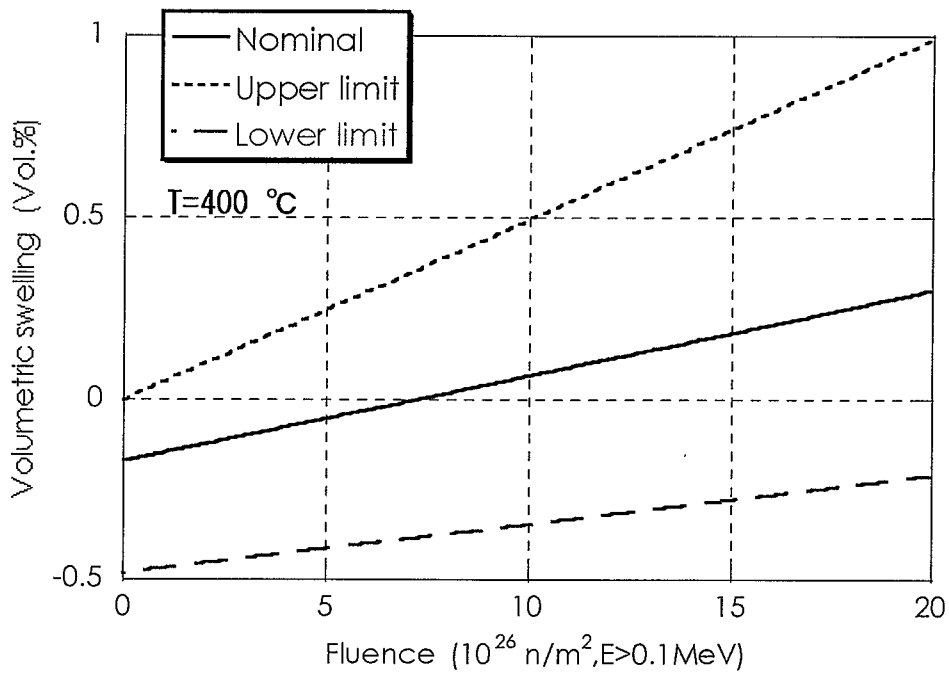
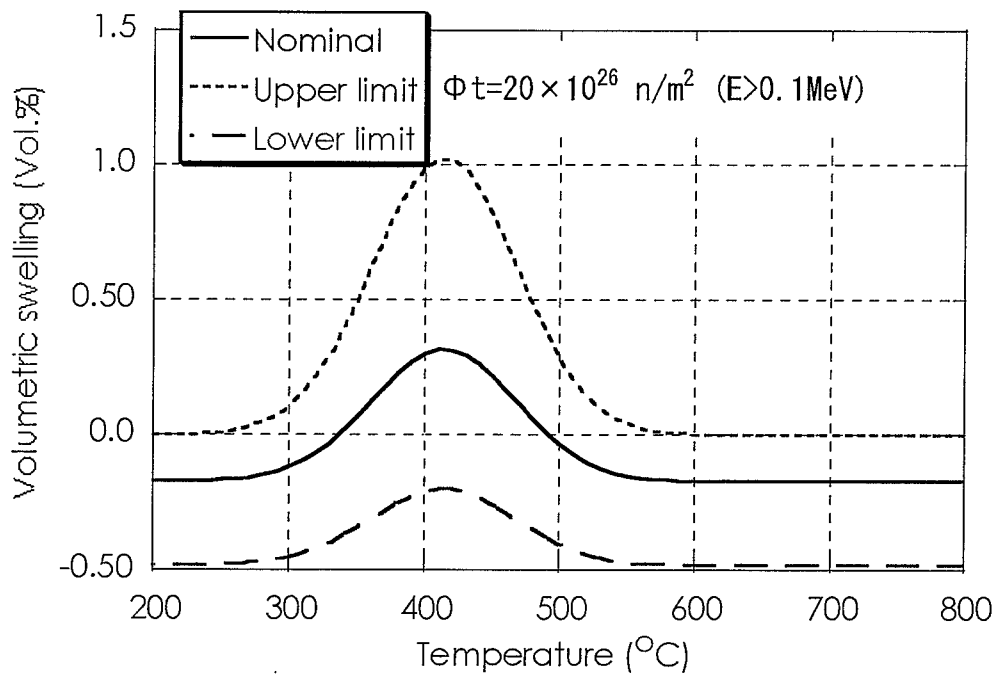


図36 照射クリープ歪み評価式と実測値の比較 ( $\sigma=121\text{MPa}$ )

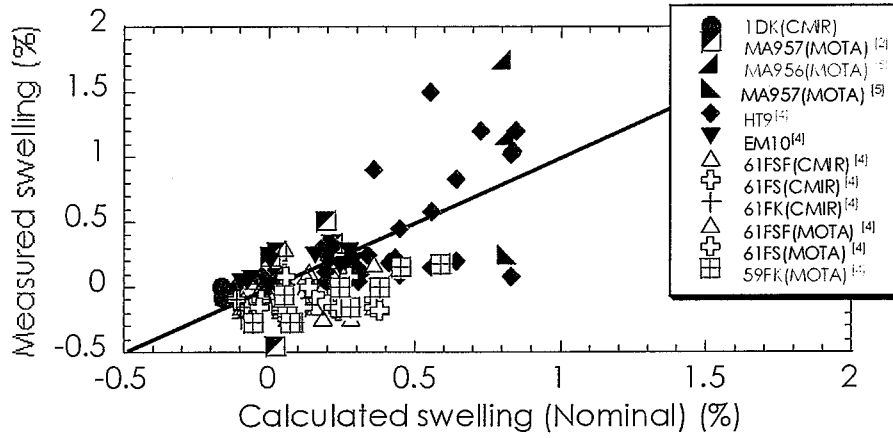


(1) 中性子照射量依存性 ( $T=400^\circ\text{C}$ )

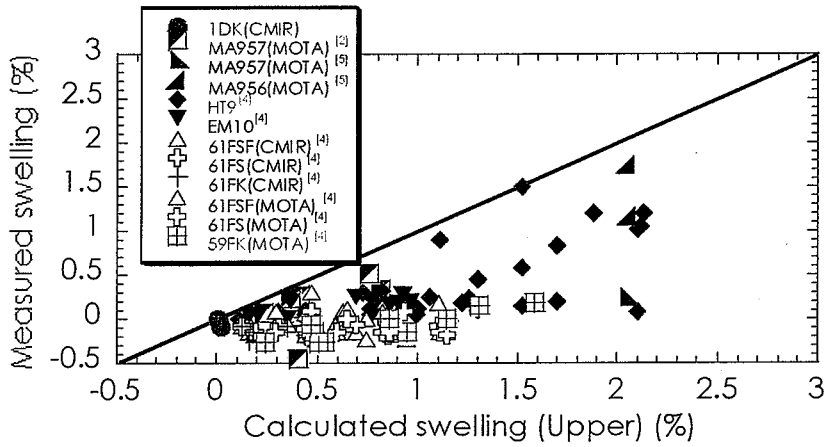


(2) 照射温度依存性 ( $\Phi t=20 \times 10^{26} \text{ n/m}^2 (E>0.1\text{MeV})$ )

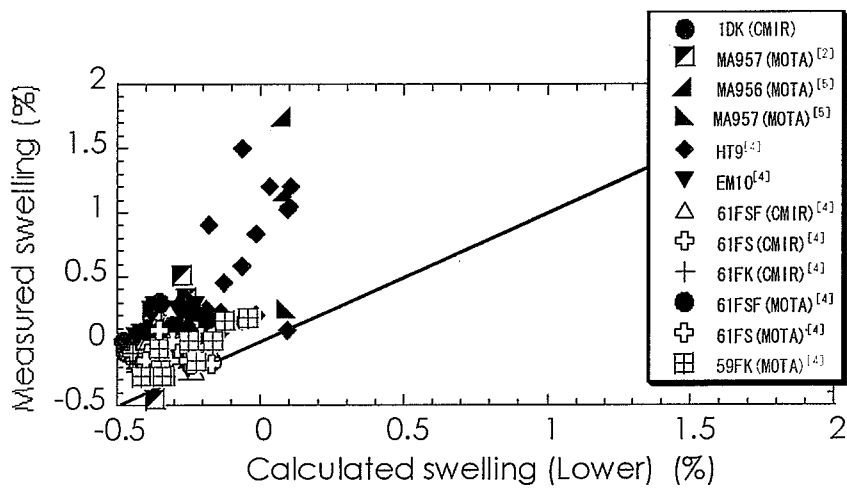
図37 スエリング式の計算結果



(1)ノミナル式と実測値の比較



(2) 上限式と実測値の比較



(3)下限値と実測値の比較

図38 スエリング式計算値と実測値の比較