

高クロム鋼の材料特性試験(Ⅱ)

HCM12A (2001年度材) の材料物性

(研究報告書)

2003年3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・転載する場合には、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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)
2003

高クロム鋼の材料特性試験(Ⅱ)
HCM12A(2001年度材)の材料物性
(研究報告書)

加藤 章一*、鬼澤 高志*、
吉田 英一*

要 旨

高クロム鋼は、高温強度特性、熱膨張係数及び熱伝導率等に優れていることから、実用化戦略調査研究における実用化炉の構造材料として期待されている。本研究では、高クロム鋼のHCM12A(2001年度材)について、基礎的な材料物性を評価することを目的に、材料物性試験を実施した。なお、本報告に示す材料物性値は、圧延鋼板(2ヒート)のみの材料物性試験結果をまとめたものであり、設計基準値ではない。

材料物性の評価項目は、以下のとおりである。

- ・ 比重 (室温)
- ・ 比熱 (室温～900℃)
- ・ 熱伝導率 (室温～900℃)
- ・ 熱膨張係数 (50℃～1000℃)
- ・ ヤング率 (室温～700℃)
- ・ ポアソン比 (室温～700℃)

* 大洗工学センター 要素技術開発部 新技術開発試験グループ

Material Properties of High Cr-Mo Steel (II)
Physical Properties of HCM12A(2001)

Shoichi KATO * , Takashi ONIZAWA * ,
Eiichi YOSHIDA *

Abstract

A high Cr-Mo steel is candidate for a structural materials of future LMFBR, because of good thermal properties and high creep strength. In this study, material physical tests were carried out on the HCM12A (2001) of high Cr-Mo steel in order to evaluation of the basic physical properties. This report only shows the measurement results of the physical properties data of the rolled steel plates (2 heats) but doesn't give the design standards of the physical properties for the future LMFBR.

The evaluated physical properties are as follows ;

- Specific gravity (R.T.)
- Specific heat (R.T.~900°C)
- Thermal conductivity coefficient (R.T.~900°C)
- Thermal expansion coefficient (50°C~1000°C)
- Young's modulus (R.T.~700°C)
- Poisson's ratio (R.T.~700°C)

* Advanced Technology Division, New Technology Development Group

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験方法	2
2.1 供試材	2
2.2 材料物性試験方法	2
3. 試験結果及び検討	5
3.1 比重	5
3.2 比熱及び熱伝導率	5
3.3 熱膨張係数	6
3.4 ヤング率及びポアソン比	6
4. 結 言	8
謝 辞	9
参考文献	10

表リスト

表 2.1-1	供試材の仕様	11
表 2.2-1	材料物性試験条件	12
表 3.1-1	HCM12A (FBR) の比重の測定結果	13
表 3.2-1	HCM12A (FBR) 及び HCM12A (火力) の比熱・熱伝導率の測定結果	13
表 3.3-1	HCM12A (FBR) 及び HCM12A (火力) の熱膨張率の測定結果	14
表 3.3-2	HCM12A (FBR) 及び HCM12A (火力) の平均熱膨張係数の測定結果	15
表 3.3-3	HCM12A (FBR) 及び HCM12A (火力) の瞬時熱膨張係数の計算結果	16
表 3.4-1	HCM12A (FBR) のヤング率の測定結果	17
表 3.4-2	HCM12A (FBR) のポアソン比の測定結果	17

図リスト

図 2.2-1	比熱及び熱伝導率の測定原理	18
図 2.2-2	熱膨張率及び熱膨張係数の測定原理	18
図 2.2-3	ヤング率及びポアソン比の測定原理	18
図 3.1-1	HCM12A 及び代表的な FBR 構造材料の比重	19
図 3.2-1	HCM12A の比熱 (熱処理条件、試験実施機関による比較)	20
図 3.2-2	HCM12A 及び代表的な FBR 構造材料の比熱	20
図 3.2-3	HCM12A の熱伝導率 (熱処理条件、試験実施機関による比較)	21
図 3.2-4	HCM12A 及び代表的な FBR 構造材料の熱伝導率	21
図 3.3-1	HCM12A の平均熱膨張係数 (試料採取方向による比較)	22
図 3.3-2	HCM12A の平均熱膨張係数 (熱処理条件、試験実施機関による比較)	22
図 3.3-3	HCM12A 及び代表的な FBR 構造材料の平均熱膨張係数	23
図 3.3-4	HCM12A の瞬時熱膨張係数 (試料採取方向による比較)	23
図 3.3-5	HCM12A の瞬時熱膨張係数 (熱処理条件、試験実施機関による比較)	24
図 3.3-6	HCM12A 及び代表的な FBR 構造材料の瞬時熱膨張係数	24
図 3.4-1	HCM12A のヤング率 (試料採取方向による比較)	25
図 3.4-2	HCM12A のヤング率 (試験実施機関による比較)	25
図 3.4-3	HCM12A 及び代表的な FBR 構造材料のヤング率	26
図 3.4-4	HCM12A のポアソン比 (試料採取方向による比較)	26
図 3.4-5	HCM12A のポアソン比 (試験実施機関による比較)	27
図 3.4-6	HCM12A 及び代表的な FBR 構造材料のポアソン比	27

1. 緒 言

高速炉（以下「FBR」）「もんじゅ」の1次及び2次主冷却系配管・機器の構造材料は、主にオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304 が用いられている。実用化戦略調査研究における実用化炉では、高信頼性を確保しつつプラントの合理化及び経済性の向上を図るため、構造材料として高温強度特性、熱膨張係数及び熱伝導率等に優れた高クロム鋼の適用が検討されている[1]。

FBR 構造材料の基礎的な物性値は、プラント設計の際に必要なデータである。このため、本試験研究では実用化炉用構造材料の候補材である高クロム鋼の HCM12A (2001 年度製作材) について、比重、比熱、熱伝導率、熱膨張係数、ヤング率及びポアソン比に関する基礎的な材料物性値を取得した。また、材料物性値に及ぼす試料採取方向、熱処理条件等による影響を検討した。

なお、本試験研究で得られた各種の材料物性値は、プラントの設計成立性評価の基礎データとして資する予定である。

2. 試験方法

2.1 供試材

供試材の仕様を表 2.1-1 に示す。供試材には、2001 年度に製作した HCM12A (2001 年度 FBR 熱処理材) (以下「HCM12A(FBR)」) の圧延鋼板 (板厚 30mm) を用いた。HCM12A (FBR) の熱処理は、FBR の運転温度域 (550℃前後) での延性改善を目指した条件になっている。また、材料物性に及ぼす熱処理条件の影響を検討するために、火力ボイラ用 HCM12A と同じ熱処理条件の HCM12A (火力仕様熱処理材) (以下「HCM12A (火力)」) の圧延鋼板 (板厚 30mm) も用いた。

2.2 材料物性試験方法

HCM12A (FBR) の比重、比熱、熱伝導率、熱膨張係数、ヤング率及びポアソン比を測定した。表 2.2-1 及び以下に試験方法を示す。各種の材料物性試験用試料は、いずれも板厚方向の中央部 (以下「1/2t」) から採取した。熱膨張係数、ヤング率及びポアソン比については、異方性を検討するため、圧延方向 (以下「L 方向」とそれと直交する方向 (以下「C 方向」) からそれぞれ試料を採取し測定した。また、比熱、熱伝導率、熱膨張係数については、HCM12A (火力) についても測定し、HCM12A (FBR) との比較や熱処理条件の影響を検討した。HCM12A (火力) の試料採取位置は、1/2t 及び L 方向である。

(1) 密度

HCM12A (FBR) の密度は、JIS Z 8807 の「固体比重測定方法」に基づき、アルキメデス法 (浮力測定法) により測定した。測定温度は室温である。比重の計算には、以下の (1a) 式及び (1b) 式を用いた。

$$\rho = W_a \cdot \rho_a / (W_a - W_b) \quad \dots \dots \dots (1a)$$

$$S = \rho / \rho_b \quad \dots \dots \dots (1b)$$

S : 比重 (-)

ρ : 密度 (g/cm³)

W_a : 空中での試料重量 (g)

W_b : 純水中での試料重量 (g)

ρ_a : 試験温度における純水の密度 (g/cm³)

ρ_b : 4℃における純水の密度 (g/cm³)

(2) 比熱及び熱伝導率

比熱及び熱伝導率の測定は、JIS R 1611 の「ファインセラミックスのレーザフラッシュ法による熱拡散率・比熱容量・熱伝導率試験方法」に準拠し、レーザフラッシュ法により実施した。試料は直径 10mm、厚さ 2mm の円板型である。なお、試料の厚さ方向が供試材の L 方向とした。試験温度は室温～900℃、試験雰囲気は真空中

(10^{-5} Torr) である。また、試験装置は株式会社リガク製 FA8510B 型を用いた。測定原理は図 2.2-1 に示すように、試料表面にレーザ光を照射し、試料裏面から発生する熱量とその時間を測定するものである。なお、比熱は (2a) 式により、熱伝導率は (2b) 式によりそれぞれ求めた。

$$C_p = \Delta Q / (\Delta T \cdot W) \quad \dots \dots \dots (2a)$$

C_p : 比熱 (J/g·K)

ΔQ : 入力エネルギー (J)

ΔT : 試料裏面の最高上昇温度 (K)

W : 試料の質量 (g)

$$\lambda = C_p \cdot \alpha \cdot \rho \quad \dots \dots \dots (2b)$$

λ : 熱伝導率 (W/m·K)

C_p : 比熱 (J/g·K)

α : 熱拡散率 (m^2/sec)

ρ : 試料の密度 (g/m^3)

(3) 熱膨張係数

JIS R 1618 の「ファインセラミックスの熱機械分析による熱膨張の測定方法」に準拠し、熱膨張率及び平均熱膨張係数を測定した。直径 10mm、長さ 50mm の中実丸棒型の試料を用いた。試料の長さ方向が供試材の L 方向または C 方向とした。試験温度は室温～1000℃、昇温速度は 5℃/min とし、試験雰囲気は Ar ガス中とした。なお、試験装置には真空理工株式会社製の DLY-9000 型を用いた。測定原理を図 2.2-2 に示す。検出棒を介して試料の熱膨張量を差動トランス型変位検出器で計測するものである。なお、検出棒とサポータの材質を同じ SiO₂ としているため、押し棒と並行するサポータの熱膨張は、相互にキャンセルされるようになっている。熱膨張率及び平均熱膨張係数は、以下の (3a) 式及び (3b) 式により求めた。

$$\varepsilon = \Delta L \cdot 100 / L_0 \quad \dots \dots \dots (3b)$$

ε : 熱膨張率 (%)

ΔL : 試料の伸び量 (mm)

L_0 : 試料の初期長さ (mm)

$$\alpha = \Delta L / (L_0 \cdot \Delta T) \quad \dots \dots \dots (3a)$$

α : 平均熱膨張係数 (mm/mm/°C)

ΔL : 試料の伸び量 (mm)

L_0 : 試料の初期長さ (mm)

ΔT : 温度差 (試験温度－室温) (°C)

(4) ヤング率及びポアソン比

ヤング率及びポアソン比は、JIS Z 2280の「金属材料の高温ヤング率試験方法」に基づき、横共振法により測定した。試料は、幅10mm、長さ60mm、厚さ2mmの平板型である。試料の長さ方向をL方向またはC方向にした。試験温度は室温から700°Cであり、大気中にてヤング率及びポアソン比の測定を実施した。試験装置は、日本テクノプラス(株)製のヤング率測定用JE-RT型とポアソン比測定用JE-GT型を使用した。測定原理を図2.2-3に示す。片持ちした試料に電磁コイルにより繰返しの曲げ変形やねじり変形を与え、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る。このときの周波数から、(4a)式によりヤング率を、(4b)式によりポアソン比をそれぞれ求めた。

$$E = \omega^2 \cdot \rho \cdot L^4 \cdot A / (I \cdot \mu^4) \dots \dots \dots (4a)$$

- E : ヤング率 (MPa)
- ω : 角振動数 (Hz)
- ρ : 試料の密度 (g/mm³)
- L : 試料の長さ (mm)
- A : 試料の断面積 (mm²)
- I : 慣性モーメント (g・mm²)
- μ : 試料、駆動部の重さに起因する装置定数

$$\nu = (E / 2G) - 1 \dots \dots \dots (4b)$$

- ν : ポアソン比 (-)
- E : ヤング率 (MPa)
- G : 剛性率 (MPa)

3. 試験結果及び検討

3.1 比重

HCM12A (FBR) の室温における比重を表 3.1-1 及び図 3.1-1 に示す。図中には、同一ヒートの比較データ[2]と HCM12A 材料強度基準試案 (以下「強度基準試案」) の値[6]を示した。また、代表的な FBR 構造材料としてオーステナイト系の SUS304、316FR、SUS316 及びフェライト系の 2・1/4Cr-1Mo 鋼、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のデータ[2]、[3]、[6]～[8]を併せて示している。本試験で得られた HCM12A (FBR) の比重は 7.84 であり、同一ヒートの比較データ及び強度基準試案の値とほぼ同等であった。また、HCM12A (FBR) の比重は、オーステナイト系の 3 鋼種よりも低く、フェライト系の 2 鋼種とほぼ同じであった。

3.2 比熱及び熱伝導率

表 3.2-1 に HCM12A (FBR) 及び HCM12A (火力) の比熱及び熱伝導率の測定結果を示す。また、図 3.2-1 に同鋼の比熱と温度との関係を示す。図中には、同一ヒートの比較データ[2]及び強度基準試案の値[6]を併せて示している。HCM12A (FBR) の比熱は、HCM12A (火力) とほぼ同じであり、熱処理条件による影響はみられなかった。試験実施機関が異なる同一ヒートの比較データと比べた場合も差はなく、試験実施機関による差はみられなかった。強度基準試案が他よりも高い値を示しているが、この差の要因は明らかではない。また、HCM12A (FBR) の 750℃付近における比熱のピークは、強磁性から常磁性に磁気変態するために生じたものと考えられる[3]。

図 3.2-2 は、本試験により得られた HCM12A (FBR) と HCM12A (火力) の比熱を代表的な FBR 構造材料のデータ[3]と比較したものである。フェライト系 2 鋼種と比較した場合、HCM12A (FBR)、同 (火力) は、300℃～650℃において 2・1/4Cr-1Mo 鋼及び Mod. 9Cr-1Mo 鋼よりも比熱が僅かに高くなる傾向を示した。2・1/4Cr-1Mo 鋼及び Mod. 9Cr-1Mo 鋼は、本鋼と同様に約 750℃で磁気変態による考えられる比熱のピークが生じている。また、800℃～900℃においては第 2 のピークがみられ、これは α 相→ γ 相への相変態が生じたことによるものと考えられる[3]。なお、HCM12A においても、同じ温度範囲において相変態が生じるが、明瞭な比熱の第 2 ピークは認められなかった。一方、オーステナイト系の SUS304、316FR 及び SUS316 は、温度上昇に伴う比熱の増加は緩やかであり、約 300℃以上ではフェライト系よりも低い値を示した。

HCM12A (FBR) の熱伝導率と温度との関係を図 3.2-3 に示す。HCM12A (FBR) の熱伝導率は、温度上昇とともに緩やかに増加してゆくが、約 400℃以上ではほとんど変化はみられず、約 30W/m・K であった。HCM12A (FBR) の熱伝導率は、HCM12A (火力) と比較して有意差はなく、熱処理の影響は確認されなかった。また、HCM12A (FBR)、同一ヒートの比較データ[2]及び強度基準試案の値[6]を比較した場合、比較データが最も低く、強度基準試案の値が最も高くなる傾向がみられ、これはデータのばらつきが大きいことが一因として推察される。

HCM12A (FBR) 及び同 (火力) と SUS304 等 [3] の熱伝導率を比較して図 3. 2-4 に示す。FBR の運転温度域付近 (400℃~600℃) で比較した場合、HCM12A (FBR) 及び同 (火力) の熱伝導率は、Mod. 9Cr-1Mo 鋼との有意差はなく、2・1/4Cr-1Mo 鋼よりも低くなる傾向を示した。また、オーステナイト系の 3 鋼種は、フェライト系 3 鋼種よりも低下する傾向がみられた。

3.3 熱膨張係数

HCM12A (FBR) 及び同 (火力) の熱膨張率、平均熱膨張係数及び瞬時熱膨張係数を表 3. 3-1~表 3. 3-3 に示す。HCM12A (FBR) の L 方向と C 方向の平均熱膨張係数を比較して、図 3. 3-1 に示す。200℃以下では、測定誤差による差が生じているが、それ以上の温度では試料採取方向による差異はほとんどないことを確認した。850℃付近で熱膨張係数の低下が生じているのは、 $\alpha \rightarrow \gamma$ の相変態が生じて結晶構造が体心立方格子 (BCC) からより稠密な面心立方格子 (FCC) になったためと考えられる。

HCM12A (FBR) の平均熱膨張係数を HCM12A (火力)、同一ヒートの比較データ [2] 及び強度基準試案の値 [6] と比較して、図 3. 3-2 に示す。200℃~650℃の温度範囲での比較では、強度基準試案を除いてほぼ同等の値を示しており、熱処理条件及び試験実施機関の差異は認められなかった。強度基準試案が他よりも僅かに下回る値を示した要因は明らかではない。

また、図 3. 3-3 に示すように、HCM12A (FBR) 及び同 (火力) の平均熱膨張係数を SUS304 等のデータ [3]~[5] と比較すると、800℃以下の温度においてはオーステナイト系 3 鋼種、2・1/4Cr-1Mo 鋼、Mod. 9Cr-1Mo 鋼、HCM12A (FBR・火力) の順に熱膨張係数は低くなっているが、HCM12A (FBR・火力) と Mod. 9Cr-1Mo 鋼との差は僅かであった。フェライト系 3 鋼種では 850℃付近で相変態 (α 相 \rightarrow γ 相) によると考えられる熱膨張係数の低下が生じていた。

同様に、瞬時熱膨張係数について図 3. 3-4~図 3. 3-6 に示す。瞬時熱膨張係数は、測定誤差が小さくなる 200℃から材料強度基準の上限温度の 650℃までの熱膨張率を用いて、最小二乗法により温度の 3 次関数とし、その微分から求めた。平均熱膨張係数と同様に、試料採取方向、熱処理条件及び試験実施機関による差異はみられず、強度基準試案のみが僅かに低い値を示していた。また、HCM12A (FBR) 及び同 (火力) と代表的な FBR 構造材料との瞬時熱膨張係数の差異は、平均熱膨張係数と同様であった。

3.4 ヤング率及びポアソン比

HCM12A (FBR) のヤング率を表 3. 4-1、図 3. 4-1 に示す。試料採取方向によるヤング率の有意差は認められなかった。図 3. 4-2 に示すように、HCM12A (FBR) のヤング率を同一ヒートの比較データ [2] 及び強度基準試案の値 [6] と比較した場合、ほぼ同じ値を示した。図 3. 4-3 は、HCM12A (FBR) と SUS304 等 [3]~[5] のヤング率を比較したものである。HCM12A (FBR) と 2・1/4Cr-1Mo 鋼、Mod. 9Cr-1Mo 鋼のヤング率に有意な差はなかった。また、オーステナイト系 3 鋼種は、フェライト系よりも全体的に下回る傾向

にあった。

表 3.4-2、図 3.4-4 に、HCM12A (FBR) のポアソン比を示す。HCM12A (FBR) のポアソン比は、温度上昇に伴い緩やかに増加していた。また、L 方向よりも C 方向が僅かに高い値になっているが、ばらつき範囲と考えられる。図 3.4-5 は、HCM12A (FBR) のポアソン比を比較データ[2]及び強度基準試案の値[6]と比較したものであり、3 者に有意差はないと考えられる。また、図 3.4-6 に示すように HCM12A (FBR) と SUS304 等[4]、[5]のポアソン比を比較した場合、375°C～650°Cの温度範囲では鋼種間に有意な差はみられなかった。

4. 結 言

高クロム鋼の HCM12A (2001 年度 FBR 熱処理材) 及び HCM12A (火力仕様熱処理材) について、材料物性試験を実施し、比重、比熱、熱伝導率、熱膨張係数、ヤング率及びポアソン比の基礎となる材料物性値を取得した。

得られた主な材料物性値の特性は、以下のとおりである。

- (1) HCM12A (FBR) の比熱、熱伝導率及び熱膨張係数は、HCM12A (火力) のそれらとほぼ同じ値を示しており、熱処理条件による有意な差異はみられなかった。
- (2) HCM12A (FBR) の熱膨張係数、ヤング率及びポアソン比に対する試料採取方向による影響 (異方性) は認められなかった。
- (3) HCM12A (FBR) 及び HCM12A (火力) の材料物性は、同じフェライト系鋼である Mod. 9Cr-1Mo 鋼と類似した特性を示した。

謝 辞

本研究を進めるに当たっては、新材料研究グループの青砥紀身グループリーダー、若井隆純副主任研究員、安藤勝訓氏の多大なご協力を得た。ここに深謝の意を表します。

参考文献

1. 此村、他、「別冊(2)各種冷却材を有する高速増殖炉に関するプラント設計評価(1)」、サイクル機構技報 No. 12 (2001)
2. 安藤、他、「高クロムフェライト系鋼の材料物性に及ぼす Cr 量の影響」、JNC TN9400 2003-022 (2003)
3. 木村、他、「FBR 構造材料の物性値測定」、PNC ZN9410 90-094 (1990)
4. 動力炉・核燃料開発事業団 (現：核燃料サイクル開発機構)、「高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等」、PNC TN241 84-08 VOL2 (1984)
5. 日本原子力発電株式会社、「高速増殖実証炉高温構造設計方針 材料強度基準等 (案)」(1999)
6. 森下、他、核燃料サイクル開発機構、日本原子力発電株式会社、「高温構造設計高度化研究 (平成 12 年度共同研究報告書)」、TY9400 2001-026 (2001)
7. 日本工業規格協会、「熱間圧延板及び鋼帯の形状、寸法、質量及び許容差」、JIS G 3193 (1990)
8. 日本工業規格協会、「ステンレス鋼板及び耐熱鋼板 質量算出方法」、JIS G 4310 (1999)

表2.1-1 供試材の仕様

HCM12A(FBR)

認識 No.	ヒート No.	製品 形状	寸法 (mm)	分析 区分	化学成分 (mass.%)														
					C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	W	Cr	Mo	V	Nb	Sol.Al	N	B
N2	F114206	圧延鋼板	T30*W1300 *L3000(圧延方向)	レートル	0.11	0.28	0.62	0.015	0.002	0.98	0.39	1.82	10.54	0.32	0.19	0.054	0.001	0.063	32 (ppm)
				チエック	0.11	0.26	0.64	0.016	0.002	1.03	0.39	1.86	10.87	0.31	0.20	0.054	0.001	0.064	34 (ppm)

熱処理条件: 焼ならし 1050°C*1.05h(A.C.)、焼き戻し 718°C*1.05h(A.C.)、端面軟化熱処理 718°C*1.03h(A.C.)

HCM12A(火力)

認識 No.	ヒート No.	製品 形状	寸法 (mm)	分析 区分	化学成分 (mass.%)														
					C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	W	Cr	Mo	V	Nb	Sol.Al	N	B
N1	F114206	圧延鋼板	T30*W1300 *L3000(圧延方向)	レートル	0.11	0.28	0.62	0.015	0.002	0.98	0.39	1.82	10.54	0.32	0.19	0.054	0.001	0.063	32 (ppm)
				チエック	0.11	0.27	0.64	0.016	0.002	1.02	0.39	1.89	10.33	0.30	0.19	0.054	0.001	0.063	31 (ppm)

熱処理条件: 焼ならし 1050°C*1.05h(A.C.)、焼き戻し 770°C*7.03h(A.C.)、端面軟化熱処理 770°C*1.02h(A.C.)

表2.2-1 材料物性試験条件

供試材		評価項目	試験方法	試験片の採取位置 (下図参照)	温度(°C)
HCM12A (FBR)	母材	比重	アルキメデス法	1/2t	室温
		比熱・ 熱伝導率	レーザフラッシュ法	1/2t, L方向	室温、50、100、200、300、 400、450、500、550、600、 650、700、725、750、775、 800、825、850、875、900
		熱膨張率・ 熱膨張係数	押し棒式変位検出法	1/2t, L方向	50°C~1000°C (25°Cピッチ、室温基準)
				1/2t, C方向	
ヤング率・ ポアソン比	横共振法	1/2t, L方向	室温、50°C、100°C~700°C (50°Cピッチ)		
		1/2t, C方向			
HCM12A (火力)	母材	比熱・ 熱伝導率	レーザフラッシュ法	1/2t, L方向	室温、100°C、200°C、 300°C、400°C、450°C、 500°C、550°C、600°C、650°C
		熱膨張率・ 熱膨張係数	押し棒式変位検出法	1/2t, L方向	50°C~650°C (25°Cピッチ、室温基準)

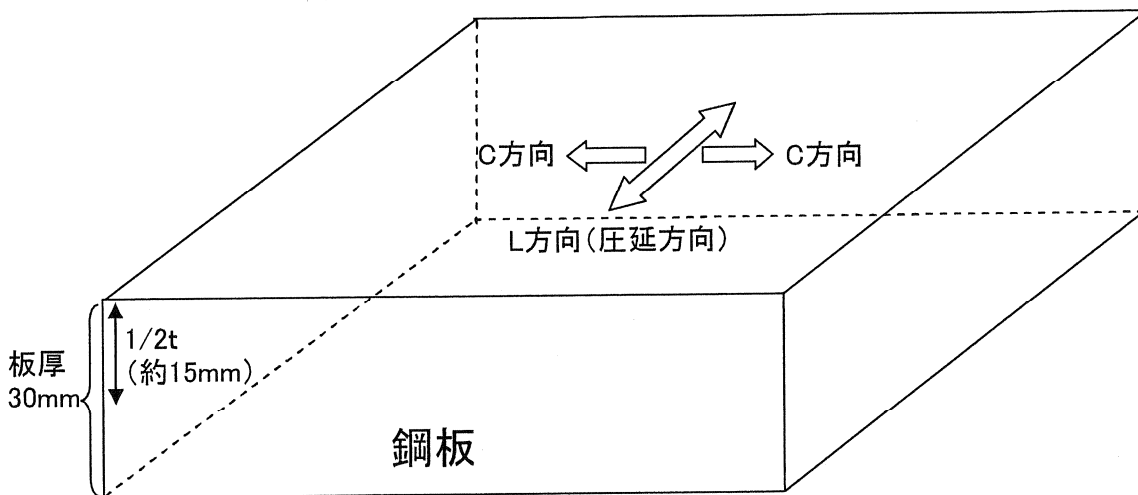


表3.1-1 HCM12A(FBR)の比重の測定結果

供試材	試料No.	温度 (°C)	空中重量 (g)	水中重量 (g)	密度 (g/cm ³)	比重 (-)
HCM12A (FBR)	1	25	92.1686	80.4431	7.84	7.84
	2	25	54.6384	47.6882	7.84	7.84
	3	25	27.6670	24.1492	7.84	7.84

表3.2-1 HCM12A(FBR)及びHCM12A(火力)の比熱・熱伝導率の測定結果

HCM12A(FBR)		
温度 (°C)	比熱 (J/g·K)	熱伝導率 (W/m·K)
	L方向	L方向
25	0.458	23.28
50	0.470	23.82
100	0.487	24.60
200	0.527	26.30
300	0.578	28.06
400	0.630	28.98
450	0.654	29.21
500	0.678	29.03
550	0.728	29.86
600	0.784	30.17
650	0.833	29.82
700	0.923	29.48
725	0.989	29.16
750	1.109	29.46
775	0.894	29.63
800	0.804	29.44
825	0.760	29.31
850	0.733	30.08
875	0.677	29.94
900	0.663	30.58

HCM12A(火力)		
温度 (°C)	比熱 (J/g·K)	熱伝導率 (W/m·K)
	L方向	L方向
25	0.456	22.58
-	-	-
100	0.502	24.7
200	0.541	26.39
300	0.602	28.64
400	0.646	29.19
450	0.672	29.59
500	0.707	29.63
550	0.761	30.77
600	0.821	31.59
650	0.893	31.22
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-
-	-	-

表3.3-1 HCM12(FBR)及びHCM12A(火力)の熱膨張率の測定結果

HCM12A(FBR)		
温度 (°C)	熱膨張率 (%)	
	L方向	C方向
25	0.0000	0.0000
50	0.0169	0.0231
75	0.0446	0.0527
100	0.0728	0.0797
125	0.1003	0.1074
150	0.1295	0.1357
175	0.1586	0.1648
200	0.1880	0.1939
225	0.2175	0.2232
250	0.2473	0.2528
275	0.2777	0.2831
300	0.3079	0.3134
325	0.3387	0.3442
350	0.3698	0.3760
375	0.4018	0.4076
400	0.4330	0.4390
425	0.4655	0.4716
450	0.4981	0.5043
475	0.5311	0.5373
500	0.5641	0.5709
525	0.5975	0.6054
550	0.6313	0.6396
575	0.6644	0.6732
600	0.6988	0.7069
625	0.7332	0.7405
650	0.7669	0.7742
675	0.8022	0.8081
700	0.8362	0.8420
725	0.8696	0.8761
750	0.9093	0.9168
775	0.9505	0.9572
800	0.9923	0.9977
825	1.0130	1.0040
850	0.8993	0.9099
875	0.9086	0.9219
900	0.9495	0.9573
925	0.9975	0.9978
950	1.0500	1.0470
975	1.1040	1.1020
1000	1.1570	1.1550

HCM12A(火力)		
温度 (°C)	熱膨張率 (%)	
	L方向	C方向
25	0.0000	-
50	0.0193	-
75	0.0434	-
100	0.0705	-
125	0.0993	-
150	0.1277	-
175	0.1565	-
200	0.1857	-
225	0.2154	-
250	0.2460	-
275	0.2764	-
300	0.3067	-
325	0.3377	-
350	0.3691	-
375	0.4011	-
400	0.4328	-
425	0.4650	-
450	0.4976	-
475	0.5305	-
500	0.5642	-
525	0.5978	-
550	0.6324	-
575	0.6659	-
600	0.6984	-
625	0.7320	-
650	0.7666	-
675	-	-
700	-	-
725	-	-
750	-	-
775	-	-
800	-	-
825	-	-
850	-	-
875	-	-
900	-	-
925	-	-
950	-	-
975	-	-
1000	-	-

表3.3-2 HCM12(FBR)及びHCM12A(火力)の平均熱膨張係数の測定結果

HCM12A(FBR)		
温度 (°C)	平均熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm/°C)	
	L方向	C方向
25	0.00	0.00
50	6.77	9.24
75	8.91	10.56
100	9.71	10.63
125	10.03	10.74
150	10.35	10.86
175	10.57	10.99
200	10.74	11.08
225	10.87	11.16
250	11.00	11.24
275	11.11	11.32
300	11.20	11.40
325	11.29	11.48
350	11.38	11.57
375	11.48	11.64
400	11.55	11.71
425	11.63	11.79
450	11.72	11.87
475	11.80	11.94
500	11.88	12.02
525	11.95	12.11
550	12.02	12.18
575	12.08	12.24
600	12.15	12.29
625	12.22	12.34
650	12.27	12.39
675	12.34	12.43
700	12.39	12.48
725	12.42	12.52
750	12.54	12.65
775	12.67	12.76
800	12.80	12.87
825	12.66	12.55
850	10.90	11.03
875	10.69	10.85
900	10.85	10.94
925	11.08	11.09
950	11.35	11.32
975	11.62	11.60
1000	11.87	11.84

HCM12A(火力)		
温度 (°C)	平均熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm/°C)	
	L方向	C方向
25	0.00	-
50	7.71	-
75	8.68	-
100	9.39	-
125	9.92	-
150	10.21	-
175	10.44	-
200	10.61	-
225	10.77	-
250	10.93	-
275	11.06	-
300	11.15	-
325	11.26	-
350	11.36	-
375	11.46	-
400	11.54	-
425	11.62	-
450	11.71	-
475	11.79	-
500	11.88	-
525	11.96	-
550	12.05	-
575	12.11	-
600	12.15	-
625	12.20	-
650	12.27	-
675	-	-
700	-	-
725	-	-
750	-	-
775	-	-
800	-	-
825	-	-
850	-	-
875	-	-
900	-	-
925	-	-
950	-	-
975	-	-
1000	-	-

表3.3-3 HCM12(FBR)及びHCM12A(火力)の瞬時熱膨張係数の計算結果

HCM12A(FBR)		
温度 (°C)	瞬時熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm/°C)	
	L方向	C方向
25	9.95	10.32
50	10.20	10.53
75	10.45	10.74
100	10.68	10.94
125	10.91	11.14
150	11.13	11.33
175	11.34	11.51
200	11.54	11.69
225	11.74	11.86
250	11.92	12.03
275	12.10	12.19
300	12.26	12.34
325	12.42	12.49
350	12.57	12.63
375	12.71	12.76
400	12.85	12.89
425	12.97	13.02
450	13.09	13.13
475	13.19	13.24
500	13.29	13.35
525	13.38	13.45
550	13.46	13.54
575	13.54	13.63
600	13.60	13.71
625	13.66	13.78
650	13.70	13.85

HCM12A(火力)		
温度 (°C)	瞬時熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/mm/°C)	
	L方向	C方向
25	9.69	-
50	9.99	-
75	10.28	-
100	10.56	-
125	10.83	-
150	11.09	-
175	11.33	-
200	11.56	-
225	11.77	-
250	11.98	-
275	12.17	-
300	12.35	-
325	12.51	-
350	12.67	-
375	12.81	-
400	12.94	-
425	13.05	-
450	13.16	-
475	13.25	-
500	13.33	-
525	13.39	-
550	13.44	-
575	13.49	-
600	13.51	-
625	13.53	-
650	13.53	-

※設計に用いる温度範囲(室温~650°C)について、瞬時熱膨張係数を計算した。

表3.4-1 HCM12A(FBR)のヤング率の測定結果

HCM12A(FBR)		
温度 (°C)	ヤング率 (GPa) ※	
	L方向	C方向
25	214.5	216.7
50	213.0	215.4
100	210.9	213.2
150	208.4	210.6
200	205.2	207.5
250	202.3	204.4
300	198.8	200.8
350	194.6	196.7
400	189.9	191.9
450	184.0	186.0
500	177.4	179.2
550	169.9	171.0
600	157.5	161.4
650	142.2	146.4
700	123.8	128.7

※GPa=10⁹Pa

表3.4-2 HCM12A(FBR)のポアソン比の測定結果

HCM12A(FBR)		
温度 (°C)	ポアソン比 (-)	
	L方向	C方向
25	0.270	0.286
50	0.270	0.286
100	0.270	0.287
150	0.271	0.289
200	0.272	0.292
250	0.274	0.294
300	0.277	0.297
350	0.280	0.301
400	0.285	0.305
450	0.291	0.311
500	0.297	0.317
550	0.303	0.328
600	0.302	0.334
650	0.325	0.352
700	0.332	0.379

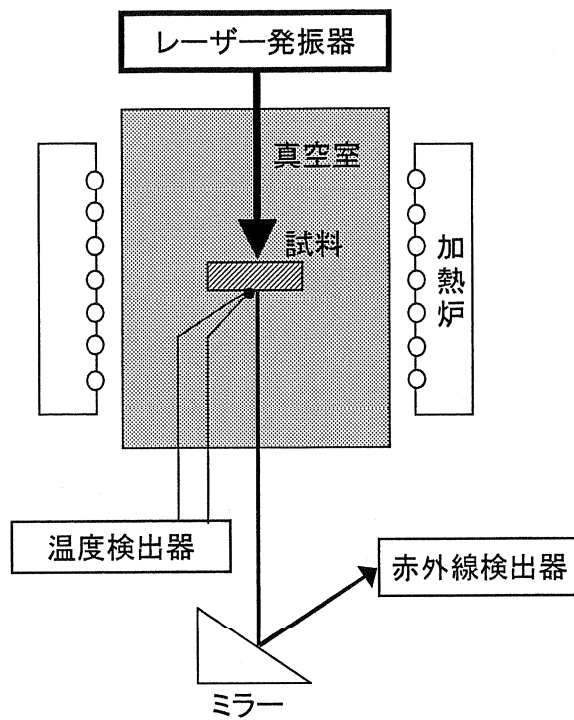


図2.2-1 比熱及び熱伝導率の測定原理

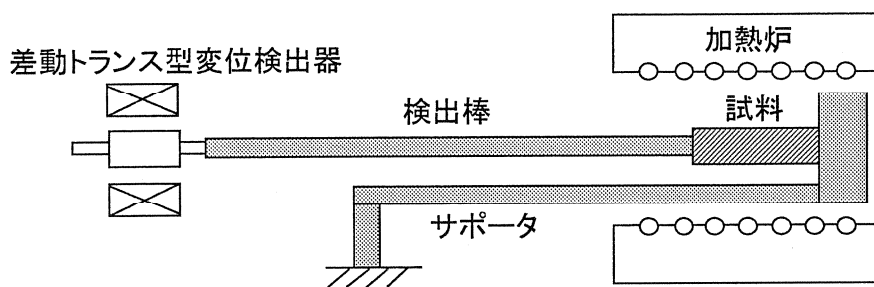


図2.2-2 熱膨張率及び熱膨張係数の測定原理

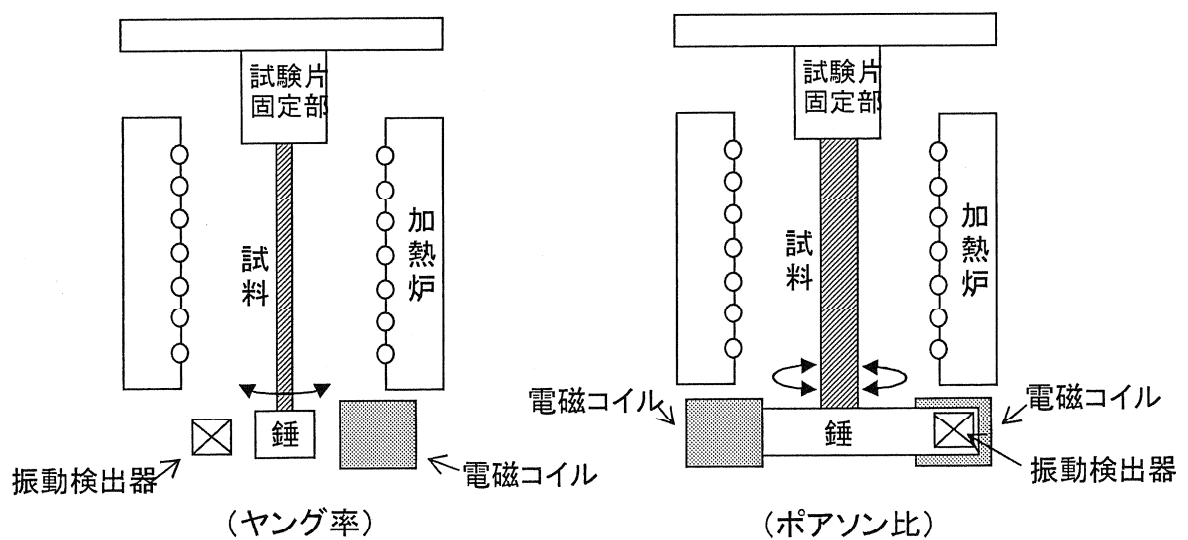


図2.2-3 ヤング率及びポアソン比の測定原理

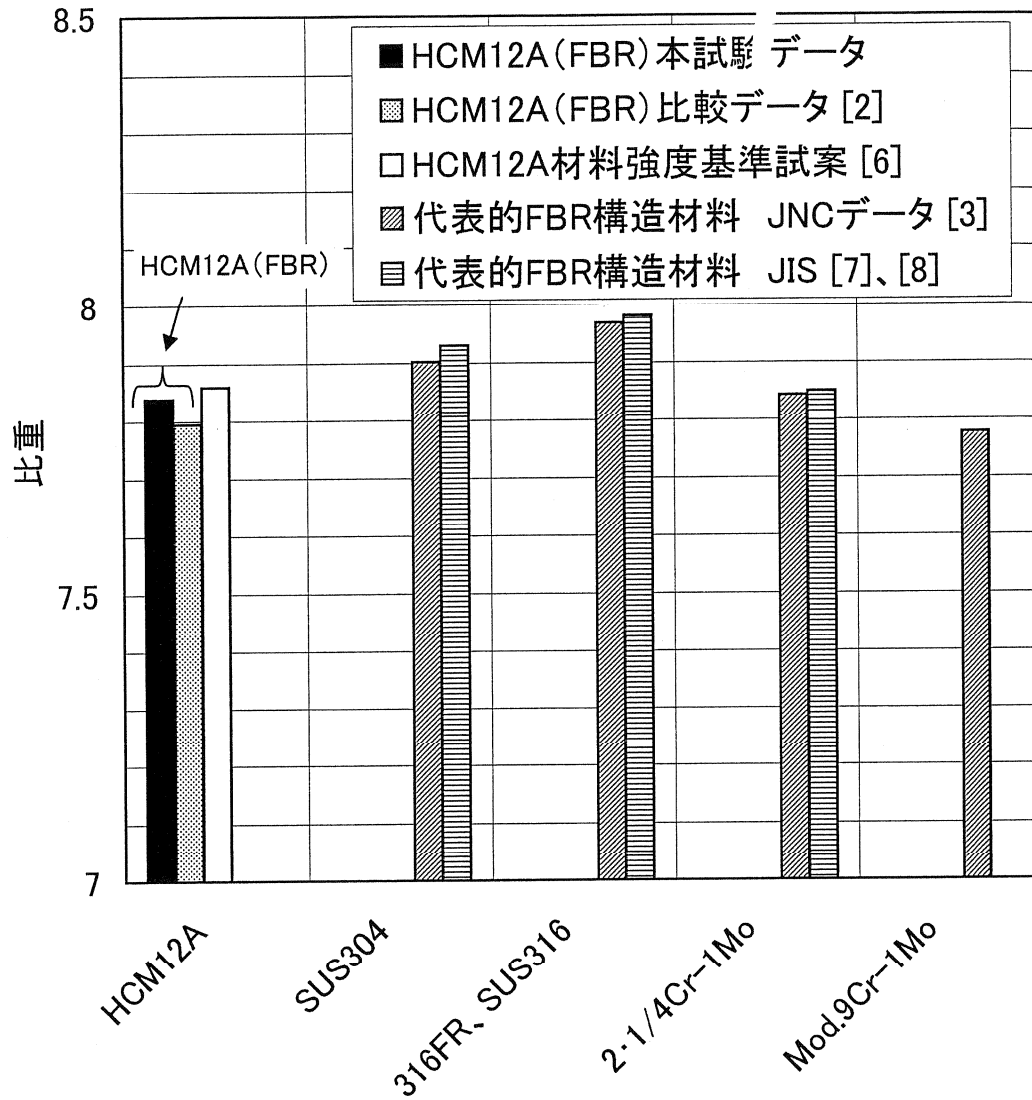


図3.1-1 HCM12A及び代表的なFBR構造材料の比重

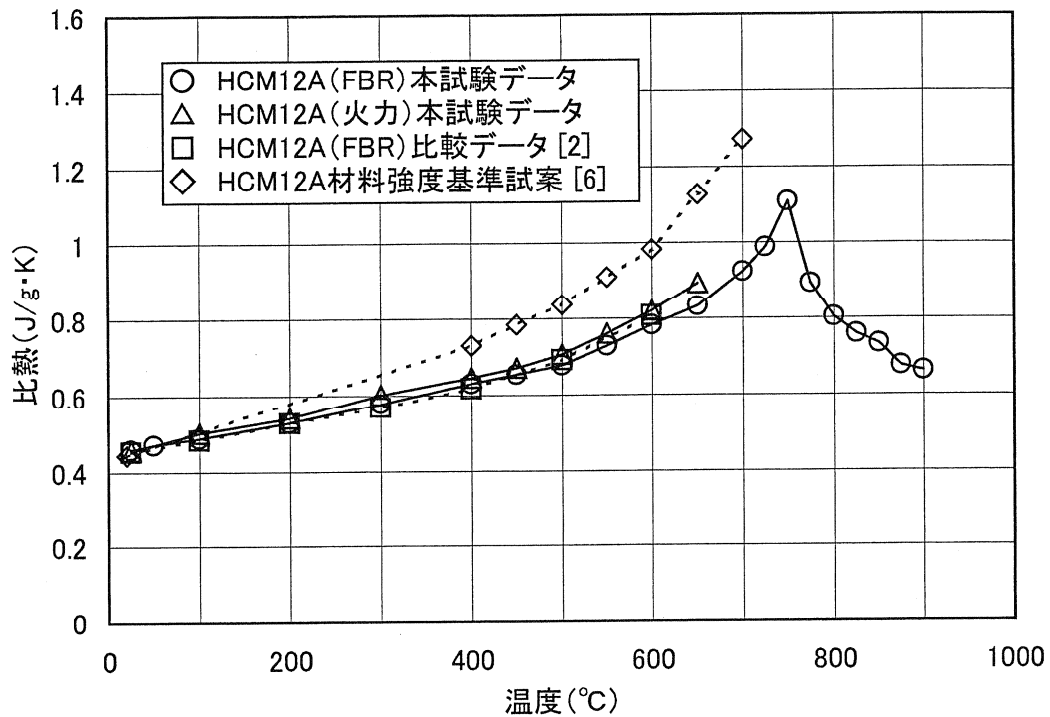


図3.2-1 HCM12Aの比熱(熱処理条件、試験実施機関による比較)

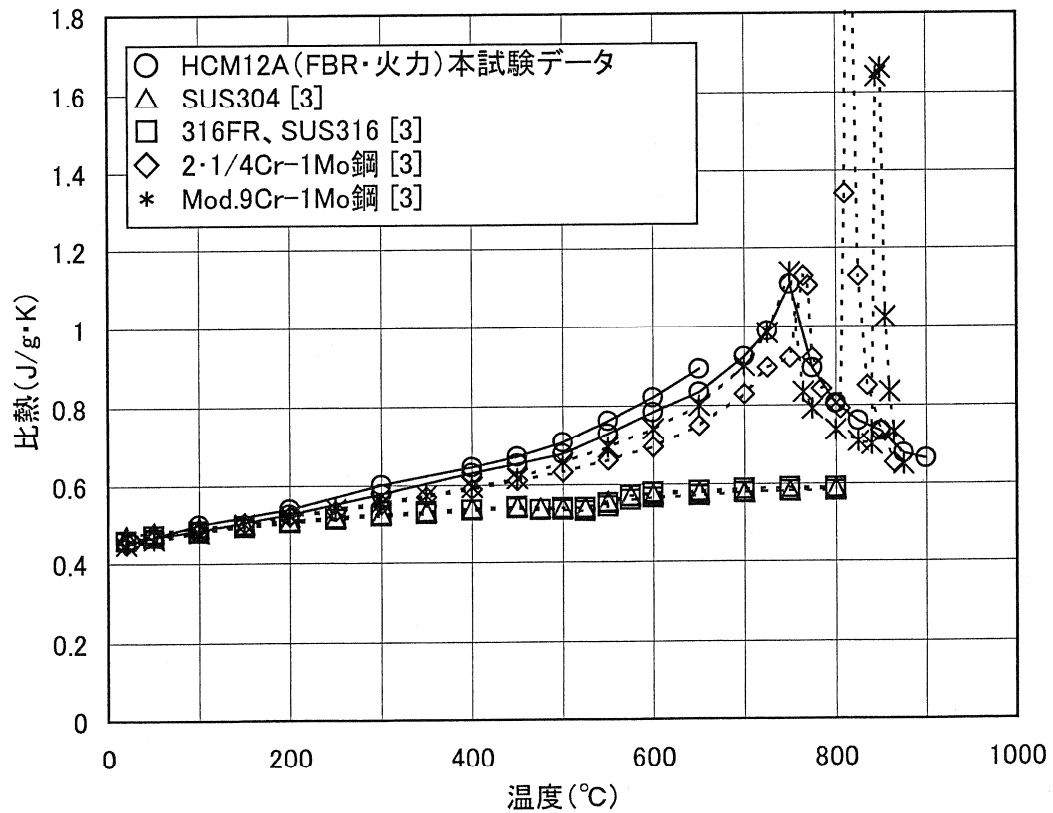


図3.2-2 HCM12A及び代表的なFBR構造材料の比熱

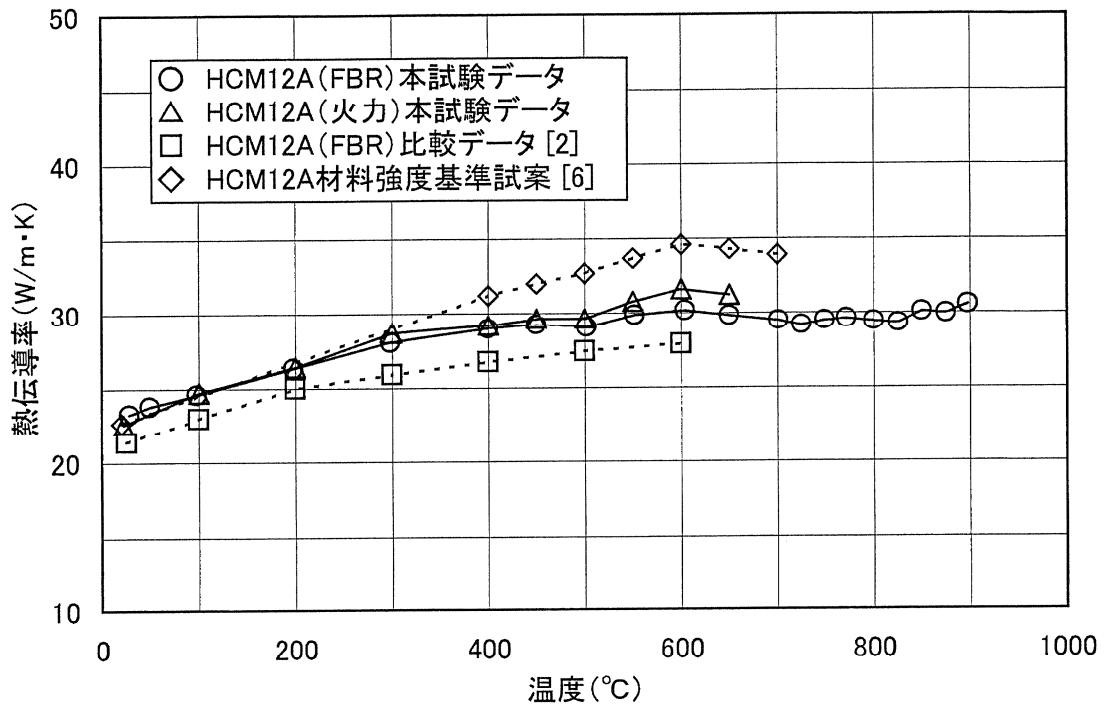


図3.2-3 HCM12Aの熱伝導率(熱処理条件、試験実施機関による比較)

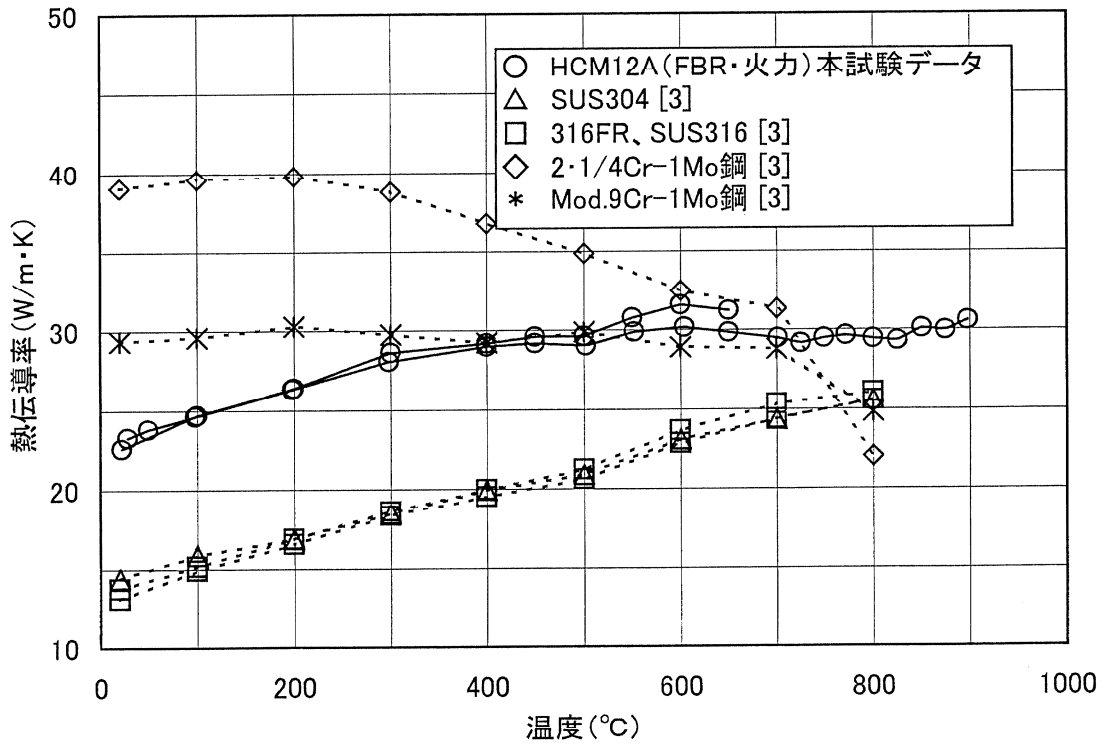


図3.2-4 HCM12A及び代表的なFBR構造材料の熱伝導率

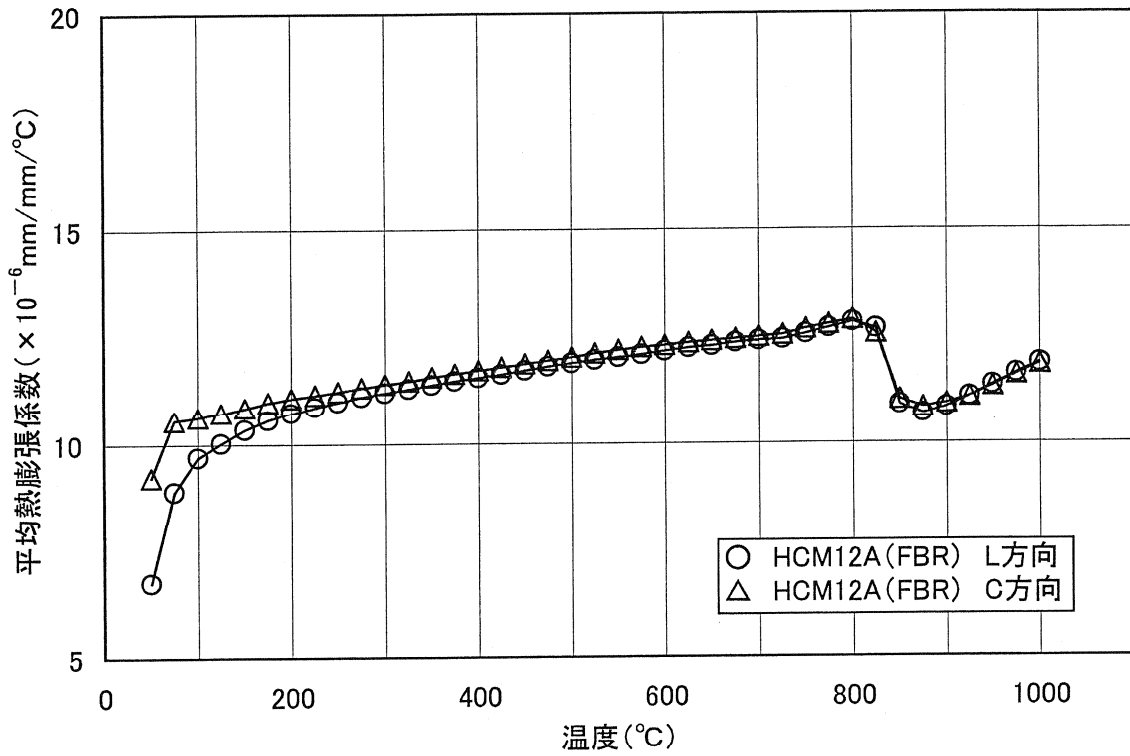


図3.3-1 HCM12Aの平均熱膨張係数(試料採取方向による比較)

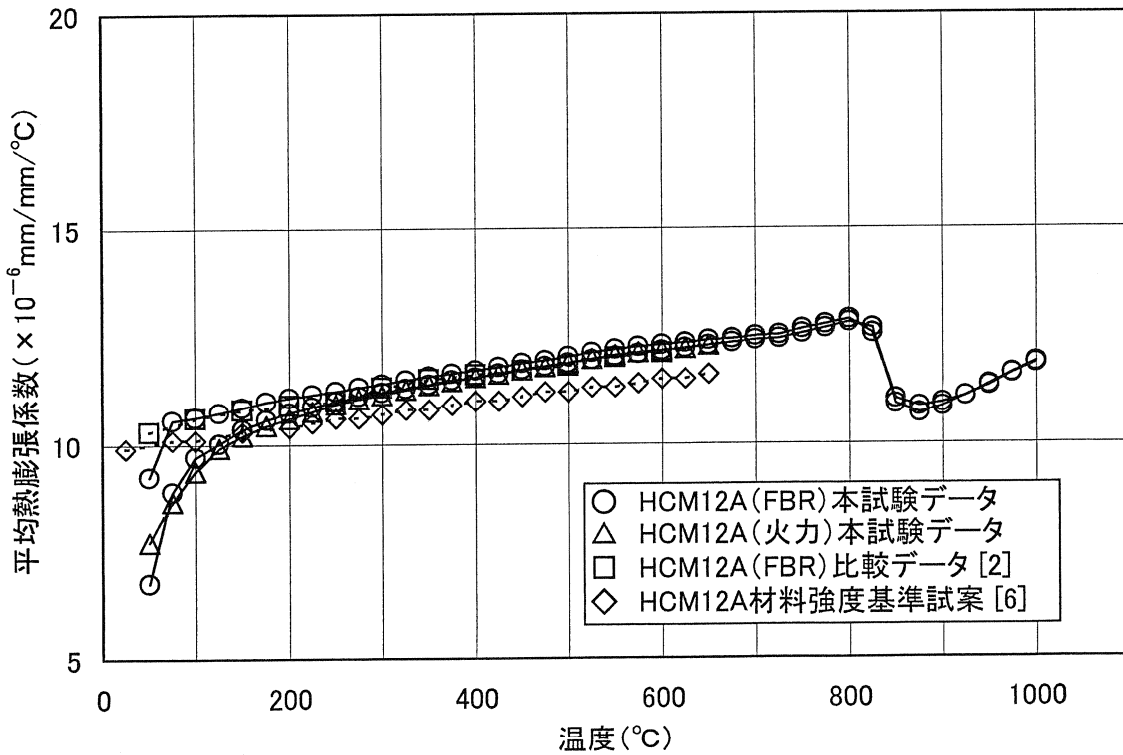


図3.3-2 HCM12Aの平均熱膨張係数(熱処理条件、試験実施機関による比較)

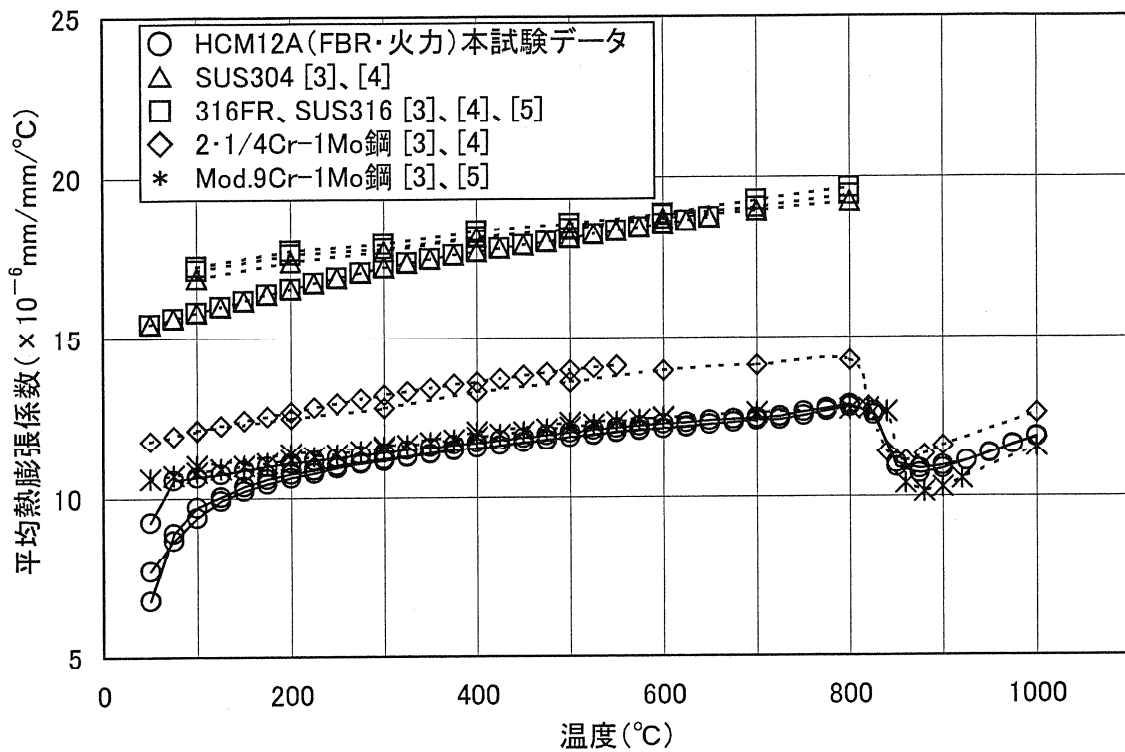


図3.3-3 HCM12A及び代表的なFBR構造材料の平均熱膨張係数

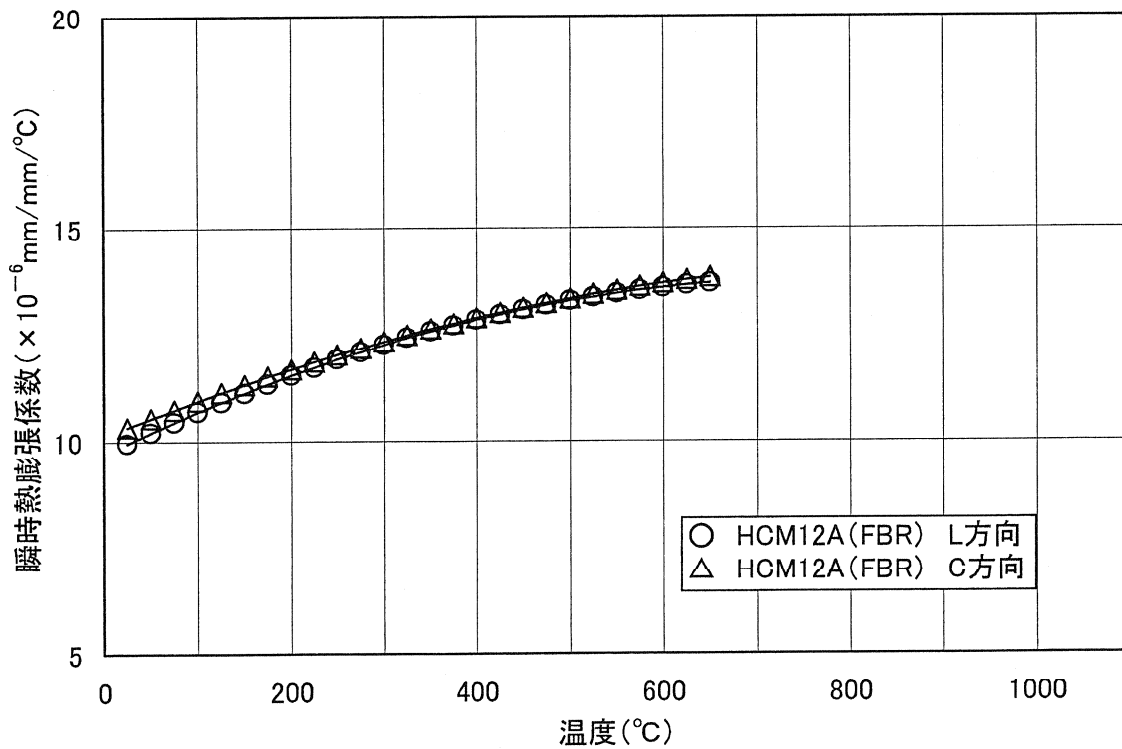


図3.3-4 HCM12Aの瞬時熱膨張係数(試料採取方向による比較)

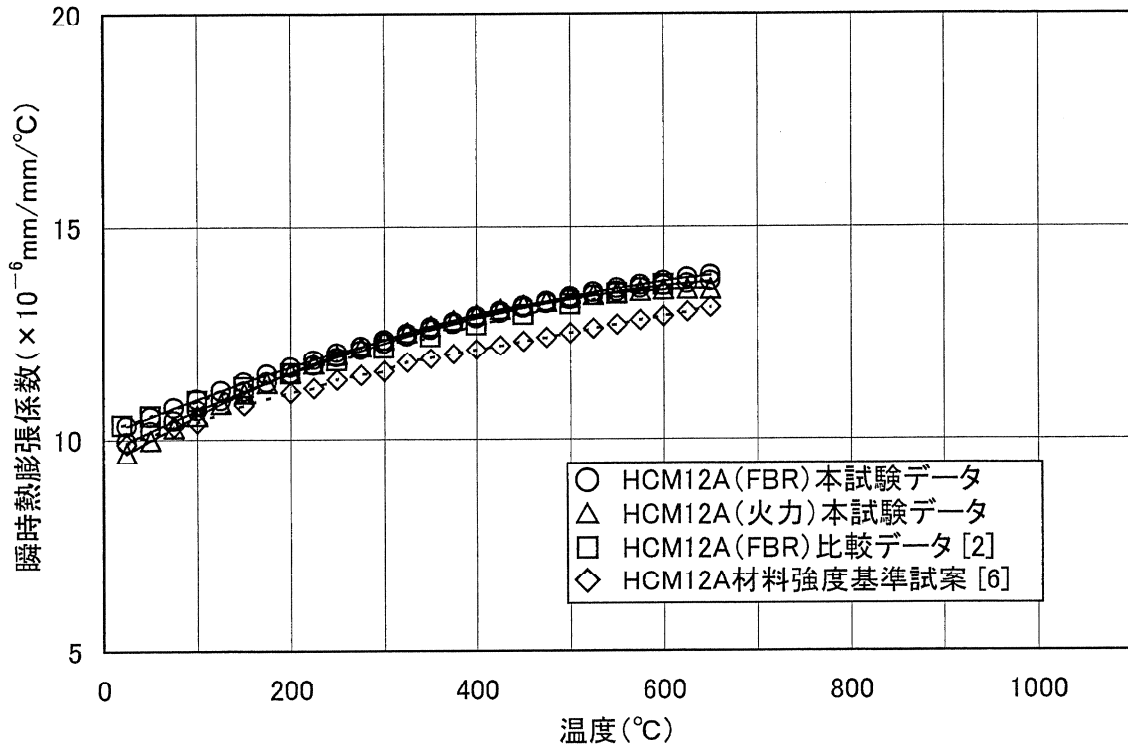


図3.3-5 HCM12Aの瞬時熱膨張係数(熱処理条件、試験実施機関による比較)

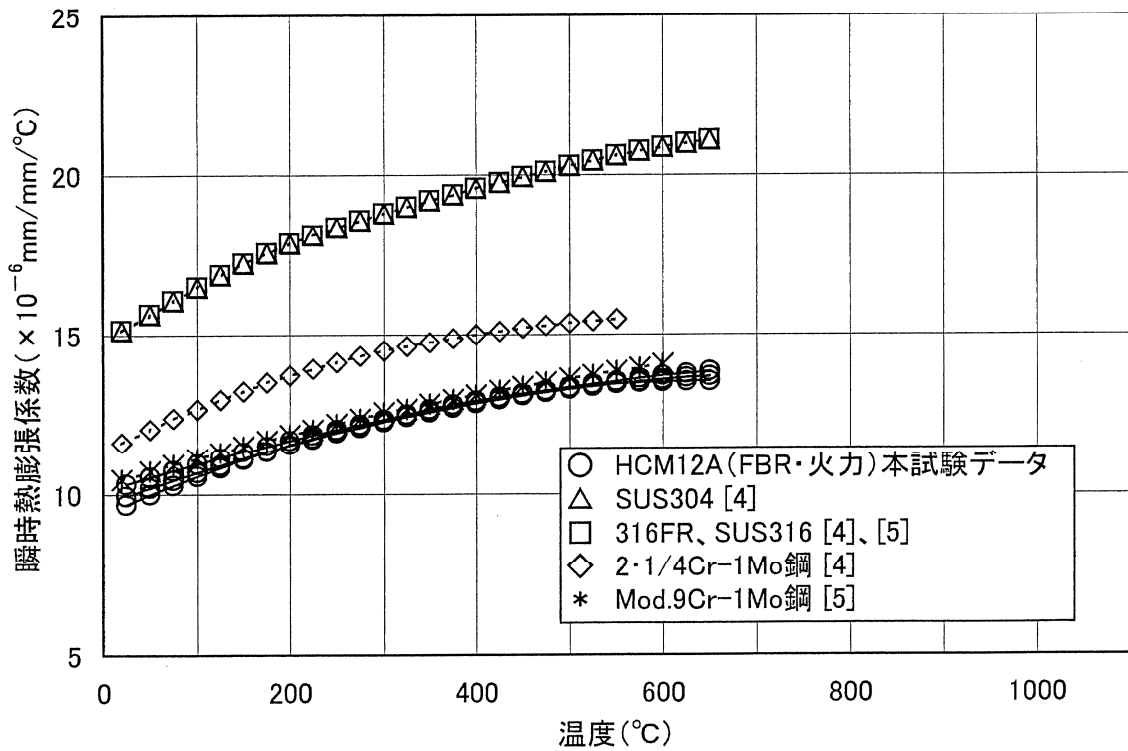


図3.3-6 HCM12A及び代表的なFBR構造材料の瞬時熱膨張係数

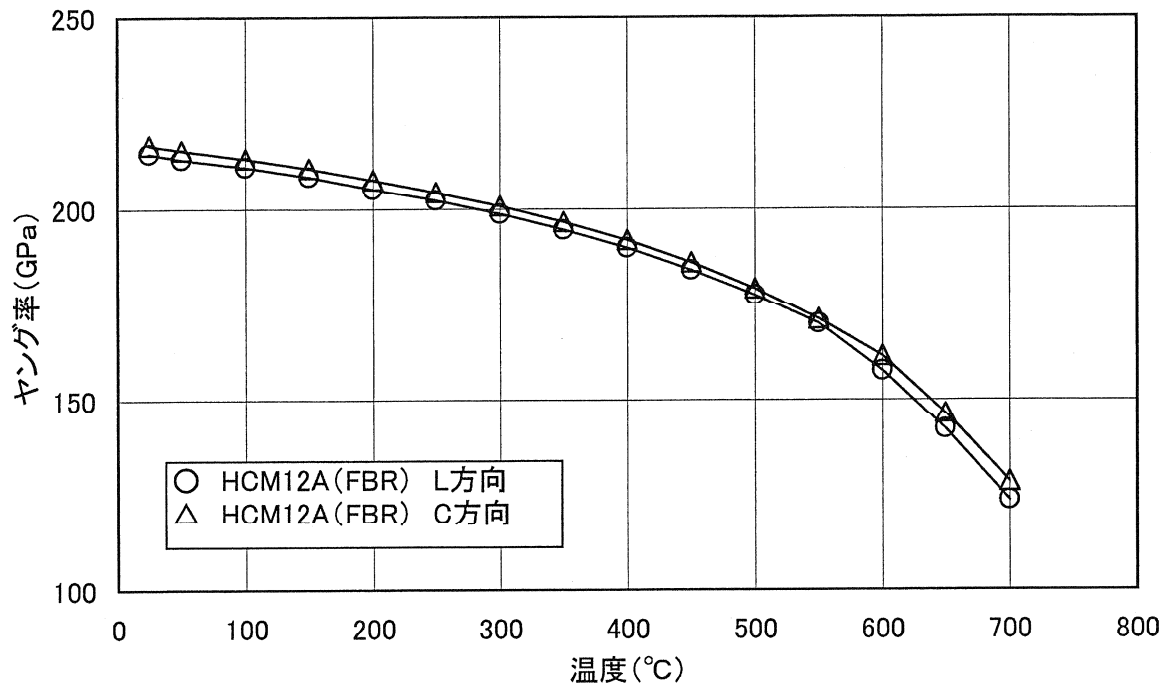


図3.4-1 HCM12Aのヤング率(試料採取方向による比較)

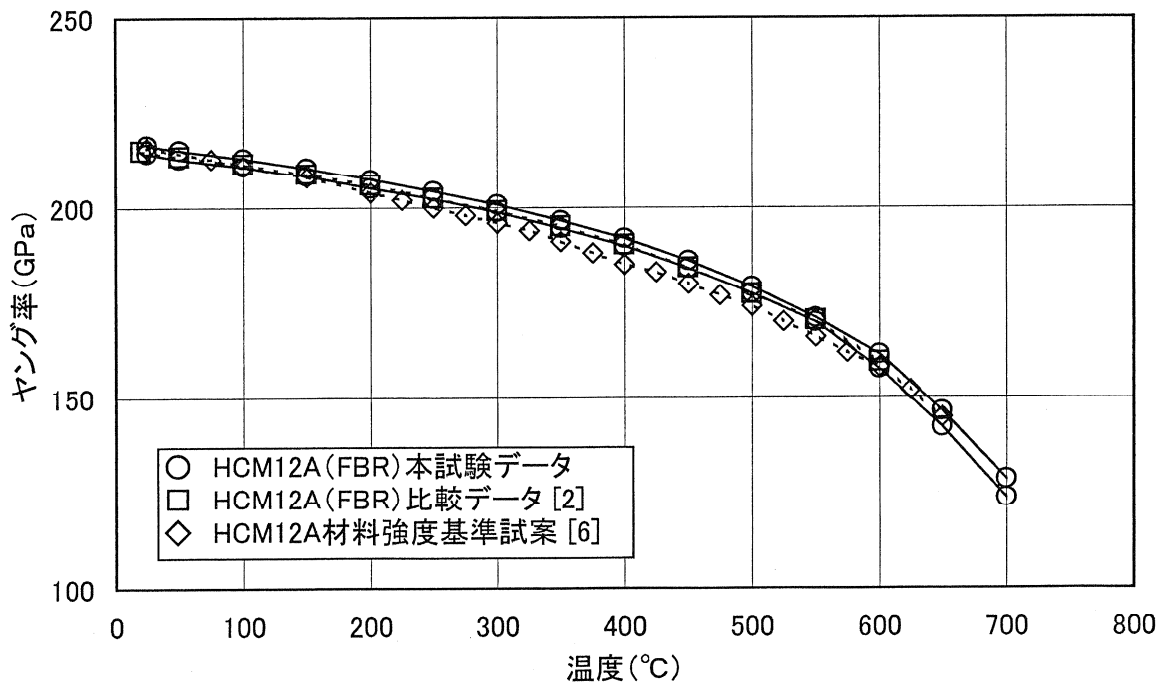


図3.4-2 HCM12Aのヤング率(試験機関による比較)

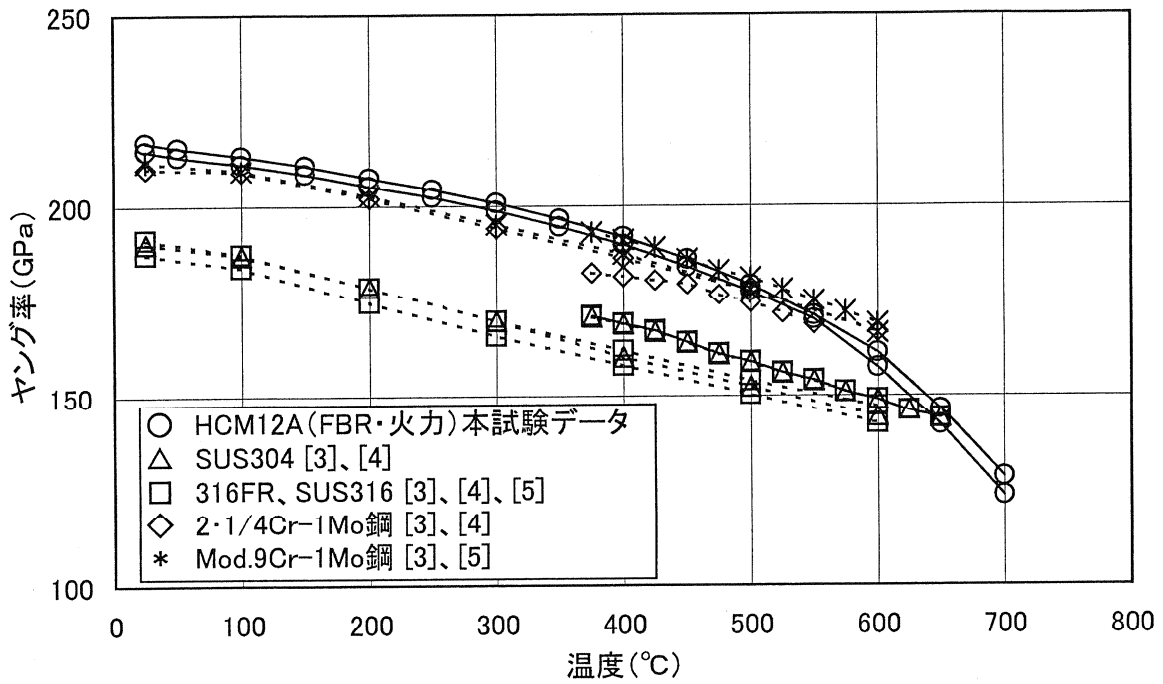


図3.4-3 HCM12A及び代表的なFBR構造材料のヤング率

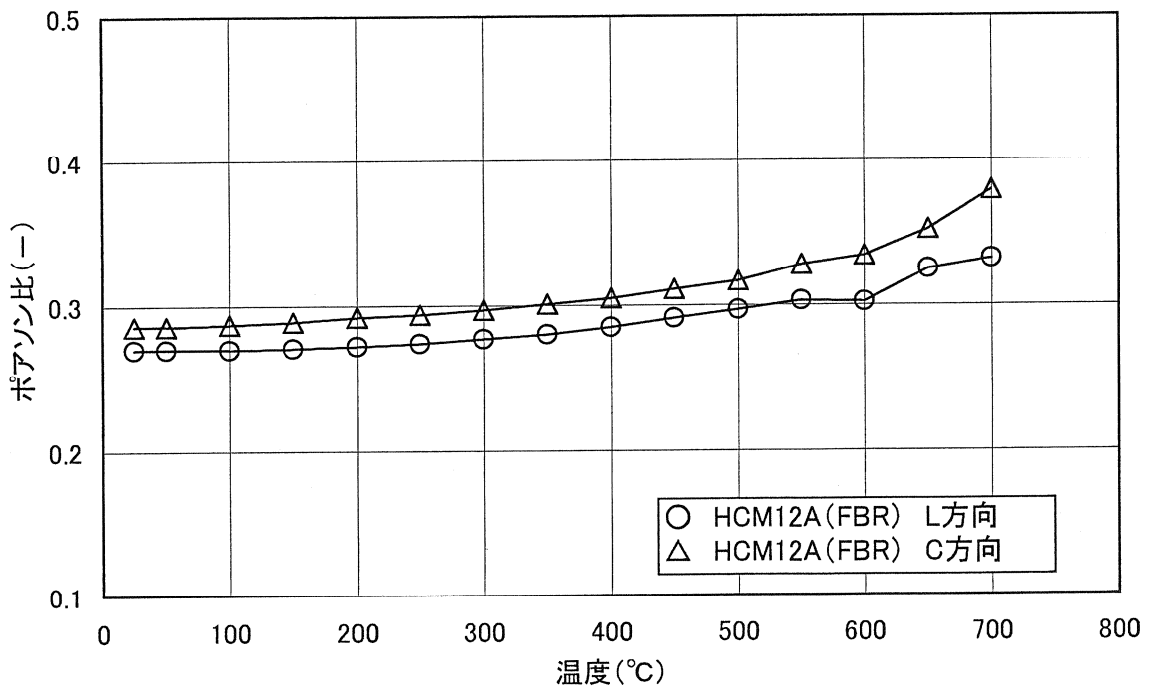


図3.4-4 HCM12Aのポアソン比(試料採取方向による比較)

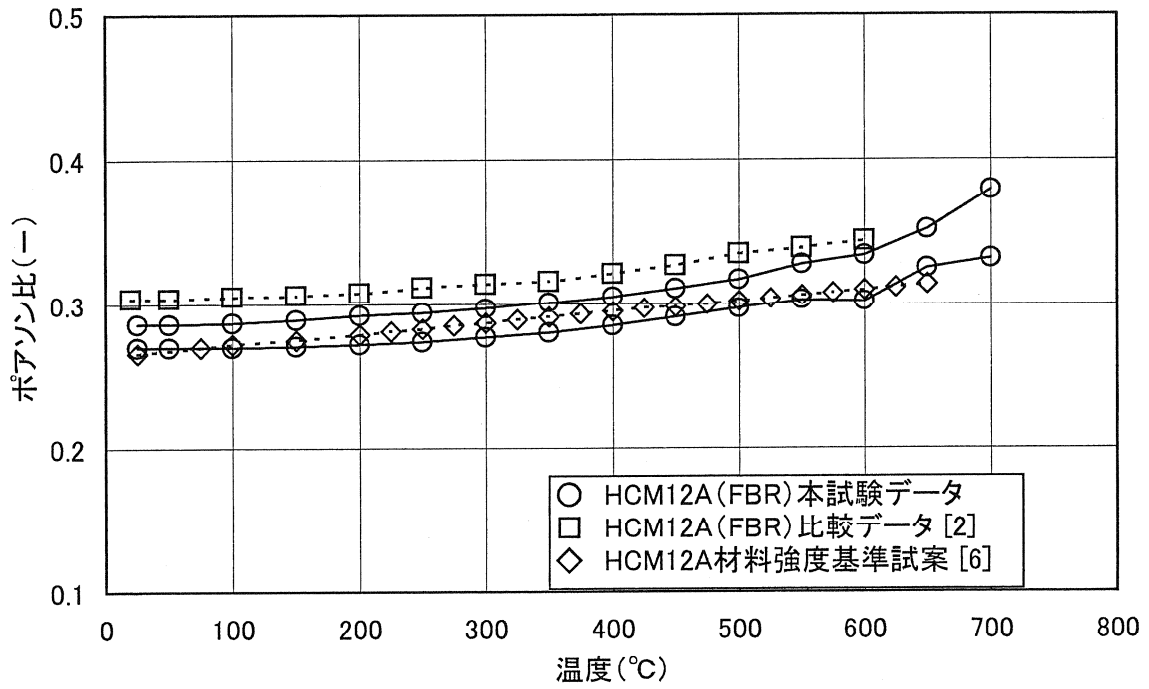


図3.4-5 HCM12Aのポアソン比(試験機関による比較)

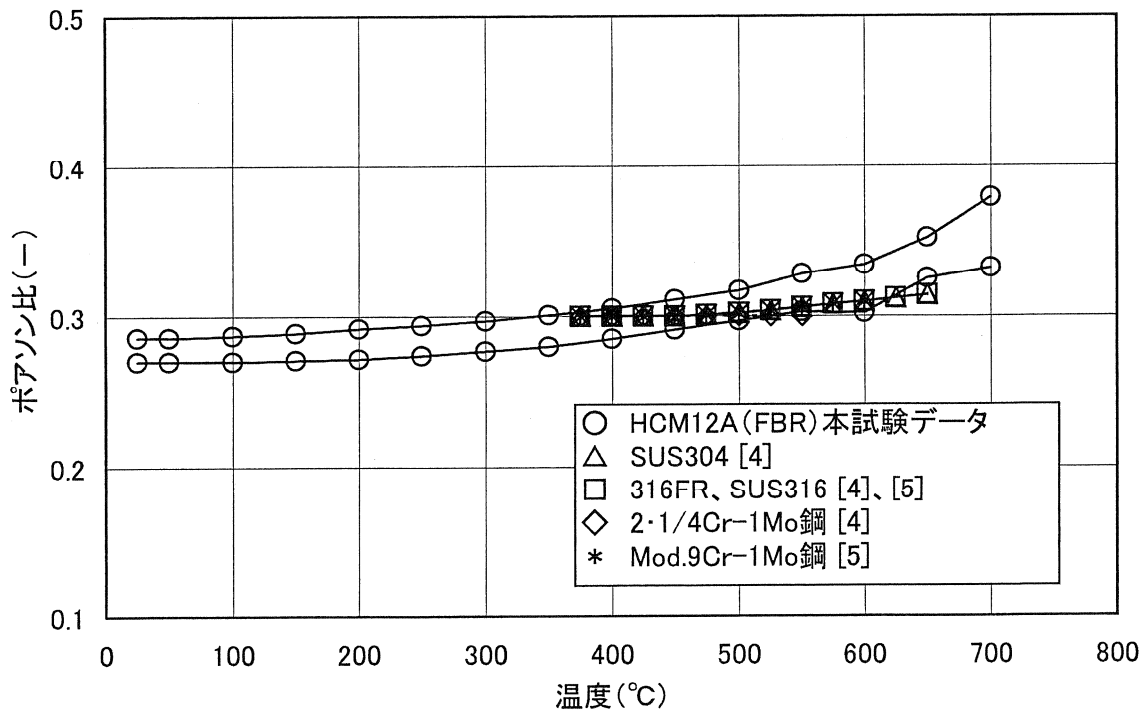


図3.4-6 HCM12A及び代表的なFBR構造材料のポアソン比