

FBR燃料ピンバンドルにおける
スパーサワイヤのたるみによる圧損増加の評価

1991年3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)

FBR燃料ピンバンドルにおける スパーサワイヤのたるみによる圧損増加の評価

菰田成一*、若林利男*、山下芳興*

要 旨

(目的) 今年度設計のFBR燃料ピンは、構造材として改良オーステナイト鋼(PNC1520)を採用している。この改良オーステナイト鋼のスエリングピーク温度は約475℃であり、「もんじゅ」の改良316鋼の約600℃と比べてはるかに低くなっている。このため、中性子照射量の高い炉中心部では、スパーサワイヤ温度の方が被覆管温度よりもスエリングピーク温度に接近する。したがって、ワイヤのたるみが問題とならないかを把握しておく必要がある。本研究の第一の目的は、燃料ピンバンドルにおいて、ワイヤのたるみに起因して、圧損が有意に増加しないことを確認することである。第二の目的は、ワイヤたるみ量とバンドル部圧損増加率の関係を明らかにすることである。

(方法) ワイヤたるみ量は、「もんじゅ」手法と同様の燃料被覆管・スパーサワイヤ機械的相互作用評価手法にて評価した。すなわち、張力が零になっても、ワイヤ巻付けピッチが一定のままと仮定し、たるみ量を評価した。圧損増加率は、このたるみ量が吸収されるように、ワイヤのピッチずれが生じるものとし、Rehmeの圧損式を用いて評価した。ワイヤのピッチずれモードとしては、最下段のピッチが長くなり、その他のピッチが一様に短くなる場合と、上段側ほど短くなる場合を想定した。

(結論) 本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) ワイヤのたるみに起因する圧損増加率は0.6%と小さく無視できる。なぜならば、この圧損増加率に対応する冷却材流量低下率は0.3%となり、炉心流量配分誤差(6~7%)と比較してはるかに小さいからである。
- (2) 圧損増加率はワイヤたるみ量にほぼ比例し、1mm当たりの圧損増加率は0.5~0.6%である。

* 大洗工学センター、技術開発部、プラント工学室

Mar., 1991

Evaluation on the increase of pressure drop due to the slack of spacer-wire in FBR fuel pin bundles

Seiichi Komoda*, Toshio Wakabayashi* and Yoshioki Yamashita*

Abstract

The structural material of FBR fuel pins designed in this fiscal year is an advanced austenitic steel (PNC1520). The swelling peak temperature of the advanced austenitic steel is about 475 °C, and it is much lower than about 600 °C of the modified 316 steel in "Monju". Thus, in the middle of the core section where neutron fluence is high, the spacer-wire temperature becomes closer to the swelling peak temperature than the cladding temperature does. Hence it is necessary to investigate that the slack of spacer-wire will not come into question. One of the aims of this work is to confirm that the rate of the increase of pressure drop due to the wire slack is negligible in the fuel pin bundles. The other aim is to clarify the correlation between the magnitude of wire slack and the rate of pressure-drop increase in the bundles.

The magnitude of wire slack is evaluated by using an evaluation method of the fuel cladding and spacer wire mechanical interaction analogous to the method in "Monju". Namely, the magnitude of wire slack is evaluated by assuming that the wrapping pitch of wire is constant even if the wire tension becomes zero. The rate of pressure drop increase is evaluated by using the pressure drop correlation proposed by Rehme on the assumption that the dispersion of wrapping pitch occurs so as to absorb the wire slack. Here, two kinds of the dispersion modes are assumed. The one is the mode that only the lowest pitch becomes longer and all the other pitches become shorter uniformly. The other is the mode that the pitches become shorter at the upper levels.

The main conclusions drawn in this study are as follows.

- (1) The rate of pressure-drop increase due to the wire slack is 0.6% and negligible, because the rate of decrease in the coolant flow rate corresponding to the rate of pressure-drop increase is 0.3 % and fairly less than the core flow distribution error (6~7 %).
- (2) The rate of pressure-drop increase is nearly proportional to the magnitude of wire slack, and it is 0.5~0.6 % per mm.

* Plant Engineering Office, Technology Development Division, Oarai Engineering Center

目 次

1.	緒 言 -----	1
2.	計算条件 -----	2
2.1	燃料要素仕様 -----	2
2.2	使用条件 -----	2
2.3	材料特性式 -----	2
2.4	計算ケース -----	2
3.	計算方法 -----	12
3.1	被覆管・ワイヤ相互作用計算 -----	12
3.2	ワイヤピッチずれ計算 -----	14
3.3	集合体圧損計算 -----	14
3.4	被覆管応力計算 -----	15
4.	計算結果 -----	17
4.1	改良オーステナイト鋼ワイヤの場合 -----	17
4.1.1	被覆管・ワイヤ相互作用 -----	17
4.1.2	集合体圧損変化率 -----	18
4.2	フェライト鋼ワイヤの場合 -----	40
5.	結果の検討 -----	43
5.1	改良オーステナイト鋼ワイヤの場合 -----	43
5.1.1	被覆管・ワイヤ相互作用 -----	43
5.1.2	集合体圧損変化率 -----	46
5.2	フェライト鋼ワイヤの場合 -----	46
6.	結 言 -----	55
	謝 辞 -----	56
	参考文献 -----	56

表 リ ス ト

表 2.1-1	燃料要素の主要仕様
表 2.1-2	製作時寸法(被覆管応力評価条件)
表 2.1-3	径方向寸法および流量(圧損評価条件)
表 2.2-1	燃料被覆管肉厚中心最高温度(ホットスポット温度)の履歴
表 2.2-2	内側炉心最大発熱ピンの軸方向温度分布(ホットスポット温度)(E01C)
表 2.2-3	内側炉心最小発熱ピンの軸方向温度分布(ホットスポット温度)(B01C)
表 2.2-4	外側炉心最大発熱ピンの軸方向温度分布(ホットスポット温度)(B01C)
表 2.2-5	外側炉心最小発熱ピンの軸方向温度分布(ホットスポット温度)(B01C)
表 2.2-6	燃料被覆管内外面圧力差履歴
表 2.2-7	被覆管内/外面腐食条件(被覆管応力評価条件)
表 2.3-1	材料特性式
表 2.4-1	被覆管-スパーサワイヤ相互作用計算ケース
表 4.1-1	被覆管外径増加率の最大値(ワイヤ材質:改良オーステナイト)
表 4.1-2	被覆管軸方向膨張率の最大値(ワイヤ材質:改良オーステナイト)
表 4.1-3	ワイヤ応力の経時変化(ワイヤ材質:改良オーステナイト)
表 4.1-4	ワイヤ張力による被覆管応力の経時変化(ワイヤ材質:改良オーステナイト)
表 4.1-5	集合体圧損変化率(ワイヤ材質:改良オーステナイト類)
表 4.2-1	ワイヤ張力(ワイヤ材質:フェライト類)

図 リ ス ト

- 図 2.2-1 高速中性子束軸方向分布 (内側炉心燃料ピン)
- 図 2.2-2 高速中性子束軸方向分布 (外側炉心燃料ピン)
- 図 3-1 燃料被覆管とスペーサワイヤの相互作用計算フロー
- 図 4.1-1 被覆管外径増加率の軸方向分布 (内側炉心最大発熱ピン; E03C; ノミナル温度)
- 図 4.1-2 被覆管外径増加率の軸方向分布 (内側炉心最大発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)
- 図 4.1-3 被覆管外径増加率の軸方向分布 (内側炉心最小発熱ピン; E03C; ノミナル温度)
- 図 4.1-4 被覆管外径増加率の軸方向分布 (内側炉心最小発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)
- 図 4.1-5 被覆管外径増加率の軸方向分布 (外側炉心最大発熱ピン; E03C; ノミナル温度)
- 図 4.1-6 被覆管外径増加率の軸方向分布 (外側炉心最大発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)
- 図 4.1-7 被覆管外径増加率の軸方向分布 (外側炉心最小発熱ピン; E03C; ノミナル温度)
- 図 4.1-8 被覆管外径増加率の軸方向分布 (外側炉心最小発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)
- 図 4.1-9 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布 (内側炉心最大発熱ピン; E03C; ノミナル温度)
- 図 4.1-10 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布 (内側炉心最大発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)
- 図 4.1-11 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布 (内側炉心最小発熱ピン; E03C; ノミナル温度)
- 図 4.1-12 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布 (内側炉心最小発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)
- 図 4.1-13 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布 (外側炉心最大発熱ピン; E03C; ノミナル温度)
- 図 4.1-14 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布 (外側炉心最大発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)
- 図 4.1-15 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布 (外側炉心最小発熱ピン; E03C; ノミナル温度)
- 図 4.1-16 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布 (外側炉心最小発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)
- 図 4.1-17 ワイヤ張力の経時変化 (内側炉心最大発熱ピン; ノミナル温度)
- 図 4.1-18 ワイヤ張力の経時変化 (内側炉心最大発熱ピン; ホットスポット温度)
- 図 4.1-19 ワイヤ張力の経時変化 (内側炉心最小発熱ピン; ノミナル温度)
- 図 4.1-20 ワイヤ張力の経時変化 (内側炉心最小発熱ピン; ホットスポット温度)
- 図 4.1-21 ワイヤ張力の経時変化 (外側炉心最大発熱ピン; ノミナル温度)
- 図 4.1-22 ワイヤ張力の経時変化 (外側炉心最大発熱ピン; ホットスポット温度)
- 図 4.1-23 ワイヤ張力の経時変化 (外側炉心最小発熱ピン; ノミナル温度)
- 図 4.1-24 ワイヤ張力の経時変化 (外側炉心最小発熱ピン; ホットスポット温度)
- 図 4.1-25 ワイヤたるみ量の経時変化 (内側炉心最大発熱ピン; ノミナル温度)
- 図 4.1-26 ワイヤたるみ量の経時変化 (内側炉心最大発熱ピン; ホットスポット温度)
- 図 4.1-27 ワイヤたるみ量の経時変化 (内側炉心最小発熱ピン; ノミナル温度)
- 図 4.1-28 ワイヤたるみ量の経時変化 (内側炉心最小発熱ピン; ホットスポット温度)
- 図 4.1-29 ワイヤたるみ量の経時変化 (外側炉心最大発熱ピン; ノミナル温度)
- 図 4.1-30 ワイヤたるみ量の経時変化 (外側炉心最大発熱ピン; ホットスポット温度)
- 図 4.1-31 ワイヤたるみ量の経時変化 (外側炉心最小発熱ピン; ノミナル温度)
- 図 4.1-32 ワイヤたるみ量の経時変化 (外側炉心最小発熱ピン; ホットスポット温度)
- 図 4.1-33 ワイヤピッチの軸方向分布 (内側炉心最大発熱ピン; ホットスポット温度)
- 図 4.1-34 ワイヤピッチの軸方向分布 (外側炉心最大発熱ピン; ホットスポット温度)

- 図 4.1-35 圧損変化率の軸方向分布(内側炉心最大発熱ピン;ホットスポット温度)
- 図 4.1-36 圧損変化率の軸方向分布(外側炉心最大発熱ピン;ホットスポット温度)
- 図 4.2-1 ワイヤ径とワイヤ応力の関係(外側炉心最大発熱ピン;ワイヤ巻付荷重5kg;ノミナル温度)
- 図 4.2-2 ワイヤ径とワイヤ応力の関係(外側炉心最大発熱ピン;ワイヤ巻付荷重5kg;ホットスポット温度)
- 図 5.1-1 被覆管外径増加率軸方向分布の比較(内側炉心最大発熱ピン;ワイヤ巻付荷重5kg;E03C)
- 図 5.1-2 被覆管軸方向膨張率軸方向分布の比較(内側炉心最大発熱ピン;ワイヤ巻付荷重5kg;E03C)
- 図 5.1-3 被覆管外径増加率の成分(内側炉心最大発熱ピン;ワイヤ巻付荷重5kg;E03C;ノミナル温度)
- 図 5.1-4 被覆管外径増加率の成分(内側炉心最大発熱ピン;ワイヤ巻付荷重5kg;E03C;ホットスポット温度)
- 図 5.1-5 高速中性子束の軸方向分布(内側炉心最大発熱ピン)
- 図 5.1-6 被覆管温度の軸方向分布(内側炉心最大発熱ピン;MOL)
- 図 5.1-7 ワイヤ張力の経時変化の比較(内側炉心最大発熱ピン;ワイヤ巻付荷重5kg)
- 図 5.1-8 ワイヤ張力の経時変化(ホットスポット温度;ワイヤ巻付荷重5kg)
- 図 5.1-9 ワイヤたるみ量の経時変化の比較(内側炉心最大発熱ピン;ワイヤ巻付荷重5kg)
- 図 5.1-10 被覆管外径増加率の比較
- 図 5.1-11 ワイヤ張力の比較
- 図 5.1-12 クリープ(照射+熱)ひずみの経時変化
- 図 5.1-13 ワイヤたるみ量と圧損変化率の関係(内側炉心最大発熱ピン;ホットスポット温度)

1 緒 言

FBR燃料ピンは、被覆管の直接接触を防止するため、スペーサワイヤが一定のピッチで螺旋状に巻き付けられ、ワイヤ両端が上下端栓に固定された構造である。ワイヤのピッチずれ発生を防止するため、適度なワイヤ張力となるように、巻付け荷重が決められる。しかし、炉内使用期間中の前期においては、クリープのためにワイヤ張力は漸減する。また、スエリングが生じる後期においては、被覆管とワイヤのスエリング速度の違いにより、ワイヤがたるむ可能性がある。実際、Phenix炉では、ワイヤのたるみに起因して燃料ピンバンドル部の流動抵抗が増加し、燃料集合体出口冷却材温度が10°C上昇したことが報告されている¹⁾。平成2年度FBR大型炉設計研究²⁾では、被覆管およびワイヤとして改良オーステナイト鋼(PNC1520)を採用しているが、そのスエリングピーク温度は約475°Cであり³⁾、「もんじゅ」の改良316鋼の約600°Cと比べてはるかに低くなっている。このため、中性子照射量の高い炉中心部では、スペーサワイヤ温度の方が被覆管温度よりもスエリングピーク温度に接近する。したがって、ワイヤのたるみが問題とならないかを把握しておく必要がある。

本研究の第一の目的は、平成2年度FBR大型炉設計研究の燃料ピンにおいて、寿命末期でのワイヤたるみに起因して、燃料ピンバンドル部の圧損が有意に増加しないことを確認することである。第二の目的は、ワイヤたるみ量と燃料ピンバンドル部圧損増加率の関係を明らかにすることである。

ワイヤたるみ量は、「もんじゅ」設計と同様の被覆管・スペーサワイヤ相互作用評価手法⁴⁾にて評価した。すなわち、張力が零になっても、ワイヤピッチが一定のままと仮定し、たるみ量を評価した。次に、このたるみ量が吸収されるように、ワイヤのピッチずれが生じるものとし、ピッチずれに起因する燃料ピンバンドル部の圧損増加率をRehmeの式⁵⁾を用いて評価した。ワイヤのピッチずれモードとしては、最下段(下流側)のピッチが長くなり、その他のピッチが一様に短くなる場合と、下段側ほど長く上段側ほど短くなる場合を想定した。

2. 計算条件

平成2年度FBR大型炉設計研究における内側炉心最大発熱ピン、内側炉心最小発熱ピン、外側炉心最大発熱ピン、外側炉心最小発熱ピンの4本を計算対象とした。

2.1 燃料要素仕様

被覆管・スペーサワイヤ相互作用計算に用いる燃料要素(燃料ピン)の主要仕様を表2.1-1に示す。また、被覆管応力計算に用いる被覆管製作時寸法、および集合体(ピンバンドル部のみ)圧損計算に用いる集合体の径方向寸法と流量を表2.1-2および表2.1-3に示す。

2.2 使用条件

(1) 被覆管およびワイヤ温度

表2.2-1に、4本のピンについて、被覆管最高温度(ホットスポット温度)の履歴を示す。

また、表2.2-2~表2.2-5には、被覆管とワイヤの軸方向温度分布を示す。

(2) 高速中性子束

図2.2-1および図2.2-2に、内側炉心燃料ピン(最大および最小発熱ピン)および外側炉心燃料ピン(最大および最小発熱ピン)の高速中性子束軸方向分布をそれぞれ示す。

(3) 被覆管内外圧力差

表2.2-6に、被覆管内外圧力差の履歴を示す。

(4) 被覆管内外面腐食

表2.2-7に、被覆管応力計算に用いる被覆管内外面腐食量を示す。尚、被覆管・スペーサワイヤ相互作用計算および集合体圧損計算では、内外面腐食は考慮しない。

2.3 材料特性式

表2.3-1に、被覆管およびワイヤに用いる改良オーステナイト鋼、またワイヤに用いるフェライト鋼の材料特性式を示す。

2.4 計算ケース

表2.4-1に、計算ケースを示す。計算のパラメータは、ワイヤ巻付け荷重および被覆管とワイヤの温度条件(ノミナル or ホットスポット)である。

表2.1-1 燃料要素の主要仕様

項 目		仕 様
1) ピン全長	(mm)	2,850
2) 炉心部長さ	(mm)	1,000
3) ブランケット部長さ	(mm)	350/350 (上部/下部)
4) プレナム部長さ	(mm)	170/900 (上部/下部)
5) 端栓部長さ	(mm)	30/50 (上部/下部)
6) 被覆管の材質		改良オーステナイト鋼 (PNC1520)
7) ワイヤの材質		改良オーステナイト鋼 (PNC1520)*1
8) ピン径	(mm)	φ8.5
9) 被覆管肉厚	(mm)	0.45
10) ワイヤ径	(mm)	φ1.2
11) ワイヤ巻付けピッチ	(mm)	165
12) ワイヤ巻付け回数	(-)	17
13) ワイヤ巻付け開始位置~ピン下端	(mm)	30
14) ワイヤ巻付け荷重	(kg)	5, 10, 15*2

注 *1) 代替案として、フェライト鋼を検討対象とする。

*2) 未定なので、3ケースについて検討する。

表2.1-2 製作時寸法 (被覆管応力評価条件)

項目	条件	項目	条件
被覆管外直径 (mm)	8.47	被覆管内直径 (mm)	7.625

表2.1-3 径方向寸法および流量 (圧損評価条件)

仕様項目	寸法	対象集合体	集合体当たり流量
ピン配列ピッチ	9.8 (mm)	内側炉心最大発熱ピンを含む集合体	32.1 (kg/sec)
被覆管外直径	8.5 (mm)	内側炉心最小発熱ピンを含む集合体	25.3 (kg/sec)
ワイヤ直径	1.2 (mm)	外側炉心最大発熱ピンを含む集合体	28.8 (kg/sec)
ラッパ管内対面巾	146.9 (mm)	外側炉心最小発熱ピンを含む集合体	22.5 (kg/sec)
集合体内ピン本数	217	-----	-----

表2.2-1 燃料被覆管肉厚中心最高温度(ホットスポット温度)の履歴 (単位:°C)

燃料要素の種類	BO1C	EO1C	BO2C	EO2C	BO3C	EO3C
内側炉心最大発熱ピン	634	700	619	684	622	686
内側炉心最小発熱ピン	700	696	699	696	681	682
外側炉心最大発熱ピン	700	656	664	634	637	614
外側炉心最小発熱ピン	700	662	675	646	652	629

注) ノミナル温度は、冷却材入口温度380°CとHSF 1.25とから逆算される温度とする。

表2.2-2 内側炉心最大発熱ピンの軸方向温度分布(ホットスポット温度) (EO1C)

ノード#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ノード長さ (mm)	950	350	250	200	100	200	200	50	350	200
ピン下端からの距離 (cm)	0 ~95	95 ~130	130 ~155	155 ~175	175 ~185	185 ~205	205 ~225	225 ~230	230 ~265	265 ~285
被覆管温度 (°C)	380	387	443	517	571	623	676	700	694	693
ワイヤ温度 (°C)	380	384	421	489	543	596	657	687	693	693

表2.2-3 内側炉心最小発熱ピンの軸方向温度分布(ホットスポット温度) (BO1C)

ノード#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
被覆管温度 (°C)	380	386	436	510	566	619	675	700	698	697
ワイヤ温度 (°C)	380	384	422	491	545	600	660	690	697	697

表2.2-4 外側炉心最大発熱ピンの軸方向温度分布(ホットスポット温度) (BO1C)

ノード#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
被覆管温度 (°C)	380	387	443	517	571	623	676	700	694	693
ワイヤ温度 (°C)	380	384	421	489	543	596	657	687	693	693

表2.2-5 外側炉心最小発熱ピンの軸方向温度分布(ホットスポット温度) (BO1C)

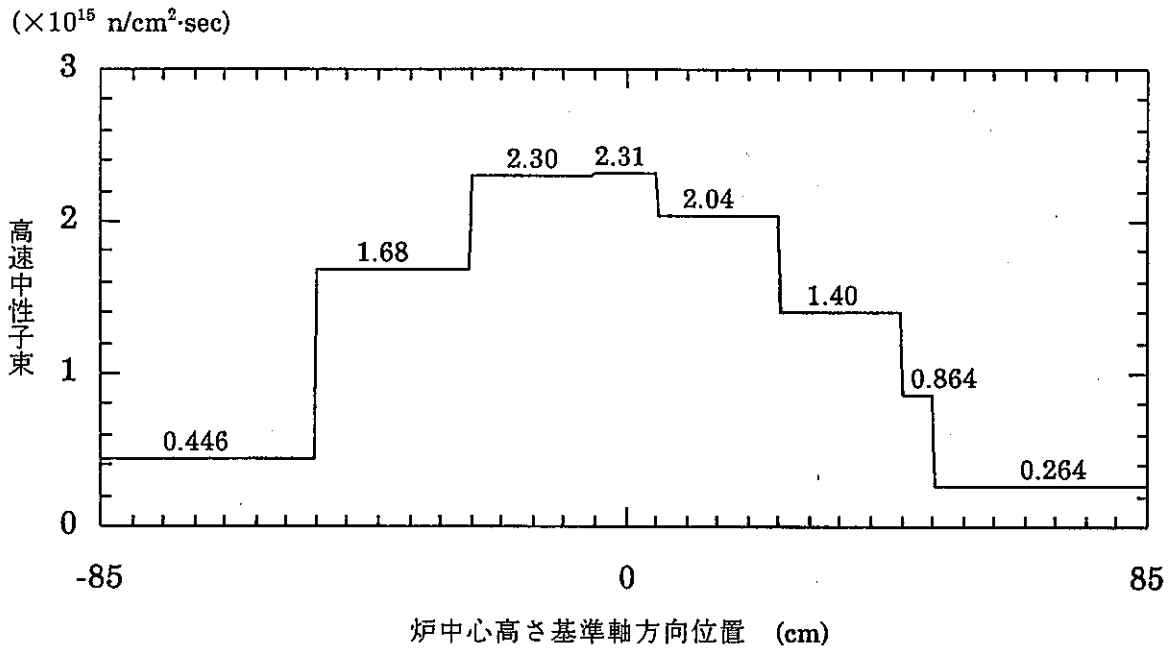
ノード#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
被覆管温度 (°C)	380	386	435	509	564	618	674	700	698	697
ワイヤ温度 (°C)	380	384	423	492	547	601	661	691	697	697

表2.2-6 燃料被覆管内外面圧力差履歴

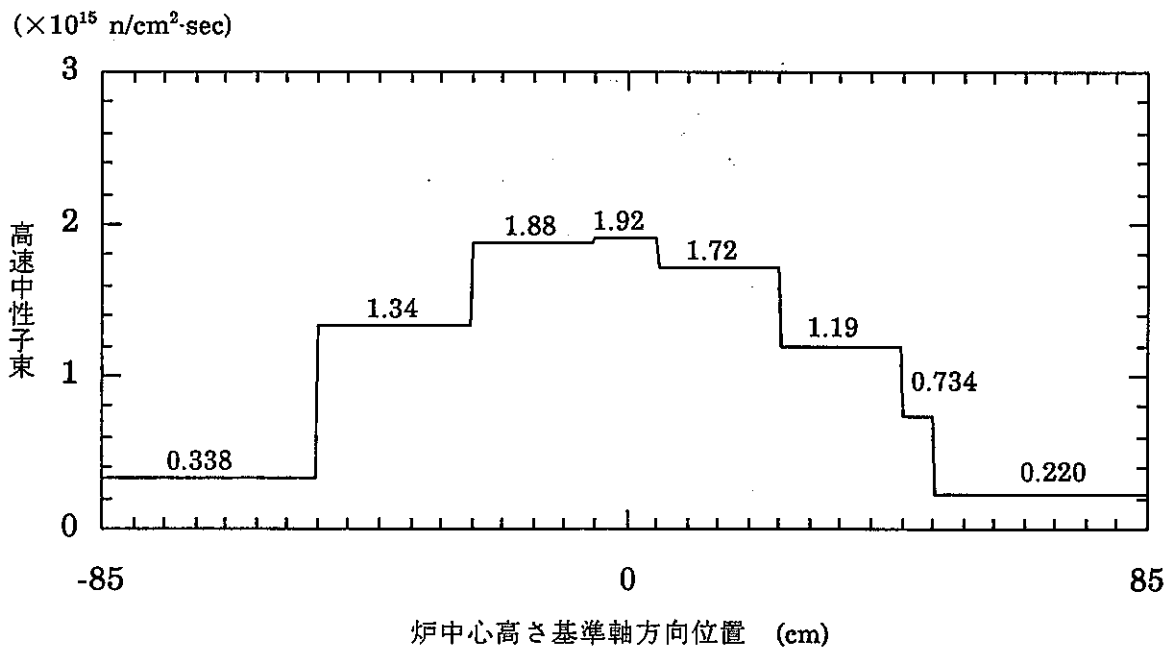
燃料要素の種類	内外面圧力差 (kg/cm ²)					
	BO1C	EO1C	BO2C	EO2C	BO3C	EO3C
内側炉心最大発熱ピン	3	35	35	73	73	106
内側炉心最小発熱ピン	3	22	22	54	54	82
外側炉心最大発熱ピン	3	33	33	70	70	102
外側炉心最小発熱ピン	3	14	14	37	37	59

表2.2-7 被覆管内/外面腐食条件 (被覆管応力評価条件)

項目	内面腐食量(μm)/外面腐食量(μm)			
	BO1C	EO1C	EO2C	EO3C
内側炉心最大発熱ピン 最高温度部 最大発熱部	35/0 35/0	51/41 82/0	77/62 98/1	100/81 98/1
内側炉心最小発熱ピン 最高温度部 最大発熱部	35/0 35/0	45/66 69/1	69/130 99/2	88/172 99/2
外側炉心最大発熱ピン 最高温度部 最大発熱部	35/0 35/0	52/40 82/1	78/57 99/1	100/65 99/1
外側炉心最小発熱ピン 最高温度部 最大発熱部	35/0 35/0	41/47 59/1	59/75 95/1	75/90 97/1

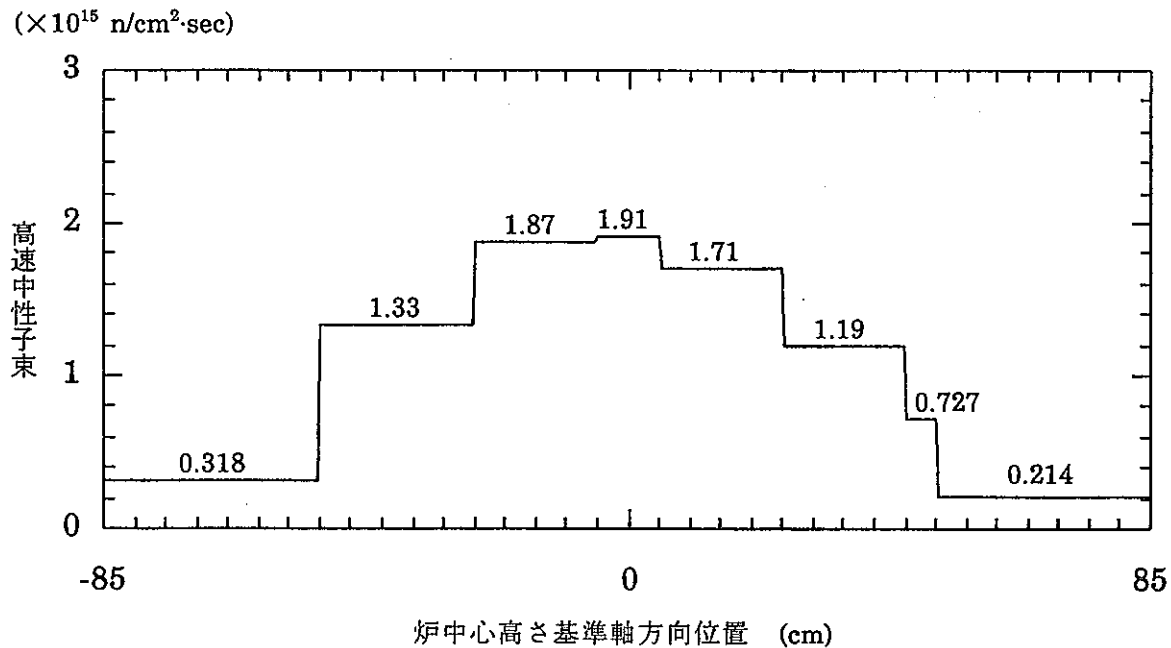


(a) 内側炉心最大発熱ピン

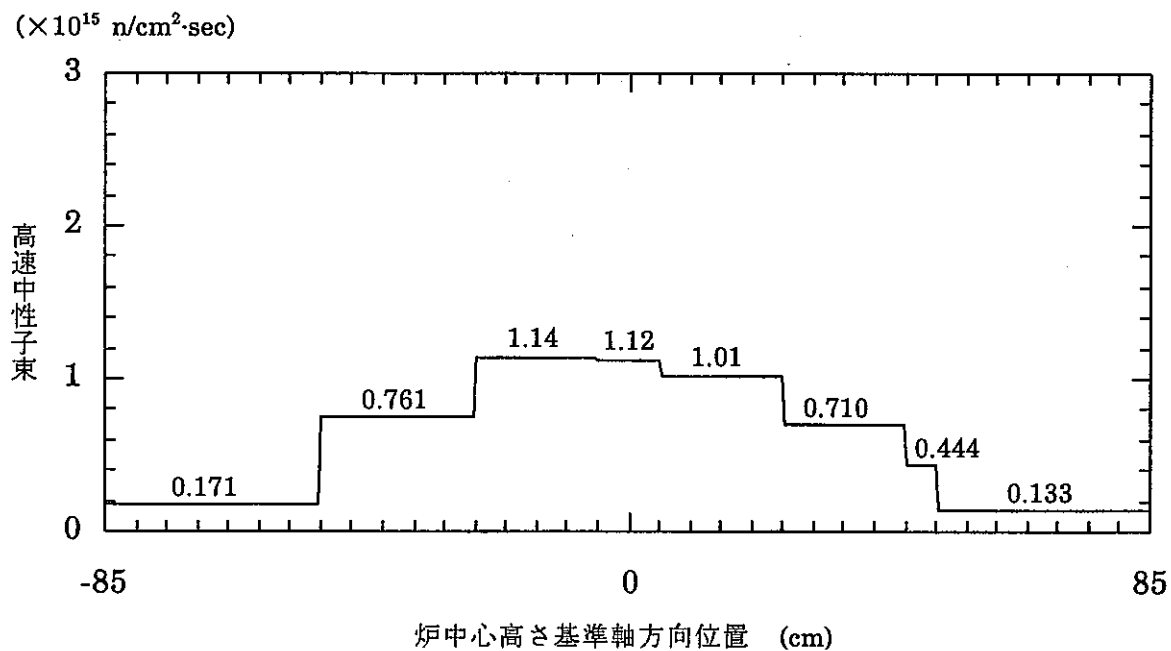


(b) 内側炉心最小発熱ピン

図2.2-1 高速中性子束軸方向分布 (内側炉心燃料ピン)



(a) 外側炉心最大発熱ピン



(b) 外側炉心最小発熱ピン

図2.2-2 高速中性子束軸方向分布 (外側炉心燃料ピン)

表2.3-1 材料特性式 (1/3)

	項 目	改良オーステナイト鋼	フェライト鋼
1	縦弾性係数 E (kgf/mm ²) E' (GPa)	$E = 19917.9743 - 7.5086 \cdot T$ for R. T. $\leq T \leq 600^\circ\text{C}$ $= 22613.0293 - 12.0004 \cdot T$ for $600^\circ\text{C} < T \leq 850^\circ\text{C}$	$E' = 221.3 - 0.078875 \cdot T$ for $0^\circ\text{C} < T < 400^\circ\text{C}$ $= 222.16 - 0.11146 \cdot T$ $+ 1.7899 \times 10^{-4} \cdot T^2$ $- 2.5333 \times 10^{-7} \cdot T^3$ for $400 \leq T \leq 700^\circ\text{C}$
2	ポアソン比 ν (-)	$\nu = 0.300$ for $20^\circ\text{C} \leq T \leq 475^\circ\text{C}$ $= 0.300 + 8 \times 10^{-5} \cdot (T - 475)$ for $475^\circ\text{C} \leq T \leq 850^\circ\text{C}$	$\nu = 0.29 + 6 \times 10^{-5} \cdot T$ for R. T. $\leq T \leq 700^\circ\text{C}$
3	平均熱膨張 係数 α (1/°C)	$\alpha = (15.0113 + 0.8726 \times 10^{-2} \cdot T$ $- 0.5872 \times 10^{-5} \cdot T^2$ $+ 0.1931 \times 10^{-8} \cdot T^3) \times 10^{-6}$ for R. T. $\leq T \leq 850^\circ\text{C}$	$\alpha = (10.512 + 5.294 \times 10^{-3} \cdot T$ $- 2.810 \times 10^{-6} \cdot T^2) \times 10^{-6}$ for R. T. $\leq T \leq 700^\circ\text{C}$
4	<p>改良オーステナイト鋼のスエリング/炉内クリープ式</p> <p>(1) スエリング式</p> $\Delta V/V = R \cdot [\phi t + (1/\alpha) \cdot \ln \{ (1 + \exp(\alpha \cdot (\tau - \phi t))) / (1 + \exp(\alpha \cdot \tau)) \}]$ <p>ここで、 $R = R_0 \cdot \exp [A (T - T_p)^2]$</p> <p>$\Delta V/V$: スエリング量 (vol. %)</p> <p>ϕ : 高速中性子束 ($10^{22} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$,) 0.1MeV)</p> <p>$t$: 高速中性子照射時間(炉内滞在時間) (sec)</p> <p>α : $0.20 ((10^{22} \text{n/cm}^2)^{-1})$</p> <p>$A$: -4.34×10^{-5} (-)、T_p : 475°C、T : 温度 ($^\circ\text{C}$)、</p> <p>R_0 : $2.50 (\% / (10^{22} \text{n/cm}^2))$、 τ : $27 (10^{22} \text{n/cm}^2)$</p> <p>[適用範囲] $T = 400 \sim 850^\circ\text{C}$、 $\phi t \leq 3 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$</p> <p>尚、$T < 400^\circ\text{C}$では、$\Delta V/V = 0$とする。</p>		

表2.3-1 材料特性式 (2/3)

4

(2) 炉内クリープ歪式

炉内クリープ歪(ϵ_{in})は照射クリープ歪(ϵ_{ir})と熱クリープ歪(ϵ_{th})の和である。

① 照射クリープ歪式

$$\epsilon_{ir} = B \cdot \phi t' \cdot \sigma^{1.3} + D \cdot S \cdot \sigma$$

ここで、 $B = 9.4425 \times 10^{-2} - 3.564 \times 10^{-4} \cdot T + 3.351 \times 10^{-7} \cdot T^2$ for $400 \leq T \leq 500$,

$$= 0 \quad \text{for } 500 < T \leq 850,$$

$$\phi t' = \phi t + \ln \{ (1 + \exp(\Omega - \phi t)) / (1 + \exp(\Omega)) \}$$

$$\Omega = 4.995, \quad D = 1.32 \times 10^{-2}$$

ϵ_{ir} : 照射クリープ歪 (%), σ : Mises型等価応力 (kgf/mm²),

S: スエリング量($\Delta V/V$) (vol. %), T : 温度 (°C),

ϕ : 高速中性子束 (10^{22} n/cm²·sec, > 0.1 MeV)

t : 高速中性子照射時間(炉内滞在時間) (sec)

[適用範囲] $T = 400 \sim 850$ °C, $\phi t \leq 3 \times 10^{23}$ n/cm², $\sigma \leq 15$ kgf/mm²

尚、 $T < 400$ °Cでは、 $S=0$ とし、 B は400°Cで接線を引き外挿する。

② 熱クリープ歪式

$$\epsilon_{th}/100 = \epsilon_T \cdot \{1 - \exp(-\gamma \cdot t)\} + d\epsilon_S/dt \cdot t$$

ここで、 $\epsilon_T = 0.001411$, $\gamma = 0.5427/t_R$, $d\epsilon_S/dt = 4.505 \times 10^{-5} \cdot t_R^{-0.3261}$,

$$\log_{10}(t_R) = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} \sigma' + A_2 \cdot (\log_{10} \sigma')^2 + A_3 \cdot (\log_{10} \sigma')^3 \text{ for } \sigma' \geq 12.5,$$

$$= B_0 + B_1 \cdot \log_{10} \sigma' \quad \text{for } \sigma' < 12.5,$$

$\sigma' = \sigma \times 2 / 1.7320508$, t : 炉内滞在時間 (hr), t_R : 破断時間 (hr),

$$A_0 = 55867 / (T + 273.15) - 20.63, \quad A_1 = -71174 / (T + 273.15),$$

$$A_2 = 56403 / (T + 273.15), \quad A_3 = -15894 / (T + 273.15),$$

$$B_0 = 28902 / (T + 273.15) - 20.63, \quad B_1 = -3846 / (T + 273.15),$$

ϵ_{th} : 熱クリープ歪 (%), σ : Mises型等価応力 (kgf/mm²), T : 温度 (°C)

[適用範囲] $T = 425 \sim 850$ °C, $\sigma \leq 18.4$ kgf/mm², $t \leq 0.5t_R$

尚、 $T < 400$ °Cでは、 $\epsilon_{th} = 0$ とする。

表2.3-1 材料特性式 (3/3)

4

フェライト鋼のスエリング/炉内クリープ式

(1) スエリング式

$$\Delta V/V = R \cdot \phi t$$

ここで、 $R = 3 \times \exp [-4.260 - 1.825 \cdot \beta - 2.176 \cdot \beta^2 + 0.579 \cdot \beta^3 - 0.027 \cdot \beta^4]$

$$\beta = (T - 437) / 100$$

$\Delta V/V$: スエリング量 (vol. %)

ϕ : 高速中性子束 ($10^{22} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$, $> 0.1 \text{MeV}$)

t : 高速中性子照射時間(炉内滞在時間) (sec)

T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)、

[適用範囲] $T = 350 \sim 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$

(2) 炉内クリープ歪式

炉内クリープ歪(ϵ_{in})は照射クリープ歪(ϵ_{ir})と熱クリープ歪(ϵ_{th})の和である。

① 照射クリープ歪式

$$\epsilon_{ir} = 100 \cdot B \cdot \phi t \cdot \sigma^{1.3}$$

ここで、 $B = (-56.36 + 18.46 \times 10^{-2} \cdot T) \times 10^{-28}$,

ϵ_{ir} : 照射クリープ歪 (%), σ : Mises型等価応力 (kg/mm^2)、

ϕt : 高速中性子照射量 (n/cm^2 , $> 0.1 \text{MeV}$)、 T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)、

[適用範囲] $T = 400 \sim 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、この温度範囲外では $\epsilon_{ir} = 0$ とする。

② 熱クリープ歪式

$$\epsilon_{th} = C_1 \cdot \exp(-Q_1/RT) \cdot \sigma^2 \cdot t + C_2 \cdot \exp(-Q_2/RT) \cdot \sigma^5 \cdot t$$

ここで、 ϵ_{th} : 熱クリープ歪 (%), σ : Mises型等価応力 (MPa)、 T : 温度 ($^{\circ}\text{K}$)

t : 炉内滞在時間 (sec)、 $R = 1.987$ 、

$C_1 = 3.49 \times 10^8$, $C_2 = 3.94 \times 10^8$, $Q_1 = 8.31 \times 10^4$, $Q_2 = 1.08 \times 10^5$

表 2.4-1 被覆管-スペーサワイヤ相互作用計算ケース

ケース No.	ワイヤ材質	計算対象	ワイヤ巻付荷重 (kg)	温度条件	備考		
1	改良オーステナイト鋼	内側炉心	最大発熱ピン	5	ノミナル	ひずみ硬化則	
2				5	ホットスポット	ひずみ硬化則	
3				10	5	ノミナル	ひずみ硬化則
4					5	ホットスポット	ひずみ硬化則
5				15	5	ノミナル	ひずみ硬化則
6					5	ホットスポット	ひずみ硬化則
7			最小発熱ピン	5	ノミナル	ひずみ硬化則	
8				5	ホットスポット	ひずみ硬化則	
9				10	5	ノミナル	ひずみ硬化則
10					5	ホットスポット	ひずみ硬化則
11				15	5	ノミナル	ひずみ硬化則
12					5	ホットスポット	ひずみ硬化則
13		外側炉心	最大発熱ピン	5	ノミナル	ひずみ硬化則	
14				5	ホットスポット	ひずみ硬化則	
15				10	5	ノミナル	ひずみ硬化則
16					5	ホットスポット	ひずみ硬化則
17				15	5	ノミナル	ひずみ硬化則
18					5	ホットスポット	ひずみ硬化則
19			最小発熱ピン	5	ノミナル	ひずみ硬化則	
20				5	ホットスポット	ひずみ硬化則	
21				10	5	ノミナル	ひずみ硬化則
22					5	ホットスポット	ひずみ硬化則
23				15	5	ノミナル	ひずみ硬化則
24					5	ホットスポット	ひずみ硬化則
25	フェライト鋼	外側炉心最大発熱ピン	5	ノミナル	ひずみ硬化則		
26			5	ホットスポット	ひずみ硬化則		
27	改良オーステナイト鋼	内側炉心最大発熱ピン	15	ホットスポット	時間硬化則		

3. 計算方法

図3-1に被覆管-ワイヤ相互作用、ワイヤずれ、集合体圧損及び被覆管応力計算の全体フローを示し、各項目ごとの計算方法を以下に示す。

3. 1 被覆管-ワイヤ相互作用計算

(1) ワイヤ張力

ワイヤ張力は、次式より求める。

$$\frac{dT}{dt} = E \cdot A_w (\dot{\epsilon}^c - \dot{\epsilon}^w)$$

$\frac{dT}{dt}$: 張力の変化速度 (kg/hr)

T : 張力 (kg)

t : 時間 (hr)

E : ワイヤのヤング率 (kg/mm²)

A_w : ワイヤの断面積 (mm²)

$\dot{\epsilon}^c$: 被ふく管のひずみ速度 (1/hr)

$\dot{\epsilon}^w$: ワイヤのひずみ速度 (1/hr)

(2) 被覆管のひずみ速度

被覆管のひずみ速度は、次式より求める。

$$\dot{\epsilon}^c = \frac{1}{dt} \left[\frac{\{\ell^2 (1 + \Delta \epsilon_z^c)^2 + \pi^2 D_0^2 (1 + \Delta \epsilon_H^c)^2\}^{\frac{1}{2}}}{(\ell^2 + \pi^2 D_0^2)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]$$

dt : 時間間隔 (hr)

ℓ : ワイヤ巻きピッチ (mm)

D₀ : 被ふく管外径 (mm)

$\Delta \epsilon_z^c$: dtにおける被ふく管の軸方向全ひずみ増分

$\Delta \epsilon_H^c$: " 円周方向全ひずみ増分

$$\Delta \epsilon_z^c = \Delta \epsilon_{zth}^c + \Delta \epsilon_{zsw}^c + \Delta \epsilon_{zcr}^c$$

$$\Delta \epsilon_{zcr}^c = \frac{\Delta \epsilon_{cr}^c}{\sigma_e} (\sigma_z - \frac{1}{2} \sigma_H) : \text{軸方向クリープひずみ増分}$$

$$\Delta \epsilon_H^c = \Delta \epsilon_{Hth}^c + \Delta \epsilon_{HSW}^c + \Delta \epsilon_{HCR}^c$$

$$\Delta \epsilon_{HCR}^c = \frac{\Delta \epsilon_{cr}^c}{\sigma_e} (\sigma_H - \frac{1}{2} \sigma_z) : \text{円周方向クリープひずみ増分}$$

$$\Delta \epsilon_{zth}^C = \Delta \epsilon_{Hth}^C : \text{熱膨張ひずみ増分}$$

$$\Delta \epsilon_{zsw} = \Delta \epsilon_{HSW}^C : \text{スエリングひずみ増分}$$

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} ((\sigma_H - \sigma_z)^2 + (\sigma_H)^2 + (\sigma_z)^2)} : \text{等価応力}$$

$$\Delta \epsilon_{CR}^C : \text{等価クリープひずみ増分}$$

$$\sigma_H = \frac{P_i \cdot D_o}{2t} : \text{円周方向応力 (Kg/mm}^2\text{)}$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_H}{2} - \frac{T \cdot \cos \alpha}{A_r} : \text{軸方向応力 (Kg/mm}^2\text{)}$$

$$P_i : \text{内圧 (Kg/mm}^2\text{)}$$

$$D_o : \text{被ふく管外径 (mm)}$$

$$t : \text{被ふく管肉厚 (mm)}$$

$$A_r : \text{被ふく管断面積 (mm}^2\text{)}$$

$$\alpha : \tan^{-1} \left\{ \frac{\pi}{L} \left(\frac{D_o}{2} + \frac{d}{2} \right) \right\}$$

$$L : \text{ワイヤ巻きピッチの } \frac{1}{2} \text{ (mm)}$$

$$d : \text{ワイヤ外径 (mm)}$$

(3) ワイヤのひずみ速度

ワイヤのひずみ速度は、次式より求める。

$$\dot{\epsilon}^W = \frac{1}{\Delta t} \{ \Delta \epsilon_{th}^W + \Delta \epsilon_{SW}^W + \Delta \epsilon_{CR}^W \}$$

$$\Delta \epsilon_{th}^W : \text{ワイヤの熱膨張ひずみ増分}$$

$$\Delta \epsilon_{SW}^W : \text{ワイヤのスエリングひずみ増分}$$

$$\Delta \epsilon_{CR}^W : \text{ワイヤのクリープひずみ増分}$$

(4) ワイヤたるみ量

ワイヤたるみ量は、次式より求める。

$$\Delta = L - \sum_{i=1, n} \{ (l/n)^2 + (D_i + d_i)^2 \}^{1/2}$$

$$L : \text{ワイヤ全長}$$

$$l : \text{ワイヤ巻付け部被覆管軸方向長さ}$$

$$D_i : i (i=1-N) \text{ ターン目の巻付ピッチ範囲における被覆管平均外径}$$

$$d_i : \text{ワイヤ平均直径}$$

(5) 被覆管とワイヤの相対すべり

被覆管とワイヤは自由に相対すべりを起こすものとする。

3. 2 ワイヤピッチずれ計算

次の本案式と代案式を用いた2通りの計算を実施する。

(a) 本案式 (最下段のワイヤ巻付ピッチを長く、その他は等ピッチとする。)

$$l_1 + (n-1) \cdot l_2 = l$$

$$\{l_1^2 + (D_1 + d_1)^2\}^{1/2} + \sum_{i=2, n} \{l_2^2 + (D_i + d_i)^2\}^{1/2} = L$$

L : ワイヤ全長

l : ワイヤ巻付け部被覆管軸方向長さ

D_i : i (i=1~N) ターン目の巻付ピッチ範囲における被覆管
平均外径

d_i : ワイヤ平均直径

(b) 代案式 (ワイヤ巻付ピッチが上段ほど短くなるものとする。)

$$l_i = l_1 - (i-1) \times \delta \quad \text{for } i=2, 3, \dots, n$$

$$(n/2) \times \{2 \cdot l_1 - (n-1) \cdot \delta\} = l$$

$$\sum_{i=1, n} \{l_i^2 + (D_i + d_i)^2\}^{1/2} = L$$

ここで、

$$l_i - \delta = l_{i+1} \text{ と仮定}$$

3. 3 集合体圧損計算

集合体圧損は、次式(Rehmeの式)より求める。また、集合体圧損変化率は製造時寸法に基づく集合体圧損に対する変化率とする。

$$\Delta P = f \cdot F \cdot (S_b/S_t) \cdot (\rho \cdot w_B^2/2)/De \cdot \Delta L$$

$$f = 64/Re' + 0.0816/Re'^{0.133}, \quad Re' = Re \times \sqrt{F},$$

$$F = (P/D)^{0.5} + [7.6 \times d_m/H \times (P/D)^2]^{2.16}, \quad d_m = D + d_w$$

S_b: バンドル濡れ縁長さ、S_t: 全濡れ縁長さ、ρ: 冷却材密度、

w_B: 流速、De: 等価直径、ΔL: 区間長さ、Re: レイノルズ数、

P: ピン配列ピッチ、D: 被覆管外直径、H: 巻付けピッチ、d_w: ワイヤ直径

3. 4 被覆管応力計算

ワイヤ張力による被覆管応力は、次式より求める。

$$\sigma_{out} = \pm \frac{M_{max} D_o}{2 I} - \frac{T \cdot \cos \alpha}{A_r} \quad (\text{外面})$$

$$\sigma_{in} = \pm \frac{M_{max} D_i}{2 I} - \frac{T \cdot \cos \alpha}{A_r} \quad (\text{内面})$$

$$M_{max} = \frac{L \cdot T}{\pi} \sin \alpha + T \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{1 - \frac{T \cdot L^2 \cdot \cos \alpha}{\pi^2 \cdot E \cdot I}} \cdot \frac{L^3 \cdot T \cdot \sin \alpha}{\pi^3 \cdot E \cdot I}$$

L : ワイヤ巻きピッチの $\frac{1}{2}$ (mm)

T : ワイヤ張力 (kg)

I : 被覆管の断面 2 次モーメント (mm²)

E : " のヤング率 (kg/mm²)

D_o : " の外径 (mm)

D_i : " の内径 (mm)

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\pi}{L} \left(\frac{D_o}{2} + \frac{d}{2} \right)$$

d : ワイヤ径

A_r : ワイヤ断面積

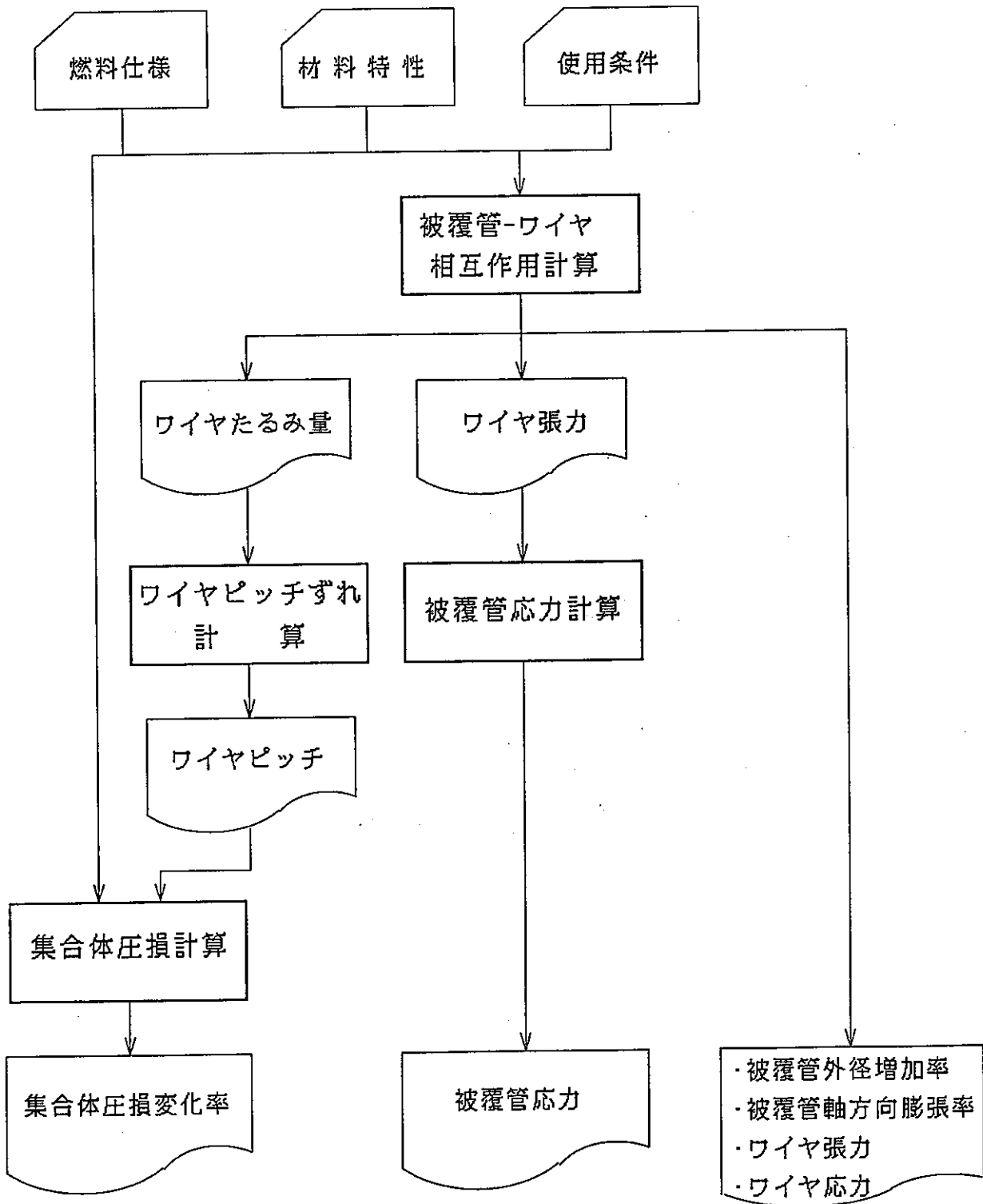


図 3-1 燃料被覆管とスペーサワイヤの相互作用計算フロー

4. 計算結果

4. 1 改良オーステナイト鋼ワイヤの場合

ワイヤ材質を被覆管と同一の改良オーステナイト鋼とした場合の被覆管-ワイヤ相互作用及び集合体圧損計算結果を以下に示す。

なお、計算ケースの詳細については表2.4-1参照。

4.1.1 被覆管-ワイヤ相互作用

(1) 被覆管外径増加率

図4.1-1～図4.1-8に内側炉心燃料ピン（最大及び最小発熱）と外側炉心燃料ピン（最大及び最小発熱）のノミナルとホットスポット温度での被覆管外径増加率の軸方向分布（EO3C）を示す。

図4.1-1～図4.1-8において、被覆管外径増加率はいずれのケースもピン下端から1600～2000mmの位置で最大となっている。

ここで、表4.1-1には、上記各ケースにおける被覆管外径増加率の軸方向最大値をまとめて示す。

表4.1-1において、被覆管外径増加率はノミナル温度、ホットスポット温度いずれの場合も内側炉心最大発熱ピンが最大であり、ノミナル温度のケースで約0.033、ホットスポット温度では約0.026である。

(2) 被覆管軸方向膨張率

図4.1-9～図4.1-16に内側炉心燃料ピン（最大及び最小発熱）と外側炉心燃料ピン（最大及び最小発熱）のノミナルとホットスポット温度での被覆管軸方向膨張率の軸方向分布（EO3C）を示す。

図4.1-9～図4.1-16において、被覆管軸方向膨張率はいずれのケースも被覆管外径増加率と同様ピン下端から1600～2000mmの位置で最大となっている。

ここで、表4.1-2には、上記各ケースにおける被覆管軸方向膨張率の軸方向最大値をまとめて示す。

表4.1-2において、被覆管軸方向膨張率はノミナル温度、ホットスポット温度いずれの場合も内側炉心最大発熱ピンが最大であり、ノミナル温度のケースで0.030、ホットスポット温度では0.024である。

(3) ワイヤ張力

図4.1-17～図4.1-24にワイヤ巻付荷重をパラメータとした内側炉心燃料ピン（最大及び最小発熱）及び外側炉心燃料ピン（最大及び最小発熱）のノミナルとホットスポット温度でのワイヤ張力の経時変化を示す。

図4.1-17～図4.1-24においてワイヤ張力はいずれのケースもBO1Cが最大であるが、中でも外側炉心最大発熱ピンのワイヤ張力が最大である。ワイヤ張力は外側炉心最小発熱燃料ピンでノミナル温度としたケース

（図4.1-23）以外はワイヤ巻付荷重を5,10,15kgとしたいずれの場合もEO3C（燃料寿命末期）に達する以前にワイヤ張力が0となる。なお、内側炉心最大発熱燃料ピンでホットスポット温度としたケースが最も

早い時期(M02C)にワイヤ張力が0となる。

また、ワイヤ巻付荷重を5kgから15kgに変化させた場合にワイヤ張力が0となる時期の差は最大でも54日(外側炉心最小発熱ピン, ホットスポット温度)程度である。

(4) ワイヤ応力

表4.1-3に内側炉心燃料ピン(最大及び最小発熱)と外側炉心燃料ピン(最大及び最小発熱)のノミナルとホットスポット温度でのワイヤ応力の経時変化(B01C, E01C, E02C, E03C)を示す。

表4.1-3において、ワイヤ応力はいずれのケースもB01C(燃料寿命初期)が最大となる。また、ワイヤ応力はノミナル温度、ホットスポット温度いずれの場合も外側炉心最大発熱ピンが最大であり、ワイヤ巻付荷重15kgでノミナル温度とした場合約13.0kg/mm²、ホットスポット温度とした場合は約13.3kg/mm²。

(5) ワイヤたるみ量

図4.1-25～図4.1-32にワイヤ巻付荷重をパラメータとした内側炉心燃料ピン(最大及び最小発熱)と外側炉心燃料ピン(最大及び最小発熱)のノミナルとホットスポット温度でのワイヤたるみ量の経時変化を示す。

図4.1-25～図4.1-32において、E03C(燃料寿命末期)におけるワイヤたるみ量は内側炉心最大発熱ピンでホットスポット温度、ワイヤ巻付荷重を5kgとしたケース(図4.1-26)が最大で約1.1mmである。

なお、上記ワイヤたるみ量が最大となる内側炉心最大発熱ピンのワイヤ巻付荷重を5kgとした場合と15kgの差は0.02mm程度である。

(6) 被覆管応力

表4.1-4に内側炉心燃料ピン(最大及び最小発熱)及び外側炉心燃料ピン(最大及び最小発熱)の最大発熱部と最高温度部におけるノミナルとホットスポット温度でのワイヤ張力による被覆管応力の経時変化(B01C, E01C, E02C, E03C)を示す。

表4.1-4において、被覆管応力はいずれのケースもB01C(燃料寿命初期)が最大となる。また、被覆管応力はノミナル温度の場合外側炉心最大発熱ピンの外面が最大であり、引張応力が2.0kg/mm²、圧縮応力が4.5kg/mm²である。また、ホットスポット温度の場合も同様に外側炉心の最大発熱ピンの外面が最大であり、引張応力が2.0kg/mm²、圧縮応力が4.6kg/mm²である。

4.1.2 集合体圧損変化率

前記ワイヤたるみ量計算において内側炉心と外側炉心でワイヤたるみ量が最大となるケース(最大発熱ピン:ワイヤ巻付荷重5kg)を対象としてE03Cにおける集合体圧損変化率計算を行った。

集合体圧損計算に用いるワイヤピッチずれは、本案式と代案式による2ケースを想定している。図4.1-33及び図4.1-34に本案式と代案式で評価した内

側炉心及び外側炉心最大発熱ピンの軸方向ワイヤピッチ分布を示す。

また、図4.1-33及び図4.1-34のワイヤピッチに基づく集合体圧損変化率を表4.1-5に示す。表4.1-5において内側炉心最大発熱ピンの集合体圧損変化率は本案式、代案式いずれも0.6%である。また、外側炉心最大発熱ピンの集合体圧損変化率は本案式の場合0.3%、代案式の場合0.2%である。ここで図4.1-35及び図4.1-36には、内側炉心及び外側炉心最大発熱ピンの軸方向圧損変化率分布を示す。

表 4.1-1 被覆管外径増加率の最大値（ワイヤ材質：改良ホースナイト）

対象ピン		温度条件	ワイヤ巻付荷重 (kg)	被覆管外径 増加率 (-)
内側炉心	最大発熱ピン	ノミナル	5	0.033
			10	0.033
			15	0.033
		ホットスポット	5	0.026
			10	0.026
			15	0.026
	最小発熱ピン	ノミナル	5	0.021
			10	0.021
			15	0.021
		ホットスポット	5	0.020
			10	0.020
			15	0.020
外側炉心	最大発熱ピン	ノミナル	5	0.022
			10	0.022
			15	0.022
		ホットスポット	5	0.021
			10	0.021
			15	0.021
	最小発熱ピン	ノミナル	5	0.012
			10	0.012
			15	0.012
		ホットスポット	5	0.014
			10	0.014
			15	0.014

表 4.1-2 被覆管軸方向膨張率の最大値(ワイヤ材質：改良オーステナイト)

対象ピン		温度条件	ワイヤ巻付荷重 (kg)	被覆管軸方向 膨張率 (-)
内側炉心	最大発熱ピン	ノミナル	5	0.030
			10	0.030
			15	0.030
		ホットスポット	5	0.024
			10	0.024
			15	0.024
	最小発熱ピン	ノミナル	5	0.020
			10	0.020
			15	0.020
		ホットスポット	5	0.017
			10	0.017
			15	0.017
外側炉心	最大発熱ピン	ノミナル	5	0.021
			10	0.021
			15	0.021
		ホットスポット	5	0.020
			10	0.020
			15	0.020
	最小発熱ピン	ノミナル	5	0.012
			10	0.012
			15	0.012
		ホットスポット	5	0.012
			10	0.012
			15	0.012

表 4.1-3 ワイヤ応力の経時変化 (ワイヤ材質: 改良オーステナイト)

対象ピン		温度条件	ワイヤ巻付荷重 (kg)	ワイヤ応力(kg/mm ²)			
				B01C	E01C	E02C	E03C
内側炉心	最大発熱ピン	ノミナル	5	5.4	2.6	0.0	0.0
			10	9.1	3.6	0.0	0.0
			15	12.7	4.5	0.0	0.0
		ホットスポット	5	5.8	0.8	0.0	0.0
			10	9.4	0.9	0.0	0.0
			15	13.0	1.0	0.0	0.0
	最小発熱ピン	ノミナル	5	5.2	1.6	0.1	0.0
			10	8.8	2.3	0.2	0.0
			15	12.4	2.8	0.2	0.0
		ホットスポット	5	5.4	0.2	0.0	0.0
			10	9.0	0.2	0.0	0.0
			15	12.5	0.3	0.0	0.0
外側炉心	最大発熱ピン	ノミナル	5	6.0	2.2	0.5	0.0
			10	9.4	3.3	0.8	0.0
			15	13.0	4.1	0.9	0.0
		ホットスポット	5	6.2	0.3	0.0	0.0
			10	9.7	0.5	0.0	0.0
			15	13.3	0.6	0.0	0.0
	最小発熱ピン	ノミナル	5	4.9	2.1	1.1	0.5
			10	8.6	3.1	1.6	0.7
			15	12.1	4.0	2.0	0.8
		ホットスポット	5	5.2	0.3	0.0	0.0
			10	8.7	0.5	0.1	0.0
			15	12.2	0.6	0.1	0.0

表 4.1-4 ワイヤ張力による被覆管応力の経時変化 (1 / 2) (ワイヤ材質: 改良オーステナイト)

対象ピン	温度条件	ワイヤ巻付荷重 (kg)	部位	応力 (kg/mm ²)								
				最大発熱部				最高温度部				
				B01C	E01C	E02C	E03C	B01C	E01C	E02C	E03C	
内側炉心	最大発熱ピン	ノミナル	5	外面	0.8	0.4	0.0	0.0	0.8	0.4	0.0	0.0
				内面	-1.8	-0.8	0.0	0.0	-1.8	-0.9	0.0	0.0
			10	外面	0.7	0.3	0.0	0.0	0.7	0.3	0.0	0.0
				内面	-1.7	-0.7	0.0	0.0	-1.7	-0.9	0.0	0.0
			15	外面	1.4	0.5	0.0	0.0	1.4	0.6	0.0	0.0
				内面	-3.1	-1.1	0.0	0.0	-3.1	-1.3	0.0	0.0
		ホットスポット	5	外面	1.1	0.4	0.0	0.0	1.1	0.5	0.0	0.0
				内面	-2.9	-1.0	0.0	0.0	-2.9	-1.2	0.0	0.0
			10	外面	1.9	0.6	0.0	0.0	1.9	0.7	0.0	0.0
				内面	-4.4	-1.4	0.0	0.0	-4.4	-1.6	0.0	0.0
			15	外面	1.6	0.5	0.0	0.0	1.6	0.6	0.0	0.0
				内面	-4.0	-1.3	0.0	0.0	-4.0	-1.5	0.0	0.0
	最小発熱ピン	ノミナル	5	外面	0.9	0.1	0.0	0.0	0.9	0.1	0.0	0.0
				内面	-2.0	-0.2	0.0	0.0	-2.0	-0.3	0.0	0.0
			10	外面	0.7	0.1	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0
				内面	-1.8	-0.2	0.0	0.0	-1.8	-0.3	0.0	0.0
			15	外面	1.4	0.1	0.0	0.0	1.4	0.1	0.0	0.0
				内面	-3.2	-0.3	0.0	0.0	-3.2	-0.3	0.0	0.0
		ホットスポット	5	外面	1.2	0.1	0.0	0.0	1.2	0.1	0.0	0.0
				内面	-3.0	-0.3	0.0	0.0	-3.0	-0.3	0.0	0.0
			10	外面	2.0	0.1	0.0	0.0	2.0	0.2	0.0	0.0
				内面	-4.5	-0.3	0.0	0.0	-4.5	-0.4	0.0	0.0
			15	外面	1.6	0.1	0.0	0.0	1.6	0.1	0.0	0.0
				内面	-4.1	-0.3	0.0	0.0	-4.1	-0.3	0.0	0.0
最小発熱ピン	ノミナル	5	外面	0.8	0.2	0.0	0.0	0.8	0.3	0.0	0.0	
			内面	-1.8	-0.5	0.0	0.0	-1.8	-0.6	0.0	0.0	
		10	外面	0.6	0.2	0.0	0.0	0.6	0.2	0.0	0.0	
			内面	-1.6	-0.5	0.0	0.0	-1.6	-0.6	0.0	0.0	
		15	外面	1.3	0.3	0.0	0.0	1.3	0.4	0.0	0.0	
			内面	-3.0	-0.7	-0.1	0.0	-3.0	-0.9	-0.1	0.0	
	ホットスポット	5	外面	1.1	0.3	0.0	0.0	1.1	0.3	0.0	0.0	
			内面	-2.8	-0.7	0.0	0.0	-2.8	-0.8	-0.1	0.0	
		10	外面	1.9	0.4	0.0	0.0	1.9	0.5	0.0	0.0	
			内面	-4.2	-0.9	-0.1	0.0	-4.2	-1.1	-0.1	0.0	
		15	外面	1.5	0.3	0.0	0.0	1.5	0.4	0.0	0.0	
			内面	-3.9	-0.8	-0.1	0.0	-3.9	-1.0	-0.1	0.0	
最小発熱ピン	5	外面	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0		
		内面	-1.9	-0.1	0.0	0.0	-1.9	-0.1	0.0	0.0		
	10	外面	0.7	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0		
		内面	-1.7	0.0	0.0	0.0	-1.7	-0.1	0.0	0.0		
	15	外面	1.3	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0		
		内面	-3.1	-0.1	0.0	0.0	-3.1	-0.1	0.0	0.0		
最小発熱ピン	5	外面	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0		
		内面	-2.8	-0.1	0.0	0.0	-2.8	-0.1	0.0	0.0		
	10	外面	1.9	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0		
		内面	-4.3	-0.1	0.0	0.0	-4.3	-0.1	0.0	0.0		
	15	外面	1.5	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0		
		内面	-4.0	-0.1	0.0	0.0	-4.0	-0.1	0.0	0.0		

表 4.1-4 ワイヤ張力による被覆管応力の経時変化 (2/2) (ワイヤ材質: 改良オーステナイト)

対象ピン	温度条件	ワイヤ巻付荷重 (kg)	部位	応力 (kg/mm ²)								
				最大発熱部				最高温度部				
				B01C	E01C	E02C	E03C	B01C	E01C	E02C	E03C	
外側炉心	最大発熱ピン	ノミナル	5	外面	0.9	0.3	0.1	0.0	0.9	0.4	0.1	0.0
				内面	-2.0	-0.7	-0.2	0.0	-2.0	-0.8	-0.2	0.0
			10	外面	0.7	0.2	0.1	0.0	0.7	0.3	0.1	0.0
				内面	-1.8	-0.6	-0.1	0.0	-1.8	-0.7	-0.2	0.0
			15	外面	1.4	0.5	0.1	0.0	1.4	0.5	0.1	0.0
				内面	-3.2	-1.0	-0.2	0.0	-3.2	-1.2	-0.3	0.0
		ホットスポット	5	外面	1.2	0.4	0.1	0.0	1.2	0.4	0.1	0.0
				内面	-3.0	-0.9	-0.2	0.0	-3.0	-1.1	-0.3	0.0
			10	外面	2.0	0.6	0.1	0.0	2.0	0.7	0.1	0.0
				内面	-4.5	-1.3	-0.3	0.0	-4.5	-1.5	-0.3	0.0
			15	外面	1.6	0.5	0.1	0.0	1.6	0.5	0.1	0.0
				内面	-4.1	-1.2	-0.3	0.0	-4.1	-1.4	-0.3	0.0
	最小発熱ピン	ノミナル	5	外面	0.9	0.0	0.0	0.0	0.9	0.1	0.0	0.0
				内面	-2.1	-0.1	0.0	0.0	-2.1	-0.1	0.0	0.0
			10	外面	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
				内面	-2.0	-0.1	0.0	0.0	-2.0	-0.1	0.0	0.0
			15	外面	1.5	0.1	0.0	0.0	1.5	0.1	0.0	0.0
				内面	-3.3	-0.2	0.0	0.0	-3.3	-0.2	0.0	0.0
		ホットスポット	5	外面	1.2	0.1	0.0	0.0	1.2	0.1	0.0	0.0
				内面	-3.1	-0.1	0.0	0.0	-3.1	-0.2	0.0	0.0
			10	外面	2.0	0.1	0.0	0.0	2.0	0.1	0.0	0.0
				内面	-4.6	-0.2	0.0	0.0	-4.6	-0.2	0.0	0.0
			15	外面	1.6	0.1	0.0	0.0	1.6	0.1	0.0	0.0
				内面	-4.2	-0.2	0.0	0.0	-4.2	-0.2	0.0	0.0
外側炉心	最大発熱ピン	5	外面	0.7	0.3	0.2	0.1	0.7	0.3	0.2	0.1	
			内面	-1.7	-0.7	-0.3	-0.2	-1.7	-0.8	-0.4	-0.2	
		10	外面	0.6	0.2	0.1	0.1	0.6	0.3	0.2	0.1	
			内面	-1.6	-0.6	-0.3	-0.1	-1.6	-0.7	-0.4	-0.2	
		15	外面	1.3	0.4	0.2	0.1	1.3	0.5	0.3	0.1	
			内面	-2.9	-1.0	-0.5	-0.2	-2.9	-1.2	-0.6	-0.3	
	最小発熱ピン	5	外面	1.1	0.4	0.2	0.1	1.1	0.4	0.2	0.1	
			内面	-2.7	-0.9	-0.5	-0.2	-2.7	-1.1	-0.6	-0.3	
		10	外面	1.8	0.6	0.3	0.1	1.8	0.6	0.3	0.1	
			内面	-4.2	-1.3	-0.6	-0.2	-4.2	-1.5	-0.8	-0.3	
		15	外面	1.5	0.5	0.2	0.1	1.5	0.5	0.3	0.1	
			内面	-3.8	-1.2	-0.6	-0.2	-3.9	-1.4	-0.7	-0.3	
外側炉心	最大発熱ピン	5	外面	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8	0.1	0.0	0.0	
			内面	-1.8	-0.1	0.0	0.0	-1.8	-0.1	0.0	0.0	
		10	外面	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	
			内面	-1.6	-0.1	0.0	0.0	-1.6	-0.1	0.0	0.0	
		15	外面	1.3	0.1	0.0	0.0	1.3	0.1	0.0	0.0	
			内面	-3.0	-0.2	0.0	0.0	-3.0	-0.2	0.0	0.0	
	最小発熱ピン	5	外面	1.1	0.1	0.0	0.0	1.1	0.1	0.0	0.0	
			内面	-2.8	-0.1	0.0	0.0	-2.8	-0.2	0.0	0.0	
		10	外面	1.8	0.1	0.0	0.0	1.8	0.1	0.0	0.0	
			内面	-4.2	-0.2	0.0	0.0	-4.2	-0.2	0.0	0.0	
		15	外面	1.5	0.1	0.0	0.0	1.5	0.1	0.0	0.0	
			内面	-3.9	-0.2	0.0	0.0	-3.9	-0.2	0.0	0.0	

表 4.1-5 集合体圧損変化率（ワイヤ材質：改良オーステナイト鋼）

対象ピン	温度条件	ワイヤ巻付荷重 (kg)	ワイヤたるみ量 (E03C) (mm)	ワイヤピッチ ずれ計算方法	圧損 $\frac{kg}{cm^2}$ ($\frac{g}{cm^2}$)		圧損 変化率(%)
					B01C	E03C	
内側炉心 最大発熱ピン	ホットスポット	5	1.10	本案式	3.200	3.220	0.6
				代案式		3.220	0.6
外側炉心 最大発熱ピン	ホットスポット	5	0.40	本案式	2.627	2.634	0.3
				代案式		2.633	0.2

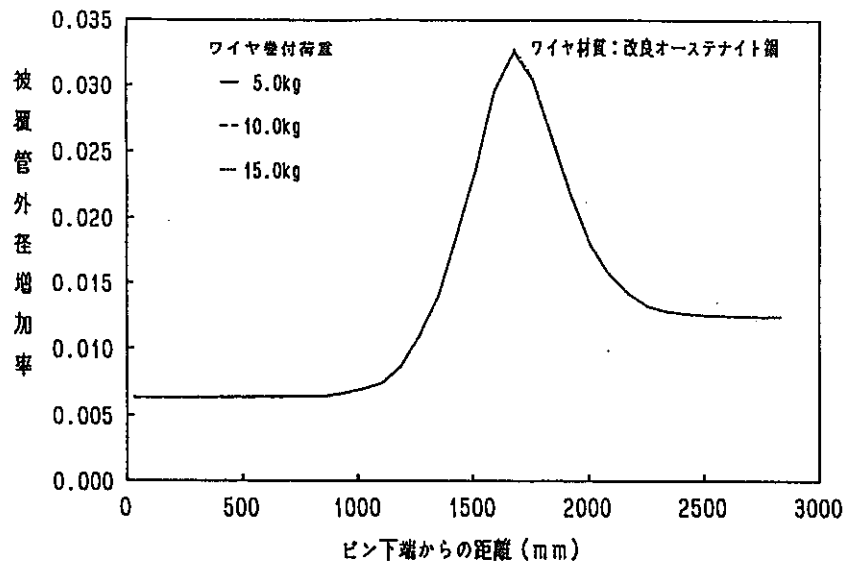


図 4.1-1 被覆管外径増加率の軸方向分布
(内側炉心最大発熱ピン; E O 3 C ; ノミナル温度)

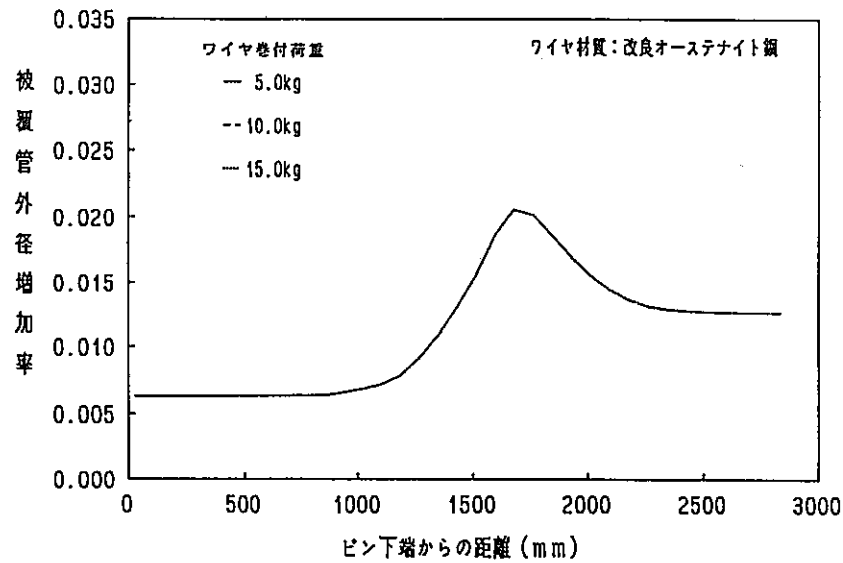


図 4.1-3 被覆管外径増加率の軸方向分布
(内側炉心最小発熱ピン; E O 3 C ; ノミナル温度)

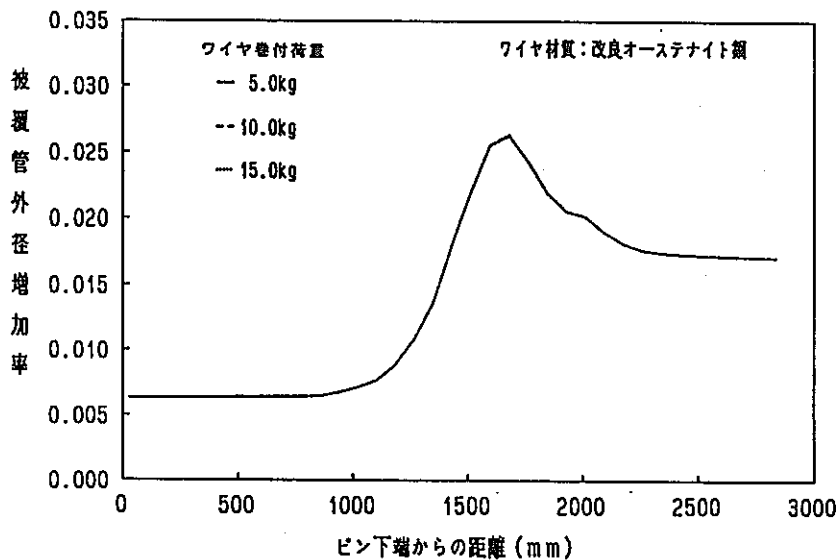


図 4.1-2 被覆管外径増加率の軸方向分布
(内側炉心最大発熱ピン; E O 3 C ; ホットスポット温度)

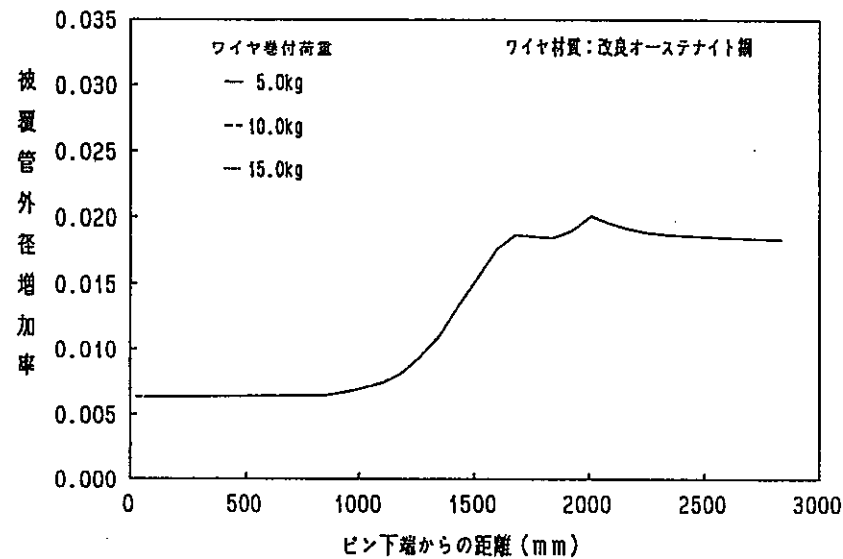


図 4.1-4 被覆管外径増加率の軸方向分布
(内側炉心最小発熱ピン; E O 3 C ; ホットスポット温度)

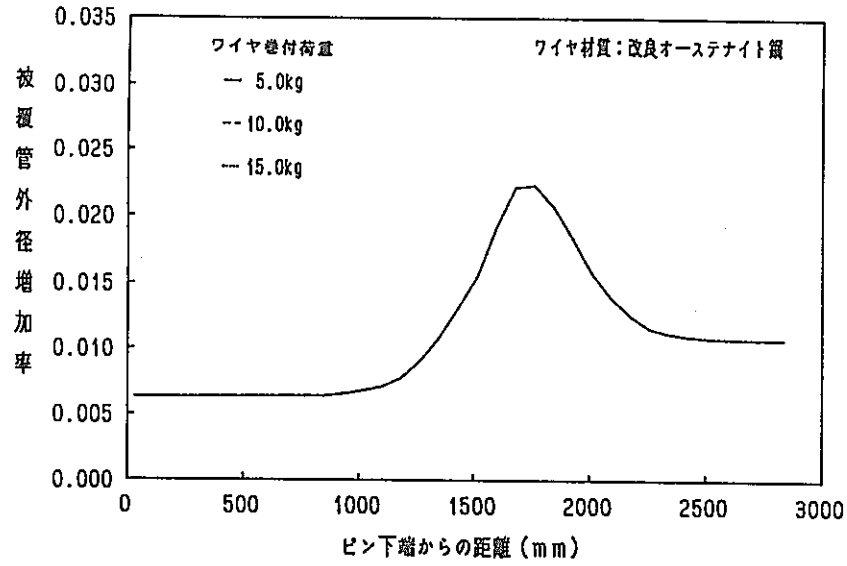


図 4.1-5 被覆管外径増加率の軸方向分布
(外側炉心最大発熱ピン; E O 3 C; ノミナル温度)

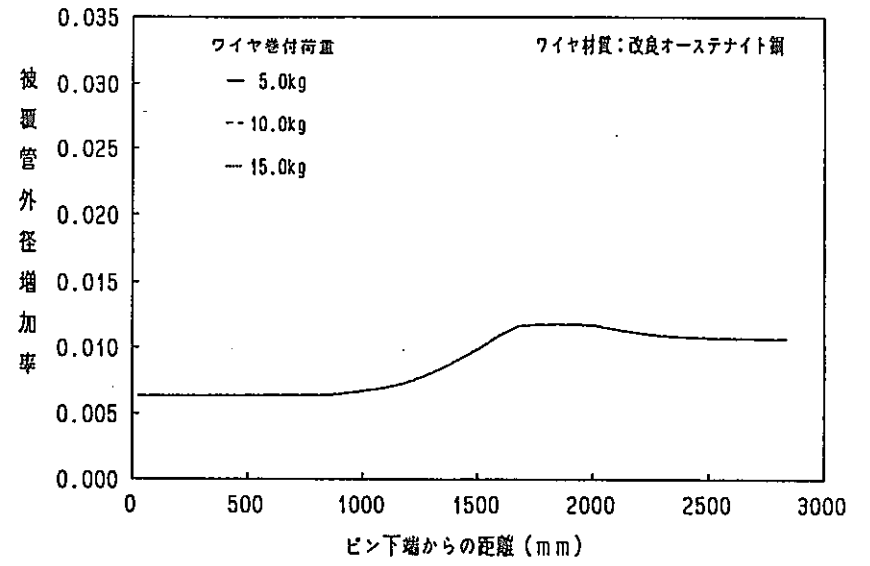


図 4.1-7 被覆管外径増加率の軸方向分布
(外側炉心最小発熱ピン; E O 3 C; ノミナル温度)

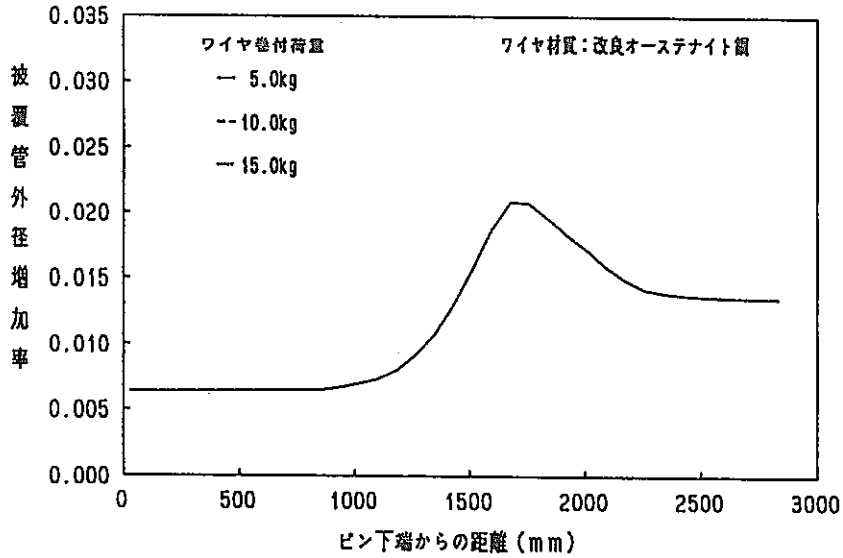


図 4.1-6 被覆管外径増加率の軸方向分布
(外側炉心最大発熱ピン; E O 3 C; ホットスポット温度)

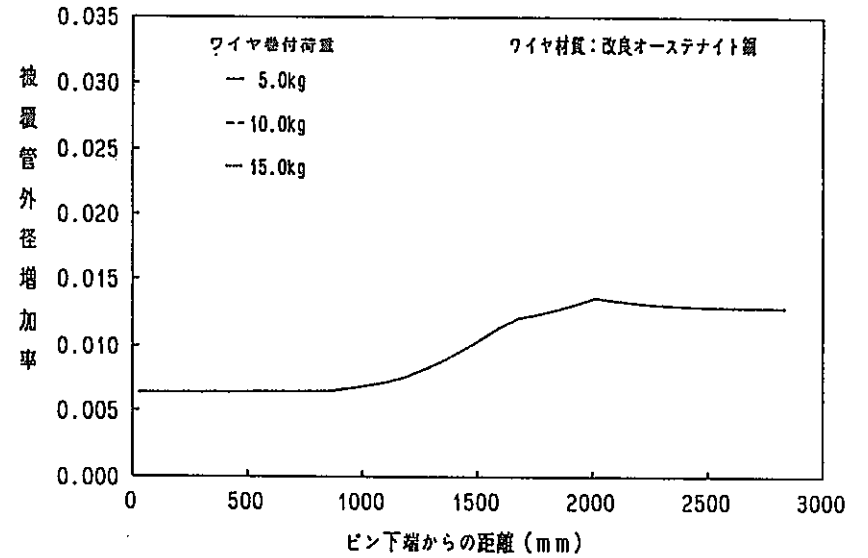


図 4.1-8 被覆管外径増加率の軸方向分布
(外側炉心最小発熱ピン; E O 3 C; ホットスポット温度)

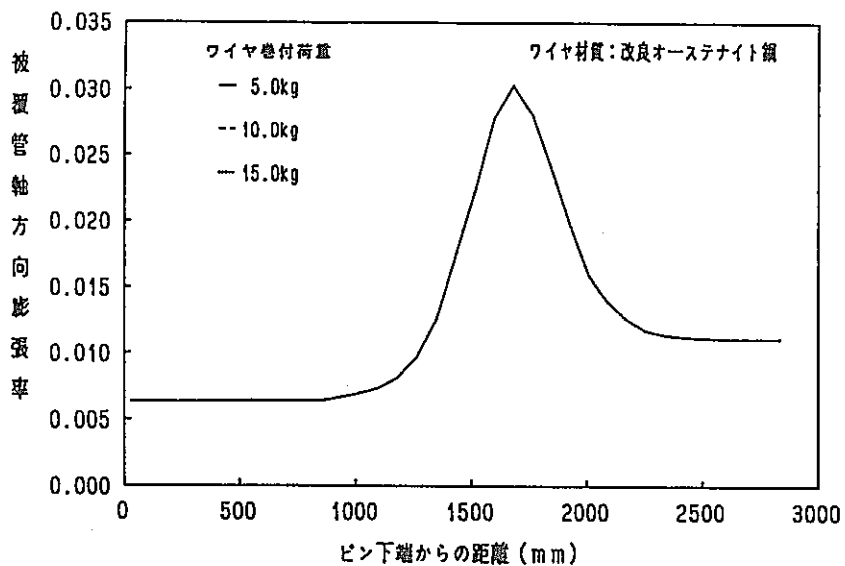


図 4.1-9 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布
(内側炉心最大発熱ピン; E03C; ノミナル温度)

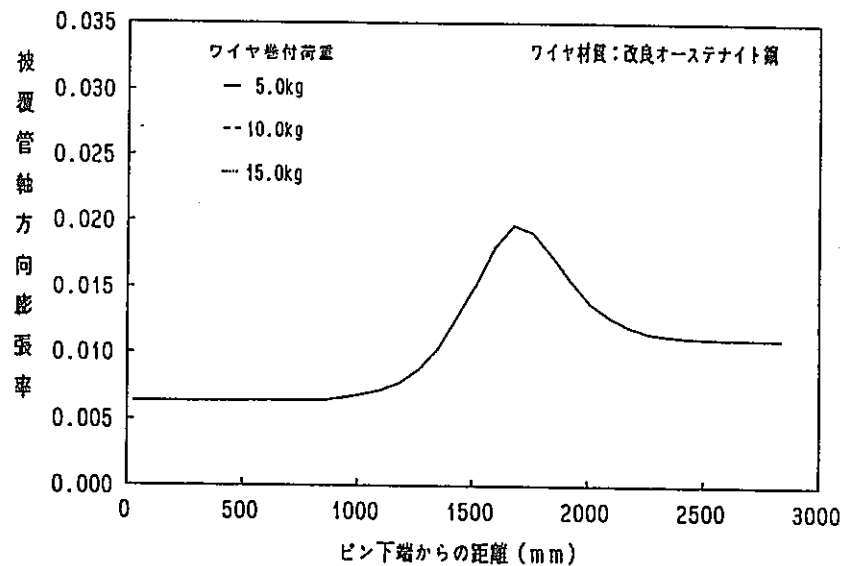


図 4.1-11 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布
(内側炉心最小発熱ピン; E03C; ノミナル温度)

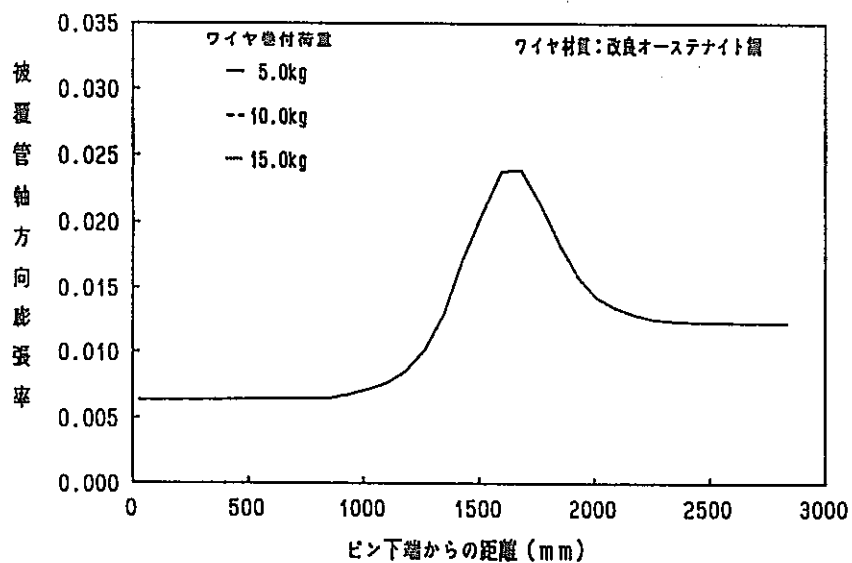


図 4.1-10 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布
(内側炉心最大発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)

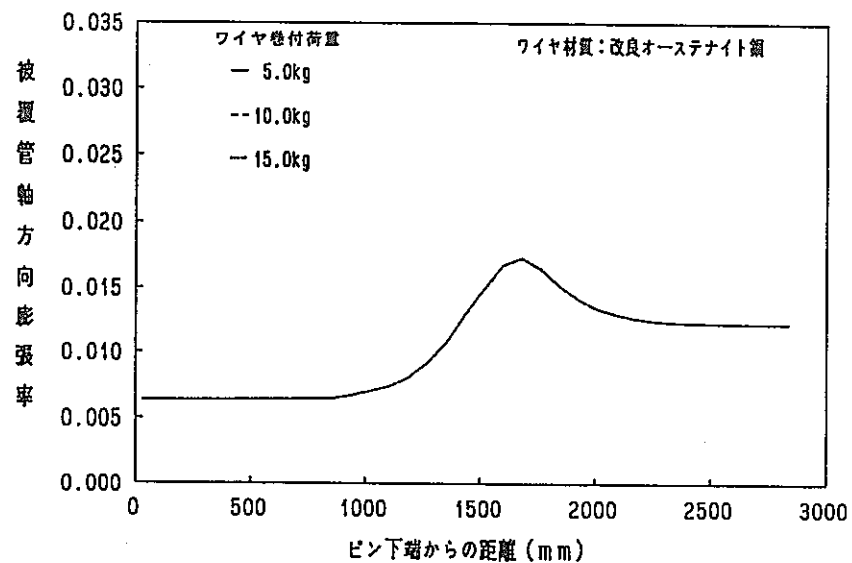


図 4.1-12 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布
(内側炉心最小発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)

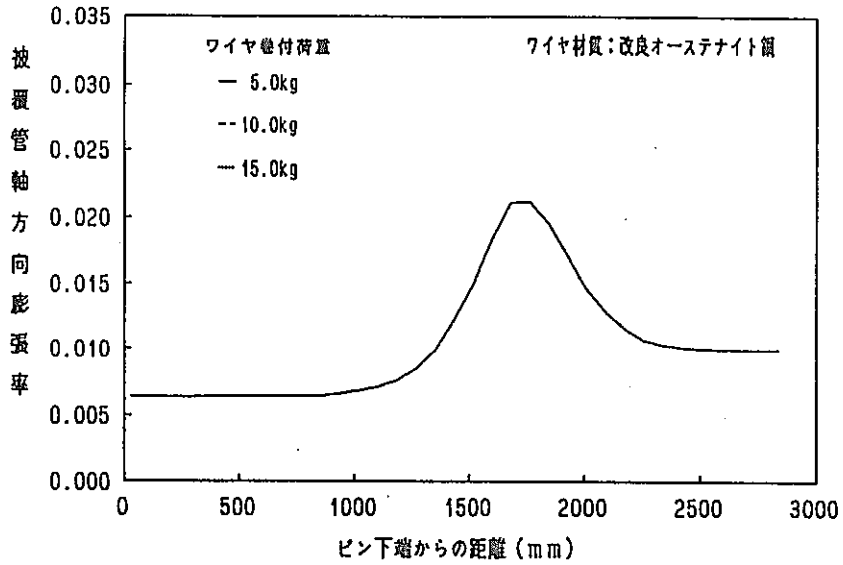


図 4.1-13 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布
 (外側炉心最大発熱ピン; E03C; ノミナル温度)

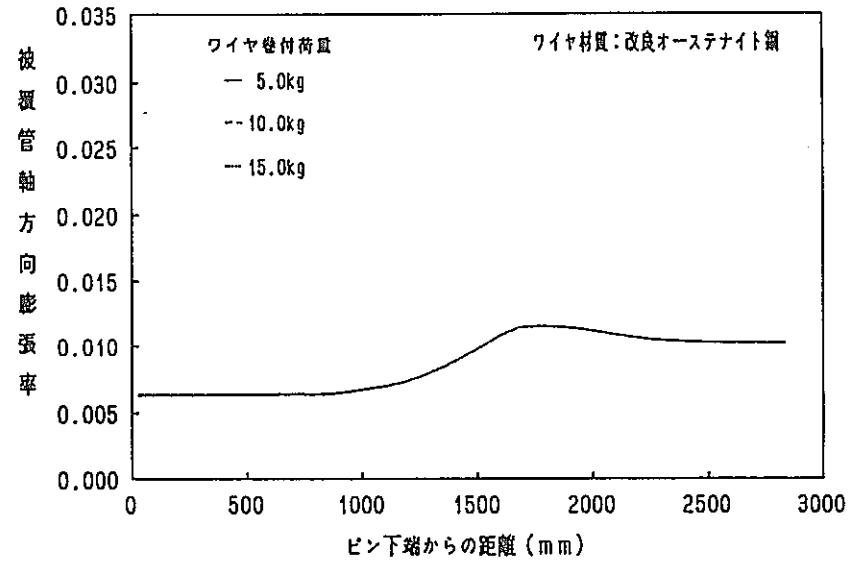


図 4.1-15 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布
 (外側炉心最小発熱ピン; E03C; ノミナル温度)

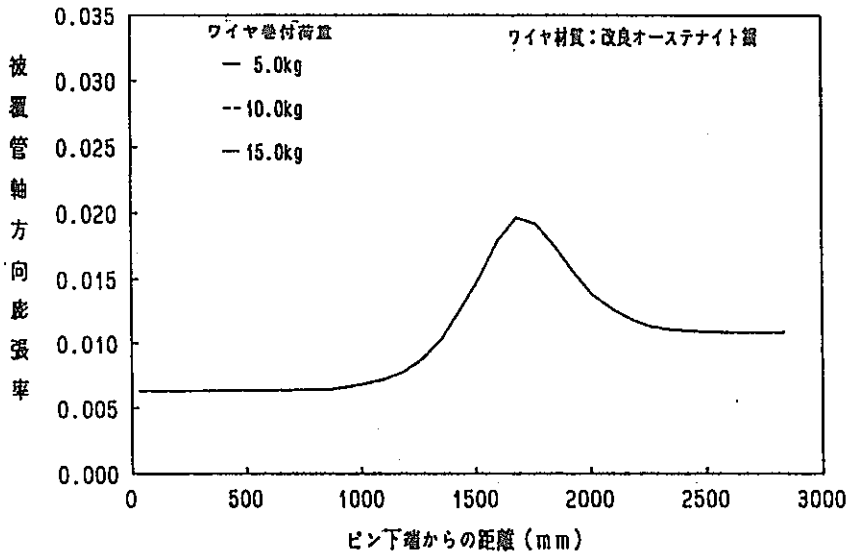


図 4.1-14 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布
 (外側炉心最大発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)

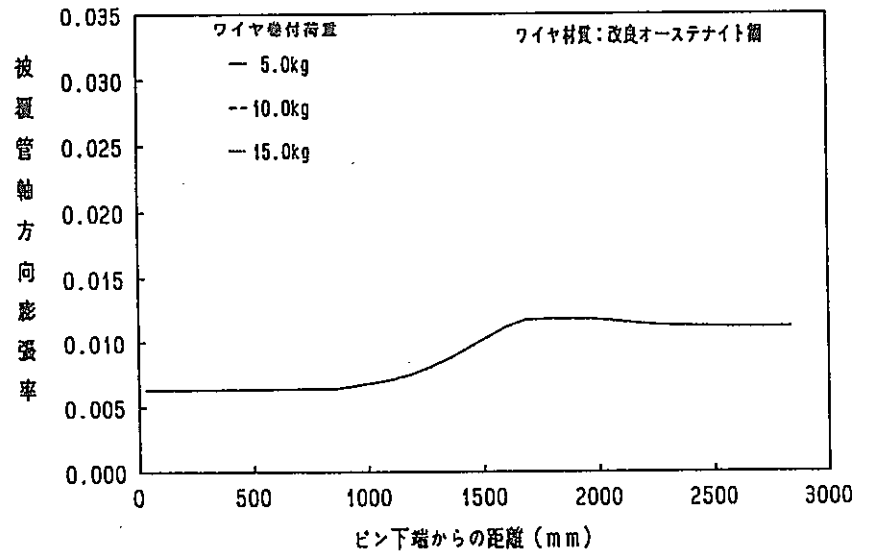


図 4.1-16 被覆管軸方向膨張率の軸方向分布
 (外側炉心最小発熱ピン; E03C; ホットスポット温度)

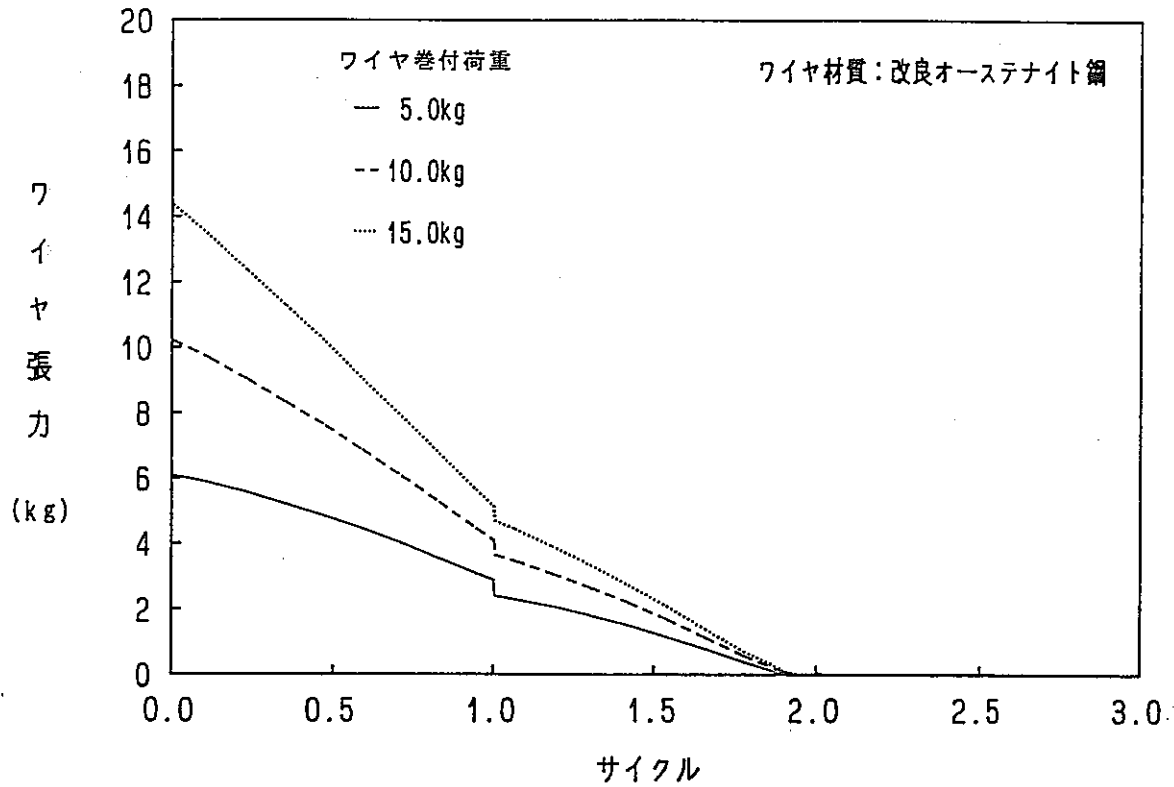


図 4.1-17 ワイヤ張力の経時変化
(内側炉心最大発熱ピン；ノミナル温度)

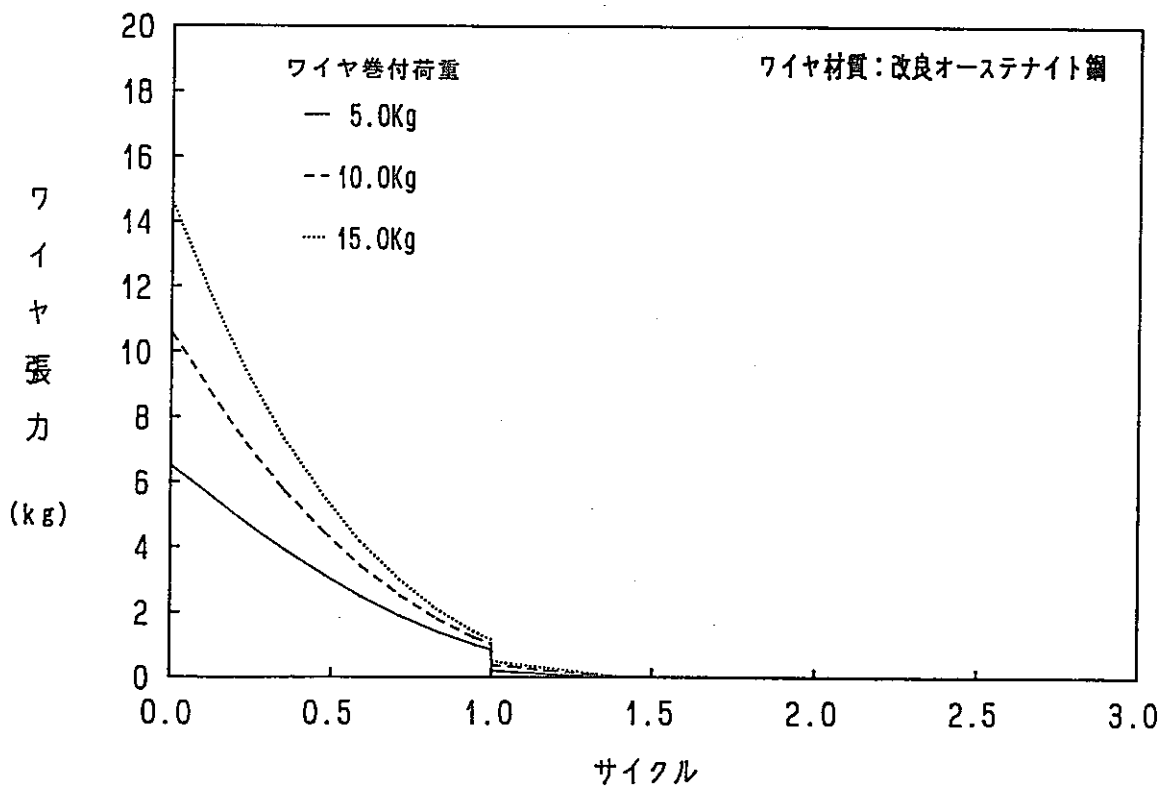


図 4.1-18 ワイヤ張力の経時変化
(内側炉心最大発熱ピン；ホットスポット温度)

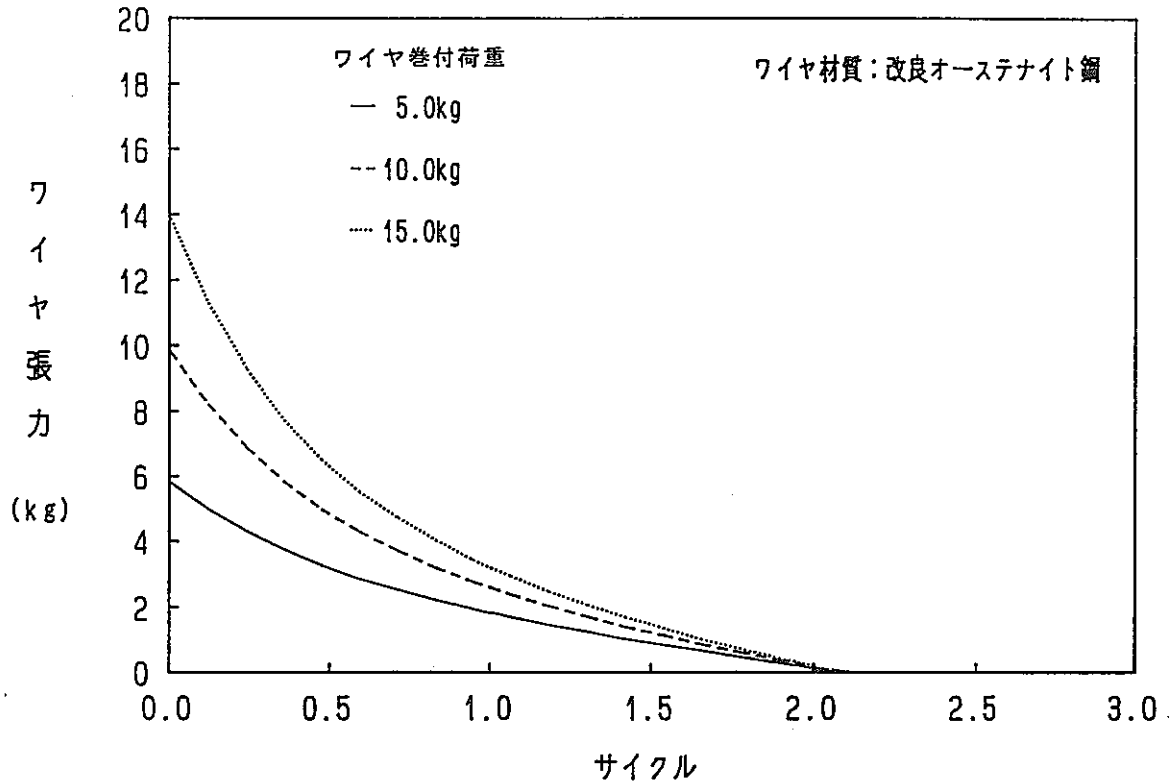


図 4.1-19 ワイヤ張力の経時変化
(内側炉心最小発熱ピン；ノミナル温度)

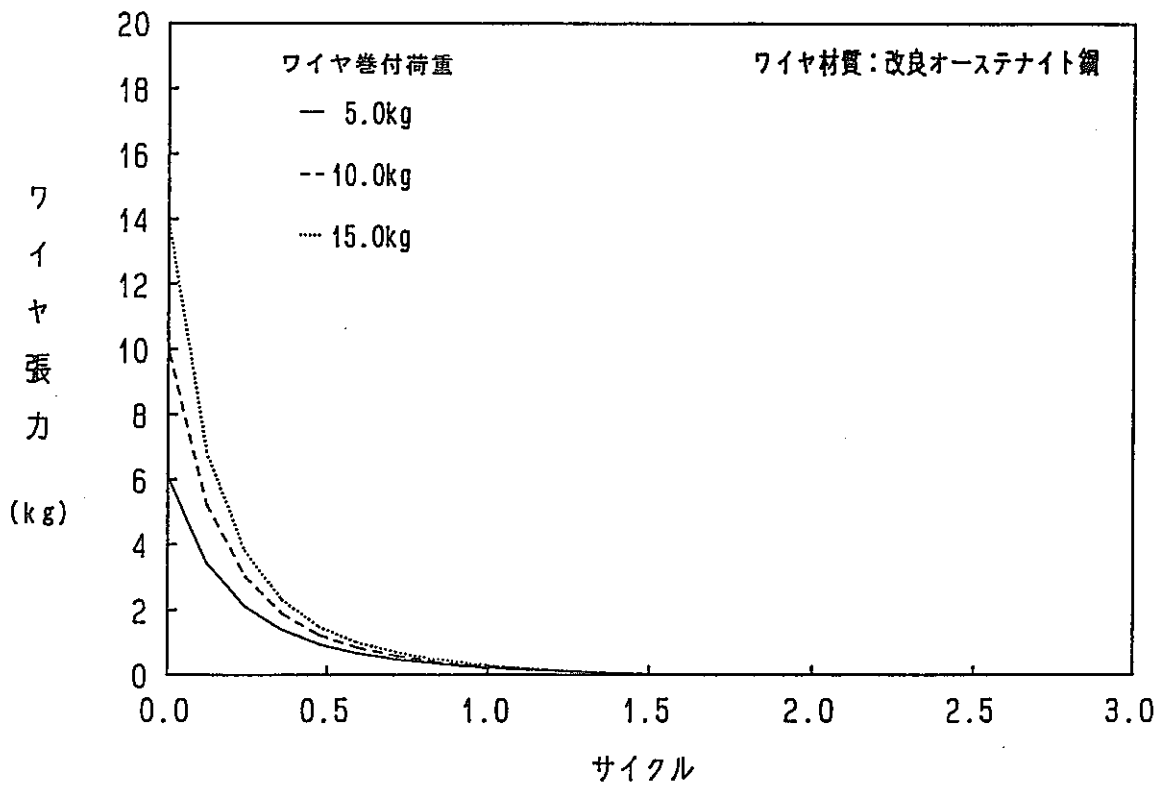


図 4.1-20 ワイヤ張力の経時変化
(内側炉心最小発熱ピン；ホットスポット温度)

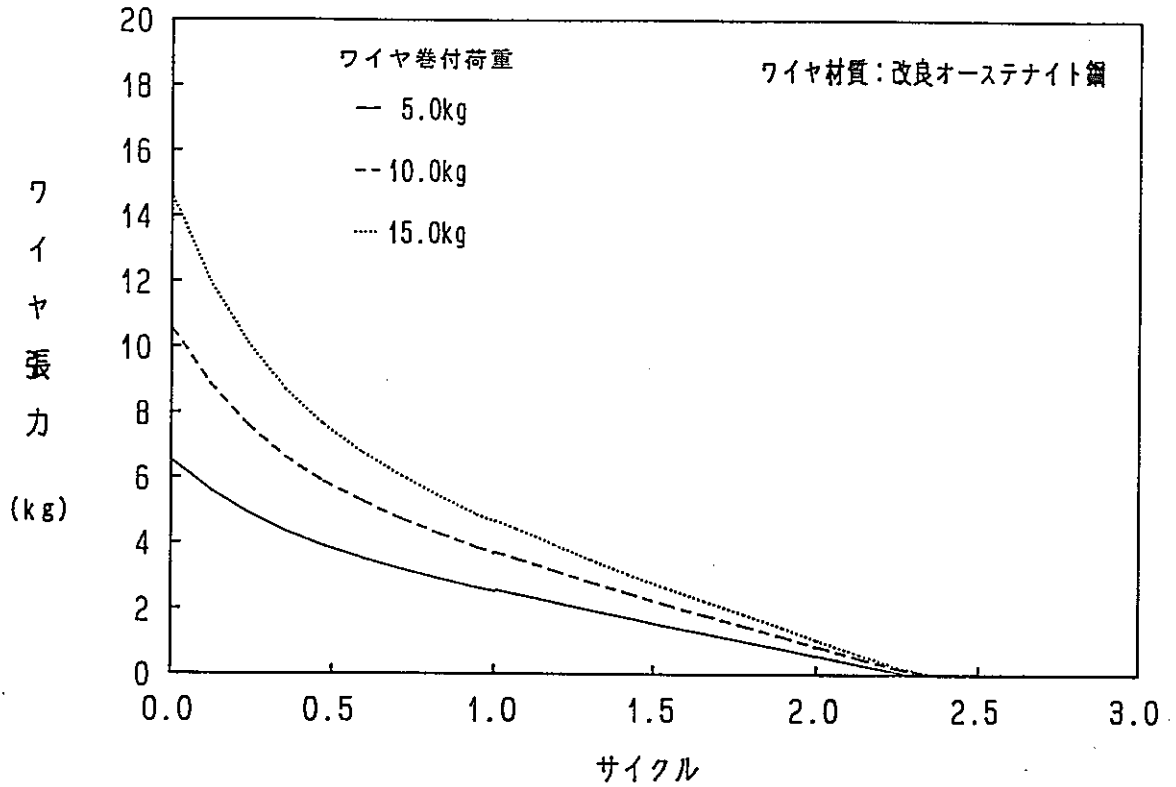


図 4.1-21 ワイヤ張力の経時変化
(外側炉心最大発熱ピン；ノミナル温度)

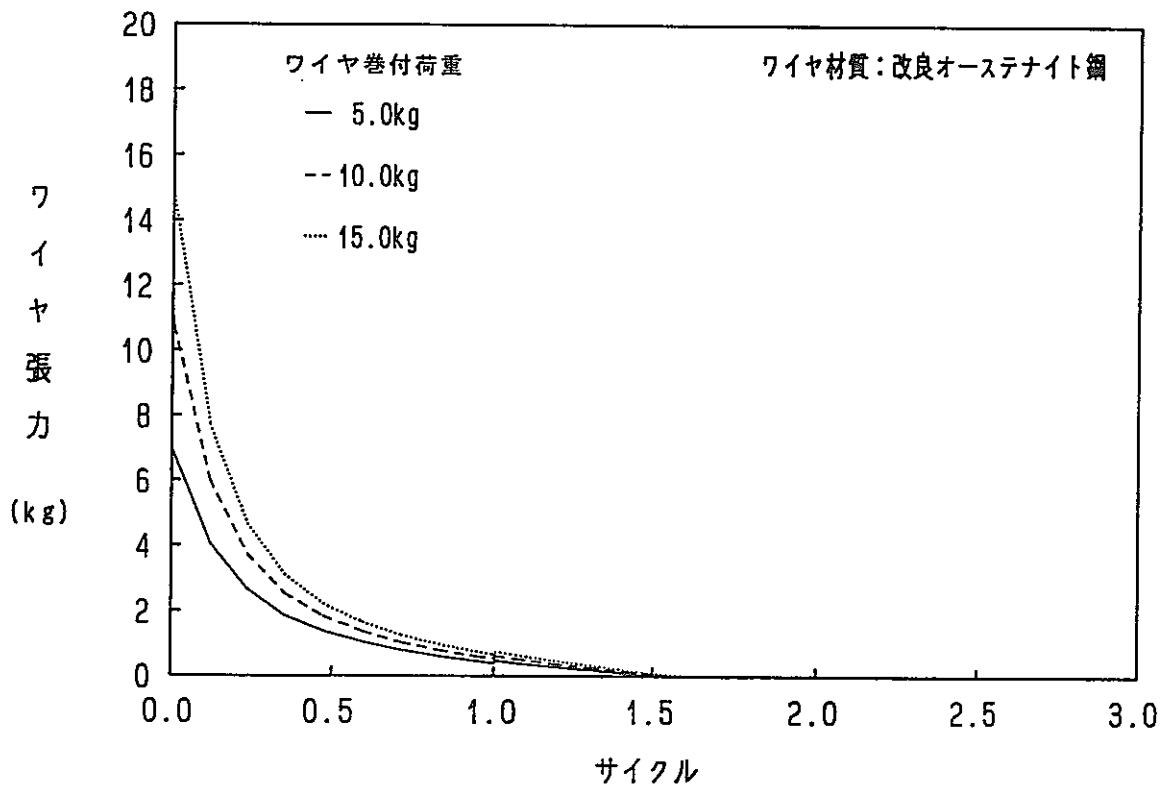


図 4.1-22 ワイヤ張力の経時変化
(外側炉心最大発熱ピン；ホットスポット温度)

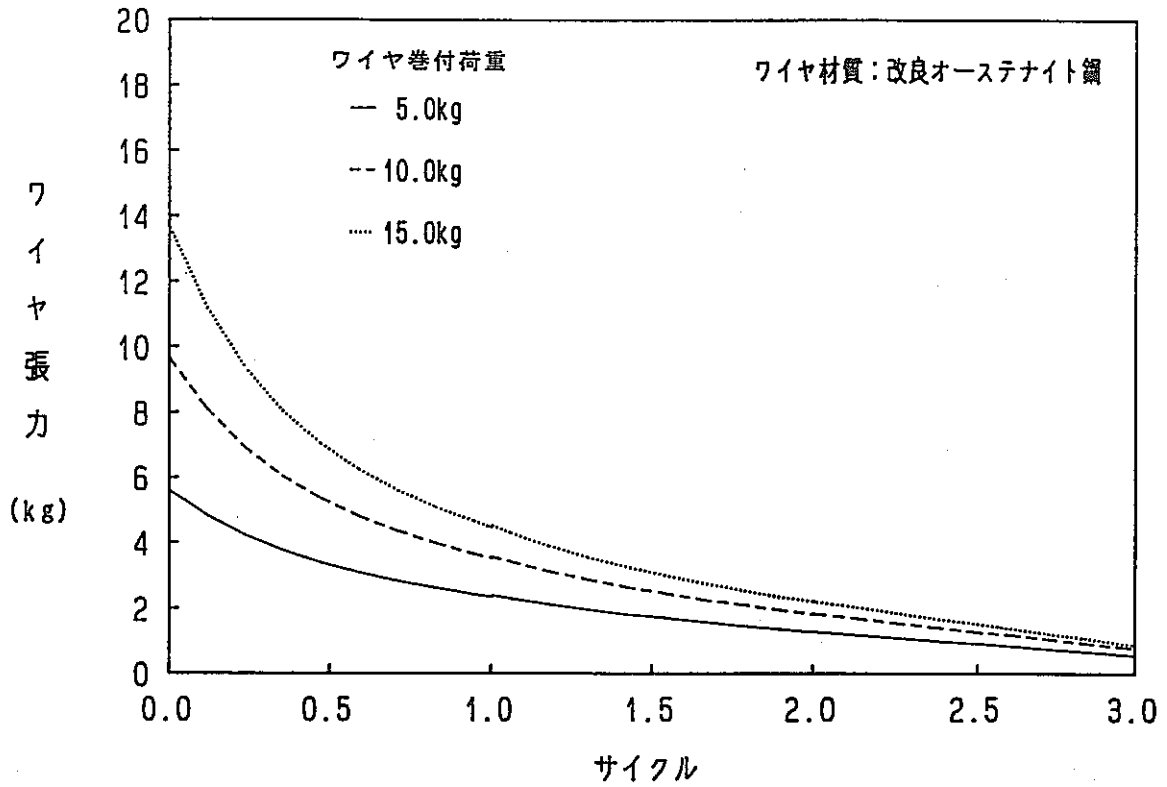


図 4.1-23 ワイヤ張力の経時変化
(外側炉心最小発熱ピン；ノミナル温度)

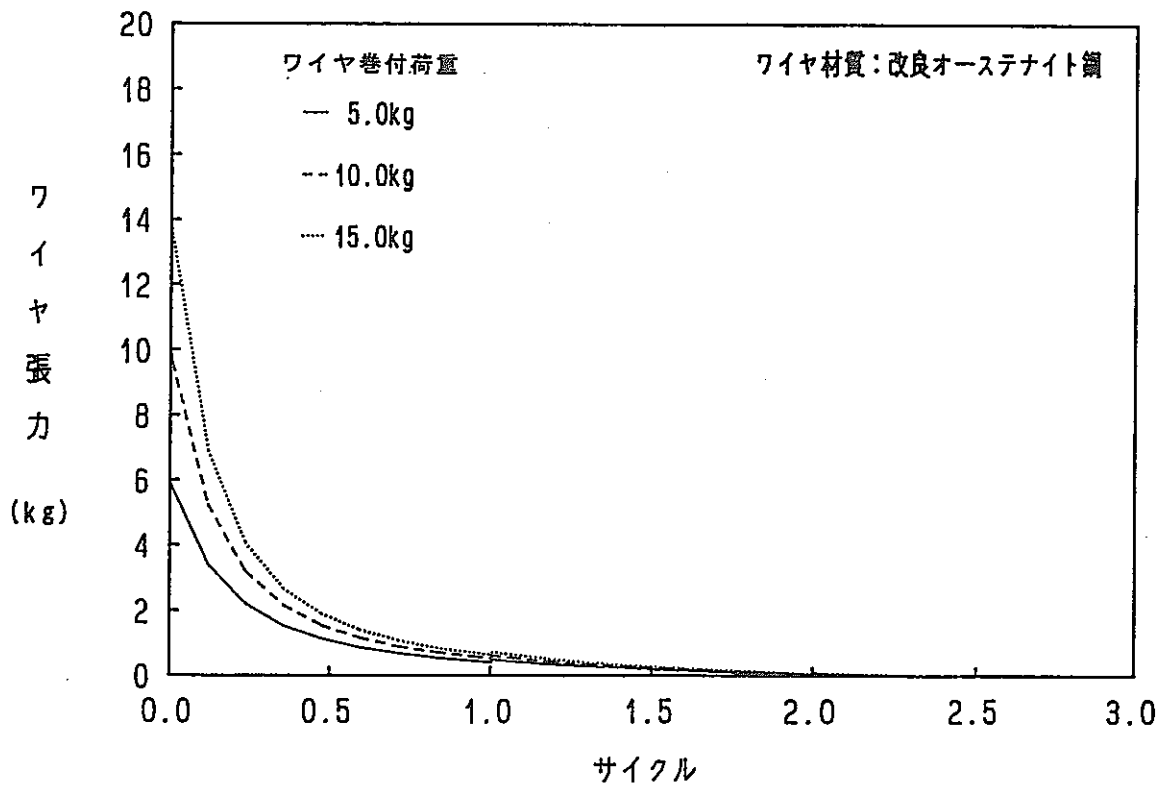


図 4.1-24 ワイヤ張力の経時変化
(外側炉心最小発熱ピン；ホットスポット温度)

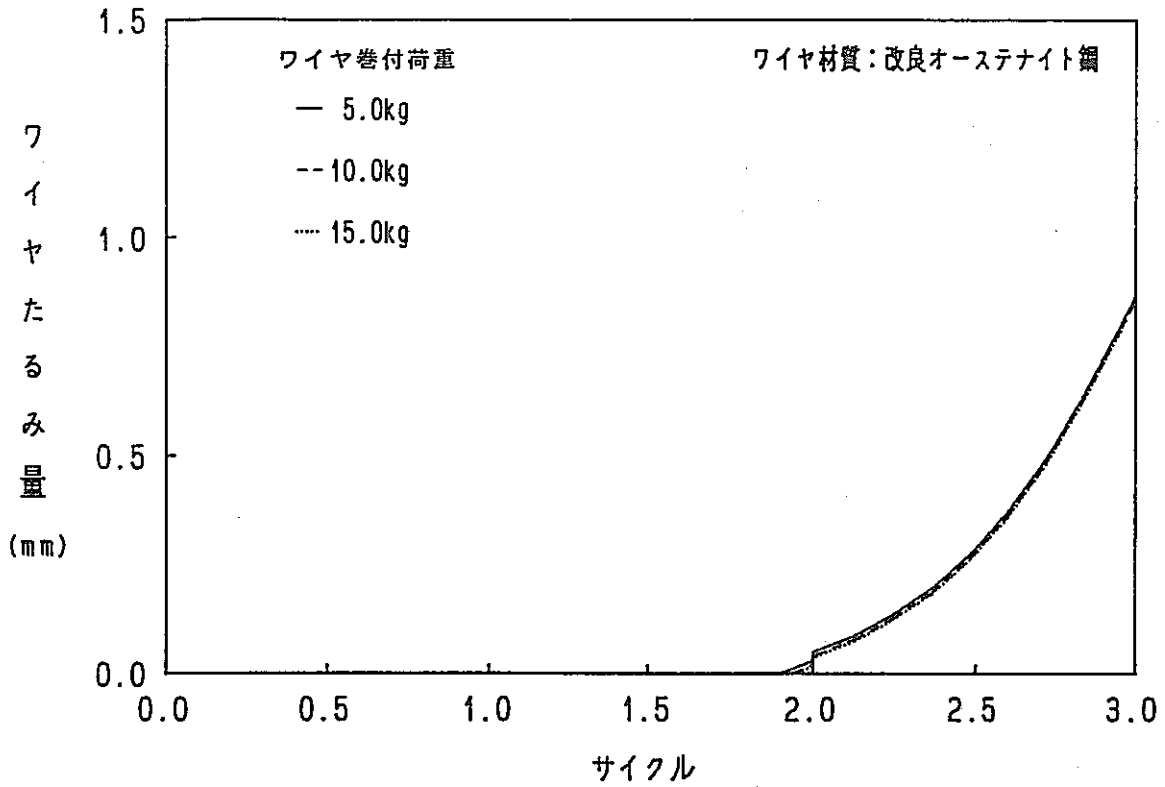


図 4.1-25 ワイヤたるみ量の経時変化
(内側炉心最大発熱ピン；ノミナル温度)

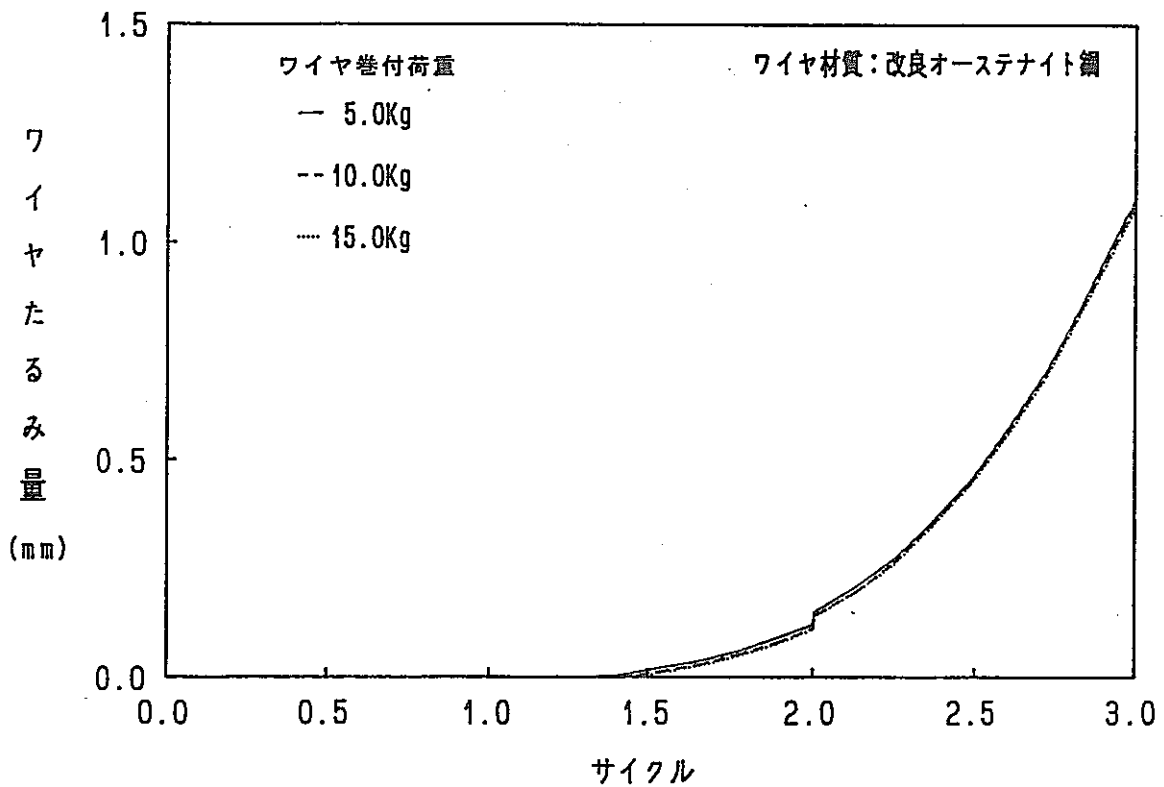


図 4.1-26 ワイヤたるみ量の経時変化
(内側炉心最大発熱ピン；ホットスポット温度)

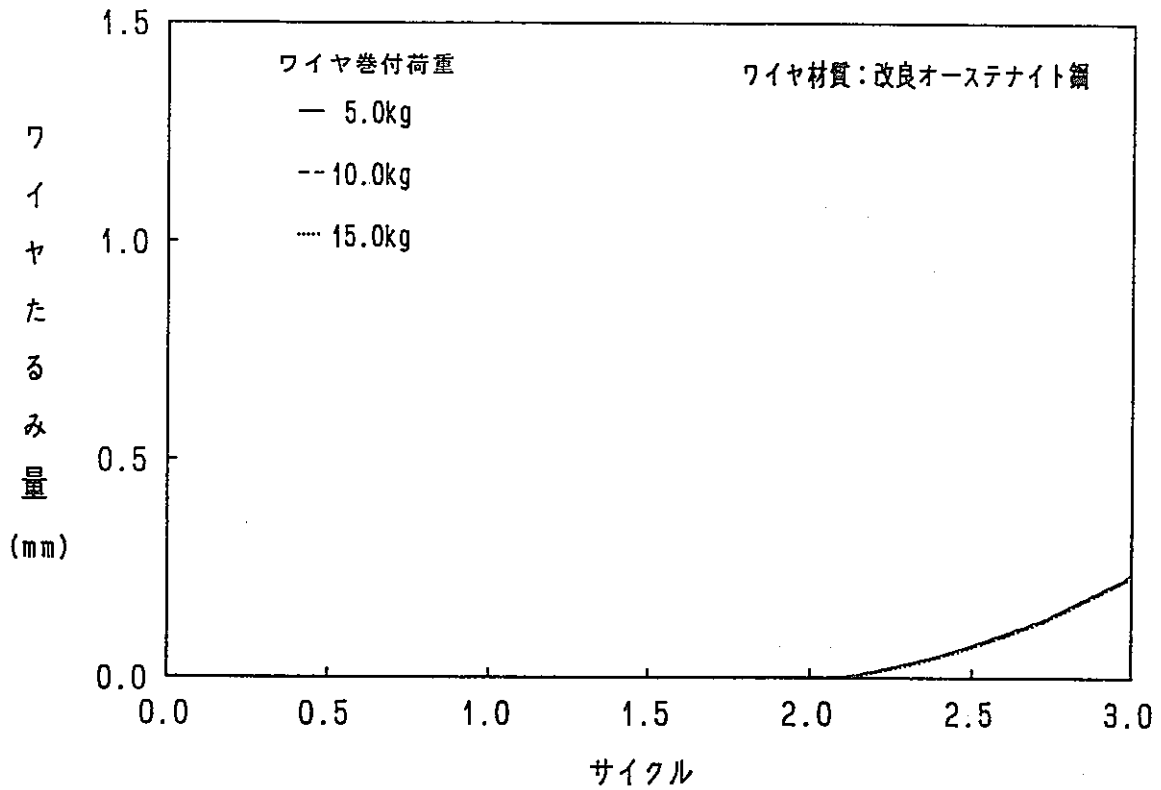


図 4.1-27 ワイヤたるみ量の経時変化
(内側炉心最小発熱ピン；ノミナル温度)

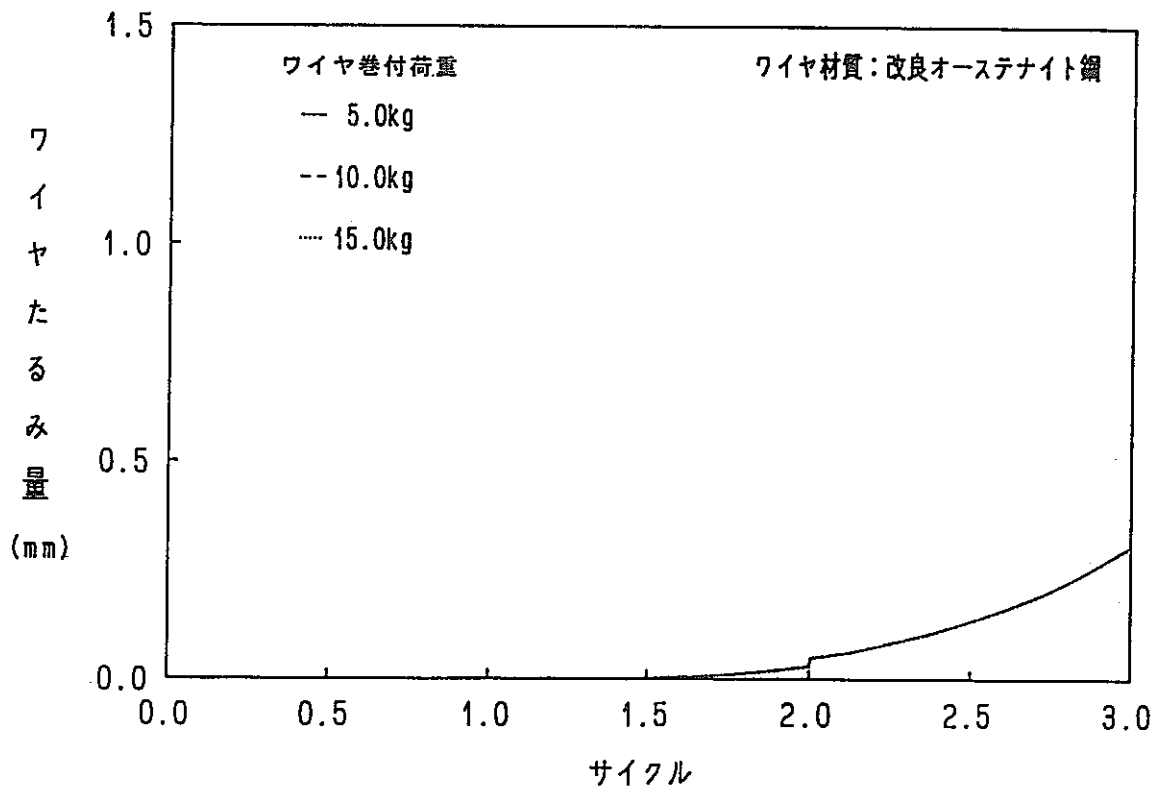


図 4.1-28 ワイヤたるみ量の経時変化
(内側炉心最小発熱ピン；ホットスポット温度)

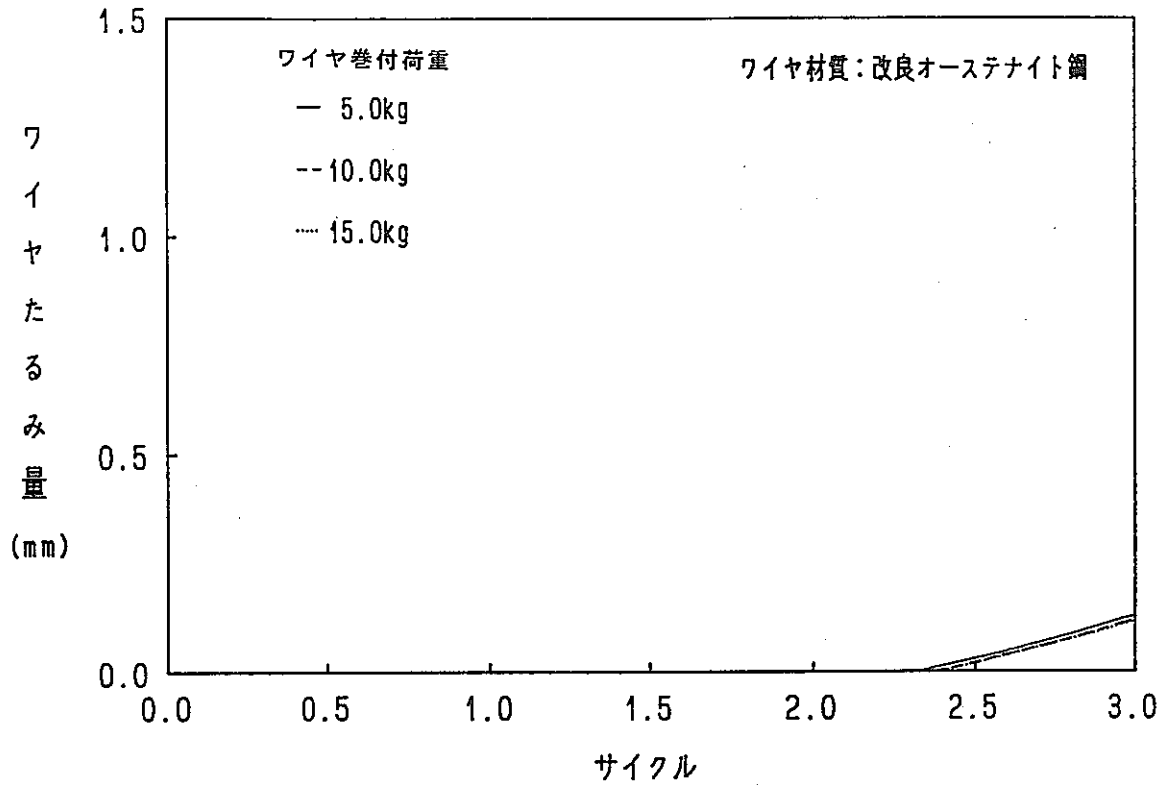


図 4.1-29 ワイヤたるみ量の経時変化
(外側炉心最大発熱ピン；ノミナル温度)

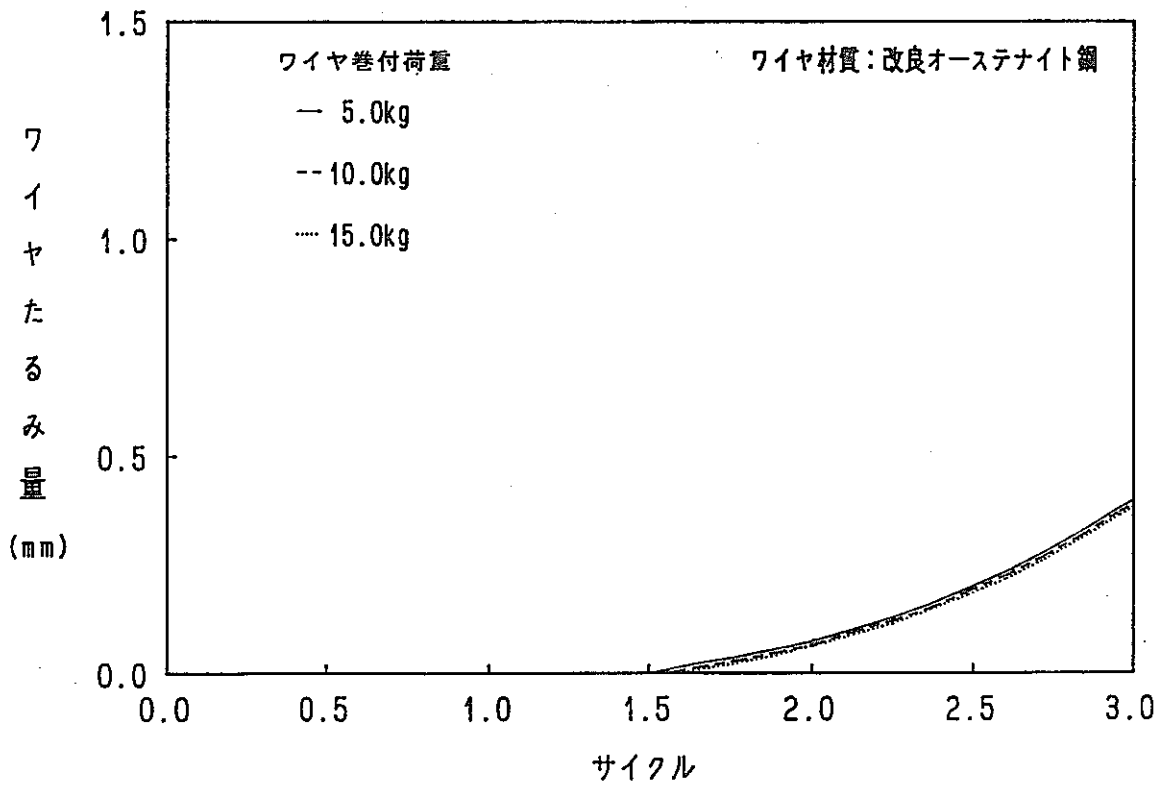


図 4.1-30 ワイヤたるみ量の経時変化
(外側炉心最大発熱ピン；ホットスポット温度)

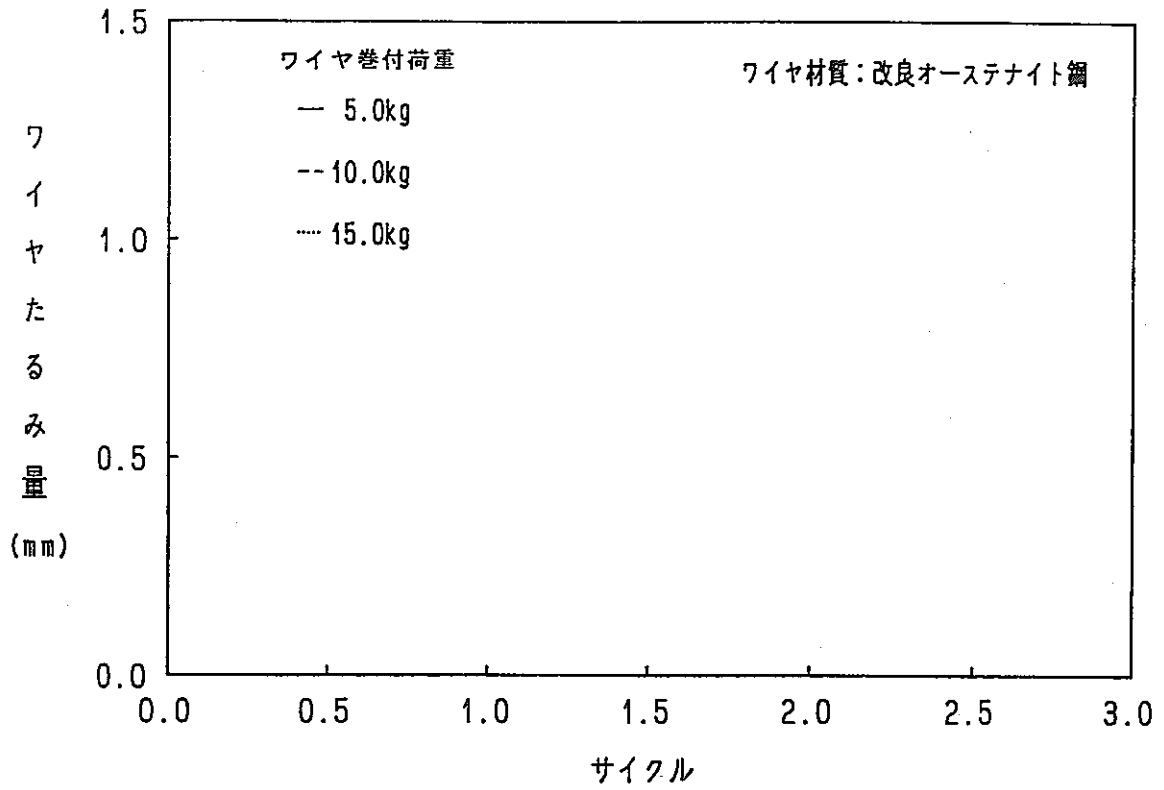


図 4.1-31 ワイヤたるみ量の経時変化
(外側炉心最小発熱ピン；ノミナル温度)

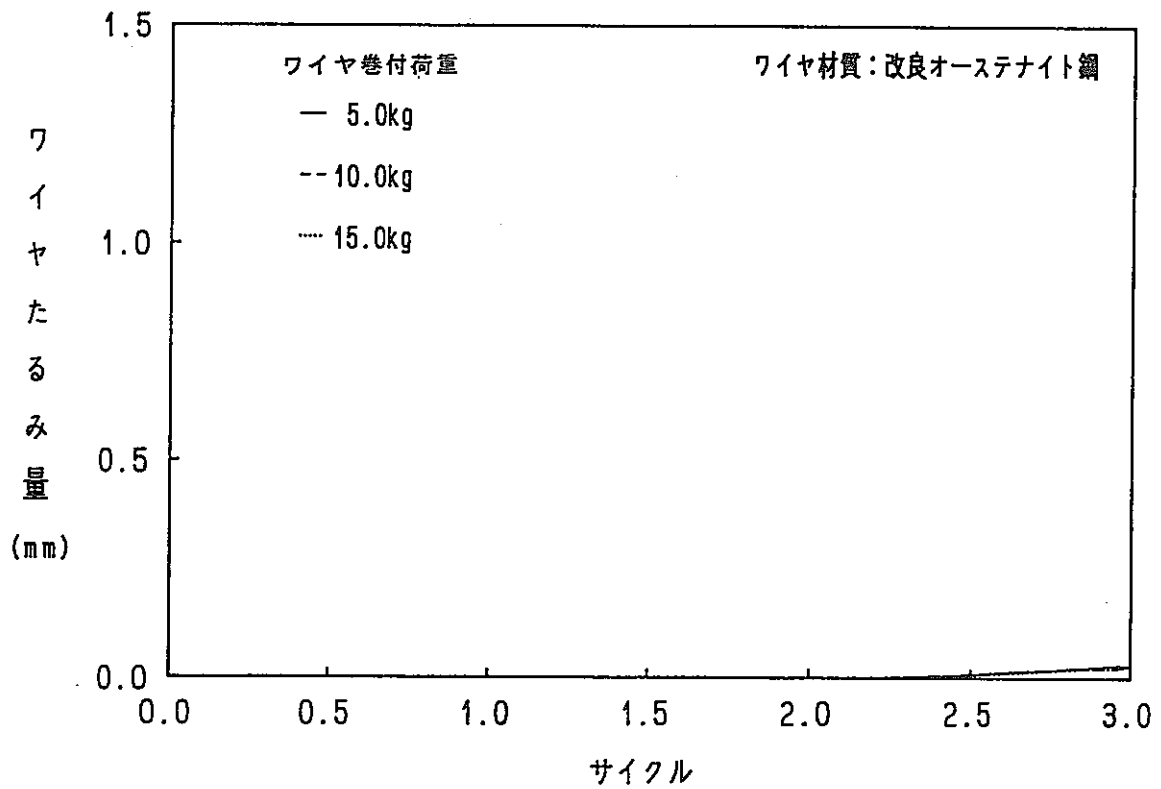


図 4.1-32 ワイヤたるみ量の経時変化
(外側炉心最小発熱ピン；ホットスポット温度)

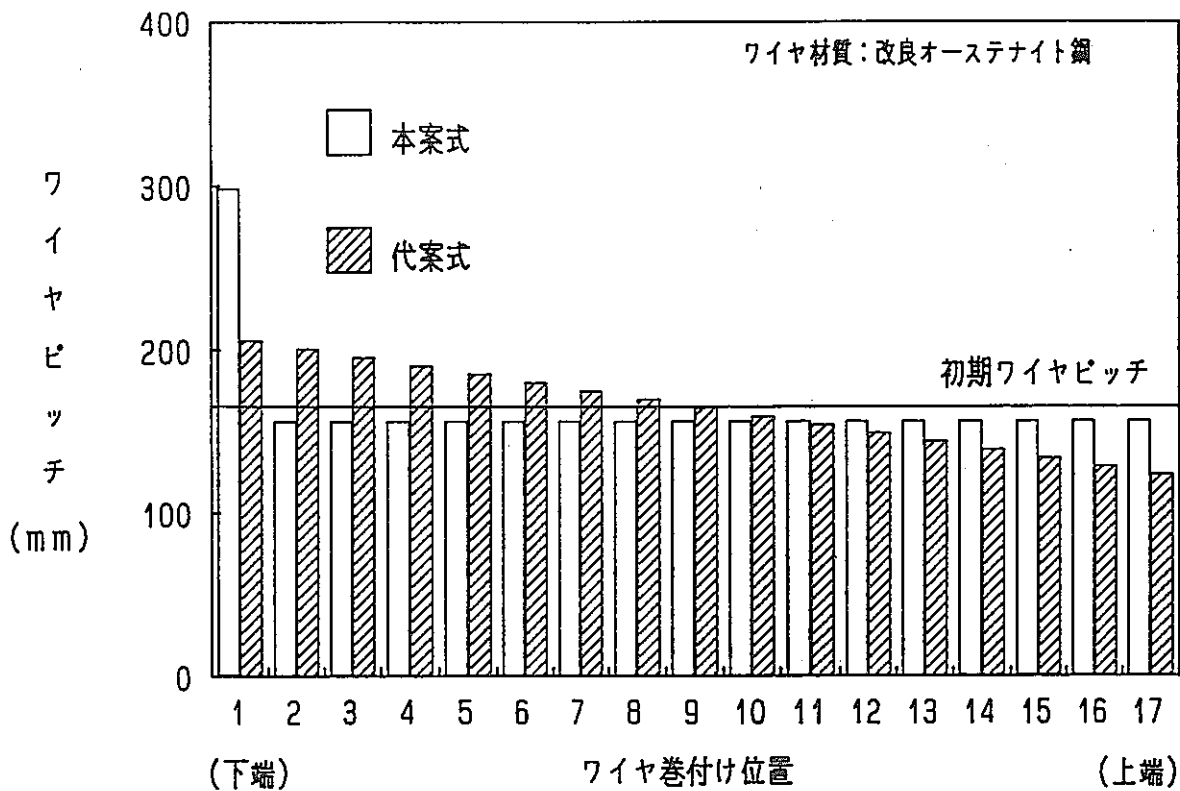


図 4.1-33 ワイヤピッチの軸方向分布
(内側炉心最大発熱ピン；ホットスポット温度)

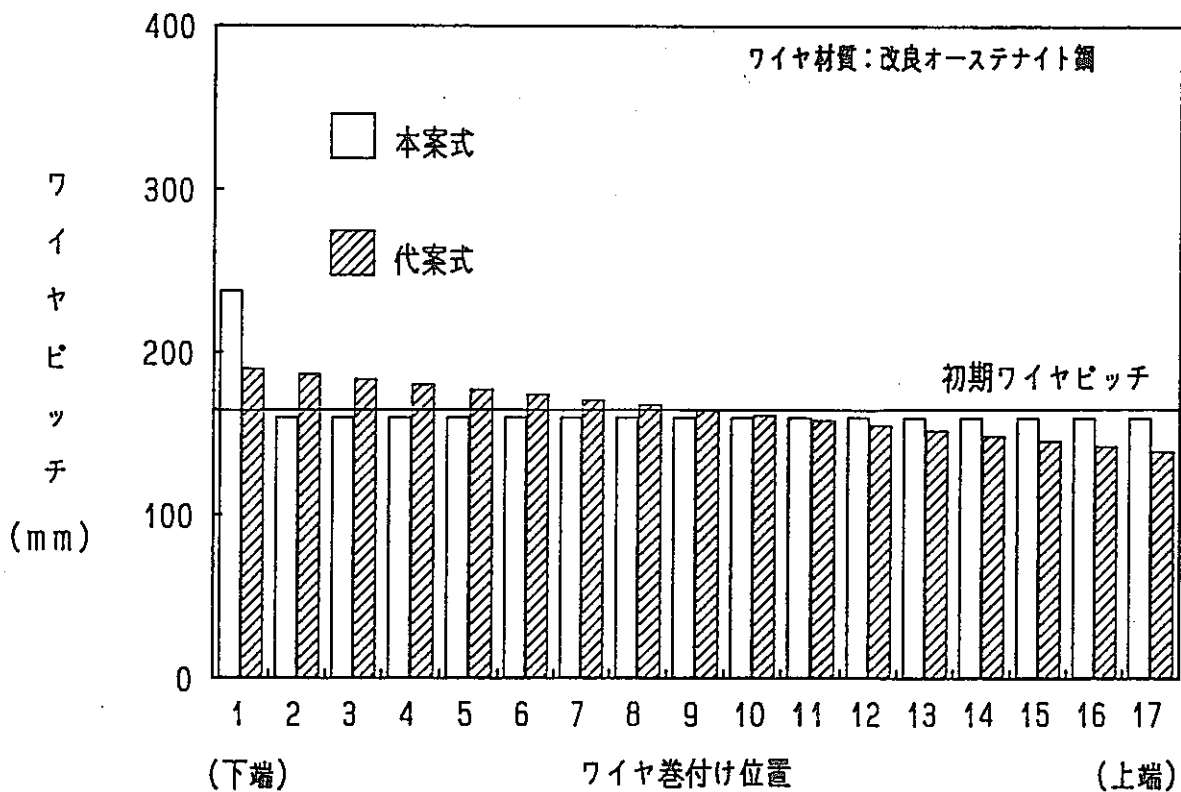


図 4.1-34 ワイヤピッチの軸方向分布
(外側炉心最大発熱ピン；ホットスポット温度)

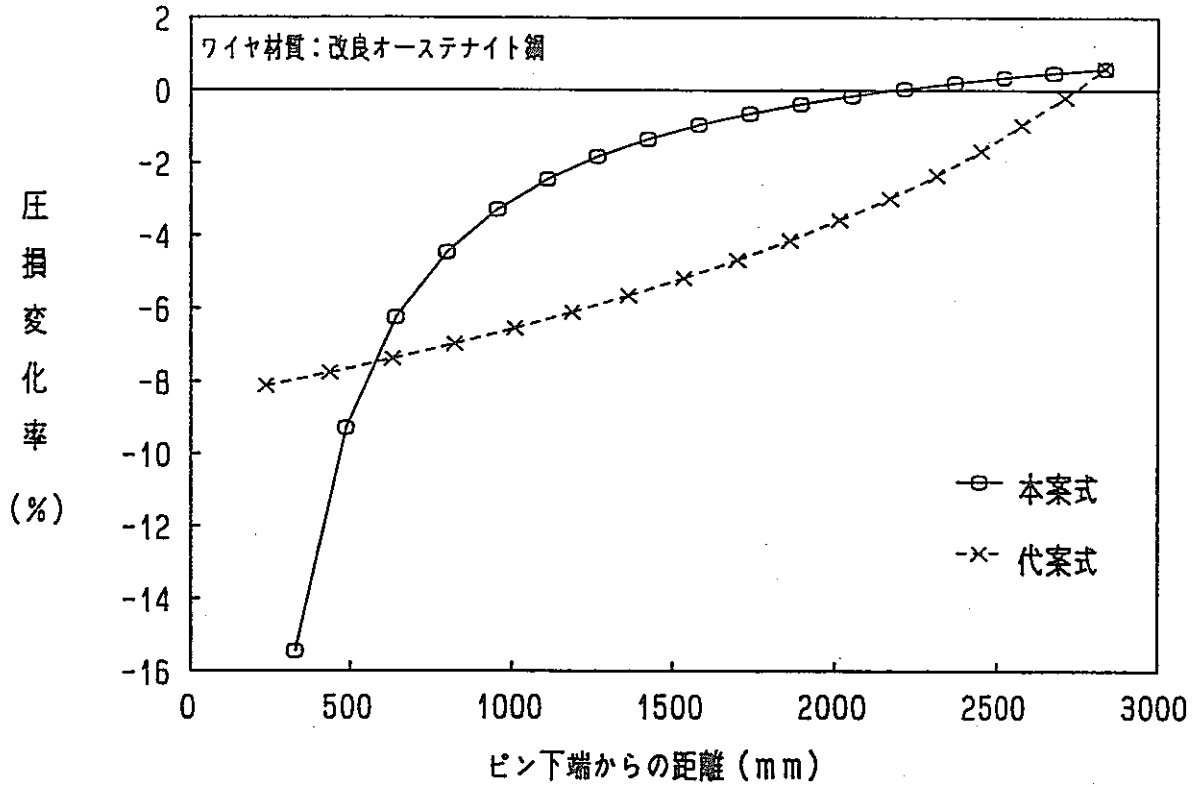


図 4.1-35 圧損変化率の軸方向分布
(内側炉心最大発熱ピン；ホットスポット温度)

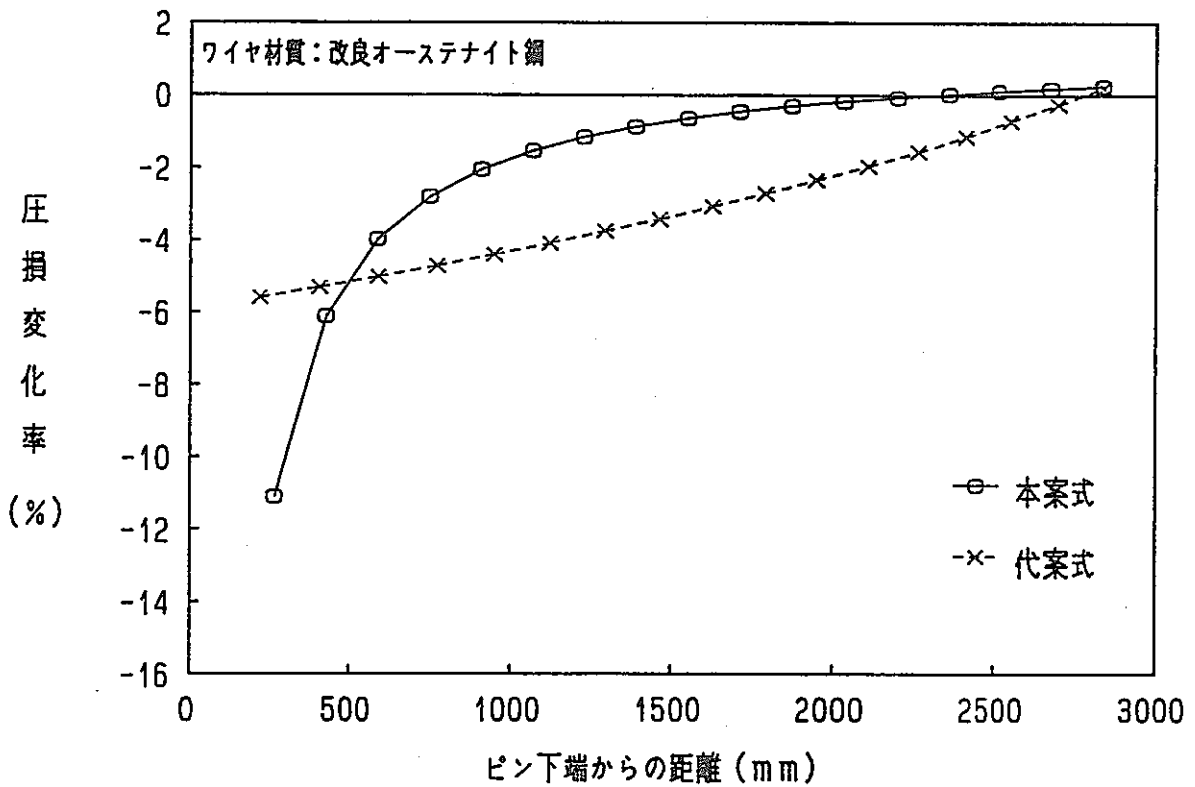


図 4.1-36 圧損変化率の軸方向分布
(外側炉心最大発熱ピン；ホットスポット温度)

4. 2 フェライト鋼ワイヤの場合

ワイヤ材質を被覆管と異なるフェライト鋼とした場合の被覆管-ワイヤ相互作用計算結果を以下に示す。なお、本計算では、ワイヤ（フェライト鋼）の熱膨張係数が被覆管より小さく、ワイヤ材質を改良オーステナイト鋼とした場合に比較し大きなワイヤ張力（応力）を生じることが予測されるため、燃料寿命初期で被覆管とワイヤの温度差が最も大きい（すなわち、ワイヤの応力が最も高い）外側炉心最大発熱ピンを対象としてワイヤ応力を計算し、まず、その成立性についての検討を行う。

(1) ワイヤ張力

表4.2-1に外側炉心最大発熱燃料ピンでワイヤ巻付荷重を5 kgとした場合のノミナルとホットスポット温度でのワイヤ張力（BOIC）を示す。

表4.2-1において、ワイヤ張力はノミナル温度とした場合は57.2 kg、ホットスポット温度とした場合は59.9 kgである。

(2) ワイヤ応力

前記ワイヤ張力によるワイヤ応力はノミナル温度とした場合で50.6 kg/mm²、ホットスポット温度とした場合53.0 kg/mm²である。ここで、ノミナル温度(630℃)及びホットスポット温度(690℃)におけるワイヤ（フェライト鋼）の設計降伏点は30.9 kg/mm²及び17.0 kg/mm²であり、ワイヤ応力はいずれの温度条件においても設計降伏点を上回る。

次に、外側炉心最大発熱ピンでワイヤ巻付荷重を5 kgとした場合について、ワイヤ径をパラメータとしたワイヤ応力計算を行い現実的な範囲内で成立条件を検討する。図4.2-1及び図4.2-2にノミナル及びホットスポット温度でのワイヤ径とワイヤ応力の関係を示す。図4.2-1においてノミナル温度でのワイヤ応力はワイヤ径を2 mmとした場合でも41.4 kg/mm²であり、設計降伏点を上回る。また、ホットスポット温度とした場合のワイヤ応力(図4.2-2)は43.5 kg/mm²(ワイヤ径2 mm)あり、設計降伏点を上回る。

表 4.2-1 ワイヤ張力(ワイヤ材質:フェライト鋼)

対象ピン	温度条件	ワイヤ巻付荷重 (kg)	ワイヤ張力(kg) [B01C]
外側炉心最大 発熱ピン	ノミナル	5.0	57.2
	ホットスポット	5.0	59.9

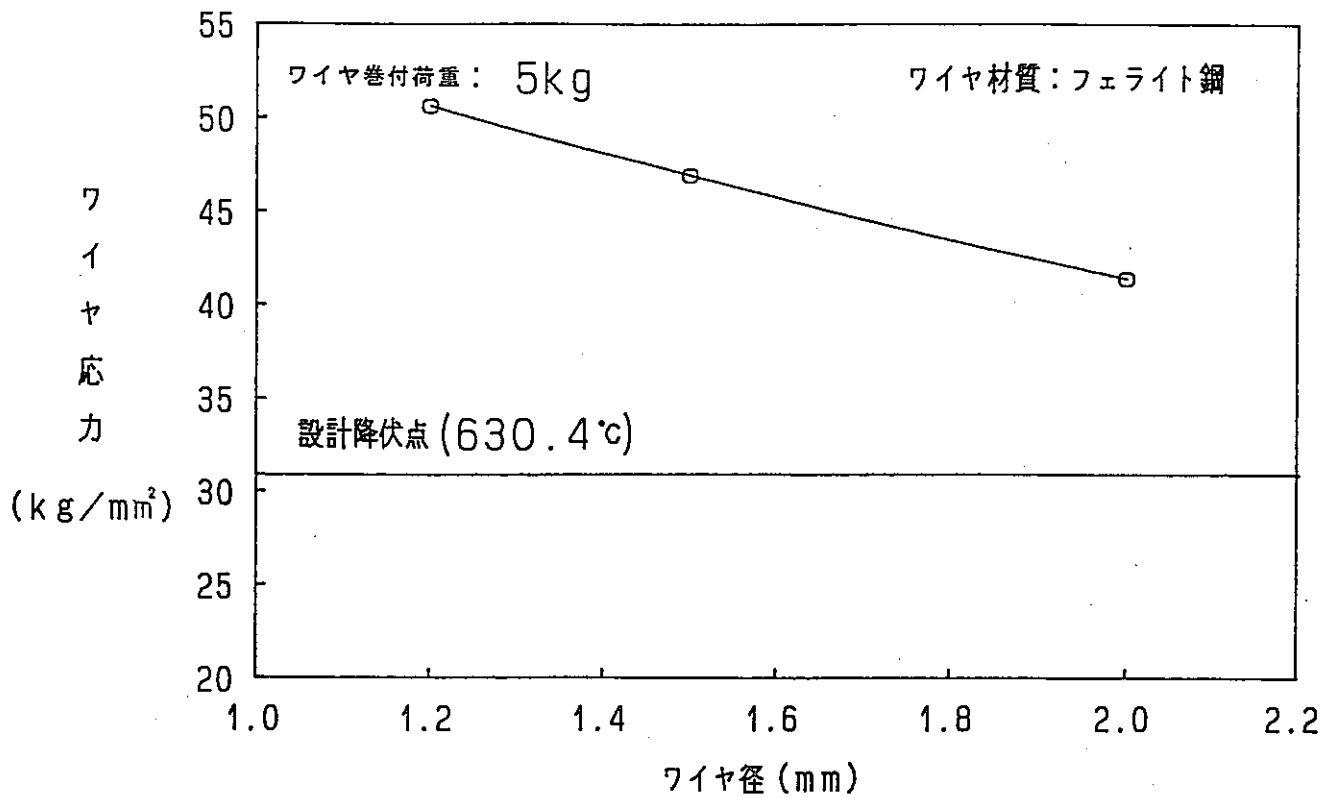


図 4.2-1 ワイヤ径とワイヤ応力の関係
(外側炉心最大発熱ピン; ワイヤ巻付け荷重 5 kg ; ノミナル温度)

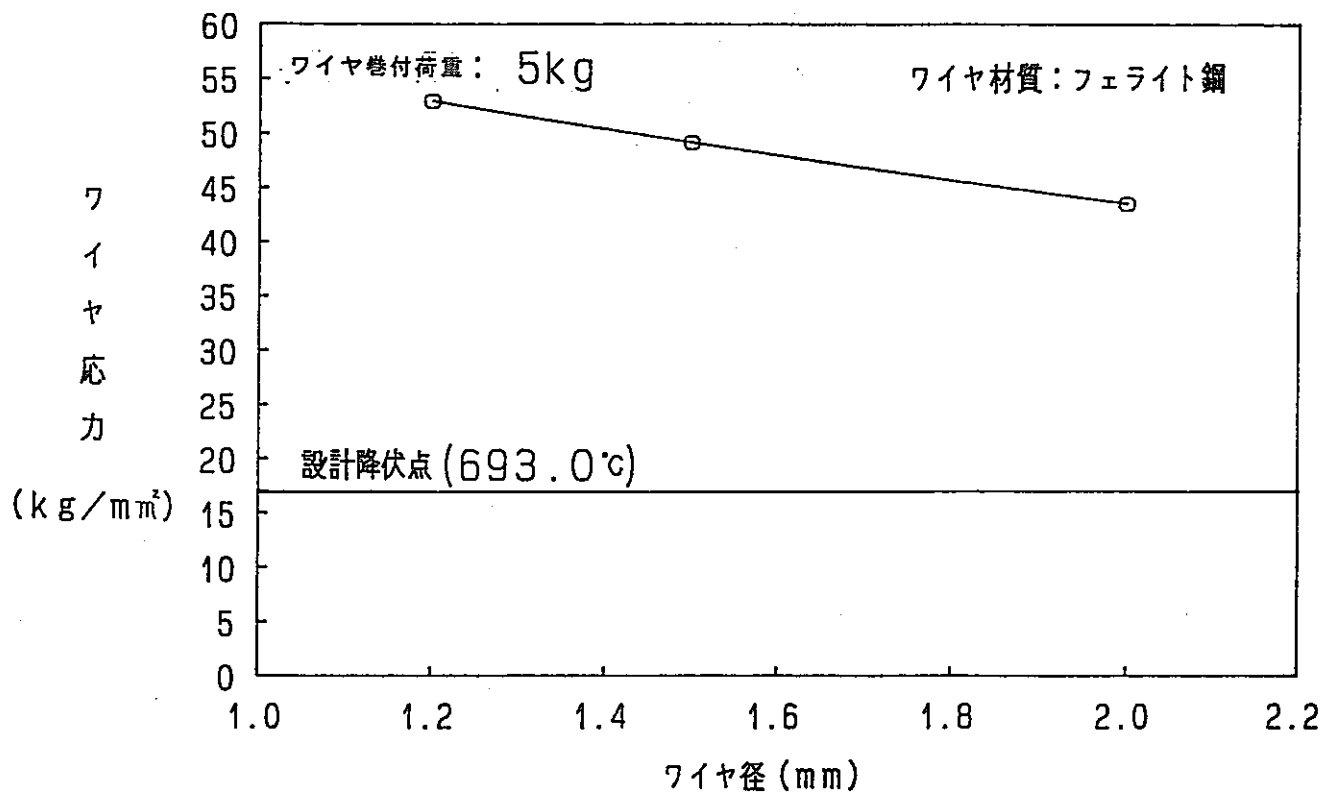


図 4.2-2 ワイヤ径とワイヤ応力の関係
(外側炉心最大発熱ピン; ワイヤ巻付け荷重 5 kg ; ホットスポット温度)

5. 結果の検討

5.1 改良オーステナイト鋼ワイヤの場合

5.1.1 被覆管-ワイヤ相互作用

(1) 被覆管外径増加率及び軸方向膨張率

図5.1- 1及び図5.1- 2に内側炉心最大発熱ピン(ワイヤ巻付荷重5 kg)のノミナルとホットスポット温度での被覆管外径増加率(EO3C)の比較及び被覆管軸方向膨張率(EO3C)の比較を示す。

図5.1- 1において外径増加率はノミナル、ホットスポット温度いずれの場合もピン下端から約1700 mmの位置で最大となっている。また、軸方向の分布としてはピン下端から約1400 mmの位置まではノミナル、ホットスポット温度両者の外径増加率に有意差はなく、約1400～2000 mmの位置ではノミナル温度の外径増加率がホットスポット温度に比較し大きく、約2000 mmでノミナル、ホットスポット温度両者の外径増加率が逆転している。

ここで、図5.1- 3及び図5.1- 4にノミナル及びホットスポット温度での外径増加率の内訳(熱膨張、スエリング、照射クリープ、熱クリープ)を示し、図5.1- 5及び図5.1- 6にはMO2Cにおける被覆管の軸方向高速中性子束分布及び軸方向温度分布を示す。図5.1- 3及び図5.1- 4において外径増加率が最大となるピン下端から約1700 mmの位置ではスエリングによる外径増加が支配的である。ここで、高速中性子束のピーク位置(図5.1- 5参照)は外径増加率が最大となる位置に対応している。このことから、ピン下端から約1700 mmでのスエリングによる外径増加率のピークの発生は上記高速中性子束の分布に起因するものと考えられる。

また、外径増加率が最大となる位置ではノミナル温度の方がホットスポット温度に比較しスエリング速度が最大となる温度(約475℃)に近い(図5.1- 6参照)ためスエリングによる外径増加率が大きな値になるものと考えられる。

次に、図5.1- 3及び図5.1- 4においてピン下端から約2000 mmより上部における外径増加は熱膨張と熱クリープが支配的であり、ノミナル温度とホットスポット温度の外径増加率の差は主として熱クリープによるものである。ここで、熱クリープ速度は高温になるに従い増加する特性を有している。このことから、ピン下端から約2000 mmより上部ではホットスポット温度とした場合の外径増加率がノミナル温度とした場合に比較し大きな値となるものと考えられる。

被覆管の軸方向膨張率(図5.1- 2)についても上記被覆管外径増加率の場合と同様に被覆管の熱膨張、スエリング及び熱クリープ特性に起因しノミナル温度とホットスポット温度で軸方向膨張率に差を生じるものと考えられる。

(2) ワイヤ張力及びたるみ量

図5.1- 7に内側炉心最大発熱ピン（ワイヤ巻付荷重5 k g）のノミナルとホットスポット温度でのワイヤ張力経時変化の比較を示す、また、図5.1- 8にはワイヤ巻付荷重を5 k g、温度をホットスポットとした条件での内側炉心燃料ピン（最大及び最小発熱）と外側炉心燃料ピン（最大及び最小発熱）のワイヤ張力経時変化の比較を示す。図5.1- 7においてホットスポット温度ではワイヤ張力が0となる時期がノミナル温度に比較し0.5サイクル程度早い。ここで、ワイヤ張力の緩和は主として熱クリープに起因したワイヤの伸びによるものである。このことから、ホットスポット温度とした場合は熱クリープによるワイヤの伸びがノミナル温度に比較し大きく、従ってワイヤ張力の緩和が早いものと考えられる。

また、ワイヤ張力の緩和速度は燃焼に伴う被覆管とワイヤの熱膨張差の変化と上記熱クリープに起因したワイヤの伸びにより決まる。ここで、内側炉心最大発熱ピンの場合は被覆管温度がサイクル中に上昇（被覆管とワイヤの熱膨張差が増加）するためワイヤ張力の緩和は他の燃料ピンに比較しゆるやかな勾配（図5.1- 8）となっており、特にノミナル温度では上記傾向が顕著である。なお、燃料寿命初期においてワイヤ張力が製造時より低い値を示しているが、これは燃料寿命初期の被覆管及びワイヤの温度が製造時に比較し約500℃（軸方向平均）程度高く縦弾性係数が小さいため、ワイヤの歪発生に必要な張力が小さくなることによるものと考えられる。

図5.1- 9に内側炉心最大発熱ピン（ワイヤ巻付荷重5 k g）のノミナルとホットスポット温度でのワイヤたるみ量経時変化の比較を示す。図5.1-9においてEO3Cでのワイヤたるみ量はホットスポット温度の場合約1.1 mmでありノミナル温度に比較し約0.2 mm程度大きな値を示している。また、ノミナル、ホットスポット温度両者のワイヤたるみ量の増加速度は同程度である。このことから、EO3Cにおけるノミナル、ホットスポット温度両者のワイヤたるみ量の差は前記ワイヤ張力が0となる時期（ワイヤたるみ発生時期）の差によるものと考えられる。

なお、ワイヤたるみ速度は、被覆管とワイヤのスエリング速度の差により決定される。ノミナル温度とホットスポット温度について比較すると、被覆管とワイヤの温度差に起因するスエリング差は、温度差の大きなホットスポット温度の方が大きくなるが、被覆管とワイヤのスエリング速度そのものは、スエリングピーク温度に近いノミナル温度の方がホットスポット温度に比較し大きい（5.1.1(1)参照）。図5.1- 9におけるワイヤたるみ量の増加速度がノミナル温度とホットスポット温度で同程度になるのは、スエリング差に及ぼすこのような温度差の影響とスエリング速度そのものの差の影響が相殺することによるためと考えられる。

(3) ワイヤ応力

ワイヤ応力は外側炉心最大発熱ピンでワイヤ巻付荷重を15 kgとした場合が最大(BOIC)であり、ノミナル温度で約13.0 kg/mm²、ホットスポット温度で約13.3 kg/mm²である。ここで、ノミナル温度及びホットスポット温度におけるワイヤの設計降伏点は36.9 kg/mm²及び43.4 kg/mm²であり、上記ワイヤ応力は設計降伏点を下回っている。従って、本計算条件の範囲(燃料仕様及び使用条件)において被覆管-ワイヤ相互作用によるワイヤ応力が強度上問題となることはないものと考えられる。

(4) クリープひずみ計算法の比較

本計算ではひずみ硬化則を用いたが、時間硬化則を用いた場合の被覆管-ワイヤ相互作用計算も1ケース実施し、硬化則の影響を検討した。結論として硬化則の影響は小さいが、以下に示すように若干の違いはある。

図5.1-10及び図5.1-11に内側炉心最大発熱ピンについてワイヤ巻付荷重を15 kg、温度をホットスポットとした条件でクリープ(照射+熱)ひずみ計算にひずみ硬化則と時間硬化則を用いた場合の被覆管外径増加率の比較及びワイヤ張力の比較を示す。

図5.1-10において外径増加率は時間硬化則を用いた場合の方がひずみ硬化則を用いた場合に比較し大きな値を示している。また、図5.1-10においてワイヤ張力はひずみ硬化則を用いた場合の方が時間硬化則を用いた場合に比較し緩和が速い。

ここで、ひずみ硬化則と時間硬化則の比較として図5.1-12に温度を550℃、等価応力を11 kg/mm²及び12 kg/mm²(期間中一定)とした場合について、ひずみ硬化則と時間硬化則を用いたクリープ

(照射+熱)ひずみの比較を示す。図5.1-12より高応力側から低応力側に移行する場合にはひずみ硬化則を用いた場合の方が時間硬化則を用いた場合に比較し大きなクリープひずみ速度となり、低応力側から高応力側に移行する場合には時間硬化則を用いた場合の方がひずみ硬化則を用いた場合に比較し大きなクリープひずみ速度となる。

内側炉心最大発熱ピンの外径増加率計算(図5.1-10)に着目すると被覆管の周方向応力(内圧)はサイクル中に増加する。従って、被覆管の周方向クリープひずみ計算は、上記の低応力側から高応力側に移行する場合に対応する。すなわち、時間硬化則を用いた場合の方がひずみ硬化則を用いた場合に比較し大きなクリープひずみ速度となるため、外径増加率は時間硬化則を用いた場合の方がひずみ硬化則を用いた場合に比較し大きな値となるものと考えられる。

一方、ワイヤ張力計算(図5.1-11)においてワイヤ張力(応力)は時間の経過に伴い減少する。従って、高応力側から低応力側へ移行する場合

に対応する。すなわち、ひずみ硬化則を用いた場合の方が時間硬化則を用いた場合に比較し大きなクリープひずみ速度となる。このことから、ワイヤ張力はひずみ硬化則を用いた場合の方が時間硬化則を用いた場合に比較しワイヤ張力の緩和が速いものと考えられる。

(5) 被覆管応力

ワイヤ張力はワイヤ巻付荷重と被覆管とワイヤの温度差（熱膨張差）が最も大きな外側炉心最大発熱ピンでワイヤ巻付荷重を15 kgとした場合であり、このとき被覆管外面応力はノミナル温度で引張応力が2.0 kg/mm²、圧縮応力が4.5 kg/mm²、ホットスポット温度で引張応力が2.0 kg/mm²、圧縮応力が4.6 kg/mm²程度（表4.1-4参照）である。

5.1.2 集合体圧損変化率

集合体圧損変化率が最大となるのは、内側炉心最大発熱ピンでワイヤ巻付荷重を5 kgとした場合であり、ワイヤピッチずれを本案式、代案式いずれで設定した場合も0.6%、（表4.1-5参照）である。このことから、ワイヤたるみに起因する集合体圧損変化率が集合体各部の温度に及ぼす影響はわずかなものと考えられる。

なお、図5.1-13にはワイヤたるみ量と集合体圧損変化率（ワイヤピッチずれは本案式により設定）の関係を示す。今回の評価では、ワイヤたるみ量は最大1.1 mmであったが、ワイヤたるみ量が2 mm程度まで増加しても集合体圧損変化率は1.1%程度であることがわかる。

5.2 フェライト鋼ワイヤの場合

ワイヤ材質を被覆管と異なるフェライト鋼とした場合には被覆管（オーステナイト鋼）とワイヤの熱膨張係数の差により寿命初期において過大なワイヤ張力（応力）を生じる。寿命初期（BOIC）に生じるワイヤ応力はワイヤ巻付荷重を5 kg/mm²ワイヤ径を2 mmとした場合でもノミナル温度とした場合で41.4 kg/mm²、ホットスポット温度とした場合約43.5 kg/mm²であり、いずれの温度条件でも設計降伏点を上回る。

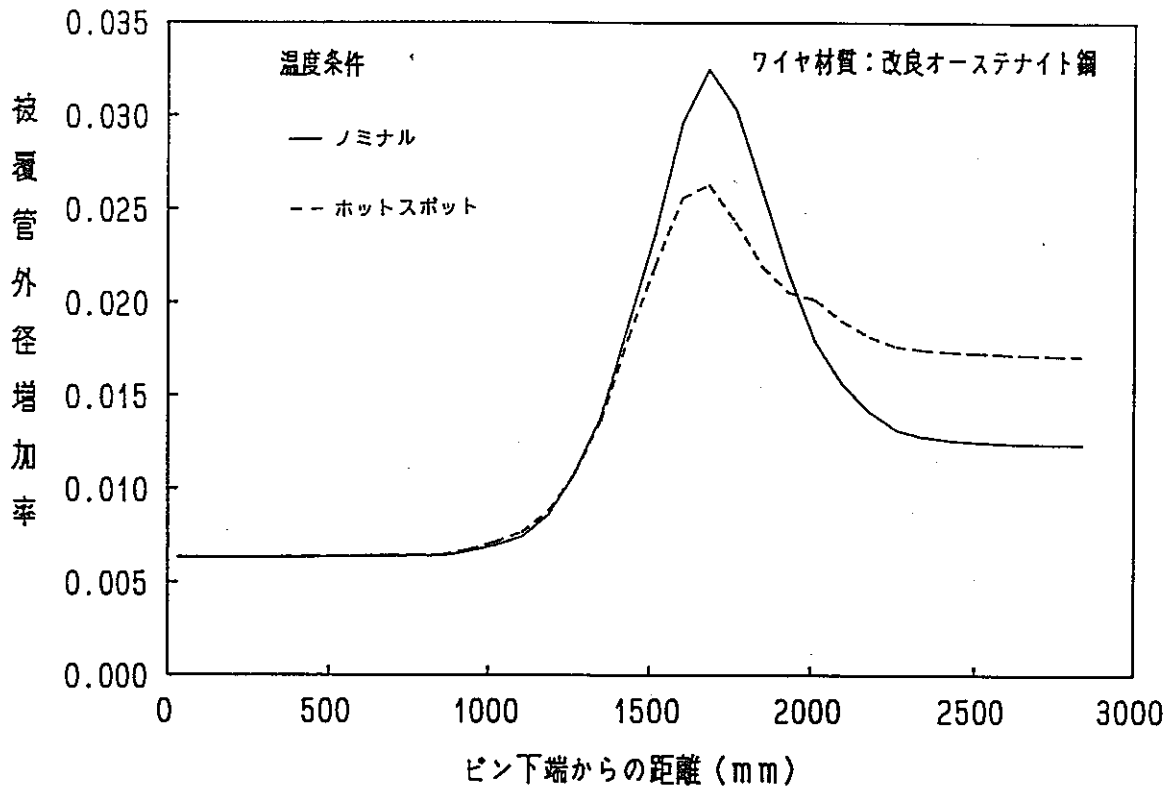


図 5.1-1 被覆管外径増加率軸方向分布の比較
 (内側炉心最大発熱ピン；ワイヤ巻付荷重 5 kg；EO3C)

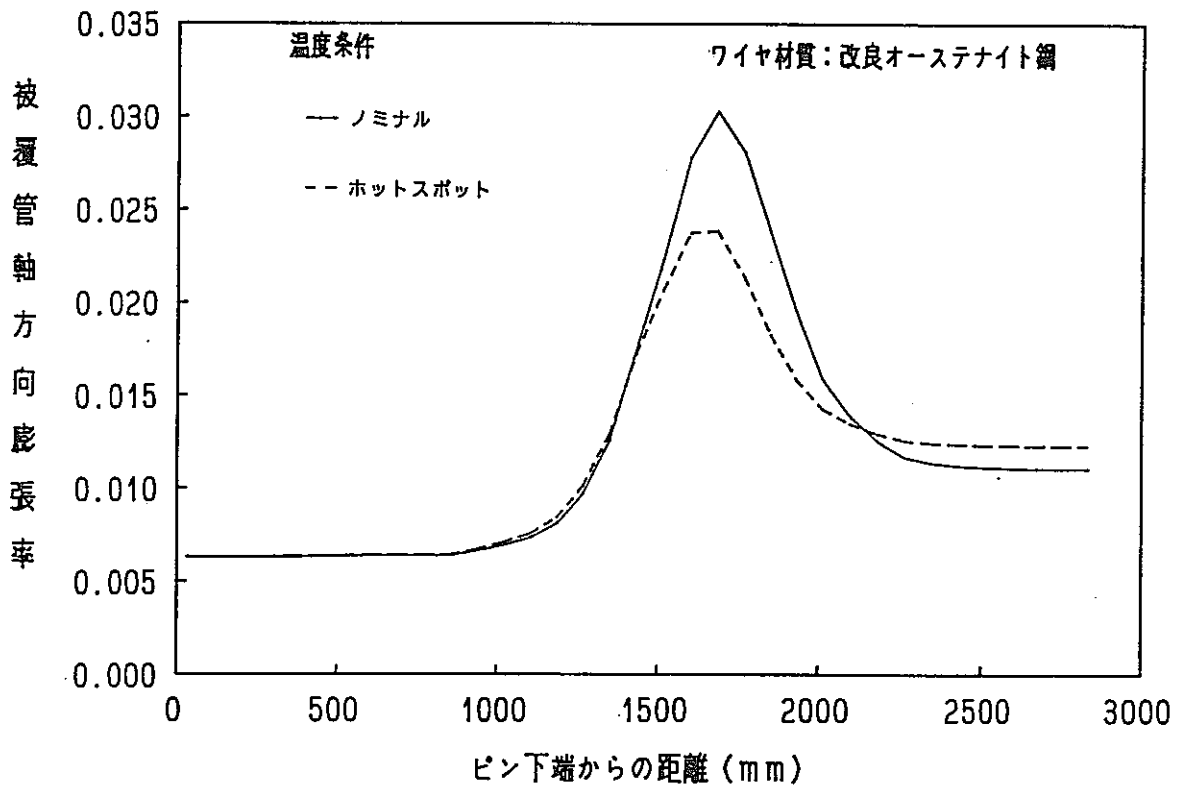


図 5.1-2 被覆管軸方向膨張率軸方向分布の比較
 (内側炉心最大発熱ピン；ワイヤ巻付荷重 5 kg；EO3C)

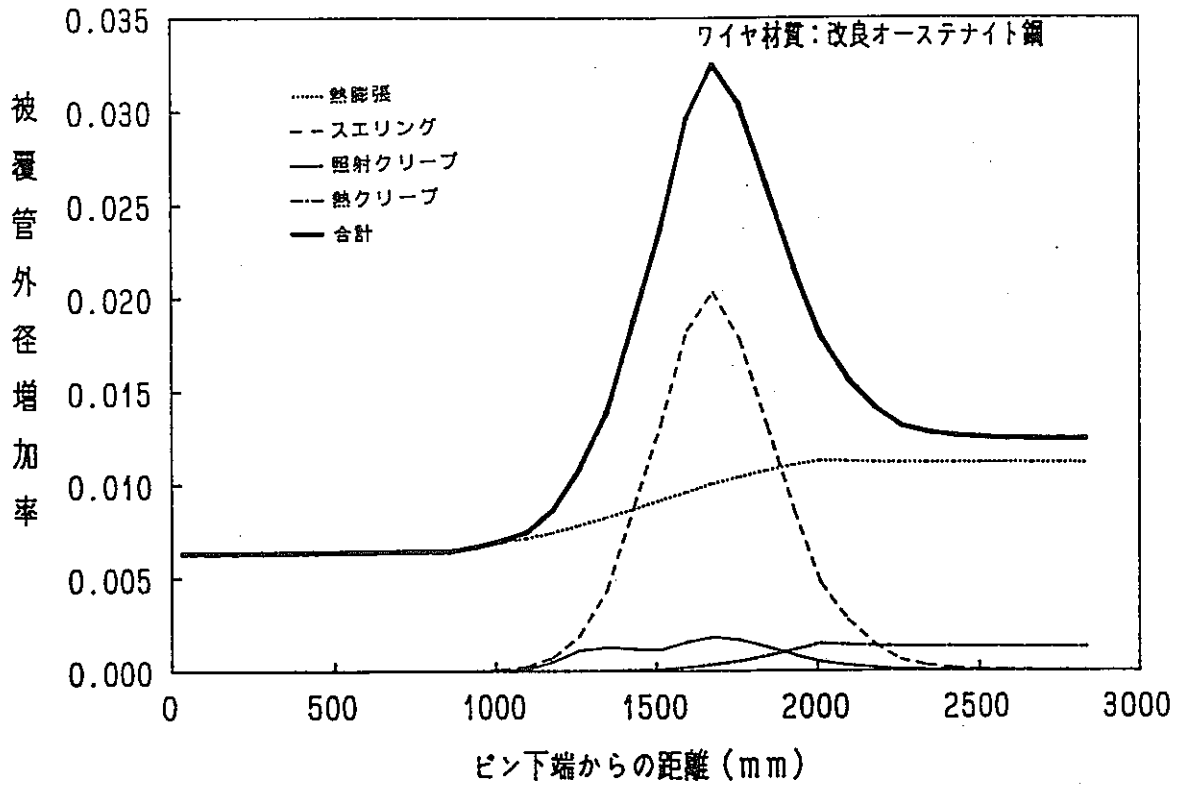


図 5.1-3 被覆管外径増加率の成分
(内側炉心最大発熱ピン；ワイヤ巻付荷重 5 kg；EO3C；ノミナル温度)

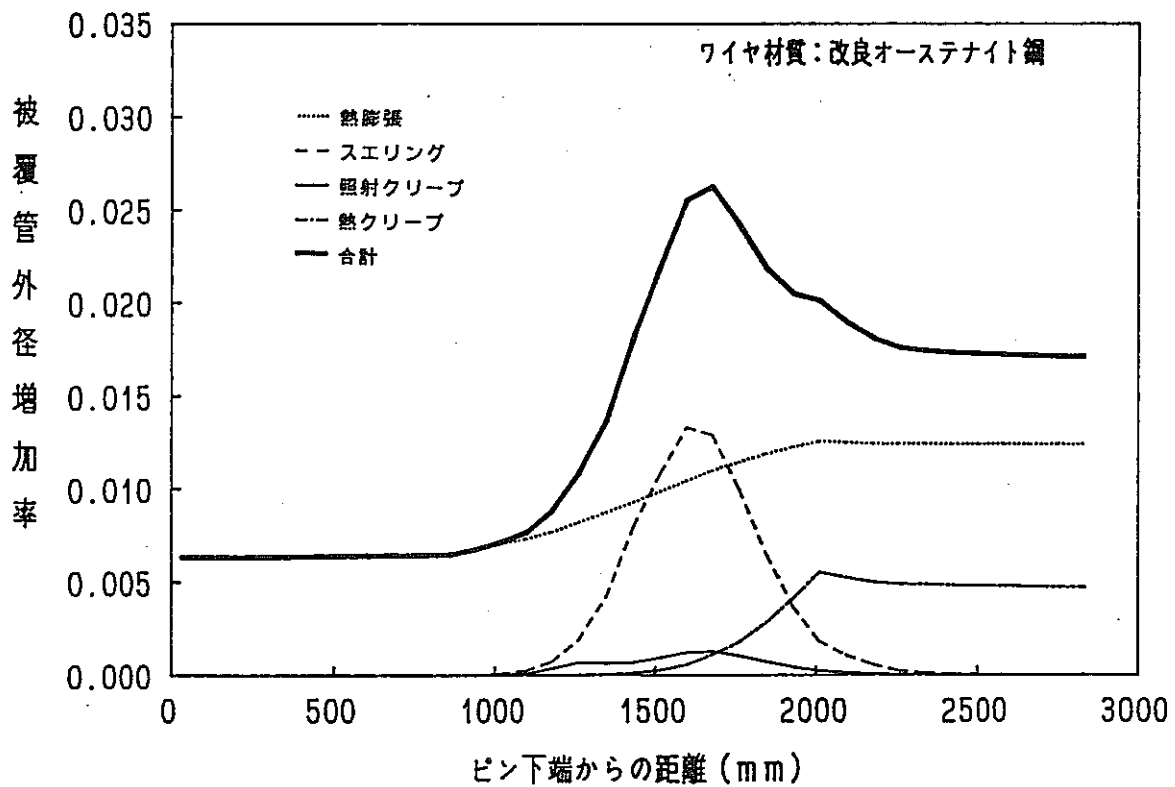


図 5.1-4 被覆管外径増加率の成分
(内側炉心最大発熱ピン；ワイヤ巻付荷重 5 kg；EO3C；ホットスポット温度)

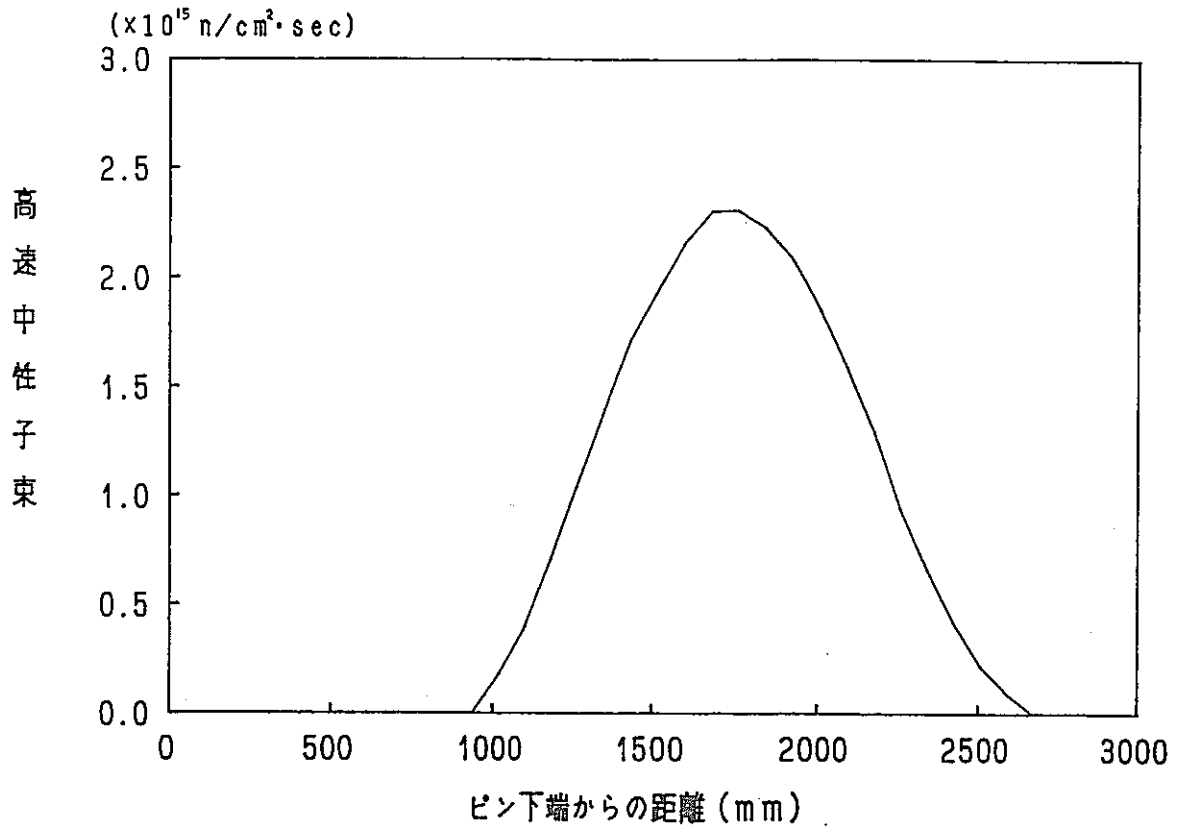


図 5.1-5 高速中性子束の軸方向分布
(内側炉心最大発熱ピン)

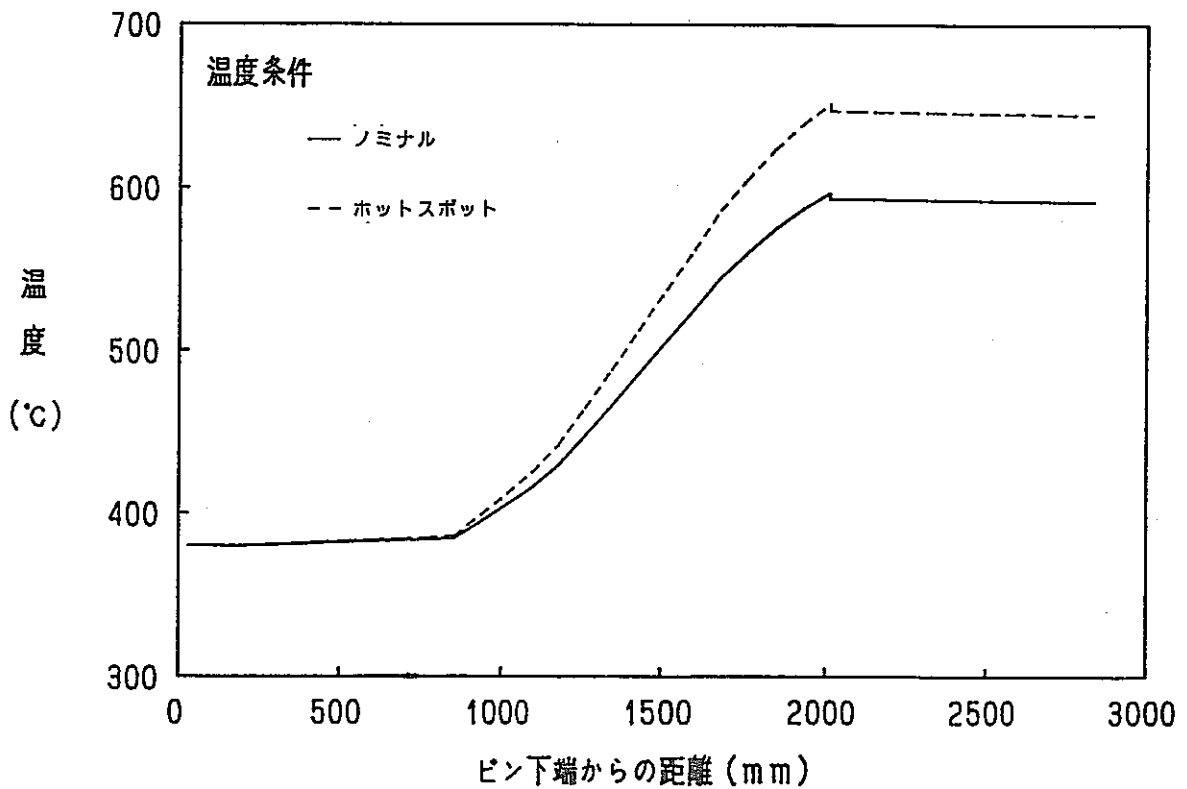


図 5.1-6 被覆管温度の軸方向分布
(内側炉心最大発熱ピン; MOL)

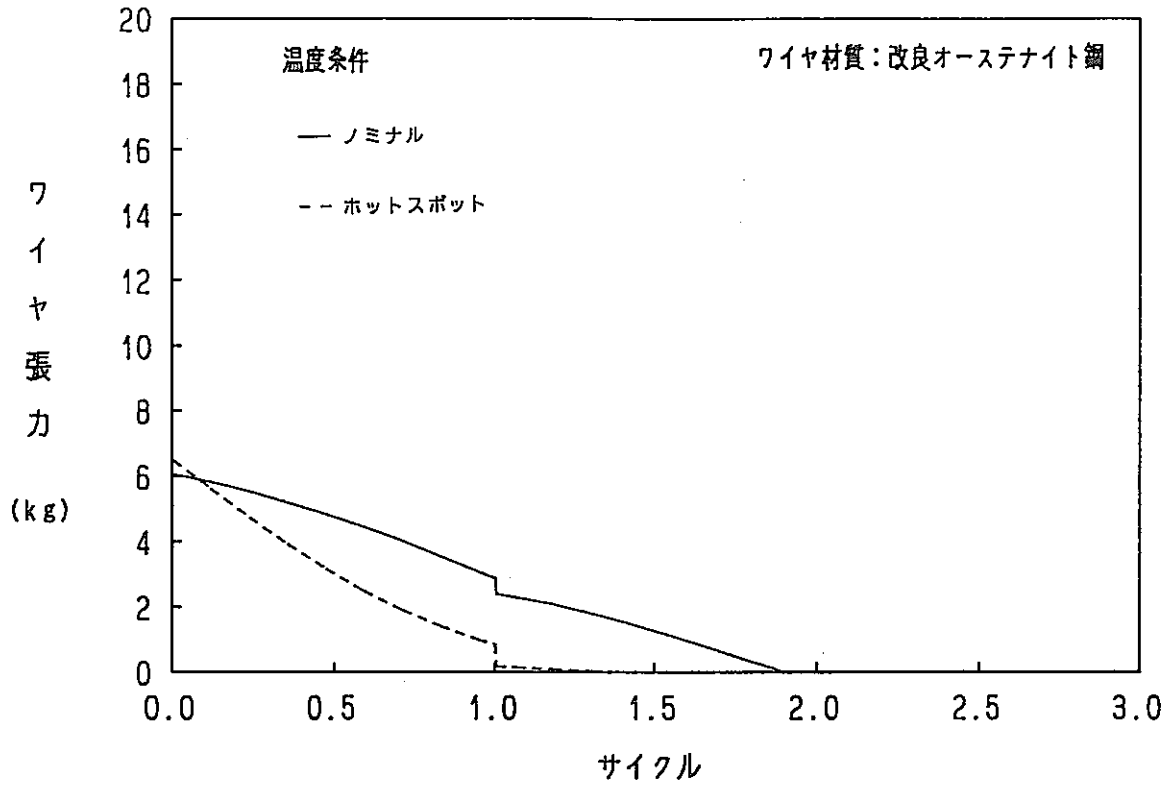


図 5.1-7 ワイヤ張力の経時変化の比較
(内側炉心最大発熱ピン; ワイヤ巻付荷重 5 kg)

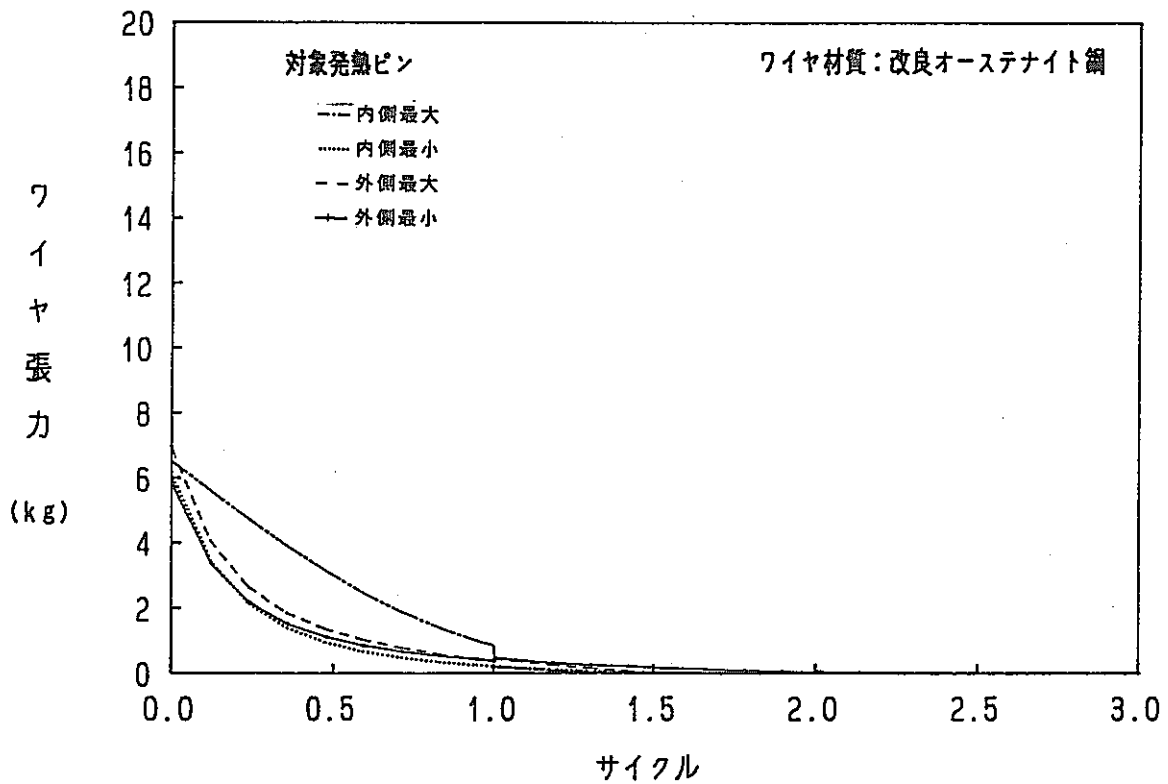


図 5.1-8 ワイヤ張力の経時変化
(ホットスポット温度; ワイヤ巻付荷重 5 kg)

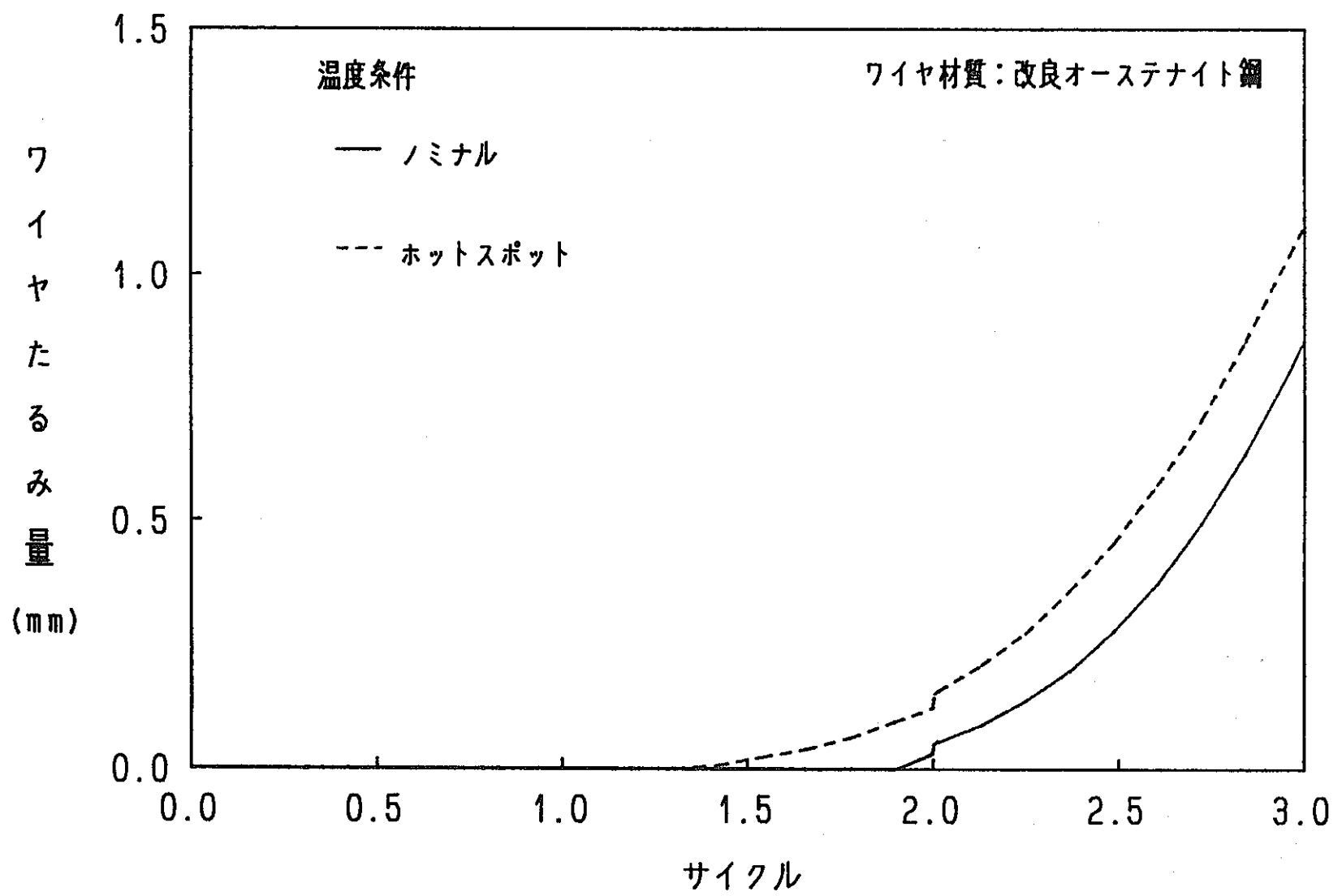


図 5.1-9 ワイヤたるみ量の経時変化の比較
(内側炉心最大発熱ピン；ワイヤ巻付荷重 5 k g)

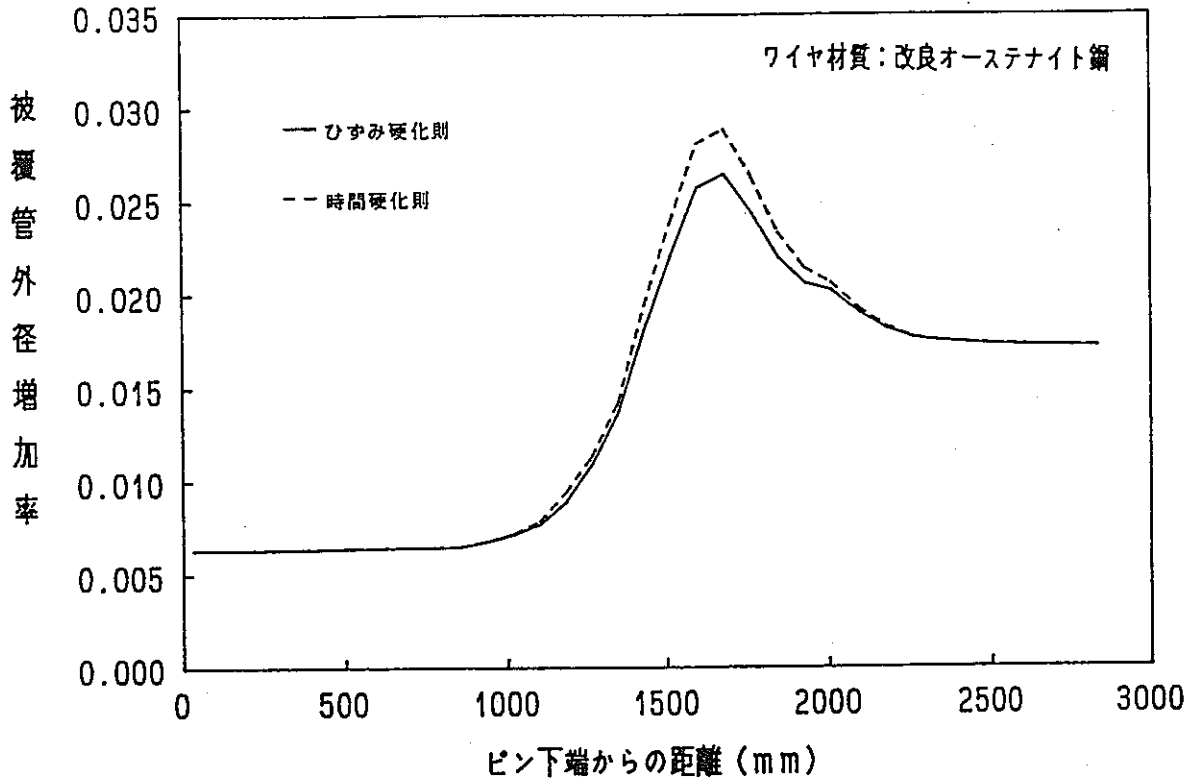


図 5.1-10 被覆管外径増加率の比較

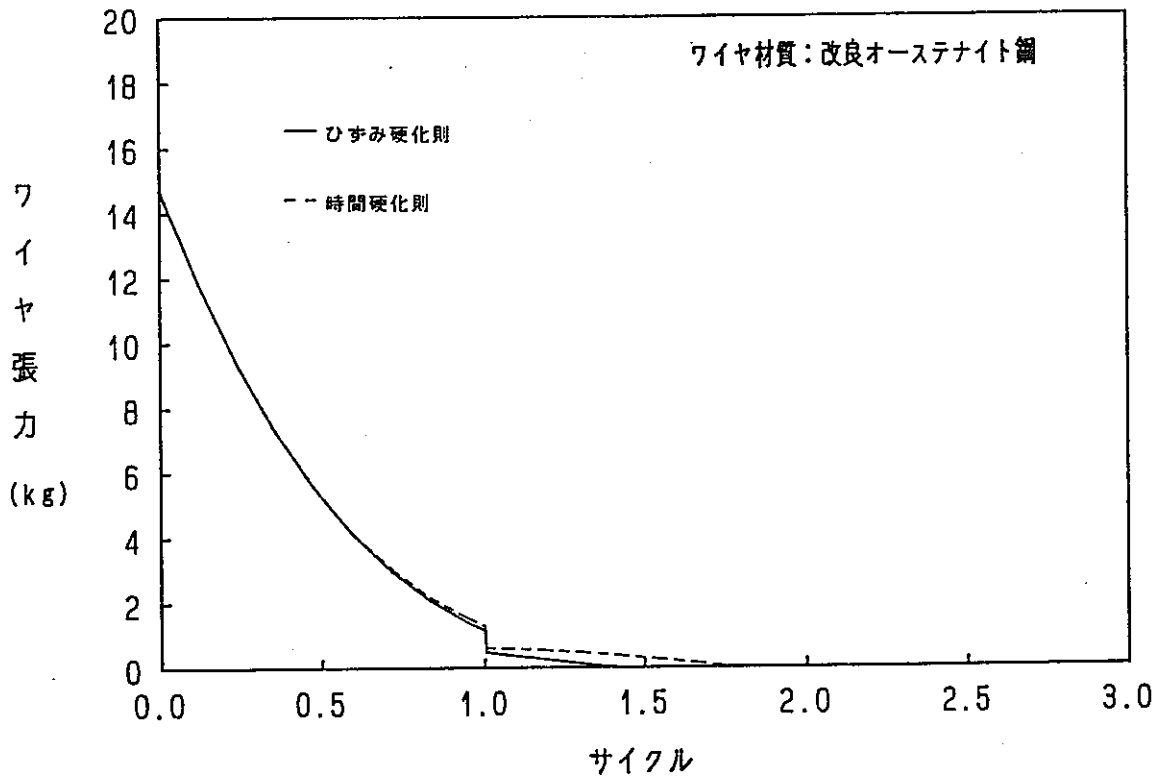


図 5.1-11 ワイヤ張力の比較

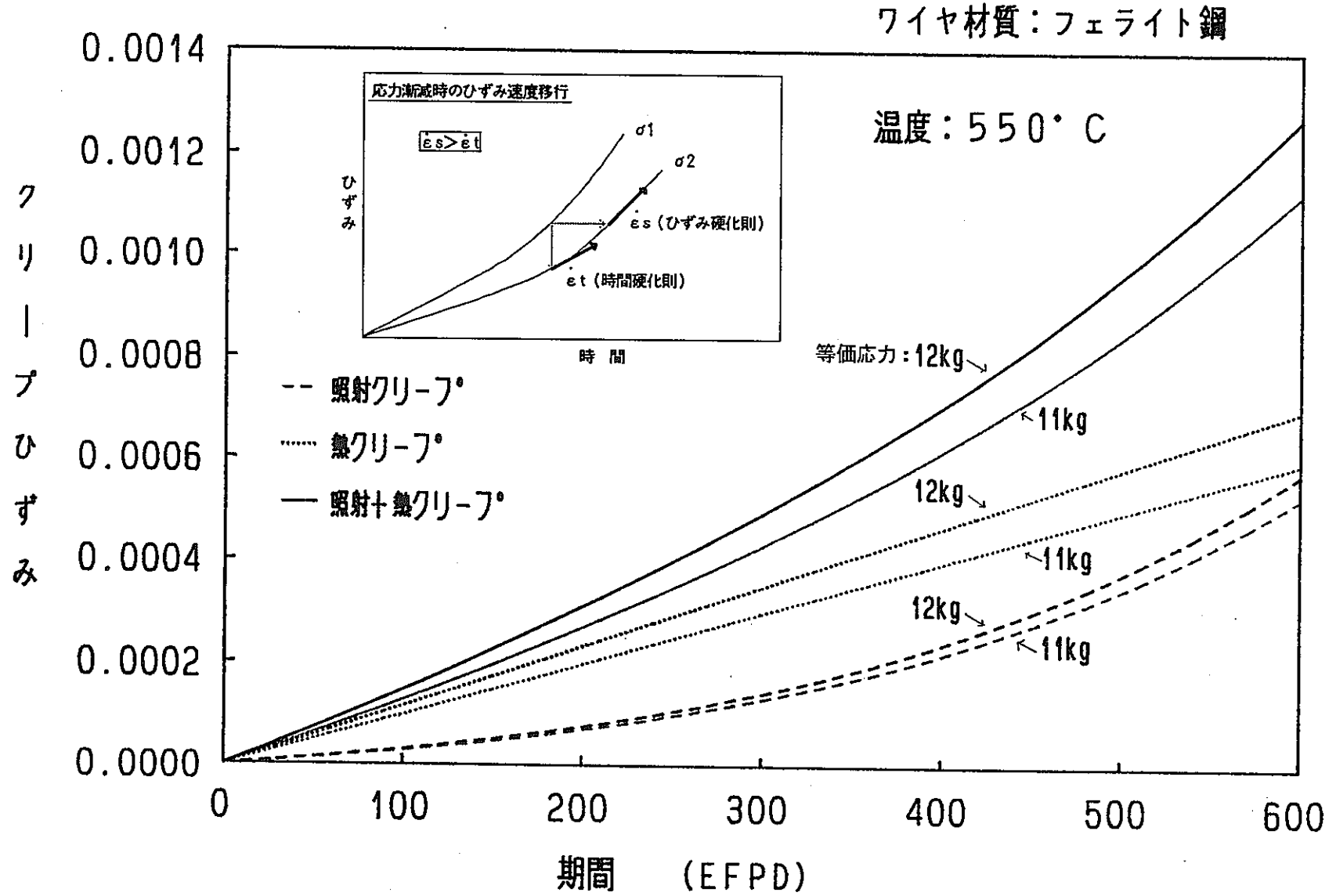


図 5.1-12 クリープ (照射+熱) ひずみの経時変化

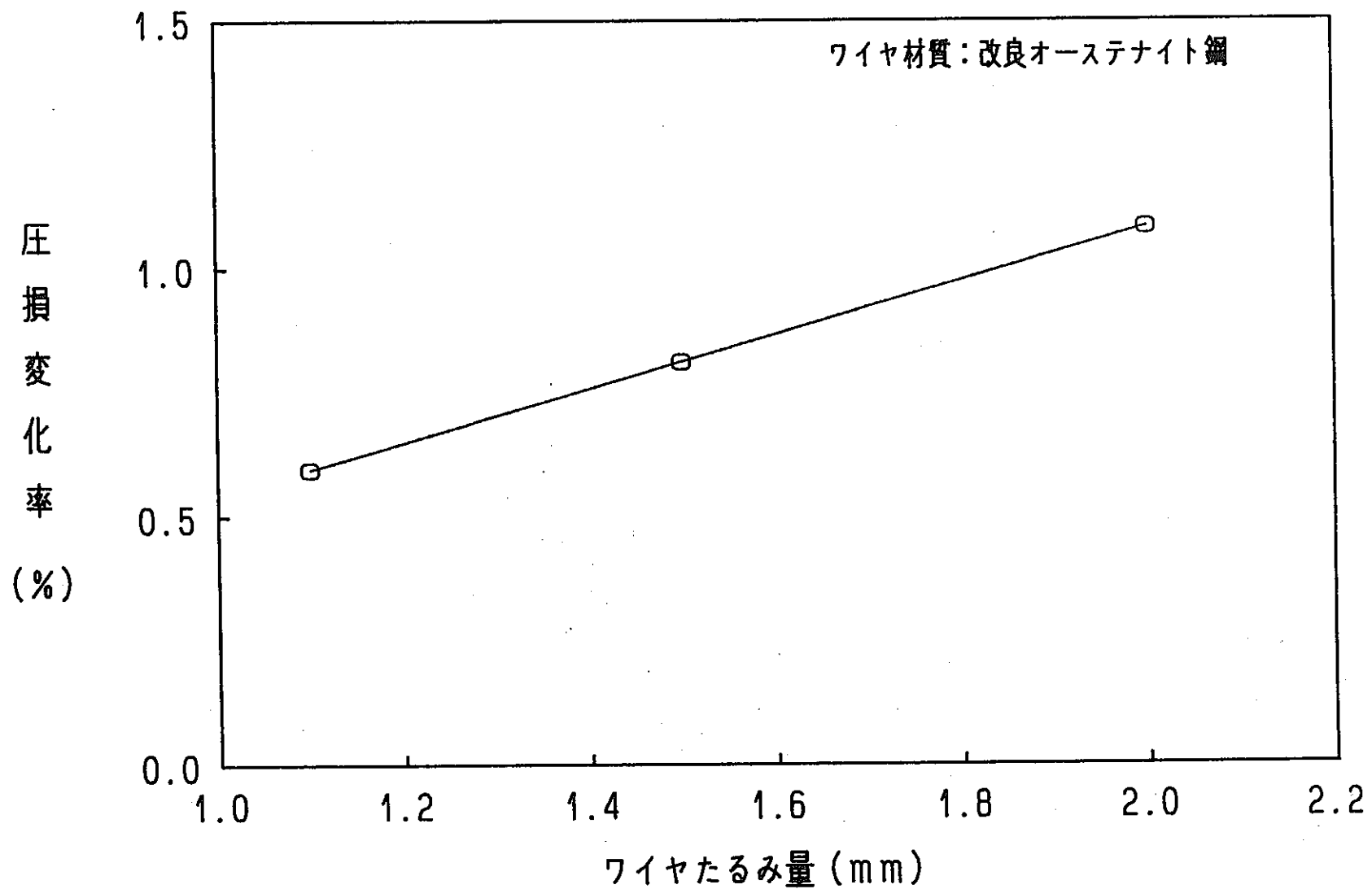


図 5.1-13 ワイヤたるみ量と圧損変化率の関係
(内側炉心最大発熱ピン；ホットスポット温度)

6. 結言

平成2年度FBR大型炉設計研究の燃料ピンについて、被覆管-スペーサワイヤ相互作用計算およびワイヤたるみに起因す燃料ピンバンドル部圧損増加率の評価を行い、以下の結論を得た。

- (1) 寿命末期におけるワイヤたるみ量は、最大で約1.1 mmである。これに起因する燃料ピンバンドル部の圧損増加率は0.6%であるが、流量低下率に換算して0.3%と小さく、流量配分誤差(6~7%)と比較して無視できる。
- (2) 圧損増加率はワイヤたるみ量にほぼ比例し、たるみ量1mm当たりの圧損増加率は0.5~0.6%である。
- (3) 巻付け荷重を増加しても、たるみ量の低減効果は期待できない。
- (4) 被覆管およびワイヤ応力は照射初期において最大となるが、巻付け荷重を「もんじゅ」並みの15 kg/mm²とした場合、被覆管応力は引っ張り側で2.0 kg/mm²、圧縮側で4.6 kg/mm²であり、ワイヤ応力は13 kg/mm²である。

尚、ワイヤ材質だけを耐スエリング性の勝るフェライト鋼に変更するならば、たるみ発生を防止できると考えられるが、フェライト鋼の熱膨張係数が小さいため、照射初期においてワイヤ応力が降伏点を上回ってしまう。

謝 辞

本研究の実施にあたっては、(株)日立製作所 十亀求氏、日立エンジニアリング(株)小川隆氏、および市毛晴夫氏に多大なご協力を頂きました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) J.L. Ratier et al: "Behaviour of Phenix standard fuel", Proc. Int. Conf. on Reliable Fuels for Liquid Metal Reactor, Tucson, 2-51, (1986).
- (2) PNC SN 9410 90-180, "平成2年度 FBR大型炉設計研究-60万kWe級プラント-", (1990年12月).
- (3) PNC SN9410 90-051, "高速炉炉心構成要素用改良オーステナイト鋼(PNC1520)材料強度基準案(暫定値)", (1990年4月).
- (4) PNC SJ 5449 86-001, "「もんじゅ」炉心燃料体強度評価・解析", (1986年3月).
- (5) K. Rehme, Nucl. Technol., vol. 17, pp. 15-23 (Jan. 1973).