

JNC TJ8400 99-075

確率論的燃料設計手法を用いた設計合理化検討

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

1999年3月

株式会社 東芝

本資料は委託契約業務に基づいて作成されたものです。

したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払って下さい。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別な許可を必要としますので、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33
核燃料サイクル開発機構 東海事業所
運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Information Section,
Administration Division,
Tokai Works,
Japan Nuclear Cycle Development Institute,
4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194
Japan

確率論的燃料設計手法を用いた設計合理化検討

松山 慎一郎* 塚井 靖*

要 旨

現行の高速炉燃料設計においては各種の不確かさを保守側に積み重ねて設計裕度を設定している。しかし、将来的には高速炉炉心の高性能化（高線出力化、高燃焼度化）が求められ、燃料設計における設計裕度の切り詰め等の設計合理化が必要となることが考えられる。

確率論的燃料設計手法は、設計裕度の定量的把握が可能となることから過度の保守性を排除するには有効な手段と考えられる。

現行の決定論的設計手法を確率論的手法に変えるためには、設計基準の確立、評価手法の開発、評価の為のデータベースが必要と考えられる。これまで、高速炉燃料設計における燃料最高温度評価、被覆管応力評価、CDFの評価に確率論を適用するために、軽水炉における統計的手法の現状を調査し、BORNFREE-DIRAD、BORNFREE-STRESSを開発してきた。

本研究では物性データに関する検討を行った。被覆管応力評価に關係する、FPガス放出率、内面腐食等の物性について、常陽等のデータに基づき新しい物性式と不確かさを設定した。新しい物性式は線出力等の関数としており、よりさまざまな設計パラメータの燃料挙動に与える感度を評価可能とした。ガス放出のノミナル値は従来式より小さくなり、不確かさは従来式より大きくなった。被覆管応力及びCDFの確率論的評価結果より2σベースでは従来用いてきたものより下がることを示した。これにより燃焼度の増大等を可能であることを示した。この評価結果に基づき、確率論で必要とされるデータを摘出した。

本報告書は、株式会社東芝が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

サイクル機構担当部課室：プルトニウム燃料センター 製造加工部 技術開発室

担当者：小澤 隆之

※ 株式会社 東芝 動力炉開発部 炉心燃料技術担当

March 1999

Study on the Rationalization of Fuel Design by Adopting
the Probabilistic Fuel Design Method

Shinichiro MATSUYAMA* and Yasushi TSUBOI*

Abstract

The design margin for uncertainties is evaluated by accumulating the uncertainties conservatively in the present LMFBR fuel design. However rationalization, such as reduction of design margin for uncertainties, is required to increase the linear heat rate and burn-up in the future.

Probabilistic design method is considered to be effective to cut the excess design margin, because the design margin can be evaluated quantitatively by this method.

In order to apply the probabilistic design method instead of present deterministic method, it is considered that the design criteria, design method and database should be provided. In the previous studies, the LWR statistic design method was investigated and BORNFREE-DIRAD and BORNFREE-STRESS were developed to apply the probabilistic fuel design method to evaluation of CDF, the cladding stress and the maximum fuel temperature.

In this study, the database of material properties was investigated. The FP gas release ratio and FCCI (Fuel cladding chemical Interaction) related to evaluation of cladding stress were investigated based on irradiated data in JOYO and other foreign LMFBR. New correlation of FP gas release ratio and FCCI were proposed and their uncertainties were evaluated. These correlation were made as the function of various parameters such as linear heat rate and burn-up and the sensitivity of these parameter to the fuel performance were able to be evaluated by using these correlation. It was evaluated that the nominal FP gas release ratio by new correlation was smaller than that of old one, and uncertainty of new correlation was larger than that of old one. The 2σ -base values of cladding stress and CDF decreased comparing to these values evaluated by old correlation. It was shown that using new correlation could increase the burn-up. The necessity database for probabilistic method was clarified by above results.

This work was preformed by Toshiba Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Takayuki OZAWA (Fuel Technology Engineering Section Plutonium Fuel Fabrication Division Plutonium Fuel Center Tokai Work)

* Advanced Reactor Engineering Dept. Toshiba Corporation

確立論的燃料設計手法を用いた設計合理化検討

1999年3月

目 次

要旨	.....(i)
Abstract	.....(ii)
表リスト	.....(iv)
図リスト	.....(vi)
1. 序論	.....1-1
2. 挙動評価モデルの見直しに関する検討	.....2.1-1
2.1 F Pガス放出率	.....2.1-1
2.2 被覆管内面腐食	.....2.2-1
2.3 被覆管強度	.....2.3-1
2.4 被覆管外面腐食	.....2.4-1
3. 挙動評価モデルの見直しに基づく BORNFREE コード修正	.....3-1
4. 挙動評価モデルの見直しによる合理化検討	.....4.1-1
4.1 評価条件	.....4.1-1
4.2 挙動評価モデルの見直しによる合理化検討	.....4.2-1
5. 設計合理化に必要なデータ等の摘出	.....5-1
6. まとめ	.....6-1
参考文献	.....R-1
付録A BORNFREE-STRESS 入力データマニュアルの追加	.....A-1
付録B BORNFREE-STRESS 入力データ	.....B-1
付録C BORNFREE-STRESS コード改修の詳細	.....C-1

表リスト

表2. 2-1	内面腐食量と照射条件	2. 2-5
表2. 2-2	内面腐食データ(外面腐食を除いた場合)	2. 2-7
表4. 1-1	最大発熱集合体の最大線出力密度履歴(初装荷燃料)	4. 1-2
表4. 1-2	最大発熱集合体のペレット最高燃焼度履歴(初装荷燃料)	4. 1-2
表4. 1-3	最大発熱集合体の最大高速中性子照射量履歴(初装荷燃料)	4. 1-2
表4. 1-4	線出力履歴	4. 1-3
表4. 1-5	軸方向出力分布(炉心燃料集合体:寿命初期)	4. 1-4
表4. 1-6	軸方向出力分布(ブランケット燃料集合体:寿命末期)	4. 1-5
表4. 1-7	集合体出力履歴	4. 1-6
表4. 1-8	炉心燃料要素仕様	4. 1-7
表4. 1-9	ブランケット燃料要素仕様	4. 1-8
表4. 2-1	従来評価式と見直しモデルの比較 (初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力)	4. 2-7
表4. 2-2	従来評価式と見直しモデルの比較 (初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力)	4. 2-7
表4. 2-3	従来評価式で出力分布誤差を無しとした場合 (初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力)	4. 2-8
表4. 2-4	見直しモデルで出力分布誤差を無しとした場合 (初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力)	4. 2-8
表4. 2-5	従来評価式で出力分布誤差を無しとした場合 (初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力)	4. 2-9
表4. 2-6	見直しモデルで出力分布誤差を無しとした場合 (初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力)	4. 2-9
表4. 2-7	従来評価式でガス放出率分布誤差を無しとした場合 (初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力)	4. 2-10
表4. 2-8	見直しモデルでガス放出率分布誤差を無しとした場合 (初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力)	4. 2-10
表4. 2-9	従来評価式でガス放出率分布誤差を無しとした場合 (初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力)	4. 2-11
表4. 2-10	見直しモデルでガス放出率分布誤差を無しとした場合 (初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力)	4. 2-11
表4. 2-11	従来評価式でガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無し とした場合(初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力)	4. 2-12
表4. 2-12	見直しモデルでガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無し とした場合(初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力)	4. 2-12

表4. 2-13	従来評価式でガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無し とした場合(初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力) · 4. 2-13
表4. 2-14	見直しモデルでガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無し とした場合(初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力) · 4. 2-13
表4. 2-15	従来評価式でガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無し とした場合(初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力) ······ 4. 2-14
表4. 2-16	見直しモデルでガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無し とした場合(初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力) ······ 4. 2-14
表4. 2-17	従来評価式でガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無し とした場合(初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力) · 4. 2-15
表4. 2-18	見直しモデルでガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無し とした場合(初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力) · 4. 2-15
表4. 2-19	見直しモデルで燃焼度を 1. 5 倍に伸長した場合の比較 (初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力) ······ 4. 2-16
表4. 2-20	見直しモデルで燃焼度を 1. 5 倍に伸長した場合の比較 (初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力) ······ 4. 2-16
表4. 2-21	見直しモデルでペレット密度公差を 2. 5 倍に緩和した場合の 比較(初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力) ······ 4. 2-17
表4. 2-22	見直しモデルでペレット密度公差を 2. 5 倍に緩和した場合の 比較(初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力) ······ 4. 2-17
表4. 2-23	見直しモデルで被覆管肉厚公差を 2 倍に緩和した場合の比較 (初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力) ······ 4. 2-18
表4. 2-24	見直しモデルで被覆管肉厚公差を 2 倍に緩和した場合の比較 (初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力) ······ 4. 2-18
表4. 2-25	見直しモデルでO/M比の公差を 1. 5 倍に緩和した場合の比較 (初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力) ······ 4. 2-19
表4. 2-26	見直しモデルでO/M比の公差を 1. 5 倍に緩和した場合の比較 (初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力) ······ 4. 2-19
表4. 2-27	見直しモデルで冷却材入口温度を 30°C 高くした場合の比較 (初装荷炉心燃料要素, 内外圧力差による応力) ······ 4. 2-20
表4. 2-28	見直しモデルで冷却材入口温度を 30°C 高くした場合の比較 (初装荷炉心燃料要素, 端栓部構造不連続による応力) ······ 4. 2-20
表4. 2-29	CDF の比較(従来評価式と見直しモデル) ······ 4. 2-21
表4. 2-30	CDF の比較(見直しモデルによる設計合理化検討ケース) ······ 4. 2-21
表5-1	設計合理化に必要なデータ ······ 5-3
表5-2	精度向上の為の対策 ······ 5-3
表5-3	設計合理化に必要なデータ(物性値) ······ 5-4

図リスト

図2.1-1	ガス放出率データの燃焼度依存性	2.1-5
図2.1-2	ペレット密度～85%のガス放出率データの燃焼度依存性	2.1-6
図2.1-3	データ値と評価式(線出力依存項なし)値の比較 (ペレット密度～85%)	2.1-7
図2.1-4	評価式(線出力依存項なし)値との差の線出力依存性 (ペレット密度～85%)	2.1-8
図2.1-5	データ値と評価式(線出力依存項あり)値の比較 (ペレット密度～85%)	2.1-9
図2.1-6	ペレット密度～93%のガス放出率データの燃焼度依存性	2.1-10
図2.1-7	データ値と評価式(線出力依存項なし)値の比較 (ペレット密度～93%)	2.1-11
図2.1-8	評価式(線出力依存項なし)値との差の線出力依存性 (ペレット密度～93%)	2.1-12
図2.1-9	データ値と評価式(線出力依存項あり)値の比較 (ペレット密度～93%)	2.1-13
図2.1-10	F P ガス放出率評価式の密度依存性(400W/cm)	2.1-14
図2.1-11	F P ガス放出率評価式の密度依存性(300W/cm)	2.1-15
図2.1-12	F P ガス放出率評価式の密度依存性(200W/cm)	2.1-16
図2.1-13	全てのデータ値と今回用いる評価式値の比較	2.1-17
図2.2-1	F C C I のデータ	2.2-8
図2.2-2	HEDLの実験式とデータの関係	2.2-8
図2.2-3	常陽のF C C I データ	2.2-9
図2.2-4	被覆管外面腐食データ	2.2-10
図2.2-5	HEDLのF C C I 式と常陽のデータの関係(95%信頼度レベル)	2.2-11
図2.2-6	HEDLのF C C I 式と常陽のデータの関係(50%信頼度レベル)	2.2-12
図2.2-7	参考評価式と常陽データの関係	2.2-13
図2.2-8	参考検討式と不確かさ($1\sigma = 19 \mu m$)	2.2-14
図2.2-9	評価式とデータの関係	2.2-15
図2.3-1	クリープ強度の照射効果	2.3-2
図2.4-1	被覆管外面腐食データ	2.4-2
図4.1-1	最大線出力密度の履歴	4.1-9
図4.1-2	ペレット最高燃焼度の履歴	4.1-10
図4.1-3	炉心燃料の線出力履歴	4.1-11
図4.1-4	ブランケット燃料の線出力履歴	4.1-11
図4.2-1	F P ガス放出率のノミナル条件での比較	4.2-22

図4. 2-2	F C C I のノミナル条件での比較	4. 2-23
図4. 2-3	出力分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力 (最高温度部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-24
図4. 2-4	出力分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力 (最大発熱部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-25
図4. 2-5	出力分布誤差を無しとした場合の端栓部構造不連続による応力 (上部端栓部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-26
図4. 2-6	ガス放出率分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力 (最高温度部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-27
図4. 2-7	ガス放出率分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力 (最大発熱部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-28
図4. 2-8	ガス放出率分布誤差を無しとした場合の端栓部構造不連続 による応力 (上部端栓部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-29
図4. 2-9	ガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合の 内外圧力差による応力 (最高温度部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-30
図4. 2-10	ガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合の 内外圧力差による応力 (最大発熱部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-31
図4. 2-11	ガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合の 端栓部構造不連続による応力 (上部端栓部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-32
図4. 2-12	ガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無しとした場合の 内外圧力差による応力 (最高温度部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-33
図4. 2-13	ガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無しとした場合の 内外圧力差による応力 (最大発熱部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-34
図4. 2-14	ガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無しとした場合の 端栓部構造不連続による応力 (上部端栓部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-35
図4. 2-15	見直しモデルでの内外圧力差による応力 (最高温度部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-36
図4. 2-16	見直しモデルでの内外圧力差による応力 (最大発熱部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-37
図4. 2-17	見直しモデルでの端栓部構造不連続による応力 (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-38
図4. 2-18	燃焼度伸長の被覆管内圧への影響	4. 2-39

図4. 2-19	燃焼度伸長の内外圧力差による応力への影響	4. 2-40
図4. 2-20	ペレット密度公差緩和の内外圧力差による応力への影響	4. 2-41
図4. 2-21	被覆管肉厚公差緩和の内外圧力差による応力への影響	4. 2-42
図4. 2-22	O/M比公差緩和の内外圧力差による応力への影響	4. 2-43
図4. 2-23	冷却材入口温度上昇の内外圧力差による応力への影響	4. 2-44
図4. 2-24	CDFの従来評価式と見直しモデルの比較(炉心上端部) (初装荷炉心燃料要素, 通常運転, E. O. L)	4. 2-45
図4. 2-25	燃焼度伸長のCDFへの影響	4. 2-46
図4. 2-26	ペレット密度公差緩和のCDFへの影響	4. 2-47
図4. 2-27	被覆管肉厚公差緩和のCDFへの影響	4. 2-48
図4. 2-28	O/M比公差緩和のCDFへの影響	4. 2-49
図4. 2-29	冷却材入口温度上昇のCDFへの影響	4. 2-50
図5-1	物性の不確かさの要因と今回の範囲	5-5

1. 序論

現行の高速炉燃料設計における健全性評価においては、各種の不確かさ（挙動評価モデル・製作公差・照射条件等の不確かさ）を保守的に積み重ねる方式を用いているが、将来的には高速炉炉心の高性能化（高線出力化・高燃焼度化）が求められることが必須であり、燃料設計における設計裕度の切り詰め等の設計合理化が必要となることが考えられている。

この設計合理化のひとつの手段として考えられるのが確率論的燃料設計手法の適用である。

即ち、確率論的手法を燃料設計に適用することにより設計裕度の定量的把握が可能となることから、確率論的燃料設計手法の適用は、過度の保守性を排除して適切な裕度を持たせた合理的な燃料設計を構築する有効な手段と考えられる。現行の設計手法を確率論的手法に替えるためには、(1) 設計基準の確立、(2) 評価手法の開発、(3) 評価のためのデータベース整備の3項目の整備が必要であると考えられる。

これまで、高速炉燃料設計における燃料最高温度評価、被ふく管応力評価、CDF評価等に確率論的手法を適用するため、軽水炉燃料設計で一部導入されている統計的設計手法の現状を調査するとともに、確率論的燃料設計コード「BORNFREE」の改良・整備を実施し、BORNFREE-DIRAD、BORNFREE-STRESS等のコード開発を実施してきた。

今年度は、確率論的燃料設計コードに内蔵されている挙動評価モデルの取扱い方法について、物性データ等の特性に応じた見直しの可能性について検討するとともに、この見直しによる仕様緩和、照射条件合理化等への影響について検討する。また、今後、確率論的手法を適用した設計合理化に向けて取得の必要な物性データ等を摘出する。

2. 挙動評価モデルの見直しに関する検討

2.1 FPガス放出率

FPガス放出率に関しては、常陽及びフェニックスで取得されたデータを検討対象とした^{(2.1-1) (2.1-2)}。これらデータのペレット密度は～85%と～93%のいずれかである。全てのガス放出率データを、ペレット密度～85%とペレット密度～93%に分類し図2.1-1に示す。ペレット密度～93%のガス放出率がペレット密度～85%のそれより小さいという傾向が見られる。ここでは、まずこれらのデータをペレット密度別(～85%、～93%)にわけ、それぞれの密度でのガス放出率の燃焼度及び線出力依存性について検討を行い、最後にガス放出率の密度依存性について検討する。

2.1.1 ペレット密度～85%データの検討

(1) 燃焼度依存性の検討

図2.1-2に、ペレット密度～85%のガス放出率を示す。

もんじゅデータより包絡線として設計された設計式は以下となる。これを図2.1-2中に実線で示す。定数項は30%である。

$BU < 70$

$$F = 30 + 1.88 \times 10^{-3} \cdot BU - 1.804 \times 10^{-8} \cdot BU^2 + 7.828 \times 10^{-14} \cdot BU^3$$

$BU > 70$

$$F = 100 \quad (2.1-1)$$

F : FPガス放出率

BU : 燃焼度 (MWd/t)

また、これまで Bornfree で使用していた従来評価式は定数項 15%がノミナル値である。これを図2.1-2中に破線で示す。従来評価式に対して図中のデータの標準偏差を計算すると 19.1%となる。もんじゅ設計式に対して図2.1-2に示す全てのデータを取りいれ、もんじゅ設計式の定数項のみを変化させて標準偏差が最小となるカーブを求めると(2.1-2)式となり、定数項は2%で標準偏差は13.8%である。

$$F = 2 + 1.88 \times 10^{-3} \cdot BU - 1.804 \times 10^{-8} \cdot BU^2 + 7.828 \times 10^{-14} \cdot BU^3 \quad (2.1-2)$$

この直線を図2.1-2中に点線で示す。得られた標準偏差が最小となる(2.1-2)式により求めた値とデータ値を比較すると図2.1-3となる。

(2) 線出力依存性の検討

(2.1-2)式をそのまま用い、(2.1-2)式と各データ点の差をとり、横軸に線出力を取ったものを図2.1-4に示す。この図から分かるように、各データ点との差は、線出力に依存していると言える。各データ点との差は線出力に比例する、としてフィッティングした直線を図2.1-4中に示す。この直線式から線出力項を決定し、この項を(2.1-2)式に加えると、(2.1-3)式に示すように線出力の効果を含めたガス放出率評価式が作成される。

$$F_{85} = 2 + 1.88 \times 10^{-3} \cdot BU - 1.804 \times 10^{-8} \cdot BU^2 + 7.828 \times 10^{-14} \cdot BU^3 + 0.143 \times LHR - 49.14 \quad (2.1-3)$$

F_{85} : F P ガス放出率(ペレット密度 85%)

BU : 燃焼度 (MWd/t)

LHR : 線出力 (W/cm)

得られたガス放出評価式(2.1-3)式により求めた値とデータ値を比較すると図2.1-5となる。標準偏差は10.2%である。

以上の検討の結果、ペレット密度～85%のF P ガス放出率データに対して、Bornfree 従来評価式では標準偏差が 19.1%であり、燃焼度依存性のみを考慮(2.1-2式)すると標準偏差は 13.8%となり、さらに線出力依存性を考慮すると 10.2%となる。

2.1.2 ペレット密度～93%データの検討

(1) 燃焼度依存性の検討

図2.1-6に、ペレット密度～93%のガス放出率を示す。

もんじゅデータより包絡線として得られた設計式を図中に実線で示す。また、Bornfree で使用していた従来設計式を図中に破線で示す。従来評価式に対して図中のデータの標準偏差を計算すると 28.3%となる。もんじゅ設計式に対して図2.1-6に示す全てのデータを取りいれ、もんじゅ設計式の定数項のみを変化させて標準偏差が最小となるカーブを求めるとき(2.1-4)式となり、定数項は-9%で標準偏差は 14.0%である。

$$F = -9 + 1.88 \times 10^{-3} \cdot BU - 1.804 \times 10^{-8} \cdot BU^2 + 7.828 \times 10^{-14} \cdot BU^3 \quad (2.1-4)$$

この直線を図2.1-6中に点線で示す。得られた標準偏差が最小となる(2.1-4)式

により求めた値とデータ値を比較すると図 2.1-7 となる。

(2) 線出力依存性の検討

ペレット密度～85%と同様の方法で線出力依存性を検討する。(2.1-4)式と各データ点の差をとり、横軸に線出力を取って図 2.1-8 に示す。なお、一部のデータは線出力の値が範囲(220～250W/cm, 250～280W/cm, 280～310W/cm)で与えられていることから、各範囲のデータの線出力は全て中間値(235W/cm, 265W/cm, 295W/cm)と仮定した。

各データ点との差は線出力に比例するとしてフィッティングした直線を図 2.1-8 中に示す。この直線式から線出力項を決定し、この項を(2.1-4)式に加えると、(2.1-5)式に示すように線出力の効果を含めたガス放出率評価式が作成される。

$$F_{93} = -9 + 1.88 \times 10^{-3} \cdot BU - 1.804 \times 10^{-8} \cdot BU^2 + 7.828 \times 10^{-14} \cdot BU^3 + 0.115 \times LHR - 31.17 \quad (2.1-5)$$

F_{93} : F P ガス放出率(ペレット密度 93%)

BU : 燃焼度 (MWd/t)

LHR : 線出力(W/cm)

得られたガス放出評価式(2.1-5)式により求めた値とデータ値を比較すると図 2.1-9 となる。標準偏差は 12.8%である。

以上の検討の結果、ペレット密度～93%の F P ガス放出率データに対して、Bornfree 従来評価式では標準偏差が 28.3%であり、燃焼度依存性のみを考慮(2.1-4 式)すると標準偏差は 14.0%となり、さらに線出力依存性を考慮すると 12.8%となる。

2.1.3 ペレット密度依存性の検討

ペレット密度 85%のガス放出評価式(2.1-3)式と、ペレット密度 93%のガス放出評価式(2.1-5)式を比較する。線出力 400W/cm の場合を図 2.1-10 に、線出力 300W/cm の場合を図 2.1-11 に、線出力 200W/cm の場合を図 2.1-12 にそれぞれ示す。図 2.1-10 及び 2.1-11 を見てわかるように、線出力 400W/cm 及び線出力 300W/cm では、ペレット密度～93%のガス放出率が小さくなっている、燃料密度の増加とともにガス放出率は小さくなる、というこれまで一般的に言われている定説と一致している。

しかし、(2.1-3)式と(2.1-5)式の線出力項の傾きの違いから、その差は線出力低下とともに徐々に小さくなり、低線出力である 200W/cm の場合には、ペレット密度～93%のガス放出率がほぼ等しくなっている。

今回の合理化検討の評価における線出力は、300W/cm 前後からそれより高い値であり、(2.1-3)式と(2.1-5)式を用いた場合にガス放出率の燃料密度依存性の傾向は線出力が高い程ガス放出率が高くなる領域での評価となる。

従って、今回の合理化検討における評価では、ガス放出率をペレット密度=93%では(2.1-3)式と、ペレット密度=85%では(2.1-5)式と等しいとし、それ以外のペレット密度では、(2.1-3)式と(2.1-5)式を線形内、外挿した値であると考える。これは(2.1-6)式で表される。

$$F = \frac{F_{93} - F_{85}}{93 - 85} (\rho - 85) + F_{85} \quad (2.1-6)$$

F : F P ガス放出率(任意のペレット密度)

F_{93} : F P ガス放出率(ペレット密度 93%)

F_{85} : F P ガス放出率(ペレット密度 85%)

ρ : ペレット密度(%)

得られたガス放出評価式(2.1-6)式により求めた値と、ペレット密度～85%及び～93%の全てのデータ値を比較すると図 2.1-13 となる。標準偏差は 11.7% となる。

2.1.4 今回用いる評価式

以上の検討より、今回の評価は以下の式を用いて確率評価を行うものとする。

$$F = \frac{F_{93} - F_{85}}{93 - 85} (\rho - 85) + F_{85} \quad (2.1-7)$$

ただし、 $F > 100$ の場合は $F = 100$ 、 $F < 0$ の場合は $F = 0$

$$\begin{aligned} F_{85} = & 2 + 1.88 \times 10^{-3} \cdot BU - 1.804 \times 10^{-8} \cdot BU^2 + 7.828 \times 10^{-14} \cdot BU^3 \\ \text{ここで、} & + 0.143 \times LHR - 49.14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{93} = & -9 + 1.88 \times 10^{-3} \cdot BU - 1.804 \times 10^{-8} \cdot BU^2 + 7.828 \times 10^{-14} \cdot BU^3 \\ & + 0.115 \times LHR - 31.17 \end{aligned}$$

BU : 燃焼度(MWd/t)

LHR : 線出力(W/cm)

ρ : ペレット密度(%)

不確かさは、定数項に対して絶対値で $1\sigma = 11.7\%$ とする。

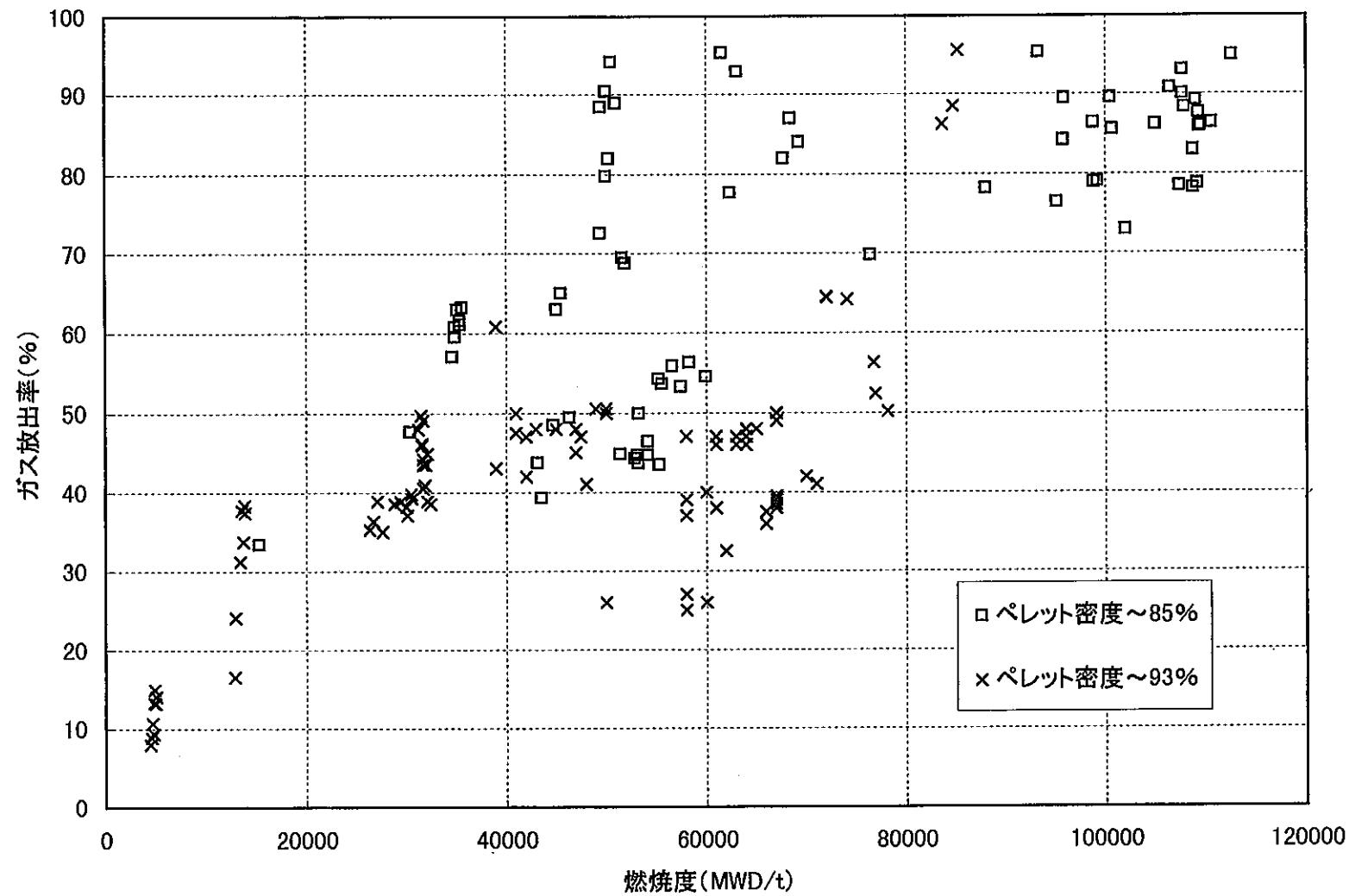


図2.1-1 ガス放出率データの燃焼度依存性

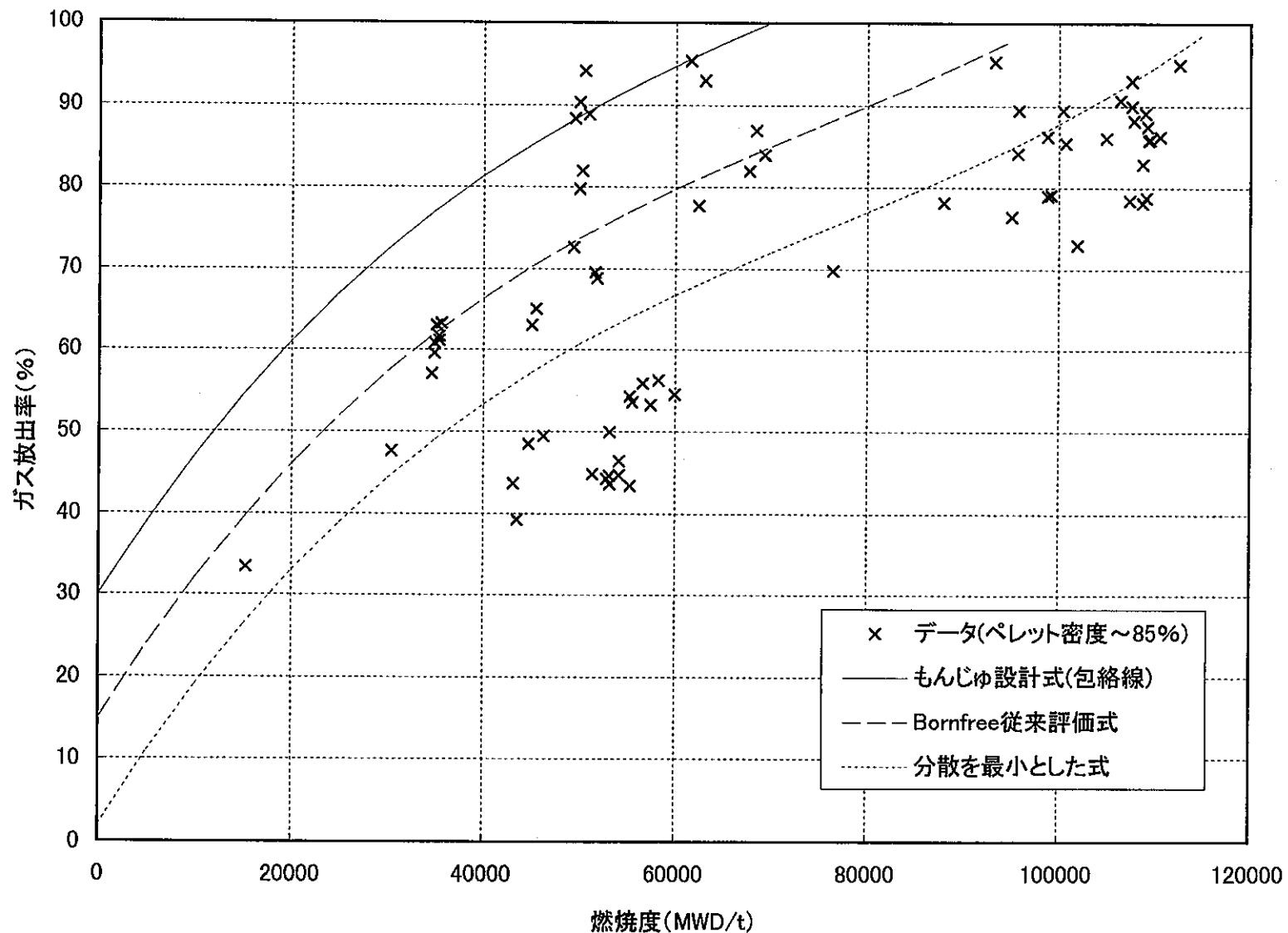


図2.1-2 ペレット密度～85%のガス放出率データの燃焼度依存性

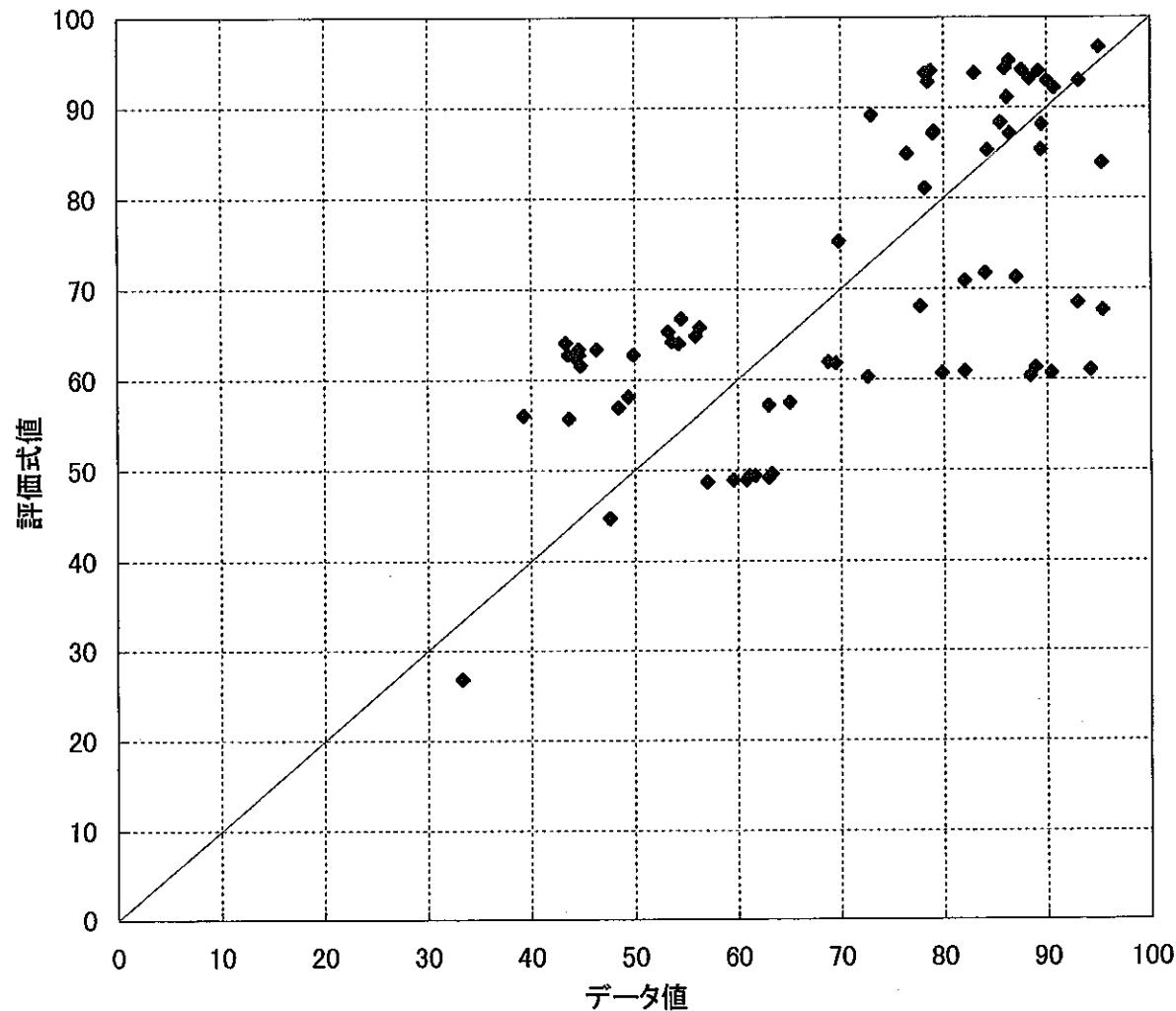


図2.1-3 データ値と評価式(線出力依存項なし)値の比較(ペレット密度～85%)

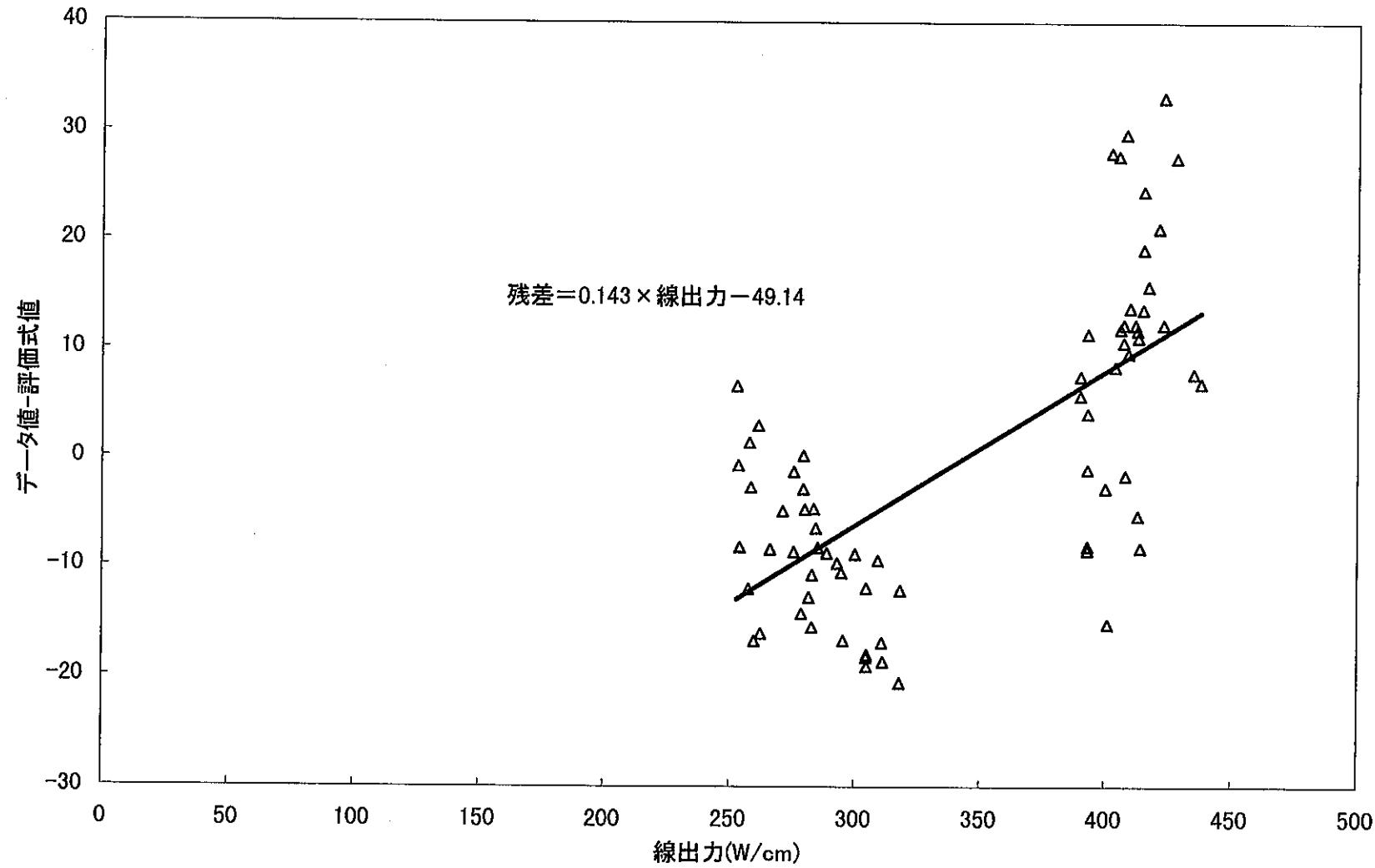


図2.1-4 評価式(線出力依存項なし)値との差の線出力依存性(ペレット密度～85%)

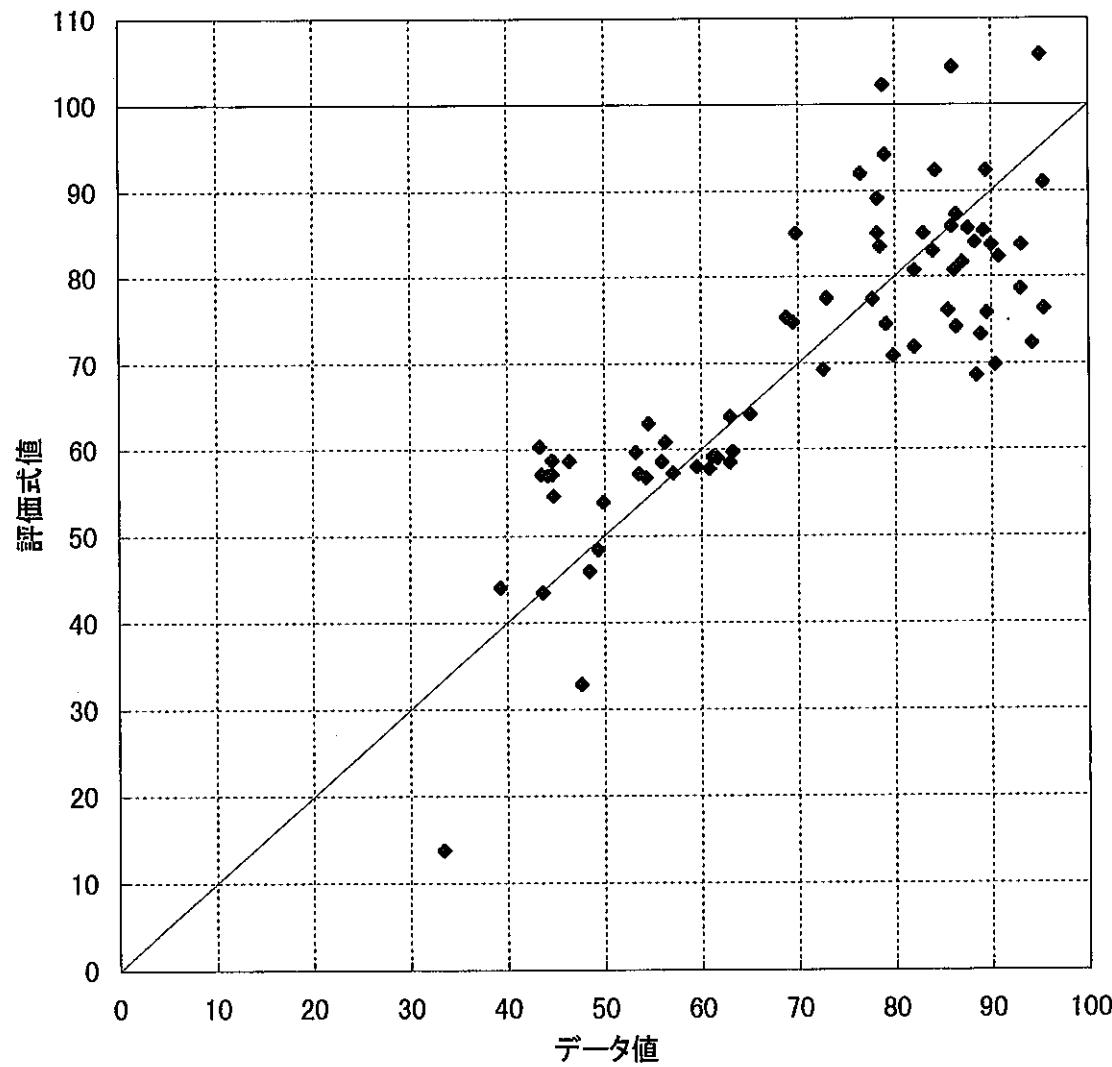


図2.1-5 データ値と評価式(線出力依存項あり)値の比較(ペレット密度～85%)

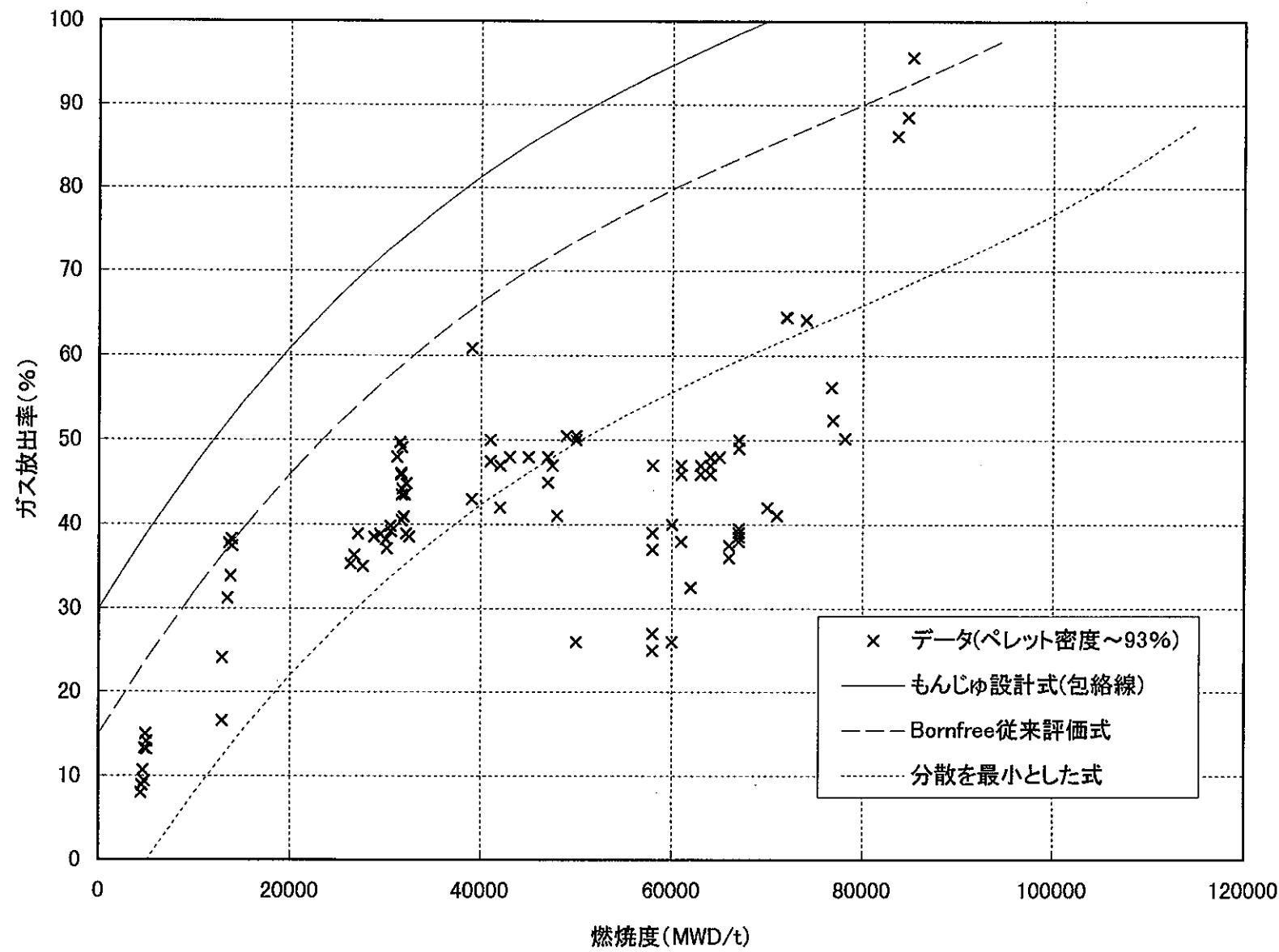


図2.1-6 ペレット密度～93%のガス放出率データの燃焼度依存性

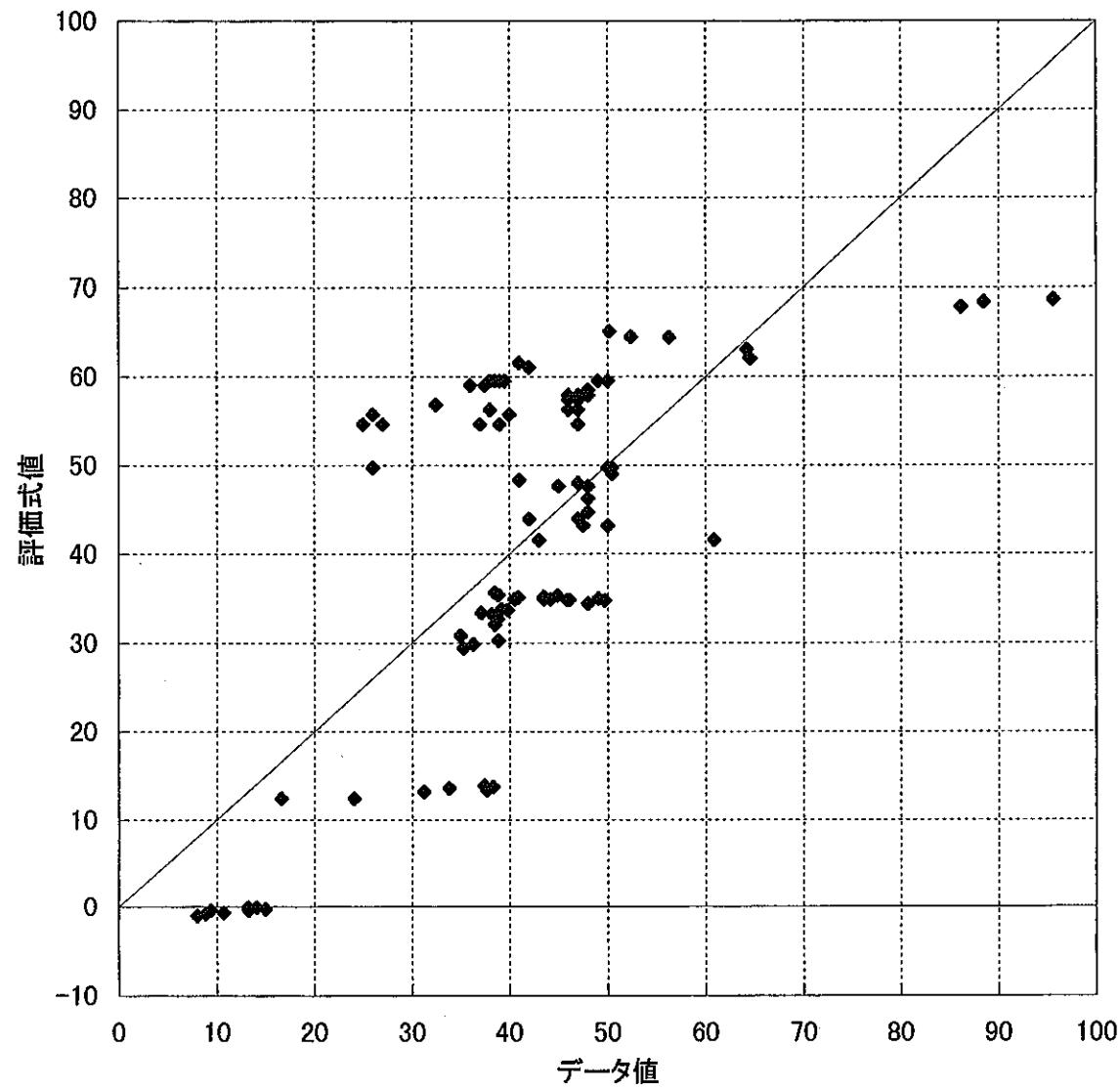


図2.1-7 データ値と評価式(線出力依存項なし)値の比較(ペレット密度～93%)

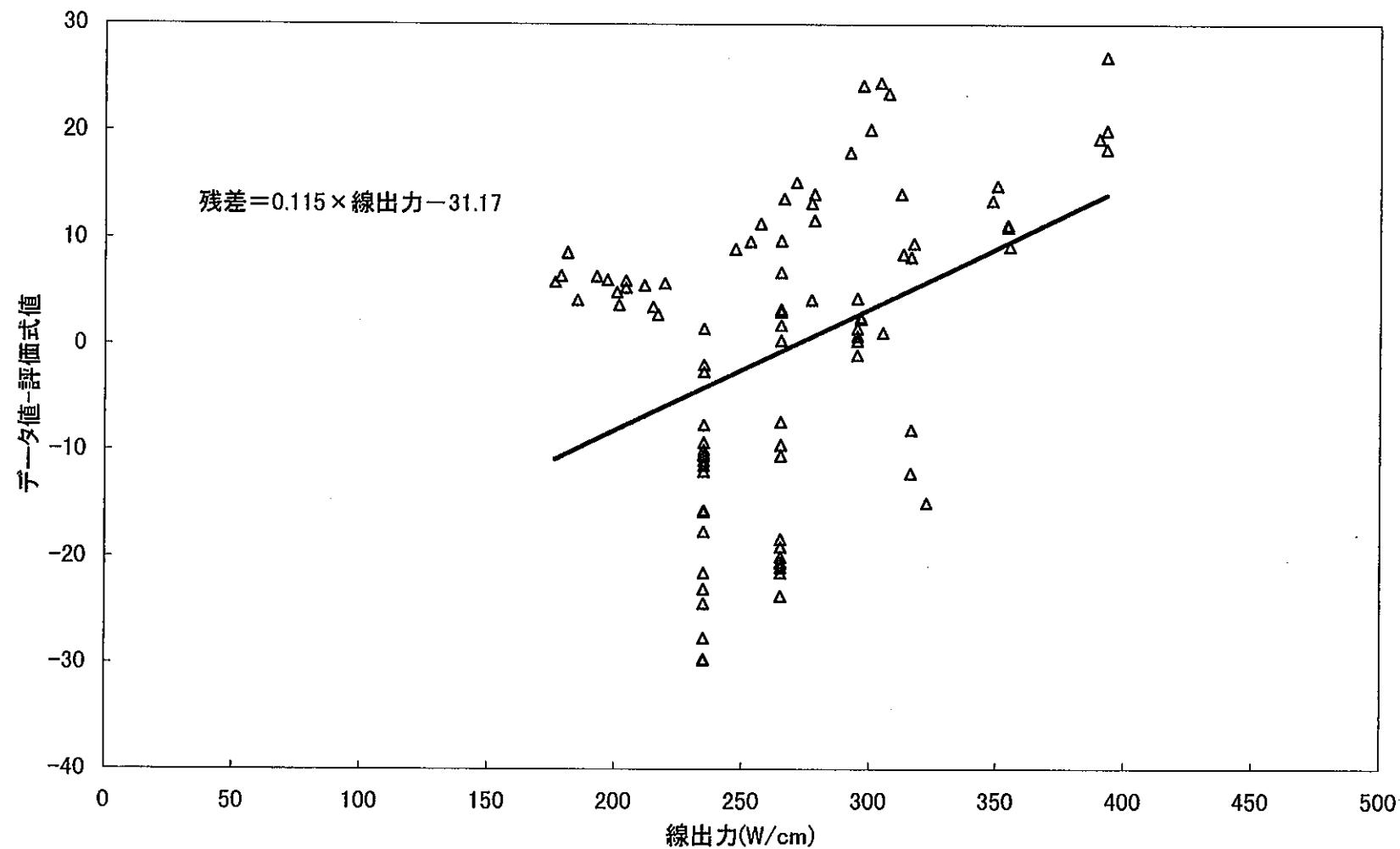


図2.1-8 評価式(線出力依存項なし)値との差の線出力依存性(ペレット密度～93%)

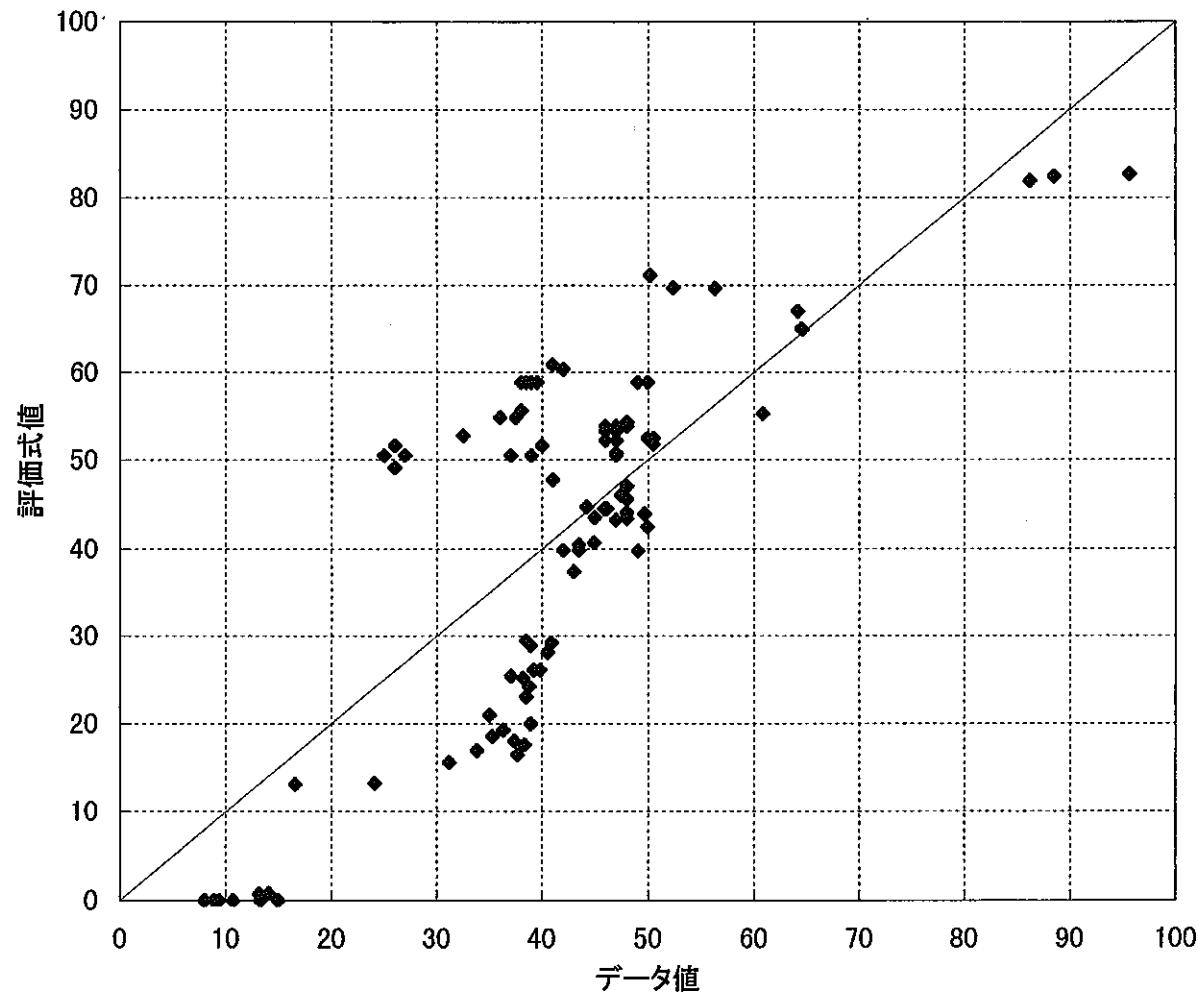


図2.1-9 データ値と評価式(線出力依存項あり)値の比較(ペレット密度～93%)

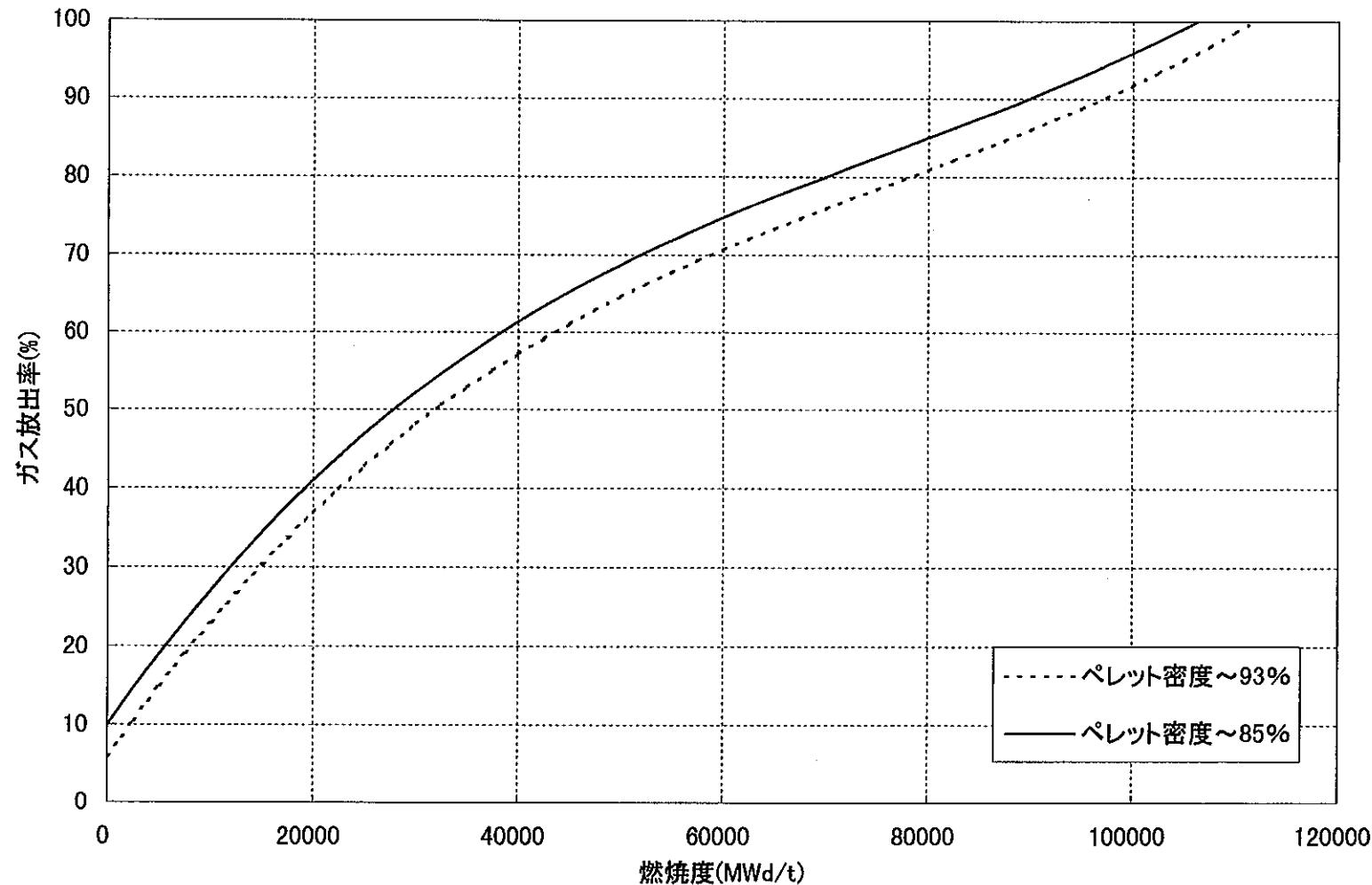


図2.1-10 FPガス放出率評価式の密度依存性
(400W/cm)

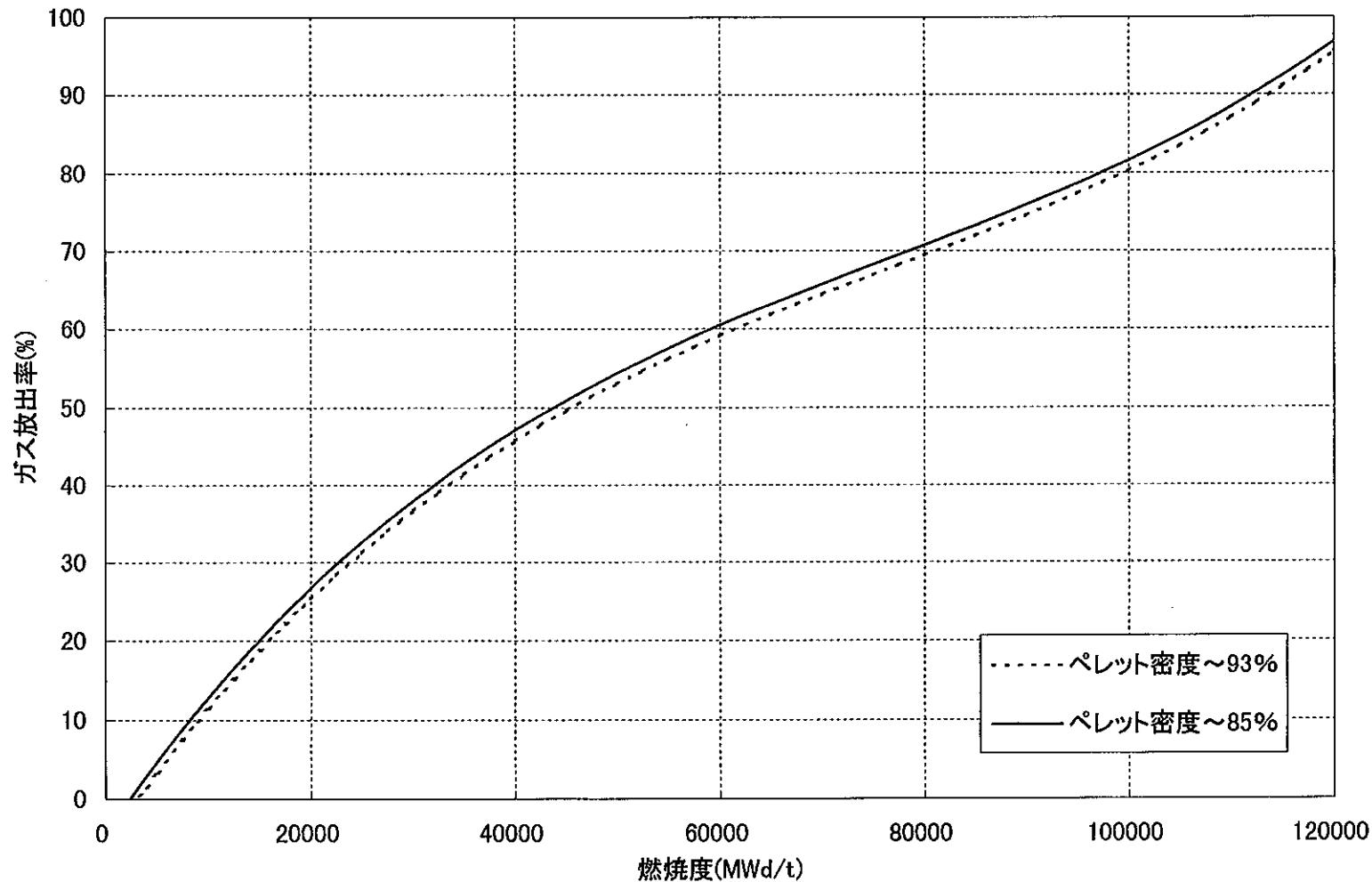


図2.1-11 FPガス放出率評価式の密度依存性
(300W/cm)

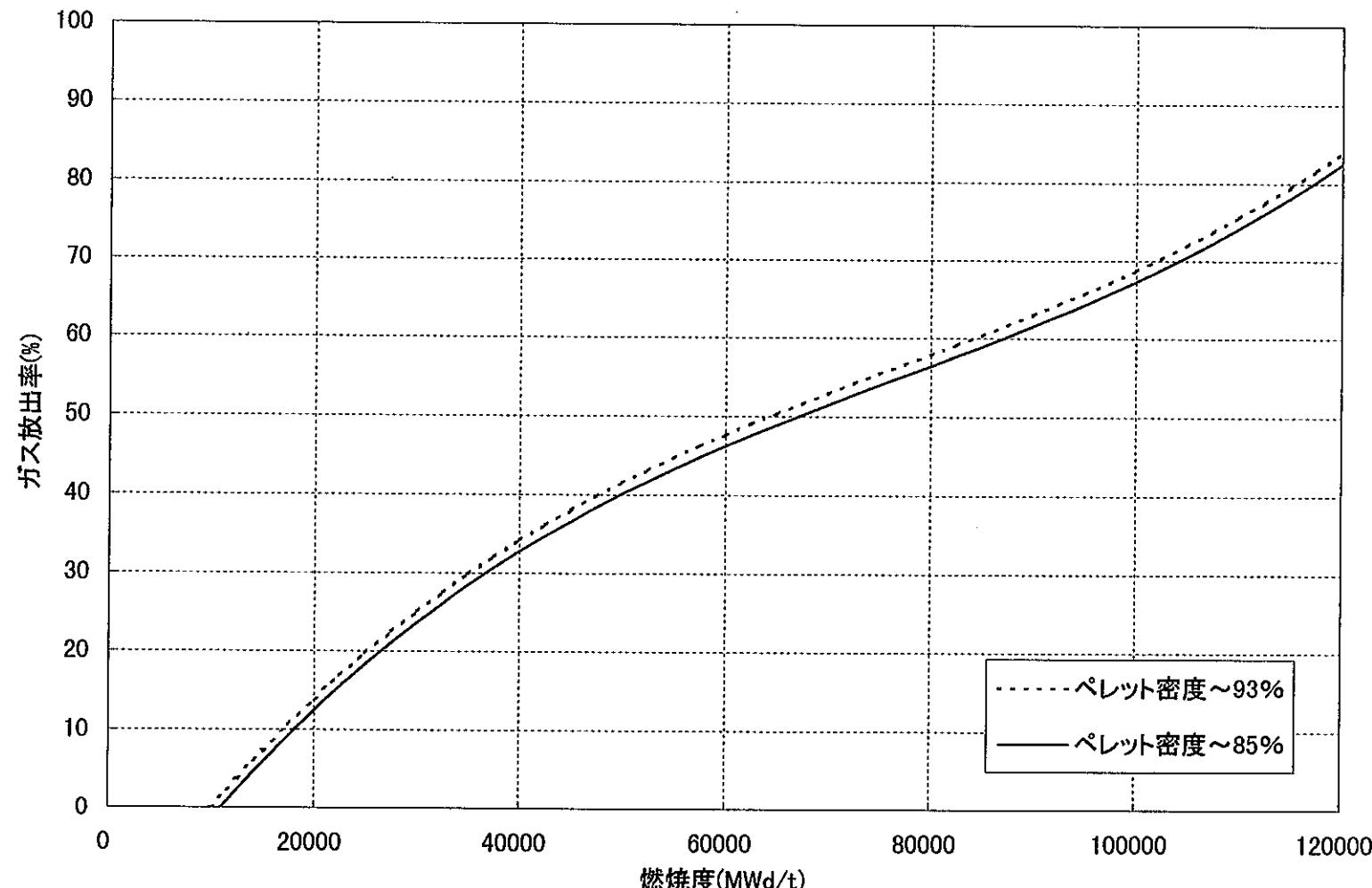


図2.1-12 FPガス放出率評価式の密度依存性
(200W/cm)

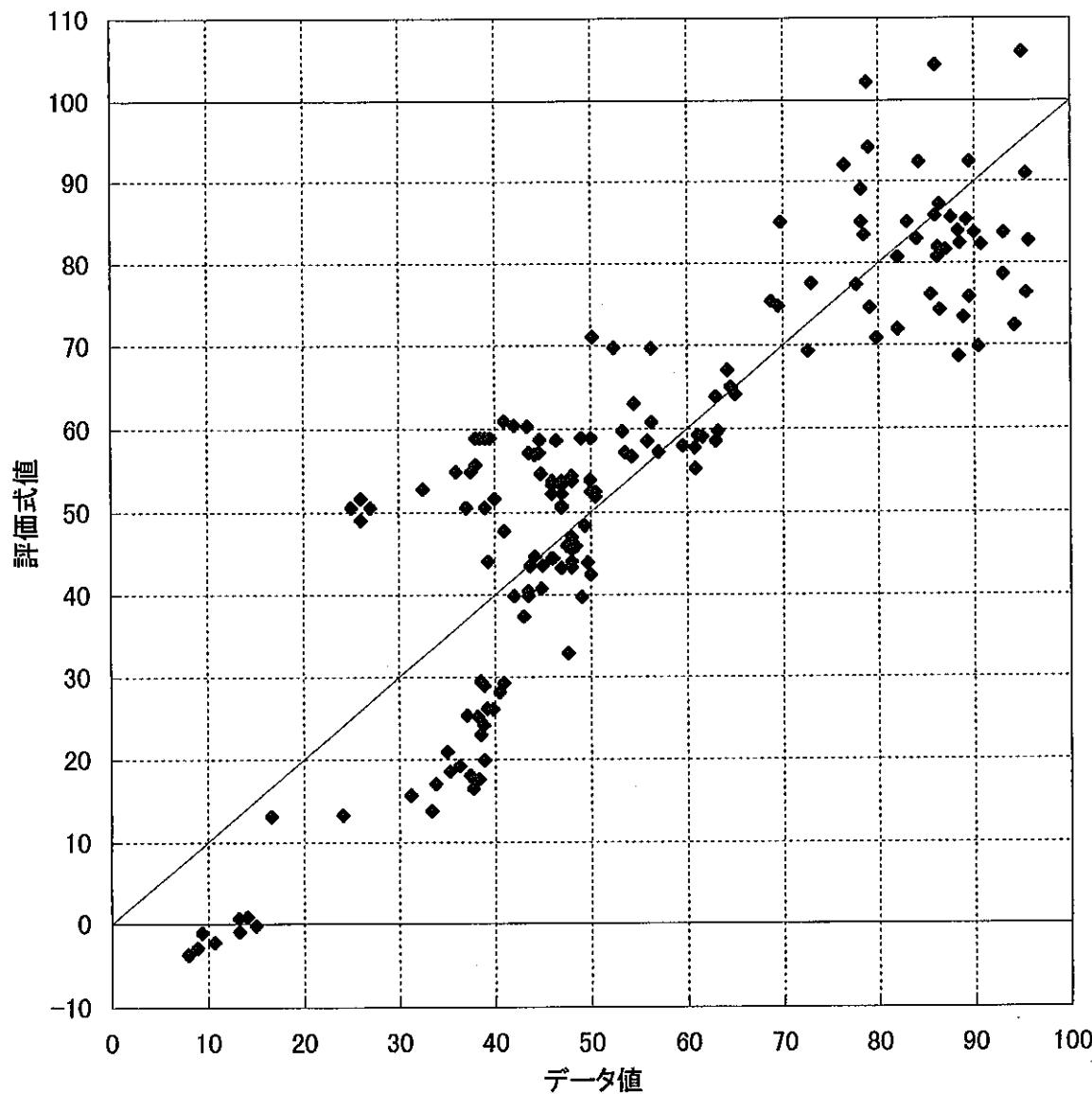


図2.1-13 全てのデータ値と今回用いる評価式値の比較

2. 2 被覆管内面腐食

2. 2. 1 内面腐食の取り扱い方法の検討

内面腐食については燃焼度 10 万 MWd/t ではおよそ 100 μm で上限とした設計式が用いられている。

480 < T ≤ 600

$$0 < B \leq 15000 \quad C = 35$$

$$15000 < B \leq 60000 \quad C = 1.2 \times 10^{-5} \cdot (T - 480) \cdot (B - 15000) + 35$$

$$60000 < B \leq 140000 \quad C = 1.2 \times 10^{-5} \cdot (T - 480) \cdot (60000 - 15000) + 35$$

600 < T ≤ 700

$$0 < B \leq 15000 \quad C = 35$$

$$15000 < B \leq 60000 \quad C = 1.2 \times 10^{-5} \cdot (600 - 480) \cdot (B - 15000) + 35$$

$$60000 < B \leq 140000 \quad C = 100$$

C : 内面腐食厚さ (μm)

B : 燃焼度 (MWd/t)

T : 温度 (°C)

本評価式は図 2. 2-1 に基づくデータ^{2.2-1)}より設定され妥当性を示されている。

このようにもんじゅの評価式は燃焼度及び温度のみの関数であり、しかも温度も 600°C 以上では同じ値となるので設計パラメータ間相互の相関の記述という意味では情報の少ない整理式である。

一方、HEDL の実験式^{2.2-2)}では温度、O/M、燃焼度、データの散らばりの関数としている。

$$D = 0.3198 (O/M - 1.935) (B+K) (T-739)$$

但し $O/M > 1.935$ 、 $B > 0$ 、 $T > 739$

D : 内面腐食による侵食深さ

O/M : 製造時 O/M

B : 局所燃焼度 (at%)

T : 被覆管内面温度 (k)

K Confident Level (%)

16.67 95

13.98 90

この HEDL の評価式では図 2.2-2 に示すようにデータは 95%の信頼度でこの式で入っている。

ここで常陽のデータベースに本式を適用し、評価式位置づけを検討する。表 2.2-1 に常陽でのデータ^{2.2-3)}を示す。これを燃焼度を横軸に示したものを図 2.2-3、に示す。このデータは、被覆管の減肉量で外面腐食も含まれている。これより、外面腐食を除外して評価する。

(1) 外面腐食の評価

外面腐食の式（もんじゅ設計式）

$$Cr = 4.927 \times 10^8 \times \exp(1.647 \times 10^4 / (T + 273.15)) \times O_x$$

Cr : 外面腐食量

O_x : 酸素濃度 (PPM)

T: 温度 (°C)

この式を図 2.2-4^{2.2-1)}と比較すると、650°Cで 9 μm であり上限式相当である。この図のノミナルと上限の関係を用いてノミナル条件の式を下記の様に設定する。

$$Cr_{nominal} = 1.8 \times 10^{10} \times \exp(2.0 \times 10^4 / (T + 273.15)) \times O_x$$

この式を用いて外面腐食量をデータより除く。

評価条件

酸素濃度 (O_x) : 3PPM

燃焼期間 : 線出力と下記ピン仕様と燃焼度より燃焼期間を求める。

ピン仕様 ピン径 5.5mm

内径 4.8mm

スミア 87%

密度 10.96g/cm³

表 2.2-2 にその評価結果を示す。なお表 2.2-2 では被覆管温度が 500°C以上のデータに対して評価した。これより分かるように被覆管温度が低いため外面腐食量は高々数 μm 程度となり、殆ど結果は変わらない。このデータを HEDL の評価式とを比較したものを見ると、図 2.2-5、図 2.2-6 に示す。FCCI の値が大きい側で HEDL の 95%式に比較すると実験点が大きくずれたものが多数現れている。すなわち常陽のデータから判断すると、FCCI

は HEDL の実験式では非保守側になっていることがわかる。

ここで改良オーステナイト鋼での参考検討用^{2,2-4)}のフィッティング式として下記を常陽のデータと比較する。

$$C=1.195E-5 \cdot (B-10000)^{0.2} \cdot \exp(-E/RT) \cdot (O/M-1.93) +45$$

C : 腐食量 (μm)

B : 燃焼度 (MWd/t)

T : 被覆管内面温度 (K)

O/M : 製造時 O/M

E : 活性化エネルギー 12500(cal/mol)

R : 気体定数 1.987 (cal/molK)

比較結果を図 2.2-7 に示す。常陽のデータを殆ど包絡している。図 2.2-8 には定数項の $45\mu\text{m}$ を 0 としたものをノミナルとしてプロットしたものと示す。この場合 $1\sigma=19\mu\text{m}$ となり 3σ 相当ではデータがすべて包絡されている。

3種類の式を温度 685°C 、O/M=1.97 で燃焼依存値を図 2.2-9 に示す。参考式がもつとも大きくなる。

以上より常陽のデータベースで今回の評価は以下の式を用いて確率評価を行うものとする。

$$C=1.195E-5 \cdot (B-10000)^{0.2} \cdot \exp(-E/RT) \cdot (O/M-1.93) +A$$

C : 腐食量 (μm)

B : 燃焼度 (MWd/t)

T : 被覆管内面温度 (K)

O/M : 製造時 O/M

E : 活性化エネルギー 12500(cal/mol)

R : 気体定数 1.987 (cal/molK)

不確かさ A に対して設定して

ノミナル A=0

1σ $19\mu\text{m}$

と設定する。

これにより、O/M、温度等の感度を取り込んで O/M の公差に対する感度等を検討可能である。

2.2.2 内面腐食に関するデータの取得について

今回は外面腐食を評価式による評価で除いたが、内面腐食のデータは今後は外面腐食を除いたものでデータを整理することが必要である。

表2.2-1 内面腐食量と照射条件 (1/2)

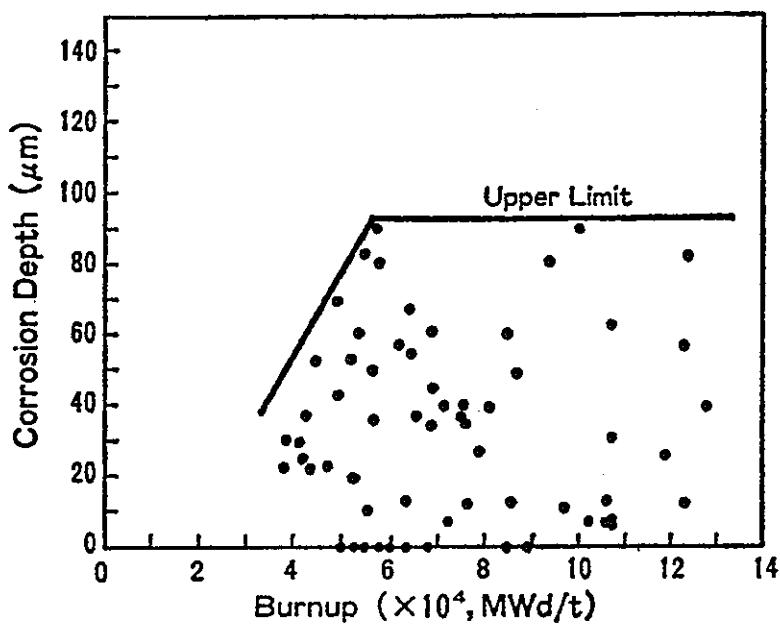
A	B	C	D	E	F	G	H	I
集合体名	試験片名	D F C B (mm)	燃焼度 (MWd/t)	L H R (W/cm)	O/M比	被覆管内面温度 (°C)	腐食形態	最大腐食量 (m)
PFD001	816422	6.0	24234	159.2	1.98	386.5	-	0
	816423	25.0	25555	250.1	1.98	400.8	-	0
	816442	125.0	33053	321.7	1.98	454.0	-	0
	816462	231.0	37142	381.0	1.98	504.9	-	0
	816463	250.0	37197	381.5	1.98	513.8	-	0
	816494	435.0	29428	286.7	1.98	583.5	-	0
	816484	535.0	20335	167.4	1.98	599.3	M	20
	816485	545.0	19401	127.3	1.98	599.5	M	15
	815226	28.8	24937	252.9	1.96	403.6	-	0
	815244	250.8	37181	361.4	1.96	514.1	-	0
	815262	422.0	39497	297.0	1.96	579.8	-	0
	815282	521.5	21601	210.8	1.96	598.9	M	17
PFD003	706422	4.0	10500	145.1	1.97	383.8	-	0
	706423	14.0	10802	192.3	1.97	391.2	-	0
	706442	115.0	13850	303.6	1.97	446.2	-	0
	706472	230.0	15823	346.5	1.97	499.1	-	0
	706473	240.0	15826	345.5	1.97	503.6	-	0
	7064A3	425.0	12647	277.5	1.97	571.0	-	0
	7064C3	526.0	8721	188.7	1.97	587.5	-	0
	7054C4	545.0	7970	117.6	1.97	588.3	-	0
	70A625	21.9	11238	250.0	1.97	397.4	-	0
	70A644	247.9	16064	362.1	1.97	510.5	-	0
	70A662	434.6	12539	279.8	1.97	575.9	-	0
	70A682	535.5	8677	190.8	1.97	587.8	-	0
PFD010	636422	4.0	3583	127.5	1.97	382.8	-	0
	636423	25.0	3810	214.7	1.97	396.9	-	0
	636442	125.0	4905	267.4	1.97	445.1	-	0
	636472	230.0	5489	309.0	1.97	490.9	-	0
	636473	250.0	5495	309.4	1.97	499.5	-	0
	6364A3	435.0	4278	241.2	1.97	563.1	-	0
	6364C3	535.0	2787	133.6	1.97	577.0	-	0
	6364C4	545.0	2634	101.3	1.97	577.3	-	0
PFD029	918422	4.0	36361	122.8	1.97	383.3	-	0
	916423	25.0	38071	203.8	1.97	396.8	-	0
	916442	126.0	46632	249.3	1.97	443.0	-	0
	916462	230.0	51653	275.9	1.97	487.1	-	0
	916463	249.0	51711	278.3	1.97	495.1	-	0
	916483	436.0	40637	217.5	1.97	559.5	-	0
	9164A4	540.0	26950	110.2	1.97	574.5	M	14
	9164A5	550.0	25615	80.3	1.97	574.9	M	10
	916025	24.3	39655	209.7	1.97	397.5	-	0
	916044	224.7	53793	287.3	1.97	489.4	-	0
	916063	435.1	42592	227.9	1.97	565.5	M	9
	916083	539.6	28855	118.6	1.97	581.6	M	8
PFD036	935822	278.0	50505	232.3	1.96	468.8	-	0
	936422	278.0	45428	209.1	1.96	482.9	-	0
	937022	278.0	39108	180.1	1.96	447.9	-	0
PFD068	C06422	276.0	47998	339.2	1.98	515.5	M	3
	C084711	425.0	39280	278.1	1.98	587.8	M	3
	C084911	551.0	23768	95.6	1.98	584.8	M	13
PFD105	A06422	25.0	39435	229.3	1.97	399.8	-	0
	A06442	250.0	57055	330.8	1.97	504.1	M	5
	A064B4	531.0	33000	174.3	1.97	585.6	I	23
	A064B5	542.0	31406	132.5	1.97	585.9	I	30
	A06022	25.9	40218	233.8	1.97	401.0	-	0
	A08042	255.6	57898	335.6	1.97	408.9	-	0
	A06062	537.5	33087	153.9	1.97	590.4	M	25

表2.2-1 内面腐食量と照射条件 (2/2)

A	B	C	D	E	F	G	H	I
集合体名	試験片名	D F C B	燃焼度 (mm)	L H R (MWd/t)	O/M比 (W/cm)	被覆管内面温度 (°C)	腐食形態	最大腐食量 (m)
PFD209	C76422		25.0	48883	187.7	1.97	397.1	-
	C76442		250.0	85235	250.1	1.97	487.5	-
	C76473		547.0	34694	84.7	1.97	562.3	M
	C7A622		25.5	51230	210.6	1.97	399.5	-
	C7A642		138.2	62785	263.2	1.97	452.8	-
	C7A662		250.2	86423	289.6	1.97	503.7	-
	C7A882		395.0	60375	257.2	1.97	560.3	-
	C7A6A2		545.5	37359	159.1	1.97	590.2	M
	C85821		249.0	80278	276.4	1.98	474.0	-
PFD153	C86422		25.0	55717	192.2	1.98	397.6	-
	C86442		247.0	75222	259.1	1.98	490.0	-
	C86474		546.0	40041	90.7	1.98	568.8	M
	C87021		249.0	88811	237.2	1.97	459.8	-
	C86022		24.8	58129	221.7	1.98	398.8	-
	C86042		135.6	71768	281.4	1.98	455.3	-
	C86062		245.3	78535	310.9	1.98	508.1	-
	C86082		395.0	69498	272.0	1.98	569.6	-
	C860A2		553.1	41417	153.3	1.98	598.7	M
PFD254	D85822		251.0	56146	247.0	1.98	464.0	-
	D86422		25.0	37241	164.3	1.98	395.2	-
	D86442		251.0	51130	225.2	1.98	483.7	-
	D86463		533.0	29355	113.5	1.98	559.7	-
	D87042		251.0	44490	196.2	1.98	457.3	-
	D86022		23.3	39791	188.6	1.98	396.7	-
	D86042		140.0	50112	238.5	1.98	450.7	-
	D86062		248.3	54575	259.5	1.98	498.1	-
	D86082		395.1	48296	222.2	1.98	551.5	M
Phenix P-0	D860A2		549.9	28574	120.6	1.98	576.7	M
	XD03A2		289.4	51776		1.98	528.0	C
	XD03C2		470.7	45594		1.98	553.0	I
	XD07C2		489.5	98503		1.955	567.0	M
	XD0781		252.0	108371	440.9	1.955	521.0	M
	XD01H2		470.1	102260		1.98	585.0	C
	XD06E4		470.0	40347		1.95	568.0	M
	XD0551		186.0	92990	422.6	1.95	497.0	M
	XD0572		242.0	96647	439.7	1.95	518.0	M
XD	XD0592		341.0	97692	443.3	1.95	551.0	M
	XD05D2		472.0	87766	399.3	1.95	585.0	M
	XD05G2		631.0	62690	284.9	1.95	605.0	M
	XD0992		242.0	94854	437.9	1.99	517.0	M
	XD09D2		341.0	95880	443.3	1.99	551.0	C
	XD09J2		494.0	83574	386.1	1.99	590.0	C
	XD09N2		631.0	81527	285.2	1.99	605.0	C
	XD1051		233.0	110853	437.5	1.955	514.0	M
	XD1071		335.0	112509	444.1	1.955	549.0	M
XD	XD1091		486.0	99138	391.3	1.955	588.0	M
	XD1081		625.0	73441	289.9	1.955	605.0	M
	XD11A1		233.0	110032	437.5	1.98	514.0	I
	XD11C1		334.0	111705	444.2	1.98	549.0	C
	XD11F1		485.0	98403	391.3	1.98	588.0	C
XD	XD11H1		626.0	72700	289.1	4.98	597.0	M
								82

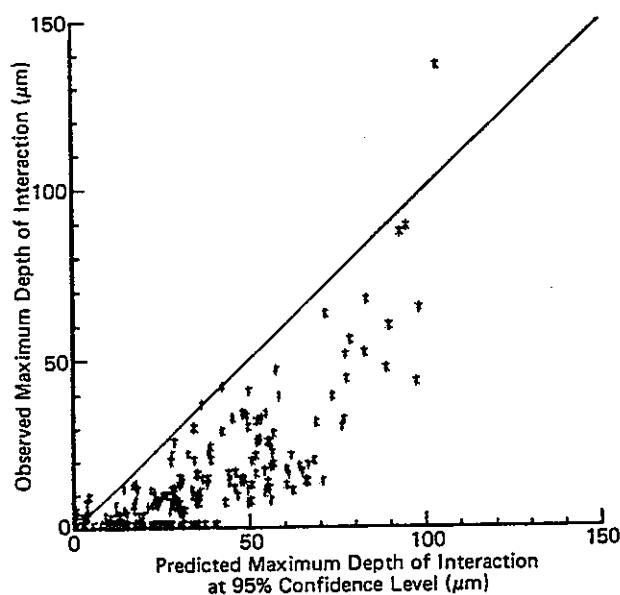
表2.2-2 内面腐食データ（外面腐食を除いた場合）

集合体名	試験片名	D F C B (mm)	燃焼度 (MWh/t)	E L H R (W/cm)	F O/M比	G 皮膜管内面温度 (°C)	H 腐食形態	I 最大腐食量 μm	J 最大腐食 (NA腐食除外)		I-J
									μm	μm	
	816462	231.0	37142	381.0	1.98	504.9	-	0	0	0	
	816463	250.0	37197	381.5	1.98	513.8	-	0	0	0	
	816494	435.0	29428	286.7	1.98	583.5	-	0	0	0	
	816484	535.0	20335	167.4	1.98	599.3	M	20	18	2	
	816485	545.0	19401	127.3	1.98	599.5	M	15	12	3	
	815244	250.8	37181	361.4	1.98	514.1	-	0	0	0	
	815262	422.0	39497	297.0	1.96	579.8	-	0	0	0	
	815282	521.5	21601	210.8	1.96	598.9	M	17	15	2	
	706472	230.0	15823	346.5	1.97	499.1	-	0	0	0	
	706473	240.0	15826	345.5	1.97	503.6	-	0	0	0	
	7064A3	425.0	12647	277.5	1.97	571.0	-	0	0	0	
	706403	526.0	8721	188.7	1.97	587.5	-	0	0	0	
	7054C4	545.0	7970	117.6	1.97	588.3	-	0	0	0	
	70A644	247.9	16064	362.1	1.97	510.5	-	0	0	0	
	70A662	434.6	12539	279.8	1.97	575.9	-	0	0	0	
	70A682	535.5	8677	190.8	1.97	587.8	-	0	0	0	
	636472	230.0	5489	309.0	1.97	490.9	-	0	0	0	
	636473	250.0	5495	309.4	1.97	499.5	-	0	0	0	
	6364A3	435.0	4278	241.2	1.97	563.1	-	0	0	0	
	6364C3	535.0	2787	133.6	1.97	577.0	-	0	0	0	
	6364C4	545.0	2634	101.3	1.97	577.3	-	0	0	0	
	916462	230.0	51653	275.9	1.97	487.1	-	0	0	0	
	916463	249.0	51711	278.3	1.97	495.1	-	0	0	0	
	916483	436.0	40637	217.5	1.97	559.5	-	0	0	0	
	9164A4	540.0	26950	110.2	1.97	574.5	M	14	11	3	
	9164A5	550.0	25615	80.3	1.97	574.9	M	10	6	4	
	916044	224.7	53793	287.3	1.97	489.4	-	0	0	0	
	916063	435.1	42592	227.9	1.97	565.5	M	9	8	1	
	916083	539.6	28855	118.6	1.97	581.6	M	8	5	3	
PFD036	935822	278.0	50505	232.3	1.96	468.8	-	0	0	0	
	936422	278.0	45428	209.1	1.96	482.9	-	0	0	0	
PFD068	C06422	276.0	47998	339.2	1.98	515.5	M	3	3	0	
	C084711	425.0	39280	278.1	1.98	587.8	M	3	2	1	
	C084911	551.0	23768	95.6	1.98	584.8	M	13	9	4	
	A06442	250.0	57055	330.8	1.97	504.1	M	5	5	0	
	A064B4	531.0	33000	174.3	1.97	585.6	I	23	21	2	
	A064B5	542.0	31406	132.5	1.97	585.9	I	30	27	3	
	A06062	537.5	33087	153.9	1.97	590.4	M	25	22	3	
	C76442	250.0	85235	250.1	1.97	487.5	-	0	0	0	
	C76473	547.0	34694	84.7	1.97	562.3	M	13	10	3	
	C7A662	250.2	86423	289.6	1.97	503.7	-	0	0	0	
	C7A882	395.0	60375	257.2	1.97	580.3	-	0	0	0	
	C7A6A2	545.5	37359	159.1	1.97	590.2	M	7	4	3	
PFD153	C85821	249.0	80278	276.4	1.98	474.0	-	0	0	0	
	C86442	247.0	75222	259.1	1.98	490.0	-	0	0	0	
	C86474	546.0	40041	90.7	1.98	568.8	M	14	10	4	
	C86062	245.3	78535	310.9	1.98	508.1	-	0	0	0	
	C86082	395.0	69498	272.0	1.98	569.6	-	0	0	0	
	C880A2	553.1	41417	153.3	1.98	598.7	M	9	4	5	
	D86442	251.0	51130	225.2	1.98	483.7	-	0	0	0	
	D86463	533.0	29355	113.5	1.98	559.7	-	0	0	0	
	D86062	248.3	54575	259.5	1.98	498.1	-	0	0	0	
	D86082	395.1	48296	222.2	1.98	551.5	M	2	1	1	
	D880A2	549.9	28574	120.6	1.98	576.7	M	17	14	3	
Phenix P-0	XD03A2	289.4	51776		1.98	528.0	C	57	56	1	
	XD0302	470.7	45594		1.98	553.0	I	66	64	2	
	XD07C2	489.5	98503		1.955	567.0	M	20	18	2	
	XD0781	252.0	108371	440.9	1.955	521.0	M	6	6	0	
	XD01H2	470.1	102260		1.98	585.0	C	80	76	4	
	XD06E4	470.0	40347		1.95	568.0	M	15	12	3	
	XD0551	186.0	92990	422.6	1.95	497.0	M	7	7	0	
	XD0572	242.0	96647	439.7	1.95	518.0	M	7	7	0	
	XD0592	341.0	97892	443.3	1.95	551.0	M	8	8	0	
	XD05D2	472.0	87766	399.3	1.95	585.0	M	11	10	1	
	XD05G2	631.0	62680	284.9	1.95	605.0	M	36	33	3	
	XD0992	242.0	94854	437.9	1.99	517.0	M	13	13	0	
	XD0992	341.0	95880	443.3	1.99	551.0	C	31	31	0	
	XD09J2	494.0	83574	386.1	1.99	590.0	C	81	79	2	
	XD09N2	631.0	81527	285.2	1.99	605.0	C	61	57	4	
	XD1051	233.0	110853	437.5	1.955	514.0	M	7	7	0	
	XD1071	335.0	112509	444.1	1.955	549.0	M	17	17	0	
	XD1091	486.0	99138	391.3	1.955	588.0	M	27	25	2	
	XD1081	625.0	73441	289.9	1.955	605.0	M	48	44	4	
	XD11A1	233.0	110032	437.5	1.98	514.0	I	53	53	0	
	XD11C1	334.0	111705	444.2	1.98	549.0	C	38	38	0	
	XD11F1	485.0	98403	391.3	1.98	588.0	C	96	94	2	
	XD11H1	626.0	72700	289.1	1.98	597.0	M	82	79	3	



FCCI corrosion depth of cold-worked
SUS 316 stainless steel fuel pins

図 2.2-1 FCCI のデータ



Measured and predicted (95% confidence level) maximum depths of interaction.

図 2.2-2 HEDL の実験式とデータの関係

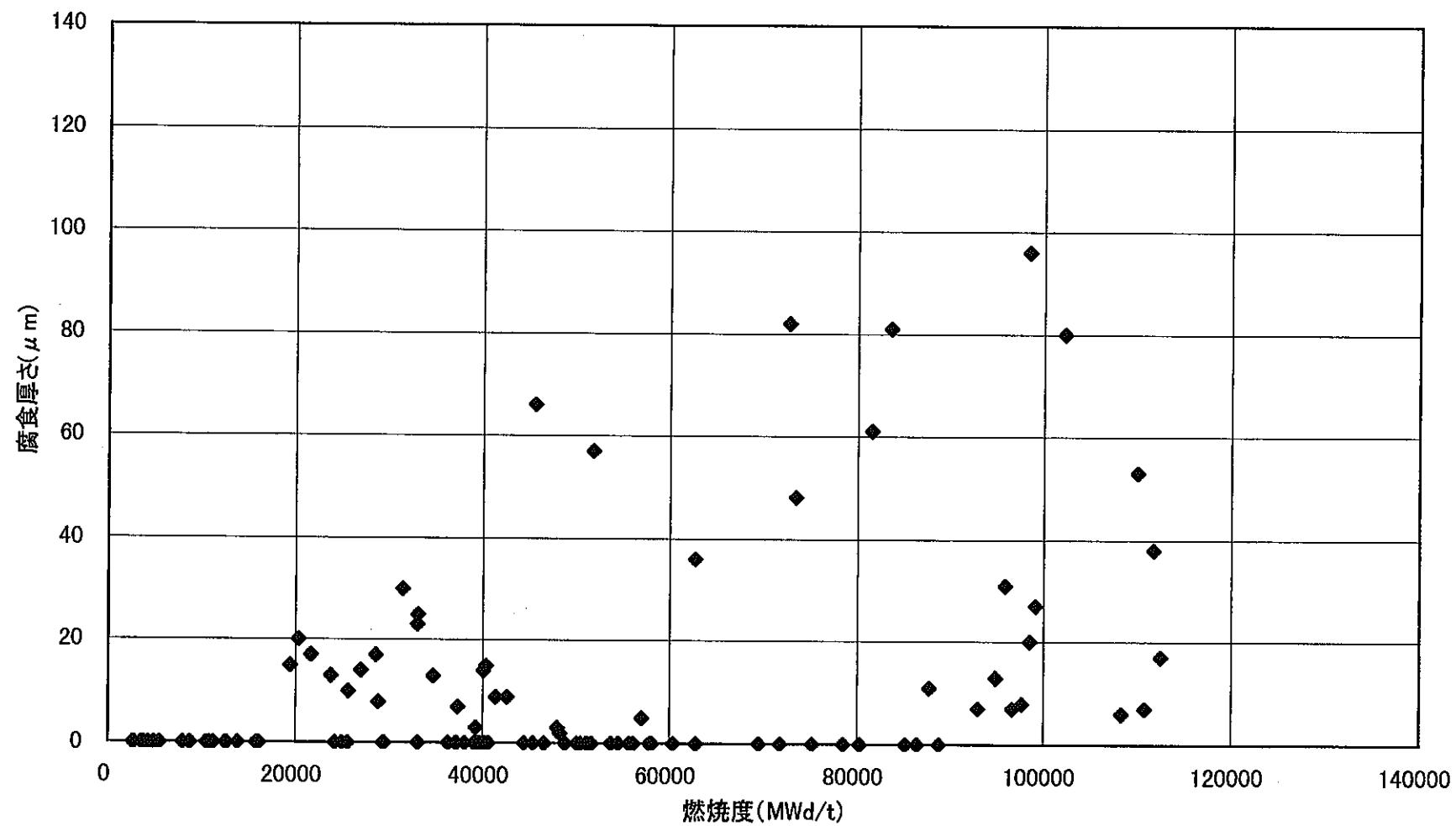


図2.2-3 常陽のFCCIデータ

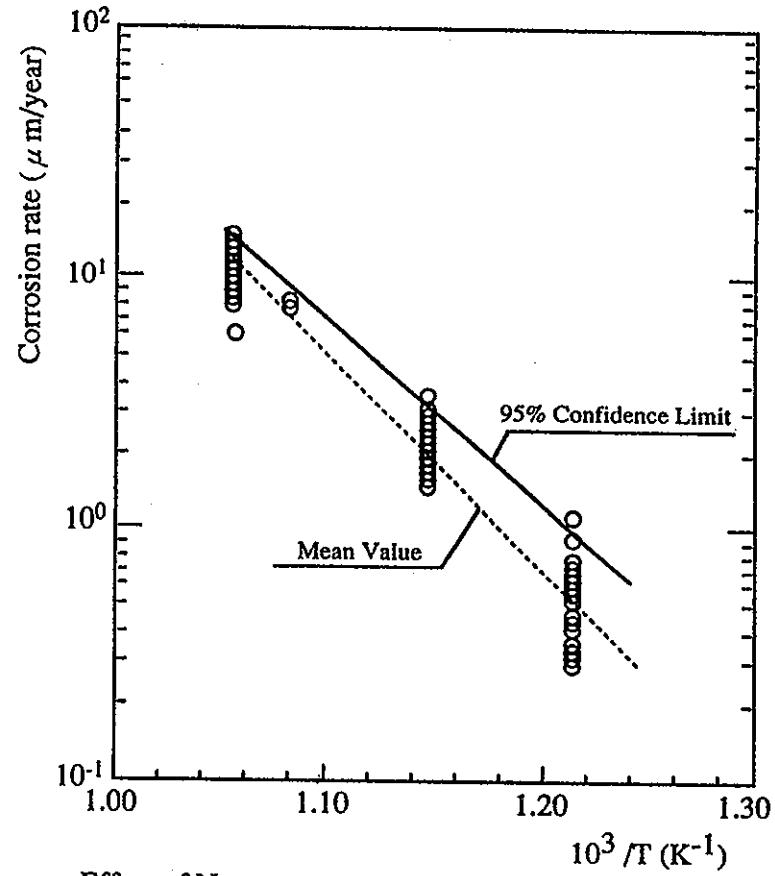
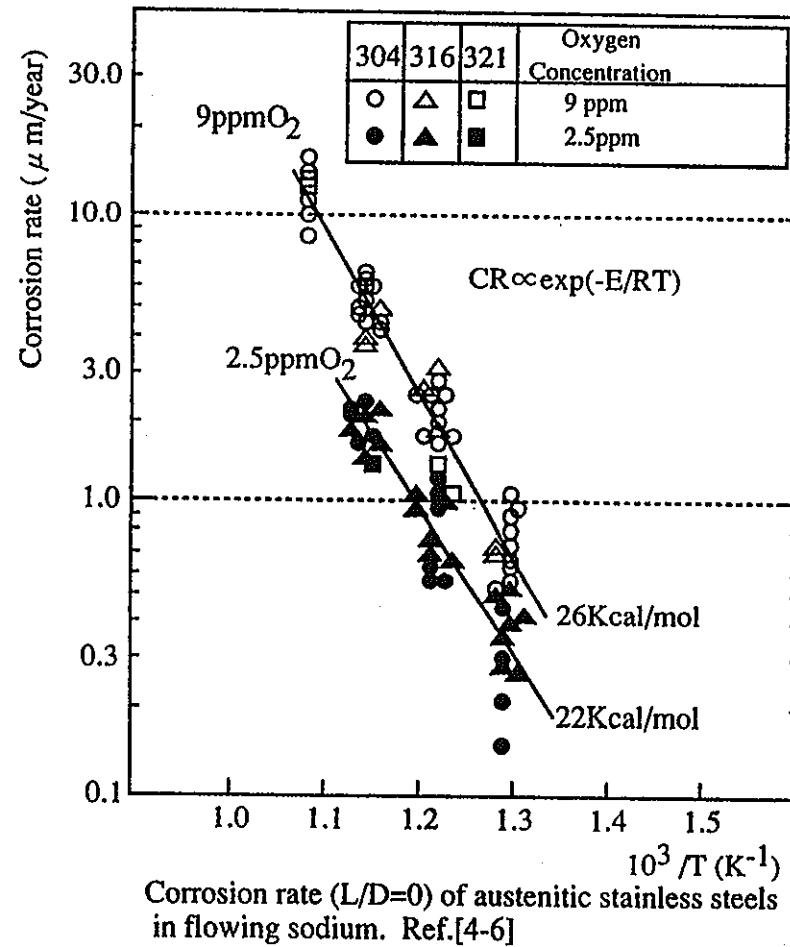


図 2.2-4 被覆管外面腐食データ

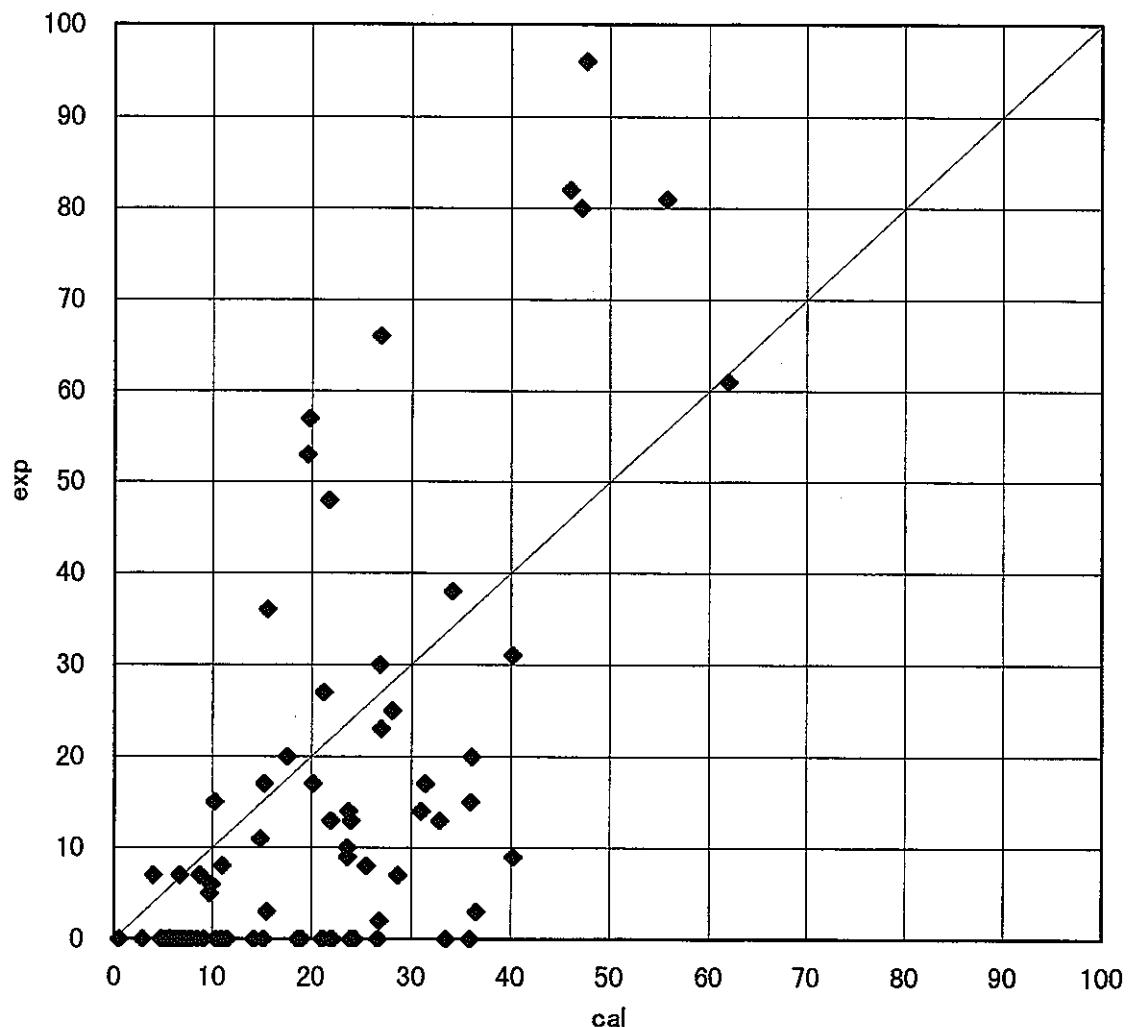


図2.2-5 HEDLのFCCI式と常陽のデータの関係（95%信頼度レベル）

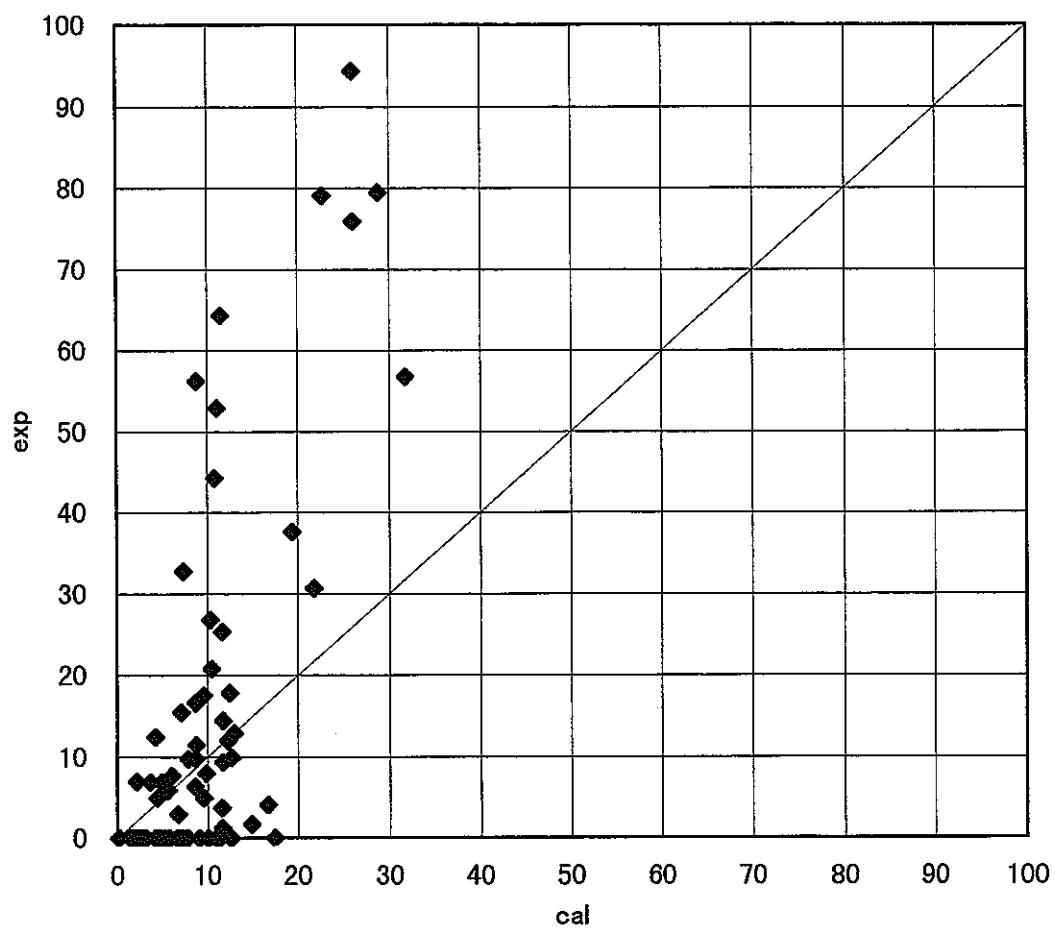


図2.2-6 HEDLのFCCI式と常陽のデータの関係 (50%信頼度レベル)

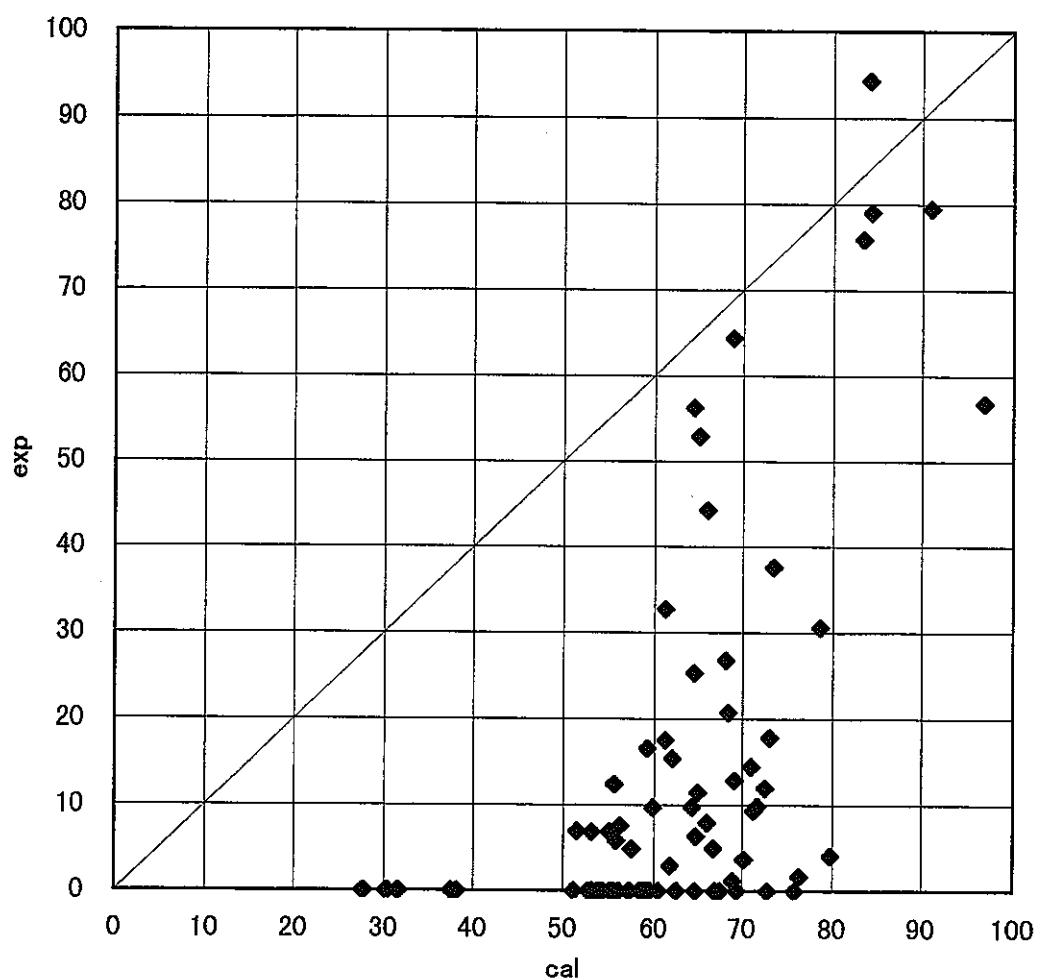


図2.2-7 参考評価式と常陽データの関係

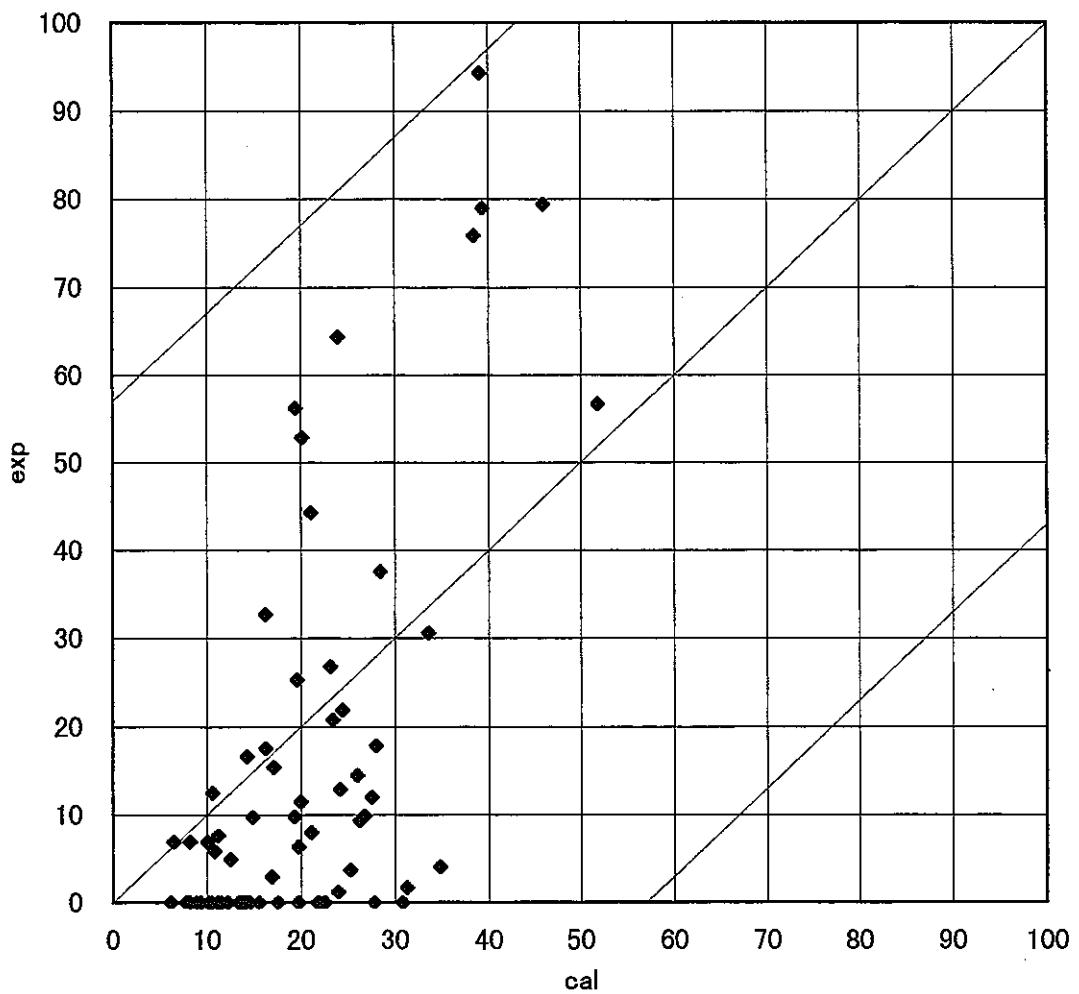


図2.2-8 参考検討式と不確かさ($1\sigma=19\mu\text{m}$)

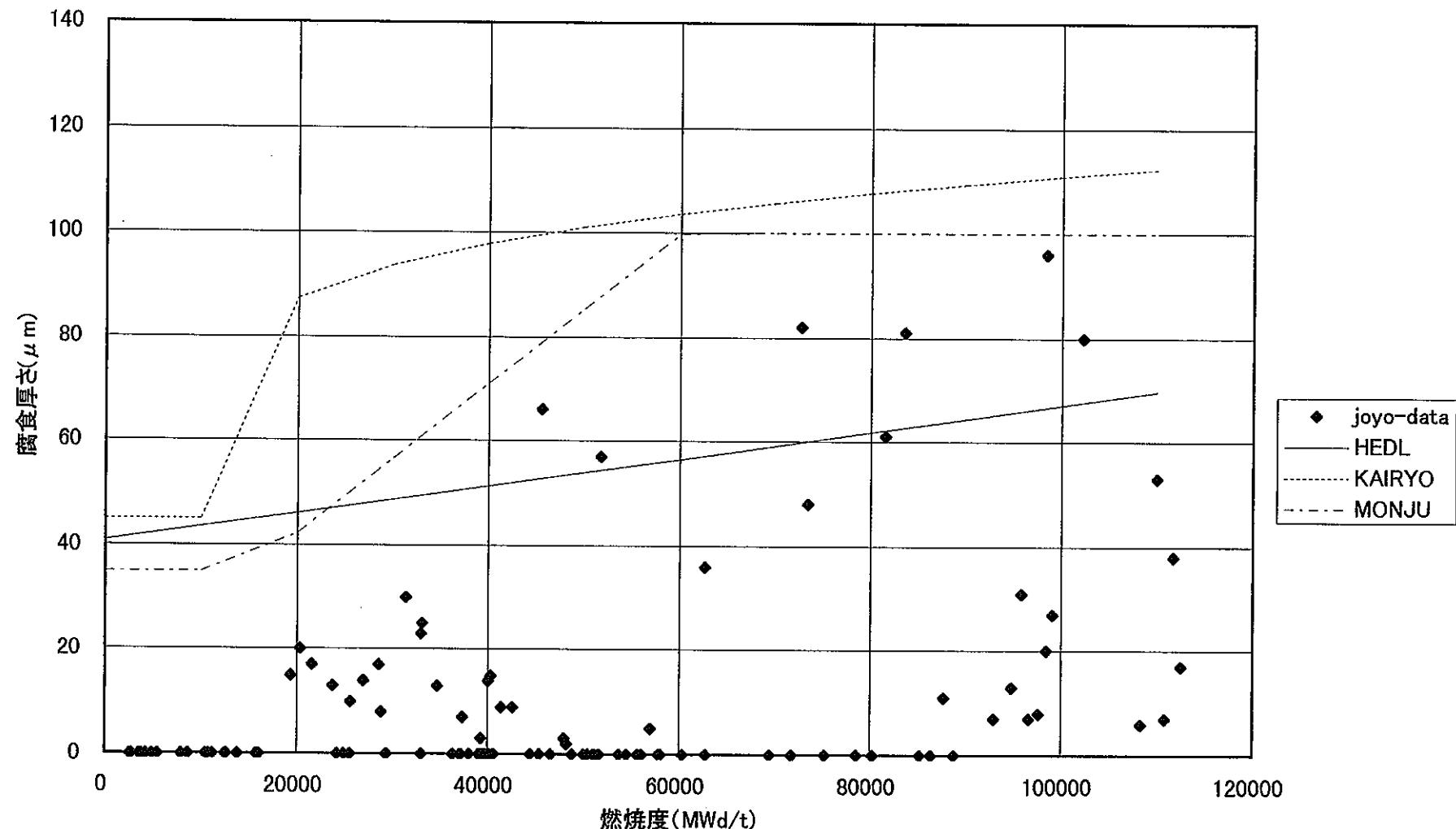
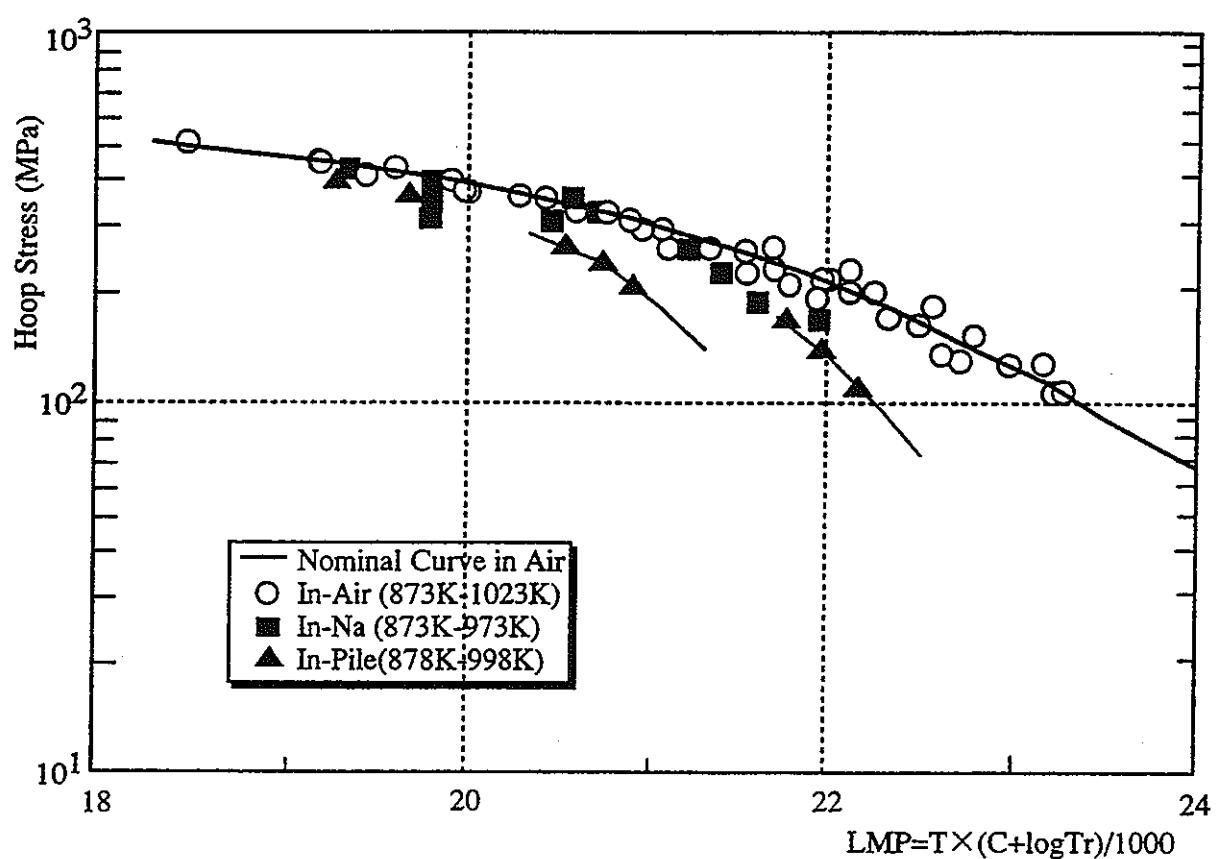


図2.2-9 評価式とデータの関係

2.3 被覆管強度

被覆管強度については現状の「もんじゅ」式のように LMP に基づき未照射材のデータから分散等は設定できる。しかしながら照射により強度が低下する効果については少ない炉内クリープ試験によりその低減効果を定めているのが実状である。その例 (PNC1520) を図 2.3-1 に示す。炉内試験については、各応力点でデータが少ないため、統計的な議論を行うのは難しい状態である。この為、非常に感度の大きな被覆管強度を取得することが難しくなっている。この点が破損確率の絶対値の信頼性を上げるうえでネックになると考えられる。



Effect of irradiation and Na environments on creep rupture strength of PNC1520

図 2.3-1 クリープ強度の照射効果

2.4 被覆管外面腐食

被覆管外面腐食はナトリウムループでデータを充足させているので、ある程度の統計処理ができるだけのデータが充足可能である。データの例を図 2.4-1 に示す。

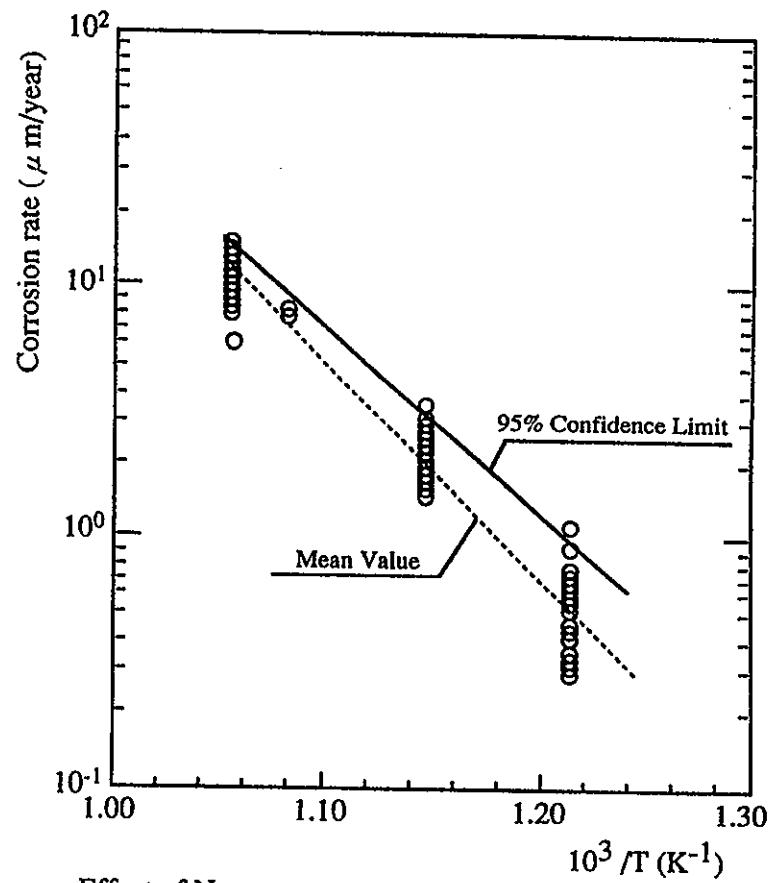
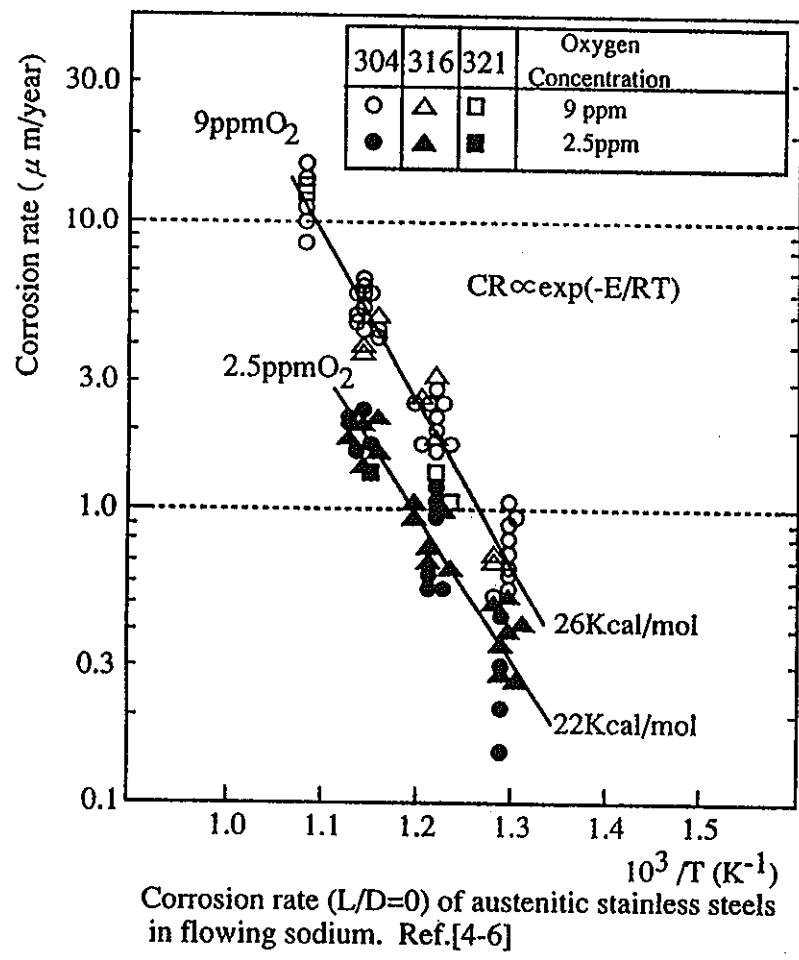


図 2.4-1 被覆管外面腐食データ

3. 挙動評価モデルの見直しに基づく BORNFREE コード修正

3.1 F P ガス放出率

3.1.1 見直しモデル

2.1 項での検討の結果得られた下記の見直しモデルを、 F P ガス放出割合のオプションに追加した。

$$F = \frac{F_{93} - F_{85}}{93 - 85} (\rho - 85) + F_{85}$$

ただし、 $F > 100$ の場合は $F = 100$ 、 $F < 0$ の場合は $F = 0$

$$\begin{aligned} F_{85} = & 2 + 1.88 \times 10^{-3} \cdot BU - 1.804 \times 10^{-8} \cdot BU^2 + 7.828 \times 10^{-14} \cdot BU^3 \\ \text{ここで、} & + 0.143 \times LHR - 49.14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{93} = & -9 + 1.88 \times 10^{-3} \cdot BU - 1.804 \times 10^{-8} \cdot BU^2 + 7.828 \times 10^{-14} \cdot BU^3 \\ & + 0.115 \times LHR - 31.17 \end{aligned}$$

BU : 燃焼度(MWd/t)

LHR : 線出力(W/cm)

ρ : ペレット密度(%)

不確かさは、定数項に対して絶対値で $1\sigma = 11.7\%$ とする。

3.1.2 修正サブルーチンの説明

- relese.f 上記見直しモデルを用いた計算ができるように拡張。
- pvclr.f 上記見直しモデルを用いて解析をする際の、RS 変数及び ZS 変数の設定を変更。

3.2 被覆管内面腐食

3.2.1 見直しモデル

2.2 項での検討の結果得られた下記の見直しモデルを、被覆管の F.P. アタック量のオプションに追加した。

$$C = 1.195E-5 \cdot (B - 10000)^{0.2} \cdot \exp(-E/RT) \cdot (O/M - 1.93) + A$$

C : 腐食量 (μm)

B : 燃焼度 (MWd/t)

T : 被覆管内面温度 (K)

O/M : 製造時 O/M

E : 活性化エネルギー 12500 (cal/mol)

R : 気体定数 1.987 (cal/molK)

不確かさ A に対して設定して

ノミナル A=0

1 σ 19 μm

3.2.2 修正サブルーチンの説明

- fpatk.f 上記見直しモデルを用いた計算ができるように拡張。
- pvclr.f 上記見直しモデルを用いて解析をする際の、RS変数の設定を変更。

4. 挙動モデルの見直しによる合理化検討

4.1 評価条件

初装荷炉心の実際の核熱条件に基づく評価を行う。

評価条件は平成8年度「確率論的FBR燃料設計コードの開発(IV)」に示す値と同じである。解析条件を表4.1-1～表4.1-9及び図4.1-1～図4.1-4に示す。

F_Pガス放出率と内面腐食を2章の検討結果に基づく評価式に変更した場合と従来評価に用いた式とを用いて比較評価する。

表4. 1—1 最大発熱集合体の最大線出力密度履歴(初装荷燃料)

[W/cm]

燃料区分	集合体番号	時期	C/R	運転サイクル				
				1	2	3	4	5
内側炉心	3	BOC	out	347	327	313	298	-
		EOC	out	343	326	313	299	-
外側炉心	124	BOC	in	350	328	314	296	-
		EOC	out	303	286	274	260	-
半径方向 ブランケット	208	BOC	in	152	171	202	223	243
		EOC	out	157	179	205	225	243

表4. 1—2 最大発熱集合体のペレット最高燃焼度履歴(初装荷燃料)

[×10⁴MWD/T]

燃料区分	集合体番号	運転サイクル				
		1	2	3	4	5
内側炉心	3	2.14	4.16	6.09	7.93	-
外側炉心	124	2.13	4.13	6.04	7.84	-
半径方向ブランケット	208	0.240	0.511	0.829	1.18	1.56

表4. 1—3 最大発熱集合体の最大高速中性子照射量履歴(初装荷燃料)

[×10²³n/cm²]

燃料区分	集合体番号	運転サイクル				
		1	2	3	4	5
内側炉心	3	0.41	0.82	1.22	1.61	-
外側炉心	124	0.32	0.63	0.95	1.26	-
半径方向ブランケット	208	0.18	0.36	0.54	0.72	0.89

表4. 1—4 線出力履歴

(W/cm)

サイクル	日数	初装荷			設計条件	
		内側	外側	ブランケット	燃料	ブランケット
1	0	347	350	152	360	160
	123	343	303	157	360	186.5
2	123.001	327	328	171	360	186.5
	246	326	286	179	347	213
3	246.001	313	314	202	347	213
	369	313	274	205	334	239.5
4	369.001	298	296	223	334	239.5
	492	299	260	225	320	266
5	492.001			243		266
	615			243		266

表4. 1—5 軸方向出力分布(炉心燃料集合体:寿命初期)

領域	集合体下部からの軸方向位置(cm)	出力(相対値)
遮蔽体	0.000	0.00000E+00
	7.500	0.00000E+00
	15.000	0.00000E+00
	19.999	0.00000E+00
下部軸方向 ブランケット	20.001	2.44755E-02
	25.000	3.35354E-02
	30.000	4.46055E-02
	35.000	5.82110E-02
	40.000	8.57407E-02
	44.500	1.18025E-01
	49.000	1.43578E-01
	53.500	1.73776E-01
	54.999	1.85007E-01
	55.001	5.67009E-01
炉心中心	56.500	5.89339E-01
	60.000	6.44538E-01
	63.500	7.00469E-01
	67.000	7.54912E-01
	70.500	7.96711E-01
	74.375	8.38172E-01
	78.250	8.83543E-01
	82.125	9.22439E-01
	86.000	9.49974E-01
	89.875	9.69858E-01
	93.750	9.86396E-01
	97.625	9.95046E-01
	101.500	1.00000E+00
	105.375	9.96440E-01
	109.250	9.79507E-01
	113.125	9.53955E-01
	117.000	9.31772E-01
	120.875	9.00557E-01
	124.750	8.49811E-01
	128.625	7.90236E-01
	132.500	7.32187E-01
	136.000	6.69724E-01
	139.500	5.86287E-01
	143.000	4.82055E-01
	146.500	4.02018E-01
	147.999	3.71887E-01
上部軸方向 ブランケット	148.001	1.00937E-01
	149.500	8.98741E-02
	154.000	6.38799E-02
	158.500	4.53664E-02
	163.000	2.97575E-02
	168.000	1.79606E-02
	173.000	1.15294E-02
遮蔽体	177.999	7.42212E-03
	178.001	0.00000E+00
	183.000	0.00000E+00
	190.500	0.00000E+00
	198.000	0.00000E+00

表4. 1—6 軸方向出力分布(ブランケット燃料集合体:寿命末期)

領域	集合体下部からの 軸方向位置(cm)	出力(相対値)
遮蔽体	0.000	0.00000E+00
	7.500	0.00000E+00
	15.000	0.00000E+00
	19.999	0.00000E+00
炉心中心	20.001	2.39105E-02
	25.000	3.76206E-02
	30.000	5.61698E-02
	35.000	8.24896E-02
	40.000	1.18694E-01
	44.500	1.62657E-01
	49.000	2.30682E-01
	53.500	3.32875E-01
	55.000	3.71766E-01
	56.500	4.06482E-01
	60.000	4.95888E-01
	63.500	5.74457E-01
	67.000	6.44298E-01
	70.500	7.13511E-01
	74.375	7.82251E-01
	78.250	8.35945E-01
	82.125	8.81620E-01
	86.000	9.26531E-01
	89.875	9.63729E-01
	93.750	9.85213E-01
	97.625	9.98187E-01
	101.500	1.00000E+00
	105.375	9.93202E-01
	109.250	9.80395E-01
	113.125	9.59072E-01
	117.000	9.18265E-01
	120.875	8.70009E-01
	124.750	8.24748E-01
	128.625	7.71464E-01
	132.500	7.02158E-01
	136.000	6.32479E-01
	139.500	5.63120E-01
	143.000	4.85002E-01
	146.500	3.95965E-01
	148.000	3.61933E-01
	149.500	3.23606E-01
	154.000	2.21735E-01
	158.500	1.54283E-01
	163.000	1.11386E-01
	168.000	7.61814E-02
	173.000	5.00131E-02
	177.999	3.11149E-02
遮蔽体	178.001	0.00000E+00
	183.000	0.00000E+00
	190.500	0.00000E+00
	198.000	0.00000E+00

表4. 1—7 集合体出力履歴

サイクル	日数	初装荷			(MW) 設計条件		
		炉心		ブランケット	炉心		ブランケット
		炉心部	全出力		炉心部	全出力	
0	0	4.421	4.662	—	4.547	4.795	—
1	0	4.383	4.622	0.528	4.547	4.795	0.556
	123	4.332	4.569	0.545	4.547	4.795	0.648
2	123.001	4.130	4.355	0.594	4.547	4.795	0.648
	246	4.117	4.342	0.622	4.383	4.622	0.740
3	246.001	3.953	4.169	0.702	4.383	4.622	0.740
	369	3.953	4.169	0.712	4.218	4.449	0.832
4	369.001	3.764	3.969	0.775	4.218	4.449	0.832
	492	3.776	3.983	0.782	4.042	4.262	0.924
5	492.001			0.844			0.924
	615			0.844			0.924

表4. 1—8 炉心燃料要素仕様

	項 目	単位	仕 様
炉心燃料ペレット	種類	—	プルトニウム・ウラン混合酸化物ペレット
	プルトニウム富化度 PuO ₂ /(Pu+U) O ₂	wt%	22.2±0.6
	ウラン濃縮度	wt%	0.2±0.02
	ペレット直径	mm	5.40±0.05
	ペレット密度	%TD	85.0±2.0
	O/M比	—	1.97± _{0.03} ^{0.02}
	Pu同位体組成比 Pu239,Pu240,Pu241,Pu242,	wt%	58:24:14:4
	蒸発性不純物量	μl/g oxide	180
軸方向燃料ベランケット	種類	—	二酸化ウランペレット
	ウラン濃縮度	wt%	0.2±0.02
	ペレット直径	mm	5.40±0.02
	ペレット密度	%TD	93.0±2.0
	O/U比	—	2.00~2.02
	蒸発性不純物量	μl/g oxide	50
被覆管	材質	—	SUS316相当ステンレス鋼(20%冷間加工材)
	外径	mm	6.500±0.030
	内径	mm	5.560±0.025
	肉厚	mm	0.470(0.443以上)
燃料要素	全長	mm	2813
	炉心燃料長さ	mm	930±5
	軸方向プランケット長さ 上部/下部	mm	300±2 / 350±2
	初期封入ガス圧	kg/cm ² ·a	1(ヘリウム)
	プレナム位置	—	上部
	プレナム体積 公差含む ノミナル値	cc	27.027 25.0
	ワイヤスペーサ材質	—	SUS316相当ステンレス鋼(20%冷間加工材)
	ワイヤスペーサ巻付ピッチ	mm	307±10
	ワイヤスペーサ巻付張力	kg	10
	ワイヤスペーサ径	mm	1.33
	冷却材流路断面積	cm ²	0.2152
	冷却材ぬれぶち長さ	cm	2.6646
	端栓材質	—	SUS316ステンレス鋼(溶体化処理材)
	要素配列ピッチ	mm	正三角形 7.87
	燃料要素数	本/集合体	169

表4. 1—9 ブランケット燃料要素仕様

	項目	単位	仕 様
ブ 燃 料 ラ ン ベ レ ッ ト	種類		二酸化ウランペレット
	ウラン濃縮度	wt%	0.2±0.02
	ペレット直径	mm	10.40±0.03
	ペレット密度	%TD	93.0±2.0
	O/U比	—	2.00~2.02
	蒸発性不純物量	μl/g oxide	50
被 覆 管	材質	—	SUS316相当ステンレス鋼(20%冷間加工材)
	外径	mm	11.60±0.04
	内径	mm	10.60±0.04
	肉厚	mm	0.50±0.04
燃 料 要 素	全長	mm	2805
	燃料長さ	mm	1580±9
	初期封入ガス圧	kg/cm ² ·a	1(ヘリウム)
	プレナム位置	—	上部
	プレナム体積		
	公差含む	cc	92.022
	ノミナル値	cc	87.0
	ワイヤスペーサ材質	—	SUS316相当ステンレス鋼(20%冷間加工材)
	ワイヤスペーサ巻付ピッチ	mm	251±10
	ワイヤスペーサ巻付張力	kg	15(中央部)
	ワイヤスペーサ径	mm	1.50±0.01(中央部)
	冷却材流路断面積	cm ²	0.483
	冷却材ぬれぶち長さ	cm	4.6245
	端栓材質	—	SUS316ステンレス鋼(溶体化処理材)
	要素配列ピッチ	mm	正三角形 13.15
	燃料要素数	本/集合体	61

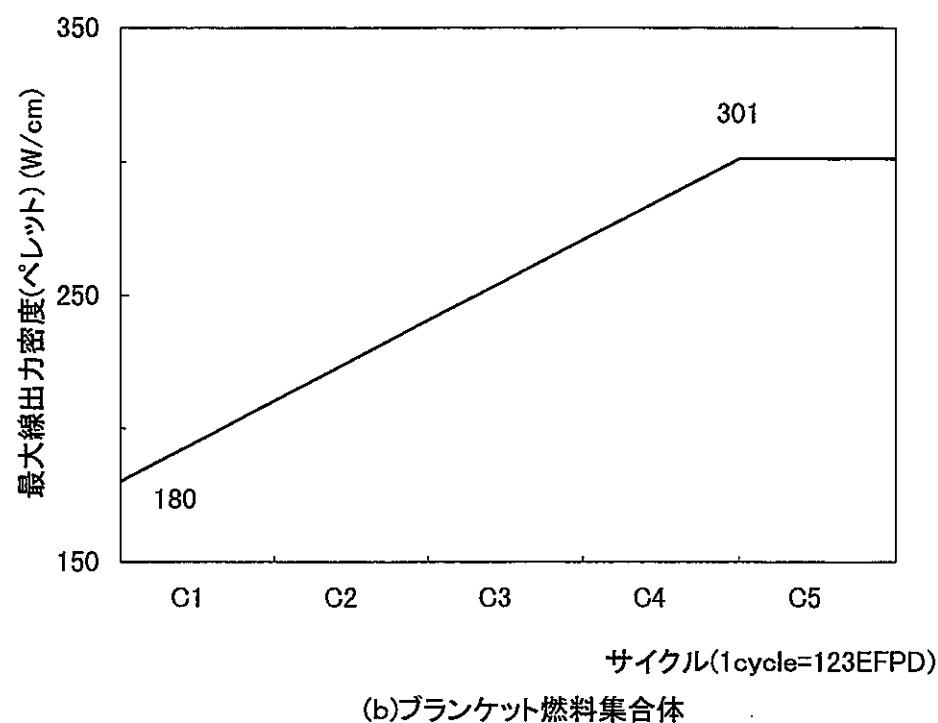
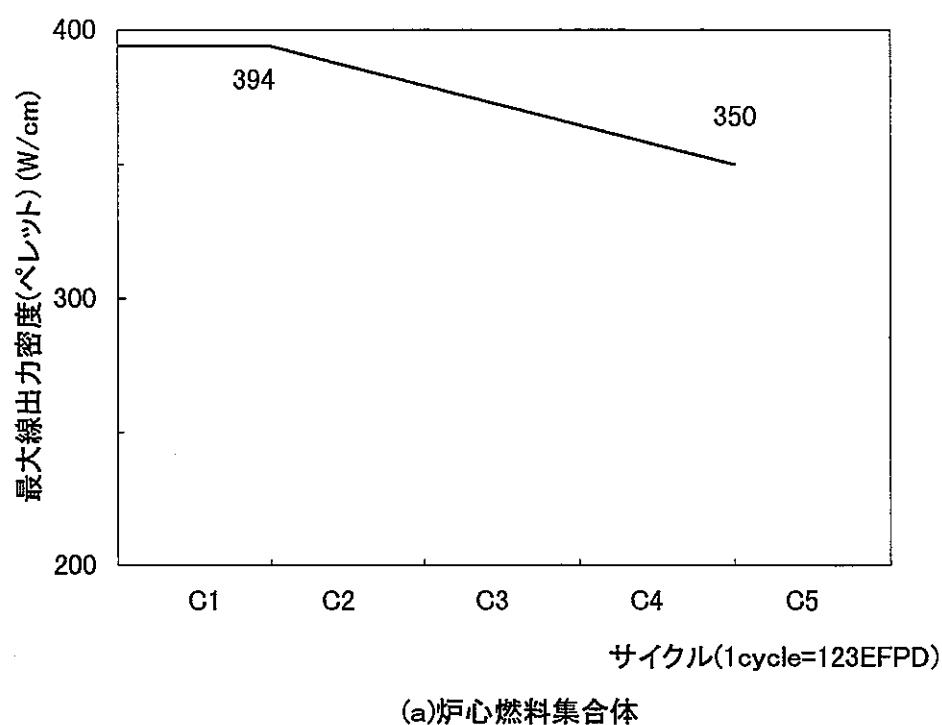


図4. 1-1 最大線出力密度の履歴

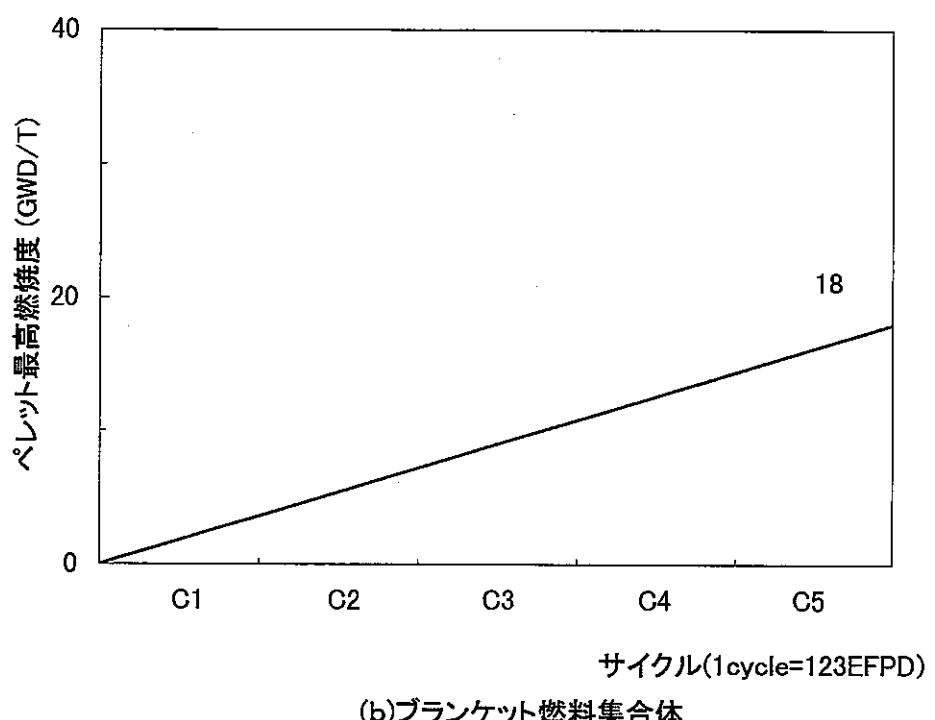
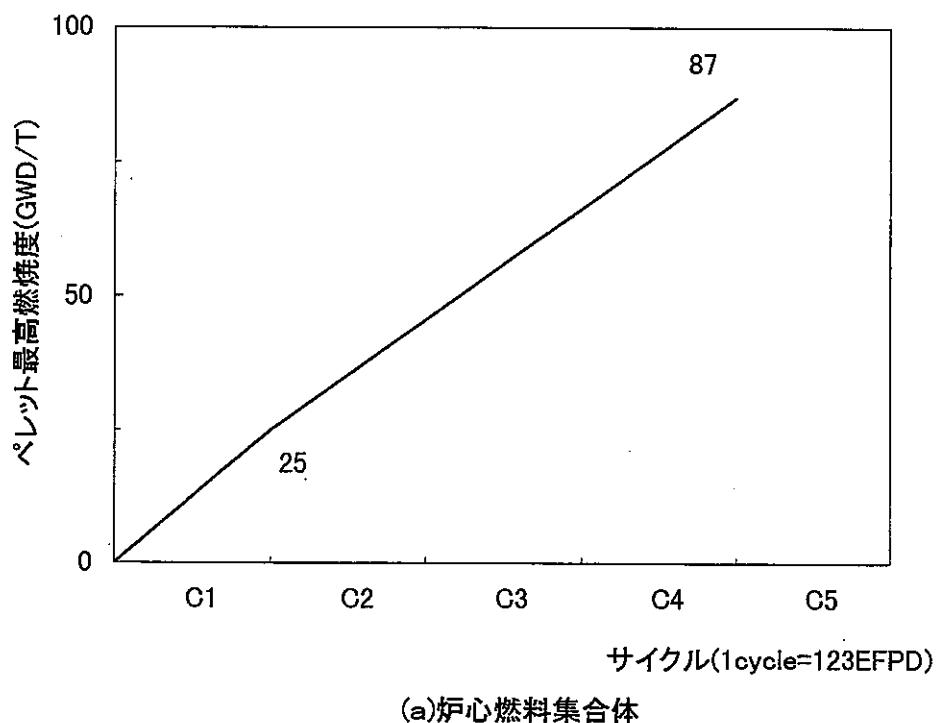


図4. 1-2 ペレット最高燃焼度の履歴

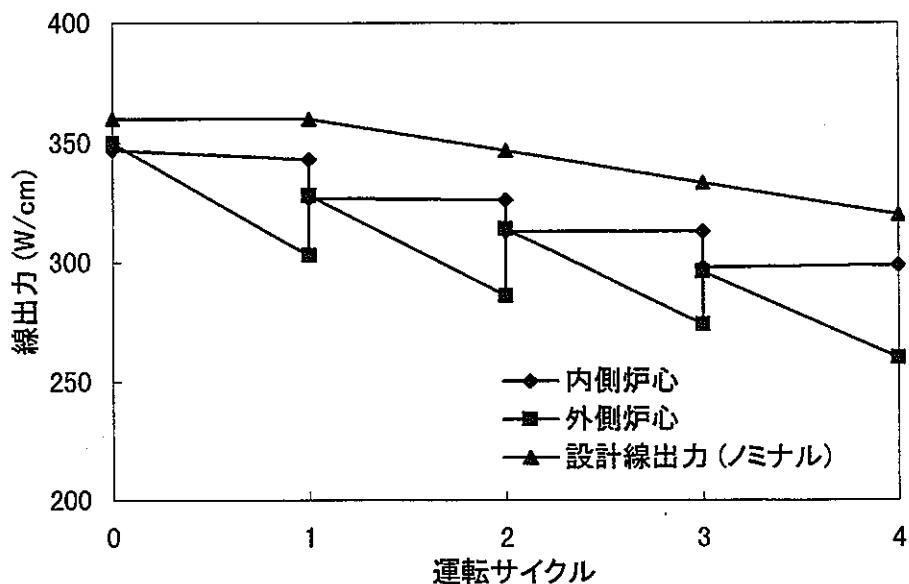


図4. 1-3 炉心燃料の線出力履歴

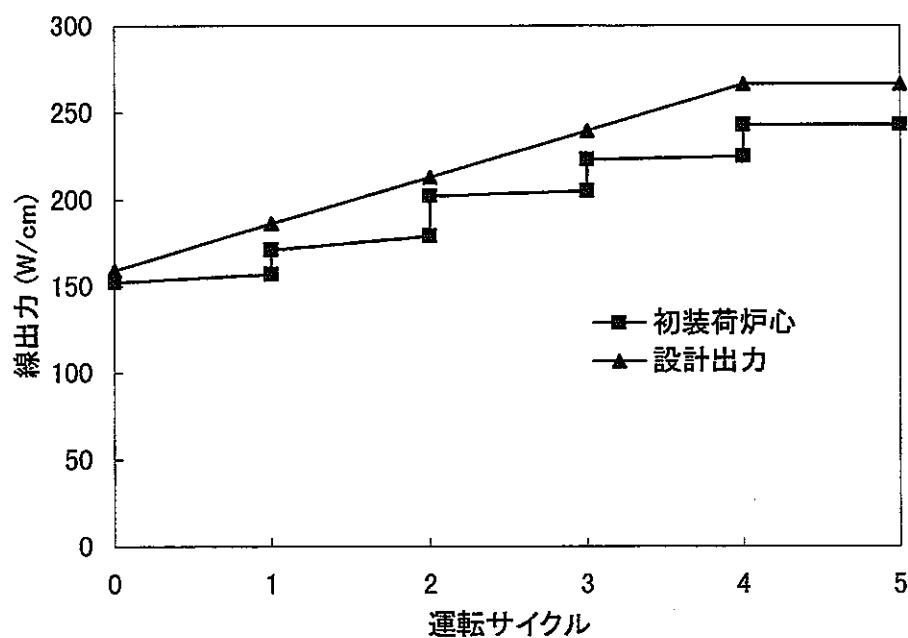


図4. 1-4 ブランケット燃料の線出力履歴

4.2 挙動評価モデルの見直しによる合理化検討

4.2.1 従来評価式と見直しモデルの比較

従来評価式と今回の検討に基づいて見直した評価式(見直しモデル)のノミナル条件での比較を F P ガス放出率について図 4.2-1 に、内面腐食について図 4.2-2 に示す。今回設定した F P ガス放出率は、初装荷条件・燃焼末期での燃焼度 ($\sim 65000 \text{ MWd/t}$)において図 4.2-1 に示すように $\sim 40\%$ 程度低い。F C C I については、H E D L の式に比較すると今回設定の評価式は大きく評価する。

この F P ガス放出率と内面腐食の変更により影響を受ける応力は、内外圧力差による応力と端栓部不連続による応力である。この応力の挙動について確率論的評価を行った。

内外圧力差による応力と端栓部不連続による応力の評価結果を表 4.2-1、表 4.2-2 に示す。内外圧力差の応力を発生させる被覆管内圧について、見直しモデルと従来評価式を比較すると、平均値は下がるが標準偏差は大きくなっている。平均値の比は、図 4.2-1 に示したノミナルの比較をほぼ反映した結果となっている。一方、標準偏差については、ガス放出率の不確かさについて従来評価式では標準偏差 1 σ 相当で 7.5%として評価してきたが見直しモデルでは 1 σ で 11.7%で評価しており標準偏差が約 1.6 倍となっているため、ほぼその比率を反映し見直しモデルの標準偏差が大きくなっている。

ここで見直しモデルの出力分布やペレット密度公差の不確かさの影響を明確にするために感度サーベイを行った。

はじめに、出力分布の不確かさの影響を明確にするために、ノミナル条件では出力分布の不確かさを 1.005 から 1.083 で一様分布を考慮していたが、出力を 1.08 倍で固定して評価した。その結果を表 4.2-3～表 4.2-6 及び図 4.2-3～図 4.2-5 に示す。見直しモデル及び従来評価式のいずれの場合でも、出力分布の不確かさを固定すると標準偏差はノミナル条件より小さくなっているが、その度合いは従来評価式の場合が大きくなっている。見直しモデルでは物性値自身の不確かさ幅(標準偏差)が大きいことから、出力分布変動の寄与が相対的に小さいことを示している。

そこで、F P ガス放出率の不確かさ幅の影響を明確にするため、F P ガス放出率の標準偏差を 0 にして評価した。その結果を表 4.2-7～表 4.2-10 及び図 4.2-6～図 4.2-8 に示す。見直しモデル及び従来評価式のいずれの場合でも、F P ガス放出率

の不確かさを固定すると標準偏差はノミナル条件より小さくなっているが、その度合いは見直しモデルの場合が大きくなっている。見直しモデルと従来評価式の標準偏差が近い値になっている。この場合、見直しモデルの標準偏差は、平均値が従来評価式より小さいにもかかわらず、従来評価式より若干大きくなっている。これは見直しモデルは線出力の依存性が考慮されているためである。従来評価式では線出力が大きくなても燃焼度が大きくなることによるガス量の増加が生じるだけなのにに対して、見直しモデルでは、線出力が大きくなるとガス放出自体が大きくなりあわせて、燃焼度も大きくなることによるガス量増加が考慮され、ガス量の変動が大きくなるので標準偏差が従来式の場合より大きくなる。

さらに、ガス放出率の不確かさを0とした条件下で出力分布及びペレット密度公差の不確かさをそれぞれ0とした評価を行った。ガス放出率の不確かさを0とした条件下で出力分布の不確かさを0とした場合の結果を表4.2-11～表4.2-14及び図4.2-9～図4.2-11に示す。見直しモデル及び従来評価式のいずれの場合でも、標準偏差はガス放出率の不確かさのみを0とした場合より小さくなっている。そして標準偏差の減少の程度は見直しモデルの方が大きい。このことは、見直しモデルの出力依存性を考慮したことが従来評価式よりも出力の不確かさを0としたときに標準偏差を大きく減少させた原因である。

一方、ガス放出率の不確かさを0とした条件下でペレット密度公差の不確かさを0とした場合の結果を表4.2-15～表4.2-18に示す。見直しモデル及び従来評価式のいずれの場合でも、標準偏差はガス放出率の不確かさを固定した場合より小さくなっている。その度合いは見直しモデルと従来評価式で大差はない。見直しモデルではペレット密度依存性が考慮されているが、ペレット密度依存性は図2.1-10～図2.1-12に示すように大きくないため、ペレット密度公差の不確かさの感度は特に大きくはならないことがわかる。

これに示すように、FPガス放出においては線出力依存性を考慮したのにもかかわらず、FPガス放出自体の不確かさが大きいためにその効果が明確に現れていないことが示されている。

被覆管肉厚に関しては、内面腐食が見直しモデルの方が大きく評価するため、見直しモデルでの評価の肉厚は小さくなっている。標準偏差は大きくなっている。

これらを組み合わせた結果が、内外圧力差の評価値となる。最高温度部を例に取

ると肉厚の平均値に対する標準偏差の相対値は 6% であり、内圧の平均値に対する標準偏差の相対値は 15% であるので、内外圧力による応力の標準偏差は、内圧に比較的大きく支配されている。

端栓部不連続の応力についても同様であるが、この部分は肉厚の減損が無視できることで、応力の標準偏差は、ほぼ内圧により決まっている。

4.2.2 設計合理化検討

見直しモデルにより以下の項目について感度解析を行った。

- ①燃焼度をノミナル条件より 1.5 倍に伸長した場合
- ②ペレット密度公差をノミナル条件より 2.5 倍に緩和した場合
- ③被覆管肉厚公差をノミナル条件より 2 倍に緩和した場合
- ④O/M 比の公差をノミナル条件より 1.5 倍に緩和した場合
- ⑤冷却材入口温度をノミナル条件より 30°C 高くした場合

(1) 応力の比較

ノミナル条件と各検討ケースの内外圧力差による応力及び端栓部不連続による応力の評価結果を図 4.2-15～図 4.2-17 にそれぞれ示す。

①燃焼度を 1.5 倍に伸長した場合

評価結果を表 4.2-19 及び表 4.2-20 に示す。燃焼度の増加により被覆管内圧が大きくなり肉厚は減少しそれらの標準偏差は大きくなる。これにより内外圧力差による応力は増加し標準偏差も増加している。燃焼度伸長の被覆管内圧への影響を図 4.2-18 に、内外圧力差による応力への影響を図 4.2-19 に示す。

内圧及び内外圧力差による応力を、平均値 + 2 σ のベースで比較すると、見直しモデルでは燃焼度約 1.05 倍で従来評価式と等しくなっている。また、平均値で比較すると、見直しモデルのでは燃焼度 1.1～1.15 倍で従来評価式と等しくなっている。

②ペレット密度公差を 2.5 倍に緩和した場合

評価結果を表 4.2-21 及び表 4.2-22 に示す。また、ペレット密度公差緩和の内外

圧力差による応力への影響を図 4.2-20 に示す。内外圧力差による応力及び端栓部不連続による応力の標準偏差はほとんど変化していない。

③被覆管肉厚公差を 2 倍に緩和した場合

評価結果を表 4.2-23 及び表 4.2-24 に示す。また、被覆管肉厚公差緩和の内外圧力差による応力への影響を図 4.2-21 に示す。被覆管肉厚の標準偏差が大きくなるため、内外圧力差による応力の標準偏差がやや大きくなっている。しかし、内外圧力による応力の標準偏差が内圧に比較的大きく支配されており、ここでは内圧の標準偏差に変化がないため、変化の程度は比較的小さい。

端栓部不連続による応力の標準偏差は、内圧の標準偏差が変化していないため、変化は小さい。

④O/M比の公差を 1.5 倍に緩和した場合

評価結果を表 4.2-25 及び表 4.2-26 に示す。また、O/M比の公差緩和の内外圧力差による応力への影響を図 4.2-22 に示す。内外圧力差による応力及び端栓部不連続による応力の標準偏差は若干大きくなるものの変化の程度は小さい。

⑤冷却材入口温度を 30°C 高くした場合

評価結果を表 4.2-27 及び表 4.2-28 に示す。また、冷却材入口温度上昇の内外圧力差による応力への影響を図 4.2-23 に示す。

内圧を、平均値 + 2 σ のベースで比較すると、見直しモデルの内外圧力差による応力は冷却材入口温度約 +10°C で従来評価式と等しくなっている。また、平均値で比較すると、見直しモデルの内外圧力差による応力は冷却材温度 +30°C でも従来評価式を下回っている。

(2) クリープ寿命損傷和(CDF)の比較

従来評価式と見直しモデルの比較を表 4.2-29 に示す。また、CDF を正規対数分布を仮定しフィッティングさせた結果を図 4.2-24 に示す。見直しモデルでは、被覆管応力の減少に伴い CDF も低下している。

見直しモデルでのノミナルケースと設計合理化検討ケースでの CDF の比較を表

4.2-30 に示す。以下、CDF は正規対数分布を仮定しフィッティングさせた結果を用いている。

①燃焼度を 1.5 倍に伸長した場合

CDF の比較を図 4.2-25 に示す。CDF を平均値 + 2 σ のベースで比較すると、見直しモデルのCDF は燃焼度約 1.1 倍で従来評価式と等しくなっている。また、平均値で比較すると、見直しモデルの内圧は燃焼度 1.2 倍で従来評価式と等しくなっている。

②ペレット密度公差を 2.5 倍に緩和した場合

CDF の比較を図 4.2-26 に示す。CDF の平均値及び標準偏差の変化は小さい。

③被覆管肉厚公差を 2 倍に緩和した場合

CDF の比較を図 4.2-27 に示す。CDF の平均値及び標準偏差の変化は小さい。

④O/M 比の公差を 1.5 倍に緩和した場合

CDF の比較を図 4.2-28 に示す。CDF の平均値及び標準偏差の変化は小さい。

⑤冷却材入口温度を 30°C 高くした場合

CDF の比較を図 4.2-29 に示す。CDF を平均値 + 2 σ のベースで比較すると、見直しモデルのCDF は冷却材入口温度約 +5°C で従来評価式と等しくなっている。また、平均値で比較すると、見直しモデルのCDF は冷却材温度 +15°C で従来評価式と等しくなっている。

(3) 応力とCDFに対する感度の比較

燃焼度を伸長したケースの評価において見直しモデルでは、応力は燃焼度約 1.05 倍で、また CDF は約 1.1 倍で従来評価式と等しくなっている。冷却材入口温度を 30°C 高くしたケースの評価において見直しモデルでは、応力は冷却材入口温度約 +10°C で、また CDF は約 +5°C で従来評価式と等しくなっている。(平均値 + 2 σ ベースでの比較)

上記結果は、CDFの温度依存性が応力依存性より大きいことを示している。この理由は、Bornfree にて使用している被覆管の破断寿命評価式は次式に示すように応力と温度の関数になっているが、この式が温度に対してより感度が強いためである。

$$F = 21.080 - 3.548 \times \log_{10} \sigma \quad (\sigma < 10.)$$

$$31.440 - 31.571 \times \log_{10} \sigma + 24.966 \times (\log_{10} \sigma)^2 - 7.3030 \times (\log_{10} \sigma)^3 \quad (\sigma \geq 10.)$$

$$\log_{10} t_R = F \times 10^3 / T - 14.04$$

t_R : 破断時間(hr)

σ : 応力(kg/mm²)

T : 温度(°K)

今回の評価は低燃焼度炉心であるため、被覆管のCDF自身の値は小さく、いずれのケースでも、もんじゅの高燃焼度炉心でのCDF値である0.3以下であるが、従来設計式とのCDFの比較による余裕分は燃焼度で1.1倍、冷却材入口温度で+5°Cとなる。

さらに、CDFでの比較と応力での比較との包絡値をとると、今回の見直しモデルによる余裕分は、燃焼度で1.05倍、冷却材入口温度で+5°Cとなる。

4.2.3 まとめ

ガス放出率についてデータを整理し、出力及びペレット密度の関数とした評価式を作成した。本評価式は、従来用いていた評価式に比較してノミナル値が下がり、不確かさが大きくなつた。本評価式を用いた被覆管応力の確率論的評価を行い、2σ相当値が従来式を用いた場合より低下することを確認した。これは従来式が保守的に評価していたことを示しており、この保守性を見直し同等の応力もしくはCDF値まで許容することで燃焼度の増加や冷却材温度増加等の設計合理化が可能なことを示している。

但し、今回はガス放出率データのばらつきが大きく標準偏差が大きいため、出力及びペレット密度等のペレット仕様に対する確率評価値の感度が明確に変化しなかつたため公差の緩和等への影響は明確に出来なかつた。

表4.2-1 従来評価式と見直しモデルの比較(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価式	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	従来評価式	0.528 3.73E-02	3.094 1.04E-02	0.431 1.69E-02	3.791 3.25E-01	1.896 1.63E-01
		見直しモデル	0.425 6.30E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.195 5.24E-01	1.597 2.62E-01
	最大発熱部	従来評価式	0.527 3.73E-02	3.175 1.41E-02	0.444 1.34E-02	3.770 3.04E-01	1.885 1.52E-01
		見直しモデル	0.424 6.29E-02	3.173 1.62E-02	0.439 2.14E-02	3.073 4.87E-01	1.537 2.44E-01

表4.2-2 従来評価式と見直しモデルの比較(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価式	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	従来評価式	0.530 3.73E-02	3.058 8.80E-03	0.470 9.04E-03	0.320 0.00E+00	0.552 4.07E-02	1.724 1.27E-01	1.695 -1.695 1.25E-01 1.25E-01	5.296 -5.296 3.91E-01 3.91E-01
		見直しモデル	0.427 6.32E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.66E-02	1.395 2.08E-01	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01

表4.2-3 従来評価式で出力分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	Rm (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ノミナル	0.528 3.73E-02	3.094 1.04E-02	0.431 1.69E-02	3.791 3.25E-01	1.896 1.63E-01
		出力分布誤差無し	0.556 3.37E-02	3.096 1.07E-02	0.427 1.77E-02	4.035 3.07E-01	2.017 1.53E-01
	最大発熱部	ノミナル	0.527 3.73E-02	3.175 1.41E-02	0.444 1.34E-02	3.770 3.04E-01	1.885 1.52E-01
		出力分布誤差無し	0.555 3.37E-02	3.187 1.34E-02	0.442 1.38E-02	4.003 2.81E-01	2.001 1.41E-01

4.2-8

表4.2-4 見直しモデルで出力分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	Rm (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ノミナル	0.425 6.30E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.195 5.24E-01	1.597 2.62E-01
		出力分布誤差無し	0.458 6.24E-02	3.106 1.30E-02	0.409 2.72E-02	3.490 5.30E-01	1.745 2.65E-01
	最大発熱部	ノミナル	0.424 6.29E-02	3.173 1.62E-02	0.439 2.14E-02	3.073 4.87E-01	1.537 2.44E-01
		出力分布誤差無し	0.457 6.23E-02	3.184 1.55E-02	0.437 2.17E-02	3.335 4.88E-01	1.667 2.44E-01

表4.2-5 従来評価式で出力分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _m θ (kg/mm ²)	P _m Z (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ノミナル	0.530	3.058	0.470	0.320	0.552	1.724	1.695 -1.695 1.25E-01 1.25E-01	5.296 -5.296 3.91E-01 3.91E-01
		出力分布誤差無し	3.73E-02	8.80E-03	9.04E-03	0.00E+00	4.07E-02	1.27E-01	1.25E-01 1.15E-01 1.15E-01	3.91E-01 3.58E-01 3.58E-01
		ノミナル	0.558	3.059	0.470	0.320	0.581	1.816	1.785 -1.785 1.15E-01	5.578 -5.578 3.58E-01
		出力分布誤差無し	3.37E-02	9.12E-03	9.04E-03	0.00E+00	3.73E-03	1.17E-02	1.15E-01 1.15E-01	3.58E-01 3.58E-01

4.
6

表4.2-6 見直しモデルで出力分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _m θ (kg/mm ²)	P _m Z (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ノミナル	0.427	3.069	0.470	0.320	0.447	1.395	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01
		出力分布誤差無し	6.32E-02	1.15E-02	9.22E-03	0.00E+00	6.66E-02	2.08E-01	2.03E-01 2.03E-01	6.39E-01 6.33E-01
		ノミナル	0.460	3.071	0.470	0.320	0.481	1.503	1.477 -1.477 2.03E-01	4.616 -4.616 6.33E-01
		出力分布誤差無し	6.26E-02	1.17E-02	9.22E-03	0.00E+00	6.59E-02	2.06E-01	2.03E-01 2.03E-01	6.33E-01 6.33E-01

表4.2-7 従来評価式でガス放出率分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	Rm (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ノミナル	0.528 3.73E-02	3.094 1.04E-02	0.431 1.69E-02	3.791 3.25E-01	1.896 1.63E-01
		ガス放出分布誤差無し	0.526 1.80E-02	3.094 1.02E-02	0.431 1.69E-02	3.781 2.29E-01	1.890 1.15E-01
	最大発熱部	ノミナル	0.527 3.73E-02	3.175 1.41E-02	0.444 1.34E-02	3.770 3.04E-01	1.885 1.52E-01
		ガス放出分布誤差無し	0.525 1.80E-02	3.175 1.39E-02	0.444 1.34E-02	3.759 1.95E-01	1.879 9.77E-02

4.2-10

表4.2-8 見直しモデルでガス放出率分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	Rm (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ノミナル	0.425 6.30E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.195 5.24E-01	1.597 2.62E-01
		ガス放出分布誤差無し	0.424 1.90E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.186 2.80E-01	1.593 1.40E-01
	最大発熱部	ノミナル	0.424 6.29E-02	3.173 1.62E-02	0.439 2.14E-02	3.073 4.87E-01	1.537 2.44E-01
		ガス放出分布誤差無し	0.423 1.90E-02	3.173 1.58E-02	0.439 2.14E-02	3.064 2.26E-01	1.532 1.13E-01

表4.2-9 従来評価式でガス放出率分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _m θ (kg/mm ²)	P _m Z (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ノミナル	0.530 3.73E-02	3.058 8.80E-03	0.470 9.04E-03	0.320 0.00E+00	0.552 4.07E-02	1.724 1.27E-01	1.695 -1.695 1.25E-01 1.25E-01	5.296 -5.296 3.91E-01 3.91E-01
		ガス放出分布誤差無し	0.528 1.81E-02	3.058 8.68E-03	0.470 8.94E-03	0.320 0.00E+00	0.550 2.19E-02	1.720 6.84E-02	1.690 -1.690 6.73E-02 6.73E-02	5.283 -5.283 2.10E-01 2.10E-01
		ノミナル	0.427 6.32E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.66E-02	1.395 2.08E-01	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01
		ガス放出分布誤差無し	0.426 1.91E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.445 2.22E-02	1.391 6.94E-02	1.367 -1.367 6.82E-02 6.82E-02	4.273 -4.273 2.13E-01 2.13E-01

4.2-11

表4.2-10 見直しモデルでガス放出率分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _m θ (kg/mm ²)	P _m Z (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ノミナル	0.427 6.32E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.66E-02	1.395 2.08E-01	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01
		ガス放出分布誤差無し	0.426 1.91E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.445 2.22E-02	1.391 6.94E-02	1.367 -1.367 6.82E-02 6.82E-02	4.273 -4.273 2.13E-01 2.13E-01

表4.2-11 従来評価式でガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	Rm (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ガス放出分布誤差無し	0.526 1.80E-02	3.094 1.02E-02	0.431 1.69E-02	3.781 2.29E-01	1.890 1.15E-01
		ガス放出分布及び 出力分布誤差無し	0.555 7.62E-03	3.096 1.06E-02	0.427 1.77E-02	4.031 1.99E-01	2.016 9.96E-02
	最大発熱部	ガス放出分布誤差無し	0.525 1.80E-02	3.175 1.39E-02	0.444 1.34E-02	3.759 1.95E-01	1.879 9.77E-02
		ガス放出分布及び 出力分布誤差無し	0.554 7.61E-03	3.187 1.31E-02	0.442 1.39E-02	3.999 1.53E-01	2.000 7.65E-02

4-2-12

表4.2-12 見直しモデルでガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	Rm (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ガス放出分布誤差無し	0.424 1.90E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.186 2.80E-01	1.593 1.40E-01
		ガス放出分布及び 出力分布誤差無し	0.456 5.67E-03	3.106 1.30E-02	0.409 2.72E-02	3.482 2.55E-01	1.741 1.28E-01
	最大発熱部	ガス放出分布誤差無し	0.423 1.90E-02	3.173 1.58E-02	0.439 2.14E-02	3.064 2.26E-01	1.532 1.13E-01
		ガス放出分布及び 出力分布誤差無し	0.456 5.66E-03	3.184 1.50E-02	0.437 2.17E-02	3.326 1.87E-01	1.663 9.35E-02

表4.2-13 従来評価式でガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _m θ (kg/mm ²)	P _m Z (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ガス放出分布誤差無し	0.528 1.81E-02	3.058 8.68E-03	0.470 8.94E-03	0.320 0.00E+00	0.550 2.19E-02	1.720 6.84E-02	1.690 -1.690 6.73E-02 6.73E-02	5.283 -5.283 2.10E-01 2.10E-01
		ガス放出分布及び 出力分布誤差無し	0.558 7.66E-03	3.059 9.00E-03	0.470 8.94E-03	0.320 0.00E+00	0.581 1.43E-02	1.815 4.47E-02	1.784 -1.784 4.39E-02 4.39E-02	5.575 -5.575 1.37E-01 1.37E-01

4.2-13

表4.2-14 見直しモデルでガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _m θ (kg/mm ²)	P _m Z (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ガス放出分布誤差無し	0.426 1.91E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.445 2.22E-02	1.391 6.94E-02	1.367 -1.367 6.82E-02 6.82E-02	4.273 -4.273 2.13E-01 2.13E-01
		ガス放出分布及び 出力分布誤差無し	0.458 5.70E-03	3.071 1.17E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.480 1.18E-02	1.499 3.69E-02	1.473 -1.473 3.62E-02 3.62E-02	4.604 -4.604 1.13E-01 1.13E-01

表4.2-15 従来評価式でガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	Rm (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ガス放出分布誤差無し	0.526 1.80E-02	3.094 1.02E-02	0.431 1.69E-02	3.781 2.29E-01	1.890 1.15E-01
		ガス放出分布及び ペレット密度公差無し	0.526 1.77E-02	3.094 1.02E-02	0.431 1.69E-02	3.780 2.28E-01	1.890 1.14E-01
	最大発熱部	ガス放出分布誤差無し	0.525 1.80E-02	3.175 1.39E-02	0.444 1.34E-02	3.759 1.95E-01	1.879 9.77E-02
		ガス放出分布及び ペレット密度公差無し	0.525 1.76E-02	3.175 1.39E-02	0.444 1.34E-02	3.759 1.94E-01	1.879 9.69E-02

4.2-14

表4.2-16 見直しモデルでガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無しとした場合(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	Rm (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ガス放出分布誤差無し	0.424 1.90E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.186 2.80E-01	1.593 1.40E-01
		ガス放出分布及び ペレット密度公差無し	0.424 1.89E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.186 2.79E-01	0.159 1.40E-01
	最大発熱部	ガス放出分布誤差無し	0.423 1.90E-02	3.173 1.58E-02	0.439 2.14E-02	3.064 2.26E-01	1.532 1.13E-01
		ガス放出分布及び ペレット密度公差無し	0.423 1.88E-02	3.173 1.58E-02	0.439 2.14E-02	3.064 2.26E-01	1.532 1.13E-01

表4.2-17 従来評価式でガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無とした場合(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _m θ (kg/mm ²)	P _m Z (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ガス放出分布誤差無し	0.528 1.81E-02	3.058 8.68E-03	0.470 8.94E-03	0.320 0.00E+00	0.550 2.19E-02	1.720 6.84E-02	1.690 -1.690 6.73E-02 6.73E-02	5.283 -5.283 2.10E-01 2.10E-01
		ガス放出分布及び ペレット密度公差無し	0.528 1.78E-02	3.058 8.68E-03	0.470 8.94E-03	0.320 0.00E+00	0.550 2.16E-02	1.720 6.76E-02	1.690 -1.690 6.64E-02 6.64E-02	5.283 -5.283 2.08E-01 2.08E-01
		ガス放出分布誤差無し	0.528 1.91E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.445 2.22E-02	1.391 6.94E-02	1.367 -1.367 6.82E-02 6.82E-02	4.273 -4.273 2.13E-01 2.13E-01
		ガス放出分布及び ペレット密度公差無し	0.426 1.90E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.445 2.21E-02	1.391 6.91E-02	1.367 -1.367 6.79E-02 6.79E-02	4.273 -4.273 2.12E-01 2.12E-01

4-2-15

表4.2-18 見直しモデルでガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無とした場合(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _m θ (kg/mm ²)	P _m Z (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ガス放出分布誤差無し	0.426 1.91E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.445 2.22E-02	1.391 6.94E-02	1.367 -1.367 6.82E-02 6.82E-02	4.273 -4.273 2.13E-01 2.13E-01
		ガス放出分布及び ペレット密度公差無し	0.426 1.90E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.445 2.21E-02	1.391 6.91E-02	1.367 -1.367 6.79E-02 6.79E-02	4.273 -4.273 2.12E-01 2.12E-01

表4.2-19 見直しモデルで燃焼度を1.5倍に伸長した場合の比較(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ノミナル	0.425 6.30E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.195 5.24E-01	1.597 2.62E-01
		燃焼度伸長	0.780 7.24E-02	3.108 1.41E-02	0.403 2.86E-02	6.048 7.49E-01	3.024 3.75E-01
	最大発熱部	ノミナル	0.424 6.29E-02	3.173 1.62E-02	0.439 2.14E-02	3.073 4.87E-01	1.537 2.44E-01
		燃焼度伸長	0.779 7.34E-02	3.192 1.95E-02	0.435 2.27E-02	5.740 6.57E-01	2.870 3.28E-01

表4.2-20 見直しモデルで燃焼度を1.5倍に伸長した場合の比較(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ノミナル	0.427 6.32E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.66E-02	1.395 2.08E-01	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01
		燃焼度伸長	0.784 7.18E-02	3.069 1.20E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.820 7.71E-02	2.564 2.41E-01	2.520 -2.520 2.37E-01 2.37E-01	7.874 -7.874 7.40E-01 7.40E-01

表4.2-21 見直しモデルでペレット密度公差を2.5倍に緩和した場合の比較(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ノミナル	0.425 6.30E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.195 5.24E-01	1.597 2.62E-01
		密度公差緩和	0.425 6.32E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.65E-01	3.195 5.26E-01	1.597 2.63E-01
	最大発熱部	ノミナル	0.424 6.29E-02	3.173 1.62E-02	0.439 2.14E-02	3.073 4.87E-01	1.537 2.44E-01
		密度公差緩和	0.424 6.32E-02	3.173 1.62E-02	0.439 2.14E-02	3.073 4.89E-01	1.536 2.44E-01

表4.2-22 見直しモデルでペレット密度公差を2.5倍に緩和した場合の比較(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ノミナル	0.427 6.32E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.66E-02	1.395 2.08E-01	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01
		密度公差緩和	0.427 6.34E-01	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.68E-02	1.395 2.09E-01	1.371 -1.371 2.05E-01 2.05E-01	4.286 -4.286 6.41E-01 6.41E-01

表4.2-23 見直しモデルで被覆管肉厚公差を2倍に緩和した場合の比較(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ノミナル	0.425 6.30E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.195 5.24E-01	1.597 2.62E-01
		肉厚公差緩和	0.425 6.30E-02	3.103 1.53E-02	0.414 3.10E-02	3.202 5.41E-01	1.601 2.71E-01
	最大発熱部	ノミナル	0.424 6.29E-02	3.173 1.62E-02	0.439 2.14E-02	3.073 4.87E-01	1.537 2.44E-01
		肉厚公差緩和	0.425 6.31E-02	3.173 1.83E-02	0.439 2.66E-02	3.081 5.02E-01	1.540 2.51E-01

表4.2-24 見直しモデルで被覆管肉厚公差を2倍に緩和した場合の比較(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ノミナル	0.427 6.32E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.66E-02	1.395 2.08E-01	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01
		肉厚公差緩和	0.427 6.32E-02	3.070 1.41E-02	0.469 1.84E-02	0.320 0.00E+00	0.447 6.85E-02	1.398 2.14E-01	1.374 -1.374 2.10E-01 2.10E-01	4.294 -4.294 6.57E-01 6.57E-01

表4.2-25 見直しモデルでO/M比の公差を1.5倍に緩和した場合の比較(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ノミナル	0.425 6.30E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.195 5.24E-01	1.597 2.62E-01
		O/M公差緩和	0.425 6.30E-02	3.103 1.38E-02	0.415 2.89E-02	3.198 5.33E-01	1.599 2.66E-01
	最大発熱部	ノミナル	0.424 6.29E-02	3.173 1.62E-02	0.439 2.14E-02	3.073 4.87E-01	1.537 2.44E-01
		O/M公差緩和	0.424 6.29E-02	3.173 1.65E-02	0.439 2.24E-02	3.076 4.90E-01	1.538 2.45E-01

表4.2-26 見直しモデルでO/M比の公差を1.5倍に緩和した場合の比較(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ノミナル	0.427 6.32E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.66E-02	1.395 2.08E-01	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01
		O/M公差緩和	0.427 6.32E-02	3.070 1.22E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.66E-02	1.396 2.08E-01	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01

表4.2-27 見直しモデルで冷却材入口温度を30°C高くした場合の比較(初装荷炉心燃料要素,内外圧力差による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	最高温度部	ノミナル	0.425 6.30E-02	3.103 1.28E-02	0.415 2.66E-02	3.195 5.24E-01	1.597 2.62E-01
		冷却材温度高	0.441 6.52E-02	3.102 1.39E-02	0.391 3.07E-02	3.518 6.02E-01	1.759 3.01E-01
	最大発熱部	ノミナル	0.424 6.29E-02	3.173 1.62E-02	0.439 2.14E-02	3.073 4.87E-01	1.537 2.44E-01
		冷却材温度高	0.440 6.52E-02	3.184 1.60E-02	0.430 2.32E-02	3.274 5.24E-01	1.637 2.62E-01

表4.2-28 見直しモデルで冷却材入口温度を30°C高くした場合の比較(初装荷炉心燃料要素,端栓部構造不連続による応力)

事象と時期	評価位置	評価条件	P (kg/mm ²)	R _m (mm)	t (mm)	ν	P _{mθ} (kg/mm ²)	P _{mZ} (kg/mm ²)	Q _{inθ} Q _{outθ} (kg/mm ²)	Q _{inZ} Q _{outZ} (kg/mm ²)
通常運転,E.O.L	上部端栓部	ノミナル	0.427 6.32E-02	3.069 1.15E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.447 6.66E-02	1.395 2.08E-01	1.372 -1.372 2.04E-01 2.04E-01	4.286 -4.286 6.39E-01 6.39E-01
		冷却材温度高	0.443 6.55E-02	3.070 1.24E-02	0.470 9.22E-03	0.320 0.00E+00	0.463 6.90E-02	1.448 2.16E-01	1.423 -1.423 2.12E-01 2.12E-01	4.447 -4.447 6.62E-01 6.62E-01

表4.2-29 CDFの比較(従来評価式と見直しモデル)

事象と時期	評価位置	評価式	ノミナル条件	出力分布誤差無し	ガス放出率分布誤差無し	ガス放出率分布誤差及び出力分布誤差無し	ガス放出率分布誤差及びペレット密度公差無し
通常運転,E.O.L	炉心上端部	従来評価式	1.08E-05	1.61E-05	1.01E-05	1.52E-05	1.02E-05
			8.41E-06	1.07E-05	6.94E-06	8.56E-06	7.05E-06
		見直しモデル	5.74E-06	9.38E-06	4.98E-06	8.22E-06	4.97E-06
			5.76E-06	8.02E-06	3.62E-06	4.75E-06	3.61E-06
	最大発熱部	従来評価式	1.79E-07	3.03E-07	1.67E-07	2.84E-07	1.67E-07
			1.56E-07	2.28E-07	1.23E-07	1.79E-07	1.23E-07
		見直しモデル	8.09E-08	1.46E-07	6.82E-08	1.25E-07	6.82E-08
			8.83E-08	1.35E-07	5.34E-08	7.83E-08	5.33E-08

表4.2-30 CDFの比較(見直しモデルによる設計合理化検討ケース)

事象と時期	評価位置	評価式	ノミナル条件	燃焼度伸長	ペレット密度公差緩和	被覆管肉厚公差緩和	O/M比公差緩和	冷却材入口温度上昇
通常運転,E.O.L	炉心上端部	見直しモデル	5.74E-06	4.56E-05	5.81E-06	5.84E-06	5.80E-06	4.15E-05
			5.76E-06	5.28E-05	5.86E-06	5.97E-06	5.92E-06	4.72E-05
	最大発熱部	見直しモデル	8.09E-08	1.29E-06	8.10E-08	1.05E-07	8.11E-08	5.82E-07
			8.83E-08	1.28E-06	8.85E-08	9.60E-07	8.87E-08	5.98E-07

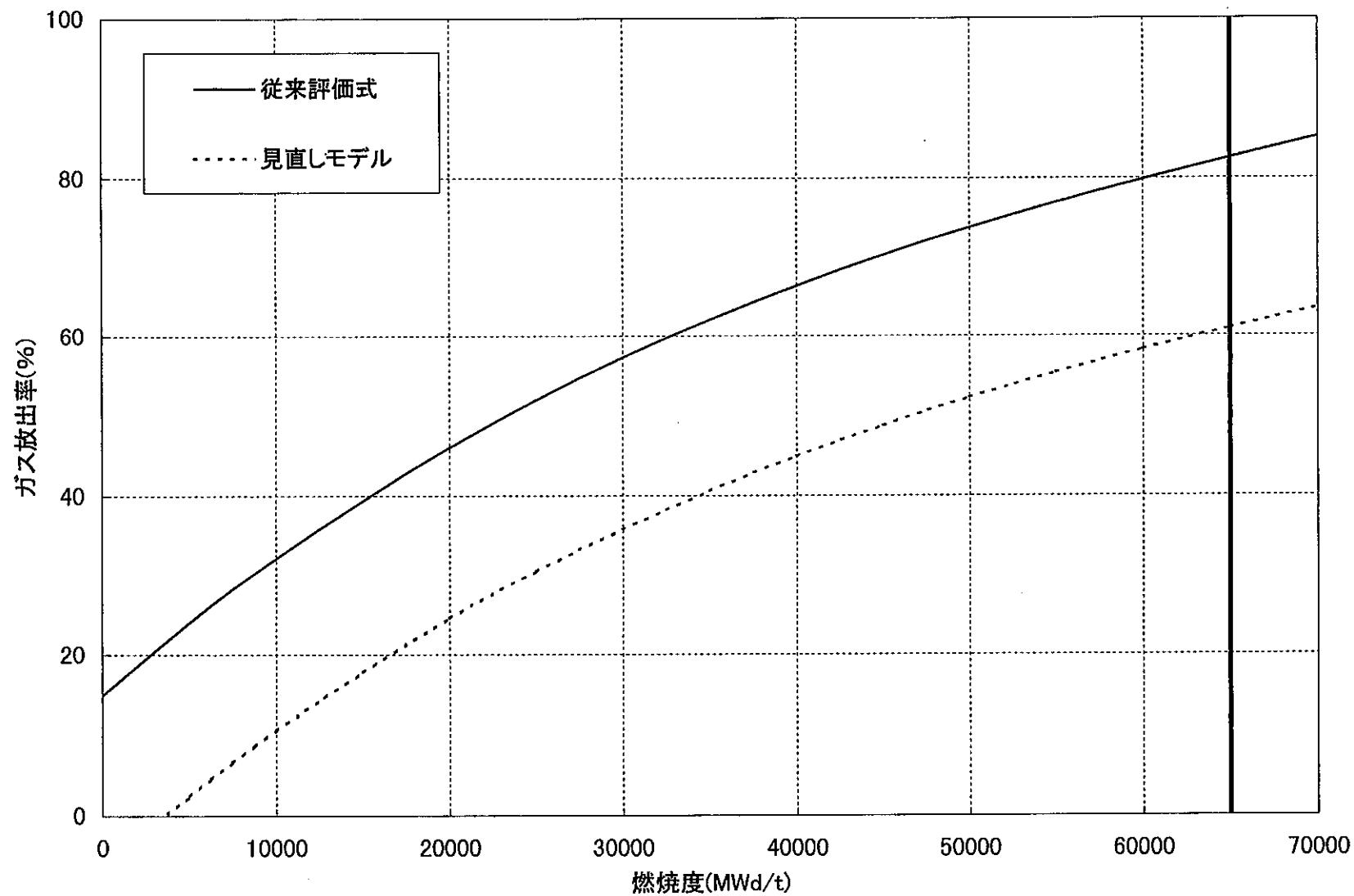


図4.2-1 FPガス放出率のノミナル条件での比較

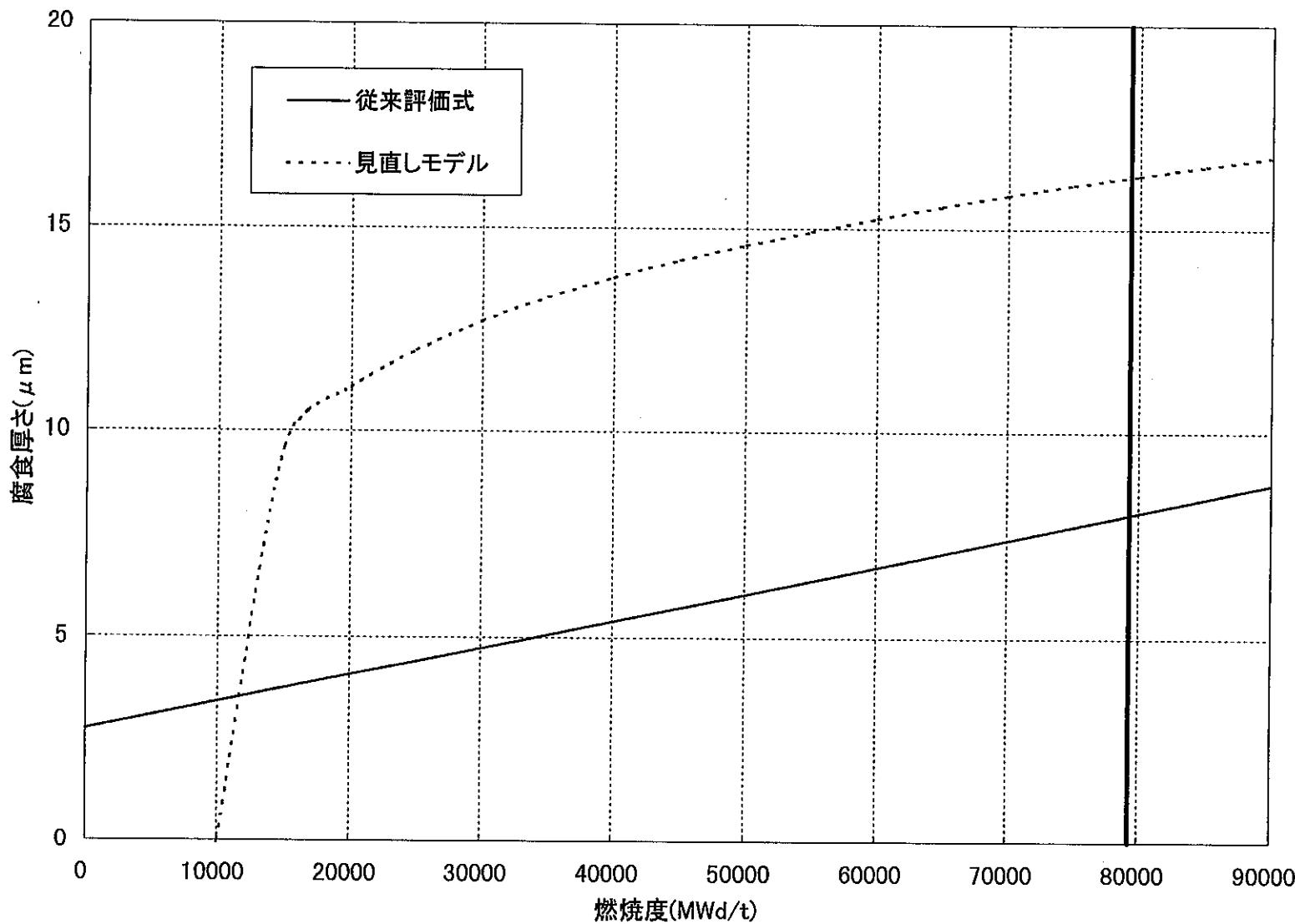


図4.2-2 FCCIのノミナル条件での比較

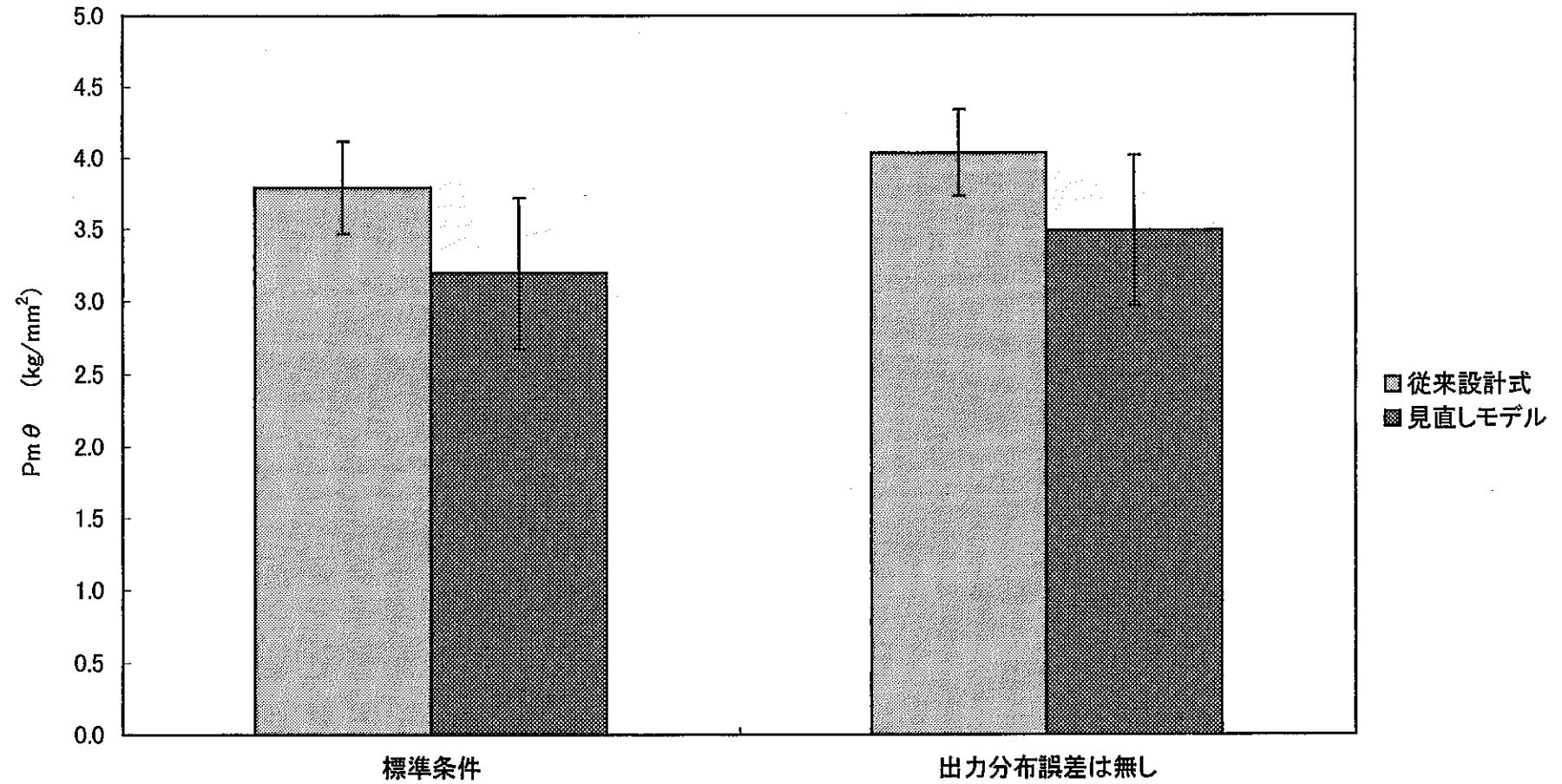


図4.2-3 出力分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力(最高温度部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

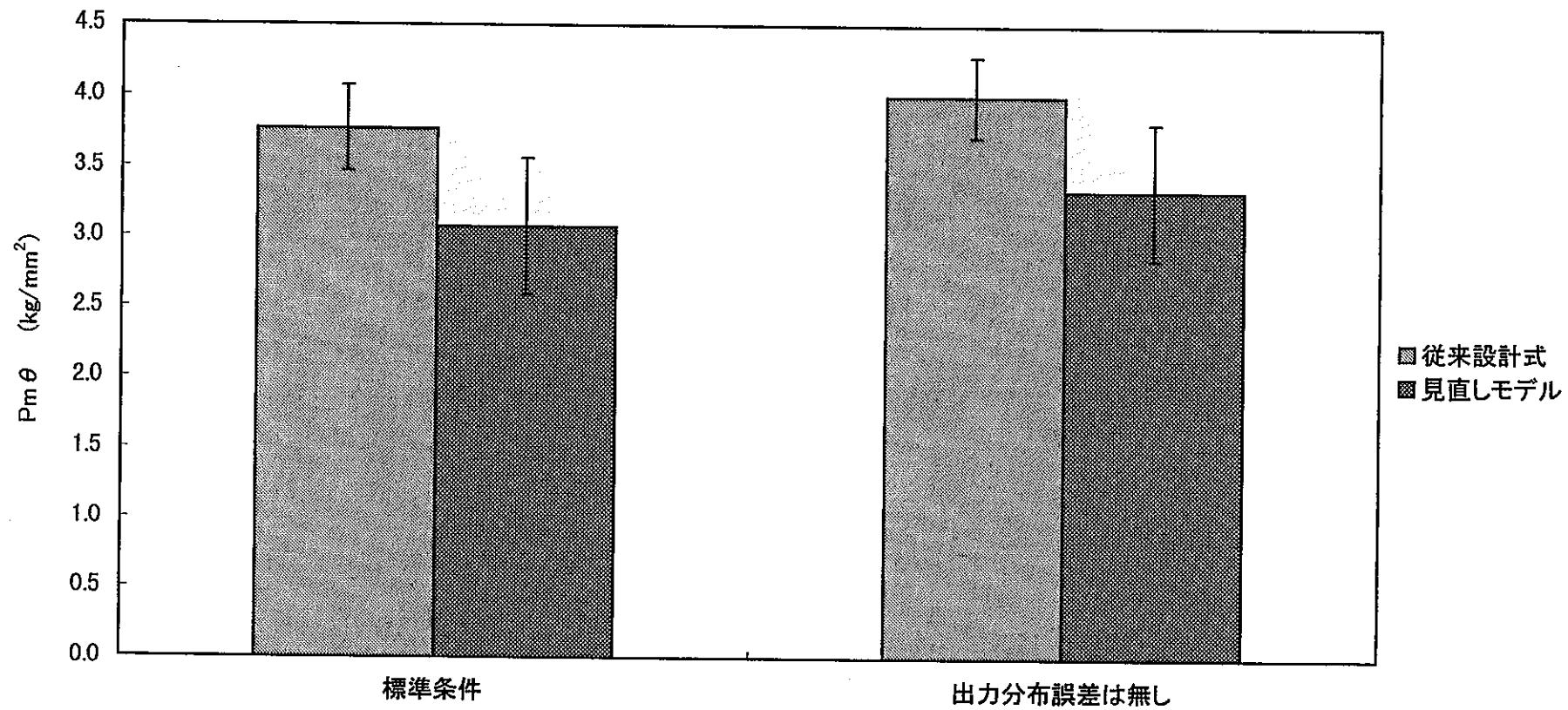


図4.2-4 出力分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力(最大発熱部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

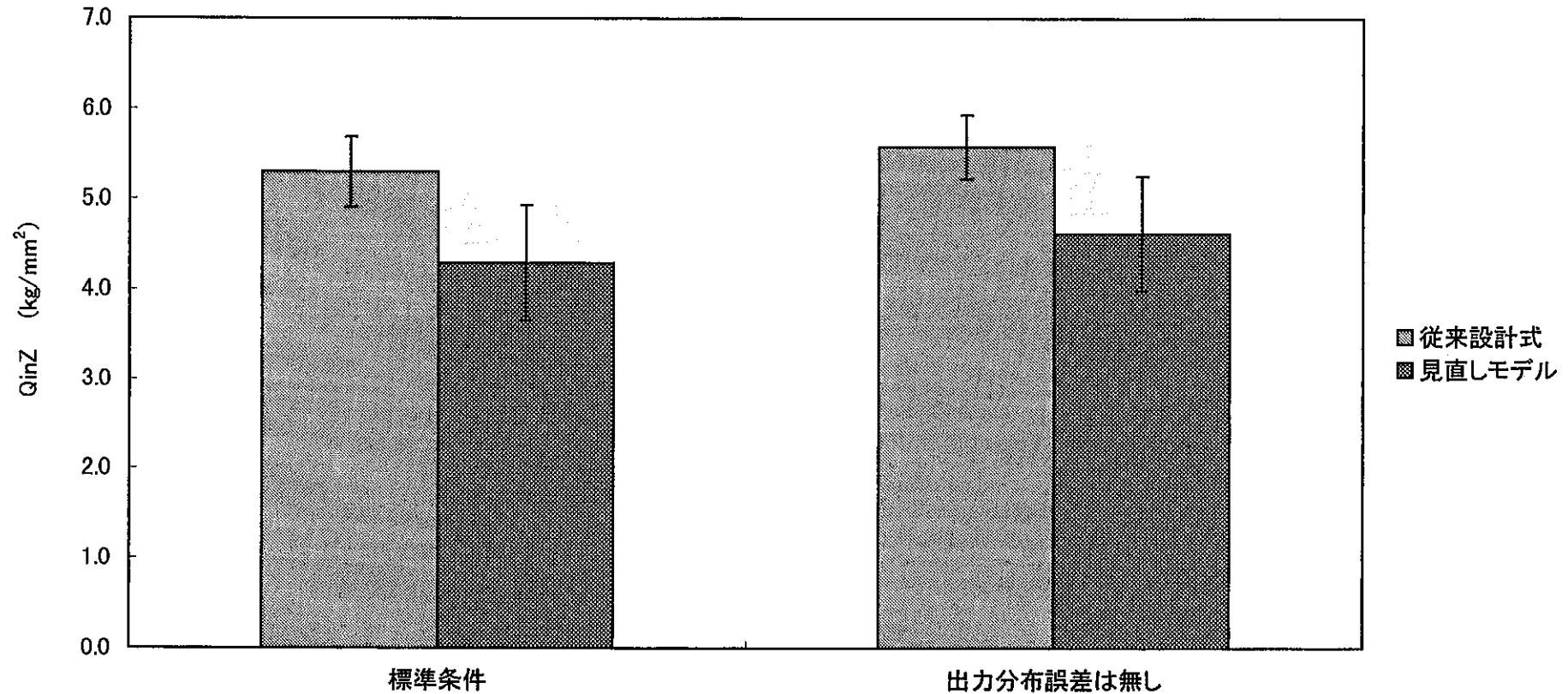


図4.2-5 出力分布誤差を無しとした場合の端栓部構造不連続による応力(上部端栓部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L.)

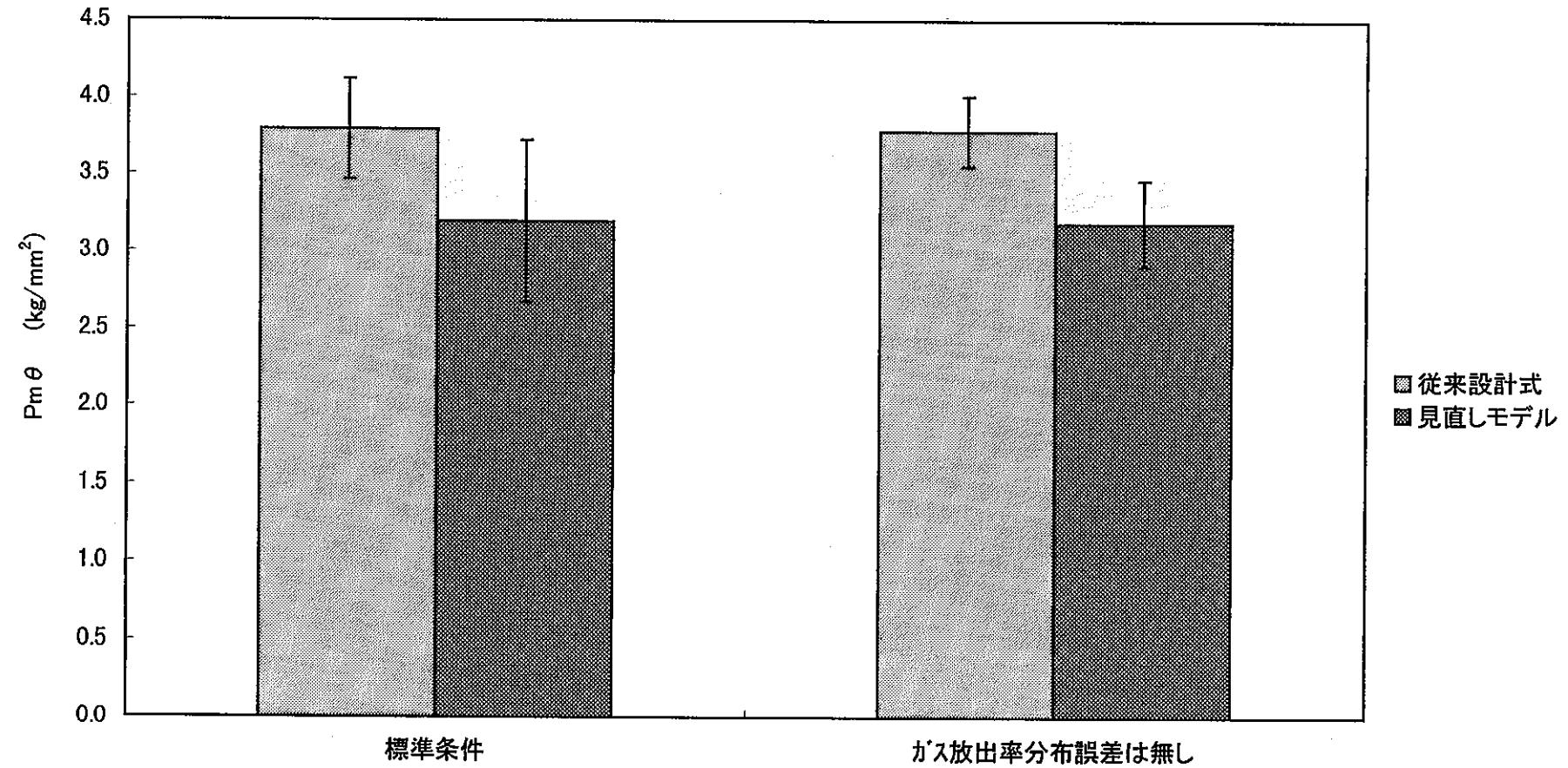


図4.2-6 ガス放出率分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力(最高温度部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

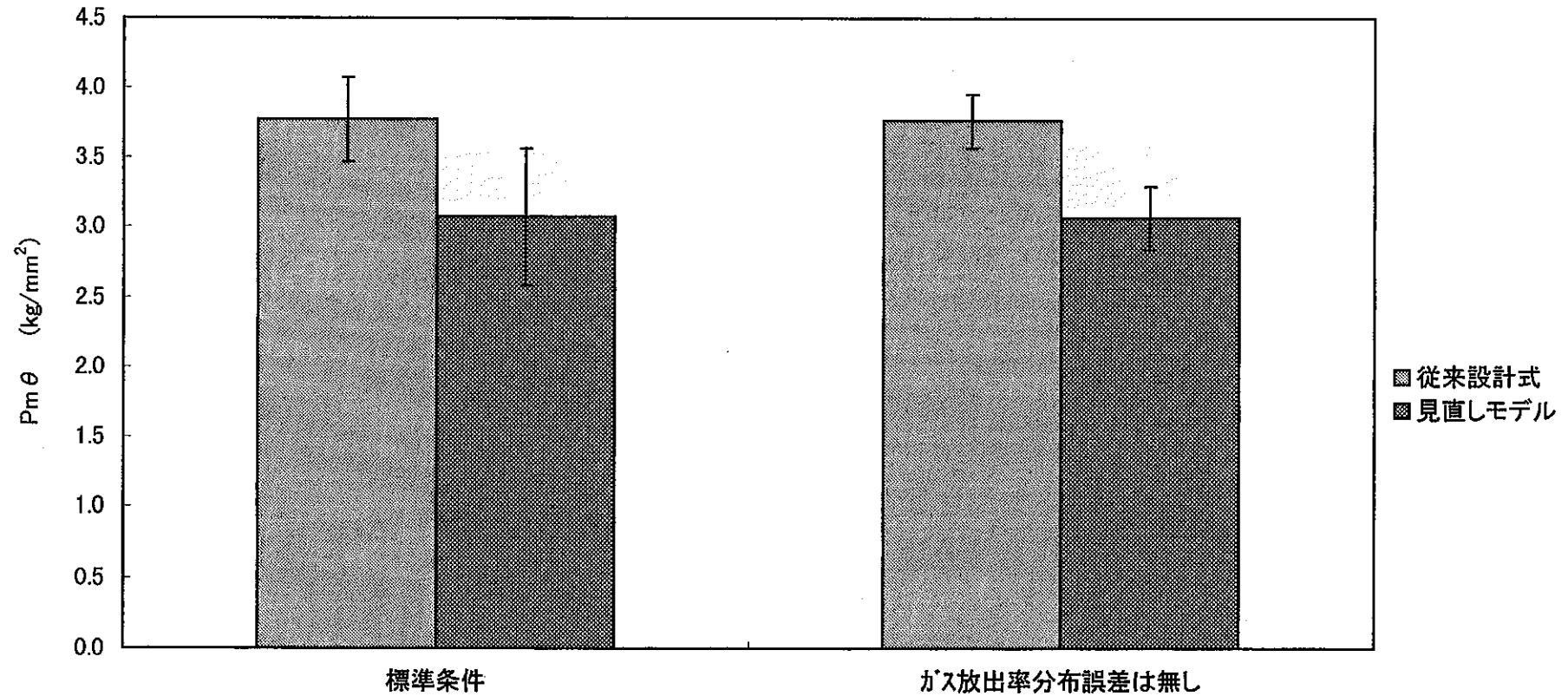


図4.2-7 ガス放出率分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力(最大発熱部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

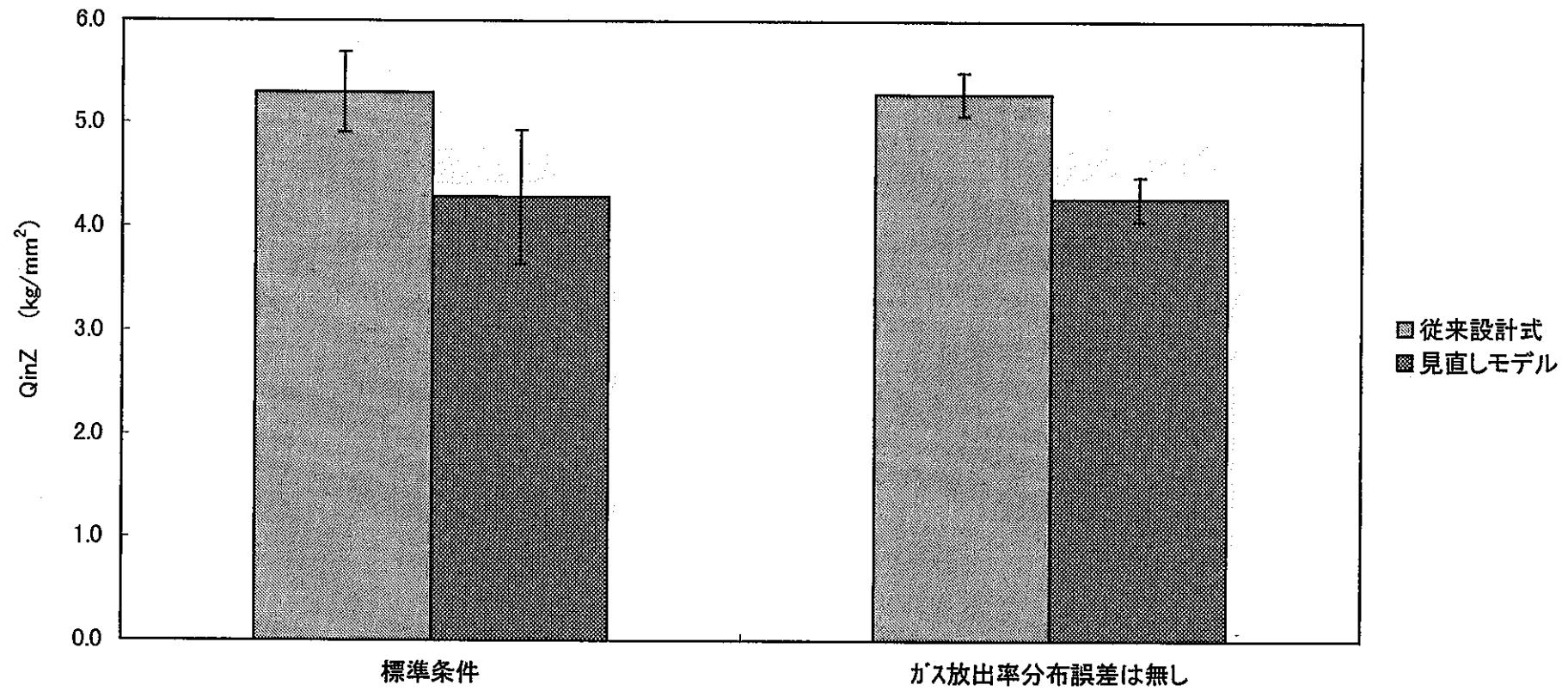


図4.2-8 ガス放出率分布誤差を無しとした場合の端栓部構造不連続による応力(上部端栓部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

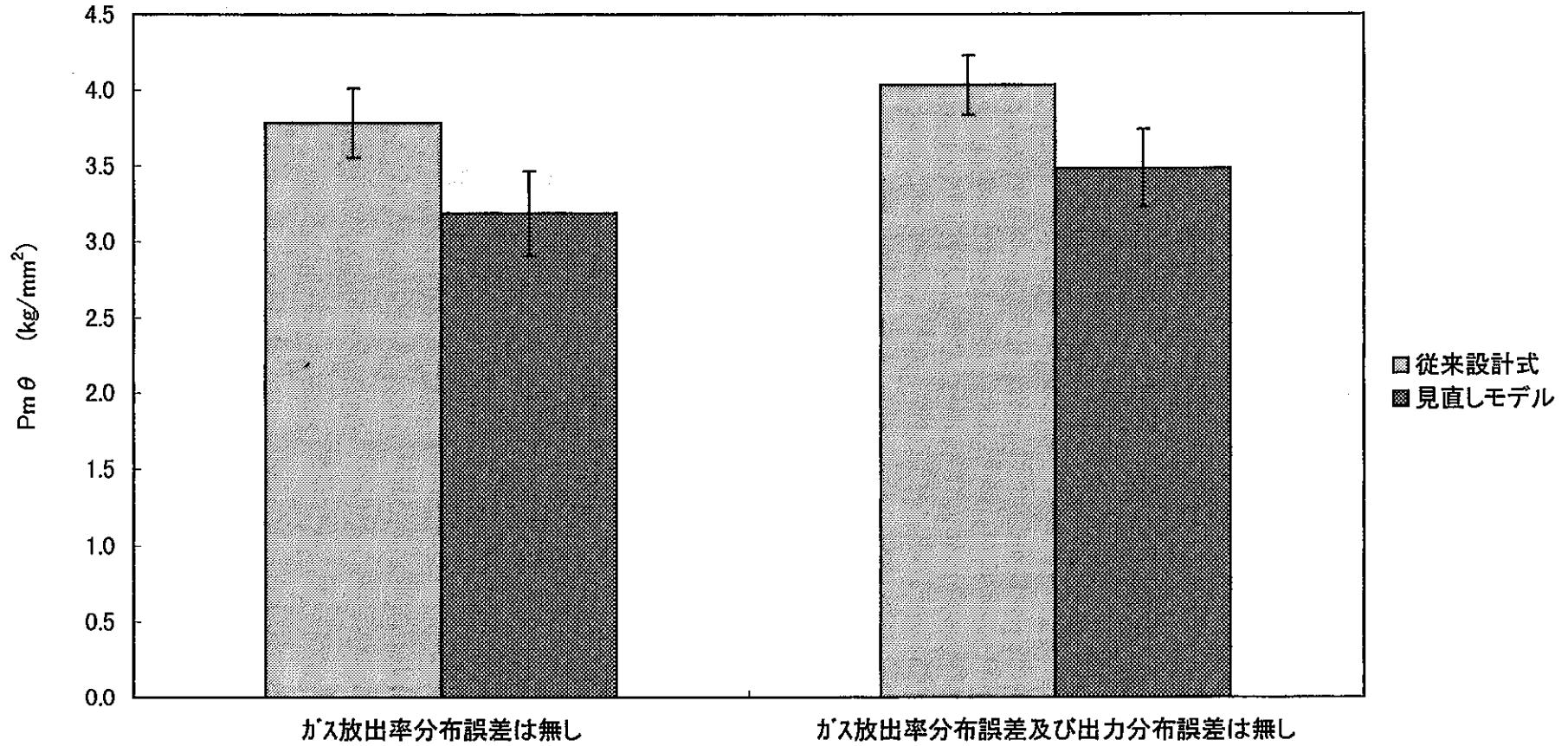


図4.2-9 ガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力(最高温度部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

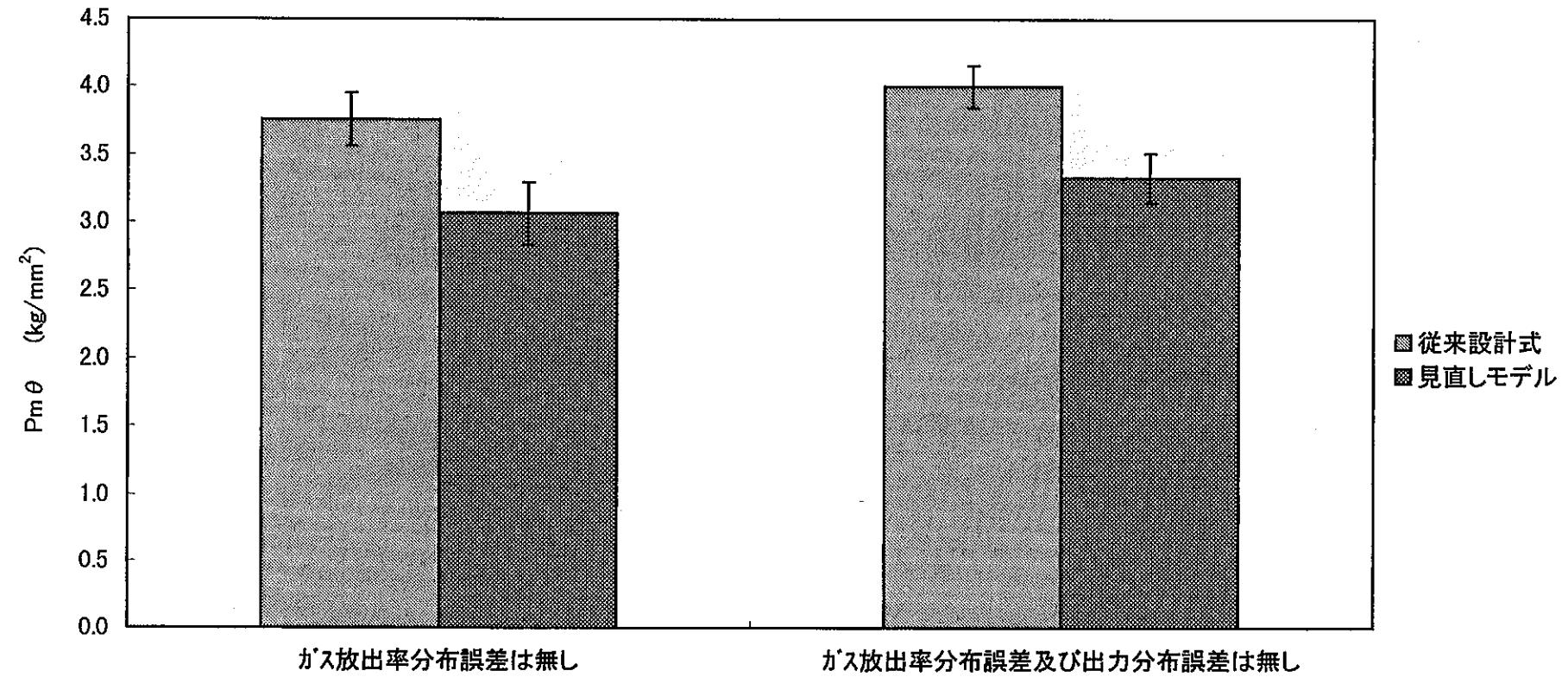


図4.2-10 ガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合の内外圧力差による応力(最大発熱部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

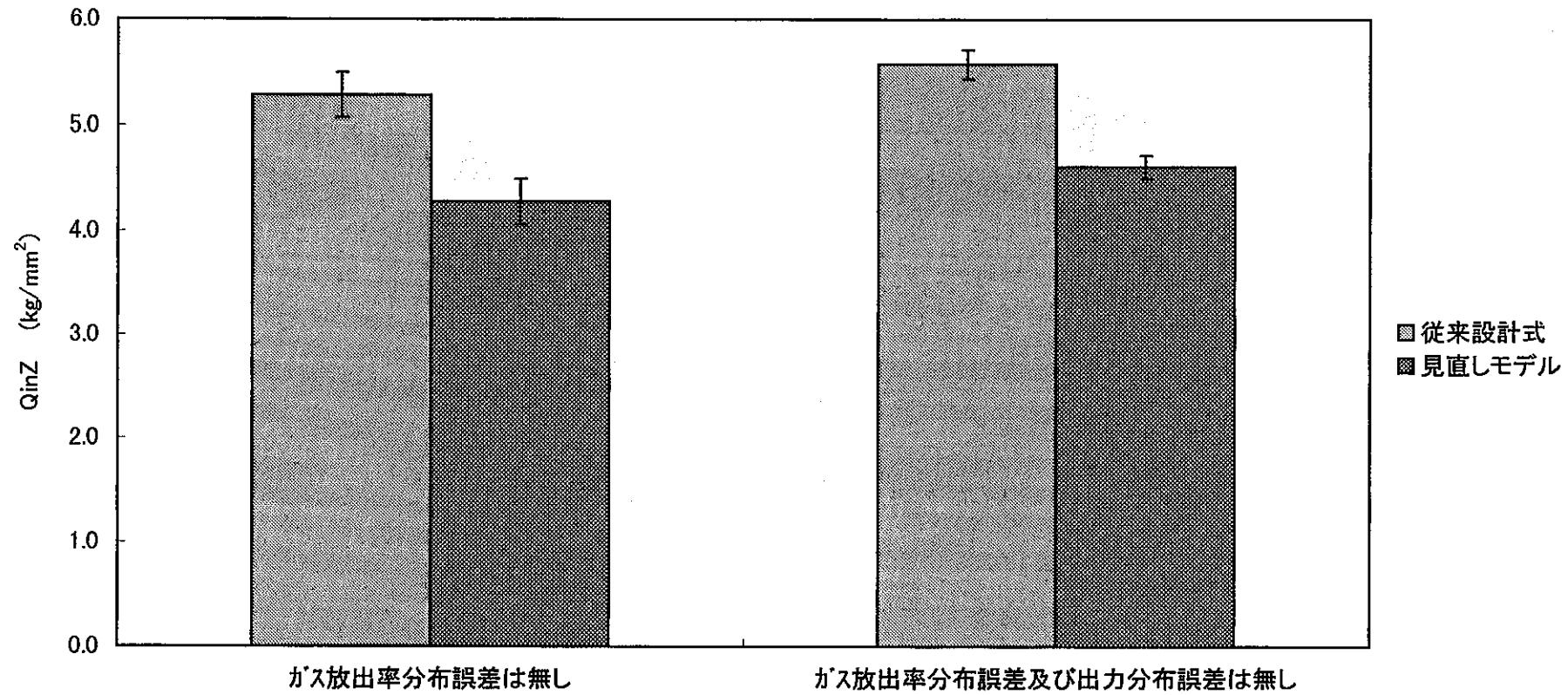


図4.2-11 ガス放出率分布誤差及び出力分布誤差を無しとした場合の端栓部構造不連続による応力(上部端栓部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L.)

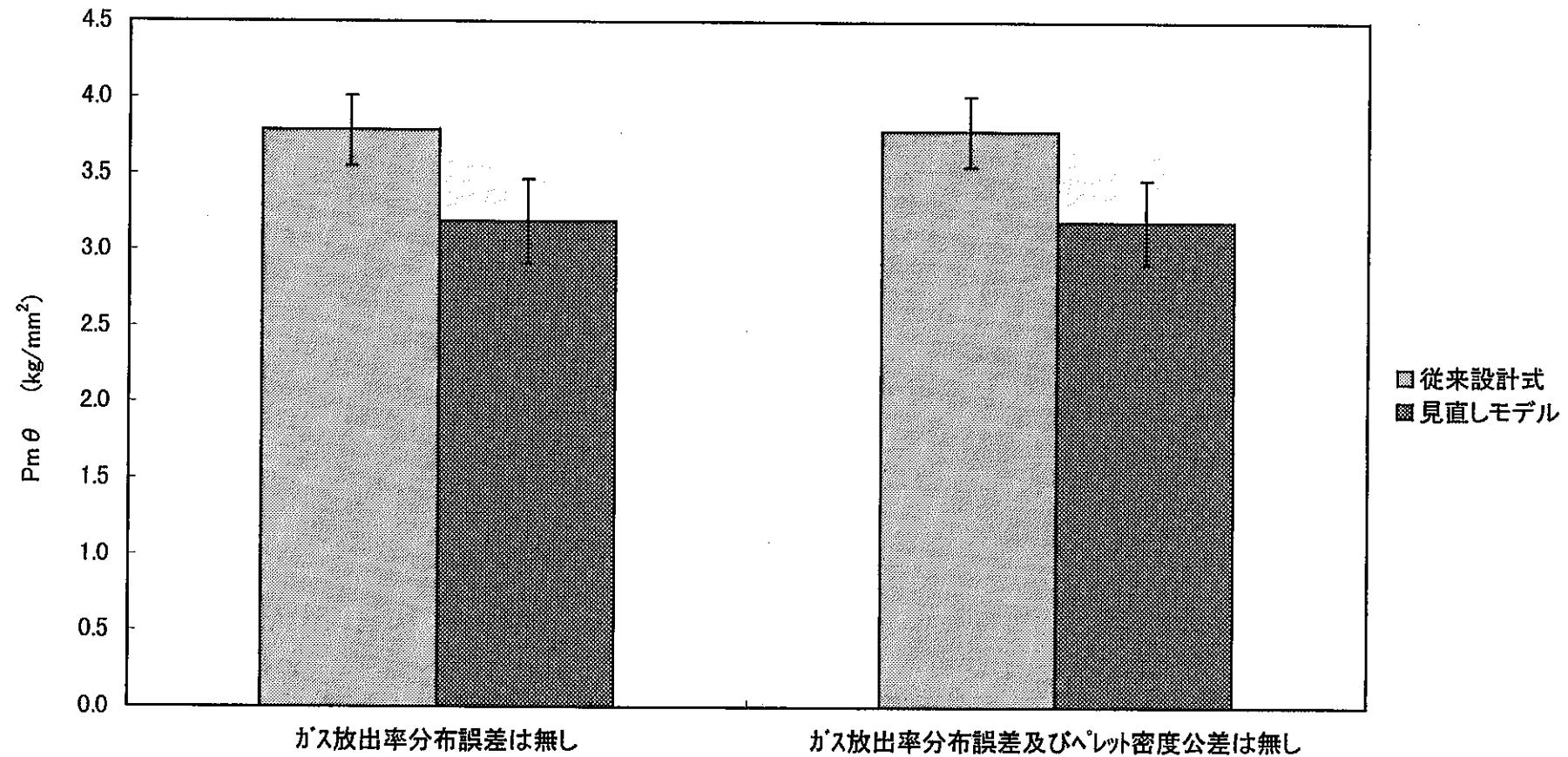


図4.2-12 ガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無しとした場合の内外圧力差による応力(最高温度部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

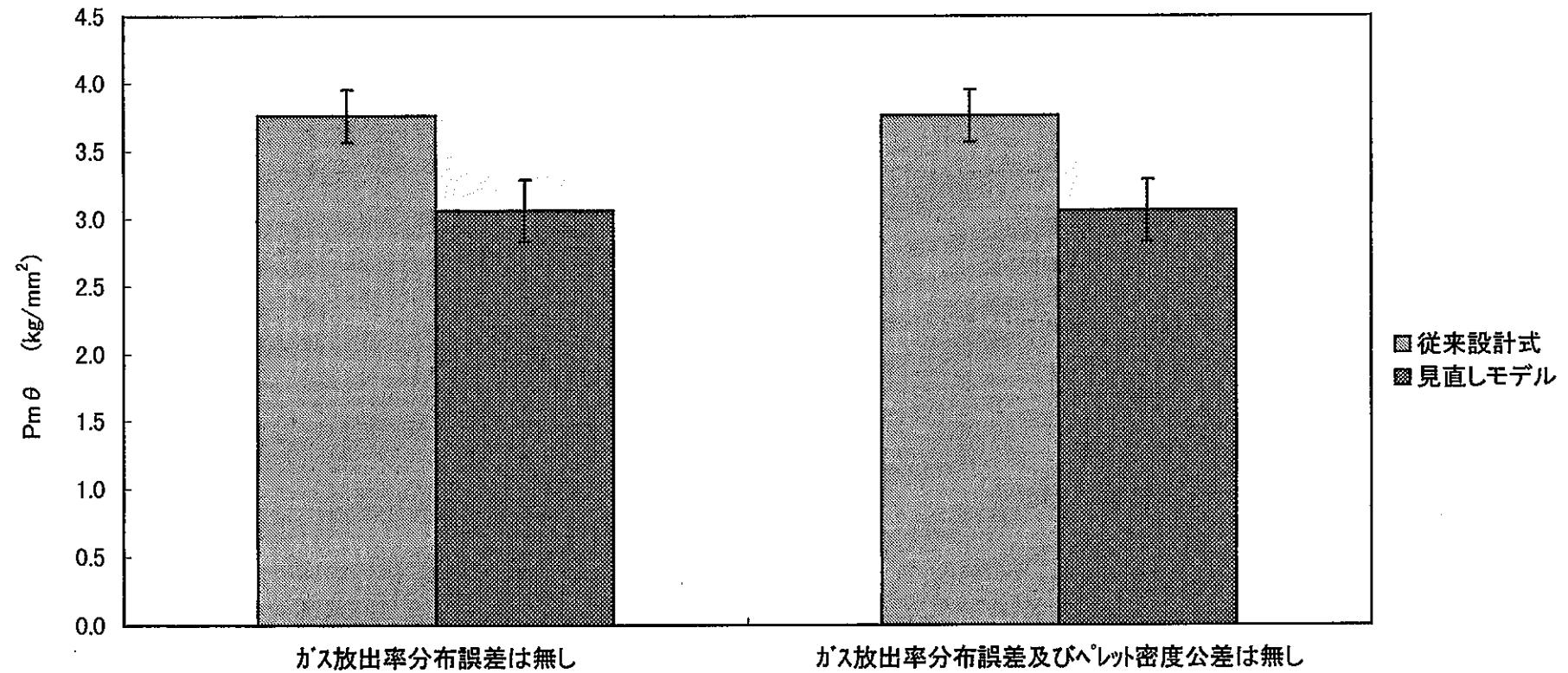


図4.2-13 ガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無しとした場合の内外圧力差による応力(最大発熱部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

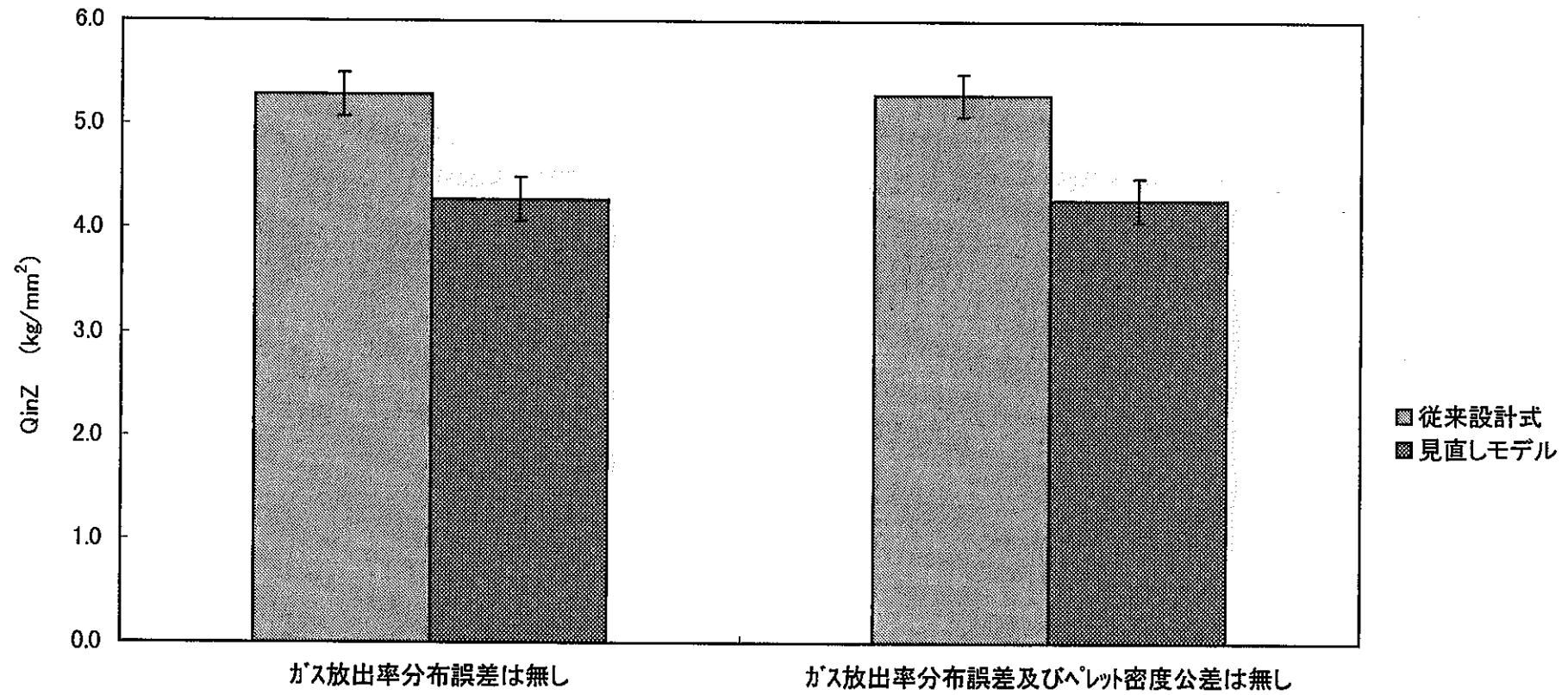


図4.2-14 ガス放出率分布誤差及びペレット密度公差を無しとした場合の端栓部構造不連続による応力(上部端栓部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

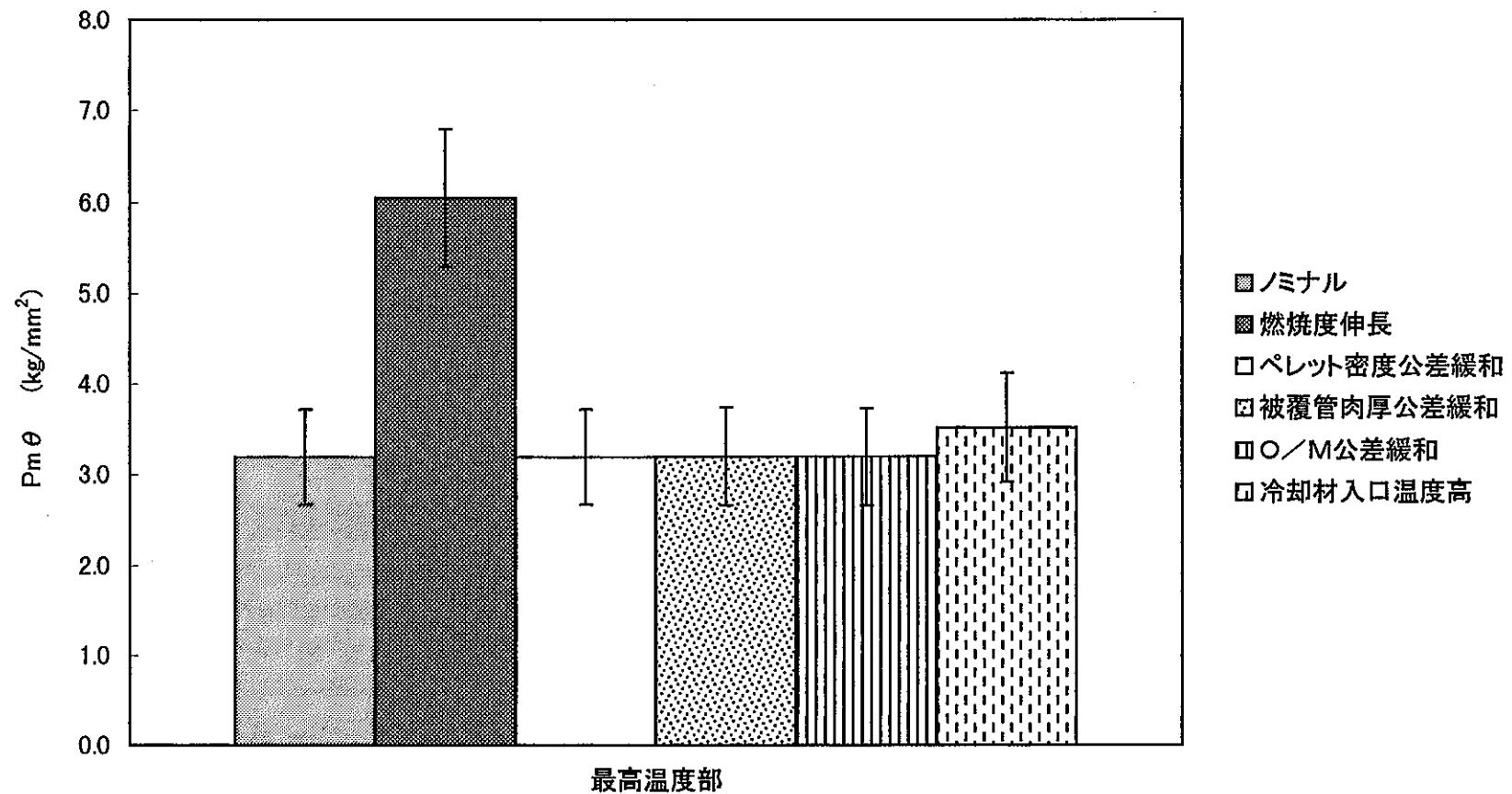


図4.2-15 見直しモデルでの内外圧力差による応力(最高温度部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L.)

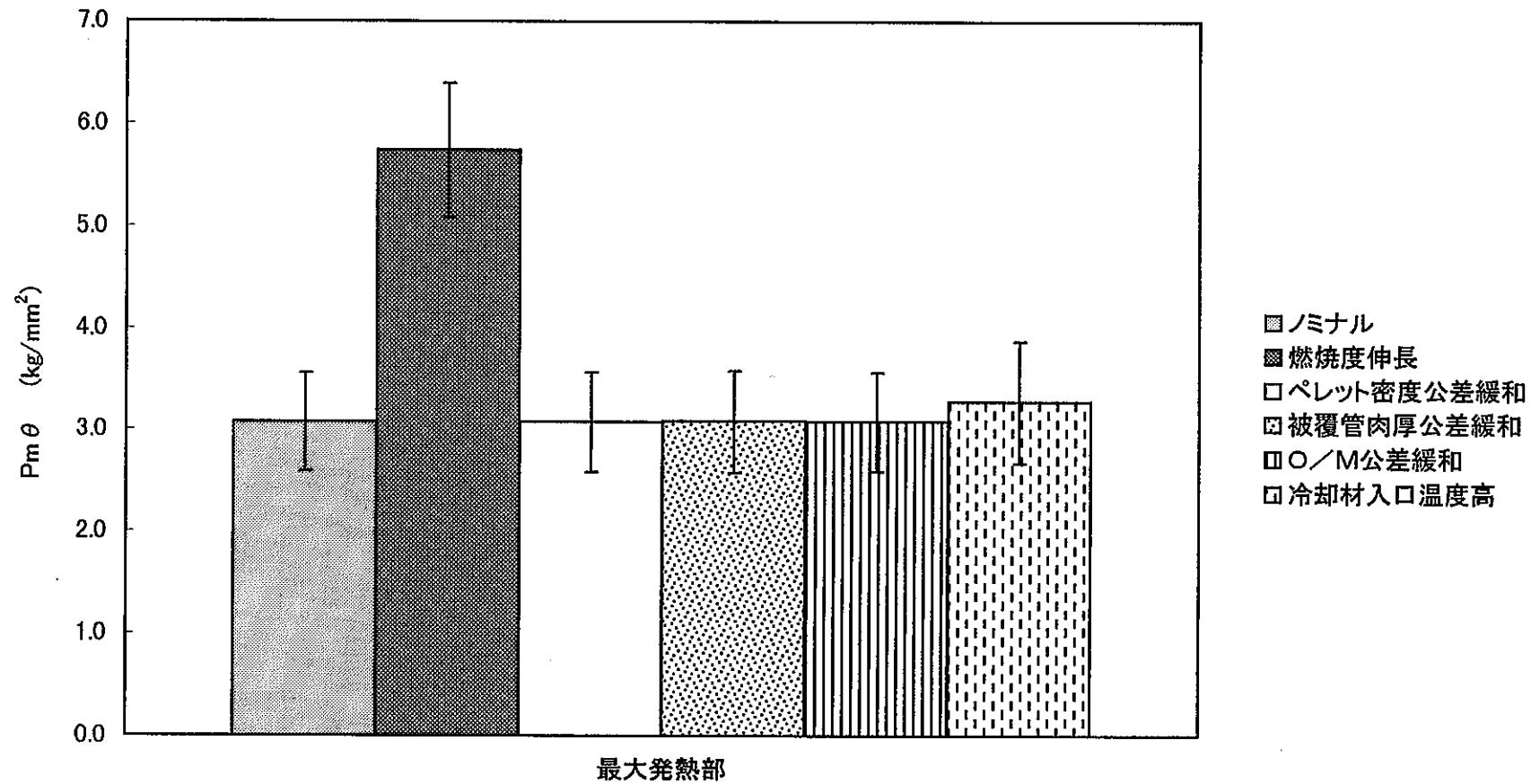


図4.2-16 見直しモデルでの内外圧力差による応力(最大発熱部)
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

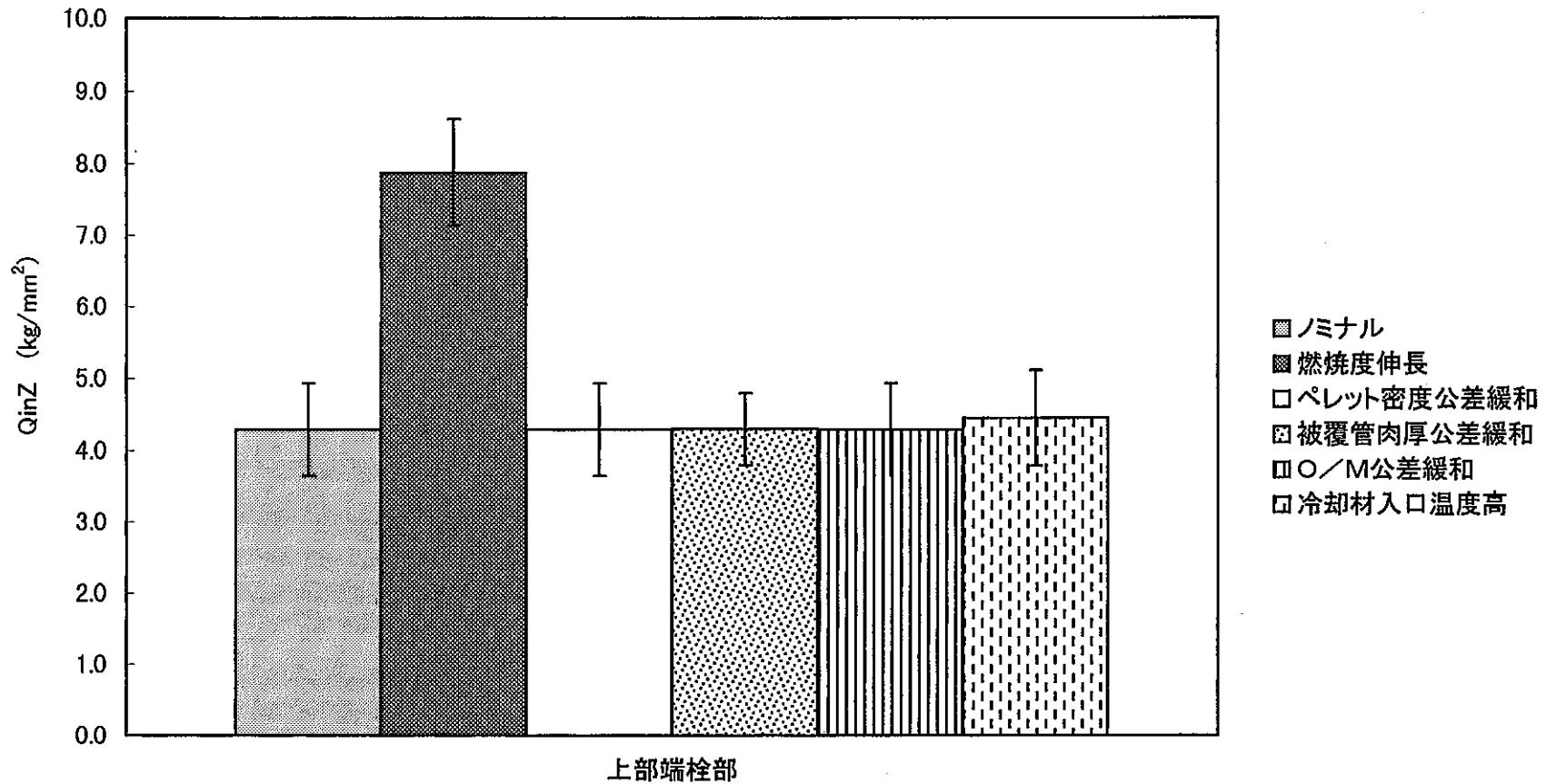


図4.2-17 見直しモデルでの端栓部構造不連続による応力
(初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L)

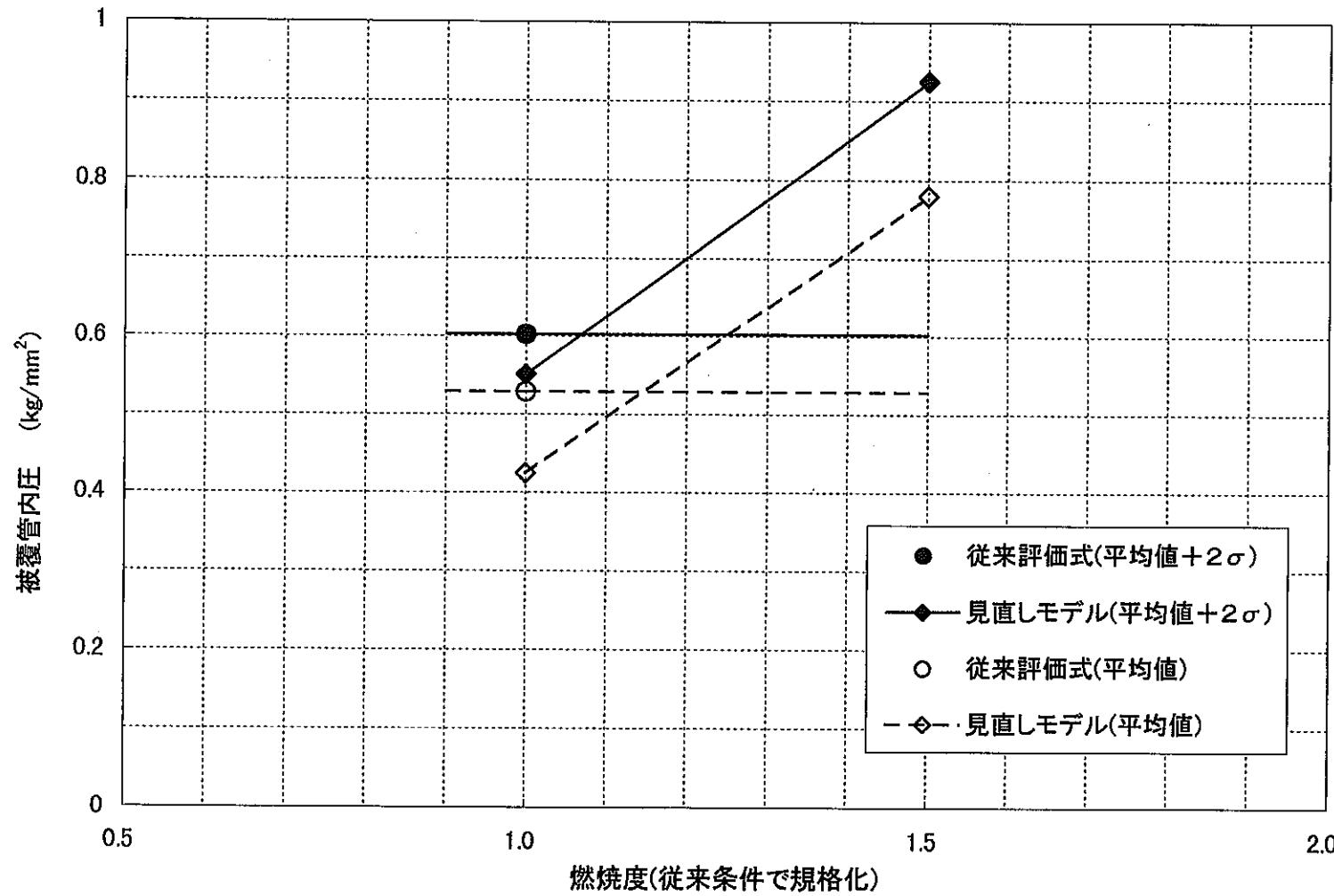


図4.2-18 燃焼度伸長の被覆管内圧への影響

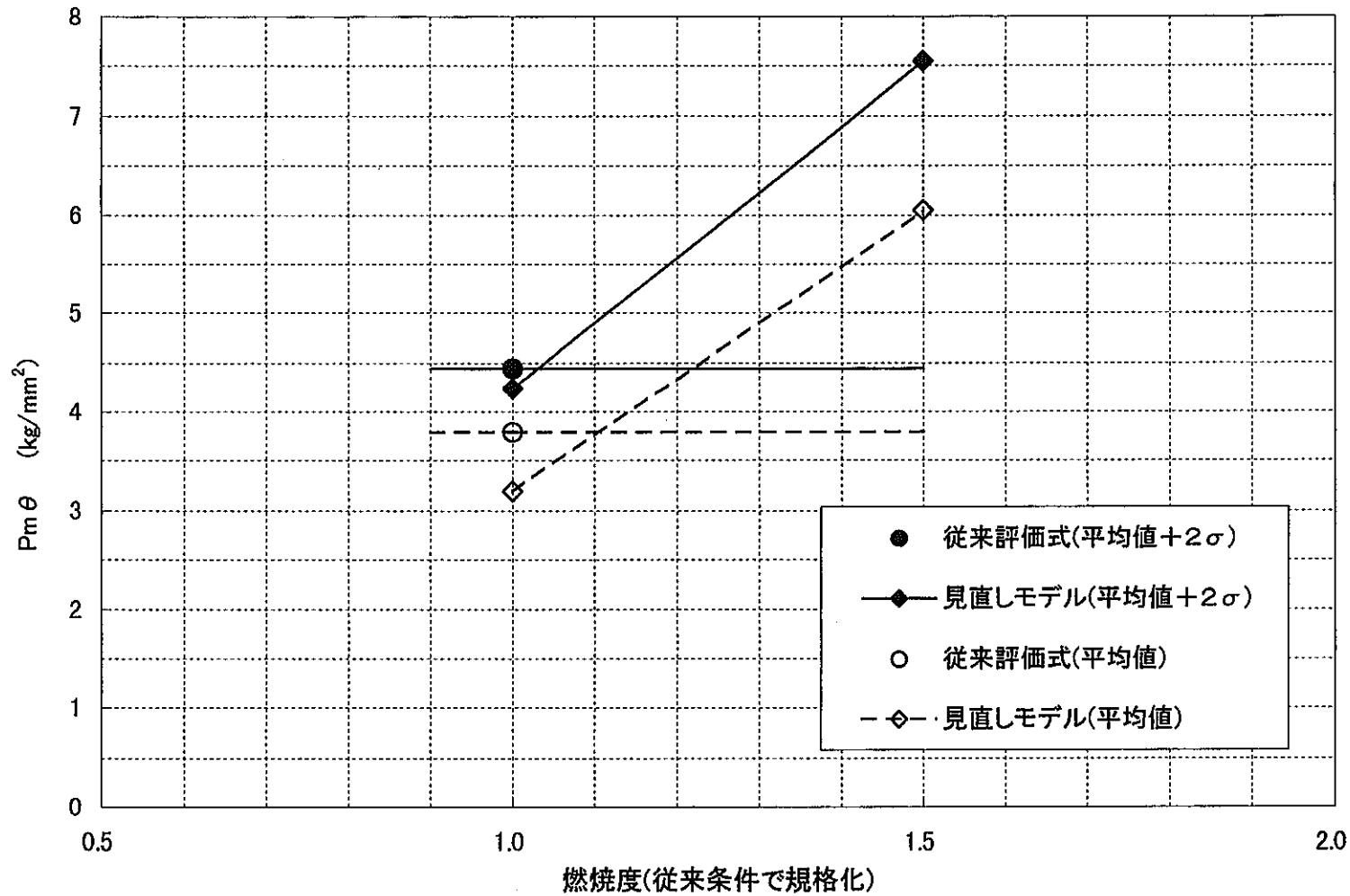


図4.2-19 燃焼度伸長の内外圧力差による応力への影響

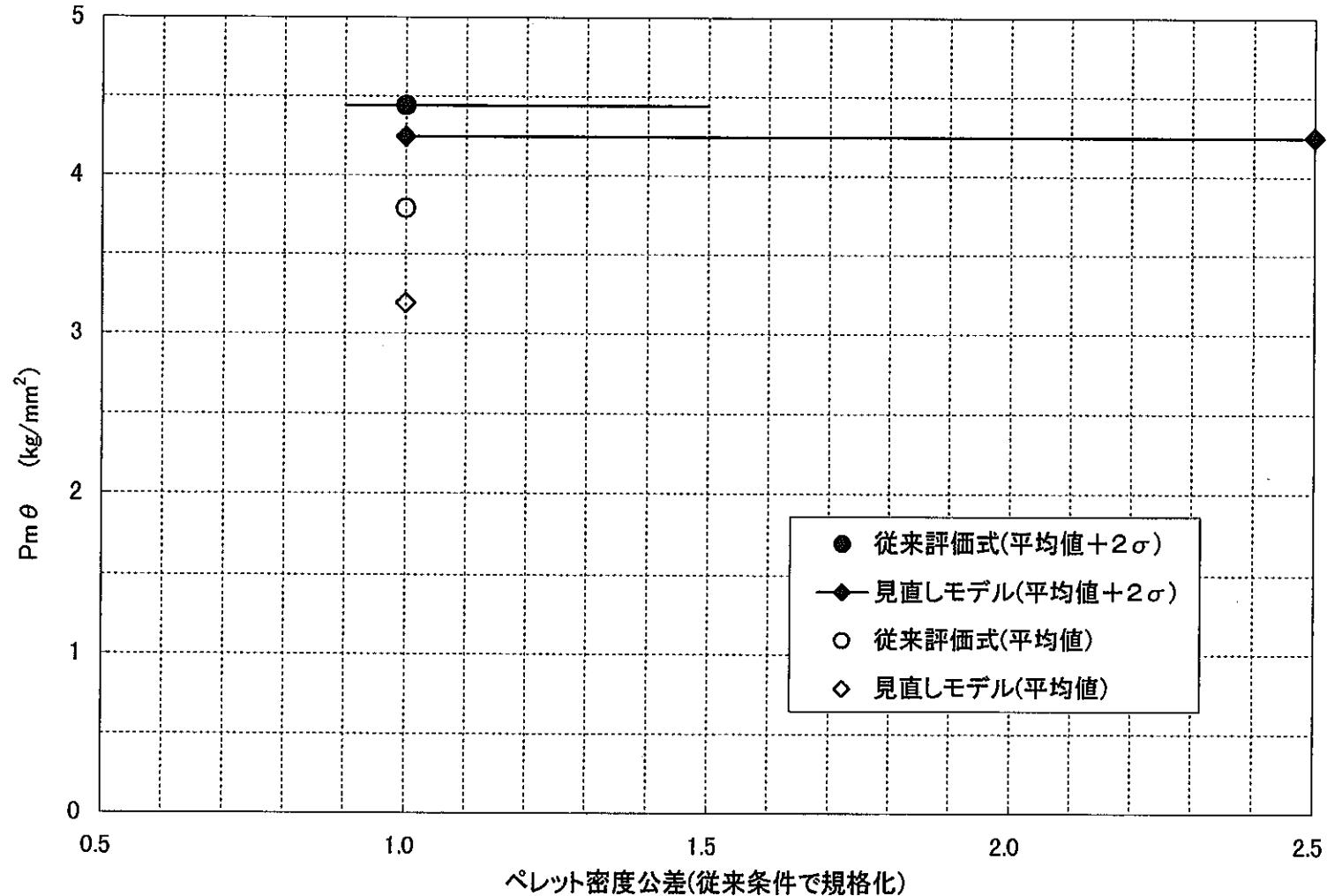


図4.2-20 ペレット密度公差緩和の内外圧力差による応力への影響

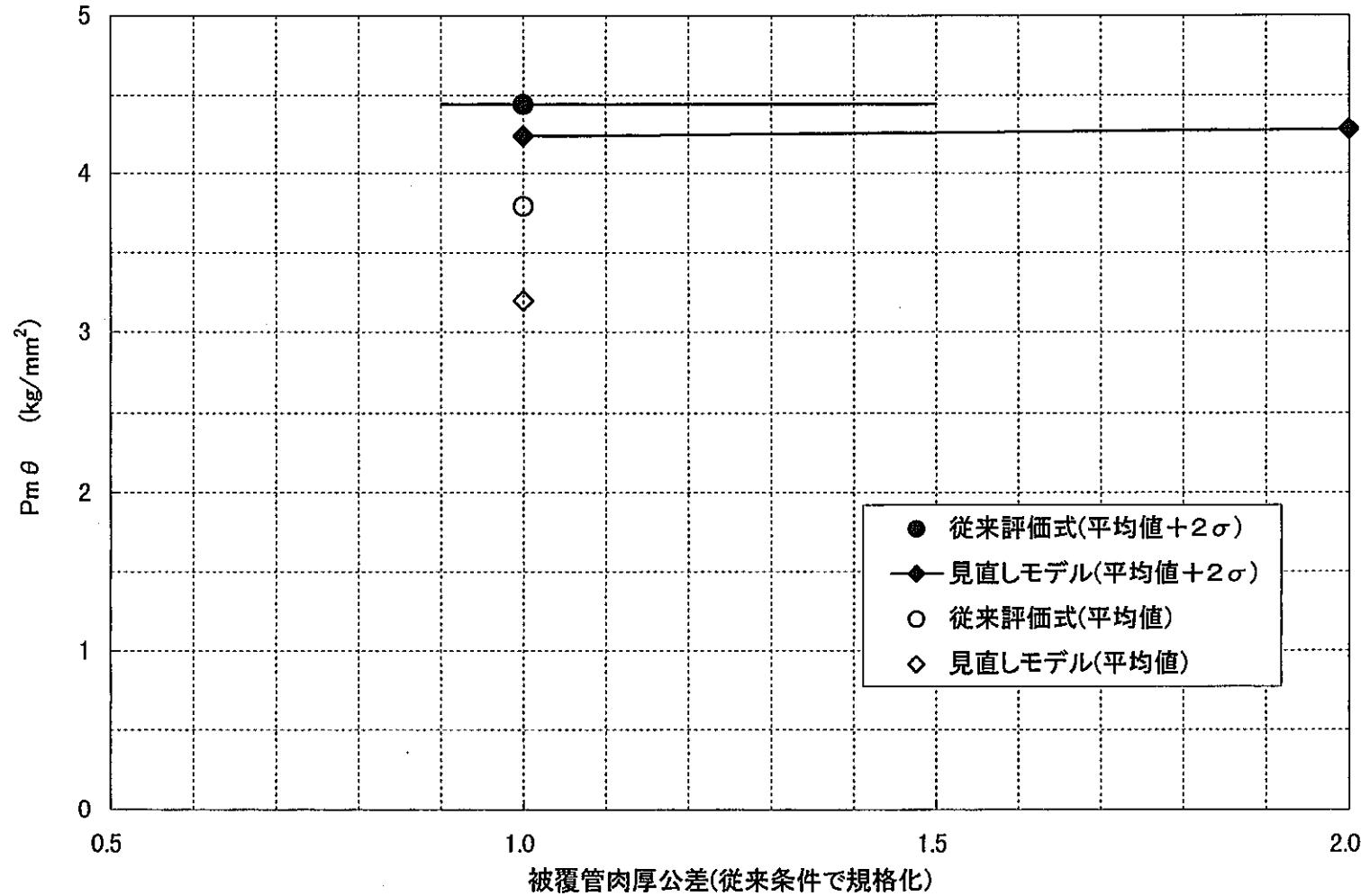


図4.2-21 被覆管肉厚公差緩和の内外圧力差による応力への影響

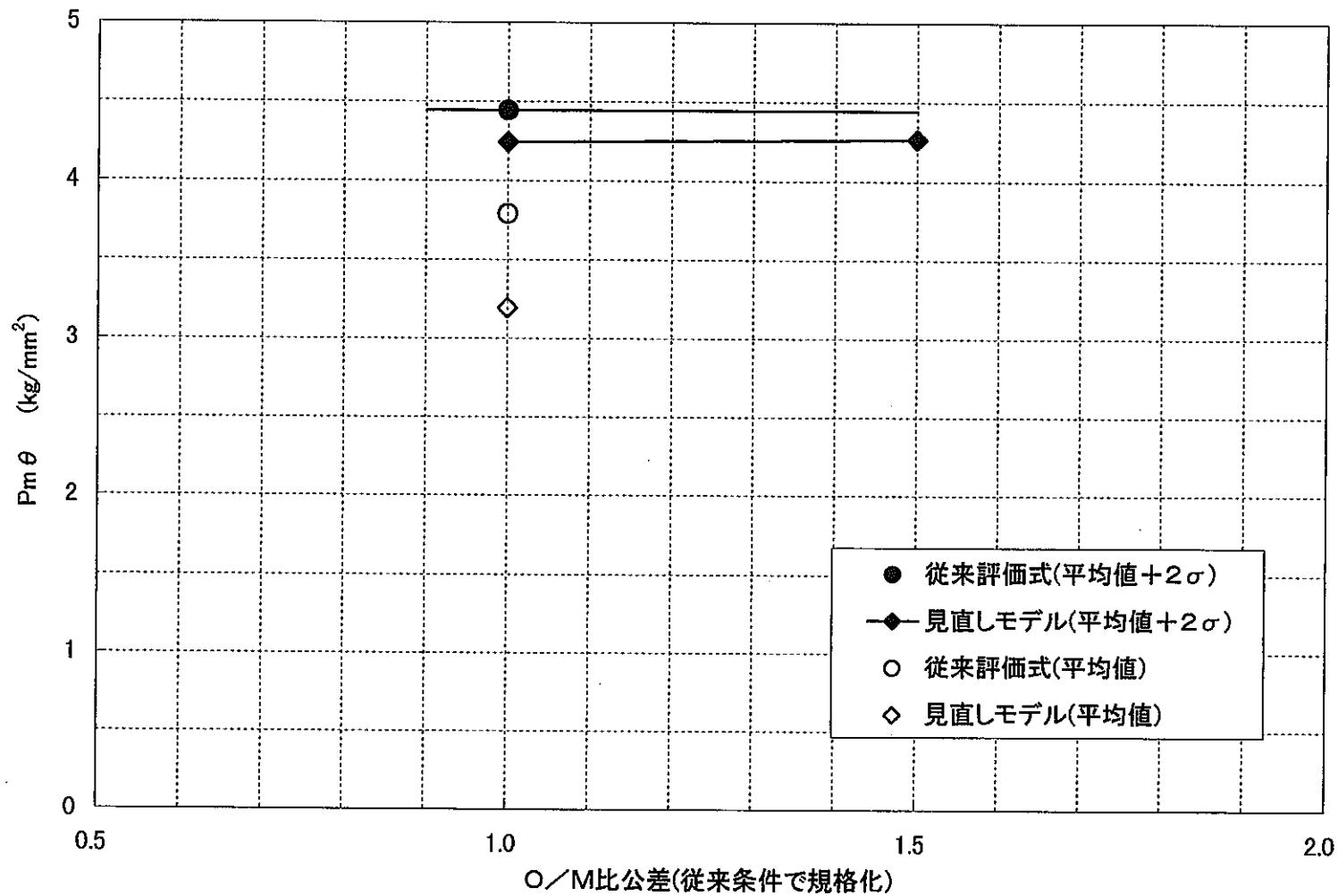


図4.2-22 O/M比公差緩和の内外圧力差による応力への影響

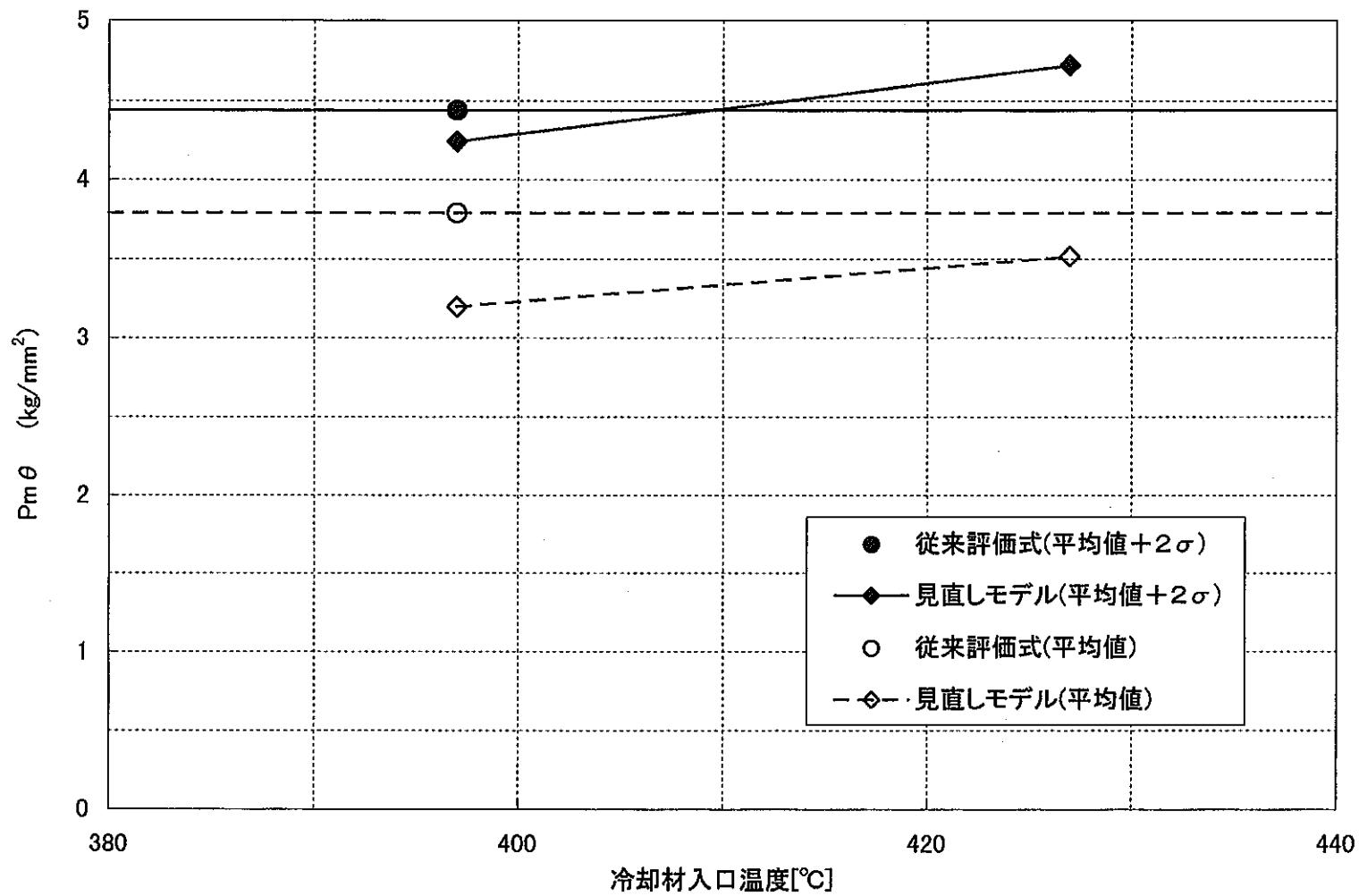


図4.2-23 冷却材入口温度上昇の内外圧力差による応力への影響

CDF(対数正規分布へのフィッティング結果)

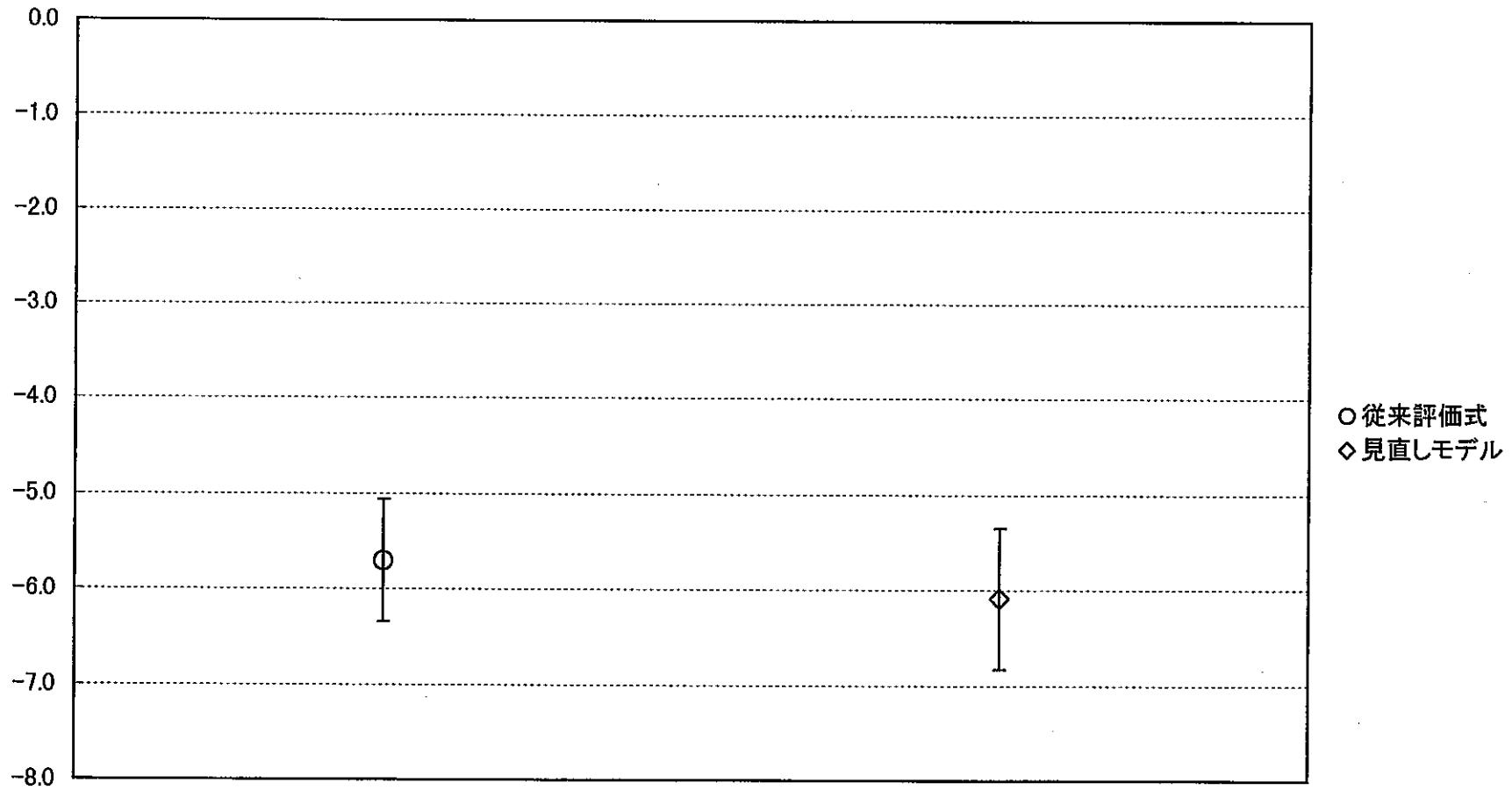


図4.2-24 CDFの従来評価式と見直しモデルの比較(炉心上端部) (初装荷炉心燃料要素,通常運転,E.O.L.)

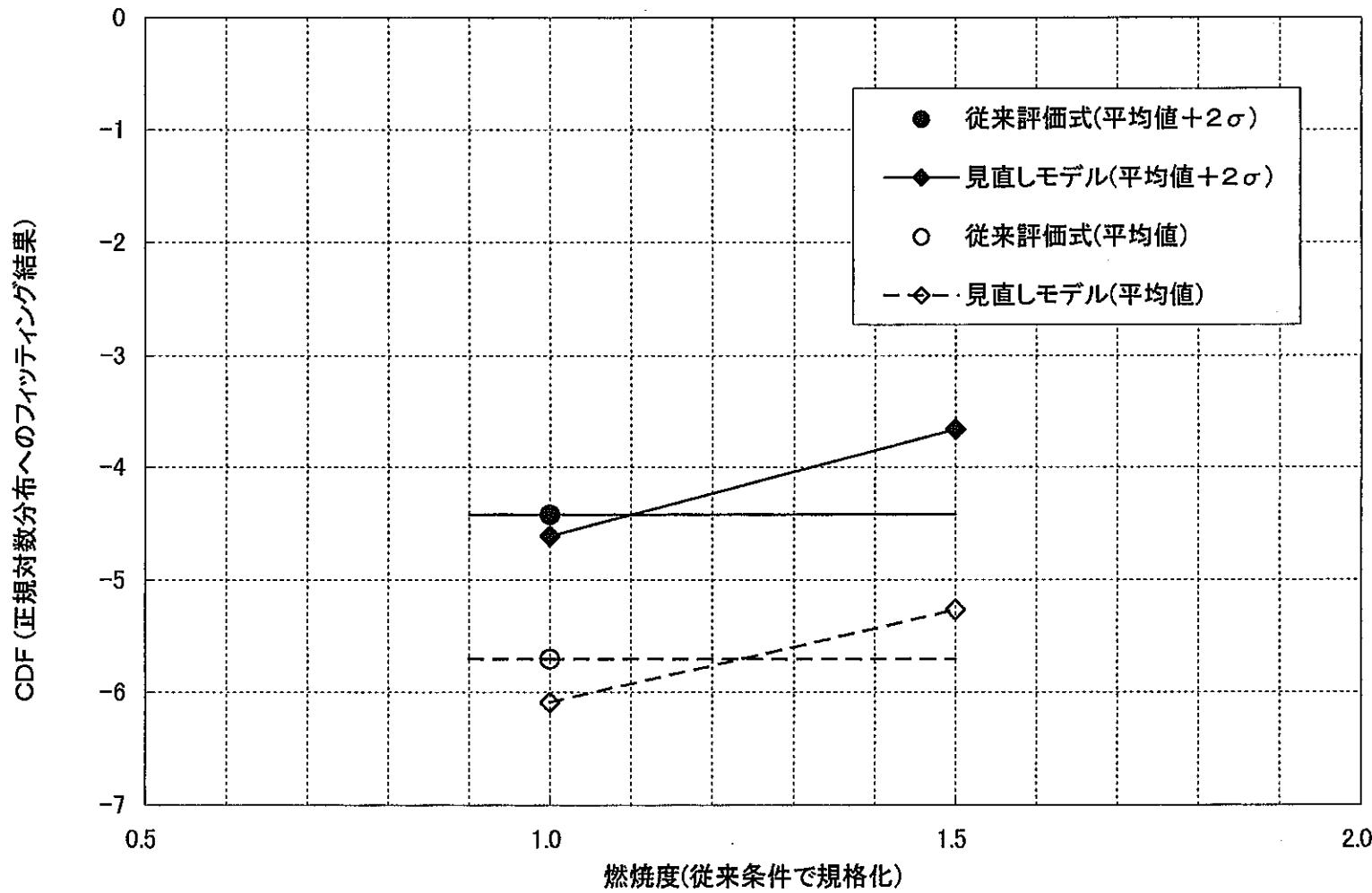


図4.2-25 燃焼度伸長のCDFへの影響

CDF (IE規対数分布へのfitting結果)

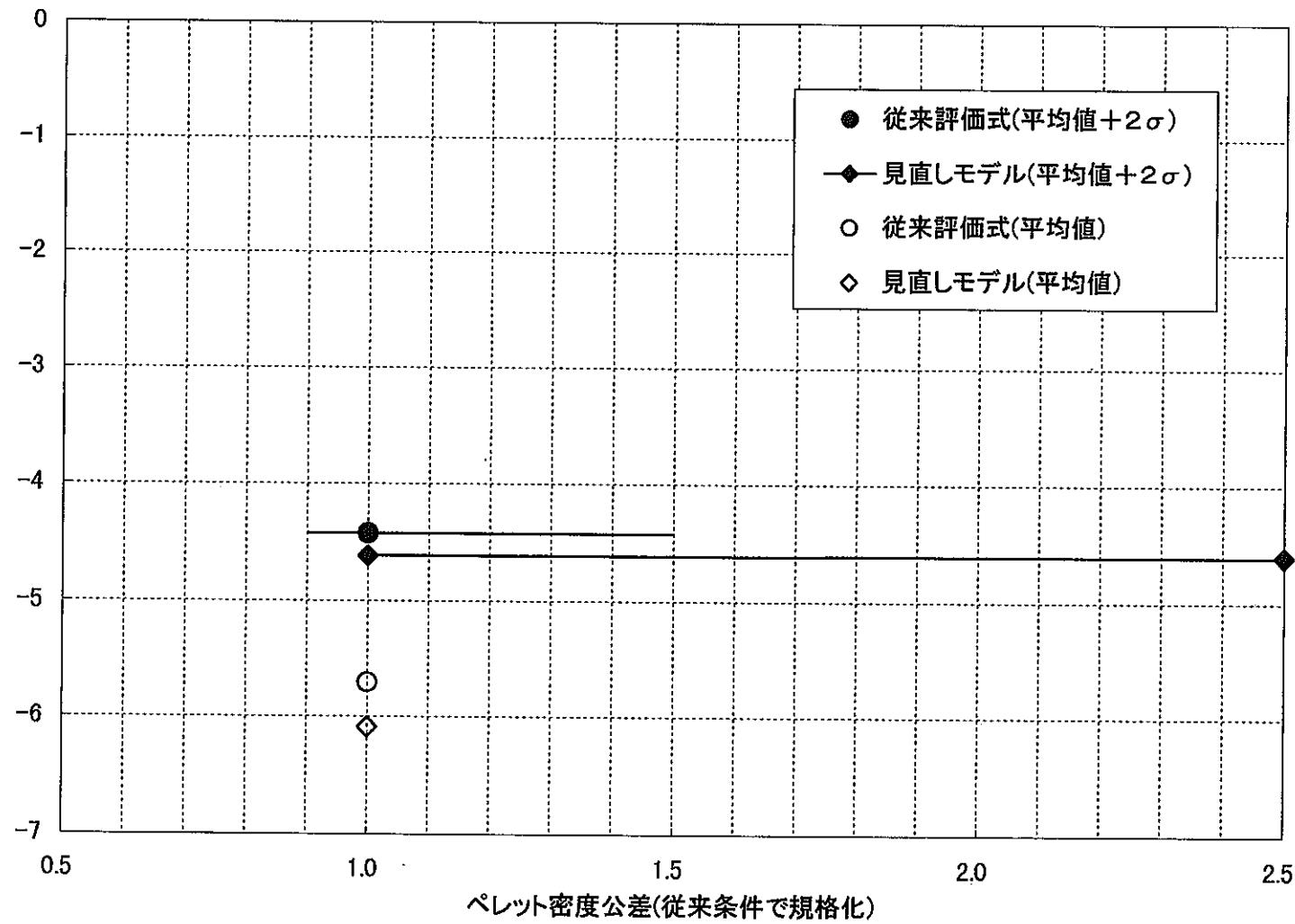


図4.2-26 ペレット密度公差緩和のCDFへの影響

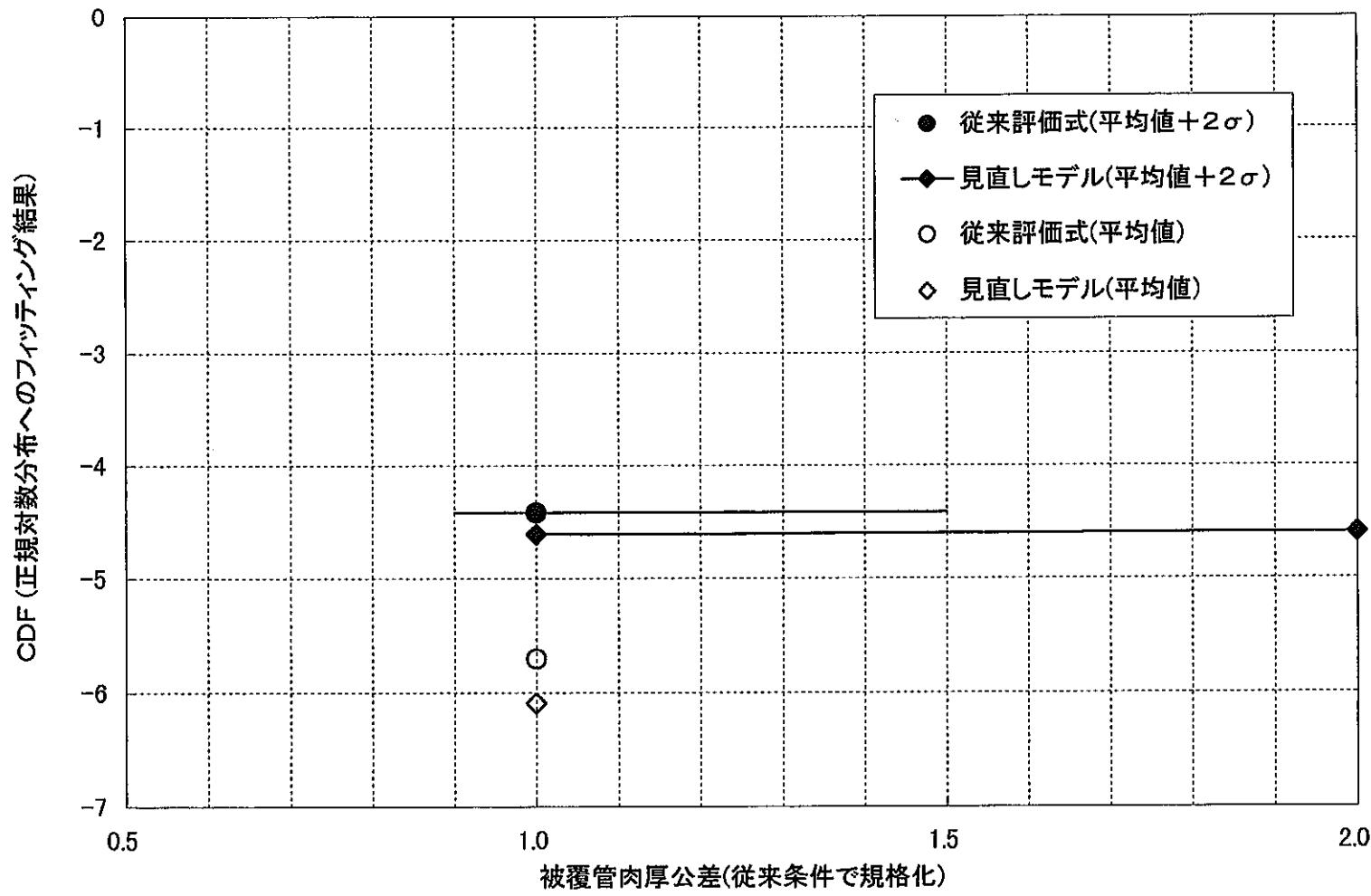


図4.2-27 被覆管肉厚公差緩和のCDFへの影響

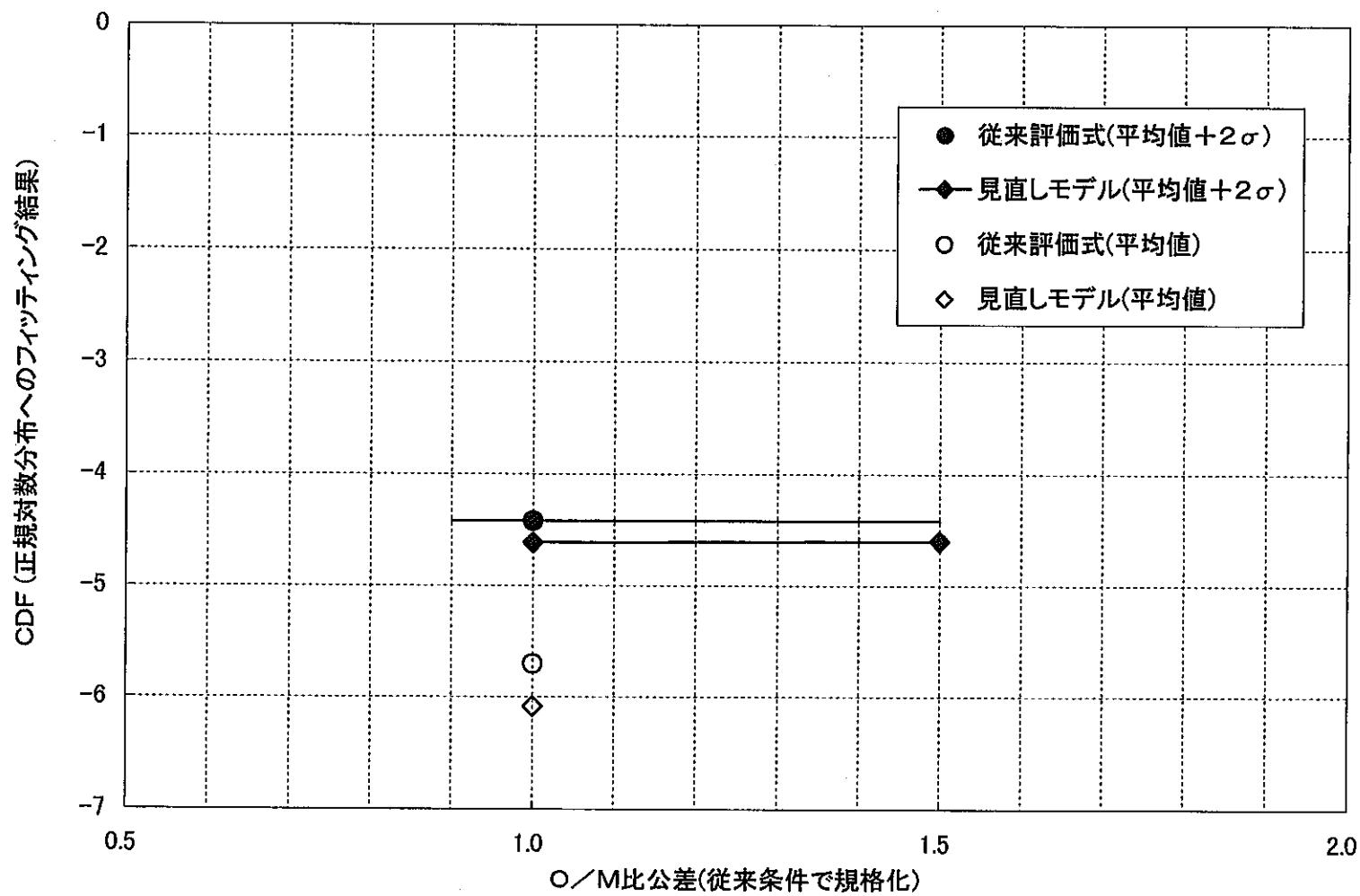


図4.2-28 O/M比公差緩和のCDFへの影響

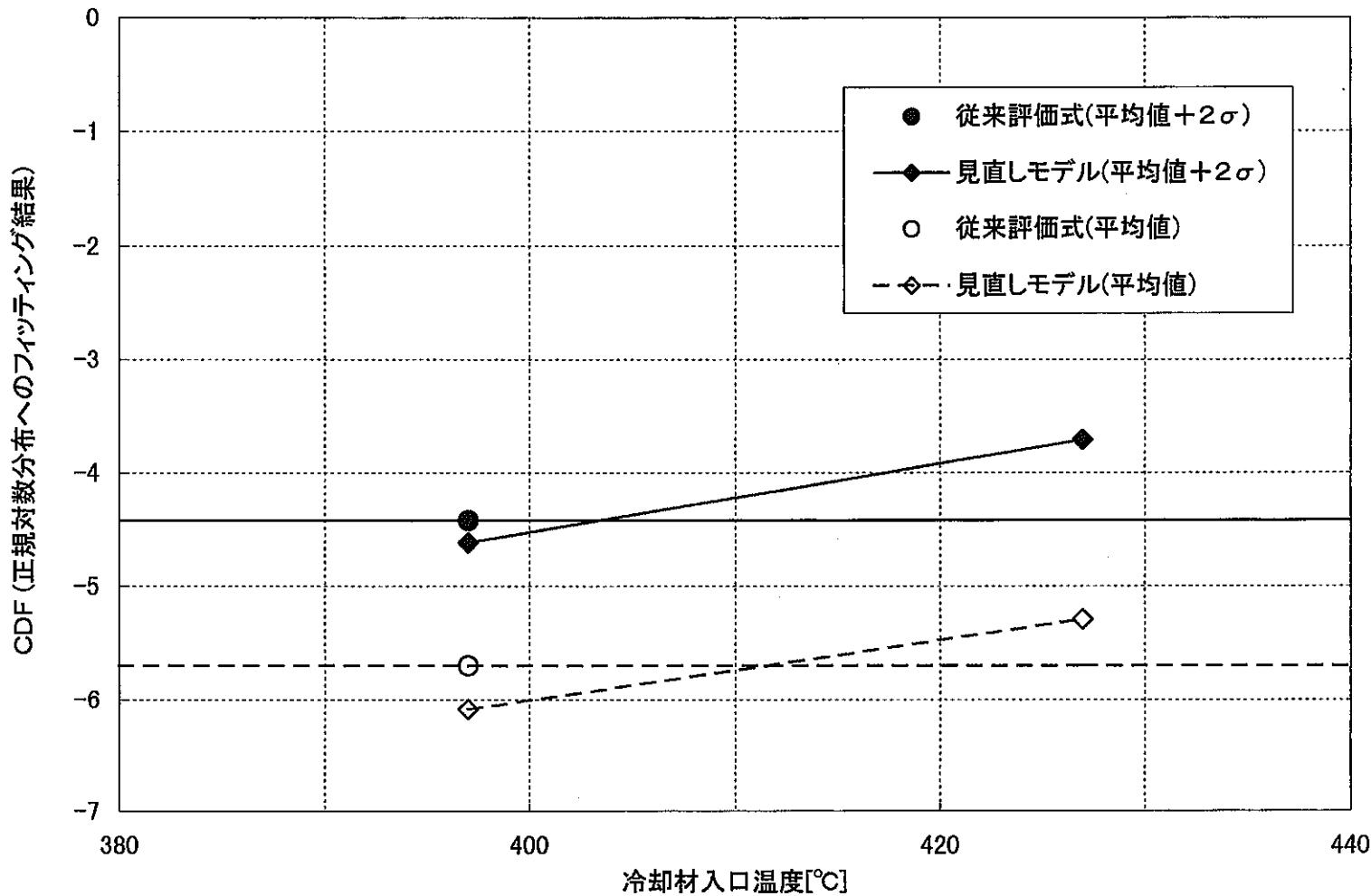


図4.2-29 冷却材入口温度上昇のCDFへの影響

5. 設計合理化に必要なデータ等の摘出

確率論的な評価における不確かさの要因（物性値）を図 5-1 に示す。確率論においては最終的には現象が統計的に不確かさを持つ部分のみを評価したいが、実際は測定誤差や挙動の相関の記述が不足等のためにその分が誤差として上記の現象の誤差に混じり込んでいる。今回の研究ではデータに基づき

①種々のパラメータの関数にした物性式（感度評価可能とするため）

②統計的に不確かさを評価できるだけのデータ数を持って設定した物性式を作成を行った。これは各種パラメータに対する燃料挙動への影響を検討するには、相関を十分に記述すること及び統計的性質が分かったデータを用いることが必要であるからである。

4章においては、燃料健全性上の重要な挙動である応力及びCDFに影響する物性値の内FPガス放出率、FCCI量について常陽データによる見直しを行い確率論的な検討を行った。この結果パラメータ間の相関を記述できても、物性データのばらつき自体が大きいとパラメータ間の相関の効果が明確に現れないことが明らかとなった。これより設計合理化においては、各種のパラメータを変えたデータを取得するだけでなくデータ自身の不確かさを出来るだけ小さくすることが各種のパラメータへの感度を検討するには必要であること、すなわち評価式の不確かさを小さくすることでが必要となることを示している。

評価式の不確かさを小さくするには、下記2点が考えられる。

③データ自身の精度向上

④フィッティング精度向上

④については、フィッティング関数を、より現象に近づけて記述することが考えられる。今回の検討では、FPガス放出率に関して線出力依存及びペレット密度公差依存をパラメータとして考察することで燃焼度の依存性のみを考慮すると不確かさ $1\sigma = 14\%$ であったものが $1\sigma = 11.7\%$ まで小さくなっている。また、低燃焼度でのガス放出が今回の検討では評価式を下回っているが、これにはガス放出開始の閾値を持たせた式を用いる等モデルの詳細化を行えば、更に不確かさを小さくできる可能性がある。これによりデータとフィッティング式の偏差を小さくして物性自身の不確かさの大きさを小さくすることが出来る。③については炉内条件の精度向上等が必要となる。

この応力及びCDFの評価の合理化において必要なデータを表 5-1 に、精度向上に必

要な対策を表 5-2 にそれぞれまとめる。

これらは、温度評価でも同様の考え方方が取れると考えられるが、項目は異なるものとなる。すなわち、温度評価においては表 5-3 に示すような物性データが必要である。なお温度評価は、単体の熱伝導等の物性のみならず挙動評価自体も上記で議論したように現象が複雑であるため記述しきれないと考えられる。これは燃料の溶融線出力を P T M 試験で取得し、コードを較正していく場合のコード較正誤差として最終的に考慮されるものである。この場合、先ほどの物性誤差はコード較正誤差に含まれるとしても良いと考えられる。この点が先ほどの F P ガス放出率の単体データとは異なるため、燃料温度評価に関わるデータは物性値も全部考慮したものとしてモデルが較正されるために単体の物性値データだけ取得するだけでなく溶融試験等のデータが重要となると考えられる。これらの評価方法の考え方については更に検討が必要である。

表 5-1 設計合理化に必要なデータ

物性	必要データ	備考
F P ガス放出率	線出力、ペレット密度、燃焼度等をパラメータとしたガス放出率データ。	データの不確かさをできるだけ小さくする必要がある。
F C C I	温度、燃焼度、O/M 等をパラメータとした内面腐食データ。	同上
被覆管クリープ強度	炉内データを統計処理可能な程度(数十点)取得する。炉内強度低下係数を統計処理可能なデータ数を取得する。	同上
被覆管外面腐食	温度、酸素濃度、流速をパラメータとしたデータ	同上

表 5-2 精度向上の為の対策

項目	対策	備考
照射条件の不確かさの低減(炉内データの精度向上)	核的精度向上 炉定数の精度向上 燃焼測定・フルエンス測定等での較正 熱的精度向上 流量分布、出力分布の測定し較正	
測定誤差の低減	・純粋な現象を分離抽出	F C C I は反応層を確認して外面腐食と分離

表 5-3 設計合理化に必要なデータ（物性値）

物性	必要データ	備考
熱伝導度	ペレット密度、Pu 富化度依存性、O/M 等をパラメータとしたデータ	炉外試験で精度が良いデータを取得する。
組織変化	線出力、ペレット密度等をパラメータとした組織変化データ。	炉内定常照射データ、及び PTM データで取得
融点	Pu 富化度、O/M 等をパラメータとしたデータ	炉外試験で取得

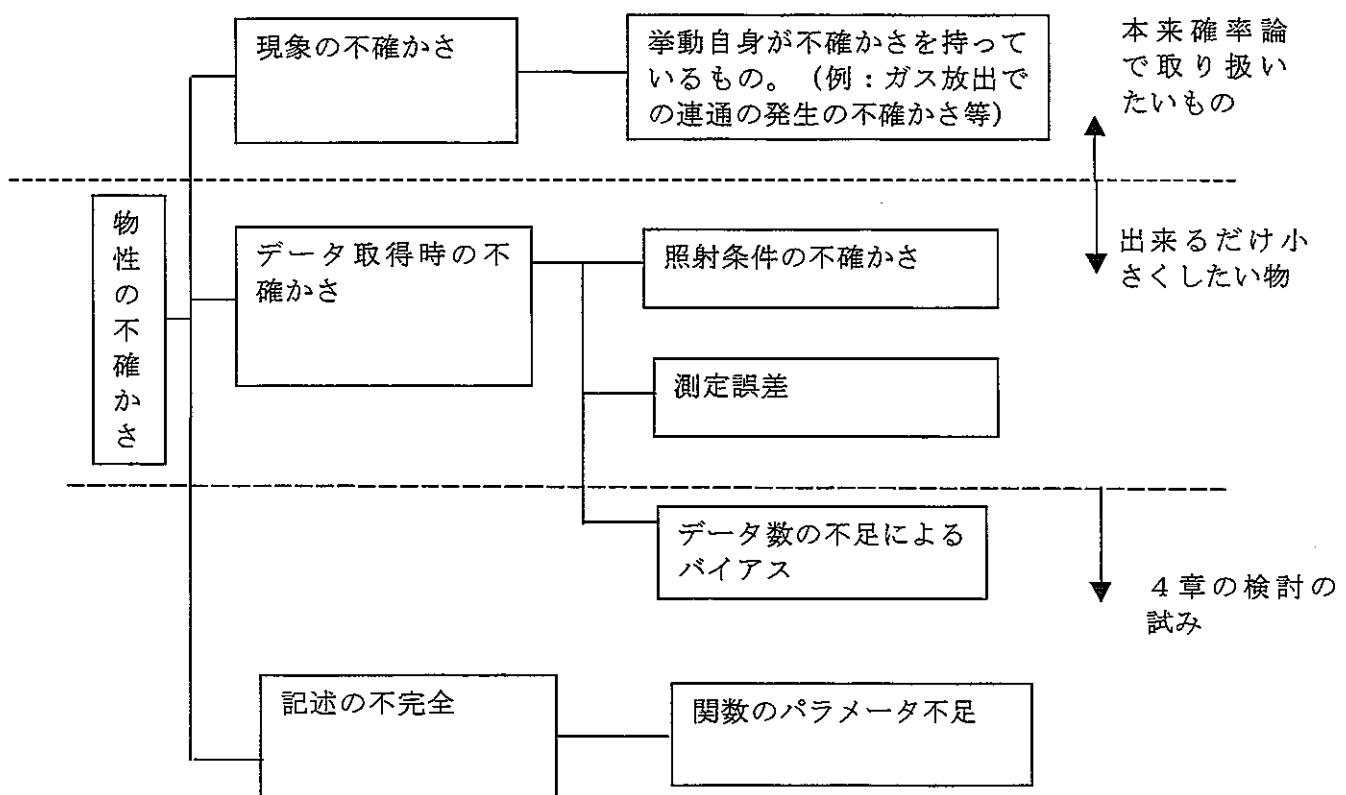


図 5-1 物性の不確かさの要因と今回の範囲

6.まとめ

本研究では物性データに関する検討を行った。被覆管応力評価に関する、FP ガス放出率、内面腐食等の物性について、常陽等のデータに基づき、新しい物性式と不確かさを設定した。新しい物性式は線出力等の関数としており、よりさまざまな設計パラメータが燃料挙動に与える感度を評価可能とした。ガス放出のノミナル値は従来式より小さくなり、不確かさは従来より大きくなった。被覆管応力の確率論的評価結果より 2σ ベースでは従来用いてきたものより下がることを示した。これにより燃焼度の増大等を可能であることを示した。この評価結果に基づき、確率論で必要とされるデータを摘出した。

参考文献

2. 1-1 P N C Z N 9410 91-236 (J N C 殿提示)
2. 1-2 J N C 殿提示(1998年10月21日)
2. 2-1 高速炉炉心材料用改良SUS316ステンレス鋼の開発 Vol30 No.11 1988
2. 2-2 'Fuel/cladding chemical Interaction In Mixed oxide fuel at high burnup' Leo A Lawrence Nuclear Technology Vol.64 Feb. 1984
2. 2-3 PNC ZN 9410 91-236 (JNC 殿提示)
2. 2-4 PNC ZN9410 92-112 高速炉炉心構成要素用 改良オーステナイト鋼 (PNC1520) 材料基準案

付録A BORNFREE-STRESS 入力データマニュアルの追加

物性式(被覆管の F.P. アタック、F P ガス放出割合)オプションの追加である。

表 3.1.3-3 オプション： I M C O R
 Table3.1.3-3 Option:IMCOR(i)

IMCOR(i) =n 第 n 番目の相関式を使用する。物性式の章参照。
 =0 i=19, i=20 は一定値を入力する。
 その他の場合は、その物性の効果が考慮されない。

		Subroutine
1		
2		
.		
.		
9	被覆管 FP-アタック量	FPATK
	=3 もんじゅ設計式	
	=4 見直しモデル	
.		
.		
19	FP ガス放出割合	RELEASE
	=0 一定値 (入力) (fraction)	
	=1 もんじゅ設計式	
	=4 見直しモデル	

付録B BORNFREE-STRESS 入力データ

「もんじゅ」(初装荷炉心燃料要素、通常運転、E.O.L) (見直しモデルによる評価)

STRESS-DATA (CORE, EOL, First loading condition)

1 0 0 0
1 2 3
0
1 2 0 0 0 0 0 0 211 0 01415 2 0 0 020 1 0 0 4 0 0 0 8 0 0 032 0 1 0 0
1 1 2 1 2 2 3 5 5 3 3 1 1 2 1 2 3 1 4 0
0 0 0 0 0 0 0 0 010 0 0 0 1 0 0 0 0 020 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 0 0
1 1 1 2 3 2 1 1 2 2 1 1 3 0 2 1
2000 2003 9999 1 3.0 0.005
1
1 198 1 MONJU
4 169 3 11 2 6 2 3 3
5 1 4.4E03 4 1.0E04 8 1.0 13 1.0E4 14 1.0E4
1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0000
675. 2650. 2750. 50.
200. 3. 0.27 2.00 50.0
11.054
0.85
270.
238.
0.9
99.50
25.0
20.0
1.0
180.
50.
200.1
151.7
1.97
0.222
0.650
0.047
0.535
0.
1.50
7.74
4
1 1 1
397.0 1.0
17 26 27
4
5
0 2 0 1 2
1
1 1 1 1
1 1 1 1
4.662E06 4.355E06 4.169E06 3.969E06

	21.35	21.35	21.35	21.35		
	0.02	0.02	0.02	0.02		
1	MONJU CORE FUEL GEOMETRY					
8						
	10.46	0.650	0.556	0.787	0.133	30.7
	0.535	0.	5.1167			
	0.85	0.90	0.94	1400.	1800.	1300.
	1.97					
	1.00	1.00				
	1.00	1.00				
1	MONJU CORE FUEL, AXIAL POWER PROFILE					
50						
	0.0	0.00000e+00	1.199	0.00000e+00	1.201	2.44755e-02
	6.2	3.35354e-02	11.2	4.46055e-02	16.2	5.82110e-02
	21.2	8.57407e-02	25.7	1.18025e-01	30.2	1.43578e-01
	34.7	1.73776e-01	36.199	1.85007e-01	36.201	5.67009e-01
	37.7	5.89339e-01	41.2	6.44538e-01	44.7	7.00469e-01
	48.2	7.54912e-01	51.7	7.96711e-01	55.575	8.38172e-01
	59.45	8.83543e-01	63.325	9.22439e-01	67.2	9.49974e-01
	71.075	9.69858e-01	74.95	9.86396e-01	78.825	9.95046e-01
	82.7	1.00000e+00	86.575	9.96440e-01	90.45	9.79507e-01
	94.325	9.53955e-01	98.2	9.31772e-01	102.075	9.00557e-01
	105.95	8.49811e-01	109.825	7.90236e-01	113.7	7.32187e-01
	117.2	6.69724e-01	120.7	5.86287e-01	124.2	4.82055e-01
	127.7	4.02018e-01	129.199	3.71887e-01	129.201	1.00937e-01
	130.7	8.98741e-02	135.2	6.38799e-02	139.7	4.53664e-02
	144.2	2.97575e-02	149.2	1.79606e-02	154.2	1.15294e-02
	159.199	7.42212e-03	159.201	0.00000e+00	164.2	0.00000e+00
	171.7	0.00000e+00	179.2	0.00000e+00		
1	MONJU CORE FUEL, RADIAL POWER PROFILE					
	1.0000	0.9971	0.9943	0.9914	0.9886	0.9857
	0.9829	0.9800	0.9771	0.9743	0.9714	0.9686
	0.9657	0.9629	0.9600			
1	0	2				
	276.95	0.0	24.0	20.0	10.0	
	0.934	0.851	1.0	1.0	4.051E-7	
47						
	-3.800	2.966E-2	1.200	4.276E-2	6.200	6.723E-2
	11.200	9.793E-2	16.200	1.377E-1	21.200	1.895E-1
	25.700	2.485E-1	30.200	3.211E-1	34.700	4.089E-1
	36.200	4.416E-1	37.700	4.740E-1	41.200	5.475E-1
	44.700	6.168E-1	48.200	6.814E-1	51.700	7.406E-1
	55.575	7.998E-1	59.450	8.518E-1	63.325	8.963E-1
	67.200	9.331E-1	71.075	9.621E-1	74.950	9.829E-1
	78.825	9.956E-1	82.700	1.000E+0	86.575	9.961E-1
	90.450	9.838E-1	94.325	9.632E-1	98.200	9.345E-1
	102.075	8.978E-1	105.950	8.531E-1	109.825	8.008E-1
	113.700	7.412E-1	117.200	6.813E-1	120.700	6.160E-1
	124.200	5.458E-1	127.700	4.714E-1	129.200	4.386E-1
	130.700	4.054E-1	135.200	3.165E-1	139.700	2.430E-1

144.200	1.833E-1	149.200	1.305E-1	154.200	8.965E-2
159.200	5.706E-2	164.200	3.962E-2	171.700	1.881E-2
179.200	0.000E+0	500.000	0.000E+0		
1.0					
3.5000E+02	3.2700E+02	3.1300E+02	2.9800E+02		
1.6100E+02	1.5000E+02	1.4400E+02	1.3700E+02		
5.7100E+01	5.3300E+01	5.1100E+01	4.8600E+01		
8.0814E+01	8.0814E+01	8.0814E+01	8.0814E+01		
1.7604E+02	1.7604E+02	1.7604E+02	1.7604E+02		
4.9548E+02	4.9548E+02	4.9548E+02	4.9548E+02		
533.5	534.7	529.8	525.6		
583.9	587.3	580.6	574.6		
583.9	587.3	580.6	574.6		
562.6	567.0	561.0	557.7		
4.4E22	4.4E22	4.4E22	4.4E22		
2.0E22	2.0E22	2.0E22	2.0E22		
7.0E21	7.0E21	7.0E21	7.0E21		
1					
23500.	23500.	23500.	23500.		
10800.	10800.	10800.	10800.		
3850.	3850.	3850.	3850.		
0.5678	0.5678	0.5678	0.5678		
11808.					
11808.					
11808.					
94000.					
43200.					
15400.					
0 0	5000.				
1 0	31				
1 1	31				
4 0	41				
4 0	41				
8 1	31				
8 1	31				
13 0	41				
13 0	41				
14 0	41				
14 0	41				
2.0 E2	8.0 E2				
1.0 E3	1.258925E3	1.584893E3	1.995262E3	2.511886E3	3.162278E3
3.981072E3	5.011872E3	6.309573E3	7.943282E3	1.0 E4	1.258925E4
1.584893E4	1.995262E4	2.511886E4	3.162278E4	3.981072E4	5.011872E4
6.309573E4	7.943282E4	1.0 E5	1.258925E5	1.584893E5	1.995262E5
2.511886E5	3.162278E5	3.981072E5	5.011872E5	6.309573E5	7.943282E5
1.0 E6					
5000.	7000.				
5000.	7000.				
1.0E-6	1.5849E-6	2.5119E-6	3.9811E-6	6.3096E-6	1.0E-5
1.5849E-5	2.5119E-5	3.9811E-5	6.3096E-5	1.0E-4	1.5849E-4
2.5119E-4	3.9811E-4	6.3096E-4	1.0E-3	1.5849E-3	2.5119E-3

3. 9811E-3	6. 3096E-3	1. 0E-2	1. 5849E-2	2. 5119E-2	3. 9811E-2
6. 3096E-2	1. 0E-1	1. 5849E-1	2. 5119E-1	3. 9811E-1	6. 3096E-1
1. 0E 0					
1. 0 E3	1. 258925E3	1. 584893E3	1. 995262E3	2. 511886E3	3. 162278E3
3. 981072E3	5. 011872E3	6. 309573E3	7. 943282E3	1. 0 E4	1. 258925E4
1. 584893E4	1. 995262E4	2. 511886E4	3. 162278E4	3. 981072E4	5. 011872E4
6. 309573E4	7. 943282E4	1. 0 E5	1. 258925E5	1. 584893E5	1. 995262E5
2. 511886E5	3. 162278E5	3. 981072E5	5. 011872E5	6. 309573E5	7. 943282E5
1. 0 E6					
0.	10000.				
0.	25000.				
5000.	10000.				
0.	25000.				
1					
2 1 1					
45	500.	720.			
41	1500.	2700.			
43					
2	2	2	0	OFUEL FRAC. DENSITY	
5	2	4	0	OPU. ENRICHMENT	
7	1	6	0	OPF GAS RELEASE FRAC.	
10	2	3	0	O CLAD OUTER DIA.	
11	2	14	0	O CLAD THICKNESS	
12	2	17	0	O FUEL OUTER DIA.	
14	1	5	0	O GRAIN GROWTH TEMP.	
15	1	7	0	OCLAD YOUNG'S MODULUS	
16	1	8	0	OFUEL YOUNG'S MODULUS	
17	1	9	0	OCLAD THERMAL EXPANS.	
18	1	10	0	OCLAD THERMAL CONDUC.	
19	1	11	0	OCLAD SWELLING RATE	
20	1	12	0	OCLAD TH. CREEP RATE	
21	1	13	0	OCLAD IRR. CREEP RATE	
22	2	22	0	O PLENUM VOLUME	
23	1	15	0	OCLAD FP ATTACK	
24	1	16	0	OCLAD NA COROSION	
26	1	18	0	OFUEL THERMAL EXPANS	
27	1	19	0	OFUEL THERMAL CONDUC.	
28	1	20	0	OFUEL SWELLING RATE	
29	1	21	0	OFUEL TH. CREEP RATE	
34	2	26	0	OFLUENCE INCREMENT	
36	1	27	0	OGAP THERM. CONDUCT.	
38	1	29	0	OLARSON MILLER PARAM.	
39	2	37	0	O O/M RATIO	
40	2	44	0	OFUEL T. D. OF EQ. COL.	
42	2	36	0	O WIRE DIA.	
41	2	23	0	O DUCT INNER DISTANCE	
44	2	24	0	O BUNDLE POWER	
45	2	31	0	O BUNDLE FLOW	
46	1	32	0	O COOLANT INLET TEMP.	
47	1	33	0	O MIXING FACTOR	
50	1	39	0	O NA VISCOSITY	

51	1	38	0	0	NA CONDUCTANCE
52	1	34	0	0	NUSSELT NUMBER
53	1	35	0	0	COOLANT SP. HEAT
54	1	40	0	0	WIRE CONTACT DNA
55	1	41	0	0	WIRE CONTACT D FILM
56	1	42	0	0	PELLET HENSHIN D FILM
57	1	43	0	0	PELLET HENSHIN D CLAD
61	2	45	0	0	WIER PITCH
63	1	46	0	0	SUS316ST SWELLING
64	1	47	0	0	TANSEN SWELLING
43					
2		1FUEL LOCAL DENSITY (ZS)			
		0.961	1.039	1.0	0.0078
3		1 CLAD OUTER DIA.			
		0.99235	1.00765	1.0	0.00153
4		1PU. ENRICHMENT (ZS)			
		0.955	1.045	1.0	0.0090
5		1 GRAIN GROWTH TEMP.			
		0.82	1.18	1.0	0.036
6		1FP GAS RELEASE FRAC. (RS)			
		-58.5	58.5	0.0	11.7
7		1CLAD YOUNG'S MODULUS(RS)			
		0.973	1.027	1.0	0.013
8		1FUEL YOUNG'S MODULUS(RS)			
		0.896	1.105	1.0	0.052
9		1CLAD THERMAL EXPANS. (RS)			
		0.905	1.095	1.0	0.019
10		1CLAD THERMAL CONDUC. (RS)			
		0.95	1.05	1.0	0.01
11		4CLAD SWELLING RATE (RS)			
		0.921	1.0789		
12		1CLAD TH. CREEP RATE (RS)			
		0.0	2.0	1.0	0.51000
13		1CLAD IRR. CREEP RATE(RS)			
		0.4	2.0	1.0	0.2
14		1 CLAD THICKNESS			
		0.9045	1.0955	1.0	0.0191
15		1CLAD FP ATTACK (RS)			
		-95.0	95.0	0.0	19.0
16		1CLAD NA COROSION (RS)			
		0.55	1.45	1.0	0.15
17		1 FUEL OUTER DIA.			
		0.98450	1.0155	1.0	0.0031
18		1FUEL THERMAL EXPANS. (RS)			
		0.500	1.500	1.0	0.100
19		1FUEL THERMAL CONDUC. (RS)			
		0.500	1.500	1.0	0.100
20		1FUEL SWELLING RATE			
		0.001	1.66	1.0	0.33
21		1FUEL TH. CREEP RATE (RS)			
		0.5	10.00	1.0	4.50

22	1 PLENUM VOLUME			
	0.9765	1.0235	1.0	0.0047
23	1 DUCT INNER DISTANCE			
	0.9960	1.0040	1.0	0.0008
24	4 BUNDLE POWER			
	1.005	1.083		
26	4FLUENCE INCREMENT (ZS)			
	0.999999	1.000001		
27	1GAP THERM. CONDUCT. (RS)			
	0.300	1.700	1.0	0.1400
29	1LARSON MILLER PARAM. (RS)			
	0.20	1.80	1.0	0.160
31	4 BUNDLE FLOW			
	0.94	1.06		
32	4 COOLANT INLET TEMP.			
	0.98750	1.01250		
33	1 MIXING FACTOR			
	0.87	1.13	1.0	0.043
34	1 NUSSELT NUMBER			
	0.5	1.5	1.0	0.10
35	1 COOLANT SP. HEAT			
	0.975	1.025	1.0	0.005
36	1 WIRE DIA.			
	0.9875	1.01250	1.0	0.0025
37	1 O/M RATIO			
	0.9745	1.0255	1.0	0.0051
38	1 NA CONDUCTIVITY			
	0.9167	1.083	1.0	0.016
39	1 NA VISCOSITY			
	0.6666	1.333	1.0	0.0666
40	4 WIRE CONTACT DEFORM. CHANNEL DNA			
	1.0350	1.0351		
41	4 WIRE CONTACT D FILM			
	2.3699	2.3700		
42	1 PELLET HENSHIN D FILM			
	0.8000	1.200	1.000	0.0666
43	1 PELLET HENSHIN D CLAD			
	0.9300	1.070	1.000	0.0233
44	1 FUEL T. D. OF EQ., COL			
	0.9233	1.0766	1.000	0.0001
45	1 WIER PITCH			
	0.9674	1.0326	1.000	0.01086
46	4 SUS316ST SWELLING			
	0.921	1.0789		
47	1 TANSEN SWELLING			
	-1.6626	1.6626	0.0	0.55252
11				
	1. E-17	0.05	1. E-16	0.05
	1. E-14	0.05	1. E-13	0.05
	1. E-11	0.05	1. E-10	0.50
	1. E-08	0.05	1. E-07	0.05

11

1. E-17 0.05
1. E-14 0.05
1. E-11 0.05
1. E-08 0.05

1. E-16 0.50
1. E-13 0.05
1. E-10 0.05
1. E-07 0.05

1. E-16 0.05
1. E-12 -.50
1. E-09 0.05

11

1. E-17 0.05
1. E-14 0.05
1. E-11 0.05
1. E-08 0.05

1. E-16 0.50
1. E-13 0.05
1. E-10 0.05
1. E-07 0.05

1. E-16 0.05
1. E-12 -.50
1. E-09 0.05

付録C BORNFREE-STRESS コード改修の詳細

以下の順序でコードの改修の詳細を示す。改修部は網かけで示した。

- release.f
- fpatk.f
- pvclr.f

```

SUBROUTINE RELESE
C
C      IMPLICIT REAL*8  (A-H,  O-Z)
C
COMMON/SET1 / NRG, ITT , TDEN1 , FDEN1 , WTMOL1, GFRAC1, FLENGTH, VINI1
& , TDMIN1, TDMAX1
1 , TFAB1 , PFAB1 , OVERM1, RCLADO, THICK , RFUELO, RFUVVD1, TMEND1
2 , BUEND1, ENCH , FSMEV , GATOMS, TEQUX1, HTMOL , PNA1 , WTMOM1
COMMON/SET3 /
1   BURN , BURNNC , BURNUP, FISION, FLUNCE, FLUX , FLUXH , AVGBUP, POWER
2 , OTEMP1, OTEMP2, OTEMP3, OTEMP4, OTEMP5, OFISS , OPOWER, FATOMS
3 , CLADTH, CLADSW, CLADIR, CLADPL, CTHRAT, CSWRAT, CIRRAT, DCTH
4 , GAP , GAPO , THICK2, YTCOT , FTHRAT, FSWRAT, FIRRAT
5 , CTHFC2, CSWFC2, CIRFC2, FTHFC2, FSWFC2, FIRFC2
6 , STREST, STRESR, STRESZ, STRESE, STRESF, STRESY, STRTXX, PGAS
7 , TIMEND, TBMAX , TIME , DTIME , CYCLE2, SMALL2, GREAT2
8 , CTEMPC, CTEMPC, TMEANC, TMEANK, PTEMPC, XYPPM , SODVEL, GAPK
9 , DFRAC (15), TFAIL (15), IRUPT (15), ISCORE, ISTOP
COMMON/PROBV / RS(90), ZS(90), PS(90), AS(90)
COMMON/IFILE / NR, NW, NF1, NF2, NF3, NF4
COMMON/INPTB / IOPT (40), IMCOR (40)
COMMON/CONST / PI, TWOPI, ABS0 , TROOM , RGAS , GMOL , ATOMOS, AVOGAD
COMMON/SET2 / RLCE (10), POWTM(10), BUP (10), TCL (10), TPL (10)
1 , HG(10), POWL(10)

C*
C*      GWDPMT = WTMOM1*5. 393E23 / (FSMEV*AVOGAD*1. E03)
XXB = AVGBUP * BURNNC
IF (IMCOR(19) .EQ. 4) GO TO 350
IF (IMCOR(19) .EQ. 3) THEN
      GFRAC1 = 1.0
      GO TO 500
ENDIF
IF (IMCOR(19) .EQ. 2) GO TO 300
C      IF ( XXB .LT. 70. ) GO TO 100
C      GFRAC1 = 1.0
C      GO TO 200
100 CONTINUE
C1 = 30.*RS(7)*ZS(7)
XXB2 = XXB * XXB
XXB3 = XXB2 * XXB
AAA = C1+1. 880*XXB-0. 01804*XXB2 + 7. 828E-5*XXB3
GFRAC1 = AAA / 100.
200 CONTINUE
GO TO 400
300 CONTINUE
C1=30.*RS(7)*ZS(7)
XXB=AVGBUP*BURNNC
XXB2=XXB*XXB
XXB3=XXB2*XXB
AAA2=15+1. 880*XXB-0. 01804*XXB2+7. 828E-5*XXB3

```

```
AAA=C1+1. 880*XXB-0. 01804*XXB2+7. 828E-5*XXB3
GFRAC2=AAA2/100. 0
IF(GFRAC2 .GE. 0. 9) GFRAC2=0. 9
GFRAC1=GFRAC2+(C1-15. 0)/100. 0
340 CONTINUE
GO TO 400
350 CONTINUE
XXB=AVGBUP*BURNc
XXB2=XXB*XXB
XXB3=XXB2*XXB
XXLHR=POWL(1)/FLENTH*POWTM(1)*1000. 0
XXPD=FDENI
AA85=2. 0+1. 880*XXB-0. 01804*XXB2+7. 828E-5*XXB3
& - +0. 143*XXLHR-49. 14
AA93=-9. 0+1. 880*XXB-0. 01804*XXB2+7. 828E-5*XXB3
& - +0. 115*XXLHR-31. 17
A8593=(AA93-AA85)/0. 08*(XXPD-0. 85)+AA86
B8593=A8593+RS(7)*ZS(7)
GFRAC1=B8593/100. 0
400 CONTINUE
IF ( GFRAC1 .GE. 1. ) GFRAC1 = 1. 0
IF ( GFRAC1 .LE. 0. ) GFRAC1 = 0.
500 CONTINUE
RETURN
END
```

```

SUBROUTINE FPATK ( X )
C
IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C
COMMON/SET1 / NRG, ITT , TDEN1 , FDEN1 , WTMOL1, GFRAC1, FLENTH, VINI1
& , TDMIN1, TDMAX1
1 , TFAB1 , PFAB1 , PFAB2 , OVERM1, RCLADO, THICK , RFUELO, RFUVD1, TMEND1
2 , BUEND1, ENCH , FSMEV , GATOMS, TEQUX1, HTMOL , PNA1 , WTMOM1
COMMON/SET3 /
1 BURN , BURNNC , BURNUP, FISION, FLUNCE, FLUX , FLUXH , AVGBUP, POWER
2 , OTEMP1, OTEMP2, OTEMP3, OTEMP4, OTEMP5, OFISS , OPOWER, FATOMS
3 , CLADTH, CLADSW, CLADIR, CLADPL, CTHRAT, CSWRAT, CIRRAT, DCTH
4 , GAP , GAPO , THICK2, YTCOT , FTHRAT, FSWRAT, FIRRAT
5 , CTHFC2, CSWFC2, CIRFC2, FTHFC2, FSWFC2, FIRFC2
6 , STREST, STRESR, STRESZ, STRESE, STRESF, STRESY, STRTXX, PGAS
7 , TIMEND, TBMAX , TIME , DTIME , CYCLE2, SMALL2, GREAT2
8 , CTEMPc, CTEMpK, TMEANC, TMEANK, PTEMPc, XYPPM , SODVEL, GAPK
9 , DFRAC (15), TFAIL (15), IRUPT (15), ISCORE, ISTOP
COMMON/PROBV / RS(90), ZS(90), PS(90), AS(90)
COMMON/INPTB / IOPT (40), IMCOR (40)
COMMON/INPTBB/ IOPAD(36), IMCAD(36)
COMMON/CONST / PI, TWOPI, ABSO , TROOM , RGAS , GMOL , ATOMOS, AVOGAD
C
C***      X = FP-ATTACK          ( MM      )
C***      BURNUP = CUMULATED BURNUP      (ATOM FRAC. )
C***      MWD/MT = 0.89546E-6 * WTMMOL /FISMEV (ATOM FRAC. )
C***      ATOM FRAC. = 1.1167 E+6 * FISMEV/WTMMOL ( MWD/MT   )
C*
C*
IF( IMCOR(9).EQ.0 ) THEN
X = 0.
RETURN
ELSE
IF( IOPAD(34) .GT. 0.) THEN
YTCIN=OTEMP2-POWER*1000.*DLOG(OTEMP4)/TWOPI/CDSUS(OTEMP2)
&           +POWER*1000.*DLOG(OTEMP5)/TWOPI/CDSUS(CTEMPC)
ELSE
YTCIN=OTEMP2-POWER*1000.*DLOG(OTEMP4)/TWOPI/CDSUS(OTEMP2)
ENDIF
C*
GO TO ( 1, 2, 3, 4, 5 ), IMCOR(9)
C*
C*
1 CONTINUE
X=7.8E-4*BURNUP*1.1167E6*FSMEV/WTMOM1
&           *EXP(-6400./(YTCIN+ABSO))
C*
RETURN
C* .....
C*

```

```

C*          HEDL FCCI CORRELATION
C*  .....
C*
C*
C*      D=0.3198(0 /M-1.935)(B+K)(T-739)
C*      D      = CORROSION DEPTH           (MICROMETER)
C*      B      = CUMULATED BURNUP         (ATOM % )
C*      K      = 16.67  ( 95% RELIABILITY )
C*      T      = CLADDING TEMPERATURE     ( K )
C*      K IS SET TO RS(23), WHICH HAS THE MEAN 4.33,
C*      STANDARD DEVIATION 7.54, AND BOUNDED BY (0., 19.41).
C*      NORMAL DISTRIBUTION IS ASSUMED.
C*
C*  .....
2 CONTINUE
Y = 0.
CKFACT = YTCIN + ABS0 - 739.
IF ( CKFACT .LE. 0. ) RETURN
BRS23 = BURNUP * 100. + RS(23)
IF ( BRS23 .LE. 0. ) RETURN
Y = 0.3198 * ( OVERM1 - 1.935 )
&           * CKFACT * BRS23
C*
IF ( Y .LE. 0. ) Y = 0.
X = Y * 1.E-3
RETURN
C*
3 CONTINUE
XBUP = BURNUP*1000.*BURNC
T = YTCIN
IF( YTCIN.GT.600. ) T = 600.
IF( XBUP.LE.15000. ) Y = 35.0
IF( XBUP.GT.15000. .AND. XBUP.LE.60000. )
& Y = 1.2E-05*(T-480.)*(XBUP-15000.)+35.
IF( XBUP.GT.60000. .AND. YTCIN.LE.600. )
& Y = 1.2E-05*(T-480.)*(60000.-15000.)+35.
IF( XBUP.GT.60000. .AND. YTCIN.GT.600. ) Y = 100.
X = Y * 1.E-03
RETURN
C*
4 CONTINUE
Y = 0.
CKFACT = YTCIN + ABS0 - 739.
IF ( CKFACT .LE. 0. ) RETURN
BRS23 = BURNUP * 100. + 16.67
IF ( BRS23 .LE. 0. ) RETURN
Y = 0.3198 * ( OVERM1 - 1.935 )
&           * CKFACT * BRS23
C*
IF ( Y .LE. 0. ) Y = 0.
X = Y * 1.E-3

```

```
      RETURN
5 CONTINUE
      XXB = AVGBUP*BURNc
      TTK = YICIN+ABSO
      XXOM = OVERMI
      YYA = XXB*1000.-10000.
      IF ( YYA .LE. 0.) YYA=0
      YYAA = YYA**0.2
      YYBB = EXP(-12500.0/I_987/TTK)
      YYCC = XXOM-1.93
      YYY = 119500.0*YYAA*YYBB*YYCC
      Y = YYY+RS(23)
      X = Y * 1.E-03
      IF ( Y .LE. 0.) Y = 0.
      RETURN
      ENDIF
      END
```

```

SUBROUTINE PVCLR
C
C      IMPLICIT REAL*8  (A-H,  O-Z)
C
C      COMMON/INPTB / IOPT  (40), IMCOR (40)
C      COMMON/PROBV / RS(90), ZS(90), PS(90), AS(90)
C      COMMON/WEIT  / WTT(30)
C      COMMON/WEIT1 / WTT1(30)
C      DO 10 I=1, 90
C          RS(I)=1. 0
C          ZS(I)=1. 0
C          PS(I)=1. 0
C          AS(I)=1. 0
C 10 CONTINUE
C      DO 20 I=1, 30
C          WTT(I)=1. 0
C 20 CONTINUE
C      DO 30 I=1, 30
C          WTT1(I)=1. 0
C 30 CONTINUE
C*
C*           IN THE DETERMINISTIC CALCULATION , CONSTANT K IN THE HEDL
C*           FCCI CORRELATION SHOULD BE SET TO THE CORRESPONDING VALUE
C*           TO THE MEDIAN OF D.      K IS SET BY THE RS(23) ITSELF.
C*
RS(23) = 4. 33
IF ( IOPT(5) .EQ. 2 ) RS(23) = 16. 67
IF ( IMCOR(9) .EQ. 5 ) RS(23) = 0
IF ( IMCOR(9) .EQ. 5 .AND. IOPT(5) .EQ. 2 )
&   RS(23) = 45. 0
IF ( IMCOR(19) .EQ. 4 .AND. IOPT(5) .EQ. 2 )
&   RS(7) = 0
IF ( IMCOR(19) .EQ. 4 .AND. IOPT(5) .EQ. 2 )
&   ZS(7) = 0
C*
RETURN
END

```