



JAEA-Technology

2007-009



JP0750165

確率論的中空燃料設計手法の開発

- BORNFREE-CEPTAR コードの開発・整備 -

Development of Probabilistic Design Method for Annular Fuel

- Development of BORNFREE-CEPTAR Code -

小澤 隆之

Takayuki OZAWA

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター
燃料技術部

Fuel Technology Department
Plutonium Fuel Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2006

確率論的中空燃料設計手法の開発 －BORNFREE-CEPTAR コードの開発・整備－

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所 プルトニウム燃料技術開発センター 燃料技術部
小澤 隆之

(2007年1月17日受理)

将来の高速炉実用化のため、高線出力化や高燃焼度化がひとつの方策として考えられているが、この際、中空燃料の採用が検討されている。このような中空燃料の設計に対応するため、日本原子力研究開発機構では中空燃料設計コード「CEPTAR」の開発を行ってきている。また、安全性を確保した合理的な燃料設計及び設計裕度の定量的評価のため、確率論的燃料設計コード「BORNFREE」を開発してきた。ここでは、中空燃料を対象とした合理的な設計手法の一環として、BORNFREE-CEPTAR コードの開発・整備を行い、確率論的設計手法の開発を行った。

確率論的中空燃料設計コード「BORNFREE-CEPTAR」を用いた試計算として行った出力上昇時における過出力時燃料溶融確率評価の結果、中空燃料では中実燃料に比べて溶融確率が約 2 枝小さくなる結果が得られ、中実燃料では出力上昇時間の増加にともない燃料組織変化の効果で顕著な溶融確率の低下がみられたが、中空燃料においては溶融確率に対する出力上昇時間の影響は比較的小さい結果が示された。また、中実燃料と同様の溶融確率条件下において、中空燃料では中空径の増加とともに許容線出力が増加する傾向があり、低密度中実燃料に比べて高密度中空燃料では高線出力化が可能となる見通しが得られた。

Development of Probabilistic Design Method for Annular Fuel

- Development of BORNFREE-CEPTAR Code -

Takayuki OZAWA

Fuel Technology Department, Plutonium Fuel Development Center,
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories,
Tokai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 17, 2007)

The increase of linear power and burn-up during the reactor operation is considered as one of measures for the utility of fast reactor in future, and then the application of annular fuels is under consideration. In order to make a design for thus annular fuels, annular fuel design code "CEPTAR" has been developed in Japan Atomic Energy Agency (JAEA). In addition, probabilistic fuel design code "BORNFREE" has been also developed for the reasonable fuel design with safety and the quantitative evaluation of design margin. In this study, aiming at the development of probabilistic design method, we developed BORNFREE-CEPTAR code to develop the reasonable design method for annular fuels.

As the results of probability evaluation of fuel melting at the transient at the initial power increase, by using the probabilistic annular fuel design code "BORNFREE-CEPTAR", the melting probability for annular fuels was estimated to be approximately two figures lower than that for solid fuels, and the remarkable decrease of melting probability, which was caused by the fuel restructuring effect, was seen in the estimation results for solid fuels, on the other hand, the results for annular fuels indicated that this effect was comparably small. In addition, the permissive linear power for annular fuels tended to enhance from that for solid fuels with the increase of initial central-hole diameter under the similar fuel melting probability condition. This indicated the possibility of higher linear power operation for high-density annular fuels than low-density solid fuels.

Keywords: Probabilistic Design, Irradiation Behavior, Annular Fuel, Fast Reactor

目 次

1. 緒言	1
2. コード開発	2
2.1. 確率論的燃料設計コード「BORNFREE」の概要	2
2.2. 中空燃料設計コード「CEPTAR」の概要	3
2.3. 確率論的中空燃料設計コード「BORNFREE-CEPTAR」の開発	4
3. 試計算	12
3.1. 計算条件	12
3.2. 計算結果	12
4. 結言	18
謝 辞	18
参考文献	18

CONTENTS

1. INTRODUCTION	1
2. CODE DEVELOPMENT	2
2.1. Outline of Probabilistic Fuel Design Code “BORNFREE”	2
2.2. Outline of Annular Fuel Design Code “CEPTAR”	3
2.3. Development of Probabilistic Annular Fuel Design Code “BORNFREE-CEPTAR”	4
3. TRIAL COMPUTATION	12
3.1. Computation Conditions	12
3.2. Computation Results	12
4. CONCLUSION	18
ACKNOWLEDGEMENT	18
REFERENCES	18

図リスト

図 2.1 決定論的設計手法と確率論的設計手法の比較	7
図 2.2 BORNFREE コードの主な構造	7
図 2.3 CEPTAR コードの主な構成	8
図 2.4 $\Delta T_{gap} + \Delta T_{fuel}$ に対する実測値と計算値の比較	8
図 2.5 溶融限界線出力に対する実測値と計算値の比較	9
図 2.6 燃料組織変化に対する実測値と計算値の比較	9
図 2.7 PFR 中空燃料における燃焼に伴う中空部縮小挙動	10
図 2.8 PFR 中空燃料の燃料組織変化領域径に対する検証結果	10
図 2.9 PFR 中空燃料の被覆管外径変化率に対する検証結果	11
図 2.10 BORNFREE-CEPTAR コードの構成	11
図 3.1 試計算でパラメータとした出力上昇速度	15
図 3.2 出力上昇パターン 1 での確率論的試計算結果	15
図 3.3 出力上昇パターン 2 での確率論的試計算結果	16
図 3.4 出力上昇パターン 3 での確率論的試計算結果	16
図 3.5 燃料溶融確率と出力上昇時間の関係	17
図 3.6 中実燃料と同程度の溶融確率となる中空燃料での過出力係数増分	17

表リスト

表 2.1 CEPTAR コードの検証に用いた短期照射試験データ	6
表 2.2 CEPTAR コードの検証に用いた長期照射試験データ	6
表 3.1 BORNFREE-CEPTAR コードの試計算パラメータ	14
表 3.2 確率論的不確かさの取扱い	14
表 3.3 中空燃料の許容線出力評価結果	14

This is a blank page.

1. 緒 言

将来の高速炉実用化のため、高線出力化や高燃焼度化がひとつの方策として考えられているが、この際、中空燃料の採用が検討されている。このような中空燃料の設計に対応するため、日本原子力研究開発機構では中空燃料設計コード「CEPTAR」の開発を行ってきていた。また、安全性を確保した合理的な燃料設計及び設計裕度の定量的評価のため、確率論的燃料設計コード「BORNFREE」を開発してきた。ここでは、中空燃料を対象とした合理的な設計手法の一環として、BORNFREE-CEPTAR コードの開発・整備を行い、確率論的設計手法の開発を行った。

ここでは、BORNFREE-CEPTAR コードの開発・整備について報告するとともに、本コードを用いた試計算として、中空燃料を対象とした出力上昇時における過出力時燃料溶融確率の試計算を行い、中空燃料における高線出力化の可能性について評価・検討を行った結果について報告する。

2. コード開発

2.1. 確率論的燃料設計コード「BORNFREE」の概要

適切な安全裕度を確保した合理的な燃料設計を行い、設計裕度の適正化を図る目的で、確率論的燃料設計コード「BORNFREE」を開発してきた。本コードを用い、燃料健全性に係る設計評価指標の統計的応答を評価することで、設計基準を超える確率や設計裕度を定量的に把握することが可能である。

従来の決定論的設計手法と確率論的設計手法の比較を図 2.1 に示す。従来の決定論的設計手法においては、保守的な設計評価結果を得るために、寸法・形状、燃料・材料物性、運転条件、設計解析モデルといった設計評価に係る種々の不確かさ因子(設計パラメータ)に対し、下限値もしくは上限値に相当する保守的な値を個々に設定し、燃料の照射挙動上矛盾する組み合わせとする場合がある。例えば、設計評価指標のひとつである被覆管応力評価においては、ペレットスエリング率を上限値相当とした場合に PCMI 応力評価結果は厳しくなり、また、FP ガス放出率を上限値相当とした場合に内圧評価結果は厳しくなる。このため、決定論的設計手法では、被覆管応力評価結果が保守的となるようにペレットスエリング率と FP ガス放出率ともに上限値相当とする場合がある。しかしながら、実際の燃料挙動上は FP ガス放出率が大きくなれば、ペレットのガススエリング率は低下するため、ペレットスエリング率と FP ガス放出率ともに大きくなることはない。このような保守的な設計条件の組み合わせで得られる設計評価結果には過度の保守性が含まれることとなり、その結果として、実際の燃料性能より線出力や燃焼度を低く制限する必要が生じたり、厳しい燃料仕様を要求することとなる可能性がある。一方、確率論的設計手法を適用した場合、設計条件となる個々の設計パラメータに各々の特性に応じた確率分布(正規分布、一様分布、対数正規分布、指数分布等)を設定し、モンテカルロ法による燃料挙動解析で照射挙動に基づいた設計評価指標の統計的応答を評価することにより、設計基準に対する設計裕度を定量的に把握することが可能である。このような定量的裕度評価結果に基づき、設計裕度を適正化することによって高線出力化や高燃焼度化が可能となるばかりでなく、燃料仕様の適正化(公差緩和等)が可能となることが考えられる。

BORNFREE コードの構造を図 2.2 に示すが、本コードは乱数発生部と挙動解析部で構成されている。乱数発生部においては確率変数となる種々の設計パラメータにそれぞれ特性や不確かさによって設定した確率分布(一様分布、正規分布、指数分布、対数正規分布)に基づき発生させた乱数を有限試行回数サンプリングし、モンテカルロ計算を行う挙動解析部で設計基準に対する設計評価指標である燃料中心温度、被覆管温度、被覆管応力、クリープ寿命分数和(CDF)の統計的応答(平均値、標準偏差等)を評価する。乱数発生部で設定する確率分布の一例として、設計パラメータのうち、寸法・形状に関する確率分布は基本的に製作公差上下限値を 3σ 相当とする正規分布を設定し、線出力等の運転条件に関連する設計パラメータについては、不確かさを保守的に考慮する目的で確率論的設計手法においても乗算的に考慮することとし、一様分布を設定する。また、物性値や解析モデルの不確かさは主に測定誤差に基づいて設定するが、確率分布については各々の物性やモデルの特性に応じて一様分布、指数正規分布及び対数正規分布を設定する。このようにして確率変数毎に設定した確率分布に従った乱数発生の元となる一様乱数については、Mersenne Twister 法に基づいた長周期・高次元均等分布を有する標準類似乱数(JIS Z 9031)を用いている。

モンテカルロ計算を行う挙動解析部においては、上記のようにして確率変数毎に設定した確率分布に基づき発生させた有限個の乱数から挙動解析に必要な 1 組の確率変数群をランダムにサンプリングし、設計評価指標(燃料中心温度、被覆管温度、被覆管応力、CDF)を解析する。本コードでは、このような手順を有限試行回数繰り返すことによって、設計評価指標の統計的応答を評価する。

本コードでは、60 個以上の確率変数を組み込んでいるが、大きく分けて以下の 4 種類に分類される。

RS 変数: 不確かさが主に測定誤差に起因する“材料・燃料物性”及び“解析モデル”に対して定義される確率変数が、この変数群に分類される。この変数群に分類される確率変数は主に炉心全体で変動する。

ZS 変数: 燃料要素全長のように、不確かさが燃料要素や燃料集合体の製作公差に起因する“幾何学形状”に対して定義される確率変数が、この変数群に分類される。この変数群に分類される確率変数は主に冷却材流量領域もしくは炉心領域単位で変動する。

PS 変数: 不確かさが燃料要素部材等の製作公差に起因し、燃料要素 1 本単位で変動する“幾何学形状”に対して定義される確率変数が、この変数群に分類され、初期ガスプレナム体積等がこのカテゴリーに属する。

AS 変数: 燃料要素の軸方向で局所的に変動する確率変数が、この変数群に分類され、被覆管肉厚、燃料ペレット内外径、プレナム温度、被覆管肉厚中心温度及び局所線出力がこのカテゴリーに属する。

このようにして分類された個々の確率変数に対し、原則として平均値が 1.0 となる確率分布を設定し、次式に従い、挙動解析に用いる入力値となる変数を試行回数毎に求める。

$$X^R(i) = X^{NOM}(i) \cdot RS(i) \cdot ZS(i) \cdot PS(i) \cdot AS(i) \quad (1)$$

ここで、 $X^R(i)$: 確率変数 $X(i)$ に対する挙動解析入力値

$X^{NOM}(i)$: 確率変数 $X(i)$ の公称値(ノミナル値)

(1)式の右辺の $RS(i) \cdot ZS(i) \cdot PS(i) \cdot AS(i)$ は確率変数 $X(i)$ に対する不確かさを示す。

2.2. 中空燃料設計コード「CEPTAR」の概要

将来の高速炉燃料における高性能化(高線出力化・高燃焼度化)のため、採用が検討されている中空燃料の照射挙動については英国 PFR で照射された高燃焼度燃料において、照射中におけるペレットの歪と組織変化による中空部の縮小挙動が観察されている。このような中空径の縮小挙動は、燃料設計において許容線出力を決定する主要因子である溶融限界線出力の評価に対して大きな影響を及ぼすことから、精度良く予測することが必要である。このため、中空燃料設計コードとして CEPTAR(Computation Code to Evaluate Fuel Pin Stability for Annular Fuel Design)コードを開発した。

図 2.3 に本コードの主な構成を示すが、燃料要素の幾何学形状、燃料・被覆管物性値及び照射条件（線出力、中性子束、冷却材・被覆管温度等）を主な入力値として燃料挙動を解析する。本コードでは熱中性子炉の燃料ペレット内でみられる径方向出力分布についても入力値として取扱った解析が可能である。解析は燃料ペレットと被覆管を径方向にそれぞれ最大 10 分割及び最大 6 分割して行い、また、軸方向には最大 9 分割して行うことができる。本コードでは、ボイド移動モデルを用いて径方向燃料密度分布を計算するが、このモデルでは、ボイド移動速度は温度勾配、濃度勾配及び UO_2 と PuO_2 の拡散係数で決定し、照射中の中空径は質量保存則に基づいて算出する。熱解析部において、燃料ペレット内に生じる径方向温度分布は一次元熱伝達モデルを適用して計算し、燃料外表面温度と燃料中心温度で収束計算する。また、応力－歪解析部においては、燃料ペレットや被覆管の熱膨張歪、スエリング歪、クリープ歪等による変形を平面歪近似に基づいて求めるが、ここではスエリング歪とクリープ歪に対して収束計算を行う。さらに、本コードでは、酸素と Pu の径方向再分布についても解析することが可能であり、それぞれの解析では、径方向分割数を最大 50 とした詳細な解析を行う。

本コードの熱的解析機能の検証では表 2.1 に示した短期照射試験データを用い、また、熱的及び機械的解析機能の検証は表 2.2 に示した長期照射試験データを用いて行っている。

図 2.4 は燃料温度に対する検証結果としてギャップ部温度上昇 (ΔT_{gap}) と燃料温度上昇 (ΔT_{fuel}) の和 ($\Delta T_{gap} + \Delta T_{fuel}$) に対して、実測値と計算値を比較した結果である。この結果から、JOYO で実施した INTA 試験結果として得られている $\Delta T_{gap} + \Delta T_{fuel}$ が約 1,200°Cまでの比較的低温領域においては $\pm 17.6\%$ (1σ)、JOYO 及び海外炉で実施した PTM 試験結果として得られている $\Delta T_{gap} + \Delta T_{fuel}$ が約 1,800~2,300°Cの高温領域においては $\pm 4.4\%$ (1σ) の精度で解析することが可能である。また、PTM 試験結果として得られている溶融限界出力に対する検証結果として、溶融限界線出力の実測値と計算値の比較を図 2.5 に示すが、本コードは溶融限界出力を $\pm 4.4\%$ (1σ) の精度で解析することが可能である。さらに、燃料温度評価に対する指標のひとつとなる燃料組織変化に対する実測値と計算値の比較結果を図 2.6 に示すが、中心空孔径及び柱状晶径とも実測値とほぼ一致する計算結果となっている。

また、さらに、長期照射試験データを用いた検証では、本コードの機械的解析機能を検証するため、PFR 定常照射データにより、図 2.7 に示すような中空燃料の中空部縮小挙動と被覆管外径変化率に対する解析精度について確認している。図 2.8 及び図 2.9 にそれぞれ PFR 中空燃料に対する燃料組織変化の検証結果及び被覆管外径変化率の検証結果を示す。このように、本コードは燃料組織変化領域に対して $\pm 13\%$ (1σ) の精度で予測することが可能であり、特に、PFR 中空燃料で観察されている燃焼に伴う中空部縮小挙動については、燃料ペレット中心部における中空径のクリープ変形によるものと考えられ、本コードにおける燃料ペレット内の応力－歪解析の結果として、燃焼に伴い縮小した中空径に対しても実測値とほぼ一致する中空径を与えていた。また、被覆管外径増加率に対しては、燃料要素最大の被覆管外径増加率を $\pm 0.5\% \Delta D/D$ の範囲で予測可能であり、この結果は本コードの被覆管応力－歪解析機能が実測値とほぼ一致する計算結果を与えることを示している。

2.3. 確率論的中空燃料設計コード「BORNFREE-CEPTAR」の開発

将来の高速炉実用化に向けた経済性向上のためには、高速炉燃料の高線出力化や高燃焼度化が

必要であり、中空燃料の採用がひとつの方策として検討されている。このような中空燃料設計に対応するため、前述の中空燃料設計コード「CEPTAR」を開発してきている。また、安全裕度を確保した合理的な燃料設計及び設計裕度の定量的評価といった燃料設計手法の高度化に資するため、前述の確率論的設計コード「BORNFREE」の開発を行っている。

ここでは、確率論的中空燃料設計手法の開発の一環として、確率論的設計コード「BORNFREE」と中空燃料設計コード「CEPTAR」を結合した確率論的中空燃料設計コード「BORNFREE-CEPTAR」を開発・整備した。図 2.10 に BORNFREE-CEPTAR コードの構成を示す。本コードは乱数発生・変数設定部と燃料挙動解析部で構成され、乱数発生・変数設定部においては、照射条件(線出力、被覆管温度等)、幾何学的条件(寸法、形状等)、物性値等の確率変数に対し、それぞれ特性に応じた確率分布(一様分布、正規分布、対数正規分布等)に従った乱数を生成する。ここで、乱数発生の元となる一様乱数の生成には、Mersenne Twister 法に基づき、長周期・高次元均等分布を有する標準類似乱数(JIS Z 9031)を用いている。このようにして発生させた確率変数毎の乱数を用いて、有限試行回数に応じた数の燃料挙動解析に必要な入力値の組み合わせ(INPUT)を作成する。本コードでは中空燃料挙動解析に必要な CEPTAR コードの INPUT を有限試行回数個作成する。これらの INPUT を用いて、燃料挙動解析部においては CEPTAR コードでモンテカルロ計算を行い、燃料中心温度、被覆管応力、クリープ寿命分数和(CDF)等の設計評価指標に対する平均値、標準偏差等を評価するとともにヒストグラムを出力する。

表 2.1 CEPTAR コードの検証に用いた短期照射試験データ^[2]

S/A ID	Pellet Type	Pellet ID (mm)	Pellet OD (mm)	Pellet Density (%T.D.)	Pellet O/M (-)	Pu Content (wt.%)	PIN OD (mm)	Tag Gas
INTA-1 (JOYO)	Annular	2	5.4	85	1.94	30	6.5	No
INTA-2 (JOYO)	Annular	2	6.49 6.54 6.59	92 95	1.94 1.97	19	7.5	No
B5D-2 (JOYO)	Solid	-	6.5	90-95	1.96-1.98	19	7.5	Yes/No
P-19/20 (EBR-II)	Solid	-	5.1	90-93	1.96-1.97	25	6.1	No
P-E01 (EBR-II)	Solid	-	5.4	86-87	1.99	29	6.5	Yes
DEA-2 (FFTF)	Solid	-	4.9	86-96	1.94-1.98	25~30	5.8	Yes
1112 (MTR)	Annular	1.5-1.7	5.00-5.57	95-97	1.97-1.98	32	5.8, 6.6	No
1112/1150 (MTR)	Solid	-	4.74-4.95	90-97	1.91-1.98	28~32	5.8	No

出典) T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

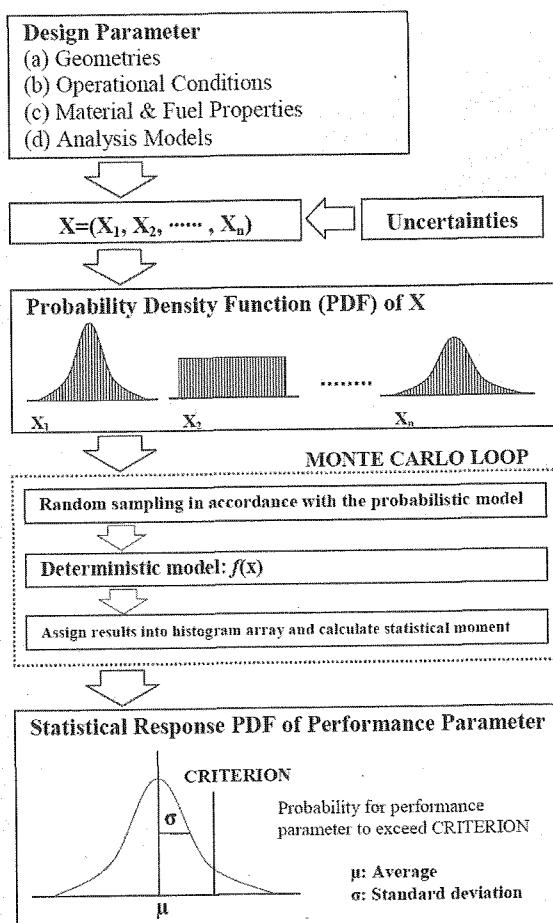
表 2.2 CEPTAR コードの検証に用いた長期照射試験データ^[2]

Cladding Material	Pellet Type	Pellet ID (mm)	Pellet OD (mm)	Pellet Density (%T.D.)	Pellet O/M (-)	Pu Content (wt.%)	PIN OD (mm)	Tag Gas
M316	Annular	1.8	4.95-4.98	94-98	1.92-2.00	24-32	5.84-5.86	No
PE16	Annular	1.8	4.93-4.95 5.53-5.56	94-99	1.97-1.99	25-33	5.84 6.58	No

出典) T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

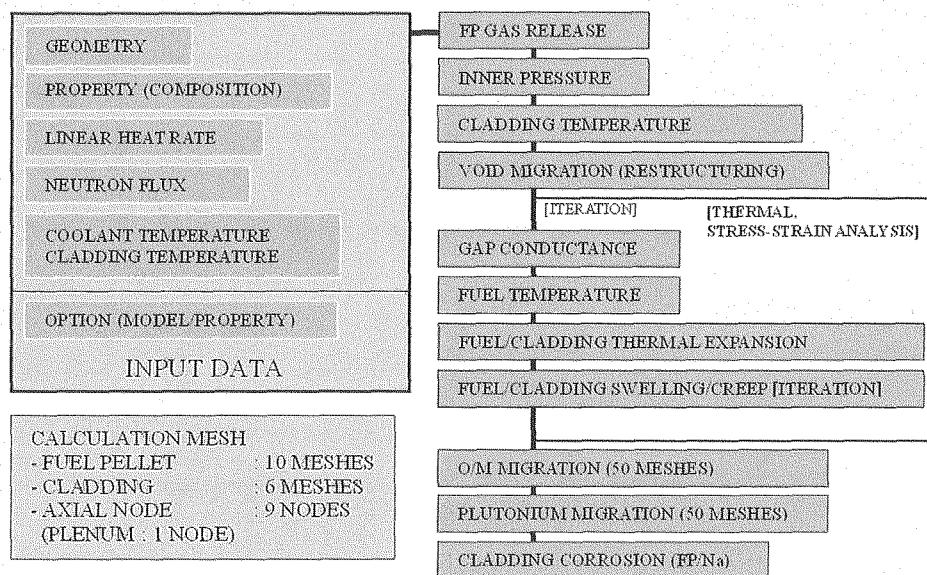
Design Method		Deterministic Method	Probabilistic Method
Design Parameters	Dimension	"WORST-CASE" Assumption	Probabilistic Density Function
	Material & Fuel Property	- Upper Limit - Lower Limit	- Normal Distribution - Uniform Distribution - Logarithmic Normal Distribution - Exponent Distribution
	Operational Condition		
	Analysis Model		
Performance Parameters		CRITERION	CRITERION
<ul style="list-style-type: none"> - Fuel Center Temperature - Cladding Temperature - Cladding Stress - Creep Damage Fraction (CDF) 		<p>RESULT</p> <p>Unreasonable Margin</p> <p>NOMINAL CONDITION</p>	<p>Statistical response PDF of Performance Parameter</p> <p>Optimized Margin</p> <p>NOMINAL CONDITION</p>
		<p>- Low Power - Short Lifetime (Low Burnup) - Rigid Specification</p>	<p>Allowance Probability</p> <p>NOMINAL CONDITION</p>
		Conventional Design	Optimized Design

出典) T. Ozawa and T. Abe, "Development of Probabilistic Design Method for Fast Reactor Fuel Rod", Nuclear Science and Engineering: 152, 37-47 (2006).

図 2.1 決定論的設計手法と確率論的設計手法の比較^[1]

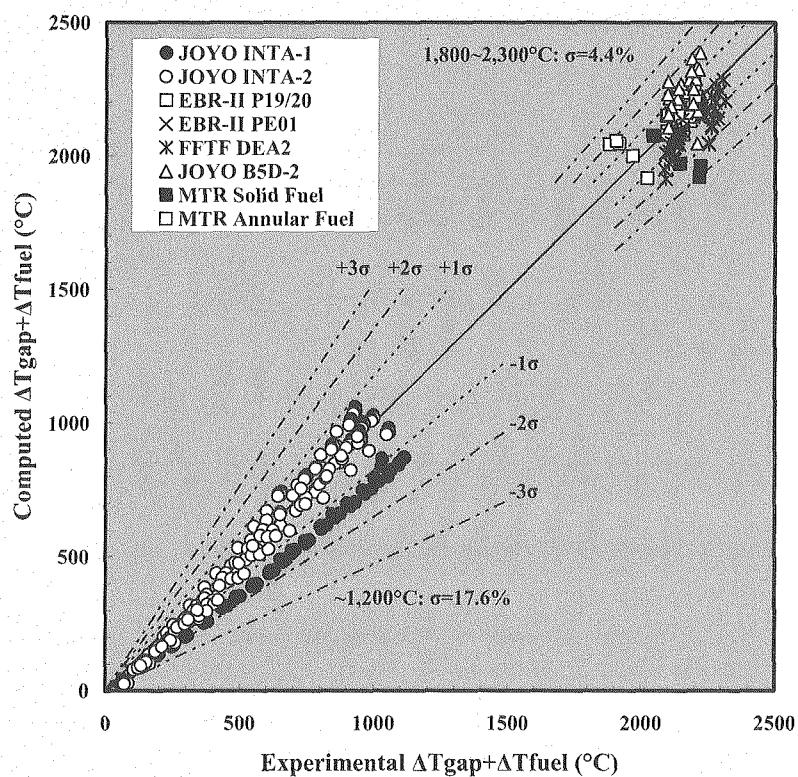
出典) T. Ozawa and T. Abe, "Development of Probabilistic Design Method for Fast Reactor Fuel Rod", Nuclear Science and Engineering: 152, 37-47 (2006).

図 2.2 BORNFREE コードの主な構造^[1]



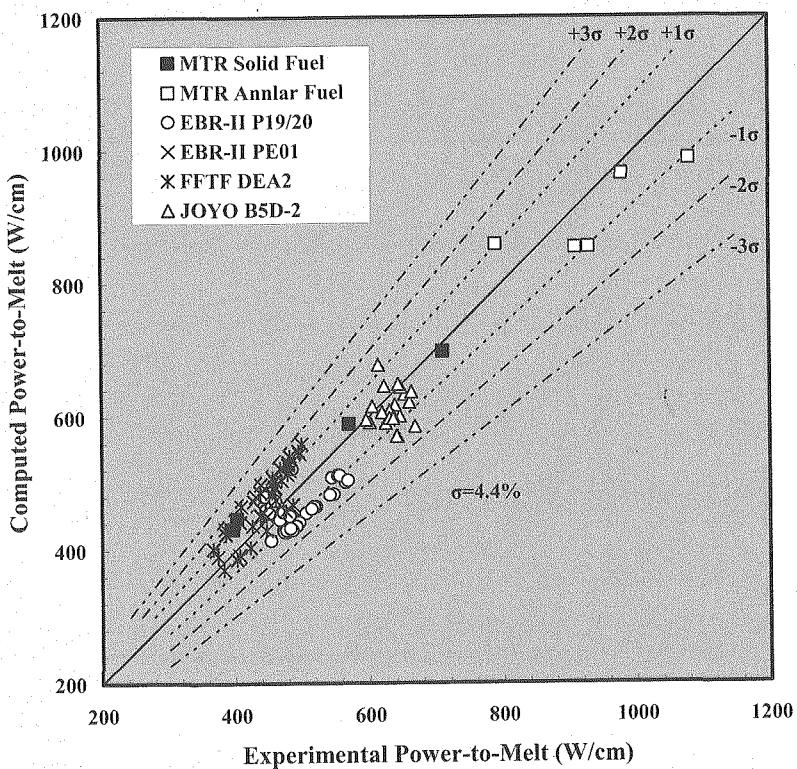
出典) T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

図 2.3 CEPTAR コードの主な構成^[2]



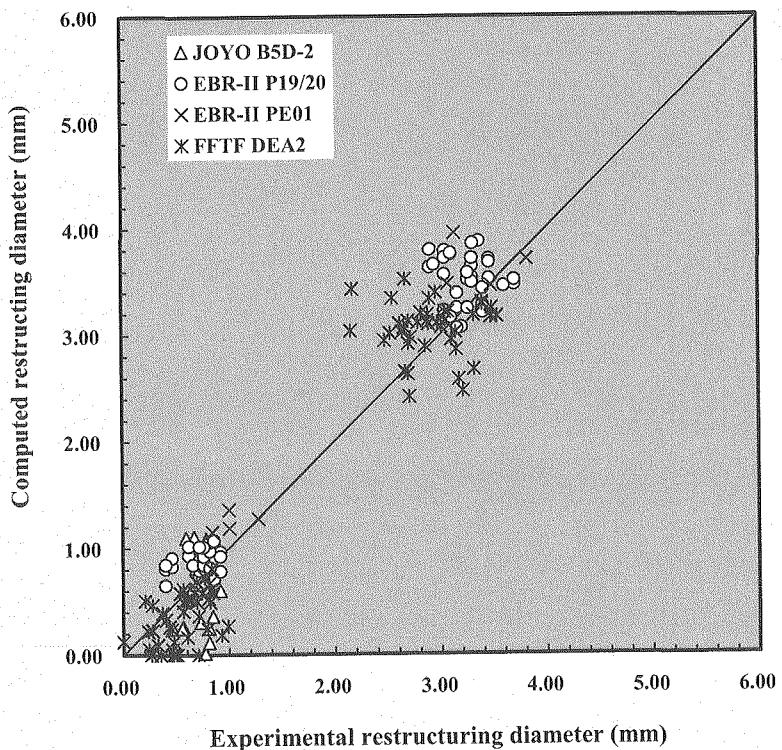
出典) T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

図 2.4 $\Delta T_{gap} + \Delta T_{fuel}$ に対する実測値と計算値の比較^[2]



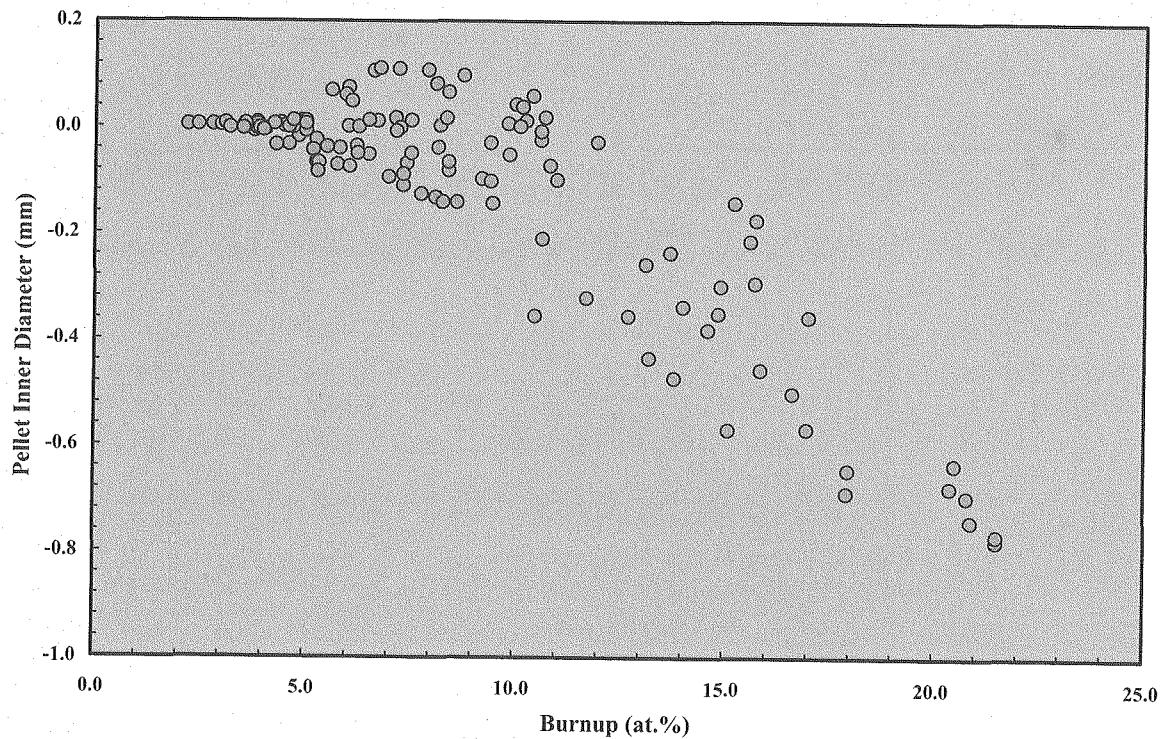
出典) T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

図 2.5 溶融限界線出力に対する実測値と計算値の比較^[2]



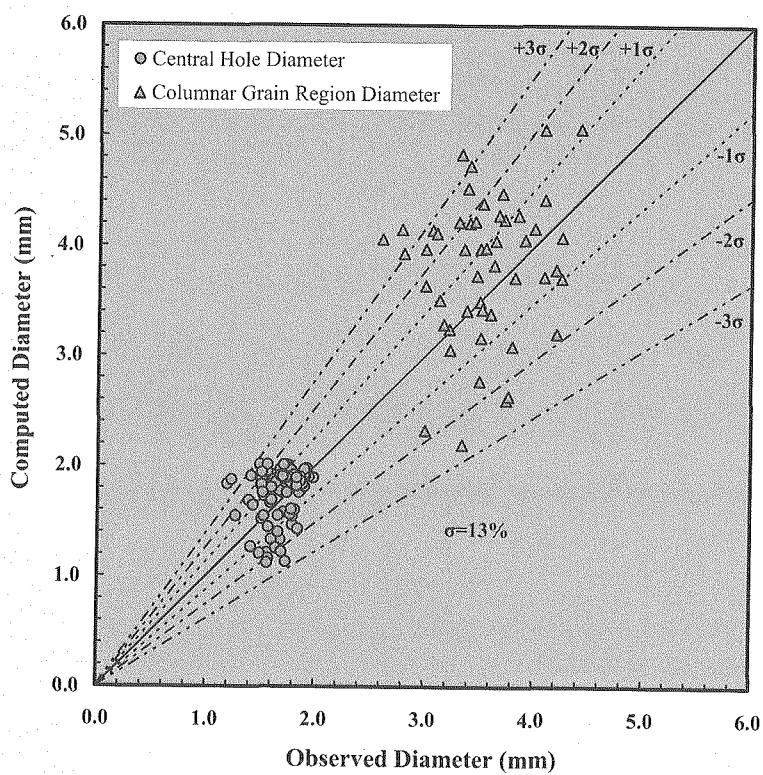
出典) T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

図 2.6 燃料組織変化に対する実測値と計算値の比較^[2]



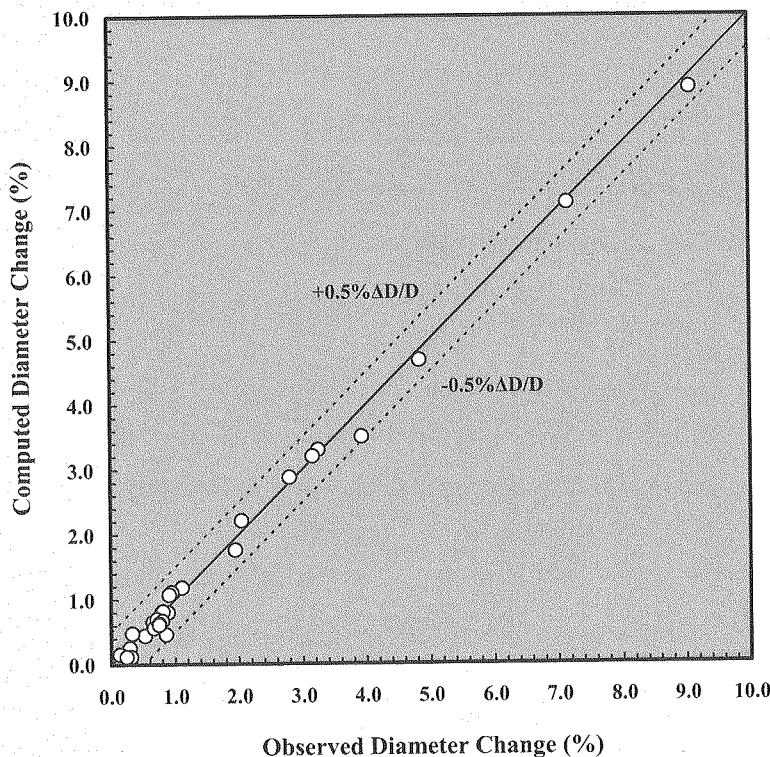
出典)T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

図 2.7 PFR 中空燃料における燃焼に伴う中空部縮小挙動^[2]



出典)T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

図 2.8 PFR 中空燃料の燃料組織変化領域径に対する検証結果^[2]



出典)T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

図 2.9 PFR 中空燃料の被覆管外径変化率に対する検証結果^[2]

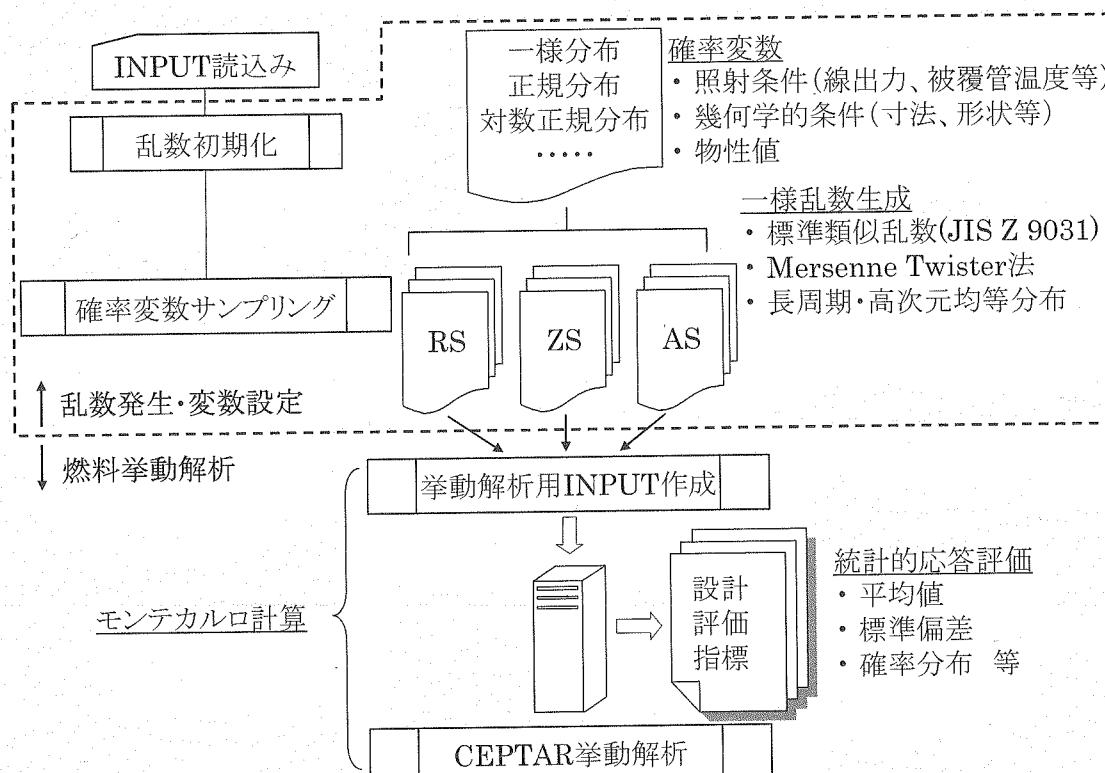


図 2.10 BORNFREE-CEPTAR コードの構成

3. 試計算

3.1. 計算条件

中空燃料採用による高線出力化の可能性について評価・検討するため、本コードを用いた試計算として、出力上昇時における過出力時燃料溶融確率の評価を行った。ここでは、スミア密度を一定とした条件での初期中空径の影響と出力上昇速度の影響を評価するため、表 3.1 に示すような計算パラメータを設定した。即ち、被覆管外径が 12mm の太径燃料ピンを対象として、中空燃料の採用による高線出力化の可能性検討のため、ペレット密度 85%T.D.の低密度中実燃料(スミア密度 82%)をレファレンスケース、スミア密度を 82%で一定とした条件で中空タイプ 1(中空径 1.7mm、燃料密度 87%T.D.)、中空タイプ 2(中空径 2.6mm、燃料密度 91%T.D.)、中空タイプ 3(中空径 3.4mm、燃料密度 95%T.D.)とした。

また、出力上昇速度に関しては、図 3.1 に示す 3 ケースとし、過出力までの出力上昇速度を 0.4%/min としたケース(パターン 1)、0.7%/min としたケース(パターン 2)に加えて、出力上昇速度は 0.4%/min で、原子炉出力 90%と 100%でそれぞれ 24 時間出力維持した後に過出力状態まで出力を上昇させる(パターン 3)とした。

BORNFREE-CEPTAR による確率論的評価では、各種の不確かさに確率分布を設定する必要があるが、ここでの試計算では表 3.2 に示すように設定した。

燃料ペレット及び被覆管の製作公差に係る確率変数には、公差上下限値を 3σ 相当とする正規分布の公差上下限値で裾切りした分布を設定した。また、線出力については、出力分布の不確かさ(5%)及び原子炉熱出力の不確かさ(2%)を乗算的に、また、図 2.5 に示した CEPTAR コードの溶融限界線出力に対する予測誤差を確率分布のバラツキとして取扱うため、平均値 1.071($=1.05 \times 1.02$)、標準偏差 0.044 の正規分布を設定した。さらに、各種の物性値に対しては、測定誤差等に基づいた上下限値を 3σ 相当とする正規分布を設定した。

3.2. 計算結果

BORNFREE-CEPTAR コードの試計算では、前述の計算条件に基づき、試行回数 10,000 回としたモンテカルロ計算を行った。図 3.2～図 3.4 に出力上昇速度毎の燃料タイプ別の燃料融点と燃料中心温度との差のヒストグラムを示す。また、燃料中心温度が燃料融点を超える確率(燃料溶融確率)と出力上昇時間の関係を図 3.5 に示す。

この結果から、出力上昇速度が 0.4%/min の場合、中実燃料の溶融確率が約 7×10^{-3} であるのに対し、中空タイプ 1 では約 4×10^{-5} 、中空タイプ 2 では約 3×10^{-9} である。また、出力上昇速度が 0.07%/min の場合、中実燃料の溶融確率が約 8×10^{-4} であるのに対し、中空タイプ 1 では約 7×10^{-6} 、中空タイプ 2 では約 6×10^{-10} となった。このように、短時間での出力上昇の場合、中空燃料の溶融確率が中実燃料に比べて約 2 枠以上低下することから、中空燃料の方が有利であることが云える。また、出力上昇パターン 3 のようにプレコンのある出力上昇パターンの場合、中実燃料では燃料組織変化の効果で燃料中心温度や標準偏差が低下するため、溶融確率は顕著に低下するが、中空燃料では初期からペレット中心部に中空部が

存在するため、燃料組織変化の効果は僅かである。

中空燃料を採用した場合における高線出力化については、出力上昇パターン 1 の出力上昇速度を 0.4%/min とした場合において、図 3.2 に示した中実燃料の溶融確率(約 7×10^{-3})と同程度の溶融確率となるまで中空燃料の線出力を高めた場合での許容線出力を求めた。その結果を図 3.6 及び表 3.3 に示すが、中実燃料と同程度の溶融確率条件において中空燃料では中空径の増加に伴い過出力係数も増加させることができ、中空タイプ 1(中空径 1.7mm)で 13%、中空タイプ 2(中空径 2.6mm)で 22%、中空タイプ 3(中空径 3.4mm)で 36%、過出力係数を増加させることができる。即ち、中実燃料での許容線出力が約 540W/cm である場合において、中空タイプ 3(中空径 3.4mm)の許容線出力は 700W/cm 程度することが可能であるものと考えられる。

表 3.1 BORNFREE-CEPTAR コードの試計算パラメータ

	中実	中空タイプ1	中空タイプ2	中空タイプ3
中空径		1.7 mm	2.6 mm	3.4 mm
燃料密度	85 %T.D.	87 %T.D.	91 %T.D.	95 %T.D.
スマア密度		82 %		
線出力		447 W/cm(過出力時)		
被覆管外径		12 mm		

表 3.2 確率論的不確かさの取扱い

不確定因子	分布型	上下限値	備 考
製作公差	正規分布	3 σ 相当	公差上下限値で裾切り
線出力	デルタ関数	乗算処理	出力分布、熱出力に係る誤差
コード予測誤差	正規分布	3 σ 相当	線出力のバラツキ: $\sigma = 4.4\%$
物性値	正規分布	3 σ 相当	測定誤差等に基づいた σ

表 3.3 中空燃料の許容線出力評価結果

燃料タイプ(中空径)	燃料密度	過出力係数増分	過出力時 許容線出力
中実燃料(0.0mm)	85 %T.D.	---	537 W/cm
中空タイプ1(1.7mm)	87 %T.D.	13 %	599 W/cm
中空タイプ2(2.6mm)	91 %T.D.	22 %	641 W/cm
中空タイプ3(3.4mm)	95 %T.D.	36 %	707 W/cm

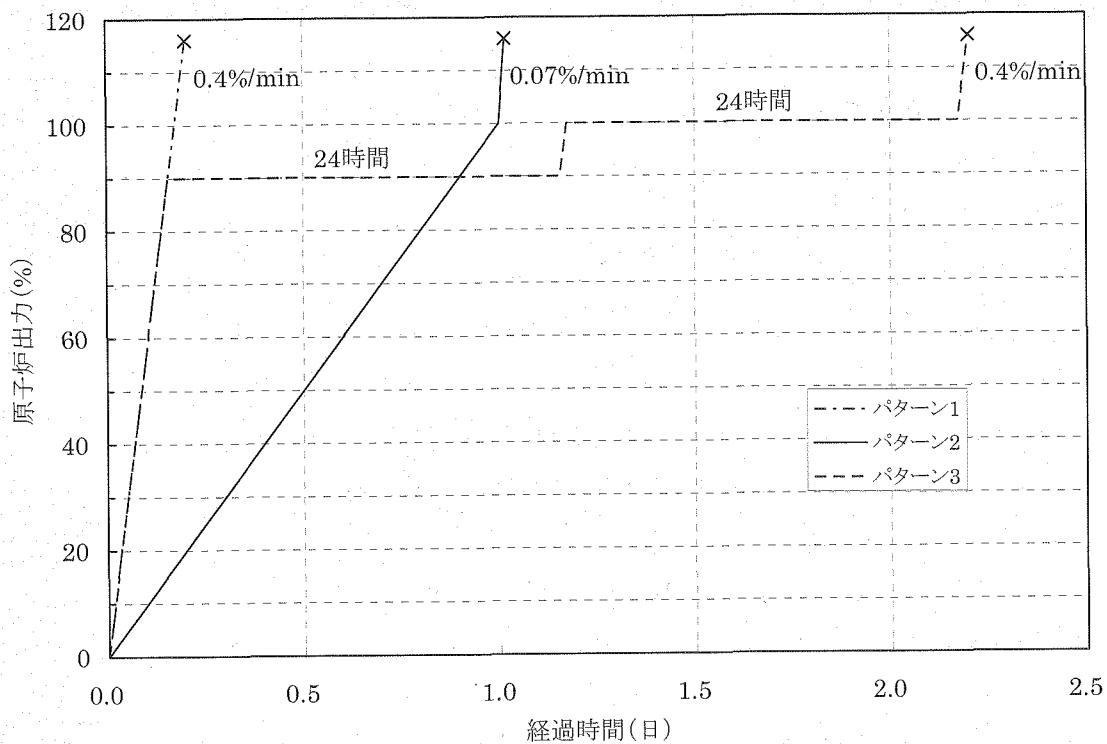


図 3.1 試計算でパラメータとした出力上昇速度

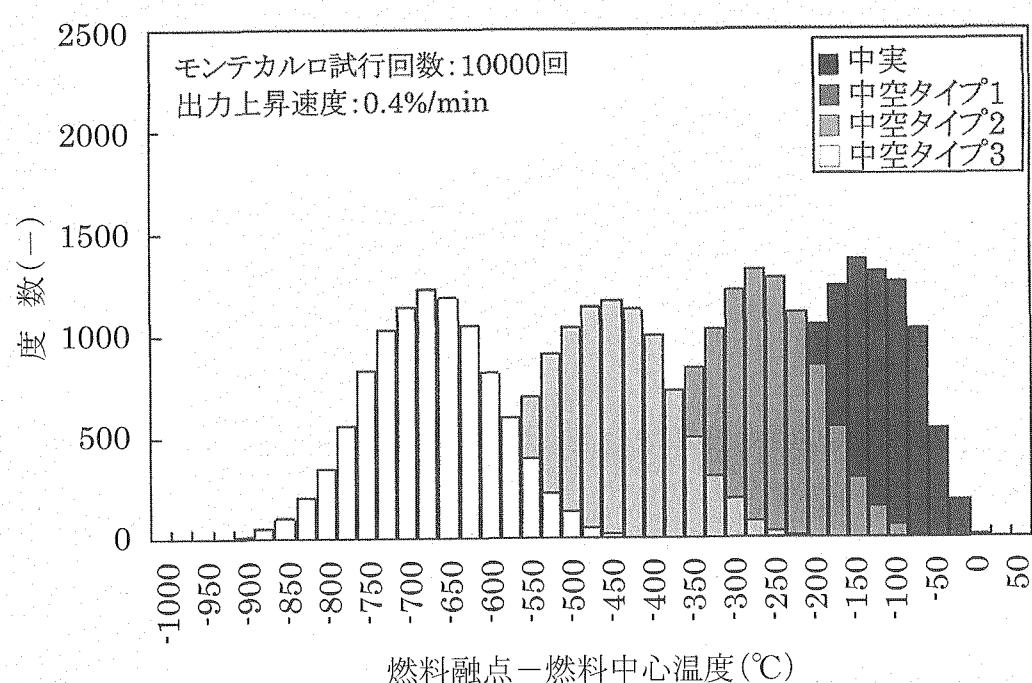


図 3.2 出力上昇パターン 1 での確率論的試計算結果

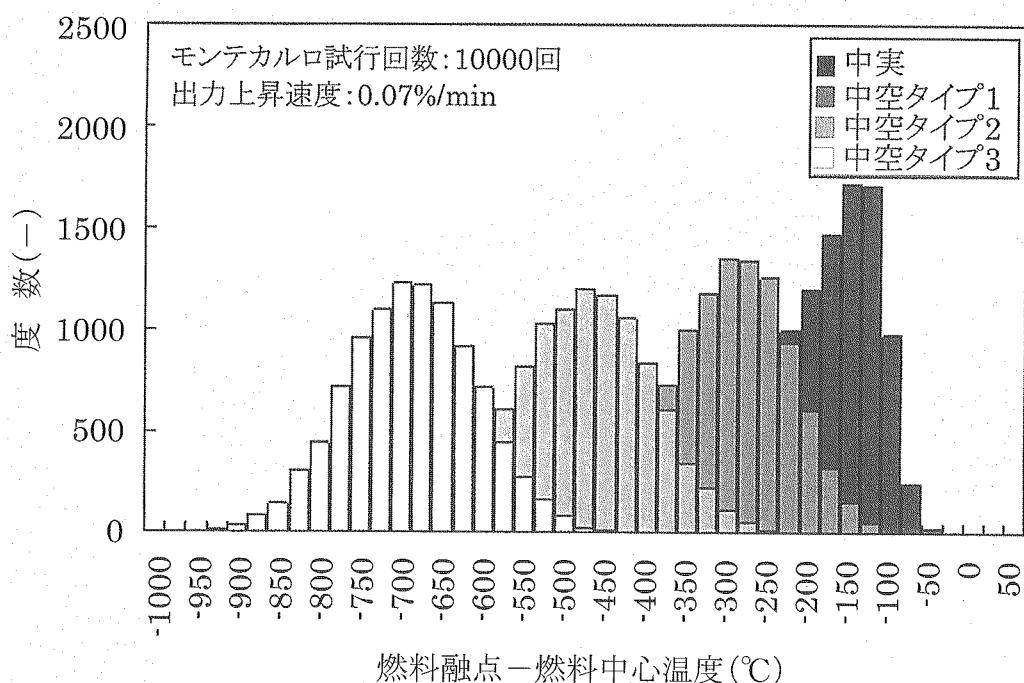


図 3.3 出力上昇パターン 2 での確率論的試計算結果

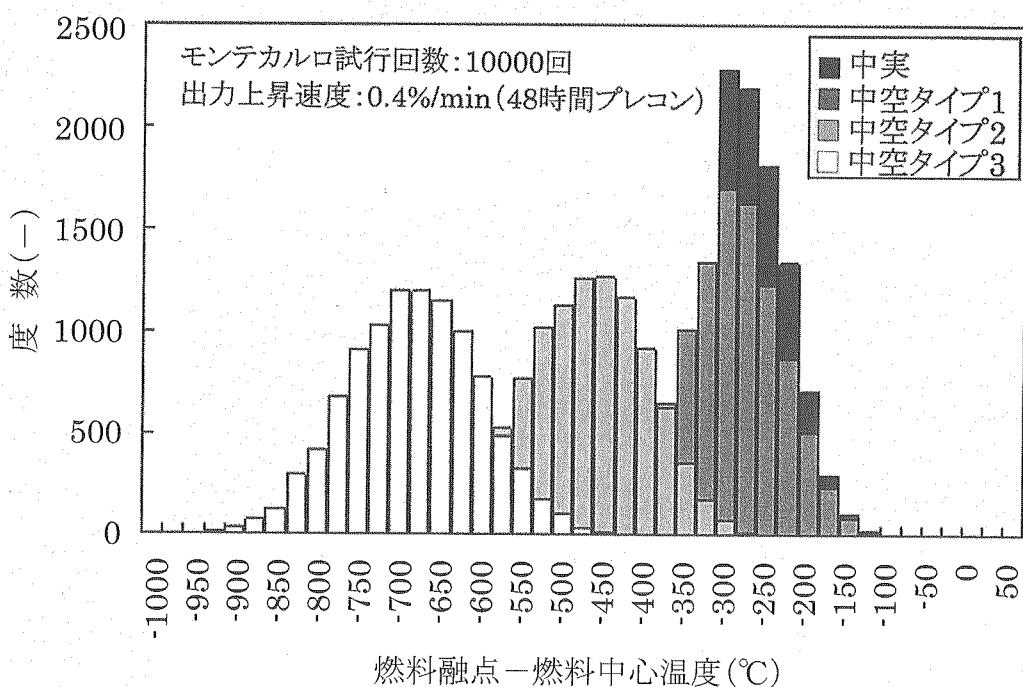


図 3.4 出力上昇パターン 3 での確率論的試計算結果

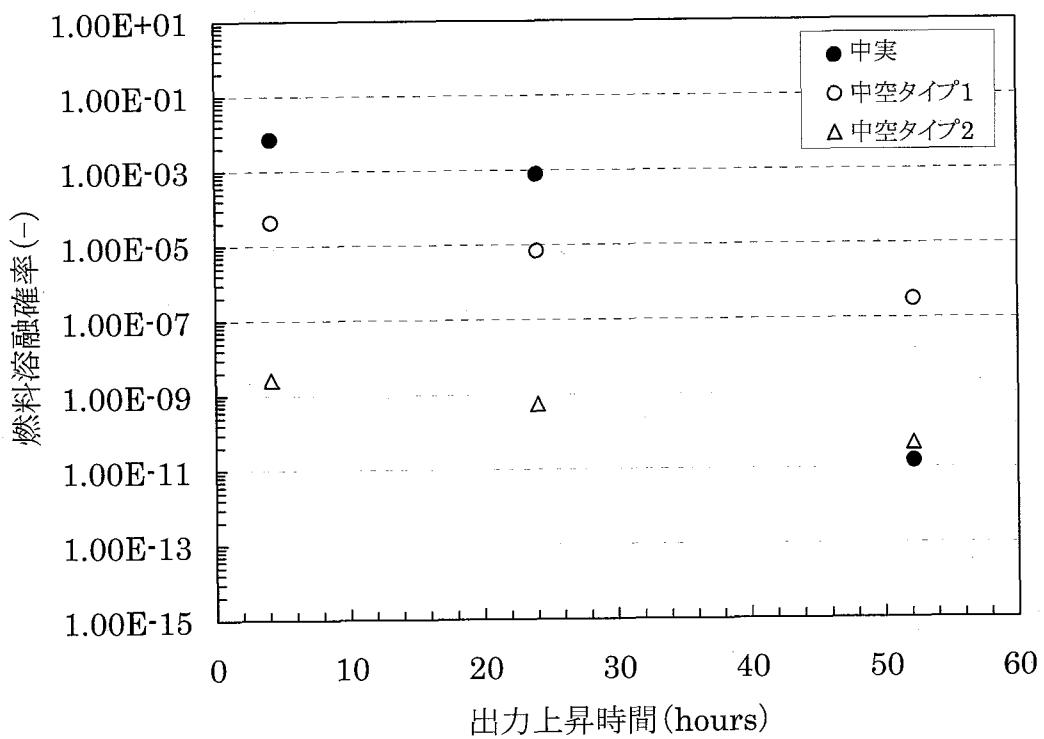


図 3.5 燃料溶融確率と出力上昇時間の関係

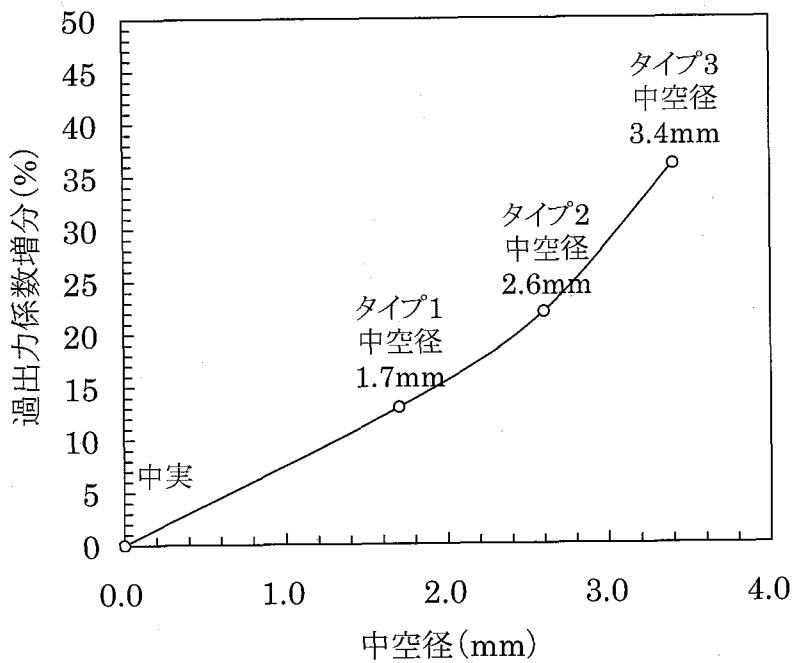


図 3.6 中実燃料と同程度の溶融確率となる中空燃料での過出力係数増分

4. 結言

将来の高速炉燃料としての採用が検討されている中空燃料の設計を合理的に行うため、確率論的中空燃料設計コード「BORNFREE-CEPTAR」の開発・整備を行った。

ここで開発したBORNFREE-CEPTARコードの試計算として、中実燃料と中空燃料の熱的設計裕度の評価及び高線出力化の検討を行った。熱的設計裕度の評価結果としては、まず、短期間での出力上昇では、中実燃料に比べて溶融確率が2桁以上低下する中空燃料が有利であることが示され、また、プレコン期間を含んだ出力上昇パターンにおいては、燃料組織変化の効果で燃料中心温度の平均値及び標準偏差が低下する中実燃料の溶融確率が顕著に低下することが示された。さらに、高線出力化の検討結果として、低密度中実燃料と同程度の溶融確率条件下において、高密度中空燃料では許容線出力が約36%程度増加する見通しを得た。

謝 辞

確率論的中空燃料設計コード「BORNFREE-CEPTAR」の開発・整備、並びに、試計算の実施にあたり実際に作業していただいた(株)NESI 中島 弘氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1: T. Ozawa and T. Abe, "Development of Probabilistic Design Method for Fast Reactor Fuel Rod", Nuclear Science and Engineering: 152, 37-47 (2006).
- 2: T. Ozawa and T. Abe, "DEVELOPMENT AND VERIFICATIONS OF FAST REACTOR FUEL DESIGN CODE CEPTAR", Nuclear Technology: 156, 39-55 (2006).

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル毎秒	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)1	1

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
压力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 热量	パワーカル	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率, 放射束	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
電荷, 電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	シemens	S	A/V
磁束密度	ウエーバー	Wb	$V \cdot s$
インダクタンス	ヘンリ	H	Wb/m^2
セルシウス温度	セルシウス度	°C	Wb/A
光束度	ルーメン	lm	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m^2
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
方向性線量当量, 人線量当量, 組織線量当量			$m^2 \cdot s^{-2}$

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	W/m^2
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$kg \cdot s^{-3}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラド每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタロジー	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容	ビン		
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1 L = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3$
トン	t	$1 t = 10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1 Np = 1$
ベル	B	$1 B = (1/2) 1n10 (Np)$

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1 eV = 1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1 u = 1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1 ua = 1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
アード	a	$1 a = 1 dam^2 = 10^4 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha = 1 hm^2 = 10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar = 0.1 MPa = 100 hPa = 10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å = 0.1 nm = 10^{-10} m$
バーン	b	$1 b = 100 fm^2 = 10^{-28} m^2$

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg = 10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn = 10^{-5} N$
ボルト	P	$1 P = 1 dyn \cdot s/cm^2 = 0.1 Pa \cdot s$
ストップ	St	$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G = 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe = (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx = 10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb = 1 cd/cm^2 = 10^4 cd/m^2$
ホタル	ph	$1 ph = 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad = 1 cGy = 10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem = 1 Sv = 10^{-2} Sv$
X線単位	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9} T$
ガンマ	Jy	$1 Jy = 10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m$
メートル系カラット	metric carat	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr = (101325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm = 101325 Pa$
カロリ	cal	$1 cal = 1 J = 10^3 erg$
ミクロ	μ	$1 μ = 1 pm = 10^{-6} m$