

高温高速炉の炉心ボイド反応度解析

区 分 変 更	
変更後資料番号	PNC TN9410 90-083
決裁年月日	平成 10 年 3 月 26 日

1990年7月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討及び周知を目的とする社内資料です。刊行物に引用する場合には、事業団の承認が必要です。



社内一般
PNC N9410 90-083
1990年7月

高温高速炉の炉心ボイド反応度解析

大谷 輝夫、大坪 章、羽賀 一男

要 旨

水素製造を目的とする高温高速炉の炉心の核特性に係る検討を行った。

本炉心は、窒化物或いは酸化物燃料を用いており、熱出力は実用炉クラスとして300～400MWtの小型炉を想定している。本報告書では、安全性を念頭において、負或いは正の小さい値のボイド係数をもつ炉心の設計を目標に解析を行った。ナトリウム・ボイド反応度の低減化の方策としては、少しパンケーキ型（炉心高さ／炉心直径=1/2～1/3）をした炉心形状を用いて炉心表面積を増大させる方法を採用した。

解析の結果、U燃料の場合はすべてのケースについて全炉心ボイド係数を負にする事が出来た。しかし、MOX燃料の場合は、ほとんどの場合が正の値となった。

又、U燃料炉心については燃焼計算をも行ったが、解析の結果1年間の燃焼期間を確保するためには、5%程度の燃焼反応度を補償するだけの余剰反応度が必要である事がわかった。

以上の解析計算はCITATIONコードを用いて行った。

大洗工学センター 技術開発部フロンティア技術開発室

新原子動力研究 高温高速炉ワーキンググループ

OFFICIAL USE ONLY

PNC N9410 90-083

JULY 1990

Void Reactivity Analysis on High
Temperature Fast Reactor

Nobuo Ohtani, Akira Otsubo,
Kazuo Haga

Abstract

Core physics was studied on the High Temperature Fast Reactor (HTFR) whose prime objective is to produce hydrogen. Core of HTFR consists of nitride or oxide fuel, and thermal power of a commercial HTFR is assumed to be 300 to 400 MWt. The analysis in this report aims at the core design having negative or small positive void reactivity from view point to attain safety if the reactors.

The method of decreasing sodium void reactivity coefficient was to increase neutron leakage through the large surface area of the core by adopting its shape of a pan cake (core height/core diameter=1/2 to 1/3).

Result of the analysis revealed that, total void coefficients is negative for all cases analyzed with U fuel. However almost all the cases analyzed had positive void reactivity coefficients for MOX fuel.

Burn-up calculation was performed for U fuel core. Calculational results showed that the excess reactivity of about 5% was necessary to compensate reactivity decrease due to the burn-up during a year.

The above calculations were performed using the CITATION code.

High Temperature Fast Reactor Working Group, New Reactor Power Dynamics Research,
Frontier Technology Development Section, Technology Development Division,
O-arai Engineering Center

高温高速炉の炉心ボイド反応度計算

報 告 書 目 次

	頁
1 はじめに	1
2 解析条件	2
3 解析手順および手法	4
3. 1 解析手順	4
3. 2 解析手法	6
4 解析結果と検討	8
4. 1 主要な炉心の中性子スペクトル	8
4. 2 ボイド反応度計算結果	8
4. 3 燃焼計算結果	12
4. 4 出力分布	14
5 結 論	40
付録 A 計算に使用した組成データ	A-1
付録 B 各国の炉心寸法データ	B-1
付録 C U N 燃料炉心と M O X 燃料炉心のナトリウムボイド反応度の比較.....	C-1

図表リスト(図)

	頁
図3. 1 解析手順	5
図4. 1 主要な核分裂性核種の η 値	26
図4. 2 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル	27
出力: 300MWt, UN燃料, ニオブ (上), パステロイ (下), H/D=1/3, 炉心サイズ: 420W/cc	
図4. 3 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル	28
出力: 300MWt, UO ₂ 燃料, ニオブ (上), パステロイ (下), H/D=1/3, 炉心サイズ: 420W/cc	
図4. 4 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル	29
出力: 300MWt, MOX燃料, ニオブ (上), パステロイ (下), H/D=1/3, 炉心サイズ: 420W/cc	
図4. 5 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル	30
出力: 300MWt, UN燃料, ニオブ (上), パステロイ (下), H/D=1/3, 炉心サイズ: 420W/cc ラッパ管構造あり	
図4. 6 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル	31
出力: 300MWt, UO ₂ 燃料, ニオブ (上), パステロイ (下), H/D=1/3, 炉心サイズ: 420W/cc ラッパ管構造あり	
図4. 7 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル	32
出力: 300MWt, 構造材:SUS, UN燃料 (上), UO ₂ 燃料 (下), H/D=1/3, 炉心サイズ: 420W/cc	
図4. 8 H/D パラメータの影響	33
図4. 9 ウラン燃料とMOX燃料の違い	34
図4. 10 出力密度 (炉心サイズ) の影響	35
図4. 11 軸遮蔽体の厚さの影響	36
図4. 12 ウラン炉心とMOX炉心の燃焼に伴う実効倍率の変化	37
図4. 13 300MWt 出力燃料炉心径方向出力	38
図4. 14 300MWt 出力燃料炉心軸方向出力	39

図表リスト(表)

	頁
表4. 1 炉心ボイド反応度計算結果	15
ウラン燃料 $H/D = 1/3$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=30cm	
表4. 2 炉心ボイド反応度計算結果	16
ウラン燃料 $H/D = 1/2$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=30cm	
表4. 3 炉心ボイド反応度計算結果	17
MOX燃料 $H/D = 1/3$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=30cm	
表4. 4 炉心ボイド反応度計算結果	18
MOX燃料 $H/D = 1/2$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=30cm	
表4. 5 炉心ボイド反応度計算結果	19
ウラン燃料 $H/D = 1/3$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=20cm	
表4. 6 炉心ボイド反応度計算結果	20
ウラン燃料 $H/D = 1/3$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=10cm	
表4. 7 炉心ボイド反応度計算結果	21
ウラン燃料 $H/D = 1/2$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=10cm	
表4. 8 炉心ボイド反応度計算結果	22
ウラン燃料 $H/D = 1/3$ 炉心サイズ=300W/cc 遮蔽体厚=30cm	
表4. 9 炉心ボイド反応度計算結果	23
ウラン燃料 $H/D = 1/3$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=30cm ラッパ管構造込み	
表4. 10 炉心ボイド反応度計算結果	24
MOX燃料 $H/D = 1/3$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=30cm ラッパ管構造込み	
表4. 11 炉心ボイド反応度計算結果	25
MOX燃料 $H/D = 1/3$ 炉心サイズ=420W/cc 遮蔽体厚=30cm	

1 はじめに

ナトリウム冷却型高速炉の安全性を支配する重要なパラメータの1つであるナトリウム・ボイド反応度は、その成分に分けると主に炉心からの中性子漏洩による負の項とプルトニウム炉心では正となるスペクトル項とのバランスによって定まる。大型炉では相対的に漏洩項が効かなくなるため反応度が正となることが多いが、小型炉では負のボイド反応度を持つ炉心の設定が可能とされている。

ナトリウム・ボイド反応度の低減化の方策としては、

- 燃料富化度の増大
- 炉心表面積の増大
- 炉心出力の減少
- 非均質炉心の採用
- 構造材比率の変化

等が考えられる。

本作業では、このような基本的なアイデアを考慮して負のナトリウム・ボイド反応度を持つ小型炉を検討するための炉物理計算を実施した。

以下では、解析内容、解析条件、計算結果とその検討、考察を述べる。

2 解析条件

対象とする高温高速炉とは、小型炉心でしかも冷却材であるナトリウム炉心出口温度を約800°Cまで上げるため、通常の高速炉の出口温度約500～560°Cに比べて沸点（現在の設計では970°Cとしている）までの冷却材温度上昇の余裕が小さい。そのため、ボイド発生を伴うような事故の対策として、炉心のボイド係数が負である特性を持たせることが出来れば望ましい事となる。

また、このような高温高速炉でなくとも、通常のプルトニウム燃料高速炉でも正のナトリウム・ボイド係数を負にもって行くための方策が各国で検討されている。正のボイド反応度の低減化の方策としては、例えば、

- (1) 燃料富化度の増大（小型化）
- (2) 炉心表面積の増大（小型化、H/D比の減少など）
- (3) 炉心出力の減少（小型化）
- (4) 非均質炉心の採用（内部ブランケットなどの採用）
- (5) 構造材の減少（冷却材体積比を上げ、ボイド時の漏洩を増加させる効果、吸収体の減少による炉心の小型化）

などが提案されている。

このようなボイド係数低減化のアイデアのうち、ここでは(1)、(2)、(3)、(5)を取り上げる。(4)については、対象とする高温高速炉にはブランケットを設けない方向で検討されているので、内部ブランケットを持ち込むことは考えない。具体的には下表に示す条件で計算を行うこととした。なお()内は代替案とし、初期設定案で所定の炉心が得られなかった場合に検討する対象とした。

当初設定した基本的な解析条件

燃料	U N (U O ₂)
被覆管材	N b - 1 % Z r - 0.1 % C (ハステロイ)
ラッパー管	なし
冷却材	ナトリウム、ただし入口650°C、出口800°C
炉心出力	300 200 (100 400) MWt
炉心H/D	0.2以上 (300MWtで1/3が望ましい)

ただし、その後の検討から、ウラン炉心については全炉心ボイド状態で正のボイド係数となることはほとんどないことがわかつてきただため、各々の解析条件の影響を見ることとしてパラメトリックに計算を行った。そのパラメータを以下に示す。

解析した条件

燃料	U N	U O ₂	M O X
被覆管材	N b - 1 % Z r - 0 . 1 % C	ハステロイ	S U S
ラッパー管	なし	あり	
冷却材	ナトリウム、ただし入口650°C、出口800°C		
炉心出力	3 0 0	4 0 0	M W t
炉心H/D	1 / 3	1 / 2	

この表で、当初考えていなかった条件について補足説明を行う。まず、燃料にM O Xが追加されたが、これは通常のプルトニウム燃料を用いた場合に同一炉心サイズでボイド反応度がどのようになるかを調べるものである。結果的にはM O X燃料炉心では正の反応度が得られ、ウラン燃料炉心の計算手順・条件などに誤りのないことを示す間接的な証拠となった。

被覆管材にS U S（ステンレス鋼）を用いることは、高温であることから炉心構造材料としては意味がない。しかし、通常の高速炉ではS U Sが使用されるので、ニオブあるいはハステロイがボイド反応度に対して核的にどの程度影響するかを調べるために対象として含めた。

炉心出力については、当初3 0 0 M W tでは負のボイド反応度となることが困難であると予想されたため、より小型の炉心を次善の案として考えたが、実際には3 0 0 M W tでも反応度変化が正にならなかったため、より出力をあげたものとして4 0 0 M W tを対象に含めることとした。

なお、後述のように、当初は燃焼計算までは考えていなかったが、ウラン燃料炉心の特性のひとつとして燃焼反応度を調べることとした。

このように、解析内容が作業の進行につれて変化してきたため、炉心燃料領域の非均質セル構造に基づくストリーミングの影響評価は取りやめた。ストリーミングによる反応度は負の側であるので、ウラン炉心については考慮しなくとも、負のボイド反応度であるとの結果への影響はない。

3 解析手順および手法

3. 1 解析手順

本解析で対象とした高温高速炉に直接参考となる炉心がないため、以下の手順で炉心を設定する。臨界性と出力分布の2点がほぼ満足できたら、この炉心に対して全炉心ナトリウムボイド状態の計算を行い、ボイド反応度を算出する。

具体的には次の手順で解析を行う。

① 「常陽」、「もんじゅ」等の燃料集合体データを用いて、ラッパー管のない燃料集合体物質体積比率を計算する。

② おおまかな炉心サイズを決定するために、炉心平均の出力密度；

「常陽」 400W/cc

「もんじゅ」 305W/cc

を参考にして約400W/ccの出力密度を持つ炉心と仮定する。これとH/D比の条件から炉心サイズを決定する。なお、径方向出力分布を平坦化するために、内側・外側の2領域炉心とする。

③ ①と②とから定まる炉心について拡散計算を行い、臨界調整ならびに出力分布の調整を行う。臨界調整は、制御棒なしのモデルで行うため、実効増倍率で1.02程度に調整する。また、出力分布については、内側炉心ピーク出力と外側炉心ピーク出力の比が1.01程度になる炉心をさがすこととした。調整パラメータとしては、内側炉心と外側炉心の境界、燃料濃縮度(MOX燃料においてはプルトニウム富化度)である。したがって、多数の炉心を対象とするときにこのプロセスで膨大な計算が必要となる。

④ 条件の満たされた炉心に対して、炉心燃料領域全体および中心領域に冷却材ボイド状態の断面積データを与えて臨界計算を行い、通常時の実効増倍率と併せて反応度を算出する。

⑤ 同様な検討を前章で示したパラメータについて行う。

⑥ 代表的な炉心(UN、MOX燃料炉心)について燃焼計算を行い、炉心寿命を調べる。

解析の具体的な手順を次頁に示す。

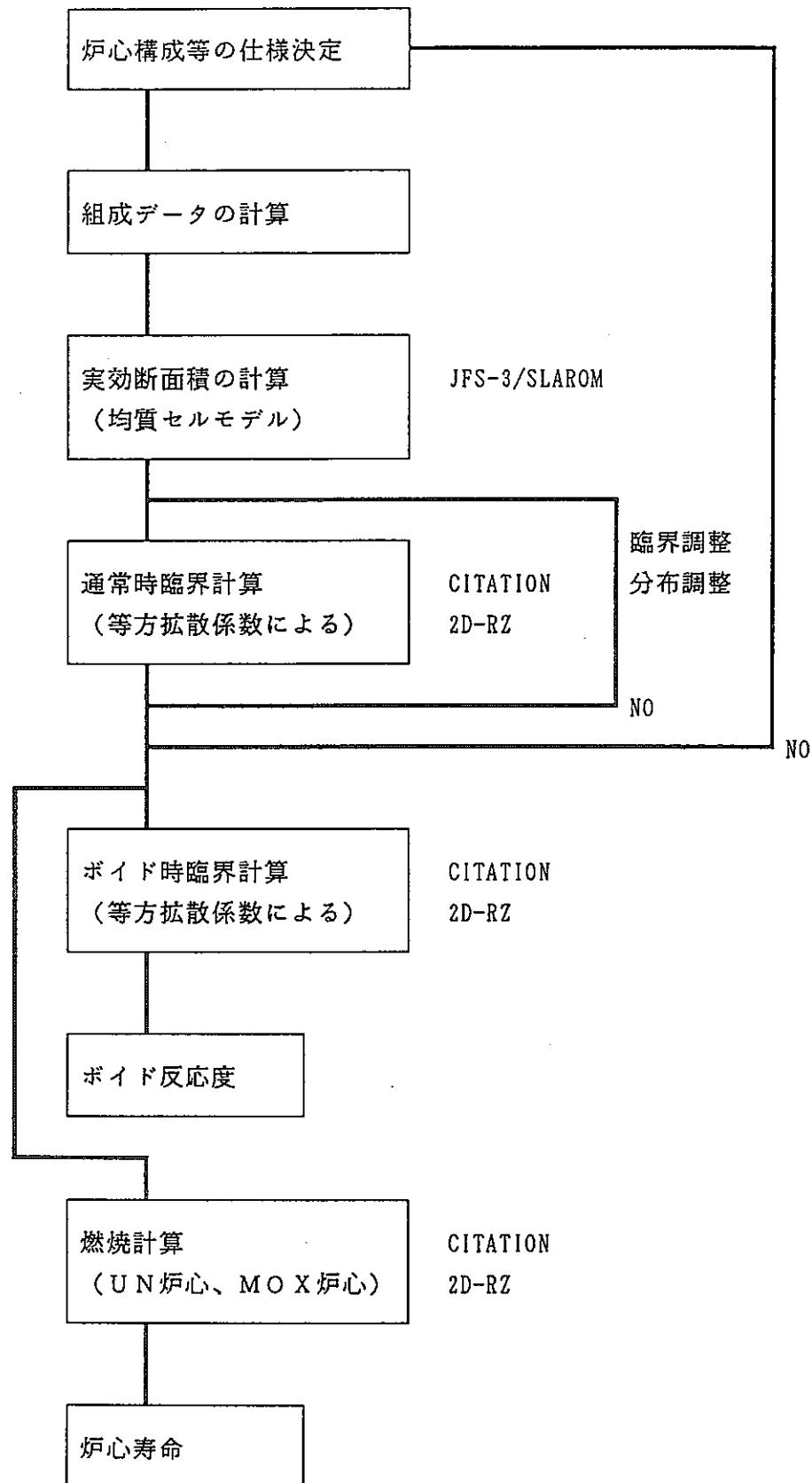


図3.1 解析手順

3. 2 解析手法

上記の解析手順に沿って計算を行う。計算に使用したライブラリと計算コードは以下の通りである。

断面積ライブラリ ; J F S 3 R J 2 - F P 2 N
(最新の J F S - 3)

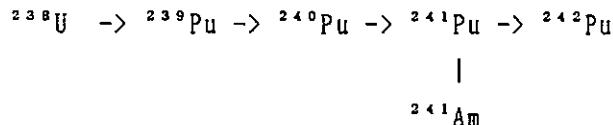
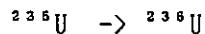
実効断面積作成コード ; S L A R O M

拡散計算コード ; C I T A T I O N

断面積ライブラリは最新の J F S - 3 を用いた。このライブラリには、従来収納されていなかったニオブ (⁹³Nb) が含まれているので、今回の解析が可能である。拡散計算に用いる実効断面積は、従来から高速炉解析に使用してきた S L A R O M コードを用いて作成した。組成データは付録にまとめてある。断面積作成モデルとしては、当初、非均質セルモデルを採用することを考えたが、解析の重点がパラメトリックサーベイに傾いたため、均質セルモデルに限ることとした。また、目的がナトリウムボイド反応度計算であるため、J S F - 3 の 70 群構造のまま全ての計算を行うこととし、断面積縮約のプロセスは除いた。炉心領域ごとに作成した実効断面積を用いて実効増倍率の計算を行った。使用した計算コードは 1、2、3 次元拡散燃焼コード C I T A T I O N である。本解析では 2 次元 R Z モデルで計算を行った。炉心出力の規格化に際しては、核分裂発熱のみを考慮している。拡散計算の条件としては、以下の通りに設定した。

- ・メッシュ幅 2 ~ 2.5 cm / メッシュ
- ・中性子束収束条件 1. E - 4
- ・固有値収束条件 1. E - 5

これらの条件は燃焼計算でも同様である。燃焼計算では、次の燃焼連鎖を考慮した。



核分裂核種から生成する FP の収率データは以下の通り扱った。単位は%である。

	^{235}U	^{238}U	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu	^{242}Pu	^{241}Am
FP/ ^{235}U	100	66						
FP/ ^{238}U		34	100					
FP/ ^{239}Pu				100	49			
FP/ ^{241}Pu					51	100	100	100

なお、疑似 FP 核種はどの親核種についても 180 日照射燃焼度に対応するものを用いた。

4 解析結果と検討

4. 1 主要な炉心の中性子スペクトル

通常のLMFBRでボイド係数が正になる原因是、炉心内の減速材の減少とともに中性子スペクトルが硬化し、 η 値のエネルギー依存性（図4.1）によって正の反応度成分が増大するためである。一方、冷却材の密度が減少すれば、炉心からの中性子漏洩は増大し、負の反応度成分も増加する。プルトニウム炉心では前者の効果が大きく、その結果正味のボイド係数が正となる。

反応度計算値を述べる前に、代表的な炉心中性子スペクトルを図4.2～図4.7に示す。

4. 2 ボイド反応度計算結果

以下では、ナトリウムボイド反応度計算結果を示すが、まとめるところである。

表番号	燃 料	構 造 材	H / D	炉心サイズ (W/cc *4)	遮蔽体厚さ (cm)	ラッパ管構 造の有無
(*1)	(*2)	(*3)				
4. 1	ウラン	N b / H	1 / 3	420	30	なし
4. 2	ウラン	N b / H	1 / 2	420	30	なし
4. 3	M O X	N b / H	1 / 3	420	30	なし
4. 4	M O X	N b / H	1 / 2	420	30	なし
4. 5	ウラン	N b / H	1 / 3	420	20	なし
4. 6	ウラン	N b / H	1 / 3	420	10	なし
4. 7	ウラン	N b / H	1 / 2	420	10	なし
4. 8	ウラン	N b / H	1 / 3	300	30	なし
4. 9	ウラン	N b / H	1 / 3	420	30	あり
4. 10	M O X	N b / H	1 / 3	420	30	あり
4. 11	ウラン	S U S	1 / 3	420	30	なし

注 (1) ウラン燃料は、UN(窒化物)およびUO₂(酸化物)の2種類を含む。

(2) N b は、N b - 1% Zr - 0.1% C であり、H はハステロイを意味している。また、参考ケースとしてSUS(ステンレス鋼)も取り上げている。

(3) H / D の H は炉心高さ、D は直径を意味している。

(4) 炉心サイズは、炉心平均出力密度(W/cc)であらわしている。これは、炉心間での比較を行うために、漏洩成分を出来るだけ同一レベルに揃えるためである。

以下にこれらの結果を順次述べる。

(1) ウラン燃料を使用したケース

表4. 1 および表4. 2 に計算結果をまとめた。どちらの表も炉心出力 300 MWt および 400 MWt の炉心に対して、燃料 (UN, UO₂)、構造材 (ニオブ、ハステロイ) を代えた計算結果である。

両表では、H/D パラメータが 1/3 および 1/2 である場合の結果を示している。炉心中央部のみボイドとなる場合では、300 Wt 炉心でも UN および UO₂ 燃料にかかわらずニオブを構造材に用いると正の反応度変化が得られる。ニオブとハステロイを比較すると、ハステロイの方がより負側の反応度変化を生じることがわかる。また炉心形状については予想されるとおり、H/D が 1/2 の場合は 1/3 の場合に比べてどの炉心も負の反応度変化が小さくなっている。

(2) MOX 燃料を使用したケース

表4. 3 および表4. 4 に MOX 燃料 (プルトニウム富化度 30% 以下、ウランは減損ウランの組成) を用いたときの計算結果をまとめた。どちらの表も上記ウラン燃料炉心の場合と異なり、炉心中央部のみならず炉心全体がボイドとなった場合でも正の反応度変化となることがわかる。プルトニウム炉心の場合、プルトニウムの遅発中性子割合 (β) がウランのものに比べて小さいため、ドル単位で見ると相当大きな正の反応度に相当する。ちなみに常陽クラスのウラン燃料炉心では β_{eff} が 0.007 程度、MOX 燃料炉心では 0.004 程度であるため、たとえ同じ 1% $\Delta\rho$ でも、前者では 1.4 \$ となるが後者は 2.5 \$ となり、制御の観点からは後者の方が格段に厳しい。

炉心出力 300 MWt と 400 MWt の炉心について比較すると、後者の方がボイド反応度 (正值) が大きく、また H/D パラメータについてもこの値が大きいほどボイド反応度が大きい。さらに上記 (1) と同じく構造材 (ニオブ、ハステロイ) の影響を見ると、ウラン炉心と同じくハステロイを用いた炉心の方が正のボイド反応度を低減する。

(3) 軸方向遮蔽体長さの影響

表4. 1 を基準として、遮蔽体長さを変化させた結果を表4. 5、表4. 6 に示す。遮蔽体厚さが 10 cm、20 cm の炉心は遮蔽設計上要求を満たさない可能性があるが、ボイド反応度についても顕著な影響を及ぼす。遮蔽体厚さが 30 cm と 10 cm のケースを比較すると、ニオブを構造材として用いた計算では前者のボイド反応度は後者の 1/3 程度になった。同様にハステロイを構造材として用いた炉心では約 1/2 程度になり、軸方向遮蔽の厚さの影響が大きいことがわかる。これは軸方向遮蔽体 (臨界性の観点からは中性子反射体として働く) の厚さの差により、中性子の漏洩量に大きな差が現れることであり、ボイド反応度を比較する場合に注意が必要である。ちなみに炉心中央部のみボイドにした計算結果に着目すると、10 cm の場合には 300 MWt 炉心の全てのケースで負の反応度変化を示すが、20 cm 厚の場合にはニオブを構造材としたケースで正の反応度変化となり、30 cm ではこの傾向が更に強くなる。表4. 7 には、遮蔽体厚さが 10 cm かつ H/D が 1/2 の場合の結果を示しているが、この程度の炉

心偏平度では、 H/D が $1/3$ の場合と大差ない。

(4) 炉心サイズの影響

表4. 1を基準として、炉心サイズを変化させた結果を表4. 8に示す。炉心サイズが大きくなれば、表面積／体積は減少し、相対的に中性子漏洩が小さくなる。ここでは炉心サイズは炉心平均出力密度（すなわち、炉心出力／炉心体積；単位W/cc）で定めている。表4. 1に示した基準ケースは、約420W/ccであり、この値は「常陽」と同程度である。一方、「もんじゅ」では約300W/ccであることから、表4. 8の結果はこれと同程度に設定したものである。

表4. 8から明らかなように、300W/ccの炉心サイズでは400MWt炉心のみならず300MWt炉心でも中央部ボイド時に正の反応度を生じる。しかしながら、この炉心でも全炉心ボイド時には負のボイド反応度となる。

(5) ウラン燃料炉心におけるラッパ管構造の影響

表4. 1ほか今まで示してきた計算結果はすべてダクトレス集合体を想定したものであるが、ボイド係数低減化のアイデアとしては構造材比率を小さくすることがあげられており、ここでは逆にラッパ管構造を取り入れた場合にボイド反応度がプラス側に動くかどうか調べた。結果を表4. 9に示す。これを表4. 1と比較すると、300MWtおよび400MWt炉心のどちらもラッパ管構造のある方が負のボイド反応度が大きく、予想に反する結果となった。ソ連の検討では、構造材比は7.5%程度まで減少させるとの極端な燃料ピン構造であり、この程度までにしないと効果が現れないのかも知れない。ちなみに、「もんじゅ」、「常陽mk1」ではそれぞれの構造材体積比は、約25%と約18%である。ここで設定したラッパ管なしの高温炉では、約14%となっている。

(6) MOX燃料炉心におけるラッパ管構造の影響

上記(5)では、ウラン燃料炉心についてラッパ管構造を取り入れた場合にボイド反応度がプラス側に動くかどうか調べた。その結果、ラッパ管構造のある方が負のボイド反応度が大きくなかった。この結果がウラン燃料独特のものかどうか検討するために、MOX燃料炉心についても計算を行った。結果を表4. 10に示す。表4. 3のダクトレスの炉心と比較すると、構造材がニオブでもハステロイでもダクトレスの場合からやや小さな値となっている。その結果、ダクトレスで+0.28%であったハステロイのケースが-0.03%となった。このような結果は(5)のウラン炉心の場合と同じである。

なお、スーパーフェニックス炉を対象とした ^{238}U 、 ^{239}Pu 、SUS、Oに対する核種数密度の10%変化時の感度係数は次の通りになっており、SUSの増加によってボイド反応度が減少すると報告されている(M. Martini, M. Salvatores)。

物質	^{238}U	^{239}Pu	SUS	O
感度係数	3.11%	-7.07%	-2.93%	-4.23%

これをみると、今回の解析結果は特別なものではないことがわかる。

(7) 構造材としてSUSを用いた場合の核的影響

既に述べたように、構造材にSUSを用いることは高温高速炉として現実的ではないが、核特性を調べるために参考計算として、被覆管がSUSであるとした計算を行った。結果を表4. 11に示す。この結果と表4. 1の構造材としてハステロイを用いた結果とを比較すると、ややSUSを使用した方が反応度の絶対値が大きいものの、300MWtおよび400MWtの各炉心の結果と同程度のボイド反応度が得られた。SUSとハステロイとは鉄、ニッケルなどが成分であるため、核的には特別大きな差はないことが予想され、その通りの結果となった。

以上の結果を再度まとめて図に示す。

● H/Dパラメータの影響(図4. 8)

図から明らかにH/D比が小さくなるほど負の度合が大きくなり、定性的にはH/D比を小さくすることはボイド反応度を小さくすることになる。ただし予想したほどには大きな変化でない。これは、1/3~1/2程度の範囲ではまだ不十分であることを示しているのかもしれない。他機関の検討では、このH/D比を0.1程度まで落とすことさえも考えられている。

● ウラン燃料とMOX燃料との違い(図4. 9)

図からわかるように、MOX燃料炉心ではボイド反応度が正、ウラン燃料炉心では負である。どちらも酸化物燃料であるので、このような差はまさにウランとプルトニウムの核断面積の差に基づいている。H/D比の依存性については、相対的にMOX燃料炉心の方が大きい。H/D比の変更はMOX燃料で有効かもしれない。

● 炉心サイズの影響(図4. 10)

同一出力でも炉心サイズが大きくなると相対的に漏洩量が減少するため、ボイド反応度はプラス側に向く。その傾向が図からわかる。UN燃料とUO₂燃料で絶対値に差が現れており、後者でニオブを用いた場合には300W/ccの炉心サイズでほとんどゼロになる。

● 軸遮蔽体の厚さの影響(図4. 11)

対象炉心は軸ブランケットの設けていないため、軸遮蔽体の厚さが直接中性子漏洩量に影響し、その結果ボイド反応度にも大きく影響することが図から読み取れる。

4. 3 燃焼計算結果

当初の解析範囲には含まれていなかったが、炉心の核特性としてはナトリウムボイド反応度のほかに、燃焼特性も評価しておく必要がある。特に、対象である高温高速炉は小型で炉心にプランケットを設けない構造であるので、中性子経済が良くなく、燃料の寿命が心配となる。また、解析の前提として、「常陽」のピン構造を参考にし、また炉心規模も「常陽」と同程度の平均出力密度としたため、約70日という「常陽」の燃料サイクルを考えると1年程度の燃料交換インターバルでさえもあやしくなってくる。一方、炉心構造材としてニオブのような高価な材料を採用するには、これに見合う炉内滞在期間が確保されることが望まれる。そこで、実際に典型的な炉心；

- ① U N 燃料、ニオブ構造材、 $H/D = 1/3$ の炉心
- ② M O X 燃料、ニオブ構造材、 $H/D = 1/3$ の炉心

について、C I T A T I O N コードにより燃焼計算を行った。

燃焼に伴う実効増倍率の変化を図4. 12に示す。半年間の運転による反応度低下はそれぞれ以下の通りとなる。\$単位の反応度については、各炉心について β_{eff} を計算したわけではなく、備考欄に示した値を換算に使用したものであり、参考データとして示した。

炉 心	半年間の反応度変化	同 \$ 換算	備 考
① U N 燃料炉心	- 2. 0 8 % $\Delta \rho$	3. 0 \$	$\beta_{eff}=0.007$ 使用
② M O X 燃料炉心	- 4. 2 9 % $\Delta \rho$	10. 7 \$	$\beta_{eff}=0.004$ 使用

したがって、1年間の寿命を確保しようとしたら、U N 炉心で 6 \$ 以上、M O X 炉心では 20 \$ 以上の余剰反応度をもたせる必要がある。ただし、実際には燃焼反応度以外に温度欠損などの余剰反応度も必要なのは言うまでもない。

参考であるが、1000MW_eクラスのLMFBRでの燃焼に5 \$ 程度の余剰反応度をもたせていることから、U N 燃料炉心で1年間燃焼期間を設けることは今後の検討しだいで可能となることが予想される。しかし、M O X 燃料炉心では長期間の燃焼期間を設けることは不可能であると推定される。

それではなぜこのようにMOX燃料では燃焼に伴う反応度低下が大きいのであろうか。炉心に装荷されたfissile(ここではウラン235、プルトニウム239および241)の重量の変化を示す。

	UN燃料炉心	MOX燃料炉心
初期fissile重量(kg)	1820	1063
半年後fissile重量(kg)	1757	1012
半年間の正味の減少(kg)	63	51
同減少割合(%)	3.5	4.8

この比較では、同一炉心サイズ、同一炉心出力であるため、核分裂反応率は同程度である。したがって、fissileの消費量はほぼ同じである。異なるとしたら、MOX燃料ではプルトニウムの同位体組成により、新たに生成されるfissileが消費に廻され、正味のfissile減少はやや緩和される程度である。上記半年間の正味のfissile減少量の差はこのためであろう。となると、初期のインベントリーに対する減少割合が重要になる。MOX燃料炉心では、まさにUN燃料炉心に比べて減少割合が大きい。この結果、図4.12に示した実効増倍率の変化となったと考えられる。

4. 4 出力分布

高温高速炉は、冷却材出口温度が高いため、出力分布の平坦化が重要であると考えられる。表4. 1～表4. 11の各表には、径および軸方向ピーピングファクタが各炉心毎に示されている。ケース毎にややばらつきがあるが、H/Dが1/3のウラン燃料炉心とМОХ燃料炉心について比較する。

	UN炉心	МОХ炉心	常陽	もんじゅ
径方向ピーピングファクタ	1.22	1.21		1.345
軸方向ピーピングファクタ	1.10	1.10	1.19	1.197
	(C/R in)	(C/R out)		

今回の高温高速炉の計算では、CRPを設けていない概念検討炉心であるため、常陽あるいは「もんじゅ」のピーピングファクタと直接比較することはできないが、おおまかな目安として上記にまとめた。

また、実際の線出力の分布を図4. 13（径方向）と図4. 14（軸方向）に示す。当然ながら、この検討ではウラン燃料炉心とМОХ燃料炉心とで特に大きな差はない。

表4.1 炉心ボイド反応度計算結果

ウラン燃料 H/D = 1/3 炉心サイズ = 420 W/CC 遮蔽体厚 = 30 cm

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	42.9 cm	27.0 cm	46.6 cm	22	28	1.02459	1.22	1.10	1.02481	1.19	1.11	0.021%	0.333
2 UN	ハステロイ	43.9 cm	26.0 cm	47.4 cm	18	24	1.00065	1.20	1.10	1.00058	1.20	1.11	-0.007%	0.339
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	39.0 cm	30.9 cm	46.6 cm	26	32	1.03251	1.26	1.10	1.03284	1.23	1.10	0.031%	0.333
4 UO ₂	ハステロイ	38.9 cm	31.0 cm	46.6 cm	22	28	1.02987	1.25	1.10	1.02976	1.24	1.10	-0.011%	0.333

炉心出力:400MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	49.9 cm	27.0 cm	51.2 cm	20	26	1.01275	1.20	1.11	1.01306	1.18	1.12	0.030%	0.333
2 UN	ハステロイ	41.0 cm	35.9 cm	51.2 cm	18	22	1.02843	1.27	1.11	1.02844	1.26	1.12	0.001%	0.333
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	45.9 cm	31.0 cm	51.2 cm	24	30	1.02994	1.24	1.11	1.03033	1.21	1.12	0.036%	0.333
4 UO ₂	ハステロイ	46.0 cm	30.9 cm	51.2 cm	20	26	1.02595	1.23	1.11	1.02596	1.22	1.12	0.001%	0.333

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	42.9 cm	27.0 cm	46.6 cm	22	28	1.02459	1.22	1.10	1.01707	1.20	1.08	-0.722%	419.4
2 UN	ハステロイ	43.9 cm	26.0 cm	47.4 cm	18	24	1.00065	1.20	1.10	1.00758	1.18	1.09	-1.322%	412.3
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	39.0 cm	30.9 cm	46.6 cm	26	32	1.03251	1.26	1.10	1.02516	1.24	1.08	-0.694%	419.4
4 UO ₂	ハステロイ	38.9 cm	31.0 cm	46.6 cm	22	28	1.02987	1.25	1.10	1.01376	1.22	1.08	-1.544%	419.4

炉心出力:400MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	49.9 cm	27.0 cm	51.2 cm	20	26	1.01275	1.20	1.11	1.00790	1.19	1.09	-0.475%	420.5
2 UN	ハステロイ	41.0 cm	35.9 cm	51.2 cm	18	22	1.02843	1.27	1.11	1.01632	1.25	1.09	-1.159%	420.5
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	45.9 cm	31.0 cm	51.2 cm	24	30	1.02994	1.24	1.11	1.02557	1.23	1.09	-0.414%	420.5
4 UO ₂	ハステロイ	46.0 cm	30.9 cm	51.2 cm	20	26	1.02595	1.23	1.11	1.01272	1.22	1.09	-1.272%	420.5

表4.2 炉心ボイド反応度計算結果

ウラン燃料 H/D = 1/2 炉心サイズ = 420 W/CC 遮蔽体厚 = 30 cm

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300Mwt

	燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度 I/C % O/C %	通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
			内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ		K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1	UN	Nb-1%Zr-0.1%O	37.0 cm	24.0 cm	61.0 cm	20 26	1.01755	1.18	1.14	1.01793	1.18	1.15	-0.037%	0.500
2	UN	ハステロイ	38.0 cm	23.0 cm	61.0 cm	18 24	1.03180	1.20	1.15	1.03180	1.18	1.15	0.000%	0.500
3	UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	34.0 cm	27.0 cm	61.0 cm	24 30	1.03273	1.22	1.14	1.03316	1.21	1.15	0.041%	0.500
4	UO ₂	ハステロイ	29.0 cm	32.0 cm	61.0 cm	20 24	1.01867	1.29	1.15	1.01861	1.26	1.15	-0.005%	0.500

炉心出力:400Mwt

	燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度 I/C % O/C %	通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
			内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ		K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1	UN	Nb-1%Zr-0.1%O	43.5 cm	23.7 cm	67.6 cm	18 24	1.00036	1.17	1.16	1.00090	1.17	1.16	-0.054%	0.503
2	UN	ハステロイ	44.2 cm	23.0 cm	67.2 cm	16 22	1.01407	1.18	1.16	1.01425	1.18	1.17	0.017%	0.500
3	UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	40.0 cm	27.2 cm	67.2 cm	22 28	1.02600	1.21	1.16	1.02672	1.20	1.16	0.068%	0.500
4	UO ₂	ハステロイ	41.2 cm	26.0 cm	67.2 cm	18 24	1.01923	1.21	1.16	1.01939	1.20	1.16	0.016%	0.500

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300Mwt

	燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度 I/C % O/C %	通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
			内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ		K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1	UN	Nb-1%Zr-0.1%O	37.0 cm	24.0 cm	61.0 cm	20 26	1.01755	1.18	1.14	1.01103	1.17	1.13	-0.634%	420.7
2	UN	ハステロイ	38.0 cm	23.0 cm	61.0 cm	18 24	1.03180	1.20	1.15	1.01875	1.17	1.12	-1.241%	420.7
3	UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	34.0 cm	27.0 cm	61.0 cm	24 30	1.03273	1.22	1.14	1.02657	1.20	1.13	-0.581%	420.7
4	UO ₂	ハステロイ	29.0 cm	32.0 cm	61.0 cm	20 24	1.01867	1.29	1.15	1.00268	1.25	1.12	-1.565%	420.7

炉心出力:400Mwt

	燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度 I/C % O/C %	通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
			内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ		K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1	UN	Nb-1%Zr-0.1%O	43.5 cm	23.7 cm	67.6 cm	18 24	1.00036	1.17	1.16	0.99694	1.16	1.14	-0.343%	417.1
2	UN	ハステロイ	44.2 cm	23.0 cm	67.2 cm	16 22	1.01407	1.18	1.16	1.00368	1.16	1.14	-1.021%	419.6
3	UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	40.0 cm	27.2 cm	67.2 cm	22 28	1.02600	1.21	1.16	1.02329	1.20	1.14	-0.258%	419.6
4	UO ₂	ハステロイ	41.2 cm	26.0 cm	67.2 cm	18 24	1.01923	1.21	1.16	1.00705	1.19	1.14	-1.186%	419.6

表4.3 炉心ボイド反応度計算結果

MOX燃料 H/D = 1/3 炉心サイズ = 420W/CC 遮蔽体厚 = 30cm

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		P U 富化度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%	44.4 cm	25.5 cm	46.6 cm	22	28	1.03033	1.21	1.11	1.03180	1.20	1.10	0.138%	0.33333
2 MOX/ハステロイ		43.9 cm	26.0 cm	47.4 cm	20	24	1.03411	1.33	1.12	1.03510	1.30	1.11	0.092%	0.33906

炉心出力:400Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		P U 富化度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%	50.9 cm	26.0 cm	51.2 cm	20	26	1.01258	1.18	1.13	1.01389	1.18	1.13	0.128%	0.333
2 MOX/ハステロイ		43.0 cm	33.9 cm	51.2 cm	18	22	1.02805	1.26	1.13	1.02892	1.24	1.14	0.083%	0.333

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		P U 富化度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%	44.4 cm	25.5 cm	46.6 cm	22	28	1.03033	1.21	1.11	1.04065	1.20	1.10	0.962%	419.4
2 MOX/ハステロイ		43.9 cm	26.0 cm	47.4 cm	20	24	1.03411	1.33	1.12	1.03666	1.13	1.11	0.238%	412.3

炉心出力:400Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		P U 富化度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%	50.9 cm	26.0 cm	51.2 cm	20	26	1.01258	1.18	1.13	1.02641	1.18	1.11	1.331%	420.5
2 MOX/ハステロイ		43.0 cm	33.9 cm	51.2 cm	18	22	1.02805	1.26	1.13	1.03265	1.25	1.11	0.434%	420.5

表4.4 炉心ボイド反応度計算結果

MOX燃料 H/D = 1/2 炉心サイズ = 420W/CC 遮蔽体厚 = 30cm

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			P U 富化度			通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz			
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%Co	39.0 cm	22.0 cm	61.0 cm	20	26	1.01620	1.19	1.16	1.01803	1.18	1.15	0.178%	0.5	
2 MOXハスティロイ		39.0 cm	22.0 cm	61.0 cm	18	24	1.03513	1.20	1.16	1.03621	1.17	1.17	0.101%	0.5	

炉心出力:400Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			P U 富化度			通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz			
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%Co	37.0 cm	30.2 cm	68.0 cm	18	22	0.99236	1.23	1.17	0.99379	1.22	1.18	0.146%	0.506	
2 MOXハスティロイ		45.2 cm	22.0 cm	67.2 cm	16	22	1.00842	1.18	1.18	1.00984	1.17	1.18	0.139%	0.500	

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			P U 富化度			通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz			
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%Co	39.0 cm	22.0 cm	61.0 cm	20	26	1.01620	1.19	1.16	1.02873	1.17	1.14	1.199%	420.7	
2 MOXハスティロイ		39.0 cm	22.0 cm	61.0 cm	18	24	1.03513	1.20	1.16	1.03890	1.18	1.14	0.351%	420.7	

炉心出力:400Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			P U 富化度			通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz			
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%Co	37.0 cm	30.2 cm	68.0 cm	18	22	0.99236	1.23	1.17	1.00843	1.22	1.16	1.606%	414.6	
2 MOXハスティロイ		45.2 cm	22.0 cm	67.2 cm	16	22	1.00842	1.18	1.18	1.01562	1.17	1.16	0.703%	419.6	

表4.5 炉心ボイド反応度計算結果

ウラン燃料 H/D = 1/3 炉心サイズ = 420W/CC 遮蔽体厚 = 20cm

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	40.9 cm	29.0 cm	46.6 cm	22	28	1.00151	1.25	1.13	1.00159	1.25	1.13	0.008%	0.33333
2 UN	ハステロイ	40.9 cm	29.0 cm	46.6 cm	20	26	1.01699	1.26	1.13	1.01678	1.26	1.13	-0.020%	0.33333
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	38.0 cm	31.9 cm	46.6 cm	26	32	1.00545	1.30	1.13	1.00556	1.27	1.13	0.011%	0.33333
4 UO ₂	ハステロイ	37.9 cm	32.0 cm	46.6 cm	24	30	1.03566	1.32	1.13	1.03553	1.28	1.13	-0.013%	0.33333

炉心出力:400MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	38.9 cm	38.0 cm	51.2 cm	22	26	1.03194	1.33	1.14	1.03211	1.30	1.14	-0.017%	0.333
2 UN	ハステロイ	40.0 cm	36.9 cm	51.2 cm	18	22	1.00464	1.31	1.14	1.00454	1.30	1.15	-0.010%	0.333
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	44.9 cm	32.0 cm	51.2 cm	24	30	1.00538	1.27	1.14	1.00595	1.25	1.14	0.056%	0.333
4 UO ₂	ハステロイ	45.0 cm	31.9 cm	51.2 cm	20	26	1.00018	1.28	1.14	0.99991	1.27	1.14	-0.027%	0.333

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	40.9 cm	29.0 cm	46.6 cm	22	28	1.00151	1.25	1.13	0.99000	1.24	1.11	-1.161%	419.4
2 UN	ハステロイ	40.9 cm	29.0 cm	46.6 cm	20	26	1.01699	1.26	1.13	0.99919	1.24	1.11	-1.752%	419.4
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	38.0 cm	31.9 cm	46.6 cm	26	32	1.00545	1.30	1.13	0.99325	1.27	1.11	-1.222%	419.4
4 UO ₂	ハステロイ	37.9 cm	32.0 cm	46.6 cm	24	30	1.03566	1.32	1.13	1.01419	1.28	1.11	-2.044%	419.4

炉心出力:400MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	38.9 cm	38.0 cm	51.2 cm	22	26	1.03194	1.33	1.14	1.02197	1.32	1.12	-0.945%	420.5
2 UN	ハステロイ	40.0 cm	36.9 cm	51.2 cm	18	22	1.00464	1.31	1.14	0.98850	1.29	1.12	-1.625%	420.5
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	44.9 cm	32.0 cm	51.2 cm	24	30	1.00538	1.27	1.14	0.99651	1.26	1.12	-0.885%	420.5
4 UO ₂	ハステロイ	45.0 cm	31.9 cm	51.2 cm	20	26	1.00018	1.28	1.14	0.98151	1.25	1.12	-1.902%	420.5

表4.6 炉心ボイド反応度計算結果

ウラン燃料 H/D = 1/3 炉心サイズ = 420W/CC 遮蔽体厚 = 10cm

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	38.9 cm	31.0 cm	46.6 cm	26	32	1.02189	1.28	1.20	1.02171	1.27	1.20	-0.017%	0.33333
2 UN	ハスティロイ	39.7 cm	30.2 cm	47.0 cm	22	28	1.00270	1.27	1.20	1.00215	1.27	1.20	-0.055%	0.33619
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	35.9 cm	34.0 cm	46.6 cm	30	36	1.01270	1.33	1.19	1.01233	1.30	1.20	-0.036%	0.33333
4 UO ₂	ハスティロイ	35.9 cm	34.0 cm	47.0 cm	26	32	1.01034	1.32	1.20	1.01009	1.31	1.20	-0.025%	0.33619

炉心出力:400MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	45.0 cm	31.0 cm	50.6 cm	24	30	1.02161	1.26	1.21	1.02151	1.25	1.21	-0.010%	0.33289
2 UN	ハスティロイ	40.0 cm	38.0 cm	52.0 cm	20	24	1.00407	1.33	1.22	1.00371	1.32	1.22	-0.036%	0.33333
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	42.6 cm	34.3 cm	51.2 cm	28	34	1.02509	1.30	1.21	1.02520	1.28	1.21	0.010%	0.3329
4 UO ₂	ハスティロイ	43.0 cm	33.9 cm	51.2 cm	24	30	1.02017	1.30	1.21	1.01973	1.28	1.21	-0.042%	0.3329

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	38.9 cm	31.0 cm	46.6 cm	26	32	1.02189	1.28	1.20	1.00251	1.27	1.18	-1.892%	419.4
2 UN	ハスティロイ	39.7 cm	30.2 cm	47.0 cm	22	28	1.00270	1.27	1.20	0.97730	1.25	1.18	-2.592%	415.8
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	35.9 cm	34.0 cm	46.6 cm	30	36	1.01270	1.33	1.19	0.99232	1.31	1.18	-2.028%	419.4
4 UO ₂	ハスティロイ	35.9 cm	34.0 cm	47.0 cm	26	32	1.01034	1.32	1.20	0.98074	1.29	1.18	-2.987%	415.8

炉心出力:400MWT

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	45.0 cm	31.0 cm	50.6 cm	24	30	1.02161	1.26	1.21	1.00447	1.25	1.19	-1.671%	435.6
2 UN	ハスティロイ	40.0 cm	38.0 cm	52.0 cm	20	24	1.00407	1.33	1.22	0.98061	1.31	1.20	-2.383%	402.5
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	42.6 cm	34.3 cm	51.2 cm	28	34	1.02509	1.30	1.21	1.00808	1.30	1.19	-1.546%	420.5
4 UO ₂	ハスティロイ	43.0 cm	33.9 cm	51.2 cm	24	30	1.02017	1.30	1.21	0.99340	1.28	1.19	-2.641%	420.5

表4.7 炉心ボイド反応度計算結果

ウラン燃料 H/D = 1/2 炉心サイズ = 420W/CC 遮蔽体厚 = 10cm

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		燃 料 濃 縮 度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _Z	K-eff	F _r	F _Z		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	35.5 cm	26.5 cm	62.0 cm	22	28	1.01313	1.25	1.24	1.01318	1.24	1.24	0.005%	0.500
2 UN	ハステロイ	36.0 cm	25.0 cm	61.0 cm	20	26	1.01841	1.26	1.25	1.01837	1.23	1.25	-0.004%	0.500
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	32.0 cm	29.0 cm	61.0 cm	26	32	1.01085	1.29	1.24	1.01105	1.27	1.24	0.019%	0.500
4 UO ₂	ハステロイ	28.0 cm	34.0 cm	62.0 cm	22	26	1.00301	1.36	1.25	1.00277	1.33	1.25	-0.024%	0.500

炉心出力:400Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		燃 料 濃 縮 度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _Z	K-eff	F _r	F _Z		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	41.2 cm	26.0 cm	67.6 cm	20	26	1.00140	1.23	1.26	1.00179	1.22	1.26	0.039%	0.503
2 UN	ハステロイ	41.2 cm	26.0 cm	67.6 cm	18	24	1.01809	1.24	1.26	1.01809	1.23	1.26	0.000%	0.503
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	37.0 cm	30.2 cm	67.2 cm	24	30	1.01762	1.27	1.25	1.01795	1.27	1.26	0.032%	0.500
4 UO ₂	ハステロイ	38.2 cm	29.0 cm	67.6 cm	20	26	1.01150	1.27	1.26	1.01128	1.26	1.26	-0.021%	0.503

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		燃 料 濃 縮 度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _Z	K-eff	F _r	F _Z		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	35.5 cm	26.5 cm	62.0 cm	22	28	1.01313	1.25	1.24	0.99676	1.22	1.22	-1.621%	400.7
2 UN	ハステロイ	36.0 cm	25.0 cm	61.0 cm	20	26	1.01841	1.26	1.25	0.99527	1.23	1.22	-2.283%	420.7
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	32.0 cm	29.0 cm	61.0 cm	26	32	1.01085	1.29	1.24	0.99390	1.26	1.22	-1.687%	420.7
4 UO ₂	ハステロイ	28.0 cm	34.0 cm	62.0 cm	22	26	1.00301	1.36	1.25	0.97627	1.32	1.22	-2.731%	400.7

炉心出力:400Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ		燃 料 濃 縮 度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _Z	K-eff	F _r	F _Z		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	41.2 cm	26.0 cm	67.6 cm	20	26	1.00140	1.23	1.26	0.98808	1.21	1.23	-1.346%	417.1
2 UN	ハステロイ	41.2 cm	26.0 cm	67.6 cm	18	24	1.01809	1.24	1.26	0.99772	1.21	1.24	-2.005%	417.1
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	37.0 cm	30.2 cm	67.2 cm	24	30	1.01762	1.27	1.25	1.00449	1.26	1.23	-1.284%	419.6
4 UO ₂	ハステロイ	38.2 cm	29.0 cm	67.6 cm	20	26	1.01150	1.27	1.26	0.98802	1.24	1.24	-2.349%	417.1

表4.8 炉心ボイド反応度計算結果

ウラン燃料 H/D = 1/3 炉心サイズ = 300W/CC 遮蔽体厚 = 30cm

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度		H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _z	K-eff	F _r	F _z	(%△ρ)		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	41.0 cm	37.0 cm	52.0 cm	20	24	1.01742	1.26	1.11	1.01775	1.26	1.12	0.032%	0.33333	
2 UN	ハスティロイ	51.0 cm	27.0 cm	52.0 cm	18	24	1.03457	1.21	1.11	1.03460	1.19	1.12	0.003%	0.33333	
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	37.0 cm	41.0 cm	52.0 cm	24	28	1.03295	1.32	1.11	1.03322	1.30	1.12	0.026%	0.33333	
4 UO ₂	ハスティロイ	48.0 cm	30.0 cm	52.0 cm	20	26	1.02927	1.24	1.11	1.02934	1.21	1.12	0.006%	0.33333	

炉心出力:400Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度		H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _z	K-eff	F _r	F _z	(%△ρ)		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	49.0 cm	37.1 cm	57.8 cm	18	22	1.00011	1.23	1.13	1.00035	1.24	1.13	0.024%	0.336	
2 UN	ハスティロイ	50.0 cm	36.1 cm	57.4 cm	16	20	1.01403	1.24	1.13	1.01415	1.24	1.13	0.011%	0.333	
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	54.0 cm	32.1 cm	57.4 cm	22	28	1.02802	1.22	1.12	1.02853	1.20	1.13	0.048%	0.333	
4 UO ₂	ハスティロイ	46.0 cm	40.1 cm	57.4 cm	18	22	1.01779	1.29	1.13	1.01790	1.27	1.13	0.011%	0.333	

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度		炉心平均出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _z	K-eff	F _r	F _z	(%△ρ)		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	41.0 cm	37.0 cm	52.0 cm	20	24	1.01742	1.26	1.11	1.01220	1.25	1.09	-0.506%	301.8	
2 UN	ハスティロイ	51.0 cm	27.0 cm	52.0 cm	18	24	1.03457	1.21	1.11	1.02350	1.20	1.10	-1.045%	301.8	
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	37.0 cm	41.0 cm	52.0 cm	24	28	1.03295	1.32	1.11	1.02849	1.30	1.10	-0.419%	301.8	
4 UO ₂	ハスティロイ	48.0 cm	30.0 cm	52.0 cm	20	26	1.02927	1.24	1.11	1.01640	1.23	1.09	-1.230%	301.8	

炉心出力:400Mwt

燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度		炉心平均出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _z	K-eff	F _r	F _z	(%△ρ)		
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	49.0 cm	37.1 cm	57.8 cm	18	22	1.00011	1.23	1.13	0.99763	1.22	1.11	-0.248%	297.2	
2 UN	ハスティロイ	50.0 cm	36.1 cm	57.4 cm	16	20	1.01403	1.24	1.13	1.00476	1.23	1.11	-0.910%	299.2	
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	54.0 cm	32.1 cm	57.4 cm	22	28	1.02802	1.22	1.12	1.02708	1.21	1.11	-0.089%	299.2	
4 UO ₂	ハスティロイ	46.0 cm	40.1 cm	57.4 cm	18	22	1.01779	1.29	1.13	1.00701	1.27	1.10	-1.052%	299.2	

表4.9 炉心ボイド反応度計算結果

ウラン燃料 H/D = 1/3 炉心サイズ = 420W/CC 遮蔽体厚 = 30cm ラッパ管構造込み

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300MWT

燃 料	構 造 材	炉 心 サ イ ズ			燃 料 濃 縮 度			通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz			
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	40.0 cm	29.9 cm	46.6 cm	26	32	1.00882	1.25	1.10	1.00905	1.21	1.10	-0.022%	0.33333	
2 UN	ハスティロイ	40.9 cm	29.0 cm	47.4 cm	22	28	1.01851	1.25	1.10	1.01823	1.22	1.11	-0.027%	0.33906	
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	35.0 cm	34.9 cm	46.6 cm	32	38	1.02617	1.29	1.10	1.02639	1.26	1.10	0.021%	0.33333	
4 UO ₂	ハスティロイ	36.4 cm	33.5 cm	46.6 cm	24	30	1.00035	1.28	1.10	1.00016	1.27	1.11	-0.019%	0.33333	

炉心出力:400MWT

燃 料	構 造 材	炉 心 サ イ ズ			燃 料 濃 縮 度			通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz			
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	45.9 cm	31.0 cm	51.2 cm	24	30	1.00633	1.22	1.11	1.00674	1.21	1.11	-0.040%	0.333	
2 UN	ハスティロイ	39.0 cm	37.9 cm	51.2 cm	20	24	1.00616	1.30	1.11	1.00602	1.28	1.12	-0.014%	0.333	
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	41.0 cm	35.9 cm	51.2 cm	28	34	1.00119	1.25	1.11	1.00163	1.26	1.11	0.044%	0.333	
4 UO ₂	ハスティロイ	43.0 cm	33.9 cm	51.2 cm	24	30	1.03749	1.29	1.12	1.03715	1.25	1.12	-0.031%	0.333	

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300MWT

燃 料	構 造 材	炉 心 サ イ ズ			燃 料 濃 縮 度			通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz			
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	40.0 cm	29.9 cm	46.6 cm	26	32	1.00882	1.25	1.10	1.00006	1.22	1.08	-0.868%	419.4	
2 UN	ハスティロイ	40.9 cm	29.0 cm	47.4 cm	22	28	1.01851	1.25	1.10	1.00148	1.22	1.08	-1.570%	412.3	
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	35.0 cm	34.9 cm	46.6 cm	32	38	1.02617	1.29	1.10	1.01730	1.26	1.08	-0.849%	419.4	
4 UO ₂	ハスティロイ	36.4 cm	33.5 cm	46.6 cm	24	30	1.00035	1.28	1.10	0.98119	1.25	1.09	-1.952%	419.4	

炉心出力:400MWT

燃 料	構 造 材	炉 心 サ イ ズ			燃 料 濃 縮 度			通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz			
1 UN	Nb-1%Zr-0.1%O	45.9 cm	31.0 cm	51.2 cm	24	30	1.00633	1.22	1.11	1.00035	1.21	1.09	-0.595%	420.5	
2 UN	ハスティロイ	39.0 cm	37.9 cm	51.2 cm	20	24	1.00616	1.30	1.11	0.99057	1.28	1.09	-1.564%	420.5	
3 UO ₂	Nb-1%Zr-0.1%O	41.0 cm	35.9 cm	51.2 cm	28	34	1.00119	1.25	1.11	0.99597	1.24	1.09	-0.524%	420.5	
4 UO ₂	ハスティロイ	43.0 cm	33.9 cm	51.2 cm	24	30	1.03749	1.29	1.12	1.02073	1.27	1.10	-1.582%	420.5	

表4.10 炉心ボイド反応度計算結果

MOX燃料 H/D = 1/3 炉心サイズ = 420W/CC 遮蔽体厚 = 30cm ラッパ管構造込み

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300MWt														
燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			P U 富化度		通常時			中心部ボイド時		ボイド反応度 (%△ρ)	H/D	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _z	K-eff	F _r	F _z		
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%Co	40.4 cm	29.5 cm	46.6 cm	26	32	1.01062	1.22	1.11	1.01208	1.22	1.12	0.142%	0.333
2 MOX	ハステロイ	41.9 cm	28.0 cm	46.8 cm	22	28	1.01160	1.23	1.12	1.01245	1.21	1.12	0.083%	0.335

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300MWt														
燃 料	構造材	炉 心 サ イ ズ			P U 富化度		通常時			炉心部ボイド時		ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度	
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	F _r	F _z	K-eff	F _r	F _z		
1 MOX	Nb-1%Zr-0.1%Co	40.4 cm	29.5 cm	46.6 cm	26	32	1.01062	1.22	1.11	1.02098	1.21	1.10	1.004%	419.4
2 MOX	ハステロイ	41.9 cm	28.0 cm	46.8 cm	22	28	1.01160	1.23	1.12	1.01130	1.22	1.10	-0.029%	417.6

表4.11 炉心ボイド反応度計算結果

ウラン燃料 H/D = 1/3 炉心サイズ = 420 W/CC 遮蔽体厚 = 30 cm

(1) 炉心中央部のみボイド

炉心出力:300Mwt

燃料	構造材	炉心サイズ			燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN SUS		37.0 cm	32.9 cm	46.6 cm	18	22	1.00023	1.27	1.09	1.00013	1.24	1.10	-0.010%	0.33333
2 UO ₂ SUS		32.9 cm	37.0 cm	46.6 cm	22	26	1.03104	1.32	1.09	1.03095	1.28	1.09	-0.009%	0.33333

炉心出力:400Mwt

燃料	構造材	炉心サイズ			燃料濃縮度		通常時			中心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	H/D
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN SUS		42.9 cm	34.0 cm	51.2 cm	18	22	1.03481	1.27	1.11	1.03475	1.23	1.11	-0.006%	0.333
2 UO ₂ SUS		38.9 cm	38.0 cm	50.8 cm	20	24	1.02909	1.31	1.10	1.02908	1.27	1.10	-0.001%	0.330

(2) 炉心部全体がボイド

炉心出力:300Mwt

燃料	構造材	炉心サイズ			燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN SUS		37.0 cm	32.9 cm	46.6 cm	18	22	1.00023	1.27	1.09	0.98568	1.24	1.08	-1.476%	419.4
2 UO ₂ SUS		32.9 cm	37.0 cm	46.6 cm	22	26	1.03104	1.32	1.09	1.01361	1.28	1.07	-1.668%	419.4

炉心出力:400Mwt

燃料	構造材	炉心サイズ			燃料濃縮度		通常時			炉心部ボイド時			ボイド反応度 (%△ρ)	炉心平均 出力密度
		内側炉心幅	外側炉心幅	炉心高さ	I/C %	O/C %	K-eff	Fr	Fz	K-eff	Fr	Fz		
1 UN SUS		42.9 cm	34.0 cm	51.2 cm	18	22	1.03481	1.27	1.11	1.02277	1.25	1.09	-1.186%	420.5
2 UO ₂ SUS		38.9 cm	38.0 cm	50.8 cm	20	24	1.02909	1.31	1.10	1.01409	1.27	1.08	-1.437%	423.8

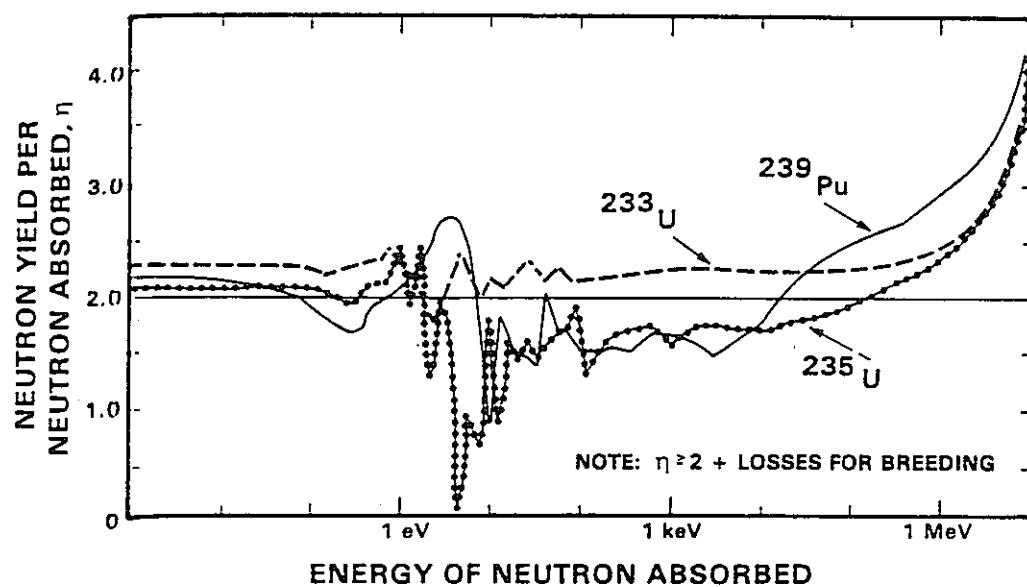


FIGURE 1.3. Neutrons produced per absorption vs energy for fissile isotopes.

図4.1 主要な核分裂性核種の η 値

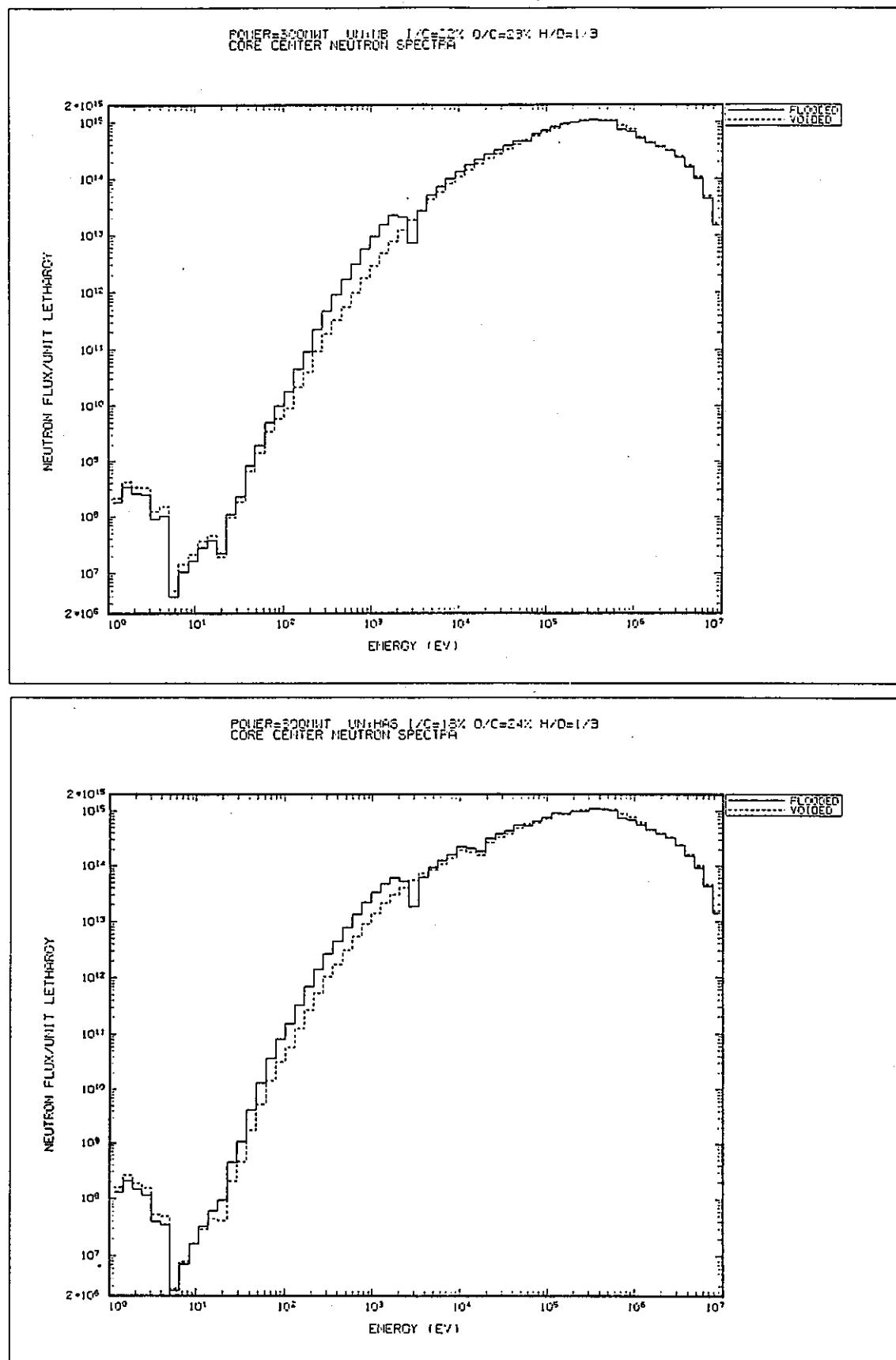


図4.2 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル
出力:300MWt, UN燃料, ニオブ (上), ハステロイ (下), H/D=1/3, 炉心サイズ:420W/cc

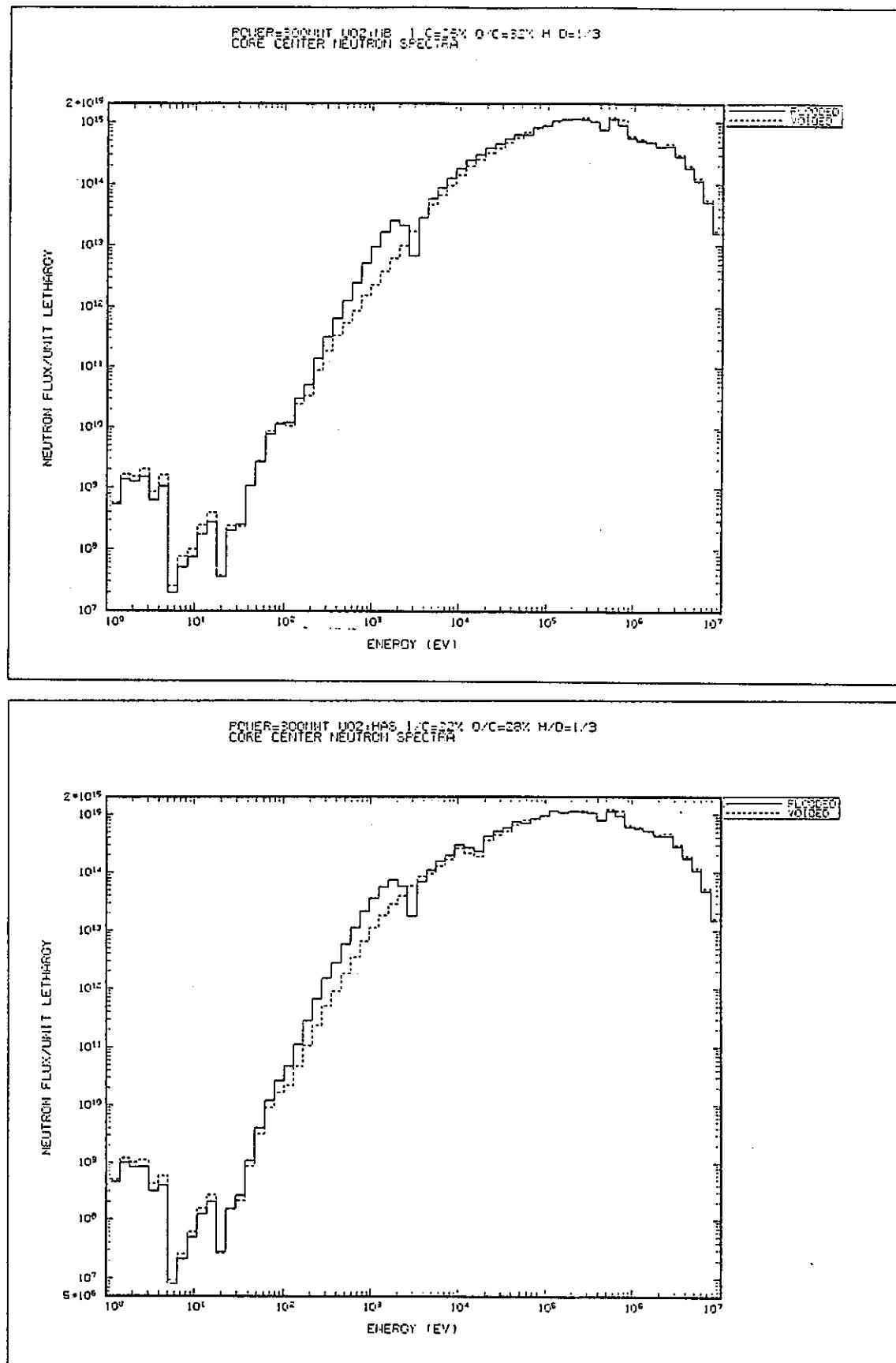


図4.3 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル
出力:300MWt, UO₂燃料, シリカ(上), ベリリウム(下), H/D=1/3, 炉心サイズ:420W/cc

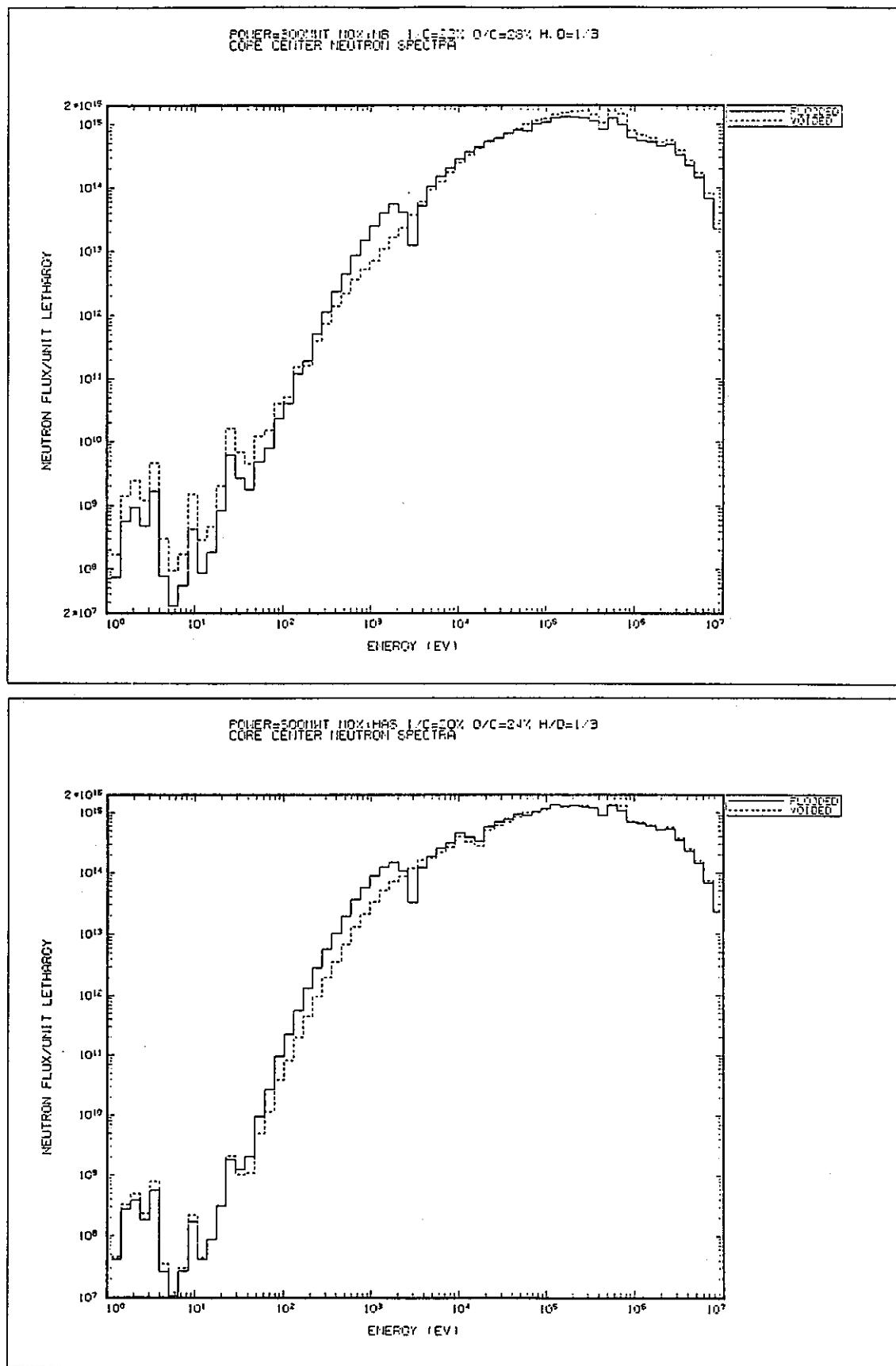


図4.4 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル
出力:300MWt, MOX燃料, ニオイ(上), ハスティ(下), H/D=1/3, 炉心サイズ:420W/cc

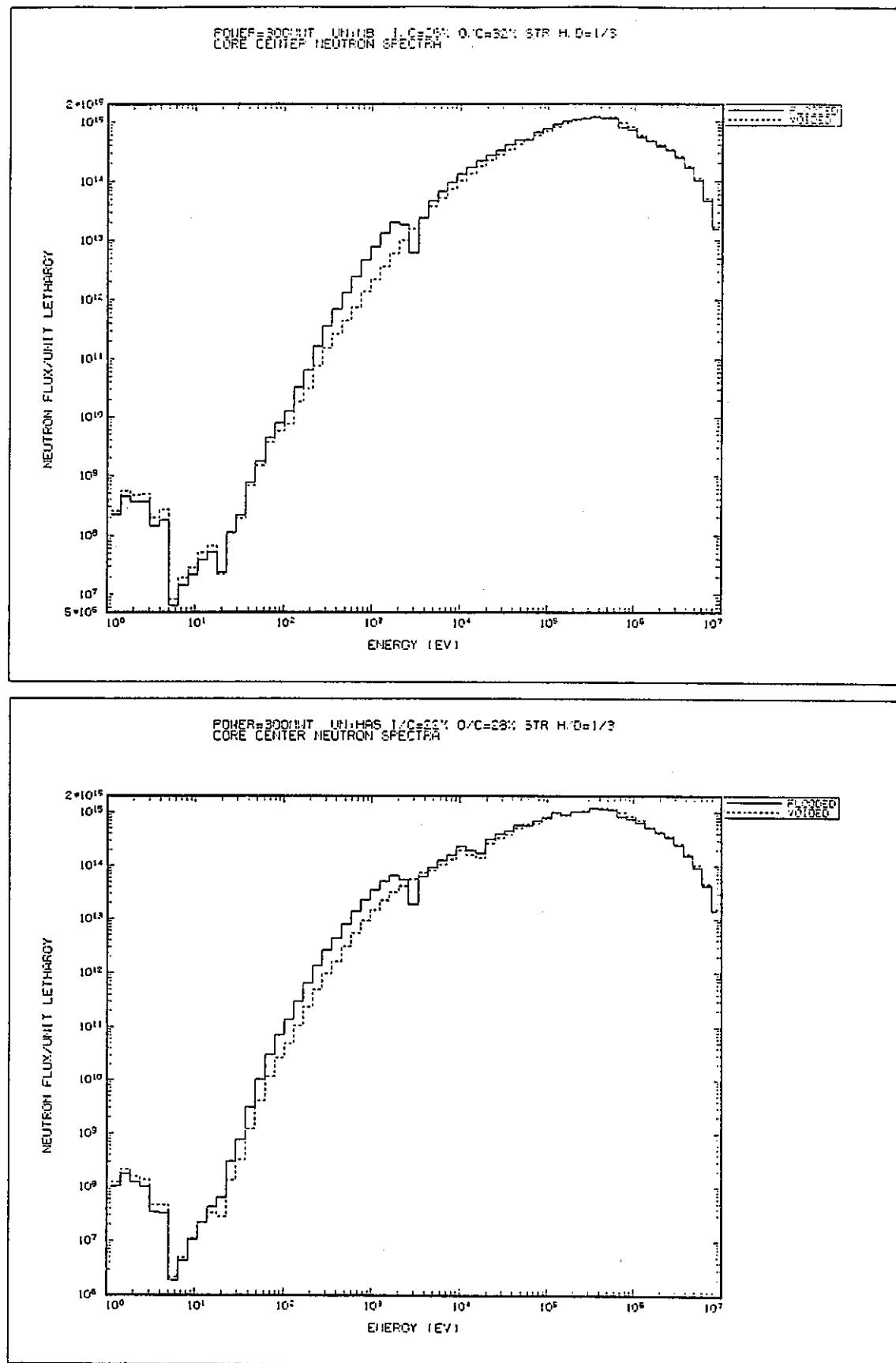


図4.5 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル
出力:300MWt, UN燃料, ニオイ(上), ハステロイ(下), H/D=1/3, 炉心サイズ:420W/cc
ラップ管構造あり

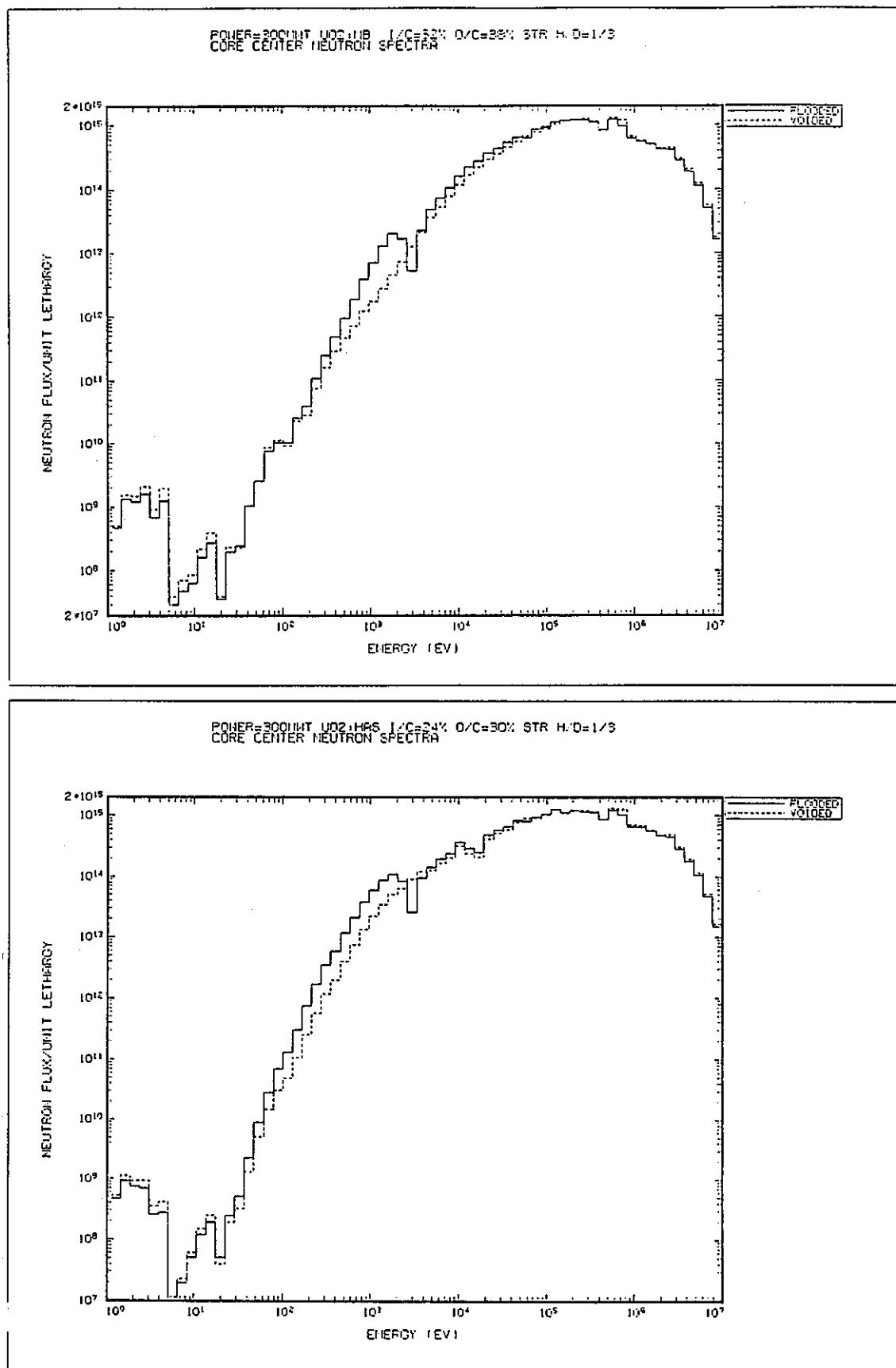


図4.6 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル
出力:300Mwt, UO₂燃料, ニオイ(上), ハステロイ(下), H/D=1/3, 炉心サイズ:420W/cc
ラッパ管構造あり

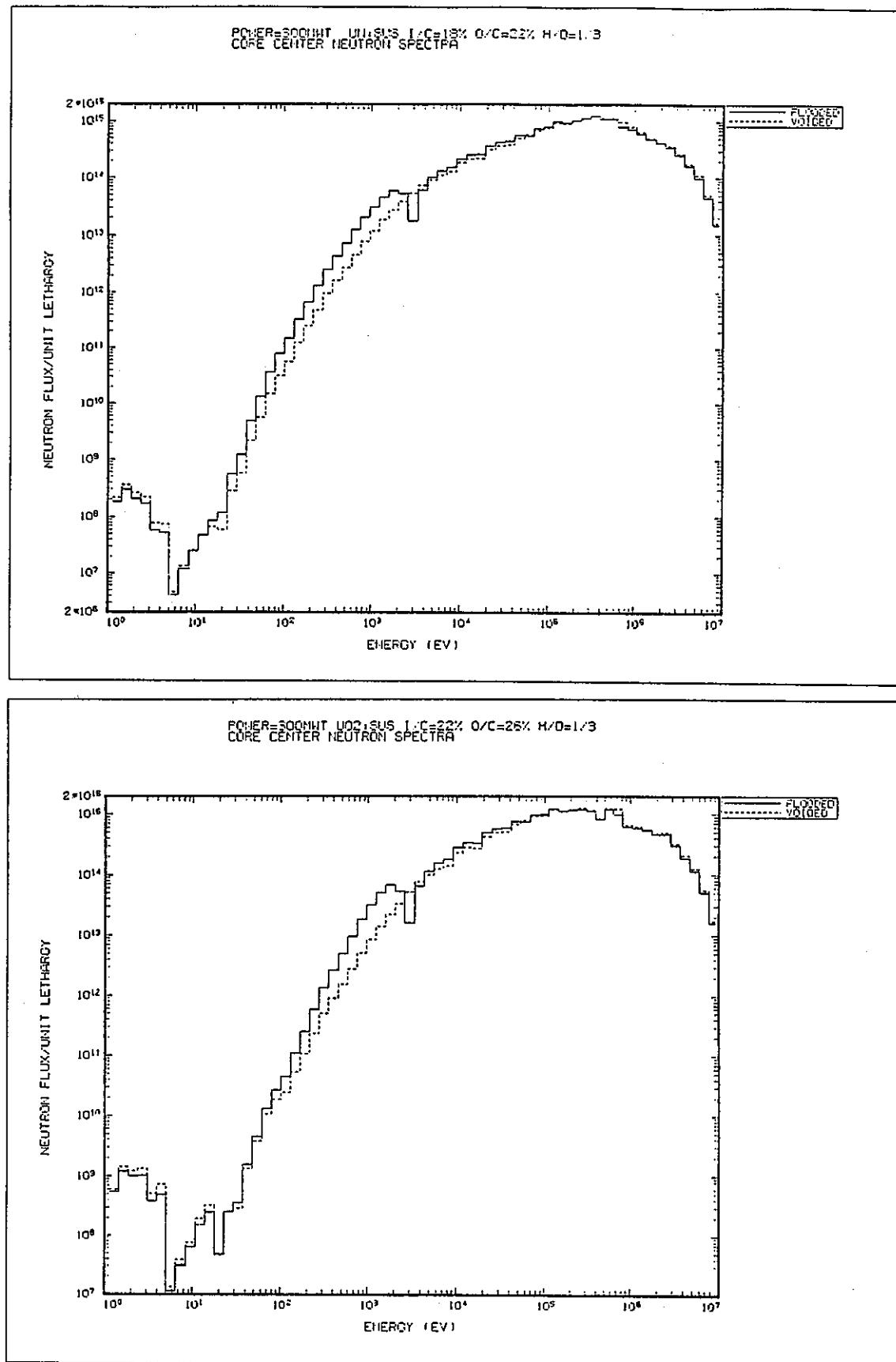


図4.7 通常時 (Flooded) とボイド時 (Voided) の炉心中心スペクトル
出力:300MWt, 構造材:SUS, UN燃料(上), UO₂燃料(下), H/D=1/3, 炉心サイズ:420W/cc

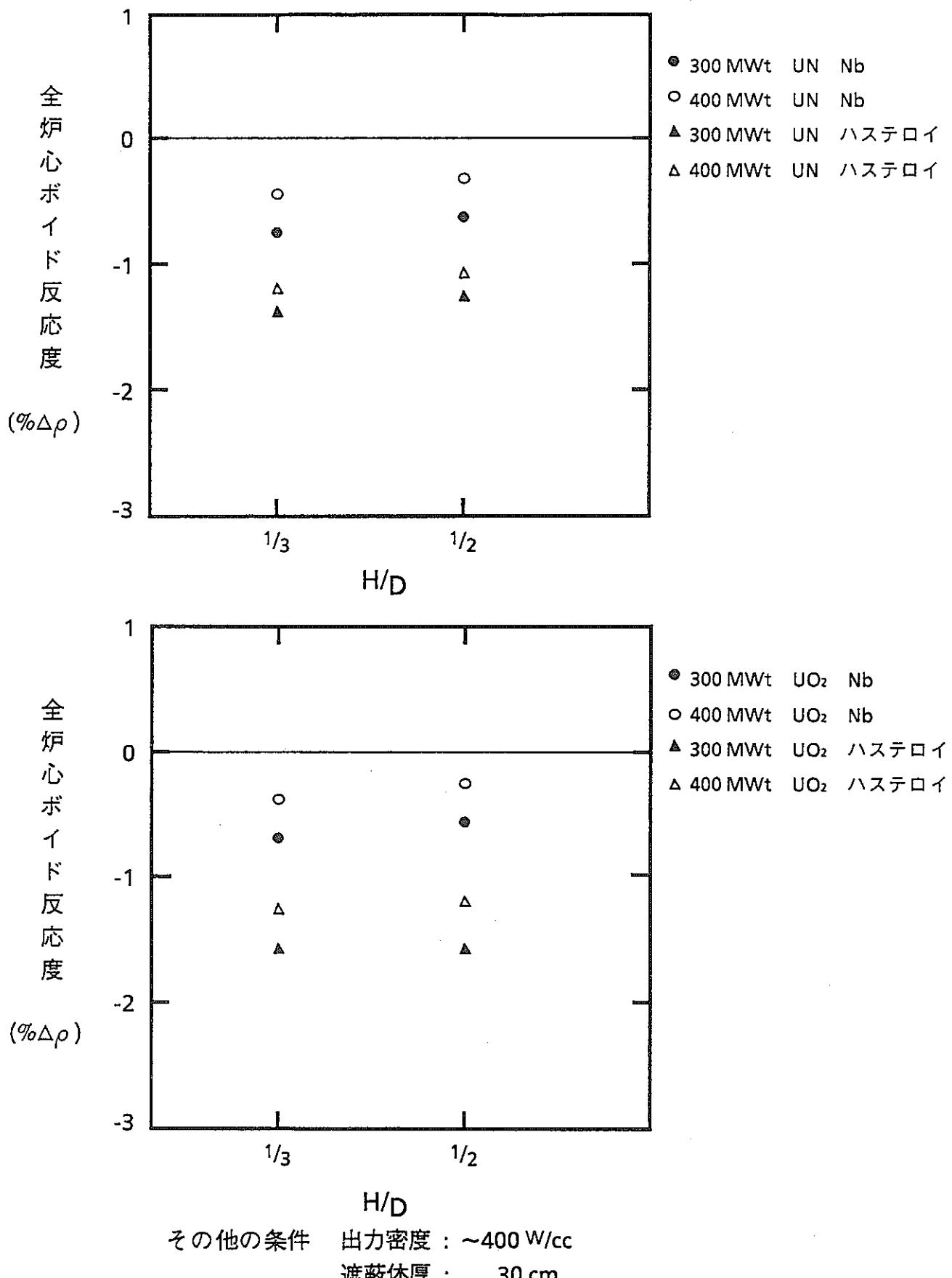


図4.8 H/Dパラメータの影響

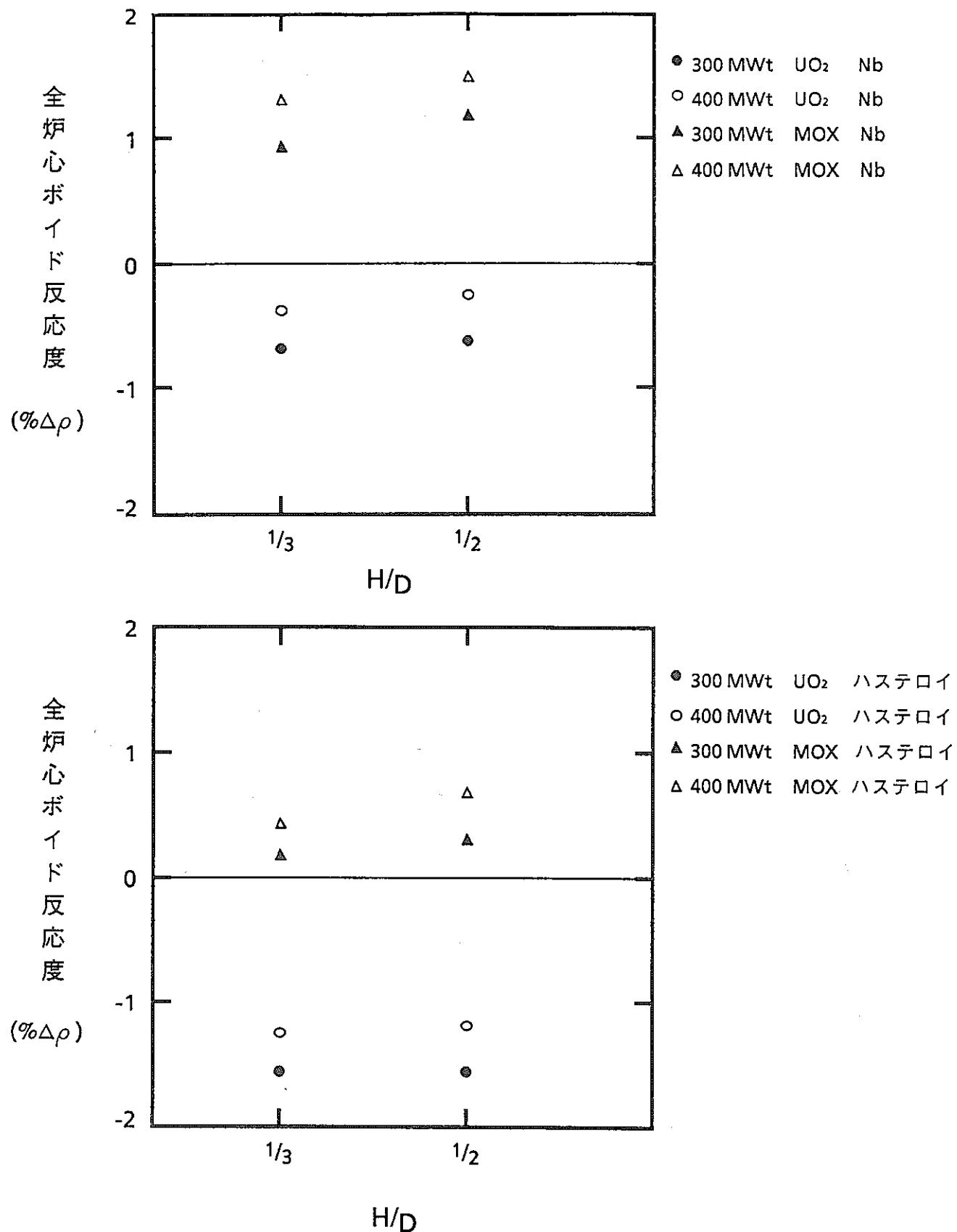


図4.9 ウラン燃料とMOX燃料の違い

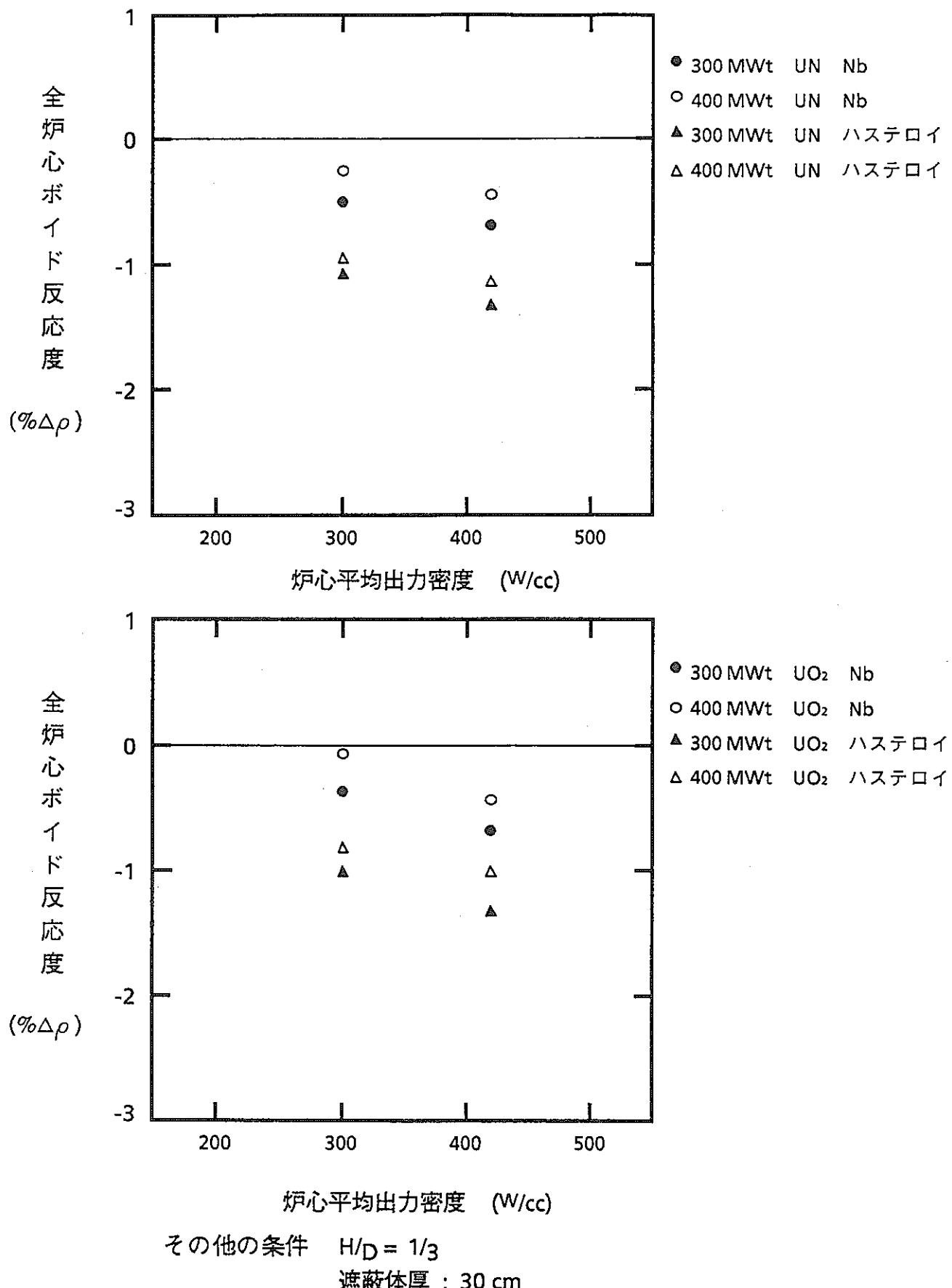
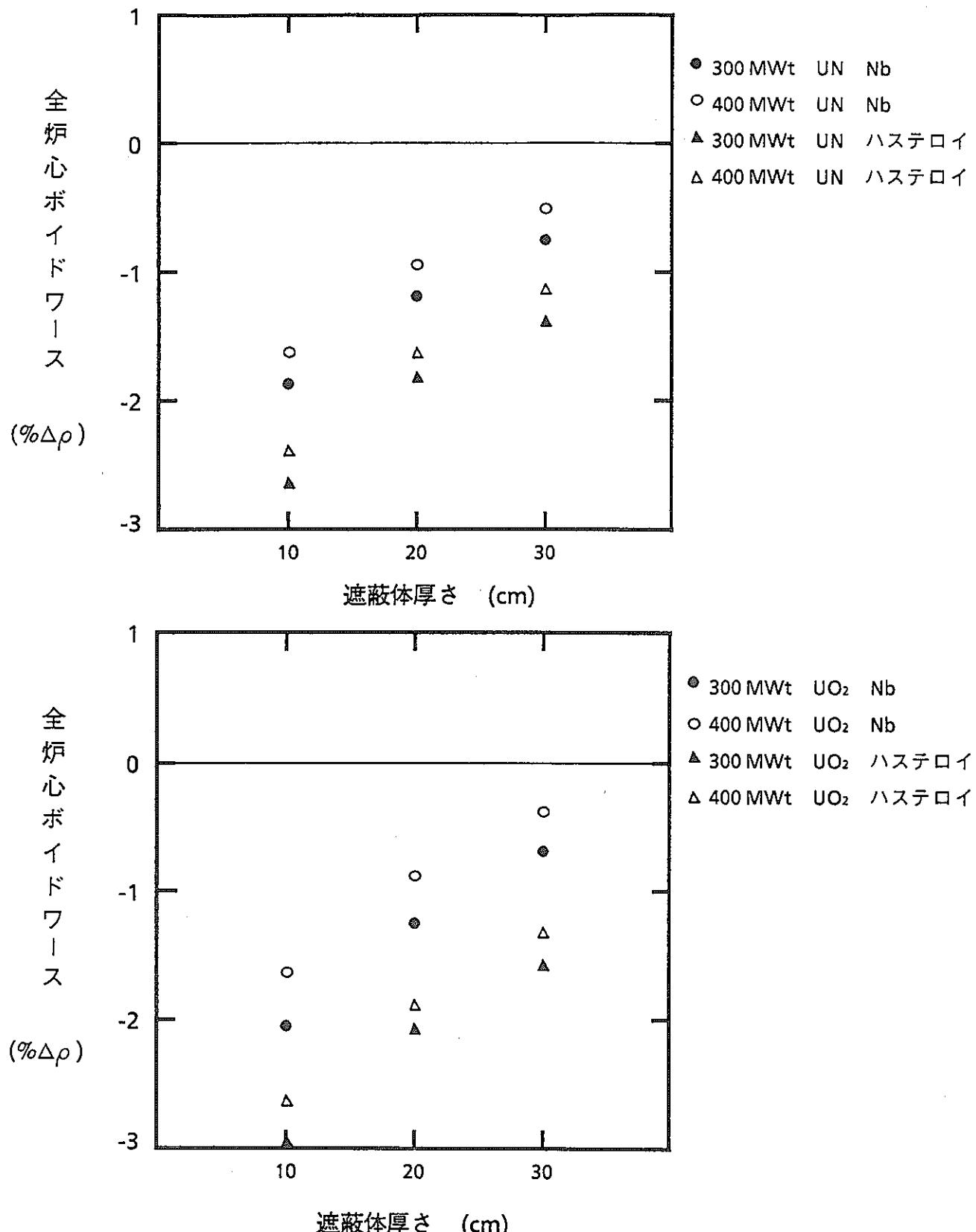


図4.10 出力密度(炉心サイズ)の影響



その他の条件 H/D = 1/3

出力密度 : ~400 W/cc

図4.11 軸遮蔽体の厚さの影響

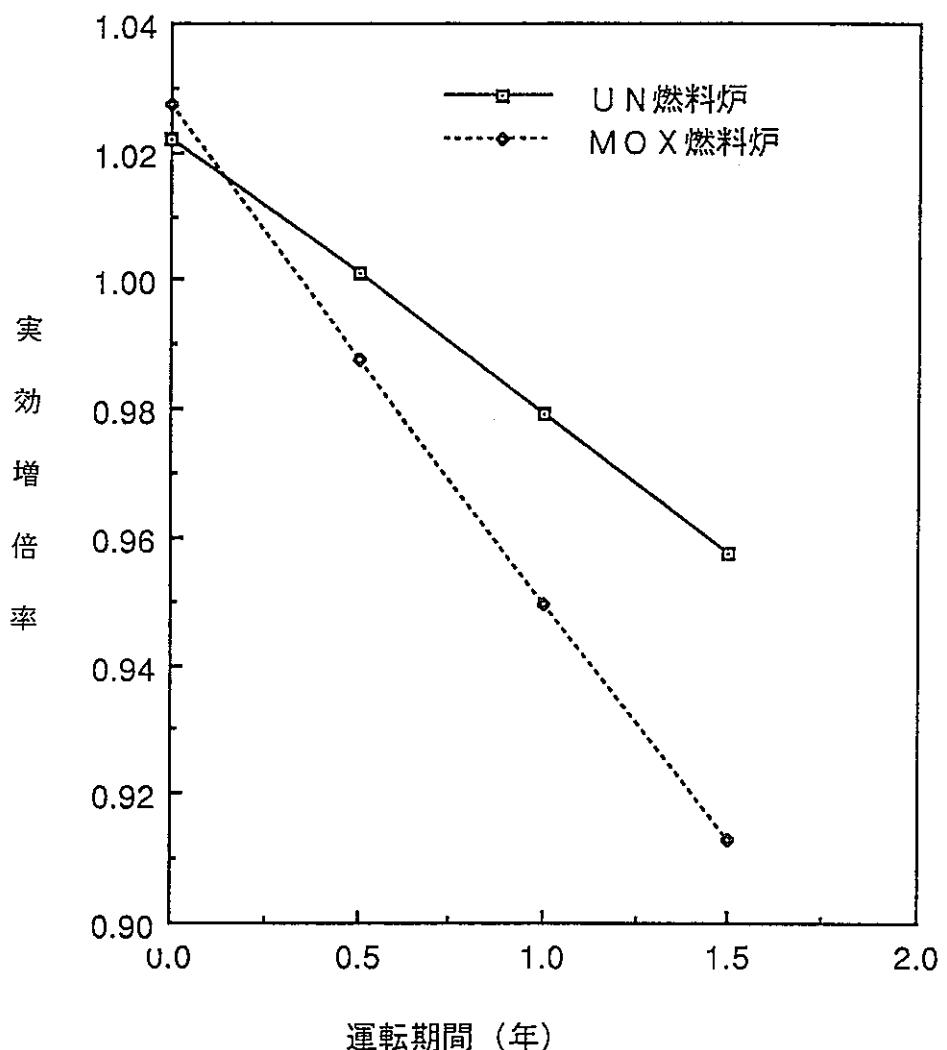


図4.12 ウラン炉心とMOX炉心の燃焼に伴う実効倍率の変化

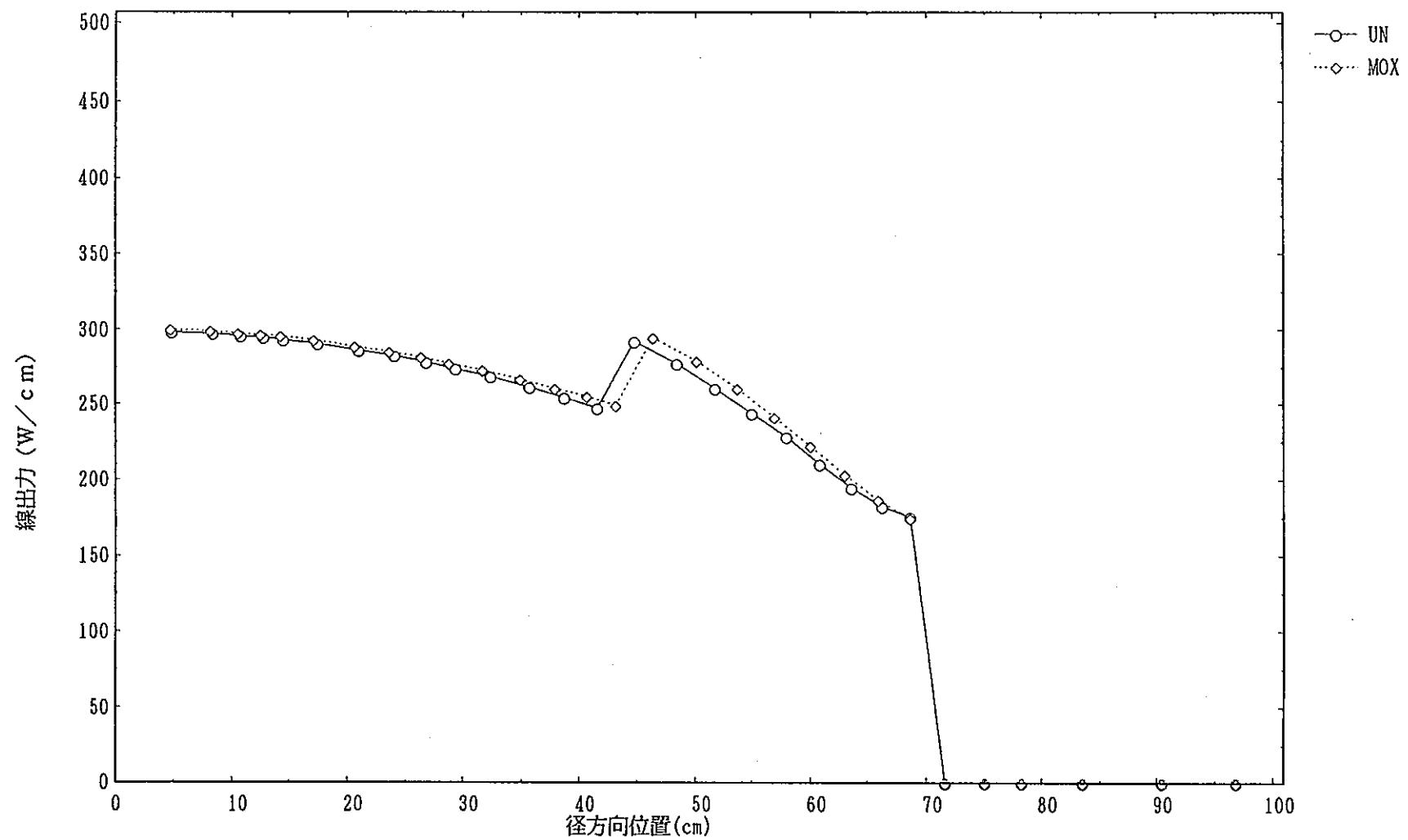


図4.13 300MWt出力燃料炉心径方向出力

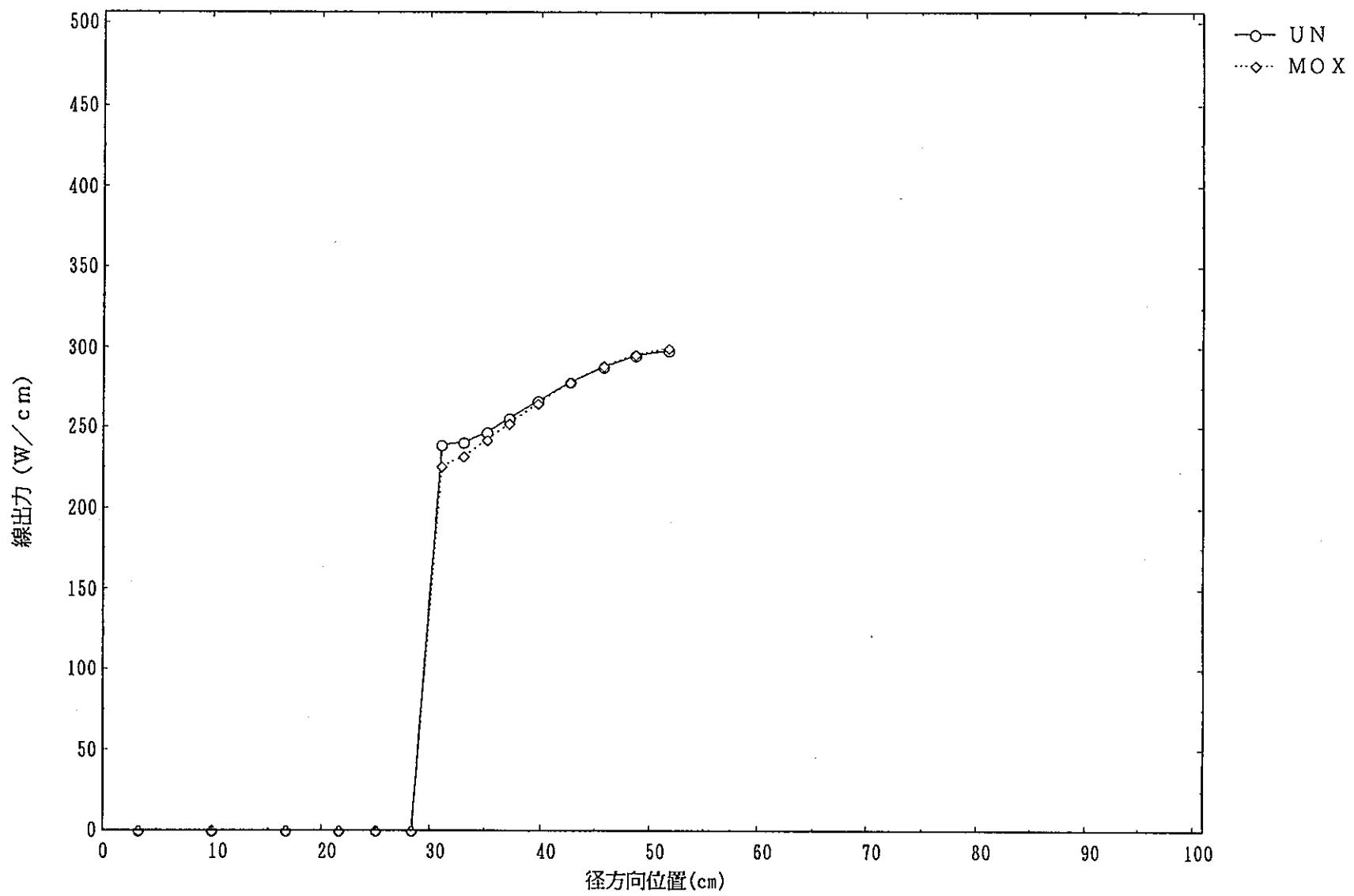


図4.14 300 MWt 出力燃料炉心軸方向出力

5 結論

300 MWt 規模の高温高速炉について、おもにナトリウムボイド反応度に注目した計算を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) ウラン燃料炉心の全炉心ボイド反応度は、今回取り上げた範囲ではすべて負となった。一方、MOX 燃料ではほとんどの場合、正の反応度が得られた。
- (2) H/D 比の影響は $1/3 \sim 1/2$ の程度では大きくない。また、ウラン炉心と MOX 炉心とを比較すると、後者の方が H/D 依存性が大きい可能性がある。
- (3) ボイド反応度はスペクトル硬化による正の反応度成分と漏洩による負の成分との差引で決まるため、径・軸反射体（遮蔽体）の厚さによって絶対値は影響を受ける。
- (4) 炉心サイズは、表面積／体積に直接影響するため、中性子漏洩量に関係する。同一出力で炉心が小さくなればナトリウムボイド反応度は小さくなる。
- (5) ラッパ管構造の影響を調べた結果、ダクトレス構造の方がボイド係数が相対的にプラス側に移ることが明らかとなった。
- (6) ウラン炉心と MOX 炉心とで燃焼計算を行った。その結果、ウラン炉心では 1 年間の燃焼期間を確保しようとしたら、5% 程度の燃焼反応度を補償するだけの余剰反応度が必要であることがわかった。

今回の計算では、燃料ピンなどの設計情報を最初から考慮しているとは言えず、構造材体積比率などは常陽のものを転用して解析を行った。窒化物燃料は酸化物燃料に比べて熱伝導率が良いため、太い径の燃料ペレットを用いることができるところから、より高温高速炉に適した燃料、減速材などの炉心体積比率を設定することが可能である。概念的な検討は今回ではほぼ済んだので、今後はより詳細な検討、例えば燃焼期間の長期化に向けて検討を進めていく必要がある。

付録A 計算に使用した組成データ

図表リスト

頁

第A. 1表 ウラン窒化物燃料 (UN) 炉心の原子数密度データ 構造材: Nb-1%Zr-0.01%C	5/30/90	A-3
第A. 2表 ウラン窒化物燃料 (UN) 炉心の原子数密度データ 構造材: ハスティロイ	.....	A-4
第A. 3表 ウラン酸化物燃料 (UO ₂) 炉心の原子数密度データ 構造材: Nb-1%Zr-0.01%C	.....	A-5
第A. 4表 ウラン酸化物燃料 (UO ₂) 炉心の原子数密度データ 構造材: ハスティロイ	.....	A-6
第A. 5表 混合酸化物燃料 (MOX) 炉心の原子数密度データ 構造材: Nb-1%Zr-0.01%C	.....	A-7
第A. 6表 混合酸化物燃料 (MOX) 炉心の原子数密度データ 構造材: ハスティロイ	.....	A-8
第A. 7表 ウラン窒化物燃料 (UN) 炉心の原子数密度データ 構造材: ステンレス	.....	A-9
第A. 8表 ウラン酸化物燃料 (UO ₂) 炉心の原子数密度データ 構造材: ステンレス	.....	A-10

付録 A 計算に使用した組成データ

次頁以降に、炉心領域の組成データを表形式でしめす。計算の前提となる体積比率は下表のデータを参考にして設定した。基本は常陽m k 1 のラッパー管なし (NW) の体積比をまるめたものである。また、ラッパー管構造を含めた体積比率は常陽の体積比を用いている。

燃料集合体仕様と幾何形状データ

項目		MONJU	MONJU:NW	JOYO-mkl	JOYOmkl,NW
集合体配列ピッチ	L (cm)	11.460	10.460	8.150	7.470
集合体間ギャップ	t (cm)	0.200	0.200	0.150	0.150
ラッパー管厚	s (cm)	0.300	0.000	0.190	0.000
集合体内ピン数	n (-)	169	169	91	91
ピン外径	d (cm)	0.650	0.650	0.630	0.630
ピン被覆管厚	q (cm)	0.047	0.047	0.035	0.035
燃料ペレット外径	a (cm)	0.540	0.540	0.540	0.540
ワイヤースペーサ外径	r (cm)	0.132	0.132	0.120	0.120
スペーサ巻付ピッチ	m (cm)	20.000	20.000	26.600	26.600
ピン配列ピッチ	p (cm)	0.787	0.787	0.760	0.760
集合体配列断面積	(cm ²)	113.737	94.753	57.524	48.325
燃料ペレット断面積	(cm ²)	38.705	38.705	20.841	20.841
ラッパー管断面積	(cm ²)	11.390	0.000	5.140	0.000
被覆管断面積	(cm ²)	15.047	15.047	5.954	5.954
ワイヤースペーサ断面積	(cm ²)	2.326	2.326	1.032	1.032
構造材断面積	(cm ²)	28.763	17.373	12.126	6.986
ボイド部断面積	(cm ²)	2.328	2.328	1.572	1.572
冷却材部断面積	(cm ²)	43.942	36.348	22.984	18.926
p/d 値	(-)	1.211	1.211	1.206	1.206
集合体内燃料部	(%)	34.030	40.848	36.230	43.127
集合体内構造材部	(%)	25.289	18.335	21.080	14.456
集合体内ボイド部	(%)	2.046	2.456	2.733	3.254
集合体内冷却材部	(%)	38.635	38.361	39.956	39.163
小計	(%)	100.000	100.000	100.000	100.000
集合体内燃料部／構造材比		1.346	2.228	1.719	2.983
平均ピンセル断面積	(cm ²)	0.6730	0.5607	0.6321	0.5310
単位面積当たりのピン本数	(-)	1.4859	1.7836	1.5820	1.8831

第A.1表 ウラン窒化物燃料(UN)炉心の原子数密度データ 5/30/90
構造材 : Nb-1%Zr-0.01%C

デー タ				
U 235重量比 (wt%)	32.00	34.00	36.00	38.00
U 238重量比 (wt%)	68.00	66.00	64.00	62.00
燃料理論密度 (g/cc)	14.32	14.32	14.32	14.32
燃料体積比 (-)	0.43	0.43	0.43	0.43
*ペレット密度(-)	0.85	0.85	0.85	0.85
(Pu, U)存在比(-)	0.94	0.94	0.94	0.94
減速材体積比 (-)	0.39	0.39	0.39	0.39
構造材体積比 (-)	0.15	0.15	0.15	0.15
空隙部体積比 (-)	0.03	0.03	0.03	0.03
燃料実効密度 (g/cc)	4.9434	4.9434	4.9434	4.9434
U 235 数密度 (個/cc/b)	4.0531E-03	4.3064E-03	4.5597E-03	4.8130E-03
U 238 数密度 (個/cc/b)	8.5039E-03	8.2538E-03	8.0037E-03	7.7536E-03
N 数密度 (個/cc/b)	1.2493E-02	1.2493E-02	1.2493E-02	1.2493E-02
O 数密度 (個/cc/b)				
Na 数密度 (個/cc/b)	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03
Nb 数密度 (個/cc/b)	8.2313E-03	8.2313E-03	8.2313E-03	8.2313E-03
Zr 数密度 (個/cc/b)	8.4763E-05	8.4763E-05	8.4763E-05	8.4763E-05
C 数密度 (個/cc/b)	6.4378E-05	6.4378E-05	6.4378E-05	6.4378E-05

* 設定値

構造材密度	8.56 (Nb)
減速材密度	0.77 (750°C)
実効原子量	252.20 (UN燃料)

第A.2表 ウラン窒化物燃料(UN)炉心の原子数密度データ 5/30/90
構造材: ハステロイ

データ				
U 235重量比 (wt%)	32.00	34.00	36.00	38.00
U 238重量比 (wt%)	68.00	66.00	64.00	62.00
燃料理論密度 (g/cc)	14.32	14.32	14.32	14.32
燃料体積比 (-)	0.43	0.43	0.43	0.43
*スミヤ密度比(-)	0.85	0.85	0.85	0.85
(Pu, U)存在比(-)	0.94	0.94	0.94	0.94
減速材体積比 (-)	0.39	0.39	0.39	0.39
構造材体積比 (-)	0.15	0.15	0.15	0.15
空隙部体積比 (-)	0.03	0.03	0.03	0.03
燃料実効密度 (g/cc)	4.9432	4.9432	4.9432	4.9432
U 235 数密度 (個/cc/b)	4.0529E-03	4.3062E-03	4.5595E-03	4.8128E-03
U 238 数密度 (個/cc/b)	8.5035E-03	8.2534E-03	8.0033E-03	7.7532E-03
N 数密度 (個/cc/b)	1.2503E-02	1.2503E-02	1.2503E-02	1.2503E-02
O 数密度 (個/cc/b)				
Na 数密度 (個/cc/b)	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03
C 数密度 (個/cc/b)	6.6244E-05	6.6244E-05	6.6244E-05	6.6244E-05
Si 数密度 (個/cc/b)	2.8304E-04	2.8304E-04	2.8304E-04	2.8304E-04
Mn 数密度 (個/cc/b)	1.4469E-04	1.4469E-04	1.4469E-04	1.4469E-04
Ni 数密度 (個/cc/b)	6.2711E-03	6.2711E-03	6.2711E-03	6.2711E-03
Cr 数密度 (個/cc/b)	3.3634E-03	3.3634E-03	3.3634E-03	3.3634E-03
Co 数密度 (個/cc/b)	2.6977E-04	2.6977E-04	2.6977E-04	2.6977E-04
Mo 数密度 (個/cc/b)	7.4571E-04	7.4571E-04	7.4571E-04	7.4571E-04
W 数密度 (個/cc/b)	2.5943E-05	2.5943E-05	2.5943E-05	2.5943E-05
Fe 数密度 (個/cc/b)	2.5621E-03	2.5621E-03	2.5621E-03	2.5621E-03

* 設定値

構造材密度 8.80 (ハステロイAで代用)
 減速材密度 0.77 (750°C)
 実効原子量 252.00 (UN燃料)

第A.3表 ウラン酸化物燃料 (UO_2) 炉心の原子数密度データ
構造材 : Nb-1%Zr-0.01%C

デー タ				
U 235重量比 (wt%)	32.00	34.00	36.00	38.00
U 238重量比 (wt%)	68.00	66.00	64.00	62.00
燃料理論密度 (g/cc)	11.08	11.08	11.08	11.08
燃料体積比 (-)	0.43	0.43	0.43	0.43
ペレット密度比 (-)	0.90	0.90	0.90	0.90
(Pu, U) 存在比 (-)	0.88	0.88	0.88	0.88
減速材体積比 (-)	0.39	0.39	0.39	0.39
構造材体積比 (-)	0.15	0.15	0.15	0.15
空隙部体積比 (-)	0.03	0.03	0.03	0.03
燃料実効密度 (g/cc)	3.7798	3.7798	3.7798	3.7798
U 235 数密度 (個/cc/b)	3.0990E-03	3.2927E-03	3.4864E-03	3.6801E-03
U 238 数密度 (個/cc/b)	6.5021E-03	6.3109E-03	6.1196E-03	5.9284E-03
N 数密度 (個/cc/b)				
O 数密度 (個/cc/b)	1.9128E-02	1.9128E-02	1.9128E-02	1.9128E-02
Na 数密度 (個/cc/b)	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03
Nb 数密度 (個/cc/b)	8.2313E-03	8.2313E-03	8.2313E-03	8.2313E-03
Zr 数密度 (個/cc/b)	8.4763E-05	8.4763E-05	8.4763E-05	8.4763E-05
C 数密度 (個/cc/b)	6.4378E-05	6.4378E-05	6.4378E-05	6.4378E-05

* 設定値

構造材密度	8.56 (Nb)
減速材密度	0.77 (750°C)
実効原子量	270.00 (UO_2 燃料)

第A.4表 ウラン酸化物燃料 (UO_2) 炉心の原子数密度データ
構造材 : ハステロイ

デ一タ				
U 235重量比 (wt%)	32.00	34.00	36.00	38.00
U 238重量比 (wt%)	68.00	66.00	64.00	62.00
燃料理論密度 (g/cc)	11.08	11.08	11.08	11.08
燃料体積比 (-)	0.43	0.43	0.43	0.43
ペレット密度 (-)	0.90	0.90	0.90	0.90
(Pu, U)存在比(-)	0.88	0.88	0.88	0.88
減速材体積比 (-)	0.39	0.39	0.39	0.39
構造材体積比 (-)	0.15	0.15	0.15	0.15
空隙部体積比 (-)	0.03	0.03	0.03	0.03
燃料実効密度 (g/cc)	3.7798	3.7798	3.7798	3.7798
U 235 数密度 (個/cc/b)	3.0990E-03	3.2927E-03	3.4864E-03	3.6801E-03
U 238 数密度 (個/cc/b)	6.5021E-03	6.3109E-03	6.1196E-03	5.9284E-03
N 数密度 (個/cc/b)				
O 数密度 (個/cc/b)	1.7349E-02	1.7349E-02	1.7349E-02	1.7349E-02
Na 数密度 (個/cc/b)	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03
C 数密度 (個/cc/b)	6.6244E-05	6.6244E-05	6.6244E-05	6.6244E-05
Si 数密度 (個/cc/b)	2.8304E-04	2.8304E-04	2.8304E-04	2.8304E-04
Mn 数密度 (個/cc/b)	1.4469E-04	1.4469E-04	1.4469E-04	1.4469E-04
Ni 数密度 (個/cc/b)	6.2711E-03	6.2711E-03	6.2711E-03	6.2711E-03
Cr 数密度 (個/cc/b)	3.3634E-03	3.3634E-03	3.3634E-03	3.3634E-03
Co 数密度 (個/cc/b)	2.6977E-04	2.6977E-04	2.6977E-04	2.6977E-04
Mo 数密度 (個/cc/b)	7.4571E-04	7.4571E-04	7.4571E-04	7.4571E-04
W 数密度 (個/cc/b)	2.5943E-05	2.5943E-05	2.5943E-05	2.5943E-05
Fe 数密度 (個/cc/b)	2.5621E-03	2.5621E-03	2.5621E-03	2.5621E-03

* 設定値

構造材密度 8.80 (ハステロイAで代用)
 減速材密度 0.77 (750°C)
 実効原子量 270.00 (UO_2 燃料)

第A.5表 混合酸化物燃料(MOX) 炉心の原子数密度データ
構造材 : Nb-1%Zr-0.01%C

デ タ				
Pu富化度 (wt%)	26	28	30	32
Pu239重量比 (wt%)	58	58	58	58
Pu240重量比 (wt%)	24	24	24	24
Pu241重量比 (wt%)	14	14	14	14
Pu242重量比 (wt%)	4	4	4	4
U 235重量比 (wt%)	0.30	0.3	0.3	0.3
U 238重量比 (wt%)	99.70	99.70	99.70	99.70
燃料理論密度 (g/cc)	11.08	11.08	11.08	11.08
燃料体積比 (-)	0.43	0.43	0.43	0.43
ペレット密度比(-)	0.90	0.90	0.90	0.90
(Pu, U)存在比(-)	0.88	0.88	0.88	0.88
減速材体積比 (-)	0.39	0.39	0.39	0.39
構造材体積比 (-)	0.15	0.15	0.15	0.15
空隙部体積比 (-)	0.03	0.03	0.03	0.03
Pu燃料実効密度(g/cc)	0.9827	1.0583	1.1339	1.2095
U 燃料実効密度(g/cc)	2.7970	2.7214	2.6458	2.5702
Pu239 数密度 (個/cc/b)	1.4363E-03	1.5468E-03	1.6573E-03	1.7677E-03
Pu240 数密度 (個/cc/b)	5.9185E-04	6.3738E-04	6.8291E-04	7.2843E-04
Pu241 数密度 (個/cc/b)	3.4382E-04	3.7026E-04	3.9671E-04	4.2316E-04
Pu242 数密度 (個/cc/b)	9.7827E-05	1.0535E-04	1.1288E-04	1.2040E-04
U 235 数密度 (個/cc/b)	2.1504E-05	2.0923E-05	2.0342E-05	1.9761E-05
U 238 数密度 (個/cc/b)	7.0565E-03	6.8658E-03	6.6751E-03	6.4844E-03
N 数密度 (個/cc/b)				
O 数密度 (個/cc/b)	1.9129E-02	1.9129E-02	1.9129E-02	1.9129E-02
Na 数密度 (個/cc/b)	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03
Nb 数密度 (個/cc/b)	8.2313E-03	8.2313E-03	8.2313E-03	8.2313E-03
Zr 数密度 (個/cc/b)	8.4763E-05	8.4763E-05	8.4763E-05	8.4763E-05
C 数密度 (個/cc/b)	6.4378E-05	6.4378E-05	6.4378E-05	6.4378E-05

* 設定値

構造材密度	8.560 (Nb)
減速材密度	0.772 (750°C)
実効原子量	270.00

第A.6表 混合酸化物燃料(MOX)炉心の原子数密度データ
構造材: ハステロイ

データ				
Pu富化度 (wt%)	26	28	30	32
Pu239重量比 (wt%)	58	58	58	58
Pu240重量比 (wt%)	24	24	24	24
Pu241重量比 (wt%)	14	14	14	14
Pu242重量比 (wt%)	4	4	4	4
U 235重量比 (wt%)	0.3	0.3	0.3	0.3
U 238重量比 (wt%)	99.7	99.7	99.7	99.7
燃料理論密度 (g/cc)	11.08	11.08	11.08	11.08
燃料体積比 (-)	0.43	0.43	0.43	0.43
ペレット密度比(-)	0.90	0.90	0.90	0.90
(Pu, U)存在比(-)	0.88	0.88	0.88	0.88
減速材体積比 (-)	0.39	0.39	0.39	0.39
構造材体積比 (-)	0.15	0.15	0.15	0.15
空隙部体積比 (-)	0.03	0.03	0.03	0.03
Pu燃料実効密度(g/cc)	0.9827	1.0583	1.1339	1.2095
U 燃料実効密度(g/cc)	2.7970	2.7214	2.6458	2.5702
Pu239 数密度 (個/cc/b)	1.4363E-03	1.5468E-03	1.6573E-03	1.7677E-03
Pu240 数密度 (個/cc/b)	5.9185E-04	6.3738E-04	6.8291E-04	7.2843E-04
Pu241 数密度 (個/cc/b)	3.4382E-04	3.7026E-04	3.9671E-04	4.2316E-04
Pu242 数密度 (個/cc/b)	9.7827E-05	1.0535E-04	1.1288E-04	1.2040E-04
U 235 数密度 (個/cc/b)	2.1504E-05	2.0923E-05	2.0342E-05	1.9761E-05
U 238 数密度 (個/cc/b)	7.0565E-03	6.8658E-03	6.6751E-03	6.4844E-03
N 数密度 (個/cc/b)				
O 数密度 (個/cc/b)	1.9129E-02	1.9129E-02	1.9129E-02	1.9129E-02
Na 数密度 (個/cc/b)	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03
C 数密度 (個/cc/b)	6.6248E-05	6.6248E-05	6.6248E-05	6.6248E-05
Si 数密度 (個/cc/b)	2.8305E-04	2.8305E-04	2.8305E-04	2.8305E-04
Mn 数密度 (個/cc/b)	1.4470E-04	1.4470E-04	1.4470E-04	1.4470E-04
Ni 数密度 (個/cc/b)	6.2714E-03	6.2714E-03	6.2714E-03	6.2714E-03
Cr 数密度 (個/cc/b)	3.3636E-03	3.3636E-03	3.3636E-03	3.3636E-03
Co 数密度 (個/cc/b)	2.6979E-04	2.6979E-04	2.6979E-04	2.6979E-04
Mo 数密度 (個/cc/b)	7.4575E-04	7.4575E-04	7.4575E-04	7.4575E-04
W 数密度 (個/cc/b)	2.5944E-05	2.5944E-05	2.5944E-05	2.5944E-05
Fe 数密度 (個/cc/b)	2.5623E-03	2.5623E-03	2.5623E-03	2.5623E-03

* 設定値

構造材密度 8.800 (ハステロイ)
減速材密度 0.772 (750°C)
実効原子量 270.00

C Si Mn Ni Cr Co Mo W Fe

第A.7表 ウラン窒化物燃料(UN)炉心の原子数密度データ
構造材:ステンレス

デー タ				
U 235重量比 (wt%)	32.00	34.00	36.00	38.00
U 238重量比 (wt%)	68.00	66.00	64.00	62.00
燃料理論密度 (g/cc)	14.32	14.32	14.32	14.32
燃料体積比 (-)	0.43	0.43	0.43	0.43
*スミヤ密度比(-)	0.85	0.85	0.85	0.85
(Pu, U)存在比(-)	0.94	0.94	0.94	0.94
減速材体積比 (-)	0.39	0.39	0.39	0.39
構造材体積比 (-)	0.15	0.15	0.15	0.15
空隙部体積比 (-)	0.03	0.03	0.03	0.03
燃料実効密度 (g/cc)	4.9432	4.9432	4.9432	4.9432
U 235 数密度 (個/cc/b)	4.0529E-03	4.3062E-03	4.5595E-03	4.8128E-03
U 238 数密度 (個/cc/b)	8.5035E-03	8.2534E-03	8.0033E-03	7.7532E-03
N 数密度 (個/cc/b)	1.2503E-02	1.2503E-02	1.2503E-02	1.2503E-02
O 数密度 (個/cc/b)				
Na 数密度 (個/cc/b)	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03
C 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Si 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Mn 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Ni 数密度 (個/cc/b)	1.4831E-03	1.4831E-03	1.4831E-03	1.4831E-03
Cr 数密度 (個/cc/b)	2.3716E-03	2.3716E-03	2.3716E-03	2.3716E-03
Co 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Mo 数密度 (個/cc/b)	1.8902E-04	1.8902E-04	1.8902E-04	1.8902E-04
W 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Fe 数密度 (個/cc/b)	8.8971E-03	8.8971E-03	8.8971E-03	8.8971E-03

* 設定値

構造材密度	8.03
減速材密度	0.77 (750°C)
実効原子量	252.00 (UN燃料)

第A.8表 ウラン酸化物燃料 (UO_2) 炉心の原子数密度データ
構造材: ステンレス

データ				
U 235重量比 (wt%)	32.00	34.00	36.00	38.00
U 238重量比 (wt%)	68.00	66.00	64.00	62.00
燃料理論密度 (g/cc)	11.08	11.08	11.08	11.08
燃料体積比 (-)	0.43	0.43	0.43	0.43
ペレット密度 (-)	0.90	0.90	0.90	0.90
(Pu, U)存在比(-)	0.88	0.88	0.88	0.88
減速材体積比 (-)	0.39	0.39	0.39	0.39
構造材体積比 (-)	0.15	0.15	0.15	0.15
空隙部体積比 (-)	0.03	0.03	0.03	0.03
燃料実効密度 (g/cc)	3.7798	3.7798	3.7798	3.7798
U 235 数密度 (個/cc/b)	3.0990E-03	3.2927E-03	3.4864E-03	3.6801E-03
U 238 数密度 (個/cc/b)	6.5021E-03	6.3109E-03	6.1196E-03	5.9284E-03
N 数密度 (個/cc/b)				
O 数密度 (個/cc/b)	1.7349E-02	1.7349E-02	1.7349E-02	1.7349E-02
Na 数密度 (個/cc/b)	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03	7.8857E-03
C 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Si 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Mn 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Ni 数密度 (個/cc/b)	1.4831E-03	1.4831E-03	1.4831E-03	1.4831E-03
Cr 数密度 (個/cc/b)	2.3716E-03	2.3716E-03	2.3716E-03	2.3716E-03
Co 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Mo 数密度 (個/cc/b)	1.8902E-04	1.8902E-04	1.8902E-04	1.8902E-04
W 数密度 (個/cc/b)	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Fe 数密度 (個/cc/b)	8.8971E-03	8.8971E-03	8.8971E-03	8.8971E-03

ステンレス鋼	
C	0.00%
Si	0.00%
Mn	0.00%
Ni	12.00%
Cr	17.00%
Co	0.00%
Mo	2.50%
W	0.00%
Fe	68.50%
合計	100.00%

* 設定値

構造材密度 8.03
減速材密度 0.77 (750°C)
実効原子量 270.00 (UO_2 燃料)

付録B 各国の炉心寸法データ

付録B 各国の炉心寸法データ

次頁以降に、各国のFBR炉心の寸法データ、 β_{eff} などの値をまとめて示す。出典は、
A. E. Walter, A. B. Reynolds, "Fast Breeder Reactors," Pergamon Press, 1981.
の付録Aである。

図表リスト

	頁	
表B. 1 初期の実験炉の炉心仕様	B-2
表B. 2 初期の動力炉・試験炉の炉心仕様	B-3
表B. 3 各国の原型炉の炉心仕様	B-4
表B. 4 各国の実証炉の炉心仕様	B-5

第B.1 初期の実験炉の炉心仕様

TABLE A-1 EARLY EXPERIMENTAL REACTORS

REACTOR Country	CLEMENTINE USA	EBR-I USA	BR-1 USSR	BR-2 USSR	BR-5 USSR	LAMPRE USA	SEFOR USA*	BR-10 USSR
GENERAL								
Date Critical	1946	1951	1955	1956	1958	1961	1969	1973
Date Full Power	1949	1951			1959	1961	1971	
Electrical Power, MW	—	0.2			—	—	—	—
Thermal Power, MW	0.025	1.2	(30W)	0.1	5	1	20	10
CORE PARAMETERS								
Core Volume, l	2.5	5.9			17.2	3.1	566	
Core Height, m	0.14	0.22			0.28	0.15	0.93	
Core Diameter, m	0.15	0.18	0.13		0.28	0.16	0.88	
Core Volume Fractions								
%Fuel		48			52	43		
%Sodium		15**			34	30		
%Other		37			14	27		
Flux, $10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	0.004	0.11		0.1	1.0	0.6	2.0	
Power Density, kW/l		170			500		35	
$\Lambda, \mu\text{s}$		0.04				0.6		
β_{eff}		0.0068	0.002			0.0032		
Doppler Constant, $-Tdk/dT$						0.008		

*Joint Venture with Germany and Euratom

**NaK

第B.2 初期の動力炉・試験炉の炉心仕様

TABLE A-2 EARLY POWER AND TEST REACTORS

REACTOR Country	DFR UK	FERMI USA	EBR-II* USA	RAPSODIE** France	BOR-60 USSR	KNK-2† Germany	JOYO†† Japan	FFTF USA	PEC Italy
GENERAL									
Date Critical	1959	1963	1963	1967/1970	1969	1977	1977/81	1980	1985
Date Full Power	1963	1970	1965	1967/1970	1973	1979	1979/82	1980	
Electrical Power, MW	15	65	20	—	12	21	—	—	
Thermal Rating, MW	60	200	62.5	24/40	60	58	75/100	400	118
CORE PARAMETERS									
Core Volume, l	120	400	73	49/42	60	250/70	304/238	1040	325
Core Height, m	0.53	0.77	0.36	0.34/0.32	0.40	0.60	0.60/0.55	0.91	0.65
Core Diameter, m	0.53	0.82	0.51	0.43/0.41	0.43	0.82	0.79/0.76	1.21	0.83
No. Enrichment Zones	1	1	1	1	1	2	1	2	1
Core Volume Fractions									
%Fuel	40	29	32	40/37	40	32	33/35	35	35
%Sodium	40	50	49	34/36	28	50	41/41	41	38
%Other	20	21	19	26/27	32	18	26/24	24	27
Peak Flux, $10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	2.5	4.5	2.5	2.0/3.2	3.3	1.8/2.2	3.0/5.0	7.2	4.1
Ave. Flux, $10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$		2.6	1.5	1.2/2.3		1.0	2.0/3.0	4.5	2.7
Peak Linear Power, kW/m	37	28	27	39/43	56	35/43	32/40	42	36
Ave. Linear Power, kW/m	35	17	23	26/31	35	16/31		24	25
Peak Power Density, kW/l	774	1002		650/1080	1180		480/701	730	512
Ave. Power Density, kW/l	900	458	860	430/770	750	150/440	279/391	460	350
$\Lambda, \mu\text{s}$	0.14	0.1		0.11/0.24		0.38	0.23/0.30	0.5	
β_{eff}	0.007		0.0068	0.005		0.006	0.005/0.004	0.0032	0.0036
Doppler Constant, $-Tdk/dT$							0.002	0.005	0.0037

*MK-I/A/MK-II Cores

**Rapsodie/Rapsodie Fortissimo

†Driver/Test Zone

††MK-I/MK-II Cores

第B.3 各国の原型炉の炉心仕様

TABLE A-3 PROTOTYPE REACTORS

REACTOR Country	BN-350 USSR	PHENIX France	PFR UK	BN-600 USSR	SNR-300 Germany	MONJU Japan	CRBRP USA
GENERAL							
Date Critical	1972	1973	1974	1980	1984	1987	1987
Date Full Power	1973	1974	1977	1980	1985	1988	1988
Electrical Rating, MW	150(a)	250	250	600	327	280	375
Thermal Rating, MW	1000	568	600	1470	762	714	975
CORE PARAMETERS							
Core Volume, l	1870	1227	1500	2500	2230	2340	2900
Core Height, m	1.06	0.85	0.91	0.75	0.95	0.93	0.91
Core Diameter, m	1.58	1.39	1.47	2.06	1.78	1.79	2.02
No. Enrichment Zones	2	2	2	2	2	2	1(b)
Core Volume Fractions							
%Fuel	46	36	36	45		32	32
%Sodium	32	36	42	33		41	42
%Other	22	28	22	22		27	24
Peak Flux, $10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	8.0	7.2	8.9	10.0	6.4	6.0	5.5
Ave. Flux, $10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$			4.5		3.2	3.0	3.4
Peak Linear Power, kW/m	44	45	48	53	36	36	42
Ave. Linear Power, kW/m	21	27	27	36	23	20	27
Peak Power Density, kW/l	730	646	770	840	520		740
Ave. Power Density, kW/l	430	406	380	550	330	295	380
$\Lambda, \mu\text{s}$		0.33	0.49		0.4	0.44	0.41
β_{eff}			0.0034		0.0035	0.0036	0.0034
Doppler Constant, $-Tdk/dT$					0.006	0.006	0.008
Breeding Ratio	1.0	1.16	1.0	1.3	1.0	1.2	1.24(c)
Doubling Time, years		40		10			30(d)

(a) Plus 5000 Mg desalinated water/hr
(b) Heterogeneous Core(c) 1.29 if LWR recycled fuel used
(d) 24 if LWR recycled fuel used

第 B.4 各国の実証炉の炉心仕様

TABLE A-4 DEMONSTRATION REACTORS

REACTOR Country	SUPER PHÉNIX France	CDFR UK	SNR-2 Germany	BN-1600 USSR
GENERAL				
Date Critical	1983	~1990	~1990	~1990
Date Full Power	1984			
Electrical Rating, MW	1200	1320	1300	1600
Thermal Rating, MW	3000	3300	3420	4200
CORE PARAMETERS				
Core volume, l	10766	6600	12000	8800
Core Height, m	1.00	1.00	0.95	1.00
Core Diameter, m	3.7	2.9	4.14	3.35
No. Enrichment Zones	2	2	2	2-3
Core Volume Fractions				
%Fuel	36.6	35	37	
%Sodium	33.8	45	41	
%Other	29.6	20	22	
Peak Flux, $10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	6.2	9.4	5.5	10.0
Ave. Flux, $10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	3.6	5.8	3.0	
Peak Linear Power, kW/m	47	42	42	
Ave. Linear Power, kW/m	28	30		
Peak Power Density, kW/l	440	620	460	710
Ave. Power Density, kW/l	275	450	270	470
$\Lambda, \mu\text{s}$	0.42			
β_{eff}	0.004	0.003	0.004	
Doppler Constant, $-Tdk/dT$	0.0086	0.008	0.009	
Breeding Ratio	1.25	1.22	1.15	1.3-1.4
Doubling Time, years	23	27		
FUEL ASSEMBLY				
No. Driver Assemblies	364	350	492	
Fuel Type	UO ₂ -PuO ₂	UO_{2}-PuO_{2}	UO_{2}-PuO_{2}	UO_{2}-PuO_{2}
Fuel Pellet Form				
Fuel Pellet Den., %TD		92		
Smear Density, %TD		80	85	
Bond Material	He	He	He+Ar	
Fuel Pellet Dia., mm		5.08	6.4	
Pin Diameter, mm	8.5	5.84	7.6	
Cladding Thickness, mm		0.35	0.50	
Cladding Material	316SS	316SS	SS	
Pin Spacers	Wire	Grid	Grid	
Pin Pitch, mm	9.8	7.35	9.1	
Pin Pitch/Diameter	1.15	1.25	1.20	
F.G. Plenum Location	T/B	B	B	
F.G. Plenum Length, m	0.15/0.85		0.65	
Pin Length, m	2.7	2.29	2.71	

付録C UN燃料炉心とMOX燃料炉心のナトリウムボイド反応度の比較

図表リスト

頁

図C. 1 MOX燃料炉心燃料領域全体ボイド時の反応度変化 C-4

図C. 2 UN燃料炉心燃料領域全体ボイド時の反応度変化 C-4

図C. 3 MOX燃料炉心中央部ボイド時の反応度変化 C-5

図C. 4 UN燃料炉心中央部ボイド時の反応度変化 C-5

付録 C UN燃料炉心とMOX燃料炉心のナトリウムボイド反応度の比較

1 はじめに

ウラン炉心ではボイド反応度が負、プルトニウム炉心では正となることは、断面積データ（直接的には κ 値）で定性的に説明される。ここでは実際にボイド反応度を厳密摂動計算で算出し、反応度成分のエネルギー依存性や、炉心相互の比較を行って定量的に検討する。

2 計算対象

ウラン炉心とプルトニウム炉心との核的な比較を行うことが目的であるので、炉心サイズ、H/D比の同一のものを対象とした。具体的には、

- ・ H/D = 1/3
- ・ 構造材 : Nb-1%Zr-0.01%C
- ・ 燃 料 : ウラン炉心 : UN
プルトニウム炉心 : MOX

である。これらの炉心に対して炉心燃料領域が全てボイド状態、中心部のみボイド状態の2ケースについて計算を行った。

3 計算方法

厳密摂動計算は、CITATIONコードでフォワード、アジョイント束を計算し、これをCIPERコードに入力して計算した。計算に使用した断面積は、CIPERコードの制約により、70群から18群に縮約して用いた。そのため、実効増倍率から直接算出した反応度変化とはやや数値が異なるが、結論が影響を受けるほどではない。

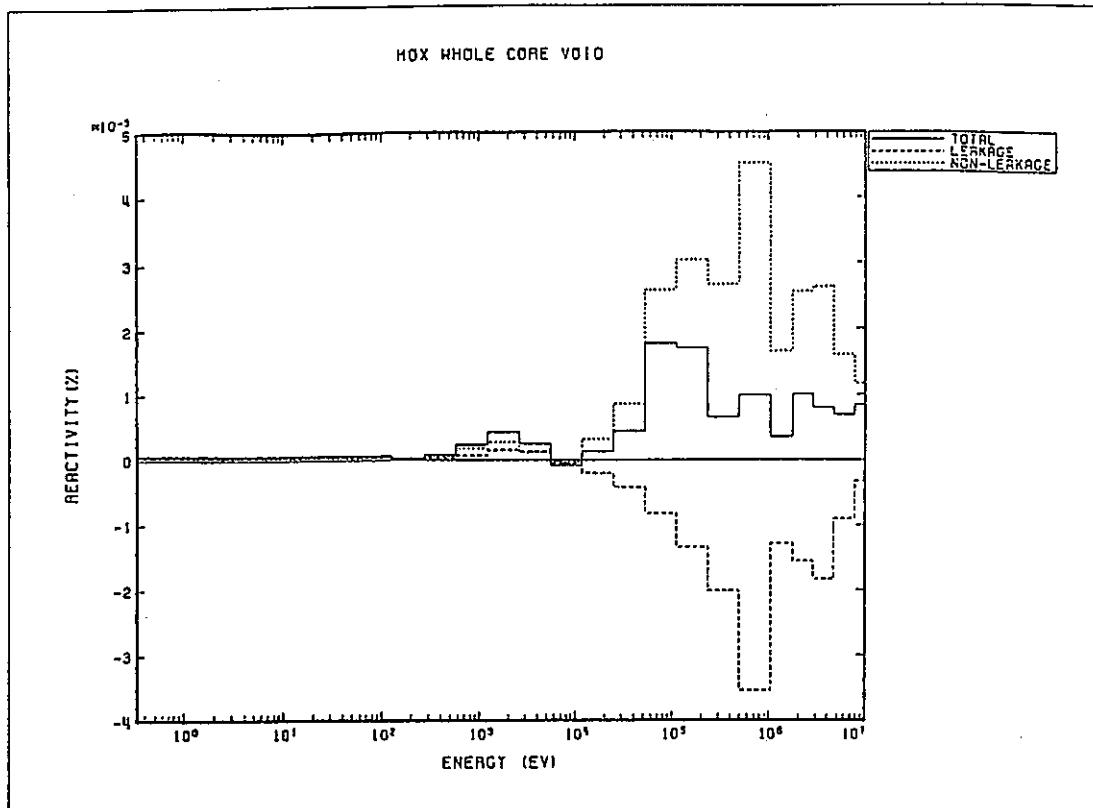
4 計算結果

MOX炉心とUN炉心を対象に、厳密摂動計算で得られた炉心全ボイド反応度を以下に示す。

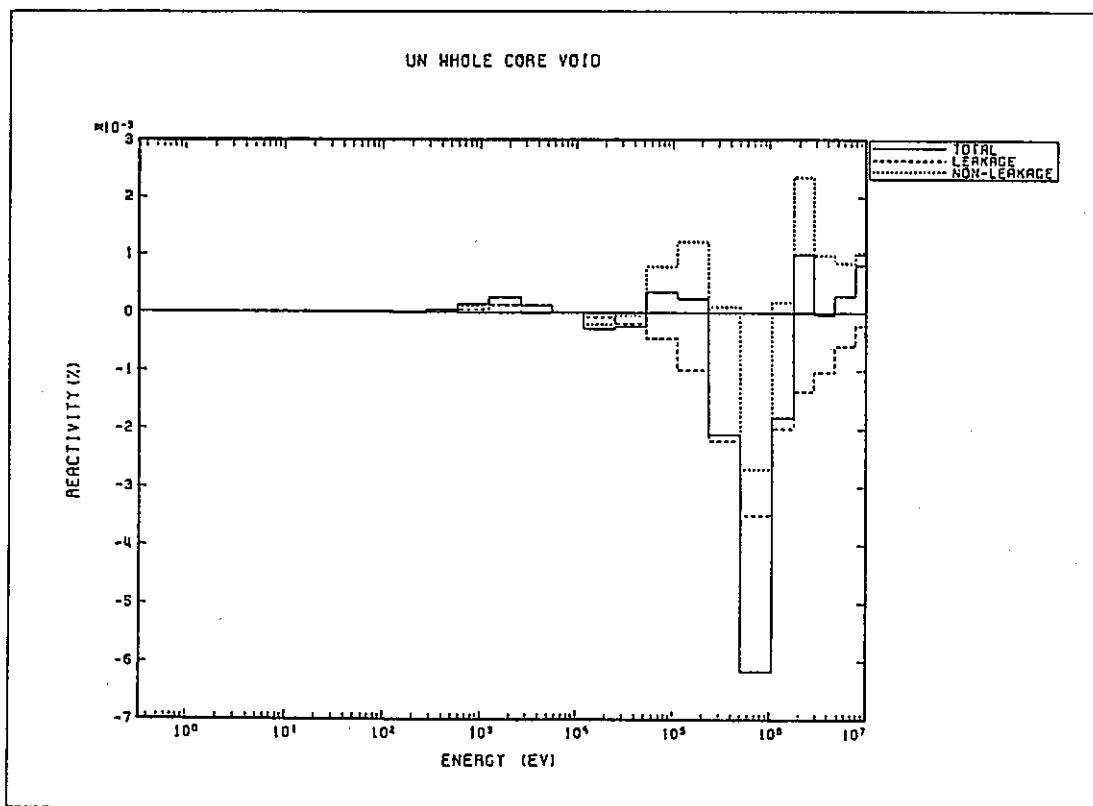
反応度成分		MOX炉心	UN炉心
非漏洩項	(% $\Delta\rho$)	2.426	0.486
漏洩項	(% $\Delta\rho$)	-1.387	-1.219
全反応度	(% $\Delta\rho$)	1.039	-0.732

これから明らかなように、ほぼ同一炉心サイズ、形状であるので漏洩項は両炉心でほとんど差がなく、漏洩以外の項で全反応度が定まっていることがわかる。つまり反応度の差は断面積に強く依存していることがわかる。

つぎに、両炉心の反応度成分のエネルギー依存性を図示する。図C. 1～図C. 4に両炉心について全炉心ボイド、炉心中央部のみボイド時の反応度成分を示す。MOX炉心とUN炉心とでは中性子束のピーク付近(1 MeV以下)で大きな差が生じていることがわかる。特に、漏洩項のエネルギー依存性は大きな差がないので、まさに中性子束のピーク領域での κ 値の差(ウランは変化小、プルトニウムはエネルギーに依存して急に変化)が影響しているものと考えられる。



図C.1 MOX燃料炉心燃料領域全体ボイド時の反応度変化



図C.2 UN燃料炉心燃料領域全体ボイド時の反応度変化

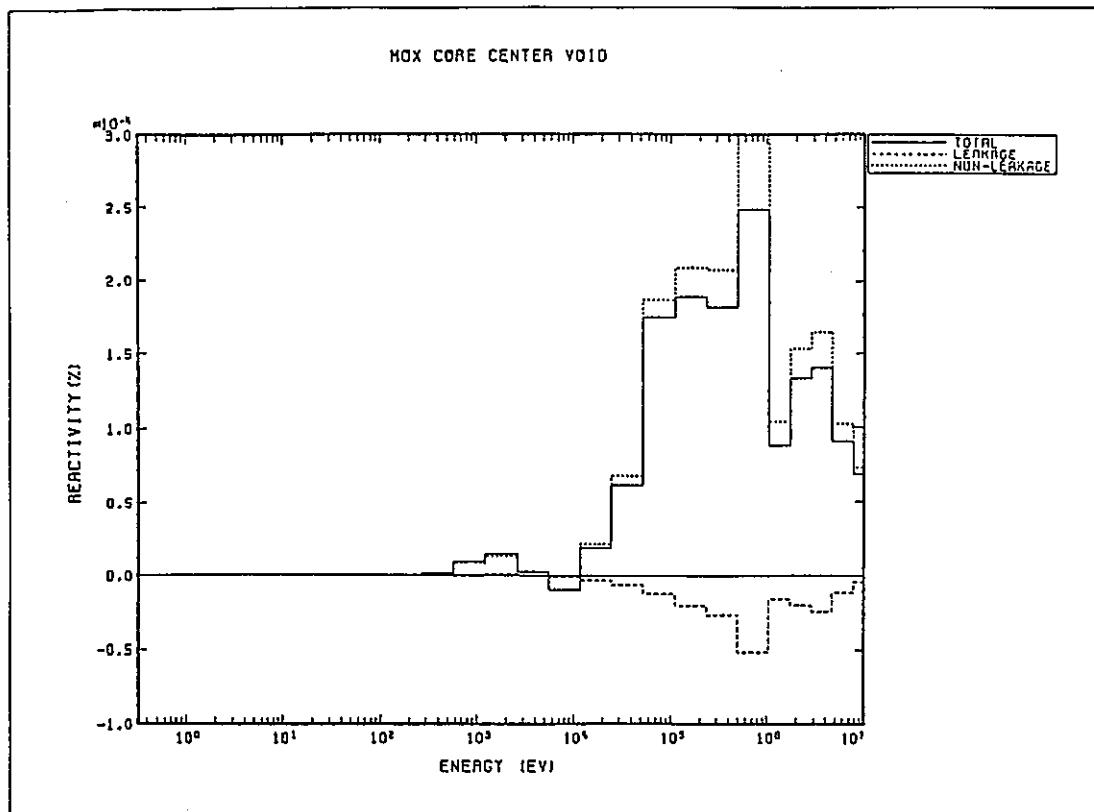


図 C.3 MOX燃料炉を中心部ボイド時の反応度変化

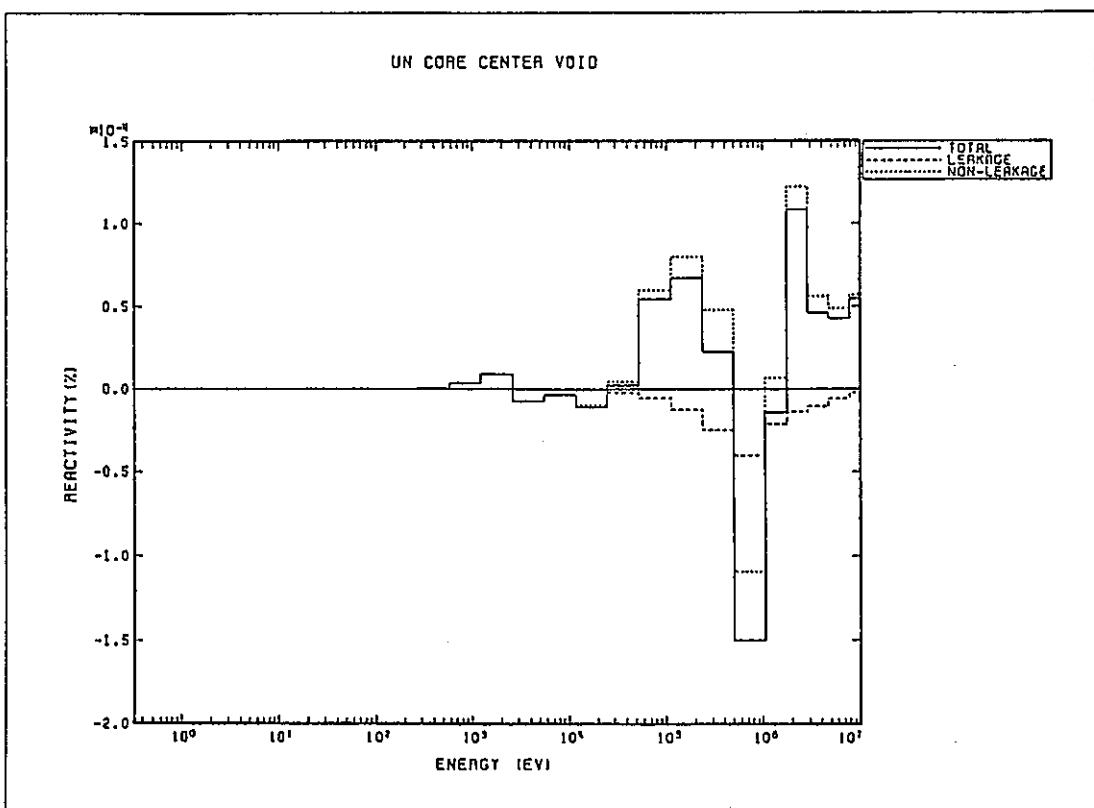


図 C.4 UN燃料炉を中心部ボイド時の反応度変化