

窒化物粒子充填燃料炉心の安全解析

(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

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49 号
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquired about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute,
4-49 Muramatsu, Nakagun, Ibaraki 319-1194
Japan

© 核燃料サイクル開発機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

1999年3月

窒化物粒子充填燃料炉心の安全解析

横山 次男*、松本 弘**

要 旨

もんじゅ高度化炉心に対して、炉心燃料として窒化物粒子充填燃料を採用した場合の安全解析を行った。炉心としてはもんじゅ高度化炉心に炉心燃料として窒化物粒子充填燃料を採用した炉心とし、それぞれの炉心の制御棒価値を評価し、さらに当該炉心のUTOP及びULOF解析評価を行い、受動的安全性を検討した。対象炉心は以下のもんじゅ炉心である。

A炉心：ナトリウムボンド、充填率50%

B炉心：ナトリウムボンド、充填率70%

C炉心：ヘリウムボンド、充填率80%

これら3ケースの炉心について、3次元解析を行い最大線出力及び制御棒価値を評価した。

更にこれらの炉心に対して、出力運転中の制御棒の異常な引抜き+スクラム失敗事象について炉心動特性解析を行い、燃料損傷あるいは冷却材沸騰防止の観点から、許容し得る投入反応度を評価・整理した。また、A炉心の充填率条件とB炉心の線出力条件を組み合わせ想定したD炉心(ナトリウムボンド・充填率50%・最大線出力975W/cm)についても炉心動特性解析を実施した。

燃料破損条件としてはNaボンド燃料については燃料ピン内Naの沸騰又は燃料の分解開始温度、Heボンド燃料については燃料の分解開始温度とした。その結果、UTOPの観点からは、ナトリウムの沸点以下をめやすとした場合、許容投入反応度は小さいが、窒化物燃料の分解温度2390℃を判断条件とした場合は、ナトリウムボンド炉心は、大きな反応度が許容でき、ヘリウムボンド炉心については、40¢程度の反応度投入が許容できることが分かった。

次に、外部電源喪失+スクラム失敗事象について炉心動特性解析を実施し、燃料損傷あるいは冷却材沸騰が防止され原子炉が安全に冷却されうるか否かを評価し、GEM(ガス膨張機構)の必要性を検討した。その結果、各炉心とも、所要のGEMがあれば沸騰を回避でき、その目安となる所要反応度は下記の通りであることが分かった。

A炉心：0.95\$

B炉心：0.8\$

C炉心：1.5\$

D炉心：0.7\$

本報告書は、(株)東芝が核燃料サイクル開発機構との契約に基づいて実施した業務の成果である。
機構担当部室：東海事業所 プルトニウム燃料センター 製造加工部 技術開発室

*) (株)東芝 磯子エンジニアリングセンター 動力炉開発部

**)(株)東芝 磯子エンジニアリングセンター もんじゅプロジェクト

Safety Analysis on Nitride Granular Packed Fuel Core

Tsugio Yokoyama*, Hiroshi Matsumoto*

Abstract

An Analysis on nitride granular packed fuel cores in the advanced Monju core was conducted. The cores include three types which apply nitride granular packed fuels as their core fuels in the advanced Monju core. The control rod worth of the cores were evaluated and the analyses of UTOP and ULOF for the cores were performed to assess their passive safety features.

The cores analyzed are following three types of Monju cores.

Core A: sodium bond, a packing ratio of 50%

Core B: sodium bond, a packing ratio of 70%

Core C: helium bond, a packing ratio of 80%

An three dimensional analysis was performed for these three cores to evaluate their maximum linear heat rate and control rod worth.

In addition, a core dynamics analysis on the event that consists of an abnormal control rod withdrawn and the failure of a scram at the power operation in these cores was conducted to evaluate and clarify the allowable insertion reactivity in view of preventing fuel failures or coolant boiling. A core named core D that was set from the combination of the packing ratio of core A and the linear heat rate of core B was also analyzed for its core dynamics.

The fuel failure condition was assumed to be the boiling of sodium in the pin or the start of fuel dissolution for the sodium bonded fuel and the start of fuel dissolution for the helium bonded fuel. The result shows that the maximum permissible insertion reactivity is small when a criteria of the sodium dissolution point of 2390 centi-degree is adopted for the sodium bond fuel cores in UTOP. And it is found that an insertion reactivity of about 40 ρ is allowed for the helium bond fuel core.

Furthermore, a core dynamics analysis on the event that consists of the loss of an external electric power and the failure of a scram was conducted to evaluate for preventing fuel failures or coolant boiling, and to clarify the necessity of GEM (gas expansion module). The result has proved that each core can prevent the core boiling if provided required GEMs. The estimated reactivities of GEM required for each core are followings.

Core A : 0.95\$

Core B : 0.8\$

Core C : 1.5\$

Core D : 0.7\$

Work performed by Toshiba Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.
JNC Liaison ; Fuel Technology Engineering Section, Plutonium Fuel Fabrication Division, Plutonium Fuel Center, Tokai Works

*) Advanced Reactor Engineering Department, Isogo Engineering Center, Toshiba Corporation

***) M Project, Isogo Engineering Center, Toshiba Corporation

目 次

要 旨	i
Abstract	ii
目 次	iii
表リスト	iv
図リスト	v
1. はじめに	1-1
2. 窒化物粒子充填燃料炉心の制御棒価値の評価	2. 1-1
2.1 対象炉心	2. 1-1
2.2 制御棒価値の評価	2. 2-1
2.3 最大線出力の評価	2. 3-1
3. 当該炉心のUTOP及びULOF解析	3. 1-1
3.1 炉心動特性解析用の炉心データ設定	3. 1-1
3.2 UTOP解析	3. 2-1
3.3 ULOF解析	3. 3-1
4. まとめ	4-1

表リスト

表2.1-1	炉心仕様	2.1-2
表2.2-1	燃焼計算手法	2.2-6
表2.2-2	燃焼特性	2.2-7
表2.2-3	制御棒価値計算手法	2.2-8
表2.2-4	制御棒設計仕様	2.2-9
表2.2-5	制御棒価値(A炉心、平衡初期)	2.2-10
表2.2-6	制御棒価値(A炉心、平衡末期)	2.2-10
表2.2-7	制御棒価値(B炉心、平衡初期)	2.2-11
表2.2-8	制御棒価値(B炉心、平衡末期)	2.2-11
表2.2-9	制御棒価値(C炉心、平衡初期)	2.2-12
表2.2-10	制御棒価値(C炉心、平衡末期)	2.2-12
表2.2-11	制御反応度収支(A炉心)	2.2-13
表2.2-12	制御反応度収支(B炉心)	2.2-14
表2.2-13	制御反応度収支評価(C炉心)	2.2-15
表2.3-1	最大線出力(A炉心、平衡初期)	2.3-4
表2.3-2	最大線出力(A炉心、平衡末期)	2.3-4
表2.3-3	最大線出力(B炉心、平衡初期)	2.3-5
表2.3-4	最大線出力(B炉心、平衡末期)	2.3-5
表2.3-5	最大線出力(C炉心、平衡初期)	2.3-6
表2.3-6	最大線出力(C炉心、平衡末期)	2.3-6
表2.3-7	各炉心の最大線出力	2.3-7
表3.1-1	各炉心の反応度係数	3.1-5
表3.1-2	各炉心の核動特性データ	3.1-5
表3.1-3	各炉心のホットテストピン設定結果	3.1-6

図リスト

図 2.1-1	対象炉心配置	2.1-3
図 2.2-1	制御棒価値計算体系(全引き抜き)	2.2-16
図 2.2-2	制御棒価値計算体系(粗調整棒全挿入)	2.2-17
図 2.2-3	制御棒価値計算体系(微調整棒全挿入)	2.2-18
図 2.2-4	制御棒価値計算体系(主炉停止系ワンロードスタック)	2.2-19
図 2.2-5	制御棒価値計算体系(後備炉停止系ワンロードスタック)	2.2-20
図 2.2-6	制御棒価値計算体系(粗調整棒半挿入)	2.2-21
図 3.1-1	窒化物燃料の熱伝導度	3.1-7
図 3.1-2	燃料の軸方向メッシュ切り	3.1-8
図 3.1-3	燃料fissile部の相対発熱分布	3.1-9
図 3.2-1	A炉心・UTOP・挿入反応度20φ(1/2)	3.2-4
図 3.2-1	A炉心・UTOP・20φ挿入(2/2)	3.2-5
図 3.2-2	A炉心・UTOP・挿入反応度30φ挿入(1/2)	3.2-6
図 3.2-2	A炉心・UTOP・30φ挿入(2/2)	3.2-7
図 3.2-3	A炉心・UTOP・挿入反応度40φ(1/2)	3.2-8
図 3.2-3	A炉心・UTOP・40φ挿入(2/2)	3.2-9
図 3.2-4	B炉心・UTOP・挿入反応度20φ(1/2)	3.2-10
図 3.2-4	B炉心・UTOP・20φ挿入(2/2)	3.2-11
図 3.2-5	B炉心・UTOP・挿入反応度30φ(1/2)	3.2-12
図 3.2-5	B炉心・UTOP・30φ挿入(2/2)	3.2-13
図 3.2-6	B炉心・UTOP・挿入反応度40φ(1/2)	3.2-14
図 3.2-6	B炉心・UTOP・40φ挿入(2/2)	3.2-15
図 3.2-7	C炉心・UTOP・挿入反応度20φ(1/2)	3.2-16
図 3.2-7	C炉心・UTOP・20φ挿入(2/2)	3.2-17
図 3.2-8	C炉心・UTOP・挿入反応度30φ(1/2)	3.2-18
図 3.2-8	C炉心・UTOP・30φ挿入(2/2)	3.2-19
図 3.2-9	C炉心・UTOP・挿入反応度40φ(1/2)	3.2-20
図 3.2-9	C炉心・UTOP・40φ挿入(2/2)	3.2-21
図 3.2-10	D炉心・UTOP・挿入反応度20φ(1/2)	3.2-22
図 3.2-10	D炉心・UTOP・挿入反応度20φ(2/2)	3.2-23
図 3.2-11	D炉心・UTOP・挿入反応度30φ(1/2)	3.2-24
図 3.2-11	D炉心・UTOP・挿入反応度30φ(2/2)	3.2-25
図 3.2-12	D炉心・UTOP・挿入反応度40φ(1/2)	3.2-26
図 3.2-12	D炉心・UTOP・挿入反応度40φ(2/2)	3.2-27

図 3.2-13	UTOPの投入反応度パラメータ計算結果	3.2-28
図 3.3-1	流量コストダウン	3.3-5
図 3.3-2	1\$相当のGEMによる負の反応度挿入	3.3-6
図 3.3-3	A炉心・ULOF・GEM 0.7\$(1/2)	3.3-7
図 3.3-3	A炉心・ULOF・GEM 0.7\$(2/2)	3.3-8
図 3.3-4	A炉心・ULOF・GEM 1\$(1/2)	3.3-9
図 3.3-4	A炉心・ULOF・GEM 1\$(2/2)	3.3-10
図 3.3-5	B炉心・ULOF・GEM 0.7\$(1/2)	3.3-11
図 3.3-5	B炉心・ULOF・GEM 0.7\$(2/2)	3.3-12
図 3.3-6	B炉心・ULOF・GEM 1\$(1/2)	3.3-13
図 3.3-6	B炉心・ULOF・GEM 1\$(2/2)	3.3-14
図 3.3-7	C炉心・ULOF・GEM 1.5\$(1/2)	3.3-15
図 3.3-7	C炉心・ULOF・GEM 1.5\$(2/2)	3.3-16
図 3.3-8	C炉心・ULOF・GEM 1.7\$(1/2)	3.3-17
図 3.3-8	C炉心・ULOF・GEM 1.7\$(2/2)	3.3-18
図 3.3-9	D炉心・ULOF・GEM 0.7\$(1/2)	3.3-19
図 3.3-9	D炉心・ULOF・GEM 0.7\$(2/2)	3.3-20
図 3.3-10	D炉心・ULOF・GEM 1\$(1/2)	3.3-21
図 3.3-10	D炉心・ULOF・GEM 1\$(2/2)	3.3-22
図 3.3-11	各炉心でのULOF時の必要GEM反応度	3.3-23

1. はじめに

窒化物燃料は、その高密度、高熱伝導度などの特性により、高性能で且つ受動的安全性を有する炉心燃料として有望と考えられる。もんじゅ高度化炉心として窒化物粒子充填燃料を採用した場合、燃料粒子の充填密度や、燃料要素径、ボンド材の種類などにより、その制御棒反応度収支や線出力等の炉心特性が異なるが、その結果、事故時の安全特性が大きく異なることが考えられる。本解析では、これらの炉心特性に加え、UTOF（スクラム失敗を伴う反応度挿入事象）、ULOF（スクラム失敗を伴う冷却材流量喪失事象）時の安全解析を行い、各種窒化物粒子充填燃料を用いたもんじゅ高度化炉心の特性を評価した。

2. 窒化物粒子充填燃料炉心の制御棒価値の評価

最初に、窒化物粒子充填燃料を炉心燃料として採用した3種のもんじゅ炉心の制御棒価値を評価した。

2. 1 対象炉心

評価対象とする炉心は以下の3種類とした。本炉心は後述の安全解析の対象としても用いた。

炉心 A. Na ボンド窒化物粒子充填燃料, 充填率 50%

炉心 B. Na ボンド窒化物粒子充填燃料, 充填率 70%

炉心 C. He ボンド窒化物粒子充填燃料, 充填率 80%

これら3ケースの炉心の基本仕様を表2. 1-1に示す。(同表においてそれぞれA. Na/50%充填, B. Na/70%充填, C. He/80%充填と表記した。)

炉心Aは燃料集合体当たりのピン本数が31ピン、炉心Bは61ピン、炉心Cは91ピンであり、炉心高さ、集合体数が同じなので、線出力はこの順で大きくなる。

また、炉心配置(径ブランケット位置までの範囲)を図2. 1-1に示す。本炉心は、3炉心とも炉心高さが103cmで、軸ブランケット、径ブランケットは無く、各々ガスペナム、SUSしゃへい体となるが、ブランケット無しであっても、窒化物燃料を用いているため炉心特性は極端に悪くなることはない。

なお、炉心第1列の6体は特殊燃料集合体を想定しているが、ここでは構造材と冷却材をモデル化した。

表 2. 1-1 炉心仕様

	もんじゅ				
	現行(169本)	高度化(127本)	窒化物粒子充填燃料		
	高燃炉心	H 8	A.Na/50%充填	B.Na/70%充填	C.He/80%充填
径方向ブランケットの有無	有	無	無	無	無
熱出力(MWt)	714	714	714	714	714
電気出力(MWe)	280	280	280	280	280
現行炉心に対する出力比 (%)	100	100	100	100	100
内側燃料集合体数(体)	108	102	102	102	102
外側燃料集合体数(体)	90	90	90	90	90
炉心燃料集合体数(体)	198	192	192	192	192
炉心高さ(cm)	93	103	103	103	103
上部軸ブランケット高さ(cm)	30	0	0	0	0
下部軸ブランケット高さ(cm)	35	9.6	0.0	0.0	0.0
リング数	8	7	4	5	6
ピン本数	169	127	37	61	91
炉心燃料ウラン濃縮度(%)	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
Pu 富化度(%)	23.0/29.9	24.05/29.11	28.20/33.89	21.74/26.27	20.01/24.51
Pu 同位体組成比(注)	基準組成	高次(1)	高次(1)	高次(1)	高次(1)
ペレット or 粒子密度(%TD)	85	95	95	95	95
スミア密度(%TD)	80.18	80.64	47.50	66.50	76.00
燃料中心空孔径(mm)	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0
ペレット or 燃料外径(mm)	5.4	6.64	13.25	10.2	8.19
ペレット or 燃料高さ(mm)	8	10	1030	1030	1030
ギャップ(mm)	0.16	0.16	0	0	0
被覆管内径(mm)	5.56	6.8	13.25	10.2	8.19
被覆管肉厚(mm)	0.47	0.5	0.97	0.97	0.60
被覆管外径(mm)	6.5	7.8	15.2	11.7	9.40
ピン配列ピッチ(mm)	7.866	9.151	16.940	13.261	10.891
P/D(°)	1.210	1.173	1.114	1.133	1.159
P/R(°)	0.0809	0.0900	0.1072	0.1095	0.1082
ワイヤ外径(mm)	1.32	1.3	1.68	1.50	1.43
ワイヤ巻付ピッチ(mm)	307	196	196	196	196
集合体配列ピッチ(mm)	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6
ラツバ管内対面距離(mm)	104.6	105.6	106.7	106.7	106.7
ラツバ管肉厚(mm)	3.0	2.7	2.7	2.7	2.7
集合体間ギャップ(mm)	5.0	4.6	3.5	3.5	3.5
ピン有効長(mm)	2750	2337	2337	2337	2337
燃料体積比(%)	0.3344	0.3383	0.2094	0.2864	0.3152
構造材体積比(%)	0.2466	0.2279	0.2347	0.2337	0.2320
ナトリウム体積比(%)	0.3988	0.3735	0.5558	0.4799	0.3533
ボイド体積比(%)	0.0201	0.0603	0.0000	0.0000	0.0995
燃料実効体積比(%)	0.2843	0.3214	0.2094	0.2864	0.3152
サイクル長さ×バッチ数	148×5	183×5/6/7	179×7/8/9	245×7/8/9	365×5/6/7
燃焼欠損反応度(%Δk/kk')	2.83	2.89	3.57	2.94	3.60
最大線出力(W/cm)	358	471	1650	975	640
増殖比(k)	1.08	0.75	0.6	0.76	0.8
取出平均燃焼度(MWD/t)	83,000	102,200	150,300	150,200	149,900
高速中性子照射量 (10 ²³ nvt)	2.13	2.47	3.63	4.59	4.79
冷却材ボイド反応度 (β)	2.7	3.8	2.99	4.15	4.75
流路面積(mm ²)	3636	3420	3064	3194	3398
濡れ線長さ(mm)	4514	3997	2332	2899	3466
等価直径(mm)	3.22	3.42	5.26	4.41	3.92
集合体断面積(mm ²)	11573	11573	11573	11573	11573
集合体当りMOXorMN量(kg)	33.7	42.1	27.5	37.6	41.3
ピン当りMOXorMN量(g)	199	332	742	616	454
インベントリ(tonHM)	5.9	7.1	5.0	6.8	7.5
集合体当り総発熱量(MW d)	2464	3798	3640	4975	5464
ピン当り総発熱量(MW d)	14.6	29.9	98.4	81.6	60.0

(注) Pu 同位体組成 (Pu238/239/240/241/242/Am241) 基準組成: 0/58/24/14/4/0, 高次(1): 3/52/27/9.5/7/1.5

本解析にあたっては「高次(1)」の同位体組成を使用した。

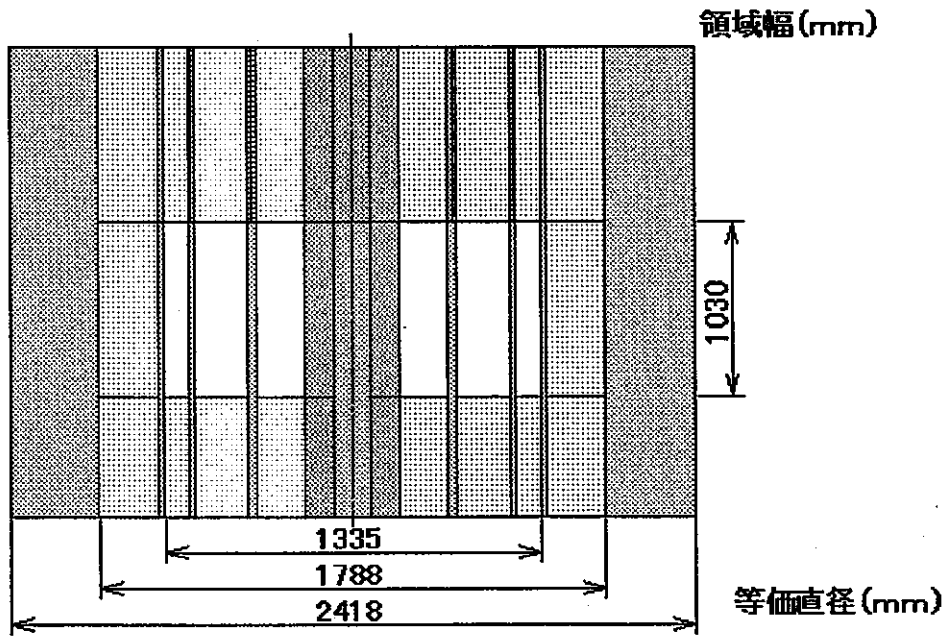
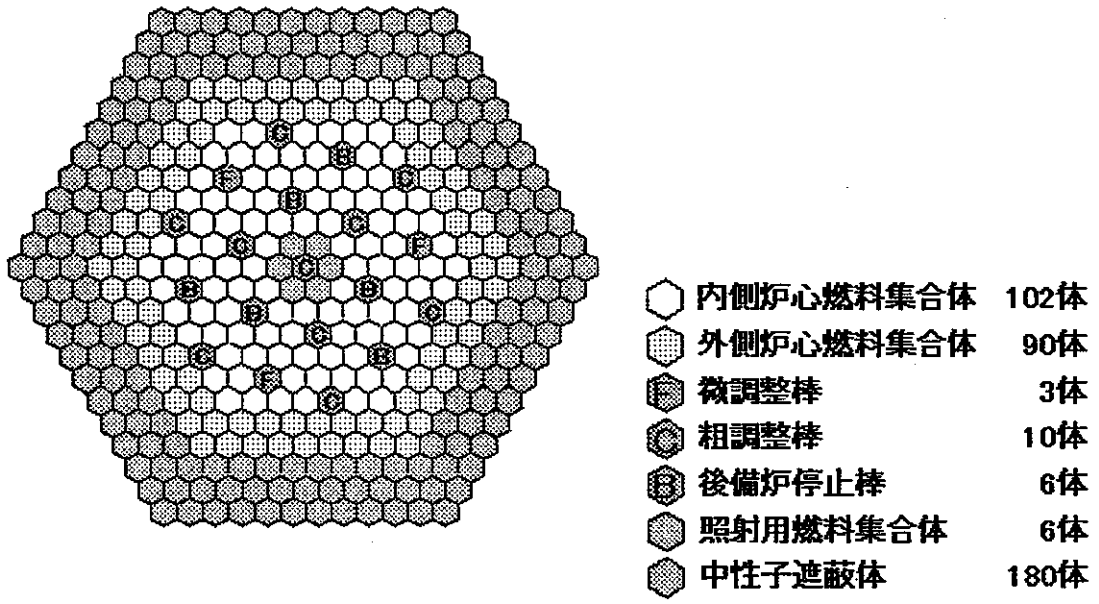


図2. 1-1 対象炉心配置

2. 2 制御棒価値の評価

3次元3角メッシュ拡散計算により、平衡サイクルの燃焼組成を用いた拡散計算を行い、制御棒価値を評価した。その際、制御棒濃縮度はもんじゅ炉心の反応度収支成立性の考え方により設定した。即ち、2. 1節で示した炉心仕様の燃焼欠損反応度を評価し、反応度収支が成立するよう制御棒濃縮度を設定した。この条件下で、各制御棒系の制御棒価値を評価した。

(1) 燃焼特性評価

収支を評価するため、各炉心の燃焼欠損反応度及び燃焼特性を表2. 2-1に示す2次元燃焼拡散計算で評価した。その際、プルトニウム富化度は表2. 1-1に示す値を用いた。

結果を表2. 2-2に示す。

この表の燃焼反応度を用いて各炉心の制御棒必要反応度を評価した。

(2) 制御棒価値評価条件

3炉心に対する制御棒価値を表2. 2-3に示す3次元3角メッシュ拡散計算（全炉心体系模擬）により評価した。

対象炉心状態は平衡サイクル初期及び末期とし、以下の6制御棒状態に対し拡散計算を行い、全引抜き時との比較により制御棒価値を求めた。

1. 全引抜き
2. 粗調整棒全挿入
3. 微調整棒全挿入
4. 主炉停止系ワンロッドスタック
5. 後備炉停止系ワンロッドスタック
6. 粗調整棒半挿入

各制御棒挿入パターン図を図2. 2-1～図2. 2-6に示す。

(3) 制御棒仕様

次に制御棒仕様としては、現制御棒仕様に基づき、表 2. 2-4 に示す仕様を採用した。高度化炉心の検討例による予備検討結果では、従来仕様の場合、主炉停止系の反応度値が不足する可能性があったので、B-10 濃縮度を 60% に増加した仕様とした。

即ち、主炉停止系制御棒は従来、B-10 濃縮度が 39% であったが、燃焼反応度が 1% 以上増大したため、60% とした。また、スタック有効長も 800 mm から炉心高さと同じ 1030 mm に増大した。スタック有効長の増大により引き抜き時の吸収体位置が集合体頂部より飛び出す可能性があるが、本炉心は軸ブランケットがないため、有効長の増大によっても、引き抜き位置の問題は生じないものと判断した。

(4) 制御棒価値

以上の条件による制御棒価値評価結果を下表に示す。

表 2. 2-5 制御棒価値 (A 炉心、平衡初期)

表 2. 2-6 制御棒価値 (A 炉心、平衡末期)

表 2. 2-7 制御棒価値 (B 炉心、平衡初期)

表 2. 2-8 制御棒価値 (B 炉心、平衡末期)

表 2. 2-9 制御棒価値 (C 炉心、平衡初期)

表 2. 2-10 制御棒価値 (C 炉心、平衡末期)

各表で、補正係数は、「もんじゅ」高中性子束炉心の解析 (1) - 「もんじゅ」高度化炉心設計研究 - (1998 年 3 月) と同様、C/E 補正として、0.95、非均質効果補正として 0.90 を見込んで設定した。また、設計余裕も同様に最小値 - 10%、最大値 + 10% を見込んで設定した。

(5) 制御棒反応度収支

(1) で評価した各炉心の燃焼反応度を反映し、必要反応度価値を求め、制御棒価値と比較することで、反応度収支を評価した。(4) の結果では、制御棒価値にサイクル初期と末期の差は小さい。従って、余剰反応度の大きいサイクル初期の制御棒価値を用いて反応度収支を評価した。

結果を下記表に示す。

表 2. 2-1 1 反応度収支評価 (炉心A)

表 2. 2-1 2 反応度収支評価 (炉心B)

表 2. 2-1 3 反応度収支評価 (炉心C)

各表で、制御棒価値の最小値が、必要反応度の最大値より大きいので、上記(3)の制御棒仕様により、反応度収支が満足できる見通しである。

但し、ヘリウムボンド燃料のC炉心は、運転サイクル長が1年で、他の炉心の2倍であるため、内部増殖比が大きいにも拘わらず、燃焼反応度欠損が大きく、一部収支に余裕がない。即ち、表 2. 2-1 3 に示すように、C炉心で粗調整棒、主炉停止系制御棒の収支を成立させるためには、炉停止余裕を $1\% \Delta \rho$ まで低減し、更に炉の反応度誤差吸収を 0.5% 削減することも想定する必要がある。但し、炉停止余裕は本来の制限に戻しただけであり、また、炉の反応度誤差吸収は出力運転経験の蓄積により大きく低減することが可能なので、C炉心でも成立見通しがある。

表 2. 2 - 1 燃焼計算手法

項目	条件
・核断面積ライブラリ	JENDL-3.2
燃焼計算	二次元RZ拡散燃焼モデル 拡散係数:等方拡散係数 カレント重み (STANBREコード) (燃料の分散装荷方式を模擬。 制御棒位置は全数引き抜き位置。)
・エネルギー群数	7群
・原子数密度計算温度	冷却材以外:20°C 冷却材:定格炉心平均
・計算体系寸法計算温度	20°C
プルトニウム富化度	表2.1-1記載値

表 2. 2 - 2 燃焼特性

項目	炉心A	炉心B	炉心C
プルトニウム富化度[wt%] 内側炉心/外側炉心	28. 20/33. 89	21. 74/26. 27	20. 01/24. 51
燃焼反応度[% Δk/kk ²]	4. 08	3. 55	4. 43
増殖比 (MOEC) 合計	0. 588	0. 730	0. 766
最大線出力[W/cm] (2次元計算概算値)	1717	990	656
平均燃焼度[万 MWd/t]	16. 4	16. 3	16. 2

表 2. 2 - 3 制御棒価値計算手法

項目	条件
・核断面積ライブラリ	JENDL-3.2
解析手法	3次元三角メッシュ拡散計算 拡散係数:等方拡散係数 (CITATIONコード)
・エネルギー群数	7群
組成	表2.1-1記載の燃焼計算結果による平衡サイクル初期及び末期組成

表 2. 2 - 4 制御棒設計仕様

項目	仕様	備考(従来値)
1) 微調整棒、粗調整棒		
a) 中性子吸収材	B ₄ C	
b) ¹⁰ B 濃縮度 (wt%)	60	39
c) B ₄ C ペレット密度 (%TD)	95	
d) B ₄ C ペレット外径 (mm)	12. 2	
e) 被覆管 外径/内径 (mm)	16. 9/12. 9	
f) 吸収体要素数 (本)	19	
g) 吸収体スタック長 (mm)	1030	800
h) 被覆管材質	SUS	
i) 体積比		
① 吸収材 (%)	19. 2	
② 構造材 (%)	30. 1	
③ 冷却材 (%)	48. 5	
④ ボイド (%)	2. 2	
2) 後備炉停止棒		
a) 中性子吸収材	B ₄ C	
b) ¹⁰ B 濃縮度 (wt%)	90	
c) B ₄ C ペレット密度 (%TD)	95	
d) B ₄ C ペレット外径 (mm)	14. 2	
e) 被覆管 外径/内径 (mm)	16. 9/14. 9	
f) 吸収体要素数 (本)	19	
g) 吸収体スタック長 (mm)	1030	930
h) 被覆管材質	SUS	
i) 体積比		
① 吸収材 (%)	26. 0	
② 構造材 (%)	22. 9	
③ 冷却材 (%)	48. 5	
④ ボイド (%)	2. 6	

表 2. 2-5 制御棒価値 (A炉心 平衡初期)

制御棒状態	実効増倍率	制御棒価値 (% $\Delta\rho$)	補正係数	最大値 (% $\Delta\rho$)	公称値 (% $\Delta\rho$)	最小値 (% $\Delta\rho$)
全引抜き	1.01128					
粗調整棒全挿入	0.90967	11.05	0.86	10.39	9.44	8.50
微調整棒全挿入	0.97898	3.26	0.86	3.07	2.79	2.51
主炉停止系 ワンロッドスタック	0.89236	13.18	0.86	12.39	11.27	10.14
後備炉停止系 ワンロッドスタック	0.94159	7.32	0.86	6.88	6.26	5.63
粗調整棒半挿入	0.96277	4.98	0.86	4.69	4.26	3.83

表 2. 2-6 制御棒価値 (A炉心 平衡末期)

制御棒状態	実効増倍率	制御棒価値 (% $\Delta\rho$)	補正係数	最大値 (% $\Delta\rho$)	公称値 (% $\Delta\rho$)	最小値 (% $\Delta\rho$)
全引抜き	0.97419					
粗調整棒全挿入	0.87594	11.51	0.86	10.83	9.84	8.86
微調整棒全挿入	0.94290	3.41	0.86	3.20	2.91	2.62
主炉停止系 ワンロッドスタック	0.85913	13.75	0.86	12.93	11.75	10.58
後備炉停止系 ワンロッドスタック	0.90702	7.60	0.86	7.15	6.50	5.85
粗調整棒半挿入	0.92723	5.20	0.86	4.89	4.44	4.00

表2.2-7 制御棒価値(B炉心 平衡初期)

制御棒状態	実効増倍率	制御棒価値 (%Δρ)	補正係数	最大値 (%Δρ)	公称値 (%Δρ)	最小値 (%Δρ)
全引抜き	1.00272					
粗調整棒全挿入	0.91676	9.35	0.86	8.79	8.00	7.20
微調整棒全挿入	0.97553	2.78	0.86	2.61	2.38	2.14
主炉停止系 ワンロッドスタック	0.90128	11.22	0.86	10.56	9.60	8.64
後備炉停止系 ワンロッドスタック	0.94484	6.11	0.86	5.75	5.22	4.70
粗調整棒半挿入	0.96165	4.26	0.86	4.01	3.64	3.28

表2.2-8 制御棒価値(B炉心 平衡末期)

制御棒状態	実効増倍率	制御棒価値 (%Δρ)	補正係数	最大値 (%Δρ)	公称値 (%Δρ)	最小値 (%Δρ)
全引抜き	0.97108					
粗調整棒全挿入	0.88769	9.67	0.86	9.10	8.27	7.44
微調整棒全挿入	0.94467	2.88	0.86	2.71	2.46	2.21
主炉停止系 ワンロッドスタック	0.87263	11.62	0.86	10.93	9.93	8.94
後備炉停止系 ワンロッドスタック	0.91499	6.31	0.86	5.94	5.40	4.86
粗調整棒半挿入	0.93120	4.41	0.86	4.15	3.77	3.39

表2.2-9 制御棒価値(C炉心 平衡初期)

制御棒状態	実効増倍率	制御棒価値 (% $\Delta\rho$)	補正係数	最大値 (% $\Delta\rho$)	公称値 (% $\Delta\rho$)	最小値 (% $\Delta\rho$)
全引抜き	1.00814					
粗調整棒全挿入	0.92619	8.78	0.86	8.25	7.50	6.75
微調整棒全挿入	0.98222	2.62	0.86	2.46	2.24	2.01
主炉停止系 ワンロッドスタック	0.91125	10.55	0.86	9.92	9.02	8.12
後備炉停止系 ワンロッドスタック	0.95273	5.77	0.86	5.43	4.93	4.44
粗調整棒半挿入	0.96877	4.03	0.86	3.79	3.45	3.10

表2.2-10 制御棒価値(C炉心 平衡末期)

制御棒状態	実効増倍率	制御棒価値 (% $\Delta\rho$)	補正係数	最大値 (% $\Delta\rho$)	公称値 (% $\Delta\rho$)	最小値 (% $\Delta\rho$)
全引抜き	0.96872					
粗調整棒全挿入	0.88980	9.16	0.86	8.61	7.83	7.05
微調整棒全挿入	0.94373	2.73	0.86	2.57	2.34	2.10
主炉停止系 ワンロッドスタック	0.87536	11.01	0.86	10.35	9.41	8.47
後備炉停止系 ワンロッドスタック	0.91536	6.02	0.86	5.66	5.14	4.63
粗調整棒半挿入	0.93078	4.21	0.86	3.96	3.60	3.24

表2.2-11 制御反応度収支(A炉心)

単位:% ρ

	主炉停止系									後備炉停止系		
	粗調整棒 9本			微調整棒 3本			主炉停止系ワレットスタック時11本			ワレットスタック時 5本 ^(*)		
	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値
1)出力補償(1) ^(*) 低温0%~30%出力	0.74	0.57	0.40	-	-	-	0.74	0.57	0.40	0.74	0.57	0.40
2)出力補償(2) ^(*) 30%~定格100%出力	-	-	-	0.63	0.49	0.34	0.63	0.49	0.34	0.63	0.49	0.34
3)燃焼補償	4.08	4.08	4.08	-	-	-	4.08	4.08	4.08	-	-	-
4)炉の反応度の誤差吸収	1.0	1.0	1.0	-	-	-	1.0	1.0	1.0	-	-	-
5)運転余裕とバイト	-	-	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	-	-	-
6)炉停止余裕	1.4	1.4	1.4	-	-	-	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
制御すべき反応度の合計	7.22	7.05	6.88	0.93	0.79	0.64	8.15	7.98	7.81	2.77	2.45	2.14
制御棒反応度価値 ^(**)	10.39	9.44	8.50	3.07	2.79	2.51	12.39	11.27	10.14	6.88	6.26	5.63
備考	<p>*1)最大値、最小値は、標準値に±30%の設計補正 *2)最大値、最小値は標準値に±10%の設計補正。主炉停止系制御棒B-10濃縮度 60wt%、後備炉停止系制御棒B-10濃縮度90wt%。制御棒吸収体長は、主炉停止系および後備炉停止系とも炉心高さと同じの105cm。 *3)調整棒全引抜位置における後備炉停止系ワレットスタックの反応度価値。</p>											

表2. 2-12 制御反応度収支(B炉心)

単位:% ρ

	主炉停止系									後備炉停止系		
	粗調整棒 9本			微調整棒 3本			主炉停止系ワレットスタック時11本			ワレットスタック時 5本 ^{(*)3}		
	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値
1)出力補償(1) ^{(*)1} 低温0%~30%出力	0.74	0.57	0.40	-	-	-	0.74	0.57	0.40	0.74	0.57	0.40
2)出力補償(2) ^{(*)1} 30%~定格100%出力	-	-	-	0.63	0.49	0.34	0.63	0.49	0.34	0.63	0.49	0.34
3)燃焼補償	3.55	3.55	3.55	-	-	-	3.55	3.55	3.55	-	-	-
4)炉の反応度の誤差吸収	1.0	1.0	1.0	-	-	-	1.0	1.0	1.0	-	-	-
5)運転余裕とバイト	-	-	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	-	-	-
6)炉停止余裕	1.4	1.4	1.4	-	-	-	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
制御すべき反応度の合計	6.69	6.52	6.35	0.93	0.79	0.64	7.62	7.45	7.28	2.77	2.45	2.14
制御棒反応度価値 ^{(*)2}	8.79	8.00	7.20	2.61	2.38	2.14	10.56	9.60	8.64	5.75	5.22	4.70
備考	<p>*1)最大値、最小値は、標準値に±30%の設計補正</p> <p>*2)最大値、最小値は標準値に±10%の設計補正。主炉停止系制御棒B-10濃縮度 60wt%、後備炉停止系制御棒B-10濃縮度90wt%。制御棒吸収体長は、主炉停止系および後備炉停止系とも炉心高さ同一の105cm。</p> <p>*3) 調整棒全引抜位置における後備炉停止系ワレットスタックの反応度価値。</p>											

表2.2-13 制御反応度収支(C炉心)

単位:% ρ

	主炉停止系									後備炉停止系		
	粗調整棒 9本			微調整棒 3本			主炉停止系ワレットスタック時11本			ワレットスタック時 5本 ^{(*)3}		
	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値
1)出力補償(1) ^{(*)1} 低温0%~30%出力	0.74	0.57	0.40	-	-	-	0.74	0.57	0.40	0.74	0.57	0.40
2)出力補償(2) ^{(*)1} 30%~定格100%出力	-	-	-	0.63	0.49	0.34	0.63	0.49	0.34	0.63	0.49	0.34
3)燃焼補償	4.43	4.43	4.43	-	-	-	4.43	4.43	4.43	-	-	-
4)炉の反応度の誤差吸収	0.5	1.0	1.0	-	-	-	1.0	1.0	1.0	-	-	-
5)運転余裕とバイト	-	-	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	-	-	-
6)炉停止余裕	1.0	1.4	1.4	-	-	-	1.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
制御すべき反応度の合計	6.65	7.40	7.23	0.93	0.79	0.64	8.10	8.33	8.16	2.77	2.45	2.14
制御棒反応度価値 ^{(*)2}	8.25	7.50	6.75	2.46	2.24	2.01	9.92	9.02	8.12	5.66	5.14	4.63
備考	<p>*1)最大値、最小値は、標準値に±30%の設計補正</p> <p>*2)最大値、最小値は標準値に±10%の設計補正。主炉停止系制御棒B-10濃縮度 60wt%、後備炉停止系制御棒B-10濃縮度90wt%。制御棒吸収体長は、主炉停止系および後備炉停止系とも炉心高さと同一の105cm。</p> <p>*3)調整棒全引抜位置における後備炉停止系ワレットスタックの反応度価値。</p>											

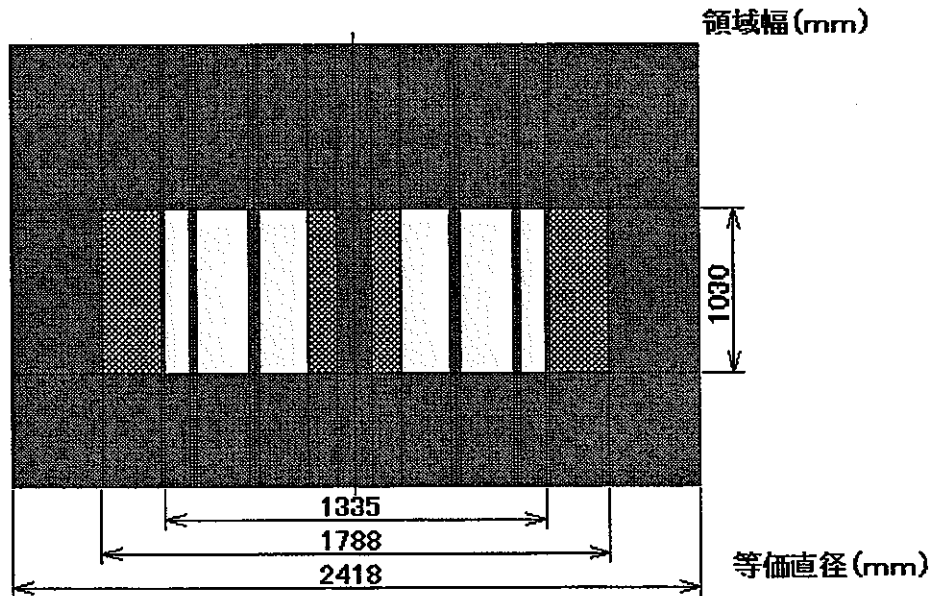
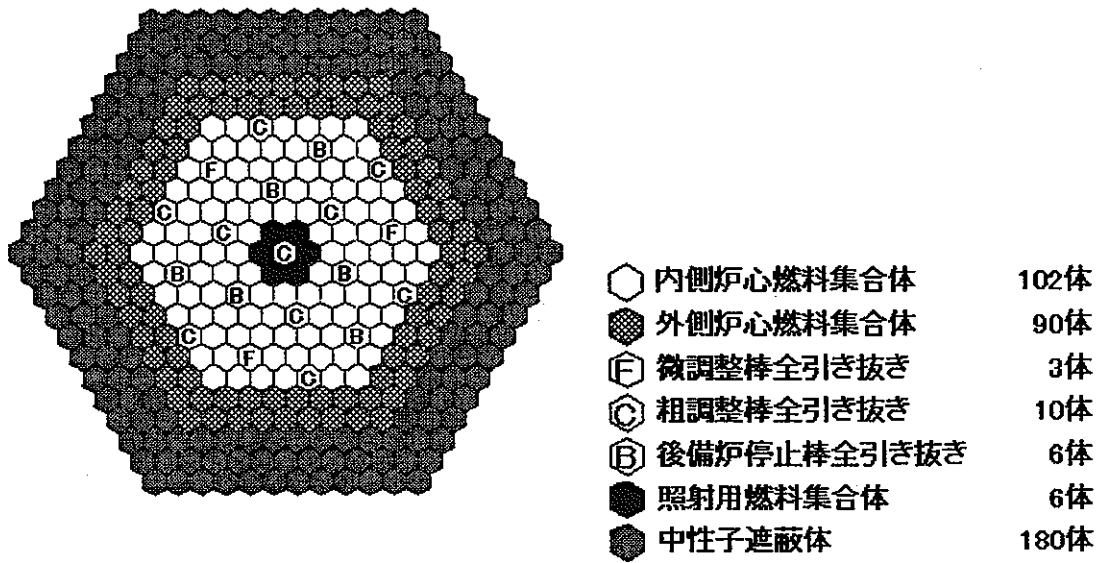


図2. 2-1 制御棒価値計算体系(全引き抜き)

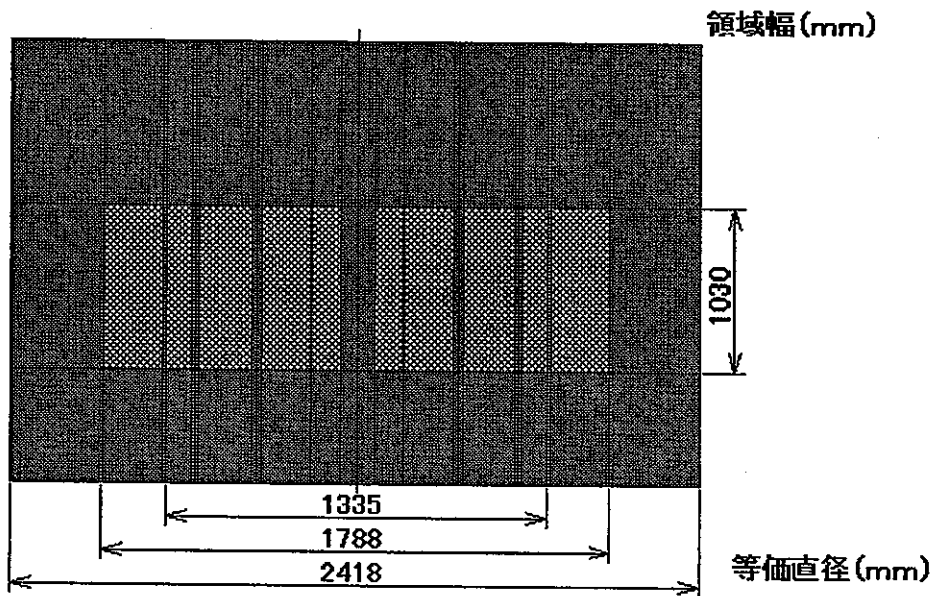
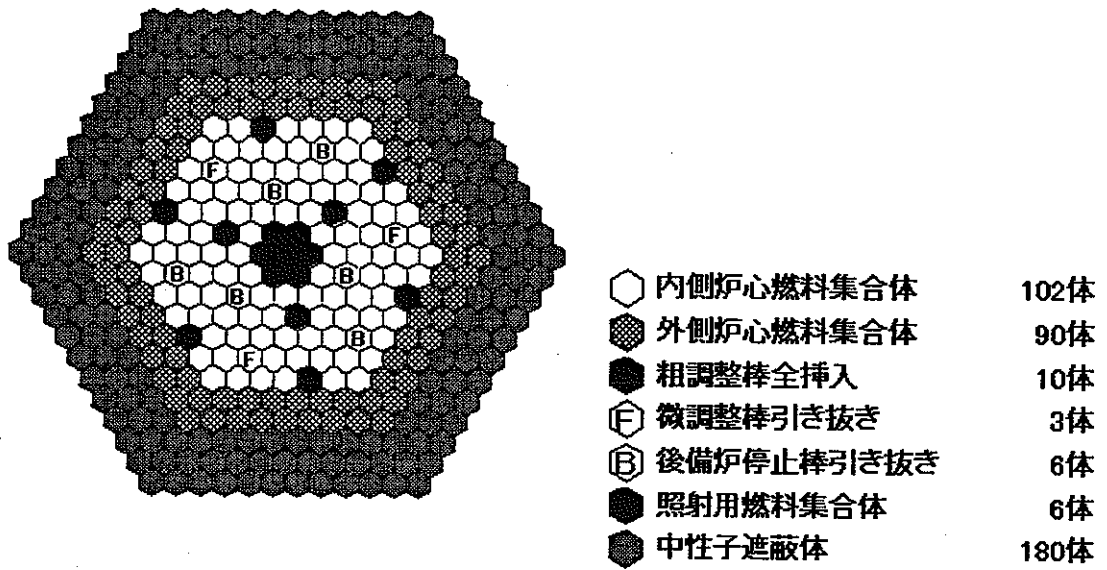
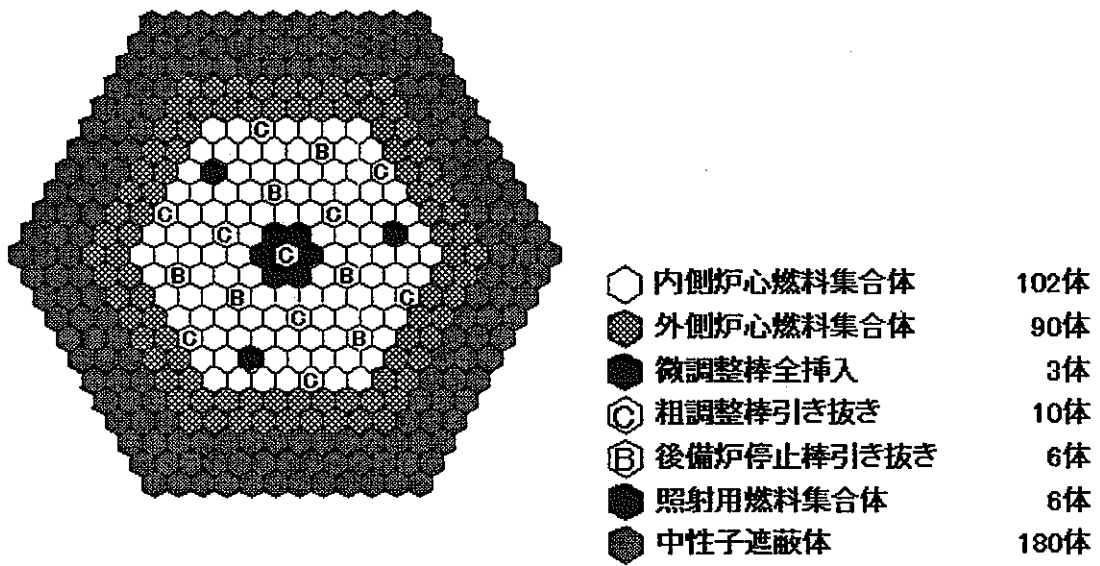
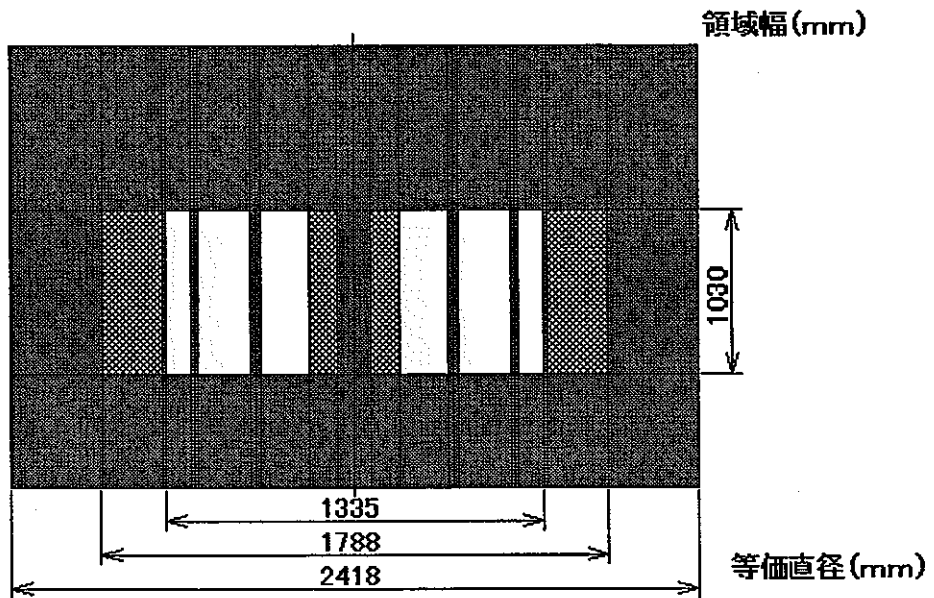


図 2. 2-2 制御棒価値計算体系 (粗調整棒全挿入)



微調整棒全挿入



微調整棒全挿入

図 2. 2-3 制御棒価値計算体系 (微調整棒全挿入)

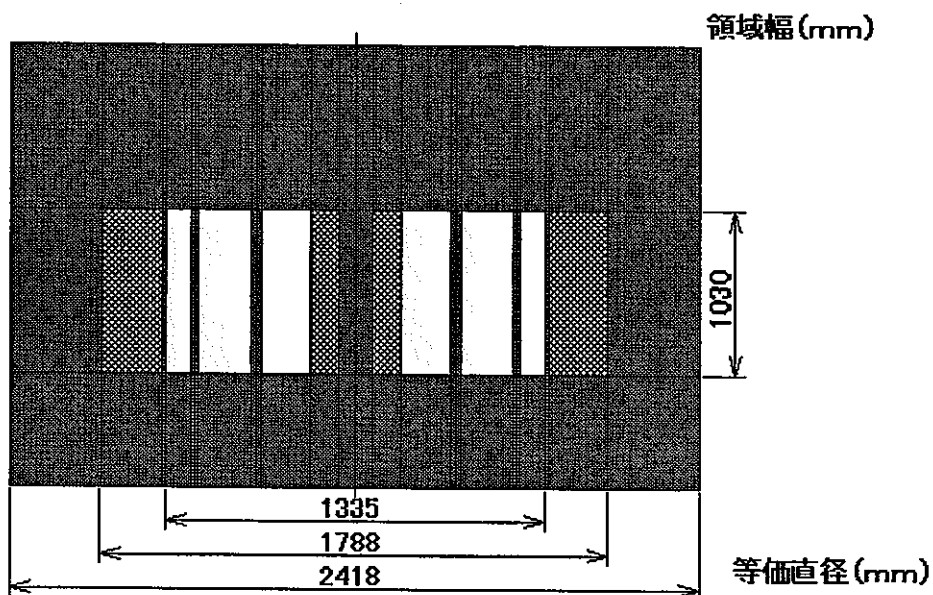
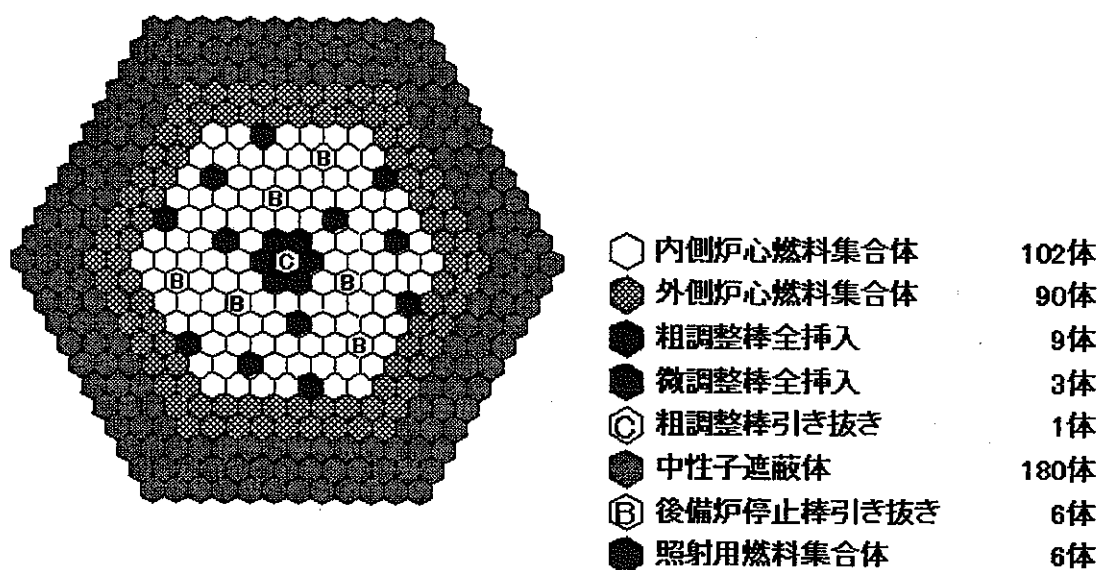
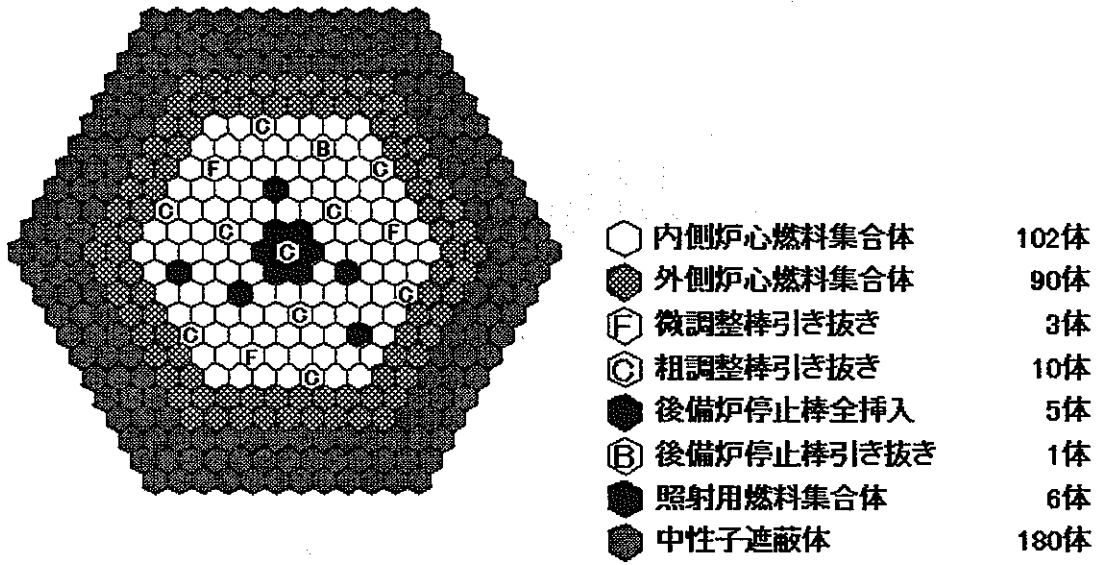
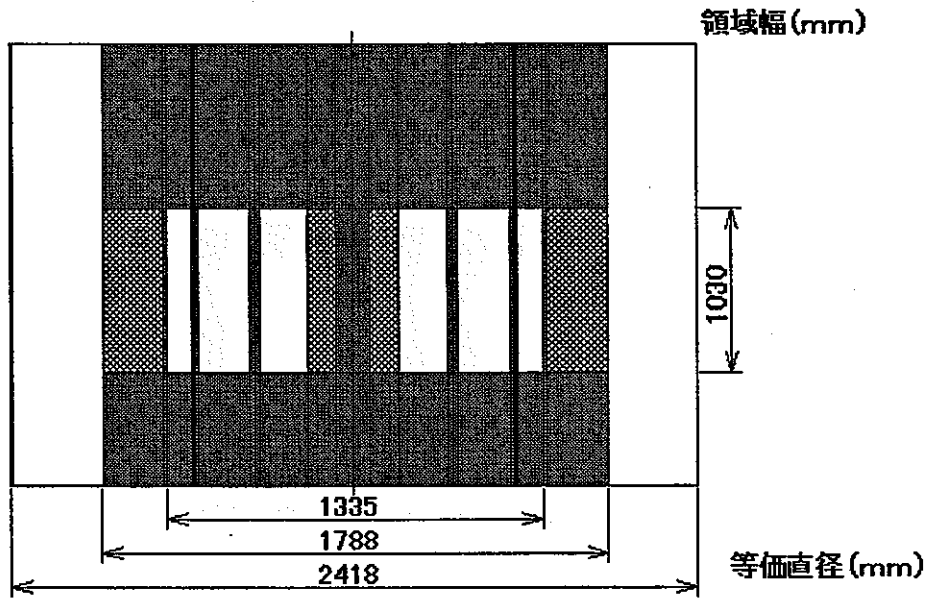


図 2. 2-4 制御棒価値計算体系 (主炉停止系ワンロッドスタック)



後備炉停止棒ワンロッドスタック



後備炉停止棒ワンロッドスタック

図 2. 2-5 制御棒価値計算体系 (後備炉停止系ワンロッドスタック)

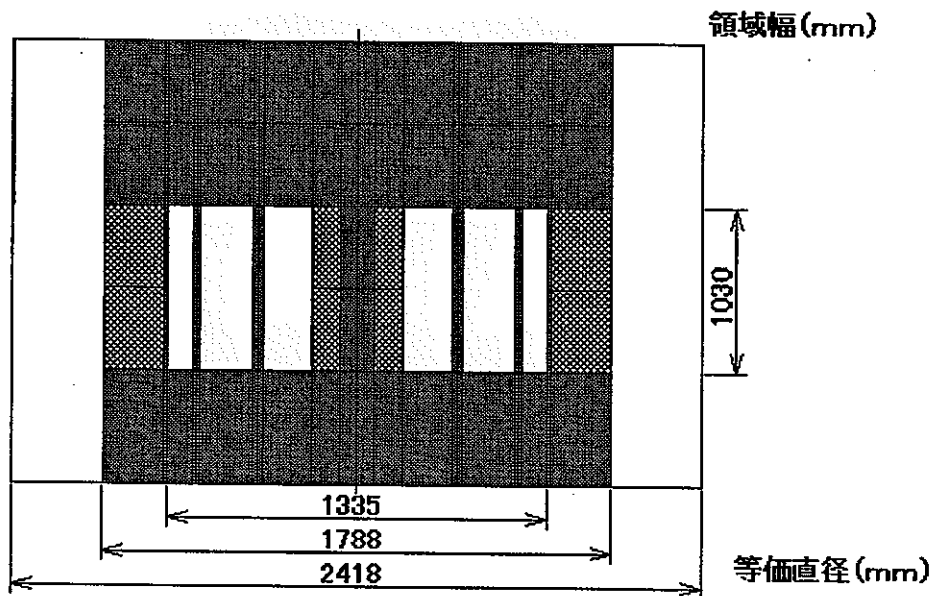
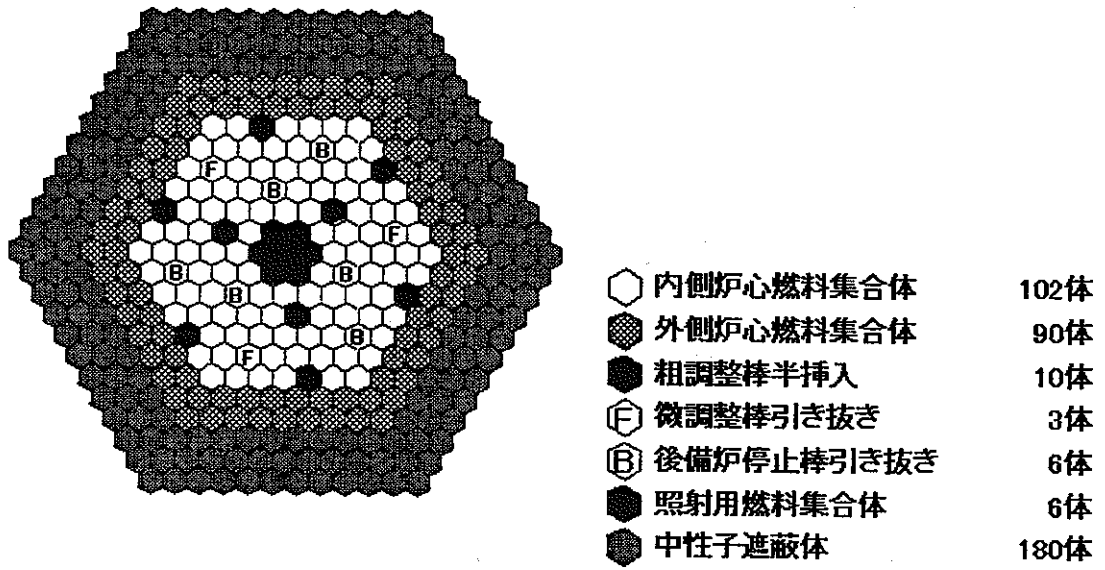


図 2. 2-6 制御棒価値計算体系 (粗調整棒半挿入)

2. 3 最大線出力の評価

3次元3角メッシュ拡散計算により、平衡サイクルの燃焼組成における最大線出力を評価した。その際、制御棒挿入深度はサイクル初期では粗調整棒半挿入、サイクル末期では全引き抜き状態を含めて各種の挿入深度での線出力を評価した。

(1) 最大線出力評価条件

3炉心に対する最大線出力を表2. 2-3に示す3次元3角メッシュ拡散計算（全炉心体系模擬）により評価した。

対象炉心状態は平衡サイクル初期及び末期とし、以下の6制御棒状態に対し拡散計算を行い、全引抜き時との比較により最大線出力を求めた。

1. 全引抜き
2. 粗調整棒全挿入
3. 微調整棒全挿入
4. 主炉停止系ワンロッドスタック
5. 後備炉停止系ワンロッドスタック
6. 粗調整棒半挿入

各制御棒挿入パターン図は図2. 2-1～図2. 2-6に示したものである。

このうち、サイクル初期はケース6の粗調整棒半挿入が、サイクル末期はケース1の全引き抜きが実際の条件に近いが、ここでは、挿入深度の影響などを評価するために、全ケースの計算を行った。

(2) 制御棒仕様

次に制御棒仕様としては、制御棒価値評価に用いた、表2. 2-4に示す仕様を用いた。

(3) 最大線出力

以上の条件による最大線出力計算値を下表に示す。

表 2. 3-1 最大線出力計算値 (A炉心、平衡初期)

表 2. 3-2 最大線出力計算値 (A炉心、平衡末期)

表 2. 3-3 最大線出力計算値 (B炉心、平衡初期)

表 2. 3-4 最大線出力計算値 (B炉心、平衡末期)

表 2. 3-5 最大線出力計算値 (C炉心、平衡初期)

表 2. 3-6 最大線出力計算値 (C炉心、平衡末期)

各表で、換算係数は出力密度を線出力に換算するために、集合体セル面積を集合体のピン数で割った値である。また、燃焼ミスマッチは各領域の新燃料の出力と平均燃焼度燃料の出力の比であり、2次元燃焼計算から求めた。

(4) 最大線出力の評価

以上の結果に基づき、最も実際の制御棒パターンに近い平衡サイクル初期と末期の最大線出力を下表に整理した。

表 2. 3-7 各炉心の最大線出力

即ち、各炉心の最大線出力は以下のようになった。

	サイクル初期	サイクル末期
	(W/cm)	(W/cm)
A炉心	1768	1795
B炉心	1062	1045
C炉心	704	686

但し、本評価は、内外炉心の富化度の最適化や、照射用特殊燃料集合体の出力への寄与、構造材、冷却材の発熱の寄与を考慮していないため、5%程度の過大評価となっており、各炉心の最適化設計における最大線出力は、3章で用いた安全解析用最大線出力（表 2. 1-1 値により A 炉心 1650W/cm、B 炉心 975W/cm、C 炉心 640W/cm）と同程度の値となると考えられる。

表2.3-1 最大線出力(A炉心 平衡初期)

制御棒状態	出力密度		換算係数		燃焼ミスマッチ		最大線出力	
	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心
	(w/cc)	(w/cc)					(w/cm)	(w/cm)
全引抜き	477.0	424.3	3.1278	3.1278	1.213	1.235	1810	1639
粗調整棒全挿入	440.3	463.8	3.1278	3.1278	1.213	1.235	1671	1792
微調整棒全挿入	486.1	451.4	3.1278	3.1278	1.213	1.235	1844	1744
主炉停止系ワンロッド スタック	467.1	496.3	3.1278	3.1278	1.213	1.235	1772	1917
後備炉停止系ワンロッド スタック	542.8	573.8	3.1278	3.1278	1.213	1.235	2059	2216
粗調整棒半挿入	469.8	450.3	3.1278	3.1278	1.213	1.235	1782	1739

表2.3-2 最大線出力(A炉心 平衡末期)

制御棒状態	出力密度		換算係数		燃焼ミスマッチ		最大線出力	
	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心
	(w/cc)	(w/cc)					(w/cm)	(w/cm)
全引抜き	477.0	424.3	3.1278	3.1278	1.203	1.225	1795	1626
粗調整棒全挿入	440.3	463.8	3.1278	3.1278	1.203	1.225	1657	1777
微調整棒全挿入	486.1	451.4	3.1278	3.1278	1.203	1.225	1829	1730
主炉停止系ワンロッド スタック	467.1	496.3	3.1278	3.1278	1.203	1.225	1758	1902
後備炉停止系ワンロッド スタック	542.8	573.8	3.1278	3.1278	1.203	1.225	2042	2199
粗調整棒半挿入	469.8	450.3	3.1278	3.1278	1.203	1.225	1768	1725

表2.3-3 最大線出力(B炉心 平衡初期)

制御棒状態	出力密度		換算係数		燃焼ミスマッチ		最大線出力	
	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心
	(w/cc)	(w/cc)					(w/cm)	(w/cm)
全引抜き	477.5	432.1	1.8972	1.8972	1.161	1.216	1052	997
粗調整棒全挿入	454.9	477.0	1.8972	1.8972	1.161	1.216	1002	1100
微調整棒全挿入	492.9	463.2	1.8972	1.8972	1.161	1.216	1086	1069
主炉停止系ワンロード スタック	484.8	514.2	1.8972	1.8972	1.161	1.216	1068	1186
後備炉停止系ワンロード ドスタック	570.7	594.7	1.8972	1.8972	1.161	1.216	1257	1372
粗調整棒半挿入	480.5	460.3	1.8972	1.8972	1.161	1.216	1058	1062

表2.3-4 最大線出力(B炉心 平衡末期)

制御棒状態	出力密度		換算係数		燃焼ミスマッチ		最大線出力	
	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心
	(w/cc)	(w/cc)					(w/cm)	(w/cm)
全引抜き	476.8	432.5	1.8972	1.8972	1.155	1.207	1045	990
粗調整棒全挿入	455.2	477.7	1.8972	1.8972	1.155	1.207	997	1094
微調整棒全挿入	492.8	463.8	1.8972	1.8972	1.155	1.207	1080	1062
主炉停止系ワンロード スタック	485.2	515.0	1.8972	1.8972	1.155	1.207	1063	1179
後備炉停止系ワンロード ドスタック	571.7	595.5	1.8972	1.8972	1.155	1.207	1253	1364
粗調整棒半挿入	480.6	460.7	1.8972	1.8972	1.155	1.207	1053	1055

表2.3-5 最大線出力(C炉心 平衡初期)

制御棒状態	出力密度		換算係数		燃焼ミスマッチ		最大線出力	
	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心
	(w/cc)	(w/cc)					(w/cm)	(w/cm)
全引抜き	480.2	434.3	1.2718	1.2718	1.13	1.2	690	663
粗調整棒全挿入	459.6	478.6	1.2718	1.2718	1.13	1.2	661	730
微調整棒全挿入	496.0	465.4	1.2718	1.2718	1.13	1.2	713	710
主炉停止系ワンロッド スタック	488.8	515.0	1.2718	1.2718	1.13	1.2	702	786
後備炉停止系ワンロッド ドスタック	573.5	593.9	1.2718	1.2718	1.13	1.2	824	906
粗調整棒半挿入	483.3	461.5	1.2718	1.2718	1.13	1.2	695	704

表2.3-6 最大線出力(C炉心 平衡末期)

制御棒状態	出力密度		換算係数		燃焼ミスマッチ		最大線出力	
	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心	内側炉心	外側炉心
	(w/cc)	(w/cc)					(w/cm)	(w/cm)
全引抜き	481.4	434.3	1.2718	1.2718	1.121	1.189	686	657
粗調整棒全挿入	461.3	478.6	1.2718	1.2718	1.121	1.189	658	724
微調整棒全挿入	497.4	465.3	1.2718	1.2718	1.121	1.189	709	704
主炉停止系ワンロッド スタック	490.8	515.3	1.2718	1.2718	1.121	1.189	700	779
後備炉停止系ワンロッド ドスタック	576.0	594.4	1.2718	1.2718	1.121	1.189	821	899
粗調整棒半挿入	484.8	461.3	1.2718	1.2718	1.121	1.189	691	698

表2.3-7 各炉心の最大線出力

炉心	平衡初期		平衡末期	
	最大線出力		最大線出力	
	内側炉心 (w/cm)	内側炉心 (w/cm)	内側炉心 (w/cm)	外側炉心 (w/cm)
A炉心	1768	1725	1795	1626
B炉心	1058	1062	1045	990
C炉心	695	704	686	657

3. 当該炉心の UTOP 及び ULOF 解析

3.1 炉心動特性解析用の炉心データ設定

(1) 最大線出力の設定

最大線出力は、サイクル機構殿御指定の平衡初期最大値として下記とする。

A 炉心 : 1650 W/cm

B 炉心 : 975 W/cm

C 炉心 : 640 W/cm

D 炉心 : 975 W/cm

ここで、D 炉心とは、仕様書に記載のない炉心形式であるが、追加で評価対象として設定したものであり、燃料の充填率は A 炉心なみの 50% であり、集合体内ピン本数等の幾何形状は B 炉心並み、従って最大線出力は B 炉心並みの 975 W/cm として設定した炉心である。

(2) 反応度係数他

反応度係数は、サイクル機構殿御指定の平衡末期炉心の空間積分の温度係数として、表 3.1-1 に示すものを使用する。

また、核動特性データはサイクル機構殿御指定の表 3.1-2 に示すものを使用する。

(3) 燃料の物性

密度

理論密度は、「原子炉工学講座 NO-4 : 燃・材料 頁 51、表 3.2 各種セラミック燃料の物性値(培風館)」より、14240kg/m³ とする。

熱伝導度

熱伝導度は、ナトリウムボンドとヘリウムボンドとに分けて、サイクル機構殿御指定のものを使用する。

Na ボンド型燃料の熱伝導度

$$KfNa = KMN * f / 100 + KNa * (100 - f) / 100$$

$$KMN = 100 * (0.02519 + 4.771E-5 * T - 1.4227E-8 * T^2) * 418.045 * 0.6 / 100 *$$

$$\{ (1 - (1 - R)) \} / \{ 1 + (1 - R) \} \quad KNa = (0.93978 - 3.2505E-4 * (T * 9 / 5 + 32)) + 3.6192E-$$

8 * (T * 9 / 5 + 32)^2) * 100 ここで、KfNa : 燃料の熱伝導度(W/mK) KMN : 窒化物燃料粒子の熱伝導度(W/mK) KNa : ナトリウムの熱伝導度(W/mK) T : 温度(°C)

R : 粒子の密度 (理論密度比, 本検討では 0.95) (fraction)

f : 粒子の充填率(%)

He ボンド型燃料の熱伝導度

$$KfHe = (Fo + 0.53 * Fs) * KMN$$

$$Fs = Fo * (1 / (1 - Fr) - 1)$$

$$Fo = Fo' \quad (Fo' \geq 0.001 \text{ の場合})$$

$$= 0.001 \quad (Fo' < 0.001 \text{ の場合})$$

$$Fo' = 0.008906 * f + 1.686 * 10^{-5} * T - 0.5668$$

$$Fr = 0.9 \quad (Fr' > 0.9 \text{ の場合})$$

$$= Fr' \quad (0.9 \geq Fr' \geq 0 \text{ の場合})$$

$$= 0 \quad (Fr' < 0 \text{ の場合})$$

$$Fr' = 0.2950 * Lg - 2.384 * Fo + 0.01912 * f + 2.763 * 10^{-5} * T - 0.7217$$

$$KMN = 100 * (0.02519 + 4.771E-5 * T - 1.4227E-8 * T^2) * 418.045 * 0.6 / 100 * ((1 - \{1-R\}) / \{1+(1-R)\})$$

$$Lg = 3.366E-3 * (T + 273.15)^{0.668}$$

ここで、

KfHe : 燃料の熱伝導度(He ボンド)

KMN : 窒化物燃料粒子の熱伝導度(W/mK)

T : 温度 (°C)

R : 粒子の密度 (理論密度比, 本検討では 0.95) (fraction)

Lg : ガスの熱伝導度 (W/mK)

f : 粒子の充填率(%)

窒化物燃料の比熱

$$Cp = \{11.9 + 2.5E-3 * Tk\} * 4.187 * 1000 / 239$$

Cp : 窒化物の比熱(cal/kg/K)

Tk:温度(K)

$$Na \text{ の比熱(cal/g/°C)} = 0.3433 - 1.387 * E-4 * Tc - 1.106 * E-7 * Tc^2$$

Tc:温度(°C)

以上の熱伝導度については、各炉心について、温度依存性を図 3.1-1 に示す。

その他のデータ

その他、判断条件に関連して、サイクル機構殿の御指定により、下記を設定しておく。

Na 沸騰温度 : 996°C

MN 分解温度 : 2390°C

(4)解析条件の設定

想定条件

- (a)UTOP に於いては、反応度挿入はステップ状とする。
- (b)ULOF に於いては、既往の安全解析で得られている流量コストダウンに対して、指定されている流量半減時間 12 秒に合わせるべく調整して、解析上は、炉心流量を入力テーブルで指定する。コストダウン後はポニーモータ引継に相当する 6.7%流量に維持されるとする。

モデル化の考え方

- (a) 原子炉容器の出入口温度は現行の 529/397°Cとする。
- (b) 1 次系流量は 5.12E+6kg/hr、全原子炉流量は 1.536E+7kg/hr(4267kg/sec)とする。
- (c) 評価ピンは、最大線出力相当の発熱かつ冷却材出口温度 610°Cとする。すなわち、冷却材温度が最大のピンの線出力が必ずしも炉心内の最大とは限らないが、このように設定する。
- (d) 熱的には全炉心を 1 チャンネルで模擬する。但し、出口温度を合わせるため、発熱の無いバイパスチャンネルは設定するが、バイパスチャンネルは本質的には評価に無関係である。
- (e) 燃料の軸方向の発熱分布を考慮する。
- (f) 燃料集合体の全長は、現行炉心程度の 4200mm から上下軸方向ブランケット合計の 650mm 程度を差し引いた 3500mm 程度と念頭に置き、発熱部の下部が 1000mm、発熱部の上部が 1400mm とする。(1000+1030+1400=3430)従って、全長は 3430mm とする。軸方向メッシュ分割の概念を図 3.1-2 に示す。
- (g) 燃料ペレットの径方向メッシュ分割は、5 分割とする。燃料の軸方向メッシュ分割は、発熱部 103cm については 10 分割程度とする。非発熱部は下部 1000mm を 5 分割、上部 1400mm を 7 分割程度とする。燃料部分の径方向メッシュ分割の概念を図 3.1-2 に併せて示す。
- (h) 反応度係数については、全炉心積分値を適用し、空間分布は無視する。
なお、燃料の発熱部 103cm 部分の発熱分布形状を図 3.1-3 に示す。

初期状態の設定

ホットテストピンを第 1 チャンネル、炉心平均チャンネルを第 2 チャンネルとする。ホットテストピンは、解析上、1 個の集合体とし、残り 191 体を炉心平均チャンネルとする。

ホットテストピンは、集合体出口ナトリウム温度が 610°C、最大線出力が指定の値を有するピンとするので、解析上は、先ず、軸方向出力分布並びに最大線出力

が所定の値となるような出力分布を指定し、次に流量を調整して(具体的にはホットテストピンの圧損係数を調整する)ナトリウム出口温度が 610℃となるようにする。

このようにし設定されたホットテストピンの主要状態は表 3.1-3 に示す通りである。

バイパスチャンネルには、全原子炉流量の 5%程度を割り振るものと想定し、ホットテストピン、炉心平均チャンネルそしてバイパスチャンネルの混合出口温度が 529℃程度となるよう、バイパスチャンネルの流量(具体的にはバイパスチャンネルの圧損係数を調整する)を調整する。

表 3.1-1 各炉心の反応度係数

項目	A 炉心	B 炉心	C 炉心	D 炉心
ド ッ プ ラ 係 数 (Tdk/k/°C)	-5.89E-3	-5.77E-3	-5.33E-3	-5.77E-3
燃料(dk/k/°C)	-2.75E-6	-2.54E-6	-2.44E-6	-2.54E-6
ナトリウム(dk/k/°C)	5.58E-6	6.55E-6	5.35E-6	6.55E-6
被覆管(dk/k/°C)	8.70E-7	1.23E-6	1.49E-6	1.23E-6
ラッパ管(dk/k/°C)	5.03E-7	5.77E-7	5.78E-7	5.77E-7

(注)D 炉心：充填率 50%、最大線出力 975W/cm、炉心の幾何形状と核特性は B 炉心に同じ

表 3.1-2 各炉心の核動特性データ

項目	A 炉心	B 炉心	C 炉心	D 炉心
実効遅発中性子割合	3.270E-3	3.418E-3	3.469E-3	3.418E-3
実効遅発中性子割合 ・各群				
1	7.020E-5	7.114E-5	7.141E-5	7.114E-5
2	7.224E-4	7.288E-4	7.307E-4	7.288E-4
3	6.046E-4	6.254E-4	6.325E-4	6.254E-4
4	1.195E-3	1.254E-3	1.275E-3	1.254E-3
5	5.350E-4	5.760E-4	5.906E-4	5.760E-4
6	1.425E-4	1.620E-4	1.690E-4	1.620E-4
遅発中性崩壊定数(/sec)	1.295E-2	1.296E-2		
1	3.110E-2	3.119E-2	1.297E-2	1.296E-2
2	1.334E-1	1.341E-1	3.123E-2	3.119E-2
3	3.447E-1	3.458E-1	1.343E-1	1.341E-1
4	1.414	1.409	3.462E-1	3.458E-1
5	3.746	3.788	1.406	1.409
6			3.802	3.788
即発中性子寿命(sec)	5.446E-7	4.310E-7	3.922E-7	4.310E-7

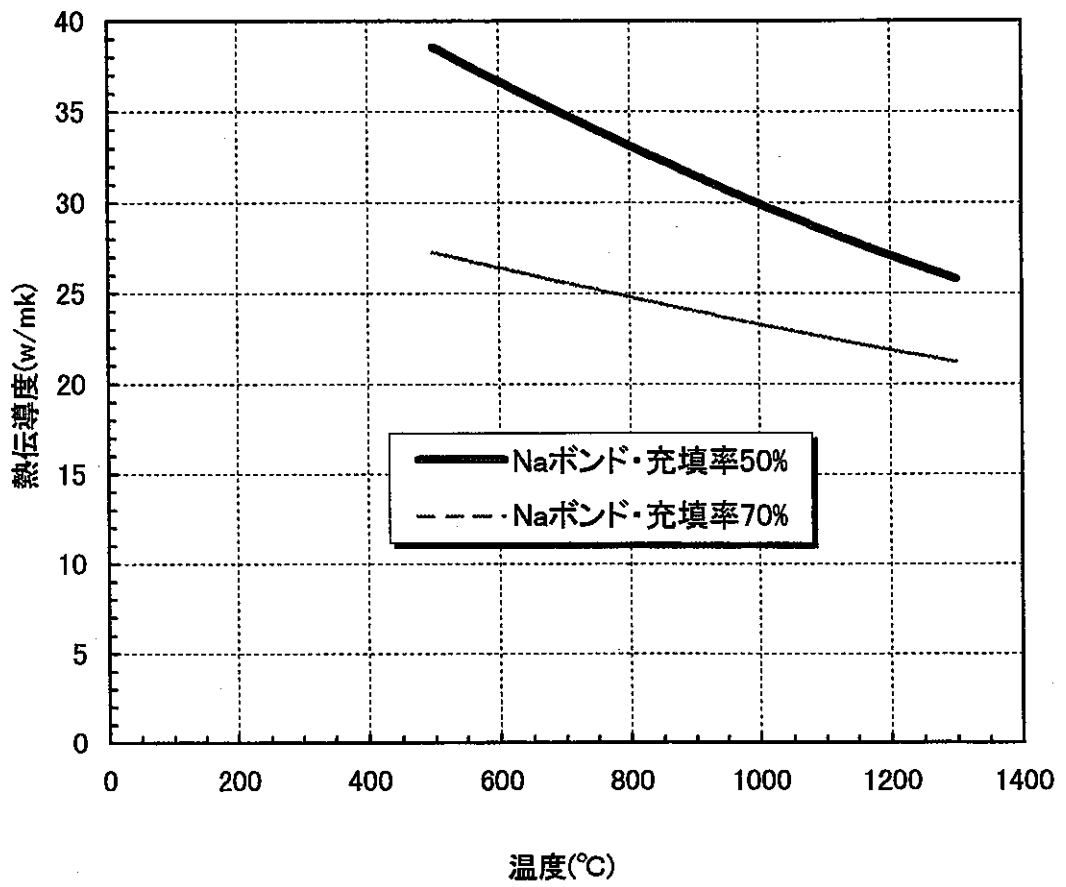
(注)D 炉心の核動特性データは、B 炉心と同一のものを適用した。

表 3.1-3 各炉心のホットテストピン設定結果

項目	A 炉心	B 炉心	C 炉心	D 炉心
仕様	Na ボンド PuN 充填率 50%	Na ボンド PuN 充填率 70%	He ボンド PuN 充填率 80%	Na ボンド PuN 充填率 50%
燃料理論密度比	0.95	0.95	0.95	0.95
PuN 充填率	50%	70%	80%	50%
集合体あたり流量 (kg/sec)	18.418	17.950	17.575	17.950
集合体あたり発熱 (MW)	4.9637	4.8356	4.7352	4.8356
集合体出入口温度	610.3/397	610.2/397	610.2/397	610.2/397
燃料最高温度位置 での状態		(J=10)		(J=11)
線出力(W/cm)	1640.8	969.6	636.4	969.6
Na 温度(°C)	503.5	503.5	503.5	529.6
被覆管肉厚中心温度(°C)	615.4	585.7	552.8	606.4
燃料表面温度(°C)	702.5	653.1	588.0	668.9
燃料中心温度(°C)	1118.4	964.8	1877.8	885.1

(注)最大線出力は各炉心について、1650,975,640W/cm と各々指定しているが、燃料中心温度が最大となる軸方向位置は、線出力最大の位置より 1 メッシュ上方に位置する結果となっており、そのため、線出力が所定の最大線出力より小さめとなっている。燃料中心最高温度が最大線出力位置に出現しないのは、燃料ペレット・被覆管間のギャップという概念の無い充填燃料の特徴と考えられる。

Naボンド窒化物燃料の熱伝導度



ヘリウムボンド・充填率80%

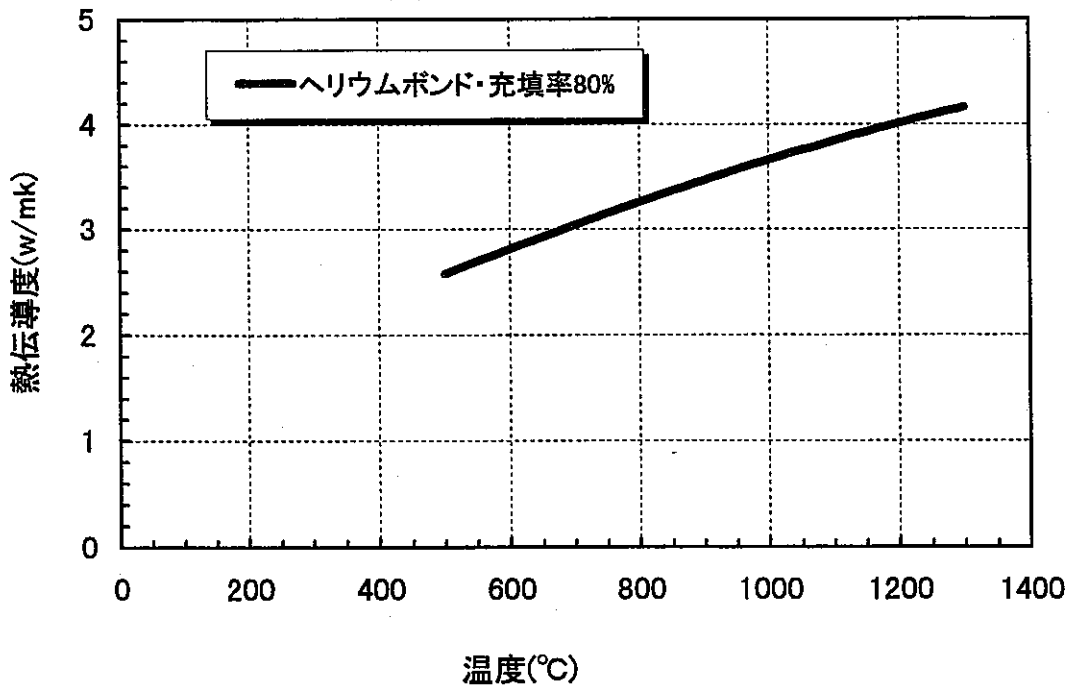


図 3.1-1 窒化物燃料の熱伝導度

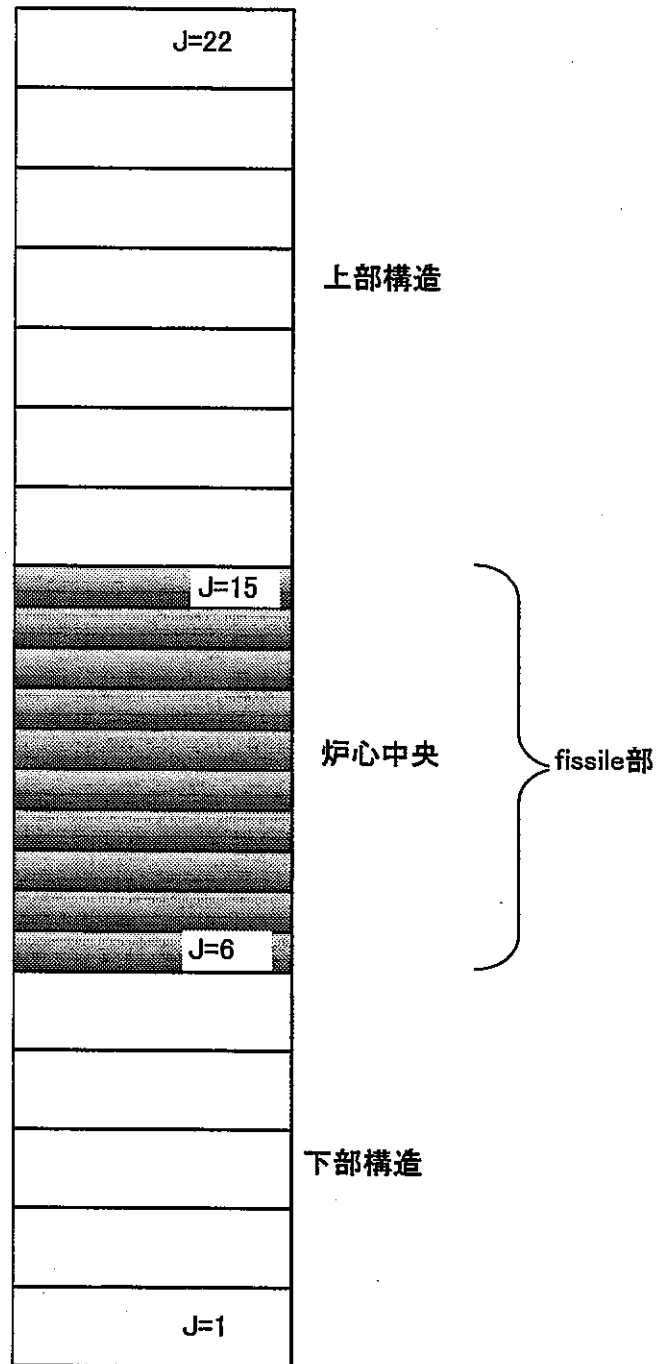


図 3.1-2 燃料の軸方向メッシュ切り

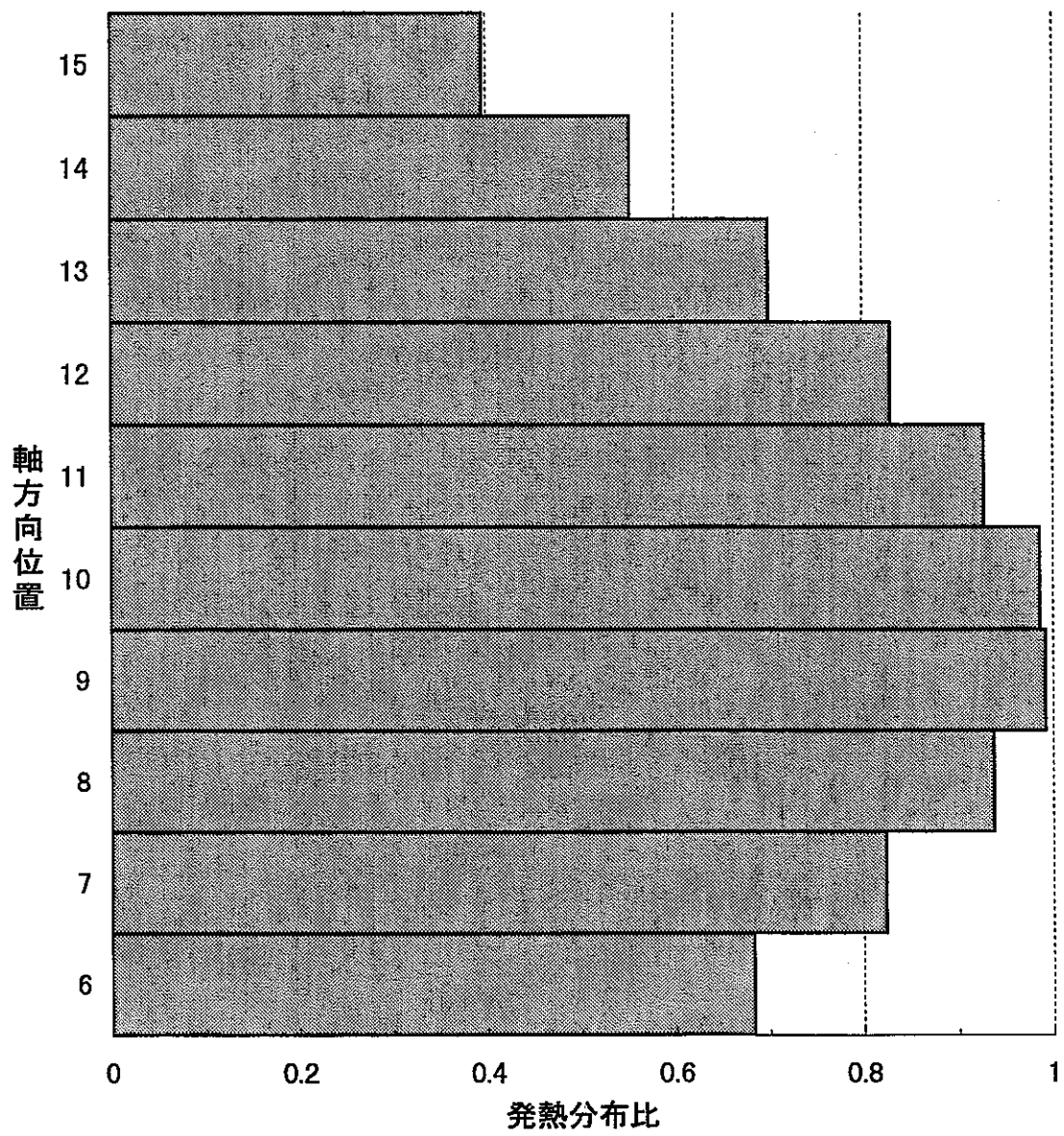


図 3.1-3 燃料fissile部の相対発熱分布

3.2 UTOP 解析

反応度は解析上、ステップ状に指定し、20φ、30φ、40φとパラメータとする。

(1) A炉心

A炉心に対する UTOP 解析結果は図 3.2-1～図 3.2-3 に示す通りである。主要な結果を整理すると下記の通りである。

投入反応度	到達炉出力 (%)	燃料中心最高温度(°C)	燃料中心最高温度の初期状態からの上昇温度(°C)
0φ	100	1118	—
20φ	131	1381	263
30φ	147	1528	410
40φ	163	1687	569

(注)燃料中心最高温度は軸方向 10 番に出現している。

30φ 投入の場合を例にとって過渡挙動を記述しておく。正の反応度投入により、炉出力が上昇し、各部温度が上昇する。これにより、ドップラ、燃料膨張の負の反応度が挿入され、正味の反応度は抑制される。200 程度の時点での反応度バランスは下記となっている。

正味合計	−0.1φ
ドップラ	−25.2φ
燃料	−12.4φ
ナトリウム	5.5φ
構造材	−1.7φ
外乱反応度	30φ

(2) B炉心

B炉心に対する UTOP 解析結果は図 3.2-4～図 3.2-6 に示す通りである。主要な結果を整理すると下記の通りである。

投入反応度	到達炉出力 (%)	燃料中心最高温度(°C)	燃料中心最高温度の初期状態からの上昇温度(°C)
0φ	100	965	—
20φ	145	1239	274
30φ	169	1394	429
40φ	195	1563	598

(3) C炉心

C炉心に対する UTOP 解析結果は図 3.2-7～図 3.2-9 に示す通りである。主要な結果を整理すると下記の通りである。

投入反応度	到達炉出力 (%)	燃料中心最高温度(°C)	燃料中心最高温度の初期状態からの上昇温度(°C)
0φ	100	1878	—
20φ	128	2212	334
30φ	143	2401	523
40φ	160	2612	734

(4) D炉心

この場合、燃料熱伝導度が今回の検討対象炉心の中では最も良好な部類に属しており、かつ線出力を抑え気味にしていることから、燃料中心最高温度が発熱最大部より下流側(上方)に出現する傾向が強くなり、定格時の燃料最高温度が軸方向 11 番の位置(他の炉心では 10 番に出現している)に出現しており、過渡時の最高温度も同一の 11 番の点に出現している。

D炉心に対する UTOP 解析結果は図 3.2-10～図 3.2-12 に示す通りである。主要な結果を整理すると下記の通りである。

投入反応度	到達炉出力 (%)	燃料中心最高温度(°C)	燃料中心最高温度の初期状態からの上昇温度(°C)
0φ	100	885 (J=11)	—
20φ	151	1155	270
30φ	177	1312	427
40φ	206	1485	600

(4) パラメータ解析結果の整理

以上の UTOP パラメータ解析の結果を整理して図 3.2-13 に示す。

ナトリウムボンド炉心については、定格時のナトリウム出口温度を 610°Cとしているが、定格時の燃料中心温度が既に 1118°C(A 炉心)、965°C(B 炉心)と高いため、被覆管内ナトリウムの非沸騰(996°C)という判断条件は満足しない。同じくナトリウムボンド炉心の D 炉心は、定格時の燃料最高温度が 885°Cと非沸騰未満ではあるが、許容投入反応度は小さい。

これらのナトリウムボンド炉心については、窒化物燃料の分解温度 2390°Cという判断条件に関しては、許容投入反応度は 40φを遙かに超えるレベルが可能であ

る。

ヘリウムボンド炉心については、窒化物燃料の分解温度 2390°Cを判断条件とすれば、30%弱程度の反応度投入が許容できる。

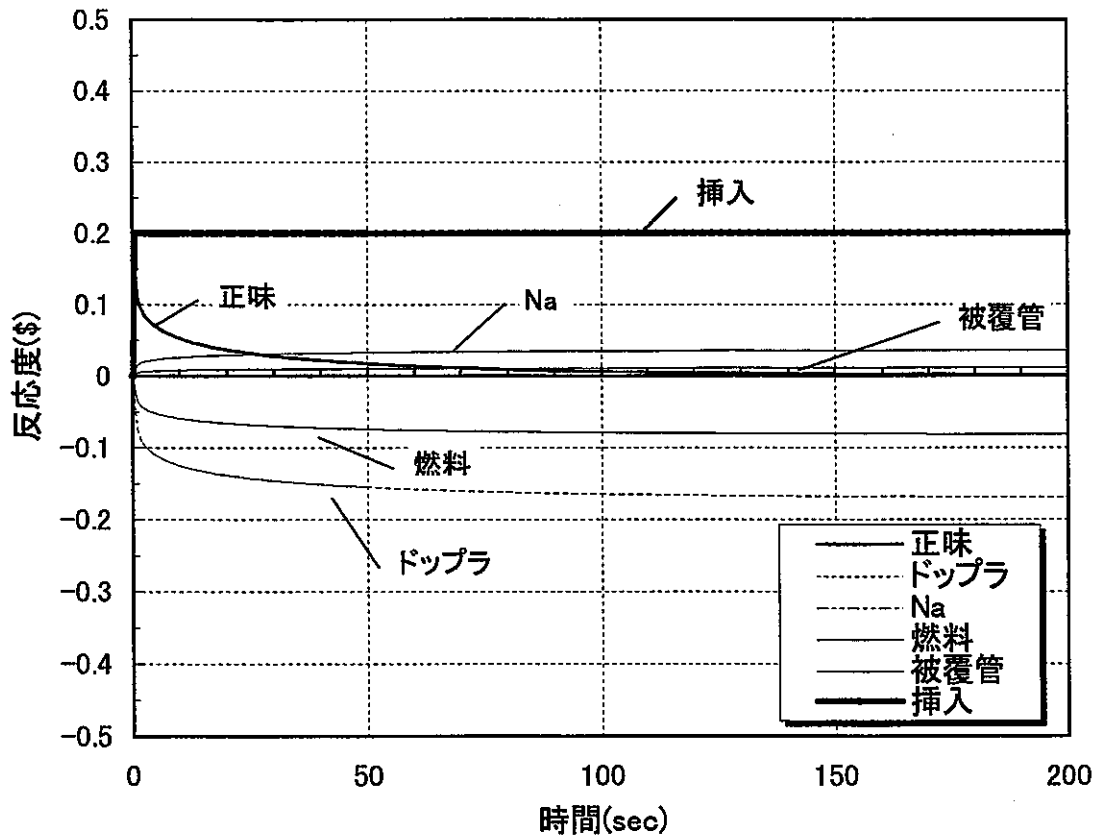
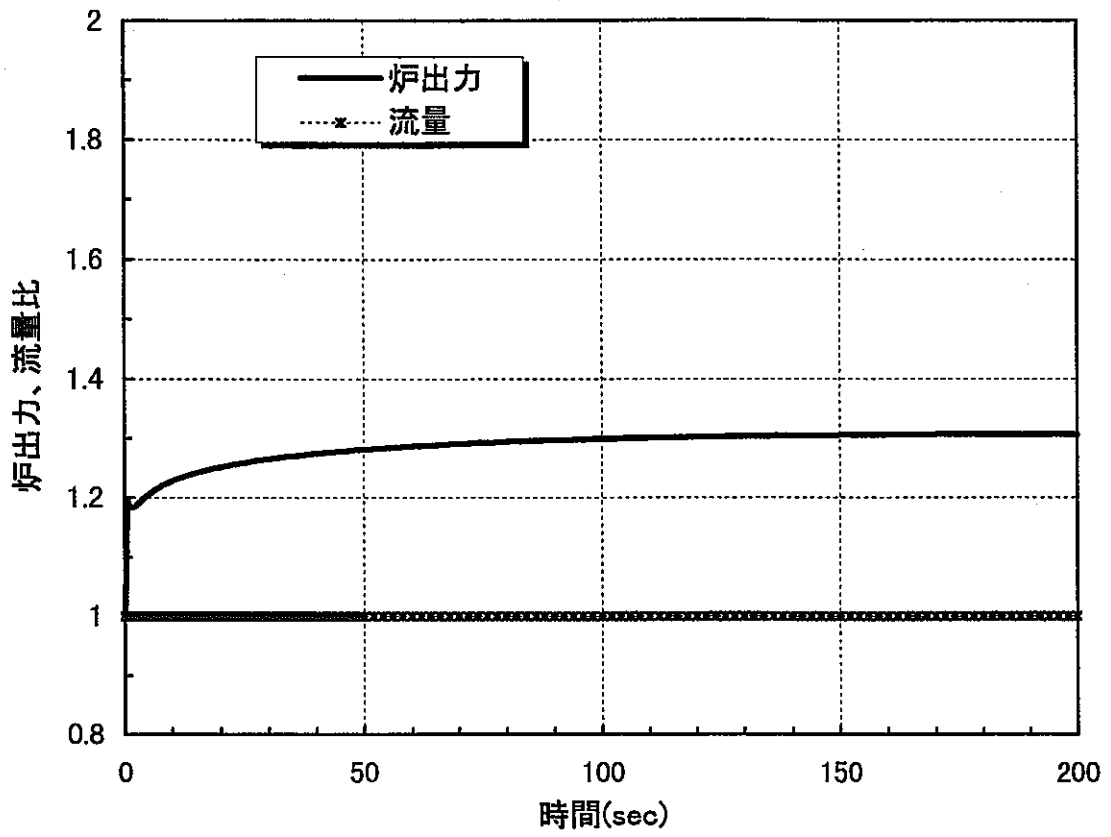


図 3.2-1 A炉心・UTOP・挿入反応度 20ϕ (1/2)

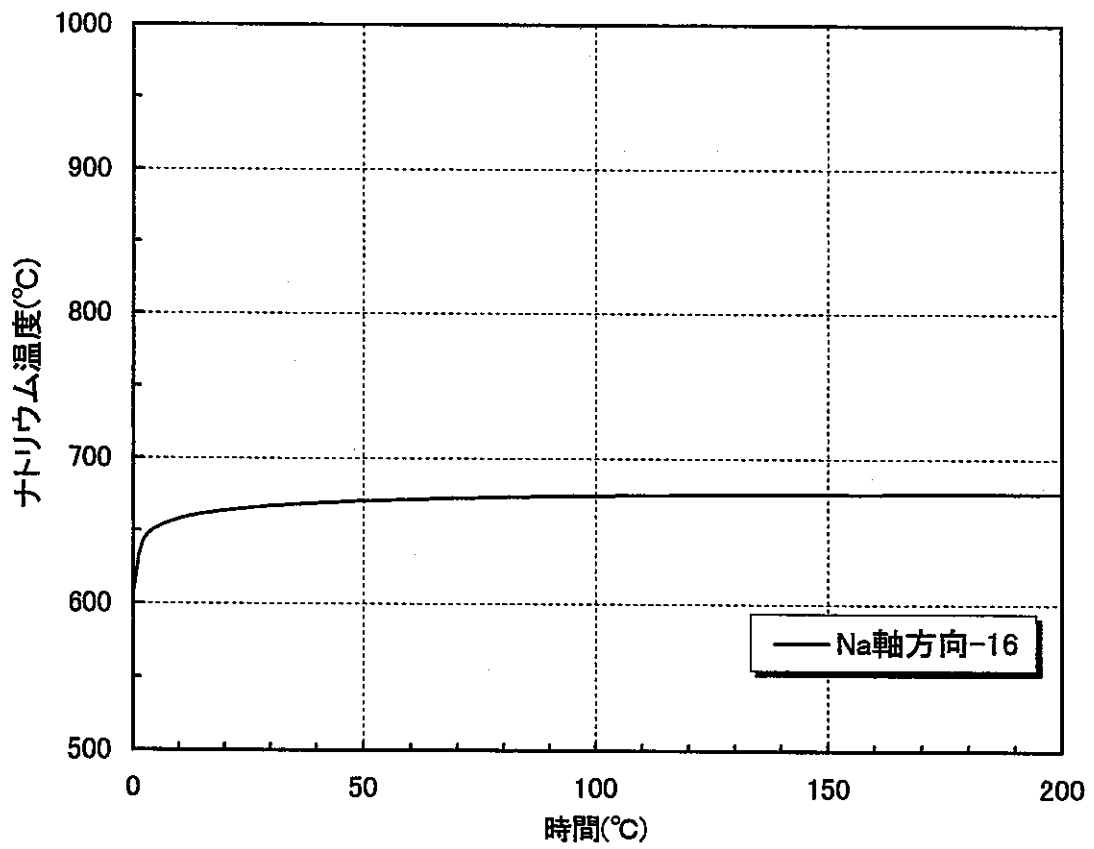
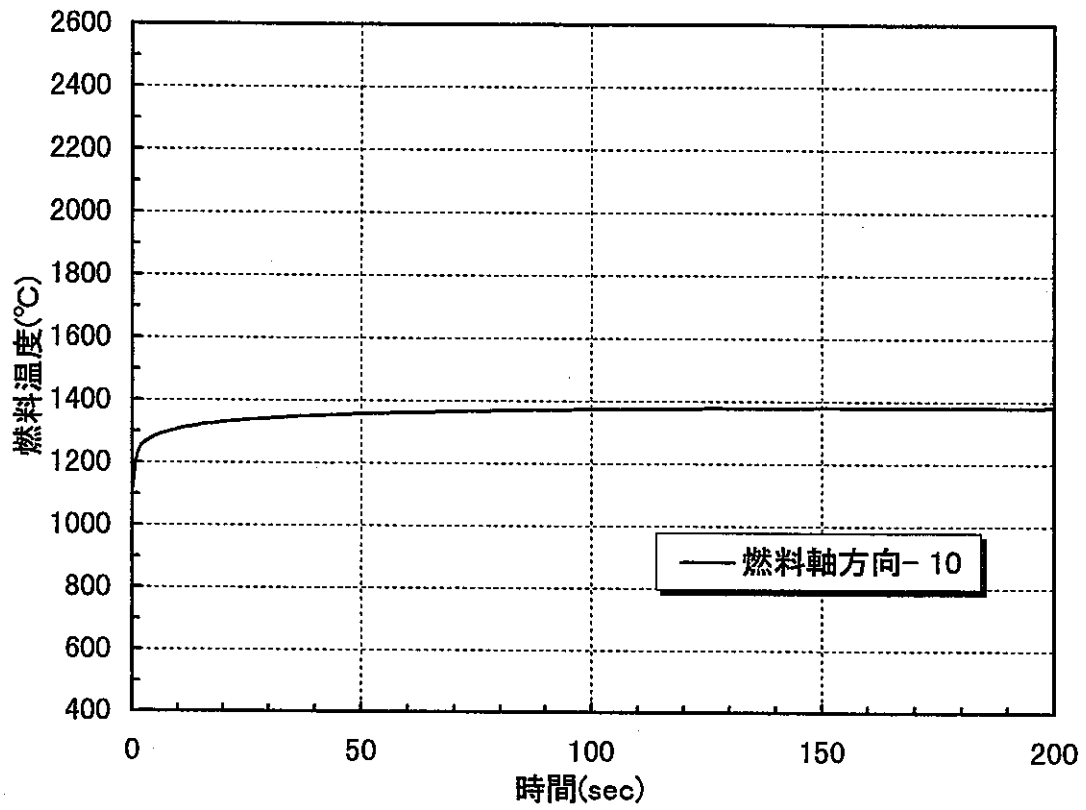


図 3.2-1 A炉心・UTOP・20φ挿入(2/2)

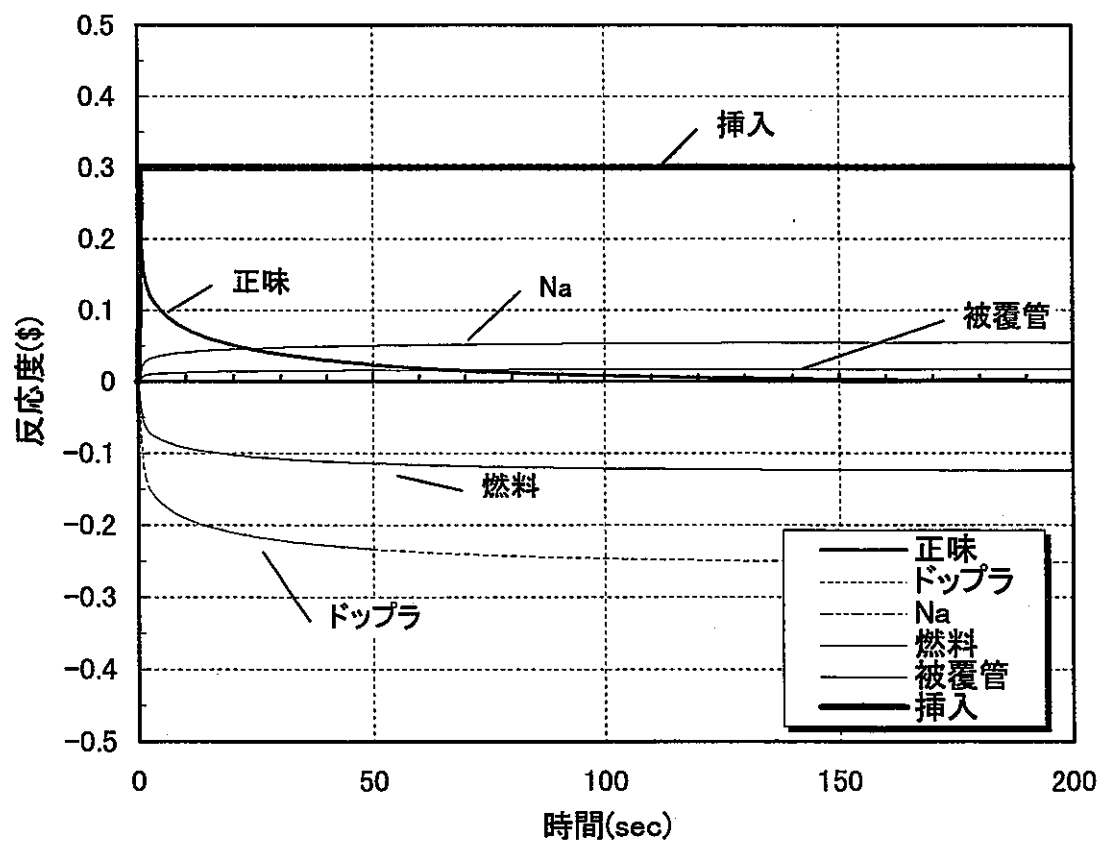
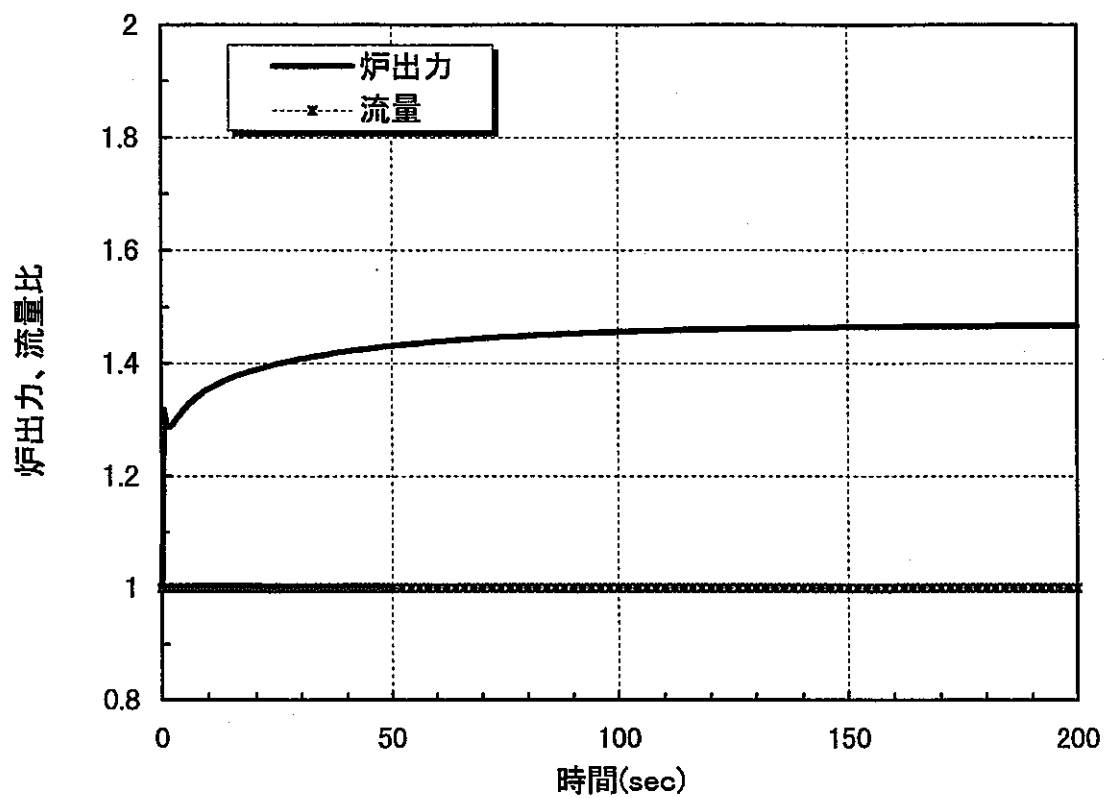


図 3.2-2 A炉心・UTOP・挿入反応度30¢ (1/2)

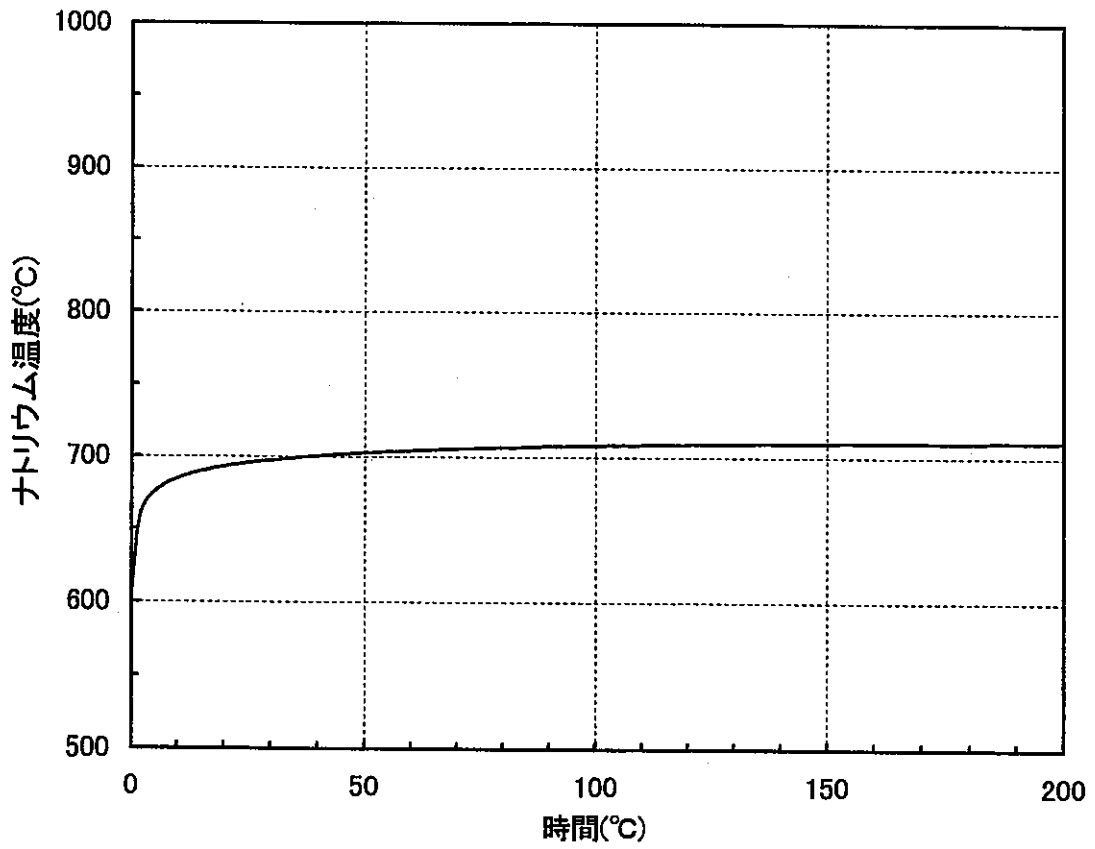
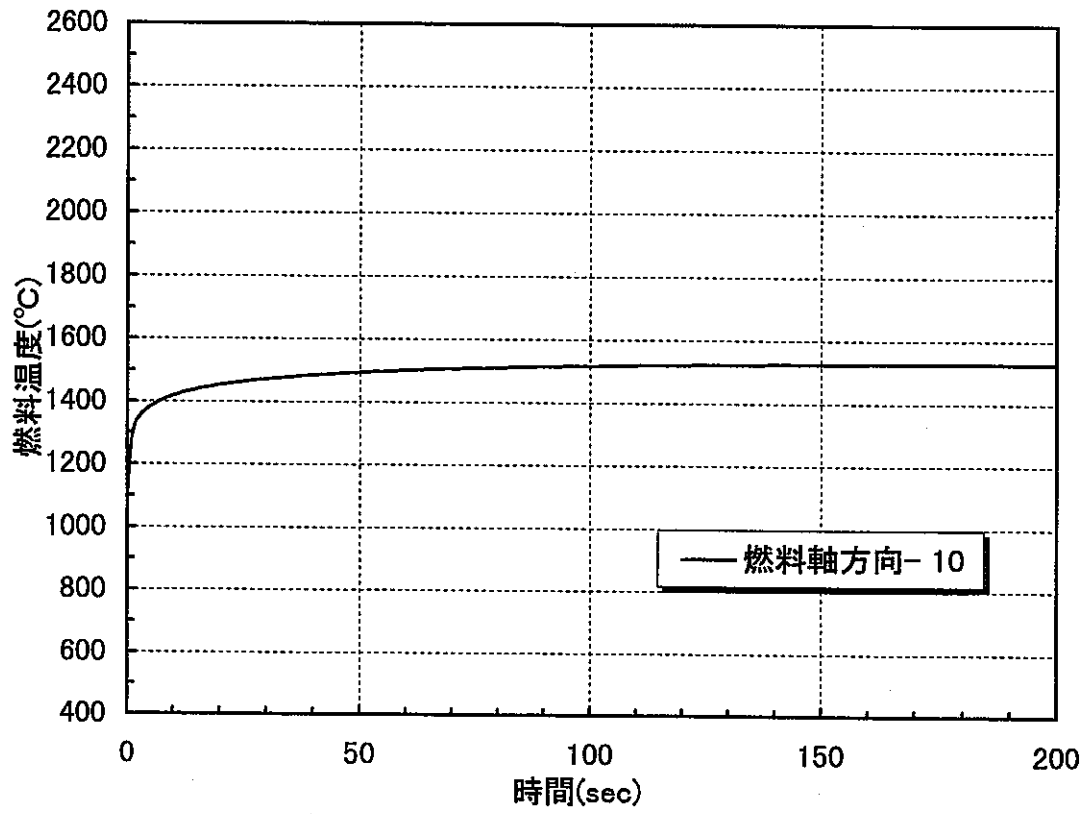


図 3.2-2 A炉心・UTOP・30 ϕ 挿入(2/2)

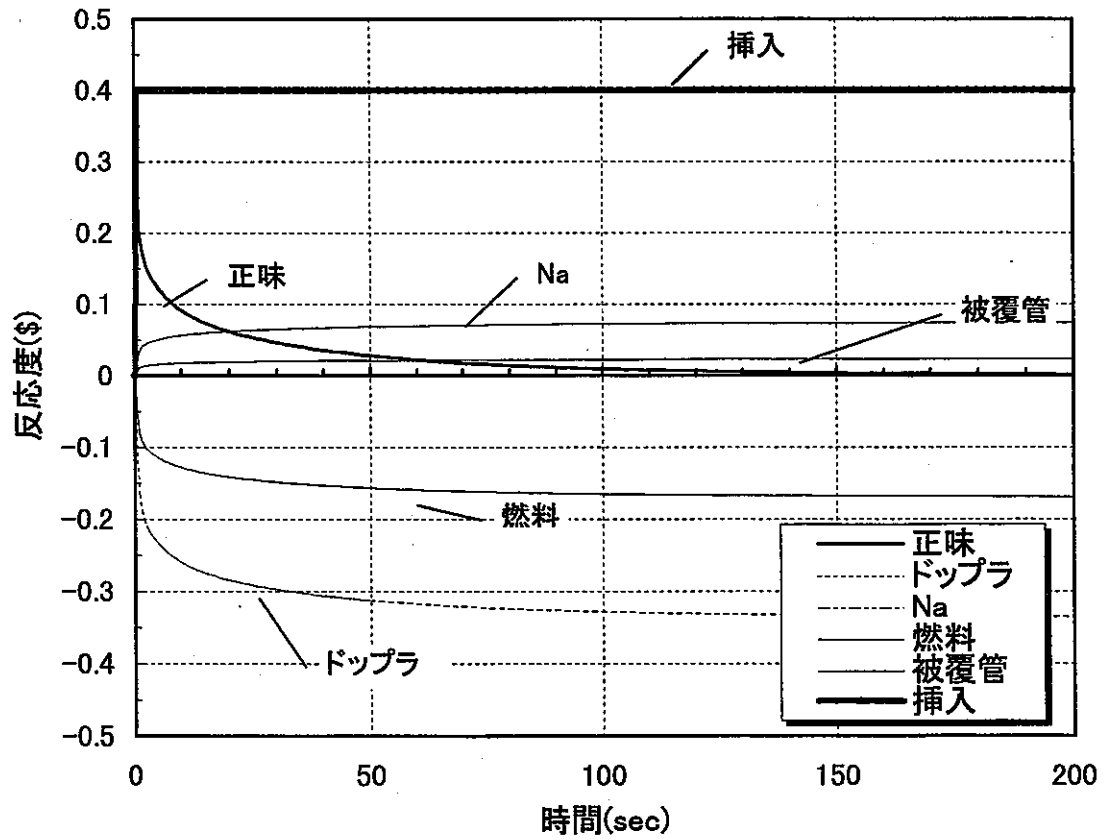
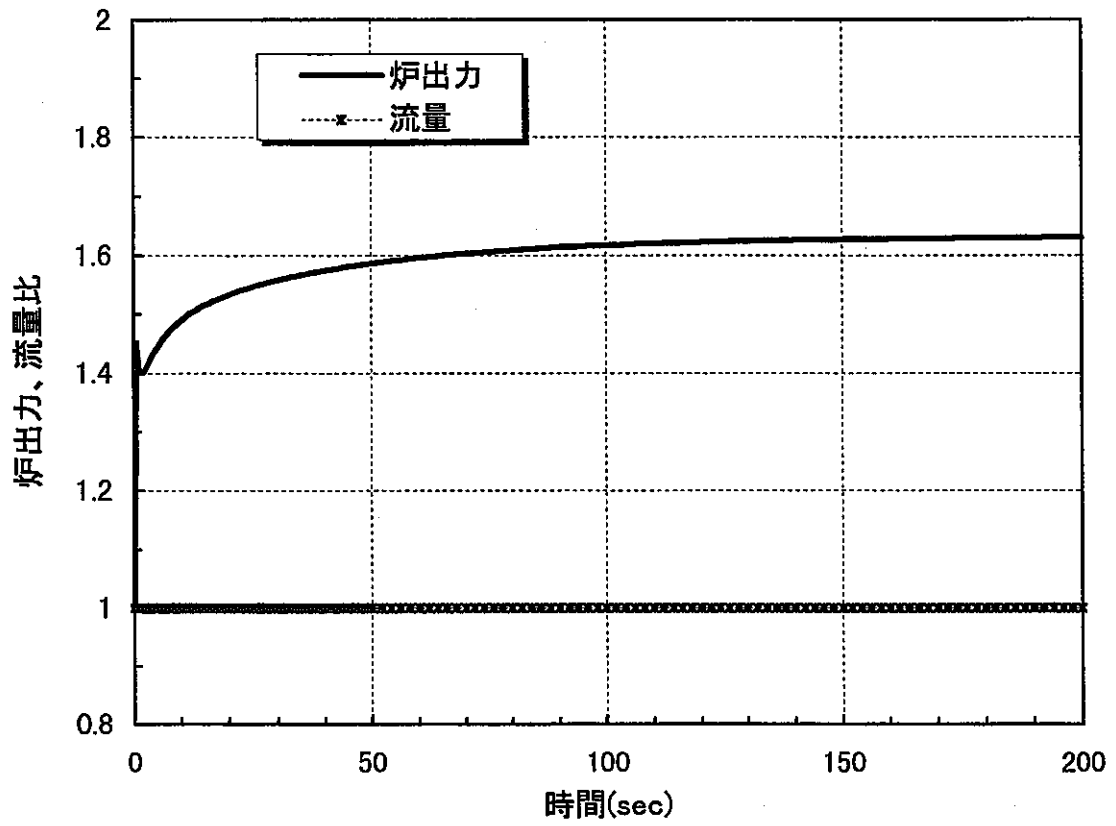


図 3.2-3 A炉心・UTOP・挿入反応度40¢ (1/2)

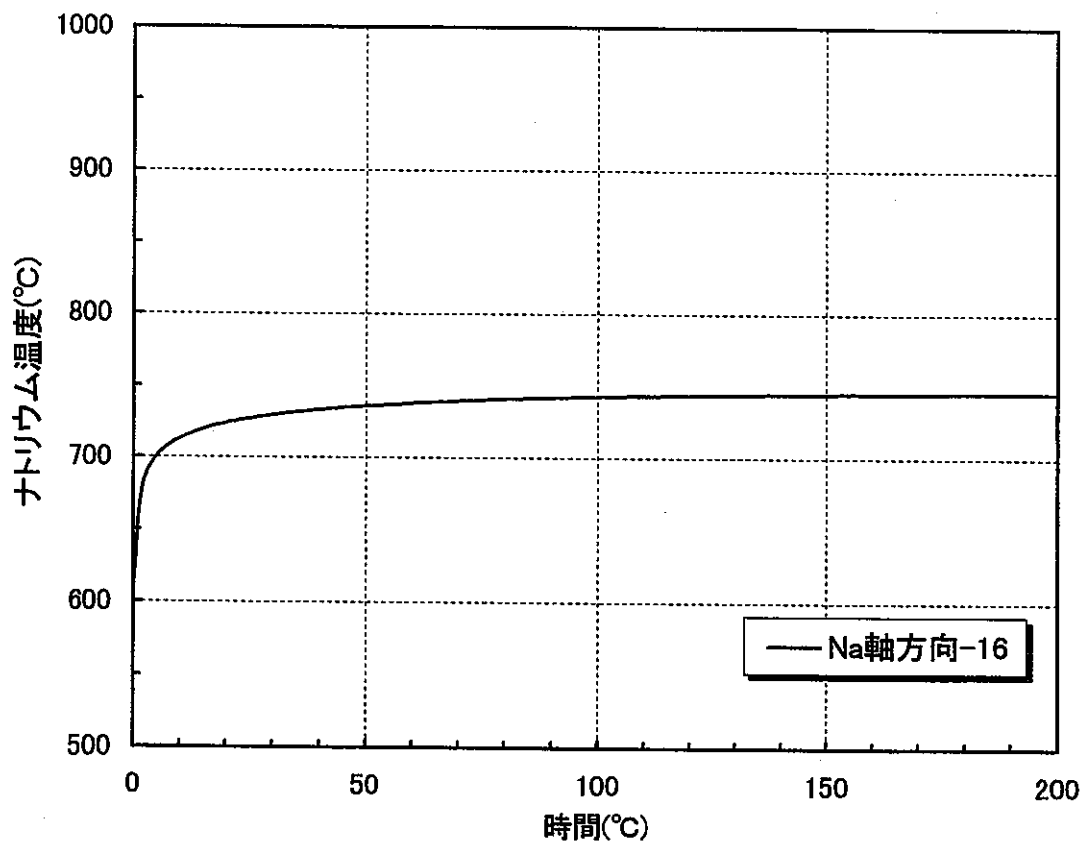
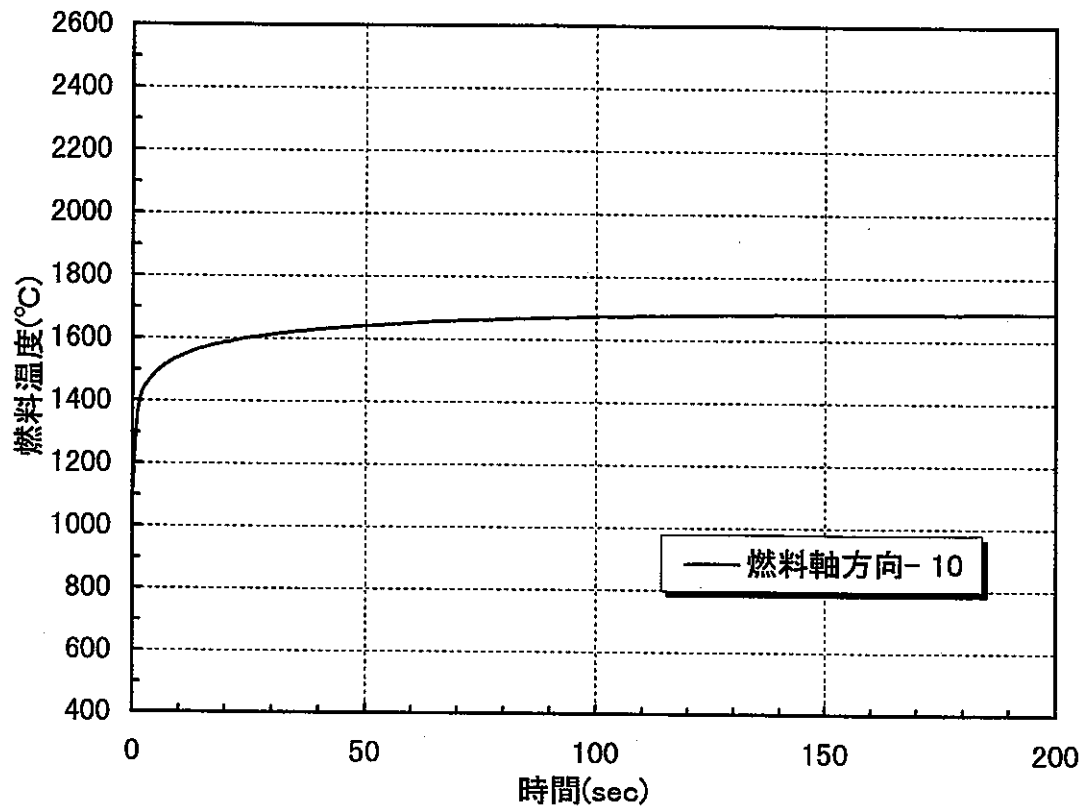


図 3.2-3 A炉心・UTOP・40φ挿入(2/2)

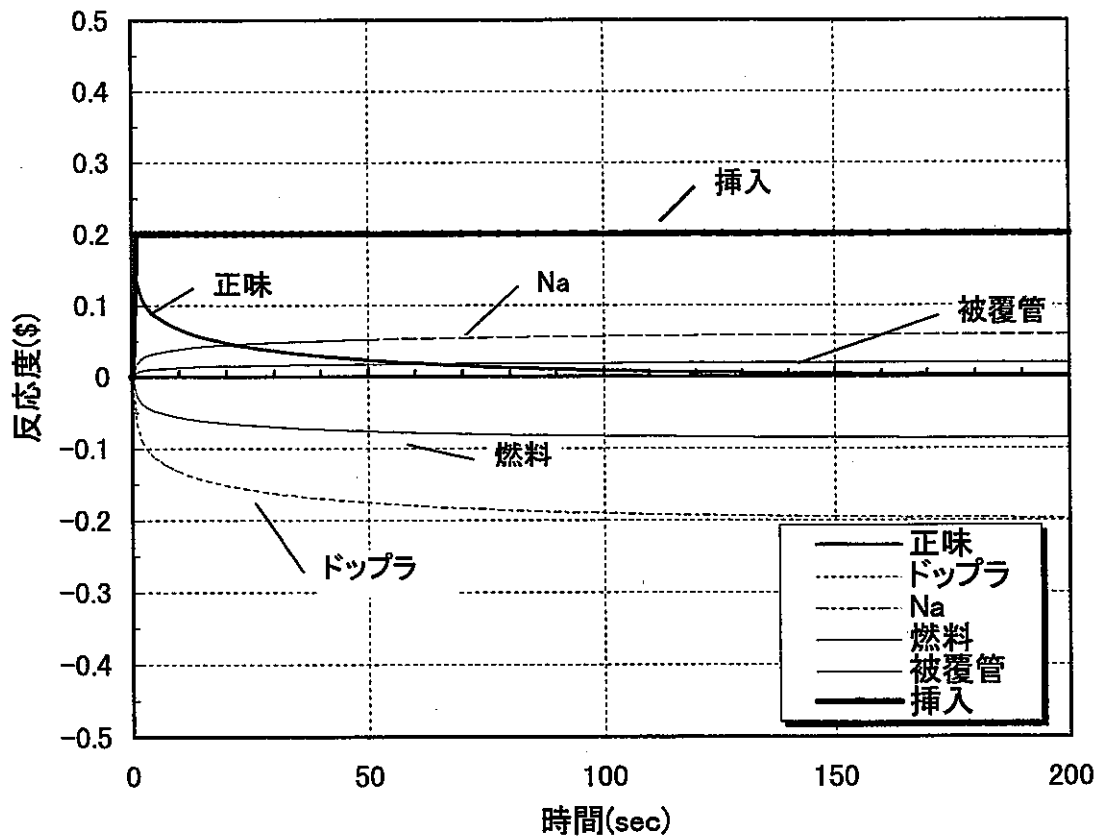
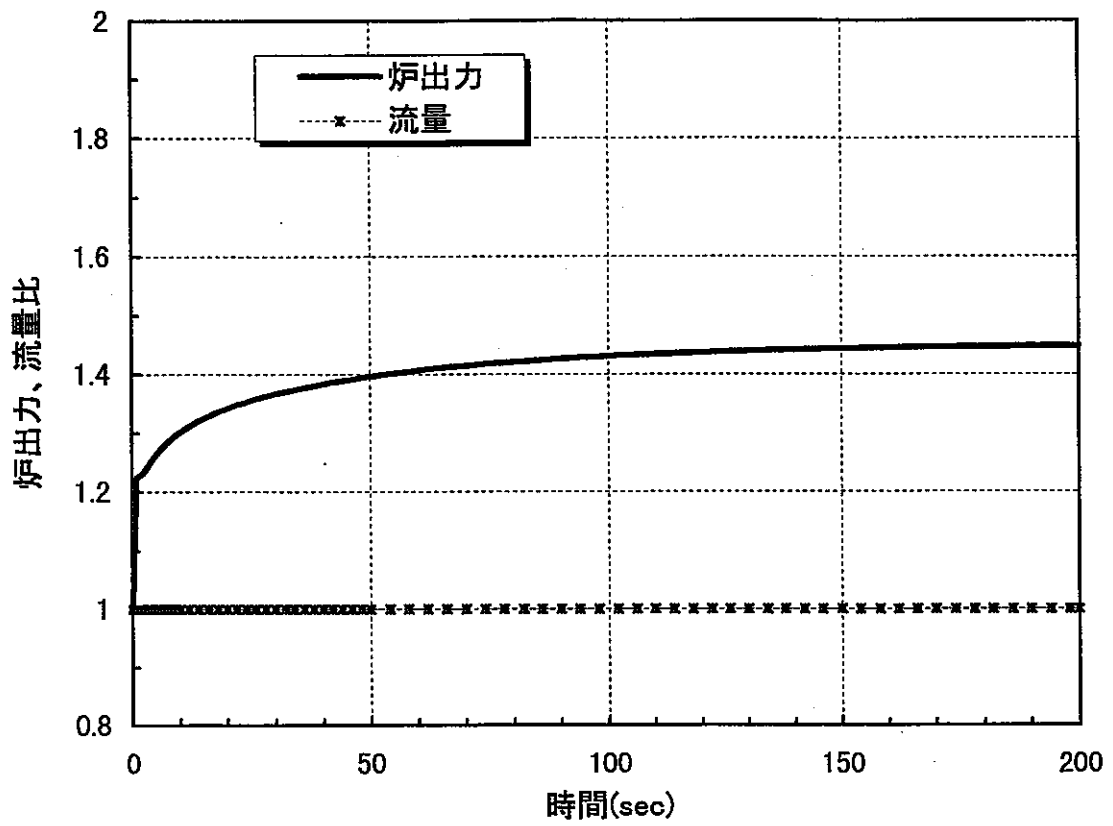


図 3.2-4 B炉心・UTOP・挿入反応度 20ϕ (1/2)

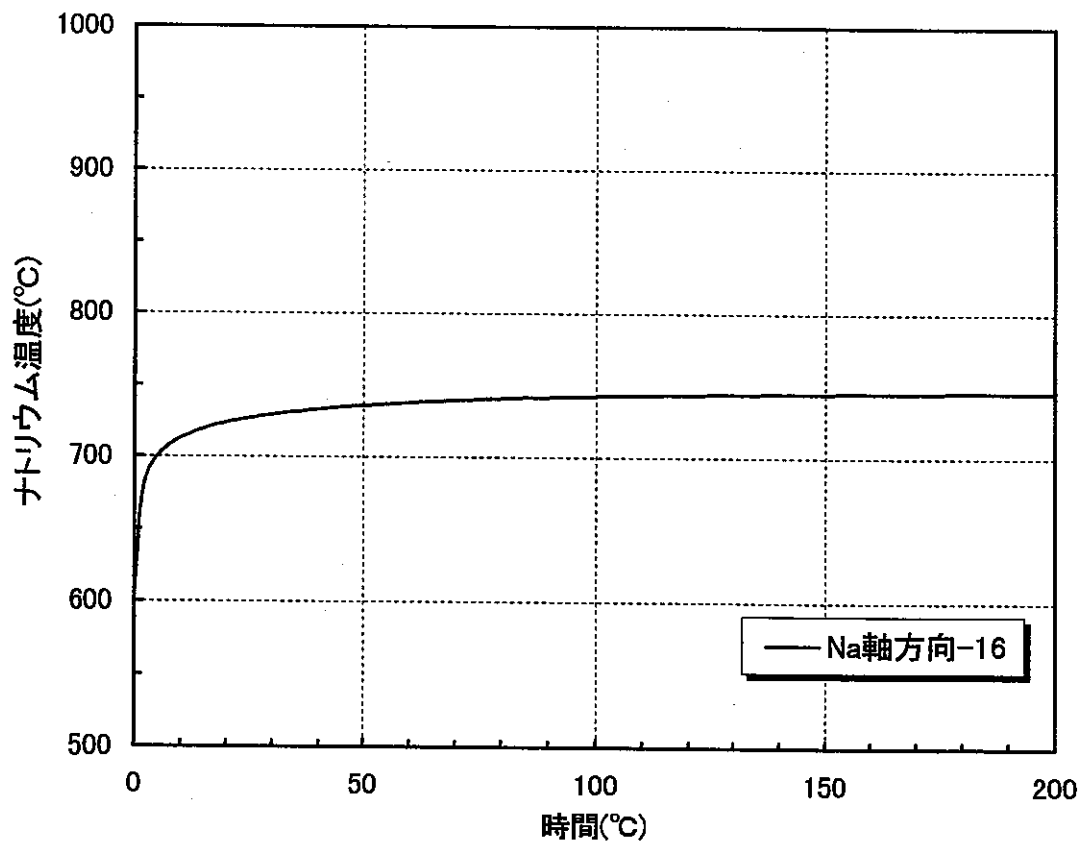
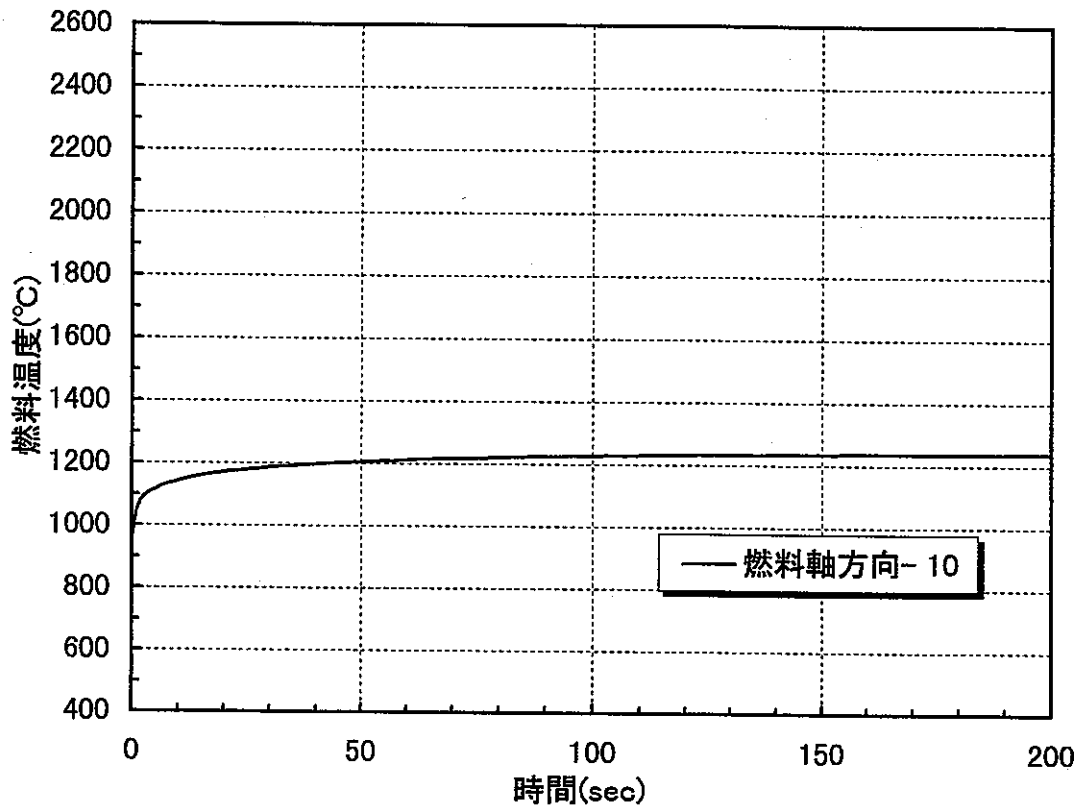


図 3.2-4 B炉心・UTOP・20φ挿入(2/2)

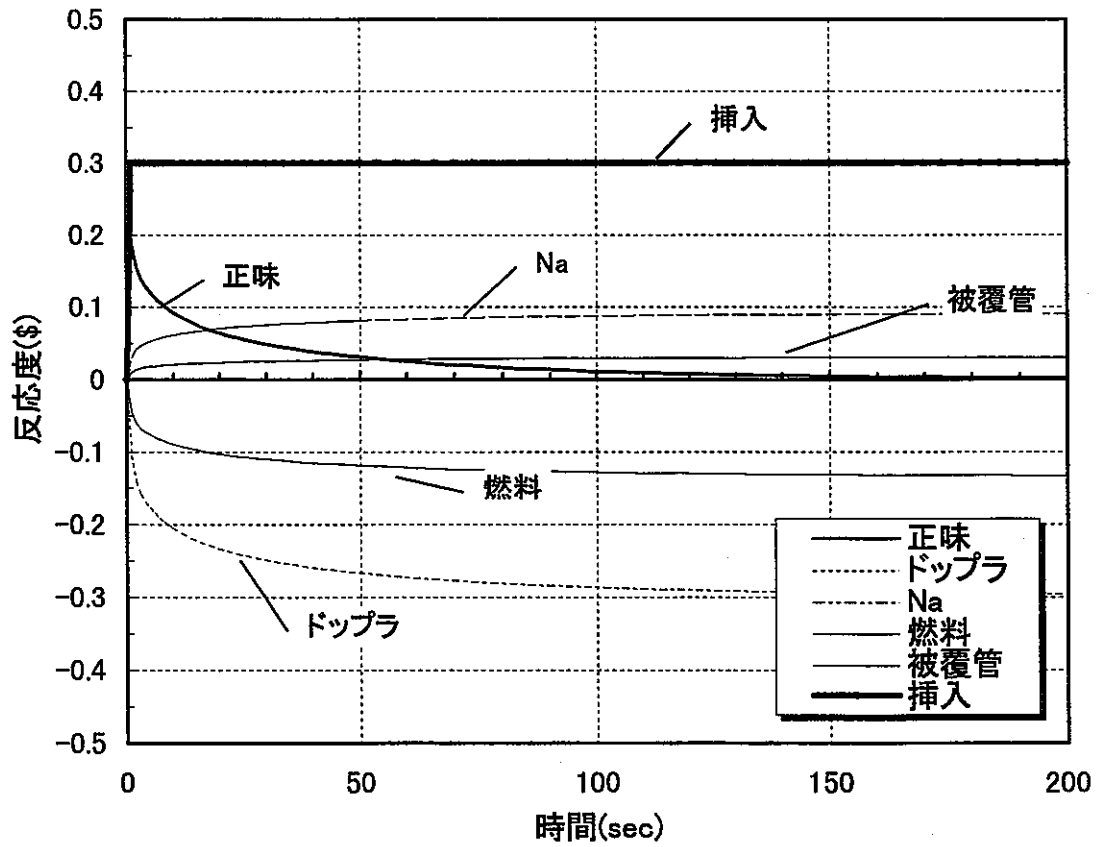
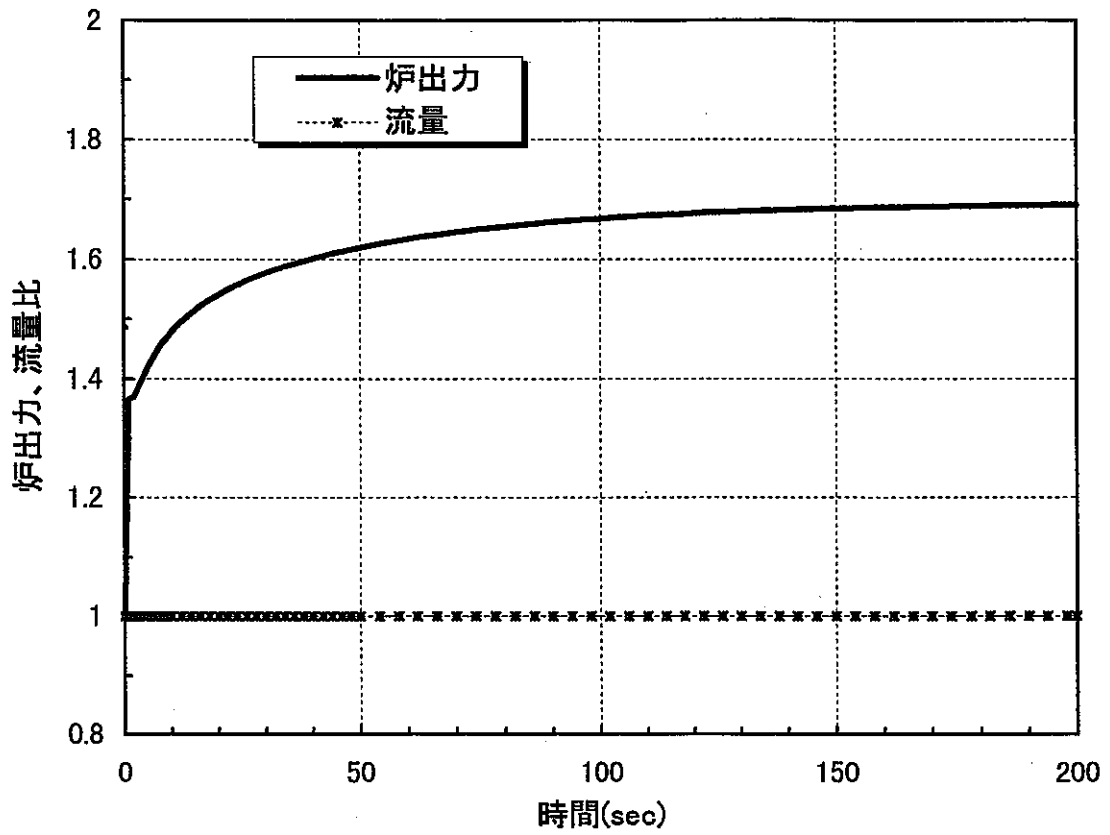


図 3.2-5 B炉心・UTOP・挿入反応度30¢ (1/2)

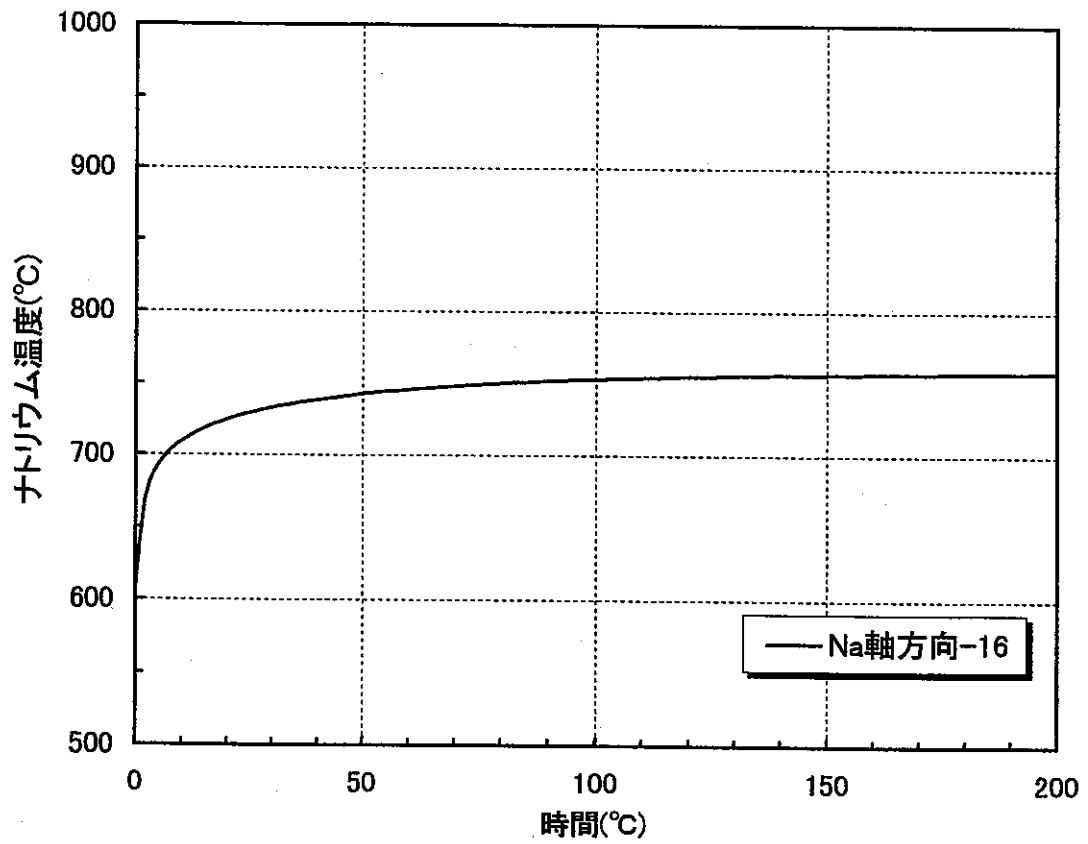
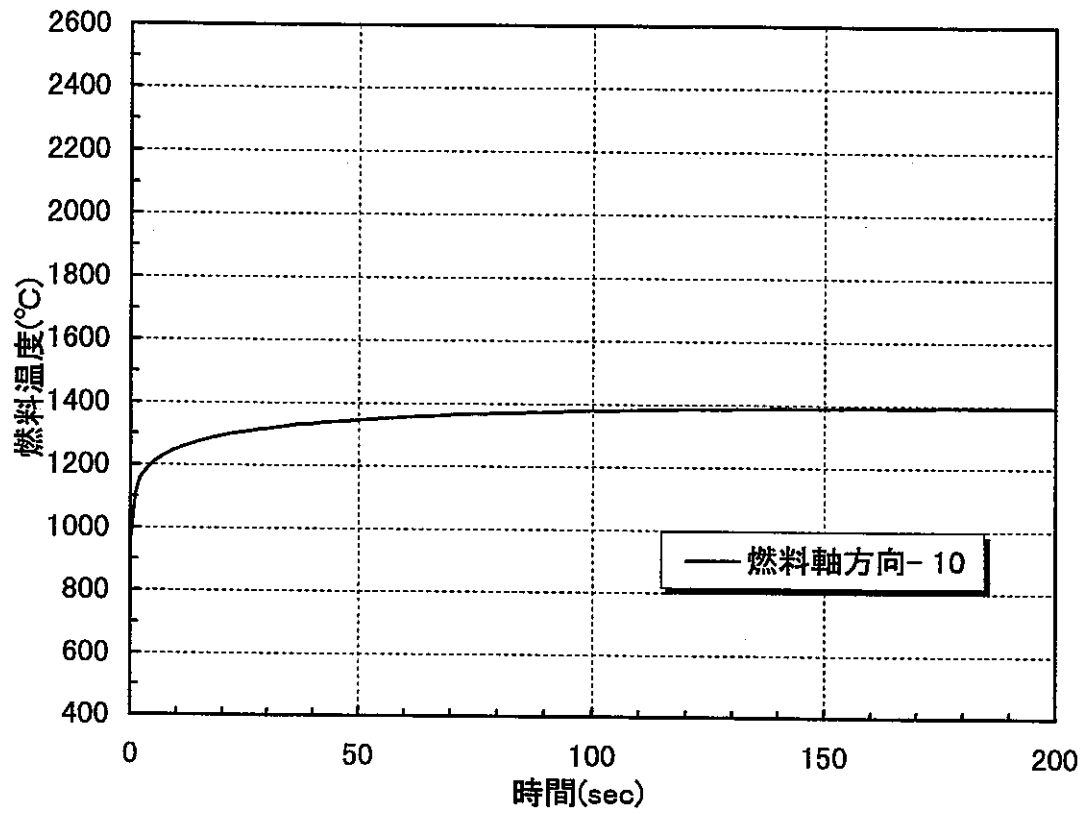


図 3.2-5 B炉心・UTOP・30φ挿入(2/2)

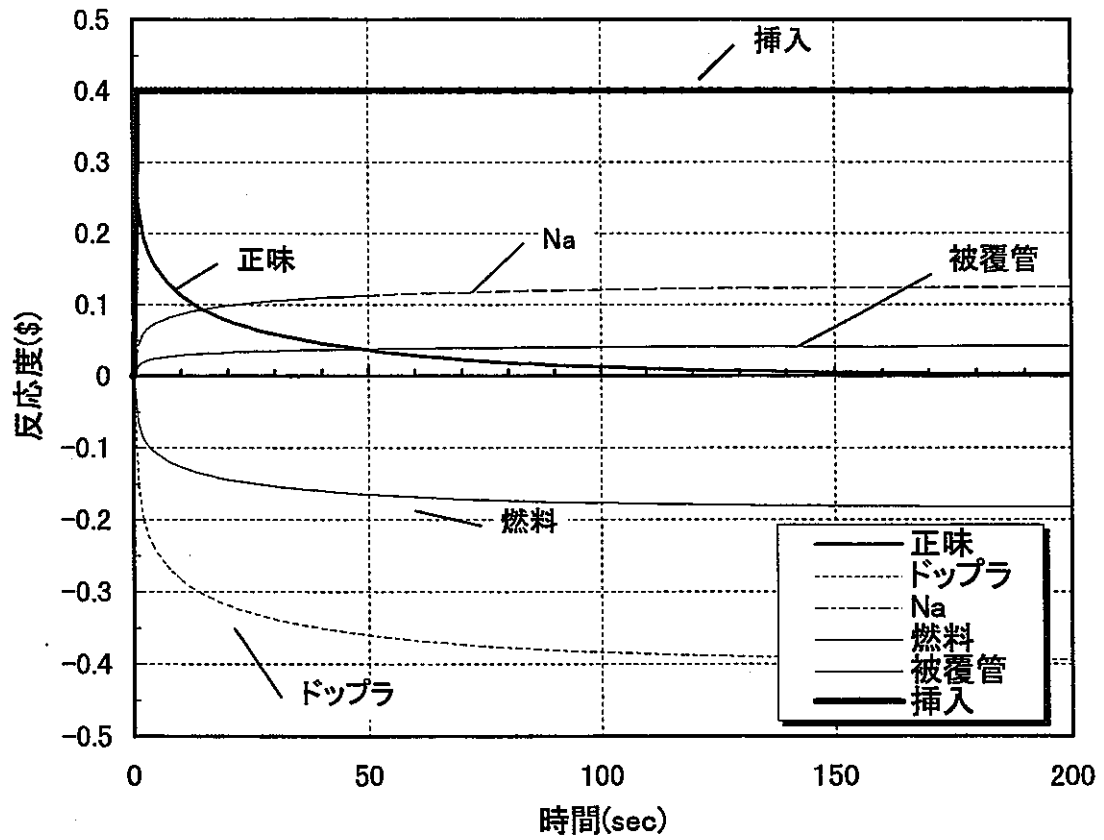
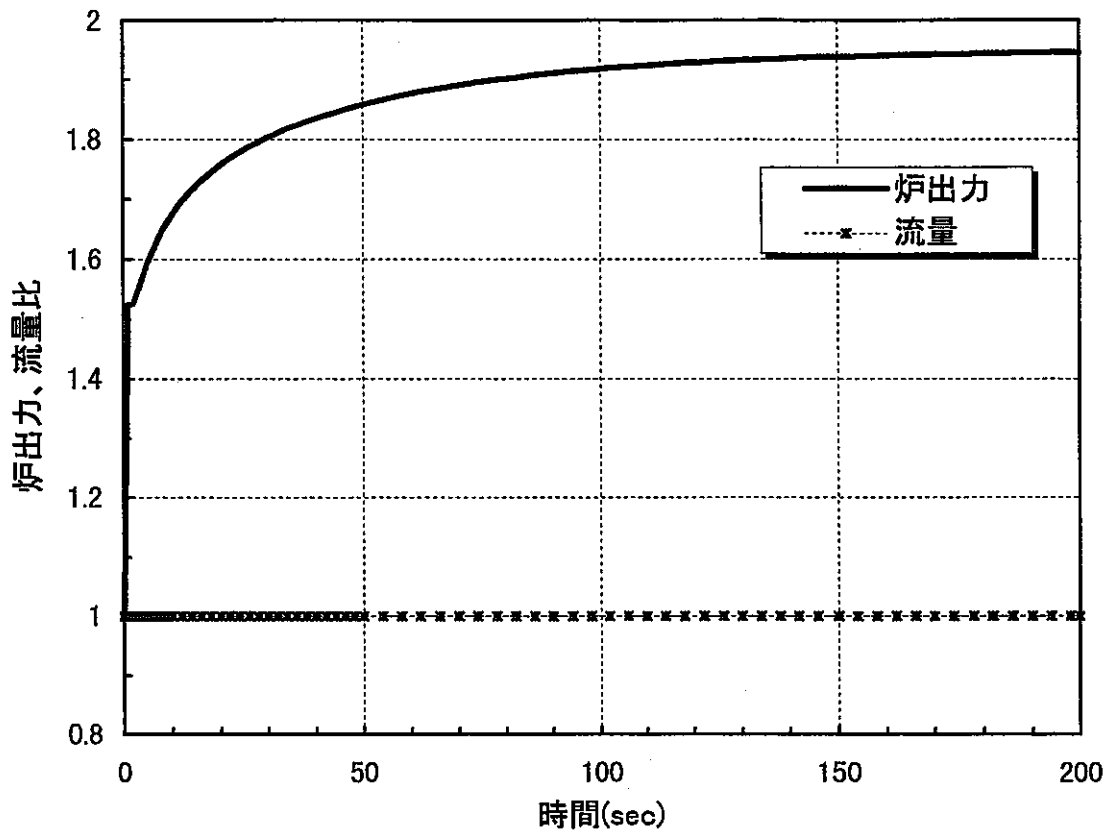


図 3.2-6 B炉心・UTOP・挿入反応度40¢ (1/2)

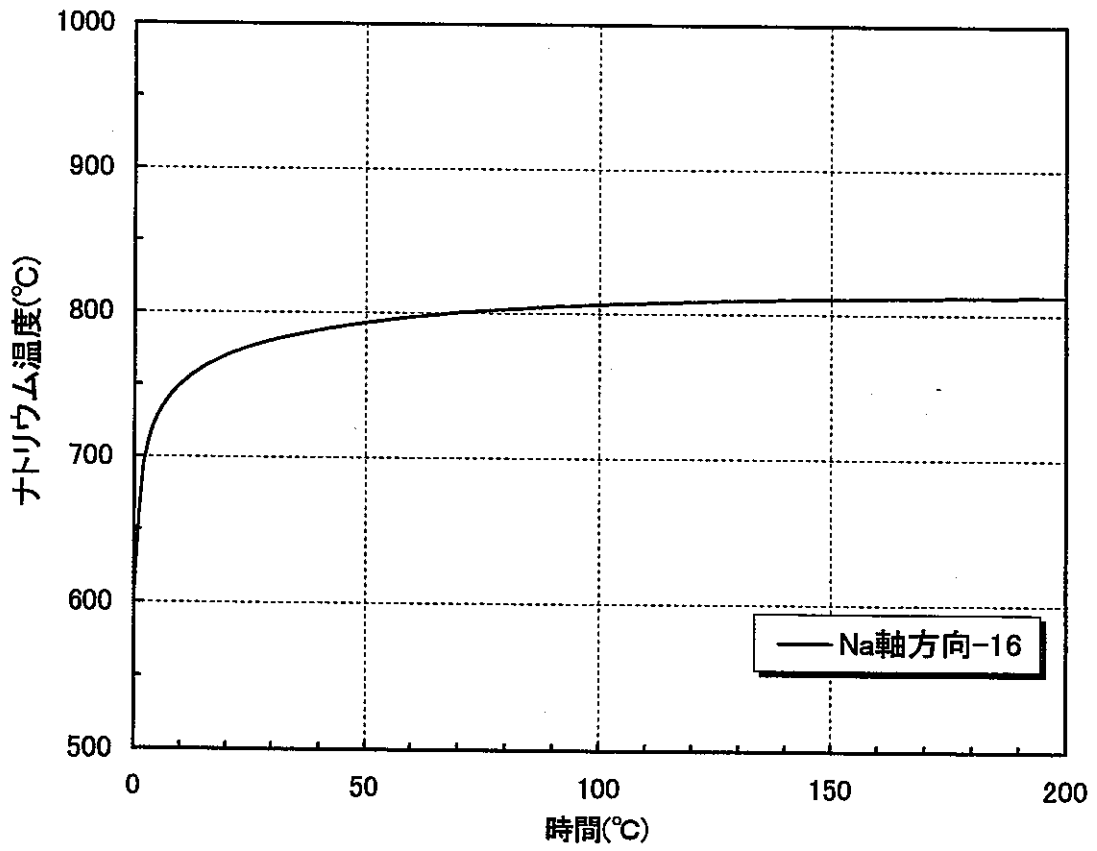
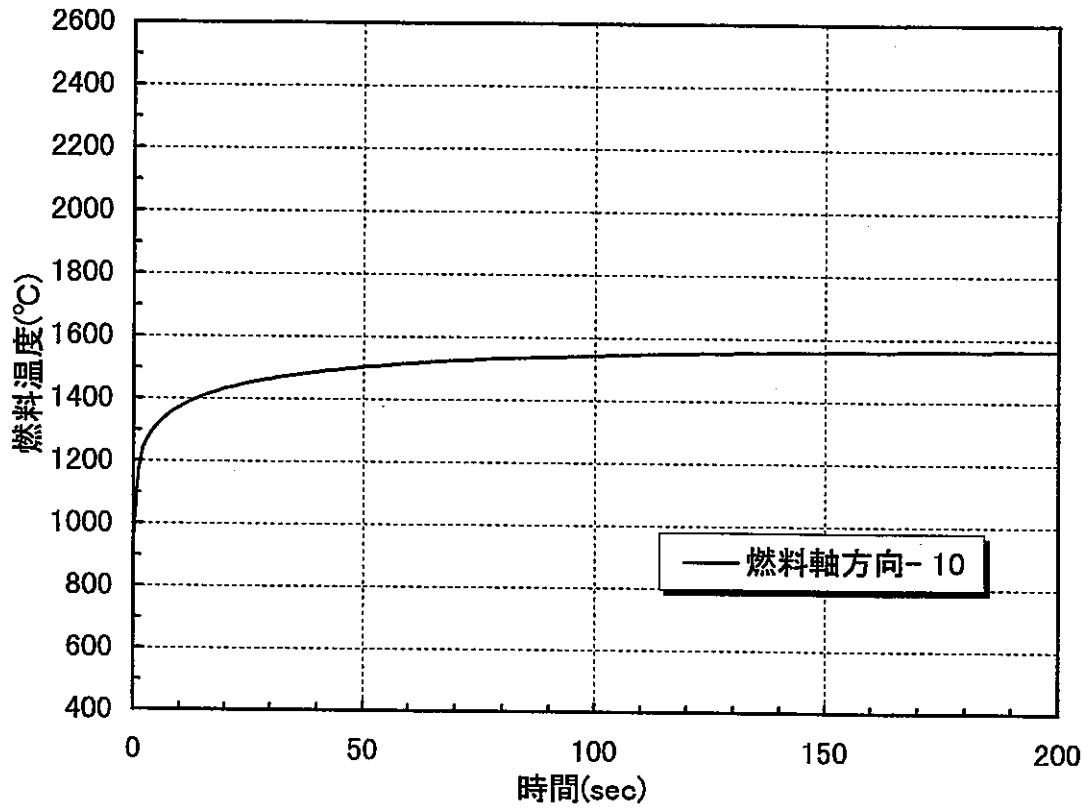


図 3.2-6 B炉心・UTOP・40φ挿入(2/2)

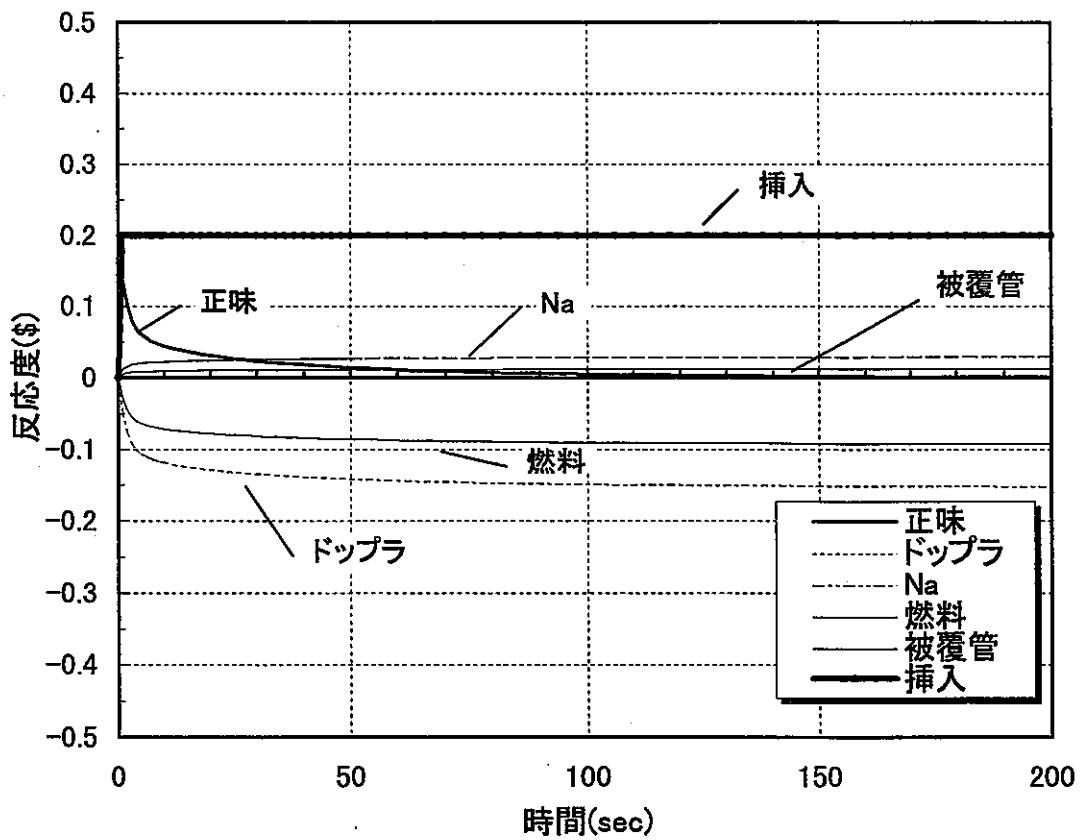
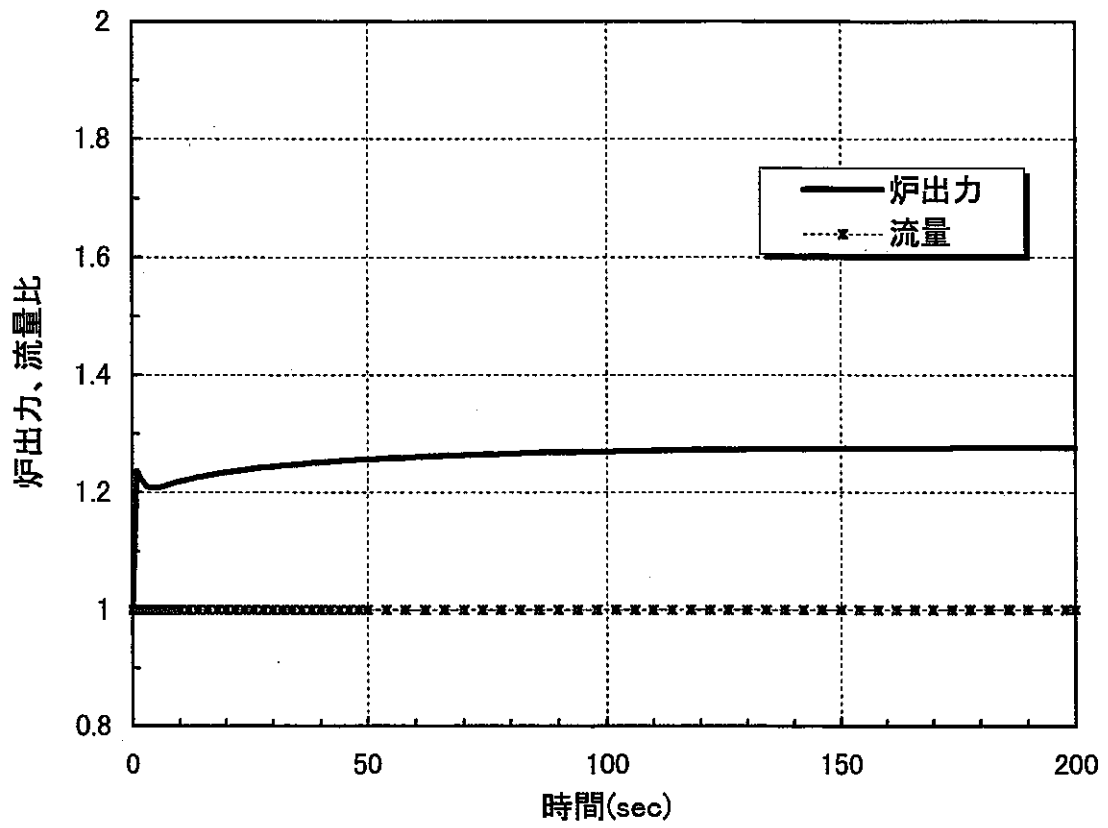


図 3.2-7 C炉心・UTOP・挿入反応度 20ϕ (1/2)

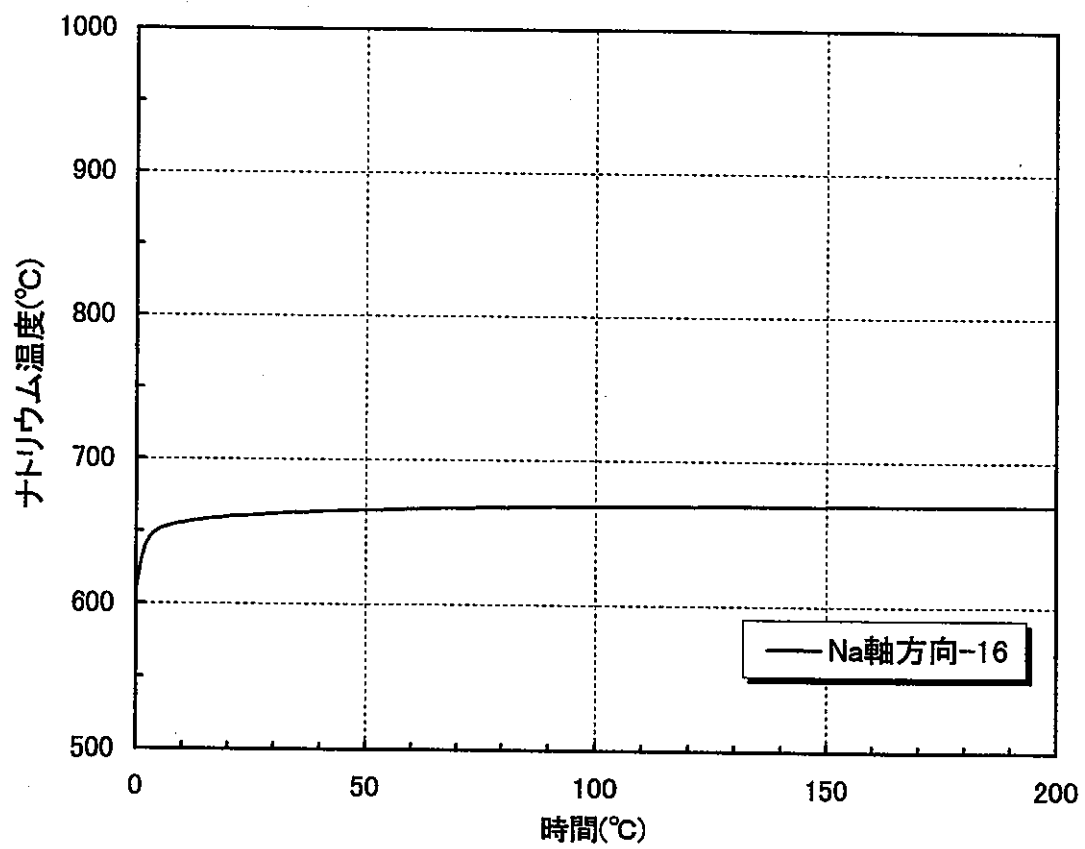
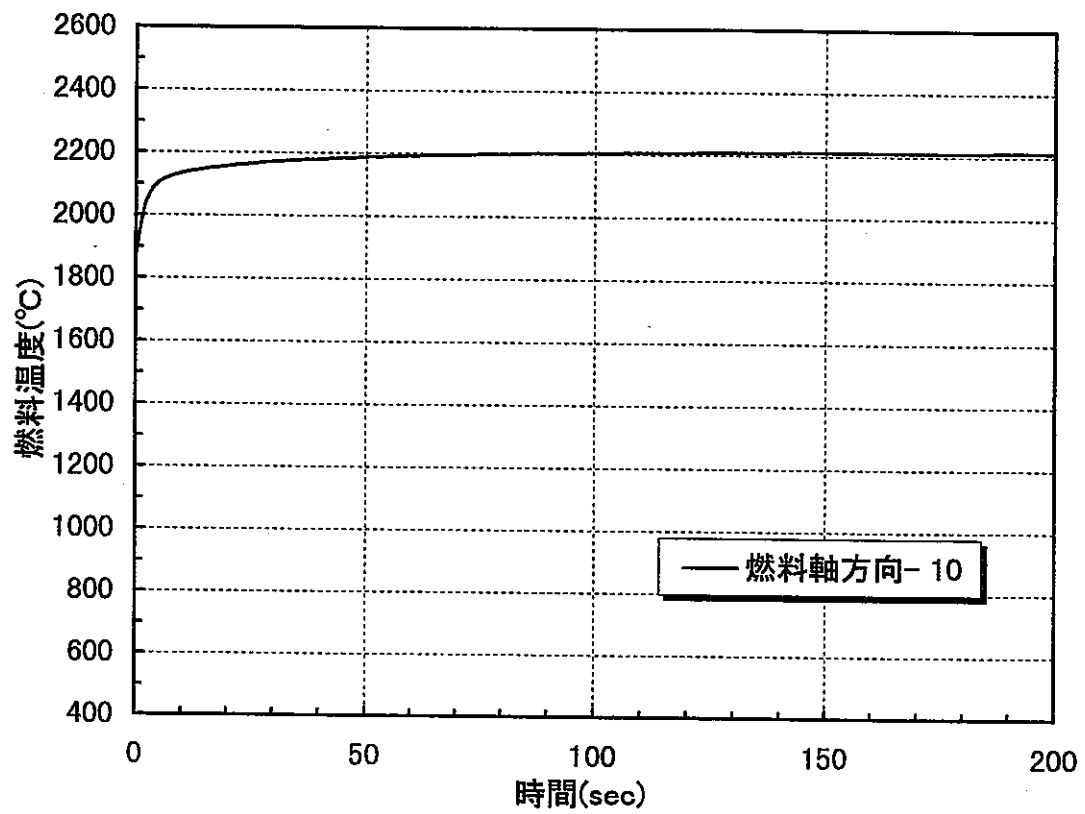


図 3.2-7 C炉心・UTOP・20φ挿入(2/2)

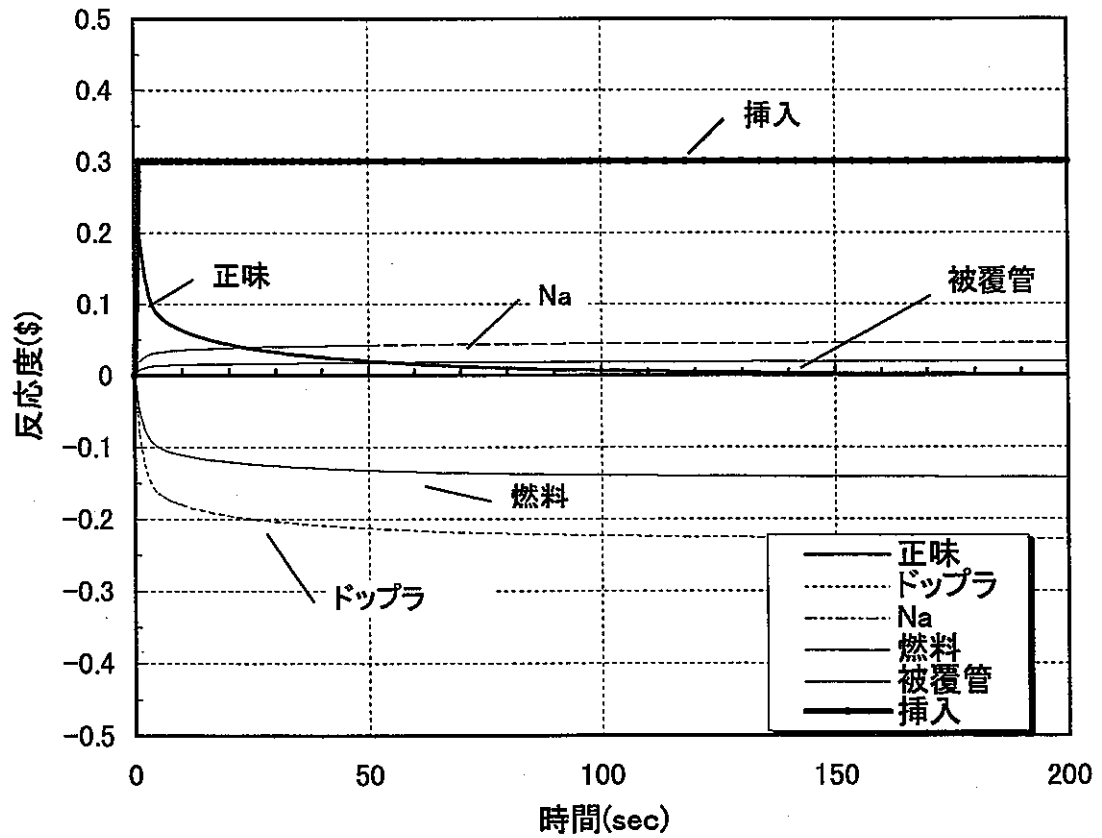
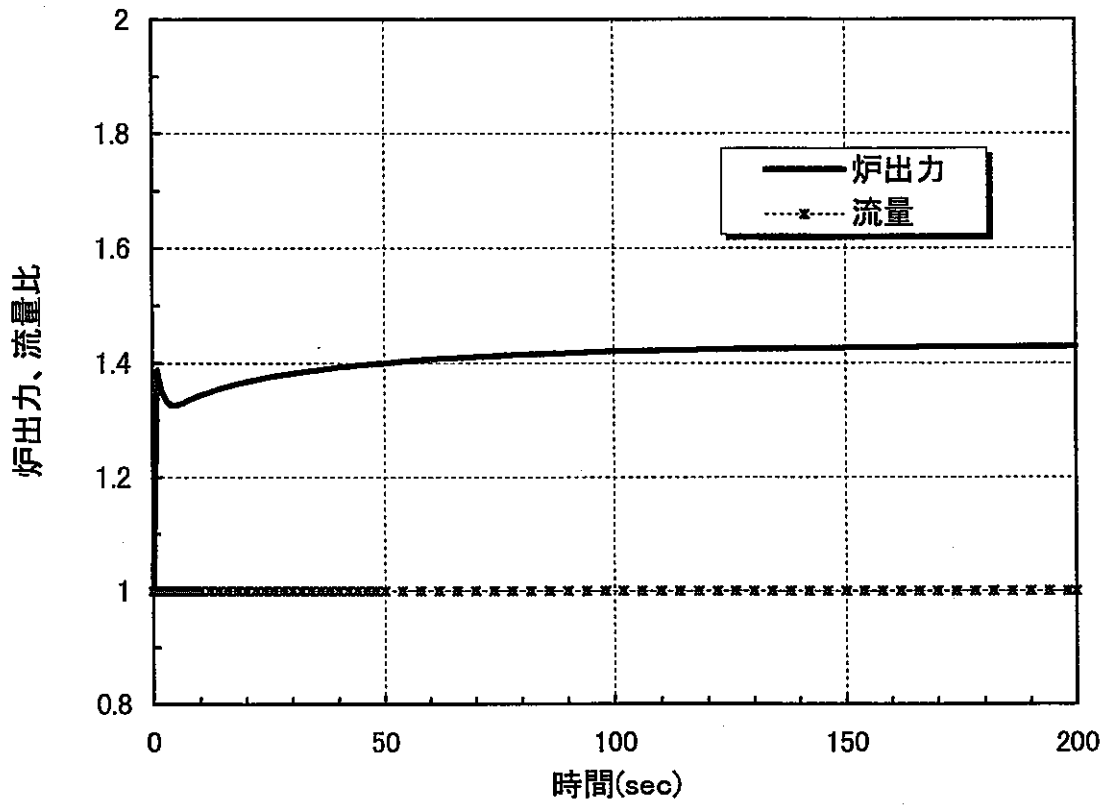


図 3.2-8 C炉心・UTOP・挿入反応度30¢ (1/2)

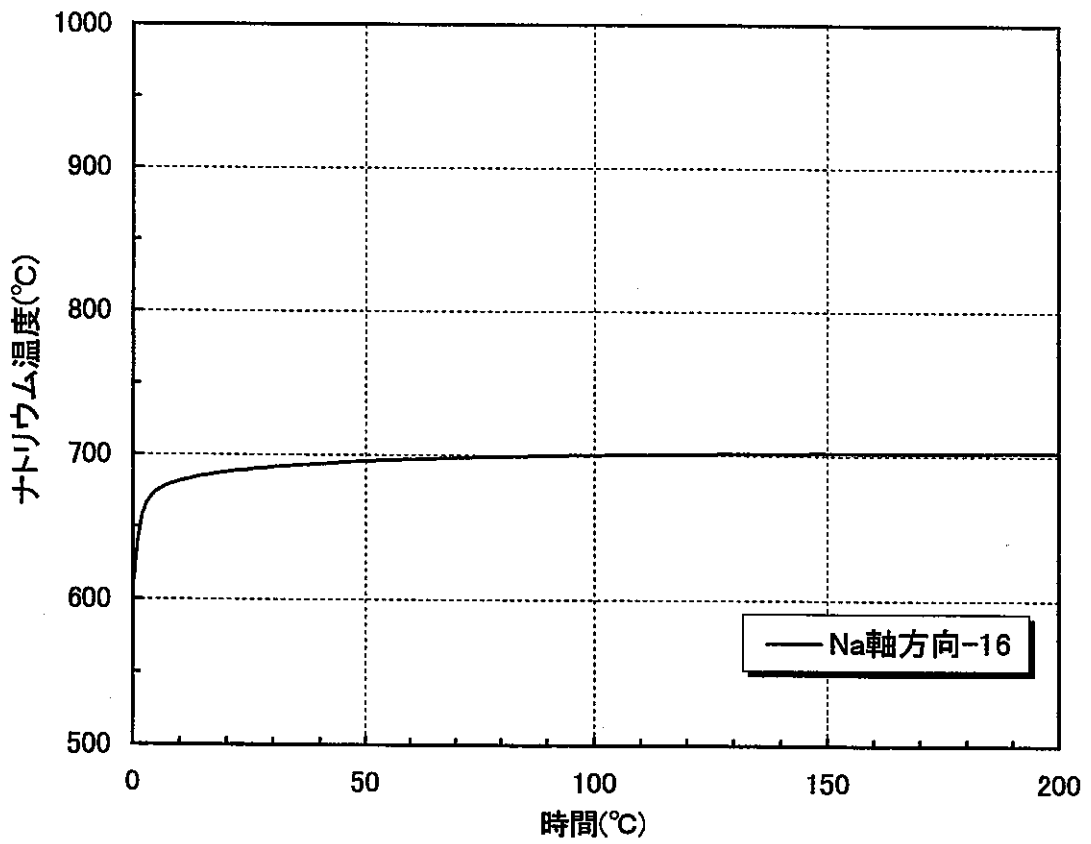
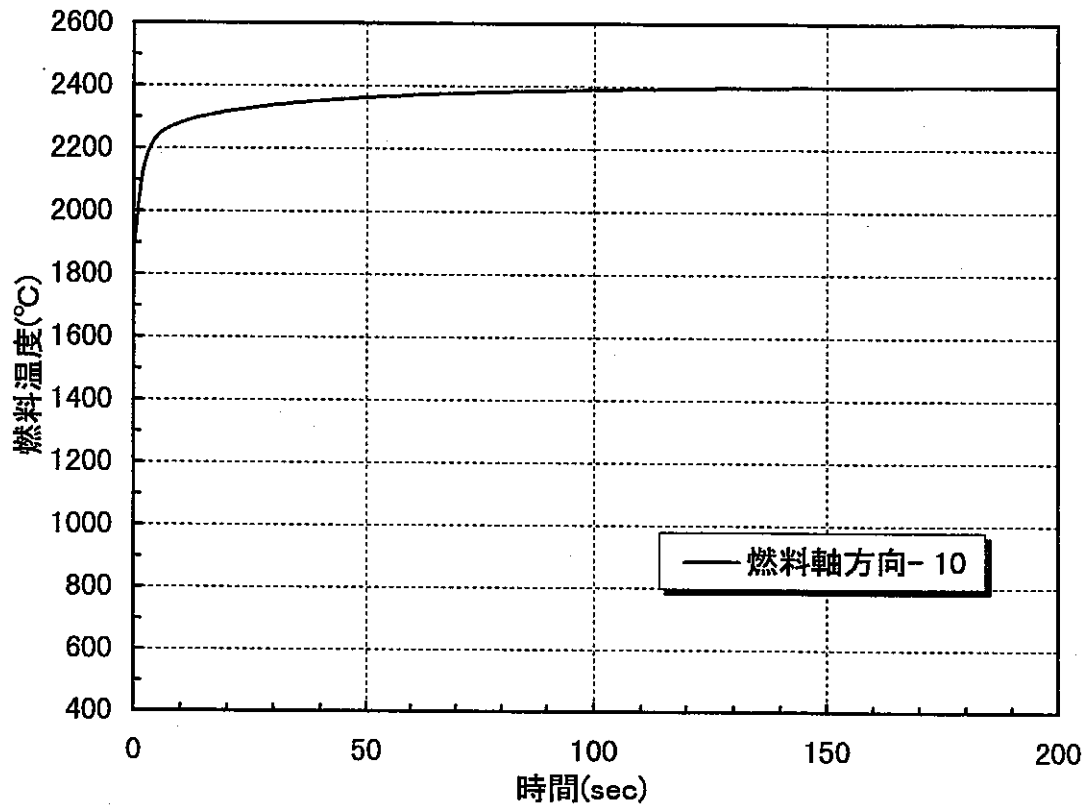


図 3.2-8 C炉心・UTOP・30φ挿入(2/2)

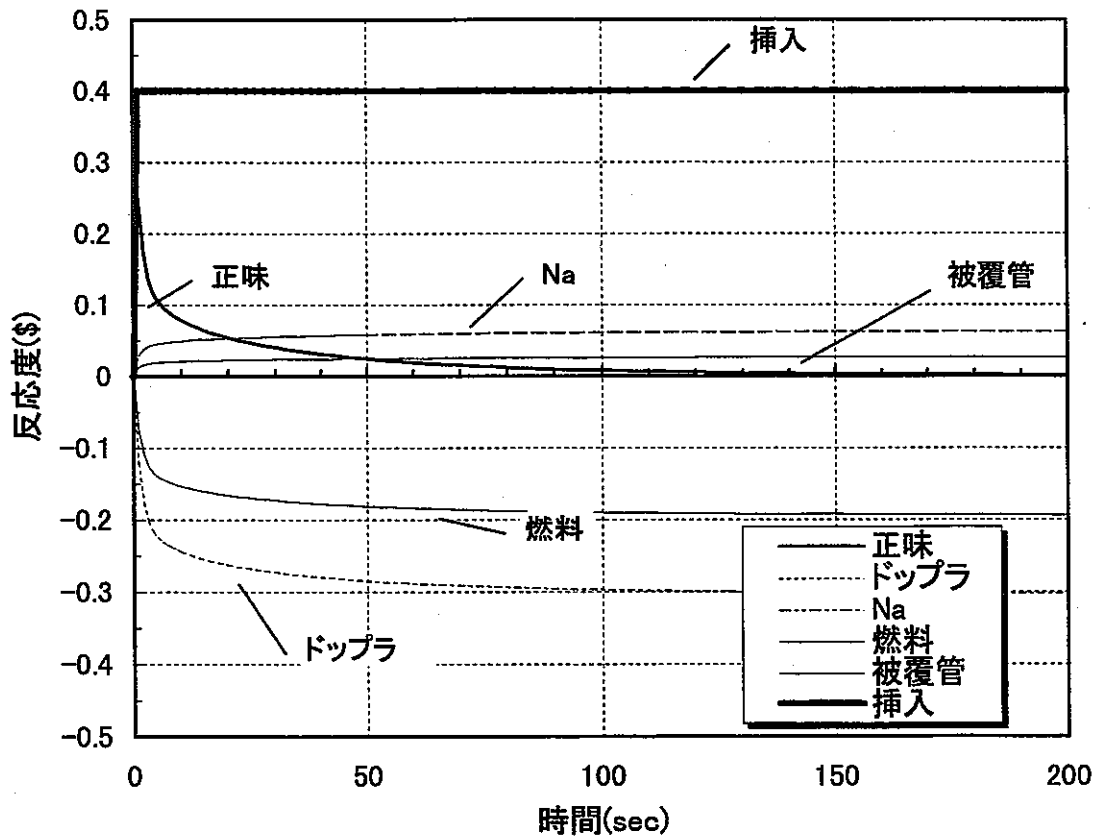
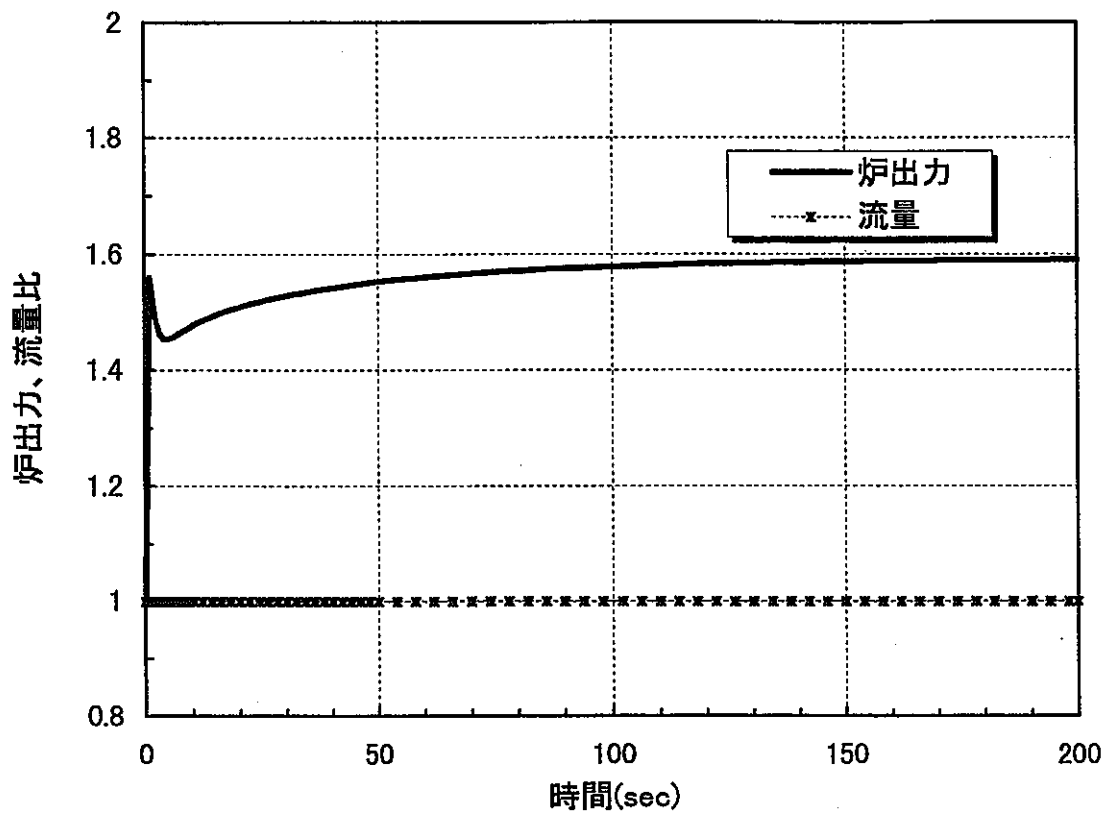


図 3.2-9 C炉心・UTOP・挿入反応度40¢ (1/2)

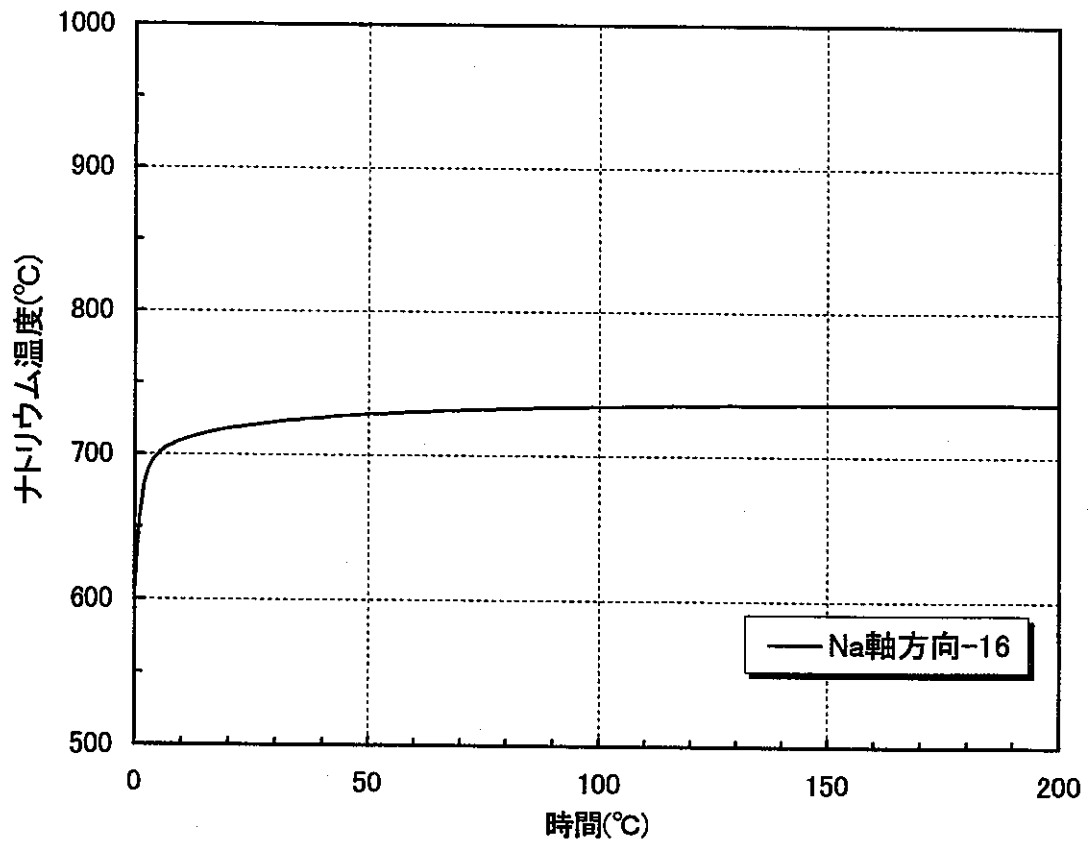
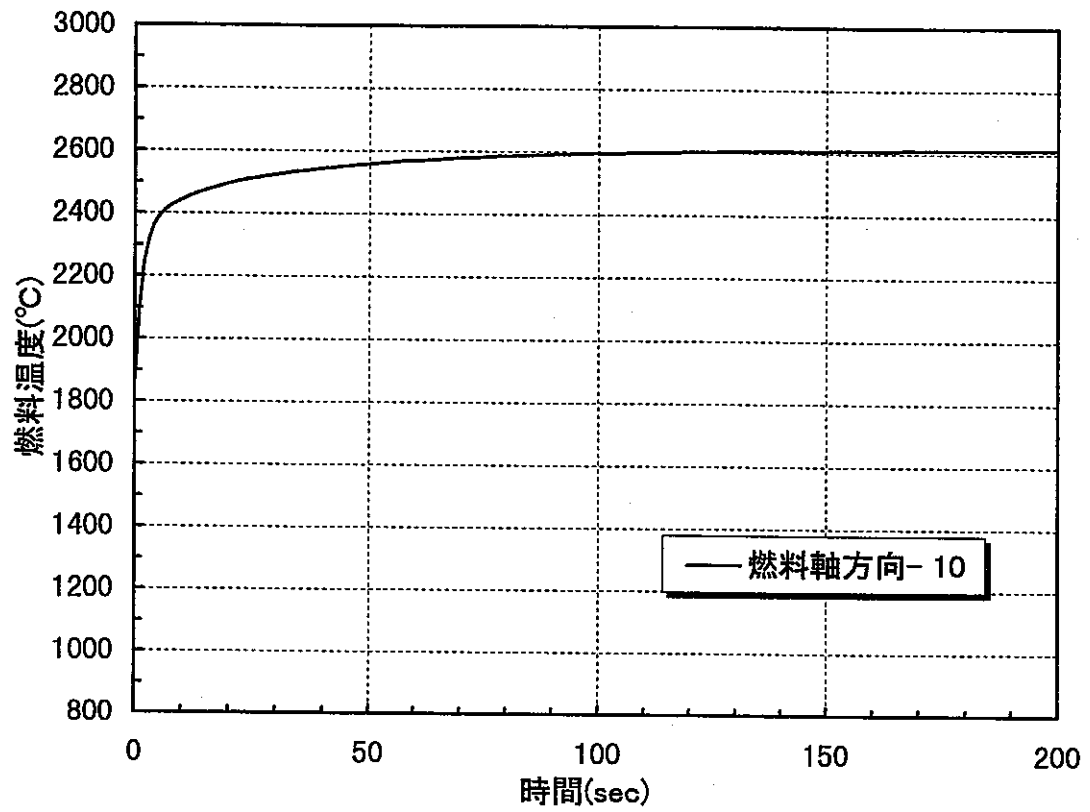


図 3.2-9 C炉心・UTOP・40φ挿入(2/2)

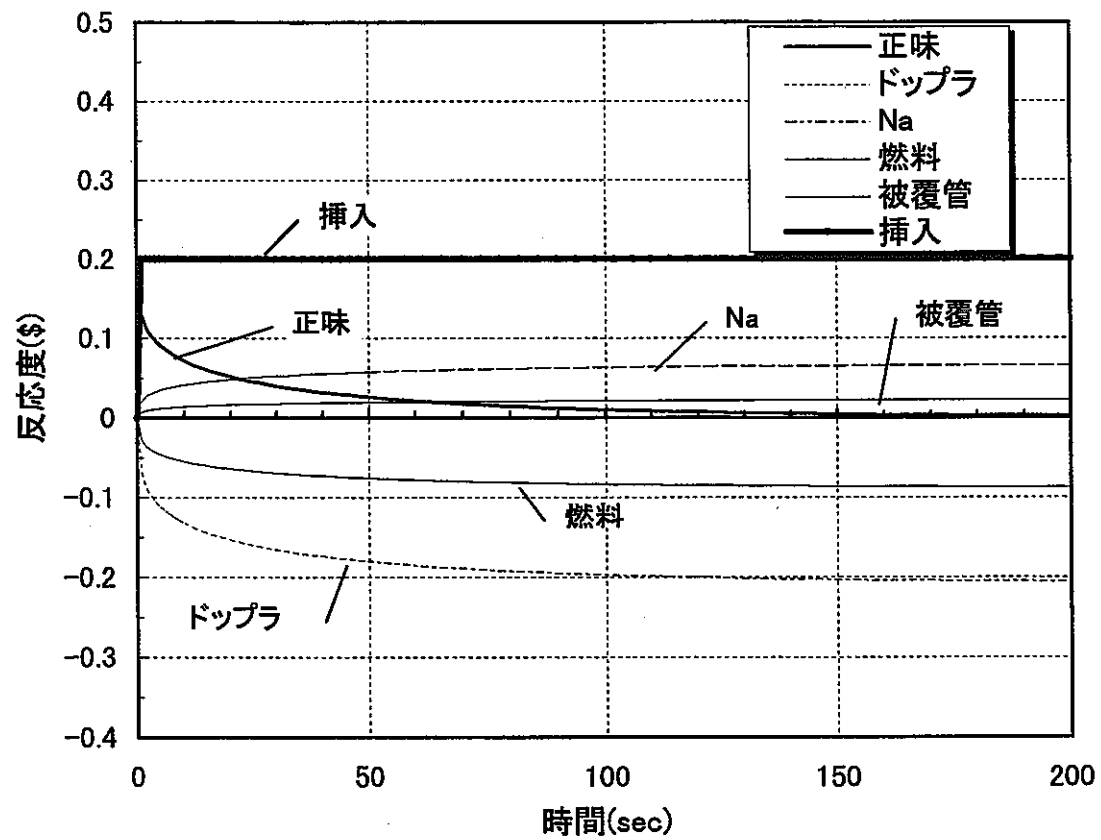
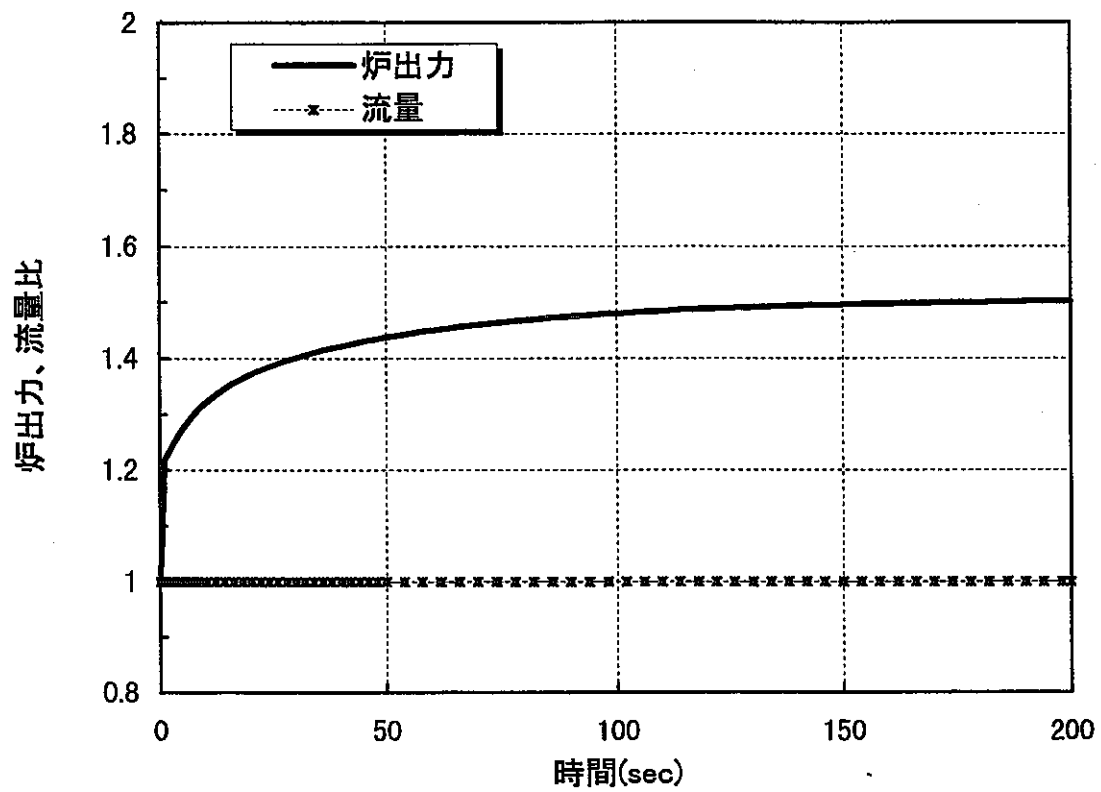


図 3.2-10 D炉心・UTOP・挿入反応度 20ϕ (1/2)

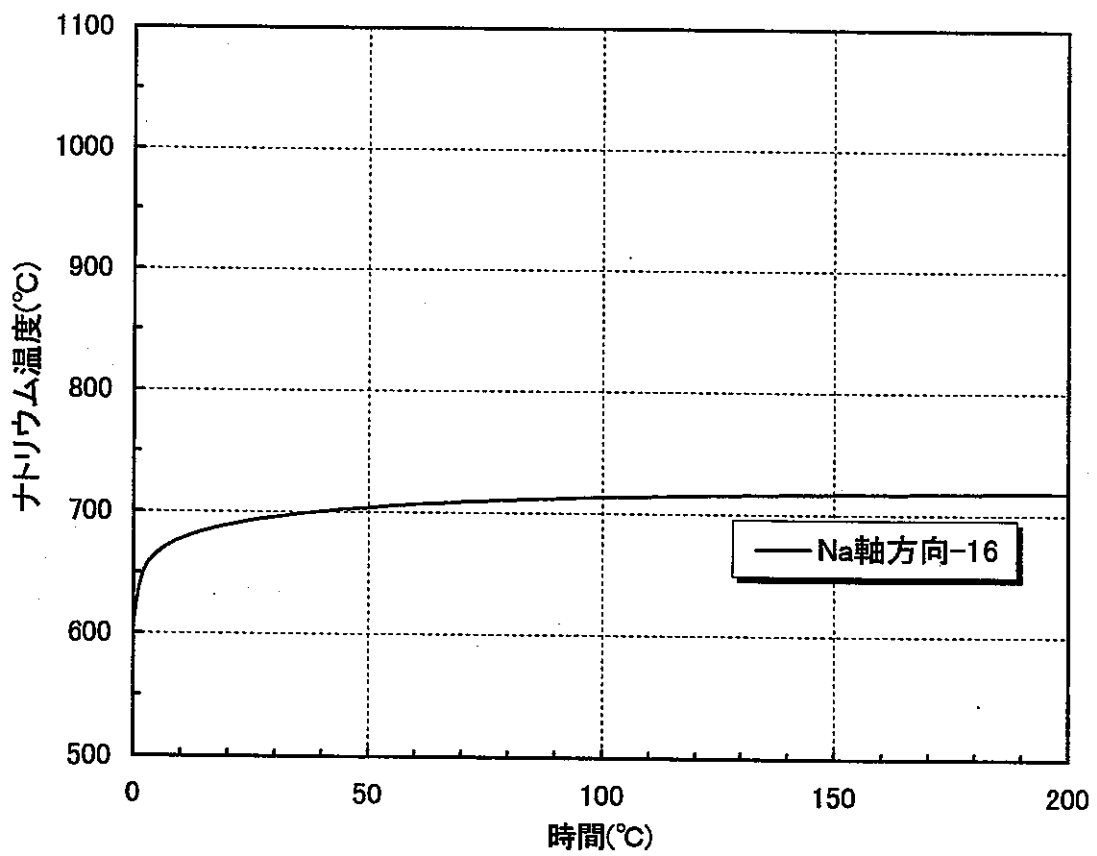
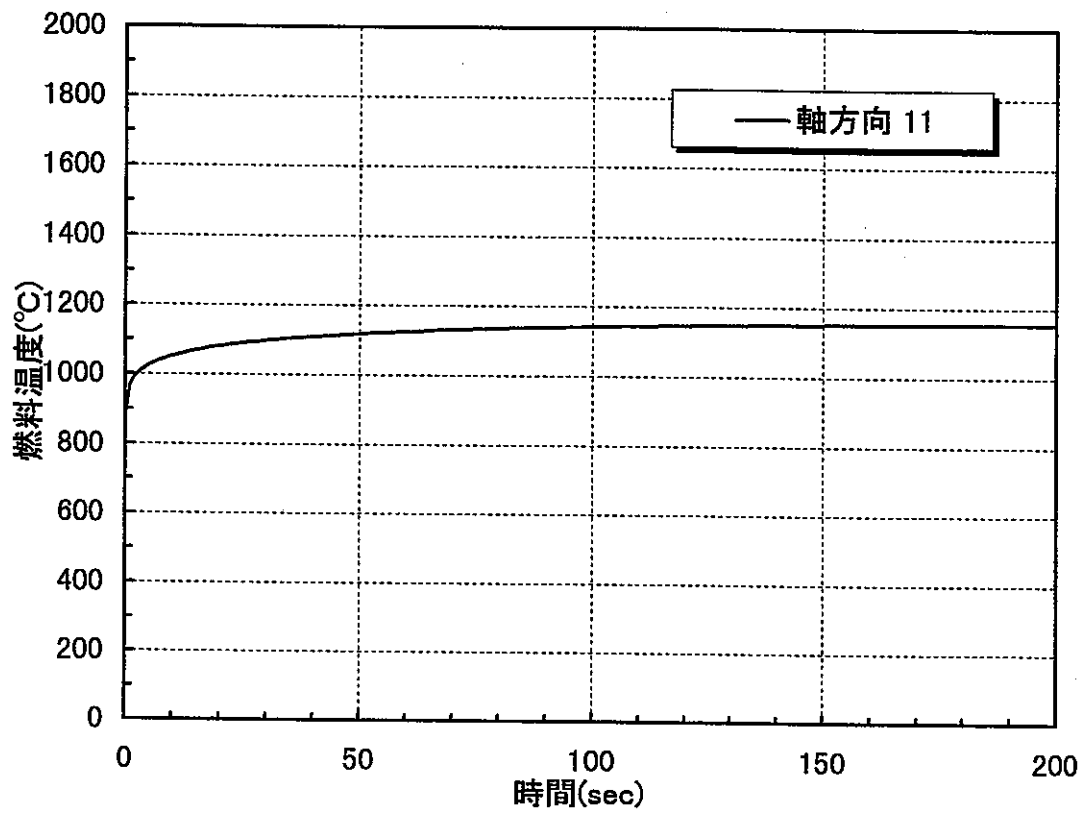


図 3.2-10 D炉心・UTOP・挿入反応度 20ϕ (2/2)

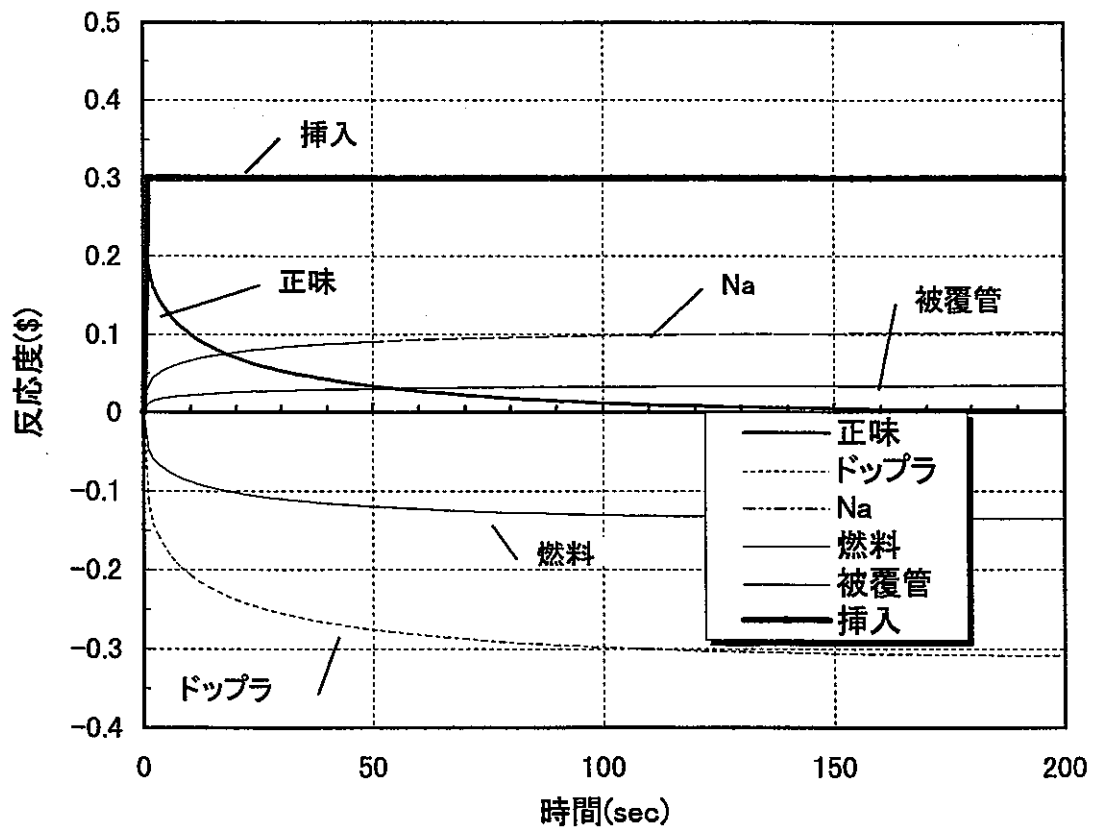
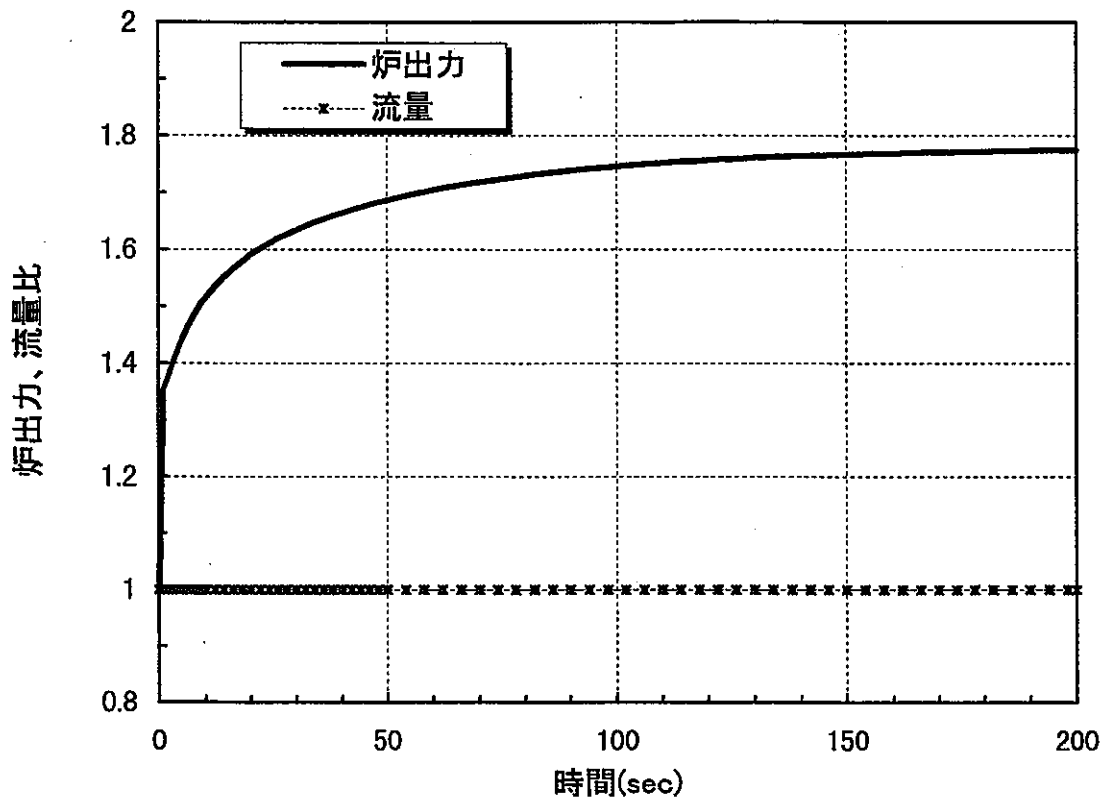


図 3.2-11 D炉心・UTOP・挿入反応度 $30 \text{ } \epsilon (1/2)$

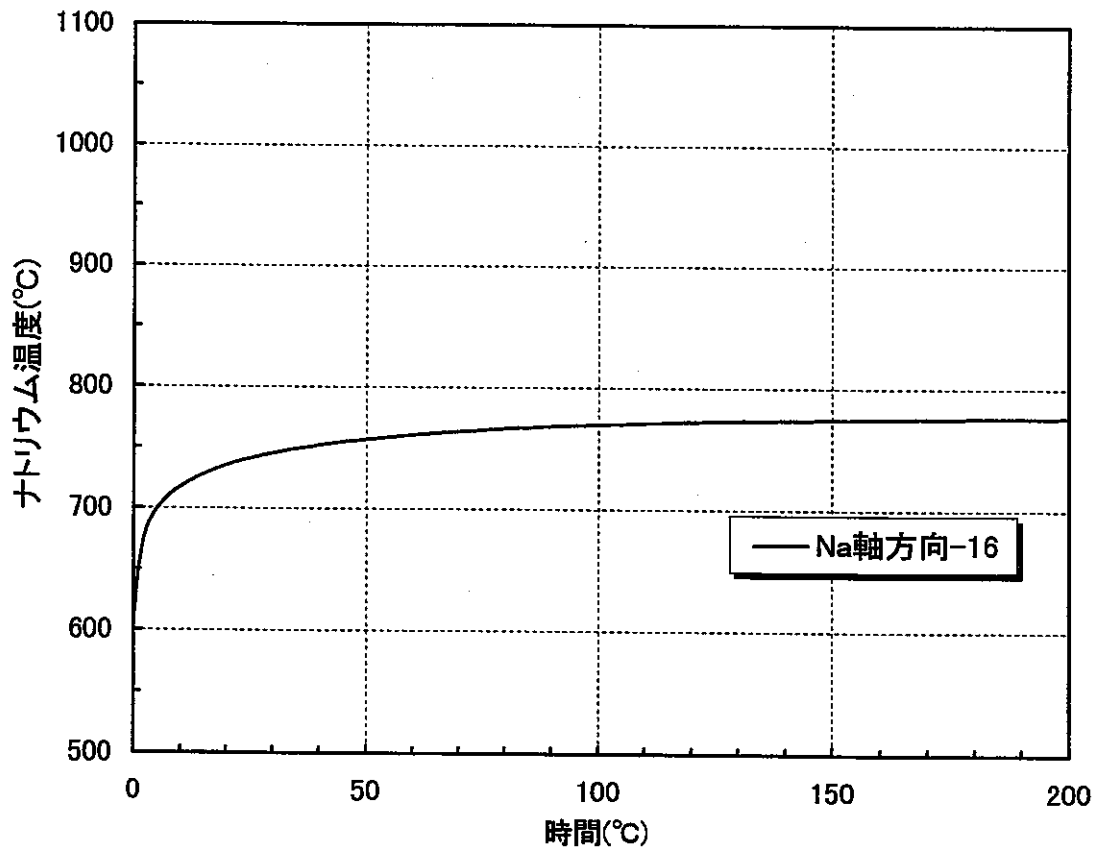
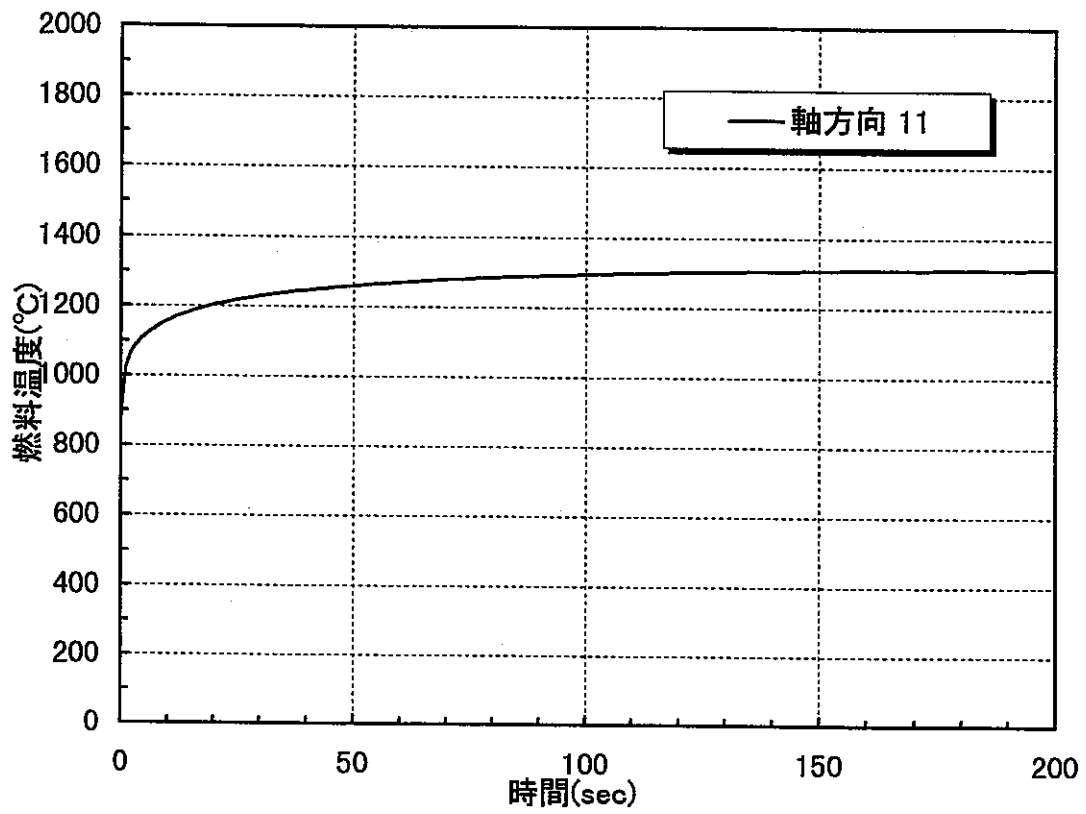


図 3.2-11 D炉心・UTOP・挿入反応度 30¢ (2/2)

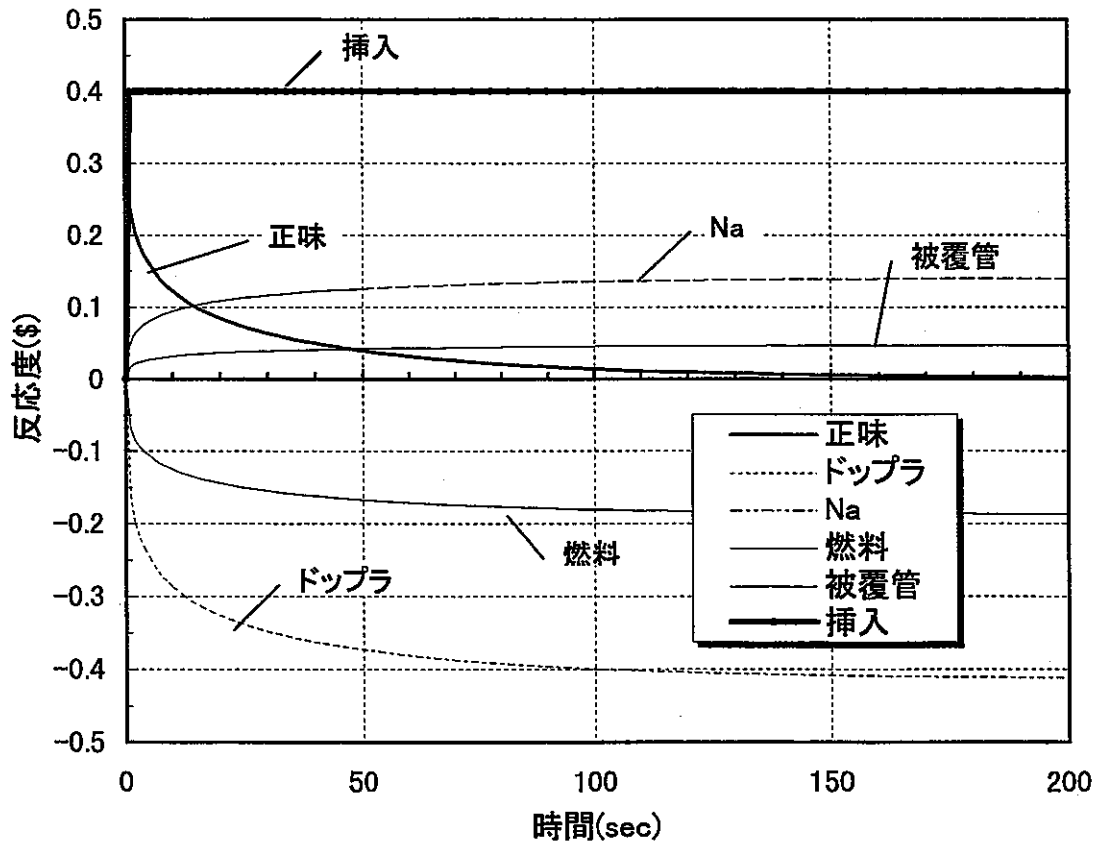
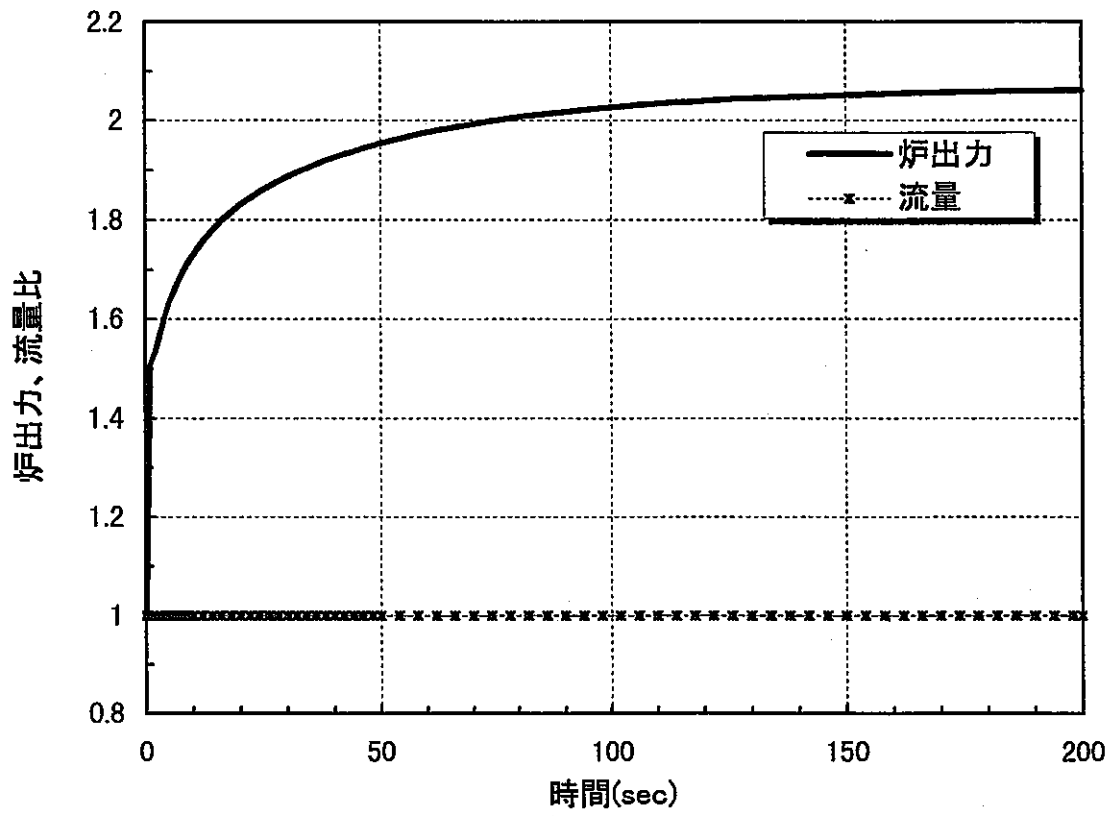


図 3.2-12 D炉心・UTOP・挿入反応度 40ϕ (1/2)

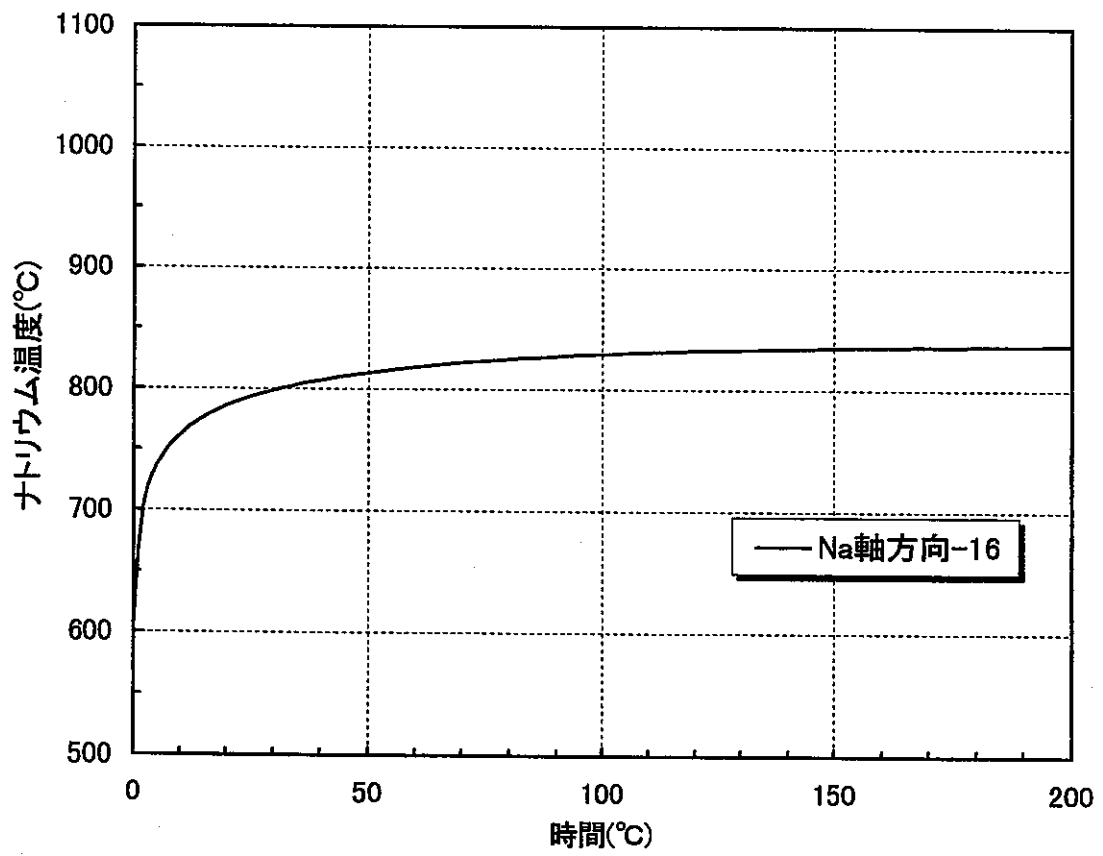
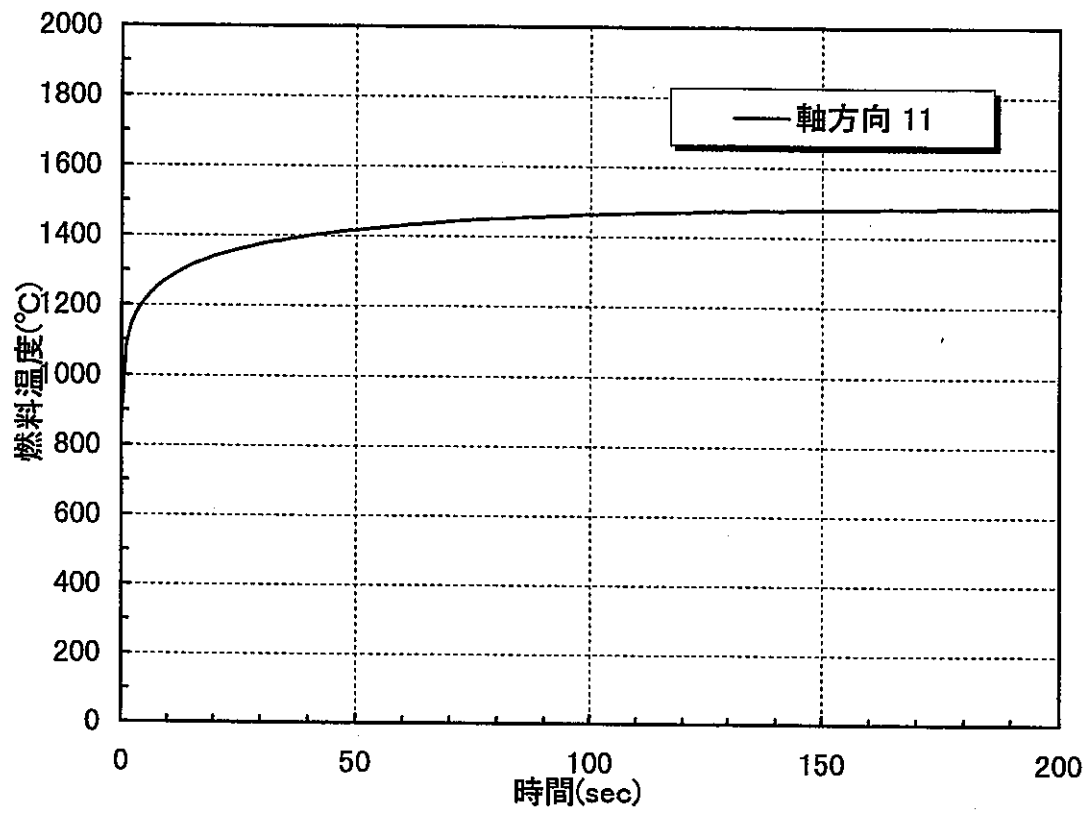


図 3.2-12 D炉心・UTOP・挿入反応度 40φ (2/2)

UTOPに於ける燃料最高温度

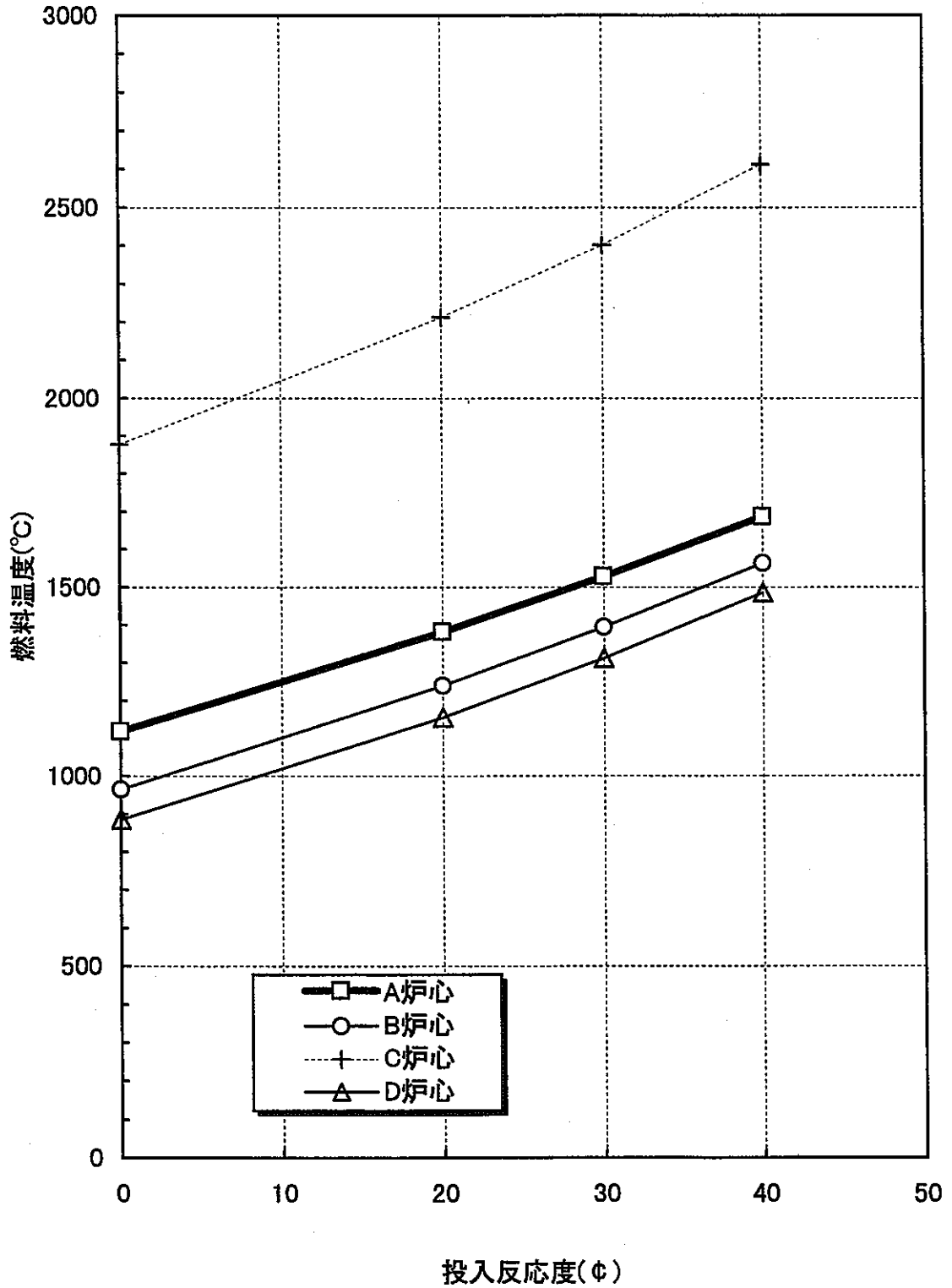


図 3.2-13 UTOPの投入反応度パラメータ計算結果

3.3 ULOF 解析

炉心流量のコーストダウンは、流量半減時間 12 秒として、図 3.3-1 に示す過渡変化を指定する。

また、GEM を想定する場合には、1\$相当の GEM(炉心の軸方向全てが理想的にボイド化したものと仮定した場合に投入され得る反応度を“相当”と呼ぶ)を例にとると、流量コストダウンに対応して図 3.3-2 に示す負の反応度挿入を想定するものとする。1\$相当 GEM の場合、最終的には、約 -61ϕ の負の反応度を期待することとなる。従って、1.5\$相当 GEM という場合は、図の 1.5 倍の反応度想定を指すものとする。解析にあたっては、まず、GEM 無しの解析を行い、次いで 1\$相当 GEM 及び 1.5\$相当 GEM の解析を各々行う。

(1) 炉心-A

解析結果を図 3.3-3~図 3.3-4 に示す。

0.7\$相当 GEM の場合の ULOF 時の炉心の過渡挙動は次の通りである。すなわち、炉心流量の低下に伴い、GEM による負の反応度が挿入され、60 秒程度で -45ϕ 程度に至り、以降整定する。一方、ナトリウム温度、構造材(被覆管、ラップ管)温度が急速に上昇し、正の反応度が挿入される。正の反応度の寄与の主成分はナトリウムのフィードバック反応度である。値としては目立たないが、ドップラ及び燃料の反応度効果は最初の 20 秒間は負となっている点は、定格時の燃料温度の低い窒化物燃料の特徴と言える。

正味の反応度は GEM の効果によって負のレベルを維持し、50 秒程度で極低値・ -18ϕ となる。これにより、炉出力は漸減し、100 秒の時点では定格の 31%程度にまで低下しているが、炉心流量は定格の 11%程度にまで低下しているため、全体的には冷却不足は否めず、炉心ナトリウム温度は上昇し続けている。166 秒で軸方向 16 番(炉心発熱部を超えた上部プレナム部)が 1079°C の極大値に達している。

燃料温度は、定格時の最高温度(1118°C)が軸方向 10 番位置となっているが、この点の燃料温度は過渡時に低下し、これより上方、例えば軸方向 15 番位置(炉心上端位置)の燃料温度は、ナトリウム温度の上昇の影響を受けて、初期の 839°C から 162 秒時点で 1121°C の極大値に到達している。

1\$相当の GEM を想定した場合、GEM の負の反応度挿入効果により、正味の反応度は 50 秒で極低値・ -28ϕ となり、炉出力は速やかに低下する。GEM 反応度は 62 秒以降 -64ϕ で整定する。炉出力が順調に低下するため、窒化物燃料とは言え、燃料平均温度が定格時より低下して、ドップラ並びに燃料の反応度はほぼ初期から正に転じている。正の反応度の主要成分は、この場合はナトリウムよりもドップラ反応度が上回る。

炉出力の速やかな低下により、炉心ナトリウム温度は軸方向 16 番位置に於いて 102 秒程度で極大値 826°C となり、沸騰をクリアしている。

燃料温度は軸方向 6 番から 12 番までは初期温度以上には上昇しない。軸方向 13 番から 15 番までは初期温度より若干上昇した後低下する挙動を示している。

(2)炉心-B

解析結果を図 3.3-5～図 3.3-6 に示す。

0.7\$相当 GEM 装荷の場合の ULOF 時の炉心の過渡挙動は次の通りである。すなわち、炉心流量の低下に伴い、ナトリウム温度、構造材(被覆管、ラップ管)温度が急速に上昇し、正の反応度が挿入される。正の反応度の寄与の主成分はナトリウムのフィードバック反応度である。ドップラ及び燃料の反応度効果は初期の 36 秒間は負で、その後正に転じる。

GEM の反応度効果により正味の反応度は負であり、50 秒程度で極低値・ -20ϕ となる。これにより、炉出力は漸減し、100 秒の時点で 27%、200 秒の時点では定格の 16%程度にまで低下しているが、炉心流量は定格の 6.7%程度にまで低下しているため、全体的には冷却不足の傾向にあり、炉心ナトリウム温度は、166 秒で軸方向 16 番(炉心発熱部を超えた上部プレナム部)が 975°Cの極大値に達している。燃料温度は、定格時の最高温度(965°C)が軸方向 10 番位置となっているが、この点の燃料温度は初期温度以上となることはなく、軸方向 15 番位置(炉心上端位置)の燃料温度は、ナトリウム温度の上昇の影響を受けて、初期の 786°Cから 162 秒時点で 997°C の極大値に到達している。

1\$相当の GEM を想定した場合、主として GEM の負の反応度挿入効果により、正味の反応度は 50 秒程度で極低値・ -33ϕ となり、炉出力は速やかに低下する。炉出力の速やかな低下により、炉心ナトリウム温度は軸方向 16 番位置に於いて 32 秒程度で極大値 751°C となり、沸騰温度を十分に下回る。

正の反応度の主要成分は、初期の短時間はナトリウムの反応度であるが、50 秒付近からは、むしろドップラ反応度が主要な正の反応度成分となっている。

(3)炉心-C

解析結果を図 3.3-7～図 3.3-8 に示す。

ヘリウムボンド炉心に於いては、定格時の燃料平均温度がナトリウム等より高く、炉出力の低下に伴い、ドップラの正の反応度が大きく挿入される点の特徴である。1.5\$相当の GEM を装荷した場合にも、炉心流量の低下に伴い、ドップラの正の反応度が挿入され、またナトリウム温度、構造材(被覆管、ラップ管)温度が急速に上昇し、これらによっても正の反応度が挿入される。正の反応度の寄与の主成分はドップラ反応度及び燃料の収縮に依る反応度である。

正味の反応度は 46 秒程度で極低値・ -29ϕ となる。これにより、炉出力は漸減し、200 秒の時点では定格の 14%程度にまで低下し、一方、炉心流量は定格の 6.7%程度にまで低下しており、炉心ナトリウム温度は、174 秒で軸方向 16 番(炉心発熱部を超えた上部プレナム部)が 887°C の極大値に達している。燃料温度は、定格時の最高温度(1878°C)が軸方向 10 番位置となっているが、この点を含め全体的に初期より上昇することはない。

1.7\$相当の GEM を想定した場合、主として GEM の負の反応度挿入効果により、正味の反応度は 54 秒程度で極低値・ -35ϕ となり、炉出力は速やかに低下する。炉出力の低下により、炉心ナトリウム温度は軸方向 16 番位置に於いて 26 秒程度で極大値 725°C となる。

燃料温度は初期温度以上には上昇しない。

(4)D 炉心

解析結果を図 3.3-9～図 3.3-10 に示す。

0.7\$相当 GEM 装荷の場合の ULOF 時の炉心の過渡挙動は次の通りである。すなわち、炉心流量の低下に伴い、ナトリウム温度、構造材(被覆管、ラップ管)温度が急速に上昇し、正の反応度が挿入される。正の反応度の寄与の主成分はナトリウムのフィードバック反応度である。ドブブラ及び燃料の反応度効果は初期の 36 秒間は負で、その後正に転じる。

GEM の反応度効果により正味の反応度は負であり、56 秒程度で極低値・ -22ϕ となる。これにより、炉出力は漸減し、100 秒の時点で 24%、200 秒の時点では定格の 13%程度にまで低下している。炉心ナトリウム温度は、158 秒で軸方向 16 番(炉心発熱部を超えた上部プレナム部)が 888°C の極大値に達している。燃料温度は、定格時の最高温度(885°C)が軸方向 11 番位置となっているが、この点を含め、上方の全ての部位に於いて燃料温度は初期温度以上となるが、最高温度は軸方向 15 番位置(炉心上端位置)に現われ、102 秒で 914°C の極大値に到達している。

1\$相当の GEM を想定した場合、主として GEM の負の反応度挿入効果により、正味の反応度は 54 秒程度で極低値・ -36ϕ となり、炉出力は速やかに低下する。炉出力の速やかな低下により、炉心ナトリウム温度は軸方向 16 番位置に於いて 28 秒程度で極大値 735°C となり、沸騰温度を十分に下回る。

正の反応度の主要成分は、初期の短時間はナトリウムの反応度であるが、30 秒付近からは、むしろドブブラ反応度が主要な正の反応度成分となっている。

(5)ULOF 解析の評価

パッシブシャットダウンの観点からは、D 炉心(ナトリウムボンド・充填率 50%、最大線出力 975W/cm)が最も裕度が高く、炉心 C(ヘリウムボンド)が最も裕度が低い。

いずれの炉心についても、GEM の反応度効果によって炉心の沸騰を回避することが可能であり、必要 GEM 反応度はナトリウム温度を 900℃以下に抑制することをめやすとした場合、図 3.3-11 に整理して示す通り、概略下記となる。

A 炉心： 0.95\$

B 炉心： 0.8 \$

C 炉心： 1.5\$

D 炉心： 0.7\$

流量コストダウン

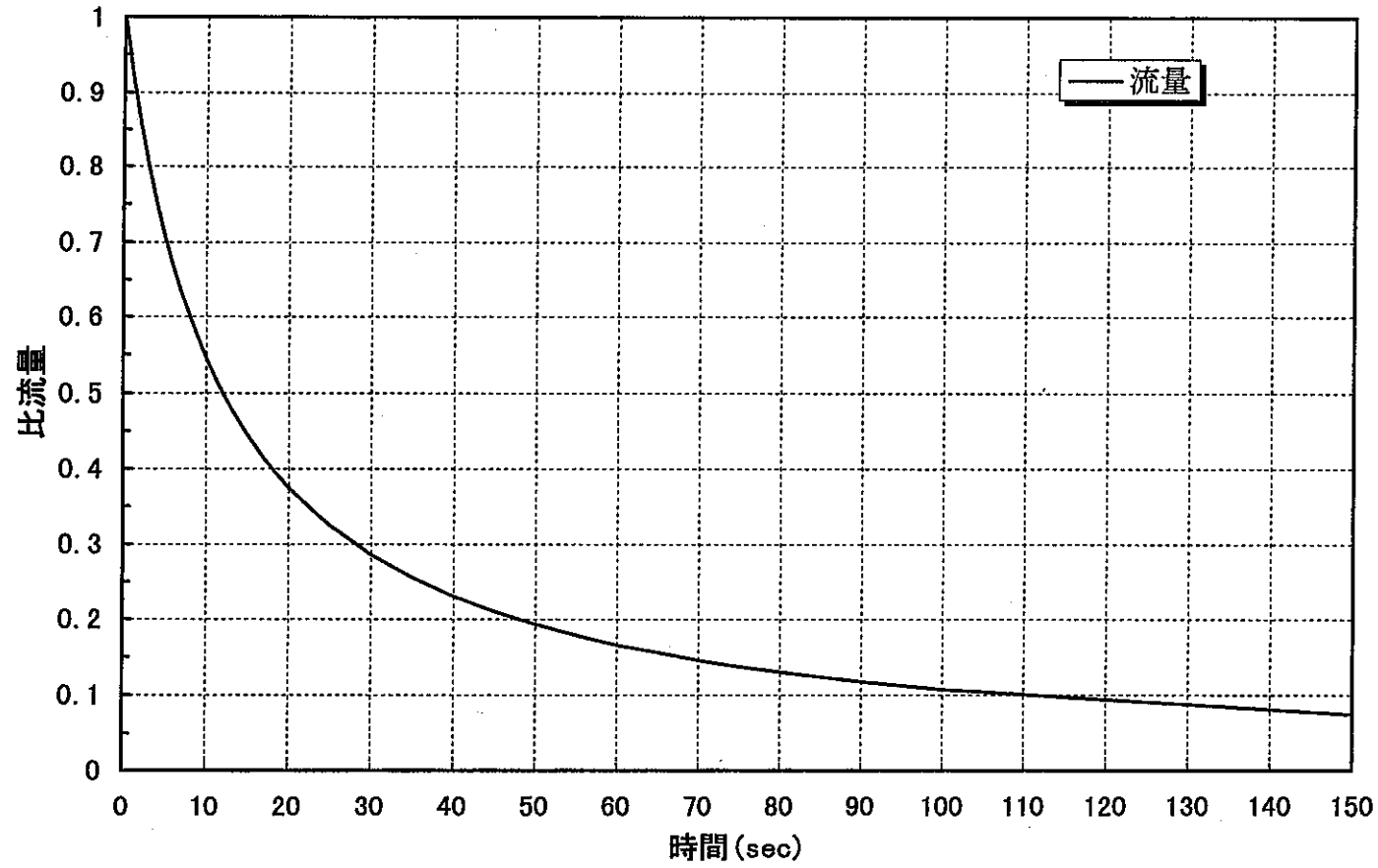


図 3.3-1 流量コストダウン

1\$相当のGEM反応度投入曲線

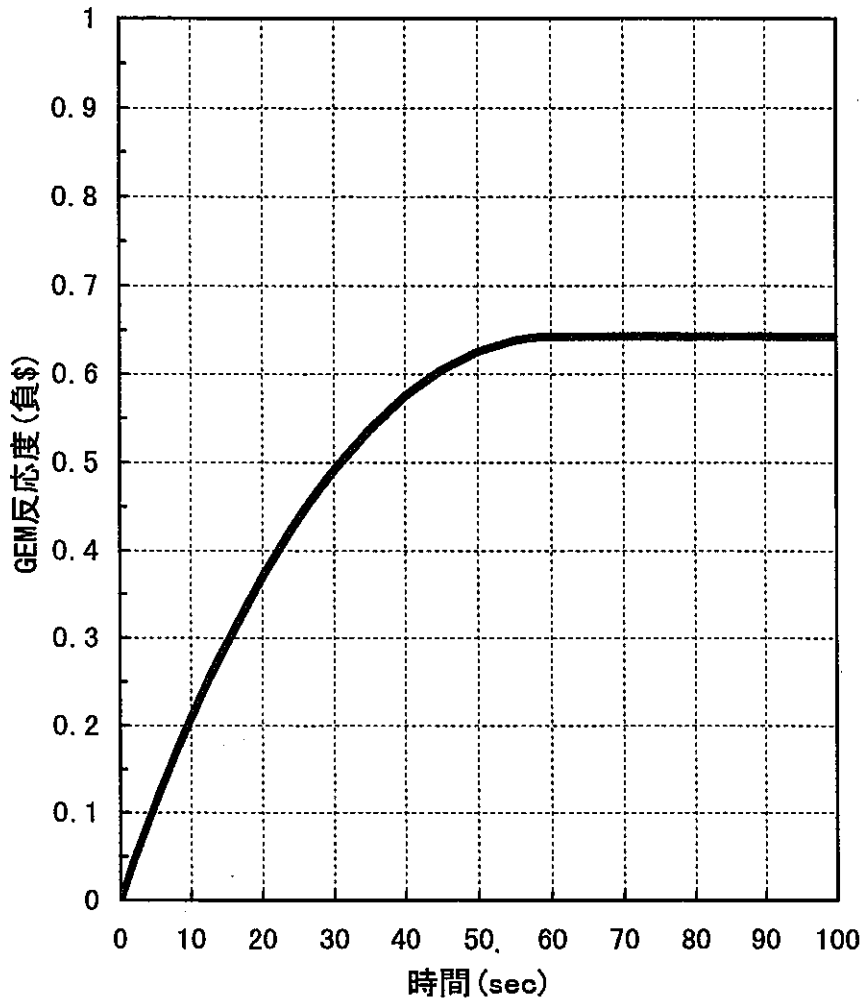


図 3.3-2 1\$相当のGEMによる負の反応度挿入

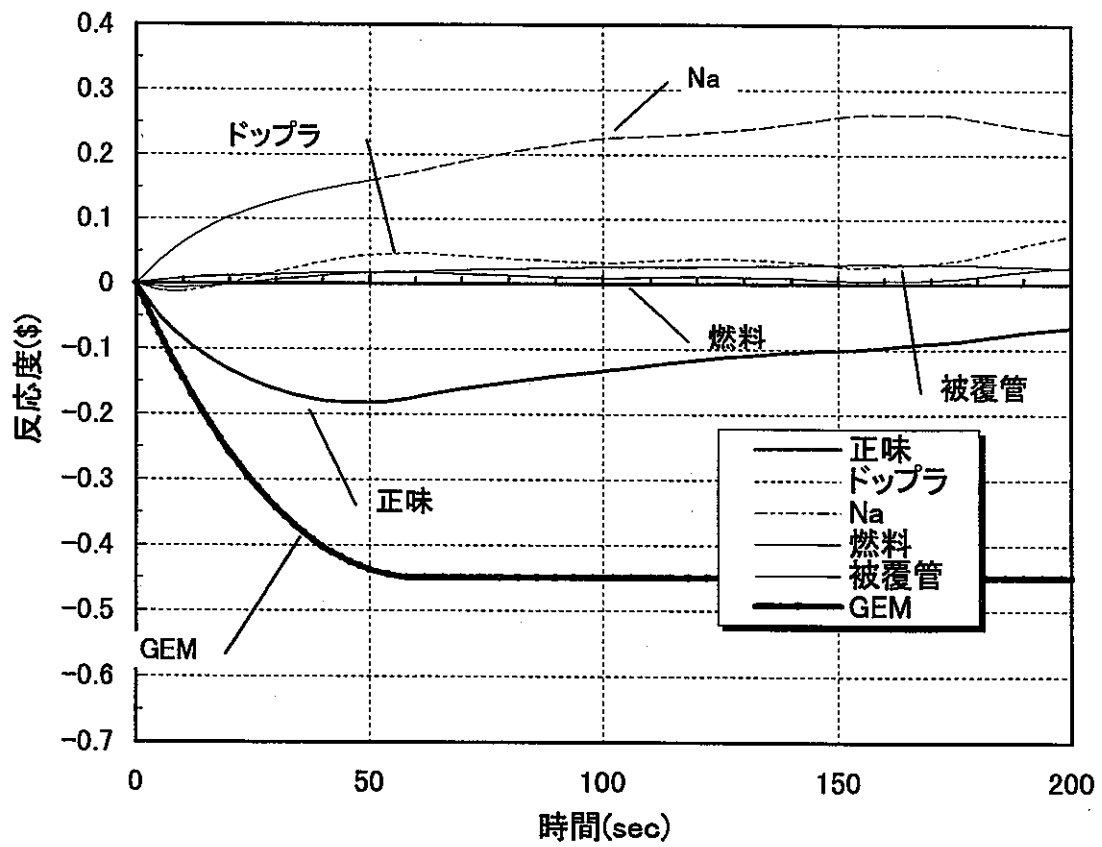
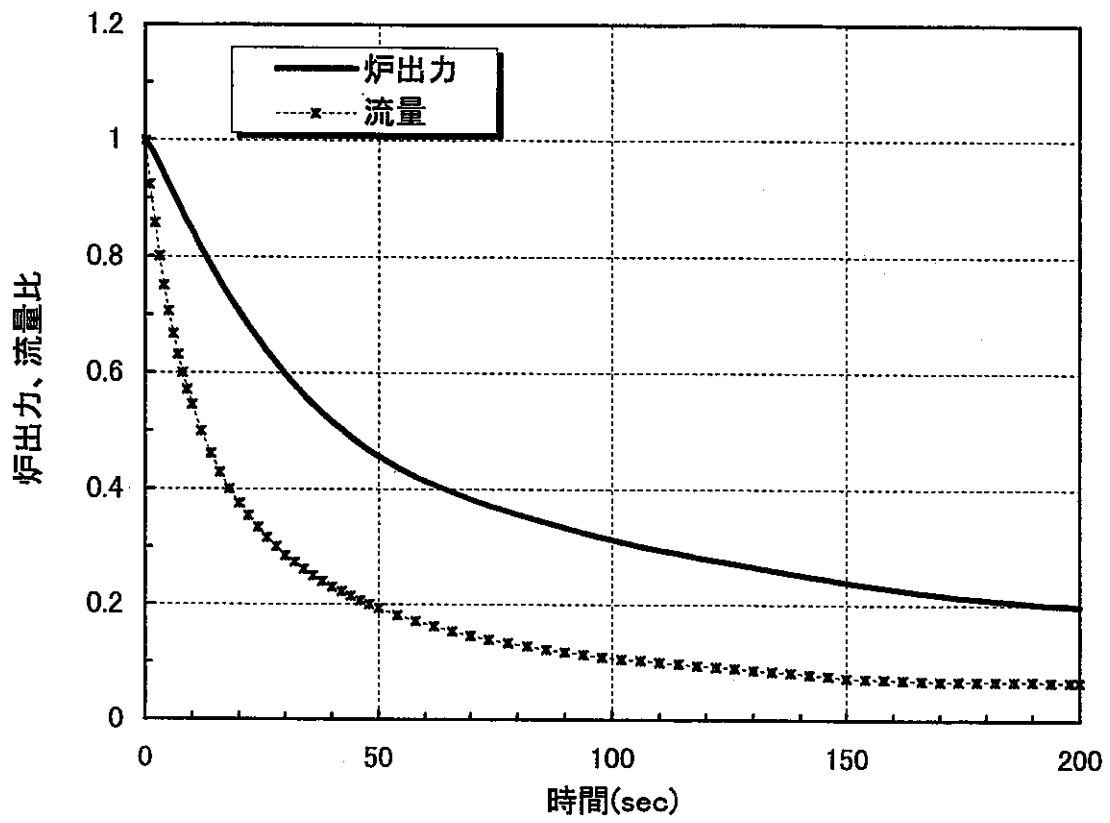


図 3.3-3 A炉心・ULOF・GEM 0.7\$(1/2)

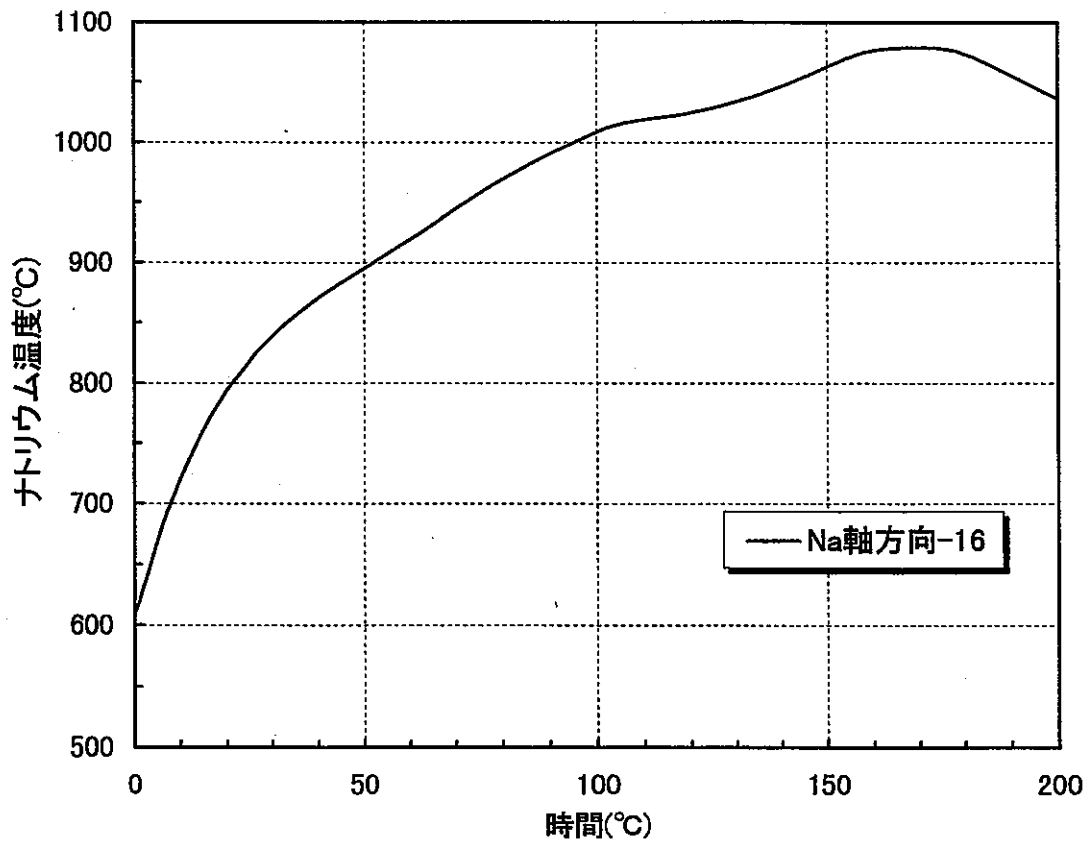
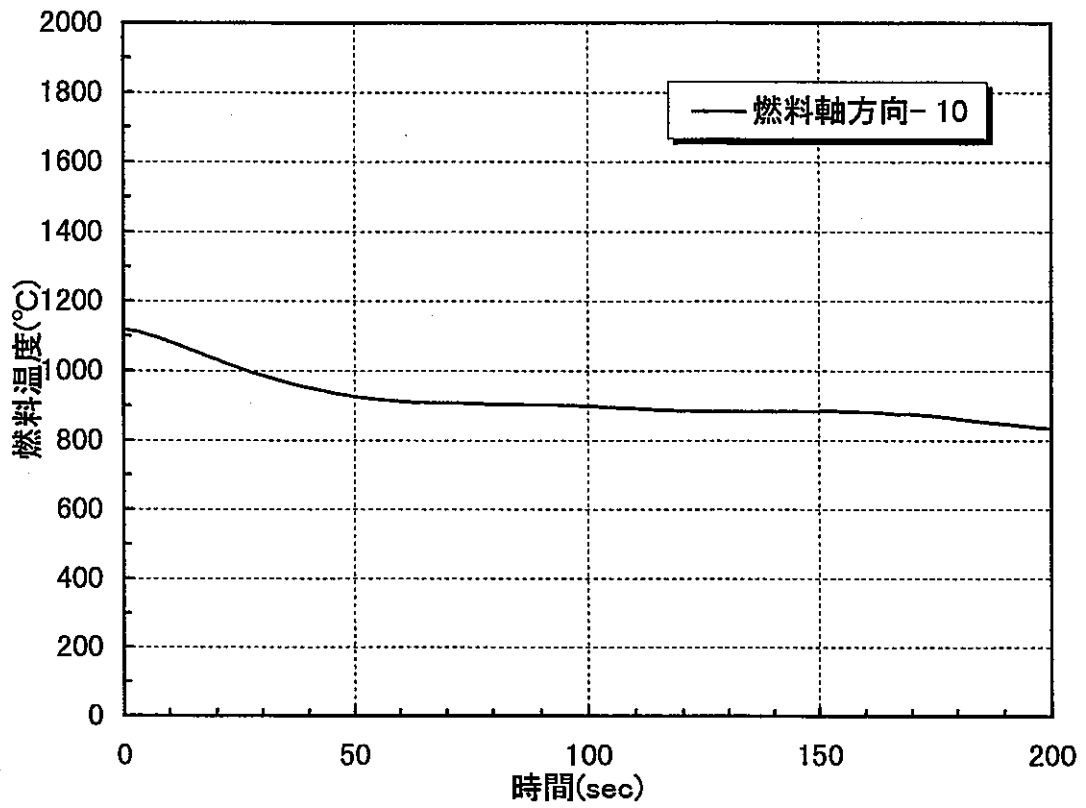


図 3.3-3 A炉心・ULOF・GEM 0.7\$(2/2)

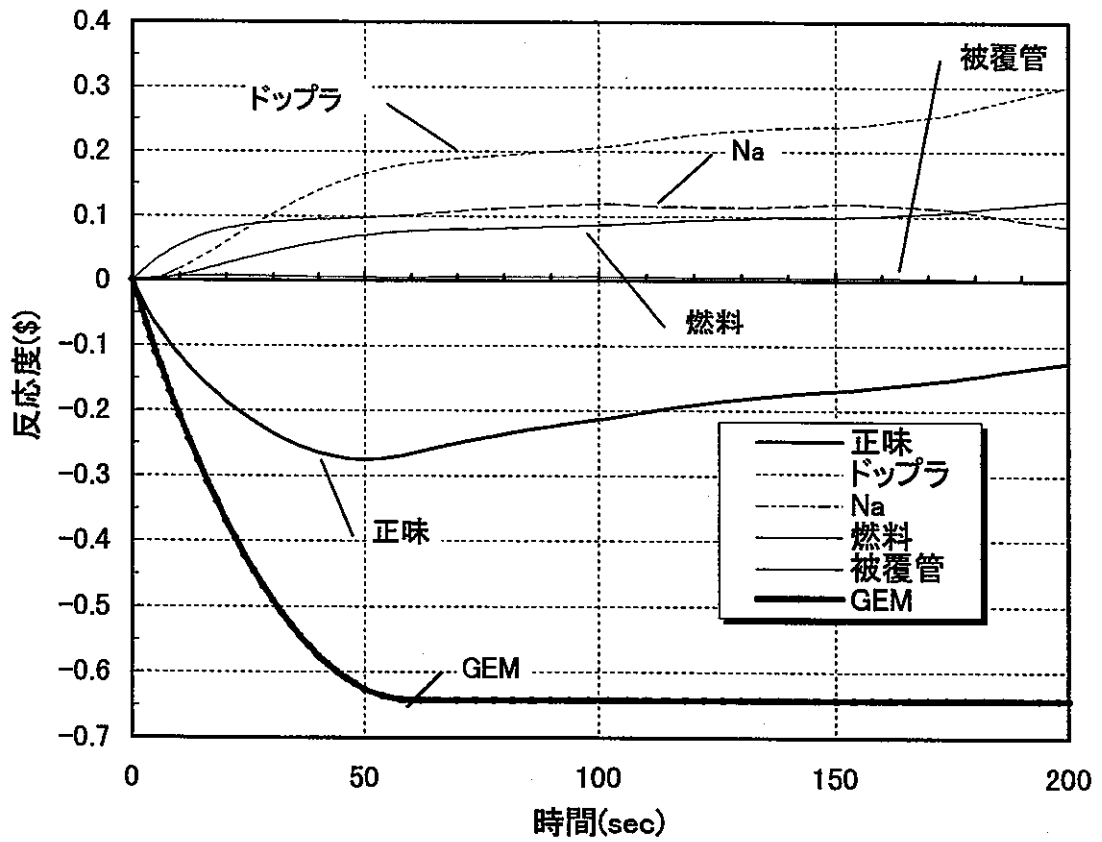
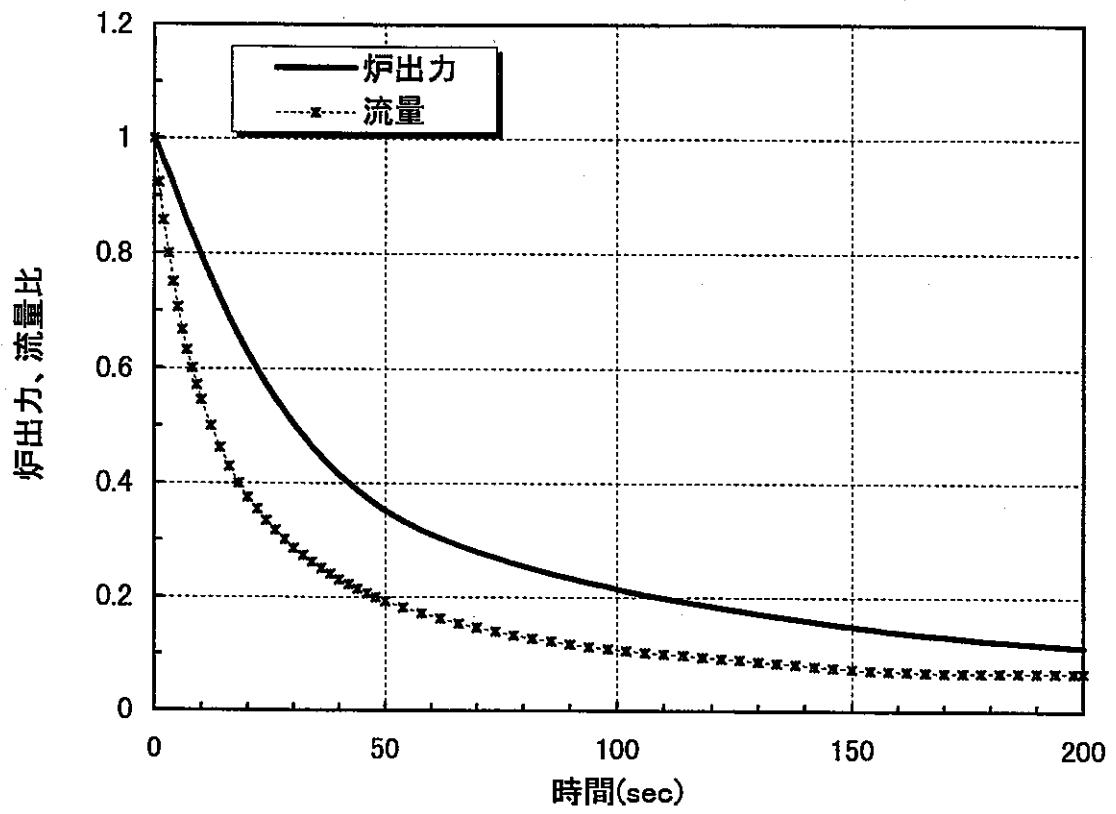


図 3.3-4 A炉心・ULOF・GEM 1\$(1/2)

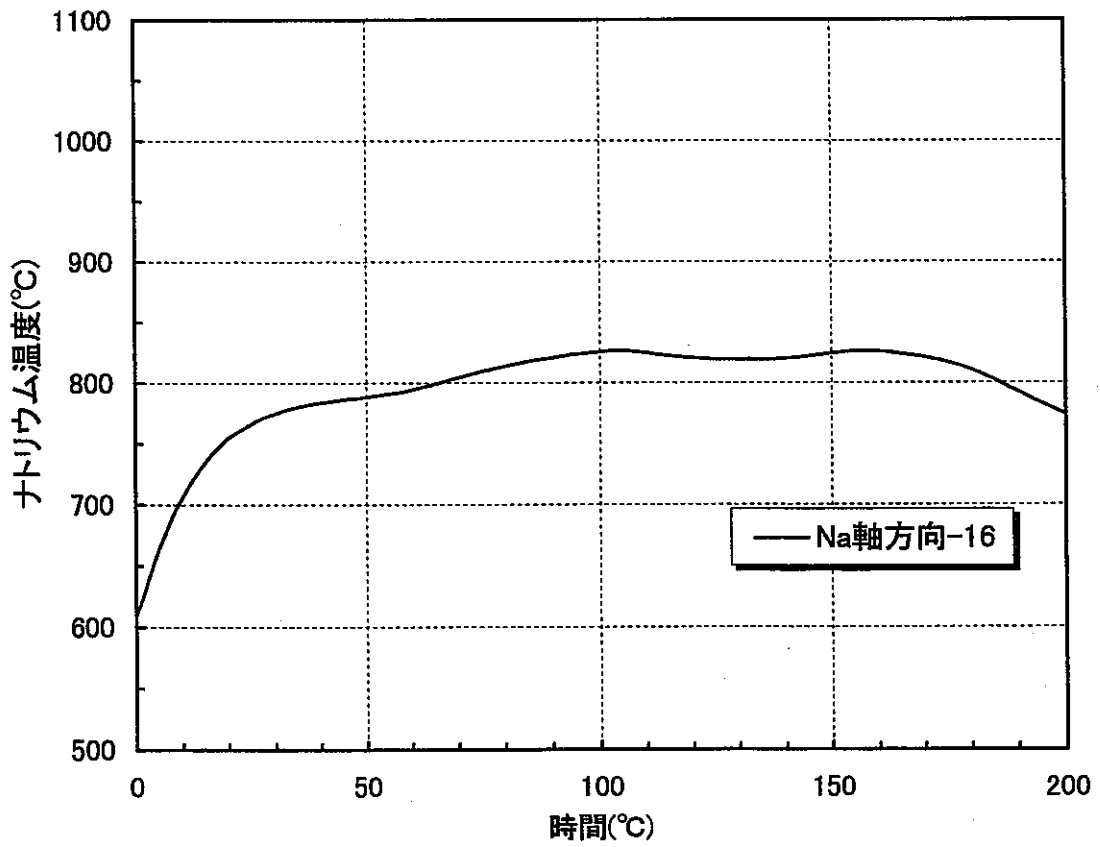
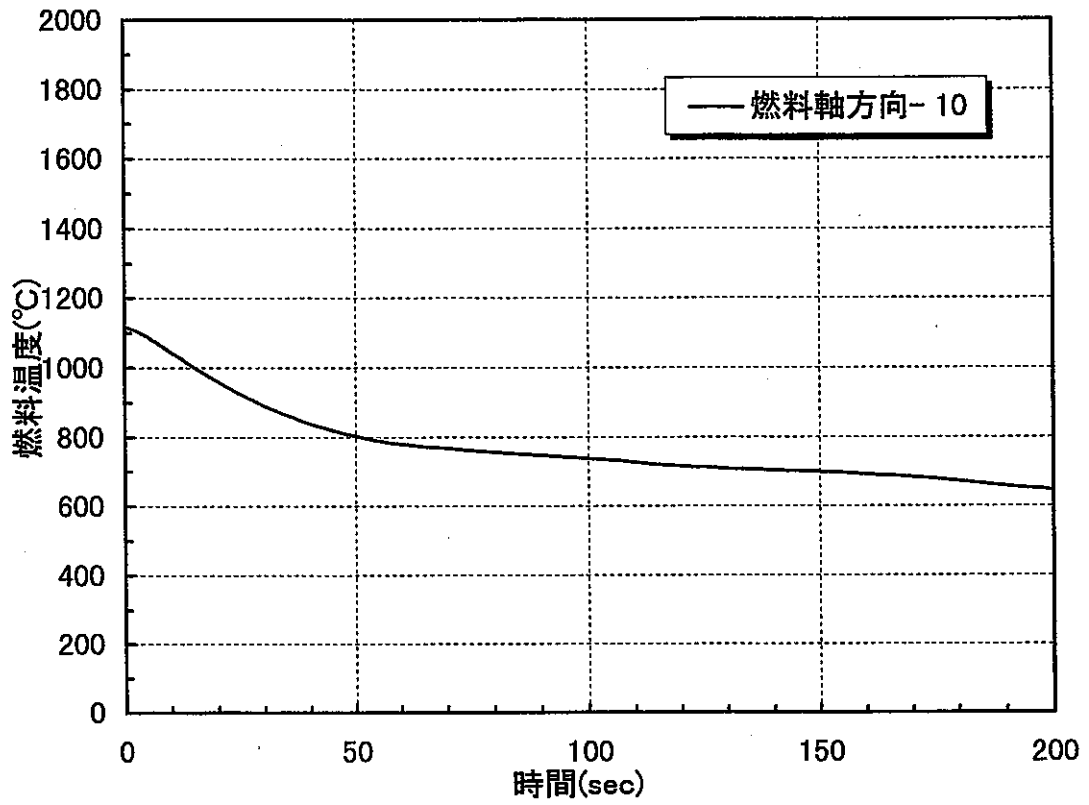


図 3.3-4 A炉心・ULOF・GEM 1\$(2/2)

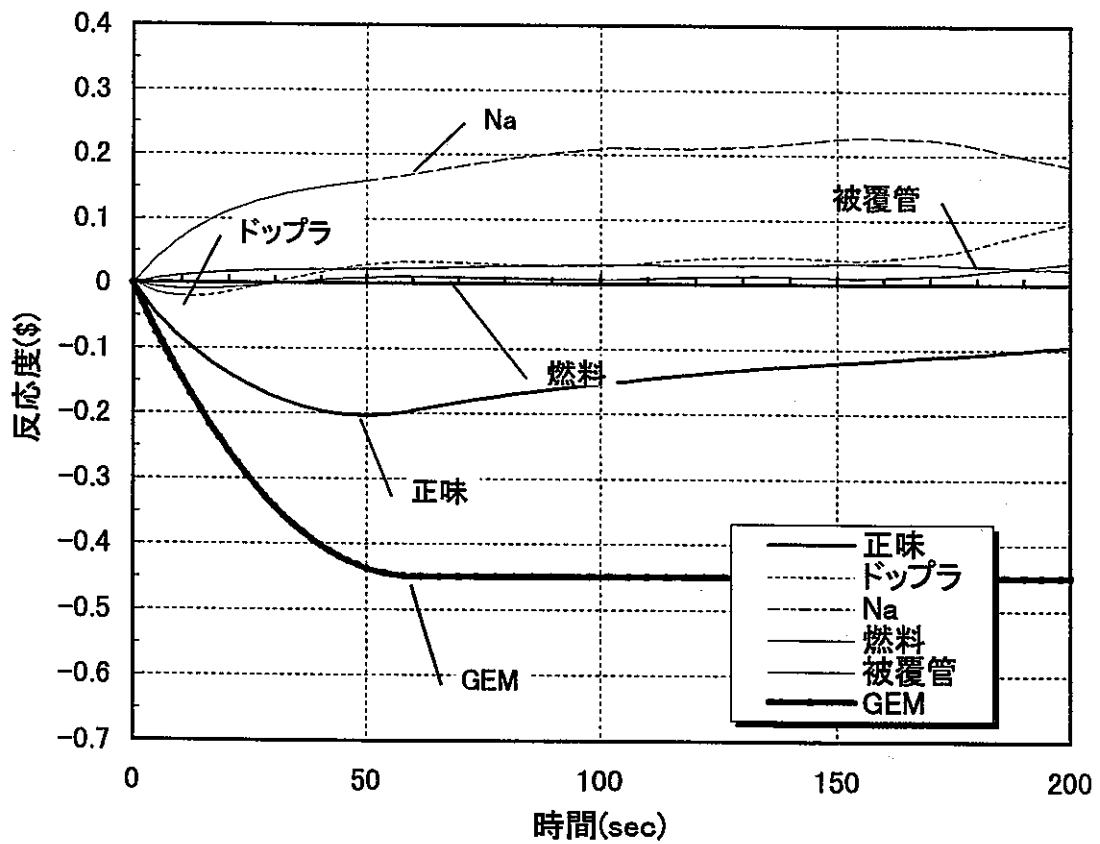
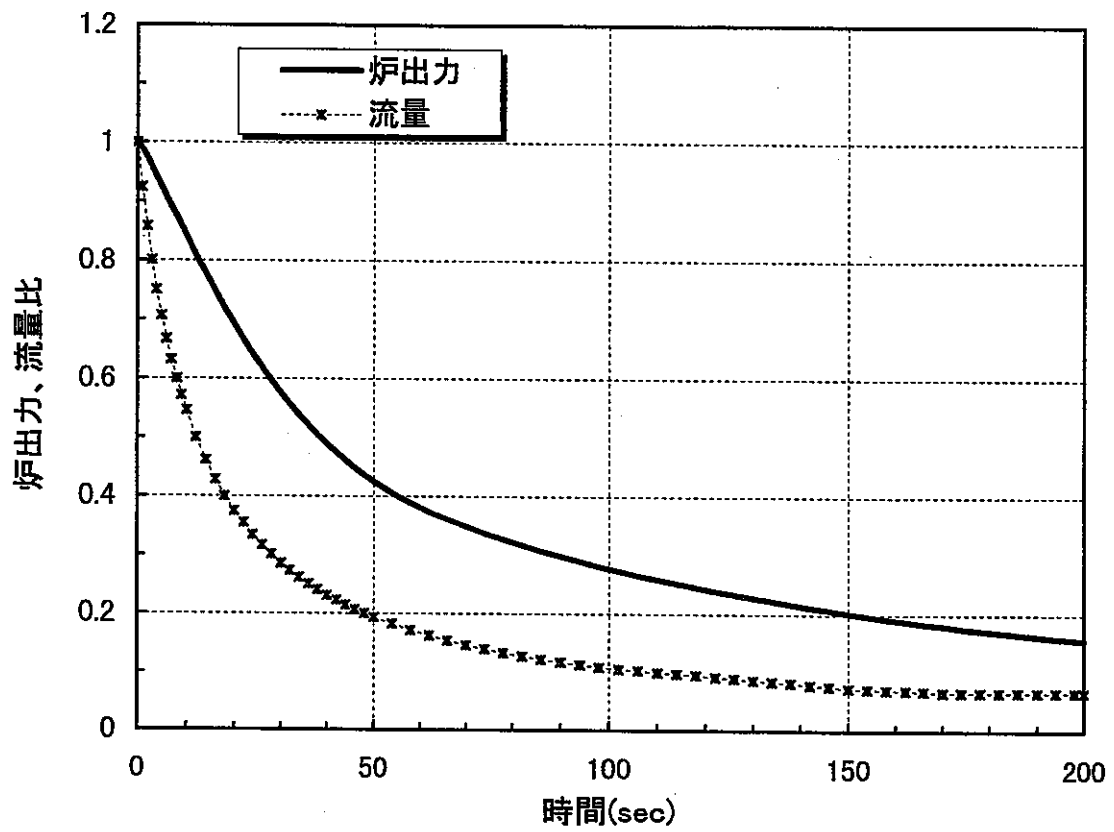


図 3.3-5 B炉心・ULOF・GEM 0.7\$(1/2)

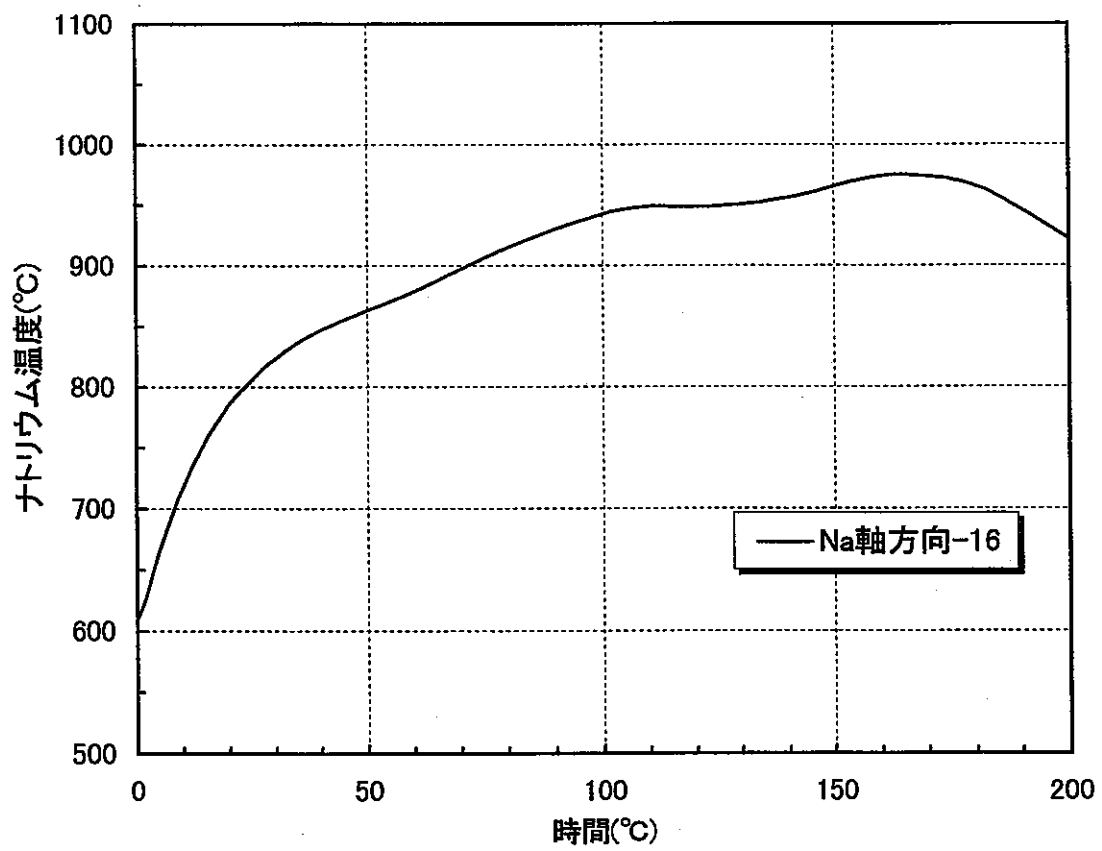
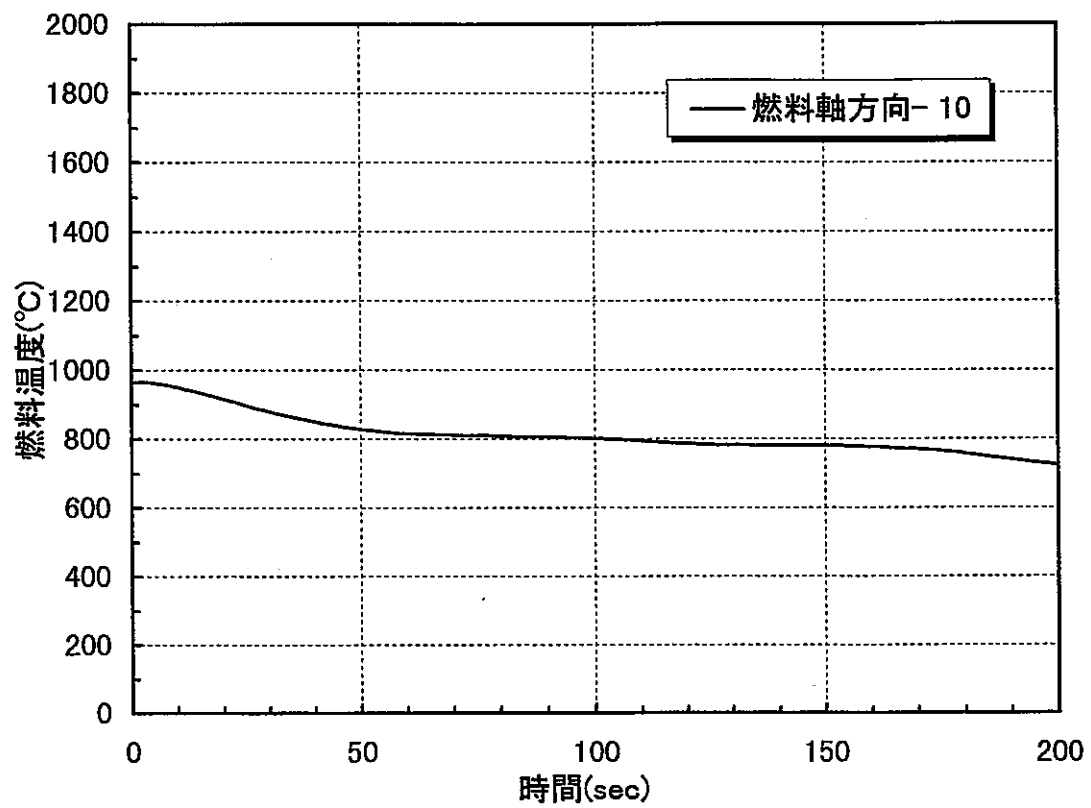


図 3.3-5 B炉心・ULOF・GEM 0.7\$(2/2)

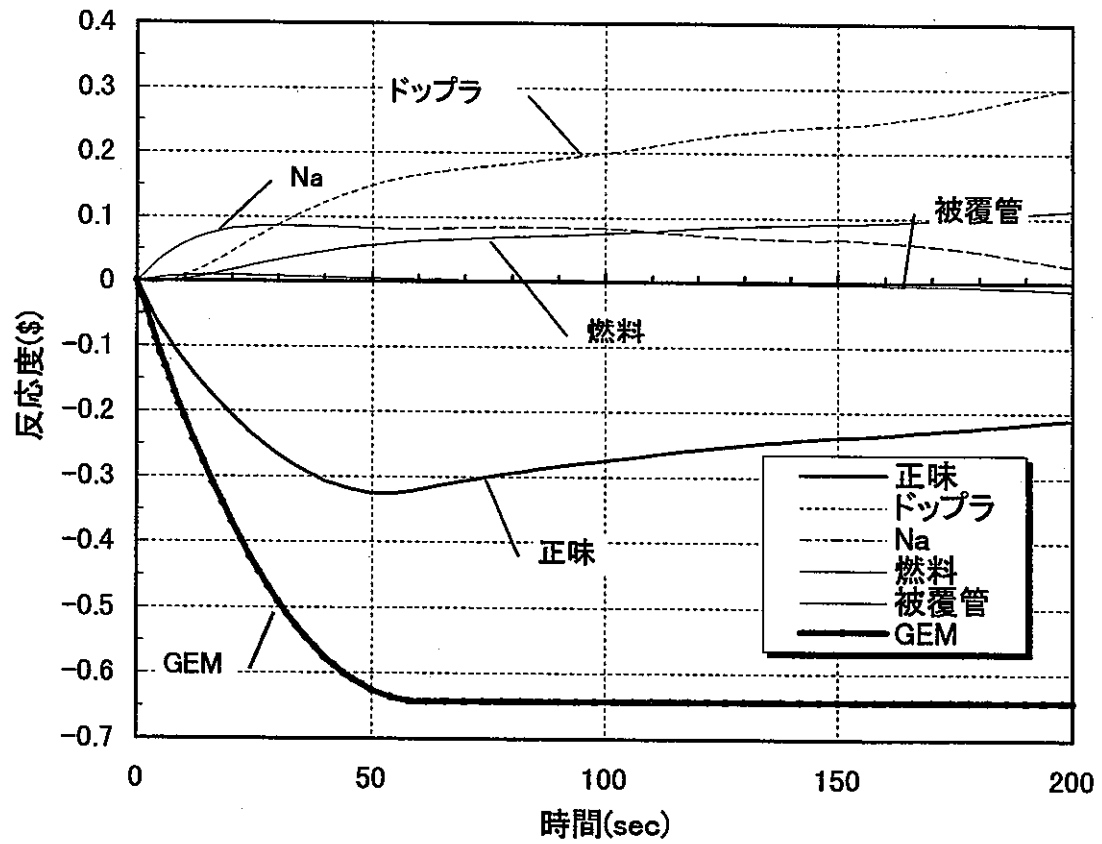
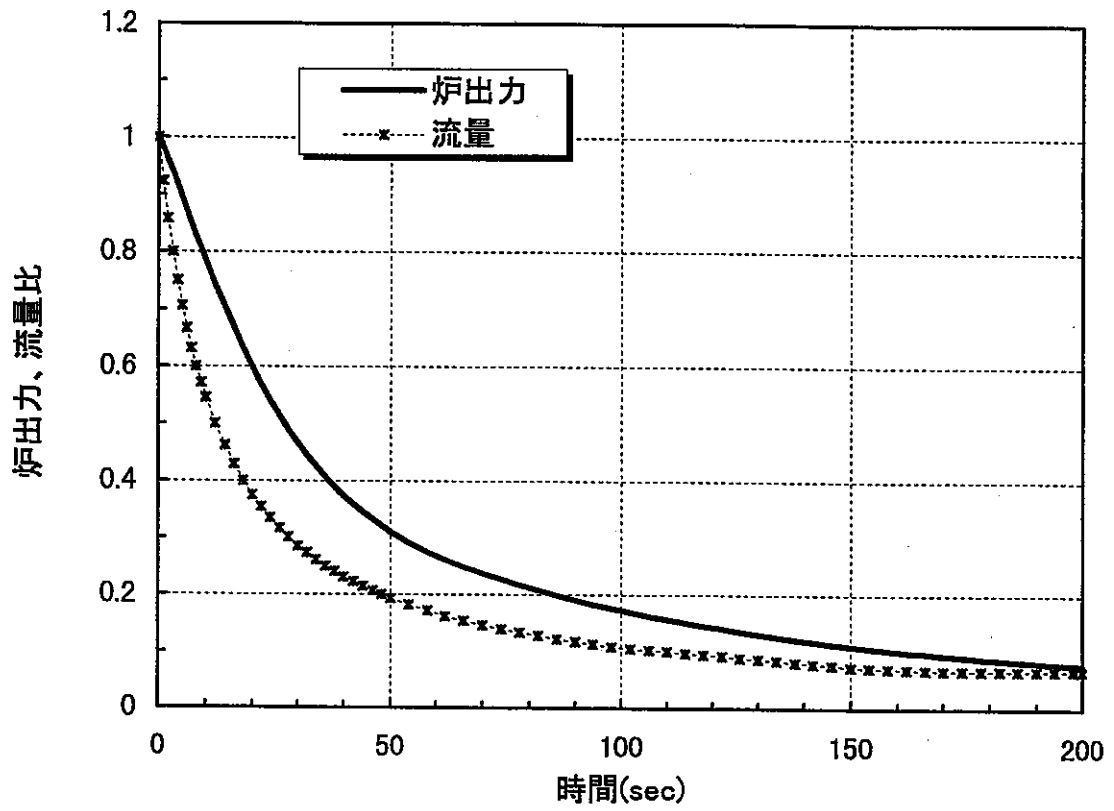


図 3.3-6 B炉心・ULOF・GEM 1\$(1/2)

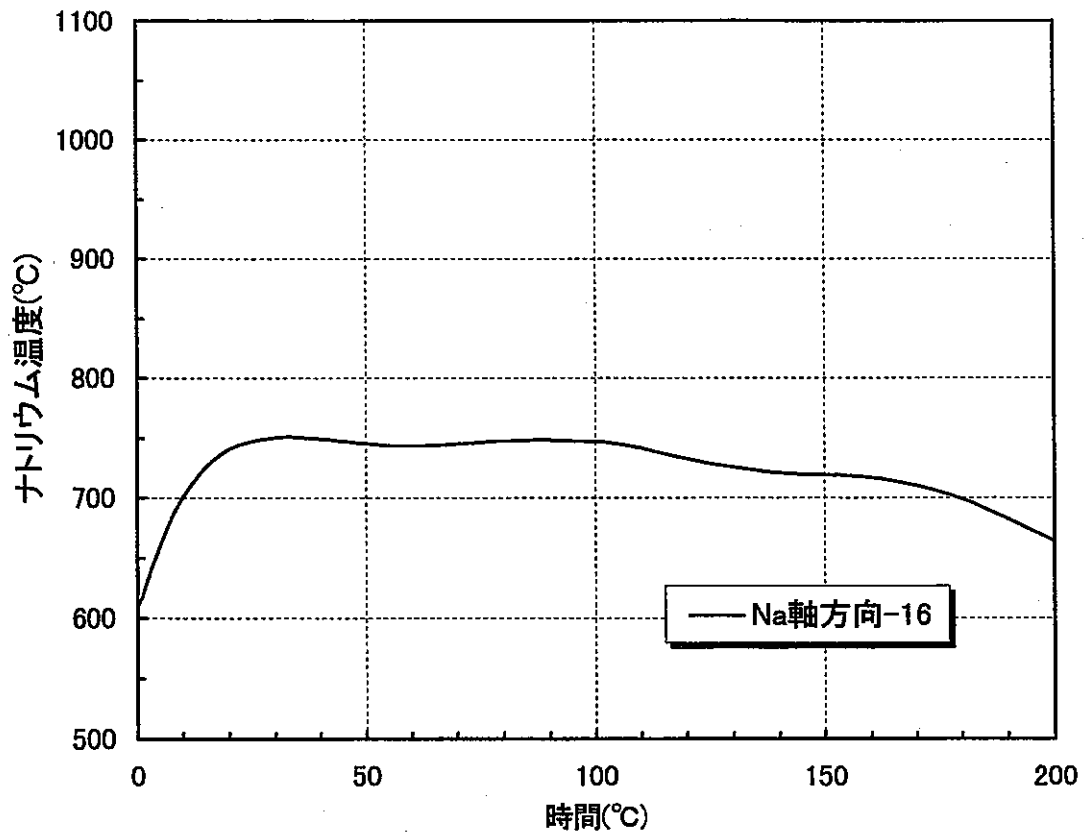
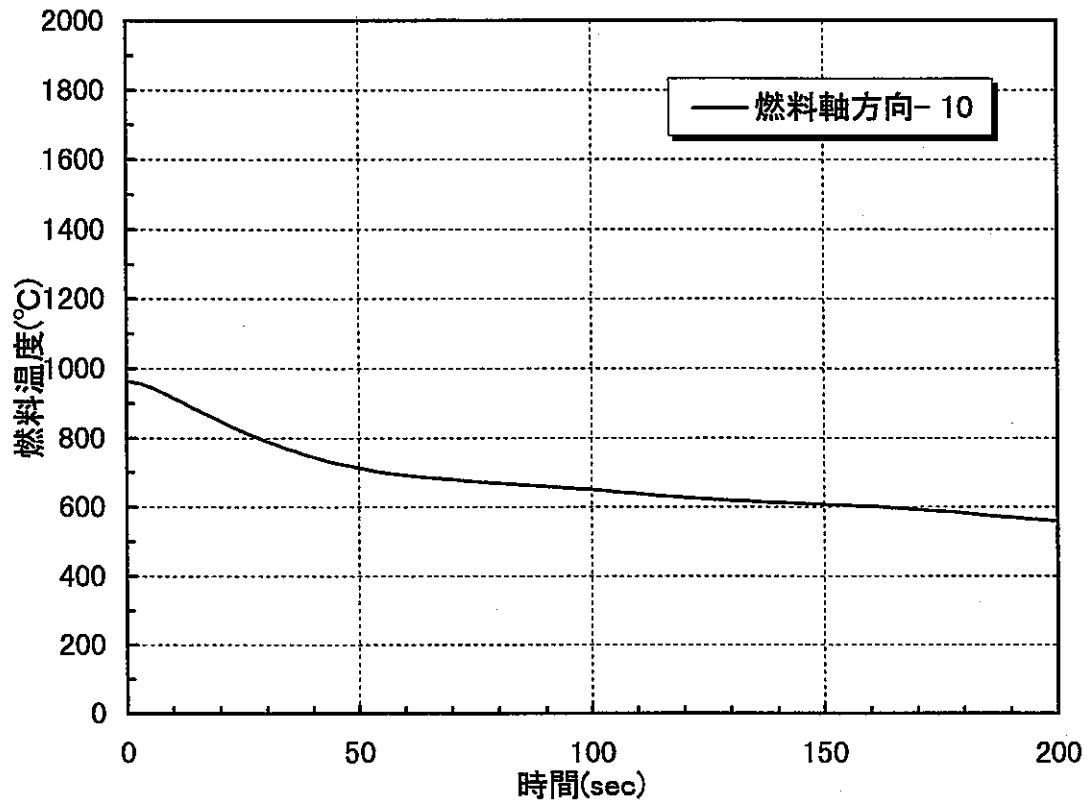


図 3.3-6 B炉心・ULOF・GEM 1\$(2/2)

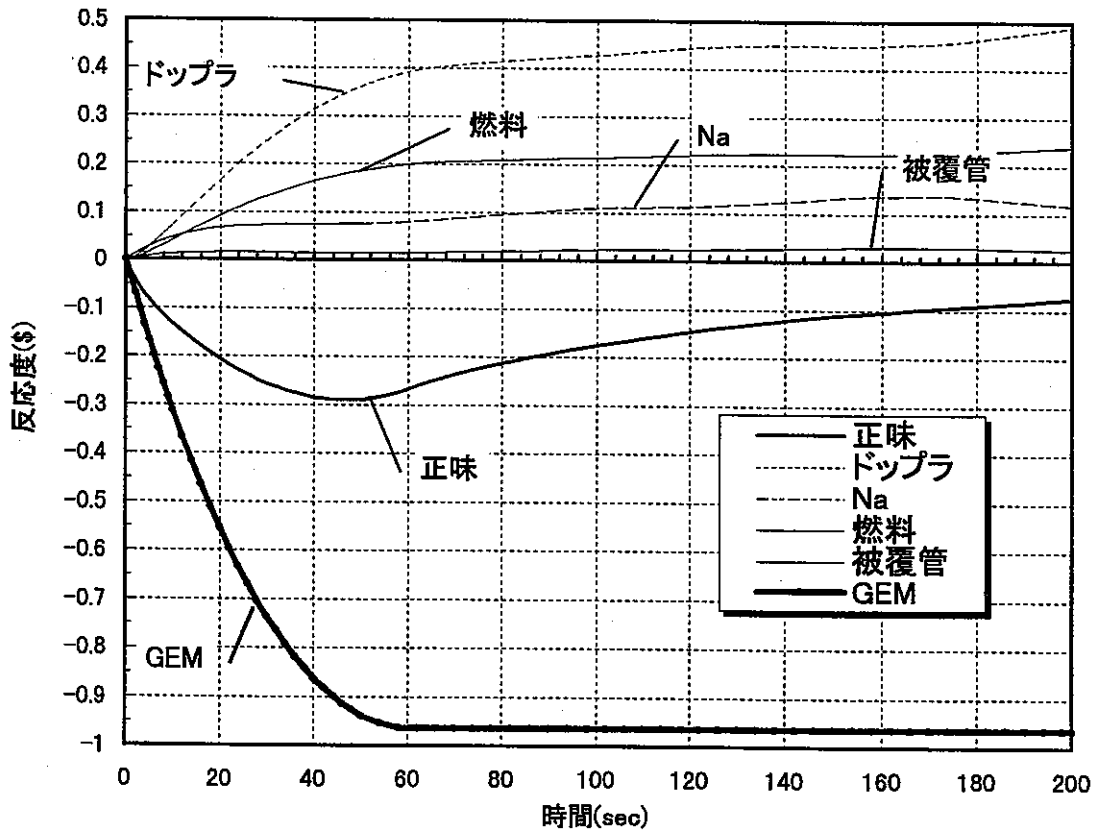
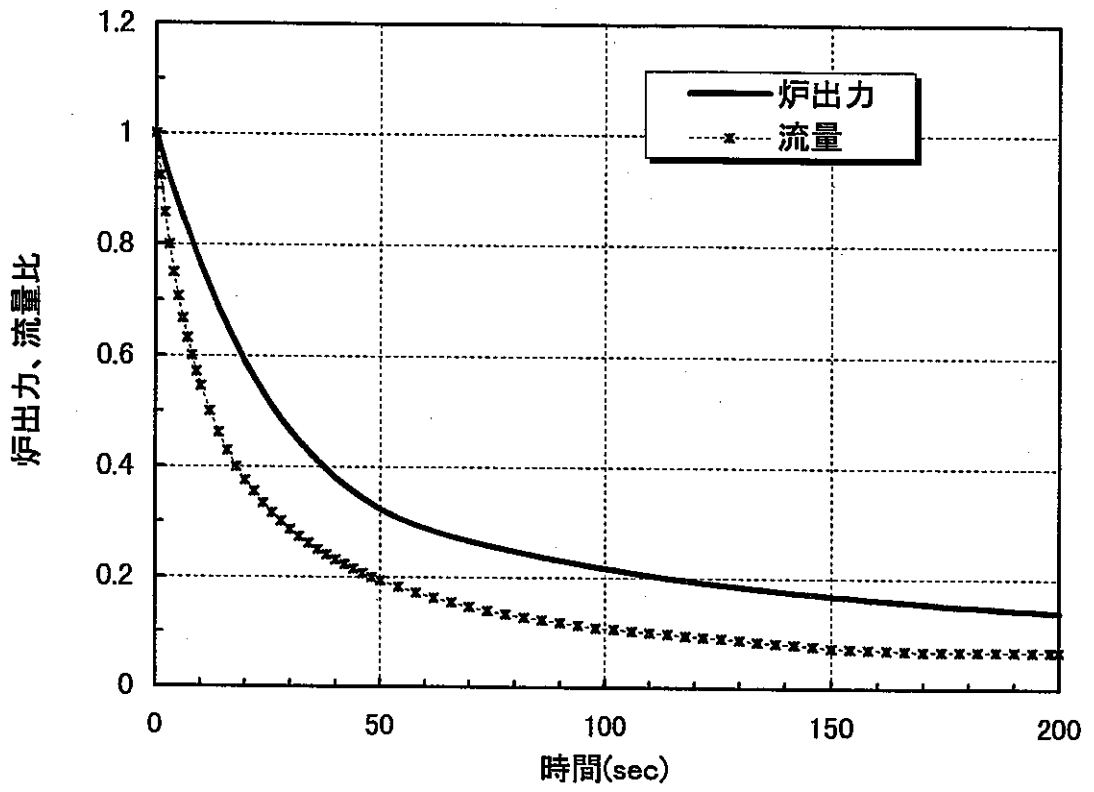


図 3.3-7 C炉心・ULOF・GEM 1.5\$(1/2)

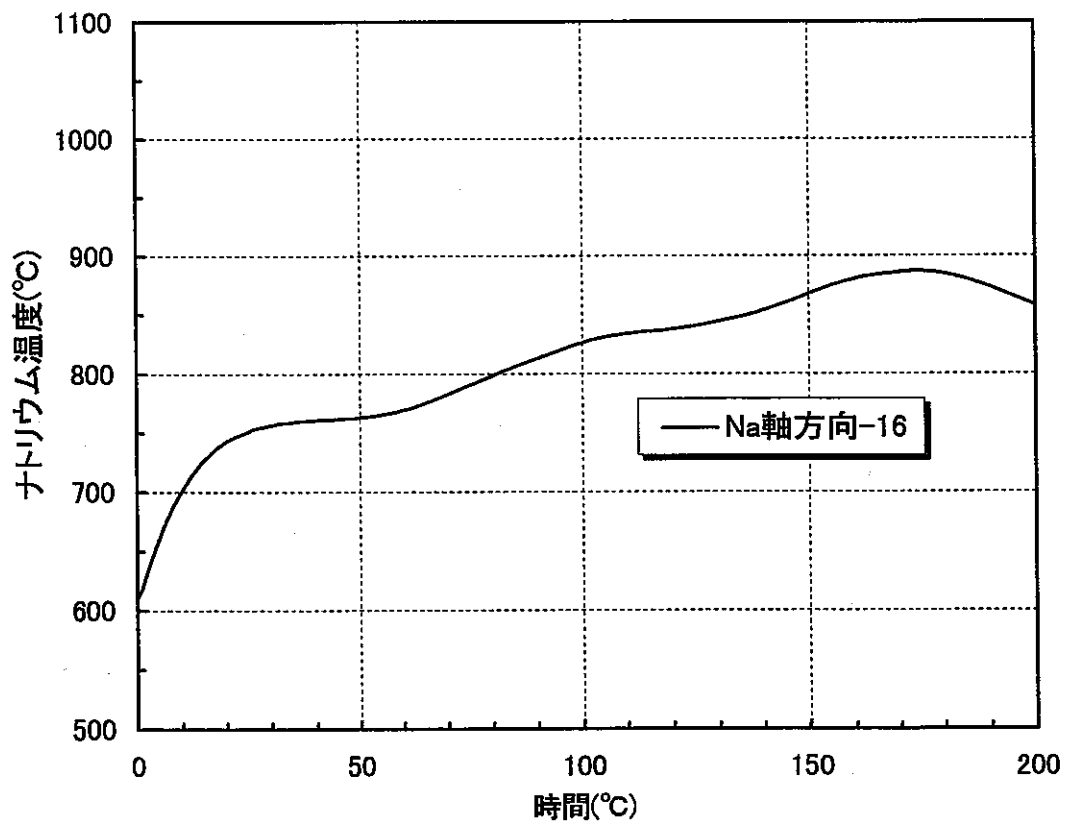
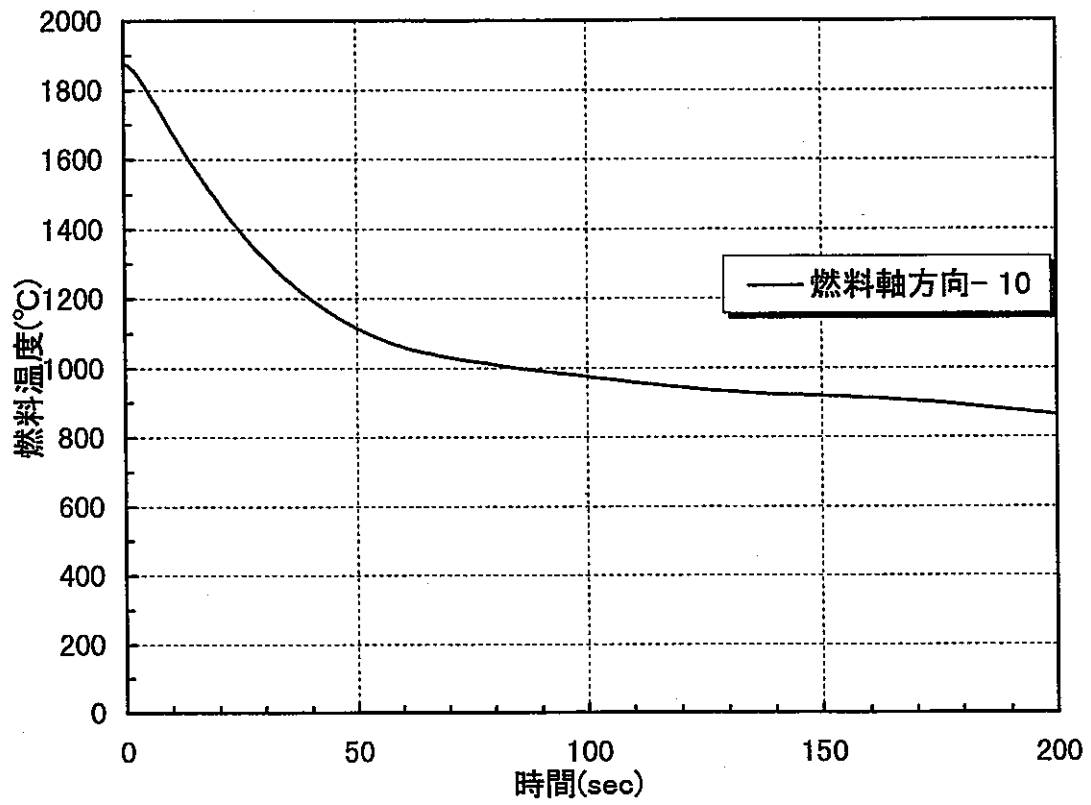


図 3.3-7 C炉心・ULOF・GEM 1.5\$ (2/2)

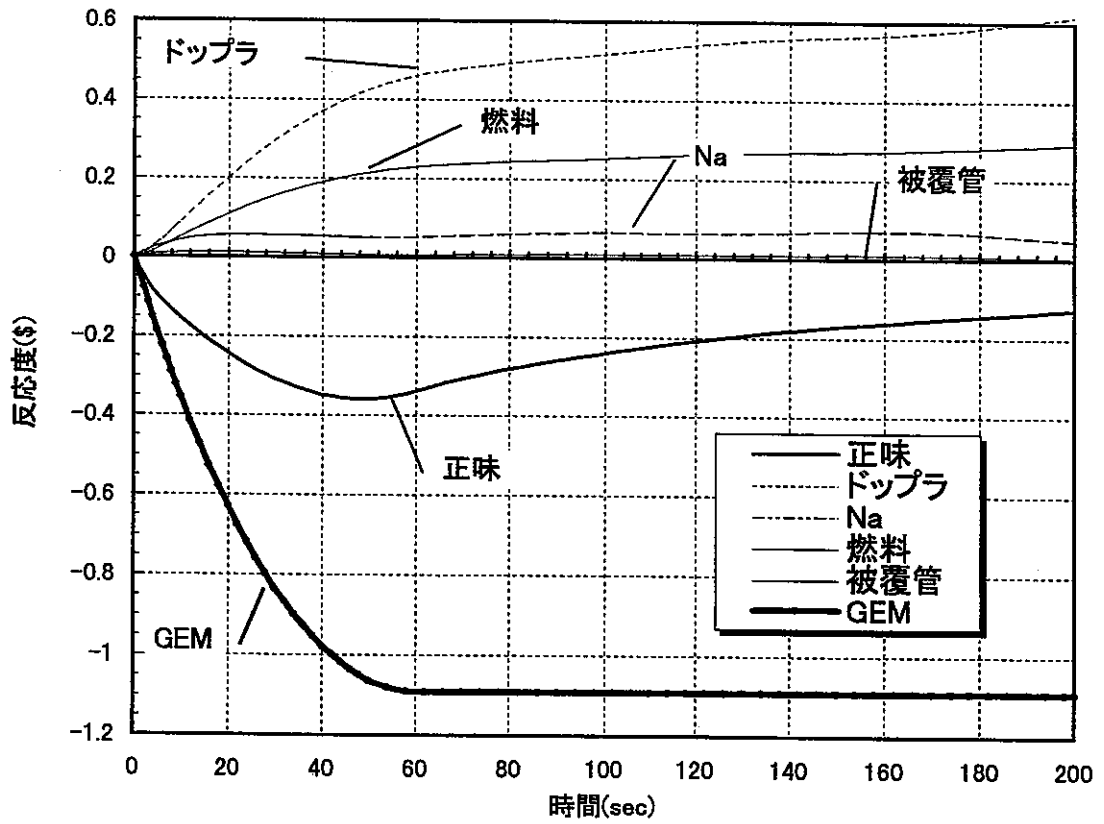
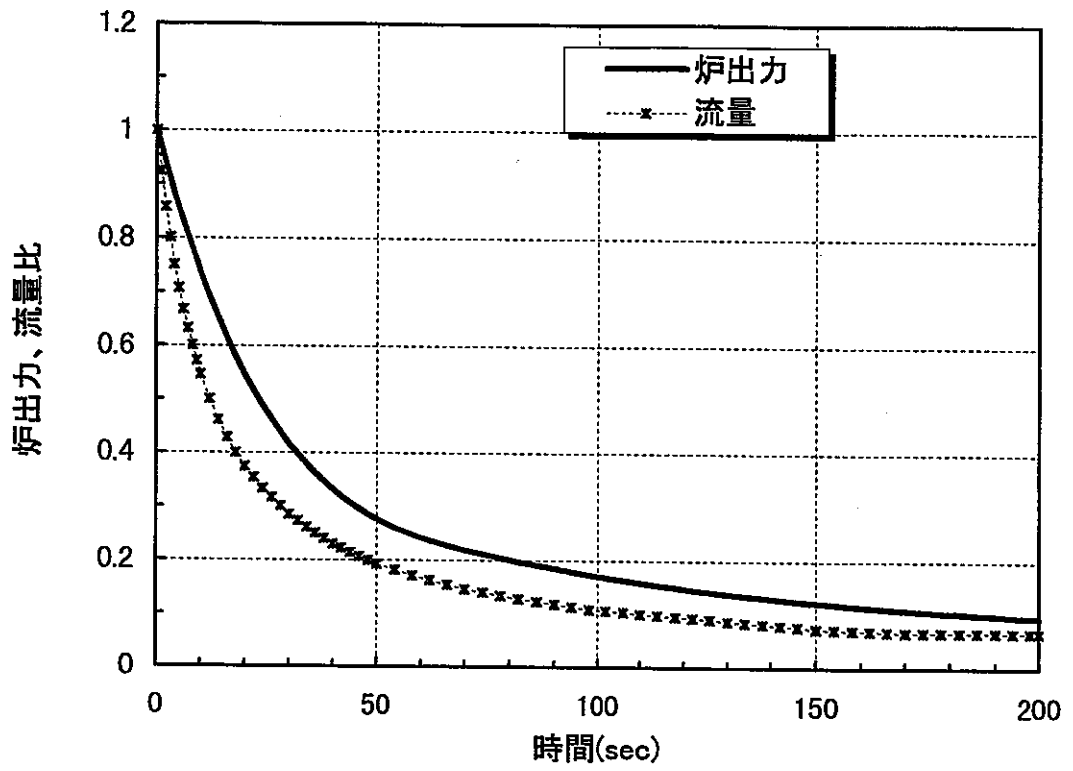


図 3.3-8 C炉心・ULOF・GEM 1.7\$(1/2)

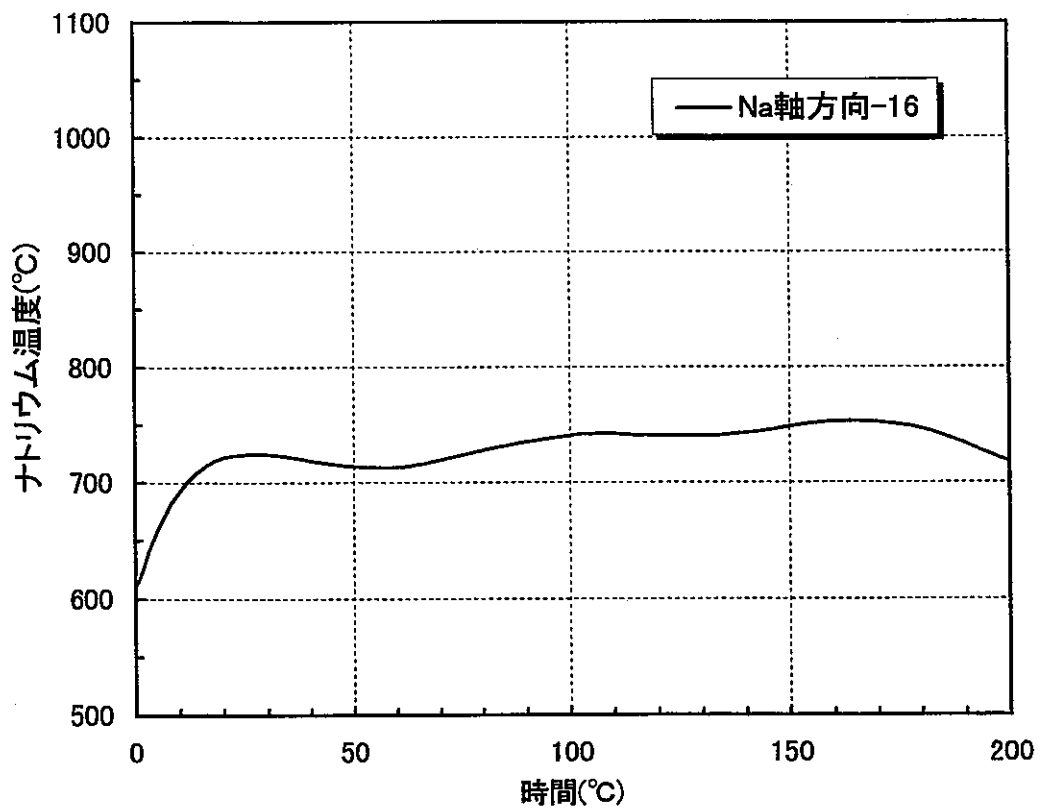
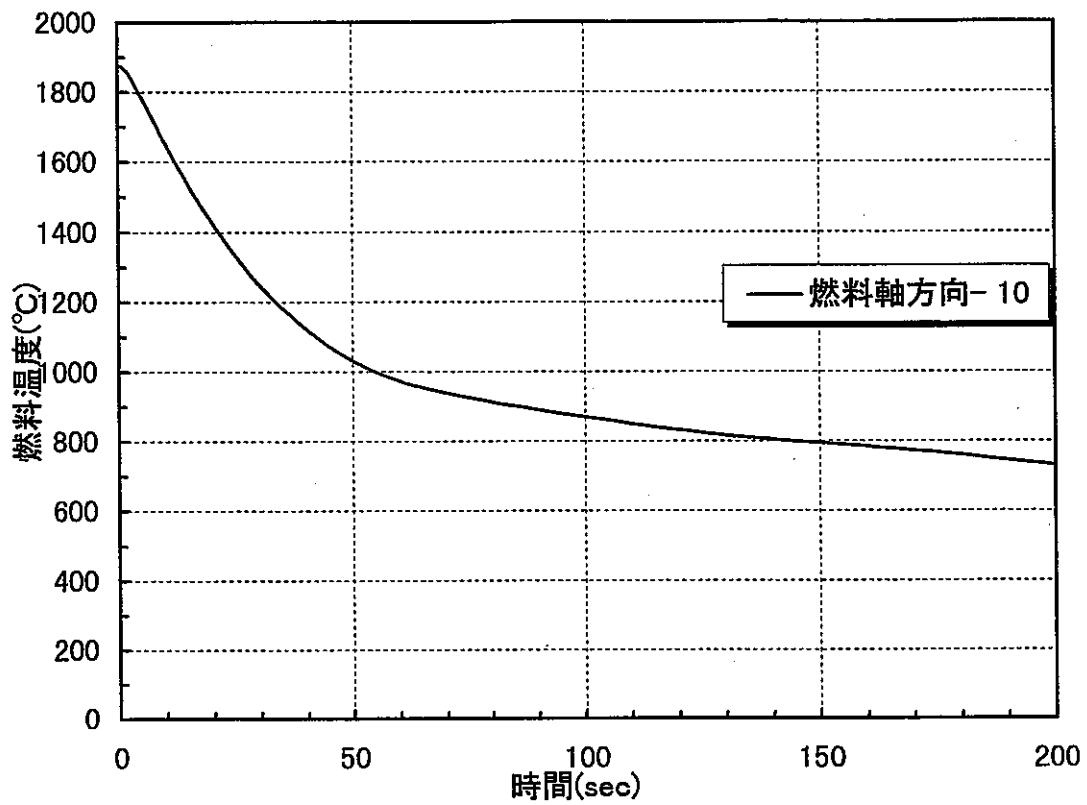


図 3.3-8 C炉心・ULOF・GEM 1.7\$ (2/2)

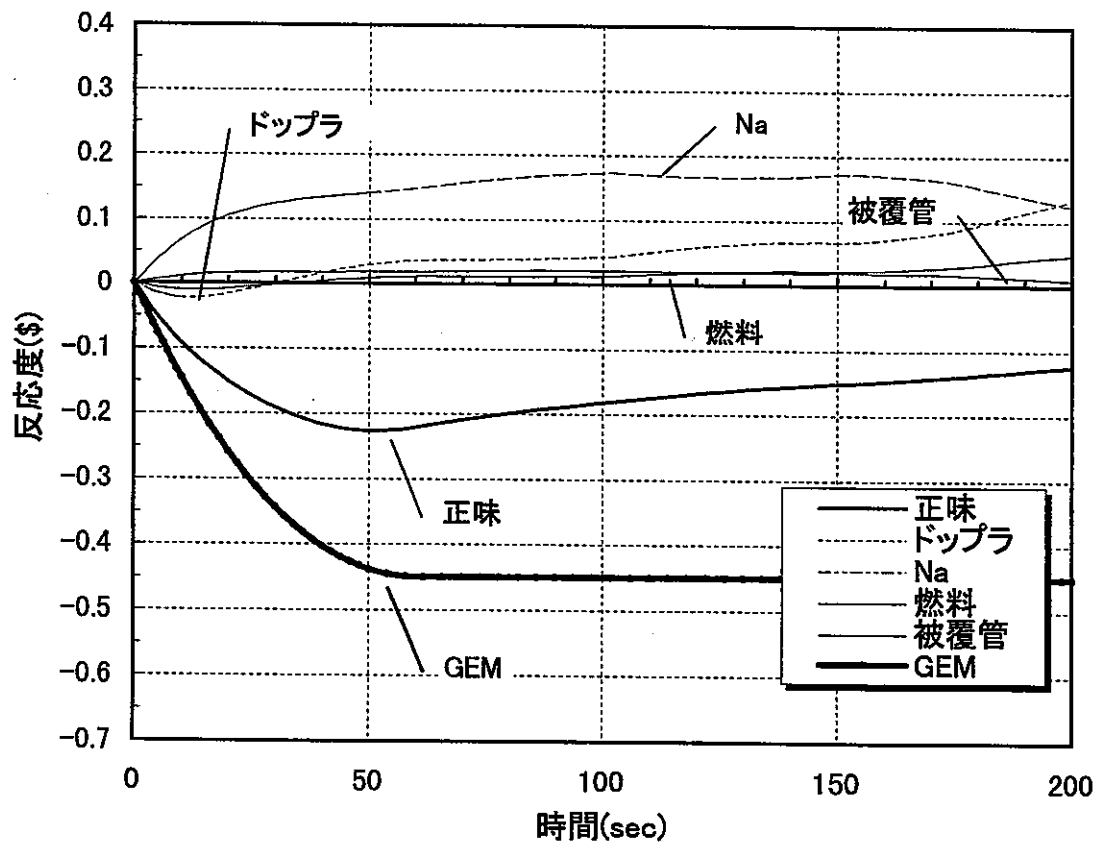
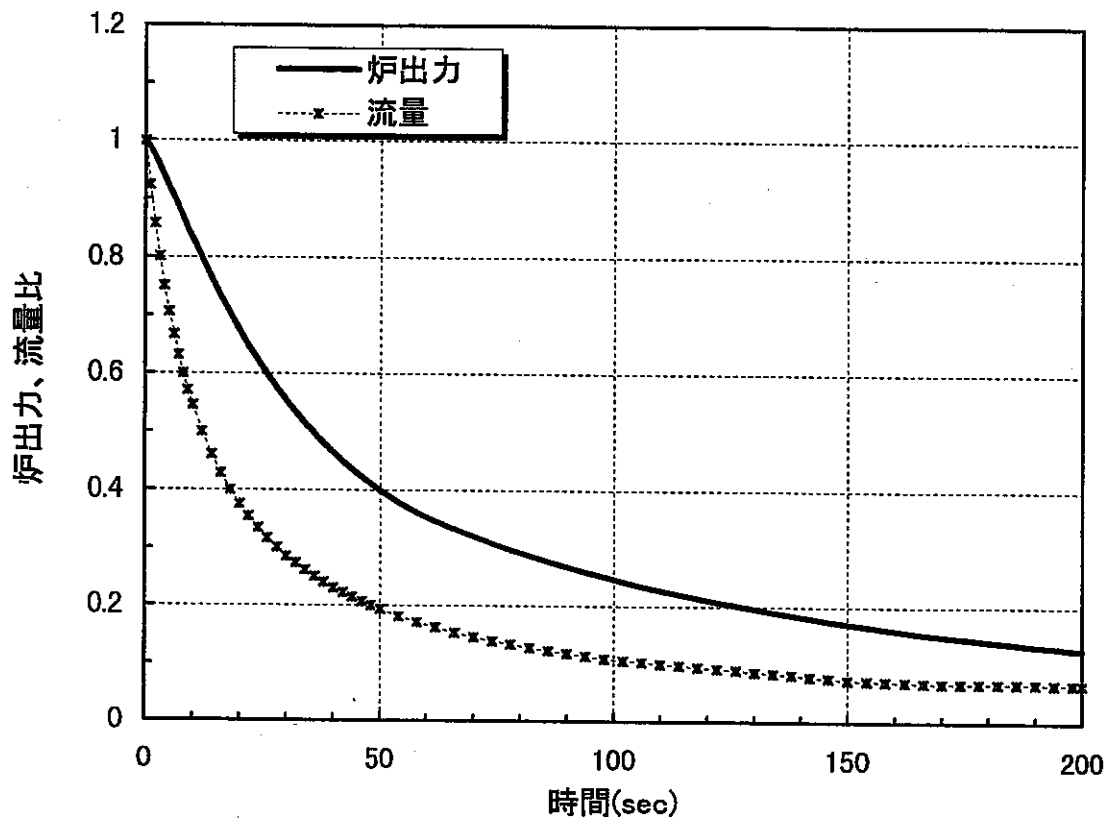


図 3.3-9 D炉心・ULOF・GEM 0.7\$(1/2)

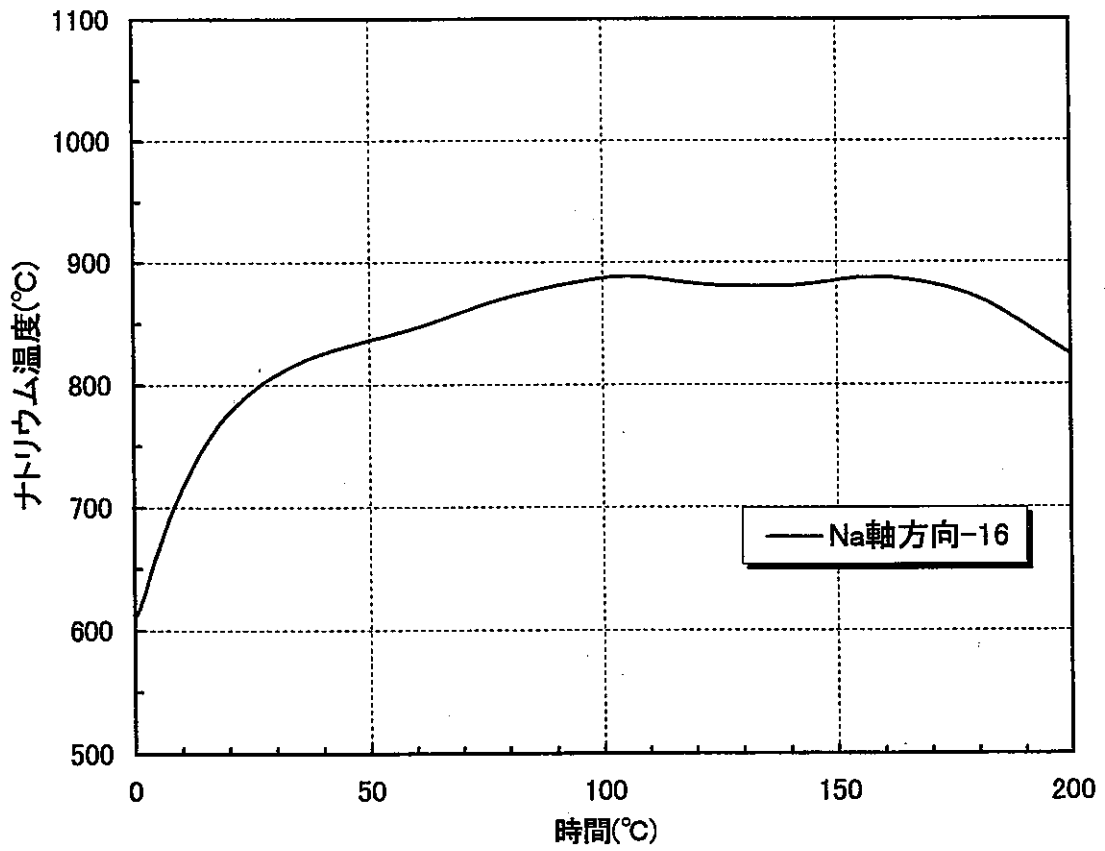
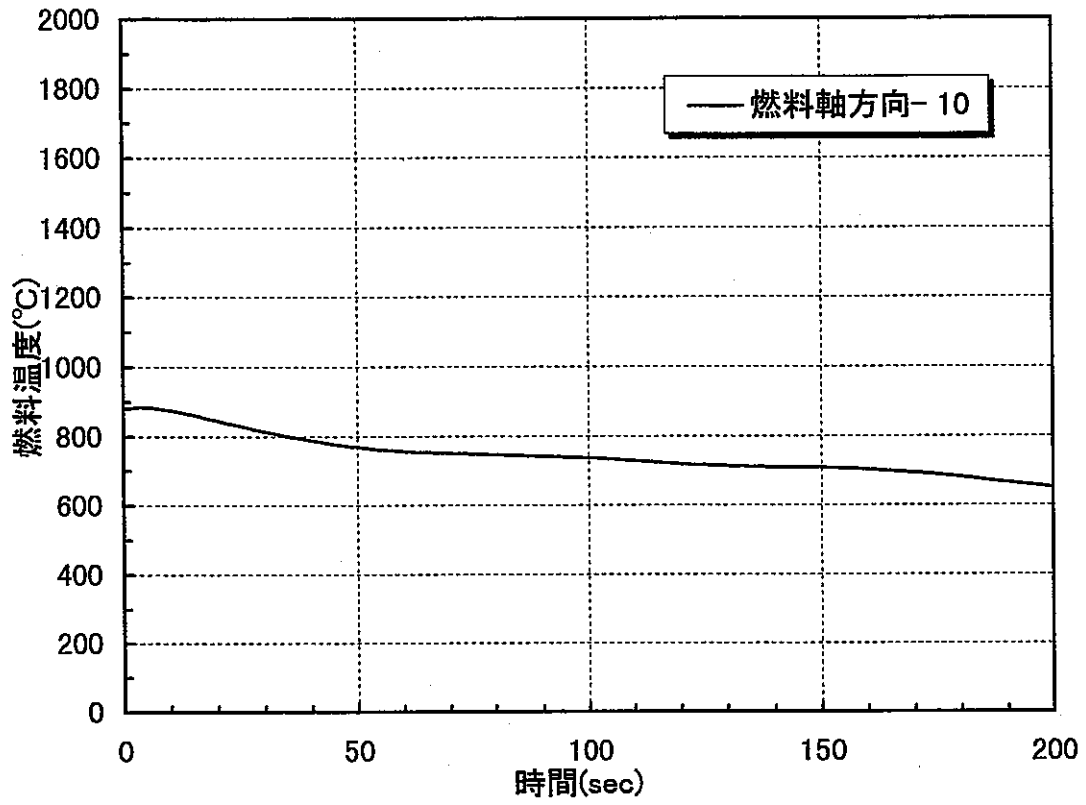


図 3.3-9 D炉心・ULOF・GEM 0.7\$(2/2)

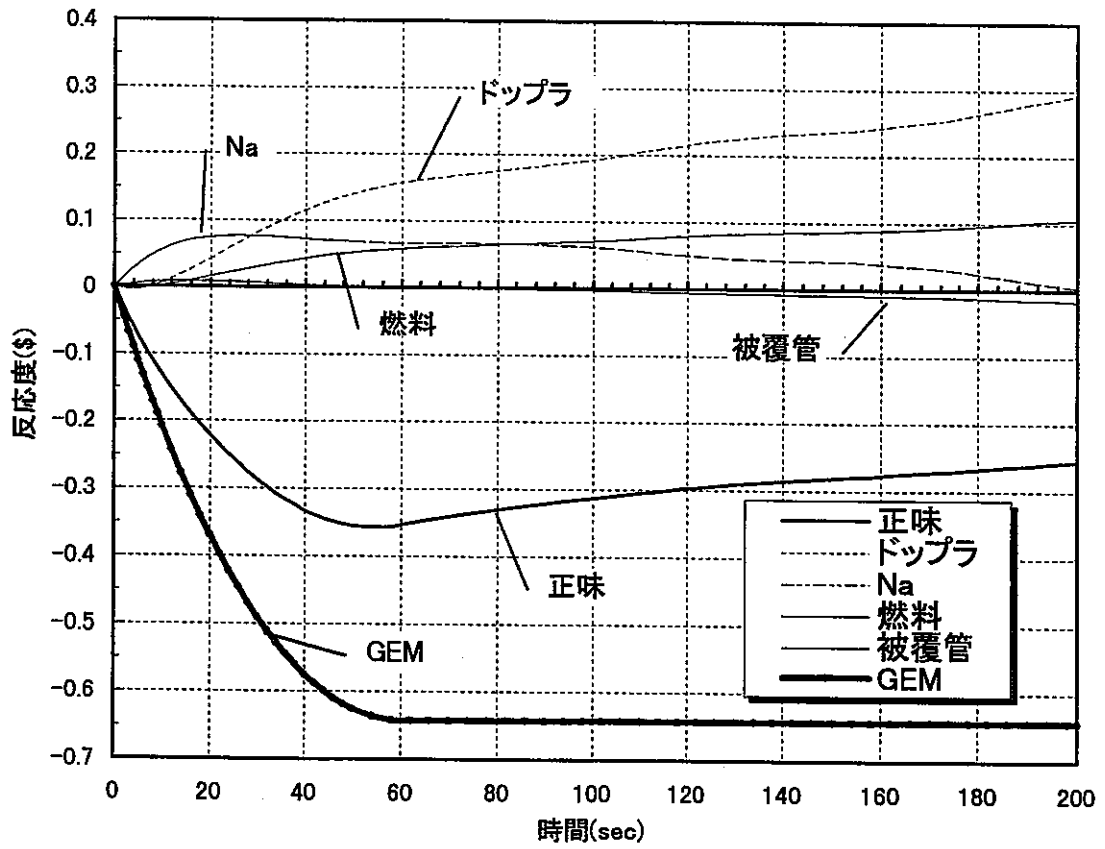
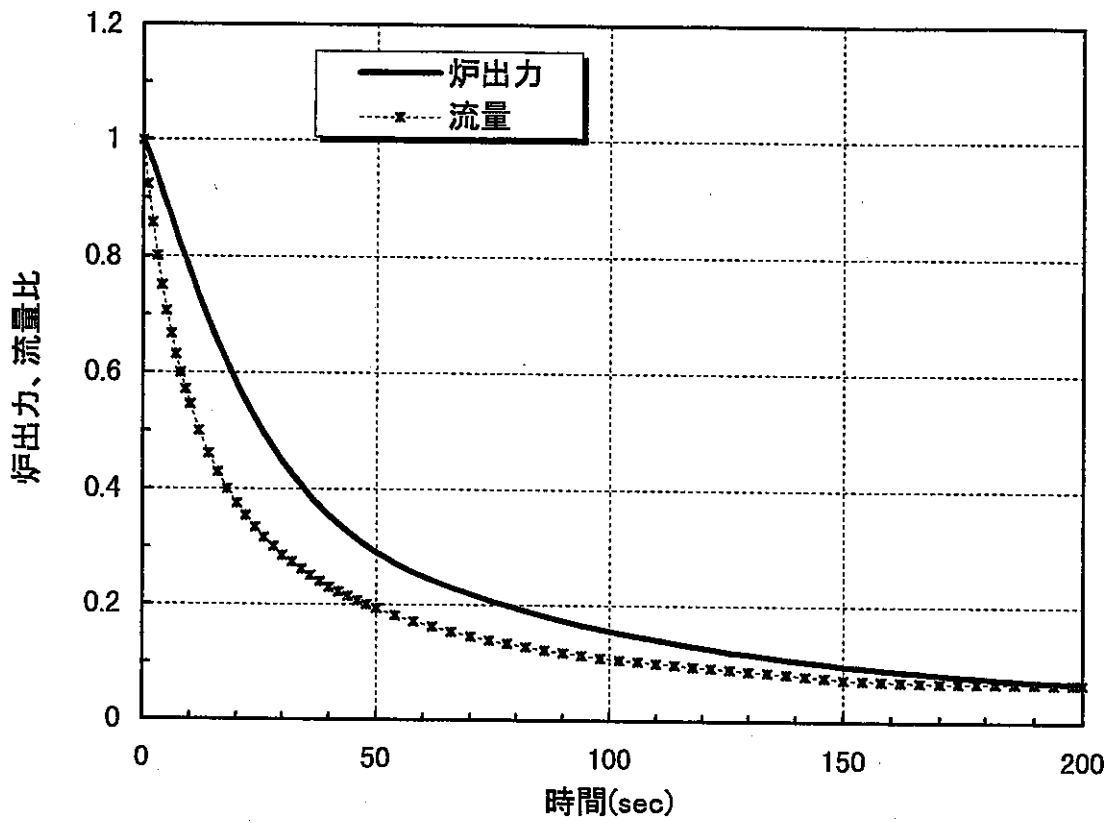


図 3.3-10 D炉心・ULOF・GEM 1\$(1/2)

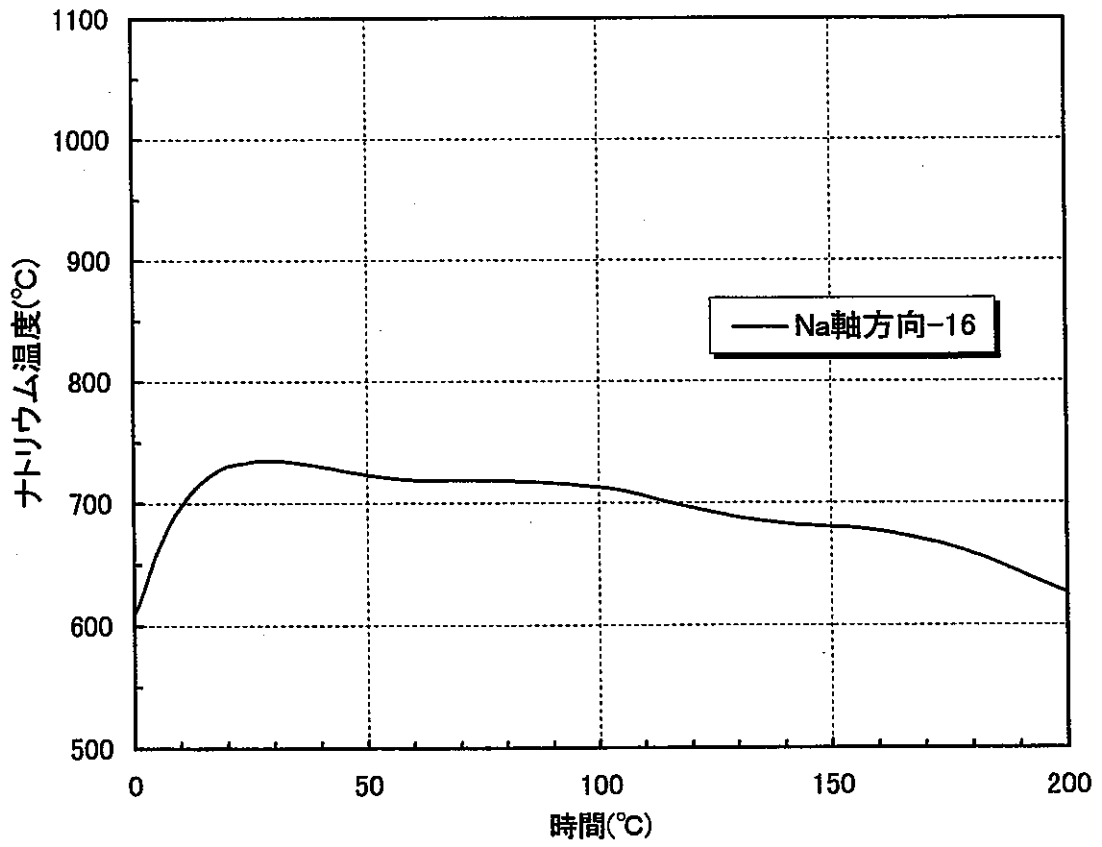
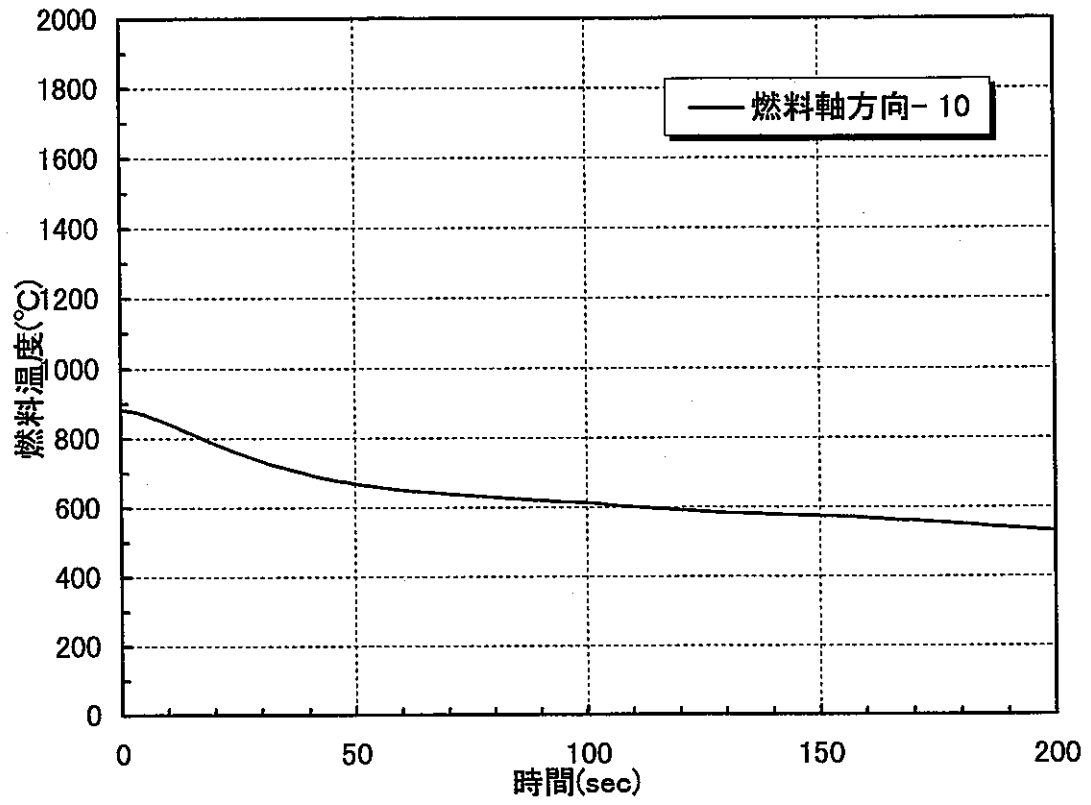


図 3.3-10 D炉心・ULOF・GEM 1\$ (2/2)

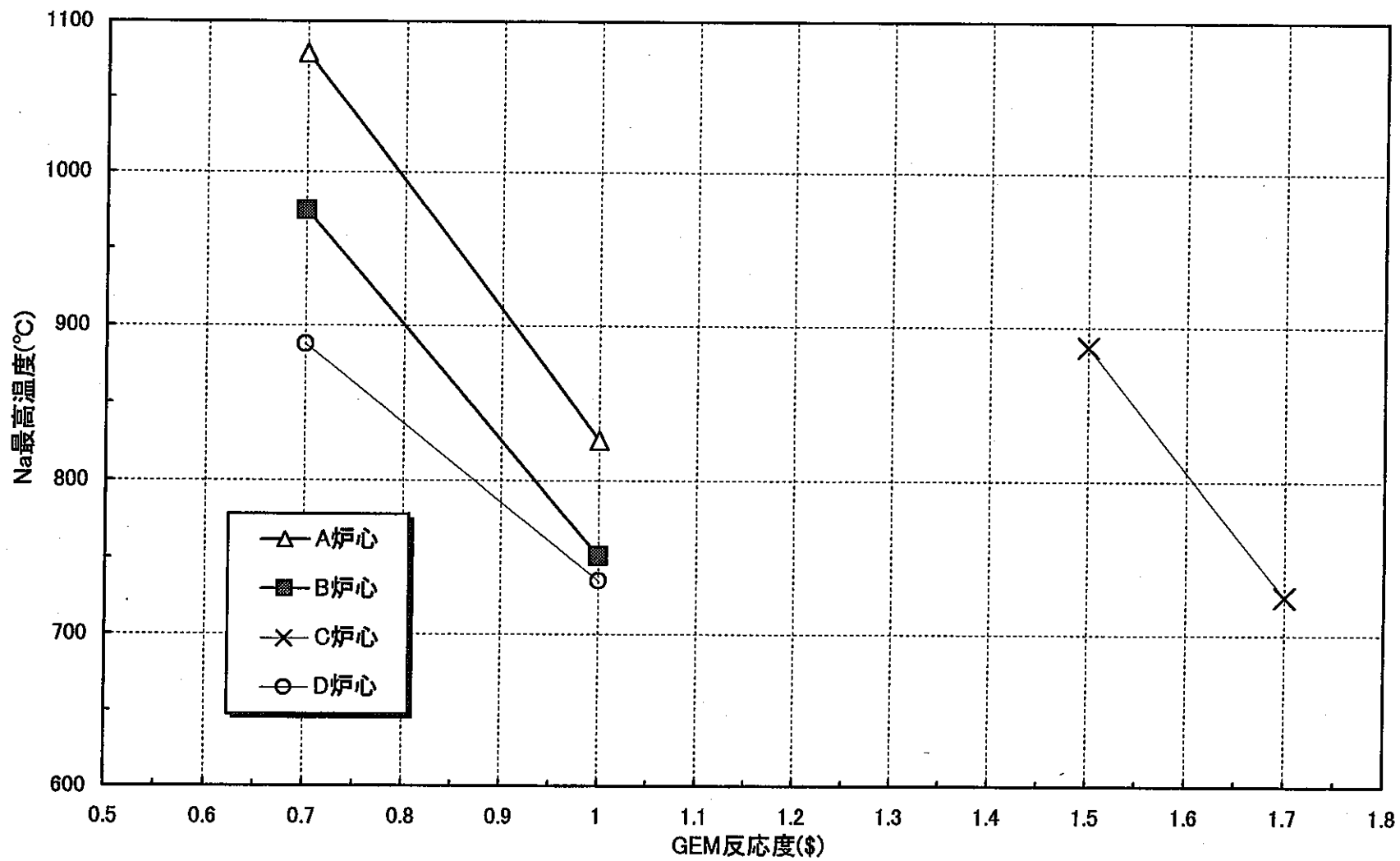


図 3.3-11

各炉心でのULOF時の必要GEM反応度

4. まとめ

もんじゅ高度化炉心に対して、炉心燃料として窒化物粒子充填燃料を採用した場合の安全解析を行った。炉心としてはもんじゅ高度化炉心に炉心燃料として窒化物粒子充填燃料を採用した場合とし、ナトリウムボンド及びヘリウムボンドの各種燃料条件で設定した炉心の最大線出力及び制御棒価値を評価し、さらに当該炉心の UTOP 及び ULOF 解析評価を行って、受動的安全性を検討した。その結果、制御棒反応度収支は各炉心とも満足できる見通しであることがわかった。また、安全性に関しては UTOP の観点からは、ナトリウムの沸点以下をめやすとした場合、許容投入反応度は小さいが、窒化物燃料の分解温度 2390℃を判断条件とした場合は、ナトリウムボンド炉心は、非常に大きい反応度が許容でき、ヘリウムボンド炉心については、40¢程度の反応度投入が許容できることが分かった。また、ULOF の観点からは、0.7\$～1.5\$相当の GEM があれば炉心の沸騰を回避できることが分かった。