

# HTTR の燃焼を通じた燃料温度の評価

— 850°C運転の場合 —

Estimation of Fuel Temperature through a Burn-up Period in HTTR

- For 850°C Operation -

柄尾 大輔 篠原 正憲 藤本 望

Daisuke TOCHIO, Masanori SHINOHARA and Nozomu FUJIMOTO

大洗研究開発センター  
高温工学試験研究炉部

Department of HTTR  
Oarai Research and Development Center

January 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAES-Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

# H T T R の燃焼を通じた燃料温度の評価

## －850°C運転の場合－

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター

高温工学試験研究炉部

柄尾 大輔・篠原 正憲・藤本 望

(2008年10月21日受理)

H T T R は黒鉛ブロック積層構造型の高温ガス炉であり、炉心の構造上の観点から燃料温度を直接的に計測することが非常に困難である。そのため、H T T R では、核特性評価コードにより出力分布を計算し、その結果を用いて燃料温度評価コードにより燃料温度評価を行っている。

本報は、H T T R の出力上昇試験、供用運転のデータをもとに、850°C運転（定格運転）時の燃焼を通じた出力分布評価及び燃料温度評価の結果をまとめたものである。

Estimation of Fuel Temperature  
through a Burn-up Period in HTTR  
— For 850°C Operation —

Daisuke TOCHIO, Masanori SHINOHARA and Nozomu FUJIMOTO

Department of HTTR  
Oarai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 21, 2008)

The HTTR is block-type high-temperature gas-cooled reactor composed graphite-block piled-up structure. In the viewpoint of core structure, it is very difficult to measure fuel temperature of the HTTR, directly. Therefore, the power distribution is calculated by nuclear characteristics estimation code, and the fuel temperature is estimated by fuel temperature estimation code with obtained power distribution data in the HTTR.

This report describes the estimation results of power distribution and fuel temperature for 850°C operation through a burn-up period.

Keywords : HTTR, Fuel Temperature, Power Distribution, Burn-up Period, 850°C Operation

## 目次

1. 緒言 .....	1
2. HTTR施設の概要 .....	2
2.1 HTTRの概要 .....	2
2.2 HTTR炉心の概要 .....	3
2.3 HTTR燃料の概要 .....	3
2.3.1 全体概要 .....	3
2.3.2 燃料の熱的制限値 .....	4
3. 核特性計算及び燃料温度計算の概要 .....	5
3.1 概要 .....	5
3.2 核特性計算システムの概要 .....	5
3.2.1 DELIGHTコード .....	5
3.2.2 TWOTRAN-2コード .....	6
3.2.3 CITATION-1000VPコード .....	6
3.3 燃料温度評価システムの概要 .....	6
3.3.1 FLOWNETコード .....	6
3.3.2 TEMDIMコード .....	7
4. 出力分布、流量分布及び燃料温度の計算結果 .....	9
4.1 出力分布計算結果 .....	9
4.2 流量分布計算結果 .....	11
4.3 燃料温度計算結果 .....	12
4.4 総合的な考察 .....	13
5. 結言 .....	14
謝辞 .....	14
参考文献 .....	14

## Contents

1.	Introduction.....	1
2.	Outline of HTTR Facility.....	2
2. 1	Outline of HTTR Facility .....	2
2. 2	Outline of HTTR core .....	3
2. 3	Outline of HTTR Fuels .....	3
2. 3. 1	Outline .....	3
2. 3. 2	Thermal limit of HTTR Fuels .....	4
3.	Outline of Nuclear Characteristics Claculation and Fuel Temperature Calculation.....	5
3. 1	Outline .....	5
3. 2	Outline of Nuclear Characteristics Claculation System .....	5
3. 2. 1	DELIGHT Code .....	5
3. 2. 2	TWOTRAN-2 Code .....	6
3. 2. 3	CITATION-1000VP Code .....	6
3. 3	Outline of Fuel Temperature Calculation System .....	6
3. 3. 1	FLOWNET Code .....	6
3. 3. 2	TEMDEM Code .....	7
4.	Calculation Result of Power Distribution, Flow Mass Rate Distribution and Fuel temperature.....	9
4. 1	Calculation Result of Power Distribution .....	9
4. 2	Calculation Result of Flow Mass rate .....	11
4. 3	Calculation Result of Fuel Temperature .....	12
4. 4	Synthetic Discussion .....	13
5.	Conclusion.....	14
	Acknowledgement.....	14
	Reference.....	14

## 1. 緒言

日本原子力研究開発機構（原子力機構）のH T T R（高温工学試験研究炉：High Temperature Engineering Test Reactor）は、高温ガス炉技術基盤の確立と高度化を目的として原子力機構大洗研究開発センターに建設された日本初の高温ガス炉である<sup>1), 2)</sup>。

H T T Rは積層構造型の高温ガス炉であり、炉心の構造上の観点から、炉心部に熱電対や温度モニタ等の温度計装を入れることは極めて困難であるため、燃料温度を直接的に計測することが非常に困難である。そのため、H T T Rでは、臨界実験装置等で検証された核特性評価コードにより出力分布を計算し、その結果を用いてモックアップ実験装置等で検証された燃料温度評価コードによりH T T Rの燃料温度評価を行っている。

これまでに、出力上昇試験等の試験運転時において燃料温度の評価及び検討・考察が行われてきているが、燃焼を通じた出力分布及び燃料温度を併せてまとめた文献はない。燃焼を通じた燃料温度の評価についてまとめておくことは、運転管理上有用な情報となるだけではなく、燃料性能等の評価にも活用することができる。

本報は、H T T Rの出力上昇試験、供用運転のデータをもとに、850°C運転（定格運転）時の燃焼を通じた出力分布評価及び燃料温度評価の結果をまとめたものである。

## 2. H T T R 施設の概要

### 2.1 H T T R の概要

H T T R の基本仕様を第 2.1 表に示す。H T T R は燃料に被覆粒子燃料、減速材に黒鉛、冷却材にヘリウムガスを使用する定格熱出力 30MW、原子炉入口冷却材温度 395°C の高温ガス炉である。H T T R の運転には、原子炉出口冷却材温度が 850°Cまでの定格運転と、950°Cまでの高温試験運転がある。

H T T R の冷却設備系統を第2.1図に示す。H T T R の原子炉冷却設備は、通常運転時に原子炉を冷却する主冷却設備、原子炉停止後に原子炉の残留熱を除去する補助冷却設備、原子炉圧力容器の周囲に設置した水冷管により 1 次遮へい体を冷却するとともに補助冷却設備による炉心の冷却が期待できないような事故時にも原子炉の残留熱を除去する炉容器冷却設備で構成される。主冷却設備は 1 次冷却設備として中間熱交換器 (IHX : Intermediate Heat Exchanger) と 1 次加圧水冷却器 (PPWC : Primary Pressurized Water Cooler) の2種類の熱交換器を並列に配置しており、IHX の 2 次側に 2 次冷却設備として 2 次加圧水冷却器 (SPWC : Secondary Pressurized Water Cooler) を配置している。原子炉内で発生した熱は、これらの熱交換器を経由して最終的に加圧水冷却設備に設置されている加圧水空気冷却器 (ACL : Air-cooler) より大気へ放散する。

現在、IHX の 2 次冷却系統は原子炉で発生した熱を大気へと放散する加圧水冷却系統へと接続されているが、将来、ISプロセスによる水素製造設備へと接続することが計画されている。

H T T R の運転には、2つの原子炉出口冷却材温度運転モードと2つの系統的な運転モードがある。原子炉出口冷却材温度運転モードについては、原子炉出力30MWで原子炉出口冷却材温度が 850°Cとなる「定格運転モード」と、原子炉出口冷却材温度が950°Cとなる「高温試験運転モード」がある。これらの運転モードについては、1 次冷却材流量を変化させることで原子炉出口冷却材温度を変化させている。また系統的な運転モードには、原子炉出力30MWの時にPPWCのみで30MWの除熱を行う「単独運転」と、原子炉出力30MWの時に、PPWCで20MW、IHXで10MWの除熱を行う「並列運転」がある。H T T R ではこれら2つの運転モードが組み合わされており、運転モードは通常「定格／単独運転モード」等のように呼ばれている。

H T T R は 1998 年 11 月 10 日に初臨界に達した後、1999 年 9 月から出力上昇試験を開始し、2001 年 12 月 7 日に原子炉出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850°C を達成した<sup>3), 4)</sup>。2002 年 3 月 6 日には定格運転（原子炉冷却材温度 850°Cまでの運転）の使用前検査合格証を取得した。2003 年 3 月からは高温ガス炉の安全性を実証する目的で安全性実証試験が行われている<sup>5), 6)</sup>。

さらに、2004 年 3 月 31 日から原子炉出口冷却材温度が 950°C となる高温試験運転の出力上昇試験を開始し<sup>7)</sup>、2004 年 4 月 19 日には原子炉出力 30MW、原子炉出口冷却材温 950°C を達成した<sup>8), 9)</sup>。高温ガス炉による冷却材温度については、過去に獨国の高温ガス実験炉 (A V R) により原子炉圧力容器内において 950°C が達成されているが、H T T R で行われた運転では 950°C の冷却材を原子炉圧力容器外部に取り出したもので、H T T R が世界で初めて成功したものである。その後、2004 年 6 月 24 日には高温試験運転（原子炉冷却材温度 950°Cまでの運転）の使用前検査合格証を取得した。その後、2007 年 3 月 19 日より原子炉出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850°C の 30 日

連続運転を実施し、850°Cの連続運転における燃料の健全性等を確認している。

## 2. 2 H T T R 炉心の概要

第2.2図にH T T Rの原子炉構造図を示す。H T T Rの原子炉は、炉心を構成する要素（炉心構成要素）、炉内構造物及び反応度制御設備で構成されている。

炉心は六角柱状の黒鉛ブロックである、燃料体、制御棒案内ブロック、及び可動反射体ブロックで構成されており、これらの炉心構成要素を円柱状に積み上げたものである。ブロックを積み上げた軸方向の1列を「1カラム」と称している。H T T Rの炉心は合計61カラムからなり、燃料体を含む燃料領域及びその外側を囲む可動反射体領域に分けられる。各々の領域には制御棒を挿入するための制御棒案内ブロックからなるカラムを設ける。

炉内構造物は固定反射体ブロック、高温プレナムブロック、サポートポスト及び炉床部断熱層等からなる炉心支持黒鉛構造物、炉心支持板、炉心支持格子及び炉心拘束機構等からなる炉心支持鋼構造物ならびに遮へい体で構成される。固定反射体ブロックは、積層ブロックからなる炉心の水平方向の変位を拘束して炉心を所定の位置に配置している。また、固定反射体ブロックは炉心拘束機構により半径方向に締め付けられており、固定反射体ブロックの水平方向の変位が拘束されている。高温プレナムブロック、サポートポスト、炉心支持板、炉心支持格子及び炉床部断熱層等は、炉心からの荷重を支持し、その荷重を圧力容器へ伝える。遮へい体は上部遮へい体ブロック及び側部遮へい体ブロックで構成されており、主に熱中性子遮へい機能を有している。炉内構造物は更に原子炉内での流路の形成、炉心の流量配分、断熱等の機能を有する。

1次冷却材は、原子炉圧力容器下部に設けた1次ヘリウムノズルと二重管の内管の間の環状流路から圧力容器内に入り、圧力容器の内壁に沿って上方向に流れ、炉心上部のプレナムに至る。その後、1次冷却材は炉心内を下降しながら高温となり、炉心下部の高温プレナムで混合した後、二重管の内管へ送られる。なお、二重管の内管は1次ヘリウムノズルを通って高温プレナムまで配管されている。

## 2. 3 H T T R 燃料の概要

### 2. 3. 1 全体概要

第2.3図にH T T Rの燃料体の概要を示す。H T T Rの燃料体は、燃料棒を黒鉛ブロック内に挿入したピン・イン・ブロック型である。燃料棒は、被覆燃料粒子を黒鉛素地に分散させた燃料コンパクトを黒鉛スリーブに挿入し、上端または上下端を黒鉛端栓で閉じたものである。黒鉛ブロックの材料には原子炉級微粒等方性黒鉛（IG-110 黒鉛）を使用している。

第2.2表に被覆燃料粒子の仕様を示す。被覆燃料粒子は燃料核を熱分解炭素等で四重に被覆したものである。被覆層は内側から順に低密度熱分解炭素（第1層）、高密度熱分解炭素（第2層）炭化ケイ素（第3層）、高密度熱分解炭素（第4層）で構成されており、燃料核で発生する核分裂生成物の放出を防止する。

第2.3表に燃料コンパクトの仕様を示す。燃料コンパクトは被覆燃料粒子を黒鉛素地に分散させた中空の円柱形状である。黒鉛素地は、天然黒鉛粉末及び人造黒鉛粉末をそれぞれ約80%及び20%の割合で混合し、バインダのフェノール樹脂を添加して焼成したものであり、バインダの一

部は炭素化する。

第2.4表に黒鉛スリーブの仕様を示す。黒鉛スリーブには、構造健全性を確保するために高い強度を有するとともに、照射に対する寸法変化が少ないことが要求される。また、黒鉛材料の酸化による減肉を少なくするために耐食性に優れているとともに、核的には高純度であることが要求される、そのため、黒鉛スリーブの材料には、原子炉級微粒等方性黒鉛（IG-110相当）を使用している。黒鉛スリーブには、上部に周り止め用のリブ、側部に偏心防止用のスペーサを設けている。側部最下部のスペーサは黒鉛ブロック突起により支持され、燃料棒が黒鉛ブロック内に保持される構造となっている。

第2.5表に燃料体の仕様を示す。燃料体は対面間距離約360mm、高さ580mmの六角柱状の黒鉛ブロック及び燃料棒で構成される。炉心最外周部の黒鉛ブロックには31ヶ所、それ以外の燃料ブロックには33ヶ所の燃料棒挿入孔が設けられている。また、燃料棒挿入孔の上部には燃料棒の周り止め用リブに対応した縦溝が設けられており、下部には燃料棒支持用の突起が設けられている。黒鉛ブロックの上部には燃料体の取扱いのための「つかみ孔」が設けられている。黒鉛ブロックの上面の角3ヶ所にはダウエルが設けられており、黒鉛ブロックの下面の角部に設けられた3ヶ所のソケットにより、積み重ねた燃料体の水平方向の位置決めを行う。ダウエル孔の底部には、燃焼に伴う反応度変化の一部を補償する反応度調整剤（BP：Burnable poison）を装荷するための孔が設けられている。黒鉛ブロックは減速材としての機能もあり、材料に原子炉級微粒等方性黒鉛（IG-110黒鉛）を使用している。

第2.4図に燃料の濃縮度及び反応度調整材の天然ほう素濃度を示す。燃料は約3.4～9.9wt%濃縮度の12種類の燃料が用いられており、燃焼を通じて出力分布を平坦化するために、各所に各濃縮度の燃料が装荷されている。

### 2.3.2 燃料の熱的制限値

原子炉の燃料については、通常運転時及び異常な過渡変化時においても燃料が健全であることが求められており、軽水炉の場合、燃料棒周りの限界熱流束比が制限値以下であり、燃料棒の被覆管が健全であることが求められている。

HTTRの場合、燃料の健全性を確保するために燃料温度を熱的制限値として定めており、

- ・通常運転時において燃料温度が1,495°C以下であること
- ・異常な過渡変化時において燃料温度が1,600°C以下であること

が求められている。

### 3. 核特性計算及び燃料温度計算の概要

#### 3.1 概要<sup>10)</sup>

第3.1図に、HTTRで用いられている核特性計算及び燃料温度計算の計算コード及び計算の流れを示す。計算システムは大きく核特性計算システム及び燃料温度計算システムに分けられ、核特性計算システムの計算コードとしてDELIGHT、TWOTRAN-2、CITATION-1000VPがあり、燃料温度計算システムの計算コードとしてFLOWNET及びTENDIMがある。

核特性計算システムでは、初めに、DELIGHTコード及びTWOTRAN-2コードを用いて、炉心の群定数を計算する。計算された群乗数を用いて、CITATION-1000VPコードにて炉心計算を行い、出力分布及び中性子束分布等を計算する。

燃料温度計算システムでは、初めに、核特性計算システムより得られた出力分布及び中性子束分布を用いて、FLOWNETコードにて冷却材流量分布及び冷却材温度分布を計算する。最後に、核特性計算システムより得られた出力分布及び中性子束分布、ならびにFLOWNETコードより得られた冷却材流量分布を用いてTENDIMコードにて燃料温度分布を算出する。

#### 3.2 核特性計算システムの概要

##### 3.2.1 DELIGHTコード<sup>10)</sup>

DELIGHTコードは、HTTRの核設計を行うために旧日本原子力研究所（旧原研）にて特別に開発された一次元の格子燃焼計算コードである。このコードは、これ以降の炉心計算で用いる燃料ブロックと黒鉛ブロックの群定数を計算するのに用いられる。DELIGHTコードでは、被覆燃料粒子がある燃料セルの多群中性子スペクトルを計算し、共鳴、中性子スペクトル、燃料セル、BPセル、臨界及び燃焼の計算を行う。核データは、ENDV/B-3から抜き取られた燃焼チェーンデータを除いてENDV/B-4をベースとしている。共鳴範囲ではコードに中間共鳴近似が用いられており、これにより被覆燃料粒子及び燃料棒集合体に起因する二重非均質性の効果を考慮できる。スペクトル計算では、2.38eV～10MeVの高速エネルギー領域で61群にP<sub>1</sub>及びB<sub>1</sub>近似が適用でき、0.0eV～2.38eVの熱エネルギー領域で50群にP<sub>0</sub>及びP<sub>1</sub>近似が適用できる。燃料セル及びBPセルの中性子分布を計算するのに衝突確率法が用いられている。

第3.2図に燃料セルの群定数を計算する際に用いた一次元計算モデルを示す。計算モデルは中心空孔、燃料コンパクト、黒鉛スリーブ、冷却材流路及び黒鉛ブロックで構成されている。燃料セルモデルの外径は、その断面積が1燃料棒あたりの燃料ブロックの断面積と同じとなるように設定している。最外周の境界条件には、等方反射境界条件を設定している。中性子スペクトルはP<sup>1</sup>近似を用いて高速及び熱エネルギー領域について111群で計算される。燃料及びBPの中性子束分布は中性子40群で衝突確率法を用いて計算している。中性子束分布は燃料セル内の群定数を幾何学的に平均化するのに用いられる。

第3.3図にBPセルの遮へい係数を計算する際に用いた一次元計算モデルを示す。BPの周りには均質化した燃料ブロックを設定している。BPセルモデルの外径は、その断面積が1BPあたりの

燃料ブロックの断面積と同じとなるように設定している。

### 3.2.2 TWOTRAN-2 コード<sup>10)</sup>

TWOTRAN-2 コードは、制御棒が挿入されている黒鉛ブロックの平均群定数を計算する輸送計算コードである。第 3.4 図に計算で用いた二次元計算モデルを示す。このモデルは、制御棒が挿入されている黒鉛ブロックの半分を表現している。黒鉛ブロックの中心線には反射境界条件を設定し、他の外周には等方反射境界を設定している。制御棒セル内で適切な中性子スペクトルを得るために、黒鉛ブロックは燃料ブロックに囲まれている。第 3.5 図に制御棒吸収体の実際の形状とモデルの形状を示す。斜線の領域がモデル化した吸収体領域である。吸収体領域の内側及び外側の境界は、内側及び外側の境界を形成する直交する直線でモデル化している。外側境界を形成する直線は、直線の中心を結んだ弦が実際の制御棒吸収体の外側境界とほぼ同じになるように決めている。内側境界を形成する直線は、モデルの吸収体領域の断面積が実際と同じになるように決めている。黒鉛ブロックの侧面と制御棒吸収体の間の外側の金属被覆の密度は均等に小さくしており、制御棒の中心孔の内側の金属被覆の密度は均質に減らしている。

### 3.2.3 CITATION-1000VP コード<sup>10)</sup>

CITATION-1000VP コードは、HTTR の炉心モデルを用いて計算を行うために、旧原研において CITATION から改良された炉心計算コードである。この計算コードでは三角メッシュの三次元炉心モデルを用いている。第 3.6 図及び第 3.7 図に炉心モデルの水平方向及び軸方向断面を示す。各々の燃料ブロックは、水平方向に 6 つの三角メッシュ、軸方向に 4 つのメッシュに分割されている。中性子のエネルギー群は、3 つの高速中性子群と 3 つの熱中性子群の 6 中性子群で構成されている。このモデルでは、実効増倍係数、出力分布、反応度調整材価値及び制御棒価値を評価する。燃料棒の出力分布は、全体の出力分布と各燃料ブロックの局所径方向ピーピングの補正係数を組み合わせることで求めている。局所径方向ピーピングの補正係数は、二次元の詳細三角メッシュ炉心モデルにより求めている。第 3.8 図にモデルを示す。

## 3.3 燃料温度評価システムの概要

### 3.3.1 FLOWNET コード<sup>10), 11)</sup>

FLOWNET コードは、冷却材の流量分布及び温度分布を計算するコードである。第 3.9 図及び第 3.10 図に計算モデルの軸方向断面及び水平方向断面を示す。FLOWNET コードの計算モデルは、炉心の幾何学的計上の対象性から、1/6 炉心をモデル化している。本モデルでは、流路の代表点に圧力ノードと呼ばれる接点を設定し、これらを流路ブランチと呼ばれる一次元の流路で結合させている。さらに、各々の流路ブランチは伝熱路ブランチで結合されている。各々の流路ブランチには、実際の流路の等価断面積、等価直径、長さ及び圧力損失係数が設定されている。固定反射体-高温プレナム部間の漏れ流れ、燃料体・可動反射体・制御棒案内ブロック間のギャップ流路の圧力損失係数は実験結果より得られた値を用いている。詳細な冷却材流量分布は、各計算より得られた出力分布ならびに炉心構成要素及び炉内構造物の寸法などにより評価している。計算では、黒鉛ブロックの主流、カラム間ギャップのバイパス流れ、固定反射体を通過する

漏れ流れ及び黒鉛ブロックの水平面のギャップ間のクロス流れを流路として設定している。

高温である原子炉出口冷却材温度 950°Cを達成するためには、燃料最高温度をできる限り低く保つことが重要となってくる。したがって、燃料の冷却に寄与しない冷却材の流れは極力抑えなければならない。HTTRでは、黒鉛構造物の間隙にシール要素を設けており、バイパス流等の燃料の冷却に寄与しない流れを極力抑えている。本計算で、シール要素における圧力損失係数は実験結果より得られた値を用いている。

### 3.3.2 TEMDIMヨード<sup>10), 11)</sup>

T E M D I M コードは燃料及びその周辺の温度分布を計算するコードである。計算は、核特性計算で求めた出力分布及び中性子束分布、F L O W N E T コードで計算された冷却材流量分布を用いる。

TEMDEMコードの第3.11図に計算モデルを示す。TEMDEMコードでは二次元円筒モデルを用いて計算を行い、第3.12図に示すようにHTTRの炉心の幾何学的対称性を考慮して、1/3炉心分の計算を行っている。

ここで、 $\Delta T^N$ は以下のとおりである。

- $\Delta T_1^N$  : 1 燃料棒における冷却材温度上昇であり、 $\Delta T_2^N \sim \Delta T_5^N$  の総和として求める。

$\Delta T_2^N$  : 流体—燃料スリーブ間外面の温度差であり、円筒座標系の熱伝導計算、熱伝達計算及び熱ふく射計算により求める。

$\Delta T_3^N$  : 燃料スリーブ内外面の温度差であり、円筒座標系の熱伝導計算により求める。

$\Delta T_4^N$  : 燃料コンパクト—燃料スリーブ内面間のギャップでの温度差であり、円筒座標系の熱伝導計算及び熱ふく射計算により求める。

$\Delta T_5^N$  : 燃料コンパクト内外面の温度差であり、円筒座標系の熱伝導計算により求める。

TEMDEMコードでは、燃料最高温度に安全裕度を見込むために工学的安全係数を適用して計算を行っている。工学的安全係数は種々の不確かさを扱ったものであり、通常運転時に、いついかなる場所においても燃料温度が熱的制限値を超えないように担保するものである。工学的安全係数は以下に示す式で適用する。

$$T^F = T_{IN}^G + \sum_{i=1}^5 (F_i \cdot \Delta T_i^N) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

$$F_i = \prod_{j=1}^{n(i)} f s_{i,j} \left\{ 1 + \sqrt{\sum_{k=1}^{m(i)} f r_{i,k}^2} \right\} \dots \quad (3.2)$$

- $T^F$  : 燃料温度(°C)  
 $T_{IN}^G$  : 冷却材入口温度(°C)  
 $\Delta T_i^N$  : 上昇温度(°C)  
 $F_i$  : 温度差または温度上昇にかかる因子(-)  
 $fr_{i,j}$  : ランダム因子(-)

$f_{S_{i,j}}$  : システマティック因子(-)

i=1 : 冷却材温度上昇に関わる因子

2 : 膜温度上昇に関わる因子

3 : 黒鉛スリーブ内の温度上昇に関わる因子

4 : 燃料コンパクトースリーブ間ギャップ温度上昇に関わる因子

5 : 燃料コンパクト内温度上昇に関わる因子

式(3.2)中では工学的安全係数にシステムティック因子とランダム因子が設定されている。第3.1表及び第3.2表に計算使用した工学的安全因子の値を示す<sup>10), 11)</sup>。システムティック因子は出力分布や流量配分の不確かさ及び原子炉熱出力の測定誤差等の系統的な性質を有する因子であり、ランダム因子は製作公差及び熱流動関係の諸定数のばらつき等の統計処理を行う因子である。本計算で用いた工学的安全因子は、設計時に定められた値を出力上昇試験等の運転に基づき見直したものである。

また、核特性計算では1/6ブロックごとに物質を均質化しているため、本計算では出力分布について非均質物質を均質化した効果による補正係数（非均質効果補正係数）1.07を考慮している。

## 4. 出力分布、流量分布及び燃料温度の計算結果

### 4.1 出力分布計算結果

第4.1表に計算条件を示す。原子炉出力は約30MW、燃焼日は0～660燃焼日まで110日間隔、制御棒位置は2610～3190mmまで145mm間隔で設定した。

第4.1図に、計算コードにより算出された実効増倍率の燃焼に伴う変化を示す。本計算では、制御棒位置を変化させて計算を行い、図中○印で示した基準制御棒位置を求めた。次にこの基準制御棒位置より1メッシュ分(1/4ブロック:145mm)制御棒を上下させて計算を行い、出力を求めた。この出力分布の計算結果を受けて、以下の2ケースについて着目し、計算結果の整理を行った。

- ①燃焼に伴う物理現象を整理・把握するために、燃焼を通じて制御棒位置が変化しない(2900mm固定)仮想的な条件での整理。(以下、「制御棒位置固定条件」という。)
- ②実際の燃焼を模擬した基準制御棒位置(制御棒位置変動)での整理。(以下、「基準制御棒位置条件」という。)

#### (1) 各カラムの径方向出力ピーキング

各カラムの径方向出力ピーキング $P_{1n}$ とは、以下に示すように各カラム出力を各カラム平均出力で割ったものである。

$$P_{1n} = \frac{P_{COL}^i}{(\sum_i P_{COL}^i) / COL} \dots \dots \dots \quad (4.1)$$

$P_{COL}^i$  : iカラムの出力(W)

COL : 炉心全カラム数(-)

しかしながら、HTTRのようにカラムによって燃料棒の本数が異なり、本評価のように燃料棒1本を対象として扱うような計算を行う場合には、この出力ピーキングに燃料棒の本数の重み付けが必要となってくる。そこで、これらの式を各カラムの燃料棒1本に関する径方向ピーキングを求めるように修正する。

$$P_1 = \frac{(P_{COL}^i / n^i)}{\{\sum_i (P_{COL}^i / n^i)\} / COL} \dots \dots \dots \quad (4.2)$$

$n^i$  : 各カラムにおける燃料棒本数

第4.2図及び第4.3図に各カラムの径方向出力ピーキングを示す。第4.2図は制御棒固定条件の結果であり、第4.3図は基準制御棒位置条件の結果である。これらの結果を見ると、燃焼期間を通じて径方向出力ピーキングは1.1を超えておらず、燃焼期間を通じて径方向出力分布が平坦であるということが示された。また、各カラム間のピーキングの分布は定性的にほとんど変化せず、高いピーキングを有するカラムは燃焼期間を通じて高いままであった。

## (2) 各カラムの出力ピーキング $P1 \times P2$

本計算モデルでは、1燃料ブロックを6分割したメッシュを採用しており、後述の流量分布計算及び燃料温度計算では、各メッシュに出力を割り振る際に当該カラムの平均出力に対する当該メッシュの出力比（出力ピーキング  $P2$ ）を用いる。出力ピーキング  $P2$  は、以下に示すように各メッシュ出力を各メッシュ平均出力で割ったものである。

$$P2 = \frac{P_{MESH}^i}{(\sum_i P_{MESH}^i) / MESH} \quad \dots \dots \dots \quad (4.1)$$

P <sub>MESH</sub> <sup>i</sup>	:	メッシュ <i>i</i> の出力(W)
MESH	:	カラム内メッシュ数(-)

また、 $P1 \times P2$  の最大値が現れる箇所は炉心内で最も出力が高いメッシュを示しており、燃料最高温度の出現位置を知る目安となるため、燃料温度評価においては重要な因子となる。

第4.4図及び第4.5図に各カラムの出力ピーキング  $P1 \times P2$  を示す。第4.4図は制御棒固定条件の結果であり、第4.5図は基準制御棒位置条件の結果である。これらの図中には、各カラムにおける  $P1 \times P2$  の最大値を示している。これらの結果を見ると、燃焼が進むにつれて  $P1 \times P2$  の最大値出現カラムが F5 → F1 → F1 → F1 → F1 → F3・F4 と推移していくことが示された。また、各カラム間での  $P1 \times P2$  の値に目立つような大きな差ではなく、出力が局所的に大きくなることはないことが示された。

## (3) 軸方向出力ピーキング PAX

第4.6図及び第4.7図にF1カラムの軸方向ピーキングを示す。第4.6図は制御棒固定条件の結果であり、第4.7図は基準制御棒位置条件での結果である。軸方向ピーキング PAX とは、以下に示すように各箇所の出力をカラム平均出力で割ったものである。

$$PAX = \frac{P_{AX}^i}{(\sum_i P_{AX}^i) / AXIS} \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

P <sub>AX</sub> <sup>i</sup>	:	評価点 <i>i</i> における出力(W)
AXIS	:	軸方向評価点数(-)

制御棒位置固定条件の場合、燃焼初期には、上部領域の<sup>235</sup>Uの濃縮度が下部のものより高いため、上部領域のピーキングが高くなっている。燃焼が進むにつれ、上部領域のピーキングが低下し、全体の出力分布が平坦になっていくことが示された。他のカラムについても同様の傾向が見られた。

基準制御棒位置条件の場合、燃焼初期には制御棒位置固定条件の場合と同様、上部領域のピーキングが高くなってしまっており、燃焼が進むにつれ、上部領域のピーキングが低下し、全体の出力分布が平坦になっていくことが示された。しかしながら、燃焼550日に制御棒が引抜かれ、上部領域のピーキングが再度増加することが示された。他のカラムについても同様の傾向が見られた。

## 4.2 流量分布計算結果

第4.2表に計算条件を示す。原子炉出力は約30MW、炉心入口冷却材温度は中心領域及び周辺領域でそれぞれ約402°C及び約393°C、冷却材流量は単独運転時の炉心冷却材流量（1次冷却材全流量から中間熱交換器でのバイパス流量を差し引いた流量）を設定した。

### (1) 燃料チャンネル、制御棒冷却チャンネル及びカラム間ギャップの冷却材流量割合

第4.8図に、制御棒位置2900mm及び燃焼330日における冷却材流量の流量割合の計算結果を示す。燃料の冷却に寄与する冷却材の流量割合は最小値で約90%となることが示された。また、炉心を通過しない冷却材の流量割合は、約0.3%とほとんどないことが示された。

第4.9図及び第4.10図に燃料チャンネル、制御棒冷却チャンネル及びカラム間ギャップの冷却材流量割合の燃焼に伴う変化を示す。第4.9図は制御棒固定条件の結果であり、第4.10図は基準制御棒位置条件での結果である。

どちらの条件でも、第2段目の燃料チャンネルの冷却材流量割合が少なく、その代わりに、カラム間ギャップの流量割合が多いことがわかる。これは、第2段目の軸方向出力ピーキングが最も高く、そのために冷却材が燃料チャンネルを流れづらくなっているものと推察される。また、制御棒冷却チャンネルの流量割合は3段目まではほぼ一定であるが、4段目以降流量割合が減少していることが示された。これは、炉心最下部において制御棒冷却チャンネルの流路が狭くなっていることによるものである。また、燃焼が進むにつれて、燃料冷却チャンネル及び制御棒冷却チャンネルの冷却材流量割合は減少してゆき、カラム間ギャップの冷却材流量割合が増加することが示された。これは黒鉛ブロックの照射に起因するカラム間ギャップの流路変形によるものである。

### (2) 各カラムにおける径方向流量ピーキング

第4.11図及び第4.12図に各カラムの径方向流量ピーキングの燃焼に伴う変化を示す。第4.11図は制御棒固定条件の結果であり、第4.12図は基準制御棒位置条件での結果である。また、(a)は燃焼330日における燃料領域各段の流量ピーキングを示しており、(b)は各カラム1段目の流量ピーキングの燃焼に伴う変化を示している。

どちらの条件でも、各段の流量ピーキングは燃焼を通じて大きく変化していないことが示された。また、各カラムの流量分布について、F2カラムの流量割合が最も少なく、次いでF1、F3・F4・F5カラムの順に流量割合が多くなることが示された。

### (3) 炉心出入口冷却材温度上昇

第4.13図及び第4.14図に炉心中心領域及び炉心周辺領域での炉心出入口冷却材温度差(炉心冷却材温度上昇)の燃焼に伴う変化を示す。第4.13図は制御棒固定条件の結果であり、第4.14図は基準制御棒位置条件での結果である。これらの図中に、運転より得られた実測値をプロットで併せて示す。

炉心冷却材温度上昇の値は、中心領域では燃焼とともに上昇し、ある期間を過ぎると下降してゆく。一方、周辺領域では、中心領域ほどではないが燃焼とともに下降し、ある期間を

過ぎると上昇してゆく。なお、実測値と計算値でずれが生じているのは、計算では燃焼を通じて炉心入口冷却材温度を一定としているのに対し、実測データは炉心入口冷却材温度が運転によって異なること、及び計算コードの物性値等に保守性を持たせていること、等に起因するものであると推察される。これについては、今後とも更なるデータの蓄積を行い、検証を行う必要があると考えられる。

#### 4.3 燃料温度計算結果

第4.3表に計算条件を示す。原子炉出力は約30MW、炉心入口冷却材温度は約402°C、冷却材流量は単独運転時の炉心冷却材流量（1次冷却材全流量から中間熱交換器でのバイパス流量を差し引いた流量）を設定した。

##### (1) 燃料最高温度（工学的安全因子考慮）

第4.15図及び第4.16図に工学的安全因子を考慮した場合の燃料最高温度評価結果を示す。

第4.15図は制御棒固定条件の結果であり、第4.16図は基準制御棒位置条件での結果である。

どちらの条件でも、燃料最高温度はカラム間でほとんど変わらないことが示された。また、燃料最高温度が現れたカラムは、燃焼が進むにつれてF5→F1→F1→F1→F1→F3・F4と変化することが示された。安全解析時の燃焼を通じた燃料最高温度は1420°Cとなっていたが、実際に得られた運転データをもとに解析条件を見直した結果、制御棒位置固定条件で約1337°C、基準制御棒位置で約1325°Cとなることが示された。

##### (2) 燃料最高温度（工学的安全因子考慮なし）

第4.17図及び第4.18図に工学的安全因子を考慮しない場合の燃料最高温度評価結果を示す。第4.17図は制御棒固定条件の結果であり、第4.18図は基準制御棒位置条件での結果である。

どちらの条件でも、燃料最高温度はカラム間でほとんど変わらないことが示された。また、燃料最高温度が現れたカラムは、燃焼が進むにつれてF5→F1→F1→F1→F1→F3・F4と変化することが示された。

##### (3) 温度分布（工学的安全因子考慮なし）

第4.19図及び第4.20図に工学的安全因子を考慮しない場合のF1カラムの軸方向温度分布を示す。第4.19図は制御棒固定条件の結果であり、第4.20図は基準制御棒位置条件での結果である。

どちらの条件でも、第1段目の温度上昇がもっとも大きく、下流に行くにつれて温度上昇が緩やかとなることが示された。また、燃料コンパクト外面-燃料スリーブ内面間のギャップにおいて、最大150°C程度の温度差があることが示された。なお、各段の間において上流側より下流側の燃料温度が低下しているが、これは、カラム間ギャップを流れてきた燃料の冷却に寄与しない冷却材が上下ブロック間ギャップで混合し、ブロック間で冷却材温度が低下することに起因するものである。

第4.21図及び第4.22図に工学的安全因子を考慮しない場合のF1カラムの燃料温度軸方向

温度分布を示す。第 4.21 図は制御棒固定条件の結果であり、第 4.22 図は基準制御棒位置条件での結果である。

どちらの条件でも、燃焼初期には第 2 段目の最下部の燃料温度が最も高いが、燃焼が進むにつれて、第 3 段目、第 4 段目の最下部の燃料温度が高くなることが示された。これは、燃焼初期には上段の出力ピーキングが高いが、燃焼が進むにつれて上段の出力ピーキングが低下してくることによるものである。

#### 4.4 総合的な考察

4.1 節～4.3 節で示した結果を元に、燃料温度と、出力・流量分布の関係を調べることとする。

まず、半径方向について調べることとする。第 4.23 図及び第 4.24 図に工学的安全因子を考慮しない場合の燃料温度、出力ピーキング及び流量ピーキングの燃焼に伴う変化を示す。第 4.23 図は制御棒固定条件の結果であり、第 4.24 図は基準制御棒位置条件での結果である。

燃焼 220 日～440 日では、燃料最高温度出現カラムと最高出力ピーキング出現カラムは整合が取れているが、燃焼 110 日、550 日、660 日では整合性がなく、F1 カラムがピーキングと異なる挙動を示している。この点について F1 カラムの流量ピーキングを見ると、流量ピーキングが小さい燃焼 220 日～440 日では燃料温度が高くなっているが、流量ピーキングが大きい燃焼 110 日、550 日、660 日では燃料温度が低下している。この結果より、F1 カラムの燃料温度は他のカラムに比べて流量の影響が大きいことが示された。

すなわち、半径方向について、燃料温度と出力ピーキングには相関があり、出力ピーキングの大小を調べることにより燃料最高温度の出現箇所をおおむね予測できることが示された。ただし、F1 カラムについては、流量の影響を大きく受けるため、F1 カラムの出力ピーキングが最も高いときには流量との相関も調べる必要がある。

次に、軸方向について調べることとする。第 4.25 図及び第 4.26 図に工学的安全因子を考慮しない場合の軸方向の燃料温度及び出力ピーキングの燃焼に伴う変化を示す。第 4.25 図は制御棒固定条件の結果であり、第 4.26 図は基準制御棒位置条件での結果である。

どちらの条件も、傾向として燃料温度が最も高い箇所は出力ピーキングが初期の状態より高くなっている箇所に現れているものの、燃料温度と出力ピーキングの間に相関を取ることはできなかった。こちらも、今後、詳細に調べる必要がある。

以上の結果より、燃料最高温度出現箇所は、半径方向については出力ピーキングを調べることでおおむね予測できることが示された。なお、軸方向については出力ピーキング、流量ピーキングともに相関が取れず、今後詳細に検討する必要がある。

## 5. 結言

本報では、HTTRの出力上昇試験、供用運転のデータをもとに、850°C運転（定格運転）時の燃焼を通じた燃料温度評価の結果についてまとめた。

その結果、燃料最高温度は約1337°Cとなることが示された。また、燃料最高温度出現カラムは径方向出力ピーキングの分布を調べることで、ある程度予測可能であることが示された。

## 謝辞

本評価を行うにあたり、小森芳廣 高温工学試験研究炉部長、中澤利雄 同部次長、伊与久達夫 同部研究主席及び西原哲夫 HTTR技術課長に御指導、御助言頂きました。さらに、運転データ等の取得にあたりHTTR運転管理課各位にご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 日本原子力研究所：“日本原子力研究所大洗研究所設置変更許可申請書（完本）〔別冊3 HTTR〕”（2001）
- (2) 斎藤伸三 他：“高温工学試験研究炉の設計と研究開発”，日本原子力学会誌，32, p. 847 (1990).
- (3) 藤川正剛 他：“HTTR（高温工学試験研究炉）の出力上昇試験”，日本原子力学会和文論文誌，1, p. 361 (2002).
- (4) 中川繁昭 他：JAERI-Tech 2002-069, “高温工学試験研究炉の出力上昇試験—試験経過及び結果の概要—” (2002)
- (5) Y. Tachibana et al. : “Plan for first phase of safety demonstration tests of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)”, Nucl. Eng. Des., 224, p. 179 (2003).
- (6) N. Sakaba et al. : “Safety Demonstration Test Plan of HTTR – Overall Program and Result of Coolant Flow Reduction Test ”, Proc. of GLOBAL 2003, New Orleans, Nov. 16–20, 2003, p. 293 (2003).
- (7) 坂場成昭 他:JAERI-Tech 2003-043, “HTTR 高温試験運転の出力上昇試験計画” (2003).
- (8) 高松邦吉 他：JAERI-Tech 2004-063, “高温工学試験研究炉の出力上昇試験（高温試験運転）－試験方法及び結果の概要－” (2004)

- (9) S. Fujikawa et al., “Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950 °C in HTTR”, Nucl. Sci. Tech., 41, 12, pp. 1245–1254 (2004).
- (10) S. Saito et.al : JAERI 1332, “Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) “ (1994).
- (11) 栗尾大輔 他：“高温ガス炉HTTRの高温試験運転における燃料温度の評価 “, 日本原子力学会和文論文誌, 5, 1, pp. 57–67 (2006).

第 2.1 表 H T T R の仕様

熱出力	:	30MW
燃料料	:	UO <sub>2</sub> 被覆粒子
燃料体形式	:	ブロック型
炉心構造材	:	黒鉛
冷却材	:	ヘリウムガス
冷却ループ数	:	1 ループ (加圧水冷却器及び中間熱交換器)
原子炉入口冷却材温度	:	395°C
原子炉出口冷却材温度	:	定格運転 850°C 高温試験運転 950°C

第 2.2 表 被覆燃料粒子の仕様

粒子形式	:	4重被覆型
粒子直径	:	920 μm
<sup>235</sup> U 濃縮度	:	約 3~10wt%
燃料核材質	:	UO <sub>2</sub>
燃料核直径	:	600 μm
被覆層材質	:	第1層 低密度熱分解炭素 第2層 高密度熱分解炭素 第3層 炭化ケイ素 第4層 高密度熱分解炭素
被覆層厚さ	:	第1層 60 μm 第2層 30 μm 第3層 25 μm 第4層 45 μm

第 2.3 表 燃料コンパクトの仕様

構 造	:	中空円状
材 質	:	被覆燃料粒子、黒鉛と炭素混合材 (黒鉛素地)
粒子充填率	:	約 30vol%
外 径	:	約 26mm
内 径	:	約 10mm
高 さ	:	約 39mm

第 2.4 黒鉛スリーブの仕様

構 造	:	円 筒
材 質	:	黒 鉛
外 径	:	約 34mm
厚 さ	:	約 4mm
長 さ	:	約 580mm
燃料部有効長さ	:	約 546mm (燃料コンパクト 14 個)

第 2.5 表 燃料体の仕様

形 式	:	ピン・イン・ブロック型
形 状	:	六角柱状ブロック
対面間距離	:	約 360mm
高 さ	:	約 580mm
燃料棒挿入孔径	:	約 41mm
ブロック間ピッチ	:	約 362mm
材 質	:	黒鉛 (IG-110 黒鉛)
燃 焼 度	:	平均 約 22000MWd/t (高温試験運転のみの場合 : 約 11000MWd/t) 最大 約 33000MWd/t (高温試験運転のみの場合 : 約 16500MWd/t)
燃料体当たりの燃料要素数	:	燃料領域最外周 31 その他 33

第 2.6 表 H T T R の核的設計値

過剰反応度	:	出力補償 約 $0.088\Delta k/k$ 燃焼補償 約 $0.043\Delta k/k$ 運転余裕 約 $0.018\Delta k/k$ (照射試験余裕を含む) 誤差 約 $0.016\Delta k/k$ 合計 約 $0.165\Delta k/k$
制御棒反応度価値	:	$0.18\Delta k/k$ 以上
炉停止余裕	:	$0.01\Delta k/k$ 以上

第3.1表 燃料温度計算に用いた工学的安全因子（システムティック因子）

	冷却材 温度上昇	膜 温度上昇	スリーブ 温度上昇	ギャップ 温度上昇	燃料コンパクト 温度上昇
熱出力	1.0	1.02	1.02	1.02	1.02
出力分布（径方向）	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03
出力分布（軸方向）	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
冷却材流量	1.01	1.008	1.0	1.0	1.0
冷却材流量分布	1.02	1.016	1.0	1.0	1.0

第3.2表 燃料温度計算に用いた工学的安全因子（ランダム因子）

	冷却材 温度上昇	膜 温度上昇	スリーブ 温度上昇	ギャップ 温度上昇	燃料コンパクト 温度上昇
<b>寸法</b>					
コンパクト内径	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01
コンパクト外径	0.0	0.0	0.0	0.37	0.012
スリーブ内径	0.0	0.0	0.015	0.37	0.0
スリーブ外径	0.0	0.017	0.012	0.0	0.0
挿入孔径	0.0	0.014	0.0	0.0	0.0
燃料有効長	0.0	0.002	0.002	0.002	0.002
<b>燃料</b>					
燃料核直径	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
燃料核密度	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
濃縮度	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
ウラン量	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
<b>冷却材物性値</b>					
比熱	0.002	0.001	0.0	0.0	0.0
熱伝導率	0.0	0.018	0.0	0.03	0.0
粘性	0.0	0.012	0.0	0.0	0.0
照射変形	0.0	0.0	0.0	0.21	0.0
コンパクト偏心効果	0.0	0.041	0.041	0.041	0.041

第 4.1 表 核特性計算の計算条件

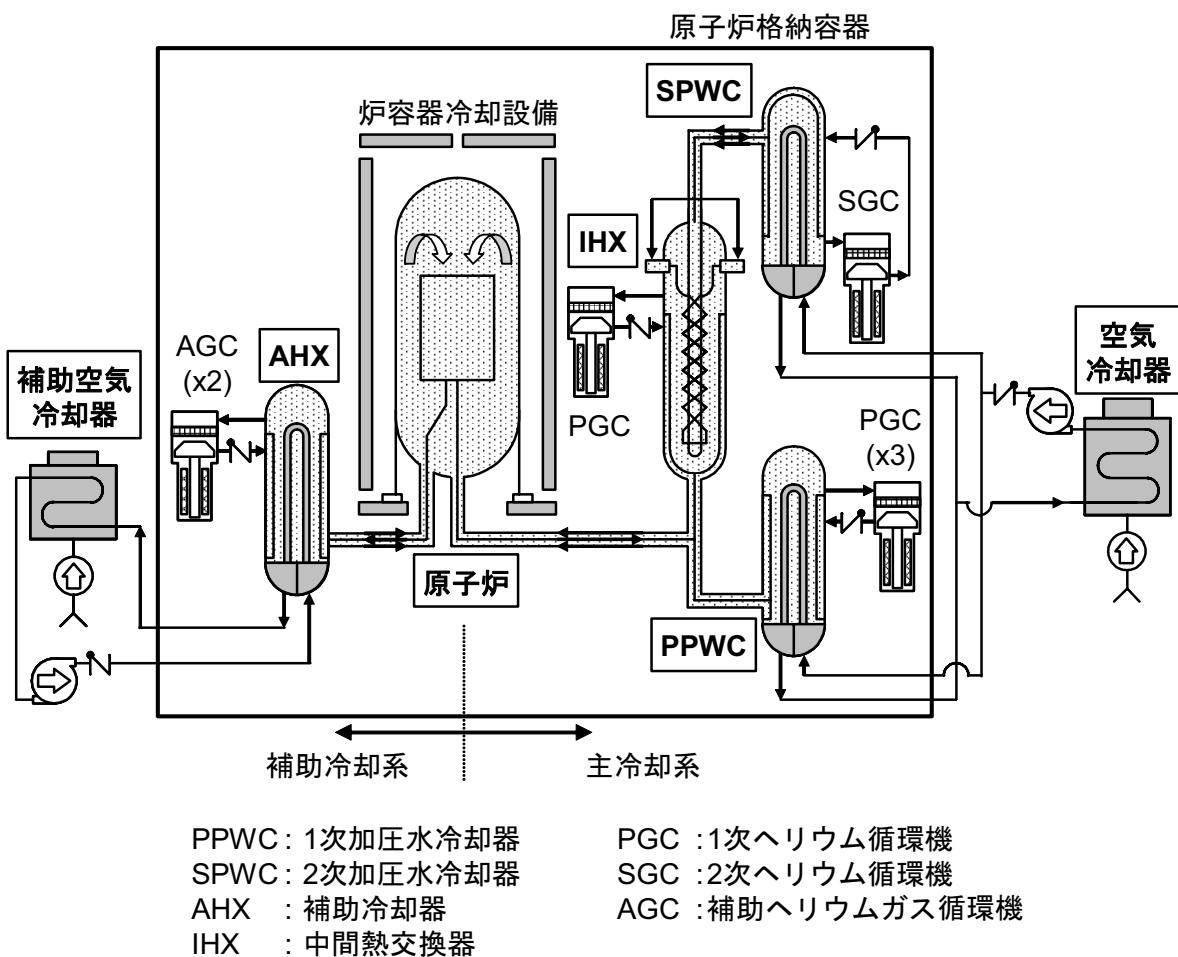
燃焼日	:	0EFPD、110EFPD、220EFPD、330EFPD、 440EFPD、550EFPD、660EFPD
制御棒位置	:	2610mm、2755mm、2900mm、3045mm、3190mm
原子炉出力	:	30MW

第 4.2 表 流量分布計算の計算条件

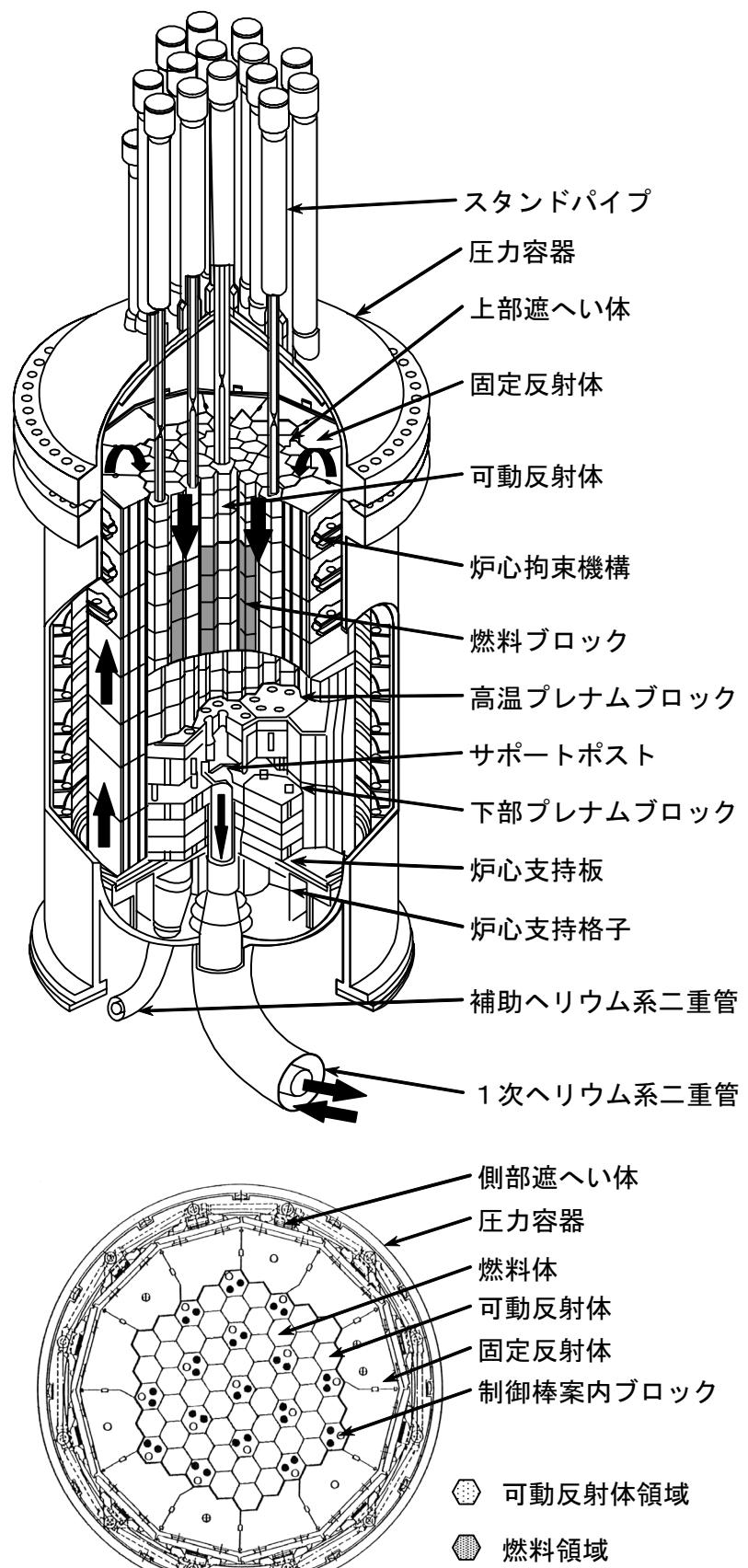
原子炉出力	:	約 30MW
炉心入口冷却材温度	:	中心領域 約 402°C 周辺領域 約 393°C
冷却材流量	:	約 44t/h

第 4.3 表 燃料温度計算の計算条件

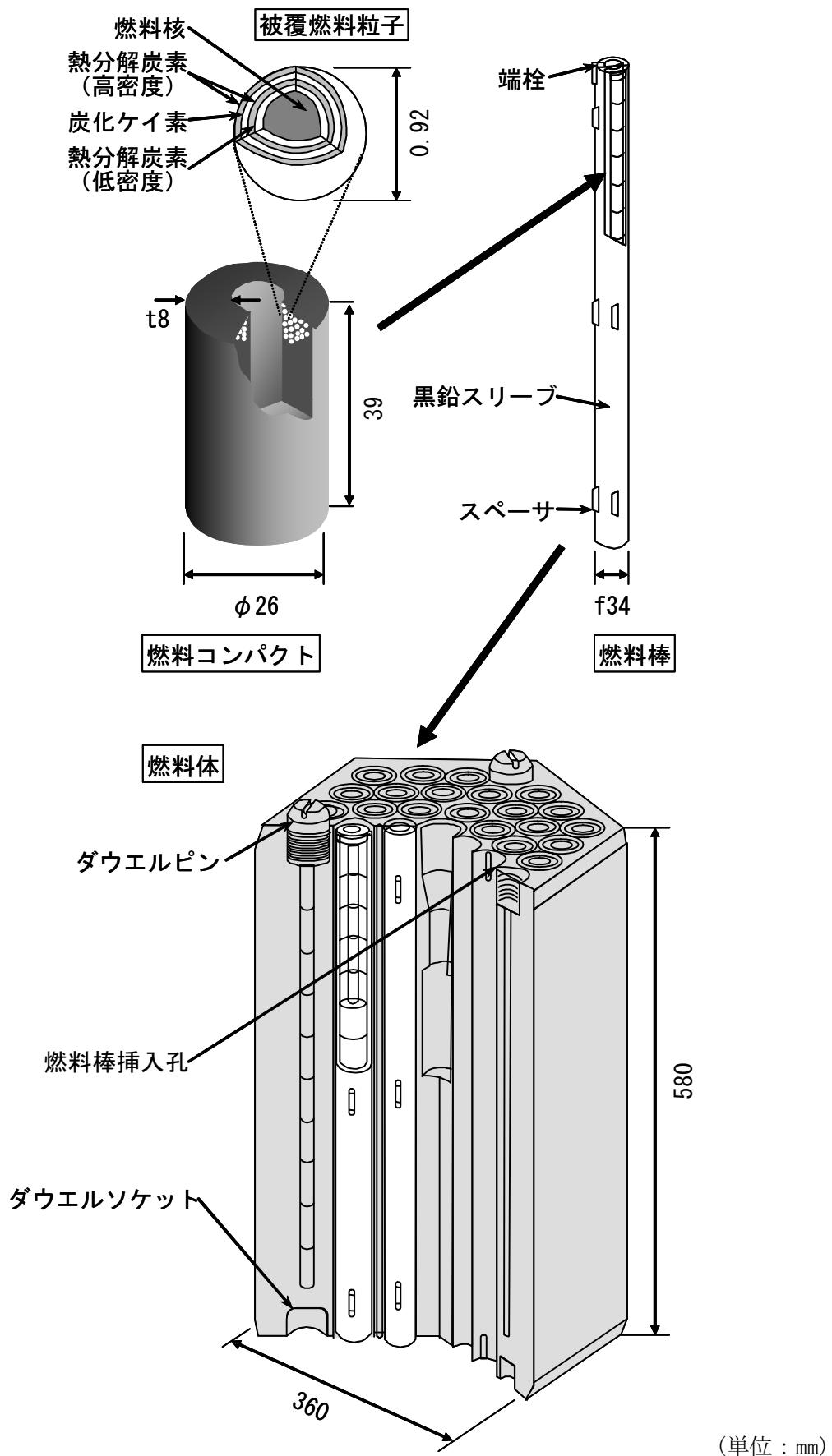
原子炉出力	:	約 30MW
炉心入口冷却材温度	:	約 402°C
冷却材流量	:	約 44t/h



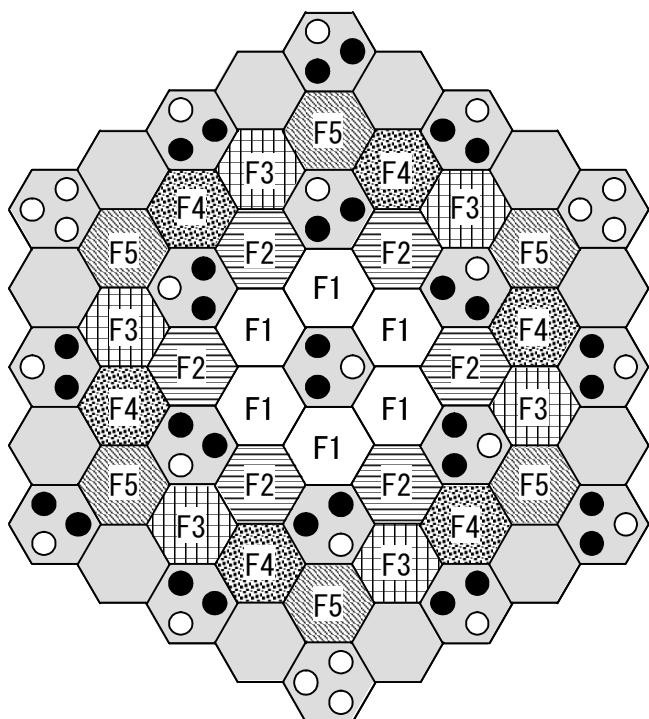
第2.1図 HTTRの冷却系統



第 2.2 図 HTTR 原子炉本体構造図



第 2.3 図 HTTR 燃料体構造図



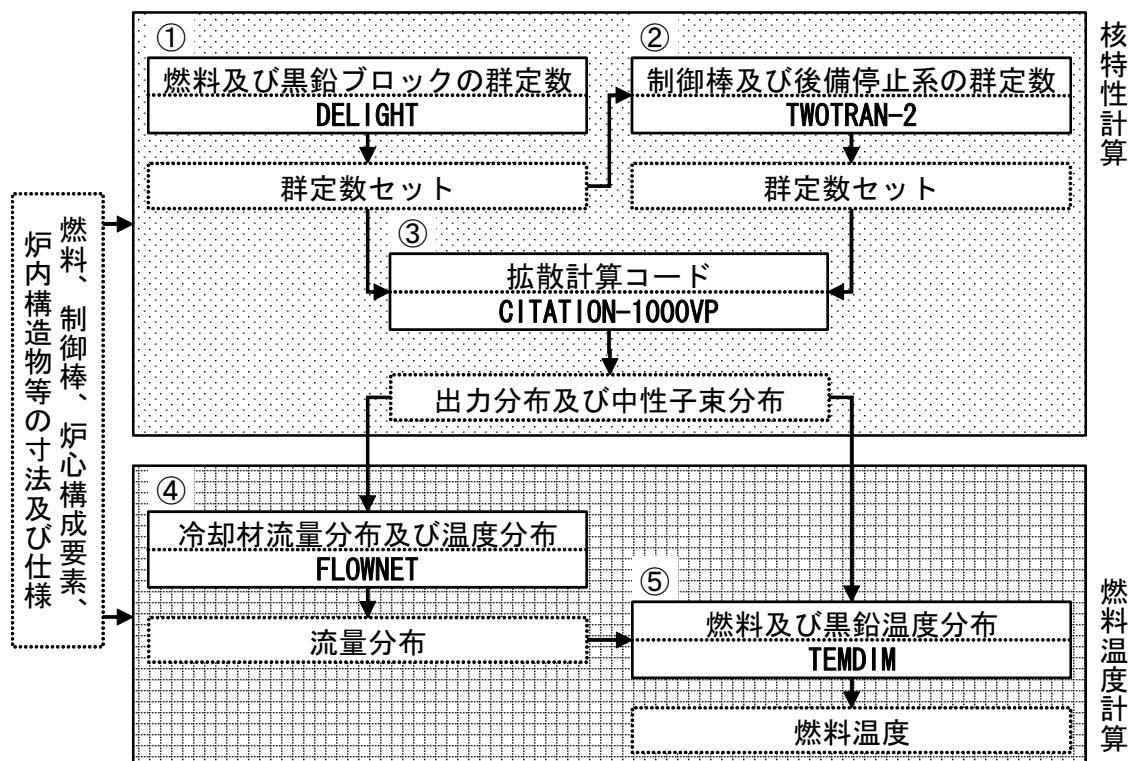
燃料濃縮度

	F1	F2	F3	F4	F5
第1段	約 6.7wt%	約 7.9wt%	約 9.4wt%	約 9.4wt%	約 9.9wt%
第2段	約 5.2wt%	約 6.3wt%	約 7.2wt%	約 7.2wt%	約 7.9wt%
第3段	約 4.3wt%	約 5.2wt%	約 5.9wt%	約 5.9wt%	約 6.3wt%
第4段	約 3.4wt%	約 3.9wt%	約 4.3wt%	約 4.3wt%	約 4.8wt%
第5段	約 3.4wt%	約 3.9wt%	約 4.3wt%	約 4.3wt%	約 4.8wt%

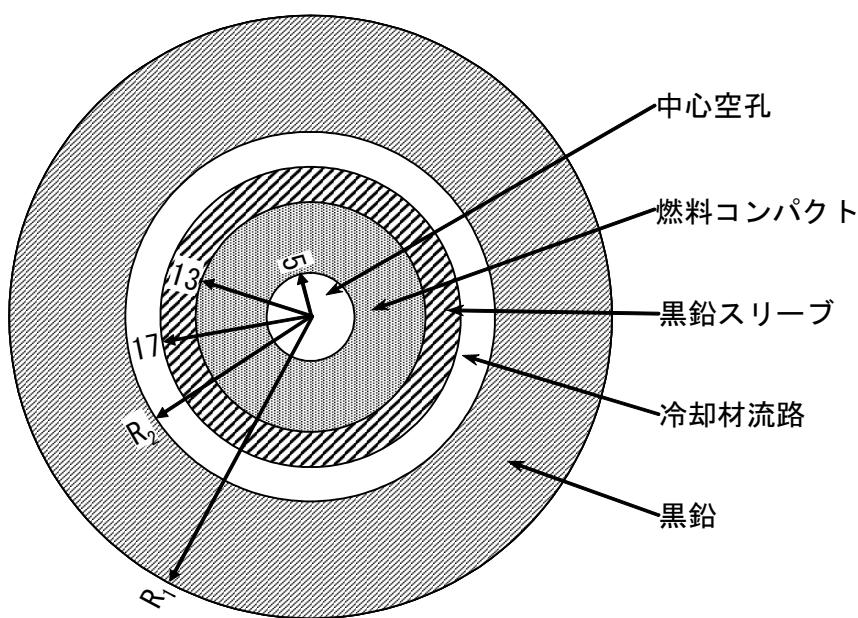
反応度調整材天然ほう素濃度

第1段	約 2.0wt%
第2段	約 2.5wt%
第3段	約 2.5wt%
第4段	約 2.0wt%
第5段	約 2.0wt%

第2.4図 燃料濃縮度及び反応度調整材天然ほう素濃度



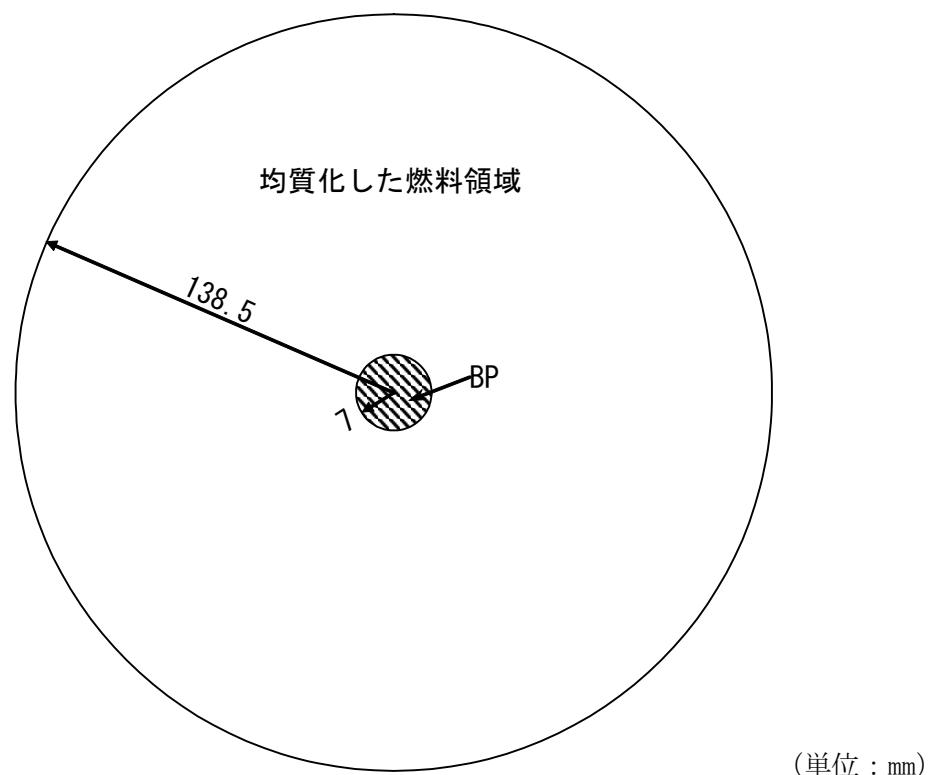
第 3.1 図 核特性計算及び燃料温度計算の流れ



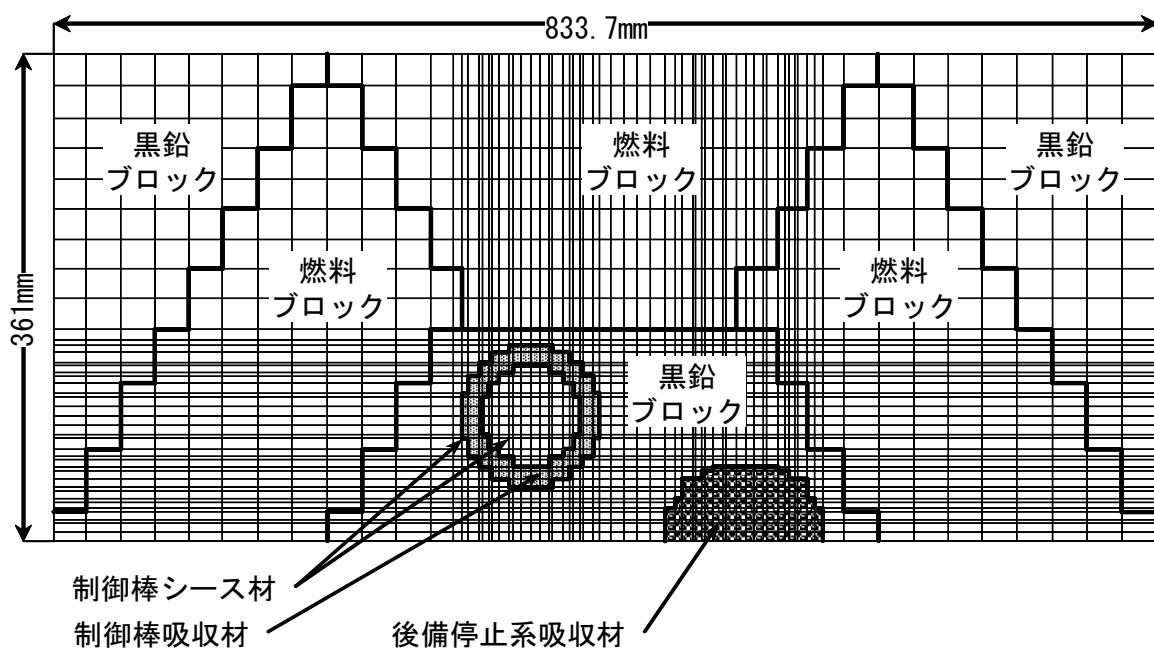
(単位 : mm)

33 燃料棒の場合、 $R_1=34.1\text{ mm}$ 、 $R_2=20.9\text{ mm}$ 31 燃料棒の場合、 $R_1=35.2\text{ mm}$ 、 $R_2=21.0\text{ mm}$ 

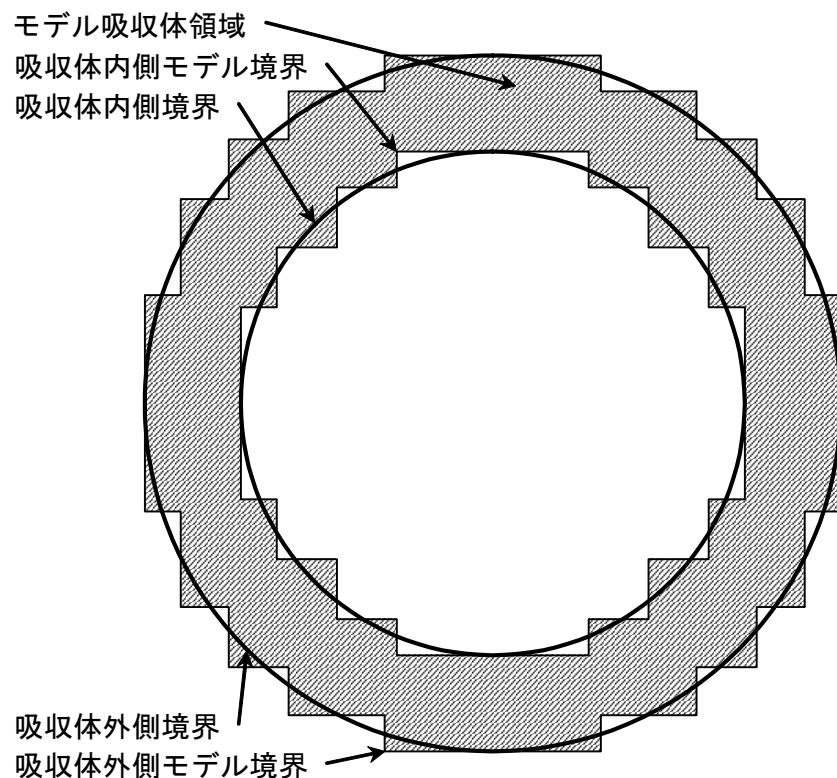
第 3.2 図 一次元円筒燃料セルモデル



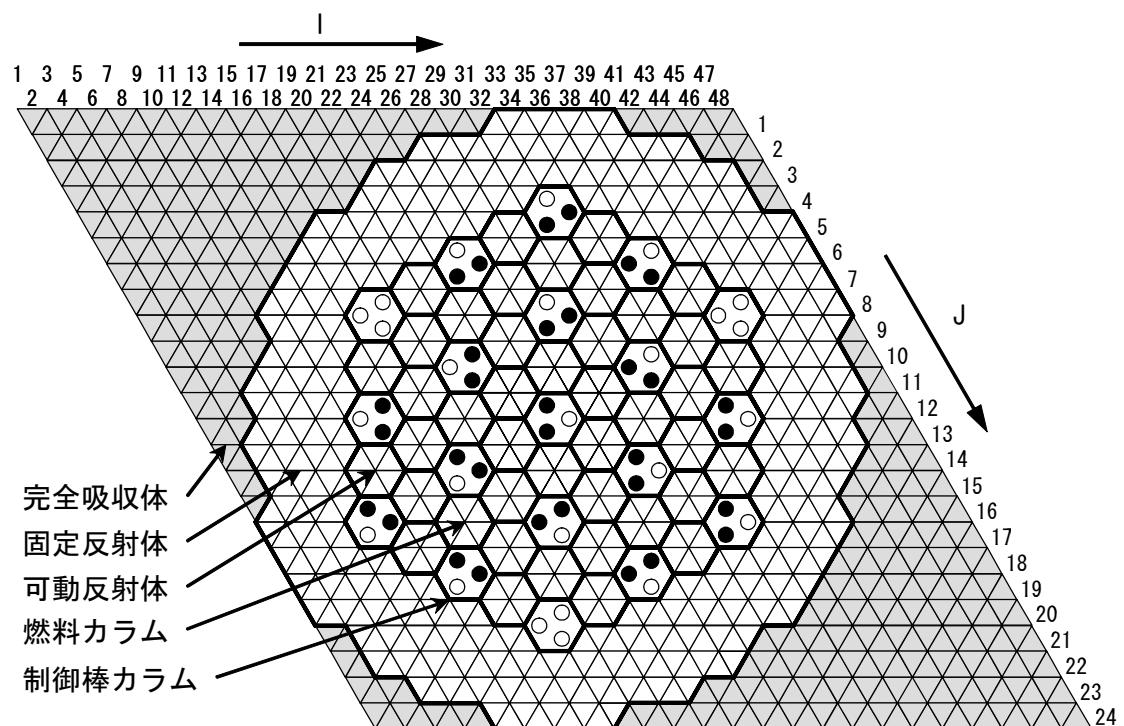
第3.3図 一次元円筒BPセルモデル



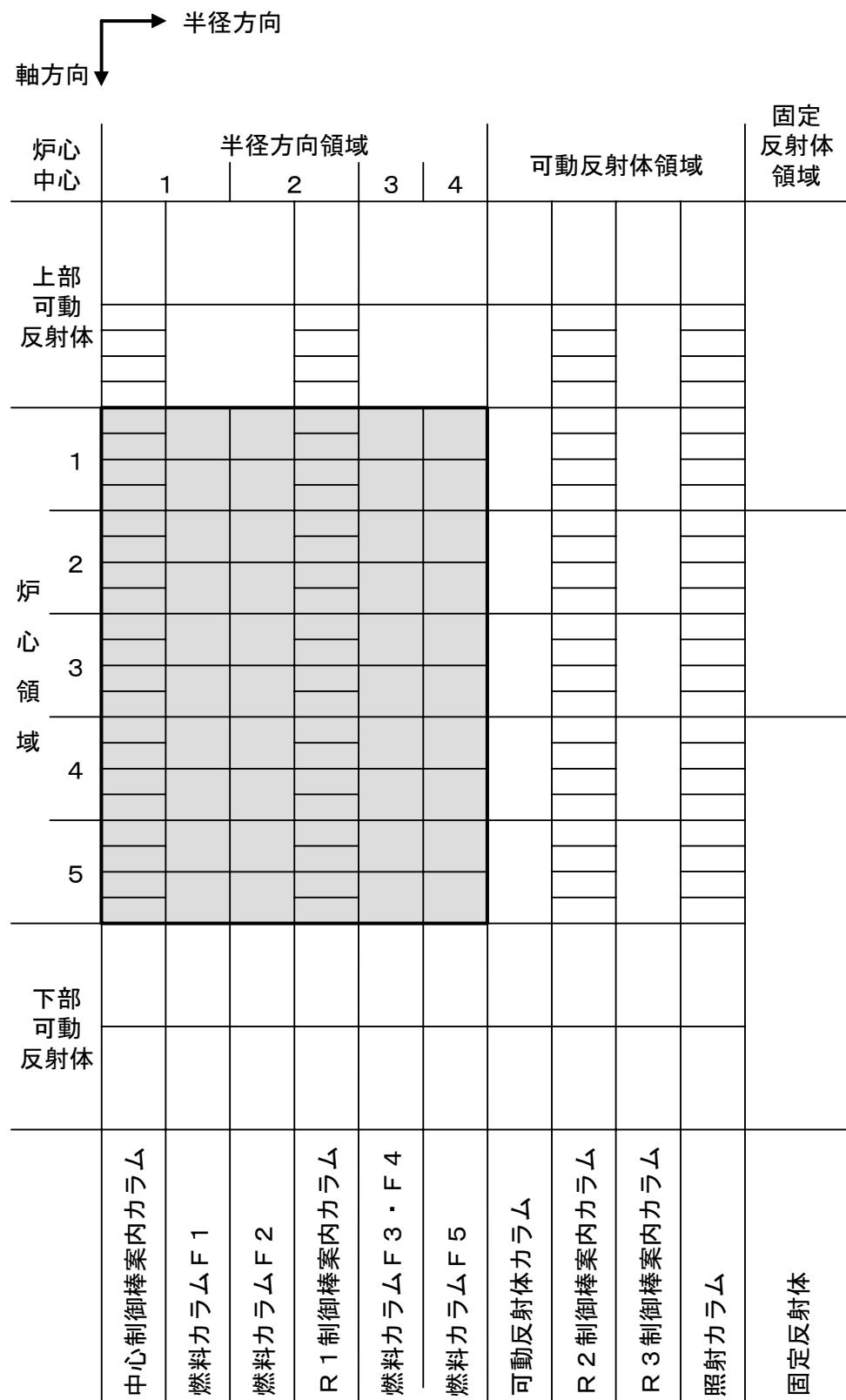
第3.4図 二次元制御棒セルモデル



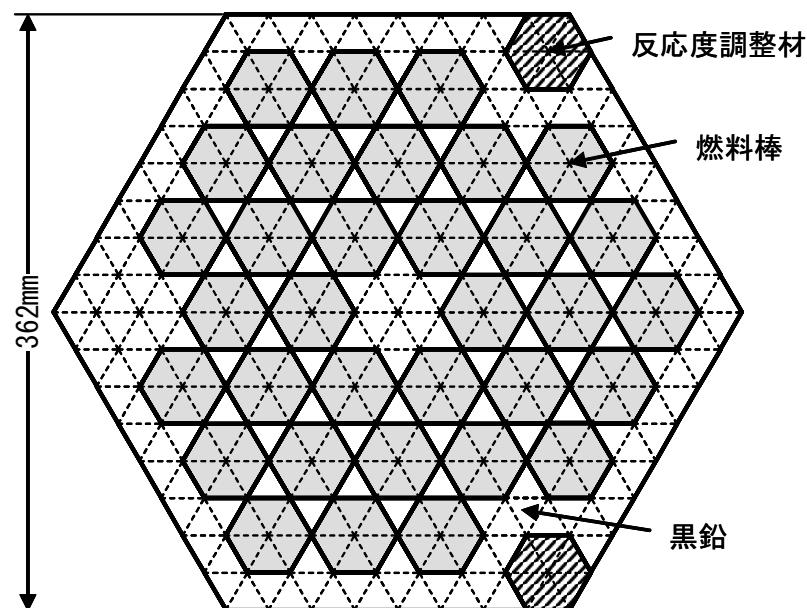
第 3.5 図 二次元制御棒吸収体モデル



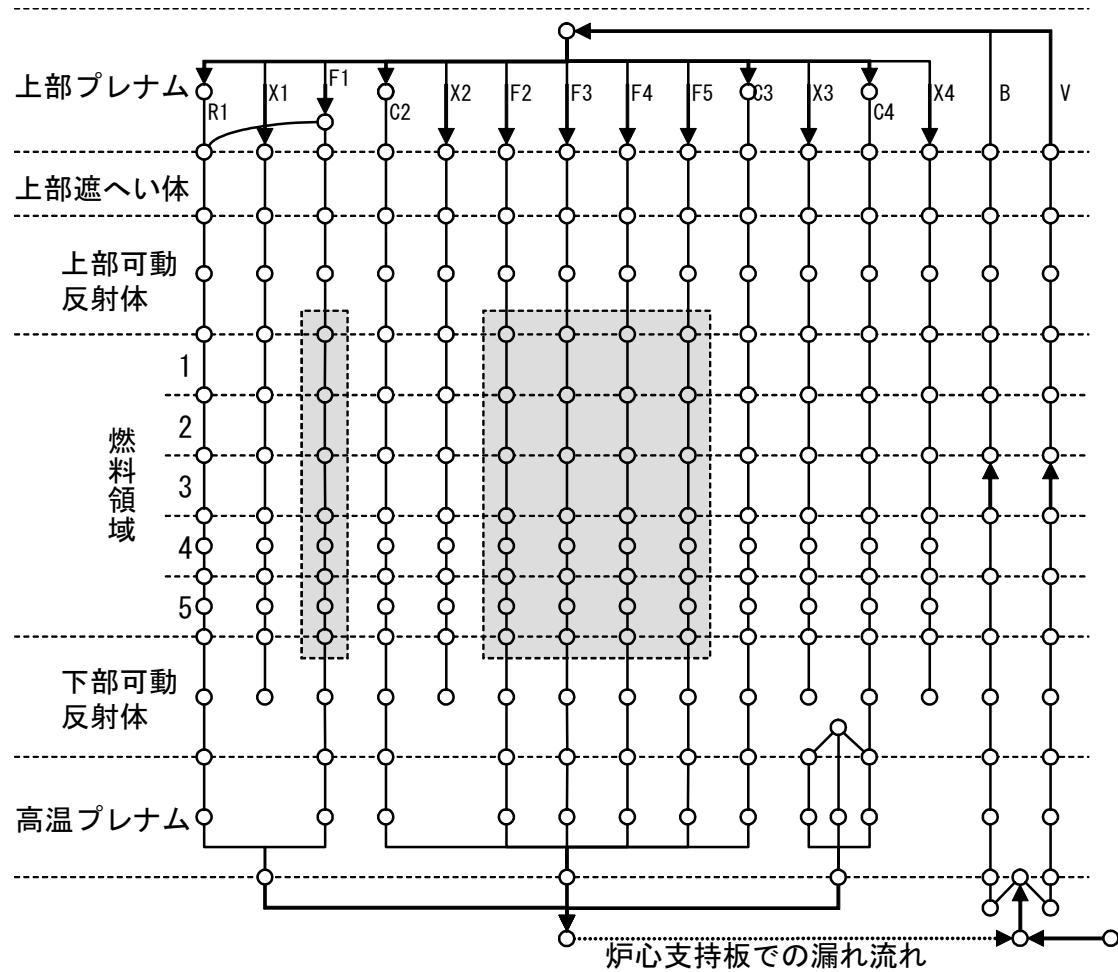
第 3.6 図 炉心計算モデル（水平方向）



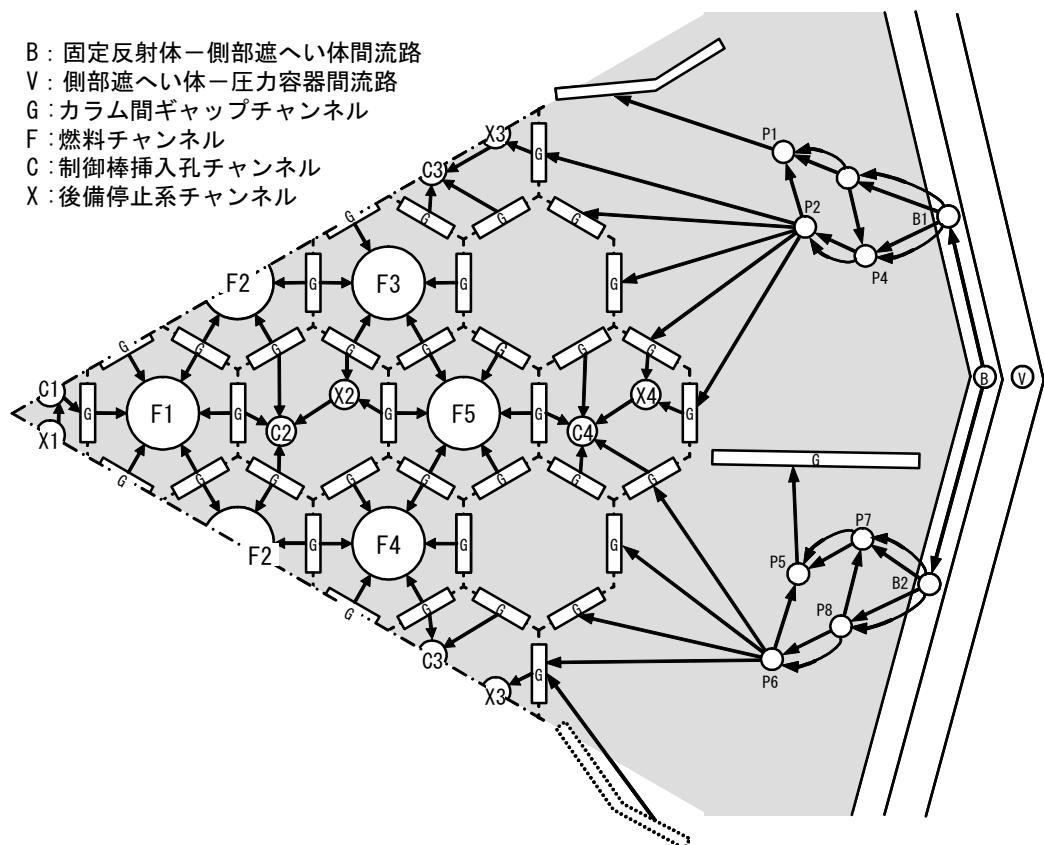
第 3.7 図 炉心計算モデル（軸方向）



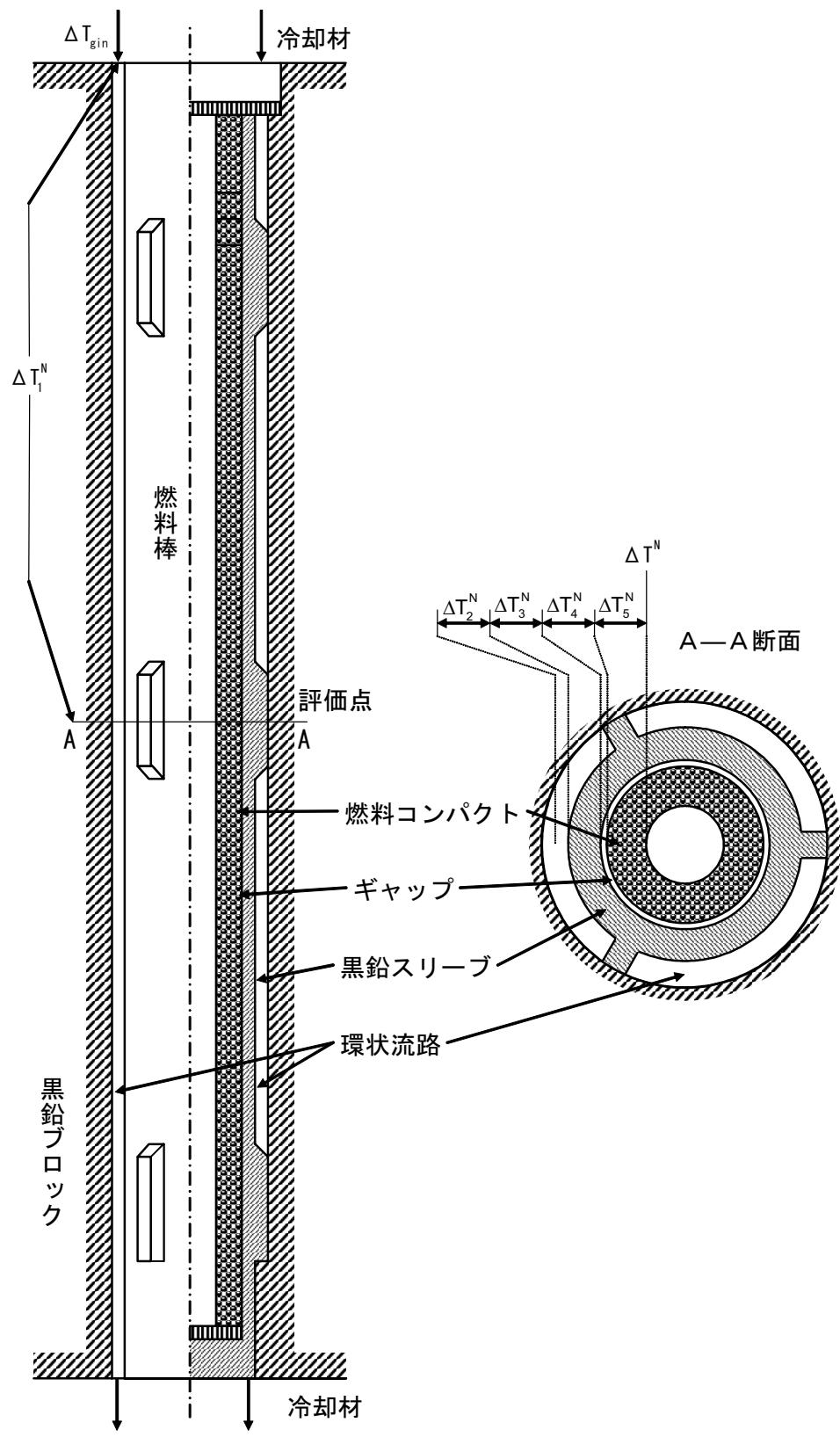
第3.8図 燃料ブロックの二次元詳細三角メッシュモデル



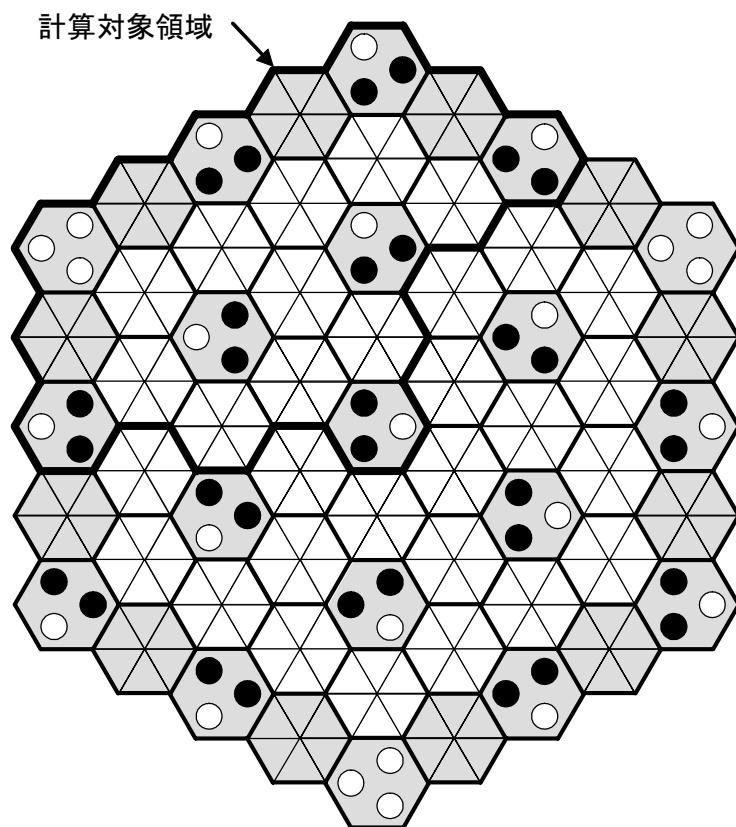
第3.9図 流量分布計算モデル（軸方向）



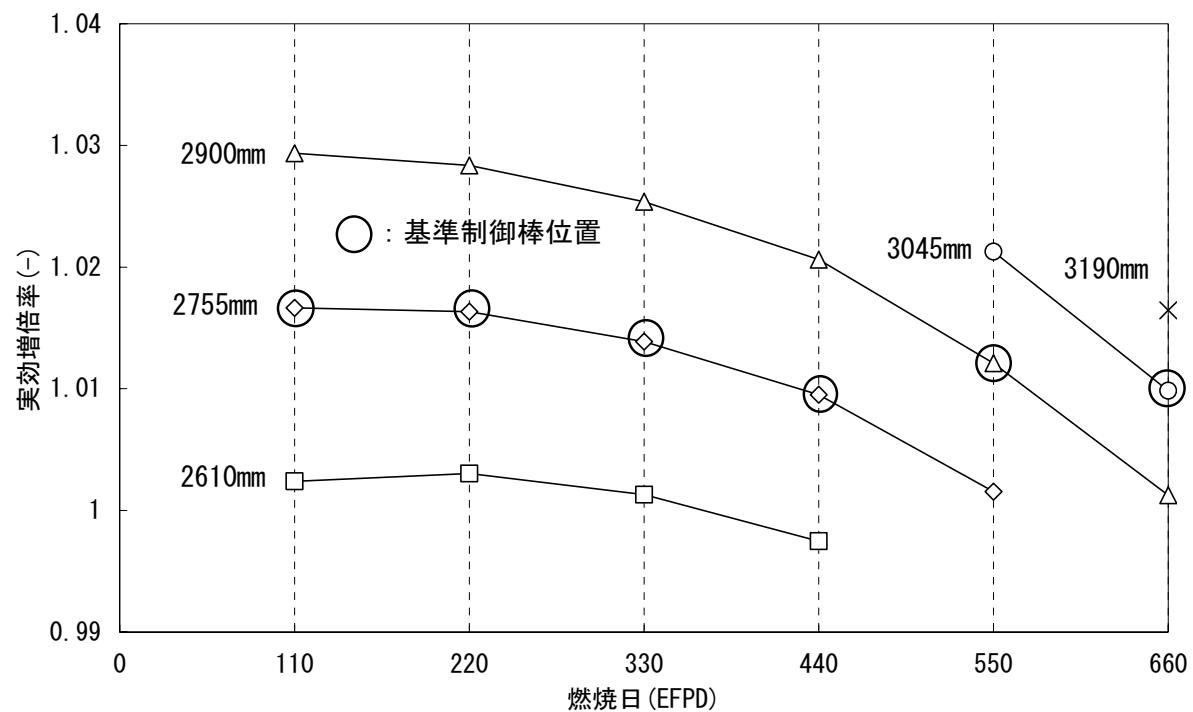
第3.10図 流量分布計算モデル（半径方向）



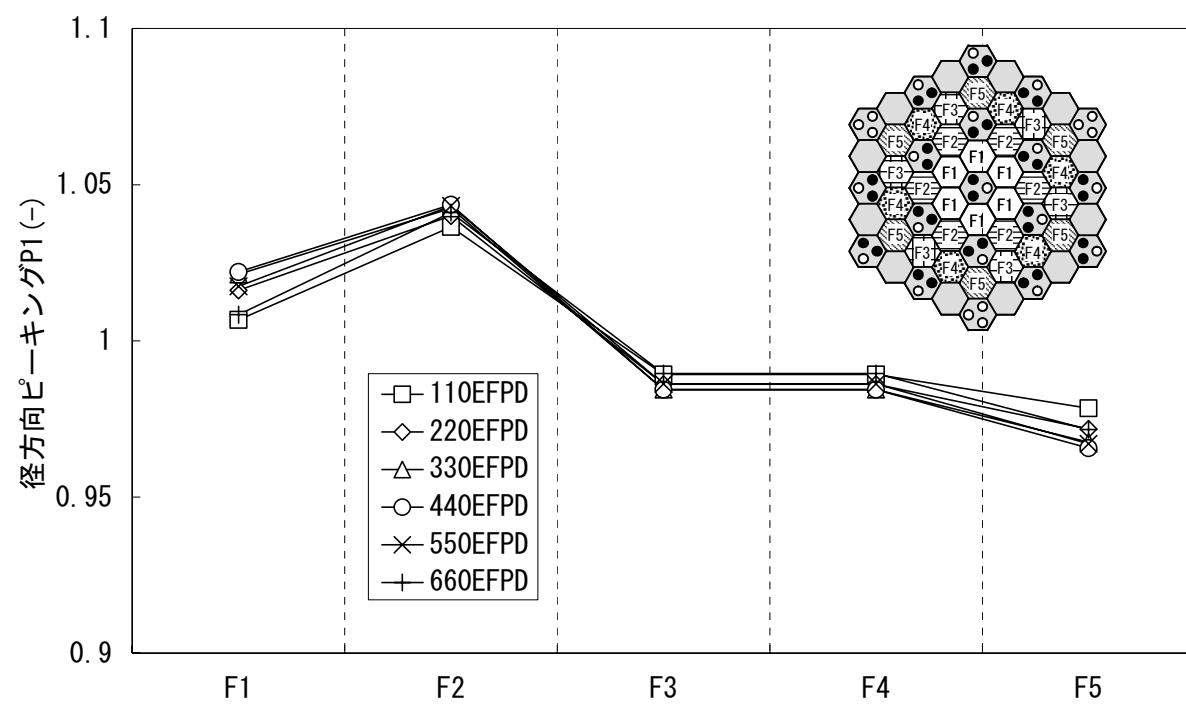
第3.11図 燃料温度評価モデル



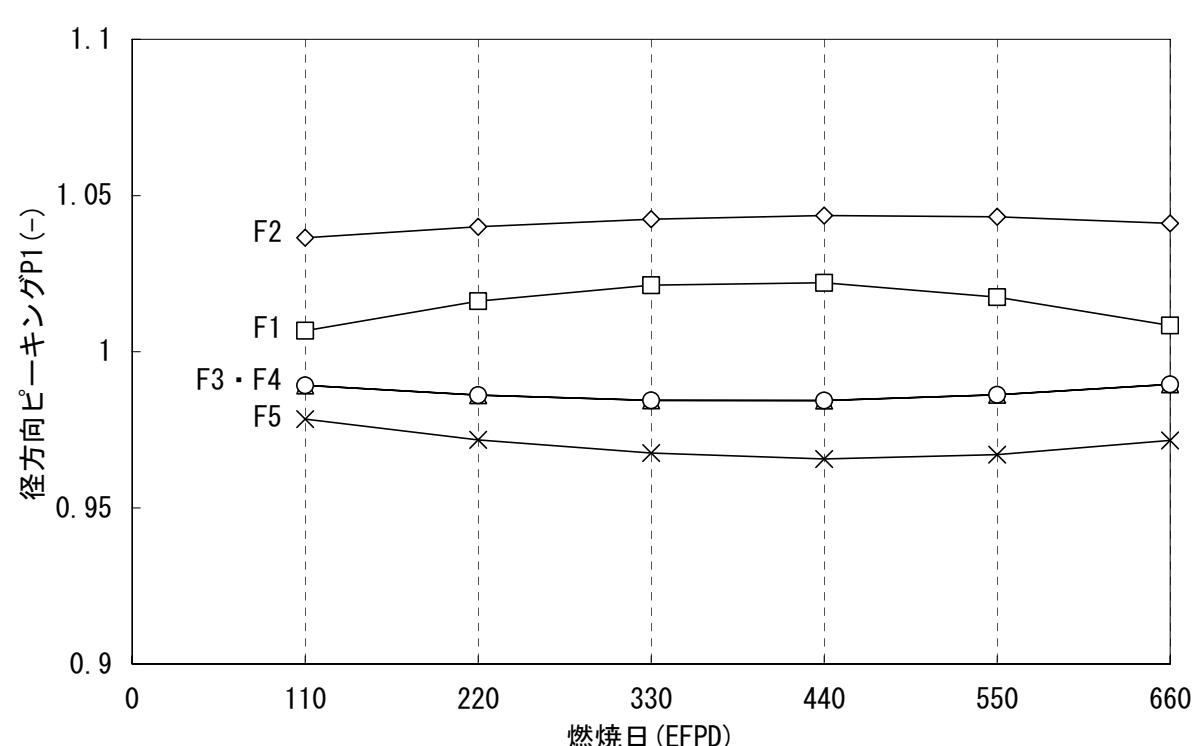
第 3.12 図 燃料温度計算における計算対象領域



第 4.1 図 実効増倍率の燃焼に伴う変化

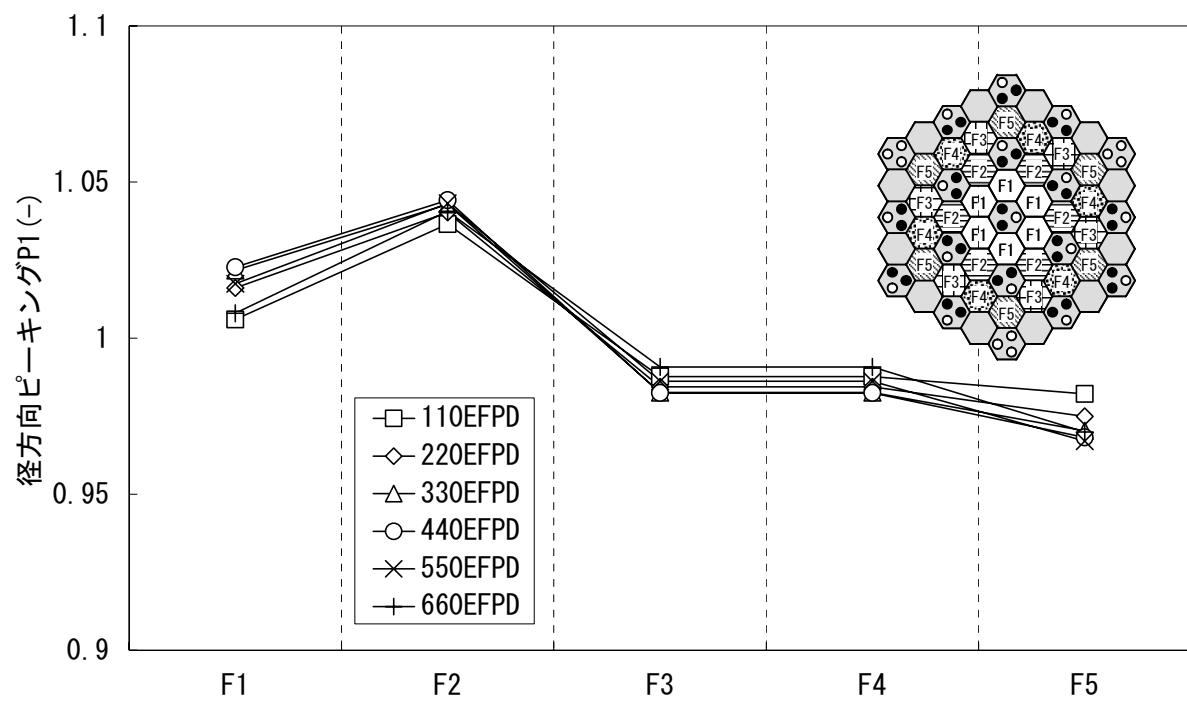


(a) 各燃料カラムの分布

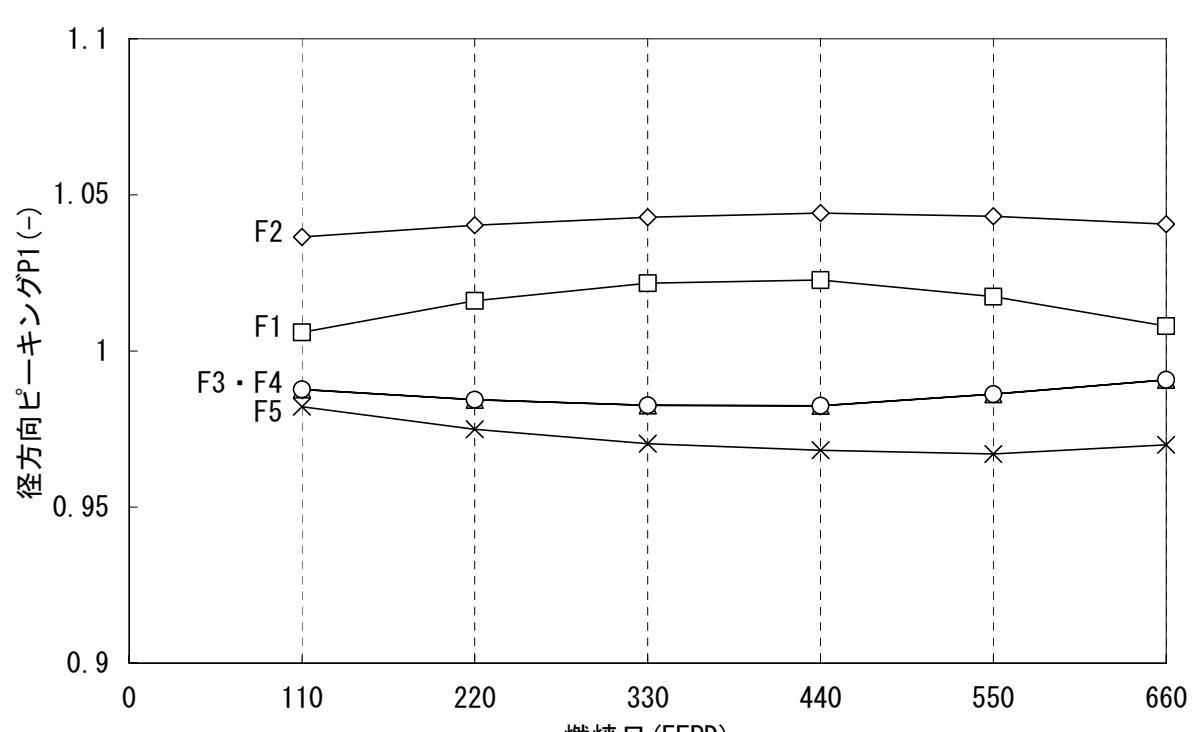


(b) 燃焼に伴う変化

第 4.2 図 各燃料カラムの径方向ピーキング P1 (制御棒位置固定条件)

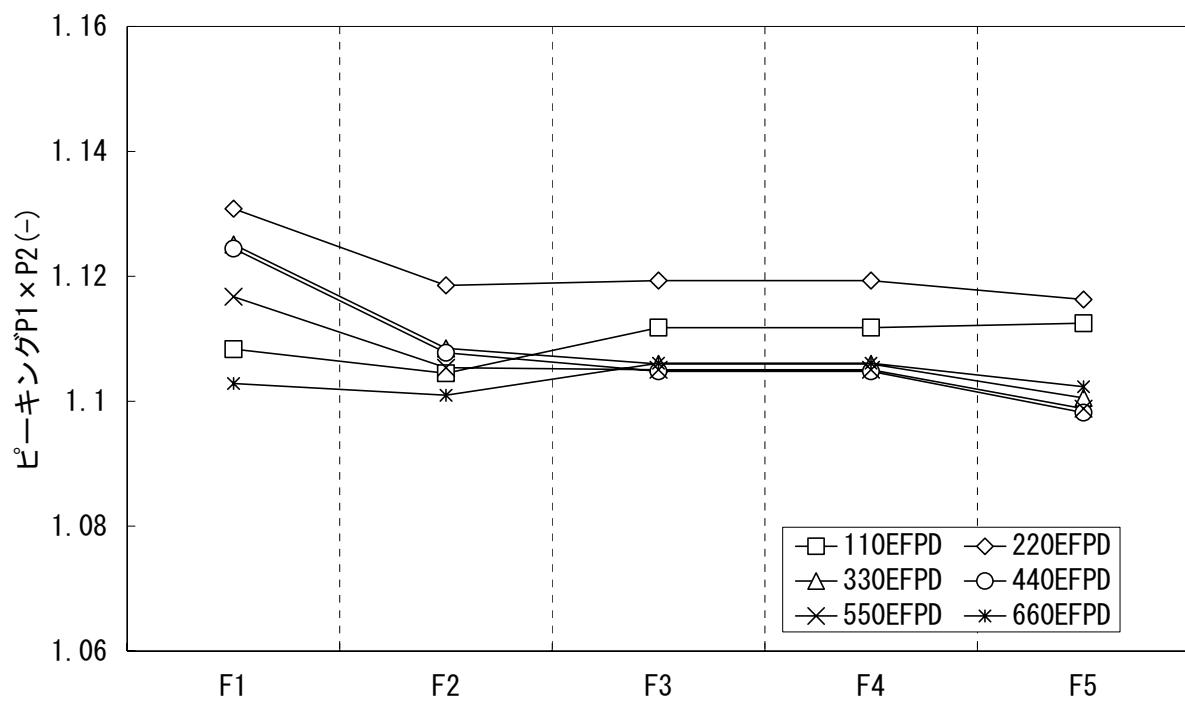


(a) 各燃料カラムの分布

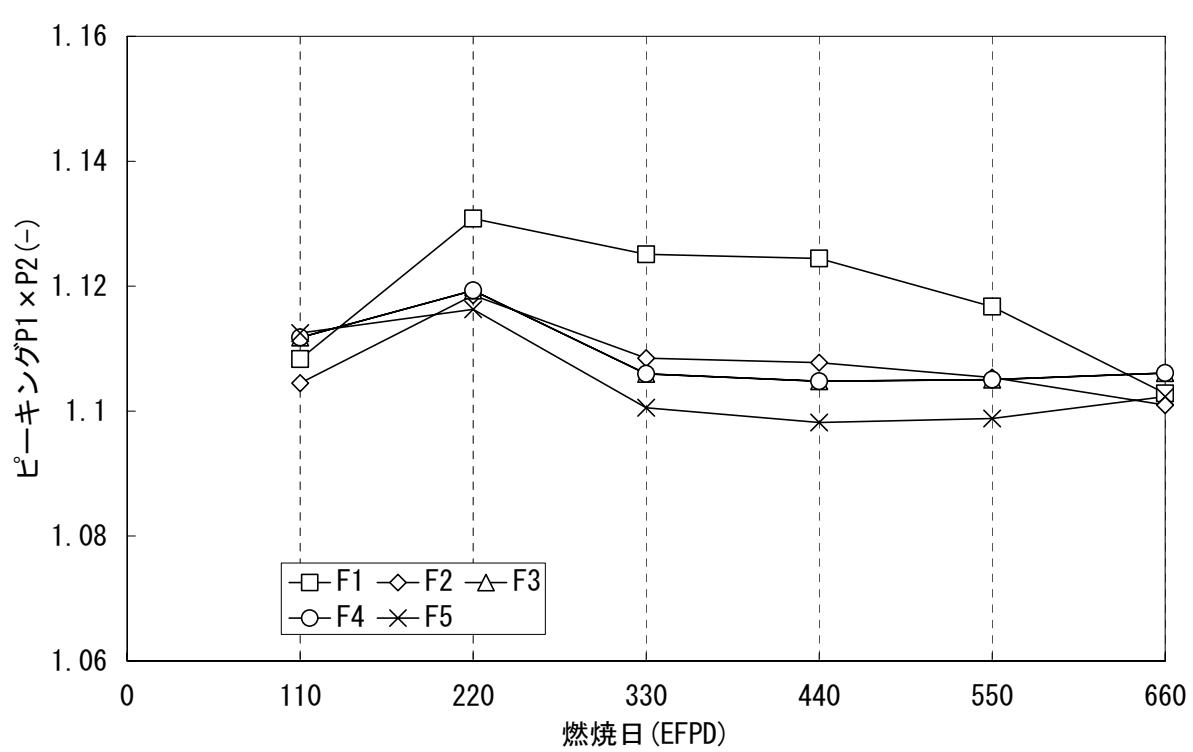


(b) 燃焼に伴う変化

第4.3図 各燃料カラムの径方向ピーキング  $P_1$  (基準制御棒位置条件)

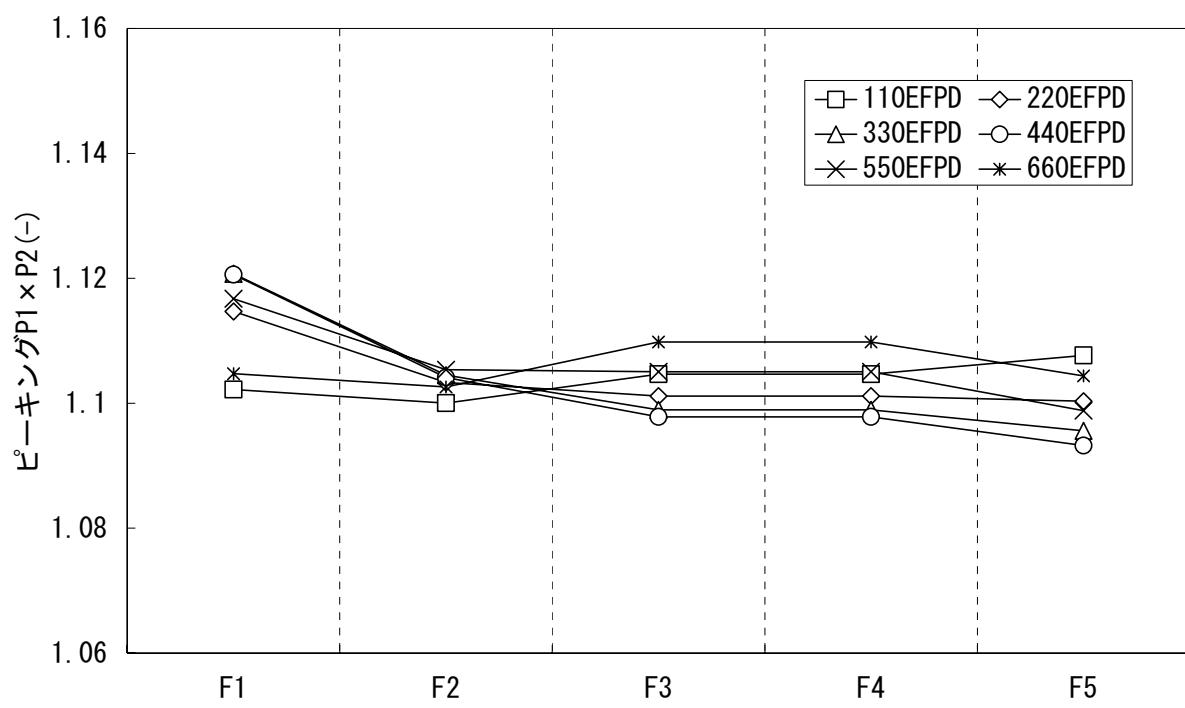


(a) 各燃料カラムの分布

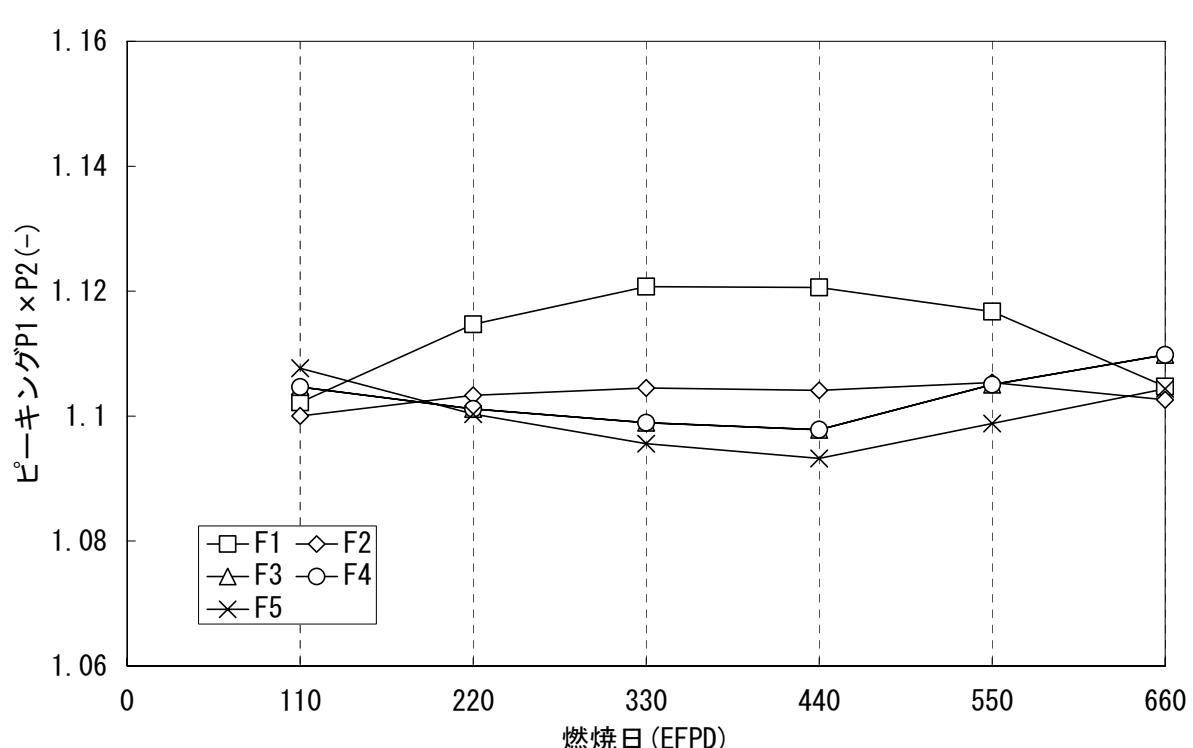


(b) 燃焼に伴う変化

第4.4図 各燃料カラムのピーキング  $P1 \times P2$  (制御棒位置固定条件)

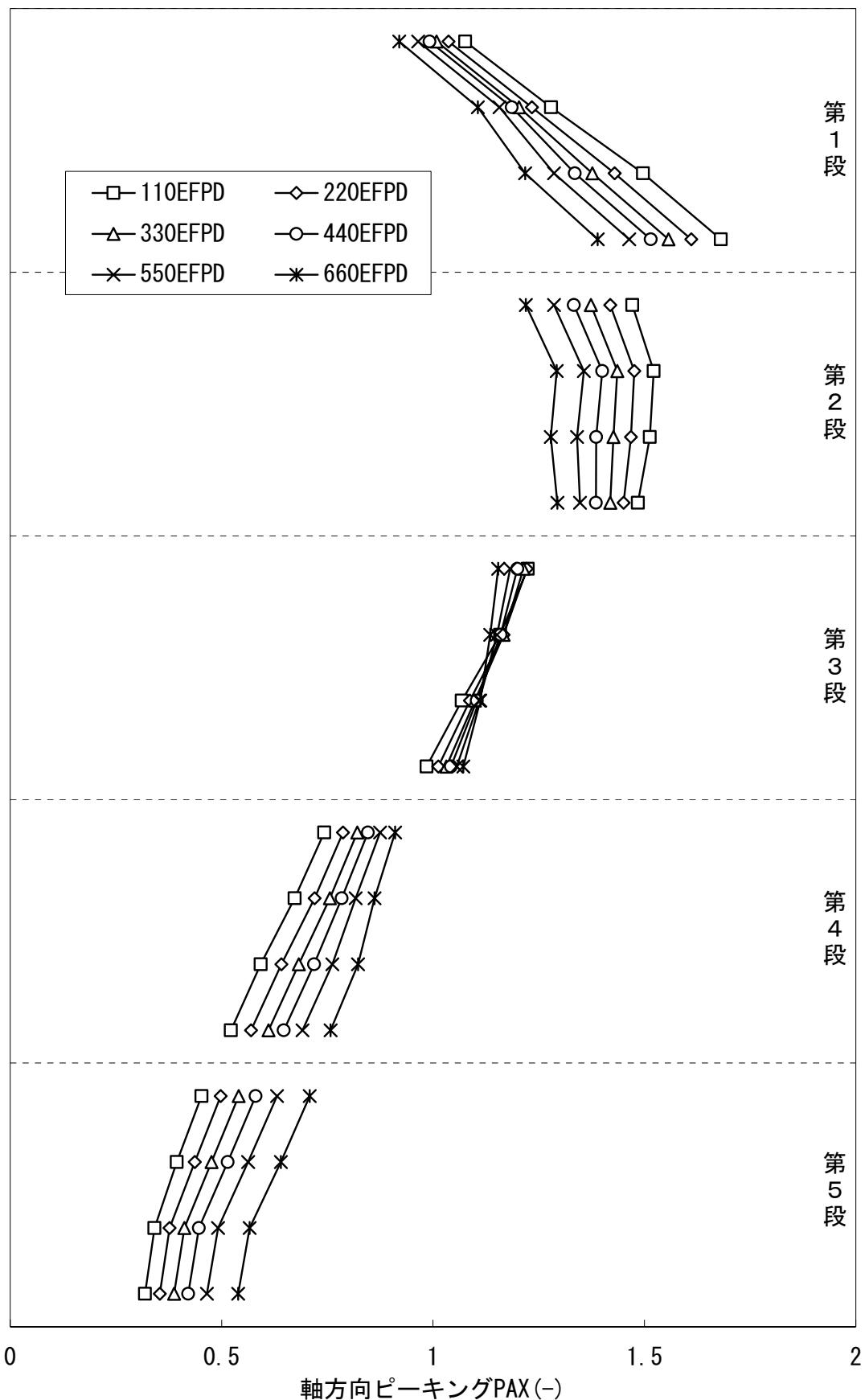


(a) 各燃料カラムの分布

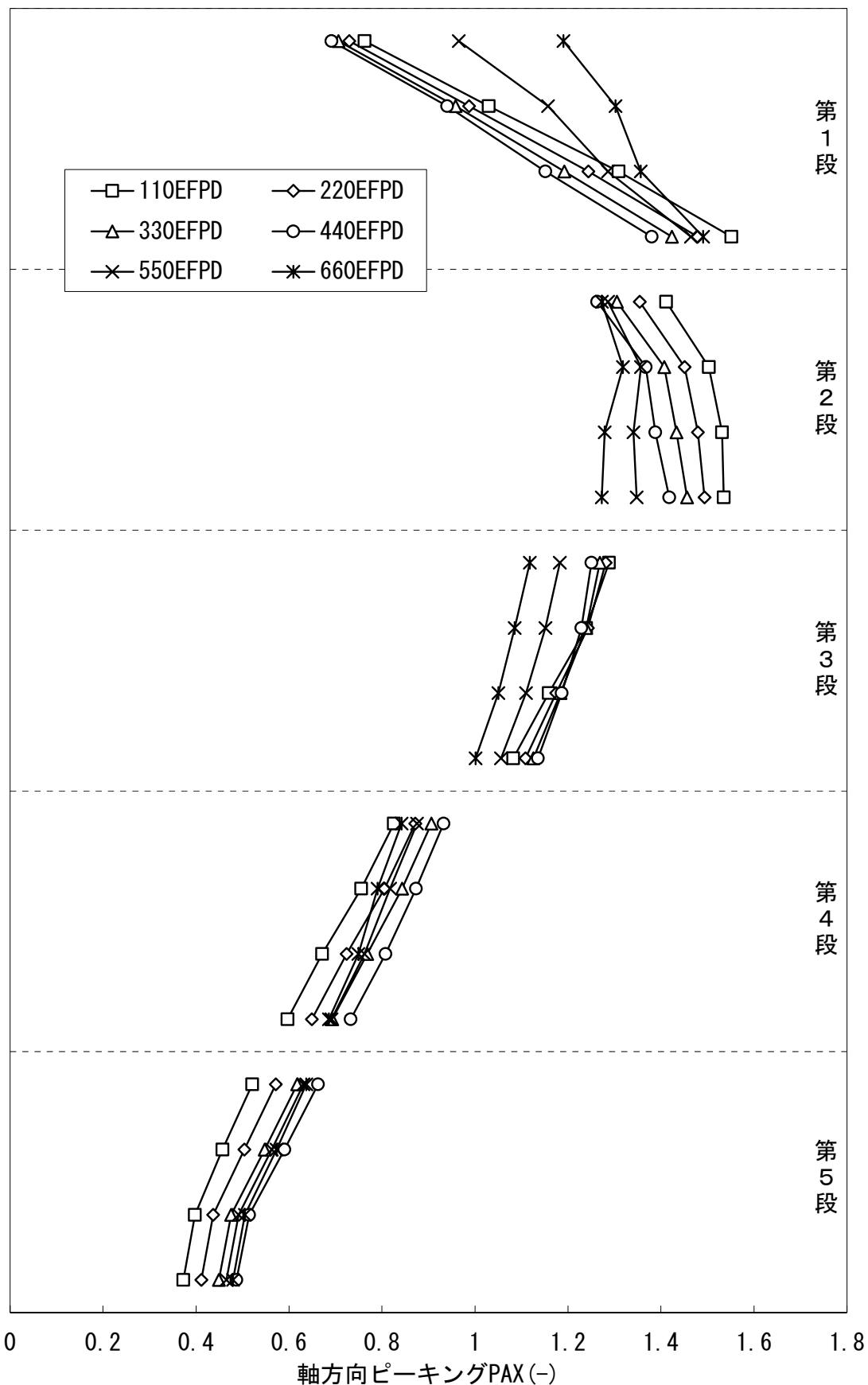


(b) 燃焼に伴う変化

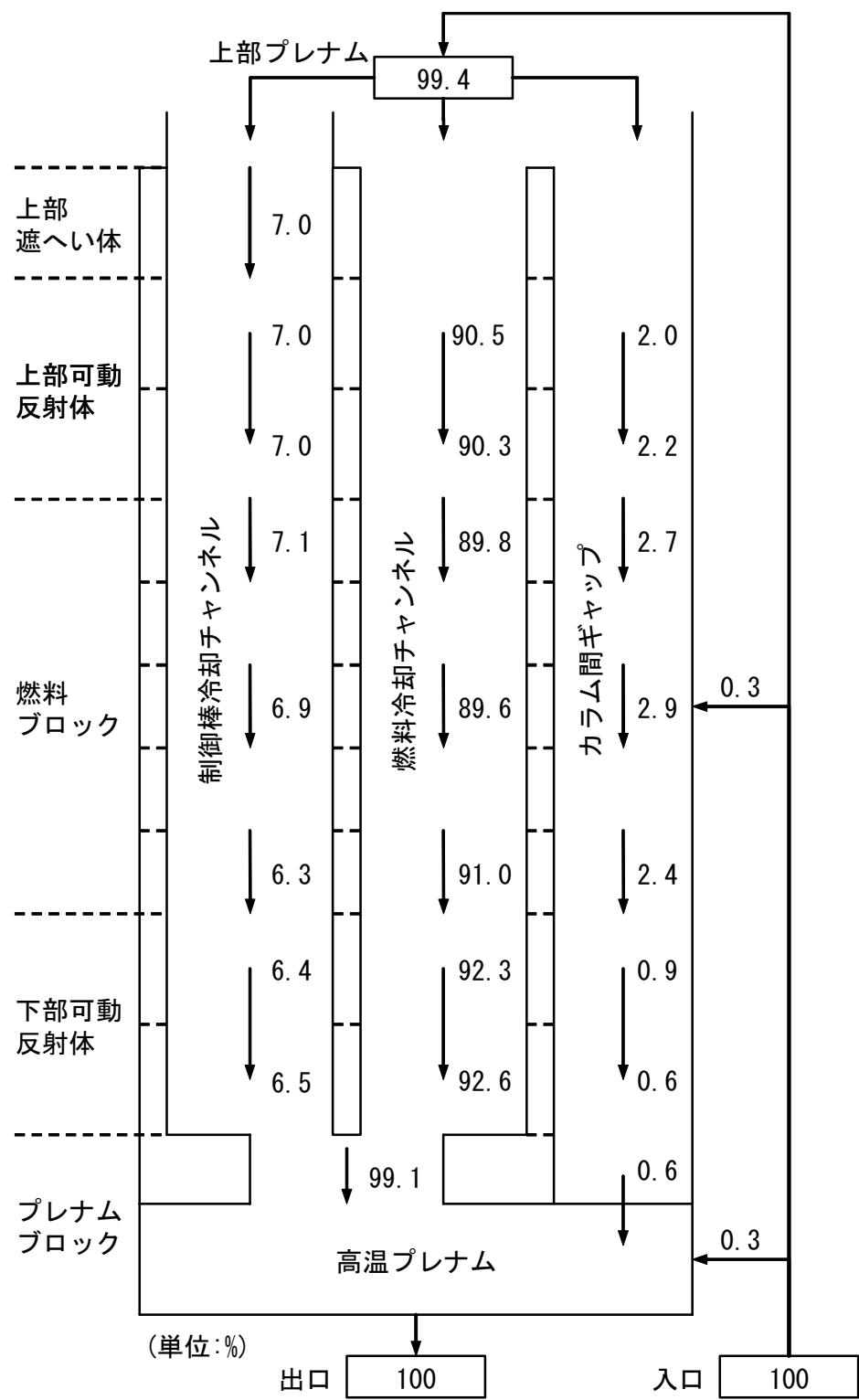
第4.5図 各燃料カラムのピーキング P1×P2 (基準制御棒位置条件)



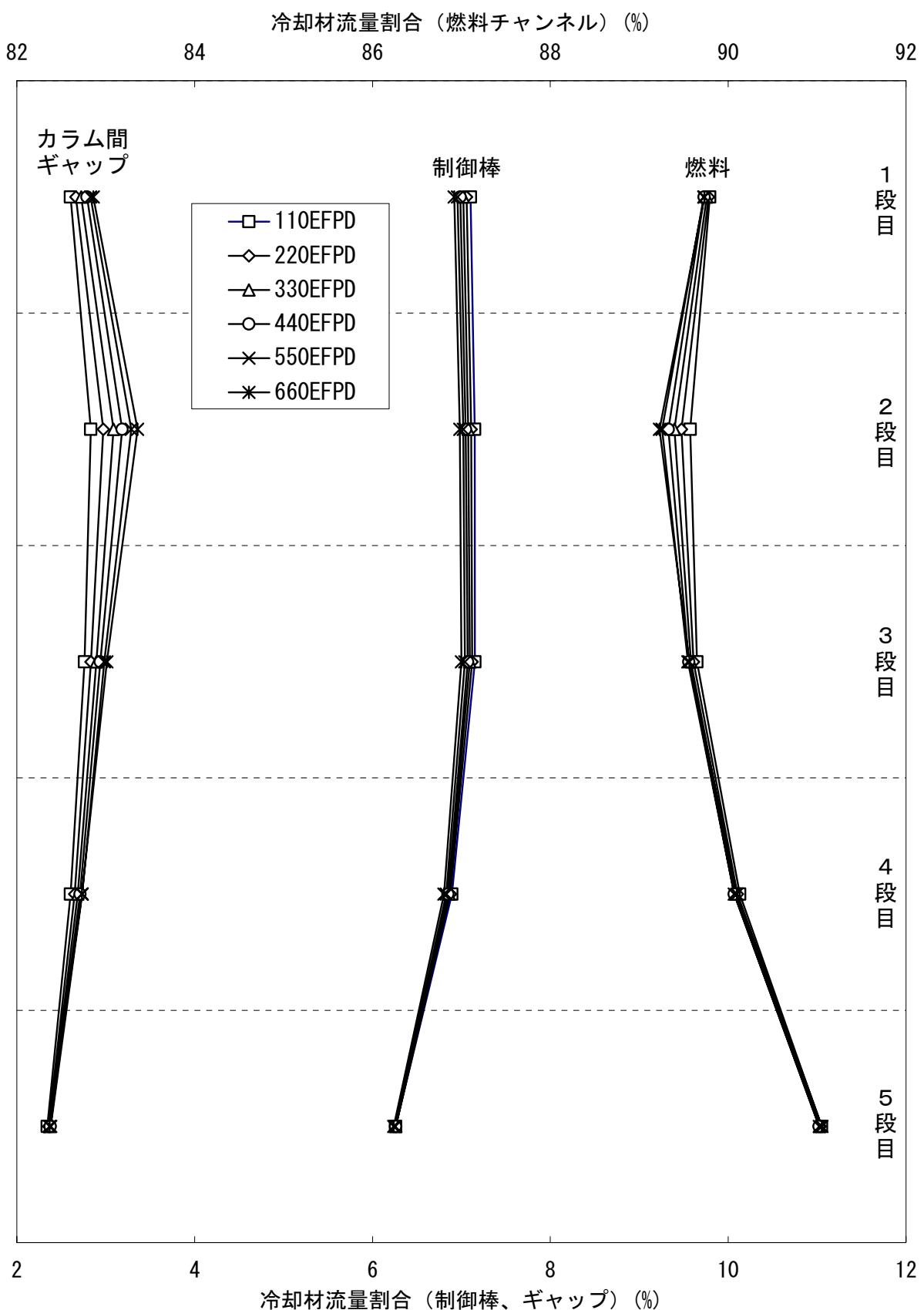
第 4.6 図 F1 カラムの軸方向ピーキング (制御棒位置固定条件)



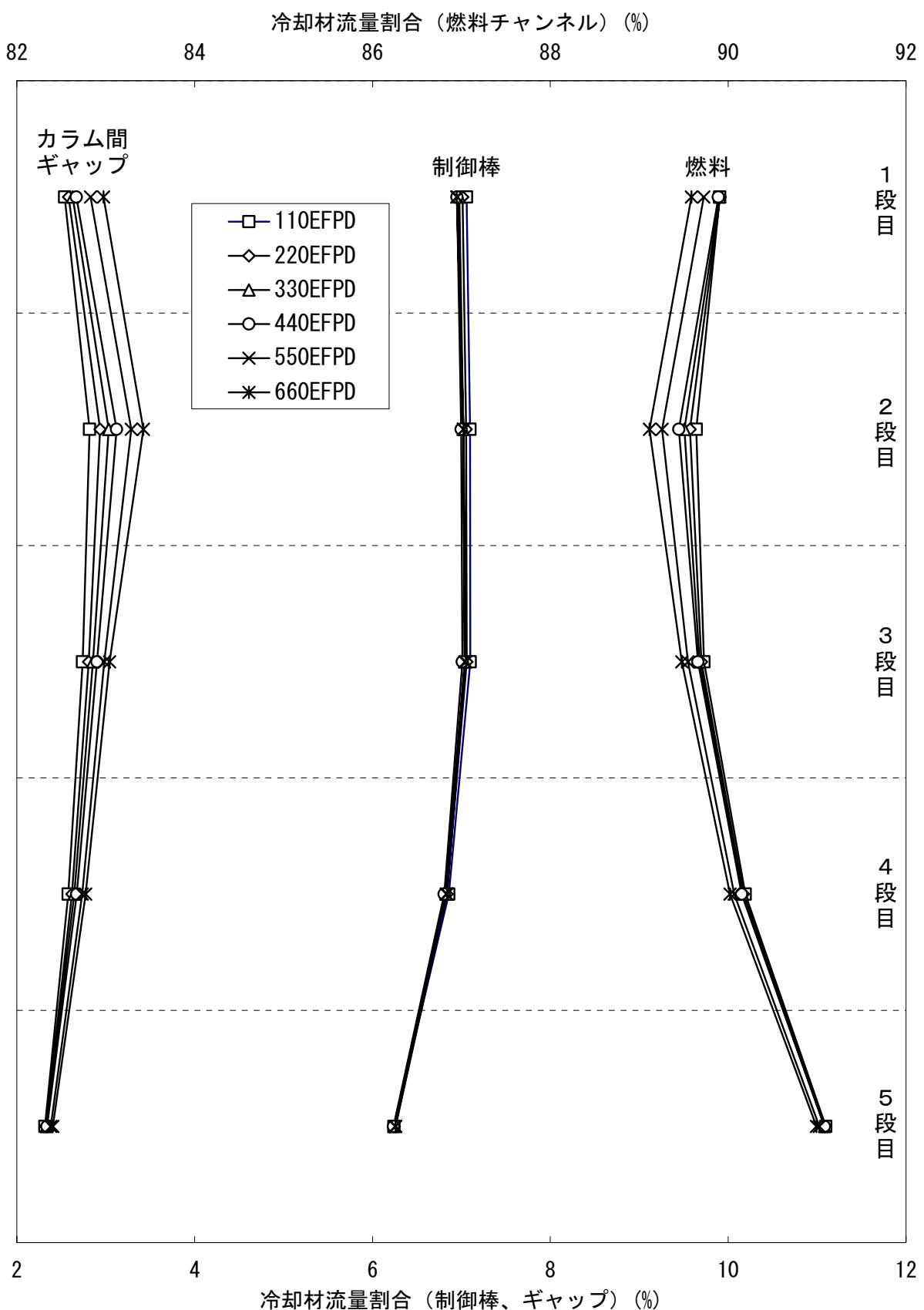
第4.7図 F1カラムの軸方向ピーキング（基準制御棒位置条件）



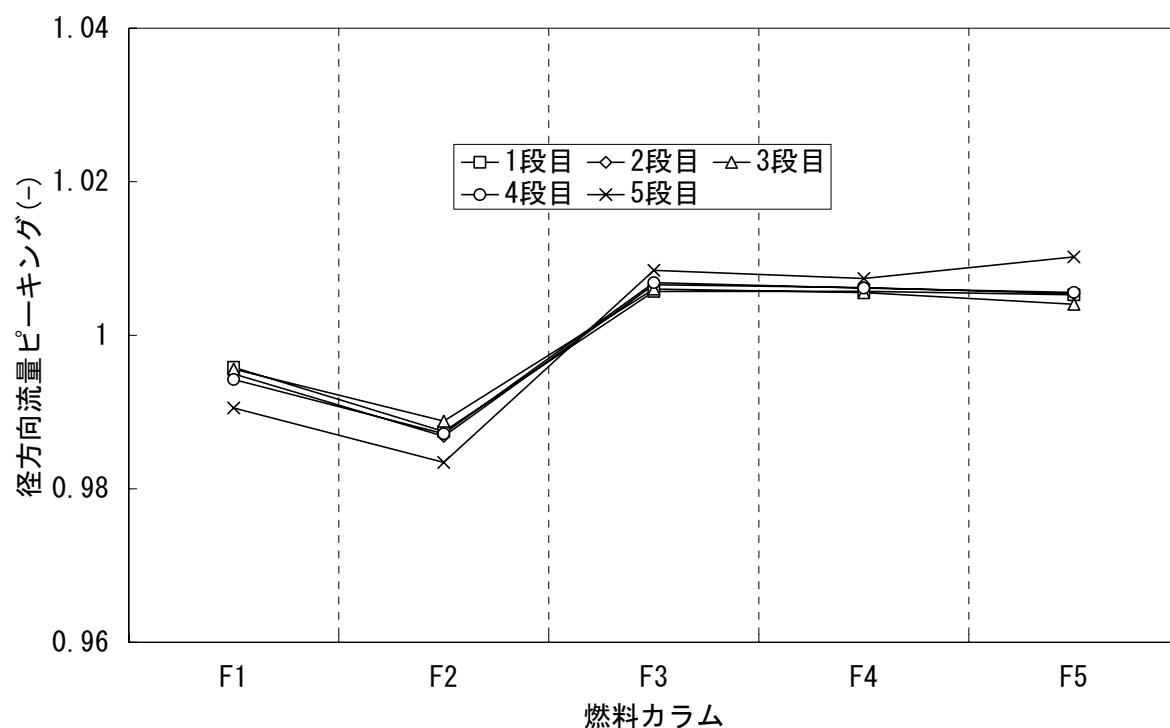
第4.8図 冷却材流量の流量割合（制御棒位置 2900mm、燃焼 330 日）



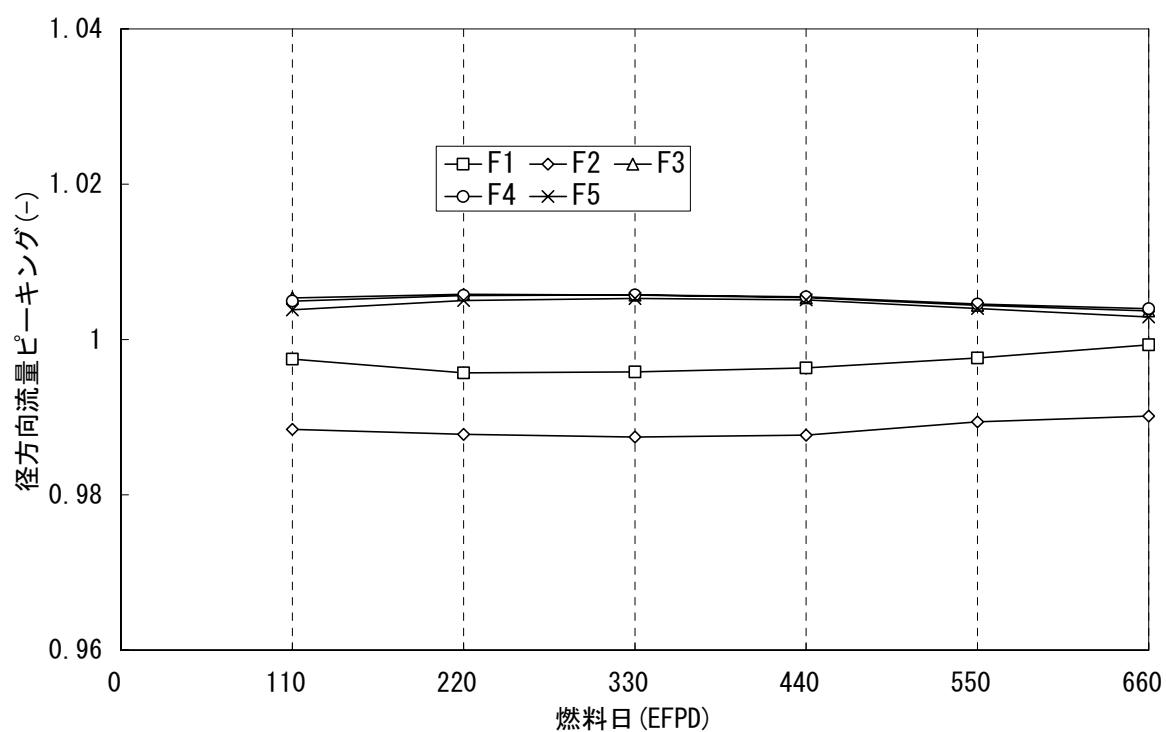
第 4.9 図 各領域における軸方向の冷却材流量割合（制御棒位置固定条件）



第 4.10 図 各領域における軸方向の冷却材流量割合（基準制御棒位置条件）

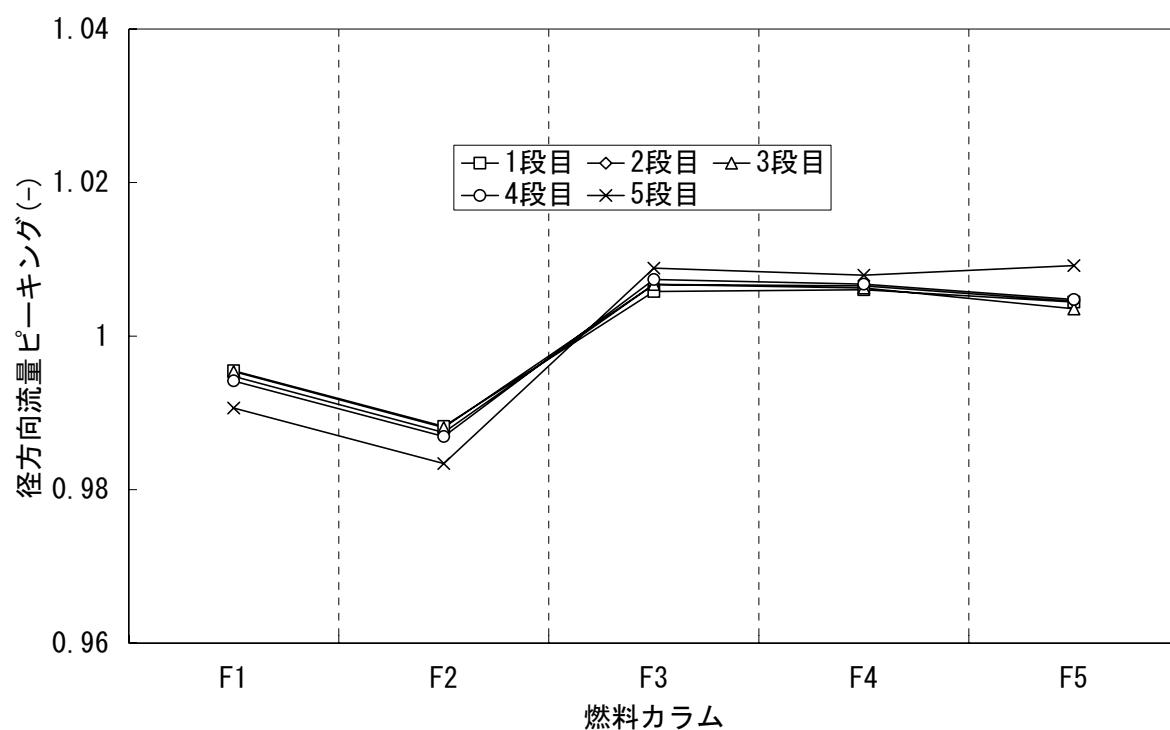


(a) 各燃料カラムの分布 (燃焼 330EFPD)

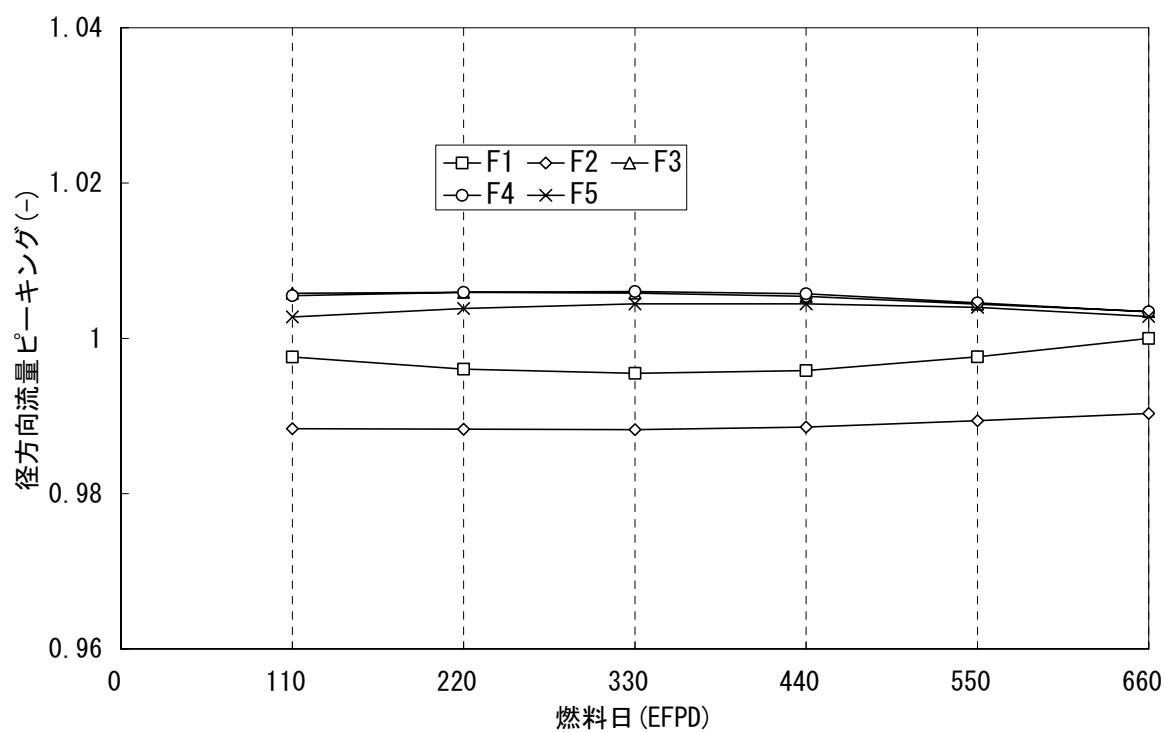


(b) 燃焼に伴う変化 (燃料 1 段目)

第 4.11 図 各カラムの径方向流量ピーキング (制御棒位置固定条件)

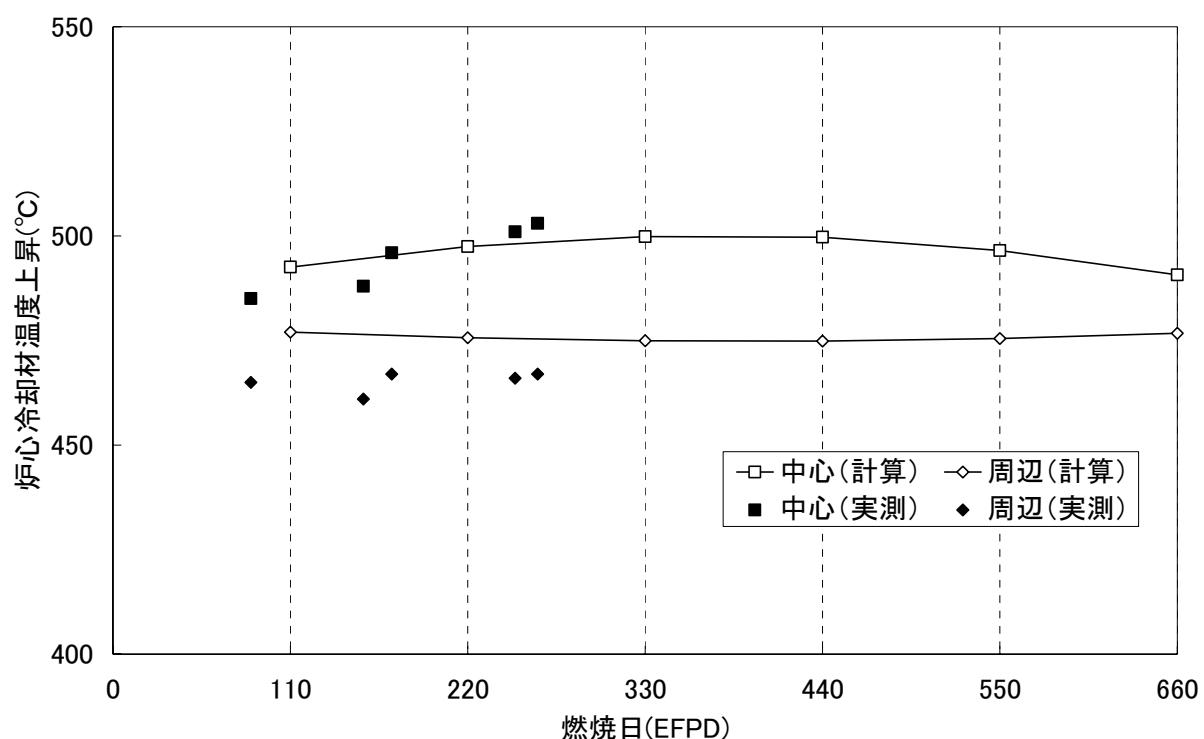


(a) 各燃料カラムの分布 (燃焼 330EFPD)

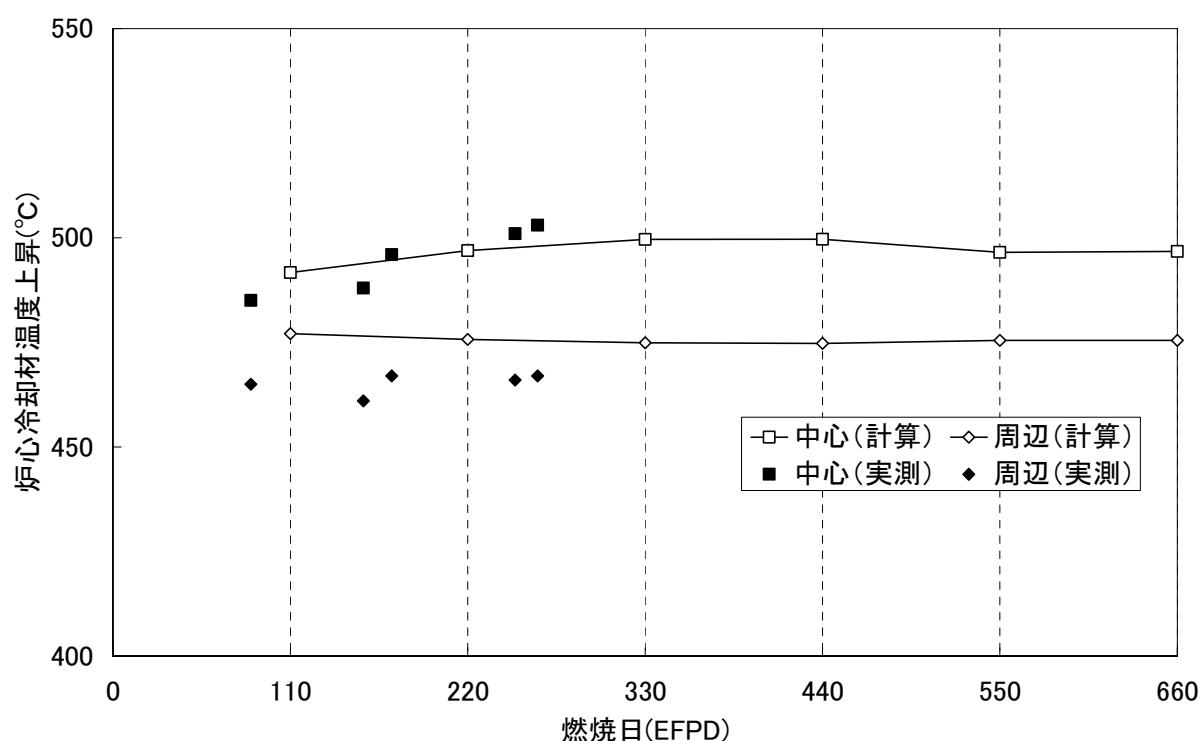


(b) 燃焼に伴う変化 (燃料 1 段目)

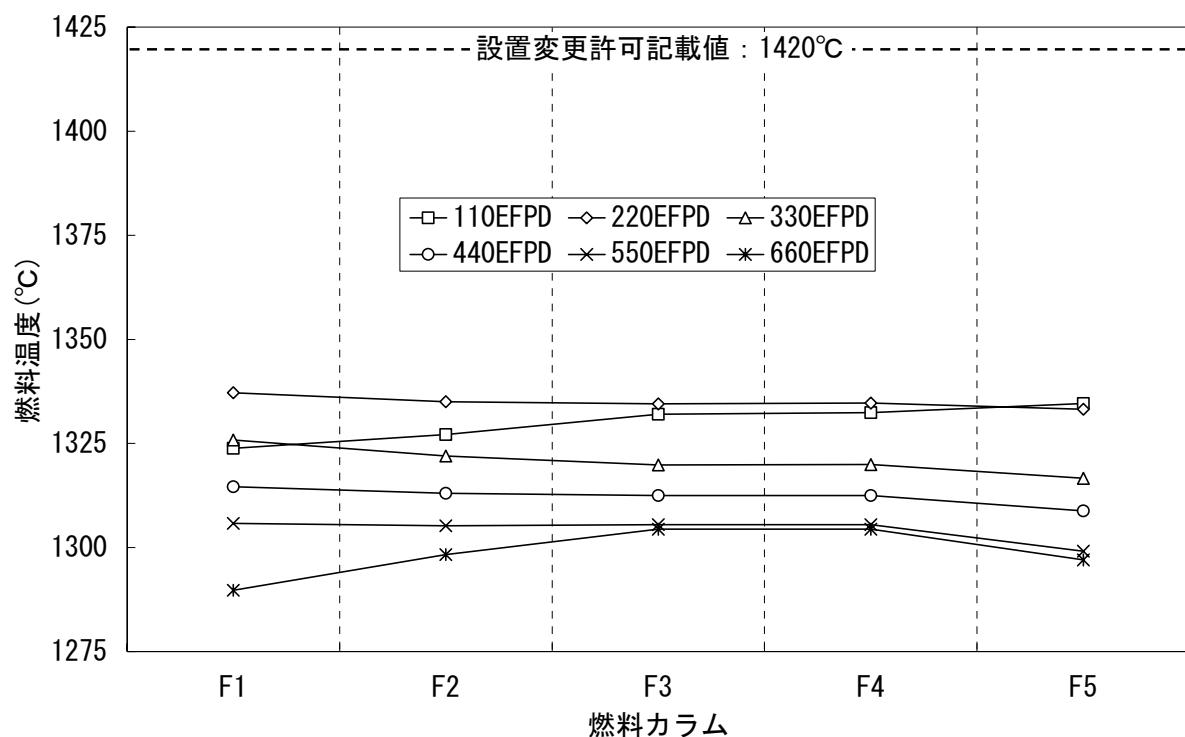
第 4.12 図 各カラムの径方向流量ピーキング (基準制御棒位置条件)



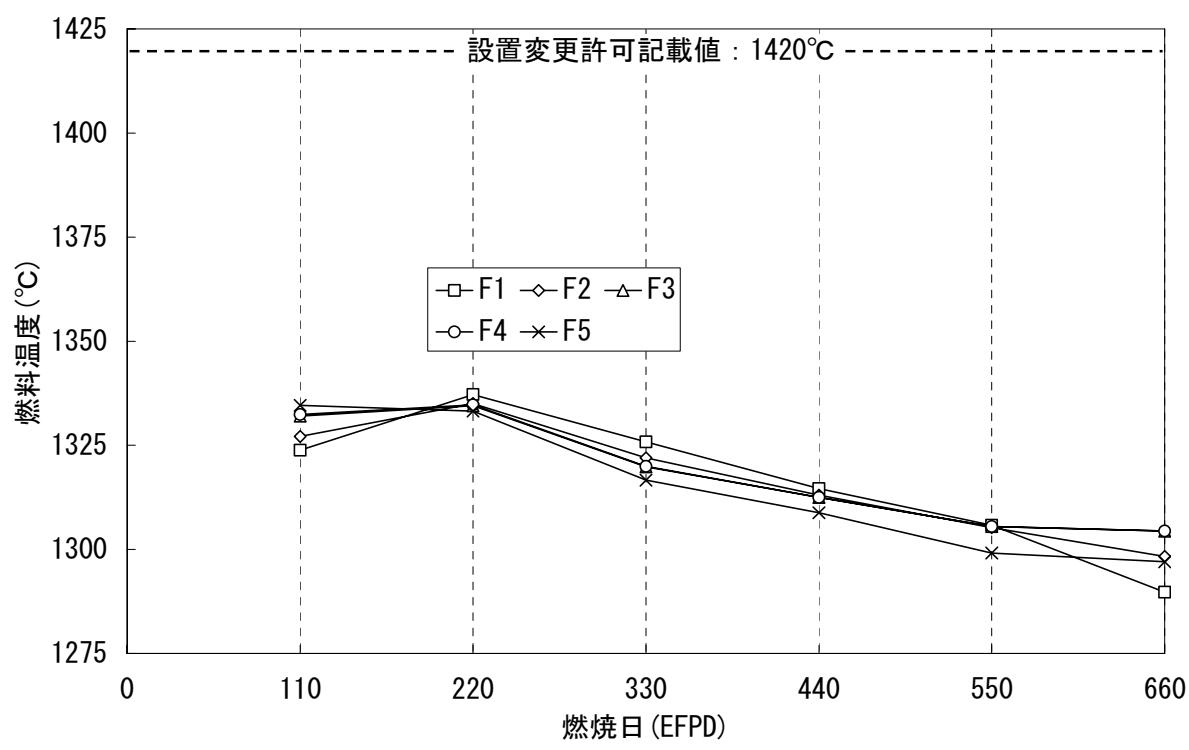
第 4.13 図 炉心の中心領域及び周辺領域における冷却材温度上昇値（制御棒位置固定条件）



第 4.14 図 炉心の中心領域及び周辺領域における冷却材温度上昇値（基準制御棒位置条件）

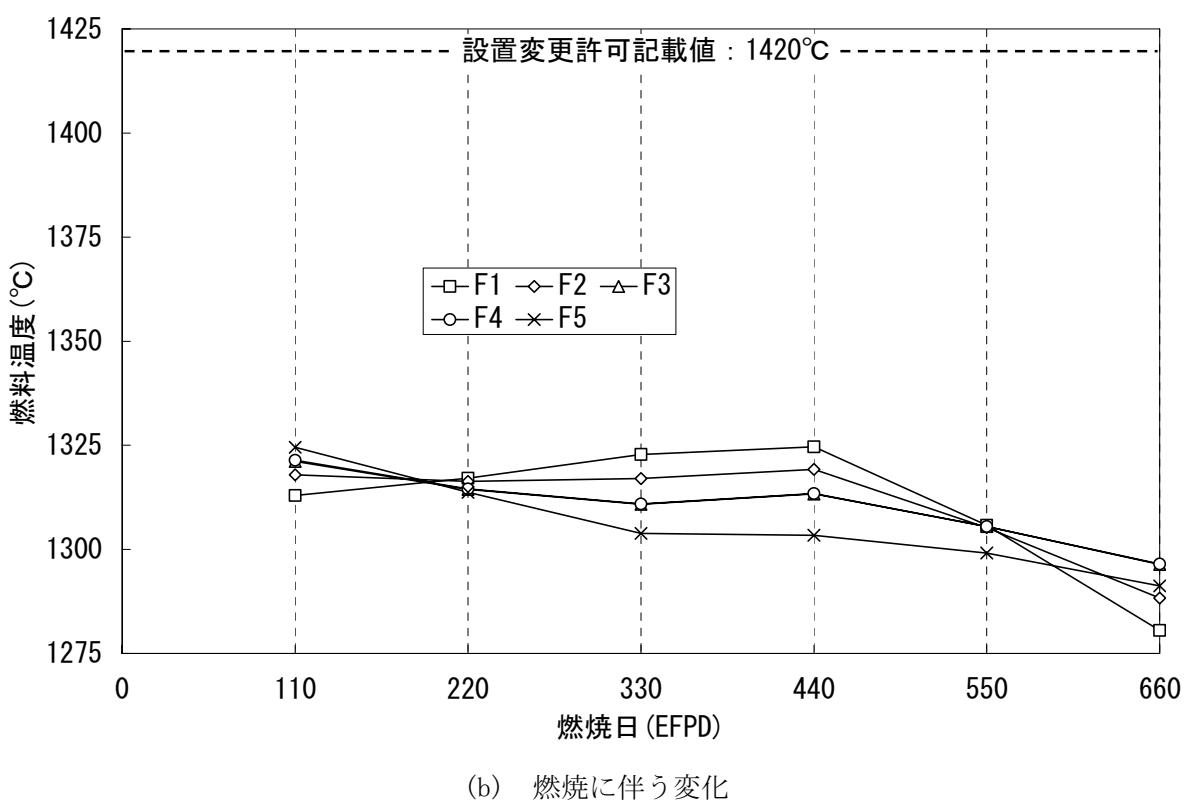
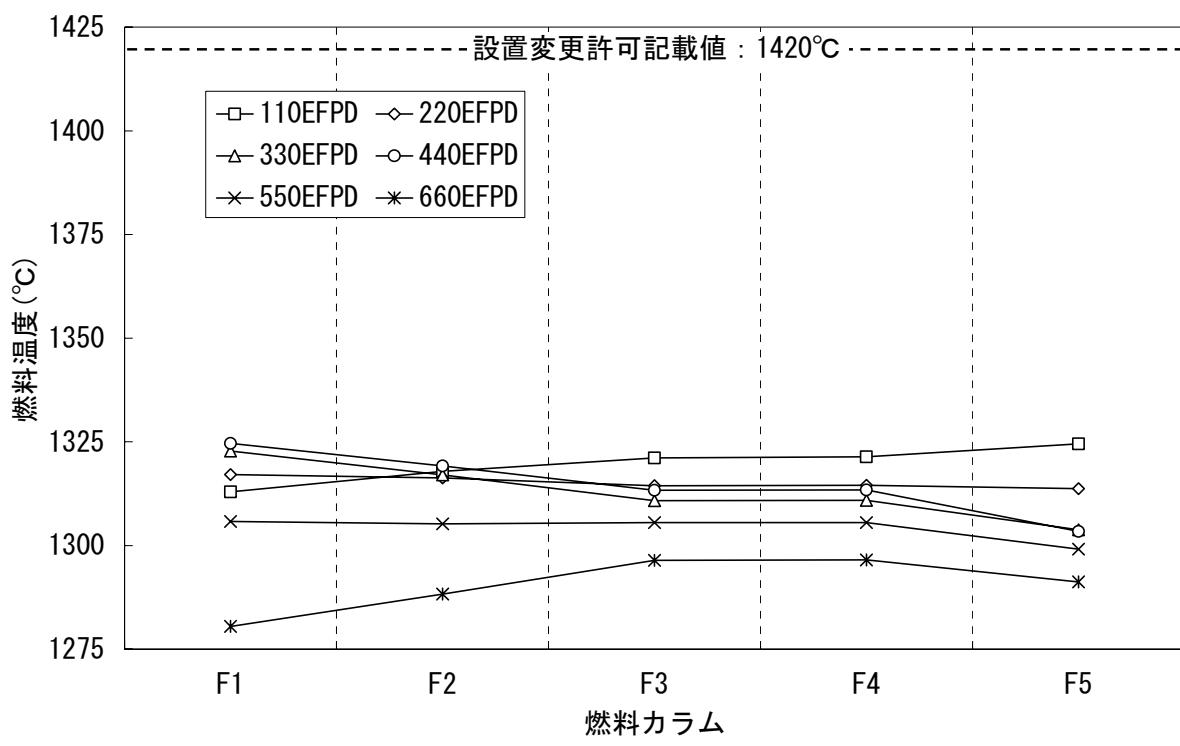


(a) 各燃料カラムの分布

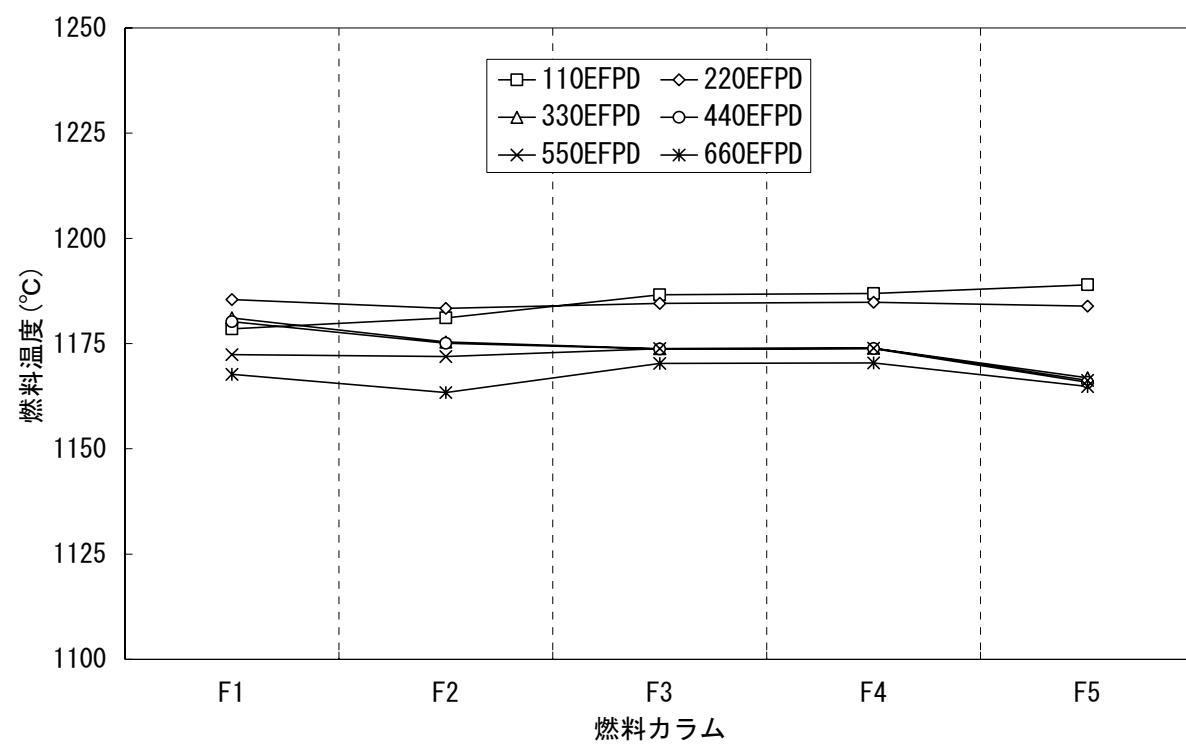


(b) 燃焼に伴う変化

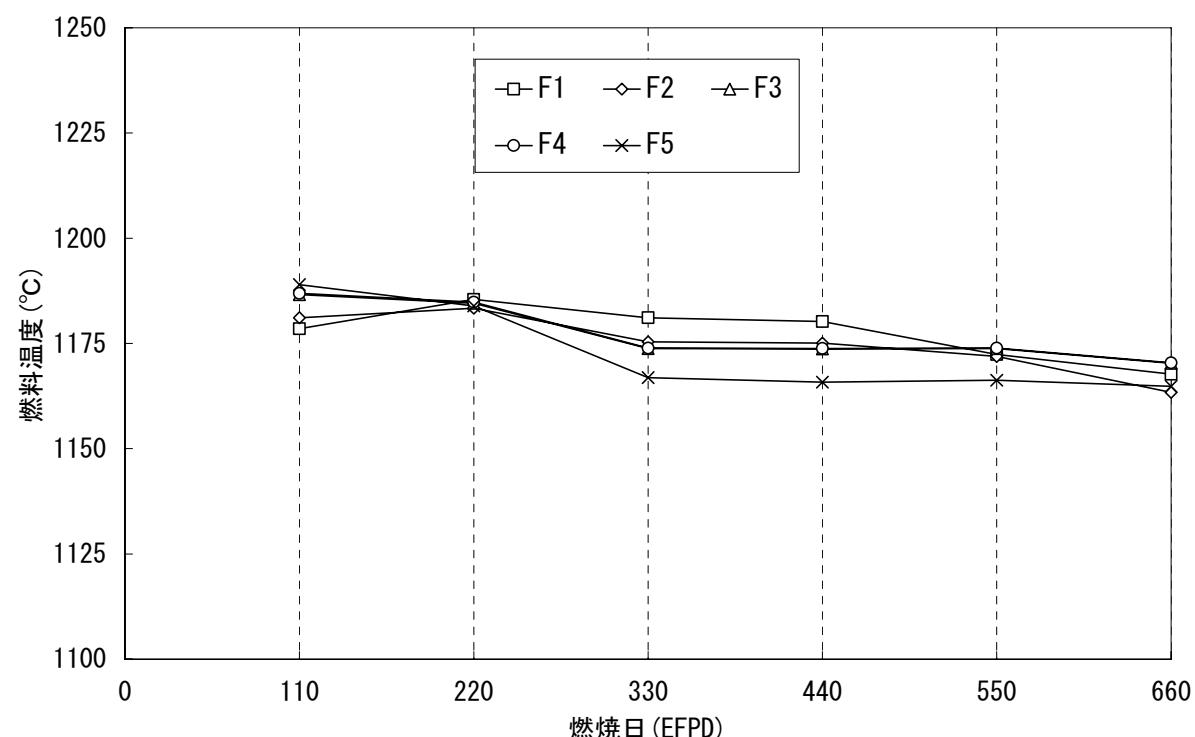
第 4.15 図 各燃料カラムの燃料最高温度（工学的安全因子考慮、制御棒位置固定条件）



第 4.16 図 各燃料カラムの燃料最高温度（工学的安全因子考慮、基準制御棒位置条件）

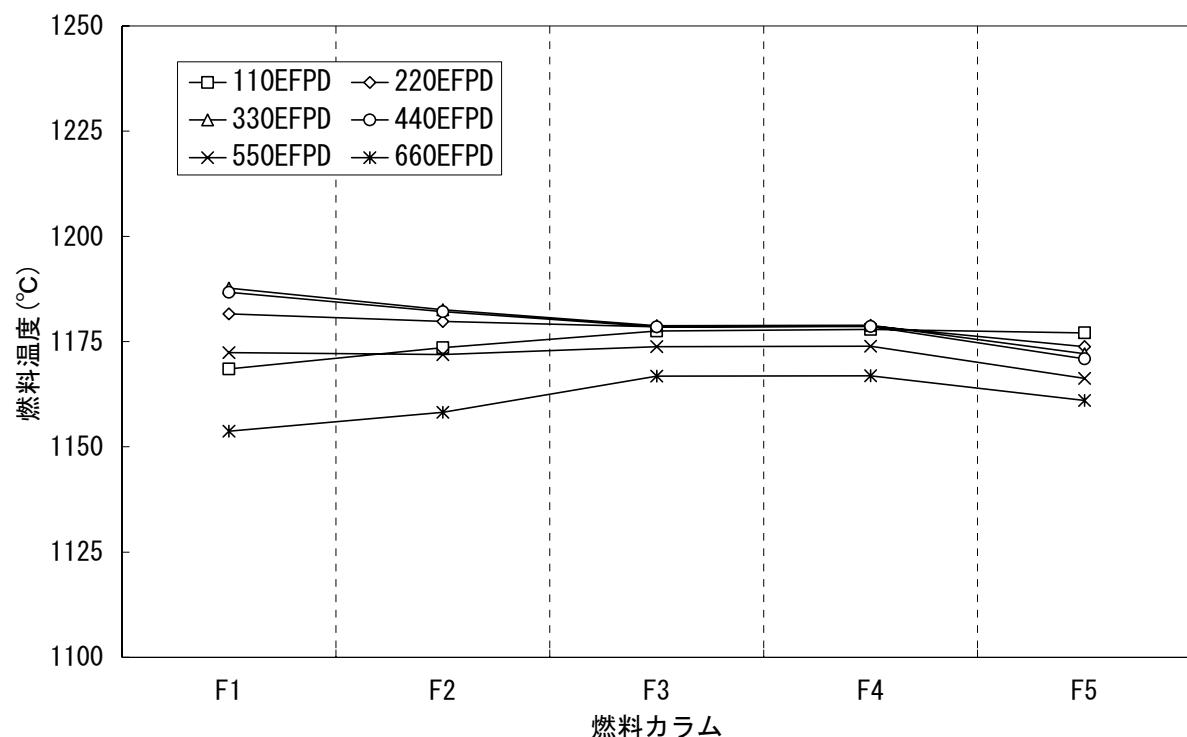


(a) 各燃料カラムの分布

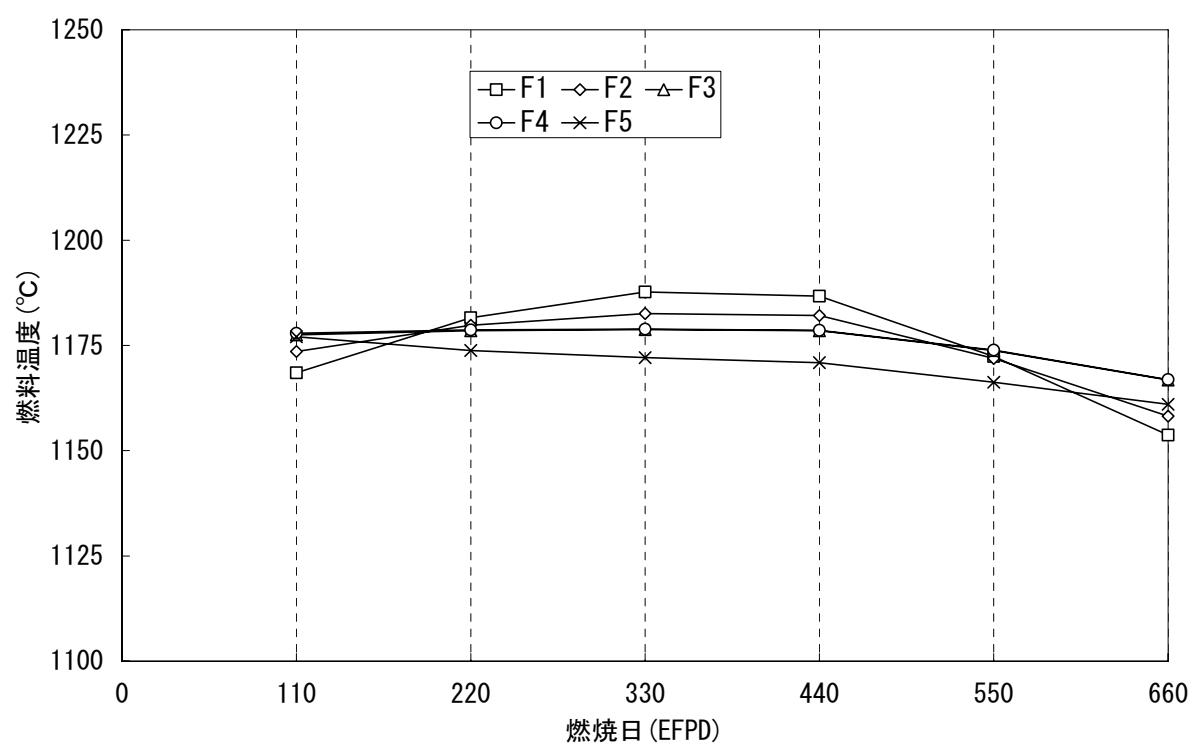


(b) 燃焼に伴う変化

第 4.17 図 各燃料カラムの燃料最高温度（工学的安全因子考慮、制御棒位置固定条件）

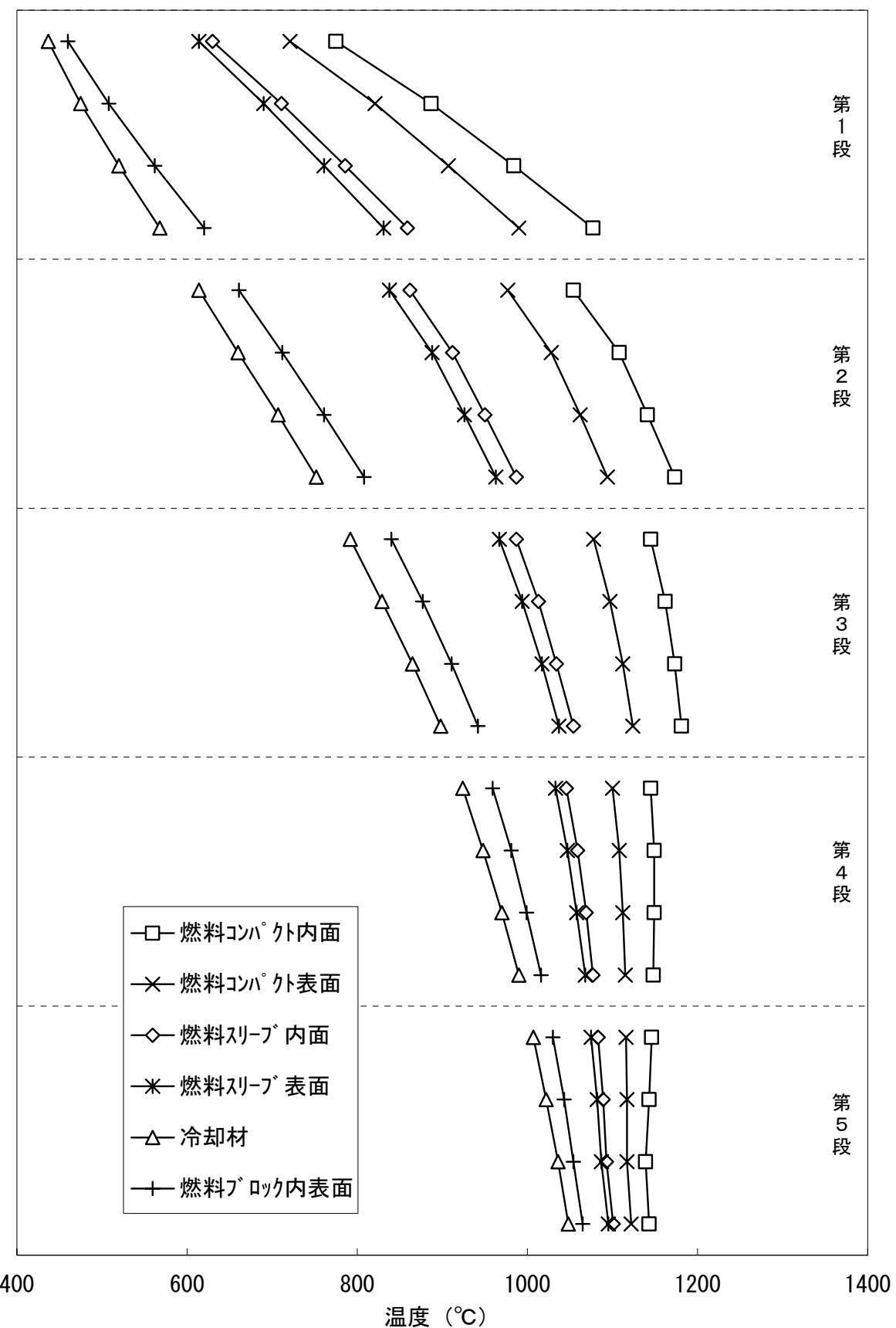


(a) 各燃料カラムの分布

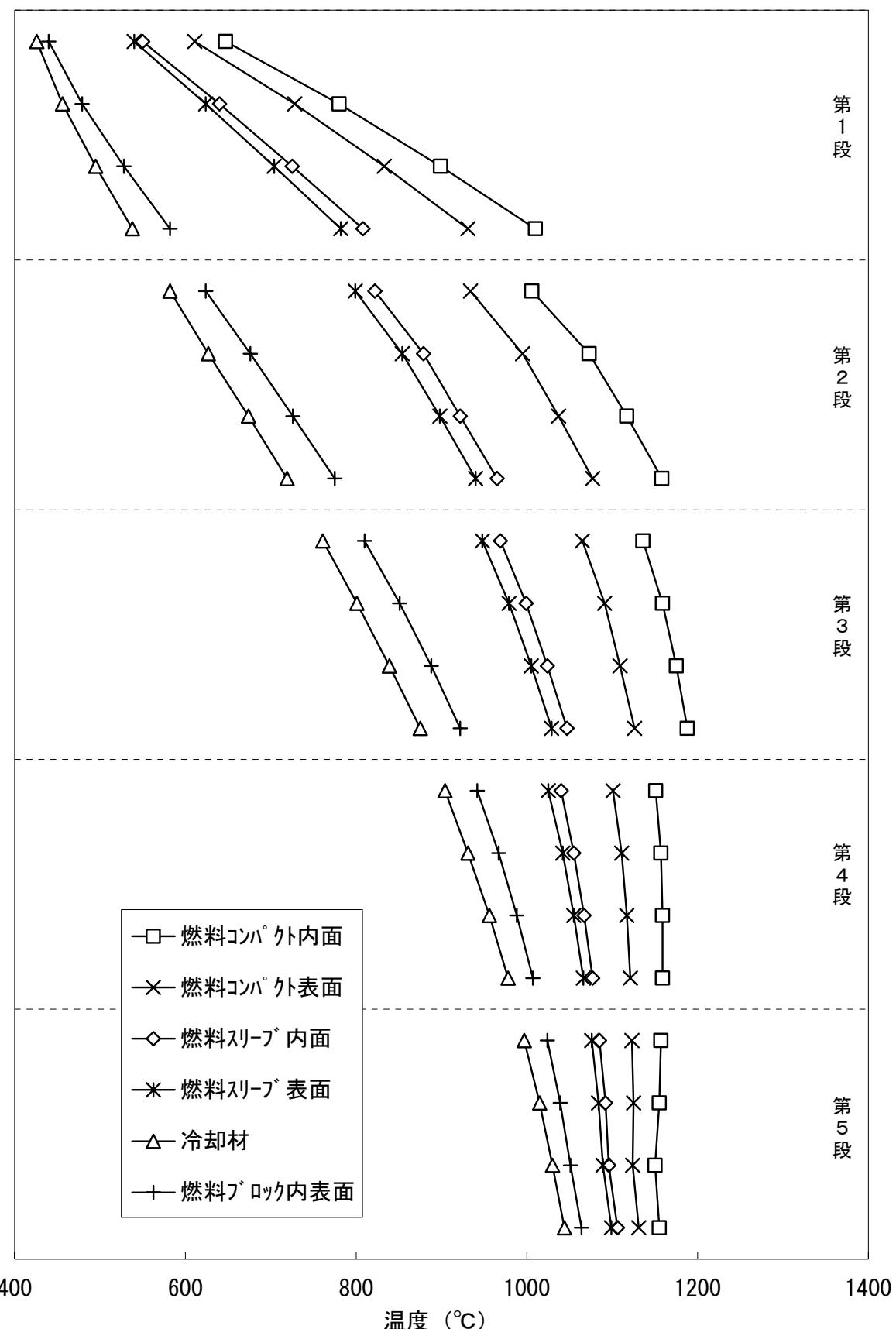


(b) 燃焼に伴う変化

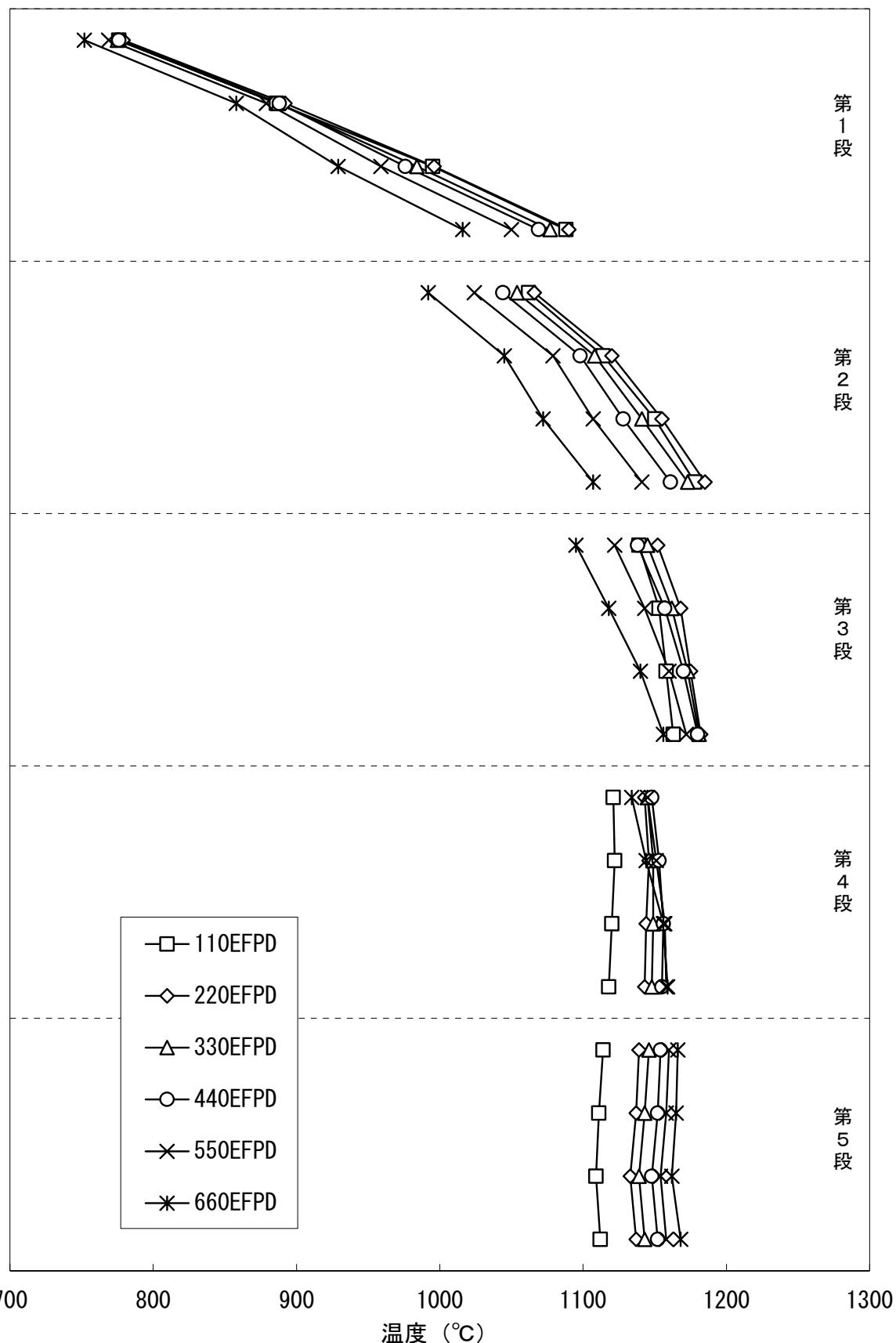
第 4.18 図 各燃料カラムの燃料最高温度（工学的安全因子考慮、基準制御棒位置条件）



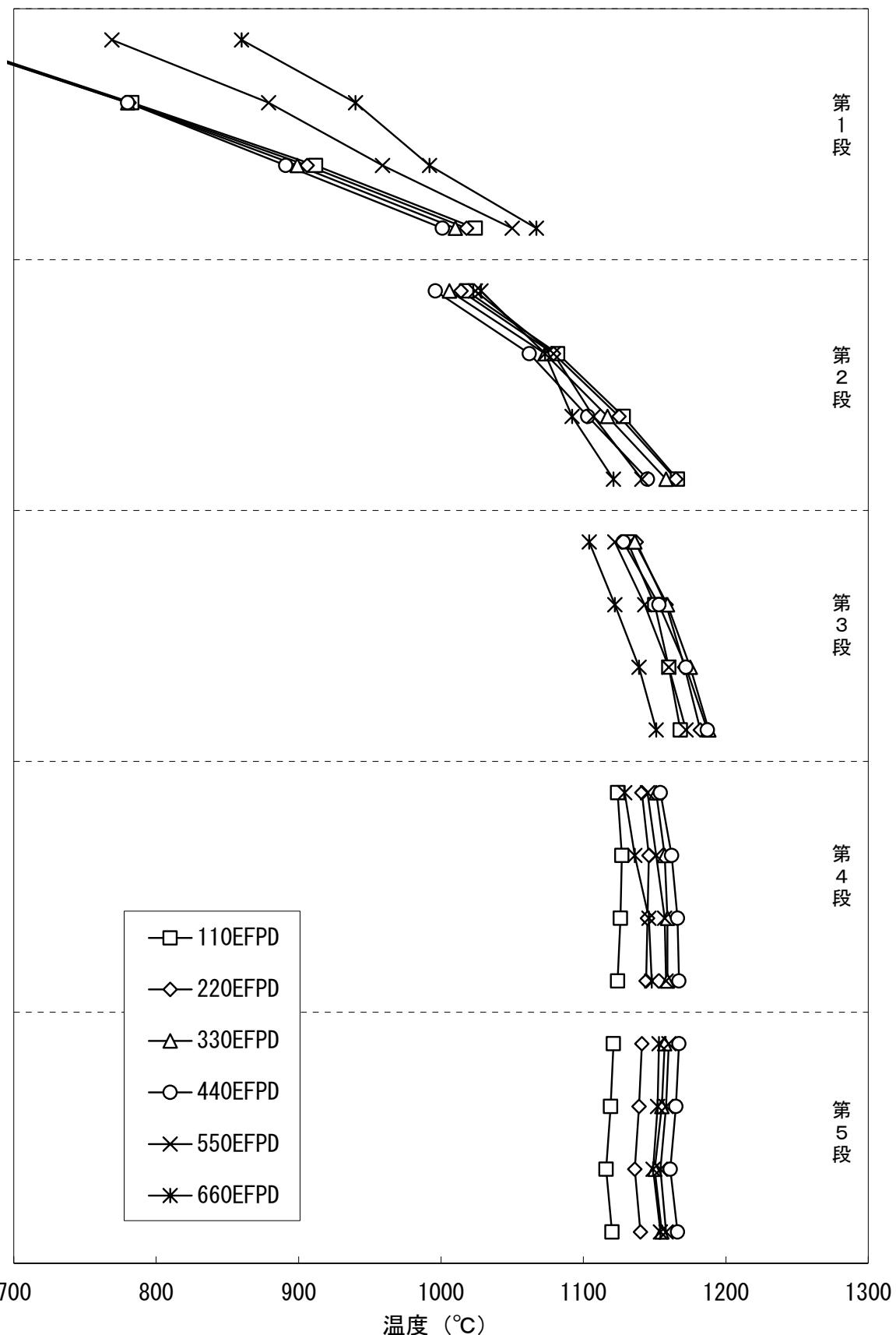
第4.19図 軸方向温度分布(330日、工学的安全因子考慮なし、F1カラム、制御棒位置固定条件)



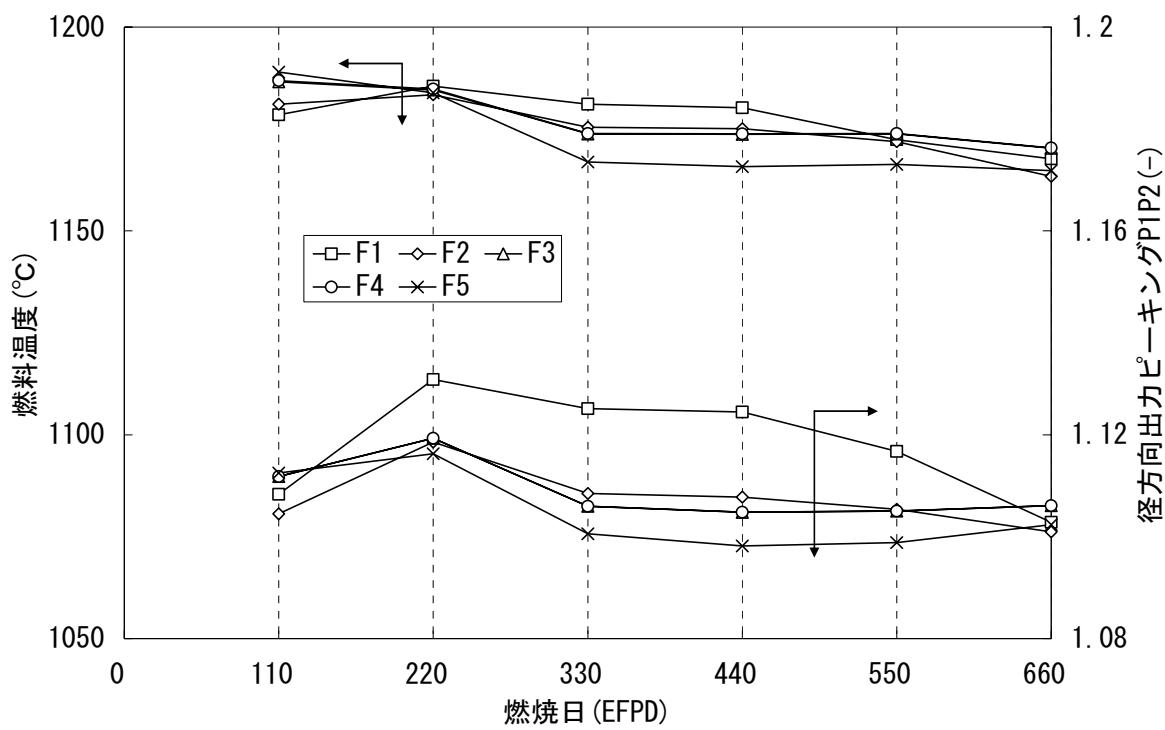
第4.20図 軸方向温度分布(330日、工学的安全因子考慮なし、F1カラム、基準制御棒位置条件)



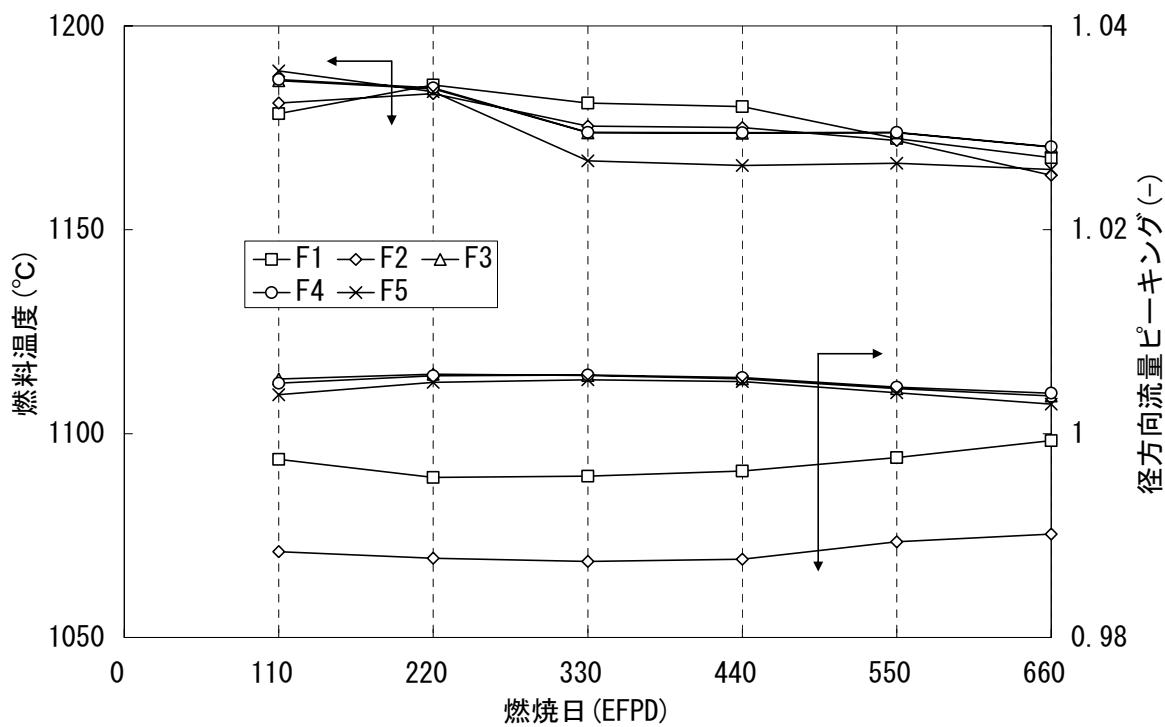
第4.21図 軸方向燃料温度分布（工学的安全因子考慮なし、F1カラム、制御棒位置固定条件）



第4.22図 軸方向燃料温度分布（工学的安全因子考慮なし、F1カラム、基準制御棒位置条件）

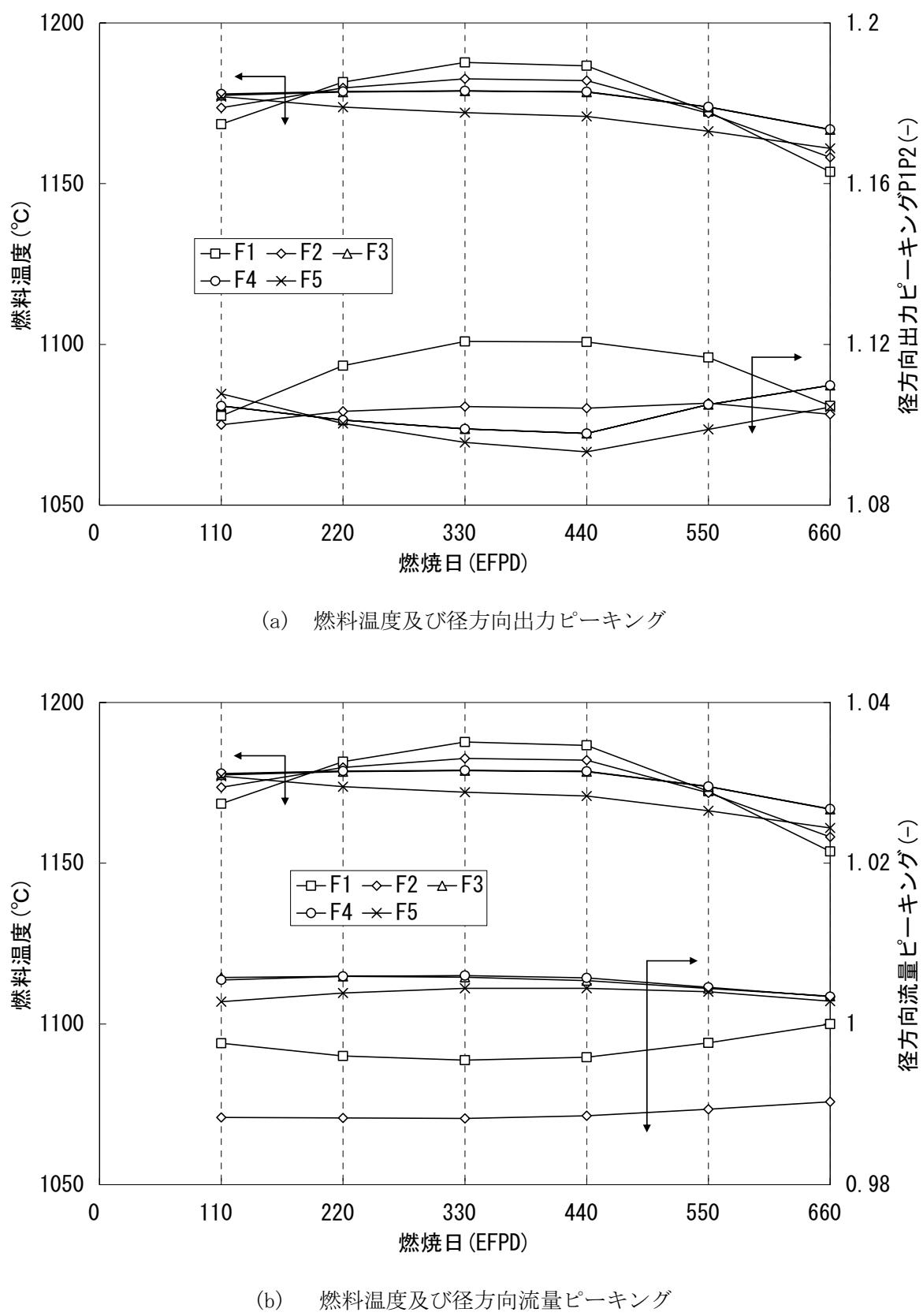


(a) 燃料温度及び径方向出力ピーキング

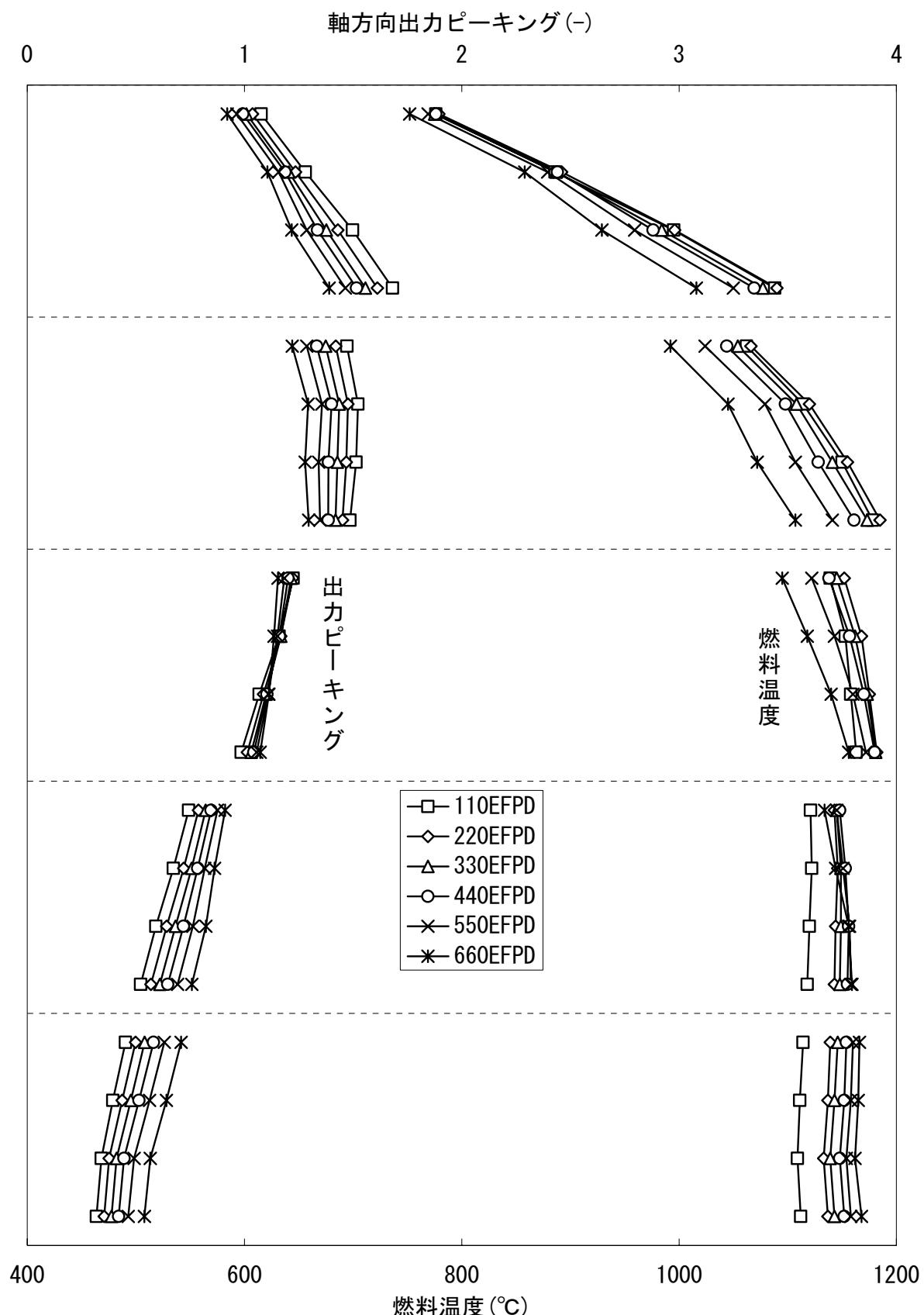


(b) 燃料温度及び径方向流量ピーキング

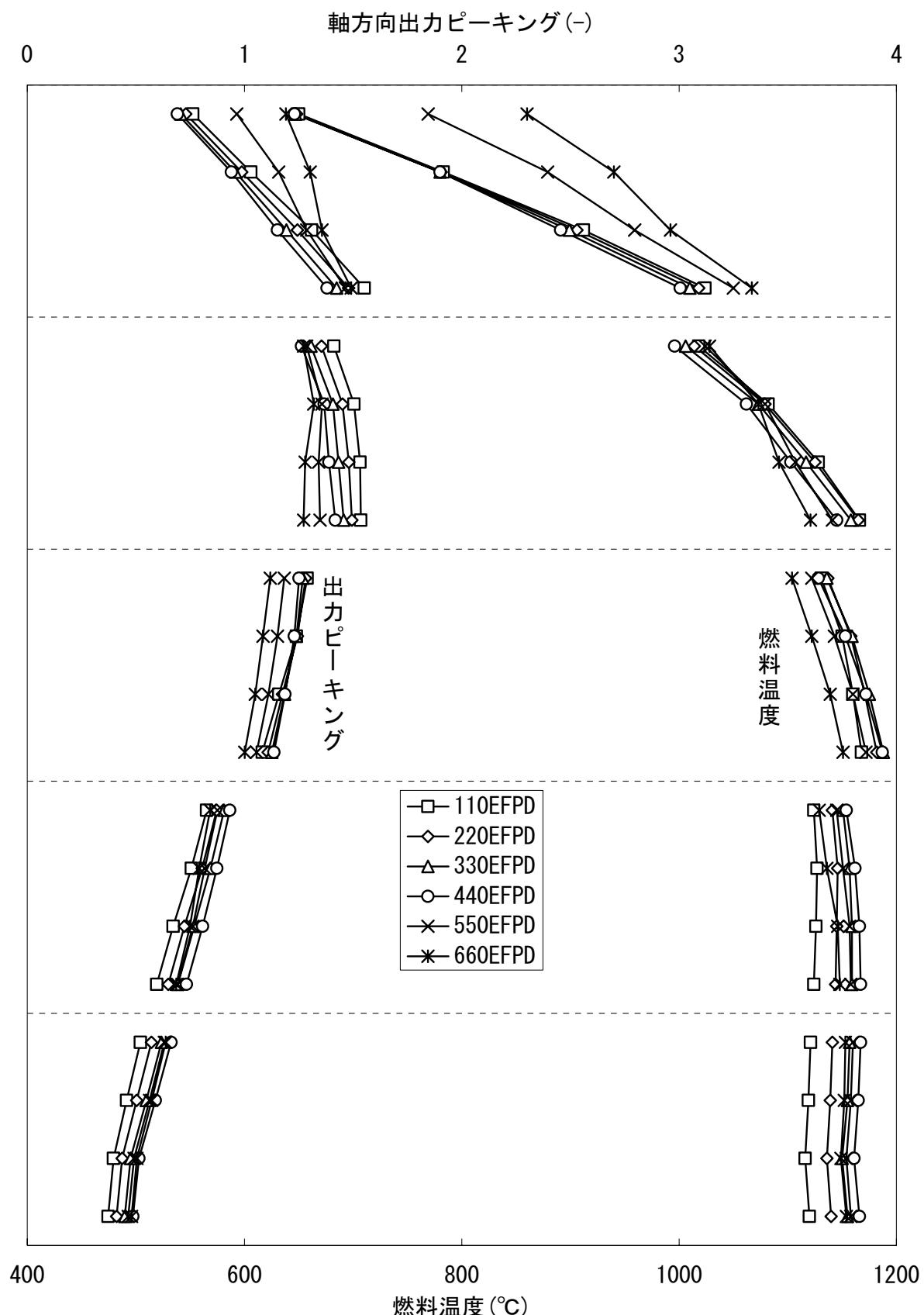
第 4.23 図 燃料温度、出力ピーキング及び流量ピーキングの燃焼に伴う変化  
(燃料温度：工学的安全因子考慮なし、制御棒位置固定条件)



第 4.24 図 燃料温度、出力ピーキング及び流量ピーキングの燃焼に伴う変化  
(基準制御棒位置条件)



第 4.25 図 軸方向の燃料温度、出力ピーキングの燃焼に伴う変化（制御棒位置固定条件）



第 4.26 図 軸方向の燃料温度、出力ピーキングの燃焼に伴う変化（基準制御棒位置条件）

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	記号
	名称	
面積	平方メートル	$m^2$
体積	立方メートル	$m^3$
速さ, 速度	メートル毎秒	$m/s$
加速度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波数	毎メートル	$m^{-1}$
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	$kg/m^3$
面積密度	キログラム毎平方メートル	$kg/m^2$
比體積	立方メートル毎キログラム	$m^3/kg$
電流密度	アンペア毎平方メートル	$A/m^2$
磁界の強さ	アンペア毎メートル	$A/m$
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	$mol/m^3$
質量濃度	キログラム毎立方メートル	$kg/m^3$
輝度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	$1^{(b)}$	$m/m$
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$1^{(b)}$	$m^2/m^2$
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	$1$	$s^{-1}$
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	$J/s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷, 電気量	クーロン	C		$s \cdot A$
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラード	F		$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	$\Omega$		$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S		$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T		$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリー	H		$kg \cdot s^2 \cdot A^{-1}$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	$^{\circ}C$		$Wb/A$
光束度	ルーメン	lm		K
照度	ルクス	lx	$cd \cdot sr^{(c)}$	cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		$lm/m^2$
吸収線量, 比エネルギー分, カーマ	グレイ	Gy		$m^{-2} cd$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv		$s^{-1}$
酸素活性	カタール	kat		$mol$

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。

実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。

(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) については CIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	$1^{\circ}=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^{\circ}=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3kg$

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1$

