



TRACY実験における  
フィードバック反応度の空間分布効果  
－第1出力ピーク特性の評価－

2001年6月

小原 徹\*・中島 健・三好 慶典・関本 博\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財團法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

TRACY 実験におけるフィードバック反応度の空間分布効果  
－第 1 出力ピーク特性の評価－

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部  
小原 徹・中島 健・三好 慶典・関本 博\*

(2001 年 4 月 16 日受理)

TRACY 実験におけるフィードバック反応度の空間分布効果を検討するために、一点炉近似モデル及び空間依存動特性コード PCTAC を用いて、第 1 出力ピーク特性の評価を行った。

平坦温度分布を有する炉心の解析では、温度フィードバック反応度に重み 1.5 をかけることにより、温度分布の空間依存性を考慮した結果と同じ結果が得られた。核計算による温度分布の空間効果の評価及び空間依存動特性解析の結果、出力ピーク時には、温度フィードバックの空間効果が、フィードバックの無い状態の出力分布によって支配されており、この結果、温度フィードバック反応度の重みが 1.5 となること、がわかった。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

\* 東京工業大学原子炉工学研究所

Spatial Distribution Effect of Feedback Reactivity in TRACY Experiments  
— Evaluation of the First Power Peak Characteristics —

Toru OBARA\*, Ken NAKAJIMA, Yoshinori MIYOSHI and Hiroshi SEKIMOTO\*

Department of Fuel Cycle Safety Research  
Nuclear Safety Research Center  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 16, 2001)

To investigate the spatial effect of feedback reactivity in TRACY experiments, evaluations of the first power peak characteristics using the one-point reactor approximation model and a space dependent kinetics code, PCTAC, were conducted.

Analyses for a core with uniform temperature distribution using the temperature feedback reactivity multiplied by a weight of 1.5 gave the same results as those for a core with space dependent power distribution. Neutronic calculations for spatial effect of temperature and space dependent kinetics analyses showed that the spatial effect of the temperature feedback reactivity at the peak power was dominated by the power distribution without feedback, and this resulted in a weight of 1.5.

Keywords : TRACY, Feedback Reactivity, Spatial Effect, One-point Reactor Approximation Model, Space Dependent Kinetics Code, First Power Peak Characteristics, Weight

---

\* Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

## 目 次

1. はじめに -----	1
2. 一点炉近似モデルを用いた重みの検討 -----	2
2.1 目的 -----	2
2.2 Nordheim-Fuchs モデルによるピーク出力の評価 -----	2
2.3 一点炉動特性コードによる計算 -----	5
2.4 核計算による重みの評価 -----	8
2.5 一点炉近似モデルによる評価のまとめ -----	9
3. 空間依存性を考慮した動特性解析による検討 -----	10
3.1 目的 -----	10
3.2 動特性解析コード PCTAC の概要 -----	10
3.3 核定数の整備 -----	11
3.4 空間分布を考慮した燃料溶液の即発超臨界時の過渡解析 -----	13
3.5 空間依存性を考慮した解析による検討のまとめ -----	56
4. まとめ -----	57
参考文献 -----	58
付録 -----	59
1. TRACY について -----	59
2. AGNES2 コードについて -----	60

## Contents

1. Introduction -----	1
2. Investigation with One-Point Reactor Approximation Model -----	2
2.1 Objective -----	2
2.2 Evaluation of Peak Power with Nordheim-Fuchs Model -----	2
2.3 Calculation using a One-Point Reactor Kinetics Code -----	5
2.4 Evaluation of Weight by Neutronic Calculations -----	8
2.5 Summary of Investigation with One-Point Reactor Approximation Model -----	9
3. Investigation with Space Dependent Kinetic Analyses -----	10
3.1 Objective -----	10
3.2 Outline of a Kinetics Code PCTAC -----	10
3.3 Preparation of Nuclear Data Set -----	11
3.4 Space Dependent Transient Analyses of Super-Prompt Critical in Solution Fuel -----	13
3.5 Summary of Investigation with Space Dependent Kinetic Analyses -----	56
4. Summary -----	57
References -----	58
Appendix -----	59
1. Outline of TRACY -----	59
2. Outline of AGNES2 Code -----	60

## 1. はじめに

溶液燃料体系の臨界事故解析手法の確立を目指し、日本原子力研究所（以下、原研）では過渡臨界実験装置 TRACY を用いた一連の臨界事故模擬実験（超臨界実験）を実施している<sup>1-6)</sup>。この実験では、<sup>235</sup>U 濃縮度約 10wt% のウランの硝酸水溶液（硝酸ウラニル水溶液）を燃料とし、最大 3\$までの反応度を添加することにより臨界事故を模擬している。この実験の解析には、主として一点炉近似の動特性解析コード AGNES2<sup>7)</sup>を使用している。実験では、温度上昇やボイドの発生により、炉心内の出力分布は時間とともに大きく変化する。一点炉近似ではこの時間変化を取り扱うことは出来ず、熱流動を含めた空間依存動特性計算が必要となる。そこで、TRACY 実験解析では、一点炉近似において出力分布を平坦とした計算を行い、実際の出力分布がある場合とのフィードバック反応度の違いを補正するために、「重み」を乗じたフィードバック反応度を用いている。現在のところ、実験の初期出力変化（第 1 出力パルス）の計算における温度フィードバック反応度の重みとしては、経験的に定めた値（1.5）を使用している。今後、空間分布を有する温度やボイドの反応度効果を適切に評価するためには、これらの空間分布の反応度依存性を明らかにし、重みの評価方法を検討する必要がある。

そこで本研究では、空間依存動特性コードを用いて TRACY 炉心を対象とした空間依存の動特性計算を行い、空間分布の効果を調べ、臨界事故時のフィードバック反応度効果の評価手法を検討した。また、一点炉近似に基づく結果との比較により、一点炉近似における重みの適用性を検証した。

なお、本研究は、東京工業大学との共同研究「臨界事故解析手法に関する研究」（平成 10 年 9 月～11 年 3 月及び 11 年 10 月～12 年 3 月）において実施したものである。

## 2. 一点炉近似モデルを用いた重みの検討

### 2.1 目的

一点炉近似に基づく動特性解析では、出力の大きさのみが時間的に変化し、その空間分布は変化しないものとして発熱量等の計算を行う。このときのフィードバック反応度は、着目しているパラメータ（例えば温度変化）の空間分布に応じた重みを乗じて評価している。一般に、出力分布としては初期定常状態の分布を与え、また、重みとしては、初期状態の中性子束と随伴中性子束の積が用いられる。一方、原研における TRACY 実験解析では、放射線分解ガスボイドの発生パラメータを炉心平均値に対して与えているため、炉心内ではどの位置の出力も等しい（平坦出力分布）として解析を行っている。この場合、温度変化は炉心内で一様となるため、反応度評価の際に実際の空間分布との違いを補正する必要がある。この補正を含めた温度フィードバック反応度に対する重みとして、TRACY 実験解析では経験的に求めた値（1.5）を使用している<sup>1,5)</sup>。

本章では、TRACY 実験解析で使用している温度フィードバック反応度の重み（1.5）の妥当性について検討した結果を示す。

### 2.2 Nordheim-Fuchs モデルによるピーク出力の評価

TRACY 実験のピーク出力を Nordheim-Fuchs (N-F) モデル<sup>8)</sup>により評価し、温度フィードバック反応度の重みについて検討した。

#### 2.2.1 ピーク出力評価式の導出

N-F モデルでは、1 ドルを超える反応度がステップ状に添加され、反応度フィードバックとして温度のみが効いている場合のピーク出力を評価できる。以下にその評価式を導出する。

遅発中性子を無視し、フィードバック反応度として温度フィードバックのみを考慮した一点炉近似動特性方程式を考える。炉心全体が平均温度になっている（一様温度分布）と仮定すると次式が成り立つ。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho - \beta_{eff}}{\Lambda} N \quad (1)$$

$$\rho = \rho_0 - \alpha_T \cdot \Delta T = \rho_0 - \frac{\alpha_T}{C_p d} \cdot E \quad (2)$$

ここで、 $N$  : 出力密度

$\rho$  : 反応度

$\rho_0$  : 添加反応度

$\beta_{eff}$  : 実効遅発中性子割合

$\Lambda$  : 即発中性子世代時間

$\Delta T$  : 温度変化（平均値）

$E$  : エネルギー密度（平均値）

$\alpha_T$  : 反応度温度係数（絶対値、一様温度分布と仮定して算出）

$C_p$  : 溶液の比熱

$d$  : 溶液の密度

である。(2)式の両辺を時間で微分すると、

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{\alpha_T}{C_p d} \cdot \frac{dE}{dt} = -\frac{\alpha_T}{C_p d} \cdot N$$

となる。これと(1)式を組み合わせると、

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\rho - \beta_{eff}}{\Lambda} \cdot \frac{C_p d}{\alpha_T} \cdot \frac{d\rho}{dt} = -\frac{C_p d}{2\alpha_T \Lambda} \cdot \frac{d}{dt} (\rho - \beta_{eff})^2 \quad (3)$$

上式を時間 0 から出力ピークの時間まで積分すると、ピーク出力密度  $N_P$  が次式のように求められる。

$$N_P = \frac{C_p d}{2\alpha_T \Lambda} (\rho_0 - \beta_{eff})^2 = \frac{C_p d \Lambda}{2\alpha_T} \omega_0^2 \quad (4)$$

ここで、添字  $P$  はピーク出力における値、 $\omega_0$  は安定逆炉周期である。また、 $\rho_P = \beta_{eff}$  及び  $\omega_0 = (\rho_0 - \beta_{eff})/\Lambda$  の関係を用いた。(4)式により、安定逆炉周期  $\omega_0$  からピーク出力を求めることができる。ただし、上式は、炉心全体が平均温度となっている場合の式である。温度分布による反応度変化を考慮する場合には、反応度温度係数に重み  $W$  を乗じた次式を使用する。

$$N_P = \frac{C_p d \Lambda}{2\alpha_T W} \omega_0^2 \quad (5)$$

この重み  $W$  は、温度の空間分布が有る場合と無い場合（一様分布）の温度フィードバック反応度の比であり、温度分布がある場合の温度フィードバック反応度を  $\Delta\rho_T$  とすると、 $W = \Delta\rho_T / (\alpha_T \Delta T)$  と表される。ピーク出力における温度分布の詳細を測定あるいは解析により求めれば、 $\Delta\rho_T$  を評価し、重み  $W$  を計算することはできる。これについては、今後の検討課題とし、ここでは、次の方法により重みを評価する。

(5)式における  $C_p, d$  は溶液燃料の物性値であり、燃料組成により決まる。また、 $\alpha_T, \Lambda$  は核特性パラメータであり、燃料組成と炉心形状（反射体条件を含む）がわかれれば、核計算により求めることができる。一方、実験では、安定逆炉周期とピーク出力が測定されている。そこで、上の N-F モデルに基づくピーク出力評価式と実験値とを比較することにより、反応度温度係数の重みが求まる。

### 2.2.2 実験との比較

前節で導出した N-F モデルの評価式 ((5)式) を用いて、原研の TRACY 実験で得られたピーク出力を評価した。評価で使用した定数を表 2.1 に示す<sup>1)</sup>。

TRACY では、10wt%濃縮の硝酸ウラニル水溶液を燃料としている。本評価における TRACY

の燃料条件は、ウラン濃度 420～430gU/l、遊離硝酸濃度 0.76～0.85N であり、また、臨界液位は 45.3～46.3cm とほぼ一定であった。ピーク出力の評価にあたっては、代表的な燃料条件の値を全ケースに適用した。

評価結果を実験値とともに、図 2.1 に示す。図に示すように、重みを 1.0 とした場合は、N-F モデルのピーク出力が過大評価となっているのに対し、重みを 1.5 とすると実験値を良く再現している。なお、逆炉周期が大きな領域では、実験値が N-F モデルから外れてくるが、これは、ピーク出力に対する放射線分解ガスボイドの効果が無視できなくなつたためである。(N-F モデルでは、温度効果のみを取り扱っている。)

なお、本評価と同様の評価をフランスの臨界事故模擬実験装置 SILENE を用いた実験の解析を実施しているが、SILENEにおいても、重み 1.5 を使用することにより、実験値を良く再現することが示されている<sup>9)</sup>。

表 2.1 ピーク出力評価で使用した定数

比熱 : $C_p$ [J/C°·g]	密度 : $d$ [g/cm³]	反応度温度 係数 : $\alpha_T$ [(dk/k)/C]	即発中性子 世代時間 : $\Lambda$ [s]
2.50	1.60	$3.6 \times 10^{-4}$	$4.3 \times 10^{-5}$

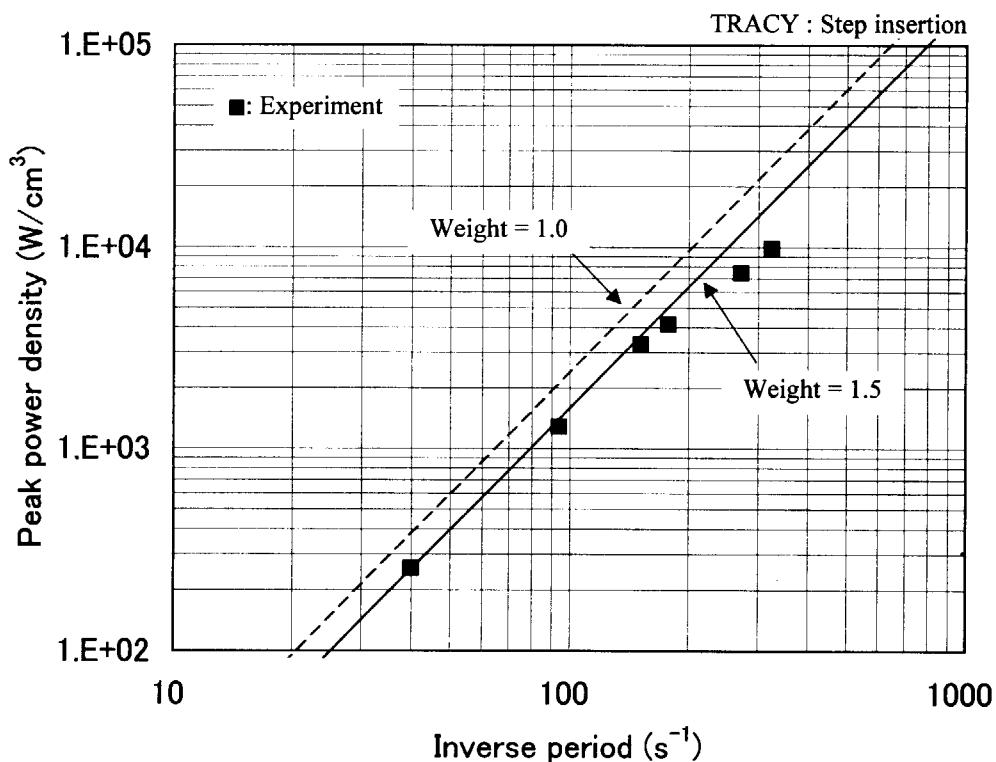


図 2.1 ピーク出力の Nordheim-Fuchs モデルによる評価  
(TRACY experiment)

## 2.3 一点炉動特性コードによる計算

### 2.3.1 第1出力ピーク特性の計算

広い範囲の反応度添加に対する TRACY の第1出力ピーク特性を一点炉近似動特性コード AGNES2<sup>7)</sup>（付録参照）により計算し、実験値との比較を行った。実験は、0.25～2.9 \$の反応度をステップ状に添加したケース（パルス引抜き）であり、ピーク出力とピークまでに発生したエネルギーを比較した。実験における燃料条件は、ウラン濃度 370～430gU/l、遊離硝酸濃度 0.6～0.8N と変化している。AGNES2 での計算は、平坦出力分布とし、反応度温度係数（温度一様変化として求めた）に重み 1.5 をかけている。また、放射線分解ガスによるボイド効果は考慮していない。計算で必要な定数は、本来、燃料条件に対応して評価すべきであるが、上記燃料条件変化のピーク出力評価への影響が小さいことから、本計算では前節と同様に全ケースとも代表的な値を使用した。表 2.2 に動特性計算で使用した定数を示す。定数算出に必要となる燃料の原子個数密度は、SST 式により求めた。なお、表 2.2 と表 2.1 とで値が若干異なっているが、これは、燃料条件の範囲が僅かに異なっているためである。また、上で述べたように、この違いによるピーク出力評価結果への影響は小さい。

図 2.2 にピーク出力密度、図 2.3 にピーク出力時のエネルギー密度の計算結果を実験値とともに示す。これらの図に示すように、添加反応度 2\$以下の範囲において、重みを 1.5 とした計算結果は実験値を良く再現していることがわかる。添加反応度が 2\$以上では、出力がピークに達する前に、放射線分解ガスボイドが発生し、大きな負の反応度フィードバック効果を与えるため、出力ピーク値及びピーク時のエネルギーが計算値に比べて減少する。なお、添加反応度 2\$の場合の安定逆炉周期は約  $170\text{s}^{-1}$  となり、前節でのピーク出力が N-F モデルから外れてくる逆炉周期とほぼ一致している。

表 2.2 AGNES2 を用いた動特性計算で使用した定数

即発中性子 世代時間 [s]	遅発中性子割合 [-]	熱容量 [J·m <sup>-3</sup> /°C]	1 次反応度 温度係数 [ cent/°C ]	2 次反応度 温度係数 [ cent/K <sup>2</sup> ]
$4.43 \times 10^{-5}$	$7.37 \times 10^{-3}$	$4.14 \times 10^{-6}$	-4.58	$-4.75 \times 10^{-3}$

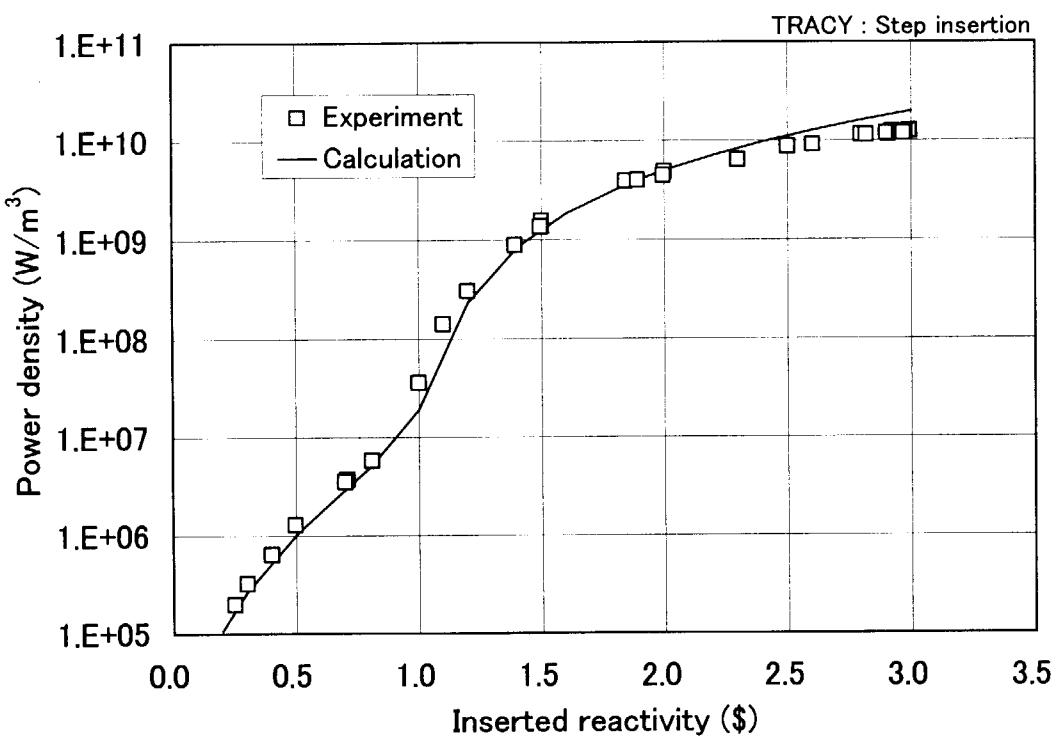


図 2.2 ピーク出力計算値の実験との比較

(Calculation : AGNES2 with W=1.5)

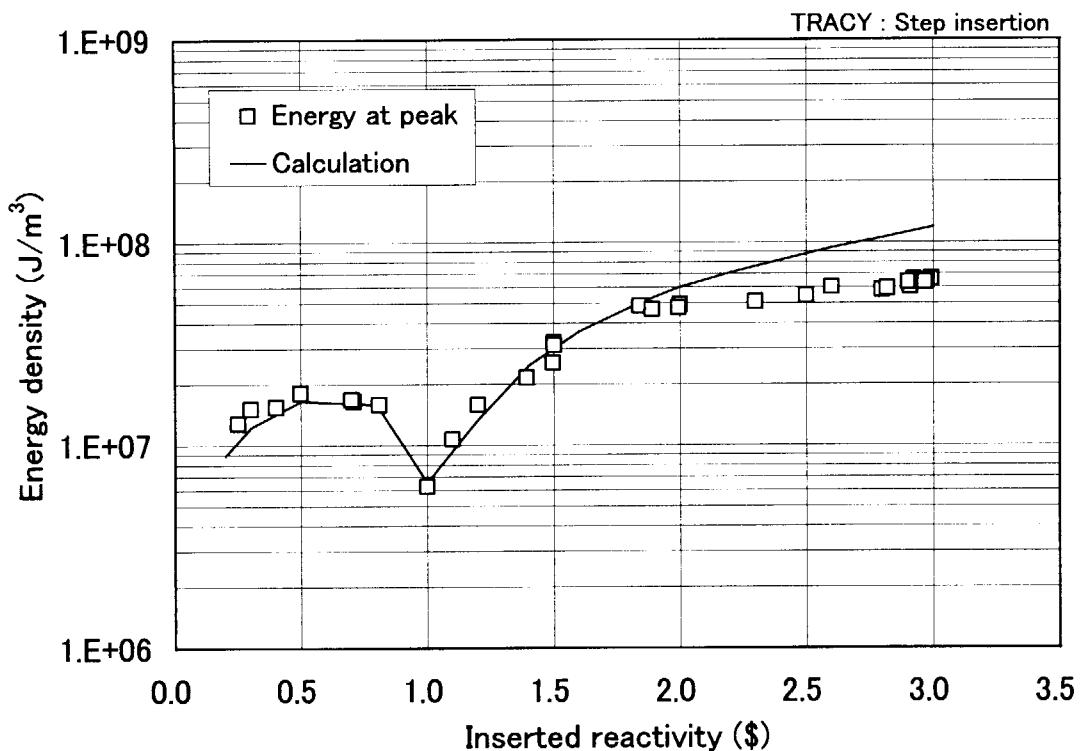


図 2.3 出力ピーク時のエネルギーの計算と実験との比較

(Calculation : AGNES2 with W=1.5)

### 2.3.2 スロートランジエント実験の解析

添加反応度 0.25 \$ をステップ状に添加した場合の出力変化を AGNES2 により計算し、実験との比較を行った。このような小さな反応度添加では、放射線分解ガスボイドの発生は観察されおらず、反応度フィードバックは温度のみとなる。計算は、反応度温度係数の重みを 1.5 とした場合と 1.0 の場合の 2 ケースについて行った。計算に使用した定数及び計算条件は 2.2.3 節の計算と同じである。

結果を図 2.4 に示す。重み 1.0 では出力を過大評価しているが、1.5 の場合には、出力の立ち上がりから約 700 秒間にわたって実験値をほぼ再現していることがわかる。この実験では、出力がピークから約 500 秒の間に 2 衍低下している。この場合、温度分布は実験中にも時間とともに変化し、対流により溶液上部の温度が高くなると考えられるが、今回行った計算結果では約 10 分間の時間変化に対して重みは一定値であることがわかった。このことは、対流による温度分布の変化が、温度フィードバック反応度の重みに与える影響は小さいことを示唆している。なお、詳細については数値計算等による検討が必要である。

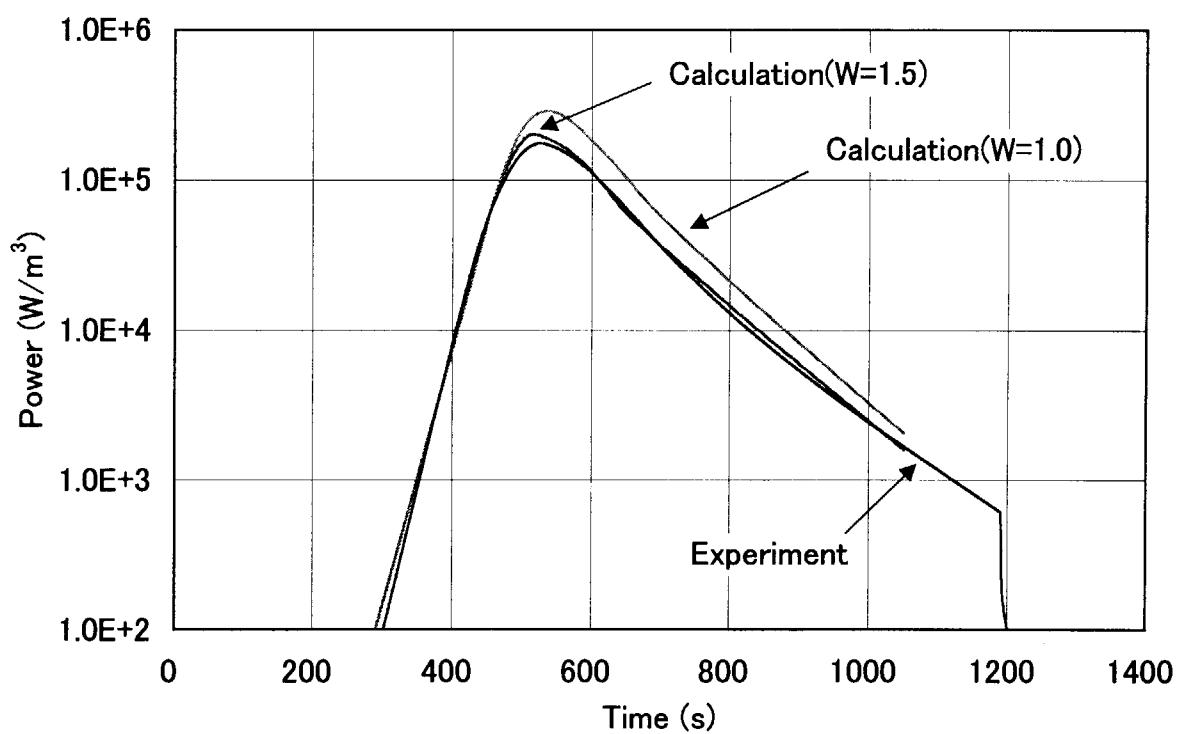


図 2.4 スロートランジエント実験の出力変化とその解析値（重み 1 及び 1.5）の比較  
(TRACY : 0.25\$ step insertion)

## 2.4 核計算による重みの評価

前節までの検討により、一点炉近似モデルで平坦出力分布を使用している場合には、温度フィードバック反応度の重みとして 1.5 を使用すると、第 1 出力ピークの実験値を再現することが分かった。本節では、温度分布の反応度への影響を評価するために、核計算により、温度分布を考慮した場合と考慮しない場合の反応度温度係数を求め、両者の比較を行った。

計算は SRAC95 コードシステム<sup>10)</sup>に内蔵の 2 次元輸送計算コード TWOTRAN により行い、核データライブラリは JENDL-3.2<sup>11)</sup>を使用した。計算に使用した体系は R-Z 円筒形状であり、使用したエネルギー群数は 17 群である。17 群のマクロ断面積は、SRAC95 の衝突確率計算法により実効断面積を作成し、その後 1 次元輸送コード ANISN により縮約し、求めた。なお、溶液燃料の原子個数密度は、SST 式により求めた。

温度分布は、溶液の半径方向及び高さ方向を各々 5 分割し、別途計算した出力分布に比例した分布を用い、分布を考慮しない場合と溶液の発熱量が等しくなるように各領域の温度を与えた。計算した温度は、23.8(初期温度), 30, 40, 50°C の 4 点である。各領域の原子個数密度は温度に応じて変化させているが、領域の体積は一定としている(領域ごとに体積変化量が異なるため、領域の体積を変化させると計算におけるメッシュ条件が変化してしまうため)。これに対応させて、分布を考慮しない場合も、密度のみを変化させ体積は一定としている。この場合、燃料量(重量)が保存されないこととなるが、その効果は無視した。

計算により求めた温度による反応度変化を表 2.3 に示す。表には、温度分布を考慮した場合と考慮しない場合の反応度係数の比も併せて示してある。これより、温度分布を考慮した場合の反応度係数は考慮しない場合の約 1.4 倍となることがわかる。この結果は、前述の動特性評価により求めた重み 1.5 とおおむね一致しており、第 1 出力ピーク時には、出力分布に比例した温度分布が形成されているものと考えられる。なお、実際に動特性計算で使用する重みを核計算により評価するためには、より詳細なモデルでの計算が必要と思われる。

表 2.3 温度分布の反応度への影響

温度 [°C]	温度変化 [°C]	温度分布あり (体積変化なし)		温度分布なし (体積変化なし)		反応度係数 の比 (分布有/無)
		反応度 [\$]	反応度係数 [\$/°C]	反応度 [\$]	反応度係数 [\$/°C]	
23.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	---
30	6.2	-0.506	-8.24E-2	-3.69	-5.98E-2	1.41
40	16.2	-1.34	-8.09E-2	-0.971	-6.05E-2	1.42
50	26.2	-2.13	-7.95E-2	-1.59	-6.12E-2	1.42

注) 反応度係数は初期温度を基準として求めている。

## 2.5 一点炉近似モデルによる評価のまとめ

TRACY の第 1 出力パルスを一点炉近似モデルにより評価する場合に使用している、温度フィードバック反応度の重み（1.5）の妥当性を検討した。

Nordheim-Fuchs モデルによる評価では、重みとして 1.5 を使用するとピーク出力の実験値を再現することが分かった。また、一点炉動特性コード AGNES2 を用いた計算においても重み 1.5 を用いた結果は、ピーク出力及びピーク時のエネルギーの実験値を再現した。さらに、スロートランジエント実験の解析では、重み 1.5 を用いた計算が約 700 秒にわたる長時間の出力変化を再現した。一般に温度分布は実験中にも時間とともに変化し、対流により溶液上部の温度が高くなると考えられるが、今回行ったスロートランジエントの解析結果では約 10 分間の時間変化に対して重みは一定値であることがわかった。

以上より平坦出力分布あるいは平均温度変化を用いて温度フィードバック反応度を計算する際には、温度分布による反応度効果を取り入れるために、重み 1.5 を使用することが妥当であることが分かった。

これらの検討に加え、温度分布が反応度に与える影響を評価するために、核計算により、温度分布の有無による反応度の変化を求めた。この結果、出力分布に比例した温度分布を与えた場合と平坦温度分布の場合の反応度の温度フィードバック反応度の比は約 1.4 となり、上の重み 1.5 とほぼ一致した。このことより、出力分布に比例した温度分布が第 1 出力ピーク時には形成されていると考えられる。

### 3. 空間依存性を考慮した動特性解析による検討

#### 3.1 目的

燃料溶液体系の即発超臨界時の過渡解析を一点炉近似法を用いて行う場合には、炉心出力による燃料溶液の温度上昇、放射線分解ガスによるボイドの発生等空間依存性のあるフィードバック効果を空間平均して取り扱う必要がある。ここでは、東京工業大学で開発された空間依存動特性解析コード PCTAC<sup>12)</sup>を用いて溶液燃料の即発超臨界時の第一パルスの過渡解析を行い、一点炉近似で解析を行う際の温度平均の方法の妥当性の検討、更にボイドを考慮する場合の補正係数等についての検討を行う。

#### 3.2 動特性解析コード PCTAC の概要

PCTAC コードはパルス炉の動特性解析のため東京工業大学で開発された空間依存動特性解析コードである。もとは 1 次元動特性解析コードであったが、本共同研究のため 2 次元体系が取り扱えるように改良した。取り扱える体系は R-Z の 2 次元体系である。

動特性解析手法は、一点炉近似解法及び改良準静的解法の二つの方法を用いることが可能である。一点炉近似解法では初期状態の中性子束分布と随伴中性子束分布のみを求め、強度関数\* の時間変化は強度関数時間ステップ幅で差分化してレンゲクッタ法で求める。準静的近似解法では、初期状態及び形状関数時間ステップ毎に形状関数\* を計算し、形状関数時間ステップ幅より小さい強度関数時間ステップ幅で強度関数を差分化して強度関数を求める。

中性子束及び随伴中性子束の空間分布は多群拡散近似によって求められる。エネルギー一群数は任意に指定することが可能である。

反応度の投入は、ステップ状またはランプ状に行なうことが可能で、各空間領域の断面積を変化させることによって行なう。

反応度フィードバック効果は、中性子束分布を求める際の空間差分の各メッシュ点における断面積の変化によって考慮される。すなわち、形状関数時間ステップ毎に各点での断面積と中性子束分布、初期状態での随伴中性子束分布からそのタイムステップでの反応度を計算する。なお、一点炉近似解法では形状関数時間ステップで中性子束分布を計算することはないため、初期状態での中性子束分布がすべてのタイムステップでの反応度の計算に用いられる。

反応度フィードバック効果は、温度上昇による核断面積の変化（ミクロ断面積の変化と密度変化による断面積の変化の両方を考慮した変化）及びボイド発生による密度減少による核断面積変化の二つの効果を考慮することができる。なお、ボイド発生による液面の上昇等過渡解析中の炉心形状変化の効果を取り扱うことはできない。

各空間メッシュ点での温度は、初期温度、その時刻までの各空間メッシュでの積分出力及び溶液の比熱から求められる。なお、伝熱及び熱の対流、溶液の移動は考慮されず、断熱として扱われる。コードには断面積ライブラリーとして複数の温度点での断面積のテーブルがイン

---

\* 中性子束を空間と時間に変数分離したときの、空間成分を形状関数、時間成分を強度関数と呼ぶ。

プラットとして与えられ、各点の温度からライブラリーの断面積を温度で直線内挿することで各空間メッシュ点での当該温度での断面積を得る。

本コードによって、体系全体の出力、反応度、積分出力の時間変化に加え、各空間メッシュ点での、出力密度、各エネルギー群での中性子束、温度、ボイド率の時間変化などを得ることができる。また実効遅発中性子割合、中性子世代時間などの動特性パラメータも出力される。

### 3.3 核定数の整備

解析に使用した核定数は以下のように整備した。

溶液は、ウラン濃縮度 10%、0.78 標準の硝酸ウラニル溶液である。溶液の組成に関するデータを表 3.1 に示す。表 3.1 のデータをもとに各核種の数密度を SST 式により求め、SRAC95<sup>10)</sup>のセル計算ルーチンによって多群マクロ断面積を作成した。セルは無限均質体系を模擬しバックリングを用いて中性子のもれによる効果を考慮した。核データライブラリーは JENDL-3.2<sup>11)</sup>を用いた。エネルギー群は 4 群とした。エネルギー群構造を表 3.2 に示す。核定数は表 3.3 に示す 25.5°C から 100°C までの 9 個の温度点に対して求めた。SRAC95 で得られた各温度点での無限増倍率を図 3.1 に示す。図 3.1 から分かるように無限増倍率は溶液温度の上昇に対して直線的に減少する。動特性計算に必要な即発中性子スペクトル、各エネルギー群での平均中性子速度、遅発中性子スペクトル、核分裂あたりの平均遅発中性子数、遅発中性子先行核寿命は SRAC95 によって出力されたデータより求めた。なお、遅発中性子先行核の群数は 6 群である。

表 3.1 解析に用いた燃料溶液の組成

溶液	ウラン密度[gU/L]	酸性度[N]	ウラン濃縮度[%]
硝酸ウラニル溶液	4.215E+2	7.8	10.0

表 3.2 エネルギー群構造

エネルギー群	エネルギー上限 [eV]	エネルギー下限 [eV]
1	1.0E+7	8.21E+5
2	8.21E+5	5.53E+3
3	5.53E+3	0.68256
4	0.68256	1E-5

表 3.3 群定数テーブルの温度点

温度点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
温度 [°C]	25.5	30	40	50	60	70	80	90	100

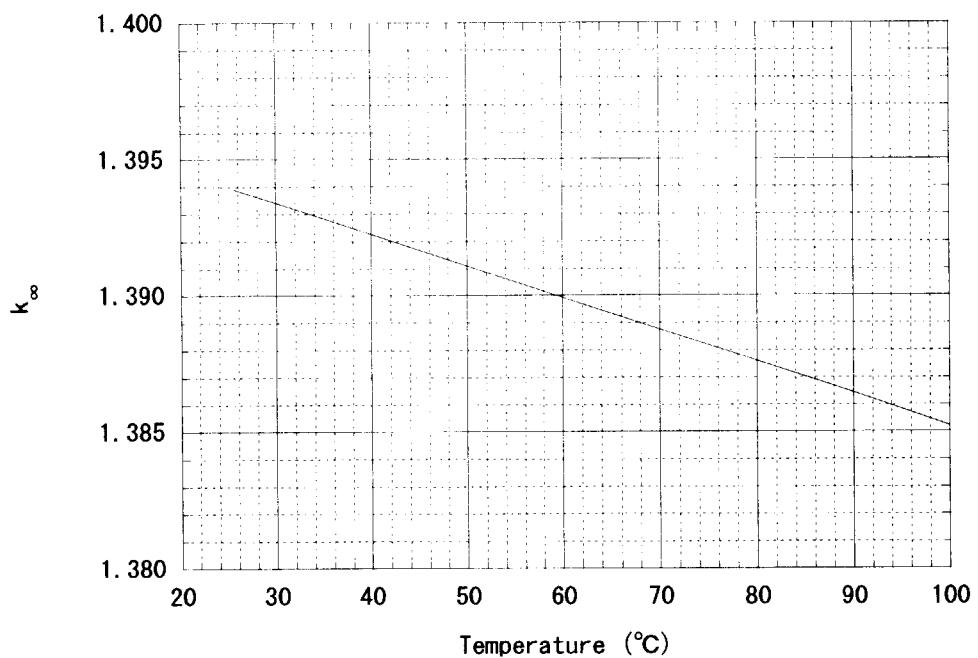


図 3.1 ウラン溶液の無限倍率の温度変化

### 3.4 空間分布を考慮した燃料溶液の即発超臨界時の過渡解析

#### 3.4.1 溫度フィードバックのみを考慮した解析

##### 3.4.1.1 解析条件

はじめに、温度フィードバックの効果のみを検討するため、ボイド効果を考慮せず温度フィードバック効果だけを考慮した解析を行った。

本解析での解析条件を表3.4に示す。実験においては炉内構造が存在するが本解析ではフィードバック効果の空間依存性の効果のみの検討のため、これらの構造物を排除しできるだけ単純な体系とした。すなわち炉心は裸円柱体系で炉心内部には構造物等は一切無い均質炉心である。

解法は一点炉近似解法(Point)及び改良準静的解法(I.Q.S.)によって行った。一点炉近似解法における温度フィードバックのかけかたは、

- (1) 初期状態の中性子束分布を保存し、炉心の空間メッシュでの各点での温度上昇を計算し、これに中性子束と随伴中性子束を用いて反応度を求める方法(Point, Space dependent),
- (2) 初期状態の中性子束分布を保存し、炉心の空間メッシュでの各点での温度上昇を計算し、炉心体積で平均化した温度を溶液全体の温度として反応度を求める方法(Point, Space independent W=1),
- (3) 初期状態の中性子束分布を保存し、炉心の空間メッシュでの各点での温度上昇を計算し、炉心体積で平均化した温度上昇に重み W=1.5 をかけた値を溶液全体の仮想的な温度上昇として反応度を求める方法(Point, Space independent, W=1.5),

の3種類の方法で解析を行った。さらに、

- (4) 改良準静的解法(I.Q.S.)で中性子束の時間変化及び温度の空間依存性を取り入れた解析、

を行った。これにより、(1) Point, Space dependent の結果と(4) I.Q.S.の結果を比較することで過渡事象中の中性子束の変化が結果に及ぼす効果を知ることができる。また、(2) Point, Space independent W=1 の結果及び(3) Space independent, W=1.5 の結果と (4) I.Q.S.の結果を比較することで一点炉近似解法による解析で炉心の積分出力と溶液比熱、炉心体積から炉心の平均温度を求めてフィードバック効果を取り入れる際に、炉心平均温度上昇にある重み W をかけることの妥当性を確認することができる。

解析の際のタイムステップは更に細かいタイムステップを設定して解析を行っても結果に違いが生じないことを確認して決定した。

初期状態は出力1Wの臨界状態とし、炉心の初期温度は炉心全領域で25.5°Cとした。

反応度投入方法は反応度の投入の際に中性子束の空間ひずみが生じない方法を採用した。すなわち初期状態では炉心全体の核分裂あたりの中性子数  $\nu$  に実効増倍率  $k_{\text{eff}}$  の逆数をかけ臨界とし、時刻0で  $\nu$  に掛けていた  $1/k_{\text{eff}}$  をステップ状に1とすることで反応度を投入した。投入反応度は、溶液の高さを調整することで体系の余剰反応度を調整することでおこなった。各解析

ケースの溶液液面高さと投入反応度の関係を表3.5に示す。炉心半径は、TRACYと同一にした。

解析は基準ケースの投入反応度1.6\$に対し投入反応度を大きくした場合(2\$)と小さくした場合(1.3\$)について解析を行った(表3.5参照)。

表 3.4 PCTAC の解析条件

炉心体系	裸円柱
解法	一点炉近似(Point)及び 改良準静的解法(I.Q.S.)
タイムステップ	強度関数計算: 5.0E-6 [sec] 形状関数、温度・ボイド分布計算: 1.0E-4 [sec]
初期状態	臨界 出力: 1 W 溶液温度: 25.5°C
反応度投入方法	t=0sec でステップ状に投入

表 3.5 温度フィードバックのみを考慮した解析での解析ケース

Case	炉心半径[cm]	炉心高さ[cm]	投入反応度[\$]	備考
A210	25.0	46.0	1.6	(基準ケース)
A250	25.0	46.7	2.0	(反応度 2\$)
A260	25.0	45.4	1.3	(反応度 1.3\$)

### 3.4.1.2 解析結果

解析によって得られた結果として各ケースの、パルスの最大出力とその時刻、パルスの半値幅、反応度投入後0.5秒までの、積分出力、炉心中心での積分出力密度、炉心中心での溶液温度を表3.6から表3.8に示す。表には先に述べた4種類の解析方法での結果を示した。なお、一点炉近似解法(Point)で温度を炉内で平均化した場合の「中心での積分出力密度」は炉内平均値を表している。また、中心温度については、炉出力による温度上昇にWを掛けた値を仮想的な温度上昇として求めた温度を示している。なお、実効遅発中性子割合は各ケースとも0.0075、平均中性子世代時間は $4.4 \times 10^{-5}$  (s) (Case A210, A230, A250, A260)または $4.3 \times 10^{-5}$  (s) (Case A240)であった。

また、投入反応度を変えたCase A210(基準ケース1.6\$)、Case A250(2.0\$)、Case A260(1.3\$)の3つのケースについては、炉心出力の時間変化、反応度の時間変化、反応度投入後0.5秒(t=0.5sec)での、炉心中心高さでの半径方向の出力分布、炉心中心軸での高さ方向の出力密度分

布、炉心中心高さでの半径方向の溶液温度分布、炉心中心軸での高さ方向の溶液温度分布を、図 3.2 から図 3.7 (Case A210)、図 3.8 から図 3.13(Case A250)、図 3.14 から図 3.19(Case A260)、にそれぞれ示した。

表 3.6 から表 3.8 の結果のうち、一点炉近似 Point (空間分布あり) と改良準静的解法(I.Q.S.)の結果を比較すると、いずれのケースも、最大出力及びその時刻、パルスの半値幅、積分出力、中心での積分出力密度、中心での温度ともほぼ一致しているのが分かる。また、図 3.2 から図 3.19 に示された、出力の時間変化、反応度の時間変化、炉内の出力密度分布、溶液の温度分布をみてもこの二つの解析方法(Point Space dependent と I.Q.S.)による結果はほぼ一致しており、曲線は完全に重なっている。

この二つの解法の主な違いは過渡状態での炉内中性子束の変化の効果を取り入れているか否かということである。この二つの解法の結果がほぼ一致していることから、温度フィードバックのみを考慮した解析、もしくはボイドが発生しない範囲内での過渡状態では、温度の空間分布が時間によって変化することによる中性子束分布分布の変化は小さく、これが解析結果に影響を与えることは無視できるということができる。これは、すべてのケースに対して成立しており、また Case A250 では溶液温度が 100°Cまで達しておりこれ以上の温度上昇はありえないことから、炉心形状、投入反応度によらずつねに成立するものと考えられる。よって、燃料溶液の第一パルスの過渡解析は溶液の温度分布の平均化を適切に行えば過渡状態での中性子束分布の変化を考慮することなく一点炉近似解法で行うことが可能であるといえる。

さらに、一点炉近似(Point)温度平均化  $W=1, W=1.5$  と改良準静的解法(I.Q.S.)の結果を表 3.6 から表 3.8 で比較するといずれの場合も、最大出力とその時刻、パルスの半値幅、積分出力が、一点炉近似(Point)温度平均化  $W=1.5$  による場合と改良準静的解法(I.Q.S.)による場合で、炉心形状や投入反応度に関わりなく、ほぼ一致していることが分かる。また、図 3.2 から図 3.19 に示された、出力の時間変化、反応度の時間変化みても一点炉近似(Point)温度平均化  $W=1.5$ (Point Space independent,  $W=1.5$ )と改良準静的解法(I.Q.S.)の結果のグラフは一致している。このことから、炉心形状が円柱の場合、一点炉近似解法で、積分出力、炉心体積及び溶液比熱から求めた炉心平均の溶液温度上昇に  $W=1.5$  を掛けた値を炉心全体の仮想的な溶液温度上昇として反応度を求ることで、投入反応度に関わらず空間依存性を正確に取り扱った場合と同じ結果を得ることができるといえる。

なお、本評価では、燃料内の伝熱、対流、溶液の移動は考慮していない。従って、上記の結論は、この仮定が成り立つ範囲において適用できるものである。しかし、この結論は第 2 章における TRACY 実験解析の結果と一致しており、少なくとも TRACY の第 1 出力パルスの評価においては、燃料内の伝熱、対流、溶液の移動の影響は十分に小さく、その効果を無視した仮定は妥当なものであったといえる。

表 3.6 解析結果(Case A210 : 投入反応度 1.6\$)

解法	温度	$P_{max}[\text{W}]$ (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	中心での 積分出力密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	中心での 温度 [°C] (t=0.5sec)
Point	空間分布あり	1.6E+8 (0.180)	0.032	6.4E+6	2.0E+2	76
Point	炉内で平均化 $W=1.0$	2.4E+8 (0.184)	0.032	9.7E+6	1.1E+2	52
Point	炉内で平均化 $W=1.5$	1.6E+8 (0.180)	0.032	6.5E+6	7.2E+1	52
IQS	空間分布あり	1.6E+8 (0.180)	0.032	6.5E+6	2.1E+2	77

表 3.7 解析結果(Case A250 : 投入反応度 2.0\$)

解法	温度	$P_{max}[\text{W}]$ (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	中心での積分 出力密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	中心での 温度 [°C] (t=0.5sec)
Point	空間分布あり	3.8E+8 (0.122)	0.020	9.3E+6	2.9E+2	98
Point	炉内で平均化 $W=1.0$	5.8E+8 (0.125)	0.020	1.4E+8	1.5E+2	64
Point	炉内で平均化 $W=1.5$	3.9E+8 (0.122)	0.020	9.5E+6	1.0E+2	64
IQS	空間分布あり	3.8E+8 (0.122)	0.020	9.5E+6	2.9E+2	100

表 3.8 解析結果(Case A260 : 投入反応度 1.3\$)

解法	温度	$P_{max}[\text{W}]$ (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	中心での積分 出力密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	中心での 温度 [°C] (t=0.5sec)
Point	空間分布あり	3.7E+7 (0.342)	0.070	3.1E+6	1.0E+2	51
Point	炉内で平均化 $W=1.0$	5.5E+7 (0.350)	0.070	4.7E+6	5.3E+1	39
Point	炉内で平均化 $W=1.5$	3.7E+7 (0.342)	0.070	3.2E+6	3.6E+1	39
IQS	空間分布あり	3.7E+7 (0.342)	0.070	3.2E+6	1.0E+2	55

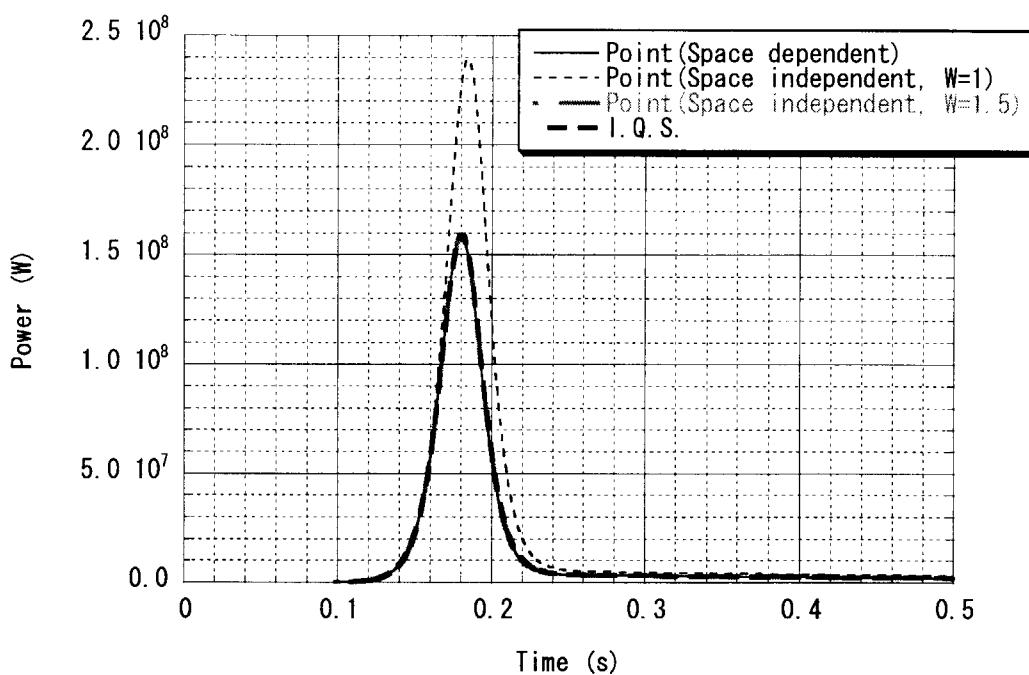


図 3.2 出力の時間変化 (Case A210 : 投入反応度1.6\$)

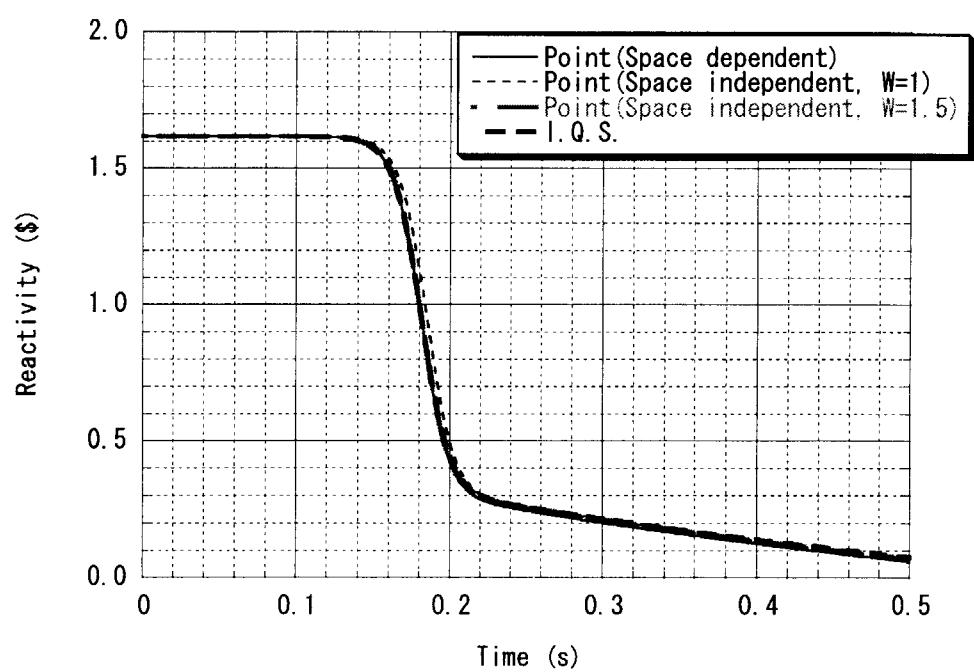


図 3.3 反応度の時間変化 (Case A210 : 投入反応度1.6\$)

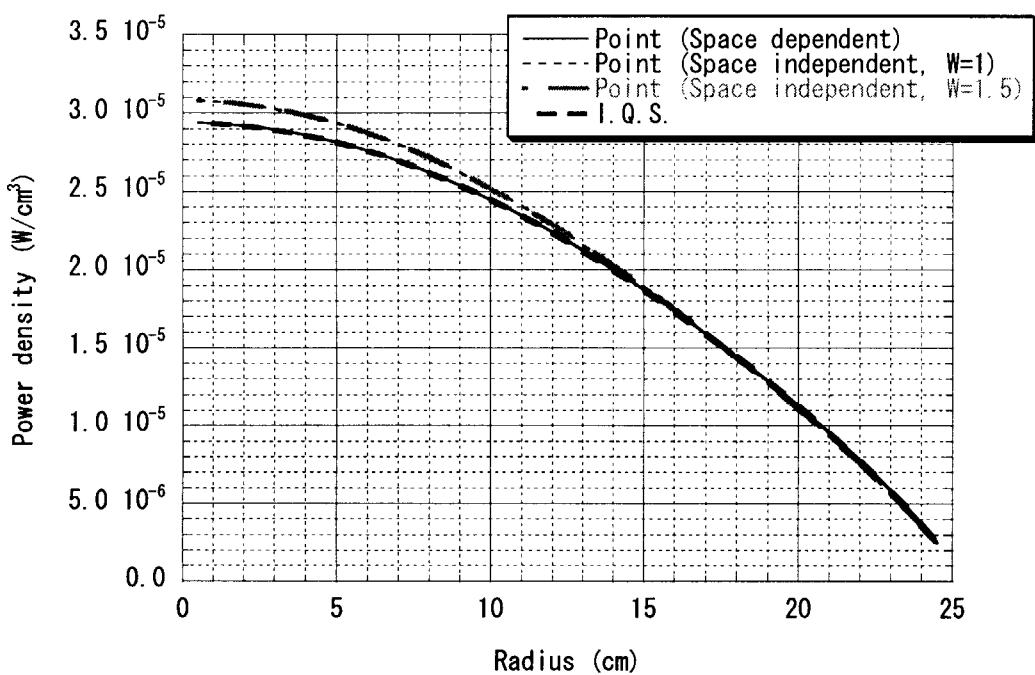


図 3.4 炉心中心高さでの半径方向の出力密度分布  
(Case A210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5s)

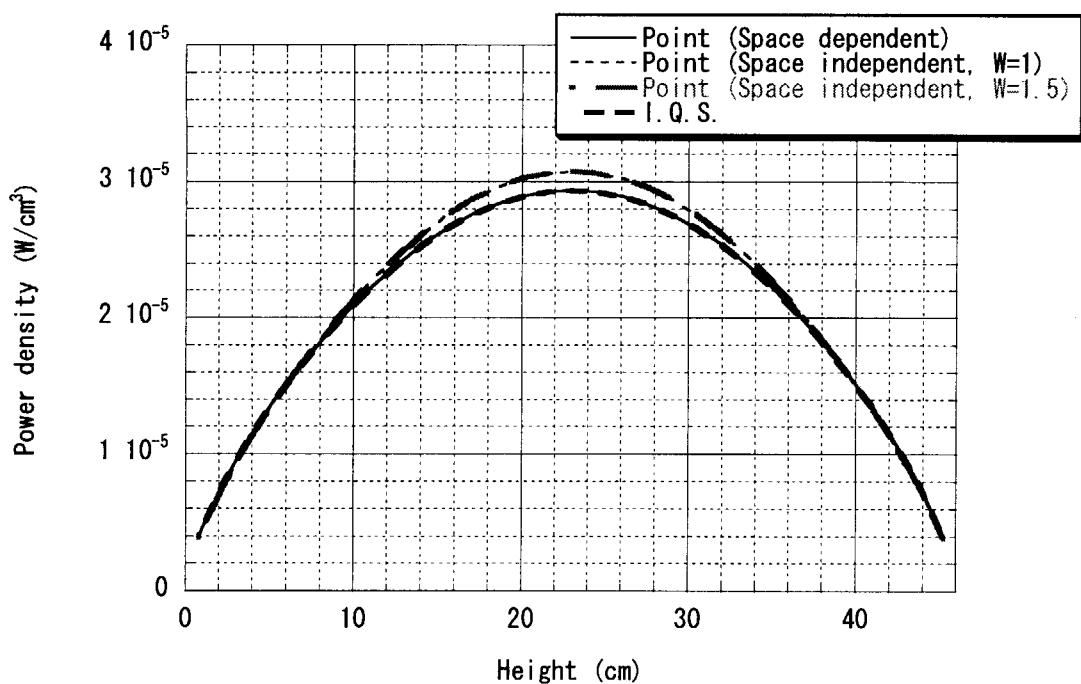


図 3.5 炉心中心軸での高さ方向の出力密度分布  
(Case A210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5sec)

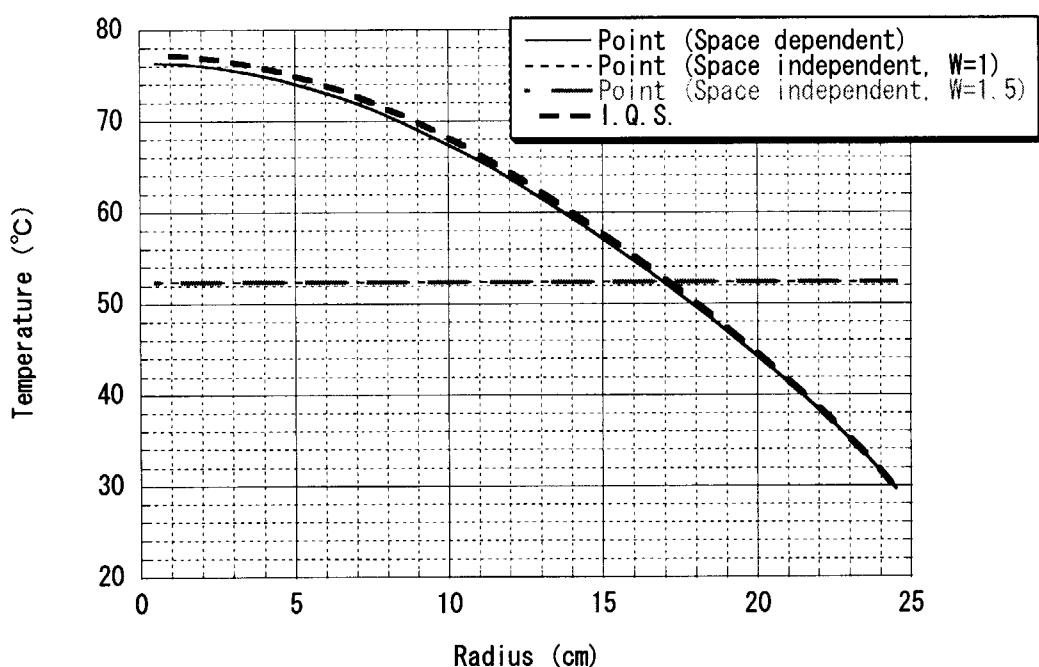


図 3.6 炉心中心高さでの半径方向の溶液温度分布  
(Case A210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5sec)

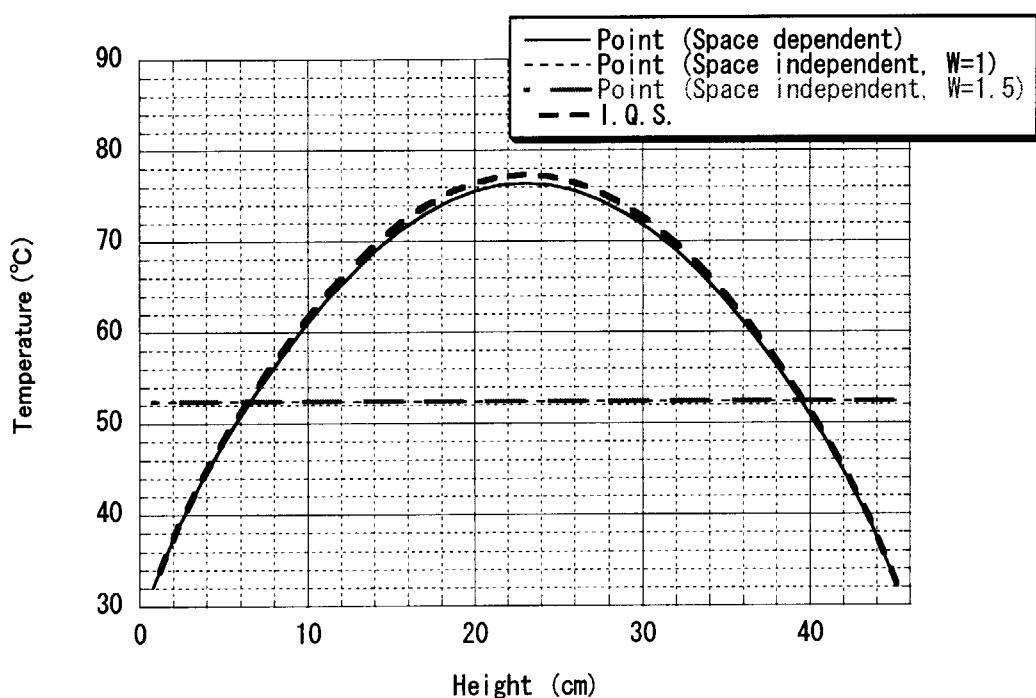


図 3.7 炉心中心軸での高さ方向の溶液温度分布  
(Case A210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5sec)

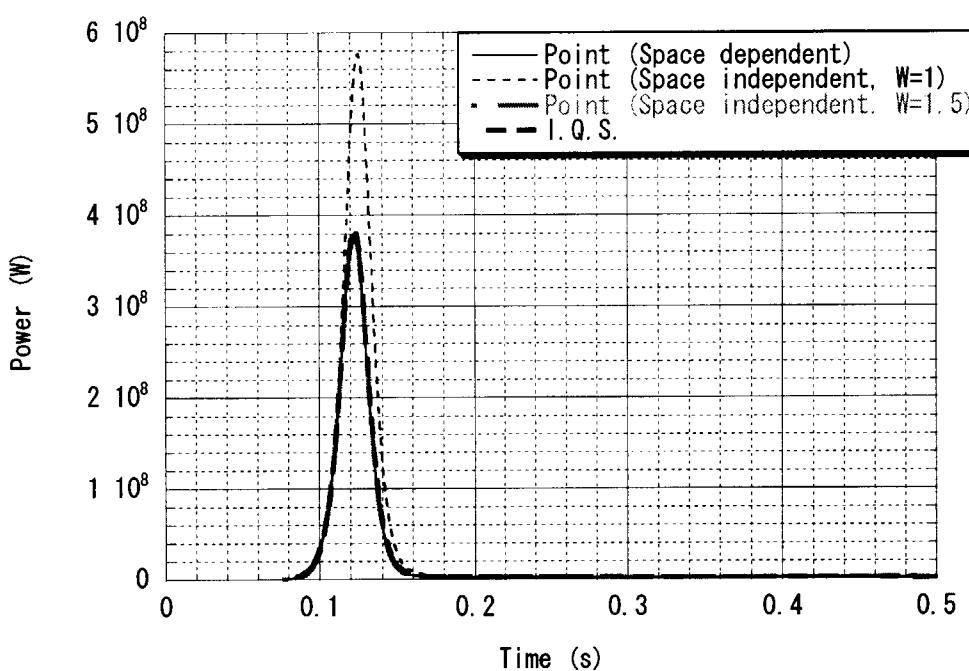


図 3.8 出力の時間変化 (Case A250 : 投入反応度2.0\$)

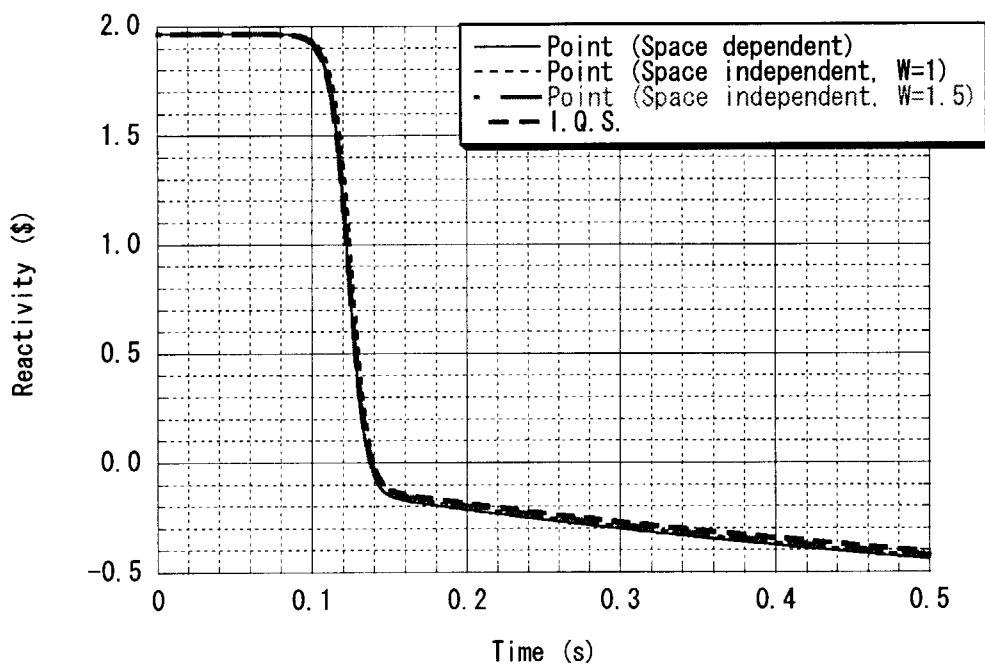


図 3.9 反応度の時間変化 (Case A250 : 投入反応度2.0\$)

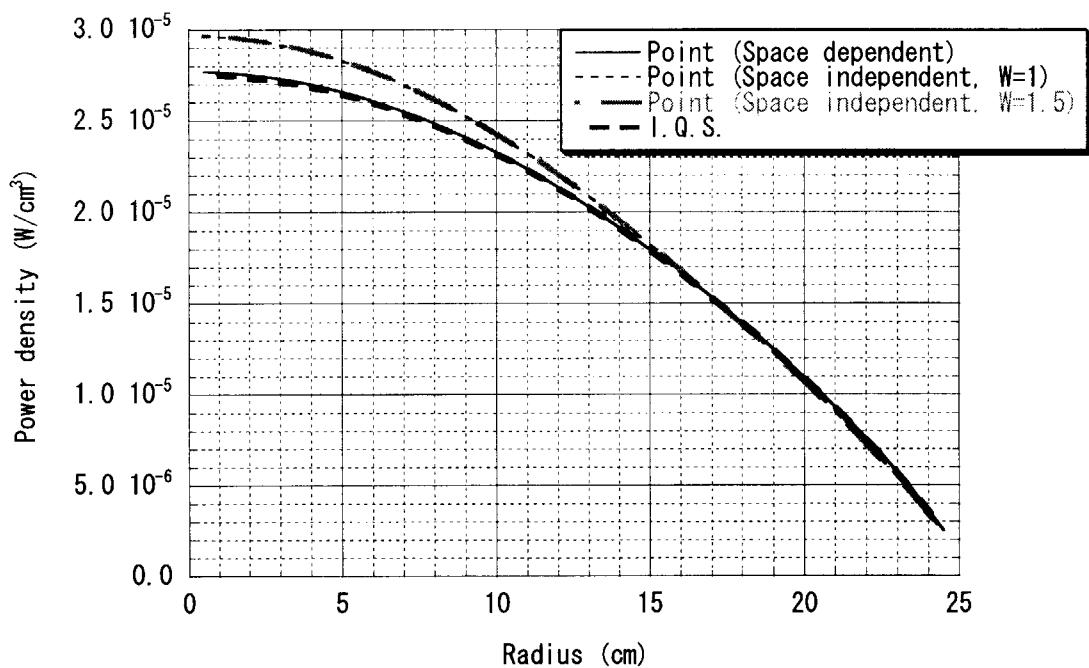


図 3.10 炉心中心高さでの半径方向の出力密度分布  
(Case A250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

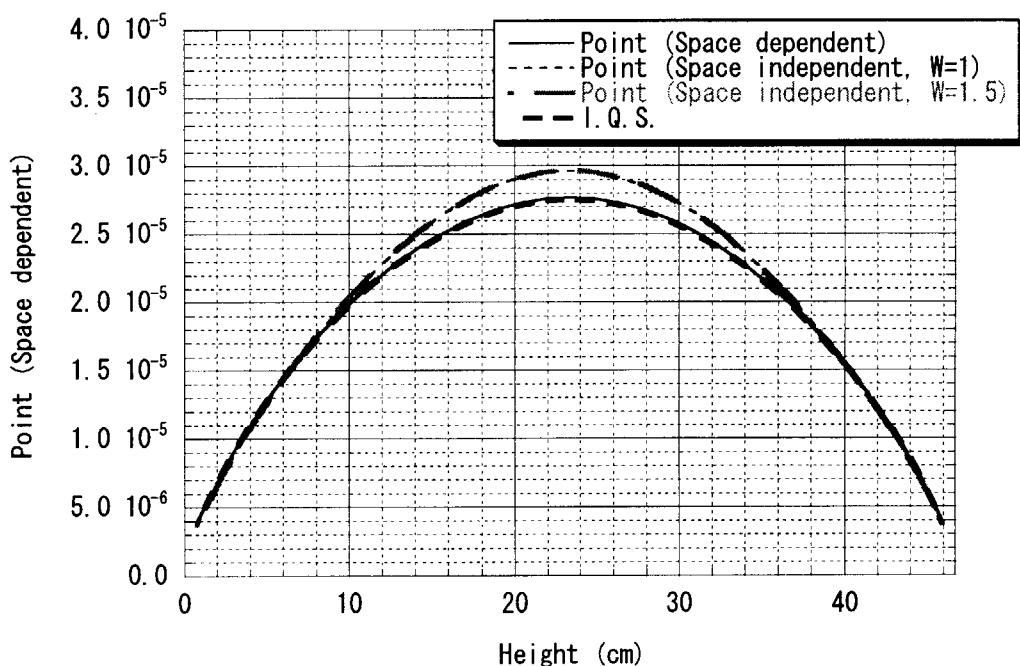


図 3.11 炉心中心軸での高さ方向の出力密度分布  
(Case A250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

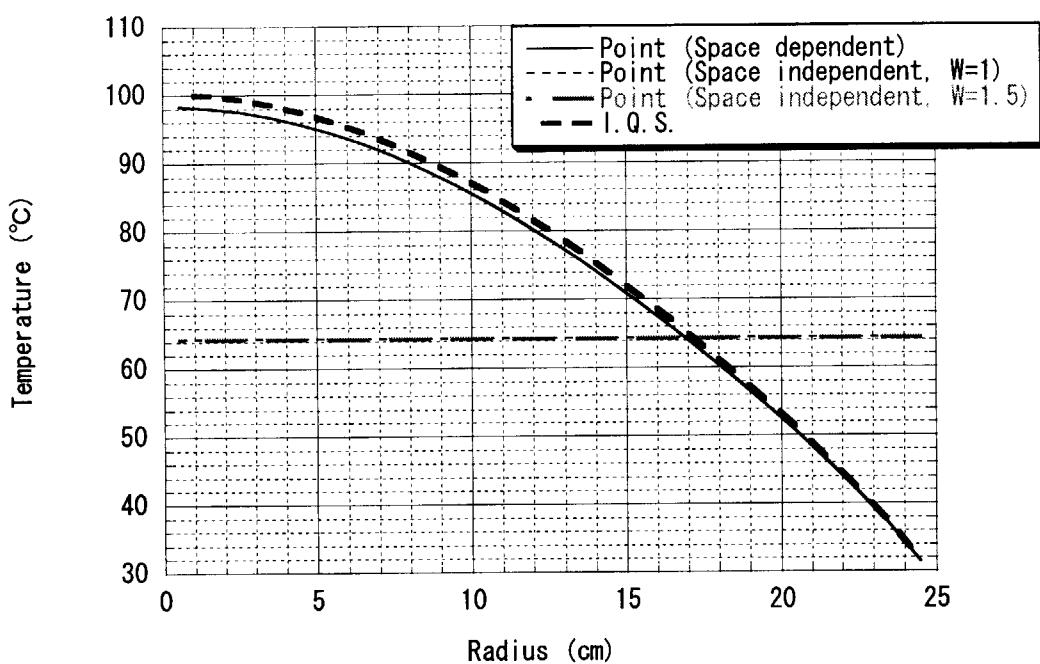


図 3.12 炉心中心高さでの半径方向の溶液温度分布  
(Case A250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

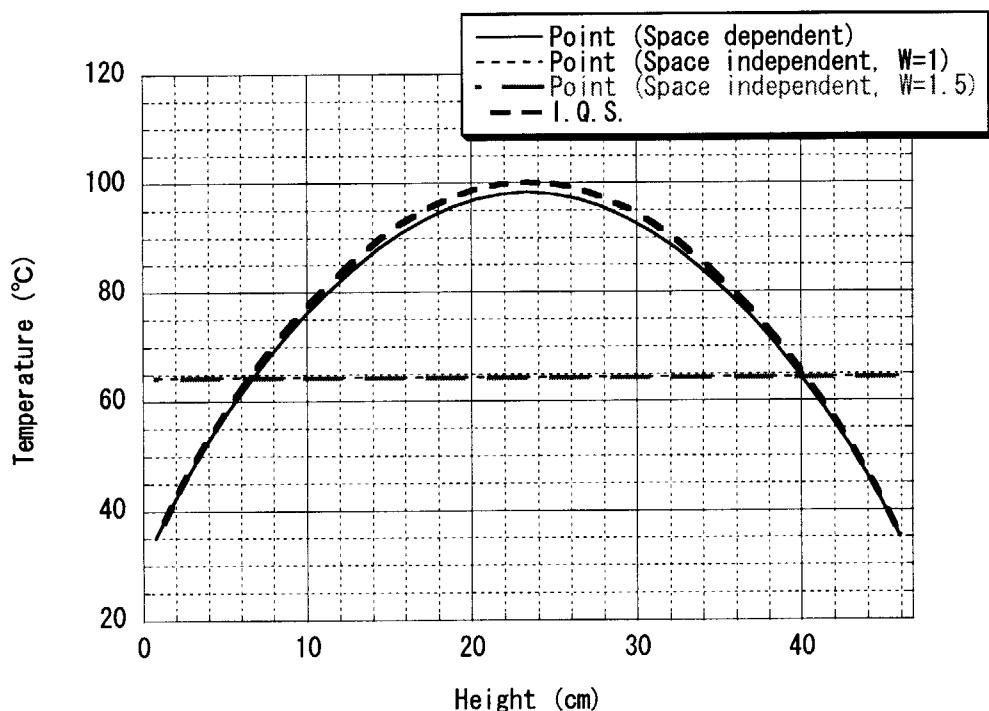


図 3.13 炉心中心軸での高さ方向の溶液温度分布  
(Case A250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

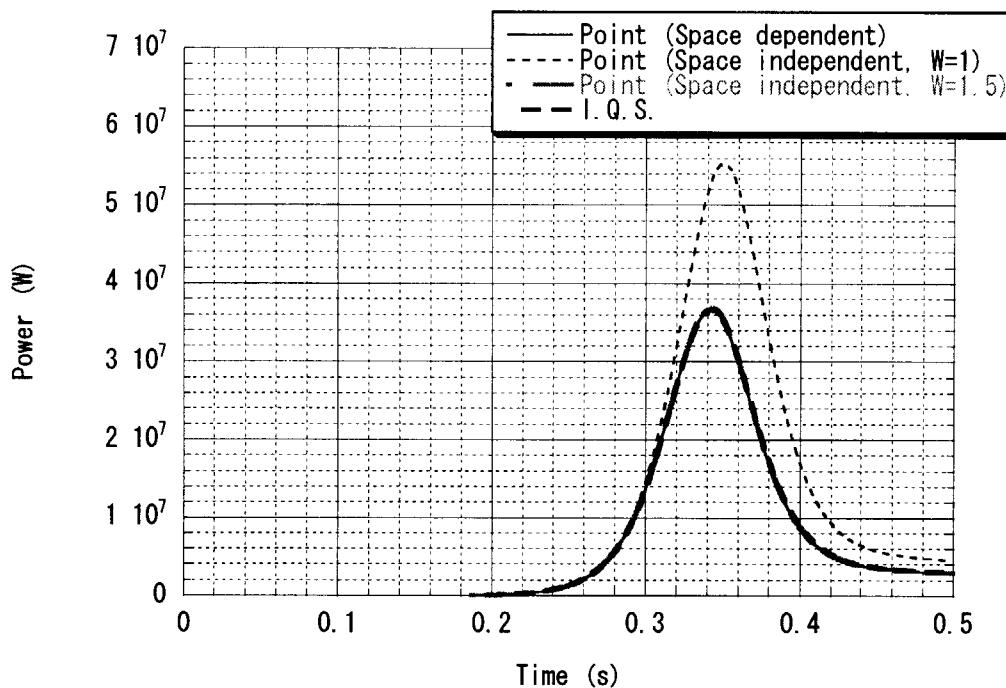


図 3.14 出力の時間変化 (Case A260 : 投入反応度1.3\$)

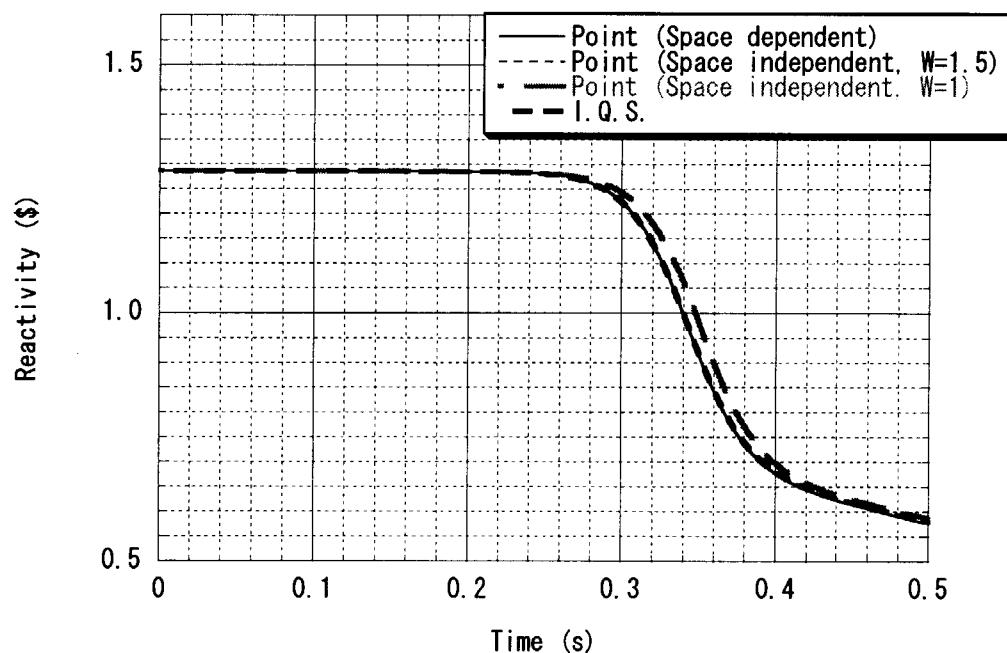


図 3.15 反応度の時間変化 (Case A260 : 投入反応度1.3\$)

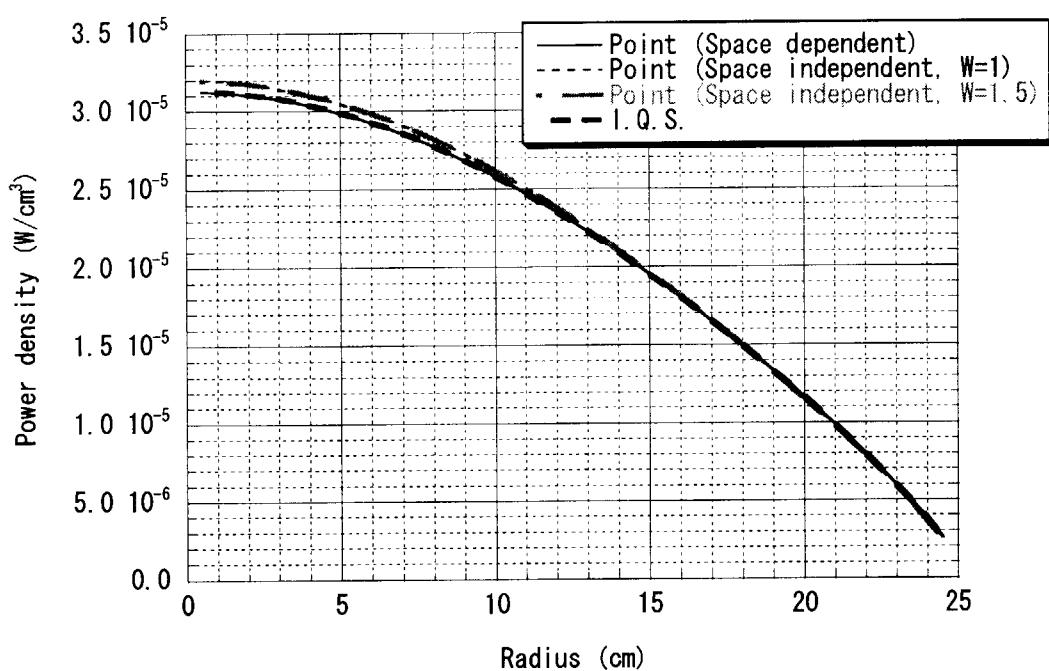


図 3.16 炉心中心高さでの半径方向の出力密度分布  
(Case A260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

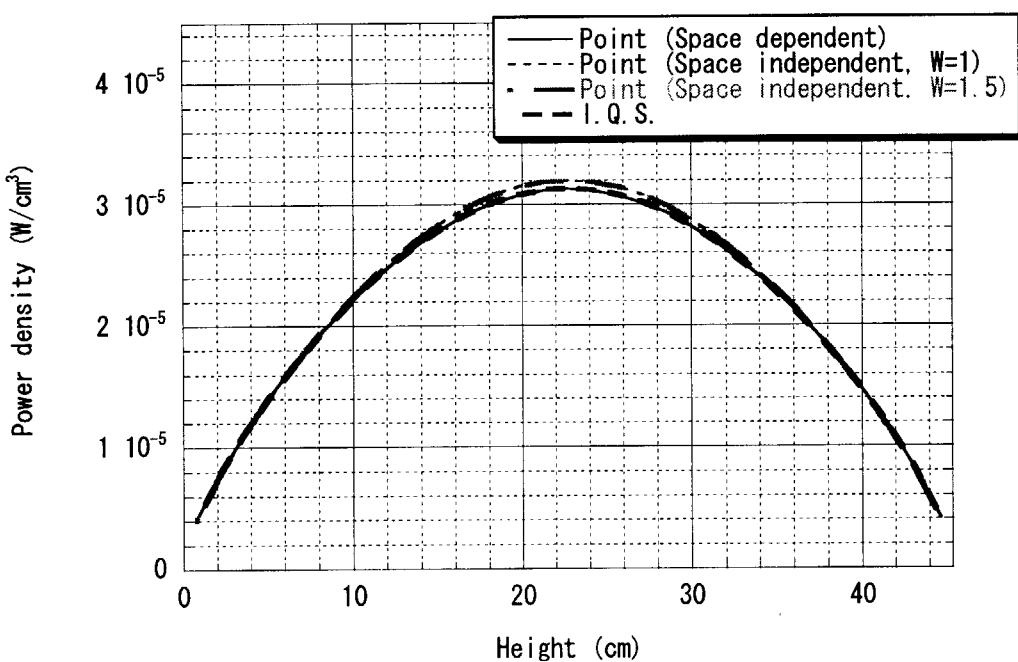


図 3.17 炉心中心軸での高さ方向の出力密度分布  
(Case A260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

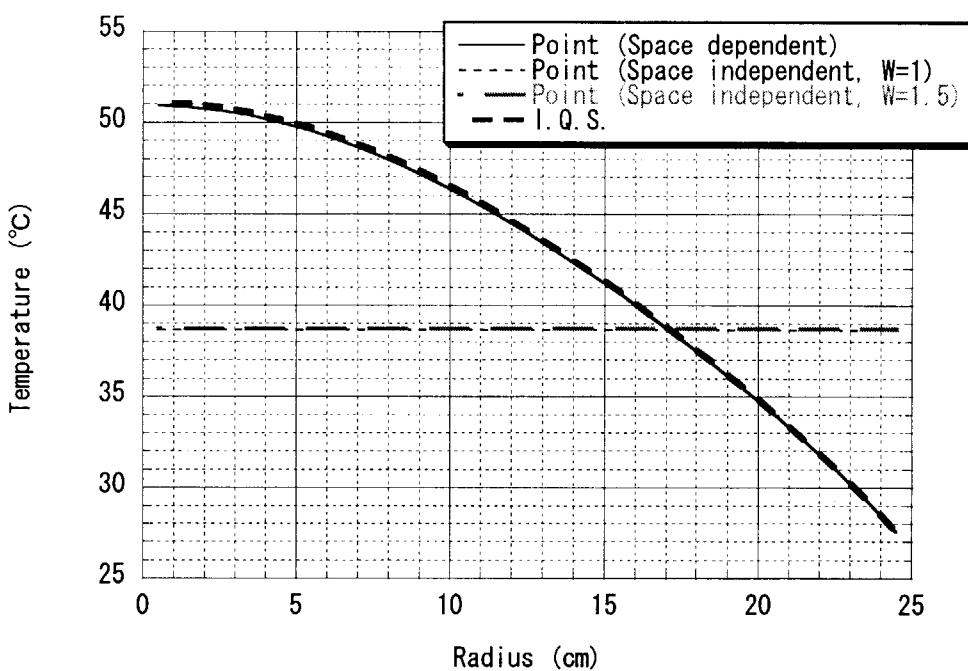


図 3.18 炉心中心高さでの溶液温度の半径方向分布  
(Case A260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

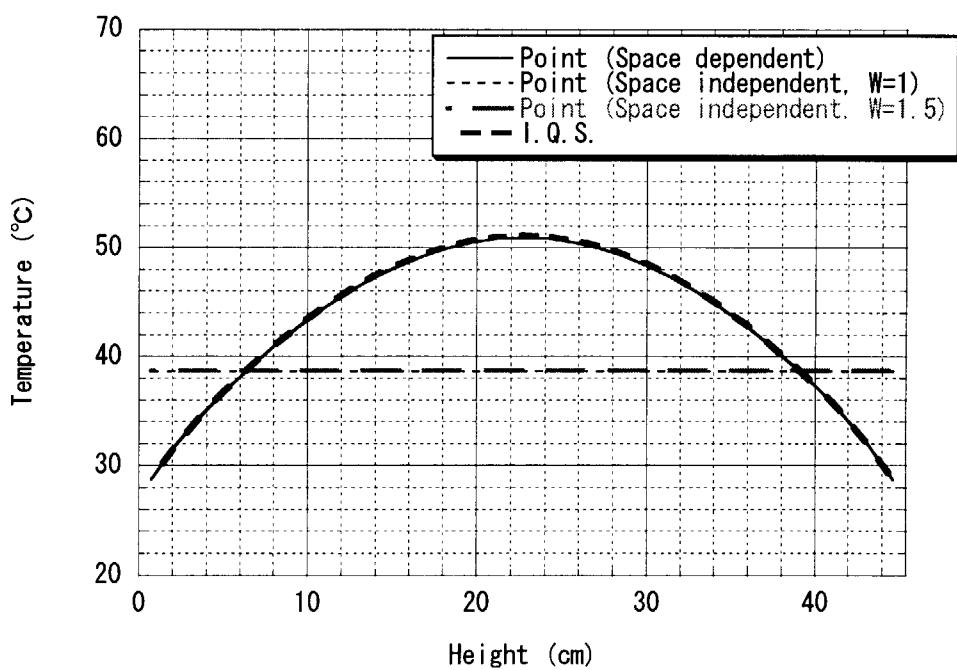


図 3.19 炉心中心軸での高さ方向の溶液温度分布  
(Case A260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

### 3.4.2 温度フィードバック効果とボイド効果を考慮した解析

#### 3.4.2.1 解析条件

つづいて、温度フィードバック効果に加えてボイド効果もとりいれた場合の解析を行った。

解析条件は、ボイド効果を取り入れている以外は、「3.4.1.1 解析条件」で述べた温度フィードバックのみを考慮した場合の解析条件、方法と同じである。燃料溶液や炉心体系も温度フィードバック効果のみを考慮した解析の場合と全く同じである。

本解析では、ボイド効果はエネルギーモデル<sup>13)</sup>によって考慮した。すなわち、各タイムステップでのボイド率（ボイド体積割合） $f$ を以下の式によって求めた。

$$f = \begin{cases} 0, & e \leq e_0 \text{ のとき} \\ \frac{kV_c}{2}(e - e_0)^2, & e > e_0 \text{ のとき} \end{cases}$$

ここで、

- $V_c$  : 臨界体積( $\text{m}^3$ )
- $e_0$  : 飽和エネルギー密度( $\text{J}/\text{m}^3$ )
- $k$  : 定数( $\text{m}^3/\text{J}^2$ )
- $e$  : そのタイムステップまでの積分出力密度( $\text{J}/\text{m}^3$ )

である。

得られたボイド体積割合 $f$ からマクロ断面積 $\Sigma$ を以下の式によって補正し、補正後のマクロ断面積 $\Sigma'$ を求めボイド効果を取り入れた。

$$\Sigma' = (1 - f)\Sigma$$

これはボイドの体積割合に応じて物質の密度を減少させたことに相当する。この効果によって溶液の無限増倍率は変化しないが、拡散近似において拡散定数が増加することになり、結果として中性子の漏れの増加をもたらすことになる。実際の現象ではボイドの生成と同時に溶液の液面が上昇し炉心体積が増加する。これは中性子の漏れの増加を抑制する効果となることが考えられるが今回の解析ではこの液面上昇の効果は取り入れられていない。

エネルギーモデルで用いたパラメータは文献値<sup>13)</sup>として、CRAC05 実験で得られた値を用いた。用いたパラメータを表 3.9 に示す。

ボイド効果を考慮した解析においても、

- (1) 一点炉近似解析で、初期状態の中性子束分布を保存し、炉心の空間メッシュでの各点での温度上昇を計算しこれに中性子束と随伴中性子束を用いて反応度を求める方法(Point, Space dependent)、
- (2) 一点炉近似解析で、初期状態の中性子束分布を保存し、炉心の空間メッシュでの各点で

の温度上昇を計算し、炉心体積で平均化した温度を炉心全体の温度として反応度を求める方法(Point, Space independent W=1)、

- (3) 一点炉近似解析で、初期状態の中性子束分布を保存し、炉心の空間メッシュでの各点での温度上昇を計算し、炉心体積で平均化した温度上昇に重み W=1.5 をかけた値を溶液全体の仮想的な温度上昇として反応度を求める方法(Point, Space independent, W=1.5)、
- (4) 改良準静的解法(I.Q.S.)で中性子束の時間変化及び温度の空間依存性を取り入れた解析

の 4 つの解析方法による比較を行った。(1),(4)では空間メッシュの各点での積分出力密度からボイド体積割合を求め、空間メッシュの各点でマクロ断面積の補正を行った。(2),(3)では炉内の平均出力密度からボイド体積割合を求め、炉内全領域で同じマクロ断面積の補正を行った。

温度フィードバックのみを考慮した解析では過渡状態での中性子束分布の変化の効果は小さく(1)と(4)の結果は常にほぼ一致していた。このため、本解析において(1)と(4)の解析結果を比較することにより、ボイドの生成による中性子束分布の変化の効果が解析結果に及ぼす影響を知ることができる。また、温度フィードバック効果のみを考慮した解析では、(3)の方法による解析結果は(4)の空間依存性を正確に取り扱った場合と常にほぼ一致していた。また、今回解析に用いた CRAC05 実験によるエネルギーモデルパラメータは炉心平均値として求められたものである。このため、このパラメータは積分出力を炉心平均した場合に用いるのが妥当である。以上のことから(3)の解析方法による結果がボイド効果を取り入れた場合の解析として実現象にもっとも近い結果を得ることができるということができる。このことから、温度フィードバック効果のみを考慮した場合の(3)での解析方法による結果と、本解析による(3)の解析方法による結果を比較することでボイドの生成による効果を検討することができる。

表 3.10 にボイド効果を考慮した本解析での解析ケースを示す。解析は基準ケースと同じ半径の炉心に対して投入反応度を変えて行った。投入反応度は基準ケース(1.6\$)、温度フィードバックのみを考慮した場合と同様の 2\$, 1.3\$ のケースに加えて更に反応度を投入した場合(2.5\$, 2.7\$)に対して行った。なお、Case 番号は温度フィードバックのみを考慮した解析では A で始まっていたのに対し B で始まり、同じ番号をもつ解析はボイド効果の考慮の有無以外は同じ条件での解析である。

表 3.9 エネルギーモデルで用いたパラメータ

臨界体積 $V_c$ (m <sup>3</sup> )	5.60E-2
飽和エネルギー $E_0$ (J)	1.13E+6
飽和エネルギー密度 $e_0$ (J/m <sup>3</sup> )	2.02E+7
定数 $k$ (m <sup>3</sup> /J <sup>2</sup> )	5.0E-17

表 3.10 ボイド効果と温度フィードバック効果を考慮した解析での解析ケース

Case	炉心半径[cm]	炉心高さ[cm]	投入反応度[\$]	備考
B210	25.0	46.0	1.6	(基準ケース)
B250	25.0	46.7	2.0	(反応度 2 \$)
B260	25.0	45.4	1.3	(反応度 1.3 \$)
B280	25.0	47.7	2.5	(反応度 2.5 \$)
B290	25.0	48.2	2.7	(反応度 2.7 \$)

### 3.4.2.1 解析結果

解析によって得られた結果として各ケースの、パルスの最大出力とその時刻、パルスの半値幅、反応度投入後 0.5 秒までの、積分出力、炉心中心での積分出力密度、炉心中心での溶液温度、中心でのボイド率を表 3.11 から表 3.15 に示す。表には先に述べた 4 種類の解析方法での結果を示した。なお、一点炉近似解法(Point)で温度を炉内で平均化した場合は、積分出力密度、及びボイド率は炉心中心での値は炉内平均値を表している。また、中心温度は、炉出力による温度上昇に W を掛けた値を仮想的な温度上昇として求めた温度を示している。また、各ケースの、炉心出力の時間変化、反応度の時間変化、反応度投入後 0.5 秒( $t=0.5\text{sec}$ )での、炉心中心高さでの半径方向の出力分布、炉心中心軸での高さ方向の出力密度分布、炉心中心高さでの半径方向の溶液温度分布、炉心中心軸での高さ方向の溶液温度分布、炉心中心高さでの半径方向のボイド体積割合の分布、炉心中心軸での高さ方向のボイド体積割合の分布を、図 3.20 から図 3.59 に示した。なお、実効遅発中性子割合は各ケースとも 0.0075、平均中性子世代時間は  $4.4 \times 10^{-5} (\text{s})$  (Case B210, B250, B260) または  $4.3 \times 10^{-5} (\text{s})$  (Case B280, B290) であった。

初めに、先の解析方法の説明で述べた、

- (1) 一点炉近似解析で、初期状態の中性子束分布を保存し、炉心の空間メッシュでの各点での温度上昇を計算しこれに中性子束と随伴中性子束を用いて反応度を求める方法(Point, Space dependent),
- (4) 改良準静的解法(I.Q.S.)で中性子束の時間変化及び温度の空間依存性を取り入れた解析

の二つの解析方法による結果について検討する。図 3.20 から図 3.59 に示されたそれぞれの結果をみると、投入反応度が 1.3 \$ (B260), 1.6 \$ (B210) では両者の結果の違いはほとんど無いが、投入反応度が 2 \$ 以上(B250,B280,B290)になるとパルス後の出力密度分布、温度分布、ボイド体積割合分布に若干の違いが生じているのがわかる。傾向としては、中性子束の空間分布を取り扱わない (1) の場合、パルス後の中心部の出力密度は大きく、溶液温度は小さく、ボイド体積割合は小さくなることが分かる。これは、表 3.11 から表 3.15 に示された炉心全体の積分出力にはいずれのケースも (1) と (4) の結果には違いが現れていないが、実際には表の有効数字以下の範囲で若干 (1) の方法による解析の結果が小さくなっていることに起因している。これは

中性子束分布がボイドの生成によりわずかながらフラットになったことによる。なお、(4)の方が中心部の出力密度が若干小さくなっているのは、ボイドによる溶液密度減少のため中心部の核分裂性核種が密度も減少したためである。

以上のようにパルス後の各物理量の空間分布には(1)の解法と(4)の解法で若干の違いが現れたものの、表3.11から表3.15に示された物理量は両者の解法の間にはほとんど違いは生じていない。このことは、ボイドの効果により過渡状態の間に若干の中性子束分布に変化が生じるもの、パルスの最大出力、半値幅、積分出力といった物理量にはこの変化はほとんど影響を与えないことを示している。

解析条件で述べたように、今回使用したボイドのエネルギーモデルのパラメータはCRAC05実験で得られた炉心平均の値であるため、炉心内の各点の局所的なボイド率として使用して解析するためには何らかの補正係数が必要になる。これは、

- (2) 一点炉近似解析で、初期状態の中性子束分布を保存し、炉心の空間メッシュでの各点での温度上昇を計算し、炉心体積で平均化した温度上昇に重み  $W=1.5$  をかけた値を炉心全体の仮想的な温度上昇として反応度を求める方法(Point, Space independent,  $W=1.5$ )、
- (3) 改良準静的解法(I.Q.S.)で中性子束の時間変化及び温度の空間依存性を取り入れた解析

の二つの解析結果が大きく異なることから明らかである。この二つの解析結果を比較することによって補正係数を決定することは可能であるとは考えられるが、ボイドの生成によっては無限増倍率は変化せず、中心部での発熱量と体系からの中性子の漏れが変化することを考えると、ボイドによる反応度効果には体系の形状の依存性があることも考えられるので今回の解析結果のみからこの補正係数について議論することは困難である。

ボイド効果の考慮の有無による結果の違いを検討するため、表3.16、表3.17、表3.18に同じ解析条件（それぞれ、A210とB210、A250とB250、A260とB260）について(3) Point, Space independent,  $W=1.5$  の場合の解析結果を示した。また、図3.60から図3.65にはそれぞれのケースでの出力の時間変化と反応度の時間変化を示した。表3.16～表3.18から、パルスの最大出力とその時間、パルスの半値幅にはほとんど違いが生じていないものの反応度投入後0.5秒までの積分出力は投入反応度が大きいほど違いが生じているのが分かる。図3.60から図3.65を見ても、投入反応度が1.3\$(A260,B260)の時は両者にほとんど違いは生じていないが、投入反応度が1.6\$(A210,B210)、2.0\$(A250,B250)の際にはパルス後のテールの部分に違いが生じておりボイド効果を考慮するとパルス後のテール部分の反応度がより小さく、そのため出力も小さくなっているのが分かる。これが積分出力の違いとなっているものと考えられる。表には0.5秒までの積分出力を示しているので、パルス後のテールが長いとその分差異が大きくなることになり、純粹に第一パルスの積分出力だけを議論するならば第一パルス後までの積分出力で議論すべきであると考えられるが、第一パルスの終わりの定義を明確にすることが難しいので今回の解析ではこれまでの解析結果同様パルスの最大出力とその半値幅だけを示している。今回の解析の投入反応度の範囲では発生するボイドが少ないため効果があまり出ていないことが考え

られるが、ボイド効果を入れずにこれ以上投入反応度を大きくした解析を行うと炉心中心部での温度が 100°C を超えてしまうため、ボイド効果を取り入れない解析はこれ以上の投入反応度では行っていない。

表 3.11 解析結果(Case B210 : 投入反応度 1.6\$)

解法	温度・ ボイド率	$P_{max}[W]$ (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	中心での 積分出力 密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	中心での 温度 [°C] (t=0.5sec)	中心での ボイド率 [%] (t=0.5sec)
Point	空間分布あり	1.5E+8 (0.178)	0.028	5.2E+6	1.6E+2	67	2.9
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.0	2.3E+8 (0.182)	0.028	8.1E+6	9.0E+1	48	0.68
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5	1.6E+8 (0.180)	0.031	6.1E+6	6.7E+1	51	0.31
IQS	空間分布あり	1.5E+8 (0.178)	0.028	5.2E+6	1.6E+2	67	2.9

表 3.12 解析結果(Case B250 : 投入反応度 2.0\$)

解法	温度・ ボイド率	$P_{max}[W]$ (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	中心での 積分出力 密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	中心での 温度 [°C] (t=0.5sec)	中心での ボイド率 [%] (t=0.5sec)
Point	空間分布あり	3.3E+8 (0.120)	0.017	6.9E+6	2.2E+2	80	5.2
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.0	5.3E+8 (0.123)	0.017	1.1E+7	1.2E+2	56	1.4
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5	3.8E+8 (0.122)	0.019	8.4E+6	9.2E+1	60	0.72
IQS	空間分布あり	3.4E+9 (0.120)	0.017	7.1E+6	2.2E+2	81	5.3

表 3.13 解析結果(Case B260 : 投入反応度 1.3\$)

解法	温度・ボイド率	P <sub>max</sub> [W] (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	中心での 積分出力 密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	中心での 温度 [°C] (t=0.5sec)	中心での ボイド率 [%] (t=0.5sec)
Point	空間分布あり	3.6E+7 (0.341)	0.066	2.9E+6	9.4E+1	49	0.76
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.0	5.5E+7 (0.349)	0.067	4.5E+6	5.0E+1	38	0.13
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5	3.7E+7 (0.342)	0.070	3.1E+6	3.5E+1	39	0.032
IQS	空間分布あり	3.6E+7 (0.341)	0.066	2.9E+6	9.5E+1	49	0.78

表 3.14 解析結果(Case B280 : 投入反応度 2.5\$)

解法	温度・ ボイド率	P <sub>max</sub> [W] (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	中心での 積分出力 密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	中心での 温度 [°C] (t=0.5sec)	中心での ボイド率 [%] (t=0.5sec)
Point	空間分布あり	7.0E+8 (8.3E-2)	1.1E-2	9.0E+6	2.7E+2	95	8.5
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.0	1.1E+9 (8.5E-2)	1.1E-2	1.4E+7	1.5E+2	64	2.4
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5	8.2E+8 (8.4E-2)	1.1E-2	1.1E+7	1.2E+2	71	1.4
IQS	空間分布あり	7.1E+8 (8.3E-2)	1.1E-2	9.2E+6	2.7E+2	96	8.8

表 3.15 解析結果(Case B290 : 投入反応度 2.7\$)

解法	温度・ ボイド率	P <sub>max</sub> [W] (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	中心での 積分出力 密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	中心での 温度 [°C] (t=0.5sec)	中心での ボイド率 [%] (t=0.5sec)
Point	空間分布あり	9.3E+8 (7.2E-2)	9.3E-3	1.0E+7	2.9E+2	102	10.3
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.0	1.5E+9 (7.4E-2)	9.3E-3	1.6E+7	1.7E+2	68	3.0
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5	1.1E+9 (7.3E-2)	1.0E-2	1.3E+7	1.3E+2	76	1.8
IQS	空間分布あり	9.4E+8 (7.2E-2)	9.5E-3	1.0E+7	2.9E+2	103	10.6

表 3.16 ボイド効果を考慮しない場合とした場合の結果の比較  
(Case A210, B210 : 投入反応度 1.6\$)

解法	温度・ ボイド率	$P_{max}[W]$ (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	炉心平均 積分出力 密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	炉心平均 温度 [°C] (t=0.5sec)	炉心平均 ボイド率 [%] (t=0.5sec)
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5 <b>ボイド効果なし</b>	1.6E+8 (0.180)	0.032	6.5E+6	7.2E+1	52	—
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5 <b>ボイド効果あり</b>	1.6E+8 (0.180)	0.031	6.1E+6	6.7E+1	51	0.31

表 3.17 ボイド効果を考慮しない場合とした場合の結果の比較  
(Case A250, B250 : 投入反応度 2.0\$)

解法	温度・ ボイド率	$P_{max}[W]$ (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	炉心平均 積分出力 密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	炉心平均 温度 [°C] (t=0.5sec)	炉心平均 ボイド率 [%] (t=0.5sec)
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5 <b>ボイド効果なし</b>	3.9E+8 (0.122)	0.020	9.5E+6	1.0E+2	64	—
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5 <b>ボイド効果あり</b>	3.8E+8 (0.122)	0.019	8.4E+6	9.2E+1	60	0.72

表 3.18 ボイド効果を考慮しない場合とした場合の結果の比較  
(Case A260, B260 : 投入反応度 1.3\$)

解法	温度・ ボイド率	$P_{max}[W]$ (時間[s])	半値幅 [s]	積分出力 [J] (t=0.5sec)	炉心平均 出力密度 [J/cm <sup>3</sup> ] (t=0.5sec)	炉心平均 温度[°C] (t=0.5sec)	炉心平均 ボイド率 [%] (t=0.5sec)
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5 <b>ボイド効果なし</b>	3.7E+7 (0.342)	0.070	3.2E+6	3.6E+1	39	—
Point	炉内で平均化 W(温度)=1.5 <b>ボイド効果あり</b>	3.7E+7 (0.342)	0.070	3.1E+6	3.5E+1	39	0.032

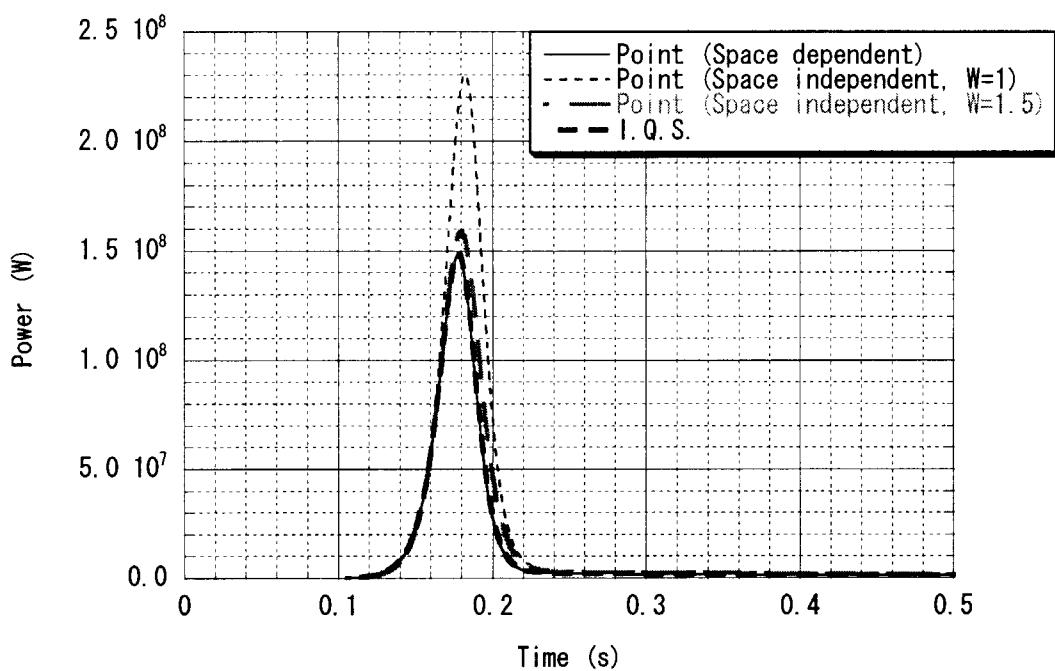


図 3.20 出力の時間変化 (Case B210 : 投入反応度1.6\$)

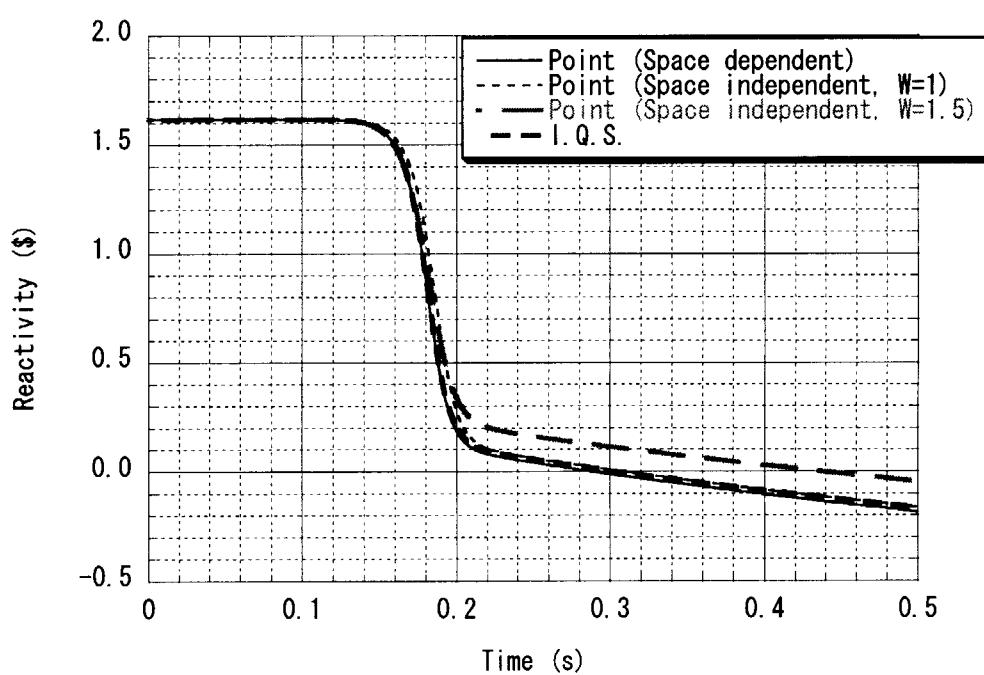


図 3.21 反応度の時間変化 (Case B210 : 投入反応度1.6\$)

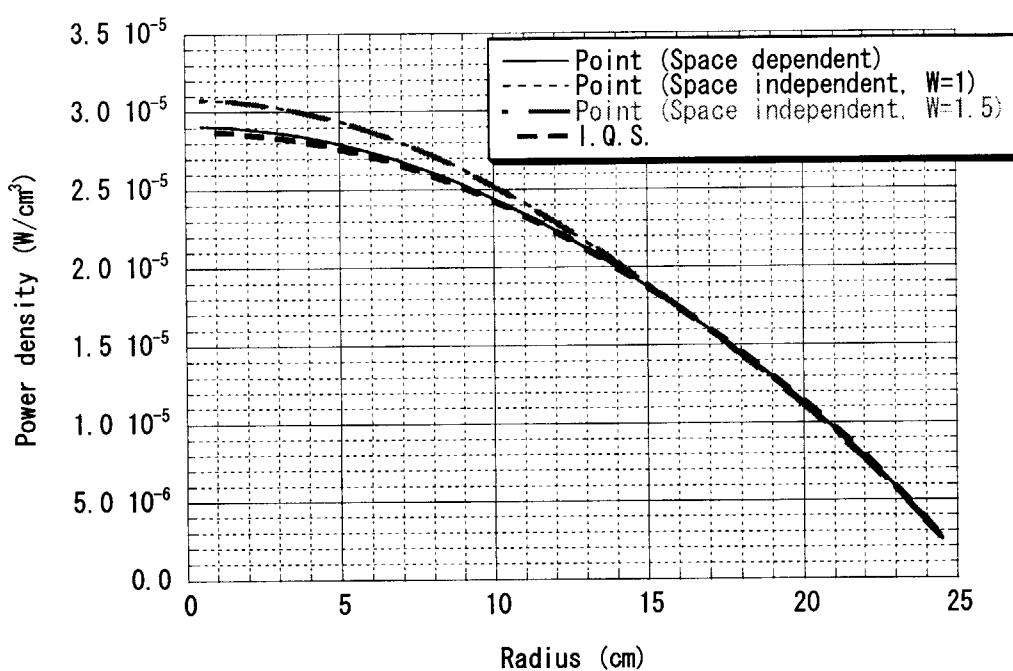


図 3.22 炉心中心高さでの半径方向の出力密度分布  
(Case B210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5sec)

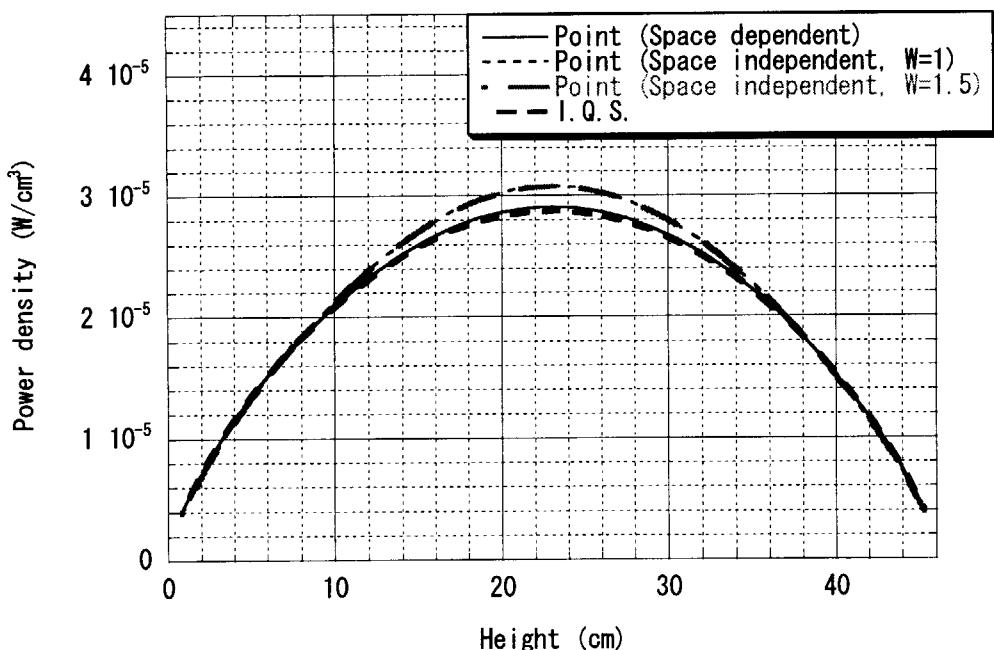


図 3.23 炉心中心軸での高さ方向の出力密度分布  
(Case B210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5sec)

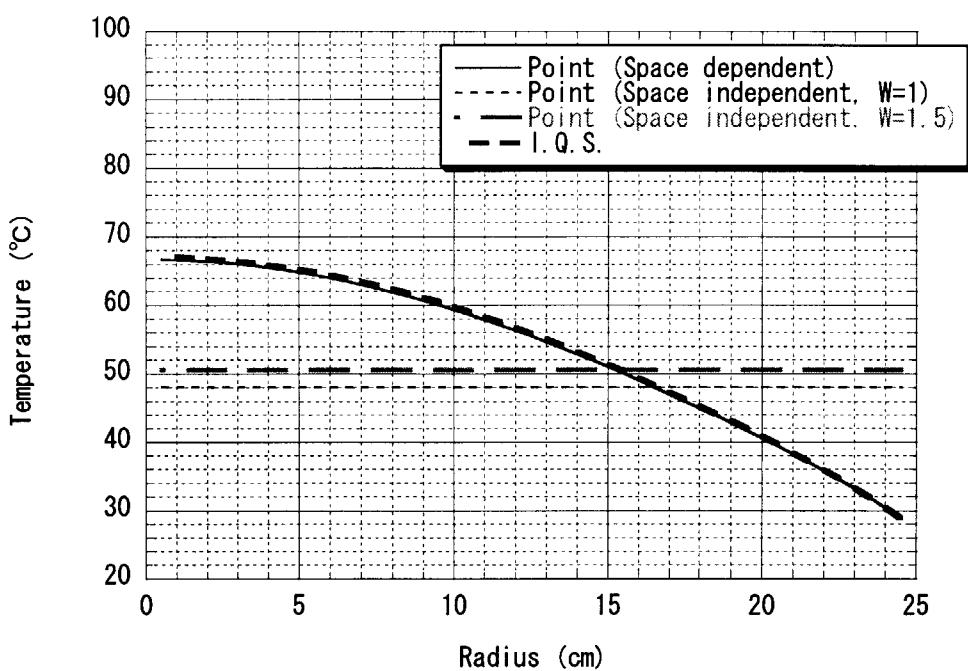


図 3.24 炉心中心高さでの半径方向の溶液温度分布  
(Case B210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5sec)

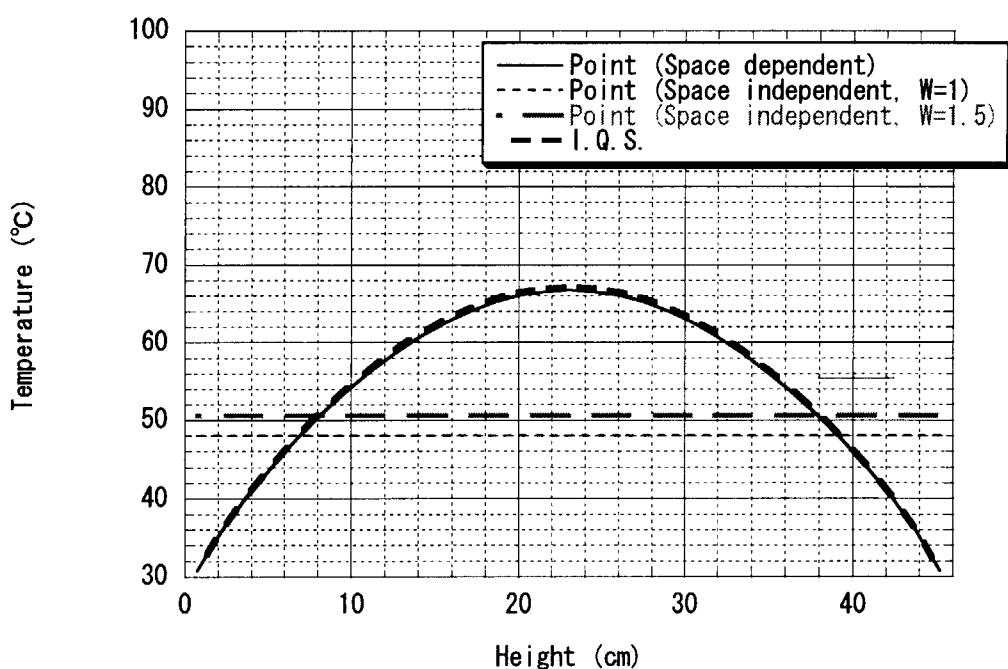


図 3.25 炉心中心軸での高さ方向の溶液温度分布  
(Case B210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5sec)

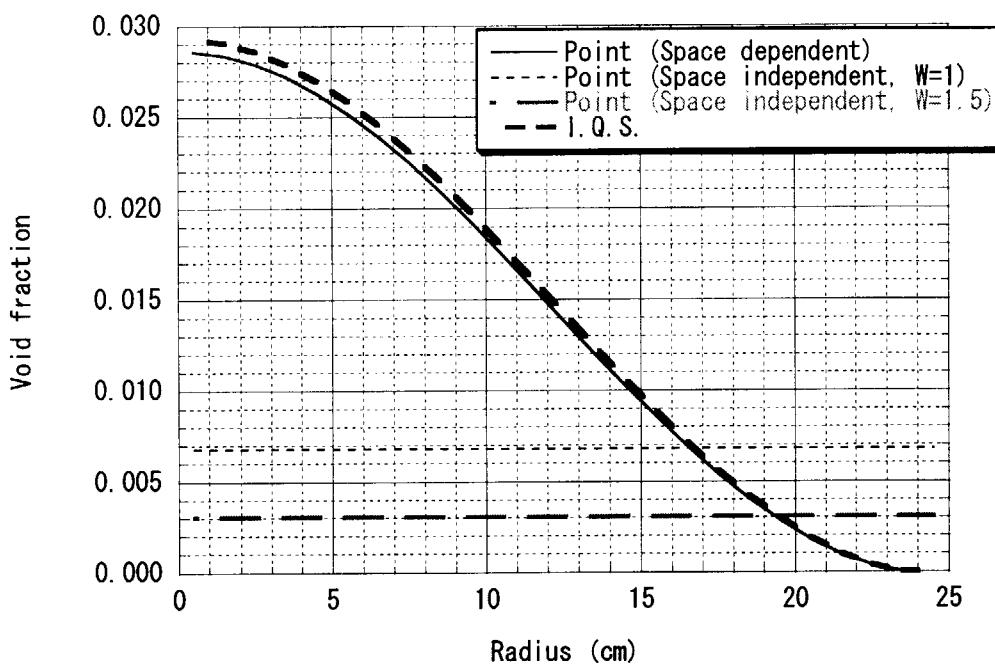


図 3.26 炉心中心高さでの半径方向のボイド体積割合分布  
(Case B210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5sec)

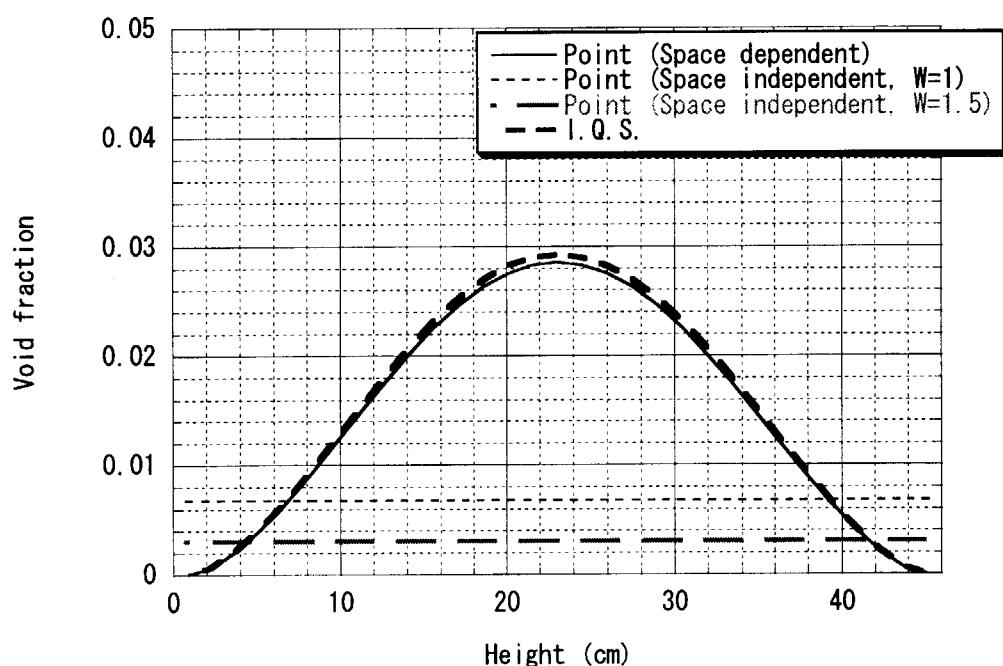


図 3.27 炉心中心軸での高さ方向のボイド体積割合分布  
(Case B210 : 投入反応度1.6\$, t=0.5sec)

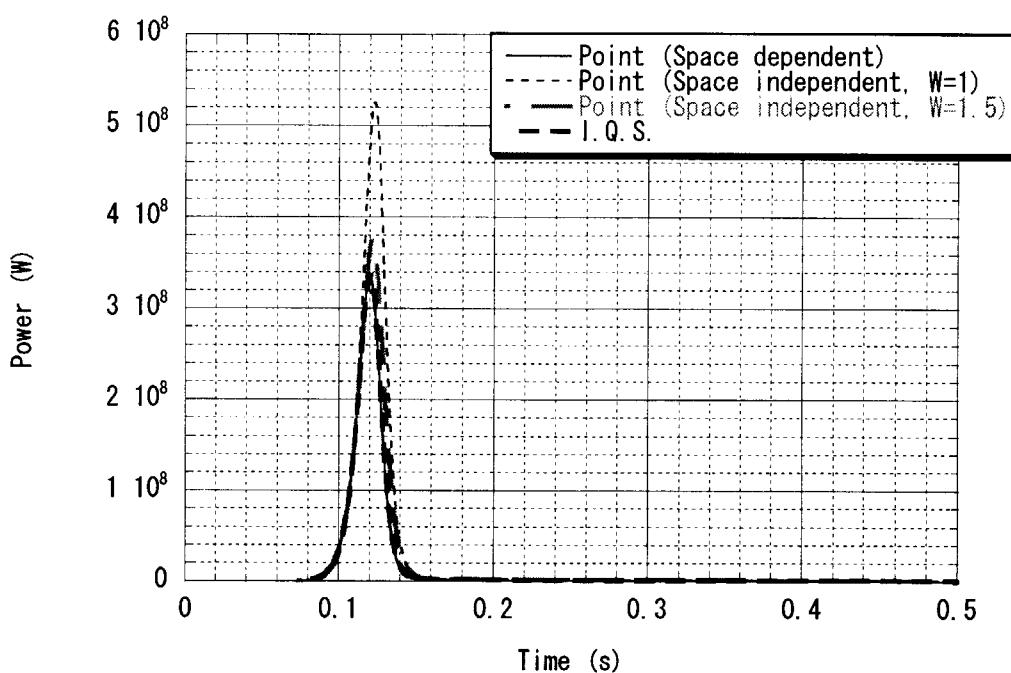


図 3.28 出力の時間変化 (Case B250 : 投入反応度2.0\$)

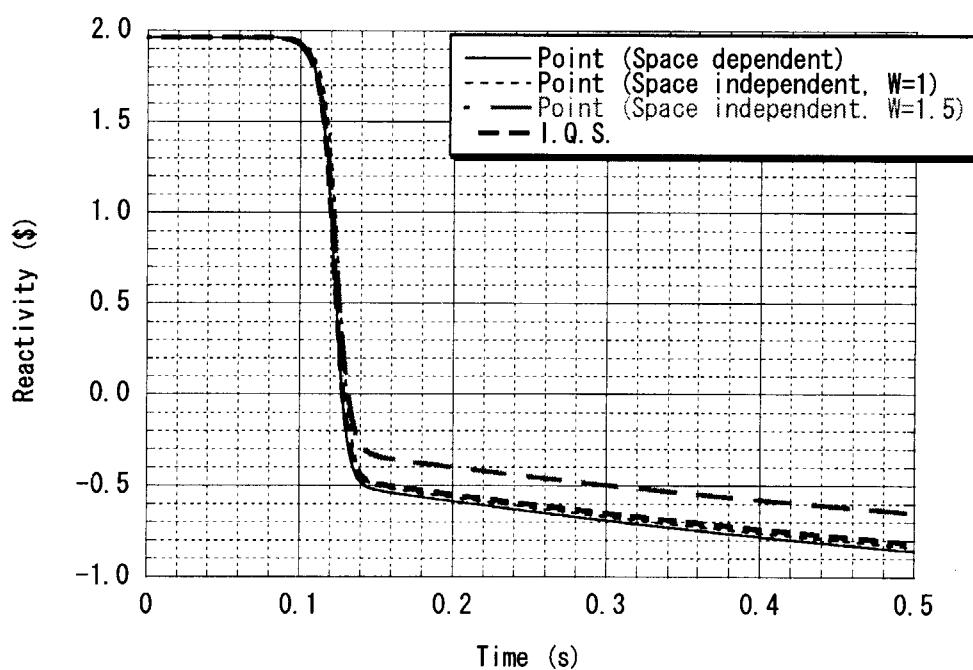


図 3.29 反応度の時間変化 (Case B250 : 投入反応度2.0\$)

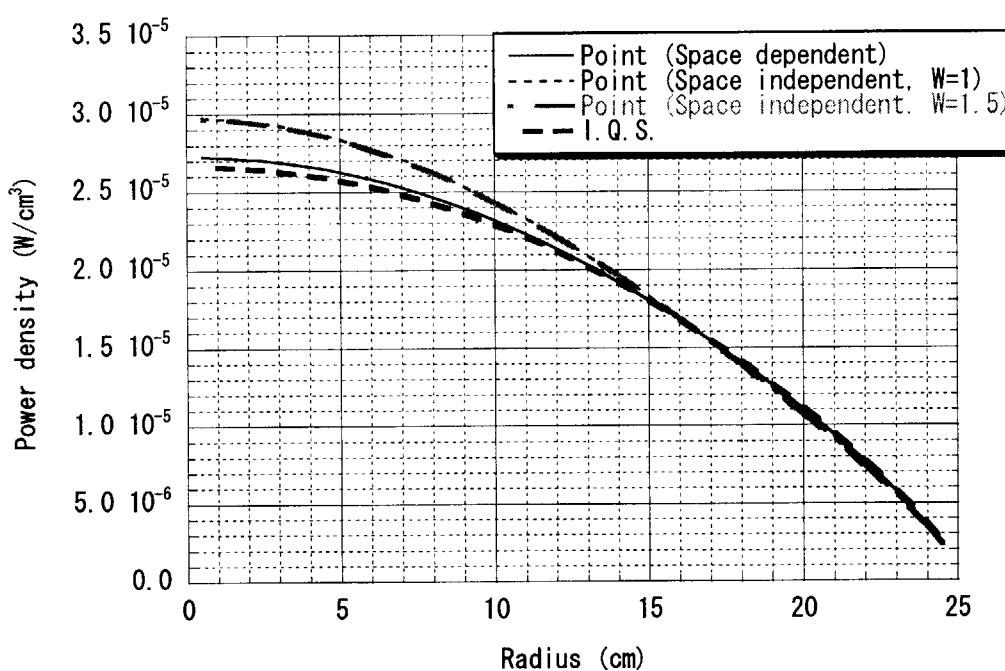


図 3.30 炉心中心高さでの半径方向の出力密度分布  
(Case B250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

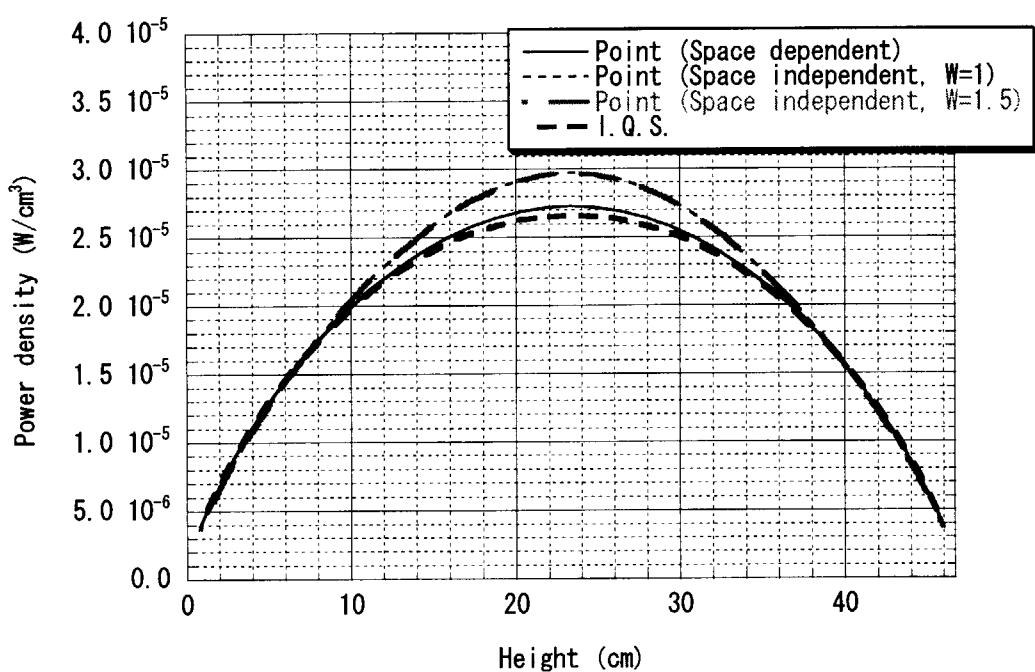


図 3.31 炉心中心軸での高さ方向の出力密度分布  
(Case B250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

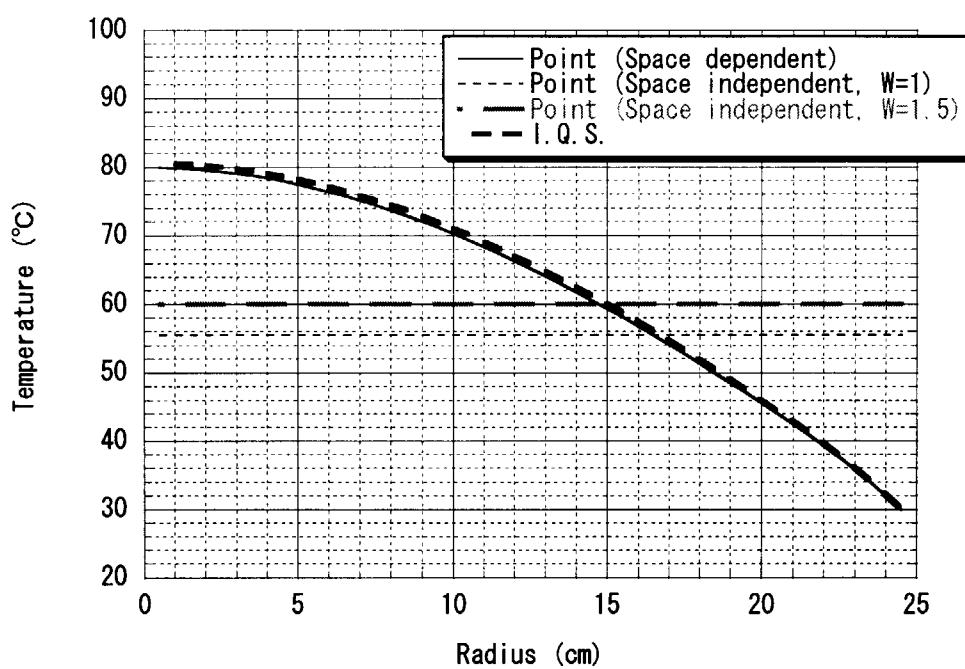


図 3.32 炉心中心高さでの半径方向の溶液温度分布  
(Case B250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

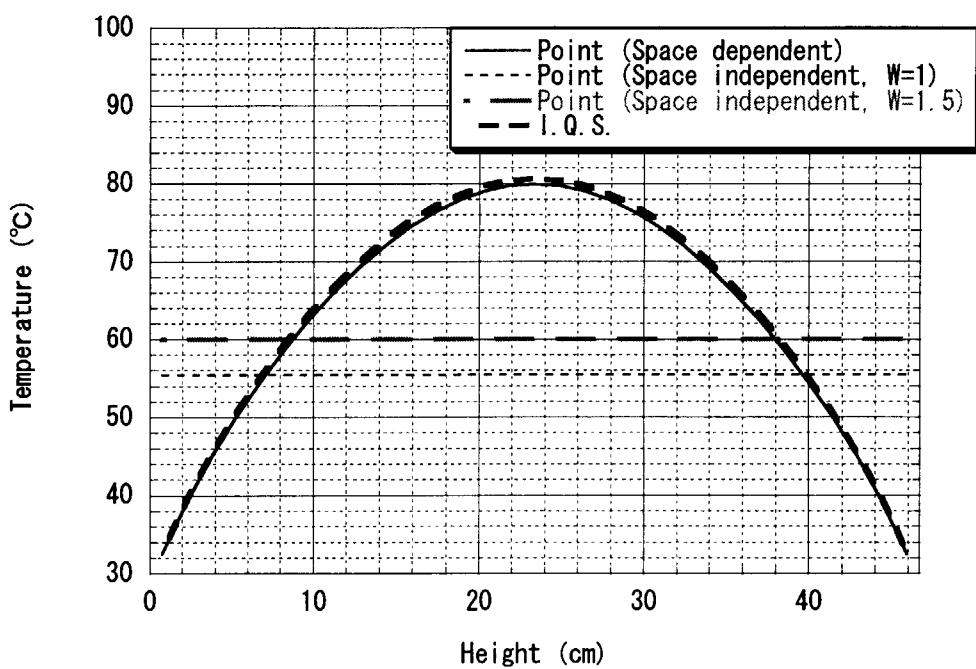


図 3.33 炉心中心軸での高さ方向の溶液温度分布  
(Case B250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

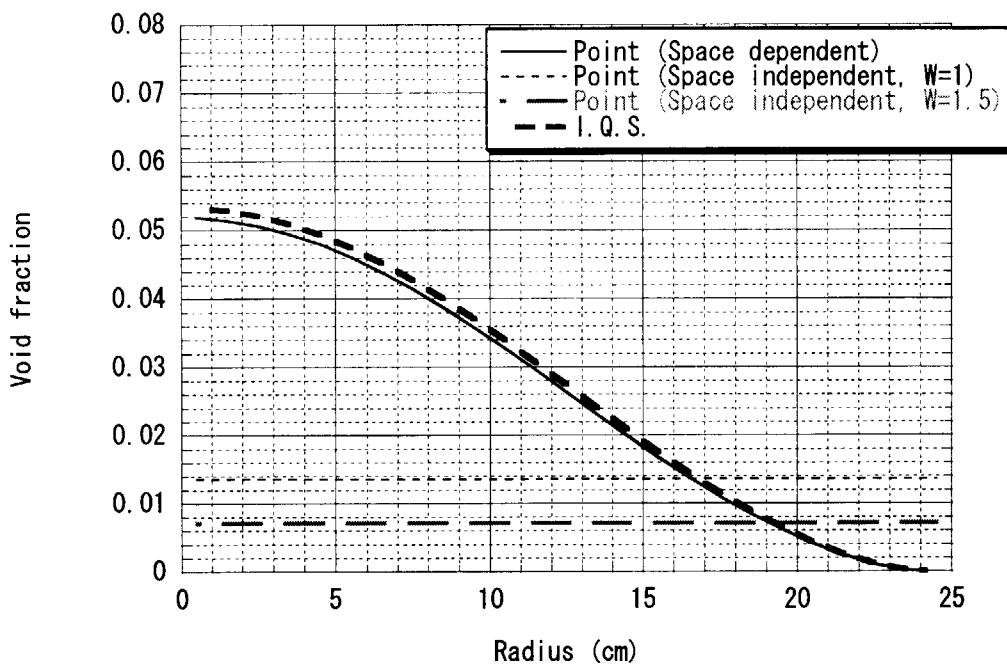


図 3.34 炉心中心高さでの半径方向のボイド体積割合分布  
(Case B250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

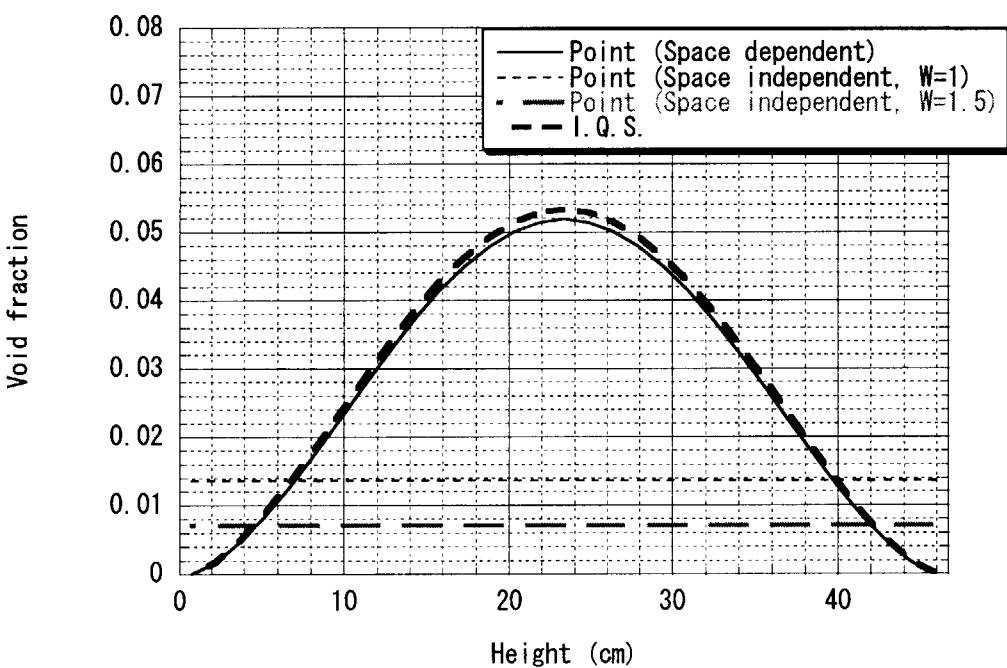


図 3.35 炉心中心軸での高さ方向のボイド体積割合分布  
(Case B250 : 投入反応度2.0\$, t=0.5sec)

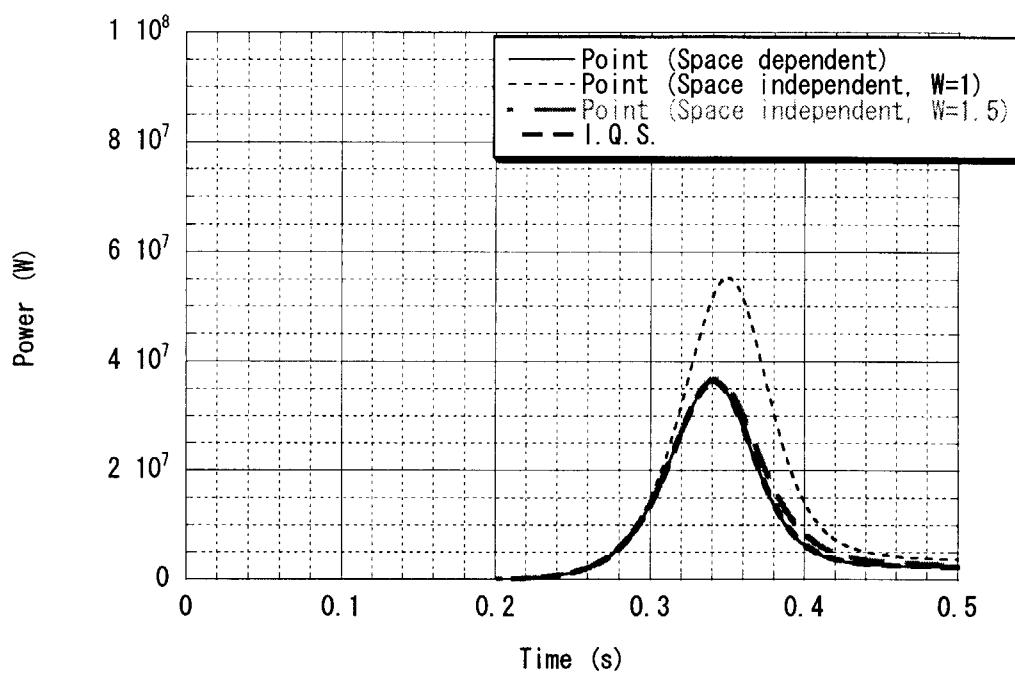


図 3.36 出力の時間変化 (Case B260 : 投入反応度1.3\$)

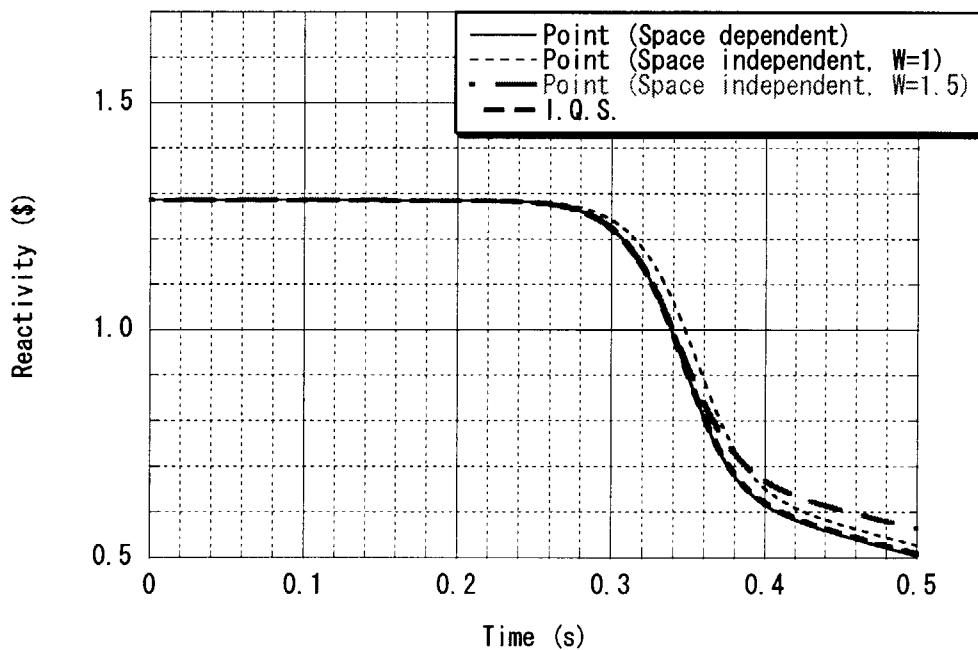


図 3.37 反応度の時間変化 (Case B260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

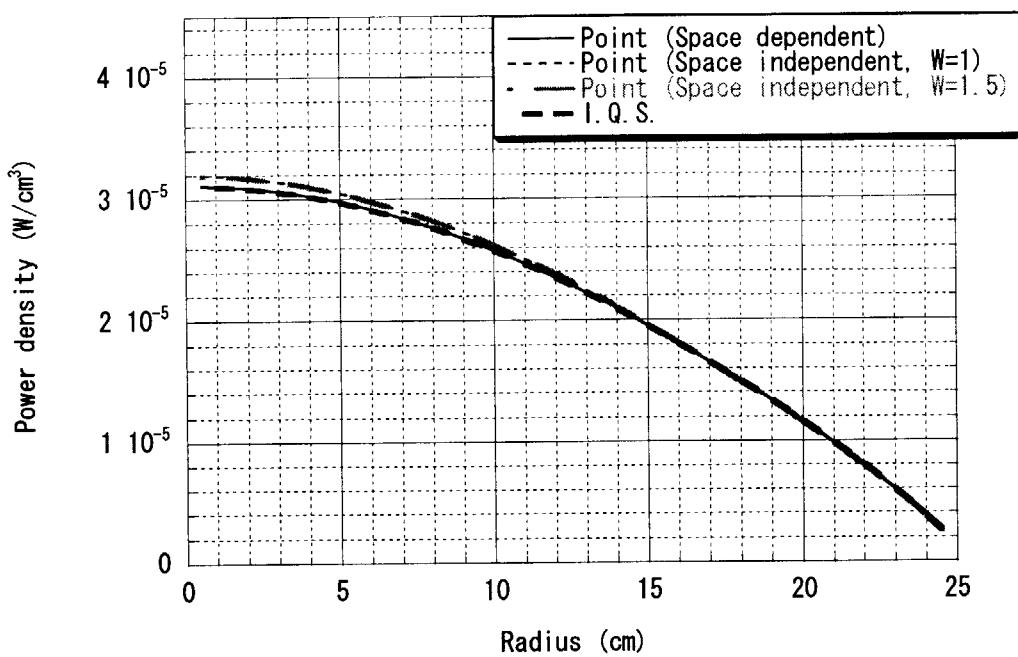


図 3.38 炉心中心高さでの半径方向の出力密度分布  
(Case B260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

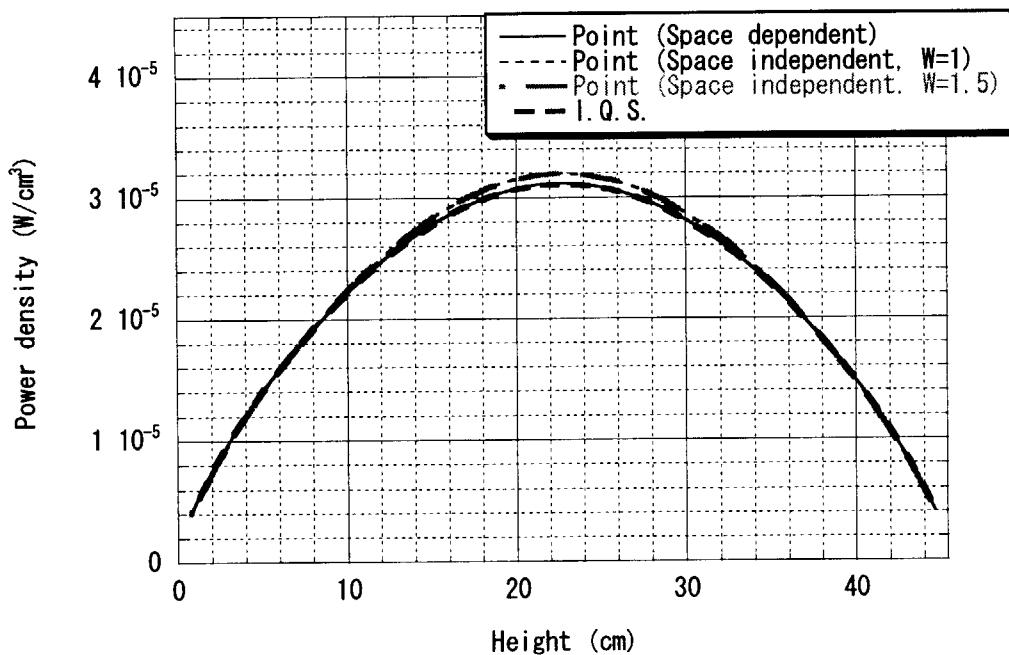


図 3.39 炉心中心軸での高さ方向の出力密度分布  
(Case B260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

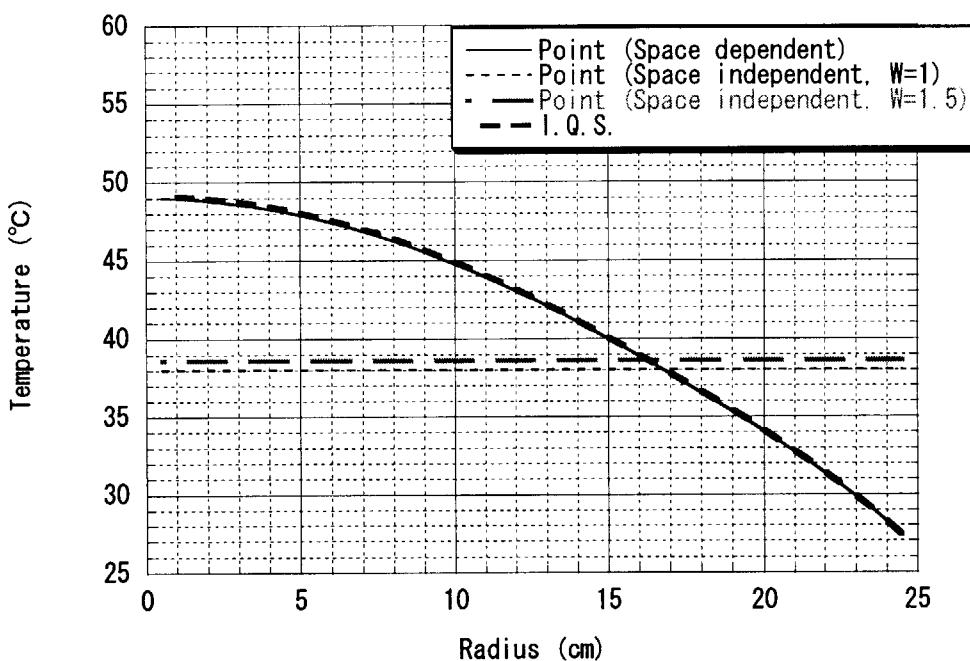


図 3.40 炉心中心高さでの半径方向の溶液温度分布  
(Case B260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

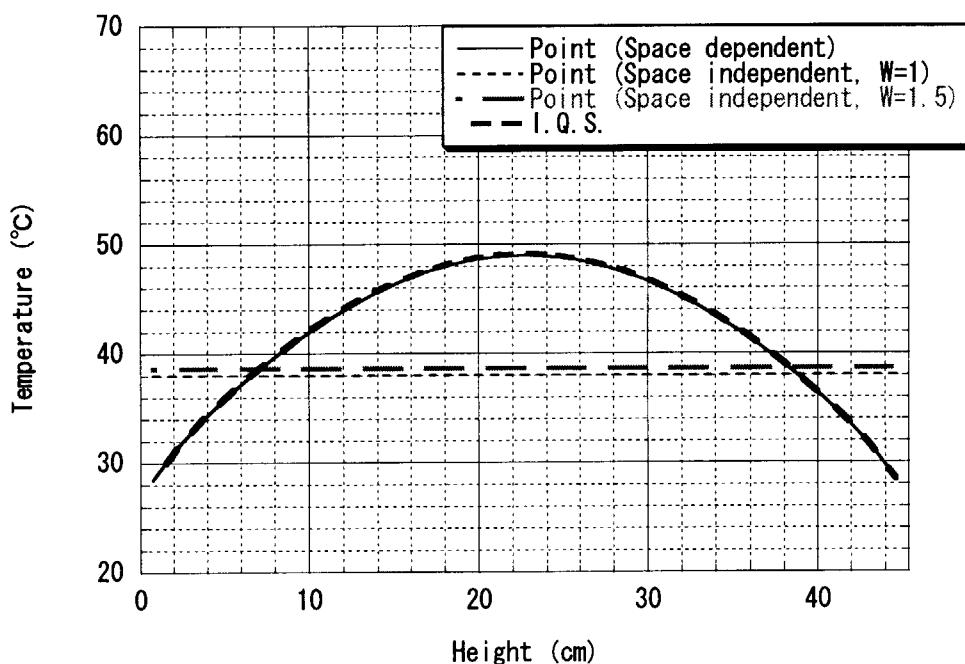


図 3.41 炉心中心軸での高さ方向の燃料温度分布  
(Case B260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

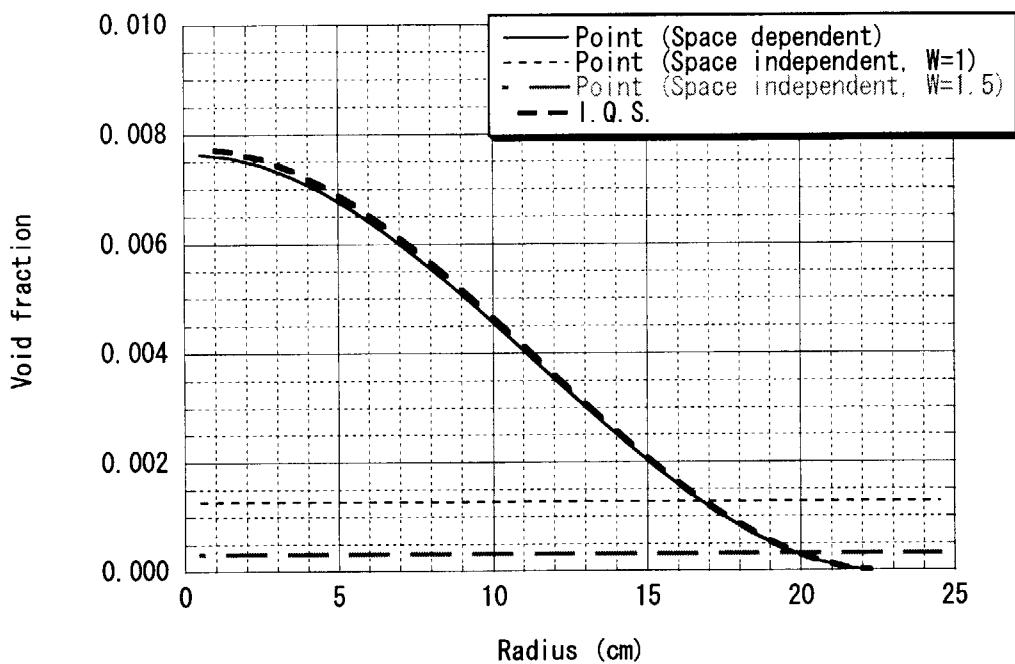


図 3.42 炉心中心高さでの半径方向のボイド体積割合分布  
(Case B260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

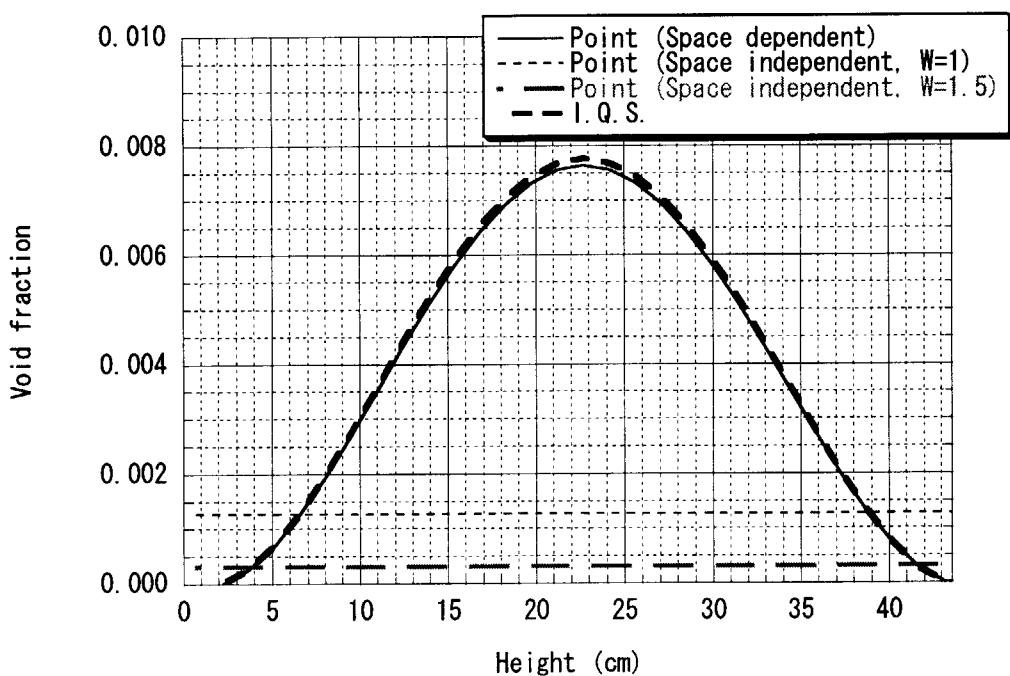


図 3.43 炉心中心軸での高さ方向のボイド体積割合分布  
(Case B260 : 投入反応度1.3\$, t=0.5sec)

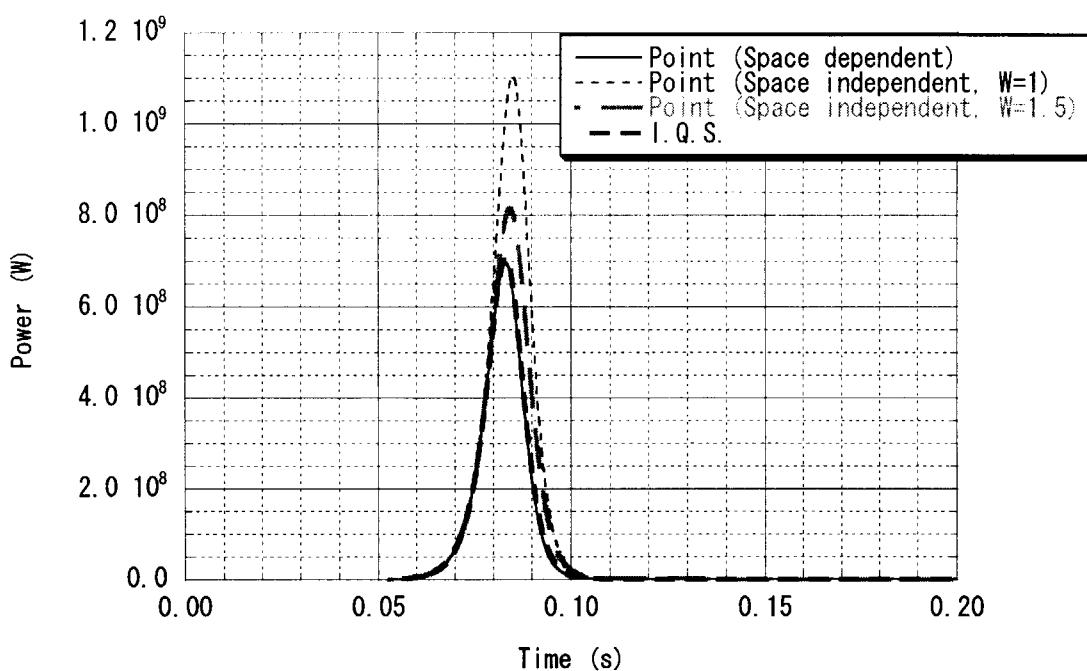


図 3.44 出力の時間変化 (Case B280 : 投入反応度2.5\$)

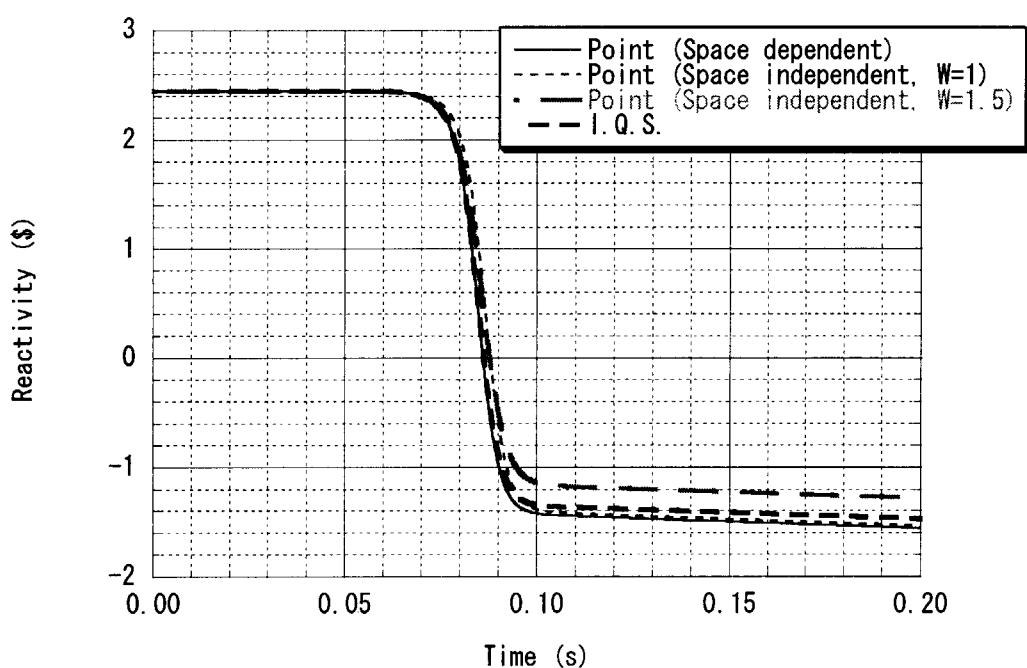


図 3.45 反応度の時間変化 (Case B280 : 投入反応度2.5\$)

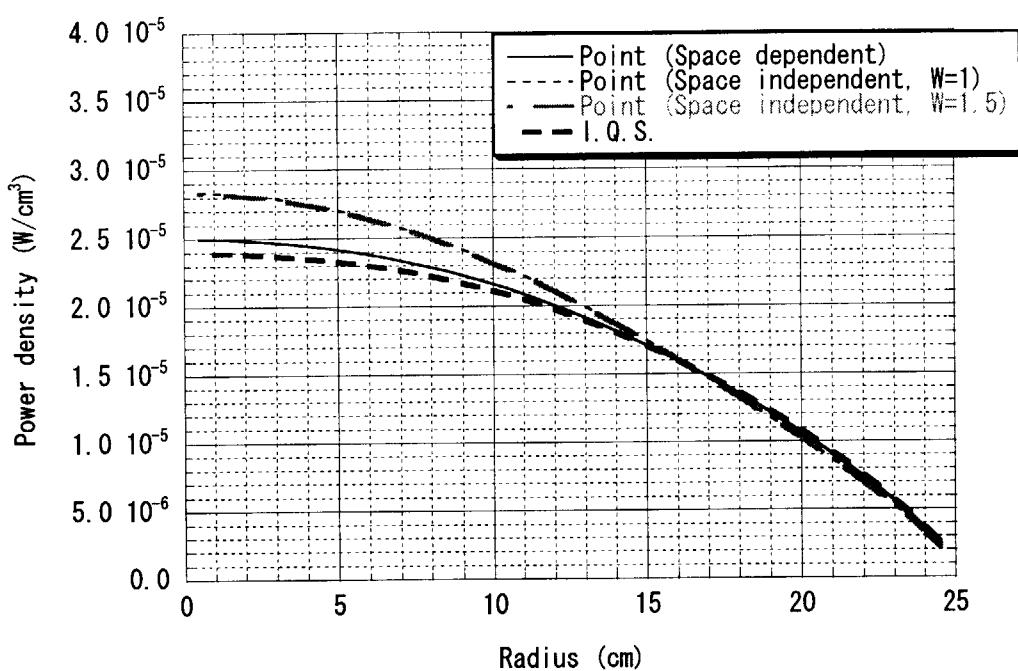


図 3.46 炉心中心高さでの半径方向の出力密度分布  
(Case B280 : 投入反応度2.5\$, t=0.5sec)

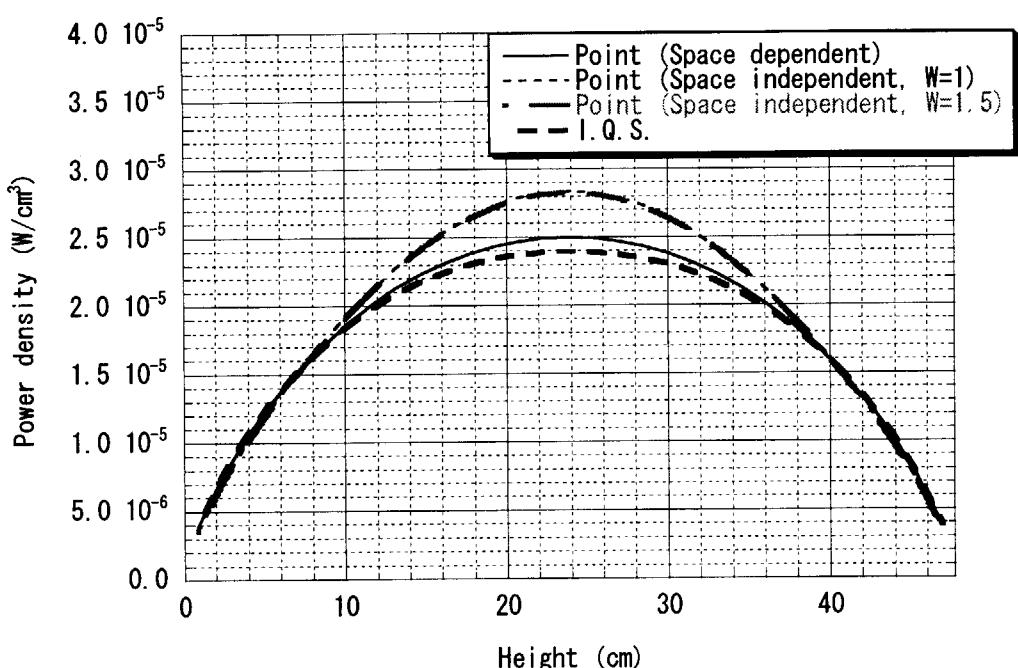


図 3.47 炉心中心軸での高さ方向の出力密度分布  
(Case B280 : 投入反応度2.5\$, t=0.5sec)

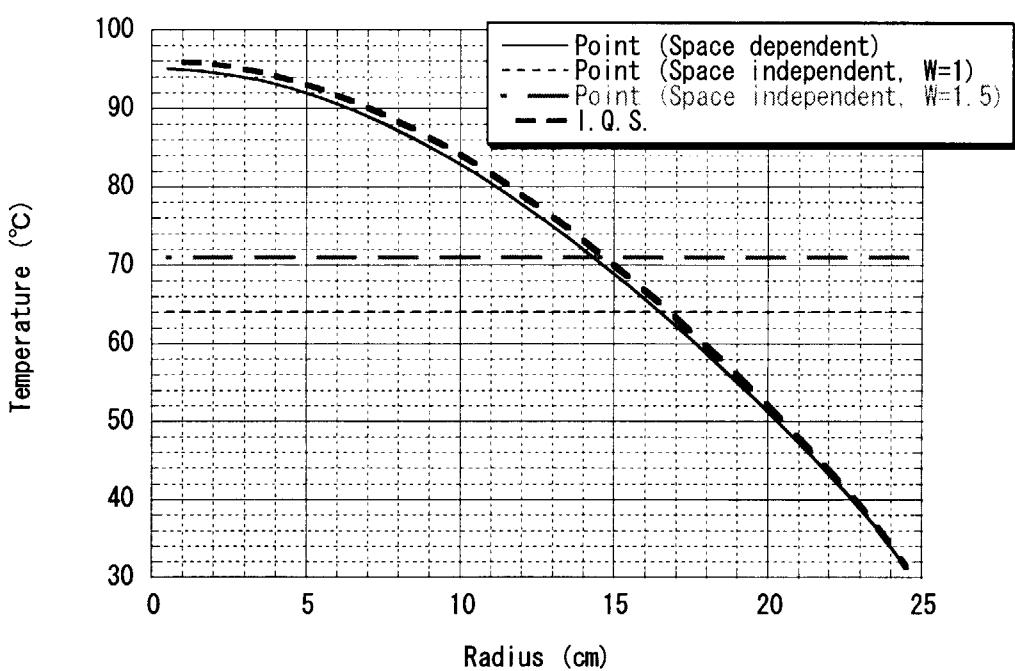


図 3.48 炉心中心高さでの半径方向の溶液温度分布  
(Case B280 : 投入反応度2.5\$, t=0.5sec)

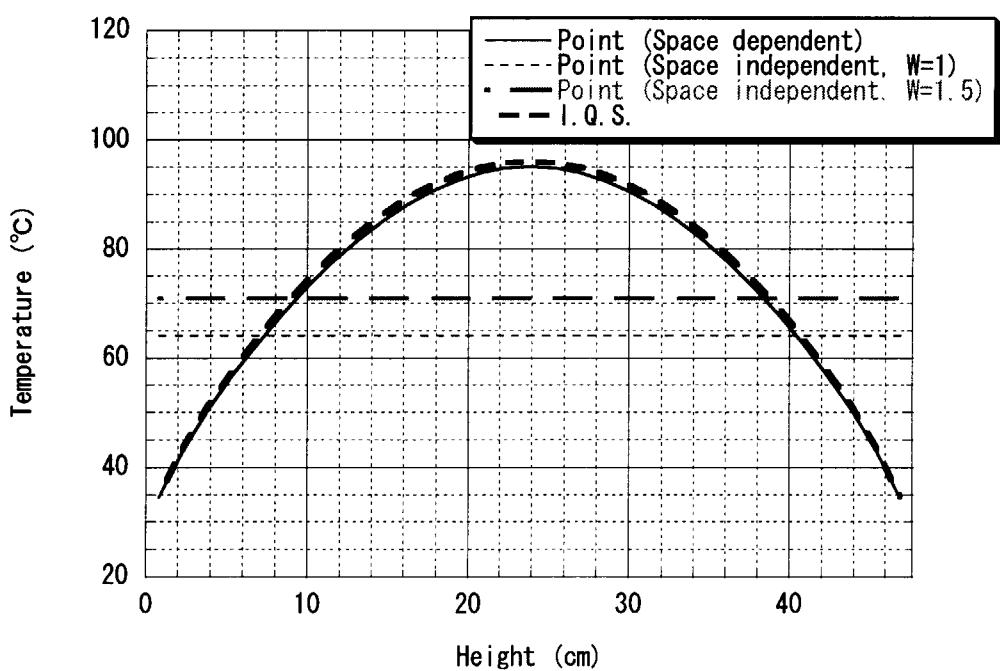


図 3.49 炉心中心軸での高さ方向の溶液温度分布  
(Case B280 : 投入反応度2.5\$, t=0.5sec)

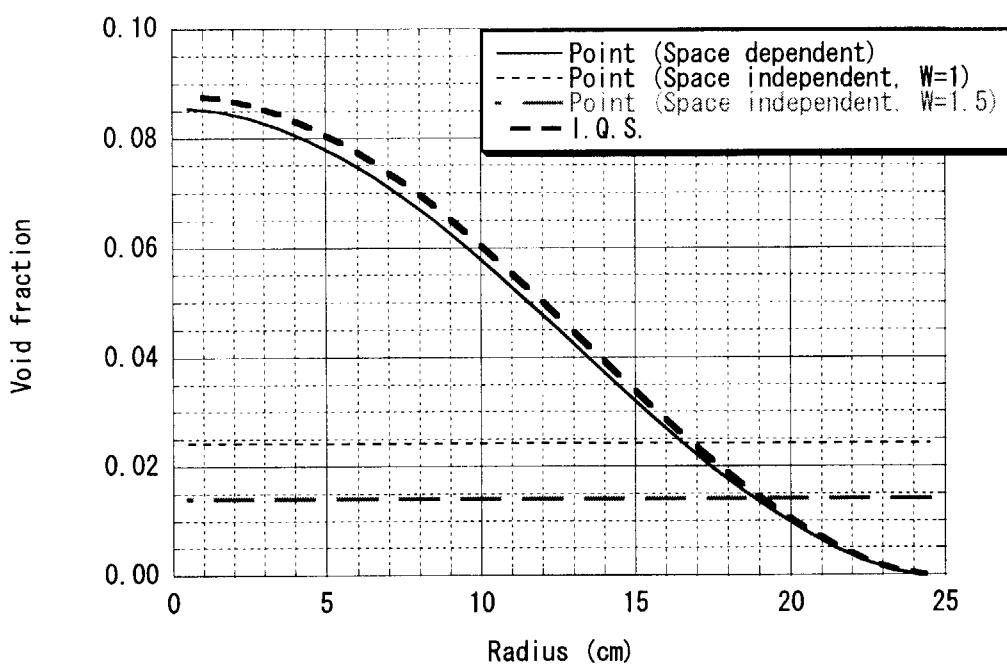


図 3.50 炉心中心高さでの半径方向のボイド体積割合分布  
(Case B280 : 投入反応度2.5\$, t=0.5sec)

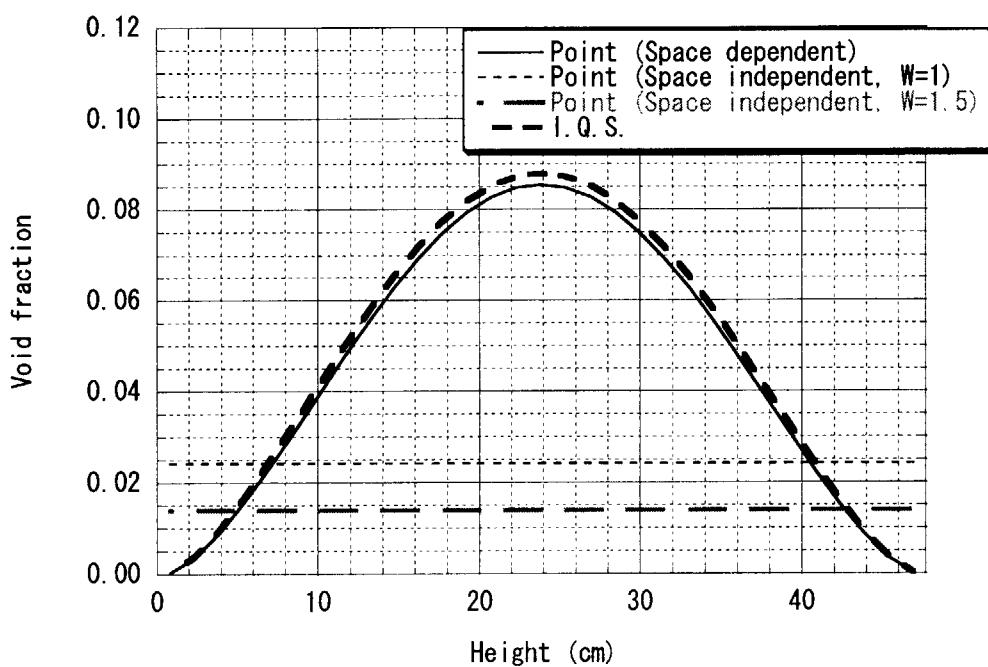


図 3.51 炉心中心軸での高さ方向のボイド体積割合分布  
(B280 : 投入反応度2.5\$, t=0.5sec)

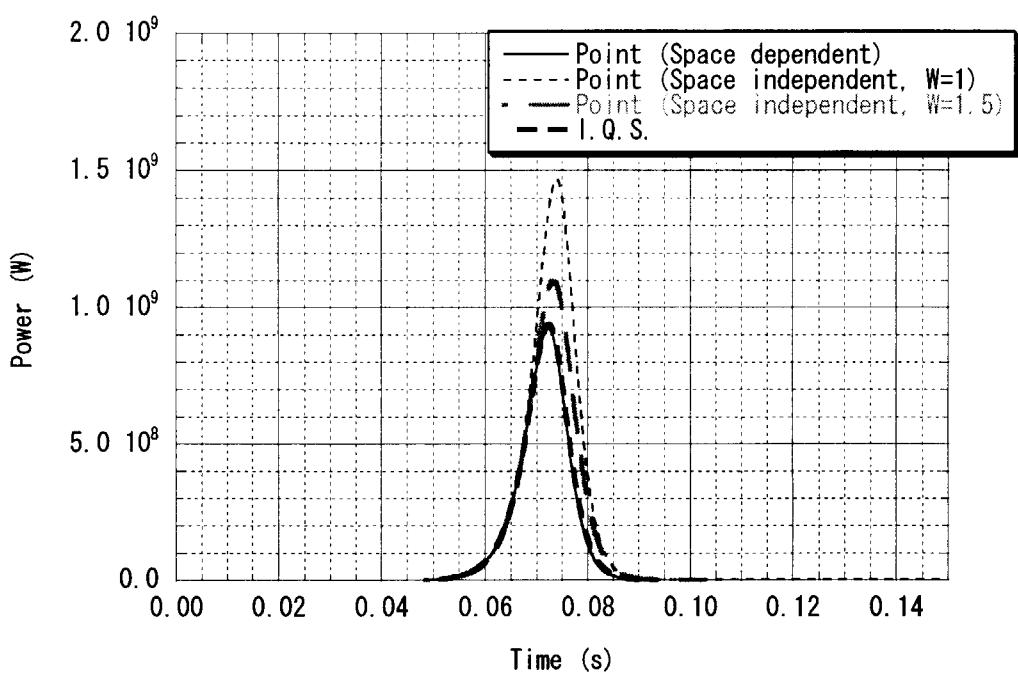


図 3.52 出力の時間変化 (Case B290 : 投入反応度2.7\$)

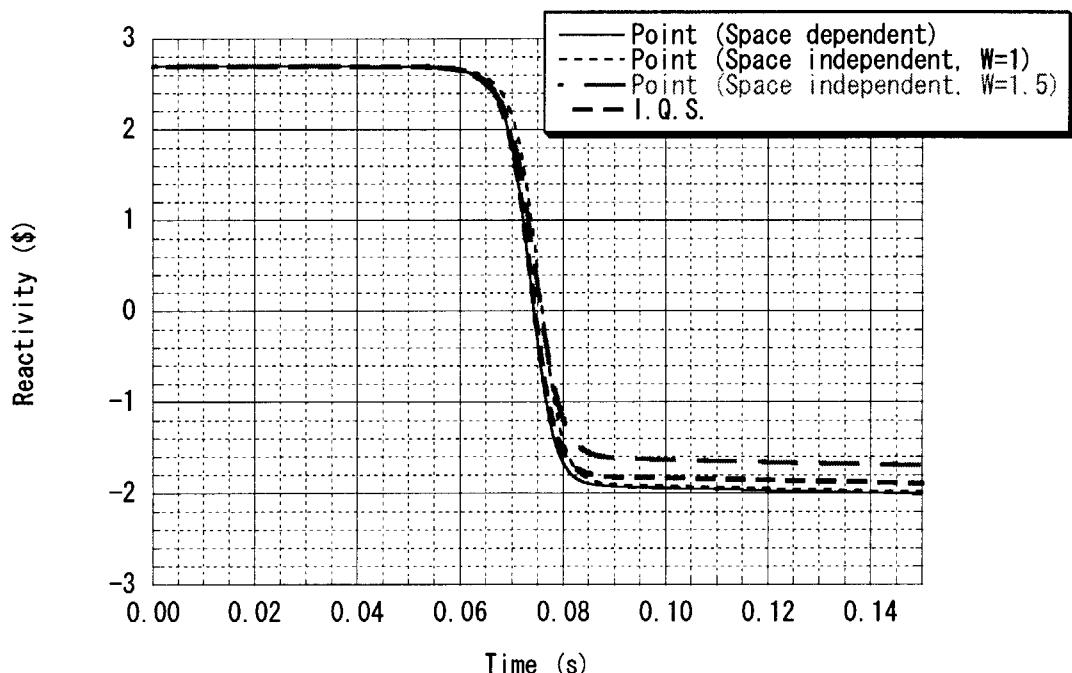


図 3.53 反応度の時間変化 (Case B290 : 投入反応度2.7\$)

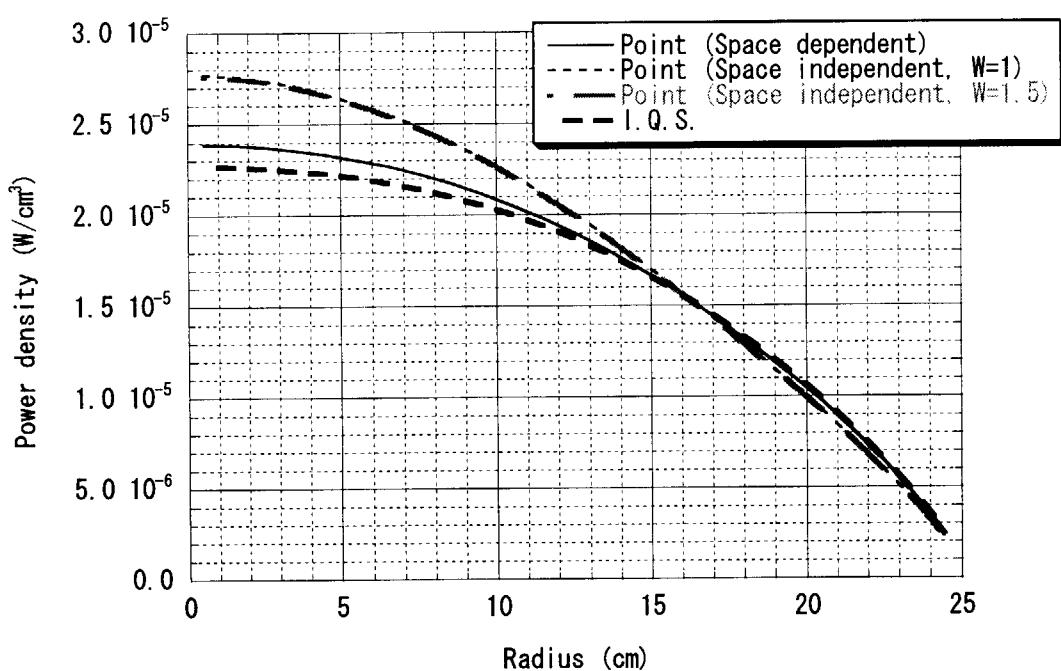


図 3.54 炉心中心高さでの半径方向の出力密度分布  
(Case B290 : 投入反応度2.7\$, t=0.5sec)

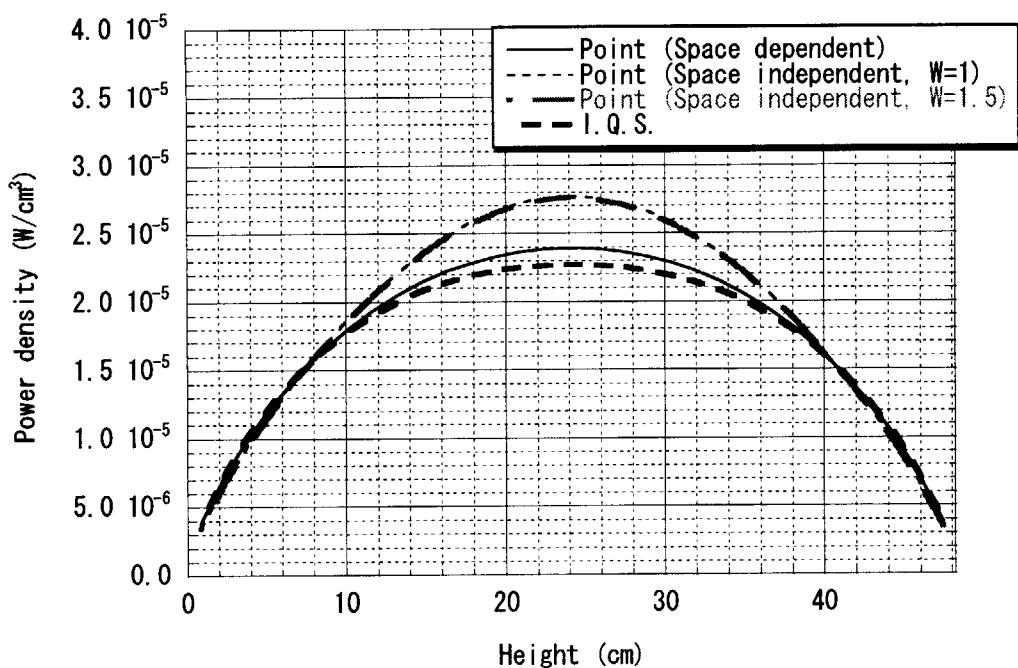


図 3.55 炉心中心軸での高さ方向の出力密度分布  
(Case B290 : 投入反応度2.7\$, t=0.5sec)

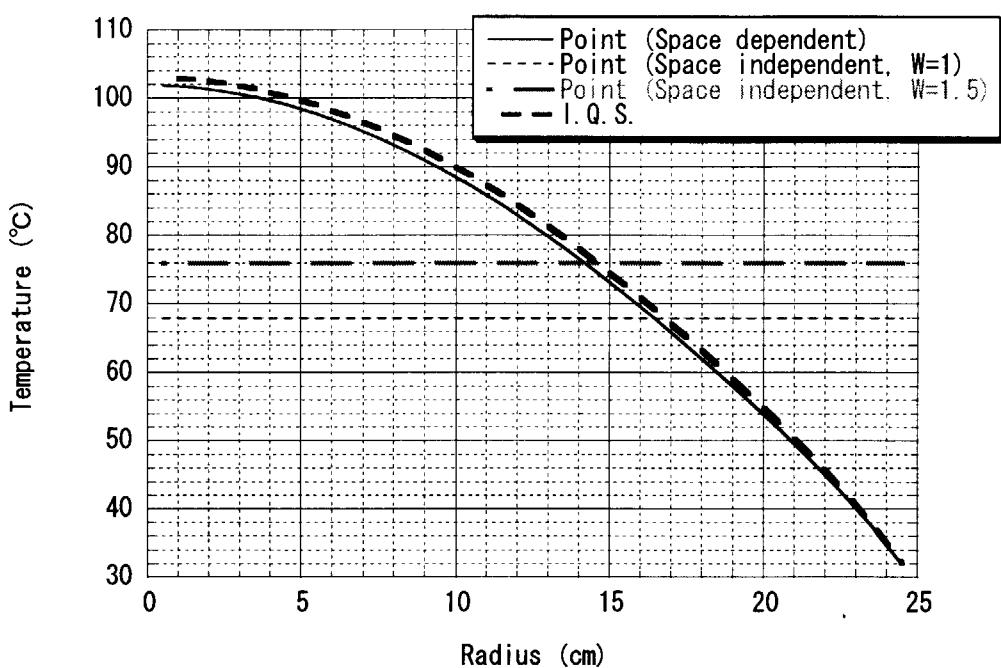


図 3.56 炉心中心高さでの半径方向の溶液温度分布  
(Case B290 : 投入反応度2.7\$, t=0.5sec)

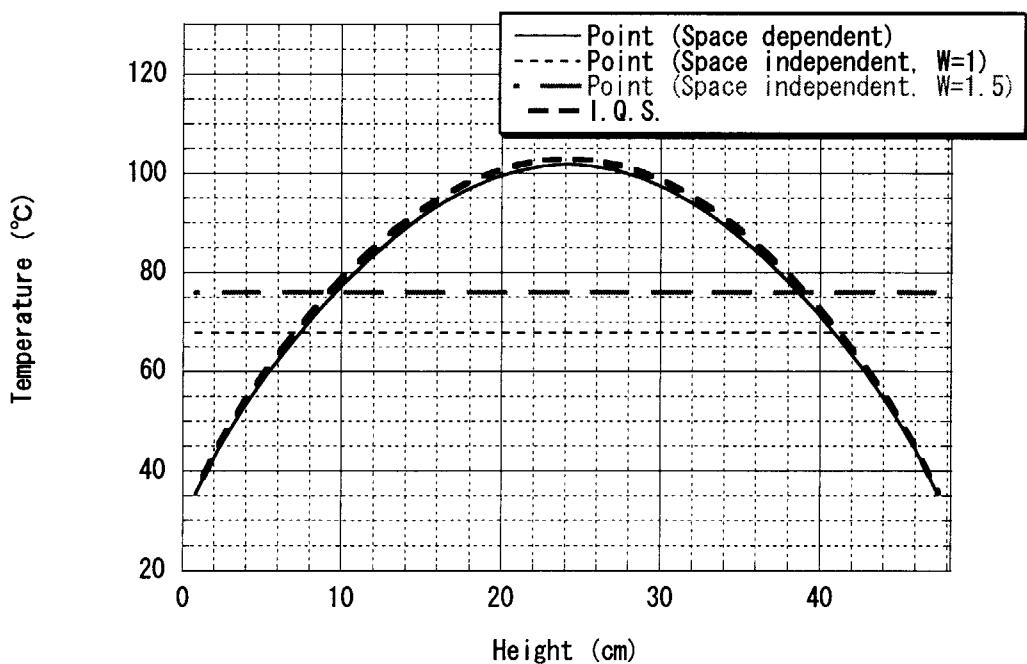


図 3.57 炉心中心軸での高さ方向の溶液温度分布  
(Case B290 : 投入反応度2.7\$, t=0.5sec)

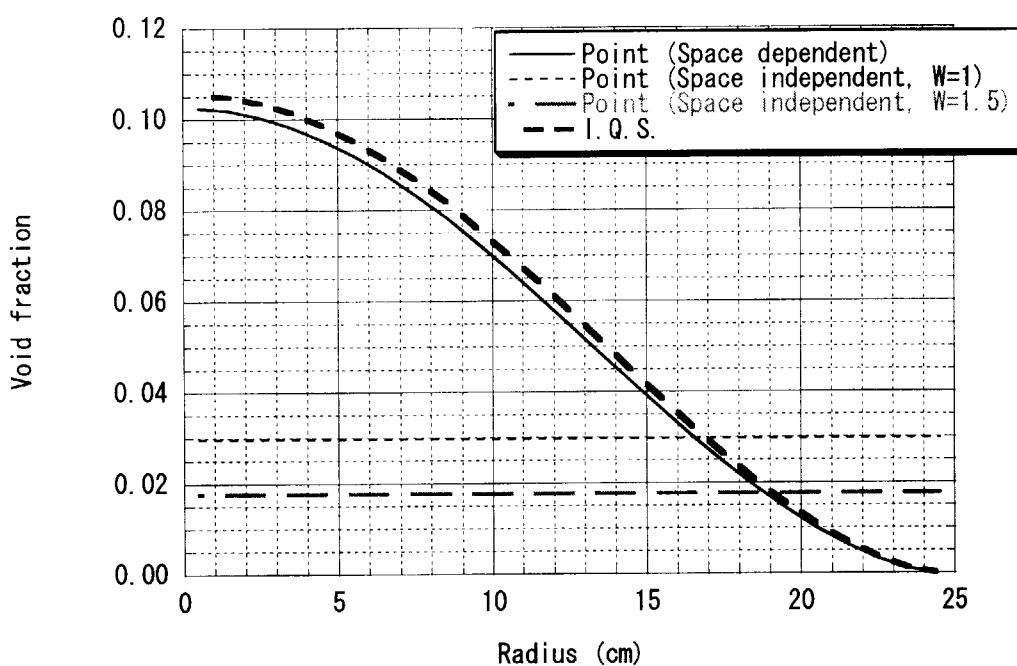


図 3.58 炉心中心高さでの半径方向のボイド体積率分布  
(Case B290 : 投入反応度2.7\$, t=0.5sec)

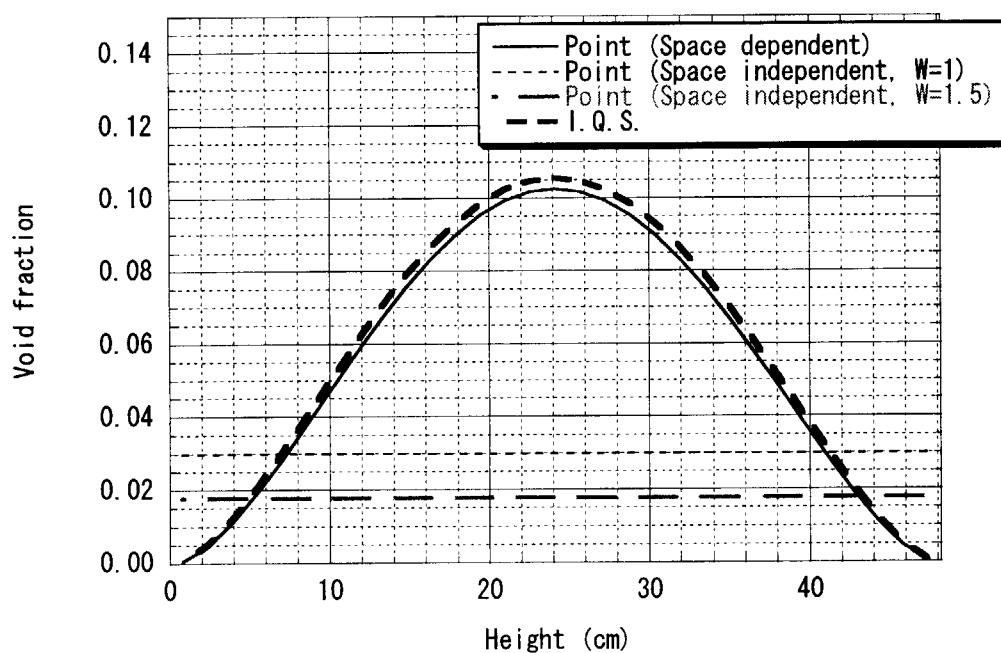


図 3.59 炉心中心軸での高さ方向のボイド体積率分布  
(Case B290 : 投入反応度2.7\$, t=0.5sec)

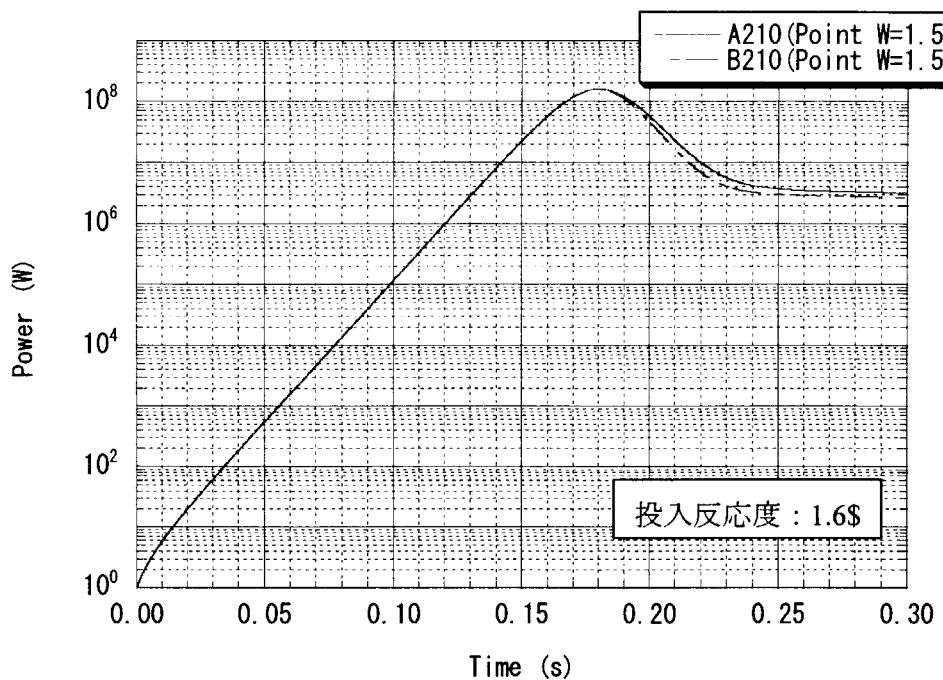


図 3.60 ボイド効果を取り入れた場合と取り入れない場合の出力変化  
(Case A210(ボイド効果なし), B210(ボイド効果あり))

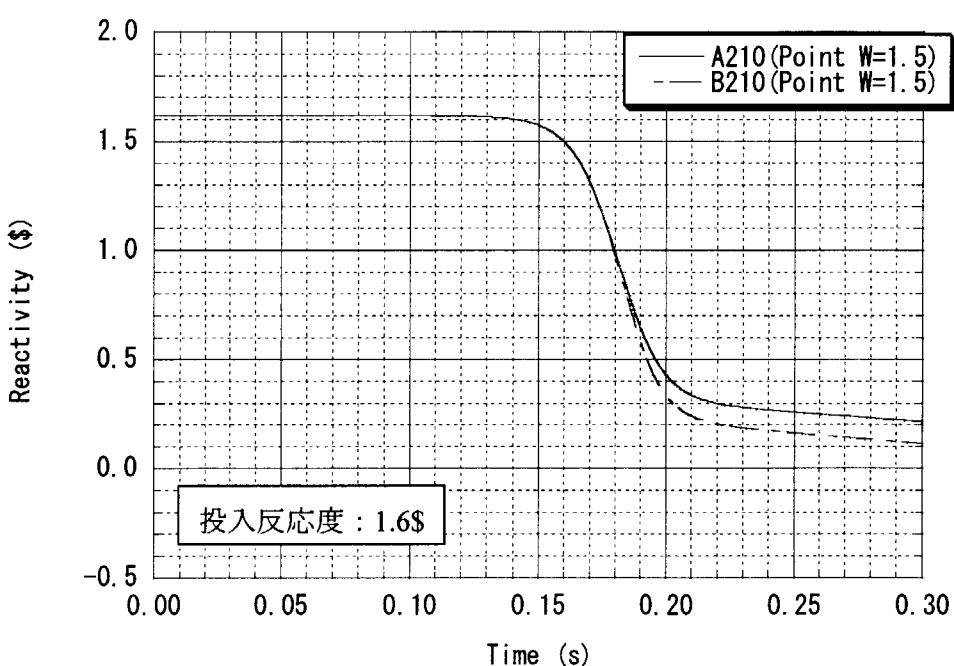


図 3.61 ボイド効果を取り入れた場合と取り入れない場合の反応度変化  
(Case A210(ボイド効果なし), B210(ボイド効果あり))

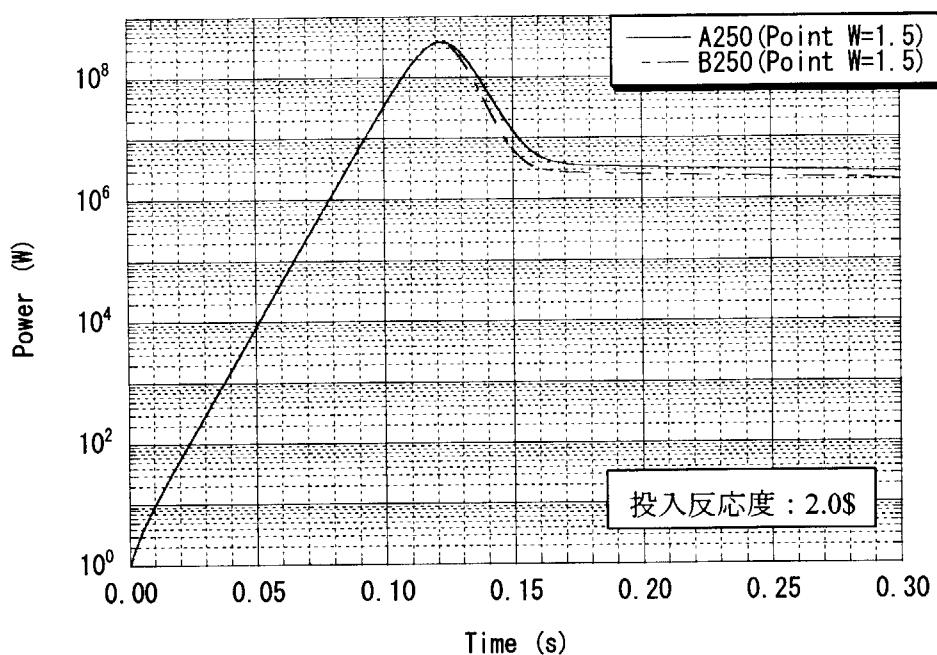


図 3.62 ボイド効果を取り入れた場合と取り入れない場合の出力変化  
(Case A250(ボイド効果無し), B250(ボイド効果あり))

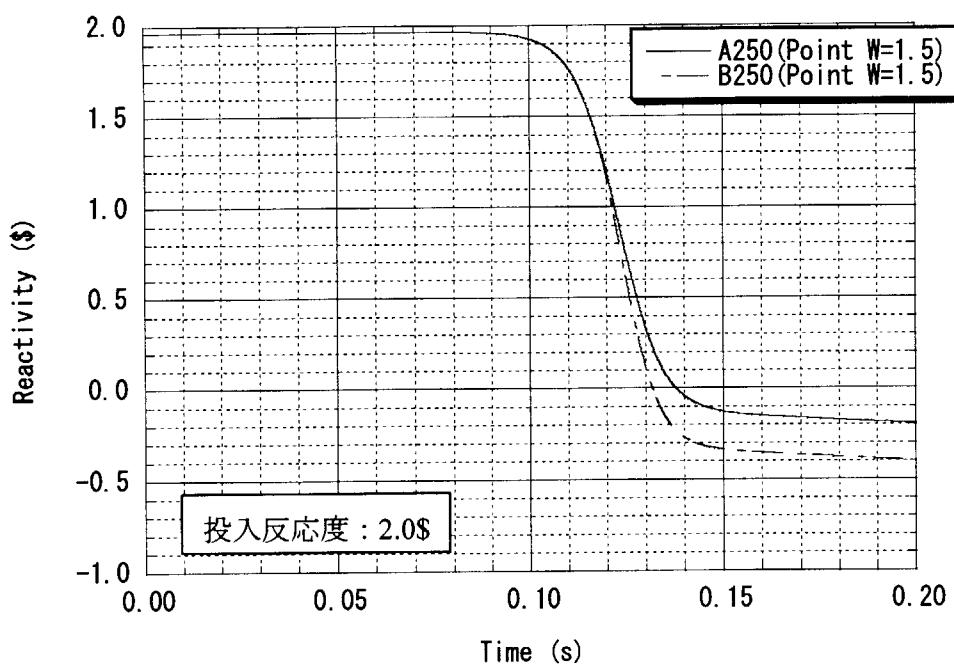


図 3.63 ボイド効果を取り入れた場合と取り入れない場合の反応度変化  
(Case A250(ボイド効果なし), B250(ボイド効果あり))

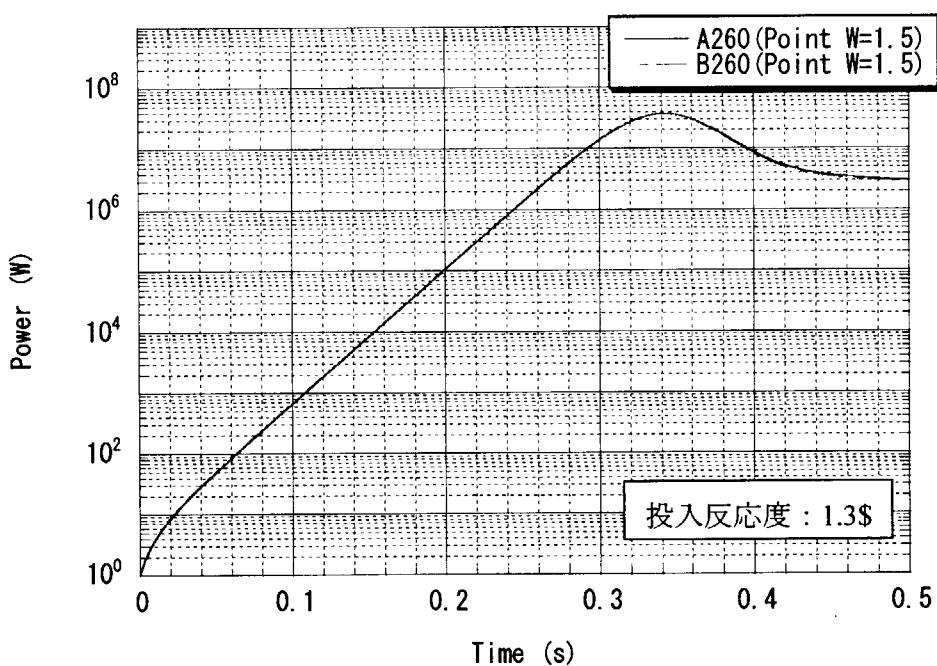


図 3.64 ボイド効果を取り入れた場合と取り入れない場合の出力変化  
(Case A260(ボイド効果なし), B260(ボイド効果あり))

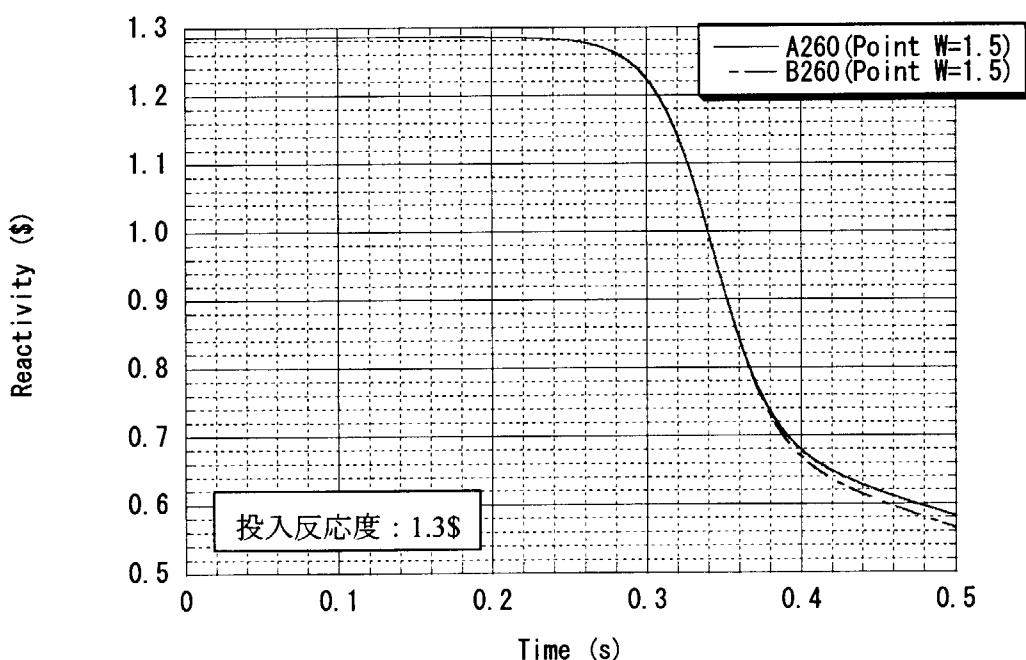


図 3.65 ボイド効果を取り入れた場合と取り入れない場合の反応度変化  
(Case A260(ボイド効果なし), B260(ボイド効果あり))

### 3.5 空間依存性を考慮した解析による検討のまとめ

東京工業大学で開発されたパルス用動特性解析コード PCTAC を用いて円柱体系の燃料溶液炉心の即発超臨界での第 1 パルスの過渡解析を行った。その結果以下のことが明らかになった。

ボイド効果のあるなしに関わらず過渡状態での炉内の中性子束分布の変化は小さく解析結果に与える影響は無視できるほど小さい。

フィードバック効果が温度によるものだけの場合、炉内の溶液温度を平均化して一点炉近似で解析を行う際には、溶液の温度上昇に  $W=1.5$  の重みをかけた値を溶液全体の仮想的な温度上昇として解析を行った場合の結果は温度の空間依存性を正確に取り扱った場合の結果とほぼ一致する。なお、この取り扱いは前章で述べた、平坦出力分布のもとで温度フィードバック反応度に重み 1.5 をかけたケースと等価である。

ボイド効果を取り入れた場合、取り入れない場合と比べて第一パルスの最大出力、半値幅といった物理量にはほとんど違いがない。ボイド効果を取り入れると第一パルス後のテール部の出力が小さくなるため第一パルスの積分出力を小さくする効果があるが今回の検討では定量的な評価には至らなかった。

実験で得られたボイドのエネルギーモデルの炉心平均パラメータを空間依存解析に用いるための補正係数については更に詳細な検討が必要である。

今後の課題としては、実際の体系には炉内に構造物がある場合が多いためその場合の平均温度の重みの妥当性の検討、今回の解析ではボイドによる液面上昇の効果が取り入れられていないのでこの効果の取り入れとその影響の検討、ボイドによる反応度効果は体系の形状に依存することが考えられるので種々の形状でのボイドによる反応度効果の検討等があげられる。

#### 4. まとめ

TRACY 実験におけるフィードバック反応度の空間分布を検討するために、一点炉近似モデル及び空間依存動特性コードによる解析・評価を行った。

##### 1) 一点炉近似モデルによる評価

- ① 一点炉近似に基づく Nordheim-Fuchs モデルを用いた、即発超臨界時のピーク出力の評価では、温度フィードバック反応度に重み 1.5 をかけることにより、実験値を再現することがわかった。
- ② 一点炉動特性コード AGNES 2 による出力ピーク特性及びスロートランジェント実験の解析では、平坦出力分布を使用した場合、温度フィードバック反応度に重み 1.5 をかけることにより、実験値を再現することがわかった。
- ③ 核計算により、温度分布の有無による温度フィードバック反応度の変化を評価した結果、出力分布に比例した温度分布を有する炉心の反応度温度係数は、平坦温度分布の場合の 1.4 倍であり、上記①、②の重み 1.5 とほぼ一致した。このことから、出力ピーク時の重みの評価には、初期状態の出力分布に比例した温度分布を使用するのが妥当であることがわかった。

##### 2) 空間依存動特性コードによる評価

- ① 今回計算した範囲では、温度上昇及び放射線分解ガスボイドの発生による中性子束分布およびピーク出力への影響は小さかった。すなわち、出力ピーク時の出力分布として、フィードバックが無い状態（初期状態）の出力分布を使用できることが示された。
- ② 温度のみのフィードバック効果を考慮した場合、平均温度変化に重み 1.5 をかけた結果は、空間依存性を正確に取扱った場合とよく一致した。これは、上記 1) の①及び②の結果と合致している。

以上の検討により、平坦温度分布（あるいは平均温度）を用いて、第 1 出力ピーク特性の解析を行う場合には、温度フィードバック反応度に重み 1.5 をかけることにより、出力分布の空間依存性を考慮した結果と同じ結果が得られることがわかった。これは、出力ピークにおける温度フィードバックの空間効果が、フィードバックが無い状態（初期状態）の出力分布によって支配されているためである。

今後は、解析的に重みを評価するための手法を検討し、種々の炉心形状における重みの評価、ボイドによる反応度フィードバックがある場合の重みの評価、第 1 出力ピーク以降の重みの取り扱い方法に関する検討、を行う予定である。

## 参考文献

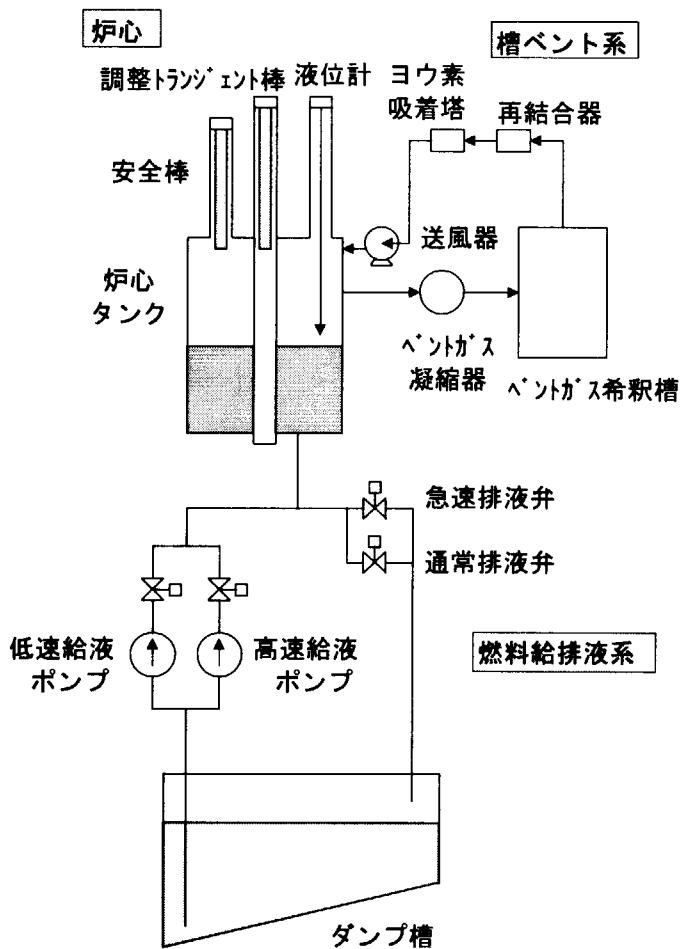
- 1) K. Nakajima et al., "Experimental Study on Criticality Accidents Using the TRACY," *Proc. Int. Conf on the Physics of Reactors (PHYSOR96)*, September 16-20, 1996, Mito, Japan, Vol.4, L83 (1996).
- 2) 中島健 他, "TRACY による実験、その研究成果," 原子力工業, **43** [9], 14 (1997).
- 3) H. Yanagisawa et al., "Experiments on Transient Behavior of a Low-Enriched Uranyl Nitrate Solution System with TRACY to Study Hypothetical Criticality Accidents in Reprocessing Plants," *Proc. 6th Int. Conf. on Nuclear Criticality Safety (ICNC'99)*, September 20-24, 1999, Versailles, France, p.900 (1999).
- 4) K. Ogawa et al., "Measurement of the Power Profile During Nuclear Excursions Initiated by Various Reactivity Additions Using TRACY," *ibid.*, p.1277.
- 5) K. Nakajima et al., "Study on Reactivity Feedback Effects in the TRACY Transient Experiments," *ibid.*, p.1286.
- 6) H. Abe et al., "Studies on Source Term Release Behavior from Fuel Solution under Simulated Nuclear Criticality Accident," *ibid.*, p.1293.
- 7) K. Nakajima and H. Yanagisawa, "Development of a Kinetics Code, AGNES, for the Evaluation of Criticality Accidents in Solution Fuel Systems," *Proc. Int. Seminar on Nuclear Criticality Safety (ISCS'87)*, October 19-23, 1987, Tokyo, p.427 (1987).
- 8) D. L. Hetrick, *Dynamics of Nuclear Reactors*, The University of Chicago Press, Chicago (1971).
- 9) 中島健, "溶液燃料を用いたパルス炉 SILENE の核特性評価," JAERI-Research 2001-003 (2001).
- 10) 奥村啓介 他, "SRAC95;汎用核計算コードシステム," JAERI-Data/Code 96-015 (1996).
- 11) T. Nakagawa et al., "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version 3, Revision 2 : JENDL-3.2," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32**[12], 1259 (1995).
- 12) T. Obara and H. Sekimoto, "Concept and Basic Performance of an In-Pile Experimental Reactor for Fast Breeder Reactors Using Fast Driver Core," *Ann. Nucl. Energy*, **24**[18], 1491 (1997).
- 13) H. M. Forehand, Jr., "Effect of Radiolytic Gas on Nuclear Excursions in Aqueous Solutions," NUREG/CR-2517 (1982).

## 付録

### 1. TRACYについて

TRACYは、直径50cmの円筒形炉心タンクに、 $^{235}\text{U}$ 濃縮度10%の硝酸ウラニル水溶液を給液することにより実験を行う。炉心タンクの中心には、直径約7cmの貫通孔があり、その内部を調整トランジエント棒（制御棒）が移動する。炉心タンクには3本の安全棒の他に、温度計、液位計、圧力計が取り付けられている。また、タンク周囲には核計装（起動系、運転系、安全出力系、過渡系）が設置されている。

超臨界実験を開始するための反応度添加は、①溶液燃料を一定の給液速度（最大65ℓ/min）で炉心タンクに給液する（ランプ給液）方法、②調整トランジエント棒を電動駆動により一定の速度（最大900cm/min）で炉心から引抜く（ランプ引抜き）方法、③調整トランジエント棒を圧縮空気駆動により瞬時（約0.2秒）に炉心から引抜く（パルス引抜き）方法の3通りで行う。反応度の添加量は最大3ドル、また実験1回あたりの積分出力は9kWh（核分裂数 $10^{18}$ ）までに制限されている。実験での反応度添加は、小さな量から行い、制限値を越えないことを確認しながら、段階的に添加量を増加させていく。



TRACY 主要系統図

TRACYの炉心は、炉心タンク内に溶液燃料として給液された硝酸ウラニル溶液である。炉心タンクは、内径が500mm、高さが約2000mm、肉厚が10mmの円筒形状で、ステンレス・スチール製である。炉心タンクは、中央に外径76.3mmの調整トランジエント棒案内管を有している。また、炉心タンクの底部には溶液燃料給排液系ラインが取り付けられている。炉心タンク底板下部は起動用中性子源（Am-Be）が挿入される構造となっている。さらに、炉心タンク周囲に、実験目的に応じて反射体水槽を設置することにより、水反射体付き炉心を構成できるようになっている。

実験では、超臨界時の出力（中性子束）、温度、圧力等の時間変化を測定し、反応度ファイードバック等のメカニズムを明らかにする。このための計測系として、核計装、温度計、圧力計が取り付けられている。核計装としては、起動系、運転系線形出力系、運転系対数出力系が炉心タンク周囲に各2系統設置されている。また、安全出力系、過渡線形出力系が各2系統、過渡対数出力系が1系統、炉室天井に設置されている。このほかに実験目的に応じて、実験用核計装が設置される。温度計は、運転監視用として炉心タンク下部底面に熱電対が1系統設置されているほか、実験系として10系統の熱電対が炉内温度分布測定のために取り付けられている。圧力計としては、炉心タンク下部側面に歪みゲージ式圧力計が1系統設置されている。これらの計測データは、すべて、データロガーによりデジタルデータとして記録されている。

放射性物質の放出、移行、沈着等に関するデータを取得するために、炉心タンクベントガスライン及び炉心タンクには、ベントガスサンプリング設備が設置されている。同設備により、ベントガス中のエアロゾル濃度、エアロゾル粒子径分布、ヨウ素濃度、水素及びNO<sub>x</sub>ガス濃度等の測定を行う。

## 2. AGNES2 コードについて

AGNES2 コードは原研で開発を行っている溶液燃料体系における臨界事故事象を計算するための動特性コードである。中性子動特性の計算は一点炉近似モデルを使用している。熱計算では、球、平板または円筒形状で3領域までをモデル化し、内側2領域における領域内の熱伝導及び各領域間の熱伝達を計算する。本報告における計算では、円筒モデルを用いて、領域1を溶液燃料、領域2をSUS容器、領域3を空気とし、領域1-2間を断熱としている。また、燃料溶液中の発熱分布及び熱伝導は無視している（領域内は等温としている）。この場合、温度分布が反応度効果に与える影響を補正するため、温度反応度係数にある一定値を重みとして乗じている。今回の解析では使用していないが、AGNES2 コードでは、溶液燃料の臨界事故事象に特有な放射線分解ガスボイドによる反応度効果を計算できる。この計算で使用するボイドに関するパラメータは、TRACY による臨界事故模擬実験の解析により決定した。

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	, ′, ″
リットル	L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ヘクタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N(=10 <sup>3</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2)=10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s}=10^4 \text{ St(ストークス)(cm}^2/\text{s)}$$

力	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038	
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>	
6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-1</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	1 cal = 4.18605 J (計量法)
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-2</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	= 4.184 J (熱化学)
3.6 × 10 <sup>-6</sup>	3.67098 × 10 <sup>-5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>-5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>35</sup>	= 4.1855 J (15°C)
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-6</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	= 4.1868 J (国際蒸気表)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-1</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	仕事率 1 PS(仮馬力)
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 75 kgf·m/s
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-24</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	= 735.499 W

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>	1	1	100	
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	0.01	0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 <sup>-1</sup>	1	

線量等量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

TRACY実験におけるフィードバック反応度の空間分布効果 — 第1出力ピーク特性の評価 —