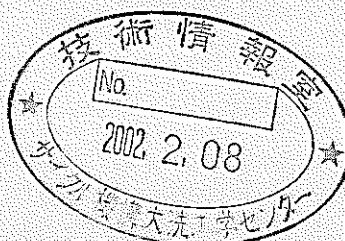


Pb-Bi 自然循環炉における酸素濃度制御解析

(研究報告)



2001年11月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

Pb-Bi 自然循環炉における酸素濃度制御解析

(研究報告)

伊藤 啓*, 堀 公明*

要旨

核燃料サイクル開発機構は、国内外の関係機関と協力し高速増殖炉の実用化戦略調査研究を実施しており、2001年3月にフェーズⅠを終了した。フェーズⅠでは、鉛・ビスマスが冷却材の1つの候補として抽出され、自然循環方式の中型炉について研究が進められた。一方、鉛・ビスマスを冷却材として用いる際には、構造材腐食性が課題の1つであり、腐食防止のためには酸素濃度の制御が重要である事が明らかになっている。

本研究では、鉛・ビスマスの構造材腐食性について、原子炉内の酸素濃度制御解析を行うために濃度拡散解析用コード(COCOA : Concentration control analysis code)を開発した。本コードは、2次元濃度拡散方程式を基礎方程式とし、有限差分法によって離散化したものである。また、酸素と水素の2成分系の濃度分布を計算し、それらの反応を模擬することが可能である。本稿では、本コードの基本的な検証を行うとともに、概念設計研究が実施されたPb-Bi冷却自然循環中型炉を対象として、燃料交換後の酸素濃度拡散解析を行い、酸素濃度制御系の制御特性を評価した。

その結果、COCOAコードは濃度拡散をシミュレート可能であることが明らかになった。また、Pb-Bi自然循環中型炉を対象とした解析においては、適切な濃度計測点を選択することで、ON-OFF制御、PID制御によって酸素濃度制御が可能であること、酸素放出系や水素放出系の故障時においても制御特性の低下は見られるものの、制御自体は可能であることを明らかにした。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 流体計算工学研究 Gr

Oxygen Concentration Diffusion Analysis of Lead-Bismuth-Cooled, Natural-Circulation Reactor

Kei Ito*, Takaaki Sakai*

Abstract

The feasibility study on fast breeder reactors in Japan has been conducted at JNC and related organizations. The Phase-I study has finished in March, 2001. During the Phase-I activity, lead-bismuth eutectic coolant has been selected as one of the possible coolant options and a medium-scale plant, cooled by a lead-bismuth natural circulation flow was studied. On the other side, it is known that lead-bismuth eutectic has a problem of structural material corrosiveness. It was found that oxygen concentration control in the eutectic plays an important role on the corrosion protection.

In this report, we have developed a concentration diffusion analysis code (COCOA : COncentration COntrol Analysis code) in order to carry out the oxygen concentration control analysis. This code solves a two-dimensional concentration diffusion equation by the finite differential method. It is possible to simulate reaction of oxygen and hydrogen by the code. We verified the basic performance of the code and carried out oxygen concentration diffusion analysis for the case of an oxygen increase by a refueling process in the natural circulation reactor. In addition, characteristics of the oxygen control system was discussed for a different type of the control system as well.

It is concluded that the COCOA code can simulate diffusion of oxygen concentration in the reactor. By the analysis of a natural circulation medium-scale reactor, we make clear that the ON-OFF control and PID control can well control oxygen concentration by choosing an appropriate concentration measurement point. In addition, even when a trouble occurs in the oxygen emission or hydrogen emission system, it observes that control characteristic drops away. It is still possible, however, to control oxygen concentration in such case.

* Thermal-Hydraulic Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

目次

1. 緒言	1
1.1 背景	1
1.2 重金属冷却材の特徴と本研究の目的	2
2. 解析手法	4
2.1 COCOA コードの概要	4
2.2 基礎方程式	4
2.3 方程式の離散化	5
3. COCOA コードの検証	7
3.1 対流項の検証問題	7
3.2 正方形キャビティ流れ解析	7
4. Pb-Bi 炉における酸素濃度制御解析結果	12
4.1 解析対象	12
4.2 解析メッシュ	12
4.3 速度場・温度場	12
4.4 解析条件	12
4.5 酸素・水素反応	12
4.6 酸素濃度制御機構	13
4.7 ON-OFF 制御における解析結果	18
4.8 PID 制御における解析結果	26
4.9 ON-OFF 制御における機器故障を想定した解析結果	32
4.10 PID 制御における機器故障を想定した解析結果	37
4.11 解析結果についての考察	40
5. 結言	42
参考文献	43
謝辞	44

表リスト

- 表 3.1 酸素総量の変化
- 表 4.1 解析ケース
- 表 4.2 解析ケース
- 表 4.3 解析ケース
- 表 4.4 解析ケース
- 表 4.5 解析結果

図リスト

- 図 2.1.1 COCOA コードのフローチャート
- 図 3.1.1 検証問題の結果
- 図 3.2.1 解析メッシュ
- 図 3.2.2 速度場
- 図 3.2.3 正方形キャビティ解析結果
- 図 4.1.1 Pb-Bi 冷却自然循環中型炉(40 万 kWe)原子炉構造
- 図 4.2.1 解析メッシュ
- 図 4.3.1 流速場・温度場
- 図 4.5.1 制御方法の概念図
- 図 4.7.1 Case1 酸素濃度分布(デミスタ部計測, ON-OFF 制御)
- 図 4.7.2 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case1 : デミスタ部計測, ON-OFF 制御)
- 図 4.7.3 Case2 酸素濃度分布(高濃度部計測, ON-OFF 制御)
- 図 4.7.4 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case2 : 高濃度部計測, ON-OFF 制御)
- 図 4.7.5 Case3 酸素濃度分布(体系全体計測, ON-OFF 制御)
- 図 4.7.6 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case3 : 体系全体計測, ON-OFF 制御)
- 図 4.8.1 Case4 酸素濃度分布(デミスタ部計測, PID 制御)
- 図 4.8.2 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case4 : デミスタ部計測, PID 制御)
- 図 4.8.3 Case5 酸素濃度分布(高濃度部計測, PID 制御)

- 図 4.8.4 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case5：高濃度部計測, PID 制御)
- 図 4.9.1 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case6：高濃度部計測, ON-OFF 制御, 水素放出系故障)
- 図 4.9.2 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case7：高濃度部計測, ON-OFF 制御, 酸素放出系故障)
- 図 4.9.3 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case8：高濃度部計測, ON-OFF 制御, デミスタ故障)
- 図 4.10.1 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case9：高濃度部計測, PID 制御, 水素放出系故障)
- 図 4.10.2 放出量と最高・最低酸素濃度の時間変化
(Case10：高濃度部計測, PID 制御, 酸素放出系故障)

1. 緒言

1.1 背景

核燃料サイクル開発機構は、将来社会の多様なニーズに柔軟に対応できる高速増殖炉（以下、FBRと示す）サイクルの実用化候補概念を構築することを目的として、1997年7月、電気事業者を中心とする国内外の関係機関と協力し、オールジャパン体制でFBRサイクルの実用化戦略調査研究を開始し、2001年3月にフェーズIを終了した^[1]。

フェーズIにおいては、革新技術を採用した幅広い技術選択肢の検討を行い、「安全性の確保」を前提とし、将来の基盤電源と比肩しうる「経済性」、「ウラン資源の有効利用」、「放射性廃棄物による環境負荷の低減」「核拡散抵抗性の確保」の5つの視点からFBRサイクル全体として整合性のとれたFBR、再処理および燃料製造に関する有望な実用化候補概念を抽出した。冷却材として、ナトリウム、重金属（鉛、鉛・ビスマス合金）、ガス（炭酸ガス、ヘリウムガス）及び水の多様な冷却材を抽出し、酸化物、金属、窒化物等の燃料形態の中から、FBRサイクルの実用化像となり得る冷却材と燃料形態のcombinationを幅広く検討し、開発目標への適合性と技術的成立性を評価した。

そのため、流体計算工学研究グループでは、プラント成立上重要な様々な熱流動現象について各種冷却材に関する相互比較を実施し、有望概念の選定に資するとともに、各概念にクリティカルパスとなる熱流動現象を明らかにする研究を進めた。重金属冷却材については、重要な熱流動評価項目である崩壊熱除去系について、鉛及び鉛・ビスマス合金（以下Pb-Biと記す。）を対象として、ナトリウム冷却炉との比較評価を実施した。その結果、重金属冷却炉は自然循環特性に比較的優れることが明らかになった^[2,3]。

設計検討作業においては、H11年度までの検討により、利用可能温度範囲の広さからPb-Biを有望な重金属冷却材として挙げている。また、ナトリウムの約10倍の密度を有すること等の要因によって、100万kWeを超えるような大型炉よりも40万kWe程度の中型規模を有望視している。さらに、H12年度の設計検討のなかで、冷却材駆動方式に関する検討が実施された。自然循環方式としては冷却材密度差のみを駆動源とする「完全自然循環方式」、及び、上昇流部に不活性ガスを吹き込み、気泡の上昇を駆動源とする「リフトポンプ方式」の比較評価が行われた。強制循環方式としては、循環ポンプのオプションとして、機械式ポンプと電磁ポンプが比較され、同時にいくつかの蒸気発生器の形式（ヘリカルコイル、バイヨネット、サーベンタイン）をパラメータとした。それらの方式について、経済性、炉心成立性、安全性、構造成立性、運転性、保守補修性から総合的に評価が実施され、その結果、「完全自然循環方式」は、簡素かつ経済性に優れ、流量喪失事故が無いという観点からは安全性にも優れた有望な概念と評価され、具体的な設計検討が進められた^[4,5,6]。

一方で、Pb-Bi冷却材を用いる上で問題となる点として、Pb-Biの持つ構造材腐食性が挙げられており、実用化戦略調査研究のフェーズIIにおいては、腐食性についての研

究が進められている。本件では、構造材腐食の決定要因となる酸素濃度に注目し、酸素濃度拡散解析を行い、濃度制御特性の基本的な評価を実施した。

1.2 重金属冷却材の特徴と本研究の目的

熱流動特性に関して、重金属冷却炉は実用化戦略調査研究において目標とする「安全性の確保」と「経済性」の観点で、それぞれ大きなメリットとなる可能性を有している事が明らかになった。鉛及び鉛・ビスマス合金の重金属冷却材は、空気及び水と科学的に発熱を伴う急激な反応は生じないことから、2次冷却系削除の経済性の高いシステムを構築可能である。ロシアにおいて提案されている BREST-300 は、冷却材喪失、火災、水素爆発、燃料破損等が放射性物質の放出にただちに繋がらない概念として固有安全性が協調されている。また、重金属冷却材の熱容量は、同容積のナトリウムに対して、約 1.2~1.5 倍程度あり、熱過渡としては、比較的緩やかな温度変化特性を示す。同様に、重金属冷却材は熱容量が大きいことから、炉心の出入口温度差が同じであれば、ナトリウム冷却炉よりも冷却材の循環速度が小さな条件のヒートバランスとなる。さらに、自然循環除熱について、重金属冷却材は、温度に対する密度差が大きく、ナトリウムよりも比較的大きな自然循環能力を有している。

一方で、鉛の密度はナトリウムの 10 倍であることから、冷却材重量の大きさがデメリットになっている。したがって、プラントの最適化では、プレナム、配管等における冷却材容積の低減が重要となる。

冷却材として使用する場合に、鉛冷却材は凝固温度（融点）が高く（327°C）、高温環境でのメンテナンス性等に課題がある。通常時の炉心入口温度 420°C（BREST-300 設計）に対して凝固温度との温度差が小さく、冷却材凍結について十分な準備が必要である。Pb-Bi は鉛と物性は大きく異ならないが、凝固温度が低い（125°C）ことから、比較的広い温度範囲で利用可能であり、現実的である。

以上のような性質に加えて、液体 Pb-Bi は、耐食鋼の主要構成元素である Cr, Ni, Fe などの溶解度が高いため、構造材腐食性を有する。腐食防止のためには、冷却材中の酸素濃度を適正な濃度に管理する必要がある。これは、冷却材中の酸素濃度が低すぎる場合、構造材表面の酸化被膜が破壊され構造材腐食が進み、逆に冷却材中の酸素濃度が高すぎる場合、コールド部に不純物（主に鉛酸化物）が析出し、流路閉塞につながるからである。ロシアの文献によると、目標とする酸素濃度は、200°C の飽和酸素濃度である 0.0023[ppm] 以上で、312°C の飽和酸素濃度である 0.244[ppm] 以下となっている。原子炉においては、燃料交換による酸素混入、SG からの水素透過などの発生が想定され、上記の範囲に酸素濃度を保つためには、水素放出とデミスタによる酸素濃度低減と、酸素放出による酸素濃度増大を組み合わせた濃度制御を行う必要がある。

本研究においては、完全自然循環方式 Pb-Bi 冷却中型炉（電気出力 40 万 kW_e（熱出力 1053MW））を対象として、Pb-Bi の構造材腐食性に注目し、冷却材中の酸素濃度制御用

プログラム(COCOA)の開発を行った。本コードを用いて、燃料交換による炉心領域への酸素注入に対し、ON-OFF制御とPID制御の2通りの制御方法について解析を行い、基本的な制御特性を評価した。また、水素放出系や酸素放出系の故障を想定した解析を実施し、影響について評価した。本研究は、これらの解析結果から適切な制御方法を提言することを目的としている。

2. 解析手法

2.1 COCOA コードの概要

本研究において作成した COCOA コードは、拡散方程式を差分法によって解くコードである。COCOA コードのフローチャートを図 2.1.1 に示す。

速度場・温度場は、あらかじめ計算されたものを読み込み、それを用いる。酸素・水素それぞれの対流・拡散を別々に計算し、両者の化学反応をシミュレートすることが可能である。酸素濃度制御のシミュレートとしては、酸素濃度の計測点を指定し、その濃度に対して水素・酸素放出と、デミスタによる酸素吸収を行う機構を模擬する。

2.2 基礎方程式

基礎方程式となる拡散方程式は、以下のように表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial x} (j_{ix}) - \frac{\partial}{\partial y} (j_{iy}) + R$$

$$j_{ik} = j_{ik}^{\rho} + j_{ik}^T + j_{ik}^P + j_{ik}^g$$

C:酸素(水素)の濃度

R:酸素(水素)の生成項(単位体積当たりの生成速度)

j_{ik} :k 方向への拡散流束

j_{ik}^{ρ} :密度勾配による拡散

j_{ik}^T :温度勾配による拡散

j_{ik}^P :圧力勾配による拡散

j_{ik}^g :外力の差異による拡散

流れ場中において、大きな温度勾配、圧力勾配、また、外力の差異は存在しないので、拡散項としては、密度勾配による拡散のみを考慮する。

$$j_{ik}^{\rho} = -D \frac{\partial C}{\partial k}$$

D:酸素(水素)の多成分系における有効拡散係数(物性値)

ここで、Dは次のWilke-Changの推算式より、計算する。

$$D = 7.4 \times 10^{-8} \frac{M_{PB}^{1/2} T}{\eta_{PB} V^{0.6}}$$

M_{PB} :Pb-Biの分子量

η_{PB} :Pb-Biの粘度

V:標準沸点における酸素(水素)の分子容($=25.6(O_2)$, $=14.3(H_2)$)

Dの空間変化を無視した場合、基礎方程式は、次のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = -D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + R$$

この式を差分法を用いて解くことで、酸素(水素)濃度の分布を求める。

2.3 方程式の離散化

時間微分項は、1次精度のオイラー陽解法で差分化する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Big|_{t=n} = \frac{C^{n+1} - C^n}{\Delta t} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} \Delta t - \dots$$

対流項は、3次精度の風上差分を用いる。

($u > 0$ の時)

$$u \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=i, y=j} = u_j \frac{2C_{i+1j} + 3C_{ij} - 6C_{i-1j} + C_{i-2j}}{6\Delta x} - u \frac{1}{12} \frac{\partial^4 C}{\partial x^4} \Delta x^3 - \dots$$

yについても、同様である。

密度拡散項は、2次精度中心差分を用いる。

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \Big|_{x=i, y=j} = \frac{C_{i+1j} - 2C_{ij} + C_{i-1j}}{\Delta x^2} - \frac{1}{12} \frac{\partial^4 C}{\partial x^4} \Delta x^2 - \dots$$

以上の式を用いたCOCOAコードについて3章で検証を行い、4章では、COCOAコードを用いてPb-Bi自然循環炉を対象とした解析を行う。

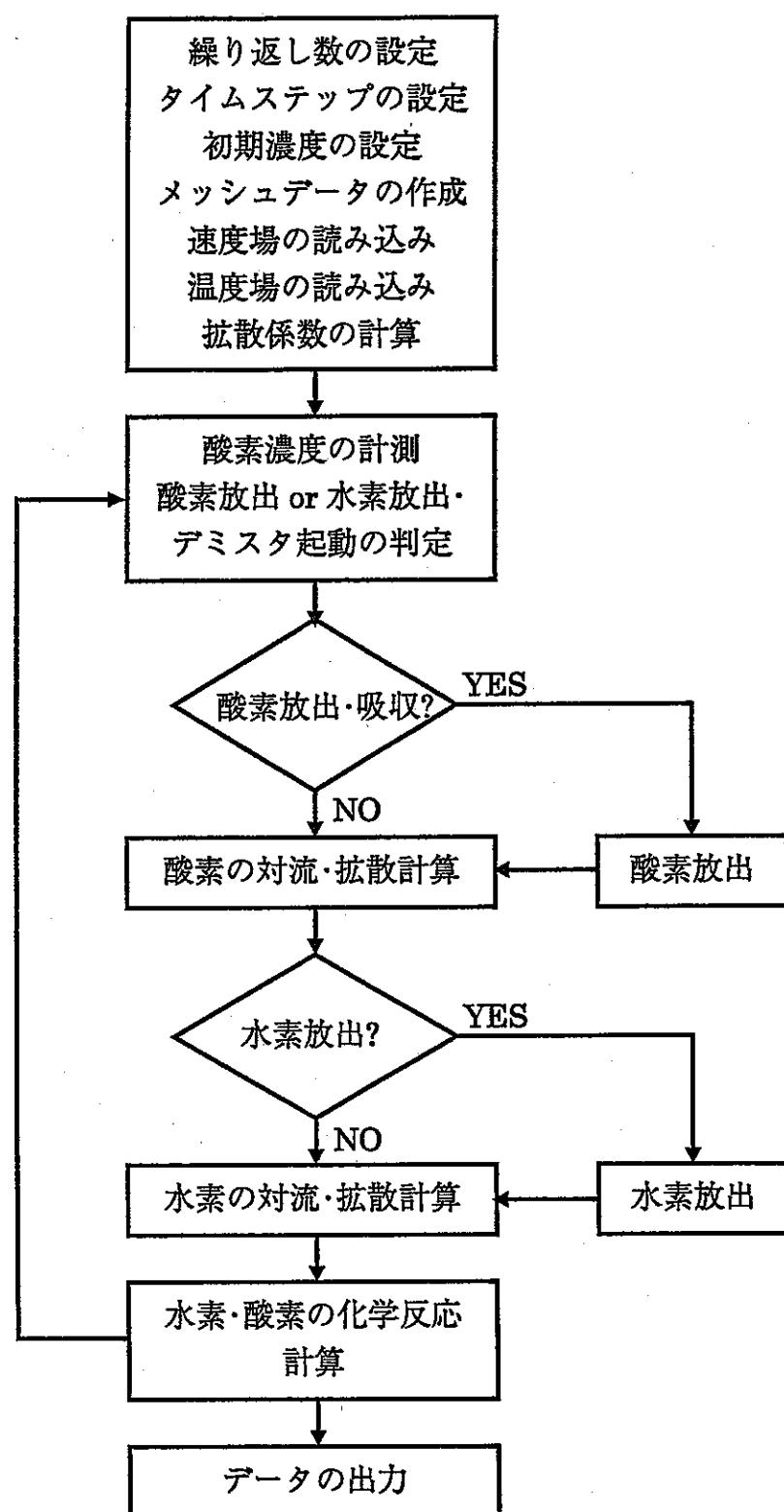


図 2.1.1 COCOA コードのフローチャート

3. COCOA コードの検証

3.1 対流項の検証問題

Pb-Bi 炉自然循環炉体系での解析を行う前に、COCOA コードの検証を行った。まずは、対流項の差分化の評価のために、対流及び拡散を含む 2 次元温度場についての検証問題を解いた。解く方程式は以下の通りである。

$$U \cdot \text{grad}T - \frac{1}{Pe} \nabla^2 T = 0$$

$$-1 \leq x \leq 1$$

$$0 \leq y \leq 1$$

ただし、温度は入口温度で無次元化されている。

検証解析の結果を図 3.1.1 に示す。これは、入口温度を与えた時の出口温度分布である。有限要素法と QUICK-FRAM による解析結果を示してある。解析結果によると、本解析で用いた 3 次精度風上差分は、有限要素法には及ばないものの、QUICK-FRAM よりは多少正確な結果に近い結果を与えていた。よって、解析手法は、十分な妥当性を有していると評価される。

3.2 正方形キャビティ流れ解析

対流項の差分化の妥当性が確認できたので、次に COCOA コードの濃度拡散計算機能を確認するために、正方形キャビティ内流れ場中の、酸素濃度拡散のシミュレーションを行った。

3.2.1 解析体系・解析条件

解析体系は、図 3.2.1 に示すような、 50×50 の等間隔直交メッシュの正方形キャビティである。図中には、酸素の放出領域も示してある。この位置から 4 秒間酸素を放出し、それが流れ場にのって拡散していく様子を計算した。

また、速度場を図 3.2.2 に示す。今回用いる COCOA コードでは、酸素の濃度は十分に低く、流れ場には影響を与えないとして仮定している。そのため、解析に用いる流れ場は別途正方形キャビティ流れ場解析コードによって求めたものを用いた。流れ場を求める上での境界条件は、No-Slip 条件とし、完全に定常になった流れ場を用いて濃度拡散解析を行った。

3.2.2 解析結果

表 3.1 に体系中の酸素総量の変化を示す。最初の 4 秒間における放出量を 100 とした時の総量変化である。総量は、酸素放出開始から 300[s]において 1.8[%]程度増加するが、その後は一定に保たれており、十分な精度を有している。

図 3.2.3 に正方形キャビティ内酸素濃度拡散解析結果を示す。酸素放出開始から 300[s]のものと、900[s]のものである。放出された酸素は、流れにのって渦中心に向かって流されていき、渦の中心が高濃度になっていく様子が観察される。これは、COCOA コードにおいて、拡散項のオーダーが対流項と比較して小さく、対流が支配する流れ場になっているためである。

以上より、与えられた流れ場中での濃度拡散計算機能について妥当性を確認した。

表 3.1 酸素総量の変化

	放出量	300[s]	600[s]	900[s]
酸素総量	100.00	101.80	101.80	101.80

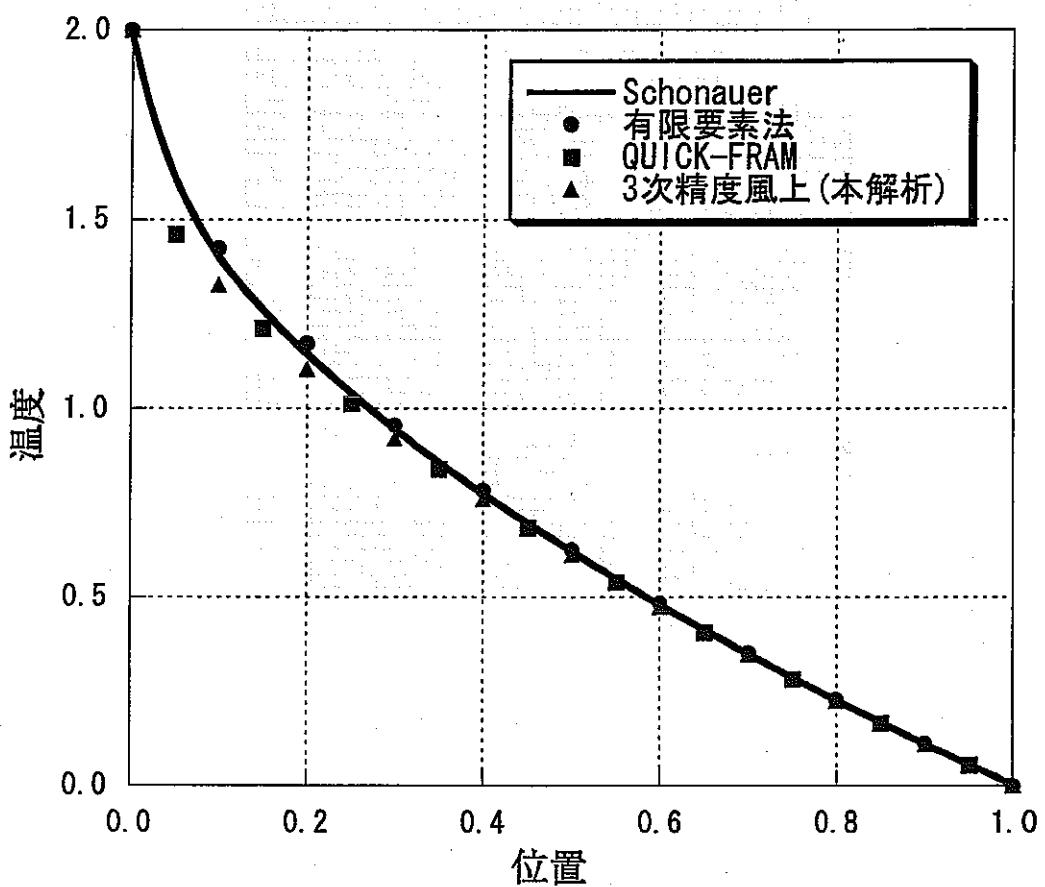


図 3.1.1 検証問題の結果

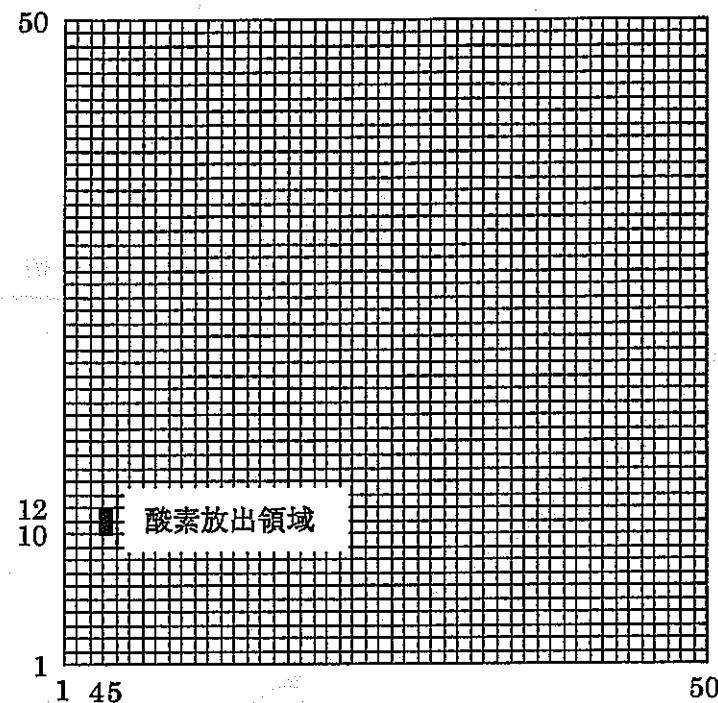
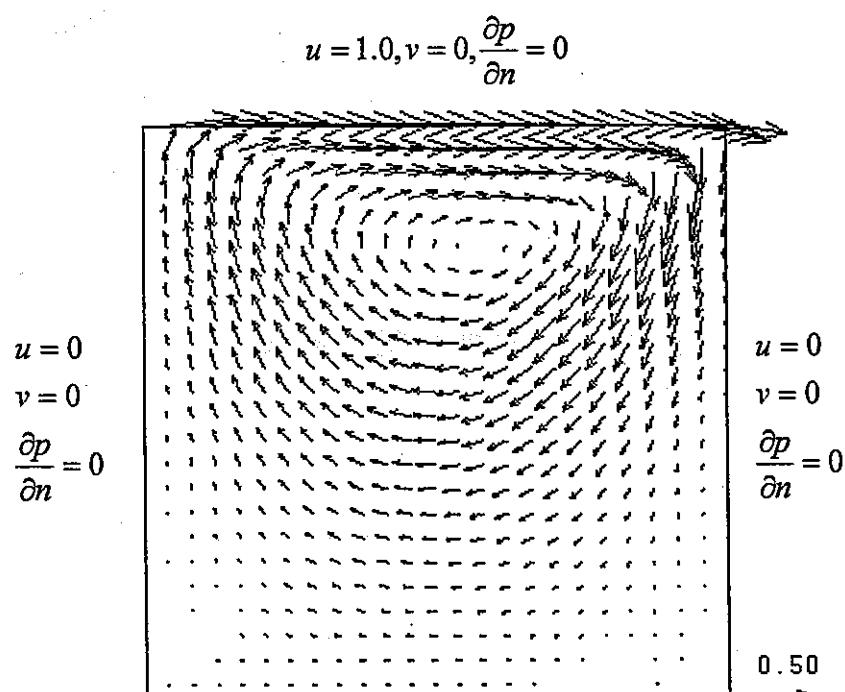
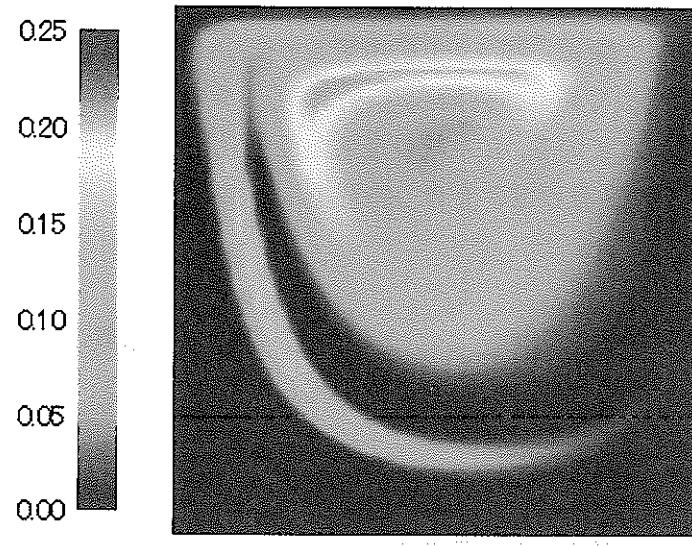


図 3.2.1 解析メッシュ

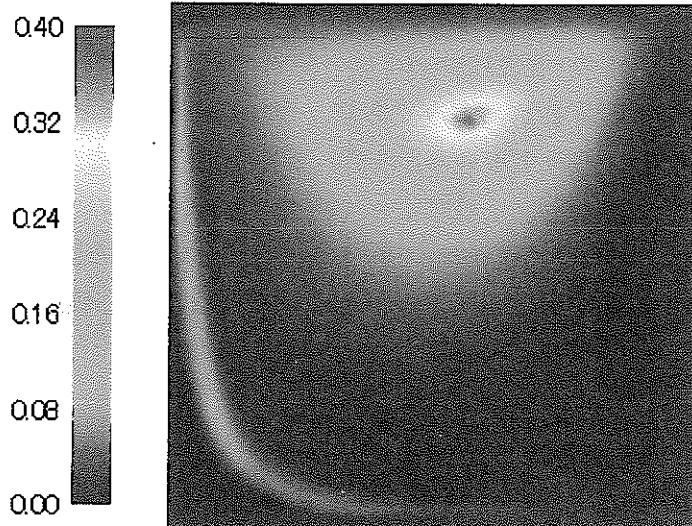


$$u = 0, v = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

図 3.2.2 速度場



t=300[s]



t=900[s]

図 3.2.3 正方形キャビティ解析結果

4. Pb-Bi 炉における酸素濃度制御解析結果

4.1 解析対象

本研究における解析対象は、図 4.1.1 に示すような Pb-Bi 冷却自然循環炉である。流路は円筒状の 2 領域構成であり、内筒内下部に炉心を配置し、ヘリカルコイル型の SG が外胴側上部に配置されている。3 系統の崩壊熱除去系(PRACS)が設けられている。解析対象は、炉心、PRACS 及び SG を含む主容器内とする。

4.2 解析メッシュ

図 4.2.1 に解析メッシュを示す。これは、Pb-Bi 冷却自然循環炉の炉心、PRACS 及び SG を含む主容器全体を R-Z2 次元でモデル化したものである。

4.3 速度場・温度場

本解析においては、速度場・温度場は解かず、あらかじめ MSG コードによって求たものを用いる。速度場・温度場を図 4.3.1 に示す。

4.4 解析条件

解析条件は以下のように与える。

- ① 酸素・水素の量は微量であり、濃度変化は速度場・温度場には影響を与えないものとする。よって、速度・温度については一定とする。
- ② 解析対象の流体は酸素と水素のみであり、それぞれ各点における Pb-Bi と同じ速度で移動しながら、拡散するものとする。また、化学反応としては酸素・水素反応のみを考慮する。ただし、それによって生成される水については無視する。
- ③ デミスターと酸素・水素放出領域は、SG 上部ダウンカマ領域寄りにある。
- ④ 酸素濃度に対する擾乱要因としては、燃料交換による炉心領域への酸素注入を考慮する。

4.5 酸素・水素反応

本解析においては、酸素濃度が上限値を超えている場合、水素を放出して酸素と反応させ酸素濃度を減少させる事を行う。この時に用いる、酸素・水素反応式は以下の化学反応平衡式を用いる。

$$K = \frac{[H_2O]}{[H_2][O_2]^{1/2}}$$

[X]:X のモル濃度

K:平衡定数

この式を満足するように、反応後の酸素濃度、水素濃度を決定する。ただし、反応前において、水の濃度は0とし、また、平衡定数は燃焼反応における平衡定数を用いるものとし、温度によって次のように変化するものとする。^[7]

$$K = 1.0 \times 10^{-4} \times T^2 - 0.1607 \times T + 78.724$$

T:各点における温度(K)

4.6 酸素濃度制御機構

本研究においては、酸素濃度制御機構として、ON-OFF制御とPID制御の2種類の制御機構について解析をおこなう。ON-OFF制御、PID制御機構の概念図を、図4.6.1に示す。

4.6.1 ON-OFF制御における酸素制御機構

- ① 計測した酸素濃度>上限値(0.244ppm)の時

水素放出($0.347[\text{g}/\text{s}]$)とデミスタによる酸素吸収をおこない酸素濃度を減少させる。

ただし、デミスタによって吸収される酸素量は、デミスタ部における酸素濃度を $C_{dem}[\text{ppm}]$ とする時、 $0.7 \times (C_{dem} - 0.244)$ とする。

- ② 計測した濃度<上限値、かつ、計測した濃度<下限値(0.0023ppm)の時

酸素放出(1.11×10^{-3})によって酸素濃度を上昇させる。

酸素濃度の計測方法としては、次の2通りについて解析をおこなう。

- ① 体系全体の濃度を計測し、その最大値及び最小値について、それぞれ酸素濃度の上限値及び下限値と比較する場合。

- ② 体系中の1点において酸素濃度を計測し、上限値・下限値と比較する場合。ただし、2箇所の計測点について解析をおこなった。

4.6.2 PID制御における制御機構

目標とする酸素濃度、比例感度、積分時間、微分時間を定めた上で、体系中の1点について酸素濃度を計測し、その濃度と目標酸素濃度の偏差についてPID演算をおこなう。その値が正の時、水素放出によって酸素濃度を減少させ、負の時、酸素放出によって酸素濃度を増加させる。また、値の絶対値によって放出量を決定する。

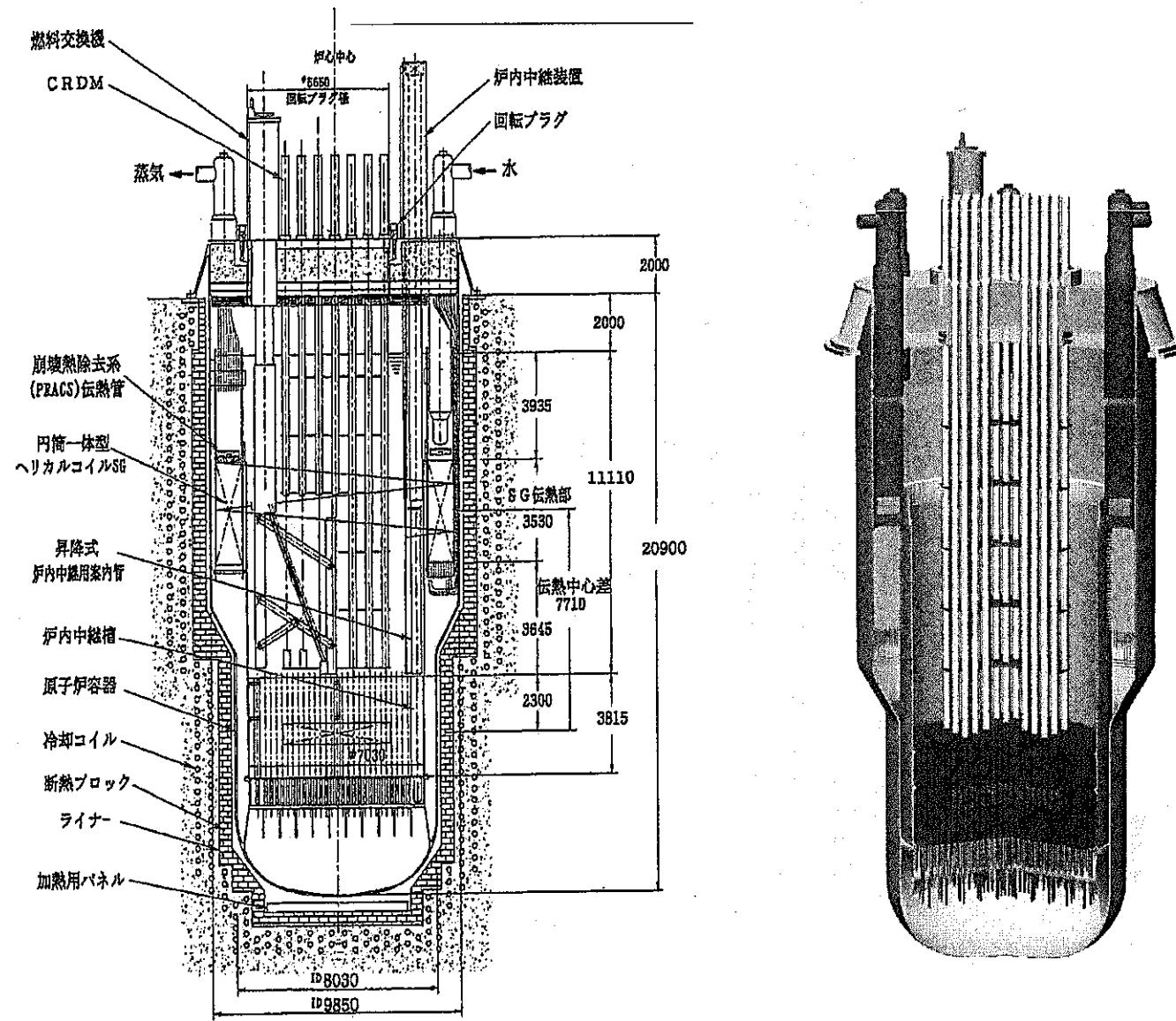


図 4.1.1 Pb-Bi 冷却自然循環中型炉(40 万 kW_e)原子炉構造

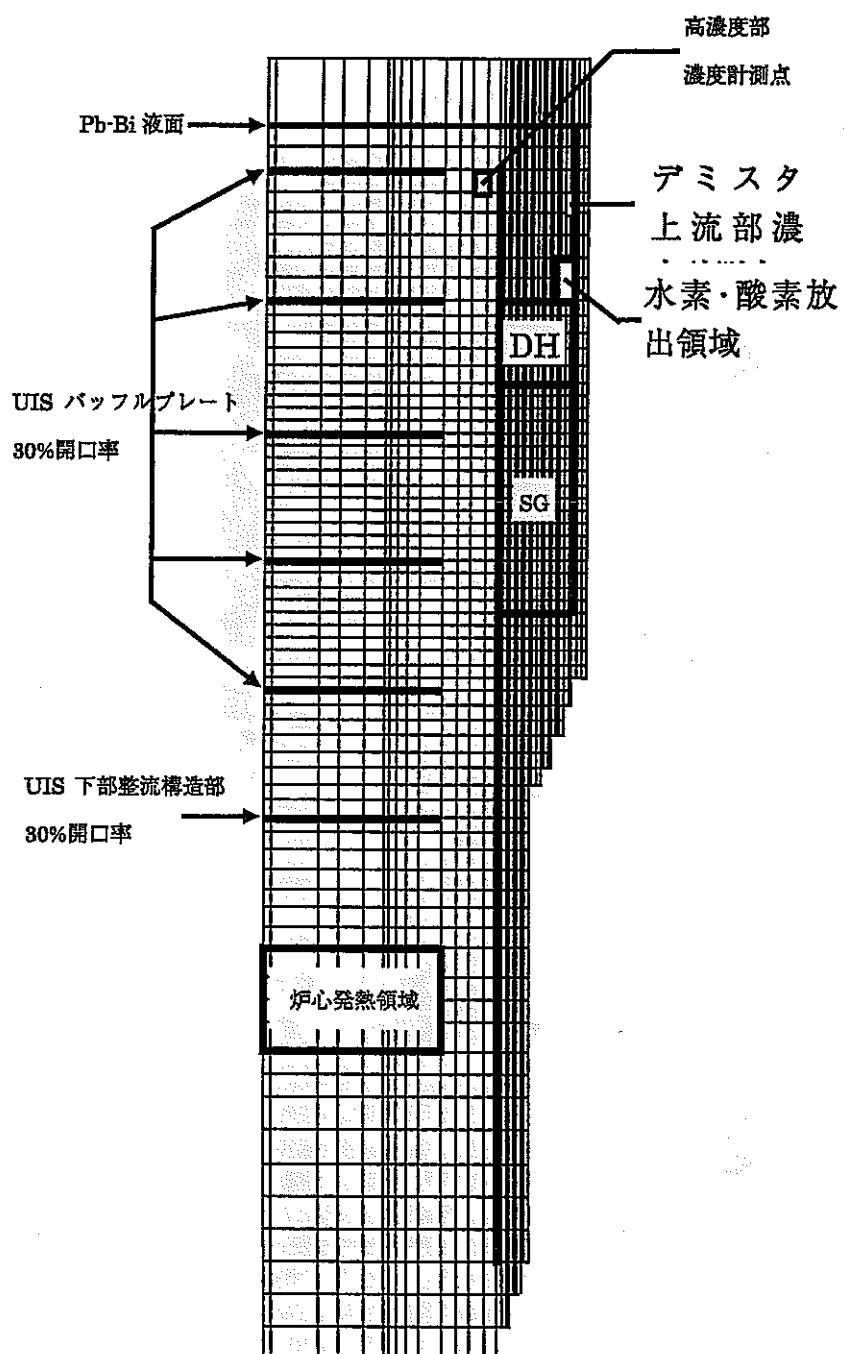


図 4.2.1 解析メッシュ

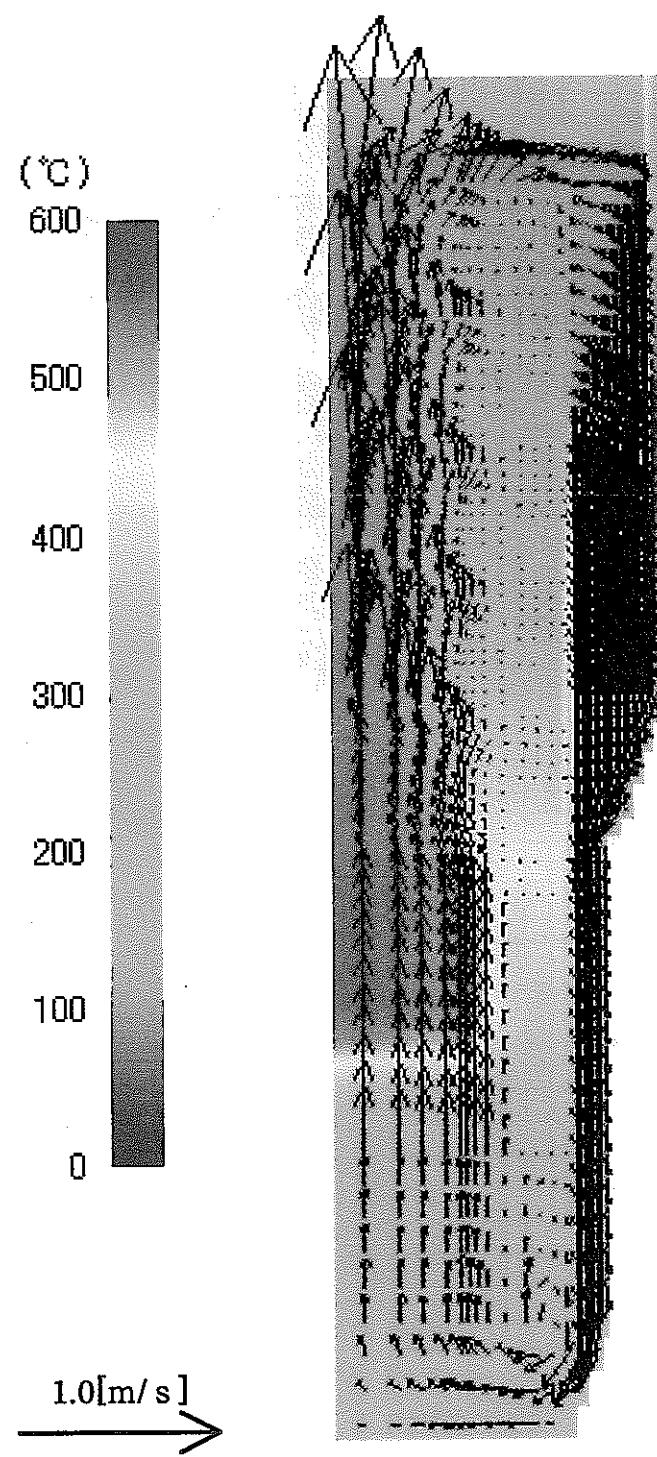


図 4.3.1 流速場・温度場

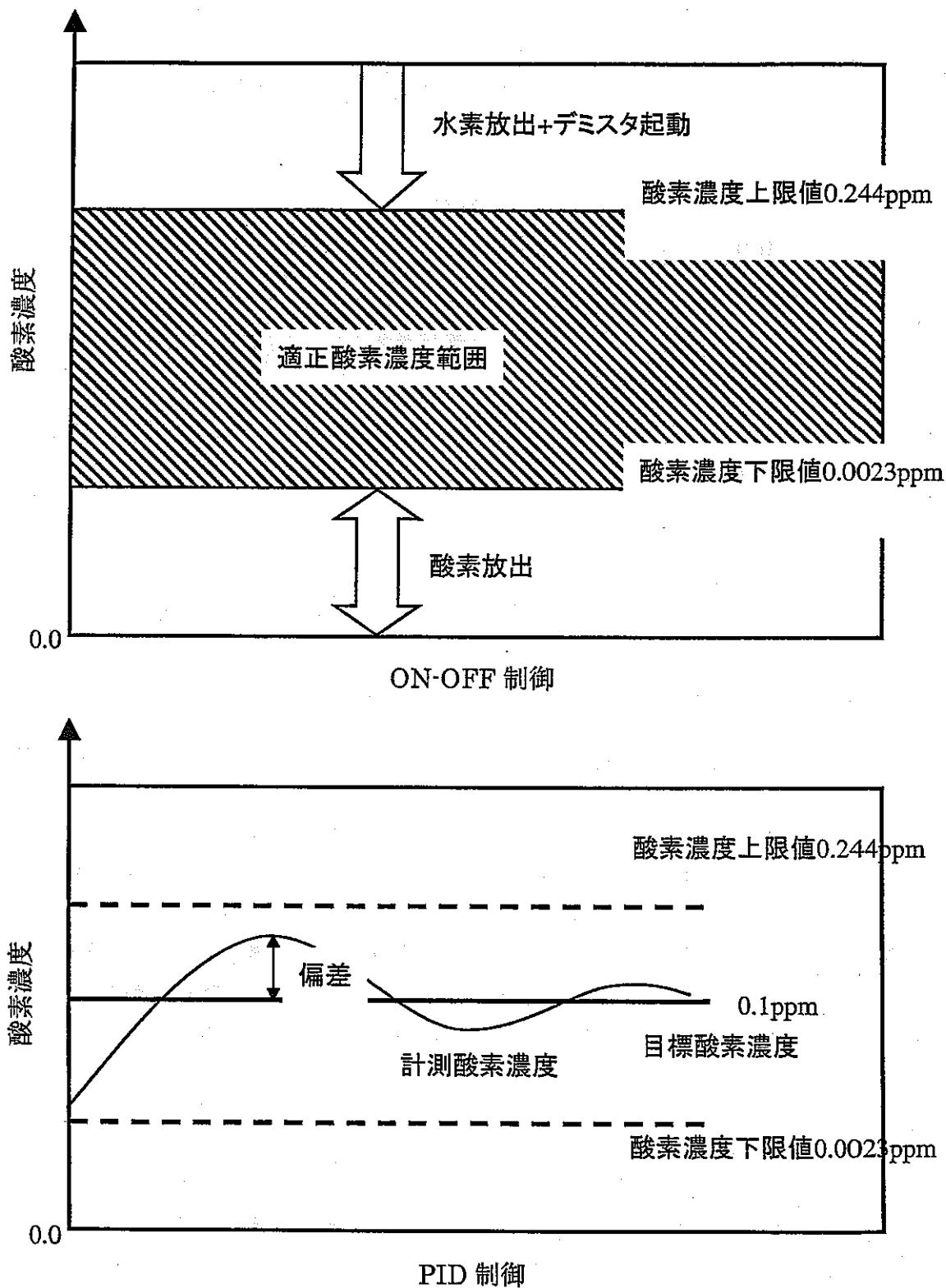


図 4.6.1 制御方法の概念図

4.7 ON-OFF 制御における解析結果

4.7.1 解析条件

ON-OFF 制御における解析は、以下の表 4.1 のケースについて行う。ここで、酸素濃度の計測点を変化させているのは、計測点の選び方によって制御特性が大きく変化するためである。

表 4.1 解析ケース

解析ケース	初期条件	酸素濃度計測点
1	炉心領域は高酸素濃度	デミスタ上流部
2	他の領域は一定酸素濃度	高酸素濃度部
3		体系全体

ただし、炉心に大量の酸素が注入されるのは、燃料交換による酸素注入をモデル化したものであり、高濃度部とは、ケース 1 の解析によって、酸素濃度が最も高くなった部分を指している。

4.7.2 デミスタ上流部で濃度を計測する解析

酸素濃度制御が必要となる条件として、燃料交換により初期に炉心部に大量の酸素が注入される条件について解析を行った。制御対象の酸素濃度はデミスタ上流部において計測する。解析結果を図 4.7.1 に示す。また、水素・酸素放出量の時間変化と酸素濃度の最高値・最低値の時間変化を図 4.7.2 に示す。

解析結果より、炉心に注入された酸素は流れに乗って上部に運ばれていき、内筒を超えて SG 側に流れ込む辺りが高濃度となる。しかし、デミスタ上流部の酸素濃度計測点においてはそれほど高濃度とはならないので、デミスタ部からの水素注入は、20 秒ほどで停止する。これ以後、水素は放出されないので、内筒付近の高濃度部においては、最大酸素濃度が上限値を上回ったままになる。酸素濃度の下限値については、最低酸素濃度が下限値を下回ることはほとんど無い。よって、デミスタ上流部で酸素濃度を計測して制御した場合、内筒付近で酸化鉛などの不純物が形成される可能性がある。

4.7.3 最高濃度部で濃度を計測する解析

デミスタ上流で酸素濃度を計測する場合には、十分な制御効果を得ることができなかったので、ケース 1 の解析で明らかになった最高濃度部(内筒上部付近)に濃度計測点を取って解析を行った。解析結果を図 4.7.3 に、水素・酸素放出量の時間変化と酸素濃度の最高値・最低値の時間変化を図 4.7.4 に示す。

高酸素濃度領域において制御対象の濃度を計測しているので、最高酸素濃度が上限値を下回る 800[s]まで水素放出が続く。この時点においては、最低酸素濃度が下限値を下

回っているが、その後上昇し、1400[s]以降は下限値を下回ることはほとんど無い。最高酸素濃度がわずかに上昇するが、1500[s]以降、体系の濃度分布に大きな変化は見られない。よって、高濃度部分で制御対象の濃度を計測した場合、炉心に大量の酸素が注入されてから1500[s]程度で、体系の酸素濃度を適正な酸素濃度範囲にすることが可能である。

4.7.4 体系全体の濃度を計測する解析

ケース2の解析結果によって、燃料交換による大幅な酸素濃度上昇を適正濃度範囲まで減少させることができると分かった。しかし、ケース2では最高濃度のみを計測しているため、下限値に対する制御性に若干問題がある。これらを踏まえて、体系全体の濃度を計測し、その中の最高値と最低値に対して制御機構を働かせる解析を行った。解析結果を図4.7.5に、水素・酸素放出量の時間変化と酸素濃度の最高値・最低値の時間変化を図4.7.6に示す。

全体を通して、濃度分布はケース2の場合と近いものになっている。ただし、ケース2の場合よりも早く水素放出が始まるため、750[s]程度で最高濃度が上限値を下回る。この時点で最低酸素濃度が下限値を下回っているため、酸素放出が始まり、1250[s]以降は最低酸素濃度が大体下限値を上回っている。

ケース2の場合と比較すると、濃度制御の即応性が多少上がっているようだが、大きな差はないといえる。

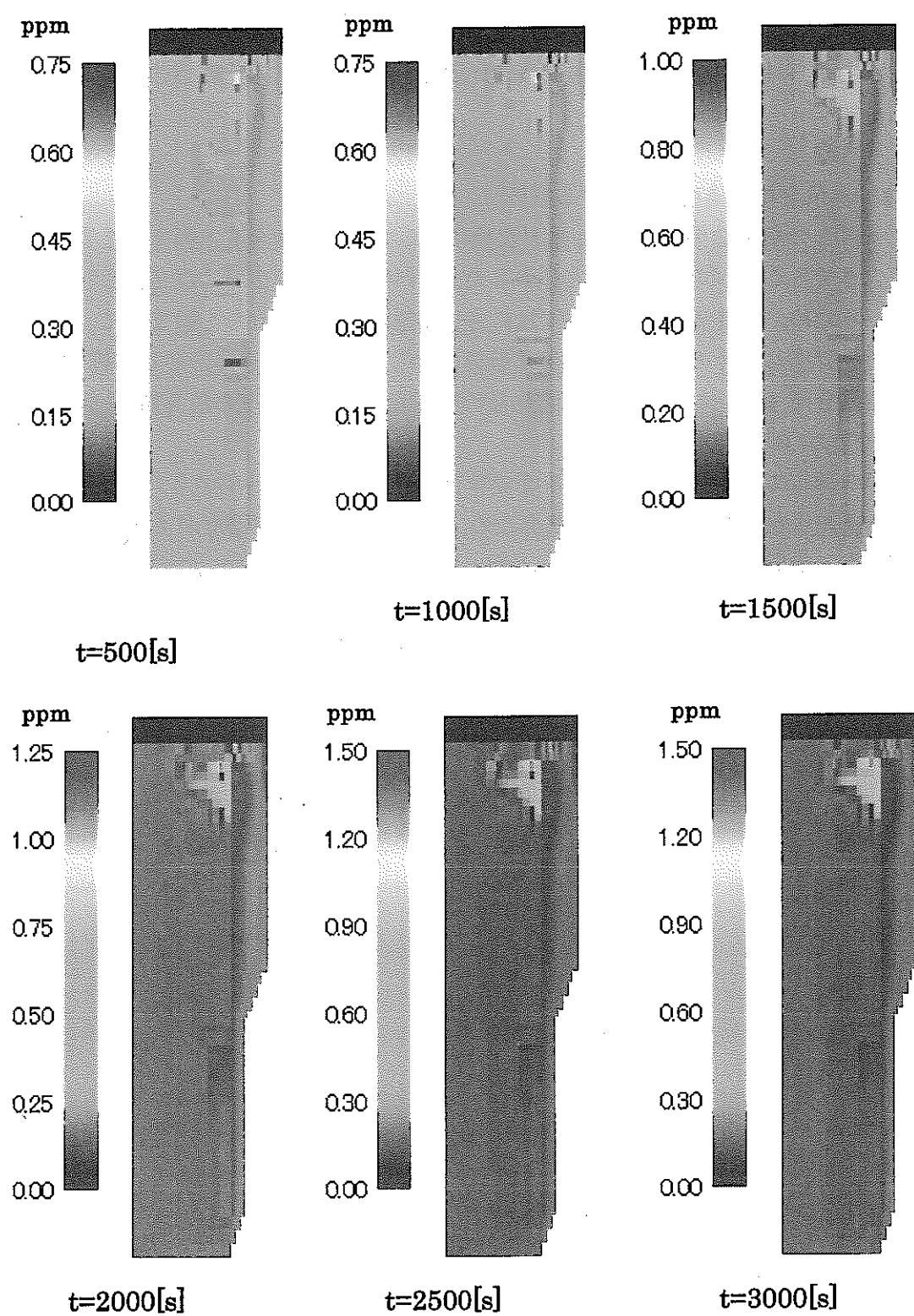


図 4.7.1 Case1 酸素濃度分布(デミスタ部計測, ON-OFF 制御)

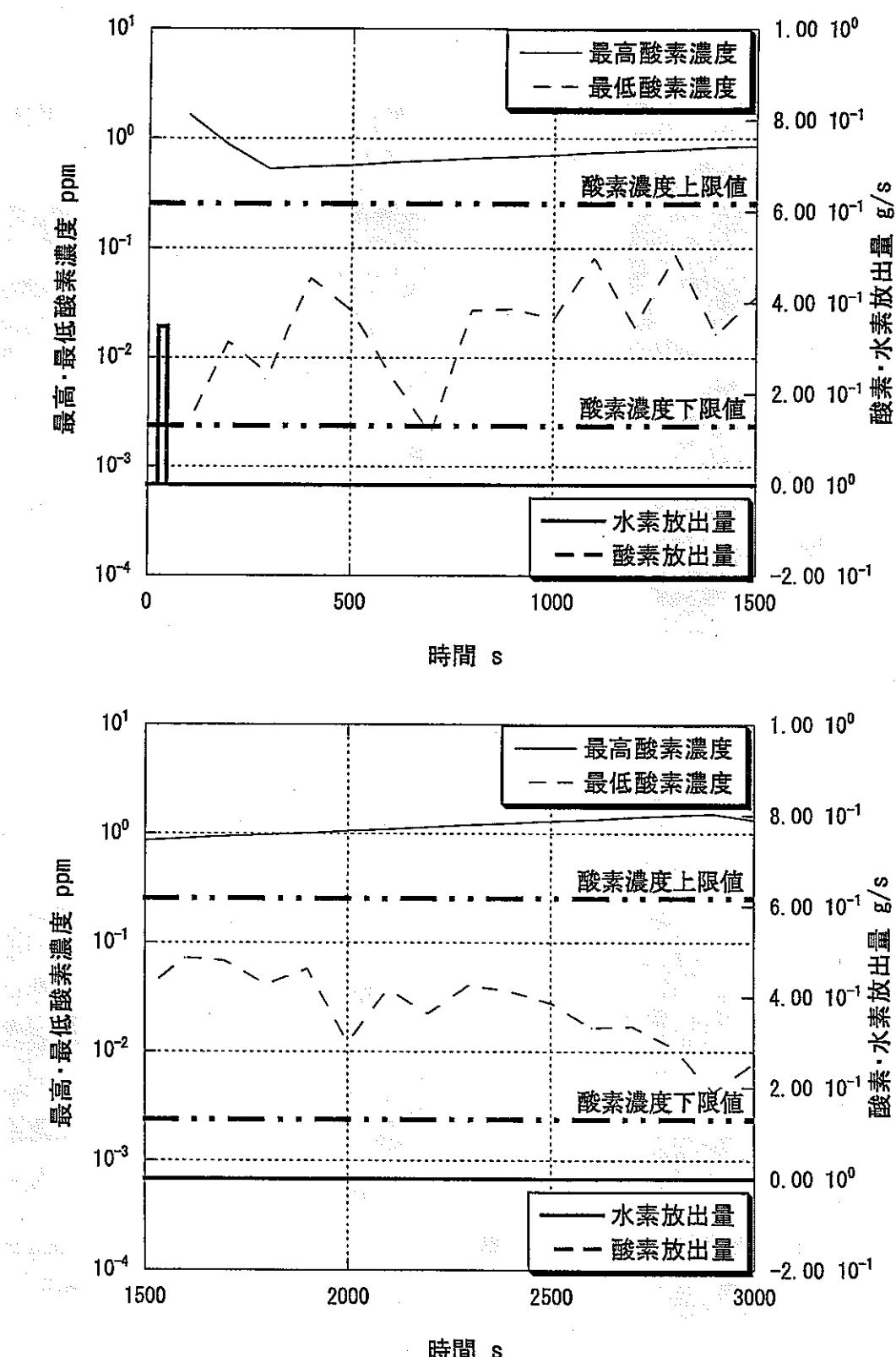


図 4.7.2 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case1: デミスタ部計測, ON-OFF 制御)

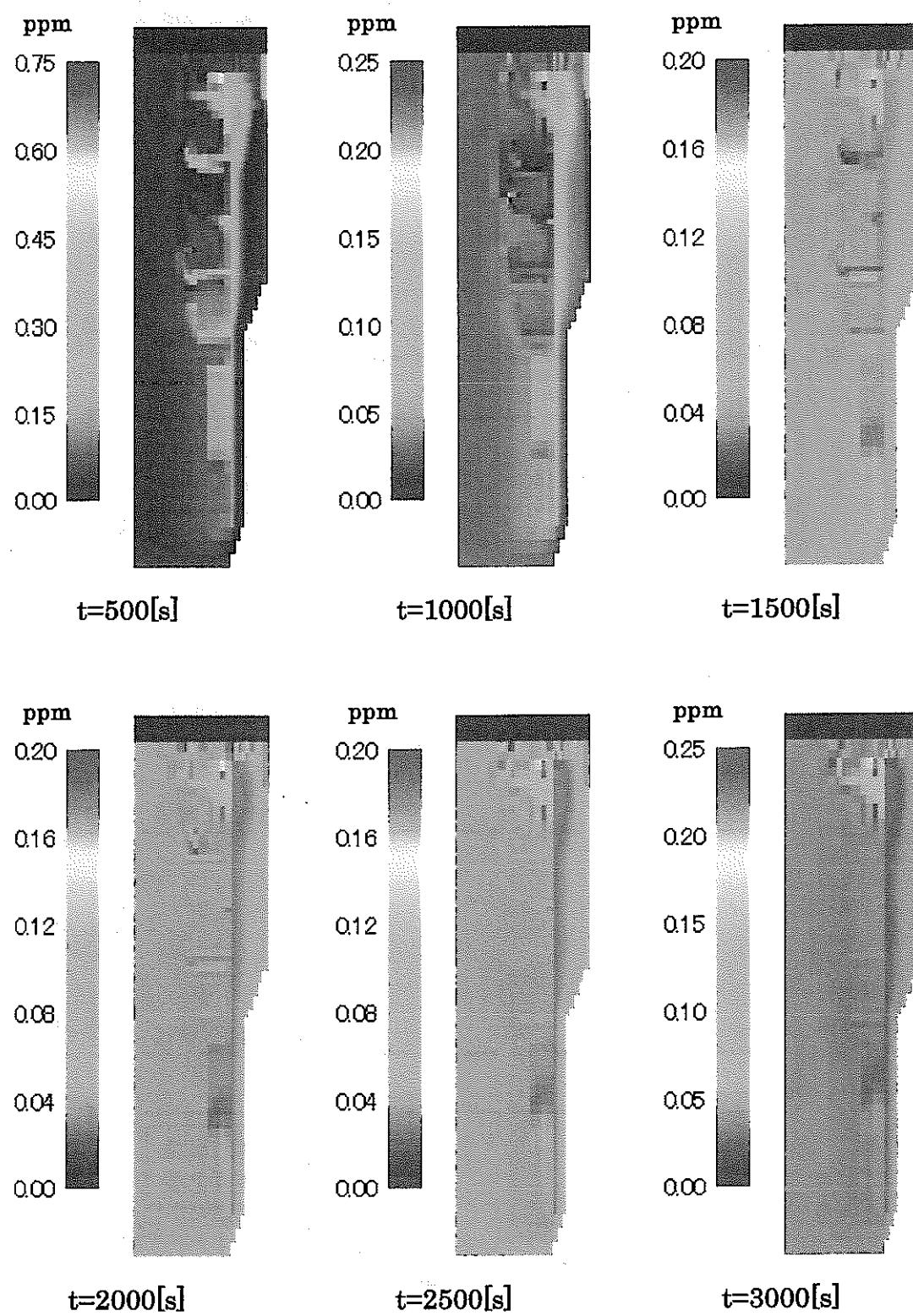


図 4.7.3 Case2 酸素濃度分布(高濃度部計測, ON-OFF 制御)

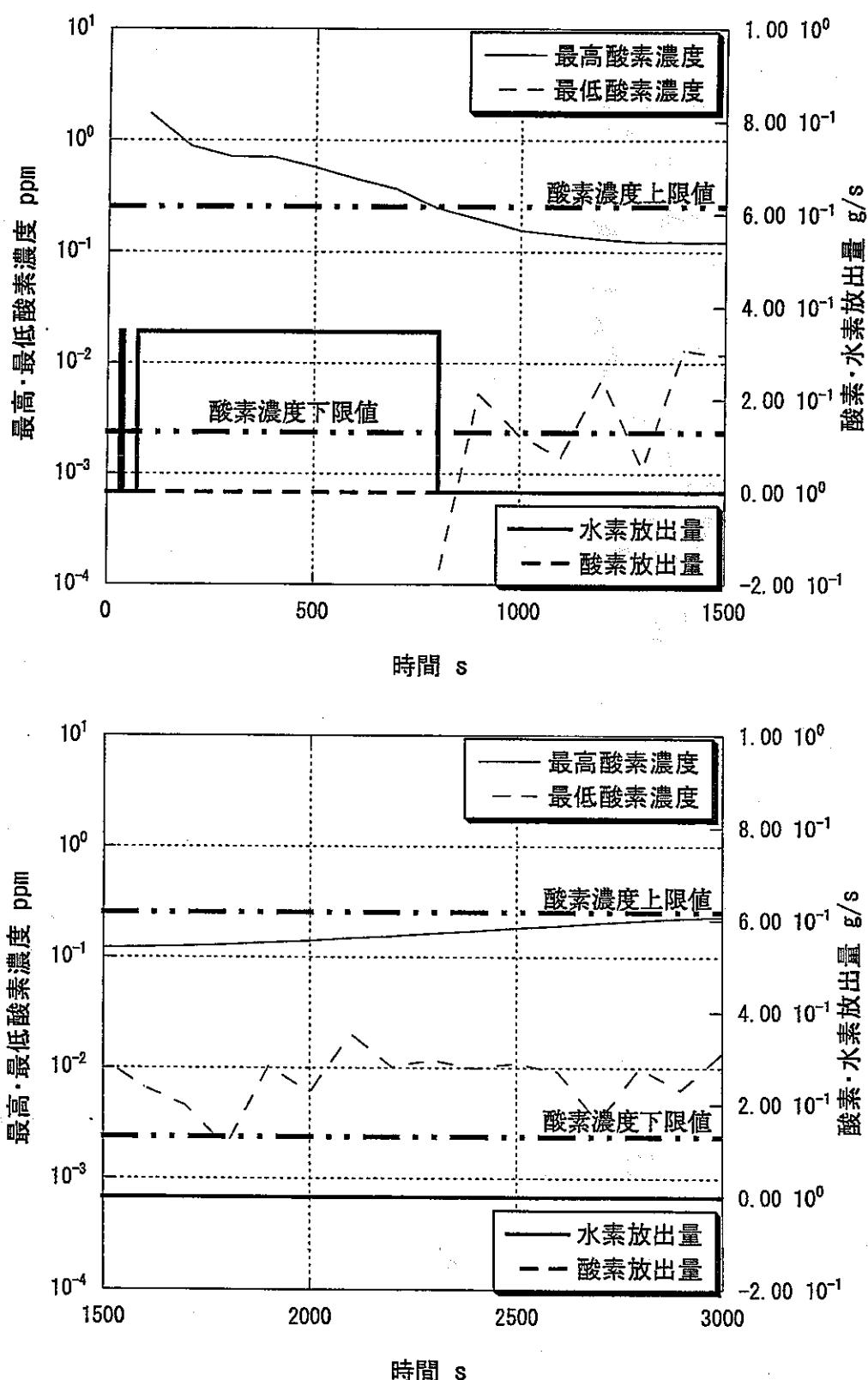


図 4.7.4 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case2:高濃度部計測, ON-OFF 制御)

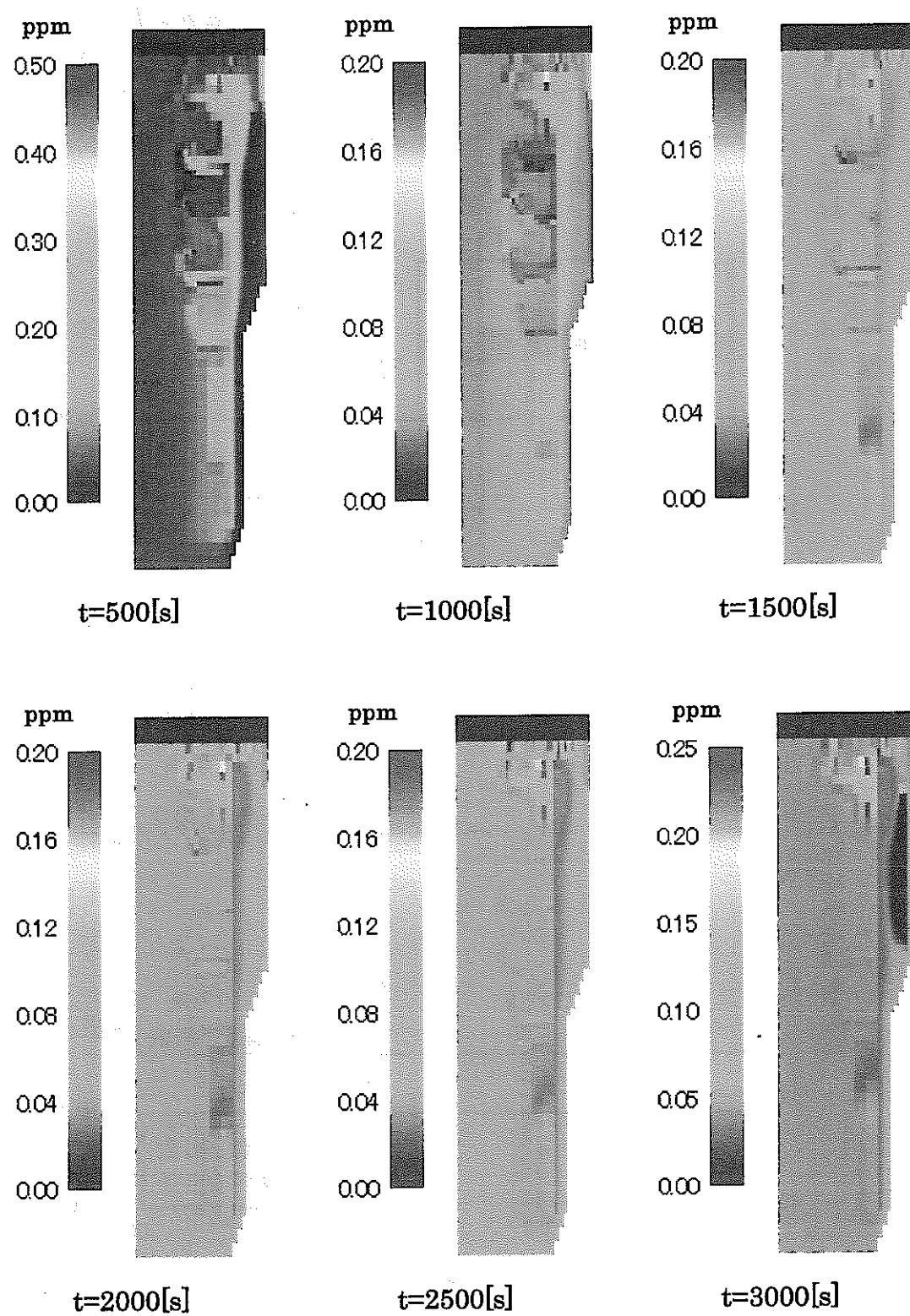


図 4.7.5 Case3 酸素濃度分布(体系全体計測, ON-OFF 制御)

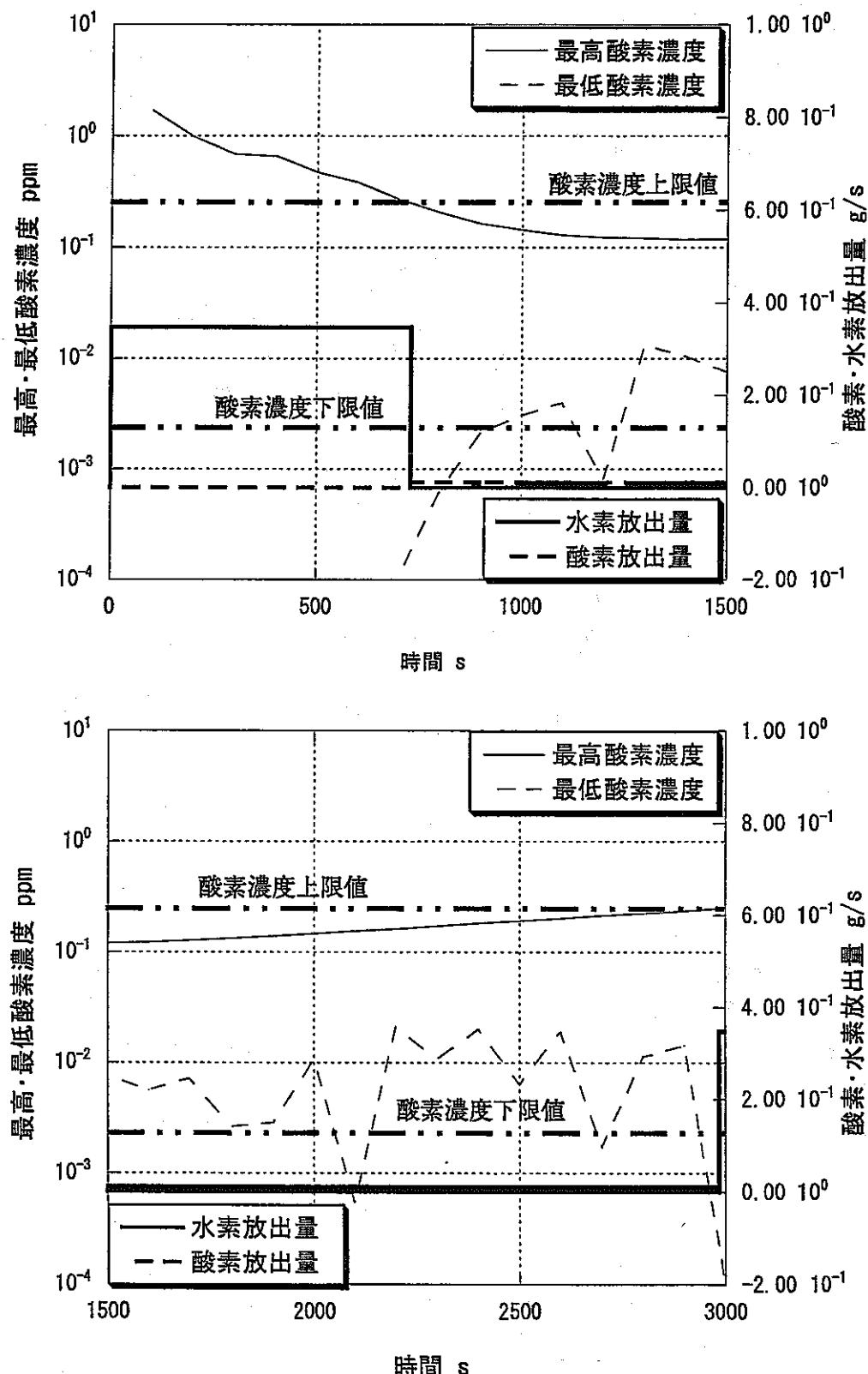


図 4.7.6 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case3:体系全体計測, ON-OFF 制御)

4.8 PID 制御における解析結果

4.8.1 解析条件

PID 制御における解析は、以下の表 4.2 のケースについて行う。濃度計測点を変化させるのは、ON-OFF 制御の場合と同じく、計測点の選び方で制御特性が大きく変化するためである。

表 4.2 解析ケース

解析ケース	初期条件	酸素濃度計測点
4	炉心領域は高酸素濃度	デミスタ上流部
5	他の領域は一定酸素濃度	高酸素濃度部

炉心領域が高酸素濃度となるのは、燃料交換のためであり、また、高酸素濃度部とは、ケース 1 の解析によって、最も酸素濃度が高くなった点のことを言う。

4.8.2 デミスタ上流部で濃度を計測する解析

ON-OFF 制御の場合と同じく、燃料交換により初期に炉心部に大量の酸素が注入される条件について解析を行った。制御対象の酸素濃度はデミスタ上流部において計測する。解析結果を図 4.8.1 に示す。また、水素・酸素放出量の時間変化と酸素濃度の最高値・最低値の時間変化を図 4.8.2 に示す。

解析結果より、内筒を超えて SG 側に流れ込む位置付近が高酸素濃度となっている。これは、ON-OFF 制御の場合と同じである。200[s]までに大量の水素が注入され、体系全体の濃度が大きく低下する。それにともない、デミスタ上流部の酸素濃度計測点における濃度が目標濃度になり、以降、水素、酸素の放出はほとんど無い。この時点までに、内筒付近の高濃度部における濃度は、酸素濃度の上限値を下回っていないので、最高酸素濃度が酸素濃度の上限値を上回ったままになる。酸素濃度の下限値については、初期の大量の水素放出によって、最低酸素濃度が大きく下限値を下回るが、600[s]辺りにおいて回復する。その後は、1500[s]付近で下限値を下回るもの、おおよそ適正範囲内に収まっている。よって、デミスタ上流部で濃度を計測する場合、構造材腐食の心配は少ないが、内筒付近で酸化鉛などの不純物が形成される可能性がある。

4.8.3 最高濃度部で濃度を計測する解析

デミスタ上流で酸素濃度を計測する場合には、最高濃度に対して十分な制御効果を得ることができなかったので、ケース 4 の解析で明らかになった最高濃度部(内筒上部付近)に濃度計測点を取って解析を行った。解析結果を図 4.8.3 に、水素・酸素放出量の時間変化と酸素濃度の最高値・最低値の時間変化を図 4.8.4 に示す。

解析結果より、500[s]程度までにかなりの量の水素が放出されることにより、

ON-OFF 制御の場合と比較して、全体的に低濃度となる。また、最高濃度がかなり低いことによって、濃度分布が均一に近くなっている。その後、最高酸素濃度が上昇することで、この均一性は崩れる。最高濃度を 0.1[ppm]にするように制御を行っているので、初期において、最高酸素濃度は急低下しその後、0.1[ppm]付近においてゆるやかに推移する。最低酸素濃度については、初期の水素放出で下限値を下回る。その後、上昇するものの、1700[s]まで下限値を下回っている。よって、高濃度部分で制御対象の濃度を計測した場合、最高酸素濃度に対する制御は良好だが、最低酸素濃度が下限値を下回る時間が長く、構造材腐食が起こる可能性が高くなる。

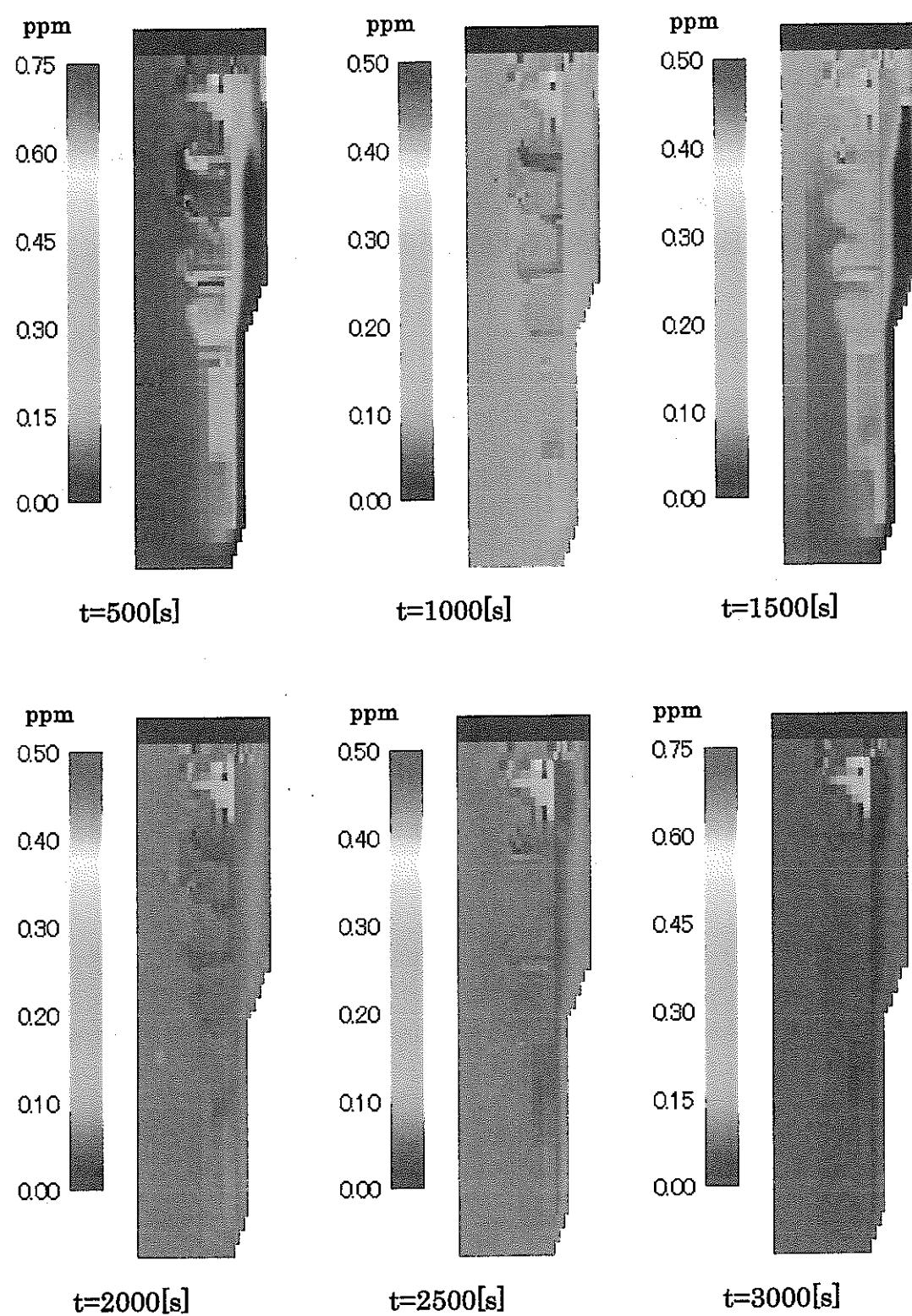


図 4.8.1 Case4 酸素濃度分布(デミスタ部濃度計測, PID 制御)

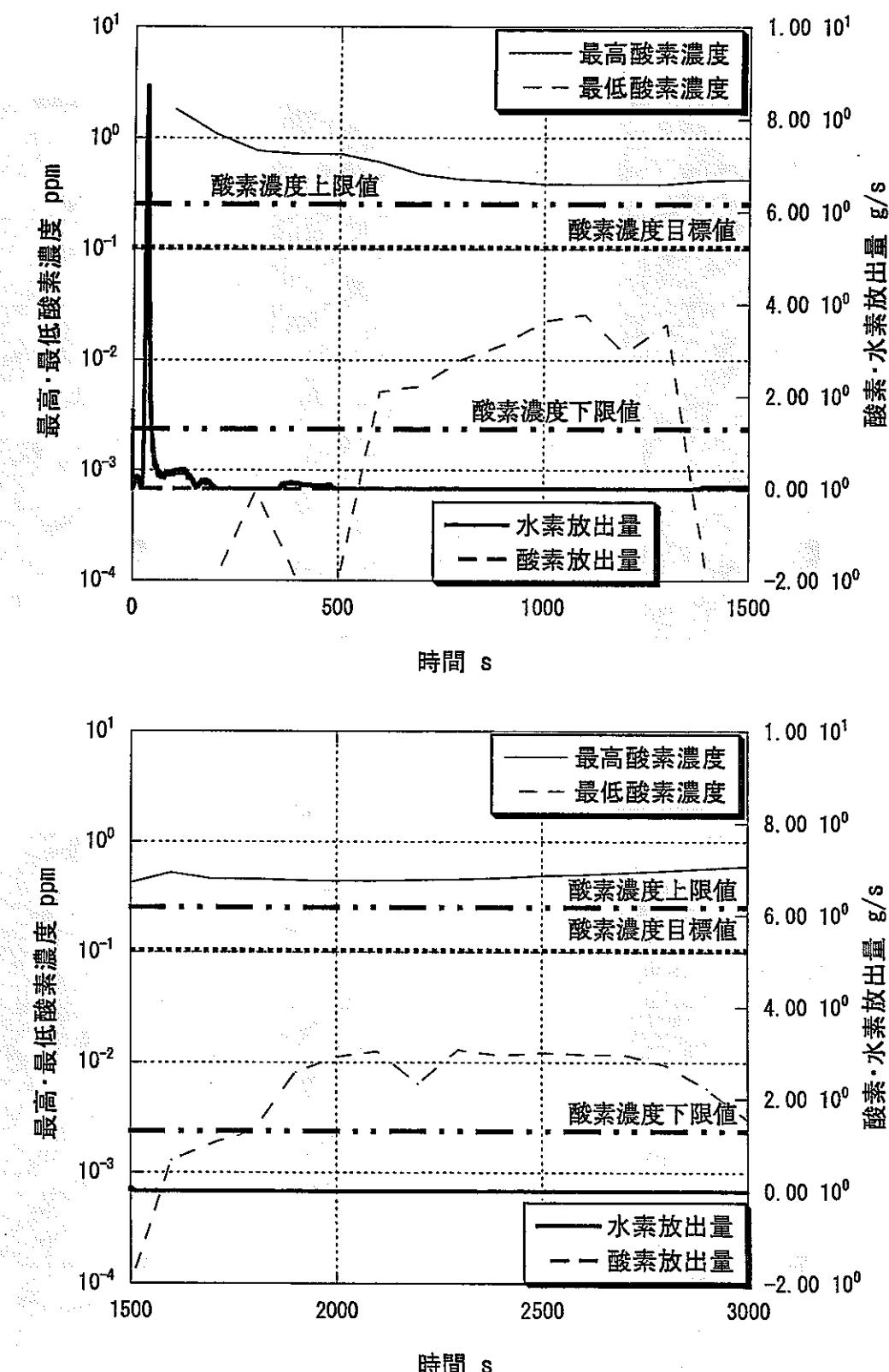


図 4.8.2 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case4: デミスタ部計測, PID 制御)

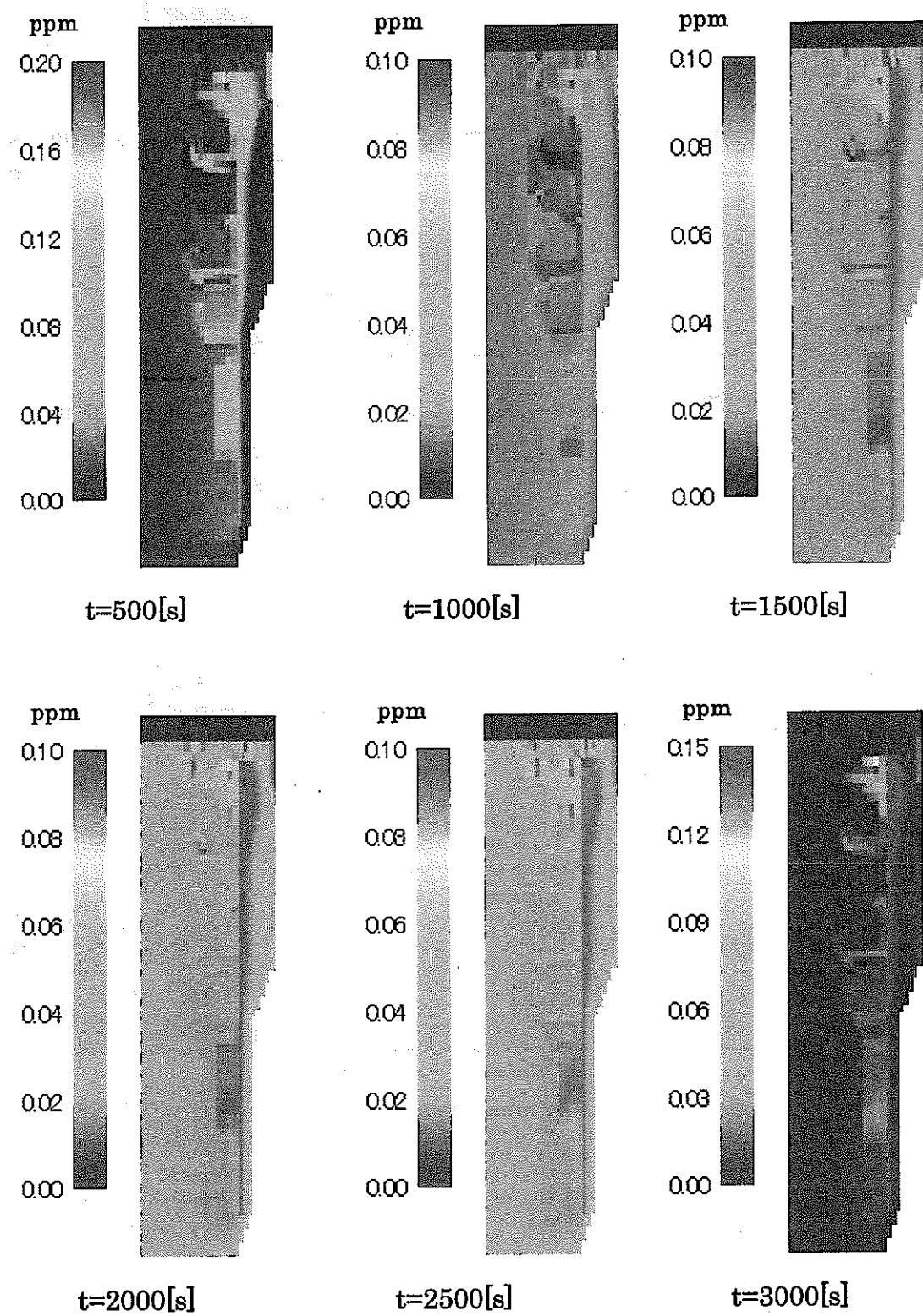


図 4.8.3 Case5 酸素濃度分布(高濃度部計測, PID 制御)

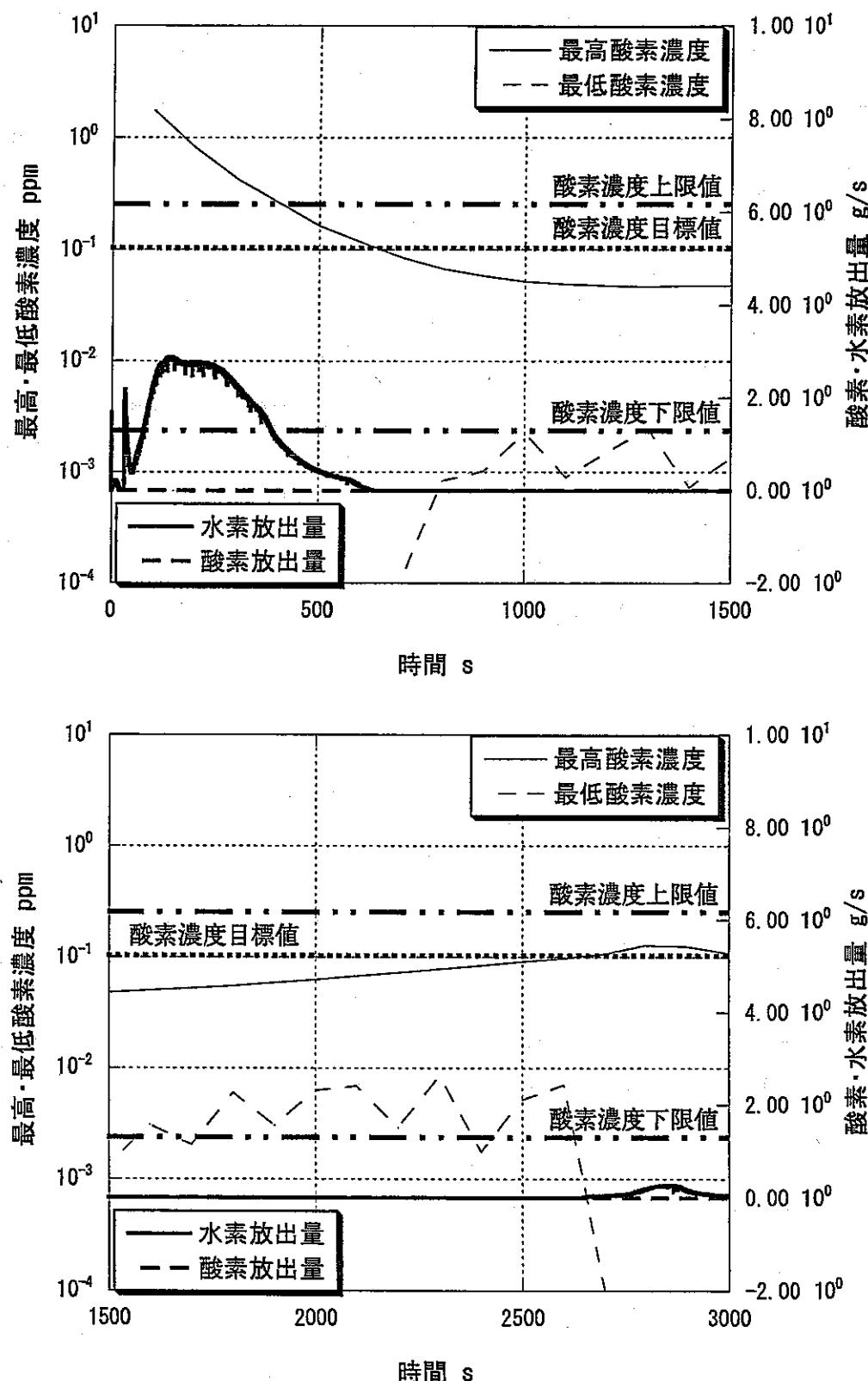


図 4.8.4 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case5:高濃度部計測, PID 制御)

4.9 ON-OFF 制御における機器故障を想定した解析結果

4.9.1 解析条件

酸素放出系、水素放出系+デミスタによって、酸素濃度を適正範囲に制御できることが前節までに確認できたので、次に機器故障を想定した解析を行う。想定する機器故障としては、酸素放出系の故障、水素放出系の故障、デミスタの故障の3通りである。解析ケースを以下の表4.3に示す。

表4.3 解析ケース

解析ケース	初期条件	酸素濃度計測点	想定機器故障
6	炉心領域は高酸素濃度 他の領域は一定酸素濃度	高酸素濃度部	水素放出系故障
7		高酸素濃度部	酸素放出系故障
8		高酸素濃度部	デミスタ故障

初期条件は、前節までと同じように、燃料交換により炉心領域が高酸素濃度をなった条件を想定し、高酸素濃度部は、前節までの解析で濃度が最も高くなつた領域(内筒付近のスタグナント領域)である。

4.9.2 水素放出系故障を想定した解析

燃料交換により初期に炉心部に大量の酸素が注入される条件において、水素放出系が故障している場合について解析を行つた。制御対象の酸素濃度は高濃度部で計測する。解析結果を図4.9.1に示す。

解析結果より、最高酸素濃度は1000[s]程度で酸素濃度上限値を下回り、最低酸素濃度も1500[s]以降は大体適正範囲内に収まる。よって、水素放出系が故障し、酸素放出系とデミスタでの制御の場合においても、酸素濃度を制御することは可能と言える。ただし、故障を想定しない場合の解析結果(ケース2)との比較より、最高酸素濃度が酸素濃度上限値を下回る時間が750[s]から1000[s]へと遅くなつてゐるのが分かる。

4.9.3 酸素放出系故障を想定した解析

ケース1と同様な条件で、酸素放出系が故障した場合の解析を行つた。結果を図4.9.2に示す。

解析結果より、初期に水素が放出されることで最高酸素濃度が減少していき、800[s]付近で酸素濃度上限値を下回ることが分かる。1300[s]以降において酸素濃度下限値を上回った値で推移する。全体的に、故障を想定しない解析結果(ケース2)とあまり変わらない解析結果になつてゐるが、これは、高い酸素濃度を低下させる解析を行つてゐるので、酸素放出の影響が少ないのである。

4.9.4 デミスタ故障を想定した解析

解析ケース 3 として、デミスタ故障を想定した場合の解析を行った。結果を図 4.9.3 に示す。

解析結果より、最高酸素濃度は 1000[s]において酸素濃度の上限値を下回り、適正濃度範囲に入る。最低酸素濃度についても、水素放出が終了する 1000[s]から上昇し始め、1600[s]以降は大体適正範囲に収まる。これより、デミスタが故障し水素放出系と酸素放出系で制御を行う場合においても、酸素濃度制御は可能であると言える。デミスタが故障していない状態(ケース 2)との比較においては、最高酸素濃度が適正範囲に入る時間が 750[s]から 1000[s]へと遅くなり、それにともなって最低酸素濃度が適正範囲に入る時間も遅くなっていることが分かる。

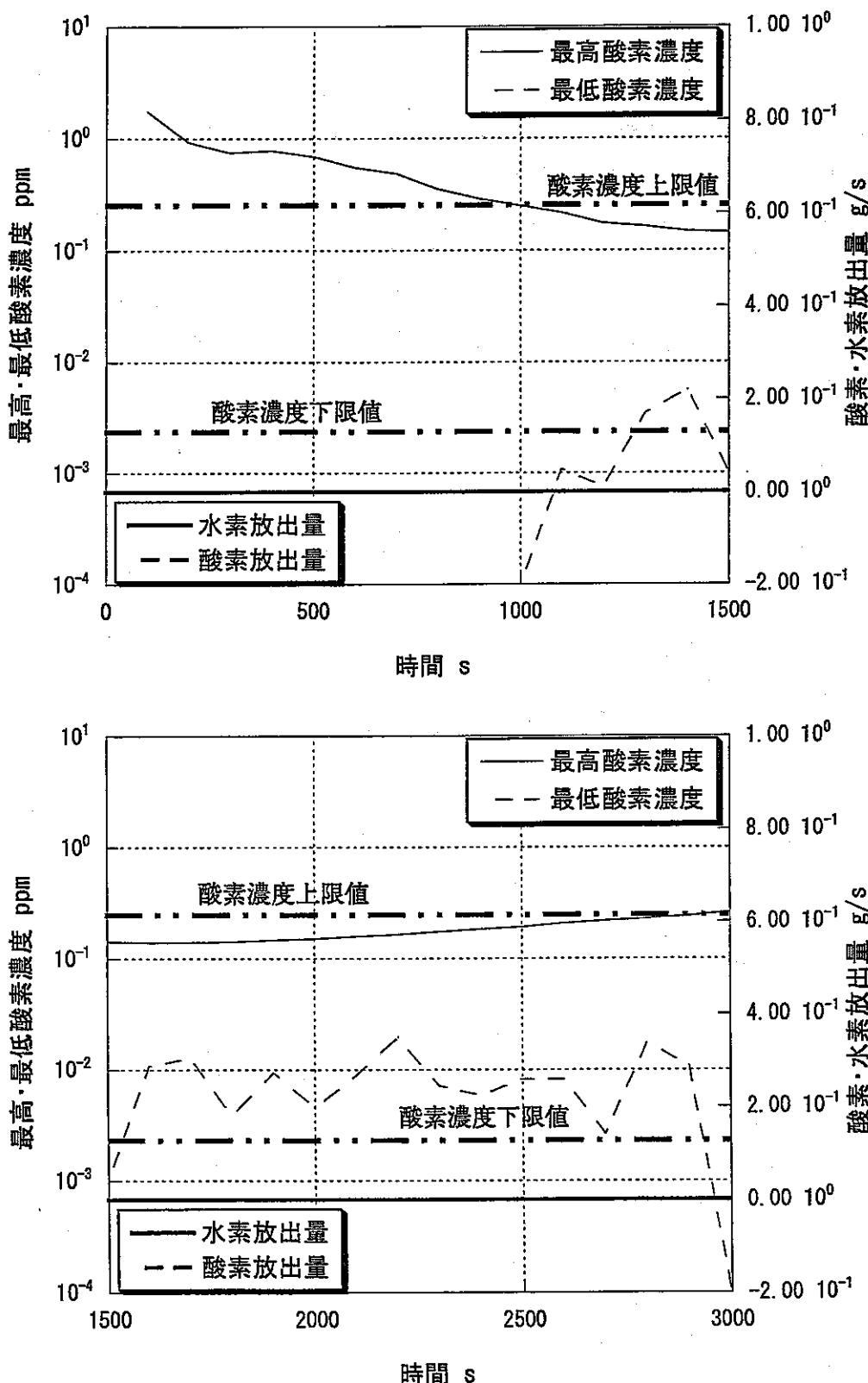


図 4.9.1 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case6:高濃度部計測, ON-OFF 制御, 水素放出系故障)

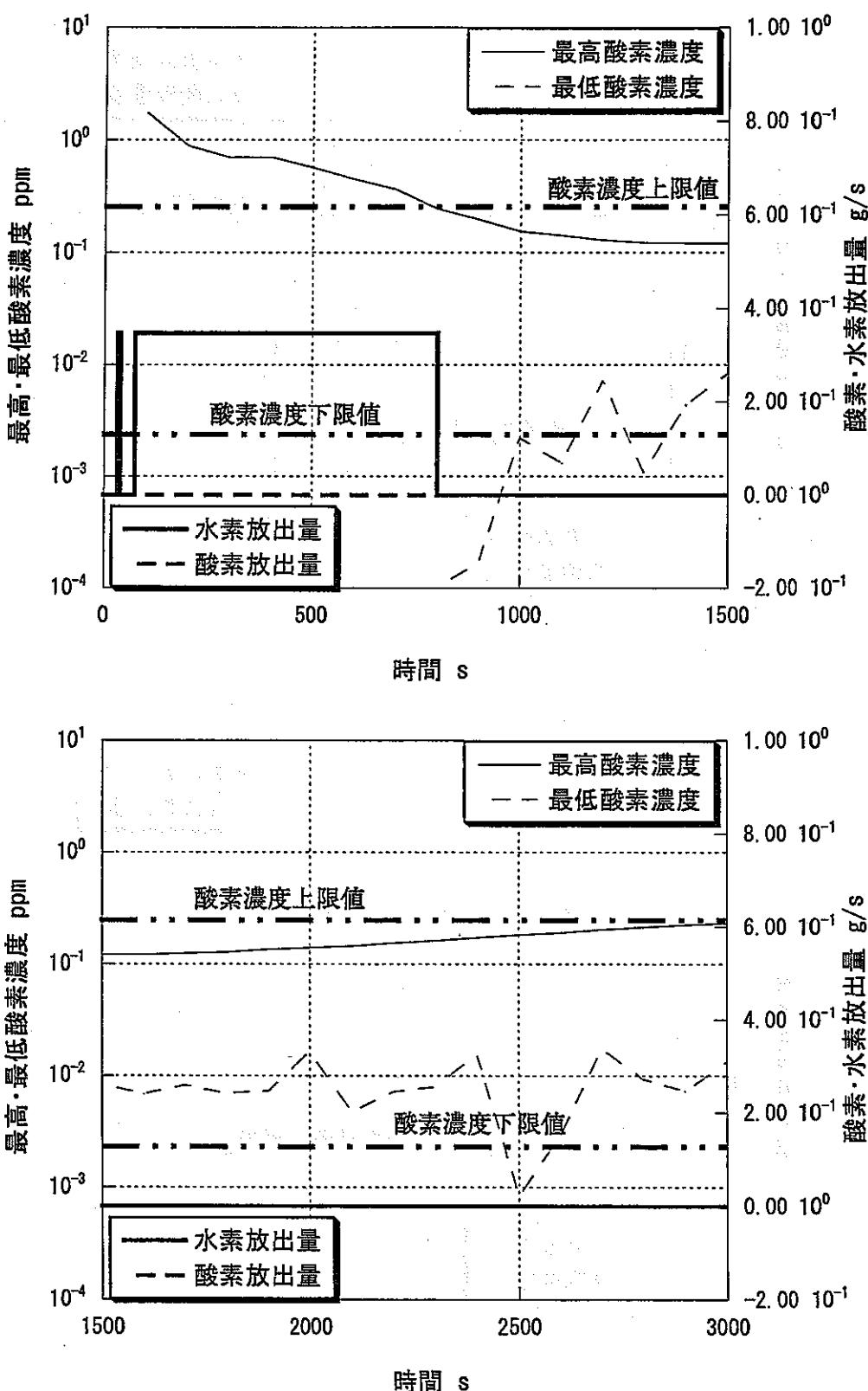


図 4.9.2 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case7:高濃度部計測, ON-OFF 制御, 酸素放出系故障)

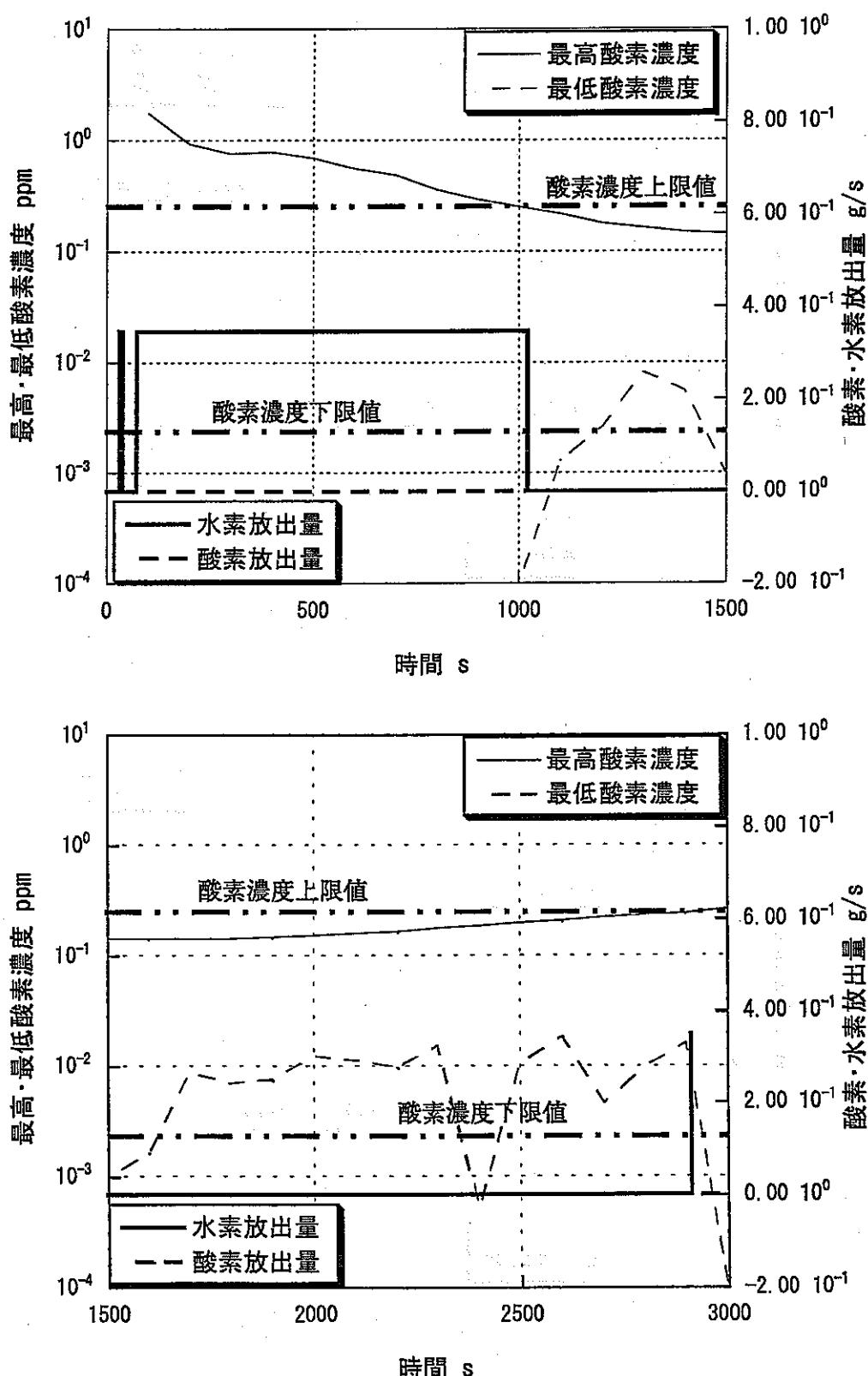


図 4.9.3 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case8:高濃度部計測, ON-OFF 制御, デミスタ故障)

4.10 PID 制御における機器故障を想定した解析結果

4.10.1 解析条件

ON-OFF 制御の場合と同様に、PID 制御についても、機器故障を想定した解析を行う。想定する事象は、酸素放出系の故障、水素放出系の故障の 2 通りである。解析ケースを以下の表 4.4 に示す。

表 4.4 解析ケース

解析ケース	初期条件	酸素濃度計測点	想定機器故障
9	炉心領域は高酸素濃度	高酸素濃度部	水素放出系故障
10	他の領域は一定酸素濃度	高酸素濃度部	酸素放出系故障

初期条件は、燃料交換により炉新領域が高酸素濃度をなった条件を想定し、高酸素濃度部は、事故事象を想定しない解析で濃度が最も高くなった領域(内筒付近のスタグメント領域)である。

4.10.2 水素放出系故障を想定した解析

燃料交換により初期に炉心部に大量の酸素が注入される条件において、水素放出系が故障している場合について解析を行った。制御対象の酸素濃度は高濃度部で計測する。解析結果を図 4.10.1 に示す。

解析結果より、最高酸素濃度はゆっくりと減少し、1000[s]で酸素濃度上限値を下回る。最低酸素濃度の回復はかなり遅れ、2200[s]以降において酸素濃度下限値を上回って推移するようになる。水素放出系が故障し、酸素放出系とデミスタでの制御の場合において、酸素濃度を制御することは可能と言えるが、故障を想定しない場合の解析結果(ケース 5)との比較から、制御能力は大幅に低下する。

4.10.3 酸素放出系故障を想定した解析

ケース 1 と同様な条件で、酸素放出系の故障を想定した場合の解析を行った。解析結果を図 4.10.2 に示す。

解析結果より、初期に水素が放出されることで最高酸素濃度が急減少し、400[s]で酸素濃度上限値を下回ることが分かる。最低酸素濃度については、酸素放出が行われない影響で、酸素濃度下限値を上回る時間帯が 1500[s]～1900[s], 2250[s]～2550[s]の 2 領域しかない。よって、酸素放出系が故障した場合においては、最低酸素濃度の制御性に問題があると言える。故障を想定しない場合の解析結果(ケース 5)と比較すると、初期の水素放出量や最高酸素濃度の推移はほとんど一致しているが、最低酸素濃度の値が全体的に低くなっている。ただし、長期的には、より高い酸素濃度へ均一化されると考えられることから、即ちに系の濃度が低下するものではない。

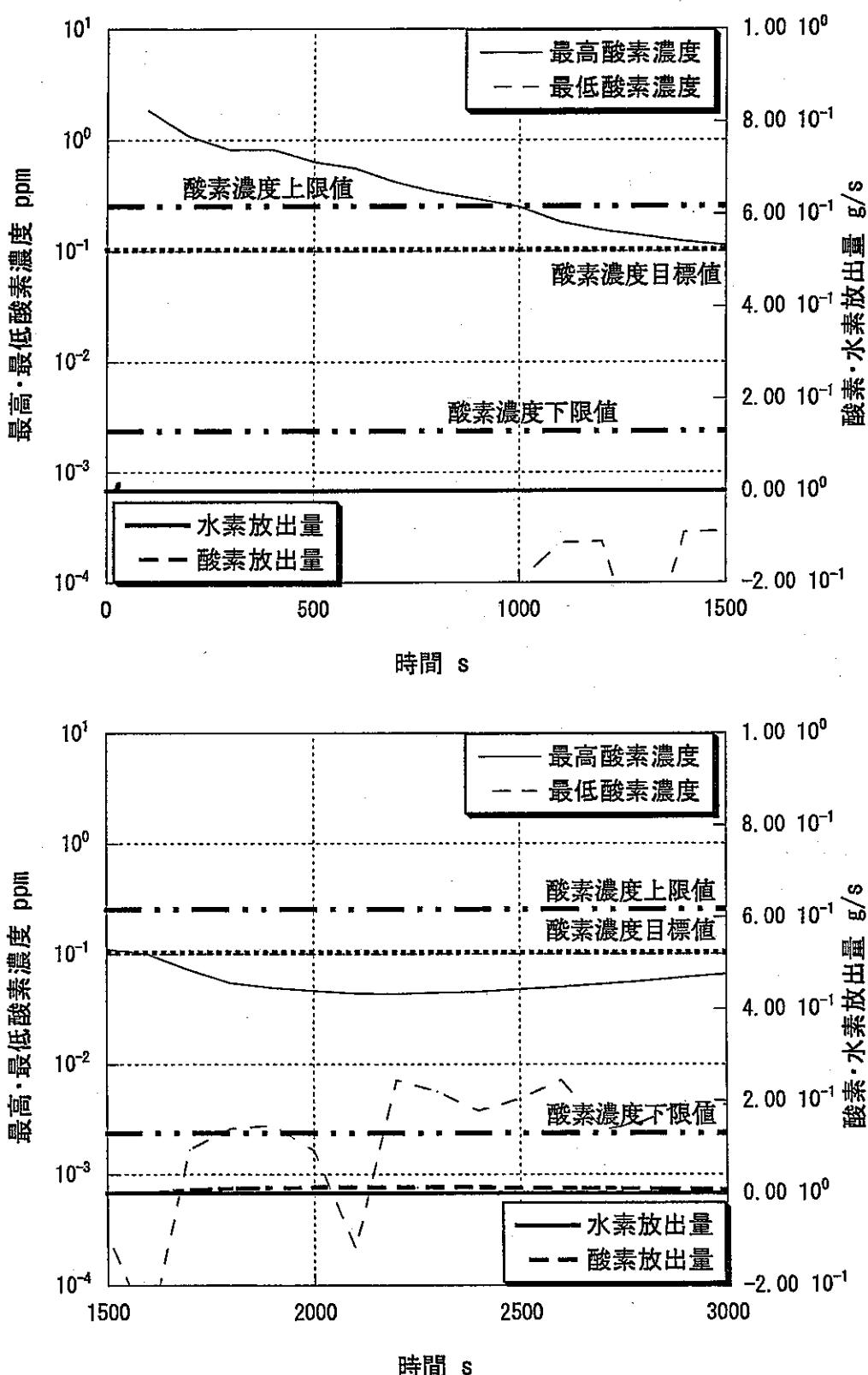


図 4.10.1 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case9:高濃度部計測, PID 制御, 水素放出系故障)

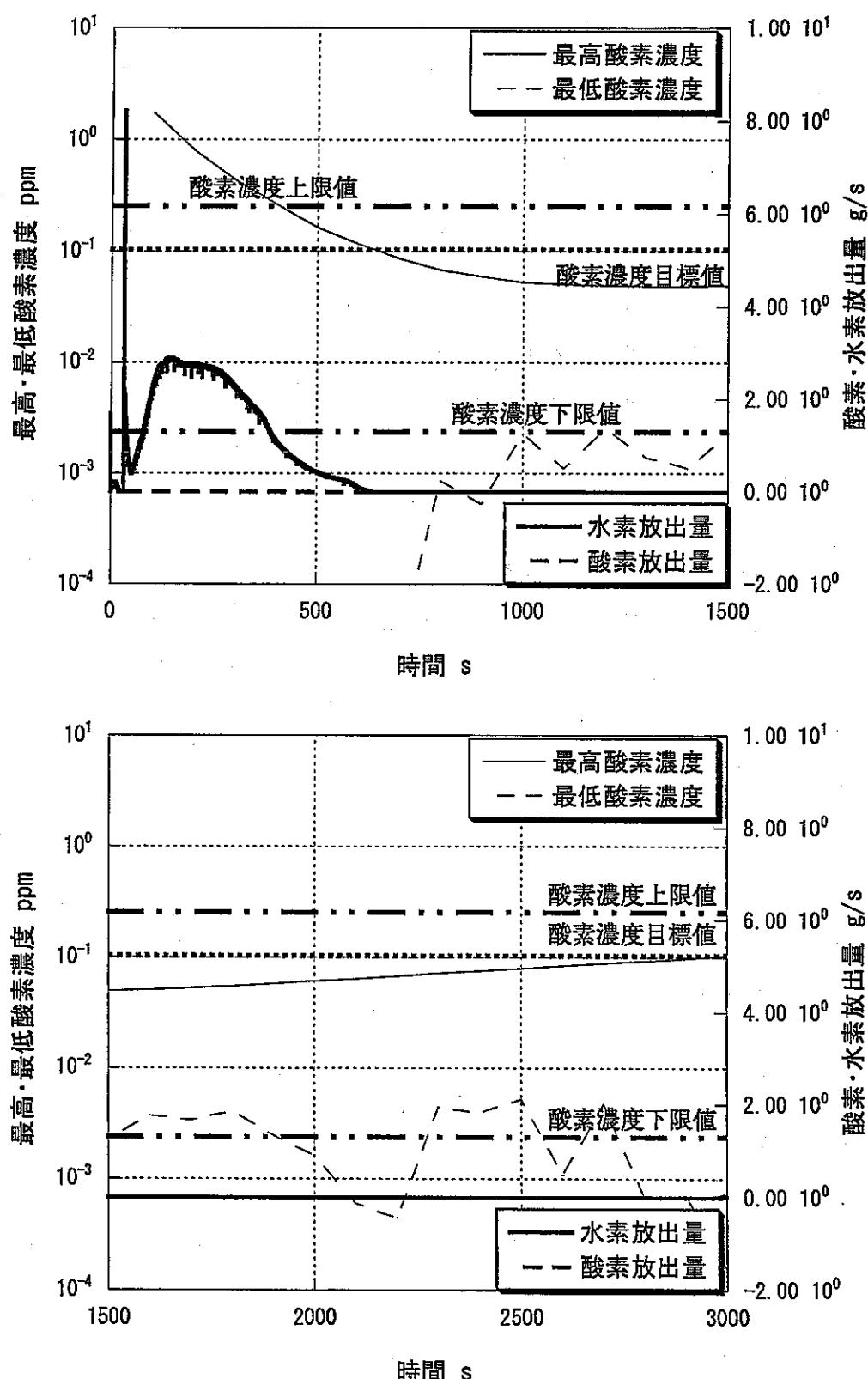


図 4.10.2 放出量と最高・最低濃度の時間変化
(Case10:高濃度部計測, PID 制御, 酸素放出系故障)

4.11 解析結果についての考察

4.11.1 解析結果のまとめ

ケース 1 からケース 10 の解析結果を表 4.5 に示す。

表 4.5 解析結果

ケース	制御方法	計測点	想定故障	最高酸素濃度 収束点	最低酸素濃度 収束点
1	ON-OFF 制御	デミスタ部	—	—	100[s]
2	ON-OFF 制御	高濃度部	—	800[s]	1300[s]
3	ON-OFF 制御	体系全体	—	750[s]	1250[s]
4	PID 制御	デミスタ部	—	—	600[s]
5	PID 制御	高濃度部	—	400[s]	1700[s]
6	ON-OFF 制御	高濃度部	水素放出系	1000[s]	1550[s]
7	ON-OFF 制御	高濃度部	酸素放出系	800[s]	1350[s]
8	ON-OFF 制御	高濃度部	デミスタ	1000[s]	1600[s]
9	PID 制御	高濃度部	水素放出系	1000[s]	2200[s]
10	PID 制御	高濃度部	酸素放出系	400[s]	—

ここで、最高酸素濃度収束点とは、最高酸素濃度が酸素濃度上限値を下回った時間、最低酸素濃度収束点とは、最低酸素濃度が酸素濃度下限値を上回った時間である。ただし、最低酸素濃度については、一度下限値を上回った後でも、再び下限値以下に減少することがあるので、それ以後最低酸素濃度がおおよそ適正範囲内に収まる時間を最低酸素濃度収束点とする。また、—は、故障を想定しない解析、もしくは、解析時間内に最高酸素濃度収束点・最低酸素濃度収束点が存在しないことを表わしている。

4.11.2 考察

表 4.5 をもとに、ケース 1 からケース 10 の解析結果について以下で考察を行なう。

(1) 濃度計測点について

まず、濃度計測点の違いによる、制御特性の変化について考察する。

ケース 1 とケース 4 の結果より、デミスタ上流部で制御対象の濃度を計測した場合には、最高酸素濃度が酸素濃度上限値を下回ることが無く、濃度制御としては失敗していることが分かる。これは、デミスタ上流部の濃度が、内筒付近の高濃度部の濃度と相関を持たないことによる。ケース 2 とケース 3 の比較より、体系全体の濃度を計測した場合に最も良好な制御特性が得られることが分かる。体系全体を計測した場合と比較すると、高濃度部にて濃度計測した場合において、濃度が適正範囲に収束する時間に 50[s] の遅れが見られるが、十分な制御性を有していると言える。実際に体系全体を計測する

ことが不可能であることを考えると、高濃度部にて濃度計測するのが現実的であると言える。

(2) 制御方法について

次に、高濃度部で濃度を計測したケース2とケース5を比較することにより、制御方法の違いによる制御特性変化について考察する。

最高酸素濃度収束点の比較より、最高酸素濃度を低下させる能力は、PID制御の方がON-OFF制御より高いと言える。これは、PID制御において、濃度制御の初期により多くの水素が放出されるためである。ただし、大量の水素が放出されることによって、最低酸素濃度も大きく低下し、適正酸素濃度範囲に戻るまでに時間を要する。PID制御において、最低酸素濃度収束点がON-OFF制御より、400[s]遅くなっている。今回の解析においては、燃料交換によって高くなった酸素濃度を低下させることが目的のため、制御特性としては、PID制御の方が即応性に勝ると見える。

(3) 故障時の制御性について

最後に、故障時の制御性について考察する。

水素放出系が故障した場合については、ケース2とケース6の比較、ケース5とケース9の比較より、制御特性の悪化はあるものの、制御自体は可能であると言える。ただし、ON-OFF制御に対してはそれ程大きな制御性の悪化は表れないのに対し、PID制御に対しては、かなり大きな制御性の悪化が表れる。これは、上記(2)に書いた初期における大量の水素放出が不可能になることによる。

酸素放出系の故障については、ケース2とケース7の比較より、ON-OFF制御については、ほとんど影響がないことが分かる。これは、今回の解析が高酸素濃度を低下させることを目的とした解析であったため、酸素放出系が不要というわけではない。一方PID制御については、ケース5とケース10の比較より、酸素放出系が故障した場合、解析時間内に最低酸素濃度が適正範囲に収まることがない。濃度制御の初期に大量の水素を放出するPID制御においては、最低酸素濃度を上昇させるために酸素放出が重要な役割を担っており、酸素放出系の故障によって最低酸素濃度の制御性が大きく悪化することが分かる。ただし、最低酸素濃度は解析終了後にも上昇すると考えられるので、解析時間内に適正酸素濃度範囲に収まらなかったとはいえる、最低酸素濃度が常に酸素濃度下限値を下回るということはない。

デミスタ故障時については、ケース2とケース7の比較より、水素放出系が故障した場合と同じく、多少の制御性の悪化は見られるが、制御自体は可能であることが分かる。

5. 結言

Pb-Bi 自然循環中型炉を対象とした、酸素濃度拡散解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 本解析を行うために開発した 2 次元濃度拡散解析用コード(COCOA)は、酸素と水素の反応を伴う濃度拡散をシミュレート可能であることを明らかにした。
- (2) 燃料交換により、炉心に大量の酸素(2.03kg)が注入された状態からの濃度制御について、酸素放出系、水素放出系+デミスタによる制御は、1000 秒程度で目標酸素濃度範囲に制御可能であることが分かった。
- (3) 制御特性は、制御対象の濃度計測点に大きく依存することから、計測点は、高濃度になり易いよどみ点に設置するのが適切と考えられる。
- (4) ON-OFF 制御でも、PID 制御でも制御は可能だが、PID 制御の方が若干即応性に勝る。
- (5) 水素放出系やデミスタの故障時においては、制御特性が低下するものの、制御は可能である。
- (6) 酸素放出系の故障時においては、PID 制御の場合において、一時的に最低酸素濃度が下限値未満となるものの、長期的にはより高い濃度に均一化されると考えられる。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：“サイクル機構技報”，No.12 別冊，(2001)
- [2] 堀公明，岩崎隆，大島宏之，山口彰：“重金属冷却炉の崩壊熱除去特性解析－鉛、鉛－ビスマス、ナトリウム冷却炉の比較評価－”，JNC TN9400 2000-033(2000)
- [3] 堀公明，大島宏之，山口彰：“重金属冷却高速増殖炉の崩壊熱除去特性－Pb 及び Pb-Bi 合金と Na 冷却材の比較評価－”，原子力学会 2000 年秋の大会，E16，(2000)
- [4] 江沼康弘，三宅隆嗣，田中良彦，批村守：“重金属冷却プラントの検討”，原子力学会 2001 年秋の大会，G57，(2001)
- [5] 堀公明，江沼康弘，岩崎隆：“重金属冷却高速増殖炉の崩壊熱除去特性解析(1)－Pb-Bi 冷却自然循環炉のプラント動特性解析手法の開発－”，原子力学会 2001 年秋の大会，J11，(2001)
- [6] 大山一宏，堀公明，江沼康弘：“重金属冷却高速増殖炉の崩壊熱除去特性解析(2)－Pb-Bi 冷却自然循環炉中型炉の崩壊熱除去特性解析－”，原子力学会 2001 年秋の大会，J12，(2001)
- [7] 斎藤孟，小泉睦男：工業熱力学，共立出版株式会社

謝 辞

本研究を実施するにあたり、FBR システムグループの江沼康弘副主研はじめ各位より貴重なご助言を賜りました。また、流体グループの山口彰グループリーダー、大島宏之主幹、村松壽晴主研及び高田孝副主研より、研究の各段階においてご指導を賜りました。

Pb-Bi 自然循環炉体系における温度場・速度場の計算は、原子力システムの岩崎隆氏に行って頂きました。

ここに、感謝の意を表します。