

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

電漿火炬之雙溫度運動模型探討及模擬  
**Two-Temperature Modeling of Thermal Plasma Flow  
in the Application to Plasma Torch**

計畫編號：1012001INER016

受委託機關(構)：國立臺灣科技大學

計畫主持人：趙修武

聯絡電話：02-27376793

E-mail address：chausw@ntust.edu.tw

核研所聯絡人員：許哲綸

報告日期：101 年 11 月 30 日



## 目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	5
一、直流電漿火炬流場模型.....	7
二、電漿反應機制模型.....	10
三、電漿氣體傳輸係數模型.....	12
四、電子能量方程式.....	14
五、數值離散方法.....	15
參、主要發現與結論.....	17
一、直流電漿火炬流場模擬.....	17
(一) 氣體氣量的影響.....	18
(二) 工作電流的影響.....	20
肆、本計畫完成之工作項目.....	24
伍、參考文獻.....	25

## 中文摘要

本計畫假設火炬內部電漿氣體具光學扁薄性、電漿氣體為電中性，以及穩態、軸對稱流動條件下，以有限體積法聯立求解磁流體動力方程組(連續方程式、動量方程式、能量方程式以及電流連續方程式)與紊流模型。本計畫使用安培定律計算流場電流分佈，利用歐姆定律計算誘導磁場大小，以闕普曼-安時考克法求解波茲曼方程式以獲得電漿氣體的傳輸係數。本計畫同時運用電漿氣體反應機制模型計算電漿氣體不同物種的濃度分布，並使用電子能量方程式描述電子溫度的變化，得以傳輸方程式描述電子、離子與中性氣體在流場內的分佈，藉此完成直流電漿火炬內部流場之雙溫度運動模型，並將該數學模型應用於計算與分析水蒸氣非傳輸型井式電漿火炬內部流場，以了解雙溫度模型對於熱電漿流場特性的影響。

**關鍵詞：**直流電漿火炬、雙溫度模型、非傳輸型、井式陰極、水蒸氣電漿。

## **Abstract**

A numerical model to simulate the steady, axial flow field inside DC plasma torch with taking the induced electrical and magnetic effects into account, where magneto-hydrodynamic equations, including the continuity equation, the momentum equations, the energy equation, the current continuity equation and the turbulence transport equations are solved by a finite volume method based on the assumption of plasma being optically thin and electrically neutral,. The chemical kinetics model is employed to calculate the production and destruction of species due to chemical reaction among species, while the electron temperature is predicted from the energy equation of electron. The transport coefficients of plasma gas are obtained from the Chapman-Enskog solution of the Boltzmann equation. The heat and mass transfer characteristics of well-type non-transferred steam plasma flow are calculated and analyzed by the proposed two-temperature model to understand the influence of electron temperature on the prediction of thermal plasma flow.

**Keywords:** DC plasma torch, two-temperature model, non-transferred, well-type cathode, steam plasma.

## 壹、計畫緣起與目的

直流電漿火炬是熱電漿技術中重要的一環，該技術可應用於許多重要的工業用途，例如電漿噴塗、電漿焊接、電漿切割、電漿合成、熱電漿廢棄物處理、電漿輔助化學蒸鍍、電漿粉末萃鍊等[1,2]。例如我國每年工業廢棄物產生量大約 1,800 萬公噸，約為生活垃圾量的二倍；其中有害工業廢棄物約為 150 萬公噸/年，所佔比率約為 8%。由於廢棄物的產生源不同，且各類廢棄物性質差異極大，均需有特殊的管理與處理技術。由於法令以及部份業者守法觀念不夠健全，由產生到處理、處置的過程中，常有不盡妥善的管理與處置，或甚而有不法傾倒及掩埋。這些結果都可能直接或間接地污染我國的環境生態及危害到人民的健康。使用電漿岩化技術可處理氣態、液態及固態廢棄物，有機物經熱解焚化減容，無機物經電漿熔融處理後，使有害重金屬均勻分佈於熔岩內達到 TCLP 要求，可符合最終處置或資源回收規範的要求[3]。近年來再生能源的課題日趨重要，其中合成氣(Syngas)的研究獲得許多研究學者的青睞[4-9]，因為合成氣可自天然有機物或廢棄物的化學反應中取得，滿足能源形式轉換以及能源回收的兩大優點。水蒸氣電漿除了具備高能量轉換效率與高氣體溫度的特性外，亦能同時產生反應性的離子與自由基，可提供合成氣反應所需的反應能量與反應物來源，成為合成氣生成的重要關鍵組件。使用惰性氣體(如氫氣、氮氣)或水蒸氣為電漿工作氣體的最大差異性在於後者較前者在火炬內部產生大量多類反應性的離子與自由基，因此這些物種間的重要性與反應性必須在數

值計算中加以考慮。同時由於火炬內部的局部溫度分布差異，使得在火炬中心的高溫區電子與其他物種具有相近的溫度，即滿足局部熱平衡條件；在靠近火炬電極附近區域由於外部冷卻系統作用氣體溫度較低，但經由外加電場作用的電子能量卻很高，因此在火炬電極附近無法達到局部熱平衡條件。這樣的能量差異性對於電子與其他粒子在電極附近的行為有顯著的影響，同時對於工作電極產生物理與化學熔蝕。為了研究電磁場、電漿氣體與溫度場間複雜的交互作用關係，必須能夠解析直流電漿火炬內部流場、溫度場與電弧特性。因為電漿火炬的尺寸不大與電漿火炬內部高溫的環境，使得量測工作變的十分困難。然而近年來電腦硬體的快速發展與數值技術的逐漸成熟，數值模擬可以用更為經濟與有效的方式，進行直流電漿火炬內部之質傳與熱傳特性研究。本研究的主要目的為建立直流電漿火炬內部流場之雙溫度運動模型。

## 貳、研究方法與過程

對於直流電漿火炬內由電弧所產生的熱電漿，本研究使用的本特性假設為電漿具光學扁薄性、電漿為電中性以及紊流場。基於上述假設下，考慮旋向速度分量以及紊流效應的二維軸對熱電漿流場，可以用磁流體動力(magneto-hydrodynamic, MHD)方程組與紊流模型加以描述，包含電流連續方程式、連續方程式、動量方程式、能量方程式、安培法則、歐姆定律與紊流方程式組成[10]。氣相化學反應部份，為能準確描述水蒸氣解離之化學變化，本研究中建立包括  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{OH}$ 、 $\text{H}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{HO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{H}^+$ 、 $\text{O}^+$ 及電子(e)等主要 12 個物種與 55 個化學反應式模型，其機制主要包括中性-中性、中性-電子的化學反應變化。本研究在模擬計算中所使用的物種反應方程式，必須考慮上述主要物種反應機制中的各個物種變化，即水蒸氣( $\text{H}_2\text{O}$ )、氫氧自由基( $\text{OH}$ )、氫原子( $\text{H}$ )、氧原子( $\text{O}$ )、氫氣( $\text{H}_2$ )、氧氣( $\text{O}_2$ )、過氧化氫( $\text{H}_2\text{O}_2$ )、過氧化氫自由基( $\text{HO}_2$ )、臭氧( $\text{O}_3$ )、氫離子( $\text{H}^+$ )、氧離子( $\text{O}^+$ )、電子(e)等物種濃度在空間中的分佈[11]。電漿氣體的傳輸係數如氣體黏性、熱傳導係數與電傳導係數，則利用氣體輸運理論加以描述，本研究利用闕普曼-安時考克法求解波茲曼方程式亦獲得熱電漿氣體的傳輸係數[12]。電子能量於流場中的變化，主要與電子自外加電場獲得能量，因非彈性碰撞化學反應與彈性碰撞損失能量，以及電子通量變化與電子溫度梯度有關[13]，本研究使用電子能量方程式描述電子能量於空間的變化。使用有限體積法的離散方式，將流場統御方程組之偏微分方程式對



任意控制單元積分，則可得到一通式。在相鄰控制體界面之廣義對流項，使用皮卡疊代法(Picard iteration method)加以近似。廣義擴散項以差分法加以近似。源項以均值定理加以近似。若將該通式中的各項以鄰近控制體中心的節點值加以近似，便可得到一聯立方程組。利用求解線性聯立方程組的數值方法，來求解上述之聯立方程組便可求得流場中之速度、壓力、電位差、紊流特性、溫度與物種濃度等物理量[14]。

## 一、直流電漿火炬流場模型

對於直流電漿火炬內由電弧所產生的電漿，其基本特性假設為電漿具光學扁薄性、電漿為電中性以及電漿流場為紊流場。在基於上述假設下，考慮二維旋向速度分量以及紊流效應的電漿流場，可以用磁流體動力方程組與紊流模型加以描述。磁流體動力方程組由電流連續方程式、連續方程式、動量方程式、能量方程式、安培法則、歐姆定律與紊流方程式組成[10]。

### 電流連續方程式

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = 0 \quad (1.1)$$

### 連續方程式

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v) = 0 \quad (1.2)$$

### 動量方程式(z 方向)

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial z} + j_r B_\theta + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \quad (1.3)$$

### 動量方程式(r 方向)

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial z} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} - j_z B_\theta + \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right] + \frac{\rho v_\theta^2}{r} \quad (1.4)$$

### 動量方程式(\theta 方向)

$$\rho u \frac{\partial w}{\partial z} + \rho v \frac{\partial w}{\partial r} = \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} \right] - \frac{\rho u w}{r}$$

(1.5)

其中

$$\begin{aligned}
\tau_{rr} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \tau_{\theta\theta} = 2\mu \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} \right), \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\
\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} &= \mu \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right], \\
\tau_{z\theta} = \tau_{\theta z} &= \mu \left[ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right], \\
\tau_{rz} = \tau_{zr} &= \mu \left[ \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right]
\end{aligned} \tag{1.6}$$

### 能量方程式

$$\begin{aligned}
\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial z} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{j_z^2 + j_r^2}{\sigma} - S_R + \frac{5k_B}{2} \left( j_z \frac{\partial T}{\partial z} + j_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\
&+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + v \frac{\partial P}{\partial r} + u \frac{\partial P}{\partial z}
\end{aligned} \tag{1.7}$$

### 安培法則

$$j_z = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad j_r = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} \tag{1.8}$$

### 歐姆定律

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r j_z \xi d\xi \tag{1.9}$$

### K-ε紊流方程式

$$\begin{aligned}
\rho u \frac{\partial K}{\partial z} + \rho v \frac{\partial K}{\partial r} &= G - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{C_k} \right) \frac{\partial K}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{C_\varepsilon} \right) \frac{\partial K}{\partial r} \right] \\
\rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \rho v \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} &= C_1 G \frac{\varepsilon}{K} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \\
&+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{C_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{C_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right]
\end{aligned} \tag{1.10}$$

$$G = \mu_l \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left( \frac{v}{r} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{w}{r} \right) \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$\mu_l = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon}, \quad k_t = \frac{\mu_l c_p}{Pr_t} \tag{1.11}$$

其中 $\rho$ 表示流體密度， $\sigma$ 表示導電率， $u$ 、 $v$ 、 $w$ 表示速度向量在 $z$ 、 $r$ 、 $\theta$ 方向上分量， $B_\theta$ 表示表示在 $\theta$ 方向上分量電流誘導磁場， $\phi$ 表示電動勢， $j_r$ 與 $j_z$ 分別表示電流向量在 $r$ 與 $z$ 方向分量， $P$ 表示壓力， $\tau$ 表示剪力張量， $S_R$ 表示輻射損失， $k$ 表示熱傳導係數， $T$ 表示溫度， $c_p$ 表示比熱， $k_B$ 波茲曼常數， $\mu_0$ 表示導磁係數， $K$ 表示紊流動能， $\varepsilon$ 表示紊流動能之消散率， $\mu_l$ 表示流體黏性， $\mu_t$ 表示紊流黏性， $k_t$ 表示紊流熱傳導係數， $C_\mu$ 、 $Pr_t$ 、 $C_k$ 、 $C_\varepsilon$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 表示紊流模型係數， $G$ 是黏滯性擴散項。

## 二、電漿反應機制模型

在氣相化學反應部份[11]，為能準確描述水蒸氣解離之化學變化，本研究中建立包括  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{OH}$ 、 $\text{H}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{HO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{H}^+$ 、 $\text{O}^+$ 及電子(e)等主要 12 個物種與 52 個化學反應式模型，各物種氣相反應機制與反應速率整理如下表一所示，其機制主要包括中性-中性、中性-電子的化學反應變化。

本研究在模擬計算中所使用的物種反應方程式，必須考慮上述主要物種反應機制中的各個物種變化，即水蒸氣( $\text{H}_2\text{O}$ )、氫氧自由基( $\text{OH}$ )、氫原子( $\text{H}$ )、氧原子( $\text{O}$ )、氫氣( $\text{H}_2$ )、氧氣( $\text{O}_2$ )、過氧化氫( $\text{H}_2\text{O}_2$ )、過氧化氫自由基( $\text{HO}_2$ )、臭氧( $\text{O}_3$ )、氫離子( $\text{H}^+$ )、氧離子( $\text{O}^+$ )、電子(e)等物種濃度在空間中的分佈。本研究使用下列傳輸方程式(2.1)描述對特定物種的化學反應以及傳輸機制，由於以穩態方式進行求解，因此忽略時間項的影響：

本研究使用下列傳輸方程式來描述流場中電子與離子的分佈[12]：

$$\nabla \cdot (n_e \mathbf{U}) + \nabla \cdot \Gamma_e = R_{e,source} - R_{e,sink} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot (n_i \mathbf{U}) + \nabla \cdot \Gamma_i = R_{i,source} - R_{i,sink} \quad (2.2)$$

其中  $\Gamma_e$  為電子通量， $\Gamma_i$  為離子通量， $n_e$  為電子密度， $n_i$  為離子密度， $R_{source}$  與  $R_{sink}$  分別代表因化學反應的生成與消耗項。電子通量  $\Gamma_e$  與離子通量  $\Gamma_i$  則由下式決定

$$\Gamma_e = -D_e \nabla n_e - \mu_e n_e \mathbf{E}, \quad (2.3)$$

$$\mathbf{\Gamma}_i = -D_i \nabla n_i + \mu_i n_i \mathbf{E}, \quad (2.4)$$

其中  $D_e$  為電子擴散係數， $D_i$  為離子擴散係數， $\mu_e$  為電子遷移率， $\mu_i$  為離子遷移率。為了滿足電流與電子濃度的相對應關係，本研究使用下式取代(2.3)式估算電子濃度：

$$n_e = \sigma / \mu_e \quad (2.5)$$

對於第  $i$  種中性粒子的傳輸分佈，則使用下式加以描述[12]：

$$\nabla \cdot (n_i \mathbf{U}) + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_i = R_{i,source} - R_{i,sink} \quad (2.6)$$

其中  $\mathbf{\Gamma}_i$  為中性粒子通量， $n_i$  為中性粒子密度。中性物種通量  $\mathbf{\Gamma}_i$  則由下式決定

$$\mathbf{\Gamma}_i = -D_i \nabla n_i, \quad (2.7)$$

其中  $D_i$  為中性物種擴散係數。

### 三、電漿氣體傳輸係數模型

若假設粒子在平衡態的分佈函數  $f_i^{(0)}$  可由下列積分方程式決定

$$\sum_{j=1}^{\nu} J(f_i^{(0)}, f_j^{(0)}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, \nu \quad (3.1)$$

其中  $J(f_i^{(0)}, f_j^{(0)}) = \iiint [f_i^{(0)} f_j^{(0)} - f_i^{(0)} f_j^{(0)}] g_{ij} b db d\epsilon d\mathbf{v}_j$  表波茲曼碰撞積分， $g_{ij}$  表粒子碰撞前的相對速度， $b$  表粒子在碰撞過程的最小距離， $\epsilon$  表粒子碰撞角度， $\mathbf{v}_j$  表粒子速度， $\nu$  表氣體混合物中粒子種類數目。若粒子分佈函數為平衡態的麥克斯威爾(Maxwell)分佈，則粒子分佈函數自動滿足波茲曼方程式：

$$f_i^{(0)} = n_i \left( \frac{m_i}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_i V_i^2}{2kT}\right) \quad (3.2)$$

其中  $n_i$  為粒子密度， $m_i$  為粒子質量， $k$  為波茲曼常數(Boltzmann Constant)， $V_i$  為粒子相對速度(Peculiar Velocity)， $T$  為粒子溫度。此時所有粒子的平均速度與溫度皆相等。若使用混合氣體各分量粒子的動量、能量與密度方程式，方程式(3.1)則可化簡為氣體混合物之涅維爾-史托克(Navier-Stokes)近似表示，如下式所示

$$\begin{aligned} f_i^{(0)} \left\{ \frac{n}{n_i} \mathbf{V}_i \mathbf{d}_i + \mathbf{b}_i : \frac{\partial \mathbf{v}_0}{\partial \mathbf{r}} - \left( \frac{5}{2} - W_i^2 \right) \frac{\partial \ln T}{\partial \mathbf{r}} \right. \\ \left. = \sum_{j=1}^{\nu} \iiint (\varphi'_i + \varphi'_j - \varphi_i - \varphi_j) f_i^{(0)} f_j^{(0)} g_{ij} b db d\epsilon d\mathbf{v}_j \right. \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$i = 1, 2, \dots, \nu$$

其中  $n$  為總粒子密度， $\mathbf{r}$  為位置向量， $\mathbf{v}_0$  為平均速度， $\mathbf{V}_i$  為粒子相對速度。經由簡化後可得下列方程式[12]：

$$n_i \left( \frac{2kT}{m_i} \right)^{1/2} \delta_{0m} = \sum_{j=1}^{\nu} \sum_{m'=0}^{\xi-1} [Q_{ij}^{(m,m')} - \frac{n_j}{n_i} \sqrt{\frac{m_j}{m_i}} Q_{ii}^{(m,m')} \delta_{0m} \delta_{0m'}] a_j^{(m')} \quad (3.4)$$

$$(\delta_{ih} - \delta_{ik}) \delta_{0m} \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2kT}{m_i}} = \sum_{j=1}^{\nu} \sum_{m'=0}^{\xi-1} [\tilde{Q}_{ij}^{(m,m')} - \frac{n_j}{n_i} \sqrt{\frac{m_j}{m_i}} \tilde{Q}_{ii}^{(m,m')} \delta_{0m} \delta_{0m'}] C_{jkh}^{(m')} \quad (3.5)$$

$$5n_i\delta_{m0} = \sum_{j=1}^v \sum_{m'=0}^{\xi-1} Q_{ij}^{(m,m')} b_j^{(m')}, \quad i=1,\dots,v \quad \text{and} \quad m=0,1,\dots,\xi-1 \quad (3.6)$$

### 1. 電傳導係數

$$\sigma = \frac{e^2 n^2}{p \rho^2} \sum_i Z_i \sum_j n_j m_j^2 D_{ij} \left( \sum_k n_k Z_k - \rho \frac{Z_j}{m_j} \right) \quad (3.7)$$

### 2. 黏性係數

$$\eta = \frac{1}{2} kT \sum_j n_j b_j^{(0)}(\xi) \quad (3.8)$$

### 3. 熱傳導係數

$$\lambda' = -\frac{5}{4} k \sum_j n_j \sqrt{\frac{2kT}{m_j}} a_j^{(1)}(\xi) \quad (3.9)$$

$$\lambda_{\text{kin}} = \lambda' + nk \|\phi_i^T\| \cdot \|\phi_{ij}\|^{-1} \cdot \|\phi_j^T\| \quad (3.10)$$

$$\lambda_{\text{Euck}} = 3.203 \cdot 10^{-3} \sqrt{T} \sum_{i=1}^v x_i \left( c_{pi} - \frac{5}{2} R \right) \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^v \frac{x_j \sigma_{ij}^2}{\sqrt{M_i + M_j}} \sqrt{2M_i M_j}} \quad (3.11)$$

$$\lambda_{\text{re}} = \frac{372.31}{T^{3/2}} \sum_{i=1}^{\mu} y_i \Delta H_i \quad (3.12)$$

$$\lambda = \lambda_{\text{kin}} + \lambda_{\text{Euck}} + \lambda_{\text{re}} \quad (3.13)$$



#### 四、電子能量方程式

為能描述電子能量於流場中的變化，本研究使用下列能量方程式來描述流場中電子能量與化學反應間的關係[13]：

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot \left( \frac{5}{3} \varepsilon \Gamma_e - \frac{5}{3} n_e D_e \nabla \varepsilon \right) \\ & = -\varepsilon \Gamma_e \cdot \mathbf{E} - \sum_l \Delta E_{\text{inel},l} K_{\text{inel},l} - 3 \sum_j \frac{m_e}{m_j} K_{\text{el},j} k_b (T_e - T). \end{aligned} \quad (4.1)$$

其中  $\varepsilon$  為電子能量， $\Gamma_e$  為電子通量， $n_e$  為電子密度， $D_e$  為電子擴散係數， $\Delta E_{\text{inel},l}$  為電子經由非彈性碰撞  $l$  造成的能量損失， $K_{\text{inel},l}$  為非彈性碰撞  $l$  造成的反應常數， $K_{\text{el},j}$  為氣體  $j$  之彈性碰撞的反應常數， $m_e$  為電子質量， $m_j$  為氣體分子質量， $k_b$  為波茲曼常數。為了比較電子溫度與氣體溫度的差異，本研究定義電子溫度比值 TR 如下：

$$\text{TR} = (T_e - T_g) / T_e$$

該值應介於 0 與 1 間。

## 五、數值離散方法

若使用有限體積法的離散方式，將上述之偏微分方程式對任意控制單元積分，則可得到下列之通式[14]：

$$\int_S \rho \phi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dS = \int_S \Gamma (\nabla \phi \cdot \mathbf{n}) dS + \int_V S_\phi dV \quad (5.1)$$

其中  $\mathbf{V}$  表一控制體， $\mathbf{S}$  表包圍該控制體之控制面， $\mathbf{n}$  為控制面上之法線向量， $\phi$  表一廣義之變量， $\mathbf{u}$  表速度向量， $\Gamma$  表廣義之擴散係數， $S_\phi$  表廣義之源項。若使用皮卡疊代法(Picard iteration method)，在相鄰控制體界面之廣義對流項  $C_f$  可以利用下式加以近似：

$$C_f = \int_S \rho \phi (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dS \approx \dot{m}_f \phi_f \quad (5.2)$$

其中  $\dot{m}_f$  表示在相鄰控制體界面上質量流率， $\phi_f$  表示在相鄰控制體界面上該物理量平均值，該值可由高階或低階進似法加以決定。廣義擴散項  $D_f$  可以利用下式加以近似：

$$D_f = \int_S \Gamma (\nabla \phi \cdot \mathbf{n}) dS \approx \Gamma_f \nabla \phi_f S_f \quad (5.3)$$

其中  $\Gamma_f$  表示在相鄰控制體界面上廣義擴散係數， $S_f$  表示在相鄰控制體界面面積， $\nabla \phi_f$  表示在相鄰控制體界面上該物理量梯度平均值，該值可由高階或低階進似法加以決定。源項  $Q_P$  可以利用下式加以近似：

$$Q_P = \int_V S_\phi dV \approx (S_\phi)_P V_P \quad (5.4)$$

其中  $(S_\phi)_P$  表示在節點 P 處的源項值平均值， $V_P$  表示包含節點 P 的控制體積。若將該通式中的各項以鄰近控制體中心的節點值加以近似，便可得到下列聯立方程組：

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + B_p \quad (5.5)$$

其中  $a$  表聯立方程組中之係數， $B$  表聯立方程組中之右手項， $p$  與  $nb$  分別表節點的位置，利用求解線性聯立方程組的數值方法，來求解上述之聯立方程組便可求得流場中之速度、壓力、電位差、紊流特性與溫度等物理量。

## 參、主要發現與結論

### 一、電漿火炬流場模擬

本研究模擬之 100 kW 直流電漿火炬(圖 1)全長為 503mm，陰極長度為 150mm，陽極長度為 350mm，進氣寬度為 3mm，火炬直徑為 18mm，水蒸氣的進氣溫度為 180°C。在電流為 180A 與水蒸氣流量為 5g/s 的工作條件下(此時電弧電壓為 464V)，進行水蒸氣電漿火炬內部流場計算。圖 2 為水蒸氣電漿火炬流場計算空間示意圖，其中 cd 為陰極區域、ef 為進氣口位置、gh 為陽極區域、ij 為火炬出口。由於火炬具軸對稱外形，數值模擬使用如圖 3 所示的流場計算網格。圖 4 為 100 kW 直流電漿火炬之以實驗方式獲得操作電流、電壓與氣量的關係圖，依照該性能關係，本研究進行兩組案例的模擬分析，如表二所示，Case A 為定流量操作火炬之流場模擬比較，Case B 為定電流操作火炬之流場模擬比較。

### (一) 氣體氣量的影響 (Case A)

圖 5 至圖 8 比較 Case A 火炬內部的電流密度分佈，其最大電流密度可達  $8.5 \times 10^7 \text{A/m}^2$ ，當工作電流愈大，進氣孔下方的高電流區域越大。圖 9 至圖 12 比較火炬內部的電流密度向量分佈，當工作電流愈大，電流密度逐漸向徑向擴展。圖 13 至圖 16 比較火炬內部的氣體溫度分佈，其最大氣體溫度可達 30,000K 以上，當工作電流愈大，進氣孔下方因焦耳熱造成的高溫區域越大。圖 17 至圖 20 比較火炬內部的軸向速度分佈，其最大軸向速度可達 3000m/s，當工作電流愈大，靠近中心軸之高速區域越大。圖 21 至圖 24 比較火炬內部的速度向量分佈，氣體自進氣孔進入火炬內部後因羅倫斯力加速而向外噴出，當工作電流愈大，噴出速度越快。圖 25 至圖 28 比較火炬內部的旋向速度分佈，其最大旋向速度可達 2000m/s 以上，當工作電流愈大，靠近中心軸高旋向速度區域越大。圖 29 比較沿中心軸之軸向速度，氣體速度在電弧域內加速，在離開電弧而逐漸減速，當工作電流愈大，氣體速度愈快。圖 30 比較沿中心軸之氣體溫度，氣體溫度在電弧域內加溫，在離開電弧而逐漸降溫，在電弧域內，氣體溫度相近約為 25000K。圖 31 至圖 34 比較火炬出口處軸向速度分佈、徑向速度分佈、旋向速度分佈與氣體溫度，在出口處的最大軸向速度可達 2500m/s 以上，徑向速度分佈很小、最大旋向速度可達 300m/s 以上，最大氣體溫度可達 10000K 以上。圖 35 至圖 38 比較火炬內部電子濃度分佈，電子濃度分佈在進氣口下方靠近中心軸區域較高，逐漸向火炬出口與壁面遞減。圖 39 至圖 42 比較火炬內部 H 濃度分佈，H 濃度分佈在靠近火炬壁面與底部較高。圖 43 至圖 46 比較火炬內部  $\text{H}^+$  濃度分佈， $\text{H}^+$  濃度分佈在靠近陽極與火炬底部

較高。圖 47 至圖 50 比較火炬內部  $H_2$  濃度分佈， $H_2$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在靠近中心軸區域較低。圖 51 至圖 54 比較火炬內部  $H_2O$  濃度分佈， $H_2O$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域很低。圖 55 至圖 58 比較火炬內部  $H_2O_2$  濃度分佈， $H_2O_2$  濃度分佈與  $H_2O$  濃度分佈相似，在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域很低。圖 59 至圖 62 比較火炬內部  $HO_2$  濃度分佈， $HO_2$  濃度分佈與  $H_2O$  及  $H_2O_2$  濃度分佈相似，在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低。圖 63 至圖 66 比較火炬內部  $O$  濃度分佈， $O$  濃度分佈與  $H_2O$ 、 $H_2O_2$  與  $HO_2$  濃度分佈相反，在靠近火炬壁面較低，在中心軸區域較高。圖 67 至圖 70 比較火炬內部  $O^+$  濃度分佈， $O^+$  濃度分佈在靠近火炬底部較高，在進氣口前方區域較低。圖 71 至圖 74 比較火炬內部  $O_2$  濃度分佈， $O_2$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低。圖 75 至圖 78 比較火炬內部  $O_3$  濃度分佈， $O_3$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低。圖 79 至圖 82 比較火炬內部  $OH$  濃度分佈， $OH$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低。圖 83 至圖 86 比較火炬內部電子溫度比值分佈，電子溫度比值分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低，表示電子溫度在靠近壁面處較氣體溫度高，在中心軸區域與氣體溫度相近。圖 87 至圖 90 比較沿中心線物種濃度分佈，圖 91 至圖 102 比較沿中心線各物種濃度分佈與工作電流的關係。圖 103 至圖 106 比較火炬出口處物種濃度分佈，圖 107 至圖 118 比較火炬出口處各物種濃度分佈與工作電流的關係，在火炬出口處由於  $H_2O$  幾乎完全解離，所以主要物種為  $H$ 、 $O$ 、 $H^+$ 、 $O^+$ ，其濃度約在  $10^{-5}$  至  $10^{-2}$  間。電流變化對於在火炬出口處物種濃度改變較不明顯。

## (二) 工作電流的影響 (Case B)

圖 119 至圖 122 比較 Case B 火炬內部的電流密度分佈，其最大電流密度可達  $8.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ ，當工作電流愈大，進氣孔下方的高電流區域越大。圖 123 至圖 126 比較火炬內部的電流密度向量分佈，當工作電流愈大，電流密度逐漸向徑向擴展。圖 127 至圖 130 比較火炬內部的氣體溫度分佈，其最大氣體溫度可達 30,000K 以上，當工作電流愈大，進氣孔下方因焦耳熱造成的高溫區域越大。圖 131 至圖 134 比較火炬內部的軸向速度分佈，其最大軸向速度可達 3000m/s，當工作電流愈大，靠近中心軸之高速區域越大。圖 135 至圖 138 比較火炬內部的速度向量分佈，氣體自進氣孔進入火炬內部後因羅倫斯力加速而向外噴出，當工作電流愈大，噴出速度越快。圖 139 至圖 142 比較火炬內部的旋向速度分佈，其最大旋向速度可達 2000m/s 以上，當工作電流愈大，靠近中心軸高旋向速度區域越大。圖 143 比較沿中心軸之軸向速度，氣體速度在電弧域內加速，在離開電弧而逐漸減速，當工作電流愈大，氣體速度愈快。圖 144 比較沿中心軸之氣體溫度，氣體溫度在電弧域內加溫，在離開電弧而逐漸降溫，在電弧域內，氣體溫度相近約為 25000K。圖 145 至圖 148 比較火炬出口處軸向速度分佈、徑向速度分佈、旋向速度分佈與氣體溫度，在出口處的最大軸向速度可達 2500m/s 以上，徑向速度分佈很小、最大旋向速度可達 300m/s 以上，最大氣體溫度可達 10000K 以上。圖 149 至圖 152 比較火炬內部電子濃度分佈，電子濃度分佈在進氣口下方靠近中心軸區域較高，逐漸向火炬出口與壁面遞減。圖 153 至圖 156 比較火炬內部 H 濃度分佈，H 濃度分佈在靠近火炬壁面與底部較高。圖 157 至圖 160 比較火炬內部  $\text{H}^+$  濃度分

佈， $H^+$ 濃度分佈在靠近陽極與火炬底部較高。圖 161 至圖 164 比較火炬內部  $H_2$  濃度分佈， $H_2$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在靠近中心軸區域較低。圖 165 至圖 168 比較火炬內部  $H_2O$  濃度分佈， $H_2O$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域很低。圖 169 至圖 172 比較火炬內部  $H_2O_2$  濃度分佈， $H_2O_2$  濃度分佈與  $H_2O$  濃度分佈相似，在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域很低。圖 173 至圖 176 比較火炬內部  $HO_2$  濃度分佈， $HO_2$  濃度分佈與  $H_2O$  及  $H_2O_2$  濃度分佈相似，在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低。圖 177 至圖 180 比較火炬內部  $O$  濃度分佈， $O$  濃度分佈與  $H_2O$ 、 $H_2O_2$  與  $HO_2$  濃度分佈相反，在靠近火炬壁面較低，在中心軸區域較高。圖 181 至圖 184 比較火炬內部  $O^+$  濃度分佈， $O^+$  濃度分佈在靠近火炬底部較高，在進氣口前方區域較低。圖 185 至圖 188 比較火炬內部  $O_2$  濃度分佈， $O_2$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低。圖 189 至圖 192 比較火炬內部  $O_3$  濃度分佈， $O_3$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低。圖 193 至圖 196 比較火炬內部  $OH$  濃度分佈， $OH$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低。圖 197 至圖 200 比較火炬內部比較火炬內部電子溫度比值分佈，電子溫度比值分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低，表示電子溫度在靠近壁面處較氣體溫度高，在中心軸區域與氣體溫度相近。圖 201 至圖 204 比較沿中心線物種濃度分佈，圖 205 至圖 216 比較沿中心線各物種濃度分佈與工作電流的關係。圖 217 至圖 220 比較火炬出口處物種濃度分佈，圖 221 至圖 232 比較火炬出口處各物種濃度分佈與工作電流的關係，在火炬出口處由於  $H_2O$  幾乎完全解離，所以主要物種為  $H$ 、 $O$ 、 $H^+$ 、 $O^+$ ，其濃度約在  $10^{-5}$  至  $10^{-2}$  間。氣量變化對於在火



炬出口處物種濃度改變較明顯。

## 二、結論

本研究假設火炬內部電漿氣體具光學扁薄性、電漿氣體為電中性，以及穩態、軸對稱流動條件下，以有限體積法聯立求解磁流體動力方程組(連續方程式、動量方程式、能量方程式以及電流連續方程式)與紊流模型。本研究使用安培定律計算流場電流分佈，利用歐姆定律計算誘導磁場大小，以闕普曼-安時考克法求解波茲曼方程式以獲得電漿氣體的傳輸係數。本研究同時運用電漿氣體反應機制模型計算電漿氣體不同物種的濃度分布，並使用電子能量方程式描述電子溫度的變化，得以傳輸方程式描述電子、離子與中性氣體在流場內的分佈，完成直流電漿火炬內部流場之雙溫度運動模型。

本研究應用該數學模型於計算與分析 100kW 水蒸氣非傳輸型井式電漿火炬內部流場。本研究進行兩組案例的模擬分析：Case A 為定流量操作火炬之流場模擬比較；Case B 為定電流操作火炬之流場模擬比較，以了解雙溫度模型對於熱電漿流場特性的影響。計算結果顯示： $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{OH}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{HO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{H}$  濃度分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域很低；電子在中心軸區域較高；在火炬出口處由於  $\text{H}_2\text{O}$  幾乎完全解離，所以主要物種為  $\text{H}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{H}^+$ 、 $\text{O}^+$ ，其濃度約在  $10^{-5}$  至  $10^{-2}$  間；對於在火炬出口處物種濃度改變，氣量較工作電流能產生物種濃度較明顯的影響；電子溫度比值分佈在靠近火炬壁面較高，在中心軸區域較低，表示電子溫度在靠近壁面處較氣體溫度高，在中心軸區域與氣體溫度相近。

## 肆、本計畫完成之工作項目

本計畫已完成原委託計畫之各項工作項目如下：

1. 收集有關電漿火炬中非平衡態之雙溫度電漿問題的研究文獻，並對其電漿中熱力學性質及傳輸性質的數據進行分析探討。
2. 建立雙溫度電漿模型及其聯立之磁流體方程組，進行平行化數值模擬。
3. 運用本核研所多核工作站進行雙溫度電漿數值模擬及初步驗證。
4. 配合著核研所火炬實驗數據進行解析並驗證電漿火炬中的運轉機制。
5. 進行平行化計算數值模擬程式技術轉移核研所，含程式解說及操作手冊。

執行本計畫所獲得之具體成果如下：

1. 建立電漿反應機制之數學模型與程式模組。
2. 建立電子能量方程式之數學模型與程式模組。
3. 建立電子、離子與中性物種傳輸方程式之數學模型與程式模組。
4. 建立電漿氣體傳輸係數之數學模型與程式模組。
5. 完成考慮電漿反應機制與電子能量之二維軸對稱穩態流場計算模組，建立分析非局部平衡之二維軸對稱穩態熱電漿流場能力。
6. 進行非局部平衡之二維軸對稱穩態熱電漿流場計算模擬，獲得氣體流場、氣體溫度場、電子溫度場以及物種濃度分布。

藉著本研究計畫的執行，以計算流體力學(CFD)方法搭配電漿反應模型來進行電漿反應機制數值模擬，解析並驗證核研所實驗數據，從而協助核研所掌握在電漿火炬中的運轉機制，改良火炬控制操作及設計參數，有助於電漿火炬相關研究執行成效以及推廣應用。由上述工作項目與具體成果，本計畫完全符合原計畫目標以及預期成果規劃。

## 伍、參考文獻

- [1] Pfender E 1995 Plasma Chem. Plasma Process. 19 1
- [2] Fauchais P and Vardelle A 2000 Plasma Phys. Control Fusion 42 365
- [3] 曾錦清，「電漿岩化技術之發展與應用」，電漿處理在環境工程之應用技術研討會，台北，2004年7月13-14。
- [4] Scott D A, Kovitya P and Haddad G N 1989 J. Appl. Phys. 66 232
- [5] Stuart P R, Munz R J and Gauvin 1984 Plasma Chem. Plasma Process. 4 4 297
- [6] Kim, S W, Park H S and Kim H J 2003 Vacuum 70 59
- [7] Nishikawa H, Ibe M, Tanaka M, Ushio M, Takemoto T, Tanaka K, Tanahashi N and Ito T 2004 Vacuum 73 589
- [8] Nishikawa H, Ibe M, Tanaka M, Takemoto T and Ushio M 2006 80 1311
- [9] Park H S, Kim C G and Kim S J 2006 J. Ind. Eng. Chem. 12 2 216
- [10] Chau S W and Hsu K L 2011 Comp. & Fluids 45 109
- [11] 趙修武、陳孝輝、廖文琳，「水蒸氣電漿化學動力反應模擬計算」，中國機械工程學會第二十七屆全國學術研討會，台北，2010年12月10-11日。
- [12] Chau, SW, Pham, QT, “Thin-Film Deposition Modeling of Hydrogenated Amorphous Silicon in the Afterglow of Argon Plasma”, The 24th International Conference on Parallel CFD, Atlanta, USA, 2012/5/21-25.
- [13] 趙修武，2011，「井式蒸氣火炬運轉機制之 3D 模擬研究」，核能研究所委託研究計畫研究報告。
- [14] Chau SW 1997 Institute of Schiffbau, Uni. Hamburg Report No. 580

表一：化學氣相反應機制

Neutral Reactions									
No.	Chemical Reaction				Chemical Reaction Rate	Ref.			
1.	H <sub>2</sub> O	+	m	+	→	OH + H + m	$k_1 = 2.66 \times 10^{-7} \exp(-478/(RT_g))N$	15	
2.	OH	+	m	+	→	O + H + m	$k_2 = 4.00 \times 10^{-9} \exp(-416/(RT_g))N$	9	
3.	H	+	H	+	m	→	H <sub>2</sub> + m	$k_3 = 8.77 \times 10^{-33} (T_g / 298)^{-0.6} N^2$	9
4.	H <sub>2</sub>	+	m	+	→	H + H + m	$k_4 = 3.70 \times 10^{-10} \exp(-402/(RT_g))N$	9	
5.	O	+	O	+	m	→	O <sub>2</sub> + m +	$k_5 = 9.26 \times 10^{-34} (T_g / 298)^{-1.0} N^2$	9
6.	O <sub>2</sub>	+	m	+	→	O + O + m	$k_6 = 1.99 \times 10^{-10} \exp(-451/(RT_g))N$	9	
7.	OH	+	O	+	→	O <sub>2</sub> + H	$k_7 = 4.55 \times 10^{-12} (T_g / 298)^{0.4} \exp(3.09/(RT_g))N$	9	
8.	OH	+	OH	+	→	H <sub>2</sub> O + O	$k_8 = 1.02 \times 10^{-12} (T_g / 298)^{1.4} \exp(1.66/(RT_g))N$	9	
9.	H	+	O <sub>2</sub>	+	→	O + OH	$k_9 = 2.56 \times 10^{-11} (T_g / 298)^{0.55} \exp(-49.6/(RT_g))N$	9	
10.	H	+	OH	+	→	O + H <sub>2</sub>	$k_{10} = 6.86 \times 10^{-14} (T_g / 298)^{2.8} \exp(-16.21/(RT_g))N$	9	
11.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	+	OH	+	→	HO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	$k_{11} = 2.91 \times 10^{-12} \exp(-1.33/(RT_g))N$	9	
12.	O <sub>2</sub>	+	OH	+	→	HO <sub>2</sub> + O	$k_{12} = 3.70 \times 10^{-11} \exp(-220/(RT_g))N$	9	
13.	OH	+	OH	+	→	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$k_{13} = 1.83 \times 10^{-12} (T_g / 298)^{-0.37} N$	16	
14.	OH	+	OH	+	→	2O + 2H	$k_{14} = 4.09 \times 10^{-9} \exp(-416/(RT_g))N$	9	
15.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	+	O	+	→	HO <sub>2</sub> + OH	$k_{15} = 1.42 \times 10^{-12} (T_g / 298)^{2.0} \exp(-16.63/(RT_g))N$	9	

表一：化學氣相反應機制(接續上表)

No.	Chemical Reaction	Chemical Reaction Rate	Ref.
16.	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$k_{16} = 4.01 \times 10^{-11} \exp(-16.63/(RT_g))N$	9
17.	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2$	$k_{17} = 8.0 \times 10^{-11} \exp(-33.26/(RT_g))N$	9
18.	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{HO}_2$	$k_{18} = 9.0 \times 10^{-11} \exp(-166/(RT_g))N$	9
19.	$\text{HO}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$k_{19} = 4.81 \times 10^{-11} \exp(2.08/(RT_g))N$	9
20.	$\text{HO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	$k_{20} = 2.91 \times 10^{-11} \exp(1.66/(RT_g))N$	9
21.	$\text{HO}_2 + \text{H} \rightarrow 2\text{OH}$	$k_{21} = 2.81 \times 10^{-10} \exp(-3.66/(RT_g))N$	9
22.	$\text{HO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$	$k_{22} = 1.10 \times 10^{-10} \exp(-8.90/(RT_g))N$	9
23.	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	$k_{23} = 3.01 \times 10^{-12} N$	9
24.	$\text{HO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}$	$k_{24} = 5.01 \times 10^{-11} \exp(-109/(RT_g))N$	9
25.	$\text{HO}_2 + \text{m} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H} + \text{m}$	$k_{25} = 2.41 \times 10^{-8} (T_g / 298)^{-1.18} \exp(-203/(RT_g))N$	9
26.	$\text{O} + \text{H} + \text{m} \rightarrow \text{OH} + \text{m}$	$k_{26} = 4.36 \times 10^{-32} (T_g / 298)^{-1.0} N^2$	9
27.	$\text{O}_2 + \text{H} + \text{m} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{m}$	$k_{27} = 5.79 \times 10^{-32} (T_g / 298)^{-0.8} N^2$	9
28.	$\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	$k_{28} = 2.97 \times 10^{-12} (T_g / 298)^{1.21} \exp(-19.71/(RT_g))N$	9
29.	$\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{H}$	$k_{29} = 3.44 \times 10^{-13} (T_g / 298)^{2.67} \exp(-26.27/(RT_g))N$	9
30.	$\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$	$k_{30} = 1.25 \times 10^{-11} (T_g / 298)^{1.3} \exp(-71.50/(RT_g))N$	9
31.	$\text{m} + \text{O}_2 + \text{O} \rightarrow \text{m} + \text{O}_3$	$k_{31} = 1.34 \times 10^{-34} (T_g / 298)^{-1.0} N^2$	9

表一：化學氣相反應機制(接續上表)

No.	Chemical Reaction				Chemical Reaction Rate	Ref.	
32.	H	+	H <sub>2</sub> O	→	H <sub>2</sub> + OH	$k_{32} = 6.882 \times 10^{-12} (T_g / 298)^{1.6} \exp(-80.82 / (RT_g)) N$	9
33.	O <sub>2</sub>	+	H <sub>2</sub>	→	HO <sub>2</sub> + H	$k_{33} = 2.41 \times 10^{-10} \exp(-237 / (RT_g)) N$	9
34.	O <sub>3</sub>	+	m	→	O <sub>2</sub> + O + m	$k_{34} = 7.16 \times 10^{-10} \exp(-93.12 / (RT_g)) N$	9
35.	O <sub>3</sub>	+	H	→	OH + O <sub>2</sub>	$k_{35} = 2.72 \times 10^{-11} (T_g / 298)^{0.75} N$	9
36.	O <sub>3</sub>	+	OH	→	HO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	$k_{36} = 3.76 \times 10^{-13} (T_g / 298)^{1.99} \exp(-5.02 / (RT_g)) N$	9
37.	OH	+	OH	→	H + HO <sub>2</sub>	$k_{37} = 1.83 \times 10^{-40} N$	9
38.	H	+	HO <sub>2</sub>	→	H <sub>2</sub> O + O	$k_{38} = 8.3 \times 10^{-11} \exp(-4.18 / (RT_g)) N$	9
39.	H <sub>2</sub> O	+	O <sub>2</sub>	→	HO <sub>2</sub> + OH	$k_{39} = 7.72 \times 10^{-12} \exp(-310 / (RT_g)) N$	9
40.	HO <sub>2</sub>	+	H <sub>2</sub> O	→	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + OH	$k_{40} = 4.65 \times 10^{-11} \exp(-137 / (RT_g)) N$	9
41.	OH	+	H + m	→	H <sub>2</sub> O + m	$k_{41} = 1.48 \times 10^{-30} (T_g / 298)^{-1.18} \exp(-2.58 / (RT_g)) N^2$	9

$$N = 6.022 \times 10^{23} \times (0.01)^3 \text{ (molecules/mole)(m}^3\text{/cm}^3\text{)}$$

$$R : 8.314 \times 10^{-3} \text{ (kJ/mole} \cdot \text{K)}$$

$T_g$  : Gas temperature (K)

$T_e$  : Electron temperature (eV)

表一：化學氣相反應機制(接續上表)

Electron Reactions								
No.	Chemical Reaction				Chemical Reaction Rate	Ref.		
42.	H <sub>2</sub>	+	H <sub>2</sub>	+	→	H <sub>2</sub> + H <sup>+</sup> + H + e	$k_{42} = 5.1 \times 10^{-16} T_g^{0.5} (1 + 4.4 \times 10^{-6} T_g) \exp(-4.6 \times 10^5 / T_g) N$	20
43.	H <sub>2</sub>	+	e	+	→	H <sup>+</sup> + H + 2e	$k_{43} = 1.9 \times 10^{-12} T_e^{0.5} (1 + 5.3 \times 10^{-6} T_e) \exp(-3.8 \times 10^5 / T_e) N$	20
44.	H	+	H	+	→	H <sup>+</sup> + H + e	$k_{44} = 1.5 \times 10^{-13} T_g^{0.5} (1 + 1.7 \times 10^{-5} T_g) \exp(-1.2 \times 10^5 / T_g) N$	20
45.	H	+	H <sub>2</sub>	+	→	H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> + e	$k_{45} = 7.9 \times 10^{-14} T_g^{0.5} (1 + 1.3 \times 10^{-5} T_g) \exp(-1.6 \times 10^5 / T_g) N$	20
46.	H	+	e	+	→	H <sup>+</sup> + 2e	$k_{46} = 4.7 \times 10^{-11} T_e^{0.5} (1 + 1.3 \times 10^{-5} T_e) \exp(-1.6 \times 10^5 / T_e) N$	20
47.	H <sub>2</sub>	+	e	+	→	2H + e	$k_{47} = 1.30 \times 10^{-10} T_e^{0.5} (1 + 2.0 \times 10^{-5} T_e) \exp(-3.5 \times 10^4 / T_e) N$	20
48.	O <sub>2</sub>	+	e	+	→	2O + e	$k_{48} = 6.86 \times 10^{-9} \exp(-6.29 / T_e) N$	21
49.	O <sub>2</sub>	+	e	+	→	O + O <sup>+</sup> + 2e	$k_{49} = 1.88 \times 10^{-10} T_e^{1.699} \exp(-16.81 / T_e) N$	21
50.	O	+	e	+	→	O <sup>+</sup> + 2e	$k_{50} = 9.0 \times 10^{-9} T_e^{0.7} \exp(-13.6 / T_e) N$	21
51.	e	+	e	+	O <sup>+</sup>	→ e + O	$k_{51} = 1.0 \times 10^{-19} (0.026 / T_e)^{4.5} N^2$	21
52.	e	+	O <sup>+</sup>	+	O <sub>2</sub>	→ O + O <sub>2</sub>	$k_{52} = 6.0 \times 10^{-27} (0.026 / T_e)^{1.5} N^2$	21
53.	O <sub>3</sub>	+	O		→	2O <sub>2</sub>	$k_{53} = 1.8 \times 10^{-11} \exp(-2300 / T_g)$	
54.	e	+	H <sup>+</sup>		→	H	$k_{54} = 2.62 \times 10^{-13} T_e^{-0.5}$	
55.	e	+	O <sup>+</sup>		→	O	$k_{55} = 5.24 \times 10^{-13} T_e^{-0.5}$	



表二：模擬案例之計算條件

Case A	
<i>I</i> (A)	MFR (g/s)
125	4.76
150	4.76
175	4.56
200	4.56
Case B	
<i>I</i> (A)	MFR (g/s)
200	3.32
200	4.56
200	6.22
200	7.78

# 100 kW Steam Torch (@ INER)

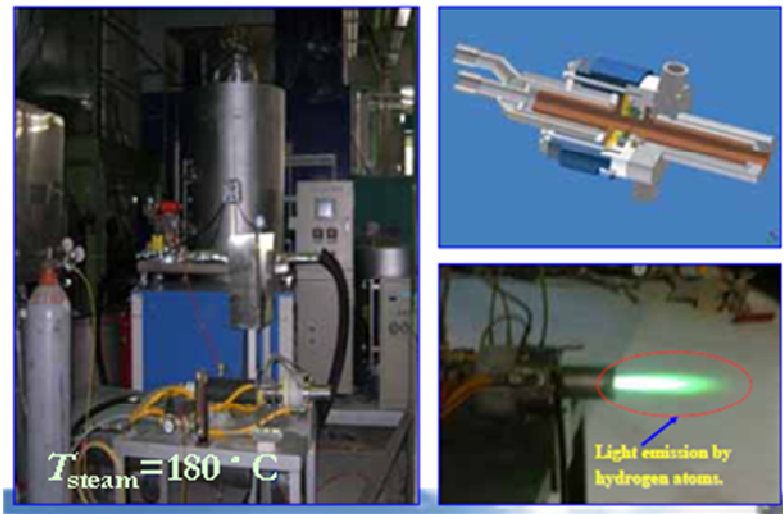


圖 1：100kW 水蒸氣電漿火炬

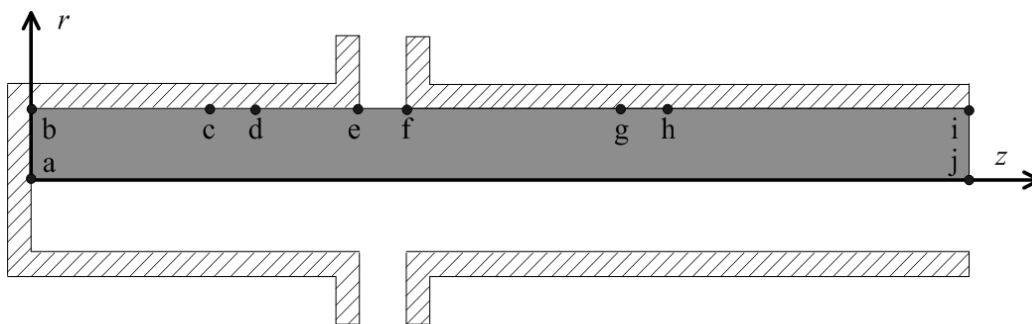


圖 2：水蒸氣電漿火炬流場計算空間示意圖

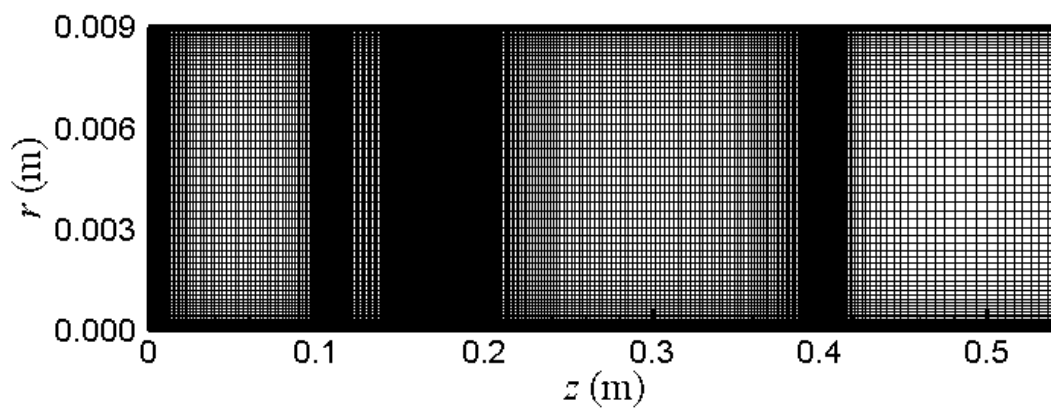


圖 3：水蒸氣電漿火炬流場網格示意圖

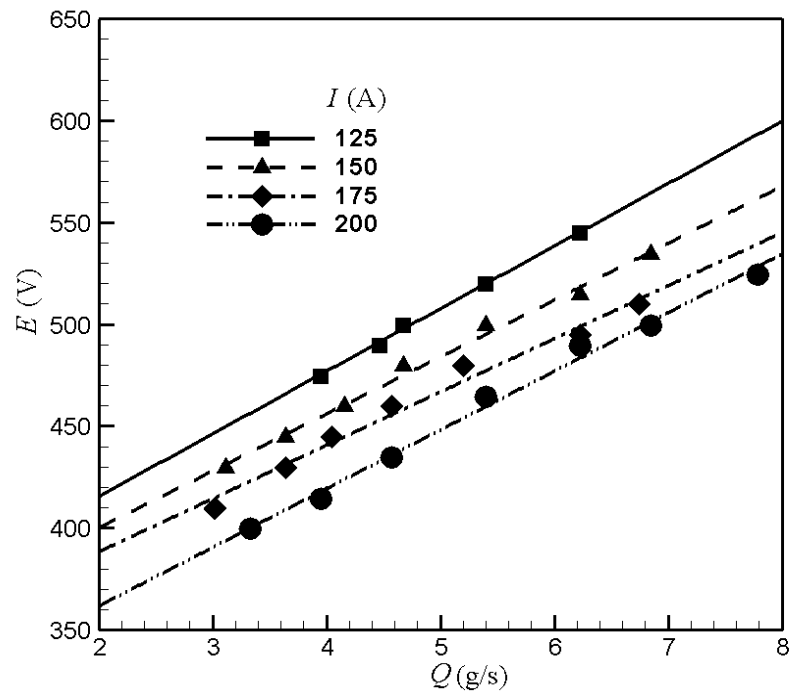


圖 4：100kW 水蒸氣電漿火炬電壓、電流與氣流量關係

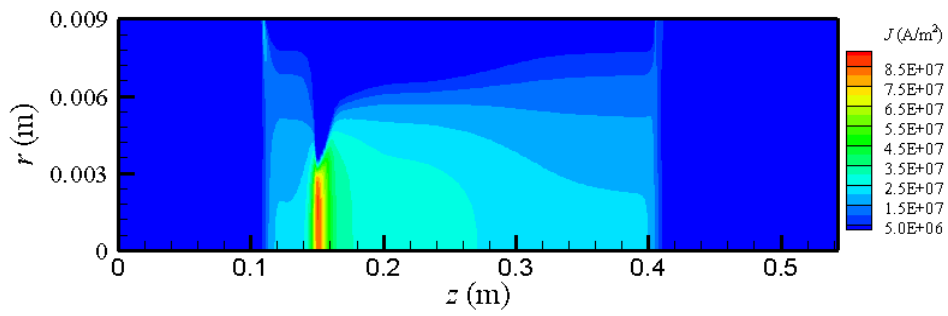


圖 5: 電流密度分佈 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

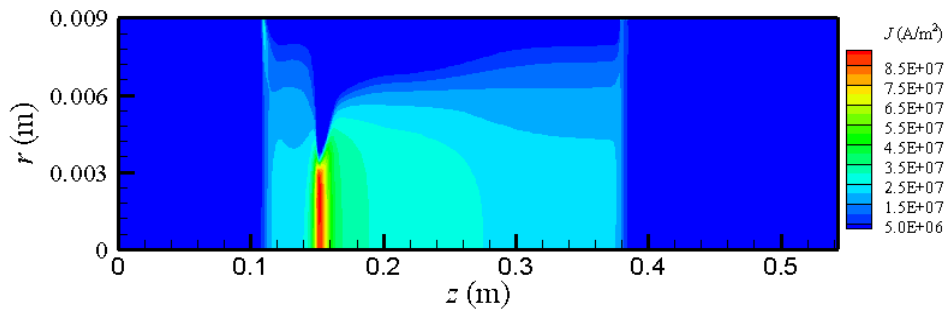


圖 6: 電流密度分佈 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

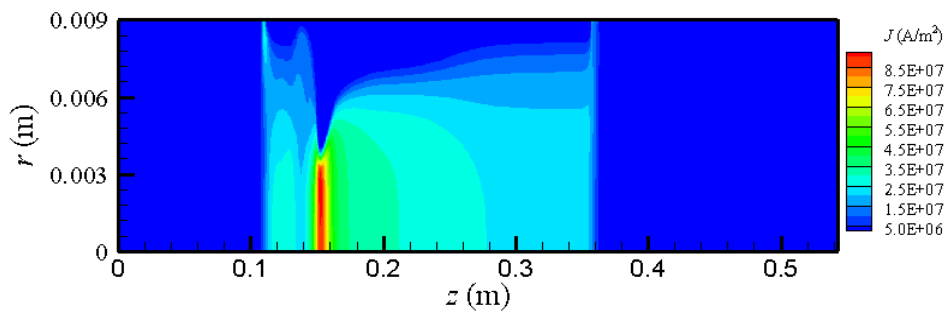


圖 7: 電流密度分佈 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

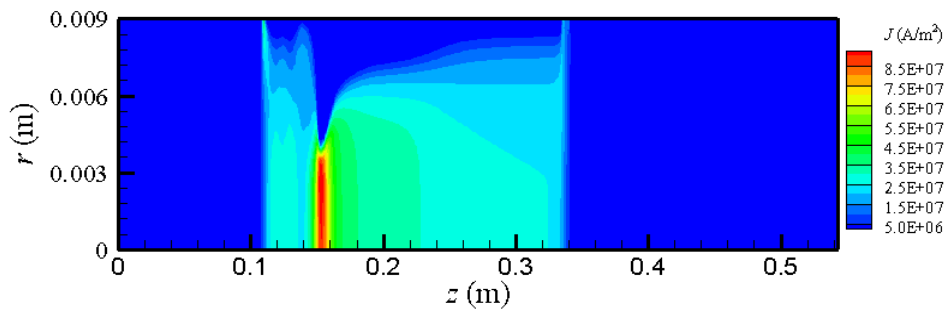


圖 8: 電流密度分佈 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

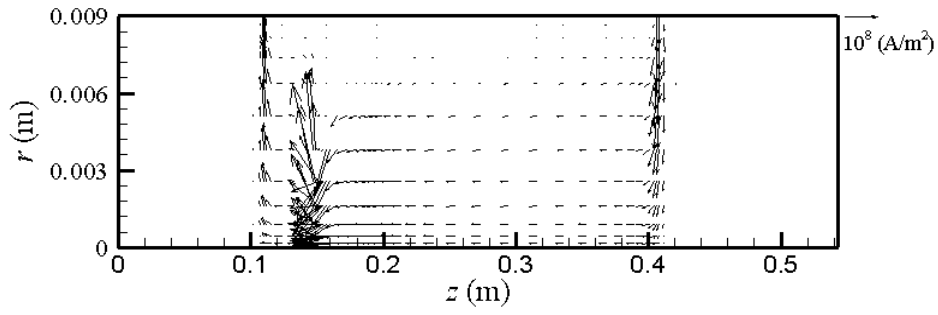


圖 9: 電流密度向量分佈 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

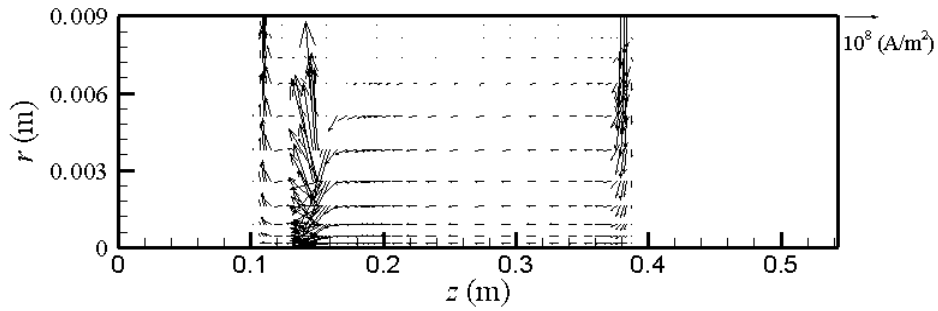


圖 10: 電流密度向量分佈 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

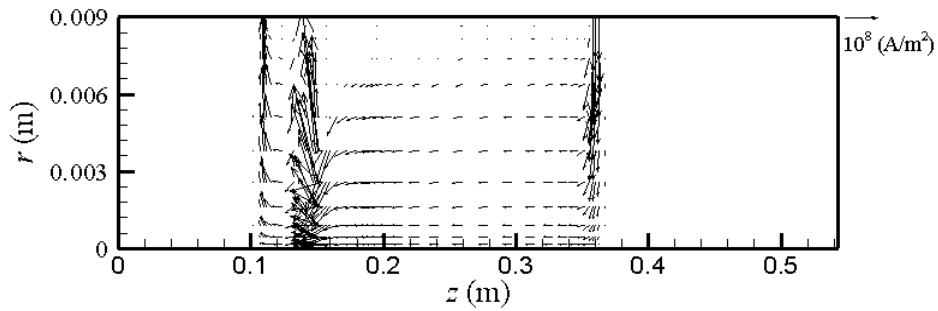


圖 11: 電流密度向量分佈 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

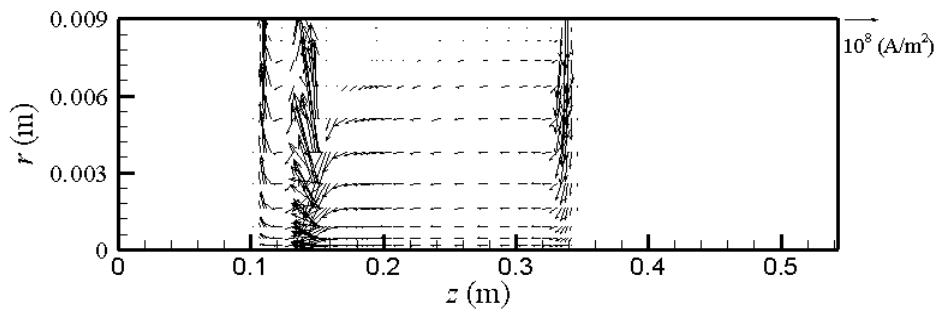


圖 12: 電流密度向量分佈 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

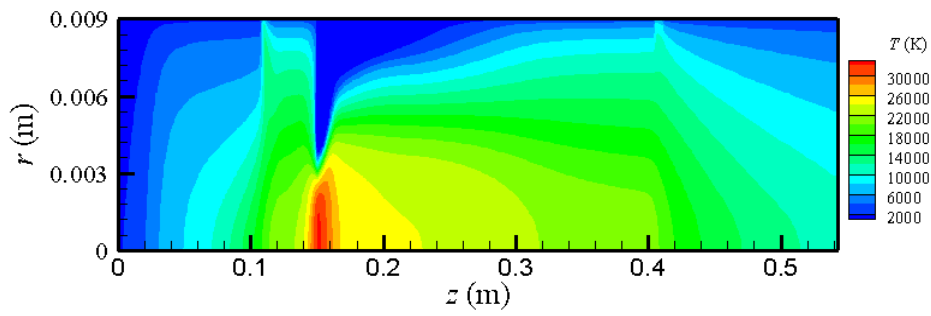


圖 13: 氣體溫度分佈 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

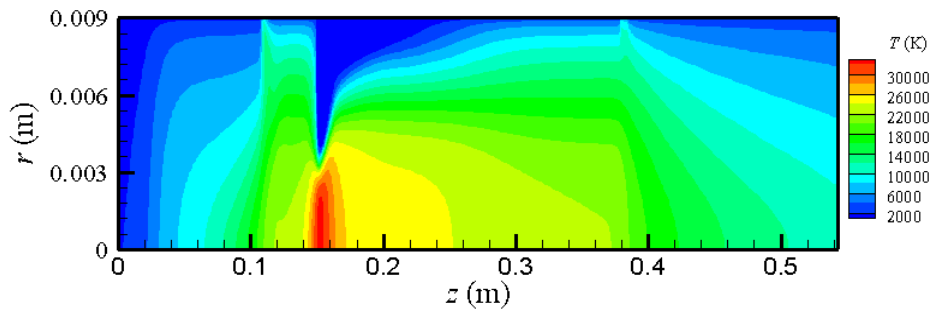


圖 14: 氣體溫度分佈 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

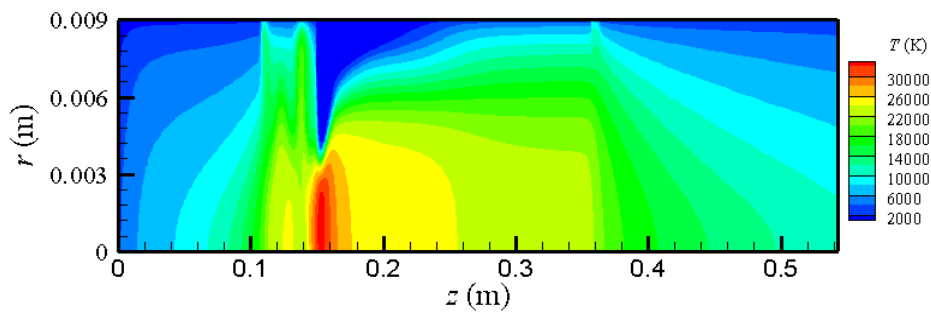


圖 15: 氣體溫度分佈 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

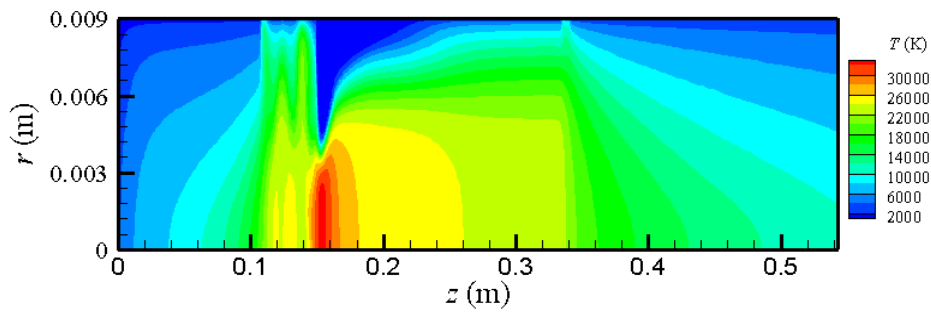


圖 16: 氣體溫度分佈 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

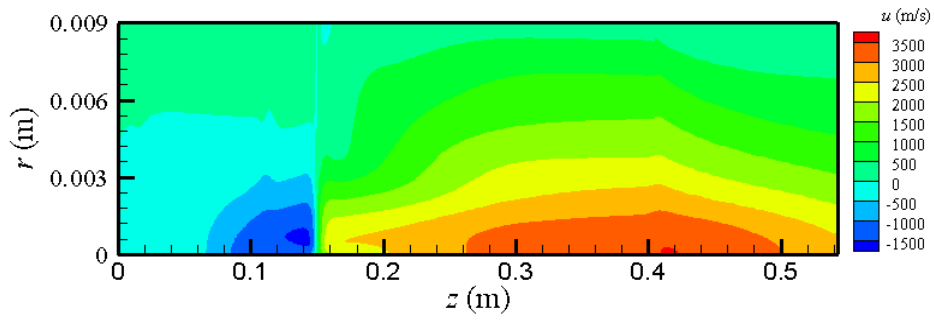


圖 17: 軸向速度分佈 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

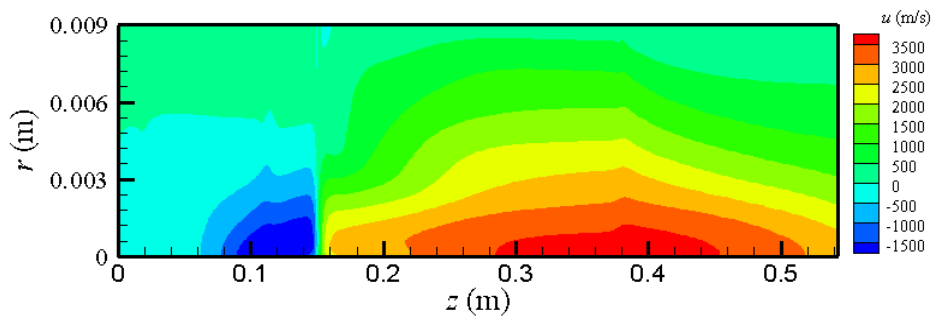


圖 18: 軸向速度分佈 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

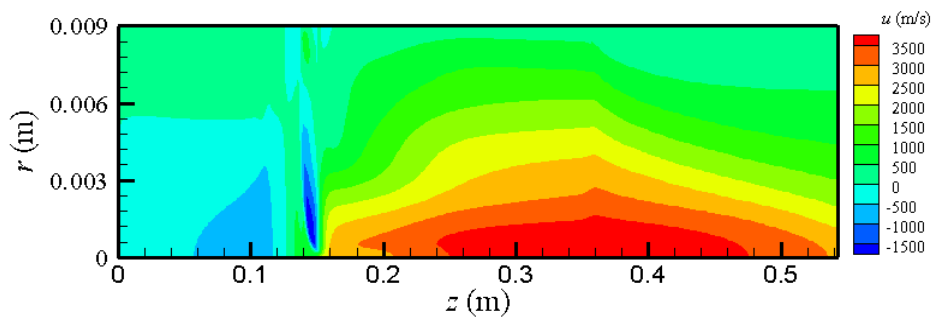


圖 19: 軸向速度分佈 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

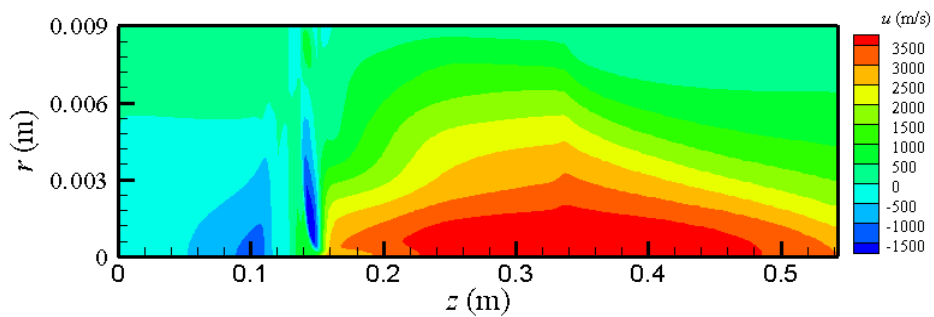


圖 20: 軸向速度分佈 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

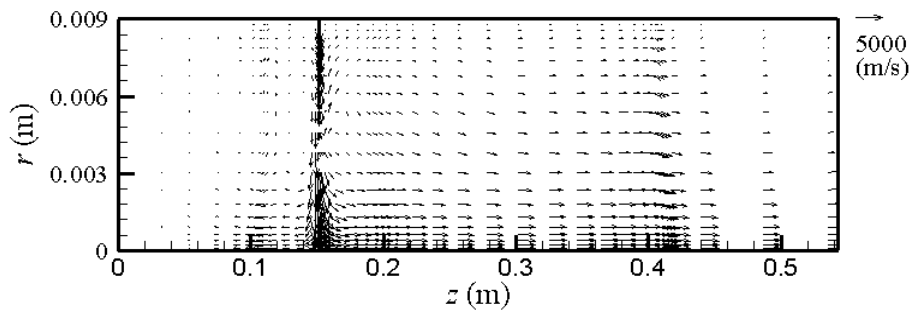


圖 21: 速度向量分佈 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

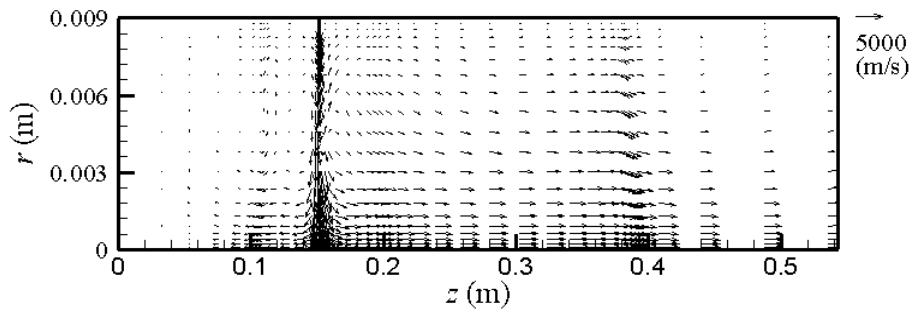


圖 22: 速度向量分佈 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

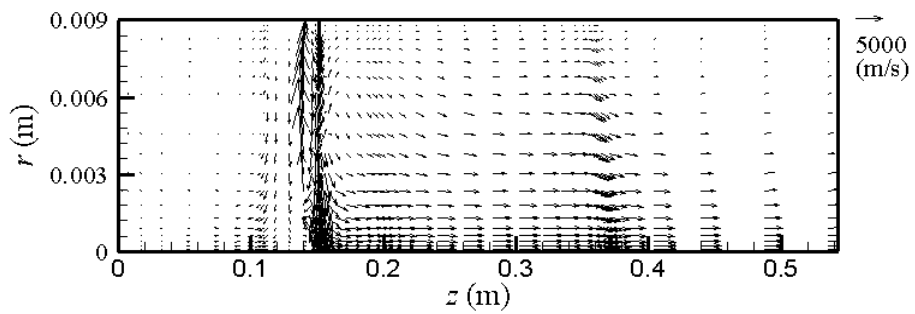


圖 23: 速度向量分佈 ( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

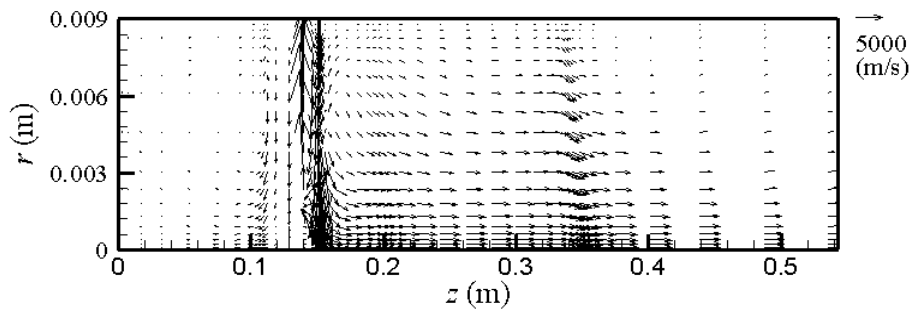


圖 24: 速度向量分佈 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )



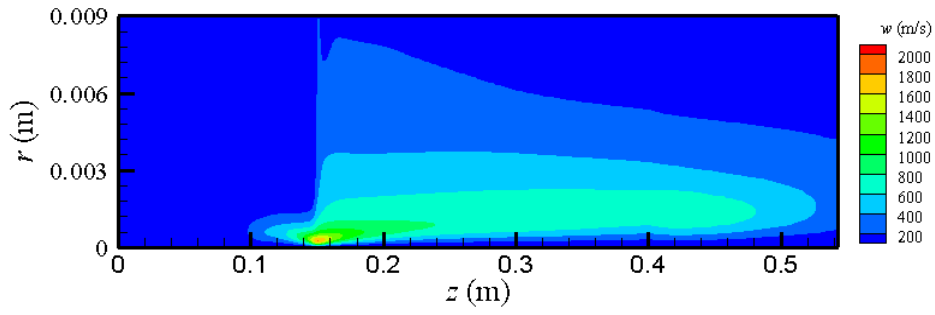


圖 25: 旋向速度分佈 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

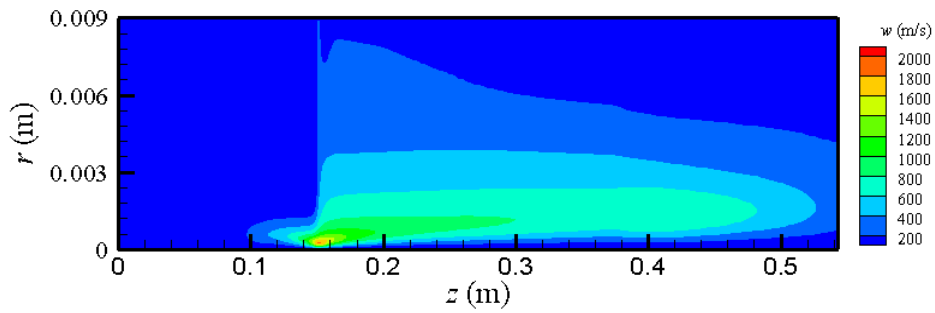


圖 26: 旋向速度分佈 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

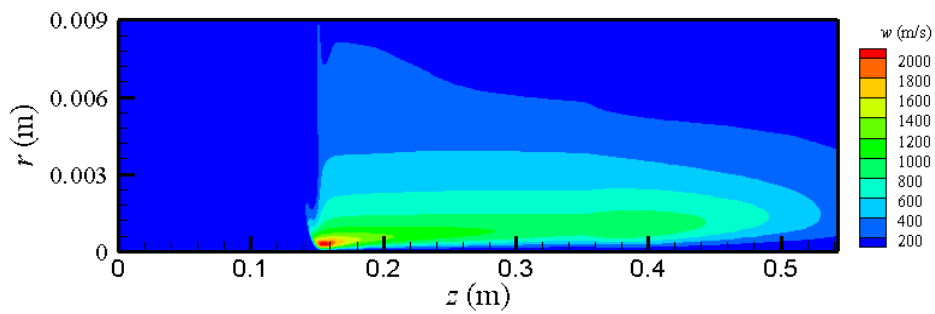


圖 27: 旋向速度分佈 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

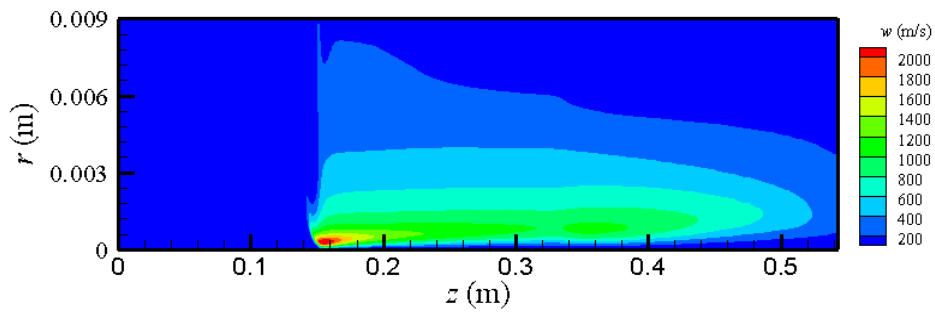


圖 28: 旋向速度分佈 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

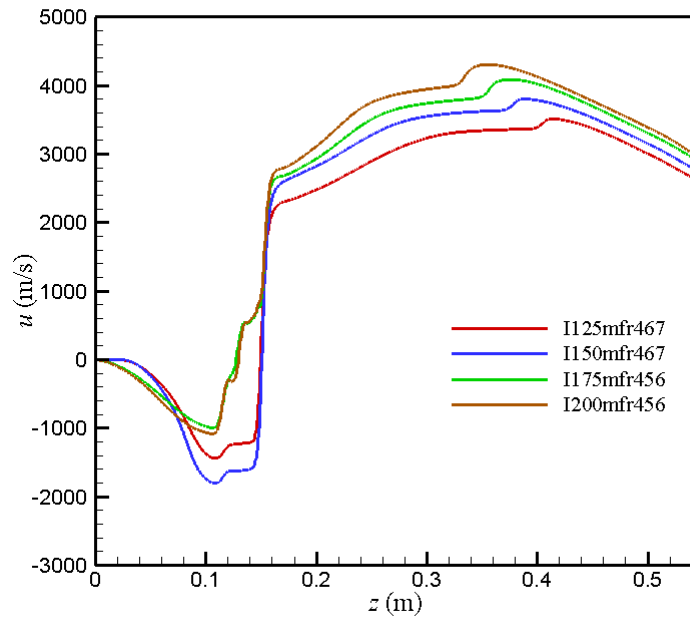


圖 29: 沿中心線軸向速度分量分布

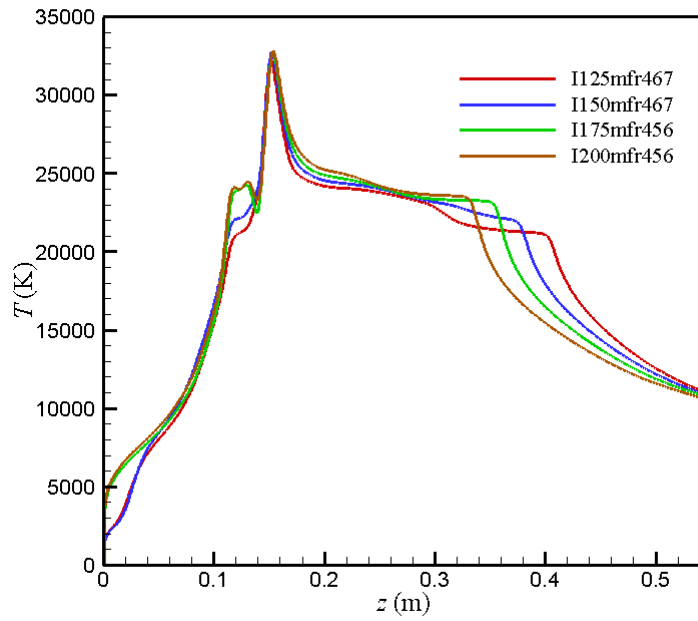


圖 30: 沿中心線氣體溫度分布

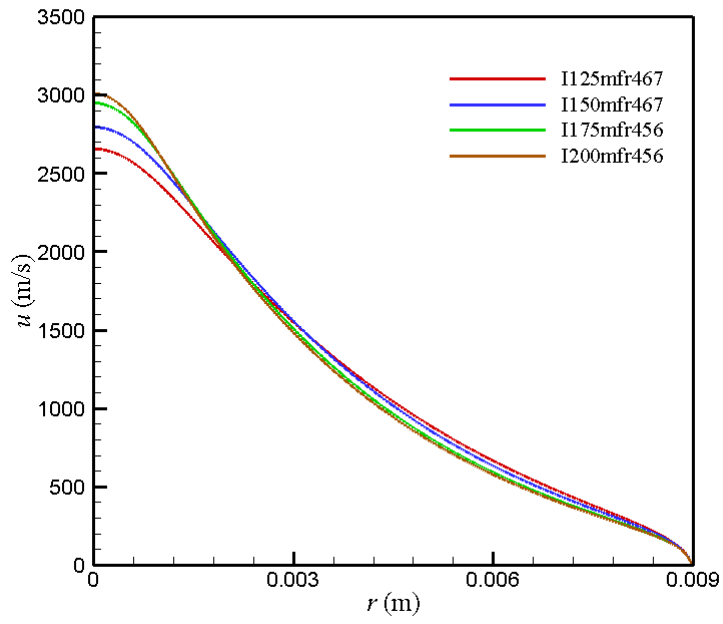


圖 31: 火炬出口處軸向速度分量分布

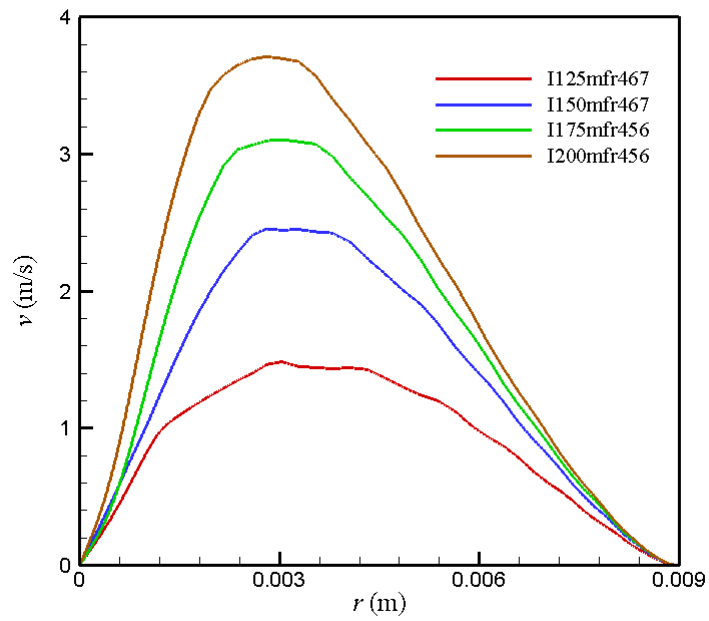


圖 32: 火炬出口處徑向速度分量分布

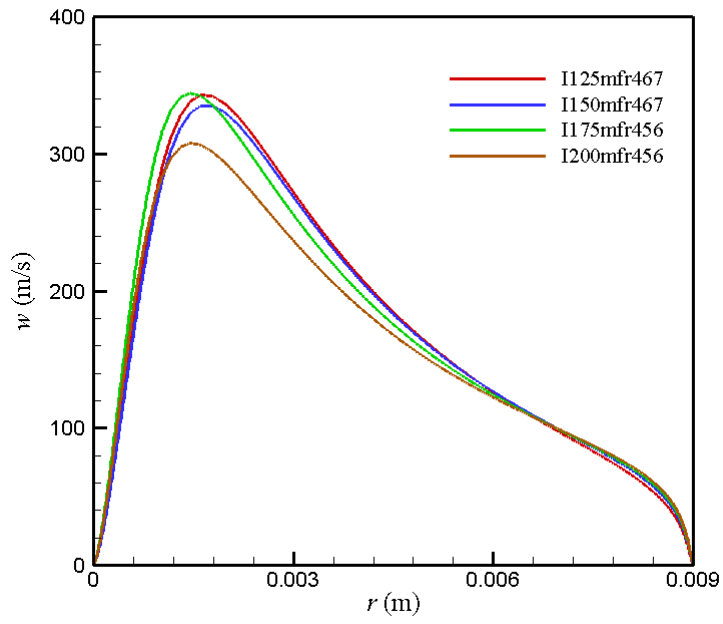


圖 33: 火炬出口處旋向速度分量分布

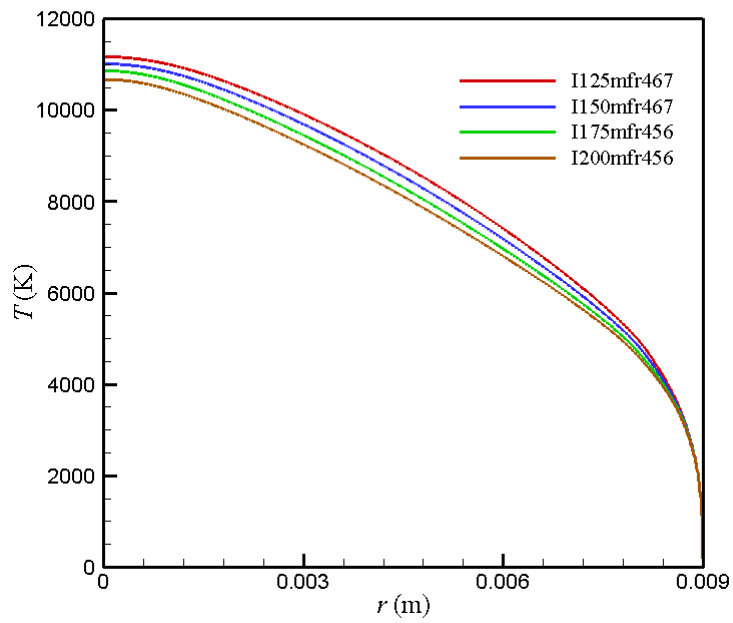


圖 34: 火炬出口處氣體溫度分布

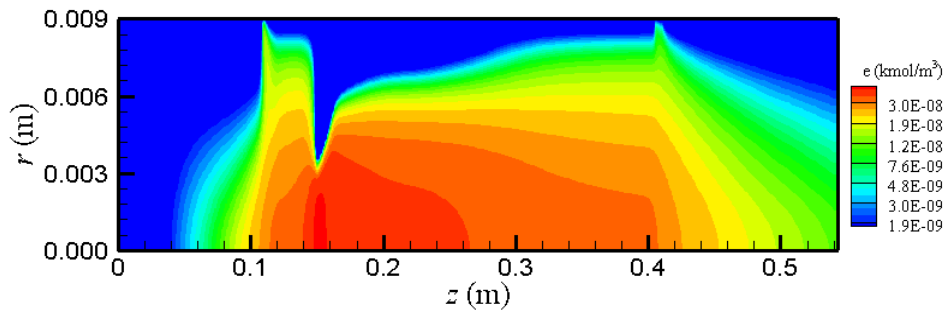


圖 35: 電子濃度分布 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

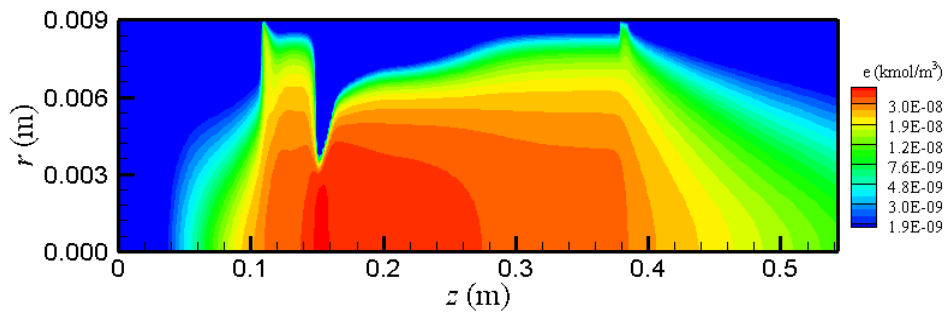


圖 36: 電子濃度分布 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

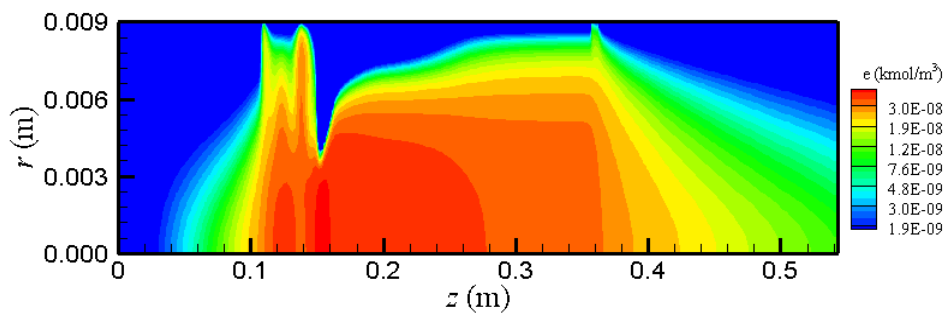


圖 37: 電子濃度分布 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

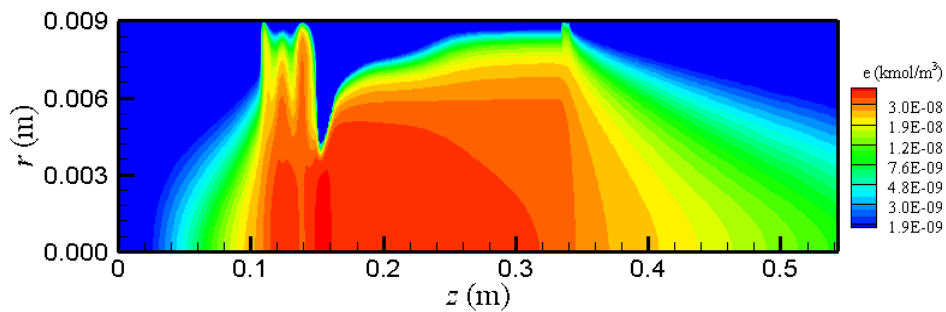


圖 38: 電子濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

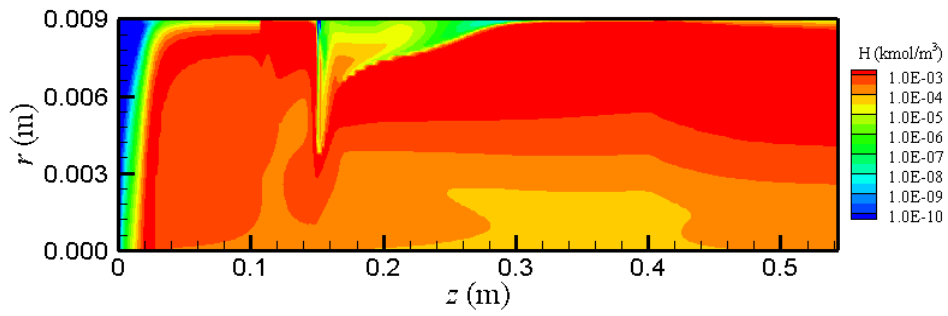


圖 39: H 濃度分布 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

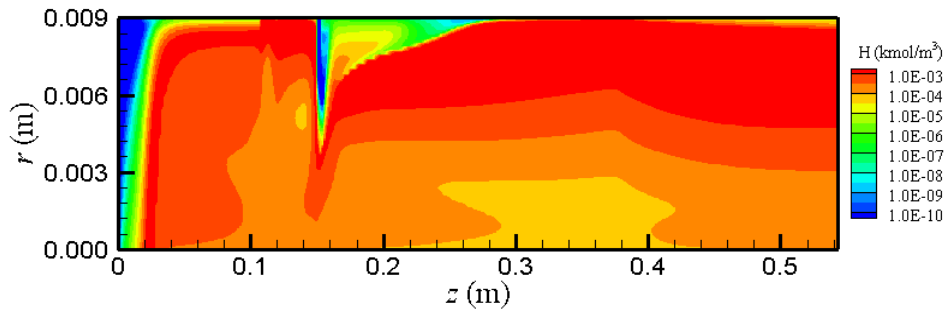


圖 40: H 濃度分布 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

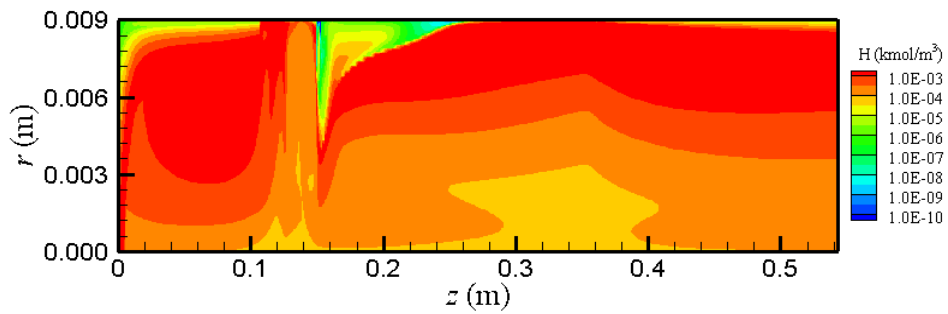


圖 41: H 濃度分布 ( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

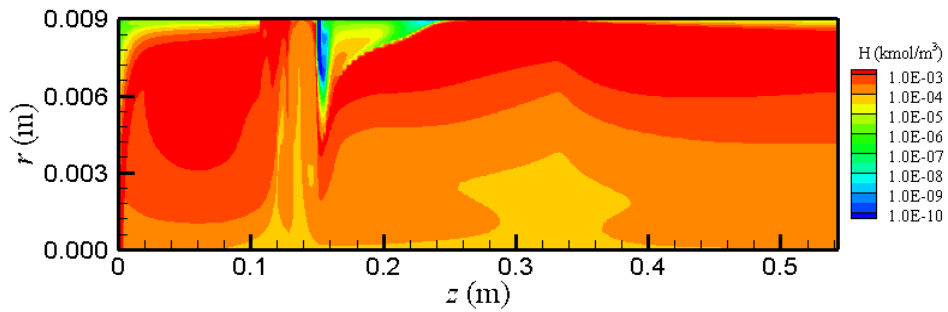


圖 42: H 濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

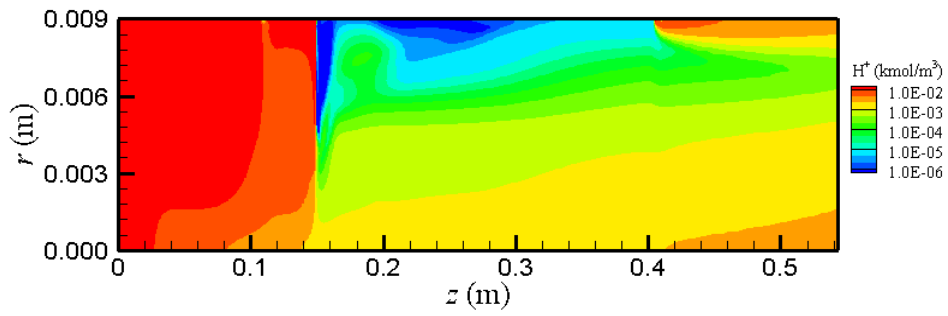


圖 43:  $H^+$  濃度分布 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

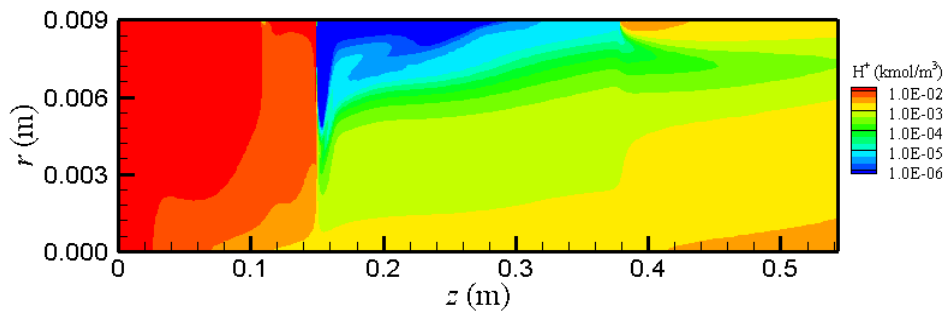


圖 44:  $H^+$  濃度分布 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

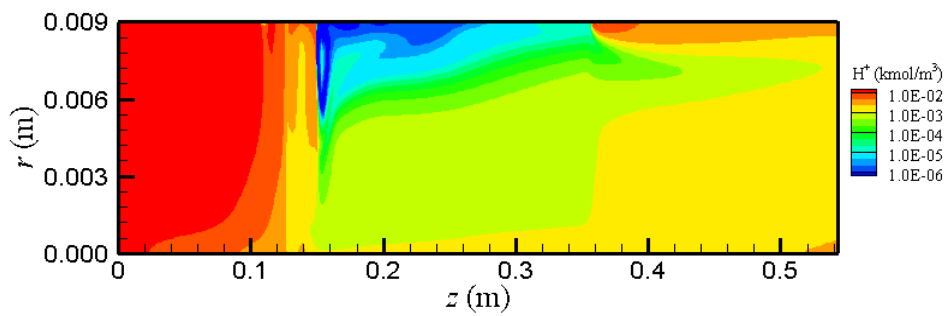


圖 45:  $H^+$  濃度分布 ( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

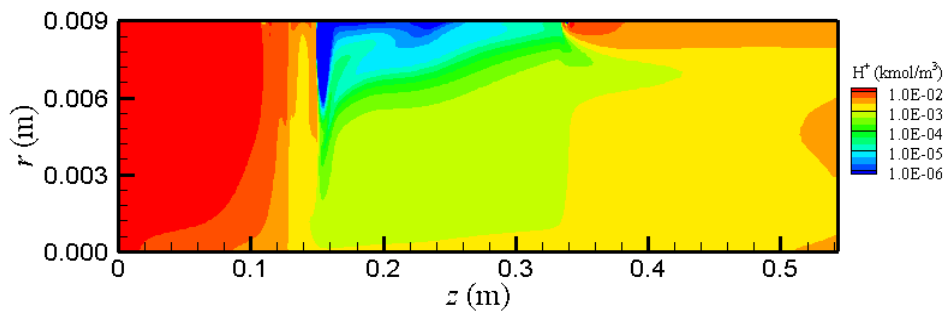


圖 46:  $H^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

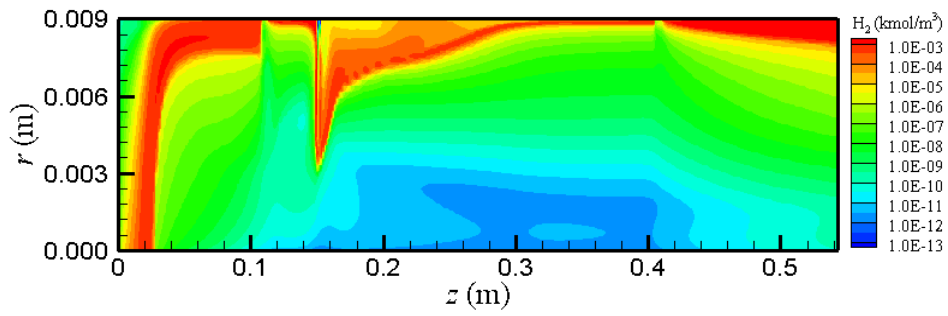


圖 47: H<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

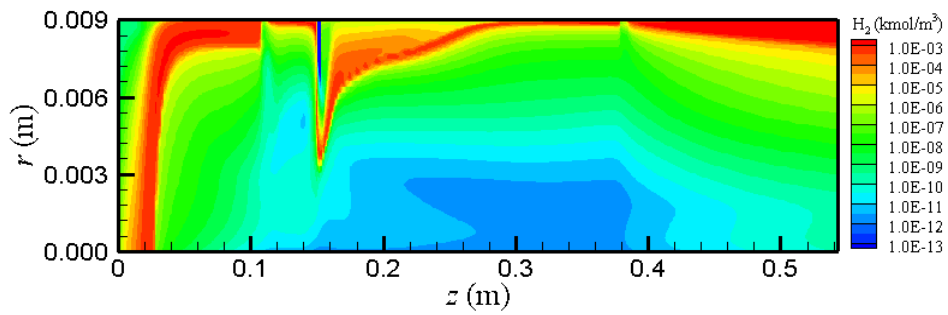


圖 48: H<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

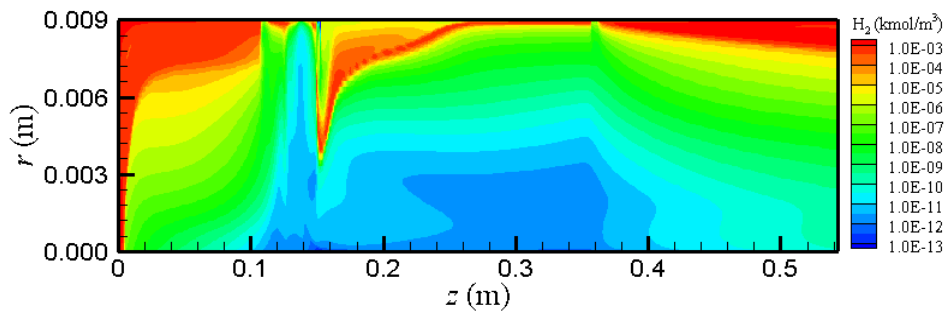


圖 49: H<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

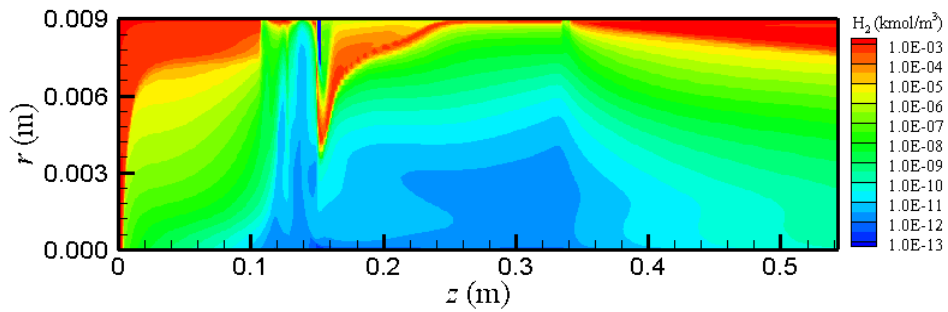


圖 50: H<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )



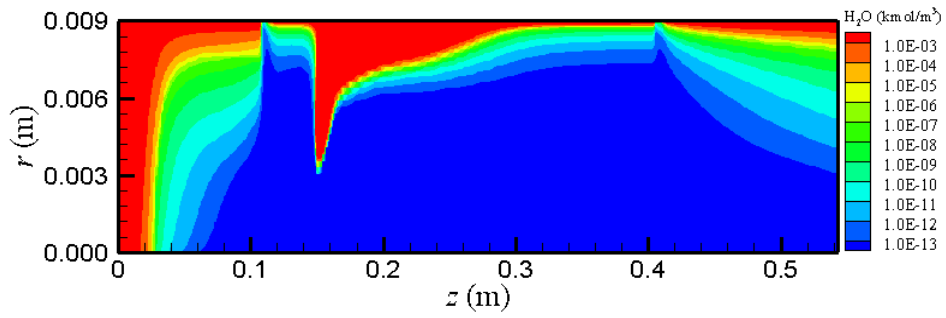


圖 51: H<sub>2</sub>O 濃度分布 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

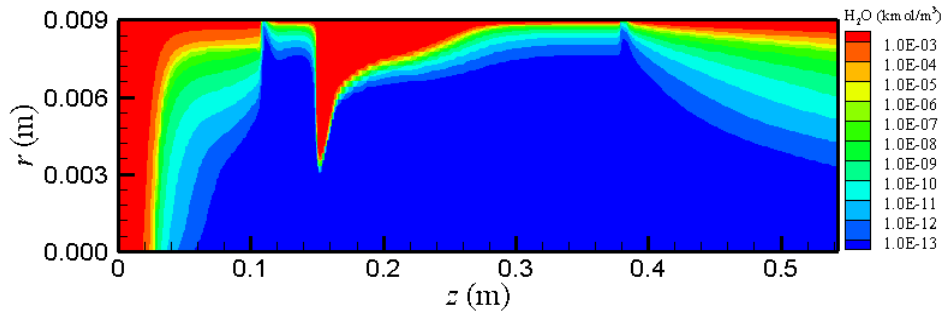


圖 52: H<sub>2</sub>O 濃度分布 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

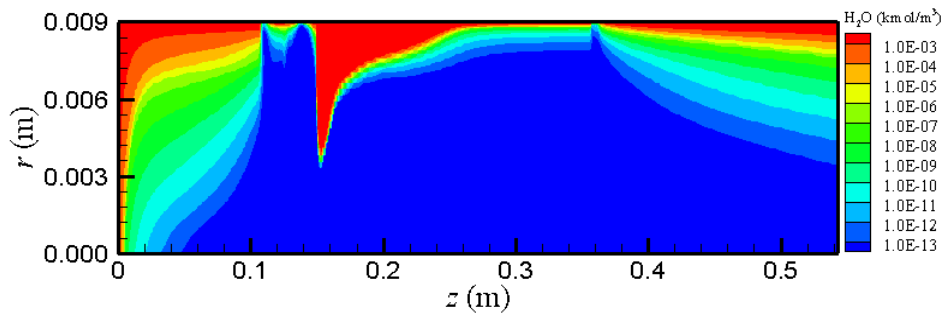


圖 53: H<sub>2</sub>O 濃度分布 ( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

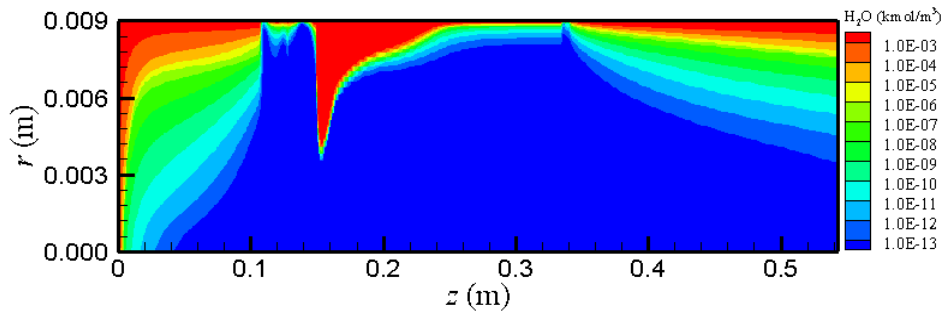


圖 54: H<sub>2</sub>O 濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

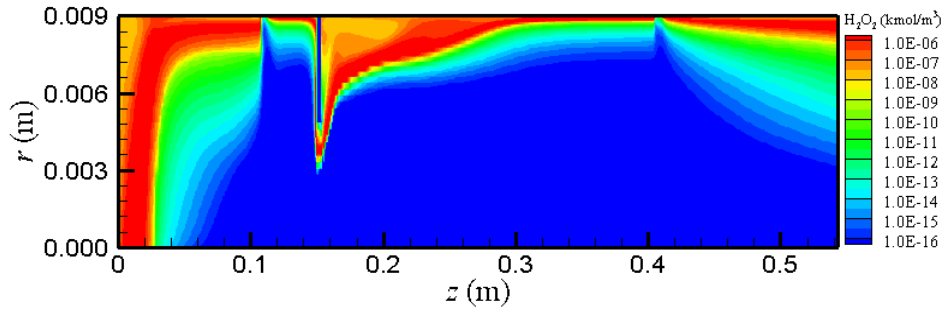


圖 55:  $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度分布 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

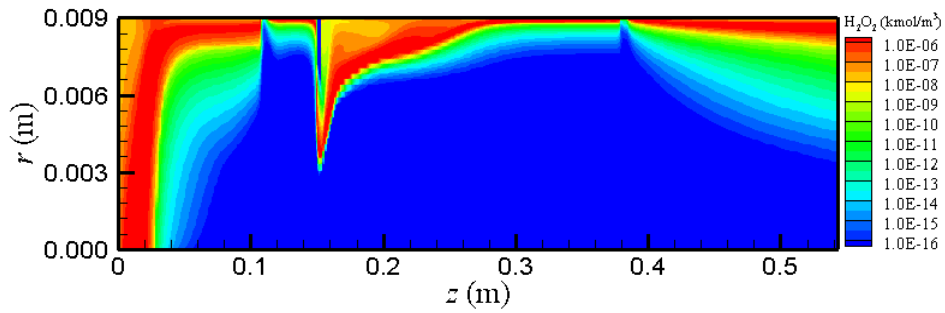


圖 56:  $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度分布 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

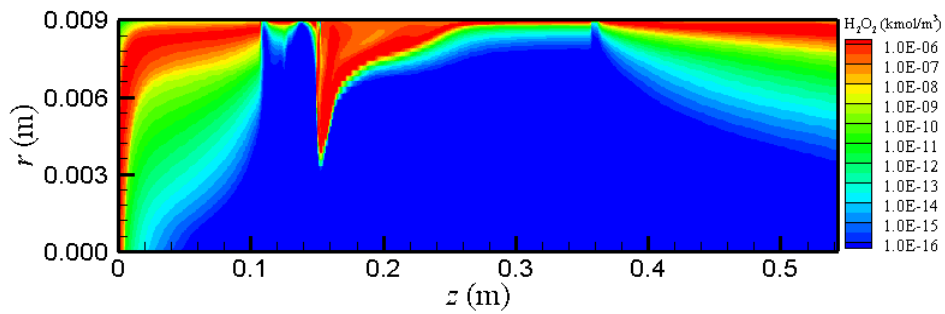


圖 57:  $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度分布 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

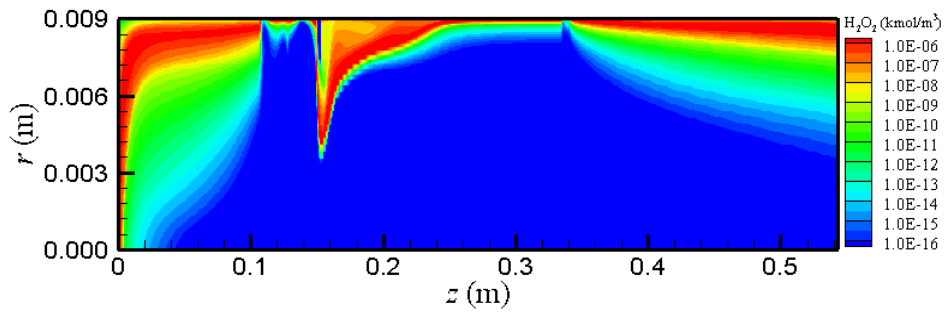


圖 58:  $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

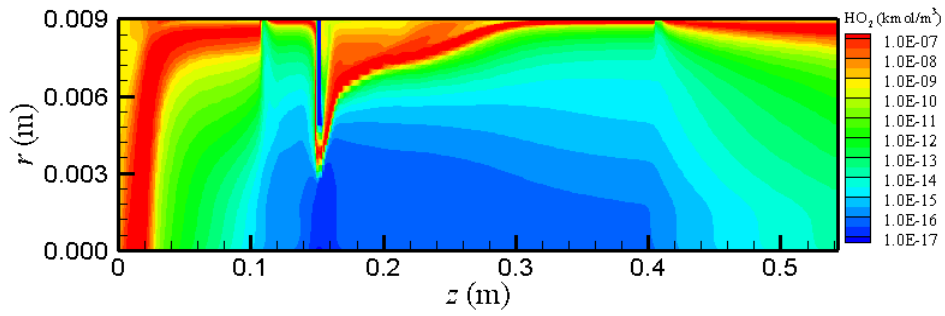


圖 59: HO<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

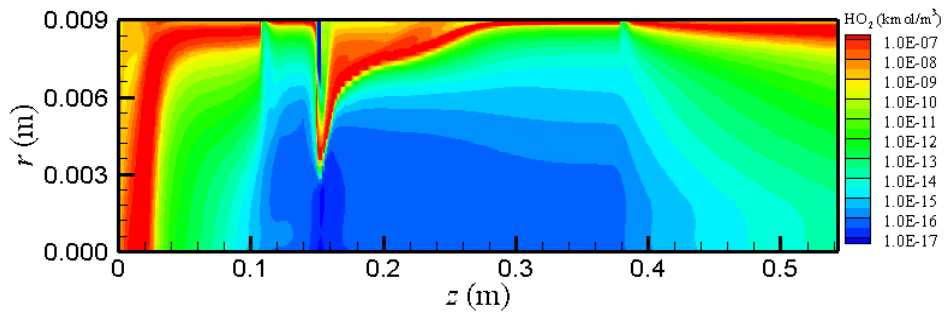


圖 60: HO<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

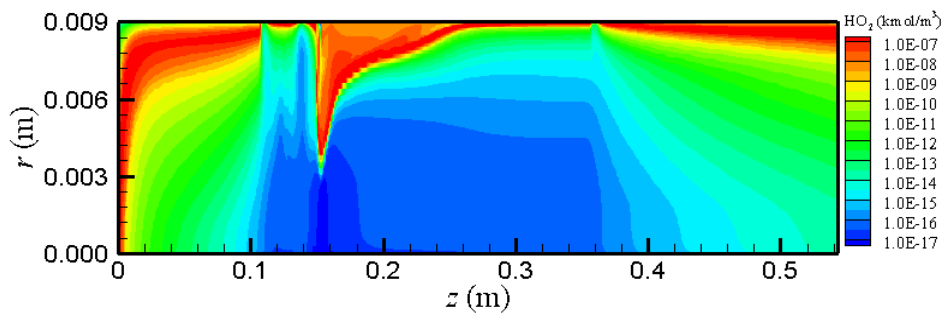


圖 61: HO<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

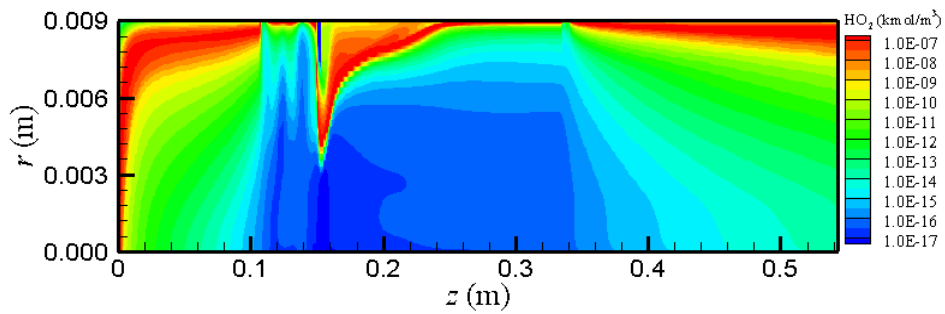


圖 62: HO<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

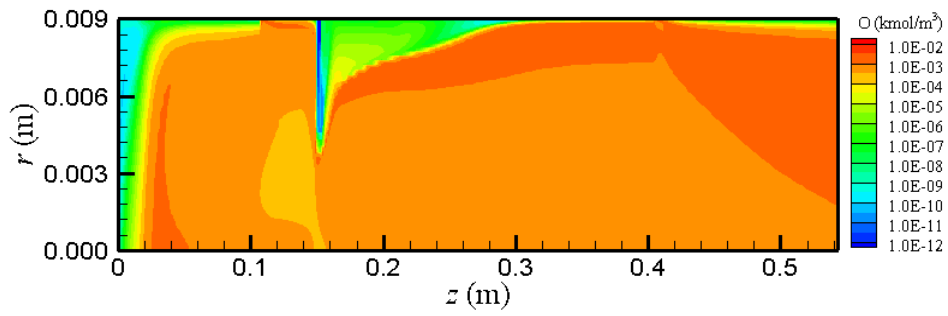


圖 63: O 濃度分布 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

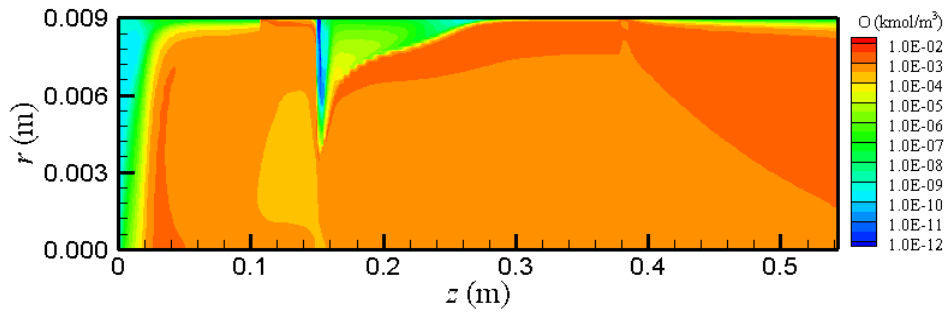


圖 64: O 濃度分布 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

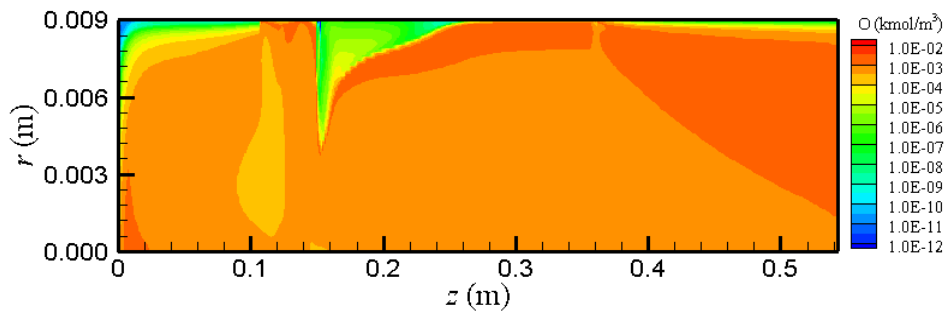


圖 65: O 濃度分布 ( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

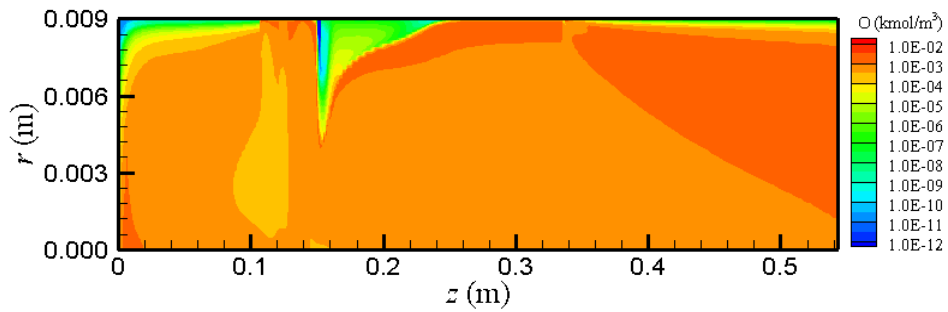


圖 66: O 濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

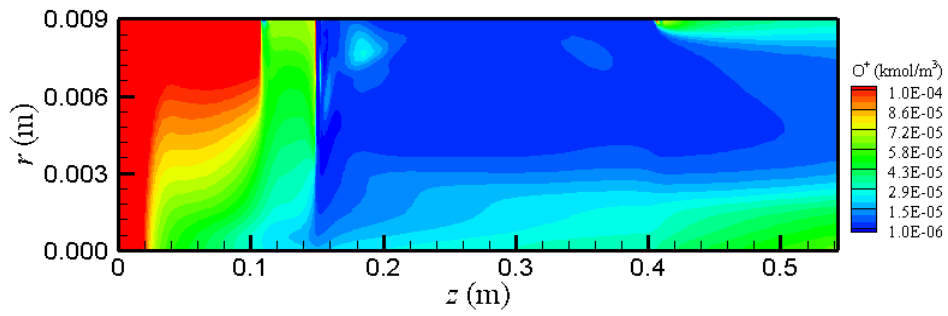


圖 67:  $O^+$  濃度分布 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

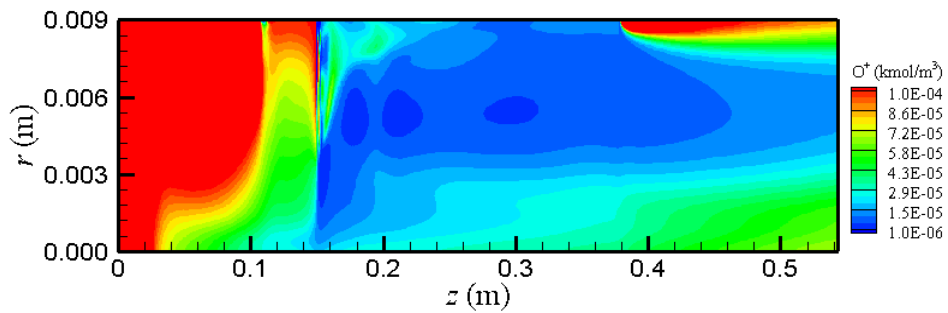


圖 68:  $O^+$  濃度分布 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

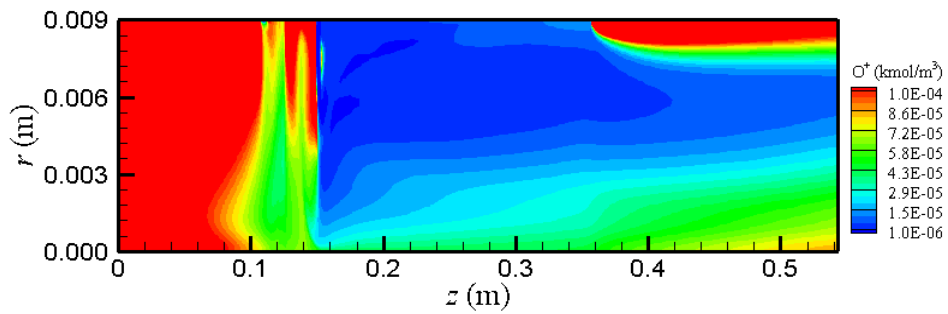


圖 69:  $O^+$  濃度分布 ( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

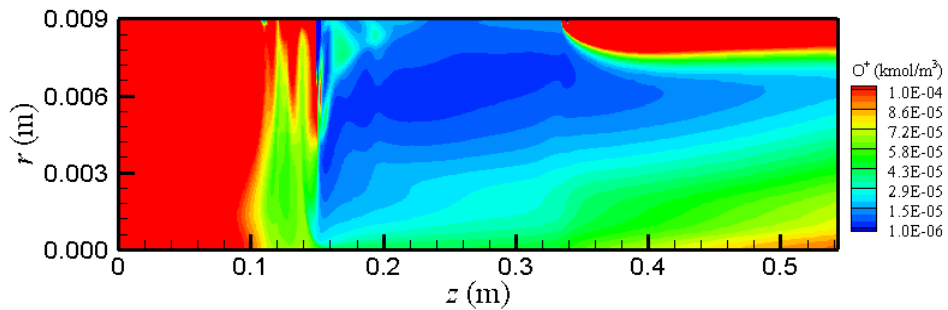


圖 70:  $O^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

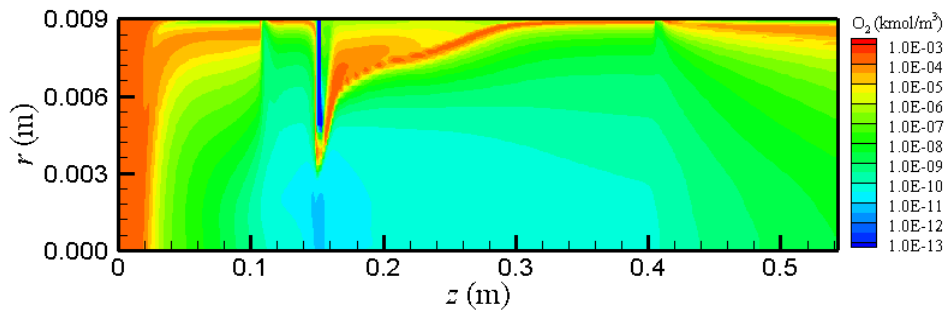


圖 71: O<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

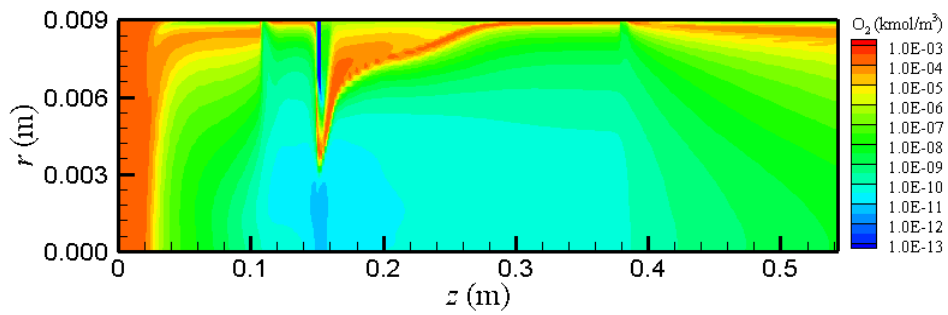


圖 72: O<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

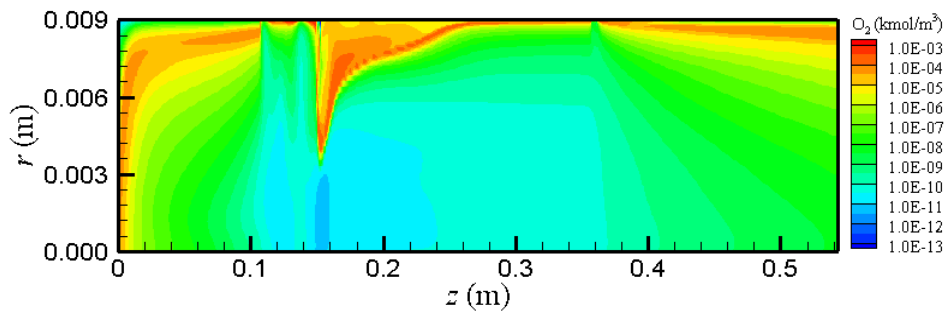


圖 73: O<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

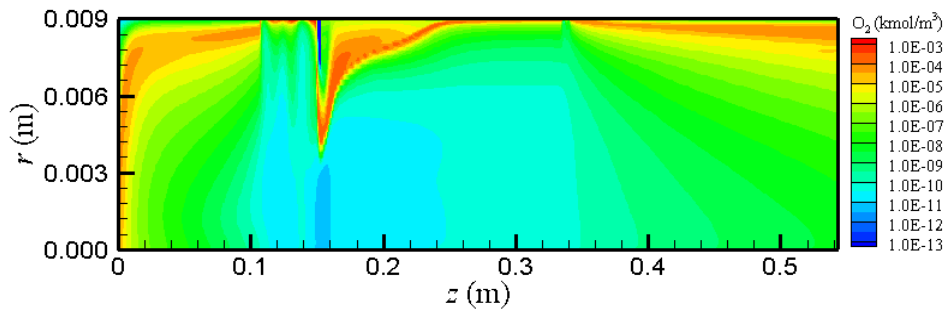


圖 74: O<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

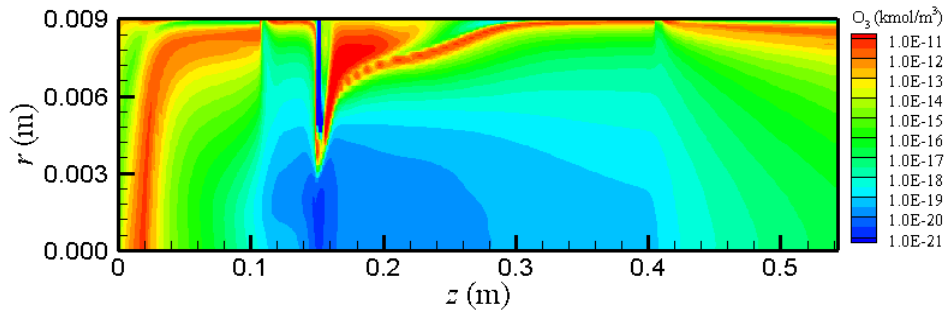


圖 75: O<sub>3</sub> 濃度分布 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

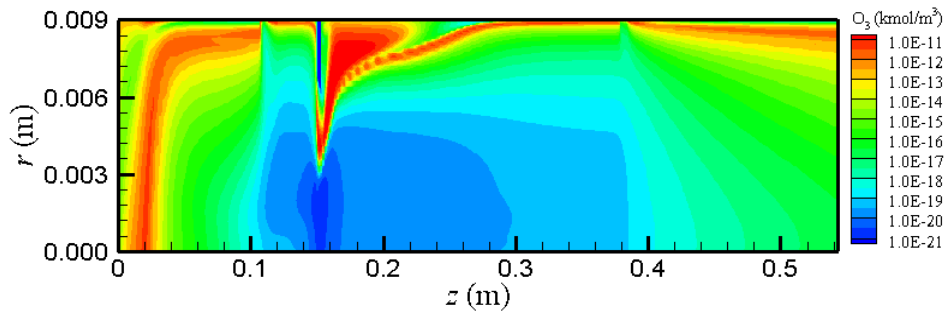


圖 76: O<sub>3</sub> 濃度分布 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

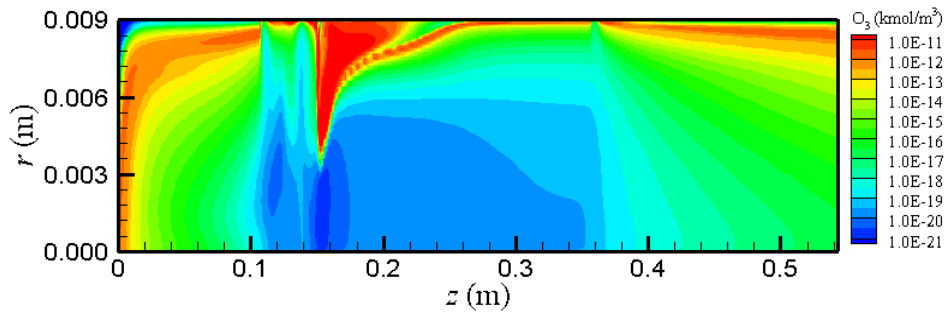


圖 77: O<sub>3</sub> 濃度分布 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

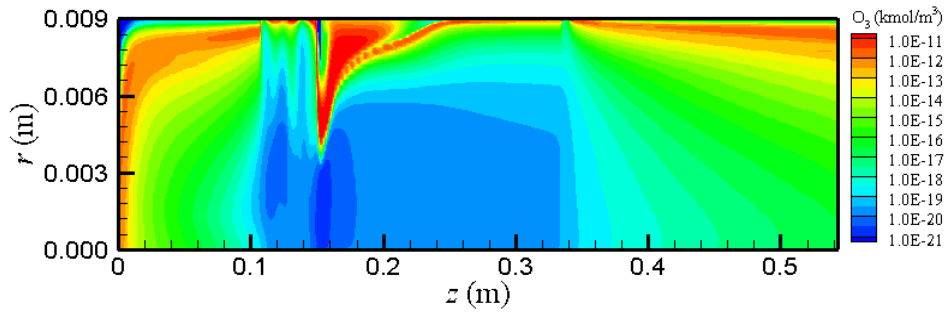


圖 78: O<sub>3</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

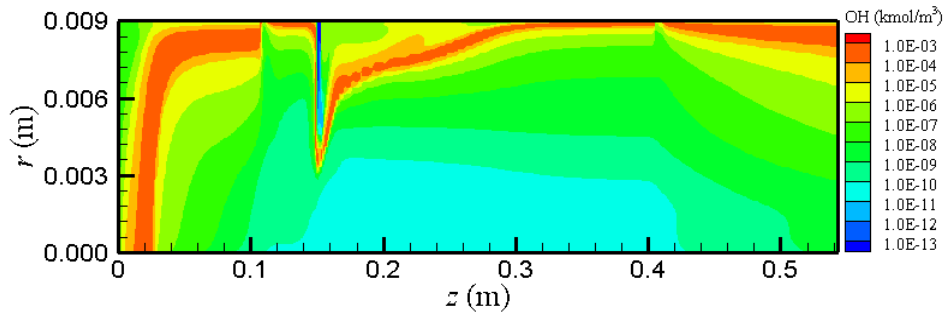


圖 79: OH 濃度分布 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

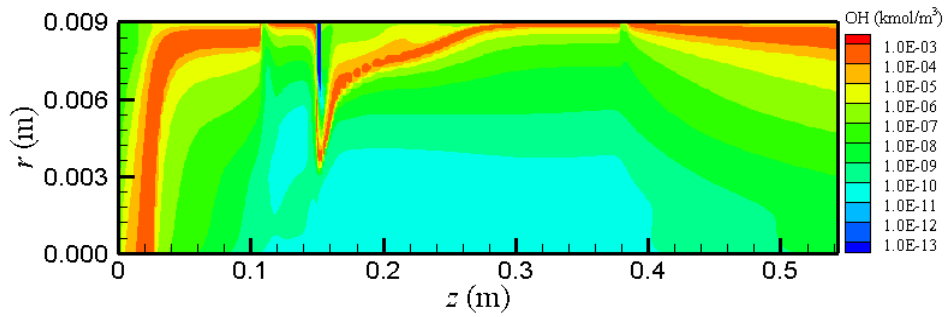


圖 80: OH 濃度分布 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

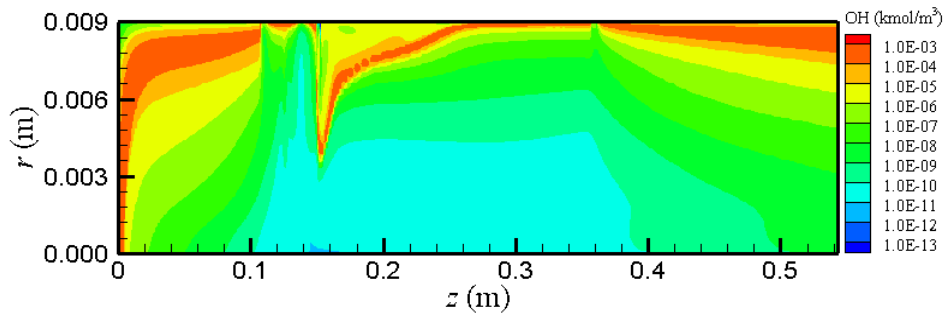


圖 81: OH 濃度分布 ( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

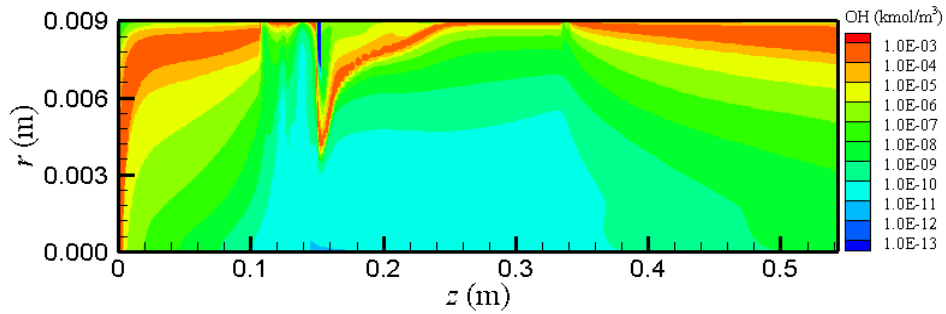


圖 82: OH 濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )



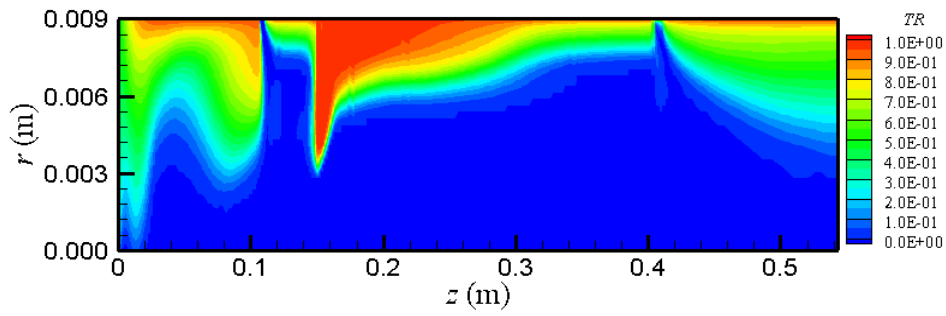


圖 83: 電子溫度比值分布 ( $I=125\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

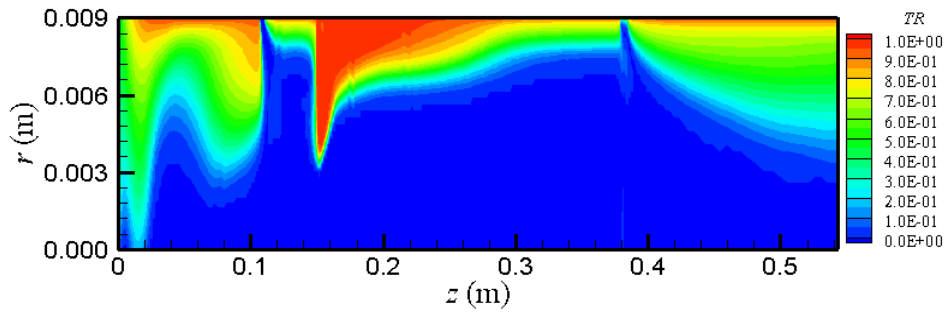


圖 84: 電子溫度比值分布 ( $I=150\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.67\text{g/s}$ )

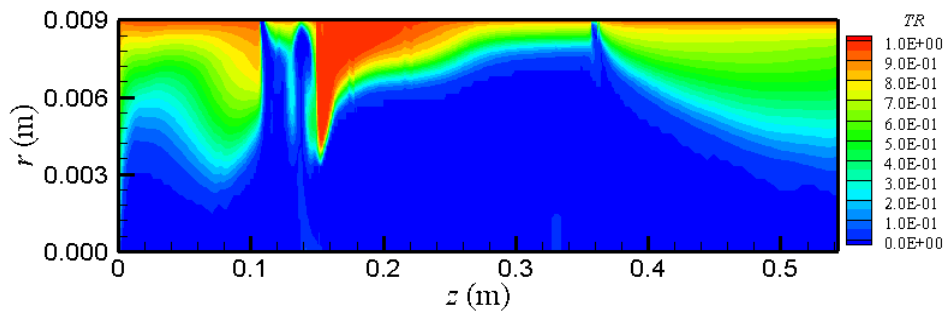


圖 85: 電子溫度比值分布 ( $I=175\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

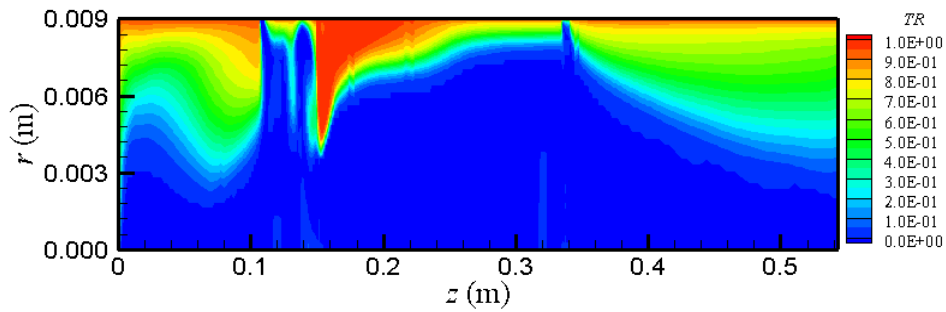


圖 86: 電子溫度比值分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

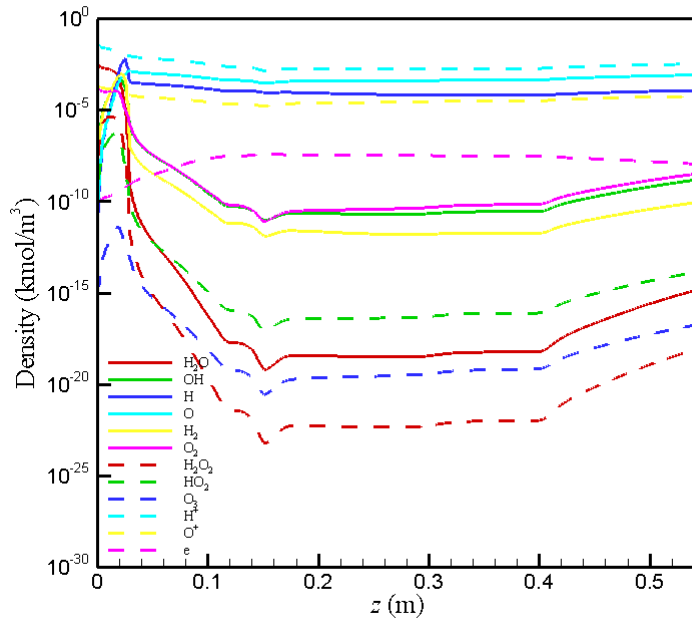


圖 87: 沿中心線物種濃度分布 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

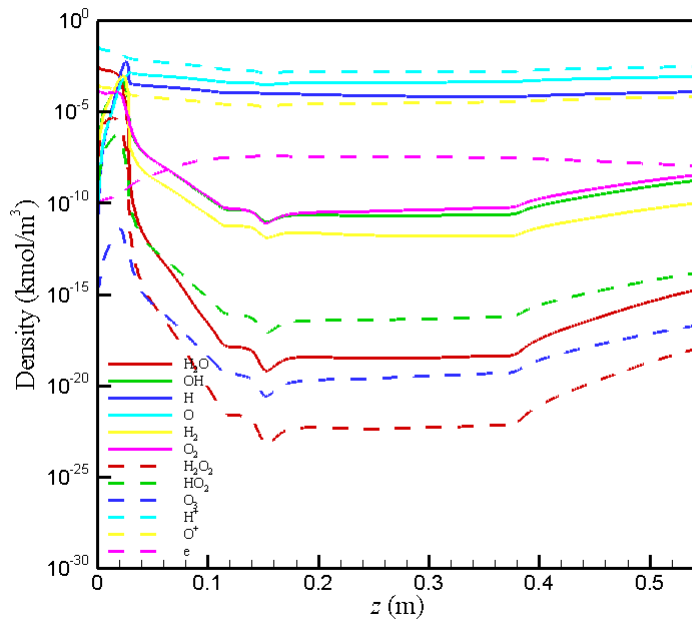


圖 88: 沿中心線物種濃度分布 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

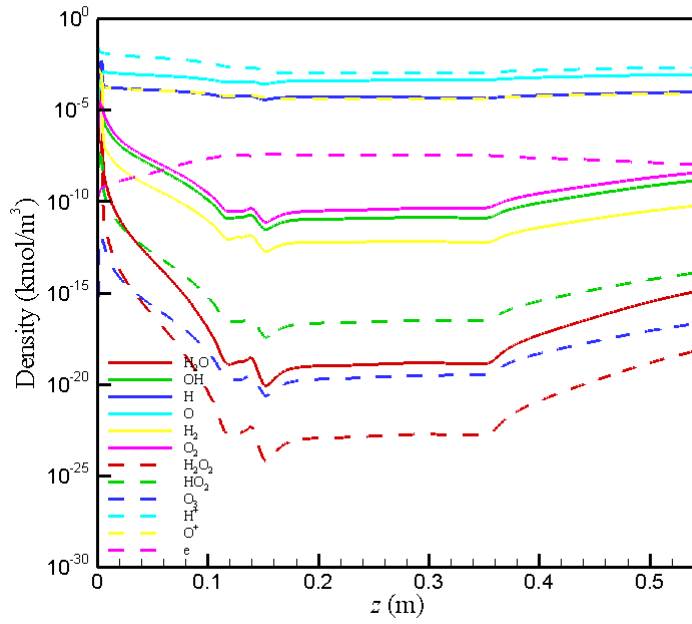


圖 89: 沿中心線物種濃度分布 ( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

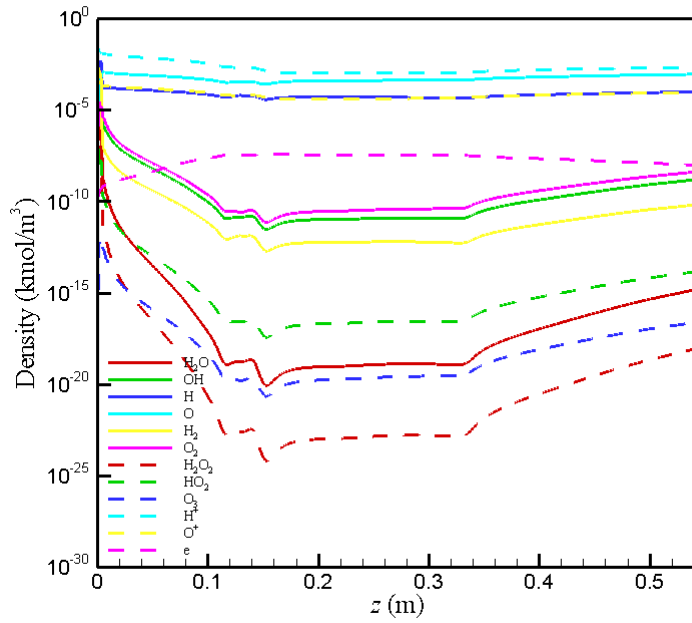


圖 90: 沿中心線物種濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

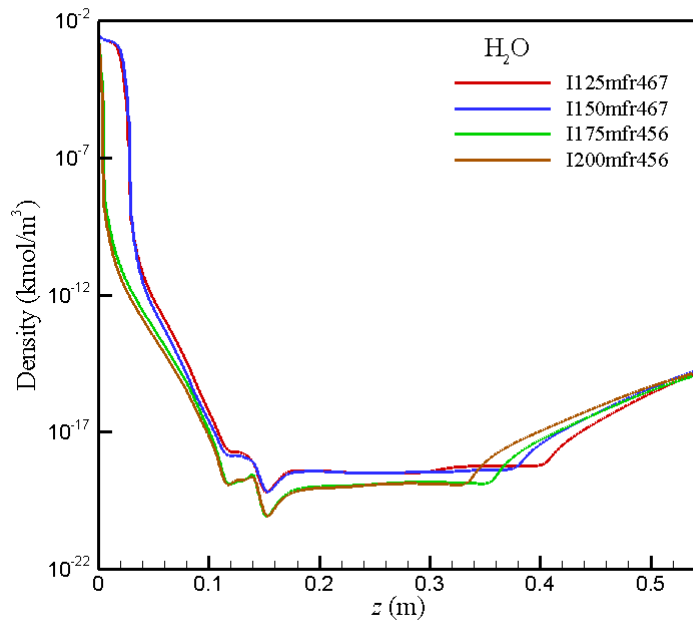


圖 91: 沿中心線 H<sub>2</sub>O 濃度分布

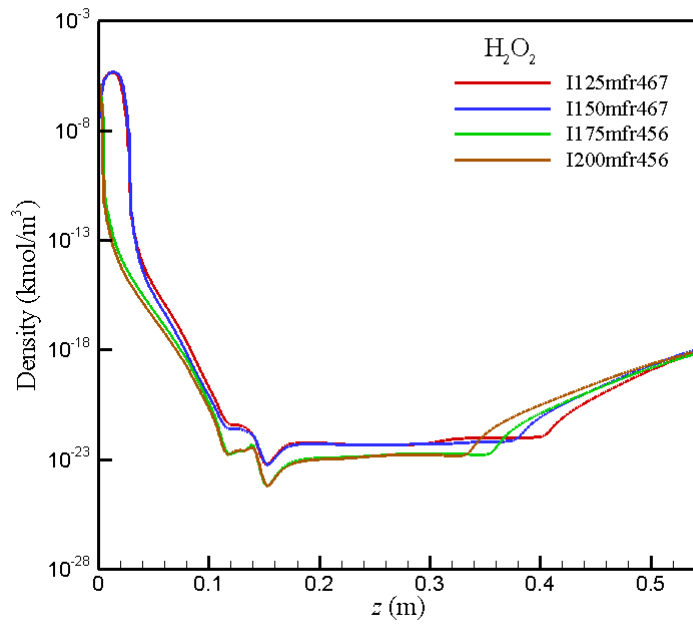


圖 92: 沿中心線 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度分布

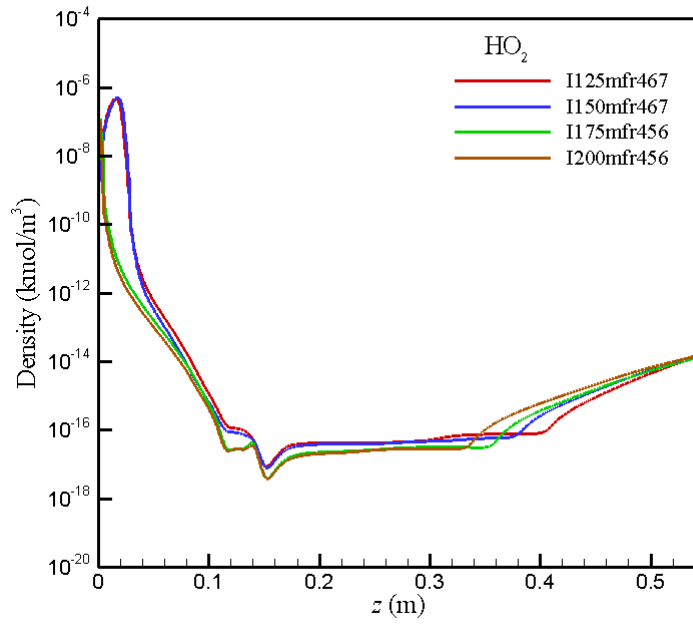


圖 93: 沿中心線  $\text{HO}_2$  濃度分布

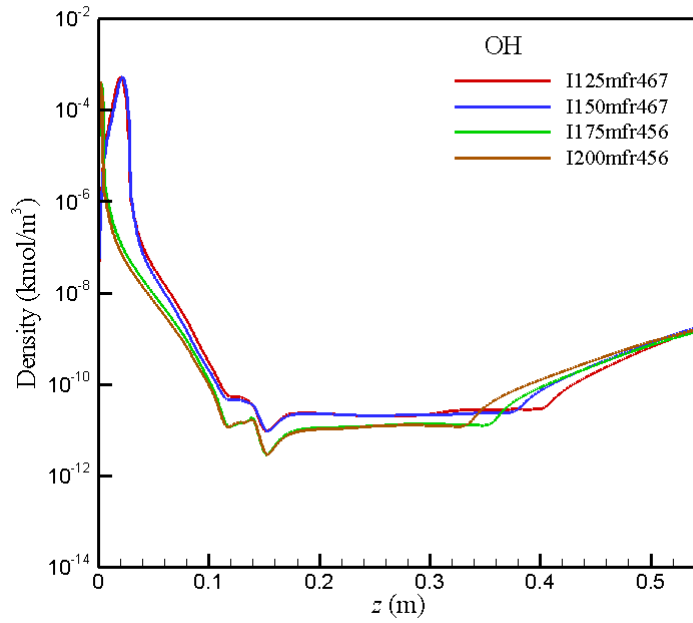


圖 94: 沿中心線  $\text{OH}$  濃度分布

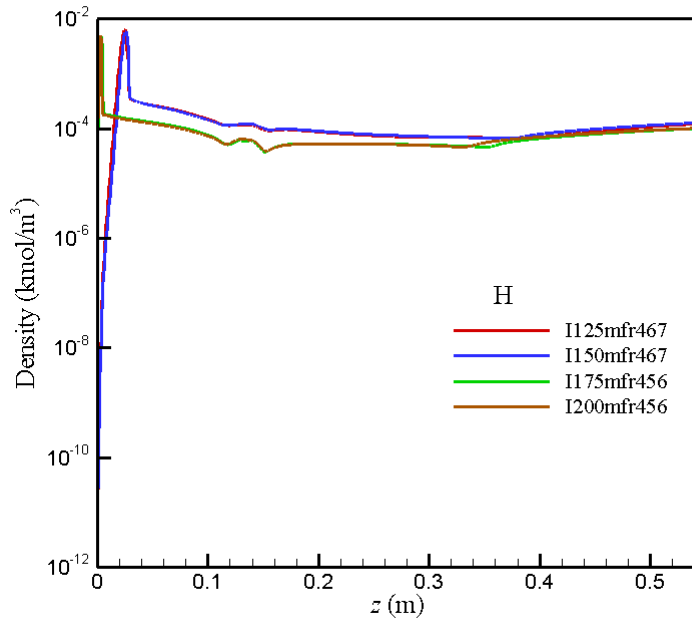


圖 95: 沿中心線 H 濃度分布

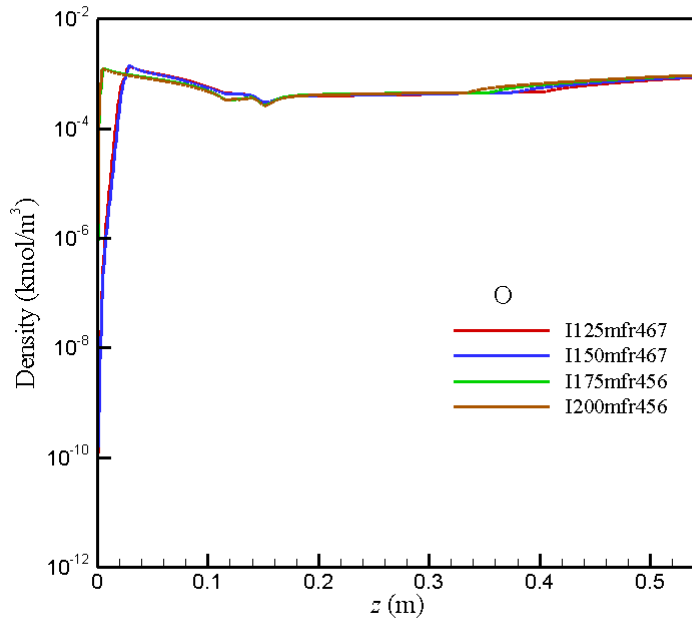


圖 96: 沿中心線 O 濃度分布

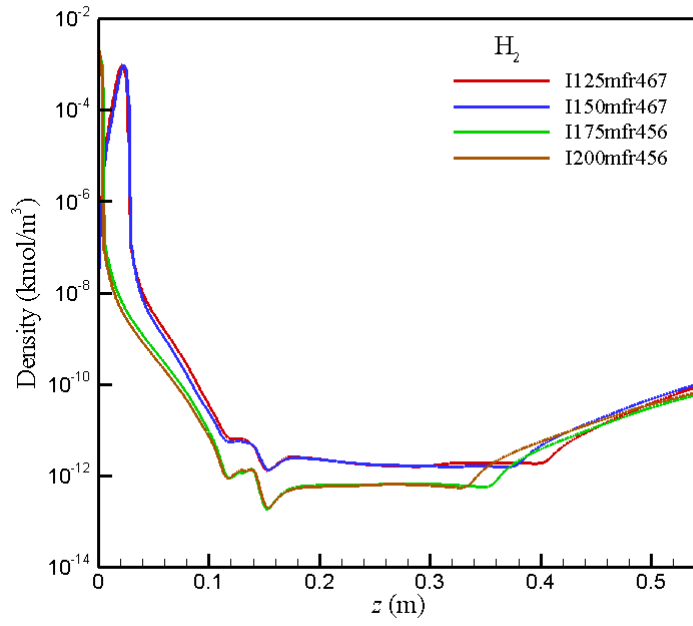


圖 97: 沿中心線  $H_2$  濃度分布

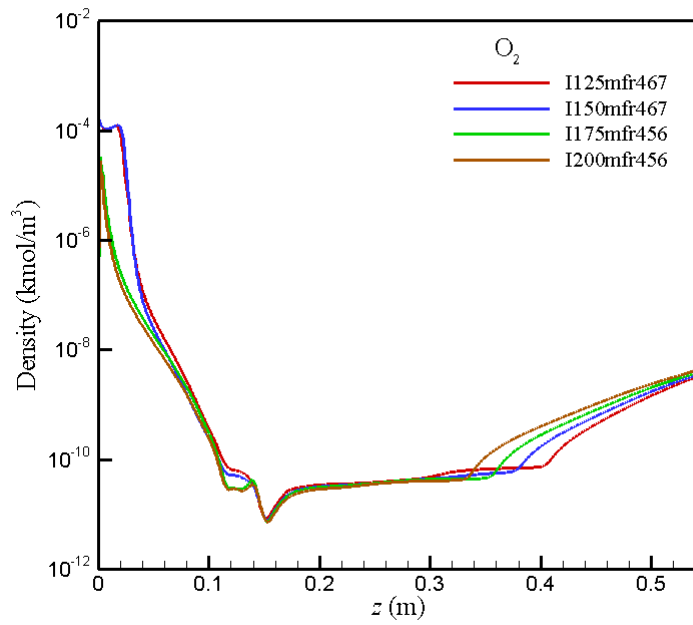


圖 98: 沿中心線  $O_2$  濃度分布

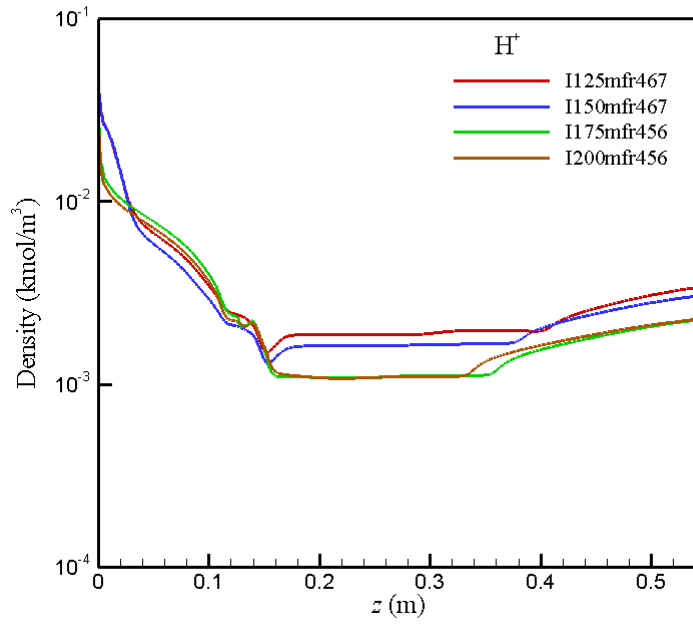


圖 99: 沿中心線  $H^+$  濃度分布

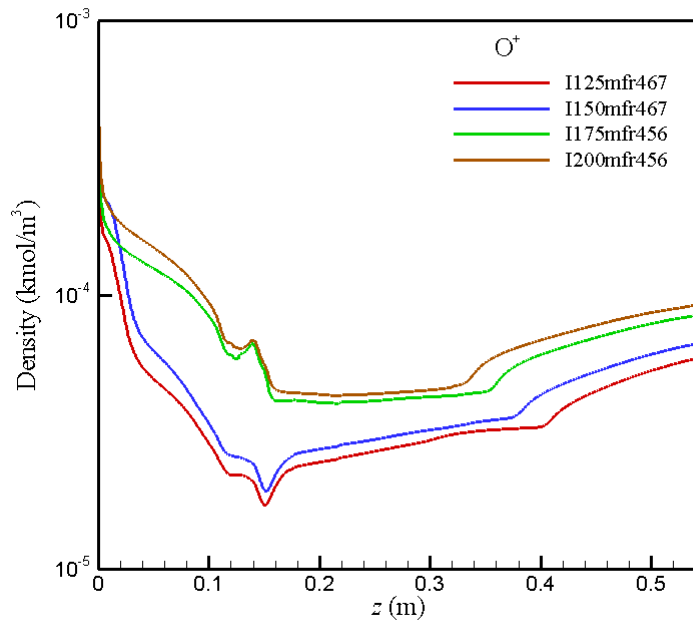


圖 100: 沿中心線  $O^+$  濃度分布



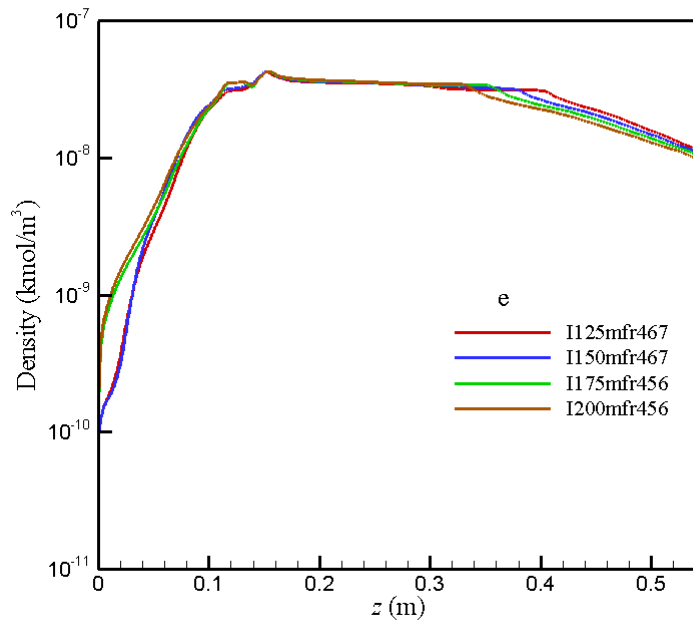


圖 101: 沿中心線電子濃度分布

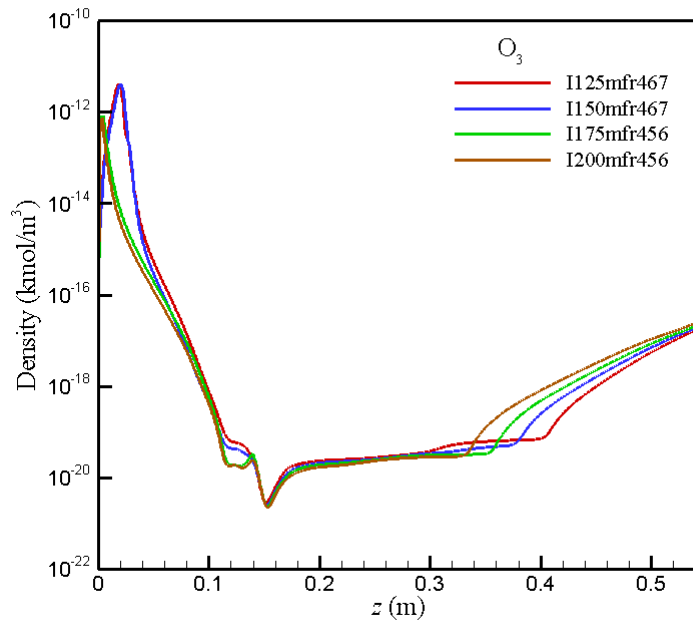


圖 102: 沿中心線  $\text{O}_3$  濃度分布

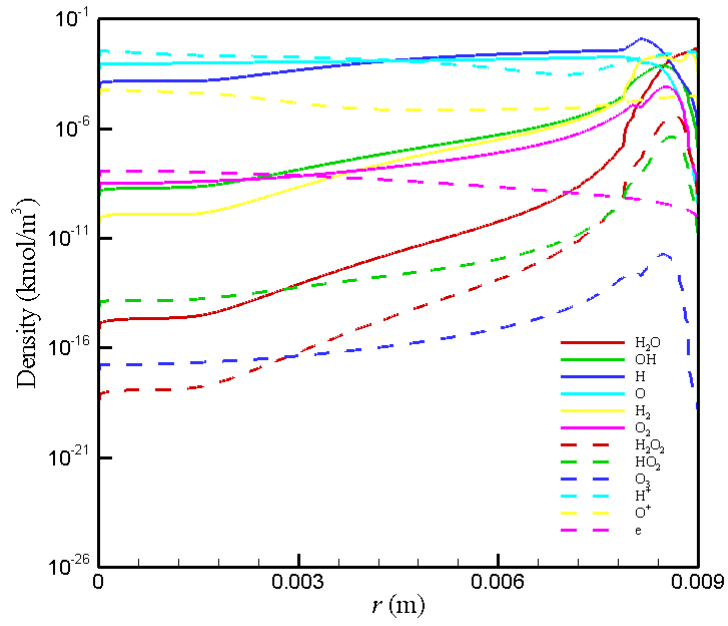


圖 103: 火炬出口處物種濃度分布 ( $I=125A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

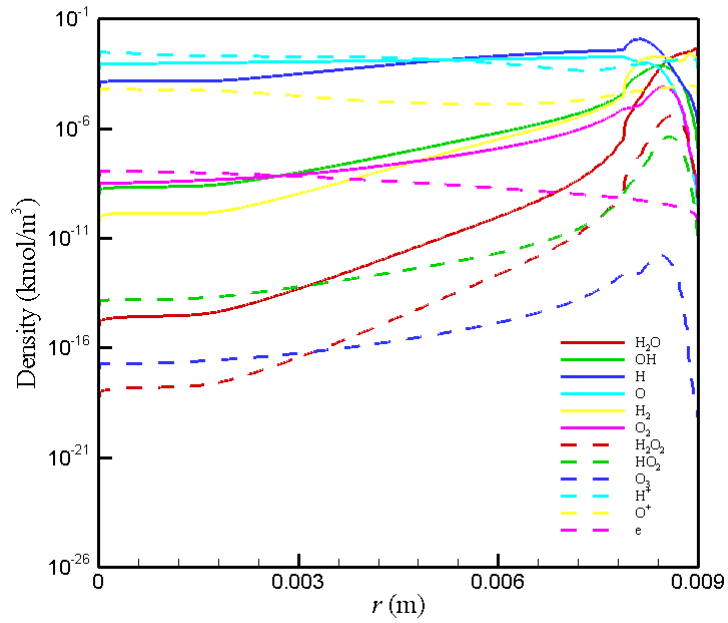


圖 104: 火炬出口處物種濃度分布 ( $I=150A$ ,  $MFR=4.67g/s$ )

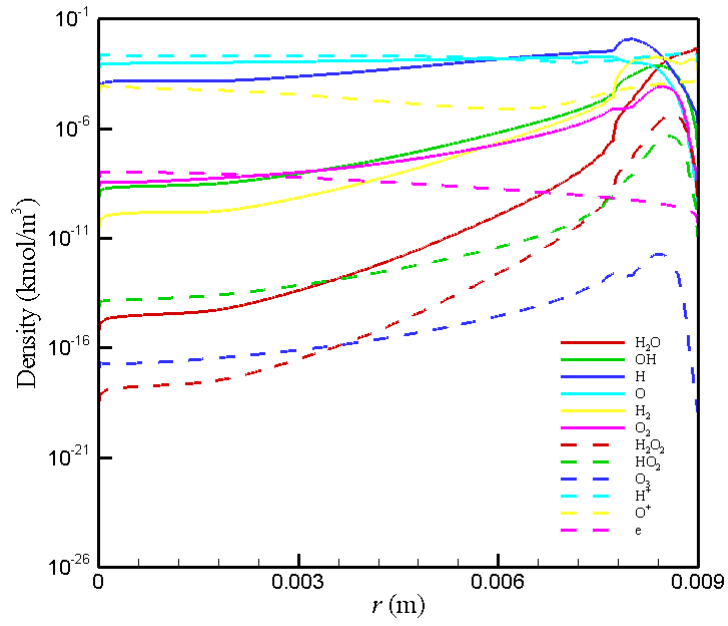


圖 105: 火炬出口處物種濃度分布( $I=175A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

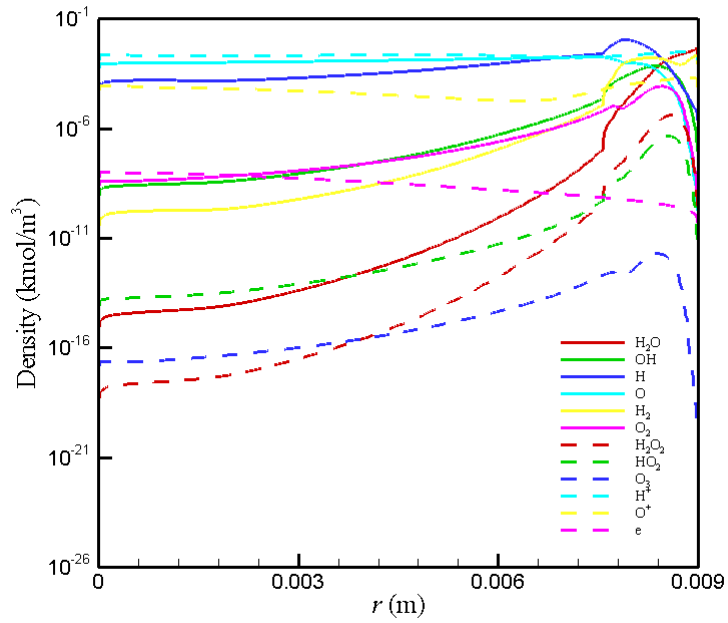


圖 106: 火炬出口處物種濃度分布( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

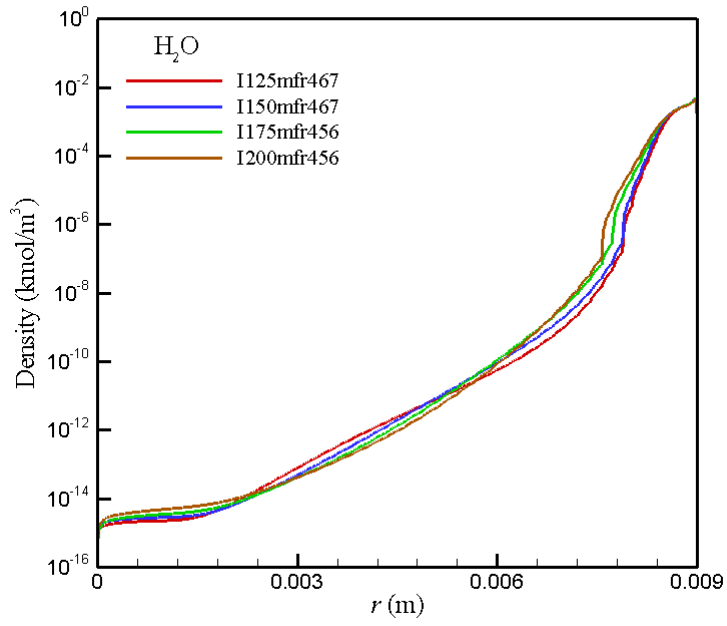


圖 107: 火炬出口處  $H_2O$  濃度分布

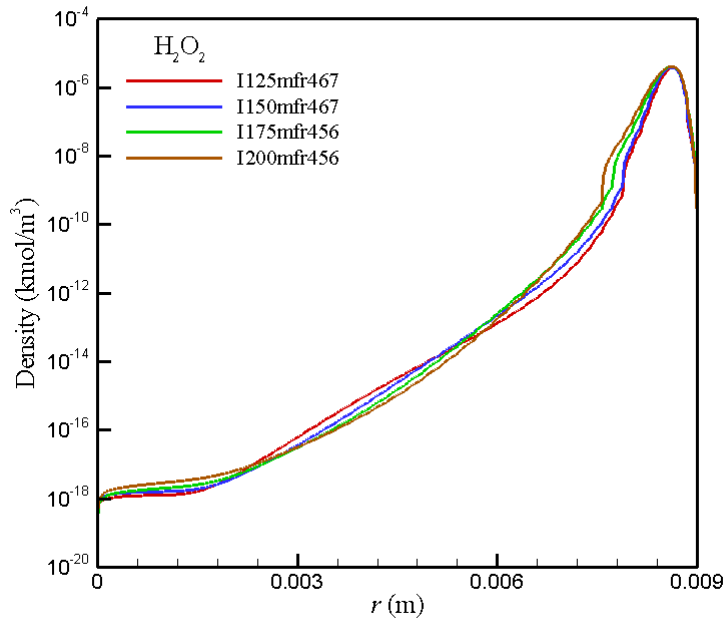


圖 108: 火炬出口處  $H_2O_2$  濃度分布

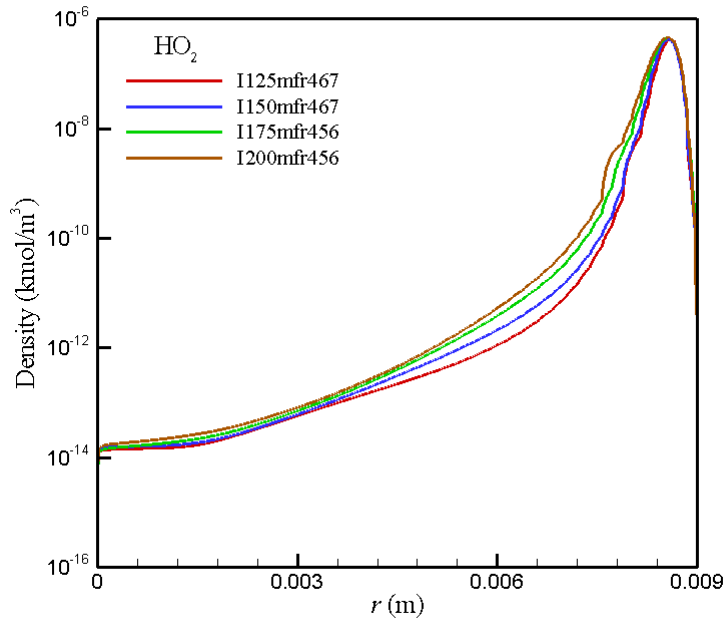


圖 109: 火炬出口處  $\text{HO}_2$  濃度分布

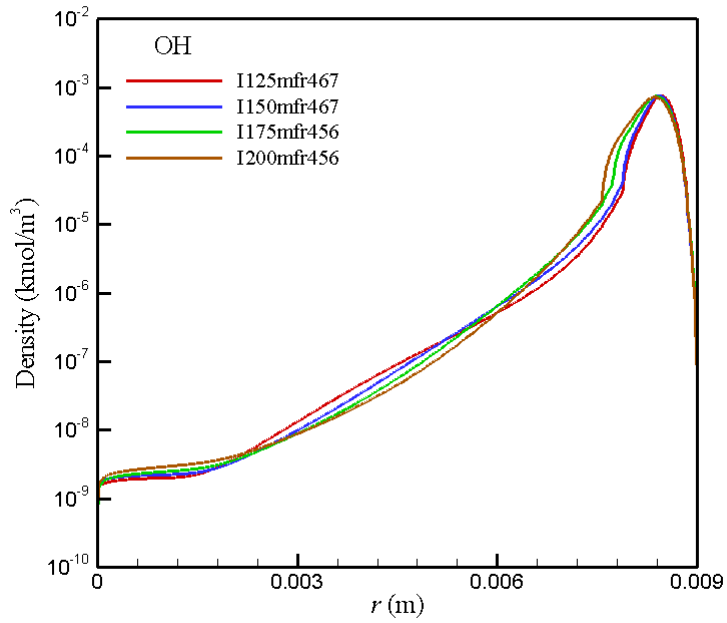


圖 110: 火炬出口處  $\text{OH}$  濃度分布

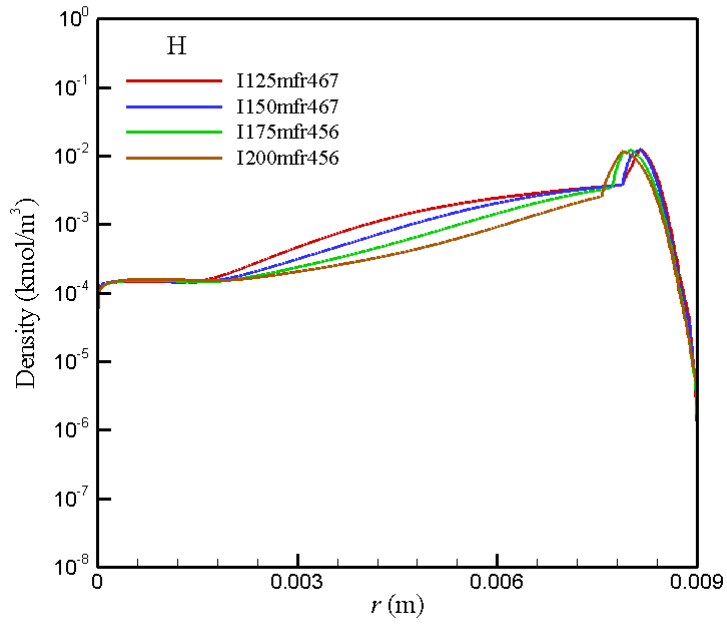


圖 111: 火炬出口處 H 濃度分布

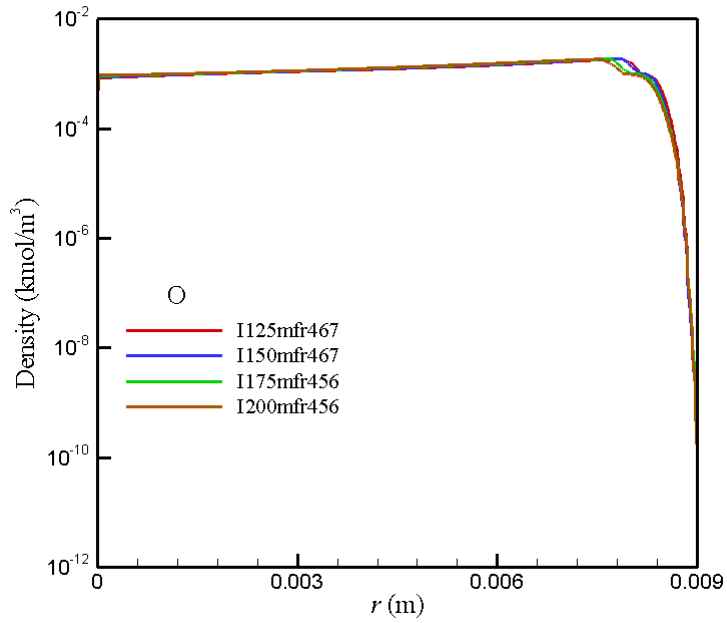


圖 112: 火炬出口處 O 濃度分布

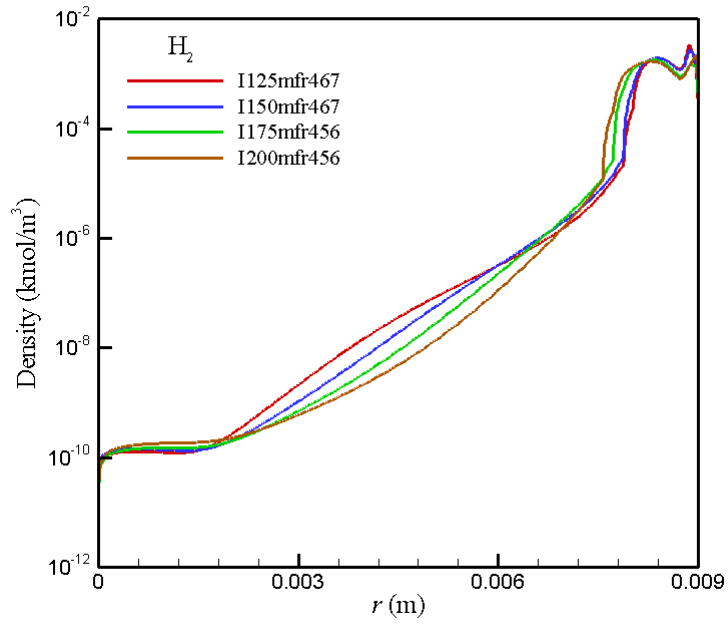


圖 113: 火炬出口處  $H_2$  濃度分布

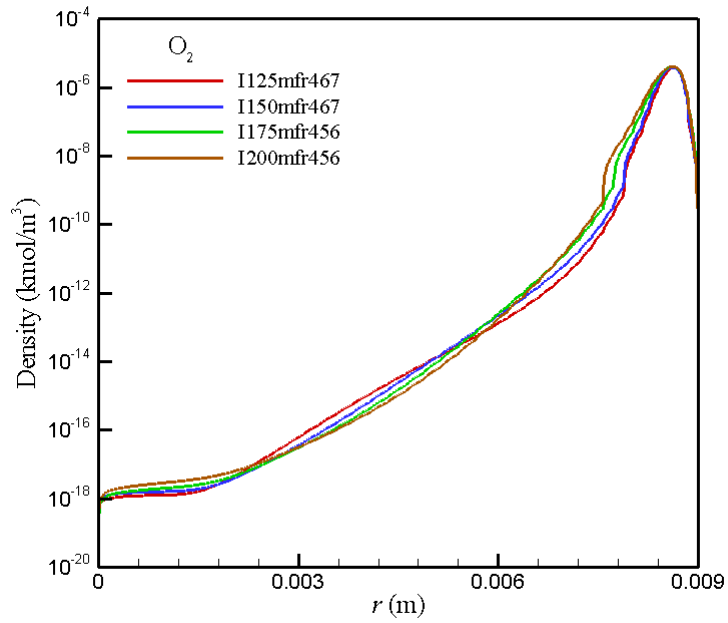


圖 114: 火炬出口處  $O_2$  濃度分布

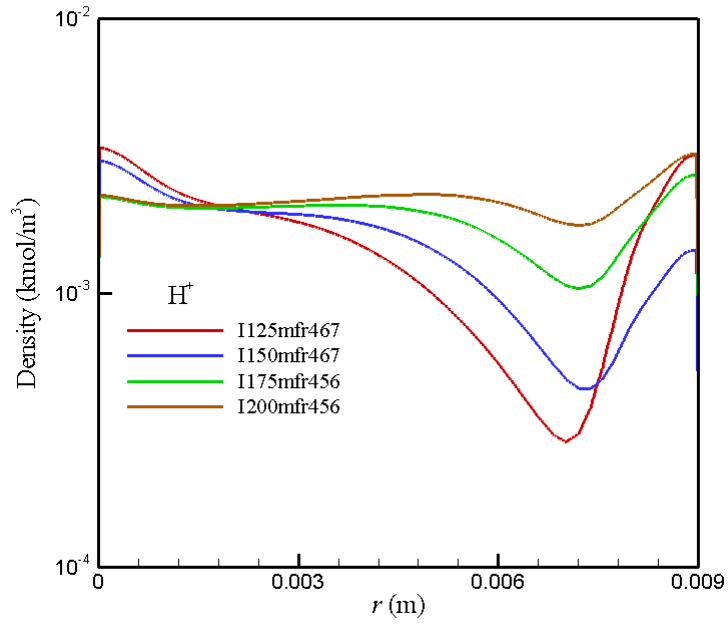


圖 115: 火炬出口處  $H^+$  濃度分布

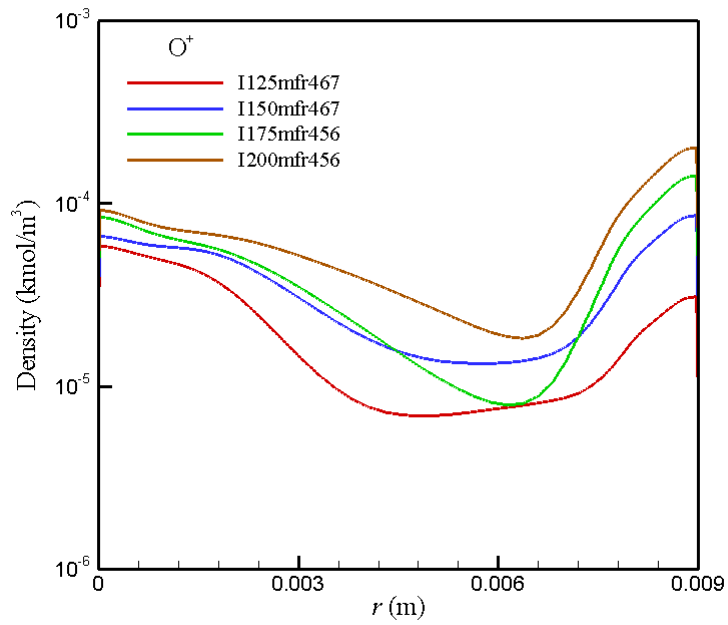


圖 116: 火炬出口處  $O^+$  濃度分布



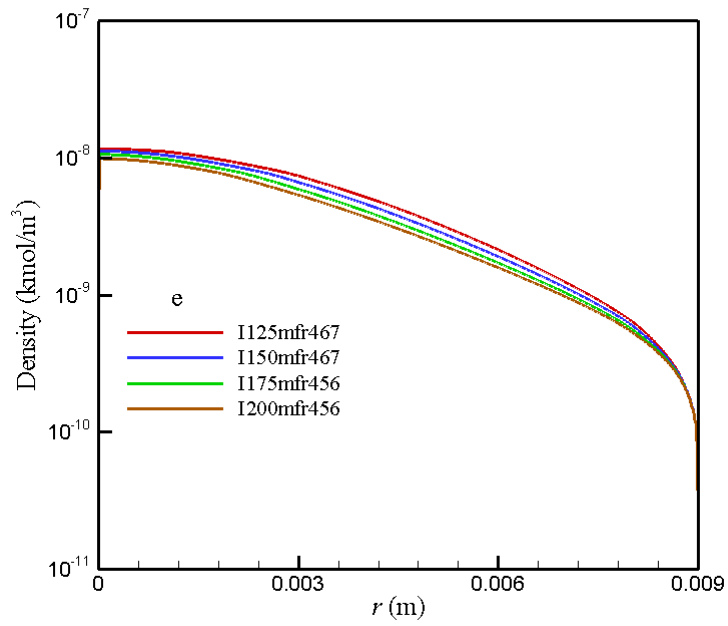


圖 117: 火炬出口處電子濃度分布

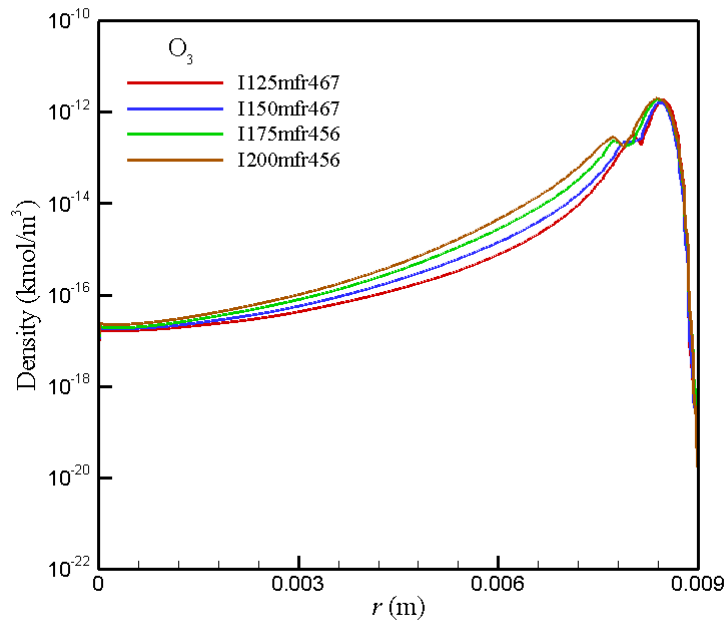


圖 118: 火炬出口處 O<sub>3</sub> 濃度分布

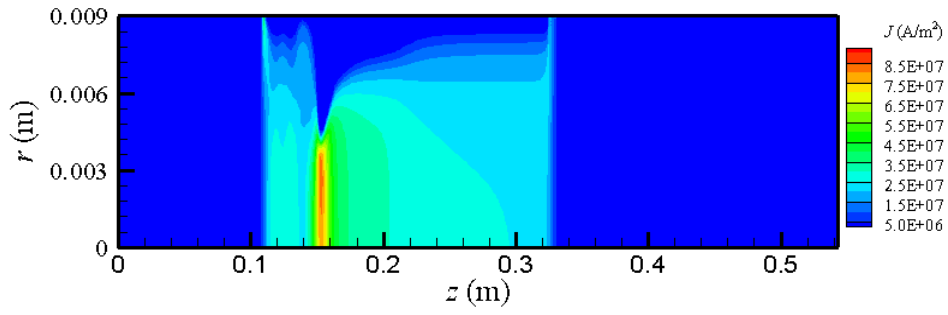


圖 119: 電流密度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

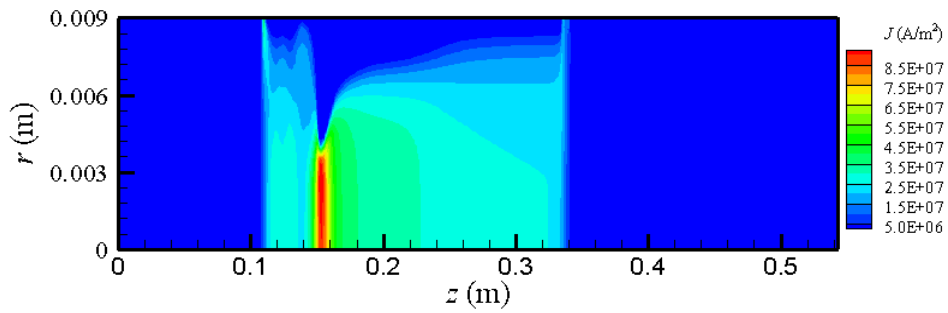


圖 120: 電流密度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

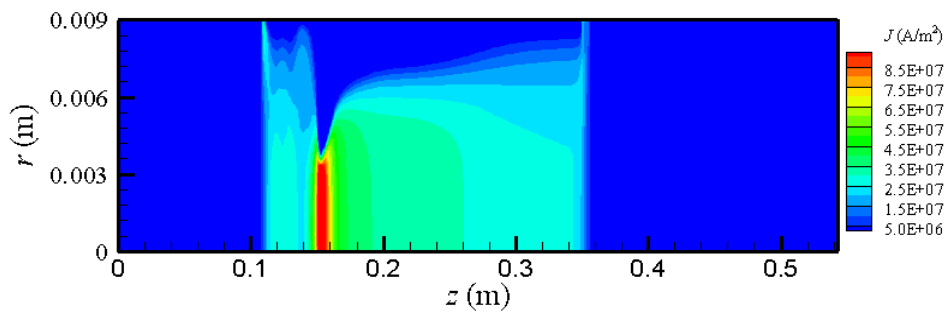


圖 121: 電流密度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

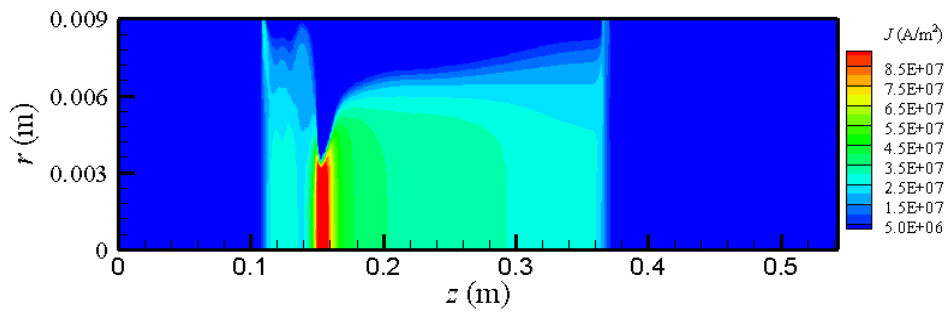


圖 122: 電流密度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

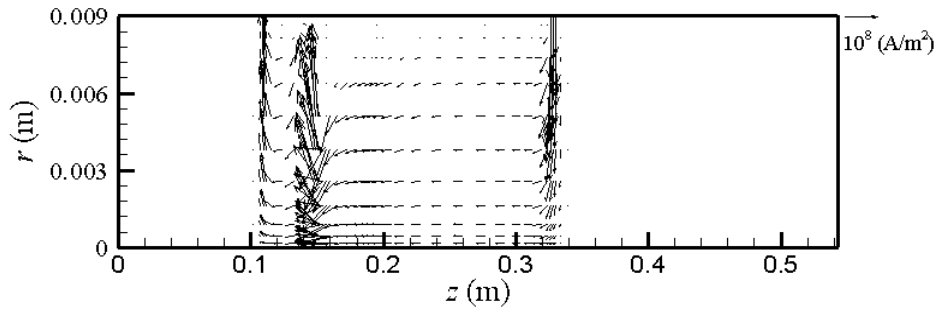


圖 123: 電流密度向量分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

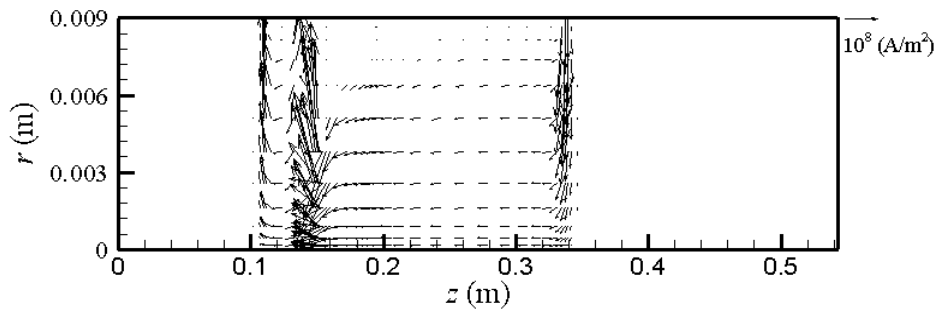


圖 124: 電流密度向量分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

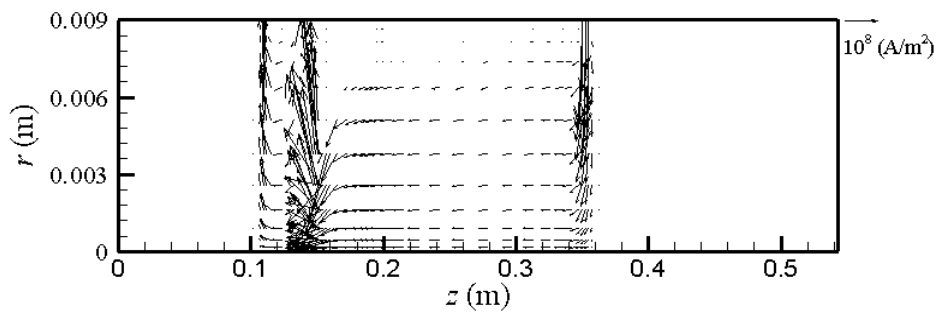


圖 125: 電流密度向量分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

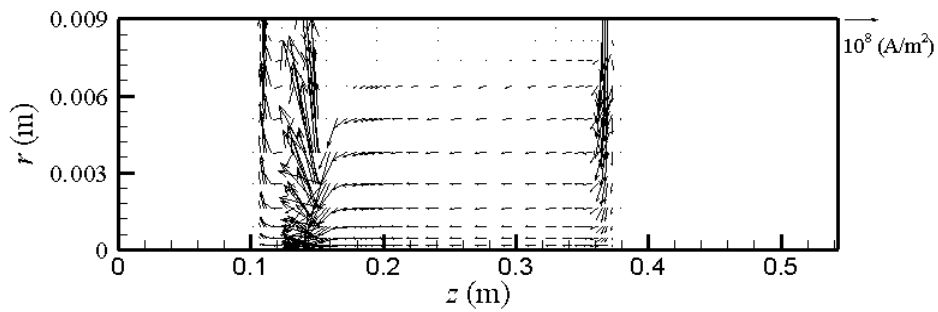


圖 126: 電流密度向量分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

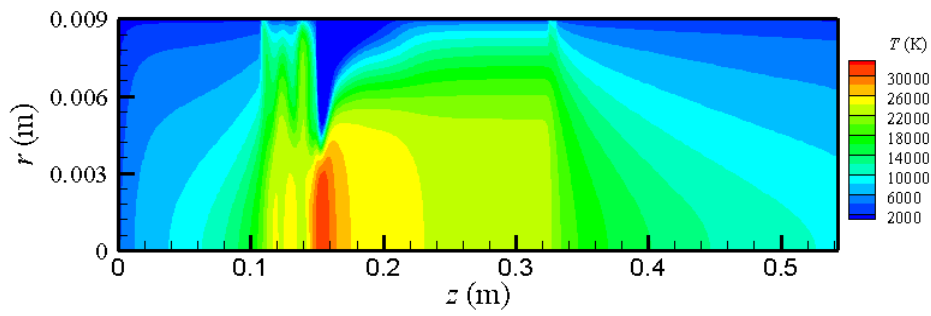


圖 127: 氣體溫度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

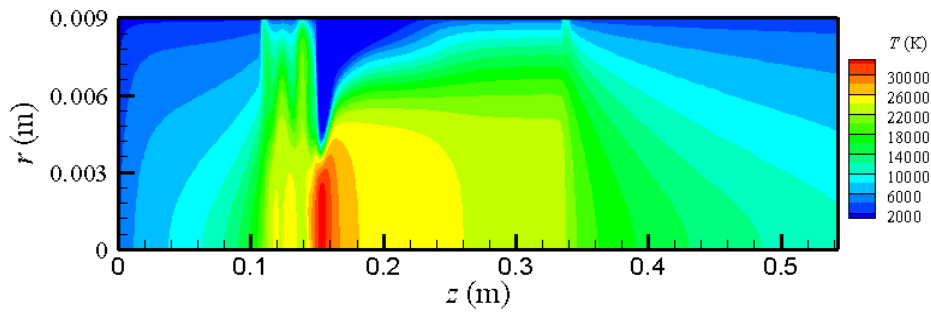


圖 128: 氣體溫度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

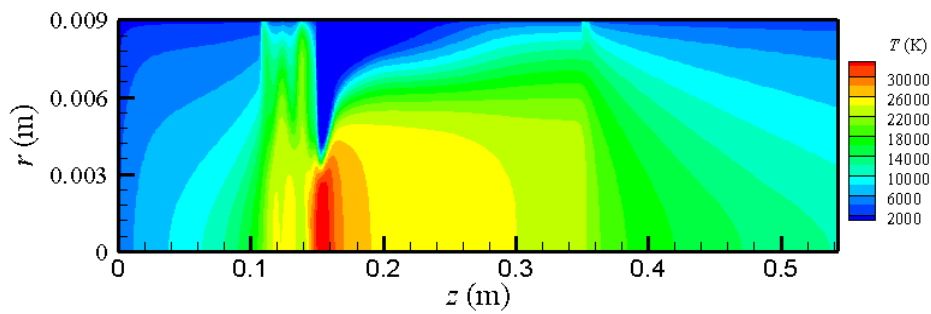


圖 129: 氣體溫度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

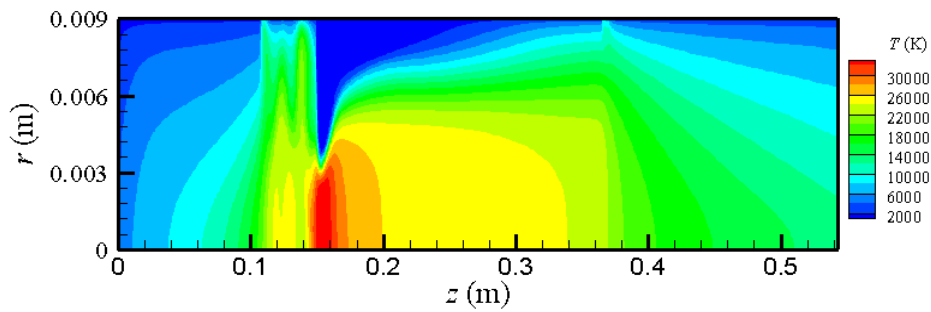


圖 130: 氣體溫度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

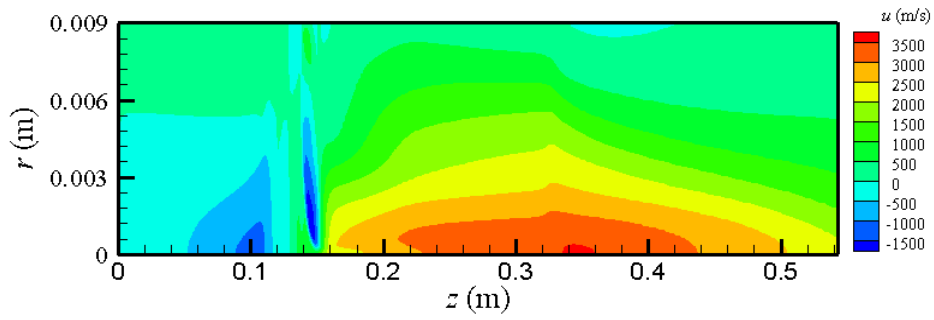


圖 131: 軸向速度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

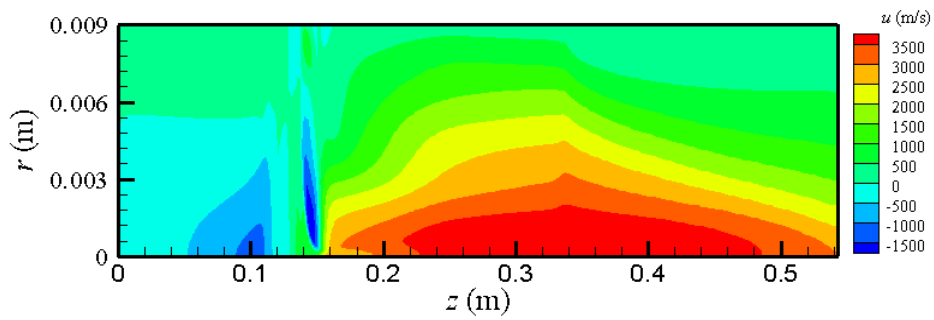


圖 132: 軸向速度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

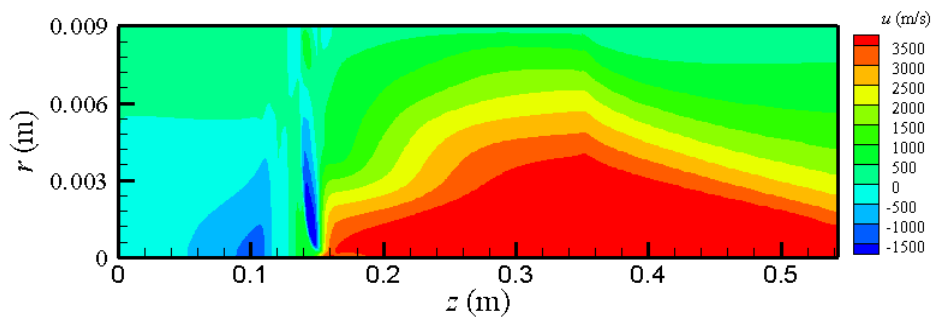


圖 133: 軸向速度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

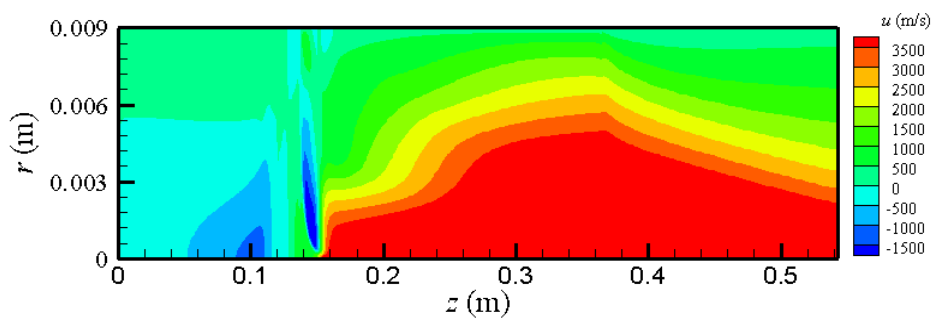


圖 134: 軸向速度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

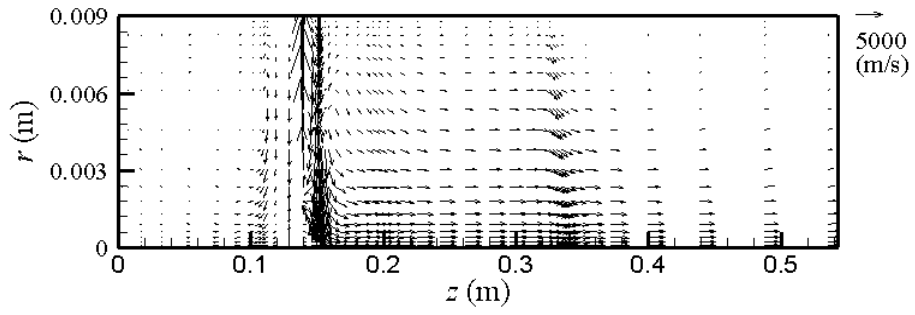


圖 135: 速度向量分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

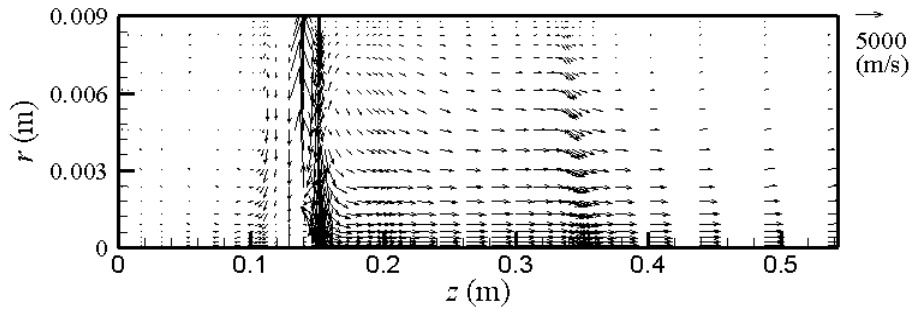


圖 136: 速度向量分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

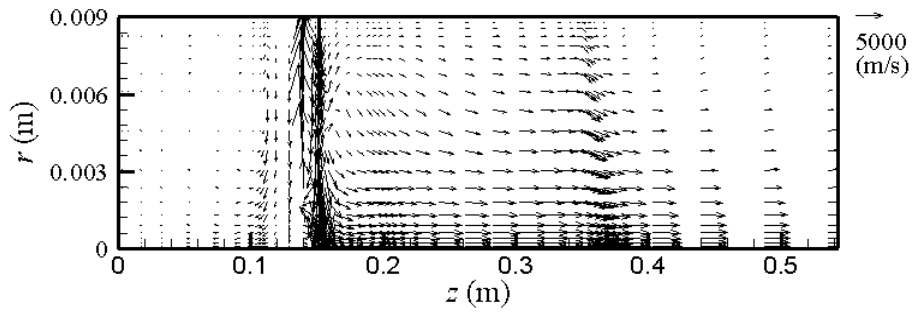


圖 137: 速度向量分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

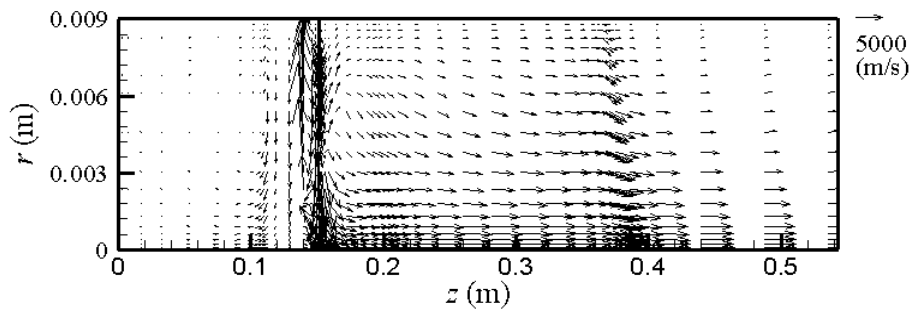


圖 138: 速度向量分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

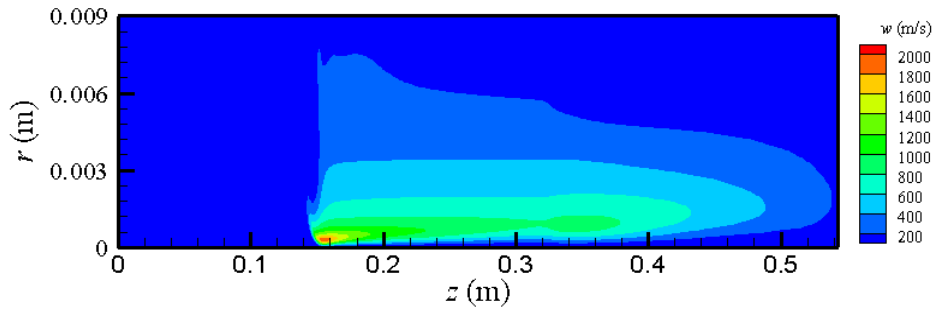


圖 139: 旋向速度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

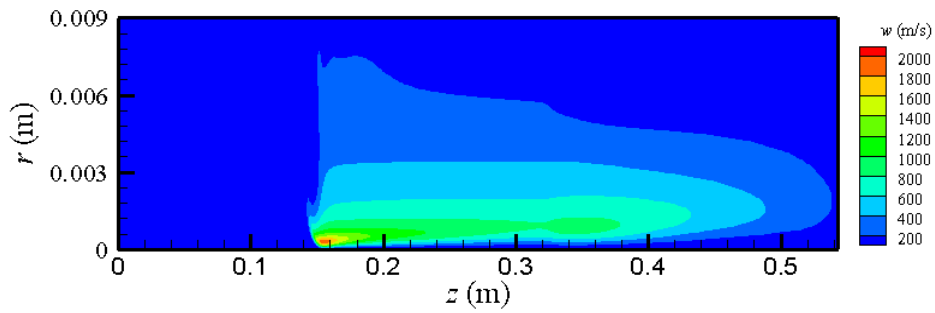


圖 140: 旋向速度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

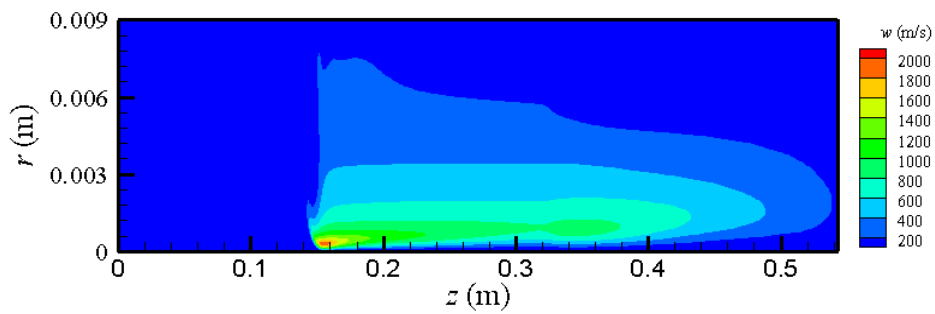


圖 141: 旋向速度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

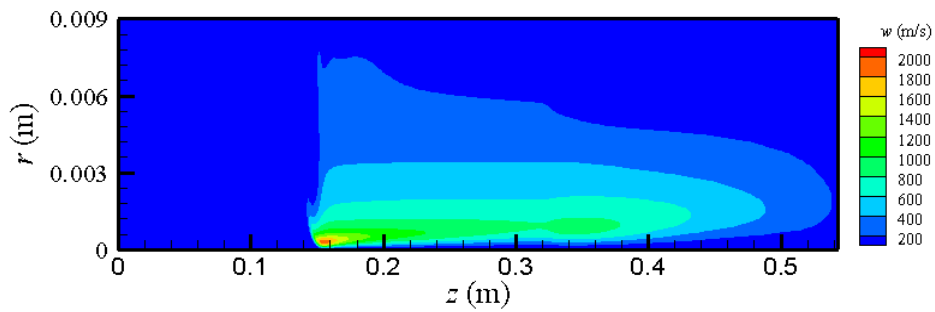


圖 142: 旋向速度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

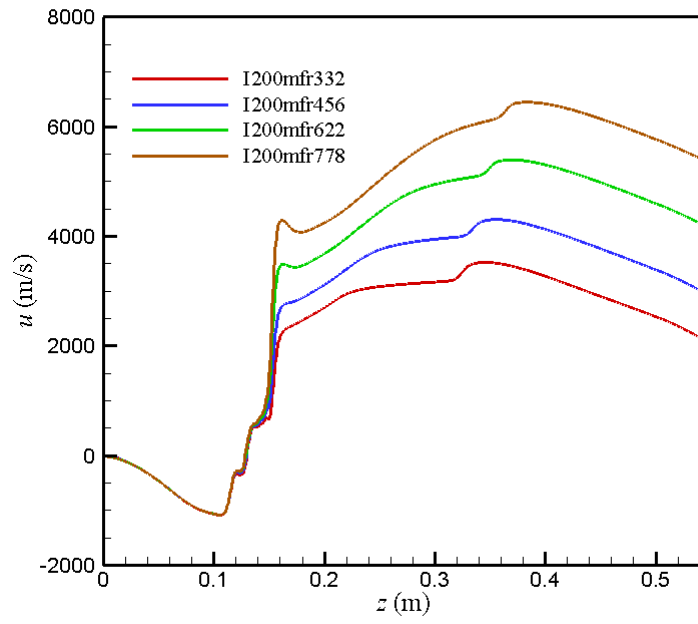


圖 143: 沿中心線軸向速度分量分布

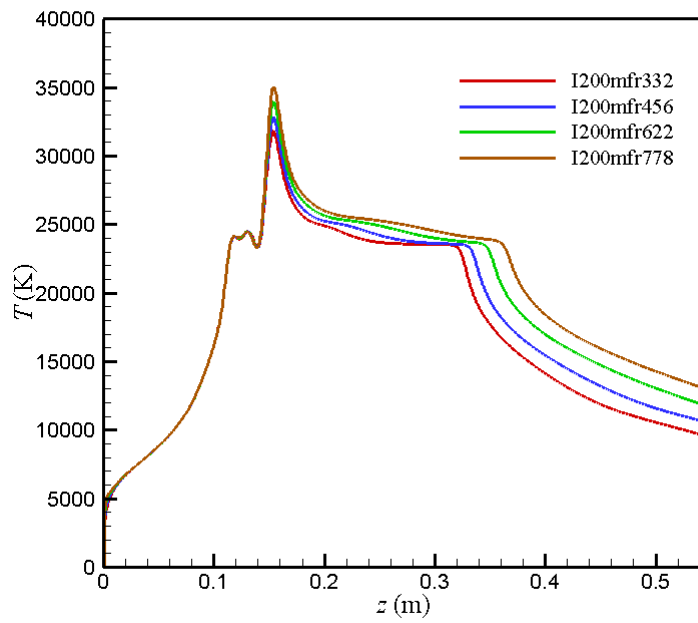


圖 144: 沿中心線氣體溫度分布



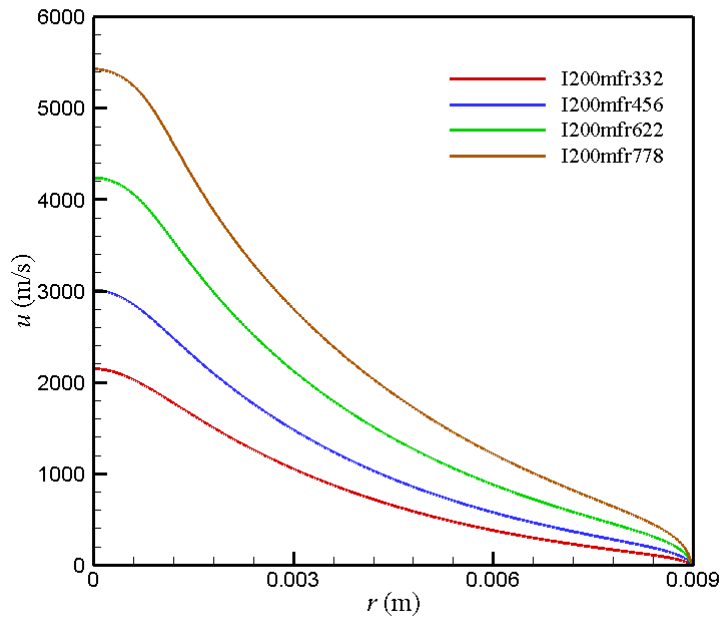


圖 145: 火炬出口處軸向速度分布

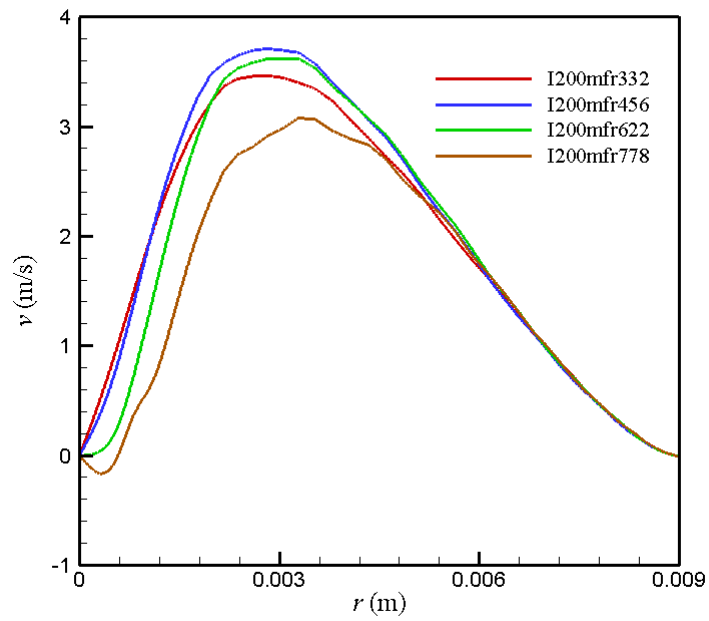


圖 146: 火炬出口處徑向速度分布

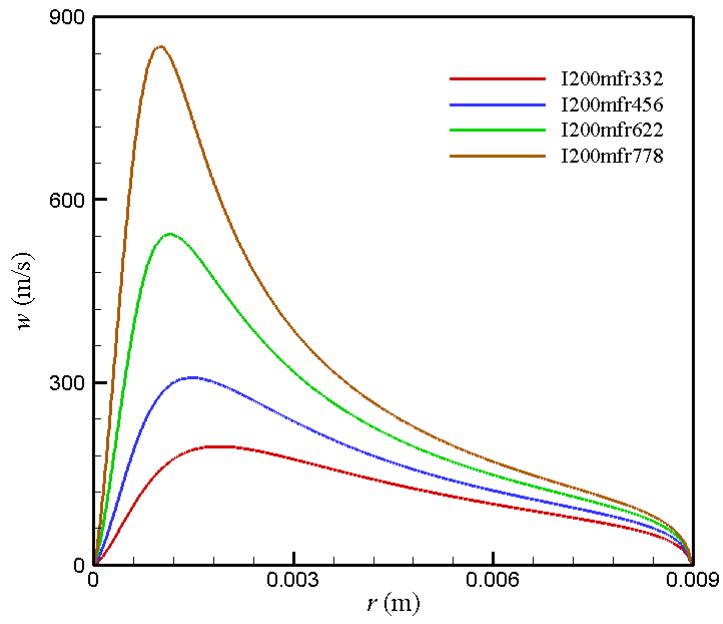


圖 147: 火炬出口處旋向速度分布

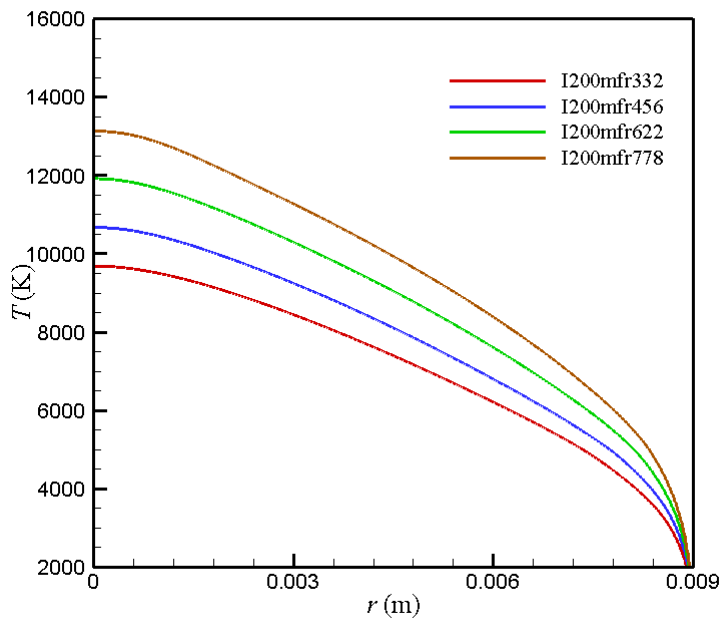


圖 148: 火炬出口處氣體溫度分布

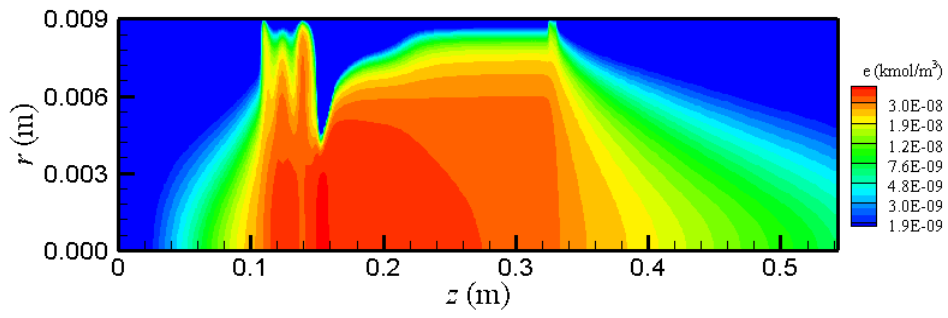


圖 149: 電子濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

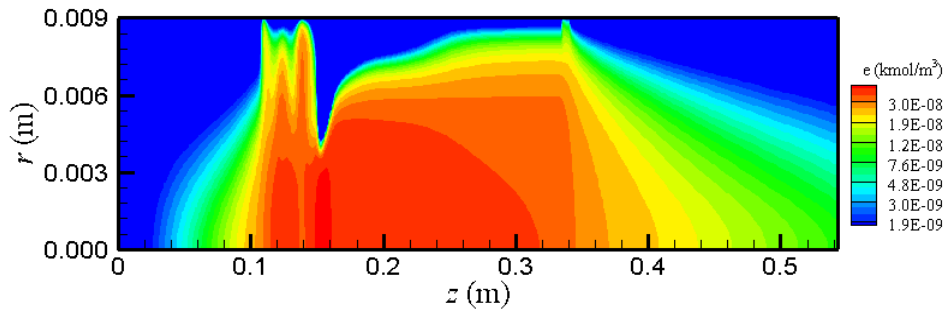


圖 150: 電子濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

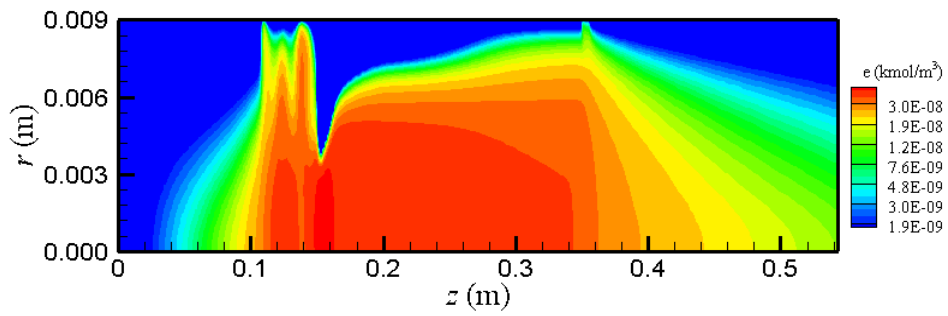


圖 151: 電子濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

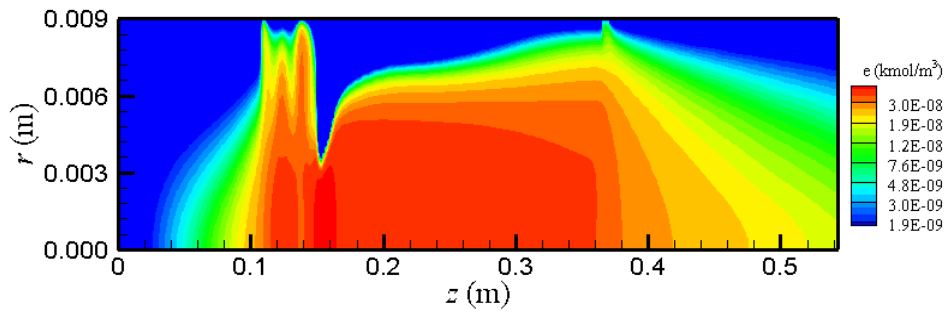


圖 152: 電子濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

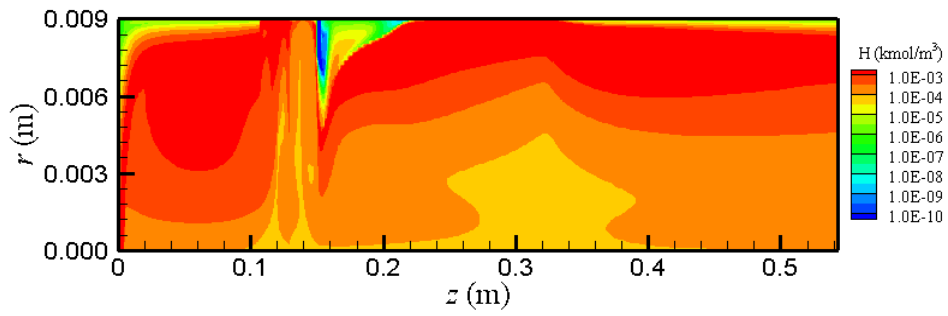


圖 153: H 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

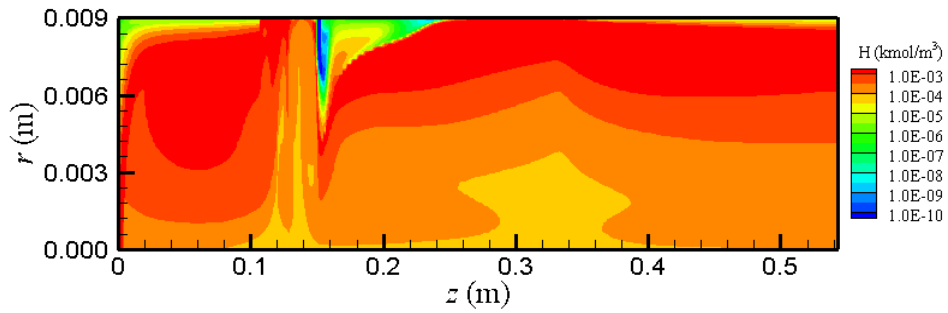


圖 154: H 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

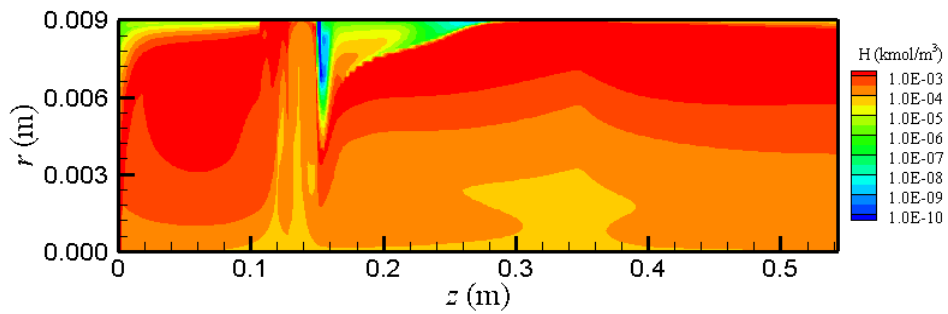


圖 155: H 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

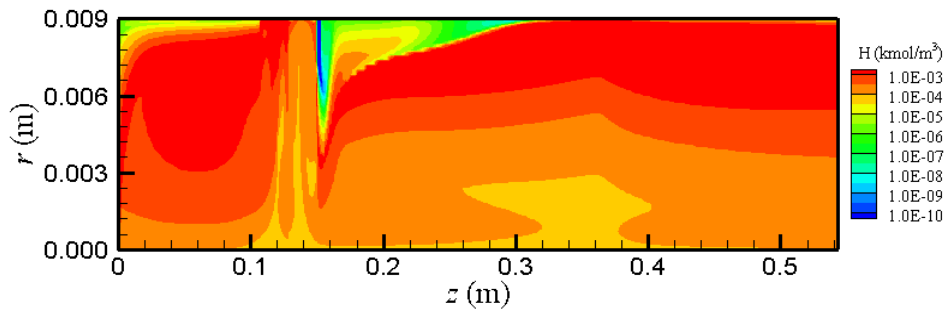


圖 156: H 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

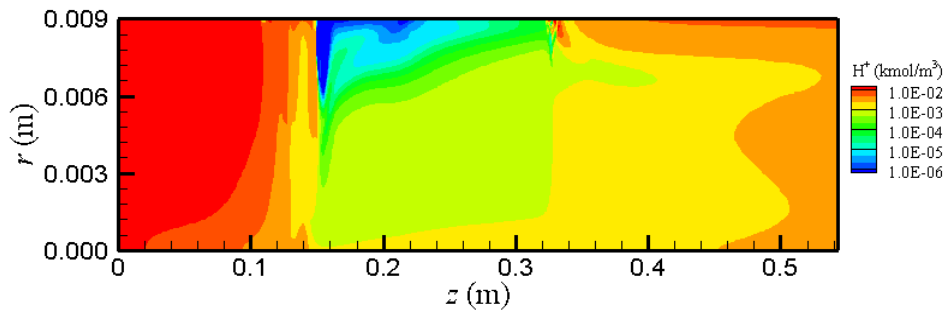


圖 157:  $H^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=3.32g/s$ )

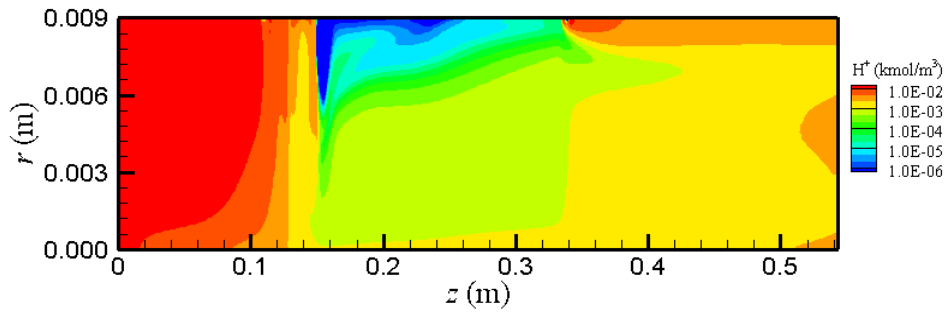


圖 158:  $H^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

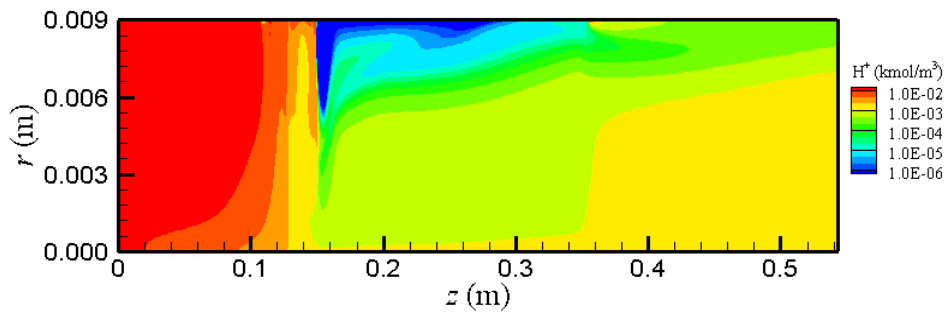


圖 159:  $H^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=6.22g/s$ )

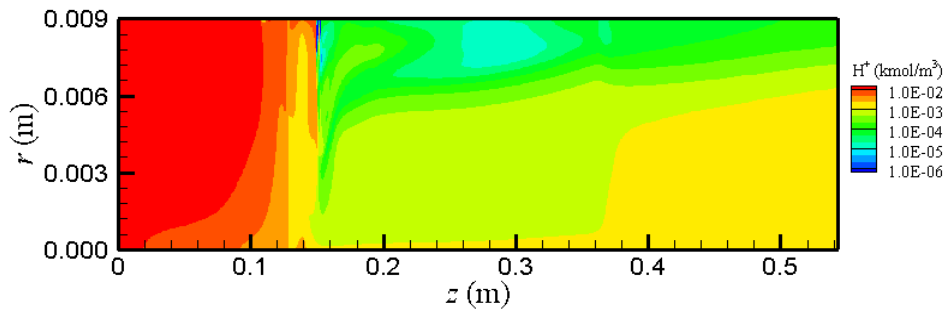


圖 160:  $H^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=7.78g/s$ )

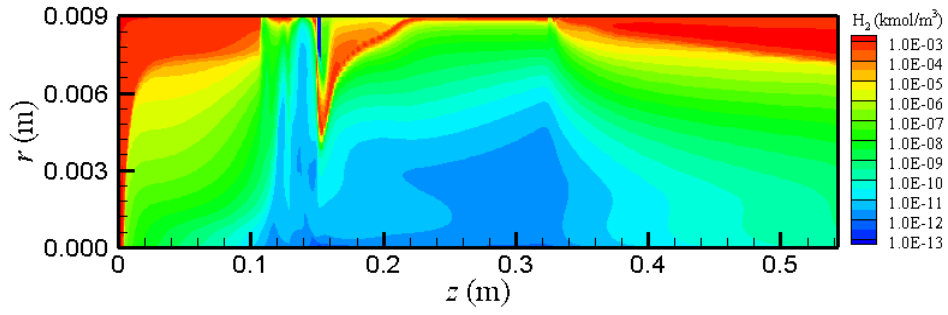


圖 161: H<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

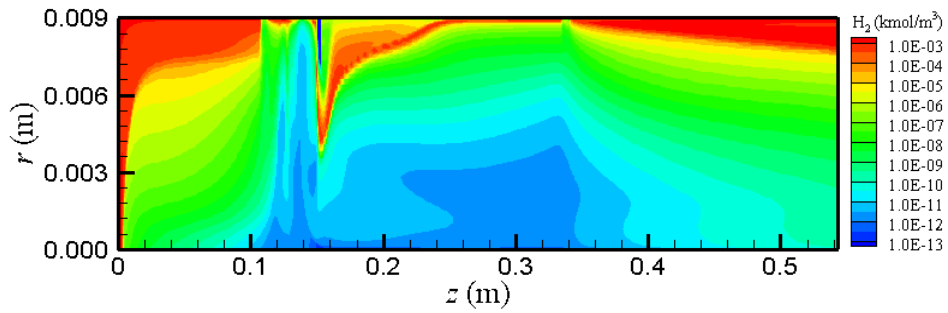


圖 162: H<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

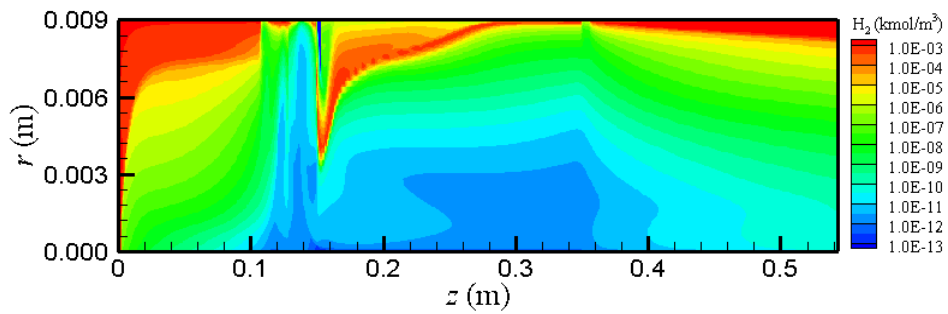


圖 163: H<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

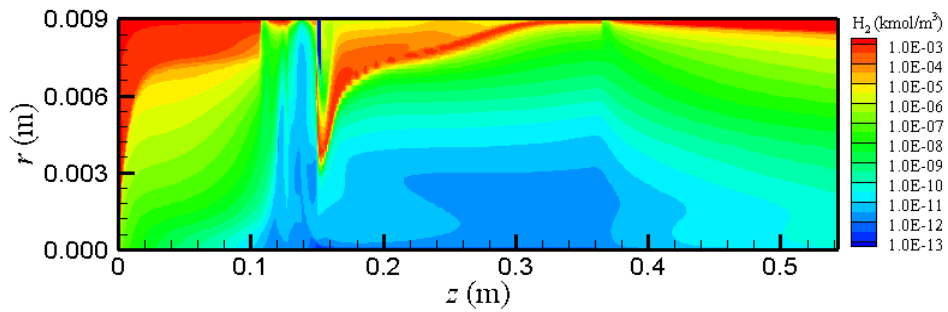


圖 164: H<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

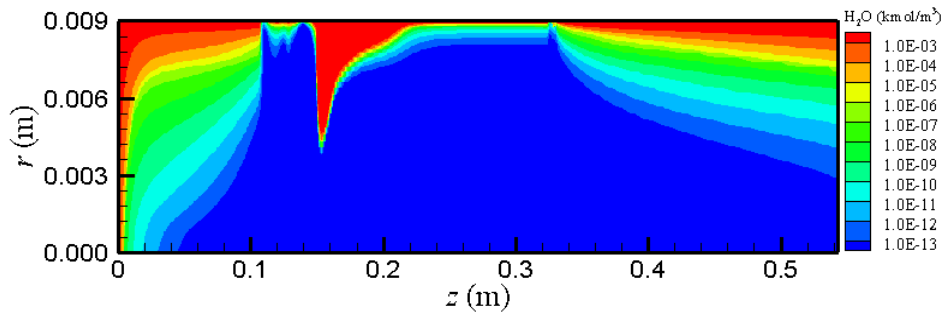


圖 165:  $H_2O$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=3.32g/s$ )

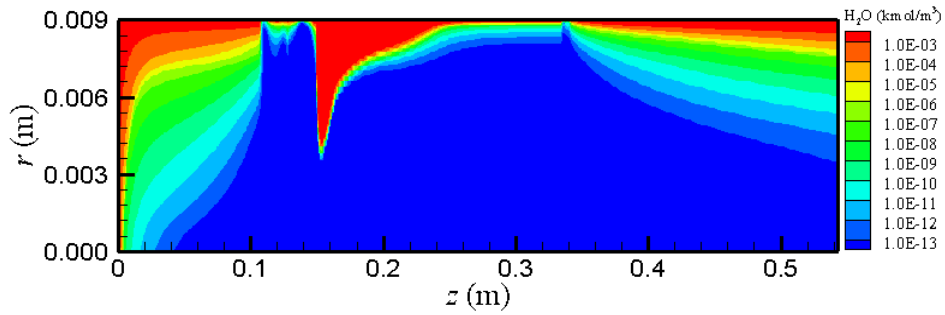


圖 166:  $H_2O$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

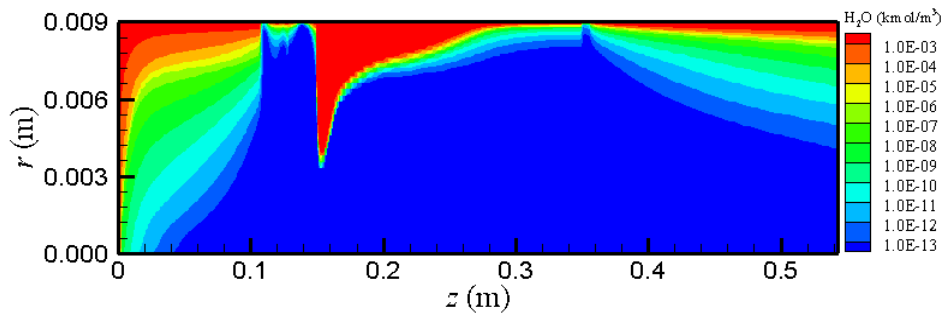


圖 167:  $H_2O$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=6.22g/s$ )

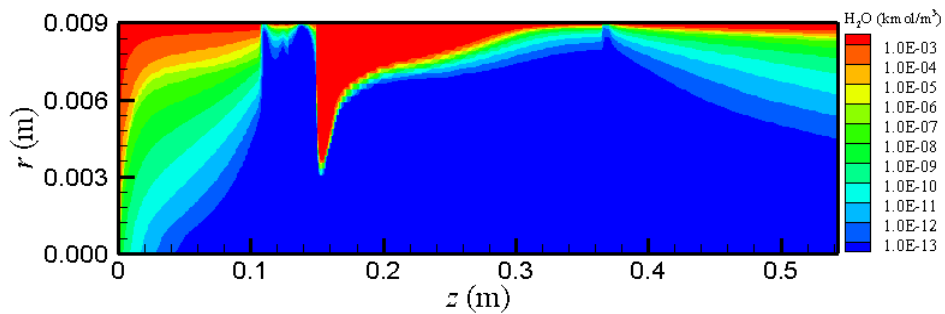


圖 168:  $H_2O$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=7.78g/s$ )

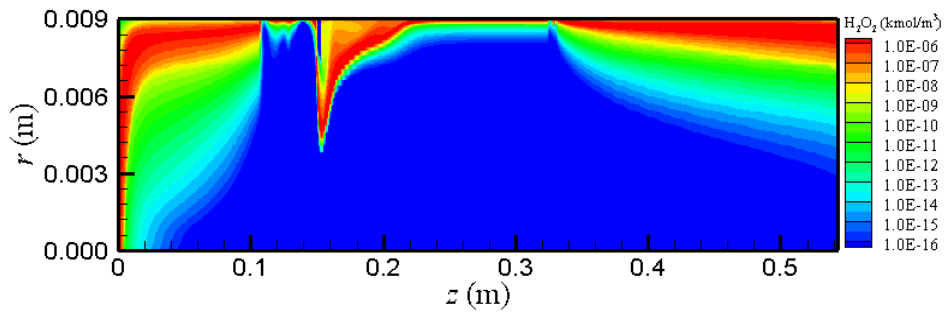


圖 169:  $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

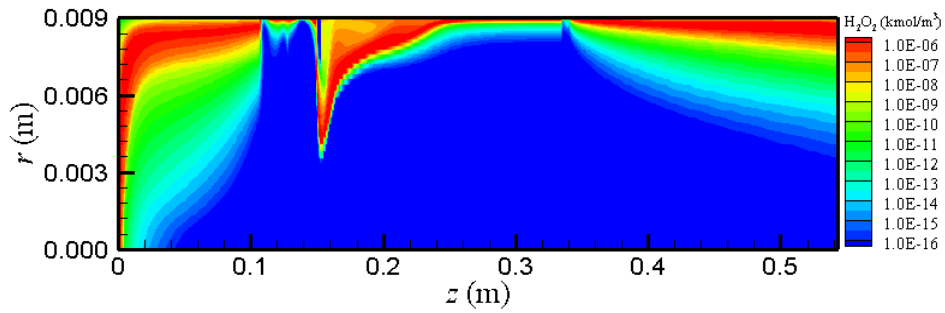


圖 170:  $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

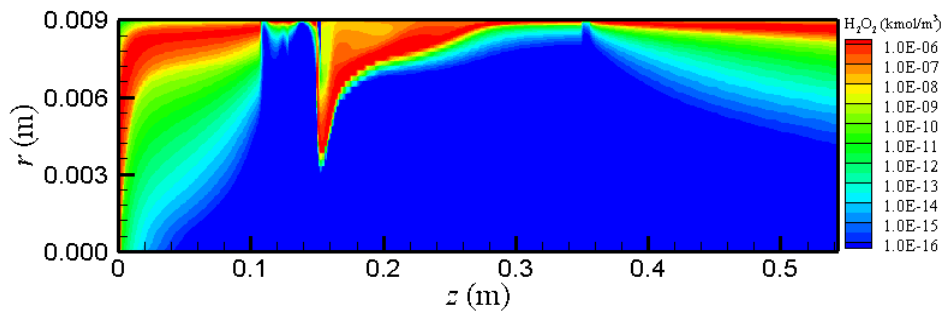


圖 171:  $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

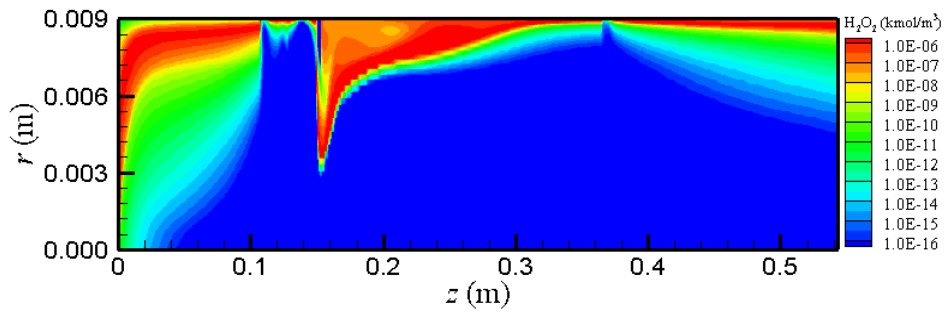


圖 172:  $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )



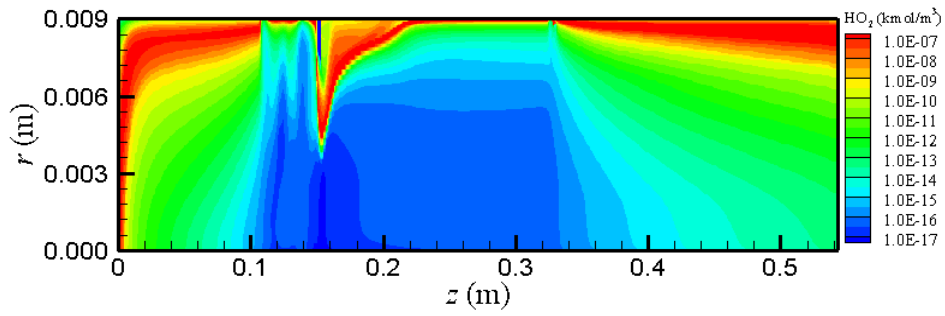


圖 173: HO<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

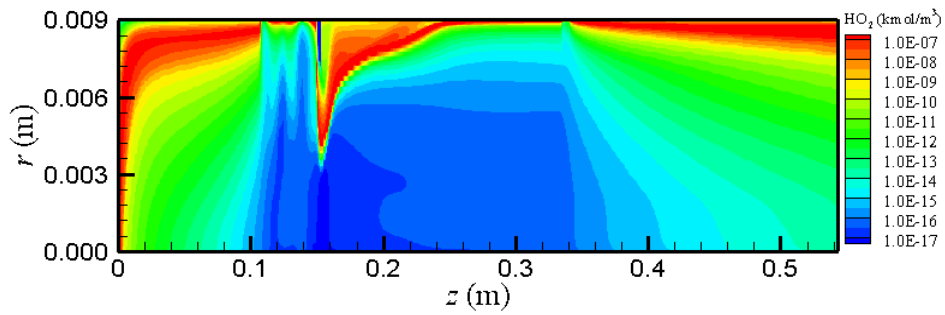


圖 174: HO<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

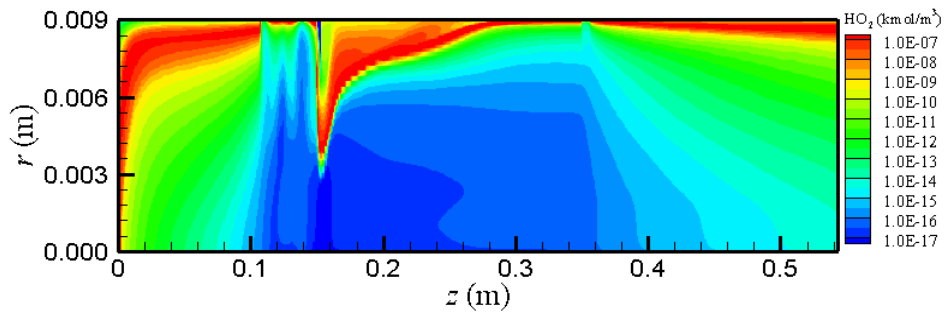


圖 175: HO<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

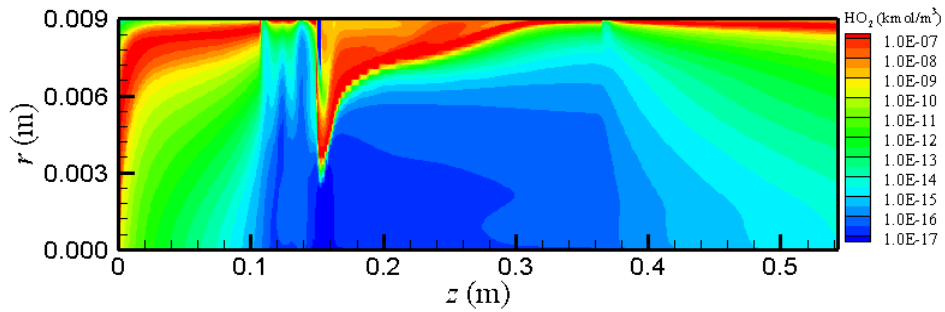


圖 176: HO<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

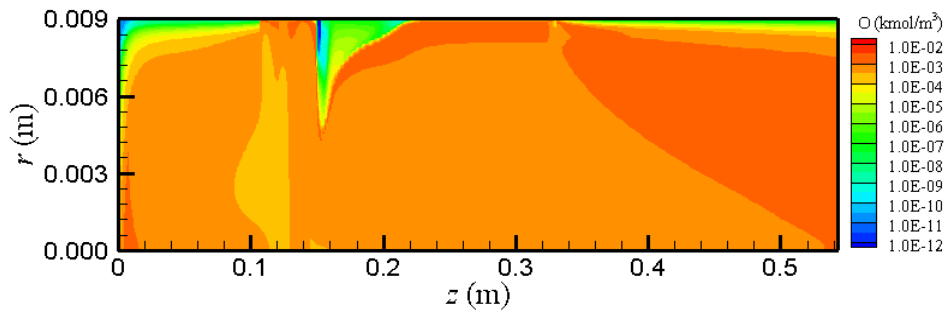


圖 177: O 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

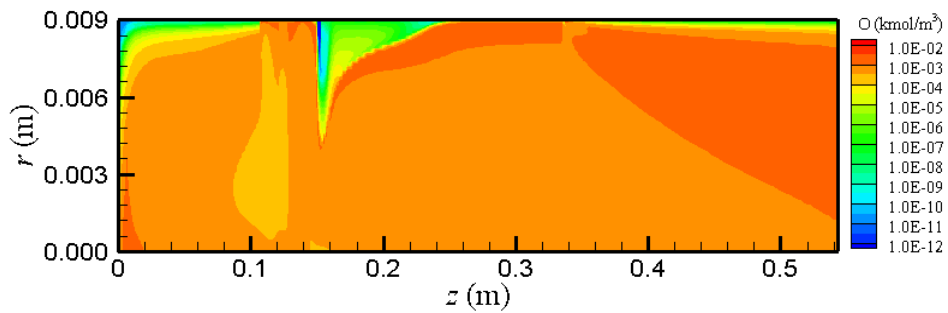


圖 178: O 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

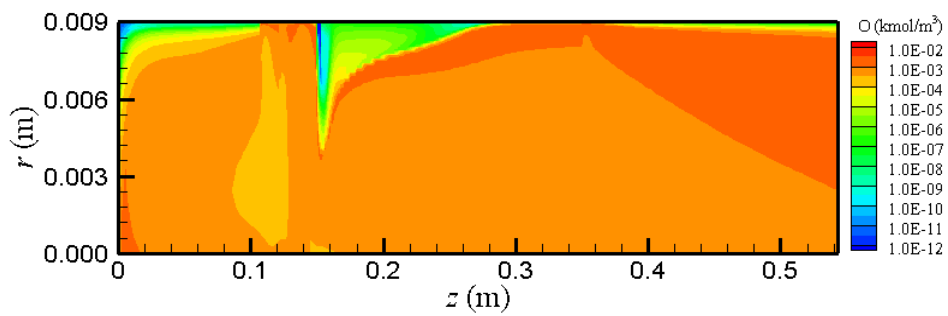


圖 179: O 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

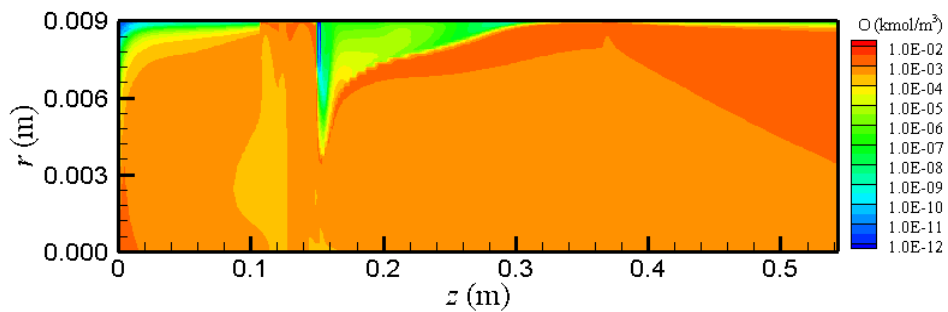


圖 180: O 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

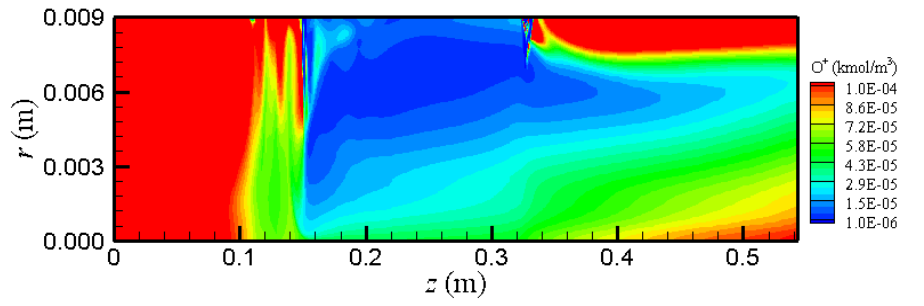


圖 181:  $O^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=3.32g/s$ )

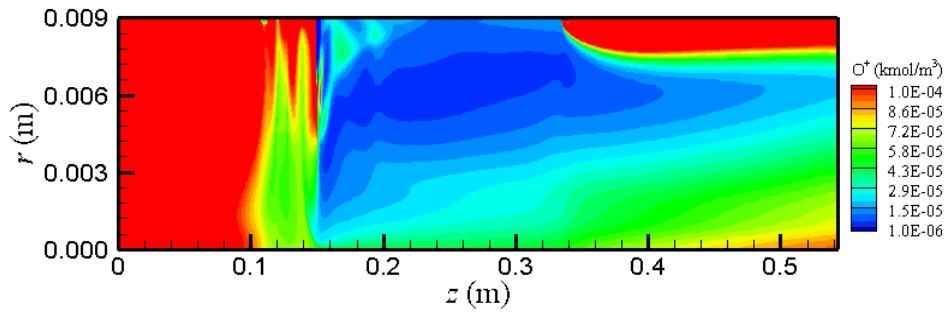


圖 182:  $O^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

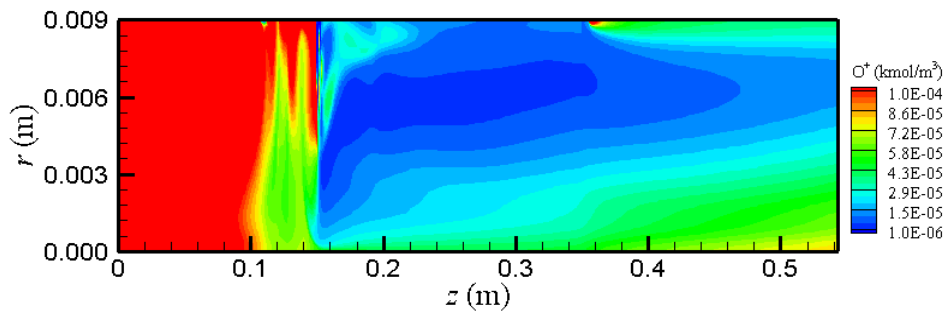


圖 183:  $O^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=6.22g/s$ )

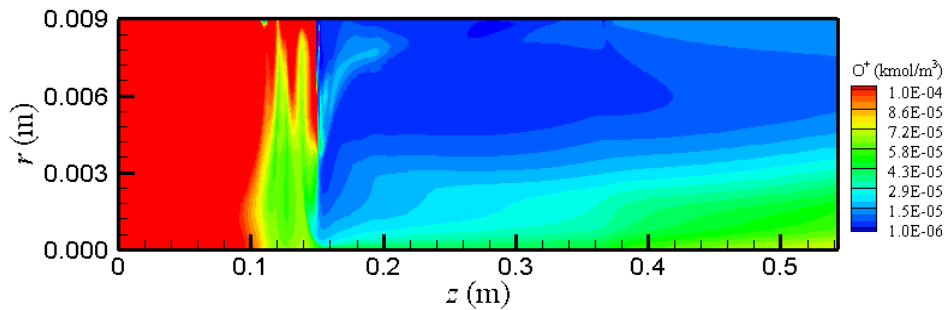


圖 184:  $O^+$  濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=7.78g/s$ )

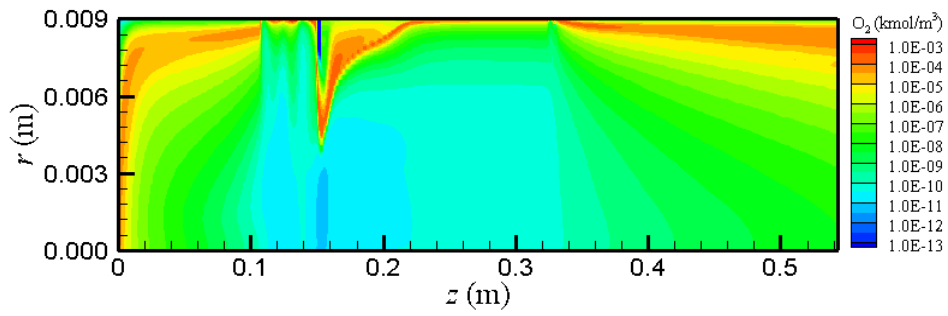


圖 185: O<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

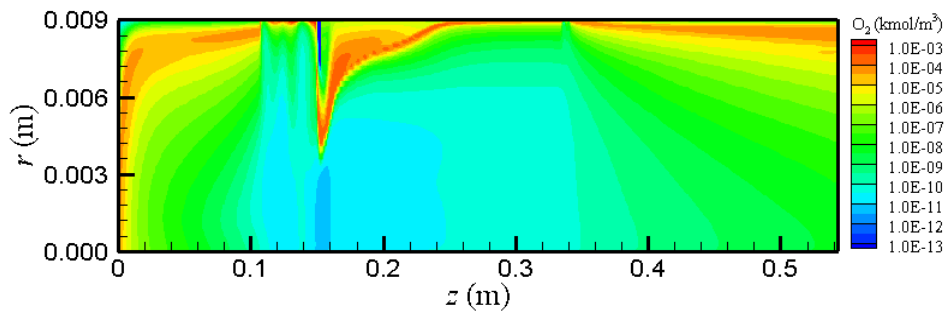


圖 186: O<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

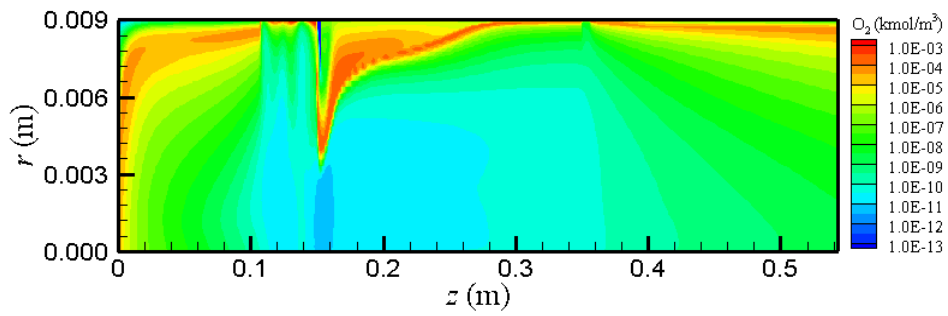


圖 187: O<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

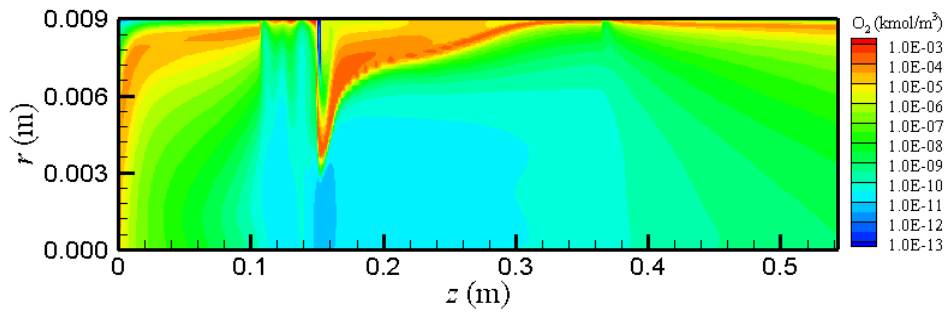


圖 188: O<sub>2</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

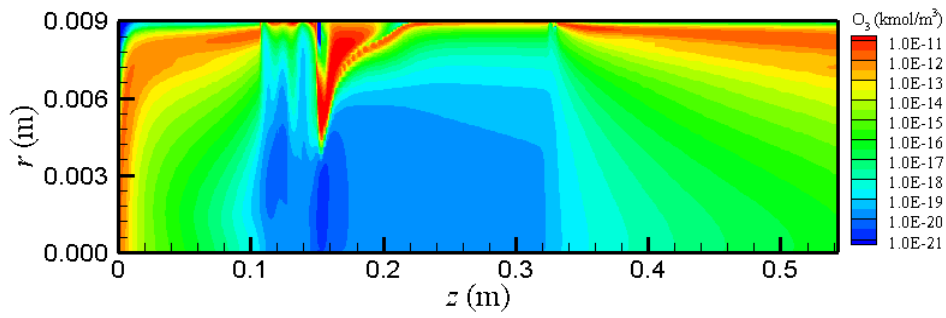


圖 189: O<sub>3</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

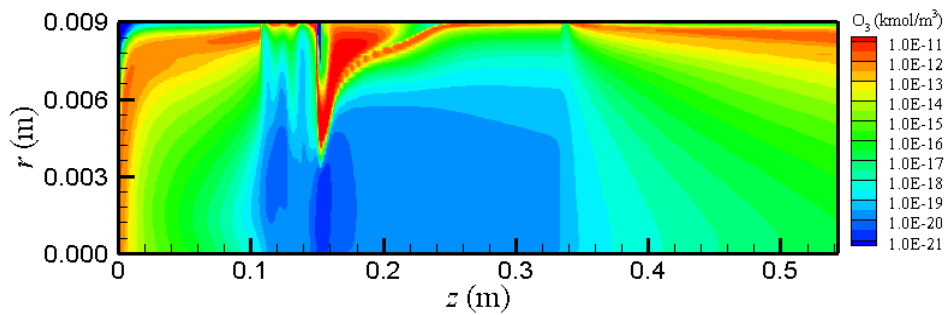


圖 190: O<sub>3</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

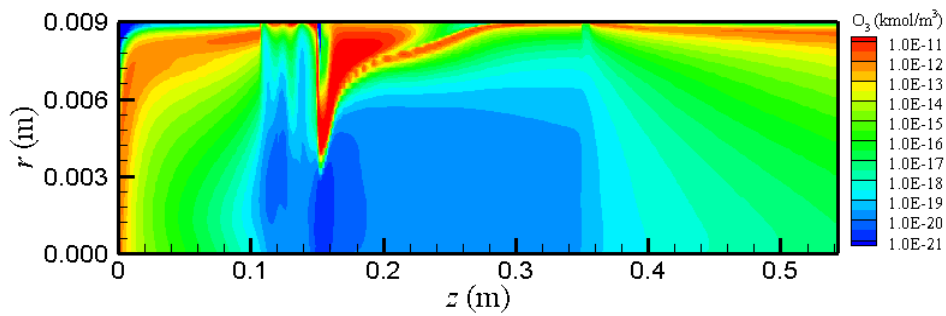


圖 191: O<sub>3</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

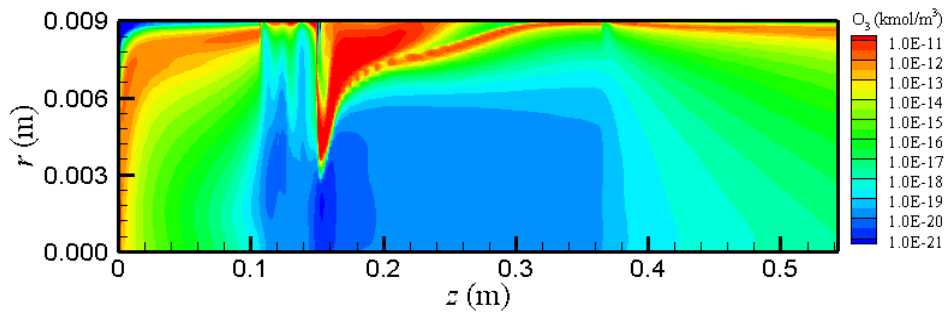


圖 192: O<sub>3</sub> 濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

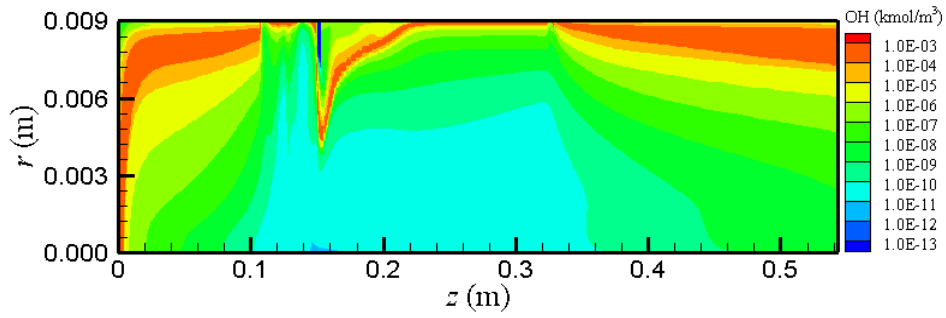


圖 193: OH 濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=3.32g/s$ )

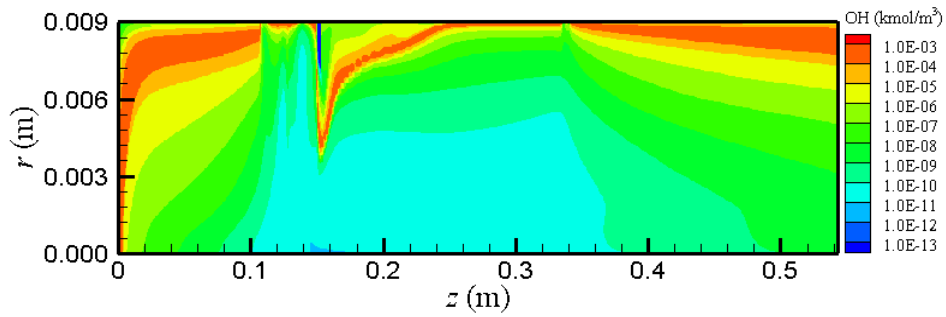


圖 194: OH 濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )

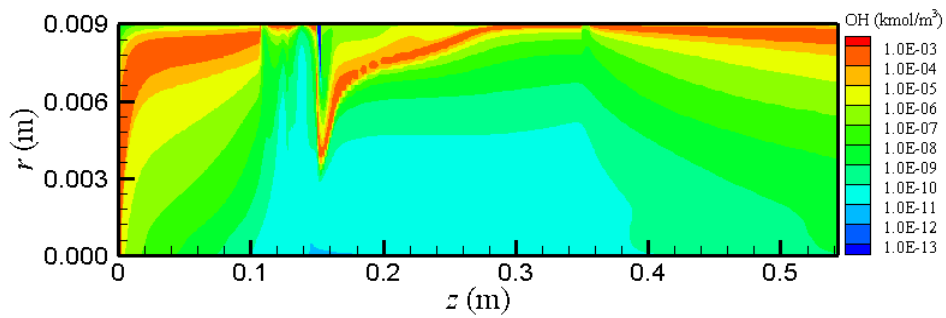


圖 195: OH 濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=6.22g/s$ )

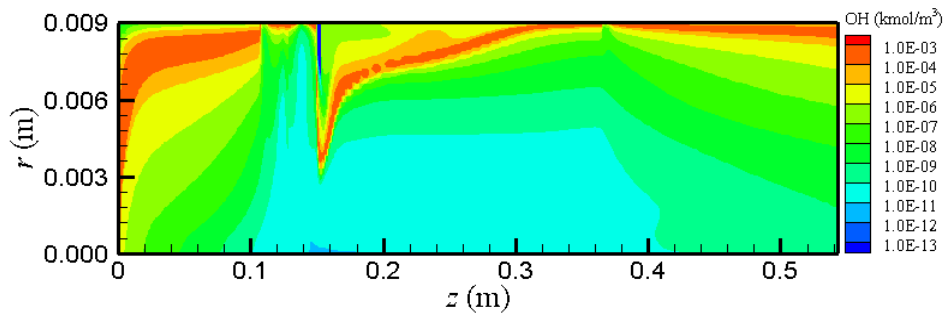


圖 196: OH 濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=7.78g/s$ )

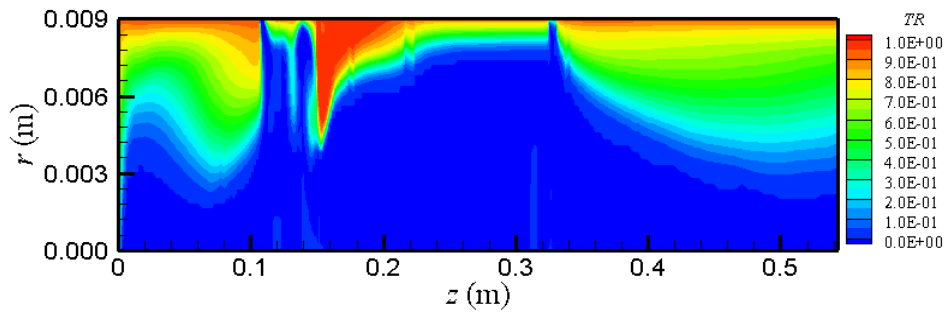


圖 197: 電子溫度比值分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

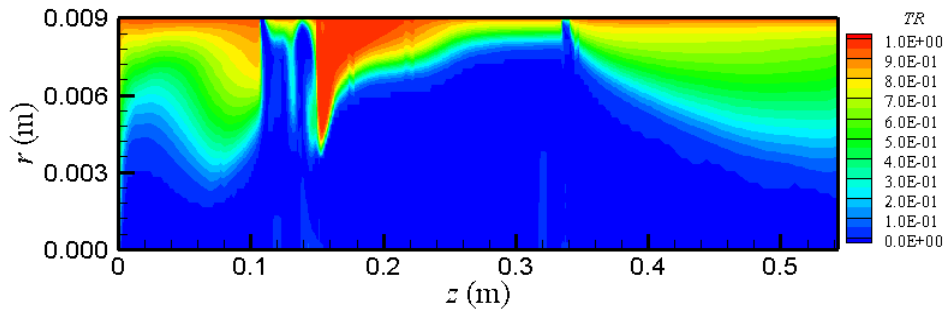


圖 198: 電子溫度比值 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )

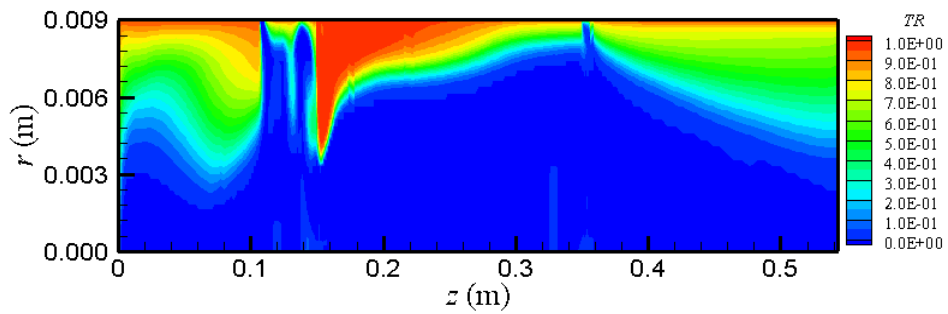


圖 199: 電子溫度比值 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

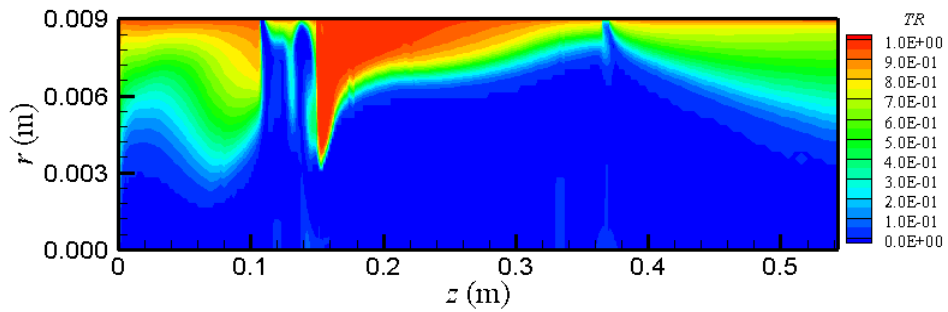


圖 200: 電子溫度比值 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

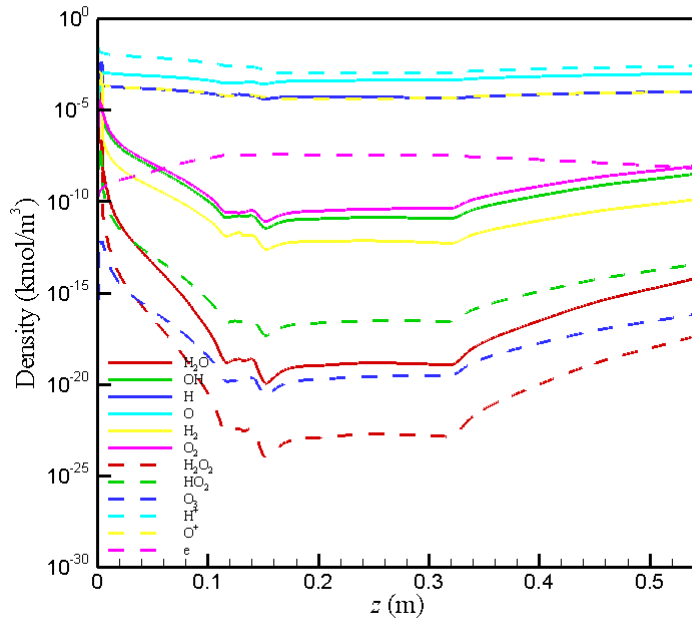


圖 201: 沿中心線物種濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=3.32g/s$ )

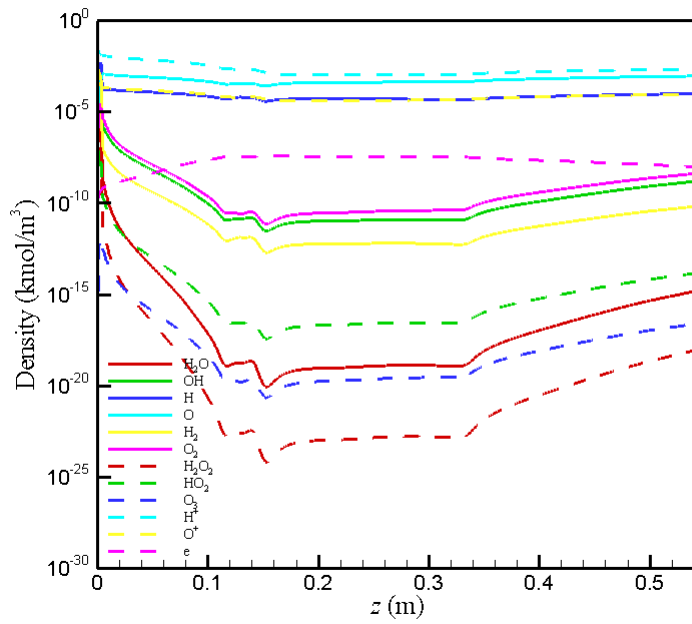


圖 202: 沿中心線物種濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=4.56g/s$ )



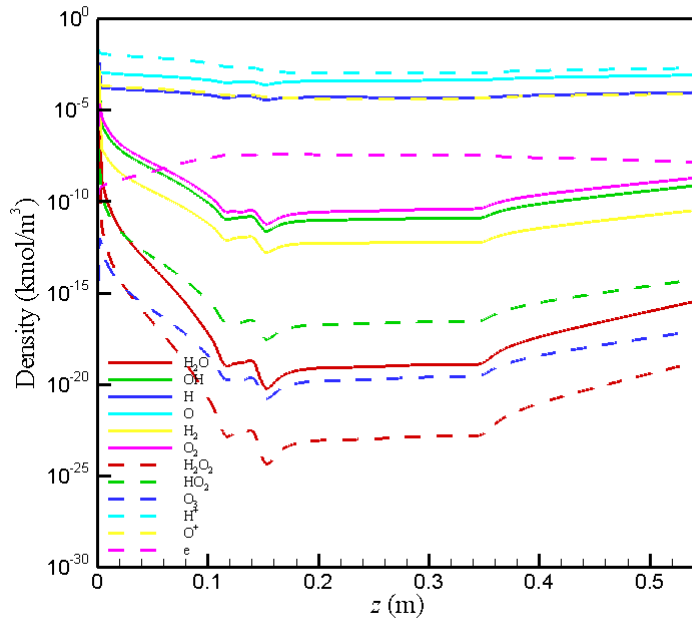


圖 203: 沿中心線物種濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=6.22\text{g/s}$ )

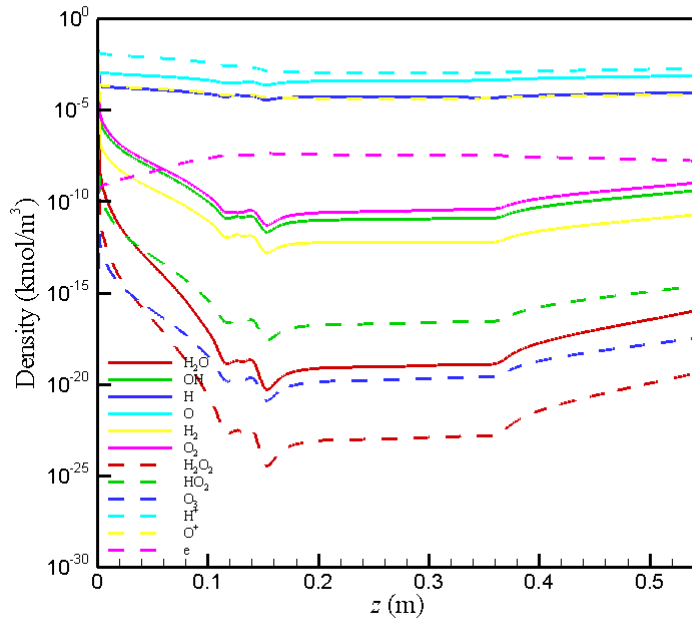


圖 204: 沿中心線物種濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=7.78\text{g/s}$ )

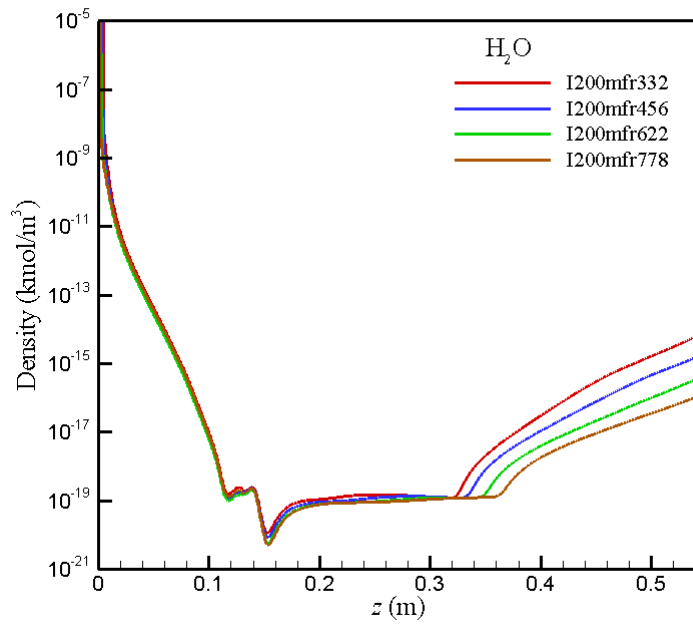


圖 205: 沿中心線  $H_2O$  濃度分布

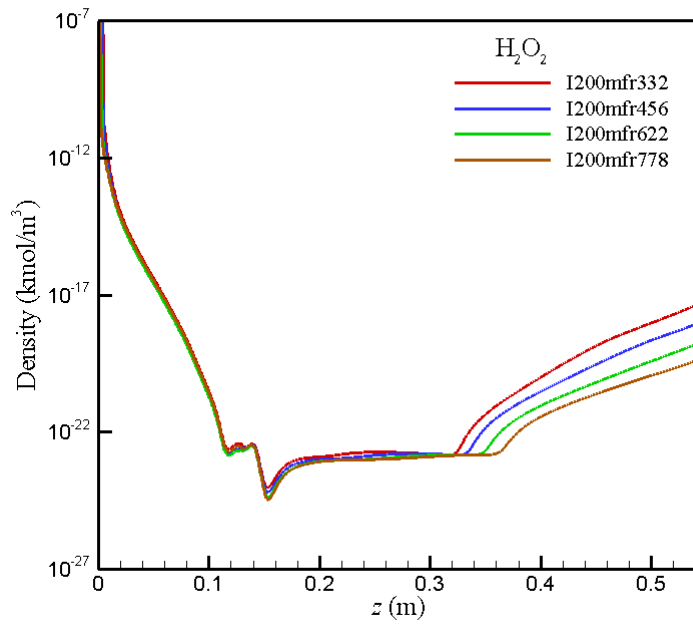


圖 206: 沿中心線  $H_2O_2$  濃度分布

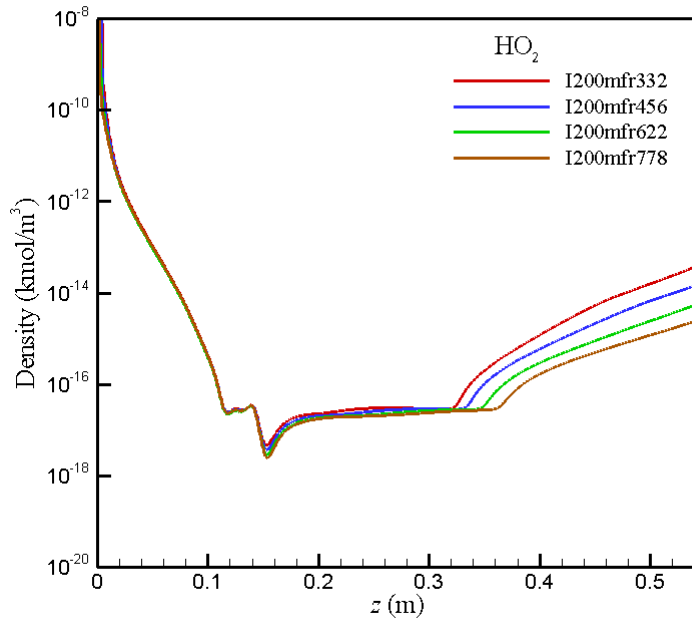


圖 207: 沿中心線  $\text{HO}_2$  濃度分布

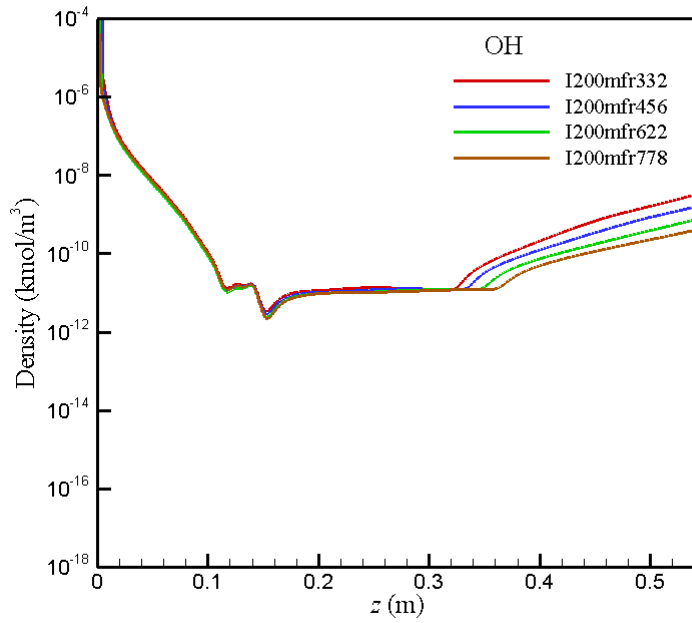


圖 208: 沿中心線  $\text{OH}$  濃度分布

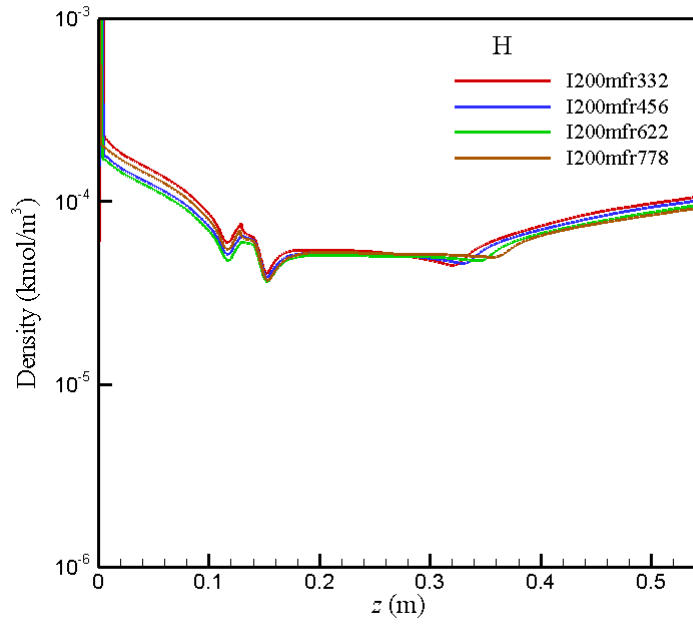


圖 209: 沿中心線 H 濃度分布

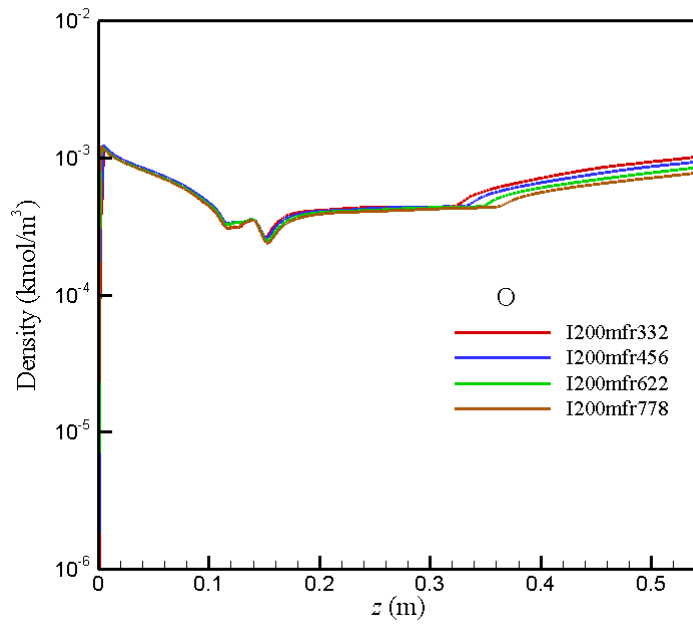


圖 210: 沿中心線 O 濃度分布

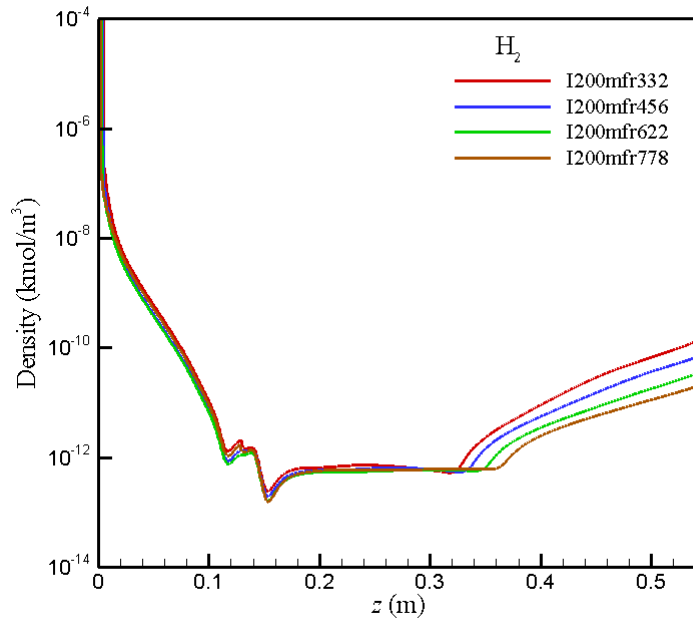


圖 211: 沿中心線  $H_2$  濃度分布

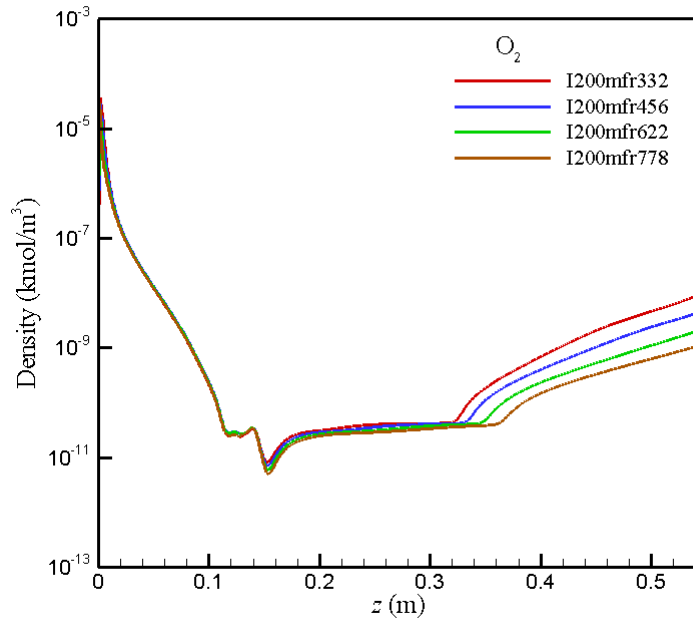


圖 212: 沿中心線  $O_2$  濃度分布

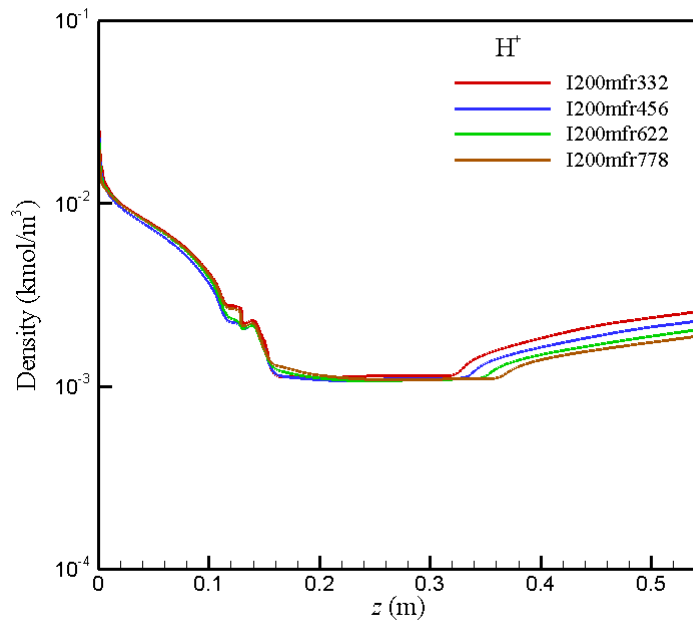


圖 213: 沿中心線  $H^+$  濃度分布

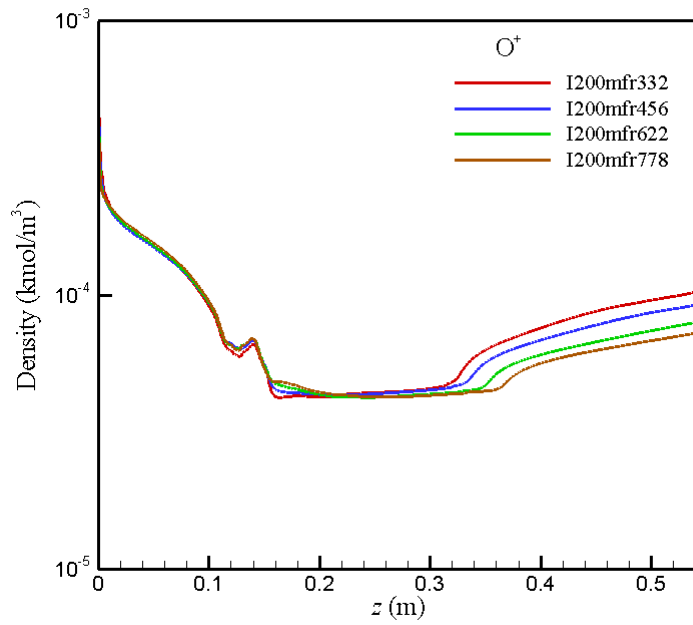


圖 214: 沿中心線  $O^+$  濃度分布

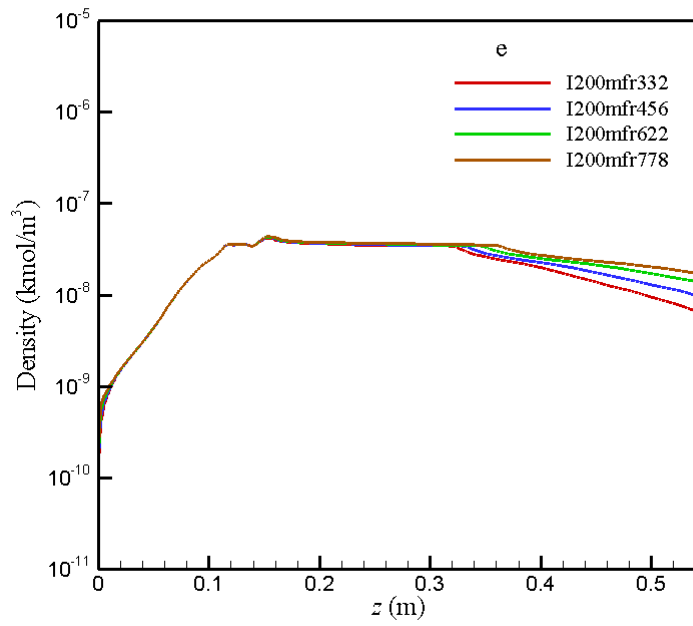


圖 215: 沿中心線電子濃度分布

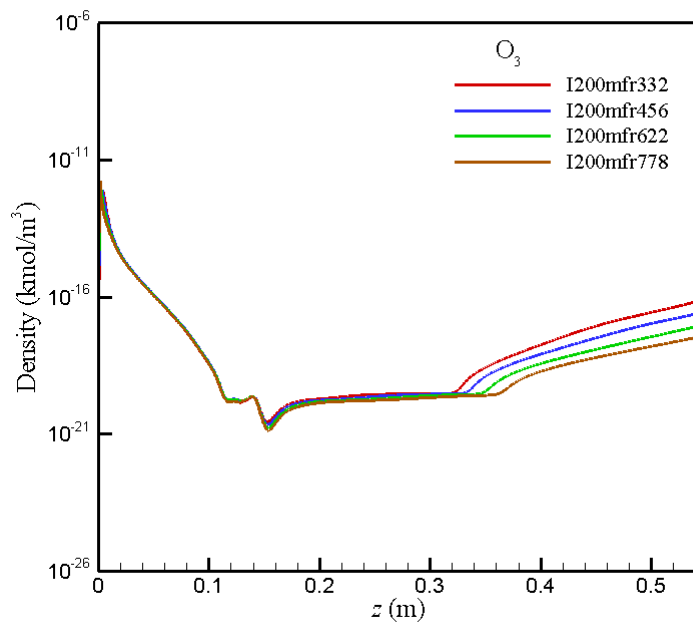


圖 216: 沿中心線  $\text{O}_3$  濃度分布

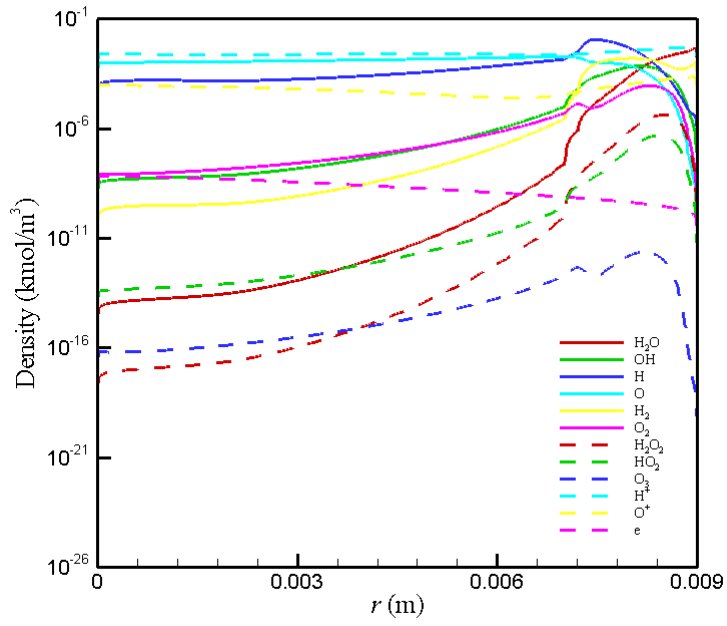


圖 217: 火炬出口處物種濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=3.32\text{g/s}$ )

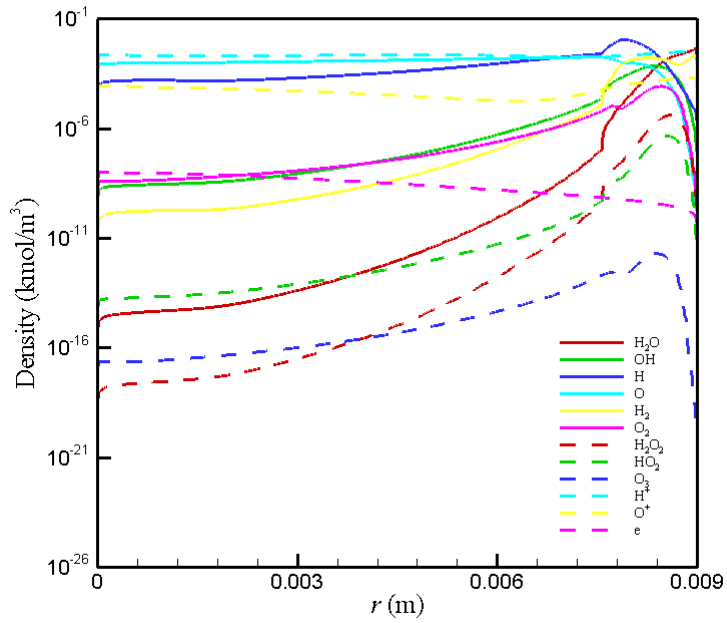


圖 218: 火炬出口處物種濃度分布 ( $I=200\text{A}$ ,  $\text{MFR}=4.56\text{g/s}$ )



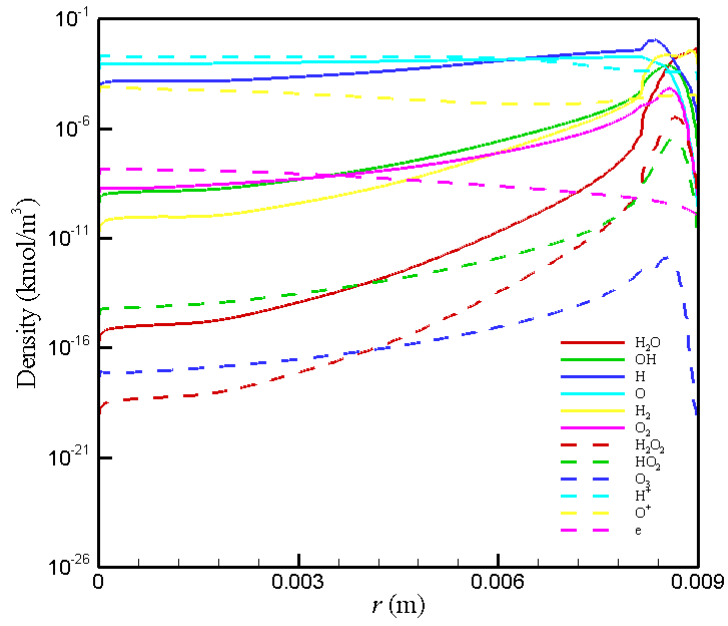


圖 219: 火炬出口處物種濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=6.22g/s$ )

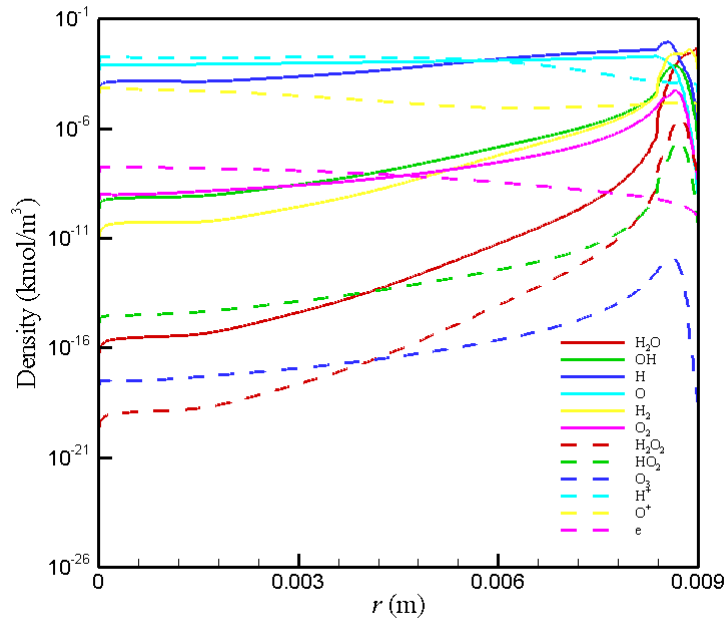


圖 220: 火炬出口處物種濃度分布 ( $I=200A$ ,  $MFR=7.78g/s$ )

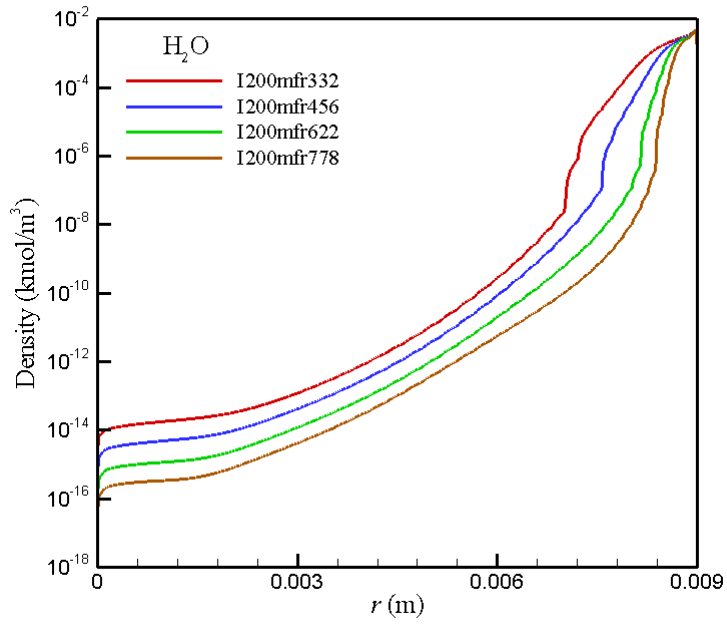


圖 221: 火炬出口處  $H_2O$  濃度分布

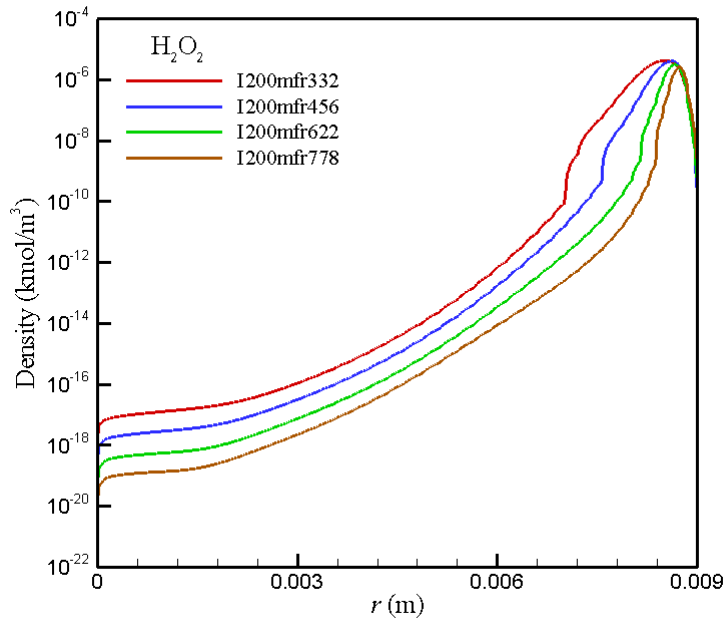


圖 222: 火炬出口處  $H_2O_2$  濃度分布

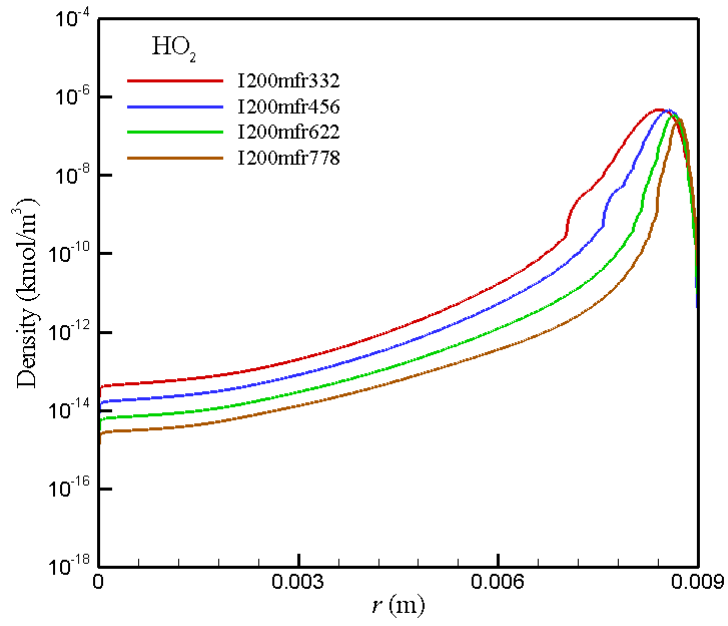


圖 223: 火炬出口處  $\text{HO}_2$  濃度分布

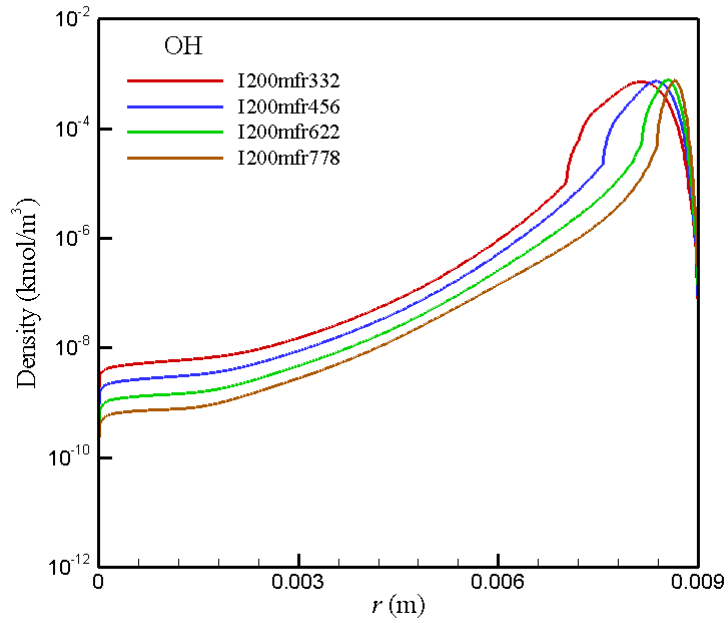


圖 224: 火炬出口處  $\text{OH}$  濃度分布

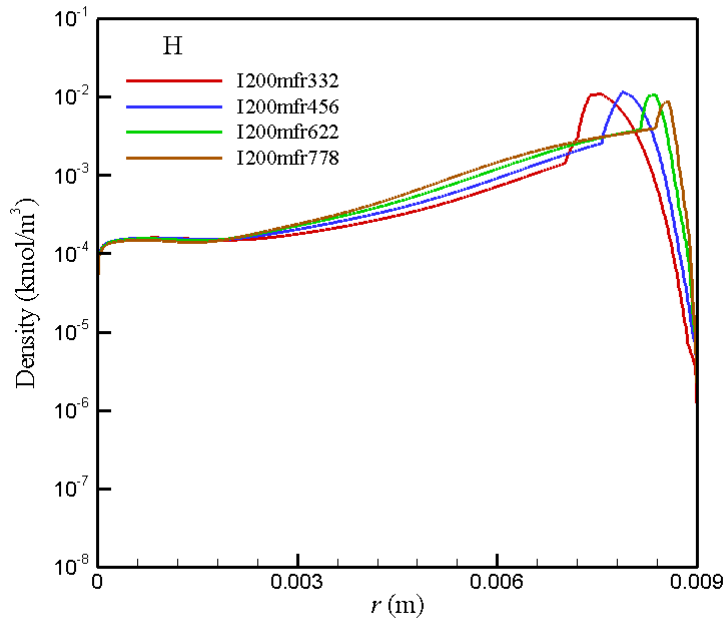


圖 225: 火炬出口處 H 濃度分布

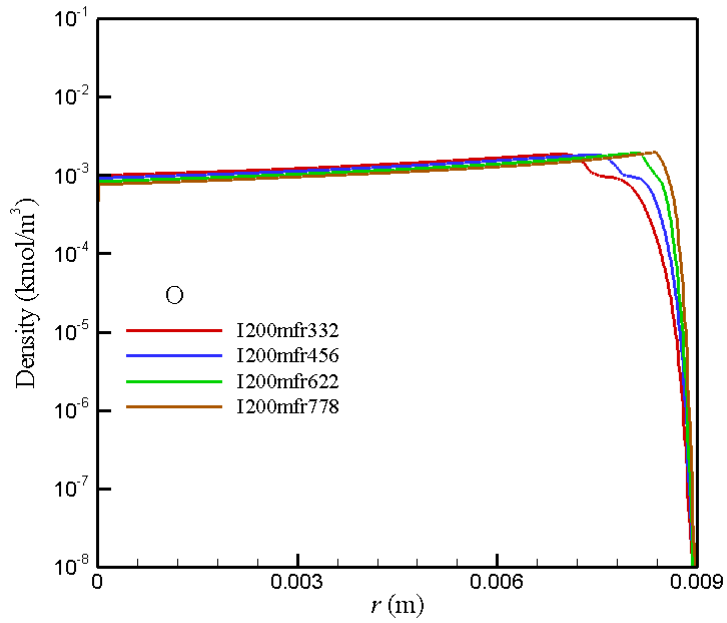


圖 226: 火炬出口處 O 濃度分布

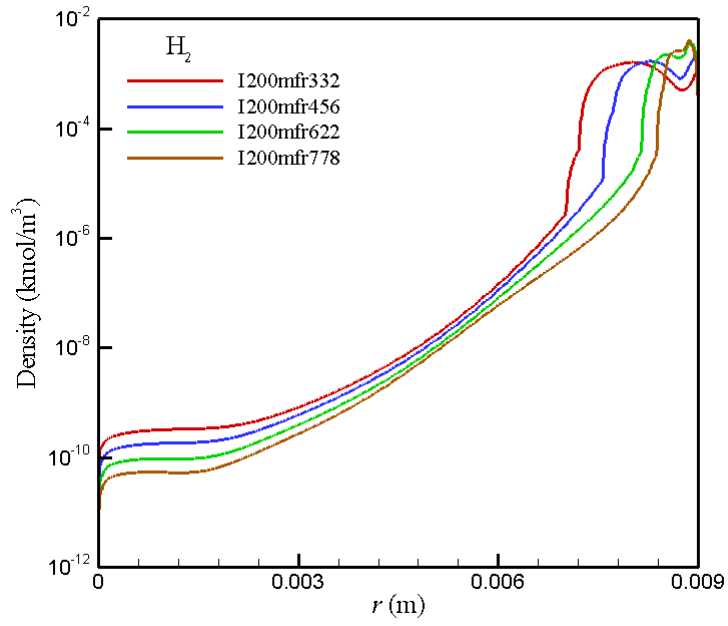


圖 227: 火炬出口處  $H_2$  濃度分布

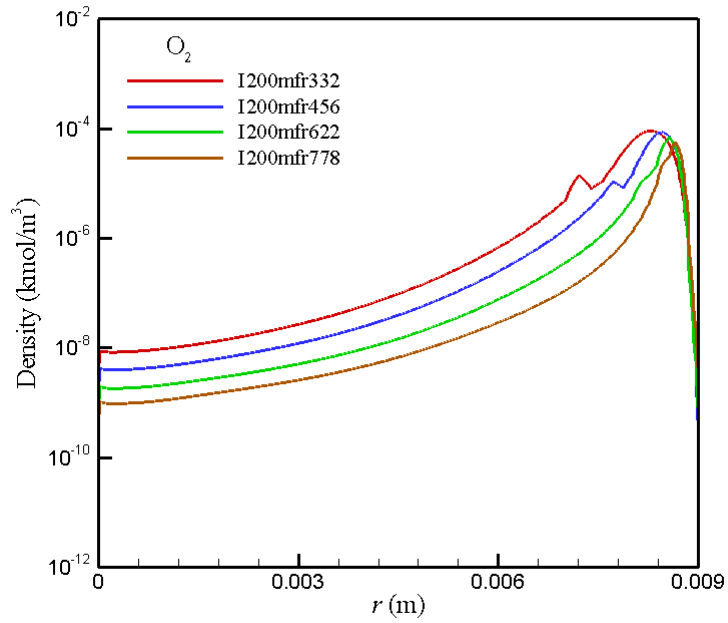


圖 228: 火炬出口處  $O_2$  濃度分布

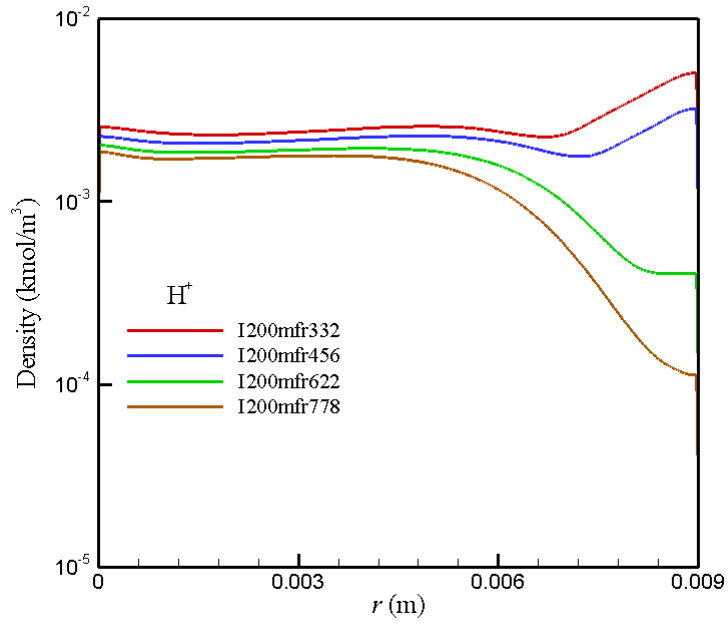


圖 229: 火炬出口處 H<sup>+</sup> 濃度分布

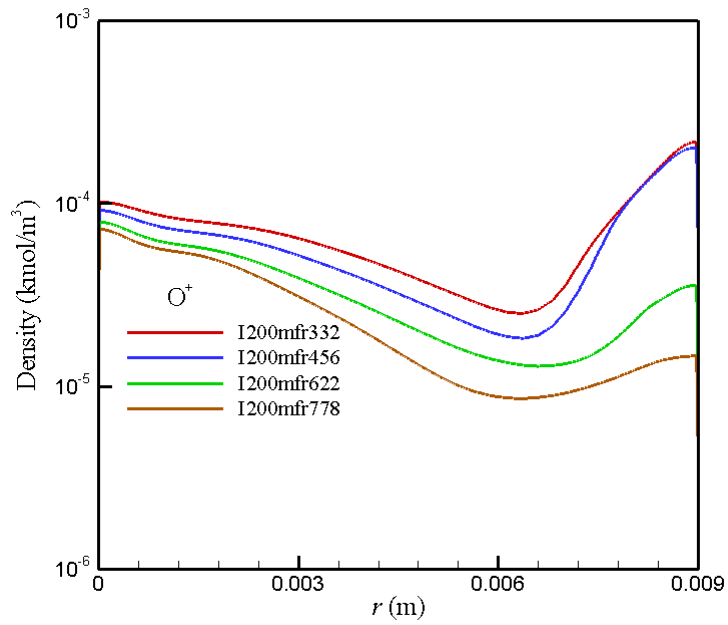


圖 230: 沿出口 O<sup>+</sup> 濃度分布

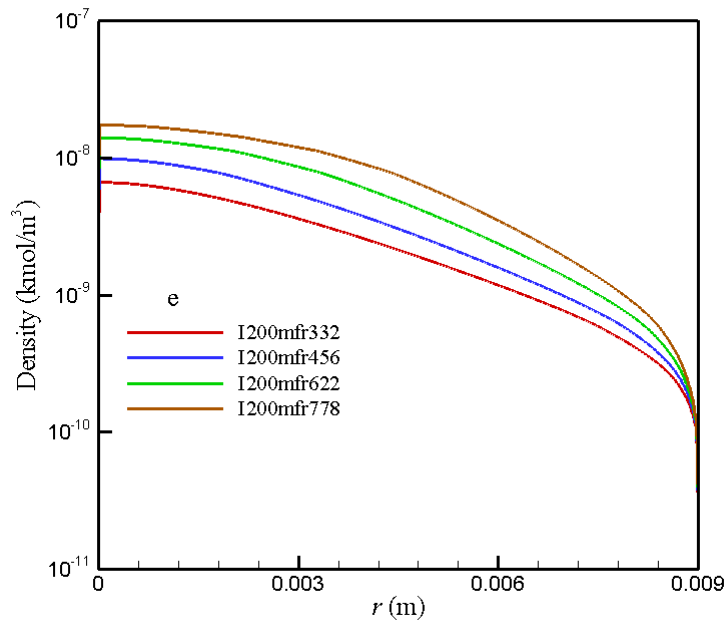


圖 231: 火炬出口處電子濃度分布

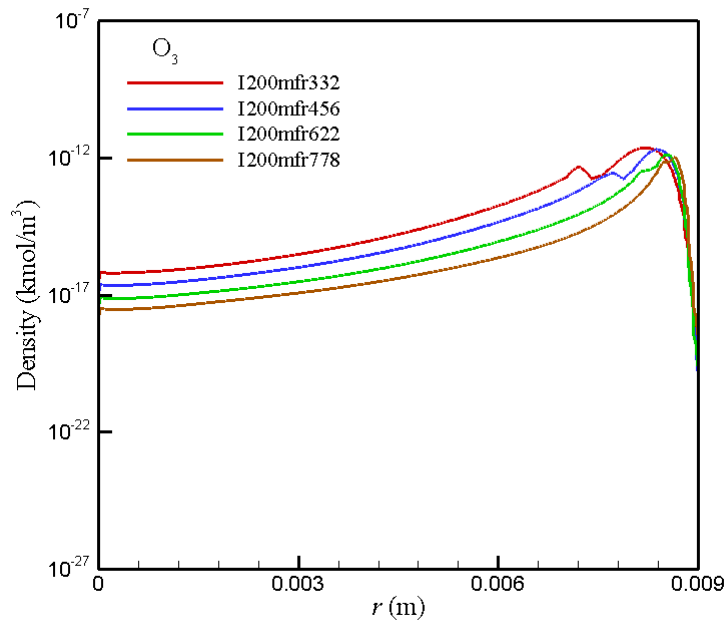


圖 232: 火炬出口處 O<sub>3</sub> 濃度分布