

分置

密閉空間内での熱過渡解析における
数値計算手法に関する一考案

1991年7月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

密閉空間内での熱過渡解析における数値計算手法に関する一考察

小林 順*、上出 英樹*

要旨

ドイツカールスルーエ原子力研究所 (KFK) で行なわれたタンク型高速炉の水流動モデル実験装置 RAMONA を用いたスクラム過渡自然循環試験を AQUA コードで解析した際、解の発散が生じ計算不能となった。この時、圧力方程式の解法を ICCG 法から PSOR 法に切り替えることによって計算を継続することができた。本報告は、ICCG 法において計算不能となる原因を解明すると共に、PSOR 法によって得られた結果の妥当性を明らかにするものである。

この種の解析において、計算不能となる原因は密閉空間における体積の減少 (シュリンケージ) によるものと考えられる。そこで、密閉空間の単純なモデルを用い、温度変化を伴う過渡計算を行なった。又、シュリンケージによる問題を避けるため、出口の形で開放空間を設けたケースについても解析し、両者の比較を行なった。これにより ICCG 法の計算不能の原因を究明し、PSOR 法の結果の妥当性を評価した。

解析の結果、ICCG 法では、密閉空間の設定そのものによって計算不能となること、シュリンケージする問題であっても温度境界条件を工夫した出口を設ける事によりこれと等価な計算が可能になることが明らかになった。一方、PSOR 法では、体系が密閉であるか開放であるかによらず計算が可能であること、その結果は ICCG 法による結果とほぼ同一であることが明らかとなった。

*安全工学部 原子炉工学室

目次

1. 序	1
2. PSOR法とICCG法の手法の違い	2
3. 解析結果	3
4. 結論	5

List of Tables

Table 1	Case-PSOR no Outlet (Global Balances at Time = 2.05E+03 seconds)	1 4
Table 2	Case-PSOR with Outlet (Global Balances at Time = 2.05E+03 seconds)	1 4
Table 3	Case-ICCG with Outlet (Global Balances at Time = 2.05E+03 seconds)	1 4

List of Figures

Fig. 1	Mesh Scheme	6
Fig. 2	Temperature and Velocity of Steady State (Initial State)	7
Fig. 3	Temperature and Velocity of Case-PSOR no Outlet at 2025 sec	8
Fig. 4	Temperature and Velocity of Case-PSOR with Outlet at 2025 sec	9
Fig. 5	Temperature and Velocity of Case-ICCG with Outlet at 2025 sec	1 0
Fig. 6	Time History of Temperature	1 1
Fig. 7	Time History of X-Velocity	1 2
Fig. 8	Time History of Z-Velocity	1 3
Fig. 9	Mass Convected at Outlet	1 5
Fig. 10	Average Velocity at Outlet	1 6

1. 序

単相多次元熱流動解析コードAQUAにおいて、圧力のポアソン方程式の解法として用いるICCG法はPSOR法に比べ計算速度が速く、AQUA標準の計算法となっている。しかし、密閉空間内での熱過渡解析における計算では、発散して計算不能に陥る場合がある。例えば、タンク型高速炉の一次系全体のスクラム時熱流動挙動を解析する場合には密閉空間内の解析となり、この問題が顕在化する。ドイツカールスルーエ原子力研究所(KFK)で行なわれたタンク型高速炉の水流動モデル実験RAMONA過渡試験のAQUAによる実験解析(要旨参照)で、ICCG法における解の発散が生じた。即ち、一次系のフローコーストダウンから自然循環に移行した約20秒後(スクラムから150秒後)の時点で、運動方程式の解とエネルギー方程式の解の一貫性を追及する外側反復計算の収束性が極端に悪化し、ついには発散して計算が停止した。この時には、発散する前のリスタートデータにより、圧力解法にPSOR法を用いて計算を続行した。一方、PSOR法では、外側反復計算の収束性の改善は見られなかったが、発散することなく計算を続行することができた。その後スクラムから800秒まで計算を行ない終了している。

このように計算不能となる原因は、密度の変化によって体積が減少することを考慮せず、液面が存在しないものとして計算を行なうことにあると考えられる。しかし、PSOR法とICCG法で結果が異なる理由は不明であり、PSOR法での結果の妥当性も明らかではない。そこで密閉空間となる2次元体系を設定し、定常状態から過渡的に冷却する計算を行ない、ICCG法とPSOR法を比較する。

次にこの密閉空間に出口境界条件を付加し、開放空間として同様な計算を行なうことにより密閉空間での解析結果と比較を行なう。

これらによりPSOR法により計算を継続したRAMONA実験解析の妥当性を知ると共に、密閉空間に適した解析手法を考察する。

2. PSOR法とICCG法の手法の違い

熱流動方程式の数値解法で最も計算時間を費やすのが、圧力に関するポアソン方程式の数値解を求めるところである。急激な過渡変化計算や、計算メッシュ数が数千以上になる場合には、最も一般的に使用されているPSOR法では極端に収束が遅くなることが知られている。そのため、AQUAではICCG法も併用できるようにしている。ICCG法は、PSOR法に比べ、定常計算では約2倍の計算の高速化が可能になる。また、PSOR法では、非定常計算において、ある程度収束条件を緩くするかあるいは収束しないまま計算を進めなければならないような問題が、ICCG法によって解決された。

a) PSOR法

この方法は、連立方程式を反復法で解くためにガウス-ザイデル法を用い、ガウス-ザイデル法の収束性を加速するために逐次過大緩和法(SOR法)を考えるというものである。

b) ICCG法

ICCG法(Incomplete Choleski Conjugate Gradient Method)は、Meijerink van der Vortらにより開発された手法であり、直接法と繰り返し法とを混合したものである。この解法は、理論的には n 次元連立1時方程式を高々 n 回の反復で解くことができるCG法に、収束性を改善するための前処理を施したもので、単相流差分法解析では n 回の反復以内にPSOR相当以上の精度を得ることができるものである。

なお、PSOR法の収束判定条件はICCG法の収束判定条件より緩く、PSOR法では 1.0×10^{-5} に対してICCG法では 1.0×10^{-6} となっている。

3. 解析結果

この計算に用いたモデルは Fig. 1 に示すように、 $30 \times 10 \times 60$ cmの直方体で x 方向が 15 mesh、y 方向が 1 mesh、z 方向が 30 mesh の x-z 2次元体系である。z 方向の負の向きに重力を作用させ、ケースにより出口境界条件を付加した。y-z 面の一方を高さ 50 cm まで 80 度、同様にもう一方の面を高さ 50 cm まで 10 度の温度一定の境界とし、液温は 50 度とする。この初期条件で定常計算を行ない、収束した状態を過渡計算の初期条件とする。過渡計算は 80 度の壁面を初めの 5 秒間で直線的に 16 度まで下げた場合の変化を 2000 秒間に渡って計算するものとした。

定常計算は ICCG 法で行なった。定常に達したときの速度ベクトル図と温度コンター図を Fig. 2 に示す。これによると自然対流の形成が見られ、温度勾配も緩やかであることがわかる。また、出口の有無による差異は生じなかった。

過渡計算は、出口のない場合についてと出口のある場合について、それぞれ ICCG 法及び PSOR 法で計算を行なった。

ICCG 法を用いた出口無し体系の解析では、時間ステップ幅を 0.01 秒まで短くしても約 0.85 秒まで計算が進んだ時点で計算不能となった。次に、同じ出口無し体系ではあるが、PSOR 法を用いた解析では、時間ステップ幅を初めの 2.0 秒までは 0.1 秒幅、次の 5.0 秒までは 0.3 秒幅、その後 1.0 秒幅として、過渡変化後の定常状態になるまでの 2025 秒までトラブル無く計算することができた。尚、他のすべての計算もこれと同一の時間ステップで行なった。

一方、出口あり体系では、ICCG 法、PSOR 法ともに 2025 秒まで計算することができた。2025 秒後の温度コンター図ならびに速度ベクトル図を、出口無し体系の ICCG 法を除く各ケースについて Fig. 3, 4, 5 に示す。これら 3 ケースの結果は、これらの図からでは差異を認められないほど一致している。

また、Fig. 1 に示した Reference Point での温度、速度 (x、z 成分) の時間変化を 3 ケースについて比較したものを Fig. 6, 7, 8 に示す。これによると、Fig. 3, 4, 5 ではわからなかった違いが現われてくる。即ち、PSOR 法はどちらの体系の解析結果ともほぼ完全に一致しているが、ICCG 法の場合は PSOR 法による結果に比べて若干の違いが認められる。Fig. 6, 7 から、温度と速度の z 成分の時間変化は 3 種類ともほぼ一致していることがわかる。Fig. 8 で

はICCG法とPSOR法の差異がはっきりと認められるが、これは計算の後半に於てであり、前半では両者は極めてよく一致している。この後半の差は計算法の違いによる誤差によるものと思われる。

Table 1,2,3 に2025秒後の各体系の各表面における諸量を示した。Surface Number $N = 9$ が出口境界を表わしている。出口あり体系における出口境界での挙動をICCG法とPSOR法で比較すると、ICCG法による結果では出口から質量の流入があることがわかる。即ち、これは温度低下に伴うシュリンケージに対応して質量が補填されていると言える。この事から出口のない場合では密度が変化し体積が減少しているにもかかわらず、液面が存在しないものとして計算を行なっていることとなり、これがICCG法の計算不能の原因になっていると考えられる。一方、PSOR法では質量の流入は見られず、出口の有無の影響はほとんどない。収束判定条件が緩いので体積の減少の影響が計算の誤差の中に埋もれてしまっている可能性がある。このため出口がなくても計算が可能となっていると考えられる。

出口あり体系のICCG法の計算結果より、出口境界での質量流量と流速の時間変化の様子を Fig. 9 および Fig. 10 に示した。Fig. 9 から2025秒までに流入した全質量を求めると、およそ450gであり、系全体に対する割合は約2.5%となる。また、Fig. 10 から出口における最大流速は0.18mm/sであり、系における最大流速の約2.4%であることがわかる。このことから、出口あり体系でのICCG法による計算においては、出口からの質量の流入があるため、出口付近はその影響を受けることになるが、出口境界から流入する流体が微量であり、その温度が体系上部の温度より僅かに高いため上方に溜まるだけで全体の流れ場、温度場に与える影響は小さいと考えられる。従って、ICCG法ではシュリンケージの問題を避けるために出口を設けても全体に対する影響はほとんどなく、液面が存在する場合の熱流動場と同一の結果を与えたと考えられる。

出口無し体系でのPSOR法による計算は、流体の収縮を考慮していないという点で物理的に不合理である。しかし、液面が存在する熱流動場と等価と考えられる出口あり体系のICCG法による結果と比較すると、全体の傾向は良く一致している。従って、シュリンケージによる液位変化がメッシュ幅に対して小さい範囲では、出口なしのPSOR法でも、シュリンケージが起こる熱流動場の解析が可能であることがわかった。

4. 結論

密閉空間において温度が低下する過渡変化をAQUAを用いて計算する場合に、ICCG法による計算では計算不能となるケースがある。一方、PSOR法では同じケースでも計算が可能である。ICCG法による計算が不可能となる原因として、シュリンケージによる影響が考えられ、出口を設けることによってシュリンケージによる問題を避けると計算が可能となった。そこで出口を設けた体系のICCG法による計算結果と出口の有る場合とない場合の体系のPSOR法による計算結果の3ケースを比較し、PSOR法の計算結果の妥当性を評価した。この解析結果からICCG法及びPSOR法について次のような知見が得られた。

(a) ICCG法は密閉空間の設定そのものが影響し、温度変化を伴う過渡計算では計算不能となる。

(b) ICCG法は温度境界条件を工夫した出口を設けるとシュリンケージする体系であっても計算が可能となる。そして、出口付近の影響は全体には及ばず、液面を考慮した場合の熱流動場とほぼ同一の結果を与えられられる。

(c) PSOR法は、ICCG法による結果とは若干の違いが生じてくるが、全体としてはほぼ一致しており、この解析に用いたような体系において、出口無し体系のPSOR法による計算結果は出口有り体系のICCG法による計算結果と同一であると言ってよい。このことから、液面を考慮した場合の熱流動場とも同一の結果を得ることができると考えられる。

PSOR法による計算がこの数値実験に用いた体系では可能となるが、これはシュリンケージの影響が微少であるため、即ち、シュリンケージによる体積の減少の影響は計算誤差の中に埋もれているためと考えられる。

従って、密閉空間においてPSOR法で計算した、RAMONAスクラム過渡自然循環試験の解析結果も妥当であることが明かとなった。

今後液面モデルの使用については更に検討を続ける。

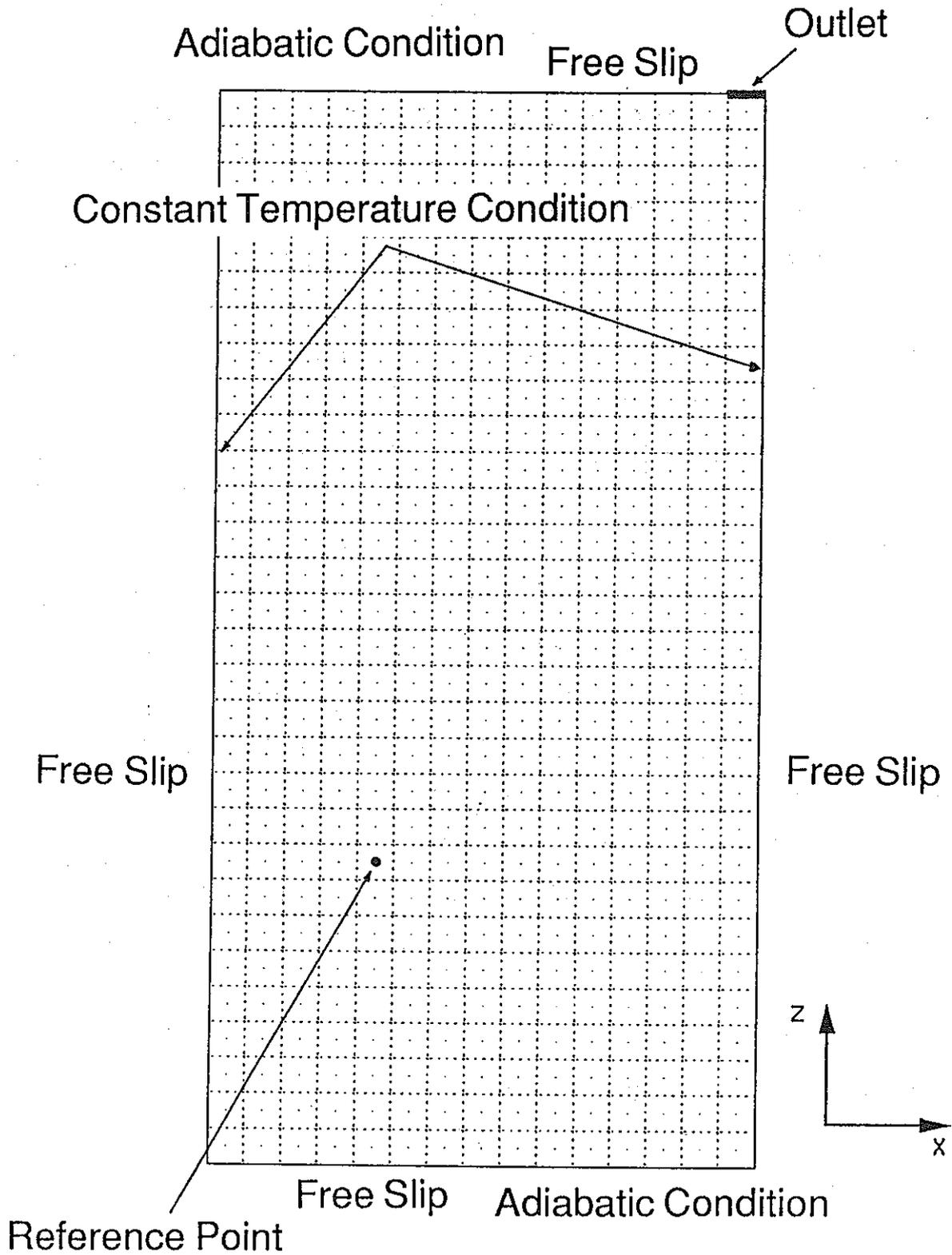
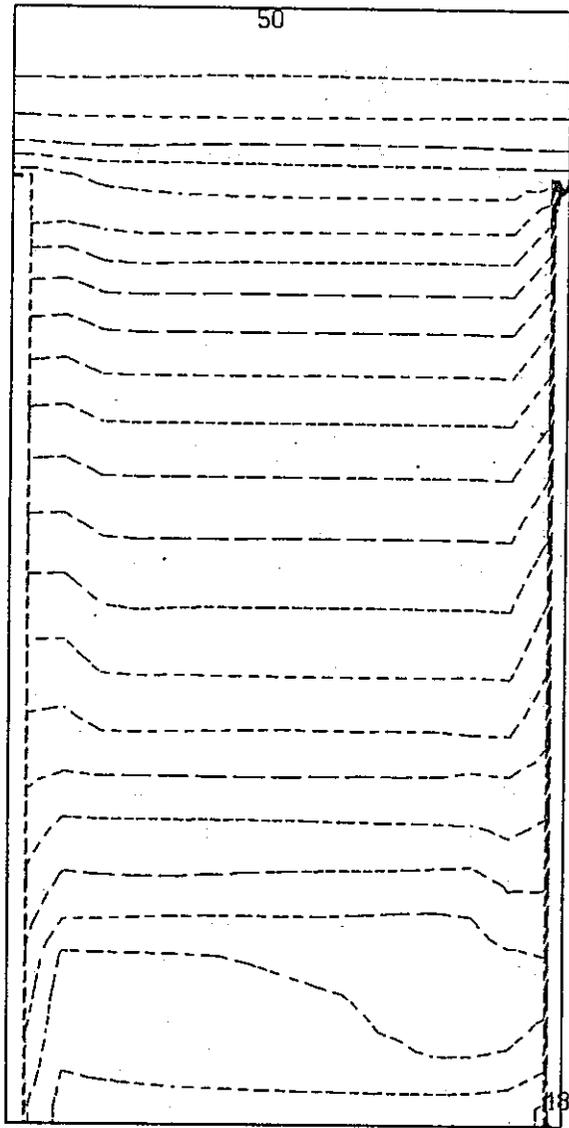
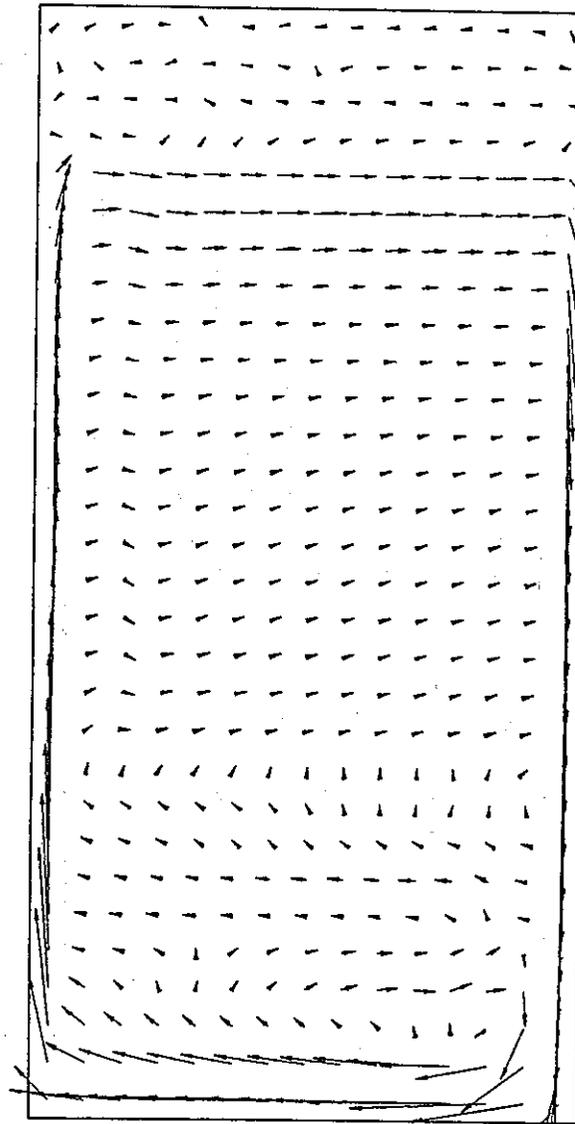


Fig. 1 Mesh Scheme



TIME: 0.0 SEC.



J = 1
 8.82×10^{-3} M/S

Fig. 2 Temperature and Velocity of Steady State
(Initial State)

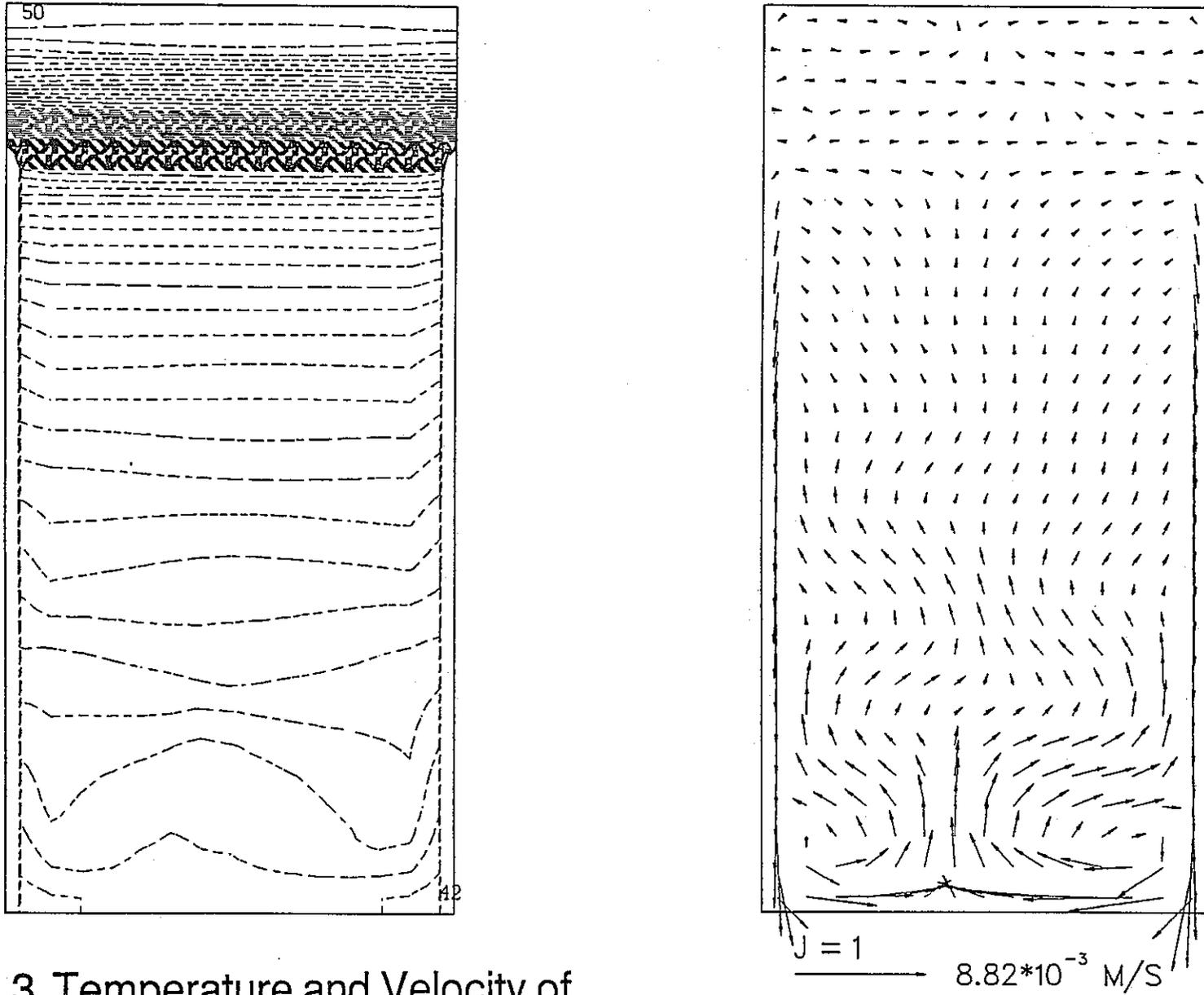


Fig. 3 Temperature and Velocity of Case-PSOR no Outlet at 2025 sec.

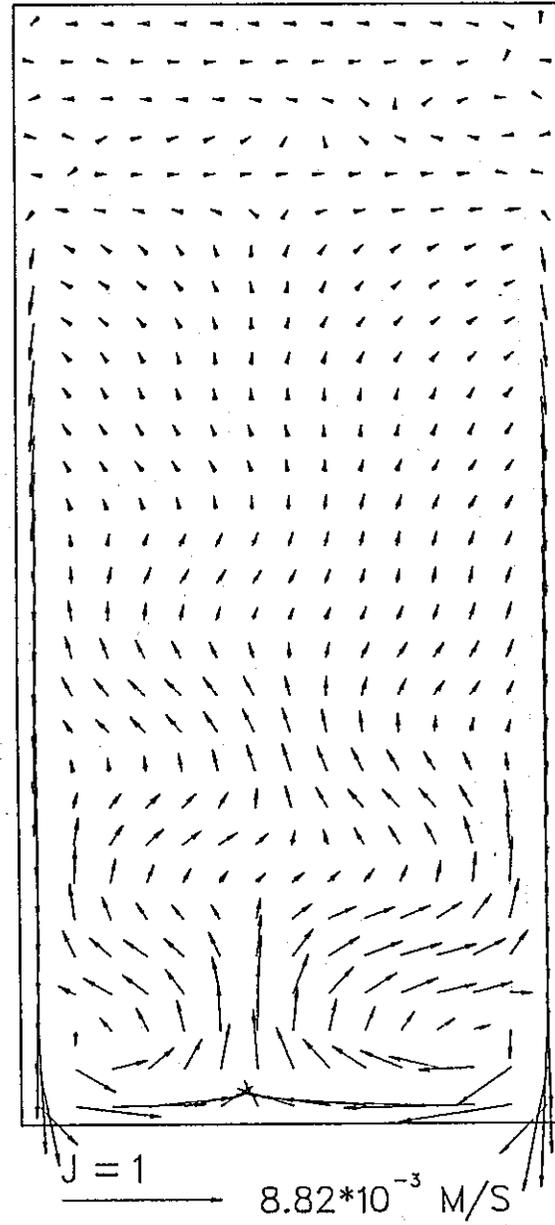
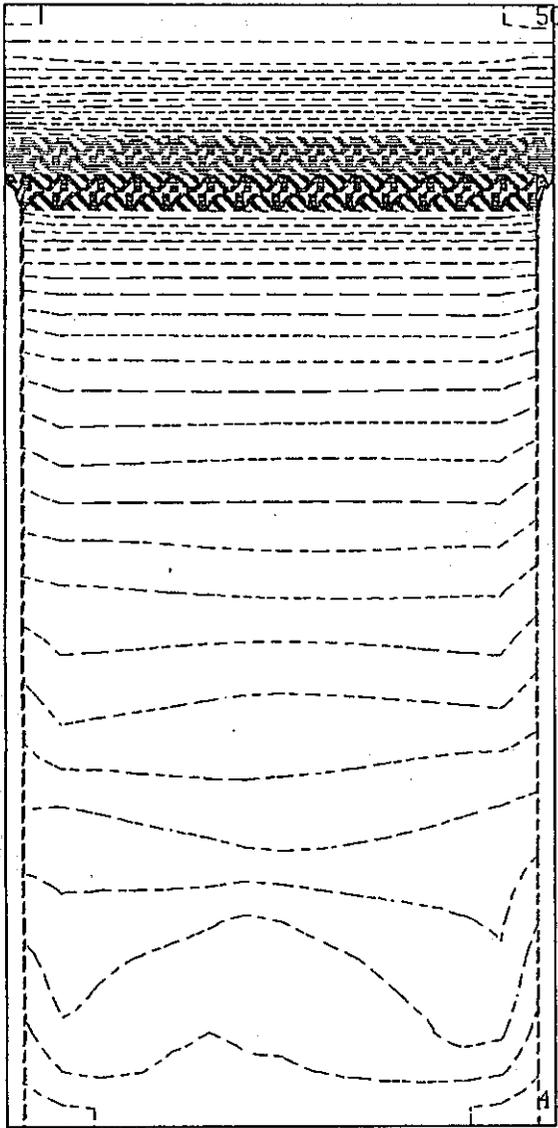


Fig. 4 Temperature and Velocity of Case-PSOR with Outlet at 2025 sec.

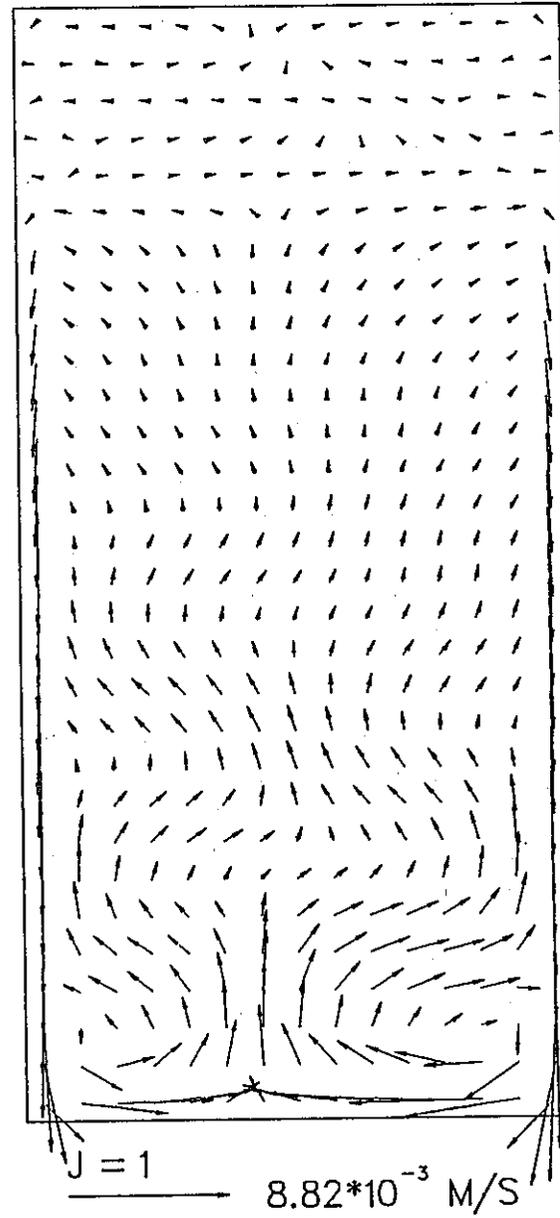
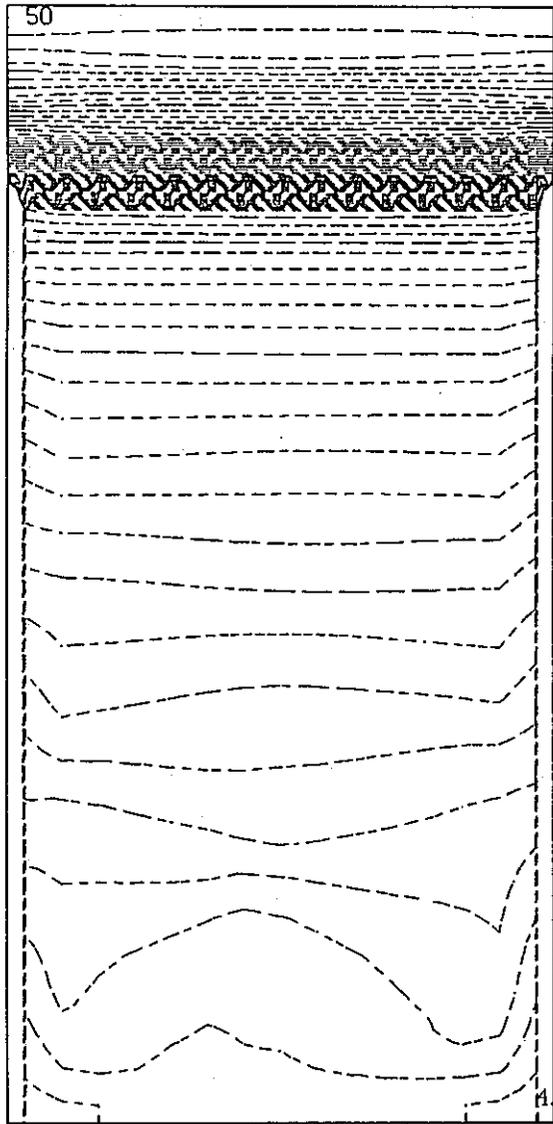


Fig. 5 Temperature and Velocity of Case-ICCG with Outlet at 2025 sec.

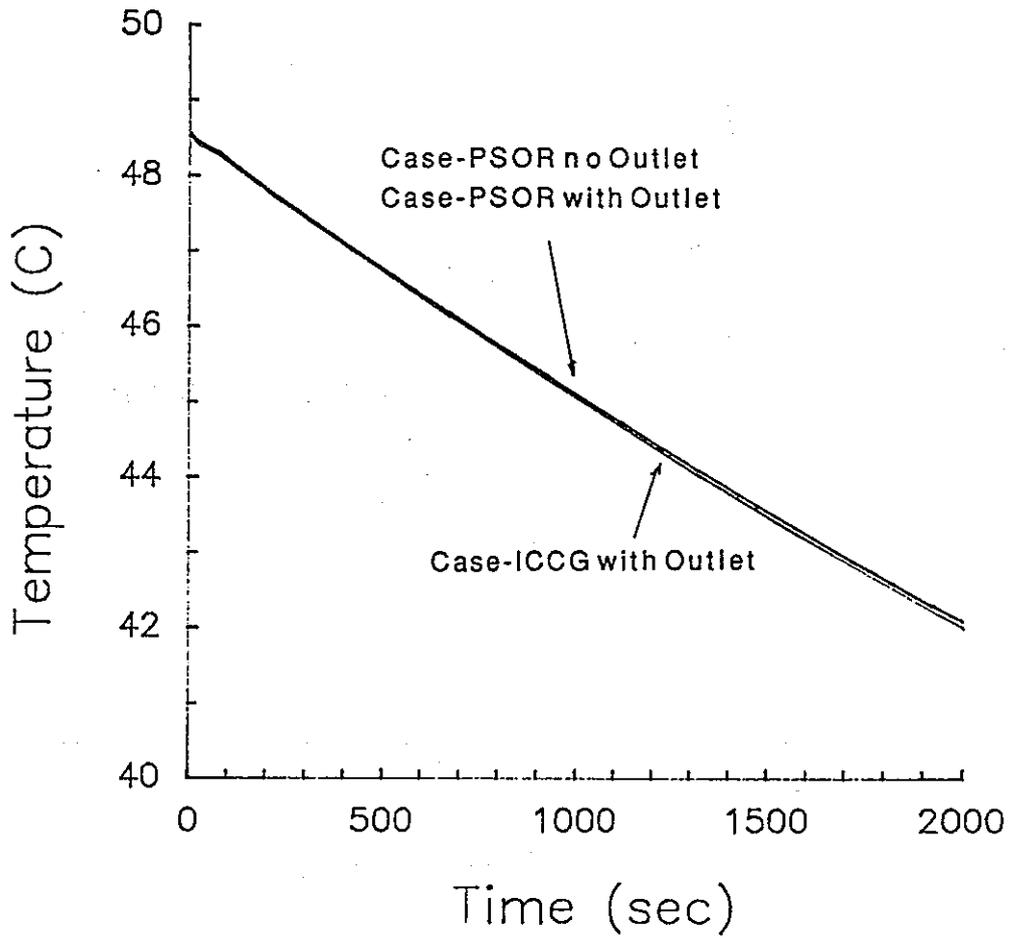


Fig. 6 Time History of Temperature

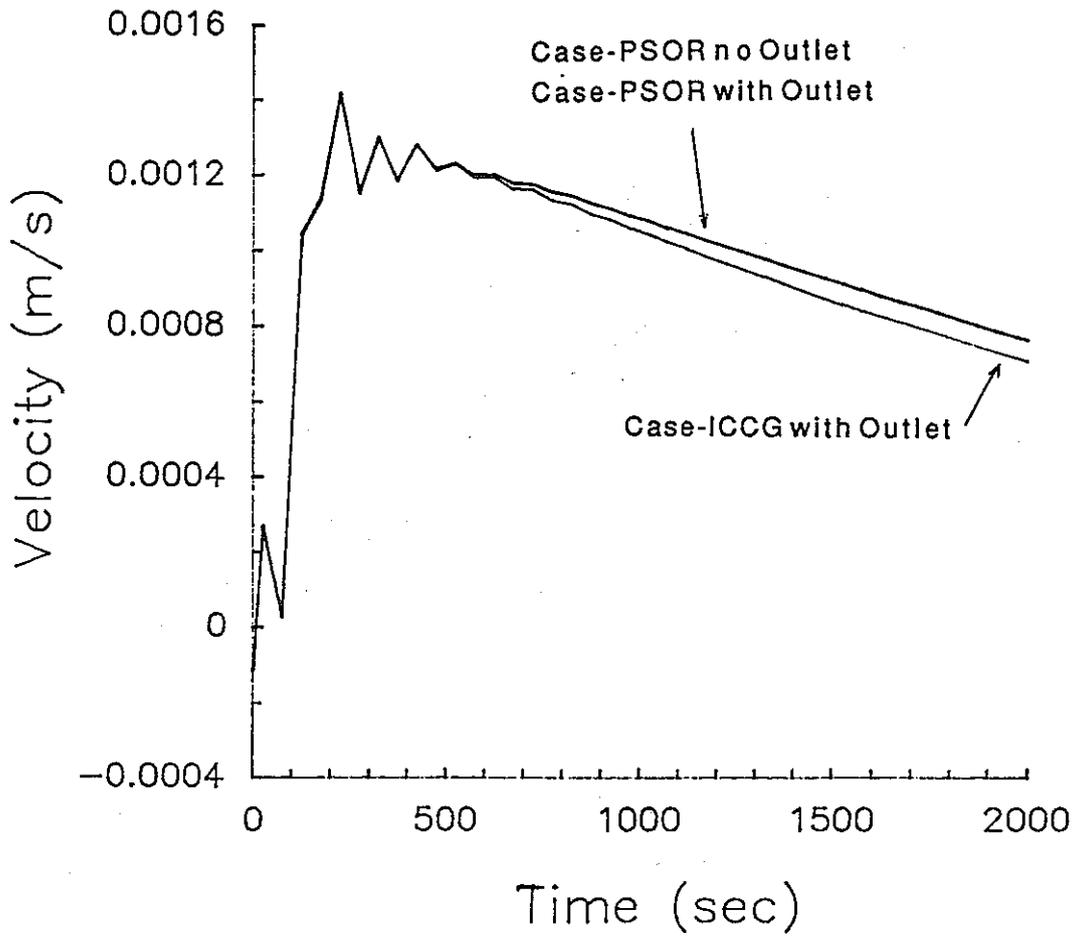


Fig. 7 Time History of X-Velocity

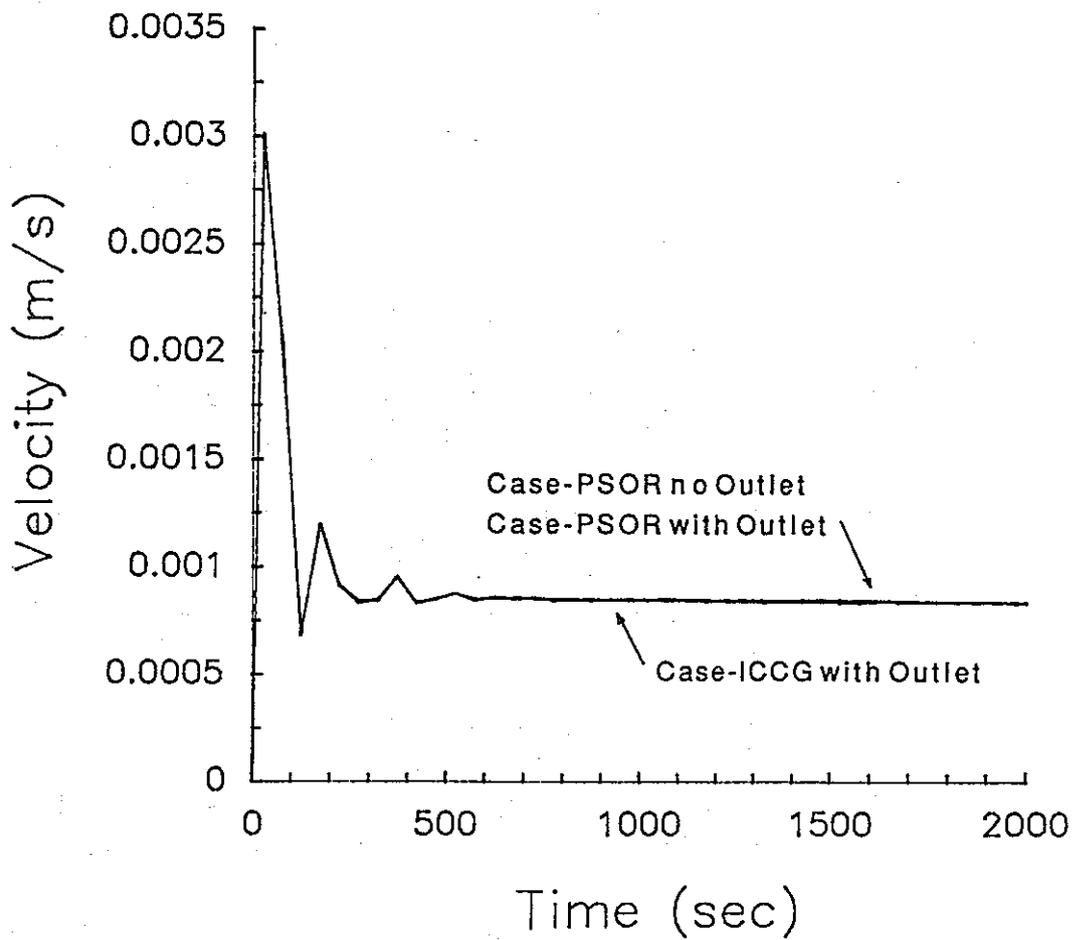


Fig. 8 Time History of Z-Velocity

Table 1 Case-PSOR no Outlet (Global Balances at Time = 2.025E+03 seconds)

SURFACE NUMBER	MASS CONVECTED (KG/SEC)	ENERGY CONVECTED (WATT)	ENERGY CONDUCTED (WATT)	AVERAGE VELOCITY (M/SEC)	AVERAGE ENTHALPY (J/KG)	AVERAGE TEMPERATURE (CELSIUS)	BULK TEMPERATURE (CELSIUS)
N= 1	0.000000E+00	0.000000E+00	-8.405916E+01	0.000000E+00	6.691468E+04	1.600000E+01	0.000000E+00
N= 2	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.031345E+02	0.000000E+00	4.195674E+04	1.000000E+01	0.000000E+00
N= 3	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.814902E+05	4.347808E+01	0.000000E+00
N= 4	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.814902E+05	4.347808E+01	0.000000E+00
N= 5	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.736860E+05	4.161005E+01	0.000000E+00
N= 6	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.084825E+05	4.993530E+01	0.000000E+00
N= 7	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.042382E+05	4.892045E+01	0.000000E+00
N= 8	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.042287E+05	4.891817E+01	0.000000E+00

Table 2 Case-PSOR with Outlet (Global Balances at Time = 2.025E+03 seconds)

SURFACE NUMBER	MASS CONVECTED (KG/SEC)	ENERGY CONVECTED (WATT)	ENERGY CONDUCTED (WATT)	AVERAGE VELOCITY (M/SEC)	AVERAGE ENTHALPY (J/KG)	AVERAGE TEMPERATURE (CELSIUS)	BULK TEMPERATURE (CELSIUS)
N= 1	0.000000E+00	0.000000E+00	-8.405916E+01	0.000000E+00	6.691468E+04	1.600000E+01	0.000000E+00
N= 2	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.031345E+02	0.000000E+00	4.195674E+04	1.000000E+01	0.000000E+00
N= 3	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.814902E+05	4.347808E+01	0.000000E+00
N= 4	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.814902E+05	4.347808E+01	0.000000E+00
N= 5	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.736860E+05	4.161005E+01	0.000000E+00
N= 6	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.084713E+05	4.993262E+01	0.000000E+00
N= 7	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.042382E+05	4.892045E+01	0.000000E+00
N= 8	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.042287E+05	4.891817E+01	0.000000E+00
N= 9	<u>0.000000E+00</u>	0.000000E+00	0.000000E+00	<u>0.000000E+00</u>	2.086395E+05	4.997283E+01	0.000000E+00

Outlet →

Table 3 Case-ICCG with Outlet (Global Balances at Time = 2.025E+03 seconds)

SURFACE NUMBER	MASS CONVECTED (KG/SEC)	ENERGY CONVECTED (WATT)	ENERGY CONDUCTED (WATT)	AVERAGE VELOCITY (M/SEC)	AVERAGE ENTHALPY (J/KG)	AVERAGE TEMPERATURE (CELSIUS)	BULK TEMPERATURE (CELSIUS)
N= 1	0.000000E+00	0.000000E+00	-8.375259E+01	0.000000E+00	6.691468E+04	1.600000E+01	0.000000E+00
N= 2	0.000000E+00	0.000000E+00	-1.028251E+02	0.000000E+00	4.195674E+04	1.000000E+01	0.000000E+00
N= 3	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.811737E+05	4.340232E+01	0.000000E+00
N= 4	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.811737E+05	4.340232E+01	0.000000E+00
N= 5	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	1.732544E+05	4.150673E+01	0.000000E+00
N= 6	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.084576E+05	4.992933E+01	0.000000E+00
N= 7	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.042505E+05	4.892339E+01	0.000000E+00
N= 8	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00	2.042465E+05	4.892244E+01	0.000000E+00
N= 9	<u>2.538419E-04</u>	5.296234E+01	0.000000E+00	<u>1.283857E-04</u>	2.086430E+05	4.997367E+01	4.997367E+01

Outlet →

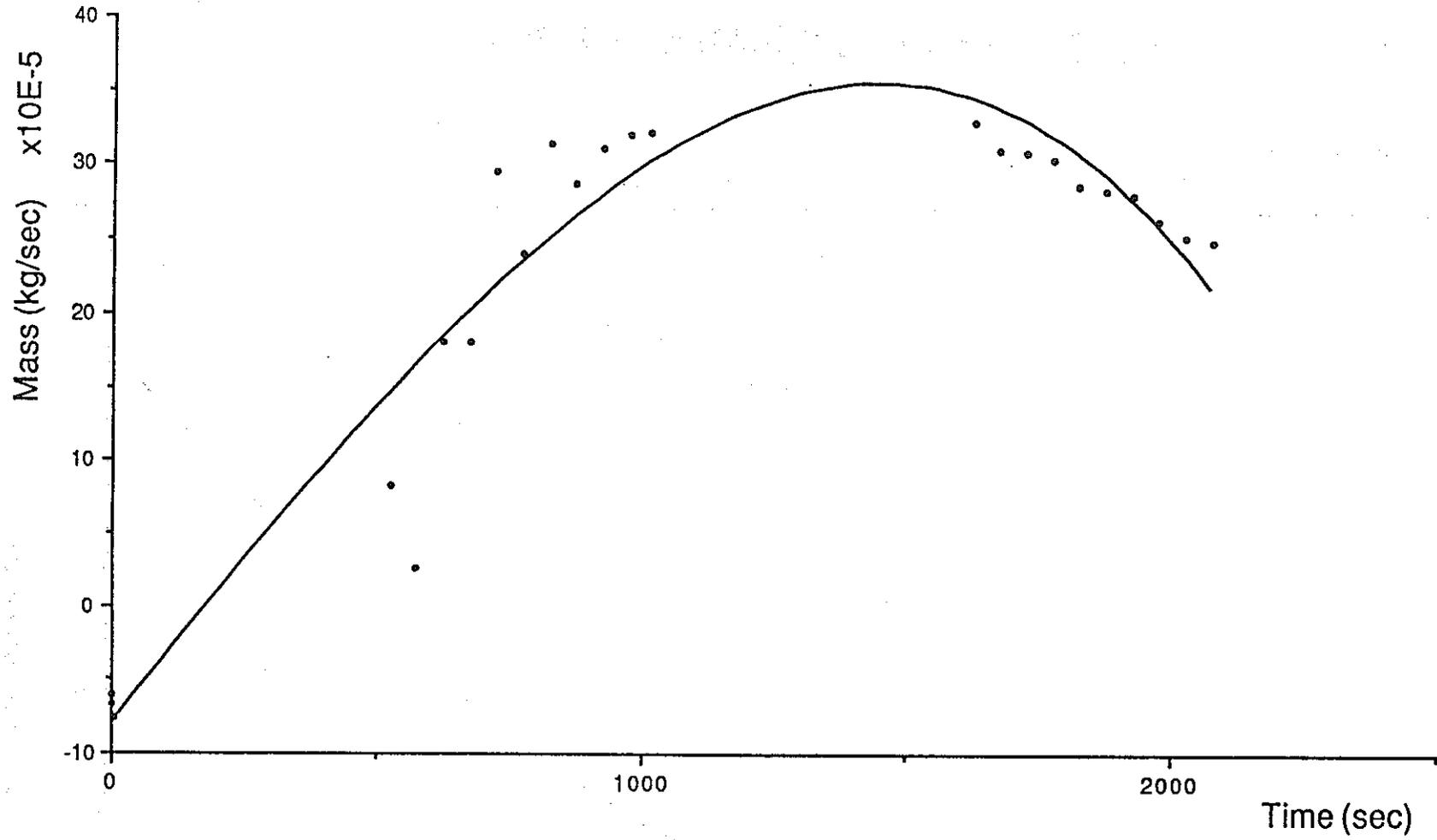


Fig. 9 Mass Convected at Outlet

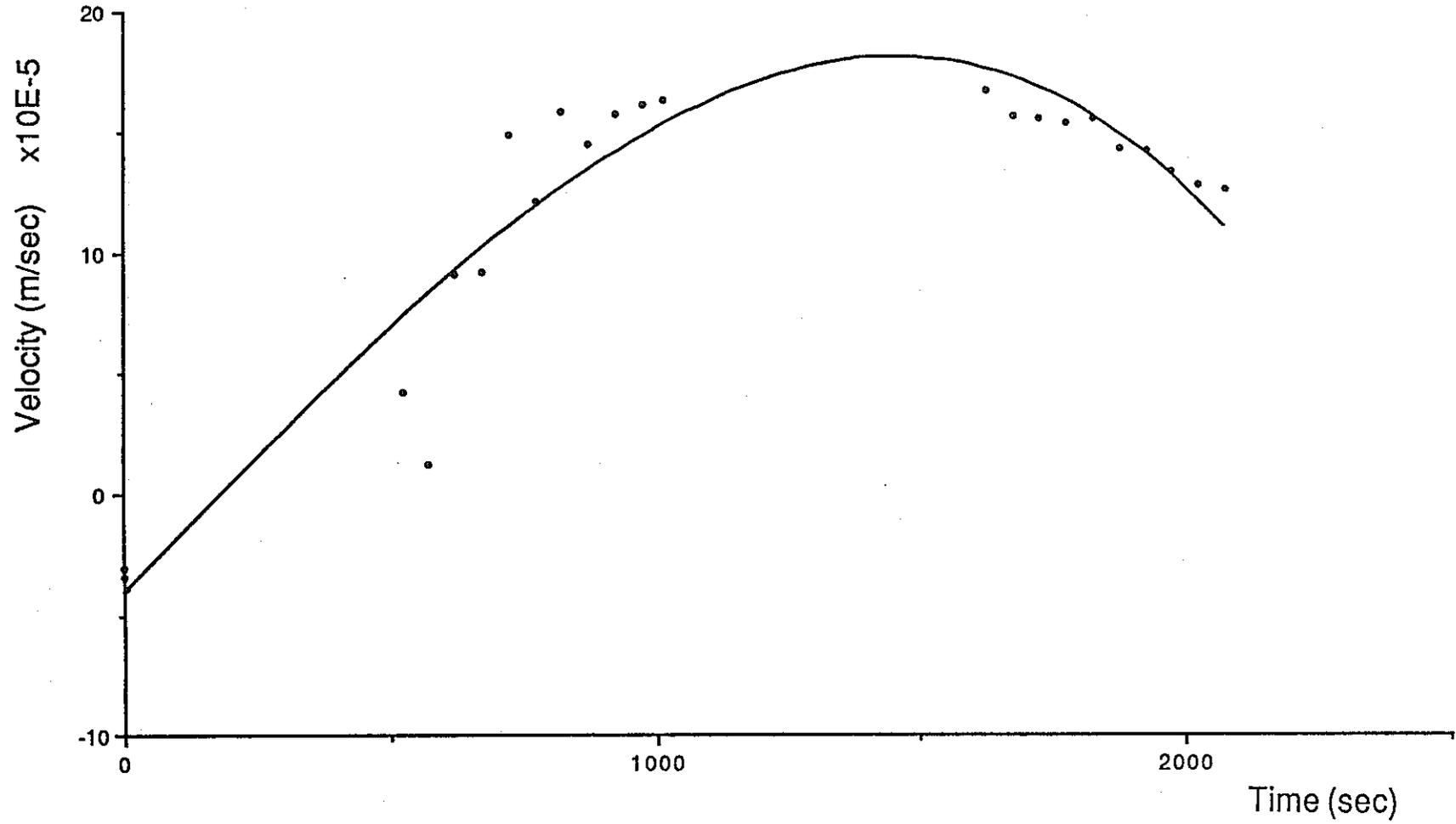


Fig. 10 Average Velocity at Outlet