

ラマンレーザー冷却方式の検討

1992年4月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

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下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki,
319-11, Japan)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1992

ラマンレーザー冷却方式の検討

萩原 正義 宮本 泰明 長谷川 信

要 旨

目 的

理研式分子レーザー法では、ウラン濃縮に必要な $16\mu\text{m}$ 光をTEA炭酸ガスレーザーとパラ水素ラマンレーザーの構成で得ている。特に、ラマンレーザーについては、変換閾値を低くし、変換効率を上げるために液体窒素冷却を採用した。これにより濃縮試験に必要なエネルギーを達成できたが、一方、液体窒素冷却による別の問題が発生したため、問題の改善策の検討を行った。

要 旨

液体窒素冷却方式によるラマンレーザーの低温化において発生した問題の改善策としてブライン冷却方式を検討した。その結果を以下に示す。

- (1) ラマンレーザー特性において、
 - ①ラマン変換効率は設計パス回数の37パスとすれば飽和変換領域に達すること。
 - ②銅ミラーの変形量は液体窒素冷却に比べ、上下で約1/5、表裏面で約1/3となり、マルチパス形成上、問題はないと考えられること。
 - ③ブライン冷却にした場合、ガス流動速度は液体窒素冷却の約半分以下と推測される他、ミラー穴付近の複雑な流動も解消されることが期待されるため、ビームの揺れは現状より改善されると思われること。
- (2) ブライン循環システムについて、
 - ①噴流方式が最適と思われること。
 - ②噴出速度を 5m/s 程度とすれば、流れによる攪拌効果が期待できること。
 - ③冷媒としてメタノール(60wt%)で充分冷却可能であること。
 - ④冷媒及び冷凍機に対して、官庁申請等を必要としないこと。

目 次

1. 目的	1
2. 概要	2
3. ブライン冷却方式によるラマンレーザーシステム	3
4. ブライン冷凍機を導入した場合のラマンレーザー特性	4
5. ブライン冷凍機(-50℃)を導入した場合の循環システム	6
6. まとめ	10

1. 目的

理研式分子レーザー法ウラン濃縮工学実証試験装置に用いるレーザーシステムは、ウラン濃縮に必要な16 μm 光をTEA炭酸ガスレーザー及びパラ水素ラマンレーザーの構成で得ている。特にラマンレーザーは変換閾値を低くし、効率的に10 μm 光を16 μm 光に変換するために、液体窒素冷却による低温型の構造としている。これにより、濃縮試験において必要なエネルギーを達成できたが、一方、液体窒素冷却による別の問題が発生した。

そこで、本報告書においては、液体窒素冷却により発生した問題の改善策として、ブライン冷却方式の検討を行った。

2. 概要

ラマンレーザーによるラマン変換（16 μ m光）エネルギーは、液体窒素による冷却方式によって、解離用及び励起用炭酸ガスレーザー光とも、濃縮試験に必要なエネルギーを達成するに至った。しかし、液体窒素による冷却のため、以下に示す問題が残った。

- ① ラマンレーザーを液体窒素冷却で定常温度にするためには、約3日間程度の時間を必要とし、濃縮試験工程上クリティカルとなっている。
- ② ラマンレーザーに液体窒素を供給する方法として、励起用及び解離用ともそれぞれ液体窒素タンク（175 ℓ /基）3基を用いて実施している。しかし、3基の同時供給によっても、最長6時間程度しかもたないため、液体窒素をラマンレーザーに連続供給するためには、6:00～24:00の2交替作業を必要とする。
- ③ 液体窒素冷却方式は、ラマンミラー（銅ミラー）の不規則な変形により設計条件であるパス回数の設定ができない。

以上の問題点を解決する対策として、-50 $^{\circ}$ Cブライン冷却によるラマンレーザーの運転について検討した。

3. ブライン冷却方式によるラマンレーザーシステム

現在検討しているブライン冷却方式のシステムを図1に示す。

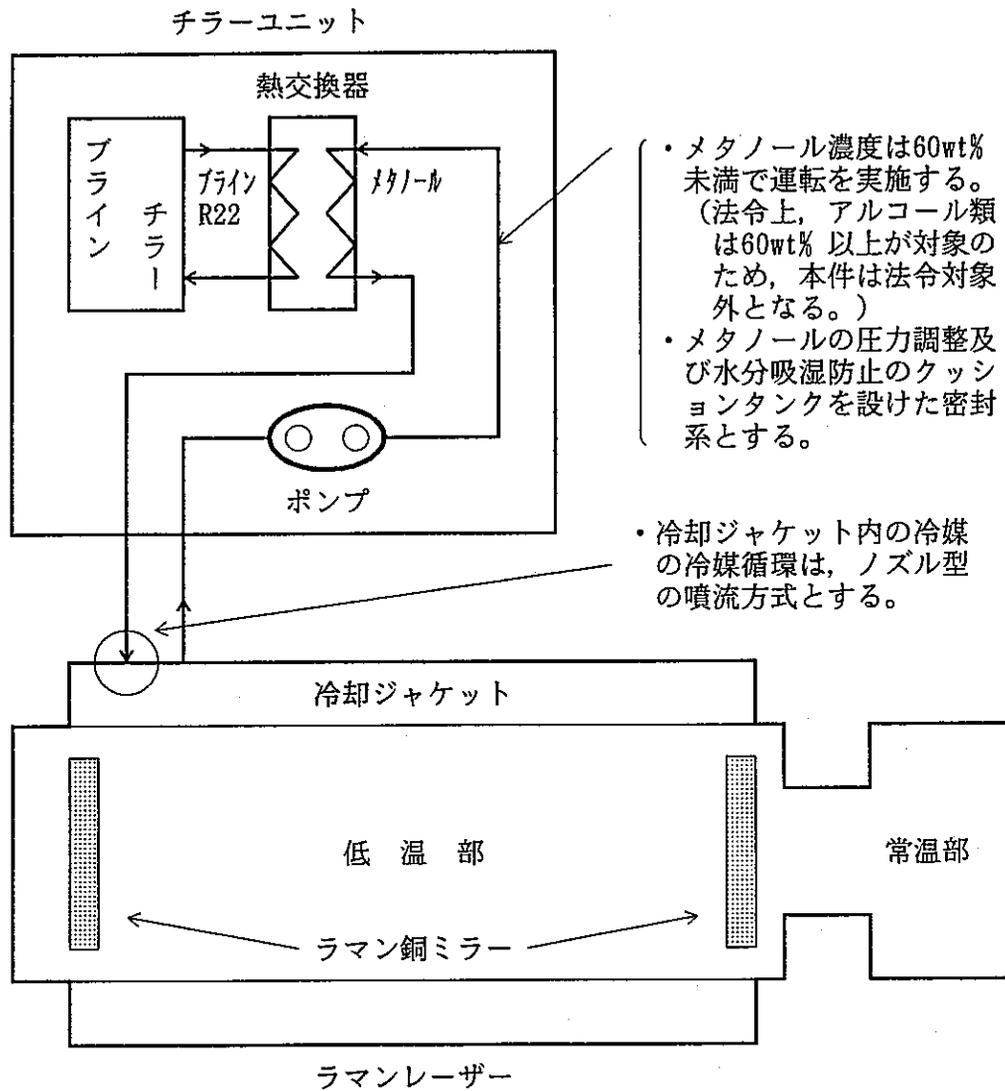


図1 ブライン冷却によるラマンレーザーシステムの構成

4. ブライン冷凍機を導入した場合のラマンレーザー特性

(1) ラマン変換効率¹⁾

冷媒を -50°C としてラマンレーザーを運転した場合の変換特性を検討した。液体窒素温度(-196°C)、ブライン温度(-50°C)及び室温(27°C)でのラマン変換過程のsteady-state近似シミュレーション結果を図2に示す。

液体窒素冷却条件では、ミラー変形のために当初の設計パス回数の38パスを20パスに変更しているが、この図から20パスでもラマン変換の飽和領域に達していることがわかる。一方、今回検討したブライン(-50°C)冷却条件でも、37パスとすれば、十分に飽和変換領域に達することがわかる。

(2) 銅ミラーの変形量

液体窒素冷却によるラマンセル内の水素ガス温度分布とブライン冷却による水素ガス温度分布をPhoenicsコードを用いてシミュレーション解析した²⁾。その結果を図3及び図4に示す。

図より、液体窒素で冷却した場合の銅ミラー上下の温度差は約 50°C 、又、ミラー表裏面の温度差は最大約 50°C となり、これが不規則なミラー変形を生じさせる原因となっている。これに対して、ブライン冷却した場合には、銅ミラー上下の温度差は約 10°C 、表裏面の温度差は最大約 20°C となる。以上の結果より、ブライン冷却条件における銅ミラーの変形量は、液体窒素冷却条件に対して上下で約 $1/5$ 、表裏面で約 $1/3$ となるため、マルチパスのアライメントは許容範囲で調整可能と判断できる。

上記、Phoenicsコードを用いたラマンセル内熱伝導解析結果に基づき、構造解析コードFINASにより、ラマン銅ミラーの弾性熱応力解析を行った³⁾。図5及び図6のように3次元のメッシュ分割を行い、各要素メッシュに働く応力により銅ミラー全体の変形量を求めた。図7に示すミラー断面の各ラインに着目し、そのラインにおけるミラーの変形量に関する解析結果を図8～図19に示した。これらの図から明らかなように、ミラーの変形量はモデル1で最大 $0.59 \times 10^{-2}\text{mm}$ 、モデル2で最大 $2.4 \times 10^{-2}\text{mm}$ であることが分かり、この値はマルチパスを形成する上で十分許容できる値であり、特に問題はないと考えられる。この件に関する詳細な検討は別途報告を行う予定である。

また、液体窒素冷却条件で観測されたスポット形状をミラー変形に関連づけてシミュレーション解析した結果、ミラー曲率半径及びミラー上部の部分的曲率半径の変化の両方がスポット形状

に寄与していることがわかり、上記解析結果を裏付けている。

(3) ビームの揺れ量

① 液体窒素冷却条件下での揺れ量の評価¹⁾

液体窒素冷却下でラマン変換する励起用及び解離用の2つのパルスレーザー光がガウス分布を持つと仮定して照射効率 η を確率的な手法（モンテカルロ法）によって評価した。計算モデルを図20に示す。照射効率 η をビームの揺れ度合い（揺れ半径（ R_r ）／ビーム半径（ r_B ））の関数として得た計算結果を図21に示す。

測定された揺れ半径 R_r は、ビーム径の1/1.5程度であるため、80～90%の照射効率が得られ、ビームの揺れ量としては問題とはならない。

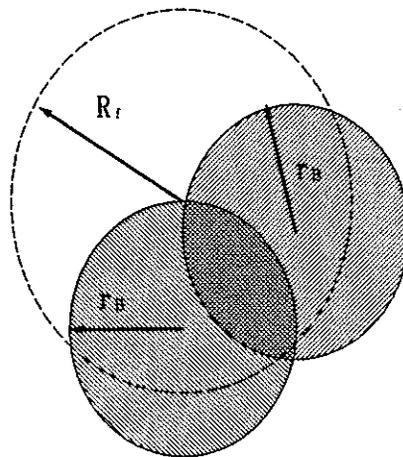


図20 2つのビームの揺れと重なりモデル

② ブライン冷却条件下での揺れ量の評価²⁾

(2)と同様に、Phoenicsコードを用いてラマンセル内の水素ガスの流れのシミュレーション解析を実施した。その結果を図22及び図23に示す。

計算結果は、入射ラマンミラーの入出射孔付近に生ずる不均一なガス流れ及びミラー表面上に発生している対流が液体窒素冷却におけるビームの揺れの発生原因であることを示している。一方、ブライン冷却のノズル通過速度及びミラー表面の対流速度は、液体窒素冷却時の約半分以下となること。また、ミラー穴付近の複雑な流れも解消されることから、液体窒素冷却条件よりもビームの揺れは少ないものと判断できる。

5. ブライン冷凍機 (-50 °C) を導入した場合の循環システム

(1) ラマンセルジャケット内のブライン循環方法

メーカーにラマンセルを輸送して構造変更をする等の大幅な改造は難しい。このため、ラマンセルを設置してあるL棟内で実施する方法を検討した。その結果を表1に示す。表から判断してケース3の噴流方式が最適と考えられる。

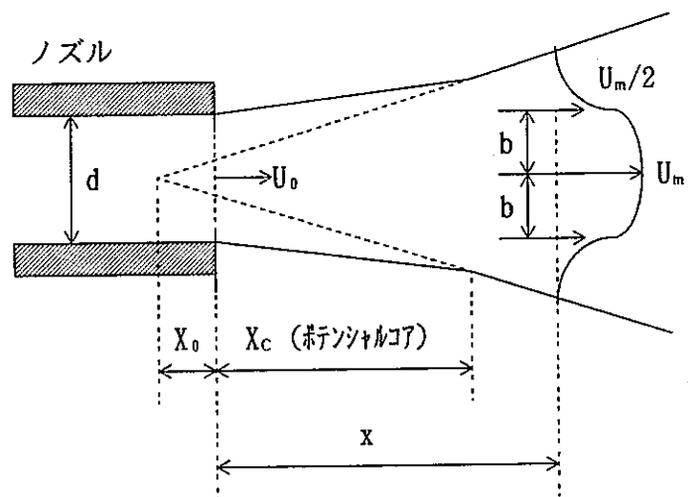
(2) 噴流方式の評価

噴流方式は、ラマンセルジャケット内にテフロンチューブを挿入することなしに、入口ノズルから冷媒を噴流状にして、その流れで攪拌効果を得る方式である。噴流による効果は、ジャケット長さ約3m前方まで効果があれば、本方式を採用することが可能であると判断できる。

ジャケット内の流れは複雑で解析が難しいため、壁面を考慮しない自由噴流及び壁面に沿って流れる壁面噴流の双方について検討し、両方が成立する条件を求める。

① 自由噴流⁵⁾

自由噴流の計算モデルを図24に示す。

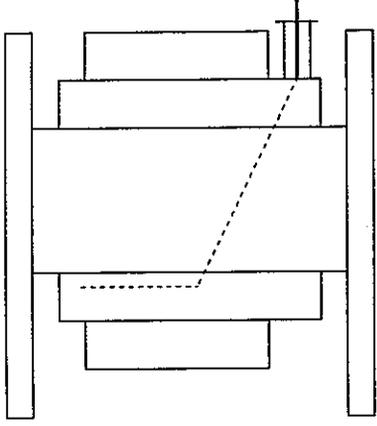
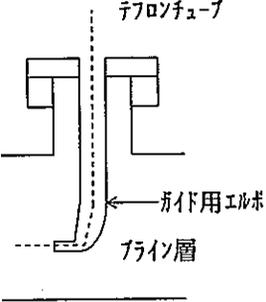
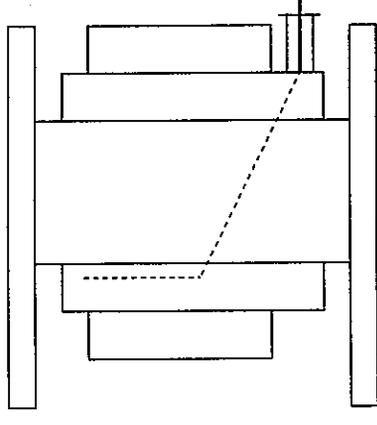
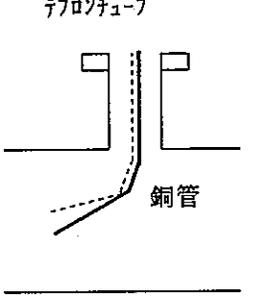
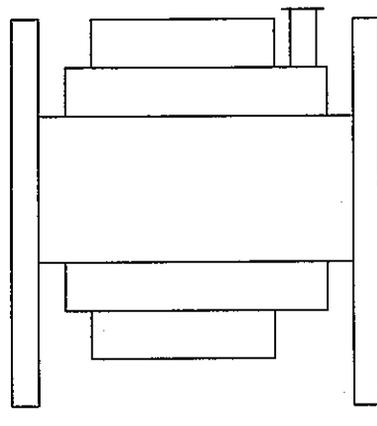


d ; ノズル径
 U_0 ; ノズル噴出速度
 X_0 ; 仮想原点
 X_c ; ポテンシャル領域
 X ; ノズル出口からの距離
 U_m ; 距離 X における最大速度
 b ; 半値幅

図24 自由噴流計算モデル

2次元自由噴流において、ノズルからの距離 x における流れは以下の式となる。

表 1. 冷却ジャケットへの冷媒充填方式

	組立図	方法	備考	評価
1	<p>テフロンチューブ挿入（入口ガイド方式）</p> 	<p>テフロンチューブ</p>  <p>ガイド用エルボ ブライン層</p> <p>テフロンチューブ</p> <p>入口ノズル部にガイド用エルボを設置し、テフロンチューブの挿入方向を安定させる。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・テフロンチューブの到達位置は、途中まではファイバースコープ等で確認可能であるが、最終位置の確認は不可能。 ・テフロンチューブの先端の固定ができないためブラインの供給中にチューブが移動する恐れがある。 	△
2	<p>テフロンチューブ挿入（銅管ガイド方式）</p> 	<p>テフロンチューブ</p>  <p>銅管</p> <p>テフロンチューブ</p> <p>テフロンチューブのガイドとして、リスクを取付けた銅管を挿入しテフロンチューブを挿入する。</p>	同上	△
3	<p>噴流方式</p> 	 <p>噴射ノズル</p> <p>テフロンチューブ</p> <p>入口部に噴射ノズルを取付ける。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・入口部に固定ノズルを取付けるだけで簡単。 ・噴射流れがテフロンチューブの代替えとなるためチューブの挿入が不要。 ・冷媒の供給圧力、供給量が若干大きくなる。 0.5 kgf/m² 15 ℓ/min 	○

$$\frac{U_m}{U_0} = 2.52 \cdot \sqrt{\lambda} \cdot \left(\frac{X-X_0}{d} \right)^{-1/2}$$

ノズル径 $d=8\text{mm}$ 、 $\lambda=0.85$ とするとノズル部から3000mmにおける流束は以下となる。

$$\frac{U_m}{U_0} = 0.12$$

② 壁面噴流⁵⁾

2次元壁面噴流では、 $(x-x_0)/d > 20$ において以下の式で表される。

$$\frac{U_m}{U_0} = 3.50 \cdot \left(\frac{X-X_0}{d} \right)^{-1/2}$$

①と同様な条件では流束は以下となる。

$$\frac{U_m}{U_0} = 0.18$$

③ 結論

①、②の検討結果より、噴出速度 $U_0 = 5\text{m/s}$ 程度であれば、セル末端における最大流速は $U_m = 0.5\text{m/s}$ 以上となり流れによる攪拌効果が期待できる。

(3) 二次冷媒の検討

① 冷媒の検討

-50℃で使用できる冷媒は、ラマンセルが一部ベローで接続する構造であるため、(a)ベロー部に圧力が掛からないこと、(b)粘度が低いこと、(c)配管材質に対して腐食性を持たないこと等の条件が必要である。

表2より、上記条件の冷媒としてはメタノールが一番良く、-50℃での使用であれば濃度60wt%程度で冷却可能である。納入及び使用実績も、化学メーカー等にある。

表 2. 冷媒の特性

冷 媒 名	凝固点 (°C)	粘 度 (cp)	評 価
塩化カルシウム(30wt%)	-51.0	27.8	腐食性のため使用不可
ナイブライン	-52.0	600	粘度が高いため使用不可
メタノール (100wt%)	-97.0	約 3	
メタノール (60wt%)	約-70	約25	
ブライン(R-11)	-111.1	1.1	室温状態で高圧となるため、 ペロー耐圧上使用不可

② メタノールの適用法令

メタノール貯蔵量 200ℓ以上で危険物貯蔵設備となるが、濃度が60wt%以下であれば、法令は適用されない。

また、冷媒の循環系については密封系とするため、取扱も安全である。

(4) ブライン冷凍機の適用法令

本件におけるブライン冷凍機は、冷凍能力が4.87トであるため、高圧ガス取締り法及び冷凍保安規則の官庁申請等を行う必要はない。

6. まとめ

以上の検討結果をまとめると、下記となる。

(1) ブライン冷凍機を導入した場合のラマンレーザー特性

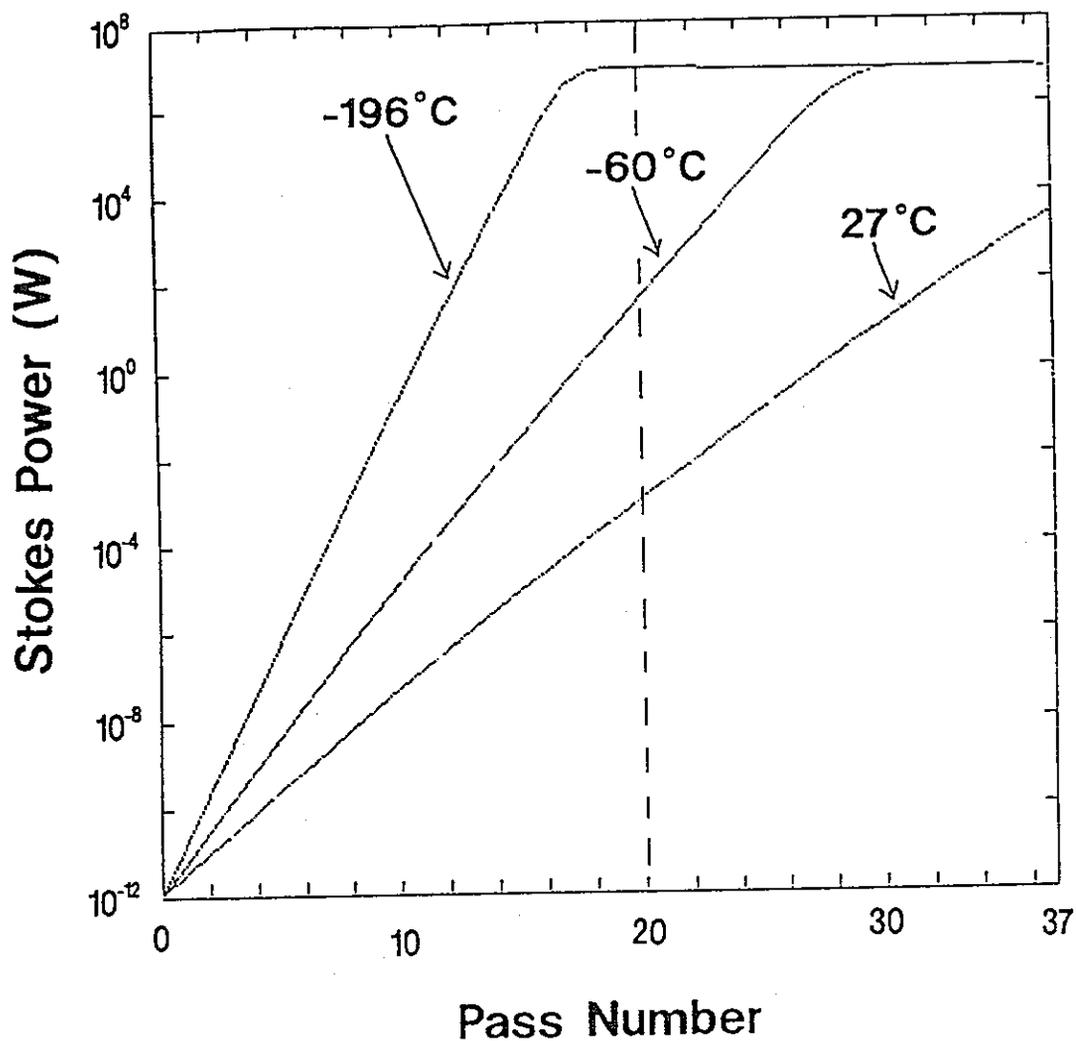
- ① ラマン変換効率は、ブライン冷却条件でも、設計パス回数の37パスとすれば、十分に飽和変換領域に達する。
- ② 銅ミラーの変形量は、液体窒素冷却に比べ、上下で約1/5、表裏面で約1/3となり、ミラーの変形量はモデル1で最大 0.59×10^{-2} mm、モデル2で 2.4×10^{-2} mmであることより、これらから、マルチパスを形成する上で問題はないと考えられる。
- ③ ビームの揺れ半径は、液体窒素冷却時でビーム径の1/1.5程度であるため、80~90%の照射効率が得られており、これをブライン冷却にした場合、流動速度は約半分以下と推測されるほか、ミラー穴付近の複雑な流動も解消されることが期待されるため、ビームの揺れは現状より改善されると思われる。

(2) ブライン冷凍機を導入した場合の循環システム

- ① ラマンセルジャケット内のブライン循環方法として、噴流方式が最適と考えられる。
- ② 噴流方式において、噴出速度が5m/s程度であれば、セル末端においても、最大流速は0.5m/s以上となり、流れによる攪拌効果が期待できる。
- ③ 冷媒としてメタノール(60wt%)の使用で十分冷却可能であり、取扱いも密封系により安全である。
- ④ 冷媒及び冷凍機に対して、法令は適用範囲外であるため官庁申請等は必要としない。

[参考文献]

- 1) 宮本他、「パラ水素ラマンレーザーの基礎特性」89BN-3100E-0010E
- 2) 「液体チッソ冷却容器の熱伝導解析」91ZJ-3189E-0010X
- 3) 「ブライン冷却容器の熱伝導解析 (2)弾性熱応力解析」91ZJ-3189E-0030X
- 4) 矢戸、「ビームの揺れに起因する照射効率の低下に関する検討」90BN-3140E-0020E
- 5) 日本機械学会編、「機械工学便覧」、A5、流体工学



Input Pump Energy : 3.5 (J)

Input Pump Pulwidth : 140 (ns)

Pump Wavelength : 1.017×10^{-5} (m)

図2 冷却条件の違いによるパス回数とラマン変換の関係

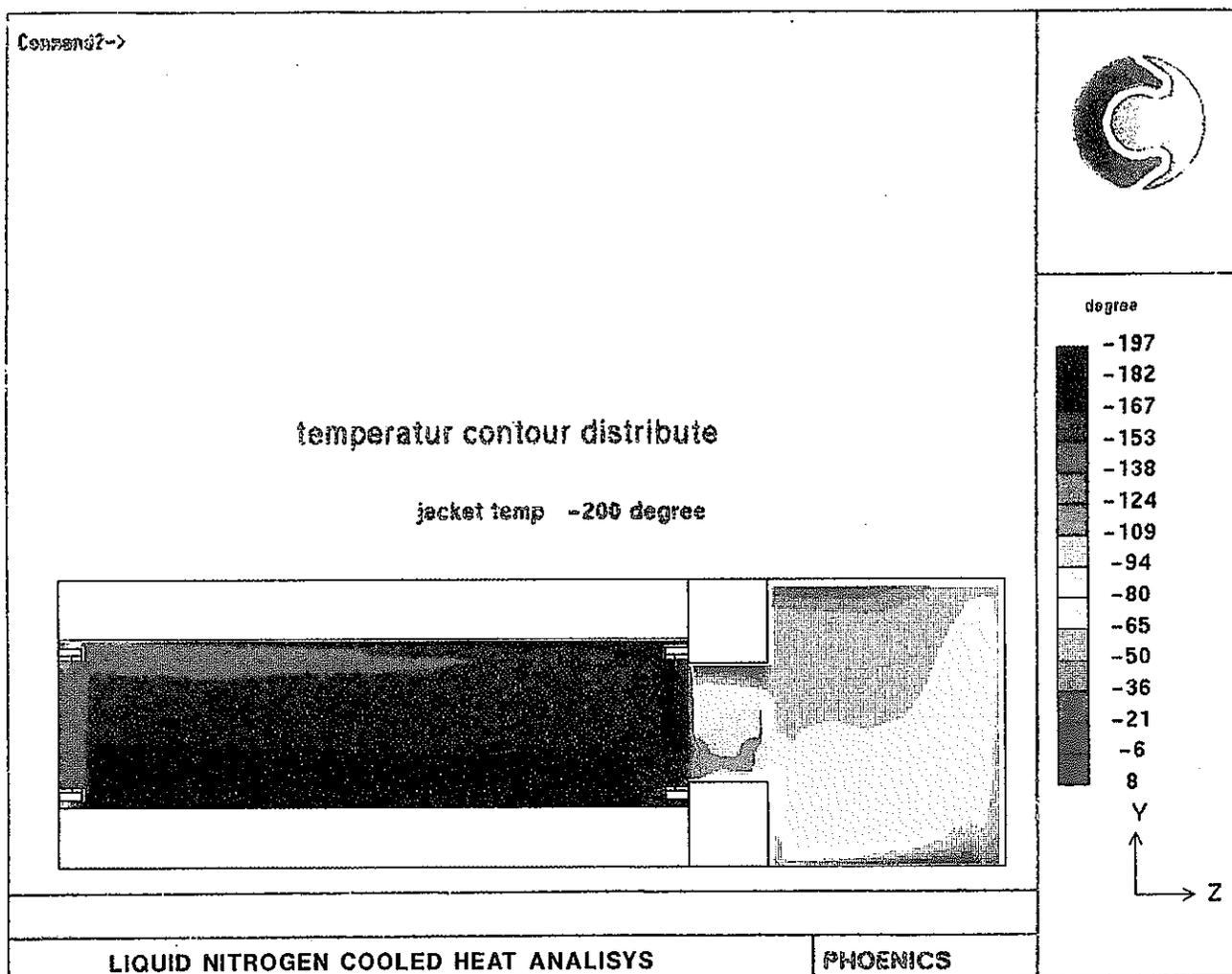


図3 液体窒素冷却（-200℃）条件下での
ラマンセル内水素ガス温度分布

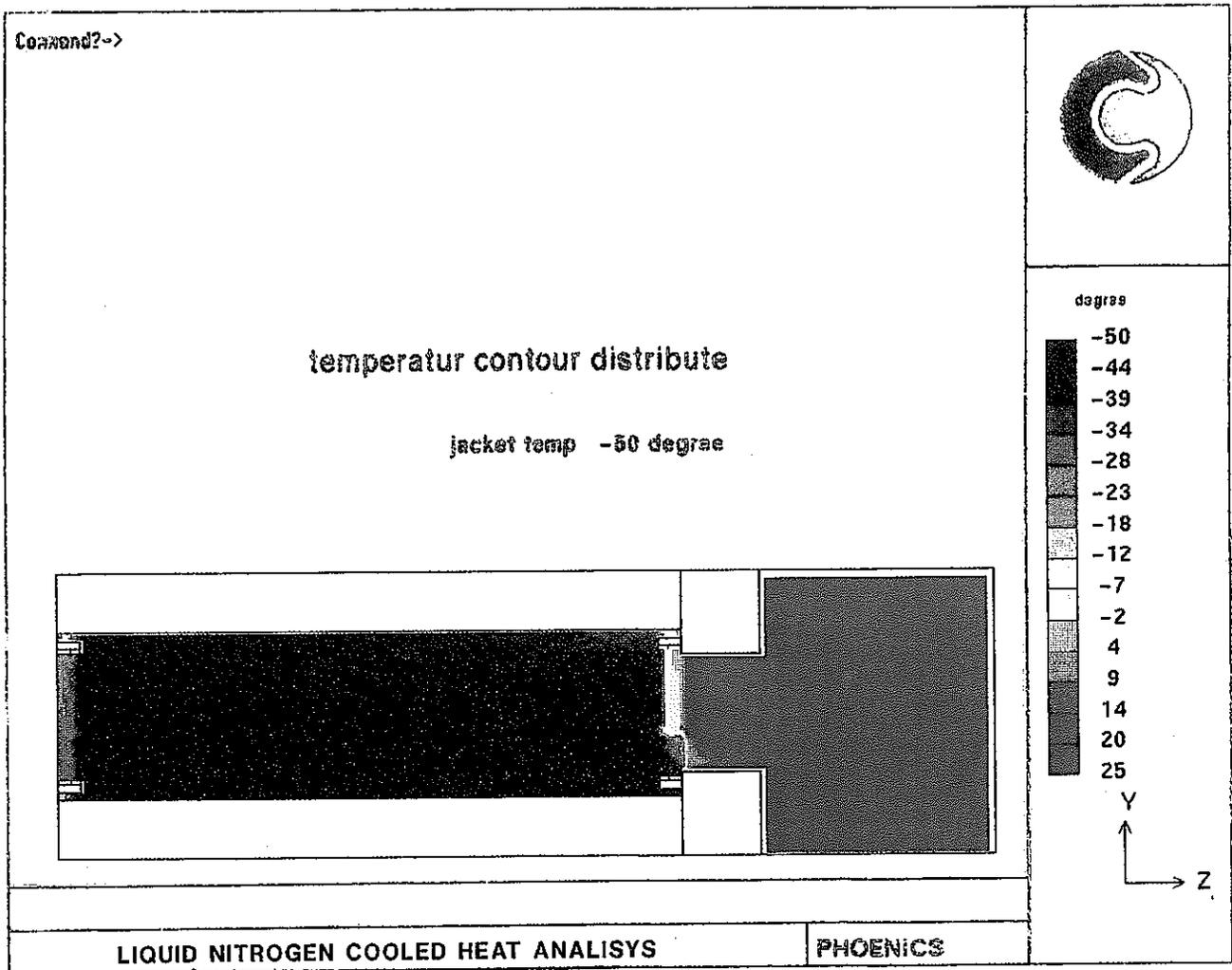


図4 プライン冷却（-50℃）条件下での
ラマンセル内水素ガス温度分布

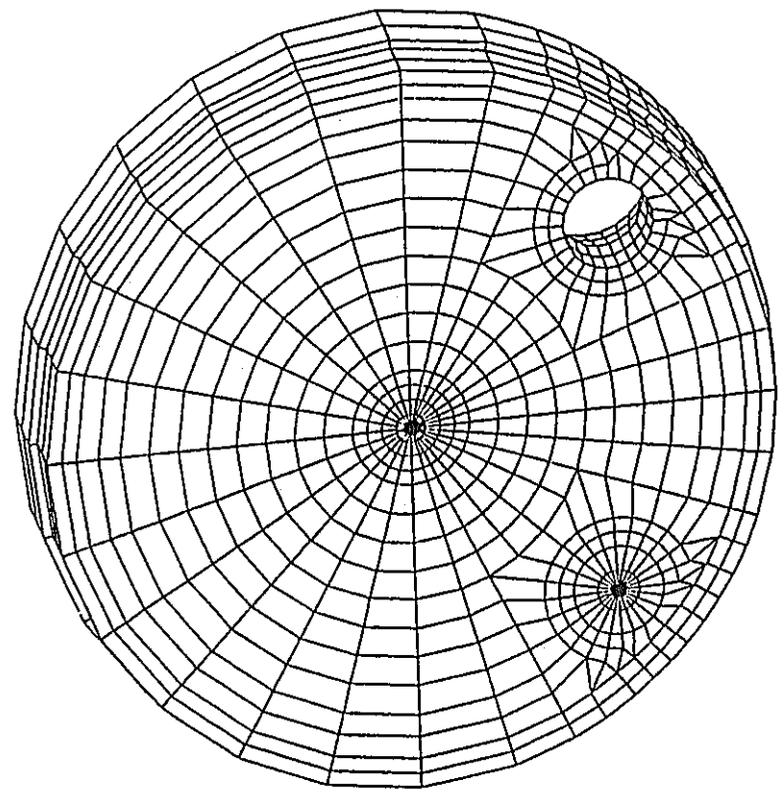


図5 モデル1 全体図 (CURVED FACE)

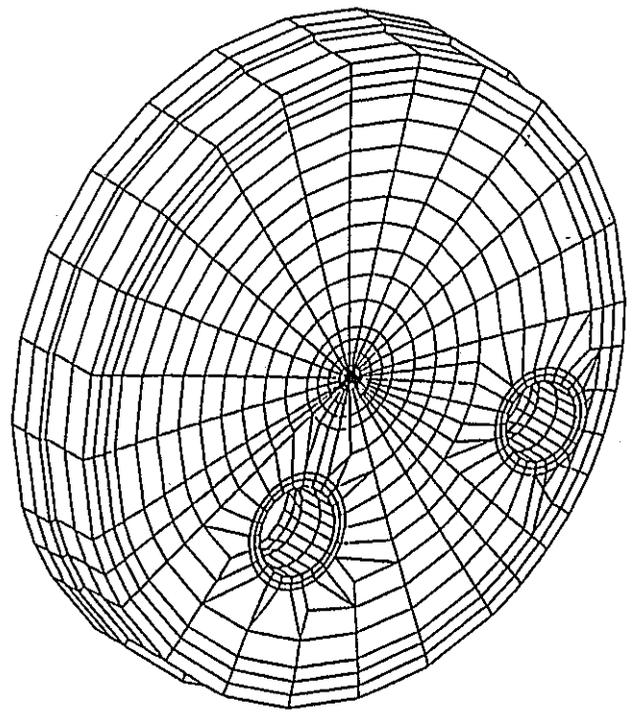
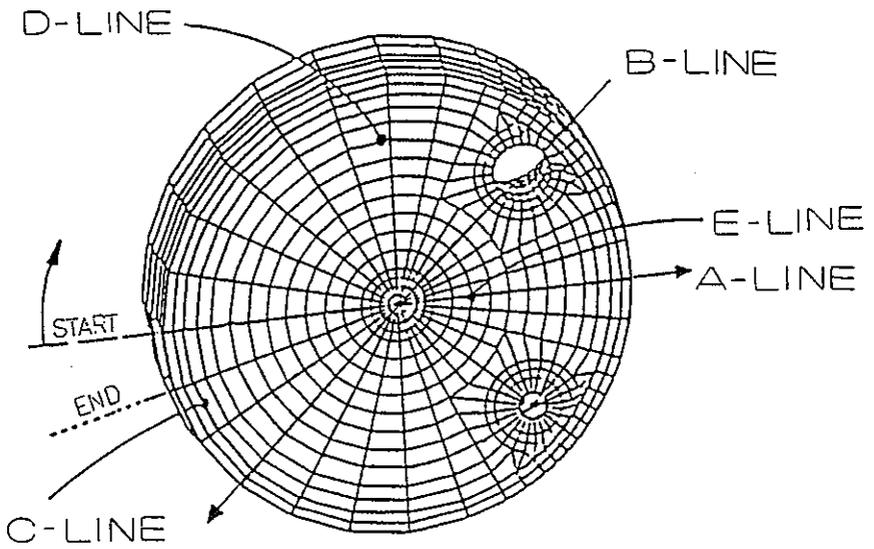
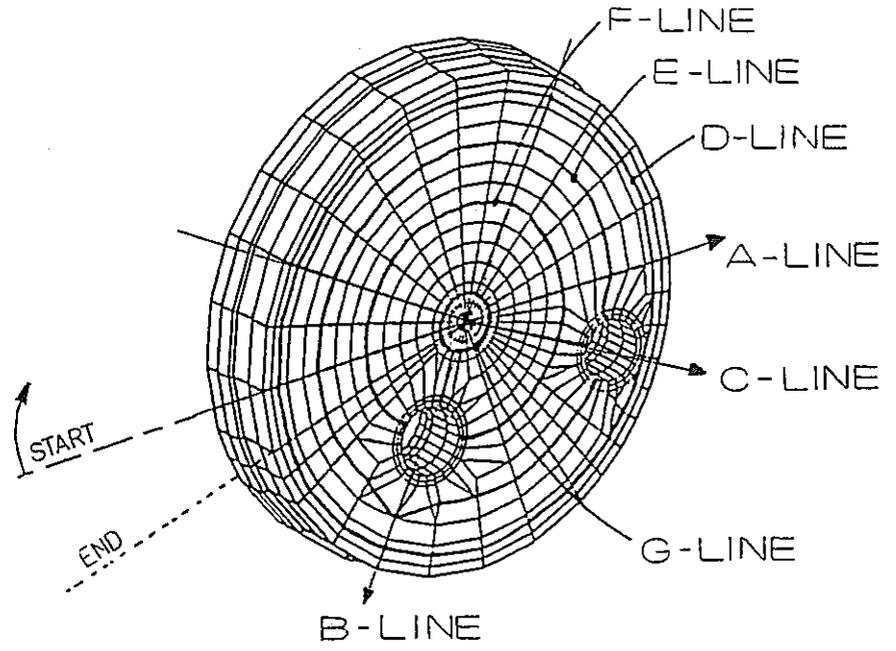


図 6 モデル 2 全体図 (CURVED FACE)



モデル1 着目ライン



モデル2 着目ライン

図7 着目ライン図

FINAS
STEP NO. 2

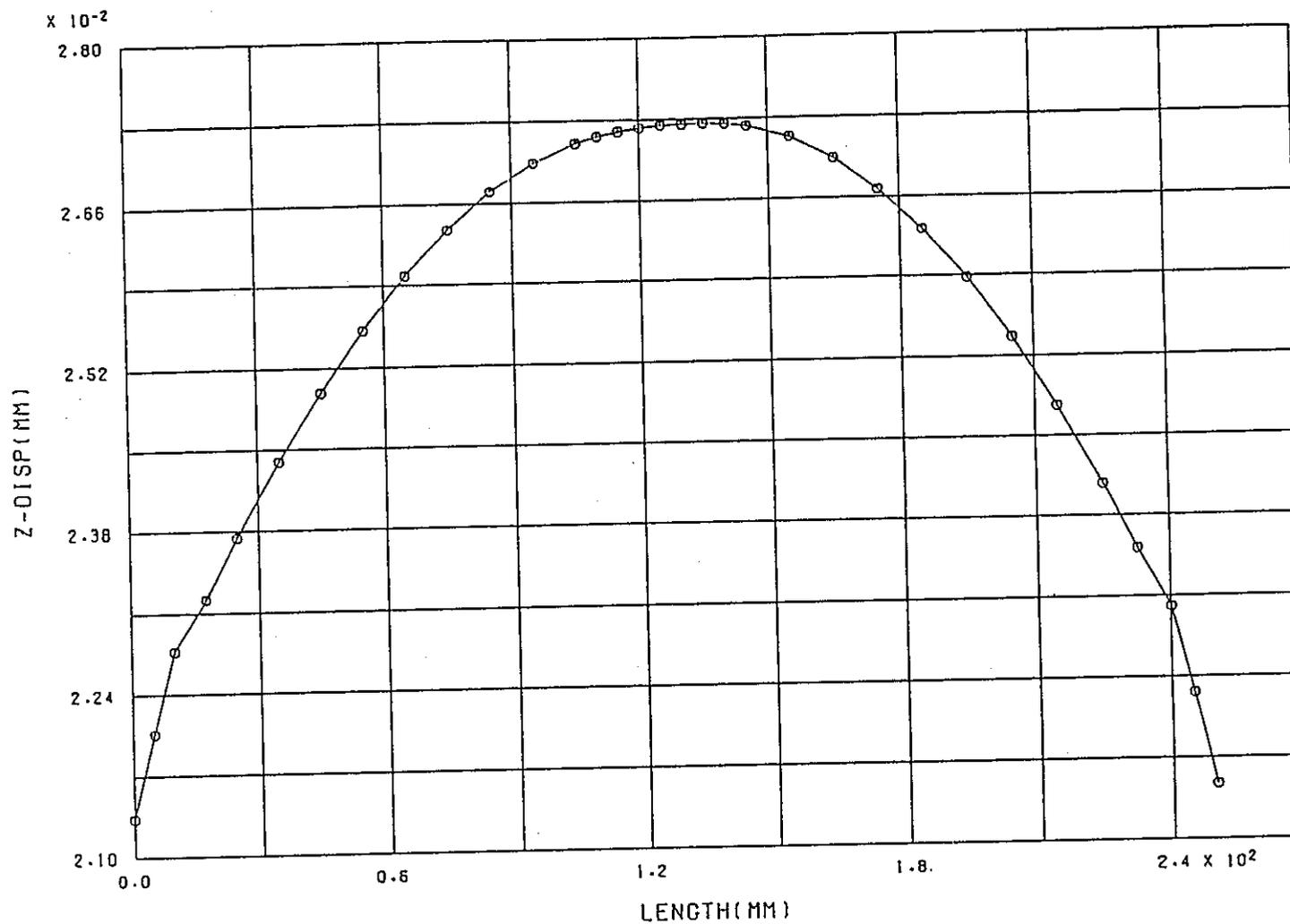
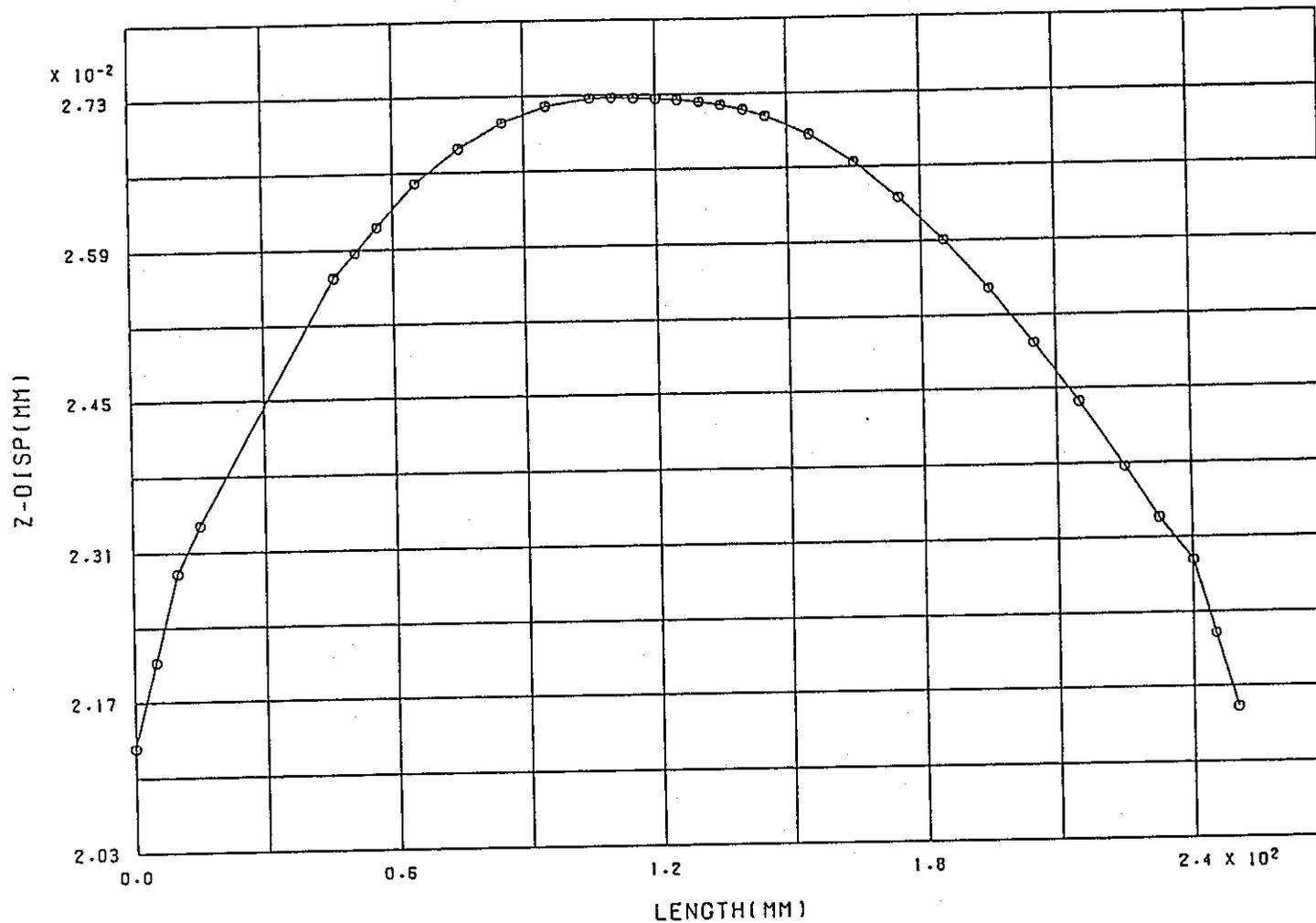


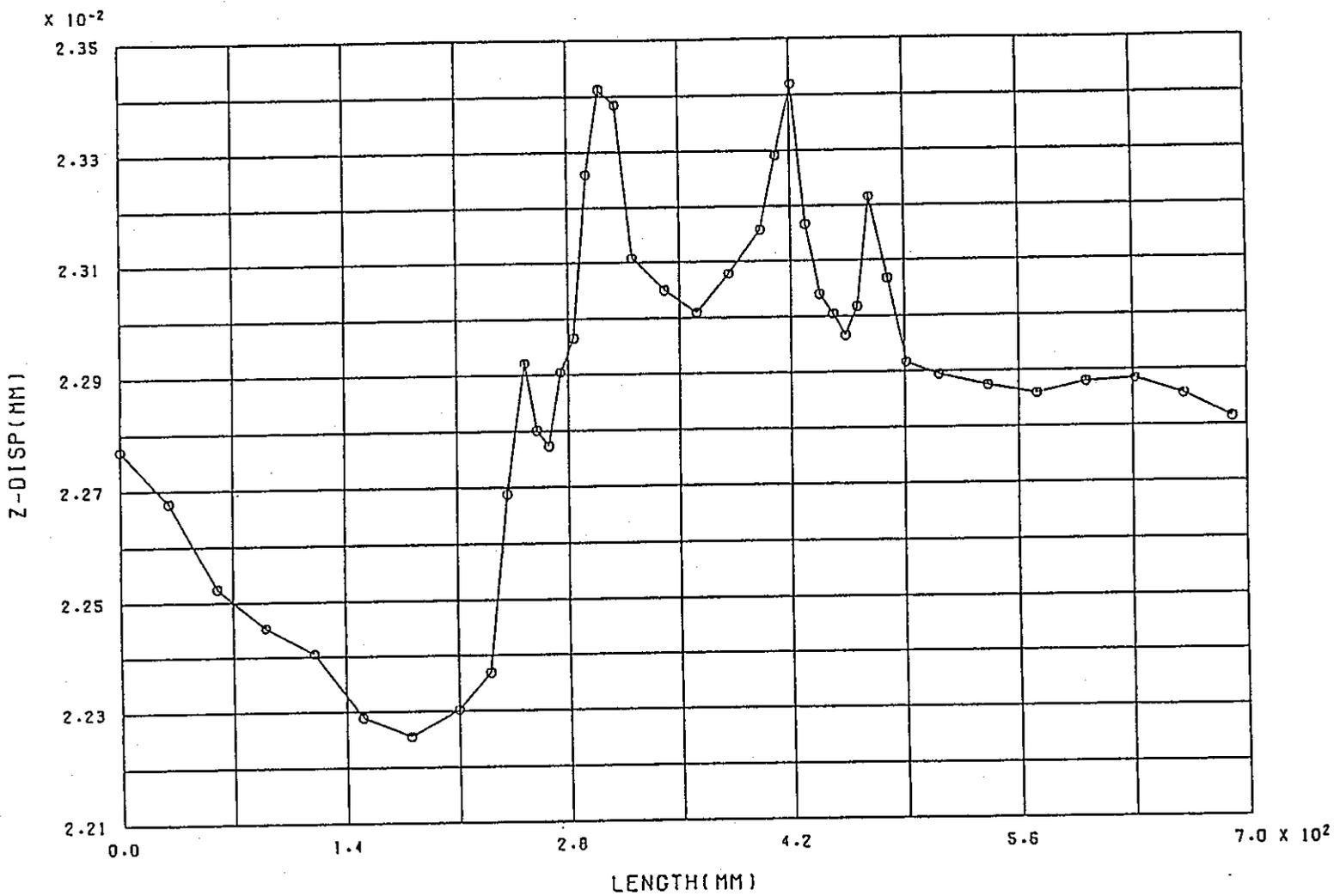
图 8 MODEL-1 A-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2



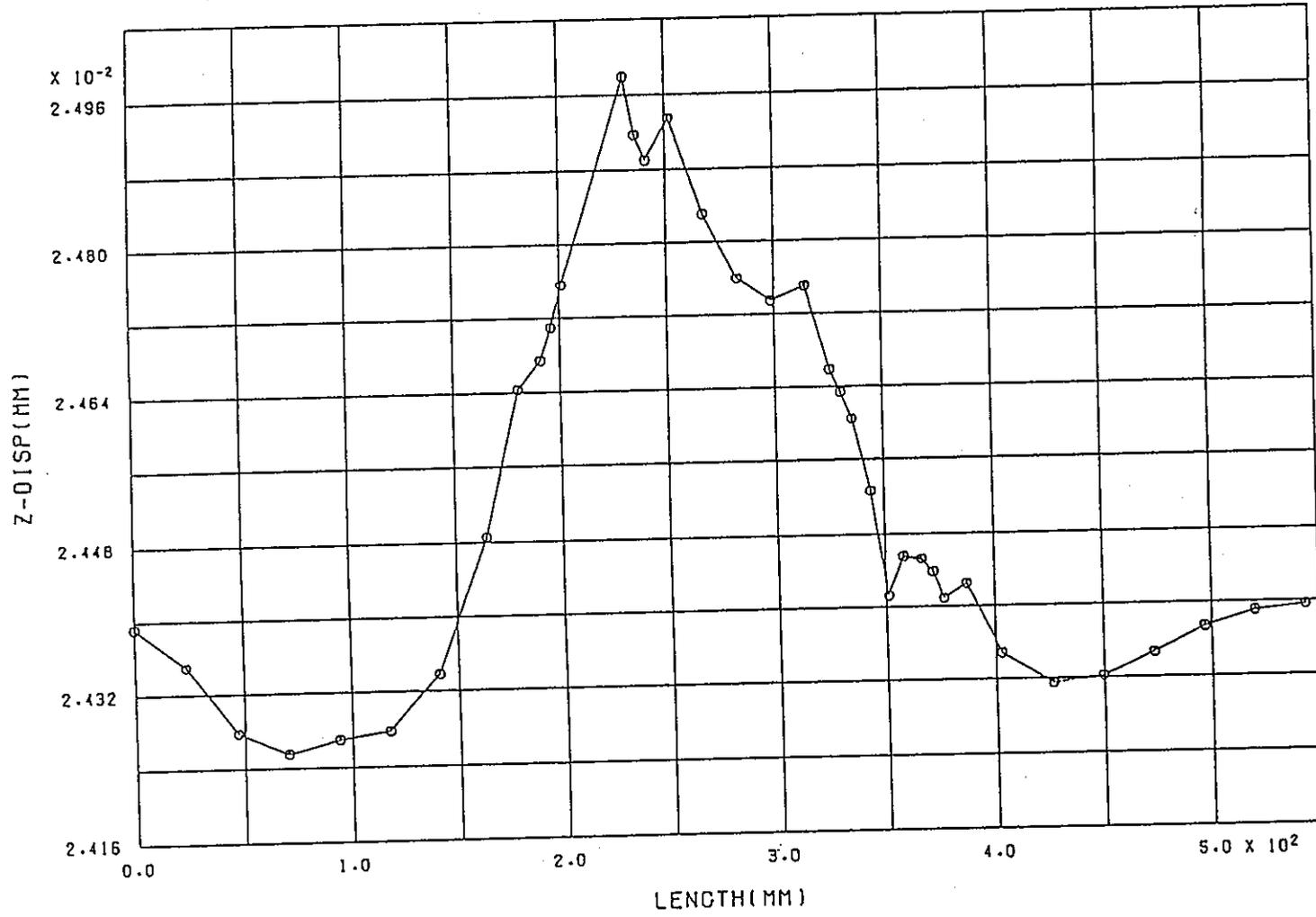
9 MODEL-1 B-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2



10 MODEL-1 C-LINE (CURVED FACE)

FINRS
STEP NO. 2



☒ 1 1 MODEL-1 O-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2

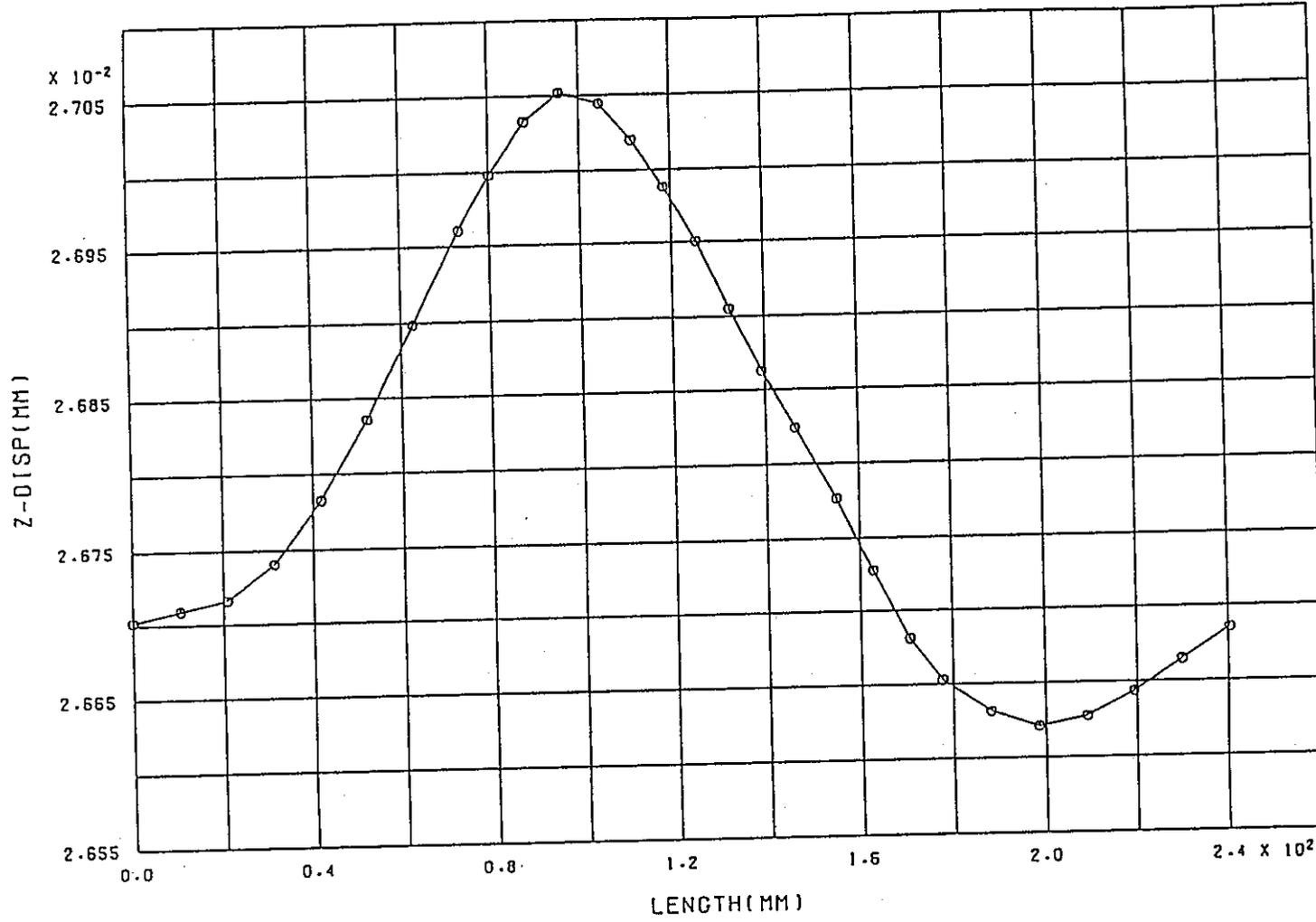


图 1 2 MODEL-1 E-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2

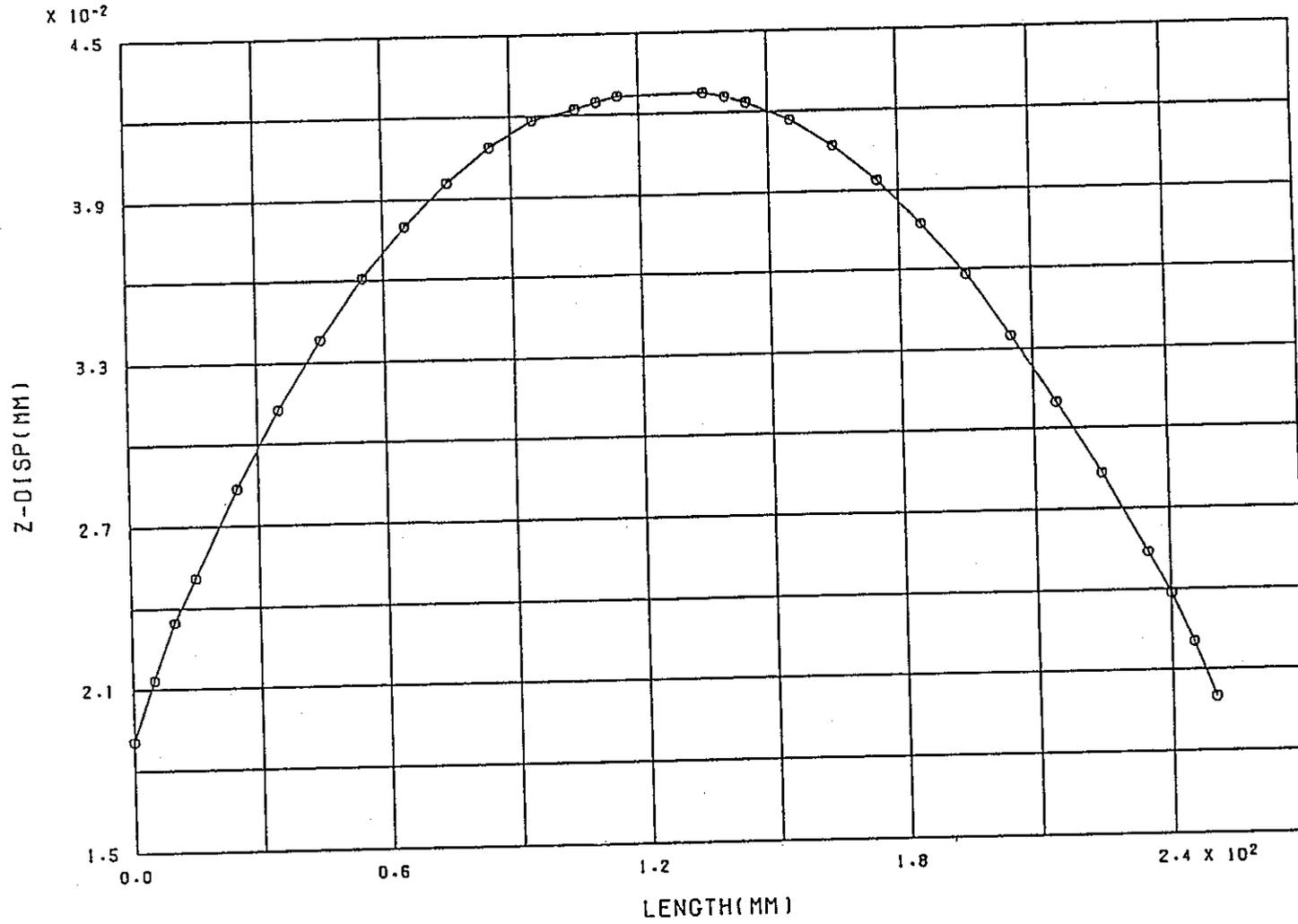


图 1 3 MODEL-2 A-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2

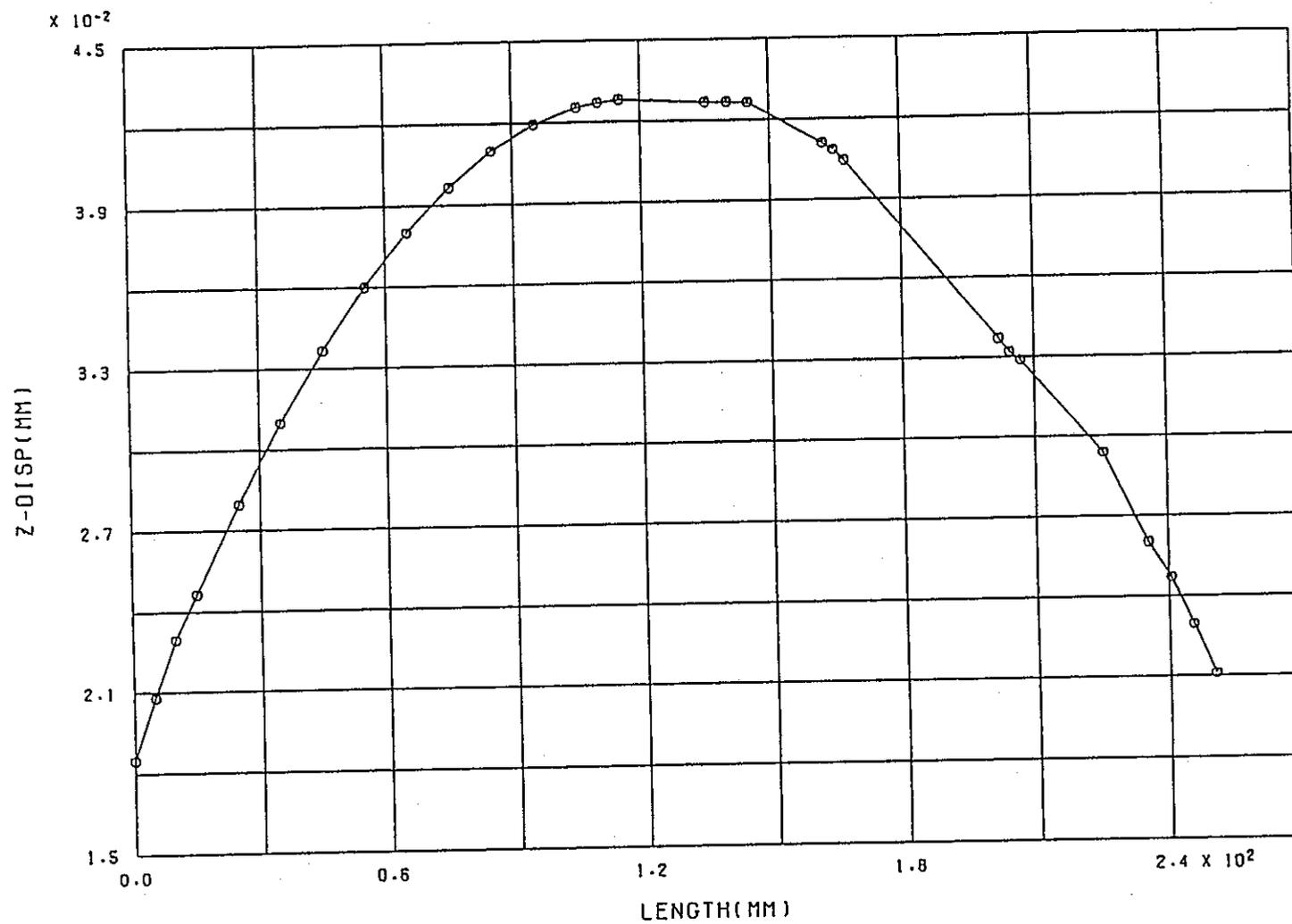


图 1 4 MODEL-2 B-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2

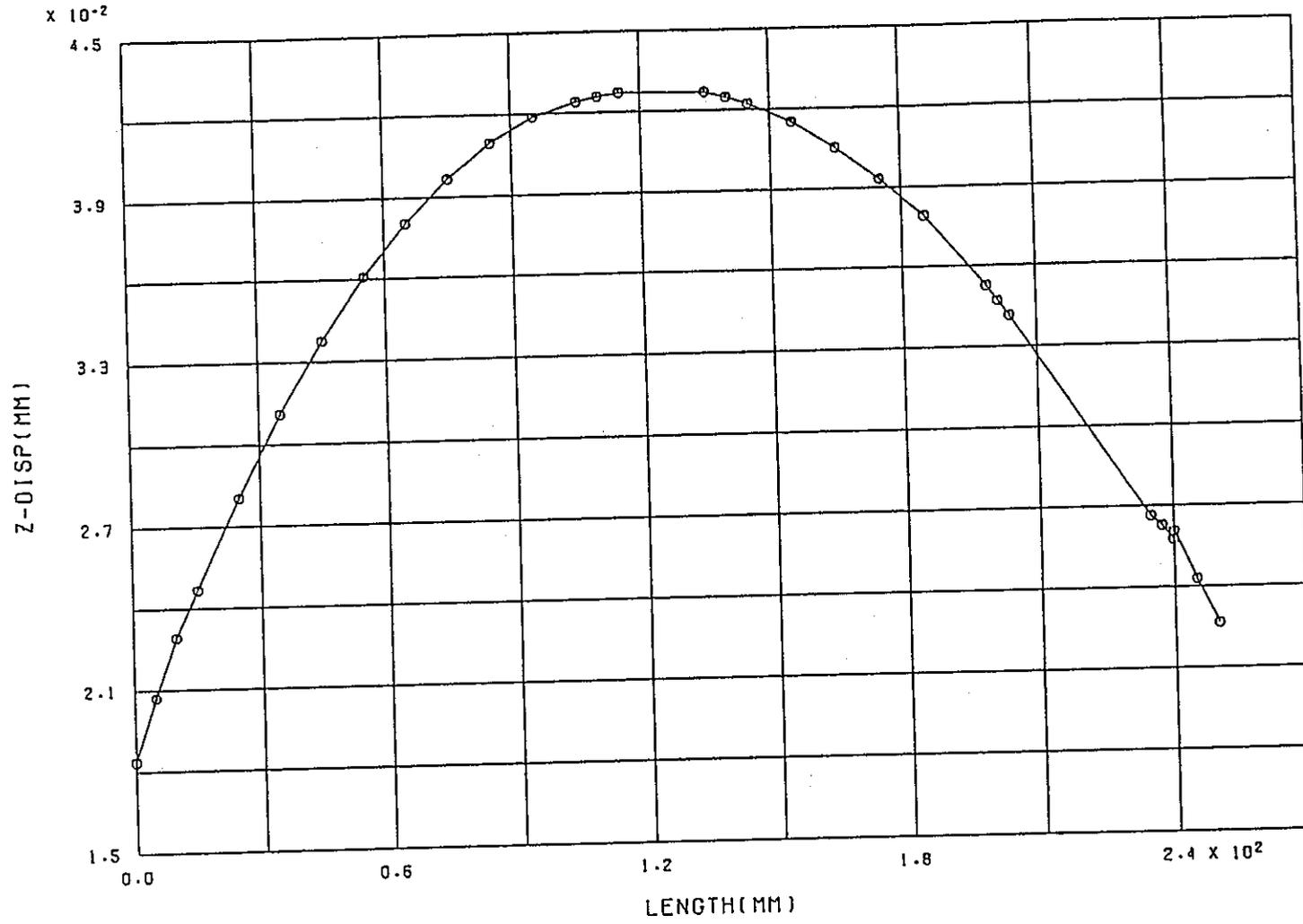


图 15 MODEL-2 C-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2

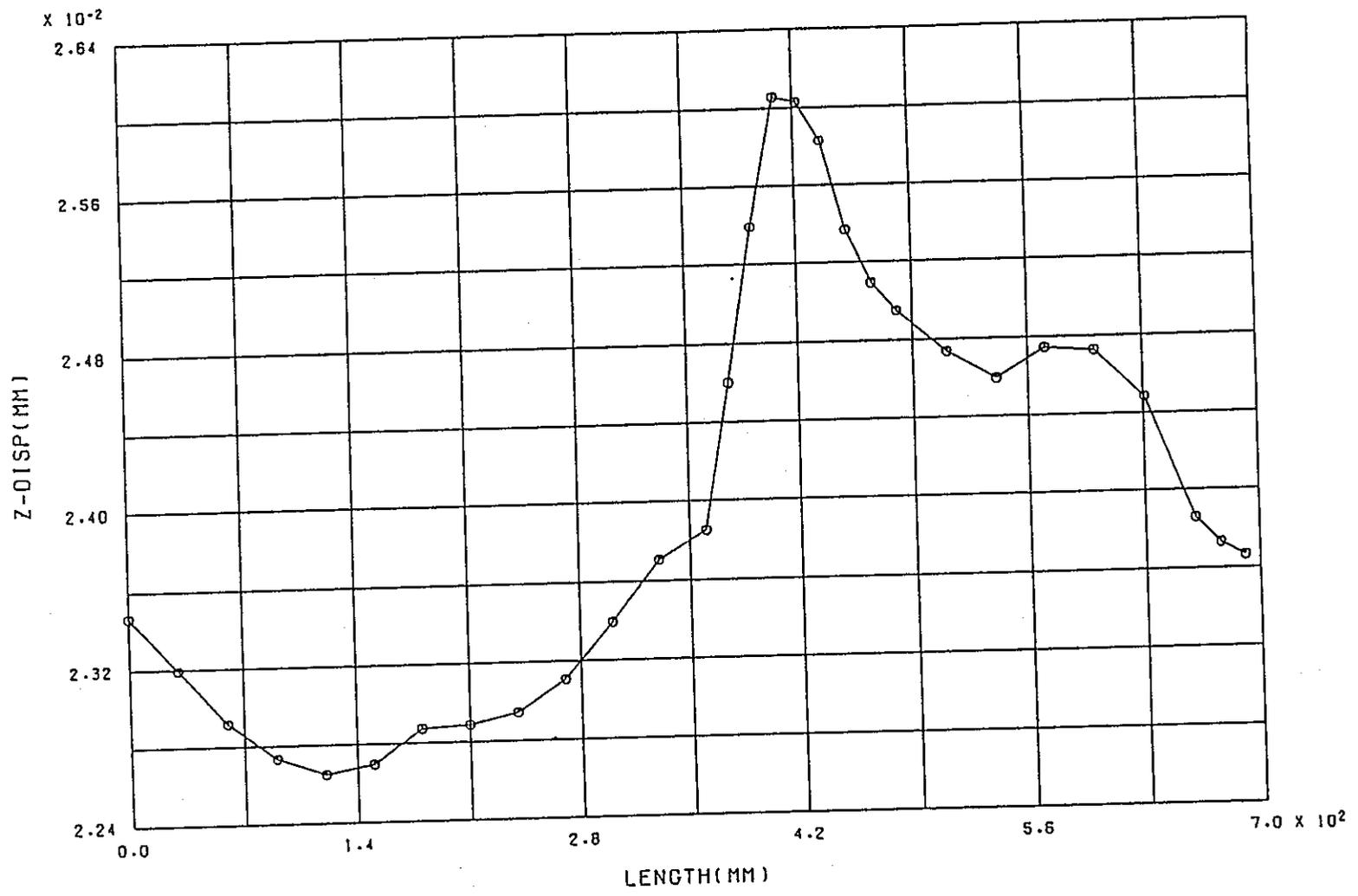


图 16 MODEL-2 D-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2

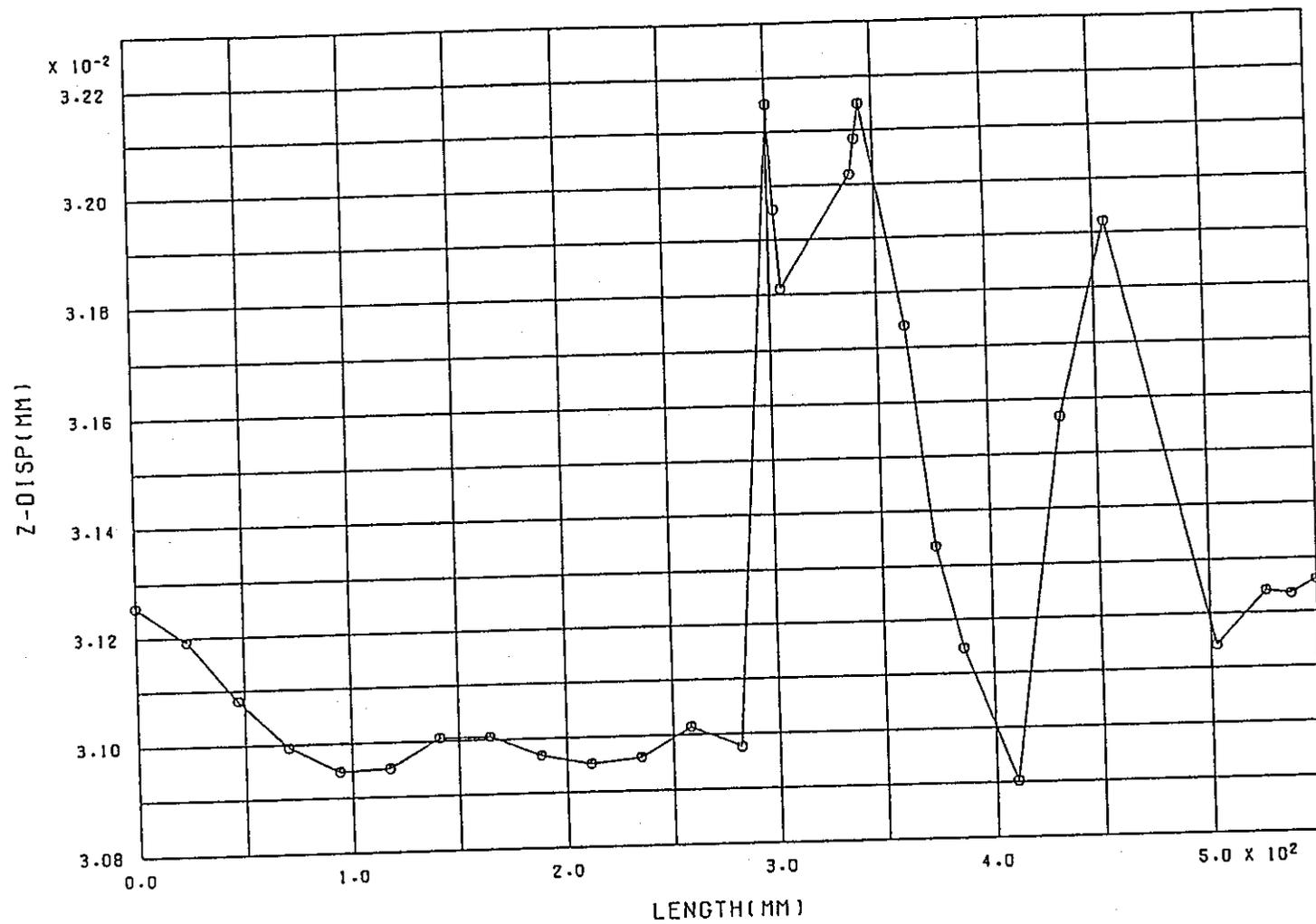


图 1 7 MODEL-2 E-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2

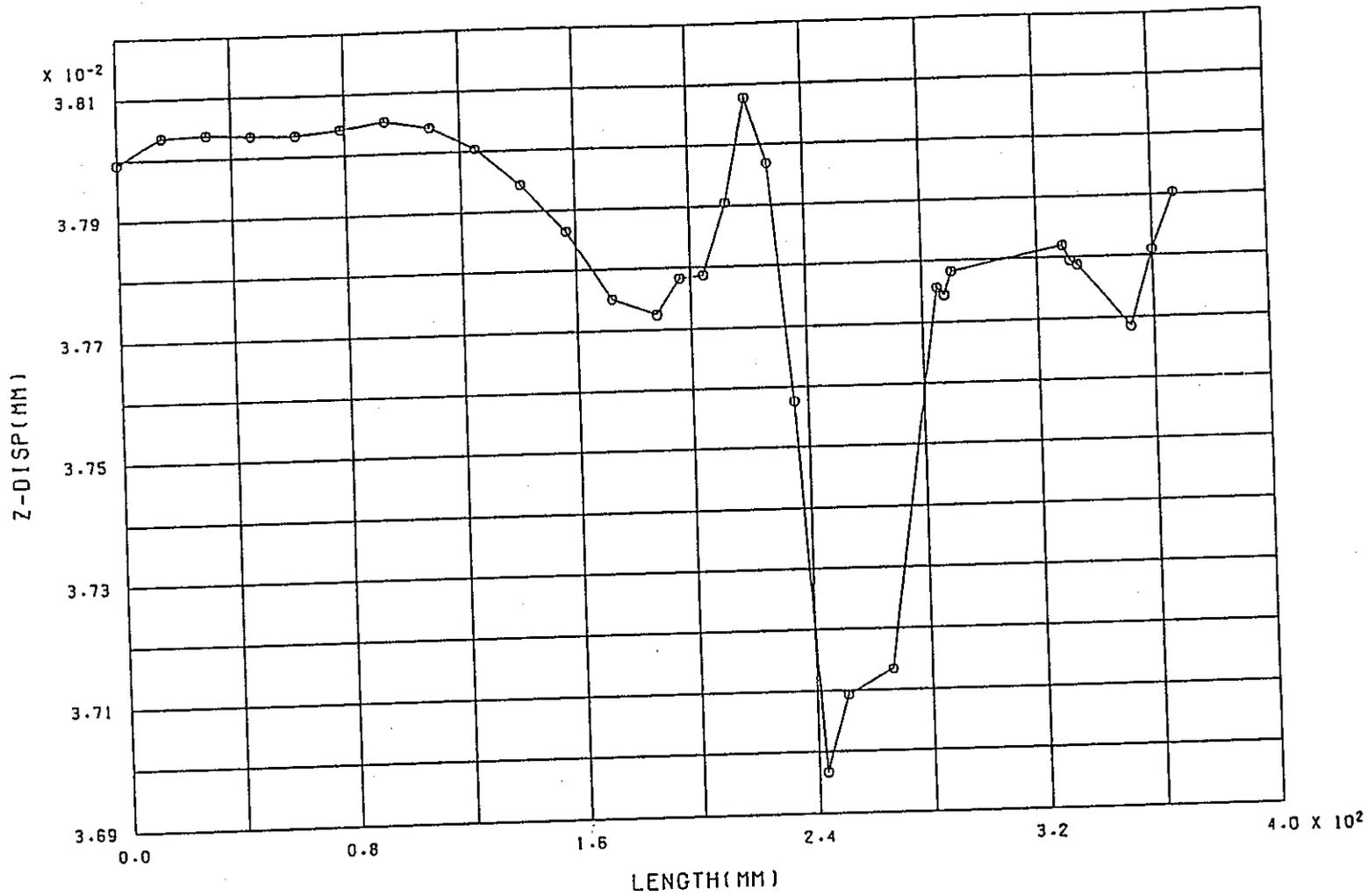


图 18 MODEL-2 F-LINE (CURVED FACE)

FINAS
STEP NO. 2

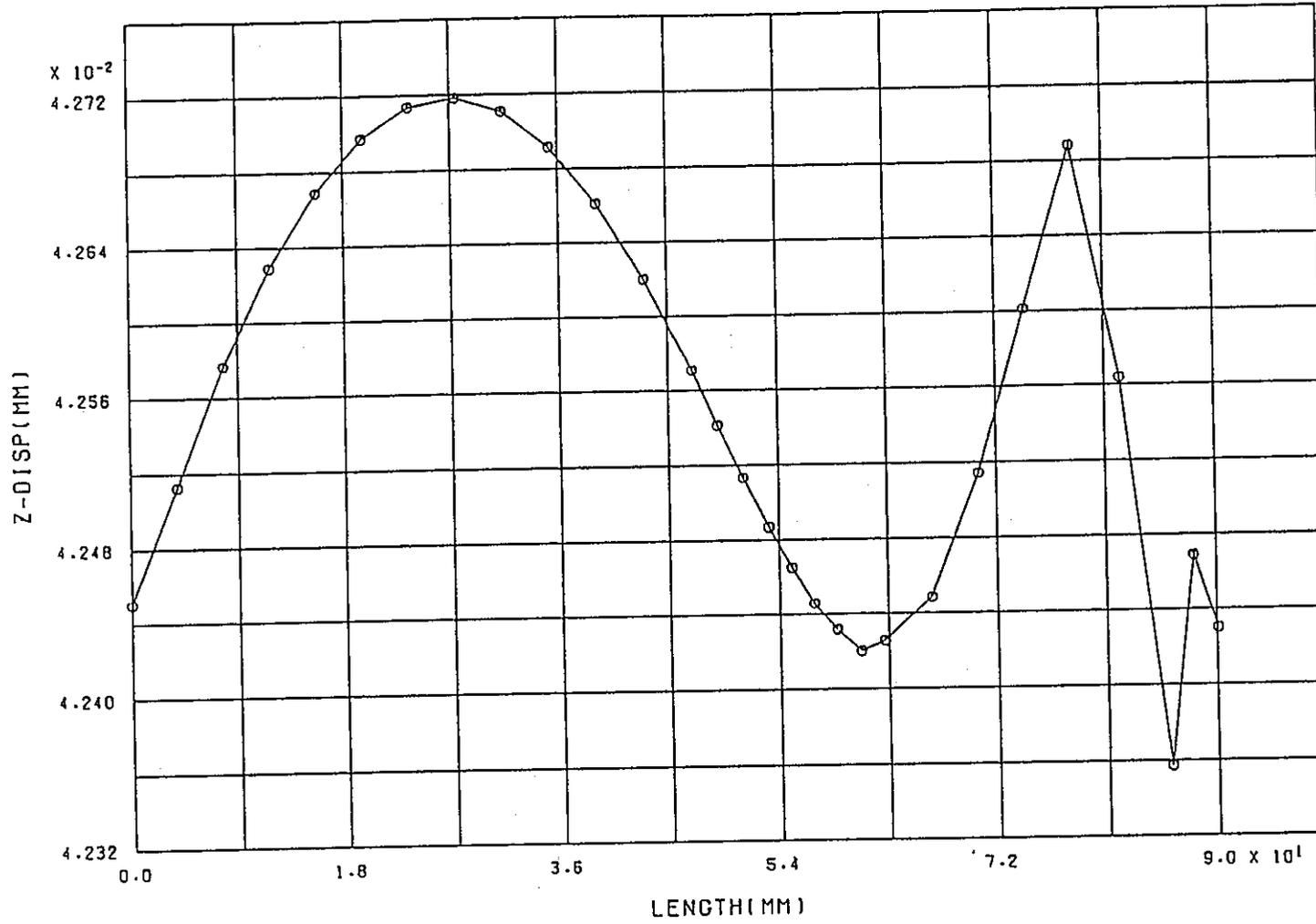


图 19 MODEL-2 G-LINE (CURVED FACE)

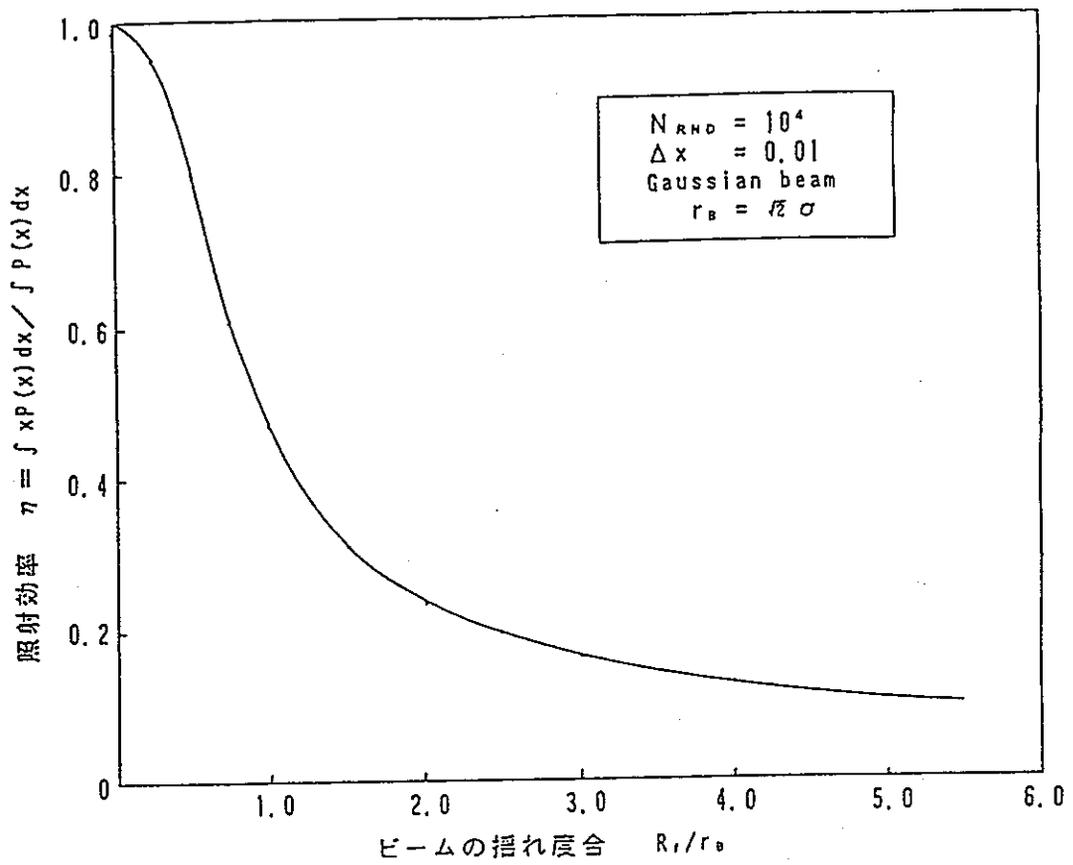


図2.1 強度分布を考慮した2波長照射における照射効率
 ($N_{RND} = 10^4$, $r_B = \sqrt{2} \sigma$ の場合)

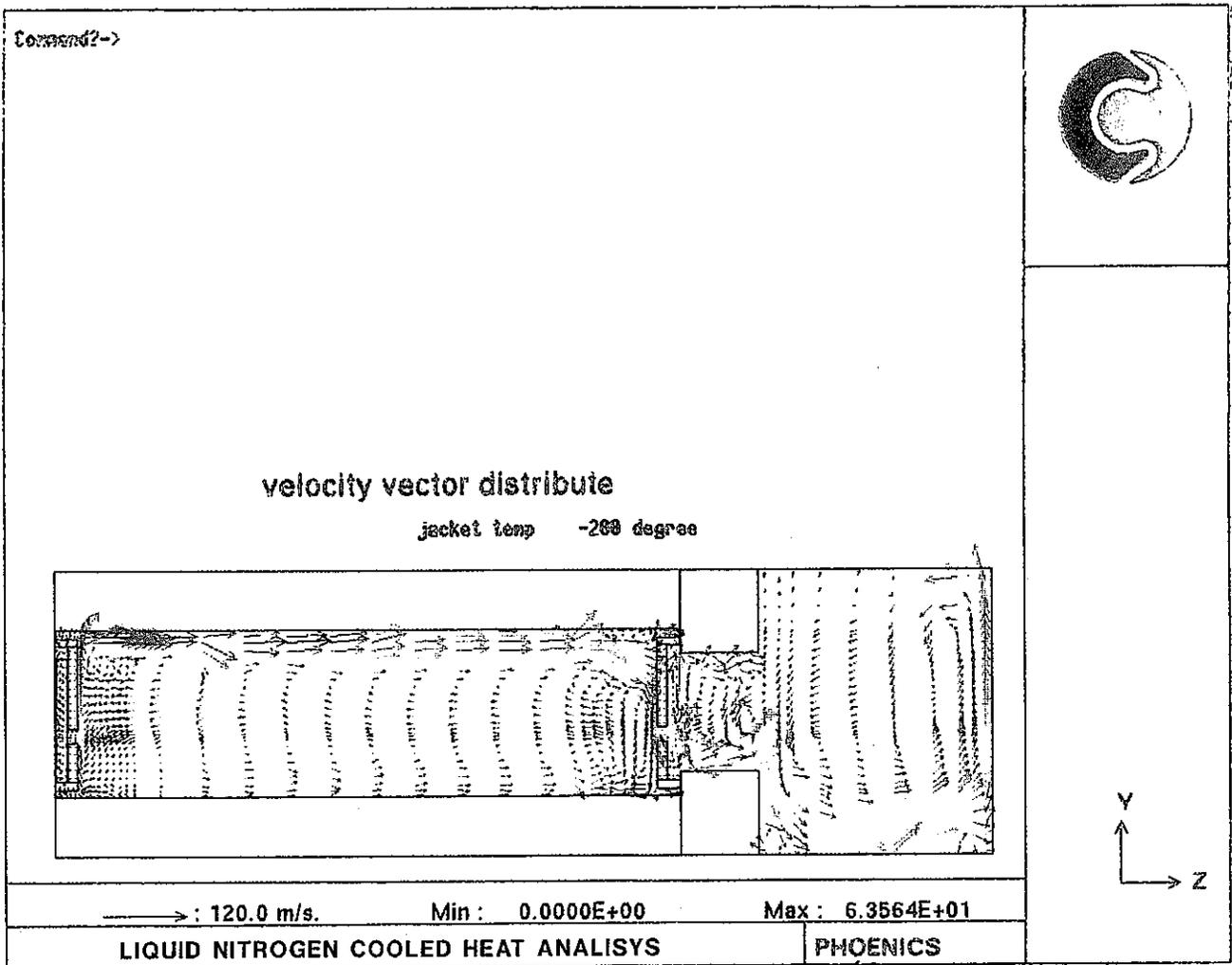


図22 液体窒素冷却（-200℃）条件下での

ラマンセル内水素ガス流線分布

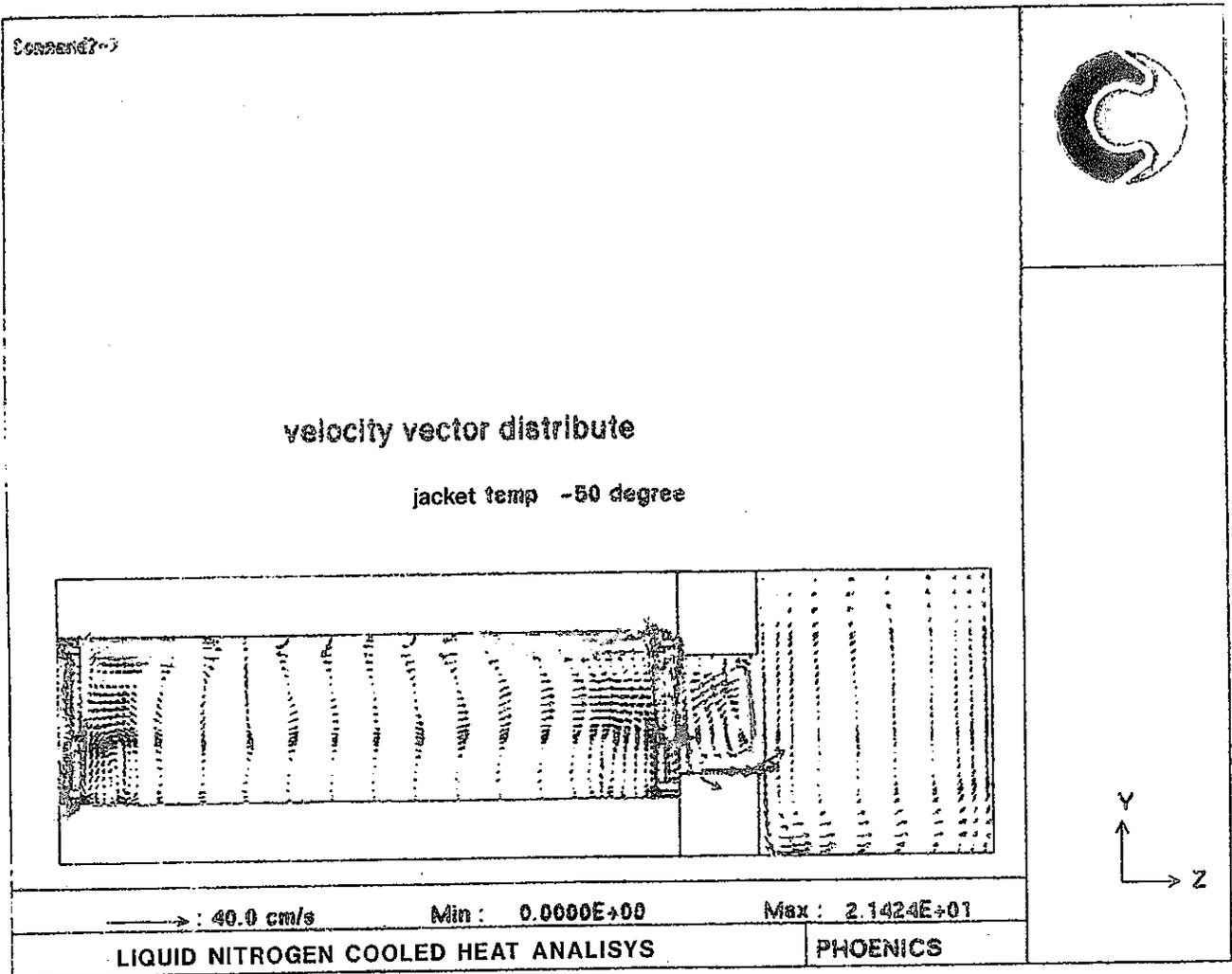


図23 ブライン冷却（-50℃）条件下での
ラマンセル内水素ガス流線分布