

JAERI-M
9539

JT-60 NBI用イオン源引き出し電極
-Exit Grid- の熱応力解析

1981年6月

柴沼 清・栗山 正明・小原 祥裕・奥村 義和

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JT-60 NBI用イオン源引き出し電極
- Exit Grid - の熱応力解析

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部
柴沼 清・栗山 正明・小原 祥裕
奥村 義和

(1981年6月3日受理)

JT-60 NBI用イオン源は50～100 KeV, 35～40 Aの水素イオンビームを最大10秒間安定に引き出すことが要求されている。このような高エネルギーでの長時間の運転では、イオン源電極は厳しい熱負荷条件下にさらされるため、電極の熱負荷問題の解決はきわめて重要である。特に、電極に生じる熱応力は厳しくなることが考えられ、その評価は必要不可欠となっている。

ここでは、JT-60用イオン源電極の中で比較的熱入力が大きく、かつ片面入熱であるExit Gridを取り上げて、熱応力の解析手法を確立した。電極材料として無酸素銅とモリブデンを用いた場合について解析を行ない、その結果をASME - Sec. IIIによって評価した。

無酸素銅電極の場合、応力は多孔部全体にわたって許容値を超えてしまい、大幅な設計の変更が必要となった。一方、モリブデン電極の場合、応力は多孔部の冷却水下流側の角の部分でのみ許容値をわずかに超えてしまった。しかし、この角の部分を完全な矩形とせず、丸みをつけた結果、応力は許容限度内に収めることができた。

Thermal Stress Analysis on the Extraction Grid
- Exit Grid - for JT-60 NBI

Kiyoshi SHIBANUMA, Masaaki KURIYAMA, Yoshihiro OHARA
and Yoshikazu OKUMURA

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June 3, 1981)

The ion sources of the neutral beam injectors for JT-60 are required to produce stable ion beam of 50 ~ 100 keV, 35 ~ 40 A for a long pulse length of up to 10 sec. This long pulse operation at high power level causes several difficult problems. One of the problems is the thermal stress in the extraction grids.

In this report, a thermal stress analysis method using finite element method has been applied to the exit grid, which is subjected to a relatively large and one-side heat loading. Oxygen-free copper and molybdenum are considered as candidate materials of the grid for this numerical analysis. Results are evaluated according to the ASME-Sec.III Code.

The stress in copper grid is extremely larger than the allowable value all over the multi-aperture region. Therefore, the design of copper grid must be fundamentally reconsidered. On the other hand, the stress in molybdenum grid is slightly over the allowable value only at two corners of the multi-aperture region. A small structural improvement in this grid enables us to suppress the stress below the allowable value.

Keywords : Exit Grid, JT-60, Neutral Beam Injectors, Thermal Stress,
Finite Element Method, Effective Elastic Constants

目 次

1. はじめに	1
2. 伝熱解析	1
3. 応力解析	7
3.1 全体解析	7
3.1.1 電極板の有効弾性係数	7
3.1.2 電極全体の变形機構	10
3.2 局部解析	11
4. まとめ	22
謝 辞	22
参考文献	22

Contents

1. Introduction	1
2. Thermal analysis	1
3. Stress analysis	7
3.1 Macroscopic stress analysis	7
3.1.1 Effective elastic constants for grid	7
3.1.2 Macroscopic deformation mechanism of grid	10
3.2 Microscopic stress analysis	11
4. Conclusions	22
Acknowledgement	22
References	22

1. はじめに

JT-60用中性粒子入射装置(NBI)のイオン源は一基あたり50~100KeV, 35~40Aの水素イオンビームを最大10秒間引き出すことが要求されている。このような高出力のイオンビームを得るためには広面積の電極が必要となり, 現在12cm×27cmのビーム引き出し面(透過率40%)をもつ大型矩形引き出し電極が予定されている¹⁾。また, イオン源とトーラス入射口間の距離が約8mであるのに対してトーラス入射口径が約50cm ϕ と小さく, ビームの発散による損失を小さくするためには, ビーム発散($1/e$)を1度以内に収める必要がある。しかし, ビームエネルギーが高く, かつ, ビームの持続時間が長くなるにつれて電極に加わる熱負荷は増大し, 大型電極の熱変形や熱応力は従来の小型電極とは比較にならぬほど増大することが考えられる。これは, ビームの発散の直接の原因となるばかりでなく, 電極の破損を引き起こす要因にもなり, 電極の設計を行う際には非常に重要な問題となる。しかしながら, NBIイオン源電極は, 一般に, イオンビームを引き出すための円孔と強制冷却のための冷却管から構成された複雑な構造をした薄板であるために, 電極の熱変形挙動は未だ十分に解明されていないのが現状であり, 局所的な応力評価に至ってはほとんど皆無に等しい。

本報は, JT-60 NBI用イオン源引き出し電極の中で比較的熱負荷が大きく, かつ, 電極の熱変形(たわみ)に最も厳しい片面入熱であるExit Gridを取り上げて, 電極の応力解析法の確立を行ったものである。さらに, 電極材料として, 無酸素銅とモリブデンを用いた場合について, 熱応力の観点からASME-sec. IIIによって評価, 検討し, 問題点を指摘している。

2. 伝熱解析

JT-60 NBI用イオン源引き出し電極は引き出し面積が12cm×27cmである4枚の電極板から構成される二段加速電極である。二段加速電極の中で最も下流にあるExit Gridは図1に示すように, 電極に直接衝突する高エネルギーの粒子と負電極であるSuppressor Gridからの電子によって熱負荷を受けると考えられる。したがって, 入熱条件は電極の上面とビーム引き出し孔内面に限定される, いわば片面入熱であり, 電極の変形(たわみ)には最も厳しい条件となっている。

電極へのこのような熱負荷は, 一般にビームの発散や電極間の残留ガス圧に大きく依存し, ビームの発散がよいほど, またガス圧が低いほど小さくなる傾向を示し, 通常の運転状態ではビームパワーの1.5%以下であることが実験的に確かめられている²⁾。そこで, JT-60 NBI用イオン源引き出し電極の設計熱負荷として, 安全率を見込みビームパワーの2%を仮定する。

Exit Gridへの熱負荷のほとんどはビーム引き出し面から受けると考えられる。ビーム引き出し面にはイオンビームを引き出すための直径4.6mmの円孔が1032個存在し, さらに強制冷却のための冷却管が44本同一方向に埋め込まれ, ビーム引き出し孔と冷却管は一例ごとに交互に配置されている。そこで, 引き出し面の対称性から図2(a)の斜線部分を取り出した図2(b)について, 電極の上面

1. はじめに

JT-60用中性粒子入射装置(NBI)のイオン源は一基あたり50~100KeV, 35~40Aの水素イオンビームを最大10秒間引き出すことが要求されている。このような高出力のイオンビームを得るためには広面積の電極が必要となり、現在12cm×27cmのビーム引き出し面(透過率40%)をもつ大型矩形引き出し電極が予定されている¹⁾。また、イオン源とトーラス入射口間の距離が約8mであるのに対してトーラス入射口径が約50cm ϕ と小さく、ビームの発散による損失を小さくするためには、ビーム発散($1/e$)を1度以内に収める必要がある。しかし、ビームエネルギーが高く、かつ、ビームの持続時間が長くなるにつれて電極に加わる熱負荷は増大し、大型電極の熱変形や熱応力は従来の小型電極とは比較にならぬほど増大することが考えられる。これは、ビームの発散の直接の原因となるばかりでなく、電極の破損を引き起こす要因にもなり、電極の設計を行う際には非常に重要な問題となる。しかしながら、NBIイオン源電極は、一般に、イオンビームを引き出すための円孔と強制冷却のための冷却管から構成された複雑な構造をした薄板であるために、電極の熱変形挙動は未だ十分に解明されていないのが現状であり、局所的な応力評価に至ってはほとんど皆無に等しい。

本報は、JT-60NBI用イオン源引き出し電極の中で比較的熱負荷が大きく、かつ、電極の熱変形(たわみ)に最も厳しい片面入熱であるExit Gridを取り上げて、電極の応力解析の確立を行ったものである。さらに、電極材料として、無酸素銅とモリブデンを用いた場合について、熱応力の観点からASME-Sec. IIIによって評価、検討し、問題点を指摘している。

2. 伝熱解析

JT-60NBI用イオン源引き出し電極は引き出し面積が12cm×27cmである4枚の電極板から構成される二段加速電極である。二段加速電極の中で最も下流にあるExit Gridは図1に示すように、電極に直接衝突する高エネルギーの粒子と負電極であるSuppressor Gridからの電子によって熱負荷を受けると考えられる。したがって、入熱条件は電極の上面とビーム引き出し孔内面に限定される、いわば片面入熱であり、電極の変形(たわみ)には最も厳しい条件となっている。

電極へのこのような熱負荷は、一般にビームの発散や電極間の残留ガス圧に大きく依存し、ビームの発散がよいほど、またガス圧が低いほど小さくなる傾向を示し、通常の運転状態ではビームパワーの1.5%以下であることが実験的に確かめられている²⁾。そこで、JT-60NBI用イオン源引き出し電極の設計熱負荷として、安全率を見込みビームパワーの2%を仮定する。

Exit Gridへの熱負荷のほとんどはビーム引き出し面から受けると考えられる。ビーム引き出し面にはイオンビームを引き出すための直径4.6mmの円孔が1032個存在し、さらに強制冷却のための冷却管が44本同一方向に埋め込まれ、ビーム引き出し孔と冷却管は一行ごとに交互に配置されている。そこで、引き出し面の対称性から図2(a)の斜線部分を取り出した図2(b)について、電極の上面

であるA域とビーム引き出し孔内面であるB域に最大ビームパワー(4MW-100KV/40A)の2%の熱負荷が1対1の割合で入熱するものと仮定すると、その平均的な熱流束はA域で206W/cm²、B域で107W/cm²である。

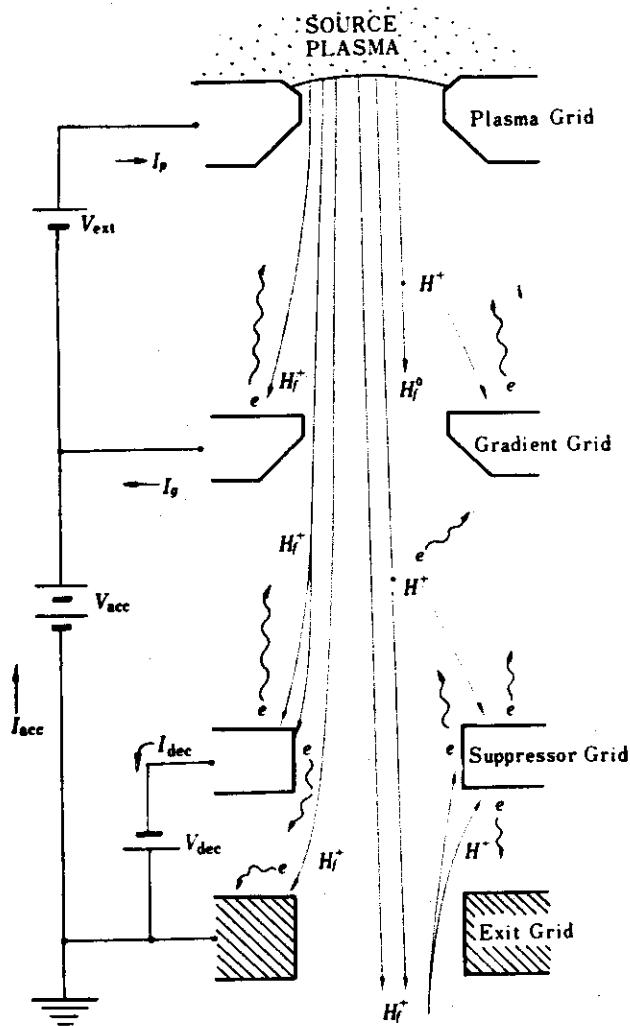


図1 電極への熱負荷

次に、電極の冷却が問題となるが、JT-60用イオン源の最大出力4 MWの2%の熱負荷を10秒間安定に除熱する必要がある。現在までのイオン源引き出し電極の冷却実験の結果^{3) 4)}から判断して、JT-60用イオン源引き出し電極の冷却条件は冷却水流速をできるだけ大きくし、サブクール度を上げるように設定しなければならない。そこで冷却水流量は全体で30ℓ/min、冷却管一本当り0.68ℓ/minとした。

伝熱解析モデルは図3であり、電極材料として無酸素銅およびモリブデンを採用し、HEATING-

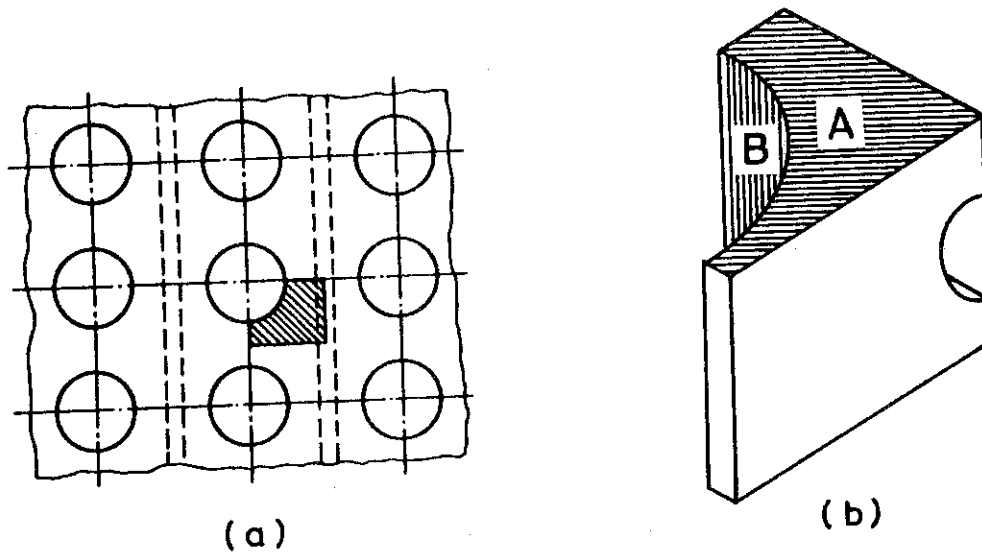


図2 Exit Grid のビーム引き出し面のモデル化

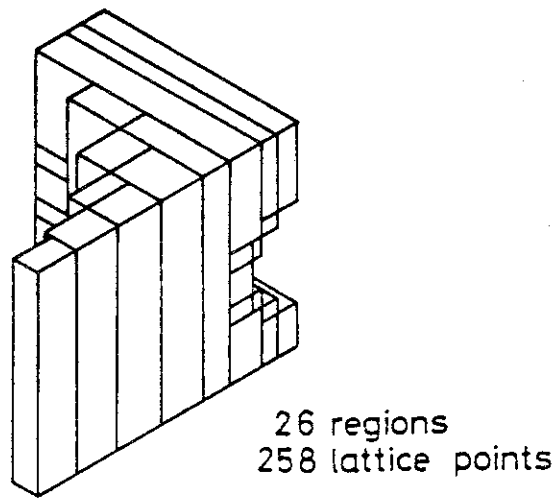


図3 伝熱計算モデル

3コード⁵⁾を使用して非定常三次元伝熱計算を行った。また、冷却水の温度は熱負荷によって電極引き出し部の流れ方向に沿って変化し、定常状態において、電極に入った熱負荷の全てが冷却水に移ったとすると、冷却水入口と出口間の温度上昇は43 degとなる。冷却水の入口温度を42℃⁶⁾とすると出口温度は85℃となり、この冷却水の温度上昇を考慮して電極の熱評価を行い、さらに、熱応力解析のための基礎データを得る必要がある。そこで、伝熱解析はビーム引き出し面の冷却水上流部(冷却水温度42℃)、中央部(冷却水温度63℃)および下流部(冷却水温度85℃)各々について行った。計算に用いた各物性値および冷却条件を表1、表2に示す。

伝熱計算の結果、最高温度は無酸素銅、モリブデン共に冷却水温度が最も高い冷却水下流部に生じた。さらに、モデル内の最高温度発生点は冷却管から最も離れた電極上面のビーム引き出し孔内面に生じ、この最高温度発生点(a点)における無酸素銅およびモリブデン各々についての温度応答曲線を図4に示す。図中、実線が無酸素銅で点線がモリブデンであるが、共に0.6秒程度で定常に達し、最高温度は無酸素銅の場合で154℃、モリブデンの場合で195℃となった。これらの結果は、無酸素銅およびモリブデンの軟化温度がそれぞれ約200℃、800℃であることから、いずれも軟化温度以下であり、温度上の問題がないことを示している。また、最高温度を示した引き出し電極冷却水下流部の定常時における無酸素銅およびモリブデン各々のモデル上面、下面の温度分布を図5、図6に示す。無酸素銅とモリブデンを比較した場合、図から明らかなように、モリブデンの熱伝導率は無酸素銅の約 $\frac{1}{3}$ と低いために、温度上昇が大きく、かつ温度勾配が急であることを示した。これは、モデル上面と下面の平均温度差にも顕著に表われ、無酸素銅の上下面の平均温度差が8.9 degであるのに対してモリブデンは21.3 degに達し2倍以上の温度差を生じた。また、これらの傾向は冷却水上流部、中央部についても同様であった。

表1 電極材料の熱的特性

	無酸素銅	モリブデン
熱伝導率 W/cm ² °C	3.86	1.42
比熱 J/kg °C	385	251
密度 kg/cm ³	0.00896	0.0102

表2 冷却条件

冷却水流速	m/s	9
熱伝達率 W/cm ² °C	上流	5.09
	中中	5.91
	下流	6.66
冷却管内径	mm	1.2

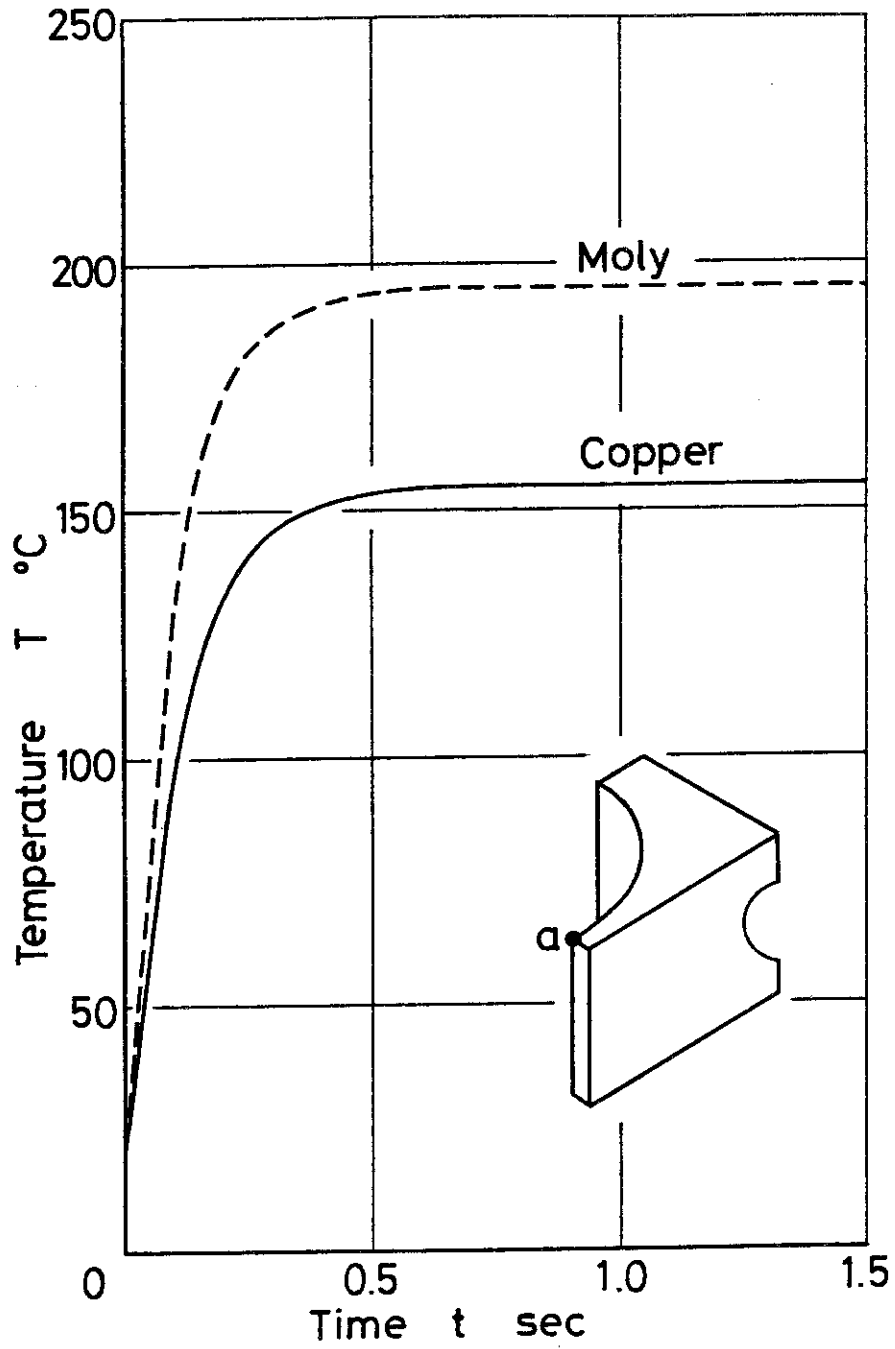


図4 温度応答曲線 (冷却水温度: 85°C)

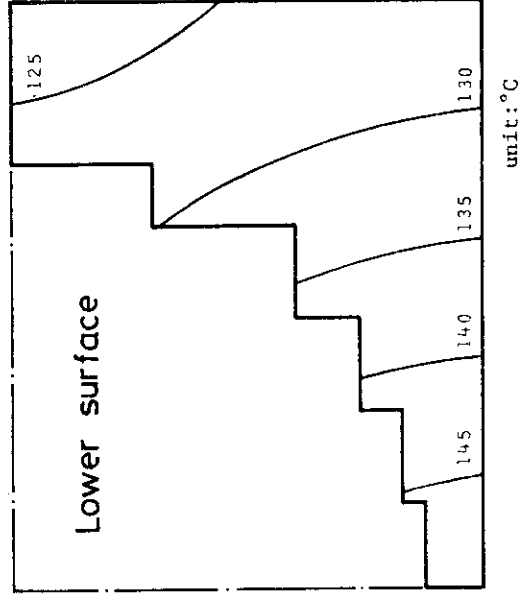
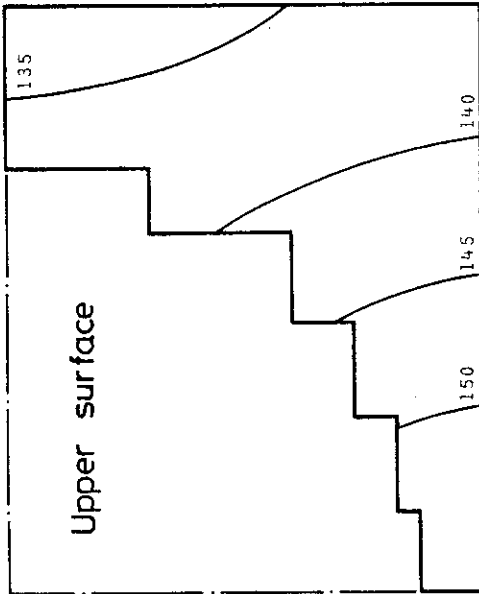


図5 ビーム引き出しし下面の温度分布
(無酸素銅，冷却水温度：85°C)

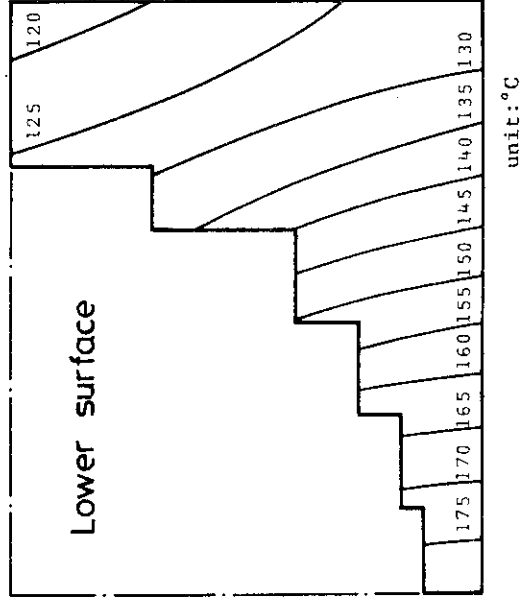
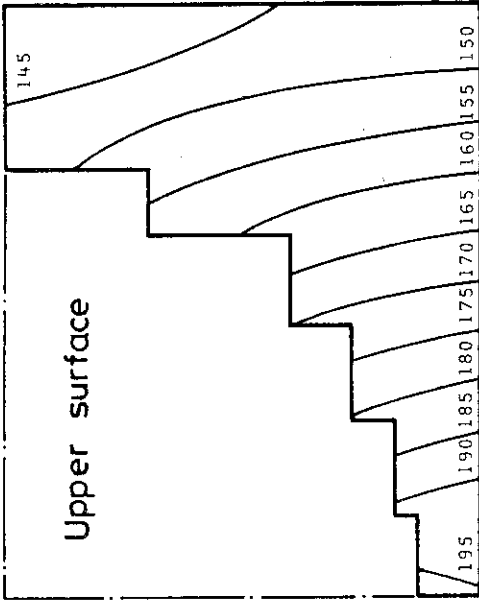


図6 ビーム引き出しし上面の温度分布
(モリブデン，冷却水温度：85°C)

3. 応力解析

Exit Grid への熱負荷は片面入熱であり、また、冷却管が存在するために定常時においても局部的な温度勾配を示すことが前章の伝熱計算の結果より明らかとなった。さらに、冷却水の温度上昇によって、電極の上流と下流では温度差を生じ、電極全体としても不均一な温度分布を示している。このように、温度分布の観点から見ても電極の熱応力発生機構は複雑であることが予想され、さらに、電極はビーム引き出し孔と冷却管が存在するための幾何学的形状による剛性の低下と異方性を有する薄板であり、局部的な応力評価はもちろん、電極全体の熱応力評価を解析解の形で行うことは不可能である。また、有限要素法で局部応力が算出でき、十分な精度が保証できる要素に分割すると、膨大な要素数となる可能性があり実用上困難な問題となる。そこで、新たな解析手法の確立を行う必要がある。今回確立した手法は次のように順序だてることができる。まず、電極板の幾何学的形状による力学的特性を巨視的に等価な直交異方性板に置換し、有限要素法と組み合わせることによって、電極板全体の熱変形解析を行う。次に、全体解析で得られた変形量を境界条件として、電極の一部を取り出したモデルについて局部的な応力を算出する。最終的に、ASME Sec. III の基準で応力を評価し、使用に耐えられるかどうかを判断する。

3.1 全体解析

3.1.1 電極板の有効弾性係数

JT-60 NBI 用イオン源引き出し電極は構造上の観点から図7のように3つの領域に分類される。すなわち、図8のようにイオンビーム束を引き出すための多数の円孔と電極への熱負荷を除熱するための冷却管から構成されたビーム引き出し面であるA領域と図9のように冷却管と母材平板から構成されたB領域と母材平板のみのC領域に分類できる。ここで、A領域とB領域については異方性による5つの弾性定数 E_L , E_T , G_{LT} , ν_{LT} , ν_{TL} をそれぞれ求める必要がある。

電極板の有効弾性係数の解析手法の一部はすでに報告しているが⁷⁾、さらに詳細な検討を加えた結果、異方性による各弾性定数は以下のように表わされる⁸⁾。

i) A領域の場合

$$E_L = \frac{2bE_0}{2 \left\{ a \int_0^r \frac{dx}{a - \sqrt{r^2 - x^2}} + (a-r) \right\} + (1-\nu_0^2) \left\{ 2t \int_0^{\frac{d}{2}} \frac{dx}{t - \sqrt{d^2 - 4x^2}} + (h-d) \right\}} \quad (1)$$

$$E_T = \frac{a^2 E_0}{b \left\{ a \int_0^r \frac{dx}{a - \sqrt{r^2 - x^2}} + (a - r) \right\}} + \frac{(4ht - \pi d^2) E_0}{8bt} \quad (2)$$

$$\nu_{TL} = \frac{a^3 \nu_0}{2b \left\{ a \int_0^r \frac{dx}{a - \sqrt{r^2 - x^2}} + (a - r) \right\}} + \frac{h \nu_0}{2b} \quad (3)$$

$$\nu_{LT} = \frac{E_L}{E_T} \nu_{TL} \quad (4)$$

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45^\circ}} - \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right) \quad (5)$$

ただし,

$$E_{45^\circ} = \frac{E_0}{a+h} \left\{ \frac{a^2}{2a \int_0^r \frac{dx}{\sqrt{2} a - \sqrt{r^2 - x^2}} + (a - \sqrt{2} r)} + \frac{h(4ht - \pi d^2)}{4ht} \right\} \quad (6)$$

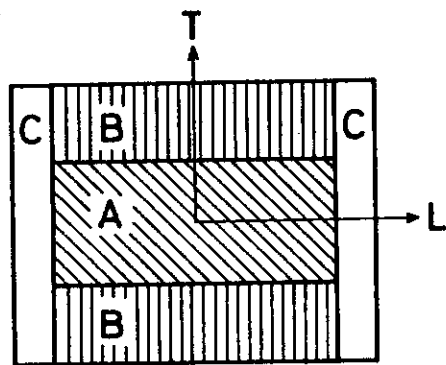


図7 電極の構造上の分類

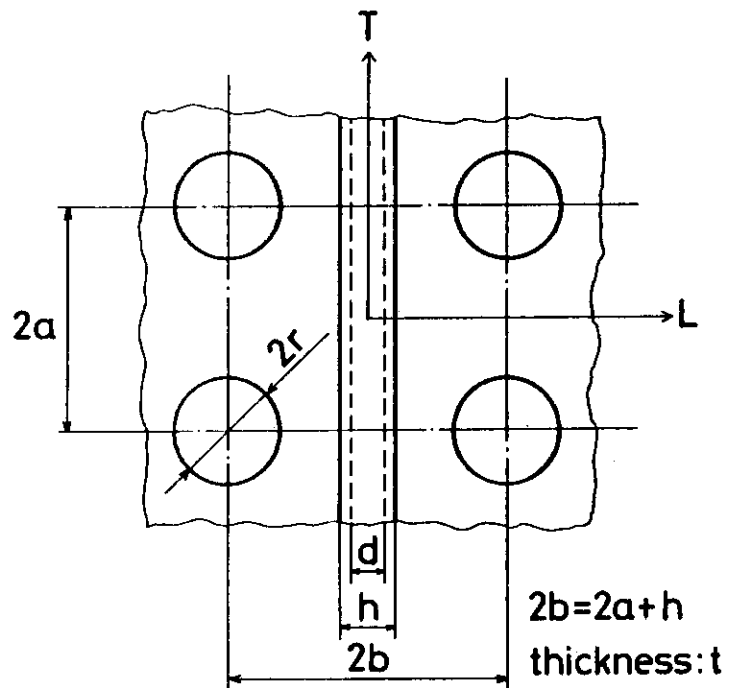


図8 ビーム引き出し面 (A領域)

ii) B領域の場合

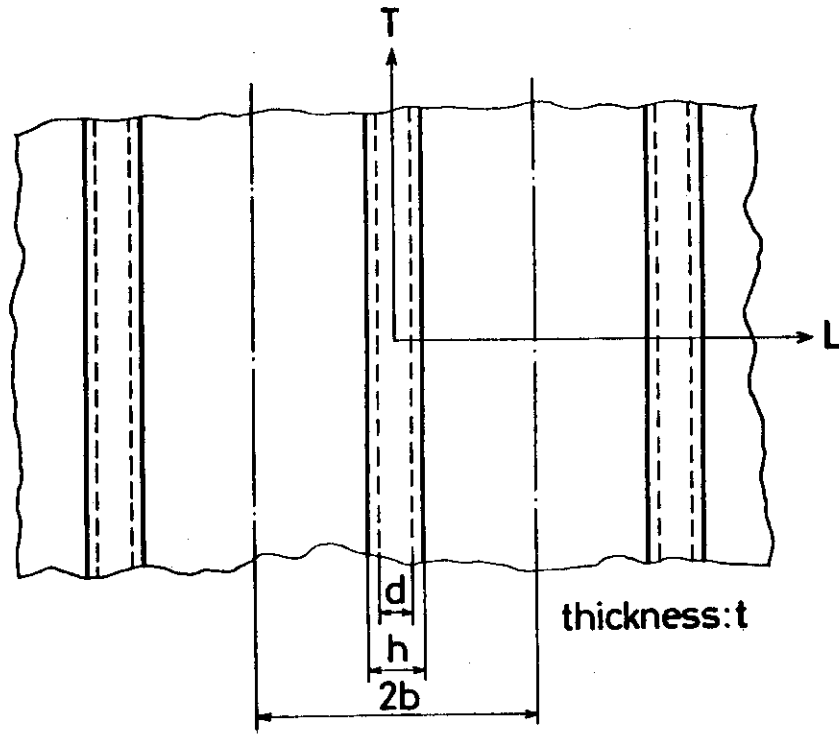


図9 冷却管領域 (B領域)

$$E_L = \frac{2bE_0}{2a + (1 - \nu_0^2) \left\{ 2t \int_0^{\frac{d}{2}} \frac{dx}{t - \sqrt{d^2 - 4x^2}} + (h - d) \right\}} \quad (7)$$

$$E_T = \frac{(8bt - \pi d^2)E_0}{8bt} \quad (8)$$

$$\nu_{TL} = \nu_0 \quad (9)$$

$$\nu_{LT} = \frac{E_L}{E_T} \nu_0 \quad (10)$$

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{32bt}{(8bt - \pi d^2)E_0} - \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right) \quad (11)$$

E_L : L軸方向の縦弾性係数

E_T : T軸方向の縦弾性係数

- ν_{LT} : L軸方向に引張った場合のポアソン比
- ν_{TL} : T軸方向に引張った場合のポアソン比
- G_{LT} : L-T軸間の横弾性係数
- E_{45° : LまたはT軸から45°傾いた方向の縦弾性係数
- E_0 : 母材の縦弾性係数
- ν_0 : 母材のポアソン比

電極材料に無酸素銅およびモリブデンを用いた場合の直交異方性による各弾性定数を求めると表3となる。なお、計算に必要な各形状の値は以下に示すとおりである。

$$2a = 5.1 \text{ mm}, \quad 2b = 6.4 \text{ mm}, \quad 2r = 4.6 \text{ mm}, \quad d = 1.2 \text{ mm}, \quad h = 1.3 \text{ mm},$$

$$t = 2.5 \text{ mm}$$

その結果、ビーム引き出し面であるA領域では、ビーム引き出し孔および冷却管が存在するために、剛性は母材の $1/3 \sim 1/4$ に大きく低下し、L方向とT方向の異方性は約20%ほどあることが明らかとなった。しかし、B領域では、わずかに $1/20 \sim 1/10$ 程度剛性が低下しただけでL方向とT方向の異方性も5%程度であった。

表3 各電極材料に対する有効弾性係数および線膨張係数

	無 酸 素 銅			モ リ ブ デ ン		
	A領域	B領域	C領域	A領域	B領域	C領域
E_L kg/mm^2	3000	11500	12500	8500	32000	35000
E_T kg/mm^2	3700	11600		10500	32500	
ν_{LT}	0.12	0.34	0.34	0.10	0.30	0.30
ν_{TL}	0.14	0.34		0.12	0.30	
G_{LT} kg/mm^2	2700	4300	4700	7900	12600	13500
線膨張係数 $1/^\circ\text{C}$	16.5×10^{-6}			4.9×10^{-6}		

3.1.2 電極全体の变形機構

電極全体の巨視的変形挙動を検討するために、前節の有効弾性係数の解析結果を用い、有限要素法⁹⁾による熱応力線形解析を行った。要素は一節点あたりの自由度が5である異方性を有する薄肉シェル要素を用い、計算は対称性を考慮して図10の斜線で示す電極全体の $1/2$ 領域について行った。境界条件は応力的に最も厳しくなる電極周辺のモーメントおよび変位を完全に拘束した。また、電極全体の温度分布は前章で行ったビーム引き出し部の三次元伝熱計算の結果から算出した。すなわち、電極の上流、下流それぞれについて、モデルの

上下面の平均温度および板厚方向での温度勾配を求め、無応力状態の温度を 20°C としたときの冷却水流れ方向の温度上昇を図 11 のように仮定した。

応力解析の結果、電極は図 12, 図 13 に実線で示すように変形した。すなわち、多孔板であるビーム引き出し面は剛性が低いために周辺から押しつけられるように変形し、さらに、Exit Grid はソースプラズマ側からの片面入熱であるために、電極板厚方向の温度勾配によってソースプラズマ側である z 軸正方向に湾曲した。このような電極の変形機構は電極への入熱条件および冷却条件によって決定され、無酸素銅、モリブデンの材料の種類とはほとんど無関係に同様な傾向を示した。また、各座標軸に対する最大変形点は図 14 に示すように、ほぼ同一の位置に生じ、この点における無酸素銅およびモリブデンについての最大変形量を表 4 に示す。

その結果、電極の変形は冷却水の流れ方向である y 方向と板厚方向である z 方向に比較的大きくなることが明らかとなった。さらに、各材料についての最大変形量は電極内の温度勾配が比較的均一な無酸素銅の場合、 y 軸方向に生じ $65\ \mu\text{m}$ 、電極板厚方向の温度勾配が比較的大きいモリブデンの場合、 z 軸方向に生じ $30\ \mu\text{m}$ であり、最大変形の発生点は材料によって異なり、熱伝導率の悪い材料ほど板厚方向の温度勾配が大きくなり、 z 軸方向に生じる傾向を示している。

以上のように、二種類の材料について電極の変形量を比較した場合、モリブデンは無酸素銅より線膨張係数が低く、かつ、剛性が高いために熱変形が少なく、電極材料として優れた結果を得た。

3.2 局 部 解 析

電極は図 7 に示されているように構造的に 3 つの領域に分けられるが、変形および温度上昇が最も厳しい領域、言い換えれば、応力が最も厳しい領域は引き出し面である多孔部である。それゆえ、応力を評価する場合、この領域のみを考慮すれば十分である。本来ならば、多孔部全面にわたって局部応力を算出しなければならないが、1032 個の円孔と 44 本の冷却管から構成された引き出し電極を考えると、實際上困難な問題となる。したがって、図 12, 図 13 から判断して、応力的に最も厳しいと思われる多孔部周辺の 6 点、すなわち、図 10 の①～⑥の番号で示された要素 ($2.55\ \text{mm} \times 3.2\ \text{mm}$) について局部応力の算出を行えば、応力を評価する上で十分と考えられる。①番～⑥番の要素はビーム引き出し孔と冷却管が存在するために、具体的には図 15 に示すモデルに対応している。ただし、⑤, ⑥番のモデルはビーム引き出し孔の位置関係より、図 15 を上下反対としている。解析モデルは全体解析と同様に薄肉シェル要素を用い、冷却管領域 I, II は冷却管が存在するために剛性が低下しており、本解析では、この領域の断面積の減少率より近似的に弾性係数を表 5 のように仮定した。しかし、このモデルにより算出される冷却管領域の応力は材料定数を低下させて求まる値であり、真の応力とは異なっている。ひずみが正確であるとすると応力は一般にこのひずみを用いて次のように表わすことができる。

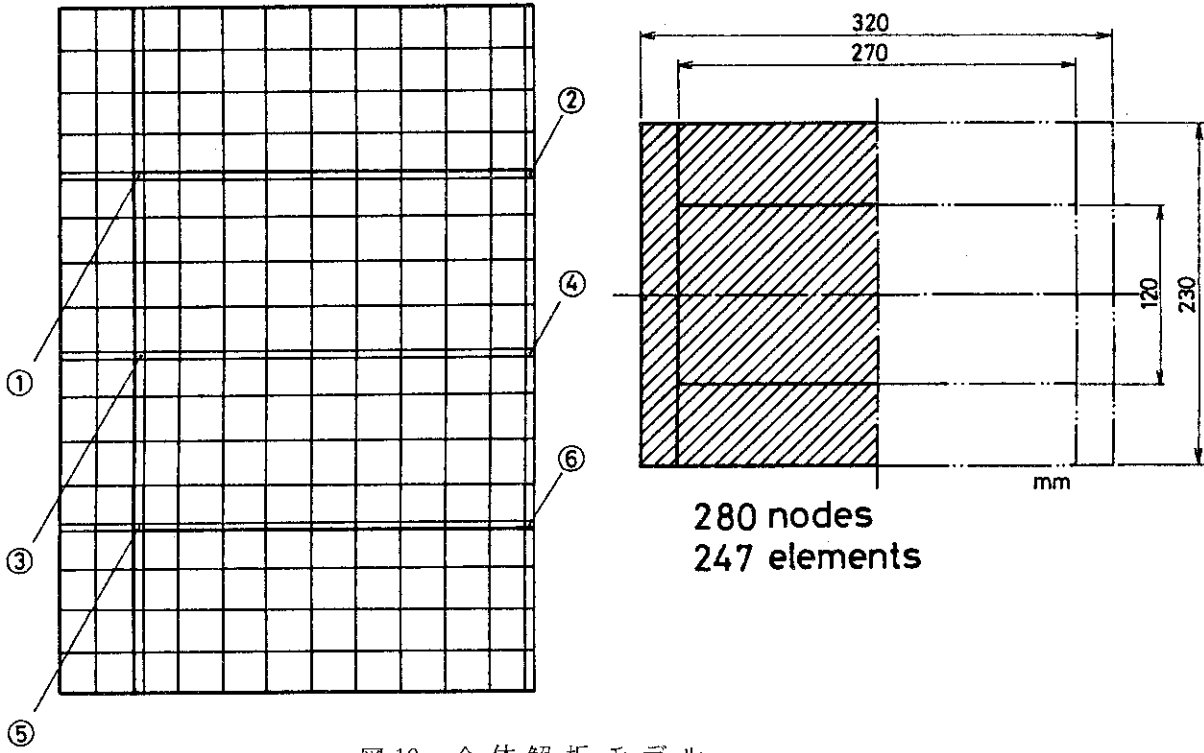


図10 全体解析モデル

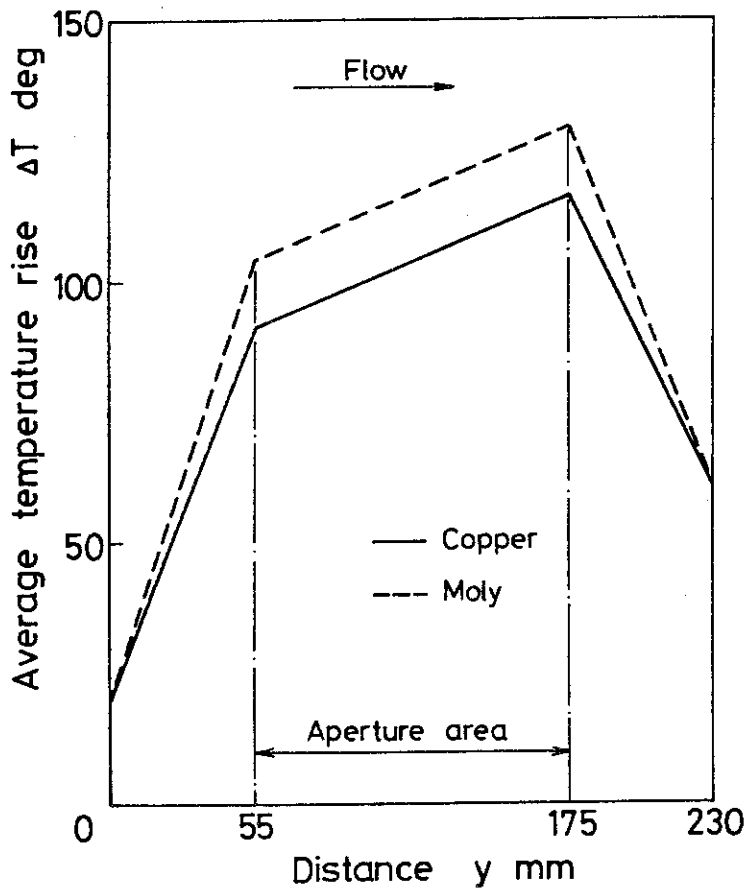


図11 電極全体の温度分布

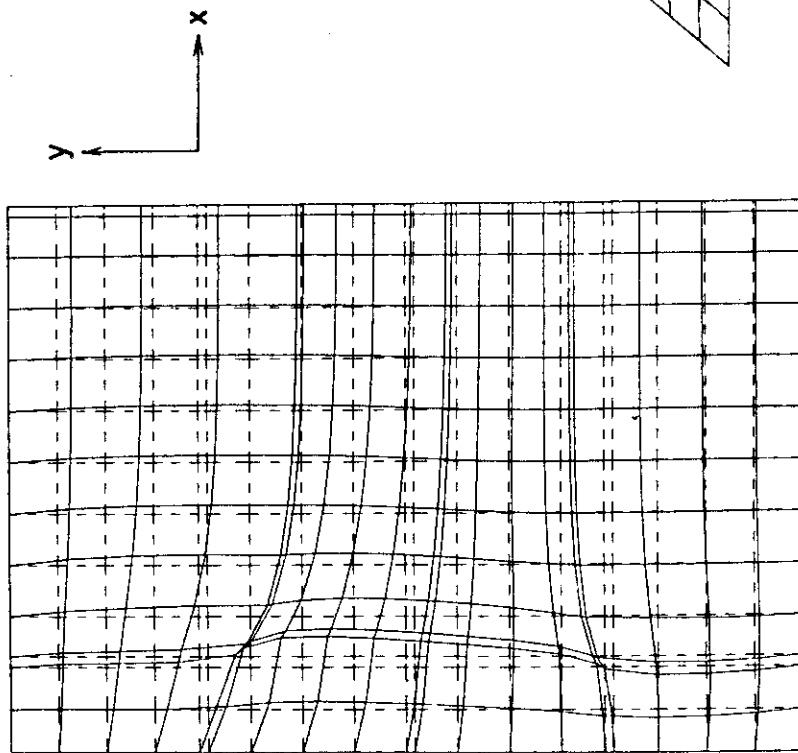


図 12 電極全体の變形機構

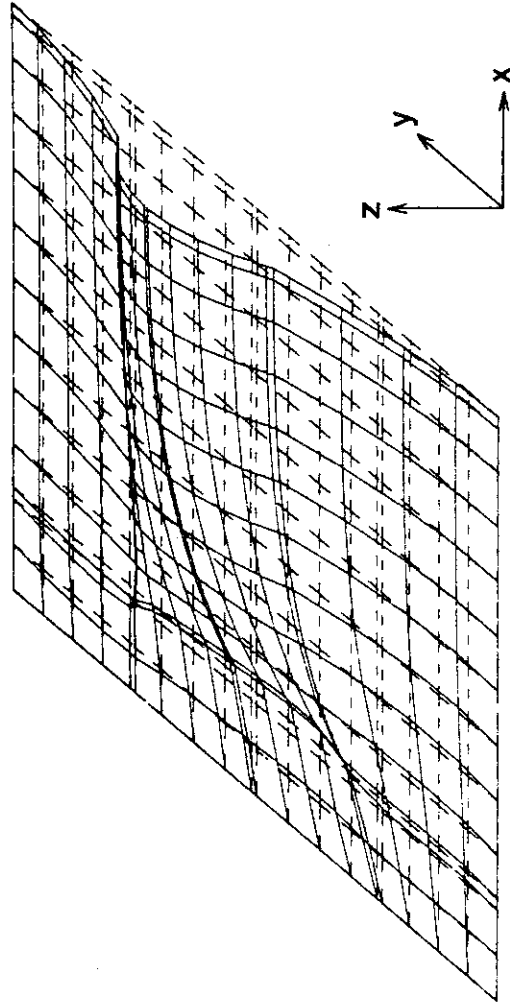


図 13 電極全体の變形機構

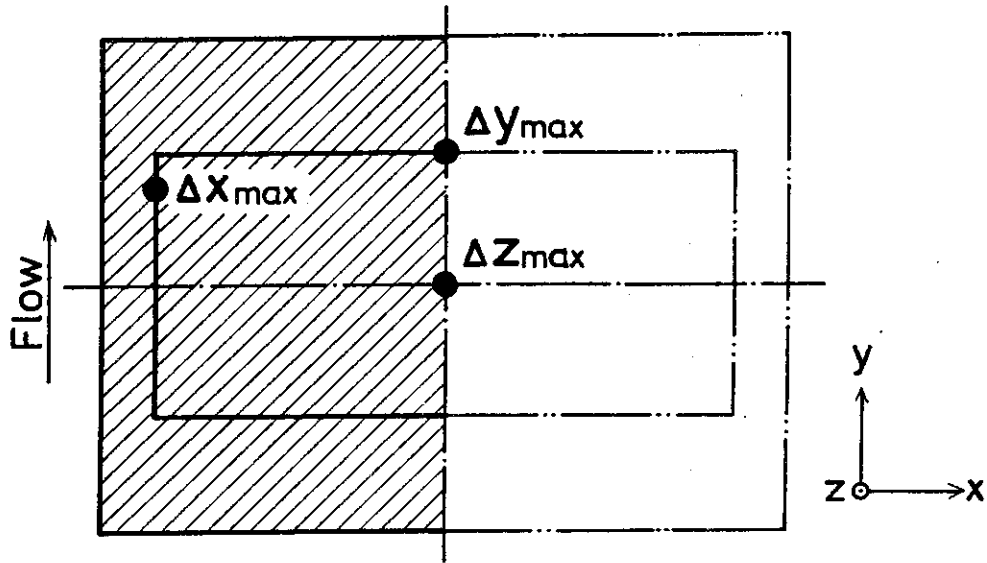


図 14 各座標軸に対する最大変形点

表 4 各座標軸に対する最大変形量

	ΔX_{max}	ΔY_{max}	ΔZ_{max}
無酸素銅	0.020	0.065	0.042
モリブデン	0.006	0.019	0.030

単位：mm

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= \frac{E}{1-2\nu} \varepsilon \delta_{ij} + 2G\varepsilon'_{ij} \\ &= E \left\{ \frac{1}{1-2\nu} \varepsilon \delta_{ij} + \frac{1}{1+\nu} (\varepsilon_{ij} - \varepsilon \delta_{ij}) \right\}\end{aligned}\quad (12)$$

$$\text{ただし, } i, j = 1, 2, 3, \quad \varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_{ii}$$

$$i = j \text{ のとき } \delta_{ij} = 1, \quad i \neq j \text{ のとき } \delta_{ij} = 0$$

真の応力は各 I, II 領域における上式の縦弾性係数 E を材料個々の母材の弾性係数 E_0 に変換すれば求めることができる。次に、モデル内の温度分布は 2 章の伝熱計算の結果を用いた。すなわち、①, ② 番のモデルについては冷却水下流側モデルの温度分布、③, ④ 番については冷却水中央部モデルの温度分布、⑤, ⑥ 番については冷却水上流側の温度分布を用いた。さらに、モデル周辺の境界条件は、各々の位置関係によって異なり、全体解析から得られた変形後の変位を採用した。

以上の条件の下に局部応力の解析を有限要素法により行い、その結果を図 16, 図 17 に示す。ここで、引き出し電極は薄板構造物であることから、応力は板厚中心軸上での応力を採用した。電極材料として無酸素銅を用いた場合、図 16 より局部的な最大応力強さはモデル番号 ①～⑥ の全てで ASME - Sec. III で規定された許容値 $3Sm = 11 \text{ kg/mm}^2$ (150°C における) を大幅に超えてしまい、特に、冷却水下流側の矩形引き出し面の角の部分 (①) での最大応力強さは 80.7 kg/mm^2 であり、許容値の 7 倍以上の値となった。これより、引き出し電極の塑性変形によるたわみの増大はもちろん電極の破壊も十分に考えられるので、無酸素銅電極を現在の設計で使用することは不可能であり、大きな設計の変更が必要となる。これに反して、モリブデンを電極材料として用いた場合、図 17 より冷却水下流側の矩形引き出し面の角の部分 (①) で最大応力強さが 68.9 kg/mm^2 であり、許容値 $3Sm = 62 \text{ kg/mm}^2$ (200°C における) をわずかに超えているものの、他の部分 (②～⑥) での最大応力強さは許容値内に収まっている。この許容値を超えた冷却水下流側の矩形引き出し面の角の部分 (①) が応力的に厳しくなる原因は、無酸素銅電極の場合も含めて、位置的に温度上昇が大きいと、図 18 に示されているように、剛性の高い冷却管領域と母材平板からの熱膨張によって、剛性の低い多孔板領域 (母材の $1/3 \sim 1/4$) の角の部分は激しいせん断変形を受けるためと考えられる。したがって、一般に、引き出し面の角の存在は大型矩形電極の構造上の問題であり、この問題を解決するためには、剛性の低い多孔板領域に急激なせん断変形が発生しにくい構造に電極を改良する必要がある。特に、冷却水下流側の矩形多孔板領域の角の部分のみで、応力が許容値を超えたモリブデン電極の場合は、わずかな構造上の設計の変更により、最大応力強さを許容限度内に収められる可能性がある。

現在の電極の構造をそれほど大きく変えないで、せん断変形を減少させるためには、ビーム

引き出し面である多孔板領域を完全な矩形とせず、最もせん断変形が激しい冷却水下流側の多孔板領域の角の部分のビーム引き出し孔を減少させ、できるだけ多孔板領域の角の部分の曲率を大きくすることが最も簡単な方法であると思われる。そこで、図 18 より判断して、多孔板領域の角の部分のビーム引き出し孔を各々 3 個ずつ、計 6 個減少させることによって、どの程度応力の集中が緩和されるかを検討するために、再度、モリブデン電極について応力解析を行った。また、全体で 1032 個のビーム引き出し孔を 6 個減少させることによる透過率の減少率は約 0.6% であり、ビームパワーにはほとんど影響しないと思われる。図 19 に示すモデルについて解析を行った結果、図 20 に示すように、多孔板領域の角の部分の曲率を大きくすることによって、せん断変形はかなり軽減された。その結果、図 21 に示すように、多孔板領域の角の部分で最も激しく集中していた応力は緩和され、許容値 $3 S m = 62 \text{ kg/mm}^2$ 以下に減少した。

以上の局部応力解析結果から、JT-60NBI イオン源電極のような大型矩形電極の材料として、モリブデンは優れた性質を示し、もし、無酸素銅を電極材料として使用する場合は、応力を緩和させるためのベローを設けるとか電極をいくつかのユニットに分割するなどの大きな構造的変更が必要であると思われる。

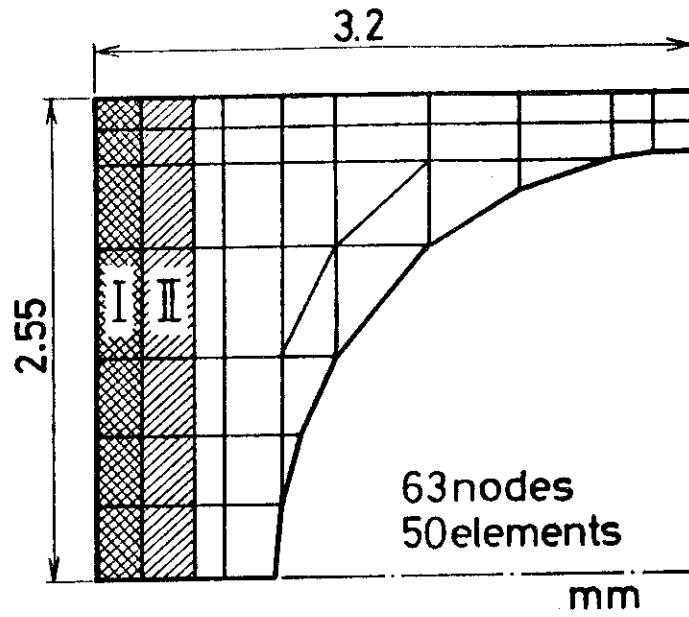


図 15 局部解析モデル

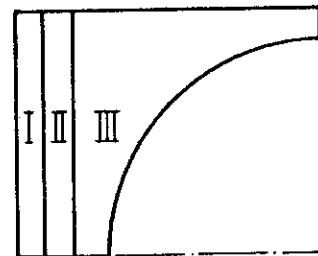


表 5 局部解析モデルの弾性定数

電極材料 領域	無酸素銅			モリブデン		
	I	II	III	I	II	III
E kg/mm ²	6500	7750	12500	18200	21700	35000
ν	0.34			0.30		

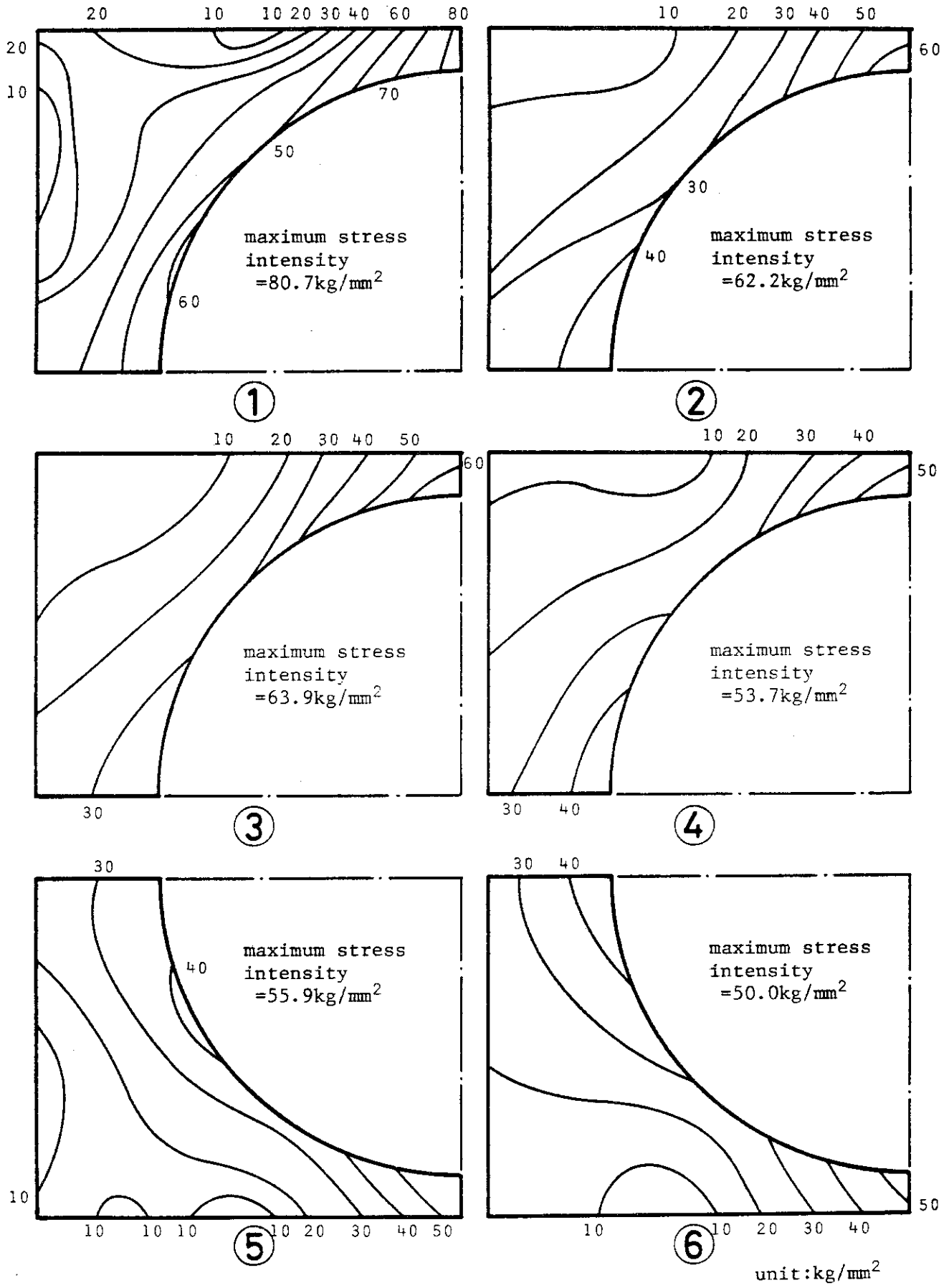


図 16 局部解析による応力強さ分布 (無酸素銅)

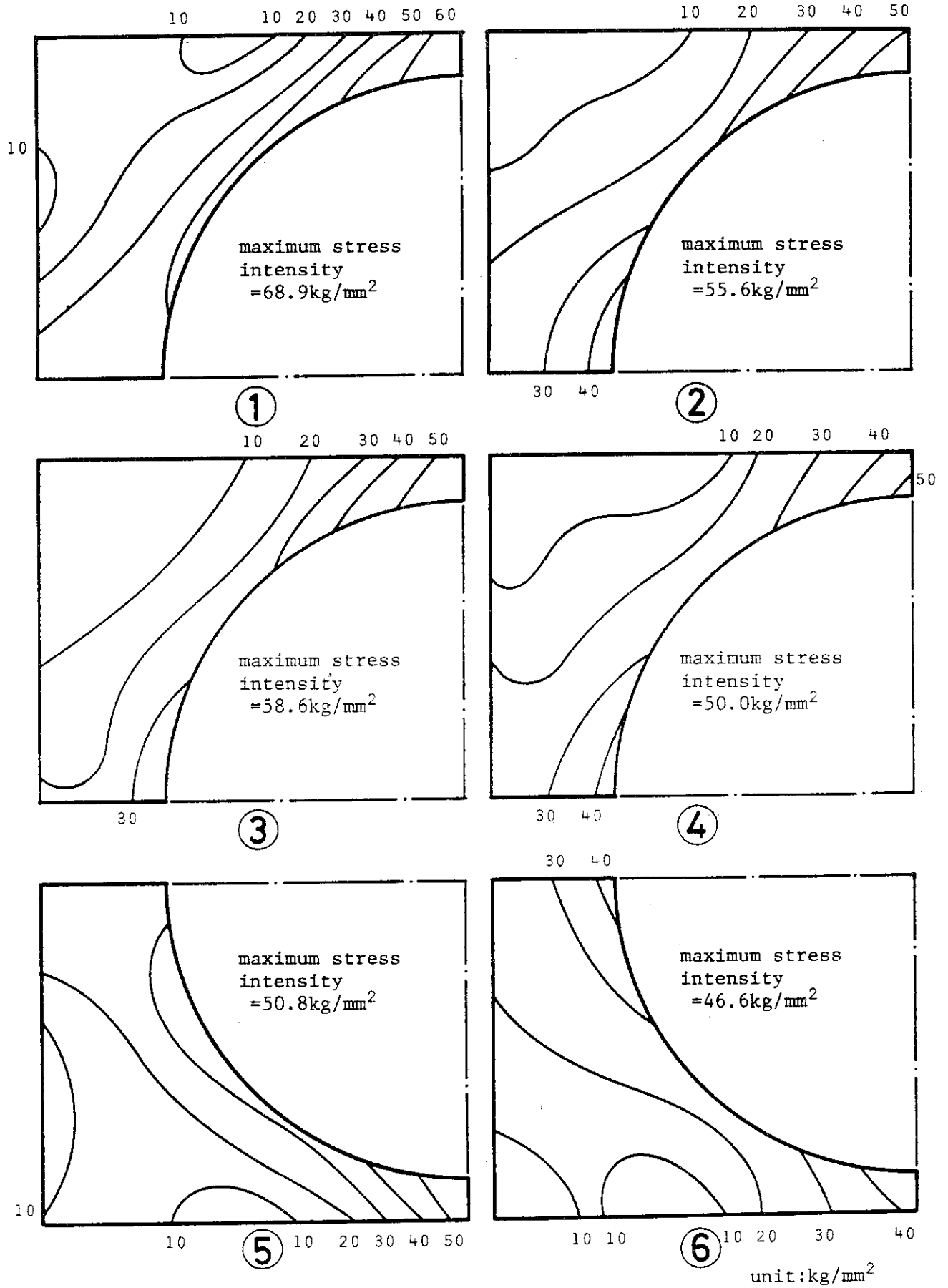


図 17 局部解析による応力強さ分布 (モリブデン)

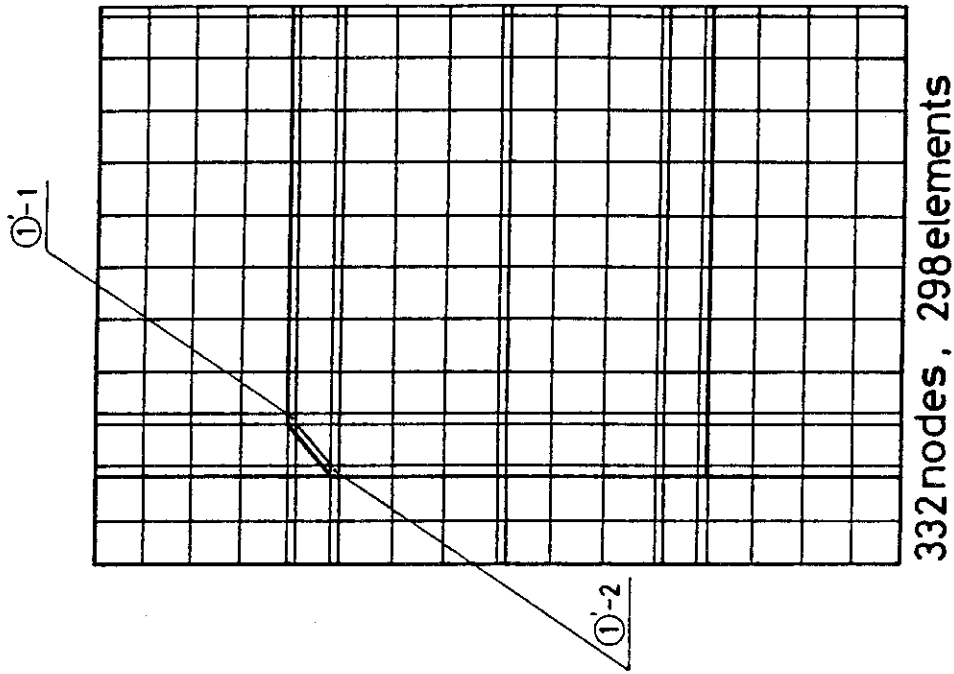


図 19 全体解析モデル (改良後)

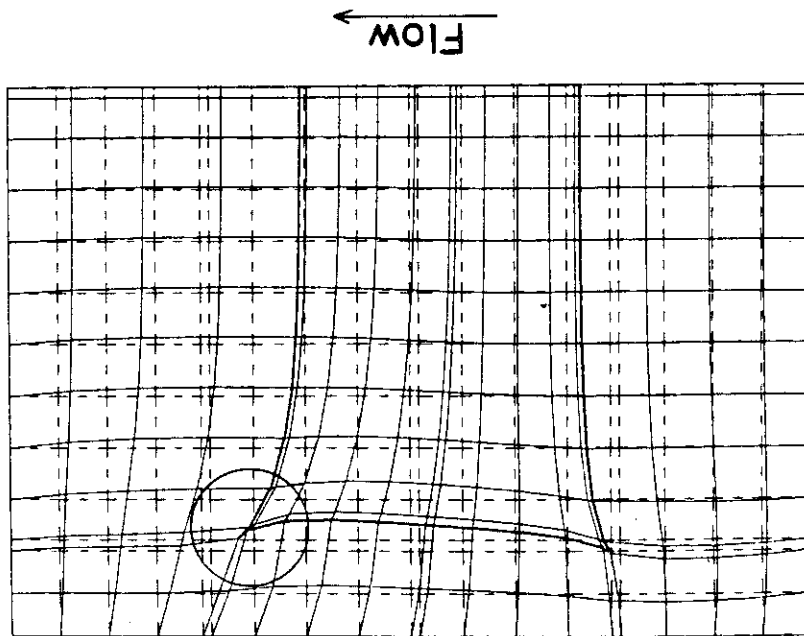


図 18 電極全体の变形機構 (モリブデン)

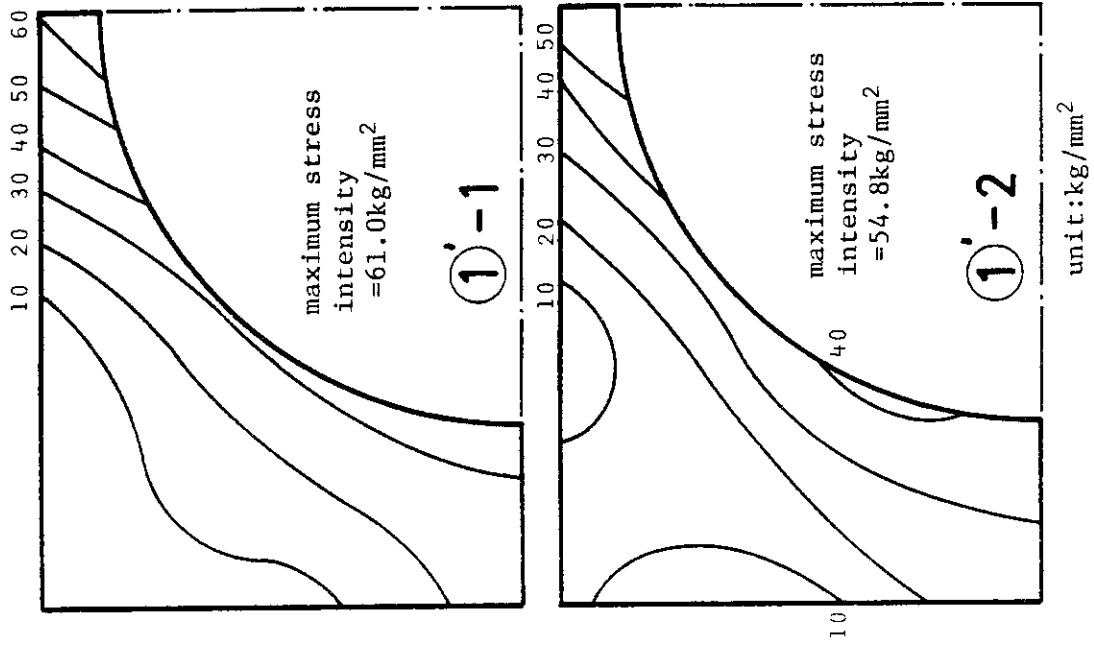


図 21 局部解析による応力強さ分布 (モリブデン)

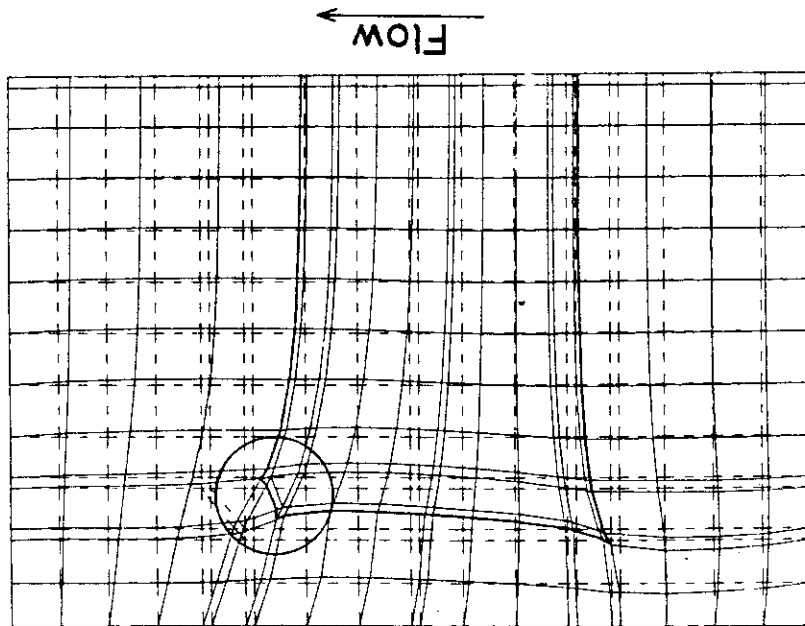


図 20 電極全体の变形機構 (モリブデン)

4. ま と め

JT-60NBI用イオン源引き出し電極の中でExit Gridは比較的熱負荷が大きく、かつ片面入熱である。この熱負荷による電極全体の変形機構および局所的な応力状態を明確にするために、有限要素法を基礎とした応力解析手法を確立した。電極材料として無酸素銅とモリブデンを用いた場合について、ASME-IIIによって評価した結果、引き出し電極多孔部(12cm×27cm)の冷却水下流側の角の部分で応力が最も集中していることが明らかとなり、大型矩形引き出し電極の構造上の問題点が指摘された。特に、無酸素銅電極の場合は、多孔部全体にわたって応力が許容値を超えてしまい、大幅な設計の変更が必要となった。しかし、モリブデン電極の場合は、多孔部下流側の角の部分でのみ応力が許容値をわずかに超えてしまったが、この部分のビーム引き出し孔を各々3個ずつ、計6個削除し丸みをつけた結果、応力は軽減し許容限度内に収めることができた。よって、JT-60用イオン源電極のような熱負荷の厳しい大型電極の場合、剛性と強度が高く、線膨張係数の低いモリブデンは無酸素銅よりも優れた電極材料であることが明らかとなった。しかし、モリブデンはへき開破壊が発生しやすく、また、水素イオンビームによる結晶粒放出の問題もあり¹⁰⁾、今後詳細な調査・検討が必要となる。

謝 辞

この研究を行っていく上で、不断の激励を載いた白形弘文加熱工学第一研究室長、松田慎三郎副主任研究員に、また有益な議論をして載いた同研究室の諸氏に感謝致します。最後に終始御指導と激励を載きました礪核融合研究開発推進センター長、小幡核融合研究部長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松田慎三郎他 : JAERI-M 7655 (1978)
- 2) Y. Okumura, Y. Ohara and T. Ohga : JAERI-M 7696 (1978)
- 3) 近藤梅夫他 : JAERI-M 7612 (1978)
- 4) H. Horiike et al. : Rev. Sci. Instrum. 50 (1979) 1453
- 5) W. D. Turner and M. Simon : "HEATING-3-An IBM 360 Heat Conduction Program", ORNL-TM 3208
- 6) 荒木政則他 : JAERI-M 9198 (1980)
- 7) 柴沼清他 : JAERI-M 8923 (1980)
- 8) 柴沼清他 投稿予定
- 9) SAP-V2 "A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems", Univ. South. Calif., (1976)
- 10) Y. Nakamura et al. : J. Nucl. Mater. 68 (1977) 253

4. ま と め

JT-60NBI用イオン源引き出し電極の中でExit Gridは比較的熱負荷が大きく、かつ片面入熱である。この熱負荷による電極全体の変形機構および局所的な応力状態を明確にするために、有限要素法を基礎とした応力解析手法を確立した。電極材料として無酸素銅とモリブデンを用いた場合について、ASME- Sec. IIIによって評価した結果、引き出し電極多孔部(12cm×27cm)の冷却水下流側の角の部分で応力が最も集中していることが明らかとなり、大型矩形引き出し電極の構造上の問題点が指摘された。特に、無酸素銅電極の場合は、多孔部全体にわたって応力が許容値を超えてしまい、大幅な設計の変更が必要となった。しかし、モリブデン電極の場合は、多孔部下流側の角の部分でのみ応力が許容値をわずかに超えてしまったが、この部分のビーム引き出し孔を各々3個ずつ、計6個削除し丸みをつけた結果、応力は軽減し許容限度内に収めることができた。よって、JT-60用イオン源電極のような熱負荷の厳しい大型電極の場合、剛性と強度が高く、線膨張係数の低いモリブデンは無酸素銅よりも優れた電極材料であることが明らかとなった。しかし、モリブデンはへき開破壊が発生しやすく、また、水素イオンビームによる結晶粒放出の問題もあり¹⁰⁾、今後詳細な調査・検討が必要となる。

謝 辞

この研究を行っていく上で、不断の激励を載いた白形弘文加熱工学第一研究室長、松田慎三郎副主任研究員に、また有益な議論をして載いた同研究室の諸氏に感謝致します。最後に終始御指導と激励を載きました磯核融合研究開発推進センター長、小幡核融合研究部長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松田慎三郎他 : JAERI-M 7655 (1978)
- 2) Y. Okumura, Y. Ohara and T. Ohga : JAERI-M 7696 (1978)
- 3) 近藤梅夫他 : JAERI-M 7612 (1978)
- 4) H. Horiike et al. : Rev. Sci. Instrum. 50 (1979) 1453
- 5) W. D. Turner and M. Simon : "HEATING - 3 - An IBM 360 Heat Conduction Program", ORNL-TM 3208
- 6) 荒木政則他 : JAERI-M 9198 (1980)
- 7) 柴沼清他 : JAERI-M 8923 (1980)
- 8) 柴沼清他 投稿予定
- 9) SAP-V2 "A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems", Univ. South. Calif., (1976)
- 10) Y. Nakamura et al. : J. Nucl. Mater. 68 (1977) 253

4. ま と め

JT-60NBI用イオン源引き出し電極の中でExit Gridは比較的熱負荷が大きく、かつ片面入熱である。この熱負荷による電極全体の変形機構および局所的な応力状態を明確にするために、有限要素法を基礎とした応力解析手法を確立した。電極材料として無酸素銅とモリブデンを用いた場合について、ASME- Sec. IIIによって評価した結果、引き出し電極多孔部(12cm×27cm)の冷却水下流側の角の部分で応力が最も集中していることが明らかとなり、大型矩形引き出し電極の構造上の問題点が指摘された。特に、無酸素銅電極の場合は、多孔部全体にわたって応力が許容値を超えてしまい、大幅な設計の変更が必要となった。しかし、モリブデン電極の場合は、多孔部下流側の角の部分でのみ応力が許容値をわずかに超えてしまったが、この部分のビーム引き出し孔を各々3個ずつ、計6個削除し丸みをつけた結果、応力は軽減し許容限度内に収めることができた。よって、JT-60用イオン源電極のような熱負荷の厳しい大型電極の場合、剛性と強度が高く、線膨張係数の低いモリブデンは無酸素銅よりも優れた電極材料であることが明らかとなった。しかし、モリブデンはへき開破壊が発生しやすく、また、水素イオンビームによる結晶粒放出の問題もあり¹⁰⁾、今後詳細な調査・検討が必要となる。

謝 辞

この研究を行っていく上で、不断の激励を載いた白形弘文加熱工学第一研究室長、松田慎三郎副主任研究員に、また有益な議論をして載いた同研究室の諸氏に感謝致します。最後に終始御指導と激励を載きました磯核融合研究開発推進センター長、小幡核融合研究部長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松田慎三郎他 : JAERI-M 7655 (1978)
- 2) Y. Okumura, Y. Ohara and T. Ohga : JAERI-M 7696 (1978)
- 3) 近藤梅夫他 : JAERI-M 7612 (1978)
- 4) H. Horiike et al. : Rev. Sci. Instrum. 50 (1979) 1453
- 5) W. D. Turner and M. Simon : "HEATING-3 - An IBM 360 Heat Conduction Program", ORNL-TM 3208
- 6) 荒木政則他 : JAERI-M 9198 (1980)
- 7) 柴沼清他 : JAERI-M 8923 (1980)
- 8) 柴沼清他 投稿予定
- 9) SAP-V2 "A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems", Univ. South. Calif., (1976)
- 10) Y. Nakamura et al. : J. Nucl. Mater. 68 (1977) 253