

JAERI-M

7 6 1 2

中性粒子入射装置用イオン源引出電極の
冷却予備実験

1978年3月

近藤梅夫^{*}・堀池寛^{**}・森田洋昭^{***}
菅原亨^{****}・田中茂

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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.

中性粒子入射装置用イオン源引出電極の冷却予備実験

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

近藤 梅夫^{*}・堀池 寛^{**}・森田 洋昭^{***}
菅原 亨^{****}・田中 茂

(1978年2月16日受理)

J T - 60 用中性粒子入射装置イオン源開発の一つとして引出電極の冷却について実験した。10 cm ϕ 強制冷却銅製電極を製作し、加速電圧 30 kV, 電流 3.8 A で 7.3 sec まで、30 kV, 1.3 A のとき 9.4 sec までの運転をした。その時の接地電極の最大温度は、冷却水の核沸騰熱伝達によって 210 °C 程度であった。また冷却水への伝熱量は最大 3.1 kw であった。一方 7 cm ϕ グラフアイト電極の実験では、放電破壊の頻発によって運転が妨げられ、さらに炭化水素イオンが全イオントリームのうち約 10 % を占めた。長いビームパルス巾の運転はそれらのことから行なうことができなかった。

*) 外来研究員 日新電機

**) 特別研究生 大阪大

***) 外来研究員 三菱重工

****) 外来研究員 東芝総研

Preliminary Experiments of Cooled Extraction Grids
in Ion Sources for Neutral Beam Injector

Umeo KONDOW,^{*} Hiroshi HORIIKE,^{**} Hiroaki MORIITA,^{***}
^{****} Tohru SUGAWARA, and Shigeru TANAKA

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received February 16, 1978)

In order to develop an ion source for JT-60 neutral beam injectors, experiments on cooling the extraction grids of the ion source were made. Copper grids with forced water cooling pipes were operated up to 7.3sec in beam extraction current of 3.8A at 30kV and up to 9.4sec in the current of 1.3A at 30kV. A maximum temperature of the grounded electrode was limited below about 210°C because of nucleate boiling heat transfer. The quantity of heat to cooling water was 3.1kW. Operation with graphite grids was interrupted by frequent electrical breakdowns; 10% of the total ion beam was hydro-carbon ions.

Keywords: Neutral Beam Injector, Ion Source, Extraction Grid, Cooling, Long Pulse, Electrode Temperature, Heat Transfer, Nucleate Boiling, Quantity of Heat, Graphite, Breakdown

* On leave from Nissin Electric Co., LTD.

** On leave from Ohsaka University

*** On leave from Mitsubishi Heavy Industires, LTD.

**** On leave from Research and Development Center, Tokyo Shibaura Electric Co., LTD.

目 次

1. はじめに	1
2. 強制冷却電極の実験	1
2.1 実験装置	1
2.2 実験結果	2
3. グラファイト電極の実験	4
4. おわりに	5
謝 辞	5
参考文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. Experiments of grids with forced water cooled pipes	1
2.1 Experimental set-up	1
2.2 Experimental results	2
3. Experiments of graphite grids	4
4. Conclusion	5
Acknowledgement	5
References	5

1. はじめに

JT-60用中性粒子入射装置に用いるイオン源は、高いパワー密度で、かつ長いビーム時間に耐える必要がある。このために生じる重要な問題の一つに、イオン源引出電極の熱負荷およびその冷却がある。さらに除熱能力の大小は、電極間のガス圧の運転領域に影響し、放電破壊や排気システムの能力に密接な関連をもつ。電極冷却の実験はいままでに H.C. Cole¹⁾ や L.D. Stewart²⁾, R. Becherer³⁾ らによって行なわれている。ここでは、電極の熱負荷を除去する 2 つの方法をとりあげ、熱負荷の軽減については考えない。除去の 1 つは、電極への熱負荷を電極の熱容量と熱輻射放出によって耐えられるようにするもの（蓄熱型）であり、もう 1 つは電極への熱流束を強制循環される冷却媒体（水）に伝達させるもの（強制冷却型）である。蓄熱型の利点は冷却パイプを必要とせず、大きなビーム透過率を得ることができる。欠点としては高融点金属を用いるために加工性が悪く、熱応力が大きくなる。強制冷却型の場合は、ほぼ逆のことがいえるが、パイプを用いるために構造の複雑さは増す。実験は強制冷却型として 10 cm ϕ の銅電極で行ない、加速電圧は 30 KV で電流、ビームパルス巾は 1.3 A で 9.4 sec, 3.8 A で 7.3 sec まで行ない、最大除熱能力は 6 KW であり、そのうち 3 KW が水への伝熱量であった。また蓄熱型として 7 cm ϕ のグラファイト電極で行なった。ビームパルス巾は 15 KV 1.4 A で 1 sec まで、電流は 25 KV, 100 msec で 3 A まで行なった。この電極ではスパッタ粒子の影響があり、炭化水素は全ビームの 10 % 程になり、放電破壊の頻発をもたらした。

2. 強制冷却電極の実験

2.1 実験装置

実験は原研イオン源テストスタンド ITS-1 と ITS-2 で行なわれ、原研デュオピガトロン型イオン源を用いた。イオン源の引出電極は各々、無酸素銅で作られ、ビーム孔部は 10 cm ϕ で厚みは 1.6 mm である。図 1 に示すように電極の表面には 16 本の無酸素銅パイプ（外径 1.8 mm ϕ 、内径 1.2 mm ϕ ）が並列に銀ロウ付されている。銅パイプは電極の冷却のために純水が流されるようになっている。ビーム孔は 3.75 mm ϕ で総数は 284 個あけられている。冷却パイプとビーム孔の列は一列ごと交互に配置され、ビーム透過率は 41.5 % である。

測定は、一段加速型では最も熱負荷の大きい接地電極⁴⁾について行なわれた。熱負荷の測定は冷却水の出入口温度差をカロリーメータを用いて行なった。接地電極の中央の温度変化は、中央に埋め込んだ熱電対を用いて測定した。熱電対には素線径 0.1 mm ϕ のクロメルーアルメルシース型熱電対を用いた。また、一部の実験では、電極枠の端の温度も熱電対を用いて測定した。

イオンビームの加速電圧；30 KV, 電流；1 ~ 5 A, ビームパルス巾；0.1 ~ 10 sec の条件下で実験を行なった。

1. はじめに

JT-60用中性粒子入射装置に用いるイオン源は、高いパワー密度で、かつ長いビーム時間に耐える必要がある。このために生じる重要な問題の一つに、イオン源引出電極の熱負荷およびその冷却がある。さらに除熱能力の大小は、電極間のガス圧の運転領域に影響し、放電破壊や排気システムの能力に密接な関連をもつ。電極冷却の実験はいままでに H.C. Cole¹⁾ や L.D. Stewart²⁾, R. Becherer³⁾ らによって行なわれている。ここでは、電極の熱負荷を除去する2つの方法をとりあげ、熱負荷の軽減については考えない。除去の1つは、電極への熱負荷を電極の熱容量と熱輻射放出によって耐えられるようにするもの（蓄熱型）であり、もう1つは電極への熱流束を強制循環される冷却媒体（水）に伝達させるもの（強制冷却型）である。蓄熱型の利点は冷却パイプを必要とせず、大きなビーム透過率を得ることができる。欠点としては高融点金属を用いるために加工性が悪く、熱応力が大きくなる。強制冷却型の場合は、ほぼ逆のことがいえるが、パイプを用いるために構造の複雑さは増す。実験は強制冷却型として 10 cm ϕ の銅電極で行ない、加速電圧は 30 KV で電流、ビームパルス巾は 1.3 A で 9.4 sec, 3.8 A で 7.3 sec まで行ない、最大除熱能力は 6 KW であり、そのうち 3 KW が水への伝熱量であった。また蓄熱型として 7 cm ϕ のグラファイト電極で行なった。ビームパルス巾は 15 KV 1.4 A で 1 sec まで、電流は 25 KV, 100 msec で 3 A まで行なった。この電極ではスパッタ粒子の影響があり、炭化水素は全ビームの 10 % 程になり、放電破壊の頻発をもたらした。

2. 強制冷却電極の実験

2.1 実験装置

実験は原研イオン源テストスタンド ITS-1 と ITS-2 で行なわれ、原研デュオピガトロン型イオン源を用いた。イオン源の引出電極は各々、無酸素銅で作られ、ビーム孔部は 10 cm ϕ で厚みは 1.6 mm である。図 1 に示すように電極の表面には 16 本の無酸素銅パイプ（外径 1.8 mm ϕ 、内径 1.2 mm ϕ ）が並列に銀ロウ付されている。銅パイプは電極の冷却のために純水が流れるようになっている。ビーム孔は 3.75 mm ϕ で総数は 284 個あけられている。冷却パイプとビーム孔の列は一列ごと交互に配置され、ビーム透過率は 41.5 % である。

測定は、一段加速型では最も熱負荷の大きい接地電極⁴⁾について行なわれた。熱負荷の測定は冷却水の出入口温度差をカロリーメータを用いて行なった。接地電極の中央の温度変化は、中央に埋め込んだ熱電対を用いて測定した。熱電対には素線径 0.1 mm ϕ のクロメルーアルメルシーズ型熱電対を用いた。また、一部の実験では、電極枠の端の温度も熱電対を用いて測定した。

イオンビームの加速電圧； 30 KV, 電流； 1 ~ 5 A, ビームパルス巾； 0.1 ~ 10 sec の条件下で実験を行なった。

2.2 実験結果

2.2.1 冷却水の電極での圧力損失

イオン源が運転されていない時の電極に流れる冷却水の圧力損失を調べた。図2に冷却水流量と圧力損失の関係を示す。よく知られている様に圧力損失は摩擦係数も含めると流速を u として $u^{1.757}$ に比例し、(管長 ℓ) / (管径 d) に比例する。測定値は $\ell/d = 10^3$ に対応する。ビーム孔部の 1.2 mm φパイプだけについては $\ell/d \sim 130$ であるので、流量を 4 ℓ/min にしてもビーム孔部の入口と出口での圧力差は 0.5 kg/cm² 程度である。このことから、電極の圧力損失を減らすには、パイプの分岐や継手に工夫をする必要があることがわかる。

2.2.2 電極の熱負荷

引出電流を変えたときの正電極、負電極および接地電極に入った熱負荷を測定した。このとき、加速ギャップ、減速ギャップ、加速電圧と減速電圧はそれぞれ 5.5 mm, 3.2 mm, 30 KV および -1.5 KV で行なった。図3に示すように、正電極への熱負荷は引出電流に比例して増加する。ここで正電極に入る熱量はアーキとビームの両方からくる。負電極の熱負荷も引出電流に比例して増えるが、その絶対値は他の電極と較べて非常に小さく、加速電力の 0.3 % 程度にすぎない。接地電極については他の電極の場合と傾向が異なっている。熱負荷は非常に大きく、引出電流に対する比はあまり依存しなかった。電流値 2 ~ 5 A で熱負荷はほぼ 6 KW 前後である。図3に引出電流に対するビームの発散角の変化をも示した。1 A のときの発散角は測定不能程度に大きく、加速電力に対する接地電極の熱負荷の比をとると、この比は、発散角が大きいほど大きいという傾向はある。また、この比が 10 % 前後と非常に大きいのは減速ギャップを 3.2 mm と最適のアスペクト比⁴⁾の場合より大きくしているためである。

2.2.3 電極の温度上昇

パルス巾が 2 sec 以下の場合

接地電極中央の温度の時間変化の一例を図4に示す。これは加速電圧、電流が 30 KV, 2 A でビームパルス巾 1 sec, 冷却水流量 2.5 ℓ/min のときの温度変化である。

図4からわかるようにビームONとOFFのときの温度の時間応答は、他の時間の応答に較べて速い。この時定数はビームパルス巾に関係なく、10 ~ 15 msec である。いま図4中の破線のようにONとOFF時以外の温度上昇の傾きと同じ曲線を引いて、破線と実線との温度差について考える。熱電対の熱接点が埋め込まれている点は、パイプ間、ビーム孔間の中点であり、パイプ内壁からの距離は約 2.45 mm である。熱伝導の特性時間 τ は、

$$\tau \sim \frac{d_s^2}{4 D} \quad (1)$$

で表わされる。ここで d_s は熱伝導長さ、Dは物質の温度拡散係数である。(1)式から、熱接点からパイプ内壁までの熱伝導の時定数は 13 msec になる。また、パイプ壁が 0 °C に保たれています、局部モデルの二次元非定常熱伝導を計算機でシミュレーションした場合では時定数は 12 m

sec であった。次にこの破線と実線との温度差をビームパルス巾を変えたときの関係を図 5 の上に示す。この温度差は明らかにビームパルス巾には関係なく、加速電流に依存する。熱流束 q と温度差 ΔT には

$$q = k \frac{\Delta T}{d_s} \quad (2)$$

の関係がある。ここで k は熱伝導率である。熱流の断面積は d_s で平均したものをとり、パイプ間の中央に熱源 20 W (5.7 KW負荷に相当) があるとして、(2)式を用いると温度差は 18 °C になる。またシミュレーションの場合では 20 W/孔として温度差は 12 °C である。これら時定数と温度差は実験値と非常に良い一致を示している。このことから、パイプ間に生じる局所的な温度差およびその時定数は(2)および(1)式を用いて概略の値を求めて大きな差はないといえる。ただし、注意する必要があるのは、2.2.2 で示した熱負荷 (図 2) は電流値に対してほとんど変化しないにもかかわらず、いま述べた温度差は電流値とともに小さくなっていることである。この原因として考えられるのは熱負荷の分布が電流によって変化することがあげられるが確認はされていない。

次に、パイプ間の温度差の基盤となるパイプ壁 (バルク) の温度上昇について考える。この温度上昇をビームパルス巾に対してプロットしたものが図 5 の下図である。この温度上昇はビームパルス巾に比例することがわかる。ここにも、先ほど述べた矛盾点がある。

ビームが OFF になった後を図 4 でみると、冷却の時定数は 1.5 sec 程までとその後とで違うのがわかる。ビームパルス巾がもっと短かい場合には、パイプ間の温度差がなくなった時点の温度よりさらに上昇する場合もある。これは電極に支持部 (ビーム孔と直接関係ない部分) があるためであり、この端とビーム孔部の端との間は 3.5 cm である。熱流のある割合は支持部に拡散していく、そこに蓄熱される。この拡散の時定数は、2 sec 前後であり、それ以下のビームパルス巾では、ビームパルス時間中の蓄熱が、ビーム OFF 後には、ビーム孔部に対して相対的に熱源として作用する。このために見掛け上冷却速度が小さくなると考えられる。冷却の過程でパイプ壁の熱伝達係数を求める。図 6 は冷却時の時定数を冷却水流量に対してプロットしたものである。この冷却の時定数は、3 ℥ / min までの流量に対してあまり大きく変化しない。この時定数と電極の熱容量から熱伝達係数を求めた。流量 2 ℥ / min で約 0.7 W / cm² deg が得られた。この値は壁温 0 °C ~ 120 °C の平均である。

パルス巾が 2 sec 以上の場合

ビームパルス巾が 2 sec 以上のときの、接地電極中央の温度の時間変化を図 7、図 8 の①に示す。図 7 は加速電圧、電流が 30 KV, 1.3 A, 冷却水流量 2 ℥ / min でビームパルス巾 9.4 sec の場合である。図 8 は 30 KV, 3.8 A, 2.8 ℥ / min でビームパルス巾 7.3 sec の場合である。ビーム時間が 2 ~ 4 sec 程度経過すると、温度上昇はほぼ飽和に達し、熱伝導の周波数よりもっと大きい周波数の温度の不安定現象が現われ、熱伝達の形式からは、強制対流域での核沸騰熱伝達に移行したことが認められる。サブクール沸騰での熱伝達では、Thomら⁵⁾の式

$$\Delta T_{\text{sat}} = 0.0243 q^{0.5} e^{-\frac{P}{886}} \quad (3)$$

を用いて過熱度 ΔT_{sat} を求めることができる。ここで P は冷却水圧力である。この実験では平均の熱流束は $q \sim 100 \text{ W/cm}^2$ 圧力は約 10 kg/cm^2 とすれば、 $\Delta T_{sat} \sim 20^\circ\text{C}$ を必要とする。図 9 に冷却水圧力に対する電極の飽和温度を示した。実線は圧力に対応する水の飽和温度である。バラツキがあるものの過熱度は 20°C 以下で、 0°C に近い。

また図 8 に電極の支持部の端の温度上昇 (②) および冷却水の温度上昇 (③) を示す。ビーム ON の間に冷却水に移った熱量は、電極に入った全熱量の 60 ~ 70 % 程度であり、他はまだ電極に蓄熱されていることがわかる。沸騰時間中の冷却水温度の上昇率から、水への熱流束の平均増加率は約 $3 \text{ W/cm}^2/\text{sec}$ である。さらに電極端の温度上昇 (②) をみると、その温度はまだ上昇しつつある。これらのことから、電極の中央部では沸騰によって温度の上昇が抑えられているものの、他の部分は温度が飽和していない、過渡状態にある。ビーム OFF 直前の状態で水への熱流束は平均で 57 W/cm^2 、全面積合計で 3.1 KW である。

臨界熱流束は Gambill の式⁶⁾ ($20 < P < 50 \text{ kg/cm}^2$)

$$q_{crit} = 146 (1 + 0.131 u) (1 + 0.03 \Delta T_{sub})$$

や Zenkevich の式⁵⁾ ($1 < P < 15 \text{ kg/cm}^2$) によれば、サブクール度 $\Delta T_{sub} = 50^\circ\text{C}$ で 450 W/cm^2 から 700 W/cm^2 となる、が沸騰熱伝達はバラツキが大きいのでさらに実験を積む必要がある。

3. グラファイト電極の実験

グラファイト電極は、銅の支持枠に熱分解黒鉛の板を固定して組立てた。グラファイト板は厚さ 1.6 mm で 3.75 mm ϕ のビーム孔が 253 ヶあいていて、ビーム透過率 72 % である。接地電極端に接触によって温度を測定した。またイオンビームの成分測定を質量分析器を用いて行なった。

実験結果について、電極端の温度は 25 KV, 3 A, 100 msec, デューティ 1 / 20 でくり返し運転を行なった場合で約 100°C の上昇をみた。温度分布を放物分布と仮定して考えると熱負荷は 80 W/cm^2 、中心温度 800°C 、全熱輻射量約 100 W になる。グラファイト電極では、温度の測定以上に、放電破壊の頻発によって運転が妨げられた。またイオンビームが電極に衝突したときに起る化学スパッタリング⁷⁾ および放電破壊時のスパッタリングによってイオンビーム成分中の炭化水素イオンが増加した。JFT-2 用イオン源（銅電極）に較べて⁸⁾ この割合は大きく約 10 % もあったマス・スペクトルの一例を図 10 に示す。また実験終了後の接地電極の表面の写真を図 11 に示す。これらのことから蓄熱型としてはグラファイト電極は NBI 用イオン源には適さないと思われる。

を用いて過熱度 ΔT_{sat} を求めることができる。ここで P は冷却水圧力である。この実験では平均の熱流束は $q \sim 100 \text{ W/cm}^2$ 圧力は約 10 kg/cm^2 とすれば、 $\Delta T_{sat} \sim 20^\circ\text{C}$ を必要とする。図 9 に冷却水圧力に対する電極の飽和温度を示した。実線は圧力に対応する水の飽和温度である。バラツキがあるものの過熱度は 20°C 以下で、 0°C に近い。

また図 8 に電極の支持部の端の温度上昇 (②) および冷却水の温度上昇 (③) を示す。ビーム ON の間に冷却水に移った熱量は、電極に入った全熱量の 60 ~ 70 % 程度であり、他はまだ電極に蓄熱されていることがわかる。沸騰時間中の冷却水温度の上昇率から、水への熱流束の平均増加率は約 $3 \text{ W/cm}^2/\text{sec}$ である。さらに電極端の温度上昇 (②) をみると、その温度はまだ上昇しつつある。これらのことから、電極の中央部では沸騰によって温度の上昇が抑えられているものの、他の部分は温度が飽和していない、過渡状態にある。ビーム OFF 直前の状態で水への熱流束は平均で 57 W/cm^2 、全面積合計で 3.1 KW である。

臨界熱流束は Gambill の式⁶⁾ ($20 < P < 50 \text{ kg/cm}^2$)

$$q_{crit} = 146 (1 + 0.131 u) (1 + 0.03 \Delta T_{sub})$$

や Zenkevich の式⁵⁾ ($1 < P < 15 \text{ kg/cm}^2$) によれば、サブクール度 $\Delta T_{sub} = 50^\circ\text{C}$ で 450 W/cm^2 から 700 W/cm^2 となる、が沸騰熱伝達はバラツキが大きいのでさらに実験を積む必要がある。

3. グラファイト電極の実験

グラファイト電極は、銅の支持枠に熱分解黒鉛の板を固定して組立てた。グラファイト板は厚さ 1.6 mm で 3.75 mm のビーム孔が 253 個あいていて、ビーム透過率 72 % である。接地電極端に接触によって温度を測定した。またイオンビームの成分測定を質量分析器を用いて行なった。

実験結果について、電極端の温度は 25 KV, 3 A, 100 msec, デューティ 1 / 20 でくり返し運転を行なった場合で約 100°C の上昇をみた。温度分布を放物分布と仮定して考えると熱負荷は 80 W/cm^2 、中心温度 800°C 、全熱輻射量約 100 W になる。グラファイト電極では、温度の測定以上に、放電破壊の頻発によって運転が妨げられた。またイオンビームが電極に衝突したときに起る化学スパッタリング⁷⁾ および放電破壊時のスパッタリングによってイオンビーム成分中の炭化水素イオンが増加した。JFT-2 用イオン源（銅電極）に較べて⁸⁾ この割合は大きく約 10 % もあったマス・スペクトルの一例を図 10 に示す。また実験終了後の接地電極の表面の写真を図 11 に示す。これらのことから蓄熱型としてはグラファイト電極は NBI 用イオン源には適さないと思われる。

4. おわりに

JT-60用イオン源ではビームパワーの2%, 50 KW 10 sec の熱負荷まで許容できなければならぬ。JT-60用では冷却パイプの伝熱面積は 250 cm^2 ほどとることができるので 200 W/cm^2 まで除熱する必要がある。この実験で用いた強制冷却電極では平均で 60 W/cm^2 , 電極中央では 100 W/cm^2 程度の除熱をほぼ 10 sec までできた。臨界熱流束の値は、実験条件が異なれば大きく変わること可能性があるので、今後は、熱流束を増加させ破壊実験を行なう必要がある。一方、蓄熱型に関しては、スパッタ比の小さい材質を選択するとともに放電破壊の起りにくくする構造にして実験する余地が残る。

謝辞

この実験を遂行するにあたり、不断の激励をいただいた白形弘文加熱工学研究室室長に、また終始協力と議論をしていただいた松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の諸氏に感謝するとともに、最後にこの実験をする機会を与えていただいた森茂核融合研究部部長に感謝いたします。

参考文献

- 1) H.C. Cole et al : CLM-P313 (1972)
- 2) L.D. Stewart et al : Proc. of the Second Symp. on Ion Sources and Formation of Ion Beams, Berkeley, California, Oct. 1974
- 3) R. Becherer : Proc. of the 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen (FRG), June 14-18 (1976)
- 4) 松田慎三郎他 : JAERI-M 6431 (1976)
- 5) 日本機械学会編 : 伝熱工学資料 (改訂第3版)
- 6) W.R. Gambill : Nuclear Safety 9 No.6 (1968) 471
- 7) 五明由夫他 : JAERI-M 6432
- 8) 柴田猛順他 : JAERI-M 6990

4. おわりに

JT-60用イオン源ではビームパワーの2%, 50 KW 10 sec の熱負荷まで許容できなければならぬ。JT-60用では冷却パイプの伝熱面積は 250 cm^2 ほどとることができるので 200 W/cm^2 まで除熱する必要がある。この実験で用いた強制冷却電極では平均で 60 W/cm^2 , 電極中央では 100 W/cm^2 程度の除熱をほぼ 10 sec までできた。臨界熱流束の値は、実験条件が異なれば大きく変わることもあるので、今後は、熱流束を増加させ破壊実験を行なう必要がある。一方、蓄熱型に関しては、スパッタ比の小さい材質を選択するとともに放電破壊の起りにくくする構造にして実験する余地が残る。

謝辞

この実験を遂行するにあたり、不断の激励をいただいた白形弘文加熱工学研究室室長に、また終始協力と議論をしていただいた松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の諸氏に感謝するとともに、最後にこの実験をする機会を与えていただいた森茂核融合研究部部長に感謝いたします。

参考文献

- 1) H.C. Cole et al : CLM-P313 (1972)
- 2) L.D. Stewart et al : Proc. of the Second Symp. on Ion Sources and Formation of Ion Beams, Berkeley, California, Oct. 1974
- 3) R. Becherer : Proc. of the 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen (FRG), June 14-18 (1976)
- 4) 松田慎三郎他 : JAERI-M 6431 (1976)
- 5) 日本機械学会編 : 伝熱工学資料 (改訂第3版)
- 6) W.R. Gambill : Nuclear Safety 9 No.6 (1968) 471
- 7) 五明由夫他 : JAERI-M 6432
- 8) 柴田猛順他 : JAERI-M 6990

4. おわりに

JT-60用イオン源ではビームパワーの2%, 50 KW 10 sec の熱負荷まで許容できなければならぬ。JT-60用では冷却パイプの伝熱面積は 250 cm^2 ほどとることができるので 200 W/cm^2 まで除熱する必要がある。この実験で用いた強制冷却電極では平均で 60 W/cm^2 , 電極中央では 100 W/cm^2 程度の除熱をほぼ10 sec までできた。臨界熱流束の値は、実験条件が異なれば大きく変わる可能性があるので、今後は、熱流束を増加させ破壊実験を行なう必要がある。一方、蓄熱型に関しては、スパッタ比の小さい材質を選択するとともに放電破壊の起りにくいくいもの、構造にして実験する余地が残る。

謝 詞

この実験を遂行するにあたり、不断の激励をいただいた白形弘文加熱工学研究室室長に、また終始協力と議論をしていただいた松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の諸氏に感謝するとともに、最後にこの実験をする機会を与えていただいた森茂核融合研究部部長に感謝いたします。

参考文献

- 1) H.C. Cole et al : CLM-P313 (1972)
- 2) L.D. Stewart et al : Proc. of the Second Symp. on Ion Sources and Formation of Ion Beams, Berkeley, California, Oct. 1974
- 3) R. Becherer : Proc. of the 9th Symp. on Fusion Technology, Garmisch-Partenkirchen (FRG), June 14-18 (1976)
- 4) 松田慎三郎他 : JAERI-M 6431 (1976)
- 5) 日本機械学会編 : 伝熱工学資料 (改訂第3版)
- 6) W.R. Gambill : Nuclear Safety 9 No.6 (1968) 471
- 7) 五明由夫他 : JAERI-M 6432
- 8) 柴田猛順他 : JAERI-M 6990

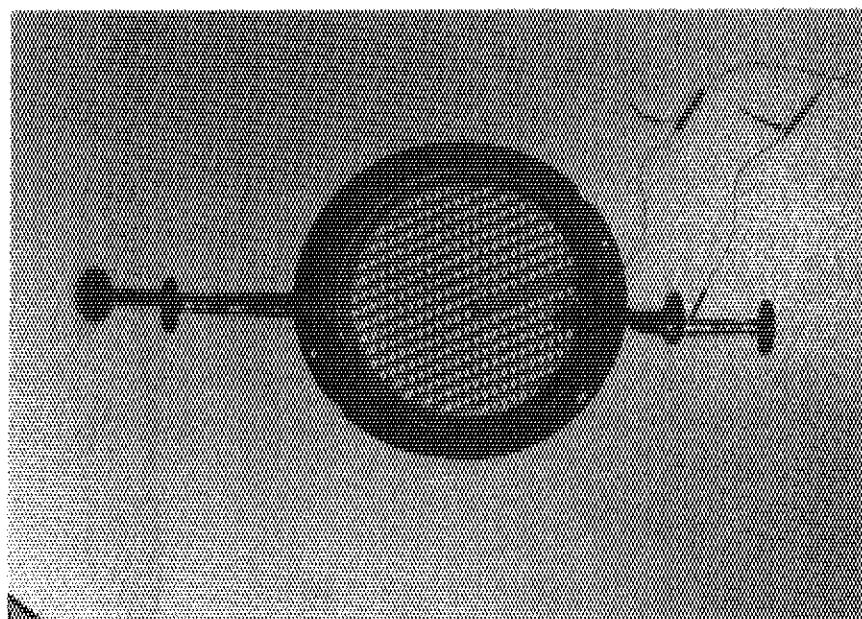


図 1. 強制水冷却電極の写真。熱電対が電極の中央に埋められている。

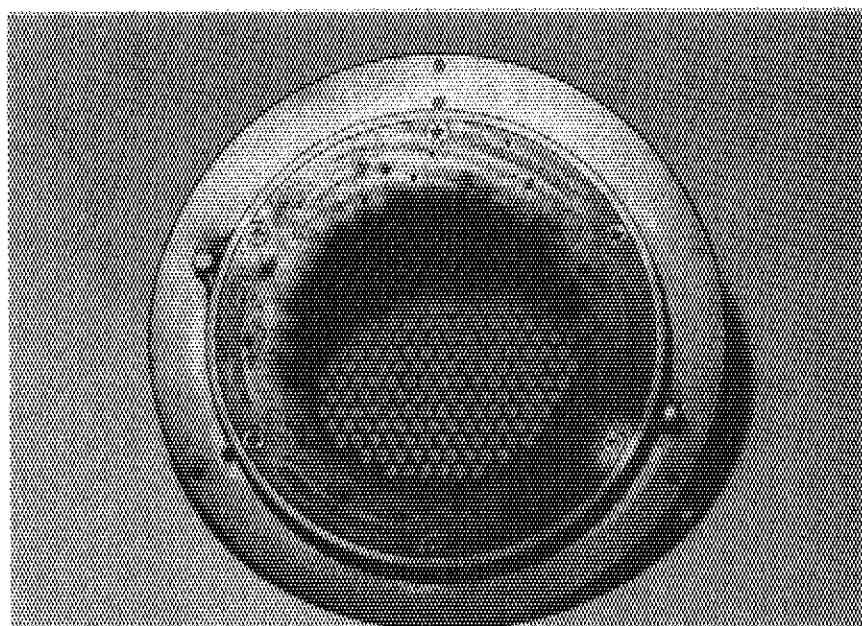


図 11. 実験終了後のグラファイト電極の写真

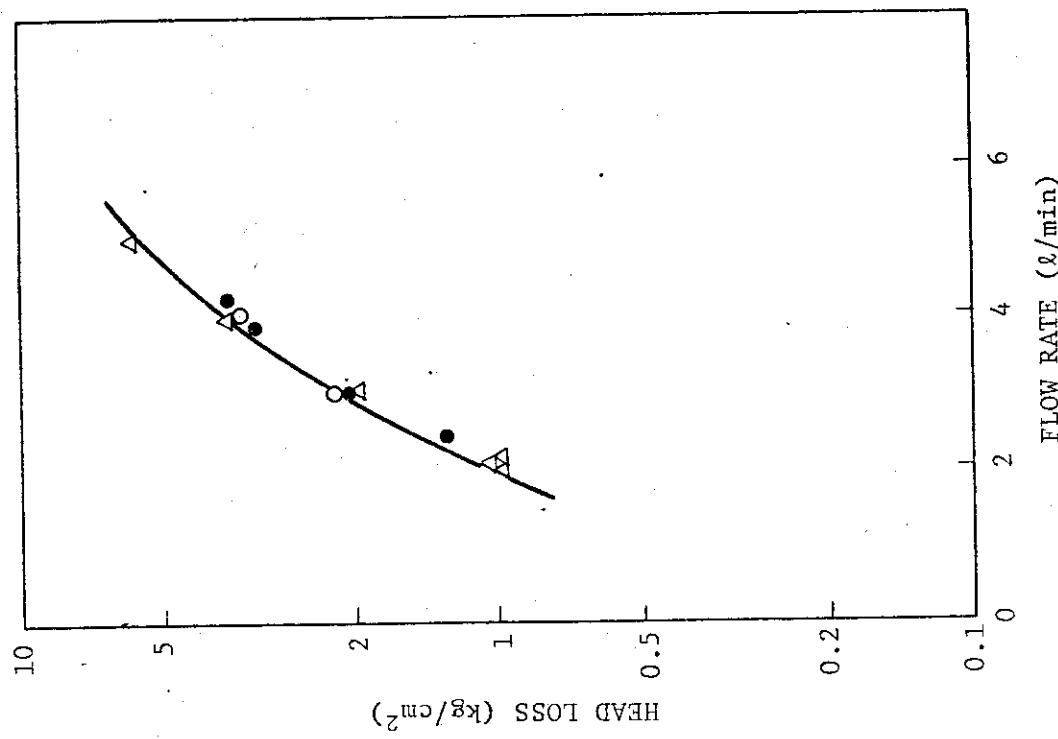
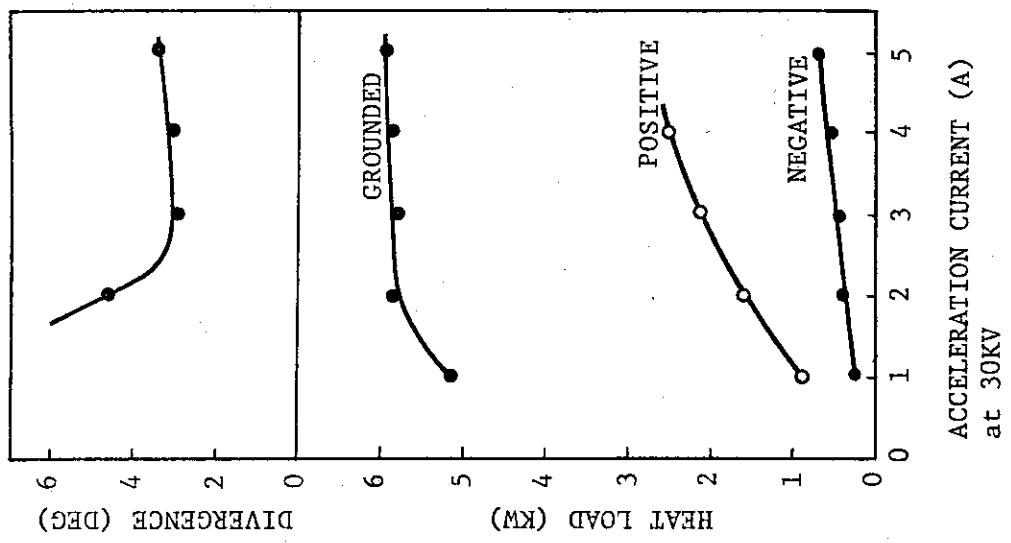


図2. 無負荷時の全冷却水流量に対する電極での冷却水圧力損失。

図3. 加速電流と電極の熱負荷および発散角の関係。
加速電圧 : 30 KV

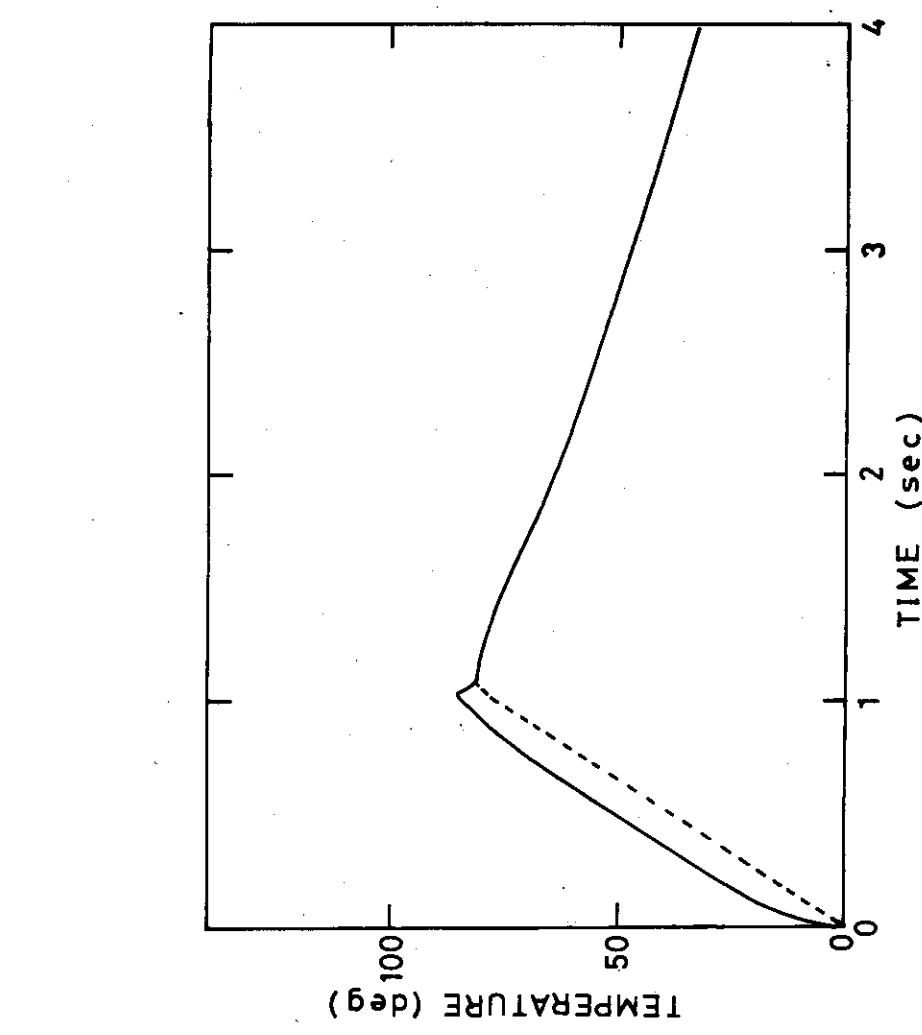


図4. ピークパルス巾が1 sec のときの温度の時間変化。
(実線) : 加速電圧; 30 KV, 電流; 2 A, 全冷却水流量; 2.5 ℓ/min

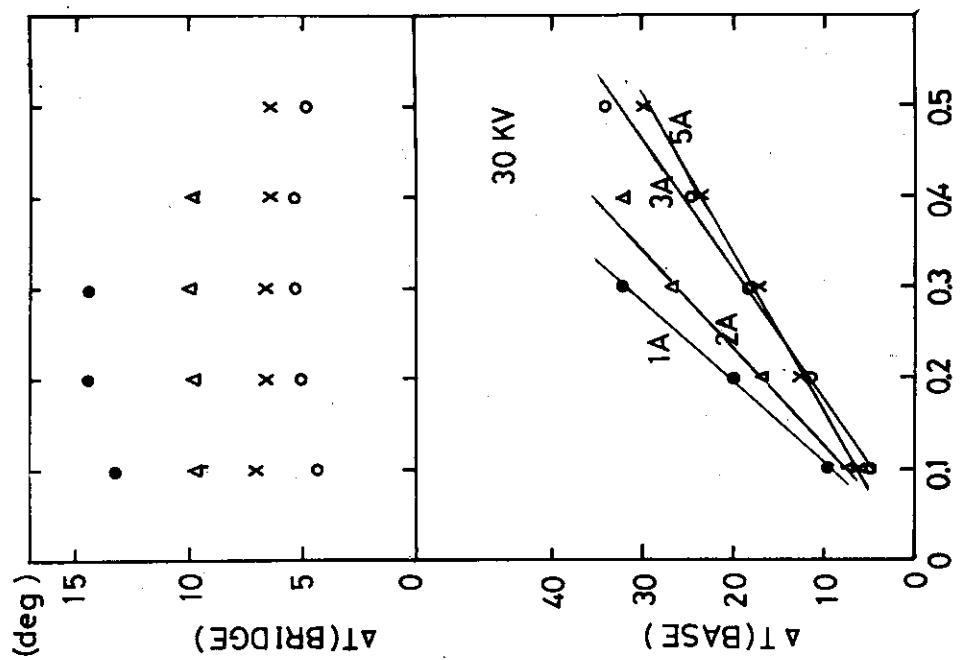


図5. ピークパルス巾を変化させたときのブリッジの温度上昇。
の温度差と、パイプ壁の温度上昇。
加速電圧 30 KV

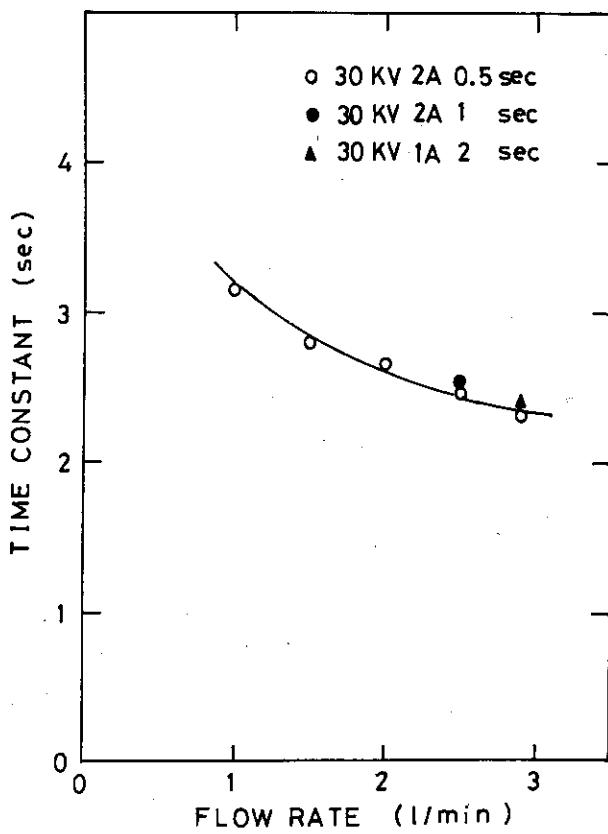


図 6. 全冷却水流量に対する電極の冷却時定数

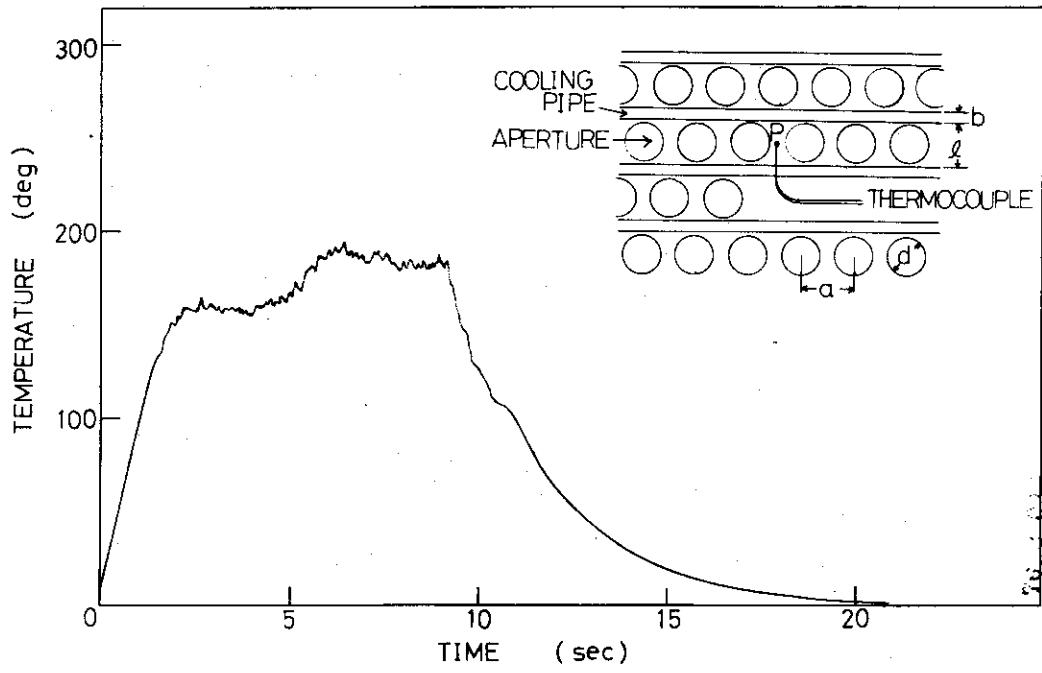


図 7. ビームパルス巾 9.4 sec のときの温度の時間変化。

加速電圧 30 KV, 電流 1.3 A, 全冷却水流量 2 ℥ /min

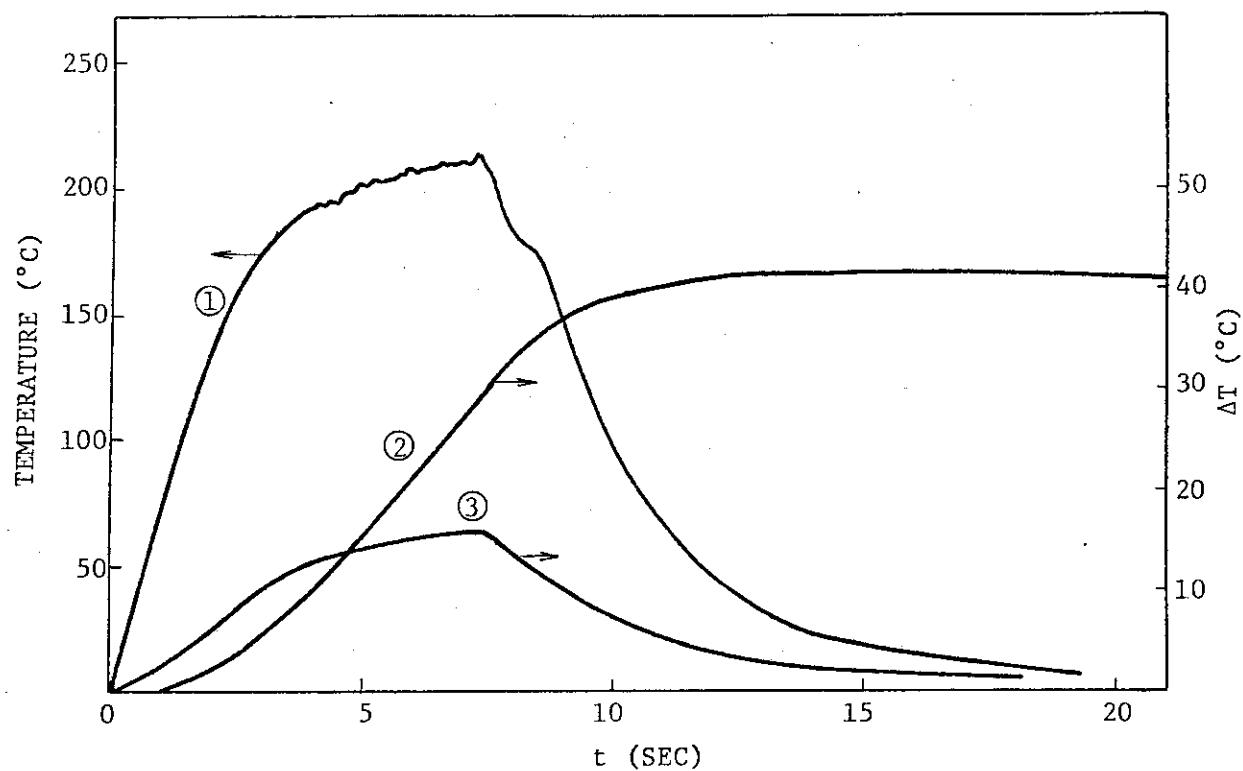


図 8. ピークパルス巾 7.3 sec のときの温度の時間変化。

①電極中央, ②電極支持端 ③冷却水出入口温度差

加速電圧 30 KV, 電流 3.8 A, 全冷却水量 2.8 ℓ/min

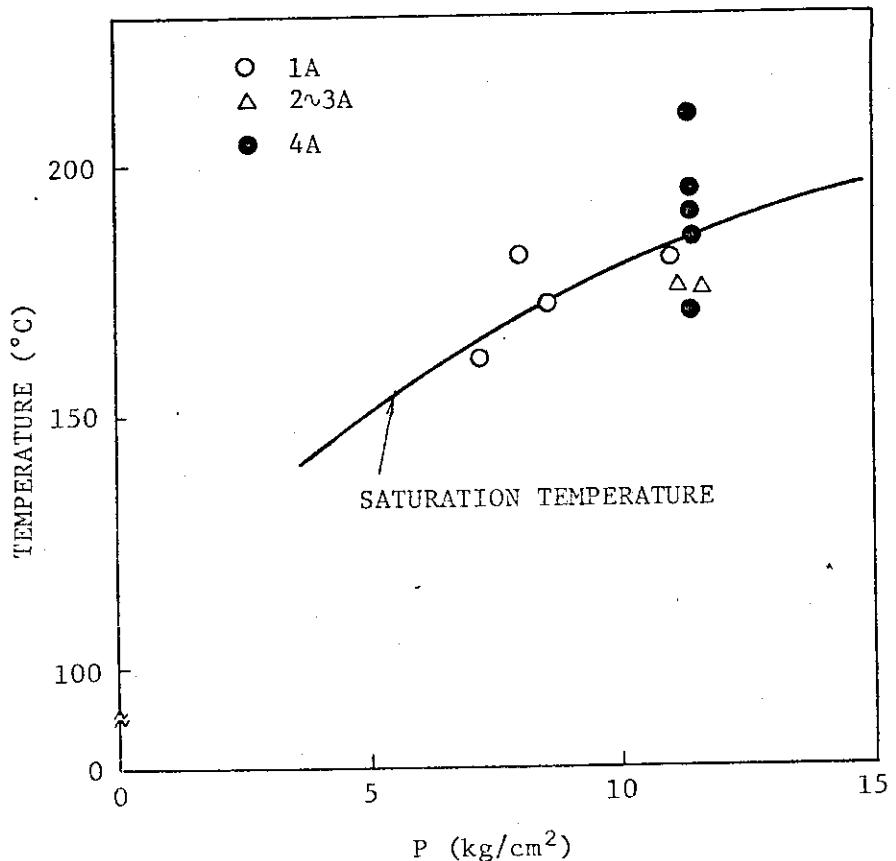


図 9. 冷却水圧力(電極部)と電極の平衡温度。

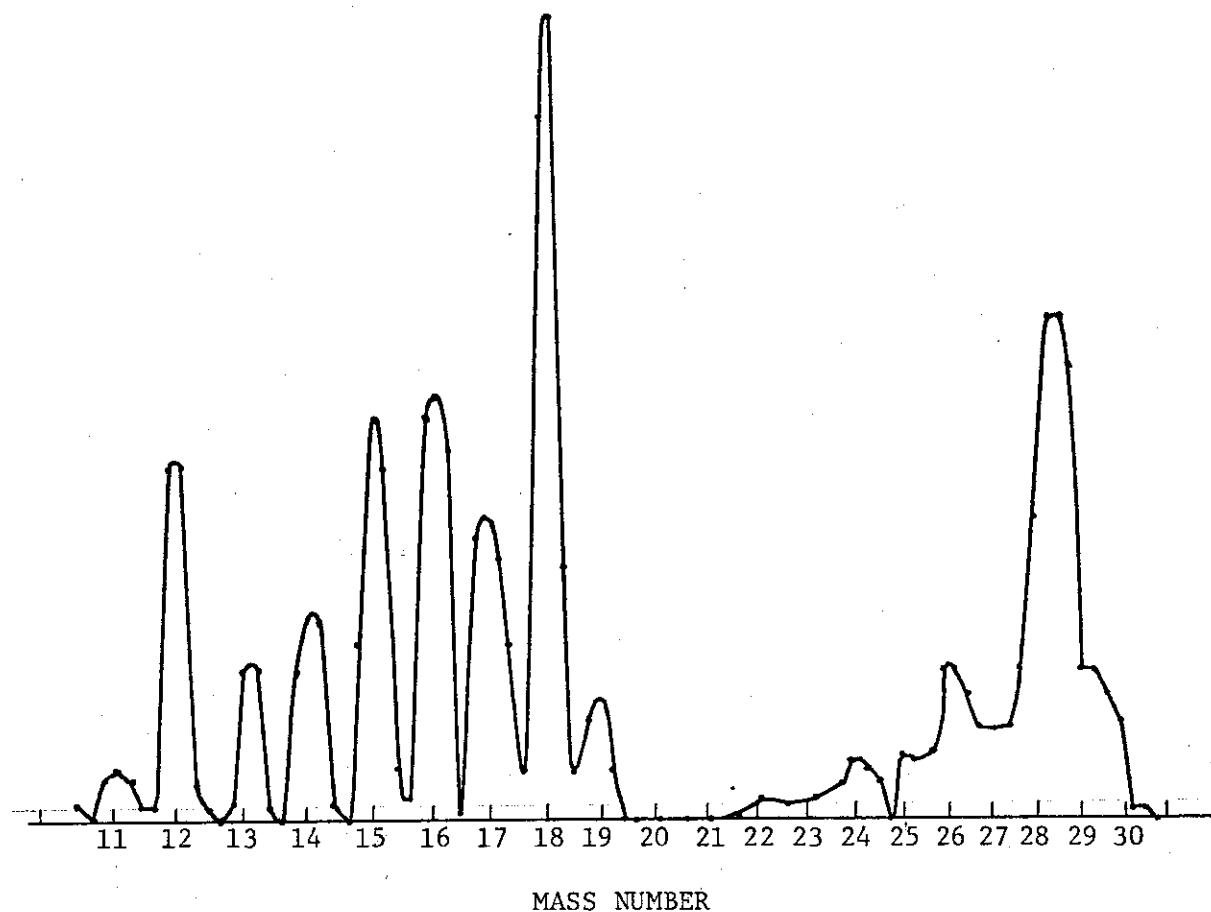


図 10. グラファイト電極を用いたときのマススペクトル

加速電圧 25 KV, 電流 3 A.