

JAERI-M

8013

水素排気用60,000ℓ/secクライオポンプの
水素ビーム入射実験

1978年12月

桜庭順二*・大賀徳道・柴田猛順

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、お申しこしてください。

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.

水素排気用 60,000 ℓ /sec クライオ
ポンプの水素ビーム入射実験

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部
桜庭順二*・大賀徳道・柴田猛順

(1978年11月27日受理)

中性粒子入射加熱装置用クライオポンプでは、必要排気速度の維持に関して、高エネルギー粒子との両立性が重要な問題となる。この問題を調べることを目的として、設計排気速度6万 ℓ /secのクライオポンプ内に、最大26.4KV, 2.7A(パルス巾100msec, パルス間隔1sec)の水素ビームを入射する実験を行った。ビーム入射に伴うクライオパネルへの熱負荷は、0.52W/ m^2 であった。この実験では、ポンプの排気性能に及ぼすビームの影響は見られなかった。また、クライオパネルへの熱入力は、モンテカルロ法による計算から、熱輻射と後方散乱粒子によるものと説明できた。

* 住友重機：外来研究員

JAERI-M 8013

Experiment of Hydrogen Beam Introduction
to 60,000 l/sec Cryopump

Junji SAKURABA,* Tokumichi OHGA and Takemasa SHIBATA

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 27, 1978)

In cryopumps for neutral beam injection system, the high energy beam compatibility of pumps is one of the important problems which are associated with pumping gases. For investigating this problem, hydrogen beam of max. 26.4 KV, 2.7 A, 100 msec pulse at 10 % duty cycle was introduced to 60,000 l/sec cryopump.

In this experiment, it did not affect the pumping performance. The heat input to cryopanel by beam introduction was 0.52 W/m^2 . It was caused by the thermal radiation and the backscattered particles from beam dump.

Key words: Neutral Beam Injection System, Cryopump,
Hydrogen Beam, Cryopanel, Heat Input,
Thermal Radiation, Backscattered Particles

* On leave from Sumitomo Heavy Industries Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験装置	2
2.1 クライオポンプ	2
2.2 ビームライン真空容器	2
2.3 イオン源	2
2.4 ビームダンプ	2
3. 実験結果と考察	3
3.1 ビームダンプ熱入力, 温度	3
3.2 シェブロンバッフル熱入力	3
3.3 クライオパネル熱入力	3
3.4 排気特性	4
3.5 モンテカルロ法による計算	4
4. 結論	5
謝辞	5
参考文献	5
付録A 熱輻射透過率の測定	6
付録B 後方散乱粒子通過率の測定	7
図	8

1. はじめに

JT-60 用中性粒子入射加熱装置 (NBI) の大容量水素排気系として、液体ヘリウム冷却によるクライオコンデンセーションポンプの使用が考えられている。¹⁾ JT-60 用 NBI では、約 10^{-5} Torr の真空度を保つために、 1×10^6 l/sec 程度の排気速度を持ったクライオコンデンセーションポンプが必要とされる。クライオコンデンセーションポンプの基本的排気性能の確認、および取扱い技術の確立を目的として、設計排気速度 1×10^4 l/sec²⁾、および 6×10^4 l/sec³⁾ のクライオポンプを試作して、実験を行ってきた。

NBI クライオポンプでは、必要排気速度の維持に関して、高エネルギー粒子との両立性が重要な問題である。JT-60 用 NBI では、イオン源から引出された約 5 MW の水素イオンビームによって、高エネルギーの後方散乱粒子が生じ、さらに内部構造物の発熱が起こる。そのため、高エネルギー後方散乱粒子と熱輻射の排気性能に与える影響を検討しておく必要がある。この問題を調べることを目的として、先の試作した設計排気速度 6×10^4 l/sec のクライオポンプ内に水素ビームを導入する実験を行なった。

クライオポンプ真空容器を、室温水素ガス流入によって、真空度 2.4×10^{-5} Torr に保ち、内部に設置したビームダンパーに最大 7.03 kw (26.4 kv, 2.7 A, パルス巾 100 msec, パルス間隔 1 sec) の水素ビームを入射した。この結果、クライオパネルには、後方散乱粒子と熱輻射によって 0.52 w/m² の熱入力が見積られた。この熱入力のうち後方散乱粒子によるものは、およそ 50 % である。JT-60 用 NBI では、1 基あたり 1.86 w/m² の後方散乱粒子と高温熱輻射による熱入力が見積られている (デューティサイクルを 1/30 とした)。今回の実験では、その 36 % にあたる熱入力となった。水素イオンビーム入射にともなう真空容器内圧力の変化は認められず、排気特性に何ら影響のないことが判った。

2. 実験装置

実験装置は、イオン源、ビームライン真空容器、クライオポンプ、ビームダンパーから成り、構成の概略を図1に示す。以下に、各機器の概要を記す。

2.1 イオン源

原研デュオピガトロン型イオン源で、JFT-2中性粒子入射加熱実験⁴⁾に用いられたものである。直径7 cmの加速減速電極は、3.75 mmφの引出し孔225個をもつ。加速電圧10~30 kv、引出し電流1~8 Aの水素イオンビームの引出しが可能である。

イオン源からの室温水素ガスの流入によって、クライオポンプ作動時に、真空容器内圧力は、 10^{-3} Torrのオーダーになる。真空度を 10^{-6} ~ 10^{-5} Torrに抑えるために、コンダクタンス390 ℓ/secの中性化セル(内径8 cm、長さ60 cmの水冷真鍮管)をイオン源のビーム引出し部に設置した。中性化セルを設置したことにより、クライオポンプへ導入したビーム組成は、 $H(E) : H(E/2) : H(E/3) : H^+(E) : H_2^+(E) : H_3^+(E) = 42 : 21 : 7 : 18 : 9 : 3$ と推定される^{4), 6)}。

2.2 ビームライン真空容器

二段加速イオン源開発用テストスタンド(ITS-2)⁵⁾真空容器の横ラインを用いた。内径60 cm、長さ3.2 mの円筒状で、排気速度2500 ℓ/secのターボモレキュラーポンプ3台(7500 ℓ/sec)による排気が行なわれる。イオン源から2.2 mの位置に、可動式ビームダンパーを設置した。

2.3 クライオポンプ³⁾(図2)

設計排気速度 3×10^4 ℓ/secの液体ヘリウム冷却クライオコンデンセーションポンプ2台から成る。それぞれ、ビームラインと平行に置かれている。クライオパネルは60 cm × 60 cm、シェブロンバッフルは、開き角度120°で、その開口部は60 cm × 67 cmである。クライオポンプ真空容器は、内径50 cmの溶接ベローズを介して、ITS-2真空容器に接続した。

クライオパネルとシェブロンバッフルへの熱入力は、それぞれ液体ヘリウムと液体窒素の蒸発量を、乾式流量計で測定して求めた。

2.4 ビームダンパ

56 cm × 60 cmの水冷銅板を、ビームラインに垂直な面から30°傾けて、クライオポンプ内に置いた。イオン源からビームダンパー中心までの距離は、約4 mである。30°傾けて設置した目的は、ビーム入射による後方散乱粒子と熱輻射を効率よくクライオパネルに入れるためである。

ビームダンパーの温度測定は、4ヶ所に取付けた熱電対(クロメル-アルメル、0.32 φ耐熱用)で行なった。また、冷却水の入口、出口の温度差を白金抵抗温度計によって測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 ビームダンプ熱入力, 温度

イオン源から引出した水素イオンビームの加速電圧が 26.4 kv (この値は, 今回の実験に使用したイオン源で安定に得られる最大値である) のとき, 引出し電流 3 ~ 5.4 A の範囲でのビームダンプへの熱入力を示したのが図 3 である。イオン源からは, 最大 14.3 kw (パルス巾 100 msec, パルス間隔 1 sec の平均) 引出し, ビームダンプへは, 7.0 kw 入射した。図 3 中には, 入射電流値に換算した値も示しており, 最大 2.7 A である。ビームダンプの受熱面積は, 0.285 m^2 であるから, 最大熱流束は, 23.9 kw/m^2 , 最大入射電流密度は 9.1 A/m^2 である。図 4 は, 熱入力に対するビームダンプ平均温度を, 熱電対による測定から求めたものである。今回の実験範囲では, 温度上昇が線形で, 入熱 1 kw あたり, 26°C の上昇を示しており, 最高温度は 210°C である。3.5 節のモンテカルロ法による計算では, 図 3, 4 に示した電流値, 温度を用いている。

3.2 シェブロンバッフル熱入力

シェブロンバッフルを冷却している液体窒素は, 熱伝導, イオン源からのコールドガスフロー等によって, 蒸発量は 24.6 l/min に保たれている。この状態で, ビーム入射を行なうと, 蒸発量の増加がみられる。この蒸発量の変化からシェブロンバッフルへの熱入力を求めた。図 5 は, ビームダンプを傾けた側のシェブロンバッフル (A 槽とする) の熱入力を, ビームダンプの熱入力に対して示したものである。図には, 3.5 節で詳述する後方散乱粒子と熱輻射の計算値をあわせて示している。ビームダンプの熱入力が 7.0 kw のとき, A 槽で, 149 w/m^2 の熱入力となった。なお, 蒸発量から入熱量を求める際, 別に, 液体窒素槽にニクロム線ヒーターを入れ, ヒーター入熱と蒸発量の関係, 0.316 w/l/min を得ており (図 6), この値を用いて算出している。JT-60 用 NBI では, 熱輻射等により, 305 w/m^2 (デューティサイクル 1/30) の熱負荷が見積られている。本実験では, その 49% に相当する熱入力となった。

今回の実験に使用したクライオポンプのシェブロンバッフルは, 銅製で表面が黒色酸化処理されている。ビーム入射実験後の肉眼による観察では, 全体に黒色化がうすれ, 一部はく離を生じていた。これは, ビームダンプから後方散乱した水素粒子によるスパッタリングが原因である。したがって, シェブロンバッフルの輻射率は, ビーム入射実験前にくらべて小さくなっているものと予想される (付録 A 参照)。この点は, 3.5 節に述べるように, クライオパネルへの熱輻射による熱負荷を大きくしている原因と思われる。

3.3 クライオパネル熱入力

クライオパネルを冷却する液体ヘリウムは, ビーム入射を行なわないとき, 熱伝導, 熱輻射, コールドガスフロー等によって, 19.6 l/min の蒸発量を示している。ビーム入射にともない, 後方散乱粒子, ビームダンパーの発熱による熱輻射のために, ヘリウム蒸発量が増加する。図 7 に, この蒸発量の変化から求めた A 槽のクライオパネルへの熱入力を示す。B 槽については, 蒸

発量が少なく測定不能であった。図7中には、後方散乱粒子と熱輻射による熱入力の計算値をあわせて示してある(3.5節に詳述)。ビームダンプの熱入力が7.0kwのとき、クライオパネルへは、0.18wの入熱となった。パネル単位面積あたりに換算すると 0.52 w/m^2 である。JT-60用NBIクライオポンプでは、デューティサイクル1/30のとき、後方散乱粒子と熱輻射による熱入力は、 1.75 w/m^2 と見積られている。したがって、今回の実験では、実機で予想される値の30%の熱負荷となった。

クライオパネルへの熱入力の測定は、乾式フロート型流量計を用いており、ヘリウム蒸発量と入熱の関係は、次の方法による。液体ヘリウム槽にニクロム線ヒーターを挿入し、供給電力と蒸発量を測定して、 7.2 l/min/w の関係を得た(図8)。この値を用いて、測定した蒸発量から、熱入力を算出した。ここで、入熱が0.1w程度のとき、蒸発量は、1l/minほどで、フロート式流量計の性質上測定誤差が0.5l/min以上出てくる。したがって、図7に示した測定値は、 $\pm 0.05\text{ w}$ の誤差を含んでくる。

3.4 排気特性

イオン源ソースガス導入を定常に行ない、ガスセルを通して $7.5\text{ Torr}\cdot\text{l/sec}$ の室温水素ガス流入となっている。このとき、クライオポンプ真空容器内は、 $2.4 \times 10^{-5}\text{ Torr}$ の圧力に保たれている。この状態で、イオン源からビームを引出しクライオポンプ内に入射させたが、ビーム入射にともなう真空度変化はみられなかった。また、パルス巾100msec、パルス間隔1secのビーム入射を、およそ1.5時間、連続して実験を行なったけれども、真空度には全く変化がみられなかった。その後ビーム入射を休止して、排気速度測定を行なった。図9は、ビーム入射を行なう前の測定結果であるが、ビーム入射実験後も同じ結果が得られた。ビーム入射による後方散乱粒子がクライオパネル面に凝縮した固体水素をたたき、衝撃離脱現象の発生することも考えられていたけれども、今回の実験範囲では観測されなかった。

3.5 モンテカルロ法による計算

シェブロンバッフル、クライオパネルへの後方散乱粒子と熱輻射による熱入力は、モンテカルロ法によって計算することができる。⁷⁾後方散乱粒子については、ビームダンプでのエネルギー反射率、シェブロンバッフルのエネルギー透過率をモンテカルロ法で計算し、ビームダンプへの入射粒子数から、それぞれの熱入力を求められる。一方、熱輻射については、シェブロンバッフルの輻射線透過率をモンテカルロ法で計算し、ビームダンプの温度から、熱入力を求めることができる。

図5、7は、上記の方法で計算した結果と測定値とともに示したものである。各図中で、一点鎖線は、後方散乱粒子による入熱、二点鎖線は熱輻射による入熱、および、実線は両者の合計した値を示している。

実測値と計算値は、シェブロンバッフルについては、良い一致をみているが、クライオパネルでは、3倍程度計算値が低い値を示している。この原因の一つは、シェブロンバッフルの場合、熱入力が大きく測定精度が良いのに対して、クライオパネルでは、0.1w程の熱入力のため測定誤差が生じやすくなることにある。したがって、フロート式ヘリウム流量計を用いた熱入力の測

定では、0.1 w の入熱に対して、計算値と測定値とが、5 倍の差を生じてでも有意の差とは言えない。

次に考えられる原因は、シェブロンバッフルの輻射率が減少し、熱輻射透過率が増していることがあげられる（付録 A 参照）

なお、後方散乱粒子の通過率は、実験により計算値の信頼性を確認している（付録 B 参照）。

4. 結 論

今回実施した水素イオンビーム入射実験は、26.4 kv, 2.7 A のビームを、パルス巾 100 msec, パルス間隔 1 sec で行なった。この実験では、クライオポンプの排気性能にビーム入射による影響は何ら現れなかった。液体窒素、液体ヘリウムの熱入力増加に伴う蒸発量増加を測定し、熱輻射と後方散乱粒子による熱負荷であることが判った。JT-60 用 NBI では、パルス巾が最大 10 sec（デューティサイクルは 1/30 または 1/60）となるため、今回行なった 100 msec のパルス巾に比べて 100 倍の時間ビームが入ることになる。その状態でも排気特性に影響がないと断言することはできない。したがって、今後、長時間のビーム引出し可能なイオン源の開発を待つて同様な実験を試みる必要があるだろう。また、クライオ面に凝縮されている固体水素が、後方散乱粒子によって衝撃離脱する現象の可能性についても、実験で調べてゆく必要があるだろう。

謝 辞

この研究を行なっていく上で終始協力と議論をしていただいた白形弘文室長、松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の方々に感謝します。また、研究の機会を与えて載きました森核融合研究開発推進センター長および小幡核融合研究部長に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 松田他：JAERI -M 7655 (1978)
- 2) 柴田他：JAERI -M 7792 (1978)
- 3) 柴田, 奥村, 桜庭：JAERI -M 7869 (1978)
- 4) T. SUGAWARA et al. : JAERI -M 7043 (1977)
- 5) 大賀他：JAERI -M 7604 (1978)
- 6) 柴田, 伊藤, 白形, 菅原：JAERI - M 6990 (1977)
- 7) 桜庭, 柴田：TAERI -M 7611 (1978)
- 8) 伝熱工学資料(改訂第 3 版) 日本機械学会編

定では、0.1 w の入熱に対して、計算値と測定値とが、5 倍の差を生じても有意の差とは言えない。

次に考えられる原因は、シェブロンバッフルの輻射率が減少し、熱輻射透過率が増していることがあげられる（付録 A 参照）

なお、後方散乱粒子の通過率は、実験により計算値の信頼性を確認している（付録 B 参照）。

4. 結 論

今回実施した水素イオンビーム入射実験は、26.4 kv, 2.7 A のビームを、パルス巾 100 msec, パルス間隔 1 sec で行なった。この実験では、クライオポンプの排気性能にビーム入射による影響は何ら現れなかった。液体窒素、液体ヘリウムの熱入力増加に伴う蒸発量増加を測定し、熱輻射と後方散乱粒子による熱負荷であることが判った。JT-60 用 NBI では、パルス巾が最大 10 sec（デューティサイクルは 1/30 または 1/60）となるため、今回行なった 100 msec のパルス巾に比べて 100 倍の時間ビームが入ることになる。その状態でも排気特性に影響がないと断言することはできない。したがって、今後、長時間のビーム引出し可能なイオン源の開発を待つて同様な実験を試みる必要があるだろう。また、クライオ面に凝縮されている固体水素が、後方散乱粒子によって衝撃離脱する現象の可能性についても、実験で調べてゆく必要があるだろう。

謝 辞

この研究を行なっていく上で終始協力と議論をしていただいた白形弘文室長、松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の方々に感謝します。また、研究の機会を与えて載きました森核融合研究開発推進センター長および小幡核融合研究部長に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 松田他：JAERI -M 7655 (1978)
- 2) 柴田他：JAERI -M 7792 (1978)
- 3) 柴田, 奥村, 桜庭：JAERI -M 7869 (1978)
- 4) T. SUGAWARA et al. : JAERI -M 7043 (1977)
- 5) 大賀他：JAERI -M 7604 (1978)
- 6) 柴田, 伊藤, 白形, 菅原：JAERI - M 6990 (1977)
- 7) 桜庭, 柴田：TAERI -M 7611 (1978)
- 8) 伝熱工学資料(改訂第 3 版) 日本機械学会編

定では、0.1 w の入熱に対して、計算値と測定値とが、5 倍の差を生じてでも有意の差とは言えない。

次に考えられる原因は、シェブロンバッフルの輻射率が減少し、熱輻射透過率が増していることがあげられる（付録 A 参照）

なお、後方散乱粒子の通過率は、実験により計算値の信頼性を確認している（付録 B 参照）。

4. 結 論

今回実施した水素イオンビーム入射実験は、26.4 kv, 2.7 A のビームを、パルス巾 100 msec, パルス間隔 1 sec で行なった。この実験では、クライオポンプの排気性能にビーム入射による影響は何ら現れなかった。液体窒素、液体ヘリウムの熱入力増加に伴う蒸発量増加を測定し、熱輻射と後方散乱粒子による熱負荷であることが判った。JT-60 用 NBI では、パルス巾が最大 10 sec（デューティサイクルは 1/30 または 1/60）となるため、今回行なった 100 msec のパルス巾に比べて 100 倍の時間ビームが入ることになる。その状態でも排気特性に影響がないと断言することはできない。したがって、今後、長時間のビーム引出し可能なイオン源の開発を待つて同様な実験を試みる必要があるだろう。また、クライオ面に凝縮されている固体水素が、後方散乱粒子によって衝撃離脱する現象の可能性についても、実験で調べてゆく必要があるだろう。

謝 辞

この研究を行なっていく上で終始協力と議論をしていただいた白形弘文室長、松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の方々に感謝します。また、研究の機会を与えて載きました森核融合研究開発推進センター長および小幡核融合研究部長に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 松田他：JAERI -M 7655 (1978)
- 2) 柴田他：JAERI -M 7792 (1978)
- 3) 柴田, 奥村, 桜庭：JAERI -M 7869 (1978)
- 4) T. SUGAWARA et al. : JAERI -M 7043 (1977)
- 5) 大賀他：JAERI -M 7604 (1978)
- 6) 柴田, 伊藤, 白形, 菅原：JAERI - M 6990 (1977)
- 7) 桜庭, 柴田：TAERI -M 7611 (1978)
- 8) 伝熱工学資料(改訂第 3 版) 日本機械学会編

定では、0.1 w の入熱に対して、計算値と測定値とが、5 倍の差を生じても有意の差とは言えない。

次に考えられる原因は、シェブロンバッフルの輻射率が減少し、熱輻射透過率が増していることがあげられる（付録 A 参照）

なお、後方散乱粒子の通過率は、実験により計算値の信頼性を確認している（付録 B 参照）。

4. 結 論

今回実施した水素イオンビーム入射実験は、26.4 kv, 2.7 A のビームを、パルス巾 100 msec, パルス間隔 1 sec で行なった。この実験では、クライオポンプの排気性能にビーム入射による影響は何ら現れなかった。液体窒素、液体ヘリウムの熱入力増加に伴う蒸発量増加を測定し、熱輻射と後方散乱粒子による熱負荷であることが判った。JT-60 用 NBI では、パルス巾が最大 10 sec（デューティサイクルは 1/30 または 1/60）となるため、今回行なった 100 msec のパルス巾に比べて 100 倍の時間ビームが入ることになる。その状態でも排気特性に影響がないと断言することはできない。したがって、今後、長時間のビーム引出し可能なイオン源の開発を待つて同様な実験を試みる必要があるだろう。また、クライオ面に凝縮されている固体水素が、後方散乱粒子によって衝撃離脱する現象の可能性についても、実験で調べてゆく必要があるだろう。

謝 辞

この研究を行なっていく上で終始協力と議論をしていただいた白形弘文室長、松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の方々に感謝します。また、研究の機会を与えて載きました森核融合研究開発推進センター長および小幡核融合研究部長に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 松田他：JAERI -M 7655 (1978)
- 2) 柴田他：JAERI -M 7792 (1978)
- 3) 柴田, 奥村, 桜庭：JAERI -M 7869 (1978)
- 4) T. SUGAWARA et al. : JAERI -M 7043 (1977)
- 5) 大賀他：JAERI -M 7604 (1978)
- 6) 柴田, 伊藤, 白形, 菅原：JAERI - M 6990 (1977)
- 7) 桜庭, 柴田：TAERI -M 7611 (1978)
- 8) 伝熱工学資料(改訂第3版) 日本機械学会編

付録 A. 熱輻射透過率の測定

シェブロンバッフルの熱輻射透過率を測定する実験を行なった。実験装置の概略を図 10 に示す。排気速度 6 万 l/sec クライオポンプのシェブロンバッフル前面に、ニクロム線ヒーターを設置し、ヒーター入力を 0 ~ 320 w まで変えてシェブロンバッフル、クライオパネルへの熱入力を測定した。それぞれの熱入力は、シェブロンバッフル、クライオパネルを冷却している液体窒素、液体ヘリウムの蒸発量変化を乾式フロート型流量計で測定して求めた。ここで、蒸発量から熱入力の算定は、図 6, 8 の実験結果 (液体窒素槽、液体ヘリウム槽にヒーターを入れ、入熱と蒸発量の関係を測定) を用いた。

図 11 に各々の熱入力の測定結果を示す。熱輻射透過率 R_t は、シェブロンバッフルへの熱入力 Q_b とクライオパネルへの熱入力 Q_c から、

$$\begin{aligned} R_t \epsilon_c &= Q_c / Q_b \\ &= 3.95 \times 10^{-3} \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

となる。ここで ϵ_c はクライオパネルの輻射率である。

一方、シェブロンバッフルの熱輻射透過率は、モンテカルロ法を用いて計算できる。⁷⁾この場合、シェブロンバッフルの輻射率 ϵ_b を決定しておくことが必要となる。図 12 は、 ϵ_b に対して計算された透過率 R_t を示している。 $R_t \epsilon_c$ の測定値 3.95×10^{-3} と図の計算値を用いて ϵ_b と ϵ_c の値が予想できる。黒色酸化銅 (シェブロンバッフル) の輻射率は、 $\epsilon_b \sim 0.07$ である。⁸⁾ 図 12 から $\epsilon_b = 0.75$ のとき、 $R_t = 1.3 \times 10^{-2}$ となり、 $\epsilon_c = 0.07$ のとき $R_t \epsilon_c = 9.1 \times 10^{-4}$ となる。実測値(1)と比較して、 $R_t \epsilon_c$ の値は 23% にしかない。この原因として、

- ① シェブロンバッフル面の黒色酸化が不十分なために ϵ_b 値が 0.6 ~ 0.7 程度になっている。
- ② クライオパネル面に凝縮した固体水素の影響で $\epsilon_c \sim 0.2$ 程度になっている。

などの点が考えられる。

付録 B. 後方散乱粒子通過率の測定

シェブロンバッフルの後方散乱粒子通過率を測定する実験を行なった。実験装置の概略を図13に示す。水素イオンビームはデュオピガトロン型イオン源(7 cm ϕ)から引出した(ビーム組成は, $H^+ : H_2^+ : H_3^+ = 61 : 29 : 10$)。平板状ビームダンパー(銅製)の中央に開口部(10 \times 80)を設け,裏面にシェブロンバッフル(銅製, 開き角度 120 $^\circ$)を取付けた。開口部へのビーム入射熱量はカロリメータ(冷却水の温度上昇により入熱を測定する)を用いた。一方, シェブロンバッフル通過ビーム熱量は, バッフル後方(イオン源に対して)に設置した 0.01 mm 厚の銅板(10 \times 80)の温度上昇を CA 熱電対(シース径 0.5 ϕ)で測定して求めた。他に, 真空容器壁等からの後方散乱粒子, 熱輻射を避けるためにシールド板を取付けた。開口部入射量 $Q_{in}(w)$ と, シェブロンバッフル通過量 $Q_t(w)$ を測定することにより, エネルギー通過率 $E_t = Q_t/Q_{in}$ が求められる。図 14 は, 加速電圧 10 ~ 25 kv のときの E_t の測定値を示す。実線は, モンテカルロ法による計算値である。この結果, 加速電圧 10 ~ 25 kv のときは, $\pm 20\%$ の範囲内で計算値が信頼できることが判った。

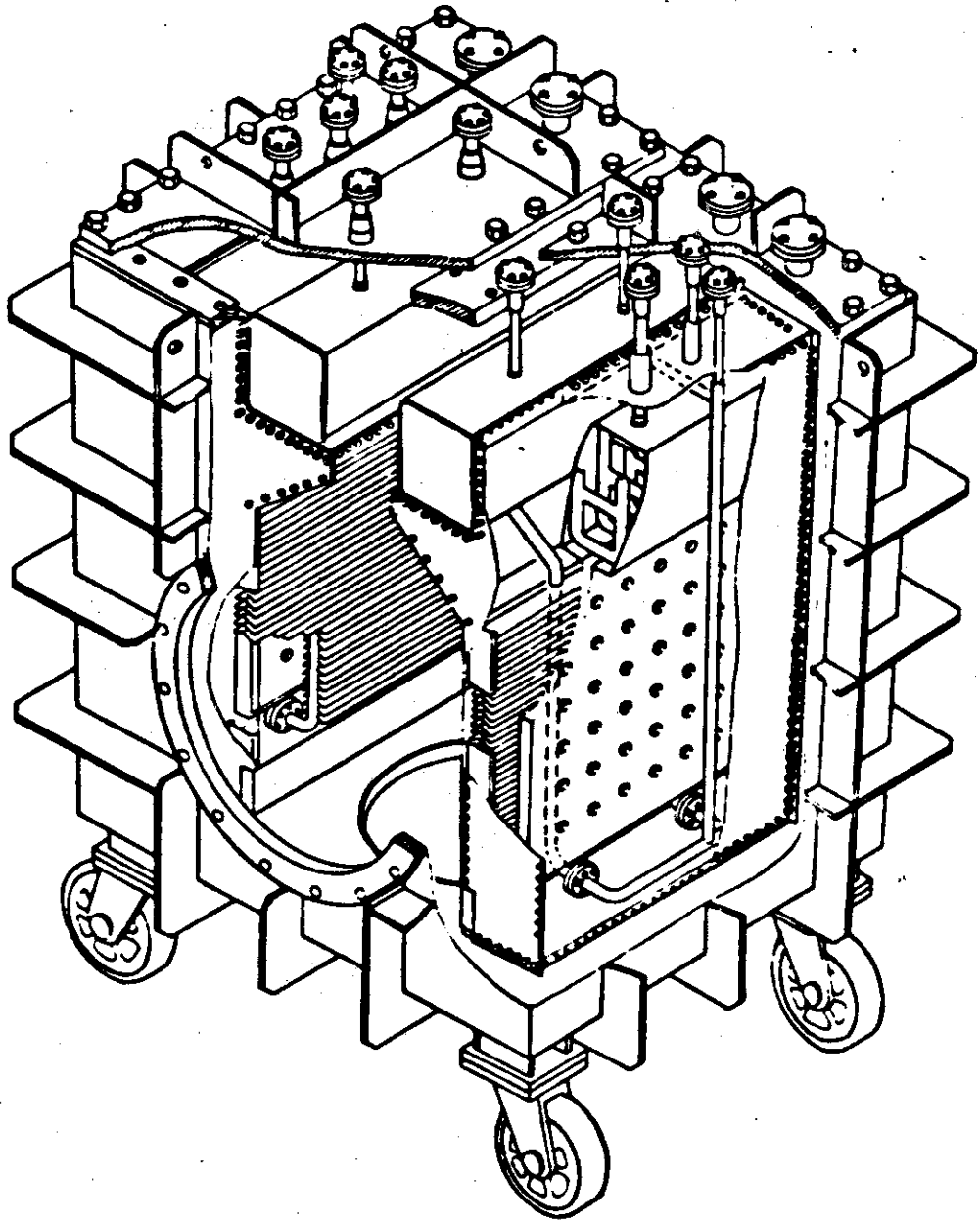


図 2 60,000 ℓ /sec クライオポンプ

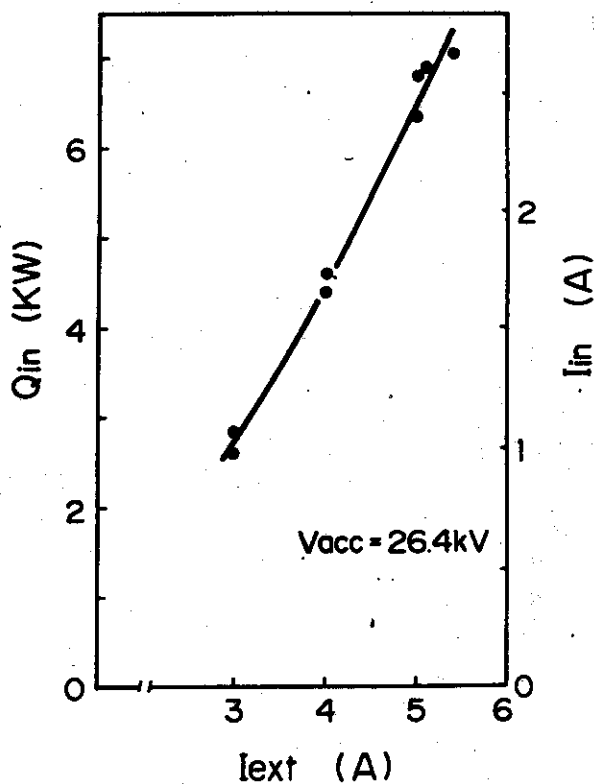


図3 引出し電流 I_{ext} に対するビームダンプ入熱量 Q_{in} と入射電流 I_{in} 。
 Q_{in} はデューティ (1/10 1/20) と乗じた値を示す。

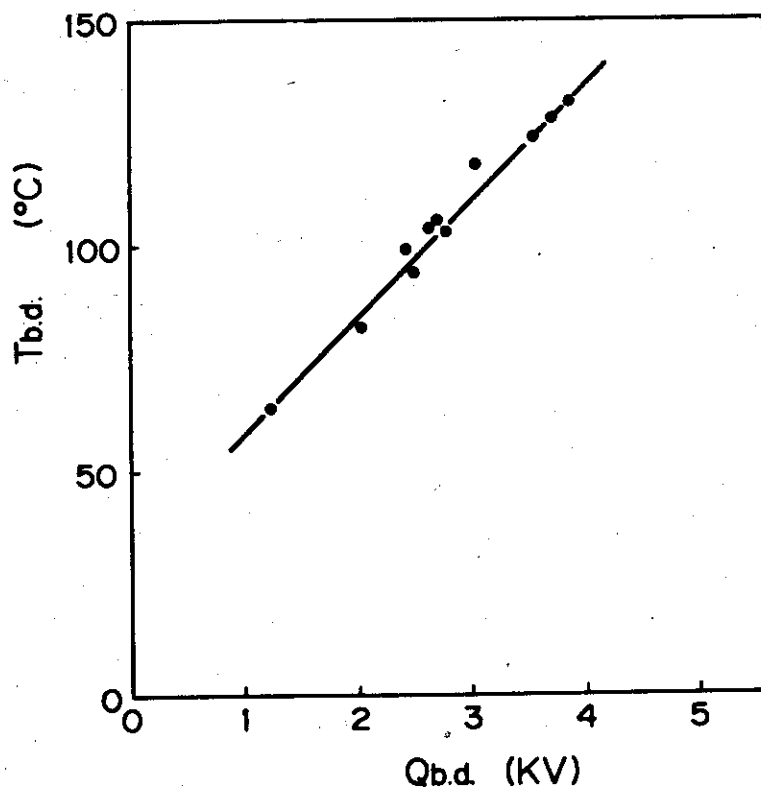


図4 ビームダンプ入熱量 $Q_{b.d.}$ に対する温度 $T_{b.d.}$ 。
 温度は熱電対による測定

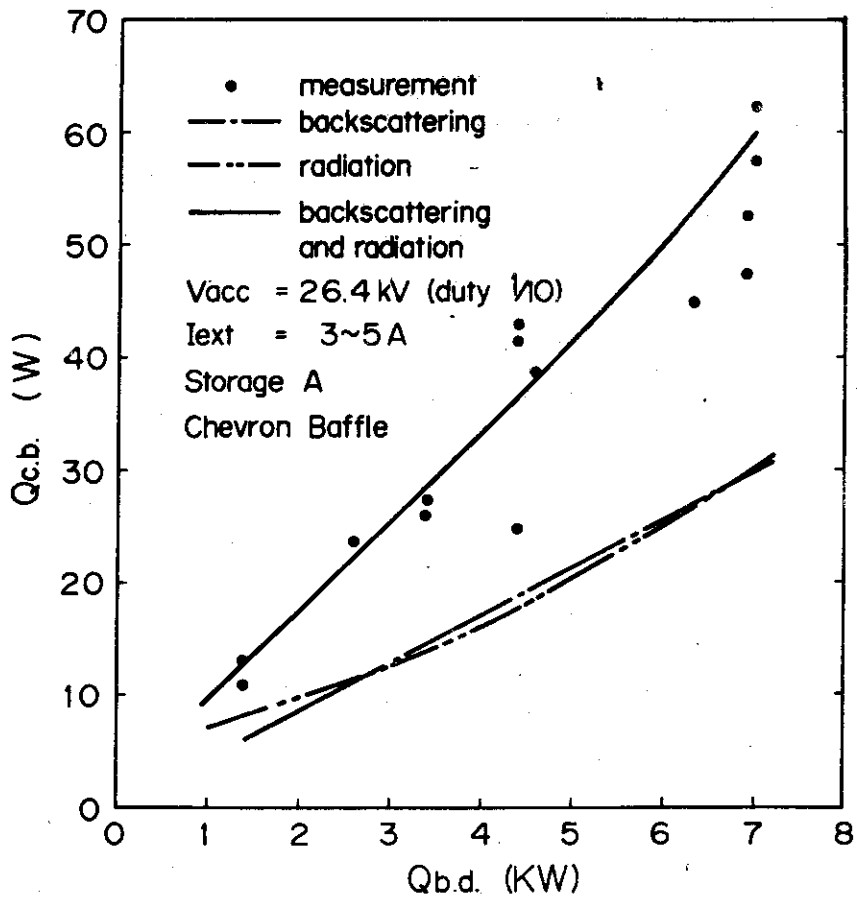


図5 シェブロンバッフル入熱量 $Q_{c.b.}$ の測定値
 曲線はモンテカルロ法による計算値
 横軸はビームダンプ入熱量 $Q_{b.d.}$

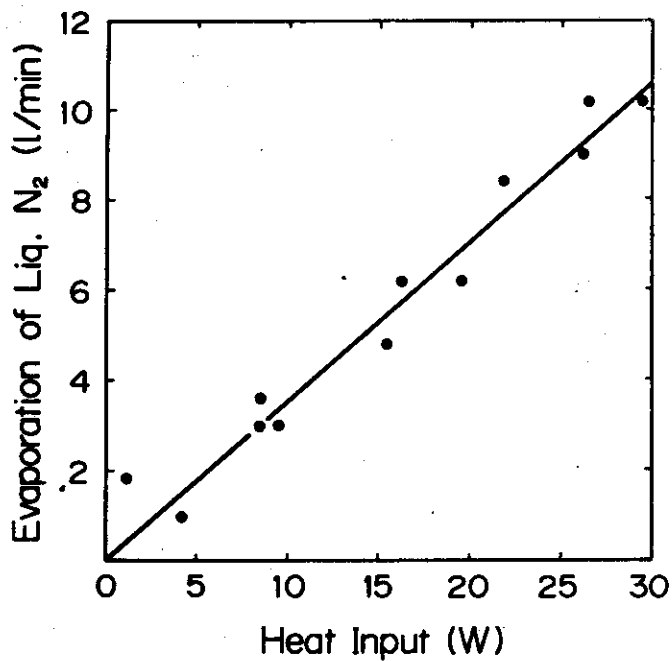


図6 液体窒素の熱入力と蒸発量の関係

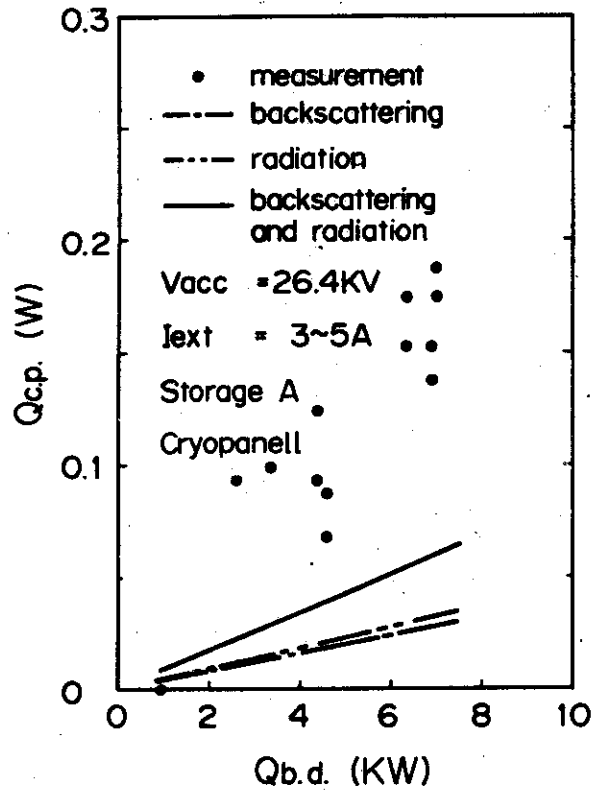


図7 クライオパネル入熱量 $Q_{c.p.}$
 横軸はビームダンプ入熱量 $Q_{b.d.}$
 曲線はモンテカルロ法による計算値

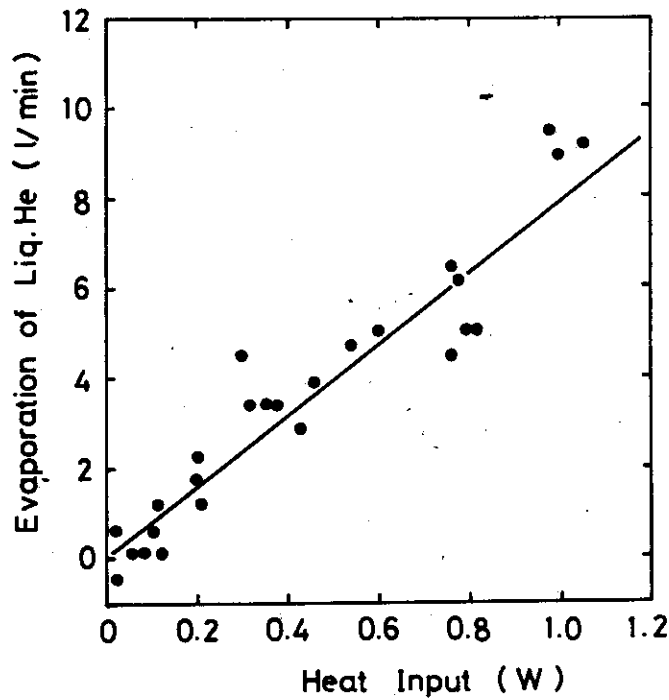


図8 液体ヘリウムの熱入力と蒸発量の関係

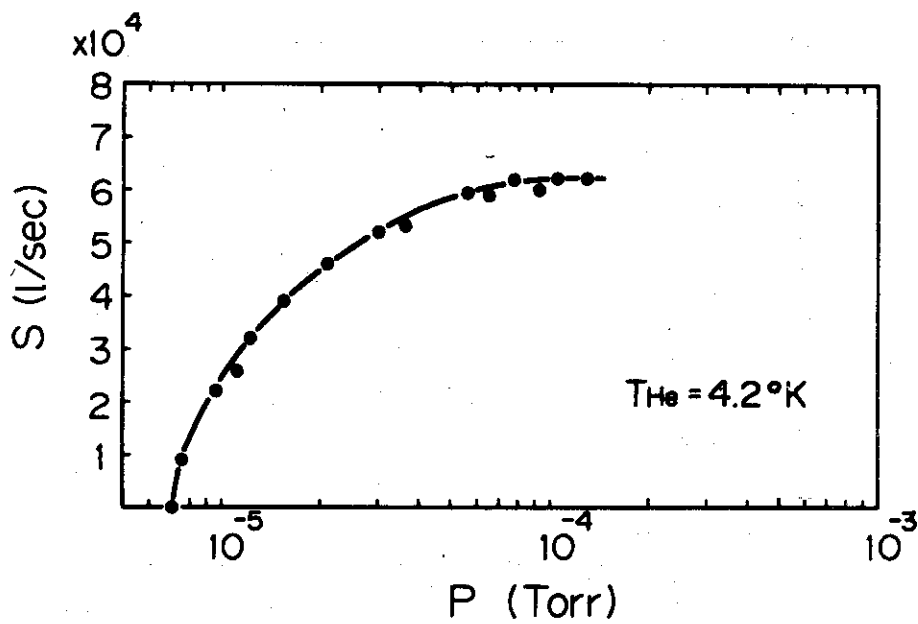


図9 クライオポンプの水素に対する排気速度

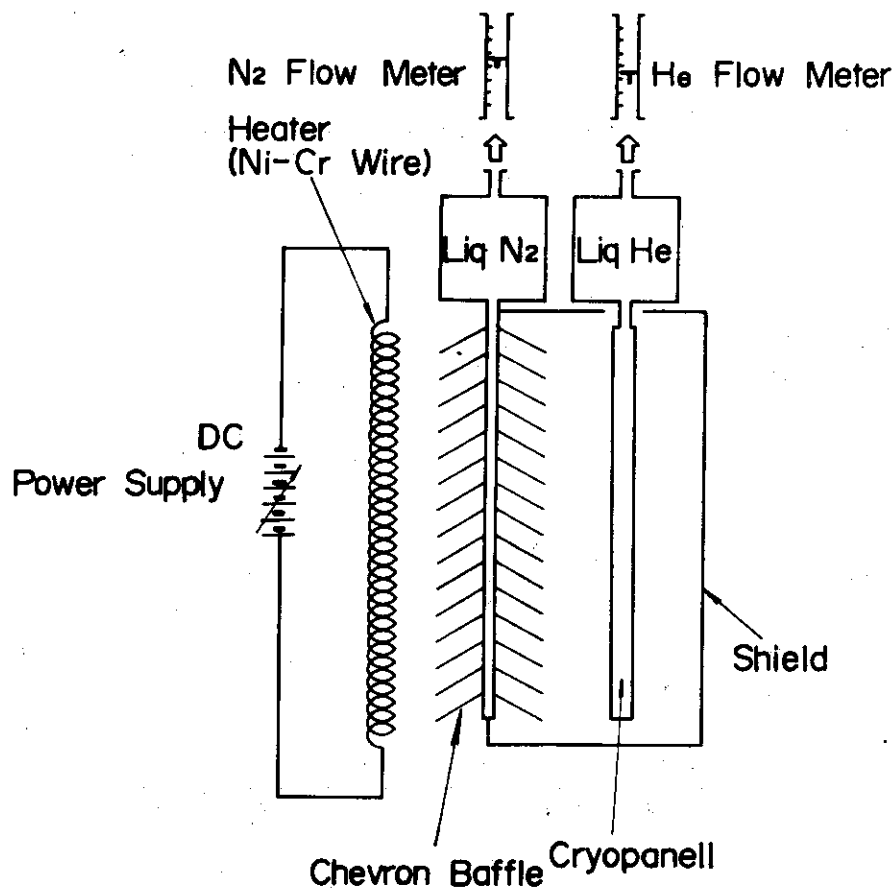


図10 シェブロンバッフルの熱輻射透過率測定実験構成図

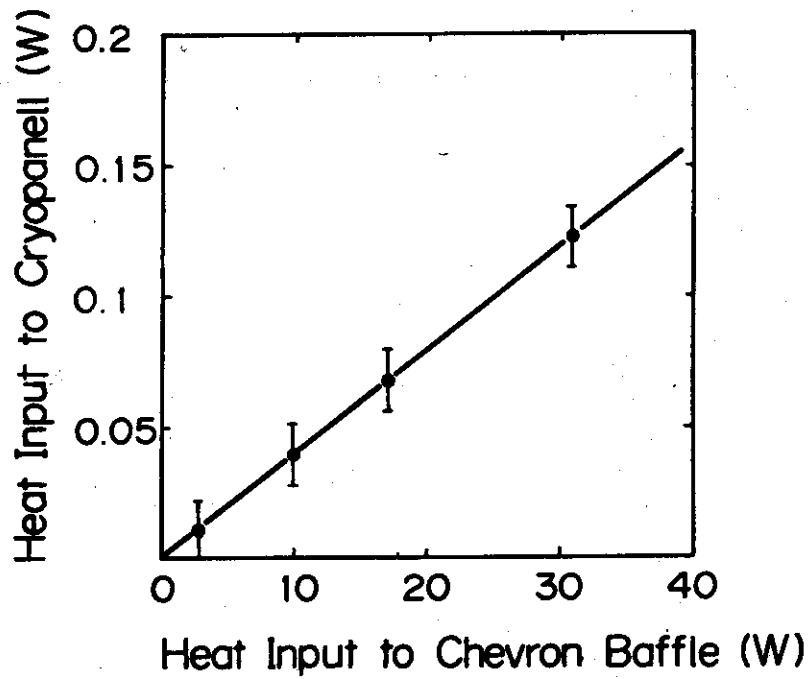


図 11 シェブロンバッフル熱入力とクライオパネル熱入力の関係

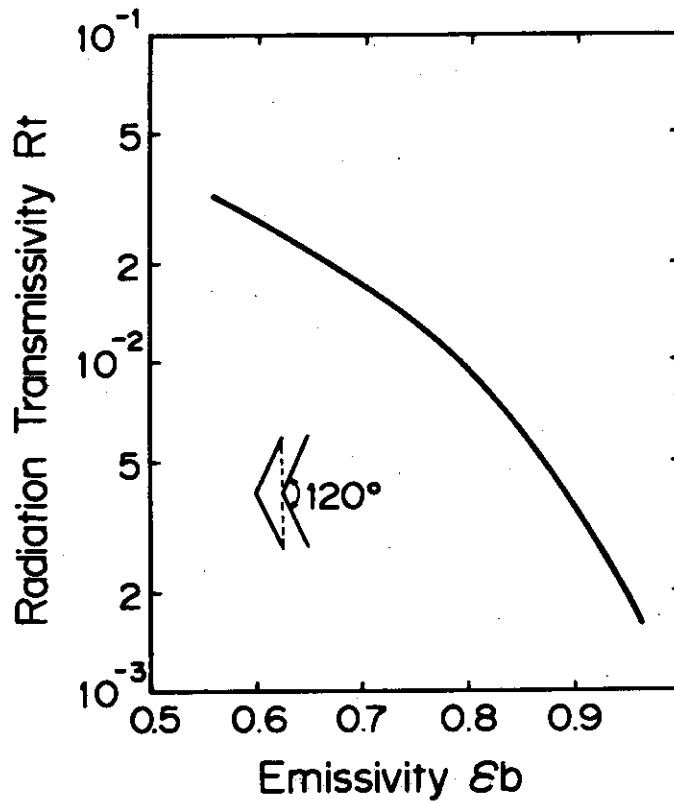
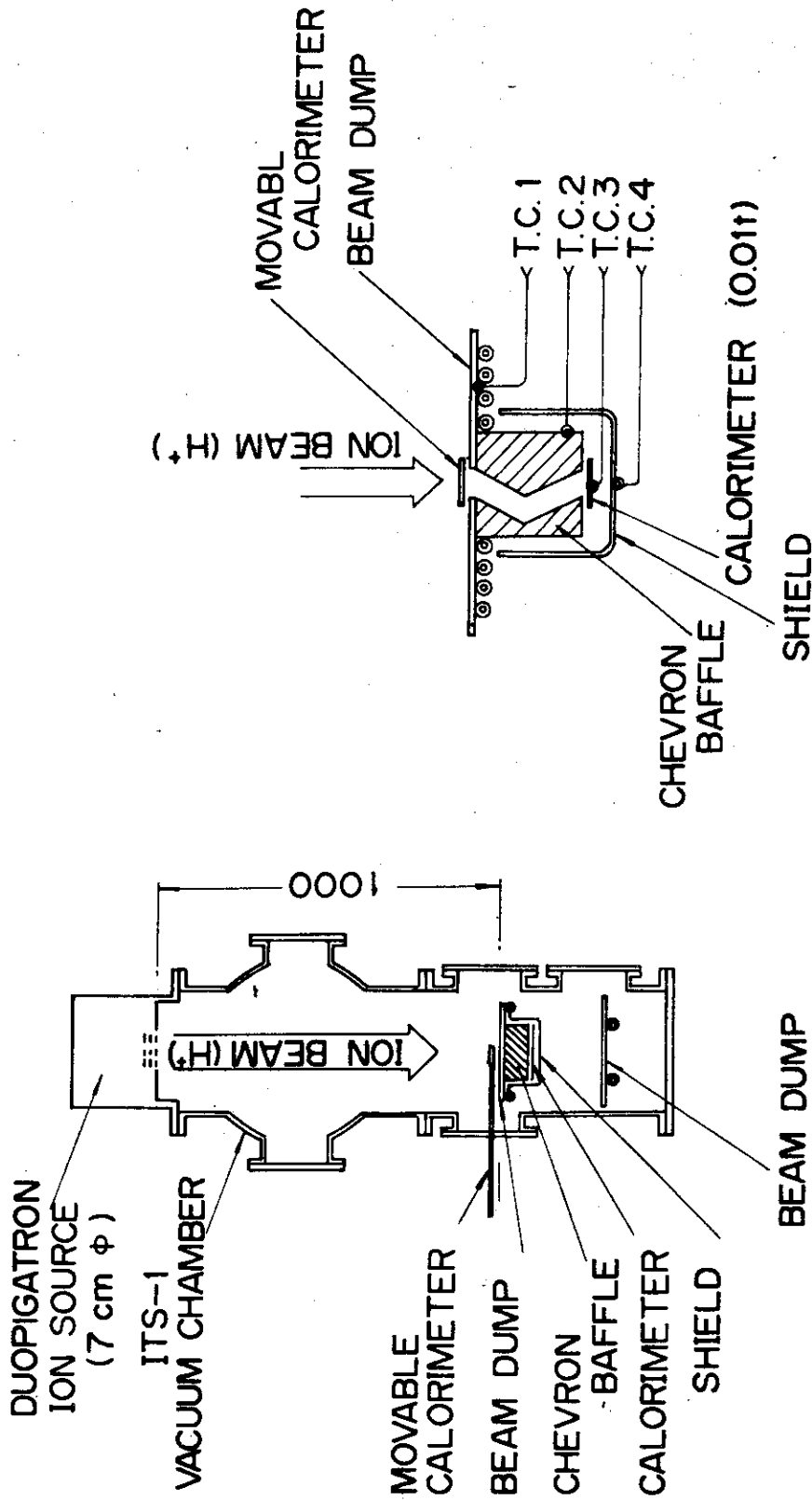


図 12 シェブロンバッフル (開口角 120°) の輻射率 ϵ_b に対する透過率 R_t モンテカルロ法による計算結果



EXPERIMENTAL APPARATUS

図13 シェプロンバッフルの後方散乱粒子通過率測定実験構成図

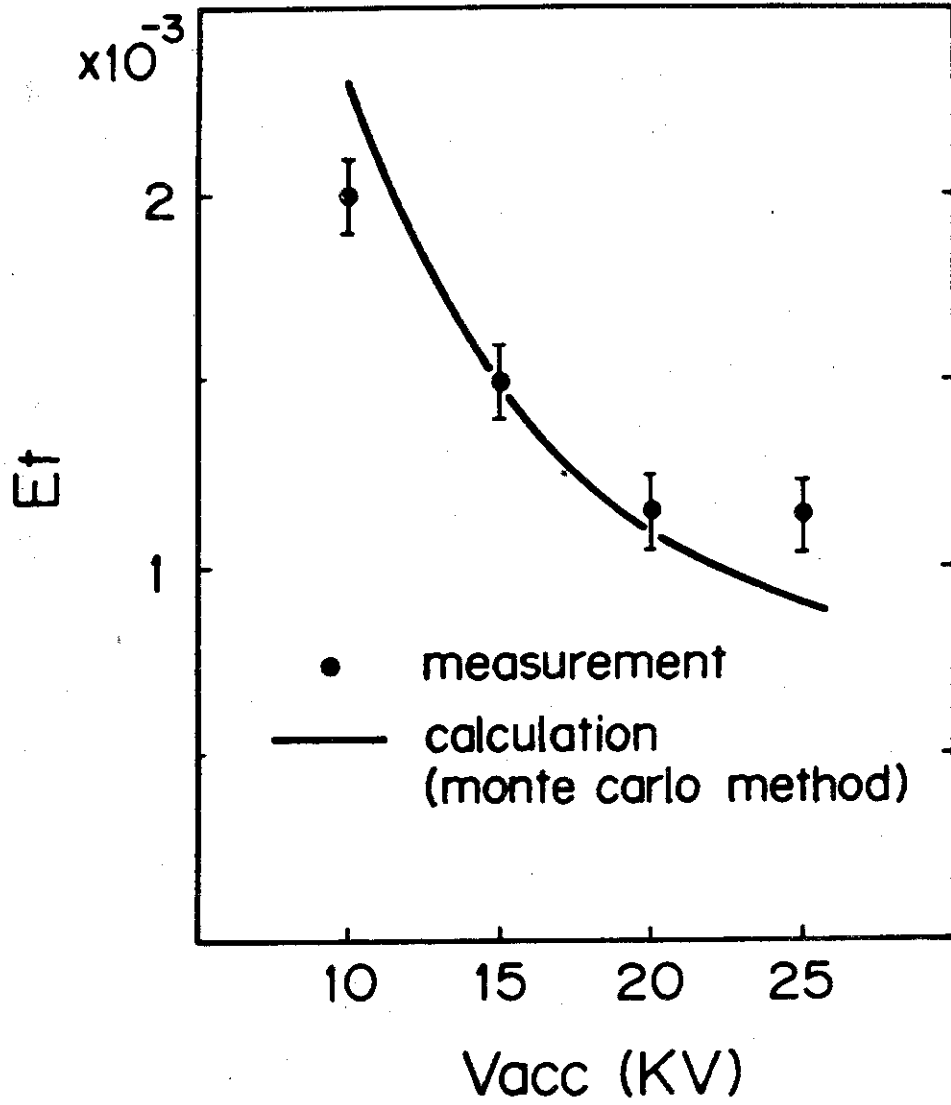


図 14 入射エネルギーに対するビーム通過率
 曲線はモンテカルロ法による計算値