

大強度 C W 電子線形加速器の現状 (技術報告)

1999年5月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

大強度CW電子線形加速器の現状 (技術報告)

野村昌弘、遠山伸一、田中拓、武井早憲、山崎良雄、
平野耕一郎、大村明子、中山元林、長谷川信、
加藤裕子*、石川雄大**、小又智輝 **、檜山徹**、
久保田 昌宏***

要旨

サイクル機構では、平成元年度から加速器を用いた核変換の可能性を探るために解決しなければならない問題の一つである大強度CW電子線形加速器の開発を行ってきた。加速器のハード開発は、平成4年度の高エネルギー物理学研究所との共同研究によりKEK Assemble Hallで行った1.2 MW(CW)クライストロン及び進行波還流型加速管の要素開発から始まり、加速器施設の全設備の据え付け完了が平成8年度末となった。その後は、各要素の調整、電子銃及びRFエージングを行い、平成10年12月に施設検査に合格し、翌平成11年1月から本格的なビーム試験を開始する運びとなった。

現在、ビームコミッショニングより、電流値 74mA、パルス幅 420 μ sec、繰り返し1ppsのビームを安定して加速することができるようになった。その後約1ヶ月のビーム試験では、パルス幅を2 msecまで広げ、電子銃室の放射線漏洩線量とチョッパースリット部の真空度の測定を行ない、これらの測定結果から、放射線漏洩線量と真空度は当面は問題にならないが、今後ビーム出力が100kWを越えた段階では改善の余地があることが判明した。また、この測定中にビームハローによるものと思われるDCCT用セラミックスダクトのリークが発生した。原因は現在調査中であるが、対策としてはビーム品質の向上、モニター系及びインターロック系の整備が今後必要となる。

大洗工学センター システム技術開発部 ビーム利用技術開発グループ

* 原子力システム 株式会社

** 株式会社 ペスコ

*** 瑞豊産業 株式会社

Present Status of the JNC High Power CW Electron Linac

MASAHIRO Nomura, TOYAMA Shinichi, TANAKA Hiroshi,
HAYANORI Takei, YOSHIO Yamazaki, KOICHIRO Hirano,
AKIKO Omura, GENRIN Nakayama, MAKOTO Hasegawa

YUKO Kato*,

TAKEHIRO Ishikawa **, TOMOKI Komata **, TORU Hiyama**,
MASAHIRO Kubota ***

Abstract

Design and construction of a high power CW electron linac was started in 1989 at PNC. The construction of the linac was completed in March 1997 and the beam commissioning was started in November 1998. After the beam commissioning, we have been successful to produce 420 μ sec width electron beam with 74 mA peak and energy 8 MeV. In the beam test, we measured the radiation level in an electron gun room and pressure at chopper slits on the condition of 2 msec width electron beams. The preliminary results show those are going to be problems more than 100 kW high power operation. In those measurements, a vacuum leak was occurred at a ceramic duct. Now we are investigating the cause of this trouble. It is necessary to prepare beam monitors and interlock systems for long pulse beams and also high quality beams are required.

JNC OEC SYSTEM ENGINEERING TECHNOLOGY DIVISION BEAN Gr

* NESI

** PESCO

*** ZUIHOU SANGYOU

目次

第1章 序	1
第2章 加速器の概要	2
第3章 コミッショニング	3
第4章 ビーム試験	5
第5章 まとめ	7
謝辞	

図表リスト

表1 目的及び開発課題	8
表2 開発の経緯	8
表3 加速器基本仕様	9
表4 施設検査ビーム条件	9
表5 問題点及び対処	10
表6 漏洩線量測定及び真空度測定	10
図1 加速器全体概略図	11
図2 電子銃図面	12
図3 電子銃放電調査	13
図4 DCCTダクト外観	14
図5 DCCTダクト内部	15
図6 ビームロスマニター測定結果	16

1. 序

サイクル機構では、平成元年度から加速器を用いた核変換の可能性を探るために解決しなければならない問題の一つである、大強度CW電子線形加速器の開発を行ってきた。この開発課題としては、文字通り「大電流電子ビームの加速」と核変換におけるエネルギーバランスを考えた場合に重要となる「加速器のエネルギーの高効率化」である。「大電流電子ビームの加速」に関しては、ビーム出力200 kW、平均電流 20 mAを目標に、BBUを抑制する為に、加速周波数として1249.135MHz (L-Band)を採用した。また、「加速器のエネルギーの高効率化」に関しては、RFを再利用し効率を上げる為に進行波還流型加速管を採用し、加速器のエネルギー効率を決める重要な要素であるクライストロンの開発も行なった。これらの目的及び開発課題を表1にまとめる。

加速器のハード開発は、平成4年度の高エネルギー物理学研究所との共同研究によりKEK Assemble Hallで行った1.2 MW (CW)クライストロン及び進行波還流型加速管の要素開発から始まり、平成7年12月には、大洗工学センター量子工学試験施設(QTF)に入射部(電子銃~バンチャー)、第一加速管及びビームダンプを据え付け、平成8年度上期には繰り返しは0.1 ppsと低いものの、パルス幅 3 msecの長パルスビームの加速に成功した。平成8年度末には加速器施設の全設備の据え付けを完了させ、各要素の調整、電子銃及びRFエージングを行い、平成10年12月に施設検査に合格し、翌平成11年1月から本格的なビーム試験を開始した。開発の経緯を表2に示す。

本報告書では、主に施設検査までのビームコミッショニングとその後約1ヶ月間行なったビーム試験の結果について述べる。また、この内容については、平成11年3月に開催された「大強度CW加速器技術研究会」(外部の専門家による指導を仰ぐために平成2年度に設立)に於いて大強度電子線形加速器開発の現状として発表を行なっている。

2. 加速器の概要

先ず初めに、本加速器の基本仕様を表3に概略を図1に示す。電子銃はDCタイプの電子銃で、加速電圧は 200 kV (DC)である。この電子銃の特徴は、カソード部分が回転構造を持ち、真空を破ること無くビームライン以外にもビームを出射し、エミッタンス等の測定ができる点である。

入射部は2台の磁場レンズ、2波混合型チョッパー空洞とスリット、プリパンチャー及びバンチャより構成されている。磁場レンズから第一加速管までの低エネルギー領域はチョッパー部分を除いてソレノイドコイルによりビームの発散を防いでいる。また、この2波混合型チョッパー空洞では、基本周波数とその2倍の周波数のRFを使用することによりエミッタンスの増加を押さえている。

加速管は先に述べた様に、RFを再利用し効率を上げる為に、進行波還流型加速管を採用している。同等の加速効率が得られる定在波型加速管と比較すると、この進行波還流型加速管は構造が単純であり製作が容易である。各還流部には、共鳴を保つ為の位相器と反射波を消すためのスタブチューナーが設置されている。また、クライストロンからのRFは、大気系立体回路に設置された位相器により各加速管独立に位相を調整できるようになっている。

ビームダンプは大強度の電子ビームを受け止められる様に、ビームを一度四極電磁石で発散させ、その後円錐上になった銅のディスクで受け止めている。ディスクは電気的に四分割されており、大まかなビームプロファイルの情報が得られるようにしている。

測定系に関しては、位置モニター、ボタン電極タイプの電流値モニター、デマルケストをスクリーンに用いたプロファイルモニタ及びビームロスモニターが各加速管毎に設置されている。また、これらのモニターを用いて測定された情報は、VMEを経由してNextStep上のプログラムで収集されている。

3. コミッショニング

ビームコミッショニングの目的は、ピーク電流 50 mA、ビーム幅400 μ sec、繰り返し1 ppsのビームを加速し、施設検査（漏洩線量測定）に合格することである。このビーム条件は、今回の施設検査により許可されたビーム条件、ピーク電流 100 mA、ビーム幅 2 msec、繰り返し1 ppsの平均電流で十分の一の値である。施設検査におけるビーム条件を表4にまとめる。

ビームコミッショニングを始めるにあたり先ず問題となったのは、電子銃の放電である。先に述べた様に電子銃は、200 kV(DC)の高圧電源を有し、しかも電子銃自体の形状が通常の電子銃に比べ複雑な構造をしている。設計の段階ではこれらを考慮し、真空度及び陽極と陰極との間隔やその形状等に注意を払い、高圧印加時には微小な放電が起きた場合でも即座に検知できる様にモニターとしてSSD (Solid State Detector)を使用する等の対応をしてきた。しかし、ビームコミッショニング前に微弱な放電が起り始め、それが連続的なものとなり、そのレベルも徐々に高くなつていった。電子銃の構造を図2に、放射線レベルの測定方法と結果を図3に示す。電子銃を分解し内部を観察したところ、放電により生じたと思われる傷がいたる所で観測された。特に、カソードを支える回転軸部分には、放電現象特有の”リヒテンベルグ图形”に似た模様が観測された。そこで、これらの部品を複合電界研磨に掛け表面状態を良好にし、更に、電子銃の加速電圧を150kVに下げる事により放電を押さえてビームコミッショニングを開始した。

次に問題となったのは、パルス幅を20 μ secから100 μ secまで広げた時に起こったビーム不安定性である。原因は、入射部に設置されたプロファイルモニターに使用しているデマルケストのチャージアップであった。これらのプロファイルモニターはビームプロファイルを観測していない時はビームラインから約10 cm 引っ込んだ状態にある為、特にチャージアップには注意を払っていなかった。しかし、プロファイルモニターがソレノイドコイル内に

設置されていること、また、ビームコミッショニング中でビーム輸送系の調整が不十分であること等を考えるとチャージアップ対策は必要であった。この問題に関しては金属メッシュをデマルケスト表面に付けることにより解決した。

その後は、電子銃の加速電圧が設計値よりも低いことや、チョッパー、プリバンチャー及びバンチャーによるビーム圧縮の調整に時間を費やしたが最終的には、ピーク電流 74 mA、パルス幅 420 μ sec、繰り返し 1 pps のビームを約 8 MeVまで加速することができ、無事施設検査に合格することができた。しかし、今後ビーム出力を上げていく段階で改善していかなければならぬ課題も判明した。一つは、ビーム幅を 420 μ secまで広げた時に電子銃室の漏洩線量が予想より高かったこと、もう一つは同様にビーム幅を広げた時にチョッパースリットの真空が悪化したことである。また、今回のビームコミッショニング中にVME、GPIBを経由してコントロールしている磁場輸送系の電源が数回制御不能となった。原因は、GP-IBのコントローラーが密閉式の電源ラック上部に設置されている為、磁場輸送系電源の発熱によりラック内の温度が上昇したためで、測定の結果、局所的には40度以上になっていた。これについては、電源ラックの前後の扉を解放状態にし温度上昇を防ぐことにより対応した。現在は、背面パネルを金属のメッシュ状の扉と交換し温度上昇を防いでいる。これらビームコミッショニングにおける問題点及び行った対処を表5にまとめる。

4. ビーム試験

ビーム試験では、パルス幅 2 msec のビームを加速し、ビームコミッショニング時に判明した今後の課題、電子銃室の放射線漏洩線量とチョッパースリットの真空度の測定を行なった。

先ず初めに、パルス幅 20 μ sec の短パルスビームを用いて軌道調整を行なった後に、ビーム位置と電流値をモニターしながらパルス幅を徐々に 2 msec まで広げていった。パルス幅が 1 msec を越えたあたりからビームが不安定になり始め、2 msec まで広げた段階では、電流値が約2割程度変動していた。ビームが不安定な為、精度の高い測定はできなかつたが、電子銃室で漏洩線量の測定をした結果、ピーク電流 250 mA (電子銃出口)、パルス幅 2 msec、繰り返し 1 pps の条件で、漏洩線量は 0.4 mSv/h と低い値であった。また、チョッパースリットの真空度に関しては、漏洩線量測定と同じビーム条件で測定した結果、真空度は 1.5×10^{-8} Torr から 7×10^{-8} Torr に悪化した。これらの測定結果から、電子銃室の漏洩線量とチョッパースリットの真空度は当面は問題にならないが、今後デュティーが高くなりビーム出力が 100 kW を越えた段階で改善する余地があることが判明した。電子銃室の漏洩線量に関しては、電子銃のパラメータ (ヒータ温度とグリッド電圧) 及び磁場レンズの最適化により漏れビームを無くすこと、また、チョッパースリットの真空度に関しては、バイパスを設けるなどしてコンダクタンスを改良すること等の対策が考えられる。測定条件及び結果を表6に示す。

このパルス幅を 2 msec まで広げ漏洩線量と真空度を測定中に最終の第七加速管とビームダンプとの間で真空リークが発生した。試験終了後、リーク箇所の調査を行った結果、DCCT用セラミックスダクトに亀裂が発見されたため、ダクトを取り外し内部を観察したところ、ビームによるものと思われる跡がセラミックスの溶接部分に見られた。図4と5にDCCT用セラミックスダクトの外観と内部の写真を示す。

図6にセラミックスダクトに真空リークが発生した時のロスモニターの測

定結果を示す。試験中のロスモニターの値がリークが起きるまで大きな変化が無かったことから、突然ビームの一部がダクトに当たったとは考えにくく、ビーム幅を広げた時に起こったビーム不安定性により、ビームハローが断続的にダクトに当たり、最終的にリークを引き起こしたと考えられる。また、このダクトが四極電磁石の後方に設置されており、四極電磁石を強く作用させることにより、ハロー部分にビームの集中する部分ができ、それがリークを引き起こし易くしていた可能性もある。原因については現在調査中であるが、今後は、ビーム品質の向上は当然であるが、長パルスビームを加速している時でもビームの情報、パルス内でのビーム位置や電流値の変化、ビームプロファイルの情報を得ることのできるモニター系の整備とそれらの情報を基にしたインターロック系の整備を行なう必要がある。

5. まとめ

ビームコミッショニングより、ピーク電流 74 mA、パルス幅 420 μ sec、繰り返し 1 pps のビームを安定して加速することができるようになった。その後約1ヶ月のビーム試験では、パルス幅を 2 msec まで広げ、電子銃室の放射線漏洩線量とチョップペースリットの真空度の測定を行なった。これらの測定結果から、漏洩線量と真空度は当面は問題にならないが、今後ビーム出力が 100 kW を越えた段階で改善の余地があることが判明した。また、この測定中にビームハローによるものと思われる DCCT 用セラミックスダクトのリークが発生した。原因は現在調査中であるが、対策としてはビーム品質の向上、モニター系及びインターロック系の整備が必要である。

謝辞

この電子線形加速器の開発にあたり、豊富な経験に基づく有益な助言をして下さった高エネルギー加速器研究機構及び日本大学原子力研究所の方々、特に、鳥塚賀治教授、佐藤勇教授に感謝いたします。

表1. 目的及び開発課題

目的: 加速器を用いた核変換の可能性を探るために解決しなければならない課題の一つである大電流加速器の開発。

1. 大電流電子ビームの加速

(10MeV, 100 mA, 4 msec, 50pps)



基本周波数 L-Band(1249.135MHz)

2. 高効率加速器の開発



高効率クライストロンの開発

進行波還流型加速管

表2. 開発の経緯

要素試験: 平成4年~5年 at KEK Assemble Hall

- ・ 1.2 MW (CW) クライストロンの開発
- ・ 進行波還流型加速管の開発

入射部 : 平成5年~8年 at PNC QTF (~ACC1)

- ・ 平成8年3月 施設検査合格
- ・ $E = 3\text{MeV}$, $I = 100\text{mA}$, $W = 3\text{msec}$, $R = 0.1\text{pps}$

加速部 : 平成8年~ at PNC QTF

- ・ 平成 9年 据え付け完了
- ・ 平成10年12月 施設検査合格
- ・ 平成11年 1月 ビーム試験開始

表3. 加速器基本仕様

エネルギー	10MeV
ピーク電流	100mA
パルス幅	4msec
繰り返し	50pps
デューティファクタ	20%
平均ビーム電流	20mA
平均ビーム出力	200kW
加速周波数	1249.135 MHz
加速モード	$2\pi/3$
加速管構造	進行波還流型
加速管の本数	8
クライストロンの本数	2
クライストロンパワー	1.2 MW CW
電子銃加速電圧	200kV DC
電子銃出口電流	300mA

表4. 施設検査ビーム条件

- ・ ピーク電流: 100 mA
- ・ ビーム幅: 2 msec (4 msec) } **x 1/10 以上**
- ・ 繰り返し: 1pps (50 pps)
- ・ エネルギー: 最大10 MeV

- ・ 電子銃放電: H.V. = 200kV --> 150kV
I = 300 mA --> 250 mA

- ・ エネルギー: KLY.2 出力 940kW --> 220kW

- ・ ビーム輸送方針: 安全確実。チョップバー2f系不使用

表5. 問題点及び対処

- ・ビーム不安定: バンチャーリー入り口 = 240 mA
: パルス幅 20 μ sec --> 100 μ sec
➡ デマルケスト(ソレノイドコイル内)チャージアップ
- ・バンチャーリー BBU: パルス幅 = 300 μ sec (150 μ sec以降)
➡ バンチャーリー入り口 = 240 mA
- ・エネルギー低: ~5MeV
 - ➡ 電子銃電圧 = 150 kV (200 kV)
 - 電子銃出口電流 = 250 mA (300 mA)
 - チョッパー出口 = 120 mA (100 mA)
 - プリバンチャーリー = オーバーバンチ
 - バンチャーリー = オーバーカレント
- ・ビーム輸送系(電源DOWN):
➡ GP-IB 通信エラー、コントローラー熱的不安定

表6. 漏洩線量測定及び真空間度測定

- ・電子銃室放射線漏洩線量測定 ~ 0.4 μ Sv/h
- ・チョッパースリット真空間度測定 $\Delta P \sim 5 \times 10^{-8}$ Torr

測定1. ビーム位置、真空、~30 min.

$$\left\{ \begin{array}{l} \cdot W = 0.42 \text{ msec} \\ \cdot I = 74 \text{ mA}, R = 1 \text{ pps} \end{array} \right. \rightarrow W = 2 \text{ msec}$$

(電流値不安定 ~1.2 msec、RF安定)

測定2. ビーム位置、真空

$$\left\{ \begin{array}{l} \cdot W = 0.42 \text{ msec} \\ \cdot I = 74 \text{ mA}, R = 1 \text{ pps} \\ \quad (0.5 \text{ pps}) \end{array} \right. \rightarrow W = 2 \text{ msec}$$

(電流値不安定 ~1.2 msec、RF安定)

↓ ↓ ↓

ビームダンプ手前DCCT用ビームダクトリーク
(セラミックス部分亀裂)

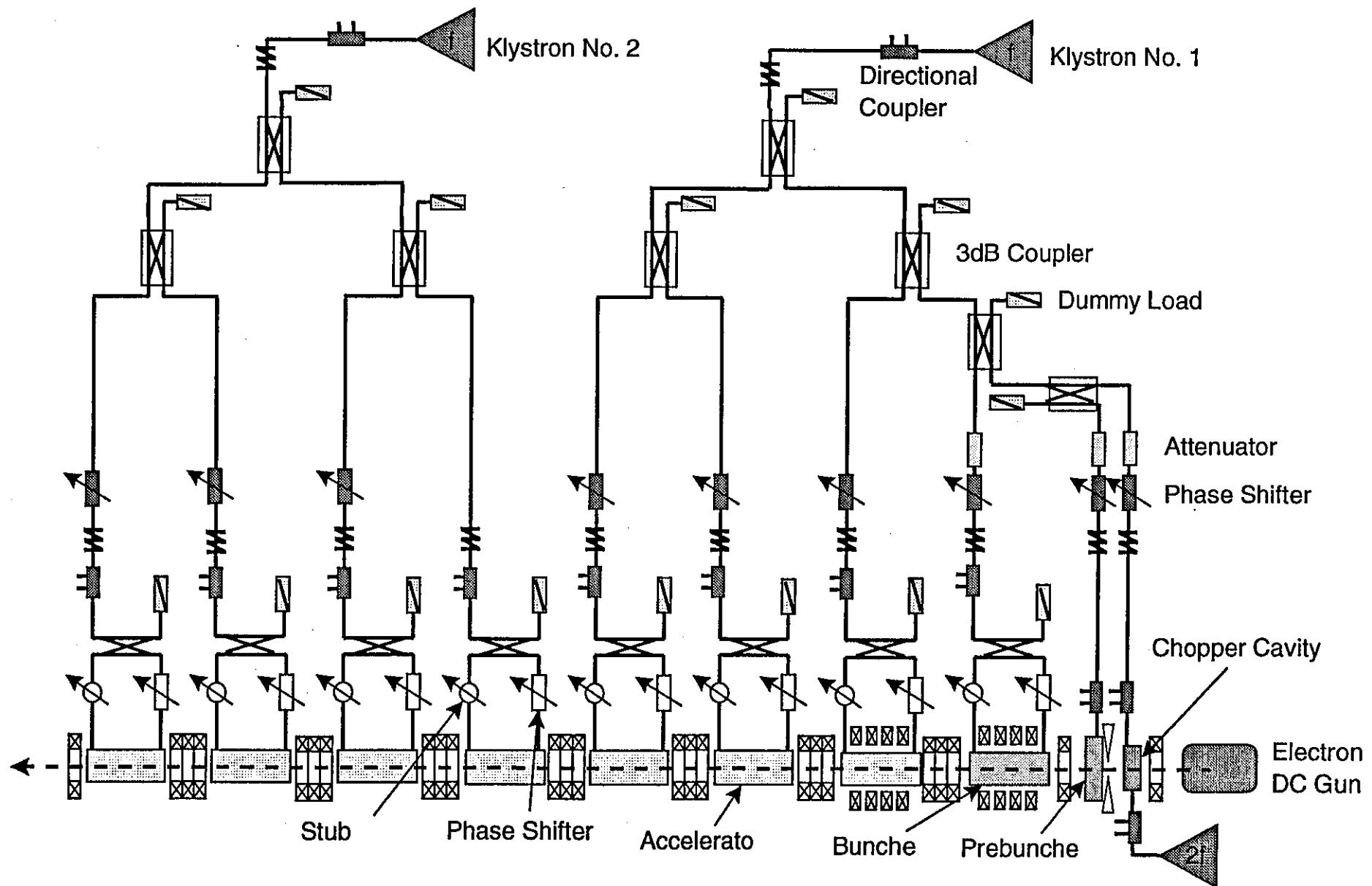
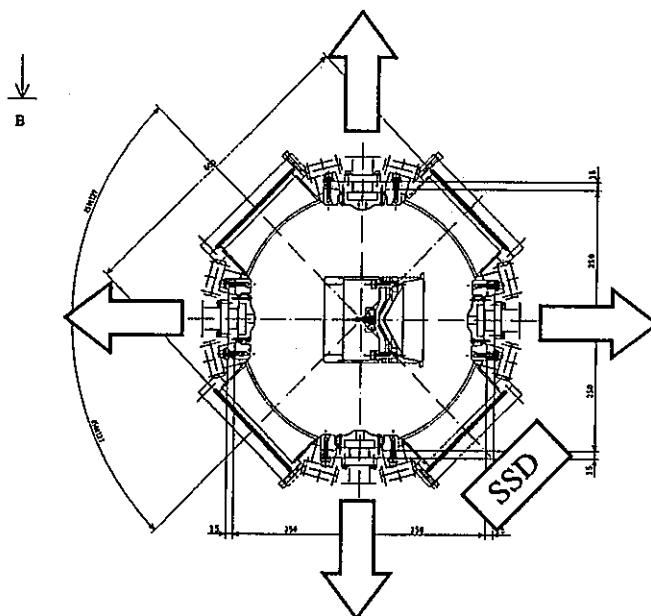
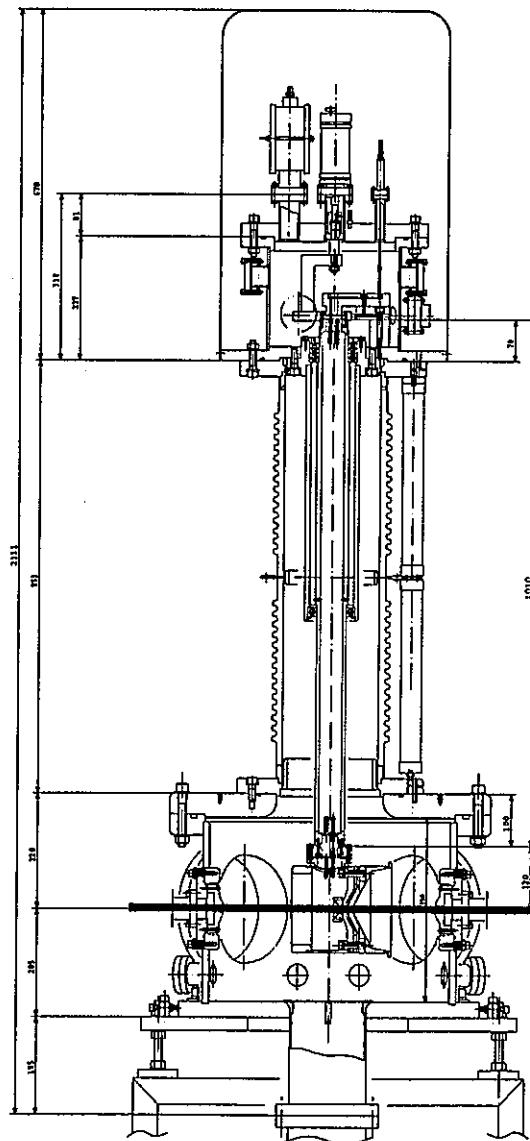


図1. 加速器全体概略図



- H.V. = 200 kV DC (0.5%)
- I = 300 mA
- W = 4 msec
- R = 50 pps
- Cathode = Y646E

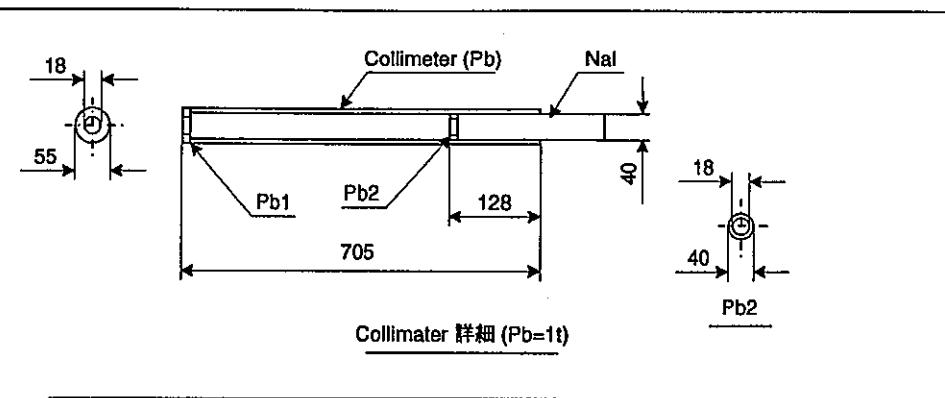
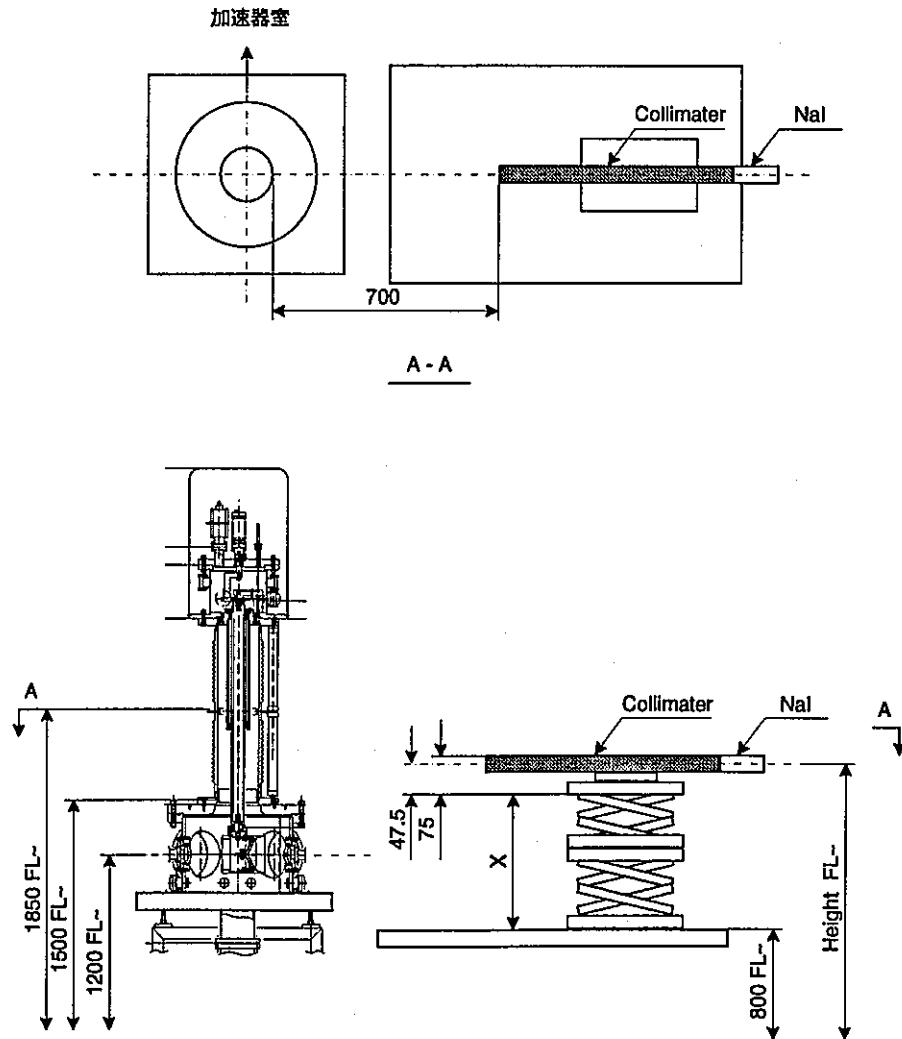
- 1) H.V. = 200 kV (DC)
2) 構造が複雑

Aging 中の放電の監視
SSDやNaIを使用

連続放電開始 (~ 180kV)

図2. 電子銃図面

測定体系



Gun条件

HV 140kV
Bias 100V
Heater [Off]
Vac. 5.0×10^{-9} torr

測定結果

X (mm)	Height (mm)	Back Ground ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)	Nal ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)
640	1487.5	0.05	0.13
670	1517.5	0.04	0.16
690	1537.5	0.06	0.21
710	1557.5	0.04	0.15
740	1587.5	0.04	0.15
790	1637.5	0.04	0.10
840	1687.5	0.05	0.08
890	1737.5	0.04	0.06
940	1787.5	0.04	0.05
980	1827.5	0.04	0.05

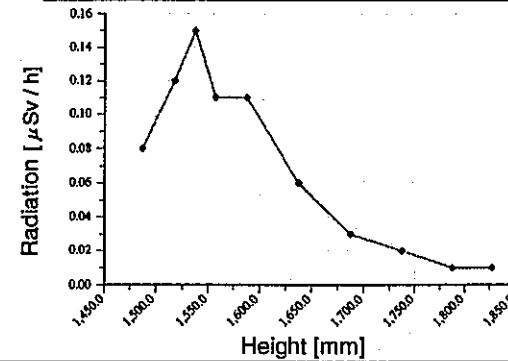


図3. 電子銃放電調査

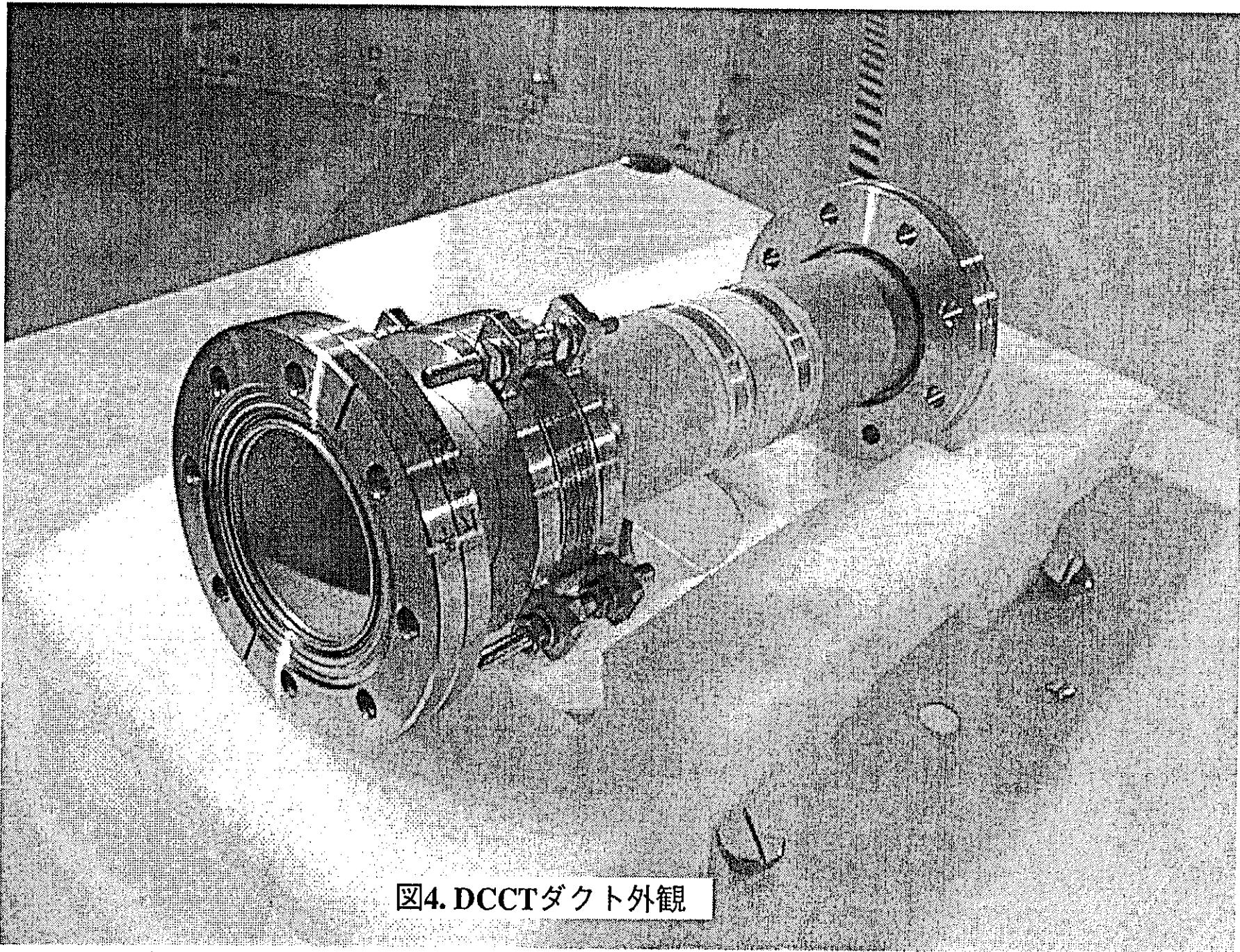
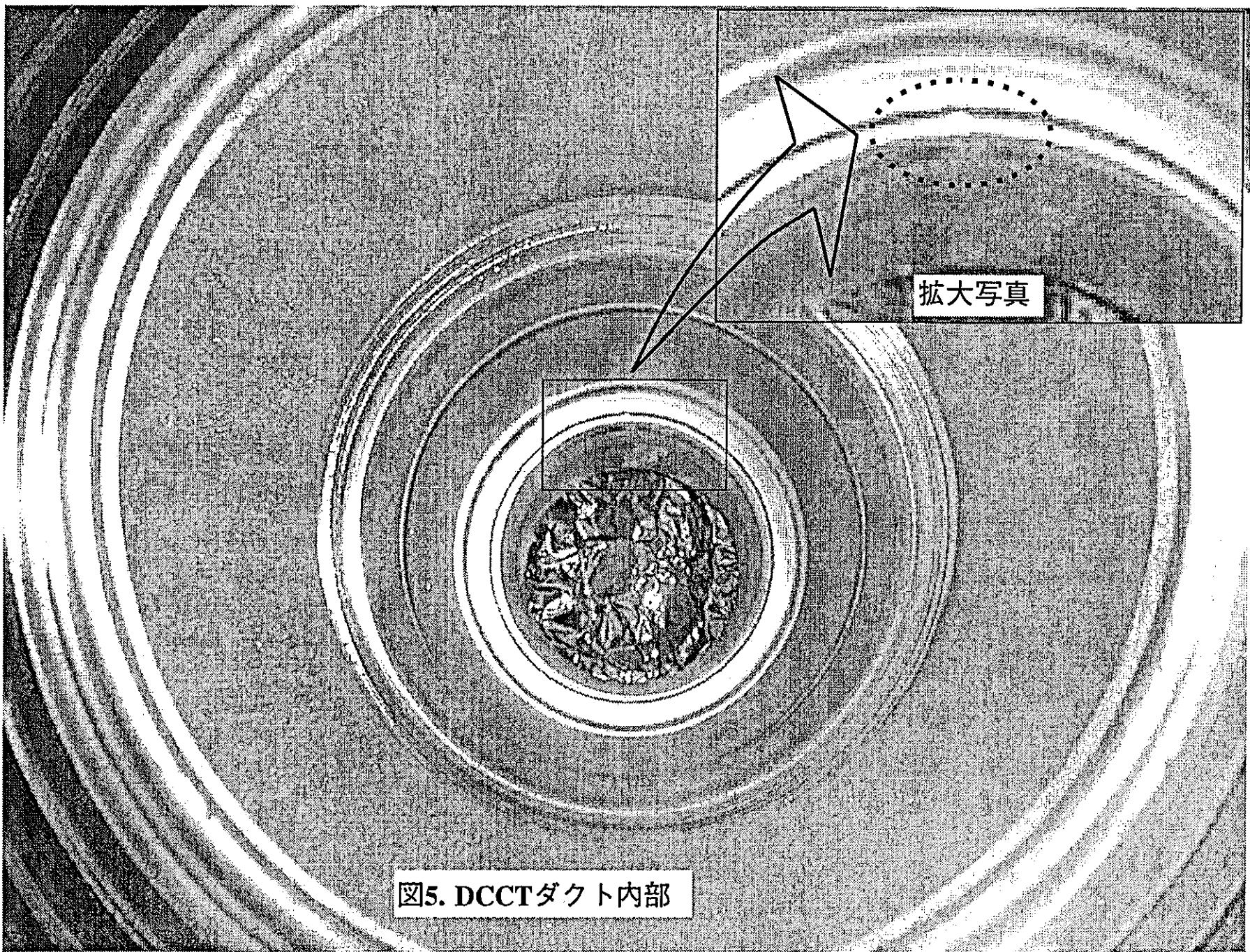


図4. DCCTダクト外観



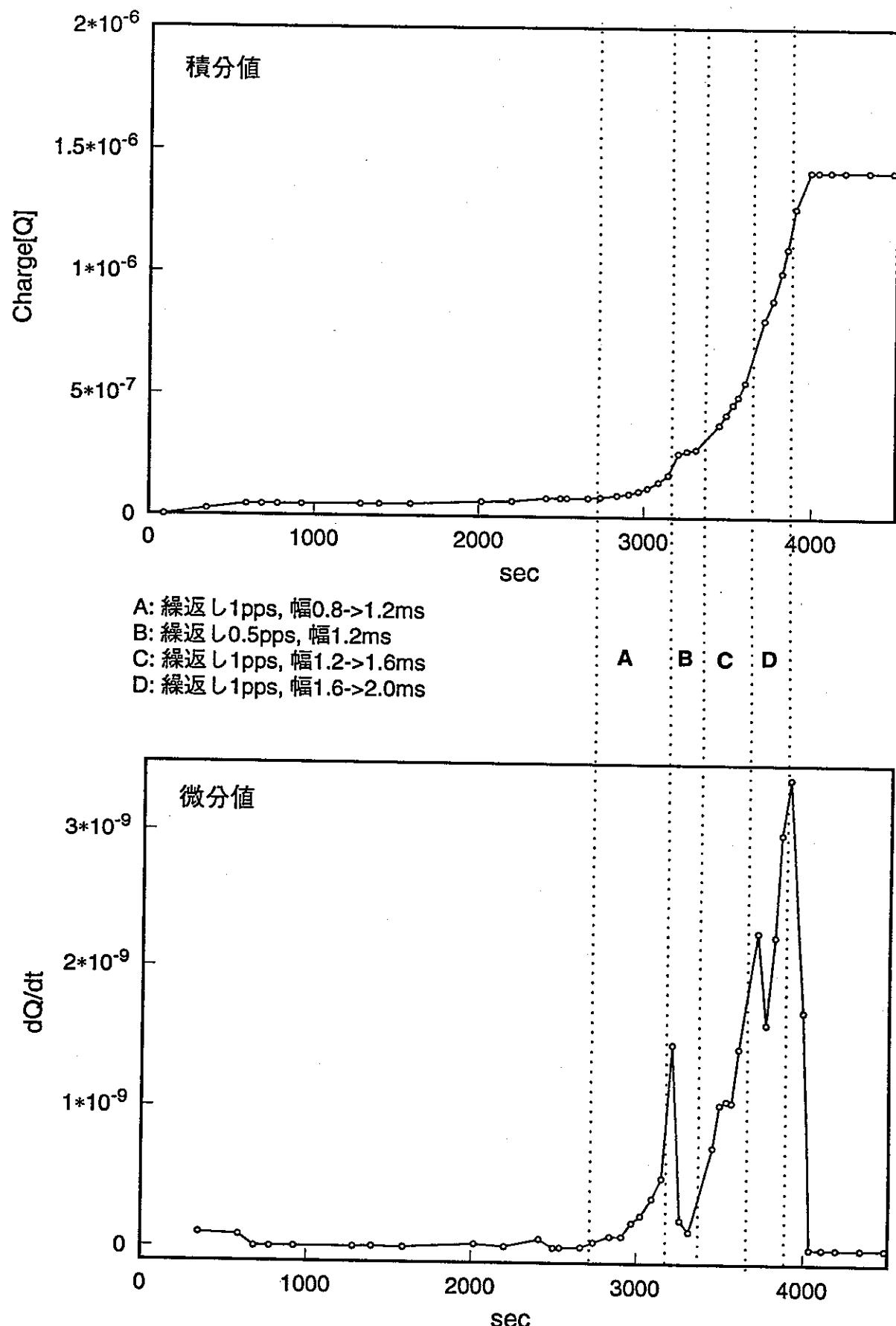


図6. ビームロスモニター測定結果