

Extension of the operational lifetime
of the proportional chambers
in the HERMES spectrometer

大西研論文ゼミ 2024/10/30

木村佑斗

DESY-HERA

研究所名

加速器名

- Deutsches Electron Synkrotron (グルーオン初観測?)
- Hadron Electron Ring Accelerator
- $\sqrt{s} = 318 \text{ GeV}$, e^- or e^+ と p が衝突(当時、世界唯一)
- e^- or e^+ は偏光
- 1992年稼働開始、2007年閉鎖



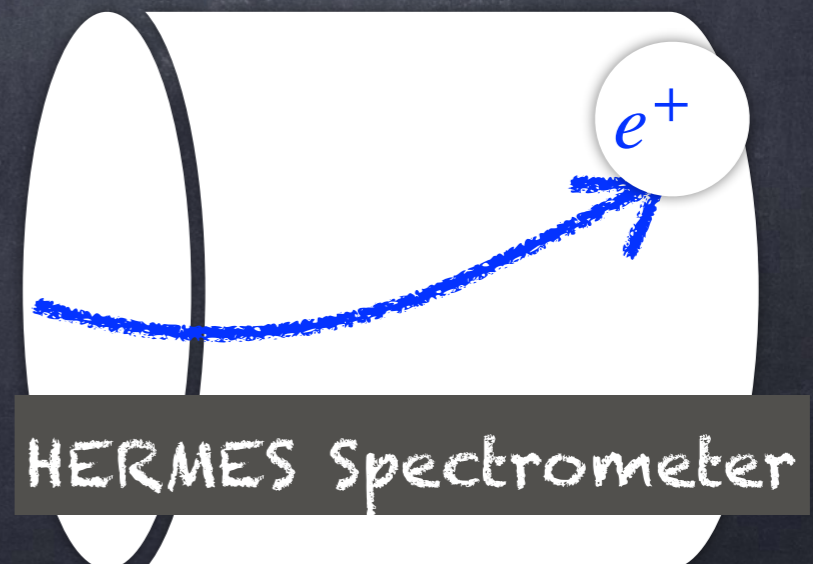
<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2007/julaug/HERA.html>

HERMES

The HERMES experiment collected data from scattering of longitudinally polarised electrons on various polarised gas targets such as hydrogen, deuterium, or helium. The main goal of the HERMES experiment is to map out the spin structure of the nucleon, i.e. protons and neutrons. These nucleons are made up of quarks with spin-1/2, bound together by gluons with spin-1. The HERMES experiment is trying to answer how the constituents make up a nucleon, which has spin-1/2. The Collaboration continues to publish results delving deeper into the spin structure of the building blocks of matter.

https://particle-physics.desy.de/research/previous_desy_experiments/index_eng.html より

Deep Inelastic Scattering



HERMES Spectrometer

K. Ackerstaff et al. / Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 417 (1998) 230–265

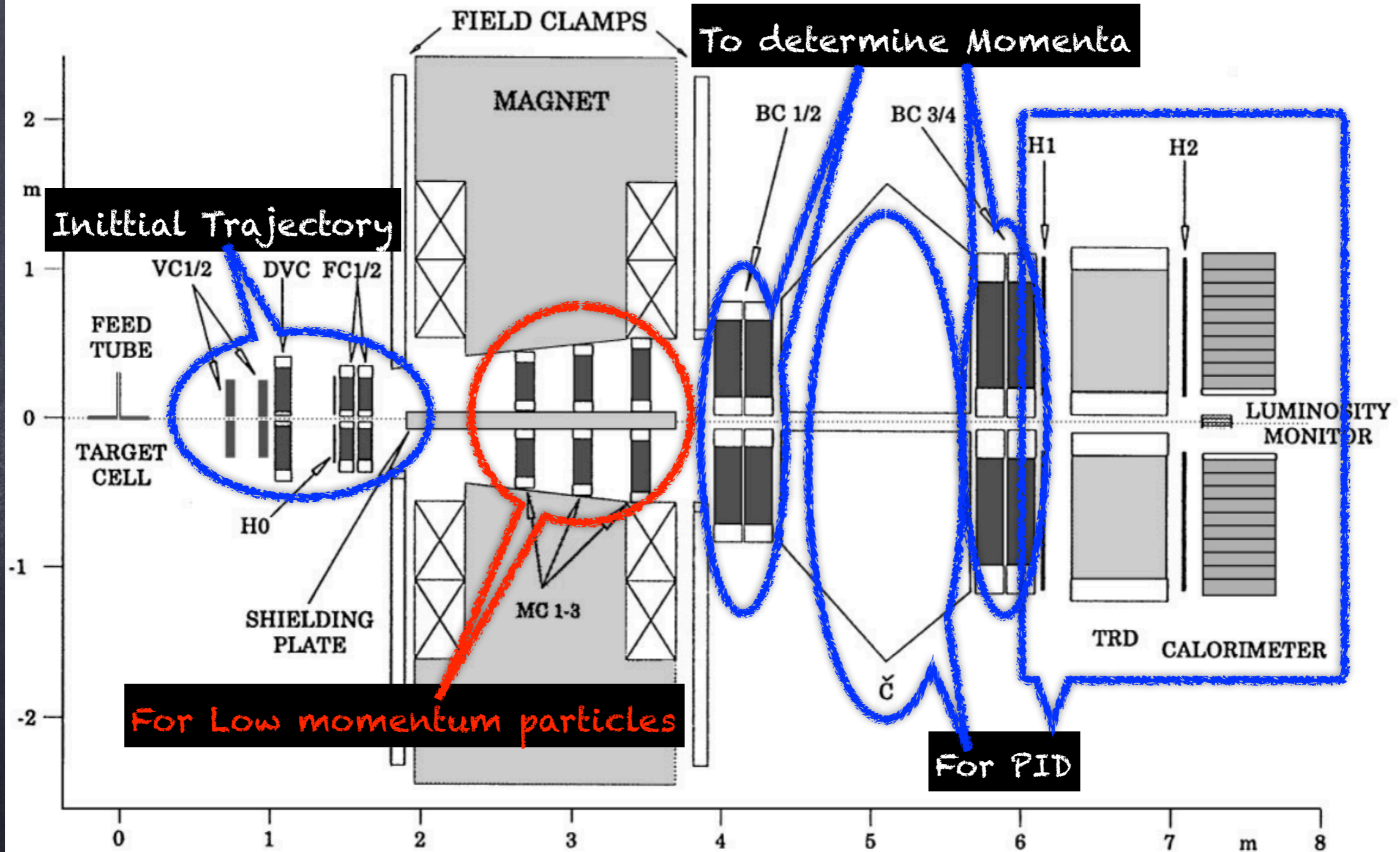


Fig. 1. Schematic side view of the HERMES spectrometer. See the text for the meaning of the labels.

Proportional Chambers in the Magnet (MC)

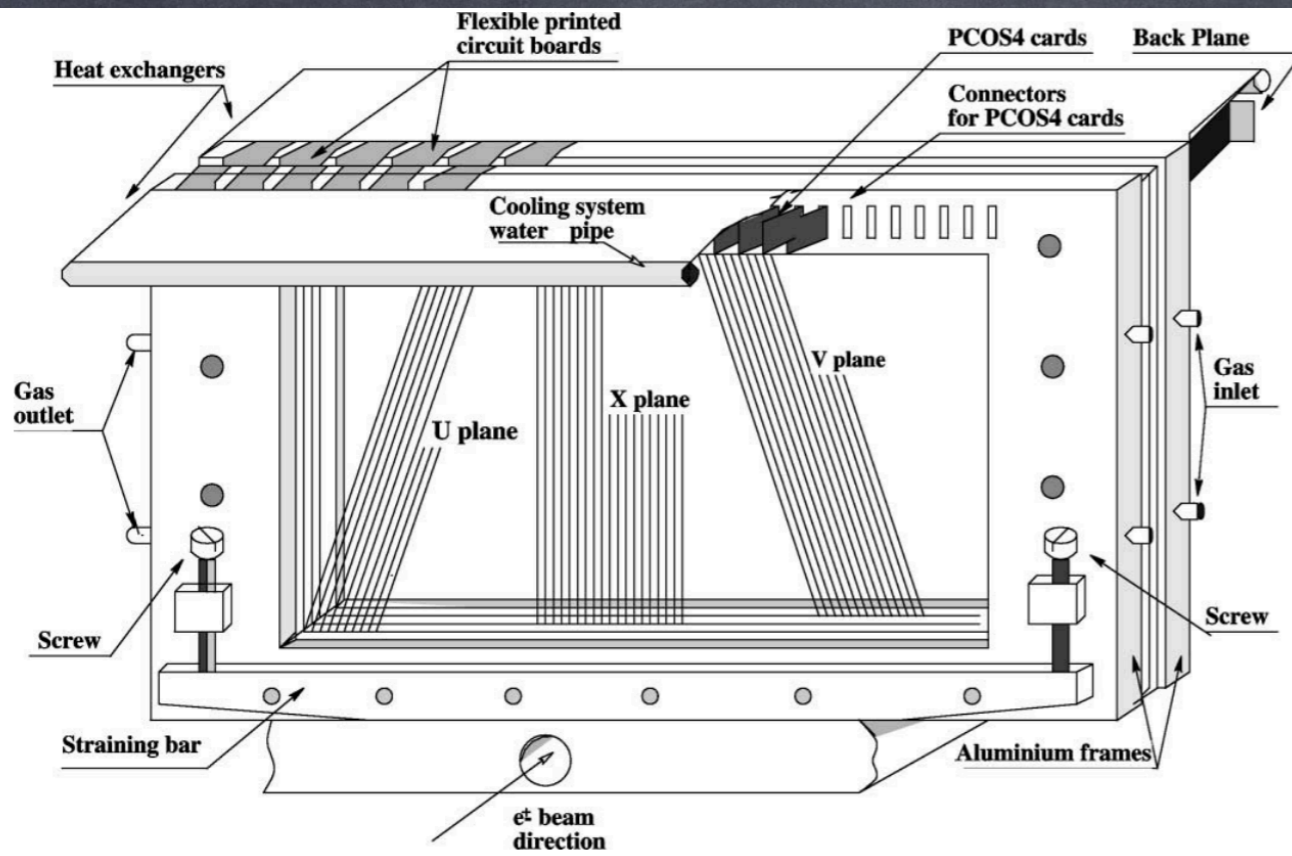
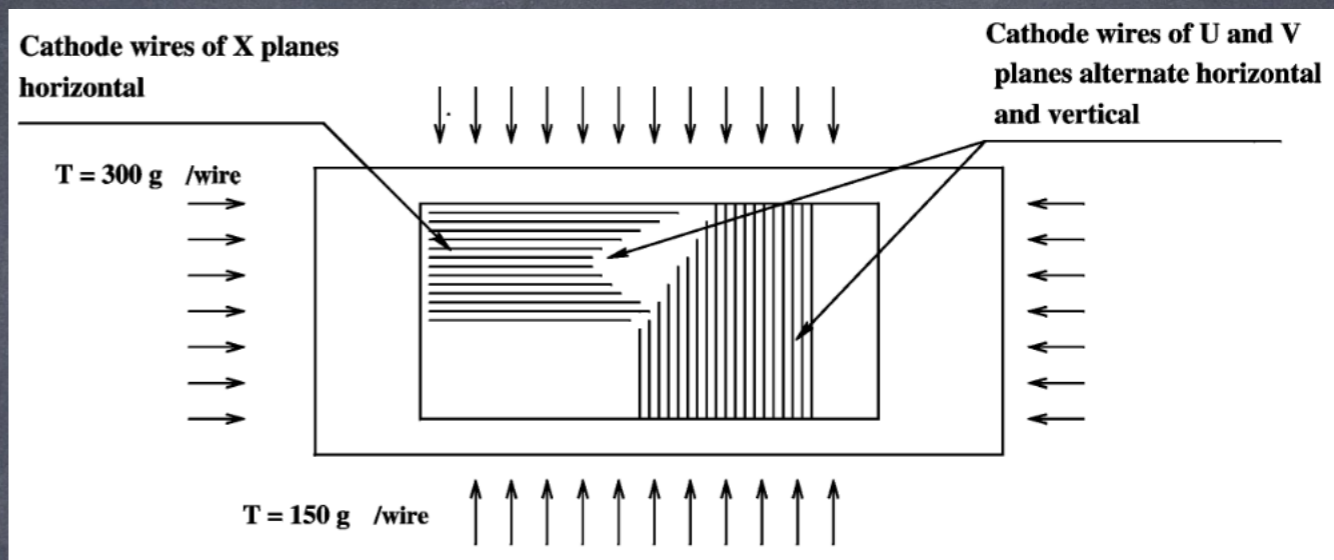


Fig. 2. Layout of one MC module.



Ar-CO₂-CF₄ (65:30:5)
 なんでCF₄?

Mechanical parameters of the MCs

	MC1			MC2			MC3		
Module active area (mm ²)	263 × 996			306 × 1210			347 × 1424		
Sense wire spacing (mm)	2			2			2		
Cathode wire spacing (mm)	0.5			0.5			0.5		
Sense wire Ø				25 µm Au-coated tungsten					
Cathode wire Ø				90 µm Bronze					
Sense wire tension (g)				50-70					
Cathode wire tension (g)				for 4 electrodes—300, for 2 electrodes—150					
	<i>U</i>	<i>X</i>	<i>V</i>	<i>U</i>	<i>X</i>	<i>V</i>	<i>U</i>	<i>X</i>	<i>V</i>
Sense wires per plane	512	496	512	608	608	608	720	720	720
Front-end boards per module	32	31	32	38	38	38	45	45	45

Aging Effect 1

Accumulated charge of Anode wires over 8 HERMES years (Estimation)

Modules	Top block		Bottom block	
	Average current (μA)	Charge (C/cm)	Average current (μA)	Charge (C/cm)
MC1	1.5	7.0×10^{-3}	0.2	0.2×10^{-3}
MC2	1.0	3.5×10^{-3}	0.15	0.15×10^{-3}
MC3	0.7	2.0×10^{-3}	0.1	0.1×10^{-3}

1995年に運転開始

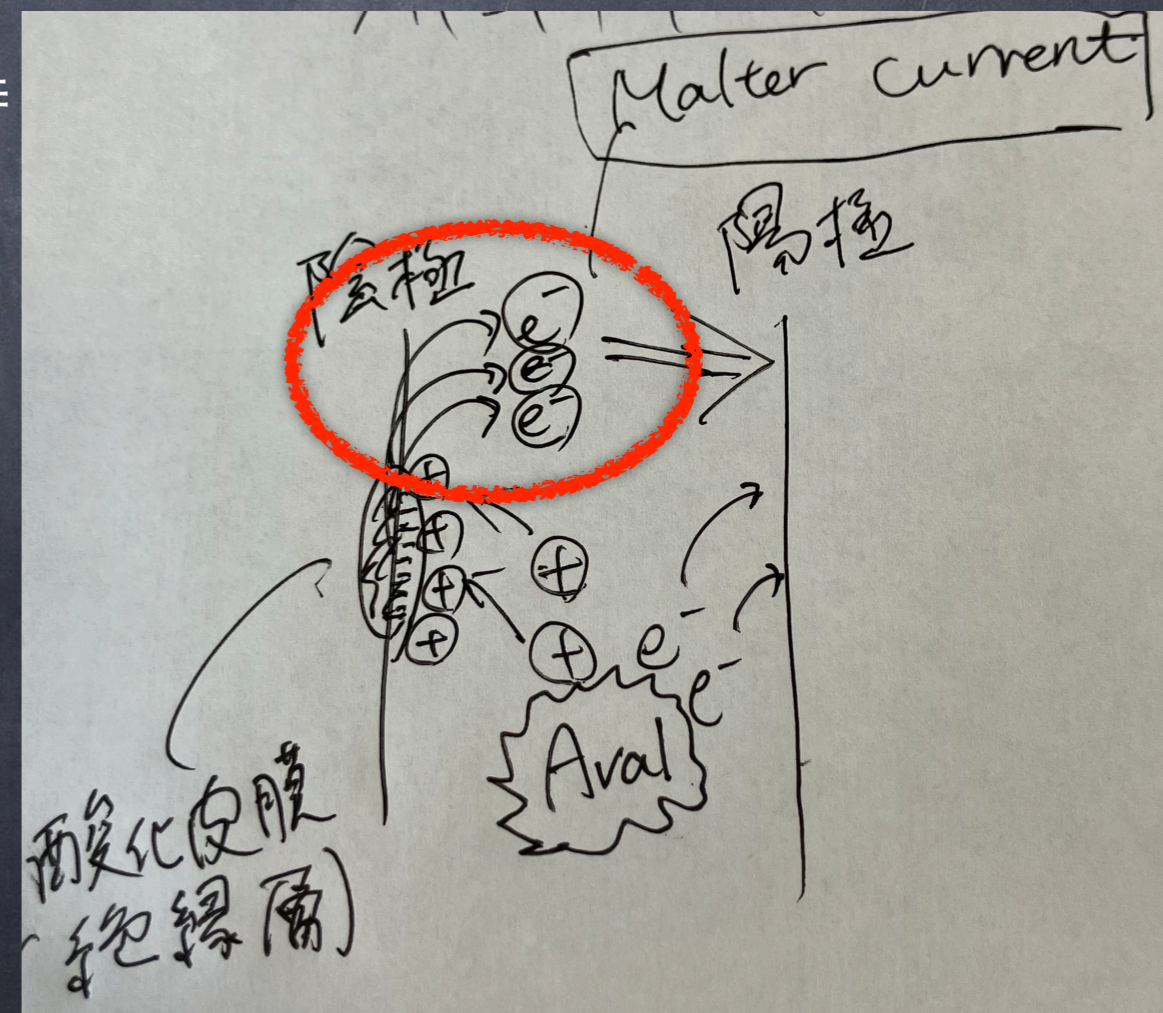
2000年の点検 (^{90}Sr をMCに照射) 時、イオン化を伴わない電流を観測

線源removedかつHVを200V下げても電流は維持

陰極ワイヤーには黒い領域発生

これらは「**Malter Effect**」によるもの

グロー放電でもアルコール洗浄でも改善せず。



Aging Effect 2

Sustained currents
on cathode wires

Drop of the efficiency

due to polymerisation on the anode wires
and screening of the electric field
because of insulated layer on cathode wires

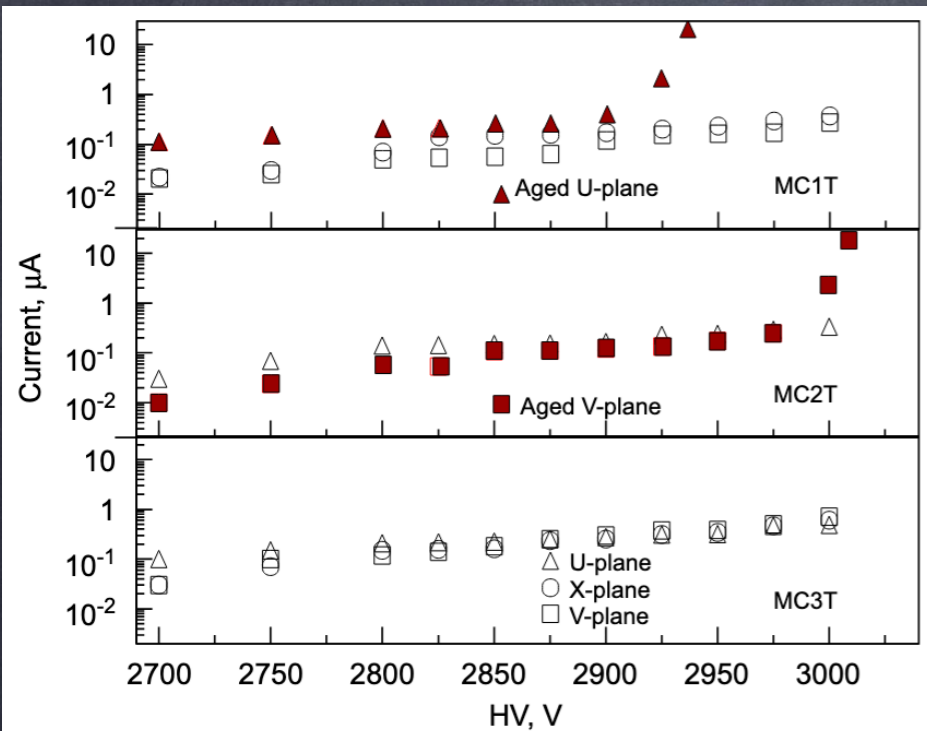


Fig. 2. Dependence of the beam ionisation current from the high voltage for the top chambers. Sustained current appears in the MC1 U-plane and MC2 V-plane top block chambers at HV = 2925 and 3000 V correspondingly.

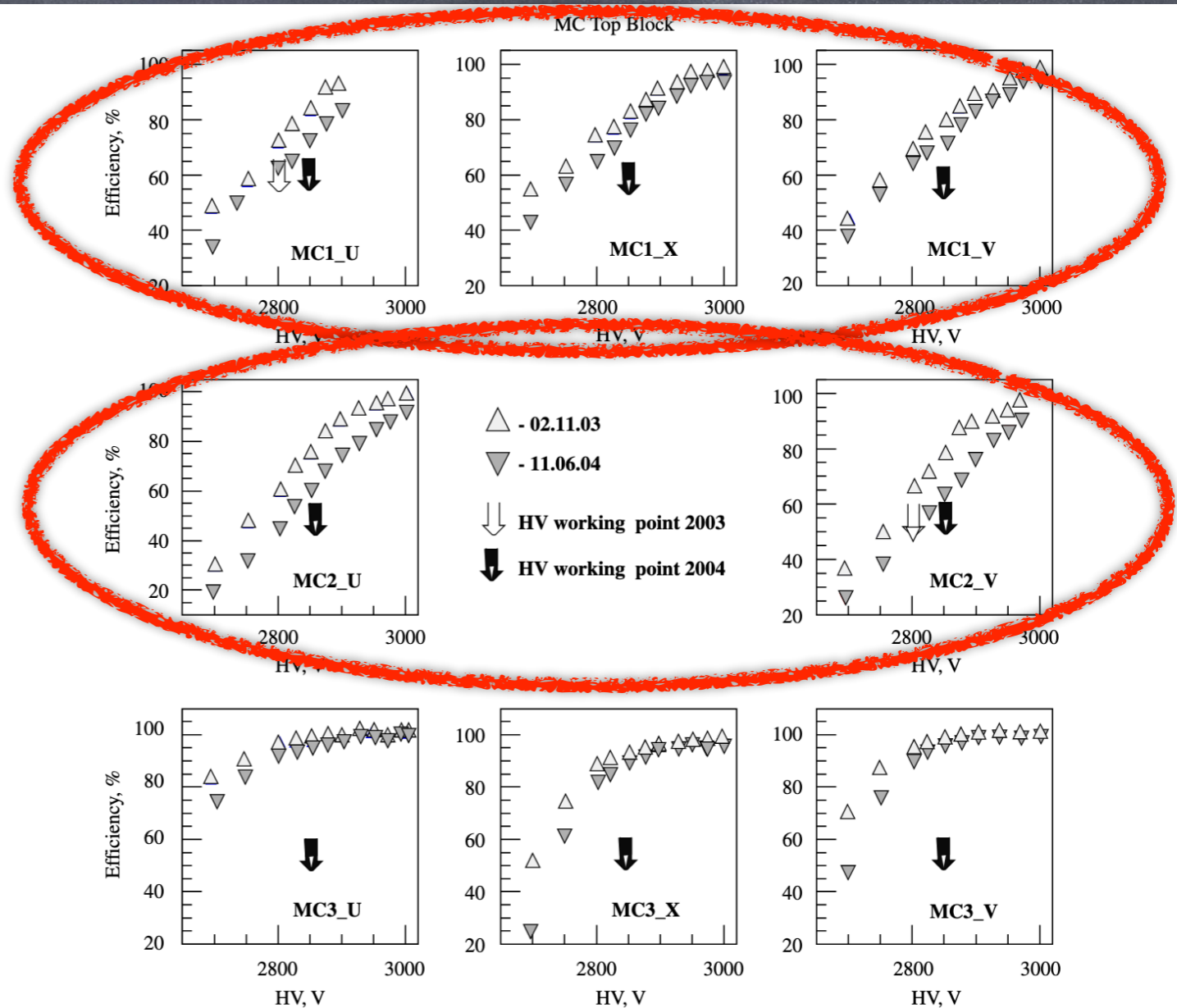


Fig. 3. Magnet chambers efficiency for the top block chamber versus high voltage at standard threshold used for data taking measured in the HERA positron beam in 2003 (Δ) and 2004 (\blacktriangledown).

Possible remedies against MC degradation

A way to reduce the Malter Effect is to use gas additives both to suppress polymerisation and to increase the conductivity of the insulating layer.

→ Vapours of water or alcohol

Because...

Molecules of water(alcohol, more strongly) exchange charge with some avalanche ions, and

Water makes all surfaces in the detector slightly more conductive, thus preventing the accumulation of ions on the polymer layer.

However, alcohol additives is a solvent action that makes the detector distort.

→ Vapours of water

Test exp.

	ϕ Anode	ϕ Cathode	Active area	HV W.P.	Water	Gas mix
TC1	15 μ m	90 μ m (bronze)	11 * 11 cm ²	2750 V	W	Manual
TC2					W/o	Already
TC3	25 μ m			2850 V	W	Manual

⁹⁰Sr β source, $I = 10$ MHz, $S^{spot} = 5$ cm² by 7 mm diameter collimator, ~6 hours exposure
 Then, whole active area was scanned as well with 200V above the W.P.,
 by 2 mm collimator to see the Matter current.
 Plus 1 week for cathode aging

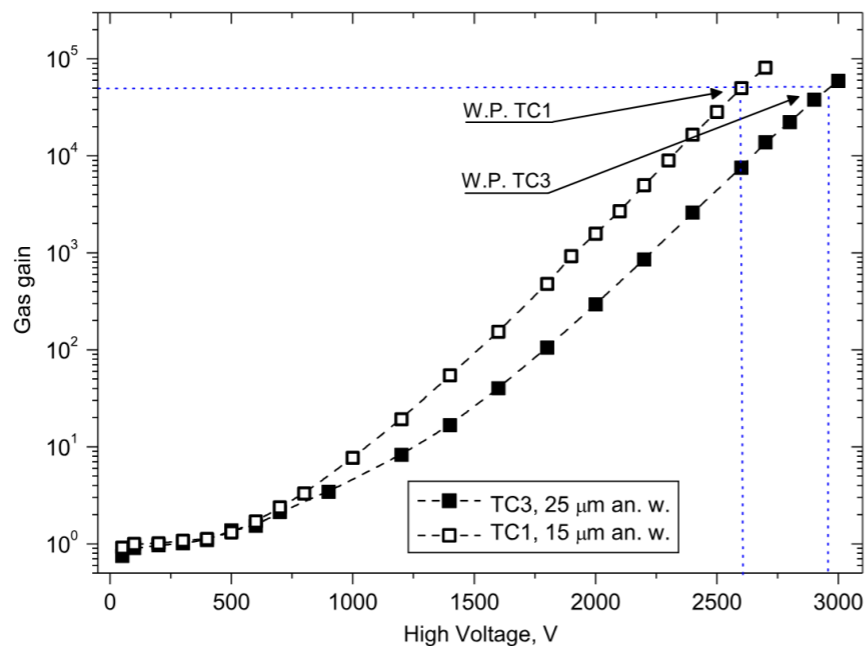
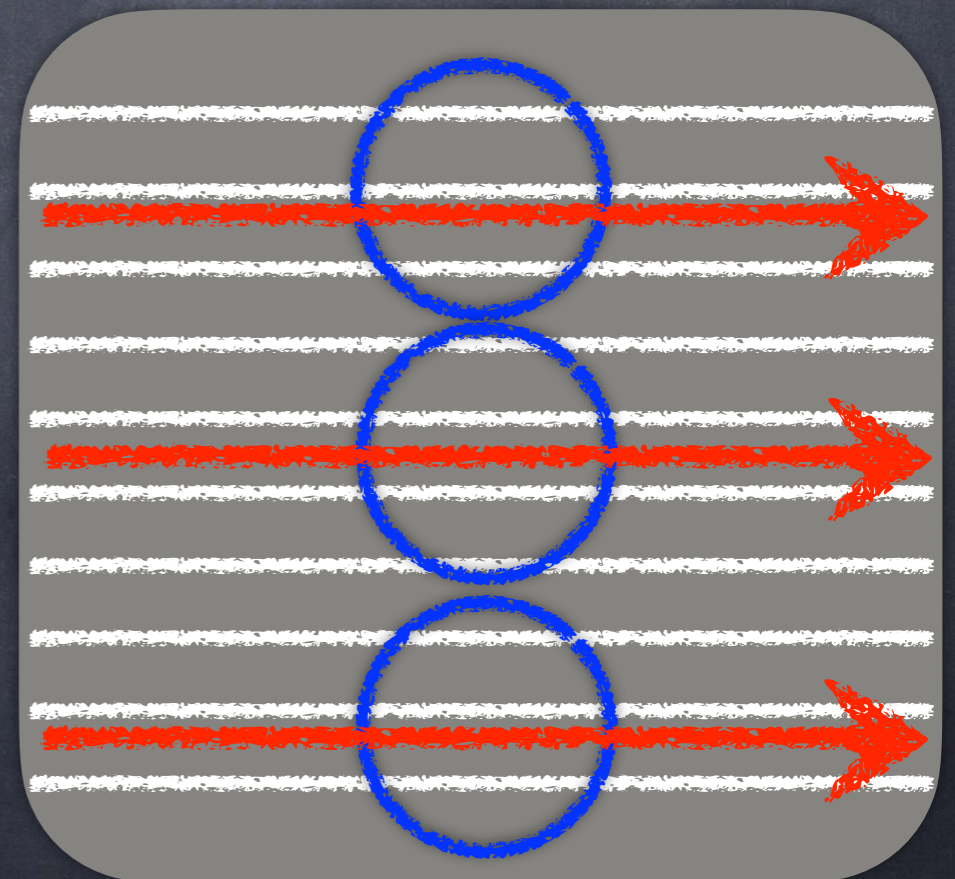


Fig. 4. Gas gain dependence on the high voltage for the test chambers TC1 with anode wire diameter 15 μ m and TC3 with anode wire diameter 25 μ m.



Anode Aging in Test exp.

Stability of gas gain due to adding water

using ^{55}Fe gamma-source

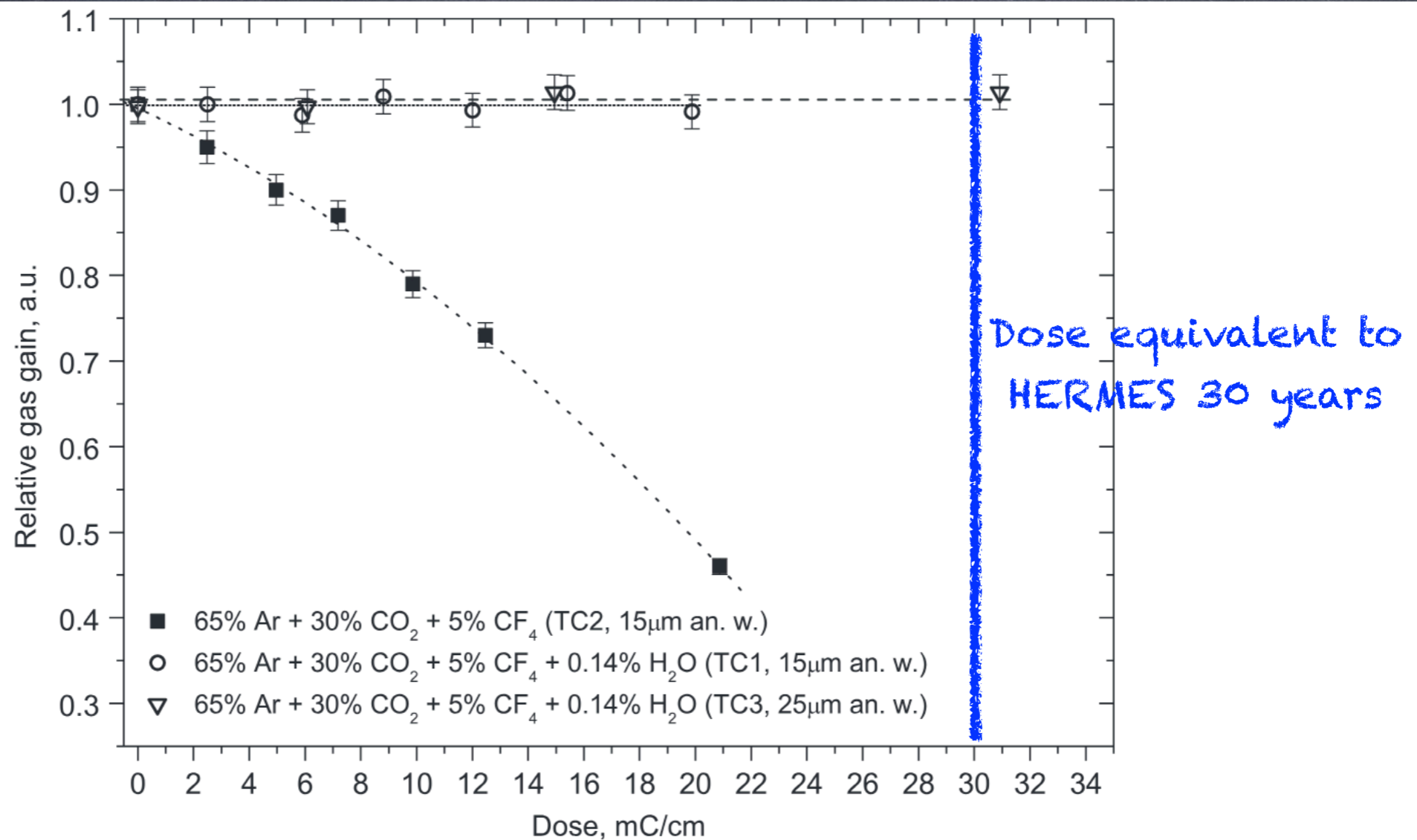


Fig. 5. Dependence of the relative gain in the irradiated zone versus accumulated charge by the anode wires. Black squares correspond to the test with standard MCs gas mixture. White cycles and triangles correspond to the test of both types of proportional chambers with addition of 0.14% H₂O to the standard gas mixture.

Anode Aging in Test exp.

Aging effect on anode wire appeared only in irradiation area.

E15のtest chmと比較できるかも。Ampの情報。

基本的なアナログ信号、 \sqrt{I} 情報ないか調べる。

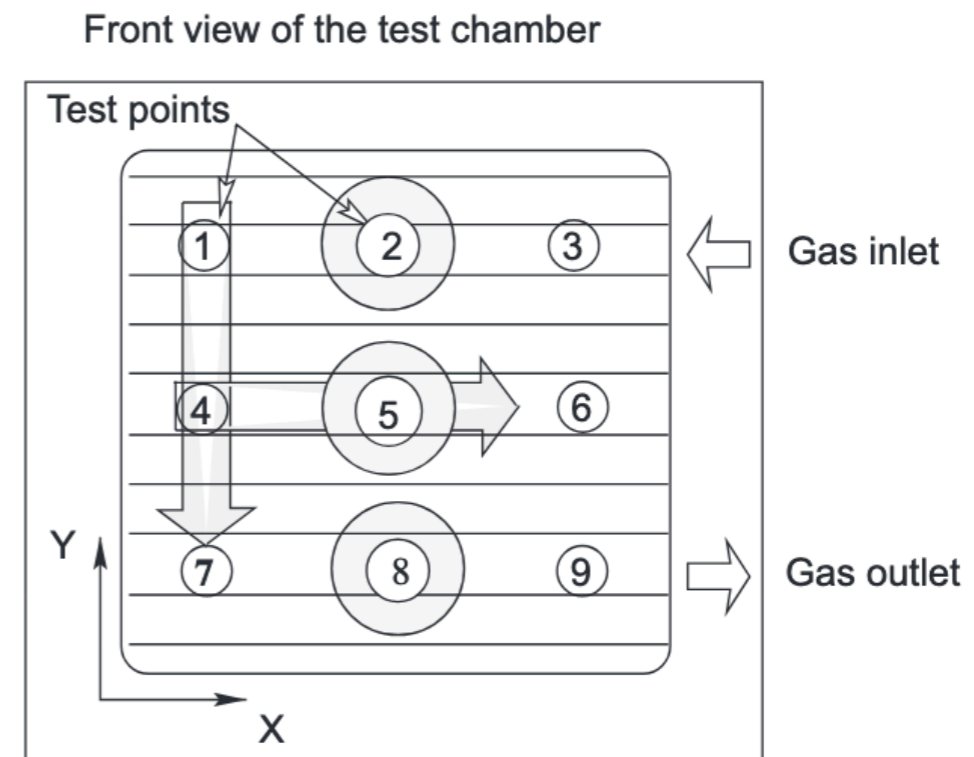
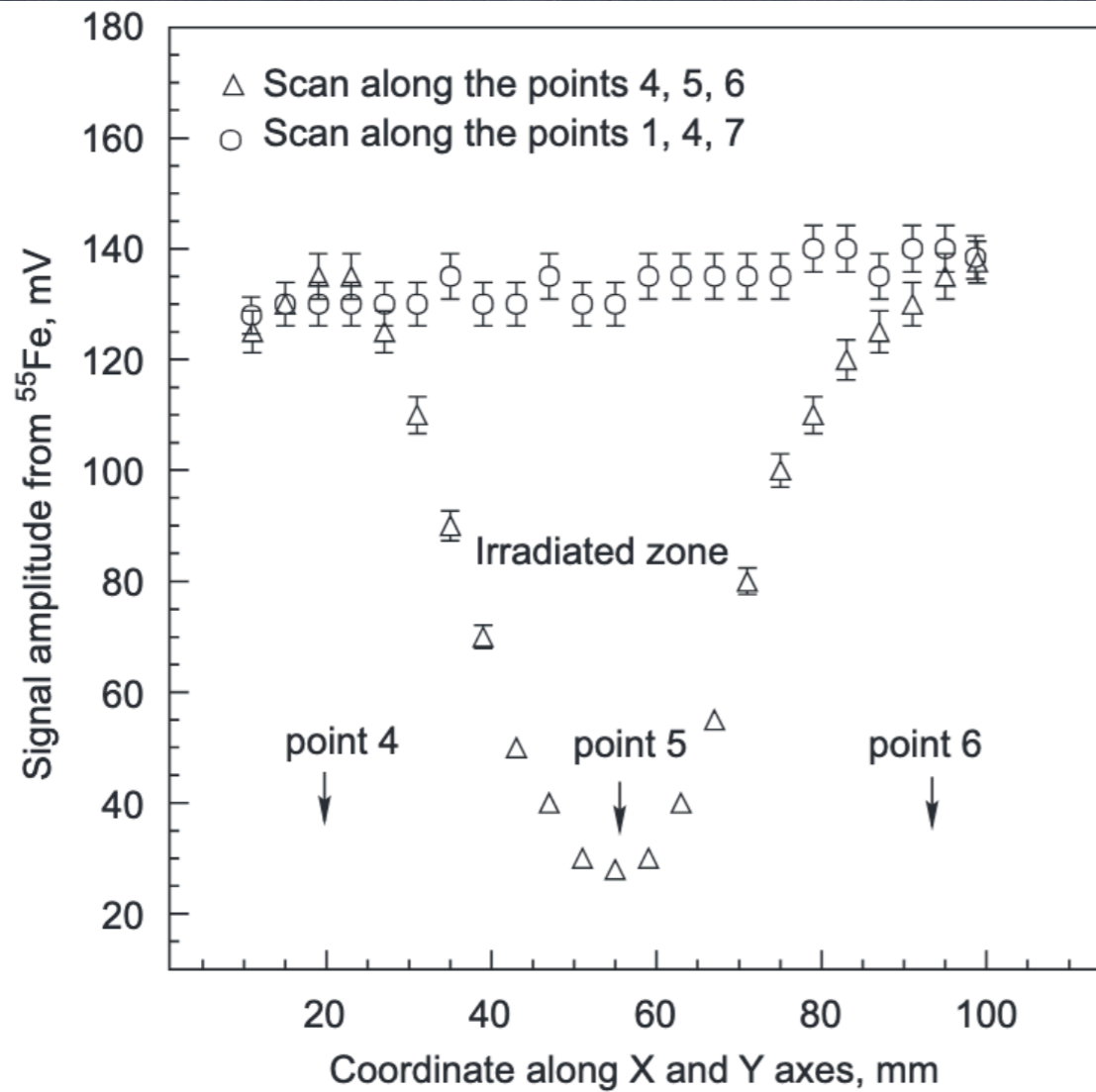


Fig. 6. The amplitude scans with an ^{55}Fe γ -source along the Y-axis through non-irradiated points 1, 4, 7 and along the X-axis through one of the irradiated zones in the point 5. The anode wires are shown in a front view of the test chamber by the lines directed along the X-axis. The accumulated charge in the irradiated zone at point 5 is equal to $Q_{\text{anode}}^{\text{point 5}} = 32 \text{ mC/cm}$.

Cathode Aging in Test exp.

Cathode aging appeared at accumulated charge of $Q_{cathode} = 4.75 \text{ mC/cm}$.

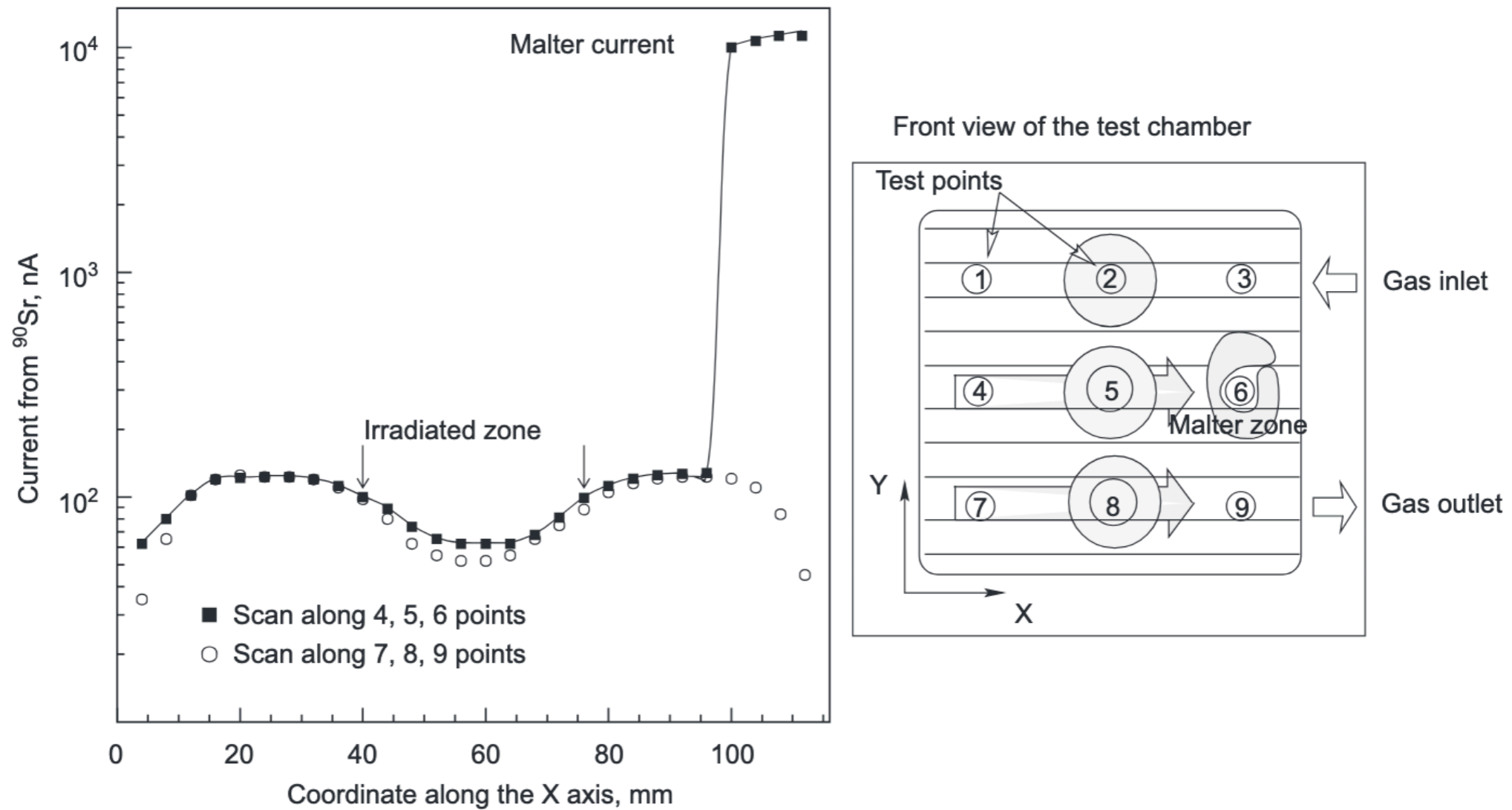


Fig. 7. Scans by the collimated ^{90}Sr β -source along the anode wires. The total accumulated charge in the irradiated zones 2, 5 and 8 is $Q_{anode}^{test} = 95 \text{ mC/cm}$ that corresponds to $Q_{cathode} = 4.75 \text{ mC/cm}$ for the cathode wires. An area where the ^{90}Sr ignited the self-sustained current is marked as 'Malter zone'.

Cathode Aging in Test exp.

Water can prevent the Malter Effect.

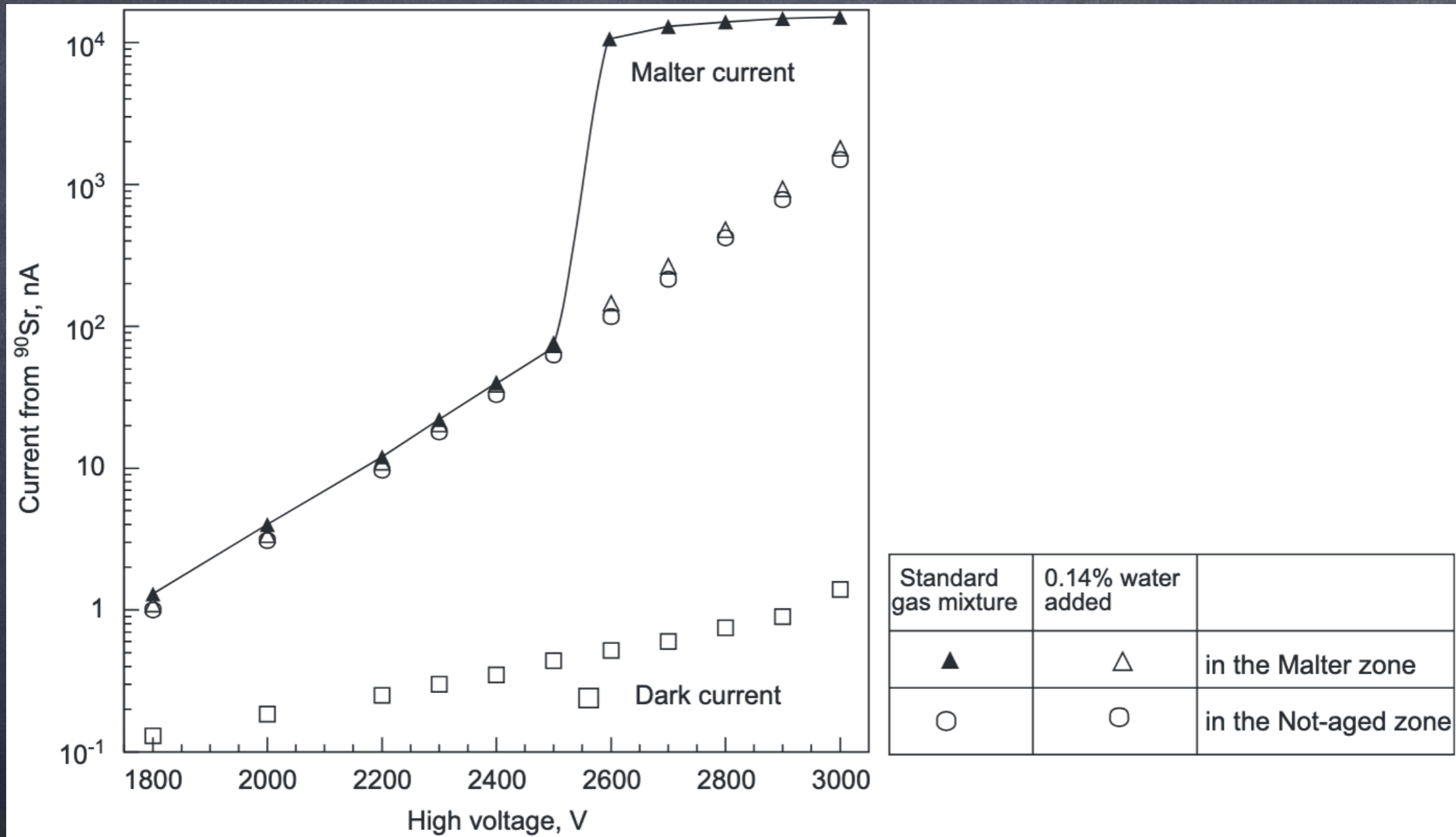
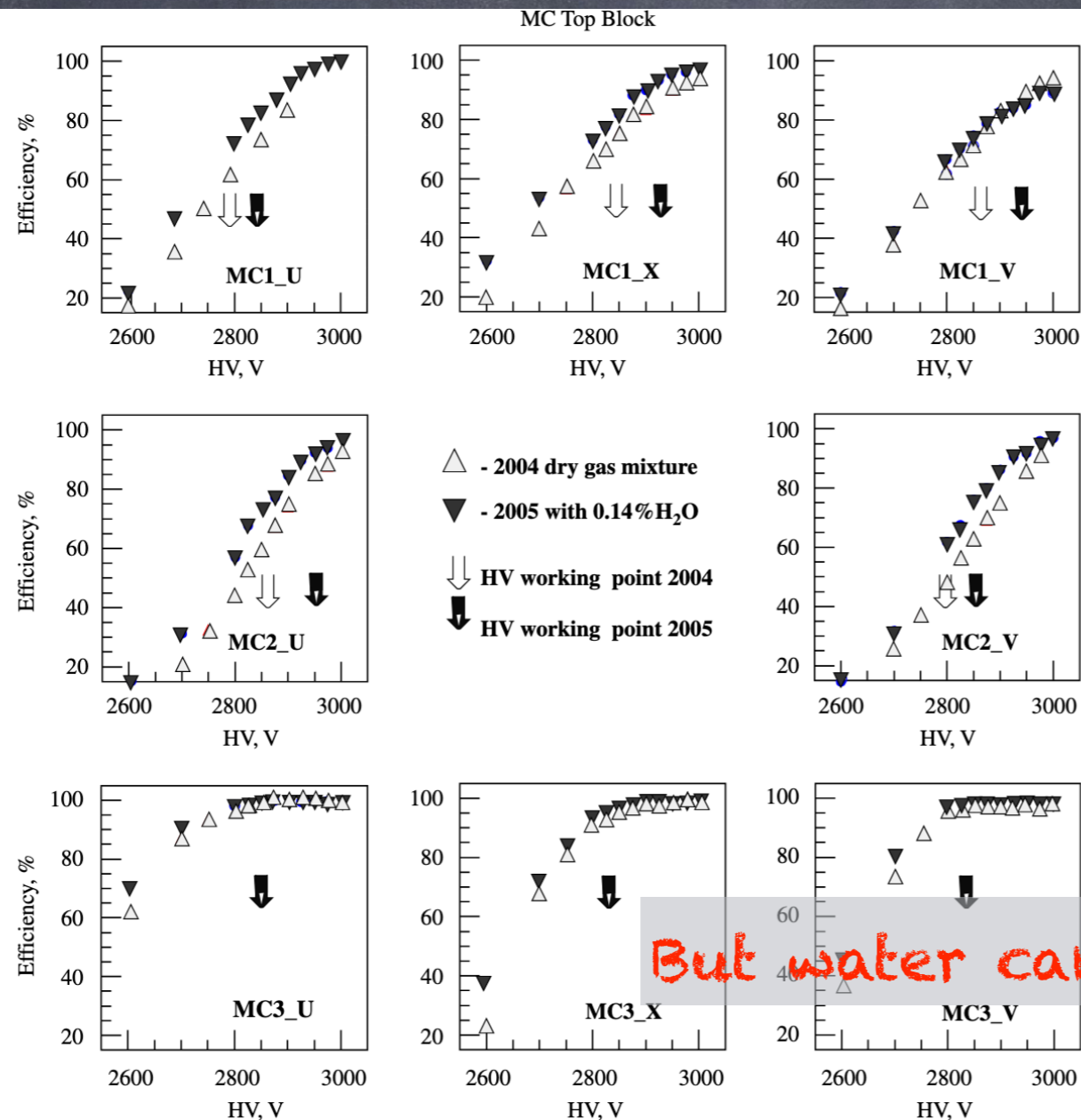


Fig. 8. Dependence of the ^{90}Sr ionisation current and dark current from high voltage.

*** skip the study of such fast aging ***

Recovery of the MCs

- Water was added since 2005.
- High Voltage scan in the electron beam → **no matter current** up to 3,000 V
- Higher efficiency due to water which disactivates the screening effect around cathode



But water can never cure the aged wires.

Fig. 10. Magnet chambers efficiency for the top block chamber versus high voltage at standard threshold used for data taken in the HERA positron beam. First measurement with dry gas mixture (▼) and next after adding of 0.14% H₂O (▲).

The idea of curing the aged TC wires without disassembly for cleaning

At first, they analyzed the deposits on the damaged wires using **Scanning Electron Microscopy (SEM)** (走査電子顕微鏡) and **X-ray emission(0-10 keV) spectroscopy (XEM)**

1. 走査電子顕微鏡 (SEM) とは

走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) とは、電子線を試料表面に照射し、生じる二次電子や反射電子を検出することで、試料表面形状や微細構造を高分解能で観察するための顕微鏡です。SEMは**透過型電子顕微鏡** (TEM) とは異なり、試料に透過する電子ではなく、試料表面で反応を起こす電子を観察するため、試料の厚さや形状に依存しない利点があります。

<https://azscience.jp/column/category/top04-sub08/>

X線発光分光法 (Xせんはっこうぶんこうほう、X-ray Emission Spectroscopy: XES) は物質の**電子状態**を調べるために使われている手法である^[1]。測定対象となる物質は、**気体**、**固体**、**液体**、**溶液**などと幅広い。

軟X線発光を生じさせるための励起源としては**電子線**や**X線管**などが用いられることもあるが、現在では、エネルギー可変で強度の強いX線が得られる**シンクロトロン放射光施設**を光源として行われる実験が主流である。発光が軟X線領域のX線である場合には**軟X線発光分光法**(Soft X-ray Emission Spectroscopy: SXES)と呼ばれることもある。

X線発光分光法では、電子線による**励起**やX線の**吸収**などによって生じるX線発光を、**回折格子分光器**^[2]、**結晶分光器**を用いてエネルギー分析することで、測定対象の物質の電子状態を観測する。エネルギー可変な放射光を励起光源として使用する場合には、X線の吸収の特徴である**元素選択性**を利用して、物質中の元素ごとに部分的に電子状態を観測することができる特徴がある。したがって、同じく電子状態を調べるための手法である**光電子分光法**と比べて、多成分系においても解析が容易であるという特徴がある。

<https://ja.wikipedia.org/wiki/X%E7%B7%9A%E7%99%BA%E5%85%89%E5%88%86%E5%85%89%E6%B3%95>

Surface of a Aged Anode Wire (TC1)

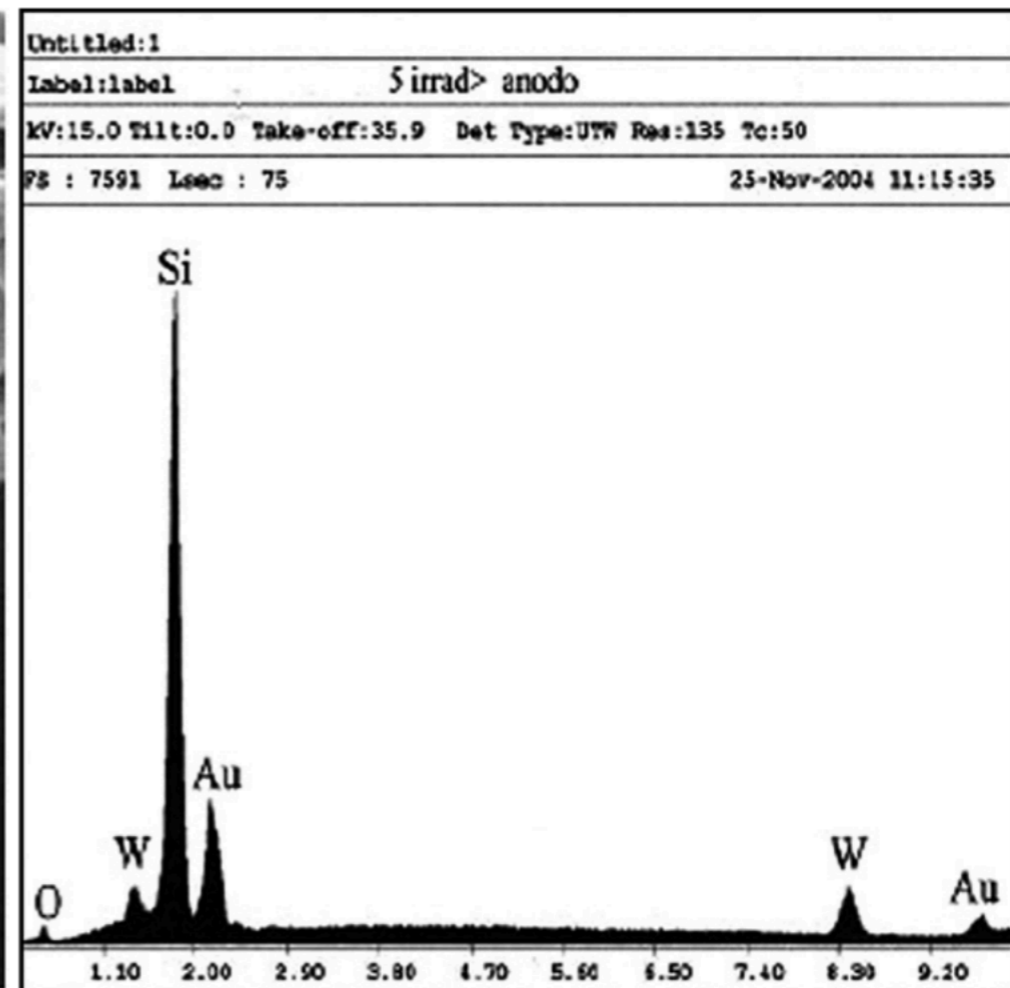
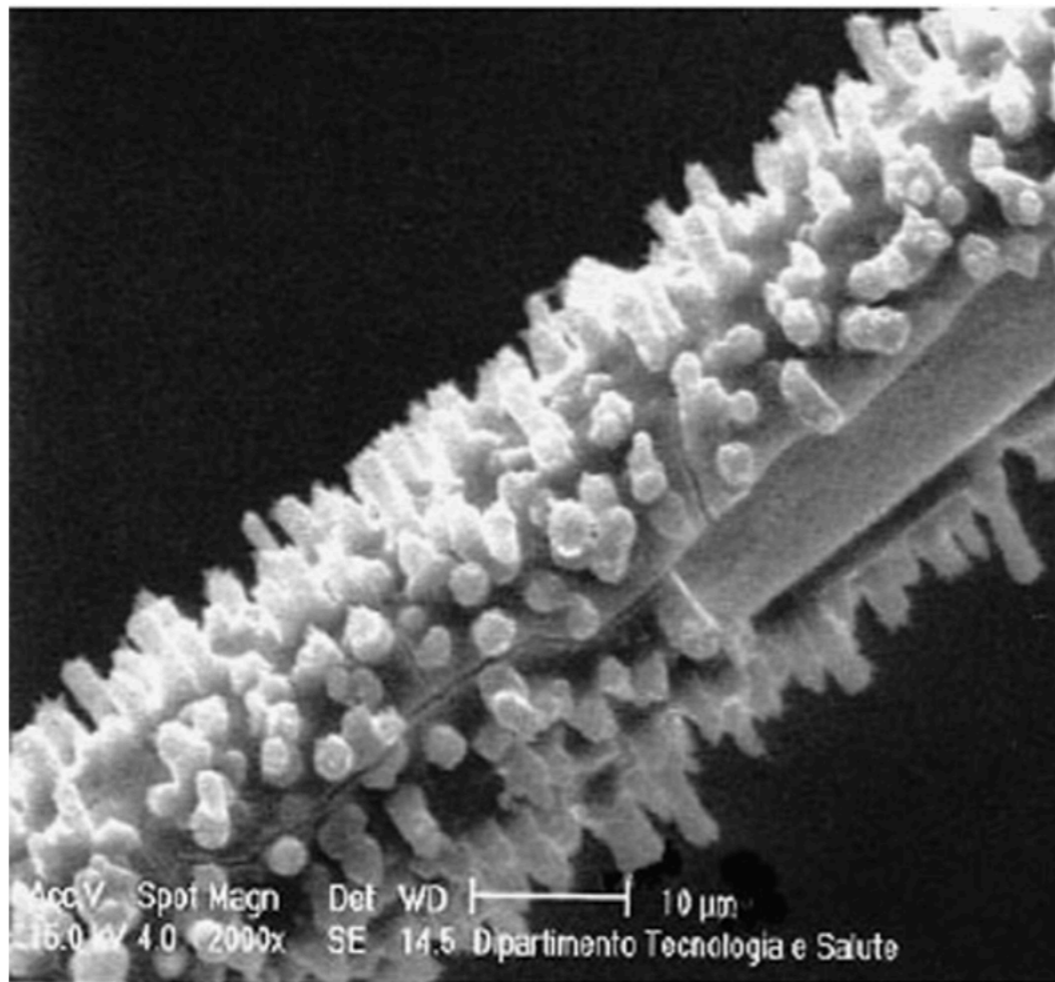
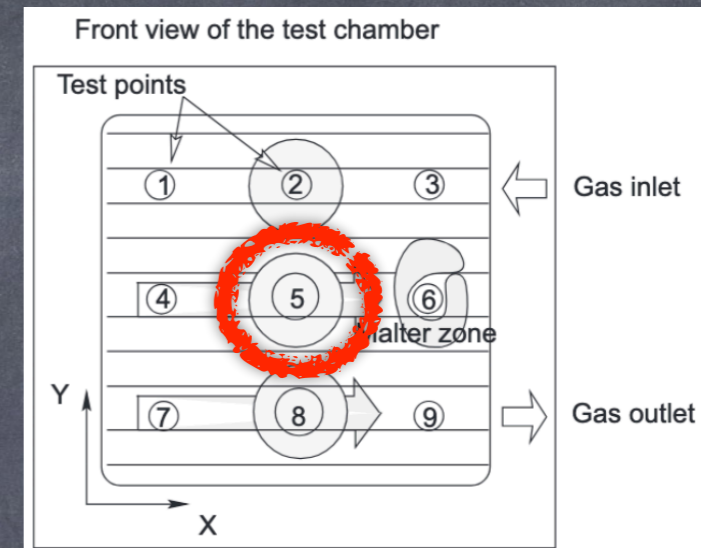


Fig. 11. SEM micrograph of the anode wire irradiated in the fifth test point (see Fig. 6) after accumulation of $Q_{\text{anode}}^{\text{point 5}} = 32 \text{ mC/cm}$ and XEM spectra of the deposits on the surface.

Surface of a Aged Cathode Wire (TC1)

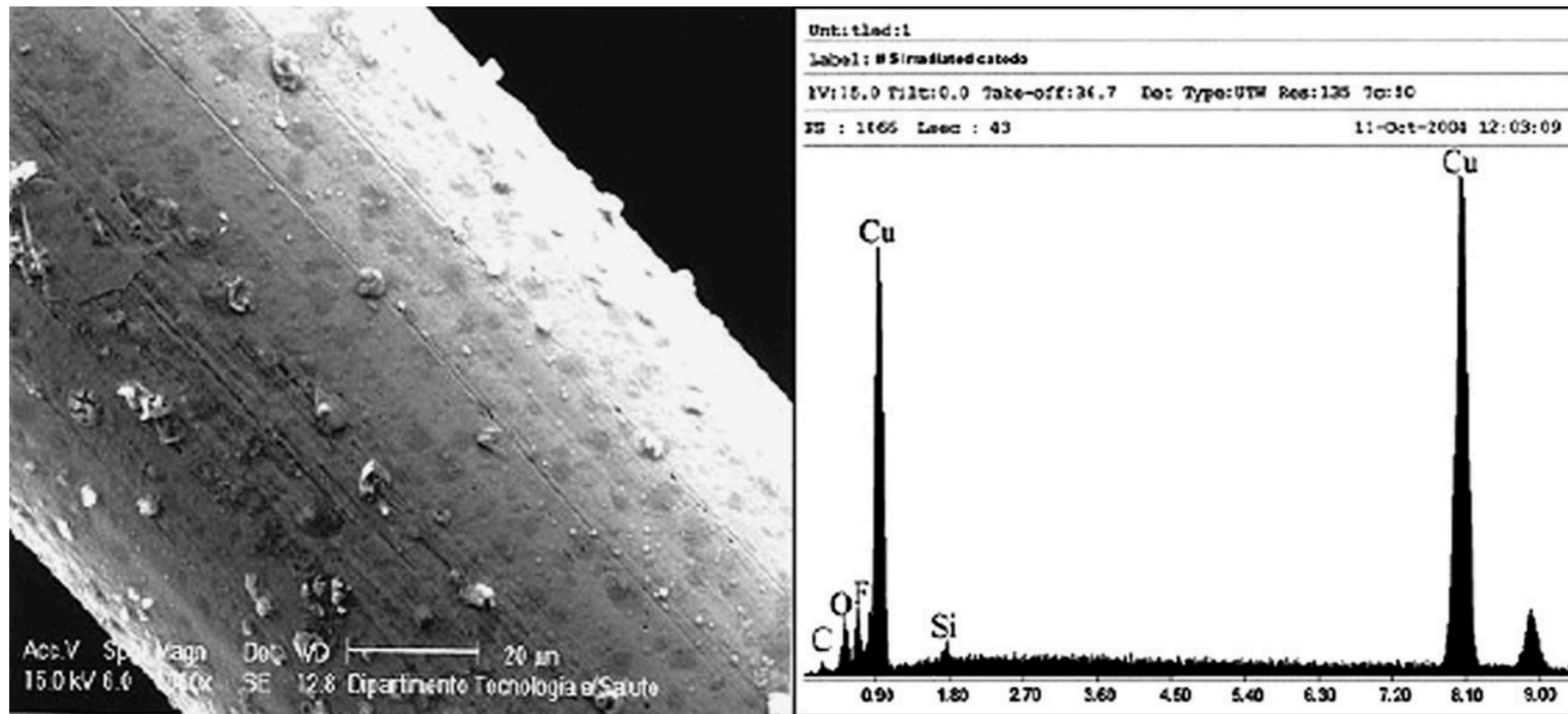
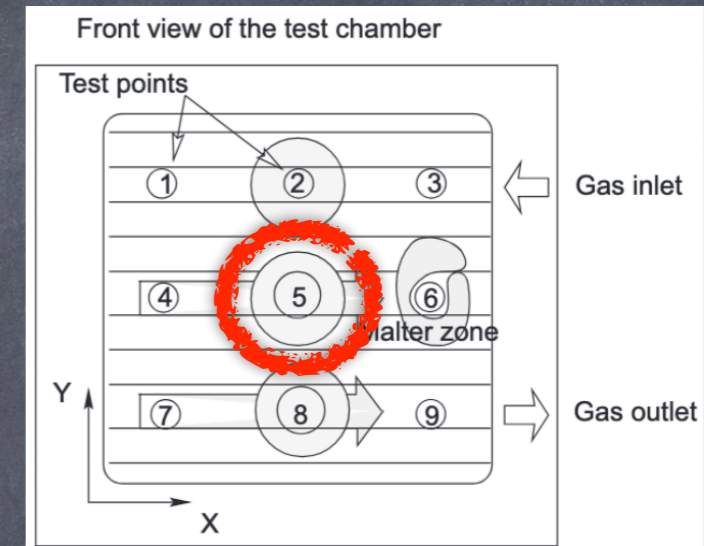


Fig. 12. SEM micrograph of the irradiated in the fifth test point (see Fig. 6) cathode wire after accumulation of $Q_{\text{cathode}} = 4.75 \text{ mC/cm}$ and XEM spectra of the deposits on the surface.

Surface of a Aged Cathode Wire in "Matter Zone" (TC1)

Higher ratio of **C** and **CuO** than points

Appearance of **resistive copper oxides** together with **carbon flakes** on the cathode wires appears to be the **reason for the Matter effect**.

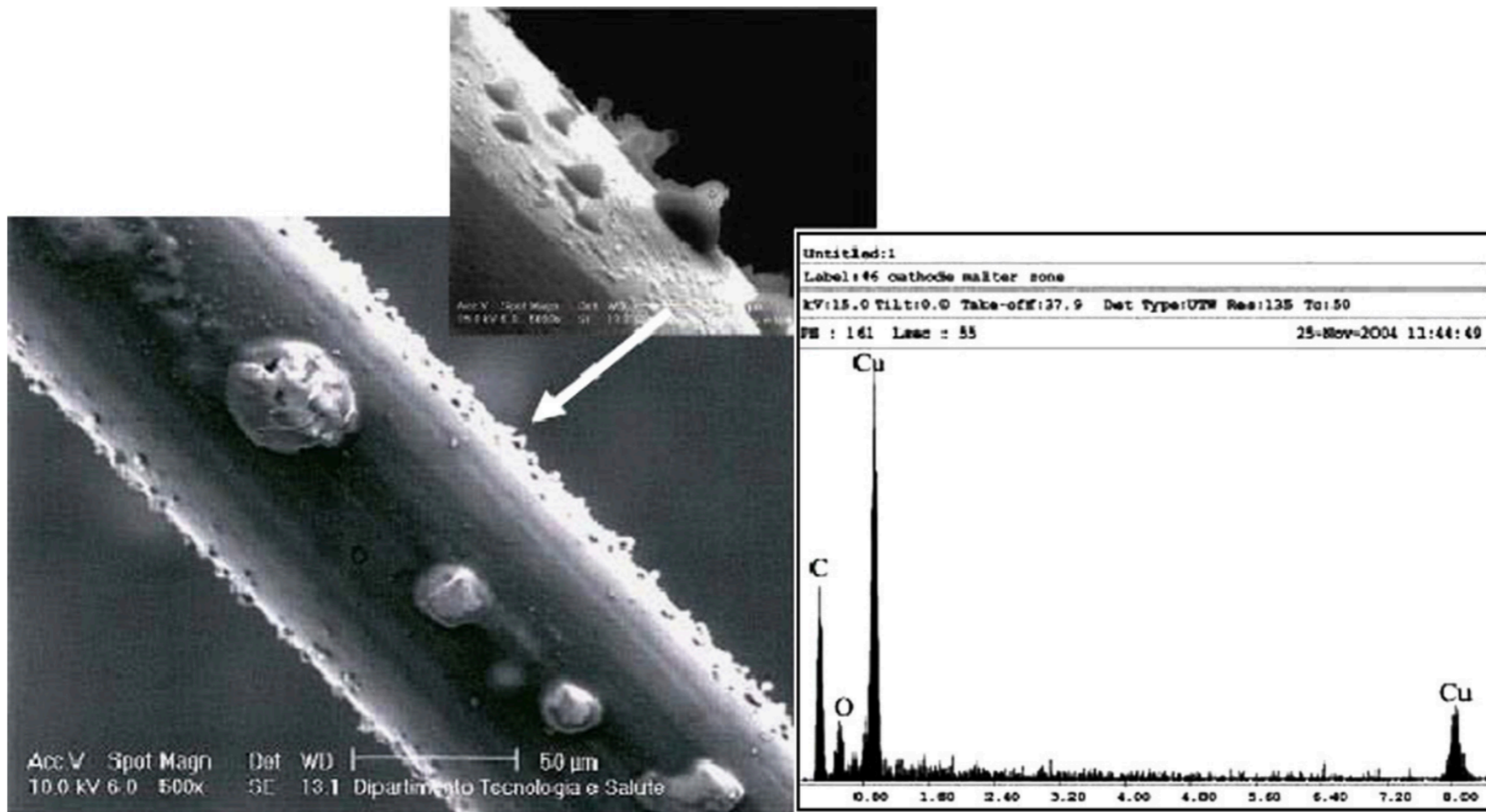
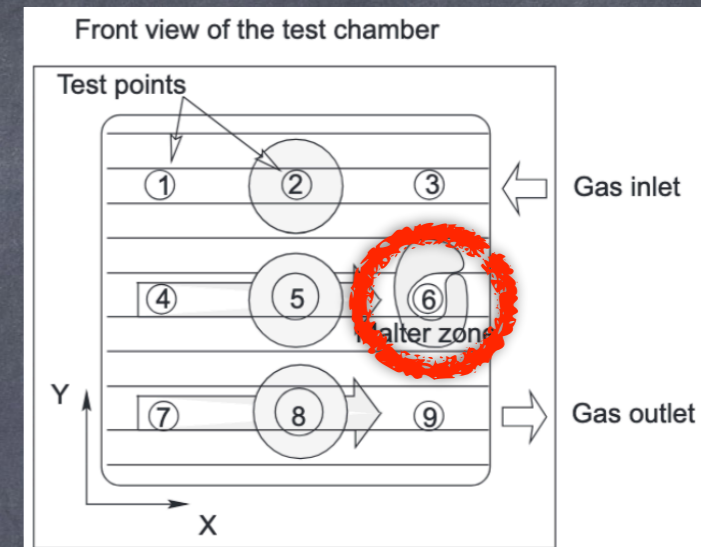


Fig. 13. SEM micrograph of the cathode wire from the non-irradiated sixth test point, see Fig. 6, after accumulated charge of $Q_{\text{cathode}} = 4.75 \text{ mC/cm}$ and XEM spectra of the deposits on the surface.

Surface of a Aged Anode Wire (TC2)

結局、
ガス配管中の油汚れが早い時期での劣化の原因でした。

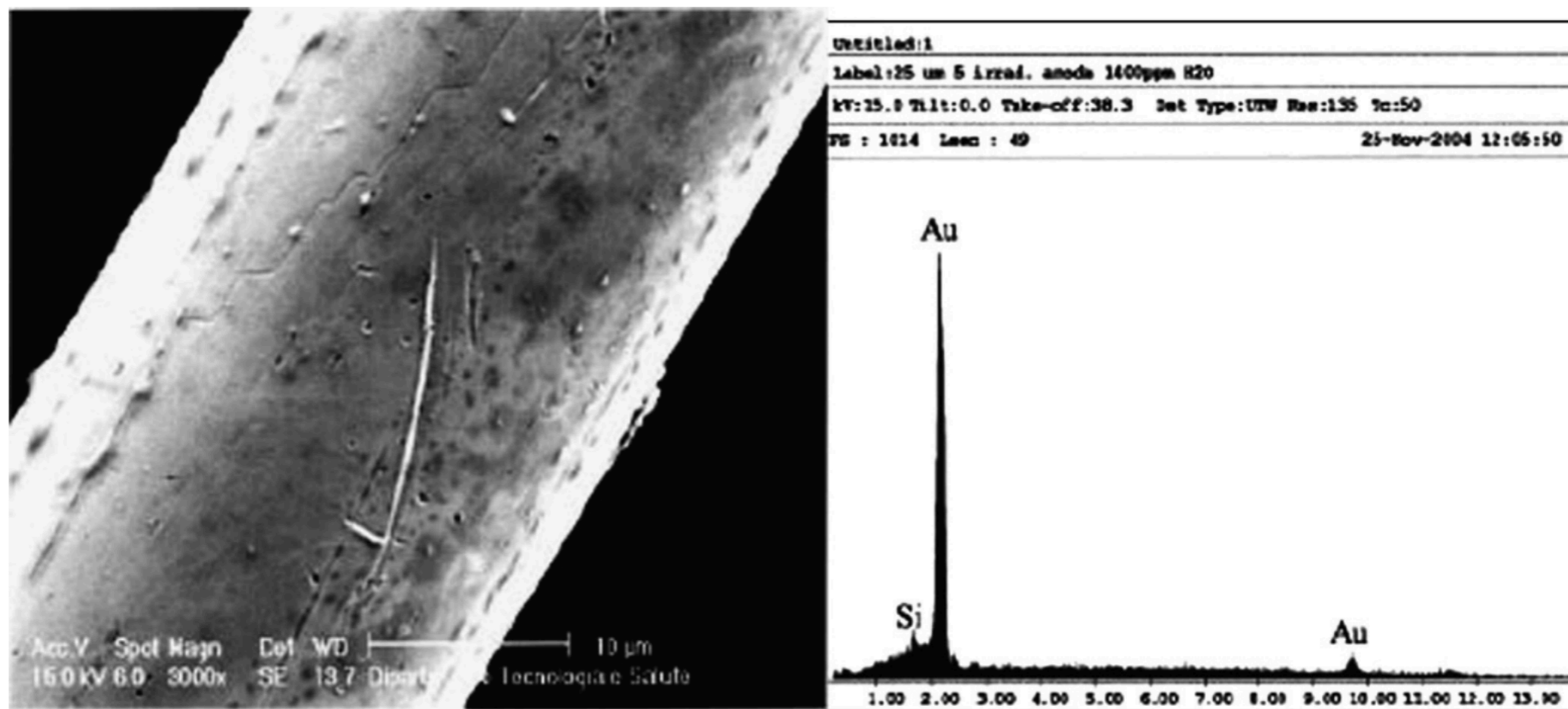
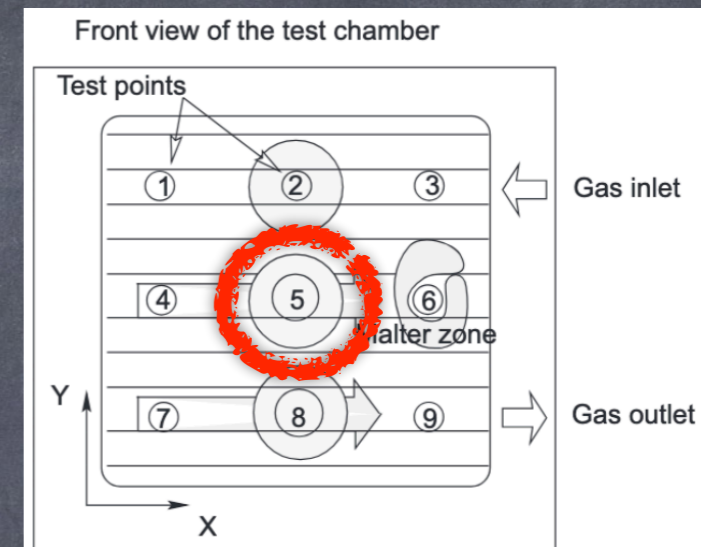


Fig. 14. SEM micrograph of the anode wire irradiated with gas mixture containing 0.14% H₂O after dose of $Q_{\text{anode}}^{\text{point } 5} = 44 \text{ mC/cm}$ and XEM spectra of the deposits on the surface.

Recovery of the aged wires

半導体部品の製造プロセスから得た技術を利用。

CF₄-CO₂ (80-20)を入れて逆電位をかける。

放電で生じたCF³⁺などが陽極に行き、堆積物であるシリコンと化合して

シリコンフッ化物に。これがガス相に行き、流れていく。

なんか炭素も取れるらしいが、調べてません。参考文献へ。

老化したテスト比例チェンバーを 15~20 nA/cm のグロー放電モードで 70 時間におわたってトレーニングした結果、老化した検出器が完全に回復することが確認されました。この回復手順では、55Fe γ 線源 (2 kHz) の照射ゾーンを使用しました。6 keV の γ 線はガスイオン化を維持し、グロー放電プラズマを安定させ、陽極堆積物の化学結合を分解することでエッチング条件を改善しました。図 15a は、90Sr によって照射されたゾ

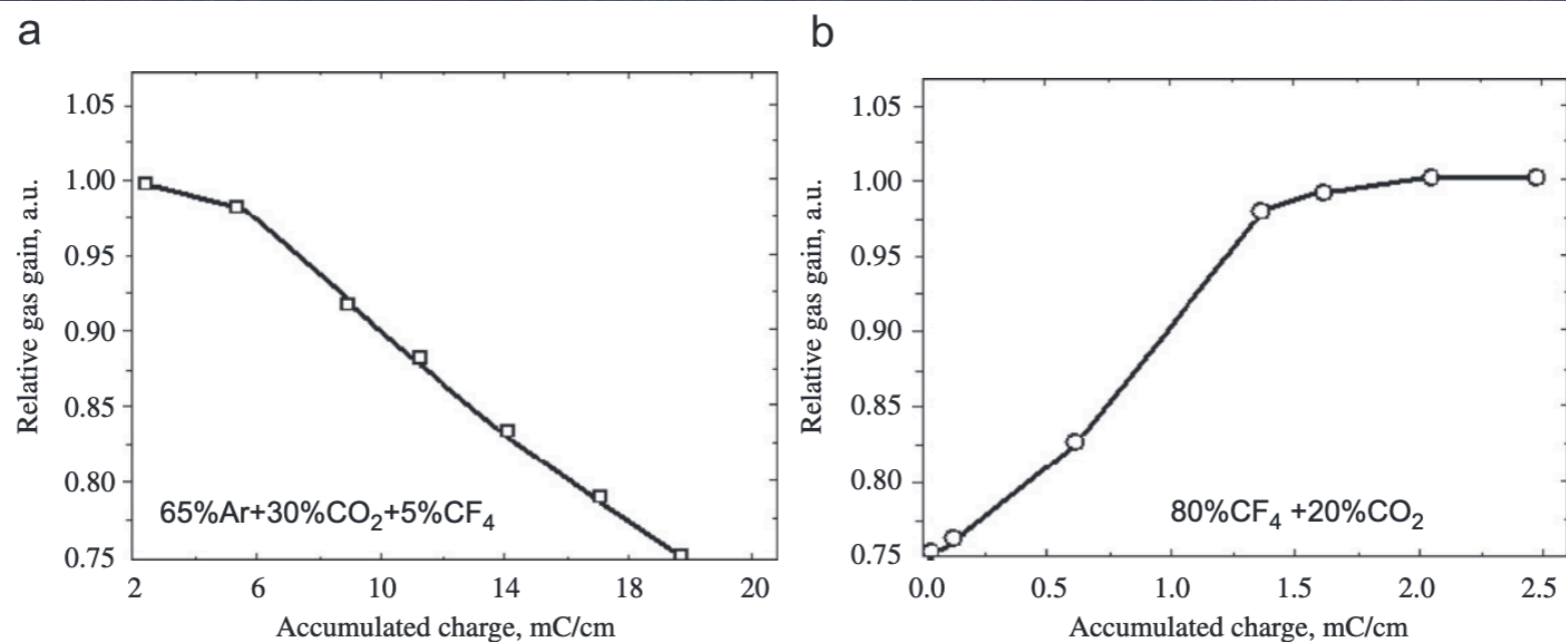


Fig. 15. (a) Dependence of the relative gas gain in the zone irradiated by ⁹⁰Sr versus charge accumulated by the anode wires. The aging performed using magnet chambers gas mixture. (b) Dependence of the relative gas gain during the recovery procedure with glow discharge versus the accumulated charge of the anode wires.

Recovery of the aged wires

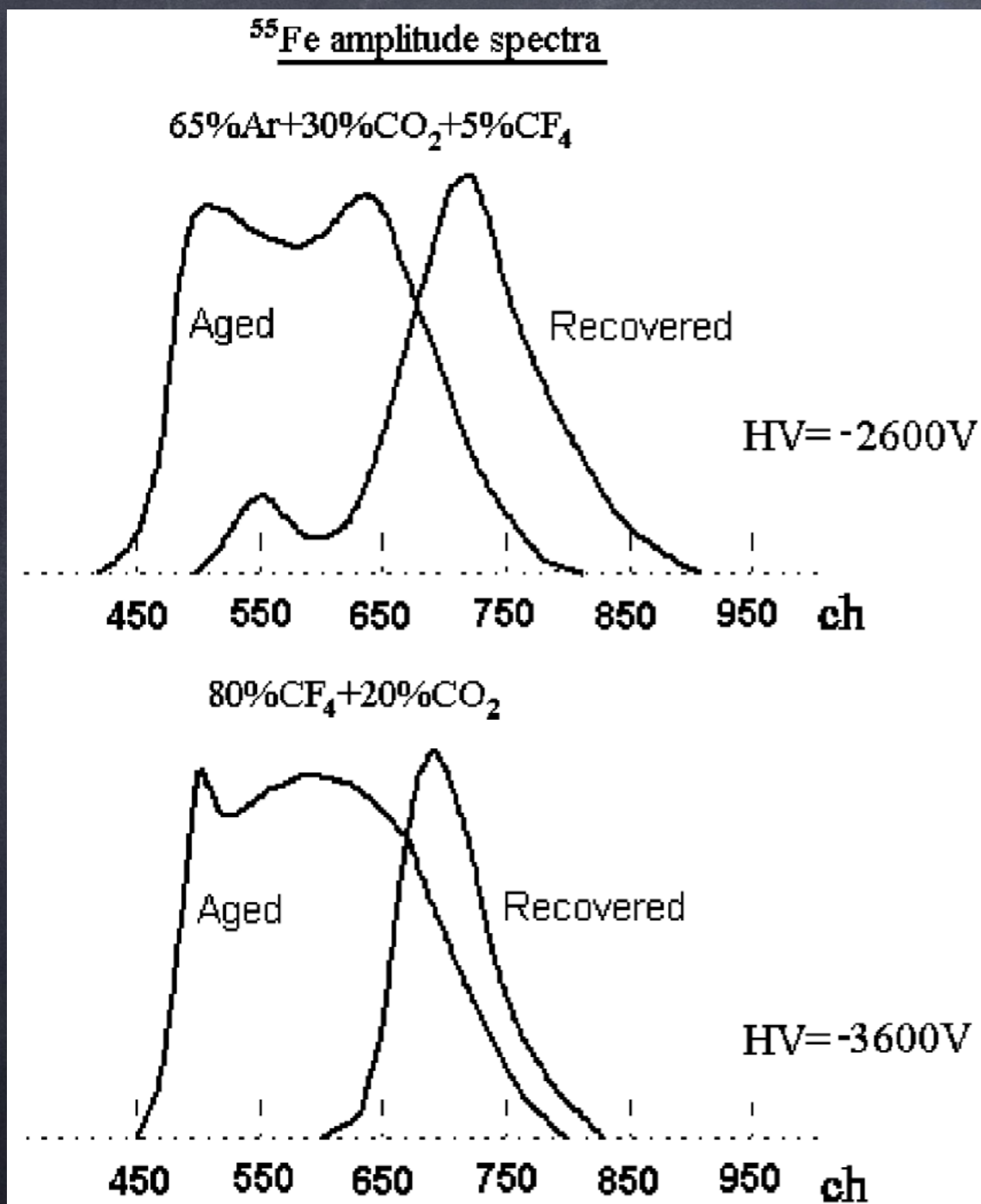


Fig. 16. A comparison of the charge spectrum shape after exposure to gas mixtures Ar/CO₂/CF₄ and CF₄/CO₂.

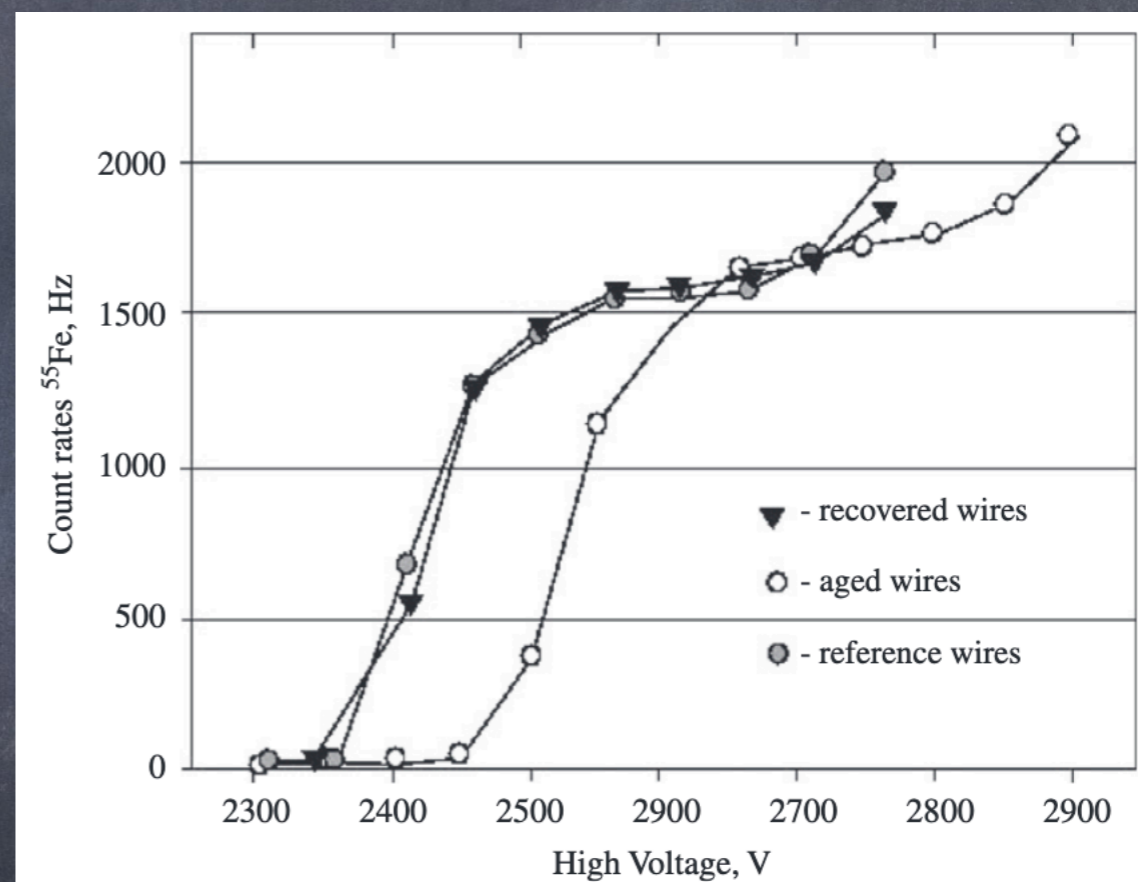


Fig. 17. Count rates from ⁵⁵Fe γ -ray source measured after aging and recovery procedure as a comparison with the count rate from the reference non-irradiated zone.

6. まとめ

HERMES 実験の準備段階において、MC のガス供給システムにシリコンベースのオイルが誤って混入したと推測されています。その結果、蓄積電荷が 10mC/cm に満たない段階で、比例チェンバーの老化劣化が始まりました。これにより効率が低下し、Malter 電流が発生しました。

実験の連続的な運用と、スペクトロメータの磁極間に設置された比例チェンバーへのアクセスが困難であったため、損傷した検出器に直接アプローチする機会はありませんでした。老化の進行を抑制するための非侵襲的な対策を見つけるため、MC のテスト版を使用した研究が行われました。その結果、ガス混合物 $65\% \text{ Ar} + 30\% \text{ CO}_2 + 5\% \text{ CF}_4$ に 0.14% の水を添加することで、老化効果を緩和することができることが判明しました。水の添加は陽極ワイヤーを清掃するものではありませんが、Malter 電流を抑制し、これにより高電圧の動作点を引き上げることができ、効率低下を補うことが可能になりました。

ガス混合物に正確に水を追加するシステムが設計されました。MC ガスシステムでのガス混合物の加湿を使用することで、老化の進行を停止させることができました。この技術により、3 年間にわたり、MC は HERMES 実験で安定かつ信頼性の高い運用を示しました。

老化した比例チェンバーを完全に回復させるための技術も示されました。今後、陰極ワイヤーでの回復効果に関する研究が必要です。また、HERMES 実験終了後に、 $80\% \text{ CO}_2 + 20\% \text{ CF}_4$ ガス混合物を使用して実際の老化した MC で回復手法を適用することが魅力的です。