邪教幹部破解金正男案：神經毒劑

1953年5月6日，英國皇家空軍麥迪臣（Ronald Maddison）走進波頓唐實驗室。這位年僅二十歲的士兵，在沉寂的密室裏依指示坐在長桌旁，戴上了防毒面具，麥迪臣只聽到自己的呼吸聲。研究員捲起他的衫袖，用膠布將一塊雙層絨布貼在前臂，然後用移液器將幾滴無色液體加在絨布上。過了二十分鐘，麥迪臣開始劇烈反應，先是汗如雨下，繼而癱倒桌上抽搐，儼如哮喘發作；他拼命掙扎，只來得及說「聽不見了」，隨即陷入昏迷。

儘管研究員緊急為麥迪臣注射解藥，匆忙將他送往醫院，但可惜為時已晚。奪走麥迪臣性命的，是二百毫克純沙林（Sarin）神經毒劑。為了買訂婚戒指給女朋友，面對誘人的十五先令報酬，還有額外三天假期，他欣然參與了國防部這項「醫學實驗」。然而，他對實驗內容和風險一無所知，因為軍方從不向他透露研究真正目的，實際是一個絕密的神經毒劑人體試驗。[1]

任何清醒的人絕不會自願參與這樣的實驗。

G 系列神經毒劑

要數當今殺傷力大的化武，神經毒劑絕對排頭位，而最為人所知的莫過於沙林。兩伊戰爭、敘利亞多次的襲擊，還有日本奧姆真理教在松本和東京地鐵兩次恐怖襲擊，都造成無數人命悲劇。1930至40年代，德國化學家開發出一系列致命的神經毒劑，德軍已經儲存了大量沙林，希特拉本可在二次大戰中大規模施放。極為諷刺的是，他們用 Zyklon B 毒氣在集中營屠殺手無寸鐵的平民，卻不在戰場上向盟軍用毒性更强的沙林。

1 Schmidt, Ulf. (2006). Cold war at Porton Down: informed consent in Britain's biological and chemical warfare experiments. Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics, 15(4), 366–380. https://doi.org/10.1017/s0963180106060488

殺蟲農藥變殺人毒藥

1936年，德國法本公司（IG Farben）的化學家施拉德（Gerhard Schrader）正在試驗一類名為有機磷酸酯（organophosphate）的殺蟲劑。他原本的任務並非製造武器，而是發明一種廉價和有效殺死蝗蟲的農藥，卻偶然合成出一種無色無味的物質。他發現這物質不僅有效殺死昆蟲，而且對人類具有極大的毒性[2]，所以無法用於農業。

法本公司將此意外發現告知德國軍方，這物質極強的毒性當然獲德軍所垂青，他們將其命名為塔崩（Tabun），有禁忌的意思。而塔崩就成了G系列的首個神經毒劑。後來被稱為「神經毒劑之父」的施拉德，與團隊再合成出三種威力更強的神經毒劑，包括沙林。[3]

完全純淨的G系列神經毒劑都是透明、無色、無臭。然而製造過程難免摻入雜質，令成品呈黃褐色並帶有微弱氣味。雖然通常被人稱曰「毒氣」，但它們在常温下其實都是液態的，其中有些極易揮發。即是説，這種特性使它們能夠通過兩種途徑傷害人體：既可以透過皮膚直接吸收，也能在空氣中擴散，經呼吸道進入體內。因此，評估它們的致死威力時，我們需要同時計算兩個因素：它們在皮膚接觸時的毒性，以及它們在空氣中的揮發性。單看皮膚接觸毒性，沙林實際上是G系列中效力相對低的，但它的揮發性卻極高，非常容易被人吸入，因此它更常被用作化武。

到第二次世界大戰結束時，納粹德國已生產了約12,000噸沙林毒氣，數量足以殺死數百萬人。但是希特拉始終沒有動用這批化武，歷史學家提出過幾個可能的因素。其中一個原因，相信是與德國倚重的閃電戰術有關。坦克和轟炸機對敵軍作出突襲，隨後緊接陸軍快速推進。如果轟炸機投放沙林或其他化學武器，將會污染地面部隊要推進

2 施拉德和同事被幾滴化合物濺到後，即時出現瞳孔收縮及呼吸困難等症狀，幸運的是他們未有痙攣以至窒息死亡。

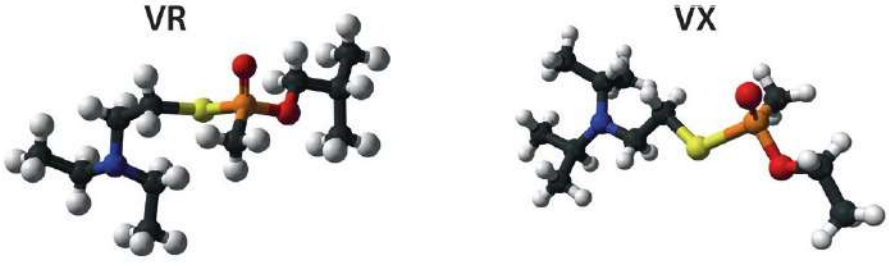
3 G系列是首個也是最古老的神經毒劑家族，因為德國（Germany）科學家首先合成而得名。神經毒劑包括：塔崩、沙林、梭曼（Soman），和在二戰後開發的環沙林（Cyclosarin）。

的區域，阻礙進攻。也許更重要的是，希特拉很可能意識到，一旦他使用化武，時任英國首相邱吉爾早已揚言會以牙還牙。

化武競賽　英國 V 系列、美版 VX、蘇聯 VR

除了二戰時期德國研發的 G 系列，其他主要大國在戰後亦開發出更強的神經毒劑，例如英國發明的 VX。V 系列的名稱由來有幾個不同講法：「V」可能是代表勝利（victory），這暗示英國兵工廠開發 VX 之目的；V 也可以是代表黏性（viscous），VX 是一種穩定及揮發度很低的油性液體，因其黏稠度不易揮發散逸，會長時間殘留在皮膚或物件表面；較多來源指 V 代表有毒（venomous），這個大概無須多解釋了吧，VX 的毒性確實遠勝沙林。1950 年代，英國科學家開發新農藥時，亦是偶然發現 V 系列毒劑。它們又是因為對人體的毒性太高而不適合農業用途，結果成為軍用化武。英國以 VX 技術換取美國核武資訊，促使美國得以自行生產美版 VX，它後來更成為美國軍備中主要的化學戰劑。[4]

正值冷戰時期，蘇聯也開發了一種稱為 VR 的神經毒劑。VR 分子是 VX 的「異構體」，意思是兩者的組成元素相同，但原子排列和連接方式不同，因此形成兩個不同的化合物，就像相同數量的積木能組成不同造型。同樣是 $C_{11}H_{26}NO_2PS$ 的分子式，四十多塊「原子積木」能組成 VR 和 VX 兩個不同結構，見下圖。



VR 和 VX 的分子結構模型

4　2023 年 7 月，美國白宮宣布完成銷毀其最後一批化學武器庫存，其中包括 4 萬噸 VX 火箭彈，履行了《禁止化學武器公約》承諾。

VX 分子滲透性高、揮發性低、化學持久性強，不易降解或清洗。這即是說，VX 會長時間殘留在受污染的物件表面、泥土和水源，對人構成嚴重威脅。正是由於這些特性，它比高揮發性的沙林更難對付。但也因此，在戰場實際應用中，會更嚴重限制地面部隊的行動。這些神經毒劑的開發主要由國防研究人員進行，而且大部份資料都不屬於公有領域，因此我們對大部份其他的 V 系毒劑所知甚少。

而我們知道的，是只需大約十毫克（即百分之一克）的 VX，相當原子筆尖大小分量的水滴，就已經足夠來殺人滅口。

金正男被毒殺之謎

2017 年 2 月 13 日，北韓領導人金正恩同父異母的兄長金正男，在馬來西亞吉隆坡國際機場遇刺身亡，這次的暗殺事件震撼全世界。事件的最初，沒有人知道是誰殺了金正男，用了甚麼毒，以及出於甚麼動機。

機場的閉路電視畫面記錄了金正男受襲和事後求助的過程。兩名女子在繁忙的離境大堂，光天化日之下從後向金正男施襲，二人用手先後在他面上塗抹了不明物質，整個過程歷時僅幾秒鐘。

遇襲後，金正男隨即向機場職員求助，表示眼睛劇痛。他跟隨警衛前往機場診所接受檢查，當時他步伐穩健，看似無礙。但情況急轉直下，他在遇襲後二十分鐘內便宣告不治。

2 月 22 日，毒理化學家杜祖健[5]收到一封特殊的電郵。發信人是日本死囚中川智正，透過律師輾轉寄出這封信。中川是前奧姆真理教幹部，他曾是教主麻原彰晃[6]的醫生，還涉及教團另外三宗 VX 毒劑謀殺案，最終被判處死刑。

5 杜祖健教授（1930–2024），生於台灣，美國科羅拉多州立大學榮休教授。國際毒理學及生化武器專家。

6 麻原彰晃，日本奧姆真理教教主，曾策劃 1995 年東京地鐵沙林毒氣襲擊和多次的毒殺事件，最終在 2018 年被處決。

在馬來西亞官方驗屍報告尚未出爐時，這位正在獄中等待處決的囚犯，就已經解開了金正男案的關鍵：死因很可能是 VX 中毒。雖然當時新聞報道只提到金正男猝死的症狀，以及各方眾說紛紜的猜測。但是中川的判斷並非空穴來風，而是來自親身經歷，他不單只治療過 VX 中毒的教友，自己也曾意外沾到 VX 中毒，需要即時注射解毒劑。

中毒的致命機制

VX 分子具親脂性，能輕易透過細胞膜（主要由脂質分子構成），經皮膚和眼睛黏膜進入人體，並迅速與一種稱為乙醯膽鹼酯酶的酵素結合。

在正常情況下，身體靠「神經傳遞素[7]」乙醯膽鹼（acetylcholine）在神經細胞之間傳遞訊號。當訊號抵達神經末梢時會觸發乙醯膽鹼的分泌，乙醯膽鹼分子擴散到神經肌肉會合處（突觸），與肌肉細胞上的接收器結合，令肌肉收縮。然後，乙醯膽鹼酯酶會催化乙醯膽鹼的分解作用，以完結該神經訊號，就像按下重置鍵，「reset」肌肉讓其回復放鬆狀態。

G 系和 V 系毒劑以及有機磷酸酯殺蟲藥都屬於「乙醯膽鹼酯酶抑制劑」，它們的作用機制是與乙醯膽鹼競爭，搶先佔據酵素的活性位點[8]。乙醯膽鹼酯酶與毒劑結合後，其催化活性便受抑制，無法再分解乙醯膽鹼。這些積聚在突觸的神經傳遞素，使肌肉和分泌腺不斷受到刺激，神經訊號無法終止，導致身體出現神經機能紊亂的症狀。

中毒者最初會出現流鼻涕、流淚、出汗和瞳孔收縮等症狀。毒性的嚴重程度取決於劑量和接觸途徑，但狀況會很快升級至口吐白沫、

7 神經傳遞素（neurotransmitter）是由神經細胞分泌的訊號分子，好比細胞之間傳遞信息的信差，將訊號從一個神經細胞傳送到下一個細胞。接收訊號的目標細胞，可以是神經細胞、腺體或肌肉細胞。

8 活性位點（active site）是酵素分子內與目標作用物結合，然後催化化學反應的位置。

呼吸困難、肌肉痙攣和失禁。若無及時的救治，情況嚴重者會因呼吸肌麻痹而昏迷，最終呼吸衰竭死亡。[9]

VX 沒有可以讓人識別的氣味，所以在症狀出現之前受害人根本無從察覺。中川假設 VX 接觸了眼睛，金正男曾表示眼痛，死時口吐白沫，正符合 VX 接觸到眼睛和導致呼吸道分泌物增加的症狀；更因為是經由眼睛黏膜進入他的身體，使毒性發作得比皮膚滲透要快速。

2 月 24 日，當局的化驗結果出爐，他們在金正男面和眼部驗出有 VX 的微量痕跡，證實了中川早前的判斷。

當時世上最毒的戰劑：VX

但這個發現同時帶來新的疑問：既然 VX 是如此致命，該兩名女子徒手施毒，為何絲毫無損？接觸過金正男的救護員亦沒有出現症狀，事後機場也無須「深層清潔」。還有就是，為甚麼需要兩個人去投毒？這些疑點尚未解答。

全球只有兩人獲日本政府批准探訪奧姆真理教死囚，杜祖健是其中一人。杜教授早在 2011 年已多次探訪中川，協助日本當局調查奧姆真理教的沙林恐襲，深入了解教團策劃恐襲的過程。到了 2017 年發生金正男案後，據日媒報道，馬來西亞政府透過聯合國向中川查詢 VX 中毒症狀。杜教授認為，中川是極少數願意分享 VX 研製經驗的人，他的親身經歷極具參考價值，很值得把史實記錄在案。中川推斷金正男被殺是用了 VX 無誤，杜教授遂與中川再次見面。兩人詳細分析了馬來西亞的化驗報告，並聯合發表論文，說明死者極可能就是被 VX 的「二元化學武器」所殺。[10]

9 U.S. Centers for Disease Control and Prevention, "VX". From https://www.cdc.gov/chemical-emergencies/chemical-fact-sheets/vx.html

10 中川智正與杜祖健合著的最後一篇學術文章於 2018 年 5 月發表，兩個月後在廣島拘留所伏法。在囚期間，他坦誠分享自己鑽研 VX 的經驗，為學術界留下了罕見的第一手資料。論文：Nakagawa, T., Tu, A.T. Murders with VX: Aum Shinrikyo in Japan and the assassination of Kim Jong-Nam in Malaysia. Forensic Toxicology 36, 542–544 (2018). https://doi.org/10.1007/s11419-018-0426-9

VX 是當時世上最毒的戰劑，為了彈藥儲存和運輸安全，美軍開發了一個二元混合型化武系統（Binary chemical weapon system）。這系統包含兩種相對無毒的前驅物：一種是稱為 QL 的含磷化合物，另一種是硫黃。這兩個前驅物只有在使用時才會混合，產生劇毒的 VX，二元設計令物流過程安全得多。然而，吉隆坡案中的配方與美軍版本有所不同，金正男和兩名襲擊者的樣本中均未驗出 QL。很顯然，她們使用了修改過的二元配方。

化驗報告列出死者和兩名疑兇身上的物質，並發現三人驗出的物質截然不同，先出手的印尼女子只驗出一種化合物，但是在後出手的越南女子則同時發現數種 VX 類似物，金正男則檢驗出 VX 及多種不同的化合物。按道理，若直接使用 VX，兩施毒者身上應找到相同物質；如今結果迥異，正好印證中川的推論：兩名女子各自攜帶一種前驅物，在接觸金正男的一刻混合成 VX，這個關鍵證據最終幫助破案。[11]

這種二元化武的設計十分巧妙：既降低了施襲者中毒的風險，又能在金正男臉上即時混合產生致命的 VX。雖然這種化學反應在低溫環境下較難進行，但她們可能用了催化劑來加速反應，只是化驗結果未能證實這一點。

杜祖健教授與毒物共舞超過半世紀，自 1980 年代起為美軍研究生化武器，其後協助日本警方調查沙林毒氣事件。在金正男暗殺案中，他再次運用其豐富經驗，揭示這個精密的 VX 二元化武系統。杜教授退休後仍筆耕不輟，著有多部毒物、生化武器及反恐專著，晚年更出版自傳，記錄畢生研究歷程。直到 2024 年 11 月 1 日在夏威夷辭世，享年九十四歲。

說回文章開首的麥迪臣，英國軍方的機密檔案直到 1970 年才開始曝光。2004 年，司法當局重新調查麥迪臣的沙林人體試驗案件，陪審團最終裁定他是遭到非法殺害。這位年輕軍人的枉死被隱瞞了五十年，冤有頭債有主，他的家屬最後獲賠償十萬英鎊，為這宗慘劇畫上句號。

11 Tu, A. T. (2020). The use of VX as a terrorist agent: action by Aum Shinrikyo of Japan and the death of Kim Jong-Nam in Malaysia: four case studies. Global Security: Health, Science and Policy, 5(1), 48–56. https://doi.org/10.1080/23779497.2020.1801352